



Universidad de Oviedo

Tesis doctoral

***La enseñanza de la óptica en 2º de Bachillerato.
Problemática actual y propuesta de mejora***

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA EDUCACIÓN
Programa Oficial de Doctorado en Educación y Psicología

Elena Álvarez Jubete

Directores:

Isabel Hevia Artime

Luigi Toffolatti Ballarin

Oviedo, 2022



RESUMEN DEL CONTENIDO DE TESIS DOCTORAL

1.- Título de la Tesis	
Español/Otro Idioma: La enseñanza de la óptica en 2º de Bachillerato. Problemática actual y propuesta de mejora.	Inglés: The teaching of optics in 2nd year of Baccalaureate. Current problems and proposal for improvement.
2.- Autor	
Nombre: Elena Álvarez Jubete	DNI/Pasaporte/NIE:
Programa de Doctorado: Programa Oficial de Doctorado en Educación y Psicología	
Órgano responsable: Centro Internacional de Posgrado – Universidad de Oviedo	

RESUMEN (en español)

Este trabajo tiene su germen en la Universidad de Alicante hace ya un par de décadas, iniciándose en 2004 cuando se obtuvo el certificado-diploma de estudios avanzados en esta universidad en el programa de “*Investigación Educativa y Desarrollo del Currículo*”. Retomando esos trabajos iniciales, en esta tesis nos hemos centrado en intentar mejorar el proceso de enseñanza y aprendizaje de la óptica en segundo de bachillerato, planteándonos los siguientes interrogantes: ¿cómo es posible mejorar la enseñanza de la óptica en el Bachillerato?, ¿presentan los docentes, estudiantes y libros de texto conceptos alternativos implícitos?, ¿una metodología basada en la resolución de problemas ayudará a mejorar la comprensión de la óptica por parte del alumnado?.

La tesis presentada se estructura en dos grandes partes: una primera parte dedicada a la fundamentación teórica y estado de la cuestión, y una segunda dedicada al trabajo de investigación e intervención en el aula. A partir de un amplio estudio bibliográfico, partimos de la hipótesis de que las dificultades que tienen los alumnos en el aprendizaje de los fenómenos ópticos tienen su origen en un conocimiento precientífico fragmentado, basado en su experiencia diaria y en la enseñanza tradicional recibida. Para constatar si esto es así, se estudia el planteamiento que realizan los libros de texto de segundo de bachillerato del tema de óptica. De manera complementaria, a través de un cuestionario y un grupo de discusión se indaga acerca de las estrategias metodológicas que emplean los docentes asturianos respecto a la enseñanza de la óptica. A la vista de los resultados obtenidos, se diseña una unidad didáctica basada en una metodología de enseñanza-aprendizaje por resolución de problemas. Para su diseño se parte del estudio de la historia de la óptica con intencionalidad didáctica, a partir del cual se establecen las ideas clave y los principales obstáculos asociados, siempre en relación con los estándares de aprendizaje



propuestos por la legislación vigente. Esta unidad didáctica se experimenta durante dos cursos académicos y, en ambos casos, se evalúa a través de los grupos de discusión con alumnos y de los diarios de campo de la docente.

Tras el proceso de investigación e intervención didáctica realizado, podemos establecer algunas conclusiones:

- La historia de la ciencia ha de tener un papel clave en la práctica educativa diaria. Se ha de buscar la explicación de los fenómenos en su origen, pues hay un paralelismo entre la historia de la ciencia y el proceso psicológico formativo de los estudiantes.
- El estudio histórico nos ha permitido establecer las ideas clave de la óptica que han de adquirir los estudiantes y, nos ha ayudado a detectar las dificultades asociadas a dichas ideas.
- Los alumnos tienen conceptos previos erróneos relativos a la óptica, que influyen en su aprendizaje en el aula. Es esencial que los profesores conozcan los conceptos alternativos de sus alumnos.
- Muchas veces, los libros de texto son una fuente de conceptos alternativos en óptica, por la información incorrecta que proporcionan. En consecuencia, muchos profesores, que basan su enseñanza en el libro de texto, mantienen sus conceptos alternativos erróneos relativos a la óptica, y los trasladan a sus estudiantes.
- Muchos alumnos, e incluso algunos docentes, aunque son capaces de resolver problemas complicados, no tienen una comprensión profunda de los principales conceptos de la óptica.
- Hemos evidenciado que los libros de texto de Física de 2º de Bachillerato ofrecen en muchas ocasiones un tratamiento empirista de los fenómenos ópticos; no tienen en cuenta la revisión histórica para la identificación de posibles problemas en la comprensión de la óptica, ni para plantear los problemas relacionados con el tema y, además, no abordan las posibles limitaciones que pueden encontrar los estudiantes para comprender el proceso de visión y la naturaleza ondulatoria de la luz. Muestran a menudo un tratamiento superficial de los conceptos básicos de óptica, con definiciones operativas, pero sin explicaciones conceptuales profundas, lo que puede impedir que los estudiantes comprendan los fenómenos expuestos.



- La mayoría de los profesores encuestados presentan carencias en la metodología didáctica de la óptica que pueden afectar a la comprensión de aspectos clave del modelo de visión de Kepler y del modelo ondulatorio de la luz.
- La experimentación de nuestra Unidad Didáctica nos permite concluir que los alumnos aprenden más sobre óptica cuando trabajan mediante una metodología de enseñanza basada en la resolución de problemas. En las dos ocasiones (2019 y 2020) que pusimos en práctica la UD, los alumnos afirman que se aprende más, y de manera más entretenida, se sienten más implicados y se muestran satisfechos con este nuevo modo de trabajar.

Consideramos que hemos conseguido suficiente y variada evidencia para poder consolidar la validez de la investigación realizada en aras de mejorar la enseñanza de la óptica en 2º de Bachillerato. Por ello, pensamos que la secuencia de enseñanza experimental diseñada podría generalizarse en las aulas contando con la adecuada formación del profesorado sobre la misma.

RESUMEN (en Inglés)

This work has its germ in the University of Alicante a couple of decades ago, starting in 2004 when the certificate-diploma of advanced studies was obtained in this university in the program of "*Educational Research and Curriculum Development*". Returning to these initial works, in this thesis we have focused on trying to improve the process of teaching and learning optics in the second year of high school, asking ourselves the following questions: how is it possible to improve the teaching of optics in the Baccalaureate?; Do teachers, students and textbooks present implicit alternative concepts?; Will a methodology based on problem solving help improve students' understanding of optics?

The thesis presented is structured in two main parts: a first part dedicated to the theoretical foundation and state of the matter, and a second one dedicated to research, work and intervention in the classroom. Based on an extensive bibliographic study, we start from the hypothesis that the difficulties that students have in learning optical phenomena have their origin in a fragmented pre-scientific knowledge, based on their daily experience and on the traditional teaching received. To verify if this is so, the approach made by the textbooks of the second year of Baccalaureate of the subject of optics is studied. In a complementary way, through a questionnaire and a discussion group, we inquire about the methodological strategies used by Asturian teachers



regarding the teaching of optics. In view of the results obtained, a didactic unit is designed based on a teaching-learning methodology for problem solving. For its design, we rely on the study of the history of optics with didactic intentionality, from which the key ideas and the main associated obstacles are established, always in relation to the learning standards proposed by current legislation. This didactic unit is experienced during two academic years and, in both cases, is evaluated through the discussion groups with students and the field diaries of the teacher.

After the process of research and didactic intervention carried out, we can establish some conclusions:

- The history of science must play a key role in daily educational practice. It is necessary to seek the explanation of the phenomena in their origin, since there is a parallel between the history of science and the psychological formative process of the students.
- The historical study has allowed us to establish the key ideas of the optics that students have to acquire, and has helped us to detect the difficulties associated with these ideas.
- Students have previous misconceptions regarding optics, which influence their learning in the classroom. It is essential that teachers know the alternative concepts of their students.
- Many times, textbooks are a source of alternative concepts in optics, because of the incorrect information they provide. Consequently, many teachers, who base their teaching on the textbook, maintain their alternative misconceptions concerning optics, and pass them on to their students.
- Many students, and even some teachers, although they are able to solve complicated problems, do not have a deep understanding of the main concepts of optics.
- We have shown that the physics textbooks of 2nd year of Baccalaureate offer on many occasions an empiricist treatment of optical phenomena; they do not take into account the historical review for the identification of possible problems in the understanding of optics, nor to raise the problems related to the subject and, in addition, do not address the possible limitations that students may encounter in understanding the process of vision and the wave nature of light. They often show a superficial treatment of the basic concepts of optics, with operational definitions, but without deep conceptual explanations, which can prevent students from understanding the phenomena exposed.



Universidad de Oviedo
Universidá d'Uviéu
University of Oviedo

- Most of the teachers surveyed have deficiencies in the didactic methodology of optics that can affect the understanding of key aspects of the Kepler vision model, and the wave model of light.
- The experimentation of our Didactic Unit, allows us to conclude that students learn more about optics when they work through a teaching methodology based on problem solving. On the two occasions (2019 and 2020) that we put into practice the UD, the students affirm that they learn more, and in a more entertaining way, they feel more involved and are satisfied with this new way of working.

We believe that we have obtained enough and varied evidence to be able to consolidate the validity of the research carried out in order to improve the teaching of optics in 2nd year of Baccalaureate. Therefore, we think that the sequence of experimental teaching designed could be generalized in the classrooms with the adequate training of teachers on it.

SR. PRESIDENTE DE LA COMISIÓN ACADÉMICA DEL PROGRAMA DE DOCTORADO
EN _____

Índice

INTRODUCCIÓN	1
¿Por qué nos interesamos en el estudio de la óptica?	1
¿Qué nos encontraremos en esta tesis?	2
PARTE I: MARCO TEORICO-CONCEPTUAL	5
CAPÍTULO 1. EL APRENDIZAJE DE LOS CONOCIMIENTOS CIENTÍFICOS DENTRO DE LA ORIENTACIÓN CONSTRUCTIVISTA.....	5
1.1. La escuela nueva. Orígenes del Aprendizaje Basado en la resolución de Problemas	6
1.2. Estructura básica de un tema dentro de la metodología de aprendizaje basado en la resolución de problemas.....	8
1.3. Modelos de naturaleza de la luz: implicaciones para la enseñanza.	13
1.4. La especificidad del conocimiento y del cambio conceptual en óptica.	15
CAPÍTULO 2. ESTUDIO HISTÓRICO Y EPISTEMOLÓGICO DE LA ÓPTICA	17
2.1. La óptica como ciencia de la visión.	17
2.2. Primera Etapa: S. XVII.....	23
2.3. Segunda Etapa: S. XVIII	30
2.4. Tercera Etapa: S. XIX	32
2.5. Reflexiones sobre el análisis histórico.	38
CAPÍTULO 3. LA ENSEÑANZA DE LA ÓPTICA.....	41
3.1. Características de las ideas alternativas en óptica.....	41
3.2. Conceptos alternativos que presenta el alumnado.	45
3.3. Conceptos alternativos que puede presentar el profesorado.....	71
3.4. Relación de los conceptos alternativos de alumnado y profesorado con los libros de texto.....	74
CAPÍTULO 4. IDEAS CLAVE, DIFICULTADES EN EL ESTUDIO DE LA ÓPTICA Y SU RELACIÓN CON LOS ELEMENTOS CURRICULARES.....	77
4.1. Ordenación del currículo de Física y Química en Secundaria y Bachillerato.	77
4.2. Relación entre los elementos curriculares y las ideas clave en el estudio de la óptica.	79
4.3. Relación entre los elementos curriculares y las dificultades en el aprendizaje de la óptica.	83
PARTE II: DESARROLLO DEL ESTUDIO	91
CAPÍTULO 5. OBJETIVOS DEL ESTUDIO	91

CAPÍTULO 6. METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN.....	95
6.1 Perspectiva metodológica adoptada.	95
6.2. Fases de la investigación. El proceso metodológico.	98
6.3 Instrumentos empleados en la recogida de información.	100
6.3.1. Análisis documental: principales obras científicas referentes a la óptica, currículo de Bachillerato y bibliografía.	101
6.3.2. Análisis de contenido: libros de texto.....	102
6.3.3. Cuestionarios a docentes.....	106
6.3.4. Grupo de discusión con docentes	109
6.4. Instrumentos empleados para evaluar la intervención:	113
6.4.1. Grupos de discusión con estudiantes.	113
6.4.2. Observación participante. Diario de Campo.	115
6.5. Participantes en la investigación.	118
6.5.1. Docentes participantes en el cuestionario	118
6.5.2. Docentes participantes en el grupo de discusión.....	119
6.5.3. Alumnado participante en la investigación.....	120
6.6. Validez de la investigación.	121
 CAPÍTULO 7: ANÁLISIS DE RESULTADOS.	 123
7.1. Estudio de la práctica docente de los profesores de Física de 2º de Bachillerato de los IES del principado de Asturias.	123
7.1.1. Análisis cuestionario docentes.	123
7.1.2. Análisis del grupo de discusión de docentes.....	131
7.2. Análisis de los libros de texto.	137
 CAPÍTULO 8. PROPUESTA DE INTERVENCIÓN DIDÁCTICA.	 151
8.1. Ideas clave y dificultades que manifiestan los estudiantes de 2º de Bachillerato después de la enseñanza habitual en óptica.	152
8.2. Toma de decisiones para elaborar la estructura problematizada de un tema de óptica de 2º de Bachillerato.	156
8.3. Planificación de un tema de óptica de 2º de Bachillerato desde el modelo de enseñanza problematizada.	158
8.4. Puntos en base a los que se organiza el estudio histórico-epistemológico para tomar decisiones y concretar la estructura problematizada de la Unidad Didáctica.....	162
8.5. Ejemplos de actividades de nuestra Unidad Didáctica.....	166
8.6. Evidencias tras la experimentación de la Unidad Didáctica.	187
 CAPÍTULO 9. CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS.....	 197
9.1. Conclusiones sobre los libros de texto.	197
9.2. Conclusiones sobre las aportaciones de los docentes.....	200
9.3. Conclusión de la experimentación de la Unidad Didáctica de óptica de 2º de Bachillerato.....	203
9.4. Síntesis de conclusiones.	206
9.5. Propuestas de mejora y futuras líneas de investigación.	208

FUENTES BIBLIOGRÁFICAS Y DOCUMENTALES.	211
ANEXOS	255
ANEXO I. Cuestionario profesores.	255
ANEXO II. Estadillo análisis de los libros de texto.	255
ANEXO III. Unidad didáctica óptica 2019.	255
ANEXO IV. Diario de clase 2019.	255
ANEXO V. Guion grupo de discusión alumnos 2019.	255
ANEXO VI. Transcripción grupo de discusión alumnos 2019.	255
ANEXO VII. Unidad didáctica óptica 2020.	255
ANEXO VIII. Diario de clase 2020.	255
ANEXO IX. Guion grupo de discusión alumnos 2020.	255
ANEXO X. Transcripción grupo de discusión alumnos 2020.	255
ANEXO XI. Guion grupo de discusión profesores 2021.	255
ANEXO XII. Transcripción grupo de discusión profesores 2021.	255

INTRODUCCIÓN

¿Por qué nos interesamos en el estudio de la óptica?

La óptica ha sido uno de los temas que más atención ha recibido a lo largo de la historia de la ciencia. El estudio de la óptica ha llevado a comprender el fenómeno de la visión y con ello se ha logrado responder a cuestiones de gran importancia: ¿cómo vemos?, ¿cómo podemos ver mejor?, ¿cómo construir instrumentos ópticos?, etc. Por otro lado, el estudio de la naturaleza de la luz a lo largo de los siglos ha sido, y aún hoy en día lo es, fuente de controversias entre distintas teorías sobre su naturaleza.

Como docente de secundaria, uno de mis objetivos cuando abordo la *enseñanza* de la óptica es conseguir que mis estudiantes comprendan conceptos relacionados con su vida diaria. Los estudiantes acuden a clase con ideas preconcebidas que han adquirido a lo largo de su vida y, a menudo, estas ideas entran en conflicto con los conceptos científicamente aceptados. Como profesora-investigadora tengo que conocer estas ideas alternativas que tienen mis alumnos sobre el mundo físico que les rodea y, en concreto, sobre la óptica. Estos conceptos alternativos juegan un papel importante en el proceso de adquisición de nuevos conocimientos, pues dificultan su aprendizaje. Es muy importante que los profesores de ciencias seamos conscientes de ello. Por otra parte, a lo largo de mi carrera docente he percibido que algunos profesores también acumulan errores conceptuales debido a un deficiente aprendizaje de la óptica. Creo que ello es debido a dos factores: el primero sería la propia enseñanza recibida, como consecuencia del escaso conocimiento de la didáctica de la física en general, y de la óptica en particular; y, en segundo lugar, a la manera con la que los libros de texto presentan estos contenidos.

El contenido del currículo educativo trata de la interacción de la luz con el mundo y el observador, pero no presta atención al mecanismo de visión y sus consecuencias, provocando que los alumnos mantengan casi intactas sus ideas previas, incluso después de la instrucción. En cambio, creemos más oportuna una aproximación holística de la óptica, considerándola como "*ciencia de la visión*", desde una metodología de enseñanza-aprendizaje por resolución de problemas. Esta metodología didáctica integra el desarrollo histórico de las diversas teorías sobre la luz y la visión, siendo más apropiada para el currículo escolar, ya que facilita el cambio conceptual en los estudiantes. Creemos que el estudio de la visión puede hacer que los alumnos se interesen por la comprensión de la naturaleza de la luz y sus propiedades. Así mismo, mediante el estudio de la óptica el

alumnado puede analizar directamente la evolución y el cambio de modelos conceptuales en esta área de la física, especialmente fructífera en la contraposición de teorías. Aprenderán cómo, a lo largo de la historia de la ciencia, muchos fenómenos han sido explicados mediante teorías rivales, y cómo una teoría acaba imponiéndose a otra, para llegar, en la actualidad, a una situación especial en este campo de conocimiento, ya que dos teorías históricamente contrapuestas conviven y se utilizan para explicar diferentes fenómenos, llegando a la formulación de la denominada dualidad onda-corpúsculo.

Desde un punto de vista pedagógico, la enseñanza y experimentación en óptica constituye una herramienta muy útil en la comprensión de los fenómenos físicos. En esta tesis doctoral se ha optado por centrar la investigación en la óptica del temario de 2º de Bachillerato. Se ha escogido este curso específico porque el estudio de la óptica en él es sumamente importante, pues sirve de nexo entre la física clásica y la física cuántica.

¿Qué nos encontraremos en esta tesis?

En base a las reflexiones realizadas y expuestas en esta introducción, el objetivo de esta tesis es intentar proporcionar una contribución, concreta y directamente aplicable, para mejorar el proceso de enseñanza y aprendizaje de la óptica en segundo curso de Bachillerato. Por ello, la presente tesis doctoral obedece a la estructura resumida en su índice, dividiéndose en dos grandes apartados: una primera parte orientada a la fundamentación teórica y al estado de la cuestión; y, una segunda, dedicada al trabajo de campo, es decir, al análisis de la práctica docente, de los problemas de aprendizaje y de las dificultades de los alumnos en segundo de Bachillerato. Basándonos en un amplio estudio bibliográfico, partimos de la hipótesis de que las dificultades que tienen los alumnos en el aprendizaje de los fenómenos ópticos tienen su origen en un conocimiento precientífico fragmentado, basado en su experiencia diaria y en la enseñanza tradicional recibida. Para constatar si esto se produce, estudiamos el planteamiento que realizan los libros de texto de segundo de Bachillerato del tema de óptica. De manera complementaria, se indaga acerca de los conceptos y estrategias metodológicas que emplean los docentes asturianos de la materia de Física, respecto a la enseñanza de la óptica. A la vista de los resultados obtenidos, se diseña una Unidad Didáctica basada en una metodología constructivista para segundo de Bachillerato, que se experimenta durante dos cursos académicos utilizando los resultados de la primera experimentación para mejorar la secuencia de actividades en la segunda. Esta Unidad Didáctica, planificada de acuerdo con la metodología de aprendizaje basado en la resolución de problemas, parte de un

estudio de la historia de la óptica con intencionalidad didáctica, en el que se ha tratado de establecer las ideas clave que el alumnado ha de adquirir, y de un análisis de los principales obstáculos que puede encontrar, siempre en relación con los elementos curriculares propuestos por la legislación vigente. A través de los grupos de discusión con alumnos y de los diarios de campo de la docente se evalúa dicha Unidad Didáctica y, tras la reflexión, se han podido establecer una serie de recomendaciones para la enseñanza de esta materia.

A nivel personal, esta tesis supone un gran aprendizaje a lo largo de más de dieciocho años. En una primera etapa trabajé con el profesor Luis Osuna de la Universidad de Alicante, con quien aprendí como llevar a cabo la enseñanza problematizada de la óptica en secundaria, basada el modelo de visión de Kepler. Juntos trabajamos en la ampliación de este modelo a la etapa de Bachillerato e iniciaba así mi carrera como doctoranda. Por motivos personales no pudimos continuar el proyecto de tesis que, años más tarde, he reanudado aquí en Asturias. En el proyecto actual he podido retomar ese trabajo empezado y avanzar en el estudio de la enseñanza de la óptica en Bachillerato, explorando nuevas metodologías y con unas perspectivas parcialmente diferentes que en la investigación inicial no había podido tomar en consideración.

PARTE I: MARCO TEORICO-CONCEPTUAL

CAPÍTULO 1. EL APRENDIZAJE DE LOS CONOCIMIENTOS CIENTÍFICOS DENTRO DE LA ORIENTACIÓN CONSTRUCTIVISTA.

Un aprendizaje significativo en ciencias implica necesariamente la sustitución de la “epistemología espontánea”¹ por la epistemología del conocimiento científico (Gil, 1983; Gil y Carrascosa, 1985; Gil, Carrascosa, Furió y Martínez Torregrosa, 1991). A lo largo de la historia de la ciencia hemos visto cómo, para conseguir desplazar antiguos conceptos, fuertemente arraigados y que resultaron ser incorrectos, por teorías científicas novedosas y, a veces, atrevidas, que, sin embargo, eran capaces de explicar los fenómenos en estudio, fue necesario un profundo cambio epistemológico. Los alumnos han de conseguir entender y asumir, por lo menos en parte, este cambio epistemológico, para lograr un cambio conceptual que les permita superar sus conceptos preconcebidos y equivocados. En este sentido, los docentes hemos de ayudar a los alumnos a superar la metodología del sentido común y a poner en práctica la metodología científica, planteando los problemas, proponiendo hipótesis, diseñando experimentos, llevándolos a cabo y, finalmente, analizando cuidadosamente los resultados. La construcción de conocimiento científico se ha de plantear a partir de la investigación realizada por el alumno para resolver un problema concreto (Gil, Carrascosa, Furió y Martínez Torregrosa, 1991).

Hemos constatado, al igual que otros autores previamente (Viennot, 1976; Ausubel, 1978; Gil, Carrascosa, Furió y Martínez Torregrosa, 1991), que hoy en día aún se sigue poniendo en práctica la enseñanza por transmisión verbal de conocimientos en su estado final, aunque se haya verificado en numerosas ocasiones su ineficacia. En nuestra práctica docente hemos comprobado cómo cuando los estudiantes abordan problemas diferentes

¹ La epistemología espontánea está *dirigida por la percepción*, se basa en los rasgos más evidentes y llamativos de los fenómenos observables. Las personas integran las experiencias sensoriales que tienen en su vida diaria en un sistema de expectativas útiles para la acción y para la predicción de hechos futuros en idénticos contextos. Las personas tienen tendencia a otorgar una “atención preferente” a aquello que apoya sus ideas “previas” y a ignorar otros aspectos que podrían contradecirlas, lo que refuerza continuamente la utilidad de las ideas espontáneas, que suelen ser utilizadas automáticamente, sin una mínima reflexión sobre su validez, en contextos diferentes (Hashweh, 1986). La epistemología espontánea se basa en certezas: no pone en cuestión lo obvio, no se piensa en términos de tentativas, ni se consideran habitualmente alternativas a lo aparente.

La "validez" de una idea no es medida por las personas según criterios científicos: pesan mucho más los factores socio/afectivos (Solomon, 1988).

a los trabajados en clase, la inmensa mayoría de ellos comete errores. Consideramos que esto pone de manifiesto una falta de comprensión clara de los conceptos científicos tratados, a pesar de la enseñanza reiterada en diferentes cursos de dichos conocimientos. En Física la mayoría de estos errores se deben a la existencia de conceptos alternativos de los alumnos, que impiden el aprendizaje correcto de determinados conceptos, leyes y teorías científicas.

Para contrarrestar estas dificultades en la alfabetización científica del alumnado de secundaria, en esta tesis optamos por un modelo de enseñanza por resolución de problemas. Por ello, en este primer capítulo nos vamos a centrar en explorar este tipo de metodología que dará cobertura al resto de planteamientos abordados en este marco teórico: estudio histórico de la óptica, concepciones alternativas del profesorado, alumnado y libros de texto, ideas clave y dificultades en el estudio de la óptica. Comenzamos este capítulo con una breve mención a la escuela nueva como contraposición a la escuela tradicional y trataremos de definir el aprendizaje basado en la resolución de problemas, considerando sus fortalezas y debilidades, el papel del docente y del estudiante en esta metodología, las fases del aprendizaje basado en la resolución de problemas y su aplicación a la Física. Posteriormente se analizarán los diferentes modelos de naturaleza de la luz y sus implicaciones educativas, pues los modelos mentales de los alumnos se forman cuando éstos aprenden conceptos sobre la luz en la escuela secundaria, pero puede que un modelo mental previo formado antes de entrar a la escuela puede estar interaccionando con su aprendizaje. Los docentes hemos de conseguir que los estudiantes construyan conceptos que les sean más útiles para observar la realidad, y que además sean científicamente correctos. Finalmente abordaremos la especificidad del cambio conceptual en la óptica.

1.1. La escuela nueva. Orígenes del Aprendizaje Basado en la resolución de Problemas

La Escuela Tradicional surge en Europa en el siglo XVII de la mano principalmente de Juan Amos Comenio (1572-1670) y Wolfgang Ratke (1571-1635) como expresión de modernidad, afianzándose en los siglos XVIII y XIX con el surgimiento de la Escuela Pública en Europa y América Latina. Pretende conservar el orden de las cosas, para lo cual el profesor asume el poder y la autoridad como transmisor de conocimientos, exige disciplina y obediencia. Es una figura autoritaria, impositiva, coercitiva, y paternalista.

Utiliza una metodología muy directiva y autoritaria, considerando al alumno como un mero espectador del proceso de enseñanza-aprendizaje. El sistema educativo se basa en la regulación de la conducta por medio del premio. Mediante la enseñanza de la escuela tradicional se consideraba que todo el alumnado podía aprender por medio de los libros y las clases magistrales.

A finales del siglo XIX se empezó a cuestionar esta metodología de la educación tradicional, poniéndose en duda la pedagogía basada en la memorización, la competencia y la disciplina. Había una necesidad de una renovación a favor de la autoformación y la actividad espontánea del alumno. La Escuela Nueva fomenta la libertad y autonomía del alumno, la dignidad de la infancia y su valor. Podemos considerar a Johann Heinrich Pestalozzi (1746-1827), Friedrich Fröbel (1782-1852), Jean-Jacques Rousseau (1712-1778), John Dewey (1859-1952), María Montessori (1870-1952), Ovide Decroly (1871-1932), Jean Piaget (1896-1980) como sus precursores.

Estos autores comienzan un movimiento renovador heterogéneo con una gran diversidad de corrientes con objetivos similares. Según Del Pozo (2004), la Escuela Nueva establece una serie de novedades con respecto a la educación tradicional:

- En lugar de utilizar un sistema de castigos y recompensas fomenta la cooperación entre el alumnado.
- Los estudiantes son los que establecen sus propias tareas, de forma que el docente que tradicionalmente dirigía la clase, con la Escuela Nueva se convierte en un orientador/a.
- En contra del sistema tradicional en el que imperaba la falta de libertad del alumnado, la Escuela Nueva defiende la autonomía y responsabilidad personal del alumno o alumna.

Para conseguir estos objetivos, la Escuela Nueva partía de los siguientes principios basados en Jiménez (2009).

1. Se reivindica la voz del alumnado dentro de su propio proceso de enseñanza, colocando al alumno en el centro del proceso de enseñanza-aprendizaje.
2. El profesor en lugar de ser el protagonista en el proceso de enseñanza-aprendizaje, pasa a ser un acompañante y facilitador en la educación del alumnado.

3. El alumno deja de ser un sujeto pasivo en la adquisición de conocimiento, y se convierte en el responsable de indagar, explorar y experimentar con el objetivo de ir aprendiendo de su propia experiencia.
4. La disposición del aula y los materiales didácticos se establecen en función de las necesidades e intereses del alumnado, la disposición de las clases busca la interacción entre el grupo, ya no se dispone en torno al docente.
5. Los materiales didácticos buscan dar respuesta a las necesidades e intereses del alumnado

En contraposición a la Escuela Tradicional que utilizaba una metodología muy directiva y autoritaria, en la que el alumno era un sujeto pasivo, un mero espectador del proceso de enseñanza-aprendizaje, la Escuela Nueva fomenta la participación del alumno y le hace el principal responsable en el proceso de enseñanza- aprendizaje. Esto favorece que el alumno sea capaz de aprender a modular su conducta, sin necesidad de acudir a una fuente externa que controle su comportamiento. La Escuela Nueva proporciona un gran protagonismo a la experiencia del alumno como medio para adquirir nuevos aprendizajes, considerando el descubrimiento, la experimentación y la investigación del propio alumno esenciales para la construcción del conocimiento.

Frente al objetivo de la escuela tradicional de que el grupo de alumnos en su conjunto adquiriera unos determinados conocimientos y destrezas que se consideran apropiados para su edad, la escuela nueva concede mucha más importancia a lo que el niño es capaz de aprender atendiendo a su desarrollo madurativo, a pesar de que el currículo proponga una serie de conceptos y competencias que el alumno debe ir aprendiendo en función de su edad biológica. El docente ha de ajustar sus clases a las necesidades e intereses del grupo en general y de cada alumno en particular.

1.2. Estructura básica de un tema dentro de la metodología de aprendizaje basado en la resolución de problemas.

La resolución de problemas una de las tareas más utilizadas por los profesores de ciencias, tanto para instruir, como para evaluar los aprendizajes (Gil, Martínez-Torregrosa, Ramírez, Dumas-Carré, Goffard y Pessoa, 1994).

El aprendizaje basado en la resolución de problemas (ABP), o en inglés *problem based learning* (PBL), es una metodología que une los principios teóricos del constructivismo,

la práctica de la enseñanza, y el diseño del currículo (Savery y Duffy, 2001). Esta metodología pretende evitar la figura del profesor como responsable en la transferencia de conocimientos, y los estudiantes como receptores pasivos de los mismos. El ABP busca que el estudiante sea el centro del proceso de enseñanza-aprendizaje, siendo responsable de su propio aprendizaje (Barrell, 1999). Se basa en principios pedagógicos que han demostrado ser útiles para mejorar los procesos de enseñanza/aprendizaje: resolución de problemas del mundo real, aprendizaje activo y cooperativo, autoevaluación, etc. A continuación, basándonos en Barrett (2005), enumeramos las características principales de esta metodología:

- Desarrolla habilidades cognitivas de alto nivel (pensamiento crítico, resolución de problemas, análisis, y toma de decisiones)
- Favorece la metacognición y el aprendizaje autorregulado.
- Los estudiantes adquieren un papel activo en la resolución de un problema, o de situación próxima a la realidad.
- Requiere de conocimientos interdisciplinarios e integrados.
- Prepara al estudiante para la vida real.
- Genera responsabilidad para asumir sus retos.

Diseñar un currículum basado en el ABP implica una selección de contenidos prácticos, y una estructuración basada en conceptos y objetivos de aprendizaje. Una vez presentado el problema a resolver, el profesor ha de hacer ver a los estudiantes la necesidad de un plan de acción para resolverlo. Éstos, han de proponer una serie de pasos a seguir. Una vez solucionado el problema, los estudiantes y el profesor han de analizar lo que se ha aprendido a través de la evaluación. Los estudiantes han de trabajar en grupo, y el profesor ha de actuar como tutor que facilita los avances en la línea adecuada para resolver el problema. El profesor ha de promover el trabajo en el grupo, escuchar al alumnado, formular las preguntas adecuadas para encarrilar el trabajo, orientar en el uso de la información, y establecer un buen clima de trabajo. Es decir, acompaña, guía, orienta, diseña los problemas, y ayuda a los alumnos a encontrar, organizar y manejar la información.

Las características que según Branda (2009) debe cumplir un problema para aplicar la estrategia ABP serían: el problema planteado tendrá como referencia los contenidos académicos a tratar, ha de ser un problema abierto, no estructurado, se ha de presentar la información de manera progresiva, debe de incluir frases controvertidas, que propicie la

discusión del grupo. Es muy importante que contenga elementos con los que pueda sentirse vinculado el estudiante y ha de reflejar la realidad.

Numerosos trabajos han puesto de manifiesto las ventajas del ABP en relación con la enseñanza habitual. A continuación, detallamos una selección de estos:

- Incrementa significativamente el uso de estrategias para resolver problemas y para obtener información (Stepien, 1993).
- Mejora el conocimiento del estudiante sobre la materia, su habilidad para resolver problemas del mundo real y su motivación para el aprendizaje (Nendaz y Tekian, 1999)
- Promueve el desarrollo de las capacidades metacognitivas de los estudiantes (Downing et al., 2009)
- Desarrolla en mayor medida las competencias profesionales (Koh et al., 2008).
- Fomenta el pensamiento crítico, la comprensión, el trabajo cooperativo, y la capacidad del estudiante de aprender a aprender (White, 1996).
- Aumenta la capacidad crítica para analizar la información (Molina et al., 2003).

Nuestra propuesta de enseñanza del tema de óptica en 2º de Bachillerato está basada en la metodología de aprendizaje basado en la resolución de problemas, integrando el aprendizaje de conceptos, modelos y su posterior desarrollo; en terminología de la enseñanza tradicional, integrando la teoría, las prácticas, los problemas y la evaluación. Los estudios realizados sobre innovación didáctica han puesto de manifiesto la necesidad de dicha integración en un único proceso (Chalmers, 1984). Basándonos en Verdú (1994), podemos resumir la planificación de la estructura de nuestro tema mediante una enseñanza problematizada por investigación orientada, en los siguientes procesos:

1. Plantear situaciones problemáticas inspiradas en observaciones que, desde el punto de vista histórico y/o epistemológico, estuvieron en el origen de los conocimientos implicados. Estas situaciones servirán de punto de partida para el trabajo de los estudiantes.
2. Organizar el índice del tema como una posible estrategia para avanzar en la solución de la situación problemática elegida, es decir que el índice se convierta en un “plan de investigación”. La estructura del tema no está guiada por los conceptos fundamentales como es habitual en los manuales o libros de texto, sino por una estrategia para resolver la situación problemática planteada. De este

modo, los conceptos formales se van introduciendo al abordar los problemas planteados, unificando cuando es posible campos inicialmente inconexos.

3. Los conceptos y modelos se introducen, tanto por alumnos como por el profesor, como hipótesis bien fundadas, que han de ser puestas a prueba en el laboratorio, en problemas de lápiz y papel, y finalmente en la identificación y predicción de nuevos hechos. Los conceptos y modelos han de ser coherentes con los conocimientos ya establecidos, y han de ser universales. A lo largo de este proceso se ha de poner a prueba los conceptos, las hipótesis y modelos propuestos por los alumnos mediante la realización de ejercicios y la resolución de problemas o prácticas de laboratorio (Martínez Torregrosa et al., 1993; Gil et al., 1999).
4. La evaluación se transforma en un instrumento de recapitulación y de ayuda en la resolución de los problemas planteados. La identificación de las ideas o conocimientos que supusieron históricamente un avance en la solución del problema, así como la identificación de los obstáculos que pueden dificultar o dificultaron históricamente dichos avances facilita la evaluación. Esta metodología permite establecer un posible itinerario de aprendizaje y otro, en paralelo, de posibles obstáculos asociados. El docente tiene que planificar en consecuencia las actividades de evaluación/aprendizaje para superar dichos obstáculos e impulsar el aprendizaje de sus alumnos.

La enseñanza problematizada favorece, de modo natural, la realización de recapitulaciones periódicas sobre lo que se ha avanzado en la solución al problema planteado, los obstáculos que se han superado y lo que aún falta por hacer. Mediante estas recapitulaciones, se consigue que los alumnos estén orientados en todo momento a lo largo de la investigación. Finalmente se lleva a cabo una recapitulación final del trabajo realizado, con características similares a un informe científico, así como otras actividades de síntesis como podrían ser mapas conceptuales, cuadros comparativos, etc.

5. La estructura problematizada se concreta en una secuencia de actividades, un plan de investigación dirigida (Furió y Gil, 1978), que se propone en el aula. El aprendizaje basado en la resolución de problemas establece que los alumnos se tienen que organizar en pequeños grupos, con tiempo para pensar, argumentar y trabajar, para avanzar, con la ayuda del profesor, en la resolución del problema planteado. Este planteamiento es sumamente propicio para el aprendizaje de

conocimientos científicos (Newton, Driver y Osborne, 1999; Driver, Newton y Osborne, 2000).

Esta metodología de enseñanza trata de promover que los alumnos hagan explícitas sus propias ideas y las comparen con las de sus compañeros. En definitiva, se favorece la implicación afectiva y la racionalidad científica de los alumnos, y también del profesor, en la resolución de los problemas. Por supuesto, todo este trabajo exige una cuidadosa planificación por parte del profesor, mediante programas concretos de investigación dirigida, que permitan que haya un tiempo libre en el aula para que los alumnos piensen, argumenten y refuten.

En el caso de la aplicación de la metodología del aprendizaje basado en la resolución de problemas aplicado a la Física, destacamos la aportación de Osuna (2007), y Osuna, Martínez-Torregrosa, Carrascosa y Verdú (2007) que detallan la puesta en práctica de la enseñanza de la óptica mediante una enseñanza problematizada obteniendo unos resultados muy satisfactorios. También resaltamos la aportación de Torregrosa et al. (2016) en la que los autores han diseñado una unidad problematizada para la enseñanza de la física cuántica en el Bachillerato, insistiendo especialmente en los grandes pasos que llevan a los estudiantes a construir los modelos científicamente aceptados.

Alveiro y Nury (2019) aplican en Colombia el aprendizaje basado en proyectos, un método afín al aprendizaje por resolución de problemas, para la enseñanza de la cinemática. Estos autores verifican que es un método que desarrolla las habilidades propias de la investigación científica y fortalece tanto el trabajo autónomo como el trabajo en equipo. Los mismos autores destacan el hecho de que la construcción del montaje experimental supusiera un claro desarrollo de la creatividad de los alumnos. Afirman que, posteriormente, la creatividad dio paso a la curiosidad, siendo el ensayo-error la forma de trabajar más recurrente. Los alumnos aceptaban y rechazaban ideas e hipótesis, siempre argumentando sobre la necesidad de cierta modificación.

Antes de concluir este apartado nos gustaría resaltar que, como se comentó en la introducción, este trabajo tiene su germen en la Universidad de Alicante hace ya un par de décadas y, por tanto, toma como referencia el trabajo de muchos investigadores del área de Didáctica de las Ciencias Experimentales de esta Universidad, fundamentalmente los trabajos de los profesores Luis Osuna García, Joaquín Martínez-Torregrosa, Rafaela Verdú Carbonell y Jaime Carrascosa Alís. Este grupo de investigadores desarrolla una

metodología de aprendizaje basada en la resolución de problemas, a la que denomina enseñanza problematizada por investigación orientada. Es por ello que, en éste trabajo, emplearemos el término enseñanza problematizada al referirnos al modelo didáctico escogido y que está basado en la resolución de problemas. Posteriormente, en el capítulo 8 de esta investigación se detalla la aplicación de esta metodología didáctica para aprendizaje de la óptica en 2º de Bachillerato.

1.3. Modelos de naturaleza de la luz: implicaciones para la enseñanza.

Las partículas y las ondas son ambos constructos de la mente humana, diseñadas para ayudarnos a hablar del comportamiento de la luz en diferentes circunstancias, luego la pregunta guía en el aprendizaje de la naturaleza de la luz no debería ser “¿qué es la luz?”, sino “¿cómo se comporta la luz?”. Con las ideas y descubrimientos fundamentales de Niels Henrik Bohr (1885-1962) y de muchos otros científicos que contribuyeron al desarrollo de la mecánica cuántica, en las primeras décadas del siglo XX, se dejó de creer en el concepto de “realidad externa” al observador. Se abandonó definitivamente la idea de que el mundo esté construido por entidades independientes del observador que interactúa, inevitablemente, con estas mismas entidades, sean ellas partículas o campos de fuerzas, para poderlas detectar y medir. Hemos de ser conscientes de que no tenemos acceso directo a la “realidad última” (noúmeno), sino que simplemente interpretamos por medio de modelos y teorías las experiencias y observaciones que tenemos de las estructuras, objetos y partículas que intentamos observar y/o medir. Los objetos de la ciencia no son, por tanto, los fenómenos de la naturaleza en sí mismos, sino los constructos creados por la comunidad científica para interpretar su naturaleza. La dimensión social de la construcción del conocimiento científico ha llevado a la comunidad científica a la creación de conceptos, modelos, convenciones y procedimientos, en su intento de comprender el mundo que nos rodea (Driver, 1995). Los modelos científicos son representaciones de los objetos, hechos, ideas, sistemas o procesos, y juegan un papel crucial reduciendo la complejidad de los fenómenos, ya que permiten una representación visual de teorías muy abstractas, gracias a la cual se pueden hacer predicciones y comprobar comportamientos. Ha de establecerse una clara distinción entre un modelo científico y la realidad en sí misma. Las ideas o conceptos acerca de la realidad están representadas explícitamente en el modelo. El modelo ayuda a los alumnos a conceptualizar la realidad sirviendo de nexo entre la mente y el mundo material.

Los modelos mentales, muchas veces preconcebidos o equivocados, son los que proporcionan a los alumnos la capacidad de predecir y explicar los fenómenos en estudio (Driver, 1995). Como resultado de la interacción de nuestros sentidos con la realidad, hemos de ser conscientes de que solamente podemos tener acceso a un modelo de la realidad, nunca hemos de considerar que nuestro propio conocimiento es “*conocimiento del mundo real*” (Goldin, 1990, p. 34) o, también, de lo que existe (noúmeno) independientemente del observador. Un modelo mental es una representación personal de un sistema que evoluciona según el individuo interactúa con dicho sistema (Norman, 1983).

Para el propósito de este estudio, una comprensión científica de la naturaleza de la luz consistiría en una comprensión simplista de dos modelos científicos, el modelo ondulatorio y el modelo corpuscular, así como de la comprensión del concepto de “rayo” y “fotón”. Al considerar la naturaleza de la luz, uno puede utilizar la idea de onda o de partícula. Al utilizar la idea de onda, la propagación de la energía de la luz a través del espacio se puede comprender como el movimiento de una onda similar a la propagación de ondas a través del agua. El rayo es una construcción geométrica que marca la dirección de propagación de la luz que se puede imaginar como una onda o como una partícula. En el modelo ondulatorio el rayo es perpendicular al frente de ondas. Al utilizar el modelo de partícula, la propagación de la energía de la luz a través del espacio se puede imaginar como en paquetes discretos, como si fuesen partículas que se mueven. Estos paquetes discretos de energía se llaman fotones y son entidades teóricas con características de partícula.

Hemos podido comprobar en todos nuestros años de docencia que los modelos mentales expresados por los estudiantes son híbridos de los modelos científicos de la luz. Consideramos que los estudiantes pueden conseguir una comprensión “científica” suficientemente buena de los fenómenos propios de la óptica geométrica, a pesar de tener diferentes modelos de luz, algunos de los cuales no coinciden con los modelos científicamente aceptados. Los estudiantes pueden conseguir explicar y entender un gran rango de fenómenos de óptica geométrica considerando la luz como un conjunto de rayos. Existen todavía libros de texto que parecen transmitir la idea de que las ondas de luz y los fotones existen realmente, lo que conduce a los estudiantes a elaborar un modelo híbrido del “fotón”: un modelo que debe contener tanto las características de onda como las de partícula.

Partiendo de la base de que no se puede tener acceso directo a la “realidad última”, una visión más constructivista de la óptica, como disciplina de la Física, proporcionaría la posibilidad de que puedan surgir en los estudiantes modelos más adecuados para explicar los resultados de los experimentos y conseguir así una buena comprensión de estos por los estudiantes.

1.4. La especificidad del conocimiento y del cambio conceptual en óptica.

A lo largo de la historia, la construcción del conocimiento científico ha evolucionado de afirmaciones simples, que hoy parecen obviedades, sobre la naturaleza de la luz y la visión, a aseveraciones mucho más complejas. Los parámetros característicos de la luz tan alejados de la percepción humana constituyen una primera fuente de complejidad, pues existe una gran diferencia entre la explicación de los fenómenos acumulados por la experiencia individual y la descripción formal de dichos fenómenos, propia de los modelos científicos. La luz en muchas situaciones no proporciona pruebas acerca de su velocidad finita (Descartes y Kepler creían que la luz se movía a velocidad infinita, es decir era instantánea), ni acerca de su naturaleza ondulatoria (Newton no estaba de acuerdo con la naturaleza ondulatoria de la luz, y proponía su naturaleza corpuscular) o de su carácter discreto (Einstein lo desveló en 1905 estableciendo el concepto de fotón). Se necesita un equipo muy sofisticado y un gran esfuerzo intelectual para comprender estas propiedades de la luz tan alejadas de la percepción directa, a escala humana.

La segunda fuente de complejidad reside en el hecho de que muchos fenómenos ópticos observados diariamente, como la dispersión de la luz, no se pueden tratar sin tener en cuenta el medio en el que viaja la luz. Dichos fenómenos se perciben por los estudiantes como desvinculados de la luz como entidad en sí misma, causando en ellos enorme confusión. Por ejemplo, el lenguaje diario incluye expresiones como “un cielo lleno de luz” que puede promover que los alumnos consideren la luz como un fenómeno estático. Los docentes hemos de reducir la complejidad de los fenómenos ópticos tratados mediante el uso de modelos mentales adecuados, que sigan siendo conceptualmente correctos, pero que resulten más asequibles para los estudiantes.

Observamos a lo largo de nuestra experiencia docente que, mediante la enseñanza tradicional de la óptica, a menudo los alumnos se limitan a sustituir los conocimientos previos, y erróneos, que tenían, por nuevos conocimientos de carácter híbrido, más que por un modelo adaptado a su persona del conocimiento formal. Consideramos al igual

que Galili et al. (1993), que las ideas previas permanecen en los alumnos, aunque modificadas en diferente medida. Los conceptos previos alternativos que tienen los estudiantes sobre la observación de la imagen se basan, generalmente, en una conceptualización holística de la imagen. Sin embargo, la enseñanza de la óptica tal y como nosotros la entendemos, propone una construcción de la imagen punto a punto, mediante haces de luz independientes que emanan de cada uno de los puntos del objeto. Esta concepción de la formación de las imágenes más compleja y abstracta no es directamente observable y contradice en cierto modo el sentido común, poniendo de manifiesto el desajuste existente entre los conocimientos previos de los estudiantes y los conceptos formales de óptica que tratamos de que comprendan con la enseñanza formal.

A partir de las prescripciones de la metodología de enseñanza-aprendizaje por resolución de problemas, a continuación, llevaremos a cabo el estudio histórico-epistemológico de la óptica para poder establecer las ideas clave en la que basar nuestra Unidad Didáctica. Posteriormente, estudiaremos las dificultades asociadas a dichos conceptos que pueden encontrar los estudiantes, y los relacionaremos con los criterios de evaluación propuestos en la legislación vigente.

CAPÍTULO 2. ESTUDIO HISTÓRICO Y EPISTEMOLÓGICO DE LA ÓPTICA

En este capítulo abordaremos un análisis histórico, fundamentado sobre trabajos anteriores e importantes, acerca de las principales teorías que trataban de describir la naturaleza de la luz. Lo hacemos en busca de un paralelismo entre el desarrollo de las diferentes teorías y la construcción de los conceptos que realizan los estudiantes durante el aprendizaje de la óptica geométrica y ondulatoria.

Hay muchas razones para incorporar la historia de la ciencia en la enseñanza de la Física (Galili y Hazan, 2016) y, en concreto, como es nuestro caso, puede inspirar estrategias de enseñanza que se pueden utilizar como principio organizador del currículo (Matthews, 1994). El desarrollo histórico de las ideas sobre óptica y las similitudes entre las ideas de los estudiantes y aquellas de los primeros científicos han sido estudiadas por diversos autores a lo largo de décadas (La Rosa et al., 1984; Selley, 1996; Galili, 1996; Galili y Lavrik, 1998; Galili y Hazan, 2000; Dedes, 2005). Piaget y García (1989) describieron el desarrollo del pensamiento científico y la psicogénesis del aprendizaje individual a través de caminos paralelos, aunque obviamente, existan diferencias importantes. La hipótesis fundamental de la epistemología genética es que hay un paralelismo entre el progreso realizado en la organización lógica y racional del conocimiento, la historia de la ciencia, y el proceso psicológico formativo correspondiente (Piaget, 1975). Por tanto, las normas que el sujeto epistémico elabora en el curso de su génesis podrían ser comparables a las normas que son inherentes al pensamiento científico (Piaget y García, 1989). La explicación de cualquier fenómeno ha de buscarse en su propia génesis, lo que confiere un papel muy importante a la historia de la ciencia, tanto en la práctica educativa, como en reflexión sobre la educación.

En nuestro caso, el estudio de la historia de la ciencia nos permite establecer los conceptos clave que tienen que comprender nuestros alumnos, y nos ayuda a detectar los obstáculos que previsiblemente encontrarán, estableciendo un paralelismo entre sus ideas intuitivas y las mantenidas en algún momento de la historia de la ciencia.

2.1. La óptica como ciencia de la visión.

Ya en la antigua Grecia los filósofos atomistas, se preguntaban acerca del fenómeno de la visión, y consideraban que de los objetos emanaba una sutil capa de átomos que formaban un simulacro del objeto, la imagen de este, *eidola*, que volaba hasta los órganos

de la vista para provocar la visión. Platón (427 a. C.- 347 a. C.) consideraba que el ojo debía emitir un fuego visual de forma que el contacto entre estas dos entidades produjera la sensación de la visión (Ferraz, 1974). Ninguna de estas teorías consideraba la luz como intermediario entre el objeto y el ojo. Aristóteles (384 a. C.- 322 a. C.), en su obra *Parva Naturalia* (348-322 a. C), reseña algunas de las incongruencias de estos primeros conceptos de la imagen óptica. Aristóteles consideraba que la luz era una cualidad que hacía posible la visión y no una emanación de ningún cuerpo, pero sus explicaciones no permitieron superar las carencias de las ideas precedentes. Euclides (325 a. C.- 265 a. C.) intentó explicar los fenómenos de la visión mediante el trazado de rayos emitidos por el ojo, que representan una especie de luz (Solís y Sellés, 2005).

A continuación, intentaremos establecer el desarrollo de la óptica como ciencia de la visión desde Ibn al-Haitham (965-1045), quien realizó una contribución fundamental al estudio de la óptica como ciencia de la visión. En la época de Ibn al-Haitham occidente atravesaba su época más oscura desde el punto de vista del desarrollo de ideas científicas y de la observación de la naturaleza. Sin embargo, cuando revivió el interés en la ciencia, las obras de los pensadores y científicos árabes se tradujeron al latín. De este modo el trabajo de Ibn al-Haythan llegó a manos de Roger Bacon (1214-1294), John Peckaham (1220-1290) y, finalmente, de Witelo (1230-1314), quien gracias a sus publicaciones difundió al trabajo de Ibn al-Haitham en occidente. La teoría sobre la formación de imágenes de Ibn al-Haitham también tuvo dificultades de aceptación debido a que su análisis de formación de la imagen en términos de puntos era difícil de entender, y no fue aceptada de inmediato por los eruditos de la época.

Ibn al-Haithan es el primero en ser consciente de que, si una persona que mira al sol cierra sus ojos, continúa viendo el disco solar durante un tiempo. Es más, mirando al sol, el observador puede llegar a sentir dolor. Estos hechos entraban en conflicto definitivamente con el mecanismo de los rayos visuales basado en la concepción griega de la imagen y aceptado por la comunidad científica de la época, ya que cuando el ojo se cierra, la visión debería de cesar. En ese mismo sentido, Ibn al-Haithan consideraba que, si la emisión de dichos rayos por el ojo del observador causara daño, éstos no serían emitidos. La visión según la imagina Ibn al-Haithan, requiere un agente externo que actúe sobre el ojo, que cuando es demasiado fuerte, aflige el órgano sensitivo, y deja una impresión duradera sobre el ojo (González-Cano, 2015). El primer cambio que propone Ibn al-Haithan respecto a la doctrina imperante, consiste en suponer un mecanismo que eliminaba la

propiedad de las imágenes de contraerse a lo largo de su camino antes de llegar al ojo del observador. Si el objeto era más pequeño que la pupila, su pequeña imagen podía propagarse en línea recta y entrar en la pupila sin necesidad de reducirse en el camino. Cualquier objeto, fuera cual fuera su tamaño, podría considerarse compuesto de muchas unidades pequeñas o puntos. Cada uno de dichos puntos emitía en todas las direcciones su propia imagen, que podía entrar en una pupila, independientemente de donde se encontrase dicha pupila, si tener que alterarse por el camino. Ibn al-Haitham también explicó como todas esas imágenes puntuales, se podían reconstruir en el interior del ojo formando una reconstrucción que se parecía al objeto que los había emitido. Aunque este mecanismo de visión aún no era perfecto, supuso un gran avance en la solución final. La visión consistía pues en la formación de una imagen óptica en el interior del ojo, que funcionaba como una cámara oscura, de tal forma que, cada uno de los rayos de luz emitidos por cada punto del objeto iluminado, atravesaba el pequeño agujero de la cámara oscura (la pupila) y formaba el punto correspondiente de la imagen en la pantalla de esa cámara (Gil del Río, 1984).

El hecho de que una persona sintiese dolor cuando miraba al sol hizo pensar a Ibn al-Haitahn que los rayos solares deberían consistir en algo capaz de afectar al sensorio hasta el punto de poder hacerle daño. Posteriormente, atribuye a los rayos el poder de hacer que los puntos imagen salgan de los cuerpos cuando estos son iluminados por el sol. Se convenció a si mismo de que el agente físico o lumen debía de existir, y además trató de averiguar su naturaleza. Ibn al-Haithan pensó que la luz debería intervenir en la visión, basándose en que el color con que se ven los objetos está en consonancia con la luz que los ilumina. Considera la luz como una entidad independiente del objeto y del ojo, que hace de intermediaria en la visión (González-Cano, 2015). Considera que los rayos de luz son las trayectorias de diminutos corpúsculos materiales. Esta es la primera vez que se desarrolla una discusión acerca de la entidad de la “luz”. Es también la primera ocasión en que se presenta la teoría corpuscular. Encontramos, por tanto, una primera relación entre la óptica como ciencia de la visión y la búsqueda de un modelo que explique la naturaleza de la luz. Podemos resumir las aportaciones de Ibn al-Haithan para explicar la visión directa, la visión con un espejo plano, o de un objeto sumergido en el agua:

- 1- Los objetos son considerados fuentes secundarias de luz.
- 2- Las fuentes luminosas extensas son idealizadas como conjuntos de fuentes luminosas puntuales que emiten rayos en todas las direcciones.

- 3- Estos rayos son líneas rectas, de cuyo comportamiento geométrico se pueden derivar consecuencias ópticas.
- 4- El ojo humano se modeliza como un instrumento óptico, con lo que la óptica como ciencia de la visión empezó a ser considerada como ciencia de la luz (Tarasov y Tarasova, 1985).
- 5- La luz comienza a ser considerada como una entidad física independiente del ojo del observador y de la fuente luminosa y, por tanto, podía ser objeto de estudio en sí misma independientemente de la visión, dando paso al estudio de la naturaleza de la luz.

Poco a poco el estudio de la óptica se iba desarrollando, pero sin una teoría sobre el mecanismo de la visión, los avances eran muy pequeños. A finales del siglo XVI la óptica se encontraba en un estado de gran confusión, a pesar del esfuerzo realizado durante muchos siglos. Gracias a la idea de que los rayos emanan de cada punto de un cuerpo en todas las direcciones de Francesco Maurolico de Messina (1494-1575), comienza un periodo nuevo y extraordinariamente productivo en óptica, porque este es un concepto básico y fundamental. Perfecciona la enseñanza de Ibn al-Haitham, según el cual todo cuerpo debería ser considerado como un número infinito de elementos puntuales, que emitirían imágenes de sí mismo en todas las direcciones. Las trayectorias de dichas imágenes son los rayos. Por tanto, un número innumerable de rayos sale de cada punto de un cuerpo hacia todas las direcciones.

Con anterioridad a la teoría de Maurolico, los científicos occidentales se sentían más atraídos por la compleja idea de las especies, en parte debido a la influencia de la antigua filosofía griega. Gracias a la teoría de Maurolico se comenzó poco a poco a hablar de rayos geométricos que salen de los puntos de los cuerpos. Estos son los rayos de luz. Es una gran innovación para su época, gracias a la cual Johannes Kepler (1571-1630) pudo desarrollar, en 1604, su obra *Supplement to Witelo* (Ad Vitellionem paralipomena).

Las ideas contenidas en la obra de Kepler proporcionan la base de la óptica del siglo XVII. Se propone explicar el mecanismo de la visión, interpretando por primera vez correctamente la función de la pupila. Ibn al-Haitham no podía comprender cómo las imágenes emitidas por el mismo punto objeto entraban en la pupila. Kepler considera que la pupila ha de ser un diafragma que delimita la cantidad de luz que entra en el ojo, y deja fuera las partes periféricas de los rayos que no se unen para formar el cono refractado. Kepler establece entonces que los rayos emitidos en un cono por un punto-objeto, después

de entrar en la pupila, vuelven a converger en un punto de la retina. Es así como ocurre la estimulación del nervio sensorio, que transmite las señales originales al cerebro y que representa las señales recibidas creando una figura que tiene la forma de un punto, o una estrella luminosa, y consigue localizar dónde está dicho punto. En estas reglas básicas encontramos el fundamento de la óptica geométrica moderna. En la Figura 2.1 mostramos un esquema del modelo de visión de Kepler.

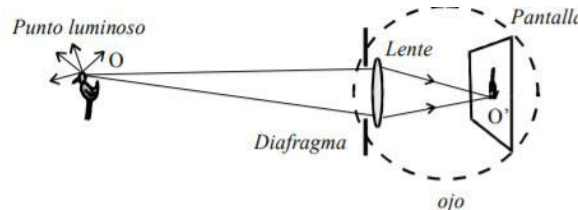


Figura 2.1: Modelo de visión de Kepler. Fuente: Osuna (2007, p.111).

Kepler también explica cómo se ven las figuras que se sitúan frente a espejos planos, y en medios transparentes, podemos ver una representación en la Figura 2.2.



Figura 2.2: Modelo de visión indirecta de Kepler. Fuente: Osuna (2007, p.58).

También en este caso fue el primero en elucidar este misterioso fenómeno, tanto tiempo estudiado. Tras tantos años de confusión, la explicación de Kepler es sencillamente maravillosa, aunque inicialmente fue cuestionada por la comunidad científica de la época. Desafortunadamente, los libros de texto actuales siguen sin explicar el mecanismo de la visión desarrollado por Kepler. En 1610, Kepler utiliza por primera vez el telescopio creado por Galileo, y aunque inicialmente tenía una disposición crítica, Kepler tuvo fe en el telescopio, mientras que la comunidad científica era muy reacia a su aceptación. Kepler fue el primero en interesarse en la utilización de las lentes. Gracias su obra *Dioptrice*, que publica en enero de 1611, las lentes adquirieron un fundamento teórico y pasaron a ser consideradas como instrumentos científicos. En la Figura 2.3 mostramos la formación de una imagen con una lente convergente siguiendo el modelo de Kepler, y en la Figura 2.4

una imagen en la que se representa la construcción gráfica para obtener la posición de la imagen que forma una lente delgada de acuerdo con el modelo de Kepler.

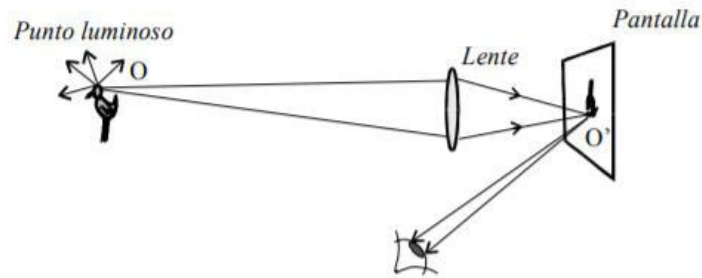


Figura 2.3: Formación de una imagen con una lente convergente siguiendo el modelo de Kepler. Fuente: Osuna (2007, p.135).

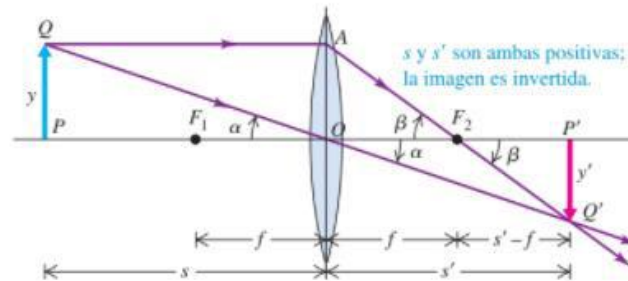


Figura 2.4: Construcción para obtener la posición de la imagen que forma una lente delgada, de acuerdo con el modelo de Kepler. Fuente: Young y Freedman (2009, p. 1174).

A continuación, en la Figura 2.5, mostramos un esquema para la formación de una imagen con una lente divergente de acuerdo con el modelo de Kepler.

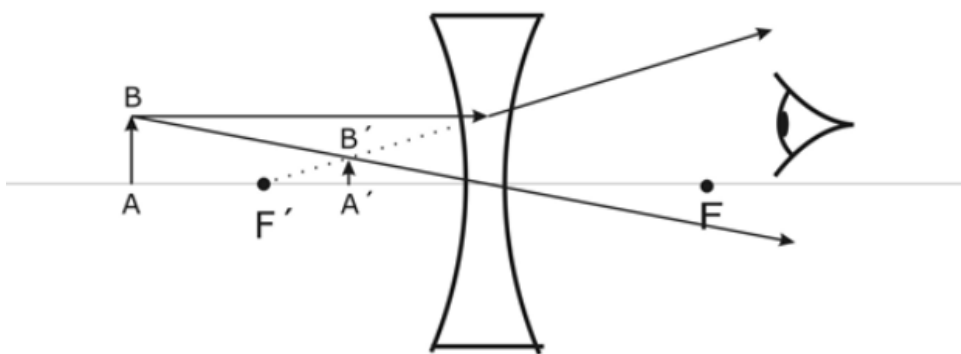


Figura 2.5: Formación de la imagen de un objeto utilizando una lente divergente de acuerdo con el modelo de Kepler. Fuente: Elaboración propia.

Después de más de trescientos años de vida empírica entre artesanos y bajo la prohibición de la ciencia, gracias al trabajo de Kepler se estableció una nueva fe, que alteró radicalmente la actitud de los científicos hacia los instrumentos de observación. La

comunidad científica comienza a considerar las lentes como una herramienta válida para obtener información, acerca del microcosmos y del macrocosmos.

La revolución iniciada por Kepler en 1610 cambió por completo la óptica clásica, y encontró una recepción muy favorable en el movimiento filosófico dominante en el siglo XVII. Era un movimiento empírico contrario al pensamiento medieval, que reprochaba a sus predecesores medievales haber privado a la humanidad, debido a su escepticismo, dogmatismo e ignorancia, de muchos siglos de utilización de las lentes.

La *óptica* entendida como “*Ciencia de la visión*”, es una ciencia compleja que debe tener en cuenta la contribución de la física, de la fisiología y de la psicología. El objetivo de la óptica es descubrir las condiciones y las leyes que permitan a un observador ver bien. La óptica como ciencia de la visión es una ciencia antropomórfica. No ha de restringirse a las características del estímulo físico, sino que ha de establecer los efectos que dicho estímulo tiene en el órgano sensitivo y, posteriormente, en los efectos de dicho estímulo en la mente. Nuestro trabajo está basado en esta idea.

Tras muchos siglos de investigación para lograr comprender las leyes que rigen la percepción de la luz, de las formas y de los colores, a principios del S XVII se logró explicar cómo se producía la visión. A partir de ese momento, el estudio histórico de la óptica ha ido pasando por diferentes fases, los expertos en el tema suelen organizar el estudio de la óptica en tres etapas que detallamos a continuación.

2.2. Primera Etapa: S. XVII.

Las innovaciones tecnológicas del S. XVII permitieron un aumento considerable de los fenómenos observables. Comienza a crearse una nueva física, que no tenía el carácter eminentemente antropomórfico de la ciencia antigua. En sus inicios la física había tratado de explicar cómo la mente humana podía llegar a conocer el mundo exterior, pero ahora ésta nueva física buscaba conocer la estructura y las leyes del mundo que se observa al exterior de la mente humana, independientemente del observador. En este periodo, el desarrollo de una teoría física de la luz está asociado a la construcción de modelos mecánicos, que procuran explicar por medio de conceptos puramente mecánicos las propiedades conocidas de la luz, como la propagación rectilínea, la reflexión y el origen de los colores.

En 1637, Descartes publica su obra *La dioptrique, Les Météores y La géometrie*. En ella, mediante la analogía del bastón que transmite una información instantánea trata de describir la luz:

Deseo que penséis que la luz no es otra cosa, dentro de los cuerpos que denominamos luminosos, que un cierto movimiento, o una acción muy rápida y viva, que pasa hacia nuestros ojos, por entremedio del aire y de otros cuerpos transparentes, de la misma forma que la resistencia de los cuerpos, que encuentra un ciego, pasa a sus manos, por medio de su bastón. Quizás lo encontrareis extraño, pero es que la luz puede extender sus rayos en un instante, desde el sol hasta nosotros: puesto que sabéis que la acción, pasa en un instante de un extremo al otro del bastón, la luz hará lo mismo, aunque haya más distancia, de la tierra a los cielos (Descartes, *Discurso del método, Dióptrica, Meteoros y Geometría*. Edición de 1981, Cap. VI, AT XI 9, G 21, n. 40).

Descartes entendía la luz como un fenómeno más dentro del mecanicismo, como una presión que era transmitida a través de la materia sutil hasta la retina, más rápidamente en medios más densos. Sin embargo, en la misma época Pierre de Fermat (1607-1665) postula la relación inversa entre velocidad y densidad (Pimentel, 2015). Ismael de Boulliau (1605-1694) ya en el año 1638, expresa sus ideas contrarias al carácter sustancial de la luz, planteando la idea de que, si los rayos de luz fueran de naturaleza sustancial, la sombra de los árboles se vería arrastrada en los días de fuerte viento. Isaac Newton (1643-1727) se decantó por la idea de que la luz debería ser de naturaleza corpuscular, basándose en el atomismo generalizado de la época. Para él, el fenómeno fundamental de la luz es la transmisión rectilínea, sólo explicable si los rayos de luz son corpúsculos que obedecen a las leyes mecánicas. Newton pensaba que, si ésta fuese un pulso o presión transmitida a lo largo de un fluido, debería rodear los obstáculos, doblándose hacia la sombra, como ocurre con el sonido o las ondas de agua; y así era en realidad. Pero Newton no lo sabía, pues solamente conocía una parte de los experimentos realizados por Francesco María Grimaldi (1618-1663), quien consideraba que la luz era un fluido de naturaleza corpórea y no atomista, aunque le asignó una característica ondulatoria.

En su obra *Physico-Mathesis de lumine, coloribus et iride*, publicada en 1665, Grimaldi explica el fenómeno de la difracción². En sus experimentos dejaba pasar un estrecho haz

²El término difracción proviene del latín *diffractum*, del verbo *diffingere* que podríamos traducir por “quebrar” o “romper en pedazos”. Conjunto de fenómenos que ocurren cuando una onda luminosa encuentra un obstáculo o una hendidura de dimensiones parecidas a la longitud de la onda involucrada.

de luz solar a un cuarto oscuro a través de un orificio, que debía de ser lo más pequeño posible, en una de sus paredes, iluminando así la pared opuesta. Encontró que la mancha de luz era más ancha que lo que preveían los cálculos geométricos y, además, estaba bordeada por bandas coloreadas; siempre azuladas del lado más cercano a la sombra central, y rojizas en el otro extremo (Pesic, 2007). En la Figura 2.6 podemos ver una representación de la disposición experimental.

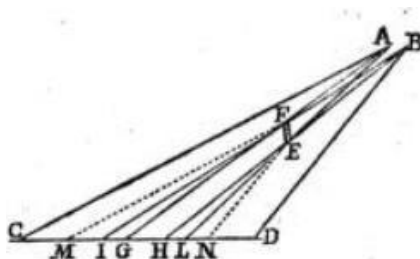


Figura 2.6: Propositio I. (Internet Archive). Disposición experimental: iluminación desde una rendija en una ventana AB con una barra opaca EF que proyecta una sombra. Los bordes de la sombra son más anchos de lo que permitirían las consideraciones geométricas.

Grimaldi concluyó que éste era un nuevo fenómeno que no se podía explicar por las leyes de la propagación rectilínea, ni mediante la reflexión o refracción de la luz. En la “*Propositio I, Primi Libri*” de su obra (Grimaldi, 1665, p.1): “Lumen propagatur seu diffunditur non solúm Directte, Refractte, ac Refflexe, sed etiam alio quidam quarto modo, difracte”, “la luz se propaga no sólo de manera directa, por refracción o por reflexión, sino que existe un cuarto modo, por difracción”. Comparó esta incursión de la luz dentro de la sombra con la del agua de un río fluyendo alrededor de una roca. Este fenómeno no pudo ser explicado por la teoría corpuscular de Newton ni por la teoría ondulatoria de Christiaan Huygens (1629-1695), y tuvo que transcurrir un siglo para la genial interpretación de Augustin Fresnel (1788-1827).

Cuando Newton decidió investigar los célebres fenómenos de los colores, las teorías de la “modificación”³ dominaban completamente el panorama científico de la época. Newton propone su *Experimentum crucis* en 1672, que sería capaz de demostrar que la

Definimos la difracción como: “cualquier desviación de los rayos de luz de su propagación rectilínea que no pueda ser interpretada como reflexión o refracción” (Sommerfeld, 1967, p. 179)

³Newton acababa de estudiar a fondo la *Dióptrica* cartesiana, en la que Descartes denunciaba la distinción escolástica entre colores *enfáticos* o *aparentes* (los producidos mediante los prismas o por el arco iris) y los *reales* (los propios de los cuerpos, desvelados, pero no producidos por la luz). Hasta Newton, los prismas eran considerados unos instrumentos empleados para provocar ilusiones ópticas y entretenimiento (Schaffer, 2011).

luz solar es una mezcla heterogénea de diferentes rayos de luz, caracterizados por diferentes refrangibilidades, mostrando que el prisma no es un modificador, sino un mero analizador de lo que ya había en la luz del Sol. Newton enuncia finalmente la siguiente proposición: “El blanco y todos los colores grises entre el negro y el blanco, están compuestos por otros colores, y la luz blanca del sol está compuesta de todos los colores primarios mezclados en una proporción adecuada” (Opticks, 1704; Libro I, Parte II, Proposición 5). La consideración de que la luz “blanca” es una mezcla de diferentes tipos de luz de distinta refrangibilidad permite explicar las aberraciones cromáticas, uno de los límites del modelo de Kepler.

Robert Hooke (1635-1703) publica en 1665 su obra *Micrographia*. En el Prefacio escribe: “Mediante los Telescopios, no hay nada por muy distante que sea que no podamos observar; y gracias a los microscopios, no habrá nada lo suficientemente pequeño, que escape a nuestra observación, se abre, por tanto, un nuevo mundo a nuestra comprensión” (Hooke, 1665, p. 18). Busca una teoría capaz de explicar los colores que aparecen tanto en las observaciones de las láminas delgadas como en la refracción ordinaria o el color aparente de los objetos. Concebía la luz como un movimiento vibratorio rápido del medio, que se propagaba a gran velocidad, pulsos que se propagan por el espacio, de un modo similar a las ondas creadas por una piedra sobre la superficie de un lago. Afirmaba que cada uno de esos pulsos, o vibración del cuerpo luminoso, generaba una esfera. Defendía una teoría ondulatoria de la luz en contra de la teoría corpuscular de Newton (Hecht, 2000).

Para estudiar la refracción, Hooke considera una fuente luminosa situada a gran distancia de la superficie de separación, de manera que podamos considerar una pequeña porción de dicha esfera plana. Los rayos son entonces perpendiculares al plano de la refracción. Considera que la refracción sigue la ley de Descartes. Para él, esta ley es experimental y no le busca una justificación teórica. Hooke define el Éter como la materia sutil que está presente en un cuerpo transparente y que es apta para transmitir la vibración. Ante el discurso de Newton sobre la luz y los colores en la *Royal Society* en 1672, Hooke entregó una crítica en la que argumentaba en contra de algunos de los postulados de Newton, y de algunas de sus conclusiones. Hooke definía: “la luz “blanca” como un conjunto de diferentes vibraciones que se propagan en los medios transparentes, de manera similar a como lo hacen los sonidos de un órgano en el aire” (Hooke, 1757, p. 10-15).

Las ideas de Hooke fueron adoptadas por Christiaan Huygens (1629-1695), quien afirma que, si los rayos se cruzan sin estorbarse mutuamente, la luz no puede deberse al transporte de materia. Influido también por Descartes, concibe la propagación de la luz como una transmisión de movimiento a través de esferas rígidas de igual tamaño situadas en una línea recta y en contacto entre sí, pero a diferencia de su maestro Descartes, Huygens opina que la luz no es instantánea, aunque afirma que se extiende con extrema velocidad. Huygens buscó describir y explicar los principales fenómenos luminosos, basándose en el concepto de la luz como pulsos no periódicos propagados por el éter. En 1690 publica su obra cumbre *Traite de la lumière*, pero en ella no encontramos los conceptos que estamos acostumbrados a asociar a ondas, tales como periodicidad, longitud de onda o frecuencia.

Otro aspecto relevante en su obra es la explicación de la doble refracción⁴, que había sido descubierta por Erasmus Bartholinus (1625-1698) al analizar las refracciones en el cristal de Islandia. Los relatos de Bartholinus se hicieron públicos en 1669 y llamaron la atención de Huygens, Hooke y Newton (Moura, 2014). Básicamente, el fenómeno de la doble refracción mostraba que un rayo incidente generaba dos rayos refractados en el cristal, uno ordinario, que obedecía a las leyes comunes de la refracción y otro extraordinario, que no obedecía a ninguna ley conocida en la época. Huygens explicó la formación de los dos rayos partiendo de la idea de que había dos propagaciones diferentes de los pulsos dentro del cristal. En la refracción ordinaria, la luz se propagaría como ondas en el éter presente en el cristal, en la refracción extraordinaria, las ondas se propagarían como esferoides no sólo en el éter, sino también en las partículas del cristal.

La idea central de Huygens está contenida en su "*principio de propagación*", según el cual un frente de ondas progresa como si cada uno de sus puntos emitiera ondas esféricas elementales, siendo la posición del frente de ondas al cabo de un tiempo la envolvente de dichas ondas elementales. Como la propagación rectilínea estaba fuera de toda duda en esa época, añadió que estas ondas secundarias sólo tenían efectividad en los puntos de contacto con su envolvente. Por tanto, si la onda resultaba obstruida, el borde de la sombra debía ser nítido, pues las regiones de las ondas elementales extremas apenas tenían efectividad. Admitiendo este elemental enunciado, demostró la ley de la reflexión y la

⁴ La doble refracción, o birrefringencia es la separación de una onda incidente en dos ondas que se transmiten a diferentes velocidades y tienen polarizaciones ortogonales. Tiene lugar cuando la luz polarizada atraviesa un mineral anisotrópico y emerge como dos rayos que viajan a velocidades diferentes.

refracción. Huygens tiene plena conciencia de las implicaciones de ese principio, pues “todas las propiedades de la luz, y todo lo que pertenece a la reflexión y a la refracción, se explica principalmente por ese punto” (Huygens, *Traité de la Lumière*; Edición de 1992, p.65). Huygens señala que: "Alrededor de cada partícula, debe haber una onda cuyo centro sea esta partícula. [...] Veremos a continuación que todas las propiedades de la luz, y todo lo que se refiere a su reflexión y refracción, se pueden explicar principalmente por este punto " (Huygens, *Traité de la Lumière*; Edición de 1992, p.65). El conjunto de ondas resultantes de cada punto del frente de ondas BG, dará lugar a un nuevo frente de onda CE. En la Figura 2.7 encontramos una ilustración del principio de Huygens obra del propio autor.

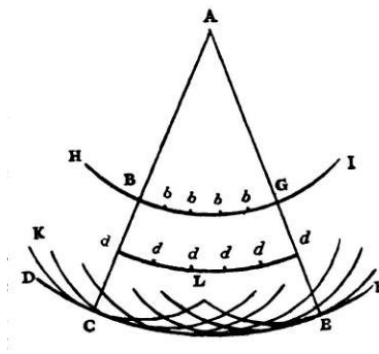


Figura 2.7: Huygens (1690). *Traité de la Lumière*, p. 19. Imagen libre.

En la Figura 2.8 mostramos la representación de la aplicación del principio de Huygens al frente de onda AA' para construir un nuevo frente de onda BB'.

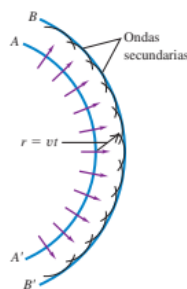


Figura 2.8: Representación de la aplicación del principio de Huygens para construir un nuevo frente de onda. Fuente: Young y Freedman (2009, p. 1144).

Huygens puede explicar por primera vez el hecho de que la luz se pueda cruzar sin estorbarse, lo que constituyó otro gran avance en la dilucidación de la naturaleza de la luz. También explica el índice de refracción, hasta entonces un valor empírico; resultando

éste de la relación entre las velocidades de propagación de las ondas en los dos medios, antes y después de la refracción.

Huygens puede explicar también la reflexión y la refracción de la luz a partir de su principio. Mostramos a continuación en la Figura 2.9 una ilustración del principio de Huygens para deducir la ley de la reflexión.

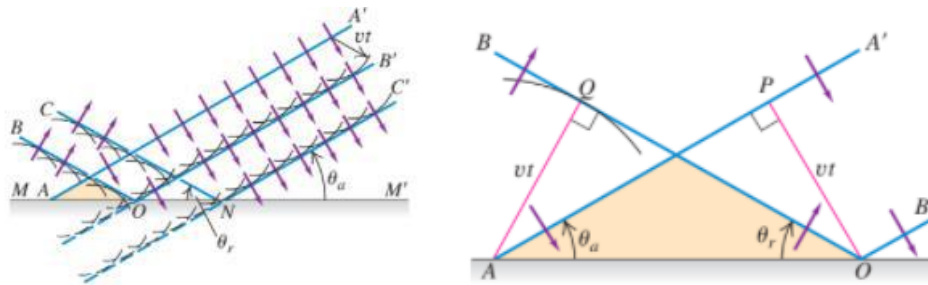


Figura 2.9: Posiciones sucesivas de una onda plana AA que se refleja en una superficie plana, y detalle ampliado. Fuente: Young y Freedman (2009, p. 1144).

También se puede explicar la refracción de la luz haciendo uso del principio de Huygens. Mostramos a continuación en la Figura 2.10 una deducción mediante un proceso similar de la ley de la refracción:

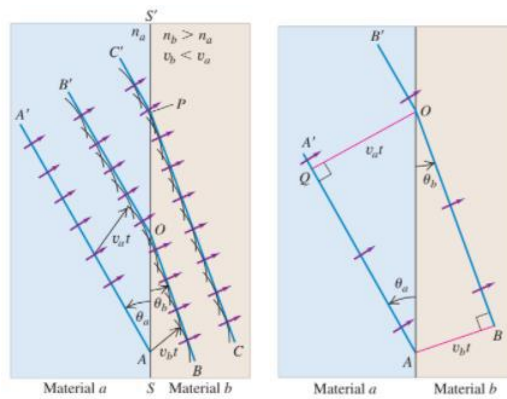


Figura 2.10: Posiciones sucesivas de una onda plana AA' que se refracta en una superficie plana y detalle ampliado. Fuente: Young y Freedman (2009, p. 1.145).

Nicolás Malebranche (1638-1715) explica mediante la teoría ondulatoria los colores en función de la velocidad de vibración, el problema ante el cual se había detenido Huygens. Acepta como incontestables las experiencias sobre dispersión de la luz hechas por Newton, pero las adapta a la teoría ondulatoria:

El rayo rojo, que es el que más fuerza tiene, puesto que sufre menos refracción que los otros rayos, no es rechazado tan rápidamente, o recomienza sus vibraciones menos frecuentemente que aquéllos que le siguen; y que el violeta que es el último y el más

débil, es aquél cuyas vibraciones son las más pequeñas y las más rápidas, o recomienzan más frecuentemente (Ferraz, 1974, p.296).

2.3. Segunda Etapa: S. XVIII

Leonhard Euler (1707-1783) publica su obra *Nova Teoría Lucis et Colorum* en 1746. En ella, se opone a la teoría corpuscular de la emisión de los newtonianos, y considera, como Descartes y Huygens, que un fluido muy sutil, el éter, llena todo el espacio. Euler hace una analogía entre el sonido y la luz: la luz es en el éter la misma cosa que el sonido en el aire. Plantea la propagación de ondas elásticas sinusoidales en el éter, la luz consistiría en una vibración de dicho éter, y la visión resultaría de la vibración comunicada por el éter a la retina. Introduce la noción de frecuencia de la vibración luminosa para explicar los colores, atribuyendo la frecuencia más alta de la vibración luminosa al color violeta, y la más baja al color rojo. Afirma que el sonido bordea los obstáculos, y que esto mismo es lo que se observa para la luz en el caso de la difracción. Para Euler, la difracción de la luz es una prueba de que la luz ha de ser un fenómeno ondulatorio. El éter juega un papel fundamental para Euler, le permite contemplar una unificación entre los fenómenos físicos. Propone por primera vez que el éter luminoso, puede explicar los fenómenos eléctricos y magnéticos. Las concepciones de Euler en esta materia pueden haber influido a Faraday.

Al estudiar el efecto de aberración de la luz en las estrellas, James Bradley (1693-1762) llegó a la conclusión de que el fenómeno se reducía a la suma vectorial de las velocidades de la luz proveniente de la estrella y la de la Tierra, asumiendo que la velocidad a la que la Tierra se movía en su órbita alrededor del sol era constante y que la velocidad de la luz que salía de las estrellas era siempre la misma, independientemente de la estrella que la emitía. Sus cálculos cuadraban con sus observaciones, pues las estrellas fijas mostraban un movimiento sistemático aparente relacionado con la dirección del movimiento de la Tierra en su órbita, y no dependía, como se había anticipado, de la posición de la Tierra en el espacio. Bradley afirma entonces que "La luz se propaga con la misma velocidad (en el mismo medio) antes y después de haber sido reflejada" (Bradley, 1728, p. 653). Era un resultado sorprendente puesto que estaba en contra de la teoría newtoniana, que preveía lo contrario, es decir: "que los rayos lanzados por las vibraciones de los cuerpos luminosos salían con una velocidad según la atracción gravitacional ejercida por la estrella sobre los corpúsculos fuese mayor o menor" (Newton, 1722, p. 339).

Tras las experiencias de Bradley, aquellos que no habían sido convencidos por los resultados de Röemer (1644-1710) sobre la velocidad de la luz, esencialmente los cartesianos, se convencieron definitivamente de que la velocidad de la luz era finita. Ya no podían utilizar el argumento que utilizaba Descartes para rechazar la propagación no instantánea de la luz: aquel que se apoyaba precisamente en el hecho de que jamás se había observado un movimiento aparente de las estrellas.

François Arago (1786-1853) retoma los resultados de Bradley con el fin de discutirlos. El objeto de su experiencia, realizada en 1806, era examinar si la velocidad de la luz era siempre la misma, independientemente de los cuerpos celestes o terrestres de los que emanase, o de aquellos por los que fuera refractada. Para ello utilizó el fenómeno de refracción de la luz, observando a través de un prisma la luz de diversas estrellas, del Sol, de la Luna, de los planetas y de objetos luminosos terrestres. La teoría de Newton, según la cual los fenómenos de refracción dentro del prisma permiten separar los rayos que corresponden a luces de velocidades diferentes, preveía que las luces emanadas de diferentes cuerpos se desvían de manera diferente: “que los rayos lanzados por las vibraciones de los cuerpos luminosos salían con una velocidad según la atracción gravitacional ejercida por la estrella sobre los corpúsculos fuese mayor o menor” (Newton, 1722, p. 339). Pero, Arago constata en su primera serie de experiencias que todas esas luces (emanadas de distintos cuerpos) sufren la misma desviación cuando atraviesan un prisma transparente. En una segunda serie de experimentos, realizados en 1810, tiene en cuenta el movimiento de la Tierra sobre su órbita y llega al mismo resultado. Una de dos: o bien la teoría de la refracción de Newton es correcta, pero sus ideas sobre la emisión de la luz son falsas; o bien una desviación igual de la luz por un prisma no se corresponde con una igualdad en la velocidad de los corpúsculos y la teoría de la refracción es falsa.

Étienne Louis Malus (1775-1812) llevó a cabo una serie de experiencias en las que observa las propiedades de la luz después de una reflexión sobre la superficie de una cuba llena de agua, y las compara con la doble refracción del espato de Islandia:

Si hacemos incidir un haz de luz sobre la superficie de agua de un estanque con un ángulo de $52^{\circ}45'$ respecto de la vertical, la luz se reflejada tiene todas las características de uno de los haces producidos por la doble refracción de un cristal de calcita (Malus, 1810, p. 430).

Malus descubriría que la doble refracción no era el único modo de polarizar la luz. La luz reflejada también podía tener “lados”. A finales del siglo XVIII, gracias al desarrollo de la mecánica newtoniana, realizado por Joseph-Louis de Lagrange (1736-1813) y Pierre-Simon Laplace (1749-1827), del que la teoría corpuscular de la luz se consideraba parte integrante, la teoría corpuscular de la luz gozaba, en general, de una mayor aceptación.

2.4. Tercera Etapa: S. XIX

En 1801, Thomas Young (1773-1829), repitió las observaciones de Grimaldi, buscando la prueba de que la luz interfiere consigo misma (Pesic, 2007), y demostró que dos ondas de luz que se superponen pueden interferir la una con la otra. Mostramos en la Figura 2.11 el patrón de interacción de ondas obtenido al arrojar dos piedras de igual tamaño en un estanque en el mismo instante. Young remite a sus lectores a esta figura que representa el patrón de ondas que interactúan producidas al arrojar dos piedras simultáneamente en un estanque, cuando explica la interferencia de la luz Fuente: *Young's Lectures* (Young, 1807).

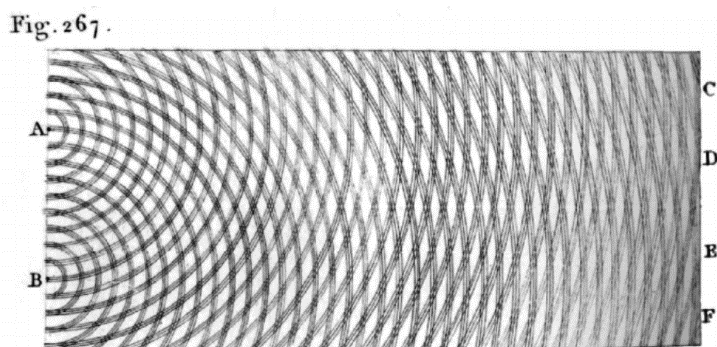


Figura 2.11: Diagrama que muestra el patrón de interacción de ondas obtenido al arrojar dos piedras de igual tamaño en un estanque en el mismo instante. Young remite a sus lectores a una esta figura que representa el patrón de ondas que interactúan producidas al arrojar dos piedras simultáneamente en un estanque, cuando explica la interferencia de la luz. Fuente: *Young's Lectures* (Young, 1807).

Young proponía el concepto de interferencia luminosa como una hipótesis para explicar la difracción. Para ello iluminó los dos bordes de un fino trozo de cartulina y observó en la pared contraria la conocida configuración de franjas claras y oscuras, que llamó interferencia. Young creía que estas franjas eran debidas al efecto conjunto de la luz que pasa a ambos lados de la cartulina. Para comprobarlo, impidió que llegara luz a uno de los bordes, de tal forma que solamente uno quedó iluminado, constatando que todas las franjas desaparecían (Pesic, 2007).

Young establece que, en el caso de la luz, para que los efectos de dos haces de luz puedan combinarse así, es necesario que se deriven del mismo origen y que lleguen al mismo punto por caminos diferentes, pero siguiendo direcciones que no se desvíen mucho de unas y otras. Mostramos a continuación en la Figura 2.12 la disposición experimental para que dos haces de luz puedan interferir entre sí.

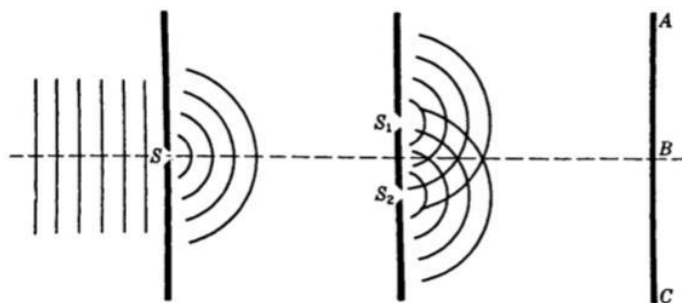


Figura 2.12: Disposición experimental para que dos haces de luz puedan interferir entre sí. Fuente: Jekins y White (2001, p. 262).

Young consideró las ondas luminosas no como pulsos, sino como ondas sinusoidales continuas. Dado que las longitudes de onda de las vibraciones de luz eran muy pequeñas comparadas con el tamaño de los objetos visibles, Young señalaba que la luz viajaría en línea recta, pudiendo producir sombras nítidas. Era consciente de que los haces de luz se doblaban en cierta medida en torno a las aristas de los objetos opacos, produciendo sombras con bordes de colores y otros efectos de la interferencia que habían sido estudiados durante el siglo XVII. Young señalaba dichos fenómenos como pruebas a favor de la teoría ondulatoria de la luz.

Tras completar la explicación de los fenómenos ópticos entonces conocidos en términos de la teoría ondulatoria de la luz, Young verificó el análisis de Huygens de los fenómenos de doble refracción observados en cristales de espato de Islandia. En enero de 1817, Young encontró una explicación sugiriendo que las ondas de luz deberían contener una vibración transversal a la dirección de propagación. Afirma que: “es posible explicar dentro de esa teoría una vibración transversal, propagándose también en la dirección del rayo con igual velocidad, pero el movimiento de las partículas ocurre en una cierta dirección constante en relación con el rayo. Eso es una polarización” (Resnick y Halliday, 1960, p.1056). Por fin se puede dar explicación al fenómeno de la polarización de la luz, considerando la luz como una vibración transversal a la dirección de propagación.

Young fue además el padre de la teoría tricromática, sugirió que la retina del ojo poseía estructuras sensibles a la luz roja, amarilla y azul respectivamente, a fin de explicar la visión del color refutando las ideas de Newton, quien afirmaba que los corpúsculos de la luz al llegar a un punto de la retina provocan vibraciones en las partículas de esta, y que cada partícula estaría sometida a un tipo de vibración distinta según el tipo de corpúsculo incidente. Pero, refuta Young:

Como es imposible concebir que cada punto sensitivo de la retina contenga un número infinito de partículas, cada una capaz de vibrar al unísono con cada posible oscilación, se hace necesario suponer un número limitado, por ejemplo, los tres principales colores rojo, amarillo y azul (Young, 1802).

Además, analiza cómo la sensación de la visión de los colores se puede interpretar a partir de estos tres tipos de luz básicos. Estamos pues ante la explicación de la visión del color. Young mostró también que la acomodación del ojo a los objetos situados a diferentes distancias se debía a cambios en la curvatura de su lente, el cristalino. Se daba por fin explicación a la capacidad del ojo de formar la imagen de objetos cercanos y lejanos con la misma distancia lente-pantalla.

Por otro lado, en 1817, la Academia de Ciencias Francesa ofreció un premio al mejor ensayo sobre el tema de la difracción. En 1818, Augustin Fresnel (1788-1827) envió una memoria para el concurso, en la que mostraba que todos los fenómenos conocidos de la óptica se podrían explicar en términos de la hipótesis de que la luz consiste en vibraciones ondulatorias transversales. Mientras estudiaba su memoria, uno de los jueces, Simeón Denis Poisson (1781-1840), encontró que una aplicación de la teoría de Fresnel a un disco circular iluminado daría lugar a un punto de luz en el centro de su sombra. Poisson pensó que ese fenómeno era improbable y así se lo comunicó a Fresnel. Sin embargo, François Arago (1786-1853), otro juez, llevó a cabo el experimento y confirmó la predicción de Poisson, lo que supuso un gran apoyo para la teoría ondulatoria.

Fresnel en su teoría de la difracción, introdujo una importante modificación al principio de Huygens. Fresnel llegó a la conclusión, mediante la realización de cuidadosos experimentos, de que la luz era una onda transversal. Añadió supuestos sobre la fase y amplitud de las ondas secundarias, y también un factor de inclinación, demostrando la no existencia de una onda regresiva, que se destruye por un fenómeno de interferencias. Es decir, Fresnel demostró que las ondas secundarias que se propagan en dirección contraria al sentido de la propagación de las ondas primarias transportaban energía nula, por lo

tanto, se puede establecer que tales ondas no tienen existencia. Con la aportación de Fresnel, se pudo calcular la perturbación ondulatoria en un punto concreto, a partir del frente de ondas primitivo, añadiendo el concepto de interferencia de las ondas.

Las ideas de Huygens con estas modificaciones se conocen como “*Principio de Huygens-Fresnel*”, aunque no se suelen citar en los textos habituales de enseñanza podríamos enunciarlo con fines didácticos del siguiente modo: “*Las ondas secundarias tienen efectividad de una intensidad máxima en la dirección normal a la envolvente, y disminuyen con un factor de oblicuidad hasta 90°*”. Se puede explicar por fin la transmisión rectilínea de la luz, que había sido el gran escollo de la teoría ondulatoria. El principio de Huygens-Fresnel es una herramienta fundamental, además, para explicar la limitación del modelo geométrico que conocemos como aproximación paraxial.

Aún a pesar de la modificación que introdujo Fresnel, el principio no es capaz de explicar que, si cada emisor emite uniformemente en todas las direcciones, además de generar una onda que viaja hacia delante, genera una onda que viaja hacia atrás, hacia la fuente, la cual no se observa en la naturaleza. Este principio fue revisado por Gustav Kirchoff (1824-1887), quien propuso en 1882 que la intensidad emitida no es igual en todas las direcciones, sino que es más intensa hacia delante y nula hacia atrás. Esta propuesta se enmarca en su “*Teoría escalar*”, suficientemente rigurosa como para poder explicar la mayor parte de los resultados experimentales macroscópicos, cuando las aberturas son mayores que las longitudes de onda y las distancias de observación son grandes. Es decir, Kirchoff demostró que el Principio Huygens-Fresnel podía deducirse a partir de la propia ecuación de ondas. Su teoría tiene inconvenientes formales de orden matemático que fueron solucionados por Sommerfeld en 1894, introduciendo algunas modificaciones en la teoría anterior. La teoría escalar es suficientemente rigurosa para explicar la mayor parte de los resultados experimentales macroscópicos. Pese a que se trata de una simplificación que no tiene en cuenta el carácter vectorial de los campos electromagnéticos, la teoría escalar funciona con éxito cuando las aberturas son más grandes que la longitud de onda de la luz y cuando las distancias de observación son suficientemente grandes. En estas condiciones, la polarización del campo electromagnético no es una información relevante y, por lo tanto, se puede prescindir del formalismo vectorial.

En su *Théorie mécanique de la double réfraction* (Fresnel, 1827), realizó un profundo estudio del comportamiento de la luz en la doble refracción y llegó a su vez a la conclusión

de que las oscilaciones deben ser transversales ya que las ondas polarizadas verticales no interfieren. Muestra que las ondas de longitud de onda más corta se propagan con una velocidad un poco menor que las de longitud de onda más larga, en un medio físico que no sea el vacío, conforme a lo que observamos en el fenómeno de la dispersión. Esta es una anomalía que normalmente pasa inadvertida en los textos habituales de enseñanza: los diferentes tipos de ondas lumínicas tienen la misma velocidad cuando el éter rellena el vacío y, sin embargo, tienen velocidades diferentes en el éter que rellena los poros del vidrio. Fresnel afirma que ésta es una anomalía que no se encuentra en ningún tipo de ondas mecánicas; es un fenómeno tan anómalo como el que ocurriría en el sonido si, después de atravesar distintas capas de aire, oyéramos antes los tonos agudos que los graves.

La teoría ondulatoria con las definitivas aportaciones de Fresnel podía finalmente explicar los diferentes fenómenos de la óptica: reflexión, refracción, birrefringencia, interferencia y difracción. La teoría ondulatoria de la luz estaba bien establecida a mediados del siglo XIX, cuando Hippolyte Fizeau (1819-1896), y Jean Bernard León Foucault (1819-1868), midieron la velocidad de la luz en diversos medios entre 1849 y 1862. Demostraron que era menor en un medio más denso, un nuevo resultado experimental contrario a la teoría corpuscular.

En el siglo XIX también hubo grandes avances en el estudio de la electricidad y el magnetismo. La espectacular síntesis de los trabajos del electromagnetismo a partir de algunas ideas apuntadas por Michael Faraday (1791-1867) realizada por James Clerk Maxwell (1831-1879) sobre la naturaleza de las ondas lumínicas, en *A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field* (Maxwell, 1865) permite predecir la existencia de ondas electromagnéticas propagándose a la velocidad de la luz, mediante un simple conjunto de ecuaciones matemáticas. Maxwell asoció el hecho de que los campos se propagaran con la velocidad de la luz con el hecho de que la luz visible fuese un caso particular de onda electromagnética, es decir, las ondas electromagnéticas en esa franja de frecuencia constituían la luz visible. Era una hipótesis muy osada, desvinculada tanto de la tradición mecánica como de la tradición de la teoría ondulatoria clásica pues, parecía que la luz consistiese en ondulaciones transversales del campo electromagnético en el mismo medio.

En su tratado de electricidad y magnetismo, *A Treatise on Electricity and Magnetism* (1873), Maxwell hablaba de la relación entre la electricidad, el magnetismo y la luz:

En varias partes de este tratado se ha hecho un intento de explicar los fenómenos electromagnéticos por medio de una acción mecánica transmitida de un cuerpo a otro mediante un cuerpo que ocupa el espacio entre ellas. La Teoría ondulatoria de la luz también asume la existencia de un medio. Tenemos que mostrar ahora que las propiedades del medio electromagnético son idénticas a las del medio luminífero. Si el estudio de dos ramas diferentes de la ciencia ha sugerido de manera independiente la existencia de un medio y si las propiedades que se tienen que atribuir a un medio para explicar los fenómenos electromagnéticos son del mismo tipo que las que se atribuyen al medio luminífero para explicar los fenómenos de la luz, la evidencia de la existencia Física del medio se verá reforzada (Maxwell, 1873, Cap. XXL, p. 781).

Maxwell prosigue en la búsqueda de las propiedades de propagación de las perturbaciones electromagnéticas:

Si se pudiera encontrar que la velocidad de propagación de las perturbaciones electromagnéticas es la misma que la velocidad de la luz, y no sólo en el aire, sino también en los medios transparentes, tendríamos fuertes razones para creer que la luz es un fenómeno electromagnético (Maxwell, 1873, CAP. XX, p. 781).

Maxwell propone la unificación de los éteres electromagnético y óptico, hasta entonces considerados independientes. En las décadas siguientes se dedicó gran esfuerzo a determinar la naturaleza Física del éter. El experimento de Michelson and Morley en 1887, fue clave para descartar su existencia⁵. Maxwell también explicó por primera vez el hecho de que las ondas lumínicas que se propagaban juntas en el vacío, es decir a la

⁵ El experimento de Michelson y Morley fue uno de los más importantes y famosos de la historia de la Física. Se realizó en 1887 por Albert Abraham Michelson y Edward Morley, con los primeros resultados concluyentes, aunque se había intentado llevarlo a cabo pocos años antes. El propósito de Michelson y Morley era medir la velocidad relativa a la que se mueve la Tierra con respecto al éter. Construyeron un interferómetro, compuesto de una lente semiespejada, que divide la luz monocromática en dos haces de luz, que se mueven con un determinado ángulo el uno respecto al otro. De este modo se conseguía que dos haces de luz (procedentes de la misma fuente), viajando en direcciones perpendiculares, recorrieran caminos ópticos iguales (distancias iguales), llegando a un punto común, donde se crea un patrón de interferencia. Este patrón de interferencia depende de la velocidad de la luz en los dos brazos del interferómetro. Cualquier diferencia en esta velocidad (provocada por la diferente dirección de movimiento de la luz con respecto al movimiento del éter) sería detectada. Michelson y Morley (1887) informaron que la medición de dicha diferencia de velocidad era tan pequeña como una cuarentava parte del desplazamiento esperado, y puesto que el desplazamiento es proporcional al cuadrado de la velocidad, concluyeron que la velocidad medida era probablemente menos de un sexto de la esperada velocidad del movimiento de la Tierra en órbita y ciertamente menos de un cuarto. Entendieron que estaba dentro del rango de un error experimental que permitiría que la velocidad fuera realmente cero, y por tanto el experimento fue llamado el *experimento fallido* más famoso de la historia. El experimento fue crucial, porque se pudo repetir, después, con más alta precisión, arrojando el mismo resultado. Gracias a este resultado y a los sucesivos, en muy pocos años todos los físicos abandonaron, por completo, la idea del éter.

misma velocidad, lo hacían a distinta velocidad en los medios materiales. Para ello consideró la materia constituida por dipolos oscilantes, y puesto que la velocidad de la luz en los medios transparentes depende de la frecuencia de la onda electromagnética, establece que las distintas frecuencias que conforman la luz blanca interaccionarán de forma diferente con dichos dipolos. Es decir, se podía explicar matemáticamente la dispersión de la luz al atravesar un prisma. Maxwell no se preocupaba demasiado de la verificación experimental de las diversas predicciones derivadas de su teoría, ni tampoco desarrolló más los aspectos cualitativos de su modelo del éter electromagnético, con su sugerente concepción de partículas de electricidad o electrones. Su trabajo llegó a ser ridiculizado.

Pero en 1886, Heinrich Rudolf Hertz (1857-1894) realizó los experimentos que confirmaban las previsiones de Maxwell. Logró producir en el laboratorio radiación electromagnética, y descubrió un detector capaz de detectar dichas ondas. Mostró también que esa radiación poseía propiedades similares a las de la luz y demostró que las ondas electromagnéticas se reflejaban en las paredes de su laboratorio, y se refractaban en prismas de brea endurecida. Además, esas mismas ondas electromagnéticas podían difractarse y polarizarse como las ondas de luz, viajando en línea recta con una velocidad que era del mismo orden que la velocidad de la luz. Hertz verificó las predicciones más importantes de la teoría electromagnética de la luz de Maxwell, y sentó las bases para el desarrollo futuro de las emisiones radiofónicas y, por ejemplo, del radar.

Una rápida retrospectiva sobre la naturaleza ondulatoria de la luz a partir del siglo XVII revela inicialmente la existencia de un modelo mecánico y, posteriormente, de un modelo electromagnético. El modelo inicial, se basaba en una explicación puramente mecánica para la perturbación, una tendencia al movimiento, que se transfería por medio de choques de un corpúsculo a otro. El segundo modelo, habla de una ampliación del electromagnetismo para un campo variable que se propaga a través del espacio.

2.5. Reflexiones sobre el análisis histórico.

Hay muchas razones para incorporar la historia de la ciencia en la enseñanza de la Física (Galili y Hazan, 2016), incluso puede inspirar estrategias de enseñanza que se pueden utilizar como principio organizador del currículo (Matthews, 1994), como es nuestro caso. El repaso histórico, muy básico, que hemos realizado, nos ha permitido en primer lugar establecer las ideas clave relacionadas con el modelo de visión de Kepler y con el

modelo ondulatorio de la luz, que nuestros alumnos han de comprender a nivel de Bachillerato. En segundo lugar, nos ha ayudado a detectar los obstáculos o dificultades que previsiblemente encontrarán los alumnos. En el campo de la óptica, se han estudiado y difundido las similitudes entre las ideas mantenidas en algún momento de la historia por los antiguos científicos y las ideas de los estudiantes (Galili y Hazan, 2000; Dedes, 2005). Existe una cierta similitud entre los conceptos históricos que fueron desplazados por los conocimientos hoy aceptados por la comunidad científica, y algunas ideas espontáneas muy arraigadas en los alumnos (Wandersee, Mintzes y Novak, 1994). Tal y como afirma Dedes (2005), todas las ideas básicas que encontramos en las antiguas teorías de visión se pueden encontrar también, en mayor o en menor medida, en los conceptos alternativos de los estudiantes.

A partir del estudio histórico de la óptica, realizado con una intencionalidad didáctica, creemos que, para poder comprender la formación de imágenes en la óptica geométrica, es muy importante una adecuada comprensión de los conceptos de haz y rayo de luz. Para poder comprender la visión del color es necesario estudiar la naturaleza heterogénea de la luz. Así mismo, creemos necesario para explicar la visión del color, que los alumnos conozcan que la retina del ojo posee estructuras sensibles a la luz roja, verde y azul respectivamente; y que los cambios de curvatura del cristalino tienen como función la acomodación del ojo para la visión de objetos situados a diferentes distancias. Consideramos el principio de Huygens-Fresnel como base de la explicación de la óptica ondulatoria, así como la necesaria asunción de que la luz se propaga en línea recta y en todas las direcciones en un medio homogéneo, pudiendo producir sombras nítidas, dado que las longitudes de onda de las vibraciones de luz son muy pequeñas comparadas con el tamaño de los objetos visibles. Así mismo, mantenemos la idea de que los alumnos han de comprender que el índice de refracción se explica como la relación entre las velocidades de propagación de las ondas antes y después de la refracción. Por otra parte, los alumnos han de conocer que la velocidad de la luz que sale de las estrellas es siempre la misma, independientemente de la estrella que la emita, es decir la velocidad de la luz, en el vacío, es una constante en nuestro universo. Finalmente, creemos que es básico que los alumnos comprendan que la luz visible es un caso particular de onda electromagnética, es decir, la luz es la propagación en el espacio de campos eléctricos y magnéticos perpendiculares.

A partir de estas ideas clave, y teniendo en cuenta los posibles obstáculos asociados a su comprensión, se puede desarrollar el estudio de la óptica de manera constructiva con la finalidad de que los alumnos logren una comprensión satisfactoria de los fenómenos ópticos.

Creemos, además, que se debe buscar la explicación de los fenómenos en su origen verdadero, y no en simples hipótesis no sufragadas por hechos. Existe, como hemos señalado, un cierto paralelismo entre la historia de la ciencia y el proceso psicológico formativo de los alumnos. En este sentido, desde nuestra perspectiva constructivista del aprendizaje, creemos que para comprender bien un concepto hemos de analizarlo desde su origen. A lo largo del estudio de la historia de la ciencia hemos podido ver cómo, para sustituir muchos de los antiguos conceptos incorrectos, por conocimientos científicos nuevos, más y mejor fundamentados por medio de experimentos, se hizo necesario un profundo cambio epistemológico. Dicho cambio epistemológico será necesario también para que los estudiantes logren un cambio conceptual que pueda ayudar a modificar sus conceptos mal fundamentados sobre la óptica. Utilizaremos como sugieren Sales, Freire y Greca (2015) un enfoque contextual en nuestro análisis histórico, pues creemos que, con una contextualización histórica, estudiando obras clave de la historia de la óptica, los alumnos podrán llegar a comprender mejor los conceptos fundamentales de la óptica como ciencia de la visión, y del modelo ondulatorio de la naturaleza de la luz. De este modo, además, los alumnos son conscientes de cómo se originan los conocimientos en la comunidad científica.

Posteriormente, en el Capítulo 4 de este trabajo, relacionaremos las ideas clave que han permitido avanzar en el estudio de la óptica con las posibles dificultades que los alumnos pueden encontrar para alcanzar los indicadores de comprensión previstos por la legislación vigente.

CAPÍTULO 3. LA ENSEÑANZA DE LA ÓPTICA

En este capítulo vamos a estudiar los condicionantes a los que nos enfrentamos en la enseñanza de la óptica. Comenzamos abordando el estudio de los conceptos alternativos del alumnado, a los que hemos de prestar verdadera atención para que el proceso de enseñanza-aprendizaje de esta materia sea un éxito. Posteriormente, estudiamos los conceptos alternativos que presentan los docentes sobre la óptica, los cuales pueden llegar a tener gran influencia en el proceso de enseñanza-aprendizaje. También planteamos la necesidad de tener en cuenta la historia de la ciencia en la enseñanza de la óptica, para establecer las ideas fundamentales que tienen que comprender nuestro alumnado y también para detectar los obstáculos que previsiblemente encontrarán. Finalizamos este capítulo reflexionando acerca de la influencia que tienen los libros de texto en el proceso de enseñanza aprendizaje de la óptica y si estos influyen en los conceptos alternativos que, tanto alumnado como profesorado, pueden presentar sobre la óptica.

3.1. Características de las ideas alternativas en óptica.

En nuestras clases de Física los alumnos muestran sus propias opiniones o sus intuiciones sobre los fenómenos físicos que observan. Estos conceptos previos están basados en su interacción con el mundo que les rodea, en la influencia de sus iguales y de los medios de comunicación, y también en la enseñanza previa que han recibido. Estas opiniones, intuiciones o conceptos previos de los estudiantes, muchas veces son diferentes de las ideas científicamente aceptadas y que consideramos importante que lleguen a comprender. Para describir tales creencias o ideas no bien fundamentadas, la comunidad científica utiliza diferentes términos tales como: conceptos erróneos, conceptos alternativos, ideas preconcebidas, conceptos ingenuos, etc. Hubber (2005) utiliza el término "conceptos alternativos" para designar los conceptos de los estudiantes que no se corresponden con el concepto aceptado por la comunidad científica. Arons (1990), por ejemplo, prefiere el término "ideas preconcebidas". Viennot (1979) utiliza "nociones intuitivas", pues dicho término refleja la vaguedad en las ideas de los estudiantes, a diferencia de las ideas científicamente aceptadas, que están fundamentadas en experimentos científicos y su interpretación rigurosa. Muchos de estos conceptos alternativos se deben a que los alumnos, a menudo, confunden correlación con causalidad. El análisis de situaciones causa-efecto puede ser una buena herramienta para poner a prueba los conceptos alternativos, fomentar el sentido crítico del alumnado, dar a conocer

una faceta del trabajo científico y, a la vez, fomentar el uso de la imaginación y de la deducción a partir de observaciones (Hernández Villalobos, 2014).

Basándonos en el estudio de las investigaciones más relevantes sobre los conceptos alternativos del alumnado (Driver, 1989; Mortimer, 1995, y Duit y Treagul, 2003), señalamos a continuación las características principales que presentan estos conceptos alternativos o ideas preconcebidas:

- a) son difíciles de cambiar a través de la enseñanza tradicional habitual;
- b) pueden desarrollarse incluso tras la enseñanza;
- c) los conceptos alternativos que tienen estudiantes procedentes de diferentes regiones y países son similares entre sí;
- d) los estudiantes pueden utilizar sus conceptos previos junto con las explicaciones aceptadas por la comunidad científica para interpretar determinados fenómenos físicos de manera totalmente incorrecta o no completamente correcta.

Estos conceptos alternativos están muy afianzados en las mentes de los estudiantes, pues suponen estructuras conceptuales coherentes para ellos (aunque sean erróneas), y son, por tanto, muy resistentes a la enseñanza, especialmente cuando están ligadas a las experiencias de su vida cotidiana.

En el campo de la óptica, se han realizado numerosos estudios en todos los niveles educativos, desde la escuela primaria hasta la edad adulta, que muestran que los estudiantes tienen conceptos alternativos relativos a la visión y a la formación de imágenes, así como también respecto de la naturaleza de la luz y de sus propiedades. Hay estudios que muestran que estos conceptos alternativos se presentan en la educación primaria (Andersson y Karrqvist, 1983; Osborne, Black, Meadows y Smith, 1993; Selley, 1996, y Koray y Bal, 2002;), en la educación secundaria (Singh y Butler, 1990; Fetherstonhaugh y Treagust, 1992; Galili, Bendall y Goldberg, 1993; Langley, Ronen y Eylon, 1997; Galili y Lavrik, 1998; Galili y Hazan, 2000; Colin, Chauvet, y Viennot, 2002, y Tao, 2004) e incluso a nivel universitario (Goldberg y McDermott, 1987; Palacios, Cazorla, y Cervantes, 1989; Saxena, 1991; Bendall, Goldberg, y Galili, 1993; Colin y Viennot, 2001, y Şengören, 2010). Otros estudios muestran, como decíamos anteriormente, que dichos conceptos alternativos no varían de una cultura a otra (Fetherstonhaugh y Treagust, 1992; Osborne, Black, Meadows, y Smith, 1993, y Langley, Ronen y Eylon, 1997).

Cuando un concepto nuevo no tiene sentido para los estudiantes, éstos tienden a mantener firmemente sus ideas propias anteriores. En particular, en nuestro campo de estudio, los estudiantes encuentran la óptica difícil de entender y, por lo tanto, tienden a mantener sus conceptos alternativos profundamente arraigados y resistentes al cambio (Heywood, 2005). Por ejemplo, la velocidad de la luz al ser tan elevada es difícil de percibir para la mente humana y, por ello, muchos alumnos consideran la luz como algo estacionario (Galili y Hazan, 2000). Como hemos comentado al defender el estudio de la óptica como ciencia de la visión, para poder explicar los fenómenos ópticos los estudiantes han de ser conscientes de que el observador constituye parte del sistema óptico, algo que han puesto de manifiesto muchos otros autores (Langley, Ronen y Eylon, 1997). Si el estudiante no es consciente de que el observador interactúa con el fenómeno observado, esto puede resultar ser una fuente de frecuentes errores por su parte.

El conflicto entre los conceptos individuales y las ideas que queremos que los alumnos comprendan puede emerger como una fuente de dificultad tanto durante la instrucción formal, como al terminar ésta. Por ejemplo, estudios post-instrucción (Goldberg y McDermott, 1986, 1987; Eylon, Ronen y Langley, 1993; Galili, Bendall y Goldberg, 1993; Ronen y Eylon, 1993; y Eylon, Ronen, y Ganiel, 1995), han revelado la persistencia de dificultades en integrar el conocimiento relativo a la propagación de la luz y también en relación con determinados patrones visuales. Ello es debido a que la enseñanza tradicional no es capaz de conseguir que los alumnos modifiquen sus conceptos alternativos y adopten el conocimiento científico aceptado.

En su estudio a partir de los datos recopilados con más de 200 estudiantes, Favale y Bondani (2013) -durante sus actividades de difusión de la física con estudiantes de secundaria en relación con la óptica- muestran que los estudiantes tienen conceptos erróneos o ideas alternativas sobre el trazado de rayos, la formación de imágenes en la reflexión y refracción y sobre los colores. Además, demuestran que dichos conceptos erróneos están muy extendidos y no dependen del género, ni del nivel, ni de la edad de los estudiantes. Concluyen que estos mismos errores están presentes en grupos de estudiantes antes y después de la enseñanza de la óptica en la escuela secundaria.

El conocimiento previo que tienen los estudiantes sobre óptica juega un papel importante en el proceso de adquisición de los nuevos conocimientos relacionados, y los conceptos alternativos también, pues dificultan el aprendizaje de los estudiantes (Duit y Treagust, 2003; Apostolides, 2008). Como consecuencia de la enseñanza tradicional, los

estudiantes que han aprendido el método formal de representación gráfica de la óptica geométrica todavía tienen dificultades para generalizar la construcción geométrica del trazado de rayos y, por tanto, son incapaces de crear una representación de la propagación de la luz alrededor o a través de componentes ópticos, especialmente en el contexto de la visión. Parece como si las manifestaciones que resultan del conocimiento formal (símbolos y procedimientos) estuvieran insertadas, sin éxito, dentro del robusto cuerpo del conocimiento previo de los alumnos, de modo que “el formalismo del trazado de rayos simplemente no tiene ninguna repercusión en el mundo de los fenómenos ópticos reales” (Di Sessa, 1988, p. 64).

Consideramos, por tanto, que cualquier metodología de enseñanza que se limite al mero formalismo matemático no será capaz de cambiar los conceptos previos de los alumnos, relacionados con su experiencia en el mundo físico que les rodea. Dado que sabemos que el conocimiento previo de los estudiantes influye en lo que pueden aprender en el aula, es esencial que los profesores sean conscientes de que existen tales conocimientos previos que tienen nuestros alumnos, incluidas sus ideas alternativas (Driver et al., 1994; Tytler, 2002). Partiendo del conocimiento de dichos conceptos, se han de proponer estrategias que sean capaces de poner a prueba los conceptos alternativos de los estudiantes y lograr que éstos sean conscientes de la necesidad de adoptar los conocimientos científicos, fundamentados en experimentos y observaciones, para poder dar respuestas adecuadas a las situaciones propuestas (Treagust, 1995; Treagust y Chandrasegaran, 2007). Este conocimiento de las dificultades conceptuales que pueden tener los estudiantes en Física es, por tanto, una información muy valiosa para los profesores, y también debería de serlo para los autores de libros de texto y las personas a cargo de establecer el currículo (Tural, 2015). En óptica se ha de tener en cuenta el hecho de que incluso futuros profesores de Física manifiestan problemas conceptuales, algo especialmente importante pues estos candidatos a profesores de Física pueden transferir sus conceptos “alternativas” o no muy bien fundamentadas a sus alumnos (Tural, 2015).

Analizamos a continuación la bibliografía en busca de los conceptos alternativos que pudieran suponer un obstáculo para los alumnos en la comprensión de los conocimientos científicos de óptica, así como los conceptos alternativos que suelen presentar los propios docentes y los libros de texto escolares.

3.2. Conceptos alternativos que presenta el alumnado.

En el siglo XXI aún se sigue utilizando la enseñanza por transmisión verbal de conocimientos en su estado final, aunque se haya puesto de manifiesto en numerosas ocasiones la escasa eficacia de este modelo de enseñanza (Viennot, 1976; Ausubel, 1978; Gil, Carrascosa, Furió y Martínez Torregrosa, 1991). Sabemos que cuando los estudiantes se enfrentan a problemas diferentes a los que han visto en clase, la mayoría de ellos comete errores, que denotan una falta de comprensión del significado profundo de los conceptos científicos más básicos, a pesar de una enseñanza reiterada, incluso en aquellos estudiantes que obtienen buenas calificaciones. En Física, estos errores se deben, en su mayoría, a la existencia de ideas “preconcebidas” (asumidas por costumbre, basadas en discusiones con amigos o por simple intuición) muy persistentes de los alumnos, que impiden el correcto aprendizaje de los conceptos científicos. Numerosos autores han estudiado profundamente el papel que tienen los conceptos alternativos en el campo de la óptica, y que impiden que los alumnos adquieran los conocimientos científicos adecuados, si no son tratados adecuadamente (De la Rosa, et al., 1984; Goldberg y McDermott, 1986; Kaminski y Viennot, 1989; Osborne, Black et al., 1993; Galili, 1996; Fler, 1996; Selley, 1996a y 1996b; Osuna, 2001; Martínez Torregrosa, Osuna, 2001 y Osuna, 2007). Desde la enseñanza tradicional, no se trabaja suficientemente con estos conceptos alternativos. Un aspecto en el que están de acuerdo muchos de estos estudios es que las dificultades que tienen los alumnos antes, durante y después de la enseñanza de los fenómenos ópticos tienen su origen en un conocimiento precientífico fragmentado, construido sobre la base de la experiencia personal. Como hemos resaltado anteriormente, este conocimiento persiste a lo largo de la enseñanza reglada y creemos que es debido a que la enseñanza tradicional no remedia los factores clave que llevan a la fragmentación. Los niños construyen ya en la infancia explicaciones sobre cómo ven, en sus esfuerzos espontáneos para entender cómo funciona la luz. Antes de recibir una educación formal, los estudiantes ya poseen su propio conocimiento espontáneo, que en general no está de acuerdo con el conocimiento científico.

Numerosos estudios han explorado las ideas de los estudiantes sobre la luz, la visión y los fenómenos ópticos. Entre otros, podemos destacar los siguientes: Stead y Osborne, 1980; Jung, 1987; Anderson y Karrqvist, 1983; Goldberg y McDermott, 1986, 1987; La Rosa, Mayer, Patirxi, y Vincentini, 1984; Watts, 1985; Guesne, 1985; Feher y Rice, 1988, 1992; Ramadas y Driver, 1989; Perales, Nievas, y Cervantes, 1989; Saxena, 1991;

Bendall, Goldberg, y Galili, 1993; Osborne, Black, Meadows y Smith, 1993; Shapiro, 1994; Selley, 1996; Langley, Ronen y Eylon, 1997; Galili y Hazan, 2000.

La visión juega un papel fundamental en la comprensión de la óptica geométrica, pues la visión nos permite detectar la luz, patrones de iluminación, interpretarlos, e identificar patrones relacionados como el objeto y la imagen. Incluso aunque la visión es uno de nuestros sentidos más importantes, y nuestra experiencia con la luz comienza desde la infancia, todos estos estudios mencionados anteriormente, muestran que los estudiantes tienen problemas serios con la comprensión de la naturaleza de la luz, su propagación, la visión y la formación de imágenes (Kaltakci, Derya y McDermott, 2016).

Osuna (2007), es sus investigaciones con alumnado de enseñanza secundaria obligatoria, identificó los siguientes obstáculos en el aprendizaje de la óptica:

1. Creer que no es necesario que llegue luz al ojo para ver
2. No pensar que de los objetos iluminados sale luz.
3. No considerar a la luz como una entidad independiente que viaja en el espacio.
4. Creer que el rayo de luz es lo que se puede ver, por ejemplo, por los agujeritos de las persianas.
5. No utilizar haces divergentes de luz procedentes de cada punto de la fuente, para explicar la formación de sombras e imágenes.
6. Creer que la imagen es “algo” que se traslada entera
7. Creer que la imagen tiene existencia real independientemente del sistema ojo-cerebro.

A estos obstáculos identificados por Osuna (2007), en base a nuestra experiencia docente⁶, añadimos los siguientes tópicos relacionados con las dificultades asociadas a la comprensión del modelo de visión de Kepler:

8. No comprender la formación de la imagen utilizando una lente convergente o un espejo.
9. No considerar los modelos y las teorías científicas como algo en continua construcción y modificación. Desconocer la existencia de dichos límites.

⁶ En el Apartado 4.2 se explica con más detalle lo que aquí sólo se menciona.

Además, la revisión bibliográfica nos ha permitido identificar de forma novedosa otros obstáculos que pueden encontrar los alumnos para comprender el modelo ondulatorio de la luz y que complementarían los señalados anteriormente:

10. No considerar que la luz visible es heterogénea.
11. No comprender las características intrínsecas de la naturaleza de la luz que resultan alejadas de la percepción humana.
12. No comprender las características básicas de los fenómenos ondulatorios.
13. No comprender la naturaleza electromagnética de la luz.
14. No saber explicar correctamente lo que se entiende por “color”.
15. No utilizar el modelo ondulatorio para explicar fenómenos que se habían explicado con el modelo geométrico.

A continuación, desarrollaremos en más profundidad cada uno de los obstáculos o tópicos señalados.

Tópico 1: Creer que no es necesario que llegue luz al ojo para ver.

Numerosos estudios muestran las dificultades que presentan los alumnos en la comprensión de los conceptos de luz y visión (Stead y Osborne, 1980; Saxena, 1991; Fetherstonhaugh y Treagust, 1992; Bendall, Goldberg y Galili, 1993; Osborne, Black, Meadows y Smith, 1993; Selley, 1996; Langley, Ronen, y Eylon, 1997; Koray y Bal, 2002; Uzun, Alev y Karal, 2013). Los estudiantes generalmente no son capaces de demostrar un vínculo entre el ojo y el objeto, o entre el ojo y la imagen vista (Bendall, Goldberg y Galili, 1993; Galili, Bendall y Goldberg, 1993; Osborne, Black, Meadows y Smith, 1993; Langley, Ronen y Eylon, 1997; Galili y Hazan, 2000; Heywood, 2005). Algunos piensan que mirar un objeto es suficiente para verlo (Langley, Ronen y Eylon, 1997; Şen, 2003; Heywood, 2005). Concretamente, varios autores (Andersson y Karrqvist 1983; Collis et al., 1998, 1989; La Rosa et al., 1984; Osborne et al., 1993; Saxena 1996; Selley 1996a, 1996b; Viennot y Chauvet, 1997; etc.) han señalado la existencia de modelos de visión alternativos a partir de los cuales los alumnos interpretan la visión sin necesidad de que llegue luz al ojo procedente del objeto y sin tener un esquema de representación de la luz geométrico e idealizado.

Goldberg y McDermott (1987) encontraron que muchos estudiantes universitarios en el curso introductorio de Física creen que un objeto luminoso que tiene una forma determinada envía rayos paralelos; y que el hecho de que los rayos sean paralelos implica

obligatoriamente que ésa es la dirección privilegiada. Bendall, Goldberg et al. (1993) muestran que la mayoría de los profesores de enseñanza elemental tiene la idea de que el ojo desempeña un papel activo, mientras que el objeto "mirado" tiene un papel pasivo. Galili y Hazan (2000) realizaron un estudio extenso en el que exploraban el conocimiento de la luz, la visión y los temas relacionados en estudiantes de Bachillerato y magisterio. Se animaba a los estudiantes a dibujar diagramas o para explicar sus respuestas. Antes de la instrucción, la mayoría de las descripciones y dibujos que realizaban para describir el proceso de la visión no hacían referencia a una relación Física entre el ojo observador y los objetos observados. Andersson, B. y F. Bach (2005) observaron también este problema en alumnos de grado 8-9, equivalentes a 3º y 4º de la ESO.

Tópico 2: No pensar que de los objetos iluminados sale luz.

La luz es identificada en su fuente primaria o como el área iluminada a veces visible sobre la superficie del objeto, y no como una entidad invisible que es emitida desde los objetos iluminados y resulta detectada por los receptores del ojo (Anderson y Karrqvist, 1983). Estos autores investigaron la comprensión de la luz y la visión en estudiantes suecos en grados 6-9 (desde los 12 a los 16 años). La investigación anterior a la instrucción mostró que aproximadamente un tercio de los alumnos en los grados 6 y 7, tenían el concepto de la luz como entidad que se propagaba en el espacio en presencia de un objeto luminoso, mientras que solamente un 10% entendía que también un objeto opaco o “no luminoso” puede emitir luz.

Langley et al. (1997) examinaron los conceptos y representaciones de los sistemas ópticos, la propagación de la luz, los patrones de iluminación y los patrones visuales de los estudiantes de décimo grado en Israel (15-16 años) mediante un cuestionario que constaba de nueve preguntas que tratan con situaciones comunes relacionadas con la luz y la vista. El hallazgo más significativo fue que la mayoría de los estudiantes no representaba correctamente la luz lejos de las fuentes. Solamente un escaso porcentaje indicaba la dirección hacia el ojo desde objetos luminosos y no luminosos, y casi nunca dibujaban diagramas explicativos coherentes para los fenómenos de formación de sombras, deslumbramiento por un espejo, y formación u observación de imágenes de espejo plano. Concluyeron que los estudiantes creían que la luz de un objeto luminoso

era visible porque la luz podía viajar en el espacio, pero no había propagación de luz desde un objeto no luminoso⁷.

Tópico 3: No considerar a la luz como una entidad independiente que viaja en el espacio.

Andersson y Karrqvist (1983), trabajando con alumnos de entre 12 y 15 años, establecieron como idea clave que la luz existe en el espacio y se propaga a modo de mensajero en el espacio y el tiempo independiente del foco y el observador. En sus trabajos exponen que solamente el 30% de los estudiantes lo entienden con claridad, siendo un obstáculo clave para el aprendizaje de la óptica.

Driver (1985), editó un texto ya clásico que inspiró en buena medida nuestra Reforma LOGSE, en el que clasifica por edades la evolución de las ideas científicas previas de los alumnos entre las edades de 12-15 años. Dedicó un apartado a la luz en el que describe las dificultades de los alumnos en relacionar la claridad ambiente con el sol o la incapacidad de muchos para entender la reflexión de la luz en el papel blanco o la relación entre la visión y la imagen virtual. Al igual que Andersson y Karrqvist (1983), encuentra que los alumnos tienen muchas dificultades en entender la luz como una entidad en el espacio desligada del foco que la genera y del receptor, cuestión clave para la interpretación de imágenes de dispositivos ópticos y el mismo ojo entendido como sistema óptico.

Ramadas y Driver (1989), en un estudio a gran escala acerca de las ideas de estudiantes de 13-14 años sobre la luz, encontraron que los estudiantes previamente a la instrucción atribuían la formación de imágenes en el espejo de objetos no luminosos a la propiedad única de los objetos más que a la propagación de la luz en sí misma. Sabemos que hay muchas similitudes en la forma en que los estudiantes comprenden la luz y algunas de las antiguas teorías. En concreto, Dedes (2005) encuentra que la mayoría de los alumnos piensan que la luz es una entidad localizada en el espacio, ciertamente parecida a la idea estática de la luz que sostenía Aristóteles. En este mismo sentido, la idea que tienen los estudiantes de que la luz se localiza en las superficies de los cuerpos iluminados era similar a la idea de Alhazen de la luz “fija” en los cuerpos opacos. Heywood (2005) señala

⁷En el caso de una vela encendida, por ejemplo, los estudiantes creían que la vela era visible porque la luz dejaba la llama y entraba en el ojo. Sin embargo, en el caso de una flor, la luz que estaba presente alrededor de la flor hizo que la flor fuera visible.

las dificultades que tienen los estudiantes (futuros maestros de primaria) con la asunción de la luz como una entidad independiente en el espacio, como un problema para comprenderla construcción de la imagen de un objeto. H.-E. Chu et al. (2009) realizaron un estudio a gran escala en Seúl, con estudiantes de 7-10º grado (12-14 años), y encontraron que entre los conceptos alternativos que mantenían los estudiantes podían destacar: la luz viaja de manera preferencial hacia un objeto; la luz permanece alrededor de un objeto; los estudiantes creen que vemos un objeto porque está ahí; y el hecho de que los estudiantes piensen que se pueden ver los objetos sin que nuestros ojos tengan que enfocar los rayos en la retina. Consideramos que los alumnos de Bachillerato en España también pueden tener estas dificultades, pues el currículo oficial no trata la óptica desde 2º ESO (13-14 años).

Tópico 4: Creer que el rayo de luz es lo que se puede ver, por ejemplo, por los agujeritos de las persianas.

Antes de intentar que los alumnos comprendan el proceso mediante el cual se produce la visión tenemos que investigar si comprenden el concepto de rayo, que es básico para la comprensión del mecanismo de la visión y, por ello, ha sido clave para el desarrollo de la Óptica. Sin embargo, en el currículo oficial el contenido de este concepto se toma como evidente, aunque su significado específico suele ser vago para muchos estudiantes y antiguos científicos. Es muy importante para el docente incidir en que lo que se ve es la luz reflejada por granos de polvo en suspensión en el aire y no la propia luz emitida por el sol o, por ejemplo, una farola.

Tópico 5: No utilizar haces divergentes de luz procedentes de cada punto de la fuente, para explicar la formación de sombras e imágenes.

Al tratar con la luz que pasa a través de agujeros, los estudiantes de 10º grado en Estados Unidos, (15-16 años) dibujan líneas que forman haces cilíndricos o rayos que divergen de la fuente hacia el agujero y continúan su propagación rectilínea más allá del agujero (Rice y Feher, 1987). La impronta brillante tiene la forma del agujero. Los rayos divergen en líneas rectas de la fuente, y los que no son interrumpidos, se supone que mantendrán la forma del agujero. Esta concepción de la emisión de luz asume que, de un punto dado de la fuente, solamente un rayo pasa por el agujero. Esta misma concepción se puede encontrar en los dibujos de los alumnos en la formación de sombras.

Por su parte, Galili y Hazan (2000b) examinaron las similitudes entre los esquemas de proyección de imagen que sostenían los alumnos de 10º grade (15-16 años) y la explicación histórica de la formación de la imagen que propuso Alhazen. Ambos están basados en la idea de que cada punto imagen está relacionado con su correspondiente punto objeto mediante un único rayo que transfiere este punto imagen. Los estudiantes al aplicar este esquema no tienen criterio para localizar la imagen punto a punto a lo largo de esa línea. Parece que los estudiantes examinados no se daban cuenta de que, en principio, no pueden conocer la posición en la que se formará la imagen punto a punto, y parece que no saben que la imagen se formará en la intersección de los rayos que emanan del correspondiente punto objeto. Consideramos que los alumnos de Bachillerato podrán encontrar también estas dificultades.

Tópico 6: Creer que la imagen es “algo” que se traslada entera.

Podemos encontrar una analogía en el desarrollo de las ideas de los estudiantes desde una concepción holística a una en la que la formación de la imagen se realiza punto a punto, con un desarrollo similar en las ideas de los antiguos científicos. En la conceptualización holística que sostienen los estudiantes, la imagen se proyecta como un conjunto en una pantalla o espejo y se percibe holísticamente. El tratamiento holístico de una imagen u objeto es común, aunque implícito, en todas las teorías sobre la visión previas a Alhazen. Galili (1996), agrupa las ideas de los estudiantes en dos tipos de esquemas de pensamiento:

- Esquema ingenuo de pensamiento, o de "imagen holística" característico de los alumnos antes de la instrucción, ontológicamente similar a la teoría de los filósofos atomistas griegos (Galili y Hazan, 2000a, 2000b).
- Esquema de conocimiento del novato o "de imagen proyectada", ontológicamente similar a la teoría de Alhazen (Galili y Hazan, 2000a, 2000b).

Tópico 7: Creer que la imagen tiene existencia real independientemente del sistema ojo-cerebro.

Goldberg y McDermott (1986) encontraron que un porcentaje significativo de estudiantes universitarios creía que un observador podría ver la imagen sólo si la imagen está a lo largo de su línea de visión del objeto, y que la imagen del objeto podría estar en diferentes posiciones para diferentes observadores. Goldberg y McDermott (1987) investigaron las

ideas de los estudiantes de un curso introductorio de Física en la Universidad sobre el comportamiento de las lentes convergentes y la imagen que se ve en una pantalla y constataron que un elevado porcentaje de estudiantes piensa que la imagen sigue existiendo, aunque se elimine la pantalla; que se seguiría viendo, aunque se aleje la pantalla, y que se vería la mitad si se tapara media lente.

Ramadas y Driver (1989) en un artículo a gran escala acerca de las ideas de estudiantes de 13-14 años sobre la luz en Reino Unido, encontraron que los estudiantes, previamente a la instrucción, atribuían la formación de imágenes en el espejo de objetos no luminosos a la propiedad única de los objetos, más que a la propagación de la luz en sí misma. Esto solamente se puede entender si el hecho de ver un objeto no luminoso se considera como una captura y los espejos están dotados de una propiedad única que les permite capturar al objeto.

Consideramos que también los alumnos de Bachillerato pueden llegar con estas ideas equivocadas o ingenuas a nuestras clases, pues el currículo no trata la óptica más allá de 2º de la ESO (alumnos de 13-14 años).

Galili et al. (1993) señalan en su estudio que la construcción de la imagen es un proceso complejo en el que los estudiantes encuentran numerosas dificultades. Galili y Hazan (2000) muestran en su estudio en curso universitario de Física para futuros maestros de primaria en Israel la existencia de los siguientes conceptos alternativos: la imagen permanece en el espejo tanto si es observada, como si no; la imagen se mueve desde el objeto hacia el espejo, donde permanece; la mitad de una lente produce la mitad de la imagen, y el resto de las imágenes como si estuviese bloqueada; cuando la pantalla se acerca o se aleja de la lente, la imagen será más grande o pequeña, pero permanecerá nítida.

Anderson y Bach (2005) encuentran que los estudiantes de grado 8-9 en Suecia, (equivalente a 3º y 4º de la ESO), piensan que las sombras se pueden concebir como una imagen o como algo que pertenece a un objeto. Nuestra experiencia nos enseña que también muchos estudiantes de Bachillerato, aunque no todos, siguen teniendo estas ideas porque no han recibido educación formal en óptica desde 2º de la ESO.

Tópico 8: No comprender la formación de la imagen utilizando una lente convergente o un espejo.

Palacios, Cazorla y Cervantes (1989), encuentran en su estudio con profesores en formación en España, que las explicaciones que ofrecen los futuros profesores sobre la formación de imágenes en un espejo plano contienen errores o deficiencias científicas. Langley, Ronen y Eylon (1997) encuentran resultados en esta línea en su estudio llevado a cabo con estudiantes de 15-16 años en Israel. Galili y Hazan (2000) también en Israel, estudian el conocimiento de los estudiantes de secundaria y universitarios sobre la luz, la visión y temas relacionados antes y después de la enseñanza habitual, obteniendo resultados que apoyan los estudios anteriormente citados.

La investigación relacionada con la comprensión de los estudiantes sobre el funcionamiento de las lentes es muy limitada, pudiéndose destacar los siguientes estudios: Goldberg y McDermott, 1983; Goldberg y McDermott, 1987; Singh y Butler, 1990; Galili y Hazan, 2000; Colin, Chauvet y Viennot, 2002; Tao, 2004.

En su estudio Goldberg y McDermott (1983) exponen cómo incluso muchos estudiantes del curso de Física introductoria de la universidad de Washington predicen que desaparecería la mitad de la imagen cuando se tapara la mitad de una lente para formar la imagen. En 1987, los mismos autores investigaron la comprensión de las imágenes reales producidas por lentes convexas (convergentes) y por los espejos cóncavo, en los estudiantes de Física introductoria, y encontraron que cuando la imagen era formada por una lente convexa (convergente) en una pantalla y luego se eliminaba la lente, los estudiantes pensaban que aún se formaría una imagen en la pantalla.

Singh y Butler (1990) estudiaron los conceptos alternativos de los estudiantes respecto a la refracción. Se administraron seis juegos de cuestionarios que cubrían términos usados en refracción, ecuaciones usadas en refracción, refracción en interfaces planas y curvas, refracción y reflexión en superficies planas, refracción en lentes y refracción en prismas a estudiantes de edad 15-19 en Nueva Zelanda, estudiantes de 16 en Singapur; y estudiantes universitarios extranjeros de primer año que estudian en Nueva Zelanda, 19 años. Encontraron que el nivel de conocimiento de los estudiantes de primer año de pregrado estaba en el mismo nivel conceptual que el de los estudiantes de secundaria. La enseñanza y el aprendizaje de la refracción se caracteriza por el aprendizaje de contenidos, de modo que los estudiantes cuando se enfrentan a una situación generalmente solo pueden responder, si se ajusta a un grupo de contenido dentro de su estructura de conocimiento.

Colin, Chauvet y Viennot (2002) llevan a cabo un estudio con estudiantes universitarios en Francia sobre las dificultades vinculadas a situaciones de la Física que involucran dos modelos: la óptica geométrica y la óptica ondulatoria. El punto de partida es una investigación de las dificultades de los estudiantes de nivel universitario. En el trabajo se muestran extractos de libros de texto para ilustrar las posibles dificultades. Los autores destacan la importancia de comprender los dibujos y de comprender la reversibilidad del trazado de rayos, como base del diseño de estrategias didácticas innovadoras.

Una experiencia muy común es la observación de las imágenes que se ven a través de los espejos. Los estudiantes de curso universitario de Física para futuros maestros de primaria también creen que las imágenes realmente existen en los espejos donde pueden verse (Galili y Hazan, 2000). La inversión lateral de la imagen se explica mediante asunciones *ad hoc*. Los estudiantes atribuyen esta inversión a la propiedad del espejo. La formación de las imágenes virtuales se explica hoy en día mediante el proceso que tiene lugar detrás de la retina y por tanto pertenece a un aspecto de la visión explicado por la psicología.

Tao (2004), en su trabajo analiza las ventajas del uso de una computadora diseñada para ayudar a los estudiantes de 15-16 años en China (10º grado) a comprender la formación de imágenes por medio de lentes. El estudio tiene como objetivo investigar cómo los estudiantes, trabajando con programas multimedia de aprendizaje asistido por computadora, construyen conocimiento y comprensión de manera compartida. El resultado de la prueba previa a la instrucción mostró que muchos estudiantes tenían "conceptualizaciones holísticas" de la formación de imágenes, en lugar del modelo de construcción de la imagen punto a punto. La prueba posterior y las entrevistas mostraron que, en general, los estudiantes mejoraron su comprensión de la formación de imágenes, aunque la mejora varió ampliamente.

Heywood (2005) se centró en el estudio de dos fenómenos ópticos fundamentales; cómo se ve un objeto y cómo se forma una imagen en un espejo plano. La mayoría de los estudiantes, maestros de primaria en formación de pregrado en un programa de 4 años de formación de maestros en Reino Unido, podían seleccionar la representación científica correcta de cómo se veía un objeto y había conciencia de la reflexión en un espejo plano. Sin embargo, los estudiantes tenían dificultades para proporcionar explicaciones científicas y aplicar el razonamiento en contextos más complejos. Consideramos que también nuestros alumnos pueden encontrar estos obstáculos.

Tópico 9: No considerar los modelos y teorías científicas como algo en continua construcción. Desconocer la existencia de dichos límites.

La óptica es un campo de la física que implica el conocimiento de diferentes modelos. Algunas veces es fácil elegir qué modelo hay que utilizar, pero otras veces no lo es tanto. Es, por tanto, un área útil para ayudar a los estudiantes a comprender qué significan los modelos. Si los alumnos comprenden los conceptos y las leyes en que se basan cada uno de los modelos y son capaces de elegir cual utilizar en cada caso, aprenden también que los modelos son construcciones intelectuales que explican o predicen fenómenos, pero no son los fenómenos en sí mismos. Así, cuando los estudiantes universitarios (19-23 años) en Francia, tienen que estudiar óptica ondulatoria, no tendrían que cambiar sistemáticamente de un modelo de razonamiento basado en la óptica geométrica a otro modelo basado en la óptica ondulatoria, sino que deberían de utilizar ambas formas de pensar en la situación apropiada (Maurines, 2010).

Tópico 10: No considerar la naturaleza heterogénea de la luz.

Las ideas sobre la naturaleza material de la luz fueron defendidas por Newton, bajo la hipótesis de que cada rayo de luz esté formado por pequeños corpúsculos. En la *Querie* 29, afirma: “Que los rayos luminosos fuesen pequeños corpúsculos proyectados por los cuerpos luminosos” (Newton, edición de 1979, p.370). Para él, el fenómeno fundamental de la luz es la transmisión rectilínea, sólo explicable si los rayos de luz son corpúsculos que obedecen a las leyes mecánicas. Si ésta fuese un pulso o presión transmitida a lo largo de un fluido, debería rodear los obstáculos, doblándose hacia la sombra, como ocurre con el sonido o las ondas de agua. Las preguntas centradas en la velocidad de propagación (Maurines, 1992, 1993, 1997) indican que los estudiantes, profesores en formación, explican el movimiento de señales mecánicas utilizando una mecánica espontánea cercana a la avanzada por Viennot (1996) para objetos materiales. Linder y Erickson (1989) plantearon el mismo razonamiento mecanicista en el caso del sonido.

Diversos estudios acerca de estudios post-instrucción (Goldberg y McDermott, 1986, 1987; Galili, Bendall y Goldberg, 1993; Ronen y Eylon, 1993; Eylon, Ronen y Langley, 1993; Eylon, Ronen y Ganiel, 1995), han revelado la persistencia de dificultades en la integración del conocimiento en cuanto a la propagación de la luz. En el estudio llevado a cabo por Fetherstonhaugh (1990) en Australia Occidental, se demuestra que un número significativo de estudiantes de 13-14 años, creía que la distancia que recorre la luz

depende de su energía. Bendall, Goldberg y Galili (1993) revelaron en su estudio que estudiantes universitarios en Israel consideraban la luz como una entidad espacial pero no necesariamente dinámica. Las descripciones diagramáticas dependen de si el sentido de la vista estaba envuelto o no, y las descripciones relacionadas con la vista cambiaban con el objeto (luminoso o no luminoso). Nuestra experiencia docente nos demuestra que muchos alumnos de Bachillerato también tienen bien arraigados estos conceptos erróneos al acudir a nuestras clases.

Tópico 11: No comprender las características propias de la naturaleza de la luz tan alejadas de la percepción humana.

En cuanto a la naturaleza de la luz, la experiencia directa no proporciona ninguna clave sobre su naturaleza ni sobre el mecanismo de visión. No hay una evidencia directa de la relación entre la luz, el objeto observado y el observador. Esta falta de evidencia deja mucho espacio libre a los alumnos para improvisar, o para encajar los pocos hechos experimentales relacionados con la luz en su teoría general sobre los sentidos y sobre el mundo. Uno de esos hechos experimentales es la imagen de los objetos observados que se ve en la superficie del ojo del observador. En los estudiantes de Bachillerato, esta falta de evidencia de un mecanismo de la visión se refleja en sus esquemas espontáneos sobre la visión. Los estudiantes tienen tendencia a compartimentalizar su conocimiento, ya que no sienten la necesidad de englobarlos en teorías más generales. Las antiguas teorías de la luz estaban basadas en experiencias con los fenómenos ópticos y en principios que hacían dicha experiencia plausible. Las ideas intuitivas de los alumnos acerca de la luz también están basadas en la experiencia. Por tanto, a lo largo de la historia, antiguos científicos y estudiantes de hoy en día, se enfrentan a los mismos obstáculos epistemológicos en la comprensión de la naturaleza de la luz y de sus propiedades, aunque lo hayan hecho de manera diferente debido a sus distintos roles y expectativas.

Galili y Hazan (2000) destacan en su investigación el hecho de que la dificultad histórica de identificar los parámetros asociados a la luz como son su velocidad o su longitud de onda, hacen muy difícil la interpretación correcta de la formación de la imagen, o de la difusión de luz por los objetos. También destacan el hecho de que se perciba el proceso de la formación de la imagen como instantáneo, pues la luz aparece como estacionaria y continua.

Tópico 12: No comprender las características básicas de los fenómenos ondulatorios.

El carácter ondulatorio de fenómenos tan cotidianos como la luz o el sonido, así como los múltiples dispositivos tecnológicos que basan su funcionamiento en las ondas. Sin embargo, la complejidad y la abstracción del modelo ondulatorio es un obstáculo importante para su enseñanza. Gracias a su investigación con alumnos de Bachillerato y universitarios, Utgers, Graciela, Pacca y Jesuita (2001) conformaron una tipología de modelos espontáneos sobre las ondas. Estos modelos muestran diferencias significativas en las consideraciones espaciotemporales. Los autores detectan que prevalece en los alumnos la tendencia a focalizar el espacio o el tiempo por separado; algunos estudiantes presentan predominio espacial (curvas que caminan, figura conocida, transmisión, transferencia) y otros temporales (repetición). Otro de los modelos (sucesión) considera espacio y tiempo (eventos similares que ocurren sucesivamente en puntos diferentes), aunque no contempla las variaciones temporales de cada punto. En otro modelo (forma y movimiento, y material-medio), espacio y tiempo aparecen menos disociados. Varios de los modelos atribuyen importancia espacial a las formas, aunque de modo diferente.

Durante una investigación sobre la comprensión de los estudiantes de la óptica en el curso introductorio de Física de la universidad de Washington, (McDermott et al., 1999) se encontró que los estudiantes tenían algunas dificultades serias que podían ser debidas, al menos en parte, a una falta de entendimiento de la naturaleza de la luz como una onda electromagnética. Muchos estudiantes no desarrollan un modelo ondulatorio básico que puedan aplicar para predecir y explicar los efectos de difracción y de interferencia. Es más, tienen serias dificultades con algunos conceptos muy básicos, como la longitud de onda, la diferencia en los caminos, y la diferencia de fase (Mc. Dermott et al., 1999). Es lógico pensar que los alumnos de Bachillerato también podrían presentar estas dificultades. La construcción de un razonamiento cualitativo sobre la base de un modelo como el ondulatorio, es una empresa difícil debido al formalismo en sí del modelo, y también a los conceptos que introduce (Maurines, 2010).

La difracción de la luz visible se puede observar a simple vista a través de aberturas de una décima de milímetro o menos. Esta es la razón por la que éste no es un fenómeno que se observa con frecuencia en la vida cotidiana. Como las longitudes de onda de la luz visible se encuentran entre 400 y 800 nm, muchos libros de texto cometen un error cuando describen que la difracción de la luz se produce a través de aberturas del mismo tamaño que la longitud de onda de la luz. Este error, es repetido a su vez por los estudiantes

universitarios que han estudiado este tema en el nivel introductorio e incluso en niveles más altos (Ambrose et al., 1999), e indica una tendencia hacia un razonamiento basado en la noción de objeto que consiste en seguir la onda considerada como un todo a través de la abertura. En situaciones tales como la difracción por una abertura, Ambrose et al. (1999) observaron que los estudiantes universitarios dibujaban líneas rectas para mostrar el camino de la luz a través del centro de la rendija y atribuían la difracción a algún tipo de interacción entre la luz incidente y los bordes.

Maurines (1992, 1993) en su investigación sobre las ondas mecánicas que se propagan a lo largo de una dirección, también demuestra que los estudiantes franceses de 16 años consideran la onda viajera como un todo y como un objeto material. Posteriormente se planteó examinar cómo razonaban los estudiantes en el caso de los fenómenos tridimensionales y si también se centraban en una forma itinerante de onda viajera, considerada como un objeto material. Maurines (1997, 1999a, 1999b) explora esta cuestión con alumnos universitarios en situaciones en las que había que utilizar el principio de Huygens-Fresnel, y demuestra que los estudiantes no utilizan el principio Huygens-Fresnel (considerar una onda como el resultado de la composición de un número infinito de ondas elementales) en las situaciones de difracción, sino que tienden a considerar la apertura como un todo y seguir los rayos de la luz incidente a través de la apertura.

En el caso de interferencias con el dispositivo de doble ranura, los estudiantes tampoco utilizan el principio de superposición de onda y el concepto de fase, sino un principio de superposición de intensidad: el patrón observado en la pantalla parece ser la superposición o la yuxtaposición de dos patrones formados por cada rendija (Ambrose et al., 1999). El mismo resultado fue obtenido por Romdhane y Maurines (2003, 2007a) para un dispositivo que consistió en tres agujeros. Además, una tendencia a considerar que la modulación de intensidad se produce cuando la onda incidente pasa a través del dispositivo de interferencia se revela también en el caso de placas delgadas (Romdhane, 2007b).

Romdhane y Maurines (2003) se centran en una experiencia universitaria desarrollada en Francia y Túnez sobre la didáctica de la óptica ondulatoria. Los análisis de los cuestionarios mostraron la persistencia de errores en la comprensión de la fase, las coherencias temporal y espacial, o la imposibilidad de interferencia entre frente de ondas

paralelos, la no descomposición en puntos emisores para focos extensos o el uso incorrecto de las leyes de la óptica geométrica.

Maurines (2010) estudia el caso de la propagación a lo largo de una dirección de una onda monocromática plana, en el que el campo puede ser descrito por una función sinusoidal en función de x y t : $y(x, t) = a \sin(\omega t - kx)$. Para explicar por qué el punto observado en una pantalla colocada detrás de la abertura no es similar a la abertura, debemos primero descomponer la abertura en infinitud de fuentes ficticias (fuentes de Huygens) y considerar que tienen una relación de fase constante ya que la luz incidente es una onda plana (las fuentes de Huygens son coherentes). Entonces, tenemos que considerar que las ondas emitidas por las fuentes de Huygens forman una sola onda resultante. La superficie de onda de la onda resultante es la envolvente de las superficies ondulatorias de las ondas de Huygens (principio de Huygens) y sus rayos, es decir la dirección de propagación de la energía, son perpendiculares a esta superficie de onda. Para determinar la irradiación de distribución en la pantalla, debemos utilizar el principio de superposición de amplitud derivado del principio de superposición de campo: la amplitud de la onda resultante es la suma de las amplitudes de todas las ondas de Huygens. Como las ondas de Huygens interfieren de manera constructiva y destructiva, es posible tener franjas brillantes y oscuras alrededor de un punto central. Cuanto menor sea el ancho de la abertura, más ancha será la mancha central brillante porque la diferencia de fase de las ondas emitidas por las fuentes Huygens situadas en los bordes de la abertura es aún menor cuando la abertura es pequeña. En el estudio encuentra que los estudiantes universitarios (19-23 años) mayoritariamente razonan a un nivel macroscópico, siguiendo los rayos de la luz incidente, en lugar de razonar a nivel de ondas elementales utilizando el concepto de fase y el principio de Huygens-Fresnel.

Tópico 13: No comprender la naturaleza electromagnética de la luz.

De acuerdo con el análisis de Fresnel, el éter debía tener una gran rigidez, comportarse como un sólido elástico y a la vez tenía que dejar pasar los cuerpos a su través. Estas propiedades mecánicas algo extrañas se complicaron aún más con la teoría de Maxwell puesto que además de ser muy tenue para permitir el movimiento de los cuerpos celestes, debía soportar oscilaciones de alta frecuencia. Así, en las décadas siguientes se dedicó gran esfuerzo a determinar la naturaleza Física del éter (Hecht, 2000).

La orientación del docente es fundamental para la interpretación correcta de las distintas representaciones de los textos y de algunas debilidades en la transposición didáctica. Como ejemplo: el principio de Huygens estaba en sus orígenes sustentado en oscilaciones mecánicas del éter, concepto que estuvo presente en la historia de la naturaleza de la luz muchos siglos antes. El abandono del éter fue un proceso muy lento que culminó en el siglo XX y significó también la separación del pensamiento científico del materialismo mecanicista. ¿Cómo lograr entonces en el corto lapso impuesto por el currículo, que el alumno abandone sus conceptos mecanicistas para pensar en términos de conceptos abstractos como los de campo eléctrico y magnético? (Bravo y Pesa, 2015)

Bravo y Pesa (2015) se cuestionan: ¿Cómo lograr que el alumno no piense en oscilaciones mecánicas de alguna sustancia en la abertura de la rendija si tiene que imaginarse el espacio vacío de la ranura como múltiples emisores para considerar luego la interacción de la radiación emitida por estos? Algunos textos no explicitan lo suficiente el sentido actual del Principio de Huygens y presentan gráficos que, al tratar de simplificar el tratamiento obstaculizan de cierta manera ese salto conceptual. Como ejemplo, utilizan explícitamente puntos para poner de manifiesto que cada parte de la rendija actúa como una fuente puntual de ondas luminosas. Es entonces donde resulta fundamental la mediación del docente para contextualizar las representaciones y gráficos que se utilicen.

Para extender el modelo ondulatorio de manera que incluya los vectores de campo oscilantes, los estudiantes en el nivel de 2° de Bachillerato deben ser capaces de interpretar el formalismo diagramático matemático que describe una onda electromagnética plana. El concepto de un plano infinito en el que dos cantidades vectoriales cada una de las cuales tiene una magnitud y dirección en cualquier punto en un instante es muy abstracto. Como docente, a lo largo de los últimos 20 años, me he dado cuenta de que la representación diagramática de la onda plana electromagnética que se utiliza comúnmente en los libros de texto es a menudo incomprensible para los alumnos. Los estudiantes también tienen dificultades con las expresiones matemáticas que describen el campo magnético y eléctrico oscilante, y también con las ecuaciones que relacionan la variación de cada campo con el otro. Justamente en este aspecto se han detectado dificultades con la interpretación del diagrama de onda electromagnética: los alumnos atribuyen extensión espacial a la amplitud del campo eléctrico (Ambrose et al., 1999; Mc Dermott, 2001), lo cual sugiere una concepción mecanicista. El error más común que cometen los alumnos es adscribir a la onda EM plana una extensión espacial

finita en el plano perpendicular a la dirección de propagación, debido a la creencia incorrecta de que los campos eléctrico y magnético están confinados a la región encerrada dentro de las curvas sinusoidales.

Mc Dermott et al. (1999) han organizado las dificultades que se identifican en los estudiantes de Bachillerato al interpretar una onda electromagnética en tres categorías que se superponen:

- a) Error al interpretar las representaciones formales de una onda electromagnética plana.
- b) Error al aplicar la fuerza de Lorentz a interacciones con ondas electromagnéticas.
- c) No reconocer que los campos eléctrico y magnético en una onda electromagnética son interdependientes.

Hay una tendencia en muchos estudiantes a atribuir una extensión espacial a la amplitud de la onda. Algunos estudiantes dibujaron diagramas de curvas sinusoidales incidentes en una rendija y basaron su razonamiento en si la luz “cabría” o no en la rendija. Algunos decían que la difracción solamente ocurría cuando la longitud de onda o la amplitud eran mayores que la anchura de la rendija por que la “Luz se tiene que doblar para poder pasar por la rendija estrecha”. Estos errores son consistentes con una mala interpretación de la representación común de una onda EM plana linealmente polarizada como la que adjuntamos en la Figura 3.1.

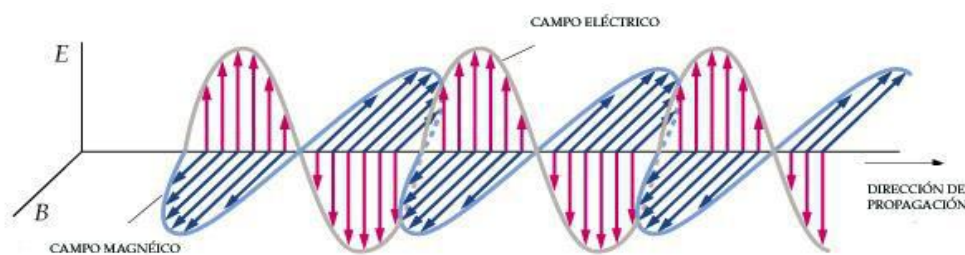


Figura 3.1: Representación común de una onda EM. Fuente: McDermott et al. (1999).

En la investigación citada anteriormente (McDermott et al, 1999), aproximadamente el 60% de los estudiantes (a nivel de Bachillerato) dijeron que el campo eléctrico o magnético era cero en un punto que se encontraba fuera de las dos curvas sinusoidales. Algunos lo hacían explícito con comentarios como “el campo en P es igual a 0, porque está fuera de la curva de “alcance” del campo **B**”. Los estudiantes que tratan la onda plana como si tuviese una extensión espacial finita atribuyen a menudo un significado especial

al eje de propagación según el diagrama. Aproximadamente el 35% afirman que los campos eléctrico o magnético son cero a lo largo del eje de propagación. Por ejemplo, un estudiante escribió: “En un punto sobre el eje de propagación de la onda electromagnética, z e y son cero, por tanto, \mathbf{B} y \mathbf{E} tiene que ser cero allí (si nos fijamos en la fórmula)”. A menudo estos estudiantes piensan que las magnitudes del campo eléctrico y magnético se incrementan con la distancia al eje de propagación. Otros estudiantes tratan la magnitud del campo como si decreciese con la distancia al eje de propagación. Algunos incluso parece que creen que los campos son “emitidos” desde el eje de propagación. Algunos estudiantes, aunque han respondido correctamente, confunden las representaciones del vector y de las líneas de campo. Los estudiantes frecuentemente no reconocen que \mathbf{E} y \mathbf{B} son interdependientes y que una onda electromagnética viajando no puede consistir en un solo campo. Algunos estudiantes tratan los campos magnéticos y eléctricos oscilantes en una onda de luz como entidades independientes. Queremos que los alumnos comprendan en profundidad el concepto de campo, que comprendan que el campo está dotado de energía y momento. Queremos que el campo llegue a adquirir un significado físico para los alumnos equiparable al que tienen otros conceptos como el de partícula o fuerza.

A lo largo de mi experiencia docente he observado que la mayoría de los alumnos adquieren una imagen de un campo de fuerzas que está lejos de la concepción científica. Suelen considerar el campo de fuerzas como una región del espacio bajo la influencia de una masa, carga o imán. Para la mayoría de los alumnos, un campo de fuerzas está vacío de significado, y, por tanto, es innecesario, redundante y complicado. La mayoría de los alumnos siguen pensando en términos de fuerza y no modifican fácilmente sus ideas previas sobre la interacción entre partículas. El tratamiento que la mayoría de los textos hacen del campo no ayuda a que los alumnos sean conscientes de la existencia real del campo, es decir de qué el campo de fuerza en cuestión es el verdadero agente de la interacción. He comprobado a lo largo de los años, y más adelante lo explicamos en mayor profundidad con el análisis de los libros de texto, que éstos potencian la idea de que la fuerza se debe a las fuentes (cargas, masas o imanes) y no al campo. Estamos, por tanto, ante una visión newtoniana de la interacción, en la que ésta se efectúa entre las partículas y no entre el campo y la partícula. No es de extrañar, por tanto, que los alumnos no logren construir el verdadero significado del concepto campo. Además, muchas veces en el aula se enfatiza principalmente el carácter operativo del concepto de campo. Así el vector “intensidad de campo” (definido como fuerza por unidad de masa) se utiliza

preferentemente para calcular la fuerza, y pocas veces se realizan discusiones cualitativas que clarifiquen el concepto de campo y lo doten de significado físico. Por tanto, los alumnos no llegan a conocer las diferencias que sobre la interacción entre partículas introduce la teoría de campos mediante acciones contiguas frente a la interpretación newtoniana a través de acciones a distancia. Tampoco podrán comprender las ventajas que la teoría de campos introduce: explicación de nuevos fenómenos como la inducción o las ondas electromagnéticas; integración de dominios separados como la óptica y el electromagnetismo; apertura de nuevas líneas de investigación en el avance de la Física. Y, por otra parte, los alumnos no serán capaces de relacionar la teoría con sus aplicaciones tecnológicas, ni las repercusiones que ha tenido para la ciencia y la sociedad.

Si no tratamos específicamente en el aula los aspectos dinámicos de los campos de fuerzas, los alumnos tampoco podrán conocer la interpretación de los aspectos energéticos asociados a la interacción. Como hemos dicho anteriormente, la mayoría de los libros de texto no presentan los campos de fuerzas como una realidad Física dotada de energía y momento. Es esencial que el docente resalte el hecho de que el campo está dotado de energía y momento, para que los alumnos lleguen a comprender el significado físico del campo. Por otra parte, los docentes hemos de interpretar los balances energéticos en situaciones que implican movimiento de partículas en presencia de campos insistiendo en el papel que juega el campo de fuerzas, porque si no, los alumnos seguirán con la idea de que la energía sigue estando asociada a la materia, que actúa como soporte de ésta.

En cuanto a los campos electromagnéticos, recuerden lo aprendido anteriormente en las unidades de campo eléctrico y magnético, comprendan la importancia del campo como realidad Física, y lo relacionen con la generación de ondas electromagnéticas. Queremos que comprendan la extraordinaria importancia que tuvo el experimento de Hertz, ya que validaba la teoría electromagnética de Maxwell. El profesor tendría que recordar los alumnos las relaciones entre campos eléctricos y magnéticos que han estudiado en unidades previas, para que puedan así comprender la producción de las ondas electromagnéticas, que no son solamente ondas lumínicas, sino que tenemos muchos tipos.

Queremos, además, que los alumnos integren en su esquema de pensamiento el campo como una realidad Física cuya existencia es esencial para explicar muchas situaciones y procesos en lo que están presentes. Si se restringe el uso del campo a fenómenos estáticos,

parece predominar la utilización del campo como un modelo simplemente útil, pero sin base Física real. Entonces las cuatro ecuaciones de Maxwell se escinden en dos grupos de dos ecuaciones, uno para la electrostática y otro para la magnetostática. En estas situaciones estáticas, la energía almacenada en los campos es la misma que la energía potencial de las configuraciones de cargas o de corrientes, y el momento lineal y angular va asociado sólo a los campos que se propagan.

El significado físico de los campos aparece mucho más claramente cuando hablamos de ondas electromagnéticas. En este caso los campos eléctrico y magnético se propagan, es decir, varían en función del tiempo y del espacio. Ya no estamos ante situaciones estáticas. Es entonces cuando nuestros estudiantes pueden entender cómo los campos eléctrico y magnético tienen importancia. La propagación de las señales electromagnéticas sucede a una velocidad finita, la acción es retardada, necesita de campos para llevar energía, momento lineal y angular. En la inducción electromagnética la transferencia de energía a través de distancias macroscópicas está muy claramente relacionada con la acción de campos variables con el tiempo.

Debemos, por tanto, considerar desde un principio que los campos son “reales”, tan reales como una partícula material. Debemos evitar que los alumnos consideren el campo como una magnitud accesoria para describir la interacción. Así mismo, tenemos que lograr que los alumnos consideren el campo como una entidad tan real como las fuentes que lo crean. Esta realidad resulta más evidente cuando las fuentes dependen del tiempo, ya que, entonces, el campo transporta energía y momentos lineal y angular, al igual que lo hacen las partículas materiales.

Podemos explicar a los alumnos el método experimental desarrollado por Heinrich Hertz⁸. La comunidad científica rápidamente llegó a la conclusión de que, puesto que las

⁸Dos varillas, cada una de una longitud de 5 pulgadas, terminadas en un extremo por una esferita metálica pulida, se fijaban sobre una recta de manera que entre las esferas quedara una pequeña zona de aire. De las esferas partían dos hilos conductores hacia un dispositivo que suministraba pulsos cortos de diferencia de potencial muy elevada que llevaban a las esferas grandes cantidades de carga eléctrica de signos opuestos, hasta que saltaba la chispa entre ellas. El aire de la zona se hacía conductor durante un corto periodo de tiempo y así proporcionaba un camino a las cargas que oscilaban de una varilla a la otra hasta alcanzarse el equilibrio eléctrico. Entonces el aire volvía a no ser conductor y el sistema quedaba preparado para el siguiente pulso de “tensión” que originaba otra serie de oscilaciones por el mismo proceso.

Si los argumentos de Maxwell eran correctos, mientras saltaba cada chispa se propagaban ondas electromagnéticas de la misma frecuencia que las oscilaciones, hasta unos $5 \cdot 10^8 \text{ s}^{-1}$, según las estimaciones de Hertz, ondas electromagnéticas con una longitud de onda de unos 60 cm, es decir en la banda de las radiofrecuencias y de las microondas. Además, esta radiación se dispersaría desde las esferas y sería

ondas hertzianas y las ondas luminosas se comportan de un modo semejante, la luz debe estar causada también por el rápido movimiento oscilatorio de partículas cargadas, quizás las existentes en los átomos del emisor de luz. Aquí teníamos el modelo de la emisión de luz (Holton y Brush, 1987, p. 628.)

Tópico 14: No explicar correctamente los colores que se observan.

También se ha mostrado la existencia y persistencia de ideas alternativas a la visión del color, aunque estas están íntimamente relacionadas con el modelo con que se interprete la visión. Difícilmente se puede achacar la sensación de color, por ejemplo, al tipo de luz que incide en el ojo si se interpreta la visión suponiendo que “algo” sale del ojo. Andersson y Karrqvist, (1983) en su trabajo con estudiantes suecos en grados 6-9 (desde los 12 a los 16 años) encuentra que los alumnos interpretan el color como una propiedad del objeto o de la luz que los ilumina y, en ocasiones, la gama de colores son una consecuencia de la mezcla luz y oscuridad.

Feher y Rice (1992) en su trabajo analizan las ideas de los niños sobre objetos de colores y sombras de colores, y señalan la existencia de modelos mentales, es decir, formas de pensar que son consistentes y generalizadas. Estos esquemas conceptuales ingenuos: interpretan el color como una propiedad del objeto o de la luz que los ilumina, considerar que los colores son una consecuencia de la mezcla luz y oscuridad, son utilizados por diferentes niños para explicar fenómenos similares, y determinan los tipos de respuestas dadas por los niños en situaciones de resolución de problemas.

Osuna et al. (2016), en su estudio, presentan algunos aspectos importantes para planificar la enseñanza problematizada de la visión de los colores para el segundo ciclo de la ESO (14-15 años) o cursos posteriores. Para ello, llevan a cabo un análisis de las concepciones históricas erróneas acerca del color, pues pueden ser conceptos alternativos que tengan los estudiantes. Un error conceptual sería considerar el color como una propiedad del

detectable por la producción de una corriente fluctuante en un alambre a cierta distancia, como se indicó anteriormente.

El primer triunfo de Hertz fue observar este efecto, aun cuando el alambre receptor (antena) se situará a muchos metros de distancia del oscilador emisor. Esa nueva radiación electromagnética invisible, llamada todavía a veces ondas hertzianas, es naturalmente idéntica a nuestras familiares ondas de radio. Hertz demostró a continuación que la radiación poseía todas las características de la luz: se reflejaba, se podía enfocar un haz, refracción, interferencia, polarización, etc. Posteriormente se demostró que la velocidad de este tipo de radiación electromagnética era la misma que la velocidad de la luz.

objeto, una sustancia o un pigmento. Este error conceptual, que podría ser un concepto alternativo que tuviesen algunos alumnos, refleja la tendencia a materializar los conceptos, y se ve reforzada por expresiones del lenguaje habitual: «verde manzana», «amarillo limón», etc. Otro error conceptual que podría constituir un obstáculo para la comprensión de cómo vemos los colores sería considerar el color como una propiedad de la luz exclusivamente, minusvalorando el papel del sistema ojo-cerebro en la creación de la sensación de color. Esta concepción alternativa no es capaz de explicar que se pueda percibir el mismo color a partir de combinaciones diferentes de distintos tipos de luz, o que se puedan percibir colores como el magenta que no vemos en el espectro de la luz blanca. Los autores destacan que es el obstáculo más común de los estudiantes de bachillerato después de la enseñanza. Esta concepción alternativa está presente en el lenguaje habitual y en los libros de texto en afirmaciones del tipo: «La suma de colores del espectro produce de nuevo luz blanca».

Osuna et al. (2007) proponen que otro de los conceptos alternativos podría ser considerar que el color es «algo» añadido a la luz que llega al ojo procedente del objeto. Durante el siglo XVII se generalizó la hipótesis de la modificación (de la que ya hemos hablado en el Capítulo 2), según la cual el color está en los objetos y la luz se modifica al interaccionar con ellos. Este concepto alternativo se manifiesta cuando se considera que la luz blanca se tiñe del color de los objetos que atraviesa o de que se refleja. Por ejemplo, cuando los alumnos consideran que la luz que traspasa un filtro se tiñe con su color.

Young, el padre de la teoría tricromática, sugirió que la retina del ojo poseía estructuras sensibles a la luz roja, amarilla y azul respectivamente, a fin de explicar la visión del color refutando las ideas de Newton, quien afirmaba que los corpúsculos de la luz al llegar a un punto de la retina provocan vibraciones en las partículas de esta, y que cada partícula estaría sometida a un tipo de vibración distinta según el tipo de corpúsculo incidente. Pero, refuta Young:

Como es imposible concebir que cada punto sensitivo de la retina contenga un número infinito de partículas, cada una capaz de vibrar al unísono con cada posible oscilación, se hace necesario suponer un número limitado, por ejemplo, los tres principales colores rojo, verde y azul (Young, 1802, 92, p. 12-48).

Además, analiza cómo la sensación de la visión de los colores se puede interpretar a partir de estos tres tipos de luz básicos. Estamos pues ante la explicación de la visión del color, otra meta clave en nuestra propuesta.

Estudios fisiológicos posteriores de la retina han mostrado la existencia de tres tipos de células fotorreceptoras (los conos) con respuesta diferente al tipo de luz. Los llamaremos conos «rojo, verde y azul», ya que, aunque su curva de fotosensibilidad abarca una banda continua de frecuencias, la máxima respuesta fisiológica de cada tipo de cono se produce en torno a las frecuencias que corresponden a dichos colores en el espectro de la luz blanca. Pero hemos de ser conscientes de que la sensación del color se elabora con aspectos físicos, pero también con aspectos subjetivos a partir de tres elementos: las características de la luz que incide en el ojo, las características fisiológicas del sistema ojo-cerebro y las características luminosas del entorno en el que se encuentra el objeto (Küppers, 1992).

Tópico 15: No utilizar el modelo ondulatorio para explicar fenómenos que se habían explicado con el modelo geométrico.

En las situaciones en las que hay que aplicar el modelo ondulatorio (Maurines, 2010), los estudiantes de último curso de Bachillerato, y de primer curso de universidad, tienden a razonar sobre la base de conceptos similares a los de la óptica geométrica. De hecho, no razonan a nivel de ondas elementales utilizando el concepto de fase y aplicando el principio de Huygens-Fresnel. En cambio, razonan a nivel macroscópico, utilizando el concepto de energía y los rayos siguientes emitidos desde la fuente. Muchos estudiantes tienden a pensar que no hay imagen en las situaciones en las que hay que utilizar el modelo ondulatorio para encontrar la imagen del objeto, y que el concepto de imagen pertenece a la óptica geométrica sólo (Maurines, 2010). En este sentido, varios autores han encontrado la misma tendencia a considerar una imagen como un todo. La imagen parece ser el objeto, que está viajando y cambiando cuando algo sucede en el camino de la luz (Fawaz y Viennot, 1986; Feher y Rice, 1987; Galili, 1996; Goldberg y Mc Dermott, 1996, 1987; Kaminski, 1989).

Aunque el mundo de las ondas luminosas sea una experiencia cotidiana para los estudiantes, desde el punto de vista didáctico la comprensión del modelo ondulatorio implica un alto grado de dificultad durante su aprendizaje. Numerosos aportes de la investigación educativa en el ámbito del modelo ondulatorio de la luz durante las últimas décadas son coincidentes en señalar la dificultad que manifiestan los alumnos en el cambio de paradigma entre la óptica geométrica y la óptica ondulatoria (Wosilait et al., 1999; Colin y Viennot, 2001; Maurines, 2010). Los alumnos resuelven las situaciones

problemáticas referidas a la óptica ondulatoria con razonamientos basados en modelos de la óptica geométrica o mezclando acríticamente elementos de ambos modelos, independientemente de los ámbitos explicativos de los mismos.

Después de analizar el papel que tuvo la experiencia de la difracción de la luz en la formulación de las distintas teorías sobre la naturaleza de esta, resulta comprensible que aún hoy los alumnos evidencien serias dificultades para el cambio de paradigma entre la óptica geométrica y la óptica ondulatoria cuando tienen que abordar situaciones experimentales que involucran los fenómenos de difracción e interferencia. Desde las cuidadosas y detalladas experiencias de Grimaldi y de Hooke, siguiendo por los intentos de Huygens y Newton de explicar el fenómeno sin abandonar la verdad experimental de que la luz se propaga en forma rectilínea, hasta llegar a las hipótesis de Young y Fresnel de la propagación ondulatoria, se observa que el escollo más duro para un cambio de paradigma parecía estar centrado en la necesidad de encontrar hipótesis y explicaciones que no contradigan la propagación rectilínea de la luz (Bravo y Pesa, 2015).

Kaltakci, Derya y McDermott (2016) encuentran una posible explicación en el hecho de que la mayoría de los profesores de instituto, al igual que la mayoría de los libros de texto, proporcionan algoritmos cuantitativos relacionados con la óptica geométrica, pero en muy pocas ocasiones se ofrece un aprendizaje conceptual coherente, y en consecuencia los alumnos no logran cambiar dichas ideas alternativas por un conocimiento formal en óptica, a lo largo de su etapa educativa.

Desde el punto de vista didáctico la comprensión del modelo ondulatorio implica un alto grado de dificultad durante su aprendizaje. Hay una tendencia en muchos de ellos a atribuir una extensión espacial a la amplitud de la onda. Numerosos aportes de la investigación educativa, en el ámbito del modelo ondulatorio de la luz durante las últimas décadas señalan la dificultad que manifiestan los alumnos en el cambio de paradigma entre la óptica geométrica y la óptica ondulatoria (Wosilait et al., 1999; Colin y Viennot, 2001; Maurines, 2010). Los alumnos resuelven las situaciones problemáticas referidas a la óptica ondulatoria con razonamientos basados en modelos de la óptica geométrica o mezclando acríticamente elementos de ambos modelos, independientemente de los ámbitos explicativos de los mismos. Incluso muchos estudiantes no han desarrollado una comprensión funcional de algunas de las ideas básicas en la óptica geométrica (Mc. Dermott et al., 1999).

Investigadores que estudian la comprensión de la óptica física (Ambrose et al., 1999) determinaron que los estudiantes de Bachillerato utilizan un modelo híbrido para explicar los fenómenos relacionados tanto con la óptica geométrica, como con la óptica física. Ello les impide establecer las conexiones adecuadas entre los fenómenos físicos y los modelos científicos acerca de la naturaleza de la luz. En otros estudios sobre la interferencia y difracción de la luz, también se puso de manifiesto que los modelos que utilizaban los estudiantes para explicar estos fenómenos no estaban de acuerdo con los modelos científicos (Ambrose 1999; Wosilait 1996, Wosilait et al., 1999). Así mismo, dichos estudios ponen de manifiesto otro hecho importante, y es que los estudiantes no poseen una comprensión funcional del modelo de onda que utilizan para explicar la interferencia y los efectos de difracción de la luz. Ambrose (1999) encontró que los estudiantes tienen muchas dificultades con conceptos tan importantes en óptica como son la diferencia de trayectoria y la diferencia de fase.

Şengören (2010) en su estudio propuso diferentes contextos físicos para la luz, encontrando que la razón por la cual los estudiantes en Turquía preferían el dibujo sinusoidal de la onda y los dibujos de onda plana puede ser que estos dibujos sean los que se usan principalmente en los libros de texto al explicar los fenómenos relacionados con la luz. De acuerdo con Ozcan (2015), y Norman (1983), los estudiantes de edades correspondientes a nuestro Bachillerato generalmente usan fragmentos de conocimiento no científico junto con conocimientos científicos al desarrollar modelos mentales relacionados con la luz. Según Norman (1983), los modelos pueden contener conceptos contradictorios, erróneos e innecesarios. Ozcan (2015) muestra en su estudio que los profesores deben prestar atención específica a ciertos conceptos clave cuando se trata de enseñar temas relacionados con la luz. Romdhane y Maurines (2003) recomiendan como estrategias didácticas dibujar simultáneamente el rayo con sus frentes de onda asociados a fin de destacar la naturaleza ondulatoria de la luz, precisar las condiciones de interferencia desde el principio y destacar la necesidad de dos rayos coherentes para producir interferencias.

Tras un exhaustivo análisis de la bibliografía existente, podemos decir que hemos detectado con cierto detalle los “conceptos alternativos” o “ideas preconcebidas” que tienen, en general, los estudiantes y que podrían resultar ser un serio obstáculo en el aprendizaje de la óptica. Para finalizar este apartado, en la Tabla 3.1 hemos intentado establecer una relación entre las ideas clave para comprender el modelo de visión de

Kepler, y las dificultades asociadas que pueden encontrar los estudiantes (derivadas de los conceptos alternativos anteriormente expuestos).

Tabla 3.1. Ideas clave para comprender el modelo de Kepler y las dificultades asociadas.

IDEAS CLAVE PARA COMPRENDER EL MODELO DE KEPLER Y DIFICULTADES ASOCIADAS	
Ideas Clave	Dificultades asociadas
1. Concebir que la visión se produce cuando llega luz al ojo procedente del objeto	<ul style="list-style-type: none"> • Creer que no es necesario que llegue luz al ojo para ver • No pensar que de los objetos iluminados sale luz • No considerar a la luz como una entidad independiente que viaja en el espacio
2. Representar la propagación de la luz mediante haces divergentes procedentes de cada punto de la fuente luminosa	<ul style="list-style-type: none"> • Creer que el rayo de luz es lo que se ve, por ejemplo, por los agujeritos de las persianas • Creer que el rayo de luz es una parte constituyente de la propia luz • No tener interiorizado el concepto de rayo de luz • No utilizar haces divergentes de luz procedentes de cada punto de la fuente, para explicar la formación de sombras e imágenes • No idealizar la fuente luminosa como un conjunto de fuentes puntuales
3. Describir la visión tanto directa como indirecta utilizando el concepto de imagen del modelo de Kepler	<ul style="list-style-type: none"> • Creer que la imagen es “algo” que se traslada entera • Creer que la imagen tiene existencia real independientemente del sistema ojo-cerebro • No tener claro el concepto de imagen óptica
4. Reconocer los límites de validez del modelo geométrico de la visión	<ul style="list-style-type: none"> • No considerar los modelos y teorías científicas como algo en continua construcción • Desconocer la existencia de dichos límites

Fuente: Elaboración propia a partir de Osuna (2007)

Del mismo modo hemos establecido una relación entre las ideas necesarias para la comprensión y utilización del modelo ondulatorio de la luz por parte del alumnado y los posibles obstáculos asociados, que mostramos en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2. Ideas clave para comprender el modelo ondulatorio de la luz y las dificultades asociadas.

IDEAS CLAVE PARA COMPRENDER EL MODELO ONDULATORIO DE LA LUZ Y DIFICULTADES ASOCIADAS	
Ideas Clave	Dificultades asociadas
1. La consideración de la naturaleza heterogénea de la luz blanca.	<ul style="list-style-type: none"> • Pensar que la luz se modifica al interactuar con los objetos • Creer que el color es una propiedad de la luz o de los objetos

<p>2. Utilizar el modelo ondulatorio para interpretar fenómenos ópticos y dar cuenta de los límites del modelo geométrico</p>	<ul style="list-style-type: none"> • No considerar la luz como una entidad Física. • No considerar que la luz tiene carácter ondulatorio • No comprender las características propias de la naturaleza de la luz tan alejadas de la percepción humana. • No comprender los fenómenos básicos de los fenómenos ondulatorios. • No utilizar el modelo ondulatorio correctamente para explicar fenómenos previamente explicados con el modelo geométrico. • Concebir la luz como algo material
<p>3. Concebir el color como una sensación que se obtiene a partir de la respuesta diferencial de tres fotorreceptores retinianos al tipo de luz incidente</p>	<ul style="list-style-type: none"> • No consideran el carácter heterogéneo de la luz “blanca”. • No relacionan la sensación de color con la diferente respuesta de los fotorreceptores retinianos a la luz incidente.

Fuente: Elaboración propia.

Como hemos venido razonando, la investigación histórica y didáctica nos permite afirmar que muchos alumnos tienen ideas erróneas sobre los conceptos que consideramos clave para comprender cómo vemos y cuál es la naturaleza de la luz. Por esto mismo, entre los objetivos de nuestra propuesta didáctica destacamos la importancia de que los estudiantes comprendan y utilicen el modelo de visión de Kepler y, además, consigan entender suficientemente bien el modelo ondulatorio de la luz. Centrando el análisis histórico en este modelo de visión, deben contemplarse este tipo de obstáculos a los que han de enfrentarse los estudiantes.

3.3. Conceptos alternativos que puede presentar el profesorado.

Se han llevado a cabo numerosos estudios acerca de los conceptos de los docentes que desarrollan su labor en Institutos de Enseñanza Secundaria o sus equivalentes en el extranjero, sobre la naturaleza de la ciencia, en los que se pone de manifiesto la diferencia entre la visión proporcionada por la epistemología contemporánea y la que mantienen los docentes, marcada por un empirismo e inductivismo extremo (Giordan, 1978; Gil, 1983; Hodson, 1985; Nussbaum, 1989, Cleminson, 1990; Meitchtry, 1999). Otros estudios (Hodson, 1998; Matthews, 1994) evidencian que los profesores de ciencias tienen una imagen empirista de la ciencia y de su método, concediendo poca importancia a sus dimensiones sociales, culturales y creativas. Esta imagen empirista que los docentes tienen sobre la ciencia, y la visión de ella que proporcionan los libros de texto (Selley, 1989; Stinner, 1992), no es, en general, muy diferente de la imagen socialmente aceptada de la ciencia. Cabe esperar que esa imagen popular de la ciencia persista, incluso entre

los profesores, si la enseñanza de las ciencias se limita a la presentación de conocimientos ya elaborados, sin permitir a los estudiantes llevar a cabo las actividades características de la actividad científica. Existen numerosos trabajos que ponen de manifiesto la necesidad de continuar investigando sobre la formación docente y el ejercicio profesional (Schön, 1998; Gunstone et al., 1993; Kaufman y Fumagalli, 2000; Angulo, 2002; Fernández et al., 2002; Fernández et al., 2009; Benarroch y Marín, 2011).

Desde la Didáctica de las Ciencias se han llevado a cabo estudios (Furio et al., 1994; Gil, 1991 y Porlán, 1989) sobre los conceptos alternativos de los profesores, puesto que parecen tener gran influencia en el proceso de enseñanza-aprendizaje, dado que el profesor es un elemento clave del proceso educativo, un profesional reflexivo que toma decisiones racionales. Estos conceptos alternativos que, en ocasiones se han formado sin una reflexión previa, de modo intuitivo, y que no son sometidos a crítica, pueden llegar a convertirse en un obstáculo epistemológico. Angulo (2002) aporta pruebas de que las ideas y creencias de los profesores tienen efectos importantes en el proceso de enseñanza-aprendizaje, y por supuesto en la evaluación. Para Harres (1999) los conceptos inadecuados más comunes de los profesores acerca de la naturaleza de la ciencia se enmarcarían en una visión empirista-inductivista, de acuerdo con lo mencionado anteriormente. Dicho autor considera también que las estrategias para el cambio de estos conceptos parcialmente inadecuados pueden tener éxito si prestan una atención especial a la historia y a la naturaleza de la ciencia.

Creemos que es muy importante analizar el comportamiento de los docentes, pues son clave en el comportamiento y aprendizaje de sus alumnos (Abel, 2007; McDermott, 2006; McDermott et al., 2006). En muchos estudios se muestra que el profesorado tiene, a veces, conceptos alternativos que son aceptados a nivel científico y que se parecen, en algún caso, a los que tiene el alumnado (Wandersee et al., 1994; Abell, 2007; Heywood, 2005). Incluso hay cierta evidencia de que algunos profesores resultan ser una de las fuentes principales de los conceptos alternativos de los estudiantes (Wandersee et al., 1994; Abell, 2007; Kikas, 2004).

Por ejemplo, Bendall, Goldberg et al. (1993) muestran que incluso en conceptos tan importantes y clave como el papel del ojo del observador y del objeto observado, la mayoría de los profesores de enseñanza elemental mantiene la idea errónea de que el ojo desempeña un papel activo, mientras que el objeto "mirado" tiene un papel pasivo. Por su parte, Pesa (1999) evidencia que los profesores tienen graves dificultades para interpretar

fenómenos elementales que solo involucran la marcha rectilínea de la luz, destaca la necesidad de una metodología de enseñanza que contemple procesos más activos, incorporando tratamientos cualitativos que propicien la reflexión sobre los significados. Carrascosa y Gil (1985), destacan que:

Los docentes no están acostumbrados a encarar situaciones elaborando las explicaciones sobre la base de dibujos de rayos... Los temas de óptica son desperdiciados en sus potencialidades para desarrollar razonamientos que permitan relacionar los conceptos estudiados con situaciones de la vida diaria. Este tipo de enseñanza produce serios daños: tanto una visión totalmente errónea de lo que es el pensamiento científico, como la afirmación de procedimientos y actitudes viciosos denunciados hace ya mucho como parte de una metodología de la superficialidad, (citado por Iparraguirre, 2007, p. 426).

Colombo y Pesa (1999) relatan su experiencia en un curso de formación de profesores sobre la enseñanza de la polarización de la luz en el que los profesores noveles volcaban sus ideas previas sobre el tema. Comprobaron que había una incomprensión considerable en la física de los fenómenos, que la realidad se confundía con el modelo, y que un recurso frecuente en los profesores era limitarse al algoritmo para la explicación del fenómeno, sin acudir a las causas físicas responsables. Los autores también evidencian la existencia de ideas previas de los profesores comunes a las de los alumnos. En las conclusiones de su estudio, los autores manifiestan la incorrecta construcción de los conceptos básicos por parte de los profesores, la aplicación de formas precientíficas de razonamiento, y la persistencia de los errores conceptuales. Resaltan la necesidad de replantear la enseñanza desde una perspectiva global de las ondas.

De acuerdo con Kaltakci, Derya y McDermott (2016), la mayoría de los profesores de Bachillerato e incluso de nivel Universitario proporcionan algoritmos cuantitativos relacionados con la óptica geométrica, pero en muy pocas ocasiones se ofrece un aprendizaje conceptual coherente. En consecuencia, los alumnos no logran cambiar dichas ideas alternativas por un conocimiento formal en óptica a lo largo de su etapa educativa.

Por todo ello, es necesario averiguar los conceptos que el profesorado de Física posee actualmente sobre la óptica, en especial, y su metodología de enseñanza a nivel de Bachillerato, y las consecuencias que esta metodología y conceptos (no del todo correctos) puedan tener para el aprendizaje de los alumnos. Nosotros llevaremos a cabo

en nuestro trabajo de investigación un estudio relativo a los profesores de Física de 2º de Bachillerato del principado de Asturias.

3.4. Relación de los conceptos alternativos de alumnado y profesorado con los libros de texto.

La realidad física es compleja y se puede simplificar solamente bajo determinadas hipótesis y en determinados contextos. Muchas veces los libros de texto plantean situaciones y ejercicios relacionados con experiencias directas de la vida diaria, pero limitándose a muy pocas experiencias y muy pocas observaciones. Por ejemplo, en relación con la naturaleza de la luz, muchos libros de texto de Primaria y Secundaria afirman que la luz se propaga en línea recta y no puede superar los obstáculos. La declaración en sí misma no es incorrecta, pero solamente se refiere a uno de los posibles comportamientos de la luz durante su propagación (por ejemplo, en un espejismo la propagación de la luz no se produce en una línea recta). Otro ejemplo podría ser el siguiente: cuando los libros de texto introducen colores, se refieren casi exclusivamente a situaciones en las que los objetos están iluminados por luz blanca, pues la mayoría de los eventos de nuestras vidas ocurren bajo la iluminación de luz blanca. Sin embargo, intentar proponer ejemplos relacionados con una fuente de luz monocromática puede resultar extremadamente útil para una mejor comprensión de los fenómenos del color, incluso desde los primeros años de instrucción.

Carrascosa (2006) lleva a cabo la búsqueda de errores conceptuales graves que tengan que ver con conceptos científicos fundamentales, en cómics, periódicos, novelas y también en libros de texto. Favale y Bondani (2013) destacan la existencia de algunas explicaciones engañosas acerca de fenómenos ópticos tanto en libros de texto como en sitios web. Señalan que la mayoría de los errores se producen en los dibujos explicativos que acompañan al texto, y son debidos a una descripción híbrida de los procesos ópticos: a veces la descripción de la trayectoria de la luz del rayo se confunde con la reconstrucción de la imagen por sistemas de lentes.

Desde nuestra experiencia docente de más de 20 años, consideramos que los libros de texto tienen una gran importancia en el proceso de enseñanza-aprendizaje. Caixeta y Souza (2010) muestran que el 99% de los profesores utilizan los libros de texto en sus aulas, convirtiéndose así en la fuente principal de información disponible para el estudiante. Estos textos son producto de una red de conexiones culturales, económicas y

políticas, que conforman un cuerpo de conocimientos legitimado para ser utilizado por los profesores en sus aulas, representando la cultura y el conocimiento generalmente aceptados (Occelli y Valeiras, 2013). Por tanto, estos materiales educativos pueden llegar a modificar el propio currículo, ya que reinterpretan y crean nuevos “sentidos” (Gomes de Abreu et al., 2005). Al igual que otros autores (García-García y Perales, 2007; Palacios-Díaz y Criado, 2017) consideramos que los textos de Ciencias a nivel de Bachillerato presentan, en general, ciertas deficiencias que podrían resultar la causa de parte de los conceptos alternativos que tienen los docentes y que transmiten después a sus propios estudiantes. Concretamente, Binns y Bell (2015) muestran que la mayoría de los textos presentan el “método científico” como la metodología científica básica, sin entrar en muchos detalles de cómo se ha llegado a definir “el método” mismo y, sobre todo, de cómo hay que aplicarlo a nivel experimental. Con estas presentaciones, reduccionistas, los estudiantes muy difícilmente pueden llegar a comprenderla riqueza y complejidad de la construcción de conocimiento en la Ciencia.

En el campo de la óptica, se han estudiado y difundido las similitudes entre las ideas de los estudiantes y las ideas mantenidas en algún momento de la historia por los antiguos científicos (Dedes, 2005; Galili y Hazan, 2000), y se han llevado a cabo diversas investigaciones que nos permiten constatar el potencial que tiene la enseñanza de la historia de la ciencia en la mejora del proceso de enseñanza-aprendizaje, especialmente desde la perspectiva constructivista (Matthews, 1994; Monk y Osborne, 1997). Se ha demostrado que el uso de la historia y la filosofía de la ciencia, con el objetivo de promover el aprendizaje sobre la naturaleza de la ciencia en sí misma, puede influir positivamente en las actitudes de los estudiantes hacia una mejor comprensión de la ciencia y de su método, ayudando al cambio conceptual y promoviendo una comprensión más profunda de las ideas científicas (Allchin, 2013; Höttecke y Silva, 2011; Matthews, 1989, 1994).

En la revisión bibliográfica hemos identificado numerosos trabajos sobre la enseñanza de las Ciencias y de la Física en los libros de texto (Campanario, 2001; Campanario, 2003; De Pro Bueno et al., 2008; García-García, 2005; García-García y Perales, 2007; Kahveci 2010; Knain, 2001; Niaz et al., 2010; Perales, 2006; Perales y Jiménez, 2002; Van Eijck y Roth, 2008), pero no hemos encontrado ningún sobre cómo se enfoca el tema de óptica en su conjunto. Encontramos estudios puntuales como los de Bravo y Pesa (2015) acerca de la difracción en la historia de la óptica y los libros de texto, y el de Kaltakci-Gurel et

al., (2016) donde se señala que en muchos libros de texto se ignora el papel del ojo del observador o no se le otorga la importancia que tiene en la formación de la imagen.

A lo largo de la historia, la óptica se ha ido construyendo con el objeto de comprender la visión humana, por lo que se trata de una ciencia compleja que participa de conocimientos de Física, de Fisiología y de Psicología (Ronchi, 1987). Esta es nuestra concepción de la óptica. Sin embargo, algunos historiadores suelen afirmar que, a partir de Maxwell, la óptica, una parcela de la Física independiente, queda englobada en el electromagnetismo (Beléndez, 2008). La mayoría de los textos escolares y manuales de Física habituales organizan la enseñanza de la óptica en dos bloques: a) la óptica geométrica, que se encarga de la explicación de los fenómenos ópticos; b) la óptica Física, en donde se establece la naturaleza de la luz y, consecuentemente, las leyes de su propagación. Esta concepción ignora los problemas a los que se enfrentaron los científicos de distintas épocas, los obstáculos conceptuales que tuvieron que vencer, las ideas novedosas que supusieron avances fundamentales, etc. Esta organización mayoritaria de los manuales de Física pierde su sentido si se analiza la evolución de las ideas a lo largo de los siglos y se intenta organizar la enseñanza de la óptica con una lógica problematizada. Es por ello por lo que, la realización de un análisis histórico de las ideas involucradas en este campo se revela como una tarea de especial importancia.

Consideramos, por tanto, que los libros de texto juegan un papel muy importante en el proceso de enseñanza aprendizaje de la óptica. Tanto los profesores como los alumnos utilizan fundamentalmente el texto como base del proceso de enseñanza aprendizaje (Good, 1993). Sin embargo, ciertos libros de texto se pueden convertir, en parte, en una fuente de conceptos alternativos por la información incorrecta que proporcionan, de manera que los profesores mantienen sus conceptos alternativos, y los trasladan a sus estudiantes, siendo los libros de texto responsables de la persistencia de estas ideas alternativas. En nuestro trabajo de investigación llevaremos a cabo un estudio de los libros de texto en Física, pues consideramos que los libros de texto pueden ser uno de los factores que propician los conceptos alternativos erróneos en los profesores.

Por todo lo tratado en este capítulo consideramos la importancia y oportunidad de un cambio en la enseñanza conceptual de la óptica.

CAPÍTULO 4. IDEAS CLAVE, DIFICULTADES EN EL ESTUDIO DE LA ÓPTICA Y SU RELACIÓN CON LOS ELEMENTOS CURRICULARES.

En una primera parte de este capítulo abordamos la ordenación del currículo de Física y Química en Secundaria y Bachillerato en el Principado de Asturias, lo cual nos permite situarnos en el contexto de estudio y aproximarnos al desarrollo curricular de la materia que nos ocupa. En un segundo momento, aventuramos una posible relación entre los conceptos clave propuestos por cada uno de los científicos que han estudiado la óptica a lo largo de la historia (los cuales hemos visto en detalle en el Capítulo 2 de este trabajo) y los criterios/indicadores de evaluación que establece la LOMCE (Ley Orgánica 8/2013, de 9 de diciembre, para la mejora de la calidad educativa), para resaltar así la importancia que tienen en el currículo de Física de 2º de Bachillerato. A partir de dichos conceptos clave en la enseñanza de la óptica, teniendo siempre en cuenta los posibles obstáculos que puede encontrar el alumnado, deberíamos plantear el proceso de enseñanza-aprendizaje de la óptica de manera constructiva.

4.1. Ordenación del currículo de Física y Química en Secundaria y Bachillerato.

La Ley Orgánica 2/2006, de 3 de mayo, de Educación, modificada por la Ley Orgánica para la Mejora de la Calidad Educativa de 8/2013, de 9 de diciembre (LOMCE), regula el Bachillerato en el capítulo IV del título I. En su artículo 32 establece que la finalidad del Bachillerato es proporcionar al alumnado la formación, madurez intelectual y humana, conocimientos y habilidades que le permitan desarrollar funciones sociales e incorporarse a la vida activa con responsabilidad y competencia; y a la vez le capacitará para acceder a la educación superior.

La Ley Orgánica 8/2013, de 9 de diciembre, define en su artículo 6, el currículo como la regulación de los siguientes elementos que determinan los procesos de enseñanza y aprendizaje para cada una de las enseñanzas: los objetivos de cada etapa educativa, las competencias, los contenidos, la metodología didáctica, los estándares y resultados de aprendizaje evaluables y los criterios de evaluación del grado de adquisición de las competencias y del logro de los objetivos de la etapa. Divide las asignaturas en tres bloques: troncales, específicas y de libre configuración autonómica. La Física y Química de 1º de Bachillerato se convierte así en materia troncal de la opción de Ciencias.

El Real Decreto 1105/2014, de 26 de diciembre que establece el currículo básico de la Enseñanza Secundaria Obligatoria y del Bachillerato, es desarrollado en el Principado de Asturias por el Decreto 42/2015, de 10 de junio que regula la ordenación del Bachillerato y establece el currículo para el Principado de Asturias. Este Decreto complementa los criterios de evaluación a través de indicadores que permiten la valoración del grado de desarrollo del criterio en cada uno de los cursos y asegurar que al término de la etapa el alumnado pueda hacer frente a los estándares de aprendizaje evaluables sobre los que versará la evaluación final de Bachillerato. También fomenta el aprendizaje basado en competencias, a través de las recomendaciones de metodología didáctica y de su evaluación complementando los criterios de evaluación, conforme a lo dispuesto en la Orden ECD/65/2015, de 21 de enero, por la que se describen las relaciones entre las competencias, los contenidos y los criterios de evaluación de la Educación Primaria, la Educación Secundaria Obligatoria y el Bachillerato.

Finalmente, la Resolución de 26 de mayo de 2016, de la Consejería de Educación y Cultura, se regula el proceso de evaluación del aprendizaje del alumnado de Bachillerato y establece el procedimiento para asegurar la evaluación objetiva y los modelos de los documentos oficiales de evaluación, según los contenidos básicos de los mismos regulados en la disposición adicional sexta del Real Decreto 1105/2014, de 26 de diciembre y en el capítulo V del Decreto 42/2015, de 10 de junio.

Según esta normativa, la enseñanza de la Física en 2º de Bachillerato tendrá como finalidad contribuir a desarrollar en el alumnado las siguientes capacidades:

- Adquirir y poder utilizar con autonomía conocimientos básicos de la Física, así como las estrategias empleadas en su construcción.
- Comprender los principales conceptos y teorías, su vinculación a problemas de interés y su articulación en cuerpos coherentes de conocimientos.
- Familiarizarse con el diseño y realización de experimentos físicos, utilizando el instrumental básico de laboratorio, de acuerdo con las normas de seguridad de las instalaciones.
- Expresar mensajes científicos orales y escritos con propiedad, así como interpretar diagramas, gráficas, tablas, expresiones matemáticas y otros modelos de representación.
- Utilizar de manera habitual las Tecnologías de la Información y la Comunicación para realizar simulaciones, tratar datos y extraer y utilizar información de

diferentes fuentes, evaluar su contenido, fundamentar los trabajos y adoptar decisiones.

- Aplicar los conocimientos físicos pertinentes a la resolución de problemas de la vida cotidiana.
- Comprender que el desarrollo de la Física supone un proceso complejo y dinámico, que ha realizado grandes aportaciones a la evolución cultural de la humanidad.
- Reconocer los principales retos actuales a los que se enfrenta la investigación en este campo de la ciencia.

Tomando como referencia este marco legal, se ha intentado establecer relación entre las ideas clave que consideramos que tienen que comprender los alumnos referentes a la óptica, con los criterios de evaluación, los indicadores y los estándares de aprendizaje que establece el Decreto 42/2015, de 10 de junio del Principado de Asturias. Estos conceptos clave a los que hacemos referencia, surgen fruto del análisis histórico que hemos realizado sobre la óptica, en busca de un paralelismo entre la construcción de los conceptos que realizan los estudiantes durante el aprendizaje de la óptica y el desarrollo de esta disciplina a lo largo de la historia. Como ya se ha comentado, la evolución de las ideas científicas nos puede ayudar a seleccionar los contenidos relevantes (Rosa-cintas et al., 2017).

4.2. Relación entre los elementos curriculares y las ideas clave en el estudio de la óptica.

Habiendo repasado con cierto detalle el desarrollo de los conceptos fundamentales de la óptica clásica de modo que puedan ser asimilados por los alumnos de 2º de Bachillerato, hemos podido establecer las ideas clave que han permitido avanzar en su estudio, y hemos comprobado cómo, efectivamente, estas ideas son la base de los criterios de evaluación y, por tanto, han de ser adquiridas por nuestros alumnos. A continuación, en la Tabla 4.1 establecemos una relación entre los conceptos clave propuestos por cada uno de los científicos que han estudiado la óptica a lo largo de la historia y los criterios de evaluación que establece la LOMCE, para resaltar así la importancia que tienen en el currículo de Física de 2º de Bachillerato.

Tabla 4.1. Ideas clave en la enseñanza de la óptica y su relación con los criterios de evaluación que establece la LOMCE para la asignatura de Física de 2º de Bachillerato.

Ideas claves/autores en la enseñanza de la óptica derivadas del estudio de la obra de:	Indicadores asociados a los criterios de evaluación que establece la LOMCE para la asignatura de Física de 2º de Bachillerato.
Kepler	<p>Bloque 5. Óptica Geométrica</p> <ul style="list-style-type: none"> - Describir los fenómenos luminosos aplicando el concepto de rayo. - Explicar en qué consiste la aproximación paraxial. - Plantear gráficamente la formación de imágenes en el dioptrio plano y en el dioptrio esférico. - Explicar la formación de imágenes en espejos y lentes delgadas trazando correctamente el esquema de rayos correspondiente e indicando las características de las imágenes obtenidas. - Explicar el funcionamiento de algunos instrumentos ópticos (lupa, microscopio, telescopio y cámara fotográfica) utilizando sistemáticamente los diagramas de rayos para obtener gráficamente las imágenes.
<p>Newton</p> <p>La luz “blanca” es de naturaleza heterogénea. La luz no se modifica al interactuar con los objetos.</p>	<p>Bloque 4. Ondas</p> <ul style="list-style-type: none"> - Explicar por qué y cómo se perciben los colores de los objetos
<p>Grimaldi</p> <p>La luz se propaga no sólo de manera directa, por refracción o por reflexión, sino que existe un cuarto modo, por difracción</p>	<p>Bloque 4. Ondas</p> <ul style="list-style-type: none"> - Reconocer la difracción y las interferencias como fenómenos propios del movimiento ondulatorio.
Hooke	<p>Bloque 5. Óptica geométrica</p> <ul style="list-style-type: none"> - Describir los fenómenos luminosos aplicando el concepto de rayo.
<p>La velocidad de la luz, aunque muy grande, es finita.</p> <p>La luz ha de ser un movimiento de vibración muy rápido y esta vibración ha de ser muy corta.</p>	<p>Bloque 4. Ondas</p> <ul style="list-style-type: none"> - Germen para el desarrollo de la teoría ondulatoria de Huygens.
Huygens	<p>Bloque 4. Ondas</p> <ul style="list-style-type: none"> - Visualizar gráficamente la propagación de las ondas mediante frentes de onda y explicar el fenómeno empleando el principio de Huygens. - Reconocer la difracción y las interferencias como fenómenos característicos de las ondas y que las partículas no experimentan. - Explicar los fenómenos de interferencia y la difracción a partir del Principio de Huygens

De todo centro emisor se propagan ondas en todas las direcciones del espacio con velocidad distinta en cada medio.

Las ondas se cruzan sin confusión y sin destruirse unas a otras.

Cada punto del espacio al que le llega una onda se comporta él mismo como emisor de una onda esférica.

El índice de refracción se explica como la relación entre las velocidades de propagación de las ondas antes y después de la refracción.

Bloque 4. Ondas

- Definir el concepto de índice de refracción e interpretar la refracción como una consecuencia de la modificación en la velocidad de propagación de la luz al cambiar de medio.

Malebranche

Explica por primera vez la relación entre los colores y las distintas velocidades de vibración

Bloque 4. Ondas

- Reconocer la dependencia del índice de refracción de un medio con la frecuencia y justificar el fenómeno de la dispersión.

Euler

Introduce la noción de frecuencia de la vibración luminosa para explicar los colores.

Bloque 4. Ondas

- Relacionar la visión de colores con la frecuencia.
- Explicar por qué y cómo se perciben los colores de los objetos

Atribuye la frecuencia más alta de la vibración luminosa al color violeta, y la más baja al color rojo

Considera la luz como una onda elástica sinusoidal que se propaga en el éter.

Bloque 4. Ondas

- Germen de la teoría de Young y posteriormente Maxwell

Unifica los fenómenos eléctricos y magnéticos, proponiendo el éter luminoso.

Bradley

La velocidad de la luz que sale de las estrellas es siempre la misma, independientemente de la estrella que la emita.

Bloque 4. Ondas

- Conocer el debate histórico sobre la naturaleza de la luz y el triunfo del modelo ondulatorio e indicar razones a favor y en contra del modelo corpuscular.

Malus

La doble refracción no era el único modo de polarizar la luz. La luz reflejada también podía tener “lados”.

Bloque 4. Ondas

- Comprender las características y propiedades de las ondas electromagnéticas, como su longitud de onda, polarización o energía, en fenómenos de la vida cotidiana.

Young

La retina del ojo posee estructuras sensibles a la luz roja, verde y azul respectivamente.	<p>Bloque 4. Ondas</p> <ul style="list-style-type: none"> - Relacionar la visión de colores con la frecuencia. - Explicar por qué y cómo se perciben los colores de los objetos
Los cambios de curvatura del cristalino tienen como función la acomodación del ojo para la visión de objetos situados a diferentes distancias.	<p>Bloque 5. Óptica Geométrica</p> <ul style="list-style-type: none"> - Describir el funcionamiento óptico del ojo humano.
Dos ondas de luz que se superponen pueden interferir la una con la otra.	<p>Bloque 4. Ondas</p> <ul style="list-style-type: none"> - Conocer el debate histórico sobre la naturaleza de la luz y el triunfo del modelo ondulatorio e indicar razones a favor y en contra del modelo corpuscular. - Explicar fenómenos cotidianos (los espejismos, el arco iris, el color azul del cielo, los patrones en forma de estrella que se obtienen en algunas fotografías de fuentes de luz, entre otros) como efectos de la reflexión, difracción e interferencia. - Reconocer la difracción y las interferencias como fenómenos característicos de las ondas y que las partículas no experimentan.
La luz viaja en línea recta, pudiendo producir sombras nítidas, dado que las longitudes de onda de las vibraciones de luz son muy pequeñas comparadas con el tamaño de los objetos visibles.	<p>Bloque 4. Ondas</p> <ul style="list-style-type: none"> - Reconocer la difracción y las interferencias como fenómenos característicos de las ondas y que las partículas no experimentan.
Young – Fresnel	
Las ondas de luz son periódicas y el color es función de la longitud de onda.	<p>Bloque 4. Ondas</p> <ul style="list-style-type: none"> - Germen de la teoría de Maxwell
La luz es una onda de naturaleza transversal	
Fresnel	
Principio de Huygens-Fresnel	<p>Bloque 5. Óptica Geométrica</p> <ul style="list-style-type: none"> - Explicar en qué consiste la aproximación paraxial. - Explicación de la propagación rectilínea de la luz.
Explicación de la difracción	<p>Bloque 4. Ondas</p> <ul style="list-style-type: none"> - Reconocer la difracción y las interferencias como fenómenos característicos de las ondas y que las partículas no experimentan. - Explicar los fenómenos de interferencia y la difracción a partir del Principio de Huygens
Explicación de la dispersión de la luz	<p>Bloque 4. Ondas</p> <ul style="list-style-type: none"> - Reconocer la dependencia del índice de refracción de un medio con la frecuencia y justificar el fenómeno de la dispersión.
Maxwell	
La luz visible es un caso particular de onda electromagnética.	<p>Bloque 4. Ondas</p> <ul style="list-style-type: none"> - Identificar las ondas electromagnéticas como la propagación de campos eléctricos y magnéticos perpendiculares. - Reconocer las características de una onda electromagnética polarizada y explicar gráficamente el mecanismo de actuación de los materiales polarizadores. - Relacionar la velocidad de la luz con las constantes eléctrica y magnética.
Explica matemáticamente las ondas electromagnéticas como la propagación de campos eléctricos y magnéticos perpendiculares	<p>Bloque 4. Ondas</p> <ul style="list-style-type: none"> - Reconocer las características de una onda electromagnética polarizada y explicar gráficamente el mecanismo de actuación de los materiales polarizadores. - Relacionar la velocidad de la luz con las constantes eléctrica y magnética.

Explicar matemáticamente la dispersión de la luz al atravesar un prisma.	- Identificar las ondas electromagnéticas que nos rodean y valorar sus efectos en función de su longitud de onda y energía.
Relaciona la velocidad de la luz con las constantes eléctrica y magnética	- Describir el espectro electromagnético, ordenando los rangos en función de la frecuencia, particularmente el infrarrojo, el espectro visible y el ultravioleta, identificando la longitud de onda asociada al rango visible (alrededor de 500 nm).
	- Evaluar la relación entre la energía transferida por una onda y su situación en el espectro electromagnético.
Hertz	
Producir por primera vez en el laboratorio radiación electromagnética	
Descubrir un detector capaz de detectar dichas ondas.	Bloque 4. Ondas
Afirma que la radiación electromagnética posee propiedades similares a las de la luz	- Reconocer y justificar en sus aspectos más básicos las aplicaciones tecnológicas de diferentes tipos de radiaciones.
Demostró que las ondas electromagnéticas se reflejaban, se refractaban y podían difractarse y polarizarse como las ondas de luz, viajando en línea recta con una velocidad que era del mismo orden que la velocidad de la luz.	- Explicar cómo se generan las ondas de la radiofrecuencia
	- Reconocer la importancia de las ondas electromagnéticas en las telecomunicaciones (radio, telefonía móvil, etc.).
	- Identificar distintos soportes o medios de transmisión (los sistemas de comunicación inalámbricos o la fibra óptica y los cables coaxiales, entre otros) y explicar de forma esquemática su funcionamiento.

Fuente: Elaboración propia

Observamos que de los 6 Bloques que componen el currículo, gran parte del Bloque 4 se dedica a la explicación de la óptica ondulatoria y el Bloque 5 en su conjunto aborda la enseñanza de la óptica geométrica. Este análisis aproximativo, nos ofrece indicios acerca de cómo encuadrar las ideas clave que hemos de lograr para que nuestros alumnos comprendan la materia y, a su vez, cumplan con los criterios de evaluación planteados en el marco de la actual ley educativa y en base a los cuales los alumnos serán evaluados. Comprobamos, por tanto, que es posible abordar estas ideas clave en el actual desarrollo curricular.

