CAPÍTULO 6

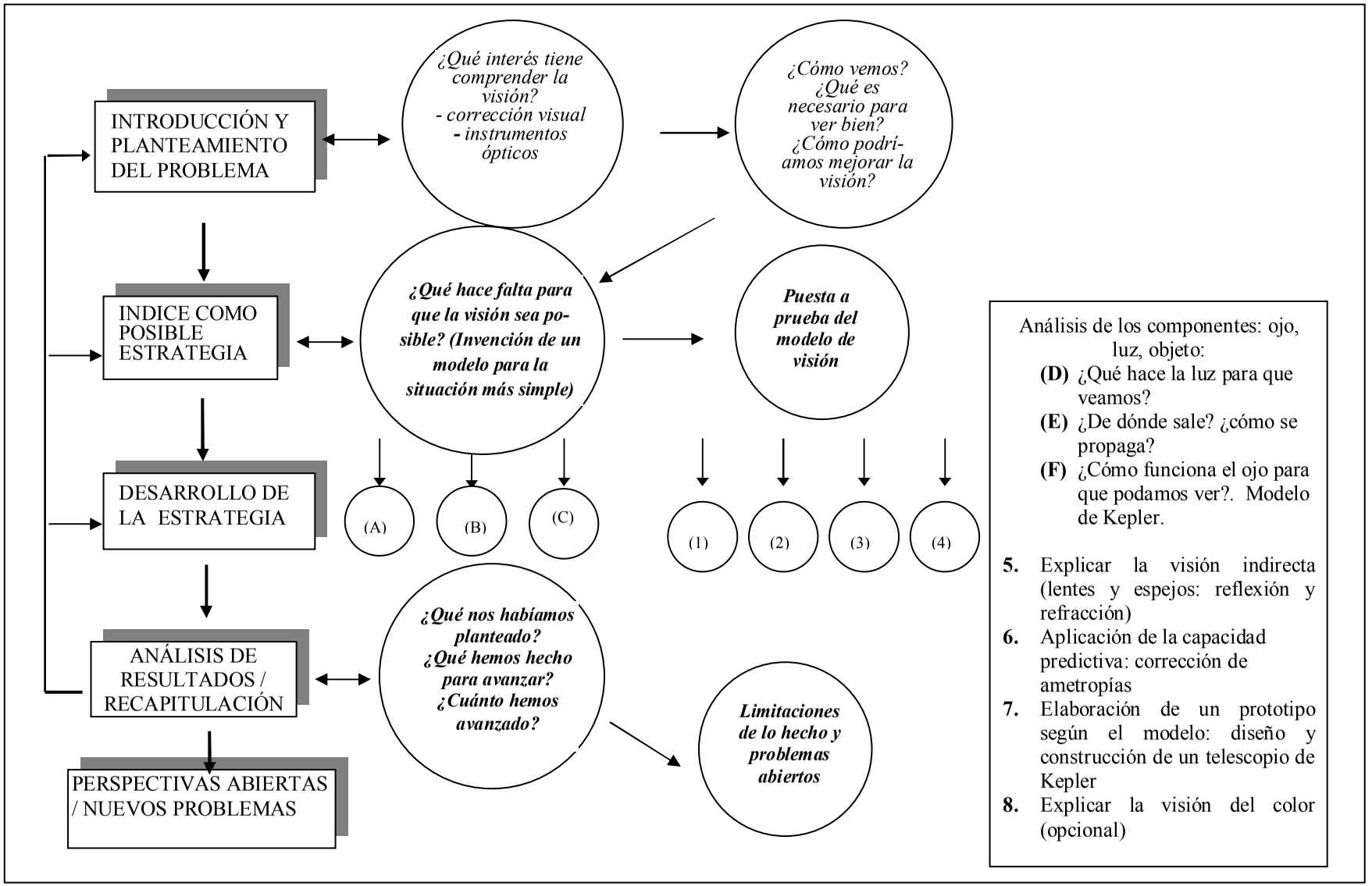
PROPUESTA DE UNA SECUENCIA DE ACTIVIDADES PARA ABORDAR EL PROBLEMA DE "¿CÓMO VEMOS? ¿CÓMO PODEMOS VER MEJOR?" BASADA EN EL ESTUDIO REALIZADO

Con toda la información que hemos obtenido del estudio empírico para probar la relevancia de los obstáculos identificados para la comprensión de cómo vemos, estamos en una posición idónea para elaborar la estructura "fina" del tema, es decir, una secuencia de actividades detallada para abordar el problema ¿cómo vemos?, ¿cómo podemos ver mejor? según la planificación propuesta que esquematizamos gráficamente en la página siguiente y que podrá servir de ayuda para la lectura del programa-guía de actividades que proponemos a continuación.

En la secuencia de actividades que presentamos para alumnos de E.S.O. hay párrafos que son comentarios o entradillas a las actividades de los alumnos y, también, comentarios para profesores en los que se justifica la actividad, se dan recomendaciones sobre la actuación del profesor o se proponen alternativas. En algunas actividades de carácter práctico se adjunta, además, una ficha para ser completada en la realización del trabajo de laboratorio, bien entendido que la ficha que ponemos a disposición de los profesores que sigan este programa-guía nunca deberá evitar el rico trabajo de formulación de hipótesis y de diseño experimental. Otras actividades integradas en este programa-guía forman parte del itinerario de evaluación y serán comentadas oportunamente. De estas últimas, las propuestas como recapitulación serán inicialmente corregidas y devueltas a los alumnos acompañadas de la "recapitulación del profesor", que incluimos, también, en este programa-guía comentado.

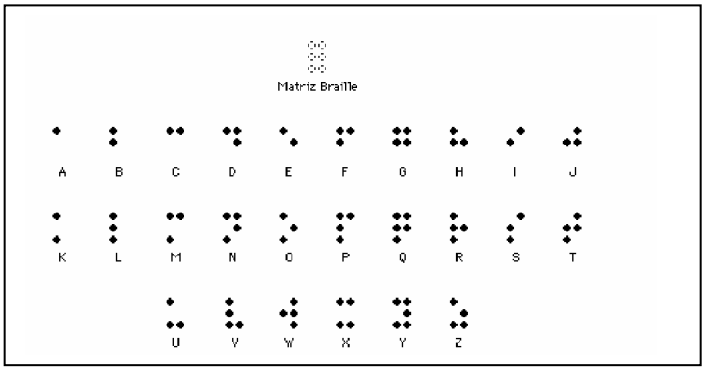
.

Gráfico 3.1: Estructura problematizada del tema: "¿Cómo vemos? ¿cómo podemos ver mejor?"



LUZ Y VISIÓN: ¿CÓMO VEMOS? ¿CÓMO PODEMOS VER MEJOR?

La importancia del problema que abordamos en este tema es fácilmente reconocible ya que a través de la visión obtenemos la mayor parte de la información con que conocemos e interpretamos nuestro entorno. A través de la visión percibimos, de las cosas que vemos, el tamaño, la forma, el color, el brillo, la textura, la proximidad o lejanía, etc.



Podemos valorar, aún más, la trascendencia de la visión en nuestras vidas si imaginamos las limitaciones que tienen las personas ciegas. Estas personas desarrollan otras capacidades para suplir, en parte, dichas limitaciones: aumento de la capacidad de percibir sonidos y sensaciones táctiles, mejora del sentido de la orientación, etc. Para la lectura y escritura utilizan el método Braille, un sistema basado en el reconocimiento por el tacto de agujeros realizados en un papel y un código de puntos para su interpretación.

A.1 *Agujereando la tapa de cartón de tu libreta con un punzón (puede servirte la aguja de un compás) y siguiendo el código Braille, escribe tu nombre y reconócelo tocando con las yemas de los dedos.*

La comprensión de cómo vemos las cosas que nos rodean ha sido uno de los problemas que más ha interesado a los científicos de todas las épocas y los avances producidos han permitido mejorar multitud de deficiencias en la visión y desarrollar aplicaciones tecnológicas que mejoran esta capacidad humana

A.2 *Citad innovaciones y aplicaciones tecnológicas desarrolladas a lo largo de la historia sobre la visión y que hayan supuesto una mejora en la calidad de vida o un avance en el desarrollo científico.*

A la vez, la comprensión de cómo vemos y el desarrollo de las aplicaciones tecnológicas que hemos citado, obligó a los científicos a considerar la luz como "algo" que puede ser objeto de estudio por parte de la Física y a conocer cómo se propaga y cómo se comporta cuando interacciona con los dispositivos ópticos: el ojo, las lentes, los espejos,...

A.3 *Plantead cuestiones que deberíamos abordar para profundizar en la comprensión de cómo vemos, de forma que podamos diseñar una estrategia para su estudio.*

Así pues, el ÍNDICE que a modo de estrategia seguiremos para avanzar en el problema de **¿cómo vemos? ¿cómo podemos ver mejor?** será:

1. ¿Qué es necesario para ver bien los objetos? Elaboración de un modelo que explique la visión directa.
   1.1. ¿Qué relación existe entre el objeto que es visto, la luz y el ojo?
   1.2. ¿Cómo funciona el ojo humano?
2. Puesta a prueba del modelo de visión en situaciones de visión indirecta.
   2.1. ¿Cómo vemos al mirar a un espejo plano?
   2.2. ¿Cómo vemos los objetos sumergidos en líquidos transparentes?
   2.3. ¿Cómo vemos al mirar a través de lentes?
3. Aplicaciones tecnológicas del modelo de visión.
   3.1. ¿Cómo se corrigen las anomalías visuales?
   3.2. ¿Cómo funciona un telescopio? (opcional)
4. Conclusiones y problemas abiertos
5. Actividades complementarias: ¿Cómo explicar el color con que vemos los objetos?

> ***Comentarios A.1, A.2 y A.3:***
> La finalidad de las dos actividades iniciales es mostrar el interés que tiene el estudio del tema. Pensamos que este enfoque es motivador para los estudiantes ya que no puede pasarles inadvertida la dificultad que tiene reconocer su nombre con el tacto. Pero no sólo eso, a la vez puede ser una llamada a la comprensión y solidaridad con las personas con anomalías visuales, no necesariamente severas, pensemos que algunos adolescentes con problemas menores de visión tienen problemas en sus relaciones con los demás y se

sienten muy afectados por ello. Por otro lado, son tantas las aplicaciones tecnológicas para mejorar la visión y corregir las anomalías visuales que pensamos que los estudiantes enmarcarán el estudio que nos ocupa en un campo más grande y de enorme interés práctico. El profesor puede completar las aportaciones de los estudiantes con información sobre:

a) Las gafas, cuyo uso se conoce desde el siglo XIII (sus primeros diseños se conocen por cuadros de retratos de monjes que datan de 1352) y cuya construcción, a partir de pruebas de ensayo y error, es anterior a la comprensión en profundidad de la visión humana.

b) Los avances en la astronomía, a partir de siglo XVI gracias a la invención del telescopio.

c) Los avances en biología y medicina con la invención del microscopio, etc.