4.3. Relación entre los elementos curriculares y las dificultades en el aprendizaje de la óptica.

En este tercer apartado, centramos nuestro análisis en ver la relación existente entre los obstáculos detectados para el aprendizaje de la óptica y los contenidos curriculares que deben trabajarse en esta etapa educativa. Creemos que el conocimiento de los "obstáculos

epistemológicos" en el desarrollo de la ciencia puede iluminar problemas similares en el aprendizaje individual. Saber dónde los “grandes científicos” han encontrado dificultad para comprender determinados fenómenos puede sugerir al profesor dónde los estudiantes podrían tener también y, obviamente, con más frecuencia, dificultades de comprensión (Matthews, 1989, p.9). Por ello, consideramos fundamental saber qué obstáculos pueden impedir que los alumnos alcancen los estándares de aprendizaje evaluables y puedan cursar con aprovechamiento los bloques relativos a la óptica en 2º de Bachillerato. En la Tabla 4.2 se propone una relación entre los elementos curriculares establecidos y los obstáculos que previsiblemente encontrarán los alumnos relacionados con ellos (analizados en detalle en el Capítulo 3).

Tabla 4.2. Relación entre los elementos curriculares y los problemas o “obstáculos” identificados en el aprendizaje de la óptica.

Bloque 4. Ondas		
Dentro de este bloque de contenidos, se trabajarán los siguientes contenidos relacionados con nuestra investigación:		
<ul style="list-style-type: none"> • Ondas electromagnéticas. • Naturaleza y propiedades de las ondas electromagnéticas. • El espectro electromagnético. • Dispersión. El color. • Transmisión de la comunicación. 		
CRITERIOS DE EVALUACIÓN E INDICADORES	ESTÁNDARES DE APRENDIZAJE EVALUABLES	OBSTÁCULOS ENCONTRADOS
<p>4.3. Expresar la ecuación de una onda en una cuerda indicando el significado físico de sus parámetros característicos. Mediante este criterio se valorará si el alumno o la alumna es capaz de:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Definir las magnitudes características de las ondas e identificarlas en situaciones reales para plantear y resolver problemas. - Deducir los valores de las magnitudes características de una onda armónica plana a partir de su ecuación y viceversa. 	<ul style="list-style-type: none"> - Obtiene las magnitudes características de una onda a partir de su expresión matemática. - Escribe e interpreta la expresión matemática de una onda armónica transversal dadas sus magnitudes características. 	Obstáculo 11
<p>4.4. Interpretar la doble periodicidad de una onda a partir de su frecuencia y su número de onda. Mediante este criterio se valorará si el alumno o la alumna es capaz de:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Justificar, a partir de la ecuación, la periodicidad de una onda armónica con el tiempo y con la posición respecto del origen. 	<ul style="list-style-type: none"> - Dada la expresión matemática de una onda, justifica la doble periodicidad con respecto a la posición y el tiempo. 	Obstáculo 11
<p>4.5. Valorar las ondas como un medio de transporte de energía, pero no de masa. Mediante este criterio se valorará si el alumno o la alumna es capaz de:</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Relaciona la energía mecánica de una onda con su amplitud. - Calcula la intensidad de una onda a cierta 	Obstáculo 11

<ul style="list-style-type: none"> - Reconocer que una de las características más sobresalientes y útiles del movimiento ondulatorio es que las ondas transportan energía de un punto a otro sin que exista transporte de masa. - Deducir la relación de la energía transferida por una onda con su frecuencia y amplitud. - Deducir la dependencia de la intensidad de una onda en un punto con la distancia al foco emisor para el caso de ondas esféricas (como el sonido) realizando balances de energía en un medio isótropo y homogéneo y aplicar los resultados a la resolución de ejercicios. - Discutir si los resultados obtenidos para ondas esféricas son aplicables al caso de ondas planas y relacionarlo con el comportamiento observado en el láser. 	<p>distancia del foco emisor, empleando la ecuación que relaciona ambas magnitudes.</p>
<p>4.6. Utilizar el Principio de Huygens para comprender e interpretar la propagación de las ondas y los fenómenos ondulatorios. Mediante este criterio se valorará si el alumno o la alumna es capaz de:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Visualizar gráficamente la propagación de las ondas mediante frentes de onda y explicar el fenómeno empleando el principio de Huygens. 	<ul style="list-style-type: none"> - Explica la propagación de las ondas utilizando el Principio Huygens. <p style="text-align: right;">Obstáculos 11 y 14</p>
<p>4.7. Reconocer la difracción y las interferencias como fenómenos propios del movimiento ondulatorio. Mediante este criterio se valorará si el alumno o la alumna es capaz de:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Reconocer la difracción y las interferencias como fenómenos característicos de las ondas y que las partículas no experimentan. - Explicar los fenómenos de interferencia y la difracción a partir del Principio de Huygens. 	<ul style="list-style-type: none"> - Interpreta los fenómenos de interferencia y la difracción a partir del Principio de Huygens. <p style="text-align: right;">Obstáculos 9, 11 y 12</p>
<p>4.8. Emplear las leyes de Snell para explicar los fenómenos de reflexión y refracción. Mediante este criterio se valorará si el alumno o la alumna es capaz de:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Enunciar la ley de Snell en términos de las velocidades de las ondas en cada uno de los medios. - Definir el concepto de índice de refracción e interpretar la refracción como una consecuencia de la modificación en la velocidad de propagación de la luz al cambiar de medio. - Aplicar las leyes de la reflexión y de la refracción en diferentes situaciones (trayectoria de la luz a su paso por un prisma, reflexión total) y para resolver ejercicios numéricos sobre reflexión y refracción, incluido el cálculo del ángulo límite. - Reconocer la dependencia del índice de refracción de un medio con la frecuencia y justificar el fenómeno de la dispersión. 	<ul style="list-style-type: none"> - Experimenta y justifica, aplicando la ley de Snell, el comportamiento de la luz al cambiar de medio, conocidos los índices de refracción. <p style="text-align: right;">Obstáculos 9 y 11</p>

<p>4.9. Relacionar los índices de refracción de dos materiales con el caso concreto de reflexión total. Mediante este criterio se valorará si el alumno o la alumna es capaz de:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Justificar cualitativa y cuantitativamente la reflexión total interna e identificar la transmisión de información por fibra óptica como una aplicación de este fenómeno. - Determinar experimentalmente el índice de refracción de un vidrio. 	<ul style="list-style-type: none"> - Obtiene el coeficiente de refracción de un medio a partir del ángulo formado por la onda reflejada y refractada. - Considera el fenómeno de reflexión total como el principio físico subyacente a la propagación de la luz en las fibras ópticas y su relevancia en las telecomunicaciones. <p style="text-align: right;">Obstáculos 9 y 11</p>
<p>4.14. Establecer las propiedades de la radiación electromagnética como consecuencia de la unificación de la electricidad, el magnetismo y la óptica en una única teoría. Mediante este criterio se valorará si el alumno o la alumna es capaz de:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Identificar las ondas electromagnéticas como la propagación de campos eléctricos y magnéticos perpendiculares. - Reconocer las características de una onda electromagnética polarizada y explicar gráficamente el mecanismo de actuación de los materiales polarizadores. - Relacionar la velocidad de la luz con las constantes eléctrica y magnética. 	<ul style="list-style-type: none"> - Representa esquemáticamente la propagación de una onda electromagnética incluyendo los vectores del campo eléctrico y magnético. - Interpreta una representación gráfica de la propagación de una onda electromagnética en términos de los campos eléctrico y magnético y de su polarización. <p style="text-align: right;">Obstáculos 9, 11 y 15</p>
<p>4.15. Comprender las características y propiedades de las ondas electromagnéticas, como su longitud de onda, polarización o energía, en fenómenos de la vida cotidiana. Mediante este criterio se valorará si el alumno o la alumna es capaz de:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Determinar experimentalmente la polarización de las ondas electromagnéticas a partir de experiencias sencillas. - Identificar las ondas electromagnéticas que nos rodean y valorar sus efectos en función de su longitud de onda y energía. 	<ul style="list-style-type: none"> - Determina experimentalmente la polarización de las ondas electromagnéticas a partir de experiencias sencillas utilizando objetos empleados en la vida cotidiana. - Clasifica casos concretos de ondas electromagnéticas presentes en la vida cotidiana en función de su longitud de onda y su energía. <p style="text-align: right;">Obstáculo 10, 11 y 15</p>
<p>4.16. Identificar el color de los cuerpos como la interacción de la luz con los mismos. Mediante este criterio se valorará si el alumno o la alumna es capaz de:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Relacionar la visión de colores con la frecuencia. - Explicar por qué y cómo se perciben los colores de los objetos. 	<ul style="list-style-type: none"> - Justifica el color de un objeto en función de la luz absorbida y reflejada. <p style="text-align: right;">Obstáculos 9, 10, 12 y 15</p>

4.17. Reconocer los fenómenos ondulatorios estudiados en fenómenos relacionados con la luz.

Mediante este criterio se valorará si el alumno o la alumna es capaz de:

- Conocer el debate histórico sobre la naturaleza de la luz y el triunfo del modelo ondulatorio e indicar razones a favor y en contra del modelo corpuscular.
- - Explicar fenómenos cotidianos (los espejismos, el arco iris, el color azul del cielo, los patrones en forma de estrella que se obtienen en algunas fotografías de fuentes de luz, entre otros) como efectos de la reflexión, difracción e interferencia.
- Analiza los efectos de refracción, difracción e interferencia en casos prácticos sencillos.

Obstáculos 9, 10, 11, 12 y 15

4.18. Determinar las principales características de la radiación a partir de su situación en el espectro electromagnético.

Mediante este criterio se valorará si el alumno o la alumna es capaz de:

- Describir el espectro electromagnético, ordenando los rangos en función de la frecuencia, particularmente el infrarrojo, el espectro visible y el ultravioleta, identificando la longitud de onda asociada al rango visible (alrededor de 500 nm).
- Evaluar la relación entre la energía transferida por una onda y su situación en el espectro electromagnético.
- Establece la naturaleza y características de una onda electromagnética dada su situación en el espectro.
- Relaciona la energía de una onda electromagnética con su frecuencia, longitud de onda y la velocidad de la luz en el vacío.

Obstáculos 9, 10, 11, 13 y 15

4.19. Conocer las aplicaciones de las ondas electromagnéticas del espectro no visible.

Mediante este criterio se valorará si el alumno o la alumna es capaz de:

- Reconocer y justificar en sus aspectos más básicos las aplicaciones tecnológicas de diferentes tipos de radiaciones.
- Analizar los efectos de las radiaciones sobre la vida en la Tierra (efectos de los rayos UVA sobre la salud y la protección que brinda la capa de ozono).
- Explicar cómo se generan las ondas de la radiofrecuencia.
- Reconoce aplicaciones tecnológicas de diferentes tipos de radiaciones, principalmente infrarroja, ultravioleta y microondas.
- Analiza el efecto de los diferentes tipos de radiación sobre la biosfera en general, y sobre la vida humana en particular.
- Diseña un circuito eléctrico sencillo capaz de generar ondas electromagnéticas, formado por un generador, una bobina y un condensador, describiendo su funcionamiento.

Obstáculos 9, 10, 11, 12, 13 y 15

4.20. Reconocer que la información se transmite mediante ondas, a través de diferentes soportes.

Mediante este criterio se valorará si el alumno o la alumna es capaz de:

- Explica esquemáticamente el funcionamiento de dispositivos de almacenamiento y

Obstáculos 9, 10, 11, 13 y 15

- Reconocer la importancia de las ondas electromagnéticas en las telecomunicaciones (radio, telefonía móvil, etc.).
- Identificar distintos soportes o medios de transmisión (los sistemas de comunicación inalámbricos o la fibra óptica y los cables coaxiales, entre otros) y explicar de forma esquemática su funcionamiento.

transmisión de la información.

Bloque 5. Óptica Geométrica

Se trabajarán todos los contenidos de este bloque, estos son:

- Leyes de la óptica geométrica.
- Sistemas ópticos: lentes y espejos.
- El ojo humano. Defectos visuales.
- Aplicaciones tecnológicas: instrumentos ópticos y la fibra óptica.

CRITERIOS DE EVALUACIÓN e INDICADORES	ESTÁNDARES DE APRENDIZAJE EVALUABLES	OBSTÁCULOS ENCONTRADOS
<p>1. Formular e interpretar las leyes de la óptica geométrica.</p> <p>Mediante este criterio se valorará si el alumno o la alumna es capaz de:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Describir los fenómenos luminosos aplicando el concepto de rayo. - Explicar en qué consiste la aproximación paraxial. - Plantear gráficamente la formación de imágenes en el dioptrio plano y en el dioptrio esférico. - Aplicar la ecuación del dioptrio plano para justificar fenómenos como la diferencia entre profundidad real y aparente y efectuar cálculos numéricos. 	<p>1.1. Explica procesos cotidianos a través de las leyes de la óptica geométrica.</p>	<p>Obstáculos 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 y 9</p>
<p>2. Valorar los diagramas de rayos luminosos y las ecuaciones asociadas como medio que permite predecir las características de las imágenes formadas en sistemas ópticos.</p> <p>Mediante este criterio se valorará si el alumno o la alumna es capaz de:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Definir los conceptos asociados a la óptica geométrica: objeto, imagen focos, aumento lateral, potencia de una lente. - Explicar la formación de imágenes en espejos y lentes delgadas trazando correctamente el esquema de rayos correspondiente e indicando las características de las imágenes obtenidas. - Obtener resultados cuantitativos utilizando las ecuaciones correspondientes o las relaciones geométricas de triángulos semejantes. - Realizar un experimento para demostrar la propagación rectilínea de la luz mediante un juego de prismas. 	<p>2.1. Demuestra experimental y gráficamente la propagación rectilínea de la luz mediante un juego de prismas que conduzcan un haz de luz desde el emisor hasta una pantalla.</p> <p>2.2. Obtiene el tamaño, posición y naturaleza de la imagen de un objeto producida por un espejo plano y una lente delgada realizando el trazado de rayos y aplicando las ecuaciones correspondientes.</p>	<p>Obstáculos 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 y 9</p>
<p>3. Conocer el funcionamiento óptico del ojo humano y sus defectos y comprender el</p>	<p>3.1. Justifica los principales defectos</p>	<p>Obstáculos 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 y 9</p>

<p>efecto de las lentes en la corrección de dichos efectos. Mediante este criterio se valorará si el alumno o la alumna es capaz de:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Describir el funcionamiento óptico del ojo humano. - Explicar los defectos más relevantes de la visión utilizando diagramas de rayos y justificar el modo de corregirlos. 	<p>ópticos del ojo humano: miopía, hipermetropía, presbicia y astigmatismo, empleando para ello un diagrama de rayos.</p>
<p>4. Aplicar las leyes de las lentes delgadas y espejos planos al estudio de los instrumentos ópticos. Mediante este criterio se valorará si el alumno o la alumna es capaz de:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Explicar el funcionamiento de algunos instrumentos ópticos (lupa, microscopio, telescopio y cámara fotográfica) utilizando sistemáticamente los diagramas de rayos para obtener gráficamente las imágenes. 	<p>4.1. Establece el tipo y disposición de los elementos empleados en los principales instrumentos ópticos, tales como lupa, microscopio, telescopio y cámara fotográfica, realizando el correspondiente trazado de rayos.</p> <p>4.2. Analiza las aplicaciones de la lupa, microscopio, telescopio y cámara fotográfica considerando las variaciones que experimenta la imagen respecto al objeto.</p>

Obstáculos 3, 4, 5, 7, 8 y 9

Fuente: Elaboración propia

Consideramos que es necesario que los docentes tengan muy presentes dichas dificultades en la enseñanza de la Física en el Bachillerato, a fin de lograr que sus estudiantes logren una comprensión satisfactoria de la óptica. Para que, además, estos se sientan sujetos activos durante todo el proceso, consideramos necesario plantear el aprendizaje de dichos contenidos mediante un modelo didáctico basado en el aprendizaje por resolución de problemas o en el aprendizaje por proyectos (Trujillo, 2015; Larmer y Mergendoller, 2010).

Por todo lo expuesto a lo largo de esta primera parte de este trabajo, y con la idea de poder superar las diferentes dificultades que presentan los estudiantes de Bachillerato en el estudio y en la comprensión de la óptica, creemos que es necesario desarrollar metodologías alternativas que nos permitan superar el desinterés del alumnado y avanzar hacia una enseñanza más contextualizada y participativa.

PARTE II: DESARROLLO DEL ESTUDIO

CAPÍTULO 5. OBJETIVOS DEL ESTUDIO

La revisión del estado de la cuestión nos ha permitido reconocer varios puntos de interés sobre los que hemos centrado nuestra investigación. De esta revisión nos surgen los siguientes interrogantes: ¿cómo es posible mejorar la enseñanza de la óptica en el Bachillerato?; ¿realmente presentan los docentes, estudiantes y libros de texto conceptos alternativos implícitos?, ¿una metodología basada en la resolución de problemas (enseñanza problematizada por investigación orientada) ayudará a mejorar la comprensión de la óptica por parte del alumnado?

Para dar respuesta a estos interrogantes, los objetivos empíricamente comprobables que nos planteamos son los siguientes:

1. Indagar acerca de los procesos de construcción del aprendizaje de la óptica del alumnado de segundo de Bachillerato.

- 1.1 Identificar los obstáculos del alumnado en el aprendizaje de la óptica.
- 1.2 Analizar la relación entre dichos obstáculos y el currículo actual.

2. Analizar y reflexionar sobre el tratamiento que realizan los libros de texto de esta etapa educativa de los contenidos relativos a la óptica.

- 2.1 Comprobar si los libros de texto utilizan la historia de la ciencia para estructurar el tema de la óptica.
- 2.2 Indagar acerca de si los libros de texto contemplan los obstáculos que puede encontrar el alumnado en el aprendizaje de este tema.
- 2.3 Profundizar acerca de cómo es tratado el tema de la óptica en los libros de texto a lo largo del tiempo a fin de constatar si se produce o no una revisión del conocimiento curricular.

3. Conocer cómo los profesores de Física y Química de 2º de Bachillerato trabajan el tema de la óptica en sus clases. Concretamente se busca:

- 3.1 Conocer si los docentes plantean la enseñanza de la óptica como ciencia de la visión o introducen las leyes de la óptica de manera empirista.

- 3.2 Determinar si los profesores utilizan la historia de la ciencia para estructurar el tema de óptica, estableciendo las ideas clave para comprender el proceso de visión y posteriormente averiguar la naturaleza de la luz.
- 3.3 Averiguar qué tratamiento hacen los profesores de los obstáculos que dificultan la comprensión de la óptica.
- 3.4 Ahondar en la valoración que hacen los profesores de los aprendizajes de sus estudiantes sobre la óptica
- 3.5 Indagar acerca de la valoración que los profesores hacen de su didáctica habitual, comparándola con una enseñanza problematizada.

4. Formular una secuencia metodológica para la enseñanza de la óptica en el Bachillerato que favorezca un aprendizaje significativo de este tema.

- 4.1 Diseñar y experimentar una Unidad Didáctica sobre la óptica basada en un modelo de enseñanza problematizada.
- 4.2 Analizar y reflexionar sobre si se ha producido una mejora en la comprensión de la óptica.

A continuación, presentamos la Tabla 5.1., en la que se muestra la relación entre los interrogantes a los que queremos dar respuesta, los objetivos de nuestra investigación y las acciones que hemos llevado a cabo para responder dichos interrogantes.

Tabla 5.1. Relación entre los interrogantes a los que queremos dar respuesta, los objetivos de nuestra investigación y las acciones que hemos llevado a cabo.

INTERROGANTE	OBJETIVO	ACCIONES
¿Cómo es posible mejorar la enseñanza de la óptica en el bachillerato?	Objetivo 1. Indagar acerca de los procesos de construcción del aprendizaje de la óptica del alumnado de segundo de Bachillerato	Revisión bibliográfica del corpus teórico
¿Realmente presentan los docentes, estudiantes y libros de texto concepciones alternativas implícitas?	Objetivo 2. Analizar y reflexionar sobre el tratamiento que realizan los libros de texto de esta etapa educativa de los contenidos relativos a la óptica.	Estudio de cómo los libros de texto tratan el tema de la óptica a lo largo del tiempo

<p>¿Cómo es posible mejorar la enseñanza de la óptica en el bachillerato?</p>	<p>Objetivo 3: Conocer cómo los profesores de Física y Química de 2º de Bachillerato trabajan el tema de la óptica en sus clases.</p>	<p>Diseño, aplicación y análisis de las respuestas a un cuestionario orientado a los profesores de Física y Química</p>
<p>¿Realmente presentan los docentes de Física y Química de 2º de Bachillerato concepciones alternativas implícitas?</p>		<p>Grupo de discusión con profesores de Física y Química</p>
<p>¿Una metodología activa (enseñanza basada en la resolución de problemas) ayudará a mejorar la comprensión de la óptica por parte del alumnado?</p>	<p>Objetivo 4. Formular una secuencia metodológica para la enseñanza de la óptica en el Bachillerato que favorezca un aprendizaje significativo de este tema.</p>	<p>Diseño y experimentación de una intervención educativa siguiendo una metodología de enseñanza problematizada Grupo de discusión con alumnos</p>

Fuente: Elaboración propia.

CAPÍTULO 6. METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN.

6.1 Perspectiva metodológica adoptada.

Una vez especificados los objetivos del estudio y los interrogantes que queremos responder, en el siguiente apartado exploramos la metodología de investigación. El diseño de investigación seguido en este trabajo se incluye dentro de una metodología de investigación no experimental (Arnal, Del Rincón y Latorre, 1994), en la que se ha optado por la complementariedad metodológica, al ser una tendencia que nos permite ampliar nuestra forma de pensar sobre temas tan complejos como suelen ser los educativos (Bisquerra, 2004). Dentro de esta integración metodológica se ha optado por lo que Bericat (1998) denomina estrategia de complementación, la cual nos ayuda a captar una parte diferente de la realidad. Es por ello por lo que las técnicas de recogida de información, acordes con los objetivos de investigación planteados, incorporan principios metodológicos propios de los modelos cuantitativos y cualitativos. Por tanto, podríamos definir nuestra investigación como cualitativa, pues buscamos concretar la problemática de la enseñanza de la óptica, pero también cuantitativa, pues en ciertas partes de la investigación también nos centramos en la cuantificación de aspectos medibles relacionados con nuestros objetivos de investigación.

Nuestra investigación surge del estudio exploratorio en la fase inicial, que se corresponde a un primer acercamiento de la realidad a estudiar, para posteriormente adentrarnos con mayor profundidad en la cuestión que nos ocupa. La investigación exploratoria constituye una primera aproximación al estudio de la óptica. Tal como plantean Toro y Parra (2010), las investigaciones exploratorias habitualmente anteceden a los estudios de tipo descriptivo, como va a ser nuestro caso. En este contexto, Hurtado (2010, p. 402) defiende que la fase o etapa exploratoria es útil para, entre otras cosas, aclarar conceptos, así como identificar sinergias e indicios que permitan ser aplicadas en investigaciones más profundas. También es interesante para aumentar la familiaridad del investigador con un conjunto de eventos que desea investigar posteriormente, por medio de un estudio más profundo y estructurado. En nuestra investigación, este estudio exploratorio nos ha permitido indagar sobre la enseñanza de la óptica mediante un exhaustivo estudio de la bibliografía y del marco legal relativo al Bachillerato. Esto nos ha permitido detectar, de

forma objetiva, distintos problemas en la enseñanza de la óptica, así como comprender su naturaleza.

Tras el estudio inicial exploratorio, adoptamos un estudio de tipo descriptivo que nos permita avanzar en el conocimiento acerca de la enseñanza de la óptica. Danhke (citado por Hernández, Fernández y Baptista, 2003), señala que “los estudios descriptivos buscan especificar las propiedades, las características y los perfiles importantes de personas, grupos, comunidades o cualquier otro fenómeno que se someta a un análisis” (p. 117). Por tanto, este enfoque nos permite medir la información recogida a través de diferentes técnicas para luego describir, analizar e interpretar sistemáticamente las características de nuestro objeto de estudio. En esta tesis, se describe la metodología de enseñanza que usan los docentes de Física cuando trabajan el tema de la óptica y también se analiza el tratamiento que los libros de texto hacen de este tema para terminar elaborando una propuesta metodológica sobre la enseñanza de la óptica en este nivel educativo.

Por otro lado, podríamos decir que nuestro planteamiento metodológico nos permite vincular investigación con innovación, lo que Brown y Collins (1992) llaman *design-based research* (investigación basada en el diseño). Este tipo de investigación se centra en el diseño y exploración de innovaciones educativas que contribuyan a una mejora de la naturaleza y comprensión del aprendizaje (Bell, 2004). Esta investigación tiene como finalidad la mejora del diseño realizado, así como la generación de pautas para la implementación de diseños educativos en situaciones con condiciones similares (Gros, 2007). En nuestro caso, tras los análisis exploratorios y descriptivos, diseñamos y experimentamos una propuesta metodológica basada en la resolución de problemas que implica un cambio en la enseñanza de la óptica. Para ello, se diseña una Unidad Didáctica de óptica que se implementa en un aula de 2º de Bachillerato en dos ocasiones a través de dos ciclos continuados de diseño, desarrollo, análisis y rediseño.

En la Tabla 6.1 se muestran los diferentes niveles metodológicos, con su objetivo, técnica e instrumento utilizado y las categorías y subcategorías de indagación.

Tabla 6.1. Etapas y niveles de investigación

Nivel	Objetivo	Técnica e instrumento	Categorías y subcategorías de indagación
EXPLORATORIO	Identificar los obstáculos conceptuales que pueden encontrar los alumnos en el aprendizaje de la óptica	<i>Análisis documental:</i> - Currículo oficial escolar. - Bibliografía	<i>Aprendizaje:</i> Conocer los obstáculos a las ideas que supusieron un avance en las teorías científicas para explicar la visión y la naturaleza de la luz <i>Construcción metodológica:</i> relación de dichos obstáculos con los conceptos alternativos de los estudiantes y con los elementos del currículo.
	Identificar los conceptos alternativos de los estudiantes en óptica		DESCRIPTIVO-INTERPRETATIVO
Identificar los errores que presentan los libros de texto y que pueden ser causa de los conceptos alternativos de los alumnos	<i>Análisis documental:</i> Estadillo análisis libros de texto	<i>Manejo de los contenidos:</i> formas de presentación de los contenidos utilizados por los docentes que no generan una adecuada comprensión.	
Identificar los errores conceptuales de los docentes, que pueden ser causa de los conceptos alternativos de los alumnos	Cuestionario	<i>Manejo de los contenidos:</i> formas de presentación de los contenidos utilizados por los docentes que no generan una adecuada comprensión.	
DESCRIPTIVO-INTERPRETATIVO	Conocer las prácticas de enseñanza-aprendizaje mediante los cuales los docentes seleccionados desarrollan sus clases de óptica	<i>Grupo de discusión:</i> Guion del grupo de discusión	<i>Experiencia docente:</i> trayectoria en la docencia. Formación específica. <i>Construcción metodológica:</i> estrategias didácticas; rol del docente y del estudiante en el aula; criterio, sentido y forma de evaluar; tendencias pedagógicas. <i>Representaciones:</i> perfil ideal de un docente, sentido de la docencia.
	Conocer la valoración de los estudiantes sobre la U.D. problematizada implantada en 2º de Bachillerato, en comparación con la enseñanza tradicional.	<i>Grupo de discusión:</i> Guion del grupo de discusión	<i>Construcción metodológica:</i> descripción del desarrollo de la clase; estrategias metodológicas utilizadas por el profesor; rol del docente y papel del estudiante en el proceso de enseñanza y aprendizaje; formas de evaluación. <i>Manejo de los contenidos:</i> formas de interacción docente-estudiante que generan comprensión. <i>Representaciones:</i> percepciones sobre los profesores, perfil de un docente. Aprendizaje a nivel académico y personal.

INTERVENCIÓN - INTERPRETACIÓN	Implementar la U.D. problematizada de óptica en 2º de Bachillerato.	<i>Observación participante:</i> Diario de campo.	Aplicar en el aula la U.D. problematizada. Escribir el Diario de Campo de la docente-investigadora.
	Analizar e interpretar la información	<i>Análisis de contenido</i>	<i>Revisar y organizar la información.</i> Lectura interpretativa de los resultados para establecer relaciones entre la metodología docente y la comprensión de la óptica.

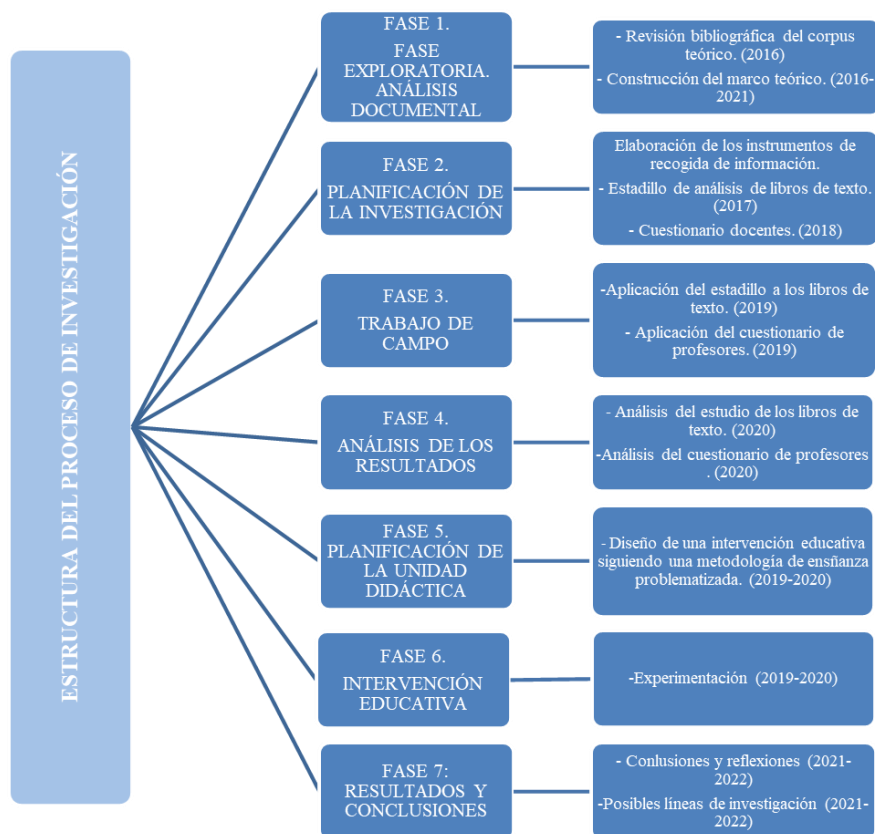
Fuente: Elaboración propia.

El proceso de investigación ha sido largo en el tiempo (durante más de 18 años), iniciándose esa fase exploratoria inicial en 2004 cuando obtuve el certificado-diploma de estudios avanzados de la Universidad de Alicante, en el programa de “*Investigación Educativa y Desarrollo del Currículo*” y continuado hasta la actualidad. A lo largo de estos años hemos hecho uso de los distintos aspectos metodológicos para poder cubrir todos los aspectos que considerábamos relevantes y conseguir plantear una investigación profunda y bien estructurada.

6.2. Fases de la investigación. El proceso metodológico.

De acuerdo con la estructura del proceso de investigación seguido, detallamos a continuación las fases en las que dividimos dicho proceso y que se recogen en la Ilustración 6.1.

Ilustración 6.1. Estructura del proceso de investigación.



Fuente: Elaboración propia

Veamos ahora cada una de estas fases con más detenimiento.

1ª fase: Exploratoria. En esta primera fase se realizó una revisión bibliográfica del corpus teórico relacionado con los objetivos de la investigación. Para ello, se retoma la investigación iniciada en 2004 y se actualiza la producción científica durante ese periodo, recurriendo a la bibliografía existente en bases de datos académicas. Por otro lado, en esta primera fase exploratoria se revisa el planteamiento que realiza el currículo de Bachillerato de la legislación educativa vigente, tanto a nivel nacional como regional, acerca del tema de la óptica. Esta primera fase nos ha permitido delimitar nuestro objeto de estudio, así como plantear el problema de investigación y la toma de decisiones de tipo metodológico.

2ª Fase. Planificación de la investigación. La segunda fase consistió en la formulación de nuestros objetivos de investigación y la selección del diseño de investigación. Durante esta fase se diseñan y elaboran los diferentes instrumentos de recogida de información y

se identifican tanto a las personas que pueden participar en la misma como el material que se va a analizar.

3ª Fase. Trabajo de campo. Recogida de información a través de los diferentes instrumentos diseñados: aplicación de cuestionarios a docentes, análisis de libros de texto y grupo de discusión de docentes.

4ª Fase. Analítica. Esta fase implica un análisis profundo de la información recogida a través de la identificación de categorías temáticas y la reducción de los datos.

5ª Fase. Planificación. En vista a los resultados obtenidos, se diseña una Unidad Didáctica sobre la óptica para solucionar las carencias detectadas en el análisis y servir de base a la observación en el aula.

6ª Fase. Intervención educativa. La Unidad Didáctica diseñada se puso en práctica en 2019 de manera experimental. En base a los resultados obtenidos en esa primera experimentación se realizan los ajustes oportunos y en 2020 se pone nuevamente en práctica. En ambas ocasiones se llevó a cabo el diario de campo de la docente y se realizó el grupo de discusión con los alumnos al finalizar su aplicación.

7ª Fase. Análisis y reflexión. Esta etapa ha estado marcada por el análisis de la intervención educativa y la reflexión en torno a toda la información obtenida a lo largo del proyecto. La integración de teoría, práctica y reflexión sitúa todo el proceso en la línea de la visión constructivista y el papel que juegan el sentido y el significado en la construcción del conocimiento (Cubero, 2005).

6.3 Instrumentos empleados en la recogida de información.

En una investigación es sumamente importante la elaboración de cada uno de los instrumentos de recogida de información, pues en gran medida los resultados obtenidos al aplicarlos estarán condicionados por la calidad de su diseño. En el contexto del tipo de investigación que proponemos, como ya se ha avanzado, se plantearon varias técnicas de recogida de información que nos permitan tener una visión general del tema objeto de estudio, poniéndose en práctica a lo largo del desarrollo de la investigación: el análisis documental, cuestionarios, grupos de discusión y la observación participante. En la Tabla 6.2 podemos ver un resumen de estas técnicas e instrumentos:

Tabla 6.2. Relación entre procedimientos de recogida de datos y fuentes de información.

Instrumento	Fuente de información	Finalidad
Análisis Documental	Legislación educativa	Fundamentar el proceso de investigación
	Material bibliográfico	
Análisis de contenido	13 libros de texto de Física de 2º de Bachillerato	Conocer cómo abordan los libros de texto la enseñanza de la Óptica
Cuestionario	45 docentes de Física de 2º de Bachillerato	Conocer cómo desarrollan los docentes la enseñanza de la Óptica
Grupo de Discusión	2 grupos con estudiantes de 2º de Bachillerato (2019 y 2020)	Opinión del alumnado al comparar la enseñanza tradicional con la Unidad Didáctica problematizada sobre Óptica
	1 grupo con profesorado de Física	Opinión de los docentes sobre la enseñanza de la Óptica
Observación participante – Diario de clase	Implementación de la Unidad Didáctica Diseñada (2019 y 2020)	Descripción y reflexión sobre la experiencia

Fuente: Elaboración propia.

A continuación, vamos a detenernos a describir con mayor detalle las características de cada uno de estos instrumentos y cómo se llevó a cabo la recogida de información.

6.3.1. Análisis documental: principales obras científicas referentes a la óptica, currículo de Bachillerato y bibliografía.

Entre los objetivos de nuestra investigación está el analizar la problemática conceptual de la enseñanza de la óptica, e indagar sobre la relación entre dicha problemática y el currículo actual. La revisión de la literatura supone estar al día del tema que se quiere investigar, pero, además, el análisis de documentos es “una fuente de gran utilidad para obtener información retrospectiva acerca de un fenómeno, situación o programa y, en ocasiones, la única fuente para acceder a una determinada información” (Del Rincón et al., 1995, p. 341). Por ello, se realizó una amplia, profunda y pertinente recopilación documental, que guio y orientó el análisis conceptual de la temática que aquí se investiga (técnica transversal a toda la investigación).

Hemos llevado cabo un análisis exhaustivo del currículo actual⁹, fijándonos en las posibles dificultades que los alumnos pueden encontrar para la superación de los estándares de aprendizaje establecidos. Para ello se han analizado pormenorizadamente la LOMCE (Ley Orgánica 8/2013, de 9 de diciembre, para la mejora de la calidad educativa), el Real Decreto 1105/2014 de 26 de diciembre, por el que se establece el currículo básico de la Educación Secundaria Obligatoria y del Bachillerato, y la Resolución de 4 de junio de 2018, de la Consejería de Educación y Cultura, por la que se regulan aspectos de la ordenación académica de las enseñanzas de la Educación Secundaria Obligatoria, del Boletín Oficial del Principado de Asturias (BOPA).

6.3.2. Análisis de contenido: libros de texto.

El análisis de contenido es una técnica que permite reducir y sistematizar cualquier tipo de información textual, visual o auditiva en datos objetivos y, a su vez, posibilita cuantificar los contenidos en categorías. Krippendorff (1990, p. 28), define el análisis de contenido como “la técnica destinada a formular, a partir de ciertos datos, inferencias reproducibles y válidas que puedan aplicarse a un contexto”. El interés de este tipo de análisis reside en la combinación de la observación de los datos y su interpretación. En este trabajo se ha recurrido al análisis de contenido para el estudio de las nociones relativas a la óptica presentes en trece libros de textos de Física de 2º de Bachillerato pertenecientes a 11 editoriales diferentes: 8 editados bajo las directrices de la LOE (Ley Orgánica 2/2006, de 3 de mayo, de Educación) y 5 manuales actualizados tras la LOMCE (Ley Orgánica 8/2013, de 9 de diciembre, para la mejora de la calidad educativa). La elección de los libros de texto obedece, por un lado, a la identificación de las editoriales de mayor difusión en el ámbito y, por otro, al conocimiento profundo de los mismos por parte de la autora de esta investigación que, a lo largo de estos años, ha ido alternando diferentes editoriales en el ejercicio de su práctica docente. En la Tabla 6.3 se recogen los datos de identificación de los libros de texto analizados.

⁹Ver apartado 3.1

Tabla 6.3. Muestra de libros de texto analizados de 2º curso de Bachillerato de Física

Ley Educativa	Editorial	Año de edición	ISBN	Código
LOE	ANAYA	2009	978-84-698-1287-7	LOE-AN
	CASALS	2009	978-84-218-4035-1	LOE-CA
	BRUÑO	2009	978-84-216-6449-0	LOE-BR
	ECIR	2003	978-84-9826-476-0	LOE-EC
	EDEBE	2009	978-84-2369-283-5	LOE-ED
	EVEREST	2009	978-84-2417-564-1	LOE-EV
	Mc GRAW HILL	2009	978-84-4817-027-1	LOE-MG
	VICENS VIVES	2009	978-84-6823-586-8	LOE-VI
LOMCE	EDELVIVES	2016	978-84-1400-342-8	LOM-ED
	Mc GRAW HILL	2016	978-84-486-0992-4	LOM-MG
	OXFORD	2016	978-01-905-0258-4	LOM-OX
	SANTILLANA	2016	978-84-680-2678-7	LOM-SA
	VICENS VIVES	2016	978-84-682-3586-8	LOM-VV

Fuente: Elaboración propia.

Para llevar a cabo el análisis de contenido de los libros de texto, se ha diseñado un estadillo (Anexo II) que se basa en la revisión bibliográfica y el estudio previo acerca de los obstáculos que dificultan la comprensión de la óptica, en base a los estándares de aprendizaje del currículo establecido por la LOMCE, y detallado en el Real Decreto 1105/2014, de 26 de diciembre. Como resultado de este estudio previo, se han diferenciado tres bloques de contenidos con un total de 25 indicadores de respuesta dicotómica que se recogen en una ficha de análisis en donde se señala la presencia o ausencia de estos en el manual analizado. La Tabla 6.4 recoge los indicadores analizados.

Tabla 6.4. Bloques e indicadores de análisis

BLOQUES	INDICADORES
BLOQUE I: ORGANIZACIÓN DEL ESTUDIO DE LA ÓPTICA	1.1. Se organiza como ciencia de la visión
	1.2. El tema se plantea de manera empirista
	1.3. Se explica la óptica geométrica en relación con la naturaleza ondulatoria de la luz
	1.4. Las leyes de la óptica geométrica se explican en relación con la visión
	1.5. Las leyes de la óptica ondulatoria se explican con relación a la naturaleza de la luz
	1.6. Considera la propagación rectilínea, la reflexión o refracción de la luz como hipótesis para explicar la visión
	1.7. Se plantea el estudio de la propagación rectilínea, la reflexión y la refracción de la luz de manera empirista
	1.8. Se plantean los límites de aplicación de la óptica geométrica para explicar la visión
BLOQUE II: TRATAMIENTO HISTÓRICO DEL TEMA	2.1. Se ofrecen lecturas históricas del tema
	2.2. A qué hacen referencia las lecturas históricas
	2.3. Se realiza una revisión histórica para plantear los

	problemas relacionados con el tema
	2.4. Se realiza una revisión histórica para plantear el índice del problema
	2.5. Se realiza una revisión histórica para sacar a la luz los grandes obstáculos que se han superado
BLOQUE III: ATENCIÓN A LOS OBSTÁCULOS QUE PUEDEN IMPEDIR LA COMPRENSIÓN DE LOS CONCEPTOS BÁSICOS	3.1 Trata a los objetos iluminados como conjuntos de puntos emisores de luz en todas las direcciones
	3.2. Explica correctamente el concepto de haz de luz
	3.3. Explica correctamente el concepto de rayo de luz
	3.4. Se señala expresamente que la luz no se ve
	3.5. Considera al ojo como parte del sistema óptico al mirar a: a) espejos planos y esféricos; b) un objeto sumergido en agua; y c) la imagen formada por lentes convergentes y divergentes
	3.6. Elabora un modelo simplificado de ojo (lente-pantalla) para introducir el concepto de imagen óptica
	3.7. Forma la imagen a partir de haces de luz emitidos por cada punto-objeto, al mirar: a) espejos planos y esféricos; b) un objeto sumergido en agua; y c) la imagen formada por lentes convergentes y divergentes
	3.8. Señala explícitamente la importancia del principio de Huygens-Fresnel para la aceptación del modelo ondulatorio
	3.9. Explica la producción de ondas electromagnéticas
	3.10. Narra el experimento de Hertz
	3.11. Introduce el concepto de campo como un mero medio de calcular la fuerza
	3.12. Llega el campo a adquirir verdadero significado físico que evita la acción a distancia convirtiéndola en una acción local entre la partícula y el campo existente en dicho punto

Fuente: Elaboración propia.

Basándonos en la idea de que los libros de texto deben ayudar a los estudiantes a lograr una comprensión razonada de las ideas claves de la materia (Roseman et al., 2001), se diseña el Bloque I para averiguar si los libros plantean el estudio de la óptica como la búsqueda de un modelo que explique la visión humana, tal y como sucedió históricamente. Este bloque está compuesto por 8 indicadores necesarios para detectar si la óptica se organiza como ciencia de la visión o de manera empirista; si las leyes de la óptica geométrica se explican en relación con la visión o como consecuencia de la naturaleza ondulatoria de la luz; y finalmente, si se plantean los límites de la óptica geométrica para explicar la visión. Este bloque se relaciona con el modelo de visión de Kepler (Kepler, 1604), según el cual la formación de imágenes se explicaría mediante el “haz de luz”, siendo los rayos solamente elementos direccionales sin entidad real. El modelo de Kepler es el modelo más sencillo con suficiente entidad para explicar la óptica geométrica en la ESO y también en Bachillerato. Por tanto, el concepto de “haz de luz” resulta clave para la comprensión de la óptica geométrica. Bajo este modelo, también nos encontramos con el concepto de “rayo”, también elemental para la comprensión del

mecanismo de la visión. Es por ello por lo que, en nuestro análisis, se ha tratado de identificar si los textos presentan la óptica como ciencia de la visión, con los conceptos de “haz de luz”, “rayo de luz” e “imagen óptica” como vertebradores del tema.

El Bloque II analiza el tratamiento histórico que hacen los textos de la óptica. En este caso se plantean 5 indicadores que han sido elaborados con la intención de mostrar si los textos tienen en cuenta la historia de la ciencia a la hora de estructurar el tema de la óptica, pues aun siendo los contextos epistemológicos y culturales diferentes e incomparables (Satiel y Viennot, 1985), conocer las dificultades que tuvieron que afrontar los científicos para la construcción del conocimiento, y los obstáculos epistemológicos involucrados, nos será de gran ayuda para detectar las dificultades que pueden encontrar los estudiantes en la asimilación de contenidos. Se ha decidido incluir este bloque puesto que como hemos planteado anteriormente en este trabajo, la explicación de cualquier fenómeno ha de buscarse en su propia génesis; en este sentido la enseñanza de la historia de la ciencia influye de manera positiva en las actitudes del alumnado hacia la ciencia, así como en su comprensión de las ideas científicas. Por ello, en esta investigación se busca comprobar si los libros de texto utilizan la historia de la ciencia para estructurar el tema de la óptica.

Finalmente, el Bloque III está compuesto por 12 indicadores, necesarios para estudiar si se tienen en cuenta los obstáculos que consideramos clave para comprender el modelo de visión de Kepler y el modelo ondulatorio de la luz. Como han evidenciado diferentes investigaciones, los libros de texto de ciencias presentan deficiencias que pueden suponer un obstáculo para el aprendizaje. Obtener información acerca de estos obstáculos permitirá generar oportunidades para que puedan ser trabajados en el aula con el alumnado a fin de superarlos. A través de este bloque pretendemos identificar si estos obstáculos están también presentes en los libros de texto de Bachillerato.

La ficha de análisis es validada a través de dos expertos del ámbito universitario procedentes de las dos áreas de conocimiento implicadas en el estudio: la física y la didáctica. Además, se ha realizado una prueba piloto con dos manuales a fin de mejorar el sistema de indicadores y poder garantizar un instrumento de recogida de información eficaz. En este proceso se comprobó que los tres Bloques abarcasen los aspectos fundamentales que los textos deberían atender para contribuir a un aprendizaje significativo de la óptica.

El proceso de análisis de los textos conlleva descomponer cada texto en unidades de información según los ítems de estudio, clasificarlos y tabularlos. En nuestro análisis se

indica la presencia o ausencia de los indicadores en los manuales. Para poder elegir si asignamos un “Sí” o un “No” a un ítem determinado, se identifica el contenido del texto para cada uno de los indicadores y se compara con la respuesta que consideramos adecuada según un modelo de enseñanza problematizada de la luz y la visión basado en el modelo de visión de Kepler y en el modelo ondulatorio de la naturaleza de la luz. Para ello, nos fundamentamos en estudios previos que han evidenciado la relevancia didáctica de dicho modelo en la Educación Secundaria Obligatoria (ESO) (Osuna, 2007), así como demostrado que su aplicación en el aula produce mejoras en los niveles de comprensión del modelo de visión de Kepler (Osuna, 2012). En análisis, nos centramos únicamente en los contenidos presentes en los libros de texto, postergando para otros análisis futuros la calidad didáctica de las imágenes y su relación con los mensajes textuales.

6.3.3. Cuestionarios a docentes.

El cuestionario constituye uno de los principales instrumentos de recogida de información en el campo de las Ciencias Sociales. Es una “técnica estructurada que permite la recogida rápida y abundante de información mediante una serie de preguntas orales o escritas que debe responder un entrevistado con respecto a una o más variables a medir” (Gómez, 2006; p.115). En nuestra investigación, la utilización del cuestionario nos permite obtener información estandarizada y garantizar la confidencialidad y el anonimato de los participantes (Macmillan y Schumacher, 2005). Por todo ello, se ha optado por diseñar un cuestionario (Anexo I) para evaluar los conocimientos sobre óptica de docentes en ejercicio, así como su conocimiento didáctico del tema a tratar. Hemos intentado que cada una de las preguntas que componen el cuestionario evalúe correctamente las categorías establecidas y recojan el pensamiento de los profesores de Física de la educación pública asturiana.

En el proceso de recogida de información llevado a cabo mediante los cuestionarios, distinguimos seis etapas diferenciadas:

1. *Identificación de la población objeto de estudio.* En este caso, el cuestionario se dirige a todos los profesores de la especialidad de Física en activo en los IES del Principado de Asturias.
2. *Diseño del cuestionario.* En base a los objetivos presentados, a la revisión de la literatura y a una reflexión y deliberación sobre el tema, se elaboró una primera versión del cuestionario en donde se recogían distintas variables y dimensiones que aparecían

consistentemente como indicadores de las valoraciones de los docentes en relación con la enseñanza de la óptica y los posibles obstáculos que puede encontrar el alumnado en su aprendizaje.

3. *Validación del instrumento.* La validación del instrumento se realizó mediante el procedimiento Inter jueces en torno a las categorías de pertinencia (en qué medida los ítems se circunscriben al objeto de estudio), univocidad (estimación de la manera en qué los ítems son comprendidos e interpretados en un mismo sentido) y claridad de los ítems del instrumento. Por otro lado, se aplicó una prueba piloto del cuestionario a 5 profesores de Física y Química en activo para valorar la pertinencia de los ítems en cada categoría y la claridad en la formulación y el uso del lenguaje que en él se presentaba. La opinión de los expertos (dos investigadores procedentes de las dos áreas de conocimiento implicadas en el estudio: la Física y la Didáctica) fue bastante positiva y todas sus recomendaciones se tomaron en cuenta para optimizar el instrumento. La fiabilidad del instrumento, analizada a partir del grado de consistencia interna alfa de Cronbach, muestra un valor general de 0.82, lo que confirma un nivel de consistencia interna adecuado (Cohen, Manion y Morrison, 2013).
4. *Cuestionarios definitivos:* Concluida la validación del instrumento, se realizan ciertas correcciones y se procede a la redacción definitiva del mismo, efectuando los cambios oportunos en función de las recomendaciones realizadas. Es en este momento del estudio cuando se le da un formato definitivo en base al medio de difusión (el correo electrónico) adquiriendo con ello un carácter de auto cumplimentación.
5. *Aplicación del cuestionario.* El procedimiento seguido consistió en el envío del cuestionario por correo electrónico a todos los Institutos de Educación Secundaria públicos de Asturias en el último trimestre del curso 2019-20. El mail iba acompañado de un mensaje explicando el sentido de la investigación y solicitando que se hiciera llegar al profesorado de la especialidad de Física del centro. En un segundo momento, se aprovechó una reunión preparatoria de las pruebas de acceso a la Universidad de la especialidad de Física, para solicitar la colaboración de los docentes de dicha especialidad. En este sentido, hemos de reconocer que las encuestas por Internet, cada vez más habituales, presentan una serie de características propias. Torrado (2004) señala algunas de unas ventajas como son que el encuestado tiene una mayor sensación de anonimato y se facilita el análisis posterior de la información. Sin embargo, también destaca algunas debilidades como son el mayor coste en la elaboración del cuestionario, y, sobre todo, una mayor “mortalidad muestral”.

6. *Análisis de los resultados:* Una vez finalizado el proceso de recogida de información, se prepararon los datos para ser importados al programa estadístico. Los datos se codificaron y analizaron con el programa estadístico SPSS v.22.0. El análisis de datos se inició con el cálculo de valores medios y de sus desviaciones típicas para proceder a los análisis descriptivos.

Tras esta reseña referida al proceso de recogida de información a través del cuestionario, parece oportuno hacer una breve descripción de las características principales de este instrumento. Como ya se ha comentado, para la realización de la investigación se elaboró ad hoc un cuestionario que combina preguntas dicotómicas (Sí/No) y una escala de valoración cerrada tipo Likert (0-3). El instrumento consta de tres dimensiones. La primera comprende 23 ítems de respuesta dicotómica acerca de cómo organiza el profesorado la enseñanza de este contenido. Esta dimensión se divide, a su vez, en tres bloques que permiten conocer cómo manejan los profesores las ideas clave de la óptica para comprender el proceso de visión, si tienen en consideración la historia de la ciencia para estructurar el estudio de la óptica y, por último, los posibles obstáculos en la enseñanza del tema. La segunda dimensión del cuestionario consta de seis bloques con un total de 24 ítems de respuestas dicotómicas y se centra en conocer la percepción que tienen los docentes del aprendizaje de su alumnado sobre este tema. Por último, la tercera dimensión recoge las valoraciones acerca de diferentes aspectos didácticos en relación con la enseñanza de la óptica. Esta tercera dimensión consta de tres bloques con 16 preguntas de escala tipo Likert (0-3).

A continuación, mostramos la Tabla 6.5 relacionando dimensiones y bloques del cuestionario de profesores.

Tabla 6.5. Dimensiones y bloques del cuestionario de investigación.

Dimensión	Bloques	Ítems
1. Enseñanza de la Óptica en 2º Bachillerato	I. Organización del estudio de la óptica	5
	II. Tratamiento histórico de la óptica	3
	III. Tratamiento de los obstáculos en la enseñanza de la óptica	15
2. Aprendizajes de los estudiantes sobre la Óptica	IV. ¿Disponen los alumnos de un esquema de representación geométrico de propagación de la luz, potencialmente explicativo?	5
	V. ¿Saben qué es una imagen óptica y cómo se forma en el modelo de Kepler?	5

	VI. ¿Conocen los elementos característicos de la lente delgada?	3
	VII. ¿Comprenden la naturaleza heterogénea de la luz blanca y la naturaleza del color?	5
	VIII. ¿Comprenden que la luz es de naturaleza ondulatoria?	3
	IX. ¿Comprenden que si la luz es de naturaleza ondulatoria presentará los fenómenos básicos de las ondas?	3
3. Valoración sobre la metodología en la enseñanza habitual de la Óptica	X. Importancia en la enseñanza habitual de la estructura problematizada	4
	XI. Importancia en la enseñanza habitual del tratamiento conceptual de la óptica	7
	XII. Importancia en la enseñanza habitual de la apropiación correcta de conceptos	5

Fuente: Elaboración propia.

6.3.4. Grupo de discusión con docentes

El grupo de discusión es una técnica de investigación que utiliza la entrevista grupal para recopilar información sobre el problema concreto de investigación. Se trata de una conversación, que ha sido diseñada con esmero, que debe tener lugar en un ambiente confortable, relajado y agradable. Los participantes responden a las preguntas que realiza el investigador, y discuten sobre ideas o comentarios que surgen en la propia discusión (Krueger, 1991). Rubio y Varas, definen el grupo de discusión como “una técnica de recogida de información, procedente de la metodología cualitativa en el ámbito de la investigación social que trata de captar la realidad social a partir del debate o la discusión en pequeños grupos” (Rubio y Varas; 1997, p. 35). Barbour (2013) resalta la participación entre los integrantes del grupo y su análisis posterior, siendo este efecto lo que le diferencia de una entrevista grupal (Pedraz 2014). Las entrevistas basadas en preguntas individuales a cada uno de los componentes, no se consideran grupos de discusión, pues el grupo de discusión lo caracteriza por la interacción dentro grupo y su análisis posterior. Mediante el grupo de discusión podemos comprender aspectos están mediados por la interacción entre los participantes a los que de otro modo no tendríamos acceso como investigadores (Morgan, 1998; Arboleda, 2008). En el grupo de discusión se pretende que la discusión surja a partir de la interacción entre los miembros en un ambiente abierto y relajado.

Ibáñez (1979), considerado por muchos como el promotor del grupo de discusión en España, plantea la primera expresión teórica completa de la investigación con grupos de

discusión, basando su estudio en el estructuralismo francés, en la antropología estructuralista de Lévi-Strauss (1908), y en el psicoanálisis con la articulación entre individuo y grupo. Dentro de esta visión del grupo de discusión, Callejo (2001) lo considera como una práctica de investigación, subrayando su función como método para conocer y no como una finalidad en sí misma. Galeano (2004) concibe el grupo de discusión como una estrategia de investigación interactiva, que puede llegar a convertirse en una importante técnica de investigación social, pues los grupos de discusión son técnicas de investigación que permiten flexibilidad en la intervención de los participantes, buscando favorecer el diálogo en lugar de buscar un consenso, que no tiene por qué producirse. El grupo de discusión debe ser homogéneo, condicionado por los objetivos de la investigación.

Para nuestra investigación, la riqueza de esta técnica se encuentra en el diálogo que se produce entre el grupo de profesores. La opinión que aporta cada docente puede transformar la de los demás, y éstos a su vez se ven influenciados por las aportaciones ajenas. Lo mismo sucede cuando llevamos a cabo el grupo de discusión entre alumnos. El debate que se origina en el grupo es un proceso en continuo cambio, pues las reflexiones de cada participante influyen y pueden llegar a transformar las del resto de participantes. En este sentido el grupo de discusión se concibe como una metodología práctica de investigación, y así es como lo utilizamos en nuestra investigación.

Los grupos de discusión, como el resto de las técnicas de investigación cualitativa, implican una planificación y sistematización previa a la recogida de información. Es una técnica flexible pues el profesor-investigador no dispone de una serie de pasos sistematizados a través de los cuales ponerla en práctica (Ortí, 1989). Krueger pretende avanzar en el conocimiento de este instrumento y de sus aplicaciones prácticas, destacando que los grupos de discusión utilizados como técnica de recogida de información en el ámbito de la investigación social “han sido de utilidad en las áreas de valoración de necesidades, desarrollo de proyectos, reclutamiento de nuevos participantes, estudios de los procesos de decisión de los compradores, mejora de programas de intervención ya en marcha y recogida de información para confeccionar cuestionarios estructurados” (Krueger, 1991, p. 52).

Para nuestra investigación el grupo de discusión es una técnica muy valiosa, pues consideramos que, gracias a su aplicación obtenemos información que posiblemente no

podríamos obtener con entrevistas individuales, cuestionarios u otras técnicas de recogida de datos.

El objetivo que pretendemos conseguir con nuestro grupo de discusión es la puesta en común de las opiniones de los docentes sobre la enseñanza de la óptica en 2º de Bachillerato. Queremos conocer cuáles son las principales dificultades a las que se enfrentan en la enseñanza de la óptica en dicho nivel; si estructuran la enseñanza de la óptica en base a la búsqueda de un modelo de visión y de un modelo sobre la naturaleza de la luz; qué metodología emplean en sus clases, y si tienen en cuenta los conceptos alternativos de los alumnos. Buscamos también recoger información cualitativa sobre percepciones, motivaciones, opiniones, actitudes, respecto a la enseñanza de la óptica. Para el desarrollo del grupo de discusión con docentes se han seguido las siguientes fases:

1. *Planteamiento de nuestro objetivo.* Nuestro objetivo es averiguar qué metodología didáctica siguen los docentes en la enseñanza de la óptica, qué dificultades encuentran en la enseñanza de la óptica, qué importancia conceden a ciertos conceptos considerados clave para la comprensión del modelo de visión de elaborado por Kepler, y también sobre el modelo ondulatorio de la luz.
2. *Selección de los participantes.* Los miembros del grupo de discusión conocen el tema a tratar pues llevan muchos años en la docencia de la asignatura de Física de 2º de Bachillerato. Se ha invitado a participar a un total de 4 profesores con destacada trayectoria profesional.
3. *Preparación del grupo de discusión.* Se ha llevado a cabo una profunda reflexión acerca de las preguntas que queremos que respondan los docentes del grupo de discusión. Para ello se ha realizado un guion abierto y flexible para ir planteando a lo largo de la sesión (Anexo XI), tomando como referencia las tres dimensiones contempladas en el cuestionario. Uno de los objetivos de este grupo es poder dar explicación a algunos datos cuantitativos recogidos a través del cuestionario. Se trata de un grupo de discusión abierto, en el que el profesor-investigador plantea una serie de preguntas, a partir de las cuales se inicia un debate entre los docentes.
4. *Organización del grupo.* Una vez constituido nuestro grupo, se prepara la reunión con los materiales necesarios. En nuestro caso se trata de un grupo de discusión online, en el que todos los participantes tienen acceso a la plataforma 365 y en concreto a la aplicación *Teams*.

5. *Desarrollo del grupo de discusión.* El grupo de discusión tuvo lugar el martes 1 de junio del año 2021. Al inicio de la sesión se solicita a los participantes su consentimiento para grabar la sesión online. Posteriormente, se comienza con la presentación del objetivo de nuestro proyecto y con la presentación del profesor-investigador que conducirá el grupo. Se explica el funcionamiento del grupo de discusión y las normas básicas de intervención y participación. El profesor-investigador va planteando los temas a partir de un guion establecido siguiendo un orden, de temas más generales a más específicos, y organizando la sesión por bloques temáticos, como es nuestro caso.
6. *Análisis de la información y elaboración de conclusiones.* Tras la sesión el profesor-investigador realiza una transcripción de la sesión grabada (transcripción completa en el Anexo XII), y analiza las respuestas de los docentes. Consideramos muy importante tener la grabación y la transcripción completa, pues incluso los silencios son muy importantes para un correcto análisis (Barbour, 2013). Tras la revisión de la transcripción, se realizó un análisis de la información a fin de poder relacionar los objetivos de la investigación con los resultados obtenidos en el grupo de discusión. A través de este análisis se seleccionaron los enunciados más representativos que daban respuesta a la propia investigación, así como a las dimensiones del estudio. La ventaja principal de un grupo de discusión es que ayuda a poner en común ideas y a compartir experiencias, información que difícilmente puede ser obtenida a través de los cuestionarios. La principal desventaja es que la organización puede ser complicada. Pueden surgir problemas, discusiones y quejas que el profesor-investigador no pueda controlar, no ha sido nuestro caso.

Basándonos en el objetivo 3 de investigación que nos habíamos planteado, “Conocer cómo los profesores de Física y Química de 2º de Bachillerato trabajan el tema de la óptica en sus clases”, establecimos las categorías de análisis, que nombramos a continuación:

- Principales dificultades que encuentran los docentes en la enseñanza de la óptica.
- Importancia que otorgan los docentes a los conocimientos previos de los alumnos que puedan interaccionar con el aprendizaje de la óptica.
- Actividades que realizan los docentes en el desarrollo del tema de óptica, para conocer si tratan la óptica como ciencia de la visión, o de manera empirista.

- Importancia que los docentes otorgan al principio de Huygens-Fresnel para explicar la óptica ondulatoria.
- Metodología que utilizan los docentes en la enseñanza de la óptica.
- Análisis que realiza el profesor acerca del aprendizaje de los alumnos.
- Posibles mejoras desde el punto de vista metodológico.

6.4. Instrumentos empleados para evaluar la intervención:

Como ya se ha comentado con anterioridad, tras el desarrollo de la investigación, y en vista de los resultados obtenidos, se diseña una Unidad Didáctica sobre óptica en base a una metodología constructivista que intente superar los obstáculos detectados. Se tiene la oportunidad de poner en práctica en dos ocasiones dicha Unidad Didáctica, lo que permite evaluarla también en dos ocasiones. En dicha evaluación se han empleado dos técnicas de recogida de datos: grupo de discusión con estudiantes y la observación participante de la docente responsable del grupo que queda registrada en un diario de campo. Veamos ahora las características de ambas técnicas.

6.4.1. Grupos de discusión con estudiantes.

El objetivo que queremos conseguir al plantear el grupo de discusión con los alumnos es la puesta en común de sus opiniones acerca de la Unidad Didáctica de óptica que hemos experimentado y la discusión por parte de los alumnos de sus ventajas o desventajas respecto de la enseñanza tradicional. Buscamos que los alumnos compartan las diferentes perspectivas que han ido adquiriendo a lo largo de su trabajo con la Unidad Didáctica, queremos conocer los puntos de vista comunes acerca de las actividades trabajadas, y su visión sobre si esta forma de trabajar es mejor o peor que la tradicional. Queremos también recoger información cualitativa sobre las percepciones, motivaciones, opiniones, y actitudes de los alumnos respecto a nuestra Unidad Didáctica de óptica. Como ya se ha comentado, se realizaron dos grupos de discusión con estudiantes a lo largo de nuestra investigación. Para llevar a cabo estos grupos de discusión se han seguido las siguientes fases:

1. *Planteamiento de nuestro objetivo.* En nuestro caso el objetivo es averiguar la opinión de los alumnos acerca de la nueva metodología que hemos usado en la Unidad Didáctica de óptica.

2. *Selección de los participantes.* Los participantes de nuestro grupo de discusión tanto en 2019 como en 2020 son todos los alumnos que cursan Física de 2º de Bachillerato del IES “Santa Bárbara” de Langreo (Asturias) en ese año concreto, con los que se ha trabajado durante todo el curso el currículo de Bachillerato de Física y con los que se ha desarrollado la Unidad Didáctica de óptica (en 2019 fueron 16 alumnos, y en 2020 15 alumnos).
3. *Preparación del grupo de discusión.* Hemos de reflexionar acerca de las preguntas que queremos que respondan los alumnos del grupo de discusión y de cómo llevarlas a cabo. En ambas ocasiones realizamos un guion de preguntas abierto y flexible (disponible en el Anexo V el guion del grupo de 2019 y en el Anexo IX el guion del grupo de discusión de 2020). El profesor-investigador plantea una serie de preguntas y, a partir de ellas, se inicia un debate entre los alumnos de nuestro grupo. En total, el guion en ambas ocasiones contempla 9 preguntas con las que buscamos que los alumnos puedan expresar su experiencia con esta metodología de trabajo.
4. *Organización del grupo.* Una vez constituido nuestro grupo, prepararemos la reunión con los materiales necesarios. En nuestro caso llevamos a cabo la reunión en ambos casos en nuestro aula-laboratorio, donde hemos desarrollado la Unidad Didáctica en las dos ocasiones, pues consideramos que hacerlo en un entorno agradable, en nuestro caso el aula, facilitará la interacción de los alumnos (Pedraz et al., 2014). En 2019 el grupo de discusión tiene lugar el viernes 29/03/2019, y en 2020 el grupo de discusión tiene lugar el viernes 06/03/2020, ambos en la hora habitual de clase.
5. *Desarrollo del grupo de discusión.* Al inicio de la sesión se solicita al alumnado su consentimiento para grabar el audio del grupo de discusión y favorecer así el análisis de la información generada en el mismo. Comenzamos con la presentación del objetivo de nuestro proyecto y con la presentación del profesor-investigador que conducirá el grupo. Se explica a los alumnos porqué les hemos invitado y qué es lo que esperamos de ellos, así como el funcionamiento de un grupo de discusión y las normas básicas de actuación. El profesor-investigador va planteando temas a partir de un guion establecido siguiendo un orden, de temas más generales a más específicos y organizando la sesión por bloques temáticos.
6. *Análisis de la información y elaboración de conclusiones.* Tras la sesión el profesor-investigador realiza una transcripción de la sesión grabada y analiza las respuestas de los alumnos. La transcripción del grupo de discusión del año 2019 se encuentra disponible en el Anexo VI, y la del grupo de discusión del año 2020 en el Anexo X.

En relación con el análisis de datos, seguimos algunas recomendaciones de Gibbs (2012) quien aconseja partir de una codificación descriptiva de la información para, posteriormente, crear una serie de códigos dotados de un carácter más analítico y descriptivo. Para realizar nuestro análisis comenzamos planteando una serie de posibles categorías a partir de las preguntas de investigación, de esta forma obtuvimos una lista de ideas temáticas clave que se fueron modificando según se analizaba toda la información.

Las categorías finales de nuestro análisis fueron establecidas basándonos en el objetivo 4.2. de nuestra investigación: Analizar y reflexionar sobre la mejora propiciada por nuestra propuesta didáctica, y serían las detalladas a continuación:

- Motivación en el aprendizaje de los contenidos de óptica.
- Comprensión de la lógica de las actividades que se iban realizando.
- Sensaciones que ha despertado en los alumnos este modo de trabajar.
- Obstáculos que han podido encontrar en el proceso de aprendizaje.
- Autoanálisis del aprendizaje por parte de los alumnos.

6.4.2. Observación participante. Diario de Campo.

El estudio de diarios de campo, como género de investigación, forma parte de la tradición de investigación en el aula, siendo un ejemplo de observación participante dentro del enfoque etnográfico (Long, 1980). Los estudios de diario son estudios de caso en primera persona, dentro del amplio campo de la investigación naturalista (Bailey, 1983). El procedimiento para la recogida de datos se basa en las anotaciones diarias del profesor. Tanto la recogida, como el análisis de los datos son considerados procesos cualitativos, sujetos a la reflexión e interpretación del investigador, en este caso de la docente. La característica fundamental del diario del profesor es que es introspectivo, es decir, el autor del diario estudia su propia enseñanza o su propio aprendizaje, utilizando la introspección y/o la retrospección. El análisis de las anotaciones puede hacerlo el mismo autor del diario o un investigador independiente que utiliza como datos el diario original o una versión pública del mismo (Bailey, 1983 y Bailey, 1990).

El diario del profesor es un recurso metodológico cuya utilización periódica permite reflejar el punto de vista del autor sobre los procesos más significativos de la dinámica en la que está inmerso. Es una guía para la reflexión sobre la práctica, favoreciendo la

toma de conciencia del profesor sobre su proceso de evolución y sobre sus modelos de referencia. Favorece, también, el establecimiento de conexiones significativas entre lo práctico y conocimiento disciplinar, lo que permite una toma de decisiones más fundamentada. A través del diario se pueden realizar focalizaciones sucesivas en la problemática que se aborda, sin perder las referencias al contexto. Por último, propicia también el desarrollo de los niveles descriptivos, analítico-explicativos y valorativos del proceso de investigación y reflexión del profesor (Porlán y Martín, 2000, p.23).

Creemos que el diario es un instrumento de gran ayuda en la formación del profesor, y puede ser un buen instrumento de autoevaluación. En este sentido, Bailey y Ochsner (1983) señalan cómo las anotaciones de los diarios del profesor muestran factores personales del docente incluyendo su estilo cognitivo, factores afectivos que puedan afectarle en la toma de decisiones, incluso las situaciones que le producen estrés. Van Lier (1988, 1990) también destaca la utilidad del uso del diario de campo en el estudio de los procesos de aprendizaje, pues en el diario de campo se describen los factores cognitivos y afectivos que afectan al aprendizaje.

Basándonos en Bailey y Ochsner (1983) y Bailey (1990) señalamos las características que definen el diario del campo de la docente-investigadora:

1. Ha sido un relato de nuestro proceso de enseñanza. Es retrospectivo y ha ayudado a la docente-investigadora a comprender los factores personales implicados en la experiencia.
2. Se ha llevado a cabo un registro sistemático de los acontecimientos, detalles y sensaciones de la experiencia de la docente-investigadora en el día a día de su práctica.
4. Se ha llevado a cabo la revisión del diario en busca de posibles patrones y acontecimientos significativos que puedan ser de ayuda para definir las cuestiones específicas de la investigación, y extraer los factores que muestren más implicación en el proceso de enseñanza-aprendizaje.
5. Se han identificado los factores más importantes en nuestra experiencia de enseñanza-aprendizaje, que serán interpretados y discutidos al final del estudio del diario.

El hecho de enfrentarnos en la práctica diaria a dilemas teóricos nos provoca cierto nivel de desacuerdo con el modelo didáctico previamente utilizado por la docente, lo que la anima a la docente-investigadora a asumir mayor riesgo teórico, provocando una evolución de su modelo didáctico.

Es entonces cuando la docente-investigador planifica, diseña y posteriormente evalúa su intervención en el aula. En nuestro caso tras el estudio del planteamiento que los libros de texto hacen de la enseñanza de la óptica, y tras el análisis de las opiniones de los docentes de Física asturianos, creemos necesario un cambio en el modo de enseñanza-aprendizaje de la óptica en el nivel de 2º de Bachillerato. Para ello, se diseña una Unidad Didáctica que consideramos mejorará la enseñanza de la óptica en este nivel. Utilizaremos el diario de campo como un instrumento de elaboración y síntesis de la información.

La docente-investigadora ha de analizar los conocimientos de los alumnos al principio del diario, durante el desarrollo de la unidad y al final de su implementación. Este análisis comparativo de los conocimientos de nuestros alumnos al principio y al final de la puesta en práctica de nuestra Unidad Didáctica nos ha aportado conocimiento sobre el proceso de aprendizaje real de los alumnos, y ha constituido también un informe evaluador para los propios alumnos. Se ha de combinar una descripción y análisis del contexto, con un registro más sistemático, estructurado y racional para describir los estados iniciales, intermedios y finales del conocimiento de los alumnos. Así mismo también se ha de llevar registro diario de la dinámica que se establece en el aula.

En el año 2019 pusimos en práctica la Unidad Didáctica (Anexo III), de la que también aportamos el diario de campo de la docente (Anexo IV). En esta primera ocasión elaboramos un diario de campo muy sencillo que nos sirvió para mejorar la temporalización y para ser más conscientes de nuestra práctica docente. No es un diario de campo perfectamente estructurado, sino más bien anotaciones y reflexiones que le surgen a la docente-investigadora durante el transcurso de la experiencia didáctica. Tras dicha experimentación, basándonos en las reflexiones de la docente-investigadora y en los comentarios de los alumnos, mejoramos la puesta en práctica de la Unidad Didáctica (Anexo VII), que volvimos a experimentar en el año 2020. En esta ocasión se ha recogido detalladamente la experiencia vivida durante la implantación de la Unidad Didáctica en dicho año, mejorando con la experiencia el proceso de toma de datos, de sensaciones de la docente, y de observación del comportamiento de los alumnos (Anexo VIII).

En esta segunda ocasión (2020), hemos tratado de describir pormenorizadamente los aspectos relativos a la organización del espacio y del material. Tratamos de que nuestro diario de clase refleje la realidad escolar en su complejidad, favoreciendo su tratamiento a través del análisis. En un primer momento formulamos una descripción de las tareas que llevan a cabo los alumnos reflejando los hechos que consideremos más significativos

desde el punto de vista psicosocial, progresivamente hemos tratado de conseguir un nivel de análisis de la problemática más profundo, determinando sus posibles causas, orígenes y consecuencias.

Hemos procurado evolucionar de las primeras descripciones que hacíamos, más generalistas, a una visión más analítica a medida que hemos categorizado y clasificando las situaciones recogidas. Al mismo tiempo que detectamos y reflejamos los problemas prácticos, hemos intentado solucionarlos en la medida que iban siendo trabajados.

Se ha comenzado a trabajar sobre la Unidad Didáctica en esta segunda ocasión el 29/01/2020 en el Aula B18, Laboratorio de Física, y se ha concluido el 06/03/2020. Un total de 21 sesiones de 55 minutos. En cada sesión se iba tomando nota de cada una de las actividades realizadas, que se pueden consultar en el (Anexo VIII).

Por lo que respecta al patrón de observación, en general, presenta la siguiente estructura:

Fecha
Aula
N.º Sesión
Grupo (número de alumnos/as asistentes a la sesión)
Aspectos observables:
1. Metodología y descripción, ¿qué hicimos?
2. Conceptos teóricos tratados en la sesión
3. Reflexión de la docente
4. Interpretación de la vivencia

6.5. Participantes en la investigación.

En los siguientes apartados se detallará el perfil de las personas que han colaborado en la investigación a través de las diferentes técnicas empleadas a lo largo de todo el proceso.

6.5.1. Docentes participantes en el cuestionario

Para la caracterización de este colectivo, se han utilizado las variables incluidas en el primer bloque del cuestionario, lo cual ha permitido obtener datos ponderados sobre sus características, siendo las variables de identificación de los sujetos: sexo, edad, años de experiencia docente y localidad. En Asturias hay 72 Institutos de Educación Secundaria (IES) públicos, en cada uno de ellos uno de los profesores del centro imparte la asignatura

de Física en 2º de Bachillerato. En centros muy grandes ocasionalmente dos. Así que estimamos que hay aproximadamente 80 docentes de Física en esta comunidad. El profesorado de esta especialidad es mayoritariamente Licenciado en Ciencias Químicas, existiendo también docentes Licenciados en Ciencias Físicas, pero en mucha menor proporción. La muestra objeto de estudio, no probabilística y por conveniencia, está compuesta por 45 docentes en activo de la especialidad de Física y Química del cuerpo de profesores en Educación Secundaria del Principado de Asturias. De estos 45 docentes, 21 son mujeres (46,6%) y 21 son hombres (46,6%), 3 personas no responden a esta cuestión. Los años de experiencia de los docentes impartiendo esta materia oscilan entre 1 y 39 años, siendo la media 18,45 años. Los docentes en el momento de realizar el cuestionario trabajan en localidades de toda Asturias.

6.5.2. Docentes participantes en el grupo de discusión

Con la finalidad de completar la visión general que tienen los docentes sobre la enseñanza de la óptica, se ha optado por la realización de un grupo de discusión. La elección de los integrantes de este grupo no responde a criterios estadísticos o probabilísticos, puesto que lo que interesaba era elegir personas que aportaran una opinión vivenciada y profunda acerca de la didáctica de la óptica. En total participan 4 docentes en activo de la especialidad de Física. Los criterios empleados para la selección de estos docentes son:

- Docentes que hayan impartido Física en 2º de Bachillerato al menos 5 años.
- Personas que hayan contestado al cuestionario de nuestra investigación previamente.
- Posibilidad de acceder a los participantes en el grupo de discusión.

En la Tabla 6.6 puede apreciarse un perfil de las personas que participan en el grupo de discusión.

Tabla 6.6. Rasgos característicos de los docentes que integran el grupo de discusión.

Docente - código	Años de experiencia docente	Experiencia en Física en 2º Bachillerato
D1	33	6 cursos
D2	20	8 cursos
D3	12	8 cursos
D4	17	5 cursos

Fuente: Elaboración propia.

El profesorado participante en el grupo de discusión tiene gran experiencia en la docencia con la materia de Física. Por ejemplo, la Docente 2 pertenece a la Real Sociedad Española de Física. El Docente 3 es preparador de oposiciones de secundaria de Física y Química. La Docente 1 ha participado con sus alumnos en numerosas ocasiones en las Olimpiadas de Física de Asturias, consiguiendo que alguno de sus alumnos ganara dicha Olimpiada y posteriormente la Olimpiada nacional.

6.5.3. Alumnado participante en la investigación.

Los alumnos participantes en la investigación pertenecen al IES Santa Bárbara, situado en el municipio de Langreo, un municipio de la cuenca minera central asturiana que por su ubicación e importancia demográfica (41.738 habitantes, datos del Padrón a 20-1-2016), se configura como la cabecera de la comarca conocida como Valle del Nalón. La superficie del concejo ocupa 82,46 km². La mayoría de su población reside en la ciudad de Langreo, que comprende los distritos urbanos de La Felguera, Sama, Ciaño, Lada, Riaño y Barros, y ocupa la vega del río Nalón. La restante se disemina por un conjunto de más de 200 entidades de población, que se reparten por el territorio rural, muchas en riesgo de despoblación. En cuanto a la situación demográfica, los datos correspondientes a Langreo siguen la tendencia negativa de nuestra Comunidad Autónoma. Según datos de 2014, su Tasa Bruta de Natalidad es de 5,6 por mil, y la de mortalidad de 14,02 por mil. Por lo tanto, el crecimiento vegetativo es negativo, a lo que se añade un saldo migratorio también negativo, lo que provoca pérdida continuada de población. La tasa de extranjeros es de 3,91%, inferior en 3 décimas a la media asturiana. En cuanto a la estructura por edades, el 10,68% es menor de 15 años, y el 23,02% es mayor de 64 años. El envejecimiento es, por tanto, altísimo. En cuanto a la procedencia de la población, casi la mitad nació fuera del concejo.

Como ya se ha comentado, se ha podido experimentar en dos ocasiones la Unidad Didáctica diseñada. En ambas ocasiones participan en la experimentación todos los alumnos que cursan Física del centro, todos ellos lo hacen por primera vez, y tienen un perfil intelectual alto. En la primera ocasión (en el 2019) son 16 los alumnos, de los cuales 7 son mujeres y 9 varones. En la segunda ocasión (2020), son 15 alumnos, de los cuales 5 son mujeres y 7 varones. (En el año 2020 uno de los alumnos tiene dictamen de altas capacidades).

6.6. Validez de la investigación.

Se considera que los resultados de una investigación son válidos cuando el estudio realizado está libre de errores. Para establecer si una investigación es válida, se ha de analizar la presencia de errores sistemáticos tanto en su diseño, como en la manera de registrar y evaluar las variables de estudio. La selección del diseño de la investigación debe ser adecuada al objetivo principal de la investigación. La validez de la investigación constituye un tema central tanto para la construcción del conocimiento científico, como en el ajuste de las propuestas de intervención, y en la toma de decisiones. Por tanto, a continuación, describimos los procedimientos que se han utilizado para contribuir a la validez de la investigación:

- Se han explicitado los instrumentos de recogida de información y su proceso de elaboración, así como la selección de los participantes en la misma.
- Al hablar de cada uno de los instrumentos empleados, se ha intentado describir los métodos de análisis utilizados para cada tipo de información (cuantitativa y cualitativa).
- Se ha especificado el contexto de la recogida de datos: cuándo, dónde y cómo se realizaron los grupos de discusión, se aplicaron los cuestionarios o se escribió el diario de campo.

Por otro lado, durante el desarrollo de la investigación se cruzaron distintas fuentes de información, técnicas y datos:

- *Triangulación de fuentes de información*: se recoge información de una gran diversidad de fuentes teóricas y empíricas y, a su vez, el trabajo de campo ha permitido obtener datos procedentes de varias fuentes (alumnado, profesorado y libros de texto).
- *Triangulación de técnicas*: cuestionarios, grupos de discusión y el análisis de contenido. En la descripción de cada una de estas técnicas, realizadas en el apartado anterior, ya se ha especificado el procedimiento seguido para la validación de los instrumentos empleados.

Al combinar múltiples visiones, métodos, teorías y materiales se pretende vencer los posibles sesgos derivados de un método único y una sola teoría.

CAPÍTULO 7: ANÁLISIS DE RESULTADOS.

7.1. Estudio de la práctica docente de los profesores de Física de 2º de Bachillerato de los IES del principado de Asturias.

En este apartado se presentan los resultados obtenidos tras el estudio de los datos aportados por el cuestionario a los docentes de Física, así como las aportaciones realizadas en el grupo de discusión.

7.1.1. Análisis cuestionario docentes.

La exposición de resultados se organiza en torno a las tres dimensiones que constituyen el instrumento de recogida de información. La primera de las dimensiones del instrumento pretende conocer cómo los docentes plantean el estudio de la óptica a su alumnado. La Tabla 7.1 presenta los valores descriptivos aportados por los docentes en los diferentes ítems de esta dimensión.

Tabla 7.1. Dimensión 1. Enseñanza de la Óptica en 2º Bachillerato

BLOQUE I: ORGANIZACIÓN DEL ESTUDIO DE LA OPTICA	Sí %	No%
1.1 ¿Organizas el estudio de la óptica como ciencia de la visión?	48,8	51,2
1.2 ¿Planteas la propagación rectilínea, la reflexión o refracción de la luz como hipótesis para explicar la visión?	62,8	37,2
1.3 ¿Planteas el estudio de la propagación rectilínea, la reflexión y la refracción de la luz de manera empirista como base para la óptica geométrica?	88,4	11,6
1.4. ¿Consideras necesario explicar las leyes de la óptica geométrica una vez averiguada la naturaleza ondulatoria de la luz?	88,4	11,6
1.5. ¿Planteas los límites de aplicación de la óptica geométrica para explicar la visión?	68,2	31,8
BLOQUE II. TRATAMIENTO HISTÓRICO DE LA OPTICA	Sí %	No%
2.1. ¿Ofreces lecturas a los estudiantes de las obras cumbre de la óptica?	2,2	97,8
2.2. En caso afirmativo, ¿Utilizas la revisión histórica para plantear los problemas relacionados con el tema?	24,4	6,2
2.3. En caso afirmativo, ¿Utilizas la revisión histórica para destacar los grandes obstáculos que se han superado?	24,4	
BLOQUE III. TRATAMIENTO DE LOS OBSTÁCULOS EN LA ENSEÑANZA DE LA ÓPTICA	Sí %	No%
3.1. ¿Consideras necesario tratar a los objetos iluminados como conjuntos de puntos emisores de luz en todas las direcciones?	55,6	44,4
3.2. ¿Consideras necesario explicar el concepto de haz de luz?	53	47
3.3. ¿Consideras necesario explicar el concepto de rayo de luz?	86	14

3.4. ¿Consideras necesario explicar expresamente que la luz no se ve?	25	75
3.5. ¿Consideras al ojo como parte del sistema óptico al mirar espejos, objetos sumergidos en agua e imágenes formadas por lentes convergentes?	56,8	43,2
3.6. ¿Consideras al ojo como parte del sistema óptico al mirar la imagen formada por lentes divergentes?	55,6	44,4
3.7. ¿Elaboras un modelo simplificado de ojo (lente-pantalla) para introducir el concepto de imagen óptica?	66,7	33,3
3.8. ¿Consideras necesario explicar que la imagen óptica se forma en la retina por concentración de haces de luz?	86,4	13,6
3.9. ¿Formas la imagen a partir de rayos de luz emitidos por cada punto-objeto?	29,5	70,5
3.10. ¿Formas la imagen a partir de haces de luz emitidos por cada punto-objeto?	29,5	70,5
3.11. ¿Consideras necesario explicar el principio de Huygens-Fresnel como clave para la aceptación del modelo ondulatorio de la luz?	86,7	13,3
3.12. ¿Consideras necesario explicar que la luz “blanca” es una mezcla de ondas de diferente frecuencia que en el vacío tienen la misma velocidad?	93,3	6,7
3.13. ¿Consideras necesario explicar que, las distintas frecuencias de las ondas lumínicas viajan a la misma velocidad en el vacío y a distinta velocidad en los medios transparentes?	79,1	20,9
3.14. ¿Consideras necesario explicar la producción de ondas electromagnéticas?	55,6	44,4
3.15. ¿Consideras necesario relacionar la sensación de color con la diferente respuesta de los fotorreceptores retinianos a la luz incidente?	35,6	64,4

Fuente: Elaboración propia.

Al analizar el Bloque I, se constata que la mitad de los docentes (51,2%) no consideran que la enseñanza de la óptica deba organizarse en torno a la visión, cuestión básica, a nuestro entender, para comprender la óptica, pues la experiencia directa no proporciona ninguna clave sobre el mecanismo de visión. Un 88,4% de los docentes basa su propuesta didáctica en una enseñanza empirista. Solamente el 11,6% de los profesores cuenta cómo explica a sus alumnos la óptica geométrica una vez averiguada la naturaleza ondulatoria de la luz. En relación con el Bloque II de esta dimensión, el 97,8% de los profesores no ofrecen lecturas de las obras cumbre de la óptica y, en todo caso, suelen proponer resúmenes de las teorías corpuscular y ondulatoria. Solamente el 24,4% de los profesores utiliza la revisión histórica para plantear los problemas relacionados con la óptica. Por último, el Bloque III nos muestra cómo el 44,4% de los profesores no considera necesario tratar a los objetos iluminados como conjuntos de puntos emisores de luz en todas las direcciones, lo cual implica que no podrán explicar correctamente la formación de los eclipses, las sombras, etc. Es imprescindible la consideración de una fuente extensa como conjunto de fuentes puntuales para poder formar correctamente la imagen. Por otro lado, un 46,7% de los profesores no considera necesario explicar el

concepto de “haz de luz”, algo fundamental para comprender la óptica geométrica y una de las mayores dificultades a las que se enfrentan los alumnos. Si no se explican correctamente conceptos como “haz de luz”, y se modeliza las fuentes extensas como conjunto de fuentes puntuales, los estudiantes no sabrán dibujar las zonas de sombra y penumbra de los objetos iluminados, pudiendo incluso confundirlas con un patrón de interferencia. Respecto a la definición del concepto de “rayo de luz”, básico en la óptica geométrica, solamente el 13% de profesores hace referencia en sus respuestas al hecho de que el rayo sea una construcción teórica. Alguna de las definiciones erróneas que proponen los profesores sobre “rayo de luz” son, por ejemplo: 1) *“Paso de la luz a través de una rendija”*, definición que da pie a que alumnos confundan el concepto de rayo de luz con los finos haces de luz que en ocasiones se ven alrededor de las fuentes primarias, como consecuencia de la dispersión de la luz por las partículas del aire. 2) *“Haz muy fino de luz que hubiese atravesado una rendija cuyas dimensiones no fueran comparables a la longitud de onda”*, definición imprecisa que da origen a confundir el concepto de rayo de luz con el de haz de luz.

Entre otros datos destacables, solamente el 40% de los profesores relatan cómo argumentan a sus alumnos el principio de Huygens-Fresnel, la base de la óptica ondulatoria. Se observa que ningún profesor resalta realmente la importancia que tuvo el principio de Huygens-Fresnel para la consolidación del modelo ondulatorio de la luz. Solamente el 55,6 % explica la producción de las ondas electromagnéticas y el dispositivo ideado por Hertz, pero solamente un 46,6 % de los profesores cuenta cómo explica a los alumnos la producción de ondas electromagnéticas. Muchas de estas respuestas hacen referencia al experimento de Hertz, pero sin puntualizar si verdaderamente lo llevan a cabo en el laboratorio o tan sólo lo mencionan. Por último, solamente el 35,6% considera necesario relacionar la sensación de color con la diferente respuesta de los fotorreceptores retinianos a la luz incidente, algo imprescindible para la comprensión de la sensación de color.

La segunda de las dimensiones de investigación indaga acerca de las percepciones que estos docentes tienen sobre el dominio de los contenidos de la óptica por parte del alumnado, tal como se exponer en la Tabla 7.2.

Tabla 7.2. Dimensión 2. Aprendizajes de los estudiantes sobre la Óptica en 2º Bachillerato

BLOQUE IV: ¿DISPONEN LOS ALUMNOS DE UN ESQUEMA DE REPRESENTACIÓN GEOMÉTRICO DE PROPAGACIÓN DE LA LUZ, POTENCIALMENTE EXPLICATIVO?	Sí %	No%
4.1. ¿Consideran los objetos que vemos son fuentes secundarias de luz?	53,3	46,7
4.2. ¿Consideran que la luz se propaga en línea recta?	97,5	2,5
4.3. ¿Consideran que la luz no es visible en sí misma?	44,2	55,8
4.4. ¿Consideran las fuentes extensas como conjuntos de fuentes puntuales?	55,6	44,4
4.5. ¿Representan la luz que sale de cada punto de la fuente luminosa mediante haces divergentes?	51,1	48,9
BLOQUE V: ¿SABEN QUÉ ES UNA IMAGEN ÓPTICA Y CÓMO SE FORMA EN EL MODELO DE KEPLER?	Sí %	No%
5.1. ¿Consideran el ojo como un sistema óptico formado por una lente convergente y una pantalla?	88,6	11,4
5.2. ¿Consideran que la imagen óptica se forma en la retina por concentración de haces de luz?	80	20
5.3. ¿Son conscientes de que, para ver bien los objetos cercanos, la lente del cristalino aumenta su curvatura (acomodación) con lo que los haces de luz acaban convergiendo y formando la imagen en esa misma pantalla (la retina)?	86,4	13,6
5.4. ¿Saben explicar que la imagen que se forma en un sistema lente convergente-pantalla es real e invertida?	93	7
5.5. ¿Son conscientes de que es necesaria la participación del cerebro, conectado con la retina por el nervio óptico, para interpretar la sensación que tenemos de la visión derecha de los objetos?	91,1	8,9
5.1. ¿Consideran el ojo como un sistema óptico formado por una lente convergente y una pantalla?	88,6	11,4
BLOQUE VI: ¿CONOCEN LOS ELEMENTOS CARACTERÍSTICOS DE LALENTE DELGADA?	Sí %	No%
6.1. ¿Manejan los elementos característicos del trazado geométrico de los haces que atraviesan la lente y que ayudan a localizar dónde situar la pantalla para ver la imagen: eje óptico, Foco objeto (F), ¿Foco imagen (F') y Centro óptico de la lente (C)?	97,7	2,3
6.2. ¿Manejan correctamente la ecuación de Gauss para las lentes delgadas $\frac{1}{s} + \frac{1}{s'} = \frac{1}{f}$?	93,3	6,7
6.3. ¿Manejan correctamente la ecuación $\beta = \frac{y'}{y} = -\frac{s'}{s}$?	93,3	6,7
BLOQUE VII: ¿COMPRENDEN LA NATURALEZA HETEROGÉNEA DE LA LUZ BLANCA Y LA NATURALEZA DEL COLOR?	Sí %	No%
7.1. ¿Comprenden que la luz “blanca” es una mezcla de ondas de diferente frecuencia?	97,8	2,2
7.2. ¿Comprenden que en el vacío dichas ondas diferentes tienen la misma velocidad?	97,6	2,4
7.3. ¿Comprenden que al interactuar con medios materiales cada una de las ondas que componen la luz blanca adquiere distinta velocidad?	84,4	15,6
7.4. ¿Creen que la luz se modifica al interactuar con los objetos?	55,6	44,4
7.5. ¿Relacionan la sensación de color con la diferente respuesta de los fotorreceptores retinianos a la luz incidente?	60	40
BLOQUE VIII: ¿COMPRENDEN QUE LA LUZ ES DE NATURALEZA ONDULATORIA?	Sí %	No%

8.1. ¿Saben que la luz se desplaza por el espacio a una velocidad finita?	95,6	4,4
8.2. ¿Son conscientes de que el carácter electromagnético de la luz “visible” hace innecesario un soporte material para su propagación?	86,7	13,3
8.3. ¿Son conscientes de que la luz no tiene carácter material?	88,6	11,4
BLOQUE IX: ¿COMPRENDEN QUE SI LA LUZ ES DE NATURALEZA ONDULATORIA PRESENTARÁ LOS FENÓMENOS BÁSICOS DE LAS ONDAS?	Sí %	No%
9.1. ¿Saben que con luces coherentes y orificios del orden de λ se producen fenómenos de difracción y de interferencias?	88,4	13,6
9.2. ¿Comprenden que las distintas frecuencias de las ondas lumínicas viajan a la misma velocidad en el vacío y a distinta velocidad en los medios transparentes (dispersión de la luz)?	93,2	6,8
9.3. ¿Utilizan el modelo ondulatorio correctamente para explicar fenómenos previamente explicados con el modelo geométrico?	68,2	31,8

Fuente: Elaboración propia.

Los ítems del Bloque IV indagan acerca de si, tras la enseñanza del tema, en opinión de los docentes, la mayoría de los estudiantes disponen de un esquema de representación geométrico de propagación de la luz potencialmente explicativo. Solamente el 44,2% de los profesores considera que, una vez explicado el tema, sus alumnos piensan que la luz no sea visible por sí misma. Esto contrasta con los datos del Ítem 3.4 donde veíamos que solamente el 25% de los profesores consideraba necesario explicar a sus alumnos que la luz no es visible por sí misma. Por su parte, los ítems del Bloque V pretenden indagar acerca de si los profesores creen que, una vez finalizado este tema, sus estudiantes saben qué es una imagen óptica y cómo se forma en el modelo de Kepler. En este sentido, el 88,6% cree que, una vez estudiado el tema, sus alumnos consideran al ojo como un sistema óptico formado por una lente convergente y una pantalla, es curioso cuando solamente un 33,3% de los profesores lo hace en sus explicaciones. Por su parte, el 80% cree que tras la enseñanza sus alumnos consideran que la imagen óptica se forma en la retina por concentración de haces de luz, cuando solamente el 29,5% de los profesores explica a sus alumnos cómo formar la imagen a partir de haces de luz emitidos por cada punto objeto. A través del Bloque VI, constatamos que la mayoría de los docentes perciben que sus estudiantes conocen los elementos característicos de la lente delgada una vez concluido el tema. Del Bloque VII destacamos que un 97,6% de los profesores considera que sus alumnos llegan a comprender que en el vacío las ondas de distinta frecuencia que componen la luz blanca se desplazan a la misma velocidad, aunque solamente el 79,1% consideraba necesario explicarlo. Por otro lado, el 60% de los profesores considera que los alumnos relacionan la sensación de color con la diferente respuesta de los fotorreceptores retinianos a la luz incidente, cuando solamente el 35,5%

de los profesores consideraba necesario explicarlo. El Bloque VIII indaga acerca de si tras la enseñanza los alumnos comprenden que la luz es de naturaleza ondulatoria, los datos aportados nos hacen pensar que esto es así. Por último, el Bloque IX trata de conocer si los profesores consideran que el alumnado consigue comprender que si la luz es de naturaleza ondulatoria presentará los fenómenos básicos de las ondas. Sobre esta cuestión, el 93,2% de los profesores consideran que tras la enseñanza sus alumnos comprenden que las distintas frecuencias de las ondas lumínicas viajan a la misma velocidad en el vacío y a distinta velocidad en los medios transparentes (dispersión de la luz), mientras que el porcentaje de docentes que considera necesario explicarlo era del 79,1 %, y solamente un 28,9% contaban en el cuestionario cómo lo hacían.

Nos gustaría enfatizar en el hecho de que, estos resultados sobre la percepción del aprendizaje que consiguen sus alumnos han de contemplarse desde las propias limitaciones de los profesores en la comprensión de los conceptos tratados.

Por último, la tercera dimensión del cuestionario se centra en cuestiones de tipo didáctico referidas a la exposición del tema de estudio en donde se solicita al profesorado que exprese el grado de importancia que otorga a las cuestiones que se le van planteando según la siguiente escala: 0= Nada Importante; 1= Poco importante; 2= Bastante Importante; 3=Muy importante. Los resultados globales se muestran en la Tabla 7.3.

Tabla 7.3. Dimensión 3. Valoración sobre la metodología en la enseñanza habitual de la Óptica en 2º Bachillerato. Basado en la realizada por Osuna 2007 para la ESO (valores porcentuales).

BLOQUE X: IMPORTANCIA EN LA ENSEÑANZA HABITUAL DE LA ESTRUCTURA PROBLEMATIZADA	0	1	2	3
	%	%	%	%
10.1. Dedicar al principio tiempo a plantear el interés que tiene tratar este tema.	2,3	9,1	54,5	34,1
10.2. Plantear la cuestión ¿cómo vemos? como problema estructurante, cuya solución supone la construcción de una teoría geométrica de la luz y la visión.	9,1	13,6	54,5	22,7
10.3. Plantear la cuestión ¿cuál es la naturaleza de la luz? como problema estructurante, cuya solución supone la construcción de una teoría ondulatoria sobre la naturaleza de la luz.	2,3	15,9	40,9	40,9
10.4. Organizar la enseñanza de este tema con una estructura problematizada (en la que los alumnos tengan que plantear hipótesis, responder preguntas cercanas a sus intereses), haciendo que el índice o secuencia de apartados sea una estrategia posible para avanzar en el problema planteado.	6,8	20,5	56,8	15,9
BLOQUE XI: TRATAMIENTO CONCEPTUAL DE LA ÓPTICA	0	1	2	3
11.1. Elaborar un sistema de representación geométrico idealizado de la luz.	0	9,1	52,3	38,6
11.2. Modelizar el ojo como un instrumento óptico formado por una lente y una pantalla con el que conceptualizar la imagen óptica.	2,3	2,3	54,5	40,9

11.3. Considerar la propagación rectilínea, la reflexión y la refracción como hipótesis formuladas para explicar la visión y no como consecuencias de una determinada concepción de la naturaleza de la luz.	4,7	27,9	44,2	23,3
11.4. Considerar la naturaleza electromagnética de la luz como hipótesis formulada para explicar sus características especiales y los fenómenos asociados a ella.	2,3	15,9	47,7	34,1
11.5. Considerar la naturaleza electromagnética y heterogénea de la luz blanca para explicar el color.	2,3	11,4	45,5	40,9
11.6. Considerar la necesidad de la implicación del cerebro en el proceso de visión	0	20,5	40,0	38,6
11.7. Desarrollar el tema en un contexto hipotético-deductivo, inventando un primer modelo de visión que debe ser puesto a prueba mediante su capacidad para explicar la visión indirecta, las anomalías visuales, el diseño de los instrumentos ópticos, etc.	6,8	40,9	43,2	9,1
BLOQUE XII: APROPIACIÓN CORRECTA DE CONCEPTOS	0	1	2	3
12.1. Existencia de oportunidades para expresar las ideas y someterlas a prueba.	2,4	7,1	69,0	21,4
12.2. Plantear metas claras de aprendizaje y prever posibles obstáculos para alcanzarlas	0	6,8	65,9	27,3
12.3. Favorecer formas de pensar cercanas al trabajo científico.	0	4,5	54,5	40,9
12.4. Evaluación con sentido, como recapitulación y reflexión sobre lo avanzado.	2,3	4,5	47,7	45,5
12.5. Hacer que alumnos y profesores vean más atractiva la enseñanza.	0	4,5	31,8	63,6

Fuente: Elaboración propia.

Los datos expuestos evidencian que los docentes valoran muy positivamente aspectos metodológicos que, como hemos constatado a través de otros ítems, no desarrollan en su práctica pedagógica. Así, vemos como un 88,6% considera importante (un 54,5% “bastante importante” y un 34,1% “muy importante”) plantear el interés del tema y un 77,2% (54,5% “bastante importante” y 22,7% “muy importante”) plantear la cuestión de “cómo” vemos (cómo se forma la imagen al interior del ojo humano) o la naturaleza de la luz como “problema estructurante”, aunque realmente no lo hace en sus clases. Por otro lado, un porcentaje elevado (90,9%) considera importante (52,3% “bastante importante” y 38,6% “muy importante”) que se elabore un sistema de representación geométrico idealizado de la luz, que se modelice el ojo como un instrumento óptico que consta de una lente y una pantalla con el que se puede explicar la formación de la imagen óptica. En menor medida (67,5%) los docentes creen que la propagación rectilínea, la refracción y la reflexión han de ser formuladas no como consecuencias de una determinada concepción de la naturaleza de la luz, si no como hipótesis para explicar la visión y (44,2% “bastante importante” y 23,3% “muy importante”). En esta línea, un 81,8% considera “bastante importante” (47,7%) o “muy importante” (34,1%) que la naturaleza electromagnética de la luz se formule como hipótesis para explicar sus características

especiales y fenómenos asociados a ella. Otro dato destacable es que un 93,2% (65,9% “bastante importante” y 27,3% “muy importante”) considera importante plantear metas concretas de aprendizaje así como prever posibles obstáculos que puedan encontrarse para alcanzarlas; un 90,4% cree importante dar la oportunidad al alumnado de expresar las ideas y someterlas a prueba (69,0% “bastante importante” y 21,4% “muy importante”); un 95,4% ve importante favorecer formas de pensar cercanas al trabajo científico (54,5% “bastante importante” y 40,9% “muy importante”); y un 93,2% ven importante evaluar con sentido como recapitulación y reflexión sobre lo avanzado (47,7% “bastante importante” y 45,5% “muy importante”).

Con el fin de comprender mejor el trabajo realizado por los docentes en el momento de explicar la óptica y, al mismo tiempo, de entender un poco mejor el alcance de los valores medios calculados para las respuestas presentadas en las Tablas anteriores, mostramos aquí la Tabla 7.4 en la que se establecen los valores medios y las correspondientes desviaciones estándar de los ítems que conforman la Dimensión 3 de nuestra encuesta.

Tabla 7.4. Dimensión 3. Media y Desviación estándar de los ítems.

Ítems	Mínimo	Máximo	Media	Desviación estándar
10.1.	0	3	2,20	0,701
10.2.	0	3	1,91	0,858
10.3.	0	3	2,20	0,795
10.4.	0	3	1,82	0,786
11.1.	1	3	2,30	0,632
11.2.	0	3	2,34	0,645
11.3.	0	3	1,86	0,833
11.4.	0	3	2,14	0,765
11.5.	0	3	2,25	0,751
11.6.	1	3	2,18	0,756
11.7.	0	3	1,55	0,761
12.1.	0	3	2,10	0,617
12.2.	1	3	2,20	0,553
12.3.	1	3	2,36	0,574
12.4.	0	3	2,36	0,685
12.5.	1	3	2,59	0,583

Fuente: Elaboración propia.

A partir del análisis de la Tabla 7.4 podemos obtener una simple “indicación” sobre la estabilidad de los resultados que se pueden extraer de nuestra muestra de estudio. Se puede observar que, en todos los casos, la desviación estándar es siempre menor que la unidad, que es la diferencia entre un valor y el sucesivo en la escala (cualitativa) de 0 a 3

aquí utilizada. Este resultado por lo menos nos indica que hasta en el caso peor de entre los presentados en la Tabla 7.4. – es decir: el que presenta una desviación estándar más grande: Ítem 10.2: $1,91 \pm 0,858$ – el valor más preferentemente escogido por los encuestados resulta suficientemente diferenciado de los demás en la escala. Si la desviación estándar resultase más grande o, más en general, mayor que la unidad, entonces tendríamos una superposición de opiniones, muy poco diferenciadas entre sí. Reiteramos que no es nada más que una simple indicación de una relativa estabilidad de los resultados que aquí se discuten.

7.1.2. Análisis del grupo de discusión de docentes

A continuación, vamos a analizar las respuestas de los docentes participantes en el grupo de discusión de acuerdo con las categorías establecidas para su análisis.

Preguntados los docentes por las principales dificultades que encuentran en la enseñanza de la óptica, encontramos que mayoritariamente refieren lagunas matemáticas de sus alumnos, abultado currículo, y excesiva presión debida a la prueba externa de acceso a la universidad:

Profesor 1: La principal dificultad es el currículo excesivamente extenso de 2° de Bachillerato. También coincide en el tiempo cuando los alumnos están más cansados, a final de curso, también hay un cierto grado de nerviosismo en los alumnos, y eso hace que sea difícil dar esta parte y la parte final de la Física.

Profesor 2: Una frustración absoluta no solo de la óptica sino también de otras partes de la Física, lo que dice el profesor 1, a mí eso me parece tremendo, son las matemáticas. A mí me crea una frustración muy grande la cantidad de tiempo que tenía que perder al explicar este tema, la cantidad de tiempo que tenía que perder con la trigonometría, brutal. Eso es muy grave.

Profesor 4: Veo dificultades sobre todo en el tema de ángulos complementarios, ángulos que son iguales, son cosas que les cuesta ver. He visto errores, incluso para trabajar con fracciones.

Profesor 2: Cuando ponían el objeto no sé cuántos milímetros, y la distancia no sé cuántos cm, bueno aquellos dibujos metían miedo. Era una cosa que no veías el objeto, y de repente una longitud que yo decía, este me lo va a sacar de aquí; y el alumno, pero profe que estoy haciéndolo con las medidas, y yo le decía, pero bueno hombre, vamos a ver chaval, hazlo un poco coherente, luego cómo sacas distancias, ángulos y demás.... terrible, terrible.

Profesor 4: Yo lo que he echado en falta como profesor, es quizá una disponibilidad de unos medios decentes experimentales, para hacerlo tangible. Quiero decir, no deja de ser muy abstracto.

Queríamos conocer si los docentes plantean la óptica como ciencia de la visión o introducen las leyes de la óptica de manera empirista, y encontramos en ellos una forma instrumentalista de tratar los conceptos clave, introduciendo las leyes de la óptica como meros formalismos matemáticos, algo que subraya las respuestas de los docentes al cuestionario:

Profesor 1: Previamente estudiamos el movimiento ondulatorio, y entonces en el movimiento ondulatorio estudiamos fenómenos que pueden sufrir las ondas, como son la reflexión, la refracción, la difracción, y entonces, partiendo de esa base que ya estudiamos en el movimiento ondulatorio, lo extendemos a la luz. Se plantea como yo os digo, la luz como una onda y que sufre los fenómenos propios de las ondas.

Profesor 2: Es que al final lo que tenemos que hacer es ponerles la fórmula, pero no demuestras de dónde sale.

Profesor 2: Y luego muchas de las fórmulas que utilizamos, que tampoco puedes demostrarles, porque tampoco tienen la base matemática para que se las demuestran, y se las pones como acto de fe.

Profesor 2: Es que al final lo que tenemos que hacer es ponerles la fórmula, pero no demuestras de dónde sale.

Profesor 2: Yo les dibujo la fórmula, y pin pon, pin pon hago los rayos.

Encontramos que los docentes participantes en el grupo de discusión ofrecen argumentaciones sin posibilidades de discusión, sin explicar los conflictos que supusieron los cambios de modelo, lo que traslada a los estudiantes una imagen de la ciencia como acumulación de conocimientos, en la que no se tienen en cuenta las dudas propias de todo proceso de descubrimiento científico, algo que concuerda con las respuestas analizadas en el cuestionario, y refuerza nuestro análisis previo.

Observamos un tratamiento empirista de la óptica por parte de los docentes participantes en el grupo de discusión, también en el uso de las prácticas de laboratorio, de acuerdo con nuestro análisis previo del cuestionario:

Profesor 4: Yo no soy capaz por la falta de material de laboratorio, o por mis destrezas, de que vean bien el rayo reflejado, refractado, un buen banco de óptica vamos, que haya para todos.

Profesor 1: Tengo que decir que justo después de dar los contenidos teóricos, y hacer los problemas de óptica, a continuación, hago la práctica obligatoria de EBAU que es la determinación del índice de refracción de un vidrio, y la verdad es que ellos me dicen que bien que lo vemos, que claridad. Les sirve para asentar los conocimientos teóricos. A mí me parece una práctica que es muy simple, muy fácil de hacer, pero que, a ellos les sirve muchísimo. Hacen una toma de datos sencillos, y después elaboran esos datos, trabajan con ellos,

elaboran la gráfica, pueden obtener de la gráfica el índice de refracción, de una forma analítica, de una forma gráfica, y para ellos fue muy muy clarificador, tengo que decir. Posiblemente no se puedan hacer más prácticas porque el tiempo es el que es, pero todas las prácticas que se puedan hacer que sirvan para afianzar los conocimientos son bienvenidas.

Respecto a la importancia que otorgan los docentes a los conocimientos previos de los alumnos, que puedan interactuar con el aprendizaje de la óptica, observamos que los profesores participantes en el grupo de discusión afirman unánimemente que los alumnos no tienen ideas previas respecto al comportamiento de la luz:

Profesor 1: Ninguna, ninguna

Profesor 3: Yo es que uno de los problemas que veo no es que tengan falsas ideas preconcebidas, es que no tienen directamente idea.

Profesor 1: En mi caso particular, los alumnos no tienen ningún conocimiento previo prácticamente. Cuando les hablas de que la velocidad de la luz es un límite de velocidad, pues es la primera vez que lo oyen. O cuando les dices que la luz se propaga en línea recta, tampoco lo habían escuchado.

Profesor 3: Es la primera vez que ven un límite fuera de la asignatura de matemáticas.

A continuación, analizamos la importancia que otorgan los docentes al principio de Huygens-Fresnel, clave para comprender el comportamiento rectilíneo de la luz dentro del modelo ondulatorio de la luz, que fue un obstáculo que hubo que vencer históricamente y que supuso la aceptación del modelo ondulatorio de la luz, además de ser una herramienta fundamental para explicar la limitación del modelo geométrico que conocemos como aproximación paraxial. Los docentes participantes en el grupo consideran que la dificultad matemática del mismo provocaría que el alumnado no pudiese comprenderlo:

Profesor 1: Excede del currículo.

Profesor 2: No merece la pena, gastas mucho tiempo.

Profesor 3: Nuestra explicación se basa en ello, pero yo creo que la aplicación que ellos hacen luego en la ejecución de los ejercicios, no tanto.

Profesor 4: Yo no insisto mucho en el principio de Huygens, yo voy al grano también.

Profesor 3: Yo es que tengo serias dudas de que puedan llegar a alcanzar esos conocimientos.

Profesor 1: Yo que soy de la época de Lavoisier casi, eso se da en 3º de carrera, en la óptica.

En este sentido insisto como docente-investigadora en que no me refiero a la parte matemática, si no a la explicación de Fresnel que evita las retro ondas y permite la explicación de la propagación rectilínea de la luz, pero los docentes consideran que no se puede hacer:

Profesor 1: No, no, que va.

Profesor 2: No, No. Yo creo que eso les excede a ellos. Ellos van a la fórmula, al dibujo, y todo tiene que ser cuadrículado. Esto, esto y esto.

Profesor 1: A ver, estás preguntando cosas a profesores de a pie, del día a día, yo entiendo que, a lo mejor, teóricamente lo ideal sería lo que tu planteas, pero nosotros como profesores de a pie, que estamos dando esto todos los días, te decimos 1 que excede del currículo, y 2 que consideramos que es algo para darlo en un curso de Física superior.

Profesor 3: Para llegar ahí, tendríamos que haber empezado con la óptica mucho antes.

Mediante el grupo de discusión buscábamos ahondar en el conocimiento de la valoración que hacen los profesores de los aprendizajes de sus alumnos sobre óptica, y encontramos que los docentes consideran que no se produce un verdadero aprendizaje muchas veces por la falta de base matemática del alumnado, y también porque los alumnos no establecen una relación entre las herramientas matemáticas y la física. Así mismo, los docentes participantes en el grupo de discusión consideran que, en ocasiones la escasa comprensión de la óptica es debida a la falta de visión geométrica. Consideran también que muchas veces los alumnos aprenden las fórmulas sin comprender su demostración y eso hace que no las entiendan verdaderamente:

Profesor 1: Otra cosa es que los alumnos digan, bueno esto no lo estudiamos porque aquí lo importante es la fórmula.

Profesor 2: Eso es, la fórmula, Exacto.

Profesor 1: Los alumnos tienen carencias matemáticas que hacen que la Física no puede avanzar como debería.... Las construcciones geométricas que implica también la óptica, algunos no tienen esas destrezas, esas habilidades de hacer los dibujos bien, y claro, un problema de óptica exige siempre un dibujo, bien hecho. A veces del dibujo se saca tanta información como de la resolución analítica:

Profesor 3: A mí me crea una frustración muy grande la cantidad de tiempo que tenía que perder al explicar este tema, la cantidad de tiempo que tenía que perder con la trigonometría, brutal. Eso es muy grave.

Profesor 2: no saben aplicar lo que tienen.

Hemos constatado que la enseñanza tradicional es el modelo didáctico más arraigado en la enseñanza de la óptica en los docentes asturianos que han participado en el cuestionario, siendo también los docentes participantes en el cuestionario una muestra de ello. Los docentes que hemos entrevistado confían en que, con una explicación clara y bien presentada por su parte, junto con los clásicos ejercicios ejemplificadores y experimentos ilustrativos, los alumnos adquirirán los conceptos que se les quiere transmitir:

Profesor 3: Claramente, pero el problema es que conjugamos dos cosas, todos queremos conseguir el máximo conocimiento en nuestros alumnos, pero, todos nos regimos por un calendario super apretado, entonces, claro, podíamos hacer más experiencias, pero claro, a base de por ejemplo no dar Física moderna, que es lo que va después. Podríamos hacer muchísimas más experiencias de óptica, si tuviésemos más horas, claro entonces al final, es que es muy complicado. A mí, aunque me gusta muchísimo el tema de innovación educativa, en 2º de Bachillerato es muy complicado, porque cualquier cosa que vayas a hacer experimentalmente te va a llevar muchísimo tiempo. Es que vas contra el temario.

Profesor 1: Tenemos el corsé de la EBAU

Profesor 2: y la presión.

Profesor 1: Si no tuviésemos el corsé de la EBAU, y la presión, pues podríamos ser más libres, para hacerlo más a nuestro gusto, con nuestras propias ideas, pero no podemos.

Profesor 3: Yo una clase normal, intento dependiendo de lo que haya que introducir ese día, dedicar como mucho 10 minutos a la explicación y luego planteamos problemas y vemos errores.

Profesor 1: Aquí estamos otra vez condicionados por la EBAU, eso es lo que determina la forma, o al menos en mí, la forma de enseñar la óptica y cualquier parte de la Física de 2º. Yo normalmente dedico una parte de la clase a una explicación teórica, utilizo el libro de texto digital que proyecto, y sobre esa proyección voy aclarando o explicando los distintos conceptos, haciendo hincapié en las explicaciones que considero que son importantes, y después el tiempo lo dedico a hacer 3 o 4 problemas tipo, y después lo que hago es que todos los ejercicios que propone el libro, o ejercicios EBAU los resuelvo yo, y se los cuelgo en Teams, a su disposición resueltos. Pero yo ya no me preocupo si los resuelven o no. En el caso de que haya dudas o quieran plantearme alguna cuestión determinada sobre algún ejercicio concreto, entonces revisamos ese ejercicio. Es la forma de avanzar que tenemos, si no sería imposible.

Profesor 4: Pero metodología de la época de Lavoisier o de la de Huygens. Innovar no, es que en segundo de Bachillerato no.

Profesor 1: Innovación muy poca.

Profesor 4: Yo siempre les intento convencer de que en esa etapa es un tema de trabajo suyo, porque es un tema general de falta de hábito. Y les digo, es que es una cosa vuestra, yo por mucho que os machaque aquí, la labor es cosa vuestra.

Profesor 2: Yo parecido a profesor 1, como siempre los grupos que tengo son muy numerosos. Normalmente lo que hago es lo mismo que el profesor 1, trabajamos sobre el libro, o sobre apuntes que yo tenga, hacemos los problemas del libro, y luego suelo hacer una serie de problemas de EBAU de Asturias y de fuera, para trabajar sobre ellos, que les doy un plazo para hacerlos y vamos resolviendo dudas en clase. Pero con ese tiempo tienes que ir a machaque, no puedes parar mucho tampoco.

Profesor 1: Yo normalmente dedico una parte de la clase a una explicación teórica, utilizo el libro de texto digital que proyecto, y sobre esa proyección voy aclarando o explicando los distintos conceptos, haciendo hincapié en las explicaciones que considero que son importantes, y después el tiempo lo dedico a hacer 3 o 4 problemas tipo, y después lo que hago es que todos los ejercicios que propone el libro, o ejercicios EBAU los resuelvo yo, y se los cuelgo en Teams, a su disposición resueltos. Pero yo ya no me preocupo si los resuelven o no. En el caso de que haya dudas o quieran plantearme alguna cuestión determinada sobre algún ejercicio concreto, entonces revisamos ese ejercicio. Es la forma de avanzar que tenemos, si no sería imposible.

Comprobamos una vez más como debido a la extensión del currículo, a la prueba EBAU basada fundamentalmente en ejercicios de resolución matemática, y a una escasa formación del profesorado en metodología de enseñanza, los profesores, aún a su pesar, se ven obligados a poner en práctica una metodología tradicional, basada en la correcta explicación del profesor y en la resolución de problemas por parte de los alumnos, con la ayuda del profesor.

Las respuestas de los docentes participantes en el grupo de discusión, al igual que sucedía mayoritariamente con las respuestas de los docentes en el cuestionario, dejan entrever que hay una carencia en la metodología didáctica de la óptica que afecta a la comprensión de aspectos clave del modelo de visión de Kepler y del modelo ondulatorio de la luz. Los profesores participantes en este estudio no plantean el problema de “¿cómo vemos?”, como origen de la teoría geométrica de la luz y la visión (o cualquier otro que pueda originar un proceso de construcción racional del modelo de visión), no proponen actividades para mostrar el interés del estudio que se va a realizar, por ejemplo: su relevancia histórica, su influencia tecnológica, la importancia en la salud, etc.; no plantean una secuencia de actividades que responda a una lógica problematizada propia del aprendizaje basado en problemas, no prestan atención a los obstáculos que pueden impedir la comprensión de los conceptos implicados el modelo de visión de Kepler, y en el modelo ondulatorio de la luz, no plantean el problema de “¿cuál es la naturaleza de la luz?, ¿qué es la luz para que se comporte como lo hace?” como origen del estudio del modelo ondulatorio de la luz.

Incluso hay un docente participante en el grupo de discusión que considera que una implementación de una metodología diferente a la enseñanza tradicional no sería valorada positivamente por un tribunal de acceso a la función docente.

Profesor 3: Tú imagínate si nos condiciona la EBAU, por lo menos a mí pienso que me condiciona, que yo llevo desde el curso pasado de preparador de oposiciones y no recomiendo a nadie que haga una programación de oposiciones de 2º de Bachillerato precisamente por eso. Porque creo que para afrontar una oposición tienes que intentar mostrar lo máximo posible, y en 2º de Bachillerato si muestras demasiado puedes dar una imagen de que no es real, porque en realidad estás viendo con cuatro profesores de Bachillerato, que da para lo que da, y si haces una programación real de 2º de Bachillerato, pues queda muy soso para una oposición. Pero es que al final nos regimos por lo que nos regimos, que es el temario brutal que hay, y el curso de 7 meses y la EBAU.

Por último, los docentes manifiestan la necesidad de ampliar la carga lectiva de la asignatura de Física y Química en el currículo para acercarnos más a la media europea, ganando así tiempo para poder enseñar de otra manera.

Profesor 1: Yo quería añadir, aunque no está relacionado con la metodología, en tanto en cuanto que esta asignatura de Física y química, no consigamos la separación de las dos materias, en cursos anteriores, no vamos a poder alcanzar los niveles de profundización que queremos, es decir, en otros países, dan Física por separado y química por separado desde edad muy temprana.

Profesor 2: Sí, sí.

Profesor 1: Entonces mientras nuestras leyes educativas no contemplen la necesidad de hacer esa separación, no podemos hacer nada. Es decir, no podemos hacer nada, nos encontraremos con una Física y química de 1º de Bachillerato, en la que, si das química bien, no das Física o viceversa, y te encontrarás en 2º de Bachillerato con estas deficiencias, alumnos que todavía tienen problemas con las unidades, que confunden Julios con Watios, que no manejan los vectores, que tienen dificultades importantes. Y claro, eso es falta de dedicación a la asignatura y de estudio en profundidad, por separado, porque, aunque son dos asignaturas con una base científica, evidentemente tienen formas diferentes de trabajar.

Profesor 3: Eso sí que daría para varios grupos de discusión.

7.2. Análisis de los libros de texto.

A través del análisis de contenido de los libros de texto de Física de 2º de Bachillerato hemos podido conocer más en profundidad como se plantea este tema. A continuación, se muestran los resultados de este análisis. En un primer momento presentamos un análisis global de los resultados obtenidos para, posteriormente, realizar un estudio más detallado que nos permita concretar los resultados para cada uno de los bloques

planteados. En la Tabla 7.5 podemos ver los resultados globales de cada uno de los indicadores analizados.

Tabla 7.5. Principales resultados en cada uno de los ítems analizados

BLOQUES	INDICADORES	Sí	No
BLOQUE I: ORGANIZACIÓN DEL ESTUDIO DE LA ÓPTICA	1.1. Se organiza como ciencia de la visión	0	13
	1.2. El tema se organiza de manera empirista	13	0
	1.3. Se explica la óptica geométrica con relación a la naturaleza ondulatoria de la luz	0	13
	1.4. Las leyes de la óptica geométrica se explican con relación a la visión	0	13
	1.5. Las leyes de la óptica ondulatoria se explican con relación a la naturaleza de la luz	3	10
	1.6. Se considera la propagación rectilínea, la reflexión o refracción de la luz como hipótesis para explicar la visión	0	13
	1.7. Se plantea el estudio de la propagación rectilínea, la reflexión y la refracción de la luz de manera empirista	13	0
	1.8. Se plantean los límites de aplicación de la óptica geométrica para explicar la visión	1	12
BLOQUE II: TRATAMIENTO HISTÓRICO DEL TEMA	2.1. Se ofrecen lecturas históricas del tema	0	13
	2.2. A qué hacen referencia las lecturas históricas	0	13
	2.3. Se realiza una revisión histórica para plantear los problemas relacionados con el tema	0	13
	2.4. Se realiza una revisión histórica para plantear el índice del problema	0	13
	2.5. Se realiza una revisión histórica para sacar a la luz los grandes obstáculos que se han superado	0	13
BLOQUE III: ATENCIÓN A LOS OBSTÁCULOS QUE PUEDEN IMPEDIR LA COMPRENSIÓN DE LOS CONCEPTOS BÁSICOS	3.1. Trata a los objetos iluminados como conjuntos de puntos emisores de luz en todas las direcciones	0	13
	3.2. Explica correctamente el concepto de haz de luz	0	13
	3.3. Explica correctamente el concepto de rayo de luz	1	12
	3.4. Se señala expresamente que la luz no se ve	1	12
	3.5. Considera al ojo como parte del sistema óptico al mirar a:	9	4
	a) espejos planos y esféricos;	6	7
	b) un objeto sumergido en agua;	1	12
	c) la imagen formada por lentes convergentes y divergentes		
	3.6. Elabora un modelo simplificado de ojo (lente-pantalla) para introducir el concepto de imagen óptica	0	13
	3.7. Forma la imagen a partir de haces de luz emitidos por cada punto-objeto, al mirar:		
	a) espejos planos y esféricos;	6	7
b) un objeto sumergido en agua;	0	13	
c) la imagen formada por lentes convergentes y divergentes	0	13	
3.8. Señala explícitamente la importancia del principio de Huygens-Fresnel para la aceptación del modelo ondulatorio	0	13	
3.9. Explica la producción de ondas electromagnéticas	1	12	
3.10. Narra el experimento de Hertz	1	12	
3.11. Introduce el concepto de campo como un mero	13	0	

medio de calcular la fuerza		
3.12. Llega el campo a adquirir verdadero significado físico que evita la acción a distancia convirtiéndola en una acción local entre la partícula y el campo existente en dicho punto	0	13

Fuente: Elaboración propia.

Un primer análisis nos permite constatar que ninguno de los libros analizados organiza la enseñanza de la óptica como ciencia de la visión, ni relaciona las leyes de la óptica con la visión. En general, proponen una enseñanza empirista, sin considerar la propagación rectilínea, la reflexión o refracción de la luz como hipótesis para explicar la visión. En ningún caso se plantean los límites de aplicación de la óptica geométrica para explicar la visión, es más, casi ningún libro plantea límites de aplicación de la óptica geométrica. Por otro lado, observamos que en los libros estudiados no se ofrecen lecturas de las obras cumbre de la óptica, sino que suelen proponer resúmenes simplistas de las teorías corpuscular y ondulatoria. En ningún caso la revisión histórica que proponen los libros de texto sirve para plantear los problemas relacionados con la óptica, ni para sacar a la luz los grandes obstáculos que se han tenido que superar para llegar a las teorías actuales.

En cuanto a las dificultades que pueden impedir a los estudiantes comprender los conceptos básicos, destacamos que ninguno de los libros analizados explica el concepto clave para la óptica geométrica de “haz de luz”, y solamente el texto de Oxford 2016 (LOM-OX) explica correctamente el concepto de “rayo de luz”, haciendo hincapié en que el rayo de luz es una construcción matemática. Solamente el texto ECIR 2003 (LOE-EC) señala expresamente que la luz no se ve. Ningún manual elabora un modelo simplificado de ojo (lente-pantalla) para introducir el concepto de imagen óptica y solamente un texto considera al ojo como parte del sistema óptico al analizar la imagen formada por lentes convergentes y divergentes. Ninguno de los libros analizados forma la imagen a partir de haces de luz emitidos por cada punto del objeto, al mirar a espejos planos y esféricos, objetos sumergidos en agua o a través de lentes convergentes y divergentes.

En cuanto a la naturaleza de la luz, ningún libro establece la importancia que tuvo el principio de Huygens-Fresnel para la consolidación del modelo ondulatorio de la luz. Solamente el texto LOE-AN explica la producción de las ondas electromagnéticas y solamente el texto LOM-SAN explica el dispositivo ideado por Hertz. Todos los textos introducen el concepto de campo como un mero medio de calcular la fuerza y en ninguno de ellos el campo llega a adquirir su verdadero significado físico, que evita la acción a

distancia, convirtiéndola en una acción local entre la partícula y el campo existente en dicho punto.

Un estudio más detallado nos permite concretar los resultados para cada uno de los objetivos que se pretenden con las preguntas formuladas en el protocolo de análisis:

Bloque I: ¿Cómo se organiza el estudio de la óptica?

Se ha constatado que todos los libros de texto definen la óptica Física y la óptica geométrica por separado y sin relación con la visión. Además, ninguno de los textos analizados vuelve a analizar las leyes de la óptica geométrica una vez conocida la naturaleza de la luz, a fin de comprobar su validez. Todos ofrecen diferentes definiciones de la óptica geométrica, sin ninguna relación con la visión, desoyendo por completo la evolución histórica de los conocimientos y sin tener en cuenta su sentido real. La Tabla 7.6 recoge algunos ejemplos representativos sobre esta cuestión:

Tabla 7.6. Ejemplos de la definición de la óptica geométrica.

EDITORIAL	TEXTO DE EJEMPLO	INTERPRETACIÓN
LOE-EC	<i>“El estudio de los fenómenos relacionados con la interacción de la luz con una superficie de separación de dos medios, permite explicar tanto las imágenes que se forman en los espejos, reflexión, como la deformación aparente de los objetos parcialmente sumergidos en agua, o refracción” (p. 193)</i>	Definen la óptica geométrica en función de los supuestos básicos
LOE-AN	Expone las leyes de la óptica como supuestos básicos antes de comenzar el tema (p. 290), y en el tema de la naturaleza de la luz explica la propagación rectilínea (p. 264)	
LOE-EV	<i>“En un medio isótropo la luz se propaga en línea recta, con una velocidad que depende del medio. Los rayos luminosos se propagan independientemente unos de otros” (p. 226)</i>	
LOE-EDE	<i>“La parte de la óptica que trata, a partir de representaciones geométricas, de los cambios de dirección que experimentan los rayos luminosos en los distintos fenómenos de reflexión y refracción” (p. 256)</i>	Define la óptica geométrica en función de las representaciones geométricas
LOM-SA	<i>“Es la parte de la Física que estudia los cambios que experimenta la dirección de propagación de los rayos de luz que sufren procesos de reflexión o de refracción por medio de representaciones geométricas” (p. 217)</i>	

LOE-MG	<i>“La óptica geométrica explica los fenómenos luminosos aplicando el concepto de rayo, que es la trayectoria que sigue la luz en su propagación. A partir de este concepto y de las leyes de la reflexión y la refracción, se obtienen las imágenes en espejos, lentes e instrumentos ópticos, que son de una gran utilidad”</i> (p. 221) / (p. 241)	Define la óptica geométrica en función del concepto de rayo
LOE-VV		
LOM-ED	<i>“Es la parte de la Física que estudia la propagación de la luz partiendo del concepto de rayo luminoso, sin considerar el carácter corpuscular o electromagnético de la luz”</i> (p. 172) / (p. 245)	
LOM-MG		
LOM-OX	<i>“Es aquella en la que no se toma en consideración la longitud de onda de la luz, pues esta es despreciable frente a las magnitudes de los objetos. Se dice así, que es la óptica en el límite en que $\lambda \rightarrow 0$”</i> (p. 254)	Define la óptica geométrica en función de la longitud de onda
LOM-VV	<i>“La reflexión de la luz es el cambio de dirección que experimentan los rayos de luz cuando, al transmitirse por un medio, encuentran en su camino la superficie lisa y pulida de otro medio a través del cual no pueden pasar, y vuelven por el mismo medio por el que han llegado”</i> (p. 188)	Incluso en las definiciones comete grandes errores
LOE-BR	<i>“Las imágenes que se observan en un espejo plano parecen estar dentro de él”. “Si percibimos una imagen es porque llega luz a nuestros ojos”</i> (p. 97)	Cuando trata la reflexión parece que relaciona la ley de la reflexión con la visión. Sin embargo, en el caso de la refracción ya no lo hace (p. 106)

Fuente: Elaboración propia.

Por otro lado, consideramos clave que la óptica ondulatoria se explique en relación con la naturaleza de la luz, a fin de dar continuidad a lo aprendido con anterioridad por los estudiantes. Sin embargo, tan sólo tres textos explican la relación entre la óptica ondulatoria y la naturaleza de la luz, encontrándonos tratamientos muy diferentes en el resto de los manuales, tal como se recoge en la Tabla 7.7.

Tabla 7.7. Ejemplos de la explicación de las leyes de la óptica ondulatoria

EDITORIAL	TEXTO DE EJEMPLO	INTERPRETACIÓN
LOE-EV		
LOE-MG	Textos que explican las leyes de la óptica ondulatoria con relación a la naturaleza de la luz (p.299) / (p. 207) / (p. 216-218)	
LOE-VV		

LOM-VV	Solamente habla de la interferencia de la luz (p. 174), de la polarización de la luz (p. 180).	Solamente explica algunos fenómenos
LOM-OX	Se explican haciendo uso de la llamada “aproximación de rayo” y apunta que esta aproximación deja de ser útil para analizar los fenómenos de difracción (p. 232-242) / (p. 192)	
LOM-SA		
LOE-AN	<i>“El principio de Huygens y el principio de Fermat permite deducir las leyes de la reflexión y de la refracción. Para el estudio de las leyes de la reflexión y de la refracción utilizaremos lo que se conoce como aproximación de rayos, ya que es más sencilla”</i> (p. 268)	
LOE-BR	<i>“Dos de los aspectos que más contribuyeron a demostrar la naturaleza ondulatoria de la luz fueron los fenómenos de interferencia y difracción”</i> (p. 127)	La mayoría de texto no lo hacen
LOE-EC	<i>“Los fenómenos ópticos que diferencian las ondas de las partículas son la difracción y las interferencias. Ambas se explican a partir del principio de Huygens”</i> (p. 217)	
LOE-ED	<i>“Los fenómenos de la óptica Física se pueden interpretar correctamente mediante una simple aplicación de la aproximación de rayos”</i> (p. 264)	
LOM-ED	Explican los fenómenos de reflexión hablando de rayo incidente y rayo reflejado o refractado (p. 159) / (p. 230)	
LOM-MG		
LOE-CA	Simplemente se introducen sin seguir ninguna secuencia ni lógica	
LOM-VV		

Fuente: Elaboración propia.

Otra de las cuestiones que se analiza es si en los libros de texto se considera la propagación rectilínea, la reflexión o refracción de la luz como hipótesis para explicar la visión. En ningún caso se plantea como eje de investigación la explicación de la visión, tal como se recoge en la Tabla 7.8.

Tabla 7.8. Ejemplos del tratamiento de los fenómenos básicos de la luz

EDITORIAL	TEXTO DE EJEMPLO	INTERPRETACIÓN
LOE-VV	Explica que la luz se propaga en línea recta y en todas direcciones a través del vacío y de todos los medios transparentes (p. 235)	No las relaciona con la visión

LOE-AN	Introduce la propagación rectilínea, la reflexión y la refracción de la luz, dentro de la naturaleza de la luz, pero sin relacionarlo con la visión (p. 264-270)	
LOE-EC	<i>“La luz parece propagarse en línea recta como confirman los rayos de luz que se observan cuando hay polvo en una habitación o la luz del Sol que atraviesa los resquicios entre las nubes, así como la formación de sombras y penumbras”</i> (p. 191)	
LOE-EV	Define la reflexión de la luz como: <i>“el cambio de dirección que experimenta un rayo luminoso al chocar contra la superficie de los cuerpos”</i> (p. 229), y la refracción de la luz es: <i>“el cambio de velocidad y dirección que experimenta un rayo luminoso al pasar de un medio transparente a otro de distinto índice de refracción”</i> (p. 230)	
LOE-MG	<i>“Se basa en la suposición de que la luz sigue siempre trayectorias rectas. Cuando nos miramos en un espejo, o cuando observamos el fondo de un río, nuestros ojos y nuestro cerebro no perciben que la luz se ha desviado, y registramos imágenes que son ilusión y no corresponden exactamente a la realidad”</i> (p. 203)	Describe nuestro sentido de la vista, pero no lo relaciona con la reflexión o refracción

Fuente: Elaboración propia.

Se ha constatado que todos los libros analizados plantean el estudio de la propagación rectilínea, la reflexión y la refracción de la luz de manera empirista. Por otro lado, a la hora de plantear los límites de aplicación de la óptica geométrica para explicar la visión, solamente el manual LOE-EV traza estos límites, pero no en función de la visión: ... “cuando no se cumplen estas condiciones, lo que resulta frecuente en la práctica, se producen alteraciones en las imágenes que se conocen con el nombre de aberraciones” (p. 248). Por su parte, LOE-ED explica que la óptica Física se ocupa del estudio de los fenómenos característicos de las ondas luminosas, como la interferencia y la difracción. A continuación, dice que: “estos fenómenos no pueden interpretarse correctamente mediante una simple aplicación de la aproximación de rayos” (p. 264). En el resto de los textos no encontramos el planteamiento de ningún límite de la óptica geométrica.

Bloque II: ¿Cuál es el tratamiento histórico del tema?

El segundo de los bloques se centra en comprobar el tratamiento histórico de la óptica. Hemos constatado que ninguno de los textos estudiados ofrece lecturas históricas del tema. Solamente algunos ofrecen resúmenes de las principales teorías, LOE-AN (p. 258-261), LOE-ED (p. 248), LOE-MG (p. 200-202). Además, ningún libro introduce la lectura

de una obra cumbre de la óptica. Solamente podríamos destacar tres textos que introducen tímidamente algún ápice histórico en este tema, tal como se recoge en la Tabla 7.9.

Tabla 7.9. Ejemplos del papel que juega la revisión histórica del tema.

EDITORIAL	TEXTO DE EJEMPLO	INTERPRETACIÓN
LOM-ED	Comienza con las primeras teorías, trata la luz como fenómeno ondulatorio, posteriormente introduce la dualidad onda-corpúsculo y finalmente habla de la luz como onda electromagnética. (p. 150-153)	
LOM-OX	Plantea la dicotomía naturaleza ondulatoria-naturaleza corpuscular. Finaliza planteando la naturaleza electromagnética de la luz (p. 223-229)	No plantean una revisión estructurada buscando hechos clave
LOM-MG	Comienza con la síntesis electromagnética, menciona las teorías corpuscular y ondulatoria, para terminar, admitiendo la doble naturaleza de la luz (p. 220-225)	

Fuente: Elaboración propia.

Bloque III: ¿Conceden los libros de texto una atención especial a los obstáculos que pueden impedir la comprensión de los conceptos básicos?

El tercer bloque se refiere a los obstáculos que pueden impedir la comprensión de los conceptos básicos por parte del alumnado. En este caso, ningún libro de texto los tiene en consideración o bien estos no se abordan correctamente. El primer aspecto que se analiza en este bloque se refiere al tratamiento que hacen de los objetos iluminados. Como puede verse en la Tabla 7.10, ningún texto trata a estos cuerpos iluminados como conjunto de puntos emisores de luz en todas las direcciones.

Tabla 7.10. Ejemplos del tratamiento de los cuerpos iluminados.

Editorial	Texto de ejemplo	Interpretación
LOM-ED		
LOM-MG		
LOM-OX		
LOM-SA	Ni siquiera explican que los objetos que vemos son fuentes secundarias de luz	No trata a los objetos iluminados como conjuntos de puntos emisores de luz en todas las direcciones
LOM-VV		
LOE-EV		
LOE-CA		
LOE-MG		

LOE-EC	Al menos establece al principio del tema que “ <i>los objetos totalmente iluminados emiten luz por igual en todas las direcciones</i> ” (p. 191)
LOE-VV	Distingue entre fuentes primarias y secundarias, pero no los trata como emisores de luz en todas las direcciones (p. 235)
LOE-AN	Ni tan siquiera describe qué son fuentes primarias o secundarias de luz y tampoco explica nada acerca de los objetos iluminados (p. 290)

Fuente: Elaboración propia.

En relación con el concepto “haz de luz”, los únicos textos que tratan de definirlo no lo hacen plenamente: “un haz de luz es un conjunto de rayos luminosos que proceden del mismo foco luminoso” (LOE-VV, p. 235). Por su parte, LOM-OX lo dibuja en algunos esquemas, pero se refiere erróneamente a él como “conjunto de rayos incidentes” (p. 257), no obstante, es el único texto que menciona la existencia real del haz de luz: “debemos tener claro que un rayo no es un haz (que físicamente si existe)” (p. 255). En relación con la formación de imágenes, algunos textos como LOE-BR, LOM-SA y LOM-VV utilizan el haz de luz en algunos esquemas en espejos planos, aunque sin explicarlo. En espejos esféricos, lentes convergentes y divergentes, utilizan el algoritmo de rayos, también sin explicar nada sobre ellos.

En cuanto al concepto de “rayo de luz”, solamente uno de los textos lo explica correctamente: “el concepto de rayo es, en realidad, una construcción matemática que solo representa la dirección de propagación del flujo de energía radiante, de modo que el rayo es perpendicular a cada punto del frente de onda” (LOM-OX, p. 255). En el resto de los manuales encontramos diferentes definiciones, recogidas en la Tabla 7.11.

Tabla 7.11. Ejemplos de la explicación del concepto de rayo.

Editorial	Texto de ejemplo	Interpretación
LOE-AN	“Una línea imaginaria perpendicular al frente de onda que definen los campos eléctrico y magnético” (p. 264)	En función del campo eléctrico y magnético
LOE-MG	“Un rayo es una línea imaginaria, dibujada en la dirección y sentido en los que se propagan las ondas, que es perpendicular a los vectores que definen el campo eléctrico y magnético de la onda” (p. 203)	
LOE-ED	“Un rayo luminoso es una línea recta con orientación definida que determina la dirección de propagación de la luz” (p. 252)	En función de la dirección de

LOE-VV	<i>“Denominamos rayos luminosos a las distintas direcciones en que se propaga la luz”</i> (p. 235)	propagación de la luz
LOE-EV	<i>“Cada una de las infinitas direcciones de propagación de la luz, todas ellas perpendiculares al frente de ondas, recibe el nombre de rayo luminoso”</i> (p. 222)	
LOM-MG	<i>“Los rayos son líneas rectas que coinciden con la dirección de propagación de la luz”</i> (p. 245)	
LOM-VV		
LOM-SA		
LOM-OX	No explican el concepto de rayo de luz	
LOE-BR		
LOE-CA		

Fuente: Elaboración propia.

Cambiando de cuestión, el único texto que señala expresamente que la luz no se ve, es el LOE-EC: “Debemos tener muy presente en el estudio de la luz que ésta “no se ve”; la luz es lo que nos permite ver los objetos en su interacción con la materia” (p. 192). Por otro lado, ningún texto considera al ojo como parte del sistema óptico al que le llega un haz divergente de luz para formar la imagen y, demás, ninguno elabora un modelo simplificado de ojo para introducir el concepto de imagen óptica. Hay textos que introducen el concepto de imagen mediante una definición: “Imagen real es aquella que puede registrarse realmente al colocar en ese punto una pantalla o un registro fotográfico” “Imagen virtual es aquella que no puede registrarse en una pantalla o registro fotográfico” (LOM-OX, p. 256). Mientras, otros definen la imagen mediante el trazado de rayos: “La imagen de un objeto se forma en el lugar donde los rayos desviados, o sus prolongaciones, vuelven a juntarse” (LOM-VV, p. 192). Otros textos, por su parte, introducen a modo de axiomas, la definición de imagen real y virtual de un objeto o bien no ofrecen ninguna definición de imagen (LOE-MG, p. 222) y (LOM-MG, p. 245). Esta información se recoge en la Tabla 7.12.

Tabla 7.12. Ejemplos del tratamiento del concepto de imagen óptica

EDITORIAL	TEXTO DE EJEMPLO	INTERPRETACIÓN
LOE-AN	<i>“Cuando los rayos que parten de un punto, que denominamos objeto, después de atravesar un sistema óptico, vuelven a concurrir en otro punto, decimos que este punto es la imagen del primero”</i> (p. 291)	Introduce el concepto de imagen mediante una definición

LOE-ED	<i>“Una imagen real de un objeto es la formada en un sistema óptico mediante intersección en un punto de los rayos convergentes procedentes del objeto puntual después de atravesar el sistema óptico” (p. 256)</i>	
LOM-OX	<i>“Imagen real es aquella que puede registrarse realmente al colocar en ese punto una pantalla o un registro fotográfico” “Imagen virtual es aquella que no puede registrarse en una pantalla o registro fotográfico” (p. 256)</i>	
LOM-VV	<i>“La imagen de un objeto se forma en el lugar donde los rayos desviados, o sus prolongaciones, vuelven a juntarse” (p. 192)</i>	
LOM-ED	<i>“La imagen se forma en el punto de intersección de dos de los rayos anteriores (algoritmo de trazado de rayos). Si la imagen se origina en un punto donde convergen los rayos luminosos, es real. Si de crea en un punto en el que convergen las prolongaciones de los rayos, es virtual” (p. 174)</i>	Define la imagen en función del trazado de rayos
LOE-VV	<i>“Si la imagen se forma allí donde se cortan los rayos después de reflejarse o de refractarse, decimos que es una imagen real. Si se forma donde se cortan las prolongaciones de los rayos, decimos que es una imagen virtual” (p. 241)</i>	
LOM-SA	Introduce primero el concepto de imagen virtual: <i>“Se obtiene al prolongar las direcciones de los rayos reflejados hasta que coinciden” (p. 218)</i>	
LOE-MG	<i>“Imagen real: Si los rayos procedentes de un punto A atraviesan un sistema óptico y convergen a la salida cortándose en un punto A´ este punto A´ recibe el nombre de imagen real de A. Si los rayos precedentes de un punto A atraviesan un sistema óptico y salen divergentes – son sus prolongaciones en sentido contrario al de propagación de la luz las que se cortan-, forman una imagen virtual en A´” (p. 222) / (p. 245)</i>	Introducen a modo de axiomas, la definición de imagen real y virtual de un objeto
LOM-MG		
LOE-BR	Introduce el concepto de imagen virtual, sin haber explicado previamente qué entendemos por imagen (p. 97)	Ni tan siquiera ofrece una definición de “imagen”

Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 7.13 puede verse como plantean los libros de texto analizados el tratamiento de la formación de imágenes que realizan. Ninguno de los libros de texto consultados utiliza el haz de luz correctamente para la formación de la imagen.

Tabla 7.13. Ejemplos del tratamiento de la formación de imágenes.

EDITORIAL	TEXTO DE EJEMPLO	INTERPRETACIÓN
LOE-AN		
LOE-EV		
LOE-VV		
LOE-MG	No utilizan en ningún caso el haz de luz	
LOE-ED		
LOM-ED		
LOE-BR	Utilizan el haz de luz en algunos esquemas en espejos planos, aunque sin explicarlo.	
LOM-SA		
LOM-VV	En espejos esféricos, lentes convergentes y divergentes, utilizan el algoritmo de rayos, sin explicar nada sobre ellos.	
LOM-MG	Habla del haz erróneamente, como “conjunto de rayos” rayos incidentes que provienen de un foco luminoso” (p. 252) / (p. 257).	
LOM-OX	Utilizan el algoritmo de rayos, sin explicar nada sobre ellos en lentes convergentes y divergentes.	

Fuente: Elaboración propia.

En cuanto a la importancia del principio de Huygens-Fresnel para la aceptación del modelo ondulatorio, ningún texto lo aborda, aunque este haya sido el paso definitivo para la consolidación del modelo ondulatorio de la luz, pues podía por fin explicar la propagación rectilínea de la luz. Por su parte, solamente un texto intenta explicar la producción de ondas electromagnéticas: “un método sencillo de generar ondas electromagnéticas consiste en preparar un circuito oscilante, que consta de una bobina y de un condensador...” (LOE-AN, p. 261) y solamente el texto LOM-SA (p.187) explica el dispositivo ideado por Hertz y que consiguió producir y detectar distintos tipos de ondas electromagnéticas.

Hemos podido constatar que todos los textos introducen el concepto de campo como un mero medio de calcular la fuerza, en la Tabla 7.14 se exponen algunos ejemplos significativos.

Tabla 7.14. Ejemplos del tratamiento del concepto de campo.

EDITORIAL	TEXTO DE EJEMPLO	INTERPRETACIÓN
LOE-AN	<i>“El vector intensidad de campo eléctrico en un punto es la fuerza que actúa sobre la unidad de carga positiva</i>	Todos los textos analizados introducen el campo como un mero medio para calcular la fuerza.
LOE-BR		

colocada en ese punto” (p. 184) / (p. 178) / (p. 135)

LOE-MG

LOE-EV *“La intensidad de campo en un punto E , es el cociente entre la fuerza F que actúa sobre una carga de prueba positiva, situada en dicho punto y el valor de esta carga” (p. 133)*

LOM-OX Trata de definir el campo eléctrico como una forma de explicar la interacción, pero no llega a darle un significado completo dentro del bloque de electromagnetismo (p. 92).

Fuente: Elaboración propia.

Por último, en ninguno de los textos seleccionados el campo llega a adquirir verdadero significado físico que evita la acción a distancia convirtiéndola en una acción local entre la partícula y el campo existente en dicho punto.

CAPÍTULO 8. PROPUESTA DE INTERVENCIÓN DIDÁCTICA.

Queremos que nuestra tesis contribuya de alguna manera a la mejora de la enseñanza de la óptica en este nivel educativo. Para ello, hemos diseñado una propuesta didáctica que se plantea conseguir:

1. Que el alumnado sea capaz de explicar, de una forma funcional, la visión humana en base al modelo geométrico de Kepler. Concretamente se busca que los estudiantes puedan:

- a) Explicar la visión directa e indirecta de los objetos, las ametropías visuales y su corrección, el funcionamiento de los instrumentos de mejora de la visión (telescopio, microscopio, etc.)
- b) Formular hipótesis sobre el comportamiento geométrico de la luz (su propagación, la interacción con espejos, al cambiar de medio, al pasar a través de lentes, etc.) sin necesidad de profundizar en su naturaleza Física.
- c) Plantear los límites de este modelo geométrico.

2. Que los estudiantes sean capaces de comprender el modelo ondulatorio de la luz para así poder explicar su comportamiento, de manera que los alumnos puedan:

- a) Elaborar un modelo físico que explique el comportamiento geométrico de la luz que hemos utilizado para explicar cómo vemos y su interacción con espejos, lentes, etc.
- b) Explicar algunos límites del modelo geométrico.
- c) Profundizar en el estudio de la naturaleza de la luz para explicar nuevos fenómenos.

A lo largo de este capítulo detallamos los procesos necesarios para elaborar nuestra Unidad Didáctica. Comenzamos analizando las ideas clave que los alumnos han de comprender y las dificultades que manifiestan los estudiantes de 2º de Bachillerato después de la enseñanza habitual en óptica. En base a ello, desarrollamos el proceso de toma de decisiones para elaborar una Unidad Didáctica problematizada de óptica, y la planificación subsiguiente de las actividades de nuestra unidad, para lo cual establecemos unos puntos sobre los que se organiza el estudio histórico y epistemológico, y concretar así la estructura de nuestra unidad. Finalmente, exponemos las evidencias tras la experimentación de la Unidad Didáctica.

8.1. Ideas clave y dificultades que manifiestan los estudiantes de 2º de Bachillerato después de la enseñanza habitual en óptica.

Hemos discutido ampliamente y con mucho detalle sobre el hecho de que la base del currículo de la óptica geométrica en Bachillerato es el modelo de visión desarrollado por Johannes Kepler (1571-1630), aunque en el currículo no se haga referencia explícita al autor de dicho modelo. Estudios previos (Osuna y Martínez-Torregrosa, 2005; Osuna et al., 2007, 2012) evidencian que éste es el modelo histórico más sencillo, coherente y con suficiente poder explicativo para una comprensión elemental de la formación de la imagen percibida por el ojo humano. Según dicho modelo, la formación de imágenes se explicaría mediante el haz de luz, siendo los rayos solamente elementos direccionales sin entidad real (Kepler, 1604). Nosotros creemos que, a pesar de su sencillez, el modelo de visión de Kepler tiene la suficiente capacidad explicativa y predictiva para basar en él la enseñanza de la óptica geométrica en 2º de Bachillerato. No obstante, el modelo de visión de Kepler (1604) presenta limitaciones para explicar algunos fenómenos ópticos. Estas dificultades resultan determinadas, como es obvio, por los descubrimientos “sucesivos” al modelo de visión de Kepler y a la doble naturaleza (corpúscular y ondulatoria) de la luz, que determina la gran complejidad de la óptica como ciencia de la visión (por ejemplo: las aberraciones cromáticas). A partir de nuestro estudio bibliográfico relativo a las conceptos incorrectos que pueden tener los estudiantes, y de nuestra experiencia docente en el aula siguiendo la metodología tradicional, (previamente al cambio metodológico que proponemos y hemos puesto en marcha en este trabajo de investigación), hemos comprobado que los alumnos tienen muchas dificultades en la comprensión del modelo de visión de Kepler, en primer lugar, y también presentan dificultades de comprensión del modelo ondulatorio de la luz, en segundo lugar.

En la Tabla 8.1. mostramos una relación de las ideas clave del modelo de visión de Kepler y las dificultades que manifiestan los estudiantes de 2º de Bachillerato después de la enseñanza, tal y cómo se han detectado a lo largo de nuestra experiencia docente siguiendo una enseñanza tradicional previa a esta investigación.

Tabla 8.1. Relación entre las ideas clave del modelo de visión de Kepler y las dificultades que manifiestan los estudiantes de 2° de Bachillerato después de la enseñanza habitual en óptica.

Para comprender cómo vemos, de acuerdo con el modelo de visión de Kepler, es necesario:	Sin embargo, los estudiantes de 2° Bachillerato antes de la enseñanza y otros estudiantes de secundaria, de distintos niveles, después de la instrucción habitual en óptica geométrica:
Concebir la visión a partir de un modelo en el que se relaciona el objeto, la luz y el ojo	<ul style="list-style-type: none"> • No consideran al ojo receptor de luz al interpretar la visión. (Obstáculo 1) • No consideran que los objetos que vemos sean fuentes de luz. (Obstáculo 2) • Creen que sólo existe luz en las fuentes luminosas o en sus proximidades, por lo que la luz no es considerada una entidad Física independiente en el espacio. (Obstáculo 3)
Disponer de un esquema de representación geométrico e idealizado de propagación de la luz potencialmente explicativo	<ul style="list-style-type: none"> • Creen que la luz, o los rayos de luz, se ven. (Obstáculo 4) • No modelizan las fuentes luminosas extensas como conjuntos de fuentes puntuales emisoras de luz en todas las direcciones, y no trazan haces divergentes de luz desde cada punto de la fuente luminosa. (Obstáculo 5)
Utilizar el concepto de imagen óptica del modelo de visión de Kepler	<ul style="list-style-type: none"> • Creen que la imagen se traslada “ya hecha” desde el objeto. (Obstáculo 6) • Creen que la imagen óptica existe con independencia del observador. (Obstáculo 7)
Conocer los límites de validez de la óptica geométrica para explicar cómo vemos	<ul style="list-style-type: none"> • Desconocen el campo de aplicabilidad de la óptica geométrica. (Obstáculo 9) • No consideran que en la sensación de la visión participa en último término la mente (ilusiones ópticas, interpretación de lo que vemos, etc.). (Obstáculo 9) • No considerar los modelos y teorías científicas como algo en continua construcción. (Obstáculo 9)

Fuente: Elaboración propia a partir de los obstáculos detectados por Osuna (2007).

En la Tabla 8.2. mostramos una relación de las ideas clave del modelo ondulatorio de la luz y las dificultades que manifiestan los estudiantes de 2° de Bachillerato después de la enseñanza, tal y cómo se han detectado a lo largo de nuestra experiencia docente siguiendo una enseñanza tradicional previa a esta investigación.

Tabla 8.2. Relación entre las ideas clave del modelo ondulatorio de la luz y las dificultades que manifiestan los estudiantes de 2° de Bachillerato después de la enseñanza habitual en óptica.

Para comprender cuál es la naturaleza de la luz y cómo se comporta, es necesario:	Sin embargo, los estudiantes de 2° Bachillerato antes de la enseñanza y los estudiantes de secundaria, de distintos niveles, después de la instrucción habitual en óptica geométrica:
La consideración de la naturaleza heterogénea de la luz blanca.	<ul style="list-style-type: none"> • Piensan que la luz se modifica al interactuar con los objetos. (Obstáculo 10) • Creen que el color es una propiedad de la luz o de los objetos. (Obstáculo 13)
Utilizar el modelo ondulatorio para interpretar fenómenos ópticos y dar cuenta de los límites del modelo geométrico	<ul style="list-style-type: none"> • No consideran la luz como una entidad Física. (Obstáculo 10) • No comprenden las características propias de la naturaleza de la luz. (Obstáculo 11) • No comprenden los fenómenos básicos de los fenómenos ondulatorios. (Obstáculo 12) • No comprenden el carácter electromagnético de la luz “visible” que hace innecesario un soporte material para su propagación. (Obstáculo 13) • Consideran válido el modelo ondulatorio para explicar unos fenómenos y el geométrico para otros. (Obstáculo 15)
Concebir el color como una sensación que se obtiene a partir de la respuesta diferencial de tres fotorreceptores retinianos al tipo de luz incidente	<ul style="list-style-type: none"> • No consideran el carácter heterogéneo de la luz “blanca”. (Obstáculo 10) • No relacionan la sensación de color con la diferente respuesta de los fotorreceptores retinianos a la luz incidente. (Obstáculo 14)

Fuente: Elaboración propia.

Podemos destacar, a este respecto, las dificultades de comprensión del principio de Huygens-Fresnel, de la experiencia de Young, del modelo de Maxwell-Faraday, que explica la luz visible como una oscilación en un rango de frecuencias de un campo electromagnético y del mismo experimento de Hertz que, sin embargo, se refiere a ondas de radio y no a ondas visibles. Es necesario que los docentes tengamos muy presentes estas dificultades señaladas en el desarrollo de los proyectos curriculares en la enseñanza de la Física en el Bachillerato, para conseguir que los alumnos logren una comprensión satisfactoria de la materia tratada.

La revisión documental realizada en la investigación exploratoria inicial y el estudio descriptivo llevado a cabo nos lleva a pensar que algunos de los obstáculos que encuentran los alumnos para la comprensión del modelo de visión de Kepler, y del modelo ondulatorio de la luz, se derivan de las pobres explicaciones que tanto los libros de texto como los docentes ofrecen sobre este tema. A continuación, mostramos en la Tabla 8.3,

en la que detallamos las ideas clave para comprender el modelo de visión de Kepler, y las relacionamos con los obstáculos basados en Osuna (2007), que muchas veces manifiestan los libros de texto y los profesores en ejercicio.

Tabla 8.3. Relación entre las ideas clave para comprender el modelo de visión de Kepler y los errores conceptuales de algunos libros de texto y algunos docentes.

Para comprender cómo vemos, de acuerdo con el modelo de visión de Kepler, es necesario:	Sin embargo, algunos libros de texto y algunos docentes:
A. Concebir la visión a partir de un modelo en el que se relaciona el objeto, la luz y el ojo	<ul style="list-style-type: none"> • No consideran al ojo receptor de luz al interpretar la visión. (Obstáculo 1) • No consideran que los objetos que vemos sean fuentes de luz. (Obstáculo 2) • Utilizan gráficos o explicaciones que inducen a pensar que sólo existe luz en las fuentes luminosas o en sus proximidades (Obstáculo 3) • No consideran explícitamente la luz como una entidad Física independiente en el espacio. (Obstáculo 10)
B. Disponer de un esquema de representación geométrico e idealizado de propagación de la luz potencialmente explicativo	<ul style="list-style-type: none"> • Inducen a creer que la luz, o los rayos de luz, se ven. (Obstáculo 4) • No modelizan las fuentes luminosas extensas como conjuntos de fuentes puntuales emisoras de luz en todas las direcciones. No trazan haces divergentes de luz desde cada punto de la fuente luminosa. (Obstáculo 5) • No utilizan las consecuencias geométricas de la propagación de la luz para predecir fenómenos ópticos. (Obstáculo 9)
C. Utilizar el concepto de imagen óptica del modelo de visión de Kepler	<ul style="list-style-type: none"> • No explican que la imagen se forma punto a punto a partir de haces divergentes. (Obstáculo 8) • No explican claramente las diferencias entre imágenes reales y virtuales (Obstáculo 7) • No explican claramente que una imagen virtual solo existe en presencia de un observador. (Obstáculo 7)
D. Conocer los límites de validez de la óptica geométrica para explicar cómo vemos	<ul style="list-style-type: none"> • No explican el campo de aplicabilidad de la óptica geométrica. (Obstáculo 9) • No consideran que en la sensación de la visión participa en último término la mente (ilusiones ópticas, interpretación de lo que vemos, etc.). (Obstáculo 9) • No consideran los modelos y teorías científicas como algo en continua construcción. (Obstáculo 9)

Fuente: Elaboración propia.

A continuación, mostramos la Tabla 8.4 en la que detallamos las claves para comprender el modelo ondulatorio de la luz y las relacionamos con los obstáculos que muchas veces manifiestan los libros de texto.

Tabla 8.4. Relación entre los conceptos clave para comprender la naturaleza de la luz y los errores conceptuales que a menudo manifiestan los libros de texto y los docentes.

Para comprender cuál es la naturaleza de la luz y cómo se comporta, es necesario:	Sin embargo, algunos libros de texto y algunos docentes:
A. La consideración de la naturaleza heterogénea de la luz blanca.	<ul style="list-style-type: none"> • No explican claramente que la luz no se modifica al interaccionar con los objetos. (Obstáculo 10) • No explican claramente que el color no es una propiedad de la luz o de los objetos. (Obstáculo 14)
B. Utilizar el modelo ondulatorio para interpretar fenómenos ópticos y dar cuenta de los límites del modelo geométrico	<ul style="list-style-type: none"> • No consideran la luz como una entidad Física. (Obstáculo 10) • No explican las características propias de la naturaleza de la luz. (Obstáculo 11) • No explican el carácter electromagnético de la luz “visible” que hace innecesario un soporte material para su propagación. (Obstáculo 13) • Consideran válido el modelo ondulatorio para explicar unos fenómenos y el geométrico para otros. (Obstáculo 15) • No explican que las distintas frecuencias de las ondas lumínicas viajan a la misma velocidad en el vacío y a distinta velocidad en los medios transparentes (dispersión de la luz) (Obstáculo 12)
C. Concebir el color como una sensación que se obtiene a partir de la respuesta diferencial de tres fotorreceptores retinianos al tipo de luz incidente	<ul style="list-style-type: none"> • No consideran el carácter heterogéneo de la luz “blanca”. (Obstáculo 10) • No relacionan la sensación de color con la diferente respuesta de los fotorreceptores retinianos a la luz incidente. (Obstáculo 14)

Fuente: Elaboración propia

Es por ello por lo que nos planteamos el desarrollo de una Unidad Didáctica basada en la metodología de enseñanza-aprendizaje basada en la resolución de problemas. Consideramos que una metodología constructiva, y unos materiales de trabajo adecuados, pueden ayudar a una comprensión satisfactoria de la óptica.

8.2. Toma de decisiones para elaborar la estructura problematizada de un tema de óptica de 2º de Bachillerato.

El grupo de investigación del Departamento de Didáctica General y Didácticas Específicas de la Universidad de Alicante ha desarrollado y probado la enseñanza por investigación orientada en repetidas ocasiones (Verdú, 2004), llegando a conseguir un protocolo para la planificación de la enseñanza problematizada. Nuestra propuesta, basada en este protocolo de planificación, es la puesta en práctica de la enseñanza

problematizada del bloque de contenidos de “La Óptica” de 2º Bachillerato. La Unidad Didáctica que proponemos consta de dos partes, una referida a la óptica geométrica de 2º de Bachillerato basada en el trabajo realizado por Osuna (2007), y otra parte en la que proponemos un tratamiento problematizado para la óptica Física, completamente novedosa.

Nuestra propuesta sostiene una aproximación al estudio de la óptica en su conjunto, considerándola como “ciencia de la visión”. Esta idea integra el desarrollo histórico de las diversas teorías sobre la luz y la visión, siendo más apropiada para el currículo escolar, pues facilita el cambio conceptual en los estudiantes. Consideramos que el estudio de la visión, por su cercanía, puede hacer que los alumnos se interesen en la comprensión de la naturaleza de la luz y sus propiedades. El estudio histórico de la luz se puede utilizar como herramienta didáctica tanto por razones metodológicas como científicas. Por ejemplo, para ayudar a los alumnos a comprender la naturaleza y el rol de los modelos científicos, dando relevancia a la existencia paralela de dos modelos que compiten entre sí, como ocurre en el caso de la óptica. Además, mediante el estudio histórico de la óptica, se enfatiza el hecho de que los modelos no pueden representar completamente un fenómeno natural, sino que solamente representan una parte de él, y que un modelo o un conocimiento científico no es cierto ni invariable. Finalmente, el desarrollo de las ideas de los estudiantes acerca de cierto fenómeno es, en algunos casos, similar al desarrollo de los modelos científicos de conocimiento.

Por otro lado, creemos que el modelo geométrico de la luz, que no incluye ninguna suposición acerca de su naturaleza, puede jugar un papel decisivo para estructurar el aprendizaje de la óptica. Al inicio de la enseñanza de la óptica, se ha de introducir la relación entre las teorías y los modelos, destacando que la óptica geométrica no tiene en cuenta la naturaleza de la luz, para evitar la relación los estudiantes en ocasiones pueden establecer entre el modelo geométrico y la naturaleza corpuscular de la luz. Basándonos en el modelo geométrico podemos diseñar estrategias de enseñanza aprendizaje para que los alumnos comprendan algunos fenómenos de la luz, en concreto aquellos fenómenos que Newton pensaba que se podían examinar sin tener en cuenta la naturaleza de la luz. Estos fenómenos serían la reflexión, refracción, el carácter heterogéneo de la luz. El hecho de trabajar con un modelo que no haga referencia a la naturaleza de la luz permite que los estudiantes trabajen con un menor número de conceptos, de manera que puedan comprender de manera más sencilla dichos fenómenos en estudio. Consideramos que este

modelo es útil siempre que se utilice como hipótesis para resolver la cuestión inicial de cómo vemos, es decir para explicar el modelo de visión humano.

Una vez comprendido el modelo de visión del ser humano, y de tener un modelo geométrico idealizado de la luz, los estudiantes pueden abordar el estudio de la naturaleza de la luz. Es decir, pueden preguntarse si la luz se comporta como una onda o como un conjunto de partículas. Cualquier modelo sobre la naturaleza de la luz tendrá que poder explicar los fenómenos que habían estudiado en la óptica geométrica. Un modelo adecuado proporciona a los alumnos un modo adecuado para revisar y cambiar si es necesario sus ideas previas más arraigadas (Poyla, 1954), pero es necesario en todo momento relacionar el modelo propuesto con la realidad, para que los alumnos lo integren en su sistema de conocimiento. Es por ello por lo que en el desarrollo de nuestra Unidad Didáctica sobre óptica tratamos de acercar el formalismo matemático a las experiencias reales de los alumnos, para intentar modificar así sus conceptos previos erróneos más arraigados. Lo hacemos mediante una interrelación constante entre dicho formalismo y las actividades de laboratorio necesarias para su comprensión.

8.3. Planificación de un tema de óptica de 2º de Bachillerato desde el modelo de enseñanza problematizada.

Para organizar un tema desde el modelo de enseñanza problematizada, hemos de reflexionar acerca de qué problemas hemos de plantear y abordar, para que los alumnos consigan un aprendizaje real del tema.

Las cuestiones que han guiado nuestra investigación para desarrollar la Unidad Didáctica son:

¿Cómo vemos?

¿Cómo se comporta la luz para que podamos ver bien?

¿Cuál es por tanto la naturaleza de la luz?

¿Qué conocimientos nos gustaría que aprendieran nuestros alumnos sobre óptica, que tengan capacidad explicativa y predictiva como para ser útiles, y con suficiente entidad para que sean objeto de enseñanza?

Basándonos en estas preguntas, establecemos el índice de nuestra unidad, de manera que siga la lógica de una investigación, llegando siempre a una recapitulación mediante la evaluación de lo que se ha avanzado.

Basándonos en el trabajo previo de Osuna (2007) con estudiantes de Educación Secundaria Obligatoria (ESO), hemos establecido una serie de pasos que nos han guiado en el estudio histórico-epistemológico para adquirir el conocimiento necesario para plantear la enseñanza problematizada de la óptica de 2º de Bachillerato, siempre con una finalidad didáctica. Los hemos estructurado en varios apartados:

1. Determinar los problemas que estuvieron en el origen de las teorías de la luz y la visión. ¿Qué nos gustaría que nuestros alumnos aprendiesen sobre este problema?

Al hacernos esta pregunta hemos podido identificar el objetivo clave, es decir, aquello que queremos que los alumnos aprendan tras el proceso de enseñanza-aprendizaje. Para que sea relevante su estudio, éste objetivo clave ha de tener suficiente poder explicativo.

2. Entre los problemas propuestos, seleccionar los más adecuados para iniciar el proceso de investigación.

La selección está orientada por su interés a la hora de organizar el plan de investigación y la actividad del aula en torno a él. No tiene por qué ser necesariamente el problema tal cual surgió históricamente, incluso, a veces, puede no ser deseable.

3. Establecer las ideas o conocimientos que supusieron avances para solucionar el problema y alcanzar el objetivo clave, y definir los obstáculos asociados.

Este estudio nos permite identificar objetivos más concretos y posibles obstáculos asociados, a los que necesariamente se ha de prestar atención para avanzar en la solución del problema. Se ha de seleccionar aquellos conocimientos que deben ser adquiridos por los alumnos para conseguir el objetivo clave, la solución al problema estructurante. Se ha de tomar conciencia de las dificultades con que se encontraron diferentes equipos de científicos, y de las ideas, pruebas, argumentos, condicionamientos técnicos y sociales, que hicieron posible, u obstaculizaron el avance en la investigación.

4. Determinar las ideas y razonamientos que pueden tener los alumnos sobre los aspectos anteriores que supongan obstáculos para el aprendizaje y que, por tanto, deban ser tomados en consideración. Determinar así mismo otros aspectos necesiten saber y saber hacer para que el avance sea posible.

Es necesario conocer las ideas y razonamientos de los alumnos sobre los conocimientos que consideramos clave para planificar adecuadamente la secuencia de actividades teniéndolas en cuenta. Hemos de basarnos en la semejanza existente entre las barreras históricas más importantes y las ideas espontáneas más arraigadas (Wandersee, Mintzes y Novak, 1994).

Este estudio empírico nos permite unir el desarrollo de secuencias de enseñanza aprendizaje con la investigación sobre las ideas previas de los alumnos. Ello evita estudios desligados del trabajo en el aula, y proporciona un conocimiento muy útil para elaborar las actividades pertinentes en el desarrollo del tema y también para la evaluación.

5. Determinar la estrategia conveniente para avanzar en la solución a los problemas iniciales, de modo que los alumnos estén orientados.

El profesor ha de planificar una estrategia para avanzar en la resolución del problema basada en la lógica de la investigación. Dicha estrategia se convertirá en el índice del tema. El profesor ha de conocer los obstáculos que previsiblemente encontrarán los alumnos, y las claves necesarias para superarlos, debe de crear un ambiente genuinamente hipotético-deductivo, en una estrategia ligada tanto intencional, como lógicamente al problema planteado.

6. Establecer el plan concreto de investigación que se ha de proponer a los alumnos para desarrollar la estrategia propuesta. Planificar la evaluación para que se convierta en un instrumento que oriente e impulse la buena marcha de la investigación.

Dicho plan de investigación constituirá nuestra Unidad Didáctica, una secuencia de actividades concretas que se van a proponer a los alumnos en el aula, junto con el sistema de evaluación concebido para impulsar el aprendizaje. El plan de investigación propuesto ha de ser considerado como una hipótesis hasta probar que con él se proporcionan las oportunidades adecuadas para aprender conocimientos científicos, poner en práctica la epistemología científica dentro de lo posible en el contexto escolar, y aprender los aspectos básicos sobre la naturaleza de la (Hodson, 1992).

Para que los alumnos tengan una visión correcta del trabajo científico estos problemas han de integrar la resolución de problemas de “papel y lápiz”, el aprendizaje conceptual, y los trabajos prácticos, ya que en la actividad científica no se puede trabajar por separado

teoría, prácticas, problemas y evaluación. Chalmers (1984) destaca que la producción científica no puede ceñirse a un método basado en una serie de pasos, cuyo seguimiento produzca un conocimiento verdadero. Monk y Osborne (1997), mantienen que la epistemología de la ciencia no se ha de basar únicamente en el componente metodológico, sino que se ha de dar importancia igualmente al interpretativo. Es decir, no basta conocer las reglas, sino que hay que llegar al significado profundo de conocer, que sería comprender las reglas. Es muy importante para ello considerar la evaluación como medio para orientar e impulsar el aprendizaje.

El modo de conocer intuitivo de los alumnos y el modo de conocer coherente con el modelo científico, que pretendemos que adquieran los estudiantes en la educación formal, difieren esencialmente en los principios conceptuales (Pozo y Gómez Crespo, 1998), epistemológicos (Vosniadu, Brewer, 1994), y ontológicos (Chi, 2002) que subyacen a ellos y que guían la manera en que los alumnos interpretan y explican los fenómenos.

Aprender ciencias implica no sólo que los alumnos han de comprender el modelo explicativo aceptado, sino también que:

- a) Los alumnos han de reconocer el conocimiento científico como un modo de conocer potencialmente útil para explicar situaciones diversas, aunque sea diferente a su propio modo de conocer. Los alumnos han de aprender a utilizar el conocimiento científico con coherencia argumentativa.

Como docentes, hemos de evitar que en la mente de los estudiantes coexistan sus ideas iniciales y las construidas con la enseñanza. Hemos de ayudar a los alumnos a utilizar conscientemente y con criterio, el modo de conocer que necesiten en función del contexto y del problema que tenga que abordar.

- b) Los alumnos han de ser conscientes del proceso de aprendizaje experimentado a lo largo de la enseñanza y de lo que implica aprender ciencias y de reflexionar críticamente al respecto.

Hemos de promover que los alumnos desarrollen una actitud crítica sobre su proceso de aprendizaje, evaluando qué aprendieron y cómo, para reconocer aquellas herramientas que les han sido útiles y que podrían continuar usando para seguir aprendiendo.

Nuestra propuesta incluye diversas actividades, en las que los estudiantes han de involucrarse en el diseño y realización de pequeñas experiencias, la resolución de

problemas de lápiz y papel, las búsquedas de bibliografía, y la construcción de modelos. Estas actividades propuestas implican la disposición del docente para ayudar a los alumnos a clarificar su modo de conocer y presentarles el modo de conocer de la ciencia. Hemos de enseñar procedimientos relacionados con la elaboración de explicaciones y la aplicación de los modelos de la ciencia. Finalmente, es nuestra labor guiar a los estudiantes en el análisis crítico y reflexivo respecto de qué y cómo han aprendido. Con esta forma de trabajo tratamos de favorecer que los alumnos hagan explícitas sus ideas propias, y además las comparen con las de sus compañeros. En este ambiente hipotético deductivo, se suceden situaciones en las que los alumnos han de argumentar y justificar, siendo, por tanto, sumamente propicio para el aprendizaje de conocimientos científicos (Newton, Driver y Osborne, 1999; Driver, Newton y Osborne, 2000).

En definitiva, se trata de crear un ambiente que favorezca simultáneamente la implicación afectiva y la racionalidad científica de todos los afectados (profesor y alumnos) en la resolución de los problemas. Por supuesto, ello exige una cuidadosa planificación de la tarea por el profesor, mediante programas concretos de investigación dirigida (programas de actividades debidamente estructuradas), que permitan que haya siempre tiempo libre en el aula para que los alumnos piensen, argumenten y refuten.

8.4. Puntos en base a los que se organiza el estudio histórico-epistemológico para tomar decisiones y concretar la estructura problematizada de la Unidad Didáctica.

El contenido del currículo trata de la interacción de la luz con el mundo y el observador, pero no presta atención al mecanismo de visión y sus consecuencias, pudiendo suceder que las ideas iniciales de los alumnos acerca de la realidad externa permanezcan intactas después de la instrucción formal. Nosotros proponemos una aproximación a la óptica considerándola como “ciencia de la visión”, pues a nuestro modo de entender integra el desarrollo histórico de las teorías sobre óptica, y es más apropiada para el currículo escolar. Creemos que es la mejor manera de abordar las ideas erróneas de los estudiantes, y facilitar en ellos el cambio conceptual. El estudio de los fenómenos asociados con la visión requiere en el aula de ciencias un docente capaz de comprender los modelos propuestos por la física (que explican la naturaleza de la luz y su interacción con la materia), la biología (que se ocupa del funcionamiento y fisiología del ojo), la química (que explica la transformación energética que se produce al estimularse las células fotosensibles) y la psicología (que intenta interpretar la percepción del objeto y del color).

A continuación, presentamos, en primer lugar, los conocimientos potencialmente explicativos y con capacidad predictiva que queremos que aprendan nuestros alumnos sobre óptica, de acuerdo con nuestra concepción de la óptica como “ciencia de la visión”. Basándonos en ellos hemos de determinar el objetivo clave y el problema estructurante. En segundo lugar, partiendo de estos conocimientos, planteamos las ideas que contribuyeron a solucionar el problema estructurante y los obstáculos que hubo que superar. Esto nos permitirá identificar las metas parciales y prever las dificultades y obstáculos que pueden tener nuestros alumnos para comprender las ideas necesarias para avanzar en la resolución del problema. Podremos entonces finalmente, definir la estrategia a seguir para avanzar en la resolución del problema planteado. Ello nos permitirá establecer el índice de la Unidad, que ha de ser un itinerario de enseñanza que ha de responder a una lógica de investigación, y en el que se ha de prever un momento de recapitulación y de la evaluación de lo que se ha conseguido avanzar.

1. Conocimientos que queremos que aprendan nuestros alumnos sobre óptica, que sean potencialmente explicativos, que tengan capacidad predictiva para ser útiles y que tengan suficiente entidad para que sean objeto de enseñanza.

Conocimientos que nos gustaría que aprendieran nuestros alumnos:

¿Qué hace falta para que la visión sea posible?

¿Cómo vemos?

¿Qué diferencia hay entre fuentes de luz primarias y secundarias?

¿Qué es la imagen y cómo se forma?

¿Cómo se ve un objeto a través de un espejo?

¿Cómo se ve un objeto sumergido en un medio transparente?

¿Cómo se comportan las lentes? ¿Cómo nos ayudan a ver mejor?

¿Cómo funcionan los telescopios y microscopios?

¿Cuál es la naturaleza de la luz?

¿Cómo se produce la luz?

¿Cómo se propaga la luz?

¿Cómo podemos explicar el color?

¿Qué influencia tiene la naturaleza de la luz en el hecho de que podamos ver?

Objetivo clave: Comprender cómo vemos y cuál es la naturaleza de la luz.

Problema estructurante: ¿Qué es la luz y cómo se comporta para que podamos ver?

2. Ideas que contribuyeron a solucionar el problema.

Ideas que contribuyeron a comprender cómo vemos y cuál es la naturaleza de la luz.

Modelo de Kepler para explicar la visión directa, a través de medios transparentes y en espejos.

Limitaciones del modelo de Kepler: difracción (Grimaldi), interferencia (versión Grimaldi), naturaleza de la luz.

Naturaleza heterogénea de la luz. *Experimentum crucis* de Newton.

Naturaleza ondulatoria de la luz: Huygens.

Naturaleza electromagnética de la luz. Síntesis de Maxwell.

Física cuántica. Explicación de la dualidad onda corpúsculo

Compatibilidad de los modelos de naturaleza de la luz con la óptica geométrica.

3. Obstáculos que hubo que superar.

Obstáculos que hubo que superar.

Comprender que de los objetos sale luz, aunque no sean emisores primarios.

Comprender que la luz en sí misma no se puede ver.

Comprender que es necesario que entre luz al ojo (un haz divergente) para que podamos ver los objetos.

Comprender el funcionamiento de las lentes.

Comprender el funcionamiento de los espejos.

Comprender que hay fenómenos que no se pueden explicar con el modelo de Kepler.

Desarrollar un nuevo modelo que pueda explicar dichos fenómenos.

Comprender el modelo ondulatorio de Huygens.

Comprender que la luz no se propaga instantáneamente.

Comprender la naturaleza electromagnética de la luz. Síntesis de Maxwell.

Comprender que es necesario manejar los dos modelos de la naturaleza de la luz para describir los diferentes experimentos.

Comprender la evolución de las teorías de la luz a lo largo de la historia y su implicación en la filosofía y la sociología de la ciencia.

Comprender la naturaleza heterogénea de la luz.

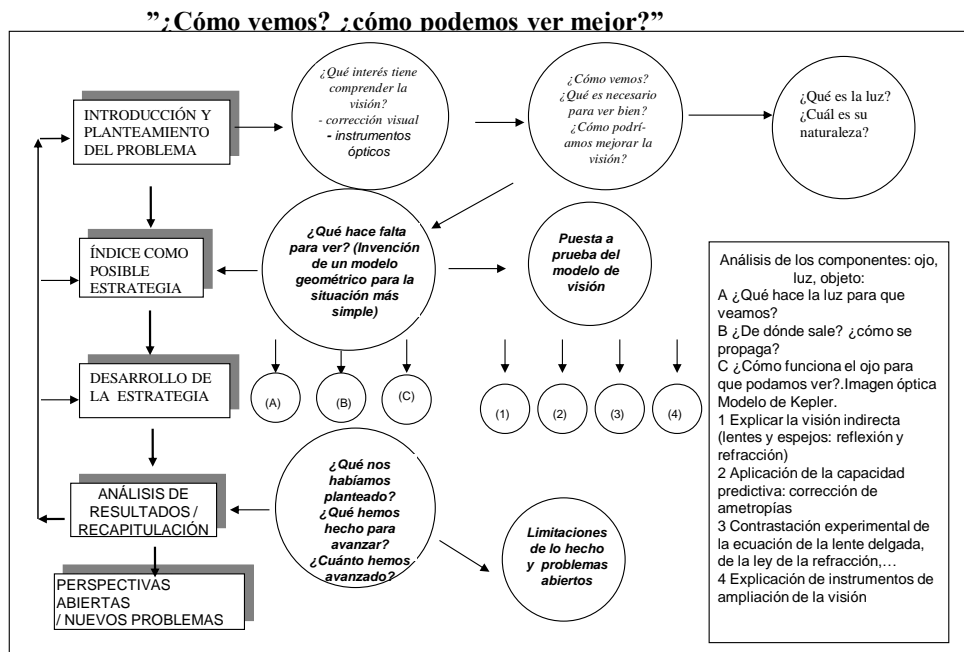
Comprender que los modelos que confeccionamos son simplemente un modo de explicar la realidad, no la realidad en sí misma.

Comprender que hay nuevos objetivos sobre los que trabajar para profundizar en la comprensión de los fenómenos ópticos.

- Definir la estrategia a seguir para avanzar en la resolución del problema planteado. Ello nos permitirá establecer el índice de la Unidad, que ha de ser un itinerario de enseñanza que ha de responder a una lógica de investigación, y en el que se ha de prever un momento de recapitulación y de la evaluación de lo que se ha conseguido avanzar.

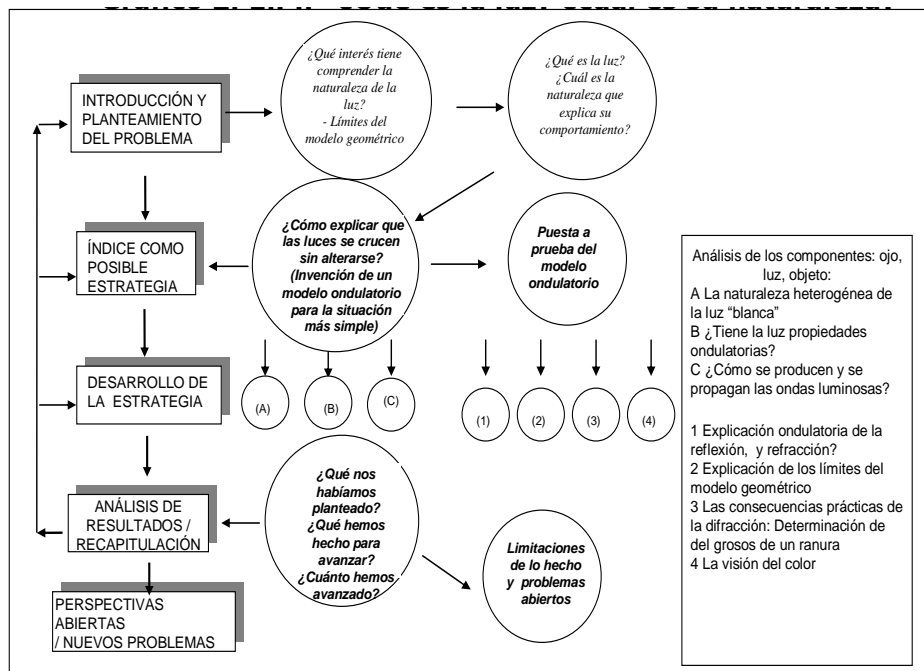
A continuación, mostramos en las Tablas 8.5 y 8.6 los gráficos de estructura del proceso que hemos seguido para la elaboración de la unidad de óptica en 2º de Bachillerato. En primer lugar, nos planteamos el problema, posteriormente establecemos un índice del tema que responda a una estrategia para resolverlo, tras lo cual desarrollamos la estrategia para llevarlo a cabo, finalmente mediante el análisis de resultados podemos establecer nuevos problemas de investigación y volver a establecer un nuevo ciclo.

Tabla 8.5. Gráfico de estructura. ¿Cómo vemos? ¿Cómo podemos ver mejor?



Fuente: Basado en Osuna (2007).

Tabla 8.6. Gráfico de estructura. ¿Qué es la luz? ¿Cuál es su naturaleza?



Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, tras años de trabajo y de mejora, hemos diseñado una Unidad Didáctica problematizada para la enseñanza de la óptica en 2º de Bachillerato. En el Anexo III adjuntamos la Unidad Didáctica que experimentamos en el año 2019, y en el Anexo VII nuestra Unidad Didáctica final que experimentamos con los alumnos en 2020.

A continuación, mostramos alguna de las actividades de la Unidad Didáctica.

8.5. Ejemplos de actividades de nuestra Unidad Didáctica.

Mediante la primera parte de la Unidad Didáctica utilizando la metodología de enseñanza-aprendizaje por resolución de problemas se busca la elaboración de un modelo geométrico de la luz que explique la visión humana. A lo largo de dicho proyecto, intentaremos ir dando respuesta a los siguientes interrogantes, que consideramos parte de una estrategia que recogemos en el índice:

Elaboración de un modelo geométrico de la luz que explique la visión humana.

1. ¿Cómo vemos los objetos al mirarlos directamente?
 - 1.1. El comportamiento geométrico de propagación de la luz
 - 1.2. La función del ojo en el proceso de visión
2. Puesta a prueba del modelo geométrico de visión en la visión indirecta.

- 2.1. ¿Cómo vemos al mirar a los espejos? La reflexión de la luz
- 2.2. ¿Cómo vemos al mirar a través de medios transparentes? La refracción de la luz
 - 2.2.1. ¿Cómo vemos los objetos sumergidos en medios transparentes?
 - 2.2.2. ¿Cómo vemos al mirar a través de las lentes?
3. Aplicaciones tecnológicas del modelo de visión
 - 3.1. La explicación y corrección de las anomalías visuales
 - 3.2. El diseño y construcción de instrumentos de ampliación de la visión: el telescopio y el microscopio
4. Conclusiones y problemas abiertos

Una vez planteado el problema introductorio: ¿qué ocurre con la luz que entra en el ojo? Comenzamos la unidad con actividades basadas en Osuna (2007), en las que los alumnos pueden plantear hipótesis, posteriormente avanzamos hacia una matematización del conocimiento recientemente adquirido, con actividades específicas para 2º de Bachillerato, en las que se relacionan las experiencias de laboratorio con los conceptos propios de este curso más abstracto. Un ejemplo de estas actividades serían las que se muestran a continuación.

Ejemplo actividad 1:

A.8 En las actividades anteriores hemos introducido los siguientes elementos característicos de la lente: Foco objeto (F), Foco imagen (F'), Centro óptico (C) y eje óptico. Utilizando las propiedades de estos elementos realiza trazados gráficos para localizar la posición de la pantalla donde se ve la imagen del objeto en los siguientes casos:

- a) Objeto alejado*
- b) Objeto cercano*
- c) Objeto entre el foco y la lente*
- d) Objeto extenso.*

- I. *¿Qué pretendemos conseguir con esta actividad?* La actividad pretende que los estudiantes se familiaricen con los trazados gráficos de formación de la imagen óptica en un sistema lente convergente-pantalla. Queremos construir junto con los alumnos, un algoritmo que permita localizar a qué distancia de la lente se ha de situar la pantalla para

que se vea la imagen de un objeto. Lo haremos a partir de las características de la lente que habíamos definido experimentalmente, F , F' , C y eje óptico, dando sentido físico al algoritmo que hemos creado.

- II. *¿Qué esperamos que hagan los alumnos?* Creemos que a los alumnos no les resultará fácil integrar todos los conceptos nuevos aprendidos en un algoritmo, al que queremos que den sentido físico. Consideramos que el profesor ha de trabajar mucho para conseguir que los alumnos sean capaces de integrar las actividades experimentales realizadas con el algoritmo creado.
- III. *¿Qué ha de hacer el profesor?* El profesor explicará que la pantalla se tendrá que colocar donde se concentra la luz, que será a una distancia diferente en cada caso. Debe de recordar siempre a los alumnos que utilicen correctamente el concepto de haz. El profesor ha de recoger y analizar las características de los diferentes trazados de las actividades realizadas asegurándose de que los alumnos comprenden el trazado gráfico adecuado para cada actividad. El profesor recordará a los alumnos que los trazados gráficos están basados en el comportamiento de la luz. Les recordará que, si situamos una fuente puntual de luz en el foco de la lente, la imagen se forma en el infinito, o en nuestro caso de experiencia de laboratorio, muy lejos. Esta propiedad de la lente nos servirá para identificar el rayo III. También les recordará que, si situamos un objeto muy lejos de la lente, su imagen se formará en el foco. Nos basamos en esta propiedad para trazar el rayo I. Así mismo explicará a los alumnos que el rayo II es deducido de la geometría del rayo I y III.

Para el caso c), el profesor explicará que si la luz procedente de un punto luminoso, una vez atravesada la lente, no se vuelve a concentrar en un punto, no se puede ver la imagen de dicho punto luminoso para ninguna posición de la pantalla. Se trata de una imagen virtual, es decir, de ninguna manera la luz se puede concentrar en ese punto.

En el caso d), el profesor recordará que las fuentes extensas han de tratarse como si fueran un conjunto de fuentes puntuales. Explicará una vez más que podemos coger dos puntos en ambos extremos y realizar el trazado gráfico para cada uno de ellos, deduciendo la posición del resto de la imagen. El profesor resaltará el hecho de que la imagen que se forma es invertida respecto al objeto.

Finalmente, como resumen el profesor reflexionará con sus alumnos sobre el hecho de que para encontrar la imagen de un objeto se puede utilizar cualesquiera dos, de los tres rayos que hemos definido en nuestro algoritmo, siempre ligados a la experiencia de

laboratorio. También recordará que el rayo en sí mismo no es nada, que simplemente delimita el haz de luz que seleccionamos.

El profesor realizará los siguientes trazados para aclarar las anteriores explicaciones:

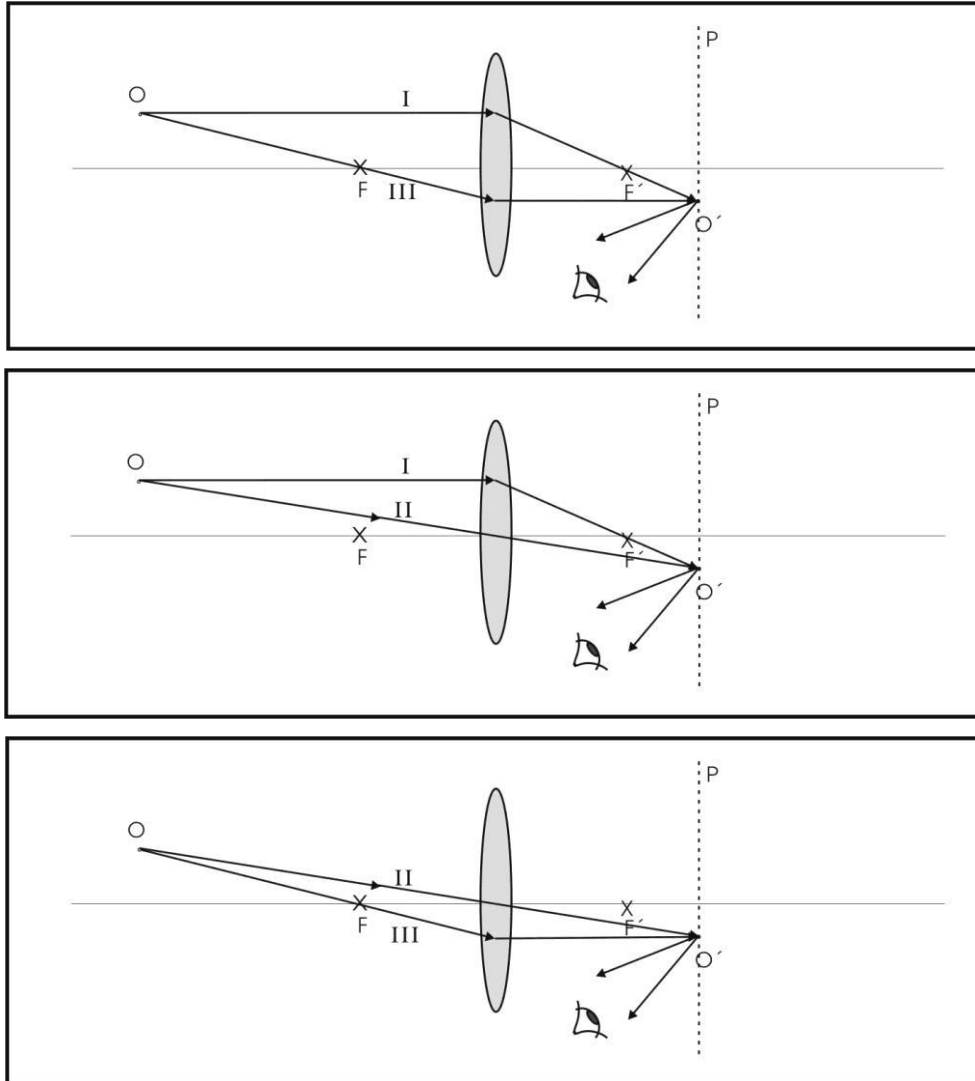


Imagen 8.1. Trazado del haz de luz que procede de un objeto y atraviesa una lente puntual. Utilización de los rayos I, II y III. Elaboración propia

El profesor debe de trazar siempre el haz de luz total para que los alumnos interioricen que toda la luz que sale del objeto y pasa por la lente va a parar al punto imagen O' , independientemente del trazado de rayos que elijamos para encontrar el punto imagen.

Les mostrará el siguiente trazado para clarificarlo:

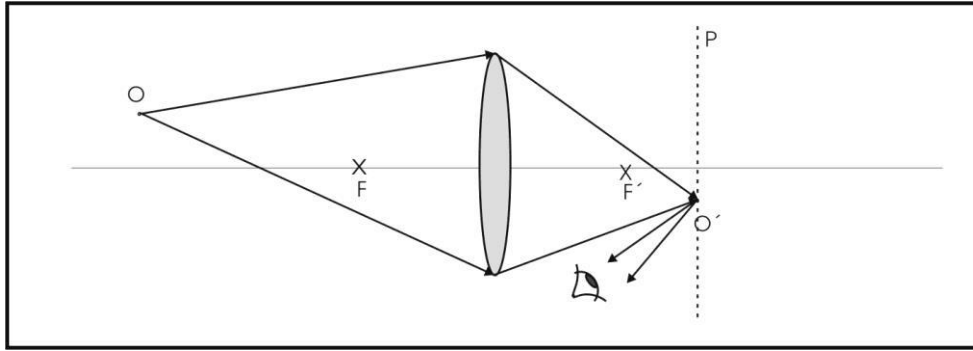


Imagen 8.2. Trazado del haz de luz total que sale de un objeto y atraviesa una lente convergente para concentrarse en un punto. Elaboración propia.

Recordará a los alumnos que no se utiliza el trazado con el haz completo porque no se sabría dónde se formaría la imagen. Sin embargo, mediante las propiedades del foco objeto y foco imagen, y su aplicación al dibujo mediante los rayos III y II, si se logra encontrar la posición en la que se forma la imagen.

Ejemplo actividad 2:

Relacionada con la Actividad 8 planteamos la siguiente actividad para demostrar matemáticamente, una vez comprendidos los conceptos fundamentales relacionándolos siempre con las actividades de laboratorio, una de las ecuaciones más utilizadas en la resolución de problemas en lentes en óptica de 2º de Bachillerato:

A.12 A partir del trazado geométrico realizado en la A.8 deducid una relación entre las distancias del objeto y de la pantalla a la lente y su distancia focal.

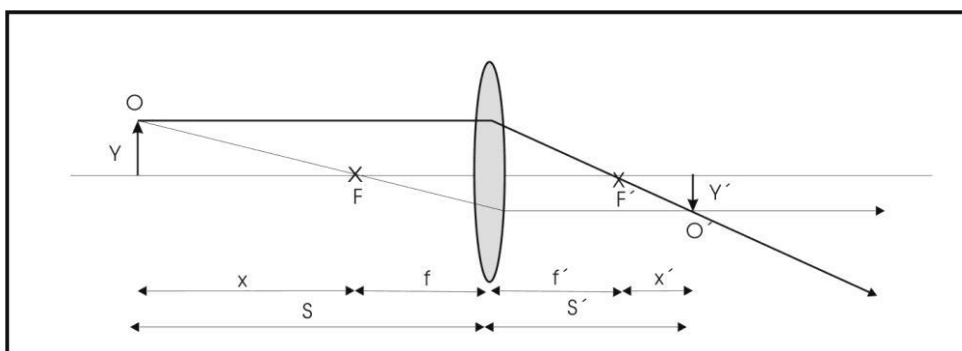


Imagen 8.3. Trazado geométrico de la formación de la imagen relacionándolo con las distancias del objeto, de la pantalla y la distancia focal. Elaboración propia.

I. *¿Qué pretendemos conseguir con esta actividad?* Queremos que los alumnos relacionen las s y s' , con las x y x' de la fórmula de Newton, ya que de ellas se deriva la ecuación de proporcionalidad más sencilla.

II. *¿Qué esperamos que hagan los alumnos?* Esperamos que los alumnos comprendan por sí mismos las siguientes relaciones entre s , s' y p .

$$s' = f(s, p)$$

Si s es grande, entonces s' es pequeño. Existe dos casos límite, uno cuando s tiende a infinito para el que s' tiende a f' , y otro cuando s tiende a f que s' tiende a infinito.

Por otra parte, si la potencia de la lente es grande la distancia a la que se forma la imagen de un objeto dado será pequeña.

III. El profesor introducirá x y x' , definiendo $x' = f(x, p)$

Explicará a los alumnos que si x aumenta x' disminuye. Así mismo, si P aumenta x' aumenta.

Comentará a los alumnos que con x y x' encontramos una relación de proporcionalidad directa.

A partir del dibujo de la formación de la imagen de un objeto, mediante la utilización de la proporcionalidad entre triángulos semejantes, se pueden encontrar las siguientes relaciones de proporcionalidad.

$$x/f = y/y'$$

$$x'/f' = y'/y$$

Igualando encontramos:

$$x/f = f'/x'$$

De donde podemos agrupar:

$$x \cdot x' = f \cdot f'$$

x. $x' = \text{cte.}$

Si se hace experimentalmente, y se representan gráficamente los datos obtenidos, se obtienen gráficas similares a las siguientes:

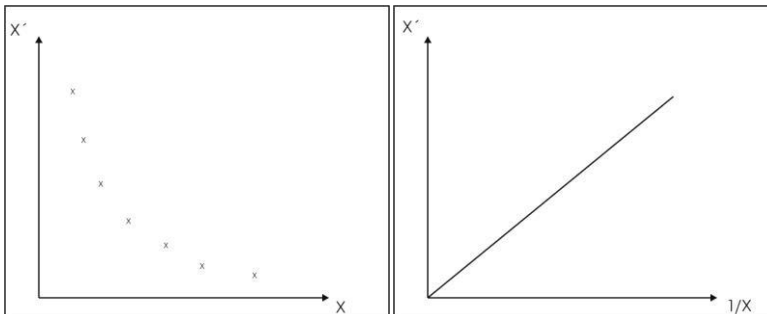


Imagen 8.4. Gráfica que relaciona x y x' ; y x' y $1/x$. Elaboración propia.

Se puede transformar la fórmula de Newton en la ecuación Gaussiana de las lentes utilizada habitualmente para resolver problemas analíticamente:

$$(s - f) \cdot (s' - f') = ff'$$

$$ss' - sf' - fs' + ff' = ff'$$

$$ss'/ss' - sf'/ss' - fs'/ss' = 0$$

$$1 = f'/s' + f/s$$

$$\mathbf{1/s + 1/s' = 1/f'}$$

Más adelante en la Unidad Didáctica abordamos la formación de imágenes en los espejos cóncavos y sus características.

Ejemplo actividad 3:

A.24 Conociendo los elementos ópticos del espejo esférico cóncavo en la aproximación paraxial (F , R , C , eje óptico) y sabiendo que la imagen es real para objetos alejados:

a) Realiza un trazado gráfico para localizar la posición donde deberíamos situar la pantalla para ver la imagen del objeto AB .

b) Deduce de la geometría de este trazado una relación entre s , s' y f' , que nos permita conocer donde vemos la imagen real formada por un espejo esférico cóncavo. (Se recomienda que se compare este trazado con el realizado en la lente convergente)

c) Deduce, igualmente, la relación entre el aumento lateral (β) y las distancias s y s' .

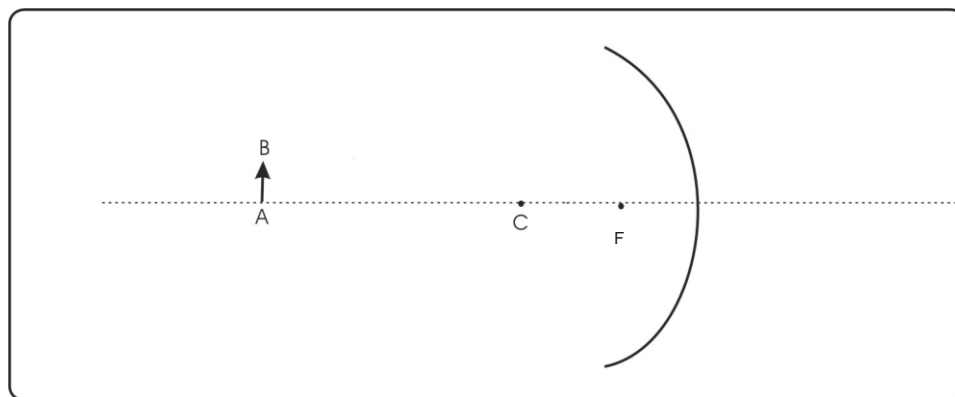


Imagen 8.5. Formación de la imagen de un objeto extenso utilizando un espejo cóncavo. Elaboración propia.

I. *¿Qué pretendemos conseguir con esta actividad?* Queremos que los alumnos consigan dibujar el trazado de rayos necesario para deducir la posición en la que se forma la imagen de objetos extensos, a partir de lo estudiado anteriormente para lentes y de lo que hemos aprendido para espejos. Queremos que los alumnos recuerden la expresión encontrada para la localización de imágenes mediante una lente convergente. Queremos que relacionen ambos trazados.

III. *¿Qué ha de hacer el profesor?* El profesor debe de insistir en las similitudes de los trazados gráficos, siendo el del espejo cóncavo simétrico del trazado del de las lentes convergentes, utilizando en ambos casos hace delimitados por un rayo que viene del infinito y pasa por el foco, rayo I, y por el otro rayo que pasando por el foco van hacia el infinito, rayo III. EL profesor ha de insistir en que, dada la simetría del trazado, se puede utilizar la misma expresión que se había utilizado para las lentes, y recordará a los alumnos la expresión de las lentes convergentes.

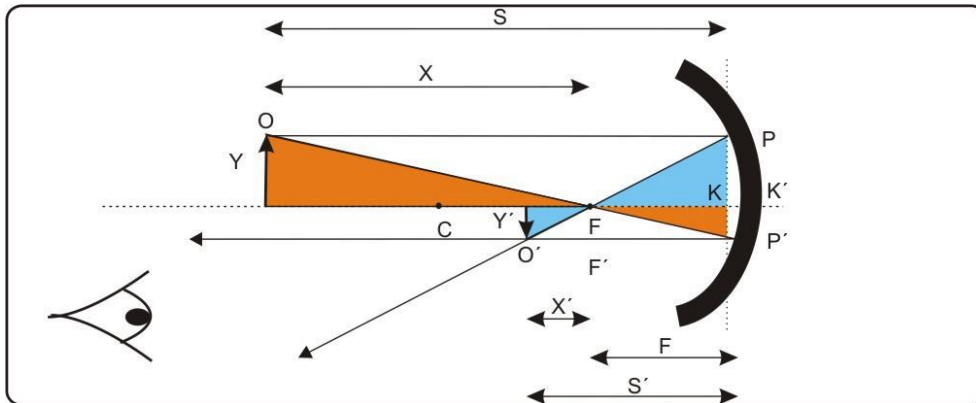


Imagen 8.6. Trazado gráfico de la formación de la imagen y su relación con la distancia focal del espejo y las distancias del objeto al espejo, y de la imagen al espejo. Elaboración propia.

El profesor también explicará que la demostración de la fórmula basada en triángulos semejantes. Así mismo explicará que debido a que como hemos visto antes, solamente el espejo cóncavo forma imagen para haces de luz que inciden muy cerca de su centro, lo que hemos estado denominando aproximación paraxial, la distancia kk' tiende a cero. Por tanto, podemos deducir, a partir de la utilización de triángulos semejantes que:

$$Y/Y' = X/F;$$

$$Y/Y' = F/X'$$

De dichas expresiones podemos deducir que:

$$X/F' = F/X'$$

Y, por tanto:

$X \cdot X' = F \cdot F'$ Que es la ecuación de Newton que hemos utilizado previamente para las lentes.

Como hemos deducido en el caso de las lentes, a partir de esta expresión se puede deducir fácilmente que:

$$1/s + 1/s' = 1/f$$

Que es la ecuación más utilizada para encontrar analíticamente la posición de la imagen de un objeto situado a una distancia s del espejo, cuya focal es f .

En estas actividades de relación del formalismo gráfico con el matemático, intentamos proponer enunciados que acerquen la actividad de nuestro proyecto a situaciones reales que viva el alumnado.

Ejemplo actividad 4:

A.25 Cuando el espejo esférico cóncavo (caso de espejo de maquillaje) se utiliza para ver objetos cercanos, entre el foco y el espejo, ¿Cómo es la imagen que vemos? Realiza un trazado gráfico explicativo.

De la geometría del trazado, podemos deducir como en casos anteriores, que la expresión: $1/s + 1/s' = 1/f$

Dado que en este caso la imagen es virtual, a la distancia s' se le asignará un signo menos.

II. El profesor realizará el siguiente dibujo explicativo:

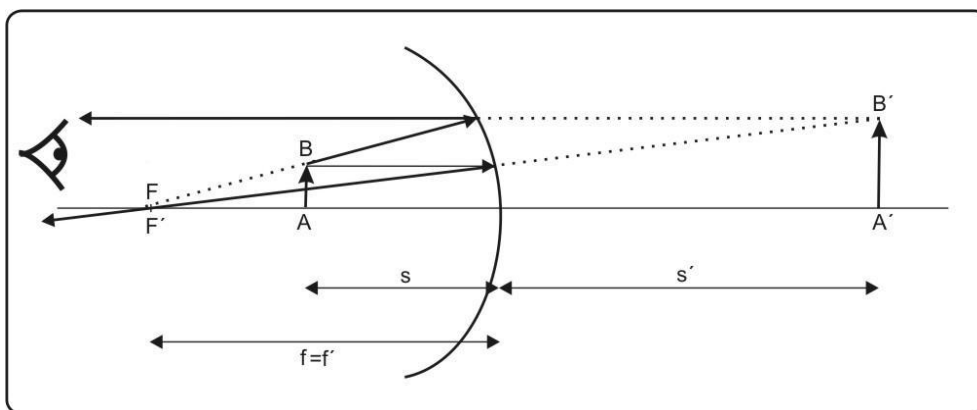


Imagen 8.7. Dibujo explicativo de la formación de la imagen de un objeto extenso en un espejo cóncavo con objetos más cercanos al espejo que la distancia focal. Elaboración propia.

Además, en distintas aplicaciones, como en cruces de calles de escasa visibilidad, se usan espejos esféricos convexos. Para comprender cómo vemos al mirar a estos espejos debemos realizar razonamientos similares a los anteriores. Consideraremos, de igual modo, la aproximación paraxial al estudiar la formación de imágenes que vemos.

Hemos mostrados solamente 4 de las 60 actividades de las que consta la primera parte de nuestra Unidad Didáctica, las más relacionadas con el formalismo matemático necesario para resolver los ejercicios EBAU relativos a estos contenidos del currículo. No obstante, como se puede ver en el Anexo VII hay muchos tipos de actividades, muchas de ellas experimentales, como las que se muestran a continuación.

Ejemplo actividad 5:

A.34. Diseña una experiencia para encontrar una relación entre el ángulo de incidencia y el ángulo de refracción. Llévala a la práctica y, a partir de los datos, encuentra una relación entre $\text{sen } i$ y $\text{sen } r$.

III. El profesor sugerirá la siguiente experiencia:

Se necesita una lente de agua con forma semicircular. Se sitúa un alfiler en un punto y mirando a través del agua se coloca otro alfiler (puede ser sobre un corcho o cartón) donde se vea en línea con la primera. Se repite la experiencia varias veces. Una vez recogidos los datos se realiza una tabla con los ángulos de incidencia y sus correspondientes ángulos de refracción.

Después se elabora una gráfica, en la que se ha de incluir el punto (0, 0). Kepler descubrió que para ángulos de incidencia menores de 20° , la relación entre el ángulo de incidencia y del de refracción era lineal. Sin embargo, para ángulos mayores la relación ya no era de linealidad. La relación entre el ángulo de incidencia y el ángulo de refracción es más compleja. Descartes trató de explicar esta relación con su teoría de los “torbellinos”, y propuso la relación entre los senos de los ángulos.

Si se realiza una tabla con los senos de los ángulos de incidencia y los de refracción, y posteriormente se realiza la representación gráfica, se obtiene una relación lineal:

$$\text{sen } i = K \text{ sen } r$$

Se llamará a la constante de proporcionalidad k índice de refracción del agua respecto del aire, que a partir de ahora denominaremos “ n ”. De acuerdo con la experiencia n tiene que ser mayor que 1.

Se ha realizado esta experiencia para la refracción de la luz cuando viaja desde el aire al agua, y se ha de generalizar esta expresión. Dado que la luz podría tomar el camino inverso, se pueden considerar los ángulos de incidencia y refracción intercambiables. Por tanto, los podemos denominar ϵ_1 y ϵ_2 . Por tanto, la expresión sería:

$$\text{sen } \epsilon_1 = n_2 \text{ sen } \epsilon_2$$

Donde n_2 es el índice de refracción del agua respecto del aire. Si se asigna al índice de refracción del vacío (y del aire aproximadamente) 1, entonces n_2 será el índice de refracción del agua.

La luz también puede pasar del aire a otro medio transparente con otro índice de refracción:

$$\text{sen } \epsilon_1 = n_3 \text{ sen } \epsilon_3$$

Se puede entonces generalizar la expresión de modo que:

$$n_2 \text{ sen } \epsilon_2 = n_3 \text{ sen } \epsilon_3$$

Y así para cualquier medio. La ley de la refracción sería de Descartes sería:

$$n_1 \text{ sen } \epsilon_1 = n_2 \text{ sen } \epsilon_2$$

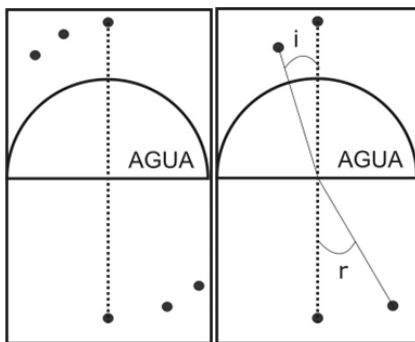


Imagen 8.8. Elaboración propia.

El profesor recordará que en la cara circular de la lente no se produce refracción ya que la luz entra perpendicular a la superficie de separación de los medios, es decir dirección radial en este caso.

La refracción de la luz, o cambio de dirección que se produce al pasar la luz del líquido al aire, en general de un medio transparente a otro, depende del tipo de líquido y, como consecuencia, la profundidad con que se verá la imagen del objeto sumergido cuando se observa desde la vertical, también dependerá del medio donde se encuentre.

Para terminar el tema proponemos actividades de recapitulación y de propuesta de límites de nuestro modelo de visión, muy importantes para introducir la segunda parte de la unidad de búsqueda de un modelo sobre la naturaleza de la luz que pueda explicar dichos límites.

Ejemplo actividad 6:

A.59. Realiza una recapitulación del tema, resaltando cuál era el problema que hemos abordado, las ideas más importantes introducidas, los límites de aplicación que tiene el modelo de visión de Kepler y los nuevos problemas que podemos abordar después de elaborar un modelo geométrico de comportamiento de la luz en la visión.

- I. Queremos que los alumnos recuerden lo que han aprendido a lo largo de la unidad, es decir buscamos que sean conscientes de la construcción de su conocimiento.
- II. Esperamos que los alumnos valoren cómo ha evolucionado su conocimiento de la óptica como ciencia de la visión a lo largo de la unidad.
- III. El profesor recordará a los alumnos las diferentes actividades que se han ido haciendo a lo largo de la unidad, para favorecer así que los alumnos puedan ser conscientes de lo que sabían y de lo que han aprendido.

Ejemplo actividad 7:

A.60. ¿Qué límites de aplicación tiene nuestro modelo de visión?

- I. Queremos que los alumnos comprendan que, aunque el modelo de visión que hemos desarrollado ha servido para explicar numerosas situaciones, hay algunas que no se pueden explicar con este modelo. Queremos que los alumnos sean conscientes de la validez relativa de los modelos en ciencia.
- II. Esperamos que los alumnos pongan de manifiesto algunas situaciones en las que el modelo de visión que hemos construido no explica lo que se ve. Esperamos que comprendan que los modelos científicos tienen un límite de aplicabilidad.
- III. El profesor propondrá situaciones que el modelo de visión construido no pueda explicar. Debe explicar a los alumnos que, en ciencia, la construcción de modelos es necesaria para poder estudiar la realidad, pero es insuficiente con un modelo para abarcar

el estudio completo de la realidad. Se han de utilizar diferentes modelos, según sea la porción de la realidad a que nos enfrentamos.

Finalmente proponemos una serie de problemas abiertos para que los alumnos sean conscientes de que todavía queda mucho por aprender sobre la óptica como ciencia de la visión:

Problemas abiertos relacionados con los límites del modelo de visión de Kepler.

Sabemos que existen límites relacionados con las características modelo de visión de Kepler: la necesidad de utilizar lentes delgadas, el hecho de que se formen halos de colores, la propia fisiología del ojo y del cerebro, las llamadas paradojas visuales. A partir de estas cuestiones a las que no podemos dar respuesta, podríamos animar a los alumnos a que se planteasen si nos ayudaría a abordar esos límites saber cuál es la naturaleza de la luz, qué son los colores, cuál sería el límite de resolución del ojo, etc.

I. Queremos que los alumnos sean conscientes de que aún queda todavía mucho por aprender sobre la óptica como ciencia de visión. Sobre todo, en este momento queremos que se pregunten qué es la luz. Intentamos preparar la introducción para la siguiente parte unidad.

II. Esperamos que los alumnos comprendan que el modelo que estamos utilizando tiene límites de aplicación, y por tanto no puede dar respuesta a los interrogantes planteados. Esperamos que los alumnos planteen la necesidad de utilizar otro modelo para explicar los fenómenos que el modelo de visión de Kepler no puede explicar.

III. El profesor debe ayudar a los alumnos a comprender que el modelo utilizado solamente explica una parte de la óptica, y que necesitamos otro modelo que pueda explicar la naturaleza de la luz, para con él poder estudiar más en profundidad otros fenómenos.

A continuación, mostramos el índice de la parte de la Unidad Didáctica referente a la búsqueda de un modelo que describa la naturaleza de la luz.

Búsqueda de un modelo que describa la naturaleza de la luz.

1. ¿Es el comportamiento de la luz de naturaleza ondulatoria?
 - 1.1. ¿Qué fenómenos confirman esta hipótesis?
 - 1.1.1 Interferencia de ondas lumínicas
 - 1.1.2. Difracción de ondas lumínicas
 - 1.1.3. Atenuación de ondas lumínicas
 - 1.1.4. Velocidad de las ondas lumínicas. La luz no es instantánea.
 - 1.1.5. Refracción de las ondas lumínicas.
 - 1.1.6. Reflexión de las ondas lumínicas.
 - 1.2. ¿Cómo se produce la luz? ¿Cómo se propaga la luz? ¿Qué es lo que se propaga?
2. Puesta a prueba del Modelo Ondulatorio para la luz.
 - 2.1. Si la luz es una onda electromagnética ¿cómo podemos producirlas? el espectro electromagnético
 - 2.2. ¿Podemos explicar el comportamiento geométrico de la luz que hemos estudiado?
 - 2.3. ¿Podemos explicar la visión del color?
3. Recapitulación y nuevos problemas. Límites de nuestro modelo ondulatorio de la luz.

Al igual que en la primera parte de la unidad tras las actividades introductorias que nos han servido para plantear el modelo ondulatorio de la luz, proponemos actividades para ponerlo a prueba experimentalmente, como por ejemplo las siguientes actividades

Ejemplo actividad 8:

A.5. Otra de las características específicas de las ondas es la de bordear obstáculos. Diseña una experiencia para comprobar si la luz tiene la capacidad de difractarse, es decir de bordear obstáculos.

I. *¿Qué pretendemos conseguir con esta actividad?* Queremos conseguir que los alumnos comprueben la difracción de la luz, y sean conscientes de que este fenómeno es propio de las ondas.

II. *¿Qué esperamos que hagan los alumnos?* Es necesario que los alumnos comprendan que la fuente de luz utilizada tiene que ser puntual, o al menos tener focos coherentes de

luz, es decir, conseguir que los átomos que producen la luz vibren con la misma frecuencia.

III. *¿Qué ha de hacer el profesor?* El profesor realizará con los alumnos el experimento de Henri Poisson (1877-1963). Expondrá una breve introducción histórica acerca de la importancia que tuvo este experimento para la aceptación del modelo de la naturaleza ondulatoria de la luz. Explicará a los alumnos la necesidad de utilizar un haz de luz coherente y monocromática, es decir, un solo tipo de luz, un láser. El profesor explicará a los alumnos que la única manera de dar un sentido a que se vea luz en el centro de la sombra circular es que la luz se ha doblado en los bordes de la chincheta. La luz que parte de cada punto del borde de la moneda recorre el mismo camino hasta el centro de la sombra, por tanto, la luz que parte de cada punto del borde de la moneda llegará con la misma fase al punto del centro de la sombra, lo que provocará una interferencia constructiva, es decir, ¡luz en el centro de una sombra!

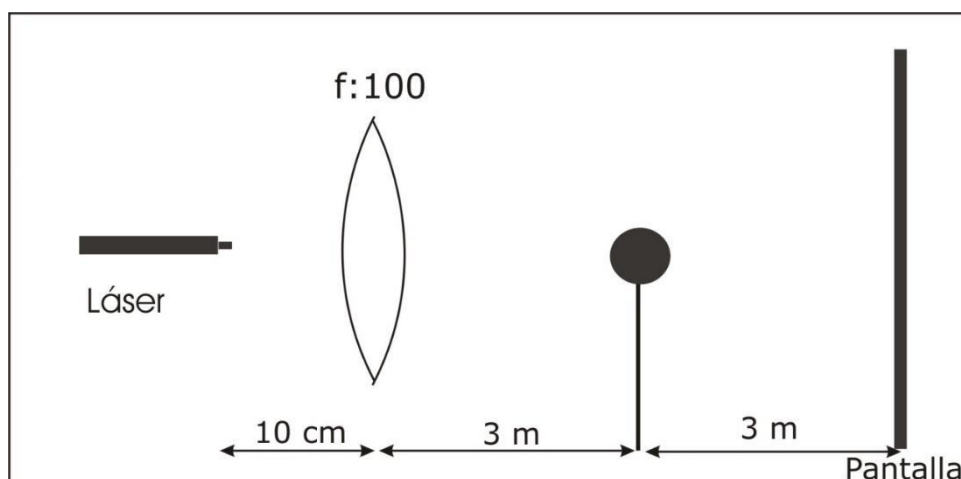


Imagen 8.9. Esquema del experimento de Poisson. Elaboración propia.

Encontraremos luz en el centro del círculo en sombra. Encontramos también actividades de carácter experimental que anima a los estudiantes a relacionar lo aprendido en otros bloques a lo largo del curso, con el estudio de las características ondulatorias de la luz, como puede ser la siguiente actividad:

Ejemplo actividad 9:

A.6. *Si la luz fuese de naturaleza ondulatoria, ¿qué cabría esperar de la intensidad luminosa que se mediría a diferentes distancias de la fuente? Propón una experiencia para comprobar tu hipótesis.*

I. *¿Qué pretendemos conseguir con esta actividad?* Queremos que los alumnos comprueben si las ondas lumínicas cumplen las características propias de las ondas. En este caso queremos comprobar que la luz se atenúa con la distancia, es decir pierde intensidad al alejarnos del foco.

II. *¿Qué esperamos que hagan los alumnos?* Esperamos que los alumnos recuerden que, una fuente puntual de luz emite luz en todas las direcciones. Por tanto, la luz se repartirá en una esfera centrada en el foco emisor. Cuanto más se aleje la luz del foco emisor, esta esfera será mayor. Por tanto, la luz se tiene que repartir sobre una superficie cada vez mayor, por lo que cuanto más nos alejemos del foco emisor, la Intensidad que midamos será cada vez menor.

III. *¿Qué ha de hacer el profesor?* El profesor explicará que la Intensidad de la luz, dado que la luz se reparte en una esfera centrada en el foco emisor, será proporcional a la inversa del radio de la esfera al cuadrado. I proporcional a $1/r^2$. De manera opcional, el profesor propondrá la utilización de una sonda que mide la Intensidad de la luz. Mediremos entonces la Intensidad de luz que llega a la sonda, procedente de una bombilla, a diferentes distancias. Posteriormente elaboraremos una gráfica de la I frente a $1/r^2$. Nos ha de salir una línea recta. El profesor procurará que las condiciones sean lo más idóneas posible, que no haya fuentes de luz (a parte de la bombilla que queremos utilizar).

Hemos de incluir siempre en la Unidad Didáctica actividades en las que el alumno tenga que recordar lo aprendido con anterioridad, para darle sentido y para conseguir avanzar en el proyecto de conocer la naturaleza de la luz. El profesor recordará que en el “*Experimentum crucis*” de Newton, realizado mediante un proyector y un prisma, la luz blanca se separa en la mezcla de colores característica del arco iris. El profesor explicará a los alumnos que se puede recoger el “arco iris” a ambos lados del prisma, uno es debido a la refracción y otro a la reflexión interna (más débil). Recordará a los alumnos que en el tema de ondas se había estudiado la refracción de un frente de ondas plano, y se había obtenido una relación entre los ángulos de incidencia y las velocidades de propagación de las ondas en ambos medios. En la primera parte del tema de óptica, se había estudiado una relación entre los ángulos de incidencia y refracción de la luz con lo que hemos llamado “índice de refracción del material.

Por ejemplo, la siguiente actividad:

Ejemplo actividad 10:

A.8. *Revisa estas expresiones para la refracción de las ondas y de los rayos luminosos y busca un significado físico al índice de refracción.*

I. *¿Qué pretendemos conseguir con esta actividad?* Queremos conseguir que los alumnos piensen que si la luz “blanca” se dispersa cuando atraviesa un prisma, es porque se trata de una mezcla de diferentes tipos de ondas, con un poder refractivo diferente. Por tanto, a partir de ahora, queremos que los alumnos comprendan que el índice de refracción de un material es diferente para cada tipo de luz, es decir, para cada frecuencia de vibración. Así, como en el sonido cada tono se corresponde con un tipo de onda sonora de una frecuencia determinada, podemos pensar que cada tipo de luz se corresponde con un tipo de onda lumínica de una frecuencia.

III. *¿Qué ha de hacer el profesor?* El profesor recordará a los alumnos la expresión que habíamos encontrado para la refracción de las ondas:

$$\text{Sen } i / \text{Sen } r = v_2 / v_1$$

Y para el caso de la refracción de las ondas lumínicas:

$$\text{Sen } i / \text{Sen } r = n$$

Ayudará a los alumnos a llegar a la conclusión de que el índice de refracción de un medio es la relación entre la velocidad de la luz en el aire (vacío) y la velocidad de la luz en dicho medio. Les comentará que el índice de refracción siempre tiene que ser mayor que uno y que será tanto mayor cuanto menos sea la velocidad de la luz en el medio. Vemos que esta actividad está relacionada con la Actividad 34 de la primera parte de la Unidad Didáctica.

El profesor explicará a los alumnos que este tema estuvo en el centro de la dicotomía teoría ondulatoria-corpúscular del siglo XVIII y XIX. Newton creía que la velocidad de la luz tenía que ser mayor en el agua. Cuando Hippolyte Fizeau (1819-1896) pudo medir que la velocidad de la luz era menor en el agua que en el aire, la comunidad científica se decantó finalmente por la teoría ondulatoria. El profesor explicará a los alumnos que el índice de refracción es diferente para cada uno de “los colores”, ya que es función de la frecuencia de la onda. En el caso de la dispersión de la luz blanca por un prisma, hemos visto que la luz violeta se refracta más que la roja. El profesor propondrá el siguiente trazado explicativo:

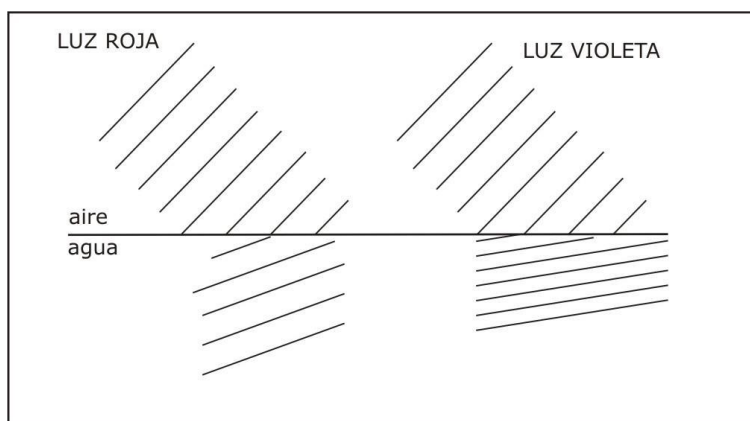


Imagen 8.10. Cambio en la velocidad de la luz al atravesar distintos medios, relacionado con el cambio de la longitud de onda para distintos colores. Elaboración propia.

El profesor explicará a los alumnos que debido a que la velocidad de las ondas cambia al pasar la luz de un medio a otro, la longitud de la onda también se ve influida (la frecuencia es constante). Por tanto, se observa que, en el caso del rojo, cuyo índice de refracción es menor, es decir la modificación de la velocidad es menor y por tanto la variación en la longitud de onda será pequeña. En el caso del violeta, cuyo índice de refracción es mayor, la variación de la velocidad al pasar al agua será mayor y por tanto la variación en la longitud de onda será mayor. Por tanto, la longitud de onda del rojo varía poco al pasar del aire al agua, mientras que la longitud de onda del violeta varía más, haciéndose más pequeña. (Si la frecuencia no varía y la velocidad de la onda disminuye, la longitud de onda tiene que disminuir).

Intentamos también que los alumnos sean conscientes de la coherencia que ha de existir entre la explicación de la naturaleza ondulatoria de la luz y los conceptos y trazados que realizábamos en la primera parte de la unidad. Una muestra de este tipo de actividades sería:

Ejemplo actividad 11:

A.16. La naturaleza de ondulatoria de la luz debe ser un modelo coherente con explicaciones que fácilmente realizábamos en la óptica geométrica. Comparar las explicaciones de los siguientes fenómenos desde los dos puntos de vista: geométrico y ondulatorio. Realiza los correspondientes trazados gráficos:

A.16.1. La emisión de luz por una fuente puntual.

I. *¿Qué pretendemos conseguir con esta actividad?* Queremos ayudar a los alumnos a comprender que la teoría ondulatoria también puede explicar la propagación rectilínea de la luz.

III. *¿Qué ha de hacer el profesor?* Para explicar la emisión de luz por una fuente puntual, el profesor expondrá a los alumnos el principio de Huygens, quien propuso que las ondas luminosas que se despliegan desde una fuente puntual podían considerarse la superposición de diminutas ondas secundarias. Huygens propuso que cada punto de cualquier frente de ondas pueda considerarse una nueva fuente puntual de ondas secundarias. Esta idea se conoce como “principio de Huygens”. *Todos los puntos a lo largo del frente de ondas AA' son, a su vez, fuente de nuevas onditas, un poco de tiempo después esas nuevas onditas superpuestas formarán una nueva superficie BB', la cual puede considerarse la envolvente de todas ellas.*

Posteriormente con la aportación de Fresnel se definió el “Principio de Huygens-Fresnel”, aunque no se suelen citar en los textos habituales de enseñanza: *“Las ondas secundarias tienen efectividad de una intensidad máxima en la dirección normal a la envolvente, y disminuyen con un factor de oblicuidad hasta 90°”*. Se puede explicar por fin la transmisión rectilínea de la luz, que había sido el gran escollo de la teoría ondulatoria. El principio de Huygens-Fresnel es una herramienta fundamental, además, para explicar la limitación del modelo geométrico que conocemos como aproximación paraxial.

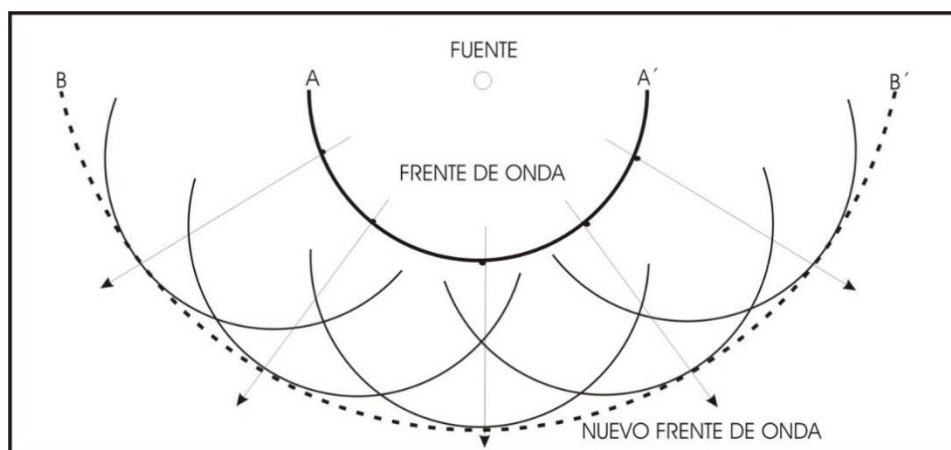


Imagen 8.11. Esquema del principio de Huygens-Fresnel. Elaboración propia.

En la figura hemos representado sólo unas cuantas del número infinito de onditas que se producen a partir de unas pocas fuentes puntuales secundarias, que se combinan para producir la envolvente BB'. Conforme se extiende la onda, cualquier segmento de ella parece menos curvo. Muy lejos de la fuente original, las ondas casi forman un plano,

como sucede, por ejemplo, con las ondas procedentes de lo sol. En la siguiente figura se muestra una construcción hecha por Huygens a base de onditas para frentes de ondas planos.

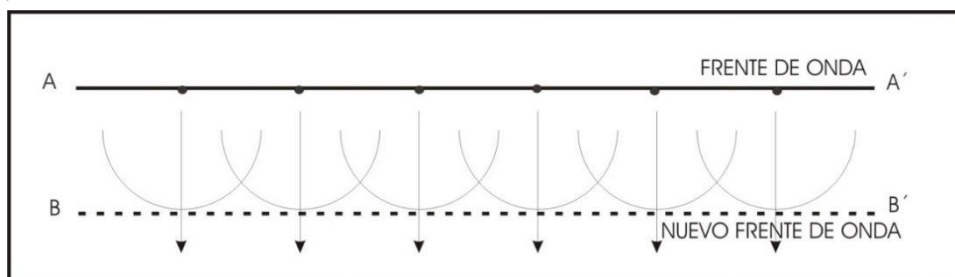


Imagen 8.12. Esquema del principio de Huygens-Fresnel para frentes planos muy alejados del foco. Elaboración propia.

Ejemplo actividad 12:

A.16.2. *Cuando un haz de luz procedente de una fuente puntual lejana incide sobre una lente convergente, converge en el foco.*

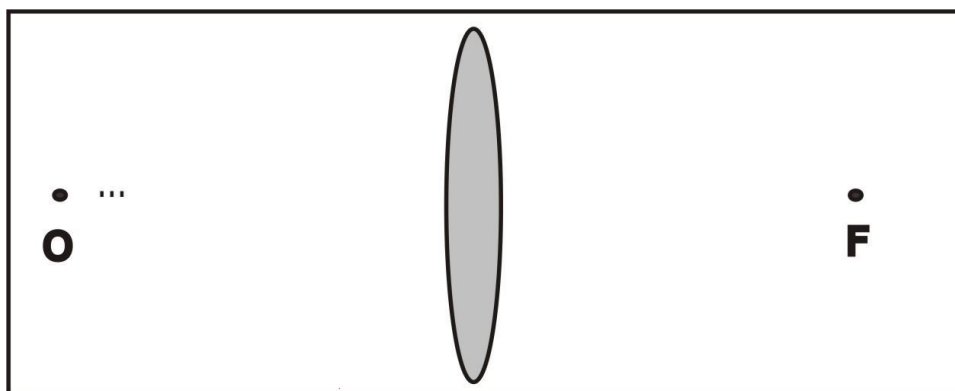


Imagen 8.13. Objeto, lente convergente y foco. Elaboración propia.

Sabemos que la explicación de la propagación rectilínea de la luz mediante el modelo ondulatorio fue un escollo difícil de superar, que de hecho durante tiempo favoreció la aceptación de la teoría corpuscular de la luz que proponía una explicación más directa.

I. *¿Qué pretendemos conseguir con esta actividad?* Queremos que los alumnos puedan dibujar desde una perspectiva ondulatoria qué le ocurriría a una onda que se desplaza y en su camino encuentra una lente convergente, una lente divergente o un espejo esférico. Queremos que los alumnos dibujen frentes de ondas que provienen de una fuente muy lejana, y por tanto al llegar a la lente lo hacen como frentes de onda planos.

II. *¿Qué esperamos que hagan los alumnos?* Esperamos que los alumnos comprendan que al estar la fuente muy alejada los frentes de onda llegan planos. Creemos que les costará trabajo al principio realizar los trazados gráficos, pero esperamos que los comprendan con ayuda del profesor.

III. *¿Qué ha de hacer el profesor?* Para dar cuenta del hecho de que la luz que proviene de una fuente lejana se concentra en el foco, el profesor explicará que la luz tarda más en pasar por el centro de la lente que por la parte exterior, debido a que la velocidad de la luz en el vidrio es menor que en el aire, dando como resultado una onda que converge en el punto F de la lente. El esquema adecuado de representación sería:

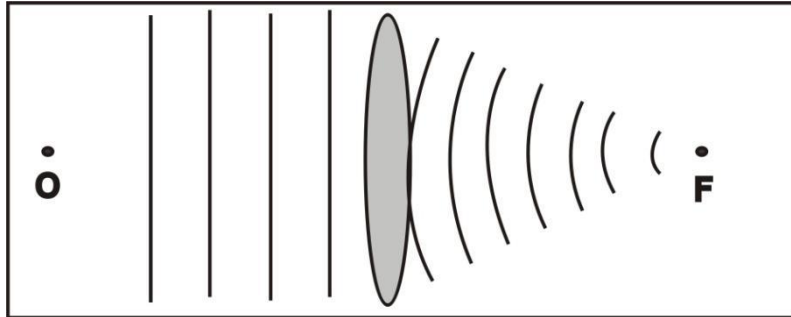


Imagen 8.14. Esquema de la concentración de la luz en el foco imagen mediante una lente convergente, utilizando frentes de onda. Elaboración propia.

El profesor comentará que muy interesante el hecho de que un prisma con una curvatura apropiada suministrará muchas trayectorias con un tiempo igual de recorrido desde el punto O hasta el punto F en el lado opuesto. La curva compensa las distancias extra que recorre la luz para llegar hasta los puntos más elevados de la superficie, al reducir en un grado adecuado el espesor de vidrio que tiene que recorrer la luz (recordar que en el vidrio la luz se desplaza a menor velocidad media). Con los puntos O y F en las posiciones apropiadas y la curvatura adecuada de las superficies en este prisma modificado, a todas las trayectorias de la luz les corresponde exactamente el mismo tiempo. En este caso, toda la luz que proviene del punto O y que incide sobre la superficie del vidrio se enfoca en el punto F. Es lo que conocemos como comportamiento de la lente convergente.

Como curiosidad, el profesor comentará a los alumnos la relación que tiene las distintas velocidades de la luz con los atardeceres. Cuando contemplamos un atardecer, vemos el Sol durante varios minutos después de que se ha hundido por debajo del horizonte. La atmósfera de la Tierra es más enrarecida cuanto más arriba y más densa cuanto más abajo. Como la luz viaja con mayor rapidez en el aire enrarecido que en el denso, la luz del Sol puede viajar con más rapidez si, en lugar de desplazarse en línea recta, evita tanto como sea posible el aire más denso, tomando una trayectoria más alta y larga con el fin de penetrar en la atmósfera con una inclinación más pronunciada. Como la densidad de la atmósfera cambia gradualmente, la trayectoria de la luz se desvía también en forma gradual para convertirse en curva. Algo que resulta muy interesante es que esta trayectoria

de tiempo mínimo nos proporciona cada día un periodo más largo de luz del Sol. Además, cuando el Sol, o la Luna, están cerca del horizonte, los rayos del borde inferior se curvan más que los del superior; esto produce un acortamiento del diámetro vertical, lo que hace al Sol verse elíptico.

8.6. Evidencias tras la experimentación de la Unidad Didáctica.

¿Una metodología activa (aprendizaje por resolución de problemas) ayudará a mejorar la comprensión de la óptica por parte del alumnado?

A través de este epígrafe, pretendemos dar respuesta a esta pregunta de investigación mediante el análisis de los grupos de discusión realizados con el alumnado que participó en las experimentaciones en 2019 y en 2020, así como de las reflexiones extraídas del Diario de Campo del docente llevado a cabo en ambas experimentaciones. En las siguientes páginas iremos desgranando algunas de las ideas aportadas a través de estas técnicas de recogida de información, las cuales se acompañan de transcripciones literales de las opiniones y reflexiones de estudiantes y docente.

En 2019 llevamos a cabo una puesta en práctica de la Unidad Didáctica¹⁰, con un grupo de 16 alumnos de 2º de Bachillerato que cursan la asignatura de Física, durante un total de 31 sesiones lectivas, desde el 6 de febrero de 2019, hasta el 29 de marzo del 2019. En esta ocasión la Unidad Didáctica (Anexo III) consta de 60 actividades para la óptica geométrica y 21 actividades para óptica Física. El grupo de discusión lo llevamos a cabo el 29 de marzo de 2019, en el Aula de referencia del grupo, estando presentes los 16 alumnos del grupo que habían participado en la puesta en práctica de nuestra Unidad Didáctica. El guion del grupo de discusión lo adjuntamos en el Anexo V, y la transcripción completa en el Anexo VI. El diario de la docente, muy escueto en esta primera experimentación, se encuentra en el Anexo IV.

Basándonos en la experiencia llevada a cabo en 2019, y en trabajos de otros colegas especialistas en óptica ya referenciados en numerosas ocasiones, mejoramos nuestro proyecto y volvimos a aplicar la Unidad Didáctica sobre óptica con ligeras mejoras

¹⁰En los diferentes Anexos de este trabajo podrá encontrarse la siguiente documentación referida a esta experiencia: Anexo III: Unidad Didáctica 2019. Anexo IV: Diario de clase de la profesora correspondiente a la puesta en práctica de la Unidad Didáctica en 2019. Anexo VII: Unidad Didáctica 2020. Anexo VIII: Diario de clase de la profesora correspondiente a la puesta en práctica de la Unidad Didáctica en 2020.

(Anexo VII) por segunda vez en el mismo Instituto de Educación Secundaria del municipio de Langreo (Asturias). En esta ocasión con un grupo de 15 alumnos de 2º de Bachillerato que cursan la asignatura de Física, durante un total de 21 sesiones lectivas, desde el 29 de enero de 2020, hasta el 06 de marzo de 2020. La Unidad Didáctica consta también de 60 actividades de óptica geométrica que se han desarrollado en 14 sesiones y 21 actividades de óptica Física que se han desarrollado en 7 sesiones. Son actividades de desarrollo autónomo en el laboratorio, actividades para afianzar los conceptos manejados en el laboratorio uniendo práctica y teoría, actividades encaminadas a que los alumnos formulen sus hipótesis y, finalmente, actividades de síntesis y de nuevas propuestas. Llevamos a cabo el grupo de discusión el 6 de marzo de 2020, en el Aula de referencia del grupo, estando presentes los 15 alumnos del grupo que habían participado en la puesta en práctica de la Unidad Didáctica. El guion del grupo de discusión lo adjuntamos en el Anexo IX, y la transcripción completa del mismo en el Anexo X. El diario de la docente, en esta ocasión ya muy completo se encuentra en el Anexo VIII.

Nos referiremos con G1 a los alumnos participantes en el grupo de discusión de 2019, y con G2 a los alumnos participantes en el grupo de discusión de 2020. Nos referiremos con D1 a las aportaciones del diario del docente llevado a cabo en 2019, y con D2 a las aportaciones pertenecientes al diario de campo de 2020.

Las categorías que hemos empleada en nuestro análisis fueron establecidas basándonos en el objetivo 4.2. de nuestra investigación: Analizar y reflexionar sobre la mejora propiciada por nuestra propuesta didáctica. En base a estas categorías iremos exponiendo las evidencias tras la experimentación didáctica.

Comenzamos analizando las respuestas de los alumnos relativas a la motivación en el aprendizaje de los contenidos de óptica. Creemos que con este modo de trabajar los alumnos se sienten más motivados en el aprendizaje de la óptica, pues cuando son preguntados sobre si esta manera de organizar el tema ha influenciado en su aprendizaje, los alumnos en su totalidad afirman que sí. Transcribimos a continuación algunas de sus razones:

“Sí, porque íbamos proponiendo opciones con cada actividad que hacíamos” G2 Alumno 10.

“Sí, porque hacíamos prácticas individuales cuando se nos ocurrían, en cada clase”. G2 Alumno 4.

“Es mucho más fácil verlo visualmente en el laboratorio que a partir de fórmulas”. G2 Alumno 4.

“Bueno me pareció que la forma de dar el tema es mucho mejor que darlo desde el libro solo, por los temas principalmente del laboratorio, porque así vemos más en práctica lo que vemos desde el punto de vista teórico, y no es simple teoría. Por ejemplo, cuando había un ejercicio que hacíamos en el laboratorio, que nosotros teníamos que decir el día anterior como se iba a hacer, que no lo traía las hojas, eso estaba bien, o sea, que nos hacía pensar un poco”. G1 Alumno 1.

“Yo creo que fue bueno obligarnos a nosotros mismos a trabajar día a día, porque si no, no nos enterábamos de nada”. G1 Alumno 2.

“A mí, lo que me parece que también nos ayudó, es que por ejemplo en el libro tú estudias el campo electromagnético desde unas bases que ya se han puesto hace tiempo, pero en este lo que hicimos fue ir siguiendo los pasos que siguieron los científicos en su momento para hacerlo”. G1 Alumno 1.

A lo largo de las sesiones en las que se ha puesto en práctica la Unidad Didáctica, la docente es consciente de que este modo de trabajar influye positivamente en el aprendizaje de los estudiantes. A continuación, transcribimos algunas reflexiones de la docente:

“Es comprensible que inicialmente ellos no sean capaces de proponer el sistema lente-pantalla para explicar la visión. Pero comprenden rápidamente su necesidad una vez que se lo explico y que utilizan los equipos de óptica que les suministro. La utilización de material de laboratorio es muy importante en este caso. Los alumnos pueden manipular las lentes y conseguir que se forme una imagen. Se muestran muy contentos y sorprendidos”. (D2)

“Al relacionar siempre las fórmulas matemáticas usadas con las actividades experimentales realizadas, los alumnos comprenden fácilmente los conceptos tratados.” (D2)

“Al afianzar el manejo de la ecuación de gauss en la resolución de problemas de óptica, los alumnos lo relacionan con lo aprendido en las experiencias y poco a poco se ven capaces y animados”. (D2)

“Entre todos realizamos el montaje. Los alumnos se muestran muy sorprendidos y comprenden que dicho experimento fuese clave para adoptar un modelo ondulatorio como explicación plausible de la naturaleza de la luz”. (D1)

En cuanto a las sensaciones que ha despertado en los alumnos este modo de trabajar, cuando la profesora pregunta al grupo si tienen la sensación de haber aprendido realmente sobre óptica los alumnos responden que sí, que mucho más que en otros temas. Valoran muy positivamente estos nuevos materiales, por encima del libro de texto. Algunas de las razones que aportan los alumnos son:

“Aprender, aprendes más que en los otros temas, aunque estudiar, tienes que estudiar lo mismo”. G2 Alumno 7.

“Aprender más estudiando lo mismo, es mejor solución claro”. G2 Alumno 10.

“No es lo mismo aprender de verdad que estudiar para un examen”. G2 Alumno 4.

“Además, cuando estás con el libro, por lo que sea, piensas, está la fórmula en el libro, para qué vas a atender, y sin embargo con esto, aunque sigues teniendo el libro, te obligas más”. G1 Alumno 4.

“Y además se hace más visual, tú ves los ejercicios que estás haciendo y los entiendes, y entonces se te queda más y mejor, porque si estuvieses explicando en la pizarra escribiendo fórmulas y fórmulas entonces lo ves peor”. G1 Alumno 7.

En relación con la comprensión de la lógica de las actividades que se iban realizando, encontramos que los alumnos son conscientes del sentido que tiene la estructura de la Unidad Didáctica:

“Otras veces te meten fórmula, fórmula, fórmula y teoría, y después con suerte, te explican cómo funciona de verdad. Y en este caso siempre vimos cómo funciona y después buscamos la explicación a eso, por ejemplo, si acercas la lente, se mueve para aquí la imagen, o se mueve para allí, y después eso ya lo explicamos con las fórmulas”, “y entonces puedes asociar mejor la fórmula al fenómeno”. G1 Alumno 3.

“Cuando estás con el libro, yo puedo estar a otra cosa, pero con esto, al tener que ir haciendo el dibujo y tal, yo creo que ayudó, y vas haciéndolo poco a poco”. G1 Alumno 5.

Los alumnos son conscientes de que pueden plantear en todo momento sus dudas. A continuación, transcribimos algunos de sus comentarios al respecto:

“Había más para preguntar las dudas, y en laboratorio también había tiempo para aclarar las dudas, o aclarar las dudas mismamente con las experiencias de laboratorio, entonces no hay materia que no te haya quedado bien”. G1 Alumno 9.

“Sí, porque además te preguntábamos cosas y todo servía para la investigación que estábamos haciendo”. G2 Alumno 8.

El hecho de que los alumnos puedan preguntar dudas en todo momento hace que se sientan integrados y sean conscientes de lo que estamos haciendo.

Encontramos en el diario de aula muchas reflexiones de la docente relativas a la importancia del trabajo experimental para lograr la comprensión satisfactoria de los conceptos tratados, y comprender así el objetivo que se persigue con la estrategia que estamos siguiendo. A continuación, mostramos algunas:

“Imagino que los alumnos necesitarán un poco de ayuda con el montaje y explicación de la experiencia. Una vez que les ayudo con el montaje, ellos se desenvuelven bien y son capaces de encontrar experimental y matemáticamente la relación propuesta por la ecuación de

Gauss. Están ya muy familiarizados con el montaje experimental que estamos utilizando”. (D2)

“Los alumnos comprenden fácilmente que la imagen ha de ser virtual, puesto que al utilizar los equipos de óptica se aprecia claramente que el haz de luz una vez que incide en el espejo se abre, y no puede converger”. (D2)

“Los alumnos muestran asombro e interés al encontrar el ángulo límite”. (D1)

“A petición de los alumnos repetimos la experiencia con distintos medios transparentes. Los alumnos disfrutaban con sus montajes. Cada vez tienen más iniciativa”. (D1)

“Creo que los alumnos realizarán el montaje según el esquema proporcionado por mí sin ningún problema y que serán capaces de formar la imagen de una fuente puntual. Considero que necesitarán ayuda para afianzar la idea de imagen óptica. Realmente es necesaria la ayuda del profesor para establecer estos conceptos, pero los alumnos los comprenden realmente, al trabajar con ellos manipulativamente.” (D2)

“Los alumnos, aunque comprenden la necesidad del haz de luz, a veces todavía intentan explicar la formación de una imagen con la utilización de un único rayo de luz. Esto es fácil de entender puesto que en muchos textos de Física aún utilizan rayos para la formación de las imágenes, sin explicar, ni utilizar el haz de luz.” (D2)

En este mismo sentido, la siguiente reflexión de la docente destaca la importancia de la correcta comprensión de los conceptos tratados, pues ni siquiera los libros de texto utilizan correctamente los conceptos necesarios para explicar la visión.

“Soy consciente de que la representación diagramática de la onda plana EM que utilizan los libros de texto, es incomprensible para los alumnos. Ayudo a los alumnos para que no caigan en el error de atribuir una extensión espacial a la amplitud de onda. A partir de del dibujo de la onda plana representada típicamente en los libros, pido a los alumnos que ordenen las magnitudes de los campos E y M en distintos lugares del dibujo. Les ayudo a comprender dicha representación. Los alumnos se muestran sorprendidos cuando comprenden el significado real de la representación de la onda EM, cuando comprenden que la onda EM no tiene una extensión espacial finita, que los campos EM no están encerrados dentro de curvas sinusoidales”. (D2)

“Los alumnos comprenden las explicaciones del profesor y se muestran ilusionados ante esta forma de explicar la producción de luz, les parece sencilla”. (D1)

Cuando se pregunta al alumnado qué forma de trabajar les gusta más, los alumnos en ambas ocasiones afirman que les gusta mucho más esta manera de trabajar:

“Electromagnetismo, si lo hubiésemos visto así sería mucho más fácil”. G2 Alumno4.

“De otra forma no lo hubiésemos entendido, pero saber utilizar las cuatro fórmulas que se necesitan para la EBAU, si lo hubiéramos aprendido”. G2 Alumno 8.

“Lo hubiéramos aprendido para la EBAU, pero no lo comprenderíamos de verdad”. G2 Alumno 1.

“Eso, eso, no sabríamos ni qué es la luz blanca, ni que se forma con el color azul y rojo”.
G2 Alumno 8.

“Yo creo que todos habiéramos tardado más tiempo en entenderlo si cogemos el libro y miramos el tema”. G1 Alumno 1.

“Me gustó una cosa que hicimos en el curso, cuando nos separamos en dos grupos para hacer un experimento, y el que ganase, ganaba un punto, una motivación extra”. G1 Alumno 8.

Las reflexiones de la docente ahondan en esta sensación de los alumnos:

“Los alumnos comprenden el concepto de foco objeto con ayuda del profesor, les cuesta trabajo como imaginábamos relacionarlo inicialmente con el trazado gráfico, pero con la explicación y con la realización de la experiencia varias veces lo van comprendiendo”. (D2)

“Se trata de deducir mediante el trazado gráfico que la distancia a la que se sitúa un objeto es igual a la distancia a la que se forma la imagen. Los alumnos no son capaces al principio de realizar el trazado de rayos correctamente y deducir qué observadores verán la imagen, creyendo que el observador C también vería la imagen. Al realizar la experiencia con espejos planos en el laboratorio, los alumnos comprenden que la imagen no está pegada al espejo, porque en ese caso se vería desde todas las posiciones (es decir 180° delante del espejo), y en realidad no ocurre así. Comprenden entonces con el trazado gráfico que les explico que solamente los observadores A y B podrían ver la imagen del objeto. Si bien la imagen no está pegada al espejo, si está siempre en la misma posición. Además, la imagen está detrás del objeto y justo a la misma distancia del espejo que el objeto. Se aprecia buena implicación de la mayoría de los alumnos. Manifiestan su preferencia por este tipo de clases más activas y participativas”. (D2)

“Los alumnos se muestran sorprendidos y animados”. (D1)

“Los alumnos disfrutaban con esta práctica y se muestran asombrados” (D1)

A la pregunta de si les gustaría que el resto de los temas los hubiésemos organizado así, la totalidad de los alumnos responden que sí.

“Sería genial, menos gravitación... risas. Sería más divertido y fácil de aprender, y se entendería mejor, y daría tiempo a dar otras cosas más difíciles en más profundidad”. G2 Alumno 1.

“Podríamos poner dinero incluso nosotros para comprar el material”. G2 Alumno 11.

“Si, por ejemplo, en los otros temas, igual a la hora de hacer los ejercicios estaba más dirigido a que los tenías que hacer de esa forma”. G1 Alumno 1.

“A mí me pareció una buena manera de entenderlo, muy entretenido, porque a mí, por ejemplo, los otros temas que son mucha teoría aquí en clase se me hacen un poco aburrido, me cuesta más entenderlo, en cambio, haciendo las pruebas también te quedan las fórmulas”.
G1 Alumno 10.

Encontramos reflexiones de la docente en ese mismo sentido que subrayan los comentarios de los alumnos:

“Con este modo de trabajar los alumnos están más integrados en el aprendizaje. Me dicen que ojalá hiciéramos así todo el curso” (D2)

La docente manifiesta en numerosas ocasiones cómo gracias a esta organización de actividades, con experiencias y explicaciones suyas, los alumnos comprenden mejor los conceptos y están más satisfechos:

“Creo que a los alumnos les costará trabajo verbalizar lo que observan en la experiencia con el espejo cóncavo. No obstante, pensamos que con la ayuda del profesor lo comprenderán. Efectivamente al principio se muestran dubitativos, pero con las explicaciones y las experiencias lo entienden y se muestran satisfechos”. (D2)

“Se aprecia buena implicación de la mayoría de los alumnos. Manifiestan su preferencia por este tipo de clases más activas y participativas”. (D1)

Respecto al autoanálisis que realizan los alumnos, encontramos que son capaces de darse cuenta de que han aprendido óptica, se sienten satisfechos con su propio aprendizaje:

“De otro modo lo aprendes de memoria, pero no lo sabes de verdad, de haberlo practicado, y así da la sensación de entenderlo”. G2 Alumno 6.

“Yo creo que, si lo hubiéramos hecho como el resto de los temas y hubiera sólo teoría y ejercicios, pues sabríamos hacer los ejercicios, pero de forma mecánica, sin entenderlo”. G1 Alumno 4.

“Si la óptica la hubiésemos dado de otra manera, más teórico, sería mucho más difícil de aprender”. G2 Alumno 6.

Se plantea al alumnado la pregunta de si valoran la Unidad Didáctica positivamente, aunque les requiera más esfuerzo, más trabajo diario. En su totalidad los alumnos responden que sí, añadiendo que preferirían trabajar todo el temario con esta metodología. A través del diario, la profesora recoge que, aunque los alumnos tengan que hacer más esfuerzo diariamente, pues necesitan estar atendiendo y siendo parte activa de la clase, sus alumnos están integrados en el proceso y son conscientes de su aprendizaje.

“Creo que a los alumnos no les resultará fácil integrar todos los conceptos nuevos aprendidos en un algoritmo, al que quiero que den sentido físico. Efectivamente es necesaria una labor insistente del profesor para que los alumnos integren estos conceptos en un algoritmo con sentido físico, pero los alumnos finalmente lo consiguen. Pueden relacionar el algoritmo del trazado de rayos, con lo que le sucede a la luz cuando atraviesa la lente convergente. Creo

que, de no haber realizado tantas experiencias con la luz en el foco, en un lugar muy lejano y en el infinito, colocando la pantalla en diferentes lugares, los alumnos no lo habrían comprendido". (D2)

"Los dos grupos interesados lo hacen autónomamente y con métodos diferentes. Parecen ilusionados con sus experimentos y muestran ilusión al poder encontrar una relación entre el ángulo de incidencia y el ángulo de refracción. A petición de los alumnos repetimos la experiencia con distintos medios transparentes. Los alumnos disfrutaban con sus montajes. Cada vez tienen más iniciativa. Finalmente, los alumnos que no tenían muchas ganas de trabajar hoy se incorporan a los grupos que estaban experimentando y se asombran igualmente de los resultados". (D2)

Para finalizar el grupo de discusión, se solicita al alumnado que de cada uno haga un resumen de su experiencia. Transcribimos algunas de las respuestas de los alumnos.

"Me da la sensación de que con este método acabas manejando mejor el tema, y con menos esfuerzo". G2 Alumno 12.

"He aprendido muchísimo, yo al principio decía esto es imposible que sea así, y yo flipaba, y ahora lo entiendo todo". G2 Alumno 11.

"A ver, te llama más la atención, y acabas aprendiendo más, porque tú ya tienes interés por el simple hecho de que puedes toquetear algo". G2 Alumno 10.

"Ya podían ser todos los temas así, porque en este tema me preguntas y sé las cosas, pero ahora me preguntas de gravitación o de cualquier cosa y no me acuerdo". G2 Alumno 7.

"Pues yo opino un cúmulo de cosas de todos, yo creo que está muy bien explicado por parte de ellos, es una muy buena unidad para aprender óptica, porque por ejemplo mis amigas que tuvieron el año pasado Física con otro profesor, dijeron que óptica era un tostón, que no les gustaba nada, que era lo peor". G2 Alumno 8.

"Haciéndolo así por las hojas, como tienes que ir poco a poco haciéndolo, mantienes mejor la atención en la clase, que a lo mejor estando, explicando por el libro, puedes llegar a estar tu a lo tuyo". G1 Alumno 6.

"Yo creo que al hacerlo se te queda todo más fácilmente, que estudiando solamente las fórmulas". G2 Alumno 5.

"Pues muy bien, porque aprendes mucho más, y además sin poner esfuerzo, por ejemplo, solamente viéndolo ya sabes cómo va a ser, y no tienes ni que memorizar los dibujos". G2 Alumno 3.

"Mira yo considero que, para el tema de gravitación, como realmente no podemos hacer ninguna práctica que sea muy representativa, pues no es necesario hacerlas, sin embargo, en electromagnetismo, yo eché muchísimo de menos no hacer más prácticas con un equipo adecuado, que no es como mecánica, que tú lo ves día a día, y con óptica a no ser que utilices un equipo como hicimos aquí, tampoco trabajas". G2 Alumno 4.

Al respecto encontramos varias reflexiones de la docente a lo largo de la experimentación con la Unidad Didáctica, consistentes con las valoraciones de los alumnos:

“Al principio les explico otra vez el trazado de rayos de objetos a distintas distancias de la lente, lo que implica distintas distancias de la pantalla. Entonces les planteo la pregunta de si la distancia de la lente a la pantalla fuese fija... ¿qué debe de hacer el ojo? Los alumnos, que hablan entre ellos, llegan a la conclusión, ayudados por mí, de que el ojo tiene que modificar la lente. Se sorprenden con esta conclusión y preguntan cómo lo hace el ojo. Ayudo a los alumnos a relacionar esta actividad con las precedentes, explicándoles las características especiales de la lente que tiene nuestro ojo, el cristalino es una lente que se puede curvar, y por tanto actuar en ocasiones como una lente delgada y en otras como una lente más gruesa, dependiendo de la distancia a la que se encuentre el objeto del que quiero formar imagen en nuestro ojo. Sin la explicación del profesor los alumnos no llegan a comprender la profundidad de los conceptos tratados.” (D2)

“El experimento de Poisson es muy bonito y sorprendente, los alumnos están muy alegres e interesados”. (D2)

Vemos cómo desde el punto de vista de la docente, los alumnos disfrutaban y aprenden más y mejor, aunque sea necesario en todo momento la supervisión cercana de la docente.

En las dos ocasiones en que pusimos a prueba la U.D., como docentes me siento satisfecha con el resultado de la experiencia de la enseñanza de la óptica desde una metodología de aprendizaje basado en la resolución de problemas. Los alumnos se muestran muy ilusionados con esta nueva forma de trabajar, consideran que aprenden más, que están atentos en todo momento, que se sienten partícipes de su propio aprendizaje, que se escuchan sus opiniones. Se ven con capacidad para proponer hipótesis y para llevarlas a cabo libremente en el laboratorio, se sienten un poco científicos.

Como docente-investigadora considero que la experiencia ha sido positiva en todos los aspectos, el buen comportamiento de los alumnos, su atención en clase, su participación, sus resultados en las pruebas objetivas, el clima de trabajo en el aula, incluso la sensación de plenitud del profesor, en todo momento vinculado con sus alumnos y con el currículo a desarrollar. Desde el punto de vista del docente, podemos decir que el uso de una estructura problematizada para llevar a cabo la enseñanza de la óptica, aunque muy demandante para el docente-investigador, es a la vez, altamente gratificante. A partir de los comentarios de los alumnos en el grupo de discusión entendemos que prefieren esta metodología sobre el libro de texto, la reconocen como más real y cercana, permitiéndoles un aprendizaje real de la óptica.

Me gustaría reseñar que, tanto en 2019 como en 2020, los resultados de estos alumnos en las pruebas objetivas en el Bloque de óptica fueron mejores que en el resto de los bloques del curso, incluso con pruebas objetivas tipo a las que se les plantean en los exámenes de acceso a la universidad. Todo ello, nos induce a creer que, mediante la metodología de la enseñanza problematizada, los alumnos aprenden realmente óptica, y además logran buenas calificaciones en los exámenes.

CAPÍTULO 9. CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS.

En este último capítulo de la tesis doctoral se intentará resumir la información obtenida en el proceso de investigación y experimentación, relacionándola con el marco teórico. Para ello, se plantean una serie de conclusiones que se pueden extraer de todo nuestro trabajo, comparándolas con resultados obtenidos en estudios previos, aportando interpretación y significado a las mismas.

9.1. Conclusiones sobre los libros de texto.

Mediante el estudio bibliográfico llevado a cabo al inicio de nuestra investigación, hemos comprobado cómo a lo largo de la historia, la óptica se ha ido construyendo con objeto de comprender la visión humana y, posteriormente, la naturaleza de la luz. Sin embargo, al analizar los libros de texto de Física de 2º de Bachillerato encontramos que la mayoría de éstos organizan la enseñanza de la óptica en dos bloques: la óptica geométrica que se encarga de la explicación de los fenómenos ópticos y la óptica física donde se establece la naturaleza de la luz y, consecuentemente, las leyes de su propagación, sin tener en cuenta la evolución histórica de la óptica como ciencia de la visión o la dicotomía onda-partícula de la luz. Se ignora, por tanto, los problemas a los que se enfrentaron los científicos de distintas épocas, los obstáculos conceptuales que se tuvieron que vencer y las ideas novedosas que supusieron avances fundamentales. Esta organización presente en la mayoría de los libros de texto de Física da a entender, erróneamente, que se construyó un modelo de visión como consecuencia de la comprensión de la naturaleza de la luz y de las leyes que rigen su propagación.

El análisis de los libros de texto que hemos llevado a cabo ha permitido un avance en el estudio de los manuales de Física, poniendo de manifiesto que los libros de texto de esta etapa educativa no siguen las prescripciones fundamentales de la Didáctica de las Ciencias. Se identifican carencias que afectan a la comprensión de aspectos clave del modelo de visión de Kepler y del modelo ondulatorio de la luz y, lo que resulta más relevante, dichas carencias se mantienen pese al cambio de Ley Educativa. Hemos visto cómo algunos libros, siguiendo el currículo de las últimas dos leyes educativas, muestran un análisis conceptual deficiente, por ejemplo, al explicar el concepto de “rayo” tan importante en óptica geométrica, o en el tratamiento de las fuentes secundarias de luz.

Estos errores continuados en el tiempo se transmiten a profesores y estudiantes, propiciando la existencia de conceptos erróneos generalizados.

En nuestra revisión y análisis del tema de óptica, hemos encontrado que los textos de Física de diferentes editoriales que compiten entre sí no presentan diferencias significativas. En general, estos libros ofrecen un tratamiento empirista de los fenómenos ópticos y, además de no tener en cuenta la revisión histórica para la identificación de posibles problemas en la comprensión de la óptica, no plantean los problemas relacionados con el tema, y no abordan las posibles limitaciones que pueden encontrar los estudiantes para comprender el proceso de visión y la naturaleza ondulatoria de la luz. Presentan los contenidos con desarrollos reduccionistas y numerosas inexactitudes o errores conceptuales, en el mismo sentido que el análisis que hacían de los textos de Física (Palacios-Díaz y Criado, 2017). Así mismo, comprobamos que, en el tema de óptica, los libros de texto utilizan gran cantidad de terminología científica específica y explicaciones incompletas de las ideas clave, tal como ya evidenciaron Ocelli y Valerias (2013) en sus análisis sobre los libros de texto de ciencias. También encontramos, que los libros de texto analizados muestran a menudo un tratamiento superficial de los conceptos básicos de óptica, con definiciones operativas, pero sin explicaciones conceptuales profundas, lo que impide que los estudiantes comprendan los fenómenos expuestos (Kahveci, 2010).

Al igual que Stern y Roseman (2004), que confirmaron a través de sus investigaciones que los textos de Física no tienen en cuenta las ideas previas de los alumnos en cuanto a óptica, nosotros hemos constatado que los libros analizados no incluyen un tratamiento adecuado de los conceptos alternativos referidos a la óptica de los alumnos, de los que existen evidencias como resultado de más de tres décadas de investigación (Happs y Treagust, 1987; Colin, Chauvet y Viennot, 2002; Andreou y Raftopoulos, 2010; Fetherstonhaugh y Heywood, 2005). Además, hemos comprobado cómo en muchas ocasiones los textos consideran que los alumnos tienen prerrequisitos conceptuales sobre el tema y, por experiencia, sabemos que en muchas ocasiones esto no es así.

En los últimos años son varios los autores que se han detenido a analizar los libros de texto de Ciencias (Moreno y Calvo, 2017; Niaz et al, 2010; Rodríguez y Niaz, 2004; Sales, Freire y Greca, 2015) lo que nos permite buscar similitudes con nuestro estudio y constatar que los libros analizados muestran la óptica como una actividad rígida, en la que no se tienen en cuenta las dudas propias de todo proceso de descubrimiento científico, ni las dificultades que se tuvieron que superar a lo largo de la historia para conseguir un

modelo adecuado que explique los fenómenos observados. Al igual que evidenciaron Stern y Roseman (2004), los libros de texto analizados presentan ciertas deficiencias en la explicación de fenómenos que perfectamente pueden ser comprendidos por el alumnado. Por todo ello, consideramos que los estudiantes tendrán dificultades para integrar los modelos geométrico y ondulatorio de la óptica, pues la mayoría del alumnado, al igual que hacen los libros de texto, abordan las situaciones experimentales desde la óptica geométrica o construyen modelos híbridos entre la óptica geométrica y la óptica ondulatoria. Los resultados de la investigación educativa así lo confirman (Maurines, 2010; Colin y Viennot, 2001; Bravo y Pesa, 2012).

Además, creemos que es necesario el diseño de materiales complementarios al libro de texto que permitan romper la visión uniforme de los contenidos de la óptica. Las actividades que proponen los libros de texto se encuentran, en su mayoría, desvinculadas de los intereses de los alumnos y no responden a una estrategia para trabajar los contenidos de la unidad. Dichas actividades, muy pautadas y cerradas, requieren estrategias de resolución inmediata, incluso en las actividades experimentales. Es cierto que los libros de texto controlan en buena medida lo que sucede en el aula, siendo el principal recurso de instrucción, pero es necesario que el profesorado sea un sujeto activo en su utilización. Creemos, por tanto, que resulta necesario un planteamiento más novedoso de la óptica en los libros de texto. Consideramos que las actividades han de partir de los conceptos alternativos de los alumnos, han de estar dirigidas a la investigación, al planteamiento de hipótesis que puedan ser resueltas mediante la selección y organización de la información y la interpretación de situaciones experimentales realizadas por los alumnos, enmarcándose en la metodología del aprendizaje basado en la resolución de problemas. Es por ello por lo que, en nuestra Unidad Didáctica, planteamos a los alumnos situaciones en las que su conocimiento previo, basado en la experiencia y el sentido común, no sea suficiente para explicar lo que sucede, pues sabemos que los alumnos se resisten, en general, a cuestionar y cambiar los elementos que componen su pensamiento (Galili, 2014).

9.2. Conclusiones sobre las aportaciones de los docentes.

Partiendo de las respuestas, a las preguntas planteadas sobre la enseñanza de la óptica en el Bachillerato, de la muestra de profesores de Física que han contestado el cuestionario y del análisis del grupo de discusión que hemos llevado a cabo con profesores, intentamos resumir los resultados principales de nuestra investigación a continuación:

1. Los profesores encuestados ofrecen un tratamiento fundamentalmente “empirista” de los fenómenos ópticos.
2. No tienen en cuenta la revisión histórica para la identificación de posibles problemas en la comprensión de la óptica, ni para plantear los problemas relacionados con el tema.
3. No tratan los obstáculos que pueden encontrar los alumnos y que les pueden impedir comprender el proceso de la visión y la naturaleza ondulatoria de la luz.
4. No utilizan una metodología de aprendizaje basada en la resolución de problemas. Presentan una carencia en la metodología didáctica de la óptica que afecta a la comprensión de aspectos clave del modelo de visión de Kepler y del modelo ondulatorio de la luz.

Desarrollamos a continuación más en profundidad los resultados principales obtenidos en nuestra investigación. En general, el profesorado de Física de 2º de Bachillerato que participa en este estudio, no tiene en cuenta la revisión histórica para la identificación de posibles problemas en la comprensión de la óptica, ni para plantear los problemas relacionados con el tema. Ofrecen argumentaciones sin posibilidades de discusión, sin explicar los conflictos que supusieron los cambios de modelo, lo que traslada a los estudiantes una imagen de la ciencia como acumulación de conocimientos, en la que no se tienen en cuenta las dudas propias de todo proceso de descubrimiento científico.

En general, manifiestan una forma instrumentalista de tratar los conceptos clave de la óptica como meros formalismos matemáticos. Por ejemplo, los docentes no introducen el principio de Huygens-Fresnel clave para comprender el comportamiento rectilíneo de la luz dentro del modelo ondulatorio de la luz, que fue un obstáculo que hubo que vencer históricamente y que supuso la aceptación del modelo ondulatorio de la luz. Parece que consideran que la dificultad matemática del mismo provocaría que el alumnado no pudiese comprenderlo. Por ello, entre otras cuestiones, creemos que los estudiantes tendrán dificultades para integrar los modelos geométrico y ondulatorio de la óptica, pues

la mayoría de los alumnos, al igual que hacen sus profesores, utilizan la óptica geométrica para resolver las situaciones experimentales, o construyen modelos híbridos entre la óptica ondulatoria y la óptica geométrica. Los resultados aquí encontrados parecen corroborar lo planteado por autores como Maurines (2010), Colin y Viennot (2001) y Bravo y Pesa (2015).

El profesorado que colabora en el estudio, considera que los alumnos no tienen ideas previas respecto al comportamiento de la luz, lo cual está en contra de todos los estudios presentes en la bibliografía analizada (Goldberg y McDermott, 1986; Kaminski y Viennot, 1989; Selley, 1996a y 1996b; Galili, 1996; Fler, 1996; Osuna, 2001; Martínez-Torregrosa, Osuna, 2001 y 2007), donde se pone de manifiesto el papel que juegan dichos conceptos alternativos en el campo de la óptica, pues impiden a los alumnos adquirir nuevos conocimientos si no son tratadas adecuadamente. La amplia investigación llevada a cabo acerca de la relación entre la enseñanza tradicional y dichos conceptos alternativos (Osborne y Wittrock, 1983; Carrascosa, 1983 y 1985; Driver, Guesne y Tiberghien, 1989; Hierrezuelo y Montero, 1989; Carrascosa y Gil, 1992; Wandersee, Mintzes y Novak, 1994; Pfundt y Duit, 2004; Galili, 2014) ha permitido concluir que los estudiantes tienen conceptos alternativos a la enseñanza formal, que en muchas ocasiones son persistentes y no se superan mediante estrategias de enseñanza convencionales. Muchos de estos conceptos alternativos son semejantes a los mantenidos a lo largo de la historia por eminentes científicos. Dado que sabemos que el conocimiento previo de los estudiantes influye en lo que pueden aprender en el aula, es esencial que los profesores sean conscientes de los conocimientos previos que tienen sus alumnos, incluidas sus ideas alternativas (Driver et al., 1994; Tytler, 2002). Partiendo del conocimiento de los conceptos previos de los alumnos, se han de formular estrategias relevantes para desafiar dichos conceptos alternativos y lograr que los alumnos asimilen los conceptos propios del conocimiento científico aceptado (Treagust, 1995; Treagust y Chandrasegaran, 2007). Ser consciente de las dificultades conceptuales de los estudiantes en Física puede proporcionar información valiosa para instructores, desarrolladores de currículos y autores de libros de texto (Tural, 2015).

Por otro lado, en este trabajo se ha evidenciado lo ya constatado por otros autores (Heywood, 2005; Wandersee et al., 1994), los docentes tienen los mismos conceptos alternativos que los alumnos, incluso hay estudios que muestran que existe una fuerte evidencia de que los profesores son una de las fuentes principales de los conceptos

alternativos de los alumnos (Wandersee et al., 1994). En relación con la materia de la óptica, creemos entender que algunos de los obstáculos clave que encuentran los alumnos para la comprensión del modelo de visión de Kepler y del modelo ondulatorio de la luz, dependen en buena medida de las explicaciones sólo “parciales” que muchos profesores proporcionan de los conceptos fundamentales tratados en esta materia.

Tras el análisis de las aportaciones de los docentes, destacamos que las principales dificultades que estos encuentran en la enseñanza de la óptica son el extenso currículo de la materia, y las carencias que tienen los alumnos en matemáticas. En las respuestas de los docentes se intuye la presión a la que están sometidos por el examen externo de acceso a la universidad y ello les impide desarrollar otra metodología de aprendizaje. Los docentes entrevistados, como la inmensa mayoría de los docentes participantes en el cuestionario, siguen practicando una metodología de enseñanza tradicional, basada en la transmisión conocimientos en su estado final, aunque se haya puesto de manifiesto en numerosas ocasiones la poca eficacia de esta enseñanza (Viennot, 1976; Ausubel, 1978; Gil, Carrascosa, Furió y Martínez Torregrosa, 1991). Los docentes participantes en el grupo de discusión son conscientes de las carencias de la enseñanza tradicional, pero se ven abocados a ella, quizás debido a la rigidez de los tiempos escolares, a la extensión del currículo, a las características de la prueba de acceso a la universidad basada fundamentalmente en ejercicios de resolución matemática, o por el desconocimiento de metodologías didácticas alternativas. Las respuestas que ofrecen los profesores participantes en el grupo de discusión dejan entrever que hay una carencia en la metodología didáctica de la óptica que afecta a la comprensión de aspectos clave del modelo de visión de Kepler y del modelo ondulatorio de la luz. Estos profesores no plantean el problema de “¿cómo vemos?”, o cualquier otro que pueda originar un proceso de construcción racional del modelo de visión, no proponen actividades para mostrar la relevancia histórica del problema a tratar, su posible influencia tecnológica, las implicaciones que pueda tener en la mejora de la salud, etc.; no plantean una secuencia de actividades basadas en la resolución de problemas, no prestan atención a los obstáculos que pueden encontrar los estudiantes; no plantean el problema de “¿cuál es la naturaleza de la luz?, ¿qué es la luz para que se comporte como lo hace?” como origen del estudio del modelo ondulatorio de la luz. Incluso hay docentes que consideran que una implementación de una metodología diferente a la enseñanza tradicional no sería valorada positivamente por un tribunal de acceso a la función docente. Por otro lado, los docentes

manifiestan la necesidad de ampliar la carga lectiva de la asignatura de Física y Química en el currículo para acercarnos más a la media europea, ganando así tiempo para poder enseñar de otra manera.

Por todo ello, creemos que sería importante un planteamiento más novedoso de la enseñanza de la óptica, en el que las actividades empiecen por el análisis y la discusión de los conceptos alternativos (y equivocados) que tienen los alumnos, en general, sobre los conceptos fundamentales de “haz de luz”, de “rayo de luz”, de “punto generador de ondas esféricas y/o planas”, “de óptica ondulatoria” vs. “óptica corpuscular”, etc. Además, estas actividades deberían, en lo posible, estar orientadas a la investigación, por medio del planteamiento de hipótesis que puedan ser verificadas mediante la selección y organización de la información; la interpretación de experimentos propuestos y realizados, en parte, por los mismos alumnos, que se enmarquen en la metodología del aprendizaje por “resolución de problemas”. Dicha investigación debería poder poner en cuestión el “conocimiento” previo de los alumnos, basado en la experiencia y el sentido común, para demostrar experimentalmente, que dicho “conocimiento” previo no resulta suficiente para explicar lo que se observa en un laboratorio. Este tipo de experiencias son extremadamente importante, porque los alumnos se resisten, en general, a cuestionar y cambiar los elementos que componen su pensamiento (Galili, 2014).

Por último, destacamos que los profesores valoran muy positivamente todos los aspectos propios de una enseñanza basada en la resolución de problemas, aunque no puedan ponerlos en práctica en sus propias clases, en su día a día. Es por ello deseable, ofrecer al profesorado una mayor formación didáctica de las ciencias en general y de la óptica en particular.

9.3. Conclusión de la experimentación de la Unidad Didáctica de óptica de 2º de Bachillerato.

A partir de la experimentación desarrollada, se ha podido constatar que los alumnos aprenden más sobre óptica cuando trabajan mediante una metodología de enseñanza basada en la resolución de problemas. Se ha visto como se incrementa su nivel de atención y participación en el aula y, tal como ellos mismos han manifestado, tienen la sensación de haber aprendido realmente sobre óptica, mucho más que en otros temas en donde se ha seguido una enseñanza tradicional. Al igual que los alumnos, considero que esta forma de trabajar les resulta más atractiva e innovadora. Como docente valoro la Unidad

Didáctica positivamente, aunque requiera mucho más esfuerzo de preparación para el docente, así como mucho más trabajo diario. Pero dicho esfuerzo se ve reconfortado por la satisfacción de poder explicar a fondo los conceptos tratados y ver como éstos son comprendidos y asimilados por mis estudiantes.

En las dos ocasiones que se puso en práctica la Unidad Didáctica, los alumnos afirman que se aprende más, de manera más entretenida, que se sienten más implicados y se muestran satisfechos con este nuevo modo de trabajar. Esta forma de trabajar les motiva, consideran que aprenden más, que están atentos en todo momento, que se sienten partícipes, que se escuchan sus opiniones. Se ven con capacidad para proponer hipótesis y para llevarlas a cabo libremente en el laboratorio, se sienten un poco científicos. En ambas ocasiones la totalidad de alumnos valoran la Unidad Didáctica positivamente, aunque les requiera más esfuerzo, más trabajo diario. Consideramos, pues, que la puesta en práctica en el aula con alumnos de segundo de Bachillerato de nuestra Unidad Didáctica produce mejoras sustanciales respecto a la enseñanza habitual. En concreto, la aplicación de nuestra Unidad Didáctica ha mostrado que:

1. Se generan oportunidades para aprender satisfactoriamente óptica. Mediante la observación de los trabajos que llevan a cabo los alumnos en clase, y también en las actividades de recapitulación, comprobamos que los alumnos comprenden los contenidos de la unidad. Además, se muestran orientados, conocen el problema que deben de resolver, son conscientes en todo momento de la estrategia que están siguiendo para ello (el índice del tema), y finalmente de los problemas que no van a poder abordar, y que pueden ser parte de otra investigación. Observamos también, mediante sus trabajos y su participación en clase, que van aprendiendo a argumentar de manera razonada y fundamentada.
2. Los alumnos mejoran los resultados en la evaluación respecto a otros bloques del curso, lo que consideramos que es debido a que han mejorado la comprensión conceptual de los conocimientos implicados.
3. Mejora la actitud hacia la asignatura, pues los estudiantes están orientados, consideran que han aprendido de verdad, y les gustaría que se trataran de este modo todos los bloques del curso.

A partir de los resultados obtenidos durante los años que ha durado esta investigación, hemos llegado a las siguientes conclusiones:

1. Es posible planificar la enseñanza sobre la naturaleza de la luz y la visión en 2° de Bachillerato mediante una metodología de aprendizaje basado en la resolución de problemas. El protocolo que hemos seguido en la elaboración de nuestra Unidad Didáctica nos ha permitido:
 - a) Plantear las cuestiones: “¿cómo vemos?, ¿cómo podemos ver mejor?, ¿cuál es la naturaleza de la luz?, como problemas en torno a los cuales organizar la enseñanza de la óptica para 2° de Bachillerato.
 - b) Considerar como objetivos clave de la Unidad Didáctica, el aprendizaje del modelo de visión de Kepler y el modelo ondulatorio de la luz. Consideramos que ambos son adecuados para la enseñanza de la óptica en 2° de Bachillerato pues tienen suficiente poder explicativo y predictivo.
 - c) Identificar las ideas clave, los conceptos fundamentales (metas parciales), que es necesario comprender acerca del modelo de visión de Kepler y del modelo ondulatorio de la luz; así como los obstáculos asociados que previsiblemente tendrán que superar los alumnos.
 - d) Diseñar una estrategia para avanzar en la resolución del problema planteado, de manera que la secuencia de enseñanza que planteamos en la Unidad Didáctica sea consistente con un plan de investigación.

2. Hemos mostrado la relevancia didáctica de las ideas clave planteadas (los conceptos fundamentales de la óptica), y de los obstáculos o dificultades asociados a ellas, pues que hemos probado que:
 - a) Hay una relación directa entre las ideas clave planteadas, y los elementos curriculares que propone la legislación vigente (Ver Tabla 4.1.). Existe así mismo, una relación directa entre dichos elementos curriculares y los obstáculos identificados en el aprendizaje de la óptica, y asociados a dichas ideas clave (Ver Tabla 4.2.).
 - b) Los alumnos poseen conceptos previos erróneos, que hemos de tener en cuenta si deseamos que comprendan las ideas clave planteadas. Algunos estudiantes, no tienen una concepción geométrica e idealizada de la luz, por lo que consideran que la luz puede ser en sí misma visible, no idealizan las fuentes extensas como conjuntos de fuentes puntuales, y al predecir fenómenos ópticos no utilizan las consecuencias geométricas de la propagación rectilínea de la luz. Algunos alumnos poseen a su vez ideas previas erróneas sobre la naturaleza de la luz, que debemos

contemplar si deseamos que comprendan la naturaleza de la luz. Así mismo, algunos alumnos tienen tendencia a interpretar el color como una propiedad del cuerpo o de la propia luz. Sabemos que muchas de estas ideas y razonamientos son persistentes a la enseñanza habitual ya que, forman parte del pensamiento de los estudiantes de 2º de Bachillerato después de la enseñanza de la óptica de acuerdo con la investigación bibliográfica realizada, y a la práctica docente a lo largo de muchos años de la investigadora.

- c) Tanto los libros de texto analizados, como los profesores que participaron en nuestro estudio, presentan carencias en el tratamiento de los conceptos fundamentales del modelo de visión de Kepler, y del modelo ondulatorio de la naturaleza de la luz.
 - d) La enseñanza tradicional habitual no contempla estos obstáculos, o dificultades que hemos identificado para comprender cómo vemos y cuál es la naturaleza de la luz.
3. La puesta en práctica en el aula con alumnos de segundo de Bachillerato, de una Unidad Didáctica para la Óptica con estructura problematizada, basada en las conclusiones del estudio previo realizado en esta investigación, produce una mejor comprensión de la óptica respecto a la enseñanza habitual.

9.4. Síntesis de conclusiones.

1. El estudio histórico nos ha permitido establecer las ideas clave de la óptica que han de adquirir los estudiantes y, por otro lado, nos ha ayudado a detectar los obstáculos o dificultades asociadas a dichas ideas, que previsiblemente encontrarán los estudiantes.
2. La historia de la ciencia, tanto en la práctica educativa diaria, como en el desarrollo del currículo, ha de tener un papel clave. Se ha de buscar la explicación de los fenómenos en su origen, pues hay un paralelismo entre la historia de la ciencia y el proceso psicológico formativo de los alumnos.
3. Los alumnos tienen conceptos previos erróneos relativos a la óptica, que influyen en su aprendizaje en el aula. Es esencial que los profesores conozcan los conceptos alternativos de sus alumnos. Así mismo, los docentes han de ser conscientes de que cualquier metodología de enseñanza que se limite al mero formalismo matemático no será capaz de cambiarlos.
4. Hemos evidenciado que, en ocasiones, los profesores pueden ser una de las fuentes principales de los conceptos alternativos de los alumnos en cuanto a la óptica se refiere.

5. Hemos mostrado que, muchas veces, los libros de texto son una fuente de conceptos alternativos en óptica, por la información incorrecta que proporcionan. Es por ello por lo que algunos profesores que basan su enseñanza en el libro de texto mantienen sus conceptos alternativos erróneos relativos a la óptica, y los trasladan a sus estudiantes.
6. Muchos alumnos, e incluso algunos docentes, aunque son capaces de resolver problemas complicados, no tienen una comprensión profunda de los principales conceptos de la óptica, pues mantienen conceptos alternativos incompatibles con un aprendizaje conceptual correcto de la óptica.
7. Hemos evidenciado que los libros de texto de Física de 2º de Bachillerato ofrecen en muchas ocasiones un tratamiento empirista de los fenómenos ópticos; no tienen en cuenta la revisión histórica para la identificación de posibles problemas en la comprensión de la óptica, ni para plantear los problemas relacionados con el tema y, además, no abordan las posibles limitaciones que pueden encontrar los estudiantes para comprender el proceso de visión y la naturaleza ondulatoria de la luz. Presentan los contenidos con desarrollos reduccionistas y numerosas inexactitudes o errores conceptuales. Así mismo, comprobamos que, en el tema de óptica, los libros de texto utilizan gran cantidad de terminología científica específica, pero explicaciones deficientes de las ideas clave. También encontramos, que los libros de texto analizados muestran a menudo un tratamiento superficial de los conceptos básicos de óptica, con definiciones operativas, pero sin explicaciones conceptuales profundas, lo que puede impedir que los estudiantes comprendan los fenómenos expuestos.
8. Los profesores encuestados ofrecen un tratamiento fundamentalmente “empirista” de los fenómenos ópticos; no tienen en cuenta la revisión histórica para la identificación de posibles problemas en la comprensión de la óptica ni para plantear los problemas relacionados con el tema; y no tratan los obstáculos que pueden encontrar los alumnos y que les pueden impedir comprender el proceso de la visión y la naturaleza ondulatoria de la luz.
9. La mayoría de los profesores encuestados presentan carencias en la metodología didáctica de la óptica que pueden afectar a la comprensión de aspectos clave del modelo de visión de Kepler y del modelo ondulatorio de la luz.
10. La experimentación de nuestra Unidad Didáctica nos permite concluir que los alumnos aprenden más sobre óptica cuando trabajan mediante una metodología de enseñanza basada en la resolución de problemas. En las dos ocasiones (2019 y 2020)

que pusimos en práctica la UD, los alumnos afirman que se aprende más, de manera más entretenida, que se sienten más implicados, y se muestran satisfechos con este nuevo modo de trabajar.

En definitiva, hemos conseguido suficiente y variada evidencia empírica, tanto en lo referente a los libros de texto, como a los profesores y a los alumnos, para consolidar la validez de la investigación realizada en aras de mejorar la enseñanza de la óptica en 2º de Bachillerato. Por ello, consideramos que la secuencia de enseñanza experimental, cuyas actividades y comentarios se incluyen en el Anexo VII, podría generalizarse en las aulas contando con la adecuada formación del profesorado.

9.5. Propuestas de mejora y futuras líneas de investigación.

Desde nuestro punto de vista, todo proceso de investigación en educación muestra mucha más entidad cuando tiene carácter aplicado y, por tanto, de dicha investigación derivan innovaciones o experiencias educativas que se apoyan en bases científicas sólidas. En esta tesis doctoral hemos dado muestra de esa relación entre investigación e innovación educativa, aunque no hemos estado exentos de ciertas limitaciones a la hora de desarrollar el estudio y la posterior experimentación, derivadas de la naturaleza de la realidad objeto de estudio. Ha resultado difícil acceder al profesorado de la especialidad y buscar su implicación en nuestro estudio. La carga docente y burocrática que asume el profesorado, la presión de la prueba de acceso a la universidad en este curso y el poco tiempo disponible pueden ser algunos factores que limitaron su colaboración. Por otro lado, la propia especificidad del tema de estudio (óptica) ya está circunscribiendo su participación, es un tema muy concreto dentro de un temario muy amplio y en el que muchos docentes no se sienten seguros. En cuanto al alumnado, sí que nos hubiera gustado poder profundizar en sus valoraciones y experimentar nuestra Unidad Didáctica con más grupos en donde pudieran participar uno o varios observadores externos.

Consideramos que en un futuro podríamos integrar alguna actividad de realidad aumentada en nuestra, este tipo de actividades se adaptan bien a las metodologías que potencian el rol activo del alumno, como podría ser nuestro caso (Villaustre et al. 2017). Así mismo, pensamos que sería positivo implicar a nuestro alumnado en el análisis de los libros de texto (Braga y Belver, 2016). Por otra parte, compartimos con Vilches, Gil y

Calero (2013) el interés por la problemática de la sostenibilidad y concebimos, al igual que dichos autores, expectativas positivas acerca del papel que la educación en ciencias puede jugar en la necesaria y urgente transición a la sostenibilidad y nos gustaría que nuestros alumnos fueran partícipes de esta necesidad.

Tanto del análisis del marco teórico, como de los resultados de la investigación práctica, emergen aspectos que constituyen el punto de partida para continuar investigando. Se nos ocurren las siguientes líneas de investigación:

- 1) Indagar acerca de las posibles causas de los conceptos alternativos relativos a la óptica tanto en los profesores como en los estudiantes.
- 2) Profundizar en el análisis de los libros de texto centrando nuestro estudio en las imágenes e ilustraciones que estos ofrecen.
- 3) Reelaborar los libros de texto de acuerdo con una enseñanza problematizada, que se ha mostrado mucho más efectiva que la enseñanza tradicional.
- 4) Experimentar una propuesta formativa en metodología de enseñanza problematizada con futuros profesores de Física y Química.
- 5) Diseño y aplicación de algún tipo de rúbrica de evaluación que nos permita objetivar de alguna manera la experimentación en el aula.
- 6) Conocer con mayor profundidad las valoraciones del alumnado y poder aplicar la Unidad Didáctica diseñada con un grupo experimental y otro de control. En ese caso, sería también interesante contar con la figura del observador externo.

Finalmente, queremos concluir indicando que, aunque en nuestro estudio hayamos centrado nuestra visión en un tema tan concreto como la óptica, en este trabajo se aportan conclusiones con repercusión tanto a nivel de investigación como a nivel pedagógico, que tienen aplicabilidad en diferentes ámbitos de la Didáctica de las Ciencias. Al fin y al cabo, nuestra intención con este trabajo no es otra que contribuir a mejorar la práctica docente en el aula y, por consiguiente, contribuir a mejorar el aprendizaje del alumnado.

FUENTES BIBLIOGRÁFICAS Y DOCUMENTALES.

- Álvarez-Jubete, E. y Hevia, I. (2017). Trabajo por proyectos: estudio de la Óptica en 2º de Bachillerato. *Actas INNODOCT/17. International Conference on Innovation, Documentation and Education*. Valencia: Universitat Politècnica de València (en prensa)
- Acevedo, J. A. (1993). Actitudes hacia el aprendizaje de las ciencias Físicas, naturales y matemáticas en BUP y COU. Un estudio sobre tres dimensiones. *Enseñanza de las Ciencias*, N. ° extra, pp. 14-14.
- Adey, P. (1997). Dimensions of progression in a curriculum. *The curriculum Journal*, 8, 3, pp. 367-390.
- Albanese, M. A., y Mitchell, S. (1993). Problem-based learning: A review of literature on its outcomes and implementation issues. *Academic Medicine*, 68, 1, pp. 52-81.
- Albert Gómez, M. J. (2006). *La Investigación Educativa*. Madrid: McGraw-Hill.
- Allchin, D. (2013). *Teaching the nature of Science: Perspectives & resources*. Saint Paul, MN: SHiPS Education Press.
- Alomá, E. y Malaver, M. (2007). Análisis de los conceptos de energía, calor, trabajo y el teorema de Carnot en textos universitarios de termodinámica. *Enseñanza de las Ciencias*, 25, 3, pp. 387-399.
- Alonso, M. (1994). *La evaluación en la enseñanza de la Física como instrumento de aprendizaje*. Tesis doctoral. Universitat de València.
- Alonso, M., Gil, D. y Martínez Torregrosa, J. (1992a). Los exámenes de Física en la enseñanza por transmisión y en la enseñanza por investigación. *Enseñanza de las Ciencias*, 10, 2, pp. 127-138.
- Alonso, M., Gil, D. y Martínez Torregrosa, J. (1992b). Concepciones espontáneas de los profesores de Ciencias sobre la evaluación: Obstáculos a superar y propuestas de replanteamiento. *Revista de Enseñanza de la Física*, 5, 2, pp. 18-38.
- Alonso, M., Gil, D. y Martínez Torregrosa, J. (1996). Evaluar no es calificar. La evaluación y la calificación en una enseñanza constructivista de las ciencias. *Investigación en la Escuela*, 30, pp. 15-26.
- Altheide, D. L. y Johnson, J. M. (1994). *Criteria for assessing interpretive validity in qualitative research*. En: N. K. Denzin y S. Lincoln (Ed.), *Handbook of qualitative research* (pp. 485-499). London: Sage.

- Altrichter, H., Posch, P. y Somekh, B. (1993). *Teachers investigate their work*. London: Routledge.
- Álvarez-Méndez, J. M. (2001). *Entender la Didáctica, entender el Curriculum*. Madrid: Miño y Dávila.
- Álvarez-Pérez, L. y González-Pineda, J. A. (1997). La diversidad en la práctica educativa. Proceso para diseñar adaptaciones curriculares. *Aula Abierta*, 69, pp. 23-41.
- Alveiro, D. y Nury, A. (2019). *Evaluación del aprendizaje basado en problemas como un método para la comprensión del tema de cinemática*. Maestría en Evaluación y Aseguramiento de la Calidad de la Educación. Universidad Externado de Colombia. Facultad de Ciencias de la Educación.
- Ambrose, B., Shaffer, P., Steinberg, R. y McDermott, L. (1999). An investigation of student understanding of single-slit diffraction and double-slit interference. *American Journal of Physics*, 67, 2, pp. 146-155.
- Andersson, B. y Bach, F. (2004). On Designing and Evaluating Teaching Sequences Taking Geometrical Optics as an Example. *Science Education*, publicado online en: Wiley InterScience (www. Interscience.wiley.com), pp. 1-23.
- Andersson, B. y Bach, F. (2005). On designing and evaluating teaching sequences taking geometrical optics as an example. *Science Education*, 89, 2, pp. 196-218.
- Andersson, B. y Karrqvist, C. (1983). How Swedish aged 12-15 years, understand light and its properties. *European Journal of Science Education*, 5, 4, pp. 387-402.
- Andreou, C. y Raftopoulos, A. (2010). Lessons from the history of the concept of the ray for teaching geometrical optics. *Science & Education*, 20, 10, pp.1007–1037. doi:10.1007/s11191-010-9302-7.
- Anta, C. (2008). Análisis bibliométrico de la investigación educativa divulgada en publicaciones periódicas españolas entre 1990-2002. *Revista Electrónica de Investigación Educativa*, 10, 1, pp. 1-17.
- Anta, C. y Pérez, J. M. (2007). *La producción científica sobre Didáctica de las Ciencias*. IV Congreso Comunicación Social de la Ciencia, noviembre, pp. 21-23, Madrid: CSIC.
- Apple, M. W. (1989). *Maestros y Textos. Una economía política de las relaciones de clase y de sexo en educación*. Madrid: Centro de Publicaciones del Ministerio de Educación y Ciencia.

- Arboleda, L. (2008). El grupo de discusión como aproximación metodológica en investigaciones cualitativas. *Revista de la Facultad Nacional de Salud Pública*, 26, 1, pp. 69-77.
- Aristóteles (348-322 a. C). *Parva Naturalia*. (Edición de 1993) Madrid: Alianza.
- Aristotle (350 a. C). *Physics*. (Edición de 1995). Athens: Papyrus Publications. <https://onlinebooks.library.upenn.edu/webbin/book/lookupname?key=Aristotle>
- Aristotle (350 a. C). *On the soul. Omnibus V. 40*. (Edición de 1997) Athens: Cactus Publications.
<https://onlinebooks.library.upenn.edu/webbin/book/lookupname?key=Aristotle>
- Arnold, M. y Millar, R. (1996). Learning the scientific “story”: a case study in the teaching and learning of elementary thermodynamics. *Science Education*, 80, 3, pp. 249- 281.
- Arnal, Del Rincón, J. D. y Latorre, A. (1994). Investigación Educativa. Fundamentos y metodología. Barcelona: Labor S.A.
- Arons, A. B. (1990). *A Guide to Introductory Physics Teaching*. New York J. Wiley and Sons.
- Arriasecq, I. y Greca, I. (2004). Enseñanza de la teoría de la relatividad especial en el ciclo polimodal: dificultades manifestadas por los docentes y textos de uso habitual. *Revista Electrónica de Enseñanza de las Ciencias*, 3, 2, pp. 211-227.
- Arroio, A. (2010). Context based learning: A role for cinema in science education. *Science Education International*, 21, 3, pp. 131-143.
- Astolfi, J. P. y Peterfalvi, B. (1993). Obstacles et construction de situations didactiques en sciences expérimentales, *Modèles pédagogiques*, 16, pp. 100-110.
- Ausubel, D. P. (1978). *Psicología educativa. Un punto de vista cognoscitivo*. México: Trillas.
- Bachelard, G. (1938). *La formation de l' esprit scientifique*. Paris: Vrin.
- Baird, J. (1986). Improving learning through enhanced metacognition. A classroom study. *European Journal of Science Education*, 8, 3, pp. 263-282.
- Ballini, P., Robardet, G. y Rolando, J. M. (1997). L' intuition, obstacle à l' acquisition de concepts scientifiques: propositions pour l' enseignement du concept d' énergie en première, *Modèles pédagogiques*, 24, pp. 81-112.

- Bailey, K. (1990). "The use of diary studies in teacher education programs". En: Richards and Nunan Ed., *Second Language Teachers Education*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Bailey, K. (1983). Competitiveness and anxiety in adult second language learning: looking at and through the diary studies. En: Seliger y Long (Ed.), *Classroom Oriented Research in Second Language Acquisition*. Rowley, Massachusetts: Newbury House.
- Bailey, K. y Ochsner, R. (1983). A methodological review of the diary studies: windmill tilting or social science? (pp. 188-198). En: Bailey, Long y Peck (Ed.), *Second Language Acquisition Studies*. Rowley, Massachusetts: Newbury House.
- Barbour, R. (2013). *Los grupos de discusión en investigación cualitativa*. Madrid: Ediciones Morata.
- Barrell, J. (1999). *El aprendizaje basado en problemas. Un enfoque investigativo*. Buenos Aires: Manantial.
- Barrett, T. (2005). Understanding problem-based learning. En *Handbook of enquiry & problem-based learning*. In T. Barrett, I. Mac Labhrainm, H. Fallon (Ed.), pp 13-25.
- Barrio, J. (2000). *Física. 2º curso de Bachillerato*. Navarra: Oxford.
- Barrow, L. H. (2000). Do Elementary Science Methods Textbooks Facilitate the Understanding of Magnet Concepts? *Journal of Science Education and Technology*, 9, 3, pp. 199-205.
- Becerra, C. (2004). *La enseñanza de la mecánica newtoniana con una estructura problematizada en el primer curso universitario*. Tesis doctoral. Universidad de Alicante.
- Beléndez, A., Pascual, I. y Rosado, L. (1989). La enseñanza de los modelos sobre la naturaleza de la luz. *Enseñanza de las Ciencias*, 7, 3, pp. 271-275.
- Bencze, L. y Hodson, D. (1999). Changing Practice by Changing Practice: Toward More Authentic Science and Science Curriculum Development. *Journal of Research in Science Teaching*, 36, 5, pp. 521-539.
- Bendall, S., Goldberg, F. y Galili, I. (1993). Prospective elementary teachers' prior knowledge about light. *Journal of Research in Science Teaching*, 30, pp. 1169-1187.
- Bericat, E. (1998). *La integración de los métodos cuantitativo y cualitativa en la investigación social. Significado y medida*. Barcelona. Ariel S.A.

- Berlin, D. F. (1996). *Action research in the science classroom: Curriculum improvement and teacher professional development*. En: J. Rhoton y P. Bowers (Ed.), *Issues in science education* (pp. 73-80). Arlington: NSELA/NSTA.
- Bernstein, R. J. (1983). *La reestructuración de la teoría social y política*. México: Fondo de Cultura Económica.
- Bernal, J. D. (1967). *Historia social de la ciencia (volumen I)*. Barcelona: Península.
- Best, D. W. (1982). *¿Cómo investigar en educación?* Madrid: Morata.
- Binns, I. C. y Bell, R. L. (2015). Representation of scientific methodology in secondary science textbooks. *Science & Education*, 24, pp. 913-936.
- Birch, T (1757). *The History of the Royal Society of London for Improving of Natural Knowledge*. London: Millar in the Strand.
- Bisquerra, R. (2004). *Metodología de la investigación educativa*. Madrid. La Muralla.
- Black, P. y Harrison, C. (2000). Formative Assessment. En: Monk, M. y Osborne, J. (Eds). *Good Practice in Science Teaching. What research has to say*, pp. 25-40. Buckingham: Open University Press.
- Blumenfeld, P.C., Soloway, E., Marx, R. W., Krajcik, J. S., Guzdial, M. y Palincsar, A. (1991). Motivating project-based learning: Sustaining the doing supporting the learning. *Educational Psychologist*, 26, 3, pp. 369-398.
- Boorstin, D.J. (1994). *Los descubridores. La naturaleza*. Barcelona: RBA.
- Braga, G. y Belver, J. L. (2016). El análisis de libros de texto: una estrategia metodológica en la formación de los profesionales de la educación. *Revista Complutense de Educación*, 27, pp. 199-218.
- Bradley, J. (1728). IV. A letter from the Reverend Mr. James Bradley Savilian Professor of Astronomy at Oxford, and F. R. S. to Dr. Edmond Halley Astronom. Reg. &c. giving an account of a new discovered motion of the fixed stars. *Philosophical Transactions*. 1728, 35, pp. 637-661. doi:10.1098/rstl.1727.0064
- Branda, L. A. (2009). El aprendizaje basado en problemas. De herejía artificial a res popularis. *Educación Médica*, 12 (1), 11-23.
- Bravo, B. (2008). *La enseñanza y aprendizaje de la visión y el color en educación secundaria obligatoria*. Tesis Doctoral no publicada. Departamento de Psicología Básica, Universidad Autónoma de Madrid.
- Bravo, S., Pesa, M. y Colombo, E. (2001). Formación y actualización de maestros: una experiencia referida a la conceptualización de los fenómenos de la visión del color. *Revista de Enseñanza de la Física*, 14, 1, pp. 5-17.

- Bravo, B., Pesa, M. y Pozo, J. I. (2011). Aprendiendo a explicar el fenómeno de la visión: efectos de la enseñanza sobre el saber de los alumnos. *Latin-American Journal of Physics Education*, 5, 2, pp. 562-572.
- Bravo, S. y Pesa, M. (2015). El fenómeno de la difracción en la historia de la óptica y en los libros de texto. Reflexiones sobre sus dificultades de aprendizaje. *Investigações em Ensino de Ciências*, 20, 2, pp. 76-102.
- Bransford, J., Brouwn, A. y Cocking, R. (2000). *How People Learn: Brain, Experience and School* (Expanded edition), NRC (National Academy Press).
- Bullejos, J. (1983). Análisis de actividades de textos de Física y Química de 2º de BUP. *Enseñanza de la Ciencias*, 6, 1, pp. 19-29.
- Buty, C., Tibergien, A. y le Marechal, J. F. (2004). Learning hypotheses and an associated tool to design and to analyse teaching-learning sequences. *International Journal of Science Education*, 26, 5, pp. 579-605.
- Caixeta, M. E. y Souza, P. (2010). Critérios que professores de química apontam como orientadores da escolha do livro didático. Ensaio, *Pesquisa Educação em Ciências*, 12, 2, pp. 121-135.
- Calero, M. I. y Conti, M. (2009). El diario de campo. Una herramienta de investigación educativa utilizada en el aula multigrado. *Quehacer Educativo*, Junio 2009, pp. 75-77.
- Calhoun, E. F. (1993). Action research: Three approaches. *Educational Leadership*, 51, pp. 62-65.
- Callejo, J. (2001). *El grupo de discusión: introducción a una práctica de investigación*. Barcelona: Ariel.
- Campanario, J. M. (2001). ¿Qué puede hacer un profesor como tú o un alumno como el tuyo con un libro de texto como éste? Una relación de actividades poco convencionales. *Enseñanza de las Ciencias*, 19, 3, pp. 351-364.
- Campanario, J. M. (2003). De la necesidad, virtud: cómo aprovechar los errores y las imprecisiones de los libros de texto para enseñar Física. *Enseñanza de las Ciencias*, 21, 1, pp. 161-172.
- Carr, W. y Kemmis, S. (1988). *Teoría crítica de la enseñanza. La investigación-acción en la formación del profesorado*. Barcelona: Martínez Roca.
- Carrascosa, J. (1983). Errores conceptuales en la enseñanza de las ciencias: selección bibliográfica. *Enseñanza de las Ciencias*, 1, 1, pp. 63-65.

- Carrascosa, J. y Gil, D. (1992). Concepciones alternativas en mecánica. Dinámica: Las fuerzas como causa del movimiento. Selección de cuestiones elaboradas para su detección y tratamiento. *Enseñanza de las Ciencias*, 10, 3, pp. 314-328.
- Carrascosa, J. (1985). Errores conceptuales en la enseñanza de la Física y la química: una revisión bibliográfica. *Enseñanza de las Ciencias*, 3, 3, 230-234.
- Carrascosa, J. (2006). El problema de las concepciones alternativas en la actualidad (parte III). Utilización didáctica de los errores conceptuales que aparecen en cómics, prensa, novelas y libros de texto. *Revista Eureka de Enseñanza y Divulgación de las Ciencias*, 3, 1, pp. 77-88.
- Casado, A., Prieto, L. y Alonso, J. (1999). El tamaño del efecto de la diferencia entre dos medias: ¿estadísticamente significativo o clínicamente relevante? *Medicina Clínica, Barcelona*, 112, pp. 584-588.
- Cassab, M. y Martins, I. (2008). Significações de professores de ciências a respeito do livro didático. *Ensaio Pesquisa Educação em Ciências*, 10, 1, pp. 97-116.
- Chalmers, A. (1984). *¿Qué es esa cosa llamada ciencia?* Madrid: Siglo XXI.
- Chalmers, A. (1992). *La ciencia y como se elabora*. Madrid: Siglo XXI.
- Chan, C. y Lo, M. (2017). Exploring inclusive pedagogical practices in Hong Kong primary EFL classrooms, *International Journal of Inclusive Education*, 21, 7, pp. 714-729. Doi: 10.1080/13603116.2016.1252798.
- Chauvet, F. (1996). Teaching colour: design and evaluation of a sequence. *European Journal of Teacher Education*, 19, 2, pp. 119-134.
- Chauvet, F., Hirn, C. y Viennot, L. (1999). Investigation on teacher transformations when implementing teaching strategies. *European project: Science teacher training in an information society* (European commission DG XII contract SOE2 CT97 2020). 411
- Chevallie, C. (1980). *Kepler. Les fondements de l'optique moderne. Introducción y notas a la traducción de Paralipomènes a Vitellion*. París: Vrin.
- Chiappetta, E. L., Sethna, G. H. y Fillman, D. A. (1993). Do middle school life science textbooks provide a balance of scientific literacy themes? *Journal of Research in Science Teaching*, 30, 7, pp. 787-797.
- Chi, M. T. H. (2002). Conceptual Change within and across Ontological Categories: Examples from Learning and Discovery in Science. En: M. Limón y L. Mason (Ed.) *Reconsidering Conceptual Change: Issues in Theory and Practice*, pp. 3-29. London: Kluwer.

- Choppin, A. (1993). Manuels scolaires, États et sociétés, XIXe -XXe siècles: Introduction. *Histoire de l' Education*, 58, pp. 5-7.
- Clarke, J., Dudley, P., Edwards, A., Rowland, S., Ryan, C. y Winter, R. (1993). Ways of presenting and critiquing action research reports. *Educational Action Research*, 1, pp. 490-492.
- Clift, R., Veal, M. L., Johnson, M. y Holland, P. (1991). Restructuring teacher education through collaborative action research. *Journal of Teacher Education*, 41, pp. 52-62.
- CLIS (Children's Learning in Science Project) (1987). *CLIS in the Classroom Approaches to Teaching. The Particulate Theory of Matter*, Centre for Studies in Science and Mathematics Education, Leeds: University of Leed.
- Cohen, J. (1988). *Statistical power analysis for behavioural sciences*. Nueva York: Academic Press.
- Cohen L., Manion L. y Morrison K. (2007). *Research methods in education*. London. Routledge.
- Colin, P. y Viennot, L. (1988). Les difficultés d'étudiants post-bac pour une conceptualisation cohérente de la diffraction et l'image optique. *Didaskalia*, 17, pp. 29-54.
- Colin, P. y Viennot, L. (2001). Using two models in optics: Students' difficulties and suggestions for teaching. *Physics Education Research: A Supplement to the American Journal of Physics*, 69, 7, pp. 36-44.
- Colin, P., Chauvet, F. y Viennot, L. (2002). *Reading images in optics: Students' difficulties, teachers' viewpoints and guidelines for a "didactical structure."* En: H. Behrendt et al. (Ed.), *Research in science education- past, present, and future* (pp. 241-246). Dordrecht: Kluwer.
- Collis, K.F., Jones, B.L., Sprod, T., Watson, J.M. y Fraser, S.P. (1998). Mapping development in students' understanding of vision using a cognitive structural model. *International Journal of Science Education*, 20, 1, pp. 45-66.
- Colombo, L. y Pesa, M. (1999). Obstáculos en el aprendizaje de la polarización luminosa: una experiencia con profesores de Física. *Caderno Catarinense de Ensino de Física*, 16, 2, pp. 208-225.
- Concari, S. B. y Giorgi, S. M. (2000). Los Problemas Resueltos en Textos Universitarios de Física. *Enseñanza de las Ciencias*, 18, 3, pp. 381-390.
- Corey, S. (1953). *Action research to improve school practices*. New York: Columbia University, Teachers College.

- Cubero Pérez, Rosario. (2005). *Perspectivas constructivistas. La intersección entre el significado, la interacción y el discurso*. Barcelona: Graò.
- Crombie, A. C. (1996). *Historia de la ciencia: De San Agustín a Galileo (I)*. Madrid: Alianza.
- Decreto 43/2015, de 10 de junio, por el que se regula la ordenación y se establece el currículo de la Educación Secundaria Obligatoria en el Principado de Asturias. BOPA núm., 150 de 30 de Junio de 2015.
- Dedes, C. (2005). The Mechanism of Vision: Conceptual Similarities between Historical Models and Children's Representations. *Science Education*, 14, pp. 699-712.
- De La Gandara, M. (1992). La investigación en enseñanza de las ciencias en España. *Revista Interuniversitaria de Formación del profesorado*, 14, pp. 19-26.
- De Pro, A. (2009). ¿Qué investigamos en Didáctica de las Ciencias Experimentales en nuestro contexto educativo? *Investigación en la Escuela*, 69, pp. 45-59.
- De Pro, A., Sánchez, G. y Valcárcel, M. V. (2008). Análisis de los libros de texto de Física y química en el contexto de la Reforma LOGSE. *Enseñanza de las Ciencias*, 26, 2, pp. 193-209.
- Del Pozo, M. M. (2004a): El movimiento pedagógico de la Escuela Nueva. En M. M. Del Pozo, J.L. Álvarez, Luengo, J., y E. Otero, (Eds.), *Teorías e instituciones contemporáneas de educación* (pp. 197-219). Biblioteca Nueva.
- Del Carmen, L. y Jiménez, M. P. (1997). Los libros de texto: un recurso flexible. *Alambique*, 11, pp. 7-14.
- Descartes, R. (1637). *Discurso del método, Dióptrica, Meteoros y Geometría*. (Edición de 1981). Madrid: Alfaguara.
- Digisi, L. L. y Willet, J. B. (1995). What high school biology teachers say about their textbook use: a descriptive study. *Journal of Research in Science Teaching*, 32, pp. 123-142. <https://doi.org/10.1002/tea.3660320204>
- Disessa, A. A. (1988). Knowledge in pieces. In G. Forman and P.B. Pufall (Ed.), *Constructivism in the computer age*. Hillsdale, NJ: Erlbaum.
- Doménech, J. L. (2000). *L'ensenyament de energia en l'educació secundària. Anàlisi de les dificultats i una proposta de millora*. Tesis doctoral. Universitat de València.
- Downing, K., Kwong, T., Chan, S. W., Lam, T. F., y Downing, W. K. (2009). Problem-based learning and the development of metacognition, *Higher Education*, 57, 5, pp. 609-621.

- Driver, R. y Oldham, V. (1986). A constructivist Approach to Curriculum development in science. *Studies in Science Education*, 13, pp. 105-122.
- Driver, R. (1995). Constructivist approaches to science teaching. En: L. P. Steffe & J. Gale (Ed.), *Constructivism in education* (pp. 385-400). Hillsdale, New Hersey: Lawrence Erlbaum.
- Driver, R. (1986). Psicología cognoscitiva y esquemas conceptuales de los alumnos. *Enseñanza de las Ciencias*, 4, 1, pp. 3-16.
- Driver, R. (1988). Un enfoque constructivista para el desarrollo del currículum en ciencias. *Enseñanza de las Ciencias*, 6, 2, pp. 109-120.
- Driver, R. (1989). Students' Conceptions and The Learning of Science. *International Journal of Science Education*, 11, pp. 481-490.
- Driver, R. (1992). *Una visión constructivista del aprendizaje y sus implicaciones en la enseñanza de las Ciencias*. Ponencia presentada en el encuentro Investigación y Desarrollo del Currículum en la Enseñanza de las Ciencias, (CIDE: MEC).412
- Driver, R., Guesne, E. y Tiberghuen, A. (1999). *Ideas científicas en la infancia y la adolescencia*. Madrid: Morata, S. L.
- Driver, R., Newton, P. y Osborne, J. (2000). Establishing of scientific argumentation in classrooms. *International Journal of Science Education*, 22, 4, pp.287-312.
- Duit, R. (2002). Conceptual Change – Still a Powerful Frame for Improving Science Teaching and Learning. *Proceedings of the Third European Symposium on Conceptual Change*, June 26–28, Turku, Finland.
- Duit, R. y Treagus, D. F. (2003). Conceptual change: A powerful framework for improving science teaching and learning. *International Journal of Science Education*, 25,6, pp. 671-688.
- Duit, R. (2006). *Bibliography*. Students' alternative frameworks and science education STCSE., (<http://www.ipn.uni-kiel.de/aktuell/stcse/stcse.html>).
- Duit, R., Gropengieber, H. y Hattmann, U. (2005). Towards science education research that is relevant for improving practice: The model of educational reconstruction. *Developing Standards in Research on Science Education-Ficher*, pp. 1-9. Leiden: Taylor & Francis
- Duschl, R. A. (1990). *Restructuring science education*, New York: Teacher College Press, Columbia University.

- Duschl, R. A. y Gitomer, D. H. (1991). Epistemological perspectives on conceptual change: implications for educational practice. *Journal of Research in Science Teaching*, 28, 9, pp. 839-858.
- Dykstra D. I., Boyle C. F. y Monarch I. A. (1992). Studying conceptual change in learning physics. *Science Education*, 6, pp. 615–652.
- Ebbutt, D. y Elliott, J. (1990). *¿Por qué deben investigar los profesores?* En J. Elliott, La investigación-acción en educación (pp. 176-190). Madrid: Morata.
- Elliott, J. (1986). "Action-research": normas para la autoevaluación en los colegios. En L. Haynes (Eds.), *Investigación-acción en el aula* (pp. 21- 48). Valencia: Generalitat Valenciana, Conselleria de Cultura, Educació i Ciència.
- Elliott, J. (1991). Estudio del currículo escolar a través de la investigación interna. *Revista Interuniversitaria de Formación del Profesorado*, 10, pp. 45-68.
- Elliott, J. (1992). ¿Son los "indicadores de rendimiento" indicadores de la calidad educativa? *Cuadernos de Pedagogía*, 206, pp. 56-60.
- Elliott, J. (1993). El cambio educativo desde la investigación-acción. Madrid: Morata.
- Elliott, J. (2000). La investigación-acción en educación. Madrid: Morata.
- Elórtogui, N., Fernández, J. y Medina, M. (2002). Estudio bibliométrico sobre la investigación en Didáctica de las Ciencias de la Naturaleza, *Alambique*, 34, pp. 82-83.
- Engels, E. y Driver, R. (1986). A study of consistency in the use of students' conceptual frameworks across different task contexts. *Science Education*, 70, 4, pp. 473- 496.
- Eylon, B., Ronen, M. y Langley, D. (1993). Responding to students' learning difficulties in geometrical optics. En: L.C. Pererira, J.A. Ferreira and H. A. Lopes (Ed.), *Proceeding of GIREP '93, International Conference on Physics Education: Light and information*. Braga, Portugal: Universidade do Minho.
- Favale, F. y Bondani, M. (2013). Misconceptions about optics: An effect of misleading explanations? *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*. Doi: 10.1117/12.2070520.
- Fawaz, A. y Viennot, L. (1986). Image optique et vision [Optical image and vision.]. *Bulletin del' Union des Physiciens*, 686, pp. 1125–1146.
- Feher, E. y Rice, K. (1987). *A comparison of teacher–student's conceptions in optics*. In Proceedings of the second international seminar: Misconceptions and educational strategies in science and mathematics (Vol. 2, pp. 108–117). Ithaca, NY: Cornell University.

- Feher, E. y Rice, K. (1992). Children's conceptions of colour. *Journal of Research in Science Teaching*, 29, 5, pp. 505-520.
- Feldman, A. (1996). Enhancing the practice of physics teachers. Mechanisms for the generation and sharing of knowledge and understanding in collaborative action research. *Journal of Research of Science Teaching*, 33, pp. 513-540.
- Fernández, I., Gil, D., Carrascosa, J., Cachapuz, A. y Praia, J. (2002). Visiones deformadas de la ciencia transmitida por la enseñanza. *Enseñanza de las Ciencias*, 20, 3, pp. 477-488.
- Fernández, J., González, B. M. y Moreno, T. (2005). La modelización con analogías en los textos de ciencias de secundaria. *Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias*, 2, 3, pp. 430-439.
- Ferraz, A. (1974). *Teorías sobre la naturaleza de la luz. De Pitágoras a Newton*, Madrid: Dossat.
- Fetherstonhaugh, A. R (1990). Misconceptions and light: a curriculum approach. *Research in Science Education*, 1990, 20, pp. 105 – 113.
- Fetherstonhaugh, T. y Treagust, D. F. (1992). Students 'understanding of light and its properties: Teaching to engender conceptual change. *Science Education*, 76, pp. 653-672.
- Fleer, M. (1996). Early learning about light: mapping preschool children's thinking about light before, during and after involvement in a two-week teaching program. *International Journal of Science Education*, 18, 7, pp. 819-836.
- Fresnel, A. (1827). *Théorie mécanique de la double réfraction*. Memoires de L'Académie Royal des Sciences. Paris: Firmin Didot, Père et files Libraires.
- Furió, C., Hernández, J. y Harris, H. (1987). Parallels between adolescents' conception of gasses and the history of Chemistry, *Journal of Chemical Education*, 64, 7, pp. 617-618.
- Furió, C., Azcona, R., Guisasola, J. y Domínguez, C. (2000). La enseñanza y el aprendizaje del conocimiento químico, 421-449, en Perales y Cañal (Eds.), *Didáctica de las Ciencias Experimentales*. Alcoy: Marfil.
- Furió, C. y Gil, D. (1978). *El programa-guía: Una propuesta para la renovación de la didáctica de la Física y Química*. Valencia: ICE de la Universidad de Valencia).
- Furió, C., Azcona, R. y Guisasola, J. (2006). Enseñanza de los conceptos de cantidad de sustancia y de mol basada en un modelo de aprendizaje como investigación orientada, *Enseñanza de las Ciencias*, 24, 1, pp. 43-58.

- Furió, C.J. y Martínez, F. S. (1985). Investigación española en la enseñanza de las ciencias (1976- 1982). Primeros resultados, *Enseñanza de las Ciencias*, (Número extra), 6.
- Furió, C. J. (1994). Tendencias actuales en la formación del profesorado de ciencias. *Enseñanza de las Ciencias*, 12, 2, pp. 188-199.
- Furió, C., Calatayud, M. L., Guisasola, J. y Furió-Gómez, C. (2005a). How are the Concepts and Theories of Acid-Base Reactions Presented? Chemistry in textbooks and as Presented by Teachers. *International Journal of Science Education*, 27, 11, pp. 1337-1358.
- Fraser, B. J. y Cohen, D. (1989). A retrospective account of the development and evaluation processes of a science curriculum project. *Science Education*, 73, pp. 25-44.
- Freire, P. (1990). *La naturaleza política de la educación: cultura, poder y liberación*. Barcelona: Paidós.
- Freire, P. (1993). *Pedagogía de la esperanza. Un reencuentro con la Pedagogía del oprimido*. Madrid: Siglo XXI.
- Gabel, D. L. (1984). *Handbook of Research on Science Teaching and Learning*, 413, New York: McMillan Pub Co.
- Galeno, M. (2004). *Estrategias de investigación social cualitativa: El giro en la mirada*, Colombia, La Carreta.
- Gallagher, S. A., Stepien, W. J. y Rosenthal, H. (1992). The effects of problem-based learning on problem solving. *Gifted Child Quarterly*, 36, pp. 195-200.
- Galagovsky, L. R. (2003). Representaciones mentales, lenguajes y códigos en la enseñanza de ciencias naturales. Un ejemplo para el aprendizaje del concepto de reacción química a partir del concepto de mezcla. *Enseñanza de las Ciencias*, 21, pp. 107-122.
- Galili, I. y Hazan, A. (2000a). Learners' knowledge in optics: interpretation structure and analysis. *International Journal of Science Education*, 22, 1, pp. 57-88.
- Galili, I. y Hazan, A. (2000b). The influence of historically oriented course on students' content knowledge in optics evaluated by means of facets-schemes analysis. *Physics Education Research (a supplement to the American Journal of Physics) Supplement 1*, 68, 7, pp. 3-15.
- Galili, I. (1996). Student's conceptual change in geometrical optics. *International Journal of Science Education*, 18, 7, pp. 847-868.

- Galili, I., Goldberg, F. y Bendall, S. (1991). Some reflections on plane mirrors and images. *The Physics Teacher*, October, pp. 471- 477.
- Galili, I., Bendall S. y Goldberg, F. (1993). The effect of prior knowledge and instruction on understanding image formation. *Journal of Research in Science Teaching*, 30, 271-301.
- Galili, I. y Lavrik, V. (1998). Flux concept in learning about light: A Critique of the present situation. *Science and Education*, 82, pp. 591-613.
- Galili, I. y Hazan, A. (2000). Learners' knowledge in optics: interpretation, structure, and analysis. *International Journal of Science Education*, 22, 1, pp. 57-88.
- Galili, I. (2014). Teaching *Optics: A Historic-Philosophical Perspective*. En: M.R. Matthews (Ed). *International Handbook of Research in History, Philosophy and Science Teaching*, Springer, Dordrecht, The Netherlands.
- Galili, I. (2016). From Comparison Between Scientists to Gaining Cultural Scientific Knowledge: Leonardo and Galileo. *Science and Education*, 25, pp. 115-145.
- García, J. J. (2005). El uso y el volumen de información en las representaciones gráficas cartesianas presentadas en los libros de texto de ciencias experimentales. *Enseñanza de las Ciencias*, 23, 2, pp. 181-199.
- García, J. J. y Perales, F. J. (2007). ¿Comprenden los estudiantes las gráficas cartesianas usadas en los textos de ciencias? *Enseñanza de las Ciencias*, 25, 1, pp. 107-132.
- García, J., Peña, A. y Pozas, A. (1995). *Física y Química*. 4º ESO, Madrid: McGraw-Hill.
- García-Carmona, A. y Criado, A. M. (2008). Enfoque CTS en la enseñanza de la Energía Nuclear: análisis de su tratamiento en textos de Física y química de la ESO. *Enseñanza de las Ciencias*, 26, 1, pp. 107-123.
- García M. (2003). *Socio estadística: introducción a la estadística en sociología*. Madrid: Alianza Editorial.
- García Ferrando, M., Ibáñez, J. y Alvira, F. (2000). *El análisis de la realidad social. Métodos y técnicas de investigación*. Madrid: Alianza.
- Garret, R., Satterly, D., Gil, D. y Martínez-Torregrosa, J. (1990). Turning exercises into problems: an experimental study with teachers in training. *International Journal of Science Education*, 12, 1, pp. 1-12.
- Gericke, N. M. y Hagberg, M. (2010). Conceptual Incoherence as a Result of the use of Multiple Historical Models in School Textbooks. *Research in Science Education*, 40, 4, pp. 605-623.

- Gibbs, G. (2012). El análisis de datos cualitativos en la Investigación cualitativa. Editorial Morata.
- Gibson, H. L. y Chase, C. (2002). Longitudinal impact of an inquiry-based science program on middle school students' attitudes toward science, *Science Education*, pp. 693-705.
- Gil del Río, E. (1984). *Óptica fisiológica clínica*. Barcelona: Toray.
- Gil, D. y Carrascosa, J. (1985). Science learning as a conceptual and methodological change. *European Journal of Science Education*, 7, 3, pp. 231-236.
- Gil, D. y Carrascosa, J. (1990). What to do about science "misconceptions". *Science Education*, 74, 5, pp. 531-540.
- Gil, D. y Carrascosa, J. (1994). Bringing pupils' learning closer to a scientific construction of knowledge: a permanent feature in innovations in science teaching. *Science Education*, 78, 3, pp. 301-315.
- Gil, D. y Martínez-Torregrosa, J. (1983). A model for problem-solving in accordance with scientific methodology. *European Journal of Science Education*, 5, 4, pp. 447-455.
- Gil, D. y Martínez-Torregrosa, J. (1987). Los programas-guía de actividades: una concreción del modelo constructivista de aprendizaje de las ciencias. *Investigación en la Escuela*, 3, pp. 3-12.
- Gil, D. y Payá, J. (1988). Los trabajos prácticos de Física y Química y la metodología científica. *Revista de Enseñanza de la Física*, 2, 2, pp. 73-79.
- Gil, D. y Pessoa, A. (1994). *Formación del profesorado de las ciencias*. Madrid: Editorial Popular.
- Gil, D. (1983). Tres paradigmas básicos en la enseñanza de las ciencias. *Enseñanza de las Ciencias*, 1, 1, pp. 26-33.
- Gil, D. (1993). Contribución de la historia y de la filosofía de las ciencias al desarrollo de un modelo de enseñanza/aprendizaje como investigación. *Enseñanza de las Ciencias*, 11, 2, pp.197-212.
- Gil, D. (1994). Diez años de investigación en Didáctica de las Ciencias: realizaciones y perspectivas. *Enseñanza de las Ciencias*, 12, 2, pp. 154-164.
- Gil, D., Martínez, J., Ramírez, L., Dumas-Carré, A., Gofard, M. y Pessoa, M. (1994). Un niño subido a un monopatín (...). Un ejemplo de tratamiento de situaciones problemáticas abiertas. *Didáctica de las Ciencias Experimentales y Sociales*, 8, pp. 97-108.

- Gil, D. (1999). ¿Puede hablarse de consenso constructivista en la educación científica? *Enseñanza de las Ciencias*, 17, 3, pp. 503-512.
- Gil, D., Carrascosa, J., Furio, C. y Martínez-Torregrosa, J. (1991). *La enseñanza de las ciencias en la educación secundaria*. Barcelona: Horsori.
- Gil, D. y Furio, C. (1999). ¿Tiene sentido seguir distinguiendo entre aprendizaje de conceptos, resolución de problemas de lápiz y papel y realización de prácticas de laboratorio? *Enseñanza de las Ciencias*, 17, 2, pp. 311-320.
- Gil, D., Guisasaola, J., Moreno, A. y Carrelhas, A. (2002). Defending Constructivism in Science Education. *Science Education*, 11, pp. 557-571.
- Gil, D., Martínez Torregrosa, J. y Senent, F. (1988). El fracaso en la resolución de problemas: una investigación orientada por nuevos supuestos. *Enseñanza de las Ciencias*, 6, 2, pp. 131-146.
- Gil, D., Martínez-Torregrosa, J. y Verdú, R. (1989). La introducción de conceptos, modelos y teorías en los textos de Física. *Enseñanza de las Ciencias*, N° extra, 1, pp. 203-204.
- Gilbert, J. K. (1995) Studies and fields: directions of research in science education. *Studies in Science Education*, 25, 2, pp. 173-197.
- Ginestie, J. (2002). The industrial project method in French industry and in French schools. *International Journal of Technology and Design Education*, 12, 2, pp. 99-122.
- Goodman, J. W. (1972). *Introduction à l'Optique de Fourier et à l'Holographie*. Paris: Masson.
- Goldberg, F. y McDermott, L. (1986). Student difficulties in understanding image formation by plane mirror. *The Physics Teacher*, 24, pp. 472-480.
- Goldberg, F. y McDermott, L. (1987). An investigation of student understanding of the real image formed by a converging lens or concave mirror. *American Journal Physics*, 55, pp. 108-119.
- Goldberg, F., Bendall S. y Galili, I. (1991). Lens, Holes, Screens, and eye. *The Physics Teacher*, Abril, pp. 221-224.
- Golding, G. A. (1990). Epistemology, constructivism, and discovery learning mathematics. En: R. B. Davies, C. A. Maher, & N. Noddings (Ed.), *Constructivist views on the teaching and learning of mathematics* (Monograph 4, 31-50). Reston, Virginia: National Council of Teachers of Mathematics.

- Gollete, G. y M. Lessard-Hébert (1988). *La investigación-acción. Sus funciones, su fundamento y su instrumentalización*. Barcelona: Laertes.
- Gomes de Abreu, R., Gomes, M. M. y Lopes, A. C. (2005). Contextualização e tecnologias em livros didáticos de Biologia e Química. *Investigações em Ensino de Ciências*, 10, 3, pp. 405-417.
- González Cano, A. (2015). Alhazen una revolución óptica. *ARBOR Ciencia, Pensamiento y Cultura*, 191-771, pp. 1-12.
- Greca, I. M. y Moreira, M. A. (2001) Mental, physical, and mathematical models in the teaching and learning of physics, *Science Education*, 86, pp. 106-21.
- Gruender, C. D. y Tobin, K. (1991). Promise and Prospect. *Science Education*, 75, 1, pp. 1-8.
- Grimaldi, F. M. (1665). *Physico-mathesis de lumine, coloribus, et iride*. (Edición 2017). Delhi: Relnk Books.
- Guesne, E. (1989). La luz. En Driver, R., Guesne, E. y Tiberghien, A. *Ideas científicas en la infancia y adolescencia (Cap. 2)*, Madrid: Morata.
- Guilbert, L. y Méloche, D. (1993). L'idée de science chez les enseignants en formation: un lieu entre l'histoire des sciences et l'hétérogénéité des visions. *Didaskalia*, 2, pp. 23-46.
- Gunstone, R. y Watts, M. (1989). Fuerza y movimiento. En Driver, R., Guesne, E. y Tiberghien, A. *Ideas científicas en la infancia y adolescencia*, 5. Madrid: Morata.
- Gutiérrez Brito, J. (2008). *Dinámica del grupo de discusión*. Madrid: Centro de Investigaciones Sociológicas (CIS). Cuadernos Metodológicos.
- Habermas, J. (1987a). *Teoría de la acción comunicativa. Volumen 1: Racionalidad de la acción y racionalización social*. Madrid: Taurus.
- Habermas, J. (1987b). *Teoría de la acción comunicativa. Volumen 2: Crítica de la razón funcionalista*. Madrid: Taurus.
- Hallbwachs, F. (1974). *La pensée physique chez l'enfant et le savant*. Geneve: Delachaux et Niestlé.
- Halloum, I. (1996). Schematic modelling for meaningful learning of physics. *International Journal of Science Education*, 33, 9, pp. 1019-1041.
- Hand, B. y Prain, V. (2002). Teachers implementing writing-to-learn strategies in junior secondary science: a case study. *Science Education*, 86, pp. 737-755.

- Harlen, W. (1992). Research and development, structuring of learning and science education: where are we now? *International Journal of Science Education*, 24, 4, pp. 343- 356.
- Hawhweh, M. Z. (1986). Towards an explanation of conceptual change. *European Journal of science Education*, 8, 3, pp. 229-249.
- Hecht, E. y Zajac, A. (2000). *Óptica*. Madrid: Addison-Wesley Iberoamericana S.A.
- Hennink, M. (2007). *International Focus Group Research. A Handbook for the Health and Social Sciences*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Hernández, R., Fernández, C. y Baptista, P. (2003). *Metodología de la investigación*. Méjico D. F.: McGraw-Hill.
- Hernández Villalobos, L. (2014). Los fenómenos y sus causas. Una oportunidad para aprender a hacer ciencia y ejercitar la imaginación. *Revista Eureka sobre enseñanza y divulgación de las ciencias*, 11, pp. 68-82.
- Heywood, D. S. (2005). Primary trainee teachers' learning and teaching about light: some pedagogic implications for initial teacher training. *International Journal of Science Education*, 27, 12, pp. 1447–1475. doi:10.1080/09500690500153741.
- Hewson, P. W. y Thorley, N. R. (1989). The conditions of conceptual change. *International Journal of Science Education*, 11, pp. 541-553.
- Hewson, P. W. (1981). A conceptual change approach to learning science. *Internacional Journal of Science Education*, 8, 3, pp. 229-249.
- Hewson, P. W. (1990). Enseñanza de “fuerza y movimiento” como cambio conceptual. *Enseñanza de las Ciencias*, 8, 2, pp. 157-171.
- Hierrezuelo, J., y Montero, A. (1989). *La ciencia de los alumnos. Su utilización en la didáctica de la Física y Química*. Barcelona: Laia.
- Hirn, C. y Viennot, L. (2000). Transformation of didactic intentions by teachers: the case of geometrical optics in grade 8 in France. *International Journal of Science Education*, 22, 4, pp. 357-384.
- Hodson, D. (1985). Philosophy of science, science, and science education. *Studies in Science Education*, 12, pp. 25-57.
- Hodson, D. (1988). Towards a philosophically more valid curriculum. *Science Education*, 72, 1, pp. 19-40.
- Hodson, D. (1992). In search of a meaningful relationship: an exploration of some issues relating to integration in science and science education. *International Journal of Science Education*, 15, 5, pp. 541-566.

- Hodson, D. (1996). Practical work in school science: exploring son direction for change. *International Journal of Science Education*, 18, 7, pp. 755-760.
- Hogan, K. y Maglienti, M. (2001). Comparing the epistemological underpinnings of students' and scientists' reasoning about conclusions. *Journal of Research in Science Teaching*, 38, 6, pp. 663-687.
- Holton, G. y Brush, S. (1997). *Introducción a los conceptos y teorías científicas*. Barcelona: Editorial Reverte. 2º Edición.
- Hooke, R. (1665). *Micrographia, or some physiological descriptions of minute bodies made by magnifying glasses? With observations and inquiries thereupon*. Open library edition OL6528209M.
- Hooke, R. (1757). *The History of The Royal Society 3*. Disponible en <http://www.newtonproject.ox.ac.uk/view/texts/normalized/NATP00005>
- Hopkins, D. (1987a). Investigación del profesor: retorno a lo básico. *Revista de Innovación e Investigación Educativa*, 3, pp. 41-50.
- Hopkins, D. (1987b): Hacia una mejora de la validez de la "investigación en la acción" (i-a). *Revista de Innovación e Investigación Educativa*, 3, pp. 61- 84.
- Hopkins, D. (1989). *Investigación en el aula: Guía del profesor*. Barcelona: PPU.
- Hosson, C. y Kaminski, W. (2007). Historical Controversy as an Educational Tool: Evaluating elements of a teaching-learning sequence conducted with the text "Dialogue on the Ways that Vision Operates". *International Journal of Science Education*, 29, 5, pp. 617-642.
- Höttecke, D. y Silva, C. C. (2011). Why implementing history and philosophy in school science education is a challenge: an analysis of obstacles. *Science & Education*, 20, 3-4, pp. 293–316. Doi: 10.1007/s11191-010-9285-4.
- Hubber B. (2005) Asia-Pacific Forum on Science Learning and Teaching, Volume 6, Issue 1, Article 1.
- Huebner, J. S. y Smith, T. L. (1994). Why magnification works. *The Physics Teacher*, 32, pp. 102-103.
- Hull, L. (2011). *Historia y Filosofía de la ciencia*. Barcelona: Editorial Crítica.
- Hull, C. (1986). *Cómo lograr la triangulación cuando sólo hay dos en el cuadrilátero*. En L. Haynes (Eds.), *Investigación-acción en el aula* (59- 66). Valencia: Generalitat Valenciana, Conselleria de Cultura, Educació i Ciència.
- Hurtado, J. (2011). *Metodología de la Investigación. Guía para la comprensión holística de la ciencia*. Cuarta Edición. Venezuela: CIEA SYPAL. Quirón Ediciones.

- Huygens, C. (1690). *Traité de la Lumière*. (Edición 1992), Paris: Dunod.
- Hye-Eun Chu, Treagust, D. F. y Chandrasegaran, A. L. (2009) A stratified study of students' understanding of basic optics concepts in different contexts using two-tier multiple-choice items, *Research in Science & Technological Education*, 27, 3, pp. 253-265, Doi: [10.1080/02635140903162553](https://doi.org/10.1080/02635140903162553)
- Ibáñez, J. (1979). *Más allá de la sociología*. Madrid: Siglo XXI.
- Ibáñez, J. (1992). *Más allá de la sociología* (2.^a ed.), Madrid, Siglo XXI.
- Ibáñez, J. (1991). “El grupo de discusión: fundamento metodológico y legitimación epistemológica” en M. Latiesa (ed.) El pluralismo metodológico en la investigación social, Ensayos típicos, Universidad de Granada, pp. 53-82.
- Ibáñez, J. (2003). *Más allá de la sociología: el grupo de discusión: técnica y crítica*. Madrid: Siglo XXI de España.
- Ibáñez, M., y Ramos, M. C. (2004). Physics Textbooks Presentation of the Energy-Conservation Principle in Hydrodynamics. *Journal of Science Education and Technology*, 13, 2, pp. 267-276.
- Iizuka, K. (1983). *Engineering Optics*. Berlin: Board, Springer series.
- Infesta, G., Vicente, A. y Cohen, I. (2012). Reflexiones en torno al trabajo con grupos de discusión en ciencias sociales. *Revista Sociológica de Pensamiento Crítico*, 6, 1, pp. 233-244.
- James, R. y Smith, S. (1985). Alienation of students from science in grades 4-12. *Science Education*, 69, pp. 39-45.
- Jenkins, F. y White, H. (2001). *Fundamentals of optics*. New York. McGraw-Hill.
- Jiménez, A. (2009). La escuela nueva y los espacios para educar. *Revista Educación y Pedagogía*, 21, 54, pp. 105-125.
- Jiménez, J. D. y Perales, F. J. (2001). Aplicación del análisis secuencial al estudio del texto escrito e ilustraciones de los libros de Física y química de la ESO. *Enseñanza de las Ciencias*, 19, 1, pp. 3-19.
- Jiménez, J. D., Prieto, R. y Perales, F. J. (1997). Análisis de los modelos y los grafismos utilizados en los libros de texto. *Alambique*, 11, pp. 75-85.
- Johari, A. y Bradshaw, A. C. (2008). Project-based learning in an internship program: A qualitative study of related roles and their motivational attributes. *Educational Technology Research and Development*, 56, pp. 329-359.

- Jones, N. F., Rassmussen, C. M. y Moffitt, M. C. (1997). *Real-life problem solving: A collaborative approach to interdisciplinary learning*. Washington: American Psychological Association.
- Jorba, J., Gómez, I. y Prat, A. (2000). *Hablar y escribir para aprender*. Madrid: Síntesis, ICE de la Universidad Autónoma de Barcelona.
- Jornet Meliá, J. M., Perales Montolío, M. J. y González Such, J. (2020). El concepto de validez de los procesos de evaluación de la docencia. *Revista Española de Pedagogía*, 78, 276, pp. 232-252.
- Jung, W. (1981). *Conceptual frameworks in elementary optics*. Working paper presented at the conference in Ludwigsburg, Frankfurt au Main.
- Kahveci, A. (2010). Quantitative Analysis of Science and Chemistry Textbooks for Indicators of Reform: A complementary perspective. *International Journal of Science Education*, 32, 11, pp. 1495-1519.
- Kaltakci Gurel, D., Eryilmaz, A. y McDermott, L. (2016). Identifying pre-service physics teachers' misconceptions and conceptual difficulties about geometrical optics. *European Journal of Physics*, 37, 4, 5705. Doi: [10.1088/0143-0807/37/4/045705](https://doi.org/10.1088/0143-0807/37/4/045705)
- Knain, E. (2001). Ideologies in school Science textbooks. *International Journal of Science Education*, 23, 3, pp. 319-329.
- Kaminski, W. (1989). Conceptions des enfants et des autres sur la lumière. Conceptions of children and others on light. *Bulletin de l'Union des Physiciens*, 716, pp. 973-996.
- Kaminski, W. y Viennot, L. (1989). Optique élémentaire. *Enseñanza de las Ciencias, número extra III Congreso*, 2, pp. 230-232.
- Kattmann, U., Gropengieber, H., Fuit, R. y Komorek, M. (1996). *Educational reconstruction- Bringing together issues of scientific clarification and student's conceptions*. Paper presented at the Annual Meeting of the NARST, St. Louis.
- Krajcik, J. S., Blumendfeld, P. C., Marx, R. W., Bass, K. M., Fredericks, J. y Soloway, E. (1998). Inquiry in project-based science classrooms: Initial attempts by middle school students. *The Journal of the Learning Sciences*, 7, pp. 313-350.
- Kemmis, S. y McTaggart, R. (1992). *Cómo planificar la investigación-acción*. Barcelona: Laertes.
- Kempa, R. F. y Ayob, A. (1995). Learning from group work in science. *International Journal of Science Education*, 17, 6, pp. 743-754.
- Kepler, J. (1604). *Les fondaments de l'optique moderne. Paralipomènes a Vitellion* (Edición 1980). París: Vrin.

- Krippendorff, K (1990): *Metodología del análisis de contenido. Teoría y Práctica*. Barcelona: Paidós Ibérica, S.A
- Klibthong, S. y Agbenyega, J. S. (2018). Exploring Professional Knowing, Being and Becoming through Inclusive Pedagogical Approach in Action (IPAA) Framework. *Australian Journal of Teacher Education*, 43, 3. pp. 109-123. doi:10.14221/ajte.2018v43n3.7
- Koch, A. (2001). Training in metacognition and comprehension of physics texts. *Science Education*, 85, pp. 758-768.
- Koh, G. C. H., Khoo, H. E., Wong, M. L. y Koh, D. (2008). The effects of problem-based learning during medical school on physician competency: A systematic review. *CMAJ*, 178, pp. 34-41.
- Koray, Ö. C. y Bal, Ş. (2002). Primary school 5th and 6th grade students' misconceptions about light and speed of light and forms of construction of these conceptions. *Journal of Gazi Education Faculty*, 22, 1, pp. 1-11.
- Kostas, D., Vasilis, K. y Spyridoula, S. (2003). Towards an Analysis of Visual Images in School Science Textbooks and Press Articles about Science and Technology. *Research in Science Education*, 33, 2, pp. 189-216.
- Krueger, A. (1991). *El grupo de discusión. Guía práctica para la investigación aplicada*. Madrid: Pirámide Psicología.
- Krueger, R.A. (1998). *Moderating Focus Groups*, Thousand Oaks: Sage.
- Krueger, R. A. y Casey, M. A. (2014). *Focus Groups: A Practical Guide for Applied Research*. EE. UU.: Sage Publications.
- Kuhn, T. S. (1971). *La estructura de las revoluciones científicas*. Méjico: Fondo de Cultura Económica.
- Küppers, H. (1992). *Fundamentos de la teoría de los colores*. México: Gili.
- Ladachart, L. (2011). Thai Physics Teachers' Conceptions about Teaching. *Journal of Science and Mathematics Education in Southeast Asia*, 34, 2, pp. 174-202
- La Rosa, C., Mayer, M., Patrizi, P. y Vicentini-Missoni, M. (1984). Common sense knowledge in optics: Preliminary results of an investigation into the properties of light. *European Journal Science Education*, 6, 4, pp. 387-397.
- Làndsberg, G. S. (1984). *Óptica*. Moscú: Mir.
- Lagley, D., Ronen, M. y Eylon, B. (1997). Light propagation and visual patterns: Preinstruction learners' conceptions. *Journal of Research in Science Teaching*, 34, 4, pp. 399-424.

- Larmer, J. y Mergendoller, J. R. (2010). Seven Essentials for Project-Based Learning. *Giving Students Meaningful Work*, 68, 1, pp. 34-37.
- Larmer, J., Ross, D. y Mergendoller, J. R. (2009) *PBL Starter Kit*. California: Buck Institute for Education.
- Latorre, A. (2003). *La investigación-acción. Conocer y cambiar la práctica educativa*. Barcelona: Graó.
- Leach, J. y Scott, P. H. (2000). Children's thinking, learning and constructivism, 41-56, En: Monk y Osborne (Ed.). *Good Practice in Science Teaching*. Buckingham: Open U. Press.
- Lemke, J. L. (1997) *Aprender a hablar Ciencia. Lenguaje, aprendizaje y valores*. Barcelona: Paidós.
- Lemke, J. L. (2001). Articulating Communities: Socio-cultural Perspectives on Science Education. *Journal of Research Science Teaching*, 38, 3, pp. 296-316.
- Le Chambre, M. C. (1657). *La Lumière*. Paris: P. Rocolet.
- Ley Orgánica 8/2013, de 9 de diciembre, para la mejora de la calidad educativa. *LOMCE*.
- Ley Orgánica 2/2006, de 3 de mayo, <https://www.boe.es/eli/es/lo/2006/05/03/2/con>.
- Linder, C. y Erickson, G. (1989). A study of tertiary physics students' Conceptualisations of sound. *International Journal of Science Education*, 11, 5, pp. 491-501.
- Lincoln, Y. S. y Denzin, N. K. (1994). *The fifth moment*. En: N.K. Denzin y Y.S. Lincoln (Ed.), *Handbook of qualitative research* (pp. 575-586). London: Sage.
- Linn, M. C. (1987). Establishing a research base for a science education: challenges, trends, and recommendations. *Journal of Research Science Teaching*, 24, 3, pp. 191-216.
- Liu, W. C., Wang, C. K. J., Tan, O. S., Koh, C. y Ee, J. A. (2008). A self-determination approach to understanding students' motivations in project work. *Learning and Individual Differences*, 19, 1, pp. 139-145.
- López Belmonte, J., Pozo Sánchez, S., Fuentes Cabrera, A. y Rodríguez García, A. M. (2019). Análisis del desempeño docente en la educación para el emprendimiento en un contexto español. *Aula Abierta*, 48, 3, pp. 321-330. <https://doi.org/10.17811/rifie.48.3.2019.321-330>
- Llorens, J. A., De Jaime, M. C. y Llopis, R. (1989). La función del lenguaje en un enfoque constructivista del aprendizaje de las ciencias. *Enseñanza de las Ciencias*, 7, 2, pp. 111-119.

- Llorens, J. A. (1988). Aprendizaje de la química y empleo del lenguaje. *Enseñanza de las Ciencias*, 6, 2, pp. 195-197.
- Long, M. (1980). Inside the «black box»: methodological issues in classroom research on language learning, *Language Learning*, 29, 1, pp. 1-30.
- López-Gay, R. (2002). *La introducción y utilización del concepto de diferencial en la enseñanza de la Física: análisis de la situación actual y propuesta para su mejora*. Tesis doctoral. Universidad Autónoma de Madrid.
- Louks-Horsley, S., Hewson, P., Love, N. y Stiles, K. E. (1998). *Designing professional development for teacher of science and mathematics*. Corwin: Thousand Oaks.
- Mata, M. y Anta, C. (1985). Evolución y nuevas tendencias en los trabajos sobre Didáctica de las Ciencias Experimentales. *Enseñanza de las Ciencias*, (Extra), 4.
- Mata, M. y Méndez, A. (1985). La renovación didáctica en las Ciencias experimentales. Estudio bibliométrico. *Enseñanza de las Ciencias*, 3, 1, pp. 3-10.
- Matthews, R. M. (1989). A role for history and philosophy of science in science teaching. *Interchange*, 20, pp. 3-15.
- McDermott, L., Stamatís, V., Heron, P. y Ambrose, B. (1999). Student understanding of light as an electromagnetic wave: Relating the formalism to physical phenomena. *American Journal of Physics*, 6, 10, pp. 891-898.
- McDermott, L. (2001). Oersted Medal Lecture 2001: Physics Education Research. The Key to Student Learning. *American Journal of Physics*, 69, 11, pp. 1127-1137.
- Malus, E. L. (1810). *Memóire, Comptes Rendus des Sciences de l'Académie des Sciences*, Tome 33.
- Marbà, A. y Márquez, C. (2005). El conocimiento científico, los textos de ciencias y la lectura en el aula. *Enseñanza de las Ciencias*, Número extra, VII congreso, pp. 1-5.
- Marín Martínez, N. y Soto Lombana, C. (2012). Evaluación de la investigación sobre cambio conceptual y concepciones alternativas. Una aproximación al estado actual de la didáctica de las ciencias. *Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias*, 9, 1, pp. 78-92.
- Martín del Pozo, R., Rivero, A. y Azcárate, M. P. (2014). Las concepciones de los futuros maestros sobre la naturaleza, cambio y utilización didáctica de las ideas de los alumnos. *Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de Las Ciencias*, 11, 3, pp. 348-363.

- Martínez-Sebastián, B. (2002). *La enseñanza/aprendizaje del modelo Sol-Tierra. Análisis de la situación actual y propuesta de mejora para los futuros profesores de primaria*. Tesis doctoral. Universidad de Valencia.
- Martínez-Torregrosa, J. (1987). *La resolución de problemas de Física como investigación: un instrumento de cambio metodológico*. Tesis doctoral. Universidad de Valencia.
- Martínez-Torregrosa, J., Doménech, J. L. y Verdú, R. (1993). Del derribo de ideas al levantamiento de puentes: la epistemología de la ciencia como criterio organizador de la enseñanza en las ciencias Física y química. *Curriculum*, 7, pp. 67-89.
- Martínez-Torregrosa, J. y Verdú, R. (1993). ¿Cómo organizar la enseñanza para un mejor aprendizaje? La estructura de los temas y los cursos en la enseñanza por investigación. *Enseñanza de las Ciencias*, Número extra, pp. 97-98.
- Martínez-Torregrosa, J., López-Gay, R., Gras, A. y Torregrosa-Gironés, G. (2002). La diferencial no es un incremento infinitesimal. Evolución del concepto de diferencial y su clarificación en la enseñanza de la Física. *Enseñanza de las Ciencias*, 20, 2, pp. 271-283.
- Martínez-Torregrosa, J., Gil, D. y Martínez-Sebastián, B. (2003). *La universidad como nivel privilegiado para un aprendizaje como investigación orientada*. En Monero, C. y Pozo, J. L. (Eds.). *La Universidad ante la nueva cultura educativa*. Madrid: Síntesis.
- Martínez-Torregrosa, J., Osuna, L. y Verdú, R. (1999). La luz y la visión en la Enseñanza Secundaria Obligatoria. *Educación Abierta. Aspectos didácticos de Física química. Física*, 8, pp. 69-101.
- Martínez-Torregrosa, J. y Osuna, L. (2000). Light and vision: epistemological and conceptual teaching-barriers in high school. *International Conference on Physics Education: "Physics Teacher Education beyond 2000"*, Barcelona, 214.
- Martínez-Torregrosa, J. y Osuna, L. (2001). Planificación de una unidad didáctica sobre "la luz y la visión". *Enseñanza de las Ciencias*, N.º extra, VI Congreso, pp. 219-220.
- Martínez-Torregrosa, J., Verdú, R. y Gil, D. (1999). La evaluación en una enseñanza de la Física como construcción de conocimientos. *Educación Abierta, 140 aspectos didácticos de Física y Química*, 8, pp. 69-101. Zaragoza: ICE Universidad de Zaragoza.
- Martínez-Torregrosa, J., Climent, D. y Verdú, R. (1994). Investigando/comprendiendo la naturaleza, 12/16. *Alambique*, 1, pp. 105-112.

- Martínez-Torregrosa, J., Alonso, M., Carbonell, F., Carrascosa, J., Doménech, J. L., Doménech, A., Osuna, L., Sendra, F. y Verdú, R. (1991). *La búsqueda de la unidad en la naturaleza. Ciencias de la Naturaleza. Educación Secundaria Obligatoria*. Valencia: Conselleria de Cultura, Educación i Ciencia.
- Martínez Losada, C., García Barros, S. y Rivadulla-López, J. C. (2009). Qué saben los/as alumnos/as de Primaria y Secundaria sobre los sistemas materiales. Cómo lo tratan los textos escolares. *Revista Electrónica de Enseñanza de las Ciencias*, 8, 1, pp. 137-155.
- Marton, F. (1981). Phenomenography-Describing conceptions of the world around us, *Instructional Science*, 10, pp. 177-200.
- Marx, R. W., Blumenfeld, P.C., Krajcik, J. S. y Soloway, E. (1997). Enacting project-based sciences: Challenges for practices and policy. *Elementary School Journal*, 94, pp. 517-538.
- Marshall, J.A., Petrosino, A.J. y Martin, T. (2010). Preservice Teachers' Conceptions and Enactments of Project-Based Instruction. *Journal of Science Education and Technology*, 19, 4, pp. 370-386.
- Mason, S. F. (1985). *Historia de las Ciencias. Tomo II: La revolución científica de los siglos XVI y XVII*. Madrid: Alianza.
- Matthews, M. R. (1994). Historia, filosofía y enseñanza de las ciencias: la aproximación actual. *Enseñanza de las Ciencias*, 12, 2, pp. 255-277.
- Matthews, M. R. (1997). Introductory Comments on Philosophy and Constructivism in Science Education, *Science & Education*, 6, pp. 5-14.
- Matthews, M. R. (1989). A role for history and philosophy of science in science teaching. *Interchange*, 20, pp. 3-15.
- Maurines, L. y Saltiel, E. (1998). Mécanique spontanée du signal. *BUP*, 707, pp. 1023-1041.
- Maurines, L. (1992). Spontaneous reasoning on the propagation of visible mechanical signals. *International Journal of Science Education*, 14, 3, pp. 279-293.
- Maurines, L. (1993). Spontaneous reasoning on the propagation of sound. In Proceedings of the third international seminar on scientific education. Ithaca, NY: Cornell University. Recuperado en septiembre, 17, 2009: <http://www2.ucsc.edu/mlrg/proc3abstracts.html>

- Maurines, L. (1997). *Raisonnement spontané sur la diffraction [Spontaneous reasoning on diffraction]*. In J. Gréa (Ed.), Actes du sixième séminaire national de recherche en didactique des sciences physiques (pp. 77–95). Lyon: Université Lyon.
- Maurines, L. (1999a). *Students and the wave geometrical model of the propagation of waves in a three dimensional medium*. En M. Bandiera, S., Caravita, E., Torracca, y M. Vicentini, (Ed.). Research in science education: past, present, future (pp. 103-112). Dordrecht: Kluwer (Selected papers of the first international conference of ESERA, Rome, 1997).
- Maurines, L. (1999b). Les étudiants et les ondes en dimension trois : analyse des difficultés des étudiants quant au modèle géométrico-ondulatoire [Analysis of students' difficulties on the wave geometrical model of three-dimensional waves]. *Didaskalia*, 15, pp. 87-122.
- Maurines, L. (1999c). Spontaneous reasoning on light diffraction and coherent optical imaging. En: M. Komorek, H. Behrendt, H. Dahncke, R. Duit, W. Gräber, y A. Kross (Ed.), Proceedings of the second international conference of ESERA, *Research in Science Education*, 1, pp. 92–94. Kiel: University of Kiel. Recuperado en September 17, 2009, en: <http://www.ipn.uni-kiel.de/projekte/esera/book/posterf.htm>
- Maurines, L. (2000). Les étudiants, la diffraction de Fraunhofer et la formation des images en éclairage cohérent [Students, the Fraunhofer diffraction and the coherent illumination optical imaging]. *Didaskalia*, 17, pp. 55-99.
- Maurines, L. (2001a). *Le raisonnement géométrique en termes d'objet dans la physique des ondes* [The geometrical reasoning in terms of object in the physics of waves]. Orsay: Mémoire d'Habilitation à Diriger des recherches, Paris: Université Paris-Sud.
- Maurines, L. (2001b). *Student and the concept of object in optical imaging*. In R. Pinto & S. Surinach (Ed.) Selected papers of the international conference on physics education GIREP 2000 (pp. 205-208). Barcelona: Elsevier.
- Maurines, L. (2003). Analyse des difficultés des étudiants quant aux concepts de phase et de surface d'onde, quant au principe de Huygens [Analysis of students' difficulties on the concepts of phase and wave surface, on Huygens' principle]. *Didaskalia*, 22, pp. 9-39.
- Maurines, L. (2010). Geometrical Reasoning in Wave Situations: The case of light diffraction and coherent illumination optical imaging. *International Journal of Science Education*, 32, 14, pp. 1895-1926.

- Maurines, L. y Mayrargue, A. (2001). *Regards croisés de l'histoire des sciences et de la didactique de la physique sur le concept d'onde*. Actes de l' université d'été, du 16 au 20 juillet, 2001, Poitiers.
- Maxwell, J. C. (1865). *A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field*. Eastford: Martino Fine Books. (2013 Reprint).
- Maxwell, J. C. (1873). *A treatise on electricity and magnetism*. Oxford: Clarendon Press.
- McMillan, J. y Schumacher, S. (2001). *Investigación educativa*. Madrid: Perason Educación, S.A.
- Méheut, M. (2004). Designing and validating two teaching-learning sequences about particle model. *International Science of Science Education*, 26, 5, pp. 605-618.
- Méheut, M. y Psillos, D. (2004). Teaching-learning sequences. Aims and tools for science education research. *International Journal of Science Education*, 26, 5, pp. 515 -535.
- Messick, S. (1989). *Validity*. In R. L. Linn (Ed.), *Educational measurement* (3rd ed.). New York, NY: American Council on education and Macmillan.
- Michelson, A. y Morley, E. (1887). On the Relative Motion of the Earth and the Luminiferous Ether. *American Journal of Science*, 34, 203, pp. 333-345.
- Middleton, H. (2005). Creative thinking, values and design and technology education. *International Journal of Technology and Design Education*, 15, 2, pp. 61-71.
- Mihás, P. y Andreadis, P. (2005). A Historical Approach to the Teaching of the Linear Propagation of Light, Shadows and Pinhole Cameras. *Science Education*, 14, pp. 675-697.
- Millar, R. (1989). Constructive criticisms. *International Journal of Science Education*, 11, pp. 587-596.
- Mioduser, D. y Betzer, N. (2007). The contribution of project-based learning to high achievers' acquisition of technological knowledge. *International Journal of Technology and Design Education*, 18, pp. 59-77.
- Mohapatra, J. K., y Parida, B. K. (1985). The location of alternative conceptions by concept graph technique. *International Journal of Science Education*, 17, 5, pp. 663-681.
- Molina, J. A., García, A., Pedraz, A. y Antón, M. A. (2003). Aprendizaje basado en problemas: una alternativa al método tradicional. *Revista de la Red Estatal de Docencia Universitaria*, 3, 2, pp. 79-85.

- Monk, M., y Osborne, J. (1997). Placing the History and Philosophy of Science on the Curriculum: A Model for the Development of pedagogy. *Science Education*, 8, 14, pp. 405-419.
- Monk, M. (1991). Genetic epistemological notes on recent research into children's understanding of light. *International Journal of Science Education*, 13, 3, pp. 255-270. National Research Council (2001). *Scientific Inquiry in Education*. Washington, DC National Academy Press.
- Morgan, D.L. (1991). *The Focus Groups Guidebook*, Newbury Park: Sage.
- Moreira, M.A. (1994). Diez años de la revista Enseñanza de las Ciencias: de una ilusión a una realidad. *Enseñanza de las Ciencias*, 12, 2, pp. 147-153.
- Moreno, L., y Calvo, M. A. (2017). La historia de la química en el currículo de ESO y de Bachillerato (LOE). Una revisión interdisciplinar para la investigación didáctica. *Enseñanza de las Ciencias*, 35, 2, pp. 147-160.
- Mortimer, E. (1995). Conceptual change or conceptual profile change? *Science & Education*, 4, 3, pp. 267-285.
- Moura, B. A. (2014). Isaac Newton e a dupla refração da luz. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 36, 4, pp. 1-15.
- Muchelli, R. (1974). *L'analyse de contenu des documents et des communications*. París: Librairies Techniques.
- Muñoz-Bello, R., y Bertomeu-Sánchez, J. R. (2003). La historia de la ciencia en los libros de texto: la(s) hipótesis de Avogadro. *Enseñanza de las Ciencias*, 21, 1, pp. 147-159.
- Nendaz, M. R. y Tekian, A. (1999). Assessment in problem-based learning medical schools: A literature review. *Teaching and Learning in Medicine*, 11, 4, pp. 232-243.
- Neto, J. M., y Fracalanza, H. (2003). O livro didático de ciências: problemas e soluções. *Ciência & Educação*, 9, 2, pp. 147-157.
- Naughton, W., Schreck, J., y Heikkinen, H. (2008). Seeking evidence for curricular relevancy within undergraduate, liberal arts chemistry textbooks. *Journal of Research in Science Teaching*, 45, 2, pp. 174-196.
- Newton, I. (1704). *Óptica o tratado de las reflexiones, refracciones, inflexiones y colores de la luz*. (Edición 1979). Madrid: Alfaguara.
- Newton, I. (1722). *Optique*. Paris: Bourgeois.
- Newton, P., Driver, R., y Osborne, J. (1999). The place of argumentation in the pedagogy of school science. *International Journal of Science Education*, 21, 5, pp. 553-576.

- Niaz, M., Klassen, S., McMillan, B. y Metz, D. (2010). Reconstruction of the history of the photoelectric effect and its implications for general physics textbooks. *Science Education*, 94, 5, pp. 903-931
- Nolen, S. B. (2003). Learning environment, motivation, and in achievement High School Science. *Journal Research in Science Teaching*, 40, pp. 347-368.
- Norman, D. A. (1983). Some observations on mental models. In d. Genter & A. Stevens (Ed.), *Mental models* (7-14). Hillsdale, New Jersey: Lawrence Erlbaum.
- Novak, J. D. (1988). Constructivismo humano: un consenso emergente. *Enseñanza de las Ciencias*, 6, 3, pp. 213-223.
- Nunan, D. (1989). *Understanding Language Classrooms: A Guide for Teacher Initiated Action*, New York: Prentice-Hall International.
- Occelli, M. y Valeiras, N. (2013). Los libros de texto de ciencias como objeto de investigación: Una revisión bibliográfica. *Enseñanza de las Ciencias*, 32, 2, pp. 133-152.
- Oja, S.N. y Smulyan, L. (1989). *Collaborative action research: A developmental approach*. London: The Falmer Press.
- Oliva, J. M. (2010). La educación secundaria como foco de atención en las publicaciones de didáctica de las ciencias de revistas de nuestro entorno. En A.M. Abril y A. Quesada (Ed.). *XXIV Encuentro de Didáctica de las Ciencias Experimentales*. Baeza, Jaén: Servicio de Publicaciones de la Universidad de Jaén, pp. 53-66.
- Orden ECD/65/2015, de 21 de enero, por la que se describen las relaciones entre las competencias, los contenidos y los criterios de evaluación de la educación primaria, la educación secundaria obligatoria y el Bachillerato. BOE» núm. 25, de 29 de enero de 2015, páginas 6986 a 7003. Ministerio de Educación, Cultura y Deporte. BOE-A-2015-738
- Ortí, A. (1989). *La apertura y el enfoque cualitativo o estructural: la entrevista abierta y la discusión de grupo*. En Ferrando, G., Ibáñez, J. y Alvira, F.: El análisis de la realidad social. Métodos y técnicas de investigación. Madrid: Alianza.
- Osborne, J. F., Black, P., Smith, M. y Meadows, J. (1990). *Light* (Primary SPACE Project research report). Liverpool: Liverpool University Press.
- Osborne, J. F., Black, P., Meadows, J. y Smith, M. (1993). Young children's (7-11) ideas about light and their development. *International Journal of Science Education*, 15, 1, pp. 83-93.

- Osborne, J. F., Erduran, S. y Simon, S. (2004). Enhancing of Quality of Argumentation in School Science. *Journal of Research in Science Teaching*, 41, 10, pp. 994-1020.
- Osborne, R. y Wittrock, M. C. (1983). Learning Science: a generative process. *Science Education*, 67, 4, pp. 489-508.
- Osborne, R. y Wittrock, M. C. (1985). The generative learning model and its implications for science education. *Studies in Science Education*, 12, pp. 59-87.
- Osborne, R., Simins, S. y Collins, S. (2003). Attitudes towards science: a review of the literature and its implications. *International Journal of Science Education*, 25, 9, pp. 1049-1079.
- Osuna, L. (2001). *La planificación de una estructura problematizada para la enseñanza de la "luz y la visión" en la ESO. Análisis de la relevancia de los objetivos propuestos y de los obstáculos previsibles*. Trabajo de investigación de Tercer Ciclo. Universidad de Valencia.
- Osuna, L. y Martínez-Torregrosa, J. (2005). La enseñanza de la luz y la visión con una estructura problematizada: propuesta de secuencia y puesta a prueba de su validez. *VII Congreso Internacional sobre Investigación en la Didáctica de las Ciencias (Número extra)*, <http://blues.uab.es/rev-ens-ciencias/>
- Osuna, L. (2007). Planificación, puesta en práctica y evaluación de la enseñanza problematizada sobre la luz y la visión en la educación secundaria obligatoria. Tesis doctoral dirigida por Jaime Carrascosa Alís y Joaquín Martínez Torregrosa. Universitat de València.
- Osuna, L., Martínez-Torregrosa, J., Carrascosa, J. y Verdú, R. (2007). Planificando la enseñanza problematizada: el ejemplo de la óptica geométrica en educación secundaria. *Enseñanza de las Ciencias*, 25, 2, pp. 277-294. <https://doi.org/10.5565/rev/ec/v30n3.515>.
- Osuna, L., Martínez-Torregrosa, J. y Menargues, M. A. (2012). Evaluación de la enseñanza problematizada sobre la luz y la visión den la Educación Secundaria obligatoria. *Enseñanza de las Ciencias*, 30, 3, pp. 295-317.
- Osuna, L., Limiñana, R., Menargues, A., Nicolás, C. Rey, S., Rosa, S. y Martínez-Torregrosa, J. (2016). Cómo vemos los colores. *Alambique Didáctica de las Ciencia Experimentales*, 85, pp. 23-29.
- Otero, J. (1985). Assimilation problems in traditional representation of scientific knowledge. *European Journal of Science Education*, 7, 4, pp. 361-369.

- Otero, J. (1997). El conocimiento de la falta de conocimiento de un texto científico. *Alambique*, 11, pp. 15-22.
- Otero, M. R., Moreira, M. A. y Greca, I. M. (2002). El uso de imágenes en textos de Física. *Investigações em Ensino de Ciências*, 7, 2, pp. 127-154.
- Padilla, M. A. (2002). *Técnicas e instrumentos para el diagnóstico y la evaluación educativa*. Madrid: CCS.
- Palacios, C. y Ansoleaga, D. (1993). Diez años de investigación e innovación en enseñanza de las ciencias desde el CIDE. *Enseñanza de las Ciencias*, Número extra, pp. 113-114.
- Palacios-Díaz, R. y Criado, A. M. (2017). Lo que no dicen los libros españoles de texto de educación secundaria obligatoria sobre la masa, el volumen y la densidad. *Enseñanza de las Ciencias*, 35, 2, pp. 51-70.
- Palacios, J. Cazorla, F. y Madrid, A. (1989). Misconception of geometric optics and their association with relevant educational variables. *International Journal of Science Education*, 11, 3, pp. 273-286.
- Park, P. (1992). *Qué es la investigación-acción participativa. Perspectivas teóricas y metodológicas*. En M. C. Salazar (Ed.): La investigación-acción participativa. Inicios y desarrollos (pp. 135-174). Madrid: Popular.
- Parke, H.M. y Coble C.R. (1997). Teachers designing curriculum as professional development: A model for transformational science teaching. *Journal of Research in Science Teaching*, 34, pp. 773-790.
- Payá, J. (1991). *Los trabajos prácticos de Física y Química: un análisis crítico y una propuesta fundamentada*. Tesis doctoral. Universidad de València.
- Pedraz Marcos A, Zarco Colón M, Ramasco Gutiérrez M, Palmar Santos AM (2014). *Investigación Cualitativa*. Barcelona: Elsevier D.L.
- Perales Palacios, F. J. (2006). Uso (y abuso) de la imagen en la enseñanza de las ciencias. *Enseñanza de las Ciencias*, 24, 1, pp. 13-30.
- Perales Palacios, F. J. (2006). Pasado, presente y ¿futuro? de los libros de texto. *Alambique*, 48, pp. 57-63.
- Perales, F. J. y Jiménez, J. (2002). Las ilustraciones en la enseñanza-aprendizaje de las ciencias. Análisis de libros de texto. *Enseñanza de las Ciencias*, 20, 3, pp. 369-386.
- Perales, F. J. y Nievas, F. (1989). Misconceptions on geometric optics and their association with relevant educational variables. *International Journal of Science Education*, 11, 3, pp. 273-286.

- Perales, F. J. y Nievas, F. (1990). *Un enfoque constructivista en la enseñanza de la óptica geométrica*. Granada: ICE Universidad de Granada.
- Perales, F. J. (1987). Análisis de contenidos en óptica geométrica. *Enseñanza de las Ciencias*, 5, 3, pp. 211-219.
- Perales, F. J. (1994). Enseñanza de la óptica. *Alambique*, 1, pp. 133-137.
- Perales, F. J. y Nievas, F. (1989). Misconceptions on geometric optics and their association with relevant educational variables. *International Journal of Science Education*, 11, 3, pp. 273-286.
- Pérez-Rodríguez, U., Álvarez-Lires, M. y Serrallé-Marzoa, J. F. (2009). Los errores de los libros de texto de primer curso de ESO sobre la evolución histórica del conocimiento del universo. *Enseñanza de las Ciencias*, 27, 1, pp. 109-120.
- Pérez de Landazabal, M. C. y Juncos del Egido, P. (1987). Exploración de las ideas previas sobre la luz en los alumnos de BUP. *Enseñanza de las Ciencias, Número extra*, pp. 278-279.
- Pfunt, H. y Duit, R. (2004). *Bibliography-Students' alternative Frameworks and Science Education*. Institut für Pädagogik der Naturwissenschaften: Kiel-Alemania.
- Piaget, J. (1970). *La epistemología genética*. Barcelona: A. Redondo.
- Piaget, J. (1975). *Introducción a la epistemología genética. El pensamiento físico*. Buenos Aires: Ed. Paidós.
- Piaget, J. y García, R. (1984). Psychogénèse et histoire des sciences, *Revue d'histoire des sciences*, 37, 2, pp. 160-161.
- Piaget J. y García, R. (1989). *Psychogenesis and the history of science*. New York, EE. UU.: Columbia University Press.
- Piaget, J. y García, R. (2004). *Psicogénesis e historia de la ciencia*. México: Siglo XXI Editores.
- Pimentel, J. (2015). Teorías de la luz y el color en la época de las luces. De Newton a Goethe. *Arbor Ciencia, Pensamiento y Cultura*. Vol. 191, 775, 264, pp. 1-13. doi:10.3989/arbor.2015.775n5003
- Polya, G. (1954). *Induction and analogy in mathematics*. Princeton NJ: Princeton University Press.
- Porlán, R. y Martín, J. (2000). *El diario del profesor. Un recurso para la investigación en el aula*. Sevilla: Diada Editorial S. L.

- Pozo, J. I., Sanz, A., Gómez, M. A. y Limón, M. (1991). Las ideas de los alumnos sobre la ciencia: una interpretación desde la psicología cognitiva. *Enseñanza de las Ciencias*, 9, 1, pp. 83-94.
- Pozo, J. I. y Gómez, M. A. (1998). *Aprender y enseñar ciencias. Del conocimiento cotidiano al conocimiento científico*. Madrid: Morata.
- Pozo, J. I. (1999). Más allá del cambio conceptual: el aprendizaje de la ciencia como cambio representacional. *Enseñanza de las Ciencias*, 17, 3, pp. 513-520.
- Pfunt, H. y Duit, R. (2004). *Bibliography-Students' alternative Frameworks and Science Education*. Institut für Pädagogik der Naturwissenschaften: Kiel-Alemania.
- Pring, R. (1978). Teachers as research. En: D. Lawton (Ed.). *Theory and Practice of Curriculum Studies* (pp. 263-245). London: Routledge & Kegan Paul.
- Ramadas, J. y Driver, R. (1989). *Aspects of secondary students' ideas about light*. Technical report, University of Leed.
- Ramírez-Moreno, J. E., Badillo-Gallego, R., y Miranda-Pérez, R. (2010). El modelo semi cuántico de Bohr en los libros de texto. *Ciência & Educação*, 16, 3, pp. 611-629.
- Raftopoulos, A., Kalyfommatou, N. y Constantinou, C. (2005). The Properties and the Nature of Light: The Study of Newton's Work and the Teaching of Optics. *Science Education*, 14, pp. 649-673.
- Raftopoulos, A. y Androu, C. (2011). Lessons from the History of the Concept of the Ray for Teaching Geometrical Optics. *Science & Education*, 20, pp. 1007-1037.
- Raviolo, A., Garritz, A. y Sosa, P. (2011). Sustancia y reacción química como conceptos centrales en química. Una discusión conceptual, histórica y didáctica. *Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de Las Ciencias*, 8, 2 pp. 40-254.
- Real Decreto 1105/2014, de 26 de diciembre establece el currículo básico de Educación Secundaria Obligatoria. Ministerio de Educación, Cultura y Deporte. [BOE-A-2015-37](#)
- Reason, P. y Bradbury, H. (2005). Preface. En P. Reason y H. Bradbury (Ed.). *Handbook of action research. Participative inquiry and practice* (xxiii-xxxi). London: Sage.
- Resnick, L. B. (1983). Mathematics and Science Learning: a new conception. *Science*, 220, pp. 477-478.
- Resnick, L. B. (1989). Convictions ontologiques dans l'apprentissage de la physique. En: N Bednarz et C. Garnier, *Construction des savoir, Obstacles et conflicts*, (pp. 103-119). Ottawa: Cirade, Agence d'ARC inc.

- Resnik, R. y Halliday, D. (1960). *Physics for students of Science and Engineering*. Michigan: Wiley.
- Resnik, M. y Ocko, S. (1990). Constructionist learning. LEGO/LOGO: Learning through and about design. Boston: MIT Media Laboratory.
- Resolución de 4 de junio de 2018, de la Consejería de Educación y Cultura, por la que se regulan aspectos de la ordenación académica de las enseñanzas de la Educación Secundaria Obligatoria, del BOPA.
- Restrego, B. (2005). Aprendizaje basado en problemas: una innovación didáctica para la enseñanza universitaria. *Educación y Educadores*, 8, pp. 9-19.
- Reverte, J. R., Gallego, A. J., Molina, R. y Satorre, R. (2006). El aprendizaje basado en proyectos como modelo docente: experiencia interdisciplinar y herramientas groupware. *Proyecto de innovación tecnológico-educativo e innovación educativa de la Universidad de Alicante*.
- Rice, K. y Feher, E. (1987). Pinholes and images: children's conceptions of light and vision I. *Science Education*, 71, 4, pp. 629-639.
- Richter, I. (1980). *The notebooks of Leonardo da Vinci (World's classics)*. Oxford: Oxford University Press.
- Rivas, M. (1986). Factores de eficacia escolar: una línea de investigación didáctica. *Bordón*, 284, pp. 693-708.
- Romdhane I. y Maurines L. (2003). Students and the interference of light: first results', Proceedings of the fourth international conference of ESERA, Noordwijkerhout, <http://www1.phys.uu.nl/esera2003/programme/pdf/192S.pdf>
- Rodríguez, M. A. y Niaz, M. (2004a). A Reconstruction of Structure of the Atom and its Implications for General Physics Textbooks: A History and Philosophy of Science Perspective. *Journal of Science Education and Technology*, 13, 3, pp. 409-424.
- Rodríguez, M. A. y Niaz, M. (2004b). La teoría cinético molecular de los gases en libros de Física: una perspectiva basada en la historia y filosofía de la ciencia. *Journal of Science Education*, 5, 2, pp. 68-72.
- Rodríguez, L. M. y Escudero, T. (2000). Interacción entre iguales y aprendizaje de conceptos científicos. *Enseñanza de las Ciencias*, 18, 2, pp. 255-274.
- Rodríguez-Sandoval, E., Vargas-Solano, E.M. y Luna-Cortés, J. (2010). Evaluación de la estrategia "aprendizaje basado en proyectos". *Educación y educadores*, 13, 1, pp. 13-25.

- Romdhane, I. (2007). *La cohérence de la lumière et les interférences lumineuses: raisonnements des étudiants et difficultés historiques* [The coherence of light and interference: students' reasoning and historical difficulties]. Thèse, Université Denis Diderot, Paris 7.
- Ronen, M. y Eylon, B. (1993). To see or not to see- the eye in geometrical optics: When and how? *Physics Education*, 28, pp. 52-59.
- Rosado, L., y García-Carmona, A. (2005). Uso de la Estadística en investigación en didáctica de la Física. En L. Rosado y Cols. (Ed.), *Didáctica de la Física y sus Nuevas Tendencias*, pp. 273-392. Madrid: UNED.
- Roth, K.J. (2008). Science teachers as researchers. En: S.K. Abell y N. G. Lederman (Ed.). *Handbook of research on science education*, (pp. 1205-1259). New York: Routledge.
- Rosa-Cintas, S., Rey, A., Menargues, A., Limiñana, R., Nicolás, C. y Martínez-Torregosa, J. (2017). Análisis de obstáculos epistemológicos históricos para la mejora de la enseñanza de la teoría de la tectónica de placas en eso y bachillerato. *Enseñanza de las ciencias: revista de investigación y experiencias didácticas*, [en línea], pp. 1399-06.
- Rossi, B. (2003). *Fundamentos de Óptica*. Barcelona, España: Reverté S. A.
- Rubio, M.^a J. y Varas, J. (1997). El análisis de la realidad en la intervención social. Madrid: CCS.
- Rudzitis, G. (2003). Basic principles of the secondary school science textbooks development. *Journal of Science Education*, 4, 2, pp. 89-92.
- Ruiz Ortega, F. J. (2007). Modelos didácticos para la enseñanza de las ciencias naturales. *Revista Latinoamericana de Estudios Educativos*. (Colombia), 3, 2, pp. 41-52.
<https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=134112600004>
- Sabra, A. I. (1989). *The Optics of Ibn al-Haytham. Books I-II-III: On Direct Vision*. London: The Warburg Institute, University of London.
- Sales, E., Freire, O. y Greca, I. E. (2015). La enseñanza de la gravitación universal de Newton orientada por la historia y la filosofía de la ciencia: una propuesta didáctica con un enfoque en la argumentación. *Enseñanza de las Ciencias*, 33, 1, pp. 205-223.
- Salinas, J. y Sandoval, J. (1994). Filtros de colores y teorías intuitivas sobre color y visión. *Revista Española de Física*, 8, 4, pp. 27-30.
- Salinas, J. y Sandoval, J. (1996). Explicación de colores resultantes: modos de razonar subyacentes. *Revista Enseñanza de Física*, 10, 2, pp. 32-34.

- Salinas, J. y Sandoval, J. (1997). Óptica y Visión: hacia un aprendizaje más integrado. *Revista Española de la Física*, 11, 1, pp. 38-43.
- Saltiel, E. y Viennot, L. (1985). ¿Qué aprendemos de las semejanzas entre las ideas históricas y el razonamiento espontáneo de los estudiantes? *Enseñanza de las Ciencias*, 3, 2, pp. 137-144.
- Sanchez-Ron, J. M. (2006). *J. C. Maxwell, Materia y Movimiento*. Barcelona: Editorial Crítica.
- Sanz, J. C. (1993). *El libro del color*. Madrid: Alianza.
- Savery, J. R. y Duffy, T. M. (1995). Problem based learning: An industrial model and its constructivist framework. *Educational Technology*, September-October, pp. 31-37.
- Savery, J. R. y Duffy, T. M. (2001). Problem based learning: An instructional model and its constructivist framework. *CRLT Technical Report N 16-01* Center for Research on Learning and Technology. Indiana University.
- Saxena, A. B. (1991). The understanding of properties of light by students in India. *International Journal of Science Education*, 13, 3, pp. 283-289.
- Schaverien, L. y Cosgrove, M. (1999). A biological basis for generative learning in technology and science. Part I: A theory of learning. *International Journal of Science Education*, 21, 12, pp. 1223-1235.
- Schaverien, L. y Cosgrove, M. (2000). A biological basis for generative learning in technology and science. Part II: Implications for technology and science education. *International Journal of Science Education*, 22, 1, pp. 13-35.
- Shafer, L. (2000). *Teacher research continuum chart*. Disponible en: <http://www.gse.gmu.edu/research/tr/trprofessional.shtml>.
- Scheaffer, S. (2011). *Trabajos de Cristal. Ensayos de historia de la ciencia, 1650-1900*. Madrid: Ediciones de historia S.A.
- Selley, N. J. (1996a). Towards a phenomenography of light and vision. *International Journal of Science Education*, 18, 7, pp. 837-846.
- Selley, N. J. (1996b). Children's ideas on light and vision. *International Journal of Science Education*, 18, 6, pp. 713-723.
- Şengören, S. K. (2010)- Turkish students' mental models of light to explain the single slit diffraction and double slit interference of light: a cross-sectional study. *Journal of Baltic Science Education*, 9, pp. 61-71.
- Serway R. y Jewett J. (2005). *Física*. Volumen II. México D. F.: Cengage Learning Editores.

- Shuell, T. J. (1987). Cognitive psychology and conceptual change: implications for teaching science. *Science Education*, 71, 2, pp. 239-250.
- Shymanky, J. A. (1993). A study of changes in middle school teachers' understanding of selected ideas in science as function of an in-service program focusing on student preconceptions. *Journal of Research in Science Teaching*, 30, pp. 737-755.
- Stepien, W. J. (1993). Problem-based learning: As authentic as it gets. *Educational Leadership*, 50, 7, pp. 25-28.
- Singh, A. y Butler, P. H. (1990). Refraction: Conceptions and knowledge structure. *International Journal of Science Education*, 12, 4, pp. 429-442.
- Sierra Bravo, R. (1992). *Técnicas de Investigación Social. Teoría y Ejercicios*. Madrid. Ed. Paraninfo.
- Solbes, J. y Zacaes, J. (1993). La óptica en la enseñanza secundaria. *Enseñanza de las Ciencias, Número extra IV congreso*, pp. 85-286.
- Solís, C. y Sellés, M. (2005). *Historia de la Ciencia*. Madrid: Espasa.
- Solomon, J. (1987). Social influences on the construction of pupils' understanding of science. *Studies in Science Education*, 14, pp. 63-82.
- Stead, B. F. y Osborne, R. J. (1980). Exploring students' concepts of light. *Australian Science Teachers Journal*, 26, 3, pp. 84-90.
- Stenhouse, L. (1985). El profesor como tema de investigación y desarrollo. *Revista de Educación*, 277, pp. 43-53.
- Stenhouse, L. (1984). *Investigación y desarrollo del currículum*. Madrid: Morata.
- Sobrado, L. y Fernández, E. (2010). Competencias emprendedoras y desarrollo del espíritu empresarial en los centros educativos. *Educación XX1*, 13, 1, pp. 15-38.
- Sommerfeld, A. (1967). *Optics*. New York: Academic Press.
- Stern, L., y Roseman, J. E. (2004). Can Middle-School Science Textbooks Help Students Learn Important Ideas? Findings from Project 2061's Curriculum Evaluation Study: Life Science. *Journal of Research in Science Teaching*, 41, 6, pp. 538-568.
- Stinner, A. (1995). Contextual sitting, science stories, and large context problems: toward a more humanistic science education. *Science Education*, 79, 5, pp. 555-581.
- Suárez, M. (1998). Desarrollo de un grupo de investigación-acción colaboradora en proyectos curriculares innovadores. *Revista de Educación*, 316, pp. 369-382.
- Suárez, M. (2002). Algunas reflexiones sobre la investigación-acción colaboradora en la educación. *Revista Electrónica de Enseñanza de las Ciencias*, 1, 1, pp. 40-56.
- Tao, P. K. (2004). Developing understanding of image formation by lenses through

- collaborative learning mediated by multimedia computer-assisted learning programs. *International Journal of Science Education*, 26, 10, pp. 1171-1197.
- Tarásov, L. y Tarásova, A. (1985). *Charlas sobre la refracción de la luz*. Moscú: Mir.
- Thomas, J. W. (2000). *A review of research on project-based learning*. California: Autodesk Foundation.
- Tiberghien, A. (1997). Learning and teaching: Differentiation and relation. *Research in Science Education*, 27, 3, pp. 359-382.
- Tikunoff, W.J., Ward, B.A. y Griffin, G.A. (1979). *Interactive research and development on teaching study: Final report*. San Francisco: Far West Laboratory for Educational Research and Development.
- Toró, I. y Parra, R. (2010). *Fundamentos epistemológicos de la investigación y la metodología de la investigación*. Medellín. Foro Editorial Universidad EAFIT.
- Torrado Fonseca, M. (2004). "Estudios de encuesta". En: Bisquerra Alzina, R. (Coord.). *Metodología de la Investigación Educativa*. Madrid. La Muralla.
- Torregrosa, J., Savall, F. Domènech, J. L., Rey, A. y Rosa, S. (2016). La enseñanza problematizada de la física cuántica en el nivel introductorio. Una propuesta fundamentada. *Revista de Enseñanza de la Física*, 28, pp. 77-100.
- Treagust, D. F. (1995). *Diagnostic assessment of students' science knowledge*. In *Learning science in the schools: Research reforming practice*, ed. S. M. Glynn and R. Duit, Vol. 1, pp. 327-346. Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum.
- Treagust, D. F. y Chandrasegaran A. L. (2007). The Taiwan National Science Learning Study in an international perspective. *International Journal of Science Education*, 29, 4, pp. 391-403.
- Trujillo, F. (2015). *Aprendizaje basado en proyectos. Infantil, Primaria y Secundaria*. Catálogo de publicaciones del Ministerio: mecd.gob.es. Edita: Secretaría General Técnica.
- Tsai, C., y Wen, M. L. (2005). Research and trends in science education from 1998 to 2002: a content analysis of publication in selected journals. *International Journal of Science Education*, 27, 1, pp. 3-14. [doi:10.1080/0950069042000243727](https://doi.org/10.1080/0950069042000243727)
- Tural, G. (2015). Cross-Grade Comparison of Students' Conceptual Understanding with Lenses in Geometric Optics. *Science Education International*, 26, 3, pp. 325-343.
- Tytler, R. (2002). Teaching for understanding: Constructivist/conceptual change teaching approaches. *Australian Science Teachers' Journal*, 48, 4, pp. 30-35.

- Utges, G., Welti, R., Fernández, P., Pacca, J. y González, E. (2001). Ondas en el nivel medio y universitario. Aportes para un análisis didáctico del contenido. *Enseñanza de las Ciencias*. Número extra, VI Congreso.
- Utges, G., Pacca, J. y Jesuina, L. A. (2001). Del concepto de ondas de sentido común al sentido científico. Un análisis de la naturaleza del cambio conceptual necesario. *Enseñanza de las Ciencias*. Número extra, VI Congreso.
- Uzun, S., Alev, N. y Karal, I. S. (2013). A cross-age study of an understanding of light and sight concepts in physics. *Science Education International*, 24, 2, pp. 129-149.
- Valdés, P., Gil, D., Vilches, A. y Martínez-Torregrosa, J. (2004). *¿Qué entendemos por constructivismo en enseñanza de las ciencias?*, En *Didáctica de las Ciencias. Nuevas Perspectivas* Colectivo de autores IPLC (pp. 398-413). La Habana: Pueblo y Educación.
- Van der Veer G. (2015). Mental models of incidental human-machine interaction (recuperado desde: <http://cs.vu.nl/~gerrit/mmi9910-report1.doc> el 24 July)
- Van den Berg, V., Mortermans, D., Spooren, P., Van Petegem, P, Gijbels, D. y Vanthournout, G. (2006). New assessment modes within project-based education the stakeholders. *Studies in Educational Evaluation*, 32, pp. 345-368.
- Van Eijck, M. y Roth, W. (2008). Representations of scientists in Canadian High School and college textbooks. *Journal of Research in Science Teaching*, 45, 9, pp. 1059-1082.
- Van Lier, L. (1988). *The Classroom and the Language Learner: Ethnography and Second Language Classroom Research*. London, United Kingdom: Longman.
- Vázquez, M. A. y Vázquez, A. (2017). Ciencia y arte se encuentran: el caso del telescopio de Galileo. *Enseñanza de las Ciencias*, 35, 3, pp. 195-215.
- Vázquez, A. (1990). Concepciones alternativas de Física y Química de Bachillerato: una metodología diagnóstica. *Enseñanza de las Ciencias*, 8, 3, pp. 251-258.
- Verdú, R. (1990). *La estructura de los temas y la introducción de conceptos y modelos en la Enseñanza de la Física. Análisis de textos habituales*. (Tesis de Máster). Universidad de València. València.
- Verdú, R. (2004). *La estructura problematizada de los temas y cursos de Física y Química como instrumento de mejora de su enseñanza y aprendizaje*. Tesis doctoral. Universitat de València. València.

- Verdú, R., Martínez-Torregrosa, J. (2001). La estructura de los temas como problemas: primeros resultados. *Enseñanza de las Ciencias*, Número extra, VI Congreso, pp. 227-228.
- Verdú, R., Martínez-Torregrosa, J. y Osuna, L. (2002). Enseñar y aprender en una estructura problematizada. *Alambique*, 34, pp. 47-55.
- Verner, I. y Betzer, N. (2001). Machine control – a design and technology discipline in Israel's senior high schools. *International Journal of Technology and Design Education*, 11, 3, pp. 263-272.
- Vernon, D. T. y Blake, R. L. (1993). Does problem-based learning work? A meta-analysis of evaluation research. *Academic Medicine*, 68, 7, pp. 550-563
- Viennot, L. (1976). *Le Raisonnement Spontané en Dynamique Élémentaire*. Tesis doctoral. Université de Paris. Paris. (publicada en 1979 por Herman: París).
- Viennot, L. (1996). *Raisonnement en physique*. Paris: De Boeck.
- Viennot, L., Chauvet, F., Colin, P. y Rebmann, G. (2004). *Designing Strategies and Tools for Teacher Training: The Role of Critical Details, Example in Optics*. Publicado online in Wiley InterScience.
- Viennot, L. y Chauvet, F. (1997). Two dimensions to characterize research-based teaching strategies: examples in elementary optics. *International Journal of Science Education*, 19, 10, pp. 1159-1168.
- Viennot, L. y Kaminsky, W. (1991). Participation des maîtres aux modes de raisonnement des élèves. *Enseñanza de las Ciencias*, 9,1, pp. 3-9.
- Viennot, L. (2002). *Razonar en Física. La contribución del sentido común*. Madrid: Ed. Antonio Machado.
- Viennot, L. (2001a). *Anticipating teacher's reactions to innovative sequences: Examples in optics*. En: R. Pintó & S. Surinach (Ed.), *Physics teacher education beyond 2000*, (pp. 65-72). Paris: Elsevier.
- Viennot, L. (2001b). *Physics education research: Inseparable contents and methods- The part played by critical details*. En: M. Athee, O. Björkqvist, E. Pehkonen, & V. Vatanen (Ed.), *Research on Mathematics and Science Education* (pp. 89-100). Jyväskylä: Institute for Educational Research, University of Jyväskylä.
- Viennot, L. y Chauvet, F. (1997). Two dimensions to analyse research-based teaching strategies. *International Journal of Science Education*, 19, 10, pp. 1159-1168.
- Vilches, A. y Gil, D. (2010). Máster de Formación Inicial del Profesorado de Enseñanza Secundaria. Algunos análisis y propuestas. *Revista Eureka sobre Enseñanza y*

- Divulgación de las Ciencias*, 7, 3, pp. 661-666. Recuperado de: <http://hdl.handle.net/10498/9818>
- Vilches, A., Gil, D. y Calero, M. (2013). Contribución de la educación científica a la apropiación de los objetivos de desarrollo sostenible. *IX Congreso Internacional sobre Investigación en Didáctica de las Ciencias*, pp. 3717-3721.
- Villaustre, L., Del Moral, M. E., Neira, M.R. y Herrero, M. (2017). Proyecto Acra: Experiencias Didácticas en Ciencias con Realidad Aumentada en los niveles Pre Universitarios. *Revista Electrónica de Tecnología Educativa*, pp. 1-18.
- Van-zee, E. H., Hammer, D., Patricia-Roy, M. B. y Peter, J. (2005). Learning and Teaching Science as Inquiry: A Case Study of Elementary School Teachers' Investigations of Light. *Wiley InterScience*.
- Vosniadou, S. (1994). Capturing and modelling the process of conceptual change. *Learning and Instruction*, 4, 1, pp. 45-69.
- Yin, H., Huang, S. y Chi Kin Lee, J. (2017). Choose your strategy wisely: Examining the relationships between emotional labor in teaching and teacher efficacy in Hong Kong primary school. *Teaching and Teacher Education*, 66, pp. 127-136. Doi: 10.1016/j.tate.2017.04.006.
- Wandersee, J. H., Mintzes, J. J. y Novak, J. D. (1994). Research on alternative conceptions in science. En: Gabel D. L. (Ed), *Handbook of Research on Science Teaching and Learning, A project of the National Science Teachers Association* (pp. 177-210). New York: McMillan Pub Co.
- Westfall, R. S. (1996). *Isaac Newton: una vida*. Cambridge: United Kingdom: Organización Editorial de la Universidad de Cambridge.
- White, T. R. y Gunstone, F. R. (1989). Meta-learning and conceptual change. *International Journal of Science Education*, 11, pp. 577-586.
- White, H. B. (1996). Dan tries problem- based learning: A case study. *To improve the Academy*, 15, pp. 75-91.
- Willard, K. y Duffrin, M.W. (2003). Utilizing project-based learning and competition to develop student skills and interest in producing quality food items. *Journal of Food Science Education*, 2, pp. 69-73.
- Williams, A. y Williams, J. (1997). Problem-based learning: An appropriate methodology for technology education. *Research in Science & Technological Education*, 15, 1, pp. 91-103

- Winter, R. (1989). *Learning from Experience. Principles and Practice in Action-Research*. London: United Kingdom: The Falmer Press.
- Witmann, M. C. (2001). The object coordination class applied to wave pulses: analyzing student reasoning in wave physics. *International Journal of Science Education*, 24, pp. 97-118
- Wittmann, M. C. (2002). The object coordination class applied to wave pulses: analysing student reasoning in wave physics. *International Journal of Science Education*, 24, 1, pp. 97-118.
- Wittmann, M. C., Steinberg, R. N. y Redish, E. F. (1999). Making Sense of how Students Make Sense of Mechanical Waves. *The Physics Teacher*, 37, 1, pp. 15-21.
- Wosilait, K., Heron, P. R. L., Schaffer, P. S. y Mc Dermott, L. (1999). Addressing students' Difficulties in applying a wave model to the interference and diffraction of light. *Physics Education Research: A supplement to the American Journal of Physics*, 67, 7, pp. 5-15.
- Yager, R. E. y Penick, J. E. (1986). Perception of tour groups towards science classes, teachers, and value of science. *Science Education*, 70, 4, pp. 353-363.
- Yore, L. D., Hand, B. y Prain, V. (2002). Scientists as writers. *International Science Education*, pp. 672-692.
- Young, T. (1802). *The Bakerian Lecture: On the theory of light and colours*. London: Philosophical Transactions, Royal Society.
- Young, T. (1807). *A course of lectures on natural philosophy and the mechanical arts*. London: J. Johnson
- Young, H. y Freedman, R. (2009). *Física Universitaria, Vol. 2. Méjico*: Editorial Pearson.
- Zeichner, K. (2005). Educational Action Research. En P. Reason y H. Bradbury (Ed.). *Handbook of Action Research. Participative inquiry and practice* (pp. 273-283). London: Sage.
- Zeichner, K. y Noffke, S. (2001). *Practitioner research*. En V. Richardson (Ed.). *Handbook of research on teaching* (pp.298-330). Washington, D.C.: Aera.
- Zoller, U. (1999). Scaling-up of Higher-Order Cognitive Skills-Oriented College Chemistry Teaching: An Action Oriented Research. *Journal of Research Teaching*, 36, 5, pp. 583-596.
- Zuber-Skerritt, O. (1996). *Introduction: New directions in action research*. En O. Zuber-Skerritt (Ed.), *New directions in action research* (pp. 3-9). Washington: Falmer Press.

ANEXOS

ANEXO I. Cuestionario profesores.

ANEXO II. Estadillo análisis de los libros de texto.

ANEXO III. Unidad didáctica óptica 2019.

ANEXO IV. Diario de clase 2019.

ANEXO V. Guion grupo de discusión alumnos 2019.

ANEXO VI. Transcripción grupo de discusión alumnos 2019.

ANEXO VII. Unidad didáctica óptica 2020.

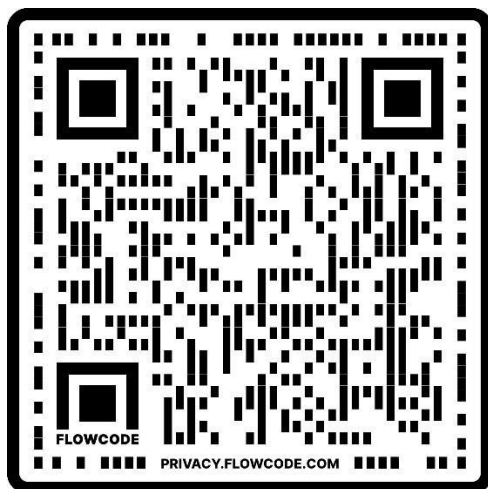
ANEXO VIII. Diario de clase 2020.

ANEXO IX. Guion grupo de discusión alumnos 2020.

ANEXO X. Transcripción grupo de discusión alumnos 2020.

ANEXO XI. Guion grupo de discusión profesores 2021.

ANEXO XII. Transcripción grupo de discusión profesores 2021.



Código QR ANEXOS

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO I. CUESTIONARIO PROFESORES.

ANEXO II. ESTADILLO ANÁLISIS DE LOS LIBROS DE TEXTO.

ANEXO III. UNIDAD DIDÁCTICA ÓPTICA 2019.

ANEXO IV. DIARIO DE CLASE 2019.

ANEXO V. GUIÓN GRUPO DE DISCUSIÓN ALUMNOS 2019.

ANEXO VI. TRANSCRIPCIÓN GRUPO DE DISCUSIÓN ALUMNOS 2019.

ANEXO VII. UNIDAD DIDÁCTICA ÓPTICA 2020.

ANEXO VIII. DIARIO DE CLASE 2020.

ANEXO IX. GUIÓN GRUPO DE DISCUSIÓN ALUMNOS 2020.

ANEXO X. TRANSCRIPCIÓN GRUPO DE DISCUSIÓN ALUMNOS 2020.

ANEXO XI. GUIÓN GRUPO DE DISCUSIÓN PROFESORES 2021.

ANEXO XII. TRANSCRIPCIÓN GRUPO DE DISCUSIÓN PROFESORES 2021.

ANEXO I. CUESTIONARIO PROFESORES

CUESTIONARIO: “LA ENSEÑANZA DE LA OPTICA”

El presente cuestionario forma parte de la Tesis Doctoral de Elena Álvarez Jubete inscrita en el programa de doctorado “*Investigación en Educación e Intervención Socioeducativa*” de la Universidad de Oviedo. La tesis tiene su foco de estudio en la enseñanza de la Óptica en 2º de Bachillerato y, a través de este cuestionario, se quiere conocer la metodología que siguen los docentes de la especialidad de Física, cómo organizan su enseñanza. Nos interesa también conocer la percepción que tienen los docentes sobre el aprendizaje de sus estudiantes de este tema, y la valoración que hacen de algunos conceptos en la enseñanza habitual.

La información recogida será utilizada exclusivamente para la investigación garantizándose la confidencialidad de sus opiniones, siendo de gran utilidad para la Tesis Doctoral. Es por ello que te pedimos que respondas a todos los ítems con la mayor sinceridad posible, marcando con un X la respuesta que más se acerque a opinión o valoración de cada ítem.

Muchas gracias.

DATOS DE IDENTIFICACIÓN:

Sexo: Mujer

Hombre

Edad:

Años de experiencia docente:

Centro educativo en el que trabaja en la actualidad:

PARTE 1: ENSEÑANZA DE LA OPTICA EN 2º BACHILLERATO.

BLOQUE I: ORGANIZACIÓN DEL ESTUDIO DE LA OPTICA	
1.1. ¿Organizas el estudio de la óptica como ciencia de la visión?	<input type="checkbox"/> Sí <input type="checkbox"/> No
1.2. ¿Planteas la propagación rectilínea, la reflexión o refracción de la luz como hipótesis para explicar la visión?	<input type="checkbox"/> Sí <input type="checkbox"/> No
1.3. ¿Planteas el estudio de la propagación rectilínea, la reflexión y la refracción de la luz de manera empirista como base para la óptica geométrica?	<input type="checkbox"/> Sí <input type="checkbox"/> No
1.4. ¿Consideras necesario explicar las leyes de la óptica geométrica una vez averiguada la naturaleza ondulatoria de la luz?	<input type="checkbox"/> Sí <input type="checkbox"/> No
1.5. En caso afirmativo, ¿cómo lo haces?	
1.6. ¿Planteas los límites de aplicación de la óptica geométrica para explicar la visión?	<input type="checkbox"/> Sí <input type="checkbox"/> No
1.7. En caso afirmativo, ¿cuáles son los más importantes en tu opinión?	

BLOQUE II. TRATAMIENTO HISTÓRICO DE LA ÓPTICA	
2.1. ¿Ofreces lecturas a los estudiantes de las obras cumbres de la óptica?	<input type="checkbox"/> Sí <input type="checkbox"/> No
2.2. En caso afirmativo, ¿cuáles son las que más utilizas?	
2.3. En caso afirmativo, ¿Utilizas la revisión histórica para plantear los problemas relacionados con el tema?	<input type="checkbox"/> Sí <input type="checkbox"/> No
2.4. En caso afirmativo, ¿Utilizas la revisión histórica para destacar los grandes obstáculos que se han superado?	<input type="checkbox"/> Sí <input type="checkbox"/> No
BLOQUE III. TRATAMIENTO DE LOS OBSTÁCULOS EN LA ENSEÑANZA DE LA ÓPTICA	
3.1. ¿Consideras necesario tratar a los objetos iluminados como conjuntos de puntos emisores de luz en todas las direcciones?	<input type="checkbox"/> Sí <input type="checkbox"/> No
3.2. ¿Consideras necesario explicar el concepto de haz de luz?	<input type="checkbox"/> Sí <input type="checkbox"/> No
3.3. En caso afirmativo, ¿qué definición utilizas?	
3.4. ¿Consideras necesario explicar el concepto de rayo de luz?	<input type="checkbox"/> Sí <input type="checkbox"/> No
3.5. En caso afirmativo, ¿qué definición utilizas?	
3.6. ¿Consideras necesario explicar expresamente que la luz no se ve?	<input type="checkbox"/> Sí <input type="checkbox"/> No
3.7. En caso afirmativo, ¿cómo lo argumentas a los alumnos?	
3.8. ¿Consideras al ojo como parte del sistema óptico al mirar espejos, objetos sumergidos en agua e imágenes formadas por lentes convergentes?	<input type="checkbox"/> Sí <input type="checkbox"/> No
3.9. ¿Consideras al ojo como parte del sistema óptico al mirar la imagen formada por lentes divergentes?	<input type="checkbox"/> Sí <input type="checkbox"/> No
3.10. ¿Elaboras un modelo simplificado de ojo (lente-pantalla) para introducir el concepto de imagen óptica?	<input type="checkbox"/> Sí <input type="checkbox"/> No
3.11. ¿Consideras necesario explicar que la imagen óptica se forma en la retina por concentración de haces de luz?	<input type="checkbox"/> Sí <input type="checkbox"/> No
3.12. ¿Formas la imagen a partir de rayos de luz emitidos por cada punto-objeto?	<input type="checkbox"/> Sí <input type="checkbox"/> No

3.13. ¿Formas la imagen a partir de haces de luz emitidos por cada punto-objeto?	<input type="checkbox"/> Sí <input type="checkbox"/> No
3.14. ¿Consideras necesario explicar el principio de Huygens-Fresnell como clave para la aceptación del modelo ondulatorio de la luz? 3.15. ¿Cómo lo argumentas a los alumnos?	<input type="checkbox"/> Sí <input type="checkbox"/> No
3.16. ¿Consideras necesario explicar que la luz “blanca” es una mezcla de ondas de diferente frecuencia que en el vacío tienen la misma velocidad?	<input type="checkbox"/> Sí <input type="checkbox"/> No
3.17. ¿Consideras necesario explicar que, las distintas frecuencias de las ondas lumínicas viajan a la misma velocidad en el vacío y a distinta velocidad en los medios transparentes? 3.18. En caso afirmativo, ¿cómo lo haces?	<input type="checkbox"/> Sí <input type="checkbox"/> No
3.19. ¿Consideras necesario explicar la producción de ondas electromagnéticas? 3.20. En caso afirmativo, ¿cómo lo haces?	<input type="checkbox"/> Sí <input type="checkbox"/> No
3.21. ¿Cómo introduces el concepto de campo electromagnético?	<input type="checkbox"/> Sí <input type="checkbox"/> No
3.22. ¿Consideras necesario relacionar la sensación de color con la diferente respuesta de los fotorreceptores retinianos a la luz incidente? 3.23. En caso afirmativo, ¿cómo lo haces?	<input type="checkbox"/> Sí <input type="checkbox"/> No

¿Quiénes añadir algún otro comentario sobre la enseñanza de la óptica?:

.....

.....

.....

.....

PARTE 2: APRENDIZAJES DE LOS ESTUDIANTES SOBRE LA OPTICA EN 2º BACHILLERATO.

En esta segunda parte nos gustaría que nos indicases según tu experiencia si, tal y como está planteada la enseñanza de la óptica por el currículo oficial, y desde los libros de texto más utilizados, tras la enseñanza de la óptica, en tú opinión **la mayoría de** los/las alumnos/as:

BLOQUE IV: ¿DISPONEN LOS ALUMNOS DE UN ESQUEMA DE REPRESENTACIÓN GEOMÉTRICO DE PROPAGACIÓN DE LA LUZ, POTENCIALMENTE EXPLICATIVO?	
4.1. ¿Consideran los objetos que vemos son fuentes secundarias de luz?	<input type="checkbox"/> Sí <input type="checkbox"/> No
4.2. ¿Consideran que la luz se propaga en línea recta?	<input type="checkbox"/> Sí <input type="checkbox"/> No
4.3. ¿Consideran que la luz no es visible en sí misma?	<input type="checkbox"/> Sí <input type="checkbox"/> No
4.4. ¿Consideran las fuentes extensas como conjuntos de fuentes puntuales?	<input type="checkbox"/> Sí <input type="checkbox"/> No
4.5. ¿Representan la luz que sale de cada punto de la fuente luminosa mediante haces divergentes?	<input type="checkbox"/> Sí <input type="checkbox"/> No
BLOQUE V: ¿SABEN QUÉ ES UNA IMAGEN ÓPTICA Y CÓMO SE FORMA EN EL MODELO DE KEPLER?	
5.1. ¿Consideran el ojo como un sistema óptico formado por una lente convergente y una pantalla?	<input type="checkbox"/> Sí <input type="checkbox"/> No
5.2. ¿Consideran que la imagen óptica se forma en la retina por concentración de haces de luz?	<input type="checkbox"/> Sí <input type="checkbox"/> No
5.3. ¿Son conscientes de que para ver bien los objetos cercanos, la lente del cristalino aumenta su curvatura (acomodación) con lo que los haces de luz acaban convergiendo y formando la imagen en esa misma pantalla (la retina)?	<input type="checkbox"/> Sí <input type="checkbox"/> No
5.4. ¿Saben explicar que la imagen que se forma en un sistema lente convergente-pantalla es real e invertida?	<input type="checkbox"/> Sí <input type="checkbox"/> No
5.5. ¿Son conscientes de que es necesaria la participación del cerebro, conectado con la retina por el nervio óptico, para interpretar la sensación que tenemos de la visión derecha de los objetos?	<input type="checkbox"/> Sí <input type="checkbox"/> No
BLOQUE VI: ¿CONOCEN LOS ELEMENTOS CARACTERÍSTICOS DE LALENTE DELGADA?	
6.1. ¿Manejan los elementos característicos del trazado geométrico de los haces que atraviesan la lente y que ayudan a localizar dónde situar la pantalla para ver la imagen: eje óptico, Foco objeto (F), Foco imagen (F') y Centro óptico de la lente (C)?	<input type="checkbox"/> Sí <input type="checkbox"/> No
6.2. ¿Manejan correctamente la ecuación de Gauss para las lentes delgadas $\frac{1}{s} + \frac{1}{s'} = \frac{1}{f}$?	<input type="checkbox"/> Sí <input type="checkbox"/> No
6.3. ¿Manejan correctamente la ecuación $\beta = \frac{y'}{y} = -\frac{s'}{s}$?	<input type="checkbox"/> Sí <input type="checkbox"/> No
BLOQUE VII: ¿COMPRENDEN LA NATURALEZA HETEROGÉNEA DE LA LUZ BLANCA Y LA NATURALEZA DEL COLOR?	
7.1. ¿Comprenden que la luz “blanca” es una mezcla de ondas de diferente frecuencia?	<input type="checkbox"/> Sí <input type="checkbox"/> No
7.2. ¿Comprenden que en el vacío dichas ondas diferentes tienen la misma velocidad?	<input type="checkbox"/> Sí <input type="checkbox"/> No
7.3. ¿Comprenden que al interaccionar con medios materiales cada una de las ondas que componen la luz blanca adquiere distinta velocidad?	<input type="checkbox"/> Sí <input type="checkbox"/> No
7.4. ¿Creen que la luz se modifica al interaccionar con los objetos?	<input type="checkbox"/> Sí <input type="checkbox"/> No

7.5. ¿Relacionan la sensación de color con la diferente respuesta de los fotorreceptores retinianos a la luz incidente?	<input type="checkbox"/> Sí <input type="checkbox"/> No
BLOQUE VIII: ¿COMPRENDEN QUE LA LUZ ES DE NATURALEZA ONDULATORIA?	
8.1. ¿Saben que la luz se desplaza por el espacio a una velocidad finita?	<input type="checkbox"/> Sí <input type="checkbox"/> No
8.2. ¿Son conscientes de que el carácter electromagnético de la luz “visible” hace innecesario un soporte material para su propagación?	<input type="checkbox"/> Sí <input type="checkbox"/> No
8.3. ¿Son conscientes de que la luz no tiene carácter material?	<input type="checkbox"/> Sí <input type="checkbox"/> No
BLOQUE IX: ¿COMPRENDEN QUE SI LA LUZ ES DE NATURALEZA ONDULATORIA PRESENTARÁ LOS FENÓMENOS BÁSICOS DE LAS ONDAS?	
9.1. ¿Saben que con luces coherentes y orificios del orden de λ se producen fenómenos de difracción y de interferencias?	<input type="checkbox"/> Sí <input type="checkbox"/> No
9.2. ¿Comprenden que las distintas frecuencias de las ondas lumínicas viajan a la misma velocidad en el vacío y a distinta velocidad en los medios transparentes (dispersión de la luz)?	<input type="checkbox"/> Sí <input type="checkbox"/> No
9.3. ¿Utilizan el modelo ondulatorio correctamente para explicar fenómenos previamente explicados con el modelo geométrico?	<input type="checkbox"/> Sí <input type="checkbox"/> No

¿Quiénes añadir algún otro comentario sobre el aprendizaje de los estudiantes?:

.....

.....

.....

.....

.....

PARTE 3: VALORACIÓN SOBRE DISTINTOS ASPECTOS DE LA ENSEÑANZA HABITUAL DE LA OPTICA EN 2º BACHILLERATO.

Por último, te solicitamos que valores los siguientes aspectos en la enseñanza habitual, escogiendo el indicador que defina mejor tus ideas a partir de la siguiente escala:

0= Nada Importante; 1= Poco importante; 2= Bastante Importante; 3=Muy importante

BLOQUE X: IMPORTANCIA EN LA ENSEÑANZA HABITUAL DE LA ESTRUCTURA PROBLEMATIZADA				
	0	1	2	3
10.1. Dedicar al principio tiempo a plantear el interés que tiene tratar este tema.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
10.2. Plantear la cuestión ¿cómo vemos? como problema estructurante, cuya solución supone la construcción de una teoría geométrica de la luz y la visión.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
10.3. Plantear la cuestión ¿cuál es la naturaleza de la luz? como problema estructurante, cuya solución supone la construcción de una teoría ondulatoria sobre la naturaleza de la luz.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

10.4. Organizar la enseñanza de este tema con una estructura problematizada (en la que los alumnos tengan que plantear hipótesis, responder preguntas cercanas a sus intereses), haciendo que el índice o secuencia de apartados sea una estrategia posible para avanzar en el problema planteado.	0 <input type="checkbox"/>	1 <input type="checkbox"/>	2 <input type="checkbox"/>	3 <input type="checkbox"/>
BLOQUE XI: IMPORTANCIA EN LA ENSEÑANZA HABITUAL DEL TRATAMIENTO CONCEPTUAL DE LA ÓPTICA				
11.1. Elaborar un sistema de representación geométrico idealizado de la luz.	0 <input type="checkbox"/>	1 <input type="checkbox"/>	2 <input type="checkbox"/>	3 <input type="checkbox"/>
11.2. Modelizar el ojo como un instrumento óptico formado por una lente y una pantalla con el que conceptualizar la imagen óptica.	0 <input type="checkbox"/>	1 <input type="checkbox"/>	2 <input type="checkbox"/>	3 <input type="checkbox"/>
11.3. Considerar la propagación rectilínea, la reflexión y la refracción como hipótesis formuladas para explicar la visión y no como consecuencias de una determinada concepción de la naturaleza de la luz.	0 <input type="checkbox"/>	1 <input type="checkbox"/>	2 <input type="checkbox"/>	3 <input type="checkbox"/>
11.4. Considerar la naturaleza electromagnética de la luz como hipótesis formulada para explicar sus características especiales y los fenómenos asociados a ella.	0 <input type="checkbox"/>	1 <input type="checkbox"/>	2 <input type="checkbox"/>	3 <input type="checkbox"/>
11.5. Considerar la naturaleza electromagnética y heterogénea de la luz blanca para explicar el color.	0 <input type="checkbox"/>	1 <input type="checkbox"/>	2 <input type="checkbox"/>	3 <input type="checkbox"/>
11.6. Considerar la necesidad de la implicación del cerebro en el proceso de visión	0 <input type="checkbox"/>	1 <input type="checkbox"/>	2 <input type="checkbox"/>	3 <input type="checkbox"/>
11.7. Desarrollar el tema en un contexto hipotético-deductivo, inventando un primer modelo de visión que debe ser puesto a prueba mediante su capacidad para explicar la visión indirecta, las anomalías visuales, el diseño de los instrumentos ópticos, etc.	0 <input type="checkbox"/>	1 <input type="checkbox"/>	2 <input type="checkbox"/>	3 <input type="checkbox"/>
BLOQUE XII: IMPORTANCIA EN LA ENSEÑANZA HABITUAL DE LA APROPIACIÓN CORRECTA DE CONCEPTOS				
12.1. Existencia de oportunidades para expresar las ideas y someterlas a prueba.	0 <input type="checkbox"/>	1 <input type="checkbox"/>	2 <input type="checkbox"/>	3 <input type="checkbox"/>
12.2. Plantear metas claras de aprendizaje y prever posibles obstáculos para alcanzarlas	0 <input type="checkbox"/>	1 <input type="checkbox"/>	2 <input type="checkbox"/>	3 <input type="checkbox"/>
12.3. Favorecer formas de pensar cercanas al trabajo científico.	0 <input type="checkbox"/>	1 <input type="checkbox"/>	2 <input type="checkbox"/>	3 <input type="checkbox"/>
12.4. Evaluación con sentido, como recapitulación y reflexión sobre lo avanzado.	0 <input type="checkbox"/>	1 <input type="checkbox"/>	2 <input type="checkbox"/>	3 <input type="checkbox"/>
12.5. Hacer que alumnos y profesores vean más atractiva la enseñanza.	0 <input type="checkbox"/>	1 <input type="checkbox"/>	2 <input type="checkbox"/>	3 <input type="checkbox"/>

Muchísimas gracias por tu tiempo y esfuerzo.

<https://goo.gl/forms/0l0aZ931RQQNdCb92>

ANEXO II. ESTADILLO PARA EL ANÁLISIS DE LOS LIBROS DE TEXTO

BLOQUES / ITEMS	Si	No
BLOQUE I: ¿CÓMO SE ORGANIZA EL ESTUDIO DE LA ÓPTICA?		
1.1. ¿Se organiza como ciencia de la visión?		
1.2. ¿Se organiza de manera empirista?		
1.3. ¿Explica la óptica geométrica en relación a la naturaleza ondulatoria de la luz?		
1.4. ¿Las leyes de la óptica geométrica se explican en relación con la visión?		
1.5. ¿Las leyes de la óptica ondulatoria se explican en relación a la naturaleza de la luz?		
1.6. ¿Considera la propagación rectilínea, la reflexión o refracción de la luz como hipótesis para explicar la visión?		
1.7. ¿Plantea el estudio de la propagación rectilínea, la reflexión y la refracción de la luz de manera empirista?		
1.8. ¿Plantea los límites de aplicación de la óptica geométrica para explicar la visión?		
BLOQUE II: ¿CUÁL ES EL TRATAMIENTO HISTÓRICO DEL TEMA?		
2.1. ¿Qué tipo de lecturas ofrece?		
2.2. ¿A qué hacen referencia las lecturas históricas?		
2.3. ¿La revisión histórica sirve para plantear los problemas relacionados con el tema?		
2.4. ¿La revisión histórica sirve para plantear el índice del problema?		
2.5. ¿La revisión histórica sirve para sacar a la luz los grandes obstáculos que se han superado?		
BLOQUE III: ¿CONCEDEN LOS LIBROS DE TEXTO UNA ATENCIÓN ESPECIAL A LOS OBSTÁCULOS QUE PUEDEN IMPEDIR LA COMPRENSIÓN DE LOS CONCEPTOS BÁSICOS?		
3.1. ¿Trata a los objetos iluminados como conjuntos de puntos emisores de luz en todas las direcciones?		
3.2. ¿Explica correctamente el concepto de haz de luz?		
3.3. ¿Explica correctamente el concepto de rayo de luz?		
3.4. ¿Señala expresamente que la luz no se ve?		
3.5. ¿Considera al ojo como parte del sistema óptico? Al mirar a: a. espejos planos y esféricos. b. un objeto sumergido en agua. c. la imagen formada por lentes convergentes y divergentes		
3.6. ¿Elabora un modelo simplificado de ojo (lente-pantalla) para introducir el concepto de imagen óptica?		
3.7. ¿Forma la imagen a partir de haces de luz emitidos por cada punto-objeto? Al mirar: a. espejos planos y esféricos. b. un objeto sumergido en agua. c. la imagen formada por lentes convergentes y divergentes		
3.8. ¿Señala explícitamente la importancia del principio de Huygens-Fresnel para la aceptación del modelo ondulatorio?		
3.9. ¿Explica la producción de ondas electromagnéticas?		
3.10. ¿Cuenta el experimento de Hertz?		

3.11. ¿Introduce el concepto de campo como un mero medio de calcular la fuerza?		
3.12. ¿Llega el campo a adquirir verdadero significado físico que evita la acción a distancia convirtiéndola en una acción local entre la partícula y el campo existente en dicho punto?		

ANEXO III. UNIDAD DIDÁCTICA ÓPTICA 2019

ELABORACIÓN DE UN MODELO GEOMÉTRICO QUE EXPLIQUE LA VISIÓN HUMANA

1. ¿Cómo vemos los objetos al mirarlos directamente?
 - 1.1. El comportamiento geométrico de propagación de la luz.
 - 1.2. La función del ojo en el proceso de visión.
2. Puesta a prueba del modelo geométrico de visión en la visión indirecta.
 - 2.1. ¿Cómo vemos al mirar a los espejos? La reflexión de la luz.
 - 2.2. ¿Cómo vemos al mirar a través de medios transparentes? La refracción de la luz.
 - 2.2.1. ¿Cómo vemos los objetos sumergidos en medios transparentes?
 - 2.2.2. ¿Cómo vemos al mirar a través de las lentes?
3. Aplicaciones tecnológicas del modelo de visión.
 - 3.1 La explicación y corrección de las anomalías visuales.
 - 3.2 El diseño y construcción de instrumentos de ampliación de la visión: el telescopio y el microscopio.
4. Conclusiones y problemas abiertos.

1. ¿Cómo vemos los objetos al mirarlos directamente?

1.1. El comportamiento geométrico de propagación de la luz

Partimos del trabajo realizado por Osuna (2007, 2003-2008, 2012) en el que se construye un modelo de visión basado en el modelo de visión de Kepler, quien en 1604 cuestionó ideas existentes desde la época de los científicos naturalistas griegos, e introdujo ideas muy novedosas y válidas, que resumimos a continuación:

- 1. Los objetos iluminados son fuentes secundarias de luz.*
- 2. Para ver los objetos el ojo no emite nada.*
- 3. La luz se propaga en línea recta y en todas las direcciones desde cada fuente puntual.*
- 4. Si el objeto que vemos es extenso podemos considerarlo como un conjunto de fuentes puntuales.*
- 5. Para poder ver, al ojo le llega un haz divergente de luz procedente de cada punto del objeto. El rayo no es nada de la propia luz ya que sólo señala una de las direcciones de propagación de la luz.*
- 6. La luz viaja en el vacío a una velocidad de $3 \cdot 10^8$ m/s. Esta velocidad es tan grande que, en los fenómenos habituales de visión, no somos capaces de detectar ningún tiempo entre la salida de la luz desde el objeto y su llegada al ojo para ser visto.*

1.2. La función del ojo en el proceso de visión.

¿Qué ocurre con la luz que entra en el ojo? Antes de formular una hipótesis debemos de conocer el interior del ojo humano. La luz que entra por la córnea, pasa por el diafragma del iris (de apertura variable), atraviesa el cristalino, que tiene forma de lente convergente de curvatura variable, y llega a la retina, que es una estructura de células nerviosas especializadas conectada con el cerebro a través del nervio óptico. Podemos ver fácilmente estas estructuras diseccionando un ojo de cordero que pueden suministrarnos en cualquier carnicería. No obstante, la sensación de la visión se produce a nivel cerebral, como las sensaciones de la audición, del tacto, del olfato o del equilibrio. Nuestra primera intención es elaborar un modelo físico, que pueda ser equivalente a este complejo sistema fisiológico, con el cual poder probar nuestras hipótesis acerca de la visión y poder contrastarlas experimentalmente.

A.1. Sugiere un sistema físico que pueda ser utilizado como modelo de ojo humano y con el cual podamos estudiar cómo se comporta la luz en su interior para dar respuesta a las preguntas que nos hacíamos inicialmente: ¿Cómo vemos? ¿Cómo podríamos ver mejor? (Osuna, 2007)

I. A partir del funcionamiento fisiológico del ojo queremos llegar a un modelo físico del mismo. Queremos que los alumnos comprendan que el ojo humano se puede simplificar como un modelo físico compuesto por una lente convergente (de curvatura variable) y una pantalla en la que se formaría la imagen (la retina).