Respecto de la A.3, sabemos que a los estudiantes les resulta de enorme dificultad plantear cuestiones en un tema que comienzan y del que tienen conocimientos e ideas confusas. No obstante, el profesor deberá "animar" a los grupos de trabajo a que escriban sus preguntas aunque no parezcan bien formuladas y sólo manifiesten ideas incipientes sobre el tema. Se les puede sugerir: "Si fuéramos un equipo científico que desea comprender cómo vemos, ¿por dónde podríamos empezar?, ¿qué preguntas nos plantearíamos primero? ¿cómo probar nuestras conjeturas?,...". Con posterioridad a sus aportaciones, se puede realizar una puesta en común del trabajo de toda la clase, donde las cuestiones planteadas por los alumnos se pueden agrupar en los siguientes problemas generales que organizan el índice del tema:

- Cuestiones que pueden englobarse en: ¿Qué es necesario para ver bien los objetos? Avanzar en la respuesta a preguntas de este tipo supondrá elaborar un modelo de visión que explique la visión directa de los objetos en el que se clarifique la función y el comportamiento del ojo, del objeto que es visto y de la luz.
- Cuestiones que pueden englobarse en: ¿Cómo vemos al mirar a un espejo, o al mirar a un objeto sumergido en el agua, o al mirar a través de las lentes,..?, es decir, cómo explicamos la visión indirecta. Avanzar en una respuesta a este tipo de preguntas supondrá poner a prueba el modelo de visión directa de los objetos, en una multitud de situaciones de visión.
- Cuestiones que pueden englobarse en: ¿Cómo mejorar la visión? En donde se incluirían preguntas tales cómo ¿qué lentes son necesarias para corregir las anomalías visuales? o ¿cómo funciona una cámara fotográfica o un telescopio?, etc. Avanzar respuestas a estas cuestiones pondría de manifiesto la capacidad tecnológica y de aplicación práctica del modelo teórico de visión elaborado.

- Otras cuestiones relativas a la visión del color: ¿Cómo vemos los colores? Lo que requerirá un refinamiento del modelo de visión y un estudio en profundidad de la luz con que se iluminan los objetos que vemos de distintos colores.

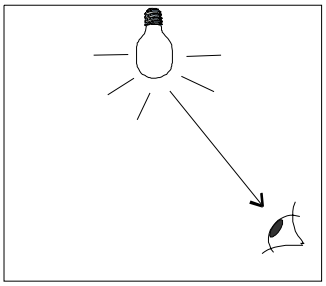
1. ¿QUÉ ES NECESARIO PARA VER BIEN LOS OBJETOS? ELABORACIÓN DE UN MODELO DE VISIÓN DIRECTA.

Como hemos comentado anteriormente comenzaremos con la situación más sencilla: cuando vemos un objeto al mirarlo directamente, clarificando la relación entre el ojo, la luz y el objeto que vemos.

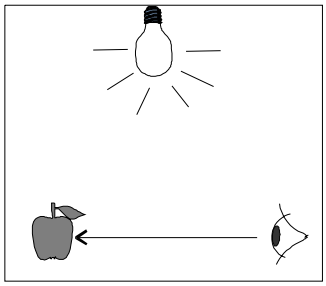
1.1 ¿Qué relación existe entre el objeto que es visto, la luz y el ojo?

A.4 *¿Qué hace falta para que podamos ver un objeto? Explicad la función que realiza el ojo, la luz y el objeto visto.*

A.4*(opcional) Una persona ha realizado las siguientes explicaciones sobre cómo ve al mirar a una bombilla encendida y a una manzana en el interior de una habitación iluminada.*



"Veo la bombilla porque envía luz al ojo"

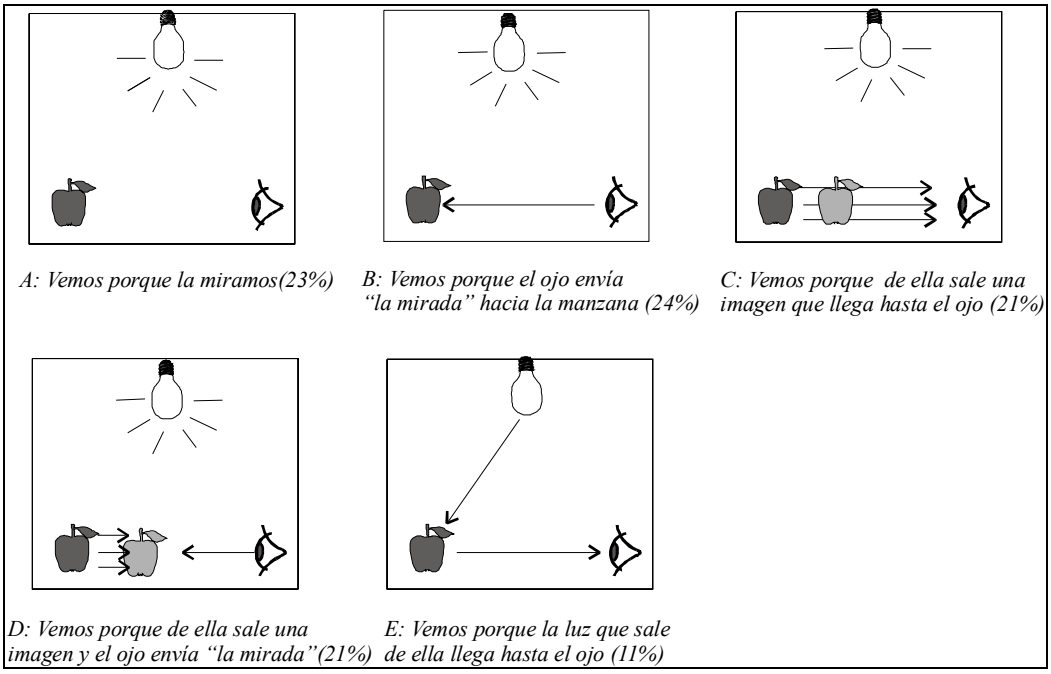


"Veo la manzana porque la miro"

Comentad si estáis de acuerdo con esas explicaciones y proponed, en su caso, otras mejores. Plantead también las dudas que os surjan.

Comentarios A.4: El objetivo de esta actividad es iniciar la reflexión sobre qué es necesario para ver un objeto y la función que realizan el objeto, la luz y el ojo, así como plantear de forma explícita los interrogantes que habrá que resolver para avanzar en el problema planteado de una forma, lógica y razonada. Recordemos que numerosas investigaciones han constatado que, en un elevado porcentaje, los estudiantes de estas edades suelen interpretar la visión como un proceso en el que no es necesario que llegue luz al ojo del observador procedente del objeto. En nuestro propio estudio empírico (véase

tabla 5.5, pag.175) hemos encontrado esquemas como los siguientes en alumnos de ESO antes de la enseñanza:



A: Vemos porque la miramos(23%)

B: Vemos porque el ojo envía "la mirada" hacia la manzana (24%)

C: Vemos porque de ella sale una imagen que llega hasta el ojo (21%)

D: Vemos porque de ella sale una imagen y el ojo envía "la mirada"(21%)

E: Vemos porque la luz que sale de ella llega hasta el ojo (11%)

El análisis y discusión de las explicaciones dadas por los alumnos a cómo vemos los objetos en esta situación, permite plantear en el aula algunos interrogantes:

1. Se admite que al ver la bombilla llega luz al ojo procedente de ella, pero, ¿es necesario que llegue luz al ojo procedente de los objetos que vemos como la manzana? Esta cuestión deberá ser recogida por el profesor aunque sea planteada de forma minoritaria por los alumnos cuando expresan que la luz de la bombilla "rebota" en la manzana.
2. ¿Sale "algo" del ojo al ver los objetos? Y también ¿qué significan las flechas dibujadas en esos esquemas?
3. ¿La bombilla encendida emite luz que se propaga en líneas rectas (rayos) en todas las direcciones? ¿Podemos aceptar esta idea y su representación sin contrastación experimental y sin un análisis en profundidad de su significado?
4. A veces se piensa que la luz de la bombilla "rebota" en la manzana y llega al ojo, pero si es así ¿por qué vemos la manzana y no la bombilla como ocurre en un espejo?, ¿sale una imagen de la manzana con la luz? o también ¿qué hace la luz en el ojo para que veamos bien la manzana?

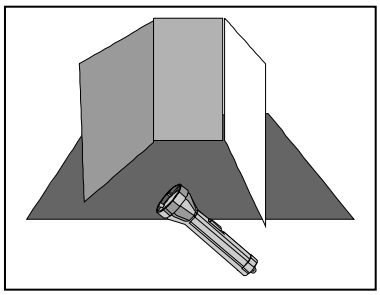
Estos interrogantes permiten cuestionar algunas ideas de "sentido común" sobre el proceso de la visión. Es conveniente resaltar que existen multitud de ejemplos en el proceso de construcción de la ciencia en los que los científicos hacen

explícitas las hipótesis contenidas en sus razonamientos y someten a pruebas rigurosas esas ideas que pueden parecer de "sentido común" (Chalmers, 1984). Debemos, pues, reflexionar y someter a contrastación experimental las consecuencias lógicas que se derivan de estas ideas (National Research Council, 2001).

Ante las dos opciones que plantea la actividad, si los alumnos aceptan que llegue luz al ojo procedente de la bombilla encendida y, sin embargo, se muestran reticentes a aceptar que del objeto iluminado salga luz que llegue al ojo para ser visto, entonces poseen dos explicaciones de la visión según el tipo de objeto que es visto, aspecto éste característico de la epistemología espontánea (Hewson, 1990). El profesor, llegado este punto, debe hacer explícita una de las características esenciales de la epistemología científica como es la búsqueda intencionada de explicaciones unitarias o universales a los fenómenos naturales (Martínez Torregrosa et al., 1993; Chalmers, 1992). Así pues, siguiendo esta intención, que reiteradamente ha producido éxitos en el proceso de construcción de la ciencia, nos llevará a preguntarnos si los objetos que vemos emiten luz, como la bombilla, y por eso los vemos. Con esa intención está prevista la experiencia que se propone realizar en la actividad siguiente. El resto de interrogantes se abordarán en actividades sucesivas.

A.5 *Citad observaciones habituales que puedan sugerir que los objetos que son iluminados emiten, a su vez, luz. Diseñad experiencias sencillas realizables en el aula para contrastar esta hipótesis anotando e interpretando las observaciones.*

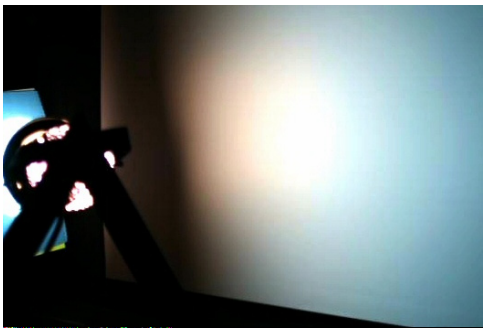
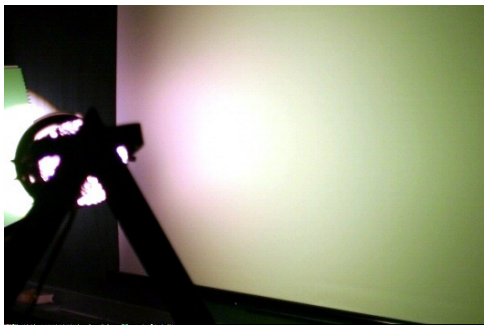
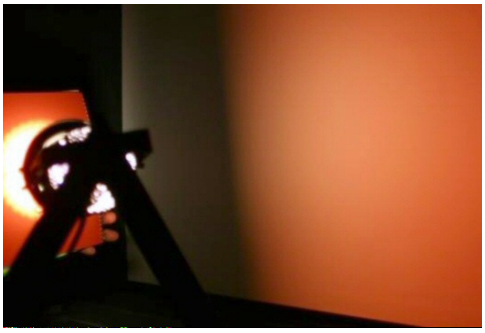
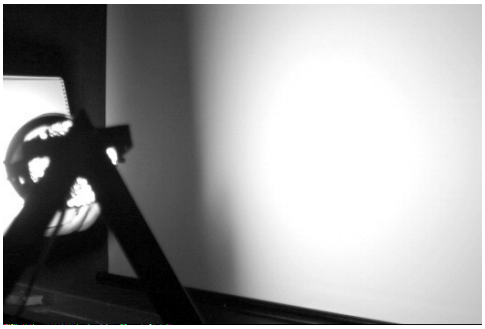
A.6 *Explicad cómo es posible que una habitación se ilumine un día nublado cuando se abre una ventana orientada al norte.*



Comentarios A.5 y A.6: A partir de las propuestas de los alumnos podemos sugerir la realización de la experiencia que se muestra en la figura del margen en la que con una linterna y un grupo de cartulinas, así dispuestas, podemos observar que la cartulina blanca se ilumina con el tono del color de la cartulina que apunta la linterna.

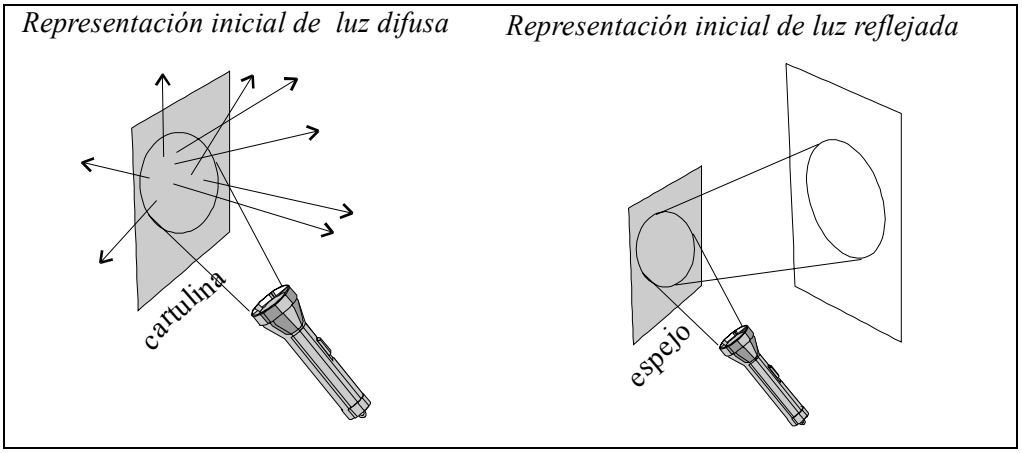
Esta experiencia ha sido descrita por. Viennot y Chauvet (1997) con la intención de "convencer" a los alumnos de que una pantalla iluminada (si no es perfectamente negra) difunde algo de luz. La estrategia propuesta es, pues, permitir a los alumnos observar que la pantalla blanca enfrentada a una roja se colorea con un tono rojo cuando la primera recibe luz "blanca" de la linterna. Si

la cambiamos por otra verde, el color de la segunda se vuelve verde y este efecto se intensifica por la percepción al contraste sucesivo. Cuando se enfrenta a la luz de la linterna una cartulina negra o un objeto negro rugoso, sin brillos, apenas podemos apreciar iluminación en la pantalla, mientras que cuando la cartulina es blanca, la pantalla recibe la iluminación máxima. Fotografías como las siguientes muestran estas experiencias.

Dada la tendencia común a interpretar el área iluminada en la pantalla en términos de un impacto de luz, de la situación cabe esperar que se facilite la introducción de la luz difundida por los objetos iluminados y puedan ser considerados como fuentes secundarias de luz. La observación de la pantalla blanca iluminada por la luz difundida suele ser expresada en el lenguaje de los alumnos con frases como: "*la luz de la linterna ha rebotado en la cartulina de color y ha llegado a la otra*". Debemos llamar la atención, entonces, que el tono de color que observamos no es el de la luz de la linterna, sino el de la cartulina donde impacta su luz, que en el caso de la cartulina negra no recibe ningún tipo de luz y, en el caso de la cartulina blanca, la pantalla recibe máxima iluminación sin modificar el tono de color con que se ve la pantalla. Por otro lado, para diferenciar la luz difundida de la luz reflejada, podemos sustituir la cartulina por un espejo plano y señalar que la luz difundida alcanza a toda la cartulina blanca, con más o menos intensidad, por lo que la luz emitida por los objetos iluminados no tiene una sola dirección de propagación. Sin embargo, la luz reflejada en el espejo sólo ilumina la cartulina blanca en una zona circular perfectamente delimitada de la misma, por lo que la idea que suele ser expresada como "rebote" está más en concordancia con el fenómeno observado en la reflexión

especular y no con el de la reflexión difusa. Estas precisiones serán, por el momento, suficientes para el objetivo perseguido y los esquemas aceptables por ahora serán los de la figura siguiente, aunque los aspectos de la visión del color y de la reflexión especular serán objeto de estudio en actividades posteriores.



La utilización de procesos cognitivos de inducción simple como éstos, puede llevar a la idea errónea o incompleta del proceso de construcción de la ciencia utilizado, pero en la unidad didáctica existe otra variedad de actividades y de situaciones con un estatus epistemológico diferente para compensar este posible efecto negativo. Por otra parte no es posible que los estudiantes puedan alcanzar una concepción completa de la ciencia, desde el punto de vista epistemológico, en un curso de iniciación a la Física como este.

Cabe resaltar que este tipo de razonamiento coincide con el usado por Alhazen (Iizuka, 1983) en contra del fuego visual defendido por algunos filósofos griegos cuando argumentaba *"... el grado de oscuridad y color de un objeto cambia en concordancia con la iluminación, y si los rayos visuales fueran los responsables de la visión, entonces la visión no debería estar influida por condiciones externas".*

A partir del análisis realizado en las actividades anteriores debemos concluir (y los estudiantes anotarán esta conclusión en sus cuadernos de trabajo basándose en las observaciones realizadas) que podemos clasificar los cuerpos que vemos en:

- fuentes luminosas primarias, cuando se produce en ellos mismos la luz que emiten (bombillas, estrellas, hogueras, pantallas de televisión,...), y
- fuentes luminosas secundarias, si la luz sale de ellos sólo si están siendo iluminados.

La A.6 está propuesta con el objetivo de poner a prueba las conclusiones obtenidas en la actividad anterior y considerar a la atmósfera como fuente

luminosa secundaria. El profesor puede plantear otras cuestiones para apreciar el papel difusor de la atmósfera como ¿qué ocurriría si el aula estuviera en la Luna y la luz del Sol no incidiera directamente sobre las ventanas?, o ¿por qué la sombra de los astronautas al andar sobre la Luna es totalmente negra y la de una persona sobre la Tierra no?

Así, pues, no sólo las fuentes primarias emiten luz que llega al ojo para ser vistas sino que también los objetos que vemos (como la manzana de A.4 que debe ser considerada como fuente secundaria de luz). Pero, ¿el ojo emite algo con la mirada para ver los objetos? Esta es la segunda idea de sentido común que debemos probar. Esta hipótesis fue defendida por algunos filósofos de la cultura griega y está apoyada, entre otras razones, en el hecho de que para ver algún objeto, el ojo debe dirigir la mirada hacia él y enfocarlo para ver nítidamente, o sea, realizar un esfuerzo que procede del interior del ojo. Sin embargo, está idea fue contestada por muchos otros pensadores en base a experiencias cotidianas.

A.7 *Si la visión fuera debida a que miramos, simplemente, o a que cuando miramos "algo" sale del ojo ¿por qué no vemos cuando estamos en la oscuridad total?*

A.7.1 *Muchas personas opinan que los ojos de los gatos, de los búhos y de algunos otros animales emiten "algo" y por eso pueden ver en la oscuridad. Y que, incluso, esa es la razón por la que podemos ver sus ojos en las noches oscuras. Argumentad a favor o en contra de estas ideas.*

Comentarios A.7 y A.7.1: En las actividades precedentes hemos realizado experiencias y dado argumentos en contra de uno de los obstáculos más fuertemente arraigados, cual es el no considerar a los objetos que vemos fuentes luminosas (véase tabla 5.2 en la página 170), sin embargo es necesario "convencerles" de que del ojo no sale nada cuando vemos un objeto. Pensemos que la flecha que en algún porcentaje los alumnos dibujan saliendo del ojo, quiere representar el esfuerzo de dirigir la mirada y enfocar el objeto y no tiene el mismo significado que las flechas que han dibujar para representar la luz emitida por las fuentes primarias y secundarias. En estas actividades se tendrá oportunidad de reflexionar sobre qué significa oscuridad **total** y desmontar algunos mitos según los cuales algunos animales que pueden ver en la noche lo hacen sin que llegue luz a sus ojos. El profesor puede, además, proponerles que escriban frases del lenguaje coloquial en las que parezca que algo sale del ojo, Por ejemplo: *"Hay miradas que matan", "iéchale una mirada a esto!".* También hay películas muy conocidas cuyos héroes (Superman) emiten "rayos láser" por los ojos capaces de fundir metales. Incluso es una idea recogida en la mitología

griega: …*"Al capturar a la Medusa, Perseo empleó su escudo como espejo para desviar su mirada cuyo poder dejaba petrificado".*

A partir de este momento, como consecuencia de estas reflexiones, siempre que dibujemos flechas entenderemos con ello que estamos representando la luz emitida por los objetos, y para indicar que el observador está mirando, bastará con que el ojo esté dibujado encarado hacia el objeto.

Otro aspecto importante que es necesario tratar antes de estudiar qué es necesario para ver bien y, con ello, el comportamiento óptico del ojo humano, es el tratamiento geométrico de la luz.

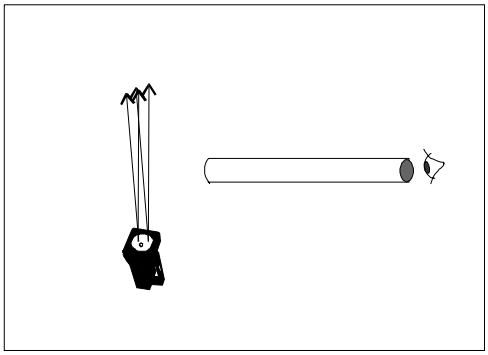
La tercera idea de sentido común sobre la que debemos reflexionar es que las fuentes luminosas (primarias y secundarias), los cuerpos que vemos, emiten luz que se propaga en líneas rectas (rayos) en todas las direcciones. Lo que nos lleva a clarificar el concepto de rayo que usamos y a probar dos consecuencias:

a) si es realmente recto el camino seguido por la luz en el aire (y en el vacío), y
b) si la propagación es instantánea o, por el contrario, la luz es una entidad que viaja a través del espacio con una rapidez limitada.