II. Esperamos que comprendan este sencillo modelo físico. No estamos seguros de que sean ellos quienes propongan en primera instancia el modelo a partir del estudio fisiológico del ojo humano.

III. El profesor debe de explicar a los alumnos que el ojo se puede considerar de forma simplificada como una lente convergente (que haría las veces de cristalino) y una pantalla en la que se formaría la imagen (que equivaldría a la retina). El profesor debe de insistir en que este modelo es una simplificación de la realidad, pues en el ojo no solamente el

cristalino funciona como lente convergente y la imagen no se forma en la retina, sino en el cerebro, tras un complejo mecanismo fisiológico.

A partir del modelo que hemos propuesto, para comprender el funcionamiento óptico del ojo humano necesitamos explorar el comportamiento de lentes convergentes. Con la intención de comprender el funcionamiento de este modelo de ojo comenzaremos por la situación más sencilla, esto es, una fuente luminosa puntual y la lente suministrada por el profesor de unas 10 dioptrías.

A.2. Realiza el montaje siguiente y explora el comportamiento óptico de este sistema, encontrando algunas posiciones de la fuente, del objeto y de la pantalla para ver en ella la imagen nítida (la fuente de luz puntual). (Basado en Osuna 2003-2008)

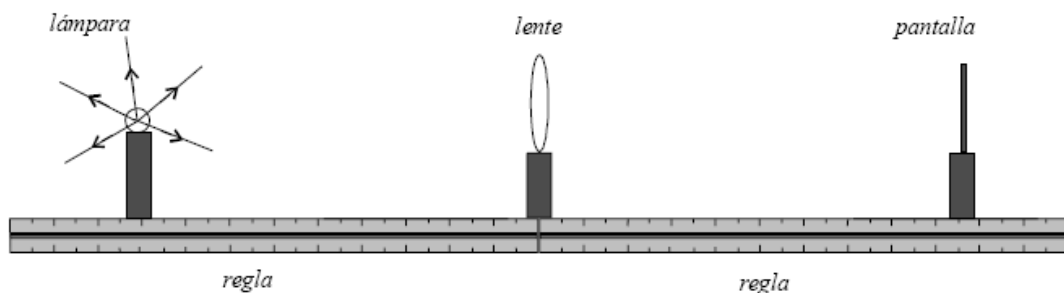


Imagen: (Osuna 2003-2008)

I. Queremos que los alumnos comprendan que la representación del filamento de la bombilla que ven en la pantalla es lo que usualmente se denomina imagen de un objeto. Buscamos que los alumnos se den cuenta de que la imagen se forma a una única distancia de la fuente y de la lente.

III. El profesor debe formular a los alumnos una hipótesis de cómo esto ha sido posible, recordándoles que todo objeto iluminado es un conjunto de fuente puntuales que emiten luz en todas las direcciones. Parte de la luz que emite la bombilla (nuestro objeto, que en este caso es una fuente primaria) llega a la lente, que hace que converja en la pantalla, formándose un patrón iluminado que nos recuerda al pequeño filamento de la bombilla (que consideramos casi puntual). Es lo que usualmente denominamos imagen óptica.

A.3. Realiza un trazado gráfico para la situación del esquema que explique la formación de la imagen en este sistema óptico lente-pantalla, equivalente al ojo humano: (Osuna, 2007)

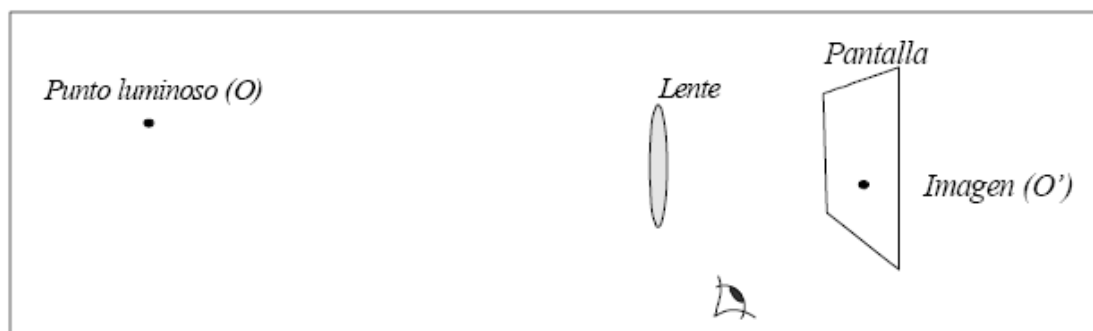


Imagen: Elaboración propia.

I. Queremos que los alumnos consigan dibujar un esquema en el que muestren como parte de la luz que sale del punto luminoso en todas las direcciones, es decir el haz de luz que nos interesa en este caso, atraviesa la lente y vuelve a convergir, reuniéndose de nuevo en el punto imagen. Es lo que denominamos imagen óptica.

III. El profesor debe de insistir en que los alumnos dibujen luz saliendo en todas las direcciones del punto objeto. Debe cerciorarse que los alumnos entienden que parte de esa luz, el haz de luz seleccionado incide en la lente y que ésta hace que vuelva a convergir en un punto. El profesor insistirá en la formación de la imagen a partir del haz de luz que habíamos seleccionado inicialmente. El profesor debe incidir en que elegimos parte de la luz, porque nos interesa saber que ocurre con la luz que inciden en la lente. El profesor propondrá finalmente el trazado adecuado:

A.4. Explora con este sistema lente-pantalla, la imagen que se ve en la pantalla cuando el objeto es extenso, por ejemplo, una diapositiva iluminada. Observa qué ocurre con el tamaño de la imagen según la posición del objeto. Realiza un trazado gráfico explicativo de estos casos.

I. Queremos que los alumnos manejen la fuente extensa de luz como un conjunto de fuentes puntuales. Buscamos que comprendan que la imagen de objetos extensos se forma punto a punto. Queremos afianzar la utilización del haz de luz para la formación de la imagen de un objeto extenso, de manera que de cada punto del objeto sale un haz de luz, que atravesará la lente y formará la imagen de dicho punto en la pantalla.

II. Esperamos que los alumnos comprendan que la imagen de un objeto extenso se forma punto a punto, del mismo modo que se forma la imagen de un objeto puntual. Esperamos que utilicen correctamente el concepto de haz de luz para formar la imagen de un objeto puntual, y por extensión de un objeto extenso.

III. El profesor debe insistir en que la imagen de un objeto extenso se forma punto a punto. Que se puede formar la imagen de un objeto extenso a partir de sus puntos más extremos. Insistirá en que la imagen está invertida, y comentará a los alumnos que ya lo verán cuando utilicen las lentes en el laboratorio. Debe explicar que posteriormente el cerebro reelabora la imagen para que tengamos la sensación de ver los objetos derechos.

A.5 Utilizando el mismo montaje de la A.2, comprueba que al alejar la fuente debemos acercar la pantalla para ver su imagen. ¿Existe una posición límite de la pantalla al alejar la fuente? Realiza un trazado gráfico explicativo para el caso límite encontrado. (Basado en Osuna 2003-2008)

I. Queremos introducir el concepto de “Foco Imagen”, es decir el lugar donde se concentra la luz procedente de la bombilla cuando esta se sitúa muy lejos (en el infinito). Lo asociaremos al trazado gráfico del rayo que procede del objeto que está en el infinito, es decir incide en la lente paralelo al eje óptico, y que pasa por el foco imagen. Lo llamaremos rayo I, cuando desarrollemos el algoritmo correspondiente a las lentes.

II. Creemos que algunos alumnos pensarán que cada rayo del haz paralelo incidente proceda de un punto diferente de la fuente, en lugar de reconocer que es un haz de luz que sale del mismo punto de la fuente, pero que como ésta está muy lejos llega a la lente casi paralelo al eje óptico.

III. El profesor debe cerciorarse de que los alumnos manejan haces de luz correctamente, es decir, deben dibujar un haz de luz que saldrá del objeto e incidirá en

la lente. Uno de los rayos que lo limita será el rayo que viene paralelo al eje óptico y pasa por el foco, y el segundo rayo será el que sale del objeto y pasa por el centro de la lente sin desviarse. Lo llamaremos rayo II, cuando desarrollemos el algoritmo correspondiente a las lentes.

A.6 Con ese mismo montaje, observa que al acercar la fuente debemos alejar la pantalla para ver su imagen. ¿Existe alguna posición límite para la fuente a partir de la cual no se forma ninguna imagen? Realiza un trazado gráfico explicativo para ese caso límite.

I. Del mismo modo que en la actividad anterior, queremos introducir el concepto de “Foco Objeto”. Lo haremos mediante un haz de luz definido por el rayo II, y el rayo III (que pasa por el foco y va hacia infinito tras atravesar la lente).

También queremos volver a definir el concepto de “eje óptico” para que los alumnos afiancen su conocimiento.

Otro objetivo muy importante de esta actividad sería comprobar la reversibilidad del trazado gráfico.

II. Los alumnos deben de llegar a la conclusión de que hay un límite de acercamiento del objeto a la lente, de manera que si lo acercamos más no se formaría la imagen.

III. El profesor debe animar a los alumnos a probar distancias de manera reflexiva. Destacará el hecho de que existe un punto especial, cuando el objeto se sitúa en el foco, para el que la imagen se forma en el infinito, es decir, que no depende de la situación de la pantalla, que será igual para cualquier situación de la pantalla.

A.7 Sitúa ahora la lente a 11 cm de la pantalla y sin variar esta distancia (que es lo que ocurre en el ojo humano con el cristalino y la retina):

a) Anota la posición a la que debe situarse un objeto para que se forme la imagen en la pantalla.

b) Cambiando la lente por otra más gruesa (una de 20 dioptrías), obtén la nueva posición del objeto para ver la imagen en la pantalla. Esta situación es equivalente a la que realiza el cristalino del ojo humano (acomodación).

I. Queremos que los alumnos relacionen el poder de convergencia de la lente con la distancia a la que forma la imagen de un objeto. Además, queremos que relacionen esta actividad con la naturaleza del ojo humano, en el cual el cristalino varía su poder de convergencia, para adaptarse a las diferentes distancias a las que se encuentran los objetos de los que queremos formar una imagen en nuestra retina.

II. Esperamos que con la ayuda del profesor los alumnos comprendan la relación que hay entre el grosor de una lente, y su capacidad para formar imágenes de objetos situados a diferentes distancias de nosotros.

III. El profesor explicará a los alumnos la relación existente entre estos trazados y lo que ocurre en el ojo humano, concretamente la relación existente con la visión de los objetos lejanos, en los que el ojo no necesita acomodación; y los objetos cercanos, en los que el ojo necesita acomodarse, necesita una lente con mayor potencia.

El sistema lente convergente-pantalla que estamos explorando como modelo de ojo humano sólo produce una imagen nítida cuando el haz de luz procedente del objeto incide en la lente paralelo (o casi) al eje óptico de la lente muy cerca del centro. Esta limitación para formar imágenes se conoce como aproximación paraxial.

A.8 En las actividades anteriores hemos introducido los siguientes elementos característicos de la lente: Foco objeto (F), Foco imagen (F'), Centro óptico (C) y eje óptico. Utilizando las propiedades de estos elementos realiza trazados gráficos para localizar la posición de la pantalla donde se ve la imagen del objeto en los siguientes casos:

a) Objeto alejado

b) Objeto cercano

c) Objeto entre el foco y la lente

d) Objeto extenso.

I. La actividad pretende familiarizar a los estudiantes con los trazados gráficos de formación de la imagen óptica en el sistema lente-pantalla.

Queremos construir un algoritmo que permita localizar el lugar en que debemos situar la pantalla para que se vea la imagen de un objeto. Lo haremos a partir de las características de la lente que habíamos definido experimentalmente, F , F' , C y eje óptico. Es decir, queremos dar sentido físico al algoritmo que hemos creado.

II. Creemos que a los alumnos no les resultará fácil integrar todos los conceptos nuevos aprendidos en un algoritmo, al que queremos que den sentido físico. Nos daremos cuenta de que es necesario mucho trabajo por parte del profesor para integrar las actividades experimentales realizadas con el algoritmo creado.

III. Para el caso c), el profesor explicará que si la luz procedente de un punto luminoso, una vez atravesada la lente, no se vuelve a concentrar en un punto, no se puede ver la imagen de dicho punto luminoso en ninguna posición de la pantalla. Será una imagen virtual (es decir la luz no se puede concentrar en ese punto). El profesor explicará que la pantalla se tendrá que colocar donde se concentra la luz, que será a una distancia diferente en cada caso. Debe de potenciar siempre el concepto de haz, y recoger y destacar las características de los trazados de las diferentes actividades realizadas en este sentido para relacionarlos con el trazado gráfico adecuado de esta actividad.

El profesor recordará a los alumnos que los trazados gráficos están basados en el comportamiento de la luz. Les recordará que, si situamos una fuente puntual de luz en el foco de la lente, la imagen se forma en el infinito (o en nuestro caso muy lejos). Esta propiedad nos servirá para identificar el rayo III. También les recordará que, si situamos un objeto muy lejos de la lente, su imagen se formará en el foco. Nos basamos en esta propiedad para trazar el rayo I. El rayo II es deducido de la geometría del rayo I y III.

En el caso d), el profesor recordará que las fuentes extensas las tratamos como si fueran un conjunto de fuentes puntuales. Escogemos ambos extremos y realizamos el trazado gráfico para cada uno de ellos. El profesor destacará el hecho de que la imagen que se forma es invertida. Por tanto, para encontrar la imagen de un objeto podemos utilizar dos de los tres rayos que conocemos. Siempre recordando que el rayo en sí mismo no significa nada, que simplemente delimita el haz de luz que seleccionamos.

El profesor realizará los siguientes trazados para aclarar las anteriores explicaciones:

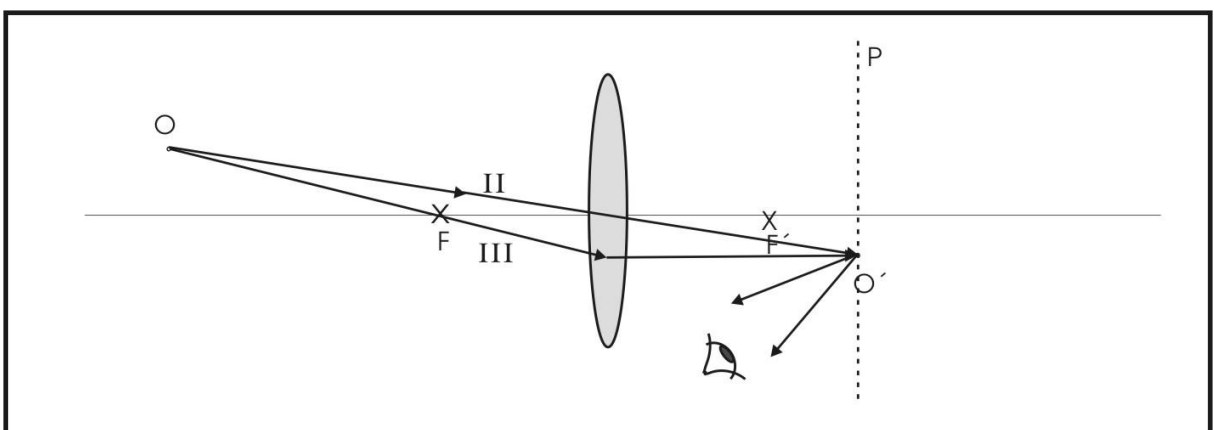
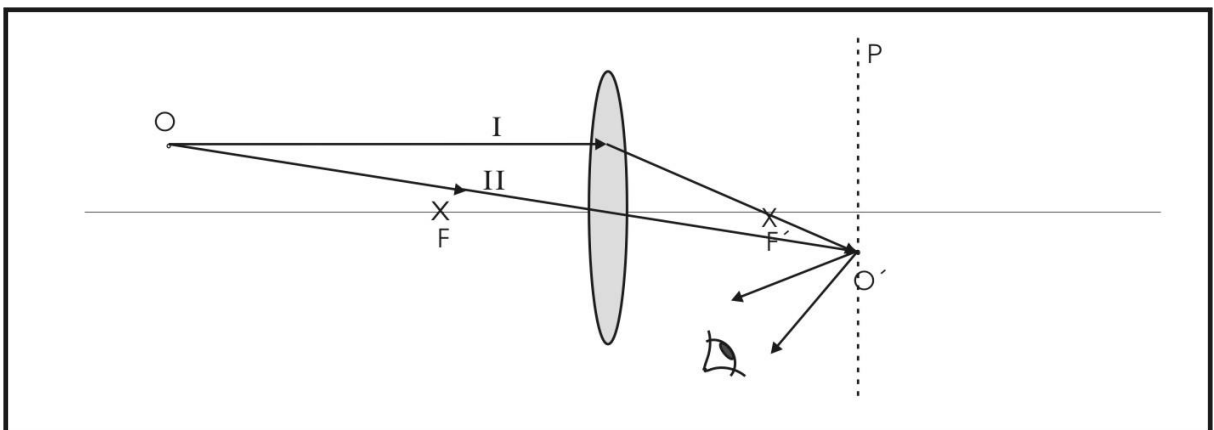
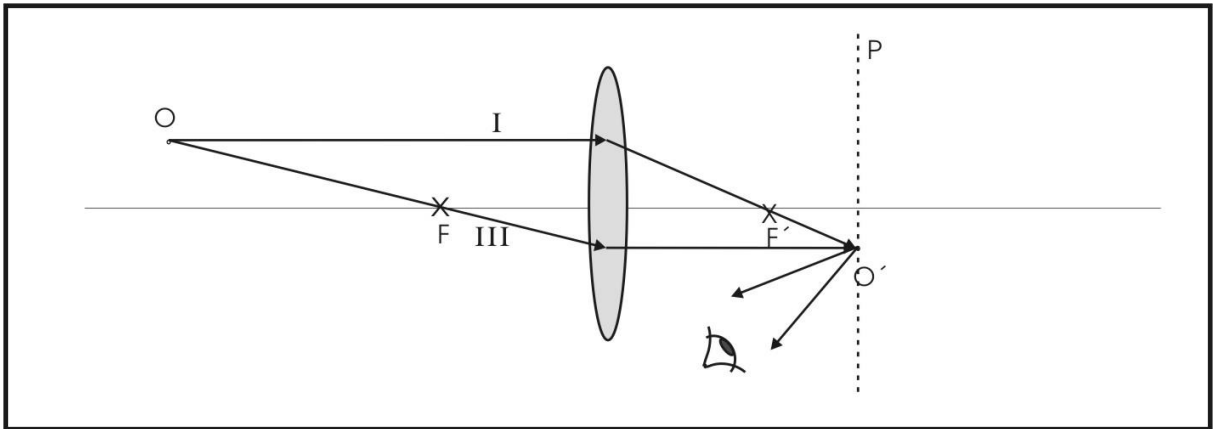


Imagen: Elaboración propia.

El profesor debe de trazar siempre el haz de luz total para que los alumnos interioricen que toda la luz que sale del objeto y pasa por la lente va a parar al punto imagen O' , independientemente del trazado de rayos que elijamos para encontrar el punto imagen. Les mostraré el siguiente trazado para clarificarlo:

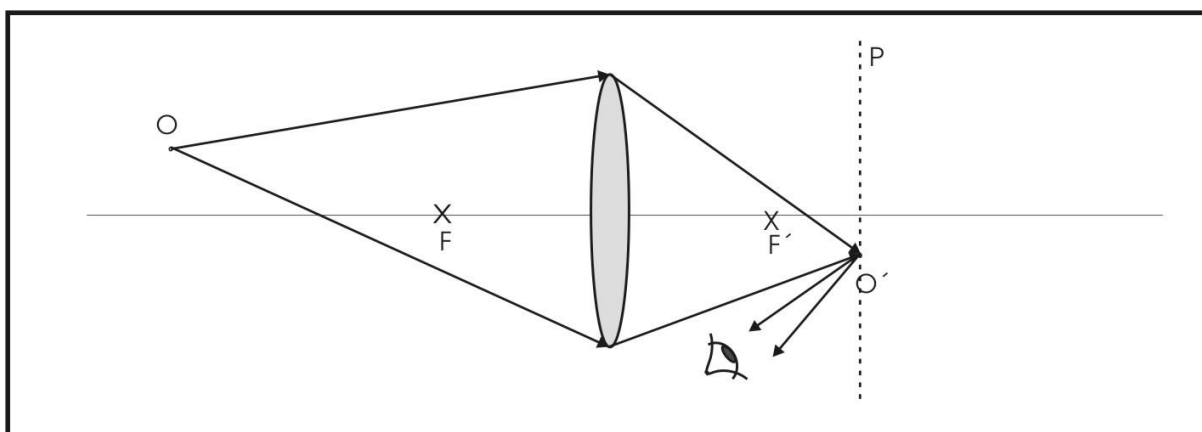


Imagen: Elaboración propia.

Recordaré a los alumnos que no utilizamos el trazado con el haz completo porque no sabemos dónde se formaría la imagen. Sin embargo, mediante las propiedades del foco objeto y foco imagen, y su aplicación al dibujo mediante los rayos III y II, si podemos encontrar dónde se forma la imagen.

A.9 Encuentra las distancias focales de las lentes suministrada por el profesor.

I. Queremos que los alumnos interioricen el concepto de distancia focal. Para ello les dejaremos lentes diferentes para que encuentren la distancia focal de cada una de ellas.

Así mismo, al utilizar un objeto extenso para formar su imagen con la lente, pretendemos conseguir que los alumnos erradiquen sus posibles concepciones alternativas sobre la imagen óptica que, sabemos por la investigación didáctica, se muestran inalteradas después de la instrucción. Goldberg y McDermott (1987) han investigado las ideas de los estudiantes, del curso de introducción de Física de la Universidad, sobre el comportamiento de las lentes convergentes y la imagen que se ve en una pantalla. Han constatado que un elevado porcentaje de estudiantes piensa que la imagen sigue existiendo, aunque se elimine la pantalla, que se seguiría viendo, aunque se aleje la

pantalla y que se vería la mitad si se tapara media lente. Galili (1996), explica las respuestas de los estudiantes que han investigado Goldberg y McDermott y él mismo, a partir de dos tipos de esquemas de pensamiento:

1. Esquema ingenuo de pensamiento, o de "imagen holística", característico de los alumnos antes de la instrucción, ontológicamente similar a la teoría de los filósofos atomistas griegos (Galili y Hazan, 2000a, 2000b).

2. Esquema de conocimiento del novato o "de imagen proyectada", ontológicamente similar a la teoría de Alhazen (Galili y Hazan, 2000a, 2000b).

III. El profesor puede proponer como actividad sencilla la formación de una imagen de un paisaje que se ve desde la ventana. Para ello necesitamos una lente y una pantalla que puede ser una hoja blanca. Suponemos que el paisaje está lo suficientemente lejos como para considerarlo en el infinito, y la focalizamos con la lente en una pantalla. El profesor explicará que la luz que viene del infinito y atraviesa la lente se concentra en el foco de ésta. Así se puede encontrar el foco de la lente, que será la distancia que hay de la pantalla a la lente.

El profesor destacará que no hace falta que el objeto sea puntual, con esta actividad comprobamos que se puede formar una imagen extensa. El profesor explicará que la imagen de un objeto extenso se forma punto a punto, de manera que cada uno de los puntos se trata como si fuese un objeto puntual.

A.10 En el sistema lente-pantalla que estamos estudiando hemos aprendido a realizar el trazado gráfico que permite localizar la posición de la imagen, para diferentes posiciones del objeto. Hemos comprobado que, en función de la distancia del objeto a la lente, la distancia de la lente a la pantalla varía. Pero en el ojo, la pantalla no es móvil. ¿Cómo es posible formar la imagen de objetos situados a distancias diferentes? ¿Qué hipótesis lo podría explicar?

I. Queremos que los alumnos se den cuenta de la maravillosa máquina que es nuestro ojo. Queremos que reflexionen a partir de las actividades realizadas anteriormente, y lleguen a la conclusión de que es necesario un cambio en la curvatura de la lente, si queremos que la imagen se forme con la pantalla a la misma distancia de la lente.

II. Esperamos que los alumnos comprendan la necesidad de que el ojo tenga una lente como el cristalino que debe de cambiar de curvatura para poder formar la imagen en la retina de diversos objetos situados a diferentes distancias.

III. El profesor debe de ayudar a los alumnos a relacionar esta actividad con las precedentes. El profesor ha de explicarles las características especiales de la lente que tiene nuestro ojo. El cristalino es una lente que se puede curvar, y por tanto actuar en ocasiones como una lente delgada y en otras como una lente más gruesa, dependiendo de la distancia a la que se encuentre el objeto del que queremos formar imagen en nuestro ojo.

A.11 Desde el punto de vista fisiológico el diafragma del iris se regula inconscientemente variando el diámetro de la pupila ¿Cómo afecta a la imagen que se forma en una pantalla un diafragma situado delante de la lente y que tape parte de ella? Prueba tus predicciones experimentalmente.

I. La metodología y la forma de introducir los conceptos, estudiadas por Viennot y Kaminski (1991) los han llevado a creer en la existencia de una "ilusión" escolar al pensar que el aprendizaje de los procedimientos algorítmicos conlleva la comprensión de los conceptos. Creemos, por tanto, que la enseñanza habitual, basada básicamente en la repetición de algoritmos geométricos de construcciones de imágenes, no permite superar las dificultades señaladas para la comprensión de la imagen óptica. Con esta actividad buscamos saber si realmente los alumnos han interiorizado el concepto de haz de luz y, han interiorizado la idealización de un objeto como conjunto de fuentes puntuales. También queremos saber si a partir de dichos conceptos, son capaces de realizar el trazado de rayos para explicar la formación de la imagen de un objeto extenso en estos casos concretos.

II. Creemos que algunos alumnos que no hayan interiorizado el concepto de haz de luz manifestarán que se verá la mitad de la imagen.

III. El profesor debe de explicar mediante los trazados gráficos adecuados, que se verá la imagen completa, pero con menor intensidad luminosa. El profesor puede pedir a los alumnos que realicen la experiencia.

Hemos estudiado cómo se forma la imagen que vemos en una pantalla utilizando una lente convergente, pero sabemos, que las lentes se pueden usar eliminando la pantalla, mirando a través de ellas en distintas situaciones.

En las actividades anteriores hemos explorado el comportamiento cualitativo de las lentes convergentes para comprender el modelo de ojo humano simulado. Pero para encontrar en este sistema la posición donde hay que situar la pantalla, es necesario una prueba experimental o bien un trazado gráfico a partir de la posición de los focos de cada lente. Sería conveniente, para simplificar esos procesos engorrosos, encontrar una expresión que relacione las distancias del objeto y de la pantalla a la lente y las características de cada lente.

A.12 A partir del trazado geométrico realizado en la A.8 deducid una relación entre las distancias del objeto y de la pantalla a la lente y su distancia focal.

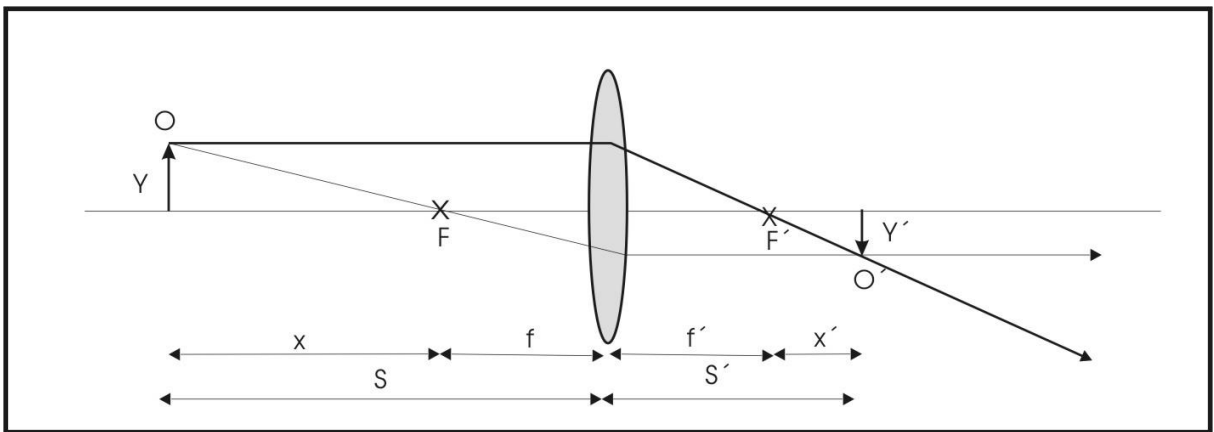


Imagen: Elaboración propia.

I. Queremos que los alumnos relacionen las s y s' con las x y x' de la fórmula de Newton, ya que de ellas se deriva la ecuación de proporcionalidad más sencilla.

II. Esperamos que los alumnos comprendan por si mismos las siguientes relaciones entre s , s' y p .

$$s' = f(s, p)$$

Si s es grande, entonces s' es pequeño. Existe dos casos límite, uno cuando s tiende a infinito para el que s' tiende a f' , y otro cuando s tiende a f que s' tiende a infinito.

Por otra parte, si la potencia e la lente es grande la distancia a la que se forma la imagen de un objeto dado será pequeña.

III. El profesor introducirá x y x' .

$$\text{Definimos } x' = f(x, p)$$

Si x aumenta x' disminuye. Si P aumenta x' aumenta.

Con x y x' encontramos una relación de proporcionalidad directa.

A partir del dibujo de la formación de la imagen de un objeto, mediante la utilización de la proporcionalidad entre triángulos semejantes, encontramos las siguientes relaciones de proporcionalidad.

$$x/f = y/y'$$

$$x'/f' = y'/y$$

Igualando encontramos:

$$x/f = f'/x'$$

De donde podemos agrupar:

$$x \cdot x' = f \cdot f'$$

$$\mathbf{x \cdot x' = cte.}$$

Si lo hacemos experimentalmente, y representamos gráficamente los datos obtenidos, obtendremos gráficas similares a las siguientes:

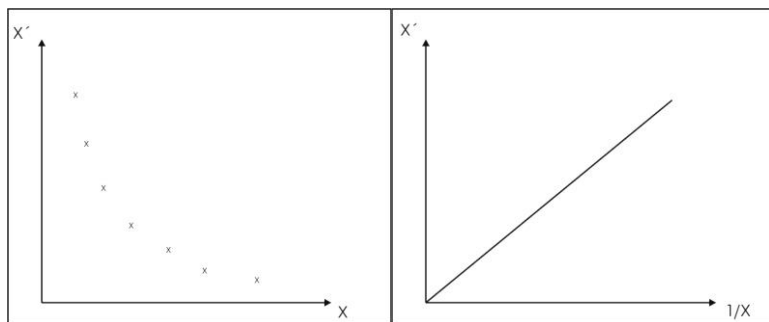


Imagen: Elaboración propia.

Podemos transformar la fórmula de Newton en la ecuación Gaussiana de las lentes utilizada habitualmente para resolver problemas analíticamente:

$$(s - f) \cdot (s' - f') = ff'$$

$$ss' - sf' - fs' + ff' = ff'$$

$$ss' / ss' - sf' / ss' - fs' / ss' = 0$$

$$1 = f' / s' + f / s$$

$$\mathbf{1/s + 1/s' = 1/f'}$$

A.12.1 (Complementaria) Diseña y realiza una experiencia para contrastar la expresión encontrada en la actividad anterior.

III. El profesor ayudará a los alumnos con el montaje, en el que la bombilla y la primera lente funcionan como sistema de iluminación, para conseguir una iluminación intensa y uniforme del objeto.

Movemos el objeto acercándolo y alejándolo de la lente y anotamos la distancia a la que se forma la imagen en cada caso. Realizaremos una tabla para recoger los datos (x y x'). Si representamos x frente a x' obtendremos una curva del tipo (dibujo).

Si representamos x' frente a $1/x$ obtendremos una línea recta.

Es decir, podremos probar experimentalmente que $x \cdot x' = cte$.

A.13 Para cada tipo de lente, la posición del objeto condiciona la posición de la pantalla dónde se ve la imagen y el tamaño con que se ve, deduce del siguiente trazado gráfico la relación entre el tamaño de la imagen y el tamaño del objeto (aumento lateral, β) en función de esas distancias.

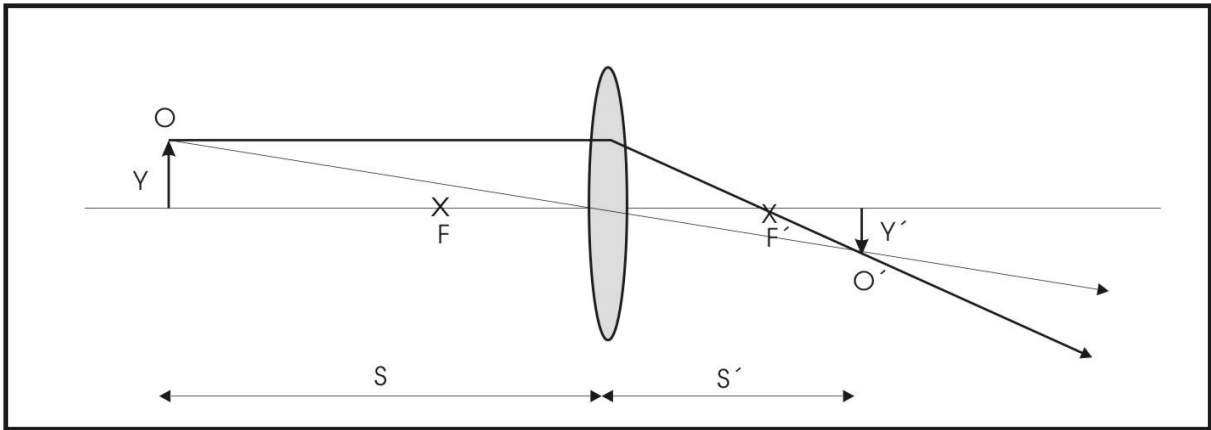


Imagen: Elaboración propia.

III. El profesor debe de recordar a los alumnos que cuanto mayor es “s”, la distancia a la que se situaba el objeto respecto de la lente, menor sería “s'” la distancia respecto de la lente a la que se formaría la imagen. Llega un momento en que por mucho que alejemos el objeto (hasta el infinito), la imagen no se forma más cerca de una determinada distancia (foco de la lente).

Por otra parte, cuánto más pequeña sea “s”, la distancia a la que situamos el objeto respecto de la lente, mayor será “s'”, la distancia a la que se forma su imagen. Existe un límite, es decir una distancia, (que será el foco objeto de la lente), de manera que si situamos el objeto a dicha distancia, su imagen se formará en el infinito.

El profesor debe inducir a sus alumnos a llegar a la fórmula de Newton, es decir, si llamamos $x:s-f$, y $x':s'-f'$, llegamos a una ecuación muy sencilla, la ecuación de Newton: $xx':f^2$. El profesor también debe de ayudar a los alumnos a dar sentido a la relación f^2 : cte.

El profesor indicará a los alumnos que, mediante el trazado gráfico para encontrar la imagen de un objeto extenso se puede deducir la expresión que relaciona el aumento de la imagen con los diferentes tamaños de objeto e imagen, y con las distancias del objeto y de la imagen a la lente (Utilizar triángulos semejantes).

A partir del dibujo encontramos que $y'/y = s'/s$ en términos absolutos.

Pero para definir el aumento lateral tenemos que tener en cuenta que dado que la altura y' es hacia abajo, le asignamos un signo negativo, para representar que la imagen está invertida. Por tanto, la expresión del aumento lateral será:

$$y'/y = \beta = -s'/s$$

A.14 Con frecuencia se caracterizan a las lentes por su poder de convergencia o potencia. Propón una relación entre la potencia de una lente y su distancia focal.

A.14.1 Suponiendo que el ojo humano es un sistema lente convergente pantalla separados 23mm. Calcula la potencia de este modelo de ojo.

A.15 Resuelve actividades de manejo numérico de estas ecuaciones válidas para las lentes delgadas y con la aproximación paraxial.

I. Queremos que los alumnos se familiaricen con la resolución de actividades relacionadas con las lentes delgadas. Así mismo, también es nuestra intención que resuelvan ejercicios puramente numéricos análogos a los de las pruebas de selectividad.

III. El profesor ayudará a resolver los problemas propuestos y recordará a los alumnos en cada ejercicio la correspondencia entre el algoritmo utilizado para resolver un problema y la realidad física en que está basado.

El profesor explicará a los alumnos la relación existente entre la distancia focal y las dioptrías de una lente. La potencia de una lente es igual a la inversa de la distancia focal: $P = 1/f$. Siempre que la distancia focal se exprese en metros, la potencia se medirá en dioptrías.

A.16 Realiza una recapitulación de lo tratado hasta aquí resaltando cuál era el problema que tratamos de resolver, las hipótesis implícitas en el modelo de visión y las pruebas realizadas para su contraste experimental. Describe con profundidad el

modelo que explica cómo vemos los objetos. ¿Qué nuevos problemas podremos resolver a continuación?

1.3. Recapitulación de las ideas principales sobre cómo vemos.

- *Los objetos que vemos son fuentes secundarias de luz.*
- *Las fuentes luminosas extensas se pueden considerar como conjuntos de fuentes luminosas puntuales.*
- *Desde cada fuente puntual se emite un haz esférico de luz. Los rayos (líneas rectas para representar la luz) no son nada de la propia luz, sólo indican los límites del haz de luz que consideramos.*
- *La luz es una entidad física que se propaga en el espacio, independiente de las fuentes y del observador y, por tanto, puede ser objeto de estudio por parte de la Física.*
- *El ojo humano funciona como un sistema óptico formado por una lente convergente y una pantalla.*
- *Para ver bien, es necesario formar una imagen en la retina. Esta imagen se forma de la siguiente manera: cada haz divergente de luz emitido por cada punto del objeto, después de entrar en el ojo, converge hasta un punto de la retina. Como en cada punto de la imagen se concentra parte de la luz emitida por cada punto del objeto, la forma y tamaño de la imagen que percibimos es una réplica a escala del tamaño y forma del objeto que vemos.*
- *Para ver bien los objetos cercanos, la lente del cristalino aumenta su curvatura (acomodación) con lo que los haces de luz convergen y forman la imagen en esa misma pantalla (la retina).*
- *La posición del objeto que vemos mediante una lente y la posición de su imagen están relacionados mediante la siguiente ecuación:*

$$1/s + 1/s' = 1/f$$

- El aumento lateral de una lente $\beta = -s'/s$

El modelo de visión que hemos elaborado, de acuerdo al modelo de visión de Kepler, explica la visión directa de los objetos, pero no profundiza en cómo se elabora la sensación en el cerebro.

2. Puesta a prueba del modelo geométrico de visión en la visión indirecta.

El modelo de Kepler, que hemos construido para explicar la visión directa de los objetos considera el ojo como un sistema óptico formado por una lente convergente y una pantalla. En la retina, o “pantalla del ojo”, se concentran los haces de luz procedentes de cada punto del objeto. En el cerebro, con quien está conectada por el nervio óptico, se elabora una representación del objeto llamada imagen óptica, con la que se percibe la forma y el tamaño de los objetos que vemos.

Vamos a poner a prueba este modelo de visión para explicar cómo vemos los objetos en distintas situaciones: al mirarlos en un espejo, cuando están sumergidos en medios transparentes, al mirarlos a través de lentes, etc.

2.1. ¿Cómo vemos al mirar en el espejo? La reflexión de la luz.

A.17 A veces se piensa que la imagen de un objeto que vemos al mirar un espejo plano está pegada en él. ¿Qué observaciones crees que contradicen esta idea? ¿Qué características tiene la imagen que se ve?

I. Queremos que los alumnos observen que la imagen se ve detrás del espejo, derecha y virtual (desde el lugar donde parece estar la imagen no puede proceder la luz). Al realizar la experiencia, los alumnos deben comprender que la imagen no está pegada al espejo, porque en ese caso se vería desde todas las posiciones (es decir 180° delante del espejo), y en realidad no ocurre así. Si bien la imagen no está pegada al espejo, si está siempre en la misma posición. Además, la imagen está detrás del objeto y justo a la misma distancia del espejo que el objeto.

II. La investigación bibliográfica nos indica que algunos estudiantes creen que las imágenes realmente existen en los espejos, donde pueden verse (Galili and Hazan 2000b).

La inversión lateral de la imagen se explica mediante asunciones *ad hoc*. Los estudiantes la atribuyen a una propiedad del espejo. La formación de las imágenes virtuales se explica hoy en día mediante el proceso que tiene lugar detrás de la retina y por tanto pertenece a un aspecto de la visión explicado por la psicología.

No obstante, esperamos que los alumnos, a partir de las observaciones necesarias, lleguen a comprender que la imagen que vemos es derecha, de igual tamaño y parece que está detrás del espejo, es decir es una imagen “virtual” (porque desde ese lugar no puede proceder la luz)

III. El profesor debe proponer la observación de objetos en el espejo y motivar a los alumnos para que definan las características de la imagen. El profesor debe de definir el concepto de imagen virtual: El punto O' , donde se localiza lo que se ve al mirar al espejo, se suele denominar *imagen virtual* del objeto puntual O , ya que de él parece proceder la luz que llega al ojo, pero O' no es una fuente luminosa.

A.18. De acuerdo con el modelo de visión que hemos elaborado, vemos un objeto cuando un haz divergente de luz procedente de cada punto del mismo entra en el ojo y éste forma una imagen en la retina. Formula una hipótesis, coherente con nuestro modelo, que explique cómo vemos un objeto puntual O al mirar a un espejo plano. Realiza un trazado gráfico.

I. Queremos que los alumnos integren en el modelo de visión que habíamos desarrollado hasta ahora esta nueva experiencia.

II. Creemos que inicialmente algunos alumnos pueden tener dificultades a la hora de realizar los trazados gráficos correctamente ya que pueden realizar trazados con un único rayo. Esperamos que algunos alumnos todavía dibujen un solo haz de luz.

III. El profesor debe de recordar que del objeto puntual sale un haz de luz, que dicho haz de luz se refleja en el espejo y vuelve a convergir en el lugar en que se forma la imagen de dicho punto. Debe de ayudar a los alumnos a realizar el trazado gráfico correcto. El profesor debe de insistir en que para cada uno de los rayos que marcan los límites del haz se cumple la ley de la reflexión, es decir, que el rayo reflejado subtienda el mismo ángulo con la normal que el ángulo incidente.

El profesor propondrá el siguiente dibujo, e insistirá en el hecho de que la imagen solamente se puede formar a partir de un haz de luz que incide en el espejo. Tratará de explicar a los alumnos que a partir de un solo rayo no se puede definir dónde se encuentra la imagen. Explicará que el dibujo de un solo rayo sólo es válido para explicar la reflexión de la luz al llegar al espejo, pero no para la formación de imágenes.

A.19. En caso de que el objeto situado frente al espejo fuese extenso, realiza el trazado geométrico adecuado que explique la formación de la imagen en un espejo.

I. Queremos que los alumnos intenten repetir el trazado de la reflexión de la luz para un par de puntos extremos del objeto, insistiendo en la hipótesis que repetidamente estamos aplicando en estos casos: considerar los objetos extensos que vemos como conjuntos de fuentes puntuales. En los trazados habituales, como el que presentamos aquí, solemos dibujar la imagen, por ejemplo, el lápiz.

III. El profesor debe de reforzar dos ideas básicas en los alumnos:

a) La imagen que dibujamos sólo tiene sentido por referencia al ojo del observador. No se trata, como hemos discutido anteriormente, de un objeto situado detrás del espejo, ya que ni siquiera la luz puede proceder de allí, por eso se le denomina imagen virtual. Para reforzar este concepto, podría preguntarse a los estudiantes una vez construida gráficamente la posición de la imagen: ¿Seguirá existiendo esa imagen si cerramos los ojos?

b) La simetría especular, tal y como se deduce de este dibujo, consiste únicamente en que los puntos del objeto más cercanos al espejo dan una imagen más cercana al mismo y los puntos más alejados dan la imagen más alejada, sin producir una inversión de derecha/izquierda (Galili et al., 1991). Sin embargo, en los libros de texto habituales, con frecuencia, se ponen ejemplos como el de un conductor que ve las letras de AMBULANCIA correctamente mirando por el espejo retrovisor del vehículo si éstas (y la palabra completa) están escritas con una inversión derecha/izquierda. En este caso es necesario precisar que el observador está situado entre el espejo y el objeto y que si el conductor tuviera la palabra AMBULANCIA y el espejo delante de él no sería necesaria esa inversión de las letras para poder leerla. Se puede escribir la palabra AMBULANCIA en un plástico transparente y leer su imagen sin dificultad cuando el plástico y el espejo

están delante del observador, por lo que se puede comprender que la imagen de esa palabra se lee sin inversiones derecha/izquierda como, a veces, suele explicarse.

La reflexión en el espejo de cualquier objeto parece ser una inversión de adelante a atrás del objeto. Es decir, el espejo invierte el orden de las cosas en una dirección perpendicular a su superficie.

Con esto en la cabeza, podemos entender por qué el espejo aparentemente invierte la mano. Es debido a la inversión de adelante atrás.

A.20. *En el esquema siguiente se representa un espejo plano, un objeto puntual (O) y un observador en varias posiciones. Dado que la posición de la imagen que se ve, no depende de la posición del observador, completa un diagrama de rayos para interpretar desde qué posiciones del observador se podrá ver la imagen al mirar al espejo (Osuna 2003-2008).*

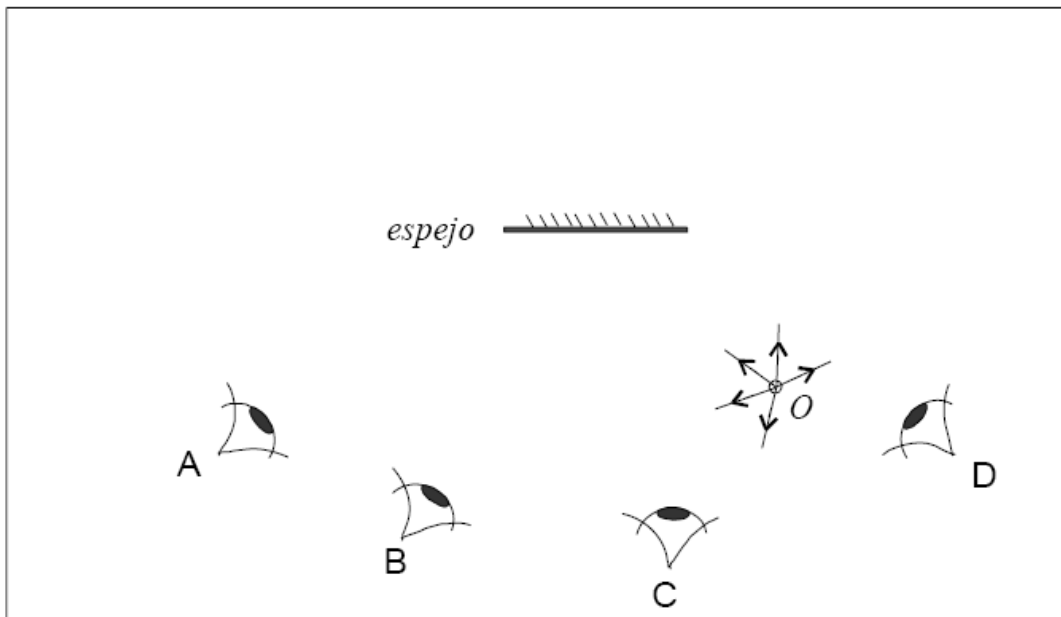


Imagen: (Osuna 2003-2008)

I. Queremos deducir, mediante el trazado gráfico realizado para localizar la imagen que vemos al mirar al espejo que la distancia de la imagen, O' , al espejo, es igual a la distancia del objeto, O , al espejo. Esta consecuencia del trazado gráfico, parece coincidir con nuestras primeras observaciones experimentales. Por tanto, nuestra hipótesis de la

reflexión de la luz que explica cómo vemos al mirar a un espejo, está de acuerdo con la experiencia.

II. Esperamos que los alumnos obtengan la respuesta a la actividad de un trazado gráfico sencillo, aprovechando que en una actividad anterior han encontrado que la posición de la imagen está a la misma distancia del espejo que el objeto. Por ello, pueden situar el punto imagen O' , y de él trazar el haz reflejado en el espejo. Las líneas punteadas trazadas en el esquema indican que el haz de luz en esa zona no existe, aunque el observador pueda interpretar que proceda del punto O' .

Esperamos que los alumnos deduzcan que sólo a los ojos de los observadores A y B les llega parte del haz de luz divergente reflejado en el espejo y que son los únicos que verán la imagen.

III. El profesor debe destacar que hemos obtenido el trazado gráfico a partir de la aplicación de la hipótesis de la reflexión de la luz, lo cual implica que la imagen sólo sea vista por algunos de los observadores. Debemos insistir en que, si se localizara en la superficie del espejo, como algunos de los alumnos creen antes de la enseñanza, debería ser vista desde cualquier posición delante del espejo. El profesor propondrá a los alumnos el siguiente dibujo:

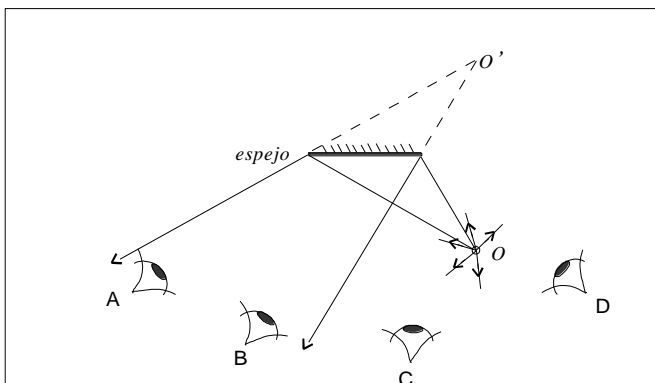


Imagen: (Osuna 2003-2008)

El profesor explicará a los alumnos que se puede obtener de un trazado gráfico sencillo, sin necesidad de utilizar semicírculos graduados para la medida de ángulos, aprovechando que en la actividad anterior hemos obtenido que la posición de la imagen está a la misma distancia del espejo que el objeto. Por ello, podemos, situar el punto imagen, O' , y de él

trazar el haz reflejado en el espejo. Las líneas punteadas trazadas en el esquema siguiente indican que el haz de luz en esa zona no existe, aunque el observador pueda interpretar que proceda del punto O'. En ese trazado gráfico se deduce que sólo a los ojos de los observadores A y B les llega parte del haz de luz divergente reflejado en el espejo y son los únicos que verán la imagen. Es de destacar que la respuesta se ha obtenido de la aplicación estricta de la hipótesis de la reflexión de la luz, pero será necesario llamar la atención de los alumnos que la imagen sólo es vista por unos observadores mientras que, si se localizara en la superficie del espejo, como algunos creen antes de la enseñanza, debería ser vista desde cualquier posición delante del espejo.

Según la secuencia de enseñanza derivada de la estructura problematizada propuesta para el tema, nuestra intención es resolver el problema de la visión indirecta, por lo que el estudio de la reflexión de la luz en los espejos planos se hace de forma subordinada al problema de la visión. Las leyes de la reflexión no se introducen, por ello, como consecuencias empíricas de determinada concepción sobre la naturaleza de la luz, sino como hipótesis lógicas que refuerzan el modelo de visión y le confieren consistencia y aplicabilidad.

En algunos instrumentos ópticos se usan espejos esféricos. Por ejemplo, Newton diseñó un telescopio con espejo esférico (o casi esférico) con el que se consiguen grandes aperturas (entra gran cantidad de luz) con mucho menos peso que si se hiciera con lentes. También conocemos los espejos que se usan para maquillaje en los que podemos ver cierta curvatura cuando los miramos de perfil. Antes de explicar la visión al mirar a estos espejos debemos explorar y conocer con detalle su comportamiento.

En los espejos esféricos, si la cara espejada es la interna (como los espejos de maquillaje) se denominan espejos cóncavos y si la cara espejada es la externa espejos convexos. Estos últimos se utilizan en las esquinas de algunas calles para ayudar a los conductores a mejorar la visibilidad de los alrededores.

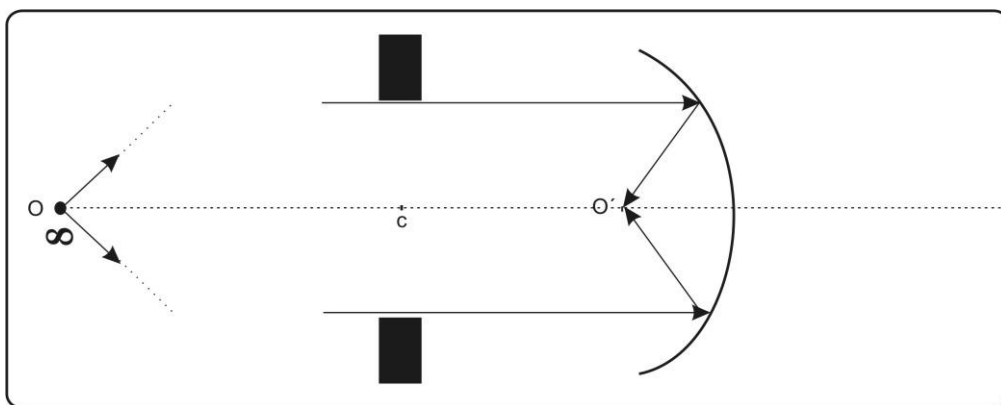
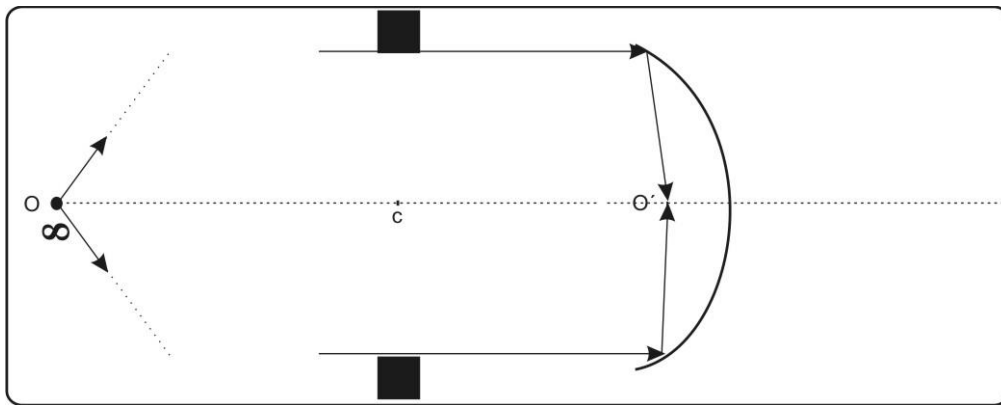
A.21 Explora cómo se ven los objetos al mirar a un espejo esférico cóncavo (puede usarse uno de maquillaje). En concreto realiza las siguientes observaciones:

a) Mira la imagen de un objeto próximo al espejo y observa los cambios que se ven al alejarlo del espejo.

b) Busca dónde se concentra la luz de una fuente puntual muy alejada del espejo.

I. Queremos que los alumnos se familiaricen con las peculiaridades de los espejos cóncavos. También buscamos que instintivamente lleguen al concepto de foco en los espejos cóncavos.

III. El profesor debe ayudar a los alumnos con las experiencias remarcando las características especiales de la imagen que se forma. El profesor debe de explicar a los alumnos que si se aplican las leyes de la reflexión a haces de luz incidentes de distinta anchura (ver dibujos), se obtiene que los haces de luz no convergen en el mismo punto.



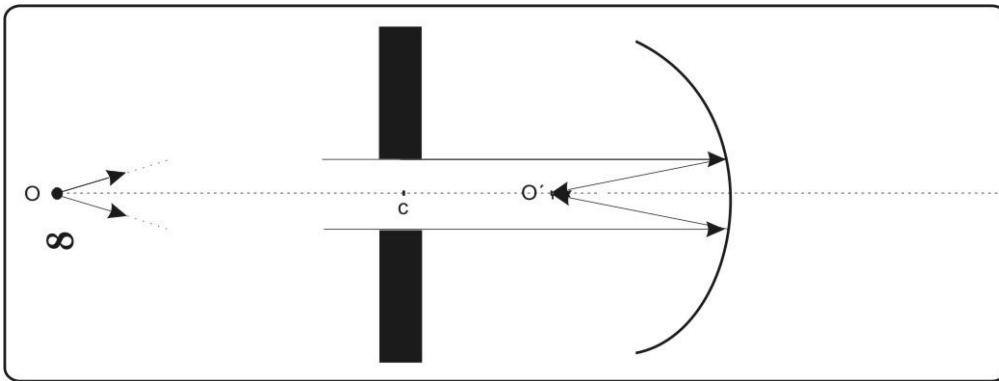
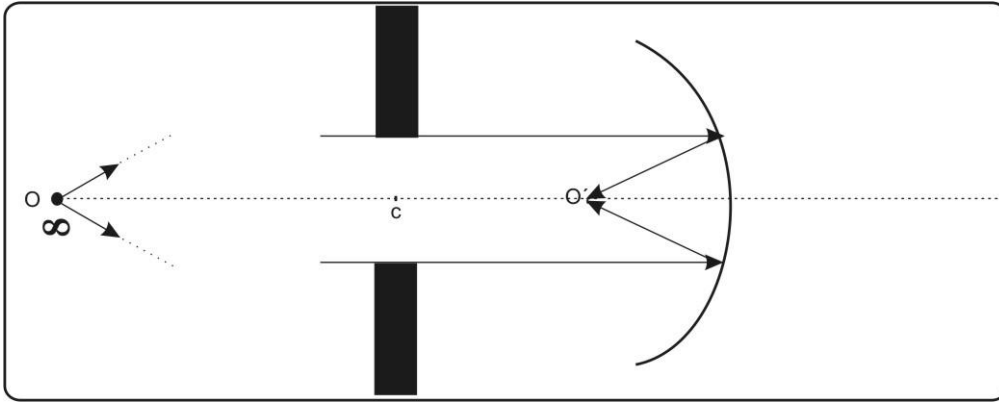


Imagen: Elaboración propia.

Si consideráramos que un punto era la imagen de otro cuando toda la luz que salía del punto objeto convergía en el punto imagen, entonces que el espejo cóncavo no es un sistema formador de imágenes. En óptica se dice que no es un sistema estigmático, ya que no forma imagen nítida en un punto y según el haz considerado, converge en un punto distinto.

Sin embargo, dado que el poder de resolución del ojo es limitado, si seleccionamos haces de luz estrechos que incidan en una pequeña parte central del espejo (donde los ángulos de incidencia son pequeños para objetos muy alejados) podemos ver una imagen real. En estos casos diremos que el espejo esférico forma imágenes dentro de la “aproximación paraxial”.

Siguiendo razonamientos similares a los utilizados en el caso de la lente convergente, cuando el espejo esférico cóncavo se utiliza en la aproximación paraxial, podemos definir un punto especial que llamamos “foco objeto”. Vemos en el dibujo que cuando el objeto

luminoso se sitúa en el infinito, la imagen se forma en un punto que llamamos “foco objeto”.

Si el objeto luminoso lo situamos en dicho punto, su imagen se formará en el infinito. Por tanto, el “foco objeto” y el “foco imagen” son el mismo punto, al que llamaremos “foco”.

Asimismo, diremos que el eje óptico es la línea que une el punto focal y el centro de curvatura. Un rayo trazado según esta línea después de la reflexión en el espejo, se trazaría por la misma línea. Esta línea y el espejo definen el vértice del espejo (V).

A.22 Demuestra que, considerando la aproximación paraxial para los espejos esféricos cóncavos, la distancia focal $f = R/2$. Para ello podemos realizar el trazado de un único rayo del haz procedente de un punto situado en el infinito sabiendo, además, que para ángulos muy pequeños tanto el seno como la tangente del ángulo son aproximadamente igual al propio ángulo expresado en radianes.

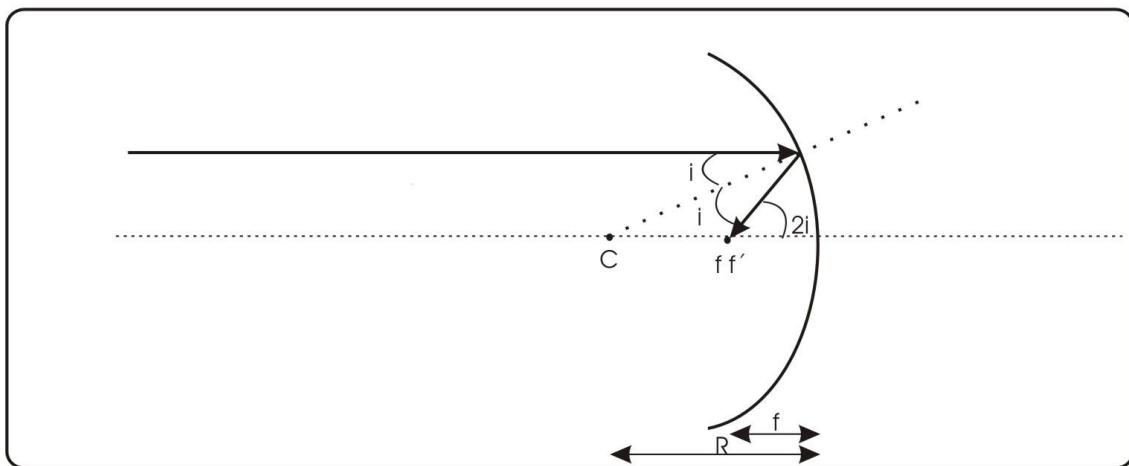


Imagen: Elaboración propia.

I. Queremos probar que $R = 2f$

III. El profesor ayudará a los alumnos con la demostración. Para ello utilizará la aproximación paraxial en la que la tangente de un ángulo es igual al ángulo expresado en radianes cuando el ángulo es pequeño. El profesor debe insistir en que este rayo que hemos dibujado es solamente parte del haz que llega al espejo. Puede dibujar el haz

completo inicialmente para proseguir posteriormente con la demostración utilizando solamente un rayo de dicho haz.

$$\operatorname{tg} \hat{i} = Y/R \qquad \hat{i} = Y/R \qquad Y = i.R$$

$$\operatorname{tg} \hat{2i} = Y/f \qquad \hat{2i} = Y/f \qquad Y = 2.i.f$$

$$i.R = 2.i.f$$

$$\text{Por tanto } 1/2 = f/R$$

$$\text{Es decir, } \mathbf{R = 2f}$$

A.23 Conociendo los elementos ópticos del espejo esférico cóncavo en la aproximación paraxial (F, R, C, eje óptico) y sabiendo que la imagen es real para objetos alejados, realiza un trazado gráfico para localizar la posición donde deberíamos situar la pantalla para ver la imagen del objeto puntual O.

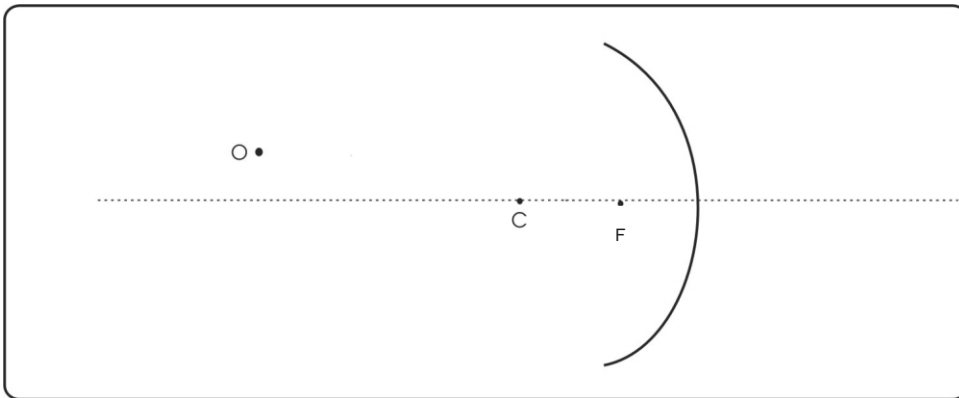


Imagen: Elaboración propia.

I. Esperamos que los alumnos realicen el trazado gráfico correctamente y que una vez dibujada la pantalla dibujen el haz de luz que sale de ella y llega al ojo del observador.

III. El profesor reforzará la idea de que para que el ojo pueda ver tiene que llegarle un haz divergente. Insistirá en que se dibuje la pantalla y el haz de luz que sale de ella hacia el ojo. Comentará que, si no hubiese pantalla, un observador correctamente situado también

podría ver la imagen. Hará el trazado gráfico explicativo necesario. El profesor insistirá en que se puede localizar la imagen utilizando el trazado de diferentes rayos, dibujándolos. El profesor explicará a los alumnos que si el haz reflejado que converge en O' , se representa simétricamente al otro lado del espejo se obtiene un trazado similar al que obtendríamos al utilizar una lente convergente.

A.24 Conociendo los elementos ópticos del espejo esférico cóncavo en la aproximación paraxial (F , R , C , eje óptico) y sabiendo que la imagen es real para objetos alejados:

a) Realiza un trazado gráfico para localizar la posición donde deberíamos situar la pantalla para ver la imagen del objeto AB .

b) Deduce de la geometría de este trazado una relación entre s , s' y f , que nos permita conocer donde vemos la imagen real formada por un espejo esférico cóncavo. (Se recomienda que se compare este trazado con el realizado en la lente convergente)

c) Deduce, igualmente, la relación entre el aumento lateral (β) y las distancias s y s' .

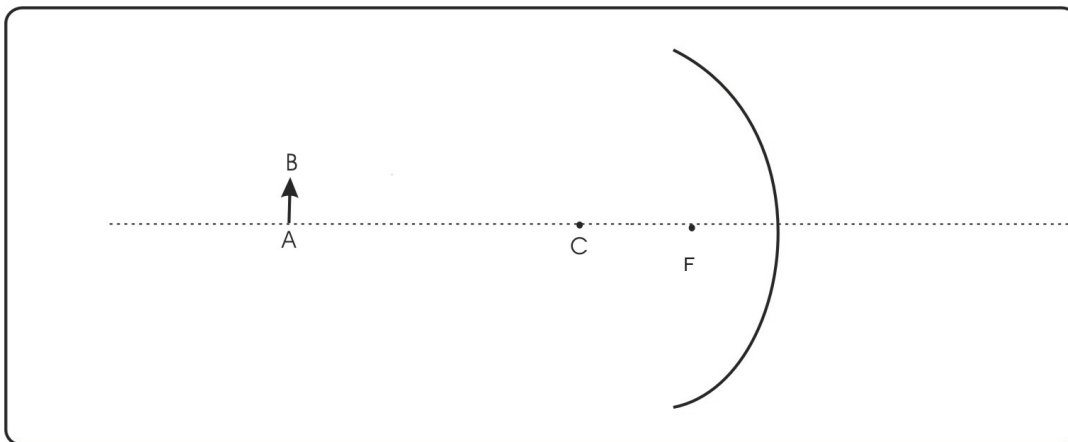


Imagen: Elaboración propia.

I. Queremos que los alumnos intuyan cómo dibujar el trazado de rayos para la formación de imágenes de objetos extensos, a partir de lo estudiado anteriormente para lentes y de lo que hemos aprendido para espejos. Queremos que los alumnos recuerden la expresión encontrada para la localización de imágenes mediante una lente convergente. Queremos que relacionen ambos trazados.

III. El profesor debe de insistir en las similitudes de los trazados gráficos, siendo el del espejo cóncavo simétrico del trazado del de las lentes convergentes (utilizando en ambos casos los rayos que vienen del infinito y pasan por el foco y pasando por el foco van hacia el infinito). Por tanto, se puede utilizar la misma expresión que se había utilizado para las lentes. Recuerda la expresión de las lentes convergentes.

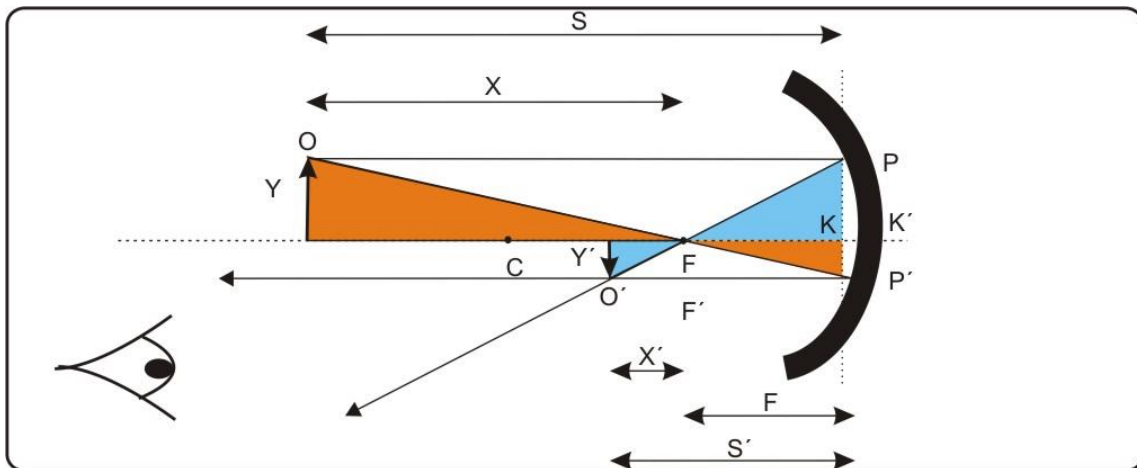


Imagen: Elaboración propia.

El profesor explicará que la demostración se basa en triángulos semejantes. Así mismo explicará que debido a que como hemos visto anteriormente, solamente el espejo cóncavo forma imagen para haces de luz que inciden muy cerca de su centro, lo que hemos estado denominando aproximación paraxial, la distancia kk' tiende a cero.

Por tanto, podemos deducir, a partir de la utilización de triángulos semejantes que:

$$Y/Y' = X/F;$$

$$Y/Y' = F/X'$$

De dichas expresiones podemos deducir que:

$$X/F' = F/X'$$

Y, por tanto:

$X \cdot X' = F \cdot F'$ Que es la ecuación de Newton que hemos utilizado previamente para las lentes.

Como hemos deducido en el caso de las lentes, a partir de esta expresión se puede deducir fácilmente que:

$$1/s + 1/s' = 1/f$$

Que es la ecuación más utilizada para encontrar la posición de la imagen de un objeto situado a una distancia s del espejo, cuya focal es f .

A.25 Cuando el espejo esférico cóncavo (caso de espejo de maquillaje) se utiliza para ver objetos cercanos, entre el foco y el espejo, ¿Cómo es la imagen que vemos? Realiza un trazado gráfico explicativo.

De la geometría del trazado, podemos deducir como en casos anteriores, que la expresión:

$$1/s + 1/s' = 1/f$$

Dado que en este caso la imagen es virtual, a la distancia s' se le asignará un signo menos.

III. El profesor realizará el siguiente dibujo explicativo:

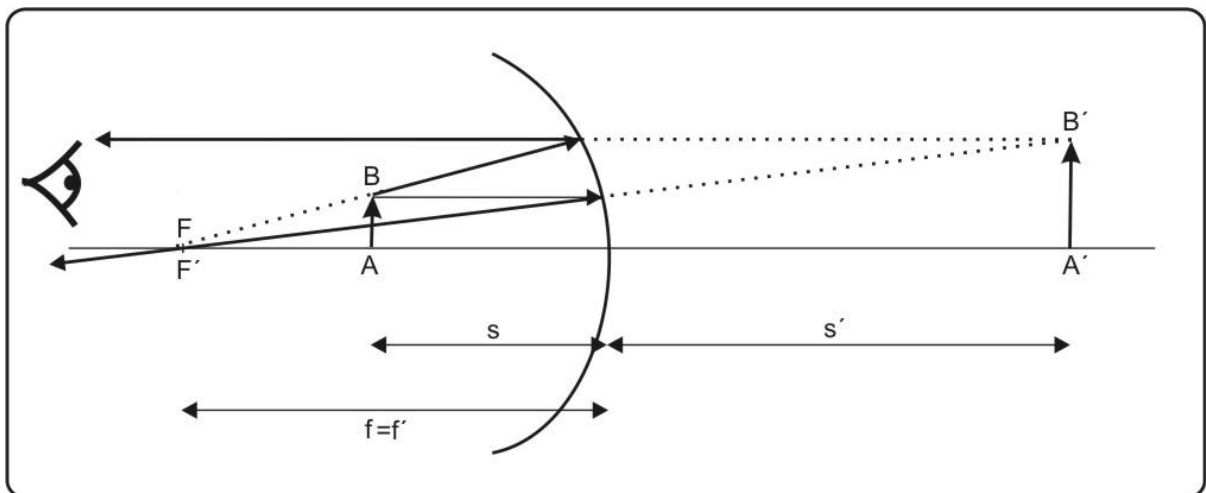


Imagen: Elaboración propia.

Además, en distintas aplicaciones, como en cruces de calles de escasa visibilidad, se usan espejos esféricos convexos. Para comprender cómo vemos al mirar a estos espejos debemos realizar razonamientos similares a los anteriores. Consideraremos, de igual modo, la aproximación paraxial al estudiar la formación de imágenes que vemos.

A.26. ¿Cómo vemos al mirar hacia un espejo convexo? Explora su comportamiento (como aproximación a este dispositivo puede usarse una cuchara metálica bien pulida).

A.27. Suponiendo la aproximación paraxial, dibuja un espejo esférico convexo y realiza trazados gráficos que expliquen la posición de los focos.

III. El profesor debe de definir el foco imagen como un punto virtual, ya que de él no puede salir luz. Debe ser por tanto una cantidad negativa (recordamos que el signo negativo simboliza que no es real). Por tanto, $f = -R/2$

Una vez que se ha comprendido el foco imagen, el profesor debe de introducir el foco objeto a partir del trazado anterior (al que deberían de haber llegado los alumnos, y que sería posteriormente validado por el profesor)

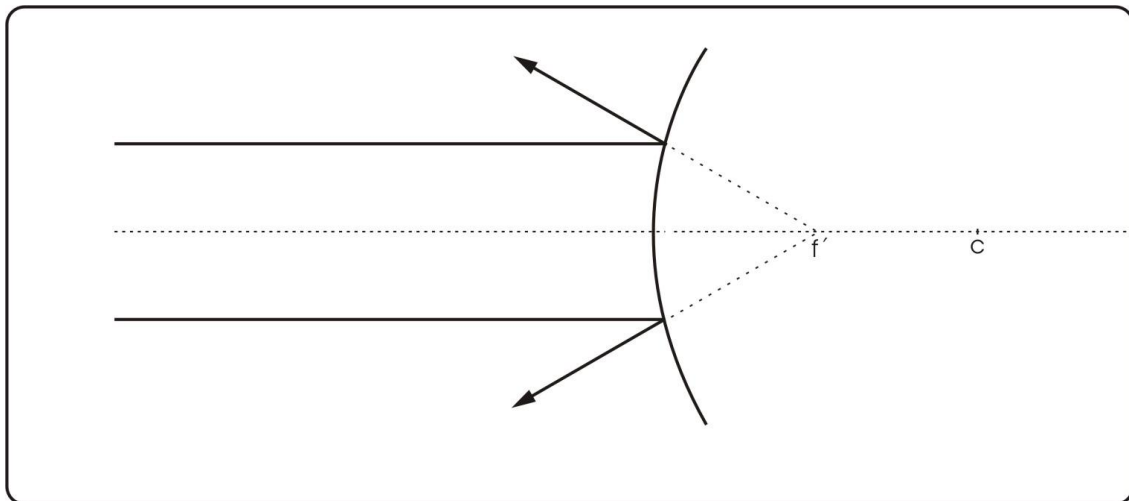


Imagen: Elaboración propia.

A partir de dicho trazado y teniendo en cuenta que la ley de la reflexión se cumple tanto en un sentido de incidencia de la luz en el espejo, como en el otro, por simetría se puede dibujar el rayo de luz que procedente del objeto “pasa” por el foco y se refleja en una dirección paralela al eje óptico.

El profesor introduciría el siguiente dibujo. Así mismo recordaría que el foco objeto también es virtual e igual al foco imagen. Es importante que el profesor recuerde a los alumnos que el foco es virtual porque de él no puede proceder la luz. Por tanto, $f = f' = -R/2$. El trazado en este caso se puede explicar por la propiedad de inversión en el sentido en que se ha movido la luz. Si el trazado anterior es válido, este ha de serlo pues es igual que el anterior, pero con la luz moviéndose en sentido contrario.

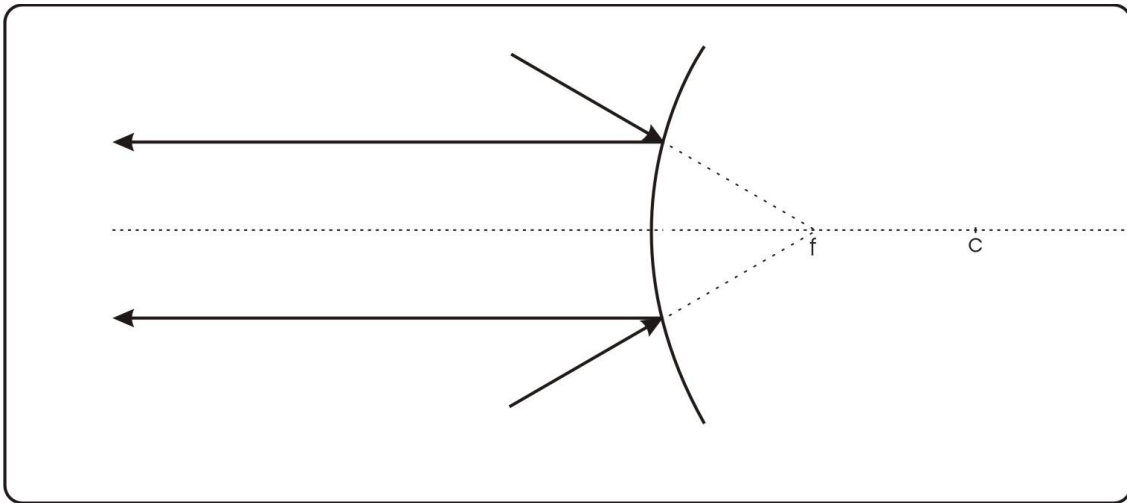


Imagen: Elaboración propia.

El profesor debe de preguntar a los alumnos acerca de si el radio es real o no. Y posteriormente explicar que sí que es real, es una característica física del objeto.

El profesor debe justificar que la ecuación de la formación de la imagen que hemos utilizado para el espejo cóncavo también puede utilizarse para el espejo convexo.

A.28. Realiza un trazado gráfico de manera que explique que la imagen de un objeto extenso que se ve en un espejo convexo es siempre virtual, derecha y de menor tamaño. Confirma tu predicción usando un espejo esférico convexo.

I. Queremos que los alumnos comprendan que la imagen que se forma no es real, ya que la luz no puede provenir de detrás del espejo. Queremos que los alumnos comprendan que si la imagen es virtual solamente tiene sentido dibujarla si dibujamos también un observador.

II. Esperamos que los alumnos realicen los trazados gráficos en los que se utilizan las propiedades de los focos que hemos estudiado y también la ley de la reflexión. Los

alumnos podrían dibujar cualquiera de los siguientes haces de luz caracterizado por los rayos que hemos estudiado en relación a los focos.

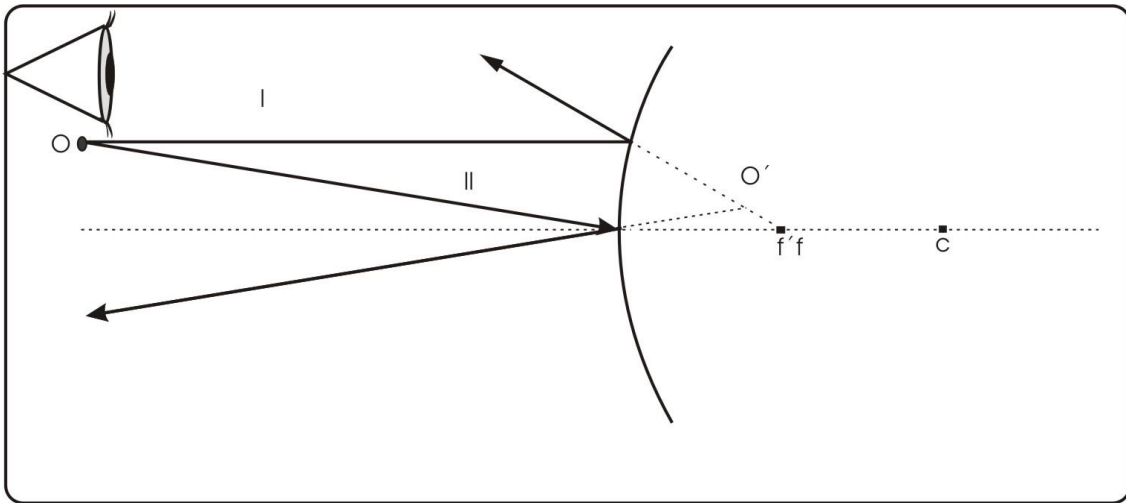


Imagen: Elaboración propia.

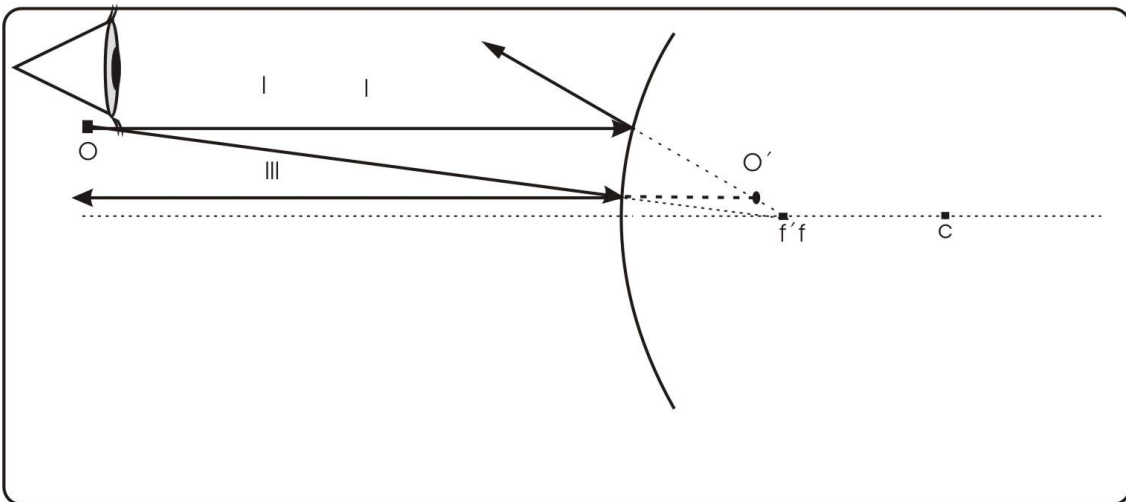


Imagen: Elaboración propia.

A.29. A partir del trazado gráfico anterior, encuentra una relación entre s , s' y la característica principal del espejo (f'). Encuentra también una expresión para el aumento lateral.

II. El profesor explicará el siguiente trazado gráfico:

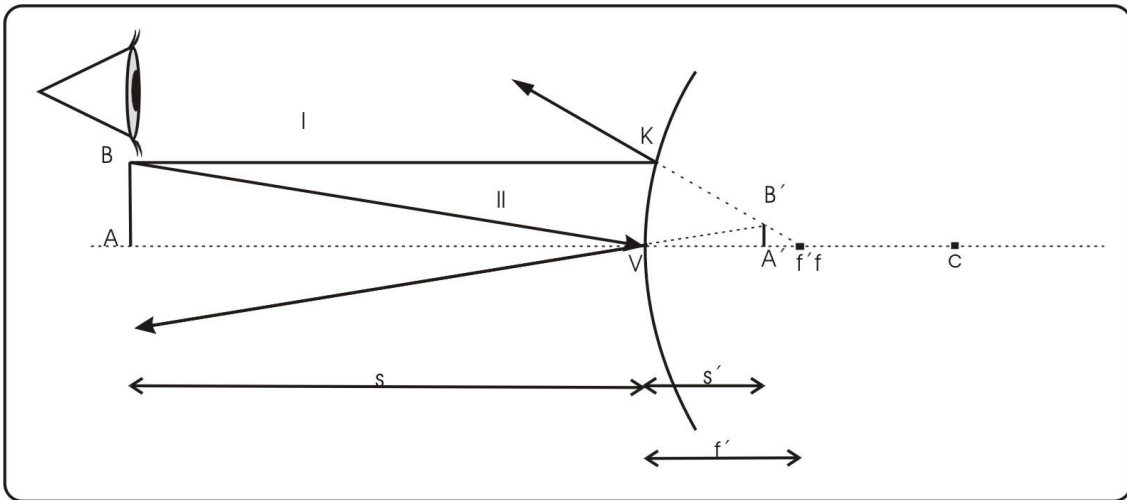


Imagen: Elaboración propia.

El profesor debe de llamar la atención de que si dibujamos O' , obligatoriamente tenemos que dibujar el ojo ya que O' no es una imagen real, es decir, en ese punto no hay concentración de luz. Solamente tiene sentido dibujar una imagen virtual si hay un observador. Las líneas puntuadas, que simbolizan lugares por donde la luz no pasa, solo tienen sentido en referencia al ojo del observador. El profesor debe de insistir en que la imagen formada por un espejo convexo es siempre virtual.

Debe de remarcar el carácter virtual de la imagen que se ha formado, y que por tanto tendrá signo negativo al igual que f' , puesto que de esos lugares no puede proceder la luz.

III. El profesor debe de ayudar a los alumnos a encontrar los siguientes triángulos semejantes en el trazado gráfico. A partir de ello aplicar el teorema de triángulos semejantes intentando que aparezcan las magnitudes que buscamos relacionar.

$$f'VK = f'A'B' \quad Y/Y' = -(f') / -(f' - s') \quad (1)$$

$$ABV = A'B'V \quad Y/Y' = S / -S' \quad (2)$$

A partir de las expresiones (1) y (2) llegamos a la expresión conocida:

$$1/S + 1/S' = 1/f'$$

Para ello hemos tenido en cuenta que tanto S' como f' deben de tener signo negativo, pues como hemos explicado anteriormente son virtuales.

También a partir de las expresiones (1) y (2) podemos llegar a una expresión para el aumento lateral

$$B = -S/S'$$

El profesor debe insistir en que este aumento no se puede medir realmente puesto que la imagen es virtual.

El aumento visual, que es real, depende de la posición del observador.

A.30. Ejercicios de manejo relacionados con espejos esféricos cóncavos aparecidos en exámenes de EBAU.

2.2 ¿Cómo vemos al mirar a través de medios transparentes? La refracción de la luz.

Otra forma de visión indirecta que debemos explicar para poner a prueba el modelo de visión de Kepler es la visión a través de medios transparentes, como cuando miramos un objeto a través de lentes o a objetos sumergidos en agua, etc.

Las lentes delgadas, cuyo comportamiento hemos estudiado para comprender el funcionamiento del ojo humano, son usadas con frecuencia para mirar a través de ellas con objeto de mejorar la visión o ampliarla. También es común el caso de mirar a un objeto sumergido en agua, como cuando miramos a un pez en una pecera o a un objeto en el fondo de una piscina, etc. Estudiar cómo se ve en estas situaciones supondrá formular hipótesis sobre el comportamiento de la luz cuando pasa de un medio transparente a otro. Dado que estos últimos ejemplos son geoméricamente más sencillos, empezaremos por ellos. Con posterioridad, aplicaremos ese hipotético comportamiento de la luz al caso de que atraviere superficies esféricas como las de las lentes, con objeto de valorar si es coherente con las expresiones que relacionan las posiciones del objeto, de la imagen y las características de las lentes delgadas.

2.2.1. ¿Cómo vemos al mirar los objetos sumergidos?

A.31. Al mirar a un pequeño objeto sumergido en un recipiente con agua nos parece verlo en otra posición. Realiza las observaciones que se representan en los esquemas y señala las características de la imagen que vemos (Osuna 2003-2008).

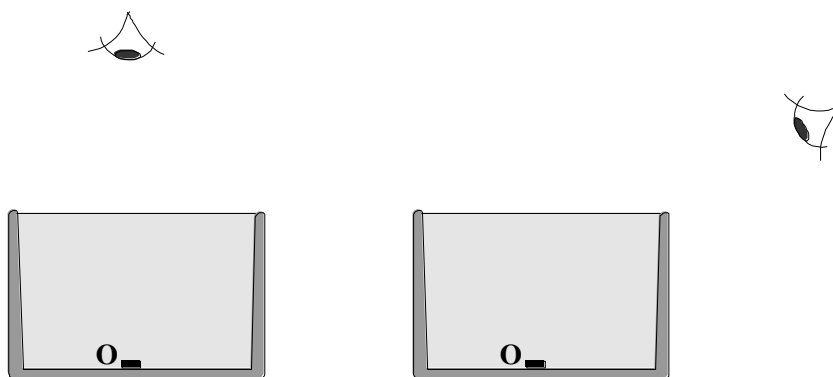


Imagen: (Osuna 2003-2008)

I. Queremos que los alumnos se den cuenta de que la posición en la que se ve el objeto depende de la posición del observador.

II. Creemos que inicialmente los alumnos tendrán dificultades para realizar el trazado gráfico adecuado, pero esperamos que con las indicaciones del profesor comprendan qué le ocurre a la luz al cambiar de medio.

III. El profesor propondrá a los alumnos que consideren un objeto puntual del que sale luz en todas las direcciones. Les animará a considerar un único haz de luz que incide en la superficie de separación de los dos medios y les animará a que hagan sus hipótesis sobre qué le sucederá a ese haz de luz para que al observador le parezca verlo más cerca. Para ello, ayudará a los alumnos a realizar el trazado gráfico y a obtener las consecuencias que de él se derivan.

Debe de explicarles que la imagen cambia de posición según desde donde se mire. Se trata de un sistema no estigmático.

Solo se podría considerar un sistema estigmático en el caso en que el observador se situase sobre la vertical del objeto, ya que en este caso la imagen se formaría en un único punto.

El profesor propondrá a los alumnos los siguientes trazados para explicar la visión:

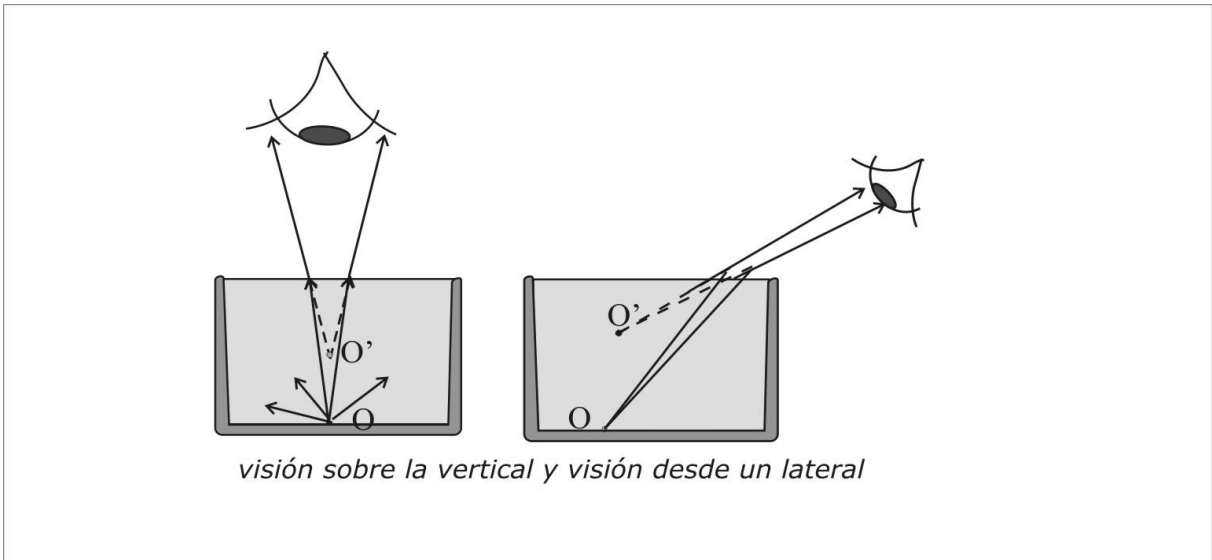


Imagen: (Osuna 2003-2008)

A.32. De acuerdo con el modelo de visión de Kepler, para ver un objeto debe entrar en el ojo un haz de luz divergente procedente de cada uno de sus puntos. Formula una hipótesis sobre el comportamiento de la luz que explique que cuando miramos hacia un objeto sumergido en agua nos parezca que se encuentra a menor profundidad.

I. Esperamos que los alumnos lleguen a realizar el siguiente trazado gráfico:

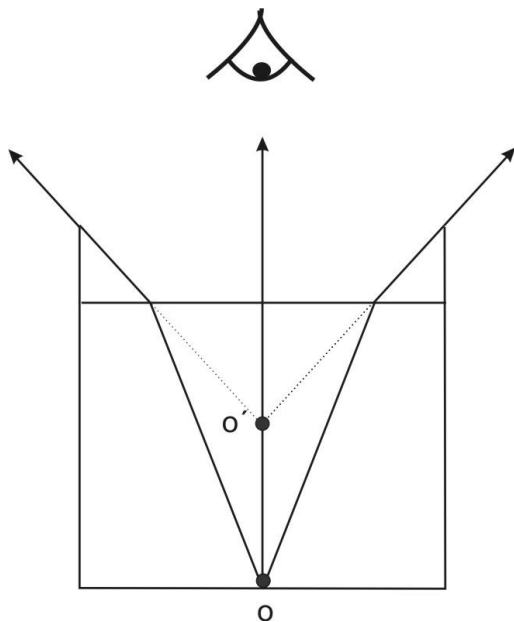


Imagen: Elaboración propia.

III. Al realizar los trazados gráficos el profesor debe señalar que la imagen es virtual, que si el haz de luz es perpendicular a la superficie de separación del medio no se desvía y que los haces de luz que inciden sobre la superficie de separación con otra inclinación si se desvían. El profesor les explicará que el fenómeno es debido a la refracción de la luz, es decir el cambio en la dirección de propagación que sufre al pasar de un medio a otro de diferente densidad.

El profesor puede llamar la atención de los alumnos acerca de dos observaciones:

a) Cuando miramos un pequeño objeto sumergido nos parece verlo a menor profundidad. La experiencia más sencilla consiste en situar un vaso de laboratorio de fondo plano sobre un folio en el que se ha dibujado con un lápiz una pequeña mancha circular. Para apreciar más claramente el efecto buscado, miraremos al círculo del papel, alternativamente, de forma directa y a través del vaso con agua.

Forramos ese mismo vaso vacío, con una cartulina negra y miramos al círculo través de un pequeño tubo, como el de una pajita de refresco sujeta en un soporte para que no varíe su inclinación, desde una posición lateral en la que podemos ver la zona próxima al círculo dibujado en el papel, pero no ese círculo. Un compañero añadirá agua al vaso y el observador verá la imagen del círculo dibujado.

De esta forma, las observaciones de los objetos sumergidos en líquidos transparentes revelan que éstos parecen encontrarse a menor profundidad, por lo que pueden ser vistos desde posiciones laterales en las que es imposible que llegue la luz directa del objeto. Para explicar estos fenómenos de forma coherente con el modelo de visión de Kepler es de esperar que los estudiantes supongan que la luz cambia de dirección al pasar del agua al aire. Al cambio de dirección de cada rayo de luz al pasar de un medio transparente a otro se le denomina refracción de la luz. En el caso de que la luz pase del agua al aire, el ángulo, ϵ , que forma un rayo de luz con la normal (N), es menor que el ángulo de refracción, ϵ' , por lo que la luz se desvía alejándose de la normal. De esta forma, el haz de luz que entra en el ojo del observador parece proceder de O', por eso se suele denominar a este punto *imagen virtual* del punto O. En ese punto parece estar situada la imagen que vemos, pero ese punto no es, en realidad, una fuente luminosa.

Los estudiantes tienen ocasión de refutar posibles ideas alternativas al mirar a un objeto sumergido. Los trazados se proponen para su análisis son algunos de los esquemas

alternativos encontrados en nuestro estudio empírico en los estudiantes antes de la enseñanza de la óptica geométrica.

A.33. Formula hipótesis acerca de los factores que influyen en el ángulo de refracción de la luz al pasar de un medio a otro.

I. Que los alumnos comprendan que el ángulo de refracción será función del medio transparente y del ángulo de incidencia.

III. El profesor explicará a los alumnos que el ángulo de refracción cuando la luz pasa del agua al aire contiene al ángulo de incidencia, al que se le suma un ángulo de desviación (que era lo que Kepler denominaba refracción). Por tanto, cuanto mayor sea el ángulo de incidencia mayor será el ángulo de refracción. El profesor realizará el siguiente dibujo explicativo:

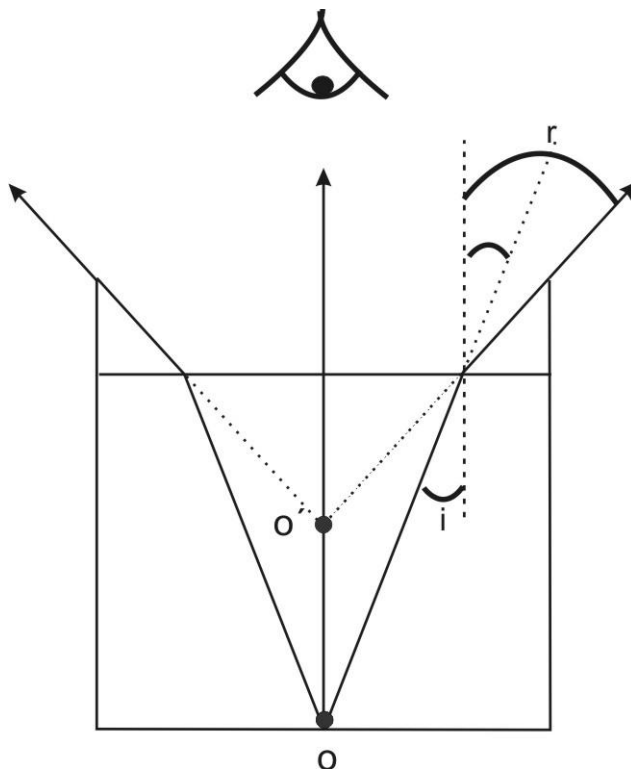


Imagen: Elaboración propia.

Si el objeto está sumergido, entonces de acuerdo con la experiencia, vemos los objetos más arriba que lo que en realidad están. Es decir, sucede que el ángulo de refracción tiene que ser mayor que el ángulo de incidencia para que esto suceda. Por tanto, vemos en el

dibujo, que cuanto mayor es el ángulo de incidencia, mayor será el ángulo de refracción. Esta relación tiene un límite, pues el ángulo de refracción no puede ser mayor que 90° . Otro límite de esta relación se establece cuando los ángulos de incidencia son muy pequeños, en este caso el ángulo de refracción también será muy pequeño. En el límite, cuando el ángulo de incidencia es de 0° , entonces el ángulo de refracción también será de 0° . Es decir, cuando la luz incide perpendicular a la superficie de separación entre los medios, no se desvía.

El profesor debe de proponer a los alumnos diversos ángulos de refracción para el mismo ángulo de incidencia según la luz atraviese diferentes materiales.

Puede sugerir la siguiente experiencia curiosa: Se llena un vaso de precipitados con glicerina, y en ella se introduce poco a poco una barrita de metacrilato. Se observa que según se va introduciendo parece que va desapareciendo. El profesor explica que ello es debido a que las sustancias tienen el mismo poder de desviación de los rayos de luz, es decir el mismo índice de refracción.

El profesor explicará que, debido a la reversibilidad del movimiento de la luz, podríamos suponer que la luz viajará del aire al agua. Sería el mismo dibujo con la luz viajando en sentido contrario. Al penetrar en el agua, la dirección de propagación de la luz se acerca a la normal. En este caso el ángulo de refracción sería mayor que el de incidencia.

A.34. Diseña una experiencia para encontrar una relación entre el ángulo de incidencia y el ángulo de refracción. Llévala a la práctica y, a partir de los datos, encuentra una relación entre $\sin i$ y $\sin r$.

III. El profesor sugerirá la siguiente experiencia:

Necesitamos una lente de agua con forma semicircular. Ponemos un alfiler en un punto y mirando a través del agua situamos otro alfiler (puede ser sobre un corcho o cartón) donde se vea en línea con la primera. Se repite la experiencia varias veces. Una vez recogidos los datos realizamos una tabla con los ángulos de incidencia y sus correspondientes ángulos de refracción.

Después realizaremos una gráfica. Debemos incluir el punto $(0, 0)$. Kepler descubrió que para ángulos de incidencia menores de 20° , la relación entre el ángulo de incidencia y del

de refracción era lineal. Sin embargo, para ángulos mayores se pierde la linealidad. La relación entre el ángulo de incidencia y el ángulo de refracción es compleja. Descartes trató de explicarla con su famosa teoría de los “torbellinos” (buscar dibujo Pelota Descartes). Entonces propuso la relación entre los senos de los ángulos.

Si realizamos una tabla con los senos de los ángulos de incidencia y los de refracción, y posteriormente realizamos la representación gráfica, obtendremos una relación lineal:

$$\text{sen } i = K \text{ sen } r$$

La constante de proporcionalidad k la llamaremos n : índice de refracción del agua respecto del aire. De acuerdo a la experiencia n tiene que ser mayor que 1.

Hemos realizado esta experiencia para la refracción de la luz cuando viaja desde el aire al agua. Tenemos ahora que generalizar esta expresión. Dado que la luz podría tomar el camino inverso, podemos considerar los ángulos de incidencia y refracción intercambiables. Por tanto, los podemos denominar e_1 y e_2 . Por tanto, la expresión sería:

$$\text{sen } e_1 = n_2 \text{ sen } e_2$$

Donde n_2 es el índice de refracción del agua respecto del aire. Si asignamos al índice de refracción del vacío (y del aire aproximadamente) 1, entonces n_2 será el índice de refracción del agua.

La luz también puede pasar del aire a otro medio transparente con otro índice de refracción:

$$\text{sen } e_1 = n_3 \text{ sen } e_3$$

Podemos generalizar la expresión ya que si:

$$\text{sen } e_1 = \text{sen } e_1, \text{ entonces:}$$

$$n_2 \text{ sen } e_2 = n_3 \text{ sen } e_3$$

Y así para cualquier medio. La ley de la refracción sería de Descartes sería:

$$n_1 \text{ sen } e_1 = n_2 \text{ sen } e_2$$

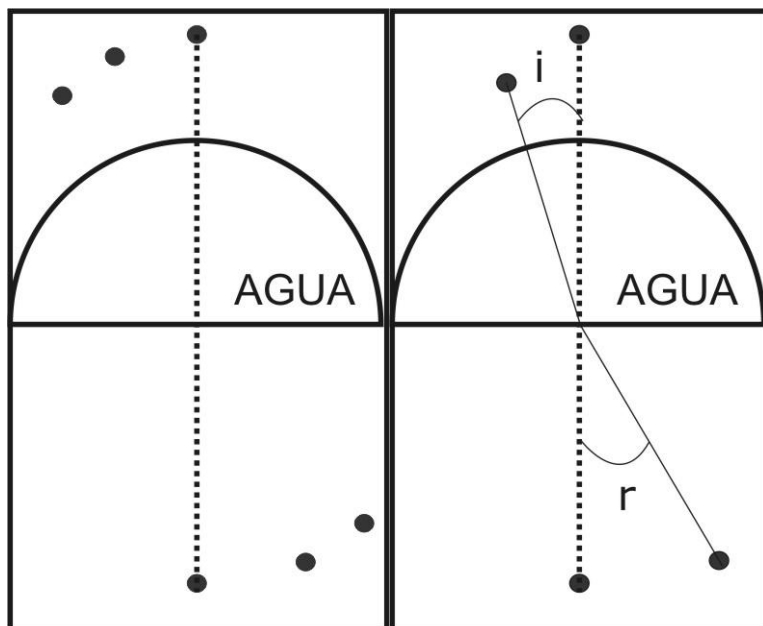


Imagen: Elaboración propia.

El profesor recordará que en la cara circular de la lente no se produce refracción ya que la luz entra perpendicular a la superficie de separación de los medios, es decir dirección radial en este caso.

La refracción de la luz, o cambio de dirección que se produce al pasar la luz del líquido al aire, en general de un medio transparente a otro, depende del tipo de líquido y, como consecuencia, la profundidad con que se verá la imagen del objeto sumergido cuando se observa desde la vertical, también dependerá del medio donde se encuentre. La relación (o cociente) entre la profundidad real y la profundidad a la que se ve la imagen, al mirarla perpendicularmente, es una característica óptica de la sustancia transparente denominada índice de refracción (n).

A.35. *Cuando la luz pasa del agua al aire, como ocurre cuando miramos a un objeto sumergido, la ley Snell-Descartes predice la existencia de un valor límite del ángulo de incidencia, a partir del cual la luz no sale del agua y se refleja en su superficie (reflexión total interna). Calcula el valor de ese ángulo límite sabiendo que el índice de refracción del agua es de 1,33. Haz lo mismo para el caso del vidrio con índice de refracción 1,5.*

A.36. Ejercicios de manejo de la ley de la refracción en exámenes de la EBAU.

2.2.2. ¿Cómo vemos al mirar a través de las lentes?

Las lentes que hemos estudiado para elaborar un modelo físico que explique la visión humana también pueden ser utilizadas para mirar a través de ellas, (visión indirecta).

A. 37. Representa cómo se ve en una pantalla la imagen formada con una lente convergente. Si se elimina la pantalla, ¿es posible ver esa imagen?, ¿desde dónde se podrá ver? Realiza un diagrama que lo explique.

III. El profesor explicará que al quitar la pantalla se forma una imagen real. Es un punto muy especial ya que emite luz, aunque no en todas las direcciones (como los objetos emisores). Es por ello que al quitar la pantalla solamente se verá el objeto desde determinadas posiciones, es decir tratándose de un objeto extenso se podrá ver cuando le llegue al observador el haz procedente de la imagen real de todos los puntos del objeto.

Cuando los objetos están próximos a las lentes convergentes decimos que actúan como lupas.

A.38. Explora el comportamiento de la lente convergente suministrada por el profesor cuando actúa como lupa anotando los resultados de las observaciones siguientes:

- a) ¿En qué margen de distancias a la lente puede estar situado el objeto para que actúe como lupa?***
- b) ¿Qué características tiene la imagen cuando la lente actúa como lupa?***

I. Queremos que los alumnos se familiaricen con una nueva característica de las lentes convergentes que anteriormente no habíamos estudiado. Queremos que comprendan que, si situamos los objetos entre el foco y la lente, ésta puede actuar como lupa, formando una imagen virtual de los mismos, derecha y ampliada.

II. Esperamos que con ayuda del profesor los alumnos comprendan cuando una lente convergente puede funcionar como lupa. Así mismo esperamos que comprendan que características tiene la imagen formada por una lupa.

III. Aunque los alumnos hayan usado la lupa en alguna ocasión no podemos suponer que conocen las características de la visión a través de ella, por lo que el profesor proporcionará a los alumnos una lente convergente de 100 mm focal (lente que suele suministrarse en los equipos de óptica de los centros educativos).

Recordará a los alumnos que éste el tipo de lente ya la habían utilizado cuando buscaban la posición de la pantalla en la que se podía ver la imagen real de una fuente puntual a distintas distancias. El profesor recordará a los alumnos que únicamente se puede ver la imagen en la pantalla cuando la fuente puntual se situaba a distancias mayores de 10 cm (distancia focal) y que, a esa distancia, el haz de luz emergente formaba sobre la pantalla, cualquiera que fuera su posición, círculos iluminados del mismo diámetro que la lente. Así mismo, les recordará que habían encontrado que para distancias menores de 10 cm a la fuente puntual, esos círculos iluminados se hacen mayores conforme se aleja la pantalla, es decir, cuando el objeto (o fuente luminosa) se sitúa entre el foco y la lente. En esta última situación, aunque la lente converja el haz de luz incidente, el haz que emerge de ella aún es divergente y no es posible obtener una imagen en una pantalla.

A.39. Una persona mira a través de una lente convergente a un objeto puntual situado entre el foco y la lente. Realiza un esquema un diagrama de rayos que explique tu hipótesis acerca de cómo es visto ese objeto cuando la lente actúa como lupa.

I. Queremos afrontar el trazado gráfico. Cuando el objeto está situado entre el foco y la lente, aunque el haz emergente ha convergido respecto al incidente, la convergencia no es suficiente para concentrar la luz en un punto.

Como el haz que llega al ojo es divergente, el observador verá una imagen (virtual) en el origen directo de ese haz de luz, lo que se asemeja a la visión en un espejo y a la de los objetos sumergidos en agua. El trazado gráfico de localización de esa imagen virtual será, pues:

En caso de tratarse de un objeto extenso, podemos imaginar que el punto O es uno de sus extremos y, para el otro, el trazado gráfico no es necesario realizarlo por ser simétrico al primero. A partir del esquema siguiente se puede entender el aumento con que se ven los objetos cuando la lente convergente se usa como lupa.

Con frecuencia se suele dibujar la imagen virtual, en este caso un lápiz, para representar que el ojo reconoce en la imagen al objeto emisor de luz, conviene volver a avisar aquí que esta imagen sólo tiene sentido por referencia al ojo del observador, que en ningún caso se trata de un objeto situado detrás de la lente y que ni siquiera es el origen de la luz que llega al ojo.

III. Opcionalmente el profesor demostrará que la misma ecuación que hemos utilizado para las lentes se puede utilizar para las lentes cuando las utilizamos como lupas.

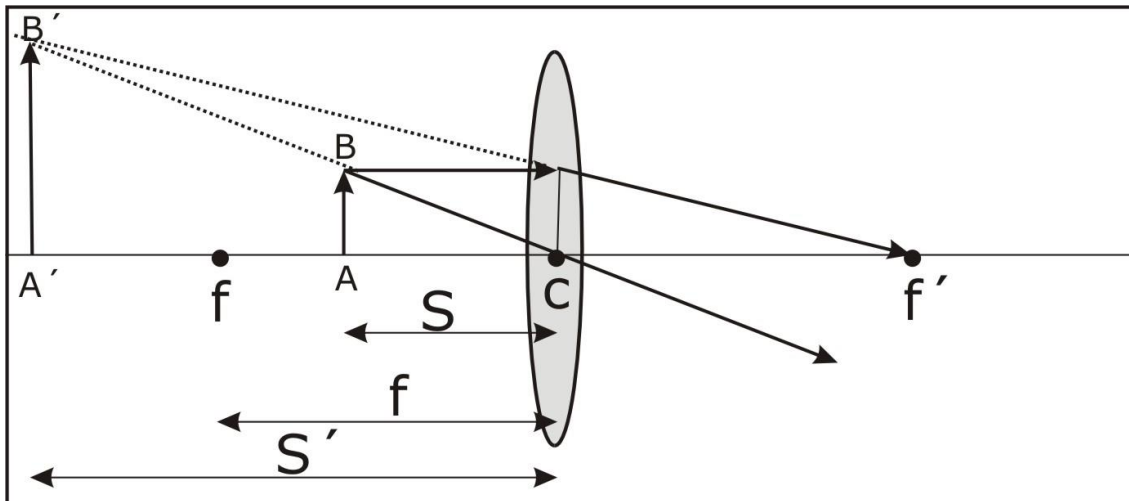


Imagen: Elaboración propia.

Los signos negativos significan que son distancias virtuales.

$$y'/y = -S' + f' / f'$$

$$y'/y = -S' / S$$

$$-S' / S = -S' + f' / f'$$

$$-S'f' = -SS' + Sf'$$

$$-SS' + Sf' + S'f' = 0$$

$$Sf' + S'f' = SS'$$

$$f'/S' + f'/S = 1$$

$$1/S + 1/S' = 1/f$$

Por tanto, llegamos a la conclusión de que, si podemos utilizar la ecuación de lentes delgadas, aunque utilicemos la lente como lupa.

El profesor debe de explicar que el aumento visual no es el aumento lateral, ya que, en el caso de la lupa, el aumento depende de la distancia a la que coloquemos la lupa del objeto y de la distancia a la que se coloque el observador de la lupa.

El profesor debe de insistir en que el aumento lateral no lo podemos medir, puesto que la imagen es virtual y no podemos medir a que distancia de la lente se forma.

El profesor debe de explicar el aumento visual de la lupa, que no es el aumento lateral, que en este caso no se podría medir.

Si llamamos ω al ángulo subtendido por el objeto desde el ojo, ó al ángulo subtendido por la imagen virtual, k a la distancia del objeto al ojo y k' a la distancia de la imagen al ojo.

$$\text{tg } \omega = y/k$$

$$\text{tg } \omega' = y'/k'$$

$$M = \text{tg } \omega' / \text{tg } \omega$$

$$M = y'/k' / y/k$$

$$M = k \cdot y' / k' \cdot y = 0.250 \cdot s' / k' \cdot s$$

Si el objeto está a 0.250 y si el objeto además está en el foco de la lente, entonces: $s=f$ y k' es aproximadamente igual a s' que será infinito.

Entonces:

$$M = 0,250/f \quad M = D/4$$

Definimos el aumento de una lupa para esta situación determinada de este modo.

Hay que determinar una situación concreta porque el lugar en el que se forma la imagen en una lupa depende de la posición del objeto.

Es muy importante no confundir el aumento lateral con los aumentos de las lupas comerciales.

A.40. ¿Cómo se ve una letra de 4 mm a través de una lupa de 15 dioptrías cuando se sitúa a 5 cm de la lente? Realiza un trazado gráfico y explica las características de la imagen.

I. Se trata de una actividad de manejo de las ecuaciones deducidas en las actividades anteriores.

A.41. Una persona se sorprende que, al mirar a un objeto cercano, a través de una lente convergente, vea la imagen derecha y más grande y sin embargo, cuando mira a un objeto lejano vea la imagen más pequeña e invertida ¿podrías explicarlo?

I. Pretendemos relacionar la experiencia al mirar a través de las lentes con los trazados gráficos que hemos ido desarrollando.

III. El profesor recordará a los alumnos los trazados que hemos ido dibujando anteriormente.

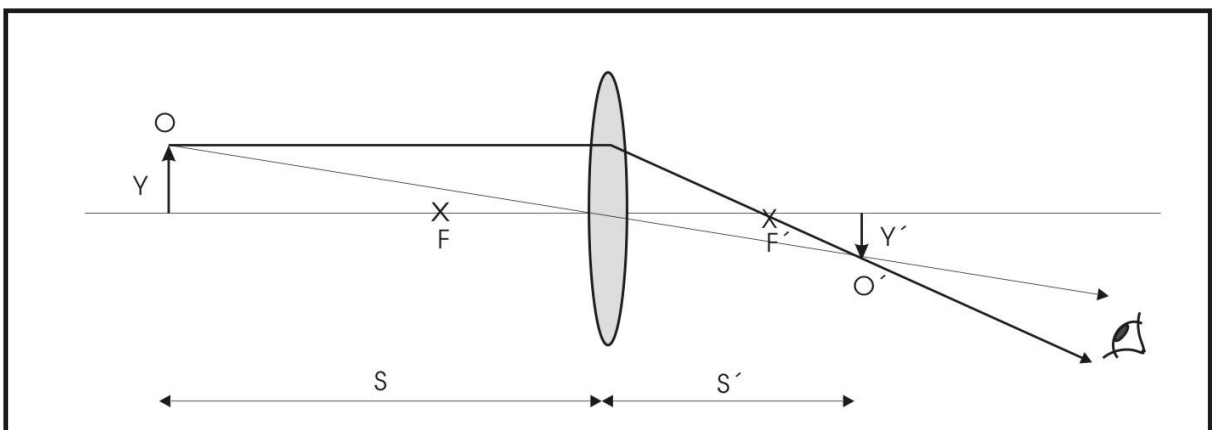


Imagen: Elaboración propia.

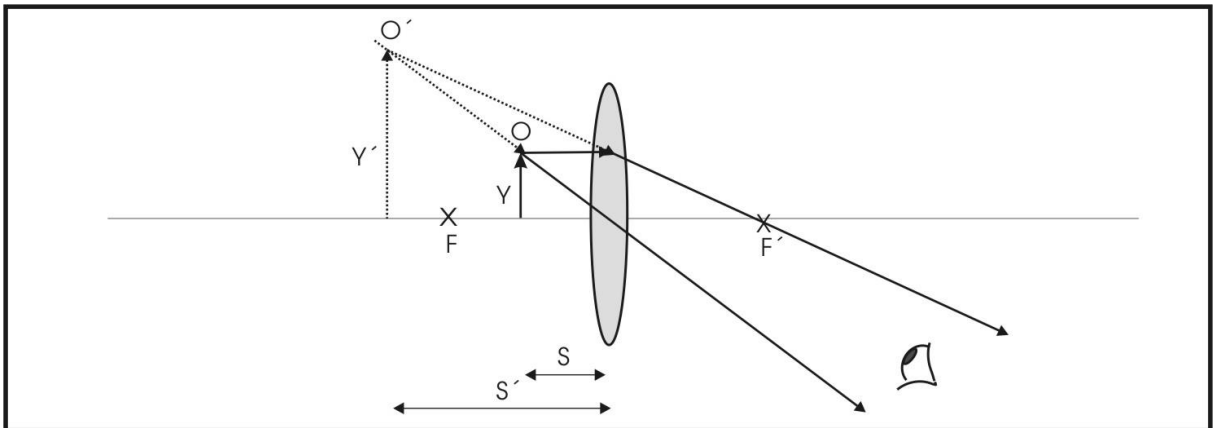


Imagen: Elaboración propia.

El profesor intentará que los alumnos relacionen estos trazados con la experiencia que han tenido con las lentes.

A. 42. Considerando la aproximación paraxial, aplicar la ley de la refracción para justificar la convergencia de los haces de luz cuando atraviesan una lente convergente. Realiza trazados gráficos para explicar el comportamiento de la luz en cada cara de la lente.

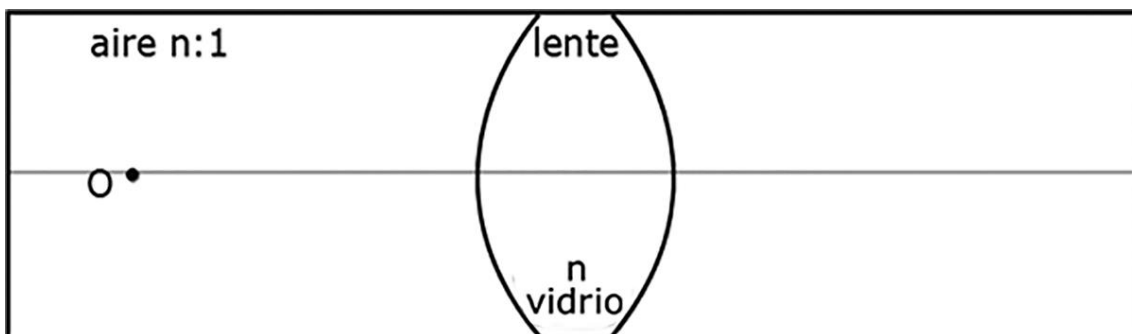


Imagen: Elaboración propia.

I. Buscamos una aplicación cualitativa de la Ley de Snell.

II. Con lo aprendido hasta ahora esperamos que los alumnos dibujen un trazado gráfico similar al siguiente:

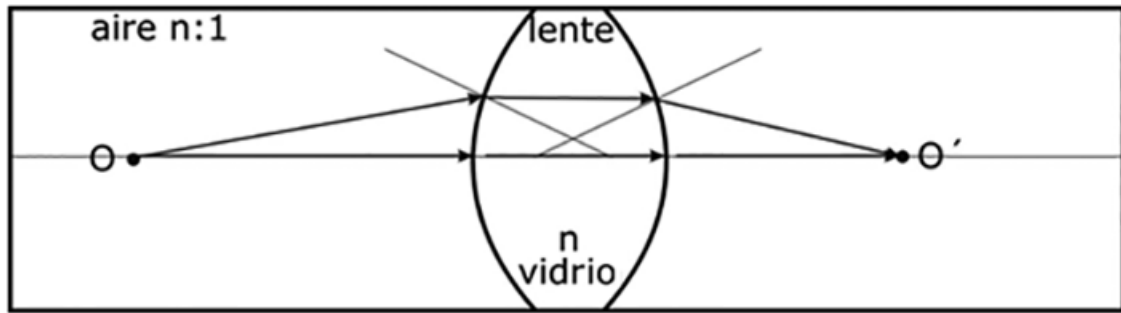


Imagen: Elaboración propia.

III. El profesor explicará el comportamiento cuantitativo de cada uno de las lentes llegando a demostrar la ecuación del dioptrio esférico.

La hipótesis de la refracción de la luz que ha permitido explicar cómo vemos los objetos cuando están sumergidos en medios transparentes y que hemos contrastado experimentalmente en algunas situaciones, tiene otras consecuencias importantes. Una de ellas es explicar cómo se comporta la luz cuando atraviesa las lentes.

A.43. (Opcional) Deduce de la relación existente entre s y s' en un dioptrio esférico cuando se considera la aproximación paraxial.

Para la deducción de la expresión utilizaremos la aproximación paraxial, para lo que los objetos han de estar situados a grandes distancias del dióptrio y los ángulos de incidencia serán, por tanto, muy pequeños.

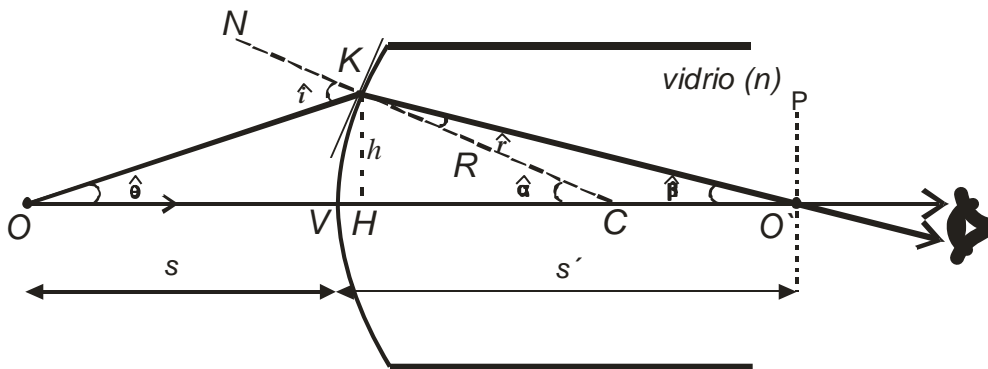


Imagen: Elaboración propia.

En estas condiciones es posible hacer la siguiente aproximación:

$$\text{sen}\theta = \text{tag}\theta = \theta.$$

Además, el tamaño del dióptrio es muy pequeño en comparación con las distancias al objeto y la imagen y además, su curvatura es pequeña, por lo que la distancia VH se puede considerar nula.

En el dibujo hemos representado un objeto puntual iluminado, O, que como sabemos emite luz en todas las direcciones. Elegimos un haz de luz, limitado por los rayos OV y OK, que incide en la superficie del dioptrio esférico convexo de radio R, con centro de curvatura en C. De acuerdo con la ley de la refracción, el rayo OV no se desvía ya que el ángulo de incidencia con la superficie es de 90°. El rayo OK, incide con un ángulo i respecto de la normal (N) a la superficie. Dado que la superficie es esférica, podemos imaginar que en el punto de incidencia hay un plano tangente a la superficie esférica cuya normal, N, está dirigida al centro de curvatura, C. Al aplicar la ley de la refracción al rayo OK, trazamos el rayo refractado KO' con un ángulo r respecto de la normal N. El haz de luz incidente limitado por los rayos OV y OK, después de entrar en el vidrio forma, pues, un haz convergente, limitado por los rayos KO' y VO', que converge en O'. Así pues, al mirar a O' podrá verse la imagen de O.

La ley de de la refracción aplicada al rayo OK permite escribir:

$$\text{sen}i = n \cdot \text{sen}r$$

Si i y r son pequeños,

entonces:

$$i = n \cdot r \quad (1)$$

Para relacionar los ángulos de esta expresión con los valores s y s' y las características de un dioptrio esférico, R y n , buscamos relaciones de i y r con otros ángulos señalados en el esquema y éstos, a su vez, con las magnitudes buscadas:

Del triángulo OKC podemos deducir que $i = \theta + \alpha$ (2)

Del triángulo CKO' podemos deducir que $a = r + \beta$, de donde $r = \alpha - \beta$ (3),

Por otro lado, los ángulos θ , α y β equivalen a: $\text{tag } \theta = \theta = \frac{h}{s}$, $\text{tag } \alpha = \alpha = \frac{h}{R}$, $\text{tag } \beta = \beta = \frac{h}{s'}$ (4)

Sustituyendo las expresiones (2) y (3) en (1): $\theta + \alpha = n \cdot (\alpha - \beta)$

Y escribiendo los ángulos θ , α y β según están expresados en (4): $\frac{h}{s} + \frac{h}{R} = n \left(\frac{h}{R} - \frac{h}{s'} \right)$

Por último, eliminando h y ordenando esa expresión, obtenemos: $\boxed{\frac{1}{s} + \frac{n}{s'} = \frac{n-1}{R}}$ (*)

Esta última es la expresión buscada, en la que se relacionan los valores de s y s' con las características del dioptrio R y n .

Pero, para realizar trazados gráficos sin necesidad de aplicar en cada caso la ley de la refracción, es cómodo usar los conceptos de puntos focales F y F' . Las distancias a esos puntos, f y f' , se pueden obtener de las propiedades de esos puntos:

Si $s \rightarrow \infty$, entonces $s' = f'$, y de la expresión anterior obtenemos que $f' = \frac{n \cdot R}{n-1}$

Y si $s' \rightarrow \infty$, entonces $s = f$, y de la misma forma obtendríamos: $f = \frac{R}{n-1}$

La expresión del dioptrio esférico (*) podemos escribirla en función de la distancia focal

imagen, f' , obteniendo una expresión similar a la usada en la lente delgada: $\boxed{\frac{1}{s} + \frac{n}{s'} = \frac{n}{f'}}$

43. (Opcional) A partir de la expresión anterior, deduce la expresión que relaciona los valores de s y s' y la focal de la lente. Considera que una lente convergente está formada por dos dioptrios, uno convexo y uno cóncavo, unidos.

III. El profesor explicará que:

Para la primera lente: $1/S + n/S_1' = n-1/R$

Para la segunda lente: $n/-S_1' + 1/S' = 1-n/-R$

El signo negativo que hemos utilizado en $-S_1'$ significa que la imagen para esta segunda lente es virtual.

Si sumamos las ecuaciones encontradas para las dos lentes, encontramos:

$$1/S + 1/S' = (n-1) \cdot 2/R$$

Pero si $S = \infty$ $S' = f$, por tanto $1/f = (n-1) \cdot 2/R$

Con lo que la ecuación final del dioptrio esférico sería:

$$1/S + 1/S' = 1/f'$$

Con lo cual podemos utilizar la misma ecuación que habíamos utilizado para lentes, y espejos.

Otro ejemplo para poner a prueba el modelo de visión que hemos elaborado sería la visión a través de lentes divergentes. ¿Cómo explicamos la visión a través de las lentes divergentes?

A.44. Explora el comportamiento de las lentes divergentes. Señala las características de la visión a través de ella y la posición de los focos. Compara las características de las lentes divergentes con las de la lente convergente.

I. Queremos que los alumnos se familiaricen con las lentes divergentes y que las comparen con las lentes convergentes que habían utilizado previamente.

II. Esperamos que los alumnos comprendan las diferencias entre las lentes convergentes y divergentes. Esperamos que los alumnos comprendan que la visión a través de ellas nos da siempre una imagen derecha, más pequeña y siempre virtual, para cualquier posición del objeto.

III. El profesor debe de explicar que significa en este caso que el foco objeto de la lente sea virtual. Les explicará a los alumnos que del foco no puede salir luz. Debe de ayudarse de dibujos para que los alumnos comprendan lo que le ocurre a los haces de luz.

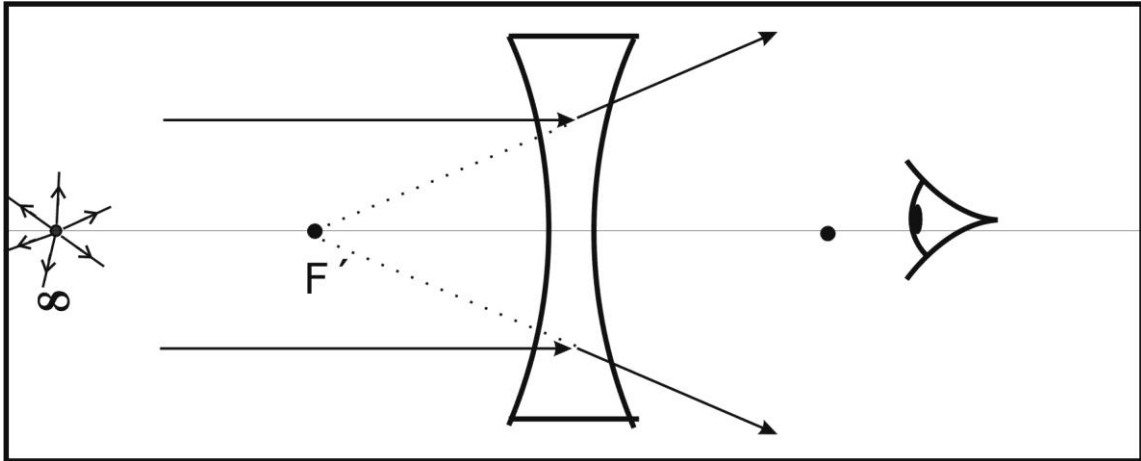


Imagen: Elaboración propia.

El profesor les explicará a los alumnos que la imagen que se forma es en todos los casos virtual. Es decir, sea cual sea la posición del objeto, no podemos encontrar su imagen en una pantalla.

El profesor puede realizar la experiencia con los alumnos colocando un foco puntual en distintas posiciones y observando que el haz de luz emergente sobre una pantalla siempre es divergente.

A.45. A partir de las observaciones anteriores completa los siguientes esquemas para clarificar gráficamente cómo se comportan las lentes divergentes:

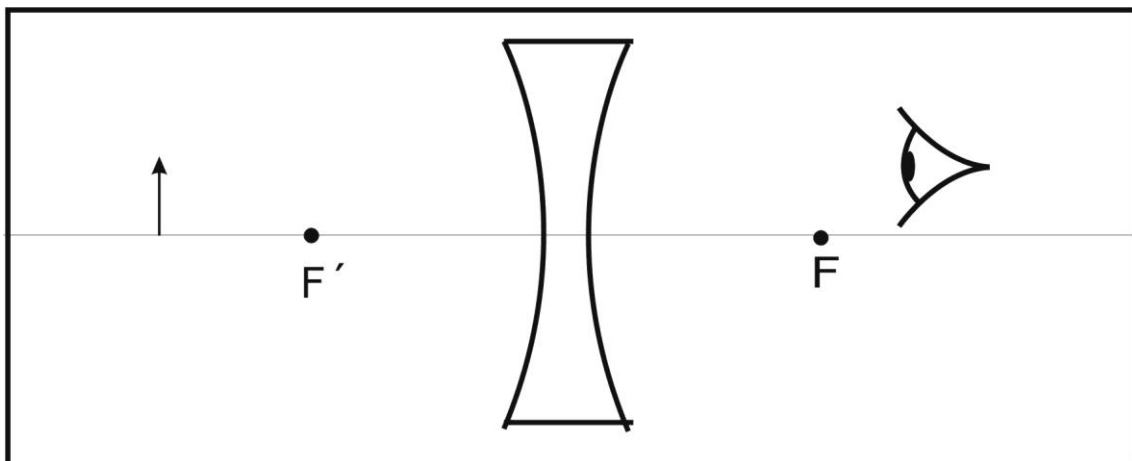


Imagen: Elaboración propia.

I. Queremos que los alumnos relacionen su experiencia con las lentes con el algoritmo del trazado de rayos que habíamos desarrollado previamente para expresar que le ocurre a la luz cuando interacciona con las lentes.

II. Esperamos que por extensión de lo que habían aprendido previamente con las lentes convergentes, algunos alumnos dibujen correctamente lo que le sucede a la luz.

También esperamos que un porcentaje de los alumnos tengan dificultades para comprender que la luz diverge al atravesar la lente, y que por tanto se formará una imagen virtual.

III. El profesor ayudará a los alumnos a relacionar la experiencia con las lentes divergentes con el trazado gráfico, y dicho trazado gráfico con el hecho de que la imagen que se forme sea virtual. Les propondrá el siguiente trazado:

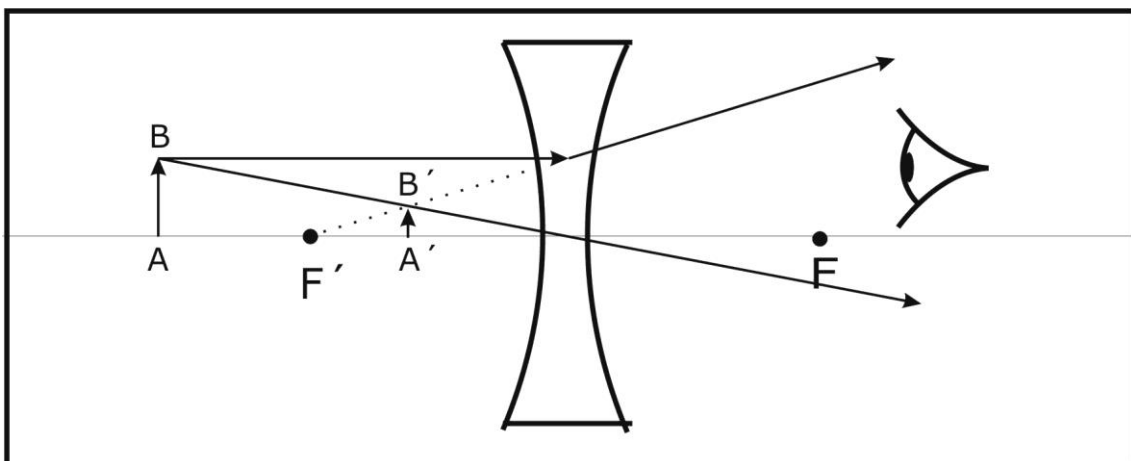


Imagen: Elaboración propia.

A.46. ¿Se cumple con este tipo de lentes la ecuación gaussiana de las lentes delgadas?

I. Queremos que los alumnos se familiaricen con el trazado gráfico necesario para las lentes divergentes, en función de las observaciones que habían hecho previamente con las lentes divergentes.

II. Esperamos que los alumnos comprendan el trazado gráfico de las lentes divergentes y su analogía con el trazado gráfico para el espejo convexo.

III. El profesor explicará que al igual que en la lente convergente, la luz que procede de puntos muy lejanos, del infinito, se concentra en el foco de la lente, pero en este caso el

foco está a la izquierda de la lente y por tanto la luz que sale de la lente parece proceder del foco, aunque nunca se va a concentrar realmente en el foco, se trata por tanto de un foco virtual.

Cuando utilicemos expresiones algebraicas deberemos utilizarlo con signo negativo para expresar que es un foco virtual.

Así mismo el profesor ayudará a los alumnos a realizar el trazado gráfico correspondiente a la formación de imágenes mediante una lente divergente. Ha de destacar que la imagen es virtual, es decir no hay una convergencia real de la luz en ningún punto. Además, la imagen es derecha y más pequeña.

El profesor indicará a los alumnos que comparen el trazado gráfico realizado para encontrar la imagen formada por una lente divergente con el trazado gráfico que realizaban para encontrar la imagen formada por un espejo convexo. El profesor ayudará a los alumnos a comprobar que son trazados simétricos, y por tanto, como la luz viaja igual en un sentido que en otro, la ecuación algebraica que utilizábamos para encontrar la imagen formada por un espejo convexo podemos utilizarla para encontrar la imagen formada por una lente divergente. El profesor comparará estos trazados gráficos que hemos realizado para las lentes divergentes con los de los espejos convexos que habíamos visto anteriormente.

El profesor indicará a los alumnos que en este caso también se cumple la ecuación Gaussiana de las lentes. El profesor explicará a los alumnos que en este caso el signo del foco objeto ha de ser negativo, pues la luz no pasa por el al atravesar la lente, es decir, es un foco virtual. Por tanto, las lentes divergentes tendrán dioptrías negativas.

El profesor explicará a los alumnos que las lentes divergentes siempre forman imágenes más pequeñas que el objeto.

(Opcional) Posteriormente el profesor indicará a los alumnos que a partir del siguiente trazado se pueden encontrar los siguientes triángulos semejantes:

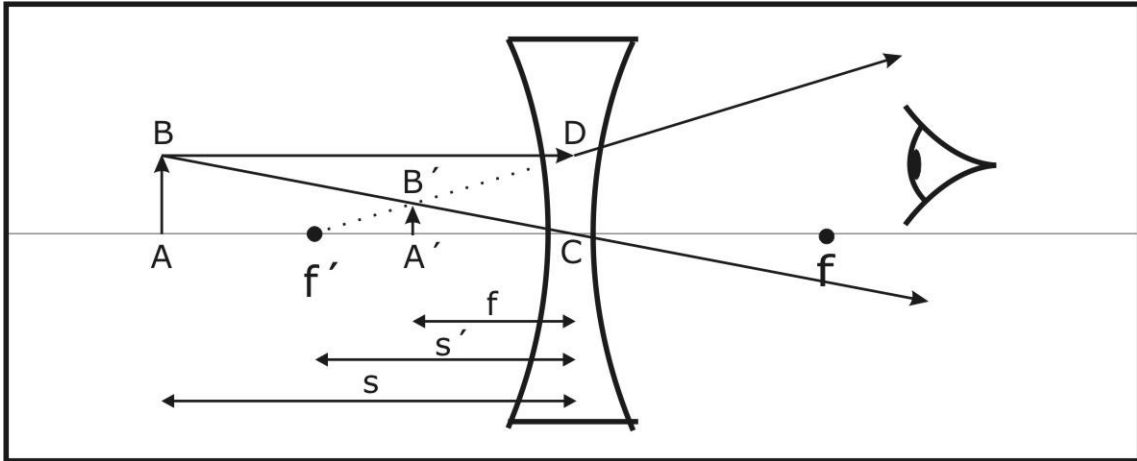


Imagen: Elaboración propia.

$A'B'C$ y ABC son triángulos semejantes, por tanto, podemos deducir que:

$$y/y' = s'/s$$

También encontramos que $F'DC$ y $F'B'A'$ son triángulos semejantes, de donde deducimos que:

$$y'/y = f' - s'/f'$$

Por tanto:

$$s'/s = f' - s'/f'$$

A partir de esta ecuación se deduce la expresión gaussiana para las lentes:

$$1/s + 1/s' = 1/f$$

A.47. a) Miramos a través de una lente divergente de -10 dioptrías a un círculo de 1 m de radio situado a 5 m de la lente. ¿Cómo veremos su imagen? Determina la distancia focal imagen, la posición de la imagen y su aumento lateral

b) ¿Cómo cambiará la imagen cuando acercamos el objeto a la lente? Realiza trazados gráficos que lo expliquen.

III. El profesor recordará a los alumnos que en este caso el signo del foco objeto ha de ser negativo, pues la luz no pasa por el al atravesar la lente, es decir, es un foco virtual. Es por ello que las lentes divergentes tienen dioptrías negativas.

El profesor explicará a los alumnos que las lentes divergentes siempre forman imágenes más pequeñas que el objeto.

3. Aplicaciones tecnológicas del modelo de visión.

El modelo de Kepler que hemos elaborado supone que la visión se produce cuando en la retina se forma una imagen del objeto y el ojo equivale a un sistema óptico formado por una lente convergente y una pantalla conectado con el cerebro. Con este modelo no sólo hemos explicado cómo se ven los objetos directamente sino, también, al mirarlos a través de espejos (planos o esféricos), a través de lentes, o cuando están sumergidos en otros medios transparentes.

Para elaborar estas explicaciones, hemos supuesto, y probado, que la luz que emite cada punto del objeto se propaga en línea recta en todas las direcciones, lo que supone que los rayos que limitan cualquier haz divergente considerado, se trazan como líneas rectas en los medios homogéneos. También hemos debido suponer que la luz se refleja al interaccionar con los espejos y se refracta, o cambia de dirección, en la superficie de separación de los medios que atraviesa. Estos cambios de dirección de cada rayo del haz divergente de luz cumplen las leyes de la reflexión y la refracción que hemos contrastado con medidas realizadas a partir de la visión en espejos o al mirar a objetos sumergidos.

A partir de los avances conseguidos estamos en disposición de estudiar qué anomalías pueden ocurrir en el ojo humano, a qué son debidas y, como consecuencia, cómo corregirlas.

3.3.1 La corrección de las anomalías visuales.

Antes de abordar este problema recordemos que el ojo humano es un cuerpo esférico de unos 2'5 cm de diámetro. La pupila, el orificio por el cual entra la luz, tiene un diámetro

entre 2 mm y 8 mm regulable en función de la intensidad de luz. La capa más externa del ojo, la esclerótica, se trata de una membrana blanca que en su zona anterior es abombada y transparente (córnea). La córnea es realmente la que produce casi toda la convergencia de los haces de luz incidentes. La luz penetra en el ojo a través de la córnea, atraviesa la pupila y el cristalino, una lente convergente que provoca otra convergencia, una especie de “ajuste fino” del haz, y consigue que la imagen se forme justamente en la retina. En la retina hay unas células receptoras de luz (llamadas conos y bastones) que generan a partir de la luz que les llega impulsos eléctricos que se propagan al cerebro a través del nervio óptico. Es en el cerebro donde se realiza principalmente la construcción de la imagen y se interpreta lo que vemos.

El ojo es un sistema complejo que nosotros hemos modelizado como un sistema óptico formado por una lente convergente y una pantalla.

Las anomalías visuales son pequeñas modificaciones del ojo real, las más frecuentes, debido a las cuales las personas no ven bien los objetos lejanos, son la miopía y la hipermetropía. La presbicia o “vista cansada”, aparece en las personas mayores de 45 años independientemente de que puedan tener otra anomalía y se manifiesta en la visión de cerca. Además de estas anomalías y unido a ellas, puede existir astigmatismo, cuando la córnea presenta irregularidades en su esfericidad. Ésta última anomalía visual no la estudiaremos en este curso debido a su gran complejidad geométrica.

Para ver bien un objeto lejano, es necesario que se forme una imagen del mismo en la retina que, como hemos estudiado, es una pantalla conectada con el cerebro a través del nervio óptico. Para un ojo emétrope (sin anomalía visual) el esquema de rayos para explicar la visión de un objeto lejano sería :(Osuna 2003-2008)

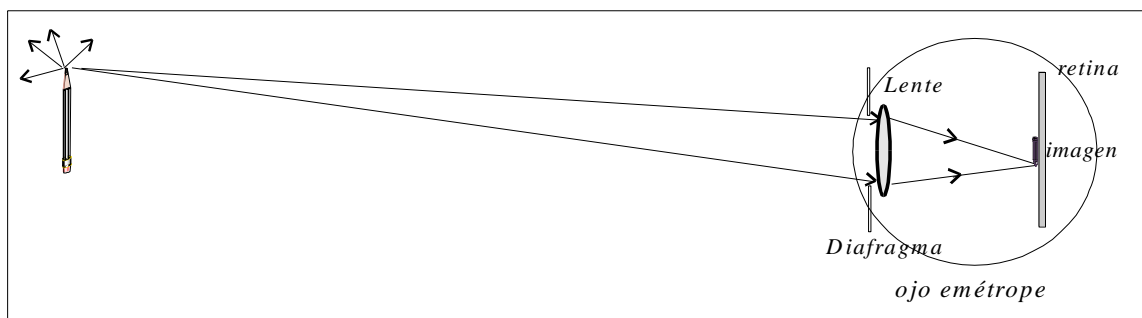


Imagen: (Osuna 2003-2008)

A.48. La miopía es la anomalía visual de los ojos cuya retina está a mayor distancia del cristalino que en el ojo emétrope. Dibuja en el esquema un diagrama de rayos que explique la visión de un ojo miope de un objeto alejado (en el esquema está señalada con línea discontinua la posición de la retina del ojo emétrope). ¿Por qué los miopes ven borrosos los objetos alejados?

Imagen: (Osuna 2003-2008)



I. Queremos que los alumnos comprendan las diferencias entre un ojo miope y otro emétrope para formar la imagen en la retina. Queremos que comprendan por qué un ojo miope forma una imagen borrosa.

II. Creemos que con las explicaciones del profesor los alumnos podrán realizar el trazado gráfico correspondiente. También esperamos que algún porcentaje de alumnos necesite la ayuda del profesor para poder plasmar sus ideas en un trazado gráfico.

III. El profesor debe ayudar a los alumnos a relacionar la incapacidad del ojo miope para ver bien con el hecho de que su retina se haya más alejada del cristalino que la retina de un ojo emétrope. Les explicará que no se forma una imagen puntual de cada punto del objeto iluminado, sino un círculo. Entre estos círculos se producen intersecciones, dando lugar a que a un mismo punto de la retina le llegue luz de distintos puntos del objeto, lo que explica la sensación de “ver borroso”

Debe de relacionar siempre la realidad física con el trazado gráfico para que los alumnos tengan siempre presente que el algoritmo que utilizan es un representación de lo que sucede en el ojo. Propondrá a los alumnos el siguiente trazado:

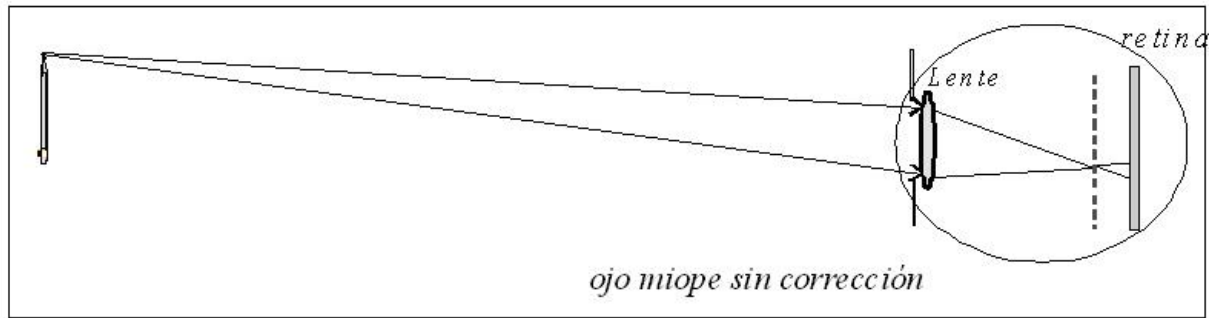


Imagen: (Osuna 2003-2008)

A.49. Dado que la distancia lente-retina no puede ser modificada, propón una solución óptica para la corrección de la miopía.

- I. Queremos que los alumnos comprendan que se puede corregir la miopía utilizando lentes divergentes.
- II. Esperamos que los alumnos comprendan esta corrección ya que previamente se habían familiarizado con la utilización de las lentes divergentes.
- III. El profesor debe ayudar a los alumnos con el trazado gráfico. El profesor propondrá a los alumnos la siguiente corrección para la miopía mediante la utilización de lentes divergentes:

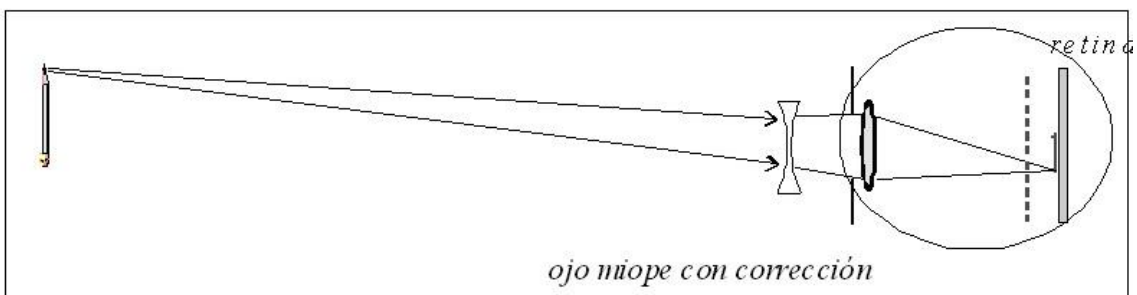
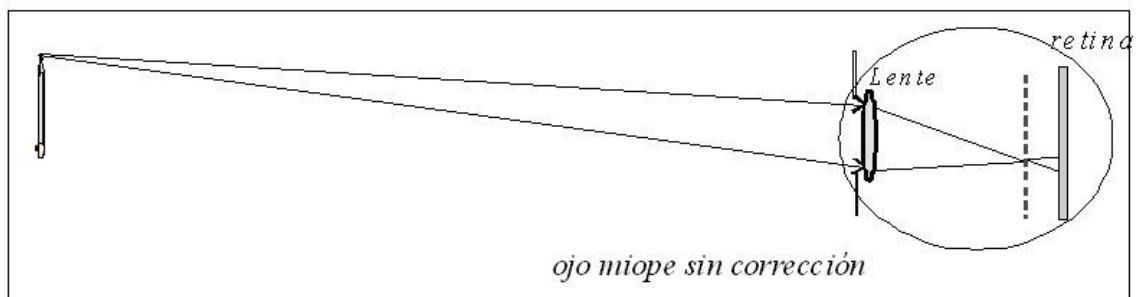


Imagen: (Osuna 2003-2008)

A.50. (ampliación). ¿Cómo graduarías a una persona con miopía? ¿Qué lente le dirías que tiene que utilizar?

III. El profesor debe de explicar a los alumnos que las personas que tienen miopía no ven correctamente los objetos lejanos. Sin embargo, los objetos que están cerca si los ven bien. En primer lugar, habría que calcular cual es el punto próximo de la persona (es decir el punto en el que comienza a ver correctamente).

Una vez conocido dicho punto, la persona necesitaría una lente divergente que formara la imagen a dicha distancia de la lente (recuerda que la imagen formada por una lente divergente es virtual). Por tanto, el punto próximo que hemos calculado antes sería la distancia s' .

Si aplicamos ahora la ecuación de las lentes que hemos estudiado:

$$1/s + 1/s' = 1/f$$

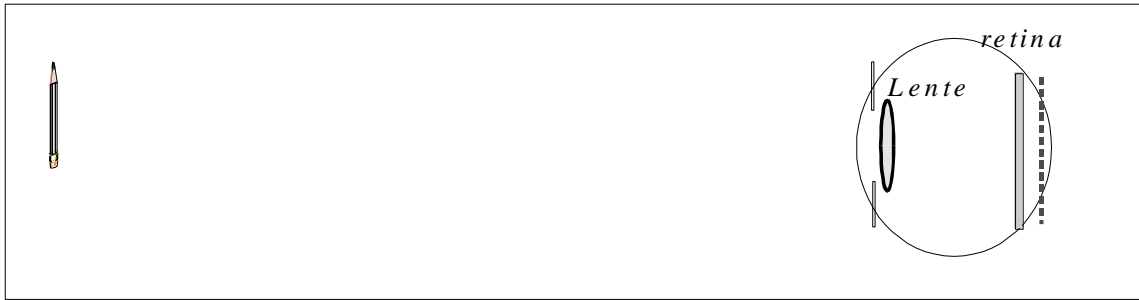
$$1/s + 1/s' = P$$

La distancia s es infinito, la distancia s' es el punto próximo, pero como es virtual, debemos ponerla con signo negativo. Entonces podemos calcular cuan ha de ser la potencia de la lente, es decir las dioptrías de la lente que debemos recomendar a la persona.

El profesor ha de destacar que la potencia será negativa, como corresponde a las lentes divergentes.

A.51. La hipermetropía es la anomalía visual de los ojos cuya retina está a menor distancia del cristalino que en el ojo emétrope. Dibuja en el esquema un diagrama de rayos para la visión de un objeto alejado. ¿Por qué los hipermétropes ven borrosos los objetos alejados? (Osuna 2003-2008).

Imagen: (Osuna 2003-2008)



I. Queremos que los alumnos comprendan que ocurre en los ojos hipermétropes y por qué estos no pueden ver bien un objeto alejado.

II. Creemos que los alumnos comprenderán que la imagen se ve borrosa al no situarse la retina en el lugar en el que se forma la imagen. Al haber realizado previamente la actividad del ojo miope, creemos que tendrán menos dificultades para realizar el trazado gráfico correspondiente.

III. El profesor debe relacionar esta actividad con la anterior y proponer el siguiente trazado gráfico a los alumnos:

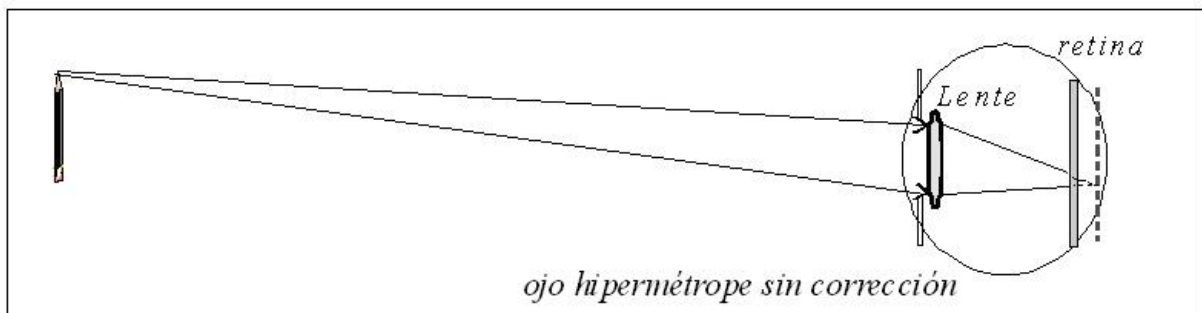


Imagen: (Osuna 2003-2008)

A.52. Dado que la distancia lente-retina no puede ser modificada, propón una solución óptica para la corrección de la hipermetropía.

I. Esperamos que los alumnos integren lo aprendido hasta ahora acerca de lentes convergentes con su vida diaria. Es una aplicación directa del estudio de la óptica a la mejora de las condiciones de vida del ser humano.

II. Esperamos que con lo aprendido hasta ahora acerca de las lentes los alumnos comprendan esta corrección de la hipermetropía. Es muy importante que los alumnos

comprendan que la lente divergente utilizada en la corrección óptica del ojo miope tiene unas propiedades ópticas contrarias a las de la lente convergente.

III. El profesor ayudará a los alumnos a encontrar la manera de corregir el ojo emétrope. El profesor proporcionará a los alumnos el siguiente trazado gráfico:

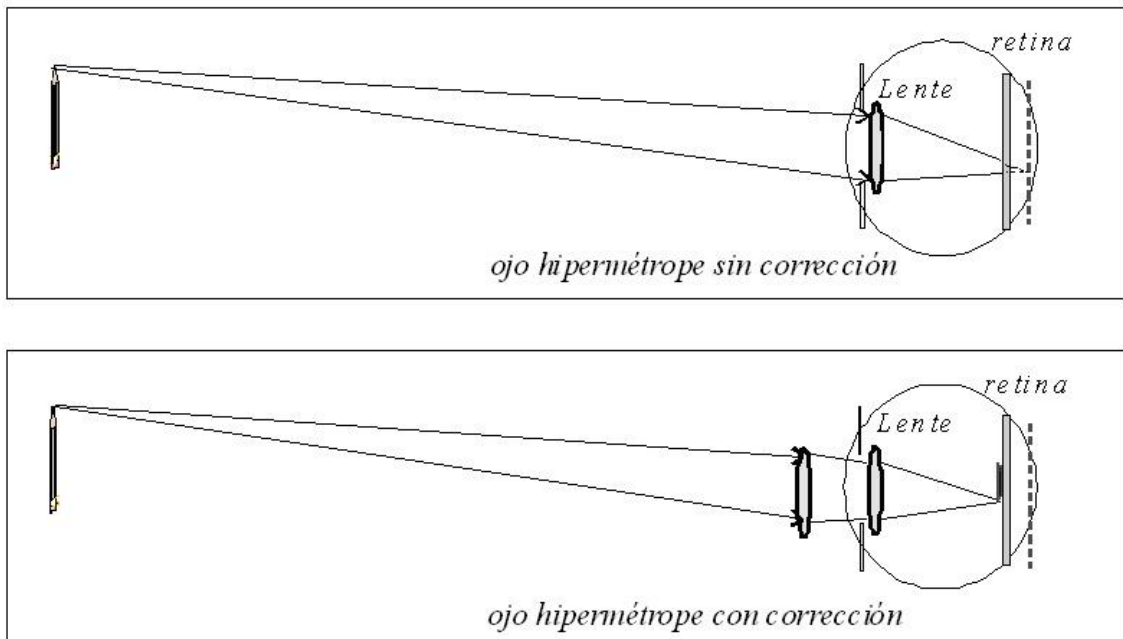


Imagen: (Osuna 2003-2008)

Además de la miopía y la hipermetropía, a partir de los 45 años de edad, aproximadamente, aparece la presbicia o “vista cansada” ya sea el ojo emétrope o con anomalía visual (miope o hipermetrope). Cuando un ojo emétrope o corregido con gafas adecuadas para ver de lejos, no ve bien de cerca se dice que tiene presbicia o “vista cansada”. Cuando estudiamos el sistema óptico lente convergente-pantalla como modelo de ojo humano, llamamos la atención de que, para formar una imagen en una pantalla situada a una distancia fija, la lente debe tener capacidad de variar su curvatura para aumentar el poder de convergencia de los haces de luz y ver nítido a diferentes distancias. Este fenómeno, denominado acomodación, lo realiza en el ojo humano la lente del cristalino y se representa en el esquema siguiente:

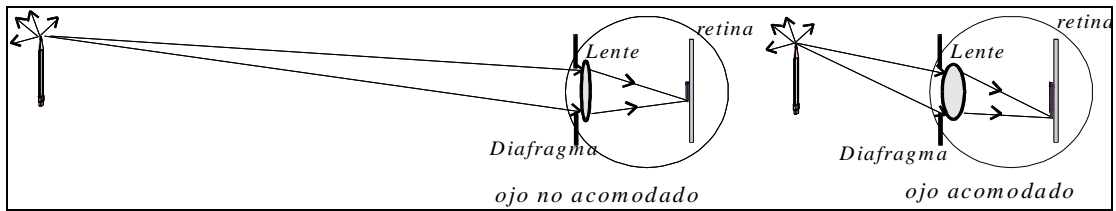


Imagen: (Osuna 2003-2008)

A.53. El esquema siguiente representa un ojo présbita, en el que el cristalino no aumenta su curvatura al mirar a los objetos cercanos. Dibuja en él un diagrama de rayos y explica por qué ve borroso. (Osuna 2003-2008).

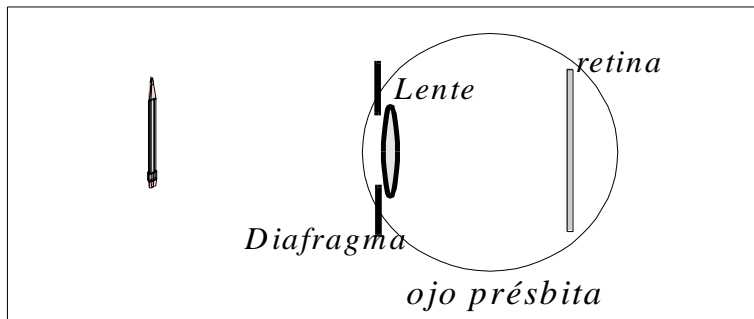


Imagen: (Osuna 2003-2008)

I. Queremos que los alumnos comprendan que, si el cristalino no se puede acomodar, es decir variar su curvatura para hacerse más convergente al mirar objetos cercanos, la imagen no se formará correctamente.

II. Esperamos que los alumnos comprendan que si la lente (el cristalino) no es lo suficientemente convergente, entonces la imagen no se formará en la retina, estará más alejada.

III. El profesor debe de proponer el siguiente trazado gráfico, relacionando el poder de convergencia de la lente, con la capacidad de adoptar cierta curvatura del cristalino, y su incapacidad en el caso del ojo présbita:

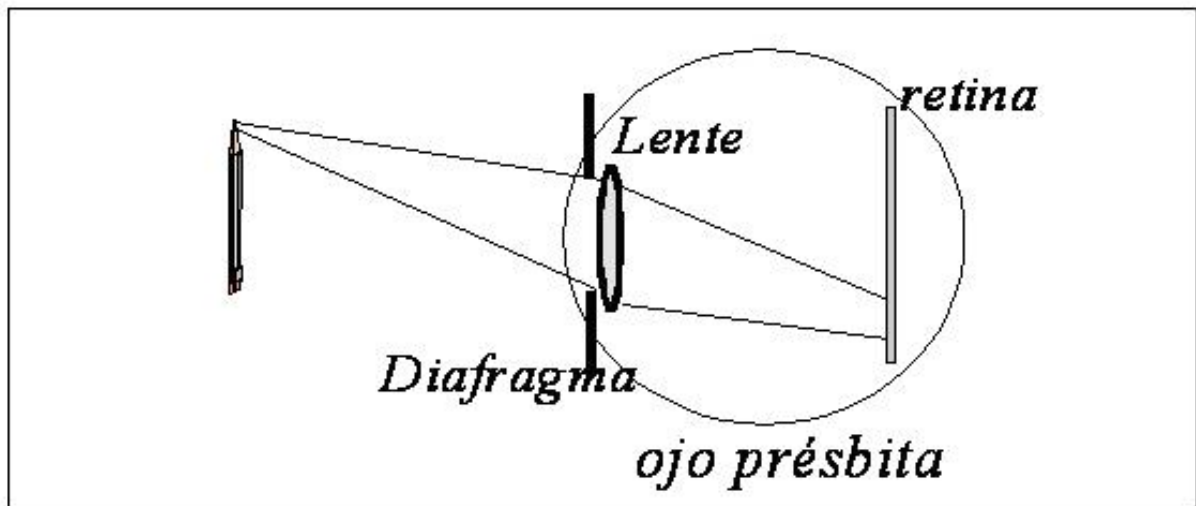


Imagen: (Osuna 2003-2008)

A.54. Propón una solución óptica para corregir la presbicia.

I. Queremos que los estudiantes tengan oportunidad de aplicar los conocimientos construidos para la comprensión de las anomalías visuales y su corrección óptica.

III. El profesor ayudará a los alumnos a comprender que si en el caso del ojo presbita, la lente del cristalino no puede aumentar su poder de convergencia al mirar a un objeto cercano, el haz de luz procedente de cada punto del mismo convergerá en un punto detrás de la retina. Por ello, la corrección del ojo presbita se realizará con lentes convergentes que equilibren el déficit de convergencia del cristalino.

3.3.2 (ampliación) El diseño y construcción de instrumentos de ampliación de la visión.

Además de las gafas para la corrección de las anomalías visuales, otra aplicación tecnológica del modelo de visión, de gran impacto social y científico, es el telescopio. El telescopio fue desarrollado a partir del siglo XVI como una herramienta de uso habitual en el campo militar y en el científico, sobre todo en astronomía. Sin embargo, al principio, su aceptación tuvo dificultades ya que las observaciones que se hacían con él cuestionaban las teorías del Universo hasta entonces aceptadas. Se sabe, por ejemplo, que, con un telescopio construido por él, Galileo observó cuatro satélites de Júpiter y

probó que tenían órbitas alrededor del planeta, lo que contradecía las ideas aceptadas en esa época de que todos los astros giraban alrededor de la Tierra. Por otro lado, la ausencia de un modelo de visión que explicara su funcionamiento, hacía que se desconfiara de lo que no era visto a “simple vista”.

A.55. Si deseamos ver una imagen al mirar a través de una lente hacia un objeto lejano, ¿qué tipo de lente deberíamos utilizar para verla del mayor tamaño posible? Dibuja un esquema que explique la visión de esta situación. Una vez obtenida la imagen cercana de un objeto lejano, ¿cómo podríamos verla aumentada?

I. Queremos que los alumnos comprendan que, si queremos ver la imagen de un objeto lejano al mayor tamaño posible, tendremos que utilizar una lente con una distancia focal grande, es decir, una lente de pocas dioptrías. Posteriormente, para poder aumentar el tamaño de la imagen creado por la primera lente, es necesario utilizar otra con gran poder de convergencia, o utilizar una lente convergente funcionando como lupa.

II. Esperamos que con los trazados gráficos adecuados los alumnos se den cuenta de que, con una lente de distancia focal pequeña, se obtiene una imagen muy cerca del foco, es decir cerca de la lente, y de tamaño muy pequeño. Sin embargo, con una lente de mayor distancia focal, la imagen que se obtiene es de mayor tamaño y está más alejada de la lente.

III. El profesor debe ayudar a los alumnos a realizar diferentes trazados gráficos para comprobar que tipo de lentes se ajusta más a sus necesidades. Puede proponer a los alumnos que realicen el trazado gráfico para la obtención de la imagen de un objeto lejano con un lente de distancia focal pequeña y con otra de distancia focal grande. Así los alumnos verán gráficamente las diferencias en el tamaño de la imagen.

A.56. El telescopio de Kepler consiste en una combinación de dos lentes convergentes: el objetivo, que consigue formar una imagen cercana del objeto lejano y el ocular, que actúa como una lupa para ver aumentada la imagen formada por el objetivo. Realiza un diagrama que explique el funcionamiento de este telescopio y construye uno con las

lentes suministradas por el profesor. ¿Qué características tiene la imagen que se ve? (Osuna 2003-2008).

I. Una vez que los alumnos han construido el telescopio en la actividad anterior y se han familiarizado con su funcionamiento, ahora buscamos que proyecten los conocimientos prácticos adquiridos y puedan realizar el trazado gráfico que muestra el comportamiento de la luz para formar la imagen que vemos a través del telescopio. Queremos que los alumnos combinen correctamente el trazado gráfico de la imagen formada por la primera lente convergente, y que utilicen la imagen formada por la primera lente como objeto para la segunda lente.

II. Esperamos que con la ayuda del profesor realicen y comprendan el trazado gráfico adecuado para explicar el comportamiento de la luz al atravesar un telescopio. Quizás tengan dificultades al realizar por primera vez el trazado gráfico de la imagen formada por el telescopio.

III. El profesor debe recordar a los alumnos las características de las lentes que están utilizando y ayudarles a realizar el trazado gráfico, resaltando la posición y el tamaño de la imagen que se forma a partir de cada una de las lentes.

El profesor debe de ayudar a los alumnos a realizar el trazado gráfico si estos muestran dificultades. Debe de recordarles que la imagen formada por la primera lente, lente objeto, será el objeto para la segunda lente, lente ocular.

En síntesis, el telescopio de Kepler consiste en un sistema de dos lentes convergentes: la primera de ellas, el objetivo, es una lente convergente casi plana. Esta lente al tener poco poder de convergencia formaría, de un objeto alejado, una imagen de gran tamaño en una pantalla alejada. Una lente de 1 dioptría, que es una lente habitual en la corrección de la visión, formaría la imagen de un objeto alejado a 1 m de distancia y una lente convergente de 2 dioptrías a 0'5 m de distancia. La imagen formada por esa lente se puede ver sin pantalla si situamos el ojo detrás de ella en la dirección de propagación de la luz. Una segunda lente actuará como lupa, aumentando el tamaño de la imagen obtenida a partir de la primera lente.

A.56.1. Con las indicaciones que aportamos en las siguientes actividades y con materiales baratos y fáciles de conseguir, se puede construir un telescopio del tipo que construyó Kepler (Osuna 2003-2008).

I. Queremos que los alumnos con la ayuda del profesor puedan montar un telescopio del estilo del que construyó Kepler y se familiaricen con las lentes utilizadas y sus características.

II. Esperamos que con la ayuda del profesor los alumnos comprendan el funcionamiento del telescopio de Kepler y se familiaricen con las lentes utilizadas

III. El profesor debe de explicar a los alumnos como construir un telescopio tipo. Para ello en primer lugar les dirá a los alumnos que peguen una lente convergente de dos dioptrías en el extremo de un tubo de cartón del mismo diámetro de la lente y de una longitud de algo más de 60 cm. Pedirá a los alumnos que se sitúen en la posición del esquema y que comprueben las características de la imagen que se ve al mirar a un objeto lejano.

El profesor explicará a los alumnos que para poder ver con mayor aumento esa imagen, podemos mirarla con una lupa. Se pueden encontrar lupas baratas de 10 dioptrías en el mercado. También se puede obtener una buena lupa (aunque de muy poco diámetro) extrayendo la lente de una cámara fotográfica desechable.

El profesor comentará a los alumnos que estas lentes son de unas 33 dioptrías y tienen el foco a unos 3 cm (distancia focal 0,03 m). Recordará a los alumnos que para que la lente que se coloca en el ocular, funcione como lupa, la imagen obtenida con el objetivo debe estar situada entre el foco del ocular y el ocular.

Explicará a los alumnos que se pueden ajustar las distancias, o enfocar, montando el ocular en un tubo de diámetro más pequeño que se pueda mover hacia delante y hacia atrás dentro del otro tubo. Es muy importante para obtener una buena visión que los centros de las lentes estén alineados.

Otro instrumento de interés es el microscopio. Pensemos en lo que supuso este instrumento en el desarrollo de, por ejemplo, la biología y la medicina.

A.57. Si deseamos ver una imagen real, del mayor tamaño posible, de un objeto pequeño y cercano, ¿qué tipo de lente deberíamos utilizar? Dibuja un esquema que explique la visión de esta situación. Una vez obtenida la imagen aumentada de ese pequeño objeto, ¿cómo podemos verla aumentada aún más?

I. Queremos que los alumnos se den cuenta mediante los trazados gráficos adecuados, de que necesitaríamos una lente con una focal grande, que formaría la imagen en una posición lejana a la lente y de tamaño mayor que el inicial.

II. Esperamos que con la ayuda del profesor los alumnos comprendan que tipo de lente necesitan.

III. El profesor debe ayudar a los alumnos a realizar los diferentes trazados gráficos aclaratorios.

A.58. Un microscopio consiste en una combinación de dos lentes convergentes: el objetivo, con el que se forma una imagen real aumentada de un pequeño objeto y cercano, y el ocular, que actúa como una lupa para ver aumentada la imagen dada por el objetivo. Realiza un diagrama que explique el funcionamiento de un microscopio y construye uno con las lentes suministradas por el profesor.

I. Queremos que los alumnos realicen, con ayuda del profesor, un trazado gráfico adecuado que represente la trayectoria que sigue la luz para formar la imagen final que proporciona el microscopio.

II. Esperamos que los alumnos comprendan los trazados gráficos que explican la trayectoria seguida por la luz.

III. El profesor proporcionará a los alumnos las lentes adecuadas para poder construir un microscopio, y les ayudará a realizar las observaciones necesarias. El profesor les propondrá el siguiente trazado:

MICROSCOPIO

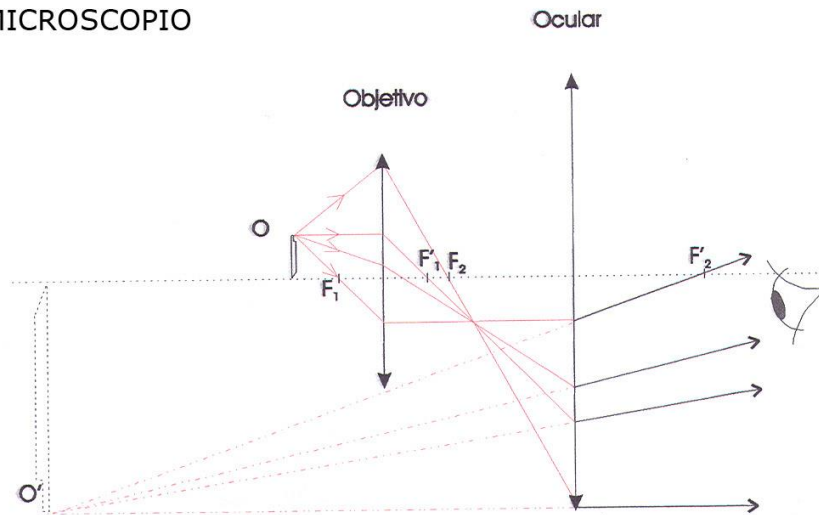


Imagen: Osuna (2007).

A.59. Realiza una recapitulación del tema, resaltando cuál era el problema que hemos abordado, las ideas más importantes introducidas, los límites de aplicación que tiene el modelo de visión de Kepler y los nuevos problemas que podemos abordar después de elaborar un modelo geométrico de comportamiento de la luz en la visión.

I. Queremos que los alumnos hagan una labor de construcción de conocimiento, al recordar lo que han ido aprendiendo a lo largo de la unidad.

II. Esperamos que los alumnos puedan comprender la evolución de su conocimiento en óptica como ciencia de la visión a lo largo de la unidad.

III. El profesor ayudará a los alumnos a recordar las diferentes actividades que han ido haciendo a lo largo de la unidad para favorecer que los alumnos puedan hacerse un esquema mental de lo que sabían y de lo que han aprendido.

A.60. ¿Qué límites de aplicación tiene nuestro modelo de visión?

I. Queremos que los alumnos comprendan que, aunque nuestro modelo de visión nos ha servido para explicar numerosas situaciones, hay algunas que no podemos explicar con él. Queremos que los alumnos comprendan la validez relativa de los modelos en ciencia.

II. Esperamos que los alumnos propongan algunas situaciones en las que nuestro modelo no explica lo que se ve. Esperamos que comprendan que los modelos científicos tienen un límite de aplicabilidad.

III. El profesor favorecerá la aparición de situaciones que nuestro modelo de visión no pueda explicar. Debe explicar a los alumnos que, en ciencia, la construcción de modelos es necesaria para poder estudiar parcelas de la realidad, pero, por otra parte, es insuficiente con un modelo para abarcar el estudio completo de la realidad, y debemos por tanto servirnos de diferentes modelos, según sea la parcela de realidad a que nos enfrentamos.

4. Problemas abiertos relacionados con los límites del modelo de visión de Kepler.

Límites relacionados con los límites del modelo de visión de Kepler: necesidad de utilizar lentes delgadas, halos de colores, fisiología del ojo y del cerebro, paradojas visuales. A partir de estos problemas, podríamos plantearnos los siguientes interrogantes: ¿Qué es la luz? ¿Qué son los colores? ¿De qué está hecha la luz? ¿Cuál es el límite de resolución del ojo?

I. Queremos que los alumnos sean conscientes de que nos queda todavía mucho que aprender sobre la óptica como ciencia de visión. Además, queremos que se pregunten sobre la naturaleza de la luz. Intentamos preparar la introducción para la siguiente unidad.

II. Esperamos que los alumnos comprendan los límites de nuestro modelo y sientan la necesidad de utilizar otro modelo para explicar otro tipo de fenómenos.

III. El profesor debe ayudar a los alumnos a comprender que nuestro modelo solamente explica una parte de la óptica y que necesitamos la ayuda de otro modelo que explica la naturaleza de la luz para poder estudiar más en profundidad otros fenómenos.

Resumen de las principales ideas sobre cómo vemos

El objetivo fundamental de la óptica es encontrar una respuesta al problema de cómo vemos. En nuestra estrategia propusimos, en un primer tema, buscar explicaciones a la visión humana a partir del tratamiento geométrico de la luz, sin considerar el problema de su naturaleza. Avanzaremos en esta estrategia intentando elaborar un modelo que explique cómo vemos los objetos al mirarlos directamente. Con posterioridad lo pondremos a prueba en situaciones de visión indirecta y en la comprensión y corrección de las anomalías visuales, incluso de los instrumentos ópticos. Conforme avancemos en este estudio y analicemos las limitaciones del modelo geométrico elaborado, deberemos, en un segundo tema, estudiar la naturaleza de la luz y analizar las simplificaciones hechas en el mismo.

Para explicar cómo vemos los objetos al mirarlos directamente hemos estudiado:

Hasta ahora, hemos intentado elaborar un modelo de visión que explique cómo vemos los objetos al mirarlos directamente. Para ello hemos seguido la siguiente estrategia:

En primer lugar, hemos analizado el comportamiento del objeto que vemos, de la luz, y del ojo del observador.

Una vez establecidas estas relaciones, hemos intentado comprender qué hace el ojo con la luz que le llega, para poder explicar así cómo vemos.

El modelo de visión que hemos construido, está basado en el publicado por el científico y astrónomo Johannes Kepler en 1604. En su trabajo, Kepler, cuestionó ideas existentes desde la época de los científicos naturalistas griegos, e introdujo ideas muy novedosas y válidas, que resumimos a continuación:

- Los objetos que vemos son fuentes secundarias de luz.
- Las fuentes luminosas extensas se pueden considerar como conjuntos de fuentes luminosas puntuales.

- Desde cada fuente puntual se emite un haz esférico de luz. Los rayos (líneas rectas para representar la luz) no son nada de la propia luz, sólo indican los límites del haz de luz que se considere.

- El ojo humano funciona como un sistema óptico formado por una lente convergente y una pantalla.

- Para ver bien, es necesario formar una imagen en la retina. La imagen se forma de la siguiente manera: cada haz divergente de luz emitido por cada punto del objeto, después de entrar en el ojo, converge hasta un punto de la retina. Como en cada punto de la imagen se concentra parte de la luz emitida por cada punto del objeto, la forma y tamaño de la imagen que percibimos es una réplica a escala del tamaño y forma del objeto que vemos. Por estudios fisiológicos se sabe que el llamado “punto” imagen de la retina ocupa, en realidad, la superficie de tres células específicas retinianas (o conos). Si la mancha luminosa producida en esa pantalla es menor que esa superficie, nuestro ojo la interpretará como un punto imagen. Lo que supone un límite en la capacidad de resolución de nuestro ojo.

- Para ver bien los objetos cercanos, la lente del cristalino aumenta su curvatura (acomodación) con lo que los haces de luz acaban convergiendo y formando la imagen en esa misma pantalla (la retina).

- La imagen que se forma en un sistema lente convergente-pantalla es real e invertida. Aparece, pues, una limitación de este modelo de visión pues se hace necesario la participación del cerebro, conectado con la retina por el nervio óptico, para interpretar la sensación que tenemos de la visión derecha de los objetos.

Además, estudiando en profundidad el sistema óptico lente convergente-pantalla, hemos encontrado unos elementos característicos que ayudan al trazado geométrico de los haces que atraviesan la lente y que ayudan a localizar dónde situar la pantalla para ver la imagen. Estos son: eje óptico, Foco objeto (F), Foco imagen (F') y Centro óptico de la lente (C).

A partir de esos elementos característicos de la lente delgada podemos realizar un trazado gráfico del que deducir una expresión matemática que relacione la posición del punto objeto(s), la posición de la pantalla donde vemos su imagen (s'), y la distancia focal de la

lente (f'): $\frac{1}{s} + \frac{1}{s'} = \frac{1}{f'}$. Esta expresión es conocida como la ecuación de Gauss para las lentes delgadas.

De la misma forma hemos podido deducir que en un sistema lente convergente-pantalla la relación entre el tamaño de la imagen y del objeto está relacionada por la expresión:

$$\beta = \frac{y'}{y} = -\frac{s'}{s}$$

Queda aún poner a prueba el modelo de visión elaborado para estudiar en qué medida es capaz de explicar las situaciones de visión indirecta (cuando miramos a un espejo, a un objeto sumergido, cuando miramos a través de las lentes) e incluso si podemos comprender por qué se producen y cómo se corrigen las anomalías visuales y algunas otras aplicaciones tecnológicas.

Por último, debemos realizar una revisión del modelo para recopilar las limitaciones que hemos encontrado en la explicación de las diferentes situaciones de visión.

ÓPTICA FÍSICA

A.1. Realiza “*Experimentum crucis*” en el laboratorio y formula una hipótesis sobre qué es la luz “blanca”.

Queremos que los alumnos sean conscientes de que hay fenómenos que no hemos explicado en la unidad de óptica geométrica y que necesitan explicación. Pretendemos que los alumnos relacionen experiencias de la vida cotidiana con el fenómeno de la descomposición de la luz blanca, por ejemplo, la formación de halos coloreados en el arco iris, en una mancha de grasa, en un CD, etc.

Esperamos que los alumnos después de realizar el experimento formulen la hipótesis de que la luz “blanca” es de naturaleza heterogénea, es decir, está formada por varios tipos de luz, que al incidir en una pantalla nos proporcionan la sensación de ver los colores que conforman el arco iris. Esperamos que comprendan que no es el medio el que modifica la

luz blanca (como sostenían algunas teorías en la época de Newton), sino que la función del prisma es la dispersión de estos tipos de luz.

El profesor describirá en primer lugar en qué consiste la experiencia de Newton, su “*Experimentum crucis*”. Para ello mediante un proyector y un prisma mostrará como la luz blanca se separa en la mezcla de colores característica del arco iris. El profesor explicará a los alumnos que se puede recoger el “arco iris” a ambos lados del prisma, uno es debido a la refracción y otro a la reflexión interna (más débil). Posteriormente el profesor contará a los alumnos como Newton quiso probar que la luz era una mezcla heterogénea de colores; y por tanto si hacíamos pasar la luz por un prisma que hacía que se descompusiera en la mezcla de colores, y después por otro prisma colocado en dirección contraria de manera que a partir de la mezcla de colores se obtuviera la luz blanca, demostraría que la luz blanca es en sí misma una mezcla heterogénea de colores. El profesor destacará que éste fue un experimento clave para rebatir la hipótesis de que eran los medios los que modificaban la luz, creando los colores. Introducirá a los alumnos el problema histórico de la naturaleza de la luz.

A partir de ahora podemos simplificar nuestro problema. Dado que la luz “blanca”, es decir la luz que nos llega del sol o de una bombilla, puede considerarse de naturaleza heterogénea, ahora podemos plantearnos las siguientes preguntas: ¿Qué son cada tipo de luz? ¿En qué se distingue un tipo de luz de otra? ¿Cómo se ven los colores?

A.2. El observador ve en las pantallas P1 y P2 círculos iluminados independientemente de que los focos F1 y F2, cuyas luces se cruzan en el espacio, se enciendan simultáneamente, o de uno en uno. Este fenómeno ocurre con cualquier tipo de luz que sea emitida por los focos. Formula una hipótesis sobre la naturaleza de la luz que explique que los haces de luz se crucen sin producir perturbación en la mancha que se ve en las pantallas.

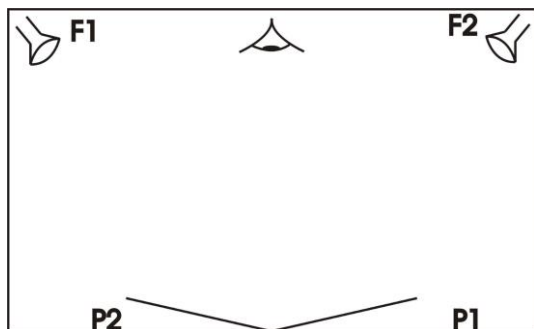


Imagen: Elaboración propia.

¿Qué puede ser la luz para que se cruce sin perturbarse?

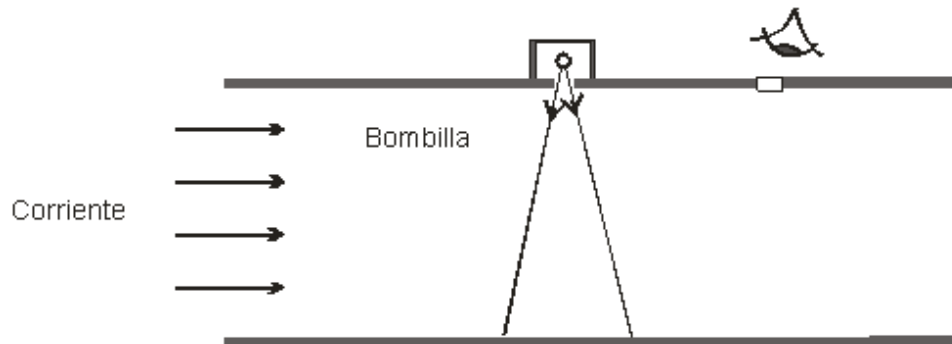
Con esta actividad pretendemos que los alumnos lleguen a la conclusión de que la luz no puede ser de naturaleza corpuscular, es decir material, porque si no al cruzarse las partículas chocarían y de alguna manera se desviarían afectando al patrón de luces que se vería en cada caso. Esperamos que un porcentaje apreciable de alumnos sostengan una concepción material de la luz.

El profesor inducirá a los alumnos a reflexionar para que lleguen por si mismos a la conclusión de que la luz no puede consistir en partículas materiales. Ayudará a los alumnos recordándoles qué otros fenómenos en los que se intercambia energía suceden sin transporte de materia. Intentará que los alumnos recuerden las características principales del movimiento ondulatorio que habían estudiado previamente.

A.3. A pesar de la hipótesis ondulatoria que formuló Christiaan Huygens (1629-1695) sobre la naturaleza de la luz, muchas personas pensaban y siguen pensando en la luz como algo material. Si la luz consistiera en algo material emitido por las fuentes, ¿qué fenómenos cabría esperar como consecuencia de esta concepción?

A. 3. (Alternativa) En el exterior de una tubería hay dos ventanas transparentes. Por una de ellas, una lámpara deja pasar un haz divergente de luz como el dibujado en el esquema. Por la otra ventana, un observador puede ver la zona iluminada en la pared opuesta de la tubería, tanto si está llena de agua como llena de aire. Con una potente bomba, situada en el extremo izquierdo, podemos hacer que circule agua o aire por la tubería de forma muy rápida y sin turbulencias.

En ningún momento el haz de la luz que atraviesa la tubería pasa del aire al agua o viceversa, sino que se propaga en un único medio, o en el aire o en el agua. (Osuna, 2007)



¿Qué ocurrirá con la posición de la mancha luminosa que vemos en la pared de la tubería? Señala la opción que creas correcta:

- Tanto la corriente de aire como la corriente de agua hacen que la mancha luminosa que veíamos antes de iniciarse el movimiento del medio se desplace de su posición original
- La corriente de aire no hace que se desplace la mancha luminosa pero la corriente de agua sí
- Ni la corriente de aire ni la corriente de agua hacen que se desplace la mancha luminosa
- La luz está formada por un tipo de materia tan sutil que no se arrastra por la corriente de aire ni por la de agua, pero sí por otro tipo de materia más densa
- Otra respuesta:

Argumenta la opción elegida.

Queremos comprobar si algunos alumnos siguen teniendo la idea de que la luz pueda estar formada por pequeños corpúsculos, es decir, si siguen manteniendo una concepción materialista de la luz.

Esperamos que la mayoría de alumnos conteste que la sombra no sería modificada por la corriente de aire o agua. Creemos que con esta actividad se pone de manifiesto que la luz no puede ser de naturaleza corpuscular. Esperamos, por tanto, que los alumnos acepten en su esquema de pensamiento como hipótesis de trabajo que la luz tiene carácter ondulatorio.

El profesor debe de explicar a los alumnos el largo e intenso debate que se produjo en la comunidad científica a lo largo de muchos siglos acerca de si la luz estaba formada por algún tipo de materia o no. Debe de aclarar a los alumnos que la sombra no se modificaría, porque el agua y el aire no interaccionan con la luz, ya que la luz no es material.

Esta hipótesis ondulatoria para la naturaleza de la luz, que se nos muestra razonable debe ser contrastada, para ello proponemos el siguiente índice a modo de estrategia:

ÍNDICE DE LA U. D. ¿Cuál es la naturaleza de la luz?

1. ¿Es el comportamiento de la luz de naturaleza ondulatoria?

1.1. ¿Qué fenómenos confirman esta hipótesis?

1.1.1 Interferencia de ondas lumínicas

1.1.2. Difracción de ondas lumínicas

1.1.3. Atenuación de ondas lumínicas

1.1.4. Velocidad de las ondas lumínicas. La luz no es instantánea.

1.1.5. Refracción de las ondas lumínicas.

1.1.6. Reflexión de las ondas lumínicas.

1.2. ¿Cómo se produce la luz? ¿Cómo se propaga la luz? ¿Qué es lo que se propaga?

2. Puesta a prueba del Modelo Ondulatorio para la luz.

2.1. Si la luz es una onda electromagnética ¿cómo podemos producirlas? el espectro electromagnético

2.2. ¿Podemos explicar el comportamiento geométrico de la luz que hemos estudiado?

2.3. ¿Podemos explicar la visión del color?

3. Recapitulación y nuevos problemas. Límites de nuestro modelo ondulatorio de la luz.

1. ¿Es el comportamiento de la luz de naturaleza ondulatoria?

1.1. ¿Qué fenómenos confirman esta hipótesis?

1.1.1. Interferencia de ondas lumínicas.

Hemos propuesto como hipótesis de trabajo la naturaleza ondulatoria de la luz. Tenemos por tanto que comprobar si la luz se comporta como lo harían las ondas.

A.4. Una de las propiedades características y más fascinantes de las ondas es su capacidad para la producción de interferencias bajo determinadas condiciones. Diseña una experiencia para poder probar si la luz produce interferencias.

Esperamos que los alumnos recuerden las características de las ondas estudiadas previamente, la interferencia, la difracción, la atenuación, etc.

Queremos que los alumnos se vayan familiarizando con las propiedades de las ondas. Podemos recordar la interferencia que se producen entre ondas en el agua. Los alumnos realizarán un montaje parecido al que diseñó Young y creemos que comprenderán los resultados de la experiencia.

El profesor explicará la necesidad de la utilización de luz de un solo tipo, es decir de una sola frecuencia, de un solo color. Recordará la necesidad de la utilización de focos coherentes, para que la luz que sale del foco lo haga con la misma fase. Es por ello necesario la utilización de luz láser, que cumple todos los requisitos. El profesor explicará que cuando dos ondas luminosas procedentes de dos focos coherentes coinciden en un punto P dado, se observa experimentalmente, que la intensidad resultante puede ser mayor o menor que la de cualquiera de las dos. A este efecto se le denomina interferencia luminosa, constructiva en el primer caso y destructiva en el segundo. El profesor propondrá a los alumnos realizar un montaje parecido al montaje que diseñó Young de doble rendija. Explicará que se requieren rendijas estrechas para que se puedan apreciar los fenómenos de interferencia. Una forma sencilla de estudiar las interferencias luminosas es utilizar monocromática (un solo color y, por tanto, una sola longitud de

onda) que se hace pasar a través de dos pequeñas rendijas. De esta forma, de acuerdo con el principio de Huygens, se consigue que esas dos rendijas se comporten como dos focos coherentes (lo único que hacen es separa el haz de luz original en dos haces idénticos). Las franjas brillantes son el resultado de interferencias constructivas y las oscuras corresponden a interferencias destructivas. Mediante la teoría corpuscular no se podría explicar este patrón, sino que las partículas de luz reproducirían en la pantalla las rendijas mediante dos franjas igualmente brillantes.

1.1.2. Difracción de ondas lumínicas.

A.5. Otra de las características específicas de las ondas es la de bordear obstáculos. Diseña una experiencia para comprobar si la luz tiene la capacidad de difractarse, es decir de bordear obstáculos.

El profesor realizará con los alumnos el experimento de Henri Poisson (1877-1963). Expondrá una breve introducción histórica acerca de la importancia que tuvo este experimento para la aceptación del modelo de la naturaleza ondulatoria de la luz. Explicará a los alumnos la necesidad de utilizar un haz de luz coherente y monocromática, es decir, un solo tipo de luz, un láser. Es necesario que los alumnos comprendan que la fuente de luz utilizada tiene que ser puntual, o al menos tener focos coherentes de luz, es decir, conseguir que los átomos que producen la luz vibren con la misma frecuencia.

El profesor explicará a los alumnos que la única manera de dar un sentido a que se vea luz en el centro de la sombra circular, es que la luz se ha doblado en los bordes de la chincheta. La luz que parte de cada punto del borde de la moneda recorre el mismo camino hasta el centro de la sombra, por tanto, la luz que parte de cada punto del borde de la moneda llegará con la misma fase al punto del centro de la sombra, lo que provocará una interferencia constructiva, es decir, ¡luz en el centro de una sombra!

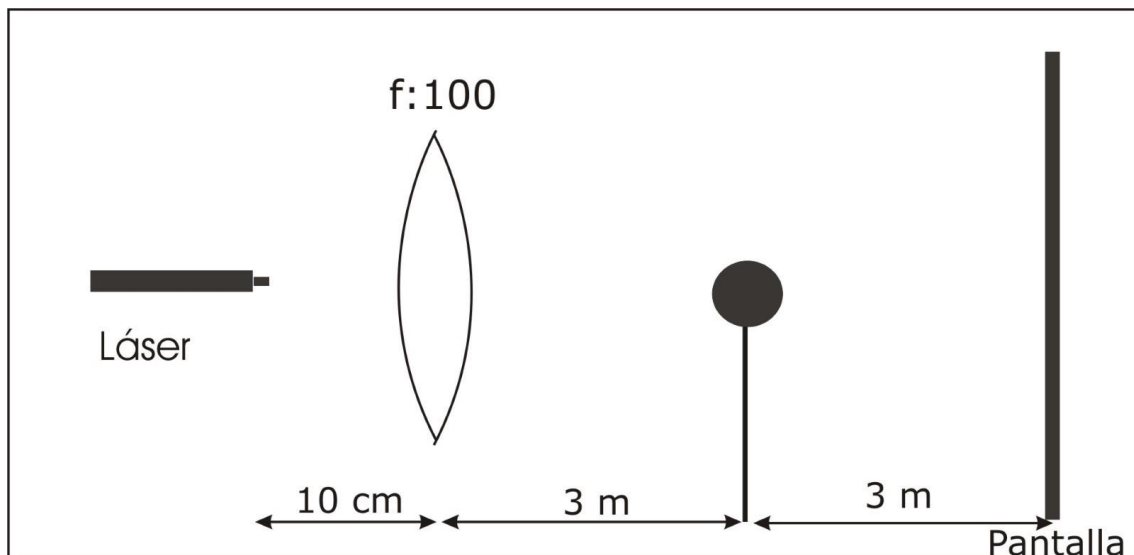


Imagen: Elaboración propia.

Encontraremos luz en el centro del círculo en sombra.

1.1.3. Atenuación de las ondas lumínicas.

A.6. Si la luz fuese de naturaleza ondulatoria, ¿qué cabría esperar de la intensidad luminosa que se mediría a diferentes distancias de la fuente? Propón una experiencia para comprobar tu hipótesis.

Queremos comprobar que las ondas lumínicas cumplen características propias de las ondas. En este caso queremos comprobar que la luz se atenúa con la distancia, es decir pierde intensidad al alejarnos del foco.

Esperamos que los alumnos recuerden que, una fuente puntual de luz emite luz en todas las direcciones. Por tanto, la luz se repartirá en una esfera centrada en el foco emisor. Cuanto más se aleje la luz del foco emisor, esta esfera será mayor. Por tanto, la luz se tiene que repartir sobre una superficie cada vez mayor, por lo que cuanto más nos alejemos del foco emisor, la Intensidad que midamos será cada vez menor.

El profesor explicará que la Intensidad de la luz, dado que la luz se reparte en una esfera centrada en el foco emisor, será proporcional a la inversa del radio de la esfera al cuadrado. I proporcional a $1/r^2$. De manera opcional, el profesor propondrá la utilización de una sonda que mide la Intensidad de la luz. Mediremos entonces la Intensidad de luz

que llega a la sonda, procedente de una bombilla, a diferentes distancias. Posteriormente elaboraremos una gráfica de la I frente a $1/r^2$. Nos ha de salir una línea recta. El profesor procurará que las condiciones sean lo más idóneas posible, que no haya fuentes de luz (a parte de la bombilla que queremos utilizar).

1.1.4. Velocidad de las ondas lumínicas. La luz no es instantánea.

A.7. El tema de la velocidad de la luz ha sido una fuente de controversia a lo largo de la historia. Si, de acuerdo a nuestra hipótesis, la luz es una onda, ha de tener cierta velocidad de propagación, es decir, tardaría un tiempo en llegar desde un punto a otro. ¿Cómo podrías medir la velocidad de la luz? ¿Qué dificultades te encontrarías?

A.7.1. Lee y comenta el siguiente diálogo sobre el problema de la medición de la velocidad de la luz.

- ¿Cómo se puede medir la velocidad de la luz?

-Esa es una muy buena pregunta. Al comienzo del siglo XVII muchos científicos creían que no había tal cosa como la "velocidad de la luz", ellos pensaban que la luz podía viajar cualquier distancia en forma instantánea. Galileo Galilei (1564-1642) no estaba de acuerdo y diseñó un experimento para medir la velocidad de la luz: él y su asistente tomaron cada uno una lámpara con rejillas y se colocaron en la cima de montañas a una milla de distancia. Galileo abría la rejilla de su lámpara y el asistente debía abrir la suya tan pronto como viera la luz de la lámpara de Galileo. De esta manera Galileo podría calcular cuánto tiempo habría pasado antes de que él viera la luz de su asistente desde la montaña.

Y así podría dividir la distancia por el tiempo medido para calcular la velocidad de la luz.

- ¿Y funcionó el experimento?

-No. El problema fue que la velocidad de la luz es simplemente muy rápida para ser medida de esta forma; en efecto tomaría muy poco tiempo (cerca de 0,000005 segundos)

para viajar esa distancia y no había forma de que Galileo pudiera medir ese intervalo con los instrumentos a su disposición.

-Entonces lo que se necesitaría sería una distancia realmente grande para que la luz la recorriera, algo así como millones de kilómetros. ¿Cómo sería posible que alguien realizase un experimento así?

-Durante la década de 1670, el astrónomo danés, Ole Roëmer (1644-1710), estaba haciendo una observación muy cuidadosa de Io, una de las lunas de Júpiter. El punto negro de la imagen a la derecha es la sombra de Io. Esta luna completa una órbita cada 1.76 días; este tiempo siempre es igual, así que Roëmer esperaba poder predecir su movimiento con gran precisión. Para su asombro, descubrió que la luna no siempre aparecía donde se suponía que debía estar. En ciertos períodos del año parecía estar atrasada en su horario y en otros se adelantaba.

-Eso si es raro. ¿Por qué orbitaría más rápido en cierta época y más lento en otra?

-Eso es exactamente lo que Roëmer se preguntó y nadie pudo darle una respuesta plausible. Sin embargo, Roëmer notó que Io parecía adelantarse en su órbita cuando la tierra estaba más cerca de Júpiter y parecía atrasarse cuando la Tierra estaba más lejos.

-Esto tiene algo que ver con la velocidad de la luz. Pero aún no consigo ver donde encaja.

-Bien, piense en esto: si la luz no viaja infinitamente rápido, entonces le debe tomar algún tiempo para viajar desde Júpiter a la Tierra. Supongamos que le toma una hora. Entonces, cuando usted observa a Júpiter a través de un telescopio, lo que realmente está viendo es la luz que arrancó una hora atrás. Usted está viendo a Júpiter y a su luna como eran una

hora en el pasado.



- Un momento, ¡me parece que ya veo a donde conduce esto! Cuando Júpiter está más lejos, le llevará más tiempo aún a la luz para llegar aquí, de forma que Roëmer estaba viendo a Io como era un poco más temprano que usualmente, tal vez una hora y quince minutos antes, en lugar de una hora. Y lo opuesto ocurría cuando Júpiter y la Tierra

estaban más cerca. Así que Io no estaba cambiando su órbita en absoluto; simplemente parecía estar en diferentes lugares dependiendo de cuánto tiempo le tomara a su luz

- ¡Muy bien! Ahora, conociendo la aparente variación en el ritmo de la órbita de Io y sabiendo cuánto varía la distancia entre la Tierra y Júpiter, Roëmer fue capaz de calcular el valor de la velocidad de la luz. La cifra que obtuvo fue de 186.000 millas por segundo, o sea 300.000 Kilómetros por segundo.

-En los años que siguieron, a medida que se desarrollaban mejores equipos y tecnologías, muchas otras personas pudieron medir la velocidad de la luz con mayor precisión. Con los recursos de la tecnología moderna, podemos medirla con un increíble nivel de precisión. Por ejemplo, los astronautas fijaron un espejo en una roca de la luna; los científicos en la Tierra pueden apuntar un láser a este espejo y medir el tiempo que tarda un pulso de láser en llegar y volver, siendo este tiempo cerca de dos segundos y medio. (Si se piensa bien, la idea tras este experimento no es tan diferente de la que propuso Galileo...) Y cualquiera que haya medido la velocidad de la luz, en cualquier época, usando cualquier método, siempre obtuvo el mismo resultado: ligeramente menos de 300.000 Kilómetros por segundo.

Anexo: ¿Cómo midió Roëmer la velocidad de la luz?

Método de Roëmer para determinar la velocidad de propagación de la luz en el vacío.

La órbita del planeta Júpiter alrededor del Sol está situada a una distancia unas cinco veces mayor que la del planeta Tierra y con un período de poco menos de 12 años. Según estos datos la Tierra se encuentra, en algunos momentos, más cercana a Júpiter que en otros.

Con un telescopio de aficionado se pueden distinguir cuatro puntos brillantes en las proximidades del planeta que se ocultan detrás de él cada cierto tiempo. La condición de satélites es debida a Galileo quien avanzó que se trataba de “lunas” con giro alrededor del planeta. Se conocen con los nombres de Io, Europa, Ganímedes y Calisto y, aunque actualmente se conocen otros dieciséis satélites, éstos son los de mayor tamaño.

Cuando la Tierra está situada en su posición más próxima a Júpiter (T_1 y J_1), los eclipses de Ganímedes se suceden con cada 7'155 días (7 días, 3 h, 43 min. y 12 s). Después de

25 eclipses han transcurrido 178'875 días (casi, medio año), por lo que la Tierra se encuentra, aproximadamente, en la posición opuesta de su órbita, T_2 , mientras que Júpiter, que apenas se ha desplazado 15° , se encuentra en J_2 .

Si el eclipse observado cuando los planetas estaban en T_1 y J_1 se produce el día 1 a las 0 h, el eclipse número 25 de ese satélite se produciría 178'875 días después, cuando los planetas se encuentren en T_2 y J_2 . Sin embargo, desde la Tierra en esta posición, se observa un retraso de 16'6 minutos, es decir el eclipse que debía producirse a las 21 horas del día 178, ocurre, en realidad a las 21 h y 16'6 min. del día 178. ¿A qué podría ser debido ese retraso?

Roemer interpretó este retraso argumentando que la luz no se propaga instantáneamente y, por tanto, cuando se observa el eclipse desde T_1 el fenómeno se percibe con un retraso Δt y cuando se observa desde T_2 el retraso, $\Delta t'$, será tanto mayor cuanto mayor sea la separación entre los planetas. La distancia mayor, en este segundo caso, recorrida por la luz es aproximadamente el diámetro de la órbita terrestre, es decir, unos 300 millones de km ($3 \cdot 10^8$ km) y dado que desde T_2 , el eclipse se observa 16'6 min. (1000 s) más tarde que desde T_1 , la velocidad de la luz se puede calcular: $v = \frac{3 \cdot 10^8 \text{ km}}{1000 \text{ s}} = 300000 \frac{\text{km}}{\text{s}}$. En tiempos de Roëmer el valor del diámetro de la órbita de la Tierra era considerado algo menor que el actual, por lo que se obtuvo un valor para la velocidad de propagación de la luz en el vacío de unos 220.000 km/s que, aunque es un valor aproximado dio una idea de su magnitud. Sin embargo, el resultado no fue aceptado por la comunidad científica hasta que cincuenta años después, Bradley, interpretó otros fenómenos astronómicos bajo el supuesto de la no propagación instantánea de la luz.

Queremos que los alumnos comprendan la magnitud de la velocidad de la luz, que destierren la antigua idea de que la luz viaja de un sitio a otro instantáneamente. Queremos que comprendan que la medición de la velocidad de la luz en el aire y en el agua fue un experimento crucial para decidir entre la teoría corpuscular de Newton y la teoría de los pulsos de luz de Huygens. Pero antes de este experimento fue necesario establecer la cuestión fundamental: ¿Es finita o infinita la velocidad de la luz? Galileo discutió este problema en su libro "Dos nuevas ciencias". Pero con sus experiencias cotidianas, no pudo estimar un valor definido para la luz, aunque llegó a la conclusión de que la velocidad de la luz probablemente no era infinita.

Inicialmente esperamos que los alumnos propongan una experiencia parecida a la que en su día propuso Galileo. El profesor explicará la imposibilidad de poder medir de ese modo la velocidad de la luz, dado que el tiempo de respuesta del ser humano es muchísimo más grande que el tiempo que tardaría la luz en llegar de un punto a otro. El profesor reforzará la idea de la necesidad de grandes distancias, distancias astronómicas para poder medir la velocidad de la luz.

El profesor destacará las enormes dificultades que hubo que superar a lo largo de la historia para lograr medir la velocidad de la luz. El profesor remarcará que el hecho de que la velocidad de la luz no fuera instantánea, apoyaba la hipótesis ondulatoria de la luz, que poco a poco se iba afianzando entre la comunidad científica. Comentaré que la evidencia definitiva de que la luz se mueve a una velocidad finita fue obtenida por el astrónomo danés, Olaf Roëmer en 1676, midiendo las diferencias de tiempo en el eclipse del satélite de Júpiter (la lectura que hemos hecho). Roëmer explicó que el retraso del eclipse era debido simplemente al hecho de que la luz de Júpiter tarda más o menos tiempo en alcanzar la tierra según las posiciones relativas de Júpiter y la Tierra sus órbitas. Comparando los tiempos de los eclipses observados en diversos puntos de la órbita de la Tierra, llegó a la conclusión de que la luz tardaba 22 minutos en cruzarla. Huygens utilizó los datos de Roëmer para hacer una estimación de la velocidad de la luz llegando al dato de 2×10^8 . Aunque el valor actualmente aceptado es de 3×10^8 , la importancia fundamental fue establecer que la propagación de la luz en el espacio libre no es instantánea, sino que exige un tiempo finito.

1.1.5. Refracción de las ondas lumínicas.

El profesor recordará que en el “Experimentum crucis” de Newton, realizado mediante un proyector y un prisma, la luz blanca se separa en la mezcla de colores característica del arco iris. El profesor explicará a los alumnos que se puede recoger el “arco iris” a ambos lados del prisma, uno es debido a la refracción y otro a la reflexión interna (más débil).

En el tema de ondas hemos estudiado la refracción de un frente de ondas plano, y hemos obtenido una relación entre los ángulos de incidencia y las velocidades de propagación

de las ondas en ambos medios. Igualmente, en la primera parte del tema de óptica, hemos estudiado una relación entre los ángulos de incidencia y refracción de la luz con lo que hemos llamado “índice de refracción del material.

A.8. Revisa estas expresiones para la refracción de las ondas y de los rayos luminosos y busca un significado físico al índice de refracción.

Queremos conseguir que los alumnos piensen que si la luz “blanca” se dispersa cuando atraviesa un prisma, se trata de una mezcla de diferentes tipos de ondas, con un poder refractivo diferente. Por tanto, a partir de ahora, el índice de refracción de un material transparente debe ser asociado a cada tipo de luz, a cada frecuencia de vibración. Así, como en el sonido cada tono se corresponde con un tipo de onda sonora de una frecuencia determinada, podemos pensar que cada tipo de luz se corresponde con un tipo de onda lumínica de una frecuencia. El profesor recordará a los alumnos la expresión que habíamos encontrado para la refracción de las ondas:

$$\text{Sen } i / \text{Sen } r = v_2 / v_1$$

Y para el caso de la refracción de las ondas lumínicas:

$$\text{Sen } i / \text{Sen } r = n$$

Ayudará a los alumnos a llegar a la conclusión de que el índice de refracción de un medio es la relación entre la velocidad de la luz en el aire (vacío) y la velocidad de la luz en dicho medio. Les comentará que el índice de refracción siempre tiene que ser mayor que uno y que será tanto mayor cuanto menos sea la velocidad de la luz en el medio.

El profesor explicará a los alumnos que este tema estuvo en el centro de la dicotomía teoría ondulatoria-corporcular del siglo XVIII y XIX. Newton creía que la velocidad de la luz tenía que ser mayor en el agua. Cuando Hippolyte Fizeau (1819-1896) pudo medir que la velocidad de la luz era menor en el agua que en el aire, la comunidad científica se decantó finalmente por la teoría ondulatoria.

El profesor explicará a los alumnos que el índice de refracción es diferente para cada uno de “los colores”, ya que es función de la frecuencia de la onda. En el caso de la dispersión

de la luz blanca por un prisma, hemos visto que la luz violeta se refracta más que la roja. El profesor propondrá el siguiente trazado explicativo:

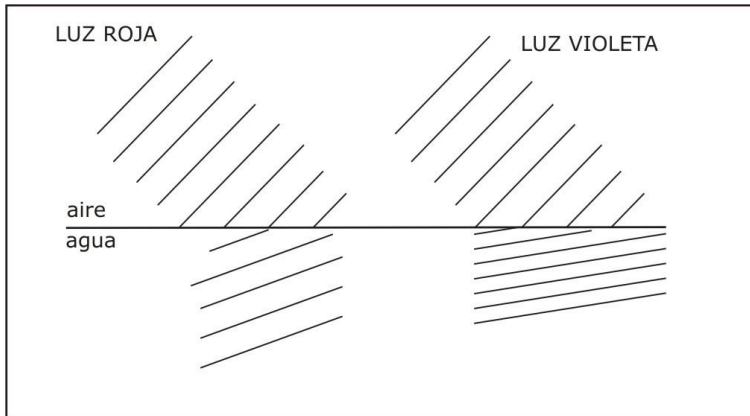


Imagen: Elaboración propia.

El profesor explicará a los alumnos que debido a que la velocidad de las ondas cambia al pasar la luz de un medio a otro, la longitud de la onda también se ve influida (la frecuencia es constante). Por tanto, observamos que, en el caso del rojo, cuyo índice de refracción es menor, es decir la modificación de la velocidad es menor y por tanto la variación en la longitud de onda será pequeña. En el caso del violeta, cuyo índice de refracción es mayor, la variación de la velocidad al pasar al agua será mayor y por tanto la variación en la longitud de onda será mayor. Observamos, por tanto, que la longitud de onda del rojo varía poco al pasar del aire al agua, mientras que la longitud de onda del violeta varía más, haciéndose más pequeña. (Si la frecuencia no varía y la velocidad de la onda disminuye, la longitud de onda tiene que disminuir).

A.9. Haciendo uso del significado físico del índice de refracción $n = c/v$, interpreta el fenómeno de la dispersión de la luz blanca que hemos estudiado al principio de la unidad.

Queremos que los alumnos comprendan cual es la naturaleza del fenómeno de refracción que habíamos estudiado previamente en óptica geométrica y que ahora vamos a estudiar desde otro punto de vista.

El profesor explicará que la trayectoria seguida por la luz al refractarse a través de los medios transparentes puede entenderse, en términos de sus causas, investigando las interacciones de las ondas luminosas y los fotones con las moléculas que componen esos

medios. Para comprender lo anterior necesitamos saber por qué la luz se desacelera en los medios transparentes como el vidrio o el agua. La rapidez de la luz es una constante de la naturaleza, en el vacío es una constante de 3×10^8 m/s. La luz tiene una velocidad menor en el agua, solamente un 75% de la velocidad en el vacío, y en un diamante solamente 41%. Cuando la luz emerge de estos medios, viaja de nuevo a su rapidez original. Pero parece un comportamiento extraño desde el punto de vista de la energía. Por ejemplo, si se dispara una bala a través de una tabla, aquella se frena al pasar a través de ésta y sale con menor rapidez; pierde algo de su energía cinética al interactuar con las fibras y astillas de madera que constituyen el material de la tabla. Evidentemente, quedaríamos sorprendidos si, después de haber sido frenada por la tabla, la bala saliera con una rapidez igual a la original. Sin embargo, esto es lo que en apariencia sucede en el caso de la luz. Un haz de luz incide sobre un vidrio con rapidez c . En su mayor parte el vidrio está compuesto de átomos de silicio, con nubes de electrones que con facilidad son forzados a vibrar cubriendo el intervalo completo de las frecuencias visibles. Si la luz incidente es absorbida, las nubes de electrones se ponen a vibrar con una frecuencia igual a la luz absorbida. Los electrones vibrantes, a su vez, emiten luz por su cuenta, a la misma frecuencia. Esta luz es menos intensa debido a que parte de la luz incidente fue absorbida y convertida en calor durante el proceso y lo más importante, no ha recorrido tanta distancia como la que habría cubierto la luz incidente no perturbada en el mismo tiempo. ¿Por qué? Porque el proceso de absorción/reemisión no es instantáneo; se requiere cierto tiempo para que se realice y, como resultado, la rapidez promedio de la luz a través del vidrio es menor que c . Esto no contradice la máxima de que la rapidez de la luz es una constante de la naturaleza porque la rapidez instantánea de la luz entre los átomos es todavía c . Cuando se habla de la velocidad de la luz en los medios transparentes se hace referencia a la rapidez promedio, que toma en consideración el atraso asociado al proceso de absorción y reemisión. Por tanto, a diferencia de la bala que pasa a través de la tabla, la luz no “horada” el vidrio.