A.8 *Cuando miramos a través de un tubo, como indica el esquema, hacia la luz que emite una linterna sólo vemos la pared de enfrente. Sin embargo, si en las proximidades de la linterna echamos el humo de un papel recién apagado o un poco de polvo de tiza, podemos ver unas "estelas" de luz.*

Realizad la experiencia y contestad las cuestiones:

- *¿se ve la luz?*
- *¿qué es lo que vemos realmente?*
- *¿qué representan los rayos de luz?*



Comentarios A.8: Dado que la estrategia que hemos diseñado para construir un modelo de visión pasa por la necesidad de disponer de un esquema de representación geométrico e idealizado para luz, las actividades diseñadas intentan huir de aquellas experiencias, como las que aparecen en la mayoría de los libros de texto, de "materialización" del rayo de luz (Chauvet et al., 1999, Hirn y Viennot 2000). Nos estamos refiriendo a aquellas experiencias en las que debido a la difusión de las partículas de polvo se hace "visible" un haz de luz

láser, o aquellas otras en las que el haz de luz de una fuente luminosa se hace pasar por una rendija e ilumina una estrecha porción de la mesa. Recordemos que tenemos evidencias suficientes para pensar que los alumnos creen que la propia luz es visible y que creen que el rayo de luz es la zona donde vemos las partículas de polvo gracias a la difusión de la luz que entra por la rendija de una ventana y no un concepto ideal que únicamente representa los límites del haz de luz emitido por cada fuente puntual. Recientemente se ha considerado que el "rayo materializado" es un detalle "crítico" que es necesario considerar con precaución en la práctica educativa y que los profesores descuidan frecuentemente sus riesgos y efectos adversos (Viennot et al. 2004). Para Saltiel y Kaminsky (cuyas ideas se recogen en el trabajo de Viennot citado anteriormente) la comprensión de la visibilidad del "rayo materializado" implica la aceptación y clarificación de tres premisas que no se pueden obviar:

a) existen partículas difusoras en la región del espacio donde se "visualiza el rayo".
b) las partículas difunden luz hacia atrás en una alargada región del espacio.
c) parte de la luz difundida por las partículas entra en el ojo del observador.

Nuestros resultados son coincidentes con las objeciones mostradas por la investigación de la práctica educativa sobre el "rayo materializado" ya que permiten confirmar que los alumnos piensan que los rayos o la propia luz es visible (véase tabla 5.2 en la página 170).

En A.8, se presenta una experiencia sencilla que se puede realizar en clase con una linterna o un proyector de diapositivas y un folio enrollado formando un tubo por el que mirar. Con ella tratamos de llamar la atención sobre los rayos de luz que dibujamos, los cuales únicamente son líneas ideales de cada una de las direcciones de propagación de la luz, que no son visibles y que lo que vemos al mirar por el tubo son las partículas de polvo que al estar iluminadas envían luz hasta el ojo. No obstante, las dibujamos como líneas rectas, lo que, de acuerdo con la estrategia seguida, deberá ser sometido a contrastación experimental y para eso las actividades siguientes.

A.9 *Citad fenómenos habituales que puedan interpretarse como consecuencia de la propagación rectilínea de la luz.*

Hemos aceptado que las fuentes primarias y secundarias (los objetos iluminados) emiten luz en todas las direcciones y hemos interpretado algunos fenómenos como consecuencia de su propagación rectilínea, pero la forma en como se representa la propagación de la luz puede ser más o menos compleja, por lo que analizaremos en

primer lugar el caso más sencillo, el de una fuente puntual, y, posteriormente, estudiaremos la propagación de la luz en fuentes extensas, de tamaño apreciable.

A.10 *Iluminando un cuerpo opaco con una fuente luminosa puntual podemos ver una sombra sobre una pantalla situada detrás de él, ¿qué forma tendrá la sombra? ¿qué tamaño tendrá? Diseñad y realizad una experiencia para probar vuestras hipótesis.*

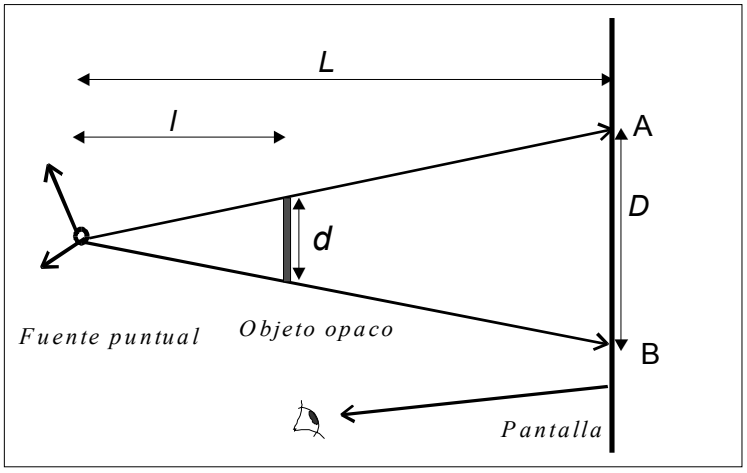
Comentarios A.9 y A.10:

Es posible que los fenómenos citados en A.9 todos sean derivados de experiencias realizadas con linternas, proyectores o punteros de luz láser, en ese caso el profesor deberá informar que estos dispositivos tienen lentes que dirigen la luz en unas direcciones preferenciales, por lo que se recomendará que propongan otros fenómenos realizados con fuentes luminosas, sin dispositivos especiales, cuya luz se propague en todas las direcciones. De entre los fenómenos citados remarcaremos la formación de sombras que será objeto de estudio en la actividad siguiente. También llamamos la atención sobre la necesidad de estudiar el fenómeno de la forma más simple posible, por lo que usaremos en principio fuentes luminosas puntuales con las que iluminar el cuerpo opaco. Recordemos que los estudiantes, en algunas situaciones, pueden predecir, por ejemplo, la forma y el tamaño de la sombra al iluminar un cuerpo opaco sin necesidad de recurrir a trazados geométricos de propagación de la luz (véase tabla 5.3 en la página 171).

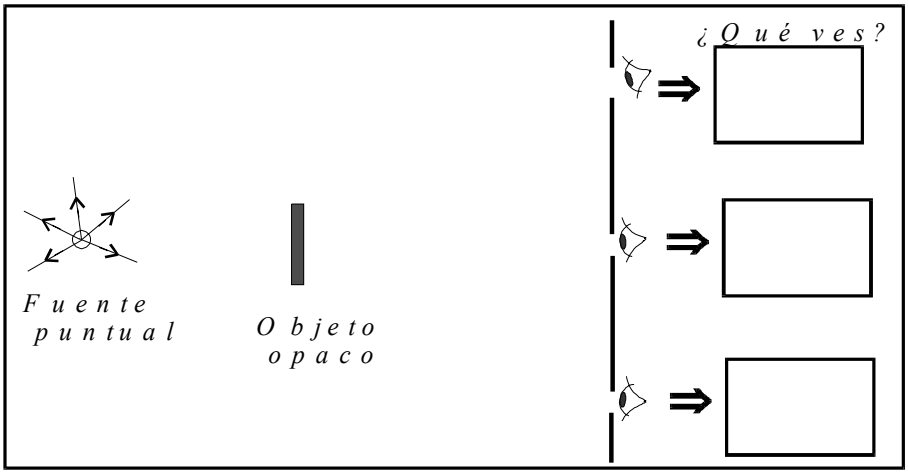
La experiencia que se propone en A.10 se puede hacer oscureciendo el aula y utilizando materiales sencillos. Como fuente puntual podemos utilizar una pequeña lámpara de linterna (3 V, 0,3 A) con un portalámparas estándar conectado a una pila de 4,5 V (conocida como pila de petaca). Los bornes de la pila de petaca permiten hacer la conexión a algunos portalámparas, directamente, sin necesidad de cables ni conexiones engorrosas.

Los alumnos pueden probar que alejando o acercando la pantalla se obtienen tamaños de sombras mayores o menores. La forma de la sombra será la del perfil del objeto que se enfrenta a la fuente luminosa y si la luz se propaga en línea recta podremos verificar que los valores de las distancias del objeto y de la sombra a la fuente y los tamaños de ambos cumplen el teorema de Tales de los triángulos semejantes: $\frac{D}{d}=\frac{L}{l}$. Dado que existen cuatro magnitudes interdependientes a variar, se les puede sugerir que comprueben esa relación dejando el objeto opaco y la fuente luminosa en una posición fija y variando, únicamente, la posición de la pantalla. De esta forma, los valores *d* y *l* son los

mismos en todos los casos y sólo se deberá medir, para cada posición de la pantalla, la anchura de la sombra, *D*, y la distancia de la pantalla a la fuente, *L*.



A.11 *Suponed que en una habitación de paredes negras situamos el ojo en los distintos agujeros señalados de la pantalla, ¿qué se verá desde cada uno de ellos cuando la fuente puntual emita luz?*



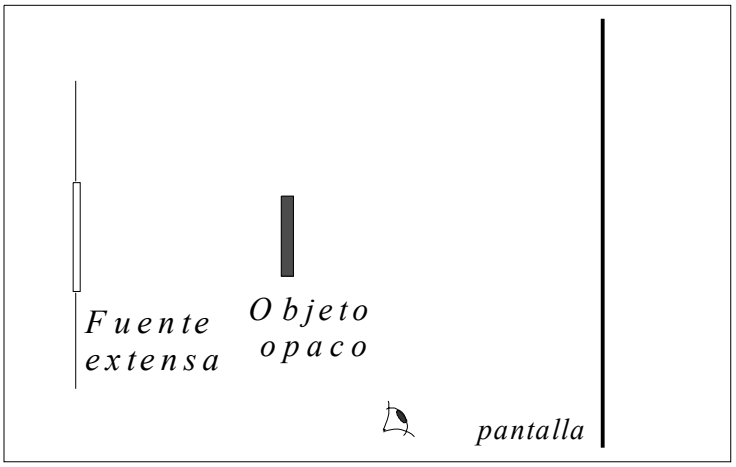
Comentarios A.11: Dada la resistencia de los alumnos a aceptar la visión como un fenómeno que se produce al incidir luz en el ojo procedente de una fuente luminosa (primaria o secundaria) y a pensar que la propia luz se ve, esta actividad permitirá poner a prueba los conocimientos elaborados en las actividades anteriores. Sería conveniente que se contestara individualmente, como si se tratara de una autoevaluación y, después, se discutiera en grupo. Es de esperar que tengamos que corregir, en algunos casos, razonando a partir de las experiencias realizadas, que desde el agujero central no se nada, no se ve el objeto opaco porque desde él no se envía luz hasta el ojo al no estar iluminada la parte enfrentada al observador. Desde los agujeros superior e inferior se ve la fuente pero no el rayo de luz y que, para predecir estos hechos, es necesario realizar trazados de rayos. Una vez corregida la actividad y analizados los

errores, los alumnos pueden tener ocasión de valorar el avance conseguido si realizan encuestas a compañeros de otras clases o a sus familiares, cuyas respuestas suelen coincidir con las de sentido común.

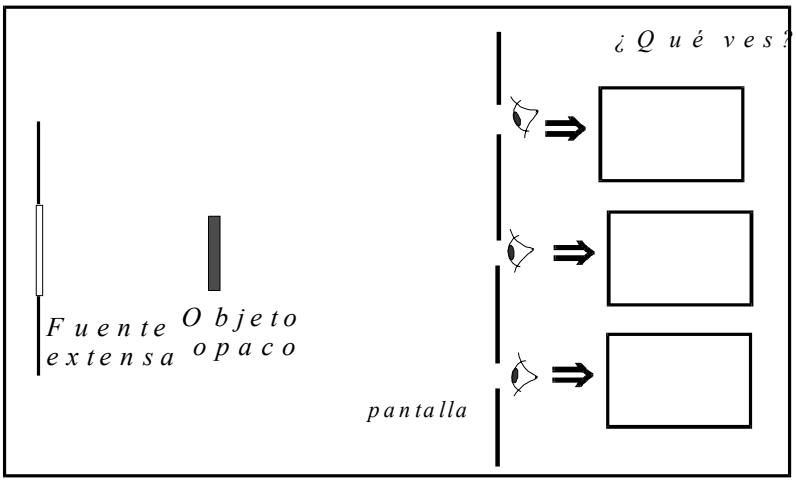
Una vez discutidos estos aspectos claves, podemos aprovechar esta actividad para introducir el concepto de haz divergente de luz. Es de esperar que las representaciones gráficas que hagan los alumnos consistan en un único rayo que pasa por el agujero por el que se ve la fuente. Si, como hemos avanzado, el rayo solo representa una de las direcciones de propagación de la luz, sería conveniente trazar dos rayos que pasen por los límites del agujero, por lo que habremos seleccionado un haz divergente de luz (cónico) que representa, mejor que un único rayo, la luz que entra por él.

Sin embargo, en la mayoría de las ocasiones, las sombras son causadas por fuentes luminosas extensas, de un tamaño apreciable.

A.12 *Si la fuente luminosa fuese un tubo fluorescente situado en la posición que señala el esquema, ¿cómo será la sombra que veremos en la pantalla? Trazad los rayos que creáis necesarios para justificar la respuesta y realizad la experiencia para confirmar las predicciones.*

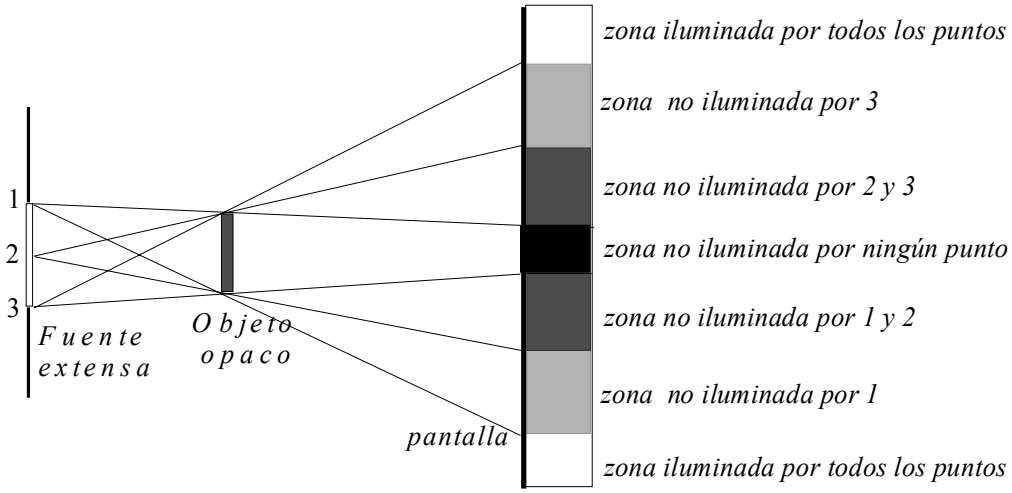


A.13 *Suponed que en una habitación de paredes negras situamos el ojo en los distintos agujeros señalados de la pantalla, ¿qué se verá desde cada uno de ellos cuando la fuente extensa emita luz Realizad trazados gráficos para confirmar las predicciones*

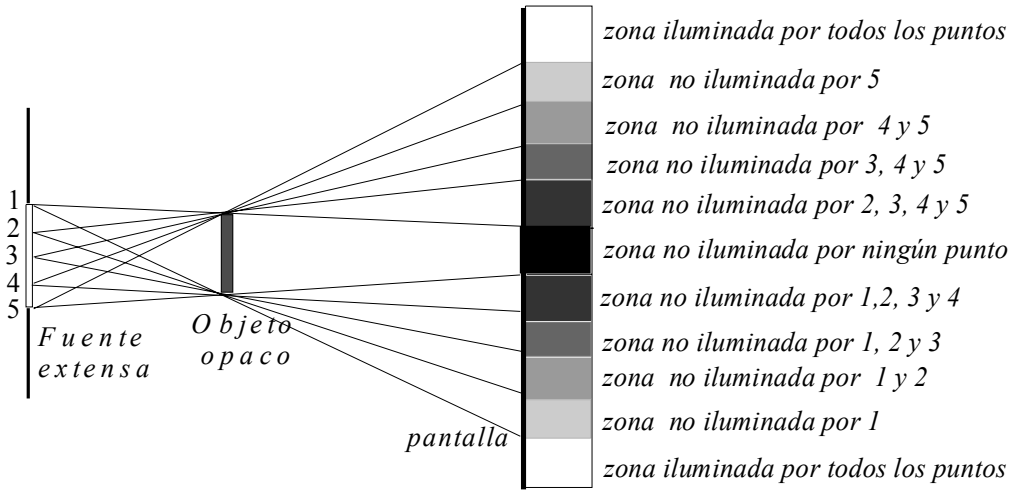


Comentarios A.12 y A.13: Cuando se utilizan fuentes extensas de luz, las predicciones que se hagan y los trazados gráficos necesitan de una hipótesis suplementaria, como es el considerar la fuente como conjuntos de fuentes puntuales. Nuestro estudio empírico ha mostrado que éste es otro obstáculo para la comprensión del modelo de visión de Kepler al que habrá que prestar atención. Si desde varios puntos de la fuente (es conveniente tomar los extremos) se trazan los haces de luz que el objeto opaco impide que lleguen a la pantalla, podremos formar áreas de sombra que se solapan. Para ayudar a comprender la formación de una penumbra continua podemos realizar trazados gráficos suponiendo que la fuente extensa está formada por conjuntos discretos de puntos (3, 5 puntos), e inferir, a partir de ellos, lo que se observará al considerar la fuente extensa como un conjunto ilimitado de puntos.

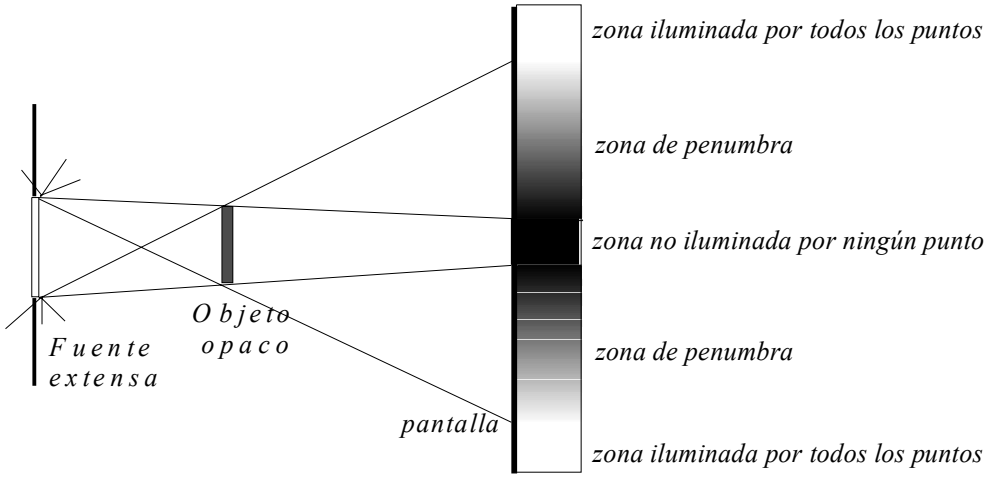
a) fuente extensa formada por tres puntos luminosos



b) fuente extensa formada por cinco puntos luminosos

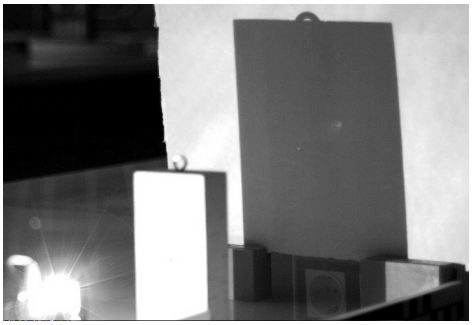


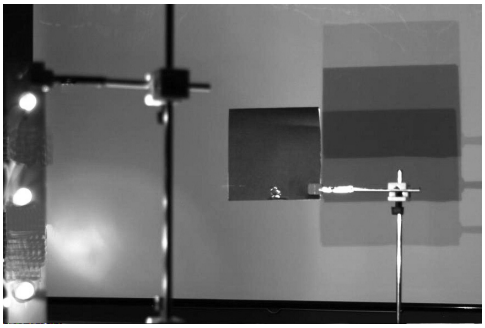
c) fuente extensa considerada como infinitos puntos luminosos

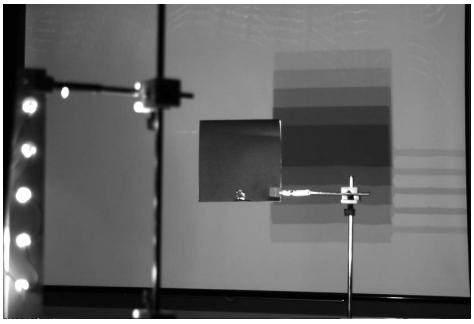


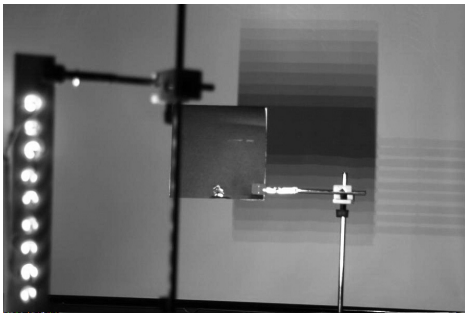
Tal y como está dispuesto el esquema, en la zona de la pantalla donde se solapan todas las áreas de sombra producidas por cada punto, la sombra será total y, en el resto, se formará un área de penumbra con mayor o menor grado de oscuridad ya que en esa área hay zonas que son sombra para algunos puntos de la fuente y no para otros. Para conocer la forma de determinar con precisión la intensidad luminosa de cada zona de la pantalla se puede consultar un reciente trabajo de Mihas y Andreadis (2005). No obstante, para este nivel de enseñanza, el profesor puede realizar experiencias para confirmar las predicciones con diferentes grupos de pequeñas lámparas (pueden usarse las bombillas enlazadas de los adornos navideños) y con tubos fluorescentes de unos 20 cm existentes en el mercado.