Posteriormente el profesor explicará a los alumnos que cada uno de los “colores” es una onda de una frecuencia característica y que se moverá en el vidrio con una velocidad determinada. Es por eso que los diferentes “colores” recorren caminos distintos al atravesar un prisma.

1.1.6. Reflexión de las ondas lumínicas.

A.10. ¿Cómo explicarías la reflexión de la luz teniendo en cuenta que la luz es una onda?

El profesor explicará a los alumnos qué es en realidad el fenómeno de reflexión a escala atómica: Cuando se ilumina un objeto con luz procedente del Sol o de una lámpara, se establece una vibración electrónica generalizada en los estados normales de energía de sus átomos. Nubes completas de electrones vibran como respuesta a los campos eléctricos oscilantes de la luz que reciben. Son estas diminutas vibraciones electrónicas las que reemiten la luz por la que vemos dicho objeto. Pongamos por ejemplo que se está iluminando una página, si se la ilumina con luz blanca, se ve blanca, lo cual revela el hecho de que los electrones se han puesto a vibrar en todas las frecuencias visibles (recordar que la luz blanca está compuesta por una mezcla de colores, es decir ondas EM de diferente frecuencia). La página blanca tiene muy poca absorción. Lo que ocurre con la tinta de la página es diferente; excepto por una pequeña reflexión, absorbe todas las frecuencias visibles y por ello se ve negra.

Por lo tanto, en las superficies de todos los objetos que nos rodean, las nubes electrónicas de los átomos experimentan ligeras vibraciones al recibir la influencia de la luz que los ilumina. Estas diminutas vibraciones, que cubren diversos intervalos de frecuencia, emiten los diferentes colores de luz debido a la cual vemos los objetos. En pocas palabras, decimos que los vemos en virtud de la luz que reflejan.

Todos sabemos que normalmente la luz viaja en línea recta. Al ir de un lugar a otro, la luz sigue la trayectoria más eficiente y viaja en línea recta. Esto es cierto si nada obstruye el paso de la luz entre ambos lugares. Si la luz es reflejada por un espejo, el cambio de dirección en la trayectoria, que de lo contrario sería recta, se describe por medio de una fórmula sencilla. Esta fórmula sencilla está basada en el *principio de tiempo mínimo*, planteado por Pierre Fermat (1607-1655) hacia el año 1650. El planteamiento es el siguiente: “de todas las trayectorias posibles que la luz podría seguir para ir de un punto a otro sigue aquella que requiere menos tiempo”.

1.2. ¿Cómo se produce la luz? ¿Cómo se propaga?

A.11. Conocemos muchas ocasiones en las que los objetos emiten luz: una brasa, un hierro muy caliente, el filamento de una lámpara de incandescencia, etc. Sabiendo que los átomos de la materia están formados por cargas eléctricas (electrones y protones), formula una hipótesis que explique la emisión de luz.

Queremos que los alumnos relacionen ideas que tengan de cursos anteriores y de la vida cotidiana con la producción de luz. Los alumnos pueden relacionar el golpe del martillo, con una fuerza que se realiza sobre el metal y pueden imaginar que dicha fuerza producirá una aceleración de las cargas eléctricas (los electrones, que son las partículas que se pueden mover, pues sabemos que los protones están en el interior del núcleo y no se mueven, salvo en reacciones nucleares).

El profesor intentará que los alumnos lleguen a la conclusión de que dicha aceleración de las cargas debido al golpe con el martillo producirá la emisión de luz. El profesor recordará a los alumnos que una carga eléctrica en reposo produce un campo eléctrico constante. Pero una carga que ha sido desplazada de su posición de equilibrio por una fuerza, intenta volver a su posición produciendo una oscilación, y esa carga oscilante producirá un campo eléctrico oscilante que se propaga oscilando por el espacio. A lo largo del curso también hemos estudiado que una carga eléctrica que se mueve produce un campo magnético. Esa oscilación de la carga eléctrica producirá por tanto un campo magnético oscilante. Esa variación del campo eléctrico y magnético que se propagan por el espacio, es una onda electromagnética, formada por un campo eléctrico y otro magnético que vibran en direcciones perpendiculares entre sí, y perpendicular así mismo a la dirección de propagación de la luz. Decimos que la luz es una onda electromagnética.

2. Puesta a prueba del modelo ondulatorio.

Ahora tenemos que poner a prueba la capacidad explicativa de nuestro modelo de la luz como radiación electromagnética. Para ello vamos a intentar explicar teniendo en cuenta que la luz es una onda electromagnética, diferentes fenómenos como la producción de la radiación electromagnética, el espectro electromagnético, el comportamiento geométrico de la luz y la visión del color

Con lo aprendido hasta ahora, debemos representar la luz como una onda, es decir como una sucesión de frentes de onda (puntos del espacio que están en fase), y a partir de esta representación intentar explicar los fenómenos estudiados en la óptica geométrica. Si nos basamos en un modelo de emisión de luz por fuentes puntuales, y nos situamos suficientemente lejos del foco emisor, podemos considerar el frente de ondas plano.

2.1. Si la luz es una onda electromagnética, ¿Cómo podemos producirla?

A.12. Realiza una síntesis de la siguiente lectura acerca de las ideas de Maxwell sobre la producción de ondas electromagnéticas. Explica con tus palabras y dibuja una onda electromagnética.

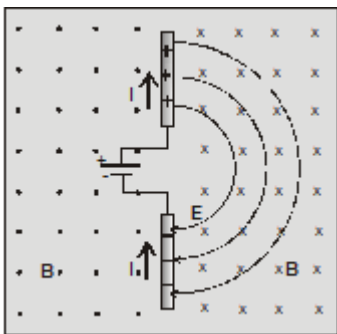


Imagen: Elaboración propia

Maxwell, para argumentar la relación entre la producción y emisión de luz y la variación de los campos eléctricos y magnéticos cuando las cargas eléctricas vibran o se aceleran, imaginó un dispositivo con dos varillas metálicas que se pueden conectar a una batería según el esquema del margen. Al cerrar el interruptor, durante un breve período de

tiempo, circula una corriente que hace que la varilla superior se carga con carga positiva y la inferior con carga negativa. Se crea, por tanto, un campo eléctrico \vec{E} cuyas líneas de fuerza van de la varilla con carga \oplus a la varilla con carga \ominus . Mientras dura esta corriente (de intensidad variable) también se genera un campo magnético (variable), cuyas líneas de fuerza son circulares alrededor de las varillas y que en el plano del papel están señaladas con puntos y cruces, según el sentido del vector \vec{B} sea saliente o entrante en ese plano. En resumen, al cerrar el interruptor, en el espacio circundante a las varillas se crea un campo electromagnético, de tal forma que los vectores \vec{E} y \vec{B} son perpendiculares en todos los puntos del espacio.

Pero, ¿hasta dónde se extiende ese campo electromagnético? ¿Es instantánea la propagación de ese campo por el espacio? Maxwell planteó estos interrogantes que se revelaron de enorme importancia.

En el caso de la situación planteada anteriormente, pronto se cargan ambas varillas y desaparece la intensidad de corriente por ellas, por lo que también desaparece pronto el campo magnético. La situación es, a partir de ese momento, estática: el valor del campo eléctrico es constante en cada punto y alcanza todos los puntos del espacio con diferente intensidad, hasta el infinito y el valor del campo magnético es cero.

Si deseamos profundizar en los fenómenos que ocurren mientras existen corrientes, podemos imaginar que las varillas de la experiencia anterior se conectan a un generador de corriente alterna sinusoidal (como el estudiado en el tema de inducción electromagnética). En este caso, durante el primer semiciclo de la corriente eléctrica, la varilla superior se va cargando con carga \oplus y la varilla inferior con carga \ominus generando una situación de los campos \vec{E} y \vec{B} similar a la analizada anteriormente. En el segundo semiciclo, al cambiar de sentido la corriente, la varilla superior se va descargando de carga \oplus y cargando de carga \ominus y los campos \vec{E} y \vec{B} cambian de sentido. Por lo tanto, en un proceso continuo, los campos eléctricos en cada punto van variando su valor y alternando su sentido. Pero como este proceso pasa en cada punto, si la propagación de \vec{E} y \vec{B} no es instantánea, mientras va cambiando sus valores en un punto van alcanzando puntos más alejados.

Este esquema simplificado del proceso de generación y propagación del campo electromagnético se caracteriza, pues, por:

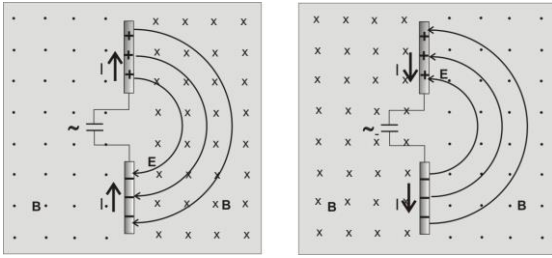


Imagen: Elaboración propia.

En cada punto del espacio alcanzado por dicha propagación los campos \vec{E} y \vec{B} son perpendiculares entre sí y perpendiculares a la dirección de propagación.

- Los campos alternan su sentido de unos puntos a otros, de manera que un determinado instante \vec{B} se dirige hacia el exterior en unos puntos y hacia el interior del plano en otros puntos, mientras que, por su parte, el campo eléctrico \vec{E} se dirige hacia arriba o hacia abajo.
- En el caso de una corriente alterna sinusoidal, la propagación electromagnética adopta una forma ondulatoria transversal típica y los vectores \vec{E} y \vec{B} están en fase, es decir, son máximos o mínimos a la vez. En la figura se representa una onda no atenuada en la dirección del eje X.
- En definitiva, las cargas oscilantes, dan lugar a un proceso de emisión y propagación por el espacio de un campo electromagnético de tipo ondulatorio. Estas ondas se llaman ondas electromagnéticas y no requieren necesariamente un medio material para propagarse, por lo que lo pueden hacer en el vacío.
- Maxwell no se limitó exclusivamente a este desarrollo cualitativo, sino que combinando las ecuaciones del electromagnetismo encontró que la velocidad de propagación de las ondas electromagnéticas es: $c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}}$, lo que indica que la velocidad de propagación depende exclusivamente del medio y que para el vacío ($\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ y $\epsilon_0 = 1/4\pi K$, con $K = 9 \cdot 10^9$ en el S.I.) ¡¡¡tiene un valor de $3 \cdot 10^8$ m/s!!!

A.13. Explica con tus palabras y dibuja una onda electromagnética.

Para entender el modelo ondulatorio de manera que incluya los vectores de campo oscilantes, los estudiantes en el nivel de 2º de Bachillerato deben ser capaces de interpretar el formalismo diagramático matemático que describe una onda electromagnética plana. Queremos que los alumnos comprendan que los campos eléctrico y magnético no están encerrados dentro de las curvas sinusoidales, tratando de evitar que se confunda la notación vectorial con la extensión de los campos eléctrico y magnético. Ambrose, B., Shaffer, P., Steinberg, R. y McDermott, L. (1999) durante una investigación sobre la comprensión de los estudiantes de la óptica física encontraron que los estudiantes tenían algunas dificultades serias con este tópico que podían ser debidas, al menos en parte, a una falta de entendimiento de la naturaleza de la luz como una onda electromagnética. Reportan que muchos estudiantes no desarrollan correctamente un modelo ondulatorio básico, tienen serias dificultades con algunos conceptos muy básicos, como la longitud de onda, la diferencia en los caminos, y la diferencia de fase.

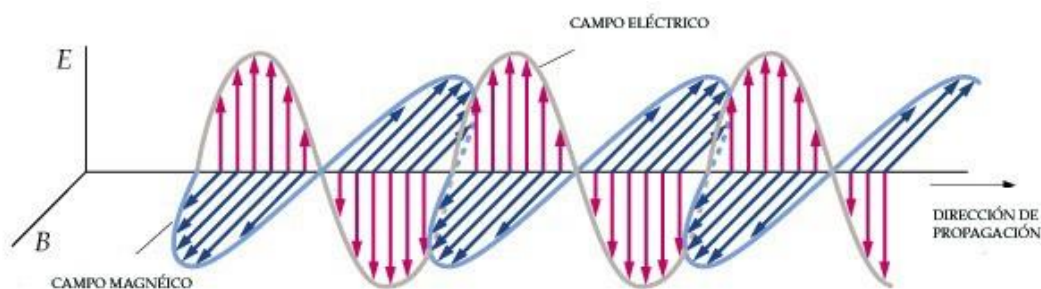


Imagen: McDermott *et al.*, 1999.

El error más común que esperamos será adscribir a la onda EM plana una extensión espacial finita en el plano perpendicular a la dirección de propagación, debido a la creencia incorrecta de que los campos eléctrico y magnético están confinados a la región encerrada dentro de las curvas sinusoidales. Esperamos que los estudiantes también tengan dificultades con las expresiones matemáticas del campo magnético y eléctrico oscilante y con las ecuaciones que relacionan la variación de cada campo con el otro. El concepto de un plano infinito en el que dos cantidades vectoriales cada una de las cuales tiene una magnitud y dirección en cualquier punto en un instante es muy abstracto. Existe la tendencia en muchos estudiantes a atribuir una extensión espacial a la amplitud de la onda. Efectivamente, dichas dificultades se identifican en los estudiantes, y se pueden

organizar en tres categorías que se superponen (Ambrose, B., Shaffer, P., Steinberg, R. y McDermott, L., 1999).

Queremos que los alumnos comprendan en profundidad el concepto de campo, que comprendan que el campo está dotado de energía y momento. Queremos que el campo llegue a adquirir un significado físico para los alumnos equiparable al que tienen otros conceptos como el de partícula o fuerza. Creemos que los alumnos sin una adecuada formación, adquieren, en su mayoría, una imagen del campo que está lejos de la concepción científica. Suelen considerar el campo como una región del espacio o volumen que delimita la influencia de una masa, carga o imán. Para los alumnos, el campo está vacío de significado, en claro contraste con los conceptos de masa, carga, fuerza... y, por tanto, es innecesario, redundante y complicado. Los alumnos siguen pensando en términos de fuerza y no modifican fácilmente sus ideas previas sobre la interacción entre partículas, y tienden a identificar el campo con una zona del espacio, un volumen de influencia y no como el agente de la interacción. Los libros de texto potencian la idea de que la fuerza se debe a las fuentes (cargas, masas o imanes) y no al campo. Estamos, por tanto, ante una visión newtoniana de la interacción, en la que ésta se efectúa entre las partículas y no entre el campo y la partícula. No es de extrañar que los alumnos no logren construir el verdadero significado del concepto campo.

El profesor tratará de explicar a los alumnos qué es una onda electromagnética. Les recordará que en temas anteriores habíamos estudiado las leyes del electromagnetismo, y que con ellas podíamos definir los campos eléctricos y magnéticos en función de las cargas o corrientes. El profesor retomará el concepto de campo para clarificar algunos posibles errores conceptuales en los alumnos. Comenzará recordando a los alumnos la importancia del concepto de campo en física, su introducción supuso poner en duda, y superar posteriormente el marco teórico mecanicista. Sin esta idea básica de campo, la evolución posterior de la física cuántica y relativista resulta inconcebible.

Por tanto, si queremos que los alumnos comprendan en su profundidad el concepto de campo, el profesor debe presentar el campo como agente de la interacción, dotado de realidad física, de energía y de momento, con existencia propia independiente de la fuerza, de forma que el alumno comprenda su importancia y necesidad. Debemos de prevenir la asociación entre energía y partícula mediante la clarificación de los aspectos energéticos en aquellas situaciones en las que interviene el campo. Al estudiar las ondas

electromagnéticas se podrá hablar de la energía asociada al propio campo de una manera más directa y clara. En este caso los campos eléctrico y magnético se propagan, es decir, varían en función del tiempo y del espacio. La propagación de las señales electromagnéticas sucede a una velocidad finita, la acción es retardada, necesita campos para llevar energía, momento lineal y angular. En la inducción electromagnética la transferencia de energía a través de distancias macroscópicas está muy claramente relacionada con la acción de campos variables con el tiempo.

A.14. Si las ondas lumínicas son de naturaleza electromagnética, es decir variaciones periódicas de los campos E y B, podemos diseñar un método para producirlas. Diseña una experiencia para producirlas.

Pretendemos conseguir que los alumnos imaginen un modo de producir ondas electromagnéticas.

El profesor propondrá a los alumnos una réplica del experimento de Hertz fácil de realizar en el laboratorio.

A. 14.1 Como actividad alternativa, lectura del experimento de Hertz:

“Si la luz es una radiación electromagnética producida por una oscilación periódica de corrientes eléctricas, un filamento metálico de una lámpara incandescente, emite luz debido a la agitación de las cargas eléctricas submicroscópicas existentes en los cuerpos neutros en cantidades equilibradas.

Aún no podemos explicar si estas cargas son partes de los átomos del foco de luz o entidades separadas tales como electrones. Los llamaremos de momento osciladores. Algunos de dichos osciladores son capaces de emitir energía electromagnética que nuestros ojos interpretan como luz; siendo la frecuencia de las ondas luminosas igual a la frecuencia periódica de dichos osciladores.

Hertz se propuso realizar un experimento que pusiese de manifiesto esta interpretación “clásica” de la emisión de luz. Un ensayo evidente sería producir una corriente oscilante en un alambre a una frecuencia igual, por ejemplo, a la que posee la luz verde y observar si se emite luz verde hacia la región que lo rodea. Pero las frecuencias de oscilación que se podía alcanzar eran relativamente bajas, muy lejos de llegar al rango de la frecuencia de la luz visible (10^{15} s^{-1}). Por tanto, un ensayo directo no era posible.

Hertz propuso lo siguiente: si la premisa fundamental de que una corriente eléctrica oscilante producía una radiación electromagnética (luz visible si se alcanzaba una frecuencia suficientemente alta), que tendría todas las características de la luz excepto, naturalmente, su visibilidad. La prueba de Hertz tuvo tanto éxito que la comunidad científica quedó convencida de que la luz era una radiación electromagnética.

En esencia, el método experimental de Hertz era sencillo. Dos varillas, cada una de una longitud de 5 pulgadas, terminadas en un extremo por una esferita metálica pulida, se fijaban sobre una recta de manera que entre las esferas quedara una pequeña zona de aire. De las esferas partían dos hilos conductores hacia un dispositivo que suministraba pulsos cortos de diferencia de potencial muy elevada que llevaban a las esferas grandes cantidades de carga eléctrica de signos opuestos, hasta que saltaba la chispa entre ellas. El aire de la zona se hacía conductor durante un corto periodo de tiempo y así proporcionaba un camino a las cargas que oscilaban de una varilla a la otra hasta alcanzarse el equilibrio eléctrico. Entonces el aire volvía a no ser conductor y el sistema quedaba preparado para el siguiente pulso de “tensión” que originaba otra serie de oscilaciones por el mismo proceso.

Si los argumentos de Maxwell eran correctos, mientras saltaba cada chispa se propagaban ondas electromagnéticas de la misma frecuencia que las oscilaciones, hasta unos $5 \cdot 10^8 \text{ s}^{-1}$, según las estimaciones de Hertz, ondas electromagnéticas con una longitud de onda de unos 60 cm. Además, esta radiación se dispersaría desde las esferas y sería detectable por la producción de una corriente fluctuante en un alambre a cierta distancia, como se indicó anteriormente.

El primer triunfo de Hertz fue observar este efecto, aun cuando el alambre receptor (antena) se situase a muchos metros de distancia del oscilador emisor. Esa nueva radiación electromagnética invisible, llamada todavía a veces ondas hertzianas, es naturalmente idéntica a nuestras familiares ondas de radio. Hertz demostró a continuación

que la radiación poseía todas las características de la luz: se reflejaba, se podía enfocar un haz, refracción, interferencia, polarización, etc. Posteriormente se demostró que la velocidad de este tipo de radiación electromagnética era la misma que la velocidad de la luz.

La comunidad científica rápidamente llegó a la conclusión de que, puesto que las ondas hertzianas y las ondas luminosas se comportan de un modo semejante, la luz debe estar causada también por el rápido movimiento oscilatorio de partículas cargadas, quizás las existentes en los átomos del emisor de luz. Aquí teníamos el modelo de la emisión de luz” (Holton y Brush, p. 628).

Queremos que los alumnos comprendan el experimento de Hertz, recuerden lo aprendido anteriormente en las unidades de campo eléctrico y magnético, y lo relacionen con la producción de ondas electromagnéticas. Queremos que comprendan la extraordinaria importancia que tuvo el experimento de Hertz, ya que validaba la teoría electromagnética de Maxwell.

El profesor debe explicar la importancia del experimento de Hertz para la aceptación de la teoría electromagnética de Maxwell, uno de los logros más grandes del pensamiento científico del siglo XIX. El profesor recordará a los alumnos las relaciones entre campos eléctricos y magnéticos que habían estudiado en unidades previas, para que puedan así comprender la producción de las ondas electromagnéticas. El profesor explicará que las ondas electromagnéticas no son solamente ondas lumínicas, sino que tenemos muchos tipos.

A.15. Si la luz es una onda, tendrá una longitud de onda y una frecuencia asociadas. ¿Cómo podríamos explicar el experimento de dispersión de la luz blanca en luces de diferentes colores? ¿Qué serían cada uno de los colores?

Queremos que los alumnos relacionen la actividad de inicio del tema, el “*Experimentum crucis*” de Newton, en la cual se mostraba que la luz blanca estaba compuesta de luces de colores, con las características de las ondas. Intentaremos que los alumnos lleguen a la

conclusión de que cada color es una onda EM, de una frecuencia y longitud de onda determinada.

2.2. ¿Podemos explicar el comportamiento geométrico de la luz?

Ahora debemos representar la luz como una onda, es decir como una sucesión de frentes de onda (puntos del espacio que están en fase), y a partir de esta representación intentar explicar los fenómenos estudiados en la óptica geométrica. Si nos basamos en un modelo de emisión de luz por fuentes puntuales, y nos situamos suficientemente lejos del foco emisor, podemos considerar el frente de ondas plano.

A.16. La naturaleza de ondulatoria de la luz debe ser un modelo coherente con explicaciones que fácilmente realizábamos en la óptica geométrica. Comparar las explicaciones de los siguientes fenómenos desde los dos puntos de vista: geométrico y ondulatorio. Realiza los correspondientes trazados gráficos:

A.16.1. La emisión de luz por una fuente puntual.

A.16.2. Cuando un haz de luz procedente de una fuente puntual lejana incide sobre una lente convergente, converge en el foco.

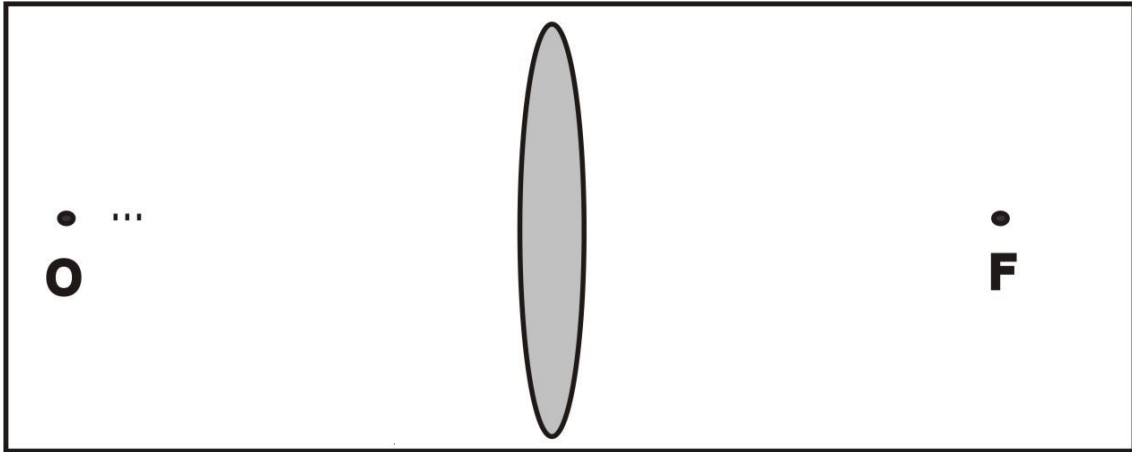


Imagen: Elaboración propia.

A.16.3. Cuando un haz de luz procedente de una fuente puntual lejana incide sobre una lente divergente, emerge después de atravesarla según la dirección del foco virtual.

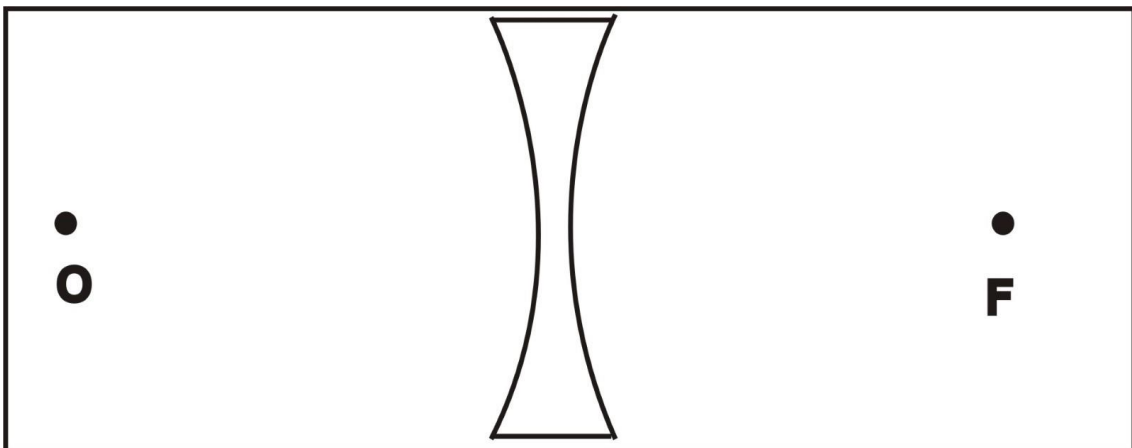


Imagen: Elaboración propia.

A.16.4. Que un haz de luz procedente de un foco muy lejano, cuando incide en un espejo cóncavo, dentro de la aproximación paraxial, se refleja, concentrándose la luz en el punto focal del espejo.

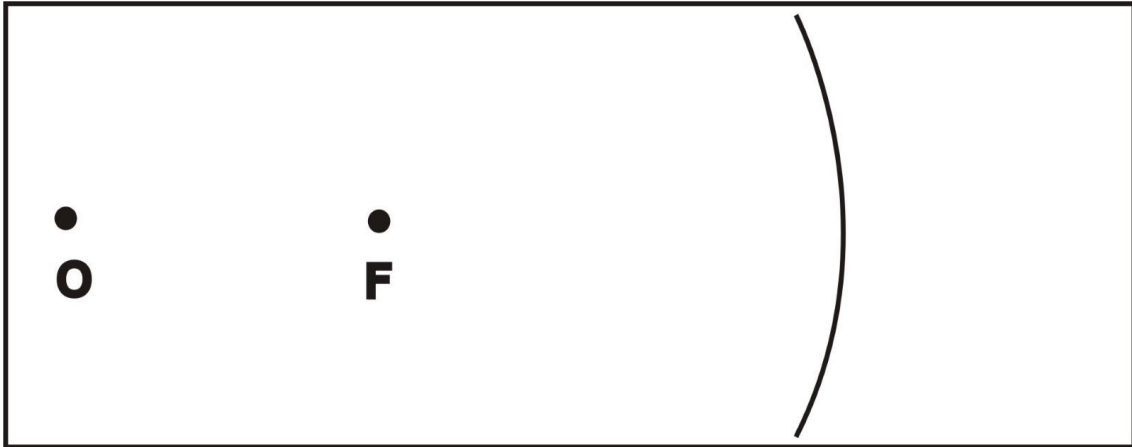


Imagen: Elaboración propia.

A.16.5. Que un haz de luz procedente de un foco muy lejano, cuando incide en un espejo convexo, dentro de la aproximación paraxial, se refleja, concentrándose la luz en el punto focal imaginario del espejo.

Sabemos que la explicación de la propagación rectilínea de la luz mediante el modelo ondulatorio fue un escollo difícil de superar, que de hecho durante tiempo favoreció la aceptación de la teoría corpuscular de la luz que proponía una explicación más directa.

Queremos ayudar a los alumnos a comprender que la teoría ondulatoria también puede explicar la propagación rectilínea de la luz. Para explicar la emisión de luz por una fuente puntual, el profesor expondrá a los alumnos el principio de Huygens, quien propuso que las ondas luminosas que se despliegan desde una fuente puntual podían considerarse la superposición de diminutas ondas secundarias. Huygens propuso que cada punto de cualquier frente de ondas pueda considerarse una nueva fuente puntual de ondas secundarias. Esta idea se conoce como “principio de Huygens”. Todos los puntos a lo largo del frente de ondas AA' son, a su vez, fuente de nuevas onditas, un poco de tiempo después esas nuevas onditas superpuestas formarán una nueva superficie BB', la cual puede considerarse la envolvente de todas ellas.

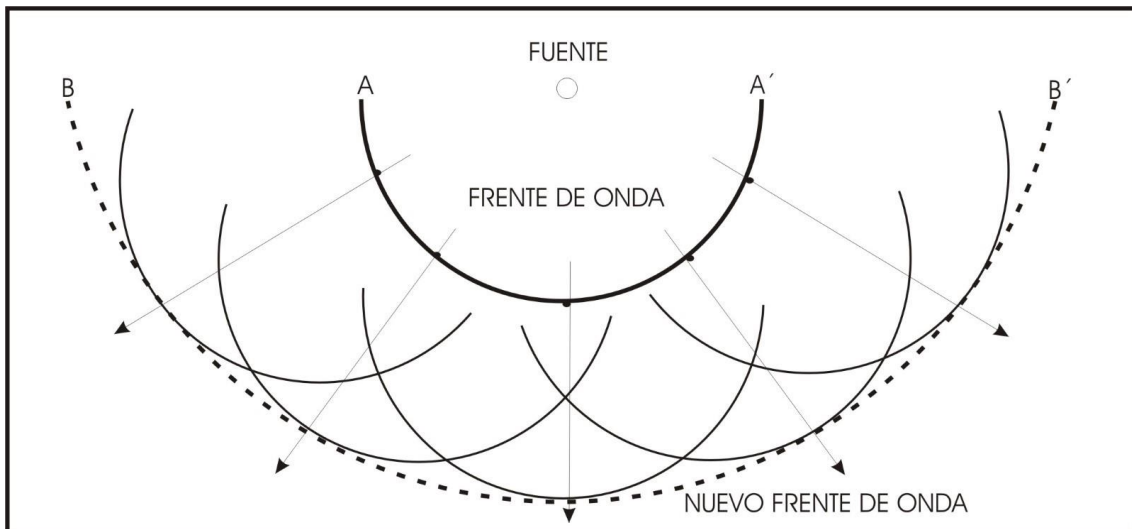


Imagen: Elaboración propia.

En la figura hemos representado sólo unas cuantas del número infinito de onditas que se producen a partir de unas pocas fuentes puntuales secundarias, que se combinan para producir la envolvente BB' . Conforme se extiende la onda, cualquier segmento de ella parece menos curvo. Muy lejos de la fuente original, las ondas casi forman un plano, como sucede, por ejemplo, con las ondas procedentes de lo sol. En la siguiente figura se muestra una construcción hecha por Huygens a base de onditas para frentes de ondas planos.

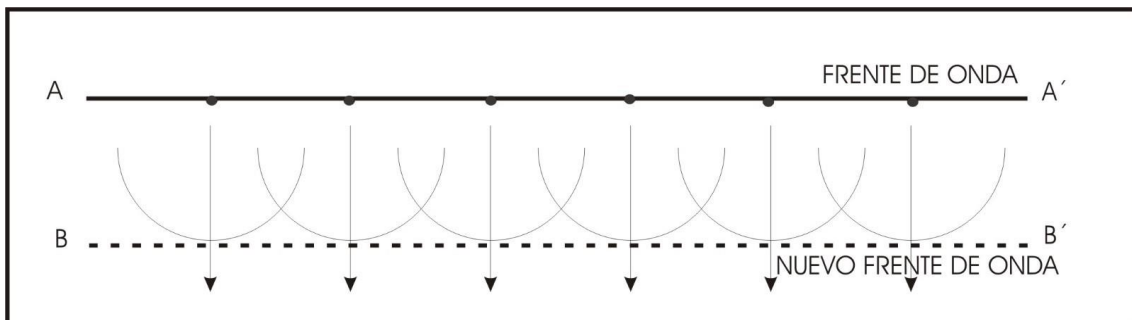


Imagen: Elaboración propia.

Queremos que, con la representación de la luz como una onda, poder dibujar desde una perspectiva ondulatoria qué le ocurriría a una onda que se desplaza y en su camino encuentra una lente convergente, una lente divergente o un espejo esférico.

Para dar cuenta del hecho de que la luz que proviene de una fuente lejana se concentra en el foco, el profesor explicará que la luz tarda más en pasar por el centro de la lente que por la parte exterior, debido a que la velocidad de la luz en el vidrio es menor que en el

aire, dando como resultado una onda que converge en el punto F de la lente. El esquema adecuado de representación sería:

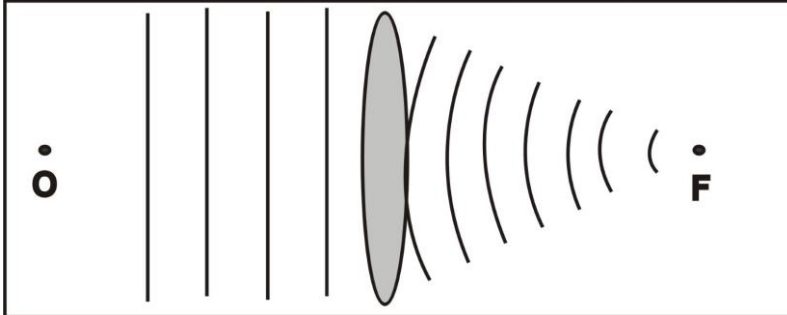


Imagen: Elaboración propia.

El profesor comentará que es un caso muy interesante el hecho de que un prisma con una curvatura apropiada suministrará muchas trayectorias con un tiempo igual de recorrido desde el punto O hasta el punto F en el lado opuesto. La curva compensa las distancias extra que recorre la luz para llegar hasta los puntos más elevados de la superficie, al reducir en un grado adecuado el espesor de vidrio que tiene que recorrer la luz (recordar que en el vidrio la luz se desplaza a menor velocidad media). Con los puntos O y F en las posiciones apropiadas y la curvatura adecuada de las superficies en este prisma modificado, a todas las trayectorias de la luz les corresponde exactamente el mismo tiempo. En este caso, toda la luz que proviene del punto O y que incide sobre la superficie del vidrio se enfoca en el punto F. Es lo que conocemos como comportamiento de la lente convergente.

Como curiosidad, el profesor comentará a los alumnos la relación que tiene las distintas velocidades de la luz con los atardeceres. Cuando contemplamos un atardecer, vemos el Sol durante varios minutos después de que se ha hundido por debajo del horizonte. La atmósfera de la Tierra es más enrarecida cuanto más arriba y más densa cuanto más abajo. Como la luz viaja con mayor rapidez en el aire enrarecido que en el denso, la luz del Sol puede viajar con más rapidez si, en lugar de desplazarse en línea recta, evita tanto como sea posible el aire más denso, tomando una trayectoria más alta y más larga con el fin de penetrar en la atmósfera con una inclinación más pronunciada. Como la densidad de la atmósfera cambia gradualmente, la trayectoria de la luz se desvía también en forma

gradual para convertirse en curva. Algo que resulta muy interesante es que esta trayectoria de tiempo mínimo nos proporciona cada día un periodo más largo de luz del Sol. Además, cuando el Sol, o la Luna, están cerca del horizonte, los rayos del borde inferior se curvan más que los del superior; esto produce un acortamiento del diámetro vertical, lo que hace al Sol verse elíptico.

En el caso de las lentes divergentes y la luz que proviene de una fuente puntual lejana, el profesor explicará que en este caso las partes exteriores del frente de ondas tardan más en atravesar la lente que la parte central, dando como resultado una onda esférica que diverge al propagarse más allá de la lente, como si procediese del punto F' de la lente.

El profesor realizaría el siguiente dibujo:

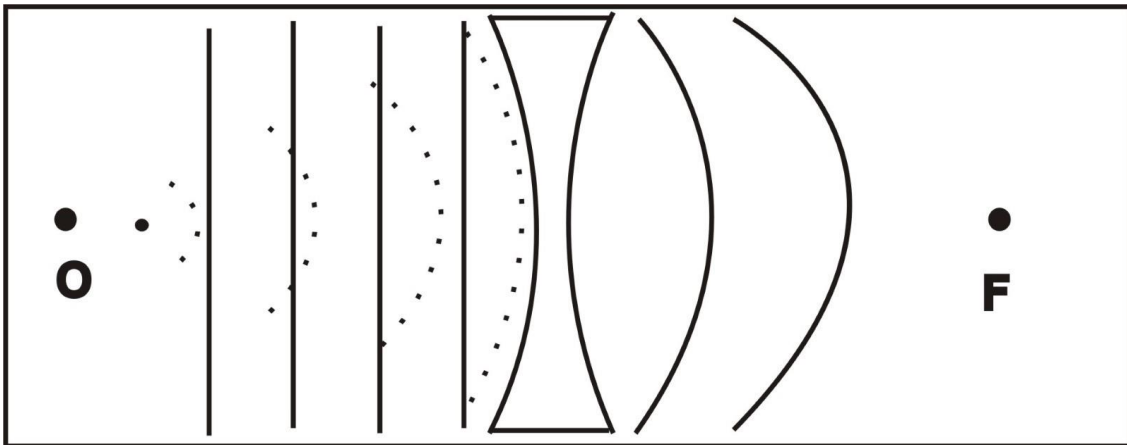


Imagen: Elaboración propia.

El profesor recordará que debemos dibujar la luz como frentes de ondas planas (teniendo en cuenta que la fuente emisora puntual está suficientemente lejos) que se propagan por el espacio. Dichos frentes de ondas planas, se convierten después de la reflexión en ondas esféricas que convergen en el punto focal F , para después divergir de éste. El profesor propondrá el siguiente dibujo a sus alumnos.

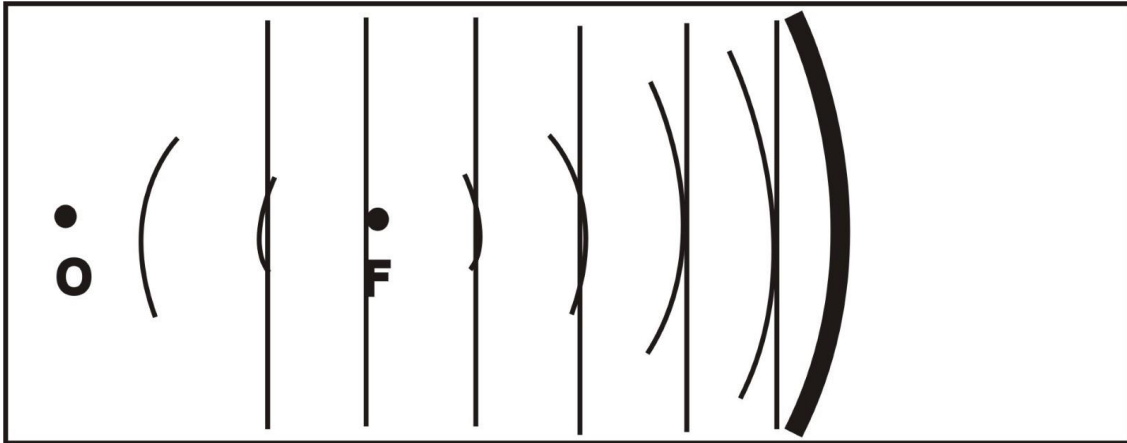


Imagen: Elaboración propia.

2.3. ¿Podemos explicar la visión del color?

La sensación de color que acompaña la visión de un objeto (¡y de las imágenes obtenidas de ellos con lentes, espejos, etc.!) va unida a la sensación de forma y tamaño que hemos estudiado, sin embargo, no es evidente comprender cómo se obtiene esa sensación, por lo que se requiere una reflexión.

A.17. ¿Es la luz “blanca” de color blanco? Razona la respuesta y describe las experiencias que apoyan vuestros argumentos.

El profesor debe hacer una reflexión sobre el lenguaje que normalmente se utiliza ya que al hablar de luz “blanca” estamos asociando también el color con cada tipo de luz. Como hemos estudiado la luz, aunque haga posible la visión, no es en sí misma una entidad visible y, si el color es una percepción asociada a los objetos que vemos (como la forma o el tamaño), entonces el color no puede ser una propiedad de la luz. Es decir, la luz no tiene color. Debemos seguir este razonamiento y, aunque no intentemos cambiar el lenguaje habitual, sí sería conveniente clarificar el significado de estas expresiones. Así, a partir de ahora, entenderemos por luz “blanca” el tipo de luz que hace que veamos blanca una pantalla iluminada por ella. La pantalla que servirá de testigo para “identificar” el tipo de luz es la pantalla habitual sobre la que se suele hacer proyecciones de

diapositivas o de cine, aquella que vemos blanca al estar iluminada con la luz habitual del Sol o de las lámparas de la clase.

Cuando decimos que el tomate es rojo estamos afirmando, entonces, que cuando está iluminado con la luz “blanca” habitual de las lámparas o la luz de día lo percibimos de color rojo, pero sabemos que puede verse de otro color si la luz con que se ilumina fuera otra. Para comprender la visión del color será necesario, pues, profundizar en cómo se obtienen las luces de “colores” a partir de la luz “blanca”. Para ello, vamos a analizar algunos fenómenos, que desde siempre han llamado poderosamente la atención, en los que se obtienen espectros de colores a partir de la luz “blanca”.

A.18. Explica cómo se obtiene la sensación de blanco, de negro, de rojo, de verde, de azul o de amarillo.

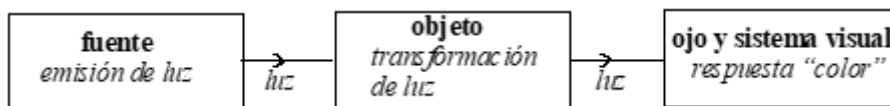
Con esta actividad esperamos que los estudiantes puedan proponer una hipótesis sencilla de interacción de la luz blanca con la materia según la cual vemos blanco un objeto al ser iluminado con luz blanca cuando todos los tipos de luz que la componen son difundidos por el objeto después de incidir la luz en él. Análogamente, se verá azul, verde, rojo, cian o amarillo cuando el objeto difunda ese tipo de luz hasta el ojo del observador y el resto de luces del espectro de la luz blanca sean absorbidas. Por último, diremos que es negro cuando el objeto absorba todos los tipos de luz. Dado que los objetos que llamamos negros son vistos por contraste con el fondo donde se encuentran, algunos alumnos, irreflexivamente, podrán opinar que el objeto negro difunde luz negra, lo que será fácil de rebatir con la hipótesis de interacción de la luz blanca con la materia ya que en su espectro no existe luz negra.

Esperamos que los estudiantes recuerden experiencias en las que el color con que se ven los objetos cambia en función de la iluminación, como pueden haber observado en su ropa al ser iluminada con las luces de color de teatros o discotecas. Si no se poseen este tipo de experiencias, se pueden realizar oscureciendo el aula y colocando filtros coloreados en un proyector de diapositivas para iluminar cartulinas u objetos diferentes. Como consecuencia, en una primera conclusión, podremos relacionar el color con el tipo de luz que difunden los objetos.

Para explicar la sensación del color es necesario disponer de, al menos, las siguientes concepciones básicas:

1. El modelo de Kepler en el que se explica la visión a partir de la luz que llega al ojo.
2. La hipótesis de la luz blanca como mezcla de distintos tipos de luz.
3. El conocimiento de que en la retina existen tres tipos de células con respuesta diferente según el tipo de luz incidente. Esta respuesta es la que hace que a cada tipo de luz le corresponda una sensación de color, pero no a la inversa, es decir, que a cada sensación de color no le corresponde un tipo de luz. Así, podemos explicar la visión del color rojo cuando incide este tipo de luz en el ojo, pero no podemos explicar la visión del magenta a partir de un tipo de luz del espectro de la luz blanca.

De acuerdo con Chauvet (1996) la comprensión de la visión del color requiere la comprensión de una cadena de sucesivos cambios en la información que sobre el color transporta la luz desde la fuente luminosa hasta el sistema visual. Esta cadena de cambios la representa según este esquema:



Esta cadena de cambios lleva asociada una serie de razonamientos que es necesario que realicen los alumnos. Estos razonamientos son la respuesta a preguntas tales como:

¿Cuál es la composición de la luz incidente?

¿Cuál es el resultado de la interacción de la luz con la materia?

¿Cuál es la composición de la luz transmitida o difundida?

¿Cuál es la respuesta del sistema visual?

Nuestra estrategia didáctica para buscar respuesta a estas preguntas, en este nivel educativo, estará basada en la hipótesis de la composición heterogénea de la luz y el conocimiento de la naturaleza ondulatoria de la luz. Recordemos que, concebir la luz blanca como una mezcla de diferentes tipos de luz fue la hipótesis fundamental de Newton en su “Óptica” para explicar la dispersión de la luz blanca al atravesar un prisma, frente

a las teorías imperantes en esa época que basaban la explicación en supuestas modificaciones de la luz. Pensamos, que la introducción de esta hipótesis en la enseñanza de la visión del color, puede ser un camino para sustituir ideas alternativas, que suponemos, podemos encontrar en los estudiantes.

Por otro lado, otras investigaciones didácticas sobre la visión del color han puesto de manifiesto, además, que los estudiantes asignan el color a una propiedad del material de que está compuesto el objeto (Feher y Rice, 1992) pero, dado que los estudiantes que han seguido esta secuencia de enseñanza han tenido ocasión de realizar experiencias en las que la luz difundida por los objetos ilumina con su mismo tono de color una pantalla blanca enfrentada a ellos, es de esperar que también relacionen el color con la luz que los ilumina o, más exactamente, de acuerdo con el modelo de visión elaborado, con alguna característica de la luz que llega a los ojos del observador.

En esta actividad abordamos el segundo eslabón de la cadena de cambios que proponía Chauvet (1996) y, para ello, buscaremos razonamientos que respondan a las cuestiones: ¿cuál es el resultado de la interacción de la luz con la materia? y ¿cuál es la composición de la luz transmitida o difundida?, aunque las respuestas a esta última cuestión deberán ser matizadas posteriormente.

La validez de la hipótesis de la heterogeneidad de la luz blanca y la propuesta de interacción de la luz con la materia para explicar la visión del color tienen límites de aplicación. Vamos a ponerlos en cuestión y vamos a sugerir a continuación las modificaciones adecuadas.

A partir de la hipótesis de la heterogeneidad de la luz blanca y de la absorción por los objetos de parte del espectro de la luz blanca que los ilumina hemos elaborado una primera explicación de la visión del color, sin embargo, la visión humana percibe colores que no se encuentran en el espectro de la luz blanca, lo que hace necesario profundizar en ella y/o modificarla. Si bien todo tipo de luz incidente en el ojo produce una sensación de color, no todas las sensaciones de color pueden ser interpretadas como consecuencia de un tipo de luz del espectro de la luz blanca. Los tonos rosas, púrpuras o magentas no se corresponden con ningún tipo de luz del espectro analizado.

A.19. Formula una hipótesis que explique cómo es posible obtener la sensación de algunos colores que no se encuentran en el espectro de la luz blanca como el marrón o el magenta. (Basado en Osuna, 2007)

Queremos que los alumnos comprendan que si la luz blanca está formada por los distintos tipos de luz que componen el espectro (del rojo al violeta), y los objetos difunden sólo parte de él hasta el ojo, la visión de los colores que no se corresponden con ninguna luz del espectro habrá que buscarla en la fisiología del ojo humano. Queremos que los alumnos conozcan experiencias con luces de color que sugieren que cuando al ojo llegan varios tipos de luz, es posible ver un color diferente de las luces que le llegan. Una de ellas, conocida como síntesis aditiva del color, fue la base para la elaboración de la teoría de la visión del color aceptada actualmente.

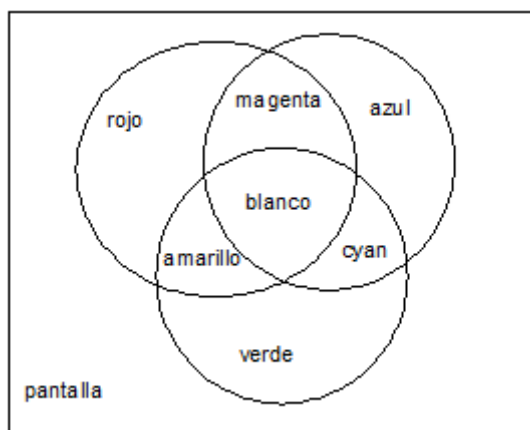


Imagen: Osuna 2007.

El profesor explicará que proyectando sobre una pantalla tres tipos de luces: rojo-anaranjado, verde y azul-violáceo, se puede percibir en las zonas de confluencia colores diferentes a los de las luces emitidas. Thomas Young, en 1802 (Sanz, 1993), propuso la teoría tricromática de la visión del color, según la cual en la retina del ojo humano deberían existir tres tipos de células especializadas del color, cada una de las cuales sería sensible a cada uno de los tipos de luz de esa experiencia. Recientemente se han realizado observaciones microscópicas de la retina y se ha medido la respuesta de estas células (los conos) a cada uno de los tipos de luz que propuso Young. Además, en la retina, existen

otras células llamadas bastones que responden de forma distinta según la intensidad luminosa, por lo que distinguimos los objetos más o menos iluminados.

El profesor explicará la siguiente figura en la que se representan las curvas de sensibilidad de cada uno de los conos de la retina. Uno de estos conos presenta un máximo de sensibilidad a un tipo de luz rojo-anaranjado, otro presenta el máximo de sensibilidad a la luz verde y el otro a la luz azul-violácea. Según la teoría tricromática de la visión de los colores, cuando a la retina llega cualquier tipo de luz, la respuesta de los tres tipos de conos, según su diferente sensibilidad espectral, provoca en el cerebro la sensación de los distintos colores que somos capaces de distinguir.

El profesor relatará el hecho de que la teoría tricromática para la visión de los colores, modifica en parte los razonamientos que habíamos hecho basándonos en la hipótesis de Newton. De forma que, a partir de ahora, podemos decir que vemos un objeto blanco cuando la luz que difunde hasta el ojo activa los tres tipos de conos de la retina. Esta activación se puede realizar, con una mezcla de todos los tipos de luz del espectro, o con otras muchas distribuciones, la más sencilla es la observada en el patrón de colores de la síntesis aditiva, en la que se obtiene la sensación de blanco cuando llegan al ojo sólo tres tipos de luz: rojo-anaranjado, verde y azul-violáceo.

A.20. Es posible obtener la sensación de cualquier color iluminando una pantalla “blanca” con distintas intensidades de luces “primarias” una azul, una verde y una roja. Obtén la mezcla de estos colores al proyectar sobre una pantalla blanca luces de estos tipos y analizad los resultados. (Basado en Osuna, 2007)

La explicación a estas experiencias se ha encontrado al estudiar la fisiología de la retina. En la retina existen dos tipos de células especializadas: los bastones que dan una respuesta distinta según la intensidad luminosa que reciben y tres tipos de conos que responden de forma distinta según el tipo de luz que reciben. Las diferentes sensaciones de color se obtienen cuando en el cerebro se reciben distintos grados de respuesta de cada tipo de estas células especializadas (conos)

Es de esperar que los estudiantes interpreten la visión de los colores magentas debido a las “mezclas” de diferentes tipos de luz. Estas mezclas pueden tener para los estudiantes el mismo significado que las de las pinturas o las de lápices de colores que han podido

realizar en las clases del área de Plástica. Pueden pensar que estas mezclas se realizan sobre el objeto, en el espacio o en el interior del ojo.

Después de estas observaciones es de esperar que los estudiantes interpreten la visión de los colores separando el tipo de luz recibida de la sensación de color producida. Recordaremos aquí, si fuera necesario, que la pantalla reemite toda la luz incidente, por lo que, si una zona ha sido iluminada con luz roja y con luz verde, la pantalla reemite luz roja y luz verde y la sensación de amarillo que percibimos se deberá a algún mecanismo del interior del ojo y/o del cerebro. Como consecuencia, la sensación de amarillo puede obtenerse de dos formas: al llegar al ojo luz amarilla o al llegar luces roja y verde. De manera similar se interpretaría la sensación de color cyan y, en el caso del magenta, llamaremos la atención de que este color no se corresponde con ningún tipo de luz del espectro de la luz blanca y se percibe cuando al ojo llega luz azul y luz roja. Los diferentes tonos de magenta, de cyan o de amarillo se pueden apreciar variando la intensidad de la luz de los respectivos focos. Por último, hay que destacar que la sensación de blanco se elabora al llegar al ojo estos tres tipos de luces sin necesidad del resto de los tipos de luz presentes en su espectro.

Una experiencia que el profesor puede realizar en clase para que los alumnos se cuestionen estas ideas consiste en hacer que se crucen dos haces de luz de distinto color que se proyectan sobre sendas pantallas. Llamar la atención de que los haces de luz llegan a las respectivas pantallas sin alterar “su color”, con lo que ninguno se “mezcla” o coge alguna propiedad del otro cuando se cruzan. Estas experiencias que quizás vayan en contra de sus expectativas pueden llevar a los estudiantes a admitir la hipótesis de Young, según la cual el cerebro debe elaborar un conjunto de diferentes sensaciones de color a partir de tres tipos de luces incidentes. La respuesta de los tres tipos de conos en función de la longitud de onda de la luz incidente según las normas CIE (www.cie.co.at) presenta un máximo para las longitudes de onda 437 nm, 533 nm y 564 nm.

El profesor explicará que la síntesis aditiva se puede realizar en clase con filtros para la iluminación de espectáculos existentes en el mercado y con tres proyectores de diapositivas o contruidos para tal fin. Cada proyector se puede construir con un tubo metálico en cuyo extremo se coloca una lente convergente de 10 dioptrías y a unos 9 cm

una lámpara halógena dicróica de 12V y 50 W. En nuestras experiencias hemos utilizado el dispositivo que se muestra en la fotografía.

Para la obtención en una pantalla del patrón de colores exacto de la síntesis aditiva, deben utilizarse tres tipos de luz cuyas longitudes de onda se encuentren en un estrecho margen alrededor del máximo de sensibilidad de cada uno de los conos, y que se pueden obtener con tres proyectores láser adecuados, lo que se aleja de los materiales y condiciones de un laboratorio escolar.

3. Recapitulación y nuevos problemas. Límites de nuestro modelo ondulatorio de la luz.

A.21. ¿Qué te sugiere la siguiente experiencia?: Si mantenemos una brújula fija en un sistema de referencia, respecto al cual se mueve una carga, la brújula detectará un campo magnético, causado por la carga en movimiento respecto de la brújula. Sin embargo, si la brújula se mueve a la misma velocidad que la carga, no detecta ningún campo magnético. Es decir, no actúa ninguna fuerza sobre la brújula.

Según la teoría clásica mecánica de Newton, las leyes de la física tenían que ser iguales en todos los sistemas de referencia inerciales, es decir aquellos que se movían entre sí con velocidad constante. ¿Ocurre esto en la experiencia anterior?

Queremos que los alumnos comprendan que nuestro modelo ondulatorio tiene límites que no podemos explicar, al igual que sucedía con el modelo geométrico. Queremos que los alumnos comprendan que estamos utilizando modelos que son una figuración de la realidad, y que por tanto tienen límites.

El profesor resaltaré que esto no ocurre con otras fuerzas. La Física clásica mantiene la idea de que todas las fuerzas son iguales en sistemas de referencia inerciales. Si queremos una ciencia universal, tendremos que atender a la necesidad de cambiar algunas ideas de la física clásica. En concreto, explicará a los alumnos que el campo magnético es un efecto

relativista, que surge precisamente entre sistemas de referencia que se mueven entre sí. Ello dará pie a la teoría de la relatividad de Albert Einstein.

En el caso de la fuerza magnética, aparece la velocidad de la partícula, pero ¿respecto de que sistema de referencia? Resulta evidente que desde diferentes sistemas se medirán diferentes velocidades, y por tanto las fuerzas magnéticas variarán de un sistema a otro. En consecuencia, las interacciones magnéticas no son algo absoluto, como las leyes de la dinámica, sino que dependen del sistema de referencia.

Es decir, las fuerzas magnéticas son relativas al sistema de referencia. Al cambiar de un sistema de referencia a otro, tanto la fuerza eléctrica como la fuerza magnética cambiarán, pero siempre existirá la misma relación en sus intensidades. Esta relación determina además la velocidad de propagación de las ondas electromagnéticas. Por consiguiente, no es extraño que la velocidad c juegue un papel de la velocidad invariante en el principio de relatividad especial.

Por otra parte, el hecho de que el desdoblamiento del campo electromagnético en campos eléctrico y magnético dependan del sistema de referencia nos advierte de que no debemos conceder una entidad absoluta a las líneas de fuerza de cada campo, aunque sí tienen un carácter absoluto algunas propiedades generales de las mismas. La existencia de cargas eléctrica y la ausencia de cargas magnéticas son propiedades absolutas y, por consiguiente, en cualquier sistema de referencia debe haber líneas de campo eléctrico que comiencen o terminen en las cargas eléctricas, mientras que las líneas de campo magnético deben cerrarse siempre sobre sí mismas.

ANEXO IV. DIARIO DE CLASE 2019

6/02/2019. SESIÓN 1

Realizamos las actividades preliminares, acerca de cómo vemos basándonos en la U.D. propuesta por Luis Osuna (2007) para la ESO. Al finalizar este conjunto de actividades los alumnos realizan una sencilla auto-evaluación encaminada a comprobar si han comprendido qué es necesario para ver, así como que es necesario utilizar el haz de luz. El profesor insiste en desterrar los iconos que se utilizan en la vida diaria y que no están de acuerdo con una representación adecuada de las fuentes de luz. Así mismo insiste en que la condición necesaria para la visión es que llegue un haz de luz divergente al ojo. Es importante asegurarse de que todos los alumnos han comprendido el concepto de HAZ de LUZ. El profesor junto con sus alumnos dibuja las luces, sombras y penumbras propias de un eclipse. Se aprecia buena disposición por parte de los alumnos.

7/02/2019. SESIÓN 2.

A.1. Sugiere un sistema físico que pueda ser utilizado como modelo de ojo humano y con el cual podamos estudiar cómo se comporta la luz en su interior para dar respuesta a las preguntas que nos hacíamos inicialmente: ¿Cómo vemos? ¿Cómo podríamos ver mejor? (Osuna, 2007)

Tras la explicación del funcionamiento fisiológico del ojo, queremos que los alumnos planteen hipótesis sobre un posible modelo del mismo. El profesor ayuda a los alumnos a considerar al ojo de manera simplificada como un conjunto de elementos convergente (cristalino)-pantalla (retina).

Los alumnos se muestran animados y comprenden el modelo propuesto. Algunos de ellos habían propuesto ideas similares.

8/02/2019. SESIÓN 3.

A.2. Realiza el montaje siguiente, y encuentra alguna posición de la fuente, el objeto y la pantalla para que el observador vea en ella la imagen del objeto (la fuente de luz puntual). (Basado en Osuna 2003-2008)

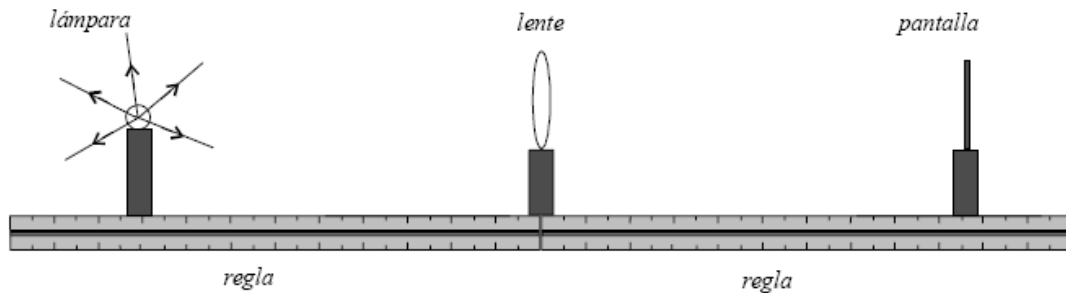


Imagen: Osuna, 2003-2008.

A partir del modelo propuesto para el ojo realizaremos un montaje en el laboratorio con una fuente de luz, una lente convergente y una pantalla para que los alumnos encuentren la imagen del objeto. Los alumnos prueban distintas posiciones de la lente, la fuente y la pantalla. Comprueban que si alejan la fuente deben de acercar la pantalla.

El profesor les plantea la idea de la existencia de un límite para una fuente muy alejada.

El profesor trata de introducir el concepto de foco imagen.

A.3. Realiza un trazado gráfico que explique la formación de la imagen con este sistema lente-pantalla basado en el modelo del ojo humano: (Osuna, 2003.2008)

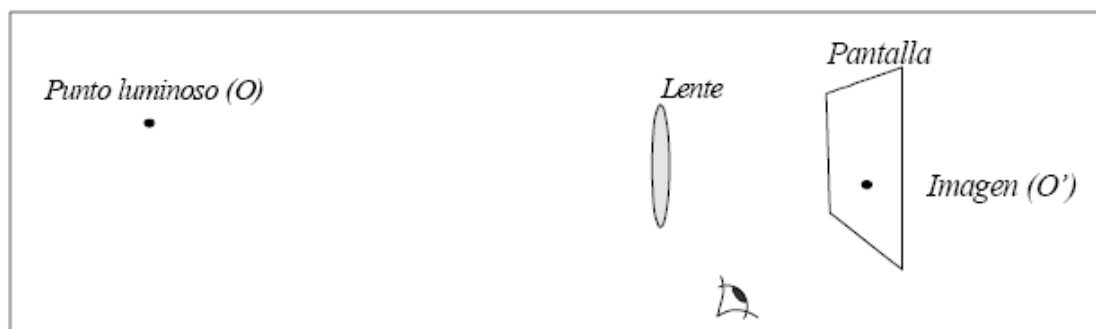


Imagen: Osuna, 2003-2008.

Los alumnos les cuesta trabajo al principio darse cuenta de que para una fuente muy alejada, cada rayo del haz paralelo incidente, procede del mismo punto de la fuente. El

profesor ha de insistir en que esto es así para fuentes muy alejadas, el haz procedente de un punto, llega casi paralelo al eje óptico.

Con esta actividad también se busca introducir el concepto de foco objeto.

Los alumnos prueban experimentalmente su existencia y tratan de realizar un trazado gráfico explicativo.

El profesor insiste en la importancia de la reversibilidad del trazado gráfico.

Los alumnos llegan a la conclusión de que hay un límite en el acercamiento del objeto a la lente, de manera que si lo acercamos más, no se forma la imagen.

Actividades de laboratorio con lentes de distinta convergencia, y lentes divergentes.

Se trata de que los alumnos comprendan la capacidad real de las lentes de focalizar la luz. Trabajamos con lo que serán el foco objeto y el foco imagen. Queremos que los alumnos comprueben que la luz que procede del infinito (o en nuestro caso de muy lejos) se concentra gracias a las lentes convergentes en un único punto, (que llamaremos foco imagen).

Igualmente trataremos de ver que sucede si situamos la luz en el foco objeto de la lente. (Queremos que los alumnos vean que, una vez atravesada la lente, la luz se va al infinito, no se concentra).

Lo hacemos con lentes convergentes de distinta potencia.

Igualmente vemos qué ocurre con las lentes divergentes.

Los alumnos se muestran contentos con las experiencias. Parecen comprender el funcionamiento de las lentes.

A.4. En el caso de un objeto extenso la imagen la formaremos considerando la fuente extensa de luz como un conjunto de fuentes puntuales. Completa el esquema siguiente a partir de estas ideas.

12/02/2019. SESIÓN 4.

Trabajamos con las lentes convergentes de distintas potencias. Realizamos las actividades

A.5 Utilizando el mismo montaje de la A.2, comprueba que al alejar la fuente debemos acercar la pantalla para ver su imagen. ¿Existe una posición límite de la pantalla al alejar la fuente? Realiza un trazado gráfico explicativo para el caso límite encontrado.

A.6 Con ese mismo montaje, observa que al acercar la fuente debemos alejar la pantalla para ver su imagen. ¿Existe alguna posición límite para la fuente a partir de la cual no se forma ninguna imagen? Realiza un trazado gráfico explicativo para ese caso límite.

Observa que acercando el objeto a la lente debemos alejar la pantalla para ver su imagen. ¿Existe alguna posición límite del objeto a partir de la cual no se pueda ver? Realiza la experiencia y un trazado gráfico explicativo.

A.7 Sitúa ahora la lente a 11 cm de la pantalla y sin variar esta distancia (que es lo que ocurre en el ojo humano con el cristalino y la retina):

a) Anota la posición a la que debe situarse un objeto para que se forme la imagen en la pantalla.

b) Cambiando la lente por otra más gruesa (una de 20 dioptrías), obtén la nueva posición del objeto para ver la imagen en la pantalla. Esta situación es equivalente a la que realiza el cristalino del ojo humano (acomodación).

A.8 En las actividades anteriores hemos introducido los siguientes elementos característicos de la lente: Foco objeto (F), Foco imagen (F'), Centro óptico (C) y eje óptico. Utilizando las propiedades de estos elementos realiza trazados gráficos para localizar la posición de la pantalla donde se ve la imagen del objeto en los siguientes casos:

a) Objeto alejado

b) Objeto cercano

c) Objeto entre el foco y la lente

d) Objeto extenso.

A.9 Encuentra las distancias focales de las lentes suministrada por el profesor.

Los alumnos manejan con familiaridad el concepto de haz de luz, de foco imagen y foco objeto. También realizamos comparaciones con lo que podría ser el ojo humano. Realizamos trazados de rayos para ir familiarizándonos con el algoritmo del trazado de rayos, siempre a partir de su comparación con la experiencia de laboratorio. Los alumnos llegan a la conclusión de que es necesario un cambio en la curvatura de la lente si queremos que la imagen se forme con la pantalla a distinta distancia, si el objeto está a diferentes distancias de la lente. El profesor ayudará a los alumnos a comprender las características tan especiales que tiene la lente de nuestro ojo. El cristalino puede curvarse dependiendo de la distancia a la que se encuentre el objeto del que queremos formar la imagen en nuestro ojo.

Lo hacemos experimentalmente con distintas lentes.

A.10 En el sistema lente-pantalla que estamos estudiando hemos aprendido a realizar el trazado gráfico que permite localizar la posición de la imagen, para diferentes posiciones del objeto. Hemos comprobado que, en función de la distancia del objeto a la lente, la distancia de la lente a la pantalla varía. Pero en el ojo, la pantalla no es móvil. ¿Cómo es posible formar la imagen de objetos situados a distancias diferentes? ¿Qué hipótesis lo podría explicar?

Buscamos que los alumnos comprendan la relación entre el poder de convergencia de las lentes y su distancia focal, y en consecuencia con la potencia de la lente.

13/02/2019. SESIÓN 5.

A.11 Desde el punto de vista fisiológico el diafragma del iris se regula inconscientemente variando el diámetro de la pupila ¿Cómo afecta a la imagen que se forma en una pantalla un diafragma situado delante de la lente y que tape parte de ella? Prueba tus predicciones experimentalmente.

Buscamos que los alumnos puedan explicar con un sistema lente-pantalla, como se puede apreciar el tamaño o la lejanía de los objetos que vemos. El profesor recordará a los

alumnos la necesidad de la modelización de un objeto extenso como un conjunto de objetos puntuales. El profesor intentará que los alumnos se fijen en el hecho de que la imagen de un punto del extremo superior del objeto se formará en la parte inferior de la pantalla. Es decir, forma la imagen invertida. Es por tanto necesario introducir la idea de que, en último término, es el cerebro conectado mediante el nervio óptico a la retina, el que elabora la sensación de visión. El profesor incidirá en la idea de que la imagen solamente existe como tal, si hay un observador. Sino sería simplemente una distribución de puntos donde se concentra la luz.

se trata de que los alumnos se den cuenta de que en la retina la imagen se forma invertida. Es muy importante que los alumnos comprueben que si tapo media lente la imagen sigue viéndose, aunque con menos luminosidad.

14/02/2019. SESIÓN 6.

A.12 A partir del trazado geométrico realizado en la A.8 deducid una relación entre las distancias del objeto y de la pantalla a la lente y su distancia focal.

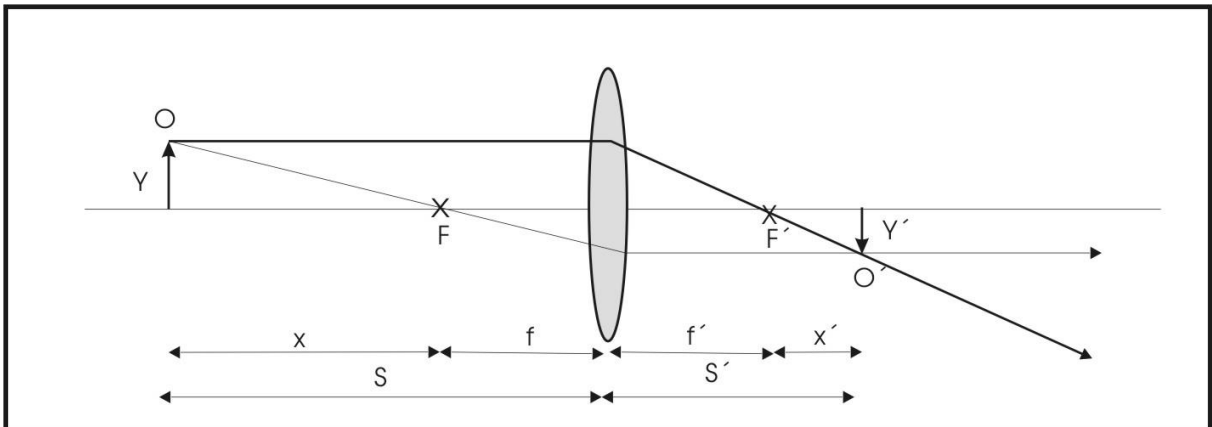


Imagen: Elaboración propia.

A.12.1 (Complementaria) Diseña y realiza una experiencia para contrastar la expresión encontrada en la actividad anterior.

A.13 Para cada tipo de lente, la posición del objeto condiciona la posición de la pantalla dónde se ve la imagen y el tamaño con que se ve, deduce del siguiente trazado gráfico

la relación entre el tamaño de la imagen y el tamaño del objeto (aumento lateral, β) en función de esas distancias.

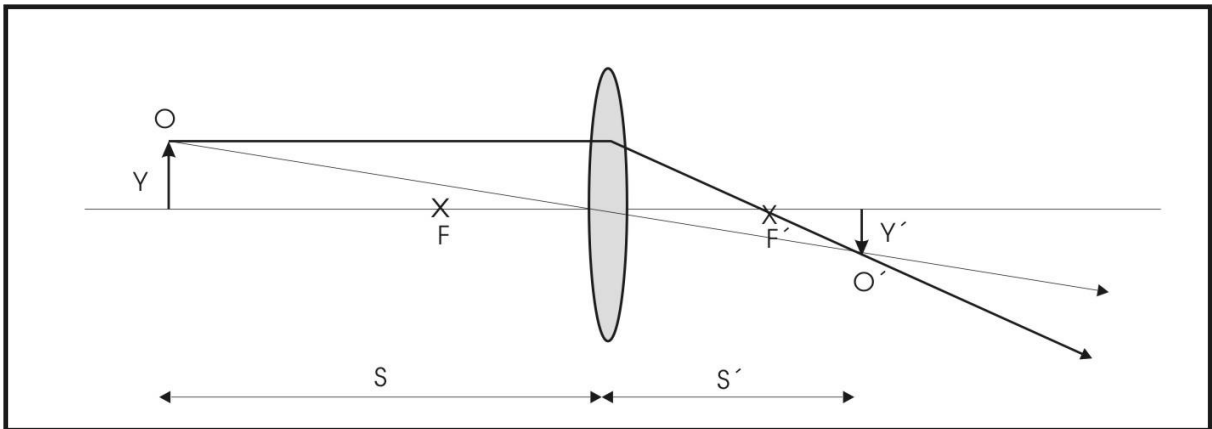


Imagen: Elaboración propia.

A.14. A partir del trazado gráfico obtener expresiones que relacionen: a) las distancias s , s' y la focal de la lente y b) el aumento del tamaño de la imagen con las distancias “ s ” y “ s' ”

A.14.1 Suponiendo que el ojo humano es un sistema lente convergente pantalla separados 23mm. Calcula la potencia de este modelo de ojo.

A.15 Resuelve actividades de manejo numérico de estas ecuaciones válidas para las lentes delgadas y con la aproximación paraxial.

Formularemos la ecuación de Newton $x \cdot x' = f^2$. Los alumnos comprenden su utilidad y su significado.

A.16 Realiza una recapitulación de lo tratado hasta aquí resaltando cuál era el problema que tratamos de resolver, las hipótesis implícitas en el modelo de visión y las pruebas realizadas para su contraste experimental. Describe con profundidad el modelo que explica cómo vemos los objetos. ¿Qué nuevos problemas podremos resolver a continuación?

Realizaremos conjuntamente la recapitulación de las ideas sobre cómo vemos. Haremos referencia al modelo de visión de Kepler. Los alumnos se encuentran ya capaces de realizar trazados de rayos con sentido. Diferencian entre imagen real virtual. Conocen las diferencias convergencias de distintas lentes y lo asocian a la capacidad del cristalino de enfocar a distintas distancias. Se ven animados y contentos.

15/02/2019. SESIÓN 7.

A.17 A veces se piensa que la imagen de un objeto que vemos al mirar un espejo plano está pegada en él. ¿Qué observaciones crees que contradicen esta idea? ¿Qué características tiene la imagen que se ve?

Comenzamos una serie de actividades dedicadas al estudio de los espejos. Queremos comprobar que nuestro modelo de visión es válido. Queremos que los alumnos comprendan que desde el lugar donde parece estar la imagen no puede proceder la luz. Los alumnos comprenden fácilmente que la imagen que forman los espejos es virtual. En la A21 lo hacemos de modo experimental.

A.18. De acuerdo con el modelo de visión que hemos elaborado, vemos un objeto cuando un haz divergente de luz procedente de cada punto del mismo entra en el ojo y éste forma una imagen en la retina. Formula una hipótesis, coherente con nuestro modelo, que explique cómo vemos un objeto puntual O al mirar a un espejo plano. Realiza un trazado gráfico.

Los alumnos aplican lo experimentado al trazado de rayos, se muestran animados.

A.19. En caso de que el objeto situado frente al espejo fuese extenso, realiza el trazado geométrico adecuado que explique la formación de la imagen en un espejo.

Repiten el trazado de la reflexión de la luz para un objeto extenso. Queremos que sigan considerando a los objetos extensos como conjuntos de puntos puntuales. Los alumnos comprenden que la imagen que dibujamos solo tiene sentido en referencia al observador, puesto que es virtual. Los alumnos se sienten cómodos con los ejercicios. Parecen comprenderlo bien. Se sorprenden inicialmente de la simetría especular, que se observa en el trazado de rayos.

A.20. En el esquema siguiente se representa un espejo plano, un objeto puntual (O) y un observador en varias posiciones. Dado que la posición de la imagen que se ve, no depende de la posición del observador, completa un diagrama de rayos para interpretar

desde qué posiciones del observador se podrá ver la imagen al mirar al espejo (Osuna 2003-2008).

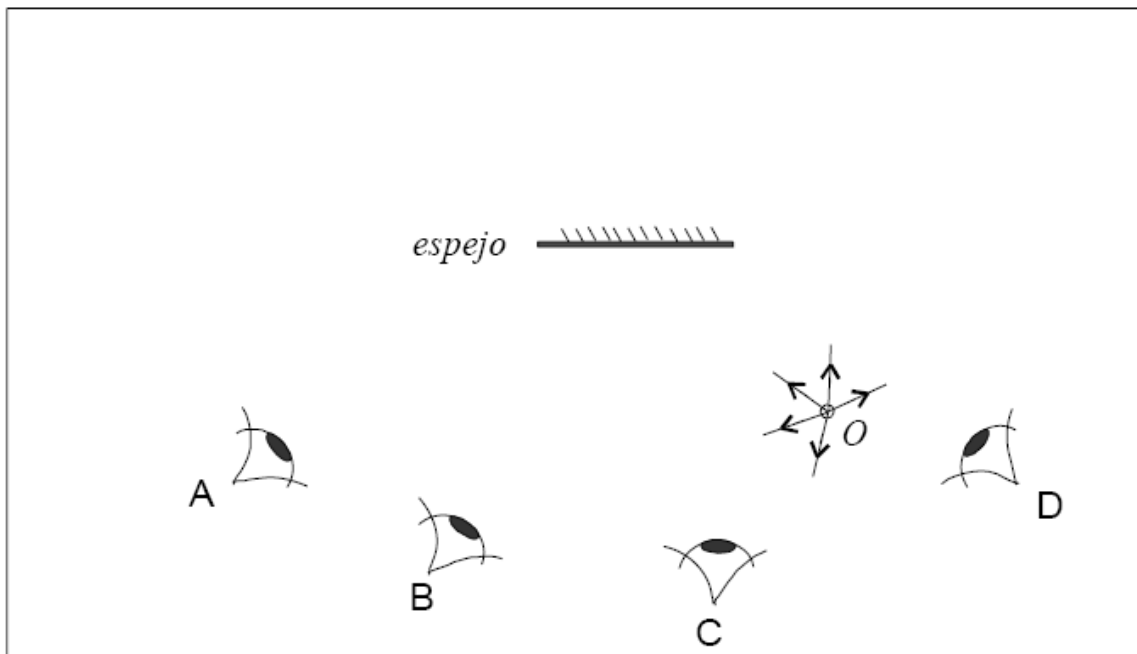


Imagen: Osuna, 2003-2008.

Se trata de deducir mediante el trazado gráfico que la distancia a la que se sitúa un objeto es igual a la distancia a la que se forma la imagen. Los alumnos son capaces de realizar el trazado de rayos correctamente y deducir que observadores verán la imagen.

Se aprecia buena implicación de la mayoría de los alumnos. Manifiestan su preferencia por este tipo de clases más activas y participativas.

19/02/2019. SESIÓN 8.

Hoy vamos a experimentar con espejos esféricos.

A.21 Explora cómo se ven los objetos al mirar a un espejo esférico cóncavo (puede usarse uno de maquillaje). En concreto realiza las siguientes observaciones:

a) Mira la imagen de un objeto próximo al espejo y observa los cambios que se ven al alejarlo del espejo.

b) Busca dónde se concentra la luz de una fuente puntual muy alejada del espejo.

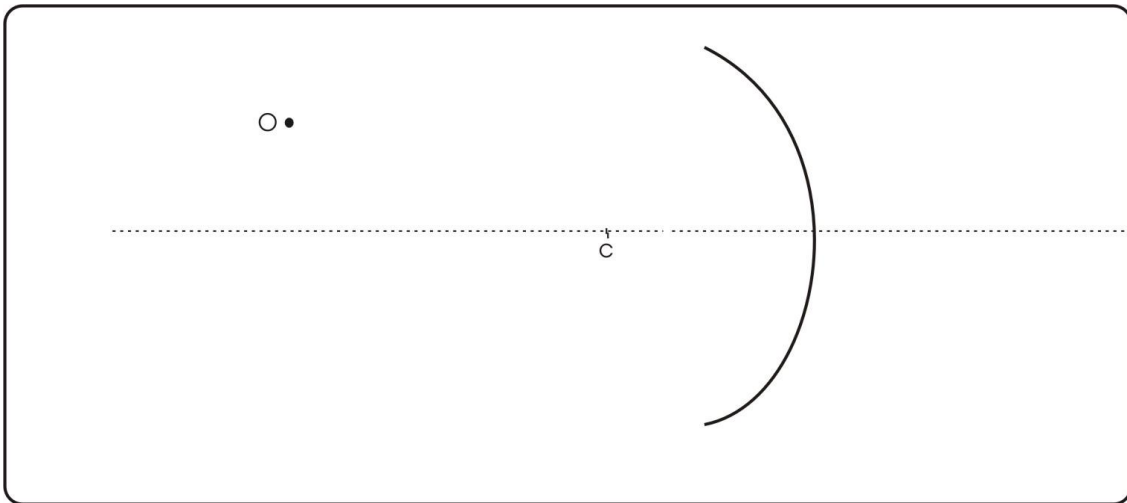


Imagen: Elaboración propia.

Se trata de que los alumnos aplicando las leyes de la reflexión hagan una representación gráfica para localizar la imagen de un objeto puntual. El profesor explica a los alumnos la necesidad de utilizar haces estrechos de luz, (aproximación paraxial) puesto que el espejo cóncavo no es un sistema estigmático.

A.22 Demuestra que, considerando la aproximación paraxial para los espejos esféricos cóncavos, la distancia focal $f = R/2$. Para ello podemos realizar el trazado de un único rayo del haz procedente de un punto situado en el infinito sabiendo, además, que para ángulos muy pequeños tanto el seno como la tangente del ángulo son aproximadamente igual al propio ángulo expresado en radianes.

se trata de encontrar el foco de los espejos cóncavos. Definimos el eje óptico. Los alumnos se muestran receptivos y asimilan con facilidad los nuevos pasos que estamos dando.

A.23 Conociendo los elementos ópticos del espejo esférico cóncavo en la aproximación paraxial (F , R , C , eje óptico) y sabiendo que la imagen es real para objetos alejados, realiza un trazado gráfico para localizar la posición donde deberíamos situar la pantalla para ver la imagen del objeto puntual O .

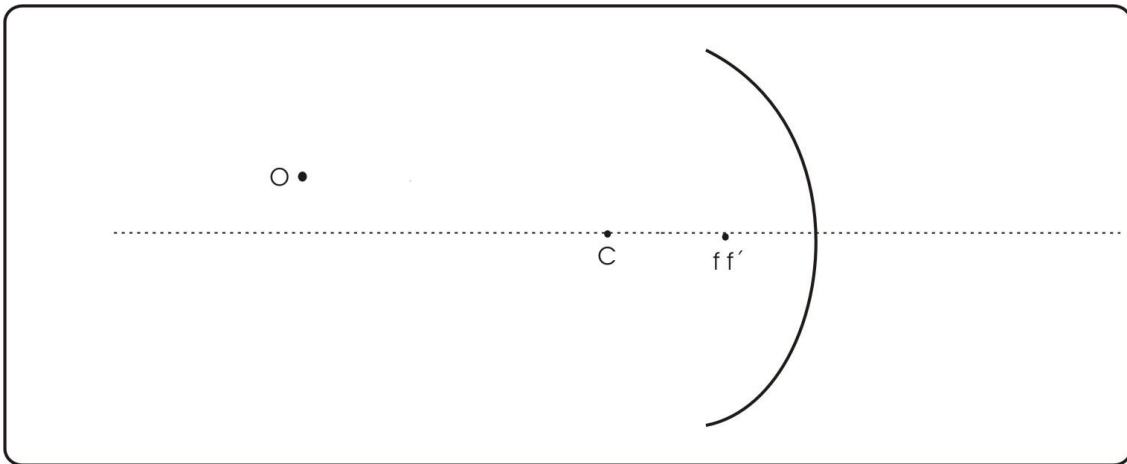


Imagen: Elaboración propia.

Tratamos de que los alumnos realicen el trazado gráfico para localizar la posición donde deberíamos colocar una pantalla para ver la imagen formada por un espejo cóncavo de un objeto puntual correctamente. El profesor explica a los alumnos que si el haz reflejado que converge en O' , se representará simétricamente al otro lado del espejo se obtendría un trazado similar al que obtendríamos con una lente convergente. Los alumnos se ayudan unos a otros, se explican entre sí. Se les ve animados.

20/02/2019. SESIÓN 9.

A.24 Conociendo los elementos ópticos del espejo esférico cóncavo en la aproximación paraxial (F , R , C , eje óptico) y sabiendo que la imagen es real para objetos alejados:

a) Realiza un trazado gráfico para localizar la posición donde deberíamos situar la pantalla para ver la imagen del objeto AB .

b) Deduce de la geometría de este trazado una relación entre s , s' y f , que nos permita conocer donde vemos la imagen real formada por un espejo esférico cóncavo. (Se recomienda que se compare este trazado con el realizado en la lente convergente)

c) Deduce, igualmente, la relación entre el aumento lateral (β) y las distancias s y s' .

Esta actividad trata de que los alumnos sean capaces de realizar el trazado gráfico para localizar la posición donde deberíamos colocar una pantalla para ver la imagen de un objeto, conociendo los elementos ópticos de un espejo. Queremos que los alumnos lo

relacionen con el trazado para las lentes convergentes. El profesor debe insistir en que el trazado gráfico para el espejo cóncavo es simétrico al de las lentes convergentes y es por ello que se podrá utilizar la misma expresión para ambos. Los alumnos comprenden bien esta simetría, se muestran receptivos y capaces.

A.25 Cuando el espejo esférico cóncavo (caso de espejo de maquillaje) se utiliza para ver objetos cercanos, entre el foco y el espejo, ¿Cómo es la imagen que vemos? Realiza un trazado gráfico explicativo.

Esta actividad busca que los alumnos a partir de su experiencia con los espejos en el laboratorio realicen un trazado gráfico para encontrar la posición de la imagen de un objeto que se encuentra mas próximo al espejo que la distancia focal.

A30 Ejercicios de PAU. A los alumnos les resultan sencillos y asequibles, muestran buena disposición y confianza.

21/02/2019. SESIÓN 10.

A.26. ¿Cómo vemos al mirar hacia un espejo convexo? Explora su comportamiento (como aproximación a este dispositivo puede usarse una cuchara metálica bien pulida).

A.27. Suponiendo la aproximación paraxial, dibuja un espejo esférico convexo y realiza trazados gráficos que expliquen la posición de los focos.

Con esta actividad los alumnos ayudados por el profesor definen el foco imagen de un espejo convexo, a partir de la experiencia en el laboratorio. El profesor recuerda que tanto el foco objeto como el imagen es virtual. Los alumnos lo entienden bien.

A.28. Realiza un trazado gráfico de manera que explique que la imagen de un objeto extenso que se ve en un espejo convexo es siempre virtual, derecha y de menor tamaño. Confirma tu predicción usando un espejo esférico convexo.

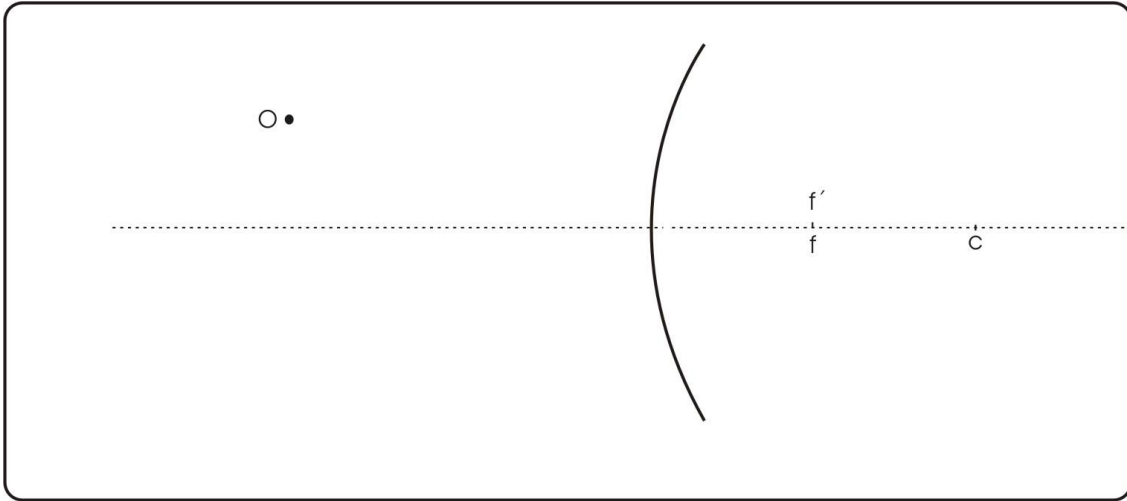


Imagen: Elaboración propia.

(Opcional) Realiza el trazado gráfico correspondiente para encontrar la imagen de un objeto extenso que se formará al reflejarse en un espejo convexo.

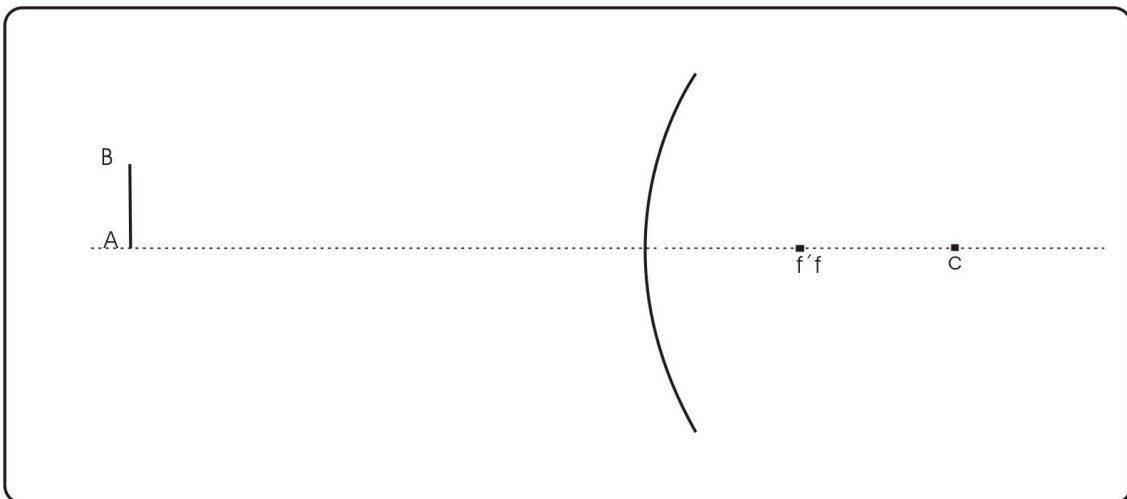


Imagen: Elaboración propia.

Se trata de que los alumnos expliquen cómo es la imagen que se ve al mirar un espejo esférico convexo, aplicando las leyes de la reflexión. Queremos que los alumnos comprendan que la imagen no es real, que la luz no puede provenir de detrás del espejo. Los alumnos muestran comprensión y solamente dibujan la imagen cuando hay un observador.

A.29. A partir del trazado gráfico anterior, encuentra una relación entre s , s' y la característica principal del espejo (f'). Encuentra también una expresión para el aumento lateral.

A.30. Ejercicios de manejo relacionados con espejos esféricos cóncavos aparecidos en exámenes de EBAU.

A.31. Al mirar a un pequeño objeto sumergido en un recipiente con agua nos parece verlo en otra posición. Realiza las observaciones que se representan en los esquemas y señala las características de la imagen que vemos (Osuna 2003-2008).

22/02/2019. SESIÓN 11.

A33 Realizamos experiencias en el laboratorio con objetos sumergidos en agua. Para explicar la formación de imágenes con lentes delgadas formulamos la hipótesis de que los haces de luz sufrían un proceso de convergencia al atravesar la lente. El caso más sencillo para estudiar el comportamiento de la luz cuando atraviesa medios transparentes es el de mirar un objeto sumergido en un medio transparente. Mediante la actividad 33 realizamos observaciones de objetos sumergidos en agua y los alumnos señalan las características de las imágenes que ven. Los alumnos se dan cuenta de que la posición de la imagen que ven depende de la posición del observador. El profesor ayuda a los alumnos para que realicen el trazado gráfico.

A.32. De acuerdo con el modelo de visión de Kepler, para ver un objeto debe entrar en el ojo un haz de luz divergente procedente de cada uno de sus puntos. Formula una hipótesis sobre el comportamiento de la luz que explique que cuando miramos hacia un objeto sumergido en agua nos parezca que se encuentra a menor profundidad.

Con ayuda del profesor y aplicando el modelo de visión de Kepler los alumnos son capaces de realizar el trazado gráfico para la obtención de la posición de la imagen de un objeto sumergido. Los alumnos se dan cuenta de que el trazado explica porqué nos parece que los objetos sumergidos están a menor profundidad.

A.33. Formula hipótesis acerca de los factores que influyen en el ángulo de refracción de la luz al pasar de un medio a otro.

Se trata de que los alumnos formulen una hipótesis acerca de los factores que influyen en el ángulo de refracción de la luz al pasar de un medio a otro. Los alumnos intuyen que cambiando el medio, por ejemplo utilizando glicerina, el ángulo de refracción cambia.

26/02/2019. SESIÓN 12.

A.34. Diseña una experiencia para encontrar una relación entre el ángulo de incidencia y el ángulo de refracción. Llévala a la práctica y, a partir de los datos, encuentra una relación entre $\sin i$ y $\sin r$.

Los alumnos diseñan su propio experimento. Los dos grupos lo hacen autónomamente y con métodos diferentes. Los alumnos muestran ilusión y buena disposición. Parecen ilusionados con sus experimentos y muestran ilusión al poder encontrar una relación entre el ángulo de incidencia y el ángulo de refracción. A petición de los alumnos repetimos la experiencia con distintos medios transparentes. Los alumnos disfrutaban con sus montajes. Cada vez tienen mas iniciativa

A.35. Cuando la luz pasa del agua al aire, como ocurre cuando miramos a un objeto sumergido, la ley Snell-Descartes predice la existencia de un valor límite del ángulo de incidencia, a partir del cual la luz no sale del agua y se refleja en su superficie (reflexión total interna). Calcula el valor de ese ángulo límite sabiendo que el índice de refracción del agua es de 1,33. Haz lo mismo para el caso del vidrio con índice de refracción 1,5.

se trata de comprender la existencia de un ángulo límite de incidencia cuando la luz pasa del agua al aire., para el cual no se produce refracción. Los alumnos lo calculan para el agua. Comparan su ángulo experimental con el teórico.

Los alumnos muestran asombro e interés al encontrar el ángulo límite.

27/02/2019. SESIÓN 13.

A.36. Ejercicios de manejo de la ley de la refracción en exámenes de la EBAU.

Esta actividad trata de que los alumnos comprendan la ley de Snell. Realizamos en clase ejercicios numéricos. Los alumnos comprenden su resolución.

Ejercicios de EBAU refracción

28/02/2019. SESIÓN 14.

Corrección ejercicios EBAU. El profesor resuelve dudas. Los alumnos se muestran capaces y animados.

1/03/2019. SESIÓN 15.

A. 37. Representa cómo se ve en una pantalla la imagen formada con una lente convergente. Si se elimina la pantalla, ¿es posible ver esa imagen?, ¿desde dónde se podrá ver? Realiza un diagrama que lo explique.

A.38. Explora el comportamiento de la lente convergente suministrada por el profesor cuando actúa como lupa anotando los resultados de las observaciones siguientes:

- a) ¿En qué margen de distancias a la lente puede estar situado el objeto para que actúe como lupa?**
- b) ¿Qué características tiene la imagen cuando la lente actúa como lupa?**

A.39. Una persona mira a través de una lente convergente a un objeto puntual situado entre el foco y la lente. Realiza un esquema un diagrama de rayos que explique tu hipótesis acerca de cómo es visto ese objeto cuando la lente actúa como lupa.

A.40. ¿Cómo se ve una letra de 4 mm a través de una lupa de 15 dioptrías cuando se sitúa a 5 cm de la lente? Realiza un trazado gráfico y explica las características de la imagen.

A.41. *Una persona se sorprende que, al mirar a un objeto cercano, a través de una lente convergente, vea la imagen derecha y más grande y, sin embargo, cuando mira a un objeto lejano vea la imagen más pequeña e invertida ¿podrías explicarlo?*

A.42. *Considerando la aproximación paraxial, explicar la convergencia de los haces de luz cuando atraviesan una lente convergente. Realizar trazados gráficos para explicar el comportamiento de la luz en cada cara de la lente*

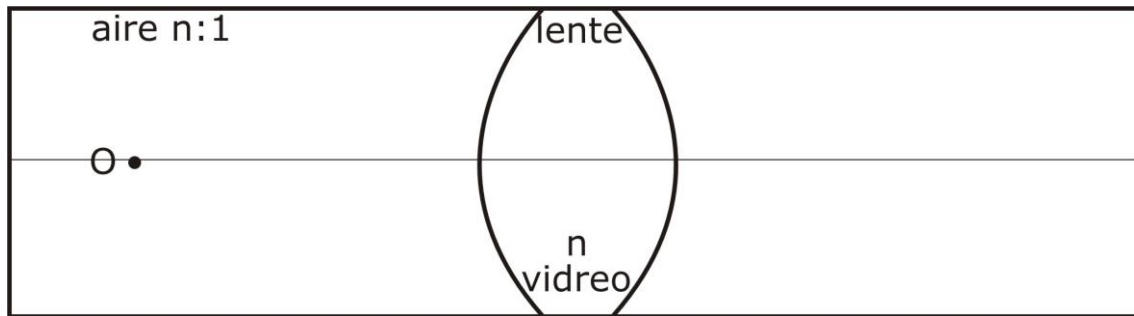


Imagen: Elaboración propia.

A partir de la hipótesis de refracción de la luz con la que hemos podido explicar como vemos los objetos sumergidos en medios transparentes, vamos a intentar explicar como se comporta la luz al atravesar las lentes. Los alumnos dibujan trazados de refracción en las dos caras

El profesor a partir del trazado gráfico aplicando la ley de Snell a los dos dioptrios llegamos a la ecuación del dioptrio esférico. El profesor recuerda a los alumnos que es la misma que la de las lentes y de los espejos.

A.43. (Opcional) *Deduce de la relación existente entre s y s' en un dioptrio esférico cuando se considera la aproximación paraxial.* Se trata de que los alumnos intenten deducir la relación existente entre s y s' en un dioptrio esférico.

Los alumnos comprenden la relación entre s y s' , plantean la ley de Snell para el primer dioptrio. Les cuesta trabajo recordar las implicaciones de la aproximación paraxial. El profesor les ayuda con las relaciones entre los ángulos. Finalmente el profesor y los alumnos consiguen llegar a la expresión $n_2 - n_1/R = n_1/s + n_2/s'$

Una vez encontrada la ecuación del dioptrio esférico, los alumnos han de aplicarla a las dos lentes y sumar ambas ecuaciones.

Los alumnos necesitan ayuda del profesor en este paso. Finalmente llegan a la ecuación $1/s + 1/s' = 1/f$

El profesor insiste en que es la misma ecuación que habíamos utilizado para lentes y espejos.

Les cuesta trabajo la deducción de la expresión, pero comprenden cuando la explica el profesor.

5/03/2019. SESIÓN 16.

A.44. Explora el comportamiento de las lentes divergentes. Señala las características de la visión a través de ella y la posición de los focos. Compara las características de las lentes divergentes con las de la lente convergente.

Vamos a explorar en el laboratorio el comportamiento de una lente convergente cuando actúa como lupa. Los alumnos se muestran dispuestos y alegres. Comprenden que en función de la distancia a la que situemos los objetos de la lente, ésta puede actuar como lente convergente, o en este nuevo caso como lupa, dando lugar a una imagen virtual, derecha y ampliada.

El profesor proporciona a los alumnos lentes convergentes de 100mm focal, y les anima a que prueben a situar objetos a más distancia de su distancia focal, y a menos.

A.39. Una persona mira a través de una lente convergente a un objeto puntual situado entre el foco y la lente. Completa en el esquema un diagrama de rayos que explique cómo es visto ese objeto cuando la lente actúa como lupa.

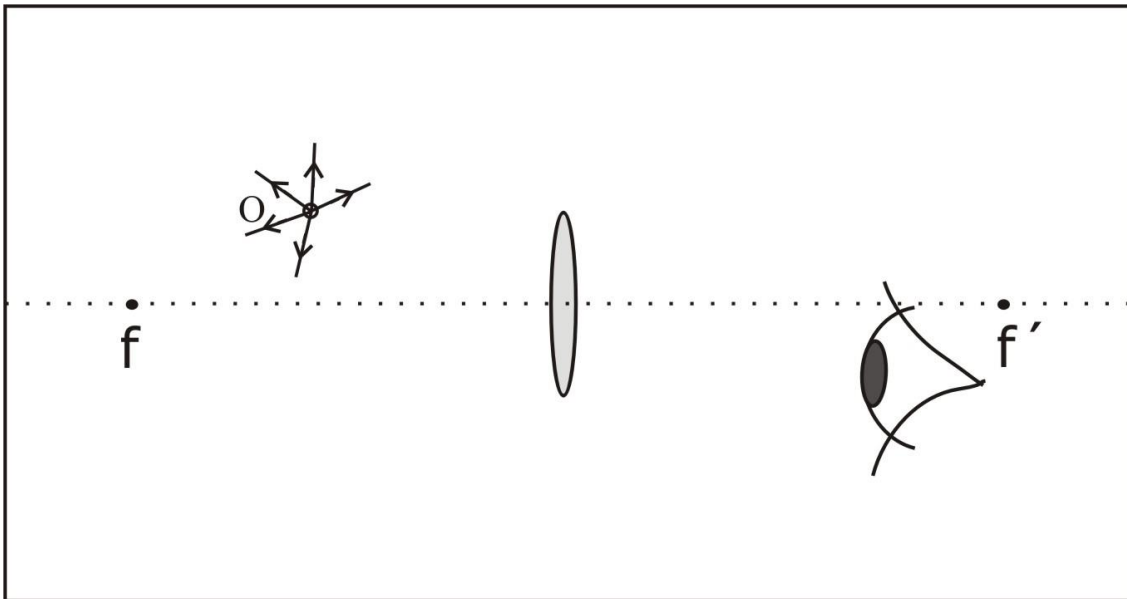


Imagen: Elaboración propia.

Trazado gráfico de la formación de la imagen virtual utilizando una lente convergente como lupa. El profesor explica a los alumnos que como el haz de luz que le llega al observador es divergente, el observador verá una imagen virtual, que se asemeja a la visión en un espejo y en objetos sumergidos.

El profesor opcionalmente demuestra que podemos utilizar la misma ecuación que hemos utilizado con las lentes.

El profesor insiste en que el aumento visual no es un aumento lateral, ya que en el caso de la lupa, el aumento depende de la distancia a la que coloquemos la lupa del objeto y de la distancia a la que se coloque el observador de la lupa.

A.40. ¿Cómo se ve una letra de 4 mm a través de una lupa de 15 dioptrías cuando se sitúa a 5 cm de la lente? Realiza un trazado gráfico y explica las características de la imagen

A.41. Una persona se sorprende que al mirar a un objeto cercano, a través de una lente convergente, vea la imagen derecha y más grande y sin embargo, cuando mira a un objeto lejano vea la imagen más pequeña e invertida ¿podrías explicarlo?

Ejercicios numéricos de aplicación tipo PAU. Los alumnos los realizan correctamente. Parece que han comprendido fácilmente las características de la lupa.

6/03/2019. SESIÓN 17.

A.44. Explora el comportamiento de las lentes divergentes. Señala las características de la visión a través de ella y la posición de los focos. Compara las características de las lentes divergentes con las de la lente convergente.

En esta actividad se proporciona a los alumnos lentes divergentes para que hagan observaciones con ella. Se trata de que los alumnos comparen las características de esta lente comparándola con la lente convergente. El profesor ayuda a los alumnos a comprender las diferencias. Los alumnos se muestran tranquilos y concentrados en la experimentación.

A.45. A partir de las observaciones anteriores completa los siguientes esquemas para clarificar gráficamente cómo se comportan las lentes divergentes:

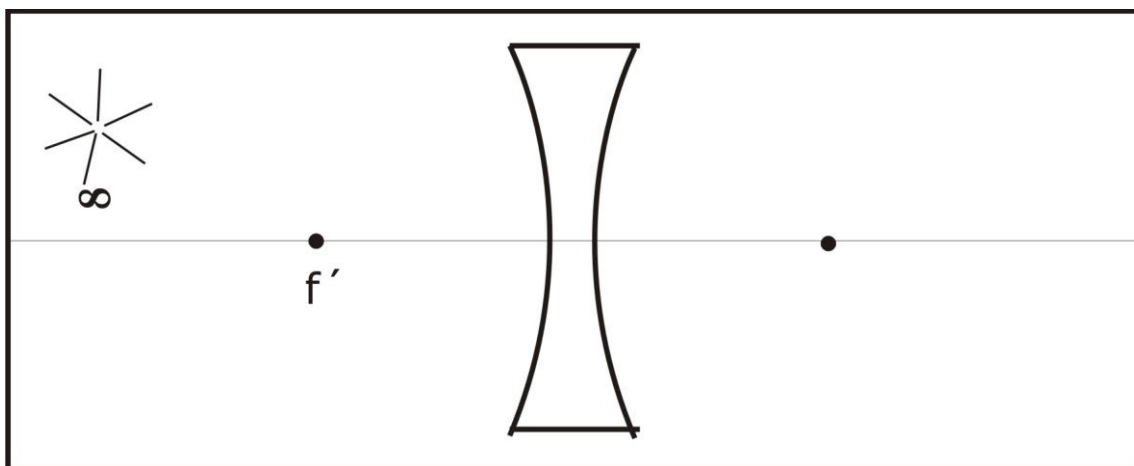


Imagen: Elaboración propia.

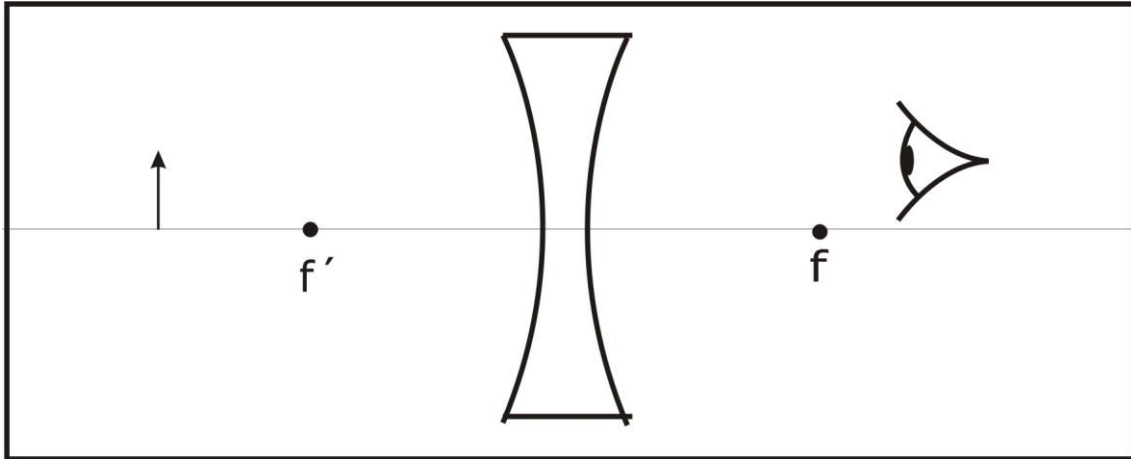


Imagen: Elaboración propia.

Actividad en la que se pide al alumno que a partir de las observaciones realizadas realice el trazado gráfico correspondiente a una lente divergente. Los alumnos, ayudados por el profesor, realizan dichos trazados finalmente. Al principio les resulta difícil por el hecho de que el foco imagen esté a la izquierda de la lente. El profesor en todo momento les ayuda, animándolos a recordar lo que sucede en las experiencias.

A.46. ¿Se cumple con este tipo de lentes la ecuación gaussiana de las lentes delgadas?

Actividad de afianzamiento en la comprensión de la visión a través de lentes divergentes.

El profesor les anima a comparar el trazado gráfico de la lente divergente con el de los espejos convexos.

7/03/2019. SESIÓN 18.

A.47. a) Miramos a través de una lente divergente de -10 dioptrías a un círculo de 1 m de radio situado a 5 m de la lente. ¿Cómo veremos su imagen? Determina la distancia focal imagen, la posición de la imagen y su aumento lateral

b) ¿Cómo cambiará la imagen cuando acercamos el objeto a la lente? Realiza trazados gráficos que lo expliquen.

Ejercicio numérico con lentes divergentes.

Los alumnos se muestran capaces.

A50 y A51 Actividades que plantean problemas abiertos.

8/03/2019. SESIÓN 19.

A.48. La miopía es la anomalía visual de los ojos cuya retina está a mayor distancia del cristalino que en el ojo emétrope. Dibuja en el esquema un diagrama de rayos que explique la visión de un ojo miope de un objeto alejado (en el esquema está señalada con línea discontinua la posición de la retina del ojo emétrope). ¿Por qué los miopes ven borrosos los objetos alejados?

Esta actividad trata de que los alumnos comprendan el comportamiento del ojo miope (que tiene la retina a mayor distancia del cristalino). El profesor ayuda a los alumnos a dibujar el ojo miope en comparación con el ojo emétrope. Los alumnos se muestran satisfechos.

A.49. Dado que la distancia lente-retina no puede ser modificada, propón una solución óptica para la corrección de la miopía.

Como continuación de la actividad anterior se pide a los alumnos que propongan una solución óptica para el ojo miope, teniendo en cuenta que la distancia cristalino-retina no puede ser modificada.

El profesor ayuda a los alumnos con el trazado gráfico. Los alumnos comprenden que han de usar lentes divergentes para conseguir que la imagen se forme más alejada. Se muestran capaces, pues anteriormente ya se habían familiarizado con las lentes divergentes.

A.50. (ampliación). ¿Cómo graduarías a una persona con miopía? ¿Qué lente le dirías que tiene que utilizar?

A.51. La hipermetropía es la anomalía visual de los ojos cuya retina está a menor distancia del cristalino que en el ojo emétrope. Dibuja en el esquema un diagrama de rayos para la visión de un objeto alejado. ¿Por qué los hipermétropes ven borrosos los objetos alejados? (Osuna 2003-2008).

Se trata de que los alumnos dibujen el esquema del diagrama de rayos para la visión de un objeto alejado en el caso de un ojo hipermetrope (aquel cuya retina está mas alejada del cristalino que en el ojo emétrope)

Los alumnos comprenden el trazado de rayos y son capaces de proponerlo.

A.52. Dado que la distancia lente-retina no puede ser modificada, propón una solución óptica para la corrección de la hipermetropía.

Dado que la distancia lente-retina no puede ser modificada, se pide a los alumnos que propongan una solución óptica para la corrección de la hipermetropía. Los alumnos proponen correctamente la utilización de lentes convergentes. Se muestran contentos e ilusionados con estos descubrimientos.

12/03/2019. SESIÓN 20.

A.53. El esquema siguiente representa un ojo présbita, en el que el cristalino no aumenta su curvatura al mirar a los objetos cercanos. Dibuja en él un diagrama de rayos y explica por qué ve borroso. (Osuna 2003-2008).

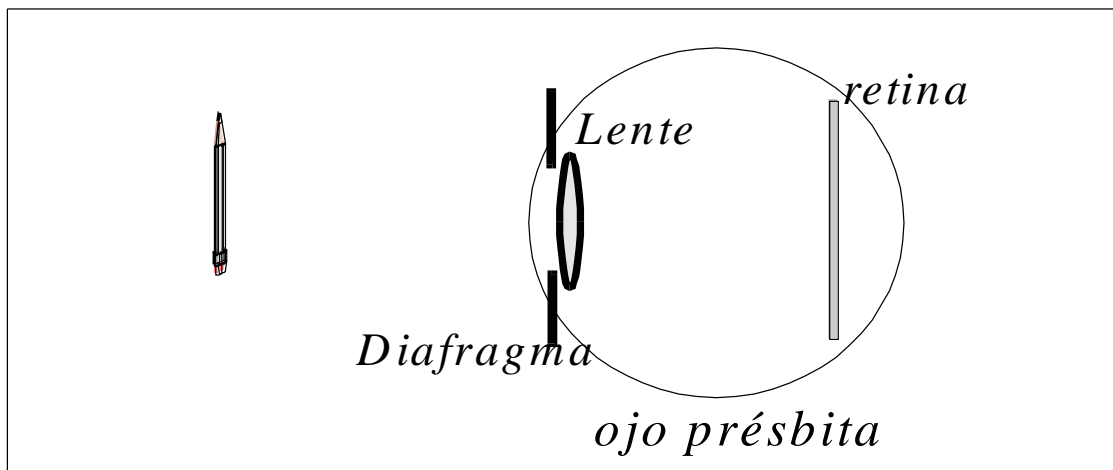


Imagen: Osuna, 2003-2008.

En esta actividad estudiamos el ojo présbita (el ojo que ha perdido la capacidad de aumentar de curvatura al mirar los objetos cercanos). Los alumnos dibujan correctamente el trazado de rayos.

A.54. Propón una solución óptica para corregir la presbicia.

Como continuación de la actividad anterior se pide a los alumnos que propongan una solución para corregir la presbicia. Los alumnos se muestran capaces.

El profesor ayuda a los alumnos a comprender la necesidad de la utilización de una lente convergente.

El profesor muestra a los alumnos las maquetas comerciales del ojo humano.

13/03/2019. SESIÓN 21.

A.55. Si deseamos ver una imagen al mirar a través de una lente hacia un objeto lejano, ¿qué tipo de lente deberíamos utilizar para verla del mayor tamaño posible? Dibuja un esquema que explique la visión de esta situación. Una vez obtenida la imagen cercana de un objeto lejano, ¿cómo podríamos verla aumentada?

Para ver un objeto lejano del mayor tamaño posible, qué lente tendría que utilizar? Los alumnos después de realizar varios trazados gráficos llegan a la conclusión, apoyados por el profesor, de que han de utilizar una lente con una distancia focal grande, es decir una lente con pocas dioptrías. Se trata de que los alumnos comiencen a familiarizarse con el funcionamiento del telescopio.

Una vez obtenida la imagen cercana de un objeto lejano, cómo podríamos verla aumentada? Los alumnos comprenden fácilmente que necesitan utilizar una lupa. Se muestran alegres y se dan cuenta de que cuanto mayor es la distancia focal de la lente, mayor es el tamaño de la imagen, y más alejada se encuentra de la lente.

El profesor anima a los alumnos a realizar trazados gráficos con lentes de diferentes distancias focales, una grande y otra pequeña, para comprobar que la lente se ajusta más a sus necesidades.

A.56. El telescopio de Kepler consiste en una combinación de dos lentes convergentes: el objetivo, que consigue formar una imagen cercana del objeto lejano y el ocular, que actúa como una lupa para ver aumentada la imagen formada por el objetivo. Realiza

un diagrama que explique el funcionamiento de este telescopio y construye uno con las lentes suministradas por el profesor. ¿Qué características tiene la imagen que se ve?

A.56.1. *Con las indicaciones que aportamos en las siguientes actividades y con materiales baratos y fáciles de conseguir, se puede construir un telescopio del tipo que construyó Kepler (Osuna 2003-2008).*

Con esta actividad experimental tratamos de que los alumnos reproduzcan en el laboratorio el telescopio de Kepler utilizando dos lentes convergentes, el objetivo para formar una imagen cercana del objeto lejano y el ocular, que actúa como lupa para ver aumentada la imagen que forma el objetivo.

El profesor proporciona un tubo de unos 60 cm y una lente convergente de 2D que hará de objetivo. Así mismo una lente convergente de 10 D que funcionará como lupa, haciendo de ocular.

El profesor ayuda a alinear las lentes. Los alumnos se muestran alegres y sorprendidos, capaces e ilusionados con el proyecto.

14/03/2019. SESIÓN 22.

A.57. *Si deseamos ver una imagen real, del mayor tamaño posible, de un objeto pequeño y cercano, ¿qué tipo de lente deberíamos utilizar? Dibuja un esquema que explique la visión de esta situación. Una vez obtenida la imagen aumentada de ese pequeño objeto, ¿cómo podemos verla aumentada aún más?*

Esta actividad está relacionada con el funcionamiento del microscopio. Se pregunta a los alumnos qué lente deberíamos utilizar para ver una imagen real del mayor tamaño posible, de un objeto cercano y pequeño. El profesor ayuda a los alumnos a realizar el trazado gráfico. Los alumnos, ayudados por el profesor, llegan a la conclusión de que necesitan una lente de focal grande. Una vez obtenida esta imagen, cómo podemos aumentarla aun mas? El profesor ayuda a los alumnos a comprender que ahora necesitamos una lente actuando de lupa.

A.58. Un microscopio consiste en una combinación de dos lentes convergentes: el objetivo, con el que se forma una imagen real aumentada de un pequeño objeto y cercano, y el ocular, que actúa como una lupa para ver aumentada la imagen dada por el objetivo. Realiza un diagrama que explique el funcionamiento de un microscopio y construye uno con las lentes suministradas por el profesor.

La actividad explica a los alumnos que el microscopio consta por tanto, de una lente convergente, el objetivo, que formará una imagen real aumentada de un objeto pequeño y cercano, y otra, el ocular, que actuará como lupa para ver aumentada la imagen dada por el objetivo. Se pide a los alumnos que realicen un diagrama que explique el funcionamiento del microscopio.

Los alumnos son capaces de realizar el trazado gráfico, ayudados por el profesor.

El profesor proporciona a los alumnos las lentes necesarias para fabricar un microscopio. Los alumnos se muestran ilusionados al ver que funciona bien. El profesor ayuda a montar el microscopio a los alumnos.

15/03/2019. SESIÓN 23.

A.59. Realiza una recapitulación del tema, resaltando cuál era el problema que hemos abordado, las ideas más importantes introducidas, los límites de aplicación que tiene el modelo de visión de Kepler y los nuevos problemas que podemos abordar después de elaborar un modelo geométrico de comportamiento de la luz en la visión.

Esta actividad pide a los alumnos que realicen una recapitulación del tema, resaltando cuál era el problema abordado, las ideas más importantes introducidas, y los límites de nuestro modelo. Los alumnos intentan construir su conocimiento al recordar lo aprendido en esta unidad.

El profesor ayuda a los alumnos recordando las diferentes actividades que de han ido haciendo a lo largo de la unidad, para que los alumnos puedan hacerse un esquema mental de lo que sabían y de lo que han aprendido.

A.60. ¿Qué límites de aplicación tiene nuestro modelo de visión?

Esta actividad sugiere a los alumnos que nuestro modelo tiene límites y les pide que piensen en algunos límites. El profesor ayuda a los alumnos en la búsqueda de estos límites. El profesor explica a los alumnos que en ciencia es necesario la construcción de modelos para poder estudiar distintas parcelas de la realidad. Pero que por otra parte, un modelo es insuficiente para abarcar el estudio completo de la realidad, y por ello debemos servirnos de diferentes modelos para cada parcela de realidad a la que nos enfrentamos.

Problemas abiertos. Queremos que los alumnos sean conscientes de que aun queda mucho por aprender sobre la óptica como ciencia de la visión.

El profesor ayuda a los alumnos a comprender que nuestro modelo de visión solamente explica una parte de la óptica, y necesitamos pues, otro modelo que explique la naturaleza de la luz para poder estudiar con más profundidad otros fenómenos.

19/03/2019. SESIÓN 24.

Comenzamos con la parte de ÓPTICA FÍSICA

A.1. Realiza “*Experimentum crucis*” en el laboratorio y formula una hipótesis sobre qué es la luz “blanca”.

Se pide a los alumnos que citen fenómenos en los que se observen halos coloreados o irisados. El profesor les comenta que esto sucede al utilizar lentes gruesas, y anima a los estudiantes a encontrar otros ejemplos. Los alumnos hablan de los CD, del arco iris, de las manchas de grasa del suelo... etc.

A partir de una imagen de la difracción de la luz con un prisma, se pregunta a los alumnos si ¿es la luz blanca la suma de todos los colores del arco iris? Y si con ese experimento podríamos corroborarlo.

Algunos alumnos en un principio piensan que sí, que la luz blanca es la suma de todos los colores del arco iris, pero otros no saben. El profesor les introduce en el problema histórico de la naturaleza de la luz y les hablará de las dos corrientes que surgieron en el S. XVII. El profesor llevará a cabo con los alumnos el *experimentum crucis* de Newton, clave para rebatir la idea de que eran los medios los que modificaban la luz.

Los alumnos realizan el experimento ayudados por el profesor, se muestran alegres y sorprendidos. Comprenden que no es el medio el que modifica la luz, ya que a partir de todos los colores se puede volver a obtener luz blanca.

A.2. El observador ve en las pantallas P1 y P2 círculos iluminados independientemente de que los focos F1 y F2, cuyas luces se cruzan en el espacio, se enciendan simultáneamente, o de uno en uno. Este fenómeno ocurre con cualquier tipo de luz que sea emitida por los focos. Formula una hipótesis sobre la naturaleza de la luz que explique que los haces de luz se crucen sin producir perturbación en la mancha que se ve en las pantallas.

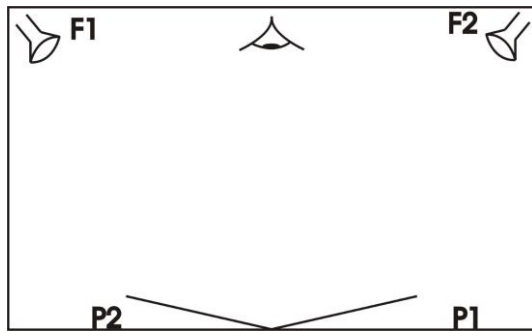


Imagen: Elaboración propia.

¿Qué puede ser la luz para que se cruce sin perturbarse?

Se pregunta a los alumnos qué puede ser la luz para que se cruce sin estorbarse al encender dos focos simultáneamente.

Los alumnos comprenden que la luz no puede ser de naturaleza corpuscular, porque si no al cruzarse las partículas chocarían y afectaría al patrón de iluminación que se observa.

A.3. A pesar de la hipótesis ondulatoria que formuló Christiaan Huygens (1629-1695) sobre la naturaleza de la luz, muchas personas pensaban y siguen pensando en la luz como algo material. Si la luz consistiera en algo material emitido por las fuentes, ¿qué fenómenos cabría esperar como consecuencia de esta concepción?

A. 3. (Alternativa) En el exterior de una tubería hay dos ventanas transparentes. Por una de ellas, una lámpara deja pasar un haz divergente de luz como el dibujado en el esquema. Por la otra ventana, un observador puede ver la zona iluminada en la

pared opuesta de la tubería, tanto si está llena de agua como llena de aire. Con una potente bomba, situada en el extremo izquierdo, podemos hacer que circule agua o aire por la tubería de forma muy rápida y sin turbulencias. (Basado en Osuna 2003-2008).

En ningún momento el haz de la luz que atraviesa la tubería pasa del aire al agua o viceversa, sino que se propaga en un único medio, o en el aire o en el agua.

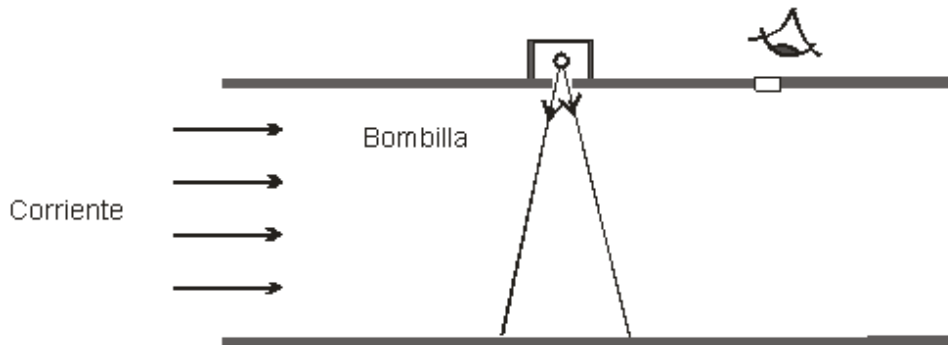


Imagen: Osuna, 2003-2008.

¿Qué ocurrirá con la posición de la mancha luminosa que vemos en la pared de la tubería? Señala la opción que creas correcta:

- Tanto la corriente de aire como la corriente de agua hacen que la mancha luminosa que veíamos antes de iniciarse el movimiento del medio se desplace de su posición original
- La corriente de aire no hace que se desplace la mancha luminosa pero la corriente de agua sí
- Ni la corriente de aire ni la corriente de agua hacen que se desplace la mancha luminosa
- La luz está formada por un tipo de materia tan sutil que no se arrastra por la corriente de aire ni por la de agua, pero sí por otro tipo de materia más densa
- Otra respuesta:

Argumenta la opción elegida.

Queremos comprobar que efectivamente todos los alumnos han comprendido que la luz no puede tener naturaleza material.

Algunos alumnos todavía manifiestan dudas sobre si la sombra se verá o no, afectada por el agua o el aire.

El profesor explica a los alumnos el largo debate que se mantuvo en la comunidad científica a lo largo de muchos siglos sobre si la luz tenía naturaleza material o no.

Los alumnos aceptan pues la hipótesis de trabajo de la naturaleza ondulatoria de la luz.

20/03/2019. SESIÓN 25.

A.4. Una de las propiedades características y más fascinantes de las ondas es su capacidad para la producción de interferencias bajo determinadas condiciones. Diseña una experiencia para poder probar si la luz produce interferencias.

En esta actividad se pide a los alumnos que diseñen una experiencia para poder probar si la luz produce interferencias.

El profesor ayuda a los alumnos con el montaje del experimento de Young de la doble rendija. El profesor insiste en la necesidad de utilizar luz de un solo tipo, es decir de una sola frecuencia, un láser.

Los alumnos recuerdan las características de las ondas que habíamos estudiado previamente, como la interferencia, la difracción y la atenuación.

Los alumnos realizan un montaje parecido al que Young hizo en su día. Se muestran sorprendidos e ilusionados. Comprenden la relevancia del experimento.

A.5. Otra de las características específicas de las ondas es la de bordear obstáculos. Diseña una experiencia para comprobar si la luz tiene la capacidad de difractarse, es decir de bordear obstáculos.

Con esta actividad queremos poner de manifiesto otra característica especial que tienen las ondas de bordear obstáculos, la difracción. Se pide a los alumnos que diseñen una experiencia para poner de manifiesto que la luz tiene la capacidad de bordear obstáculos.

El profesor ayuda a los alumnos proponiendo el experimento de Poisson, explicándoles la importancia histórica que tuvo.

Entre todos realizamos el montaje. Los alumnos se muestran muy sorprendidos y comprenden que dicho experimento fue clave para adoptar un modelo ondulatorio como explicación plausible de la naturaleza de la luz.

21/03/2019. SESIÓN 26.

A.6. Si la luz fuese de naturaleza ondulatoria, ¿qué cabría esperar de la intensidad luminosa que se mediría a diferentes distancias de la fuente? Propón una experiencia para comprobar tu hipótesis.

Se pide a los alumnos que propongan una experiencia para comprobar su hipótesis.

Los alumnos comprenden que la luz ha de perder intensidad al alejarse del foco, puesto que como habíamos visto en óptica geométrica, si una fuente puntual emite en todas las direcciones la luz se repartirá en una esfera centrada en el foco emisor. Si la luz cada vez tiene que repartirse sobre una superficie mayor, la intensidad que midamos será cada vez menor.

El profesor propone la utilización de una sonda que mide la intensidad de luz. Anima a los alumnos a realizar una gráfica en la que representen la I frente a $1/r^2$. Los alumnos comprenden que ha de salir una línea recta.

A.7. El tema de la velocidad de la luz ha sido una fuente de controversia a lo largo de la historia. Si, de acuerdo a nuestra hipótesis, la luz es una onda, ha de tener cierta velocidad de propagación, es decir, tardaría un tiempo en llegar desde un punto a otro. ¿Cómo podrías medir la velocidad de la luz? ¿Qué dificultades te encontrarías?

A.7.1. Lee y comenta el siguiente diálogo sobre el problema de la medición de la velocidad de la luz.

En esta actividad se explica a los alumnos que el tema de la velocidad de la luz fue fuente de controversia a lo largo de la historia. Desde el marco conceptual del modelo ondulatorio se mantenía que, si la luz fuese una onda, tendría cierta velocidad de propagación. Se pide a los alumnos que diseñen alguna experiencia para medir la velocidad de la luz, señalando que dificultades podrían encontrar. Los alumnos proponen experiencias parecidas a las que en su día propuso Galileo.

El profesor comentará a los alumnos la importancia histórica del asunto. Destacará las grandes dificultades que hubo que superar para medir la velocidad de la luz, explicando que se necesitan distancias astronómicas para poder medirla, dada su extremada rapidez. El profesor comentará a los alumnos el hecho de que la luz o fuese instantánea apoyaba la hipótesis ondulatoria de la luz, que poco a poco se iba afianzando en la comunidad científica. Comentará que la evidencia definitiva la obtuvo Roëmer en 1676. Huygens utilizó los datos de Roëmer para hacer una estimación de la velocidad de la luz en 2×10^8 . El profesor proporcionará a los alumnos los textos originales de Galileo y una lectura sobre Roëmer y los satélites de Júpiter.

A.8. Revisa las expresiones para la refracción de las ondas y de los rayos luminosos y busca un significado físico al índice de refracción.

Queremos conseguir que los alumnos piensen que si la luz “blanca” se dispersa cuando atraviesa un prisma, se trata de una mezcla de diferentes tipos de ondas, con un poder refractivo diferente. Por tanto, a partir de ahora, el índice de refracción de un material transparente debe ser asociado a cada tipo de luz, a cada frecuencia de vibración. Así, como en el sonido cada tono se corresponde con un tipo de onda sonora de una frecuencia determinada, podemos pensar que cada tipo de luz se corresponde con un tipo de onda lumínica de una frecuencia. El profesor recordará a los alumnos la expresión que habíamos encontrado para la refracción de las ondas:

$$\text{Sen } i / \text{Sen } r = v_2 / v_1$$

Y para el caso de la refracción de las ondas lumínicas:

$$\text{Sen } i / \text{Sen } r = n$$

Los alumnos llegan a la conclusión, con la ayuda de profesor, de que el índice de refracción de un medio es la relación entre la velocidad de la luz en el aire (vacío) y la velocidad de la luz en dicho medio. Les comentará que el índice de refracción siempre tiene que ser mayor que uno y que será tanto mayor cuanto menos sea la velocidad de la luz en el medio.

El profesor explicará a los alumnos que este tema estuvo en el centro de la dicotomía teoría ondulatoria-corpúscular del siglo XVIII y XIX. Newton creía que la velocidad de la luz tenía que ser mayor en el agua. Cuando Hippolyte Fizeau (1819-1896) pudo medir que la velocidad de la luz era menor en el agua que en el aire, la comunidad científica se decantó finalmente por la teoría ondulatoria.

El profesor explicará a los alumnos que el índice de refracción es diferente para cada uno de “los colores”, ya que es función de la frecuencia de la onda. En el caso de la dispersión de la luz blanca por un prisma, hemos visto que la luz violeta se refracta más que la roja. El profesor propondrá el siguiente trazado explicativo:

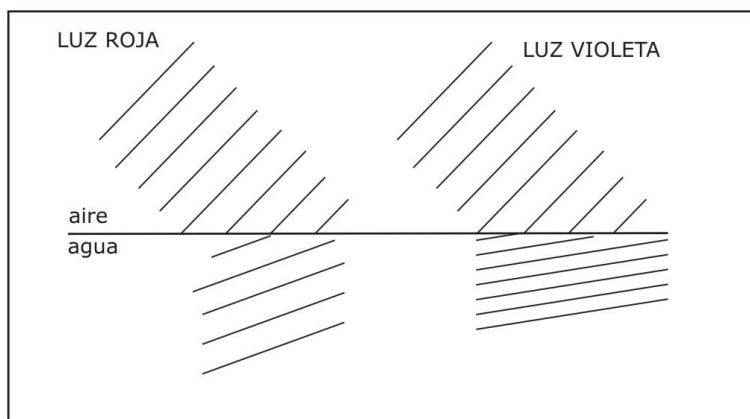


Imagen: Elaboración propia.

El profesor explicará a los alumnos que debido a que la velocidad de las ondas cambia al pasar la luz de un medio a otro, la longitud de la onda también se ve influida (la frecuencia es constante). Por tanto, observamos que, en el caso del rojo, cuyo índice de refracción es menor, es decir la modificación de la velocidad es menor y por tanto la variación en la longitud de onda será pequeña. En el caso del violeta, cuyo índice de refracción es mayor, la variación de la velocidad al pasar al agua será mayor y por tanto la variación en la longitud de onda será mayor. Observamos, por tanto, que la longitud de onda del rojo varía poco al pasar del aire al agua, mientras que la longitud de onda del violeta varía

más, haciéndose más pequeña. (Si la frecuencia no varía y la velocidad de la onda disminuye, la longitud de onda tiene que disminuir).

A.9. Haciendo uso del significado físico del índice de refracción $n = c/v$, interpreta el fenómeno de la dispersión de la luz blanca que hemos estudiado al principio de la unidad.

Queremos que los alumnos comprendan cual es la naturaleza del fenómeno de refracción que habíamos estudiado previamente en óptica geométrica y que ahora vamos a estudiar desde otro punto de vista.

El profesor explicará que, para entender la trayectoria seguida por la luz al refractarse a través de los medios transparentes, necesitamos saber por qué la luz se desacelera en los medios transparentes como el vidrio o el agua. La rapidez de la luz es una constante de la naturaleza, en el vacío es una constante de 3×10^8 m/s. La luz tiene una velocidad menor en el agua, solamente un 75% de la velocidad en el vacío, y en un diamante solamente 41%. Cuando la luz emerge de estos medios, viaja de nuevo a su rapidez original. Pero parece un comportamiento extraño desde el punto de vista de la energía

El profesor explicará que en su mayor parte el vidrio está compuesto de átomos de silicio, con nubes de electrones que con facilidad son forzados a vibrar cubriendo el intervalo completo de las frecuencias visibles. Si la luz incidente es absorbida, las nubes de electrones se ponen a vibrar con una frecuencia igual a la luz absorbida. Los electrones vibrantes, a su vez, emiten luz por su cuenta, a la misma frecuencia. Esta luz es menos intensa debido a que parte de la luz incidente fue absorbida y convertida en calor durante el proceso y lo más importante, no ha recorrido tanta distancia como la que habría cubierto la luz incidente no perturbada en el mismo tiempo.

Los alumnos tardan en comprender que el proceso de absorción/reemisión no es instantáneo; se requiere cierto tiempo para que se realice y, como resultado, la rapidez promedio de la luz a través del vidrio es menor que c . Esto no contradice la máxima de que la rapidez de la luz es una constante de la naturaleza porque la rapidez instantánea de la luz entre los átomos es todavía c . Cuando se habla de la velocidad de la luz en los medios transparentes se hace referencia a la rapidez promedio, que toma en consideración el atraso asociado al proceso de absorción y reemisión. Por tanto, a diferencia de la bala que pasa a través de la tabla, la luz no “horada” el vidrio.

Posteriormente el profesor explicará a los alumnos que cada uno de los “colores” es una onda de una frecuencia característica y que se moverá en el vidrio con una velocidad determinada. Es por eso que los diferentes “colores” recorren caminos distintos al atravesar un prisma.

A.10. ¿Cómo explicarías la reflexión de la luz teniendo en cuenta que la luz es una onda?

Los alumnos no son capaces de proponer por sí mismos una explicación a este fenómeno. Recuerdan la ley de la reflexión, pero no logran proponer una hipótesis.

El profesor explicará a los alumnos qué es en realidad el fenómeno de reflexión a escala atómica.

El profesor recordará a los alumnos que todos sabemos que normalmente la luz viaja en línea recta. Al ir de un lugar a otro, la luz sigue la trayectoria más eficiente y viaja en línea recta. Esto es cierto si nada obstruye el paso de la luz entre ambos lugares. Si la luz es reflejada por un espejo, el cambio de dirección en la trayectoria, que de lo contrario sería recta, se describe por medio de una fórmula sencilla. Esta fórmula sencilla está basada en el *principio de tiempo mínimo*, planteado por Pierre Fermat (1607-1655) hacia el año 1650. El planteamiento es el siguiente: “de todas las trayectorias posibles que la luz podría seguir para ir de un punto a otro sigue aquella que requiere menos tiempo”.

A.11. Conocemos muchas ocasiones en las que los objetos emiten luz: una brasa, un hierro muy caliente, el filamento de una lámpara de incandescencia, etc. Sabiendo que los átomos de la materia están formados por cargas eléctricas (electrones y protones), formula una hipótesis que explique la emisión de luz.

El profesor ayuda a los alumnos a relacionar esta aceleración de cargas, con una carga que oscila y que puede producir un campo eléctrico oscilante que se propaga por el espacio. El profesor ayudará a los alumnos a recordar que un campo eléctrico variable produce un campo magnético.

El profesor explica a los alumnos que esta variación del campo eléctrico y magnético que se propagan por el espacio, es una onda electromagnética, formada por un campo eléctrico y otro magnético que vibran en direcciones perpendiculares entre sí, y perpendiculares a la dirección de propagación de la luz.

Los alumnos comprenden las explicaciones del profesor y se muestran ilusionados ante esta forma de explicar la producción de luz, les parece sencilla.

17/03/2017. SESIÓN 27

A.12. Realiza una síntesis de la siguiente lectura acerca de las ideas de Maxwell sobre la producción de ondas electromagnéticas.

Con esta actividad buscamos que los alumnos se pregunten ¿qué implica una variación del campo eléctrico? y ¿qué significa que la luz es una radiación electromagnética?

Queremos que los alumnos comprendan que el campo está dotado de energía y de momento. Queremos que el campo llegue a adquirir verdadero significado físico para los alumnos. El profesor remarcará la importancia del concepto de campo, clave para la superación del marco teórico mecanicista y la evolución posterior de la física cuántica y relativista.

El campo electromagnético es capaz de transmitir energía a través de grandes distancias, es una idea clave para que los alumnos comprendan su existencia real. El profesor ha de conseguir que los alumnos consideren el campo como un agente real de interacción, no como una zona del espacio donde se pueden detectar fuerzas creadas por una carga, masa, o imán.

El profesor ha de insistir en las diferencias que sobre la interacción entre partículas introduce la teoría de campos mediante acciones contiguas frente a la interpretación newtoniana de acciones a distancia. Es muy importante que el alumno comprenda que el campo es una realidad física dotada de energía y momento.

Al hablar de ondas electromagnéticas se podrá hablar de energía asociada al propio campo de una manera más clara.

Con ayuda del profesor los alumnos recuerdan las leyes del electromagnetismo y logran explicarlas en términos de campos.

A.13. Explica con tus palabras y dibuja una onda electromagnética.

En esta actividad se pide a los alumnos que definan con sus palabras una onda electromagnética.

Al principio los alumnos muestran explicaciones vagas sobre las ondas EM. Los alumnos son conscientes, en su mayoría, de que no es necesario un medio material. El profesor junto con los alumnos, establece que las ondas EM son la propagación de energía a través de campos eléctricos y magnéticos inducidos que oscilan por el espacio con el mismo ritmo que las cargas vibrantes que las envían (y que se mueven a una velocidad de c)

El profesor ha de insistir en que la radiación EM es la transferencia de energía por oscilaciones rápidas de campos EM en el espacio. Ha de insistir que las ondas transfieren Energía sin que haya transporte de materia. El profesor explica a los alumnos la aportación decisiva de Maxwell sobre la corriente de desplazamiento, para establecer una simetría completa entre campos eléctricos y magnéticos. Si una variación de un campo magnético induce un campo eléctrico, una variación temporal del campo eléctrico debía inducir un campo magnético.

En esta actividad también se solicita a los alumnos que con lo aprendido hasta ahora dibujen una onda EM. Es una actividad compleja, pues exige de los alumnos que sean capaces de interpretar el formalismo matemático que describe una onda EM. El concepto de plano infinito en el que dos cantidades vectoriales cada una de las cuales una magnitud y dirección en cualquier punto en un instante es muy abstracto. Los alumnos se muestran sorprendidos cuando el profesor les ayuda a comprender el significado real de la representación de la onda EM.

El profesor ayuda a los alumnos a comprender dicha representación. El profesor es consciente de que la representación diagramática de la onda plana EM que utilizan los libros de texto, es incomprensible para los alumnos. Ayuda a los alumnos para que no caigan en el error de atribuir una extensión espacial a la amplitud de onda. A partir de del dibujo de la onda plana representada típicamente en los libros se pide a los alumnos que ordenen las magnitudes de los campos E y M en distintos lugares del dibujo.

El profesor ha de cerciorarse de que los alumnos comprenden que la onda EM no tiene una extensión espacial finita, que los campos EM no están encerrados dentro de curvas sinusoidales. El profesor ha de evitar que se confundan la notación vectorial con la extensión de los campos E y B.

Al principio algunos alumnos creen que los campos están confinados en las curvas sinusoidales. Algunos alumnos creen que los campos son emitidos desde el eje de propagación. Algunos estudiantes no son conscientes de que E y B son interdependientes.

26/03/2019. SESIÓN 28

A.14. Si las ondas lumínicas son de naturaleza electromagnética, es decir variaciones periódicas de los campos E y B, podemos diseñar un método para producirlas. Diseña una experiencia para producirlas.

A. 14.1 Como actividad alternativa, lectura del experimento de Hertz:

Los alumnos realizan, ayudados por el profesor una réplica del experimento de Hertz. Se muestran ilusionados al comprenderlo, y darse cuenta de lo que significó para la aceptación del modelo ondulatorio.

Queremos que los alumnos comprendan el experimento de Hertz, recuerden lo aprendido anteriormente en las unidades de campo eléctrico y magnético, y lo relacionen con la producción de ondas electromagnéticas. Queremos que comprendan la extraordinaria importancia que tuvo el experimento de Hertz, ya que validaba la teoría electromagnética de Maxwell.

El profesor debe explicar la importancia del experimento de Hertz para la aceptación de la teoría electromagnética de Maxwell, uno de los logros más grandes del pensamiento científico del siglo XIX. El profesor recordará a los alumnos las relaciones entre campos eléctricos y magnéticos que habían estudiado en unidades previas, para que puedan así comprender la producción de las ondas electromagnéticas. El profesor explicará que las ondas electromagnéticas no son solamente ondas lumínicas, sino que tenemos muchos tipos.

A.15. Si la luz es una onda, tendrá una longitud de onda y una frecuencia asociadas. ¿Cómo podríamos explicar el experimento de dispersión de la luz blanca en luces de diferentes colores? ¿Qué serían cada uno de los colores?

Esta actividad pide a los alumnos que expliquen el experimento de la dispersión de la luz blanca, teniendo en cuenta que la luz es una onda, y por tanto ha de tener una longitud de onda y una frecuencia asociada.

Queremos que los alumnos relacionen la actividad del inicio del tema, el "*Experimentum crucis*" con las características de las ondas.

El profesor ayuda a los alumnos a relacionar cada color con ondas de diferentes características, con su longitud de onda y una frecuencia asociada.

Los alumnos se muestran receptivos y motivados. Lo comprenden fácilmente.

A.16. La naturaleza de ondulatoria de la luz debe ser un modelo coherente con explicaciones que fácilmente realizábamos en la óptica geométrica. Comparar las explicaciones de los siguientes fenómenos desde los dos puntos de vista: geométrico y ondulatorio. Realiza los correspondientes trazados gráficos:

A.16.1. La emisión de luz por una fuente puntual.

Los alumnos no saben dar respuesta a esta pregunta.

El profesor ha de ayudar a los alumnos, explicándoles que esta cuestión fue un escollo difícil de superar, y que de hecho no fue hasta que Huygens propuso su principio de propagación de la luz, que la teoría ondulatoria comenzó a tenerse en cuenta frente a la corpuscular. Newton defendía la Teoría corpuscular basándose fundamentalmente en la propagación rectilínea de la luz.

El profesor explicará el "Principio de Huygens" a los alumnos. El profesor ayudará a los alumnos a dibujar los frentes de onda secundarios en distintas situaciones.

Los alumnos se muestran sorprendidos y animados.

27/03/2019. SESIÓN 29

A.16.2. Cuando un haz de luz procedente de una fuente puntual lejana incide sobre una lente convergente, converge en el foco.

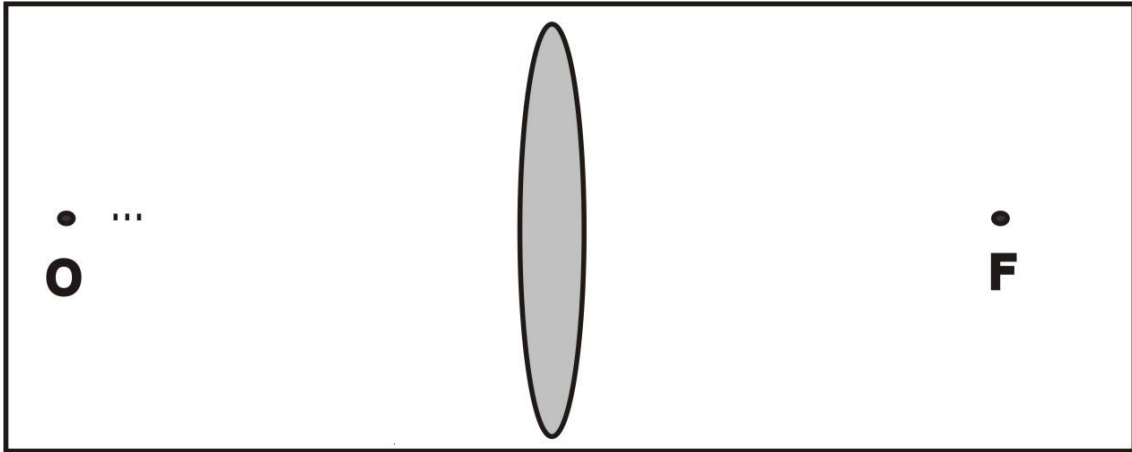


Imagen: Elaboración propia.

Se pide a los alumnos que realicen un esquema explicativo de la refracción de la luz. El profesor ayuda a los alumnos comentándoles que la velocidad de la luz en el aire es mayor que la velocidad de la luz en el agua. El profesor ayuda a los alumnos con el trazado gráfico.

Esta actividad pretende que los alumnos expliquen teniendo en cuenta el modelo ondulatorio de la luz qué le sucede a un haz de luz que procede de un foco muy lejano, cuando incide en una lente fina convergente.

Al principio los alumnos no son capaces de realizar el trazado de los frentes de onda.

El profesor ayuda a los alumnos explicándoles que la luz tarda más en pasar por el centro de la lente que por la parte exterior, de modo a que la velocidad de la luz en el vidrio es menor que en el aire. Ello hace que los frentes de onda converjan en un punto F.

El profesor recuerda a los alumnos que en los medios materiales los electrones absorben y reemiten la luz, proceso que no es instantáneo. Por supuesto, la rapidez instantánea de la luz entre dos átomos sigue siendo c . El profesor hace hincapié en el hecho de que cuando se habla de la velocidad de la luz en los medios transparentes, se hace referencia a la rapidez promedio.

A.16.3. Cuando un haz de luz procedente de una fuente puntual lejana incide sobre una lente divergente, emerge después de atravesarla según la dirección del foco virtual.

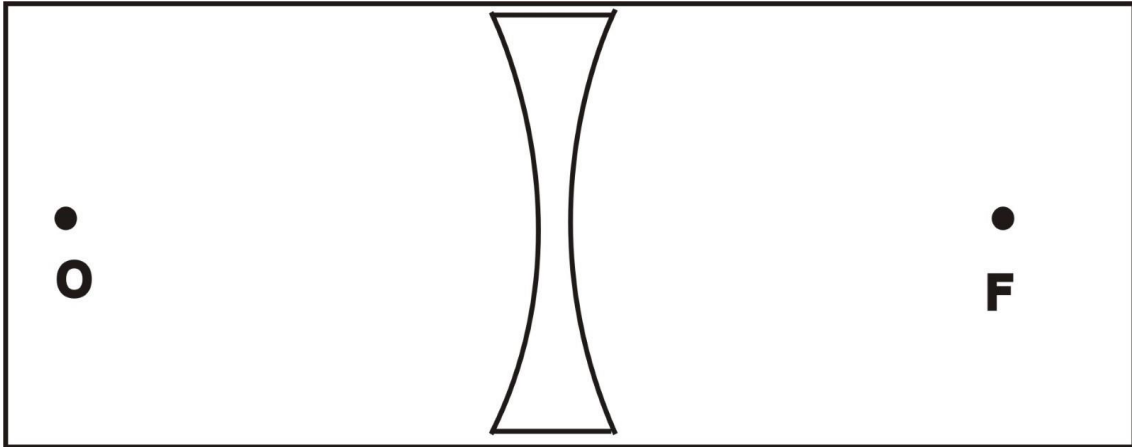


Imagen: Elaboración propia.

Se pide a los alumnos que realicen el trazado de los frentes de onda para el caso de una lente divergente.

Los alumnos son capaces de intuir, ayudados por el profesor, lo que ocurrirá con una lente convergente,

El profesor ayuda a los alumnos con el trazado explicando que en las partes exteriores el frente de ondas tarda más en atravesar la lente que por la parte central, dando como resultado una onda esférica que diverge al propagarse más allá de la lente, como si procediese del punto f' de la lente.

El profesor realiza el dibujo correspondiente para asegurarse de que todos los alumnos lo han comprendido.

A.16.4. Que un haz de luz procedente de un foco muy lejano, cuando incide en un espejo cóncavo, dentro de la aproximación paraxial, se refleja, concentrándose la luz en el punto focal del espejo.

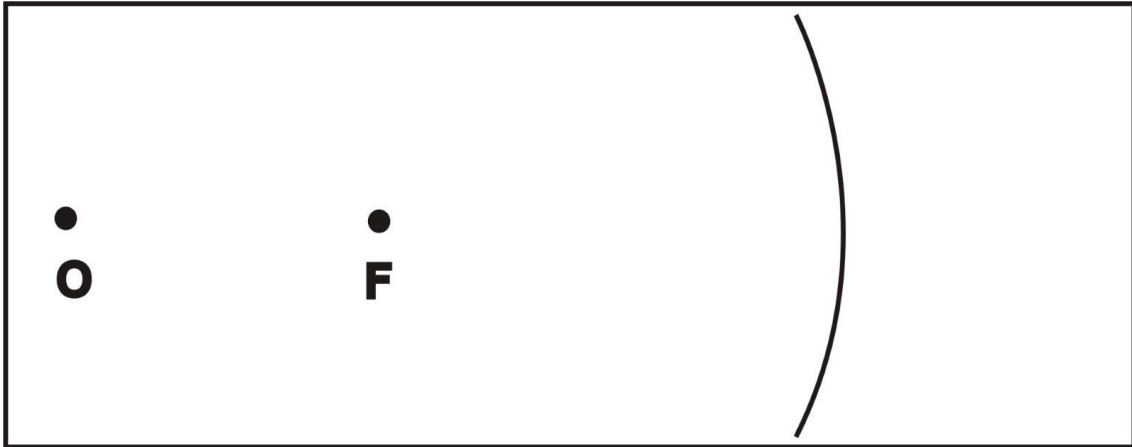


Imagen: Elaboración propia.

Se pide a los alumnos que propongan una explicación para la reflexión de la luz en un espejo plano inicialmente, teniendo en cuenta que la luz es una onda.

El profesor explica a los alumnos el "principio de tiempo mínimo" de Fermat.

Buscamos que los alumnos dibujen frentes de ondas que se reflejan. Al principio no son capaces, necesitan ayuda del profesor.

El profesor explica a los alumnos como el frente de ondas plano que llega al espejo, es reflejado por éste con el mismo ángulo de incidencia, de acuerdo con el principio de Fermat.

Se pide a los alumnos que expliquen de acuerdo al modelo ondulatorio la reflexión de la luz en un espejo esférico cóncavo.

Algunos alumnos se muestran capaces, otros necesitan algo de ayuda del profesor.

El profesor dibuja la luz como frentes de onda planos, y que después de la reflexión se convierten en ondas esféricas que convergen en f , para después divergir desde éste.

A.16.5. Que un haz de luz procedente de un foco muy lejano, cuando incide en un espejo convexo, dentro de la aproximación paraxial, se refleja, concentrándose la luz en el punto focal imaginario del espejo.

Los alumnos son capaces, ayudados por el profesor de realizar un trazado similar al anterior, en el que los frentes de onda esféricos reflejados, parecen proceder de un punto f' detrás del espejo.

28/03/2019. SESIÓN 30

A.17. ¿Es la luz “blanca” de color blanco? Razona la respuesta y describe las experiencias que apoyan vuestros argumentos.

Los alumnos no saben responder correctamente esta cuestión, dicen vagamente que sí.

El profesor debe hacer una reflexión sobre el lenguaje que normalmente se utiliza ya que al hablar de luz “blanca” estamos asociando también el color con cada tipo de luz. Como hemos estudiado la luz, aunque haga posible la visión, no es en sí misma una entidad visible y, si el color es una percepción asociada a los objetos que vemos (como la forma o el tamaño), entonces el color no puede ser una propiedad de la luz. Es decir, la luz no tiene color. Debemos seguir este razonamiento y, aunque no intentemos cambiar el lenguaje habitual, sí sería conveniente clarificar el significado de estas expresiones. Así, a partir de ahora, entenderemos por luz “blanca” el tipo de luz que hace que veamos blanca una pantalla iluminada por ella. La pantalla que servirá de testigo para “identificar” el tipo de luz es la pantalla habitual sobre la que se suele hacer proyecciones de diapositivas o de cine, aquella que vemos blanca al estar iluminada con la luz habitual del Sol o de las lámparas de la clase.

A.18. Explica cómo se obtiene la sensación de blanco, de negro, de rojo, de verde, de azul o de amarillo.

La mayoría de los alumnos afirman que vemos blanco un objeto al ser iluminado con luz blanca cuando todos los tipos de luz que la componen son difundidos por el objeto después de incidir la luz en él. Proponen que se verá azul, verde, rojo, cyan o amarillo cuando el objeto difunda ese tipo de luz hasta el ojo del observador y el resto de luces del espectro de la luz blanca sean absorbidas.

Los alumnos dicen que el negro se obtiene cuando el objeto absorbe todos los tipos de luz.

Dado que los objetos que llamamos negros son vistos por contraste con el fondo donde se encuentran, algunos alumnos, irreflexivamente, podrán opinar que el objeto negro

difunde luz negra, lo que será fácil de rebatir con la hipótesis de interacción de la luz blanca con la materia ya que en su espectro no existe luz negra.

El profesor recuerda distintas experiencias, en las que el color con el que se ven los objetos cambia en función de la iluminación, como su ropa al ser iluminada con las luces de color de teatros o discotecas.

Como consecuencia, en una primera conclusión, podremos relacionar el color con el tipo de luz que difunden los objetos.

A.19. Formula una hipótesis que explique cómo es posible obtener la sensación de algunos colores que no se encuentran en el espectro de la luz blanca como el marrón o el magenta.

Los alumnos no encuentran explicación plausible.

Queremos que los alumnos comprendan que si la luz blanca está formada por los distintos tipos de luz que componen el espectro (del rojo al violeta), y los objetos difunden sólo parte de él hasta el ojo, la visión de los colores que no se corresponden con ninguna luz del espectro habrá que buscarla en la fisiología del ojo humano. Queremos que los alumnos conozcan experiencias con luces de color que sugieren que cuando al ojo llegan varios tipos de luz, es posible ver un color diferente de las luces que le llegan. Una de ellas, conocida como síntesis aditiva del color, fue la base para la elaboración de la teoría de la visión del color aceptada actualmente.

El profesor explicará que proyectando sobre una pantalla tres tipos de luces: rojo-anaranjado, verde y azul-violáceo, se puede percibir en las zonas de confluencia colores diferentes a los de las luces emitidas. Thomas Young, en 1802 propuso la teoría tricromática de la visión del color, según la cual en la retina del ojo humano deberían existir tres tipos de células especializadas del color, cada una de las cuales sería sensible a cada uno de los tipos de luz de esa experiencia.

El profesor explicará que se han realizado observaciones microscópicas de la retina y se ha medido la respuesta de estas células (los conos) a cada uno de los tipos de luz que propuso Young. Además, en la retina, existen otras células llamadas bastones que responden de forma distinta según la intensidad luminosa, por lo que distinguimos los objetos más o menos iluminados.

El profesor explicará que, según la teoría tricromática de la visión de los colores, cuando a la retina llega cualquier tipo de luz, la respuesta de los tres tipos de conos, según su diferente sensibilidad espectral, provoca en el cerebro la sensación de los distintos colores que somos capaces de distinguir.

El profesor relatará el hecho de que la teoría tricromática para la visión de los colores, modifica en parte los razonamientos que habíamos hecho basándonos en la hipótesis de Newton. De forma que, a partir de ahora, podemos decir que vemos un objeto blanco cuando la luz que difunde hasta el ojo activa los tres tipos de conos de la retina. Esta activación se puede realizar, con una mezcla de todos los tipos de luz del espectro, o con otras muchas distribuciones, la más sencilla es la observada en el patrón de colores de la síntesis aditiva, en la que se obtiene la sensación de blanco cuando llegan al ojo sólo tres tipos de luz: rojo-anaranjado, verde y azul-violáceo.

A.20. Es posible obtener la sensación de cualquier color iluminando una pantalla “blanca” con distintas intensidades de luces “primarias” una azul, una verde y una roja. Obtén la mezcla de estos colores al proyectar sobre una pantalla blanca luces de estos tipos y analizad los resultados.

Los alumnos disfrutan con esta práctica y se muestran asombrados.

La explicación a estas experiencias se ha encontrado al estudiar la fisiología de la retina. En la retina existen dos tipos de células especializadas: los bastones que dan una respuesta distinta según la intensidad luminosa que reciben y tres tipos de conos que responden de forma distinta según el tipo de luz que reciben. Las diferentes sensaciones de color se obtienen cuando en el cerebro se reciben distintos grados de respuesta de cada tipo de estas células especializadas (conos)

Algunos estudiantes interpretan la visión de los colores magentas debido a las “mezclas” de diferentes tipos de luz. Estas mezclas pueden tener para los estudiantes el mismo significado que las de las pinturas o las de lápices de colores que han podido realizar en las clases del área de Plástica. Pueden pensar que estas mezclas se realizan sobre el objeto, en el espacio o en el interior del ojo.

Después de estas observaciones los alumnos interpretan la visión de los colores separando el tipo de luz recibida de la sensación de color producida.

El profesor recordará, si fuera necesario, que la pantalla reemite toda la luz incidente, por lo que, si una zona ha sido iluminada con luz roja y con luz verde, la pantalla reemite luz roja y luz verde y la sensación de amarillo que percibimos se deberá a algún mecanismo del interior del ojo y/o del cerebro. Como consecuencia, la sensación de amarillo puede obtenerse de dos formas: al llegar al ojo luz amarilla o al llegar luces roja y verde. De manera similar se interpretaría la sensación de color cyan y, en el caso del magenta, llamaremos la atención de que este color no se corresponde con ningún tipo de luz del espectro de la luz blanca y se percibe cuando al ojo llega luz azul y luz roja. Los diferentes tonos de magenta, de cyan o de amarillo se pueden apreciar variando la intensidad de la luz de los respectivos focos. Por último, hay que destacar que la sensación de blanco se elabora al llegar al ojo estos tres tipos de luces sin necesidad del resto de los tipos de luz presentes en su espectro.

El profesor explicará que la síntesis aditiva se puede realizar en clase con filtros para la iluminación de espectáculos existentes en el mercado y con tres proyectores de diapositivas o contruidos para tal fin. Cada proyector se puede construir con un tubo metálico en cuyo extremo se coloca una lente convergente de 10 dioptrías y a unos 9 cm una lámpara halógena dicróica de 12V y 50 W. En nuestras experiencias hemos utilizado el dispositivo que se muestra en la fotografía.

Para la obtención en una pantalla del patrón de colores exacto de la síntesis aditiva, deben utilizarse tres tipos de luz cuyas longitudes de onda se encuentren en un estrecho margen alrededor del máximo de sensibilidad de cada uno de los conos, y que se pueden obtener con tres proyectores láser adecuados, lo que se aleja de los materiales y condiciones de un laboratorio escolar.

3. Recapitulación y nuevos problemas. Límites de nuestro modelo ondulatorio de la luz.

A.21. ¿Qué te sugiere la siguiente experiencia?: Si mantenemos una brújula fija en un sistema de referencia, respecto al cual se mueve una carga, la brújula detectará un campo magnético, causado por la carga en movimiento respecto de la brújula. Sin embargo, si la brújula se mueve a la misma velocidad que la carga, no detecta ningún campo magnético. Es decir, no actúa ninguna fuerza sobre la brújula.

El profesor explicará a los alumnos que el campo magnético es un efecto relativista, que surge precisamente entre sistemas de referencia que se mueven entre sí. Comentaré que esta idea dará lugar al desarrollo de la teoría de la relatividad de Einstein.

El profesor recordará que en el caso de la fuerza magnética aparece la velocidad de la partícula, ¿pero respecto a qué sistema de referencia? Resulta evidente que desde diferentes sistemas de referencia se medirán diferentes velocidades, y por tanto las fuerzas magnéticas variarán de un sistema a otro. El profesor insistirá en que las leyes del magnetismo no son algo absoluto, como las leyes de la dinámica, sino que dependen del sistema de referencia. Lo que siempre será constante, será la relación entre las intensidades eléctrica y magnética. Es esta relación la que determina la velocidad de propagación de las ondas EM. Por tanto, no es extraño que la velocidad c , juegue un papel invariante en el principio de relatividad especial.

El profesor recordará que, según la teoría clásica mecánica de Newton, las leyes de la física tenían que ser iguales en todos los sistemas de referencia inerciales, es decir aquellos que se movían entre sí con velocidad constante. ¿Ocurre esto en la experiencia anterior?

Queremos que los alumnos comprendan que nuestro modelo ondulatorio tiene límites que no podemos explicar, al igual que sucedía con el modelo geométrico. Queremos que los alumnos comprendan que estamos utilizando modelos que son una figuración de la realidad, y que por tanto tienen límites.

29/03/2019. SESIÓN 31

Grupo de discusión

ANEXO V. GUIÓN GRUPO DE DISCUSIÓN ALUMNOS 2019

Presentación del proyecto

Estudio de la Universidad de Oviedo en un proyecto de investigación sobre la enseñanza de la óptica en 2º de Bachillerato.

Presentación personal de los intervinientes

Invitación a presentarse brevemente (debe permitir la identificación de las voces para la transcripción fina de los grupos).

Pregunta introductoria

¿La organización del tema ha influenciado mi aprendizaje?

PREGUNTAS CLAVE

1. ¿Había libertad para expresar dudas en todo momento?
2. ¿Tenía sentido lógico lo que íbamos haciendo?
3. ¿Os habéis sentido partícipe de una investigación?
4. ¿Habéis disfrutado proponiendo actividades experimentales para comprobar mi hipótesis?
5. ¿Habéis tenido la sensación de haber aprendido de verdad?
6. ¿Es un tema difícil del que no habéis comprendido nada?
7. ¿Os habéis sentido perdido con esta forma de trabajar?
8. ¿Esta forma de trabajar ha ayudado a que comprendáis el tema?
9. ¿Os gustaría que la enseñanza se organizara así?

ANEXO VI. TRANSCRIPCIÓN GRUPO DISCUSIÓN ALUMNOS 2019

Profesora: Estamos a viernes 29 de marzo de 2019, y vamos a empezar el grupo de discusión sobre la unidad de óptica geométrica y física que hemos llevado a cabo. A continuación, los intervinientes se presentan y comenzaremos acto seguido. A mi derecha:

ALUMNO	IDENTIFICADOR
A.	Alumno 1
E.	Alumno 2
A.	Alumno 3
M.	Alumno 4
C.	Alumno 5
J.	Alumno 6
A.	Alumno 7
E.	Alumno 8
J.	Alumno 9
N.	Alumno 10
A.	Alumno 11
I.	Alumno 12
I.	Alumno 13
J.	Alumno 14
P.	Alumno 15
L.	Alumno 16

Profesora: Buenos días alumnos del grupo de Física del instituto, que estáis cursando 2º de Bachillerato este año y que han participado en el proyecto de la unidad didáctica de óptica. Entonces chicos, a continuación, os planteo la pregunta introductoria y espero que vosotros podáis desarrollar vuestras ideas, conclusiones, temas que os gustaría tratar o

haber tratado sobre la organización de este tema. Os pregunto si ¿Creéis que esta organización diferente que hemos llevado del tema ha influenciado vuestro aprendizaje? Sois libres de comentar lo que pensáis y creéis sobre él.

- *Alumno 1: Bueno me pareció que la forma de dar el tema es mucho mejor que darlo desde el libro solo, por los temas principalmente del laboratorio, porque así vemos más en práctica lo que vemos desde el punto de vista teórico, y no es simple teoría.*

Profesora: venga más.... ¿Opináis como el Alumno 1?

- *Alumnos: sí.*
- *Alumno 3: se hace más ameno.*

Profesora: ¿más ameno?

Profesora: eso es bueno, ¿no?

- *Alumnos: sí.*
- *Alumno 3: sí.*
- *Alumno 2: se puede aprender a hacerlo desde el principio.*
- *Alumno 1: se entiende mejor cómo funciona.*

Profesora: ¿alguien que no opine así, o que le parezca un poquito rollo un poquito rollo las prácticas de laboratorio o haberlo integrado desde el principio? U, ¿os parece de verdad bien, más comprensible, más ameno, más entretenido?

- *Alumno 7: más entretenido....*

Profesora: ¿sí?

- *Alumno 3: y divertido.*

Profesora: ¿sí? ¿Estaría bien hacerlo todo el curso así verdad?

- *Alumnos: sí.*

Profesora: estaría bien, lo que pasa que desgraciadamente no tenemos tiempo para hacer todo el curso así, y tampoco tenemos material. Más... Más opiniones, más cosas que os apetezca comentar, destacar

- *Alumno 5: lo ha dicho todo el Alumno 1.*

Profesora: El Alumno 1 lo ha resumido bien, pero venga seguimos, que seguramente tenéis más cosas de las que hablar, si habéis podido o no plantear dudas, si os parece que tiene sentido lógico lo que íbamos haciendo, si os habéis sentido partícipe de la investigación, el Alumno 1 decía que sí, pero bueno puede haber más opciones de respuesta. Comentad cosas, por favor.

- *Alumno 4: yo creo que sí tiene sentido, porque empezamos con algo muy básico y luego íbamos avanzando para entenderlo, porque podíamos haber empezado por algo que fuese difícil que no entendiéramos, pero lo primero que dimos era muy fácil para entender lo siguiente.*

Profesora: vale, eso ayuda entonces, ¿no? poquito a poquito, ¿no?

- *Alumnos: sí.*
- *Alumno 1: por ejemplo, cuando había un ejercicio que hacíamos en el laboratorio, que nosotros teníamos que decir el día anterior como se iba a hacer, que no lo traía las hojas, eso estaba bien, o sea, que nos hacía pensar un poco. Y luego también cuando hacíamos las prácticas en el laboratorio, después, podíamos toquetear un poco nosotros con sentido, pero fuera de lo que se nos pedía.*

Profesora: aportar algo también vosotros ¿no?

- *Alumnos: sí.*

Profesora: y pensar vosotros en alguna otra cosa que se os ocurriese hacer...

- *Alumno 2: podíamos hacer cosas que no íbamos específicamente a ello, pero después podíamos comprobar cómo funcionaban algunas cosas...*

Profesora: ¿había más libertad de poner en práctica cosas que se os ocurrían?

- *Alumno 2: sí.*

Profesora: vale, ¡qué bien! Más...

- *Alumno 9: todos los dibujos que veíamos en el papel y eso, al poder verlo materialmente en el laboratorio, con las pruebas y todo eso, pues te ayudaba a entenderlo y saber qué era ese dibujo...*
- *Alumnos: sí....*

Profesora: claro... cuando por ejemplo el foco, o el trazado de rayos de la luz que atraviesa la lente y se concentra en el foco, sí que os ayuda el verlo en verdad para luego relacionarlo con el trazado de rayos, ¿es eso lo que decís, más o menos...?

- *Alumnos: sí.*

Profesora: muy bien, y más, ¡venga! Jesús, no me ha contado cosas, Alumno 12, Alumnos 13, Alumno 16. ¿Qué os parece la relación entre el desarrollo del tema con haber aprendido de verdad sobre el tema?, o sea, ¿os da la sensación de haber aprendido realmente sobre óptica o no?

- *Alumnos: sí.*

Profesora: ¿sí?, ¿igual, más o menos que con otros temas?

- *Alumnos: más, mucho más.*

Profesora: ¿sí?, ¿todos?

- *Alumnos: sí.*

Profesora: ¿seguro?

- *Alumnos: sí.*
- *Alumno 15: también le dedicamos mucho más tiempo.*

Profesora: también es verdad, hemos dedicado más tiempo en proporción que a otro tema, tampoco mucho más en una programación, pero bueno probablemente tres o cuatro sesiones extra se ha llevado. Lo que decíais vosotros, estaría guay hacer todo el curso así...

- *Alumnos: sí.*

Profesora: pero también estaría bien que nos recortaran un poco de temario para poderlo hacer, porque si no...

- *Alumno 15: es que no era lo típico de teoría y ejercicios, sino que además de la teoría, lo hacíamos nosotros, dibujando.*
- *Alumno 16: lo aplicabas.*
- *Alumno 2: yo creo que nos queda bastante más afianzado lo que aprendimos que de otra forma.*

Profesora: os da la sensación de tener que estudiar menos a parte, ¿no?, que con lo hecho en clase....

- *Alumno 5: por ejemplo, para dibujar elementos del campo magnético tengo que ponerme y repasarlo, pero de óptica no me hace falta.*

Profesora: pero ahora mismo ¿todo el mundo sabría dibujar un trazado de rayos de verdad?, de lentes espejos...

- *Alumno 5: sí.*
- *Alumno 3: sí.*
- *Alumno 9: sí.*
- *Alumnos: sí.*

Profesora: a ver chicas, que me falta por aquí también gente sin decirme nada, ¿qué os parece a vosotros? ¿Alguien considera que el tema es difícil, y que no ha entendido muy bien lo que hemos estado haciendo?

- *Alumnos: no.*
- *Alumno 3: difícil es, pero se entiende.*

Profesora: ¿sí?

- *Alumno 3: sí.*

Profesora: ¿sí?, bueno eso entonces tampoco está mal, pues aun siendo difícil, hemos conseguido entre todos entenderlo. Y, ¿es porque creéis que esta forma os ayuda a comprender el tema?

- *Alumnos: sí.*
- *Alumno 1: yo creo que todos habiéramos tardado más tiempo en entenderlo si cogemos el libro y miramos el tema.*
- *Alumno 7: si, porque traería mucho rollo el libro, fijo.*

- *Alumno 6: yo creo que, si lo hubiéramos hecho como el resto de los temas y hubiera sólo teoría y ejercicios, pues sabríamos hacer los ejercicios, pero de forma mecánica, sin entenderlo.*

Profesora: eso es muy importante.

- *Alumno 2: pues como cuando vimos lo de las líneas de campo, cuando lo ves en el libro y tal, pues a lo mejor no lo entiendes, pero cuando pones unas limaduras con un imán, pues.*

Profesora: es tan claro, se ve tan bonito, que parece que te queda en la cabeza para siempre. Bueno, pues estaría bien si, seguir trabajando así. ¿Os gustaría que el resto de temas los hubiésemos organizado así?

- *Alumnos: sí.*

Profesora: ¿sí? ¿seguro?, decidme la verdad.

- *Alumnos: sí*

Profesora: aunque requiera un poco más de trabajo diario vuestros, porque a veces en clase, podéis estar escuchando sin tener una participación activa, pero en esta unidad en todo momento vosotros también trabajabais, ¿valoráis eso positivamente, aunque os requiera más esfuerzo?

- *Alumnos: sí.*

Profesora: ¿seguro?

- *Alumnos: sí.*

Profesora: ¿y estaríais dispuestos a hacer así todo el curso?

- *Alumnos: sí.*
- *Alumno 1: por ejemplo, el tema del electromagnetismo, aunque no tenemos el material para hacerlo bien, bien, pero yo creo, a mí me parece un tema que estaría muy bien hacerlo así.*

Profesora: la verdad que sí, se entendería mejor.

- *Alumnos: mucho mejor, sí.*

Profesora: Venga más cosas chicas... ¿qué se os ocurre decir?, ¿algo negativo?

- *Alumno 13: yo lo que haría sería recortar la cantidad de ejercicios, son demasiados sobre el mismo tema, y te acabas confundiendo.*

Profesora: un poco insistente, a lo mejor ¿más de la cuenta?

- *Alumno 13: claro, porque te pregunta siempre lo mismo, y digo, va no será siempre lo mismo, y empiezas a pensar, y al final es lo mismo siempre.*

Profesora: tienes razón.

- *Alumno 13: hay que usar siempre el mismo esquema y tantos ejercicios iguales.*

Profesora: vale, o sea que se podría recortar el tema aun manteniendo el sentido, no tan repetitivo.

- *Alumno 13: sí.*

Profesora: a veces por intentar afianzar, igual mira, llega a tener el efecto contrario.

- *Alumno 13: sí.*

Profesora: bien. ¡Venga! más cosas negativas, que esto siempre es bueno para luego mejorar. Pensad algo que no os viene bien, que no os gustó, o que, aunque os gusta en el fondo, que mejoraríais algún aspecto.

- *Alumno 2: más material de laboratorio, esto de intentar hacer alguna cosa y no poder porque no había material...*

Profesora: claro, y que el material es un poquitín precario, la verdad. Venga chicos, chicas...

Profesora: y el papel del profesor en este tema, quizá es un poquito más activo, pero a la vez con más libertad para vosotros, ¿os parece más interesante?, ¿o no?, ¿o menos?

- *Alumnos: mejor.*

Profesora: ¿un poquito mejor?

- *Alumnos: sí, sí.*

Profesora: ¿valoráis más un tipo de trabajo así, en este sentido?

- *Alumno 1: si, por ejemplo, en los otros temas, igual a la hora de hacer los ejercicios estaba más dirigido a que los tenías que hacer de esa forma.*
- *Alumno 2: y se perdía más tiempo en hacer los ejercicios en la pizarra y tal, y aprendíamos menos.*
- *Alumno 1: si es verdad, sí.*

Profesora: claro, si cuando el profesor está explicando en la pizarra, si hasta entonces lo has entendido, pues lo estás entendiendo, pero si estás un poquito perdido, no estás aprovechando absolutamente nada. Y, sin embargo, de esta manera, sí que parece que estás más implicado todo el rato. ¿Vosotros también creéis eso?

- *Alumnos: sí.*

Profesora: ¿es una implicación más constante?, ¿o no?

- *Alumnos: sí.*
- *Alumno 1: y además estabas preguntando siempre: ¿lo entendéis?, y si querías preguntar algo lo preguntabas y ya está, sin problema, sin problema.*
- *Alumno 6: había más para preguntar las dudas, y en laboratorio también había tiempo para aclarar las dudas, o aclarar las dudas mismamente con las experiencias de laboratorio, entonces no hay materia que no te haya quedado bien...*

Profesora: vale, eso también es importante. Venga, alguna cosina que se os ocurra, que no hayamos tocado aún, cosas negativas también para mejorar para otro año, como menos actividades repetitivas, ¿qué más?, o más material.... Eso vamos a hablarlo con el secretario. Alumno 9, Alumno 5, que no me contáis nada.

- *Alumno 5: yo estoy de acuerdo con todo*
- *Alumnos: risas...*

-Profesora: muy bien, Alumno 6, ¿alguna aportación?

- *Alumno 6: a mí me pareció una buena manera de entenderlo, muy entretenido, porque a mí, por ejemplo, los otros temas que son mucha teoría aquí en clase, me*

resultan un poco aburrido, me cuesta más entenderlo, en cambio, haciendo las pruebas también te quedan las fórmulas....

Profesora: estaría bien de verdad a largo plazo plantear el 2º de bachillerato entero así, recortando el currículo un poco, porque además de que, si no, no nos da tiempo, puede cansar, pero estaría chulo, aunque esto lleva mucho trabajo. Pero sí, estaría muy bien hacerlo. Alumno 8 ¡venga! ¡Alumno 7!

- *Alumno 8: haciéndolo así por las hojas, como tienes que ir poco a poco haciéndolo, mantienes mejor la atención en la clase, que a lo mejor estando explicando por el libro, puedes llegar a estar tu a lo tuyo.*

Profesora: claro... y desconectas más...

- *Alumno 8: y con las hojas como vas poco a poco, atiendes más.*

Profesora: ¿te ayuda a centrarte más?

- *Alumno 8: sí, sí.*
- *Alumno 7: y además se hace más visual, tú ves los ejercicios que estás haciendo y los entiendes, y entonces se te queda más y mejor, porque si estuvieses explicando en la pizarra escribiendo fórmulas y fórmulas entonces lo ves peor...*

-Profesora: vale, muy bien chicos. Alumno 11, Alumno 10, Alumno 9, ¿una valoración de cosas positivas y negativas? Vamos cerrando un poquitín entre todos....

- *Alumno 10: no se me ocurre nada, estoy de acuerdo con todo.*

Profesora: ¿Alumno 9?

- *Alumno 9: yo creo que hubiera sido aún mejor todavía poder haber hecho todas las clases en el laboratorio, hubiera sido mucho mejor.*

Profesora: si, hubiera sido mucho mejor.

-Alumno 9: no perderíamos el tiempo entre bajar y, por ejemplo, estás explicando una cosa y coges una lente en ese momento, o sea, no es hacer toda la clase de práctica.

Profesora: eso es ideal, como tú muy bien dices. Ya os comenté al principio que ese es otro de los problemas del centro, no disponemos del laboratorio de Física nada más que

una hora a la semana, y alguna otra hora que nos han ido dejando, o cambiándonos la hora. Pero eso yo lo pedí en la memoria final del año pasado, lo pediré éste, que por favor pongan la clase de Física en el laboratorio de Física como es lo más lógico y normal y no se perdería tiempo. Y lo que tú dices no haría falta toda la clase en el laboratorio, sería más bonito decir, bueno pues ahora hacemos esto, lo vemos y seguimos. Así de este modo, hemos tenido que centrar días enteros. Como propuesta de mejora está muy bien, a ver si la consideran. Gracias,

Profesora: ¡Alumno 11!

- *Alumno 11: es que estoy de acuerdo con todo lo que han dicho los compañeros. Me gustó una cosa que hicimos en el curso, cuando nos separamos en dos grupos para hacer un experimento, y el que ganase, ganaba un punto, una motivación extra.*

Profesora: eso está bien, ¿no? Un refuerzo positivo instantáneo.

- *Alumno 11: en lo demás estoy de acuerdo con mis compañeros.*

Profesora: buena aportación, eso también lo tendremos en cuenta, claro. Chicos, ¿Alumno 12, Alumno 13?

- *Alumno 13: como mejora, aportar un formulario del tema, que eso ayuda mucho.*

Profesora: ah vale, un recordatorio de todas las fórmulas reunidas.

- *Alumno 13: y un esquema.*

Profesora: no obstante, lo tenéis en el conjunto de resúmenes que os día al principio, ¿vale?

- *Alumnos: sí.*
- *Alumno 13: pero al ser tan tocho, la gente no lo mira.*

Profesora: vale, sería mejor justo después del tema.

- *Alumno 13: una hojita...*

Profesora: una hojina, vale.

- *Alumnos: risas.*

-Alumno 1: Luego pues, por ejemplo, igual las hojas habría que estructurarlas mejor para que hubiera más espacio para hacer los ejercicios, pues había muchos ejercicios que tenías que hacer un trazado gráfico en un espacio pequeñísimo.

Profesora: vale... El diseño de las hojas que yo os di, que tuvieran más espacio libre ¿no?, para hacer los trazados.

-Alumnos: sí.

Profesora: perfecto.

-Alumno 1: y a mí, lo que me parece que también nos ayudó, es que por ejemplo en el libro tú estudias el campo electromagnético desde unas bases que ya se han puesto hace tiempo, pero en este lo que hicimos fue ir siguiendo los pasos que siguieron los científicos en su momento para hacerlo.

Profesora: y eso os ayuda, ¿no?

- Alumnos: sí.*
- Alumno 2: y es que, además, otras veces te meten fórmula, fórmula, fórmula y teoría, y después con suerte, te explican cómo funciona de verdad. Y en este caso siempre vimos cómo funciona y después buscamos la explicación a eso, por ejemplo, si acercas la lente, se mueve para aquí la imagen, o se mueve para allí, y después eso ya lo explicamos con las fórmulas.*

Profesora: genial...

- Alumno 2: y entonces puedes asociar mejor la fórmula al fenómeno.*
- Alumno 1: primero haces la observación y luego le buscas una explicación, o una fórmula.*

Profesora: sí, le buscas una explicación. Vale, muy bien, eso me ayudará. ¡Jesús!

- Alumno 14: yo creo que fue buen el obligarnos a nosotros mismos a trabajar día a día, porque si no, no nos enterábamos de nada.*

Profesora: eso es verdad también, hay cosas que parten de una obligación al principio, y luego pues vemos el beneficio, ¿verdad? Muy bien, lo dices como algo positivo, o negativo

- *Alumno 14: a veces bueno, y a veces malo.*

Profesora: depende del día, ¿no?

- *Alumno 14: sí.*

Profesora: ¿Alumno 15, Alumno 16?

- *Alumno 16: ya lo han dicho...*

Profesora: ¿nada extra? Aunque sea malo, muy malo.

- *Alumno 15, Alumno 16: no.*

Profesora: ¿bien entonces?

- *Alumno 15, Alumno 16: sí.*

Profesora: me quedan por aquí el Alumno 3, y el Alumno 4, ¿qué avanzamos? ¿qué decimos?, o ¿cómo resumimos?

- *Alumno 4: me pareció muy interesante y yo creo que aprendes mucho más, y es más dinámico.*
- *Alumno 3: nada, eso que cuando estás con el libro, yo puedo estar a otra cosa, pero con esto, al tener que ir haciendo el dibujo y tal, yo creo que ayudó, y vas haciéndolo poco a poco. Además, cuando seguimos el libro y explicas en la pizarra, atiendes 10 minutos, otros 10 minutos no...*
- *Alumno 6: además cuando estás con el libro, por lo que sea, piensas, está la fórmula en el libro, para qué vas a atender, y sin embargo con esto, aunque sigues teniendo el libro, te obligas más...*

Profesora: si no se nos ocurre nada más, ya hemos expresado opiniones, buenas, malas. En principio, parece ser que sí que os ha gustado más que un tema normal, y que consideraréis que habéis aprendido más, ¿verdad?

- *Alumnos: sí.*

Profesora: pues nada, muchas gracias a todos por haber participado en el grupo de discusión, y seguiremos mejorando.

- *Alumno 1: gracias a ti.*

Profesora: de nada. Gracias.

- *Alumnos: aplausos.*

Profesora: gracias chicos.

ANEXO VII. UNIDAD DIDÁCTICA ÓPTICA 2020

ELABORACIÓN DE UN MODELO GEOMÉTRICO DE LA LUZ QUE EXPLIQUE LA VISIÓN HUMANA

1. ¿Cómo vemos los objetos al mirarlos directamente?
 - 1.1. El comportamiento geométrico de propagación de la luz
 - 1.2. La función del ojo en el proceso de visión
2. Puesta a prueba del modelo geométrico de visión en la visión indirecta.
 - 2.1. ¿Cómo vemos al mirar a los espejos? La reflexión de la luz
 - 2.2. ¿Cómo vemos al mirar a través de medios transparentes? La refracción de la luz
 - 2.2.1. ¿Cómo vemos los objetos sumergidos en medios transparentes?
 - 2.2.2. ¿Cómo vemos al mirar a través de las lentes?
3. Aplicaciones tecnológicas del modelo de visión
 - 3.1. La explicación y corrección de las anomalías visuales
 - 3.2. El diseño y construcción de instrumentos de ampliación de la visión: el telescopio y el microscopio
4. Conclusiones y problemas abiertos

1. ¿Cómo vemos los objetos al mirarlos directamente?

1.1. El comportamiento geométrico de propagación de la luz

Partimos del trabajo realizado por Osuna (2007, 2003-2008, 2012) en el que se construye un modelo de visión basado en el modelo de visión de Kepler, quien en 1604 cuestionó ideas existentes desde la época de los científicos naturalistas griegos, e introdujo ideas muy novedosas y válidas, que resumimos a continuación:

- 1. Los objetos iluminados son fuentes secundarias de luz.*
- 2. Para ver los objetos el ojo no emite nada.*
- 3. La luz se propaga en línea recta y en todas las direcciones desde cada fuente puntual.*
- 4. Si el objeto que vemos es extenso podemos considerarlo como un conjunto de fuentes puntuales.*
- 5. Para poder ver, al ojo le llega un haz divergente de luz procedente de cada punto del objeto. El rayo no es nada de la propia luz ya que sólo señala una de las direcciones de propagación de la luz.*
- 6. La luz viaja en el vacío a una velocidad de $3 \cdot 10^8$ m/s. Esta velocidad es tan grande que, en los fenómenos habituales de visión, no somos capaces de detectar ningún tiempo entre la salida de la luz desde el objeto y su llegada al ojo para ser visto.*

1.2. La función del ojo en el proceso de visión.

Queremos conocer qué sucede en el ojo cuando entra la luz, para lo cual necesitamos conocer el interior del ojo humano. Sabemos que la luz entra por la córnea, atraviesa el diafragma del iris (de apertura variable), pasa por el cristalino (lente convergente de curvatura variable), y finalmente llega a la retina (conjunto de células nerviosas especializadas que están conectadas a través del nervio óptico con el cerebro). Se puede diseccionar un ojo de cordero para observar todos estos componentes. Es muy importante incidir en el hecho de que, al igual que las sensaciones de la audición, del tacto, del olfato o del equilibrio, la sensación de la visión se produce a nivel cerebral. Vamos a elaborar un modelo físico de ojo en el laboratorio con el cual poder analizar

cómo se produce la visión. Hemos de intentar que sea equivalente a una versión simplificada, pero válida, del complejo sistema fisiológico que es el ojo humano.

A.1. Sugiere un sistema físico que pueda ser utilizado como modelo de ojo humano y con el cual podamos estudiar cómo se comporta la luz en su interior para dar respuesta a las preguntas que nos hacíamos inicialmente: ¿Cómo vemos? ¿Cómo podríamos ver mejor? (Osuna, 2007)

I. Partiendo del funcionamiento fisiológico del ojo intentaremos desarrollar un modelo físico del mismo. Presentaremos a los alumnos el ojo humano de manera simplificada como un modelo físico compuesto por una lente convergente (de curvatura variable) y una pantalla en la que se formaría la imagen (la retina).

II. Consideramos que los alumnos comprenderán este sencillo modelo físico, pero no creemos que ellos mismos sean capaces de proponer dicho modelo a partir del estudio fisiológico del ojo humano.

III. El profesor comentará que el ojo se puede considerar, en una primera aproximación, como una lente convergente (que sería el equivalente del cristalino) y una pantalla en la que se formaría la imagen (que equivaldría a la retina). El profesor explicará que en el ojo realmente no solamente el cristalino funciona como lente convergente y la imagen se forma en el cerebro, no en la retina, sino en el cerebro, tras un complejo mecanismo fisiológico. Por tanto, es muy importante que insista en que este modelo es una simplificación de la realidad.

A partir del modelo que hemos propuesto, para comprender el funcionamiento óptico del ojo humano necesitamos explorar el comportamiento de lentes convergentes. Con la intención de comprender el funcionamiento de este modelo de ojo comenzaremos por la situación más sencilla, esto es, una fuente luminosa puntual y la lente suministrada por el profesor de unas 10 dioptrías.

A.2. Realiza el montaje siguiente y explora el comportamiento óptico de este sistema, encontrando algunas posiciones de la fuente, del objeto y de la pantalla para ver en ella la imagen nítida (la fuente de luz puntual). (Basado en Osuna 2003-2008)

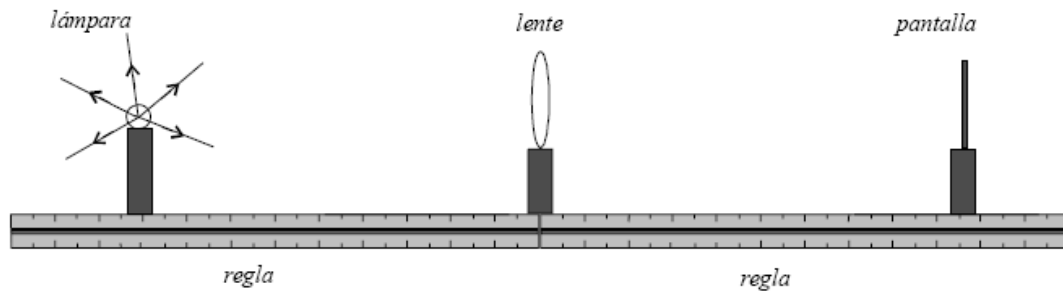


Imagen: Osuna 2003-2008.

I. Queremos que los alumnos comprendan que lo que ven en la pantalla es la imagen del filamento de la bombilla, es decir la imagen de un objeto. Intentamos con esta actividad, que los alumnos comprendan que la imagen solamente se puede formar a una única distancia de la fuente y de la lente.

III. El profesor explicará a los alumnos una vez que éstos han formulado sus hipótesis, que parte de la luz que emite la bombilla (en este caso el objeto es una fuente primaria) llega a la lente; la lente consigue que la luz converja en la pantalla, donde se forma un patrón iluminado que nos recuerda al pequeño filamento de la bombilla (que consideramos casi puntual). Es lo que usualmente denominamos imagen óptica.

A.3. Realiza un trazado gráfico para la situación del esquema que explique la formación de la imagen en este sistema óptico lente-pantalla, equivalente al ojo humano. (Osuna, 2003-2008)

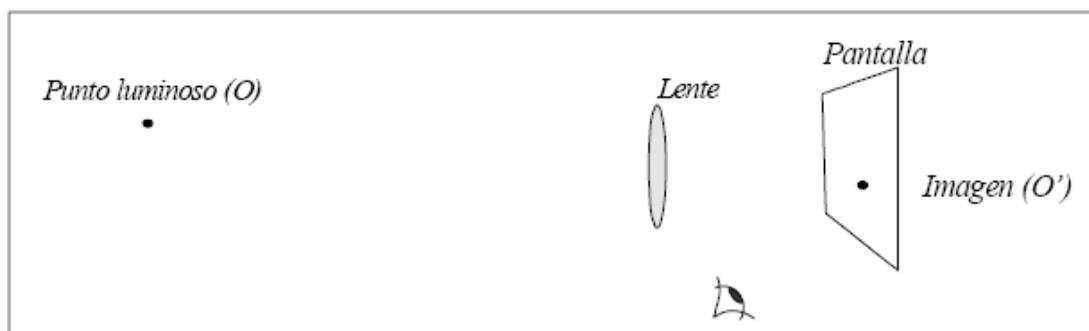


Imagen: Osuna 2003-2008.

I. Queremos que los alumnos dibujen un esquema en el que la luz sale del punto luminoso en todas las direcciones. Queremos que muestren como parte de esa luz, el haz de luz que

nos interesa, atraviesa la lente y converge de nuevo en el punto imagen, dando lugar a la imagen óptica.

III. El profesor ha de insistir en que los alumnos dibujen la luz saliendo del punto objeto en todas las direcciones. Ha de conseguir que los alumnos entiendan que el haz de luz seleccionado, es solamente parte de esa luz que sale del objeto. El profesor ha de recordar a los alumnos que dicho haz de luz incide en la lente y que es la lente la que hace que el haz de luz converja en un punto. El profesor insistirá en que la formación de la imagen se produce a partir del haz de luz que incide en la lente. Finalmente, el profesor propondrá el trazado adecuado.

A.4. Explora con este sistema lente-pantalla, la imagen que se ve en la pantalla cuando el objeto es extenso, por ejemplo, una diapositiva iluminada. Observa qué ocurre con el tamaño de la imagen según la posición del objeto. Realiza un trazado gráfico explicativo de estos casos.

I. Queremos que los alumnos comprendan que una fuente extensa de luz ha de modelizarse como si fuera un conjunto de fuentes puntuales, y que comprendan, así mismo, que la imagen de un objeto extenso se forma punto a punto. Hemos de conseguir que los alumnos comprendan que de cada punto del objeto sale un haz de luz, que atravesará la lente y formará la imagen de dicho punto en la pantalla. Y que el conjunto de estos puntos imagen proporciona la imagen completa del objeto extenso.

II. Esperamos que los alumnos comprendan que la imagen de un objeto extenso se forma punto a punto, es decir repitiendo varias veces el procedimiento que habían aprendido para formar la imagen de un objeto puntual. Esperamos que utilicen correctamente el concepto de haz de luz para formar la imagen de un objeto puntual, y por extensión para formar la imagen de un objeto extenso.

III. El profesor debe de insistir en que la imagen de un objeto extenso se forma punto a punto. El profesor explicará a los alumnos que se puede formar la imagen de un objeto extenso utilizando solamente los puntos más extremos del objeto. Insistirá en que la imagen está invertida, y comentará a los alumnos que más adelante cuando utilicen las lentes en el laboratorio lo comprobarán. El profesor explicará a sus alumnos que el

cerebro reelabora la imagen consiguiendo que tengamos la sensación de ver los objetos derechos.

A.5 Utilizando el mismo montaje de la A.2, comprueba que al alejar la fuente debemos acercar la pantalla para ver su imagen. ¿Existe una posición límite de la pantalla al alejar la fuente? Realiza un trazado gráfico explicativo para el caso límite encontrado. (Basado en Osuna 2003-2008)

I. Mediante esta actividad queremos introducir el concepto de “Foco Imagen”, es decir el lugar donde se concentra la luz procedente de la bombilla cuando ésta se sitúa muy, muy lejos (teóricamente en el infinito). Queremos que los alumnos consigan asociar la experiencia del laboratorio en la que sitúan la fuente muy muy lejos y la luz, una vez atravesada la lente se concentra en el foco, con el trazado gráfico del rayo que procede del objeto que está en el infinito, y que, tras incidir en el lente paralelo al eje óptico, pasa por el foco imagen. Cuando desarrollemos el algoritmo correspondiente a las lentes a este rayo lo llamaremos rayo I.

II. Creemos que es posible que algunos alumnos piensen que cada rayo del haz paralelo incidente proceda de un punto diferente de la fuente, en lugar de darse cuenta de que es un único haz de luz que sale del mismo punto de la fuente, pero que como ésta muy muy lejos llega al lente casi paralelo al eje óptico.

III. El profesor debe de cerciorarse de que los alumnos manejan los haces de luz correctamente, insistiendo que el haz de luz paralelo que incide en la lente procede de un único punto objeto que está muy muy lejano. El profesor explicará que uno de los rayos que limitan este haz, será el rayo que viene paralelo al eje óptico y pasa por el foco y que denominaremos rayo I en el algoritmo que desarrollaremos posteriormente. Explicará también, que existe un segundo rayo que sale del objeto y pasa por el centro de la lente sin desviarse. Lo llamaremos rayo II, cuando desarrollemos el algoritmo correspondiente a las lentes. Insistirá en relacionar estos algoritmos con las experiencias reales llevadas a cabo en el laboratorio.

A.6 Con ese mismo montaje, observa que al acercar la fuente debemos alejar la pantalla para ver su imagen. ¿Existe alguna posición límite para la fuente a partir de la cual no se forma ninguna imagen? Realiza un trazado gráfico explicativo para ese caso límite.

I. Del mismo modo que en la actividad anterior introdujimos el concepto de “Foco Imagen”, con esta actividad queremos introducir el concepto de “Foco Objeto”. Lo haremos mediante un haz de luz definido por el rayo II, y el rayo III (que pasa por el foco y va hacia infinito tras atravesar la lente).

También queremos volver a definir el concepto de “eje óptico” para que los alumnos afiancen su conocimiento.

Otro objetivo muy importante de esta actividad sería comprobar la reversibilidad del trazado gráfico.

II. Los alumnos deben de llegar a la conclusión de que hay un límite de acercamiento del objeto a la lente, de manera que si lo acercamos más no se formaría la imagen.

III. El profesor debe animar a los alumnos a que prueben a situar el objeto, en nuestro caso la bombilla a distintas distancias de la lente, y que vayan fijándose en lo que sucede. Explicará a los alumnos que existe un punto especial, si el objeto se sitúa en el foco, la imagen se forma en el infinito, independientemente de donde se sitúe la pantalla.

A.7 Sitúa ahora la lente a 11 cm de la pantalla y sin variar esta distancia (que es lo que ocurre en el ojo humano con el cristalino y la retina):

a) Anota la posición a la que debe situarse un objeto para que se forme la imagen en la pantalla.

b) Cambiando la lente por otra más gruesa (una de 20 dioptrías), obtén la nueva posición del objeto para ver la imagen en la pantalla. Esta situación es equivalente a la que realiza el cristalino del ojo humano (acomodación).

I. Queremos que los alumnos relacionen el poder de convergencia de la lente con la distancia a la que se forma la imagen de un objeto con dicha lente. Además, queremos que relacionen esta actividad con la naturaleza del ojo humano.

II. Esperamos que con la ayuda del profesor los alumnos comprendan la relación que hay entre el grosor de una lente, y su capacidad para formar imágenes de objetos situados a diferentes distancias de nosotros.

III. El profesor explicará a los alumnos la relación existente entre estos trazados y lo que ocurre en el ojo humano, concretamente la relación existente con la visión de los objetos lejanos, en los que el ojo no necesita acomodación; y los objetos cercanos, en los que el ojo necesita acomodarse, necesita una lente con mayor potencia. El profesor explicará a los alumnos que el cristalino (la lente de nuestro ojo) varía su poder de convergencia para formar la imagen en la retina, adaptándose a las diferentes distancias a las que se encuentran los objetos.

El sistema lente convergente-pantalla que estamos explorando como modelo de ojo humano sólo produce una imagen nítida cuando el haz de luz procedente del objeto incide en el lente paralelo (o casi) al eje óptico de la lente muy cerca del centro. Esta limitación para formar imágenes se conoce como aproximación paraxial.

A.8 En las actividades anteriores hemos introducido los siguientes elementos característicos de la lente: Foco objeto (F), Foco imagen (F'), Centro óptico (C) y eje óptico. Utilizando las propiedades de estos elementos realiza trazados gráficos para localizar la posición de la pantalla donde se ve la imagen del objeto en los siguientes casos:

a) Objeto alejado

b) Objeto cercano

c) Objeto entre el foco y la lente

d) Objeto extenso.

I. La actividad pretende que los estudiantes se familiaricen con los trazados gráficos de formación de la imagen óptica en un sistema lente convergente-pantalla.

Queremos construir junto con los alumnos, un algoritmo que permita localizar a qué distancia de la lente se ha de situar la pantalla para que se vea la imagen de un objeto. Lo haremos a partir de las características de la lente que habíamos definido experimentalmente, F , F' , C y eje óptico, dando sentido físico al algoritmo que hemos creado.

II. Creemos que a los alumnos no les resultará fácil integrar todos los conceptos nuevos aprendidos en un algoritmo, al que queremos que den sentido físico. Consideramos que el profesor ha de trabajar mucho para conseguir que los alumnos sean capaces de integrar las actividades experimentales realizadas con el algoritmo creado.

III. El profesor explicará que la pantalla se tendrá que colocar donde se concentra la luz, que será a una distancia diferente en cada caso. Debe de recordar siempre a los alumnos que utilicen correctamente el concepto de haz. El profesor ha de recoger y analizar las características de los diferentes trazados de las actividades realizadas asegurándose de que los alumnos comprenden el trazado gráfico adecuado para cada actividad.

El profesor recordará a los alumnos que los trazados gráficos están basados en el comportamiento de la luz. Les recordará que, si situamos una fuente puntual de luz en el foco de la lente, la imagen se forma en el infinito, o en nuestro caso de experiencia de laboratorio, muy lejos. Esta propiedad de la lente nos servirá para identificar el rayo III. También les recordará que, si situamos un objeto muy lejos de la lente, su imagen se formará en el foco. Nos basamos en esta propiedad para trazar el rayo I.

Así mismo explicará a los alumnos que el rayo II es deducido de la geometría del rayo I y III.

Para el caso c), el profesor explicará que si la luz procedente de un punto luminoso, una vez atravesada la lente, no se vuelve a concentrar en un punto, no se puede ver la imagen de dicho punto luminoso para ninguna posición de la pantalla. Se trata de una imagen virtual, es decir, de ninguna manera la luz se puede concentrar en ese punto.

En el caso d), el profesor recordará que las fuentes extensas han de tratarse como si fueran un conjunto de fuentes puntuales. Explicará una vez más que podemos coger dos puntos en ambos extremos y realizar el trazado gráfico para cada uno de ellos, deduciendo la posición del resto de la imagen. El profesor resaltará el hecho de que la imagen que se forma es invertida respecto al objeto.

Finalmente, como resumen el profesor reflexionará con sus alumnos sobre el hecho de que para encontrar la imagen de un objeto se puede utilizar cualesquiera dos, de los tres rayos que hemos definido en nuestro algoritmo, siempre ligados a la experiencia de laboratorio. También recordará que el rayo en sí mismo no es nada, que simplemente delimita el haz de luz que seleccionamos.

El profesor realizará los siguientes trazados para aclarar las anteriores explicaciones:

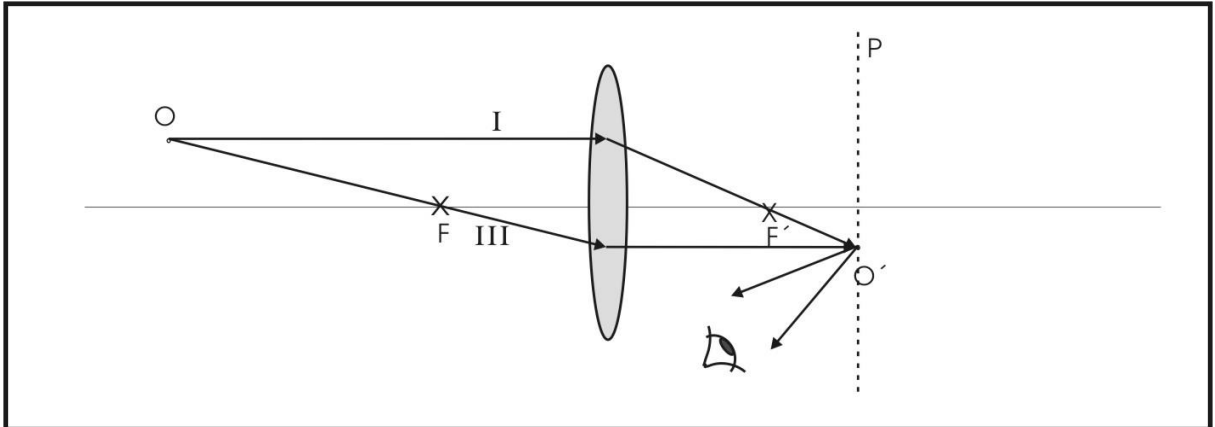


Imagen: Elaboración propia.

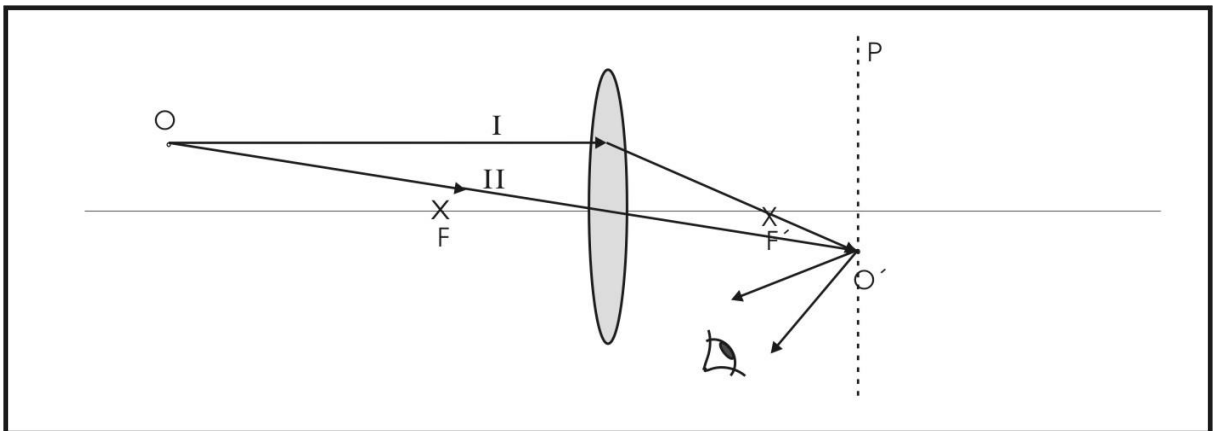


Imagen: Elaboración propia.

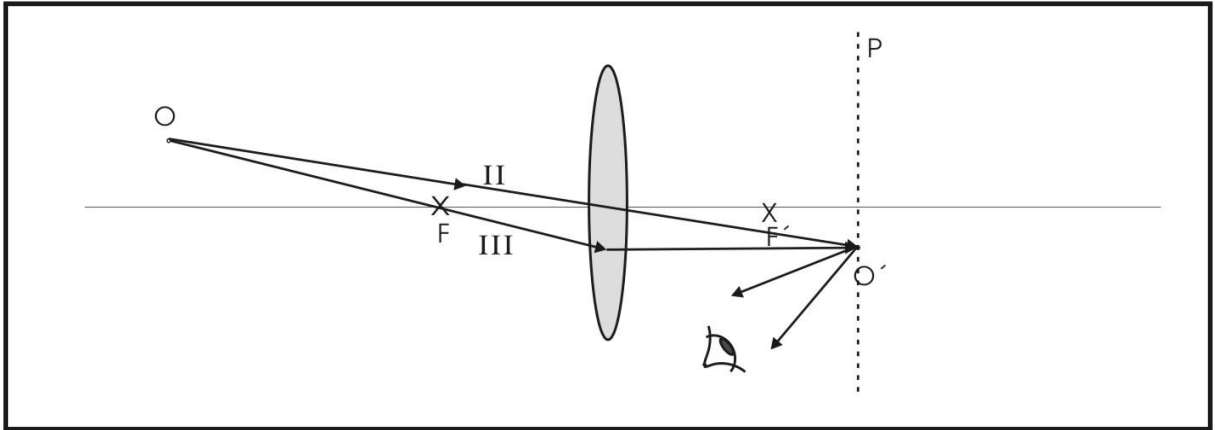


Imagen: Elaboración propia.

El profesor debe de trazar siempre el haz de luz total para que los alumnos interioricen que toda la luz que sale del objeto y pasa por la lente va a parar al punto imagen O' , independientemente del trazado de rayos que elijamos para encontrar el punto imagen. Les mostraré el siguiente trazado para clarificarlo:

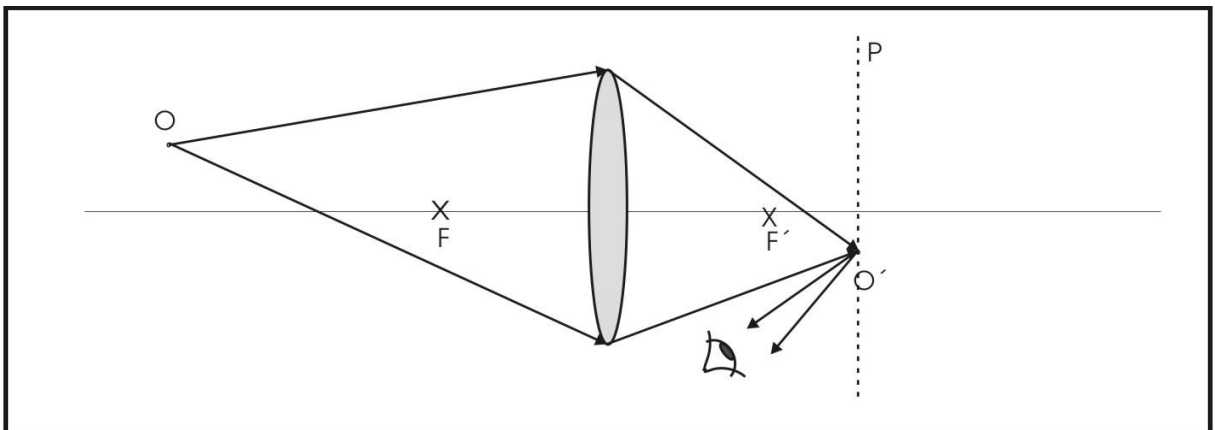


Imagen: Elaboración propia.

Recordaré a los alumnos que no se utiliza el trazado con el haz completo porque no se sabría dónde se formaría la imagen. Sin embargo, mediante las propiedades del foco objeto y foco imagen, y su aplicación al dibujo mediante los rayos III y II, si se logra encontrar la posición en la que se forma la imagen.

A.9 Encuentra las distancias focales de las lentes suministrada por el profesor.

I. Queremos que los alumnos interioricen el concepto de distancia focal. Para ello el profesor les suministrará lentes diferentes para que encuentren la distancia focal de cada una de ellas.

Así mismo, al utilizar un objeto extenso para formar su imagen con la lente, pretendemos conseguir que los alumnos erradiquen sus posibles concepciones alternativas sobre la imagen óptica que, sabemos por la investigación didáctica, se muestran inalteradas después de la instrucción. Goldberg y McDermott (1987) han investigado las ideas de los estudiantes, del curso de introducción de Física de la Universidad, sobre el comportamiento de las lentes convergentes y la imagen que se ve en una pantalla. Han constatado que un elevado porcentaje de estudiantes piensa que la imagen sigue existiendo, aunque se elimine la pantalla, que se seguiría viendo, aunque se aleje la pantalla y que se vería la mitad si se tapara media lente.

Mediante esta actividad los alumnos comprobarán que se puede formar la imagen de una fuente extensa. El profesor recordará una vez más que la imagen de un objeto extenso se forma punto a punto, de manera que cada uno de los puntos del objeto extenso se trata como si fuese un objeto puntual.

III. El profesor propondrá a los alumnos que intenten conseguir que se forme la imagen del paisaje que se ve desde la ventana mediante una lente convergente y una pantalla, que puede ser una hoja blanca. Les explicará que han de suponer que el paisaje está en el infinito, o lo suficientemente lejos como para considerarlo en el infinito. Les ayudará a comprobar que de acuerdo a lo que habían estudiado y experimentado previamente, se puede hallar la imagen de dicho paisaje en el foco de la lente. Les recordará que han de colocar la pantalla, en este caso la hoja blanca, a esa distancia para poder ver la imagen. El profesor recordará otra vez a los alumnos que la luz que viene del infinito y atraviesa la lente convergente se concentra en el foco de ésta. De este modo se puede encontrar el foco de la lente, la distancia que hay de la pantalla a la lente. Los animará que prueben a hacerlo con lentes de distinta potencia, para comprobar que las distancias focales son diferentes.

A.10 En el sistema lente-pantalla que estamos estudiando hemos aprendido a realizar el trazado gráfico que permite localizar la posición de la imagen, para diferentes

posiciones del objeto. Hemos comprobado que, en función de la distancia del objeto a la lente, la distancia de la lente a la pantalla varía. Pero en el ojo, la pantalla no es móvil. ¿Cómo es posible formar la imagen de objetos situados a distancias diferentes? ¿Qué hipótesis lo podría explicar?

I. Queremos que los alumnos se den cuenta de lo maravilloso que es nuestro ojo. Queremos que a partir de las actividades realizadas anteriormente reflexionen, y lleguen a la conclusión de que es necesario un cambio en la curvatura de la lente que hay en nuestro ojo, si queremos que la imagen se forme en una pantalla que está siempre a la misma distancia de la lente.

II. Esperamos que los alumnos comprendan la necesidad de que el ojo tenga una lente como el cristalino que debe de cambiar de curvatura para que se pueda formar la imagen de objetos situados a diferentes distancias en la retina (que está siempre a la misma distancia del cristalino).

III. El profesor debe de ayudar a los alumnos a relacionar esta actividad con las actividades precedentes. El profesor ha de explicarles las características especiales del cristalino, la lente que tiene nuestro ojo. Ha de contarles que el cristalino es una lente que se puede curvar, y por tanto puede actuar en ocasiones como una lente delgada y en otras como una lente más gruesa, dependiendo de la distancia a la que se encuentre el objeto.

A.11 Desde el punto de vista fisiológico el diafragma del iris se regula inconscientemente variando el diámetro de la pupila ¿Cómo afecta a la imagen que se forma en una pantalla un diafragma situado delante de la lente y que tape parte de ella? Prueba tus predicciones experimentalmente.

I. Viennot y Kaminski (1991) estudiaron la metodología y la forma de introducir los conceptos en la enseñanza, llegando a la conclusión de que el aprendizaje de los procedimientos algorítmicos no lleva a la comprensión de los conceptos. Creemos, al igual que dichos autores, que la enseñanza habitual, basada básicamente en la repetición de algoritmos geométricos para la construcción de imágenes, no ayuda a los alumnos a superar las dificultades en la comprensión de la formación de la imagen óptica. Con esta actividad queremos saber si los alumnos realmente han comprendido el concepto de haz de luz y, la idealización de un objeto como conjunto de fuentes puntuales. También

queremos saber si a partir de dichos conceptos, los alumnos son capaces de realizar el trazado de rayos para explicar la formación de la imagen de un objeto extenso en estos casos concretos.