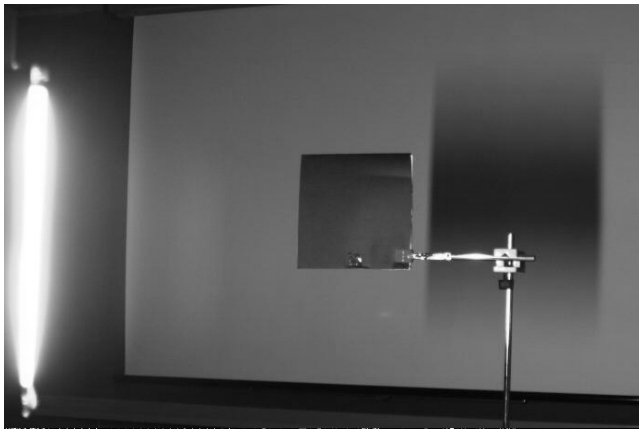
Fotografías de estas experiencias, que confirman las predicciones de los trazados gráficos anteriores, se muestran a continuación.







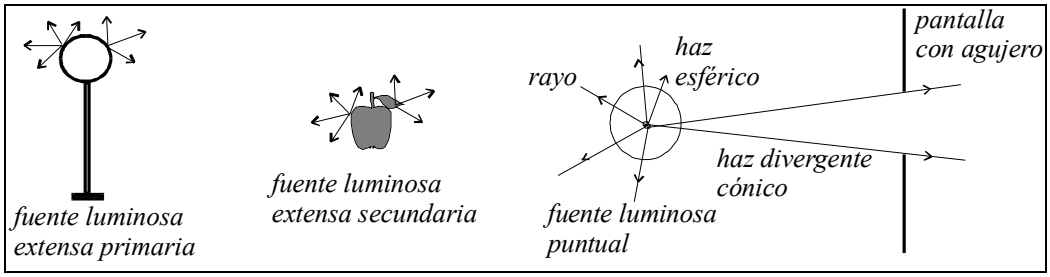




La A.13 tiene la misma intención que la A.11, ahora con una fuente extensa. Hemos probado en el capítulo 5 que los modelos de visión alternativos en este campo son persistentes y sobreviven a la enseñanza habitual, por lo que deberemos proponer actividades donde tengan ocasiones reiteradas de reflexionar sobre esas formas comunes de pensar para acabar aceptando el modelo de visión por recepción de luz en el ojo. Es posible que algunos alumnos todavía cometan errores y piensen que desde los agujeros extremos se ve penumbra en vez de parte de la fuente o que respondan que desde el agujero central se ve sombra, como si de un objeto oscuro se tratara, cuando desde él, con las distancias y tamaños del esquema, no se ve nada ya que no incide en el ojo ningún haz de luz desde ningún punto de la fuente. Sería conveniente, aquí

también, que se respondiera de forma individual y después se pusiera en común en grupo, lo que ayudaría a reflexionar sobre sus errores.

El profesor podrá concluir que, a partir de ahora, la representación de la luz emitida desde cada punto será la que Galili y Hazan (2000a) denominan modelo de "cactus" que aparece en el esquema de abajo. Y que dado que los rayos dibujados no tienen entidad real, ni representan ninguna parte de la luz que emite la fuente, tiene más sentido físico el concepto de **haz de luz**. Una fuente puntual emite un haz esférico de luz, pero la parte que pasa por un orificio en una pantalla será un haz cónico divergente. En este haz cónico divergente de luz, los rayos trazados sólo representan los límites del haz de luz.



Otra consecuencia de la hipótesis de propagación de la luz sobre la que hay que reflexionar es si su propagación es instantánea o la luz es una entidad que viaja a través del espacio con una rapidez muy grande aunque no infinita.

Galileo, en 1638, diseñó una experiencia basada en determinar el tiempo que tarda la luz que emite una hoguera en recorrer la distancia que separa dos colinas alejadas, pero visibles. Ni los relojes existentes en esa época, ni los aparatos de detección, eran tan precisos como para medir el tiempo que invierte la luz en recorrer distancias de ese orden. Cuando no se disponen de estos medios técnicos, es necesario recurrir a fenómenos en los que la luz recorra grandes distancias, como las que separan a los planetas. La primera determinación de la velocidad de la luz en el vacío es debida a Roëmer (1676) y se basó en la observación de los eclipses de los satélites de Júpiter. Actualmente se puede determinar, de forma directa, la velocidad de propagación de la luz en el vacío gracias a un espejo que los astronautas de una las misiones Apolo situaron en la superficie lunar. Se realizan experiencias con luz láser en las que se mide el tiempo que tarda una un pulso de luz emitido desde la Tierra en regresar, después de haberse reflejado en el espejo situado en la Luna. Estas experiencias son

tan precisas que han permitido conocer que, actualmente, la Luna se está alejando de la Tierra a razón de 3'5 cm cada año.

A.14 *Un pulso de luz láser es emitido desde la Tierra en dirección al espejo situado en la superficie lunar, después de 2'56 segundos se detecta en la Tierra la luz reflejada en él. Sabiendo que la distancia de la Tierra a la Luna es de 384.000 km, determinad la velocidad de la luz en el vacío.*

A.15 *En una galaxia tan lejana que no se puede ver a simple vista colapsó una estrella y se formó una supernova que emitió una luz tan intensa que, mil años después, dicha supernova, pudo ser observada desde la Tierra durante varios días ¿dónde se encontraba la luz emitida durante los mil años que tardó en ser vista la supernova desde la Tierra? ¿a qué distancia ocurrió ese fenómeno?*

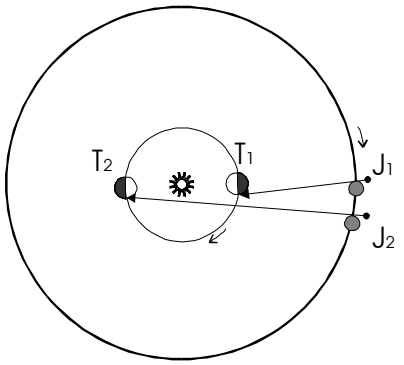
> ***Comentarios A.14 y A.15*****:** Se trata de actividades sencillas para determinar la velocidad de propagación de la luz en el vacío y para reflexionar sobre alguna consecuencia de ese valor tan elevado. En primer lugar, a efectos de la visión de los objetos ordinarios un valor tan elevado de la velocidad de la luz es equivalente a que su propagación sea prácticamente instantánea, pero deja de ser así cuando consideramos la visión de las estrellas o de las galaxias. En segundo lugar, aunque al llegar aquí ya se ha tenido oportunidad de tratar la representación de la luz, es conveniente recordar que la investigación didáctica, y nuestro propio estudio, ha puesto de manifiesto que los alumnos creen que únicamente hay luz en las fuentes o en sus proximidades, por lo que considerar que la luz puede viajar en el espacio cuando la fuente ha desaparecido y, todavía no ha llegado a nosotros para poder ver el fenómeno, introduce una reflexión sobre su consideración de entidad física separada de las fuentes y del ojo y que tiene existencia independiente en el espacio, lo que hace que pueda ser objeto de estudio en sí misma por parte de la Física. Si el profesor lo considera conveniente puede sugerirles la lectura del documento que se acompaña a continuación sobre el método usado por Roëmer para la determinación de la luz. La actividad A.16 es de simple manejo de los trazados de rayos aprendidos y se puede relacionar con aprendizajes básicos de astronomía.

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 15º, se encuentra en J_2.

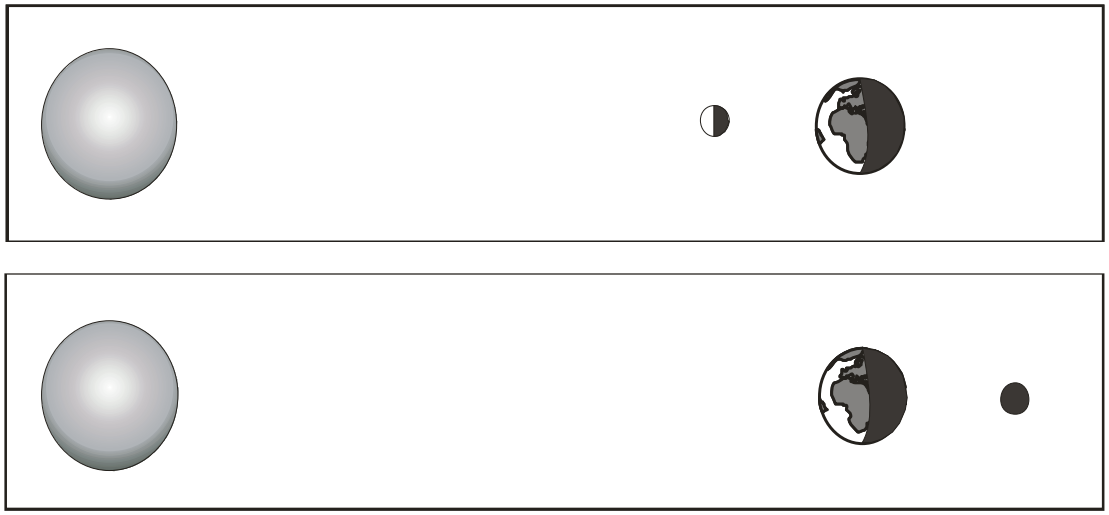


Si el eclipse observado cuando los planetas estaban en T_1 y J_1 se produce el día 1 a las 0 h, el eclipse número 25 de ese satélite se produciría 178'875 días después, cuando los planetas se encuentren en T_2 y J_2 . Sin embargo, desde la Tierra en esta posición, se observa un retraso de 16'6 minutos, 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: $c \cong \frac{3.10^8 \text{km}}{1000 s} = 300.000 \frac{Km}{s}$. 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.

Podemos poner a prueba lo que hemos aprendido en los trazados gráficos anteriores al enfrentarnos con la explicación de fenómenos naturales que, como los eclipses de Sol y de Luna, han llamado poderosamente la atención a las personas de diferentes culturas desde la antigüedad.

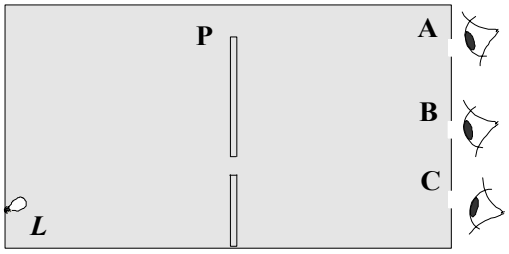
A.16 *En los esquemas siguientes se representan el Sol, la Tierra y la Luna en dos posiciones relativas distintas en el mismo plano. Realizad trazados de rayos para explicar los eclipses de Sol y de Luna, señalando las zonas de la Tierra donde se verán eclipses parciales de Sol.*



Autoevaluación 1. *En una caja de paredes negras se instala una pantalla negra con un orificio y una pequeña lámpara, que podemos considerar puntual, como se indica en el esquema:*

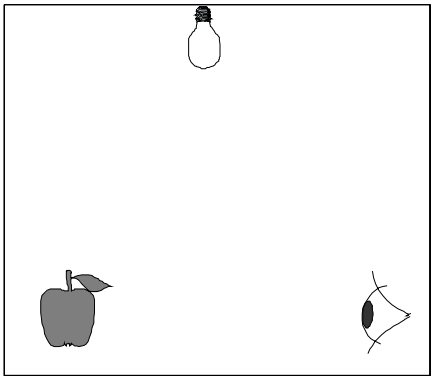
A) ¿Qué podremos ver al mirar por los orificios exteriores antes de conectar la lámpara (L)?

B) Una vez conectada, ¿qué se podrá ver al mirar por los orificios A, B y C hacia el orificio de la pantalla P?



A.17 *A modo de recapitulación de lo tratado hasta aquí, explica cómo vemos un objeto situado en una habitación iluminada. Para ello:*

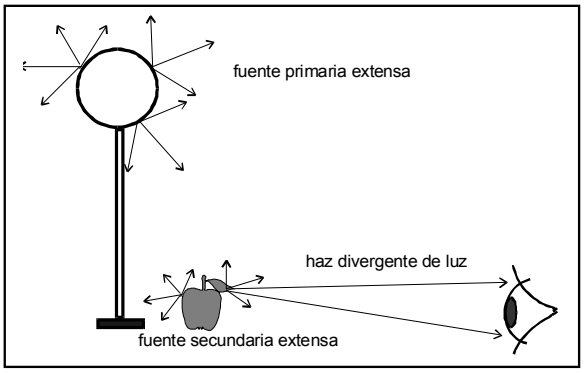
a) Dibuja un diagrama de rayos en el cuadro del margen.
b) Enuncia las hipótesis que hemos formulado para elaborar el modelo de visión referidas a las fuentes luminosas, a la propagación de la luz y al papel del ojo, etc.
c) Da argumentos justificativos que apoyen esas hipótesis.
d) Plantea los nuevos interrogantes que vamos a abordar a continuación.



Comentarios de Autoevaluación y A.17: Estas dos actividades forman parte del sistema de evaluación del tema. En la primera, que es similar a otras dos anteriores, intentamos que los alumnos se hagan conscientes de los aspectos más relevantes del modelo de visión tratado hasta ahora: *La visión se produce por recepción de luz en el ojo procedente de las fuentes luminosas (primarias o secundarias). La luz se propaga en líneas rectas en todas las direcciones desde cada punto de la fuente y no es visible en sí misma.* Una vez completadas las respuestas, cada alumno podrá corregirse si se construye este dispositivo con una simple caja de cartón que habremos preparado tal y como se señala en el esquema.

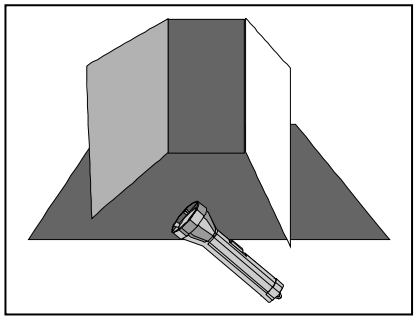
La A.17, de recapitulación de lo tratado hasta aquí, será realizada individualmente por los alumnos y recogida para su corrección. Dado que cada alumno puede tener carencias diferentes, el profesor podrá aportarles "la recapitulación del profesor" donde pueden valorar sus avances, carencias o errores. A continuación acompañamos esta recapitulación.

Recapitulación de las ideas sobre cómo vemos antes de estudiar el ojo humano

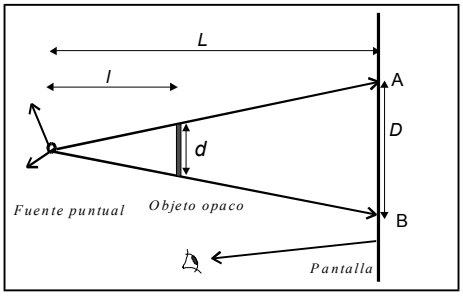


Para explicar cómo vemos un objeto en una habitación iluminada hemos debido suponer que la luz procedente del objeto debe llegar hasta el ojo. El ojo es, pues un receptor de haces divergentes de luz procedentes de cada punto del objeto que es considerado como una fuente luminosa secundaria. El esquema del margen representa cómo vemos un objeto en una habitación iluminada

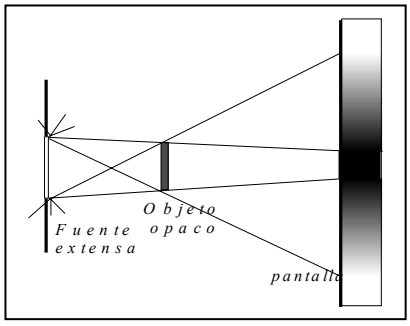
Para elaborar este modelo hemos formulado las siguientes hipótesis:



1. Los objetos iluminados son fuentes secundarias de luz. Esta hipótesis está basada en el hecho de ver con el mismo tono de color una pantalla situada enfrente de una cartulina de color iluminada directamente.
2. Para ver los objetos el ojo no emite nada. Ya que, si así fuera, sería posible ver en la oscuridad total, lo cual sabemos que no ocurre.



3. La luz se propaga en línea recta y en todas las direcciones desde cada fuente puntual. Esta hipótesis esta basada en la observación de las sombras que se forman en una pantalla cuando se interpone un cuerpo opaco entre la fuente y la pantalla. La sombra es de la misma forma del objeto y del tamaño que cabe esperar si la luz se propagara en línea recta.



4. Si el objeto que vemos es extenso podemos considerarlo como un conjunto de fuentes puntuales. Esta hipótesis fue realizada para explicar la formación de sombras y penumbras que se forman en una pantalla cuando se interpone un objeto opaco entre la fuente y una pantalla.

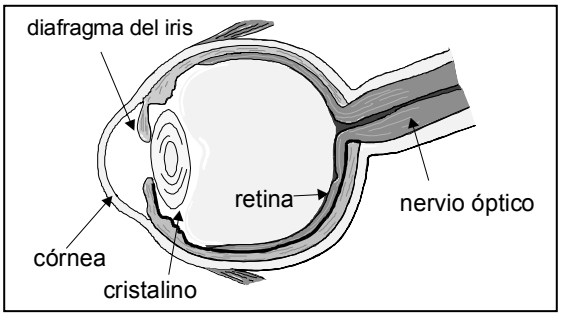
5. Para poder ver, al ojo le llega un haz divergente de luz procedente de cada punto del objeto. El rayo de luz no es nada de la propia luz ya que sólo señala una de las direcciones de propagación de la luz.
6. La luz viaja en el vacío a una velocidad de 300.000 km/s. Esta velocidad es tan grande que, 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.

Para profundizar en el modelo de visión de los objetos y explicar qué es necesario para ver bien, ahora, deberemos plantearnos: ¿qué "hace" la luz en el ojo para poder ver los objetos y distinguir su forma y su tamaño?, es decir, ¿cómo funciona el ojo humano?

1.2 ¿Cómo funciona el ojo humano?

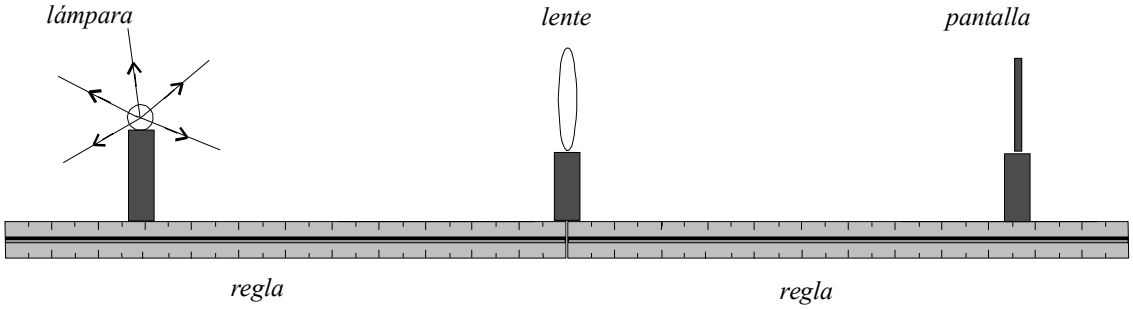
En nuestro objetivo de elaborar un modelo de visión que explique cómo vemos los objetos hemos debido ampliar la consideración de fuentes luminosas a los objetos iluminados. Además, hemos debido idealizar las fuentes luminosas extensas como conjuntos de puntos que emiten luz en todas las direcciones, hemos concebido la luz como una entidad física que viaja en el espacio a 300.000 km/s y que la luz misma no es visible. Para acabar de completar el modelo de visión debemos abordar otras preguntas que ya planteamos en el índice, estas son: ¿qué "hace" el ojo con la luz que le llega para poder ver bien?, o lo que es lo mismo ¿cómo funciona el ojo humano?

A.18 *Idead algún método que permita conocer cómo funciona el ojo humano, es decir, que permita conocer cuál es el comportamiento de la luz en su interior para explicar cómo vemos el tamaño y la forma de los objetos.*



La fisiología del ojo sugiere que un sistema formado por una lente convergente (como el cristalino) y una pantalla (retina) es un buen prototipo para simular un ojo humano, por lo que vamos a explorar el funcionamiento de este sistema óptico.

A.19 *Explorad el comportamiento de la lente convergente suministrada por el profesor. Para ello realizad el montaje siguiente y contestad las cuestiones.*



A) Buscad la posición donde hay que situar la pantalla para que se vea la imagen de la fuente luminosa puntual. Utilizar una lente convergente delgada (f'=100). Escribid resultados y observaciones.

Distancia de la fuente a la lente	**Distancia de la imagen a la lente**
Muy lejos (3 0 4 m)	
100 cm	
50 cm	
20 cm	
10 cm	

B) Observad el movimiento de la imagen cuando la fuente luminosa puntual se mueve hacia la derecha e izquierda y hacia arriba y abajo. Anotad las observaciones.