II. Creemos que algunos alumnos que no hayan comprendido el concepto de haz de luz manifestarán que se verá la mitad de la imagen.

III. El profesor debe de explicar mediante los trazados gráficos adecuados, que se verá la imagen completa, pero con menor intensidad luminosa. El profesor ayudará a los alumnos a que realicen la experiencia.

Hemos estudiado cómo se forma la imagen que vemos en una pantalla utilizando una lente convergente, pero sabemos, que las lentes se pueden usar eliminando la pantalla, mirando a través de ellas en distintas situaciones.

En las actividades anteriores hemos explorado el comportamiento cualitativo de las lentes convergentes para comprender el modelo de ojo humano simulado. Pero para encontrar en este sistema la posición donde hay que situar la pantalla, es necesario una prueba experimental o bien un trazado gráfico a partir de la posición de los focos de cada lente. Sería conveniente, para simplificar esos procesos engorrosos, encontrar una expresión que relacione las distancias del objeto y de la pantalla a la lente y las características de cada lente.

A.12 A partir del trazado geométrico realizado en la A.8 deducid una relación entre las distancias del objeto y de la pantalla a la lente y su distancia focal.

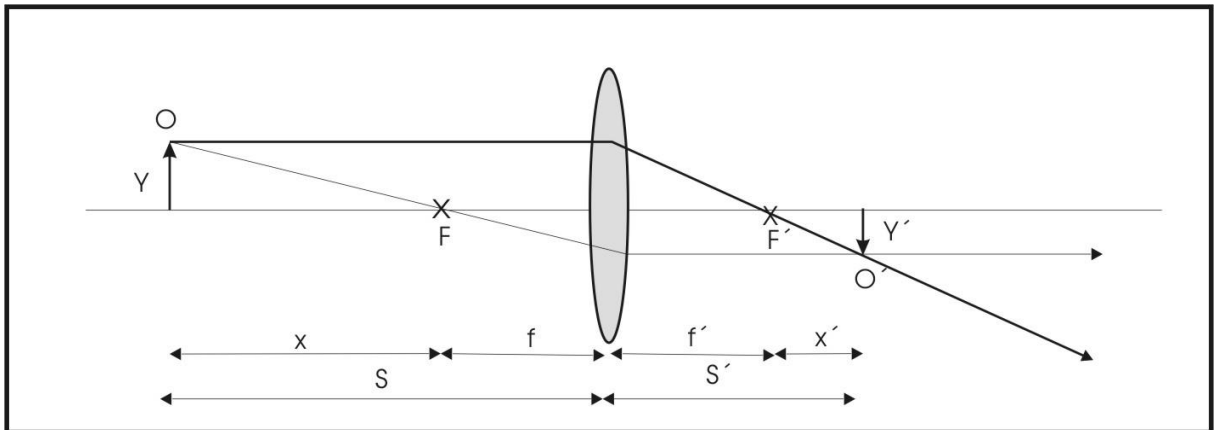


Imagen: Elaboración propia.

I. Queremos que los alumnos relacionen las s y s' , con las x y x' de la fórmula de Newton, ya que de ellas se deriva la ecuación de proporcionalidad más sencilla.

II. Esperamos que los alumnos comprendan por sí mismos las siguientes relaciones entre s , s' y p .

$$s' = f(s, p)$$

Si s es grande, entonces s' es pequeño. Existe dos casos límite, uno cuando s tiende a infinito para el que s' tiende a f' , y otro cuando s tiende a f que s' tiende a infinito.

Por otra parte, si la potencia de la lente es grande la distancia a la que se forma la imagen de un objeto dado será pequeña.

III. El profesor introducirá x y x' , definiendo $x' = f(x, p)$

Explicará a los alumnos que si x aumenta x' disminuye. Así mismo, si P aumenta x' aumenta.

Comentará a los alumnos que con x y x' encontramos una relación de proporcionalidad directa.

A partir del dibujo de la formación de la imagen de un objeto, mediante la utilización de la proporcionalidad entre triángulos semejantes, se pueden encontrar las siguientes relaciones de proporcionalidad.

$$x/f = y/y'$$

$$x'/f' = y'/y$$

Igualando encontramos:

$$x/f = f'/x'$$

De donde podemos agrupar:

$$x \cdot x' = f \cdot f'$$

$$x \cdot x' = \text{cte.}$$

Si se hace experimentalmente, y se representan gráficamente los datos obtenidos, se obtienen gráficas similares a las siguientes:

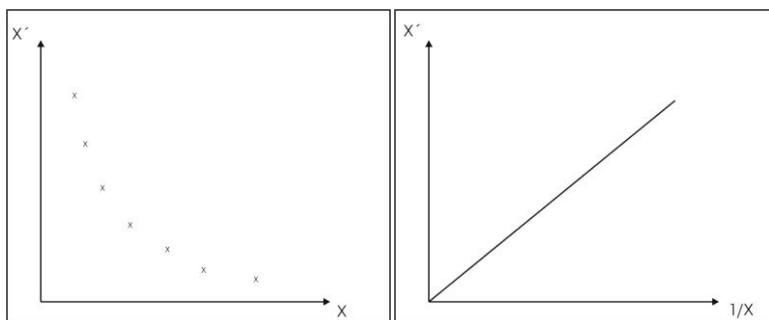


Imagen: Elaboración propia.

Se puede transformar la fórmula de Newton en la ecuación Gaussiana de las lentes utilizada habitualmente para resolver problemas analíticamente:

$$(s - f) \cdot (s' - f') = ff'$$

$$ss' - sf' - fs' + ff' = ff'$$

$$ss' / ss' - sf' / ss' - fs' / ss' = 0$$

$$1 = f'/s' + f/s$$

$$1/s + 1/s' = 1/f'$$

A.12.1 (Complementaria) Diseña y realiza una experiencia para contrastar la expresión encontrada en la actividad anterior.

III. El profesor ayudará a los alumnos con el montaje, en el que la bombilla y la primera lente funcionan como sistema de iluminación, para conseguir una iluminación intensa y uniforme del objeto.

Indicará a los alumnos que han de mover el objeto acercándolo y alejándolo de la lente y anotar la distancia a la que se forma la imagen en cada caso. Posteriormente han de realizar una tabla para recoger los datos (x y x'). Si se representa x frente a x' se obtiene una curva como la que hemos mostrado en la actividad anterior, mientras que si se representa x' frente a $1/x$, se obtiene una línea recta, como la mostrada en el dibujo de la actividad anterior.

Es decir, podremos probar experimentalmente que $x \cdot x' = \text{cte}$.

A.13 Para cada tipo de lente, la posición del objeto condiciona la posición de la pantalla dónde se ve la imagen y el tamaño con que se ve, deduce del siguiente trazado gráfico la relación entre el tamaño de la imagen y el tamaño del objeto (aumento lateral, β) en función de esas distancias.

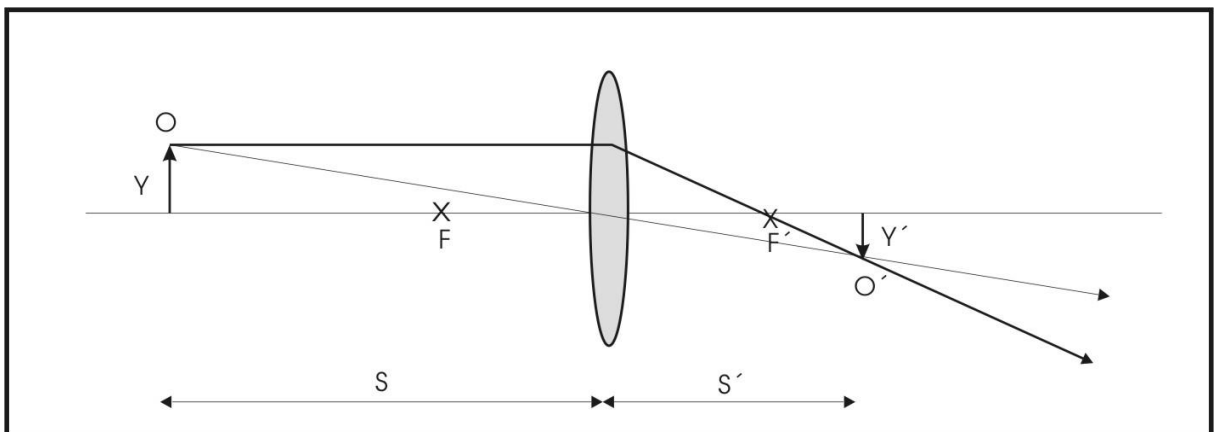


Imagen: Elaboración propia.

III. El profesor debe de recordar a los alumnos que cuanto mayor es “s”, la distancia a la que se situaba el objeto respecto de la lente, menor sería “s'” la distancia respecto de la lente a la que se formaría la imagen. Llega un momento en que por mucho que alejemos el objeto (hasta el infinito), la imagen no se forma más cerca de una determinada distancia (foco de la lente).

Por otra parte, cuánto más pequeña sea “s”, la distancia a la que situamos el objeto respecto de la lente, mayor será “s’”, la distancia a la que se forma su imagen. Existe un límite, es decir una distancia, (que será el foco objeto de la lente), de manera que, si situamos el objeto a dicha distancia, su imagen se formará en el infinito.

El profesor debe inducir a sus alumnos a llegar a la fórmula de Newton, es decir, si llamamos $x: s-f$, y $x': s'-f'$, llegamos a una ecuación muy sencilla, la ecuación de Newton: $xx': f^2$. El profesor también debe de ayudar a los alumnos a dar sentido a la relación f^2 : cte.

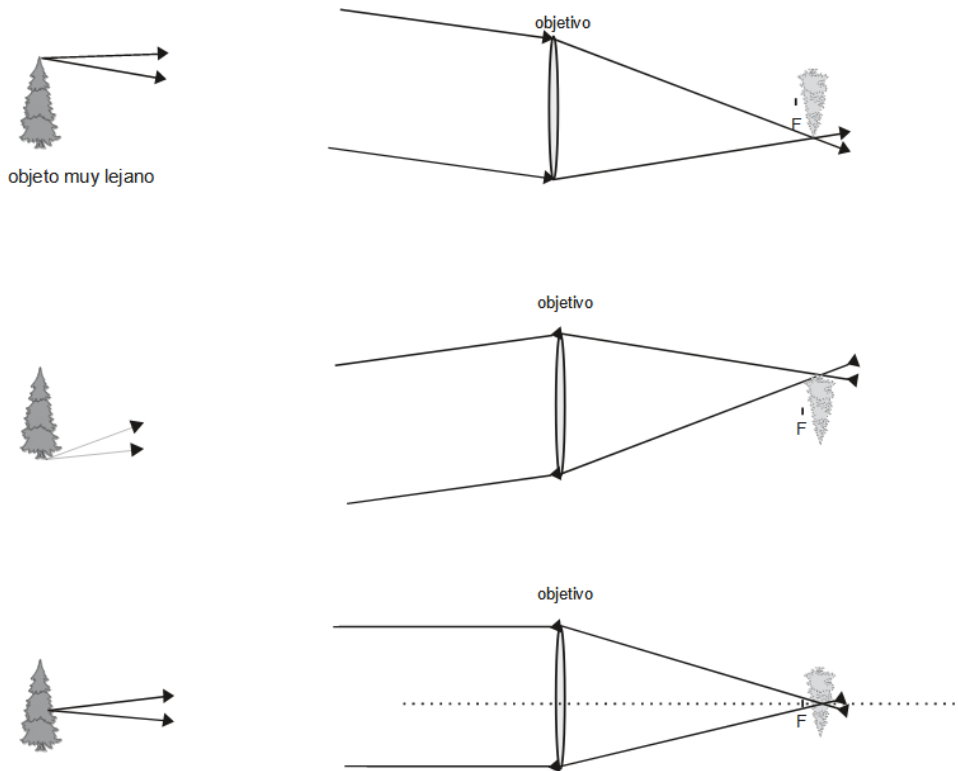
El profesor indicará a los alumnos que, mediante el trazado gráfico para encontrar la imagen de un objeto extenso se puede deducir la expresión que relaciona el aumento de la imagen con los diferentes tamaños de objeto e imagen, y con las distancias del objeto y de la imagen a la lente (Utilizar triángulos semejantes).

A partir del dibujo encontramos que $y'/y = s'/s$ en términos absolutos.

Pero para definir el aumento lateral tenemos que tener en cuenta que dado que la altura y' es hacia abajo, le asignamos un signo negativo, para representar que la imagen está invertida. Por tanto, la expresión del aumento lateral será:

$$y'/y = \beta = -s'/s$$

El profesor puede explicar a los alumnos la formación de la imagen de un objeto extenso utilizando trazados del tipo:



Fuente: Elaboración propia.

A.14 *Con frecuencia se caracteriza a las lentes por su poder de convergencia o potencia. Propón una relación entre la potencia de una lente y su distancia focal.*

A.14.1 *Suponiendo que el ojo humano es un sistema lente convergente pantalla separados 23mm. Calcula la potencia de este modelo de ojo.*

A.15 *Resuelve actividades de manejo numérico de estas ecuaciones válidas para las lentes delgadas y con la aproximación paraxial.*

I. Queremos que los alumnos se familiaricen con la resolución de actividades relacionadas con las lentes delgadas. Así mismo, también es nuestra intención que resuelvan ejercicios puramente numéricos análogos a los de las pruebas de acceso a la universidad.

III. El profesor ayudará a resolver los problemas propuestos y recordará a los alumnos en cada ejercicio la correspondencia entre el algoritmo utilizado para resolver un problema y la realidad física en que está basado y que ellos han probado en numerosas ocasiones en el laboratorio.

El profesor explicará a los alumnos la relación existente entre la distancia focal y las dioptrías de una lente. La potencia de una lente es igual a la inversa de la distancia focal: $P = 1/f$. Siempre que la distancia focal se exprese en metros, la potencia se medirá en dioptrías.

A.16 Realiza una recapitulación de lo tratado hasta aquí resaltando cuál era el problema que tratamos de resolver, las hipótesis implícitas en el modelo de visión y las pruebas realizadas para su contraste experimental. Describe con profundidad el modelo que explica cómo vemos los objetos. ¿Qué nuevos problemas podremos resolver a continuación?

1.3. Recapitulación de las ideas principales sobre cómo vemos.

- *Los objetos que vemos son fuentes secundarias de luz.*
- *Las fuentes luminosas extensas se pueden considerar como conjuntos de fuentes luminosas puntuales.*
- *Desde cada fuente puntual se emite un haz esférico de luz. Los rayos (líneas rectas para representar la luz) no son nada de la propia luz, sólo indican los límites del haz de luz que consideramos.*
- *La luz es una entidad física que se propaga en el espacio, independiente de las fuentes y del observador y, por tanto, puede ser objeto de estudio por parte de la Física.*
- *El ojo humano funciona como un sistema óptico formado por una lente convergente y una pantalla.*
- *Para ver bien, es necesario formar una imagen en la retina. Esta imagen se forma de la siguiente manera: cada haz divergente de luz emitido por cada punto del objeto, después de entrar en el ojo, converge hasta un punto de la retina. Como en cada punto de la imagen se concentra parte de la luz emitida por cada punto del objeto, la forma y tamaño de la imagen que percibimos es una réplica a escala del tamaño y forma del objeto que vemos.*

- Para ver bien los objetos cercanos, la lente del cristalino aumenta su curvatura (acomodación) con lo que los haces de luz convergen y forman la imagen en esa misma pantalla (la retina).

- La posición del objeto que vemos mediante una lente y la posición de su imagen están relacionados mediante la siguiente ecuación:

$$1/s + 1/s' = 1/f$$

- El aumento lateral de una lente $\beta = -s'/s$

El modelo de visión que hemos elaborado, de acuerdo al modelo de visión de Kepler, explica la visión directa de los objetos, pero no profundiza en cómo se elabora la sensación en el cerebro.

2. Puesta a prueba del modelo geométrico de visión en la visión indirecta.

El modelo de Kepler, que hemos construido para explicar la visión directa de los objetos considera el ojo como un sistema óptico formado por una lente convergente y una pantalla. En la retina, o "pantalla del ojo", se concentran los haces de luz procedentes de cada punto del objeto. La retina está conectada por el nervio óptico con el cerebro, que elabora una representación del objeto llamada imagen óptica, con la que se percibe la forma y el tamaño de los objetos que vemos.

Vamos a poner a prueba este modelo de visión para explicar cómo vemos los objetos en distintas situaciones: al mirarlos en un espejo, cuando están sumergidos en medios transparentes, al mirarlos a través de lentes, etc.

2.1. ¿Cómo vemos al mirar en el espejo? La reflexión de la luz.

A.17 A veces se piensa que la imagen de un objeto que vemos al mirar un espejo plano está pegada en él. ¿Qué observaciones crees que contradicen esta idea? ¿Qué características tiene la imagen que se ve?

I. Queremos que los alumnos se den cuenta de que la imagen se ve detrás del espejo. Es una imagen derecha y virtual, pues desde el lugar donde parece estar la imagen no puede

proceder la luz. Al realizar la experiencia, los alumnos deben comprender que, si la imagen estuviera pegada al espejo, se vería desde todas las posiciones, es decir un rango de 180° delante del espejo, y esto no sucede en la realidad. Queremos que se den cuenta de que, si bien la imagen no está pegada al espejo, si está siempre en la misma posición. Además, la imagen está detrás del objeto y justo a la misma distancia del espejo que el objeto.

II. La investigación bibliográfica nos indica que algunos estudiantes creen que las imágenes realmente existen en los espejos, donde pueden verse (Galili and Hazan 2000b). La inversión lateral de la imagen se explica mediante asunciones *ad hoc*. Los estudiantes la atribuyen a una propiedad del espejo. No obstante, esperamos que los alumnos, a partir de las observaciones necesarias, lleguen a comprender que la imagen que vemos es derecha, de igual tamaño y parece que está detrás del espejo, es decir es una imagen “virtual” (porque desde ese lugar no puede proceder la luz).

III. El profesor debe proponer la observación de objetos en el espejo y motivar a los alumnos para que definan las características de la imagen. El profesor debe de definir el concepto de imagen virtual: El punto O' , donde se localiza lo que se ve al mirar al espejo, se suele denominar *imagen virtual* del objeto puntual O , ya que de él parece proceder la luz que llega al ojo, pero O' no es una fuente luminosa.

A.18. De acuerdo con el modelo de visión que hemos elaborado, vemos un objeto cuando un haz divergente de luz procedente de cada punto del mismo entra en el ojo y éste forma una imagen en la retina. Formula una hipótesis, coherente con nuestro modelo, que explique cómo vemos un objeto puntual O al mirar a un espejo plano. Realiza un trazado gráfico.

I. Queremos que los alumnos comprendan esta nueva experiencia y la puedan relacionar con el modelo de visión que habíamos desarrollado hasta ahora

II. Creemos que inicialmente algunos alumnos pueden tener dificultades para realizar los trazados gráficos correctamente, imaginamos que algunos alumnos aún se sientan tentados a realizar trazados con un único rayo. Esperamos que algunos alumnos todavía dibujen un solo haz de luz.

III. El profesor debe de recordar que del objeto puntual sale un haz de luz, que dicho haz de luz se refleja en el espejo y vuelve a convergir en el lugar en que se forma la imagen de dicho punto. Debe de ayudar a los alumnos a realizar el trazado gráfico correcto. El profesor debe de insistir en que para cada uno de los rayos que marcan los límites del haz se cumple la ley de la reflexión, es decir, que el rayo reflejado subtienda el mismo ángulo con la normal que el ángulo incidente.

El profesor insistirá en el hecho de que la imagen solamente se puede formar a partir de un haz de luz que incide en el espejo. Tratará de explicar a los alumnos que a partir de un solo rayo no se puede definir dónde se encuentra la imagen.

A.19. En caso de que el objeto situado frente al espejo fuese extenso, realiza el trazado geométrico adecuado que explique la formación de la imagen en un espejo.

I. Queremos que los alumnos repitan el trazado de rayos de acuerdo a la ley de la reflexión de la luz, pero en este caso para un par de puntos extremos del objeto.

II. Esperamos que la mayoría de los alumnos sean capaces de hacerlo con ayuda del profesor.

III. El profesor ha de insistir en que se ha de considerar los objetos extensos que vemos como conjuntos de fuentes puntuales.

El profesor debe de insistir en que la imagen, al ser virtual, solamente tiene sentido por referencia al ojo del observador. El profesor recordará a los alumnos que es una imagen virtual pues la luz puede proceder de detrás del espejo. El profesor podría reflexionar con sus alumnos acerca de si seguiría existiendo esa imagen si cerramos los ojos.

El profesor explicará a los alumnos que la simetría especular consiste en que los puntos del objeto más cercanos al espejo darán lugar a la formación de una imagen más cercana al mismo, de acuerdo a las leyes de reflexión; y los puntos más alejados darán lugar a una imagen más alejada, no se producen en ningún caso una inversión de derecha/izquierda (Galili *et al.*, 1991). La reflexión en el espejo de cualquier objeto es una inversión de adelante a atrás del objeto, es decir, el espejo invierte el orden de las cosas en una dirección perpendicular a su superficie. El profesor realizará un trazado gráfico explicativo similar al siguiente: (Osuna, 2003-2008)

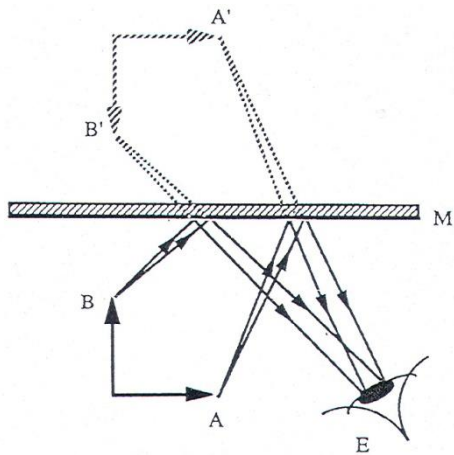


Imagen: (Osuna 2003-2008)

El profesor propondrá a los alumnos que una vez comprendido esto, se puede entender por qué el espejo aparentemente invierte la mano, pues es debido a la inversión de adelante atrás.

A.20. *En el esquema siguiente se representa un espejo plano, un objeto puntual (O) y un observador en varias posiciones. Dado que la posición de la imagen que se ve, no depende de la posición del observador, completa un diagrama de rayos para interpretar desde qué posiciones del observador se podrá ver la imagen al mirar al espejo (Osuna 2003-2008).*

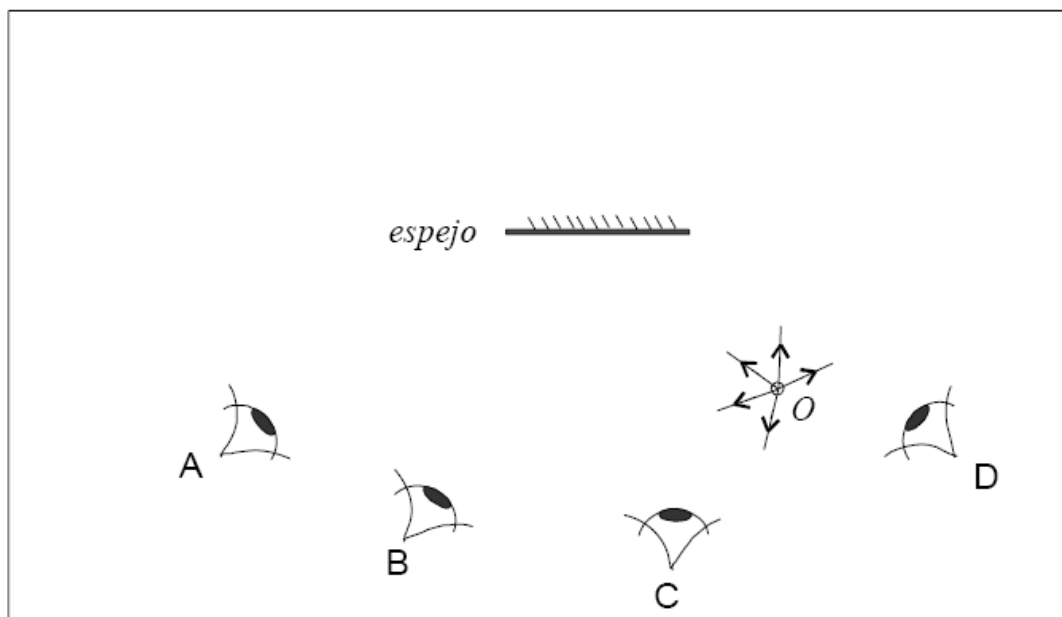


Imagen: (Osuna 2003-2008)

I. Queremos deducir, mediante el trazado gráfico realizado para localizar la imagen que vemos al mirar al espejo que la distancia de la imagen, O' , al espejo, es igual a la distancia del objeto, O , al espejo. Esta consecuencia del trazado gráfico, coincide con nuestras primeras observaciones experimentales. Por tanto, nuestra hipótesis de la reflexión de la luz que explica cómo vemos al mirar a un espejo, está de acuerdo con la experiencia.

II. Esperamos que los alumnos consigan mediante un trazado gráfico sencillo, la solución a la actividad, aprovechando que en una actividad anterior han encontrado que la posición de la imagen está a la misma distancia del espejo que el objeto.

Esperamos que los alumnos deduzcan que sólo a los ojos de los observadores A y B les llega parte del haz de luz divergente reflejado en el espejo y que son los únicos que verán la imagen.

III. El profesor destacará el hecho de que se obtenido el trazado gráfico a partir de la aplicación de la hipótesis de la reflexión de la luz, lo cual implica que la imagen sólo sea vista por algunos de los observadores. El profesor ha de insistir en que, si la imagen estuviese en la superficie del espejo, como algunos de los alumnos creen antes de la enseñanza, se debería de ver desde cualquier posición delante del espejo. El profesor propondrá a los alumnos el siguiente dibujo:

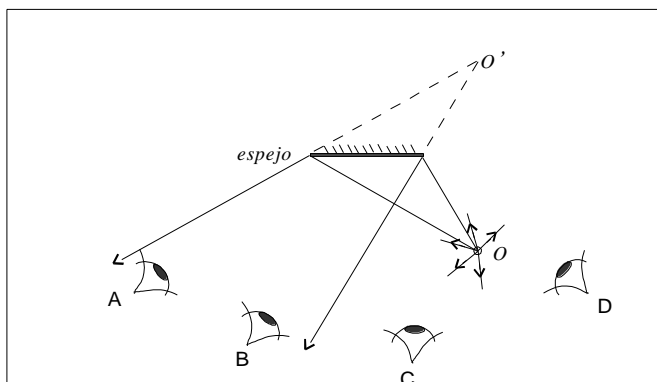


Imagen: (Osuna 2003-2008)

El profesor explicará a los alumnos que se puede obtener la respuesta a partir de un trazado gráfico sencillo, aprovechando que en la actividad anterior hemos obtenido que la posición de la imagen está a la misma distancia del espejo que el objeto. Es decir, se puede situar el punto imagen O' , y a partir de O' trazar el haz reflejado en el espejo. Las

líneas punteadas trazadas en el esquema indican que el haz de luz en esa zona no existe, aunque el observador pueda interpretar que proceda del punto O'. En ese trazado gráfico se deduce que sólo a los ojos de los observadores A y B les llega parte del haz de luz divergente reflejado en el espejo y por tanto solamente estos observadores verán la imagen. El profesor hará hincapié en que la respuesta se ha obtenido a partir de la aplicación estricta de la hipótesis de la reflexión de la luz, y que solamente los observadores A y B pueden ver la imagen; mientras que, si se localizara en la superficie del espejo se debería de ver desde cualquier posición delante del espejo.

Según la secuencia de enseñanza derivada de la estructura basada en la metodología de aprendizaje por resolución de problemas que inicialmente habíamos establecido para el tema de óptica, nuestra intención era comprender la visión indirecta, por lo que el estudio de la reflexión de la luz en los espejos planos se hace de forma subordinada al problema de la visión. No se introducen las leyes de la reflexión de la luz como hechos empíricos a partir de una concepción concreta sobre la naturaleza de la luz, sino como hipótesis lógicas que refuerzan el modelo de visión construido, confiriéndole consistencia y aplicabilidad.

En algunos instrumentos ópticos se usan espejos esféricos. Por ejemplo, Newton diseñó un telescopio con espejo esférico (o casi esférico) con el que se consiguen grandes aperturas (entra gran cantidad de luz) con mucho menos peso que si se hiciera con lentes. También conocemos los espejos que se usan para maquillaje en los que podemos ver cierta curvatura cuando los miramos de perfil. Antes de explicar la visión al mirar a estos espejos debemos explorar y conocer con detalle su comportamiento.

En los espejos esféricos, si la cara espejada es la interna (como los espejos de maquillaje) se denominan espejos cóncavos y si la cara espejada es la externa espejos convexos. Estos últimos se utilizan en las esquinas de algunas calles para ayudar a los conductores a mejorar la visibilidad de los alrededores.

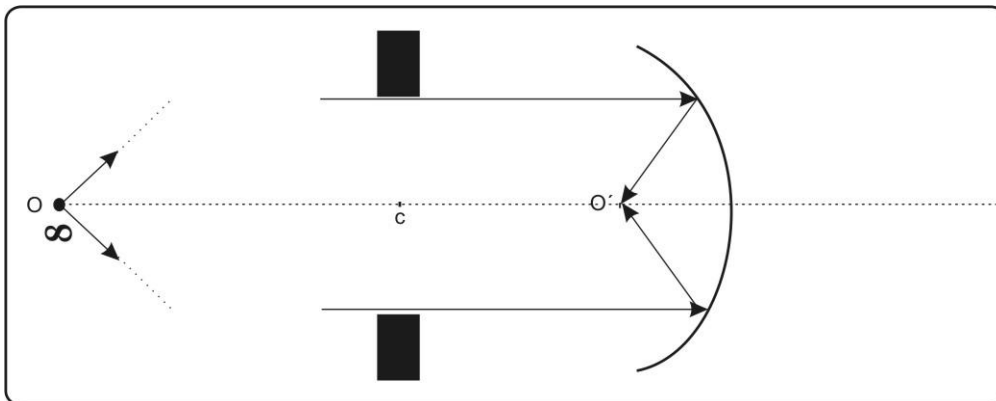
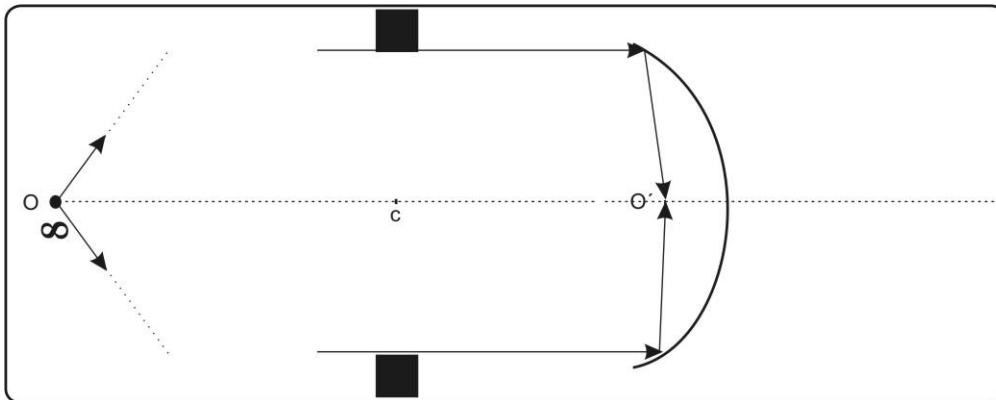
A.21 Explora cómo se ven los objetos al mirar a un espejo esférico cóncavo (puede usarse uno de maquillaje). En concreto realiza las siguientes observaciones:

a) Mira la imagen de un objeto próximo al espejo y observa los cambios que se ven al alejarlo del espejo.

b) Busca dónde se concentra la luz de una fuente puntual muy alejada del espejo.

I. Queremos que los alumnos se familiaricen con las peculiaridades de los espejos cóncavos, y que instintivamente lleguen al concepto de foco en los espejos cóncavos.

III. El profesor debe ayudar a los alumnos con las experiencias remarcando las características especiales de la imagen que se forma. El profesor debe de explicar a los alumnos que si se aplican las leyes de la reflexión a haces de luz incidentes de distinta anchura (ver dibujos), se obtiene que los haces de luz no convergen en el mismo punto.



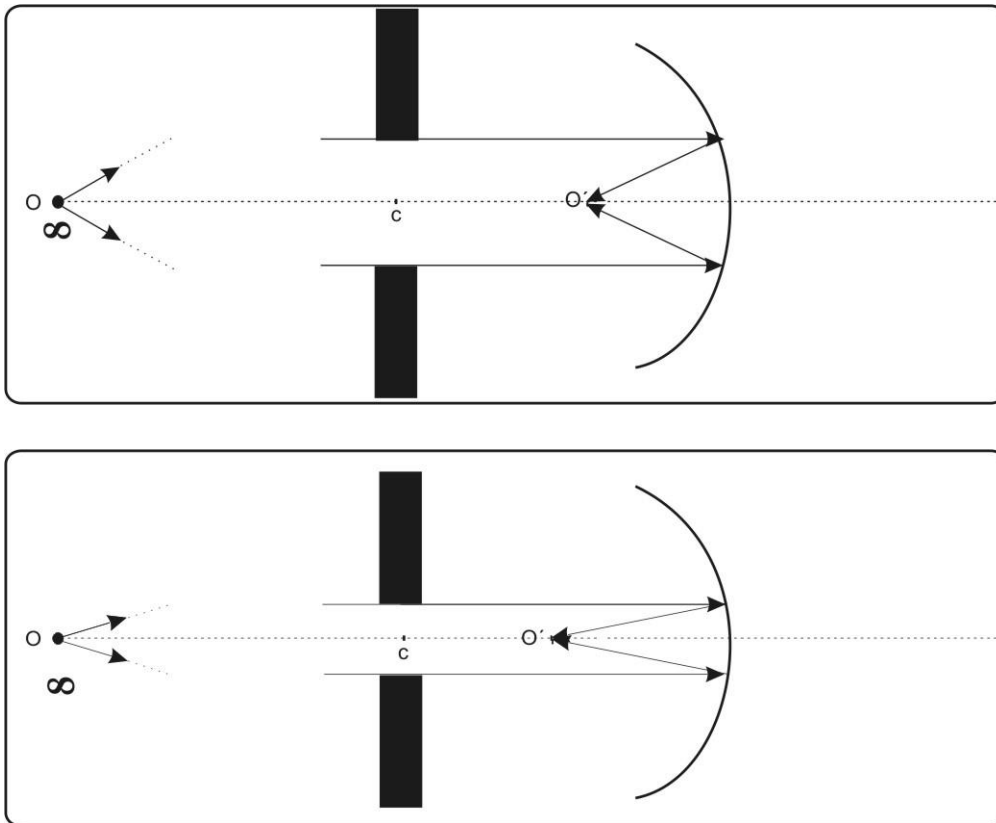


Imagen: Elaboración propia.

De acuerdo al concepto de imagen que hemos desarrollado, es decir, un punto es la imagen de otro cuando toda la luz que sale del punto objeto converge en el punto imagen, el espejo cóncavo no es un sistema capaz de formar imágenes. En óptica se dice que no es un sistema estigmático, ya que no es capaz de formar una imagen nítida en un punto y según el haz que se escoja, éste converge en un punto distinto.

Sin embargo, si tenemos en cuenta que el poder de resolución del ojo es limitado, y se seleccionan haces de luz estrechos que incidan en una pequeña parte central del espejo (donde los ángulos de incidencia son pequeños para objetos muy alejados) se puede ver una imagen real. Es decir, el espejo esférico puede, dentro de la “aproximación paraxial”, dar lugar a la formación de imágenes reales.

Mediante razonamientos similares a los utilizados en el caso de la lente convergente, cuando el espejo esférico cóncavo se utiliza en la aproximación paraxial, se puede definir un punto especial, el “foco objeto”. Vemos en el dibujo que cuando el objeto luminoso se sitúa en el infinito, la imagen se forma en un punto que llamamos “foco objeto”.

Si el objeto luminoso lo situamos en dicho punto, su imagen se formará en el infinito. Por tanto, el “foco objeto” y el “foco imagen” son el mismo punto, al que llamaremos “foco”.

Asimismo, diremos que el eje óptico es la línea que une el punto focal y el centro de curvatura. Un rayo trazado según esta línea después de la reflexión en el espejo, se trazaría por la misma línea. Esta línea y el espejo definen el vértice del espejo (V).

A.22 Demuestra que, considerando la aproximación paraxial para los espejos esféricos cóncavos, la distancia focal $f = R/2$. Para ello podemos realizar el trazado de un único rayo del haz procedente de un punto situado en el infinito sabiendo, además, que para ángulos muy pequeños tanto el seno como la tangente del ángulo son aproximadamente igual al propio ángulo expresado en radianes.

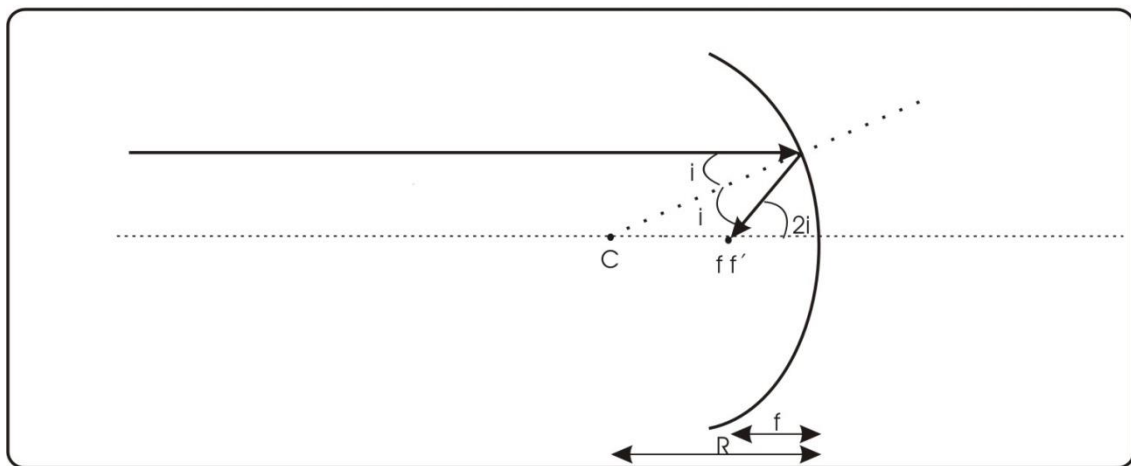


Imagen: Elaboración propia.

I. Queremos probar que $R = 2f$

III. El profesor ayudará a los alumnos con la demostración. Para ello utilizará la aproximación paraxial en la que la tangente de un ángulo es igual al ángulo expresado en radianes cuando el ángulo es pequeño. El profesor debe insistir en que este rayo que hemos dibujado es solamente parte del haz que llega al espejo. Puede dibujar el haz completo inicialmente para proseguir posteriormente con la demostración utilizando solamente un rayo de dicho haz.

$$\operatorname{tg} \hat{i} = Y/R \qquad \hat{i} = Y/R \qquad Y = i \cdot R$$

$$\tan \theta_i = Y/f \quad \theta_i = Y/f \quad Y = 2 \cdot i \cdot f$$

$$i \cdot R = 2 \cdot i \cdot f$$

Por tanto $1/2 = f/R$

Es decir, $R = 2f$

A.23 Conociendo los elementos ópticos del espejo esférico cóncavo en la aproximación paraxial (F , R , C , eje óptico) y sabiendo que la imagen es real para objetos alejados, realiza un trazado gráfico para localizar la posición donde deberíamos situar la pantalla para ver la imagen del objeto puntual O .

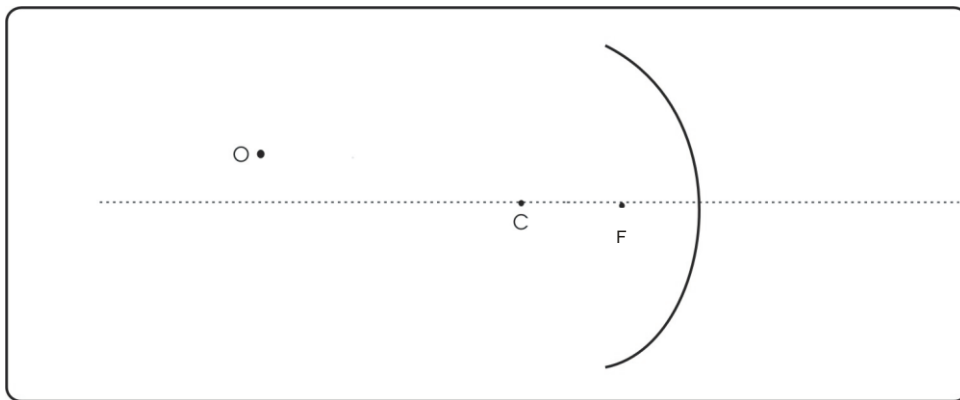


Imagen: Elaboración propia.

I. Esperamos que los alumnos realicen el trazado gráfico correctamente y que una vez dibujada la pantalla en el lugar donde converge el haz de luz, y se forma la imagen, dibujen el haz de luz que sale de ella y llega al ojo del observador.

III. El profesor insistirá en la idea de que para que el ojo pueda ver tiene que llegarle un haz divergente. Insistirá en que se dibuje la pantalla y el haz de luz que sale de ella hacia el ojo. Comentará que, si no hubiese pantalla, un observador correctamente situado también podría ver la imagen, puesto que se trata de una imagen real. Hará el trazado gráfico explicativo necesario. El profesor insistirá en que se puede localizar la imagen utilizando el trazado de diferentes rayos, dibujándolos. El profesor explicará a los alumnos que si el haz reflejado que converge en O' , se representa simétricamente al otro lado del espejo se obtiene un trazado similar al que obtendríamos al utilizar una lente convergente.

A.24 Conociendo los elementos ópticos del espejo esférico cóncavo en la aproximación paraxial (F , R , C , eje óptico) y sabiendo que la imagen es real para objetos alejados:

a) Realiza un trazado gráfico para localizar la posición donde deberíamos situar la pantalla para ver la imagen del objeto AB .

b) Deduce de la geometría de este trazado una relación entre s , s' y f' , que nos permita conocer donde vemos la imagen real formada por un espejo esférico cóncavo. (Se recomienda que se compare este trazado con el realizado en la lente convergente)

c) Deduce, igualmente, la relación entre el aumento lateral (β) y las distancias s y s' .

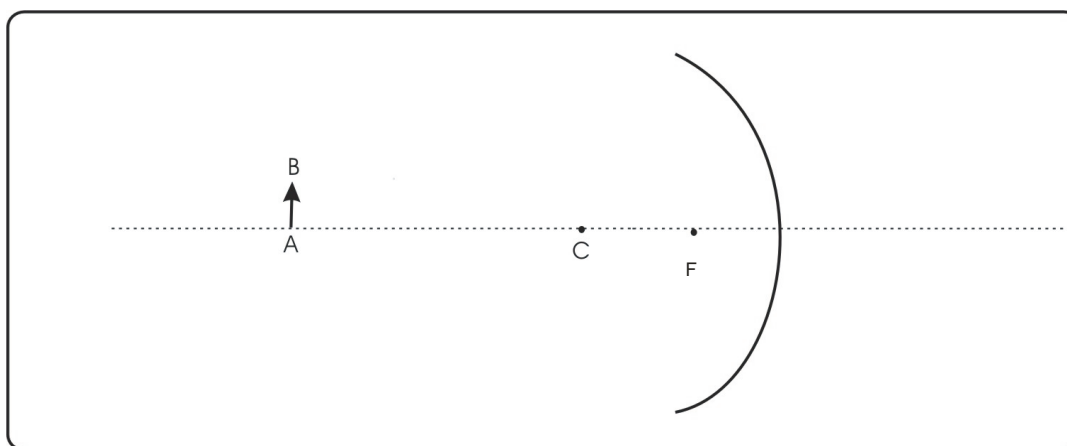


Imagen: Elaboración propia.

I. Queremos que los alumnos consigan dibujar el trazado de rayos necesario para deducir la posición en la que se forma la imagen de objetos extensos, a partir de lo estudiado anteriormente para lentes y de lo que hemos aprendido para espejos. Queremos que los alumnos recuerden la expresión encontrada para la localización de imágenes mediante una lente convergente. Queremos que relacionen ambos trazados.

III. El profesor debe de insistir en las similitudes de los trazados gráficos, siendo el del espejo cóncavo simétrico del trazado del de las lentes convergentes, utilizando en ambos casos hace delimitados por un rayo que viene del infinito y pasa por el foco, rayo I, y por el otro rayo que pasando por el foco van hacia el infinito, rayo III. EL profesor ha de insistir en que, dada la simetría del trazado, se puede utilizar la misma expresión que se

había utilizado para las lentes, y recordará a los alumnos la expresión de las lentes convergentes.

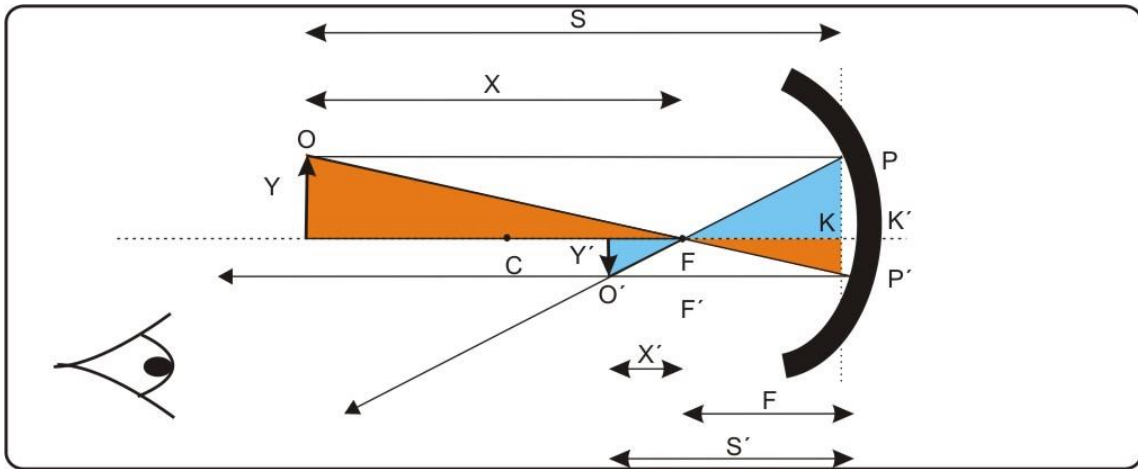


Imagen: Elaboración propia.

El profesor también explicará que la demostración de la fórmula basada en triángulos semejantes. Así mismo explicará que debido a que como hemos visto anteriormente, solamente el espejo cóncavo forma imagen para haces de luz que inciden muy cerca de su centro, lo que hemos estado denominando aproximación paraxial, la distancia kk' tiende a cero.

Por tanto, podemos deducir, a partir de la utilización de triángulos semejantes que:

$$Y/Y' = X/F;$$

$$Y/Y' = F/X'$$

De dichas expresiones podemos deducir que:

$$X/F' = F/X'$$

Y, por tanto:

$X \cdot X' = F \cdot F'$ Que es la ecuación de Newton que hemos utilizado previamente para las lentes.

Como hemos deducido en el caso de las lentes, a partir de esta expresión se puede deducir fácilmente que:

$$1/s + 1/s' = 1/f$$

Que es la ecuación más utilizada para encontrar analíticamente la posición de la imagen de un objeto situado a una distancia s del espejo, cuya focal es f .

A.25 Cuando el espejo esférico cóncavo (caso de espejo de maquillaje) se utiliza para ver objetos cercanos, entre el foco y el espejo, ¿Cómo es la imagen que vemos? Realiza un trazado gráfico explicativo.

De la geometría del trazado, podemos deducir como en casos anteriores, la expresión: $1/s + 1/s' = 1/f$

Dado que en este caso la imagen es virtual, a la distancia s' se le asignará un signo menos.

III. El profesor realizará el siguiente dibujo explicativo:

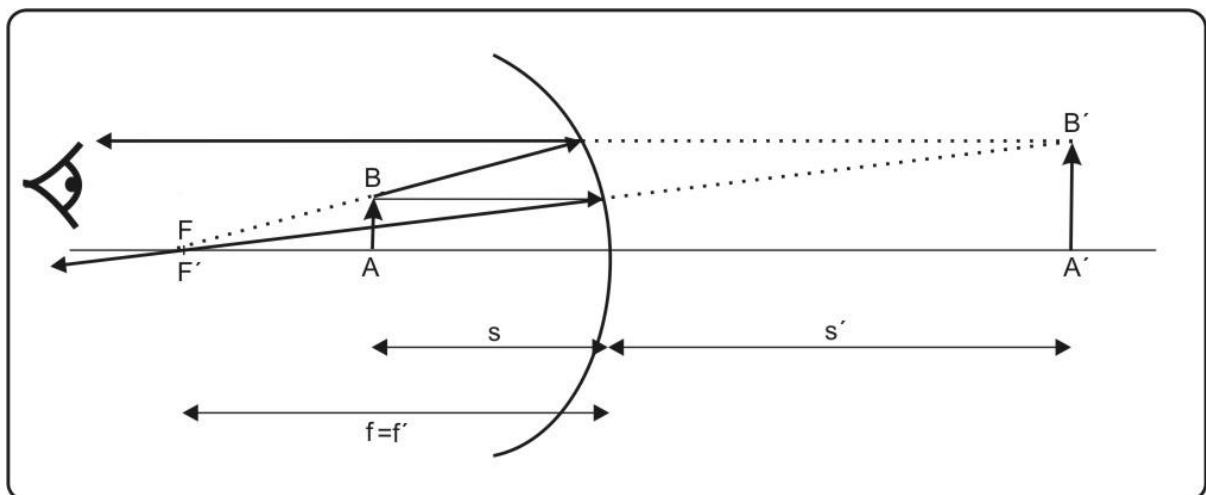


Imagen: Elaboración propia.

Además, en distintas aplicaciones, como en cruces de calles de escasa visibilidad, se usan espejos esféricos convexos. Para comprender cómo vemos al mirar a estos espejos debemos realizar razonamientos similares a los anteriores. Consideraremos, de igual modo, la aproximación paraxial al estudiar la formación de imágenes que vemos.

A.26. ¿Cómo vemos al mirar hacia un espejo convexo? Explora su comportamiento (como aproximación a este dispositivo puede usarse una cuchara metálica bien pulida).

A.27. Suponiendo la aproximación paraxial, dibuja un espejo esférico convexo y realiza trazados gráficos que expliquen la posición de los focos.

III. El profesor debe de definir el foco imagen como un punto virtual, ya que de él no puede salir luz. Debe ser por tanto una cantidad negativa (recordamos que el signo negativo simboliza que no es real). Por tanto, $f = -R/2$

Una vez que se ha comprendido el foco imagen, el profesor debe de introducir el foco objeto a partir del trazado anterior (al que deberían de haber llegado los alumnos, y que sería posteriormente validado por el profesor)

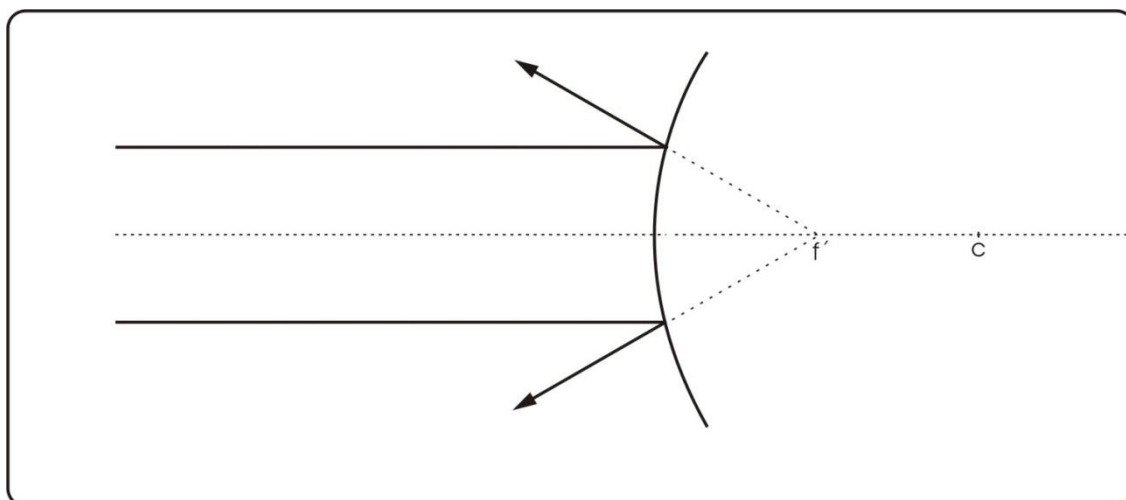


Imagen: Elaboración propia.

A partir de dicho trazado y teniendo en cuenta que la ley de la reflexión se cumple tanto en un sentido de incidencia de la luz en el espejo, como en el otro, por simetría se puede dibujar el rayo de luz que procedente del objeto “pasa” por el foco y se refleja en una dirección paralela al eje óptico.

El profesor introduciría el siguiente dibujo. Así mismo recordaría que el foco objeto también es virtual e igual al foco imagen. Es importante que el profesor recuerde a los alumnos que el foco es virtual porque de él no puede proceder la luz. Por tanto, $f = f' = -R/2$. El trazado en este caso se puede explicar por la propiedad de inversión en el sentido en que se ha movido la luz. Si el trazado anterior es válido, este ha de serlo pues es igual que el anterior, pero con la luz moviéndose en sentido contrario.

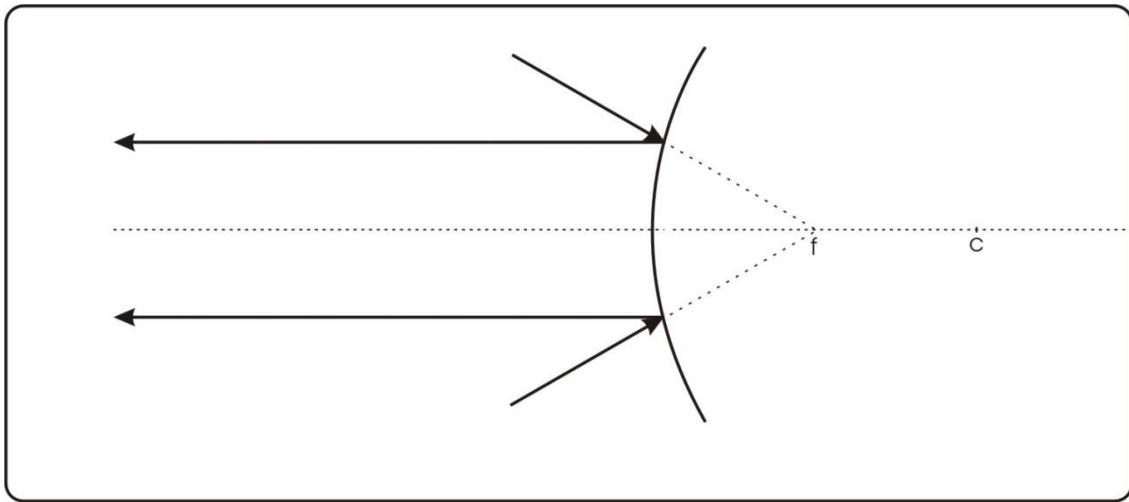


Imagen: Elaboración propia.

El profesor debe de preguntar a los alumnos acerca de si el radio es real o no. Y posteriormente explicar que sí que es real, es una característica física del objeto.

El profesor debe justificar que, a partir de la geometría del trazado, se puede deducir como en casos anteriores, la expresión: $1/s + 1/s' = 1/f$

Dado que en este caso la imagen es virtual, a la distancia s' se le asignará un signo menos, así mismo, dado que el foco también es virtual, también se le asignará un signo menos.

A.28. Realiza un trazado gráfico de manera que explique que la imagen de un objeto extenso que se ve en un espejo convexo es siempre virtual, derecha y de menor tamaño. Confirma tu predicción usando un espejo esférico convexo.

I. Queremos que los alumnos comprendan que la imagen que se forma no es real, ya que la luz no puede provenir de detrás del espejo. Queremos que los alumnos comprendan que si la imagen es virtual solamente tiene sentido dibujarla si dibujamos también un observador.

II. Esperamos que los alumnos realicen los trazados gráficos en los que se utilizan las propiedades de los focos que hemos estudiado y también la ley de la reflexión. Los alumnos podrían dibujar cualquiera de los siguientes haces de luz caracterizado por los rayos que hemos estudiado en relación a los focos.

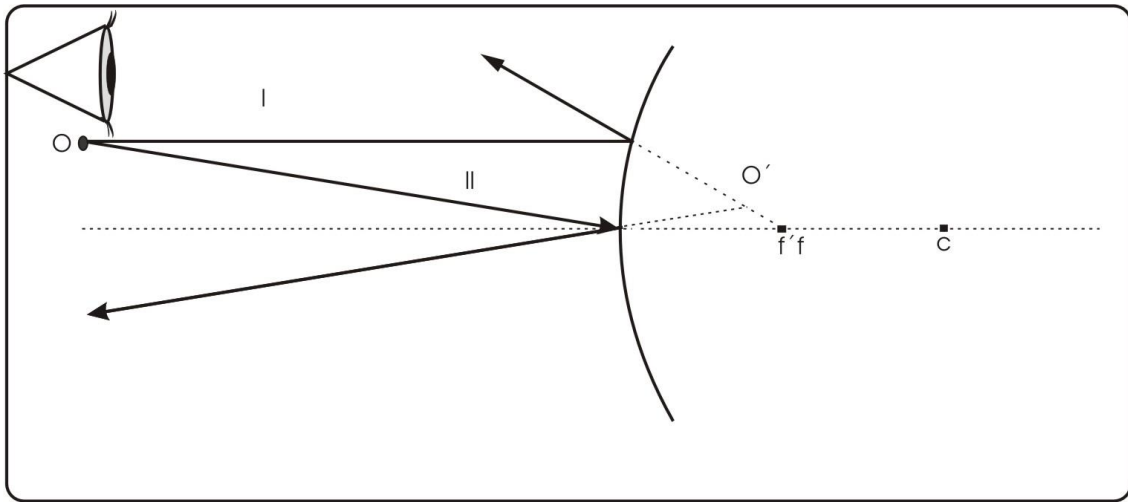


Imagen: Elaboración propia.

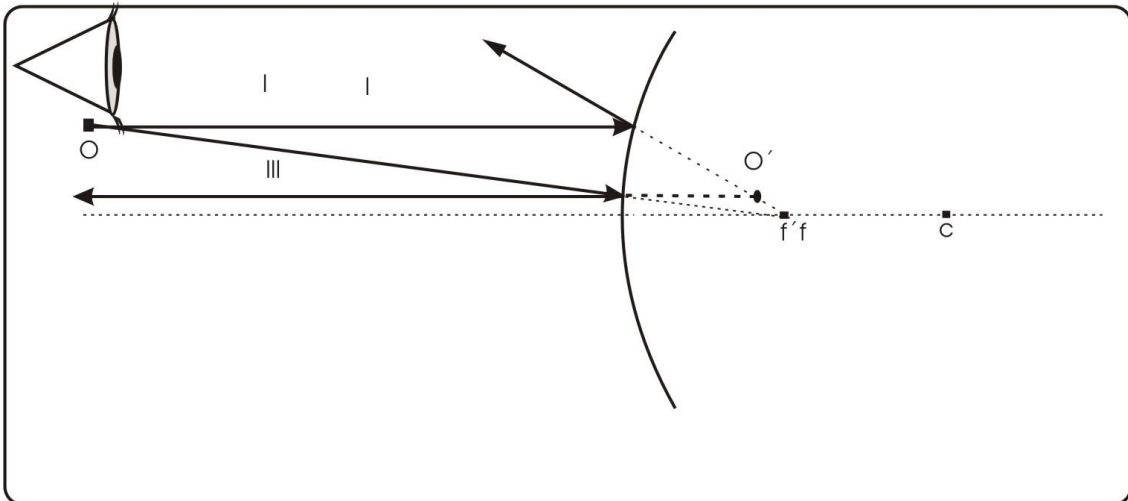


Imagen: Elaboración propia.

A.29. *A partir del trazado gráfico anterior, encuentra una relación entre s , s' y la característica principal del espejo (f'). Encuentra también una expresión para el aumento lateral.*

II. El profesor explicará el siguiente trazado gráfico:

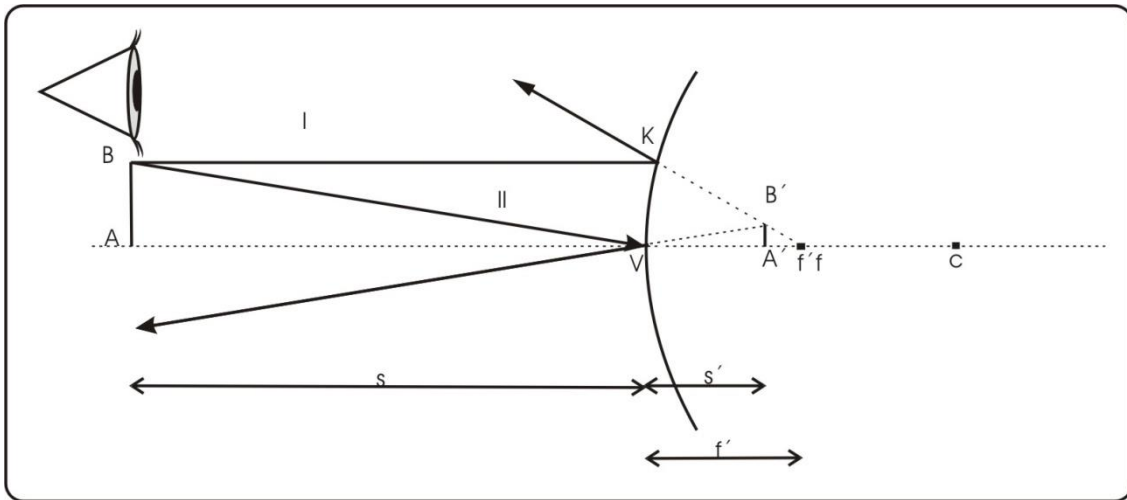


Imagen: Elaboración propia.

El profesor debe de llamar la atención de que si dibujamos O' , obligatoriamente tenemos que dibujar el ojo ya que O' no es una imagen real, es decir, en ese punto no hay concentración de luz. Solamente tiene sentido dibujar una imagen virtual si hay un observador. Las líneas puntuadas, que simbolizan lugares por donde la luz no pasa, solo tienen sentido en referencia al ojo del observador. El profesor debe de insistir en que la imagen formada por un espejo convexo es siempre virtual.

Debe de remarcar el carácter virtual de la imagen que se ha formado, y que por tanto s' como tendrán un signo negativo al aplicar la expresión: $1/s + 1/s' = 1/f$, puesto que de esos lugares no puede proceder la luz.

III. El profesor debe de ayudar a los alumnos a encontrar los siguientes triángulos semejantes en el trazado gráfico. A partir de ello aplicar el teorema de triángulos semejantes intentando que aparezcan las magnitudes que buscamos relacionar.

$$f \triangle VK = f' \triangle A'B' \quad Y / Y' = - (f') / - (f' - s') \quad (1)$$

$$ABV = A'B'V \quad Y / Y' = S / - S' \quad (2)$$

A partir de las expresiones (1) y (2) llegamos a la expresión conocida:

$$1/S + 1/S' = 1/f'$$

Para ello hemos tenido en cuenta que tanto S' como f' deben de tener signo negativo, pues como hemos explicado anteriormente son virtuales.

También a partir de las expresiones (1) y (2) podemos llegar a una expresión para el aumento lateral

$$B = -S/S'$$

El profesor debe insistir en que este aumento no se puede medir realmente puesto que la imagen es virtual.

El aumento visual, que es real, depende de la posición del observador.

A.30. Ejercicios de manejo relacionados con espejos esféricos cóncavos aparecidos en exámenes de EBAU.

2.2 ¿Cómo vemos al mirar a través de medios transparentes? La refracción de la luz.

Otra forma de visión indirecta que debemos explicar a partir del modelo de visión de Kepler es la visión a través de medios transparentes, por ejemplo, cuando miramos un objeto sumergido en agua, cuando miramos a través de lentes, etc.

Hemos estudiado el comportamiento de las lentes delgadas para comprender el funcionamiento del ojo humano, y sabemos que se puede utilizar para mejorar la visión o ampliarla. Si queremos comprender cómo vemos cuando miramos a través de medios transparentes, hemos de formular hipótesis sobre el comportamiento de la luz cuando pasa de un medio transparente a otro. Comenzaremos estudiando cómo se ve al mirar objetos sumergidos en agua, pues los trazados son geoméricamente más sencillos, posteriormente con lo ya aprendido investigaremos qué sucede cuando la luz atraviesa superficies esféricas como es el caso de las lentes. De este modo, se podrá valorar si el modelo que utilizamos es coherente con las expresiones que relacionan las posiciones del objeto, de la imagen y las características de las lentes delgadas.

2.2.1. ¿Cómo vemos al mirar los objetos sumergidos?

A.31. Al mirar a un pequeño objeto sumergido en un recipiente con agua nos parece verlo en otra posición. Realiza las observaciones que se representan en los esquemas y señala las características de la imagen que vemos (Osuna 2003-2008).

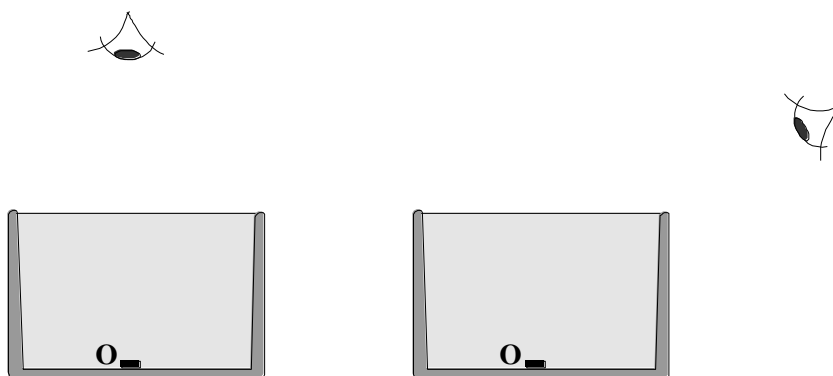


Imagen: (Osuna 2003-2008)

I. Queremos que los alumnos observen que la posición en la que se ve el objeto varía en función de la posición en la que se coloque el observador.

II. Creemos que los alumnos tendrán dificultades al principio para realizar el trazado gráfico adecuado. Esperamos que con la ayuda del profesor los alumnos comprendan lo que le ocurre a la luz cuando cambia de un medio a otro.

III. El profesor comentará a los alumnos que consideren que el objeto sumergido es puntual, y desde dicho objeto sale luz en todas las direcciones. Explicará a los alumnos que de toda la luz que sale del objeto dibujen un único haz de luz, que incide en la superficie de separación de los dos medios. Intentará que los alumnos propongan hipótesis sobre qué le sucederá a ese haz de luz para que al observador le parezca verlo más cerca. El profesor ayudará a los alumnos a realizar el trazado gráfico y a comprender las implicaciones de dicho trazado.

El profesor recordará con los alumnos que la imagen cambia de posición en función de dónde se sitúe el observador, y los animará a experimentarlo en el laboratorio. Les dirá que se trata por tanto de un sistema no estigmático.

El profesor explicará a los alumnos que solamente en el caso de que el observador se situase en la vertical del objeto, se podría considerar el sistema estigmático, ya que en este caso la imagen se formaría en un único punto.

El profesor propondrá a los alumnos los siguientes trazados para explicar la visión:

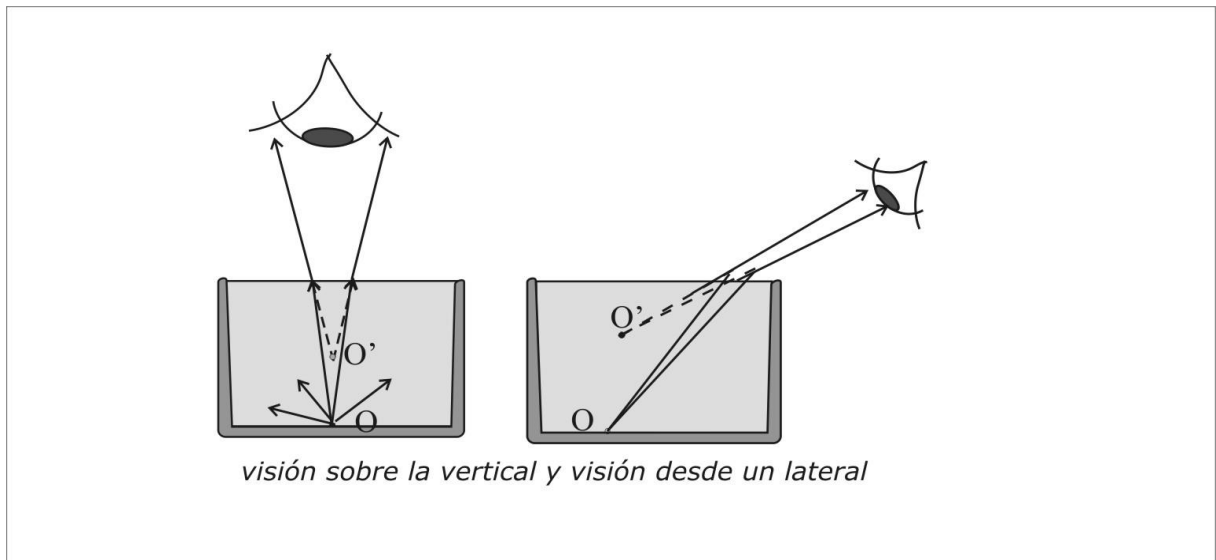


Imagen: (Osuna 2003-2008).

A.32. De acuerdo con el modelo de visión de Kepler, para ver un objeto debe entrar en el ojo un haz de luz divergente procedente de cada uno de sus puntos. Formula una hipótesis sobre el comportamiento de la luz que explique que cuando miramos hacia un objeto sumergido en agua nos parezca que se encuentra a menor profundidad.

I. Esperamos que los alumnos lleguen a realizar el siguiente trazado gráfico:

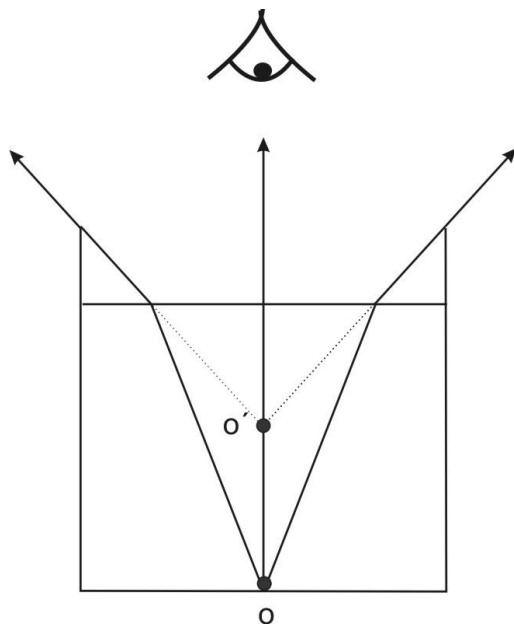


Imagen: Elaboración propia.

II. Esperamos que los alumnos se den cuenta de que la luz ha de cambiar de dirección al pasar del agua al aire, y que puedan refutar posibles ideas alternativas que tuviesen, mediante la observación de un objeto sumergido en el laboratorio.

III. Al realizar los trazados gráficos el profesor debe señalar que la imagen es virtual, que si el haz de luz es perpendicular a la superficie de separación del medio no se desvía y que los haces de luz que inciden sobre la superficie de separación con otra inclinación si se desvían. El profesor comentará que es debido a la refracción de la luz, es decir al cambio en la dirección de propagación que sufre la luz al pasar de un medio a otro de diferente densidad.

El profesor ha de insistir en que cuando se mira un pequeño objeto sumergido parece que se ve a menor profundidad. El profesor realizará la siguiente experiencia sencilla con los alumnos: en un folio se dibuja con lápiz una pequeña mancha circular, y sobre dicha mancha se sitúa un vaso de fondo plano. Para apreciar más claramente el efecto buscado, los alumnos han de mirar el círculo dibujado en el papel de forma directa y de forma indirecta a través del vaso con agua, alternativamente.

Comentará otra vez a sus alumnos que las observaciones de objetos sumergidos en líquidos transparentes nos llevan a considerar que los objetos parecen encontrarse a menor profundidad, y que pueden ser vistos desde posiciones laterales en las que es imposible que llegue la luz directa del objeto.

El profesor explicará a los alumnos que se denomina refracción de la luz al cambio de dirección de cada rayo de luz al pasar de un medio transparente a otro. En el caso de que la luz pase del agua al aire, el ángulo, ϵ , que forma un rayo de luz con la normal (N), es menor que el ángulo de refracción, ϵ' , por lo que la luz se desvía alejándose de la normal. De esta forma, el haz de luz que entra en el ojo del observador parece proceder de O', por eso se suele denominar a este punto *imagen virtual* del punto O. En ese punto parece estar situada la imagen que vemos, pero ese punto no es, en realidad, una fuente luminosa.

A.33. Formula hipótesis acerca de los factores que influyen en el ángulo de refracción de la luz al pasar de un medio a otro.

I. Queremos que los alumnos comprendan que el ángulo de refracción será función del medio transparente y del ángulo de incidencia.

III. El profesor explicará a los alumnos que cuanto mayor sea el ángulo de incidencia mayor será el ángulo de refracción. Les comentará a los alumnos que el ángulo de refracción cuando la luz pasa del agua al aire ha de contener el ángulo de incidencia, al que se le suma un ángulo de desviación (lo que Kepler denominaba refracción). El profesor realizará el siguiente dibujo explicativo:

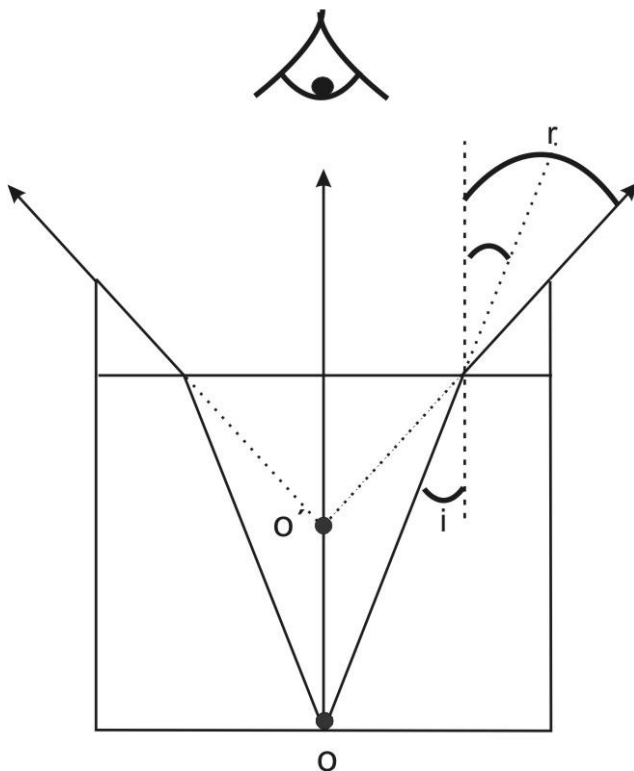


Imagen: Elaboración propia.

El profesor explicará que, si el objeto está sumergido, entonces de acuerdo con la experiencia, se ven los objetos más arriba que lo que en realidad están. Ha de hacer hincapié que para que esto suceda el ángulo de refracción tiene que ser mayor que el ángulo de incidencia. Por tanto, cuanto mayor es el ángulo de incidencia, mayor será el ángulo de refracción. Esta relación tiene un límite, pues el ángulo de refracción no puede ser mayor que 90° . Otro límite de esta relación se establece cuando los ángulos de incidencia son muy pequeños, en este caso el ángulo de refracción también será muy pequeño. En el límite, cuando el ángulo de incidencia es de 0° , entonces el ángulo de refracción también será de 0° . Es decir, cuando la luz incide perpendicular a la superficie de separación entre los medios, no se desvía.

El profesor comentará a los alumnos que se verían diversos ángulos de refracción para el mismo ángulo de incidencia según la luz atravesase diferentes materiales. Puede llevar a cabo en el laboratorio con los alumnos la siguiente experiencia: se llena un vaso de precipitados con glicerina, y en ella se introduce poco a poco una barrita de metacrilato. Se observa que según se va introduciendo parece que va desapareciendo. El profesor explicará que ello es debido a que ambas sustancias tienen el mismo poder de desviación de los rayos de luz, es decir el mismo índice de refracción.

El profesor explicará que, debido a que podemos considerar reversible el movimiento de la luz, podríamos suponer que la luz viajará del aire al agua. Sería el mismo dibujo con la luz viajando en sentido contrario. Al penetrar en el agua, la dirección de propagación de la luz se acerca a la normal. En este caso el ángulo de refracción sería mayor que el de incidencia.

A.34. Diseña una experiencia para encontrar una relación entre el ángulo de incidencia y el ángulo de refracción. Llévala a la práctica y, a partir de los datos, encuentra una relación entre $\sin i$ y $\sin r$.

III. El profesor sugerirá la siguiente experiencia:

Se necesita una lente de agua con forma semicircular. Se sitúa un alfiler en un punto y mirando a través del agua se coloca otro alfiler (puede ser sobre un corcho o cartón) donde se vea en línea con la primera. Se repite la experiencia varias veces. Una vez recogidos los datos se realiza una tabla con los ángulos de incidencia y sus correspondientes ángulos de refracción.

Después se elabora una gráfica, en la que se ha de incluir el punto (0, 0). Kepler descubrió que para ángulos de incidencia menores de 20° , la relación entre el ángulo de incidencia y del de refracción era lineal. Sin embargo, para ángulos mayores la relación ya no era de linealidad. La relación entre el ángulo de incidencia y el ángulo de refracción es más compleja. Descartes trató de explicar esta relación con su teoría de los “torbellinos”, y propuso la relación entre los senos de los ángulos.

Si se realiza una tabla con los senos de los ángulos de incidencia y los de refracción, y posteriormente se realiza la representación gráfica, se obtiene una relación lineal:

$$\text{sen } i = K \text{ sen } r$$

Se llamará a la constante de proporcionalidad k índice de refracción del agua respecto del aire, que a partir de ahora denominaremos “ n ”. De acuerdo a la experiencia n tiene que ser mayor que 1.

Se ha realizado esta experiencia para la refracción de la luz cuando viaja desde el aire al agua, y se ha de generalizar esta expresión. Dado que la luz podría tomar el camino inverso, se pueden considerar los ángulos de incidencia y refracción intercambiables. Por tanto, los podemos denominar ϵ_1 y ϵ_2 . Por tanto, la expresión sería:

$$\text{sen } \epsilon_1 = n_2 \text{ sen } \epsilon_2$$

Donde n_2 es el índice de refracción del agua respecto del aire. Si se asigna al índice de refracción del vacío (y del aire aproximadamente) 1, entonces n_2 será el índice de refracción del agua.

La luz también puede pasar del aire a otro medio transparente con otro índice de refracción:

$$\text{sen } \epsilon_1 = n_3 \text{ sen } \epsilon_3$$

Se puede entonces generalizar la expresión ya que si:

$$\text{sen } \epsilon_1 = \text{sen } \epsilon_1,$$

Entonces:

$$n_2 \text{ sen } \epsilon_2 = n_3 \text{ sen } \epsilon_3$$

Y así para cualquier medio. La ley de la refracción sería de Descartes sería:

$$\mathbf{n_1 \text{ sen } \epsilon_1 = n_2 \text{ sen } \epsilon_2}$$

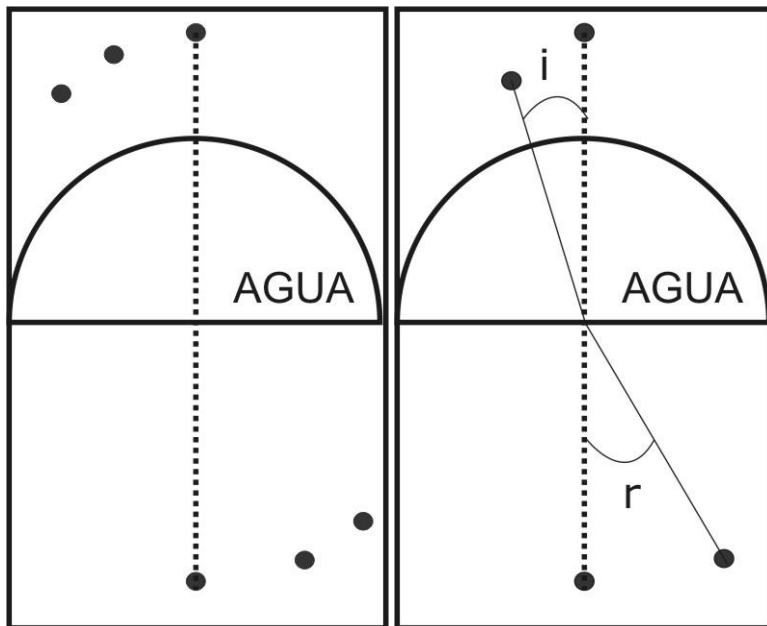


Imagen: Elaboración propia.

El profesor recordará que en la cara circular de la lente no se produce refracción ya que la luz entra perpendicular a la superficie de separación de los medios, es decir dirección radial en este caso.

La refracción de la luz, o cambio de dirección que se produce al pasar la luz del líquido al aire, en general de un medio transparente a otro, depende del tipo de líquido y, como consecuencia, la profundidad con que se verá la imagen del objeto sumergido cuando se observa desde la vertical, también dependerá del medio donde se encuentre.

El profesor comentará con sus alumnos que se denomina “ n ”, o índice de refracción al cociente entre la profundidad real y la profundidad a la que se ve la imagen, al mirarla perpendicularmente, y que es una característica óptica de una determinada sustancia transparente.

A.35. *Cuando la luz pasa del agua al aire, como ocurre cuando miramos a un objeto sumergido, la ley Snell-Descartes predice la existencia de un valor límite del ángulo de incidencia, a partir del cual la luz no sale del agua y se refleja en su superficie (reflexión total interna). Calcula el valor de ese ángulo límite sabiendo que el índice de refracción del agua es de 1,33. Haz lo mismo para el caso del vidrio con índice de refracción 1,5.*

A.36. Ejercicios de manejo de la ley de la refracción en exámenes de la EBAU.

2.2.2. ¿Cómo vemos al mirar a través de las lentes?

Las lentes que hemos estudiado para elaborar un modelo físico que explique la visión humana también pueden ser utilizadas para mirar a través de ellas, lo que denominamos visión indirecta.

A. 37. Representa cómo se ve en una pantalla la imagen formada con una lente convergente. Si se elimina la pantalla, ¿es posible ver esa imagen?, ¿desde dónde se podrá ver? Realiza un diagrama que lo explique.

III. El profesor explicará que al quitar la pantalla se forma una imagen real. Es un punto muy especial ya que emite luz, aunque no en todas las direcciones, como sucede con los objetos emisores de luz. Es por ello que al quitar la pantalla solamente se verá el objeto desde determinadas posiciones, es decir tratándose de un objeto extenso se podrá ver cuando le llegue al observador el haz procedente de la imagen real de todos los puntos del objeto.

Cuando los objetos están próximos a las lentes convergentes decimos que actúan como lupas.

A.38. Explora el comportamiento de la lente convergente suministrada por el profesor cuando actúa como lupa anotando los resultados de las observaciones siguientes:

- a) *¿En qué margen de distancias a la lente puede estar situado el objeto para que actúe como lupa?*
- b) *¿Qué características tiene la imagen cuando la lente actúa como lupa?*

I. Queremos que los alumnos se familiaricen con una nueva característica de las lentes convergentes que anteriormente no habíamos estudiado. Queremos que comprendan que, si situamos los objetos entre el foco y la lente, ésta puede actuar como lupa, formando una imagen virtual de los mismos, derecha y ampliada.

II. Esperamos que con ayuda del profesor los alumnos comprendan cuando una lente convergente puede funcionar como lupa. Así mismo esperamos que comprendan que características tiene la imagen formada por una lupa.

III. Aunque los alumnos hayan usado la lupa en alguna ocasión no podemos suponer que conocen las características de la visión a través de ella, por lo que el profesor proporcionará a los alumnos una lente convergente de 100 mm focal (lente que suele suministrarse en los equipos de óptica de los centros educativos).

Recordará a los alumnos que éste el tipo de lente ya la habían utilizado cuando buscaban la posición de la pantalla en la que se podía ver la imagen real de una fuente puntual a distintas distancias. El profesor recordará a los alumnos que únicamente se puede ver la imagen en la pantalla cuando la fuente puntual se situaba a distancias mayores de 10 cm (distancia focal) y que, a esa distancia, el haz de luz emergente formaba sobre la pantalla, cualquiera que fuera su posición, círculos iluminados del mismo diámetro que la lente. Así mismo, les recordará que habían encontrado que para distancias menores de 10 cm a la fuente puntual, esos círculos iluminados se hacen mayores conforme se aleja la pantalla, es decir, cuando el objeto (o fuente luminosa) se sitúa entre el foco y la lente. En esta última situación, aunque la lente converja el haz de luz incidente, el haz que emerge de ella aún es divergente y no es posible obtener una imagen en una pantalla.

A.39. Una persona mira a través de una lente convergente a un objeto puntual situado entre el foco y la lente. Realiza un esquema un diagrama de rayos que explique tu hipótesis acerca de cómo es visto ese objeto cuando la lente actúa como lupa.

I. Queremos afrontar el trazado gráfico. Cuando el objeto está situado entre el foco y la lente, aunque el haz emergente ha convergido respecto al incidente, la convergencia no es suficiente para concentrar la luz en un punto. Así pues, como el haz que llega al ojo es divergente, el observador verá una imagen, que en este caso será virtual. El cerebro del

observador situará la imagen en el origen directo de ese haz de luz que le llega al ojo, lo que se asemeja a la visión en un espejo y a la de los objetos sumergidos en agua.

En caso de tratarse de un objeto extenso, podemos imaginar que el punto O es uno de sus extremos y, para el otro, el trazado gráfico no es necesario realizarlo por ser simétrico al primero. A partir del esquema siguiente se puede entender el aumento con que se ven los objetos cuando la lente convergente se usa como lupa.

Con frecuencia se suele dibujar la imagen virtual, en este caso un lápiz, para representar que el ojo reconoce en la imagen al objeto emisor de luz, conviene volver a avisar aquí que esta imagen sólo tiene sentido por referencia al ojo del observador, que en ningún caso se trata de un objeto situado detrás de la lente y que ni siquiera es el origen de la luz que llega al ojo.

III. Opcionalmente el profesor demostrará que la misma ecuación que hemos utilizado para las lentes se puede utilizar para las lentes cuando las utilizamos como lupas, y realizará el siguiente trazado gráfico para la localización de esa imagen virtual.

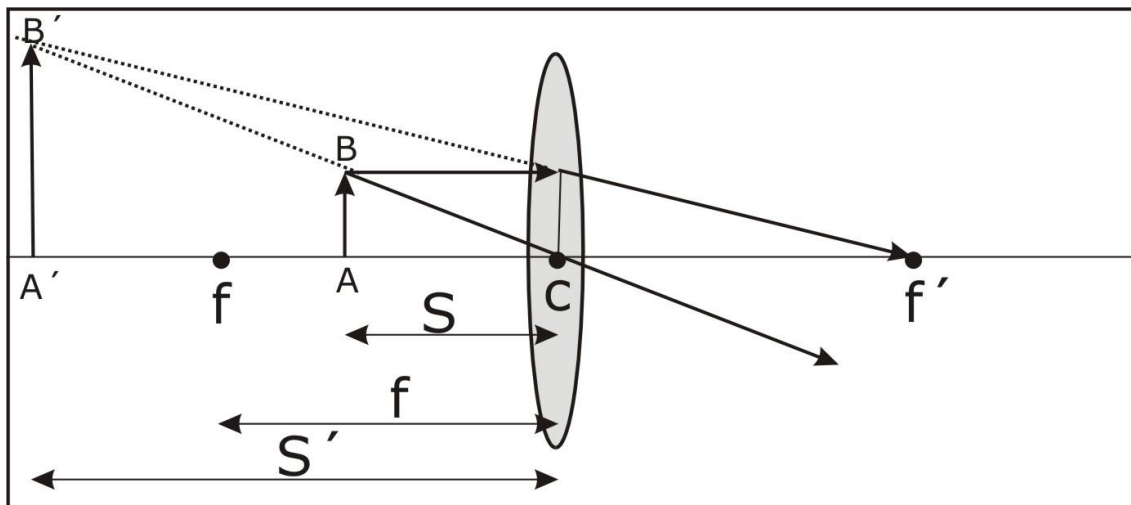


Imagen: Elaboración propia.

Los signos negativos significan que son distancias virtuales.

$$y'/y = -S' + f' / f'$$

$$y'/y = -S' / S$$

$$-S' / S = -S' + f' / f'$$

$$-S' f' = -SS' + Sf'$$

$$-SS' + Sf' + S'f = 0$$

$$Sf' + S'f = SS'$$

$$f'/S' + f/S = 1$$

$$1/S + 1/S' = 1/f$$

Por tanto, llegamos a la conclusión de que sí se puede utilizar la ecuación de lentes delgadas, aunque utilicemos la lente como lupa, es decir, aunque el objeto esté situado entre el foco y la lente, es decir muy cerca de la lente.

El profesor debe de explicar que el aumento visual no es el aumento lateral, ya que, en el caso de la lupa, el aumento depende de la distancia a la que coloquemos la lupa del objeto y de la distancia a la que se coloque el observador de la lupa.

El profesor debe de insistir en que el aumento lateral no lo podemos medir, puesto que la imagen es virtual y no podemos medir a que distancia de la lente se forma.

El profesor debe de explicar el aumento visual de la lupa, que no es el aumento lateral, que en este caso no se podría medir.

Si llamamos ω al ángulo subtendido por el objeto desde el ojo, ω' al ángulo subtendido por la imagen virtual, k a la distancia del objeto al ojo y k' a la distancia de la imagen al ojo.

$$\text{tg } \omega = y/k$$

$$\text{tg } \omega' = y'/k'$$

$$M = \text{tg } \omega' / \text{tg } \omega$$

$$M = y'/k' / y/k$$

$$M = k \cdot y' / k' \cdot y = 0.250 \cdot s' / k' \cdot s$$

Si el objeto está a 0.250 y si el objeto además está en el foco de la lente, entonces: $s=f$ y k' es aproximadamente igual a s' que será infinito.

Entonces:

$$M = 0,250/f \quad M = D/4$$

Definimos el aumento de una lupa para esta situación determinada de este modo.

Hay que determinar una situación concreta porque el lugar en el que se forma la imagen en una lupa depende de la posición del objeto.

Es muy importante no confundir el aumento lateral con los aumentos de las lupas comerciales.

A.40. ¿Cómo se ve una letra de 4 mm a través de una lupa de 15 dioptrías cuando se sitúa a 5 cm de la lente? Realiza un trazado gráfico y explica las características de la imagen.

I. Se trata de una actividad de manejo de las ecuaciones deducidas en las actividades anteriores.

A.41. Una persona se sorprende que, al mirar a un objeto cercano, a través de una lente convergente, vea la imagen derecha y más grande y, sin embargo, cuando mira a un objeto lejano vea la imagen más pequeña e invertida ¿podrías explicarlo?

I. Queremos que los alumnos relacionen la experiencia de laboratorio de mirar a través de las lentes con los trazados gráficos que hemos ido desarrollando.

III. El profesor recordará a los alumnos los trazados que hemos ido dibujando anteriormente.

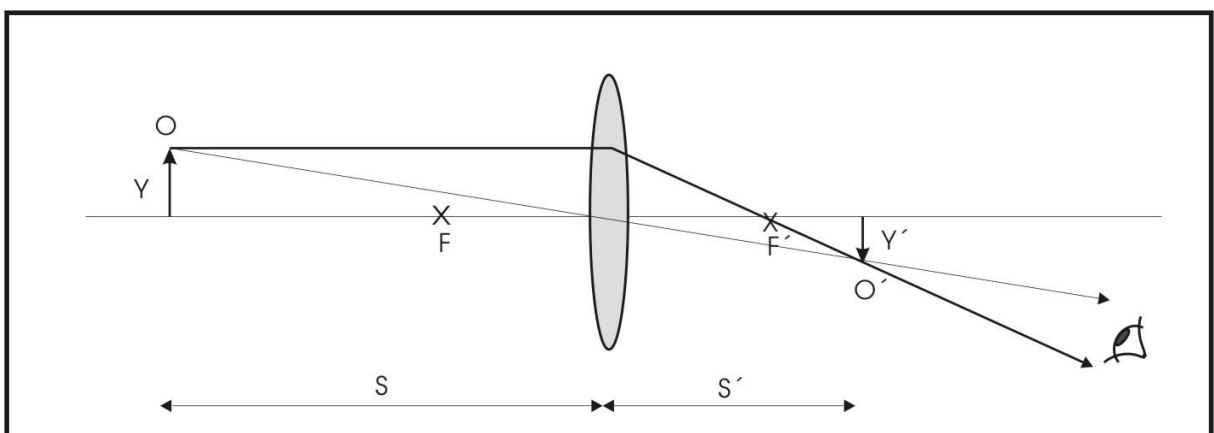


Imagen: Elaboración propia.

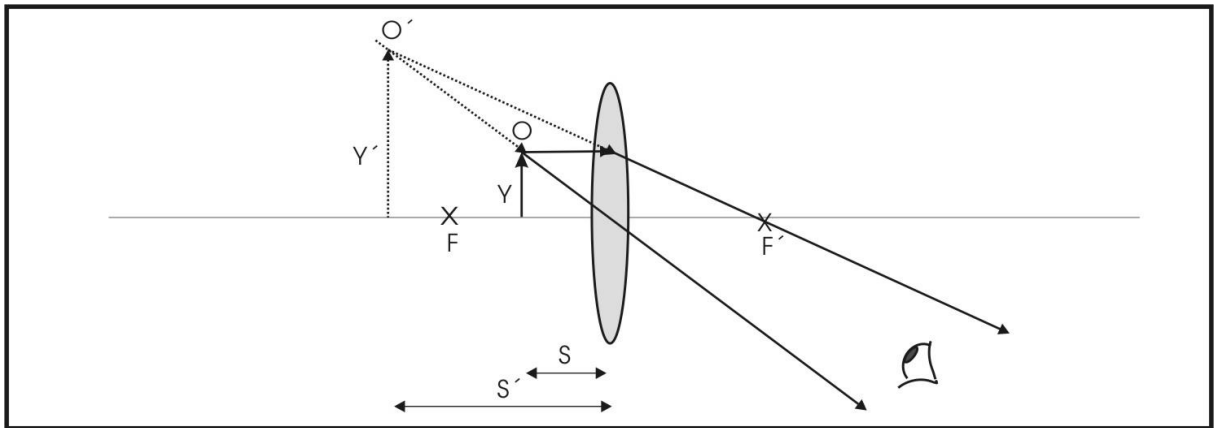


Imagen: Elaboración propia.

El profesor intentará que los alumnos relacionen estos trazados con la experiencia que han tenido con las lentes.

A. 42. Considerando la aproximación paraxial, aplicar la ley de la refracción para justificar la convergencia de los haces de luz cuando atraviesan una lente convergente. Realiza trazados gráficos para explicar el comportamiento de la luz en cada cara de la lente.



Imagen: Elaboración propia.

I. Buscamos una aplicación cualitativa de la Ley de Snell.

II. Con lo aprendido hasta ahora esperamos que los alumnos dibujen un trazado gráfico similar al siguiente:

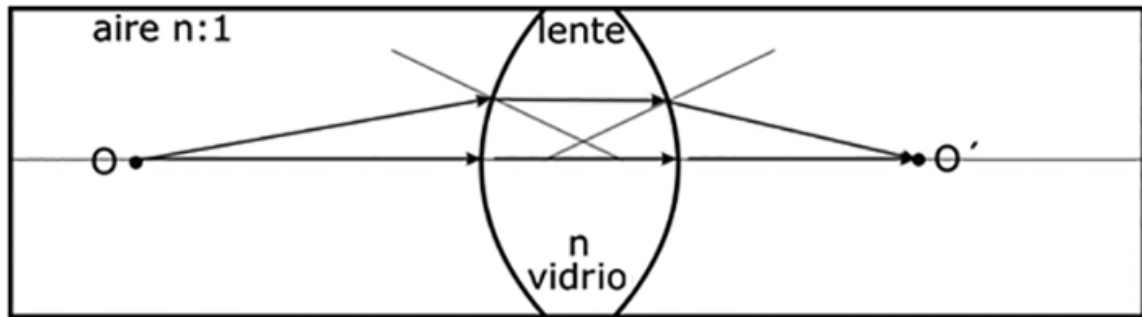


Imagen: Elaboración propia.

III. El profesor explicará el comportamiento cuantitativo de cada uno de las lentes llegando a demostrar la ecuación del dioptrio esférico.

La hipótesis de la refracción de la luz que ha permitido explicar cómo vemos los objetos cuando están sumergidos en medios transparentes y que hemos contrastado experimentalmente en algunas situaciones, tiene otras consecuencias importantes. Una de ellas es explicar cómo se comporta la luz cuando atraviesa las lentes.

A.43. (Opcional) Deduce de la relación existente entre s y s' en un dioptrio esférico cuando se considera la aproximación paraxial.

Para la deducción de la expresión utilizaremos la aproximación paraxial, para lo que los objetos han de estar situados a grandes distancias del dioptrio y los ángulos de incidencia serán, por tanto, muy pequeños.

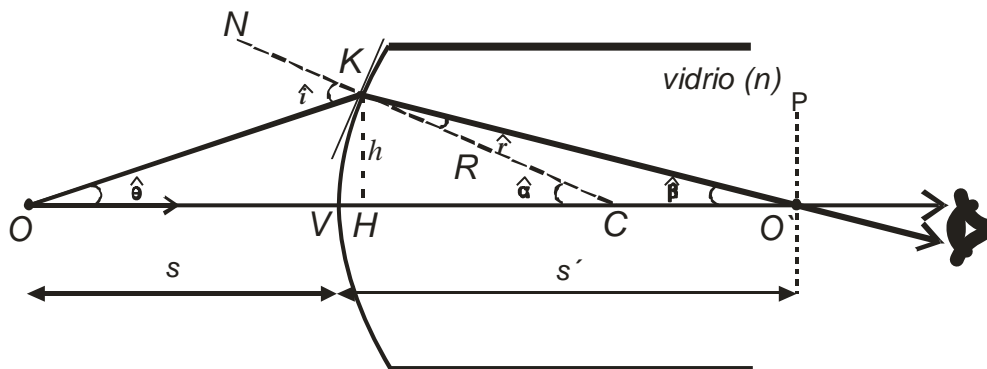


Imagen: Osuna 2003-2008.

En estas condiciones es posible hacer la siguiente aproximación:

$$\text{sen}\theta = \text{tag}\theta = \theta.$$

Además, el tamaño del dióptrio es muy pequeño en comparación con las distancias al objeto y la imagen y, además, su curvatura es pequeña, por lo que la distancia VH se puede considerar nula.

En el dibujo hemos representado un objeto puntual iluminado, O, que como sabemos emite luz en todas las direcciones. Elegimos un haz de luz, limitado por los rayos OV y OK, que incide en la superficie del dioptrio esférico convexo de radio R, con centro de curvatura en C. De acuerdo con la ley de la refracción, el rayo OV no se desvía ya que el ángulo de incidencia con la superficie es de 90°. El rayo OK, incide con un ángulo i respecto de la normal (N) a la superficie. Dado que la superficie es esférica, podemos imaginar que en el punto de incidencia hay un plano tangente a la superficie esférica cuya normal, N, está dirigida al centro de curvatura, C. Al aplicar la ley de la refracción al rayo OK, trazamos el rayo refractado KO' con un ángulo r respecto de la normal N. El haz de luz incidente limitado por los rayos OV y OK, después de entrar en el vidrio forma, pues, un haz convergente, limitado por los rayos KO' y VO', que converge en O'. Así pues, al mirar a O' podrá verse la imagen de O.

La ley de de la refracción aplicada al rayo OK permite escribir:

$$\text{sen}i = n \cdot \text{sen}r$$

Si i y r son pequeños,

entonces:

$$i = n \cdot r \quad (1)$$

Para relacionar los ángulos de esta expresión con los valores s y s' y las características de un dioptrio esférico, R y n , buscamos relaciones de i y r con otros ángulos señalados en el esquema y éstos, a su vez, con las magnitudes buscadas:

Del triángulo OKC podemos deducir que $i = \theta + \alpha$ (2)

Del triángulo CKO' podemos deducir que $\alpha = r + \beta$, de donde $r = \alpha - \beta$ (3),

Por otro lado, los ángulos θ , α y β equivalen a: $\text{tag } \theta = \theta = \frac{h}{s}$, $\text{tag } \alpha = \alpha = \frac{h}{R}$, $\text{tag } \beta = \beta = \frac{h}{s'}$ (4)

Sustituyendo las expresiones (2) y (3) en (1): $\theta + \alpha = n \cdot (\alpha - \beta)$

Y escribiendo los ángulos θ , α y β según están expresados en (4): $\frac{h}{s} + \frac{h}{R} = n \left(\frac{h}{R} - \frac{h}{s'} \right)$

Por último, eliminando h y ordenando esa expresión, obtenemos: $\frac{1}{s} + \frac{n}{s'} = \frac{n-1}{R}$ (*)

Esta última es la expresión buscada, en la que se relacionan los valores de s y s' con las características del dioptrio R y n .

Pero, para realizar trazados gráficos sin necesidad de aplicar en cada caso la ley de la refracción, es cómodo usar los conceptos de puntos focales F y F' . Las distancias a esos puntos, f y f' , se pueden obtener de las propiedades de esos puntos:

Si $s \rightarrow \infty$, entonces $s' = f'$, y de la expresión anterior obtenemos que $f' = \frac{n \cdot R}{n-1}$

Y si $s' \rightarrow \infty$, entonces $s = f$, y de la misma forma obtendríamos: $f = \frac{R}{n-1}$

La expresión del dioptrio esférico (*) podemos escribirla en función de la distancia focal

imagen, f' , obteniendo una expresión similar a la usada en la lente delgada: $\frac{1}{s} + \frac{n}{s'} = \frac{n}{f'}$

43. (Opcional) A partir de la expresión anterior, deduce la expresión que relaciona los valores de s y s' y la focal de la lente. Considera que una lente convergente está formada por dos dioptrios, uno convexo y uno cóncavo, unidos.

III. El profesor explicará que:

Para la primera lente: $1/S + n/S_1' = n-1/R$

Para la segunda lente: $n/-S_1' + 1/S' = 1-n/ -R$

El signo negativo que hemos utilizado en $-S_1'$ significa que la imagen para esta segunda lente es virtual.

Si sumamos las ecuaciones encontradas para las dos lentes, encontramos:

$$1/S + 1/S' = (n-1) \cdot 2/R$$

Pero si $S = \infty$ $S' = f$, por tanto $1/f = (n-1) \cdot 2/R$

Con lo que la ecuación final del dioptrio esférico sería:

$$1/S + 1/S' = 1/f'$$

Con lo cual podemos utilizar la misma ecuación que habíamos utilizado para lentes, y espejos.

Otro ejemplo para poner a prueba el modelo de visión que hemos elaborado sería la visión a través de lentes divergentes. ¿Cómo explicamos la visión a través de las lentes divergentes?

A.44. Explora el comportamiento de las lentes divergentes. Señala las características de la visión a través de ella y la posición de los focos. Compara las características de las lentes divergentes con las de la lente convergente.

I. Queremos que los alumnos se familiaricen con las lentes divergentes y que las comparen con las lentes convergentes que habían utilizado previamente.

II. Esperamos que los alumnos comprendan las diferencias entre las lentes convergentes y divergentes. Esperamos que los alumnos comprendan que la visión a través de ellas nos da siempre una imagen derecha, más pequeña y siempre virtual, para cualquier posición del objeto.

III. El profesor debe de explicar que significa en este caso que el foco objeto de la lente sea virtual. Les explicará a los alumnos que del foco no puede salir luz. Debe de ayudarse de dibujos para que los alumnos comprendan lo que les ocurre a los haces de luz.

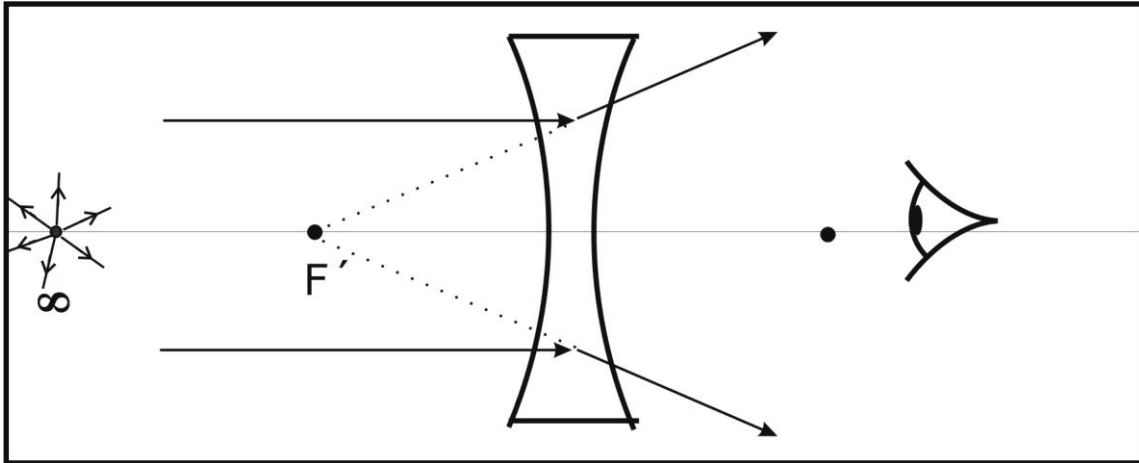


Imagen: Elaboración propia.

El profesor les explicará a los alumnos que la imagen que se forma es en todos los casos virtual. Es decir, sea cual sea la posición del objeto, no podemos encontrar su imagen en una pantalla.

El profesor puede realizar la experiencia con los alumnos colocando un foco puntual en distintas posiciones y observando que el haz de luz emergente sobre una pantalla siempre es divergente.

A.45. A partir de las observaciones anteriores completa los siguientes esquemas para clarificar gráficamente cómo se comportan las lentes divergentes:

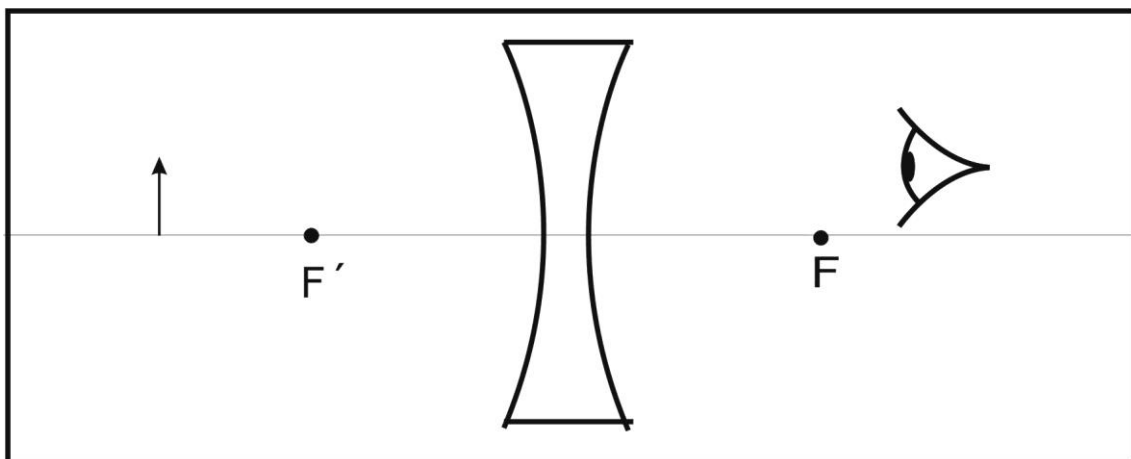


Imagen: Elaboración propia.

I. Queremos que los alumnos relacionen su experiencia con las lentes con el algoritmo del trazado de rayos que habíamos desarrollado previamente para expresar que le ocurre a la luz cuando interacciona con las lentes.

II. Esperamos que por extensión de lo que habían aprendido previamente con las lentes convergentes, algunos alumnos dibujen correctamente lo que le sucede a la luz.

También esperamos que un porcentaje de los alumnos tengan dificultades para comprender que la luz diverge al atravesar la lente, y que por tanto se formará una imagen virtual.

III. El profesor ayudará a los alumnos a relacionar la experiencia con las lentes divergentes con el trazado gráfico, y dicho trazado gráfico con el hecho de que la imagen que se forme sea virtual. Les propondrá el siguiente trazado:

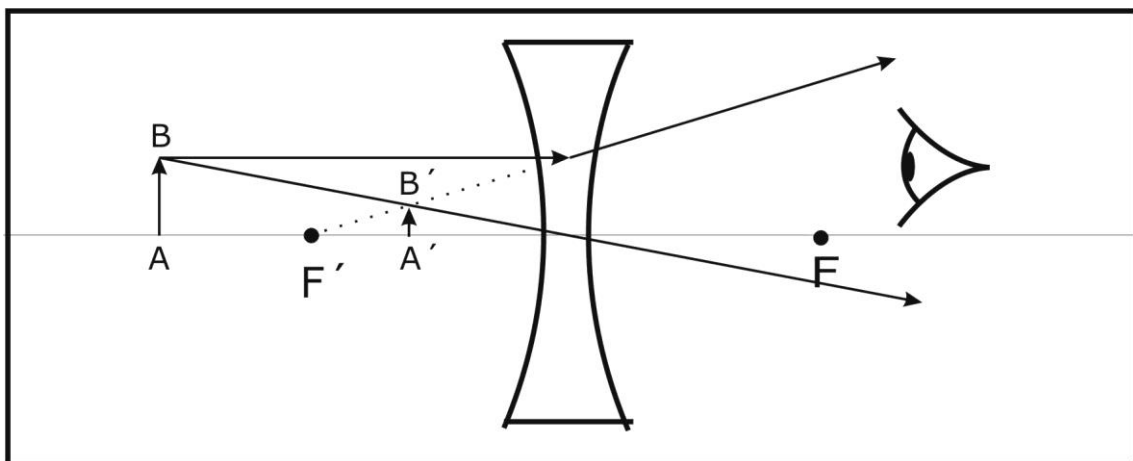


Imagen: Elaboración propia.

A.46. ¿Se cumple con este tipo de lentes la ecuación gaussiana de las lentes delgadas?

I. Queremos que los alumnos se familiaricen con el trazado gráfico necesario para las lentes divergentes, en función de las observaciones que habían hecho previamente con las lentes divergentes.

II. Esperamos que los alumnos comprendan el trazado gráfico de las lentes divergentes y su analogía con el trazado gráfico para el espejo convexo.

III. El profesor explicará que al igual que en la lente convergente, la luz que procede de puntos muy lejanos, del infinito, se concentra en el foco de la lente, pero en este caso el

foco está a la izquierda de la lente y por tanto la luz que sale de la lente parece proceder del foco, aunque nunca se va a concentrar realmente en el foco, se trata por tanto de un foco virtual.

Cuando se utilicen expresiones algebraicas se ha de utilizar con signo negativo para expresar que es un foco virtual.

Así mismo el profesor ayudará a los alumnos a realizar el trazado gráfico correspondiente a la formación de imágenes mediante una lente divergente. Ha de destacar que la imagen es virtual, es decir no hay una convergencia real de la luz en ningún punto. Además, la imagen es derecha y más pequeña.

El profesor indicará a los alumnos que comparen el trazado gráfico realizado para encontrar la imagen formada por una lente divergente con el trazado gráfico que realizaban para encontrar la imagen formada por un espejo convexo. El profesor ayudará a los alumnos a comprobar que son trazados simétricos, y, por tanto, como la luz viaja igual en un sentido que en otro, la ecuación algebraica que utilizábamos para encontrar la imagen formada por un espejo convexo podemos utilizarla para encontrar la imagen formada por una lente divergente. El profesor comparará estos trazados gráficos que hemos realizado para las lentes divergentes con los de los espejos convexos que habíamos visto anteriormente.

El profesor indicará a los alumnos que en este caso también se cumple la ecuación Gaussiana de las lentes. El profesor explicará a los alumnos que en este caso el signo del foco objeto ha de ser negativo, pues la luz no pasa por el al atravesar la lente, es decir, es un foco virtual. Por tanto, las lentes divergentes tendrán dioptrías negativas.

El profesor explicará a los alumnos que las lentes divergentes siempre forman imágenes más pequeñas que el objeto.

(Opcional) Posteriormente el profesor indicará a los alumnos que a partir del siguiente trazado se pueden encontrar los siguientes triángulos semejantes:

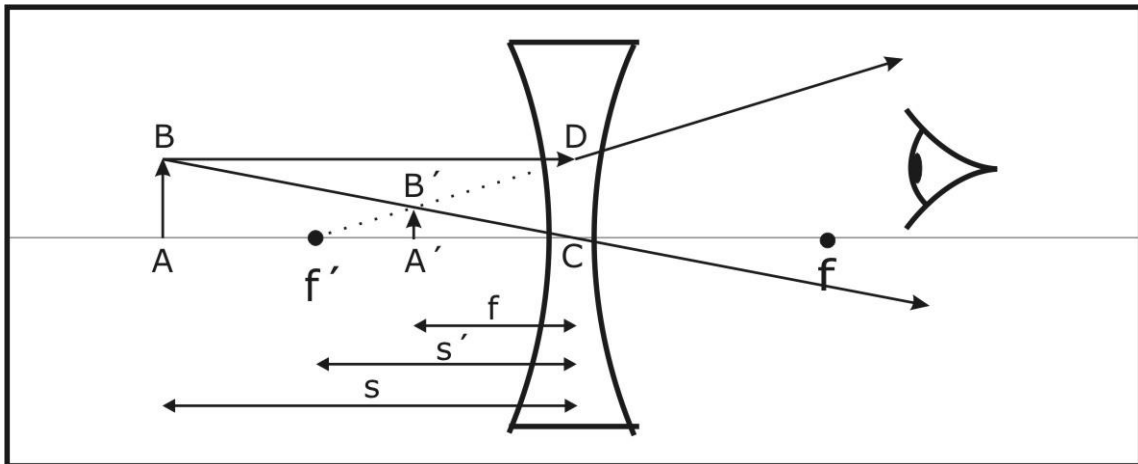


Imagen: Elaboración propia.

$A'B'C$ y ABC son triángulos semejantes, por tanto, podemos deducir que:

$$y/y' = s'/s$$

También encontramos que $F'DC$ y $F'B'A'$ son triángulos semejantes, de donde deducimos que:

$$y'/y = f' - s'/f'$$

Por tanto:

$$s'/s = f' - s'/f'$$

A partir de esta ecuación se deduce la expresión gaussiana para las lentes:

$$1/s + 1/s' = 1/f$$

A.47. a) Miramos a través de una lente divergente de -10 dioptrías a un círculo de 1 m de radio situado a 5 m de la lente. ¿Cómo veremos su imagen? Determina la distancia focal imagen, la posición de la imagen y su aumento lateral

b) ¿Cómo cambiará la imagen cuando acercamos el objeto a la lente? Realiza trazados gráficos que lo expliquen.

III. El profesor recordará a los alumnos que en este caso el signo del foco objeto ha de ser negativo, pues la luz no pasa por el al atravesar la lente, es decir, es un foco virtual. Es por ello que las lentes divergentes tienen dioptrías negativas.

El profesor explicará a los alumnos que las lentes divergentes siempre forman imágenes más pequeñas que el objeto.

3. Aplicaciones tecnológicas del modelo de visión.

El modelo de visión que hemos elaborado basado en el modelo de visión de Kepler establece que la visión se produce cuando en la retina se forma una imagen del objeto. El ojo se considera experimentalmente como un sencillo sistema óptico formado por una lente convergente y una pantalla. Sabemos que dicha pantalla en el ojo es la retina, que está conectado con el cerebro, que es donde verdaderamente se produce la sensación de visión. Con este modelo se puede explicar cómo se ven los objetos al mirarlos directamente, y también al mirar objetos de modo indirecto, es decir, a través de espejos planos, a través de espejos esféricos, a través de lentes, o cuando están sumergidos en otros medios transparentes.

Para ello hemos supuesto inicialmente, y probado experimentalmente, que la luz que emite cada punto del objeto se propaga en línea recta en todas las direcciones, Para nuestro algoritmo, ello supone que los rayos que limitan el haz divergente considerado se trazan como líneas rectas en los medios homogéneos. También hemos supuesto inicialmente, y comprobado experimentalmente que la luz se refleja al interactuar con los espejos; y que la luz se refracta, es decir, cambia de dirección, en la superficie de separación de los medios que atraviesa. Hemos contrastado a partir de las experiencias de visión en espejos o al mirar a objetos sumergidos que estos cambios de dirección de cada rayo que limita el haz divergente de luz considerado cumplen las leyes de la reflexión y la refracción.

Vamos a avanzar un poco más y a estudiar las anomalías del ojo humano, a qué son debidas y, cómo corregirlas.

3.3.1 La corrección de las anomalías visuales.

El ojo humano es un cuerpo prácticamente esférico de unos 2'5 cm de diámetro. La pupila, que es el orificio por el cual entra la luz, tiene un diámetro entre 2 mm y 8 mm regulable en función de la intensidad de luz. La capa más externa del ojo, la esclerótica,

se trata de una membrana blanca que en su zona anterior es abombada y transparente (córnea). La córnea es realmente la que produce casi toda la convergencia de los haces de luz incidentes. La luz penetra en el ojo a través de la córnea, atraviesa la pupila y el cristalino, una lente convergente que provoca otra convergencia, una especie de “ajuste fino” del haz, y consigue que la imagen se forme justamente en la retina. En la retina hay unas células receptoras de luz (llamadas conos y bastones) que generan a partir de la luz que les llega impulsos eléctricos que se propagan al cerebro a través del nervio óptico. Es en el cerebro donde se realiza principalmente la construcción de la imagen y se interpreta lo que vemos.

El ojo es un sistema complejo que nosotros hemos modelizado como un sistema óptico formado por una lente convergente y una pantalla.

Las anomalías visuales son pequeñas modificaciones del ojo real, las más frecuentes, debido a las cuales las personas no ven bien los objetos lejanos, son la miopía y la hipermetropía. La presbicia o “vista cansada”, aparece en las personas mayores de 45 años independientemente de que puedan tener otra anomalía y se manifiesta en la visión de cerca. Además de estas anomalías y unido a ellas, puede existir astigmatismo, cuando la córnea presenta irregularidades en su esfericidad. Ésta última anomalía visual no la estudiaremos en este curso debido a su gran complejidad geométrica.

Para ver bien un objeto lejano, es necesario que se forme una imagen del mismo en la retina que, como hemos estudiado, es una pantalla conectada con el cerebro a través del nervio óptico. Para un ojo emétrope (sin anomalía visual) el esquema de rayos para explicar la visión de un objeto lejano sería :(Osuna 2003-2008)

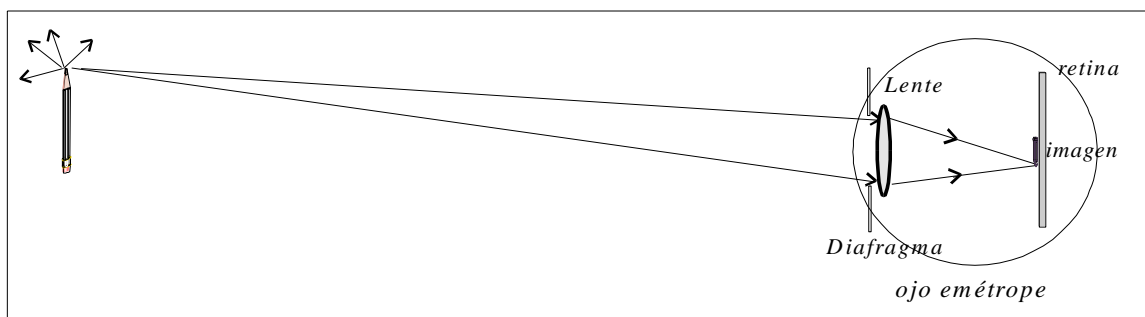


Imagen: (Osuna 2003-2008).

A.48. La miopía es la anomalía visual de los ojos cuya retina está a mayor distancia del cristalino que en el ojo emétrope. Dibuja en el esquema un diagrama de rayos que explique la visión de un ojo miope de un objeto alejado (en el esquema está señalada con línea discontinua la posición de la retina del ojo emétrope). ¿Por qué los miopes ven borrosos los objetos alejados? (Osuna 2003-2008)



Imagen: (Osuna 2003-2008).

I. Queremos que los alumnos comprendan las diferencias entre donde forma la imagen un ojo miope y donde forma la imagen un ojo emétrope en relación a la retina. Queremos que comprendan por qué un ojo miope forma una imagen borrosa en la retina.

II. Creemos que los alumnos podrán realizar el trazado gráfico correspondiente con las explicaciones del profesor. Creemos que algunos alumnos necesiten la ayuda del profesor para realizar el trazado gráfico.

III. El profesor explicará a los alumnos que la incapacidad del ojo miope para ver bien está relacionada con el hecho de que su retina está más alejada del cristalino que la retina de un ojo emétrope, y por tanto en la retina no se forma una imagen puntual de cada punto del objeto iluminado, sino un círculo. A un mismo punto de la retina le llegue luz de distintos puntos del objeto, pues se producen intersecciones entre los círculos, y por eso el ojo miope tiene la sensación de ver borroso.

El profesor ayudará a los alumnos a relacionar la realidad física con el trazado gráfico para que éstos tengan siempre presente que el algoritmo de rayos que dibujamos es una representación de lo que sucede en el ojo.

Finalmente, el profesor realizará el siguiente trazado:

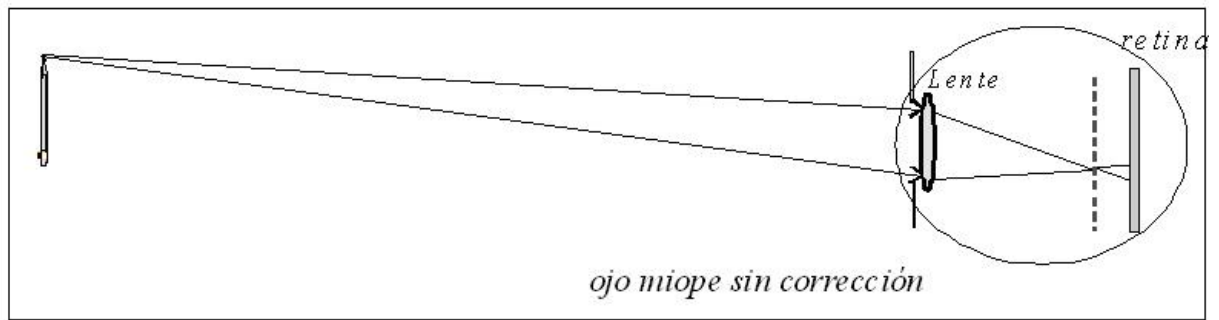


Imagen: (Osuna 2003-2008).

A.49. Dado que la distancia lente-retina no se puede modificar, propón una solución óptica para la corrección de la miopía. (Osuna 2003-2008)

I. Queremos que los alumnos comprendan que se puede corregir la miopía utilizando lentes divergentes.

II. Esperamos que los alumnos comprendan esta corrección ya que previamente habían trabajado en el laboratorio con lentes divergentes, y están familiarizados con lo que le sucede a la luz cuando atraviesa este tipo de lentes.

III. El profesor ayudará a los alumnos con el trazado gráfico, y finalmente, propondrá a los alumnos la siguiente corrección para la miopía mediante la utilización de lentes divergentes:

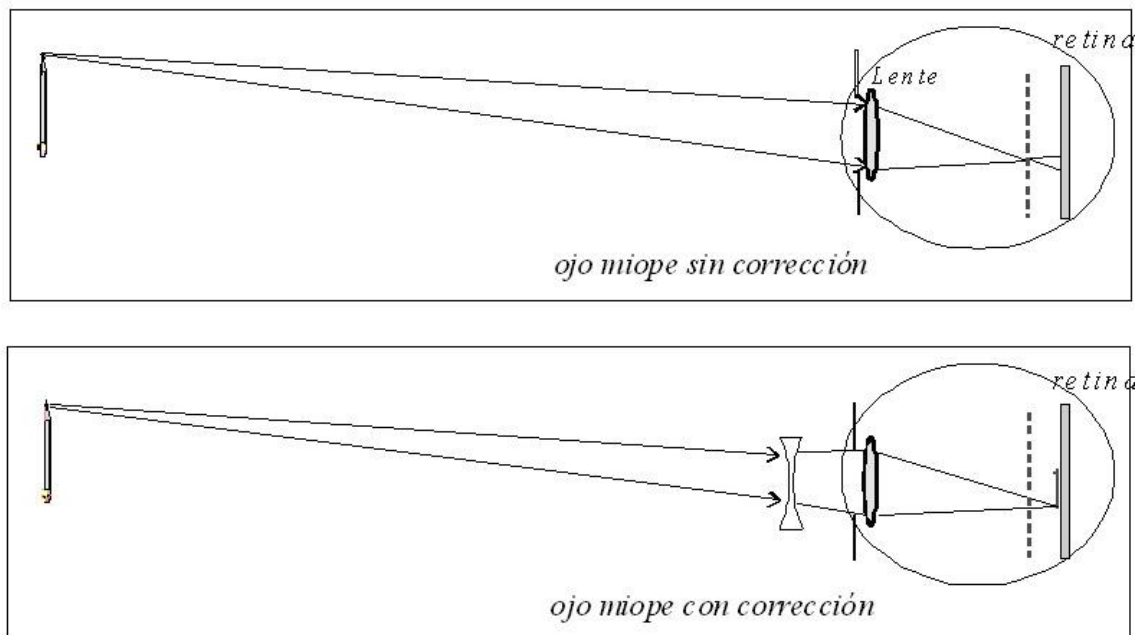


Imagen: (Osuna 2003-2008).

A.50. (ampliación). ¿Cómo graduarías a una persona con miopía? ¿Qué lente le dirías que tiene que utilizar?

III. El profesor debe de explicar a los alumnos que las personas que tienen miopía no ven correctamente los objetos lejanos, aunque ven bien los objetos cercanos. En primer lugar, habría que calcular cual es el punto próximo de la persona (es decir el punto en el que comienza a ver correctamente).

Una vez conocido dicho punto, la persona necesitaría una lente divergente que formara la imagen a dicha distancia de la lente (recuerda que la imagen formada por una lente divergente es virtual). Por tanto, el punto próximo que hemos calculado antes sería la distancia s' .

Si aplicamos ahora la ecuación de las lentes que hemos estudiado:

$$1/s + 1/s' = 1/f$$

$$1/s + 1/s' = P$$

La distancia s es infinito, la distancia s' es el punto próximo, pero como es virtual, debemos ponerla con signo negativo. Entonces podemos calcular cuan ha de ser la

potencia de la lente, es decir las dioptrías de la lente que debemos recomendar a la persona.

El profesor ha de destacar que la potencia será negativa, como corresponde a las lentes divergentes.

A.51. La hipermetropía es la anomalía visual de los ojos cuya retina está a menor distancia del cristalino que en el ojo emétrope. Dibuja en el esquema un diagrama de rayos para la visión de un objeto alejado. ¿Por qué los hipermétropes ven borrosos los objetos alejados? (Osuna 2003-2008).

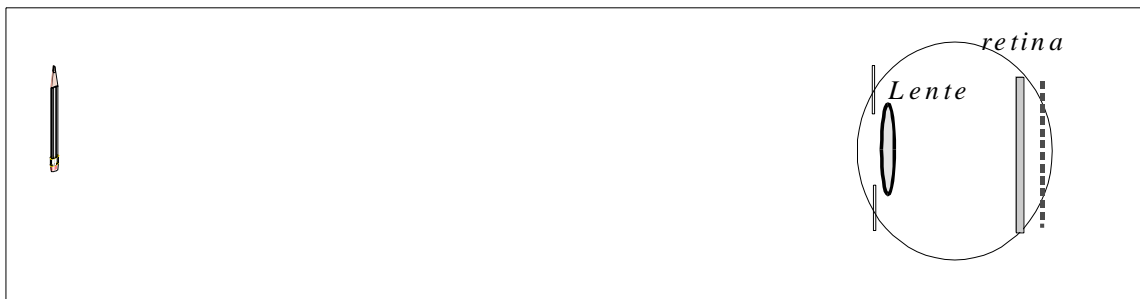


Imagen: (Osuna 2003-2008).

I. Queremos que los alumnos comprendan por qué los ojos hipermétropes no pueden ver bien un objeto alejado.

II. Creemos que los alumnos comprenderán, al igual que sucedía con el ojo miope, que la imagen se ve borrosa al no situarse la retina en el lugar en el que se forma la imagen. Creemos que los alumnos tendrán menos dificultades para realizar el trazado gráfico correspondiente, una vez comprendida la actividad del ojo miope.

III. El profesor debe relacionar esta actividad con la anterior y proponer el siguiente trazado gráfico a los alumnos:

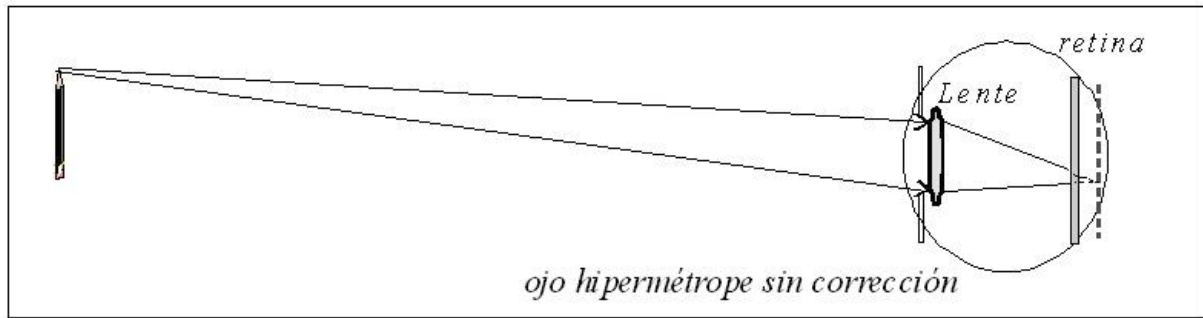


Imagen: (Osuna 2003-2008).

A.52. Dado que la distancia lente-retina no puede ser modificada, propón una solución óptica para la corrección de la hipermetropía.

I. Esperamos que los alumnos relacionen sus experiencias anteriores con lentes convergentes y esta aplicación relacionada con la vida diaria.

II. Esperamos que con lo aprendido hasta ahora acerca de las lentes los alumnos comprendan como se produce la corrección de la hipermetropía. Es muy importante que los alumnos comprendan que la lente divergente que se utiliza para la corrección óptica del ojo miope tiene unas propiedades ópticas contrarias a las de la lente convergente.

III. El profesor comentará con los alumnos que estamos ante una mejora de las condiciones de vida del ser humano derivada del estudio de la óptica. El profesor ayudará a los alumnos a encontrar la manera de corregir el ojo hipermetrope. El profesor proporcionará a los alumnos el siguiente trazado gráfico:

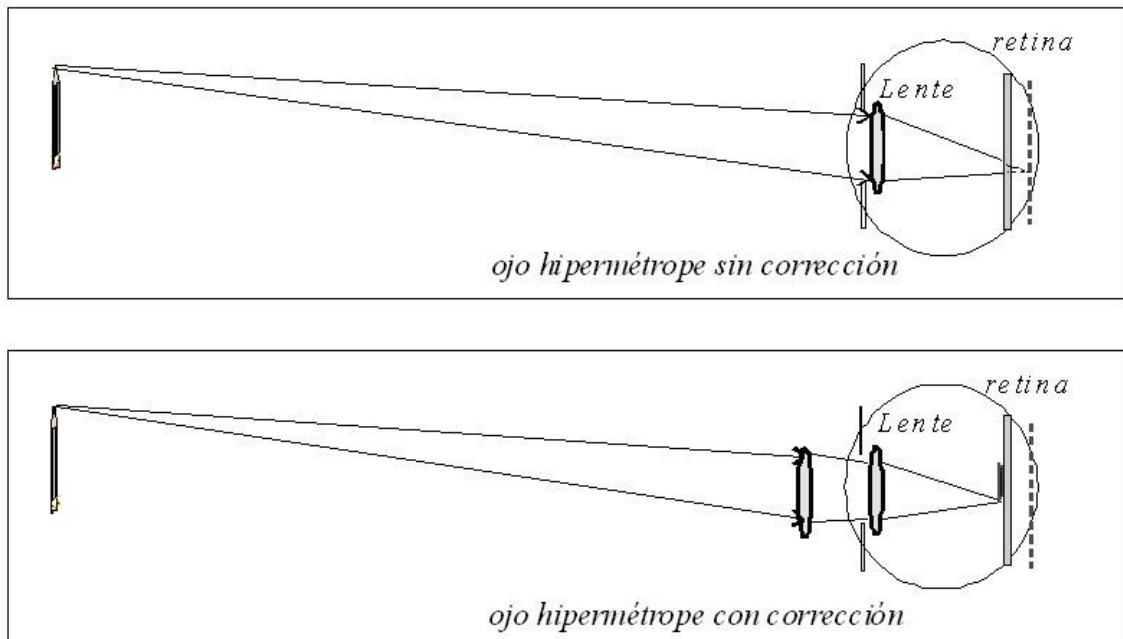


Imagen: (Osuna 2003-2008).

A partir de los 45 años de edad, en muchas personas aparece la presbicia, o vista cansada, y esto puede sucederle al ojo emétrope o a un ojo con anomalía visual previa (miopía o hipermetropía). Cuando un ojo no ve bien de cerca, se dice que tiene presbicia o vista cansada, ya sea un ojo emétrope o corregido con gafas adecuadas para ver de lejos. En el sistema óptico lente convergente-pantalla que hemos utilizado como modelo de ojo humano, señalamos que, para formar una imagen de un objeto situado a cualquier distancia, en una pantalla situada a una distancia fija, la lente ha de tener capacidad para variar su curvatura, aumentando así el poder de convergencia de los haces de luz cuando sea necesario, para poder ver bien cuando el objeto se sitúa a distancias. Este fenómeno de acomodación en el ojo humano lo realiza la lente del cristalino.

A.53. El esquema siguiente representa un ojo présbita, en el que el cristalino no aumenta su curvatura al mirar a los objetos cercanos. Dibuja en él un diagrama de rayos y explica por qué ve borroso. (Osuna 2003-2008).

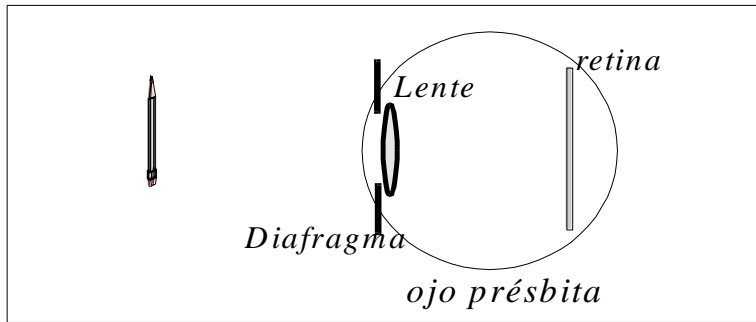


Imagen: (Osuna 2003-2008).

I. Queremos que los alumnos comprendan que, si el cristalino no se puede acomodar, es decir variar su curvatura para hacerse más convergente al mirar objetos cercanos, la imagen no se formará correctamente.

II. Esperamos que los alumnos comprendan que si la lente (el cristalino en el caso del ojo humano) no es lo suficientemente convergente, entonces la imagen no se formará en la retina, si no más alejada.

III. El profesor debe de proponer el siguiente trazado gráfico, relacionando el poder de convergencia de la lente, con la capacidad de adoptar cierta curvatura del cristalino, y su incapacidad en el caso del ojo presbita:

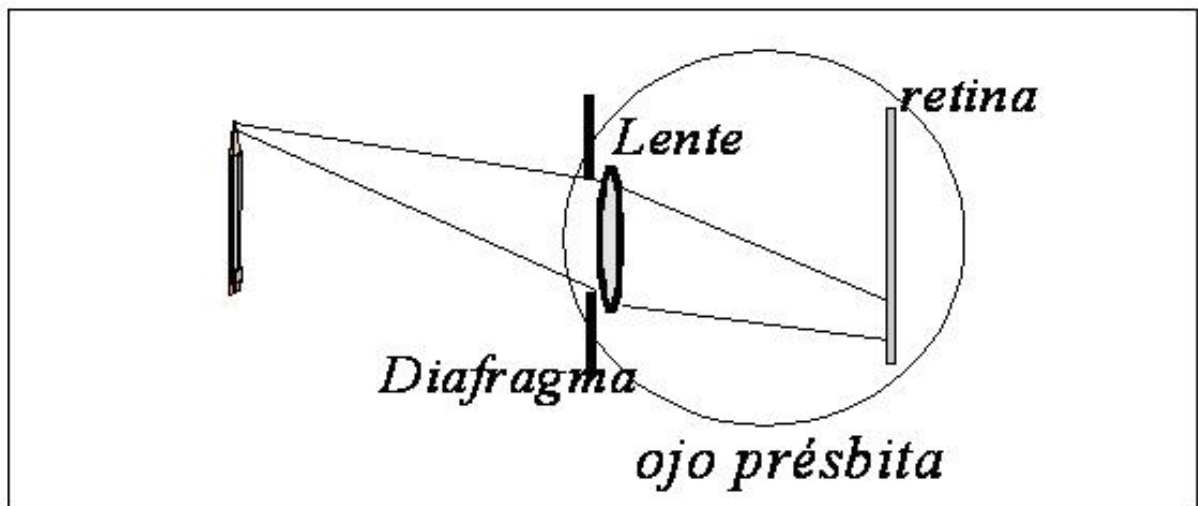


Imagen: (Osuna 2003-2008).

A.54. Propón una solución óptica para corregir la presbicia.

I. Queremos que los estudiantes tengan oportunidad de aplicar los conocimientos construidos para la comprensión de las anomalías visuales y su corrección óptica.

III. El profesor ayudará a los alumnos a comprender que si en el caso del ojo presbita, la lente del cristalino no puede aumentar su poder de convergencia al mirar a un objeto cercano, el haz de luz procedente de cada punto del mismo convergerá en un punto detrás de la retina. Por ello, la corrección del ojo presbita se realizará con lentes convergentes que equilibren el déficit de convergencia del cristalino.

3.3.2 (Ampliación) El diseño y construcción de instrumentos de ampliación de la visión.

Otra aplicación tecnológica del modelo de visión, junto con las gafas que ya hemos estudiado para la corrección de las distintas anomalías visuales, y que también tuvo un gran impacto científico y social fue el telescopio. A partir del siglo XVI el telescopio se utilizó como una herramienta de uso habitual en astronomía. Las observaciones que se hacían con el telescopio cuestionaban las teorías del Universo hasta entonces aceptadas. Galileo con un telescopio construido por él mismo, observó cuatro satélites de Júpiter y pudo constatar que describían órbitas alrededor del planeta, lo que contradecía las ideas aceptadas en esa época de que todos los astros giraban alrededor de la Tierra.

A.55. Si deseamos ver una imagen al mirar a través de una lente hacia un objeto lejano, ¿qué tipo de lente deberíamos utilizar para verla del mayor tamaño posible? Dibuja un esquema que explique la visión de esta situación. Una vez obtenida la imagen cercana de un objeto lejano, ¿cómo podríamos verla aumentada?

I. Queremos que los alumnos comprendan que, si queremos ver la imagen de un objeto lejano al mayor tamaño posible, tendremos que utilizar una lente con una distancia focal grande, es decir, una lente de pocas dioptrías. Posteriormente, para poder aumentar el tamaño de la imagen creado por la primera lente, es necesario utilizar otra con gran poder de convergencia, o utilizar una lente convergente funcionando como lupa.

II. Esperamos que, con la ayuda del profesor para realizar los trazados gráficos explicativos, los alumnos comprendan que, con una lente de distancia focal pequeña, se obtiene una imagen muy cerca del foco, es decir cerca de la lente, y de tamaño muy

pequeño. Sin embargo, con una lente de mayor distancia focal, la imagen que se obtiene es de mayor tamaño y está más alejada de la lente.

III. El profesor ayudará a los alumnos a realizar diferentes trazados gráficos para comprobar qué tipo de lentes sería mejor utilizar. Animará a los alumnos a que realicen el trazado gráfico para la obtención de la imagen de un objeto lejano con un lente de distancia focal pequeña y también con otra lente de distancia focal grande. De este modo, los alumnos verán gráficamente las diferencias en el tamaño de la imagen.

A.56. El telescopio de Kepler consiste en una combinación de dos lentes convergentes: el objetivo, que consigue formar una imagen cercana del objeto lejano y el ocular, que actúa como una lupa para ver aumentada la imagen formada por el objetivo. Realiza un diagrama que explique el funcionamiento de este telescopio y construye un prototipo con las lentes suministradas por el profesor. ¿Qué características tiene la imagen que se ve? (Osuna 2003-2008).

I. Queremos que los alumnos construyan en el laboratorio un prototipo de telescopio y puedan comprender trabajando con él su funcionamiento. Por otro lado, queremos que relacionen estos conocimientos prácticos adquiridos con el trazado gráfico del comportamiento de la luz para formar la imagen que vemos a través del telescopio. Queremos que los alumnos comprendan que, la imagen formada por la primera lente convergente, una imagen real, será objeto para la segunda lente.

II. Esperamos que con la ayuda del profesor los alumnos realicen y comprendan el trazado gráfico para explicar el comportamiento de la luz al atravesar un telescopio. Quizás tengan dificultades al realizar por primera vez el trazado gráfico de la imagen formada por el telescopio.

III. El profesor debe recordar a los alumnos las características de las lentes que están utilizando y ayudarles a realizar el trazado gráfico, resaltando la posición y el tamaño de la imagen que se forma a partir de cada una de las lentes; y les ayudará con el trazado gráfico si muestran dificultades. El profesor recordará a los alumnos que la imagen formada por la primera lente, lente objeto, será el objeto para la segunda lente, lente ocular.

El telescopio de Kepler consiste por tanto en un sistema con dos lentes convergentes: la primera lente el objetivo, es una lente convergente casi plana que tiene poco poder de convergencia, y que formará una imagen de gran tamaño de un objeto alejado, en una pantalla a su vez alejada. Una lente habitual en la corrección de la visión, como puede ser una lente de 1 dioptría, dará lugar a la formación de la imagen de un objeto alejado a 1 m de distancia, mientras que una lente convergente de 2 dioptrías dará lugar a la formación de la imagen de un objeto alejado a 0'5 m de distancia. Si situamos el ojo de un observador detrás de ella en la dirección de propagación de la luz, la imagen formada por esa lente se puede ver sin pantalla. Una segunda lente actuará como lupa, aumentando el tamaño de la imagen obtenida a partir de la primera lente.

A.56.1. Con las indicaciones que aportamos en las actividades anteriores y con materiales baratos y fáciles de conseguir, se puede construir un telescopio casero del tipo que construyó Kepler (Osuna 2003-2008). Intenta construir en grupo, en casa, un telescopio de Kepler.

I. Queremos que los alumnos con la ayuda del profesor puedan montar un telescopio del estilo del que construyó Kepler.

II. Esperamos que con la ayuda del profesor los alumnos puedan construir un telescopio similar al de Kepler, y comprendan su funcionamiento. Esperamos que ellos busquen en internet cómo construirlo.

III. El profesor preguntará a los alumnos si han encontrado en internet información sobre cómo hacerlo. Explicará a los alumnos que han de comprar una lente convergente de dos dioptrías, que es barata y accesible; y que también necesitan un tubo de cartón del mismo diámetro de la lente y de una longitud de algo más de 60 cm, al que han de pegar la lente. El profesor animará a los alumnos a que se sitúen en la posición del esquema y observen las características de la imagen que se ve al mirar a un objeto lejano.

El profesor explicará a los alumnos que, si se quiere ver esa imagen con mayor aumento, se puede mirar dicha imagen a través de una lupa. Les dirá a los alumnos que pueden encontrar lupas baratas de 10 dioptrías en el mercado.

El profesor recordará a los alumnos que para que la lente que se coloca en el la lente ocular funcione como lupa, la imagen obtenida con el lente objetivo debe estar situada entre el foco de la lente ocular y dicha lente.

Explicará a los alumnos que se pueden ajustar las distancias, es decir enfocar, si se monta el ocular en un tubo de diámetro más pequeño que se pueda mover hacia delante y hacia atrás dentro del otro tubo. Es muy importante para obtener una buena visión que los centros de las lentes estén alineados.

Otra ampliación tecnológica de interés en el mundo de la óptica es el microscopio. Históricamente el microscopio supuso un gran avance para el desarrollo de la biología y la medicina, y a día de hoy es de uso diario en laboratorios de todo el mundo.

A.57. Si deseamos ver una imagen real, del mayor tamaño posible, de un objeto pequeño y cercano, ¿qué tipo de lente deberíamos utilizar? Dibuja un esquema que explique la visión de esta situación. Una vez obtenida la imagen aumentada de ese pequeño objeto, ¿cómo podemos verla aumentada aún más?

I. Queremos que los alumnos mediante los trazados gráficos adecuados se den cuenta de que necesitaríamos una lente convergente con una distancia focal grande, que formará la imagen de tamaño mayor que el inicial y en una posición lejana a la lente.

II. Esperamos que con la ayuda del profesor los alumnos se den cuenta del tipo de lente que necesitan para obtener el efecto deseado.

III. El profesor debe ayudar a los alumnos a realizar los diferentes trazados gráficos utilizando lentes de diferente distancia focal.

A.58. Un microscopio consiste en una combinación de dos lentes convergentes: el objetivo, con el que se forma una imagen real aumentada de un pequeño objeto y cercano, y el ocular, que actúa como una lupa para ver aumentada la imagen dada por el objetivo. Realiza un diagrama que explique el funcionamiento de un microscopio y construye uno con las lentes suministradas por el profesor.

I. Queremos que los alumnos, con ayuda del profesor, realicen un trazado gráfico adecuado que represente la trayectoria que sigue la luz para formar la imagen final que proporciona el microscopio.

II. Esperamos que los alumnos comprendan los trazados gráficos que explican la trayectoria seguida por la luz.

III. El profesor proporcionará a los alumnos las lentes adecuadas para poder construir un microscopio, y les ayudará a realizar las observaciones necesarias. El profesor les propondrá el siguiente trazado:

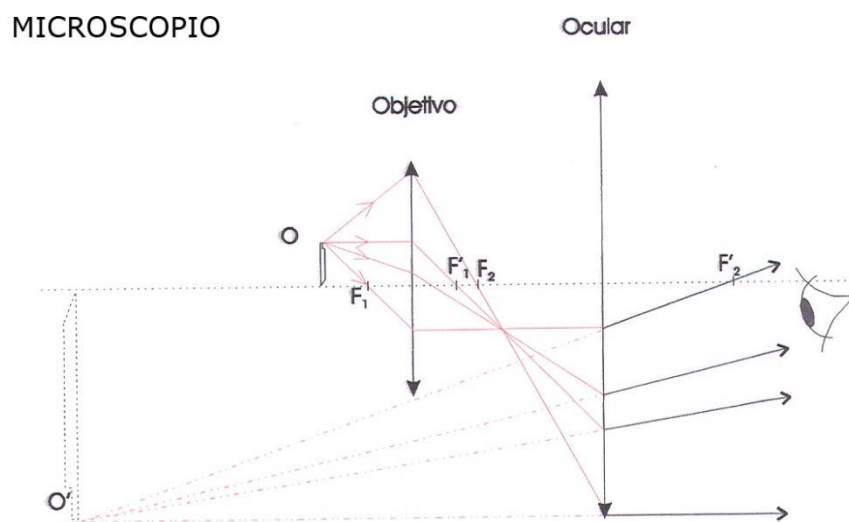


Imagen: Osuna (2007).

A.59. Realiza una recapitulación del tema, resaltando cuál era el problema que hemos abordado, las ideas más importantes introducidas, los límites de aplicación que tiene el modelo de visión de Kepler y los nuevos problemas que podemos abordar después de elaborar un modelo geométrico de comportamiento de la luz en la visión.

I. Queremos que los alumnos recuerden lo que han aprendido a lo largo de la unidad, es decir buscamos que sean conscientes de la construcción de su conocimiento.

II. Esperamos que los alumnos valoren cómo ha evolucionado su conocimiento de la óptica como ciencia de la visión a lo largo de la unidad.

III. El profesor recordará a los alumnos las diferentes actividades que se han ido haciendo a lo largo de la unidad, para favorecer así que los alumnos puedan ser conscientes de lo que sabían y de lo que han aprendido.

A.60. ¿Qué límites de aplicación tiene nuestro modelo de visión?

I. Queremos que los alumnos comprendan que, aunque el modelo de visión que hemos desarrollado ha servido para explicar numerosas situaciones, hay algunas que no se pueden explicar con este modelo. Queremos que los alumnos sean conscientes de la validez relativa de los modelos en ciencia.

II. Esperamos que los alumnos pongan de manifiesto algunas situaciones en las que el modelo de visión que hemos construido no explica lo que se ve. Esperamos que comprendan que los modelos científicos tienen un límite de aplicabilidad.

III. El profesor propondrá situaciones que el modelo de visión construido no pueda explicar. Debe explicar a los alumnos que, en ciencia, la construcción de modelos es necesaria para poder estudiar la realidad, pero es insuficiente con un modelo para abarcar el estudio completo de la realidad. Se han de utilizar diferentes modelos, según sea la porción de la realidad a que nos enfrentamos.

4. Problemas abiertos relacionados con los límites del modelo de visión de Kepler.

Sabemos que existen límites relacionados con las características modelo de visión de Kepler: la necesidad de utilizar lentes delgadas, el hecho de que se formen halos de colores, la propia fisiología del ojo y del cerebro, las llamadas paradojas visuales. A partir de estas cuestiones a las que no podemos dar respuesta, podríamos animar a los alumnos a que se planteasen si nos ayudaría a abordar esos límites saber cuál es la naturaleza de la luz, qué son los colores, cuál sería el límite de resolución del ojo, etc.

I. Queremos que los alumnos sean conscientes de que aún queda todavía mucho por aprender sobre la óptica como ciencia de visión. Sobre todo, en este momento queremos que se pregunten qué es la luz. Intentamos preparar la introducción para la siguiente parte unidad.

II. Esperamos que los alumnos comprendan que el modelo que estamos utilizando tiene límites de aplicación, y por tanto no puede dar respuesta a los interrogantes planteados. Esperamos que los alumnos planteen la necesidad de utilizar otro modelo para explicar los fenómenos que el modelo de visión de Kepler no puede explicar.

III. El profesor debe ayudar a los alumnos a comprender que el modelo utilizado solamente explica una parte de la óptica, y que necesitamos otro modelo que pueda explicar la naturaleza de la luz, para con él poder estudiar más en profundidad otros fenómenos.

Recapitulación de las principales ideas sobre cómo vemos

En nuestra estrategia para comprender cómo vemos, propusimos en un primer tema, encontrar la explicación de la visión, a partir de un modelo basado en el tratamiento geométrico de la luz, sin considerar en ningún momento la naturaleza de la luz. Avanzamos en nuestra estrategia elaborando inicialmente un modelo que explique cómo vemos los objetos al mirarlos directamente. Posteriormente hemos puesto a prueba nuestro modelo al mirar a través de lentes, de agua, al mirar en el espejo, es decir situaciones de visión indirecta. También con el modelo de visión propuesto hemos comprendido y aprendido a corregir las anomalías visuales, y también hemos analizado el comportamiento de algunos instrumentos ópticos. Al analizar las limitaciones del modelo geométrico que hemos elaborado, vamos a estudiar en una segunda parte de la unidad, la naturaleza de la luz.

El modelo de visión que hemos construido está basado en el publicado por el científico y astrónomo Johannes Kepler en 1604, que resumimos a continuación:

- Los objetos que vemos son fuentes secundarias de luz.
- Las fuentes luminosas extensas se pueden considerar como conjuntos de fuentes luminosas puntuales.
- Desde cada fuente puntual se emite un haz esférico de luz. Los rayos (líneas rectas para representar la luz) no son nada de la propia luz, sólo indican los límites del haz de luz que se considere.
- El ojo humano funciona como un sistema óptico formado por una lente convergente y una pantalla.

- Para ver bien, es necesario formar una imagen en la retina.
- Cada punto del objeto emite un haz de luz divergente que, al entrar en el ojo, converge en un punto de la retina. Cada punto de la imagen concentra parte de la luz emitida por cada punto del objeto, por tanto, la forma y el tamaño de la imagen que percibimos es una réplica del objeto que vemos, a escala. En realidad, el llamado “punto” imagen de la retina ocupa la superficie de tres células específicas retinianas (o conos). Cuando la mancha luminosa que se produce en la retina es menor que esa superficie, nuestro ojo la interpreta como un punto imagen; ello supone un límite en la capacidad de resolución de nuestro ojo.
- Para ver bien los objetos cercanos, la lente del cristalino aumenta su curvatura (acomodación) con lo que los haces de luz acaban convergiendo y formando la imagen en esa misma pantalla (la retina).
- La imagen que se forma en un sistema lente convergente-pantalla es real e invertida. Es por tanto necesario la participación del cerebro, conectado con la retina por el nervio óptico, para interpretar la sensación que tenemos de la visión derecha de los objetos.
- Al analizar en profundidad el sistema óptico lente convergente-pantalla, hemos encontrado unos elementos característicos: eje óptico, Foco objeto (F), Foco imagen (F') y Centro óptico de la lente (C). Con ellos podemos realizar el trazado geométrico de los haces de luz que atraviesan la lente y localizar dónde se ha de situar la pantalla para ver la imagen. También hemos desarrollado un algoritmo en conexión con las experiencias de laboratorio: La luz procedente de un punto luminoso situado muy lejos, cuando incide en la lente forma un haz paralelo, que después de atravesar la lente converge en el punto focal imagen F'. De igual modo, si situamos el objeto luminoso en el foco de la lente, después de atravesar la lente sale paralela al eje, no converge.
- A partir de esos elementos característicos de la lente delgada podemos realizar un trazado gráfico del que deducir una expresión matemática que relacione la posición del punto objeto(s), la posición de la pantalla donde vemos su imagen (s'), y la distancia focal de la lente (f'): $\frac{1}{s} + \frac{1}{s'} = \frac{1}{f'}$. Esta expresión es conocida como la ecuación de Gauss para las lentes delgadas. -

- De la misma forma hemos podido deducir que en un sistema lente convergente-pantalla la relación entre el tamaño de la imagen y del objeto está relacionada por la expresión:

$$\beta = \frac{y'}{y} = -\frac{s'}{s}$$

ÓPTICA FÍSICA

En la primera parte del tema de óptica basándonos en el modelo de Kepler, hemos explicado cómo vemos los objetos, tanto al mirarlos directamente como a través de lentes y espejos, etc. Hemos avanzado expresiones de cálculo para determinar las características de las imágenes, hemos explicado las anomalías visuales y la forma de su corrección, incluso hemos podido comprender el funcionamiento de instrumentos que amplían el poder del ojo humano (telescopio y microscopio). Hemos estudiado una serie de fenómenos que podíamos interpretar, explicar y predecir con una serie de conceptos y reglas que hemos ido utilizando para poder explicar la visión tanto directa como indirecta. Estos conceptos que resumimos a continuación se engloban en los manuales de Física dentro de la llamada aproximación de la “Óptica Geométrica”.

- a) La luz emitida por cada punto de las fuentes luminosas se propaga esféricamente. Un haz de luz es parte de la esfera de luz que se propaga y cada rayo es una línea recta que limita cada haz de luz trazado. Estos rayos no se desvían cuando la luz se propaga en el mismo medio. Los rayos no son nada de la propia luz
- b) Los rayos se desvían en los espejos de forma que los ángulos de incidencia y reflexión son iguales
- c) Los rayos se desvían cuando la luz pasa de un medio transparente a otro. La relación entre los ángulos de incidencia y refracción se ajusta a la ley de Snell-Descartes: $n_1 \cdot \sin i = n_2 \cdot \sin r$, donde n es el índice de refracción que nos informa de la capacidad de desviar los rayos cuando pasan a ese medio, siendo para el vacío $n=1$, el valor más pequeño
- d) La luz no es una entidad visible en sí misma

Al elaborar este modelo geométrico del comportamiento de la luz no nos hemos ocupado de cuál es la naturaleza de la propia luz, y al finalizar la parte de la unidad habíamos

planteado algunos límites de este modelo, como, por ejemplo, si se concentra con una lente convergente la luz emitida por una fuente puntual en una pantalla, se pueden ver halos coloreados alrededor de la imagen, y también se ven zonas irisadas cuando miramos un CD iluminado con la luz solar, tampoco se puede explicar el arco iris, etc.

En esta parte de la unidad abordaremos estas cuestiones que nos han quedado sin resolver. Sabemos que existen dos formas de transportar energía de un sitio a otro. Mediante un movimiento de partículas materiales, acompañada de un transporte neto de materia (como es el caso de la energía del viento, de una corriente de agua, etc.) o bien mediante ondas, sin que exista un transporte neto de materia, sino una perturbación que se propaga por un medio dado (como el sonido o las olas en la superficie del mar). ¿A cuál de las dos categorías anteriores pertenece la luz? ¿Es un chorro de partículas lumínicas que salen del foco? O, por el contrario, ¿Se trata de una onda, de una perturbación que se origina en la fuente luminosa y se extiende rápidamente por el medio que la rodea? Ambas hipótesis, corpuscular y ondulatoria, tuvieron a lo largo de la historia periodos de aceptación.

Para contextualizar el tema haremos un breve resumen de la evolución histórica de las Teorías sobre la naturaleza de la luz.

Desde la antigüedad la humanidad se ha interesado en la luz, proponiendo una gran variedad de explicaciones acerca de su naturaleza para poder interpretar lo que sucedía a su alrededor. Fueron de gran importancia los modelos de la visión creados en la época clásica en Grecia. Demócrito creía que de los objetos emanaban unas imágenes ya formadas y que la luz las transportaba hasta nuestros ojos.

Aristóteles elaboró en primer término una teoría de la visión y un modo de describir la naturaleza de la luz. Para Aristóteles el color es especialmente sensible para la visión (On the soul, B´418 a 16-19). Pero la visión no es una sensación bruta y solamente se completa después de un escrutinio mental de la información por la persona que acaba reconociendo el objeto observado. (On the soul, B´418 a 20-24). Por tanto, para Aristóteles, la visión tiene un nivel sensorial y otro psicológico.

Posteriormente, alrededor del año 1000, Alhacen propuso su modelo de la visión que explicaba fenómenos que los anteriores modelos no podían explicar. Consideraba que la

visión era posible gracias a la luz y que los objetos iluminados eran fuentes secundarias de luz que emitían rayos de luz en todas las direcciones. Relacionaba cada punto del objeto con un punto del ojo a partir de la emisión de un rayo que va del objeto al ojo. De este modo explicaba que la imagen del objeto se formara en el ojo.

En el siglo XVII, el astrónomo Kepler propuso su modelo de visión. Consideró que desde cada punto luminoso se proyectaba al exterior una esfera de luz que se expandía. Creía que los rayos luminosos no tienen existencia física real, eran solamente elementos geométricos que muestran la propagación de la luz en línea recta y en todas las direcciones. Fue un gran paso. A partir de Kepler, se desarrollaron de forma más elaborada dos modelos fundamentales sobre la naturaleza de la luz.

Durante el siglo XVII, y hasta comienzos del siglo XX, la teoría corpuscular y la teoría ondulatoria, se fueron alternando en grado de aceptación entre la comunidad científica en función de su capacidad para interpretar los hechos experimentales. También influía el prestigio de los diferentes científicos que las apoyaban. La óptica geométrica, fue desarrollándose al margen de la dicotomía entre modelos sobre la naturaleza de la luz, basándose únicamente en la propagación rectilínea de la luz y las leyes de la reflexión y refracción, pudo explicar cómo se forman las imágenes de los objetos, el mecanismo de la visión y el funcionamiento de muchos instrumentos ópticos.

Según el modelo ondulatorio, formulado por Huygens, la luz se propaga en el éter – sustancia especial que, según se suponía, impregnaba todo el espacio- como ondas esféricas, con una cierta velocidad, que depende del medio. Por tanto, según este modelo, la luz no es algo sustancial que se proyecta desde el foco al exterior, sino una perturbación que se origina en el foco luminoso y se propaga como una onda por los restantes puntos del espacio debido a las vibraciones del éter que todo lo impregna.

Según el modelo corpuscular de la materia, formulado por Newton, la luz estaría formada por partículas de diferentes formas y tamaños de forma que en cada color las partículas serían idénticas entre sí y diferentes a las de los demás colores; la velocidad de las partículas de luz sería diferente según el tipo de partículas y según el medio por el que se propagasen. Estas partículas se emitían por el foco luminoso y se movían siempre en línea recta según las leyes de la mecánica.

La teoría ondulatoria de la luz defendida por Huygens quien consideraba que la luz era una onda longitudinal que se propagaba desde el foco luminoso hasta el observador. Inicialmente este modelo no gozó de mucho éxito, pero esta situación cambió a mediados del siglo XIX, gracias a las experiencias de Young y Fresnel, que solo podían explicarse mediante la teoría ondulatoria. También fueron decisivos los experimentos de Fizeau y Foucault que mostraron que la velocidad de la luz en el agua era menor que en el vacío, un hecho contrario a lo que predecía la teoría corpuscular.

De todos modos, todavía quedaba una grave dificultad para explicar, dentro de la teoría ondulatoria, el hecho de que la luz se propagaba en el vacío había que suponer la existencia de una sustancia hipotética, el éter, que impregna todo el espacio. El éter de acuerdo a los hechos experimentales debía tener unas propiedades muy especiales, ser a la vez muy rígido y muy elástico, y tan tenue que no frenase el movimiento de los astros en su seno.

Esta dificultad se superó a finales del siglo XIX, cuando Maxwell mediante su tratado del electromagnetismo, estableció que la luz era un tipo de onda electromagnética y que, por tanto, podía propagarse perfectamente por el vacío.

Así pues, a principios del siglo XX, la comunidad científica aceptaba que la luz era una onda electromagnética que se propagaba en el vacío con una velocidad aproximada de 300.000Km/s.

A principios del siglo XX Einstein establece un nuevo modelo para explicar la naturaleza de la luz, basado en unas nuevas partículas de energía: los fotones.

Actualmente, el gran físico de nuestro tiempo Richard Feynmann, ha desarrollado el modelo descrito por la electrodinámica cuántica.

En la enseñanza de la naturaleza de la luz los docentes hemos de tener cuidado al utilizar los diferentes modelos científicos, destacando siempre el hecho de que representan ideas completamente diferentes. Hemos de poner verdadero énfasis en el hecho de que los modelos científicos no representan la realidad en sí misma sino ideas o conceptos acerca de la realidad.

Tanto los docentes como las personas que desarrollan los currículos han de tener especial cuidado en evitar un lenguaje que pueda apoyar la construcción de modelos híbridos por parte de los alumnos, puesto que estos modelos dan la sensación a los alumnos de que tienen acceso a la realidad.

Algunos libros de texto refuerzan la idea de que las ondas de luz y los fotones existen en realidad, lo que hace que los alumnos construyan un modelo híbrido de un fotón con características de onda y de partícula.

Los docentes hemos de cambiar el estatus ontológico del fotón, pasando de una sustancia material a un proceso. De este modo, se puede apreciar la teoría actual sobre la naturaleza de la luz, la electrodinámica cuántica. De acuerdo a esta teoría la luz se comporta como partículas que tienen asociada una función de onda de probabilidad para determinar su localización en cualquier lugar. (Feynman, 1985)

Durante el estudio de la óptica geométrica se han intentado explicar fenómenos relacionados con la visión, y el comportamiento de la luz cuando interactúa con otros medios, espejos, lentes, al pasar del aire al agua, etc., sin analizar qué es la luz.

En la aproximación de la óptica geométrica, las longitudes de onda son muy pequeñas en comparación con las dimensiones de los equipos disponibles para su estudio. Por otra parte, las energías de los fotones son muy pequeñas en comparación con la sensibilidad del equipo utilizado. Es decir, dentro de la aproximación de la óptica geométrica, podemos prescindir de consideraciones referentes a la longitud de onda de onda y de la cuantización de la luz en forma de fotones.

Cuando se aplican los principios de la óptica geométrica a lentes gruesas se aprecian los detalles de los experimentos, y se observan fenómenos que se alejan de las explicaciones que es capaz de proporcionar la óptica geométrica. Por ejemplo, la óptica geométrica no explica los halos coloreados al formar las imágenes con las lentes gruesas.

Para explicar estos fenómenos tenemos que conocer cuál es la naturaleza de la luz, qué otros tipos de comportamiento presenta. En este caso, las longitudes de onda ya son comparables a las dimensiones del equipo, y hemos de estudiar el comportamiento de ondas, sin tener en cuenta la aproximación cuántica. Este método se basa en la teoría clásica de la radiación electromagnética.

En el caso de la óptica geométrica, la longitud de onda de la luz visible en comparación con el tamaño de los objetos con los que interacciona, no era relevante.

En temas posteriores estudiaremos otra aproximación más del comportamiento de la luz. Cuando nos encontramos ante longitudes de onda muy cortas, entonces podemos no tener

en cuenta la naturaleza ondulatoria, ya que en este caso la energía de los fotones es muy grande. Entonces las cosas se hacen fáciles de nuevo. La imagen completa, que unifica todo el rango en un único modelo, no la comprenderemos hasta el final.

Hay numerosas referencias en la bibliografía acerca de estudios sobre el pensamiento de los alumnos acerca de fenómenos ópticos. En esta parte de nuestra unidad vamos a centrarnos en los trabajos en los cuales se pone de manifiesto las ideas de los alumnos acerca de la luz como fenómeno físico. Resaltamos a continuación algunos de los estudios que nos han parecido más interesantes:

Guesne (1978) entrevistó a 20 estudiantes de 14 años acerca de la luz y la visión. Los alumnos mostraban la idea de la luz como entidad en movimiento en contextos en los que se veía la imagen especular de la luz de una antorcha.

Anderson and Karrqvist (1983) investigaron la comprensión de la luz y la visión en estudiantes suecos en grados 6-9. La investigación anterior a la instrucción, mostró que aproximadamente un tercio de los alumnos en los grados 6 y 7, tenían el concepto de la luz como entidad que se propagaba en el espacio en presencia de un objeto luminoso, mientras que solamente un 10% mostraban dicha concepción en el caso de un objeto no luminoso.

Ramadas and Driver (1989) descubrieron resultados similares en un artículo a gran escala acerca de las ideas de estudiantes de 13-14 años sobre la luz. Encontraron que los estudiantes previamente a la instrucción atribuían la formación de imágenes en el espejo de objetos no luminosos a la propiedad única de los objetos más que a la propagación de la luz en sí misma. Esto se puede entender si el hecho de ver un objeto no luminoso se considera como una captura y los espejos están dotados de una propiedad única que les permite capturar al objeto.

Bendall, Goldberg and Galili (1993) revelaron que estudiantes universitarios consideraban la luz como una entidad espacial pero no necesariamente dinámica. Las descripciones diagramáticas de los estudiantes dependían de si el sentido de la vista estaba envuelto o no, y las descripciones relacionadas con la vista cambiaban con el objeto (luminoso o no luminoso).

No hay estudios específicos sobre las ideas en óptica de alumnos de 17-18 años, es decir de alumnos de 2º de Bachillerato.

Dedes (2005), encontró que todas las ideas básicas que encontramos en las antiguas teorías de visión se pueden encontrar en las concepciones de los estudiantes también. También hay muchas similitudes en la forma en que los estudiantes comprenden la luz. La mayoría piensan que la luz es una entidad localizada en el espacio, ciertamente parecido a la idea estática de la luz que sostenía Aristóteles. La idea que tienen los estudiantes de que la luz se localiza en las superficies de los cuerpos iluminados era similar a la idea de Alhazen de la luz “fija” en los cuerpos opacos.

Estas investigaciones muestran que los estudiantes ya antes de la instrucción tenían ideas y representaciones en su intento de comprender su experiencia diaria con la luz y la visión. Estas ideas y representaciones no eran completamente compatibles con el modelo formal que se supone que los estudiantes debían de aprender. El problema no es ya que estas ideas previas no se correspondan con las ideas aceptadas en nuestro modelo actual, sino que estas ideas tienen un denominador común: se dota en ellas a los objetos con propiedades *ad hoc*, las cuales les permite llevar a cabo los roles que el pensamiento precientífico les atribuye.

DiSessa (1988) sostiene que *“La física intuitiva consiste en un gran número de fragmentos... muchos de los cuales se pueden entender como simples abstracciones de experiencias comunes que se toman como relativamente primitivas en el sentido de que no necesitan explicaciones: simplemente pasan”* (p. 52) *“¿Cómo vemos la transición del razonamiento del sentido común acerca del mundo físico a la comprensión científica?”* ... *“Mi punto de vista es que la transición hacia la comprensión científica envuelve un mayor cambio estructural hacia la sistematización más que un salto en el contenido”* (p. 49)

El conflicto entre las concepciones individuales y las ideas que queremos que los alumnos comprendan puede emerger como una fuente de dificultad durante y después de la instrucción formal. De hecho, como hemos visto estudios acerca de estudios post-instrucción (Goldberg and McDermott, 1986, 1987; Galili, Bendall and Goldberg, 1993; Ronen and Eylon, 1993; Eylon, Ronen and Langley, 1993; Eylon, Ronen, and Ganiel, 1995), han revelado la persistencia de dificultades en integrar el conocimiento en cuanto a la propagación de la luz.

A.1. Realiza el “*Experimentum crucis*” en el laboratorio y formula una hipótesis sobre qué es la luz “blanca”.

I. Queremos que los alumnos sean conscientes de que hay fenómenos que no hemos explicado en la unidad de óptica geométrica y que necesitan explicación. Pretendemos que los alumnos relacionen experiencias de la vida cotidiana con el fenómeno de la descomposición de la luz blanca, por ejemplo, la formación de halos coloreados en el arco iris, en una mancha de grasa, en un CD, etc.

II. Esperamos que los alumnos después de realizar el experimento formulen la hipótesis de que la luz “blanca” es de naturaleza heterogénea, es decir, está formada por varios tipos de luz, que al incidir en una pantalla nos proporcionan la sensación de ver los colores que conforman el arco iris. Esperamos que comprendan que no es el medio el que modifica la luz blanca (como sostenían algunas teorías en la época de Newton), sino que la función del prisma es la dispersión de estos tipos de luz.

III. El profesor describirá en primer lugar en qué consiste la experiencia de Newton, su “*Experimentum crucis*”. Para ello mediante un proyector y un prisma mostrará como la luz blanca se separa en la mezcla de colores característica del arco iris. El profesor explicará a los alumnos que se puede recoger el “arco iris” a ambos lados del prisma, uno es debido a la refracción y otro a la reflexión interna (más débil). Posteriormente el profesor contará a los alumnos como Newton quiso probar que la luz era una mezcla heterogénea de colores; y por tanto si hacíamos pasar la luz por un prisma que hacía que se descompusiera en la mezcla de colores, y después por otro prisma colocado en dirección contraria de manera que a partir de la mezcla de colores se obtuviera la luz blanca, demostraría que la luz blanca es en sí misma una mezcla heterogénea de colores. El profesor destacará que éste fue un experimento clave para rebatir la hipótesis de que eran los medios los que modificaban la luz, creando los colores. Introducirá a los alumnos el problema histórico de la naturaleza de la luz.

Puesto que la luz “blanca”, es decir la luz que nos llega del sol o de una bombilla, puede considerarse de naturaleza heterogénea, ahora podemos plantearnos las siguientes preguntas: ¿Qué es cada tipo de luz? ¿En qué se distingue un tipo de luz de otra? ¿Cómo se ven los colores?

A.2. El observador ve en las pantallas P1 y P2 círculos iluminados independientemente de que los focos F1 y F2, cuyas luces se cruzan en el espacio, se enciendan simultáneamente, o de uno en uno. Este fenómeno ocurre con cualquier tipo de luz que sea emitida por los focos. Formula una hipótesis sobre la naturaleza de la luz que explique que los haces de luz se crucen sin producir perturbación en la mancha que se ve en las pantallas.

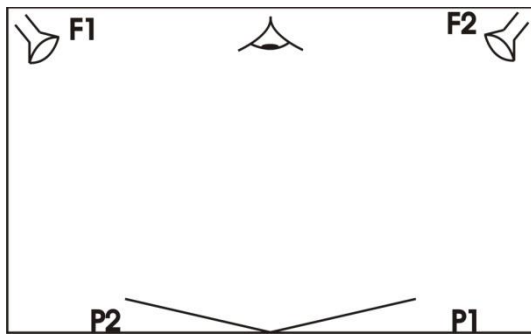


Imagen: Elaboración propia.

¿Qué puede ser la luz para que se cruce sin perturbarse?

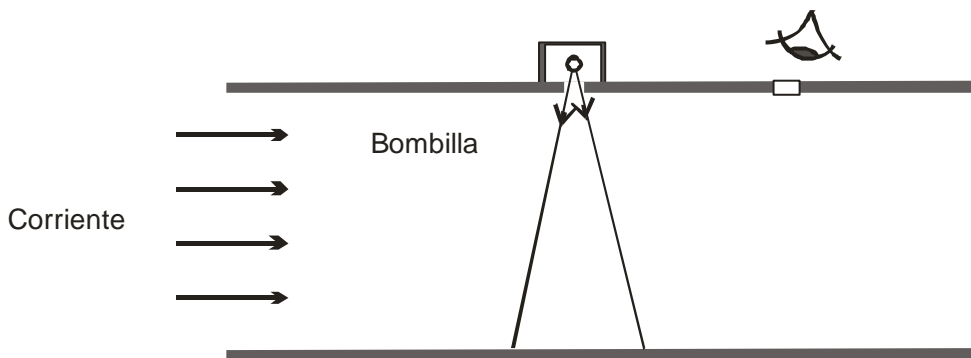
I. Con esta actividad pretendemos que los alumnos lleguen a la conclusión de que la luz no puede ser de naturaleza corpuscular, es decir material, porque si no al cruzarse las partículas chocarían y de alguna manera se desviarían afectando al patrón de luces que se vería en cada caso. Esperamos que un porcentaje apreciable de alumnos sostengan una concepción material de la luz.

III. El profesor inducirá a los alumnos a reflexionar para que lleguen por sí mismos a la conclusión de que la luz no puede consistir en partículas materiales. Ayudará a los alumnos recordándoles qué otros fenómenos en los que se intercambia energía suceden sin transporte de materia. Intentará que los alumnos recuerden las características principales del movimiento ondulatorio que habían estudiado previamente.

A.3. A pesar de la hipótesis ondulatoria que formuló Christiaan Huygens (1629-1695) sobre la naturaleza de la luz, muchas personas pensaban y siguen pensando en la luz como algo material. Si la luz consistiera en algo material emitido por las fuentes, ¿qué fenómenos cabría esperar como consecuencia de esta concepción?

A. 3. (Alternativa) En el exterior de una tubería hay dos ventanas transparentes. Por una de ellas, una lámpara deja pasar un haz divergente de luz como el dibujado en el esquema. Por la otra ventana, un observador puede ver la zona iluminada en la pared opuesta de la tubería, tanto si está llena de agua como llena de aire. Con una potente bomba, situada en el extremo izquierdo, podemos hacer que circule agua o aire por la tubería de forma muy rápida y sin turbulencias.

En ningún momento el haz de la luz que atraviesa la tubería pasa del aire al agua o viceversa, sino que se propaga en un único medio, o en el aire o en el agua. (Basado en Osuna 2003.2008).



¿Qué ocurrirá con la posición de la mancha luminosa que vemos en la pared de la tubería? Señala la opción que creas correcta:

- Tanto la corriente de aire como la corriente de agua hacen que la mancha luminosa que veíamos antes de iniciarse el movimiento del medio se desplace de su posición original
- La corriente de aire no hace que se desplace la mancha luminosa pero la corriente de agua sí
- Ni la corriente de aire ni la corriente de agua hacen que se desplace la mancha luminosa
- La luz está formada por un tipo de materia tan sutil que no se arrastra por la corriente de aire ni por la de agua, pero sí por otro tipo de materia más densa
- Otra respuesta:

Argumenta la opción elegida.

I. Queremos comprobar si algunos alumnos siguen teniendo la idea de que la luz pueda estar formada por pequeños corpúsculos, es decir, si siguen manteniendo una concepción materialista de la luz.

II. Esperamos que la mayoría de alumnos conteste que la sombra no sería modificada por la corriente de aire o agua. Creemos que con esta actividad se pone de manifiesto que la luz no puede ser de naturaleza corpuscular. Esperamos, por tanto, que los alumnos acepten en su esquema de pensamiento como hipótesis de trabajo que la luz tiene carácter ondulatorio.

III: El profesor debe de explicar a los alumnos el largo e intenso debate que se produjo en la comunidad científica a lo largo de muchos siglos acerca de si la luz estaba formada por algún tipo de materia o no. Debe de aclarar a los alumnos que la sombra no se modificaría, porque el agua y el aire no interaccionan con la luz, ya que la luz no es material.

Consideramos por tanto que la hipótesis sobre la naturaleza ondulatoria de la luz, es razonable, y por tanto vamos a proponer un índice a modo de estrategia para contrastarla. Este será el índice de la segunda parte de nuestra unidad didáctica.

ÍNDICE DE LA U. D. ¿Cuál es la naturaleza de la luz?

1. ¿Es el comportamiento de la luz de naturaleza ondulatoria?

1.1. ¿Qué fenómenos confirman esta hipótesis?

1.1.1 Interferencia de ondas lumínicas

1.1.2. Difracción de ondas lumínicas

1.1.3. Atenuación de ondas lumínicas

1.1.4. Velocidad de las ondas lumínicas. La luz no es instantánea.

1.1.5. Refracción de las ondas lumínicas.

1.1.6. Reflexión de las ondas lumínicas.

1.2. ¿Cómo se produce la luz? ¿Cómo se propaga la luz? ¿Qué es lo que se propaga?

2. Puesta a prueba del Modelo Ondulatorio para la luz.

2.1. Si la luz es una onda electromagnética ¿cómo podemos producirlas? el espectro electromagnético

2.2. ¿Podemos explicar el comportamiento geométrico de la luz que hemos estudiado?

2.3. ¿Podemos explicar la visión del color?

3. Recapitulación y nuevos problemas. Límites de nuestro modelo ondulatorio de la luz.

1. ¿Es el comportamiento de la luz de naturaleza ondulatoria?

1.1. ¿Qué fenómenos confirman esta hipótesis?

1.1.1. Interferencia de ondas lumínicas.

Hemos propuesto como hipótesis de trabajo la naturaleza ondulatoria de la luz. Tenemos por tanto que comprobar si la luz se comporta como lo harían las ondas.

A.4. Una de las propiedades características y más fascinantes de las ondas es su capacidad para la producción de interferencias bajo determinadas condiciones. Diseña una experiencia para poder probar si la luz produce interferencias.

I. Queremos que los alumnos se vayan familiarizando con las propiedades de las ondas. Podemos recordar la interferencia que se producen entre ondas en el agua. Los alumnos realizarán un montaje parecido al que diseñó Young y creemos que comprenderán los resultados de la experiencia.

II. Esperamos que los alumnos recuerden las características de las ondas estudiadas previamente, la interferencia, la difracción, la atenuación, etc.

III. El profesor explicará la necesidad de la utilización de luz de un solo tipo, es decir de una sola frecuencia, de un solo color. Recordará la necesidad de la utilización de focos coherentes, para que la luz que sale del foco lo haga con la misma fase. Es por ello necesario la utilización de luz láser, que cumple todos los requisitos. El profesor explicará que cuando dos ondas luminosas procedentes de dos focos coherentes coinciden en un punto P dado, se observa experimentalmente, que la intensidad resultante puede ser mayor o menor que la de cualquiera de las dos. A este efecto se le denomina interferencia luminosa, constructiva en el primer caso y destructiva en el segundo. El profesor propondrá a los alumnos realizar un montaje parecido al montaje que diseñó Young de doble rendija. Explicará que se requieren rendijas estrechas para que se puedan apreciar los fenómenos de interferencia. Una forma sencilla de estudiar las interferencias luminosas es utilizar monocromática (un solo color y, por tanto, una sola longitud de onda) que se hace pasar a través de dos pequeñas rendijas. De esta forma, de acuerdo con

el principio de Huygens, se consigue que esas dos rendijas se comporten como dos focos coherentes (lo único que hacen es separa el haz de luz original en dos haces idénticos). Las franjas brillantes son el resultado de interferencias constructivas y las oscuras corresponden a interferencias destructivas. Mediante la teoría corpuscular no se podría explicar este patrón, sino que las partículas de luz reproducirían en la pantalla las rendijas mediante dos franjas igualmente brillantes.

1.1.2. Difracción de ondas lumínicas.

A.5. Otra de las características específicas de las ondas es la de bordear obstáculos. Diseña una experiencia para comprobar si la luz tiene la capacidad de difractarse, es decir de bordear obstáculos.

I. Queremos conseguir que los alumnos comprueben la difracción de la luz, y sean conscientes de que este fenómeno es propio de las ondas.

II. Es necesario que los alumnos comprendan que la fuente de luz utilizada tiene que ser puntual, o al menos tener focos coherentes de luz, es decir, conseguir que los átomos que producen la luz vibren con la misma frecuencia.

III. El profesor realizará con los alumnos el experimento de Henri Poisson (1877-1963). Expondrá una breve introducción histórica acerca de la importancia que tuvo este experimento para la aceptación del modelo de la naturaleza ondulatoria de la luz. Explicará a los alumnos la necesidad de utilizar un haz de luz coherente y monocromática, es decir, un solo tipo de luz, un láser. El profesor explicará a los alumnos que la única manera de dar un sentido a que se vea luz en el centro de la sombra circular, es que la luz se ha doblado en los bordes de la chincheta. La luz que parte de cada punto del borde de la moneda recorre el mismo camino hasta el centro de la sombra, por tanto, la luz que parte de cada punto del borde de la moneda llegará con la misma fase al punto del centro de la sombra, lo que provocará una interferencia constructiva, es decir, ¡luz en el centro de una sombra!

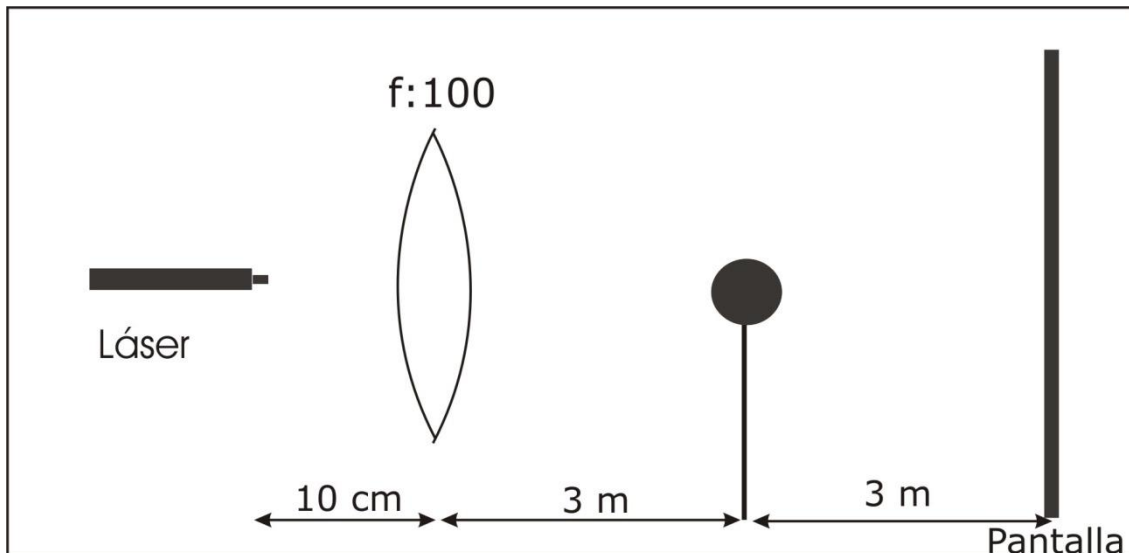


Imagen: Elaboración propia.

Encontraremos luz en el centro del círculo en sombra.

1.1.3. Atenuación de las ondas lumínicas.

A.6. Si la luz fuese de naturaleza ondulatoria, ¿qué cabría esperar de la intensidad luminosa que se mediría a diferentes distancias de la fuente? Propón una experiencia para comprobar tu hipótesis.

I. Queremos que los alumnos comprueben si las ondas lumínicas cumplen las características propias de las ondas. En este caso queremos comprobar que la luz se atenúa con la distancia, es decir pierde intensidad al alejarnos del foco.

II. Esperamos que los alumnos recuerden que, una fuente puntual de luz emite luz en todas las direcciones. Por tanto, la luz se repartirá en una esfera centrada en el foco emisor. Cuanto más se aleje la luz del foco emisor, esta esfera será mayor. Por tanto, la luz se tiene que repartir sobre una superficie cada vez mayor, por lo que cuanto más nos alejemos del foco emisor, la Intensidad que midamos será cada vez menor.

III. El profesor explicará que la Intensidad de la luz, dado que la luz se reparte en una esfera centrada en el foco emisor, será proporcional a la inversa del radio de la esfera al cuadrado. I proporcional a $1/r^2$. De manera opcional, el profesor propondrá la utilización

de una sonda que mide la Intensidad de la luz. Mediremos entonces la Intensidad de luz que llega a la sonda, procedente de una bombilla, a diferentes distancias. Posteriormente elaboraremos una gráfica de la I frente a $1/r^2$. Nos ha de salir una línea recta. El profesor procurará que las condiciones sean lo más idóneas posible, que no haya fuentes de luz (a parte de la bombilla que queremos utilizar).

1.1.4. Velocidad de las ondas lumínicas. La luz no es instantánea.

A.7. El tema de la velocidad de la luz ha sido una fuente de controversia a lo largo de la historia. Si, de acuerdo a nuestra hipótesis, la luz es una onda, ha de tener cierta velocidad de propagación, es decir, tardaría un tiempo en llegar desde un punto a otro. ¿Cómo podrías medir la velocidad de la luz? ¿Qué dificultades te encontrarías?

A.7.1. Lee y comenta la siguiente historia sobre el problema de la medición de la velocidad de la luz.

A principios del siglo XVII muchos científicos pensaban que la luz podía viajar cualquier distancia en forma instantánea. Galileo Galilei (1564-1642) no opinaba lo mismo y diseñó un experimento para poder medir la velocidad de la luz: él y su asistente se colocaron en la cima de montañas a una milla de distancia y tomaron cada uno una lámpara con rejillas. Galileo abría la rejilla de su lámpara y el asistente debía abrir la suya tan pronto como viera la luz de la lámpara de Galileo. Entonces, Galileo podría calcular cuánto tiempo habría pasado antes de que él viera la luz de su asistente desde la montaña, y así podría calcular la velocidad de la luz dividiendo la distancia por el tiempo medido para. El experimento no funcionó, porque la velocidad de la luz es demasiado rápida para ser medida de esta forma. Tardaría muy poco tiempo, unos 0,000005 segundos en viajar esa distancia y, por tanto, era imposible que Galileo pudiera medir ese intervalo con los instrumentos que estaba utilizando.

Es necesario por tanto una distancia realmente grande, millones de kilómetros para poder medir la velocidad de la luz.

¿Cómo sería posible que alguien realizase un experimento así?

Durante la década de 1670, el astrónomo danés, Ole Roëmer (1644-1710), realizaba observaciones muy cuidadosas de Io, una de las lunas de Júpiter, que completa una órbita cada 1.76 días. Puesto que este tiempo ha de ser siempre es igual, Roëmer esperaba que su movimiento se pudiese predecir con gran precisión. Descubrió, sin embargo, que la luna no siempre aparecía donde él; si no que en determinados períodos del año parecía estar adelantada en su horario y en otros atrasada.

Roëmer se preguntó ¿por qué orbitaría más rápido en ciertos momentos del año y más lentamente en otros? Roëmer observó que Io parecía adelantarse cuando la tierra estaba más cerca de Júpiter y atrasarse cuando la Tierra estaba más lejos. Imaginó que tendría relación con la velocidad de la luz; si la luz no viaja infinitamente rápido, entonces tardará tiempo en viajar desde Júpiter a la Tierra. Cuando se observa Júpiter a través de un telescopio, lo que realmente se ve es la luz que salió tiempo atrás, en el pasado. Por tanto, cuando Júpiter está más lejos, la luz tardará más tiempo en llegar a la Tierra, de forma que Roëmer estaba viendo como era Io un poco más temprano que usualmente. Y lo opuesto ocurría cuando Júpiter y la Tierra estaban más cerca. Así que Roemer se dio cuenta de que Io no estaba cambiando su órbita en absoluto; simplemente parecía estar en diferentes lugares dependiendo de cuánto tiempo le tomara a su luz llegar a la Tierra.

Conociendo la aparente variación en el ritmo de la órbita de Io y sabiendo cuánto varía la distancia entre la Tierra y Júpiter a lo largo del año, Roëmer pudo calcular el valor de la velocidad de la luz.

A medida que se desarrollaban mejores equipos y tecnologías, se pudo medir la velocidad de la luz con mayor precisión. Actualmente se puede medir con un increíble nivel de precisión. Desde la Tierra se puede apuntar un láser a un espejo que los astronautas situaron en una roca de la luna, y medir el tiempo que tarda un pulso de láser en llegar y volver, siendo este tiempo cerca de dos segundos y medio. La idea tras este experimento no es tan diferente de la que propuso Galileo.

Anexo: ¿Cómo midió Roëmer la velocidad de la luz?

Método de Roëmer para determinar la velocidad de propagación de la luz en el vacío.

El radio de la órbita del planeta Júpiter alrededor del Sol es unas cinco veces mayor que el radio del planeta Tierra y, tiene un período de poco menos de 12 años. Por tanto, la Tierra se encuentra, en algunos momentos, más cerca de Júpiter que en otros.

En las proximidades de Júpiter, con un telescopio de aficionado se pueden distinguir cuatro puntos brillantes que se ocultan detrás del planeta cada cierto tiempo. Galileo concluyó que se trataba de “lunas” con giro alrededor del planeta, es decir eran satélites de Júpiter, y sus nombres son: Io, Europa, Ganímedes y Calisto. Actualmente se conocen otros dieciséis satélites, aunque los descubiertos por Galileo eran los de mayor tamaño.

Cuando la Tierra está situada en su posición más cercana a Júpiter (T_1 y J_1), los eclipses de Ganímedes suceden cada 7'155 días (7 días, 3 h, 43 min. y 12 s). Es decir, tras 25 eclipses, habrán transcurrido 178'875 días (casi, medio año), y la Tierra se encontrará, aproximadamente, en la posición opuesta de su órbita, T_2 ; y Júpiter, que apenas se ha desplazado 15° , se encontrará en J_2 .

Sin embargo, si el eclipse cuando los planetas están en T_1 y J_1 se produce el día 1 a las 0 h, entonces el eclipse número 25 de ese satélite se produce 178'875 días después, cuando los planetas se encuentren en T_2 y J_2 . Desde la Tierra en esta posición, se observa un retraso de 16'6 minutos, es decir el eclipse que debía producirse a las 21 horas del día 178, ocurre, en realidad a las 21 h y 16'6 min. del día 178.

¿A qué podría ser debido ese retraso?

Roemer interpretó el retraso considerando que la velocidad de la luz no es infinita, es decir no se propaga instantáneamente y, por tanto, cuando se observa el eclipse desde T_1 el fenómeno se percibe con un retraso Δt , y cuando se observa desde T_2 con un retraso, $\Delta t'$. Desde luego el retraso será tanto mayor cuanto mayor sea la separación entre los Júpiter y la Tierra. En el segundo caso, la distancia mayor recorrida por la luz es aproximadamente el diámetro de la órbita terrestre, unos 10^8 km. Puesto que desde T_2 el eclipse se observa 16'6 min (1000 s) más tarde que desde T_1 $c = \frac{3 \cdot 10^8 \text{ km}}{1000 \text{ s}} = 300.000 \frac{\text{km}}{\text{s}}$ [OBJ].

Cuando Roëmer hizo este cálculo, el valor del diámetro de la Tierra era considerado algo menor que el actual, por lo que se obtuvo un valor para la velocidad de propagación de la luz en el vacío de unos 220.000 km/s. Aunque no fue un valor exacto, si daba idea de la magnitud de la velocidad de la luz.

El resultado no fue aceptado por la comunidad científica hasta que cincuenta años después, Bradley, interpretó bajo el supuesto de la no propagación instantánea de la luz otros fenómenos astronómicos.

I. Queremos que los alumnos comprendan la magnitud de la velocidad de la luz, que destierren la antigua idea de que la luz viaja de un sitio a otro instantáneamente. Queremos que comprendan que la medición de la velocidad de la luz en el aire y en el agua fue un experimento crucial para decidir entre la teoría corpuscular de Newton y la teoría de los pulsos de luz de Huygens. Pero antes de este experimento fue necesario establecer la cuestión fundamental: ¿Es finita o infinita la velocidad de la luz? Galileo discutió este problema en su libro “Dos nuevas ciencias”. Pero con sus experiencias cotidianas, no pudo estimar un valor definido para la luz, aunque llegó a la conclusión de que la velocidad de la luz probablemente no era infinita.

II. Inicialmente esperamos que los alumnos propongan una experiencia parecida a la que en su día propuso Galileo. El profesor explicará la imposibilidad de poder medir de ese modo la velocidad de la luz, dado que el tiempo de respuesta del ser humano es muchísimo más grande que el tiempo que tardaría la luz en llegar de un punto a otro. El profesor reforzará la idea de la necesidad de grandes distancias, distancias astronómicas para poder medir la velocidad de la luz.

III. El profesor destacará las enormes dificultades que hubo que superar a lo largo de la historia para lograr medir la velocidad de la luz. El profesor remarcará que el hecho de que la velocidad de la luz no fuera instantánea, apoyaba la hipótesis ondulatoria de la luz, que poco a poco se iba afianzando entre la comunidad científica. Comentaré que la evidencia definitiva de que la luz se mueve a una velocidad finita fue obtenida por el astrónomo danés, Olaf Roëmer en 1676, midiendo las diferencias de tiempo en el eclipse del satélite de Júpiter (la lectura que hemos hecho). Roëmer explicó que el retraso del eclipse era debido simplemente al hecho de que la luz de Júpiter tarda más o menos tiempo en alcanzar la tierra según las posiciones relativas de Júpiter y la Tierra sus órbitas. Comparando los tiempos de los eclipses observados en diversos puntos de la órbita de la Tierra, llegó a la conclusión de que la luz tardaba 22 minutos en cruzarla. Huygens utilizó los datos de Roëmer para hacer una estimación de la velocidad de la luz llegando al dato de 2×10^8 . Aunque el valor actualmente aceptado es de 3×10^8 , la importancia fundamental

fue establecer que la propagación de la luz en el espacio libre no es instantánea, sino que exige un tiempo finito.

1.1.5. Refracción de las ondas lumínicas.

El profesor recordará que en el “Experimentum crucis” de Newton, realizado mediante un proyector y un prisma, la luz blanca se separa en la mezcla de colores característica del arco iris. El profesor explicará a los alumnos que se puede recoger el “arco iris” a ambos lados del prisma, uno es debido a la refracción y otro a la reflexión interna (más débil).

En el tema de ondas hemos estudiado la refracción de un frente de ondas plano, y hemos obtenido una relación entre los ángulos de incidencia y las velocidades de propagación de las ondas en ambos medios. Igualmente, en la primera parte del tema de óptica, hemos estudiado una relación entre los ángulos de incidencia y refracción de la luz con lo que hemos llamado “índice de refracción del material.

A.8. Revisa estas expresiones para la refracción de las ondas y de los rayos luminosos y busca un significado físico al índice de refracción.

I. Queremos conseguir que los alumnos piensen que si la luz “blanca” se dispersa cuando atraviesa un prisma, es porque se trata de una mezcla de diferentes tipos de ondas, con un poder refractivo diferente. Por tanto, a partir de ahora, queremos que los alumnos comprendan que el índice de refracción de un material es diferente para cada tipo de luz, es decir, para cada frecuencia de vibración. Así, como en el sonido cada tono se corresponde con un tipo de onda sonora de una frecuencia determinada, podemos pensar que cada tipo de luz se corresponde con un tipo de onda lumínica de una frecuencia.

III. El profesor recordará a los alumnos la expresión que habíamos encontrado para la refracción de las ondas:

$$\text{Sen } i / \text{Sen } r = v_2 / v_1$$

Y para el caso de la refracción de las ondas lumínicas:

$$\text{Sen } i / \text{Sen } r = n$$

Ayudará a los alumnos a llegar a la conclusión de que el índice de refracción de un medio es la relación entre la velocidad de la luz en el aire (vacío) y la velocidad de la luz en dicho medio. Les comentará que el índice de refracción siempre tiene que ser mayor que uno y que será tanto mayor cuanto menos sea la velocidad de la luz en el medio.

El profesor explicará a los alumnos que este tema estuvo en el centro de la dicotomía teoría ondulatoria-corporcular del siglo XVIII y XIX. Newton creía que la velocidad de la luz tenía que ser mayor en el agua. Cuando Hippolyte Fizeau (1819-1896) pudo medir que la velocidad de la luz era menor en el agua que en el aire, la comunidad científica se decantó finalmente por la teoría ondulatoria.

El profesor explicará a los alumnos que el índice de refracción es diferente para cada uno de “los colores”, ya que es función de la frecuencia de la onda. En el caso de la dispersión de la luz blanca por un prisma, hemos visto que la luz violeta se refracta más que la roja. El profesor propondrá el siguiente trazado explicativo:

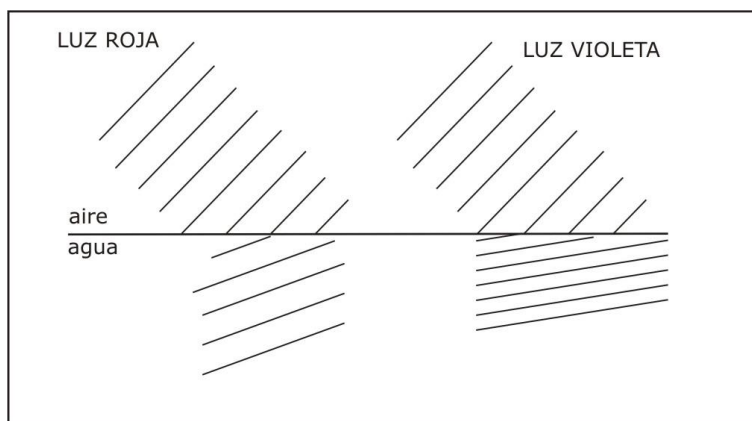


Imagen: Elaboración propia.

El profesor explicará a los alumnos que debido a que la velocidad de las ondas cambia al pasar la luz de un medio a otro, la longitud de

la onda también se ve influida (la frecuencia es constante). Por tanto, se observa que, en el caso del rojo, cuyo índice de refracción es menor, es decir la modificación de la velocidad es menor y por tanto la variación en la longitud de onda será pequeña. En el caso del violeta, cuyo índice de refracción es mayor, la variación de la velocidad al pasar al agua será mayor y por tanto la variación en la longitud de onda será mayor. Por tanto, la longitud de onda del rojo varía poco al pasar del aire al agua, mientras que la longitud

de onda del violeta varía más, haciéndose más pequeña. (Si la frecuencia no varía y la velocidad de la onda disminuye, la longitud de onda tiene que disminuir).

A.9. Haciendo uso del significado físico del índice de refracción $n = c/v$, interpreta el fenómeno de la dispersión de la luz blanca que hemos estudiado al principio de la unidad.

I. Queremos que los alumnos comprendan cual es la naturaleza del fenómeno de refracción que habíamos estudiado previamente en óptica geométrica y que ahora vamos a estudiar desde otro punto de vista.

III. El profesor explicará que la trayectoria seguida por la luz al refractarse a través de los medios transparentes puede entenderse, en términos de sus causas, investigando las interacciones de las ondas luminosas y los fotones con las moléculas que componen esos medios. Para comprender lo anterior necesitamos saber por qué la luz se desacelera en los medios transparentes como el vidrio o el agua. La rapidez de la luz es una constante de la naturaleza, en el vacío es una constante de 3×10^8 m/s. La luz tiene una velocidad menor en el agua, solamente un 75% de la velocidad en el vacío, y en un diamante solamente 41%. Cuando la luz emerge de estos medios, viaja de nuevo a su rapidez original. Pero parece un comportamiento extraño desde el punto de vista de la energía. Por ejemplo, si se dispara una bala a través de una tabla, aquella se frena al pasar a través de ésta y sale con menor rapidez; pierde algo de su energía cinética al interactuar con las fibras y astillas de madera que constituyen el material de la tabla. Evidentemente, quedaríamos sorprendidos si, después de haber sido frenada por la tabla, la bala saliera con una rapidez igual a la original. Sin embargo, esto es lo que en apariencia sucede en el caso de la luz. Un haz de luz incide sobre un vidrio con rapidez c . En su mayor parte el vidrio está compuesto de átomos de silicio, con nubes de electrones que con facilidad son forzados a vibrar cubriendo el intervalo completo de las frecuencias visibles. Si la luz incidente es absorbida, las nubes de electrones se ponen a vibrar con una frecuencia igual a la luz absorbida. Los electrones vibrantes, a su vez, emiten luz por su cuenta, a la misma frecuencia. Esta luz es menos intensa debido a que parte de la luz incidente fue absorbida y convertida en calor durante el proceso y lo más importante, no ha recorrido tanta distancia como la que habría cubierto la luz incidente no perturbada en el mismo tiempo. ¿Por qué? Porque el proceso de absorción/reemisión no es instantáneo; se requiere cierto

tiempo para que se realice y, como resultado, la rapidez promedio de la luz a través del vidrio es menor que c . Esto no contradice la máxima de que la rapidez de la luz es una constante de la naturaleza porque la rapidez instantánea de la luz entre los átomos es todavía c . Cuando se habla de la velocidad de la luz en los medios transparentes se hace referencia a la rapidez promedio, que toma en consideración el retraso asociado al proceso de absorción y reemisión. Por tanto, a diferencia de la bala que pasa a través de la tabla, la luz no “horada” el vidrio.

Posteriormente el profesor explicará a los alumnos que cada uno de los “colores” es una onda de una frecuencia característica y que se moverá en el vidrio con una velocidad determinada. Es por eso que los diferentes “colores” recorren caminos distintos al atravesar un prisma.

1.1.6. Reflexión de las ondas lumínicas.

A.10. ¿Cómo explicarías la reflexión de la luz teniendo en cuenta que la luz es una onda?

III. El profesor explicará a los alumnos qué es en realidad el fenómeno de reflexión a escala atómica: Cuando se ilumina un objeto con luz procedente del Sol o de una lámpara, se establece una vibración electrónica generalizada en los estados normales de energía de los átomos del objeto. Nubes completas de electrones vibran como respuesta a los campos eléctricos oscilantes de la luz que reciben. Son estas diminutas vibraciones electrónicas las que reemiten la luz, gracias a la cual vemos dicho objeto. Pongamos por ejemplo que se está iluminando una página, si se la ilumina con luz blanca, se ve blanca, lo cual revela el hecho de que los electrones se han puesto a vibrar en todas las frecuencias visibles (el profesor recordará a los alumnos que la luz blanca está compuesta por una mezcla de colores, es decir ondas EM de diferente frecuencia). La página blanca tiene muy poca absorción. Lo que ocurre con la tinta de la página es diferente; excepto por una pequeña reflexión, absorbe todas las frecuencias visibles y por ello se ve negra.

Por lo tanto, en las superficies de todos los objetos que nos rodean, las nubes electrónicas de los átomos experimentan ligeras vibraciones al recibir la influencia de la luz que los

ilumina. Estas diminutas vibraciones, que cubren diversos intervalos de frecuencia, emiten los diferentes colores de luz debido a la cual vemos los objetos. En pocas palabras, decimos que los vemos en virtud de la luz que reflejan.

Todos sabemos que normalmente la luz viaja en línea recta. Al ir de un lugar a otro, la luz sigue la trayectoria más eficiente y viaja en línea recta. Esto es cierto si nada obstruye el paso de la luz entre ambos lugares. Si la luz es reflejada por un espejo, el cambio de dirección en la trayectoria, que de lo contrario sería recta, se describe por medio de una fórmula sencilla. Esta fórmula sencilla está basada en el *principio de tiempo mínimo*, planteado por Pierre Fermat (1607-1655) hacia el año 1650. El planteamiento es el siguiente: “de todas las trayectorias posibles que la luz podría seguir para ir de un punto a otro sigue aquella que requiere menos tiempo”.

1.2. ¿Cómo se produce la luz? ¿Cómo se propaga?

A.11. Conocemos muchas situaciones en las que los objetos emiten luz: una brasa, un hierro muy caliente, el filamento de una lámpara de incandescencia, etc. Sabiendo que los átomos de la materia están formados por cargas eléctricas (electrones y protones), formula una hipótesis que explique la emisión de luz.

I. Queremos que los alumnos relacionen las ideas que tengan de cursos anteriores y de su vida cotidiana con la producción de luz. Los alumnos pueden relacionar el golpe del martillo, con una fuerza que se realiza sobre el metal y pueden imaginar que dicha fuerza producirá una aceleración de las cargas eléctricas (los electrones, que son las partículas que se pueden mover, pues sabemos que los protones están en el interior del núcleo y no se mueven, salvo en reacciones nucleares).

III. El profesor intentará que los alumnos lleguen a la conclusión de que dicha aceleración de las cargas debido al golpe con el martillo producirá la emisión de luz. El profesor recordará a los alumnos que una carga eléctrica en reposo produce un campo eléctrico constante. Pero una carga que ha sido desplazada de su posición de equilibrio por una fuerza, intenta volver a su posición produciendo una oscilación, y esa carga oscilante producirá un campo eléctrico oscilante que se propaga oscilando por el espacio. A lo largo

del curso también hemos estudiado que una carga eléctrica que se mueve produce un campo magnético. Esa oscilación de la carga eléctrica producirá por tanto un campo magnético oscilante. Esa variación del campo eléctrico y magnético que se propagan por el espacio, es una onda electromagnética, formada por un campo eléctrico y otro magnético que vibran en direcciones perpendiculares entre sí, y perpendicular así mismo a la dirección de propagación de la luz. Decimos que la luz es una onda electromagnética.

2. Puesta a prueba del modelo ondulatorio.

Ahora tenemos que poner a prueba la capacidad explicativa de nuestro modelo de la luz como radiación electromagnética. Para ello vamos a intentar explicar teniendo en cuenta que la luz es una onda electromagnética, diferentes fenómenos como la producción de la radiación electromagnética, el espectro electromagnético, el comportamiento geométrico de la luz y la visión del color

Con lo aprendido hasta ahora, debemos representar la luz como una onda, es decir como una sucesión de frentes de onda (puntos del espacio que están en fase), y a partir de esta representación intentar explicar los fenómenos estudiados en la óptica geométrica. Si nos basamos en un modelo de emisión de luz por fuentes puntuales, y nos situamos suficientemente lejos del foco emisor, podemos considerar el frente de ondas plano.

2.1. Si la luz es una onda electromagnética, ¿Cómo podemos producirla?

A.12. Realiza una síntesis de la siguiente lectura acerca de las ideas de Maxwell sobre la producción de ondas electromagnéticas. Explica con tus palabras y dibuja una onda electromagnética.

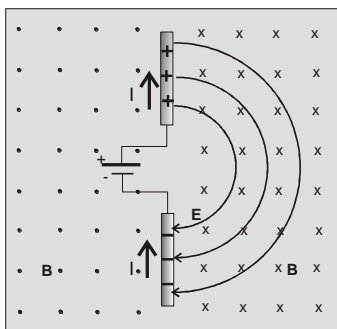


Imagen: Elaboración propia.

Maxwell, para argumentar la relación entre la producción y emisión de luz y la variación de los campos eléctricos y magnéticos cuando las cargas eléctricas vibran o se aceleran, imaginó un dispositivo con dos varillas metálicas que se pueden conectar a una batería según el esquema del margen. Al cerrar el interruptor, durante un breve período de tiempo, circula una corriente que hace que la varilla superior se carga con carga positiva y la inferior con carga negativa. Se crea, por tanto, un campo eléctrico \vec{E} cuyas líneas de fuerza van de la varilla con carga \oplus a la varilla con carga \ominus . Mientras dura esta corriente (de intensidad variable) también se genera un campo magnético (variable), cuyas líneas de fuerza son circulares alrededor de las varillas y que en el plano del papel están señaladas con puntos y cruces, según el sentido del vector \vec{B} sea saliente o entrante en ese plano. En resumen, al cerrar el interruptor, en el espacio circundante a las varillas se crea un campo electromagnético, de tal forma que los vectores \vec{E} y \vec{B} son perpendiculares en todos los puntos del espacio.

Pero, ¿hasta dónde se extiende ese campo electromagnético? ¿Es instantánea la propagación de ese campo por el espacio? Maxwell planteó estos interrogantes que se revelaron de enorme importancia.

En el caso de la situación planteada anteriormente, pronto se cargan ambas varillas y desaparece la intensidad de corriente por ellas, por lo que también desaparece pronto el campo magnético. La situación es, a partir de ese momento, estática: el valor del campo eléctrico es constante en cada punto y alcanza todos los puntos del espacio con diferente intensidad, hasta el infinito y el valor del campo magnético es cero.

Si deseamos profundizar en los fenómenos que ocurren mientras existen corrientes, podemos imaginar que las varillas de la experiencia anterior se conectan a un generador de corriente alterna sinusoidal (como el estudiado en el tema de inducción electromagnética). En este caso, durante el primer semiciclo de la corriente eléctrica, la varilla superior se va cargando con carga \oplus y la varilla inferior con carga \ominus generando una situación de los campos \vec{E} y \vec{B} similar a la analizada anteriormente. En el segundo semiciclo, al cambiar de sentido la corriente, la varilla superior se va descargando de carga \oplus y cargando de carga \ominus y los campos \vec{E} y \vec{B} cambian de sentido. Por lo tanto, en un proceso continuo, los campos eléctricos en cada punto van variando su valor y alternando su sentido. Pero como este proceso pasa en cada punto, si la propagación de \vec{E} y \vec{B} no es instantánea, mientras va cambiando sus valores en un punto van alcanzando puntos más alejados.

Este esquema simplificado del proceso de generación y propagación del campo electromagnético se caracteriza, pues, por:

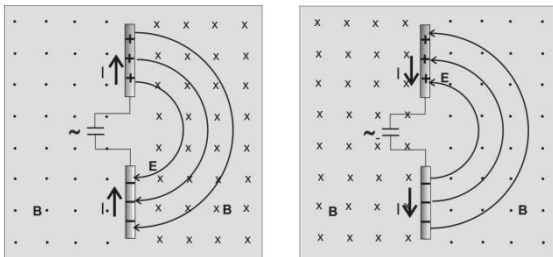


Imagen: Elaboración propia.

En cada punto del espacio alcanzado por dicha propagación los campos \vec{E} y \vec{B} son perpendiculares entre sí y perpendiculares a la dirección de propagación.

- Los campos alternan su sentido de unos puntos a otros, de manera que un determinado instante \vec{B} se dirige hacia el exterior en unos puntos y hacia el interior del plano en otros puntos, mientras que, por su parte, el campo eléctrico \vec{E} se dirige hacia arriba o hacia abajo.
- En el caso de una corriente alterna sinusoidal, la propagación electromagnética adopta una forma ondulatoria transversal típica y los vectores \vec{E} y \vec{B} están en fase, es decir, son máximos o mínimos a la vez. En la figura se representa una

onda no atenuada en la dirección del eje X.

- *En definitiva, las cargas oscilantes, dan lugar a un proceso de emisión y propagación por el espacio de un campo electromagnético de tipo ondulatorio. Estas ondas se llaman ondas electromagnéticas y no requieren necesariamente un medio material para propagarse, por lo que lo pueden hacer en el vacío.*
- *Maxwell no se limitó exclusivamente a este desarrollo cualitativo, sino que combinando las ecuaciones del electromagnetismo encontró que la velocidad de propagación de las ondas electromagnéticas es: $c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}}$, lo que indica que la velocidad de propagación depende exclusivamente del medio y que para el vacío ($\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ y $\epsilon_0 = 1/4\pi K$, con $K = 9 \cdot 10^9$ en el S.I.) c tiene un valor de $3 \cdot 10^8$ m/s!!!*

A.13. Explica con tus palabras y dibuja una onda electromagnética.

Para entender el modelo ondulatorio de manera que incluya los vectores de campo oscilantes, los estudiantes en el nivel de 2º de Bachillerato deben ser capaces de interpretar el formalismo diagramático matemático que describe una onda electromagnética plana.

I. Queremos que los alumnos comprendan en profundidad el concepto de campo, que comprendan que el campo está dotado de energía y momento. Queremos que el campo llegue a adquirir un significado físico para los alumnos equiparable al que tienen otros conceptos como el de partícula o fuerza. Creemos que los alumnos sin una adecuada formación, adquieren, en su mayoría, una imagen del campo que está lejos de la concepción científica. Suelen considerar el campo como una región del espacio o volumen que delimita la influencia de una masa, carga o imán. Para los alumnos, el campo está vacío de significado, en claro contraste con los conceptos de masa, carga, fuerza... y, por tanto, es innecesario, redundante y complicado. Los alumnos siguen pensando en términos de fuerza y no modifican fácilmente sus ideas previas sobre la interacción entre partículas, y tienden a identificar el campo con una zona del espacio, un volumen de influencia y no como el agente de la interacción. Los libros de texto potencian la idea de que la fuerza se debe a las fuentes (cargas, masas o imanes) y no al campo. Estamos, por tanto, ante una visión newtoniana de la interacción, en la que ésta se efectúa entre las

partículas y no entre el campo y la partícula. No es de extrañar que los alumnos no logren construir el verdadero significado del concepto campo.

Queremos que los alumnos comprendan que los campos eléctrico y magnético no están encerrados dentro de las curvas sinusoidales, tratando de evitar que se confunda la notación vectorial con la extensión de los campos eléctrico y magnético. Ambrose, B., Shaffer, P., Steinberg, R. y McDermott, L. (1999) en su investigación sobre la comprensión de los estudiantes de la óptica física encontraron que los estudiantes tenían dificultades serias al respecto, y que podían deberse a una falta de comprensión de la naturaleza electromagnética de la luz. En su estudio establecen que muchos estudiantes no desarrollan correctamente un modelo ondulatorio básico, y tienen muchas dificultades con conceptos muy básicos del modelo ondulatorio como la longitud de onda, la diferencia en los caminos, y la diferencia de fase.

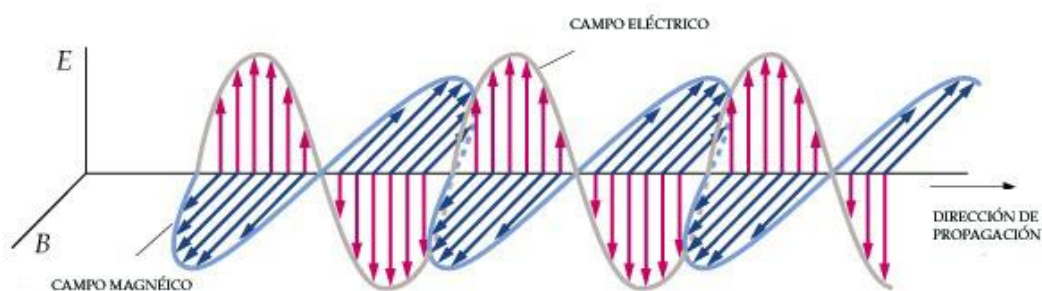


Imagen: McDermott *et al.*, 1999.

II. Consideramos que el error más común que cometerán los alumnos será adscribir a la onda EM plana una extensión espacial finita en el plano perpendicular a la dirección de propagación. Esto es debido a la idea incorrecta de que los campos eléctrico y magnético están confinados en la región encerrada dentro de los dibujos de las curvas sinusoidales.

Esperamos que los estudiantes también tendrán dificultades con las expresiones matemáticas del campo magnético y eléctrico oscilante, y con las ecuaciones que relacionan la variación de cada campo con el otro. El concepto de un plano infinito en el que dos cantidades vectoriales cada una de las cuales tiene una magnitud y dirección en cualquier punto en un instante es muy abstracto. Existe la tendencia en muchos estudiantes a atribuir una extensión espacial a la amplitud de la onda. Efectivamente, dichas dificultades se identifican en los estudiantes (Ambrose, B., Shaffer, P., Steinberg, R. y McDermott, L., 1999).

III. El profesor tratará de explicar a los alumnos qué es una onda electromagnética. Les recordará que en temas anteriores habíamos estudiado las leyes del electromagnetismo, y que con ellas podíamos definir los campos eléctricos y magnéticos en función de las cargas o corrientes. El profesor retomará el concepto de campo para clarificar algunos posibles errores conceptuales en los alumnos. Comenzará recordando a los alumnos la importancia del concepto de campo en física, su introducción supuso poner en duda, y superar posteriormente el marco teórico mecanicista. Sin esta idea básica de campo, la evolución posterior de la física cuántica y relativista resulta inconcebible.

Por tanto, si queremos que los alumnos comprendan en su profundidad el concepto de campo, el profesor debe presentar el campo como agente de la interacción, dotado de realidad física, de energía y de momento, con existencia propia independiente de la fuerza, de forma que el alumno comprenda su importancia y necesidad. Debemos de prevenir la asociación entre energía y partícula mediante la clarificación de los aspectos energéticos en aquellas situaciones en las que interviene el campo. Al estudiar las ondas electromagnéticas se podrá hablar de la energía asociada al propio campo de una manera más directa y clara. En este caso los campos eléctrico y magnético se propagan, es decir, varían en función del tiempo y del espacio. La propagación de las señales electromagnéticas sucede a una velocidad finita, la acción es retardada, necesita campos para llevar energía, momento lineal y angular. En la inducción electromagnética la transferencia de energía a través de distancias macroscópicas está muy claramente relacionada con la acción de campos variables con el tiempo.

A.14. Si las ondas lumínicas son de naturaleza electromagnética, es decir variaciones periódicas de los campos E y B, podemos diseñar un método para producirlas. Diseña una experiencia para producirlas.

I. Pretendemos conseguir que los alumnos imaginen un modo de producir ondas electromagnéticas.

III. El profesor propondrá a los alumnos una réplica del experimento de Hertz fácil de realizar en el laboratorio.

A. 14.1 Como actividad alternativa, lectura del experimento de Hertz:

Si entendemos que la luz es una radiación electromagnética producida por una oscilación periódica de corrientes eléctricas, entonces, un filamento metálico de una lámpara incandescente, ha de emitir luz debido a la agitación de las cargas eléctricas submicroscópicas, que sabemos existen en cantidades equilibradas en todos los cuerpos neutros.

Aún no podemos saber si estas cargas forman parte de los átomos del foco emisor de luz, o si son entidades individuales tales como electrones, de momento las llamaremos osciladores. Algunos de estos osciladores pueden emitir energía electromagnética, que nuestros ojos interpretan como luz. La frecuencia de estas ondas luminosas será igual a la frecuencia periódica de dichos osciladores.

Hertz se propuso realizar un experimento que pusiese de manifiesto esta interpretación “clásica” de la emisión de luz. Un ensayo evidente sería producir una corriente oscilante en un alambre de una frecuencia igual a la que posee la luz verde, por ejemplo, y observar si emite luz verde. El problema era que las frecuencias de oscilación que se podían alcanzar eran relativamente bajas, muy lejos de llegar al rango de la frecuencia de la luz visible (10^{15} s^{-1}), y era imposible, por tanto, un ensayo directo.

Entonces Hertz ideó lo siguiente: producir una corriente eléctrica oscilante que producía una radiación electromagnética (luz visible si se alcanzaba una frecuencia suficientemente alta), que tuviera todas las características de la luz excepto, naturalmente, su visibilidad. La prueba de Hertz tuvo tanto éxito que la comunidad científica quedó convencida de que la luz era una radiación electromagnética.

En esencia, el método experimental de Hertz era sencillo, consistía en dos varillas, cada una de una longitud de 5 pulgadas, terminadas en un extremo por una esferita metálica pulida, se fijaban sobre una recta de manera que entre las esferas quedara una pequeña zona de aire. De las esferas partían dos hilos conductores hacia un dispositivo que suministraba pulsos cortos de diferencia de potencial muy elevada que llevaban a las esferas grandes cantidades de carga eléctrica de signos opuestos, hasta que saltaba la chispa entre ellas. El aire de la zona se hacía conductor durante un corto periodo de tiempo y así proporcionaba un camino a las cargas que oscilaban de una varilla a la otra

hasta alcanzarse el equilibrio eléctrico. Entonces el aire volvía a no ser conductor y el sistema quedaba preparado para el siguiente pulso de “tensión” que originaba otra serie de oscilaciones por el mismo proceso.

Si las ideas de Maxwell eran correctas, mientras saltaba cada chispa se propagaban ondas electromagnéticas de la misma frecuencia que las oscilaciones, hasta unos $5 \cdot 10^8$ s^{-1} , según las estimaciones de Hertz, ondas electromagnéticas con una longitud de onda de unos 60 cm. Además, esta radiación se dispersaría desde las esferas y sería detectable por la producción de una corriente fluctuante en un alambre a cierta distancia, como se indicó anteriormente.

El primer triunfo de Hertz fue observar este efecto, aun cuando el alambre receptor (antena) se situará a muchos metros de distancia del oscilador emisor. Esa nueva radiación electromagnética invisible, llamada todavía a veces ondas hertzianas, es naturalmente idéntica a nuestras familiares ondas de radio. Hertz demostró a continuación que la radiación poseía todas las características de la luz: se reflejaba, se podía enfocar un haz, refracción, interferencia, polarización, etc. Posteriormente se demostró que la velocidad de este tipo de radiación electromagnética era la misma que la velocidad de la luz.

La comunidad científica rápidamente llegó a la conclusión de que, puesto que las ondas hertzianas y las ondas luminosas se comportan de un modo semejante, la luz debe estar causada también por el rápido movimiento oscilatorio de partículas cargadas, quizás las existentes en los átomos del emisor de luz. Tenemos un modelo de la emisión de luz”

I. Queremos que los alumnos comprendan el experimento de Hertz, recuerden lo aprendido anteriormente en las unidades de campo eléctrico y magnético, y lo relacionen con la producción de ondas electromagnéticas. Queremos que comprendan la extraordinaria importancia que tuvo el experimento de Hertz, ya que validaba la teoría electromagnética de Maxwell.

II. El profesor debe explicar la importancia del experimento de Hertz para la aceptación de la teoría electromagnética de Maxwell, uno de los logros más grandes del pensamiento científico del siglo XIX. El profesor recordará a los alumnos las relaciones entre campos eléctricos y magnéticos que habían estudiado en unidades previas, para que puedan así comprender la producción de las ondas electromagnéticas. El profesor explicará que las

ondas electromagnéticas no son solamente ondas lumínicas, sino que tenemos muchos tipos.

A.15. Si la luz es una onda, tendrá una longitud de onda y una frecuencia asociadas. ¿Cómo podríamos explicar el experimento de dispersión de la luz blanca en luces de diferentes colores? ¿Qué serían cada uno de los colores?

I. Queremos que los alumnos relacionen la actividad de inicio del tema, el “*Experimentum crucis*” de Newton, en la cual se mostraba que la luz blanca estaba compuesta de luces de colores, con las características de las ondas. Intentaremos que los alumnos lleguen a la conclusión de que cada color es una onda EM, de una frecuencia y longitud de onda determinada.

2.2. ¿Podemos explicar el comportamiento geométrico de la luz?

Ahora debemos representar la luz como una onda, es decir como una sucesión de frentes de onda (puntos del espacio que están en fase), y a partir de esta representación intentar explicar los fenómenos estudiados en la óptica geométrica. Si nos basamos en un modelo de emisión de luz por fuentes puntuales, y nos situamos suficientemente lejos del foco emisor, podemos considerar el frente de ondas plano.

A.16. La naturaleza de ondulatoria de la luz debe ser un modelo coherente con explicaciones que fácilmente realizábamos en la óptica geométrica. Comparar las explicaciones de los siguientes fenómenos desde los dos puntos de vista: geométrico y ondulatorio. Realiza los correspondientes trazados gráficos:

A.16.1. La emisión de luz por una fuente puntual.

I. Queremos ayudar a los alumnos a comprender que la teoría ondulatoria también puede explicar la propagación rectilínea de la luz.

III. Para explicar la emisión de luz por una fuente puntual, el profesor expondrá a los alumnos el principio de Huygens, quien propuso que las ondas luminosas que se

despliegan desde una fuente puntual podrían considerarse la superposición de diminutas ondas secundarias. Huygens propuso que cada punto de cualquier frente de ondas pueda considerarse una nueva fuente puntual de ondas secundarias. Esta idea se conoce como “principio de Huygens”. *Todos los puntos a lo largo del frente de ondas AA’ son, a su vez, fuente de nuevas onditas, un poco de tiempo después esas nuevas onditas superpuestas formarán una nueva superficie BB’, la cual puede considerarse la envolvente de todas ellas.*

Posteriormente con la aportación de Fresnel se definió el “Principio de Huygens-Fresnel”, aunque no se suelen citar en los textos habituales de enseñanza: *“Las ondas secundarias tienen efectividad de una intensidad máxima en la dirección normal a la envolvente, y disminuyen con un factor de oblicuidad hasta 90°”*. Se puede explicar por fin la transmisión rectilínea de la luz, que había sido el gran escollo de la teoría ondulatoria. El principio de Huygens-Fresnel es una herramienta fundamental, además, para explicar la limitación del modelo geométrico que conocemos como aproximación paraxial.

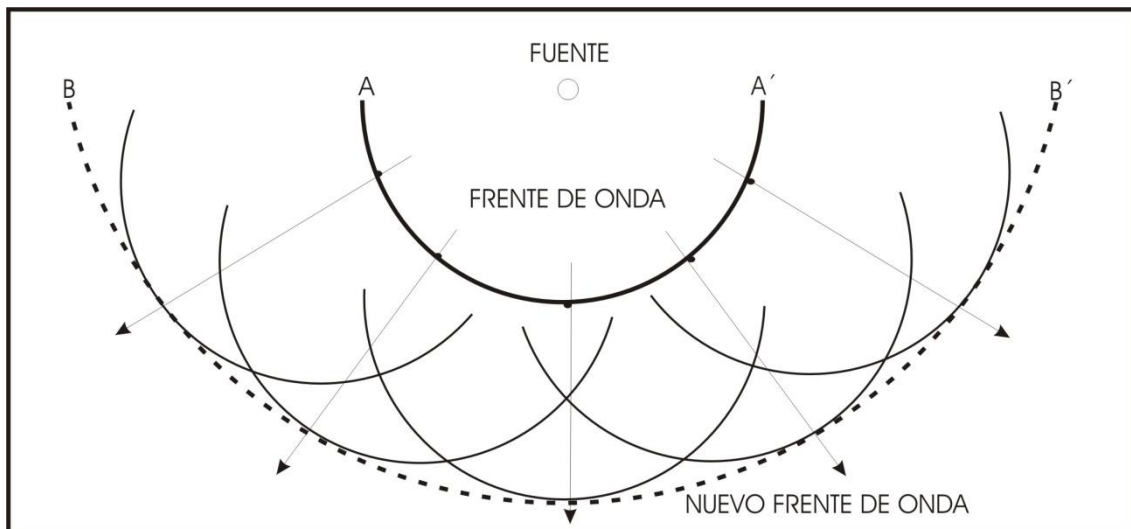


Imagen: Elaboración propia.

En la figura hemos representado sólo unas cuantas del número infinito de onditas que se producen a partir de unas pocas fuentes puntuales secundarias, que se combinan para producir la envolvente BB’. Conforme se extiende la onda, cualquier segmento de ella parece menos curvo. Muy lejos de la fuente original, las ondas casi forman un plano, como sucede, por ejemplo, con las ondas procedentes de lo sol. En la siguiente figura se muestra una construcción hecha por Huygens a base de onditas para frentes de ondas planos.

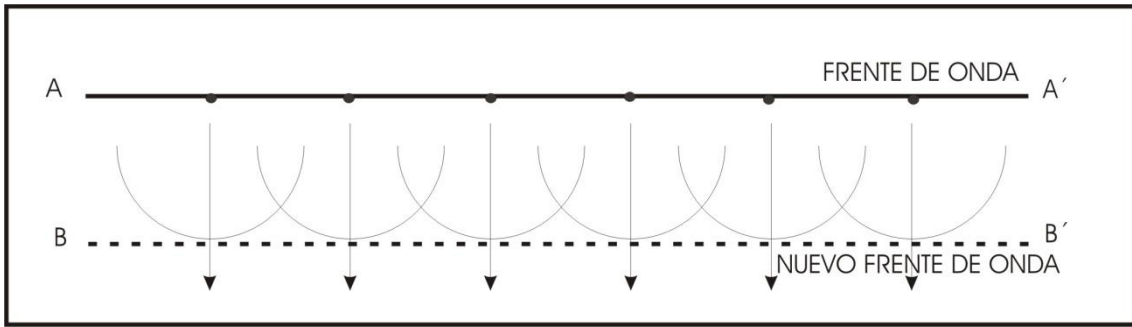
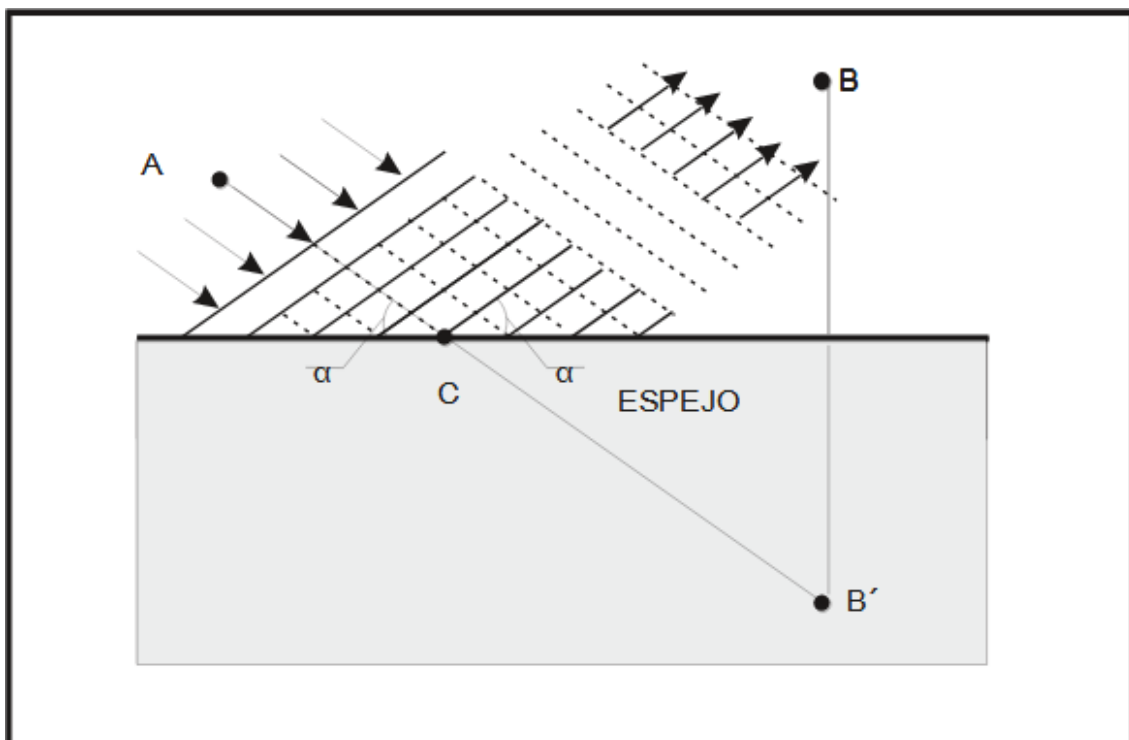


Imagen: Elaboración propia.

El profesor podrá explicar utilizando el principio de Huygens-Fresnel la reflexión de la luz:



Fuente: Elaboración propia.

A.16.2. Cuando un haz de luz procedente de una fuente puntual lejana incide sobre una lente convergente, converge en el foco.

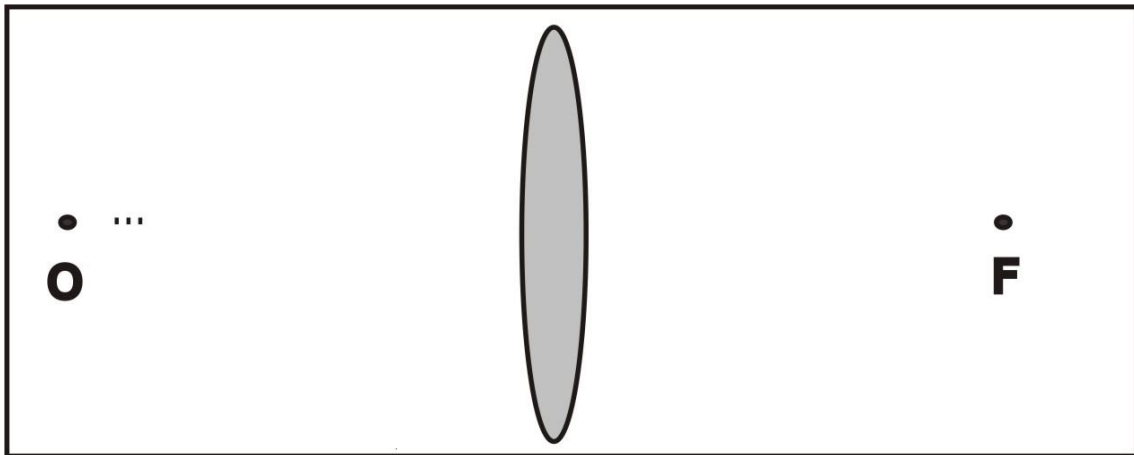


Imagen: Elaboración propia.

Sabemos que la explicación de la propagación rectilínea de la luz mediante el modelo ondulatorio fue un escollo difícil de superar, que de hecho durante tiempo favoreció la aceptación de la teoría corpuscular de la luz que proponía una explicación más directa.

I. Queremos que los alumnos puedan dibujar desde una perspectiva ondulatoria qué le ocurriría a una onda que se desplaza y en su camino encuentra una lente convergente, una lente divergente o un espejo esférico. Queremos que los alumnos dibujen frentes de ondas que provienen de una fuente muy lejana, y por tanto al llegar a la lente lo hacen como frentes de onda planos.

II. Esperamos que los alumnos comprendan que al estar la fuente muy alejada los frentes de onda llegan planos. Creemos que les costará trabajo al principio realizar los trazados gráficos, pero esperamos que los comprendan con ayuda del profesor.

III. Para dar cuenta del hecho de que la luz que proviene de una fuente lejana se concentra en el foco, el profesor explicará que la luz tarda más en pasar por el centro de la lente que por la parte exterior, debido a que la velocidad de la luz en el vidrio es menor que en el aire, dando como resultado una onda que converge en el punto F de la lente. El esquema adecuado de representación sería:

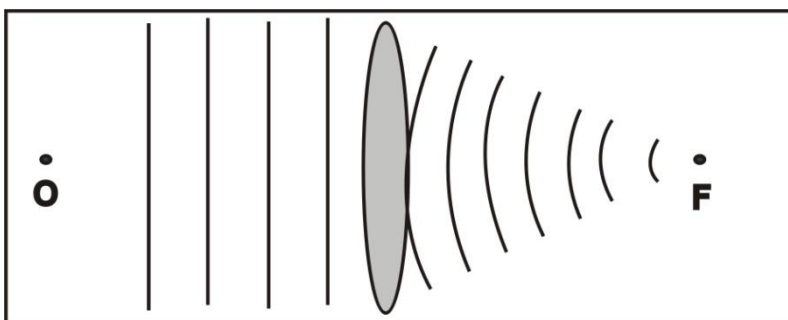


Imagen: Elaboración propia.

El profesor comentará que muy interesante el hecho de que un prisma con una curvatura apropiada suministrará muchas trayectorias con un tiempo igual de recorrido desde el punto O hasta el punto F en el lado opuesto. La curva compensa las distancias extra que recorre la luz para llegar hasta los puntos más elevados de la superficie, al reducir en un grado adecuado el espesor de vidrio que tiene que recorrer la luz (recordar que en el vidrio la luz se desplaza a menor velocidad media). Con los puntos O y F en las posiciones apropiadas y la curvatura adecuada de las superficies en este prisma modificado, a todas las trayectorias de la luz les corresponde exactamente el mismo tiempo. En este caso, toda la luz que proviene del punto O y que incide sobre la superficie del vidrio se enfoca en el punto F. Es lo que conocemos como comportamiento de la lente convergente.

Como curiosidad, el profesor comentará a los alumnos la relación que tiene las distintas velocidades de la luz con los atardeceres. Cuando contemplamos un atardecer, vemos el Sol durante varios minutos después de que se ha hundido por debajo del horizonte. La atmósfera de la Tierra es más enrarecida cuanto más arriba y más densa cuanto más abajo. Como la luz viaja con mayor rapidez en el aire enrarecido que en el denso, la luz del Sol puede viajar con más rapidez si, en lugar de desplazarse en línea recta, evita tanto como sea posible el aire más denso, tomando una trayectoria más alta y más larga con el fin de penetrar en la atmósfera con una inclinación más pronunciada. Como la densidad de la atmósfera cambia gradualmente, la trayectoria de la luz se desvía también en forma gradual para convertirse en curva. Algo que resulta muy interesante es que esta trayectoria de tiempo mínimo nos proporciona cada día un periodo más largo de luz del Sol. Además, cuando el Sol, o la Luna, están cerca del horizonte, los rayos del borde inferior se curvan más que los del superior; esto produce un acortamiento del diámetro vertical, lo que hace al Sol verse elíptico.

A.16.3. Cuando un haz de luz procedente de una fuente puntual lejana incide sobre una lente divergente, emerge después de atravesarla según la dirección del foco virtual.

I. Queremos que los alumnos comprendan qué le sucede a la luz cuando atraviesa una lente divergente, considerando la naturaleza ondulatoria de la luz.

II. Esperamos que los alumnos comprendan que al estar la fuente muy alejada los frentes de onda llegan planos. Creemos que les costará trabajo al principio realizar los trazados gráficos, pero esperamos que los comprendan con ayuda del profesor.

III. En el caso de las lentes divergentes y la luz que proviene de una fuente puntual lejana, el profesor explicará que en este caso las partes exteriores del frente de ondas tardan más en atravesar la lente que la parte central, dando como resultado una onda esférica que diverge al propagarse más allá de la lente, como si procediese del punto F' de la lente.

El profesor recordará que debemos dibujar la luz como frentes de ondas planas (teniendo en cuenta que la fuente emisora puntual está suficientemente lejos) que se propagan por el espacio. Dichos frentes de ondas planas, se convierten después de la refracción en ondas esféricas que convergen en el punto focal F , para después divergir de éste. El profesor propondrá el siguiente dibujo a sus alumnos.

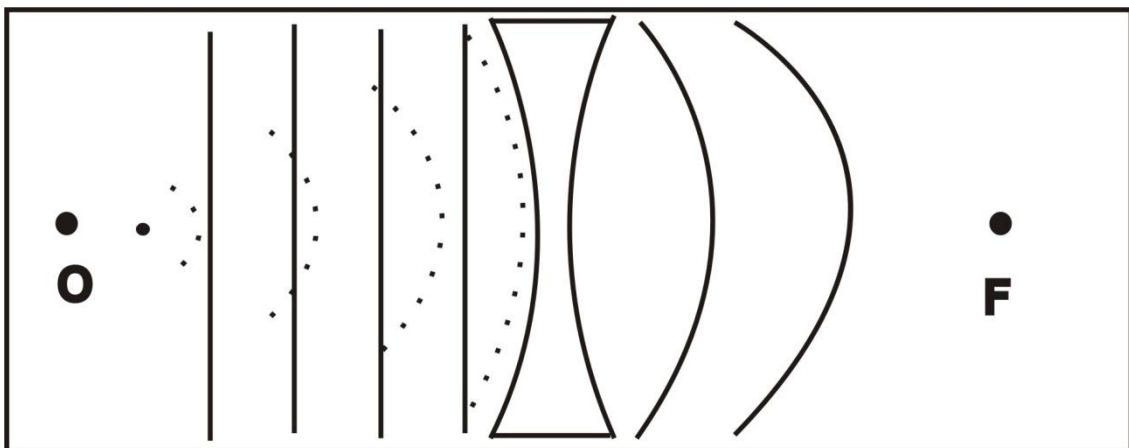


Imagen: Elaboración propia.

A.16.4. Que un haz de luz procedente de un foco muy lejano, cuando incide en un espejo cóncavo, dentro de la aproximación paraxial, se refleja, concentrándose la luz en el punto focal del espejo.



Imagen: Elaboración propia.

I. Queremos que los alumnos comprendan qué le sucede a la luz cuando incide en un espejo cóncavo, considerando la naturaleza ondulatoria de la luz.

II. Esperamos que los alumnos comprendan que al estar la fuente muy alejada los frentes de onda llegan planos. Creemos que les costará trabajo al principio realizar los trazados gráficos, pero esperamos que los comprendan con ayuda del profesor.

III. El profesor ayudará a los alumnos con el trazado gráfico y les propondrá el siguiente trazado.

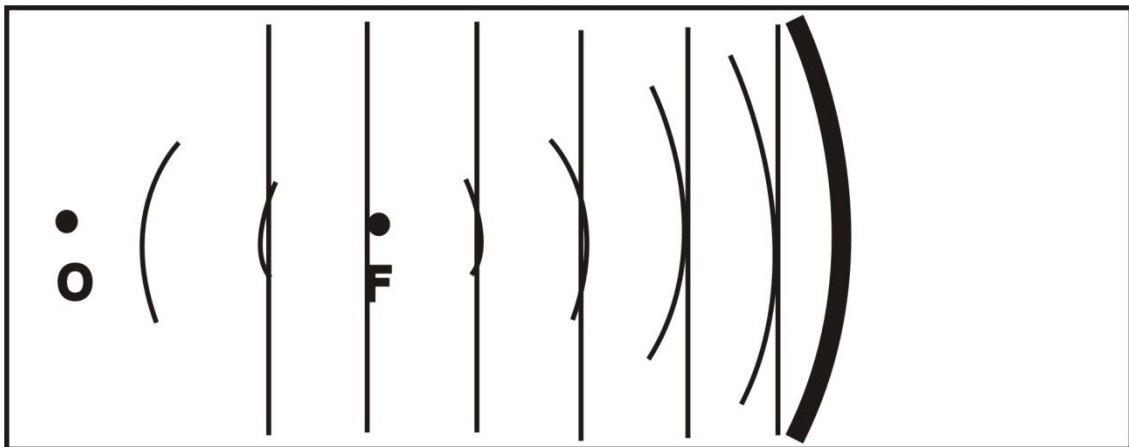


Imagen: Elaboración propia.

A.16.5. Que un haz de luz procedente de un foco muy lejano, cuando incide en un espejo convexo, dentro de la aproximación paraxial, se refleja, concentrándose la luz en el punto focal imaginario del espejo.

I. Queremos que los alumnos comprendan qué le sucede a la luz cuando incide en un espejo cóncavo, considerando la naturaleza ondulatoria de la luz.

II. Esperamos que los alumnos comprendan que al estar la fuente muy alejada los frentes de onda llegan planos. Creemos que les costará trabajo al principio realizar los trazados gráficos, pero esperamos que los comprendan con ayuda del profesor.

III. El profesor ayudará a los alumnos con el trazado gráfico incidiendo en que en esta ocasión la luz no converge tras incidir en un espejo convexo. No se forma por tanto imagen real. El profesor recordará que debemos dibujar la luz como frentes de ondas planas (teniendo en cuenta que la fuente emisora puntual está suficientemente lejos) que se propagan por el espacio. Dichos frentes de ondas planas, se convierten después de la reflexión en el espejo convexo en ondas esféricas que convergen en el punto focal F (situado detrás del espejo, para después divergir de éste). El profesor insistirá en que se formará una imagen virtual, pues la luz no puede proceder del foco situado detrás del espejo.

2.3. ¿Podemos explicar la visión del color?

La sensación de color que acompaña la visión de un objeto (¡y de las imágenes obtenidas de ellos con lentes, espejos, etc.!) va unida a la sensación de forma y tamaño que hemos estudiado, sin embargo, no es evidente comprender cómo se obtiene esa sensación, por lo que se requiere una reflexión.

A.17. ¿Es la luz “blanca” de color blanco? Razona la respuesta y describe las experiencias que apoyan vuestros argumentos.

I. Queremos que los alumnos sean conscientes de que en ocasiones el lenguaje habitual no es adecuado para definir fenómenos científicamente. Queremos que los alumnos sean conscientes de que la luz, aunque haga posible la visión, no es visible en sí misma. Queremos que los alumnos comprendan que el color no es una propiedad de los objetos.

II. Esperamos que al principio los alumnos tengan algunas dificultades con la comprensión de estos conceptos, pero esperamos que con la ayuda del profesor consigan una verdadera comprensión del color.

III. El profesor debe hacer una reflexión sobre el lenguaje que normalmente se utiliza ya que al hablar de luz “blanca” estamos asociando también el color con cada tipo de luz. Como hemos estudiado la luz, aunque haga posible la visión, no es en sí misma una entidad visible y, si el color es una percepción asociada a los objetos que vemos (como la forma o el tamaño), entonces el color no puede ser una propiedad de la luz. Es decir, la luz no tiene color. Debemos seguir este razonamiento y, aunque no intentemos cambiar el lenguaje habitual, sí sería conveniente clarificar el significado de estas expresiones. Así, a partir de ahora, entenderemos por luz “blanca” el tipo de luz que hace que veamos blanca una pantalla iluminada por ella. La pantalla que servirá de testigo para “identificar” el tipo de luz es la pantalla habitual sobre la que se suele hacer proyecciones de diapositivas o de cine, aquella que vemos blanca al estar iluminada con la luz habitual del Sol o de las lámparas de la clase.

Cuando decimos que el tomate es rojo estamos afirmando, entonces, que cuando está iluminado con la luz “blanca” habitual de las lámparas o la luz de día lo percibimos de color rojo, pero sabemos que puede verse de otro color si la luz con que se ilumina fuera otra. Para comprender la visión del color será necesario, pues, profundizar en cómo se obtienen las luces de “colores” a partir de la luz “blanca”. Para ello, vamos a analizar algunos fenómenos, que desde siempre han llamado poderosamente la atención, en los que se obtienen espectros de colores a partir de la luz “blanca”.

A.18. Explica cómo se obtiene la sensación de blanco, de negro, de rojo, de verde, de azul o de amarillo.

I. Con esta actividad esperamos que los estudiantes puedan proponer una hipótesis sencilla de interacción de la luz blanca con la materia según la cual vemos blanco un objeto al ser iluminado con luz blanca cuando todos los tipos de luz que la componen son difundidos por el objeto después de incidir la luz en él. Análogamente, se verá azul, verde, rojo, cian o amarillo cuando el objeto difunda ese tipo de luz hasta el ojo del observador y el resto de luces del espectro de la luz blanca sean absorbidas. Por último, diremos que

es negro cuando el objeto absorba todos los tipos de luz. Dado que los objetos que llamamos negros son vistos por contraste con el fondo donde se encuentran, algunos alumnos, irreflexivamente, podrán opinar que el objeto negro difunde luz negra, lo que será fácil de rebatir con la hipótesis de interacción de la luz blanca con la materia ya que en su espectro no existe luz negra.

En esta actividad buscaremos razonamientos que respondan a las cuestiones: ¿cuál es el resultado de la interacción de la luz con la materia? y ¿cuál es la composición de la luz transmitida o difundida?, aunque las respuestas a esta última cuestión deberán ser matizadas posteriormente.

II. Esperamos que los estudiantes recuerden experiencias en las que el color con que se ven los objetos cambia en función de la iluminación, como pueden haber observado en su ropa al ser iluminada con las luces de color de teatros o discotecas. Si no se poseen este tipo de experiencias, se pueden realizar oscureciendo el aula y colocando filtros coloreados en un proyector de diapositivas para iluminar cartulinas u objetos diferentes. Como consecuencia, en una primera conclusión, podremos relacionar el color con el tipo de luz que difunden los objetos.

III. El profesor explicará a los alumnos que para comprender cómo se forma la sensación del color es necesario disponer de, al menos, las siguientes concepciones básicas:

1. El modelo de Kepler en el que se explica la visión a partir de la luz que llega al ojo.
2. La hipótesis de la luz blanca como mezcla de distintos tipos de luz.
3. El conocimiento de que en la retina existen tres tipos de células con respuesta diferente según el tipo de luz incidente. Esta respuesta es la que hace que a cada tipo de luz le corresponda una sensación de color, pero no a la inversa, es decir, que a cada sensación de color no le corresponde un tipo de luz. Así, podemos explicar la visión del color rojo cuando incide este tipo de luz en el ojo, pero no podemos explicar la visión del magenta a partir de un tipo de luz del espectro de la luz blanca.

El profesor recordará a los alumnos la hipótesis manejada al principio de esta parte de la unidad, sobre la composición heterogénea de la luz y la naturaleza ondulatoria de la luz. Recordará a los alumnos que, Newton en su “Óptica” consideró la luz blanca como una mezcla de diferentes tipos de luz como hipótesis fundamental para explicar la dispersión

de la luz blanca al atravesar un prisma, frente a las teorías imperantes en esa época que basaban la explicación en supuestas modificaciones de la luz.

Pensamos, que la introducción de esta hipótesis en la enseñanza de la visión del color, puede ser un camino para sustituir ideas alternativas, que suponemos, podemos encontrar en los estudiantes.

Por otro lado, otras investigaciones didácticas sobre la visión del color han puesto de manifiesto, además, que los estudiantes asignan el color a una propiedad del material de que está compuesto el objeto (Feher y Rice, 1992) pero, dado que los estudiantes que han seguido esta secuencia de enseñanza han tenido ocasión de realizar experiencias en las que la luz difundida por lo objetos ilumina con su mismo tono de color una pantalla blanca enfrentada a ellos, es de esperar que también relacionen el color con la luz que los ilumina o, más exactamente, de acuerdo con el modelo de visión elaborado, con alguna característica de la luz que llega a los ojos del observador.

La validez de la hipótesis de la heterogeneidad de la luz blanca y la propuesta de interacción de la luz con la materia para explicar la visión del color tienen límites de aplicación. Vamos a ponerlos en cuestión y vamos a sugerir a continuación las modificaciones adecuadas.

A partir de la hipótesis de la heterogeneidad de la luz blanca y de la absorción por los objetos de parte del espectro de la luz blanca que los ilumina hemos elaborado una primera explicación de la visión del color, sin embargo, la visión humana percibe colores que no se encuentran en el espectro de la luz blanca, lo que hace necesario profundizar en ella y/o modificarla. Si bien todo tipo de luz incidente en el ojo produce una sensación de color, no todas las sensaciones de color pueden ser interpretadas como consecuencia de un tipo de luz del espectro de la luz blanca. Los tonos rosas, púrpuras o magentas no se corresponden con ningún tipo de luz del espectro analizado.

A.19. Formula una hipótesis que explique cómo es posible obtener la sensación de algunos colores que no se encuentran en el espectro de la luz blanca como el marrón o el magenta.

I. Queremos que los alumnos comprendan que si la luz blanca está formada por los distintos tipos de luz que componen el espectro (del rojo al violeta), y los objetos difunden sólo parte de estas luces, la visión de los colores que no se corresponden con ninguna luz del espectro habrá que buscarla en la fisiología del ojo humano. Queremos que los alumnos conozcan experiencias con luces de colores que sugieren que cuando al ojo llegan varios tipos de luz, es posible ver un color diferente de las luces que le llegan. La síntesis aditiva del color, fue la base para la elaboración de la teoría de la visión del color aceptada actualmente.

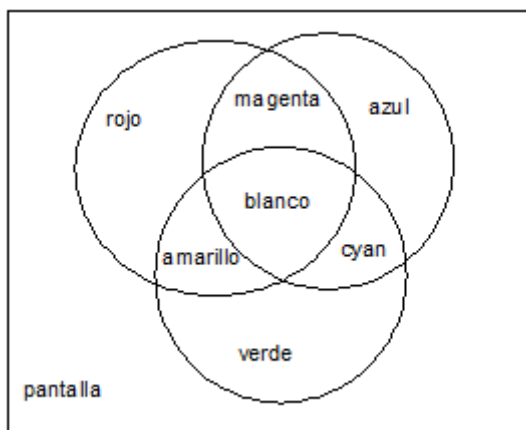


Imagen: (Osuna 2003-2008).

III. El profesor explicará que proyectando sobre una pantalla luces de tres colores: rojo, verde y azul, se puede percibir en las zonas de confluencia colores diferentes a los de las luces emitidas. En 1802, Thomas Young propuso la teoría tricromática de la visión del color, que establecía que en la retina del ojo humano existen tres tipos de células especializadas del color, cada una de las cuales es sensible a los llamados colores primarios: rojo, verde y azul. Posteriormente se han realizado se ha medido la respuesta los conos (estas células especializadas) a cada uno de los tipos de luz que propuso Young. El profesor explicará que cada uno de estos conos presenta un máximo de sensibilidad a un tipo de luz rojo-anaranjado, otro presenta el máximo de sensibilidad a la luz verde y el otro a la luz azul-violácea. La respuesta es máxima para un determinado tipo de luz, pero cada cono también responde a otras luces del espectro próximas. Por tanto, cuando a la retina llega luz, la respuesta de los tres tipos de conos, según su diferente sensibilidad espectral, provoca en el cerebro la sensación de los distintos colores que somos capaces de distinguir En la retina, existen además otras células llamadas bastones que responden a la intensidad luminosa, gracias a las cuales vemos los objetos más o menos iluminados.

El profesor relatará el hecho de que la teoría tricromática para la visión de los colores, modifica en parte los razonamientos que habíamos hecho basándonos en la hipótesis de Newton. De forma que, a partir de ahora, podemos decir que vemos un objeto blanco cuando la luz que difunde hasta el ojo activa los tres tipos de conos de la retina. Esta activación se puede realizar, con una mezcla de todos los tipos de luz del espectro, o con otras muchas distribuciones, la más sencilla es la observada en el patrón de colores de la síntesis aditiva, en la que se obtiene la sensación de blanco cuando llegan al ojo sólo tres tipos de luz: rojo-anaranjado, verde y azul-violáceo.

Al igual que en la primera parte de nuestra unidad didáctica hemos de proponer actividades finales para establecer los límites de nuestro modelo.

A.20. Es posible obtener la sensación de cualquier color iluminando una pantalla “blanca” con distintas intensidades de luces “primarias” una azul, una verde y una roja. Obtén la mezcla de estos colores al proyectar sobre una pantalla blanca luces de estos tipos y analizad los resultados.

I. Queremos que los alumnos comprendan que la explicación a estas experiencias se ha encontrado al estudiar la fisiología de la retina. Queremos que conozcan el hecho de que en la retina existen dos tipos de células especializadas: los bastones que dan una respuesta distinta según la intensidad luminosa que reciben y tres tipos de conos que responden de forma distinta según el tipo de luz que reciben. Finalmente queremos que comprendan que las diferentes sensaciones de color se obtienen cuando en el cerebro se reciben distintos grados de respuesta de cada tipo de estas células especializadas (conos)

II. Es de esperar que los estudiantes interpreten la visión de los colores magentas debido a las “mezclas” de diferentes tipos de luz. Estas mezclas pueden tener para los estudiantes el mismo significado que las de las pinturas o las de lápices de colores que han podido realizar en las clases del área de Plástica. Pueden pensar que estas mezclas se realizan sobre el objeto, en el espacio o en el interior del ojo.

Después de estas observaciones es de esperar que los estudiantes interpreten la visión de los colores separando el tipo de luz recibida de la sensación de color producida.

Recordaremos aquí, si fuera necesario, que la pantalla reemite toda la luz incidente, por lo que, si una zona ha sido iluminada con luz roja y con luz verde, la pantalla reemite luz roja y luz verde y la sensación de amarillo que percibimos se deberá a algún mecanismo del interior del ojo y/o del cerebro. Como consecuencia, la sensación de amarillo puede obtenerse de dos formas: al llegar al ojo luz amarilla o al llegar luces roja y verde. De manera similar se interpretaría la sensación de color cyan y, en el caso del magenta, llamaremos la atención de que este color no se corresponde con ningún tipo de luz del espectro de la luz blanca y se percibe cuando al ojo llega luz azul y luz roja. Los diferentes tonos de magenta, de cyan o de amarillo se pueden apreciar variando la intensidad de la luz de los respectivos focos. Por último, hay que destacar que la sensación de blanco se elabora al llegar al ojo estos tres tipos de luces sin necesidad del resto de los tipos de luz presentes en su espectro

III. El profesor puede realizar en clase una experiencia para que los alumnos se cuestionen estas ideas, y consiste en conseguir que se crucen dos haces de luz de distinto color, y que se proyectan sobre sendas pantallas. Resaltará el hecho de que los haces de luz llegan a las respectivas pantallas sin alterar su color, es decir no se mezclan ni adquieren propiedades del otro cuando se cruzan. Estas experiencias pueden ayudar a los alumnos a admitir la hipótesis de Young, según la cual el cerebro elabora las diferentes sensaciones de color a partir de tres tipos de luces incidentes.

Para obtener en una pantalla el patrón de colores exacto de la síntesis aditiva, se tiene que utilizar tres tipos de luz cuyas longitudes de onda se encuentren en el máximo de sensibilidad de cada uno de los conos (o en un estrecho margen), y que se pueden obtener con tres proyectores láser adecuados. Según las normas CIE, la respuesta de los tres tipos de conos en función de la longitud de onda de la luz incidente, presenta un máximo para las longitudes de onda 437 nm, 533 nm y 564 nm. Esta experiencia se aleja de los materiales y condiciones de un laboratorio escolar.

El profesor explicará que la síntesis aditiva se puede realizar en el laboratorio, utilizando filtros para la iluminación que existen en el mercado, y con tres proyectores de diapositivas o proyectores contruidos para tal fin con un tubo metálico en cuyo extremo se coloca una lente convergente de 10 dioptrías y a unos 9 cm una lámpara halógena dicróica de 12V y 50 W.

3. Recapitulación y nuevos problemas. Límites de nuestro modelo ondulatorio de la luz.

A.21. ¿Qué te sugiere la siguiente experiencia?: Si mantenemos una brújula fija en un sistema de referencia, respecto al cual se mueve una carga, la brújula detectará un campo magnético, causado por la carga en movimiento respecto de la brújula. Sin embargo, si la brújula se mueve a la misma velocidad que la carga, no detecta ningún campo magnético. Es decir, no actúa ninguna fuerza sobre la brújula.

Según la teoría clásica mecánica de Newton, las leyes de la física tenían que ser iguales en todos los sistemas de referencia inerciales, es decir aquellos que se movían entre sí con velocidad constante. ¿Ocurre esto en la experiencia anterior?

I. Queremos que los alumnos comprendan que nuestro modelo ondulatorio tiene límites que no podemos explicar, al igual que sucedía con el modelo geométrico. Queremos que los alumnos comprendan que estamos utilizando modelos que son una figuración de la realidad, y que por tanto tienen límites.

III. El profesor resaltará que esto no ocurre con otras fuerzas. La Física clásica mantiene la idea de que todas las fuerzas son iguales en sistemas de referencia inerciales. Si queremos una ciencia universal, tendremos que atender a la necesidad de cambiar algunas ideas de la física clásica. En concreto, explicará a los alumnos que el campo magnético es un efecto relativista, que surge precisamente entre sistemas de referencia que se mueven entre sí. Ello dará pie a la teoría de la relatividad de Albert Einstein.

En el caso de la fuerza magnética, aparece la velocidad de la partícula, pero ¿respecto de que sistema de referencia? Resulta evidente que desde diferentes sistemas se medirán diferentes velocidades, y por tanto las fuerzas magnéticas variarán de un sistema a otro. En consecuencia, las interacciones magnéticas no son algo absoluto, como las leyes de la dinámica, sino que dependen del sistema de referencia.

Es decir, las fuerzas magnéticas son relativas al sistema de referencia. Al cambiar de un sistema de referencia a otro, tanto la fuerza eléctrica como la fuerza magnética cambiarán, pero siempre existirá la misma relación en sus intensidades. Esta relación determina además la velocidad de propagación de las ondas electromagnéticas. Por consiguiente, no

es extraño que la velocidad c juegue un papel de la velocidad invariante en el principio de relatividad especial.

Por otra parte, el hecho de que el desdoblamiento del campo electromagnético en campos eléctrico y magnético dependan del sistema de referencia nos advierte de que no debemos conceder una entidad absoluta a las líneas de fuerza de cada campo, aunque sí tienen un carácter absoluto algunas propiedades generales de las mismas. La existencia de cargas eléctrica y la ausencia de cargas magnéticas son propiedades absolutas y, por consiguiente, en cualquier sistema de referencia debe haber líneas de campo eléctrico que comiencen o terminen en las cargas eléctricas, mientras que las líneas de campo magnético deben cerrarse siempre sobre sí mismas.

ANEXO VIII. DIARIO DE CLASE 2020

INICIALES	IDENTIFICADOR
I. M.	Alumno 1
S.	Alumno 2
A.F.	Alumno 3
D. S.	Alumno 4
J. S.	Alumno 5
J. P.	Alumno 6
I. P.	Alumno 7
C. A.	Alumno 8
R. D.	Alumno 9
I. J.	Alumno 10
D. S.	Alumno 11
J. Z.	Alumno 12
L. L.	Alumno 13
C. B.	Alumno 14
D. G.	Alumno 15

Miércoles 29/01/2020 AULA B18 LABORATORIO DE FÍSICA

08:30-09:25 SESIÓN 1

GRUPO 1: 15 Alumnos

1. Metodología y descripción. ¿Qué hicimos?

Planteo la pregunta a los alumnos ¿Cómo vemos? ¿Qué es necesario para ver?

Los alumnos comienzan a debatir entre sí, llegando a la primera conclusión, si no hay luz no se ve. Posteriormente van pensando que también hace falta la participación del ojo y de “algo que refleje la luz”.

Les hablo entonces del modelo de visión de Kepler y el adelanto que supuso para la explicación de la visión humana. Les cuento las ideas en que se sustenta.

Insisto en desterrar los iconos que se utilizan en la vida diaria y que no están de acuerdo con una representación adecuada de las fuentes de luz. Así mismo insisto en que la condición necesaria para la visión es que llegue un haz de luz divergente al ojo.

Los alumnos 6, 7, 8 y 12 todavía no comprenden el haz de luz, dicen que por qué es necesario dibujar dos rayos.

Me aseguro de que todos los alumnos han comprendido el concepto de HAZ de LUZ, que Considero clave para poder explicar la visión, dibujando las luces, sombras y penumbras propias de un eclipse, mediante el haz de luz, insistiendo que no se podría explicar sin la utilización del haz de luz.

Ahora los alumnos 6, 7, 8 y 12 dicen que por fin han entendido la necesidad de utilizar el haz de luz. Los demás creo que también.

Los alumnos muestran muy buena disposición. El alumno 11 muestra su satisfacción ante la explicación y afirma que por fin comprende los eclipses.

2. Conceptos tratados.

Ideas basadas en el modelo de Kepler:

- 1. Los objetos iluminados son fuentes secundarias de luz.*
- 2. Para ver los objetos el ojo no emite nada.*
- 3. La luz se propaga en línea recta y en todas las direcciones desde cada fuente puntual.*
- 4. Si el objeto que vemos es extenso podemos considerarlo como un conjunto de fuentes puntuales.*

5. *Para poder ver, al ojo le llega un haz divergente de luz procedente de cada punto del objeto. El rayo no es nada de la propia luz ya que sólo señala una de las direcciones de propagación de la luz.*

6. *La luz viaja en el vacío a una velocidad de $3 \cdot 10^8$ m/s. Esta velocidad es tan grande que, en los fenómenos habituales de visión, no somos capaces de detectar ningún tiempo entre la salida de la luz desde el objeto y su llegada al ojo para ser visto.*

3. Reflexión de la docente

Creo que los alumnos de 2º de Bachillerato han comprendido fácilmente los presupuestos del modelo de visión de Kepler como base para nuestra unidad didáctica. Se muestran muy felices al comprender mediante los dibujos explicativos que hemos hecho en la pizarra, cómo se explican los eclipses.

4. Interpretación

Los alumnos tienen suficiente madurez para comprender fácilmente el modelo de visión de Kepler.

1. ¿Qué hicimos?

Les pregunto ahora ¿cómo funciona el ojo humano?

Los alumnos debaten entre sí sin llegar a ninguna idea concreta. Leemos entonces el epígrafe de su UD correspondiente a la función del ojo en la visión.

2. Conceptos tratados

La función del ojo en el proceso de visión.

3. Reflexión de la docente

Creía que inicialmente los alumnos tendrán alguna idea de cómo funciona el ojo humano, pues en biología se trata la disección del ojo. Realmente los alumnos no tienen una idea clara sobre el ojo humano y es necesario que se lo explique al menos esquemáticamente.

4. Interpretación

Con la explicación mediante esquemas del ojo humano, los alumnos comprenden cómo es el ojo humano.

1. ¿Qué hicimos?

A.1. Sugiere un sistema físico que pueda ser utilizado como modelo de ojo humano y con el cual podamos estudiar cómo se comporta la luz en su interior para dar respuesta a las preguntas que nos hacíamos inicialmente: ¿Cómo vemos? ¿Cómo podríamos ver mejor? (Osuna, 2007)

Inicialmente algunos alumnos 7, 9 y 10 proponen que el ojo funciona como una lupa, o unas lentillas, en ningún momento plantean la idea de la necesidad de que haya una pantalla.

Ayudo a los alumnos a hacerse una idea de cómo funcionan las lentes, sacando varias lentes diferentes y dejándoles una pantalla y una fuente puntual. Les pido que pongan la fuente a diferentes distancias y observen qué pasa, insistiendo en la necesidad de utilizar una pantalla.

En grupos libres de 4 o 5 alumnos, los alumnos juegan con las lentes y las pantallas, están animados y entretenidos.

Explico a los alumnos que el ojo se puede considerar de forma simplificada como una lente convergente (que haría las veces de cristalino) y una pantalla en la que se formaría la imagen (que equivaldría a la retina). Insisto en que este modelo es una simplificación de la realidad, pues en el ojo no solamente el cristalino funciona como lente convergente y la imagen no se forma en la retina, sino en el cerebro, tras un complejo mecanismo fisiológico.

Los alumnos se muestran animados y comprenden el modelo propuesto. Algunos de ellos (alumnos 4 y 5) habían propuesto ideas similares tras el uso de las lentes.

2. Conceptos tratados.

A partir del funcionamiento fisiológico del ojo quiero llegar a un modelo físico del mismo. Busco que los alumnos comprendan que el ojo humano se puede simplificar como

un modelo físico compuesto por una lente convergente (de curvatura variable) y una pantalla en la que se formaría la imagen (la retina).

3. Reflexión de la docente

Espero que comprendan este sencillo modelo físico. Creo que es difícil que sean ellos quienes propongan en primera instancia el modelo a partir del estudio fisiológico del ojo humano.

4. Interpretación.

Es comprensible que inicialmente ellos no sean capaces de proponer el sistema lente-pantalla, para explicar la visión. Pero comprenden rápidamente su necesidad una vez que se lo explico y que utilizan los equipos de óptica que les suministro. La utilización de material de laboratorio es muy importante en este caso. Los alumnos pueden manipular las lentes y conseguir que se forme una imagen. Se muestran muy contentos y sorprendidos.

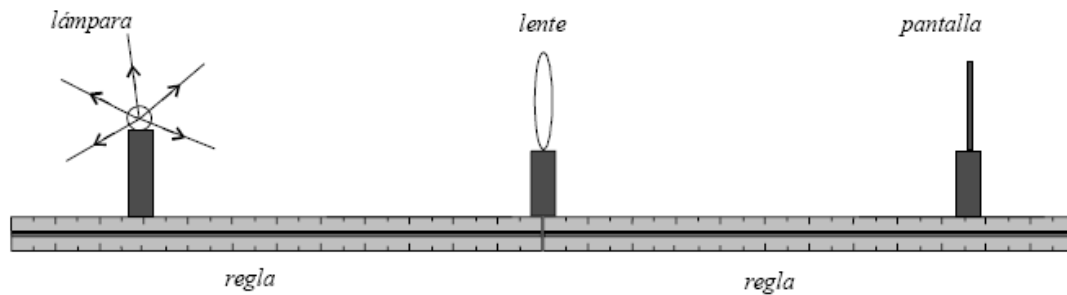
Jueves 30/01/2020 AULA B18 LABORATORIO DE FÍSICA

08:30-09:25 SESIÓN 2

GRUPO 1: 15 Alumnos

1. Metodología y descripción. ¿Qué hicimos?

A.2. Realiza el montaje siguiente, y encuentra alguna posición de la fuente, el objeto y la pantalla para que el observador vea en ella la imagen del objeto (la fuente de luz puntual). (Basado en Osuna 2003-2008)



A partir del modelo propuesto para el ojo realizamos un montaje en el laboratorio con una fuente de luz, una lente convergente y una pantalla para que los alumnos encuentren la imagen del objeto.

Los alumnos en grupos de 3 o 4 realizan el montaje y prueban distintas posiciones de la lente, la fuente y la pantalla.

Grupo 1: Alumnos 4, 5, 6, 7 y 8.

Grupo 2: Alumnos 9, 11, 12, 13 y 14.

Grupo 3: Alumnos 1, 2, 3 y 10.

Comprueban que si alejan la fuente deben de acercar la pantalla. Prueban con lentes de distinta convergencia e incluso con una lente divergente. Están animados, hablan entre sí y se corrigen.

Les planteo la idea de la existencia de un límite en la posición en la que hay que situar la pantalla para una fuente muy alejada, quiero trata de introducir el concepto de foco imagen. Parece que el grupo 2 lo está haciendo por su cuenta y comprenden el concepto. Me acerco al grupo 3 y los animo ayudándoles, parece que entienden lo que hay que hacer y se muestran sorprendidos ante el resultado obtenido.

El grupo 1 necesita un poco más de ayuda, la alumna 8 dice que la luz de le molesta en los ojos, y el alumno 1 no tiene mucha gana de trabajar.

Les planteo la hipótesis de cómo esto ha sido posible, recordándoles que todo objeto iluminado es un conjunto de fuente puntuales que emiten luz en todas las direcciones. Les explico que parte de la luz que emite la bombilla (nuestro objeto, que en este caso es una fuente primaria) llega a la lente, que hace que converja en la pantalla, formándose un

patrón iluminado que nos recuerda al pequeño filamento de la bombilla (que Considero casi puntual). Es lo que usualmente denominamos imagen óptica.

Quiero que los alumnos comprendan que la representación del filamento de la bombilla que ven en la pantalla es lo que usualmente se denomina imagen de un objeto. Busco que los alumnos se den cuenta de que la imagen se forma a una única distancia de la fuente y de la lente. Quiero afianzar el concepto de haz de luz e imagen óptica. Trato de introducir poco a poco el concepto de foco imagen.

2. Conceptos tratados.

Encontrar la imagen experimental óptica de un objeto.

3. Reflexión de la docente

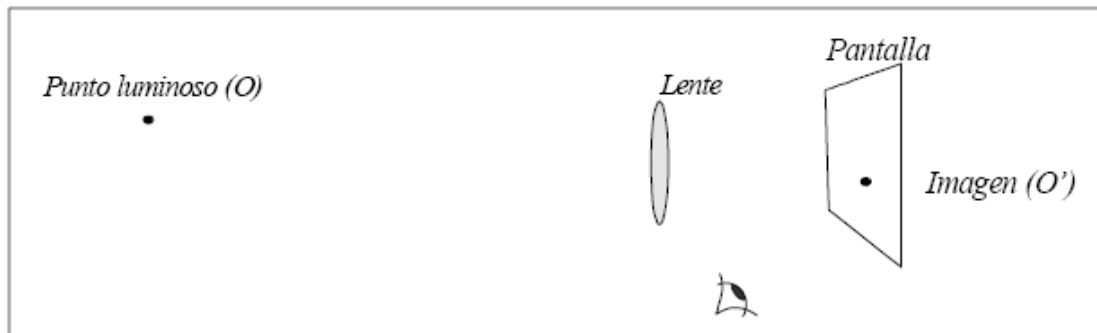
Creo que los alumnos realizarán el montaje según el esquema proporcionado por mí sin ningún problema y que serán capaces de formar la imagen de una fuente puntual. Considero que necesitarán ayuda para afianzar la idea de imagen óptica.

4. Interpretación.

Realmente es necesaria la ayuda del profesor para establecer estos conceptos, pero los alumnos los comprenden realmente, al trabajar con ellos manipulativamente.

1. Metodología y descripción. ¿Qué hicimos?

A.3. Realiza un trazado gráfico que explique la formación de la imagen con este sistema lente-pantalla basado en el modelo del ojo humano: (Osuna, 2007)



Los alumnos prueban experimentalmente su existencia y tratan de realizar un trazado gráfico explicativo, pero ellos solos no lo consiguen.

Quiero que los alumnos consigan individualmente o en pequeños grupos dibujar un esquema en el que muestren como parte de la luz que sale del punto luminoso en todas las direcciones, es decir el haz de luz que nos interesa en este caso, atraviesa la lente y vuelve a convergir, reuniéndose de nuevo en el punto imagen. Es lo que denominamos imagen óptica. Están sentados por parejas para trabajar conjuntamente.

Alumno 4, Alumno 5 y Alumno 6.

Alumno 6 y Alumno 7.

Alumno 9 y Alumno 11.

Alumno 13 y Alumno 14.

Alumno 2 y Alumno 3.

Alumno 4 y Alumno 10.

Alumno 6 y Alumno 7.

Alumno 1 y Alumno 12.

Necesito explicarles que la pantalla reemite la luz para que llegue a nuestro ojo y podamos ver la imagen.

Insisto en que los alumnos dibujen luz saliendo en todas las direcciones del punto objeto. Me cerciero de que los alumnos entienden que parte de esa luz, el haz de luz seleccionado, incide en la lente y que ésta hace que vuelva a convergir en un punto. Incido en que

elegimos parte de la luz, porque nos interesa saber que ocurre con la luz que inciden en la lente.

Insisto en la formación de la imagen a partir del haz de luz que habíamos seleccionado inicialmente.

2. Conceptos tratados.

Trazado de rayos e imagen óptica.

3. Reflexión de la docente

Creo que inicialmente los alumnos no podrán establecer ellos solos el trazado de rayos, necesitarán ayuda del profesor.

4. Interpretación

Considero que al principio les cuesta trabajo realizar la transferencia de conocimientos experimentales al trazado gráfico.

1. Metodología y descripción. ¿Qué hicimos?

A.4. Explora con este sistema lente-pantalla, la imagen que se ve en la pantalla cuando el objeto es extenso, por ejemplo, una diapositiva iluminada. Observa qué ocurre con el tamaño de la imagen según la posición del objeto. Realiza un trazado gráfico explicativo de estos casos.

Los alumnos preguntan si la distancia entre la lente y la pantalla tiene que ser fija, les digo que sí, que es lo que sucede en el ojo. Prueban con objetos iluminados a distintas distancias. Están entretenidos y animados.

La pareja formada por los alumnos 9 y 11, se anima a probar con lentes diferentes y con distintos objetos iluminados.

Después de que han acabado les explico otra vez que la imagen de un objeto extenso se forma punto a punto, que se puede formar la imagen de un objeto extenso a partir de sus puntos más extremos.

Realizo el trazado de rayos en la pizarra y les explico que la imagen está invertida.

Les doy una diapositiva con una ranura con forma de “1” para que prueben a iluminarla y observen cómo la imagen se forma invertida de arriba abajo y de izquierda a derecha. Les comento que posteriormente el cerebro reelabora la imagen para que tengamos la sensación de ver los objetos derechos.

La pareja formada por los alumnos 2 y 3, afirma que ellos ven la imagen derecha, están muy ilusionados pensando que “algo raro” está pasando. Les explico que es que su lente convergente está actuando como lupa porque tienen el objeto muy cerca de la lente, les digo que esta propiedad de las lentes convergentes la estudiaremos más adelante. Posteriormente alejan el objeto de la lente y comprueban que efectivamente la imagen está invertida.

Todos los grupos realizan correctamente la actividad, mostrando interés y comprensión.

2. Conceptos tratados.

Quiero que los alumnos manejen la fuente extensa de luz como un conjunto de fuentes puntuales. Busco que comprendan que la imagen de objetos extensos se forma punto a punto. Quiero afianzar la utilización del haz de luz para la formación de la imagen de un objeto extenso, de manera que de cada punto del objeto sale un haz de luz, que atravesará la lente y formará la imagen de dicho punto en la pantalla.

Introduzco la idea de que la imagen de los objetos se forma en nuestra retina invertida, y que posteriormente el cerebro reelabora la sensación de visión.

3. Reflexión de la docente

Espero que los alumnos comprendan que la imagen de un objeto extenso se forma punto a punto, del mismo modo que se forma la imagen de un objeto puntual. Espero que utilicen correctamente el concepto de haz de luz para formar la imagen de un objeto puntual, y por extensión de un objeto extenso.

Creo que se sorprenderán al ver la imagen invertida de los objetos iluminados.

4. Interpretación.

Los alumnos comprenden fácilmente los puntos tratados en esta actividad.

1. Metodología y descripción. ¿qué hicimos?

A.5 Utilizando el mismo montaje de la A.2, comprueba que al alejar la fuente debemos acercar la pantalla para ver su imagen. ¿Existe una posición límite de la pantalla al alejar la fuente? Realiza un trazado gráfico explicativo para el caso límite encontrado.

En los mismos grupos los alumnos realizan la experiencia con lentes de distinta convergencia que les proporciono. Entienden bien lo que se les pide con esta actividad. Hablan y razonan entre ellos, parecen entretenidos.

Casi todos los alumnos (excepto los alumnos 1 y 12), llegan a la conclusión de que hay un límite en el acercamiento del objeto a la lente, de manera que, si lo acercamos más, no se forma la imagen. A los otros grupos tengo que ayudarles un poco.

Finalmente me cercioro de que los alumnos manejan haces de luz correctamente, es decir, dibujan un haz de luz que saldrá del objeto e incidirá en la lente. Uno de los rayos que lo limita será el rayo que viene paralelo al eje óptico y pasa por el foco, y el segundo rayo será el que sale del objeto y pasa por el centro de la lente sin desviarse. Lo llamaremos rayo II, cuando desarrollemos el algoritmo correspondiente a las lentes, siempre teniendo en cuenta esta experiencia que hemos hecho en el laboratorio.

Insisto en que, para fuentes muy alejadas, el haz procedente de un punto, llega casi paralelo al eje óptico, es decir para una fuente muy alejada, cada rayo del haz paralelo incidente, procede del mismo punto de la fuente. Judit pregunta entonces si son dos rayos, y tengo que volver a explicar que son los rayos que limitan el haz que procede de un punto luminoso situando muy lejos.

Les explico la importancia de la reversibilidad del trazado gráfico.

Los alumnos se muestran contentos con las experiencias. Parecen comprender el funcionamiento de las lentes. Creo que el alumno 14 está a estas horas ya un poco despistado.

2. Conceptos tratados.

Foco imagen: lugar donde se concentra la luz procedente de la bombilla cuando esta se sitúa muy lejos (en el infinito).

Quiero que los alumnos comprendan la capacidad real de las lentes de focalizar la luz. Trabajamos con el foco imagen. Quiero que los alumnos comprueben que la luz que procede del infinito (o en nuestro caso de muy lejos) se concentra gracias a las lentes convergentes en un único punto, (que llamaremos foco imagen).

Lo asociaremos al trazado gráfico del rayo que procede del objeto que está en el infinito, es decir incide en el lente paralelo al eje óptico, y que pasa por el foco imagen. Lo llamaremos rayo I, cuando desarrollemos el algoritmo correspondiente a las lentes.

3. Reflexión de la docente

Creo que, tras realizar la experiencia, los alumnos comprenderán que hay un límite en el acercamiento del objeto a la lente, de manera que, si lo acercamos más, no se forma la imagen.

Creo que al principio a los alumnos les costará trabajo darse cuenta de que, para una fuente muy alejada, cada rayo del haz paralelo incidente, procede del mismo punto de la fuente. Creo que algunos alumnos pensarán que cada rayo del haz paralelo incidente proceda de un punto diferente de la fuente, en lugar de reconocer que es un haz de luz que sale del mismo punto de la fuente, pero que como ésta está muy lejos llega a la lente casi paralelo al eje óptico.

4. Interpretación

A los alumnos les cuesta darse cuenta del trazado de rayos correspondiente a una fuente lejana y que llega casi paralela al eje óptico, pero al realizar la práctica mejora su comprensión, puesto que lo relacionan con lo que están haciendo y comprobando ellos mismo.

Viernes 31/02/2020 AULA B18 LABORATORIO DE FÍSICA

09:25-10:20 SESIÓN 3

GRUPO 1: 15 Alumnos

1. Metodología y descripción. ¿Qué hicimos?

A.6 Con ese mismo montaje, observa que al acercar la fuente debemos alejar la pantalla para ver su imagen. ¿Existe alguna posición límite para la fuente a partir de la cual no se forma ninguna imagen? Realiza un trazado gráfico explicativo para ese caso límite.

Antes de comenzar la actividad les recuerdo lo aprendido hasta ahora mediante unos trazados gráficos explicativos en la pizarra. Les pregunto si está claro o si tienen alguna pregunta, pero parece que lo recuerdan y lo han comprendido.

En pequeños grupos los alumnos comienzan a probar distancias de manera reflexiva, al principio de la actividad les cuesta ponerse, están un poco cansados y dormidos. Me dicen que es viernes y que han tenido una semana dura.

Grupo 1: Alumnos 5, 6, 7 y 8.

Grupo 2: Alumnos 9, 11 y 12.

Grupo 3: Alumnos 1, 2, 3, 4 y 10.

Grupo 4: Alumnos 13, 14 y 15

Les ayudo a encontrar el foco objeto. Les explico en la pizarra la reversibilidad del trazado gráfico, y eso les ayuda a comprender que han de situar la fuente de luz a una distancia igual al foco imagen, es decir en el foco objeto (usamos lentes con la misma distancia focal a ambos lados)

Estamos usando inicialmente una lente convergente de $f=100\text{mm}$, es decir con 10 D.

Destaco el hecho de que existe un punto especial, cuando el objeto se sitúa en el foco, para el que la imagen se forma en el infinito, es decir, que no depende de la situación de la pantalla, que será igual para cualquier situación de la pantalla.

2. Conceptos tratados.

Quiero introducir el concepto de “Foco Objeto”. Lo haremos mediante un haz de luz definido por el rayo II, y el rayo III (que pasa por el foco y va hacia infinito tras atravesar la lente). También quiero volver a definir el concepto de “eje óptico” para que los alumnos afiancen su conocimiento.

Otro objetivo muy importante de esta actividad sería comprobar la reversibilidad del trazado gráfico.

3. Reflexión de la docente

Creo que los alumnos pueden llegar a la conclusión, con la ayuda del profesor, de que hay un límite de acercamiento del objeto a la lente, de manera que si lo acercamos más no se formaría la imagen

4. Interpretación.

Los alumnos comprenden el concepto de foco objeto con ayuda del profesor, les cuesta trabajo como imaginábamos relacionarlo inicialmente con el trazado gráfico, pero con la explicación y con la realización de la experiencia varias veces lo van comprendiendo.

1. Metodología y descripción. ¿Qué hicimos?

A.7 Sitúa ahora la lente a 11 cm de la pantalla y sin variar esta distancia (que es lo que ocurre en el ojo humano con el cristalino y la retina):

a) Anota la posición a la que debe situarse un objeto para que se forme la imagen en la pantalla.

b) Cambiando la lente por otra más gruesa (una de 20 dioptrías), obtén la nueva posición del objeto para ver la imagen en la pantalla. Esta situación es equivalente a la que realiza el cristalino del ojo humano (acomodación).

Los alumnos llevan a cabo la experiencia ya más despiertos.

Inicialmente utilizamos una lente de 10 dioptrías ($f=100\text{mm}$) y posteriormente una de 20 dioptrías ($f=50\text{mm}$)

Explico a los alumnos la relación existente entre estos trazados y lo que ocurre en el ojo humano, concretamente la relación existente con la visión de los objetos lejanos, en los que el ojo no necesita acomodación; y los objetos cercanos, en los que el ojo necesita acomodarse, necesita una lente con mayor potencia.

Preguntan si eso es lo que sucede también con las lentes de diferente graduación y les explico un poco.

2. Conceptos tratados.

Quiero que los alumnos relacionen el poder de convergencia de la lente con la distancia a la que forma la imagen de un objeto. Además, quiero que relacionen esta actividad con la naturaleza del ojo humano, en el cual el cristalino varía su poder de convergencia, para adaptarse a las diferentes distancias a las que se encuentran los objetos de los que formar una imagen en nuestra retina.

3. Reflexión de la docente

Espero que con la ayuda del profesor los alumnos comprendan la relación que hay entre el grosor de una lente, y su capacidad para formar imágenes de objetos situados a diferentes distancias de nosotros. Con este modo de trabajar los alumnos están más integrados en el aprendizaje. Me dicen que ojalá hiciéramos así todo el curso.

4. Interpretación.

Los alumnos comprenden bien lo que sucede con esta experiencia, y lo saben relacionar con lo que sucede en el ojo humano. Les gusta ver los cambios de convergencia de las lentes.

1. Metodología y descripción. ¿Qué hicimos?

A.8 En las actividades anteriores hemos introducido los siguientes elementos característicos de la lente: Foco objeto (F), Foco imagen (F'), Centro óptico (C) y eje óptico. Utilizando las propiedades de estos elementos realiza trazados gráficos para localizar la posición de la pantalla donde se ve la imagen del objeto en los siguientes casos:

a) Objeto alejado

b) Objeto cercano

c) Objeto entre el foco y la lente

d) Objeto extenso.

Antes de comenzar con la actividad les explico en el encerado los trazados gráficos otra vez, insistiendo en el paralelismo con las actividades experimentales que hemos realizado.

Los alumnos atienden y entienden, sobre todo al relacionarlo con las experiencias realizadas.

Después de la experiencia realizo una vez más el trazado de rayos insistiendo en que dichos rayos son parte de del haz de luz.

Les explico que con estos trazados podemos calcular la distancia a la que se formará una imagen de una lente, con el objeto situado a una distancia concreta de la lente. I. La actividad pretende familiarizar a los estudiantes con los trazados gráficos de formación de la imagen óptica en el sistema lente-pantalla.

Para el caso c) les explico que si la luz procedente de un punto luminoso, una vez atravesada la lente, no se vuelve a concentrar en un punto, no se puede ver la imagen de dicho punto luminoso en ninguna posición de la pantalla. Será una imagen virtual (es decir la luz no se puede concentrar en ese punto).

Les explico que la pantalla se tendrá que colocar donde se concentra la luz, que será a una distancia diferente en cada caso.

Recuerdo siempre la necesidad de utilizar el concepto de haz, destacando las características de los trazados de las diferentes actividades realizadas en este sentido para relacionarlos con el trazado gráfico adecuado de esta actividad.

Les recuerdo a los alumnos que los trazados gráficos están basados en el comportamiento de la luz.

Una vez más les recuerdo que si situamos una fuente puntual de luz en el foco de la lente, la imagen se forma en el infinito (o en nuestro caso muy lejos). Esta propiedad nos servirá para identificar el rayo III.

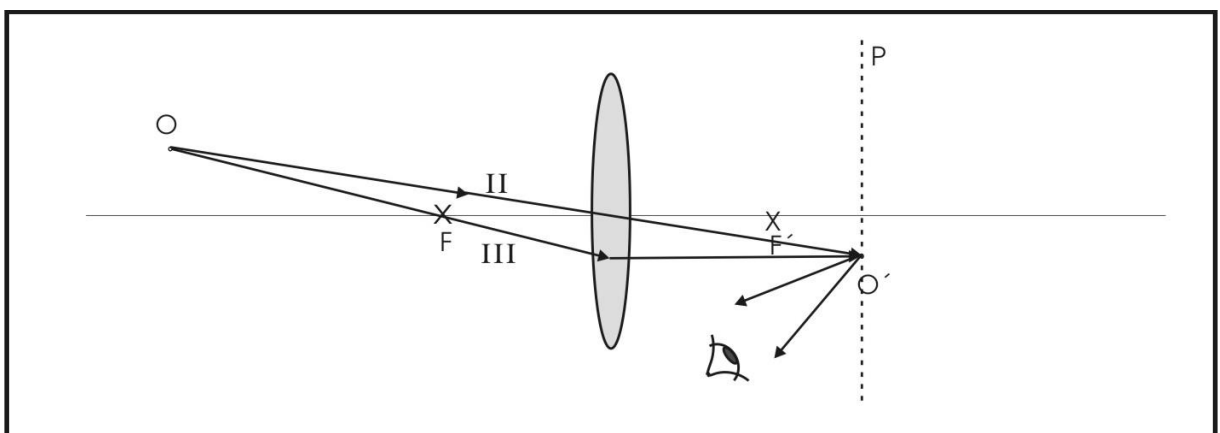
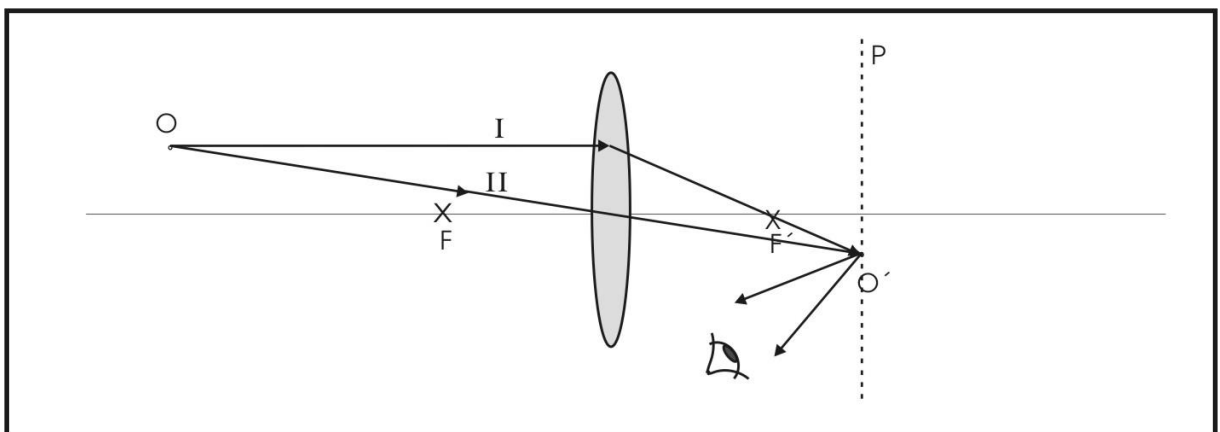
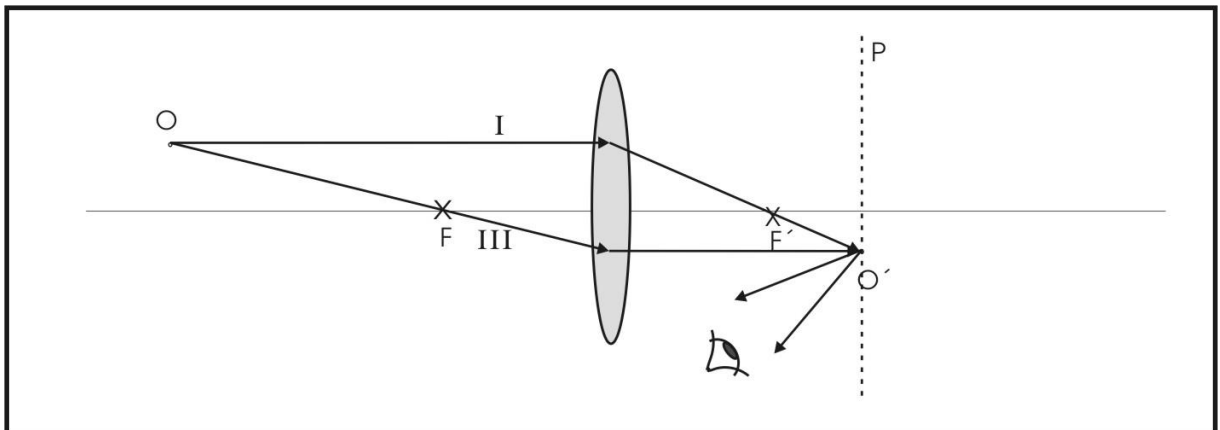
También, que, si situamos un objeto muy lejos de la lente, su imagen se formará en el foco. Nos basamos en esta propiedad para trazar el rayo I.

El rayo II es deducido de la geometría del rayo I y III, y de las características de las lentes.

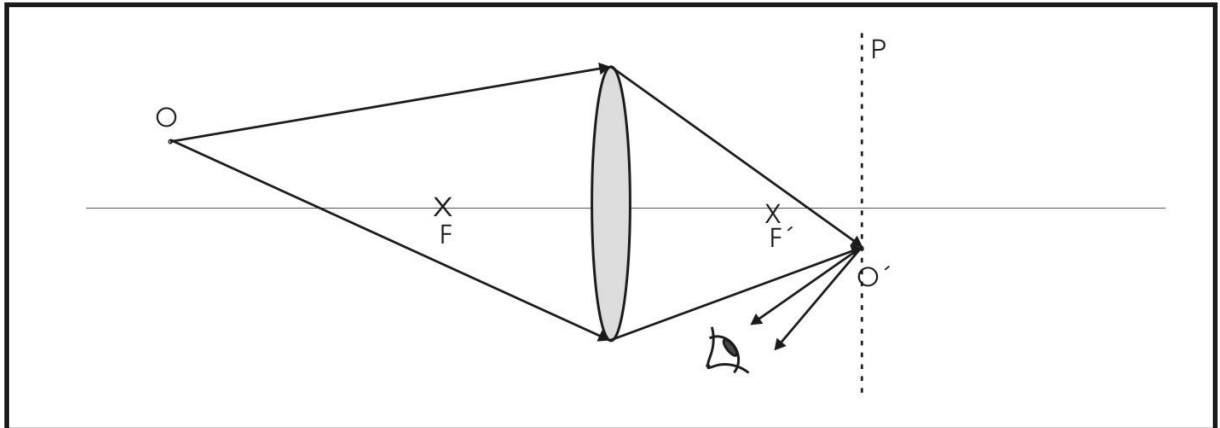
En todos los casos, les recuerdo que las fuentes extensas las Trato como si fueran un conjunto de fuentes puntuales. Escogemos ambos extremos y realizamos el trazado gráfico para cada uno de ellos.

Destaco el hecho de que la imagen que se forma es invertida. Por tanto, para encontrar la imagen de un objeto podemos utilizar dos de los tres rayos que conocemos. Siempre recordando que el rayo en sí mismo no significa nada, que simplemente delimita el haz de luz que seleccionamos.

Realizo los siguientes trazados para aclarar las anteriores explicaciones:



Siempre trazo el haz de luz total para que los alumnos interioricen que toda la luz que sale del objeto y pasa por la lente va a parar al punto imagen O' , independientemente del trazado de rayos que elijamos para encontrar el punto imagen.



Recuerdo a los alumnos que no utilizamos el trazado con el haz completo porque no sabemos dónde se formaría la imagen. Sin embargo, mediante las propiedades del foco objeto y foco imagen, y su aplicación al dibujo mediante los rayos III y II, si podemos encontrar dónde se forma la imagen.

Finalmente les cuento que hemos conseguido construir un algoritmo que permita localizar el lugar en que debemos situar la pantalla para que se vea la imagen de un objeto, a partir de las características de la lente que habíamos definido experimentalmente, F , F' , C y eje óptico. Es decir, hemos dado sentido físico al algoritmo que hemos creado.

2. Conceptos tratados.

Algoritmo de rayos I, II y III. Características de la lente: F , F' , C y eje óptico.

3. Reflexión de la docente

Creo que a los alumnos no les resultará fácil integrar todos los conceptos nuevos aprendidos en un algoritmo, al que quiero que den sentido físico.

4. Interpretación.

Efectivamente es necesaria una labor insistente del profesor para que los alumnos integren estos conceptos en un algoritmo con sentido físico, pero los alumnos finalmente lo consiguen. Pueden relacionar el algoritmo del trazado de rayos, con lo que le sucede a la luz cuando atraviesa la lente convergente. Creo que, de no haber realizado tantas

experiencias con la luz en el foco, en un lugar muy lejano y en el infinito, colocando la pantalla en diferentes lugares, los alumnos no lo habrían comprendido.

1. Metodología y descripción. ¿Qué hicimos?

A.9 Encuentra las distancias focales de las lentes suministrada por el profesor.

Los alumnos manejan con familiaridad el concepto de haz de luz, de foco imagen y foco objeto. También realizamos comparaciones con lo que podría ser el ojo humano. Realizamos trazados de rayos para ir familiarizándonos con el algoritmo del trazado de rayos, siempre a partir de su comparación con la experiencia de laboratorio. Los alumnos llegan a la conclusión de que es necesario un cambio en la curvatura de la lente si quiero que la imagen se forme con la pantalla a distinta distancia, si el objeto está a diferentes distancias de la lente. Lo hacemos experimentalmente con distintas lentes.

Les ayudo a comprender las características tan especiales que tiene la lente de nuestro ojo. El cristalino puede curvarse dependiendo de la distancia a la que se encuentre el objeto del que quiero formar la imagen en nuestro ojo.

Quiero que los alumnos interioricen el concepto de distancia focal. Para ello les dejamos lentes diferentes para que encuentren la distancia focal de cada una de ellas.

Les propongo como actividad sencilla la formación de una imagen de un paisaje que se ve desde la ventana. Para ello necesitamos una lente y una pantalla que puede ser una hoja blanca. Suponemos que el paisaje está lo suficientemente lejos como para considerarlo en el infinito, y la focalizamos con la lente en una pantalla. El profesor explicará que la luz que viene del infinito y atraviesa la lente se concentra en el foco de ésta. Así se puede encontrar el foco de la lente, que será la distancia que hay de la pantalla a la lente.

Les comento que no hace falta que el objeto sea puntual, con esta actividad comprobamos que se puede formar una imagen extensa. Les explico que la imagen de un objeto extenso se forma punto a punto, de manera que cada uno de los puntos se trata como si fuese un objeto puntual.

2. Conceptos tratados.

Distancias focales.

3. Reflexión de la docente

Creo que los alumnos necesitarán ayuda para comprender las características tan especiales que tiene la lente de nuestro ojo.

4. Interpretación.

Es un mecanismo complejo que necesita ser explicado en profundidad para comprenderlo bien.

1. Metodología y descripción. ¿Qué hicimos?

A.10 En el sistema lente-pantalla que estamos estudiando hemos aprendido a realizar el trazado gráfico que permite localizar la posición de la imagen, para diferentes posiciones del objeto. Hemos comprobado que, en función de la distancia del objeto a la lente, la distancia de la lente a la pantalla varía. Pero en el ojo, la pantalla no es móvil. ¿Cómo es posible formar la imagen de objetos situados a distancias diferentes? ¿Qué hipótesis lo podría explicar?

Al principio les explico otra vez el trazado de rayos de objetos a distintas distancias de la lente, lo que implica distintas distancias de la pantalla.

Entonces les planteo la pregunta de si la distancia de la lente a la pantalla fuese fija... ¿qué debe de hacer el ojo?

Los alumnos hablando entre ellos llegan a la conclusión, ayudados por mí, de que el ojo tiene que modificar la lente.

Se sorprenden con esta conclusión y preguntan cómo lo hace el ojo.

2. Conceptos tratados.

Busco que los alumnos comprendan la relación entre el poder de convergencia de las lentes y su distancia focal, y en consecuencia con la potencia de la lente.

Quiero que los alumnos se den cuenta de la maravillosa máquina que es nuestro ojo. Quiero que reflexionen a partir de las actividades realizadas anteriormente, y lleguen a la

conclusión de que es necesario un cambio en la curvatura de la lente, si quiero que la imagen se forme con la pantalla a la misma distancia de la lente.

3. Reflexión de la docente

Espero que los alumnos comprendan la necesidad de que el ojo tenga una lente como el cristalino que debe de cambiar de curvatura para poder formar la imagen en la retina de diversos objetos situados a diferentes distancias.

4. Interpretación.

El profesor debe de ayudar a los alumnos a relacionar esta actividad con las precedentes, explicándoles las características especiales de la lente que tiene nuestro ojo, el cristalino es una lente que se puede curvar, y por tanto actuar en ocasiones como una lente delgada y en otras como una lente más gruesa, dependiendo de la distancia a la que se encuentre el objeto del que quiero formar imagen en nuestro ojo. Sin la explicación del profesor los alumnos no llegan a comprender la profundidad de los conceptos tratados.

Miércoles 05/02/2020 AULA B18 LABORATORIO DE FÍSICA

08:30-09:25 SESIÓN 4

GRUPO 1: 15 Alumnos

1. Metodología y descripción. ¿Qué hicimos?

A.11 Desde el punto de vista fisiológico el diafragma del iris se regula inconscientemente variando el diámetro de la pupila ¿Cómo afecta a la imagen que se forma en una pantalla un diafragma situado delante de la lente y que tape parte de ella? Prueba tus predicciones experimentalmente.

Faltan dos alumnos: Alumno 8 y Alumno 13.

Al principio de la clase recuerdo lo que habíamos hecho hasta ahora. A modo de resumen explico todos los trazados gráficos relacionándolos con las distintas actividades experimentales. Intento que los alumnos hagan un esfuerzo de memoria, y al mismo tiempo se lo explicamos al alumno que ha faltado la sesión anterior.

Les pido que vuelvan a montar las lentes y pantallas y vuelvan a probar objetos a distintas distancias de las lentes, comprobando a qué distancia se forma la imagen. Así mismo les pido que cambien la lente de 100mm por la de 50mm observando qué ocurre con la imagen. También les pido que vuelvan a encontrar el foco imagen y el foco objeto de la lente. A modo de recapitulación de lo visto hasta ahora.

Los alumnos recuerdan y comprenden lo que hemos estado haciendo hasta hoy y lo relacionan con los trazados gráficos.

Entonces planteamos la actividad. Algunos alumnos opinan que se verá la mitad de la imagen, otros que no se verá nada. Se plantea un debate entre ellos. Los animo entonces a realizar la actividad con todas las persianas bajadas y las luces apagadas.

Se sorprenden mucho cuando ven que se forma la misma imagen, pero con menos intensidad.

2. Conceptos tratados.

Busco que los alumnos comprendan el funcionamiento del iris.

Con esta actividad busco saber si realmente los alumnos han interiorizado el concepto de haz de luz, y la idealización de un objeto como conjunto de fuentes puntuales. También quiero saber si a partir de dichos conceptos, son capaces de realizar el trazado de rayos para explicar la formación de la imagen de un objeto extenso en estos casos concretos.

Quiero los alumnos comprueben que si tapo media lente la imagen sigue viéndose, aunque con menos luminosidad.

3. Reflexión de la docente

Creo que algunos alumnos que no hayan interiorizado el concepto de haz de luz manifestarán que se verá la mitad de la imagen.

4. Interpretación.

Creo que, gracias a la explicación del profesor, y mediante los trazados gráficos adecuados, los alumnos relacionan el haz de luz con la formación punto a punto de la imagen del objeto y pueden comprender que se verá la imagen completa, pero con menor

intensidad luminosa. Al principio les cuesta trabajo comprenderlo pues quizás no han interiorizado realmente el significado del haz de luz.

1. Metodología y descripción. ¿Qué hicimos?

A.12 A partir del trazado geométrico realizado en la A.8 deducid una relación entre las distancias del objeto y de la pantalla a la lente y su distancia focal.

Les introduzco x y x' .

Definimos $x' = f(x, p)$

Les explico que si x aumenta x' disminuye. Si P aumenta x' aumenta.

Con x y x' encontramos una relación de proporcionalidad directa.

A partir del dibujo de la formación de la imagen de un objeto, mediante la utilización de la proporcionalidad entre triángulos semejantes, encontramos las siguientes relaciones de proporcionalidad.

$$x/f = y/y'$$

$$x'/f' = y'/y$$

Igualando encontramos:

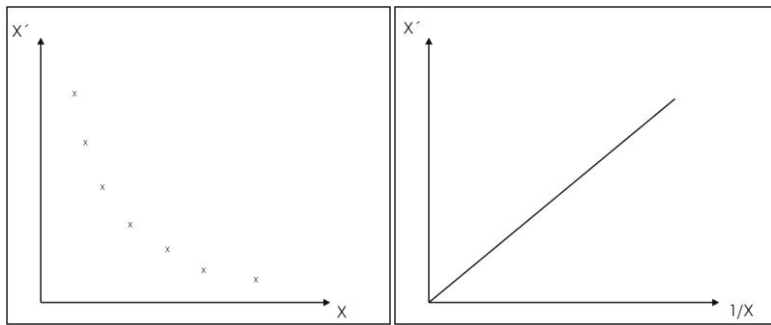
$$x/f = f'/x'$$

De donde podemos agrupar:

$$x \cdot x' = f \cdot f'$$

$$x \cdot x' = \text{cte.}$$

Si lo hacemos experimentalmente, y representamos gráficamente los datos obtenidos, obtendremos gráficas similares a las siguientes:



Podemos transformar la fórmula de Newton en la ecuación Gaussiana de las lentes utilizada habitualmente para resolver problemas analíticamente:

$$(s - f) \cdot (s' - f') = ff'$$

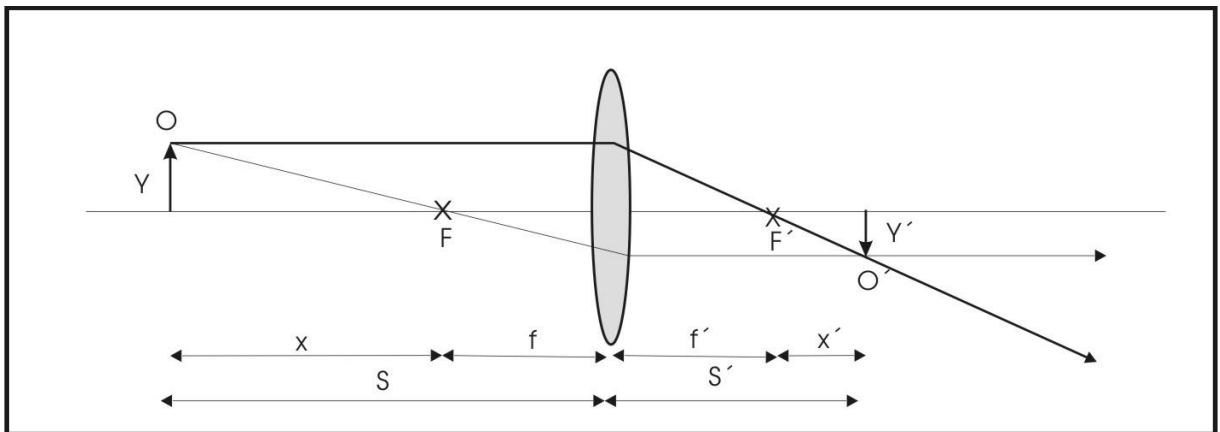
$$ss' - sf' - fs' + ff' = ff'$$

$$ss' / ss' - sf' / ss' - fs' / ss' + ff' / ss' = 0$$

$$1 = f' / s' + f / s$$

Les explico que esta ecuación es la que se utiliza para resolver los problemas que habitualmente se plantean en la EBAU sobre óptica.

$$1/s + 1/s' = 1/f'$$



2. Conceptos tratados.

Quiero que los alumnos relacionen las s y s' con las x y x' de la fórmula de Newton, ya que de ellas se deriva la ecuación de proporcionalidad más sencilla.

3. Reflexión de la docente

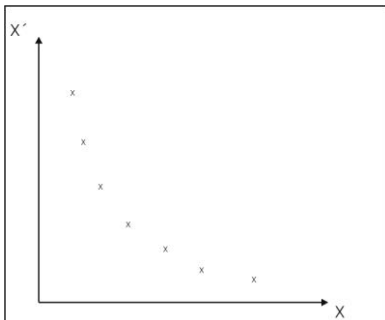
Espero que los alumnos comprendan por sí mismos que si s es grande, entonces s' es pequeño. Existe dos casos límite, uno cuando s tiende a infinito para el que s' tiende a f' , y otro cuando s tiende a f que s' tiende a infinito. Creo que entenderán por ellos mismos que si el poder de convergencia de la lente es grande, la distancia a la que se forma la imagen de un objeto dado será pequeña.

Aunque no pensamos que ellos mismos puedan llegar a plantear la relación entre x y x' .

1. Metodología y descripción. ¿Qué hicimos?

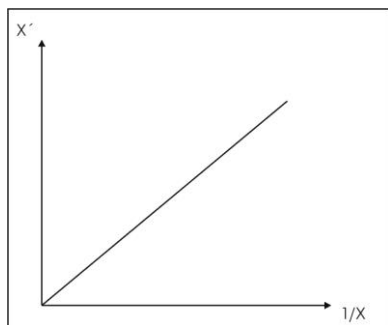
A.12.1 (Complementaria) Diseña y realiza una experiencia para contrastar la expresión encontrada en la actividad anterior.

Movemos el objeto acercándolo y alejándolo de la lente y anotamos la distancia a la que se forma la imagen en cada caso. Realizaremos una tabla para recoger los datos (x y x'). Representamos x' frente a x , y obtenemos una gráfica:



Los animo a representar x' frente a $1/x$, y les pregunto qué tipo de gráfica obtendríamos.

Los alumnos tardan en comprender que obtenemos una gráfica:



Es decir, podremos probar experimentalmente que $x \cdot x' = \text{cte.}$

A continuación, les propongo que probemos con la ecuación Gaussiana para las lentes. Les comento que con la lente que hemos estado utilizando de $f=100\text{mm}$, que apliquen la ecuación.

Les propongo que utilicen una distancia de la lente a la pantalla de 15 cm.

Buscan experimentalmente a qué distancia tendrían que situar el objeto para que se formase la imagen en la pantalla situada a 15 cm, con la lente de 10cm de distancia focal.

Se muestran entretenidos y contentos. Los distintos grupos llegan a la conclusión que la distancia habría de ser de 35 cm.

Los animo a comprobar si se cumple la ecuación, y se muestran muy contentos al comprobarlo. Dicen que les encanta esta forma de trabajar.

2. Conceptos tratados.

Comprobación experimental de la ecuación de Gauss para las lentes.

3. Reflexión de la docente

Imagino que los alumnos necesitarán un poco de ayuda con el montaje y explicación de la experiencia.

4. Interpretación.

Una vez que les ayudo con el montaje, ellos se desenvuelven bien y son capaces de encontrar experimentalmente y matemáticamente la relación propuesta por la ecuación de Gauss. Están ya muy familiarizados con el montaje experimental que estamos utilizando.

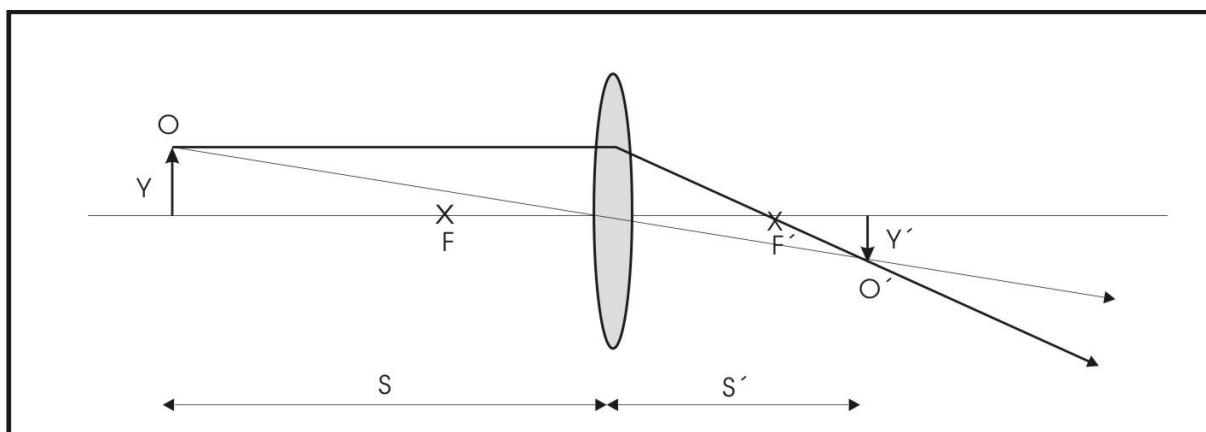
1. Metodología y descripción. ¿Qué hicimos?

A.13 Para cada tipo de lente, la posición del objeto condiciona la posición de la pantalla dónde se ve la imagen y el tamaño con que se ve, deduce del siguiente trazado gráfico la relación entre el tamaño de la imagen y el tamaño del objeto (aumento lateral, β) en función de esas distancias.

Al principio de la actividad les recuerdo a los alumnos la necesidad de la modelización de un objeto extenso como un conjunto de objetos puntuales. Intento que los alumnos se fijen en el hecho de que la imagen de un punto del extremo superior del objeto se formará en la parte inferior de la pantalla. Es decir, la lente convergente forma la imagen invertida. Les recuerdo que, en último término, es el cerebro conectado mediante el nervio óptico a la retina, el que elabora la sensación de visión.

Incido una vez más en la idea de que la imagen solamente existe como tal, si hay un observador. Si no sería simplemente una distribución de puntos donde se concentra la luz.

A continuación, realizo el siguiente trazado gráfico en la pizarra:



Les recuerdo que cuanto mayor es “s”, la distancia a la que se situaba el objeto respecto de la lente, menor sería “s’” la distancia respecto de la lente a la que se formaría la imagen. Llega un momento en que por mucho que alejemos el objeto (hasta el infinito), la imagen no se forma más cerca de una determinada distancia (foco de la lente). Por otra parte, cuánto más pequeña sea “s”, la distancia a la que situamos el objeto respecto de la lente, mayor será “s’”, la distancia a la que se forma su imagen. Existe un límite, es decir una distancia, (que será el foco objeto de la lente), de manera que, si situamos el objeto a dicha distancia, su imagen se formará en el infinito.

Intento que lleguen ellos por su propia cuenta a la fórmula de Newton, es decir, si llamamos $x:s-f$, y $x':s'-f'$, llegamos a una ecuación muy sencilla, la ecuación de Newton: $xx':f^2$. Les ayudo a darse cuenta de que f^2 : cte.

Indico a los alumnos que, mediante el trazado gráfico para encontrar la imagen de un objeto extenso se puede deducir la expresión que relaciona el aumento de la imagen con

los diferentes tamaños de objeto e imagen, y con las distancias del objeto y de la imagen a la lente (Los animo a utilizar triángulos semejantes).

Les dejo un poco de tiempo para que lo intenten ellos mismos.

Pasado un tiempo les indico que partir del dibujo encontramos que $y'/y = s'/s$ en términos absolutos.

Pero para definir el aumento lateral tenemos que tener en cuenta que dado que la altura y' es hacia abajo, le asignamos un signo negativo, para representar que la imagen está invertida. Por tanto, la expresión del aumento lateral será:

$$y'/y = \beta = -s'/s$$

Los alumnos preguntan una vez más el porqué del signo menos. Se lo vuelvo a explicar.

2. Conceptos tratados.

Busco que los alumnos puedan explicar con un sistema lente-pantalla, como se puede apreciar el tamaño o la lejanía de los objetos que vemos.

Quiero que comprendan la relación entre la distancia del objeto a la lente y la distancia a la que se forma la imagen, y cómo esto está relacionado con el tamaño que tendrá la imagen formada.

Aumento lateral: $y'/y = \beta = -s'/s$

Para definir el aumento lateral tenemos que tener en cuenta que dado que la altura y' es hacia abajo, le asignamos un signo negativo, para representar que la imagen está invertida.

3. Reflexión de la docente

Creo que los alumnos no podrán llegar por sí mismos al planteamiento de la ecuación del aumento lateral de una lente. Sin embargo, pensamos que, con un poco de ayuda del profesor, comprenderán el trazado y la ecuación.

4. Interpretación.

Con ayuda del profesor los alumnos comprenden el trazado y la ecuación del aumento lateral, pues siempre lo relacionamos con las experiencias realizadas, lo que les ayuda muchísimo en la comprensión.

1. Metodología y descripción. ¿Qué hicimos?

A.14. Con frecuencia se caracteriza a las lentes por su poder de convergencia o potencia. Propón una relación entre la potencia de una lente y su distancia focal.

Al principio les pido que recuerden qué sucedía con las lentes de $f=100\text{mm}$ y $f=50\text{mm}$. Les pido que recuerden cuál de las dos formaba las imágenes más cerca de la lente. Algunos alumnos dicen que la de 50mm .

Les digo que vuelvan a realizar la experiencia.

Entonces todos comprueban que con la lente de 50 mm la imagen se forma más cerca de la lente. Les digo entonces que esa lente tiene mayor poder de convergencia, y que observen que el poder de convergencia es inversamente proporcional a la distancia focal.

Ellos comprenden perfectamente esta relación.

Entonces explico a los alumnos la relación existente entre la distancia focal y las dioptrías de una lente. La potencia de una lente es igual a la inversa de la distancia focal: $P = 1/f$. Siempre que la distancia focal se exprese en metros, la potencia se medirá en dioptrías.

2. Conceptos tratados.

Potencia de una lente.

3. Reflexión de la docente

Creo que haciendo una analogía con las experiencias que hemos llevado a cabo, los alumnos podrán comprender que la capacidad de convergencia de una lente es inversamente proporcional a su distancia focal.

4. Interpretación.

Al relacionar siempre las fórmulas matemáticas usadas con las actividades experimentales realizadas, los alumnos comprenden fácilmente los conceptos tratados.

Jueves 06/02/2020 AULA B18 LABORATORIO DE FÍSICA

11:35-12:30 SESIÓN 5

GRUPO 1: 15 Alumnos

Faltan 2 alumnos: Alumno 6 y Alumno 14.

1. Metodología y descripción. ¿Qué hicimos?

A.15 Resuelve actividades EBAU de manejo numérico de estas ecuaciones válidas para las lentes delgadas y con la aproximación paraxial.

Les ayudo a resolver los problemas propuestos y les recuerdo en cada ejercicio la correspondencia entre el algoritmo utilizado para resolver un problema y la realidad física en que está basado, y que hemos trabajado en las anteriores actividades.

2. Conceptos.

Todos los vistos hasta ahora en la Unidad Didáctica.

3. Reflexión de la docente

Creo que en los primeros ejercicios los alumnos necesitarán ayuda para resolverlos, y poco a poco ellos serán capaces de hacerlo solos.

4. Interpretación

Al afianzar el manejo de la ecuación de gauss en la resolución de problemas de óptica, los alumnos lo relacionan con lo aprendido en las experiencias y poco a poco se ven capaces y animados.

1. Metodología y descripción. ¿Qué hicimos?

Seguimos realizando ejercicios EBAU sobre óptica. Los alumnos traían algunos hechos de casa. Los corrijo en la pizarra preguntando en todo momento qué teníamos que hacer y si entendían los resultados.

En todo momento les sigo recordando la analogía entre el logaritmo de rayos que aplicamos para el trazado gráfico y su correspondencia física con los haces de luz que

manejamos en las actividades de laboratorio. Me aseguro de que lo entienden todos. También insisto en que las distancias han de estar todas en la misma unidad, y que cuando utilicemos la ecuación de las dioptrías, la distancia focal ha de estar en metros.

Los alumnos se muestran capaces, los tenían bien hechos de casa, en su mayoría.

Algunos alumnos todavía plantean alguna duda acerca de la ecuación de gauss y el aumento lateral.

Los alumnos comprenden la correspondencia entre el algoritmo que utilizamos y lo que sucede en realidad con la luz.

2. Conceptos.

Todos los vistos hasta ahora en la Unidad Didáctica.

3. Reflexión de la docente

Creo que hoy ya serán capaces de resolver los ejercicios por sí mismo, quizás con un poco de ayuda puntual del profesor.

4. Interpretación

Al afianzar el manejo de la ecuación de gauss en la resolución de problemas de óptica, los alumnos lo relacionan con lo aprendido en las experiencias y poco a poco se ven capaces y animados.

Viernes 07/02/2020 AULA B18 LABORATORIO DE FÍSICA

09:25-10:20 SESIÓN 6

GRUPO 1: 15 Alumnos

Seguimos haciendo actividades EBAU

1. Metodología y descripción. ¿Qué hicimos?

A.16 Realiza una recapitulación de lo tratado hasta aquí resaltando cuál era el problema que Trato de resolver, las hipótesis implícitas en el modelo de visión y las pruebas realizadas para su contraste experimental. Describe con profundidad el modelo que explica cómo vemos los objetos. ¿Qué nuevos problemas podremos resolver a continuación?

Realizamos conjuntamente la recapitulación de las ideas sobre cómo vemos, haciendo referencia al modelo de visión de Kepler.

Les recuerdo que nuestro modelo de ojo era muy sencillo, una lente convergente y una pantalla.

Los alumnos se encuentran ya capaces de realizar trazados de rayos con sentido. Diferencian entre imagen real virtual. Conocen las diferencias convergencias de distintas lentes y lo asocian a la capacidad del cristalino de enfocar a distintas distancias. Se ven animados y contentos.

2. Conceptos tratados.

Finalmente les propongo a modo de resumen las siguientes ideas:

- *Los objetos que vemos son fuentes secundarias de luz.*
- *Las fuentes luminosas extensas se pueden considerar como conjuntos de fuentes luminosas puntuales.*
- *Desde cada fuente puntual se emite un haz esférico de luz. Los rayos (líneas rectas para representar la luz) no son nada de la propia luz, sólo indican los límites del haz de luz que Considero.*
- *La luz es una entidad física que se propaga en el espacio, independiente de las fuentes y del observador y, por tanto, puede ser objeto de estudio por parte de la Física.*
- *El ojo humano funciona como un sistema óptico formado por una lente convergente y una pantalla.*
- *Para ver bien, es necesario formar una imagen en la retina. Esta imagen se forma de la siguiente manera: cada haz divergente de luz emitido por cada punto del objeto, después de entrar en el ojo, converge hasta un punto de la retina. Como en cada punto*

de la imagen se concentra parte de la luz emitida por cada punto del objeto, la forma y tamaño de la imagen que percibimos es una réplica a escala del tamaño y forma del objeto que vemos.

- Para ver bien los objetos cercanos, la lente del cristalino aumenta su curvatura (acomodación) con lo que los haces de luz convergen y forman la imagen en esa misma pantalla (la retina).

- La posición del objeto que vemos mediante una lente y la posición de su imagen están relacionados mediante la siguiente ecuación:

$$1/s + 1/s' = 1/f$$

- El aumento lateral de una lente $\beta = - s' / s$

3. Reflexión de la docente

Imagino que, aunque los alumnos hayan comprendido los conceptos que hemos tratado hasta ahora, no serán capaces de hacer una recapitulación completa como la que les propongo al final. De todos modos, creo que si serán capaces de recordar las ideas principales tratadas.

4. Interpretación.

Aún a pesar de comprender los objetos tratados, a los alumnos les cuesta trabajo proponer por sí mismo los conceptos principales.

Lunes 10/02/2020 AULA B18 LABORATORIO DE FÍSICA

10:20-11:15

GRUPO 1: 15 Alumnos

Hoy no tenemos clase porque hay una charla sobre las mujeres en la ciencia.

Miércoles 12/02/2020 AULA B18 LABORATORIO DE FÍSICA

10:20-11:15 SESIÓN 7

GRUPO 1: 15 Alumnos

Faltan 2 alumnos: Alumno 5 y Alumno 13.

1. Metodología y descripción. ¿Qué hicimos?

A.17 A veces se piensa que la imagen de un objeto que vemos al mirar un espejo plano está pegada en él. ¿Qué observaciones crees que contradicen esta idea? ¿Qué características tiene la imagen que se ve?

Comenzamos una serie de actividades dedicadas al estudio de los espejos. Quiero comprobar que nuestro modelo de visión es válido para estudiar la visión indirecta. Quiero que los alumnos comprendan que desde el lugar donde parece estar la imagen no puede proceder la luz.

Propongo a los alumnos la observación de objetos en varios espejos planos y les pido que definan las características de la imagen. Los alumnos en grupos se observan en los espejos.

Posteriormente montamos el carril con una ranura un espejo plano y el disco de Harl, para que observen el haz de luz como incide en el espejo y cómo se refleja. Quiero que vayan pudiendo intuir la ley de la reflexión.

El alumno 11 propone que el rayo incidente y el rayo reflejado forman el mismo ángulo respecto de la normal.

Posteriormente les ayudo a definir el concepto de imagen virtual: El punto O' , donde se localiza lo que se ve al mirar al espejo, se suele denominar *imagen virtual* del objeto puntual O , ya que de él parece proceder la luz que llega al ojo, pero O' no es una fuente luminosa.

2. Conceptos tratados

Quiero que los alumnos observen que la imagen se ve detrás del espejo, derecha y virtual (desde el lugar donde parece estar la imagen no puede proceder la luz).

3. Reflexión de la docente

La investigación bibliográfica nos indica que algunos estudiantes creen que las imágenes realmente existen en los espejos, donde pueden verse (Galili and Hazan, 2000b). La

inversión lateral de la imagen se explica mediante asunciones *ad hoc*. Los estudiantes la atribuyen a una propiedad del espejo. La formación de las imágenes virtuales se explica hoy en día mediante el proceso que tiene lugar detrás de la retina y por tanto pertenece a un aspecto de la visión explicado por la psicología.

No obstante, espero que los alumnos, a partir de las observaciones necesarias, lleguen a comprender que la imagen que vemos es derecha, de igual tamaño y parece que está detrás del espejo, es decir es una imagen “virtual” (porque desde ese lugar no puede proceder la luz)

4. Interpretación

Los alumnos comprenden fácilmente que la imagen que forman los espejos es virtual, puesto que no puede venir la luz de detrás del espejo.

1. Metodología y descripción. ¿Qué hicimos?

A.18. De acuerdo con el modelo de visión que hemos elaborado, vemos un objeto cuando un haz divergente de luz procedente de cada punto del mismo entra en el ojo y éste forma una imagen en la retina. Formula una hipótesis, coherente con nuestro modelo, que explique cómo vemos un objeto puntual O al mirar a un espejo plano. Realiza un trazado gráfico.

Quiero que los alumnos integren en el modelo de visión que habíamos desarrollado hasta ahora esta nueva experiencia.

Los alumnos aplican lo experimentado al trazado de rayos, se muestran animados, aunque no son capaces de realizar un trazado gráfico que explique dónde se forma la imagen.

Les ayudo dibujando en la pizarra un espejo, un objeto luminoso y un ojo. Les recuerdo que como habíamos comprendido en actividades anteriores, para poder ver una imagen, ha de llegarle al ojo un haz de luz divergente.

Les recuerdo que del objeto puntual sale un haz de luz, que dicho haz de luz se refleja en el espejo y vuelve a convergir en el lugar en que se forma la imagen de dicho punto. Insisto en que para cada uno de los rayos que marcan los límites del haz se cumple la ley

de la reflexión, es decir, que el rayo reflejado subtienda el mismo ángulo con la normal que el ángulo incidente.

Les explico que a partir de un solo rayo no se puede definir dónde se encuentra la imagen, insisto en que el dibujo de un solo rayo sólo es válido para explicar la reflexión de la luz al llegar al espejo, pero no para la formación de imágenes.

2. Conceptos tratados.

Quiero que los alumnos integren en el modelo de visión que habíamos desarrollado hasta ahora la reflexión de la luz, y cómo realizar un trazado gráfico explicativo.

3. Reflexión de la docente

Creo que inicialmente algunos alumnos pueden tener dificultades a la hora de realizar los trazados gráficos correctamente ya que pueden realizar trazados con un único rayo. Espero que algunos alumnos todavía dibujen un solo haz de luz.

4. Interpretación.

Los alumnos, aunque comprenden la necesidad del haz de luz, a veces todavía intentan explicar la formación de una imagen con la utilización de un único rayo de luz. Esto es fácil de entender puesto que en muchos textos de física aún utilizan rayos para la formación de las imágenes, sin explicar, ni utilizar el haz de luz.

1. Metodología y descripción. ¿Qué hicimos?

A.19. En caso de que el objeto situado frente al espejo fuese extenso, realiza el trazado geométrico adecuado que explique la formación de la imagen en un espejo.

Quiero que los alumnos intenten repetir el trazado de la reflexión de la luz para un par de puntos extremos del objeto, insistiendo en la hipótesis que repetidamente estamos aplicando en estos casos: considerar los objetos extensos que vemos como conjuntos de fuentes puntuales.

Los alumnos repiten el trazado de la reflexión de la luz para un objeto extenso.

Los alumnos 6 y 7 preguntan que dónde está el observador en relación al espejo y al objeto luminoso.

Tras la realización de la actividad los alumnos comprenden que la imagen que dibujamos solo tiene sentido en referencia al observador, puesto que es virtual.

Los alumnos se sienten cómodos con los ejercicios. Parecen comprenderlo bien. Los alumnos 4 y 11 están muy sorprendidos de la simetría especular, que se observa en el trazado de rayos.

Refuerzo estas dos ideas básicas en los alumnos:

- a) La imagen que dibujamos sólo tiene sentido por referencia al ojo del observador. No se trata, como hemos discutido anteriormente, de un objeto situado detrás del espejo, ya que ni siquiera la luz puede proceder de allí, por eso se le denomina imagen virtual. Para reforzar este concepto, Pregunto a los estudiantes una vez construida gráficamente la posición de la imagen: ¿Seguirá existiendo esa imagen si cerramos los ojos? Los alumnos contestan que no.
- b) La simetría especular, tal y como se deduce de este dibujo, consiste únicamente en que los puntos del objeto más cercanos al espejo dan una imagen más cercana al mismo y los puntos más alejados dan la imagen más alejada, sin producir una inversión de derecha/izquierda. Sin embargo, en los libros de texto habituales, con frecuencia, se ponen ejemplos como el de un conductor que ve las letras de AMBULANCIA correctamente mirando por el espejo retrovisor del vehículo si éstas (y la palabra completa) están escritas con una inversión derecha/izquierda. En este caso es necesario precisar que el observador está situado entre el espejo y el objeto y que si el conductor tuviera la palabra AMBULANCIA y el espejo delante de él no sería necesaria esa inversión de las letras para poder leerla. Se puede escribir la palabra AMBULANCIA en un plástico transparente y leer su imagen sin dificultad cuando el plástico y el espejo están delante del observador, por lo que se puede comprender que la imagen de esa palabra se lee sin inversiones derecha/izquierda como, a veces, suele explicarse.

Les explico que la reflexión en el espejo de cualquier objeto parece ser una inversión de adelante a atrás del objeto. Es decir, el espejo invierte el orden de las cosas en una dirección perpendicular a su superficie.

Con esto en la cabeza, podemos entender por qué el espejo aparentemente invierte la mano. Es debido a la inversión de adelante atrás.

2. Conceptos tratados.

Imagen de un objeto extenso en un espejo. Trazado de la reflexión de la luz para un par de puntos extremos del objeto

3. Reflexión de la docente

Creo que quizás al principio a los alumnos les cuesta trabajo darse cuenta que de cada punto del objeto tiene que salir un haz de luz hacia el espejo, y que cada rayo que delimita dicho haz ha de cumplir la ley de la reflexión, formando un haz divergente.

Creo que puede haber algún alumno que no se dé cuenta de que la luz no puede provenir de detrás del espejo.

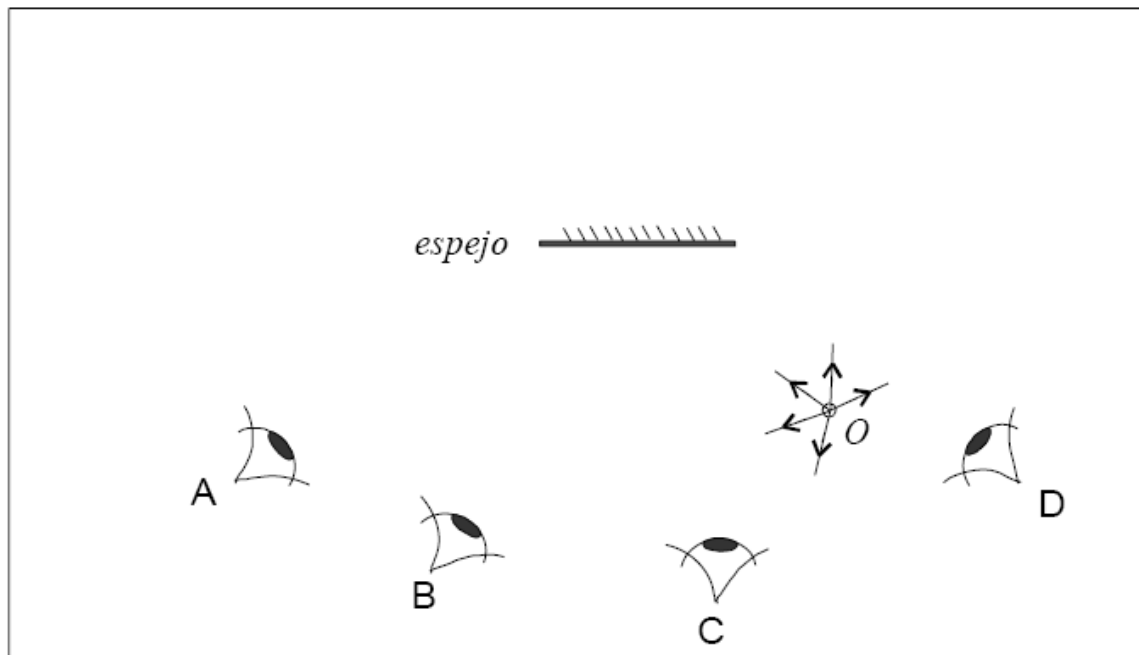
4. Interpretación.

Tras la realización del trazado gráfico y la explicación del profesor los alumnos son capaces de comprender el trazado gráfico de la imagen, y su característica virtual.

Tras la realización de la actividad los alumnos comprenden que la imagen que dibujamos solo tiene sentido en referencia al observador, puesto que es virtual.

1. Metodología y descripción. ¿Qué hicimos?

A.20. En el esquema siguiente se representa un espejo plano, un objeto puntual (O) y un observador en varias posiciones. Dado que la posición de la imagen que se ve, no depende de la posición del observador, completa un diagrama de rayos para interpretar desde qué posiciones del observador se podrá ver la imagen al mirar al espejo (Osuna 2003-2008).



Quiero deducir, mediante el trazado gráfico realizado para localizar la imagen que vemos al mirar al espejo que la distancia de la imagen, O' , al espejo, es igual a la distancia del objeto, O , al espejo.

Les comento a los alumnos que esta consecuencia del trazado gráfico, parece coincidir con nuestras primeras observaciones experimentales. Por tanto, nuestra hipótesis de la reflexión de la luz que explica cómo vemos al mirar a un espejo, está de acuerdo con la experiencia.

Vuelvo a recordar a los alumnos que hemos obtenido el trazado gráfico a partir de la aplicación de la hipótesis de la reflexión de la luz, lo cual implica que la imagen sólo sea vista por algunos de los observadores. Debemos insistir en que, si se localizara en la superficie del espejo, como algunos de los alumnos creía antes de la enseñanza, debería ser vista desde cualquier posición delante del espejo.

Les explico que se puede obtener de un trazado gráfico sencillo, sin necesidad de utilizar semicírculos graduados para la medida de ángulos, aprovechando que en la actividad anterior hemos obtenido que la posición de la imagen está a la misma distancia del espejo que el objeto. Por ello, podemos, situar el punto imagen, O' , y de él trazar el haz reflejado en el espejo. Las líneas punteadas trazadas en el esquema siguiente indican que el haz de luz en esa zona no existe, aunque el observador pueda interpretar que proceda del punto O' .

Les comento que a partir de este trazado gráfico se deduce que sólo a los ojos de los observadores A y B les llega parte del haz de luz divergente reflejado en el espejo y son los únicos que verán la imagen.

Destaco que la respuesta la hemos obtenido de la aplicación estricta de la hipótesis de la reflexión de la luz, pero será necesario llamar la atención de los alumnos que la imagen sólo es vista por unos observadores mientras que, si se localizara en la superficie del espejo, como algunos creen antes de la enseñanza, debería ser vista desde cualquier posición delante del espejo.

2. Conceptos tratados.

Según la secuencia de enseñanza derivada de la estructura problematizada propuesta para el tema, nuestra intención es resolver el problema de la visión indirecta, por lo que el estudio de la reflexión de la luz en los espejos planos se hace de forma subordinada al problema de la visión. Las leyes de la reflexión no se introducen, por ello, como consecuencias empíricas de determinada concepción sobre la naturaleza de la luz, sino como hipótesis lógicas que refuerzan el modelo de visión y le confieren consistencia y aplicabilidad.

3. Reflexión de la docente

Espero que los alumnos obtengan la respuesta a la actividad de un trazado gráfico sencillo, aprovechando que en una actividad anterior han encontrado que la posición de la imagen está a la misma distancia del espejo que el objeto. Por ello, pueden situar el punto imagen O' , y de él trazar el haz reflejado en el espejo. Las líneas punteadas trazadas en el esquema indican que el haz de luz en esa zona no existe, aunque el observador pueda interpretar que proceda del punto O' .

Espero que los alumnos al principio crean que los observadores A, B y C puedan ver el objeto. Con las explicaciones del profesor confiamos en que deduzcan que sólo a los ojos de los observadores A y B les llega parte del haz de luz divergente reflejado en el espejo y que son los únicos que verán la imagen.

4. Interpretación.

Se trata de deducir mediante el trazado gráfico que la distancia a la que se sitúa un objeto es igual a la distancia a la que se forma la imagen. Los alumnos no son capaces al principio

de realizar el trazado de rayos correctamente y deducir qué observadores verán la imagen, creyendo que el observador C también vería la imagen.

Al realizar la experiencia con espejos planos en el laboratorio, los alumnos comprenden que la imagen no está pegada al espejo, porque en ese caso se vería desde todas las posiciones (es decir 180° delante del espejo), y en realidad no ocurre así.

Comprenden entonces con el trazado gráfico que les explico que solamente los observadores A y B podrían ver la imagen del objeto.

Si bien la imagen no está pegada al espejo, si está siempre en la misma posición. Además, la imagen está detrás del objeto y justo a la misma distancia del espejo que el objeto.

Se aprecia buena implicación de la mayoría de los alumnos. Manifiestan su preferencia por este tipo de clases más activas y participativas.

Jueves 13/02/2020 AULA B18 LABORATORIO DE FÍSICA

11:35-12:30 SESIÓN 8

GRUPO 1: 15 Alumnos

1. Metodología y descripción. ¿Qué hicimos?

A.21 Explora cómo se ven los objetos al mirar a un espejo esférico cóncavo (puede usarse uno de maquillaje). En concreto realiza las siguientes observaciones:

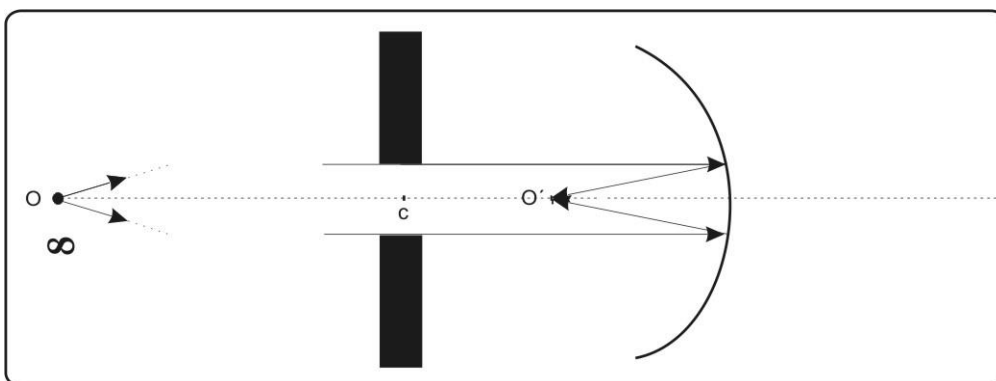
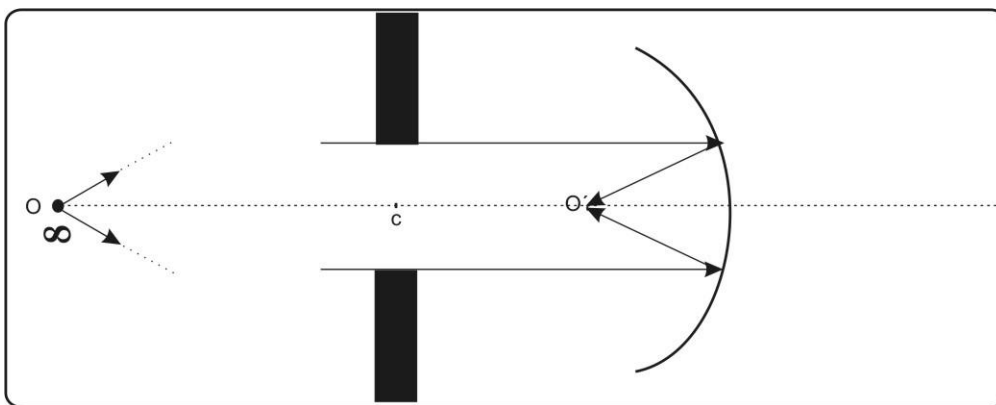
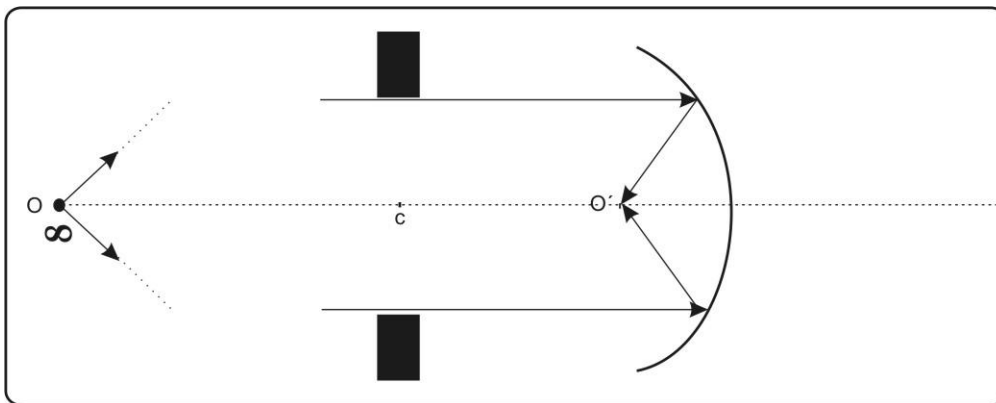
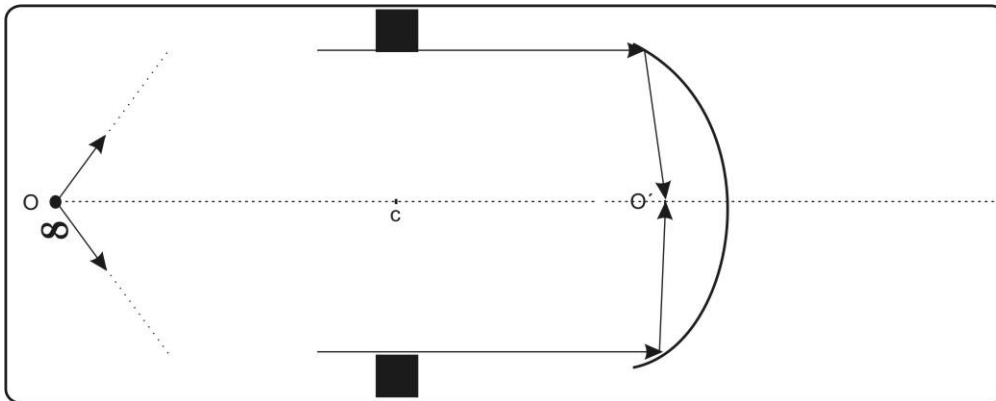
a) Mira la imagen de un objeto próximo al espejo y observa los cambios que se ven al alejarlo del espejo.

b) Busca experimentalmente dónde se concentra la luz de una fuente puntual muy alejada del espejo.

Quiero que los alumnos se familiaricen con las peculiaridades de los espejos cóncavos. También busco que intuitivamente lleguen al concepto de foco en los espejos cóncavos, puesto que ya lo conocen de las lentes.

Lo comprobamos con los espejos cóncavos de los equipos de óptica.

Les explico que si se aplican las leyes de la reflexión a haces de luz incidentes de distinta anchura (ver dibujos), se obtiene que los haces de luz no convergen en el mismo punto.



Lo comprobamos con nuestros equipos.

Si consideráramos que un punto era la imagen de otro cuando toda la luz que salía del punto objeto convergía en el punto imagen, entonces que el espejo cóncavo no es un sistema formador de imágenes. En óptica se dice que no es un sistema estigmático, ya que no forma imagen nítida en un punto y según el haz considerado, converge en un punto distinto.

Sin embargo, dado que el poder de resolución del ojo es limitado, si seleccionamos haces de luz estrechos que incidan en una pequeña parte central del espejo (donde los ángulos de incidencia son pequeños para objetos muy alejados) podemos ver una imagen real. En estos casos diremos que el espejo esférico forma imágenes dentro de la “aproximación paraxial”.

Siguiendo razonamientos similares a los utilizados en el caso de la lente convergente, cuando el espejo esférico cóncavo se utiliza en la aproximación paraxial, podemos definir un punto especial que llamamos “foco objeto”. Vemos en el dibujo que cuando el objeto luminoso se sitúa en el infinito, la imagen se forma en un punto que llamamos “foco objeto”.

Si el objeto luminoso lo situamos en dicho punto, su imagen se formará en el infinito. Por tanto, el “foco objeto” y el “foco imagen” son el mismo punto, al que llamaremos “foco”. A Daniel se le ocurre hacerlo con el espejo fuera del banco óptico y se ve muy bien. A David se le ocurre situar una lente convergente justamente a la distancia del dónde del foco del espejo, y también se observa muy bien que el espejo no es capaz de hacer converger la luz.

Asimismo, les comento que el eje óptico es la línea que une el punto focal y el centro de curvatura. Un rayo trazado según esta línea después de la reflexión en el espejo, se trazaría por la misma línea. Esta línea y el espejo definen el vértice del espejo (V).

2. Conceptos tratados.

Sistema estigmático. El “foco objeto” y el “foco imagen” son el mismo punto, al que llamaremos “foco” del espejo. Trazado gráfico del algoritmo del foco de un espejo cóncavo. Vértice del espejo.

3. Reflexión de la docente

Creo que a los alumnos les costará trabajo verbalizar lo que observan en la experiencia con el espejo cóncavo. No obstante, pensamos que con la ayuda del profesor lo comprenderán.

4. Interpretación.

Efectivamente al principio se muestran dubitativos, pero con las explicaciones y las experiencias lo entienden y se muestran satisfechos.

1. Metodología y descripción. ¿Qué hicimos?

A.22 Demuestra que, considerando la aproximación paraxial para los espejos esféricos cóncavos, la distancia focal $f = R/2$. Para ello podemos realizar el trazado de un único rayo del haz procedente de un punto situado en el infinito sabiendo, además, que para ángulos muy pequeños tanto el seno como la tangente del ángulo son aproximadamente igual al propio ángulo expresado en radianes.

Se trata de encontrar el foco de los espejos cóncavos. Definimos el eje óptico. Los alumnos se muestran receptivos y asimilan con facilidad los nuevos pasos que estamos dan. Quiero probar que $R = 2f$

Les ayudo con la demostración utilizando la aproximación paraxial, en la que la tangente de un ángulo es igual al ángulo expresado en radianes cuando el ángulo es pequeño. Dibujo el haz completo inicialmente para proseguir posteriormente con la demostración utilizando solamente un rayo de dicho haz.

Insisto en que este rayo que hemos dibujado es solamente parte del haz que llega al espejo. Puede

$$\text{tg } \hat{i} = Y/R \qquad \hat{i} = Y/R \qquad Y = i.R$$

$$\text{tg } \hat{2i} = Y/f \qquad \hat{2i} = Y/f \qquad Y = 2.i.f$$

$$i.R = 2.i.f$$

$$\text{Por tanto } 1/2 = f/R$$

$$\text{Es decir, } \mathbf{R = 2f}$$

2. Conceptos tratados.

Relación entre el foco de un espejo cóncavo y su radio de curvatura.

3. Reflexión de la docente

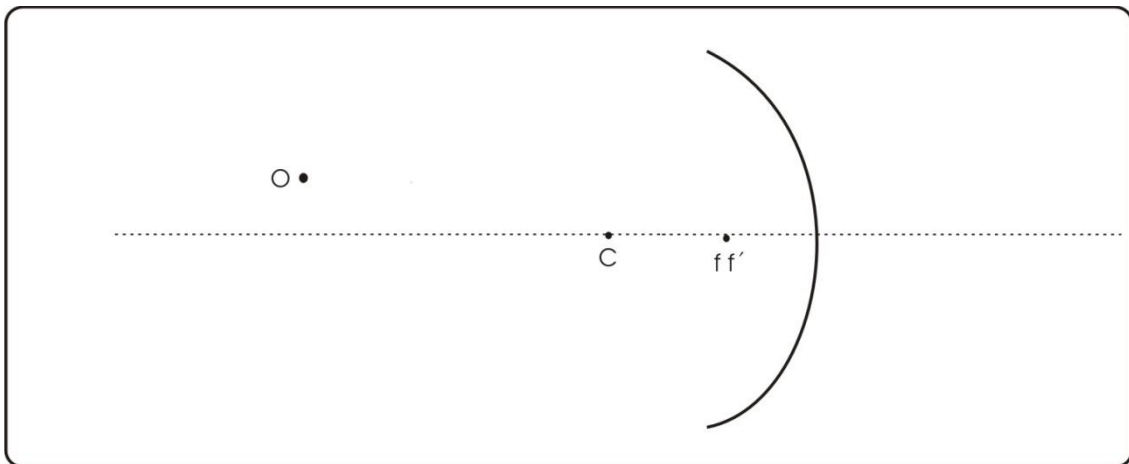
Creo que los alumnos por sí solos no serán capaces de desarrollar la demostración, pero sí con ayuda del profesor.

4. Interpretación.

A los alumnos les cuesta mucho trabajo todas las actividades que son de demostración matemática, y más aún las basadas en trigonometría, puesto que los conocimientos de geometría necesarios aún los tienen poco asimilados.

1. Metodología y descripción. ¿Qué hicimos?

A.23 Conociendo los elementos ópticos del espejo esférico cóncavo en la aproximación paraxial (F , R , C , eje óptico) y sabiendo que la imagen es real para objetos alejados, realiza un trazado gráfico para localizar la posición donde deberíamos situar la pantalla para ver la imagen del objeto puntual O .



Se trata de que los alumnos aplicando las leyes de la reflexión hagan una representación gráfica para localizar la imagen de un objeto puntual. Les recuerdo la necesidad de utilizar haces estrechos de luz, (aproximación paraxial) puesto que el espejo cóncavo no es un sistema estigmático.

Les animo a realizar el trazado gráfico de cada uno de los rayos que delimitan el haz, e intentar dibujar un rayo reflejado con el mismo ángulo respecto de la normal que el ángulo incidente, y lo mismo para el otro rayo que delimita el haz.

Algunos alumnos lo consiguen por sí mismos (Alumnos 4 y 11).

Intento que sean los alumnos quienes realicen el trazado gráfico para localizar la posición donde deberíamos colocar una pantalla para ver la imagen formada por un espejo cóncavo de un objeto puntual correctamente.

Les explico que si el haz reflejado que converge en O' , se representará simétricamente al otro lado del espejo se obtendría un trazado similar al que obtendríamos con una lente convergente.

Los alumnos se ayudan unos a otros, se explican entre sí. Se les ve animados.

2. Conceptos tratados.

Trazado gráfico de la formación de imágenes puntuales en espejos cóncavos.

3. Reflexión de la docente

Imaginamos que los alumnos necesitarán ayuda inicialmente.

4. Interpretación.

Efectivamente, la mayoría de los alumnos necesita de mi ayuda para poder realizar el trazado gráfico, pero luego lo comprenden.

1. Metodología y descripción. ¿Qué hicimos?

A.24 Conociendo los elementos ópticos del espejo esférico cóncavo en la aproximación paraxial (F , R , C , eje óptico) y sabiendo que la imagen es real para objetos alejados:

a) Realiza un trazado gráfico para localizar la posición donde deberíamos situar la pantalla para ver la imagen del objeto AB .

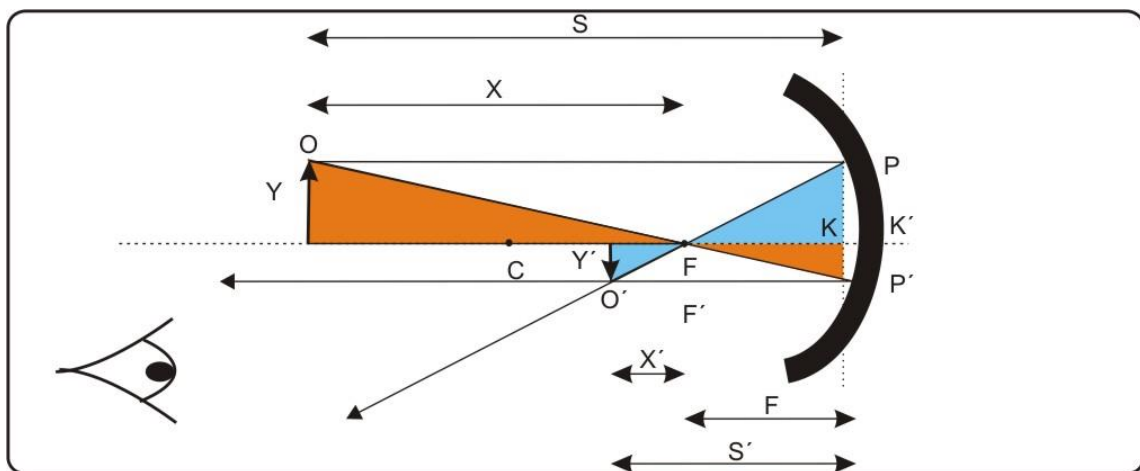
b) Deduce de la geometría de este trazado una relación entre s , s' y f , que nos permita conocer donde vemos la imagen real formada por un espejo esférico cóncavo. (Se recomienda que se compare este trazado con el realizado en la lente convergente)

c) Deduce, igualmente, la relación entre el aumento lateral (β) y las distancias s y s' .

Esta actividad trata de que los alumnos sean capaces de realizar el trazado gráfico para localizar la posición donde deberíamos colocar una pantalla para ver la imagen de un objeto, conociendo los elementos ópticos de un espejo. Quiero que los alumnos lo relacionen con el trazado para las lentes convergentes.

Insisto en las similitudes de los trazados gráficos, siendo el del espejo cóncavo simétrico del trazado del de las lentes convergentes (utilizando en ambos casos los rayos que vienen del infinito y pasan por el foco y pasando por el foco van hacia el infinito). Por tanto, se puede utilizar la misma expresión que se había utilizado para las lentes. Les recuerdo la expresión de las lentes convergentes.

Se muestran asombrados de la similitud entre los dos trazados.



Les explico que la demostración se basa en triángulos semejantes. Así mismo, que debido a que como hemos visto anteriormente, solamente el espejo cóncavo forma imagen para haces de luz que inciden muy cerca de su centro, lo que hemos estado denominando aproximación paraxial, la distancia kk' tiende a cero.

Por tanto, podemos deducir, a partir de la utilización de triángulos semejantes que:

$$Y/Y' = X/F;$$

$$Y/Y' = F/X'$$

De dichas expresiones podemos deducir que:

$$X/F' = F/X'$$

Y, por tanto:

$X \cdot X' = F \cdot F'$ Que es la ecuación de Newton que hemos utilizado previamente para las lentes.

Como hemos deducido en el caso de las lentes, a partir de esta expresión se puede deducir fácilmente que:

$$1/s + 1/s' = 1/f$$

Que es la ecuación más utilizada para encontrar la posición de la imagen de un objeto situado a una distancia s del espejo, cuya focal es f .

Los alumnos comprenden bien esta simetría, se muestran receptivos y capaces.

2. Conceptos tratados.

Ecuación de Gauss para los espejos.

3. Reflexión de la docente

No Creo que los alumnos sean capaces de formular la deducción por sí mismos, pero confiamos en que una vez propuesta por el profesor, lo comprendan bien.

4. Interpretación.

A los alumnos les cuesta mucho trabajo todas las actividades que son de demostración matemática, y más aún las basadas en trigonometría, puesto que los conocimientos de geometría necesarios aún los tienen poco asimilados.

1. Metodología y descripción. ¿Qué hicimos?

A.25 Cuando el espejo esférico cóncavo (caso de espejo de maquillaje) se utiliza para ver objetos cercanos, entre el foco y el espejo, ¿Cómo es la imagen que vemos? Realiza un trazado gráfico explicativo.

Esta actividad busca que los alumnos a partir de su experiencia con los espejos en el laboratorio realicen un trazado gráfico para encontrar la posición de la imagen de un objeto que se encuentra más próximo al espejo que la distancia focal.

Algunos alumnos (Alumnos 4, 11 y 13) son capaces de realizar el trazado gráfico por sí mismos, otros alumnos lo comprenden cuando yo lo dibujo en la pizarra.

2. Conceptos tratados.

Imagen virtual en espejos cóncavos para objetos situados entre el foco y el vértice del espejo.

3. Reflexión de la docente

Imaginamos que algunos alumnos no serán capaces de hacer el trazado gráfico por sí mismos, pero otros sí.

4. Interpretación.

Hay diferentes ritmos de aprendizaje en la clase.

Viernes 14/02/2020 AULA B18 LABORATORIO DE FÍSICA

11:35-12:30 SESIÓN 9

GRUPO 1: 15 Alumnos

1. Metodología y descripción. ¿Qué hicimos?

A.26. ¿Cómo vemos al mirar hacia un espejo convexo? Explora su comportamiento (como aproximación a este dispositivo puede usarse una cuchara metálica bien pulida).

Les dejo un par de cucharas que traigo yo de casa para que observen cómo se ven. Posteriormente les digo que realicen un montaje similar al que habíamos utilizado para el espejo cóncavo, pero con el convexo.

Les propongo que vuelvan a comprobar cómo enfoca la luz un espejo cóncavo, y que después le den la vuelta para que funcione como espejo convexo (los espejos de nuestro

equipo de óptica tienen pulidas ambas caras, de forma que pueden funcionar como espejo cóncavo o convexo).

Los animo a comparar ambas situaciones y a encontrar las diferencias.

Los alumnos se dan cuenta de que el espejo convexo no converge la luz.

Les pido que piensen cómo será la imagen que genere un espejo convexo, y la mayoría dicen que ha de ser virtual. Les insisto que efectivamente, el espejo convexo no hace converger la luz, luego no puede formar una imagen real.

2. Conceptos tratados.

Formación de imágenes por espejos convexos.

3. Reflexión de la docente

Creo que los alumnos disfrutaran con esta experiencia sencilla y que pueden relacionar con su experiencia diaria.

4. Interpretación.

Los alumnos comprenden fácilmente que la imagen ha de ser virtual, puesto que al utilizar los equipos de óptica se aprecia claramente que el haz de luz una vez que incide en el espejo se abre, y no puede converger.

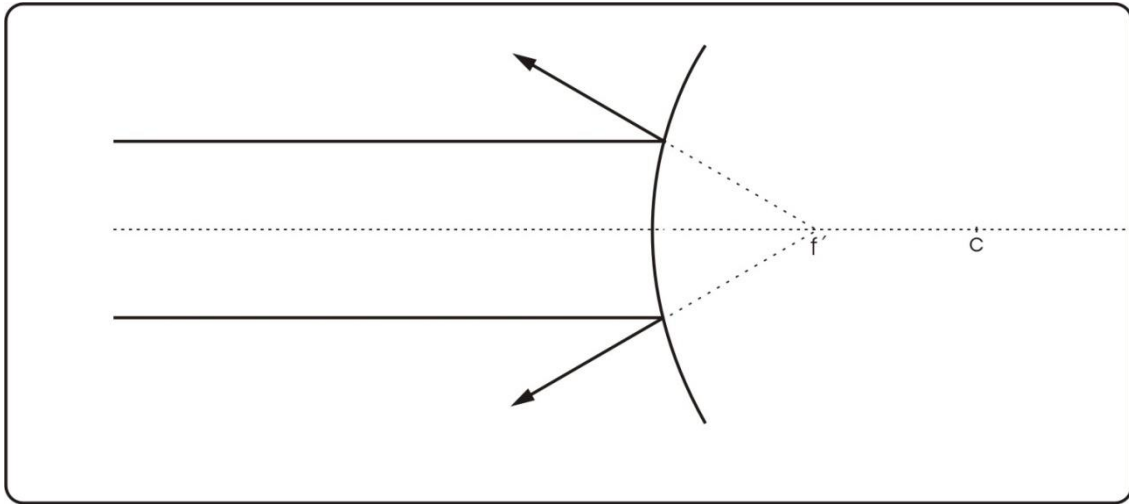
1. Metodología y descripción. ¿Qué hicimos?

A.27. Suponiendo la aproximación paraxial, dibuja un espejo esférico convexo y realiza trazados gráficos que expliquen la posición de los focos.

Con esta actividad los alumnos ayudados por el profesor definen el foco imagen de un espejo convexo, a partir de la experiencia en el laboratorio.

Les explico que el foco imagen es un punto virtual, ya que de él no puede salir luz. Debe ser por tanto una cantidad negativa (recordamos que el signo negativo simboliza que no es real). Por tanto, $f = -R/2$.

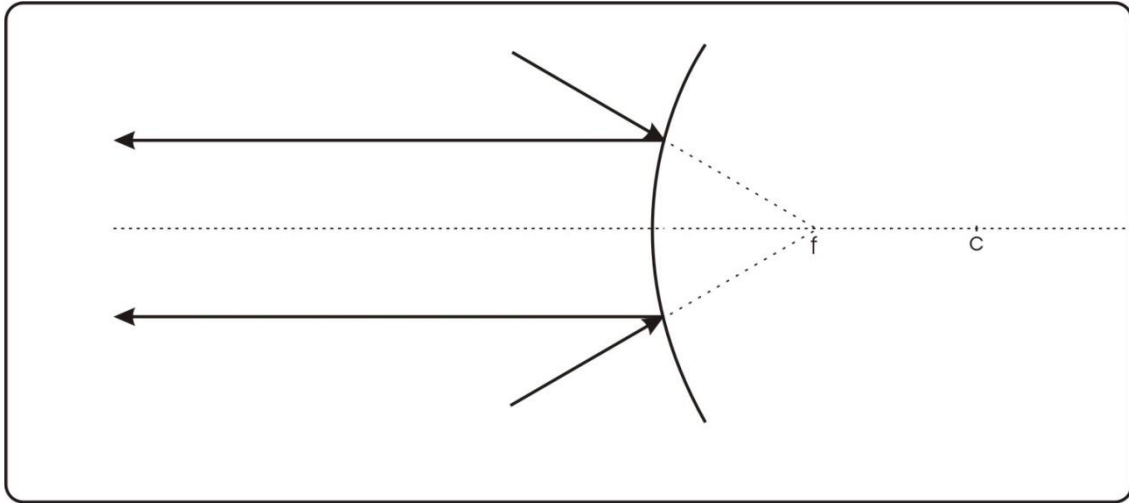
Realizo el siguiente trazado gráfico en la pizarra. Los alumnos comprenden su significado físico, comparándolo siempre con la experiencia con los espejos convexos que acaban de hacer.



Una vez que se ha comprendido el foco imagen, introduzco el foco objeto a partir del trazado anterior.

A partir de dicho trazado y teniendo en cuenta que la ley de la reflexión se cumple tanto en un sentido de incidencia de la luz en el espejo, como en el otro, por simetría se puede dibujar el rayo de luz que procedente del objeto “pasa” por el foco y se refleja en una dirección paralela al eje óptico.

Les explico que el foco objeto también es virtual e igual al foco imagen. Les recuerdo que el foco es virtual porque de él no puede proceder la luz. Por tanto, $f = f' = -R/2$. El trazado en este caso se puede explicar por la propiedad de inversión en el sentido en que se ha movido la luz. Si el trazado anterior es válido, este ha de serlo pues es igual que el anterior, pero con la luz moviéndose en sentido contrario.



Les pregunto si el radio es real o no, muchos alumnos dicen que no.

Posteriormente les explico que sí que es real, es una característica física del objeto.

2. Conceptos tratados.

Focos de los espejos convexos.

3. Reflexión de la docente

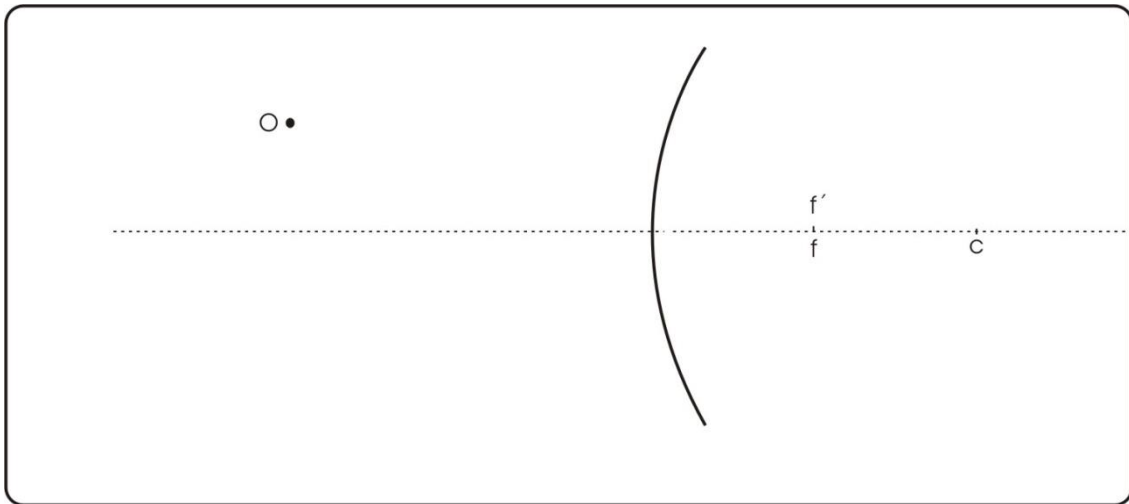
Creo que los alumnos serán capaces de dibujar el foco imagen por sí mismos, sin embargo, Creo que tendrán problemas para realizar el trazado del foco objeto.

4. Interpretación.

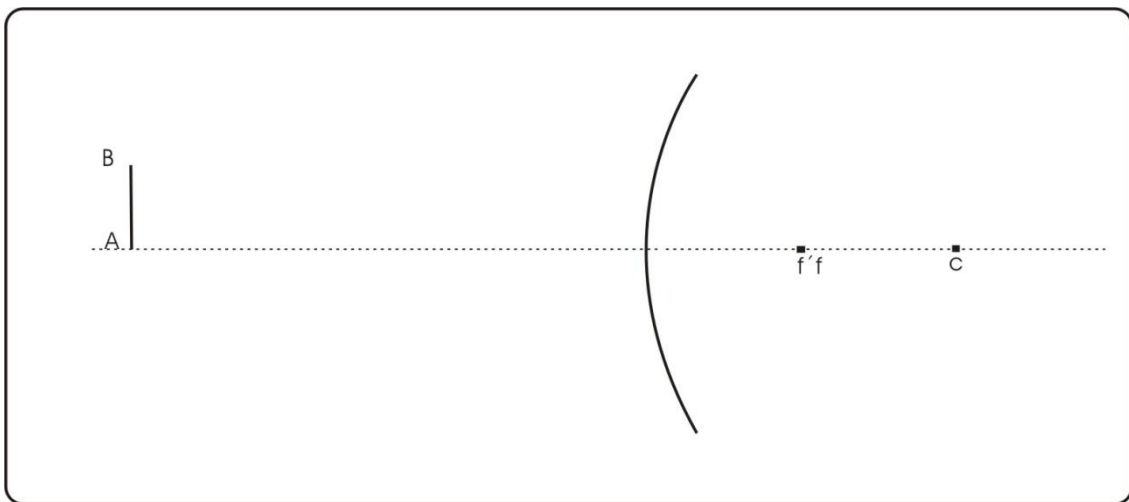
Muchas veces los alumnos necesitan la ayuda de la explicación del profesor, pero luego lo entienden e interiorizan.

1. Metodología y descripción. ¿Qué hicimos?

A.28. Realiza un trazado gráfico de manera que explique que la imagen de un objeto extenso que se ve en un espejo convexo es siempre virtual, derecha y de menor tamaño. Confirma tu predicción usando un espejo esférico convexo.



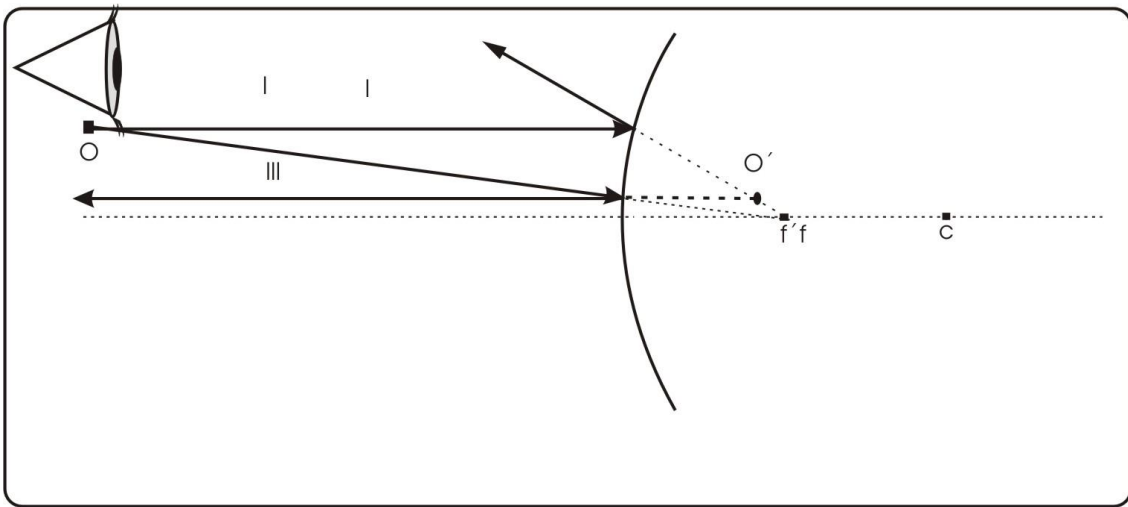
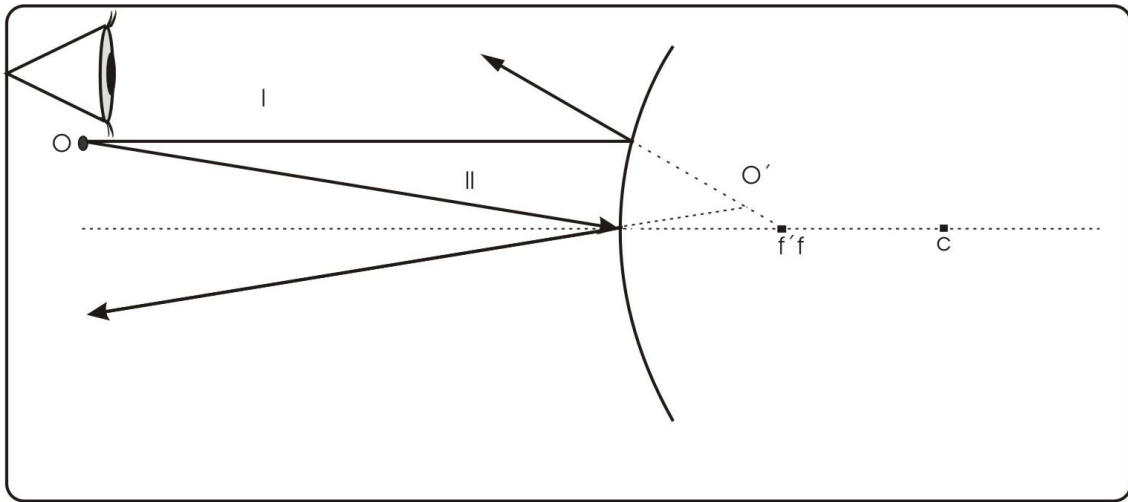
(Opcional) Realiza el trazado gráfico correspondiente para encontrar la imagen de un objeto extenso que se formará al reflejarse en un espejo convexo.



Se trata de que los alumnos expliquen cómo es la imagen que se ve al mirar un espejo esférico convexo, aplicando las leyes de la reflexión. Quiero que los alumnos comprendan que la imagen no es real, que la luz no puede provenir de detrás del espejo. Quiero que los alumnos comprendan que si la imagen es virtual solamente tiene sentido dibujarla si dibujamos también un observador.

La mayoría de los alumnos muestran comprensión y solamente dibujan la imagen cuando hay un observador.

Espero que los alumnos realicen los trazados gráficos en los que se utilizan las propiedades de los focos que hemos estudiado y también la ley de la reflexión. Los alumnos podrían dibujar cualquiera de los siguientes haces de luz caracterizado por los rayos que hemos estudiado en relación a los focos.



A.29. *A partir del trazado gráfico anterior, encuentra una relación entre s , s' y la característica principal del espejo (f'). Encuentra también una expresión para el aumento lateral.*

A.30. *Ejercicios de manejo relacionados con espejos esféricos cóncavos aparecidos en exámenes de EBAU.*

Lunes 17/02/2020 AULA B18 LABORATORIO DE FÍSICA

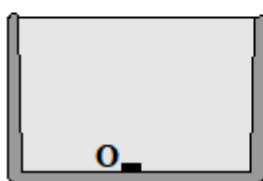
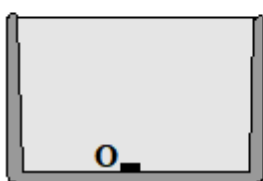
08:30-09:25 SESIÓN 10

GRUPO 1: 15 Alumnos

Faltan dos alumnos: Alumno 8 y Alumno 13.

1. Metodología y descripción. ¿Qué hicimos?

A.31. Al mirar a un pequeño objeto sumergido en un recipiente con agua nos parece verlo en otra posición. Realiza las observaciones que se representan en los esquemas y señala las características de la imagen que vemos (Osuna 2003-2008).



Realizamos experiencias en el laboratorio con objetos sumergidos en agua. Para explicar la formación de imágenes con lentes delgadas formulamos la hipótesis de que

Quiero que los alumnos se den cuenta de que la posición en la que se ve el objeto depende de la posición del observador.

El caso más sencillo para estudiar el comportamiento de la luz cuando atraviesa medios transparentes es el de mirar un objeto sumergido en un medio transparente.

Les animo a pensar lo que sucede cuando tenemos objetos en el suelo de una piscina.

Los alumnos en pequeños grupos realizan observaciones de objetos sumergidos en agua a distintas profundidades con material de vidrio de laboratorio.

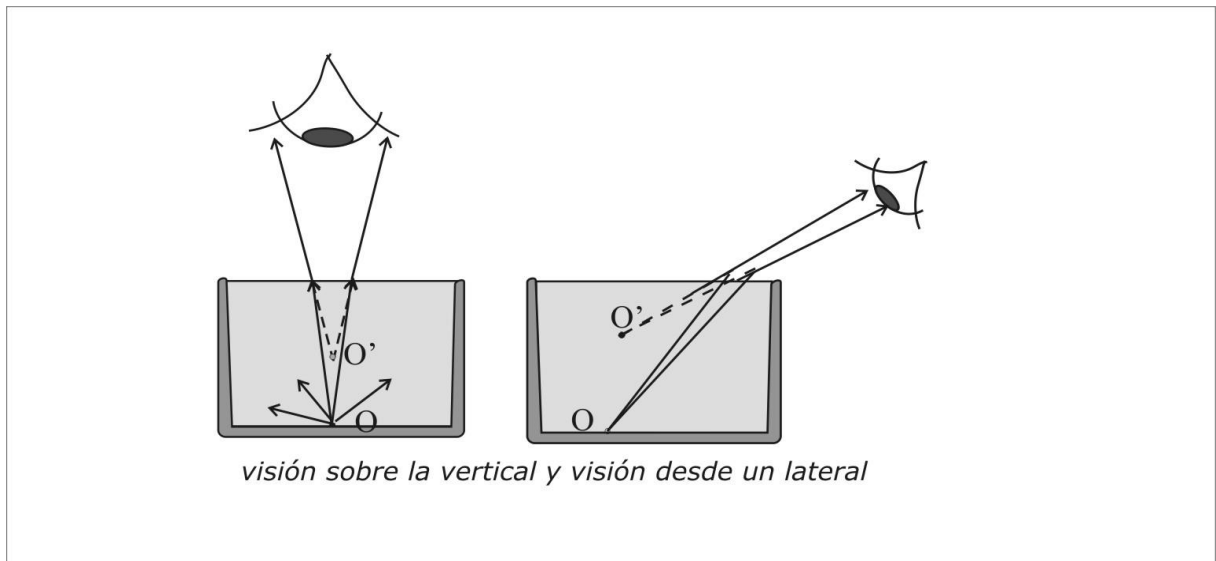
Algunos alumnos (Alumnos 2, 3, 4, 10 y 11) se dan cuenta de que la posición de la imagen que ven depende de la posición del observador. Ayudo a todos los alumnos a darse cuenta de este hecho.

Les comento a los alumnos que consideren un objeto puntual del que sale luz en todas las direcciones, considerando un único haz de luz que incide en la superficie de separación de los dos medios y les animo a que hagan sus hipótesis sobre qué le sucederá a ese haz de luz para que al observador le parezca verlo más cerca.

Les explico que la imagen cambia de posición según desde donde se mire, y les animo a comprobarlo con el material de laboratorio a su disposición. Se trata de un sistema no estigmático.

Solo se podría considerar un sistema estigmático en el caso en que el observador se situase sobre la vertical del objeto, ya que en este caso la imagen se formaría en un único punto.

Propongo a los alumnos los siguientes trazados para explicar la visión:



Les incido en el hecho de que, si no miramos desde la vertical, podemos ver imágenes en diferentes lugares. A David le llama mucho la atención este hecho.

Los alumnos 6 y 7 parecen no entenderlo. Los alumnos 14 y 15 están un poco despistados hoy.

2. Conceptos tratados.

Visión indirecta de objetos sumergidos en el agua. Sistema no estigmático.

3. Reflexión de la docente.

Creo que a los alumnos les llamará la atención el hecho de que no veamos los objetos en el mismo sitio al mirar desde diferentes posiciones.

Creo que inicialmente los alumnos tendrán dificultades para realizar el trazado gráfico adecuado, pero espero que con las indicaciones del profesor comprendan qué le ocurre a la luz al cambiar de medio.

4. Interpretación.

Los diferentes grupos de la clase van entiendo poco a poco la actividad en función de su concentración y de su capacidad.

Al final con mi ayuda todos parecen entender la actividad.

1. Metodología y descripción. ¿Qué hicimos?

A.32. De acuerdo con el modelo de visión de Kepler, para ver un objeto debe entrar en el ojo un haz de luz divergente procedente de cada uno de sus puntos. Formula una hipótesis sobre el comportamiento de la luz que explique que cuando miramos hacia un objeto sumergido en agua nos parezca que se encuentra a menor profundidad.

Algunos alumnos son capaces de realizar directamente el trazado gráfico (Alumnos 3, 4, 10 y 11), otros alumnos me preguntan y yo les voy ayudando. Poco a poco todos los alumnos realizan el trazado gráfico pertinente.

Les explico entonces que la imagen es virtual, que si el haz de luz es perpendicular a la superficie de separación del medio no se desvía y que los haces de luz que inciden sobre la superficie de separación con otra inclinación si se desvían.

Les comento que este fenómeno es debido a la refracción de la luz, es decir el cambio en la dirección de propagación que sufre al pasar de un medio a otro de diferente densidad.

Les explico que la ley de la refracción puede explicar el hecho de que cuando miramos un pequeño objeto sumergido nos parece verlo a menor profundidad. La experiencia más sencilla consiste en situar un vaso de laboratorio de fondo plano sobre un folio en el que se ha dibujado con un lápiz una pequeña mancha circular. Para apreciar más claramente el efecto buscado, miraremos al círculo del papel, alternativamente, de forma directa y a través del vaso con agua.

Forramos ese mismo vaso vacío, con una cartulina negra y miramos al círculo través de un pequeño tubo, como el de una pajita de refresco sujeta en un soporte para que no varíe su inclinación, desde una posición lateral en la que podemos ver la zona próxima al círculo dibujado en el papel, pero no ese círculo. Un compañero añadirá agua al vaso y el observador verá la imagen del círculo dibujado.

De esta forma, las observaciones de los objetos sumergidos en líquidos transparentes revelan que éstos parecen encontrarse a menor profundidad, por lo que pueden ser vistos desde posiciones laterales en las que es imposible que llegue la luz directa del objeto.

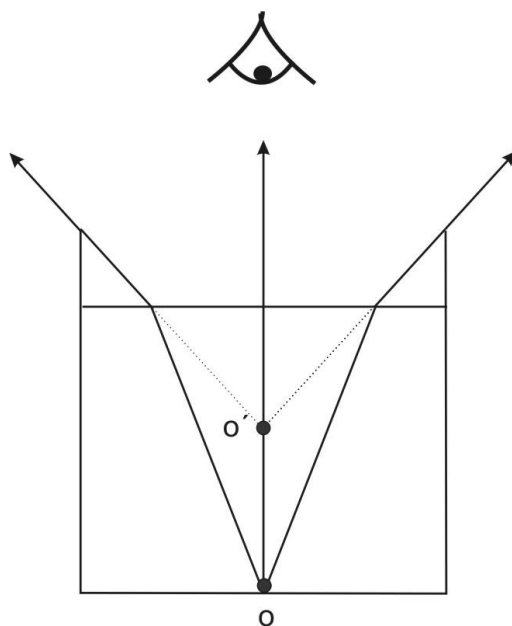
Para explicar estos fenómenos de forma coherente con el modelo de visión de Kepler es de esperar que los estudiantes supongan que la luz cambia de dirección al pasar del agua al aire. Al cambio de dirección de cada rayo de luz al pasar de un medio transparente a otro se le denomina refracción de la luz. En el caso de que la luz pase del agua al aire, el ángulo, ϵ , que forma un rayo de luz con la normal (N), es menor que el ángulo de refracción, ϵ' , por lo que la luz se desvía alejándose de la normal. De esta forma, el haz de luz que entra en el ojo del observador parece proceder de O', por eso se suele denominar a este punto *imagen virtual* del punto O. En ese punto parece estar situada la imagen que vemos, pero ese punto no es, en realidad, una fuente luminosa.

2. Conceptos tratados.

Refracción de la luz.

3. Reflexión de la docente.

Espero que tras la realización de la actividad anterior los alumnos lleguen a realizar el siguiente trazado gráfico:



4. Interpretación.

Con ayuda del profesor y aplicando el modelo de visión de Kepler los alumnos son capaces de realizar el trazado gráfico para la obtención de la posición de la imagen de un objeto sumergido. Los alumnos se dan cuenta de que el trazado explica por qué nos parece que los objetos sumergidos están a menor profundidad.

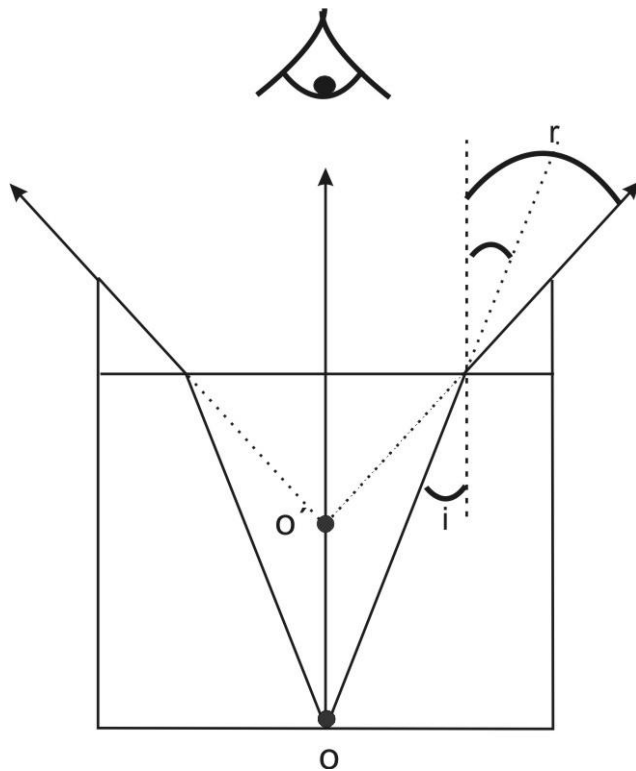
1. Metodología y descripción. ¿Qué hicimos?

A.33. Formula hipótesis acerca de los factores que influyen en el ángulo de refracción de la luz al pasar de un medio a otro.

Se trata de que los alumnos formulen una hipótesis acerca de los factores que influyen en el ángulo de refracción de la luz al pasar de un medio a otro.

Algunos alumnos (Alumnos 4, 10 y 11el) intuyen que, cambiando el medio, por ejemplo, utilizando glicerina, el ángulo de refracción cambia. Les explico que efectivamente se producen ángulos de refracción diferentes para el mismo ángulo de incidencia según la luz atraviese diferentes materiales.

Explico a los alumnos que el ángulo de refracción cuando la luz pasa del agua al aire contiene al ángulo de incidencia, al que se le suma un ángulo de desviación (que era lo que Kepler denominaba refracción). Por tanto, cuanto mayor sea el ángulo de incidencia mayor será el ángulo de refracción. Realizo el siguiente dibujo explicativo:



Si el objeto está sumergido, entonces de acuerdo con la experiencia, vemos los objetos más arriba que lo que en realidad están. Es decir, sucede que el ángulo de refracción tiene que ser mayor que el ángulo de incidencia para que esto suceda. Por tanto, vemos en el dibujo, que cuanto mayor es el ángulo de incidencia, mayor será el ángulo de refracción. Esta relación tiene un límite, pues el ángulo de refracción no puede ser mayor que 90° . Otro límite de esta relación se establece cuando los ángulos de incidencia son muy pequeños, en este caso el ángulo de refracción también será muy pequeño. En el límite, cuando el ángulo de incidencia es de 0° , entonces el ángulo de refracción también será de 0° . Es decir, cuando la luz incide perpendicular a la superficie de separación entre los medios, no se desvía.

Como experiencia curiosa, les sugiero: Se llena un vaso de precipitados con glicerina, y en ella se introduce poco a poco una barrita de metacrilato. Se observa que según se va introduciendo parece que va desapareciendo. Ello es debido a que las sustancias tienen el mismo poder de desviación de los rayos de luz, es decir el mismo índice de refracción.

Les comento que, debido a la reversibilidad del movimiento de la luz, podríamos suponer que la luz viajara del aire al agua. Sería el mismo dibujo con la luz viajando en sentido contrario. Al penetrar en el agua, la dirección de propagación de la luz se acerca a la normal. En este caso el ángulo de refracción sería mayor que el de incidencia.

2. Conceptos tratados.

Reversibilidad del movimiento de la luz. Ángulo límite. Factores que influyen en el ángulo de refracción de la luz al pasar de un medio a otro.

3. Reflexión de la docente.

Creo que algunos alumnos serán capaces de formular hipótesis acerca de los factores que influyen en el ángulo de refracción de la luz al pasar de un medio a otro.

4. Interpretación.

Los alumnos más creativos son capaces de proponer ellos las hipótesis y comprobarlas experimentalmente. Otros alumnos no proponen, pero si comprenden cuando las explico.

1. Metodología y descripción. ¿Qué hicimos?

A.34. Diseña una experiencia para encontrar una relación entre el ángulo de incidencia y el ángulo de refracción. Llévala a la práctica y, a partir de los datos, encuentra una relación entre $\sin i$ y $\sin r$.

Un grupo de alumnos es capaz de diseñar su propio experimento (Alumnos 9, 11 y 12).

Otro grupo (Alumnos 2, 3, 4 y 10) necesitan un poco de ayuda para empezar.

El grupo de los alumnos 1, 5, 6, 7, 14 y 15, no están muy interesados en el experimento.

Los dos grupos interesados lo hacen autónomamente y con métodos diferentes. Parecen ilusionados con sus experimentos y muestran ilusión al poder encontrar una relación entre el ángulo de incidencia y el ángulo de refracción. A petición de los alumnos repetimos la experiencia con distintos medios transparentes. Los alumnos disfrutaban con sus montajes. Cada vez tienen más iniciativa. Finalmente, los alumnos que no tenían muchas ganas de trabajar hoy se incorporan a los grupos que estaban experimentando y se asombran igualmente de los resultados.

Ayudo a los alumnos y les explico que necesitamos una lente de agua con forma semicircular. Ponemos un alfiler en un punto y mirando a través del agua situamos otro alfiler (puede ser sobre un corcho o cartón) donde se vea en línea con la primera. Se repite

la experiencia varias veces. Una vez recogidos los datos realizamos una tabla con los ángulos de incidencia y sus correspondientes ángulos de refracción.

Después realizaremos una gráfica. Debemos incluir el punto (0, 0). Kepler descubrió que para ángulos de incidencia menores de 20°, la relación entre el ángulo de incidencia y el de refracción era lineal. Sin embargo, para ángulos mayores se pierde la linealidad. La relación entre el ángulo de incidencia y el ángulo de refracción es compleja. Descartes trató de explicarla con su famosa teoría de los “torbellinos”. Entonces propuso la relación entre los senos de los ángulos.

Si realizamos una tabla con los senos de los ángulos de incidencia y los de refracción, y posteriormente realizamos la representación gráfica, obtendremos una relación lineal:

$$\text{sen } i = K \text{ sen } r$$

La constante de proporcionalidad k la llamaremos n : índice de refracción del agua respecto del aire. De acuerdo a la experiencia n tiene que ser mayor que 1.

Hemos realizado esta experiencia para la refracción de la luz cuando viaja desde el aire al agua. Tenemos ahora que generalizar esta expresión. Dado que la luz podría tomar el camino inverso, podemos considerar los ángulos de incidencia y refracción intercambiables. Por tanto, los podemos denominar ϵ_1 y ϵ_2 . Por tanto, la expresión sería:

$$\text{sen } \epsilon_1 = n_2 \text{ sen } \epsilon_2$$

Donde n_2 es el índice de refracción del agua respecto del aire. Si asignamos al índice de refracción del vacío (y del aire aproximadamente) 1, entonces n_2 será el índice de refracción del agua.

La luz también puede pasar del aire a otro medio transparente con otro índice de refracción:

$$\text{sen } \epsilon_1 = n_3 \text{ sen } \epsilon_3$$

Podemos generalizar la expresión ya que si:

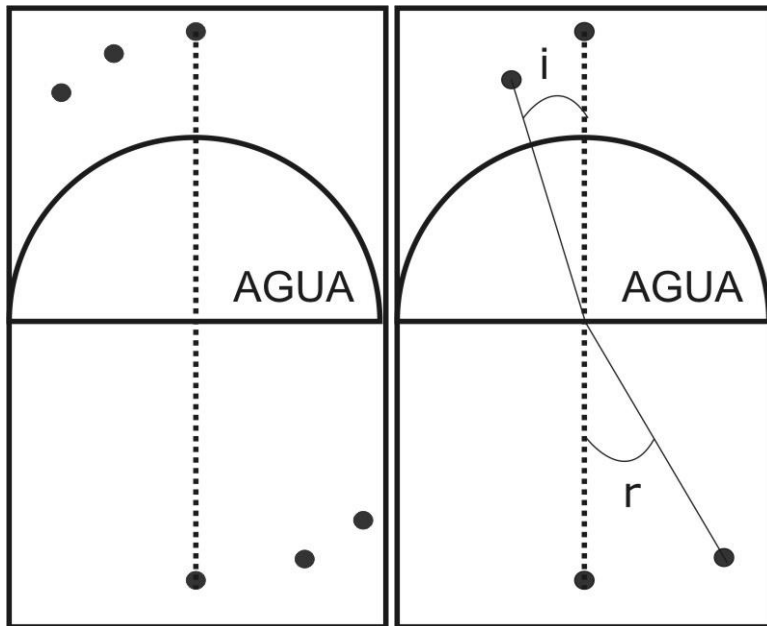
$$\text{sen } \epsilon_1 = \text{sen } \epsilon_1, \text{ entonces:}$$

$$n_2 \text{ sen } \epsilon_2 = n_3 \text{ sen } \epsilon_3$$

Y así para cualquier medio. La ley de la refracción sería de Descartes sería:

$$n_1 \text{ sen } \epsilon_1 = n_2 \text{ sen } \epsilon_2$$

Les explico el significado del índice de refracción de un medio material $n = c/v$. Les explico que históricamente fue una meta a superar en la explicación de la naturaleza de la luz, y en la explicación de su comportamiento.



Recuerdo a los alumnos que en la cara circular de la lente no se produce refracción ya que la luz entra perpendicular a la superficie de separación de los medios, es decir dirección radial.

Les recuerdo que la refracción de la luz, o cambio de dirección que se produce al pasar la luz del líquido al aire, en general de un medio transparente a otro, depende del tipo de líquido y, como consecuencia, la profundidad con que se verá la imagen del objeto sumergido cuando se observa desde la vertical, también dependerá del medio donde se encuentre. La relación (o cociente) entre la profundidad real y la profundidad a la que se ve la imagen, al mirarla perpendicularmente, es una característica óptica de la sustancia transparente denominada índice de refracción (n).

Judit vuelve a preguntar qué es el índice de refracción de un medio, se lo vuelvo a explicar, parece que los demás alumnos lo comprenden.

2. Conceptos tratados.

Deducir experimentalmente la ley de la refracción de la luz al cambiar de medio. Índice de refracción.

2. Reflexión de la docente.

Creo que algunos alumnos serán capaces de proponer alguna experiencia para deducir dicha ley. Sin embargo, suponemos que la mayoría de alumnos necesitarán ayuda del profesor para diseñar un experimento adecuado.

3. Interpretación.

El carácter diferente de los alumnos.

1. Metodología y descripción. ¿Qué hicimos?

A.35. Cuando la luz pasa del agua al aire, como ocurre cuando miramos a un objeto sumergido, la ley Snell-Descartes predice la existencia de un valor límite del ángulo de incidencia, a partir del cual la luz no sale del agua y se refleja en su superficie (reflexión total interna). Calcula el valor de ese ángulo límite sabiendo que el índice de refracción del agua es de 1,33. Haz lo mismo para el caso del vidrio con índice de refracción 1,5.

Se trata de comprender la existencia de un ángulo límite de incidencia cuando la luz pasa del agua al aire, para el cual no se produce refracción. El grupo de los alumnos 3, 4 y 10 lo calculan ellos solos para el agua. Los alumnos 5, 6 y 7 necesitan un poco de ayuda. Los alumnos 1, 2, 12, 13 y 14 no tenían mucha gana de trabajar hoy.

Los alumnos muestran asombro e interés al encontrar el ángulo límite.

Les explico que cuando la luz pasa de un medio con mayor índice de refracción a otro con menor índice de refracción, cuanto mayor es el ángulo de incidencia, mayor será el de refracción, llegando a un límite para el cual no se produce refracción. Considero en ese límite que el ángulo de refracción es de 90° . Introduciendo valores en la expresión matemática de la ley de Snell-Descartes, podemos averiguar cuál es dicho ángulo límite.

Les explico que no hay ángulo límite para pasar de medios de menor índice de refracción a medios con mayor índice de refracción, y les animo a probar poniendo un ejemplo con la fórmula matemática anteriormente citada.

2. Conceptos tratados.

Ángulo límite.

3. Reflexión de la docente.

Creo que alumnos serán capaces de realizar el cálculo ellos mismos, y que otros necesitarán la ayuda del profesor.

4. Interpretación.

Algunos alumnos no tienen mucha gana de trabajar hoy, tienen después examen de Matemáticas y están un poco despistados.

1. Metodología y descripción. ¿Qué hicimos?

A.36. Ejercicios de manejo de la ley de la refracción en exámenes de la EBAU.

Esta actividad trata de que los alumnos comprendan la ley de Snell. Realizamos en clase ejercicios numéricos. Los alumnos comprenden su resolución.

El alumno 4 pregunta por la relación de c con la longitud de onda y la frecuencia. Le explico que al igual que todas las ondas $c=\lambda \cdot f$.

El alumno 11 pregunta que si los ángulos con los que inciden los rayos de un haz de luz proceden del mismo punto, deberían ser iguales..... Le explico que solamente si dicho punto se encuentra en el infinito, y podemos considerar que llegan paralelos al incidir en la superficie de separación de los dos medios, en cualquier otro caso no. Le explico el dibujo de la formación de la imagen de un objeto puntual cercano al espejo, donde se observa claramente que cada uno de los rayos incide en la superficie de separación con un ángulo diferente, cada uno de los cuales será reflejado cumpliendo la ley de la reflexión y por ello podremos encontrar la imagen virtual de dicho punto.

Los alumnos se ponen por parejas a hacer los ejercicios.

Les digo que el próximo día corregiremos en clase.

Miércoles 19/02/2020 AULA B18 LABORATORIO DE FÍSICA

09:25-10:20 SESIÓN 11

GRUPO 1: 15 Alumnos

Faltan 5 alumnos: Alumno 5, Alumno 6, Alumno 7, Alumno 10 y Alumno 13.

1. Metodología y descripción. ¿Qué hicimos?

A.36. Ejercicios de manejo de la ley de la refracción en exámenes de la EBAU.

Seguimos con la corrección de ejercicios EBAU referentes a la refracción de la luz. Hoy faltan muchos alumnos, algunos están enfermos y otros se han quedado estudiando porque luego tienen examen de historia.

Los alumnos 2, 3, 4 y 11 tienen los ejercicios hechos y comentan que les han resultado sencillos.

El resto de alumnos asistentes no los tenían hechos.

Los voy haciendo y explicando yo en la pizarra.

El alumno 11 pregunta si la longitud de una onda se modifica al cambiar de medio, le explico que sí, puesto que cambia la velocidad de propagación de la onda, y la frecuencia se mantiene constante.

Los ejercicios de cálculo de la velocidad de propagación de la luz en el agua o vidrio, sabiendo el índice de refracción de dicho medio les resultan muy sencillos a todos.

Al final de la clase también todos comprenden la relación entre la velocidad de propagación de la luz, su longitud de onda y su frecuencia en diferentes medios.

Todos los alumnos afirman que ya saben hacer los ejercicios de EBAU, que lo entienden bien.

Jueves 20/02/2020 AULA B18 LABORATORIO DE FÍSICA

11:35-12:30 SESIÓN 12

GRUPO 1: 15 Alumnos

1. Metodología y descripción. ¿Qué hicimos?

A. 37. Representa cómo se ve en una pantalla la imagen formada con una lente convergente. Si se elimina la pantalla, ¿es posible ver esa imagen?, ¿desde dónde se podrá ver? Realiza un diagrama que lo explique.

Les propongo que cojamos las lentes convergentes que hemos estado utilizando y miremos con ellas el paisaje a través de la ventana.

Los alumnos experimentan con las lentes y se asombran de ver las imágenes invertidas, aunque rápidamente recuerdan nuestras experiencias con las lentes convergentes y las pantallas.

Les explico que la imagen que se forma es real y que no se forma en una pantalla.

El alumno 6 dice que si tenemos una pantalla: nuestro ojo. Le explico que en este caso estamos viendo una imagen aérea y los animo a comprobar si se ve desde 180° como sucede cuando la imagen está en una pantalla.

Los animo a mirar desde diferentes posiciones dicha imagen y a comprobar qué sucede.

Todos los alumnos se muestran sorprendidos de comprobar que solamente se ve la imagen desde ciertas posiciones.

Les explico que una lente convergente que forma una imagen en una pantalla, forma una imagen real, y si quitamos la pantalla, la imagen real es un punto muy especial ya que emite luz, aunque no en todas las direcciones (como los objetos emisores). Es por ello que al quitar la pantalla solamente se verá el objeto desde determinadas posiciones, es decir tratándose de un objeto extenso se podrá ver cuando le llegue al observador el haz

procedente de la imagen real de todos los puntos del objeto. Les animo a experimentarlo con las lentes mirando el paisaje exterior de la ventana.

2. Conceptos tratados.

Imagen real formada por una lente convergente sin pantalla.

3. Reflexión de la docente.

Creo que al principio los alumnos no sabrán responder a la pregunta planteada. Creo que después de la experiencia podrán comprender bien que la imagen solamente se podrá ver desde algunas posiciones.

4. Interpretación.

A los alumnos les ayuda mucho la experimentación directa para poder comprender los fenómenos físicos estudiados.

1. Metodología y descripción. ¿Qué hicimos?

A.38. Explora el comportamiento de la lente convergente suministrada por el profesor cuando actúa como lupa anotando los resultados de las observaciones siguientes:

- a) ¿En qué margen de distancias a la lente puede estar situado el objeto para que actúe como lupa?*
- b) ¿Qué características tiene la imagen cuando la lente actúa como lupa?*

Quiero que los alumnos se familiaricen con una nueva característica de las lentes convergentes que anteriormente no habíamos estudiado. Quiero que comprendan que si situamos los objetos entre el foco y la lente, ésta puede actuar como lupa, formando una imagen virtual de los mismos, derecha y ampliada.

Recuerdo a los alumnos que éste el tipo de lente ya la habían utilizado cuando buscaban la posición de la pantalla en la que se podía ver la imagen real de una fuente puntual a distintas distancias.

Recuerdo a los alumnos que para una lente de $f=100\text{mm}$, únicamente se puede ver la imagen en la pantalla cuando la fuente puntual se situaba a distancias mayores de 10 cm

(distancia focal) y que, a esa distancia, el haz de luz emergente formaba sobre la pantalla, cualquiera que fuera su posición, círculos iluminados del mismo diámetro que la lente.

Así mismo, les recuerdo que habían encontrado que para distancias menores de 10 cm a la fuente puntual, esos círculos iluminados se hacen mayores conforme se aleja la pantalla, es decir, cuando el objeto (o fuente luminosa) se sitúa entre el foco y la lente. En esta última situación, aunque la lente converja el haz de luz incidente, el haz que emerge de ella aún es divergente y no es posible obtener una imagen en una pantalla, es decir no es posible formar una imagen real.

Les comento que las lentes convergentes cuando actúan como lupa forman imágenes virtuales.

Los animo a mirar el paisaje de la ventana con la lente de $f=100\text{mm}$ e ir acercando la lente al ojo. Comprueban que cuando la lente está a menos de 10cm del ojo, la imagen que forma es derecha. Les hace mucha ilusión este cambio.

2. Conceptos tratados.

Imagen virtual producida por una lente convergente cuando actúa como lupa.

3. Reflexión de la docente.

Aunque los alumnos hayan usado la lupa en alguna ocasión no podemos suponer que conocen las características de la visión a través de ella, por lo que proporcionaré a los alumnos una lente convergente de 100 mm focal.

Espero que con mi ayuda los alumnos comprendan cuando una lente convergente puede funcionar como lupa. Así mismo espero que comprendan que características tiene la imagen formada por una lupa.

4. Interpretación.

1. Metodología y descripción. ¿Qué hicimos?

A.39. Una persona mira a través de una lente convergente a un objeto puntual situado entre el foco y la lente. Realiza un esquema un diagrama de rayos que explique tu hipótesis acerca de cómo es visto ese objeto cuando la lente actúa como lupa.

Quiero que los alumnos se enfrenten al trazado gráfico.

Les explico que cuando el objeto está situado entre el foco y la lente, aunque el haz emergente ha convergido respecto al incidente, la convergencia no es suficiente para concentrar la luz en un punto.

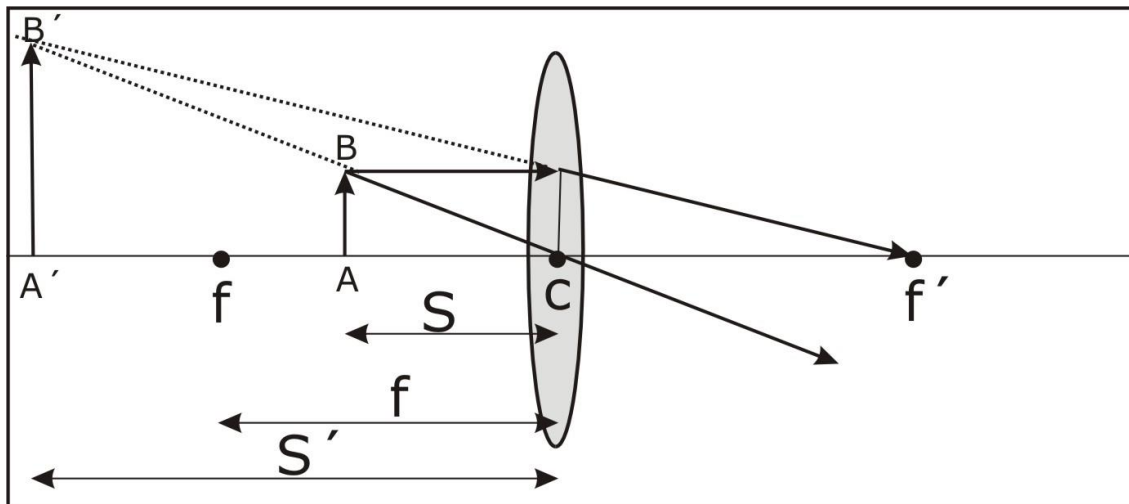
Les animo a probar a realizar ellos el trazado. Les doy un tiempo.

Posteriormente les cuento que como el haz que llega al ojo es divergente, el observador verá una imagen (virtual) en el origen directo de ese haz de luz, lo que se asemeja a la visión en un espejo y a la de los objetos sumergidos en agua. En caso de tratarse de un objeto extenso, podemos imaginar que el punto O es uno de sus extremos y, para el otro, el trazado gráfico no es necesario realizarlo por ser simétrico al primero.

Con frecuencia se suele dibujar la imagen virtual, en este caso un lápiz, para representar que el ojo reconoce en la imagen al objeto emisor de luz, conviene volver a avisar aquí que esta imagen sólo tiene sentido por referencia al ojo del observador, que en ningún caso se trata de un objeto situado detrás de la lente y que ni siquiera es el origen de la luz que llega al ojo.

Les comento que la misma ecuación que hemos utilizado para las lentes se puede utilizar para las lentes cuando las utilizamos como lupas.

Los alumnos 4 y 11 preguntan por la demostración y les ofrezco la siguiente demostración:



Los signos negativos significan que son distancias virtuales.

$$y'/y = -S' + f' / f'$$

$$y'/y = -S' / S$$

$$-S' / S = -S' + f' / f'$$

$$-S'f' = -SS' + Sf'$$

$$-SS' + Sf' + S'f' = 0$$

$$Sf' + S'f' = SS'$$

$$f' / S' + f' / S = 1$$

$$\mathbf{1/S + 1/S' = 1/f}$$

Por tanto, llegamos a la conclusión de que, si podemos utilizar la ecuación de lentes delgadas, aunque utilicemos la lente como lupa.

Vuelvo a insistir en que cuando la imagen es virtual, el signo de s' ha de ser negativo.

Pregunto a los alumnos si comprenden el signo de s' y afirman que sí. Carlos pregunta que si cuando la imagen es virtual el signo es negativo y le digo que sí, recordándole que s' es virtual y por tanto de ahí no puede proceder la luz.

Les explico que este caso, el aumento visual no es el aumento lateral, ya que, en el caso de la lupa, el aumento depende de la distancia a la que coloquemos la lupa del objeto y de la distancia a la que se coloque el observador de la lupa.

El profesor debe insistir en que el aumento lateral no lo podemos medir, puesto que la imagen es virtual y no podemos medir a qué distancia de la lente se forma. Es muy importante no confundir el aumento lateral con los aumentos de las lupas comerciales.

El alumno me pregunta que cómo se calcula entonces el aumento lateral, y le explico que el aumento visual de la lupa, no es el aumento lateral, que en este caso no se podría medir.

Si llamamos ω al ángulo subtendido por el objeto desde el ojo, ω' al ángulo subtendido por la imagen virtual, k a la distancia del objeto al ojo y k' a la distancia de la imagen al ojo.

$$\text{tg } \omega = y/k$$

$$\text{tg } \omega' = y'/k'$$

$$M = \text{tg } \omega' / \text{tg } \omega$$

$$M = y'/k' / y/k$$

$$M = k \cdot y' / k' \cdot y = 0.250 \cdot s' / k' \cdot s$$

Si el objeto está a 0.250 y si el objeto además está en el foco de la lente, entonces: $s=f$ y k' es aproximadamente igual a s' que será infinito.

Entonces:

$$M = 0,250/f \quad M = D/4$$

Definimos el aumento de una lupa para esta situación determinada de este modo.

Hay que determinar una situación concreta porque el lugar en el que se forma la imagen en una lupa depende de la posición del objeto.

Es muy importante no confundir el aumento lateral con los aumentos de las lupas comerciales.

2. Conceptos tratados.

Trazado de rayos de una lente convergente actuando como lupa. Imagen virtual. Aumento de una lupa no es igual al aumento lateral.

3. Reflexión de la docente.

Creo que solamente algunos alumnos serán capaces de proponer por sí mismos el trazado gráfico de la formación de la imagen.

4. Interpretación.

Como en otras actividades se aprecia distintos niveles de razonamiento en los alumnos.

1. Metodología y descripción. ¿Qué hicimos?

A.40. ¿Cómo se ve una letra de 4 mm a través de una lupa de 15 dioptrías cuando se sitúa a 5 cm de la lente? Realiza un trazado gráfico y explica las características de la imagen.

Es una actividad de manejo de las ecuaciones deducidas en las actividades anteriores.

2. Conceptos tratados.

Trazado gráfico de la formación de una imagen por una lente convergente actuando como lupa.

3. Hipótesis.

Imaginamos que algunos alumnos serán capaces de realizar el trazado gráfico y otros necesitarán ayuda del profesor.

4. Interpretación.

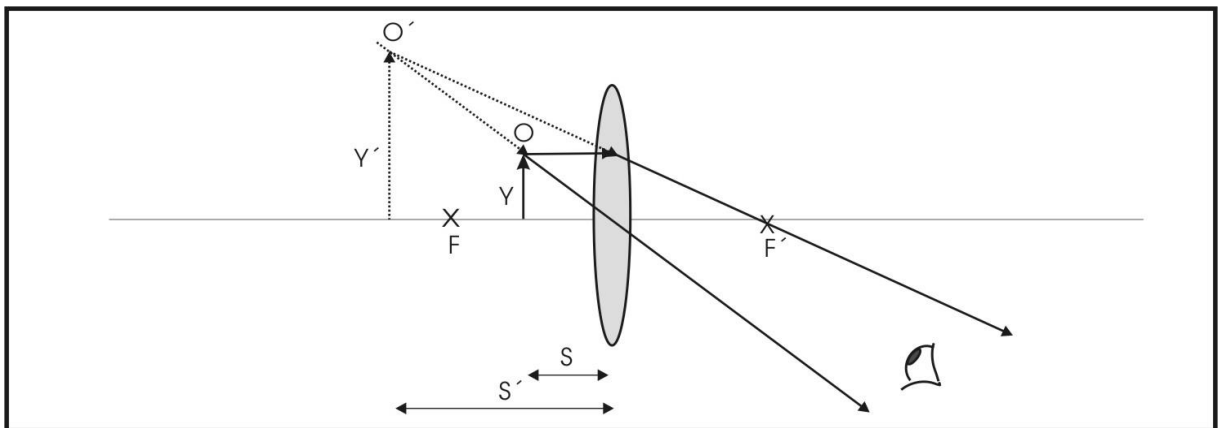
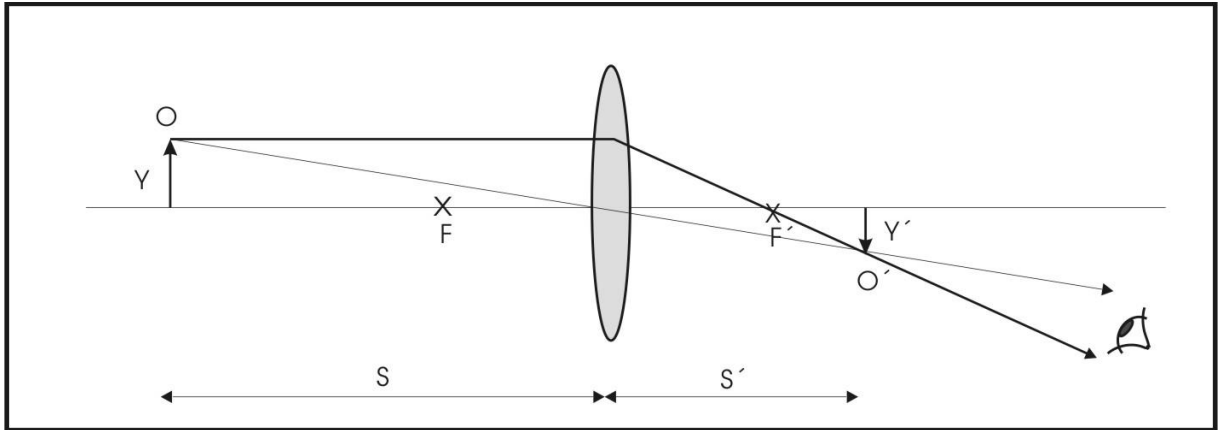
Los alumnos con mucha iniciativa como los alumnos 2, 3, 4, 11 y 13, se enfrentan rápidamente a la resolución y realizan un trazado gráfico adecuado. Los demás necesitan un poco de ayuda, pero finalmente comprenden el dibujo.

1. Metodología y descripción. ¿Qué hicimos?

A.41. Una persona se sorprende que, al mirar a un objeto cercano, a través de una lente convergente, vea la imagen derecha y más grande y, sin embargo, cuando mira a un objeto lejano vea la imagen más pequeña e invertida ¿podrías explicarlo?

Pretendemos relacionar la experiencia al mirar a través de las lentes con los trazados gráficos que hemos ido desarrollando para afianzar los conceptos tratados.

Recuerdo a los alumnos los trazados que hemos ido dibujando anteriormente.



Intento que los alumnos relacionen estos trazados con la experiencia que han tenido con las lentes.

2. Conceptos tratados.

Imagen de un objeto lejano y de otro cercano, formada por una lente convergente.

3. Reflexión de la docente.

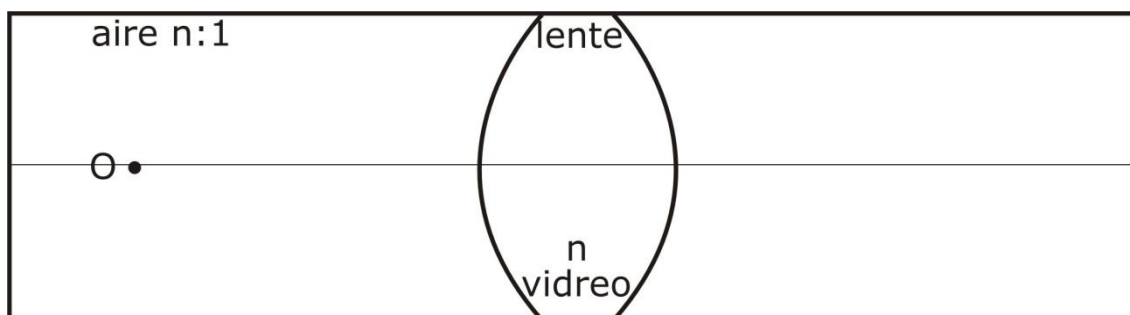
Creo que la mayoría de los alumnos serán capaces de realizar los dos trazados gráficos.

4. Interpretación.

Efectivamente, excepto los alumnos 1, 14 y 15, el resto de los alumnos realizan los trazados gráficos adecuados. Tras mi explicación, parece todos los alumnos lo comprenden.

1. Metodología y descripción. ¿Qué hicimos?

A.42. Considerando la aproximación paraxial, explica la convergencia de los haces de luz cuando atraviesan una lente convergente. Realizar trazados gráficos para explicar el comportamiento de la luz en cada cara de la lente



A partir de la hipótesis de refracción de la luz con la que hemos podido explicar cómo vemos los objetos sumergidos en medios transparentes, vamos a intentar explicar cómo se comporta la luz al atravesar las lentes. Busco una aplicación cualitativa de la Ley de Snell.

Algunos alumnos (Alumnos 2, 3, 4, 5, 10 y 11) dibujan trazados de refracción en las dos caras, siendo capaces de comprender rápidamente que dichos trazados muestran cómo converge la luz al atravesar la lente.

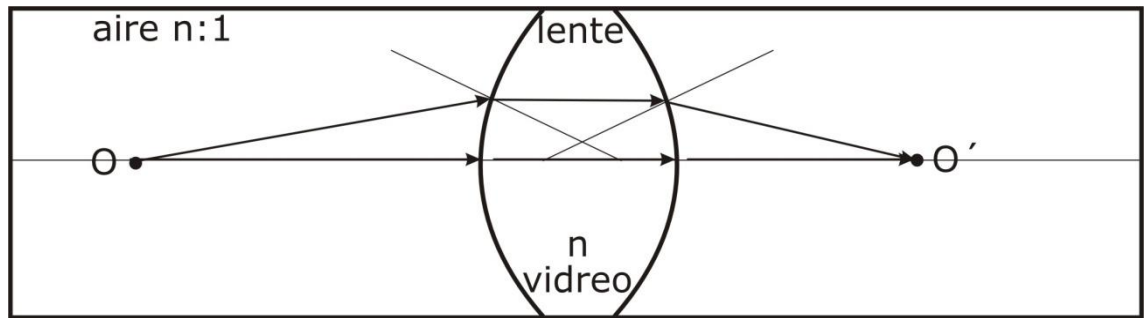
Les comento que, a partir del trazado gráfico, y aplicando la ley de Snell a los dos dioptrios, se puede llegar a la ecuación del dioptrio esférico, que es la misma que la de las lentes y de los espejos.

2. Conceptos tratados.

Ecuación del dioptrio esférico.

3. Reflexión de la docente.

Con lo aprendido hasta ahora espero que los alumnos dibujen un trazado gráfico similar al siguiente:



4. Interpretación.

Algunos alumnos son capaces de avanzar la respuesta y otros necesitan ayuda.

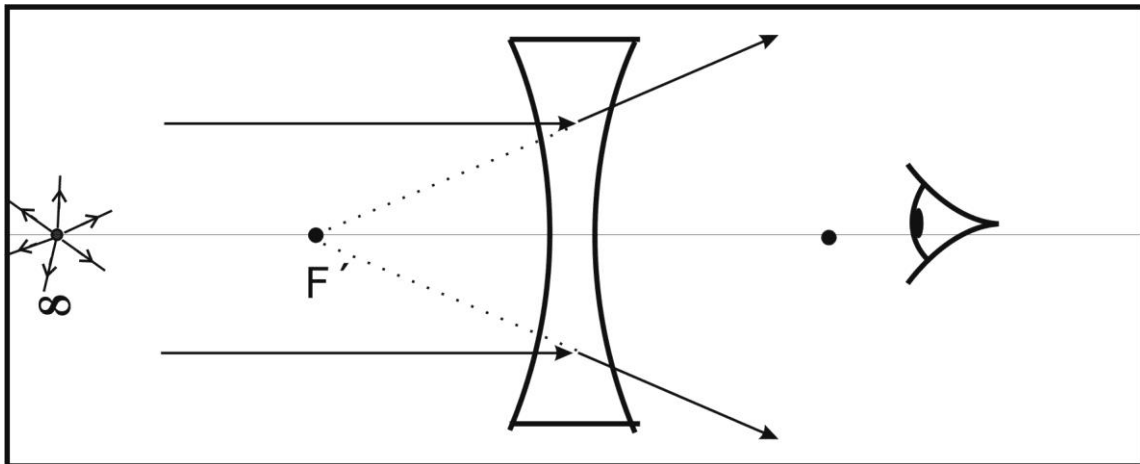
1. Metodología y descripción. ¿Qué hicimos?

A.44. Explora el comportamiento de las lentes divergentes. Señala las características de la visión a través de ella y la posición de los focos. Compara las características de las lentes divergentes con las de la lente convergente.

Quiero que los alumnos se familiaricen con las lentes divergentes y que las comparen con las lentes convergentes que habían utilizado previamente. Les dejo las lentes divergentes de $f=-100\text{mm}$ y también las lentes convergentes y divergentes con su forma.

Les explico que en este caso el foco objeto de la lente es virtual, es decir, de él no puede proceder la luz.

Realizo en la pizarra los siguientes dibujos para que comprendan lo que les ocurre a los haces de luz.



Les explico que la imagen que se forma es en todos los casos virtual. Es decir, sea cual sea la posición del objeto, no podemos encontrar su imagen en una pantalla.

Animo a los alumnos a realizar la experiencia colocando un foco puntual en distintas posiciones y observando que el haz de luz emergente sobre una pantalla siempre es divergente.

Animo a los alumnos a que comparen las características de esta lente, con la lente convergente, y les ayudo a comprender las diferencias.

Los alumnos se muestran tranquilos y concentrados en la experimentación.

2. Conceptos tratados.

Lentes divergentes, focos.

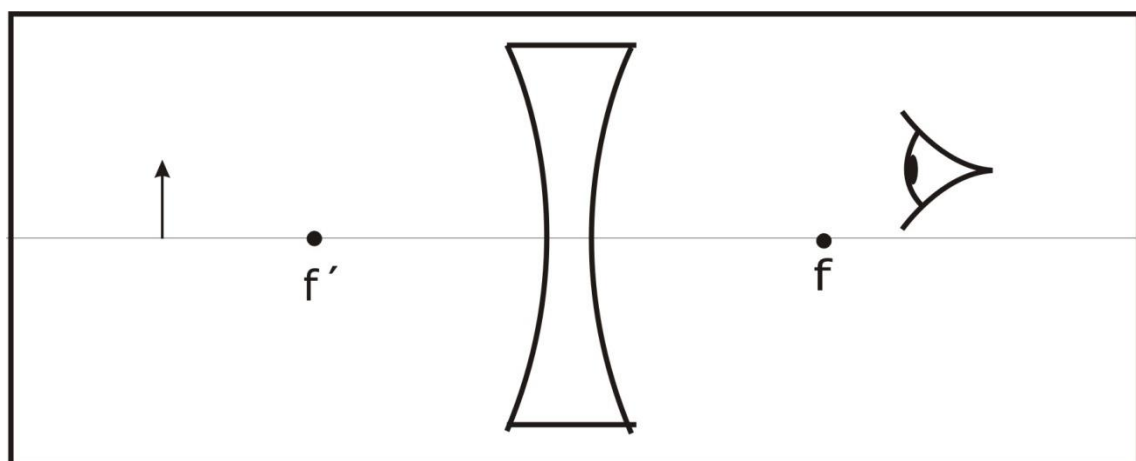
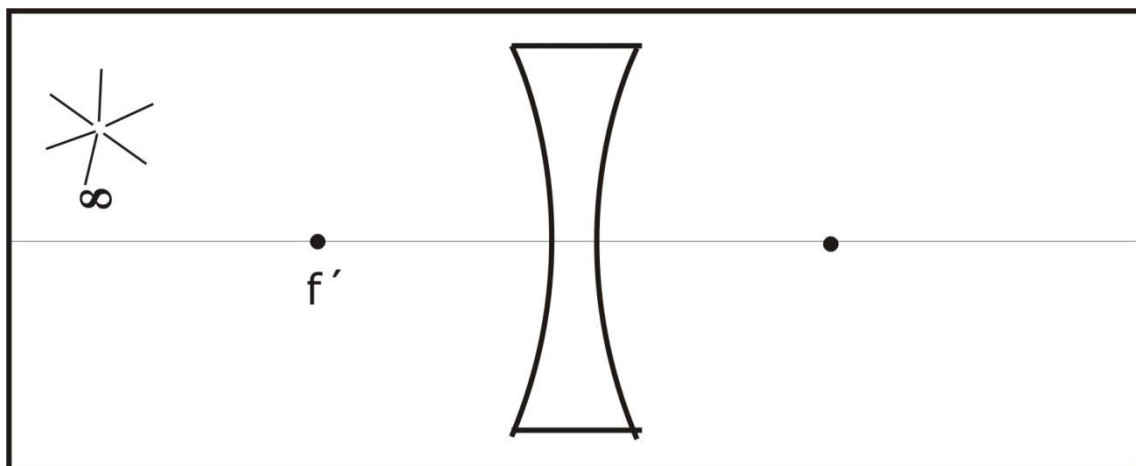
3. Reflexión de la docente.

Espero que los alumnos comprendan las diferencias entre las lentes convergentes y divergentes. Espero que los alumnos comprendan que la visión a través de ellas nos da siempre una imagen derecha, más pequeña y siempre virtual, para cualquier posición del objeto.

4. Interpretación.

1. Metodología y descripción. ¿Qué hicimos?

A.45. A partir de las observaciones anteriores completa los siguientes esquemas para clarificar gráficamente cómo se comportan las lentes divergentes:



Quiero que los alumnos relacionen su experiencia con las lentes con el algoritmo del trazado de rayos que habíamos desarrollado previamente para expresar que le ocurre a la luz cuando interacciona con las lentes.

Actividad en la que se pide al alumno que a partir de las observaciones realizadas realice el trazado gráfico correspondiente a una lente divergente.

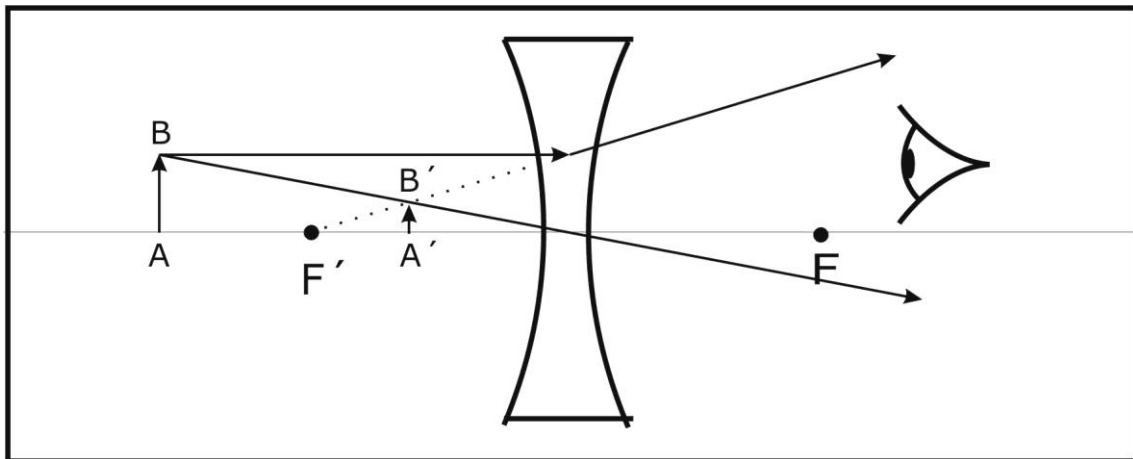
Los alumnos, ayudados por mí realizan dichos trazados finalmente. Al principio les resulta difícil por el hecho de que el foco imagen esté a la izquierda de la lente. Les ayudo en todo momento animándoles a recordar lo que sucede en las experiencias.

Animo a los alumnos a que comparen el trazado gráfico realizado para encontrar la imagen formada por una lente divergente con el trazado gráfico que realizaban para encontrar la imagen formada por un espejo convexo, y les ayudo a comprobar que son trazados simétricos, y por tanto, como la luz viaja igual en un sentido que en otro, la

ecuación algebraica que utilizábamos para encontrar la imagen formada por un espejo convexo podemos utilizarla para encontrar la imagen formada por una lente divergente.

El profesor comparará estos trazados gráficos que hemos realizado para las lentes divergentes con los de los espejos convexos que habíamos visto anteriormente.

Les ayudo a relacionar la experiencia con las lentes divergentes con el trazado gráfico, y dicho trazado gráfico con el hecho de que la imagen que se forme sea virtual, y les propondrá el siguiente trazado:



2. Conceptos tratados.

Foco virtual de las lentes divergentes.

3. Reflexión de la docente.

Espero que por extensión de lo que habían aprendido previamente con las lentes convergentes, algunos alumnos dibujen correctamente lo que le sucede a la luz.

Espero que los alumnos comprendan el trazado gráfico de las lentes divergentes y su analogía con el trazado gráfico para el espejo convexo.

También Espero que un porcentaje de los alumnos tengan dificultades para comprender que la luz diverge al atravesar la lente, y que por tanto se formará una imagen virtual.

4. Interpretación

1. Metodología y descripción. ¿Qué hicimos?

A.46. ¿Se cumple con este tipo de lentes la ecuación gaussiana de las lentes delgadas?

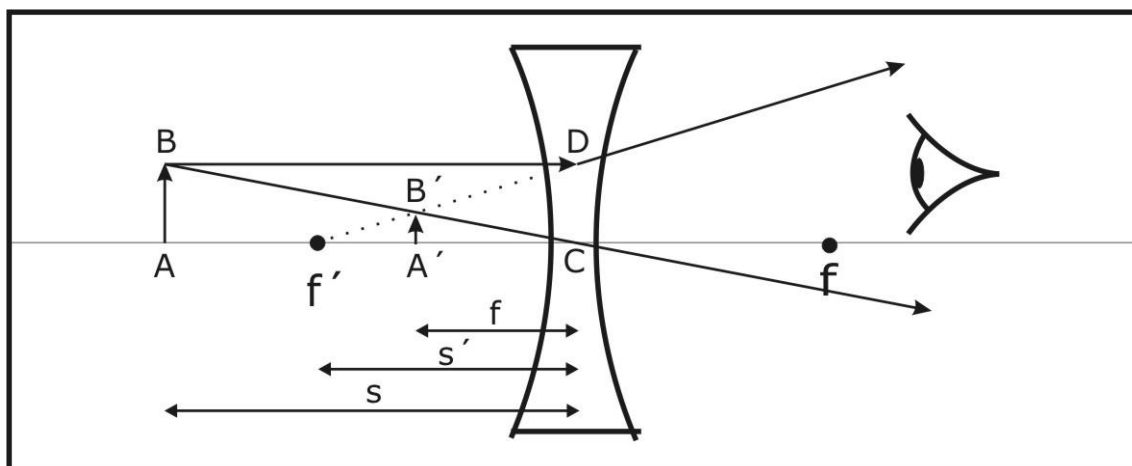
Les recuerdo que los trazados gráficos que realizábamos para encontrar la posición en la que se forma la imagen en un espejo convexo y en una lente convergente, son trazados simétricos, y, por tanto, como la luz viaja igual en un sentido que en otro, la ecuación algebraica que utilizábamos para encontrar la imagen formada por un espejo convexo podemos utilizarla para encontrar la imagen formada por una lente divergente.

Les comento que sí, pero con la salvedad de que cuando utilizemos expresiones algebraicas deberemos utilizarlo con signo negativo para expresar que es un foco virtual. Les recuerdo que la imagen es virtual, es decir no hay una convergencia real de la luz en ningún punto, y por tanto s' también ha de ser negativa.

Les comento que, puesto que el foco es virtual, y su signo negativo, las lentes divergentes tendrán dioptrías negativas.

El profesor explicará a los alumnos que las lentes divergentes siempre forman imágenes más pequeñas que el objeto.

El alumno 11 me pregunta por la demostración, y le propongo la siguiente: a partir del siguiente trazado se pueden encontrar los siguientes triángulos semejantes:



$A'B'C$ y ABC son triángulos semejantes, por tanto, podemos deducir que:

$$y/y' = s'/s$$

También encontramos que $F'DC$ y $F'B'A'$ son triángulos semejantes, de donde deducimos que:

$$y'/y = f' - s'/f'$$

Por tanto:

$$s'/s = f' - s'/f'$$

A partir de esta ecuación se deduce la expresión gaussiana para las lentes:

$$1/s + 1/s' = 1/f$$

1. Metodología y descripción. ¿Qué hicimos?

A.47. a) Miramos a través de una lente divergente de -10 dioptrías a un círculo de 1 m de radio situado a 5 m de la lente. ¿Cómo veremos su imagen? Determina la distancia focal imagen y la posición de la imagen.

b) ¿Cómo cambiará la imagen cuando acercamos el objeto a la lente? Realiza trazados gráficos que lo expliquen.

Ejercicio numérico con lentes divergentes.

En pequeños grupos los alumnos se muestran capaces, y resuelven correctamente el ejercicio.

Viernes 21/02/2020 AULA B18 LABORATORIO DE FÍSICA

09:25-10:30 SESIÓN 13

GRUPO 1: 15 Alumnos

1. Metodología y descripción. ¿Qué hicimos?

A.48. La miopía es la anomalía visual de los ojos cuya retina está a mayor distancia del cristalino que en el ojo emétrope. Dibuja en el esquema un diagrama de rayos que explique la visión de un ojo miope de un objeto alejado. ¿Por qué los miopes ven borrosos los objetos alejados?

Esta actividad trata de que los alumnos comprendan el comportamiento del ojo miope (que tiene la retina a mayor distancia del cristalino). Quiero que los alumnos comprendan las diferencias entre un ojo miope y otro emétrepe para formar la imagen en la retina. Quiero que comprendan por qué un ojo miope forma una imagen borrosa, relacionando la incapacidad del ojo miope para ver bien con el hecho de que su retina se haya más alejada del cristalino que la retina de un ojo emétrepe.

Algunos alumnos (Alumnos 6, 7 y 12) comentan que si la miopía no era un problema que tenían las personas que no veían bien de cerca. Les explico que no es exactamente así y les dibujo el ojo miope.

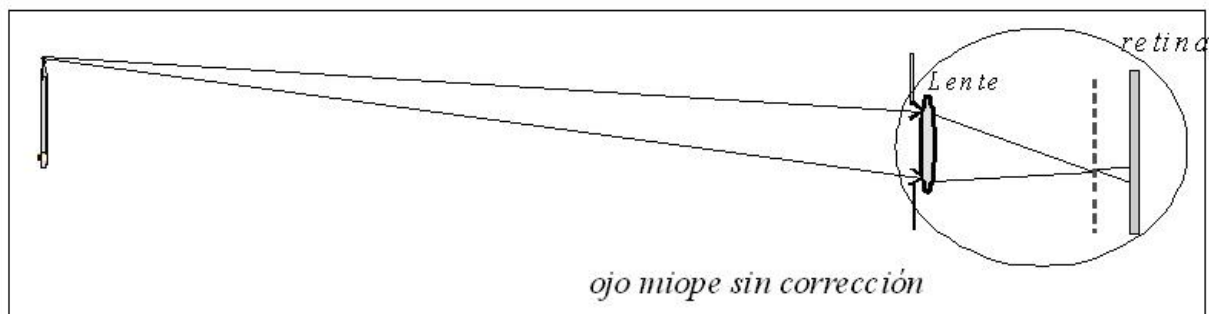
Les dibujo en la pizarra el ojo emétrepe y les ayudo a dibujar el ojo miope en comparación con el ojo emétrepe.

Les explico que no se forma una imagen puntual de cada punto del objeto iluminado, sino un círculo. Entre estos círculos se producen intersecciones, dando lugar a que a un mismo punto de la retina le llegue luz de distintos puntos del objeto, lo que explica la sensación de “ver borroso”.

Los animo a relacionar siempre la realidad física con el trazado gráfico para que los alumnos tengan siempre presente que el algoritmo que utilizan es una representación de lo que sucede en el ojo.

Algunos alumnos han llegado ellos solos al trazado correspondiente (Alumnos 2, 3, 4, 10 y 11). Otros alumnos me piden ayuda.

Finalmente propongo para todos en la pizarra el siguiente trazado:



2. Conceptos tratados.

Miopía

3. Reflexión de la docente.

Creo que con las explicaciones del profesor los alumnos podrán realizar el trazado gráfico correspondiente. También Espero que algún porcentaje de alumnos necesite la ayuda del profesor para poder plasmar sus ideas en un trazado gráfico.

4. Interpretación.

Algunos alumnos comprenden por sí mismo que al tener la pantalla más lejana al lugar donde se forma la imagen, pues no se formará una imagen puntual de cada punto del objeto.

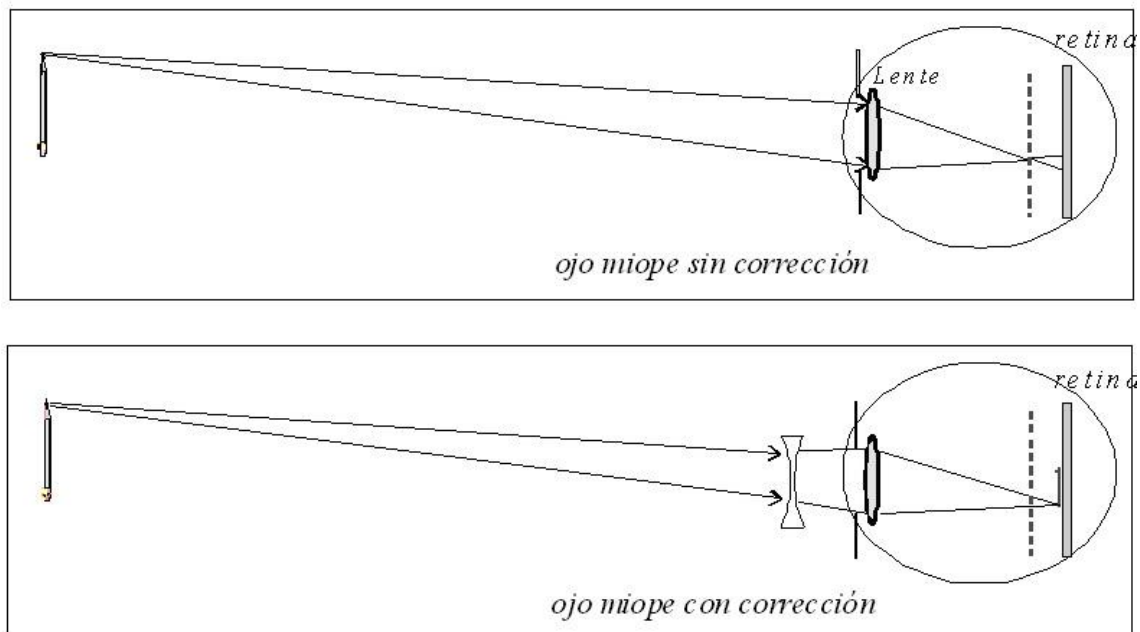
1. Metodología y descripción. ¿Qué hicimos?

A.49. Dado que la distancia lente-retina no puede ser modificada, propón una solución óptica para la corrección de la miopía.

Como continuación de la actividad anterior se pide a los alumnos que propongan una solución óptica para el ojo miope, teniendo en cuenta que la distancia cristalino-retina no puede ser modificada. Quiero que los alumnos comprendan que se puede corregir la miopía utilizando lentes divergentes.

Los alumnos comprenden que han de usar lentes divergentes para conseguir que la imagen se forme más alejada.

Les ayudo con el trazado gráfico, proponiendo la siguiente corrección para la miopía mediante la utilización de lentes divergentes:



2. Conceptos tratados.

Corrección de la miopía. Trazado gráfico.

3. Reflexión de la docente.

Espero que algunos alumnos propongan esta corrección ya que previamente se habían familiarizado con la utilización de las lentes divergentes.

4. Interpretación.

Los alumnos comprenden la necesidad de utilizar lentes divergentes.

1. Metodología y descripción. ¿Qué hicimos?

A.50. (ampliación). ¿Cómo graduarías a una persona con miopía? ¿Qué lente le dirías que tiene que utilizar?

Les propongo esta actividad de manera optativa para realizar en casa.

Creo que los alumnos 3, 4, 5 y 11 lo van a intentar.

Les ayudo explicándoles que las personas que tienen miopía no ven correctamente los objetos lejanos, sin embargo, los objetos que están cerca si los ven bien. Por ello, en

primer lugar, habría que calcular cual es el punto próximo de la persona (es decir el punto en el que comienza a ver correctamente).

Una vez conocido dicho punto, la persona necesitaría una lente divergente que formara la imagen a dicha distancia de la lente (recuerda que la imagen formada por una lente divergente es virtual). Por tanto, el punto próximo que hemos calculado antes sería la distancia s' .

Explicación para el día siguiente, si no lo traen bien hecho: Si aplicamos ahora la ecuación de las lentes que hemos estudiado:

$$1/s + 1/s' = 1/f$$

$$1/s + 1/s' = P$$

La distancia s es infinito, la distancia s' es el punto próximo, pero como es virtual, debemos ponerla con signo negativo. Entonces podemos calcular cuan ha de ser la potencia de la lente, es decir las dioptrías de la lente que debemos recomendar a la persona.

El profesor ha de destacar que la potencia será negativa, como corresponde a las lentes divergentes.

1. Metodología y descripción. ¿Qué hicimos?

A.51. La hipermetropía es la anomalía visual de los ojos cuya retina está a menor distancia del cristalino que en el ojo emétrope. Dibuja en el esquema un diagrama de rayos para la visión de un objeto alejado. ¿Por qué los hipermétropes ven borrosos los objetos alejados? (Osuna 2003-2008).

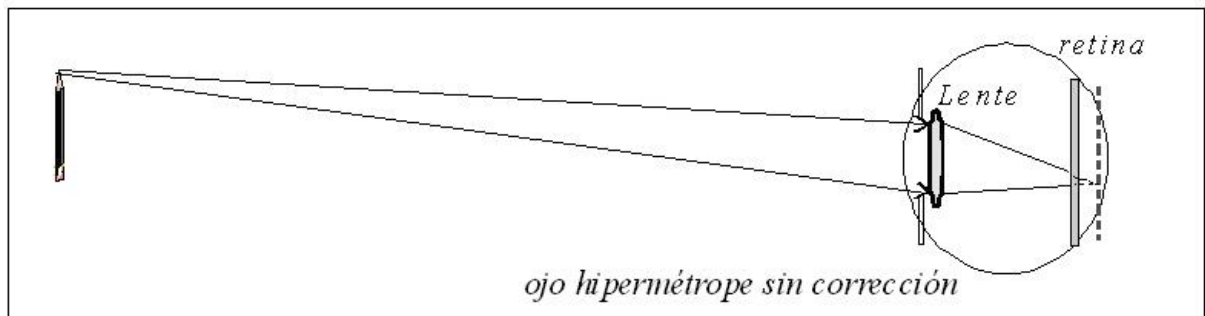


Se trata de que los alumnos dibujen el esquema del diagrama de rayos para la visión de

un objeto alejado en el caso de un ojo hipermetrope (aquel cuya retina está más cerca del cristalino que en el ojo emétrepe)

Algunos alumnos (Alumnos 2, 3, 4, 5, 10, 11 y 13) son capaces de proponer el trazado de rayos adecuado.

Animo a todos los alumnos a relacionar esta actividad con la anterior y finalmente propongo el siguiente trazado gráfico a los alumnos:



2. Conceptos tratados.

Hipermetropía

3. Reflexión de la docente.

Creo que los alumnos comprenderán que la imagen se ve borrosa al no situarse la retina en el lugar en el que se forma la imagen.

4. Interpretación.

Al haber realizado previamente la actividad del ojo miope, tienen menos dificultades para realizar el trazado gráfico correspondiente.

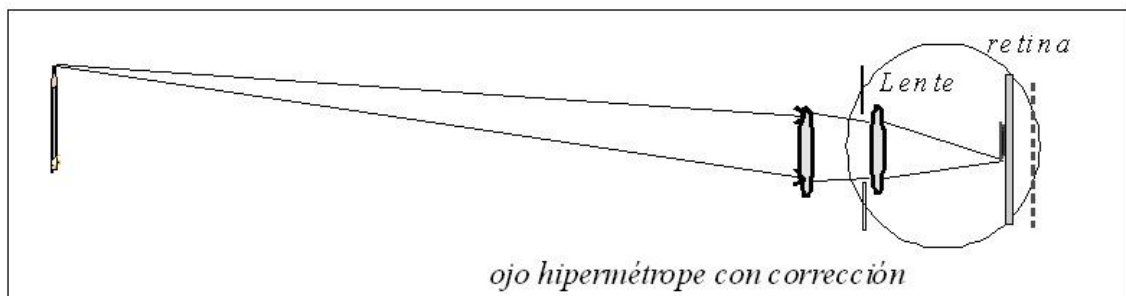
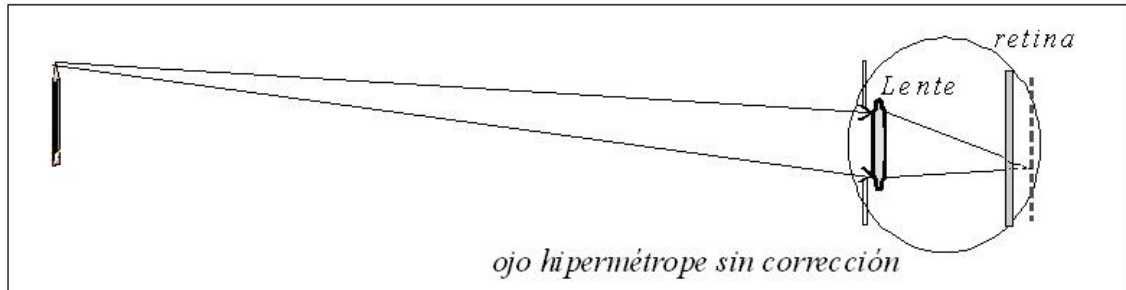
1. Metodología y descripción. ¿Qué hicimos?

A.52. Dado que la distancia lente-retina no puede ser modificada, propon una solución óptica para la corrección de la hipermetropía.

Dado que la distancia lente-retina no puede ser modificada, se pide a los alumnos que propongan una solución óptica para la corrección de la hipermetropía.

Los alumnos proponen correctamente la utilización de lentes convergentes. Se muestran contentos e ilusionados con estos descubrimientos.

Les propongo el siguiente trazado gráfico:



Todos se muestran contentos e ilusionados con estos descubrimientos.

2. Conceptos tratados.

Corrección de la hipermetropía.

3. Reflexión de la docente.

Espero que los alumnos integren lo aprendido hasta ahora acerca de lentes convergentes con su vida diaria. Es una aplicación directa del estudio de la óptica a la mejora de las condiciones de vida del ser humano.

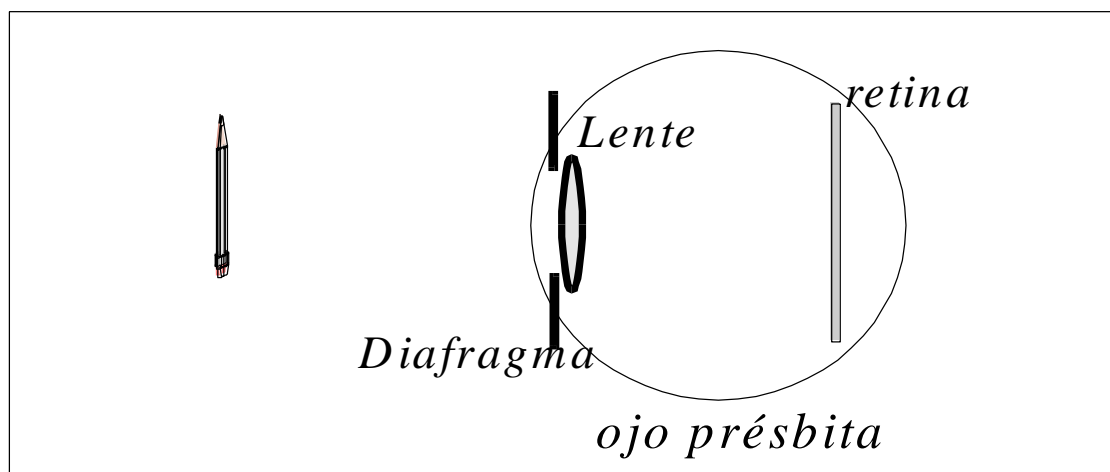
Espero que con lo aprendido hasta ahora acerca de las lentes los alumnos comprendan esta corrección de la hipermetropía. Es muy importante que los alumnos comprendan que la lente divergente utilizada en la corrección óptica del ojo miope tiene unas propiedades ópticas contrarias a las de la lente convergente.

4. Interpretación.

Gracias al paralelismo con la actividad de corrección de la miopía, en este caso, todos los alumnos comprenden perfectamente el trazado gráfico.

1. Metodología y descripción. ¿Qué hicimos?

A.53. El esquema siguiente representa un ojo présbita, en el que el cristalino no aumenta su curvatura al mirar a los objetos cercanos. Dibuja en él un diagrama de rayos y explica por qué ve borroso. (Osuna 2003-2008).

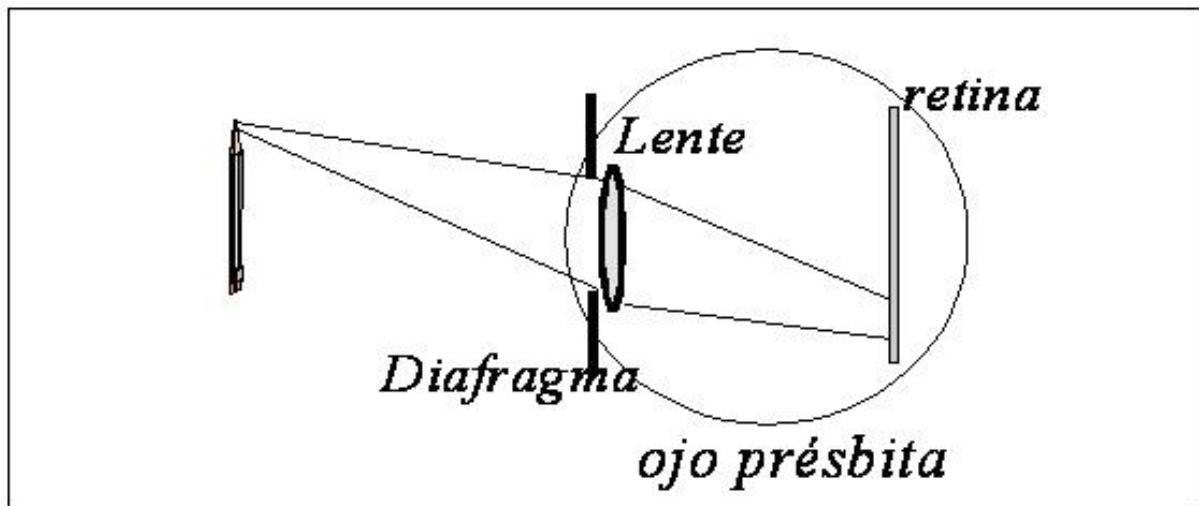


En esta actividad estudiamos el ojo présbita (el ojo que ha perdido la capacidad de aumentar de curvatura al mirar los objetos cercanos).

Quiero que los alumnos comprendan que, si el cristalino no se puede acomodar, es decir variar su curvatura para hacerse más convergente al mirar objetos cercanos, la imagen no se formará correctamente.

Algunos alumnos proponen ellos mismos el trazado gráfico correspondiente (Alumnos 2, 3, 4 y 11).

Finalmente les propongo el siguiente trazado gráfico, relacionando el poder de convergencia de la lente, con la capacidad de adoptar cierta curvatura del cristalino, y su incapacidad en el caso del ojo présbita:



2. Conceptos tratados.

Ojo presbita.

3. Reflexión de la docente.

Espero que los alumnos comprendan que si la lente (el cristalino) no es lo suficientemente convergente, entonces la imagen no se formará en la retina, estará más alejada, y necesitaríamos una lente convergente para poder formar la imagen en la retina.

4. Interpretación.

Al haber hecho actividades anteriores en este sentido, los alumnos comprenden rápidamente la situación.

1. Metodología y descripción. ¿Qué hicimos?

A.54. Propón una solución óptica para corregir la presbicia.

Como continuación de la actividad anterior se pide a los alumnos que propongan una solución para corregir la presbicia. Quiero que los estudiantes tengan oportunidad de aplicar los conocimientos construidos para la comprensión de las anomalías visuales y su corrección óptica.

Los alumnos se muestran capaces.

Pregunto por grupos y compruebo que todos los alumnos comprenden que si en el caso del ojo presbita, la lente del cristalino no puede aumentar su poder de convergencia al mirar a un objeto cercano, el haz de luz procedente de cada punto del mismo convergerá en un punto detrás de la retina. Por ello, la corrección del ojo presbita se realizará con lentes convergentes que equilibren el déficit de convergencia del cristalino.

2. Conceptos tratados.

Corrección de la presbicia.

3. Reflexión de la docente.

Creo que, al haber realizado actividades previas parecidas, los alumnos no tendrán ningún problema.

4. Interpretación.

Efectivamente, los alumnos se muestran capaces y sin dudas.

1. Metodología y descripción. ¿Qué hicimos?

A.55. Si deseamos ver una imagen al mirar a través de una lente hacia un objeto lejano, ¿qué tipo de lente deberíamos utilizar para verla del mayor tamaño posible? Dibuja un esquema que explique la visión de esta situación. Una vez obtenida la imagen cercana de un objeto lejano, ¿cómo podríamos verla aumentada?

Quiero que los alumnos comprendan que, para ver la imagen de un objeto lejano al mayor tamaño posible, tendremos que utilizar una lente con una distancia focal grande, es decir, una lente de pocas dioptrías.

Planteo a los alumnos la siguiente cuestión: para ver un objeto lejano del mayor tamaño posible, ¿qué lente tendría que utilizar?

Ayudo a los alumnos a realizar diferentes trazados gráficos para comprobar que tipo de lentes se ajusta más a sus necesidades, proponiéndoles que realicen el trazado gráfico para la obtención de la imagen de un objeto lejano con un lente de distancia focal pequeña y con otra de distancia focal grande. Les animo a realizar varios trazados gráficos, con diferentes distancias focales.

Los alumnos comprueban gráficamente las diferencias en el tamaño de la imagen, y los alumnos 4, 10 y 11 proponen volver a utilizar las lentes y pantallas para comprobarlo.

Algunos llegan solos a la conclusión (alumnos 4, 10 y 11), de que han de utilizar una lente con una distancia focal grande, es decir una lente con pocas dioptrías. Animo a los alumnos que aún no se han dado cuenta (alumnos 5, 6, 7 11 y 15) a realizar trazados gráficos con lentes de diferentes distancias focales, una grande y otra pequeña, para comprobar que lente se ajusta más a sus necesidades.

Entonces, una vez obtenida la imagen cercana de un objeto lejano, les pregunto: ¿cómo podríamos verla aumentada? Los alumnos comprenden fácilmente que necesitan utilizar una lupa. Se muestran alegres.

2. Conceptos tratados.

Formación de la imagen aumentada de un objeto lejano.

3. Reflexión de la docente.

Espero que con los trazados gráficos adecuados los alumnos se den cuenta de que, con una lente de distancia focal pequeña, se obtiene una imagen muy cerca del foco, es decir cerca de la lente, y de tamaño muy pequeño. Sin embargo, con una lente de mayor distancia focal, la imagen que se obtiene es de mayor tamaño y está más alejada de la lente.

4. Interpretación.

Algunos alumnos comprenden fácilmente la actividad propuesta, mientras que otros necesitan de la ayuda del profesor.

1. Metodología y descripción. ¿Qué hicimos?

A.56. El telescopio de Kepler consiste en una combinación de dos lentes convergentes: el objetivo, que consigue formar una imagen cercana del objeto lejano y el ocular, que actúa como una lupa para ver aumentada la imagen formada por el objetivo. Realiza un diagrama que explique el funcionamiento de este telescopio y construye uno con las lentes suministradas por el profesor. ¿Qué características tiene la imagen que se ve?

Animo a los alumnos a intentar realizar el trazado gráfico adecuado para explicar la formación de la imagen con el telescopio Kepler. Los alumnos no son capaces de combinar el trazado gráfico de la imagen formada con la primera lente, con el trazado gráfico a partir de esta primera imagen real para la formación de la imagen final.

Les ayudo diciéndoles que la imagen formada por la primera lente, que es una imagen real, actúa como objeto para la segunda lente.

Algunos alumnos tras la realización de la actividad anterior proponen su propio trazado gráfico. Les ayudo diciéndoles que si el objeto está muy lejano el haz de luz llegará paralelo al eje óptico.

No son capaces de concretar el trazado gráfico. Entonces les ayudo proponiendo un haz de luz con cierta inclinación delimitado por dos rayos, uno que procediendo del infinito pasara por el foco objeto, y al salir de la lente fuera recto al infinito, y otro que pasara por el centro de la lente y no se desviara. Forma una imagen real, que hacemos coincidir con la distancia focal del ocular, y entonces de cada punto de dicha imagen parte un haz de luz delimitado por dos rayos, uno que pasa por el centro de la lente y no se desvía y otro que paralelo al eje óptico cuando incide en la lente se va al foco objeto (formando un haz paralelo otra vez).

2. Conceptos tratados.

Formación de imágenes por un telescopio.

3. Reflexión de la docente

Creo que por sí mismo los alumnos no serán capaces de realizar el trazado gráfico.

4. Interpretación.

Con ayuda del profesor los alumnos comprenden el trazado gráfico.

A.56.1. (opcional) Con las indicaciones que aportamos en las siguientes actividades y con materiales baratos y fáciles de conseguir, se puede construir un telescopio del tipo que construyó Kepler (Osuna 2003-2008).

Con esta actividad experimental trato de que los alumnos reproduzcan en el laboratorio el telescopio de Kepler utilizando dos lentes convergentes, el objetivo para formar una imagen cercana del objeto lejano y el ocular, que actúa como lupa para ver aumentada la imagen que forma el objetivo.

Les propongo la actividad opcional para casa en grupos. Los animo a utilizar un tubo de unos 60 cm y una lente convergente de 2D que hará de objetivo. Así mismo una lente convergente de 10 D que funcionará como lupa, haciendo de ocular.

Les digo que las lentes han de estar perfectamente alineadas.

Los alumnos se muestran alegres e ilusionados con el proyecto, quedan entre ellos para hacerlo en casa. Les doy dos semanas de plazo.

1. Metodología y descripción. ¿Qué hicimos?

A.57. Si deseamos ver una imagen real, del mayor tamaño posible, de un objeto pequeño y cercano, ¿qué tipo de lente deberíamos utilizar? Dibuja un esquema que explique la visión de esta situación. Una vez obtenida la imagen aumentada de ese pequeño objeto, ¿cómo podemos verla aumentada aún más?

Esta actividad está relacionada con el funcionamiento del microscopio. Se pregunta a los alumnos qué lente deberíamos utilizar para ver una imagen real del mayor tamaño posible, de un objeto cercano y pequeño.

Algunos alumnos (Alumnos 2, 3, 4, 10, 11 y 13) proponen rápidamente la necesidad de utilizar una lente de distancia focal grande para formar la imagen real y aumentada. Posteriormente para verla aún más aumentada, una lupa. Se ve que lo han entendido bien.

El profesor ayuda a los demás alumnos a realizar el trazado gráfico.

Al final, todos alumnos llegan a la conclusión de que necesitan una lente de focal grande para la obtención de una imagen real un poco aumentada, y posteriormente, para aumentarla aún más, comprenden que necesitamos una lente convergente actuando de lupa.

2. Conceptos tratados.

Funcionamiento del microscopio.

3. Reflexión de la docente

Creo que después de haber realizado la actividad del telescopio, los alumnos propondrán correctamente la necesidad de la utilización de una lente de distancia focal grande.

4. Interpretación.

Con la realización previa de las actividades concernientes al telescopio, los alumnos comprenden más fácilmente el funcionamiento del microscopio.

1. Metodología y descripción. ¿Qué hicimos?

A.58. Un microscopio consiste en una combinación de dos lentes convergentes: el objetivo, con el que se forma una imagen real aumentada de un pequeño objeto y cercano, y el ocular, que actúa como una lupa para ver aumentada la imagen dada por el objetivo. Realiza un diagrama que explique el funcionamiento de un microscopio y construye uno con las lentes suministradas por el profesor.

La actividad explica a los alumnos que el microscopio consta por tanto, de una lente convergente, el objetivo, que formará una imagen real aumentada de un objeto pequeño y cercano, y otra, el ocular, que actuará como lupa para ver aumentada la imagen dada por el objetivo. Se pide a los alumnos que realicen un diagrama que explique el funcionamiento del microscopio.

Algunos alumnos (Alumnos 2, 3, 4, 10, 11 y 13) son capaces de realizar el trazado gráfico ayudados un poco por mí.

El resto de alumnos tarda más en comprender el trazado gráfico, y tengo que explicarlo varias veces en la pizarra.

Finalmente proporciono a los alumnos las lentes necesarias para fabricar un microscopio en pequeños grupos. Les ayudo a todos un poco.

Todos los grupos formados se muestran ilusionados al ver que funciona bien.

2. Conceptos tratados.

Formación de imágenes con un microscopio. Trazado gráfico

3. Reflexión de la docente

Creo que como hemos realizado previamente la actividad del telescopio, a los alumnos les resultará más sencillo proponer el trazado gráfico en esta actividad.

4. Interpretación.

Los alumnos se muestran más capaces al realizar analogías rápidas con las actividades previas.

Lunes 24/02/2020 AULA B18 LABORATORIO DE FÍSICA

12:20-11:15 SESIÓN 14

GRUPO 1: 15 Alumnos

1. Metodología y descripción. ¿Qué hicimos?

A.59. Realiza una recapitulación del tema, resaltando cuál era el problema que hemos abordado, las ideas más importantes introducidas, los límites de aplicación que tiene el modelo de visión de Kepler y los nuevos problemas que podemos abordar después de elaborar un modelo geométrico de comportamiento de la luz en la visión.

Esta actividad pide a los alumnos que realicen una recapitulación del tema, resaltando cuál era el problema abordado, las ideas más importantes introducidas, y los límites de nuestro modelo. Los alumnos intentan construir su conocimiento al recordar lo aprendido en esta unidad.

Ayudo a los alumnos recordando las diferentes actividades que se han ido haciendo a lo largo de la unidad, para que los alumnos puedan hacerse un esquema mental de lo que sabían y de lo que han aprendido.

Les recuerdo que el objetivo fundamental de la óptica es encontrar una respuesta al problema de cómo vemos. En nuestra estrategia propusimos, en un primer tema, buscar explicaciones a la visión humana a partir del tratamiento geométrico de la luz, sin considerar el problema de su naturaleza. Hemos avanzado en esta estrategia intentando

elaborar un modelo que explique cómo vemos los objetos al mirarlos directamente, y posteriormente lo hemos puesto a prueba en situaciones de visión indirecta y en la comprensión y corrección de las anomalías visuales, incluso de los instrumentos ópticos.

Les recuerdo que para explicar cómo vemos los objetos al mirarlos directamente hemos seguido la siguiente estrategia:

En primer lugar, hemos analizado el comportamiento del objeto que vemos, de la luz, y del ojo del observador.

Una vez establecidas estas relaciones, hemos intentado comprender qué hace el ojo con la luz que le llega, para poder explicar así cómo vemos.

El alumno 11 recuerda que los objetos que vemos son fuentes secundarias de luz.

El alumno 4 que las fuentes luminosas extensas se pueden considerar como conjuntos de fuentes luminosas puntuales.

El alumno 3 dice que desde cada fuente puntual se emite un haz esférico de luz.

El alumno 10 dice que le llamó mucho la atención el hecho de que los rayos no son nada de la propia luz, y el alumno 11 recuerda que sólo indican los límites del haz de luz que se considere.

Los alumnos 6 y 7 consideran muy importante el hecho de que consideremos que el ojo humano funciona como un sistema óptico formado por una lente convergente y una pantalla.

Los alumnos 5 y 8 recuerdan que les pareció muy importante y por ello recuerdan que, para ver bien, es necesario formar una imagen en la retina

El alumno 4. recuerda que, para ver bien los objetos cercanos, la lente del cristalino aumenta su curvatura.

Los alumnos 13 y 14 apuntan que la imagen que se forma en un sistema lente convergente-pantalla es real e invertida, que le había llamado mucho la atención. Y Javi recuerda que no conocía que era necesaria la participación del cerebro en la elaboración de la sensación de la visión.

El alumno 15 recuerda que le llamó mucho la atención la existencia de los focos de una lente. Les recuerdo entonces que son unos puntos muy especiales, y entre todos recordamos sus características acompañándolas por un trazado gráfico explicativo en la pizarra.

Les pregunto que si se acuerdan de la ley de Gauss para las lentes delgadas y todos dicen que sí. Les recuerdo el criterio que habíamos utilizado para la asignación de signos en función de si la luz podía o no provenir del punto considerado. Les recuerdo que esta ley es válida para espejos convexos y cóncavos, y también para lentes divergentes, como habíamos visto a lo largo de la unidad.

Tras un tiempo de puesta en común, les intento resumir el modelo de visión que hemos construido, está basado en el publicado por el científico y astrónomo Johannes Kepler en 1604. En su trabajo, Kepler, cuestionó ideas existentes desde la época de los científicos naturalistas griegos, e introdujo ideas muy novedosas y válidas, que resumimos a continuación:

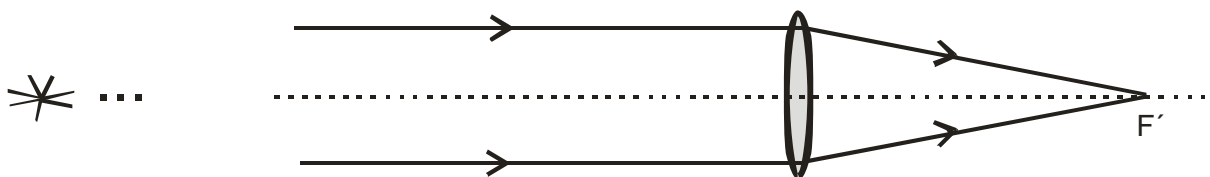
- Los objetos que vemos son fuentes secundarias de luz.
- Las fuentes luminosas extensas se pueden considerar como conjuntos de fuentes luminosas puntuales.
- Desde cada fuente puntual se emite un haz esférico de luz. Los rayos (líneas rectas para representar la luz) no son nada de la propia luz, sólo indican los límites del haz de luz que se considere.
- El ojo humano funciona como un sistema óptico formado por una lente convergente y una pantalla.
- Para ver bien, es necesario formar una imagen en la retina. La imagen se forma de la siguiente manera: cada haz divergente de luz emitido por cada punto del objeto, después de entrar en el ojo, converge hasta un punto de la retina. Como en cada punto de la imagen se concentra parte de la luz emitida por cada punto del objeto, la forma y tamaño de la imagen que percibimos es una réplica a escala del tamaño y forma del objeto que vemos. Por estudios fisiológicos se sabe que el llamado “punto” imagen de la retina ocupa, en realidad, la superficie de tres células específicas retinianas (o conos). Si la mancha luminosa producida en esa pantalla es menor que esa superficie, nuestro ojo la interpretará

como un punto imagen. Lo que supone un límite en la capacidad de resolución de nuestro ojo.

- Para ver bien los objetos cercanos, la lente del cristalino aumenta su curvatura (acomodación) con lo que los haces de luz acaban convergiendo y formando la imagen en esa misma pantalla (la retina).

- La imagen que se forma en un sistema lente convergente-pantalla es real e invertida. Aparece, pues, una limitación de este modelo de visión pues se hace necesario la participación del cerebro, conectado con la retina por el nervio óptico, para interpretar la sensación que tenemos de la visión derecha de los objetos.

Además, estudiando en profundidad el sistema óptico lente convergente-pantalla, hemos encontrado unos elementos característicos que ayudan al trazado geométrico de los haces que atraviesan la lente y que ayudan a localizar dónde situar la pantalla para ver la imagen. Estos son: eje óptico, Foco objeto (F), Foco imagen (F') y Centro óptico de la lente (C).



La luz procedente de un punto luminoso situado muy lejos, cuando incide en la lente forma un haz paralelo, que después de atravesar la lente converge en el punto focal imagen F'.

A partir de esos elementos característicos de la lente delgada podemos realizar un trazado gráfico del que deducir una expresión matemática que relacione la posición del punto objeto(s), la posición de la pantalla donde vemos su imagen (s'), y la distancia focal de la lente (f): $\frac{1}{s} + \frac{1}{s'} = \frac{1}{f}$. Esta expresión es conocida como la ecuación de Gauss para las lentes delgadas.

De la misma forma hemos podido deducir que en un sistema lente convergente-pantalla la relación entre el tamaño de la imagen y del objeto está relacionada por la expresión:

$$\beta = \frac{y'}{y} = -\frac{s'}{s}$$

2. Conceptos tratados.

Modelo de visión de Kepler

3. Reflexión de la docente.

Creo que ellos mismos no serán capaces de realizar una recopilación completa, pero confiamos en que vayan proponiendo puntos principales.

4. Interpretación.

Efectivamente los alumnos no realizan una síntesis completa por sí mismos, pero si van proponiendo ideas y recordando experiencias.

1. Metodología y descripción. ¿Qué hicimos?

A.60. ¿Qué límites de aplicación tiene nuestro modelo de visión?

Esta actividad sugiere a los alumnos que nuestro modelo tiene límites y les pide que piensen en algunos límites. Ayudo a los alumnos en la búsqueda de estos límites. Les explico que en ciencia es necesario la construcción de modelos para poder estudiar distintas parcelas de la realidad. Pero que por otra parte, un modelo es insuficiente para abarcar el estudio completo de la realidad, y por ello debemos servirnos de diferentes modelos para cada parcela de realidad a la que nos enfrentamos.

Problemas abiertos. Quiero que los alumnos sean conscientes de que aún queda mucho por aprender sobre la óptica como ciencia de la visión.

Ayudo a los alumnos a comprender que nuestro modelo de visión solamente explica una parte de la óptica, y necesitamos pues, otro modelo que explique la naturaleza de la luz para poder estudiar con más profundidad otros fenómenos.

Les recuerdo que ellos mismos preguntaban por qué se formaban esos halos coloreados en los bordes de las lentes, y que dicho fenómeno no lo podemos explicar con el modelo de visión de Kepler.

2. Conceptos tratados.

Límites del modelo de visión de Kepler.

3. Reflexión de la docente

Creo que los alumnos necesitarán ayuda del profesor para proponer estos límites.

4. Interpretación.

Miércoles 26/02/2020 AULA B18 LABORATORIO DE FÍSICA

08:30-09:25 SESIÓN 16

GRUPO 1: 15 Alumnos

Falta: Alumno 7

Introducción a la Unidad Didáctica.

En la primera parte del tema de óptica basándonos en el modelo de Kepler, hemos explicado cómo vemos los objetos, tanto al mirarlos directamente como a través de lentes y espejos, etc. Hemos avanzado expresiones de cálculo para determinar las características de las imágenes, hemos explicado las anomalías visuales y la forma de su corrección, incluso hemos podido comprender el funcionamiento de instrumentos que amplían el poder del ojo humano (telescopio y microscopio). Hemos estudiado una serie de fenómenos que podíamos interpretar, explicar y predecir con una serie de conceptos y reglas. Se engloban dentro de la llamada aproximación de la “Óptica Geométrica”. Las resumimos a continuación:

- a) *La luz emitida por cada punto de las fuentes luminosas, se propaga esféricamente. Un haz de luz es parte de la esfera de luz que se propaga y cada rayo es una línea recta que limita cada haz de luz trazado. Estos rayos no se desvían cuando la luz se propaga en el mismo medio. Los rayos no son nada de la propia luz*
- b) *Los rayos se desvían en los espejos de forma que los ángulos de incidencia y reflexión son iguales*
- c) *Los rayos se desvían cuando la luz pasa de un medio transparente a otro. La relación entre los ángulos de incidencia y refracción se ajusta a la ley de Snell-Descartes: $n_1 \cdot \sin i = n_2 \cdot \sin r$, donde n es el índice de refracción que nos informa de la capacidad de desviar los rayos cuando pasan a ese medio, siendo para el vacío $n=1$, el valor más pequeño*

d) *La luz no es una entidad visible en sí misma*

Al elaborar este modelo geométrico del comportamiento de la luz que ha permitido avanzar explicaciones sobre la visión y la formación de imágenes, no nos hemos ocupado de cuestiones como ¿qué es la luz?, ¿qué es lo que se propaga?, etc.

Por otro lado, algunas observaciones realizadas con focos de luz y lentes han permitido señalar algunos límites de aplicación de este modelo geométrico. Por ejemplo, al concentrar con una lente convergente la luz emitida por una fuente puntual en una pantalla, vemos algunos halos coloreados alrededor de la imagen. También vemos zonas irisadas cuando miramos un CD iluminado con la luz solar, el arco iris, etc.

En esta unidad abordaremos estas cuestiones que nos han quedado sin resolver. Sabemos que existen dos formas de transportar energía de un sitio a otro. Mediante un movimiento de partículas materiales, acompañada de un transporte neto de materia (como es el caso de la energía del viento, de una corriente de agua, etc.) o bien mediante ondas, sin que exista un transporte neto de materia, sino una perturbación que se propaga por un medio dado (como el sonido o las olas en la superficie del mar). ¿A cuál de las dos categorías anteriores pertenece la luz? ¿Es un chorro de partículas lumínicas que salen del foco? o, por el contrario, ¿Se trata de una onda, de una perturbación que se origina en la fuente luminosa y se extiende rápidamente por el medio que la rodea? Ambas hipótesis, corpuscular y ondulatoria, tuvieron a lo largo de la historia periodos de aceptación.

Para contextualizar el tema haremos un breve resumen de la evolución histórica de las Teorías sobre la naturaleza de la luz.

La luz siempre ha despertado un gran interés y desde la antigüedad se han elaborado distintas explicaciones acerca de su naturaleza que sirvieron para interpretar toda una serie de fenómenos. Por su gran importancia podemos destacar los modelos de la visión creados por los filósofos de la naturaleza griegos.

Demócrito, por ejemplo, pensaba que de los objetos emanaban unas imágenes ya formadas que eran transportadas por la luz hasta nuestros ojos.

Aristóteles fue el primero en postular una teoría de la visión que también incluía un intento de describir la naturaleza de la luz. Creía que todos los medios, pero

especialmente los transparentes, contenían una cualidad potencialmente transparente o “substancia”, a la cual llamaba diáfano (transparente) que “brilla” (se vuelve realmente transparente) en presencia de fuego. La luz es el color, es decir, una propiedad, de dicha “substancia” y por tanto es estática. Cambios posteriores en esta “substancia brillante” dan lugar a la sensación de diferentes colores. Para Aristóteles el color es especialmente sensible para la visión (On the soul, B'418 a 16-19). Pero la visión no es una sensación bruta y solamente se completa después de un escrutinio mental de la información por la persona que a acaba reconociendo el objeto observado. (On the soul, B'418 a 20-24). Por tanto, para Aristóteles, la visión tiene un nivel sensorial y otro psicológico.

Posteriormente, alrededor del año 1000 de nuestra era, Alhacen mejoró estos modelos con su propio modelo de la visión que explicaba fenómenos que los anteriores modelos no podían explicar. Pensaba que la luz era el agente causante de la visión y que los objetos iluminados eran fuentes secundarias de luz ya que emitían rayos de luz. Para explicar la visión relacionaba cada punto del objeto con un punto del ojo a partir de la emisión de un rayo que va del objeto al ojo. De esta forma, la imagen del objeto se forma en el ojo.

Ya en el siglo XVII, el astrónomo Kepler dio un gran paso con su modelo, que es el que utilizamos nosotros para comprender la visión. Supuso que desde cada punto luminoso se proyectaba al exterior una esfera de luz que se expandía. Par él, los rayos de luminosos no tienen existencia física real, sino que son tan sólo elementos geométricos que muestran la propagación de la luz en línea recta y en todas las direcciones.

A partir de Kepler, se desarrollaron de forma más elaborada dos modelos fundamentales sobre la naturaleza de la luz.

Según el modelo ondulatorio, formulado por Huygens, la luz se propaga en el éter – sustancia especial que, según se suponía, impregnaba todo el espacio- como ondas esféricas, con una cierta velocidad (que depende del medio). Por tanto, según este modelo, la luz no es algo sustancial que se proyecta desde el foco al exterior, sino una perturbación que se origina en el foco luminoso y se propaga como una onda por los restantes puntos del espacio debido a las vibraciones del éter que todo lo impregna.

Según el modelo corpuscular de la materia, formulado por Newton, la luz estaría formada por partículas de diferentes formas y tamaños de forma que en cada color las

partículas serían idénticas entre sí y diferentes a las de los demás colores; la velocidad de las partículas de luz sería diferente según el tipo de partículas y según el medio por el que se propagasen. Estas partículas se emitían por el foco luminoso y se movían siempre en línea recta según las leyes de la mecánica.

La teoría ondulatoria de la luz defendida por Huygens consideraba a la luz como una onda longitudinal que se propagaba desde el foco luminoso hasta el observador. Inicialmente este modelo no gozó de mucho éxito.

No obstante, la situación cambió a mediados del siglo XIX, debido a las experiencias de Young y Fresnel, que solo podían explicarse mediante la teoría ondulatoria. Igualmente fueron decisivos los experimentos de Fizeau y Foucault que mostraron que la velocidad de la luz en el agua era menor que en el vacío, contrariamente a lo que predecía la teoría corpuscular.

De todos modos, todavía quedaba una grave dificultad por solucionar: como la luz se propagaba en el vacío, había que suponer la existencia de una sustancia hipotética “el éter” que impregnaba todo el espacio y que (para explicar los hechos experimentales) debía tener unas propiedades muy especiales (como ser a la vez muy rígido y muy elástico y tan tenue que no frenase el movimiento de los astros en su seno)

Esta dificultad se superó cuando a finales del siglo XIX, Maxwell estableció que la luz era un tipo de onda electromagnética y que, por tanto, podía propagarse perfectamente por el vacío. Así pues, a principios del siglo XX, toda la comunidad científica aceptaba que la luz era una onda electromagnética que se propagaba en el vacío con una velocidad aproximada de 300.000Km/s.

Desde el siglo XVII hasta comienzos del siglo XX, las teorías ondulatoria y corpuscular de la luz fueron cambiando su grado de aceptación entre la comunidad científica internacional dependiendo de su capacidad para interpretar los hechos experimentales y también del prestigio de los científicos que apoyaban una u otra teoría. No obstante, eso no fue un obstáculo para que se desarrollara todo un cuerpo de conocimientos (la óptica geométrica) en el que basándose únicamente en algunos hechos (como la propagación rectilínea de la luz y las leyes de la reflexión y refracción), se puede explicar satisfactoriamente cómo se forman las imágenes de los objetos, el mecanismo de la visión y el funcionamiento de muchos instrumentos ópticos (cámara oscura, lupas, telescopios,

microscopios, cámaras fotográficas y el propio ojo). Todo ello al margen del modelo utilizado para describir la naturaleza de la luz.

Con la revolución de la física de principios del siglo XX se establece un nuevo modelo para la naturaleza de la luz, el modelo descrito por Einstein, basado en unas nuevas partículas: fotones. Actualmente se ha desarrollado el modelo descrito por el gran físico de nuestro tiempo Richard Feynmann, el modelo descrito mediante la electrodinámica cuántica.

En la enseñanza de la naturaleza de la luz hay que tener cuidado en la distinción de los diferentes modelos científicos, destacando el hecho de que representan ideas completamente diferentes. Además, hay que poner énfasis en el hecho de que los modelos científicos representan ideas o conceptos acerca de la realidad y no a la realidad en sí misma.

La construcción de modelos híbridos da consistencia a la visión realista de que uno puede tener acceso directo a la realidad.

Desde este punto de vista, tanto los profesores como las personas que planean el currículo deben de evitar el lenguaje que apoye este punto de vista.

Si se inculca a los estudiantes que las ondas de luz y los fotones existen en realidad, y algunos de los libros de texto el lenguaje diario refuerza esta idea, entonces, ellos se quedan con un modelo híbrido de un fotón que debe contener tanto las características de onda como las de partícula. Si cambiamos el estatus ontológico del fotón de uno con sustancia material a un proceso, entonces se puede apreciar la teoría actual de la luz llamada electrodinámica. En esta teoría la luz se comporta como partículas que tienen asociada una función de onda de probabilidad para determinar su localización en cualquier lugar. (Feynman, 1985)

Durante el estudio de la óptica geométrica hemos explicado fenómenos relacionados con la visión y el comportamiento de la luz cuando interactúa con otros medios, espejos, lentes, al pasar del aire al agua, etc. Y no nos hemos preocupado de pensar qué es la luz, sino tan solo de explicar cómo se comportaba.

En la aproximación de la óptica geométrica, se da la condición de que las longitudes de onda son muy pequeñas comparadas con las dimensiones del equipo disponible para su estudio. Además, las energías de los fotones, utilizando la teoría cuántica, son muy

pequeñas comparadas con la sensibilidad energética del equipo utilizado. Cuando utilizamos esta aproximación nos olvidamos de la longitud de onda de onda y de la cuantización de la luz en forma de fotones.

Pero cuando se aplican los principios de la óptica geométrica a lentes gruesas se aprecian los detalles de los experimentos, y se observan fenómenos que se alejan de las explicaciones que es capaz de proporcionar la óptica geométrica. Por ejemplo, la óptica geométrica no explica los halos coloreados al formar las imágenes con las lentes gruesas. Para explicar estos fenómenos tenemos que conocer cuál es la naturaleza de la luz, que otros tipos de comportamiento presenta.

Estaríamos dentro de la aproximación que denominamos óptica ondulatoria. En este caso, las longitudes de onda son comparables a las dimensiones del equipo, lo cual es muy poco frecuente con la luz visible y los objetos de la vida cotidiana, pero es, sin embargo, muy fácil con las ondas de radio, y la energía de los fotones son incluso más pequeñas. En este caso estudiamos el comportamiento de ondas, sin tener en cuenta la aproximación cuántica. Este método se basa en la teoría clásica de la radiación electromagnética.

En temas posteriores estudiaremos otra aproximación más del comportamiento de la luz. Cuando nos encontramos ante longitudes de onda muy cortas, entonces podemos no tener en cuenta la naturaleza ondulatoria, ya que en este caso la energía de los fotones es muy grande. Entonces las cosas se hacen fáciles de nuevo. La imagen completa, que unifica todo el rango en un único modelo, no la comprenderemos hasta el final.

Hay numerosas referencias en la bibliografía acerca de estudios sobre el pensamiento de los alumnos acerca de fenómenos ópticos. En esta parte de nuestra unidad vamos a centrarnos en los trabajos en los cuales se pone de manifiesto las ideas de los alumnos acerca de la luz como fenómeno físico. Resaltamos a continuación algunos de los estudios que nos han parecido más interesantes:

Guesne (1978) entrevistó a 20 estudiantes de 14 años acerca de la luz y la visión. Los alumnos mostraban la idea de la luz como entidad en movimiento en contextos en los que se veía la imagen especular de la luz de una antorcha.

Anderson and Karrqvist (1983) investigaron la comprensión de la luz y la visión en estudiantes suecos en grados 6-9. La investigación anterior a la instrucción, mostró que aproximadamente un tercio de los alumnos en los grados 6 y 7, tenían el concepto de la luz como entidad que se propagaba en el espacio en presencia de un objeto luminoso, mientras que solamente un 10% mostraban dicha concepción en el caso de un objeto no luminoso.

Ramadas and Driver (1989) descubrieron resultados similares en un artículo a gran escala acerca de las ideas de estudiantes de 13-14 años sobre la luz. Encontraron que los estudiantes previamente a la instrucción atribuían la formación de imágenes en el espejo de objetos no luminosos a la propiedad única de los objetos más que a la propagación de la luz en sí misma. Esto se puede entender si el hecho de ver un objeto no luminoso se considera como una captura y los espejos están dotados de una propiedad única que les permite capturar al objeto.

Bendall, Goldberg and Galili (1993) revelaron que estudiantes universitarios consideraban la luz como una entidad espacial pero no necesariamente dinámica. Las descripciones diagramáticas de los estudiantes dependían de si el sentido de la vista estaba envuelto o no, y las descripciones relacionadas con la vista cambiaban con el objeto (luminoso o no luminoso).

No hay estudios específicos sobre las ideas en óptica de alumnos de 17-18 años, es decir de alumnos de 2° de Bachillerato.

Dedes (2005), encontró que todas las ideas básicas que encontramos en las antiguas teorías de visión se pueden encontrar en las concepciones de los estudiantes también. También hay muchas similitudes en la forma en que los estudiantes comprenden la luz. La mayoría piensan que la luz es una entidad localizada en el espacio, ciertamente parecido a la idea estática de la luz que sostenía Aristóteles. La idea que tienen los estudiantes de que la luz se localiza en las superficies de los cuerpos iluminados era similar a la idea de Alhazen de la luz “fija” en los cuerpos opacos.

Estas investigaciones muestran que los estudiantes ya antes de la instrucción tenían ideas y representaciones en su intento de comprender su experiencia diaria con la luz y la visión. Estas ideas y representaciones no eran completamente compatibles con el modelo formal

que se supone que los estudiantes debían de aprender. El problema no es ya que estas ideas previas no se correspondan con las ideas aceptadas en nuestro modelo actual, sino que estas ideas tienen un denominador común: se dota en ellas a los objetos con propiedades *ad hoc*, las cuales les permite llevar a cabo los roles que el pensamiento precientífico les atribuye.

DiSessa (1988) sostiene que “La física intuitiva consiste en un gran número de fragmentos... muchos de los cuales se pueden entender como simples abstracciones de experiencias comunes que se toman como relativamente primitivas en el sentido de que no necesitan explicaciones: simplemente pasan” (p. 52) “¿Cómo vemos la transición del razonamiento del sentido común acerca del mundo físico a la comprensión científica?” ... “Mi punto de vista es que la transición hacia la comprensión científica envuelve un mayor cambio estructural hacia la sistematización más que un salto en el contenido” (p. 49)

El conflicto entre las concepciones individuales y las ideas que queremos que los alumnos comprendan puede emerger como una fuente de dificultad durante y después de la instrucción formal. De hecho, como hemos visto estudios acerca de estudios post-instrucción (Goldberg and McDermott, 1986, 1987; Galili, Bendall and Goldberg, 1993; Ronen and Eylon, 1993; Eylon, Ronen and Langley, 1993; Eylon, Ronen, and Ganiel, 1995), han revelado la persistencia de dificultades en integrar el conocimiento en cuanto a la propagación de la luz.

1. Metodología y descripción. ¿Qué hicimos?

A.1. Realiza “*Experimentum crucis*” en el laboratorio y formula una hipótesis sobre qué es la luz “blanca”.

Quiero que los alumnos sean conscientes de que hay fenómenos que no hemos explicado en la unidad de óptica geométrica y que necesitan explicación. Pretendemos que los alumnos relacionen experiencias de la vida cotidiana con el fenómeno de la descomposición de la luz blanca, por ejemplo, la formación de halos coloreados en el arco iris, en una mancha de grasa, en un CD, etc.

Pido a los alumnos que citen fenómenos en los que se observen halos coloreados o irisados. El profesor les comenta que esto sucede al utilizar lentes gruesas, y anima a los estudiantes a encontrar otros ejemplos. Los alumnos hablan de los CD, del arco iris, de las manchas de grasa del suelo... etc.

A partir de una imagen de la difracción de la luz con un prisma, se pregunta a los alumnos si ¿es la luz blanca la suma de todos los colores del arco iris? Y si con ese experimento podríamos corroborarlo.

Algunos alumnos (Alumnos 2, 3, 4, 10, 11 y 13) en un principio piensan que sí, que la luz blanca es la suma de todos los colores del arco iris, pero otros alumnos dicen que no saben.

Introduzco entonces el problema histórico de la naturaleza de la luz y les hablo de las dos corrientes que surgieron en el S.XVII.

Les propongo realizar el *experimentum crucis* de Newton, clave para afirmar que la luz blanca es un conjunto de los diferentes colores y rebatir la idea de que eran los medios los que modificaban la luz.

Les cuento en primer lugar en qué consiste la experiencia de Newton, su "*Experimentum crucis*". Para ello mediante un proyector y un prisma les muestro como la luz blanca se separa en la mezcla de colores característica del arco iris, que se puede recoger el "arco iris" a ambos lados del prisma, uno debido a la refracción y otro a la reflexión interna (más débil). Posteriormente les cuento como Newton quiso probar que la luz era una mezcla heterogénea de colores; y por tanto si hacíamos pasar la luz por un prisma que hacía que se descompusiera en la mezcla de colores, y después por otro prisma colocado en dirección contraria de manera que a partir de la mezcla de colores se obtuviera la luz blanca, demostraría que la luz blanca es en sí misma una mezcla heterogénea de colores. Insisto en que éste fue un experimento clave para rebatir la hipótesis de que eran los medios los que modificaban la luz, creando los colores, introduciendo a los alumnos el problema histórico de la naturaleza de la luz.

Los alumnos en pequeños grupos realizan el experimento ayudados por el profesor, se muestran alegres y sorprendidos. Algunos alumnos comprenden rápidamente que no es el medio el que modifica la luz, ya que a partir de todos los colores se puede volver a obtener luz blanca, pero otros alumnos (Alumnos 1, 6, 7, 14 y 15 aún no comprenden qué

es lo que estamos haciendo con el segundo prisma). Me paro con ellos y vuelvo a explicar desde el principio, me detengo y voy poco a poco contándoles que el segundo prisma si reúne los colores, significa ello que la luz blanca es el conjunto de las luces de diferentes colores que vemos, si no fuese así y el prisma modificara los colores, éste segundo prisma tendría que modificarlos aún más. Parece que ahora lo entienden y se muestran alegres por ello.

2. Conceptos tratados.

Experimentum crucis, la luz blanca es un conjunto de luces de colores.

3. Reflexión de la docente.

Esperamos que algunos alumnos después de realizar el experimento formulen la hipótesis de que la luz “blanca” es de naturaleza heterogénea, es decir, está formada por varios tipos de luz, que al incidir en una pantalla nos proporcionan la sensación de ver los colores que conforman el arco iris. Esperamos que, con ayuda del profesor, todos los alumnos comprendan que no es el medio el que modifica la luz blanca (como sostenían algunas teorías en la época de Newton), sino que la función del prisma es la dispersión de estos tipos de luz.

4. Interpretación.

Algunos alumnos comprenden fácilmente el experimento, mientras que otros necesitan más ayuda.

Jueves 27/02/2019 AULA B18 LABORATORIO DE FÍSICA

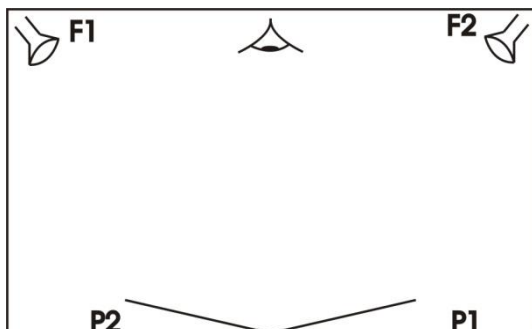
08:30-09:25-11:15 SESIÓN 17

GRUPO 1: 15 Alumnos

1. Metodología y descripción. ¿Qué hicimos?

A.2. El observador ve en las pantallas P1 y P2 círculos iluminados independientemente de que los focos F1 y F2, cuyas luces se cruzan en el espacio, se enciendan simultáneamente, o de uno en uno. Este fenómeno ocurre con cualquier tipo de luz que sea emitida por los focos. Formula una hipótesis sobre la naturaleza

de la luz que explique que los haces de luz se crucen sin producir perturbación en la mancha que se ve en las pantallas.



¿Qué puede ser la luz para que se cruce sin perturbarse?

Se pregunta a los alumnos qué puede ser la luz para que se cruce sin estorbarse al encender dos focos simultáneamente. Con esta actividad pretendemos que los alumnos lleguen a la conclusión de que la luz no puede ser de naturaleza corpuscular, es decir material, porque si no al cruzarse las partículas chocarían y de alguna manera se desviarían afectando al patrón de luces que se vería en cada caso. Esperamos que un porcentaje apreciable de alumnos sostengan una concepción material de la luz.

Muchos alumnos comprenden que la luz no puede ser de naturaleza corpuscular, porque si no al cruzarse las partículas chocarían y afectaría al patrón de iluminación que se observa, pero aún hay alumnos que lo dudan (Alumnos 1, 6, 12, 14 y 15). Les animo a reflexionar para que lleguen por sí mismos a la conclusión de que la luz no puede consistir en partículas materiales, y les propongo la siguiente actividad.

También les recuerdo que hay otros fenómenos en los que se intercambia energía y que suceden sin transporte de materia. Los animo a recordar las características principales del movimiento ondulatorio que habían estudiado previamente.

2. Conceptos tratados.

Naturaleza ondulatoria de la luz.

3. Reflexión de la docente.

Esperamos que muchos alumnos propongan la naturaleza ondulatoria de la luz.

4. Interpretación.

Sabemos que hay alumnos que les cuesta más trabajo comprender que la luz no tiene carácter material.

1. Metodología y descripción. ¿Qué hicimos?

A.3.1 A pesar de la hipótesis ondulatoria que formuló Christiaan Huygens (1629-1695) sobre la naturaleza de la luz, muchas personas pensaban y siguen pensando en la luz como algo material. Si la luz consistiera en algo material emitido por las fuentes, ¿qué fenómenos cabría esperar como consecuencia de esta concepción?

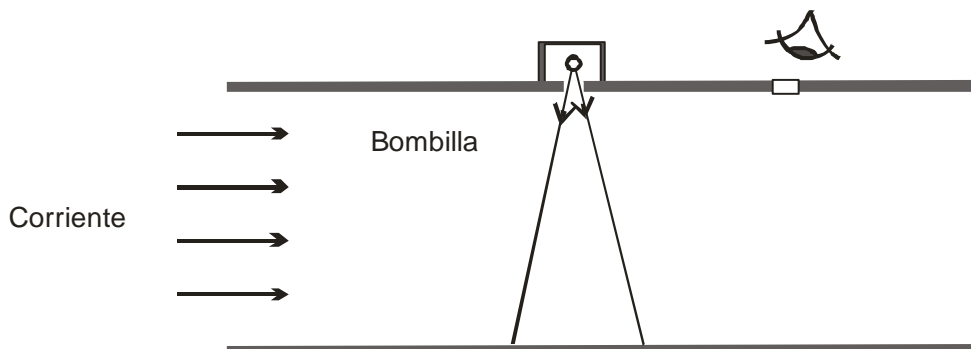
Animo a los alumnos a pensar en diferentes opciones. El alumno 11 contesta que las partículas chocarían entre sí. Daniel dice que pesarían y que la luz no podría ir tan rápido.

Al resto de alumnos no se les ocurre nada.

Introduzco entonces la segunda parte de la actividad:

A.3.2 En el exterior de una tubería hay dos ventanas transparentes. Por una de ellas, una lámpara deja pasar un haz divergente de luz como el dibujado en el esquema. Por la otra ventana, un observador puede ver la zona iluminada en la pared opuesta de la tubería, tanto si está llena de agua como llena de aire. Con una potente bomba, situada en el extremo izquierdo, podemos hacer que circule agua o aire por la tubería de forma muy rápida y sin turbulencias.

En ningún momento el haz de la luz que atraviesa la tubería pasa del aire al agua o viceversa, sino que se propaga en un único medio, o en el aire o en el agua.



¿Qué ocurrirá con la posición de la mancha luminosa que vemos en la pared de la tubería? Señala la opción que creas correcta:

- Tanto la corriente de aire como la corriente de agua hacen que la mancha luminosa que veíamos antes de iniciarse el movimiento del medio se desplace de su posición original
- La corriente de aire no hace que se desplace la mancha luminosa pero la corriente de agua sí
- Ni la corriente de aire ni la corriente de agua hacen que se desplace la mancha luminosa
- La luz está formada por un tipo de materia tan sutil que no se arrastra por la corriente de aire ni por la de agua, pero sí por otro tipo de materia más densa
- Otra respuesta:

Argumenta la opción elegida.

Quiero comprobar si algunos alumnos siguen teniendo la idea de que la luz pueda estar formada por pequeños corpúsculos, es decir, si siguen manteniendo una concepción materialista de la luz, o si efectivamente todos los alumnos han comprendido que la luz no puede tener naturaleza material.

Algunos alumnos todavía manifiestan dudas sobre si la sombra se verá o no, afectada por el agua o el aire (Alumnos 1, 6, 12 y 14)

Explico a los alumnos el largo e intenso debate que se produjo en la comunidad científica a lo largo de muchos siglos acerca de si la luz estaba formada por algún tipo de materia o no, aclarando que la sombra no se modificaría, porque el agua y el aire no interaccionan con la luz, ya que la luz no es material.

Finalmente, los alumnos aceptan pues la hipótesis de trabajo de la naturaleza ondulatoria de la luz.

2. Conceptos tratados.

La luz no tiene carácter material.

3. Reflexión de la docente.

Esperamos que la mayoría de alumnos conteste que la sombra no sería modificada por la corriente de aire o agua. Creemos que con esta actividad se pone de manifiesto que la luz no puede ser de naturaleza corpuscular. Esperamos, por tanto, que los alumnos acepten en su esquema de pensamiento como hipótesis de trabajo que la luz tiene carácter ondulatorio.

4. Interpretación.

Finalmente, con esta actividad mental tan sencilla, hemos conseguido que los alumnos comprendan que la luz no tiene carácter material.

1. Metodología y descripción. ¿Qué hicimos?

A.4. Una de las propiedades características y más fascinantes de las ondas es su capacidad para la producción de interferencias bajo determinadas condiciones. Diseña una experiencia para poder probar si la luz produce interferencias.

Quiero que los alumnos se vayan familiarizando con las propiedades de las ondas. Intento que los alumnos recuerden las características de las ondas que habíamos estudiado previamente, como la interferencia, la difracción y la atenuación. Algunos alumnos (Alumnos 3, 4, 10 y 11) recuerdan la interferencia. Animo a todos los alumnos a recordar la interferencia que se produce entre ondas en el agua.

Insisto en la necesidad de utilizar luz de un solo tipo, es decir de una sola frecuencia, un solo color, un láser. Les recuerdo la necesidad de la utilización de focos coherentes, para que la luz que sale del foco lo haga con la misma fase. Es por ello necesario la utilización de luz láser, que cumple todos los requisitos.

Les vuelvo a explicar que cuando dos ondas luminosas procedentes de dos focos coherentes coinciden en un punto P dado, se observa experimentalmente, que la intensidad resultante puede ser mayor o menor que la de cualquiera de las dos. A este efecto se le denomina interferencia luminosa, constructiva en el primer caso y destructiva en el segundo.

Una forma sencilla de estudiar las interferencias luminosas es utilizar monocromática (un solo color y, por tanto, una sola longitud de onda) que se hace pasar a través de dos pequeñas rendijas. De esta forma, de acuerdo con el principio de Huygens, se consigue que esas dos rendijas se comporten como dos focos coherentes (lo único que hacen es separa el haz de luz original en dos haces idénticos). Las franjas brillantes son el resultado de interferencias constructivas y las oscuras corresponden a interferencias destructivas. Mediante la teoría corpuscular no se podría explicar este patrón, sino que las partículas de luz reproducirían en la pantalla las rendijas mediante dos franjas igualmente brillantes.

Les propongo realizar un montaje parecido al montaje que diseñó Young de doble rendija, que han de ser estrechas para que se puedan apreciar los fenómenos de interferencia.

Los alumnos en pequeños grupos realizan un montaje parecido al que Young hizo en su día.

El grupo de los alumnos 10, 11 y 12, es el primero en conseguir el patrón de interferencia.

El grupo formado por los alumnos 1, 2, 3, 4, y 10, también están muy ilusionados con el experimento y también consiguen ver el patrón de interferencia, aunque con menos nitidez. Su láser es peor. Los alumnos 13 y 14 se unen a este grupo, están un poco cansados hoy, y no participan mucho.

El grupo formado por los alumnos 5, 6 y 8 no han conseguido montar el experimento. Les digo que se unan al grupo de los alumnos 10, 11 y 12, para que puedan observar los resultados.

Todos los alumnos se muestran sorprendidos e ilusionados. Comprenden la relevancia del experimento.

2. Conceptos tratados.

Interferencia de ondas de luz. Experimento de Young.

3. Reflexión de la docente.

Esperamos que los alumnos recuerden las características de las ondas estudiadas previamente, la interferencia, la difracción, la atenuación, etc., y que sean capaces de comprender la relevancia del experimento de Young. Creemos que, ayudados por el profesor, todos los grupos serán capaces de reproducir el experimento de Young.

4. Interpretación.

Algún grupo no ha conseguido por sí mismo montar el experimento, debido quizás a la falta de sueño y cansancio acumulado. Los alumnos dicen que han estado estudiando hasta muy tarde la noche anterior para un examen.

1. Metodología y descripción. ¿Qué hicimos?

A.5. Otra de las características específicas de las ondas es la de bordear obstáculos. Diseña una experiencia para comprobar si la luz tiene la capacidad de difractarse, es decir de bordear obstáculos.

Con esta actividad Quiero poner de manifiesto otra característica especial que tienen las ondas de bordear obstáculos, la difracción. Se pide a los alumnos que diseñen una experiencia para poner de manifiesto que la luz tiene la capacidad de bordear obstáculos. No se les ocurre nada.

Les propongo el experimento de Henri Poisson (1877-1963). Les hago una breve introducción histórica acerca de la importancia que tuvo este experimento para la aceptación del modelo de la naturaleza ondulatoria de la luz. Explico la necesidad de utilizar un haz de luz coherente y monocromática, es decir, un solo tipo de luz, un láser. Es necesario que los alumnos comprendan que la fuente de luz utilizada tiene que ser puntual, o al menos tener focos coherentes de luz, es decir, conseguir que los átomos que producen la luz vibren con la misma frecuencia.

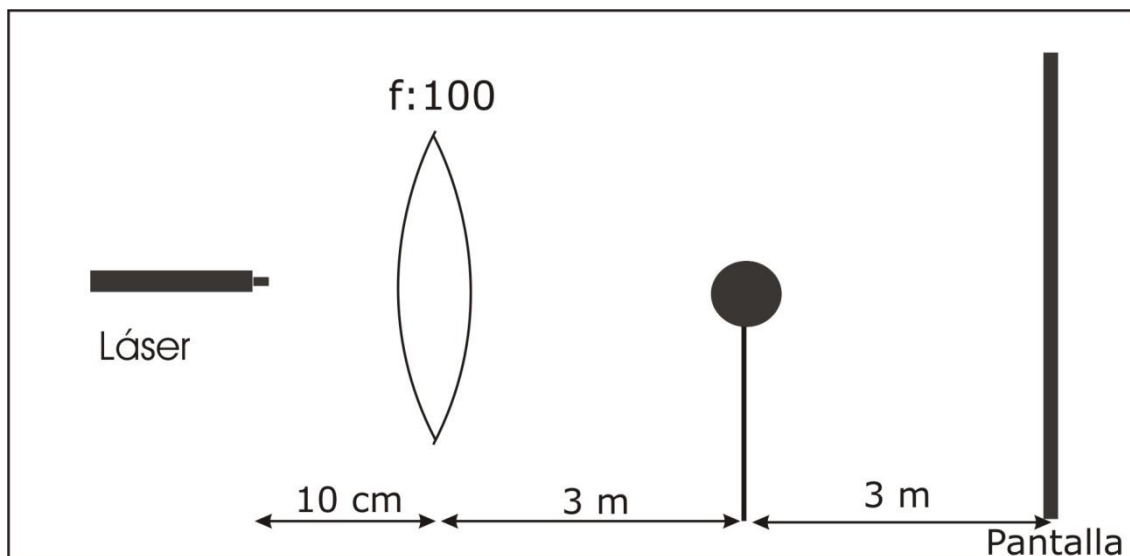
Los alumnos 4 y 11 afirman que la única manera de dar un sentido a que se vea luz en el centro de la sombra circular, es que la luz se ha doblado en los bordes de la chincheta. La luz que parte de cada punto del borde de la moneda recorre el mismo camino hasta el centro de la sombra, por tanto, la luz que parte de cada punto del borde de la moneda llegará con la misma fase al punto del centro de la sombra, lo que provocará una interferencia constructiva, es decir, ¡luz en el centro de una sombra!

Entre todos realizamos un montaje único. Les propongo las distancias adecuadas según el esquema adjunto, y les digo que ya he probado yo varias opciones, y que son esas distancias las que permiten que se vea bien. Les digo que no se puede mirar directamente

al puntero laser, que puede dañar la retina. Tardamos un poco en montarlo todo, pero finalmente sale bien.

Les pregunto que si se les ocurre alguna explicación al punto de luz que se observa en el centro de la sombra de la chincheta. Los alumnos dicen que no.

Los alumnos se muestran muy sorprendidos y comprenden que dicho experimento fuese clave para adoptar un modelo ondulatorio como explicación plausible de la naturaleza de la luz.



Encontramos luz en el centro del círculo en sombra.

2. Conceptos tratados.

Difracción de la luz. Experimento de Poisson.

3. Hipótesis.

Creemos que los alumnos se sorprenderán mucho al realizar el experimento y ver la luz en el centro de la sombra. Creemos que este experimento les ayudará finalmente a comprender que la luz tiene naturaleza ondulatoria.

4. Interpretación.

El experimento de Poisson es muy bonito y sorprendente, los alumnos están muy alegres e interesados.

Viernes 28/02/2020 AULA B18 LABORATORIO DE FÍSICA

09:25-10:30 SESIÓN 18

GRUPO 1: 15 Alumnos

1. Metodología y descripción. ¿Qué hicimos?

A.6. Si la luz fuese de naturaleza ondulatoria, ¿qué cabría esperar de la intensidad luminosa que se mediría a diferentes distancias de la fuente? Propón una experiencia para comprobar tu hipótesis.

Quiero comprobar que las ondas lumínicas cumplen características propias de las ondas. En este caso Quiero comprobar que la luz se atenúa con la distancia, es decir pierde intensidad al alejarnos del foco.

Se pide a los alumnos que propongan una experiencia para comprobar su hipótesis.

Los alumnos 4 y 11 comentan que la luz ha de perder intensidad al alejarse del foco. Les comento a todos que puesto que como habíamos visto en óptica geométrica, si una fuente puntual emite en todas las direcciones la luz se repartirá en una esfera centrada en el foco emisor. Si la luz cada vez tiene que repartirse sobre una superficie mayor, la intensidad que midamos será cada vez menor.

Les explico que la Intensidad de la luz, dado que la luz se reparte en una esfera centrada en el foco emisor, será proporcional a la inversa del radio de la esfera al cuadrado. I proporcional a $1/r^2$. Si realizáramos una gráfica en la que representen la I frente a $1/r^2$, tendría que salir una línea recta.

De manera opcional, el profesor propondrá la utilización de una sonda que mide la Intensidad de la luz, procurando que las condiciones sean lo más idóneas posible, que no haya fuentes de luz.

2. Conceptos tratados.

Atenuación de la luz.

3. Reflexión de la docente.

Esperamos que los alumnos recuerden que, una fuente puntual de luz emite luz en todas las direcciones, y por tanto la luz se repartirá en una esfera centrada en el foco emisor. Cuanto más se aleje la luz del foco emisor, esta esfera será mayor. Por tanto, la luz se tiene que repartir sobre una superficie cada vez mayor, por lo que cuanto más nos alejemos del foco emisor, la Intensidad que midamos será cada vez menor.

4. Interpretación.

1. Metodología y descripción. ¿Qué hicimos?

A.7. El tema de la velocidad de la luz ha sido una fuente de controversia a lo largo de la historia. Si, de acuerdo a nuestra hipótesis, la luz es una onda, ha de tener cierta velocidad de propagación, es decir, tardaría un tiempo en llegar desde un punto a otro. ¿Cómo podrías medir la velocidad de la luz? ¿Qué dificultades te encontrarías?

A.7.1. Lee y comenta el siguiente diálogo sobre el problema de la medición de la velocidad de la luz. - ¿Cómo se puede medir la velocidad de la luz?

-Esa es una muy buena pregunta. Al comienzo del siglo XVII muchos científicos creían que no había tal cosa como la "velocidad de la luz", ellos pensaban que la luz podía viajar cualquier distancia en forma instantánea. Galileo Galilei (1564-1642) no estaba de acuerdo y diseñó un experimento para medir la velocidad de la luz: él y su asistente tomaron cada uno una lámpara con rejillas y se colocaron en la cima de montañas a una milla de distancia. Galileo abría la rejilla de su lámpara y el asistente debía abrir la suya tan pronto como viera la luz de la lámpara de Galileo. De esta manera Galileo podría calcular cuánto tiempo habría pasado antes de que él viera la luz de su asistente desde la montaña.

Y así podría dividir la distancia por el tiempo medido para calcular la velocidad de la luz.

- ¿Y funcionó el experimento?

-No. El problema fue que la velocidad de la luz es simplemente muy rápida para ser medida de esta forma; en efecto tomaría muy poco tiempo (cerca de 0,000005

segundos) para viajar esa distancia y no había forma de que Galileo pudiera medir ese intervalo con los instrumentos a su disposición.

-Entonces lo que se necesitaría sería una distancia realmente grande para que la luz la recorriera, algo así como millones de kilómetros. ¿Cómo sería posible que alguien realizase un experimento así?

-Durante la década de 1670, el astrónomo danés, Ole Roëmer (1644-1710), estaba haciendo una observación muy cuidadosa de Io, una de las lunas de Júpiter. El punto negro de la imagen a la derecha es la sombra de Io. Esta luna completa una órbita cada 1.76 días; este tiempo siempre es igual, así que Roëmer esperaba poder predecir su movimiento con gran precisión. Para su asombro, descubrió que la luna no siempre aparecía donde se suponía que debía estar. En ciertos períodos del año parecía estar atrasada en su horario y en otros se adelantaba.

-Eso si es raro. ¿Por qué orbitaría más rápido en cierta época y más lento en otra?

-Eso es exactamente lo que Roëmer se preguntó y nadie pudo darle una respuesta plausible. Sin embargo, Roëmer notó que Io parecía adelantarse en su órbita cuando la tierra estaba más cerca de Júpiter y parecía atrasarse cuando la Tierra estaba más lejos.

-Esto tiene algo que ver con la velocidad de la luz. Pero aún no consigo ver donde encaja.

-Bien, piense en esto: si la luz no viaja infinitamente rápido, entonces le debe tomar algún tiempo para viajar desde Júpiter a la Tierra. Supongamos que le toma una hora. Entonces, cuando usted observa a Júpiter a través de un telescopio, lo que realmente está viendo es la luz que arrancó una hora atrás. Usted está viendo a

Júpiter y a su luna como eran una hora en el pasado.



- Un momento, ¡me parece que ya veo a donde conduce esto! Cuando Júpiter está más lejos, le llevará más tiempo aún a la luz para llegar aquí, de forma que Roëmer estaba viendo a Io como era un poco más temprano que usualmente, tal vez una hora

y quince minutos antes, en lugar de una hora. Y lo opuesto ocurría cuando Júpiter y la Tierra estaban más cerca. Así que Io no estaba cambiando su órbita en absoluto; simplemente parecía estar en diferentes lugares dependiendo de cuánto tiempo le tomara a su luz

- ¡Muy bien! Ahora, conociendo la aparente variación en el ritmo de la órbita de Io y sabiendo cuánto varía la distancia entre la Tierra y Júpiter, Roëmer fue capaz de calcular el valor de la velocidad de la luz. La cifra que obtuvo fue de 186.000 millas por segundo, o sea 300.000 Kilómetros por segundo.

-En los años que siguieron, a medida que se desarrollaban mejores equipos y tecnologías, muchas otras personas pudieron medir la velocidad de la luz con mayor precisión. Con los recursos de la tecnología moderna, podemos medirla con un increíble nivel de precisión. Por ejemplo, los astronautas fijaron un espejo en una roca de la luna; los científicos en la Tierra pueden apuntar un láser a este espejo y medir el tiempo que tarda un pulso de láser en llegar y volver, siendo este tiempo cerca de dos segundos y medio. (Si se piensa bien, la idea tras este experimento no es tan diferente de la que propuso Galileo...) Y cualquiera que haya medido la velocidad de la luz, en cualquier época, usando cualquier método, siempre obtuvo el mismo resultado: ligeramente menos de 300.000 Kilómetros por segundo.

Anexo: ¿Cómo midió Roëmer la velocidad de la luz?

Método de Roëmer para determinar la velocidad de propagación de la luz en el vacío.

La órbita del planeta Júpiter alrededor del Sol está situada a una distancia unas cinco veces mayor que la del planeta Tierra y con un período de poco menos de 12 años. Según estos datos la Tierra se encuentra, en algunos momentos, más cercana a Júpiter que en otros.

Con un telescopio de aficionado se pueden distinguir cuatro puntos brillantes en las proximidades del planeta que se ocultan detrás de él cada cierto tiempo. La condición de satélites es debida a Galileo quien avanzó que se trataba de “lunas” con giro alrededor del planeta. Se conocen con los nombres de Io, Europa, Ganímedes y

Calisto y, aunque actualmente se conocen otros dieciséis satélites, éstos son los de mayor tamaño.

Cuando la Tierra está situada en su posición más próxima a Júpiter (T_1 y J_1), los eclipses de Ganímedes se suceden con cada 7'155 días (7 días, 3 h, 43 min. y 12 s). Después de 25 eclipses han transcurrido 178'875 días (casi, medio año), por lo que la Tierra se encuentra, aproximadamente, en la posición opuesta de su órbita, T_2 , mientras que Júpiter, que apenas se ha desplazado 15° , se encuentra en J_2 .

Si el eclipse observado cuando los planetas estaban en T_1 y J_1 se produce el día 1 a las 0 h, el eclipse número 25 de ese satélite se produciría 178'875 días después, cuando los planetas se encuentren en T_2 y J_2 . Sin embargo, desde la Tierra en esta posición, se observa un retraso de 16'6 minutos, es decir el eclipse que debía producirse a las 21 horas del día 178, ocurre, en realidad a las 21 h y 16'6 min. del día 178. ¿A qué podría ser debido ese retraso?

Roemer interpretó este retraso argumentando que la luz no se propaga instantáneamente y, por tanto, cuando se observa el eclipse desde T_1 el fenómeno se percibe con un retraso Δt y cuando se observa desde T_2 el retraso, $\Delta t'$, será tanto mayor cuanto mayor sea la separación entre los planetas. La distancia mayor, en este segundo caso, recorrida por la luz es aproximadamente el diámetro de la órbita terrestre, es decir, unos 300 millones de km ($3 \cdot 10^8$ km) y dado que desde T_2 el eclipse se observa 16'6 min. (1000 s) más tarde que desde T_1 , la velocidad de la luz se puede calcular: $c \cong \frac{3 \cdot 10^8 \text{ km}}{1000 \text{ s}} = 300.000 \frac{\text{Km}}{\text{s}}$. En tiempos de Roëmer el valor del diámetro de la órbita de la Tierra era considerado algo menor que el actual, por lo que se obtuvo un valor para la velocidad de propagación de la luz en el vacío de unos 220.000 km/s que, aunque es un valor aproximado dio una idea de su magnitud. Sin embargo, el resultado no fue aceptado por la comunidad científica hasta que cincuenta años después, Bradley, interpretó otros fenómenos astronómicos bajo el supuesto de la no propagación instantánea de la luz.

Quiero que los alumnos comprendan la magnitud de la velocidad de la luz, que destierren la antigua idea de que la luz viaja de un sitio a otro instantáneamente. En esta actividad se explica a los alumnos que el tema de la velocidad de la luz fue fuente de controversia a lo largo de la historia. Desde el marco conceptual del modelo ondulatorio se mantenía que si la luz fuese una onda, tendría cierta velocidad de propagación.

Quiero que comprendan que la medición de la velocidad de la luz en el aire y en el agua fue un experimento crucial para decidir entre la teoría corpuscular de Newton y la teoría de los pulsos de luz de Huygens. Pero antes de este experimento fue necesario establecer la cuestión fundamental: ¿Es finita o infinita la velocidad de la luz? Galileo discutió este problema en su libro “Dos nuevas ciencias”. Pero con sus experiencias cotidianas, no pudo estimar un valor definido para la luz, aunque llegó a la conclusión de que la velocidad de la luz probablemente no era infinita.

Se pide a los alumnos que diseñen alguna experiencia para medir la velocidad de la luz, señalando que dificultades podrían encontrar.

El alumno 6 dice que es imposible medir la velocidad de la luz. El alumno 3 dice también que es imposible. El alumno 10 dice que se podría hacer con mucha distancia. Los alumnos 5 y 8 dicen que se podría hacer con espejos. Y entonces el alumno 10 dice que con espejos en los que se reflejase la luz muchas veces. Pero ninguno de ellos acaba de proponer un experimento cerrado, son más bien ideas.

Comento a los alumnos la importancia histórica del asunto, destacando las enormes dificultades que hubo que superar a lo largo de la historia para lograr medir la velocidad de la luz. Remarco el hecho de que la velocidad de la luz no fuera instantánea, apoyaba la hipótesis ondulatoria de la luz, que poco a poco se iba afianzando entre la comunidad científica. Les cuento que la evidencia definitiva de que la luz se mueve a una velocidad finita fue obtenida por el astrónomo danés, Olaf Roëmer en 1676, midiendo las diferencias de tiempo en el eclipse del satélite de Júpiter (la lectura que hemos hecho). Roëmer explicó que el retraso del eclipse era debido simplemente al hecho de que la luz de Júpiter tarda más o menos tiempo en alcanzar la tierra según las posiciones relativas de Júpiter y la Tierra sus órbitas. Comparando los tiempos de los eclipses observados en diversos puntos de la órbita de la Tierra, llegó a la conclusión de que la luz tardaba 22 minutos en cruzarla. Huygens utilizó los datos de Roëmer para hacer una estimación de la velocidad de la luz llegando al dato de 2×10^8 . Aunque el valor actualmente aceptado es de 3×10^8 , la importancia fundamental fue establecer que la propagación de la luz en el espacio libre no es instantánea, sino que exige un tiempo finito.

2. Conceptos tratados.

Velocidad finita de la luz. Velocidad de la luz en el vacío mayor que en medios materiales.

3. Reflexión de la docente.

Inicialmente esperamos que los alumnos propongan una experiencia parecida a la que en su día propuso Galileo. Les explicaré entonces la imposibilidad de poder medir de ese modo la velocidad de la luz, dado que el tiempo de respuesta del ser humano es muchísimo más grande que el tiempo que tardaría la luz en llegar de un punto a otro; reforzando la idea de la necesidad de grandes distancias, distancias astronómicas para poder medir la velocidad de la luz.

4. Interpretación.

Los alumnos son conscientes de que la velocidad de la luz es finita, pero no son capaces de proponer un experimento para medirla, no alcanzan a comprender la extrema rapidez de la luz.

1. Metodología y descripción. ¿Qué hicimos?

A.8. Revisa las expresiones para la refracción de las ondas y de los rayos luminosos y busca un significado físico al índice de refracción.

Quiero conseguir que los alumnos piensen que si la luz “blanca” se dispersa cuando atraviesa un prisma, se trata de una mezcla de diferentes tipos de ondas, con un poder refractivo diferente. Por tanto, a partir de ahora, el índice de refracción de un material transparente debe ser asociado a cada tipo de luz, a cada frecuencia de vibración. Así, como en el sonido cada tono se corresponde con un tipo de onda sonora de una frecuencia determinada, podemos pensar que cada tipo de luz se corresponde con un tipo de onda lumínica de una frecuencia.

Les recuerdo la expresión que habíamos encontrado para la refracción de las ondas:

$$\text{Sen } i / \text{Sen } r = v_2 / v_1$$

Y para el caso de la refracción de las ondas lumínicas, habíamos encontrado en el laboratorio:

$$\text{Sen } i / \text{Sen } r = n$$

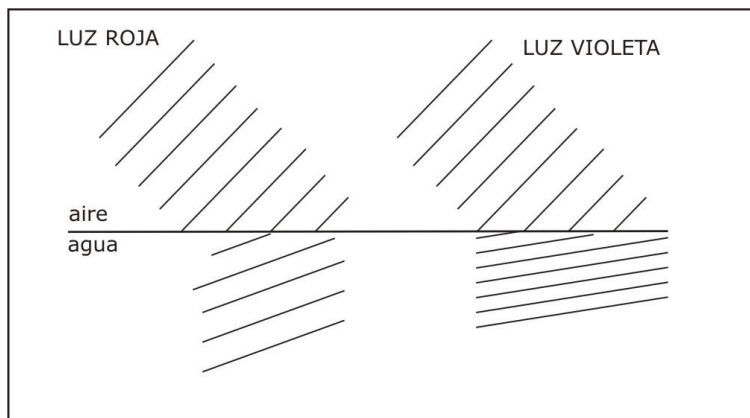
Los alumnos llegan a la conclusión, con la ayuda de profesor, de que el índice de refracción de un medio es la relación entre la velocidad de la luz en el aire (vacío) y la velocidad de la luz en dicho medio.

Les comento que el índice de refracción siempre tiene que ser mayor que uno y que será tanto mayor cuanto menor sea la velocidad de la luz en el medio.

Les cuento entonces que este tema estuvo en el centro de la dicotomía teoría ondulatoria-corporcular del siglo XVIII y XIX. Newton creía que la velocidad de la luz tenía que ser mayor en el agua. Cuando Hippolyte Fizeau (1819-1896) pudo medir que la velocidad de la luz era menor en el agua que en el aire, la comunidad científica se decantó finalmente por la teoría ondulatoria.

Insisto en que el índice de refracción es diferente para cada uno de “los colores”, ya que es función de la frecuencia de la onda. En el caso de la dispersión de la luz blanca por un prisma, hemos visto que la luz violeta se refracta más que la roja.

Les propongo el siguiente trazado explicativo:



Debido a que la velocidad de las ondas cambia al pasar la luz de un medio a otro, la longitud de la onda también se ve influida (la frecuencia es constante). Por tanto,

observamos que, en el caso del rojo, cuyo índice de refracción es menor, es decir la modificación de la velocidad es menor y por tanto la variación en la longitud de onda será pequeña. En el caso del violeta, cuyo índice de refracción es mayor, la variación de la velocidad al pasar al agua será mayor y por tanto la variación en la longitud de onda será mayor. Observamos, por tanto, que la longitud de onda del rojo varía poco al pasar del aire al agua, mientras que la longitud de onda del violeta varía más, haciéndose más pequeña. (Si la frecuencia no varía y la velocidad de la onda disminuye, la longitud de onda tiene que disminuir).

2. Conceptos tratados.

Significado físico del índice de refracción y dependencia con el color.

3. Reflexión de la docente

Creemos que los alumnos no llegarán sin la ayuda de profesor, a la conclusión de que el índice de refracción de un medio es la relación entre la velocidad de la luz en el aire (vacío) y la velocidad de la luz en dicho medio.

Creemos que les costará trabajo comprender que el índice de refracción es función de la longitud de onda, y por tanto la luz blanca se dispersa al atravesar un prisma, o medio material

4. Interpretación.

1. Metodología y descripción. ¿Qué hicimos?

A.9. Haciendo uso del significado físico del índice de refracción $n = c/v$, interpreta el fenómeno de la dispersión de la luz blanca que hemos estudiado al principio de la unidad.

Quiero que los alumnos comprendan cual es la naturaleza del fenómeno de refracción que habíamos estudiado previamente en óptica geométrica y que ahora vamos a estudiar desde otro punto de vista.

Les explico que, para entender la trayectoria seguida por la luz al refractarse a través de los medios transparentes, necesitamos saber por qué la luz se desacelera en los medios transparentes como el vidrio o el agua. La rapidez de la luz es una constante de la naturaleza, en el vacío es una constante de 3×10^8 m/s. La luz tiene una velocidad menor en el agua, solamente un 75% de la velocidad en el vacío, y en un diamante solamente 41%. Cuando la luz emerge de estos medios, viaja de nuevo a su rapidez original. Pero parece un comportamiento extraño desde el punto de vista de la energía

Les cuento que en su mayor parte el vidrio está compuesto de átomos de silicio, con nubes de electrones que con facilidad son forzados a vibrar cubriendo el intervalo completo de

las frecuencias visibles. Si la luz incidente es absorbida, las nubes de electrones se ponen a vibrar con una frecuencia igual a la de la luz absorbida. Los electrones vibrantes, a su vez, emiten luz por su cuenta, a la misma frecuencia. Esta luz es menos intensa debido a que parte de la luz incidente fue absorbida y convertida en calor durante el proceso y lo más importante, no ha recorrido tanta distancia como la que habría cubierto la luz incidente no perturbada en el mismo tiempo.

Los alumnos tardan en comprender que el proceso de absorción/reemisión no es instantáneo; se requiere cierto tiempo para que se realice y, como resultado, la rapidez promedio de la luz a través del vidrio es menor que c . Esto no contradice la máxima de que la rapidez de la luz es una constante de la naturaleza porque la rapidez instantánea de la luz entre los átomos es todavía c .

Les explico entonces que cuando se habla de la velocidad de la luz en los medios transparentes se hace referencia a la rapidez promedio, que toma en consideración el atraso asociado al proceso de absorción y reemisión. Por tanto, a diferencia de la bala que pasa a través de la tabla, la luz no “horada” el vidrio.

A continuación, les explico que cada uno de los “colores” es una onda de una frecuencia característica y que se moverá en el vidrio con una velocidad determinada. Es por eso que los diferentes “colores” recorren caminos distintos al atravesar un prisma.

2. Conceptos tratados.

Dispersión de la luz blanca al atravesar un prisma en función de las diferentes frecuencias de las luces que conforman la luz blanca.

3. Hipótesis.

Creemos que los alumnos necesitarán ayuda del profesor para poder explicar este fenómeno.

4. Interpretación.

Es una relación compleja y necesita de ayuda por mi parte.

Lunes 02/03/2020 AULA B18 LABORATORIO DE FÍSICA

12:20-13:15 SESIÓN 19

GRUPO 1: 15 Alumnos

Faltan dos alumnos: Alumno 8 y Alumno 13.

1. Metodología y descripción. ¿Qué hicimos?

A.10. ¿Cómo explicarías la reflexión de la luz teniendo en cuenta que la luz es una onda?

Los alumnos no son capaces de proponer por sí mismos una explicación a este fenómeno. Recuerdan la ley de la reflexión, pero no logran proponer una hipótesis.

A continuación, les explico el fenómeno de reflexión a escala atómica. Cuando se ilumina un objeto con luz procedente del Sol o de una lámpara, se establece una vibración electrónica generalizada en los estados normales de energía de sus átomos. Nubes completas de electrones vibran como respuesta a los campos eléctricos oscilantes de la luz que reciben. Son estas diminutas vibraciones electrónicas las que reemiten la luz por la que vemos dicho objeto. Pongamos por ejemplo que se está iluminando una página, si se la ilumina con luz blanca, se ve blanca, lo cual revela el hecho de que los electrones se han puesto a vibrar en todas las frecuencias visibles (recordad que la luz blanca está compuesta por una mezcla de colores, es decir ondas EM de diferente frecuencia). La página blanca tiene muy poca absorción. Lo que ocurre con la tinta de la página es diferente; excepto por una pequeña reflexión, absorbe todas las frecuencias visibles y por ello se ve negra.

Por lo tanto, en las superficies de todos los objetos que nos rodean, las nubes electrónicas de los átomos experimentan ligeras vibraciones al recibir la influencia de la luz que los ilumina. Estas diminutas vibraciones, que cubren diversos intervalos de frecuencia, emiten los diferentes colores de luz debido a la cual vemos los objetos. En pocas palabras, decimos que los vemos en virtud de la luz que reflejan.

Les explico que tenemos que distinguir entre la reflexión difusa que se produce en cualquier superficie y la reflexión especular. Los alumnos 4 y 11 se muestran sorprendidos e interesados.

Todos sabemos que normalmente la luz viaja en línea recta. Al ir de un lugar a otro, la luz sigue la trayectoria más eficiente y viaja en línea recta. Esto es cierto si nada obstruye el paso de la luz entre ambos lugares. Si la luz es reflejada por un espejo, el cambio de dirección en la trayectoria, que de lo contrario sería recta, se describe por medio de una fórmula sencilla. Esta fórmula sencilla está basada en el *principio de tiempo mínimo*, planteado por Pierre Fermat (1607-1655) hacia el año 1650. El planteamiento es el siguiente: “de todas las trayectorias posibles que la luz podría seguir para ir de un punto a otro sigue aquella que requiere menos tiempo”, y así se puede explicar que el ángulo de incidencia sea igual al de reflexión.

Como curiosidad, el profesor comentará a los alumnos la relación que tiene las distintas velocidades de la luz con los atardeceres. Cuando contemplamos un atardecer, vemos el Sol durante varios minutos después de que se ha hundido por debajo del horizonte. La atmósfera de la Tierra es más enrarecida cuanto más arriba y más densa cuanto más abajo. Como la luz viaja con mayor rapidez en el aire enrarecido que en el denso, la luz del Sol puede viajar con más rapidez si, en lugar de desplazarse en línea recta, evita tanto como sea posible el aire más denso, tomando una trayectoria más alta y más larga con el fin de penetrar en la atmósfera con una inclinación más pronunciada. Como la densidad de la atmósfera cambia gradualmente, la trayectoria de la luz se desvía también en forma gradual para convertirse en curva. Algo que resulta muy interesante es que esta trayectoria de tiempo mínimo nos proporciona cada día un periodo más largo de luz del Sol. Además, cuando el Sol, o la Luna, están cerca del horizonte, los rayos del borde inferior se curvan más que los del superior; esto produce un acortamiento del diámetro vertical, lo que hace al Sol verse elíptico.

2. Conceptos tratados.

Reflexión de la luz. Reflexión difusa y reflexión especular.

3. Reflexión de la docente

Creemos que inicialmente los alumnos no se darán cuenta de que todos los objetos que vemos están reflejando la luz, en todas las direcciones. Creemos que inicialmente asociarán reflexión con reflexión especular.

4. Interpretación.

Los alumnos no son conscientes de la reflexión difusa.

1. Metodología y descripción. ¿Qué hicimos?

A.11. Conocemos muchas ocasiones en las que los objetos emiten luz: una brasa, un hierro muy caliente, el filamento de una lámpara de incandescencia, etc. Sabiendo que los átomos de la materia están formados por cargas eléctricas (electrones y protones), formula una hipótesis que explique la emisión de luz.

Quiero que los alumnos relacionen ideas que tengan de cursos anteriores y de la vida cotidiana con la producción de luz. Los alumnos pueden relacionar el golpe del martillo, con una fuerza que se realiza sobre el metal y pueden imaginar que dicha fuerza producirá una aceleración de las cargas eléctricas (los electrones, que son las partículas que se pueden mover, pues sabemos que los protones están en el interior del núcleo y no se mueven, salvo en reacciones nucleares).

Intento que los alumnos lleguen a la conclusión de que dicha aceleración de las cargas debido al golpe con el martillo producirá la emisión de luz. Les recuerdo que una carga eléctrica en reposo produce un campo eléctrico constante. Pero una carga que ha sido desplazada de su posición de equilibrio por una fuerza, intenta volver a su posición produciendo una oscilación, y esa carga oscilante producirá un campo eléctrico oscilante que se propaga oscilando por el espacio. A lo largo del curso también hemos estudiado que una carga eléctrica que se mueve produce un campo magnético. Esa oscilación de la carga eléctrica producirá por tanto un campo magnético oscilante. Esa variación del campo eléctrico y magnético que se propagan por el espacio, es una onda electromagnética, formada por un campo eléctrico y otro magnético que vibran en direcciones perpendiculares entre sí, y perpendicular así mismo a la dirección de propagación de la luz. Decimos que la luz es una onda electromagnética.

Los alumnos comprenden las explicaciones profesor y se muestran ilusionados ante esta forma de explicar la producción de luz.

2. Conceptos tratados.

Producción de luz.

3. Reflexión de la docente

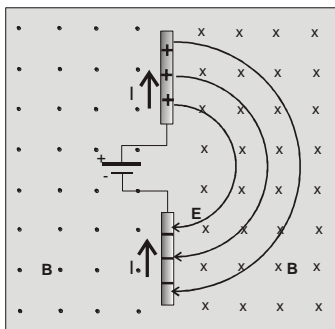
Creemos que por sí mismos los alumnos no serán capaces de establecer una relación entre el movimiento de cargas y la producción de luz, pero pensamos que con ayuda del profesor serán capaces de relacionar ambos conceptos.

4. Interpretación.

1. Metodología y descripción. ¿Qué hicimos?

A.12. Realiza una síntesis de la siguiente lectura acerca de las ideas de Maxwell sobre la producción de ondas electromagnéticas.

Maxwell, para argumentar la relación entre la producción y emisión de luz y la variación de los campos eléctricos y magnéticos cuando las cargas eléctricas vibran



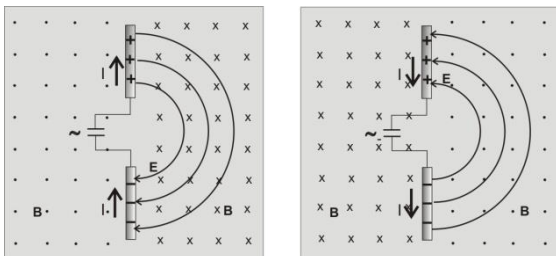
o se aceleran, imaginó un dispositivo con dos varillas metálicas que se pueden conectar a una batería según el esquema del margen. Al cerrar el interruptor, durante un breve período de tiempo, circula una corriente que hace que la varilla superior se carga con carga positiva y la inferior con carga negativa. Se crea, por tanto, un campo eléctrico \vec{E} cuyas líneas de fuerza van de la varilla con carga \oplus a la varilla con carga \ominus . Mientras dura esta corriente (de intensidad variable) también se genera un campo magnético (variable), cuyas líneas de fuerza son circulares alrededor de las varillas y que en el plano del papel están señaladas con puntos y cruces, según el sentido del vector \vec{B} sea saliente o entrante en ese plano. En resumen, al cerrar el interruptor, en el espacio circundante a las varillas se crea un campo electromagnético, de tal forma que los vectores \vec{E} y \vec{B} son perpendiculares en todos los puntos del espacio.

Pero, ¿hasta dónde se extiende ese campo electromagnético? ¿Es instantánea la propagación de ese campo por el espacio? Maxwell planteó estos interrogantes que se revelaron de enorme importancia.

En el caso de la situación planteada anteriormente, pronto se cargan ambas varillas y desaparece la intensidad de corriente por ellas, por lo que también desaparece pronto el campo magnético. La situación es, a partir de ese momento, estática: el valor del campo eléctrico es constante en cada punto y alcanza todos los puntos del espacio con diferente intensidad, hasta el infinito y el valor del campo magnético es cero.

Si deseamos profundizar en los fenómenos que ocurren mientras existen corrientes, podemos imaginar que las varillas de la experiencia anterior se conectan a un generador de corriente alterna sinusoidal (como el estudiado en el tema de inducción electromagnética). En este caso, durante el primer semiciclo de la corriente eléctrica, la varilla superior se va cargando con carga \oplus y la varilla inferior con carga \ominus generando una situación de los campos \vec{E} y \vec{B} similar a la analizada anteriormente. En el segundo semiciclo, al cambiar de sentido la corriente, la varilla superior se va descargando de carga \oplus y cargando de carga \ominus y los campos \vec{E} y \vec{B} cambian de sentido. Por lo tanto, en un proceso continuo, los campos eléctricos en cada punto van variando su valor y alternando su sentido. Pero como este proceso pasa en cada punto, si la propagación de \vec{E} y \vec{B} no es instantánea, mientras va cambiando sus valores en un punto van alcanzando puntos más alejados.

Este esquema simplificado del proceso de generación y propagación del campo electromagnético se caracteriza, pues, por:



En cada punto del espacio alcanzado por dicha propagación los campos \vec{E} y \vec{B} son perpendiculares entre sí y perpendiculares a la dirección de propagación.

- Los campos alternan su sentido de unos puntos a otros, de manera que un determinado instante \vec{B} se dirige hacia el exterior en unos puntos y hacia el interior del plano en otros puntos, mientras que, por su parte, el campo eléctrico \vec{E} se dirige hacia arriba o hacia abajo.
- En el caso de una corriente alterna sinusoidal, la propagación electromagnética adopta una forma ondulatoria transversal típica y los vectores \vec{E} y \vec{B} están en fase, es decir, son máximos o mínimos a la vez. En la figura se representa una onda no atenuada en la dirección del eje X.
- En definitiva, las cargas oscilantes, dan lugar a un proceso de emisión y propagación por el espacio de un campo electromagnético de tipo ondulatorio. Estas ondas se llaman ondas electromagnéticas y no requieren necesariamente un medio material para propagarse, por lo que lo pueden hacer en el vacío.
- Maxwell no se limitó exclusivamente a este desarrollo cualitativo, sino que combinando las ecuaciones del electromagnetismo encontró que la velocidad de propagación de las ondas electromagnéticas es: $c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}}$, lo que indica que la velocidad de propagación depende exclusivamente del medio y que para el vacío ($\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ y $\epsilon_0 = 1/4\pi K$, con $K = 9 \cdot 10^9$ en el S.I.) ¡¡¡tiene un valor de $3 \cdot 10^8$ m/s!!!

Con esta actividad buscamos que los alumnos se pregunten ¿qué implica una variación del campo eléctrico? y ¿qué significa que la luz es una radiación electromagnética?

Quiero que los alumnos comprendan que el campo está dotado de energía y de momento. Quiero que el campo llegue a adquirir verdadero significado físico para los alumnos. Insisto una vez más en la importancia del concepto de campo, clave para la superación del marco teórico mecanicista y la evolución posterior de la física cuántica y relativista.

El campo electromagnético es capaz de transmitir energía a través de grandes distancias, es una idea clave para que los alumnos comprendan su existencia real. Quiero que los

alumnos consideren el campo como un agente real de interacción, no como una zona del espacio donde se pueden detectar fuerzas creadas por una carga, masa, o imán.

Insisto en las diferencias que sobre la interacción entre partículas introduce la teoría de campos mediante acciones contiguas frente a la interpretación newtoniana de acciones a distancia. Es muy importante que el alumno comprenda que el campo es una realidad física dotada de energía y momento.

Al hablar de ondas electromagnéticas se podrá hablar de energía asociada al propio campo de una manera más clara.

Ayudo a los alumnos a recordar las leyes del electromagnetismo para poder explicarlas en términos de campos.

2. Conceptos tratados.

Teoría de Maxwell sobre la producción de ondas electromagnéticas.

3. Reflexión de la docente

Creo que con mi ayuda los alumnos comprenderán que el campo es una realidad física dotada de energía y momento, y que al referirnos a ondas electromagnéticas podremos hablar de energía asociada al propio campo de una manera más clara.

4. Interpretación.

1. Metodología y descripción. ¿Qué hicimos?

A.13. Explica con tus palabras y dibuja una onda electromagnética.

En esta actividad se pide a los alumnos que definan con sus palabras una onda electromagnética.

Al principio los alumnos ofrecen explicaciones vagas sobre las ondas EM, aunque son conscientes, en su mayoría, de que no es necesario un medio material.

Les ayudo a comprender que las ondas EM son la propagación de energía a través de campos eléctricos y magnéticos inducidos que oscilan por el espacio con el mismo ritmo que las cargas vibrantes que las envían (y que se mueven a una velocidad de c)

Insisto en que la radiación EM es la transferencia de energía por oscilaciones rápidas de campos EM en el espacio, y que las ondas transfieren Energía sin que haya transporte de materia. Explico la aportación decisiva de Maxwell sobre la corriente de desplazamiento, para establecer una simetría completa entre campos eléctricos y magnéticos. Si una variación de un campo magnético induce un campo eléctrico, una variación temporal del campo eléctrico debía inducir un campo magnético.

Soy consciente de que la representación diagramática de la onda plana EM que utilizan los libros de texto, es incomprendible para los alumnos. Ayudo a los alumnos para que no caigan en el error de atribuir una extensión espacial a la amplitud de onda. A partir de del dibujo de la onda plana representada típicamente en los libros, pido a los alumnos que ordenen las magnitudes de los campos E y M en distintos lugares del dibujo. Les ayudo a comprender dicha representación. Los alumnos se muestran sorprendidos cuando comprenden el significado real de la representación de la onda EM, cuando comprenden que la onda EM no tiene una extensión espacial finita, que los campos EM no están encerrados dentro de curvas sinusoidales.

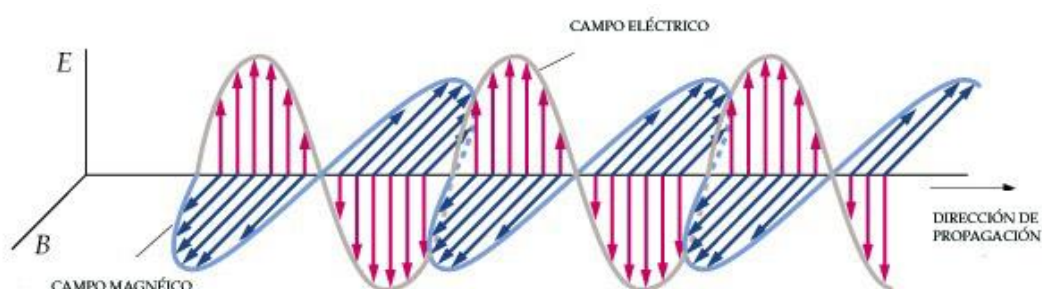
Insisto mucho para que no confundan la notación vectorial con la extensión de los campos E y B.

Al principio algunos alumnos (Alumnos 1, 6, 7 y 12) creen que los campos están confinados en las curvas sinusoidales. Algunos alumnos (Alumnos 5 y 14) creen que los campos son emitidos desde el eje de propagación. Algunos estudiantes (Alumnos 9 y 15) no son conscientes de que E y B son interdependientes. Los alumnos 4, 10 y 11 parece que lo entienden bien.

Para entender el modelo ondulatorio de manera que incluya los vectores de campo oscilantes, los estudiantes en el nivel de 2º de Bachillerato deben ser capaces de interpretar el formalismo diagramático matemático que describe una onda electromagnética plana.

Quiero que los alumnos comprendan que los campos eléctrico y magnético no están encerrados dentro de las curvas sinusoidales, tratando de evitar que se confunda la notación vectorial con la extensión de los campos eléctrico y magnético.

Algunos alumnos (Alumnos 1, 5, 6, 7, 9, 12, 14 y 15) tienen dificultades serias con este tópico que podrían ser debidas, al menos en parte, a una falta de entendimiento de la naturaleza de la luz como una onda electromagnética. Es posible que no hayan desarrollado correctamente el modelo ondulatorio básico, y aún tengan serias dificultades con algunos conceptos muy básicos, como la longitud de onda, la diferencia en los caminos, y la diferencia de fase.



Quiero que los alumnos comprendan en profundidad el concepto de campo, que comprendan que el campo está dotado de energía y momento, quiero que el campo llegue a adquirir un significado físico para los alumnos equiparable al que tienen otros conceptos como el de partícula o fuerza. Creo que los alumnos sin una adecuada formación, adquieren, en su mayoría, una imagen del campo que está lejos de la concepción científica. Suelen considerar el campo como una región del espacio o volumen que delimita la influencia de una masa, carga o imán. En este caso el campo está vacío de significado, en claro contraste con los conceptos de masa, carga, fuerza... y, por tanto, es innecesario, redundante y complicado.

Si no se trabaja adecuadamente, los alumnos siguen pensando en términos de fuerza y no modifican fácilmente sus ideas previas sobre la interacción entre partículas, y tienden a identificar el campo con una zona del espacio, un volumen de influencia y no como el agente de la interacción, como es el caso de algunos de nuestros alumnos.

Los libros de texto potencian la idea de que la fuerza se debe a las fuentes (cargas, masas o imanes) y no al campo. Estamos, por tanto, ante una visión newtoniana de la interacción, en la que ésta se efectúa entre las partículas y no entre el campo y la partícula. No es de

extrañar que los alumnos no logren construir el verdadero significado del concepto campo.

Les recuerdo que en temas anteriores habíamos estudiado las leyes del electromagnetismo, y que con ellas podíamos definir los campos eléctricos y magnéticos en función de las cargas o corrientes. Retomo el concepto de campo para clarificar algunos posibles errores conceptuales en los alumnos. Comienzo recordando a los alumnos la importancia del concepto de campo en física, puesto que su introducción supuso poner en duda, y superar posteriormente el marco teórico mecanicista. Sin esta idea básica de campo, la evolución posterior de la física cuántica y relativista resulta inconcebible.

Si quiero que los alumnos comprendan en su profundidad el concepto de campo, he de presentar el campo como agente de la interacción, dotado de realidad física, de energía y de momento, con existencia propia independiente de la fuerza, de forma que el alumno comprenda su importancia y necesidad. He de evitar la asociación entre energía y partícula mediante la clarificación de los aspectos energéticos en aquellas situaciones en las que interviene el campo.

Ahora, al estudiar las ondas electromagnéticas podremos hablar de la energía asociada al propio campo de una manera más directa y clara; pues en este caso los campos eléctrico y magnético se propagan, es decir, varían en función del tiempo y del espacio. La propagación de las señales electromagnéticas sucede a una velocidad finita, la acción es retardada, necesita campos para llevar energía, momento lineal y angular. En la inducción electromagnética la transferencia de energía a través de distancias macroscópicas está muy claramente relacionada con la acción de campos variables con el tiempo.

2. Conceptos tratados.

Carácter electromagnético de la luz.

3. Reflexión de la docente

El error más común que esperamos será adscribir a la onda EM plana una extensión espacial finita en el plano perpendicular a la dirección de propagación, debido a la creencia incorrecta de que los campos eléctrico y magnético están confinados a la región encerrada dentro de las curvas sinusoidales. Esperamos que los estudiantes también

tengan dificultades con las expresiones matemáticas del campo magnético y eléctrico oscilante y con las ecuaciones que relacionan la variación de cada campo con el otro. El concepto de un plano infinito en el que dos cantidades vectoriales cada una de las cuales tiene una magnitud y dirección en cualquier punto en un instante es muy abstracto.

En esta actividad también se solicita a los alumnos que con lo aprendido hasta ahora dibujen una onda EM. Es una actividad compleja, pues exige de los alumnos que sean capaces de interpretar el formalismo matemático que describe una onda EM.

El concepto de plano infinito en el que dos cantidades vectoriales cada una de las cuales tiene una magnitud y dirección en cualquier punto en un instante es muy abstracto, por lo que creemos que los alumnos por sí mismos no serán capaces de comprenderlo.

4. Interpretación.

1. Metodología y descripción. ¿Qué hicimos?

A.14. Si las ondas lumínicas son de naturaleza electromagnética, es decir variaciones periódicas de los campos E y B, podemos diseñar un método para producirlas. Diseña una experiencia para producirlas.

A. 14.1 Como actividad alternativa, lectura del experimento de Hertz:

Quiero que los alumnos comprendan el experimento de Hertz, recuerden lo aprendido anteriormente en las unidades de campo eléctrico y magnético, y lo relacionen con la producción de ondas electromagnéticas. Quiero que comprendan la extraordinaria importancia que tuvo el experimento de Hertz, ya que validaba la teoría electromagnética de Maxwell.

Les explico la importancia del experimento de Hertz para la aceptación de la teoría electromagnética de Maxwell, uno de los logros más grandes del pensamiento científico del siglo XIX. Recuerdo las relaciones entre campos eléctricos y magnéticos que habían estudiado en unidades previas, para que puedan así comprender la producción de las ondas electromagnéticas, y explico que las ondas electromagnéticas no son solamente ondas lumínicas, sino que hay de muchos tipos.

Les cuento que, si la luz es una radiación electromagnética producida por una oscilación periódica de corrientes eléctricas, un filamento metálico de una lámpara incandescente, emite luz debido a la agitación de las cargas eléctricas submicroscópicas existentes en los cuerpos neutros en cantidades equilibradas.

Sin considerar si estas cargas son partes de los átomos del foco de luz o entidades separadas tales como electrones, los llamaremos de momento osciladores. Algunos de dichos osciladores son capaces de emitir energía electromagnética que nuestros ojos interpretan como luz; siendo la frecuencia de las ondas luminosas igual a la frecuencia periódica de dichos osciladores.

Les cuento que Hertz se propuso realizar un experimento que pusiese de manifiesto esta interpretación “clásica” de la emisión de luz. Un ensayo evidente sería producir una corriente oscilante en un alambre a una frecuencia igual, por ejemplo, a la que posee la luz verde y observar si se emite luz verde hacia la región que lo rodea. Pero las frecuencias de oscilación que se podía alcanzar eran relativamente bajas, muy lejos de llegar al rango de la frecuencia de la luz visible (10^{15} s^{-1}). Por tanto, un ensayo directo no era posible.

Hertz, entonces propuso lo siguiente: si la premisa fundamental de que una corriente eléctrica oscilante producía una radiación electromagnética (luz visible si se alcanzaba una frecuencia suficientemente alta), que tendría todas las características de la luz excepto, naturalmente, su visibilidad. La prueba de Hertz tuvo tanto éxito que la comunidad científica quedó convencida de que la luz era una radiación electromagnética.

En esencia, el método experimental de Hertz era sencillo. Dos varillas, cada una de una longitud de 5 pulgadas, terminadas en un extremo por una esferita metálica pulida, se fijaban sobre una recta de manera que entre las esferas quedara una pequeña zona de aire. De las esferas partían dos hilos conductores hacia un dispositivo que suministraba pulsos cortos de diferencia de potencial muy elevada que llevaban a las esferas grandes cantidades de carga eléctrica de signos opuestos, hasta que saltaba la chispa entre ellas. El aire de la zona se hacía conductor durante un corto periodo de tiempo y así proporcionaba un camino a las cargas que oscilaban de una varilla a la otra hasta alcanzarse el equilibrio eléctrico. Entonces el aire volvía a no ser conductor y el sistema quedaba preparado para el siguiente pulso de “tensión” que originaba otra serie de oscilaciones por el mismo proceso.

Si los argumentos de Maxwell eran correctos, mientras saltaba cada chispa se propagaban ondas electromagnéticas de la misma frecuencia que las oscilaciones, hasta unos $5 \cdot 10^8 \text{ s}^{-1}$, según las estimaciones de Hertz, ondas electromagnéticas con una longitud de onda de unos 60 cm. Además, esta radiación se dispersaría desde las esferas y sería detectable por la producción de una corriente fluctuante en un alambre a cierta distancia, como se indicó anteriormente.

El primer triunfo de Hertz fue observar este efecto, aun cuando el alambre receptor (antena) se situará a muchos metros de distancia del oscilador emisor. Esa nueva radiación electromagnética invisible, llamada todavía a veces ondas hertzianas, es naturalmente idéntica a nuestras familiares ondas de radio. Hertz demostró a continuación que la radiación poseía todas las características de la luz: se reflejaba, se podía enfocar un haz, refracción, interferencia, polarización, etc. Posteriormente se demostró que la velocidad de este tipo de radiación electromagnética era la misma que la velocidad de la luz.

La comunidad científica rápidamente llegó a la conclusión de que, puesto que las ondas hertzianas y las ondas luminosas se comportan de un modo semejante, la luz debe estar causada también por el rápido movimiento oscilatorio de partículas cargadas, quizás las existentes en los átomos del emisor de luz. Aquí teníamos el modelo de la emisión de luz.

Quiero que los alumnos comprendan el experimento de Hertz, recuerden lo aprendido anteriormente en las unidades de campo eléctrico y magnético, y lo relacionen con la producción de ondas electromagnéticas. Quiero que comprendan la extraordinaria importancia que tuvo el experimento de Hertz, ya que validaba la teoría electromagnética de Maxwell.

Los alumnos comprenden la importancia del experimento de Hertz para la aceptación de la teoría electromagnética de Maxwell, uno de los logros más grandes del pensamiento científico del siglo XIX.

1. Metodología y descripción. ¿Qué hicimos?

A.15. Si la luz es una onda, tendrá una longitud de onda y una frecuencia asociadas. ¿Cómo podríamos explicar el experimento de dispersión de la luz blanca en luces de diferentes colores? ¿Qué serían cada uno de los colores?

Quiero que los alumnos expliquen el experimento de la dispersión de la luz blanca teniendo en cuenta que la luz es una onda, y por tanto ha de tener una longitud de onda y una frecuencia asociada. Quiero que los alumnos relacionen la actividad del inicio del tema, el "*Experimentum crucis*" con las características de las ondas.

Los alumnos 3, 4, 10 y 11 proponen que los distintos colores han de ser luces de diferente longitud de onda. El resto de alumnos no saben.

Ayudo a todos los alumnos a relacionar cada color con ondas de diferentes características, con su longitud de onda y una frecuencia asociada.

Finalmente los alumnos lo comprenden fácilmente, y se muestran receptivos y motivados..

2. Conceptos tratados.

Los diferentes colores son ondas de diferente frecuencia, que viajan juntas en el vacío, pero que, en los medios materiales, como viajan a distinta velocidad, se dispersan.

3. Reflexión de la docente

Creo que inicialmente algunos alumnos propondrán acertadamente que los diferentes colores son ondas de distintas características, y que otros alumnos necesitarán mi ayuda.

4. Interpretación.

Miércoles 04/03/2020 AULA B18 LABORATORIO DE FÍSICA

08:30-09:25 SESIÓN 20

GRUPO 1: 15 Alumnos

Falta: Alumno 13

1. Metodología y descripción. ¿Qué hicimos?

A.16. La naturaleza de ondulatoria de la luz debe ser un modelo coherente con explicaciones que fácilmente realizábamos en la óptica geométrica. Comparar las

explicaciones de los siguientes fenómenos desde los dos puntos de vista: geométrico y ondulatorio. Realiza los correspondientes trazados gráficos:

A.16.1. La emisión de luz por una fuente puntual.

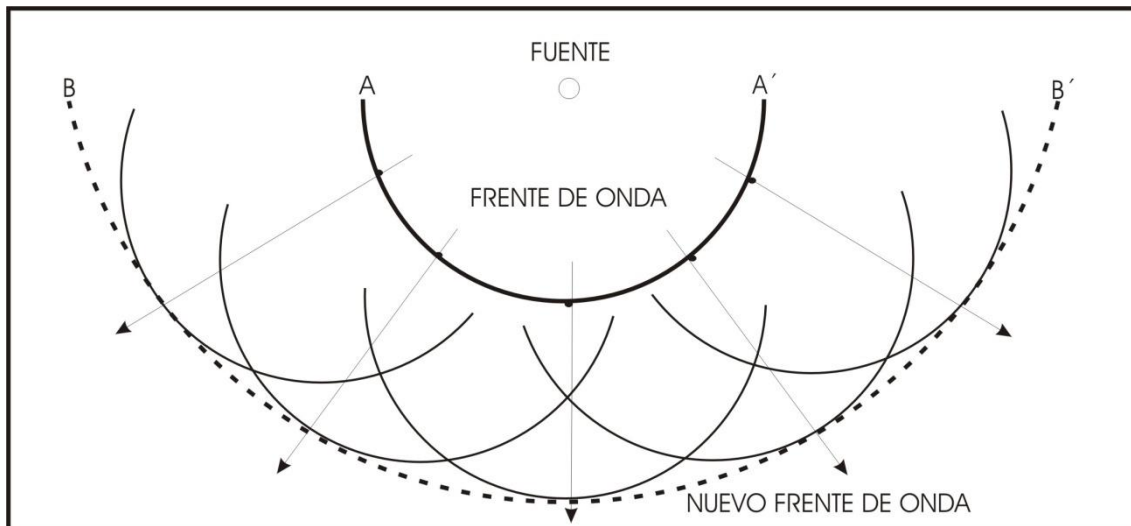
Los alumnos no saben dar respuesta a esta pregunta.

Les explico que esta cuestión fue un escollo difícil de superar, y que de hecho no fue hasta que Huygens propuso su principio de propagación de la luz, que la teoría ondulatoria comenzó a tenerse en cuenta frente a la corpuscular. Newton defendía la Teoría corpuscular basándose fundamentalmente en la propagación rectilínea de la luz. Les cuento que la explicación de la propagación rectilínea de la luz mediante el modelo ondulatorio fue un escollo difícil de superar, que de hecho durante tiempo favoreció la aceptación de la teoría corpuscular de la luz que proponía una explicación más directa.

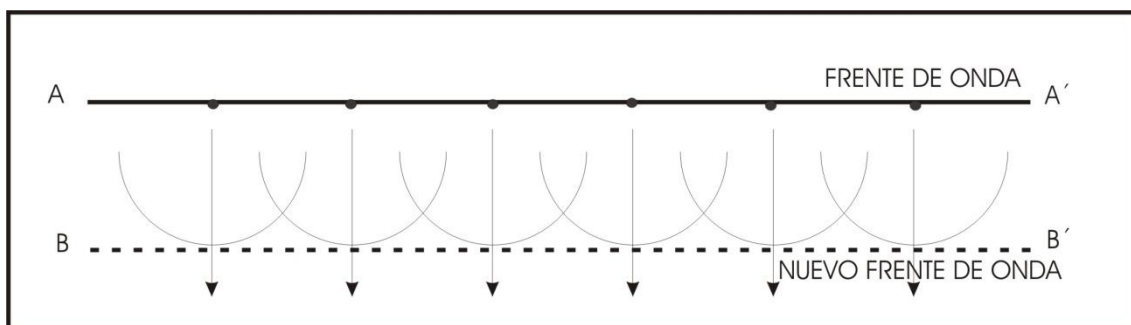
Quiero ayudar a los alumnos a comprender que la teoría ondulatoria también puede explicar la propagación rectilínea de la luz. Para explicar la emisión de luz por una fuente puntual, introduzco el principio de Huygens.

Huygens afirmaba que cada punto de cualquier frente de ondas pueda considerarse una nueva fuente puntual de ondas secundarias. Esta idea se conoce como "*principio de Huygens*". "*Todos los puntos a lo largo del frente de ondas AA' son, a su vez, fuente de nuevas onditas, un poco de tiempo después esas nuevas onditas superpuestas formarán una nueva superficie BB', la cual puede considerarse la envolvente de todas ellas*".

Posteriormente con la aportación de Fresnel se definió el "*Principio de Huygens-Fresnel*", aunque no se suelen citar en los textos habituales de enseñanza: "*Las ondas secundarias tienen efectividad de una intensidad máxima en la dirección normal a la envolvente, y disminuyen con un factor de oblicuidad hasta 90°*". Se puede explicar por fin la transmisión rectilínea de la luz, que había sido el gran escollo de la teoría ondulatoria. El principio de Huygens-Fresnel es una herramienta fundamental, además, para explicar la limitación del modelo geométrico que conocemos como aproximación paraxial.



En la figura hemos representado sólo unas cuantas del número infinito de onditas que se producen a partir de unas pocas fuentes puntuales secundarias, que se combinan para producir la envolvente BB' . Conforme se extiende la onda, cualquier segmento de ella parece menos curvo. Muy lejos de la fuente original, las ondas casi forman un plano, como sucede, por ejemplo, con las ondas procedentes de lo sol. Les recuerdo que habíamos estado considerando que el haz de luz emitido por una fuente muy lejana, podría considerarse limitado por dos rayos paralelos. En la siguiente propongo una construcción hecha por Huygens a base de onditas para frentes de ondas planos.



Les explico que los rayos de luz que hemos dibujado serían perpendiculares en todo punto al frente de ondas. Les recuerdo que los rayos de luz no son nada en sí mismos.

Queremos que, con la representación de la luz como una onda, poder dibujar desde una perspectiva ondulatoria qué le ocurriría a una onda que se desplaza y en su camino encuentra una lente convergente, una lente divergente o un espejo esférico.

Los alumnos se muestran sorprendidos y animados.

2. Conceptos tratados.

Principio de Huygens-Fresnel.

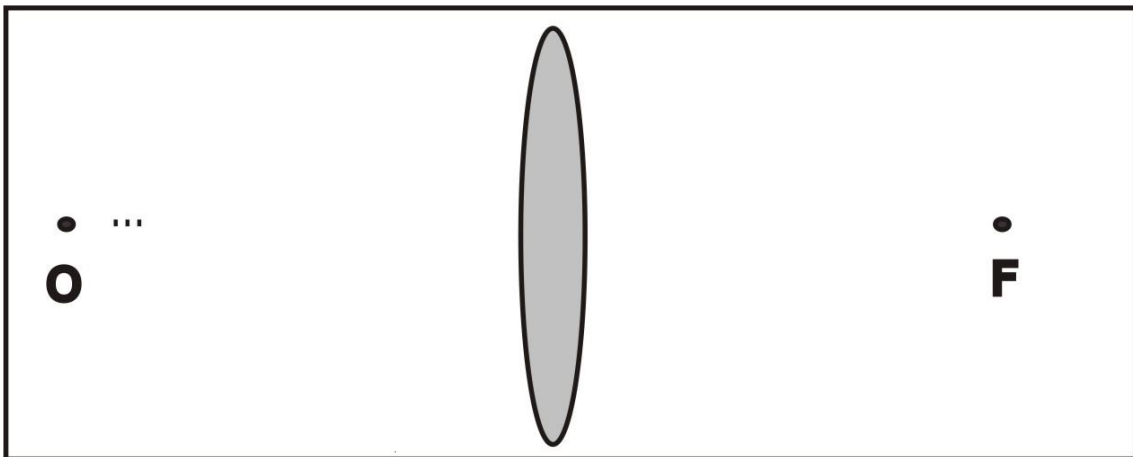
3. Reflexión de la docente.

Creemos que por sí mismos la mayoría de alumnos no será capaz de dibujar los frentes de onda.

4. Interpretación.

1. Metodología y descripción. ¿Qué hicimos?

A.16.2. Cuando un haz de luz procedente de una fuente puntual lejana incide sobre una lente convergente, converge en el foco.



Busco que los alumnos expliquen teniendo en cuenta el modelo ondulatorio de la luz qué le sucede a un haz de luz que procede de un foco muy lejano, cuando incide en una lente fina convergente.

Quiero que los alumnos que realicen un esquema explicativo de la refracción de la luz. Les ayudo recordándoles que la velocidad de la luz en el aire es mayor que la velocidad de la luz en el vidrio.

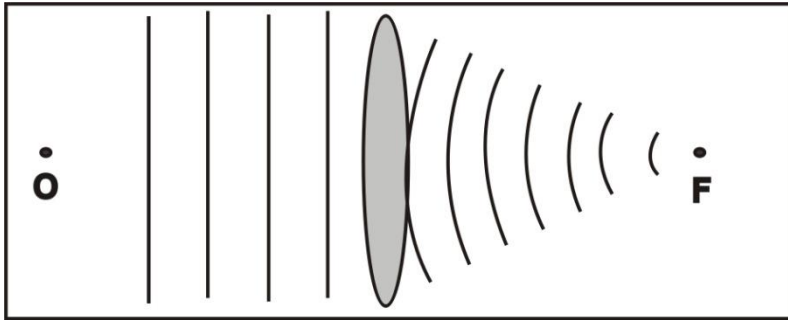
Al principio los alumnos no son capaces de realizar el trazado de los frentes de onda.

Les ayudo explicándoles que la luz tarda más en pasar por el centro de la lente que por la parte exterior, debido a que la velocidad de la luz en el vidrio es menor que en el aire. Les recuerdo que en los medios materiales los electrones absorben y reemiten la luz, proceso

que no es instantáneo. Por supuesto, la rapidez instantánea de la luz entre dos átomos sigue siendo c . Hago hincapié en el hecho de que cuando se habla de la velocidad de la luz en los medios transparentes, se hace referencia a la rapidez promedio.

Ello hace que los frentes de onda converjan en un punto F .

El esquema adecuado de representación sería:



2. Conceptos tratados.

Realizar el trazado gráfico dibujando frentes de onda de un haz de luz procedente de una fuente puntual lejana, cuando incide sobre una lente convergente.

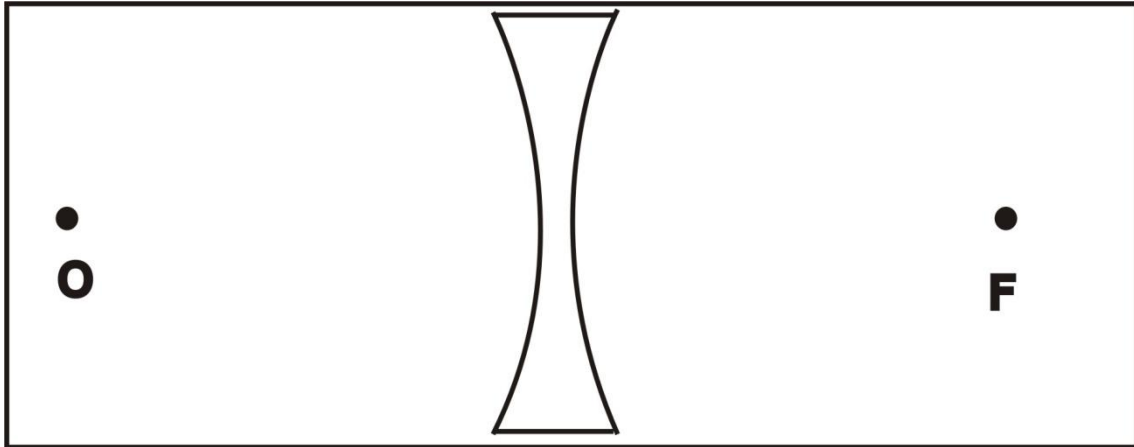
3. Reflexión de la docente

Creo que en un primer momento los alumnos no serán capaces de proponer un trazado gráfico adecuado.

4. Interpretación.

1. Metodología y descripción. ¿Qué hicimos?

A.16.3. Cuando un haz de luz procedente de una fuente puntual lejana incide sobre una lente divergente, emerge después de atravesarla según la dirección del foco virtual.

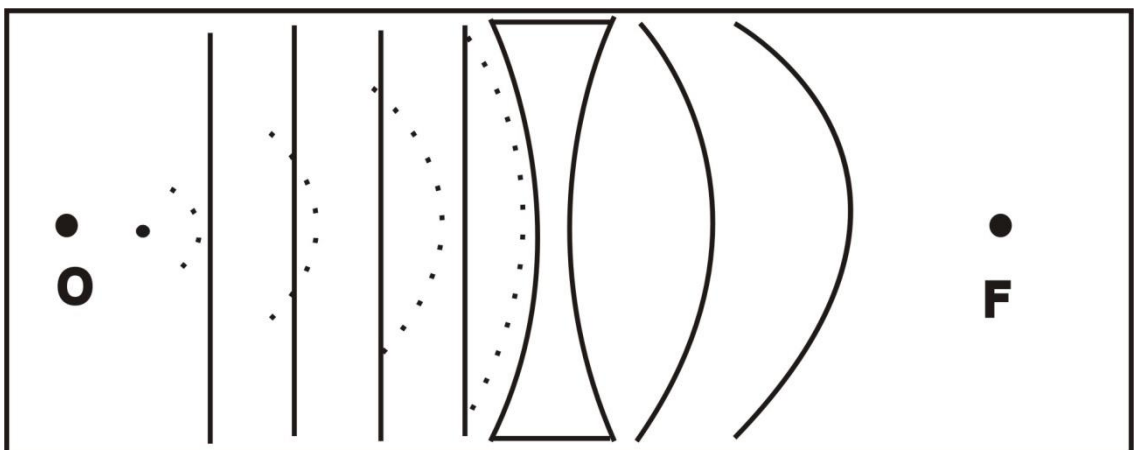


Se pide a los alumnos que realicen el trazado de los frentes de onda para el caso de una lente divergente.

Algunos alumnos (Alumnos 4, 10 y 11) son capaces de intuir, ayudados por el profesor, lo que ocurrirá con una lente divergente, después de haber estudiado lo que le ocurre a una lente convergente.

Les ayudo con el trazado explicando que en las partes exteriores el frente de ondas tarda más en atravesar la lente que por la parte central, dando como resultado una onda esférica que diverge al propagarse más allá de la lente, como si procediese del punto f' de la lente.

Realizo el dibujo correspondiente para asegurarme de que todos los alumnos lo han comprendido:



Parece que después de la explicación, todos los alumnos lo han comprendido. Al menos eso dicen cuando les pregunto.

Creo que los alumnos 5 y 8 están hoy un poco despistadas.

2. Conceptos tratados.

Realizar el trazado gráfico dibujando frentes de onda de un haz de luz procedente de una fuente puntual lejana, cuando incide sobre una lente divergente.

3. Reflexión de la docente

Creemos que algunos alumnos tras haber hecho el correspondiente a la lente convergente, serán capaces de proponer el trazado gráfico.

4. Interpretación.

1. Metodología y descripción. ¿Qué hicimos?

A.16.4. Que un haz de luz procedente de un foco muy lejano, cuando incide en un espejo cóncavo, dentro de la aproximación paraxial, se refleja, concentrándose la luz en el punto focal del espejo.



Primero les explico la reflexión de la luz en un espejo plano inicialmente, teniendo en cuenta que la luz es una onda, de acuerdo al "principio de tiempo mínimo" de Fermat.

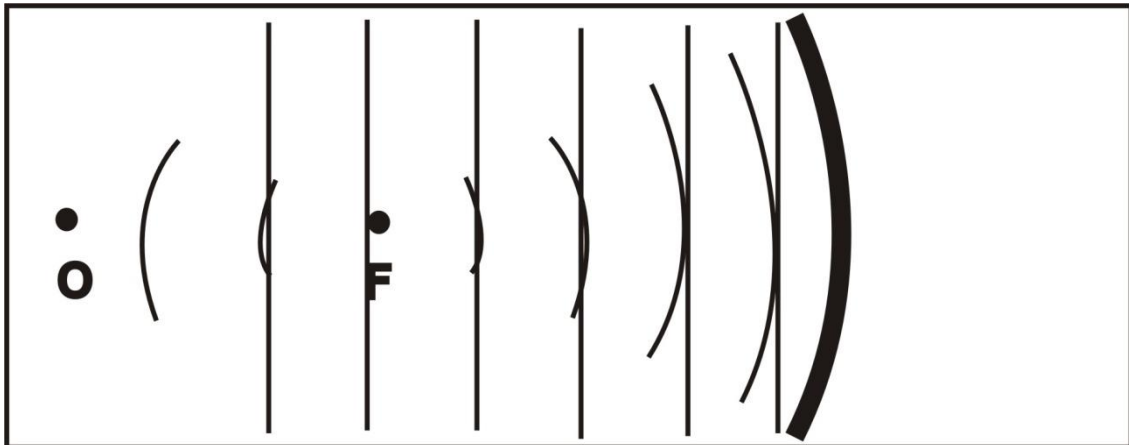
Quiero que los alumnos dibujen frentes de ondas que se reflejan. Al principio no son capaces y necesitan mi ayuda. Les explico como el frente de ondas plano que llega al espejo, es reflejado por éste con el mismo ángulo de incidencia, de acuerdo con el principio de Fermat.

Una vez que han comprendido lo que sucede en espejos planos, pido a los alumnos que expliquen de acuerdo al modelo ondulatorio la reflexión de la luz en un espejo esférico cóncavo.

Algunos alumnos se muestran capaces de hacerlo por sí mismos (Alumnos 3, 4, 10 y 11), otros necesitan algo de ayuda, pero lo consiguen hacer (Alumnos 1, 2, 6, 7, y 9). Otros alumnos (Alumnos 5, 8, 12, 14 y 15) todavía no son capaces de realizar el trazado y se lo explico otra vez.

Dibujó entonces la luz como frentes de onda planos, y que después de la reflexión se convierten en ondas esféricas que convergen en f , para después divergir desde éste.

Les recuerdo que debemos dibujar la luz como frentes de ondas planas (teniendo en cuenta que la fuente emisora puntual está suficientemente lejos) que se propagan por el espacio. Dichos frentes de ondas planas, se convierten después de la reflexión en ondas esféricas que convergen en el punto focal F , para después divergir de éste. Propongo entonces el siguiente dibujo:



2. Conceptos tratados.

Realizar el trazado gráfico dibujando frentes de onda de un haz de luz procedente de una fuente puntual lejana, cuando incide sobre un espejo cóncavo.

3. Reflexión de la docente

Creo que algunos alumnos tras haber hecho el trazado correspondiente a las lentes convergentes y divergentes, serán capaces de proponer el trazado gráfico para el espejo cóncavo. Otros necesitarán mi ayuda.

4. Interpretación.

1. Metodología y descripción. ¿Qué hicimos?

A.16.5. Que un haz de luz procedente de un foco muy lejano, cuando incide en un espejo convexo, dentro de la aproximación paraxial, se refleja, concentrándose la luz en el punto focal imaginario del espejo.

Los alumnos son capaces, ayudados por el profesor de realizar un trazado similar al anterior, en el que los frentes de onda esféricos reflejados, parecen proceder de un punto f' detrás del espejo.

2. Conceptos tratados.

Realizar el trazado gráfico dibujando frentes de onda de un haz de luz procedente de una fuente puntual lejana, cuando incide sobre un espejo convexo.

3. Reflexión de la docente

4. Interpretación.

Jueves 05/03/2020 AULA B18 LABORATORIO DE FÍSICA

08:30-09:25 SESIÓN 21

GRUPO 1: 15 Alumnos

1. Metodología y descripción. ¿Qué hicimos?

A.17. ¿Es la luz “blanca” de color blanco? Razona la respuesta y describe las experiencias que apoyan vuestros argumentos.

Los alumnos no saben responder correctamente esta cuestión, dicen vagamente que sí. El alumno 4 afirma que sí, y que los objetos que vemos negros es porque emiten luz negra.

Les invito a hacer una reflexión sobre el lenguaje que normalmente se utiliza ya que al hablar de luz “blanca” estamos asociando también el color con cada tipo de luz. Les recuerdo que, como hemos estudiado, la luz, aunque haga posible la visión, no es en sí misma una entidad visible y, si el color es una percepción asociada a los objetos que vemos (como la forma o el tamaño), entonces el color no puede ser una propiedad de la luz. Insisto en que la luz no tiene color. Debemos seguir este razonamiento y, aunque no

intentemos cambiar el lenguaje habitual, sí sería conveniente clarificar el significado de estas expresiones.

Les digo que, a partir de ahora, entenderemos por luz “blanca” el tipo de luz que hace que veamos blanca una pantalla iluminada por ella. La pantalla que servirá de testigo para “identificar” el tipo de luz es la pantalla habitual sobre la que se suele hacer proyecciones de diapositivas o de cine, aquella que vemos blanca al estar iluminada con la luz habitual del Sol o de las lámparas de la clase.

Probamos a iluminar una pantalla con diferentes luces, tanto directas, como difundidas por un cuerpo.

Cuando decimos que el tomate es rojo estamos afirmando, entonces, que cuando está iluminado con la luz “blanca” habitual de las lámparas o la luz de día lo percibimos de color rojo, pero sabemos que puede verse de otro color si la luz con que se ilumina fuera otra. Para comprender la visión del color será necesario, pues, profundizar en cómo se obtienen las luces de “colores” a partir de la luz “blanca”.

2. Conceptos tratados.

La luz “blanca” es el tipo de luz que hace que veamos blanca una pantalla iluminada por ella.

3. Reflexión de la docente

Creemos que algunos alumnos creerán que el color es una propiedad de la luz.

4. Interpretación.

En muchas ocasiones interfiere el vocabulario que empleamos en nuestra vida, con el significado físico de ciertos fenómenos, como en este caso el color.

1. Metodología y descripción. ¿Qué hicimos?

A.18. Explica cómo se obtiene la sensación de blanco, de negro, de rojo, de verde, de azul o de amarillo.

En esta actividad buscamos razonamientos que respondan a las cuestiones: ¿cuál es el resultado de la interacción de la luz con la materia? y ¿cuál es la composición de la luz transmitida o difundida?, aunque las respuestas a esta última cuestión deberán ser matizadas posteriormente.

Los alumnos 1, 2, 3, 4, 10 y 11, afirman que vemos blanco un objeto al ser iluminado con luz blanca cuando todos los tipos de luz que la componen son difundidos por el objeto después de incidir la luz en él. Proponen que se verá azul, verde, rojo, cyan o amarillo cuando el objeto difunda ese tipo de luz hasta el ojo del observador y el resto de luces del espectro de la luz blanca sean absorbidas.

Algunos alumnos (Alumnos 1, 4, 6 y 12) irreflexivamente, opinan que el objeto negro difunde luz negra. Entonces los animo a rebatir su idea con la hipótesis de interacción de la luz blanca con la materia ya que en su espectro no existe luz negra.

Les explico que los objetos que llamamos negros son vistos por contraste con el fondo donde se encuentran.

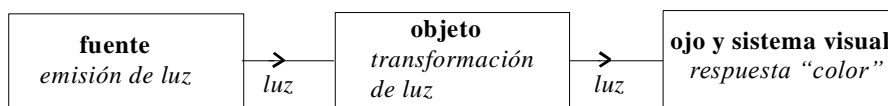
Les pido que recuerden distintas experiencias, en las que el color con el que se ven los objetos cambia en función de la iluminación, como la ropa al ser iluminada con las luces de color de teatros o discotecas.

Como consecuencia, en una primera conclusión, podremos relacionar el color de un objeto con el tipo de luz que difunde.

Comento a los alumnos que para explicar la sensación del color es necesario disponer de, al menos, las siguientes concepciones básicas:

1. El modelo de Kepler en el que se explica la visión a partir de la luz que llega al ojo.
2. La hipótesis de la luz blanca como mezcla de distintos tipos de luz.
3. El conocimiento de que en la retina existen tres tipos de células con respuesta diferente según el tipo de luz incidente. Esta respuesta es la que hace que a cada tipo de luz le corresponda una sensación de color, pero no a la inversa, es decir, que a cada sensación de color no le corresponde un tipo de luz. Así, podemos explicar la visión del color rojo cuando incide este tipo de luz en el ojo, pero no podemos explicar la visión del magenta a partir de un tipo de luz del espectro de la luz blanca.

Les cuento que de acuerdo con Chauvet (1996) la comprensión de la visión del color requiere la comprensión de una cadena de sucesivos cambios en la información que sobre el color transporta la luz desde la fuente luminosa hasta el sistema visual. Esta cadena de cambios la representa según este esquema:



Esta cadena de cambios lleva asociada una serie de razonamientos que es necesario que realicen los alumnos. Estos razonamientos son la respuesta a preguntas tales como:

¿Cuál es la composición de la luz incidente?

¿Cuál es el resultado de la interacción de la luz con la materia?

¿Cuál es la composición de la luz transmitida o difundida?

¿Cuál es la respuesta del sistema visual?

Les digo entonces que nuestra respuesta a estas preguntas, ha de estar basada en la hipótesis de la composición heterogénea de la luz y el conocimiento de la naturaleza ondulatoria de la luz. Les recuerdo que, concebir la luz blanca como una mezcla de diferentes tipos de luz fue la hipótesis fundamental de Newton en su “Óptica” para explicar la dispersión de la luz blanca al atravesar un prisma, frente a las teorías imperantes en esa época que basaban la explicación en supuestas modificaciones de la luz.

Algunos alumnos (Alumnos 6, 12, 14 y 15) todavía asignan el color a una propiedad del material de que está compuesto el objeto.

Les recuerdo entonces las experiencias que hemos realizado en las que la luz difundida por lo objetos ilumina con su mismo tono de color una pantalla blanca enfrentada a ellos, intentando que los alumnos relacionen el color de la pantalla con la luz que los ilumina o, más exactamente, de acuerdo con el modelo de visión elaborado, con alguna característica de la luz que llega a los ojos del observador.

2. Conceptos tratados.

Visión del color. ¿Cuál es el resultado de la interacción de la luz con la materia? y ¿cuál es la composición de la luz transmitida o difundida?

3. Reflexión de la docente

Imagino que la mayoría de los alumnos creerán que vemos blanco un objeto al ser iluminado con luz blanca cuando todos los tipos de luz que la componen son difundidos por el objeto después de incidir la luz en él; que se verá azul, verde, rojo, cyan o amarillo cuando el objeto difunda ese tipo de luz hasta el ojo del observador y absorba el resto de luces del espectro de la luz blanca. Aunque creo que habrá alumnos que asignen el color a una propiedad del material de que está compuesto el objeto, sin contar con la luz que los ilumina.

4. Interpretación.

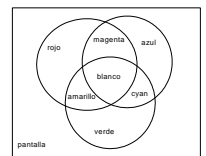
1. Metodología y descripción. ¿Qué hicimos?

A.19. Formula una hipótesis que explique cómo es posible obtener la sensación de algunos colores que no se encuentran en el espectro de la luz blanca como el marrón o el magenta.

Los alumnos no encuentran explicación plausible.

Quiero que los alumnos comprendan que si la luz blanca está formada por los distintos tipos de luz que componen el espectro (del rojo al violeta), y los objetos difunden sólo parte del espectro hasta el ojo, la visión de los colores que no se corresponden con ninguna luz del espectro habrá que buscarla en la fisiología del ojo humano.

Quiero que los alumnos conozcan experiencias con luces de color que sugieren que cuando al ojo llegan varios tipos de luz, es posible ver un color diferente de las luces que le llegan. Una de ellas, conocida como síntesis aditiva del color, fue la base para la elaboración de la teoría de la visión del color aceptada actualmente.



Realizamos entonces la siguiente actividad:

Proyectando sobre una pantalla tres tipos de luces: rojo-anaranjado, verde y azul-violáceo, se puede percibir en las zonas de confluencia colores diferentes a los de las luces emitidas.

Les cuento que Thomas Young, en 1802 propuso la teoría tricromática de la visión del color, según la cual en la retina del ojo humano deberían existir tres tipos de células especializadas del color, cada una de las cuales sería sensible a cada uno de los tipos de luz de esa experiencia.

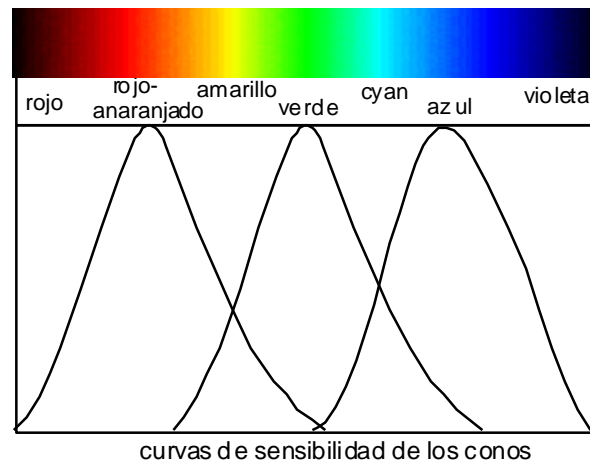
Les comento entonces que se han realizado observaciones microscópicas de la retina y se ha medido la respuesta de estas células (los conos) a cada uno de los tipos de luz que propuso Young. Además, en la retina, existen otras células llamadas bastones que responden de forma distinta según la intensidad luminosa, por lo que distinguimos los objetos más o menos iluminados.

Les explico que, según la teoría tricromática de la visión de los colores, cuando a la retina llega cualquier tipo de luz, la respuesta de los tres tipos de conos, según su diferente sensibilidad espectral, provoca en el cerebro la sensación de los distintos colores que somos capaces de distinguir.

Vemos entonces que la teoría tricromática para la visión de los colores, modifica en parte los razonamientos que habíamos hecho basándonos en la hipótesis de Newton. De forma que, a partir de ahora, podemos decir que vemos un objeto blanco cuando la luz que difunde hasta el ojo activa los tres tipos de conos de la retina. Esta activación se puede realizar, con una mezcla de todos los tipos de luz del espectro, o con otras muchas distribuciones. La más sencilla de las cuales es la observada en el patrón de colores de la síntesis aditiva, en la que se obtiene la sensación de blanco cuando llegan al ojo sólo tres tipos de luz: rojo-anaranjado, verde y azul-violáceo.

Les explico a continuación la siguiente figura en la que se representan las curvas de sensibilidad de cada uno de los conos de la retina. Uno de estos conos presenta un máximo de sensibilidad a un tipo de luz rojo-anaranjado, otro presenta el máximo de sensibilidad a la luz verde y el otro a la luz azul-violácea. Según la teoría tricromática de la visión de los colores, cuando a la retina llega cualquier tipo de luz, la respuesta de los tres tipos de conos, según su diferente sensibilidad espectral, provoca en el cerebro la sensación de los distintos colores que somos capaces de distinguir. Cómo se observa en las curvas de

sensibilidad de cada uno de los conos, la respuesta es máxima para un determinado tipo de luz, pero cada cono también responde para otras luces del espectro próximas.



Es de esperar que los estudiantes interpreten la visión de los colores magentas debido a las “mezclas” de diferentes tipos de luz. Estas mezclas pueden tener para los estudiantes el mismo significado que las de las pinturas o las de lápices de colores que han podido realizar en las clases del área de Plástica. Pueden pensar que estas mezclas se realizan sobre el objeto, en el espacio o en el interior del ojo.

Pero queremos que después de las observaciones que hemos realizado, es de esperar que los estudiantes interpreten la visión de los colores separando el tipo de luz recibida de la sensación de color producida. Recordaremos aquí, si fuera necesario, que la pantalla reemite toda la luz incidente, por lo que, si una zona ha sido iluminada con luz roja y con luz verde, la pantalla reemite luz roja y luz verde y la sensación de amarillo que percibimos se deberá a algún mecanismo del interior del ojo y/o del cerebro. Como consecuencia, la sensación de amarillo puede obtenerse de dos formas: al llegar al ojo luz amarilla o al llegar luces roja y verde. De manera similar se interpretaría la sensación de color cyan y, en el caso del magenta, llamaremos la atención de que este color no se corresponde con ningún tipo de luz del espectro de la luz blanca y se percibe cuando al ojo llega luz azul y luz roja. Los diferentes tonos de magenta, de cyan o de amarillo se pueden apreciar variando la intensidad de la luz de los respectivos focos. Por último, hay que destacar que la sensación de blanco se elabora al llegar al ojo estos tres tipos de luces sin necesidad del resto de los tipos de luz presentes en su espectro.

Les propongo entonces realizar la siguiente experiencia que consiste en hacer que se crucen dos haces de luz de distinto color que se proyectan sobre sendas pantallas. Les

animo a fijarse en que los haces de luz llegan a las respectivas pantallas sin alterar “su color”, con lo que ninguno se “mezcla” o coge alguna propiedad del otro cuando se cruzan.

Estas experiencias que quizás vayan en contra de sus expectativas pueden llevar a los estudiantes a admitir la hipótesis de Young, según la cual el cerebro debe elaborar un conjunto de diferentes sensaciones de color a partir de tres tipos de luces incidentes. La respuesta de los tres tipos de conos en función de la longitud de onda de la luz incidente presenta un máximo para las longitudes de onda 437 nm, 533 nm y 564 nm. Realizamos entonces la síntesis aditiva con filtros de un equipo de óptica para tal fin, puesto que, para la obtención en una pantalla del patrón de colores exacto de la síntesis aditiva, deben utilizarse tres tipos de luz cuyas longitudes de onda se encuentren en un estrecho margen alrededor del máximo de sensibilidad de cada uno de los conos.

2. Conceptos tratados.

Síntesis tricromática. Vemos un objeto blanco cuando la luz que difunde hasta el ojo activa los tres tipos de conos de la retina.

3. Reflexión de la docente

Creo que algunos estudiantes interpretarán la visión de los colores magentas debido a las “mezclas” de diferentes tipos de luz, pensando que estas mezclas se realizan sobre el objeto.

4. Interpretación.

Muchos alumnos confunden la mezcla de luces con la mezcla de colores de plástica que se realizan sobre el objeto.

1. Metodología y descripción. ¿Qué hicimos?

A.20. Es posible obtener la sensación de cualquier color iluminando una pantalla “blanca” con distintas intensidades de luces “primarias” una azul, una verde y una roja. Obtén la mezcla de estos colores al proyectar sobre una pantalla blanca luces de estos tipos y analizad los resultados.

Los alumnos disfrutaron con esta práctica y se muestran asombrados.

Les cuento que como habíamos visto anteriormente, la explicación a estas experiencias se ha encontrado al estudiar la fisiología de la retina. En la retina existen dos tipos de células especializadas: los bastones que dan una respuesta distinta según la intensidad luminosa que reciben y tres tipos de conos que responden de forma distinta según el tipo de luz que reciben. Las diferentes sensaciones de color se obtienen cuando en el cerebro se reciben distintos grados de respuesta de cada tipo de estas células especializadas (conos)

3. Recapitulación y nuevos problemas. Límites de nuestro modelo ondulatorio de la luz.

A.21. ¿Qué te sugiere la siguiente experiencia?: Si mantenemos una brújula fija en un sistema de referencia, respecto al cual se mueve una carga, la brújula detectará un campo magnético, causado por la carga en movimiento respecto de la brújula. Sin embargo, si la brújula se mueve a la misma velocidad que la carga, no detecta ningún campo magnético. Es decir, no actúa ninguna fuerza sobre la brújula.

Les explico que el campo magnético es un efecto relativista, que surge precisamente entre sistemas de referencia que se mueven entre sí. Comentaré que esta idea dará lugar al desarrollo de la teoría de la relatividad de Einstein.

Les recuerdo que en el caso de la fuerza magnética aparece la velocidad de la partícula, ¿pero respecto a qué sistema de referencia? Resulta evidente que desde diferentes sistemas de referencia se medirán diferentes velocidades, y por tanto las fuerzas magnéticas variarán de un sistema a otro. El profesor insistirá en que las leyes del magnetismo no son algo absoluto, como las leyes de la dinámica, sino que dependen del sistema de referencia. Lo que siempre será constante, será la relación entre las intensidades eléctrica y magnética. Es esta relación la que determina la velocidad de propagación de las ondas EM. Por tanto, no es extraño que la velocidad c , juegue un papel invariante en el principio de relatividad especial.

Les recuerdo que, según la teoría clásica mecánica de Newton, las leyes de la física tenían que ser iguales en todos los sistemas de referencia inerciales, es decir aquellos que se movían entre sí con velocidad constante. ¿Ocurre esto en la experiencia anterior?

Quiero que los alumnos comprendan que nuestro modelo ondulatorio tiene límites que no podemos explicar, al igual que sucedía con el modelo geométrico. Quiero que los alumnos comprendan que estamos utilizando modelos que son una figuración de la realidad, y que por tanto tienen límites.

Les cuento que esto no ocurre con otras fuerzas. La Física clásica mantiene la idea de que todas las fuerzas son iguales en sistemas de referencia inerciales. Si queremos una ciencia universal, tendremos que atender a la necesidad de cambiar algunas ideas de la física clásica. En concreto, explicaré a los alumnos que el campo magnético es un efecto relativista, que surge precisamente entre sistemas de referencia que se mueven entre sí. Ello dará pie a la teoría de la relatividad de Albert Einstein.

En el caso de la fuerza magnética, aparece la velocidad de la partícula, pero ¿respecto de que sistema de referencia? Resulta evidente que desde diferentes sistemas se medirán diferentes velocidades, y por tanto las fuerzas magnéticas variarán de un sistema a otro. En consecuencia, las interacciones magnéticas no son algo absoluto, como las leyes de la dinámica, sino que dependen del sistema de referencia.

Es decir, las fuerzas magnéticas son relativas al sistema de referencia. Al cambiar de un sistema de referencia a otro, tanto la fuerza eléctrica como la fuerza magnética cambiarán, pero siempre existirá la misma relación en sus intensidades. Esta relación determina además la velocidad de propagación de las ondas electromagnéticas. Por consiguiente, no es extraño que la velocidad c juegue un papel de la velocidad invariante en el principio de relatividad especial.

Por otra parte, el hecho de que el desdoblamiento del campo electromagnético en campos eléctrico y magnético dependa del sistema de referencia nos advierte de que no debemos conceder una entidad absoluta a las líneas de fuerza de cada campo, aunque sí tienen un carácter absoluto algunas propiedades generales de las mismas. La existencia de cargas eléctrica y la ausencia de cargas magnéticas son propiedades absolutas y, por consiguiente, en cualquier sistema de referencia debe haber líneas de campo eléctrico que

comiencen o terminen en las cargas eléctricas, mientras que las líneas de campo magnético deben cerrarse siempre sobre sí mismas.

Viernes 06/03/2020 AULA B18 LABORATORIO DE FÍSICA

09:25-10:30 SESIÓN 23

GRUPO 1: 15 Alumnos

GRUPO DE DISCUSIÓN

ANEXO IX. GUION GRUPO DISCUSIÓN ALUMNOS 2020

Presentación del proyecto

Estudio de la Universidad de Oviedo en un proyecto de investigación sobre la enseñanza de la óptica en 2º de Bachillerato.

Presentación personal de los intervinientes

Invitación a presentarse brevemente (debe permitir la identificación de las voces para la transcripción fina de los grupos).

Pregunta introductoria

¿La organización del tema ha influenciado mi aprendizaje?

PREGUNTAS CLAVE

1. ¿Había libertad para expresar dudas en todo momento?
2. ¿Tenía sentido lógico lo que íbamos haciendo?
3. ¿Os habéis sentido partícipe de una investigación?
4. ¿Habéis disfrutado proponiendo actividades experimentales para comprobar mi hipótesis?
5. ¿Habéis tenido la sensación de haber aprendido de verdad?
6. ¿Es un tema difícil del que no habéis comprendido nada?
7. ¿Os habéis sentido perdido con esta forma de trabajar?
8. ¿Esta forma de trabajar ha ayudado a que comprendáis el tema?
9. ¿Os gustaría que la enseñanza se organizara así?

ANEXO X. TRANSCRIPCIÓN GRUPO DE DISCUSIÓN ALUMNOS 2020

Buenos días, hoy es viernes 6 de marzo del año 2020, estoy con mis alumnos de 2º de Bachillerato A y B a las 09:25 y hemos terminado nuestro proyecto de investigación sobre la enseñanza de la óptica en 2º de Bachillerato. Llevamos más o menos un mes de trabajo con ello, y ahora voy a pedirlos chicos, que os presentéis, vuestro nombre y edad.

INICIALES	IDENTIFICADOR
I. M.	Alumno 1
S.	Alumno 2
A.F.	Alumno 3
D. S.	Alumno 4
J. S.	Alumno 5
J. P.	Alumno 6
I. P.	Alumno 7
C. A.	Alumno 8
R. D.	Alumno 9
I. J.	Alumno 10
D. S.	Alumno 11
J. Z.	Alumno 12
L. L.	Alumno 13
C. B.	Alumno 14
D. G.	Alumno 15

Bueno fijaos, la pregunta sobre la que va a girar esta pequeña conversación es que si esta organización del tema que hemos trabajado con la óptica, diferente al resto del curso, ha influenciado o no positivamente en vuestro aprendizaje. Ya sabéis que esto no tiene ninguna repercusión en vuestra nota, os pido que respondáis con absoluta franqueza. Por favor, respetemos el turno de palabra.

Os empiezo preguntando si tenáis libertad para expresar vuestras dudas en todo momento.

- *Sí, sí, sí, sí...*- Varios alumnos.
- *No os miraba yo mal ni nada*- Profesora.

- *Risas*- Varios alumnos.

Bien, ¿Os parece que lo que estábamos haciendo tenía algún sentido lógico? - Profesora.

- *Sí, sí, sí, sí...*- Varios alumnos.
- *¿Le encontrabais sentido?* - Profesora.
- *Sí, sí, sí, sí...*- Varios alumnos.
- *¿Sí? Si es que no, decid que no, ¿de verdad eh!* - Profesora.
- *Sí, sí, sí, sí...*- Varios alumnos.
- *¡Que no ye por hacer la pelota, de verdad!* - Alumno 8.

¿Os habéis sentido partícipes de una investigación? - Profesora.

- *Sí, sí*- Alumno 10.
- *Yo creo que sí*- Alumno 2.
- *Por supuesto que sí*- Alumno 11.
- *Por supuesto*- Alumno 4.
- *Sí, porque íbamos proponiendo opciones con cada actividad que hacíamos*- Alumno 10.
- *Sí, porque hacíamos prácticas individuales cuando se nos ocurrían, en cada clase*- Alumno 4.
- *Sí, porque además te preguntábamos cosas y todo servía para la investigación que estábamos haciendo*- Alumno 8.

¿Y os parecía que los experimentos seguían una lógica en vuestra cabeza? - Profesora.

- *Sí, sí, sí, sí...*- Varios alumnos.

¿Os parecía que estabais buscando una respuesta a la pregunta inicial? - Profesora.

- *Es mucho más fácil verlo visualmente en el laboratorio que a partir de fórmulas*- Alumno 4.
- *Mucho mejor así que solo escribiéndolo en la pizarra*- Alumno 10.

Lo que buscamos es que esta forma más experimental os ayuda a encontrar la lógica en lo que estudiamos. ¿Os parece entonces que, aunque no hagamos una investigación científica propiamente dicha, con este modo de trabajar sois más partícipes de una investigación? - Profesora.

- *Sí, sí, sí, sí...*- Varios alumnos.
- *Gracias chicos*- Profesora.

¿Habéis disfrutando proponiendo actividades experimentales para comprobar algunas hipótesis que se os ocurrían como solución a las actividades? - Profesora.

- *Sí, sí, sí, sí...*- Varios alumnos.
- *Sobre todo, con los prismas*- Alumno 4.
- *Es genial poder experimentar*- Alumno 11.

- *Es genial, es como que se aprende más-* Alumno 12.

¿Y os parece que así se aprende más? - Profesora.

- *Sí, sí, se aprende más-* Alumno 2 y Alumno 3.
- *Sí, sí, se aprende más-* Alumno 6 y Alumno 7.

¿Y os parece que se asienta más el conocimiento? - Profesora.

- *Es necesario hacer prácticas, pero no muchas-* Alumno 4.
- *Vale-* Profesora.
- *Las necesarias para entender claramente los conceptos-* Alumno 4.
- *Muy bien Alumno 4-* Profesora.

A ver chicos, ¿Tenéis la sensación de haber aprendido óptica de verdad? - Profesora.

- *Sí, sí, sí, sí...* - Varios alumnos.

Y en comparación con otros bloques, hemos dado el bloque de interacción gravitatoria, de interacción electromagnética, de ondas, y óptica, ¿Tenéis la sensación de manejar mejor este bloque que los demás o no? - Profesora.

- *Sí, sí-* Alumno 3 y Alumno 1.
- *Aprender, aprendes más que en los otros temas, aunque estudiar, tienes que estudiar lo mismo-* Alumno 7.
- *Sí, sí, sí, sí...* - Varios alumnos.
- *Pero aprender aprendes más-* Alumno 1.
- *Bueno, esto también es importante-* Profesora.
- *Aprender más estudiando lo mismo, es mejor solución claro-* Alumno 10.
- *Sí, sí, sí, sí...* - Varios alumnos.
- *No es lo mismo aprender de verdad que estudiar para un examen-* Alumno 4.
-

Claro, claro así debería de ser, que nos dedicásemos más a aprender y menos a preparar la EBAU, pero este curso está súper focalizado al examen de EBAU, pero bueno- Profesora.

¿No os parece que este es un tema difícil del que no habéis aprendido nada después del trabajo de estos días? - Profesora.

- *No, no, no...* - Varios alumnos.
- *Al principio era un poco, ¿Qué está pasando aquí?* - Alumno 11.
- *Al principio no entendíamos nada, no lo podíamos creer-* Alumno 5.
- *Risas...* - Varios alumnos.

Entonces, ¿Os habéis sentido perdidos con esta forma de trabajar? - Profesora.

- *No, no, no...*- Varios alumnos.

Y el librito de actividades de nuestra Unidad Didáctica, ¿Qué os ha parecido? - Profesora.

- *Bien, muy bien*- Todos los alumnos
- *Estaba muy bien.* Alumno 4.
- *No estaría mal añadir un poquito más de teoría*- Alumno 11.
- *Vale*- Profesora.
- *Más teoría*- Varios alumnos.
- *A mí me parece que está bien, incluso quitaría cosas, porque a veces es profundizar demasiado, porque igual hay cosas que no vamos a verlas nunca más en la vida, y como tenemos que centrarnos en la EBAU, aunque para saber está bien, pero más teoría, no, no*- Alumno 8.

Vale, está bien que haya opiniones diversas. Entonces, ¿Creéis que esta forma de trabajar diferente a la de otros bloques os ha ayudado a comprender mejor el tema? - Profesora.

- *Sí, sí, sí.* - Varios alumnos.
- *Electromagnetismo, si lo hubiésemos visto así sería mucho más fácil*- Alumno 4.
- *Sí, la verdad, pero no tenemos material, y aunque lo hemos intentado comprar, no hay presupuesto en el centro, son 1500 euros, pero efectivamente si pudiéramos trabajar el electromagnetismo en el laboratorio, incluso el experimento de Hertz, sería más chulo y aprenderíais más*- Profesora.
- *Si la óptica la hubiésemos dado de otra manera, más teórico, sería mucho más difícil de aprender*- Iván M.
- *De otra forma no lo hubiésemos entendido, pero saber utilizar las cuatro fórmulas que se necesitan para la EBAU, si lo hubiéramos aprendido*- Alumno 8.
- *Lo hubiéramos aprendido para la EBAU, pero no lo comprenderíamos de verdad*- Alumno 1.
- *Eso, eso, no sabríamos ni qué es la luz blanca, ni que se forma con el color azul y rojo*- Alumno 8.
- *De otro modo lo aprendes de memoria, pero no lo sabes de verdad, de haberlo practicado, y así da la sensación de entenderlo*- Alumno 6.
- *Eso, eso*- Varios alumnos.

Y lo mismo con los criterios de signos, las imágenes reales, virtuales, ¿Os parece entonces que lo manejáis con sentido? - Profesora.

- *Sí, sí, sí*- Varios alumnos.
- *Estaría bien practicar en el laboratorio con los planetas*- Profesora.
- *Risas, sí, sí, eso sí que estaría genial*- Varios alumnos.

- *Sí, sí, como para no-* Alumno 11

Otra pregunta chicos, ¿Os gustaría que todo el curso se organizase así? - Profesora.

- *Sí, si-* Todos los alumnos.
- *Sería la leche-* Alumno 11.
- *Sería genial, menos gravitación... risas. Sería más divertido y más fácil de aprender, y se entendería mejor, y daría tiempo a dar otras cosas más difíciles en más profundidad-* Alumno 1.
- *Podríamos poner dinero incluso nosotros para comprar el material-* Alumno 11.
- *Yo creo que en cada bloque puede haber o no puede haber-* Alumno 8.

Se podría hacer electromagnetismo y ondas, ahora que viene física cuántica es más complejo porque los equipos son muy caros- Profesora.

Ahora os pido que de uno en uno diciendo vuestro nombre hagáis un resumen de vuestra sensación de si habéis aprendido más o no, de si os ha gustado más o menos, y si creéis que esto tiene más sentido o no- Profesora.

- *Me da la sensación de que con este método acabas manejando mejor el tema-* Alumno 12.

Vale, y ¿Más o menos esfuerzo que de otra manera? - Profesora.

- *Menos, menos esfuerzo-* Alumno 12.
- *He aprendido muchísimo, yo al principio decía esto es imposible que sea así, y yo flipaba, y ahora lo entiendo todo-* Alumno 11.
- *¿Te gusta?, ¿Te motiva?* - Profesora.
- *Sí, sí, muchísimo, me siento como un niño-* Alumno 11.
- *Me gusta más y aprendes qué pasa con la luz-* Alumno 9.
- *¿Te gusta más así Alumno 9?* - Profesora.
- *Sí, sí-* Alumno 9.
- *¿Alumno 10?* - Profesora.
- *A ver, te llama más la atención, y acabas aprendiendo más, porque tú ya tienes interés por el simple hecho de que puedes toquetear algo-* Alumno 10.
- *Es verdad, y ¿Te gusta más así el tema?* - Profesora.
- *Sí, sí-* Alumno 10.
- *¿Alumno 7?* - Profesora.
- *Ya podían ser todos los temas así, porque en este tema me preguntas y sé las cosas, pero ahora me preguntas de gravitación o de cualquier cosa y no me acuerdo-* Alumno 7.
- *Es verdad, no te acuerdas ya de nada-* Alumno 8.
- *Ya porque este año estáis aprendiendo muchas cosas intensamente-* Profesora.
- *Buena memorizando...*- Varios alumnos.

- Alumno 6, *¿Qué me cuentas?* - Profesora.
- *Como dice Alumno 7, te resulta más fácil, te queda mejor en la cabeza si lo estás viendo, que, si solamente te aprendes una fórmula simplemente porque es así, mucho mejor de este modo-* Alumno 6.
- Alumno 8, *¡venga!* - Profesora.
- *Pues yo opino un cúmulo de cosas de todos, yo creo que está muy bien explicado por parte de ellos, es una muy buena unidad para aprender óptica, porque por ejemplo mis amigas que tuvieron el año pasado física con otro profesor, dijeron que óptica era un tostón, que no les gustaba nada, que era lo peor-* Alumno 8.
- *Ah, qué guay, me alegro, eso me gusta escucharlo, que tanto trabajo valga para algo está guay, gracias-* Profesora.
- Alumno 5, *¡venga!* - Profesora.
- *Yo creo que al hacerlo se te queda todo más fácilmente, que estudiando solamente las fórmulas-* Alumno 5.
- *Vale muy bien, gracias Alumno 5. ¿Alumno 3?* - Profesora.
- *Pues muy bien, porque aprendes mucho más, y además sin poner esfuerzo, por ejemplo, solamente viéndolo ya sabes cómo va a ser, y no tienes ni que memorizar los dibujos-* Alumno 3.
- *Vale gracias, Alumno 3. ¿Alumno 4?* - Profesora.
- *Yo la verdad es que me ha servido, y considero que para algunos temas es necesario hacer más prácticas, porque además de que se hace más rápido, se aprende mejor-* Alumno 4.

¿Y alguna crítica chicos? - Profesora.

- *Mira yo considero que, para el tema de gravitación, como realmente no podemos hacer ninguna práctica que sea muy representativa, pues no es necesario hacerlas, sin embargo, en electromagnetismo, yo eché muchísimo de menos no hacer más prácticas con un equipo adecuado, que no es como mecánica, que tú lo ves día a día, y con óptica a no ser que utilices un equipo como hicimos aquí, tampoco trabajas-* Alumno 4.
- *Gracias, Alumno 4. ¿Alumno 2?* - Profesora.
- *A mí me parece que estaba muy bien porque era muy visual y muy práctico y era muy fácil de aprender-* Alumno 2.
- *Gracias Alumno 2. ¿Alumno 1?* - Profesora.
- *Yo lo mismo que Alumno 2, así lo aprendes más fácil y rápido y no tienes que ponerte en casa porque ya lo entiendes, sin tener que hacer el esfuerzo de pensar cómo es en la vida real-* Alumno 1.

Vale chicos, me parecen muy bien todas vuestras respuestas. Ahora entonces si cogéis unas lentes ya sabéis cuales son convergentes, divergentes, espejos, prismas, luces, colores- Profesora.

- *Incluso sabemos hacer un telescopio por nosotros mismos- Varios alumnos.*
- *Por cierto, el telescopio para el lunes- Profesora.*

Muchas gracias chicos, ha sido un placer trabajar con vosotros- Profesora.

- *Aplausos- Varios alumnos.*

ANEXO XI. GUION GRUPO DE DISCUSIÓN PROFESORES 2021

Presentación del proyecto

Proyecto de investigación sobre la enseñanza de la óptica en 2º de Bachillerato. Universidad de Oviedo.

Presentación personal de los intervinientes

Invitación a presentarse brevemente (debe permitir la identificación de las voces para la transcripción fina de los grupos).

Pregunta introductoria

1. Principales dificultades que encontramos en la enseñanza de la óptica. Principales dificultades que tienen los alumnos.

PREGUNTAS CLAVE

2. ¿Consideráis que los alumnos tienen ideas previas sobre óptica?
3. ¿Consideráis que, si utilizáramos una metodología más práctica, los alumnos aprenderían mejor los conceptos relacionados con la óptica?
4. ¿Realizáis un planteamiento de las leyes de la óptica geométrica de manera empirista, explicando las leyes, o como herramienta necesaria para explicar la óptica como ciencia de la visión?
5. ¿Consideráis que, si utilizáramos una metodología más práctica, se aprenderían mejor los conceptos relacionados con la óptica?
6. ¿Realizáis un planteamiento de las leyes de la óptica geométrica de manera empirista, explicando las leyes, o como herramienta necesaria para explicar la óptica como ciencia de la visión?
7. ¿Qué importancia otorgáis al principio de Huygens-Fresnell?
8. ¿Creéis que merece la pena explicar el principio de Huygens en profundidad con la aportación de Fresnell, gracias a la cual se puede explicar con el modelo ondulatorio la propagación rectilínea de la luz?

9. Metodología, enseñanza tradicional o enseñanza basada en proyectos y resolución de problemas. ¿Qué metodología usáis? ¿Qué os parece que funciona mejor?

ANEXO XII. TRANSCRIPCIÓN GRUPO DE DISCUSIÓN PROFESORES 2021

Martes 01 de junio de 2021

Profesor 1: 33 años de experiencia, jefa de Departamento del IES Dr. Fleming, Oviedo. Física de 2º de bachillerato los últimos 6 años.

Profesor 2: 20 años de docencia, profesora de Física y Química, pertenece al grupo de la enseñanza de la Física, muchos años de docencia de Física de 2º de bachillerato.

Profesor 3: 12 años de experiencia docente, bastantes cursos profesor de Física de 2º de bachillerato.

Profesor 4: 17 años de experiencia, profesor de Física de 2º de bachillerato varios años, este año preparándola de nuevo.

Principales dificultades que encontramos en la enseñanza de la óptica. Principales dificultades que tienen los alumnos.

- *Profesor 1: La principal dificultad es el currículo excesivamente extenso de 2º de bachillerato. Empezamos la óptica a finales de marzo o principio de abril, el curso termina a finales de mayo y nos vemos con muy poco tiempo para dar en profundidad de una forma correcta esta parte de la física. Lucha contra el reloj, hay que terminar el currículo, luego queda la física moderna y hay que darlo todo. La física moderna no es menos importante que la óptica. También coincide en el tiempo cuando los alumnos están más cansados, a final de curso, también hay un cierto grado de nerviosismo en los alumnos, y eso hace que sea difícil dar esta parte y la parte final de la física. La dificultad de esta parte es menor que la de la parte anterior que es el electromagnetismo que es el corazón de este curso. A los alumnos les cuesta muchísimo, muchísimo el electromagnetismo, y se emplea mucho tiempo en ello, y quizás eso va en detrimento de dedicarle el tiempo necesario a la óptica. Las dificultades este año y el anterior a causa de la pandemia se ven agudizadas. Dificultades de base matemáticas importantísimas. Los alumnos tienen carencias matemáticas que hacen que la física no puede avanzar como debería. Por ejemplo, que un alumno desconozca cuando dos ángulos son iguales, la razón por la que dos ángulos son iguales, eso hace que el profesor de física tenga que gastar tiempo para explicar y razonar por qué aquellos ángulos son iguales. Por ejemplo, que desconozcan cosas tan simples como que cuando la luz entra en prisma equilátero, el rayo refractado atraviesa el prisma paralelamente a la base del prisma. Cosas muy simples, que a veces te parece imposible que tengas que pararte a explicar. Y tienes que hacerlo porque si no los alumnos no lo entienden, y no pueden seguir avanzando. Dificultades de operatividad, sacar un seno, o una tangente, cosas de ese tipo. Las construcciones geométricas que implica también la óptica, algunos no tienen esas destrezas, esas habilidades de*

hacer los dibujos bien, y claro, un problema de óptica exige siempre un dibujo, bien hecho. A veces del dibujo se saca tanta información como de la resolución analítica.

- *Profesor 3: Muchas de las dificultades que estaba pensando ya las introdujo el profesor 1, pero un aspecto que crea mucha dificultad, unido al momento en el que se da la óptica en 2º de bachillerato, es que nunca hayan visto nada de óptica hasta 2º de bachillerato. Estaría bien que conociesen algunas de las normas físicas que establece la óptica antes de llegar a segundo de bachillerato, porque partimos de un tema absolutamente nuevo. Ese problema que veía muy claro en casi toda la física de 2º de bachillerato. Damos física desde 2º de la ESO a su manera, pero siempre damos mecánica, y 2º de bachillerato son un montón de temas nuevos, y muchas veces, por lo que decía el profesor 1, por la dinámica de 2º de bachillerato, por el ritmo tan brutal, porque se acaba el curso, vamos como tiros, y a veces como profesores no nos paramos a pensar, a ver que estos chavales jamás vieron lo que es la óptica en sí misma y nosotros aquí en el segundo día, ya estamos tirando rayos. Entonces claro eso también es un problema, no lo tenemos que centrar solo en segundo de bachillerato, ya viene de antes. Luego una frustración absoluta no solo de la óptica sino también de otras partes de la física, lo que dice Aida, a mí eso me parece tremendo, son las matemáticas. A mí me crea, a mí me creaba, hace tres años que no doy la física, una frustración muy grande la cantidad de tiempo que tenía que perder al explicar este tema, la cantidad de tiempo que tenía que perder con la trigonometría, brutal. Eso es muy grave. No quiero pensar lo que tuvo que ser explicar óptica a través de Teams, si me tengo que poner ahí a tirar rayos, muy difícil.*

- *Profesor 1: Totalmente de acuerdo con lo que apuntas Profesor 3, es la primera vez que oyen hablar de estas cuestiones.*

- *Profesor 3: Este año empezamos por física todos los niveles, porque el año pasado, todos los niveles habían dado solamente química, para intentar compensar. El resultado fue fatal por la parte matemática. Te pones en 1º Bachillerato por física y no han dado vectores.... El resultado fue fatal.*

- *Profesor 1: En el Fleming ya hemos llegado a la conclusión de que es un fracaso...*

- *Profesor 3: Una propuesta que podría ayudar en la enseñanza de la óptica, sería plantear los conceptos más básicos en cursos anteriores, sería que cuando llegasen a 2º de bachillerato por lo menos tuviesen unas nociones mínimas del tema.*

- *Profesor 4: Suscribo lo que dicen ellos, de todos modos, pienso que la parte de óptica es la que menos carga matemática tiene. Veo dificultades sobre todo en el tema de ángulos complementarios, ángulos que son iguales, son cosas que les cuesta ver. He visto errores, incluso para trabajar con fracciones. A la mínima calculadora, y con los signos. Plantear el dibujo, esquema ayuda muchísimo. Eso es también una batalla con ellos. Yo lo que he echado en falta como profesor, es quizá una disponibilidad de unos medios decentes experimentales, para hacerlo tangible. Quiero decir, no deja de ser muy abstracto. Yo no soy capaz por la falta de material de laboratorio, o por mis destrezas, de que vean bien el rayo reflejado, refractado, un buen banco de óptica vamos, que haya para todos.*

- *Profesor 1: Tengo que decir que justo después de dar los contenidos teóricos, y hacer los problemas de óptica, a continuación, hago la práctica obligatoria de EBAU que es la determinación del índice de refracción de un vidrio, y la verdad es que ellos me dicen que bien que lo vemos, que claridad. Les sirve para asentar los conocimientos teóricos. A mí me parece una práctica que es muy simple, muy fácil de hacer, pero que, a ellos les sirve muchísimo. Hacen una toma de datos sencillos, y después elaboran esos datos, trabajan con ellos, elaboran la gráfica, pueden obtener de la gráfica el índice de refracción, de una forma analítica, de una forma gráfica, y para ellos fue muy muy clarificador, tengo que decir. Posiblemente no se puedan hacer más prácticas porque el tiempo es el que es, pero todas las prácticas que se puedan hacer que sirvan para afianzar los conocimientos son bienvenidas.*

- *Profesor 2: Estoy de acuerdo con todo lo que dijisteis y, sobre todo, como en óptica casi todo lo tienes que hacer a través del dibujo, la manera de hacer ellos el dibujo. Los que son de dibujo porque son de dibujo y lo quieren hacer a escala, y los que no son de dibujo, porque no son de dibujo y mete miedo, cuando empiezan: mide un milímetro y lo otro, cómo coloco el folio para hacer el dibujo.*

- *Profesor 3: yo cuando daba este tema los primeros días trabajaba con papel milimetrado.*

- *Profesor 2: si al principio sí, pero luego cuando ponían el objeto no sé cuántos milímetros, y la distancia no sé cuántos cm, bueno aquellos dibujos metían miedo. Era una cosa que no veías el objeto, y de repente una longitud que yo decía, este me lo va a sacar de aquí; y el alumno, pero profe que estoy haciéndolo con las medidas, y yo le decía, pero bueno hombre, vamos a ver chaval, hazlo un poco coherente, luego cómo sacas distancias, ángulos y demás.... terrible, terrible.*

Investigador, en relación con lo que me contáis, por un lado, aunque la óptica solamente se ve en 2º de bachillerato, claro, como es algo relacionado con su vida diaria, creéis, percibís que los alumnos tienen ideas previas sobre la óptica.

- *Profesor 1: Ninguna, ninguna.*
- *Profesor 2: No saben distinguir la miopía de la hipermetropía, del astigmatismo, nada.*
- *Profesor 4: En ese sentido yo tengo que decir que sí, me sorprendió cuando en defectos de la visión, si están bastante centrados, sobre todo los que tienen gafas, sabían lo que tenían y les sirvió.*
- *Profesor 2: bueno los que tienen gafas, los que no ya te digo yo que no.*

Investigador: Y sobre la naturaleza de la luz, percibís si tienen alguna creencia previa, alguna idea preconcebida.

- *Profesor 3: Yo es que uno de los problemas que veo no es que tengan falsas ideas preconcebidas, es que no tienen directamente idea.*
- *Profesor 1: Es que es empezar de cero, yo no sé si en 2º ESO hay algo....*
- *Profesor 2: En segundo de la ESO aparece en el currículo,*

- *Profesor 1: Otra cosa es que se dé, pero igual, unas mínimas nociones, experimentos sencillos del vaso de agua con la pajita,*

- *Profesor 2: En 2º de ESO en el currículo está reflexión y refracción y teoría del color.*

- *Profesor 1: Pero bueno, eso en el caso de que se llegue a dar. En mi caso particular, los alumnos no tienen ningún conocimiento previo prácticamente. Cuando les hablas de que la velocidad de la luz es un límite de velocidad, pues es la primera vez que lo oyen. O cuando les dices que la luz se propaga en línea recta, tampoco lo habían escuchado.*

- *Profesor 3: Es la primera vez que ven un límite fuera de la asignatura de matemáticas.*

- *Profesor 1: Exacto sí.*

- *Profesor 3: Claro, pero si el problema muchas veces no es que no den esas cosas en matemáticas, es que no establecen la relación de las herramientas matemáticas con otras disciplinas.*

- *Profesor 2: Claro, no saben aplicar lo que tienen. Por eso el que es bueno en matemáticas, normalmente es muy bueno en física.*

- *Profesor 1: Yo siempre les digo que sean críticos con los resultados. A veces les sale una velocidad de escape de $3 \cdot 10^{15}$. Pero vamos a ver hombre, esto no puede ser, hay que reflexionar. ¿Por qué no? Lo hice con la calculadora, está bien. No hombre no, no te puede salir a la velocidad superior a lo que es el límite hasta ahora conocido de velocidad. Desconocen esa cuestión.*

Investigador. ¿Consideráis que, si utilizáramos una metodología más práctica, se aprenderían mejor los conceptos relacionados con la óptica?

- *Profesor 3: Claramente, pero el problema es que conjugamos dos cosas, todos queremos conseguir el máximo conocimiento en nuestros alumnos, pero, todos nos regimos por un calendario super apretado, entonces, claro, podíamos hacer más experiencias, pero claro, a base de por ejemplo no dar física moderna, que es lo que va después. Podríamos hacer muchísimas más experiencias de óptica, si tuviésemos más horas, claro entonces al final, es que es muy complicado. A mí, aunque me gusta muchísimo el tema de innovación educativa, en 2º de Bachillerato es muy complicado, porque cualquier cosa que vayas a hacer experimentalmente te va a llevar muchísimo tiempo. Es que vas contra el temario.*

- *Profesor 1: Tenemos el corsé de la EBAU*

- *Profesor 2: y la presión.*

- *Profesor 1: Si no tuviésemos el corsé de la EBAU, y la presión, pues podríamos ser más libres, para hacerlo más a nuestro gusto, con nuestras propias ideas, pero no podemos.*

- *Profesor 2, y 3: No, No.*

- *Profesor 4: De todas formas, al margen de la EBAU, la física de 2º Bachillerato, como habéis dicho antes, es totalmente nueva. O sea, quitando el concepto de masa y trabajo, el resto es nuevo, a la energía potencial le das otra vuelta. Es un currículo muy amplio y muy nuevo para ellos.*

- *Profesor 1: Es más les tienes que convencer de que cómo es que decíamos en 4º que la energía potencial era mgh , cómo es que ahora es GMM/R , cómo salió eso. No solamente están luchando con dificultades matemáticas, sino también con conceptos aprendidos en cursos anteriores, que digamos, simples, y que ahora hay que darles una vuelta y una precisión.*

- *Profesor 4: claro.*

- *Profesor 2: exactamente.*

- *Profesor 1: son varias cuestiones las que están ahí en juego, y contra las que luchamos claro.*

- *Profesor 2: Y luego muchas de las fórmulas que utilizamos, que tampoco puedes demostrarles, porque tampoco tienen la base matemática para que se las demuestres, y se las pones como acto de fe.*

- *Profesor 4: Ahí entras ya en el juego de ellos, es que esto es Física, no es casar fórmulas, porque si fuese casar fórmulas, se las dábamos al principio de curso y hala a ver cómo las casáis, pero te ves abocado a entrar en ese juego, mira es que esto no te lo puedo demostrar.*

- *Profesor 2: Exactamente.*

Investigador: Realizáis un planteamiento de las leyes de la óptica geométrica de manera empirista, explicando las leyes, o como herramienta necesaria para explicar la óptica como ciencia de la visión.

Silencio.....

- *Profesor 2: Estoy pensando....*

- *Profesor 3: Esa pregunta fue más de tesis doctoral que de ...*

- *Profesor 4: Sí exactamente....*

- *Profesor 2: Yo es que allí les planto las fórmulas, porque no me voy a poner a hacer las demostraciones que estoy haciendo para la oposición hija mía, si les hago eso están tres días mirando para mí como si fuera un extraterrestre.*

- *Profesor 3: No, pero eso ya lo dijimos antes, tampoco puedes porque partes de estrategias matemáticas que ellos desconocen.*
- *Profesor 2: que no....*
- *Profesor 3: Yo no sé vosotros cómo lo estáis haciendo este año, pero los nuestros están integrando ahora,*

Investigador: Yo me refería al hecho de un planteamiento de las leyes de la óptica para intentar con ellas explicar la visión, como fue el desarrollo histórico, o de forma empirista.

- *Profesor 1: Previamente estudiamos el movimiento ondulatorio, y entonces en el movimiento ondulatorio estudiamos fenómenos que pueden sufrir las ondas, como son la reflexión, la refracción, la difracción, y entonces, partiendo de esa base que ya estudiamos en el movimiento ondulatorio, lo extendemos a la luz.*
- *Profesor 2: Ya, pero yo creo que a lo que el investigador se refiere es a que cojas el principio de Fermat y empieces a hacer cómo la reflexión sale a partir del principio de Fermat, como la refracción sale del principio de Fermat derivando igualando a cero, yo creo que es más bien eso sabes.*
- *Profesor 1: Desde luego eso excede el currículum de 2º de Bachillerato.*
- *Profesor 2: Exactamente, es que excede el currículum. Aunque deberían de saberlo, es mínimos, máximos...*
- *Profesor 1: Ya, pero desde luego no se plantea así. Se plantea como yo os digo, la luz como una onda y que sufre los fenómenos propios de las ondas.*

- *Profesor 3: Volvemos al dilema, currículum-estrategias de enseñanza. Es que claro es que hay veces en que tenemos que casar las dos cosas. Yo estoy con profesor 1, lo otro ya es demasiado. Yo no me lo planteaba.*
- *Profesor 2: Es que al final lo que tenemos que hacer es ponerles la fórmula, pero no demuestras de dónde sale, si a partir del principio de Fermat lo fuiste desarrollando.*
- *Profesor 1: Eso fíjate, que ni en los años en los que las clases duraban 60 min y teníamos unos alumnos más concienciados en el estudio de la física. Ni siquiera en los mejores años eso fue posible.*
- *Profesor 2: Yo creo que eso se da en carrera y poco más.*
- *Profesor 1: Yo desde luego, nunca lo hice en 2º de Bachillerato.*
- *Profesor 3: Yo tampoco.*

Investigador. Y una vez que tenemos claro la naturaleza de la luz, utilizando ondas y frentes de ondas, explicáis la reflexión y la refracción utilizando frentes de ondas.

- *Profesor 1: Sí, eso sí.*
- *Profesor 2: Sí, eso sí.*
- *Profesor 1: Explicamos las leyes de la reflexión y la refracción en base a los frentes de ondas.*
- *Profesor 2: Sí, sí.*
- *Profesor 1: Hacemos la construcción geométrica.*

- *Profesor 3: Sí, sí, en esa parte pongo videos y aplicaciones, más que hacerlo yo.*

Investigador: Importancia del principio de Huygens-Fresnell.

- *Profesor 1: Es fundamental que entiendan el principio de Huygens, si no toda la construcción geométrica de frentes de ondas, está basada en el principio de Huygens. Tienen que tenerlo claro.*
- *Profesor 2: Sí, sí.*
- *Profesor 3: Nuestra explicación se basa en ello, pero yo creo que la aplicación que ellos hacen luego en la ejecución de los ejercicios, no tanto.*
- *Profesor 2: Yo les dibujo la fórmula, y pin pon, pin pon hago los rayos.*
- *Profesor 4: Yo no insisto mucho en el principio de Huygens, yo voy al grano también.*
- *Profesor 1: Bueno, pero cuando introduces la explicación y cuando tratas de explicar esa expresión matemática, lo haces en base a ese principio. Otra cosa es que los alumnos digan, bueno esto no lo estudiamos porque aquí lo importante es la fórmula.*
- *Profesor 2: Eso es, la fórmula, Exacto.*
- *Profesor 1: Pero tú como profesor, tienes la obligación, entiendo yo, de hacer esa explicación. Yo al menos la hago siempre.*
- *Profesor 2: Además la haces en ondas, en fenómenos ondulatorios y todo eso.*

- *Profesor 1: Yo veo una continuidad del tema, el movimiento ondulatorio y a continuación la luz como onda electromagnética.*
- *Profesor 2: Sí, sí, exacto.*

Investigador: ¿Creéis que merece la pena explicar el principio de Huygens en profundidad con la aportación de Fresnell, gracias a la cual se puede explicar con el modelo ondulatorio la propagación rectilínea de la luz?

- *Profesor 1: Excede del currículo.*
- *Profesor 2: No merece la pena, gastas mucho tiempo.*
- *Profesor 3: Yo es que tengo serias dudas de que puedan llegar a alcanzar esos conocimientos.*
- *Profesor 2: A entenderlo.*
- *Profesor 1: Yo que soy de la época de Lavoisier casi, eso se da en 3º de carrera, en la óptica.*

Investigador: no me refiero a la parte matemática, si no a la explicación de Fresnell que evita las retroondas y permite la explicación de la propagación rectilínea de la luz.

- *Profesor 1: No, no, que va.*
- *Profesor 2: No, No. Yo creo que eso les excede a ellos. Ellos van a la fórmula, al dibujo, y todo tiene que ser cuadriculado. Esto, esto y esto.*
- *Profesor 1: A ver, estás preguntando cosas a profesores de a pie, del día a día, yo entiendo que, a lo mejor, teóricamente lo ideal sería lo que tu planteas, pero nosotros como profesores de a pie, que estamos dando esto todos los días, te decimos 1 que excede del currículo, y 2 que consideramos que es algo para darlo en un curso de física superior.*

- *Profesor 3: Para llegar ahí, tendríamos que haber empezado con la óptica mucho antes.*

- *Profesor 2: Exactamente.*

- *Profesor 1: Eso exigiría mucho más tiempo, más dedicación y más madurez del alumnado.*

- *Profesor 2: Ahí, ahí, ahí. Exactamente, estoy de acuerdo contigo profesor 1, en la madurez.*

- *Profesor 1: Es que tú quieres reconducirnos a un punto y a un camino que te gustaría oír, pero no.*

- *Profesor 4: No estás bien.*

- *Profesor 3: Elegiste mal para hacernos cambiar de idea, somos muy cabezones. A mi está empezando a apetezarme un montón volver a dar física.*

- *Profesor 1: Pues os diré desde mi experiencia, que es la asignatura más gratificante que podemos dar en Física y Química.*

- *Profesor 2: Yo estoy de acuerdo contigo.*

- *Profesor 1: No hay ni punto de comparación. Fíjate que a mí siempre me gustó la química de 2º de Bachillerato muchísimo, siempre fui muy fan, di muchísimos años la química. Pero dar física es otra cosa, además, porque los alumnos, aunque quizás no es políticamente correcto, pero es cierto, los alumnos que escogen física tienen una capacidad mental superior. Desde luego es la élite de los alumnos que nos podemos encontrar en este departamento.*

- *Profesor 3: Eso a lo mejor en un instituto grande como el vuestros sí, pero en instis pequeños, si coges el grupo entero, tienen falta de trabajo, no tienen ese sacrificio o trabajo de muchos de los alumnos que yo tengo en química. ¿Por qué? A lo mejor en un instituto como el Fleming no pasa lo mismo, pero aquí (IES Santa Bárbara), los alumnos de física no tienen mucha necesidad de nota, no tenemos muchos alumnos que quieran hacer el doble grado de física y mate, es un perfil de ingeniería. A mí lo que me frustra un poco es que, aunque sean alumnos con buena capacidad, tienen muy poca de trabajo, mucha menos que los alumnos de química.*

- *Profesor 4: Bueno cambia mucho de un centro a otro, las diferentes capacidades existen, eso es verdad.*

- *Profesor 3: El problema que veo en la física en los centros pequeños, en los que me muevo yo, en los que estuve los últimos años, es que tienes muy poco alumnado, y dentro de ese poco alumnado, tienes unos cuantos que cogen la asignatura porque les influye en los estudios posteriores, pero no la cogen con un ansia de cursar la asignatura con gran sacrificio, y entonces claro no es lo mismo. A lo mejor tú tienes un número de alumnos mayor.*

- *Profesor 1: Este año es un poco especial porque solamente tengo un grupo de veintitantos alumnos, pero normalmente tenemos dos e incluso tres grupos de física, que son alumnos que están muy motivados porque quieren hacer el doble grado de matemáticas y física, o porque simplemente quieren hacer física, o porque quieren hacer una ingeniería. Desde luego, son muy capaces, no están tan condicionados como los de la rama sanitaria por la nota, y precisamente por eso, se sienten más libres y tienen mejores rendimientos.*

- *Profesor 3: Hombre está claro, pero yo te estoy hablando del centro en el que estoy yo que es el grande de la cuenca, y tengo 44 alumnos de química, y 12 de física, la proporción es 1/3, menos yo creo.*

- *Profesor 1: Jesús es que tienes que empezar a cogerlos tú, risas...*

Investigador: tienes que cogerla tú.

Investigador: Metodología, enseñanza tradicional o enseñanza basada en proyectos y resolución de problemas. ¿Qué metodología usáis? ¿Qué os parece que funciona mejor?

- *Profesor 1: Voy a dejaros hablar porque si no después me decís que os machaco las ideas, así que... ahora voy a callar.*

- *Profesor 3: Yo la estrategia que sigo en 2º de bachillerato, busca un poco la construcción. Intento dedicar el menor tiempo posible dentro de las limitaciones personales, y dedico mucho tiempo a la parte práctica, permitiendo bastante tiempo de intromisión de ellos en la resolución de los ejercicios. Quizá peque de hacer demasiados ejercicios, pero intento dedicar mucho tiempo a eso, incluso de tiempo del aula, no solo de casa, a que ellos hagan los ejercicios y trabajar sobre los errores. Eso desde el punto de vista metodológico no sé cómo clasificarlo. La estrategia que yo sigo, la seguía mucho en física y también la sigo en química, aunque en química quizás los ejercicios son un poco repetitivos. Yo una clase normal, intento dependiendo de lo que haya que introducir ese día, dedicar como mucho 10 minutos a la explicación y luego planteamos problemas y vemos errores. Yo dedico una parte de la pizarra a ir apuntando los errores. Yo creo que donde más aprenden ellos, es equivocándose. Entonces intento que ellos tengan el peso de la parte práctica de los ejercicios, que participen mucho en clase. Además, cuando daba física tenía muy pocos alumnos, que participen mucho en clase, que propongan ellos estrategias de resolución, que se equivoquen, e ir apuntando esos errores que al final son los que tienen todos. Seguro que esos errores no son muy distintos de los que os encontráis vosotros, porque al final se equivocan casi siempre en las mismas partes, en general y en concreto de óptica.*

- *Profesor 1: Claro, profesor 3, eso puedes hacerlo cuando tienes pocos alumnos. Pero yo, cuando tengo un grupo de 26, es un poco difícil de llevar eso a cabo. Es la dificultad que tenemos en nuestro centro, que nuestros grupos siempre están a tope, cuando tienes 20 casi te consideras afortunado. Para nosotros tener 20 es tener poco, solemos tener entre 25 y 30. Entonces, a ver, una vez más, yo diría que aquí estamos otra vez condicionados por la EBAU, eso es lo que determina la forma, o al menos en mí, la forma de enseñar la óptica y cualquier parte de la física de 2º. Yo normalmente dedico una parte de la clase a una explicación teórica, utilizo el libro de texto digital que proyecto, y sobre esa proyección voy aclarando o explicando los distintos conceptos, haciendo hincapié en las explicaciones que considero que son importantes, y después el tiempo lo dedico a hacer 3 o 4 problemas tipo, y después lo que hago es que todos los ejercicios que propone el libro, o ejercicios EBAU los resuelvo yo, y se los cuelgo en Teams, a su disposición resueltos. Pero yo ya no me preocupo si los resuelven o no. En el caso de que haya dudas o quieran plantearme alguna*

cuestión determinada sobre algún ejercicio concreto, entonces revisamos ese ejercicio. Es la forma de avanzar que tenemos, si no sería imposible.

- *Profesor 4: yo ahora mismo estoy más cerca de la experiencia del profesor 3, y yo la dificultad que veo es que la física la aprenden trabajando ellos, les lanzo los problemas, que se enfrenten a ellos, y a partir de las dificultades y los errores ir avanzando. Pero también depende mucho de cómo trabaje el grupo, al final muchas veces, acabo yo haciendo los problemas. Pero metodología de la época de Lavoisier o de la de Huygens. Innovar no, es que en segundo de bachillerato no.*
- *Profesor 1: Innovación muy poca.*
- *Profesor 4: Yo siempre les intento convencer de que en esa etapa es un tema de trabajo suyo, porque es un tema general de falta de hábito. Y les digo, es que es una cosa vuestra, yo por mucho que os machaque aquí, la labor es cosa vuestra.*
- *Profesor 2: Yo parecido a profesor 1, como siempre los grupos que tengo son muy numerosos, excepto este año, que tengo 3 alumnos de física y 2 de química, son mayores de 25 años, pero yo la dificultad que tenía es que esta gente desde 4º de la ESO no habían visto ni matemáticas, ni física ni química. Se saltaron 1º de bachillerato. Normalmente lo que hago es lo mismo que Aida, trabajamos sobre el libro, o sobre apuntes que yo tenga, hacemos los problemas del libro, y luego suelo hacer una serie de problemas de EBAU de Asturias y de fuera, para trabajar sobre ellos, que les doy un plazo para hacerlos y vamos resolviendo dudas en clase. Pero con ese tiempo tienes que ir a machaque, no puedes parar mucho tampoco.*

Investigador: Condicionado todo por la EBAU y por el poco tiempo que tenemos real para poder explicar.

- *Profesor 4: Y por la amplitud del currículo, ojo.*
- *Profesor 3: Tú imagínate si nos condiciona la EBAU, por lo menos a mí pienso que me condiciona, que yo llevo desde el curso pasado de preparador de oposiciones y no recomiendo a nadie que haga una programación de oposiciones de 2º de bachillerato precisamente por eso. Porque creo que para afrontar una oposición tienes que intentar mostrar lo máximo posible, y en 2º de*

bachillerato si muestras demasiado puedes dar una imagen de que no es real, porque en realidad estás viendo con cuatro profesores de bachillerato, que da para lo que da, y si haces una programación real de 2º de bachillerato, pues queda muy soso para una oposición. Pero es que al final nos regimos por lo que nos regimos, que es el temario brutal que hay, y el curso de 7 meses y la EBAU.

Investigador: Quiero hacer latente la realidad.

- *Profesor 1: Yo quería añadir, aunque no está relacionado con la metodología, en tanto en cuanto que esta asignatura de física y química, no consigamos la separación de las dos materias, en cursos anteriores, no vamos a poder alcanzar los niveles de profundización que queremos, es decir, en otros países, dan física por separado y química por separado desde edad muy temprana.*

- *Profesor 2: Sí, sí.*

- *Profesor 1: Entonces mientras nuestras leyes educativas no contemplen la necesidad de hacer esa separación, no podemos hacer nada. Es decir, no podemos hacer nada, nos encontraremos con una física y química de 1º de bachillerato, en la que, si das química bien, no das física o viceversa, y te encontrarás en 2º de bachillerato con estas deficiencias, alumnos que todavía tienen problemas con las unidades, que confunden Julios con Watios, que no manejan los vectores, que tienen dificultades importantes. Y claro, eso es falta de dedicación a la asignatura y de estudio en profundidad, por separado, porque, aunque son dos asignaturas con una base científica, evidentemente tienen formas diferentes de trabajar.*

- *Profesor 3: Eso sí que daría para varios grupos de discusión.*

- *Profesor 1: Para varias tesis doctorales.*

Investigador: Muchas gracias a todos por compartir vuestra experiencia. Así tengo una visión realista de la enseñanza de la óptica y os lo agradezco mucho. Sé que estáis muy ocupados.