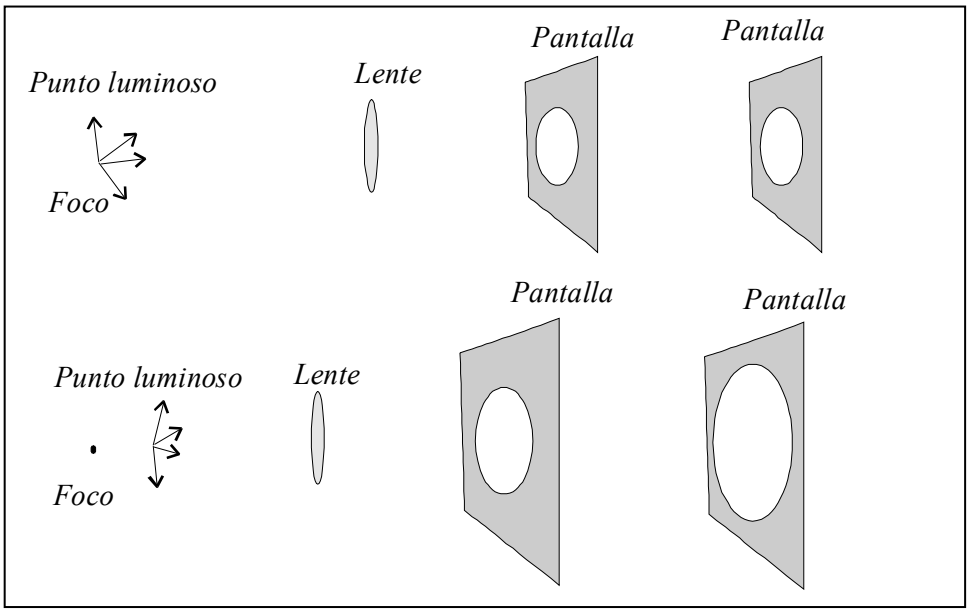
C) Buscad la imagen de un objeto extenso con forma de **P** *y señalar las características de la imagen que vemos en la pantalla.*

D) Dejando la pantalla fija a 10 cm de la lente y cambiando la lente convergente por otra más gruesa (f'=50), encontrad la posición en la que hay que colocar el objeto para ver la imagen nítida sobre la pantalla.

Comentarios A.18 y A.19: Al estudiar la fisiología del ojo se pretende encontrar dos elementos ópticos con los cuales modelizar el funcionamiento del ojo: una lente convergente de curvatura variable (el cristalino) y una pantalla (la retina). Con estos dos elementos se puede elaborar un modelo de ojo humano con el que poder estudiar su comportamiento y, aunque es bien sabido que el elemento con más poder refractivo es la córnea, esta simplificación es una buena aproximación para el nivel de enseñanza al que está dirigido. El profesor puede describir los componentes del ojo humano a partir de láminas, maquetas existentes en los laboratorios de Biología de los centros de enseñanza o diseccionando un ojo de vaca o de cordero. Este último método permite aislar el cristalino y reconocer que su comportamiento se asemeja al de una lupa. Una vez modelizado el ojo humano como un sistema óptico formado por una lente convergente y una pantalla, la

A.19, pretende familiarizar a los estudiantes con este sistema y reconocer observacionalmente la imagen óptica de un objeto puntual. A partir de los datos obtenidos en la tabla podrán concluir que:

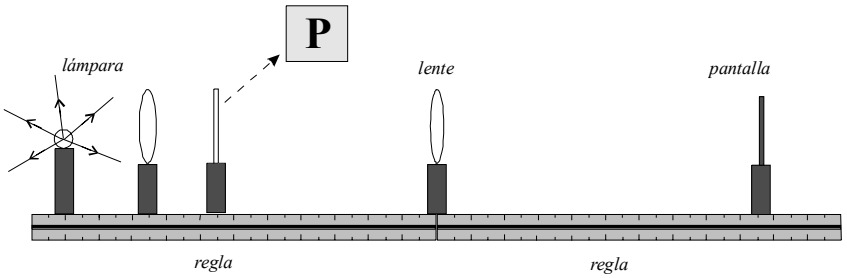
- La lente forma la imagen en la pantalla a distancias cada vez mayores conforme acercamos el objeto. Para cada posición del objeto la posición hay una única posición de la pantalla donde se ve su imagen.
- La lente tiene un límite en su capacidad de formar imágenes. Para la lente suministrada por el profesor (f'=100), cuando la fuente luminosa puntual se coloca a unos 10 cm de ella (en el punto focal), se observa un círculo luminoso en la pantalla del mismo diámetro que la lente en cualquier posición de la pantalla. Para distancias menores, al alejar la pantalla, el círculo luminoso se hace cada vez mayor. Para distancias del objeto a esa lente, iguales o menores de 10 cm, no será posible ver su imagen para ninguna posición de la pantalla. Se pueden puede realizar observaciones como las que muestra el esquema.



- Las imágenes de los cuerpos extensos se ven invertidas (la parte de arriba se verá abajo y la de la derecha se verá a la izquierda) por lo que la imagen de una **P** será vista como una **d**.
- Si en el sistema lente-pantalla dejamos la pantalla fija a 10 cm de la lente, en la que podemos ver la imagen del filamento de la fuente cuando se encuentra muy alejada, y cambiamos la lente por otra de mayor poder de convergencia (más gruesa en su centro), podemos comprobar que, en este caso, la imagen nítida se puede ver en la pantalla cuando el objeto está mucho más cercano a ese sistema óptico. Esta observación será de interés, ya que hemos modelizado el ojo humano como un sistema formado por una lente convergente y una pantalla y hemos observado en el primer apartado de esta actividad que, para una lente dada, la

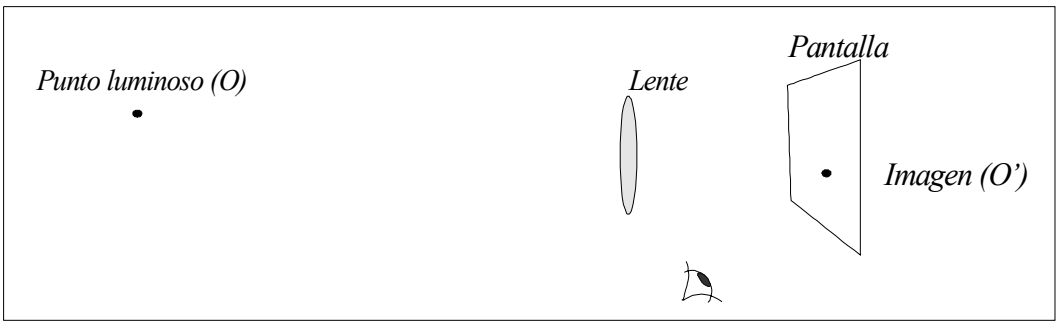
posición de la pantalla donde se ve la imagen es única para cada posición del objeto y, dado que en el ojo humano la pantalla (retina) no puede alejarse ni acercarse, para formar la imagen de objetos cercanos aumenta la curvatura del cristalino, se hace más grueso por el centro. Para cada distancia del objeto el cristalino cambia su poder de convergencia para formar la imagen en la retina, siendo mayor su grosor en el centro cuando enfoca objetos cercanos (acomodación).

Para el montaje técnico de esta experiencia se puede utilizar como fuente luminosa puntual el mismo dispositivo usado para formar sombras en A.11 y como objeto extenso el dibujo de una **P** en un papel translúcido. Cuando se trate de ver en la pantalla la imagen del objeto extenso, conviene que esté uniformemente iluminado, para ello situaremos una lente convergente, que actuará de condensadora, próxima a la fuente puntual y antes del objeto. Los detalles de este montaje se pueden ver en este el siguiente esquema.

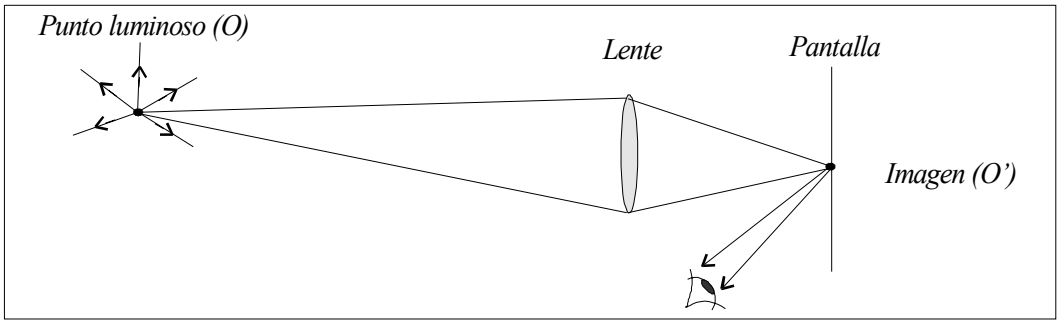


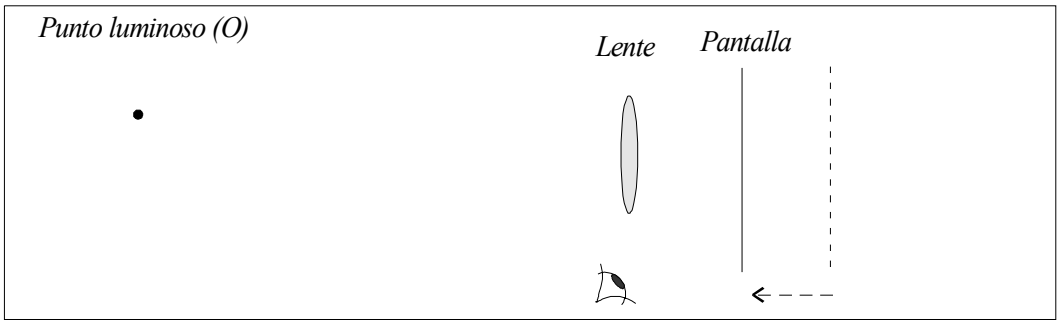
Las observaciones que hemos realizado nos han permitido aproximarnos al funcionamiento del ojo humano, pero dado que la luz, en sí misma, no es visible, debemos emitir hipótesis sobre su comportamiento cuando atraviesa la lente convergente y se forma, en algunas condiciones, una imagen óptica en la pantalla. Comenzaremos por el caso más sencillo, cuando el objeto es una fuente luminosa puntual.

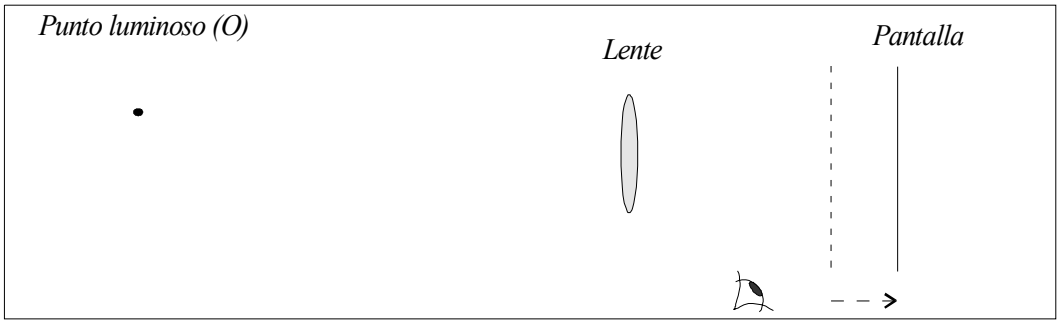
A.20 *Emitid hipótesis sobre cómo se comporta la luz emitida por la fuente puntual para que después de atravesar la lente forme una imagen nítida en una pantalla. Realizad un diagrama de rayos y precisar qué es una imagen óptica.*



A.21 *El primer esquema representa cómo se forma en una pantalla la imagen de una fuente luminosa puntual. Si mantenemos en la misma posición la fuente puntual y la lente, pero adelantamos y alejamos la pantalla, ¿qué veremos en estas situaciones? Realizad diagramas de rayos en los esquemas siguientes que expliquen vuestras predicciones.*



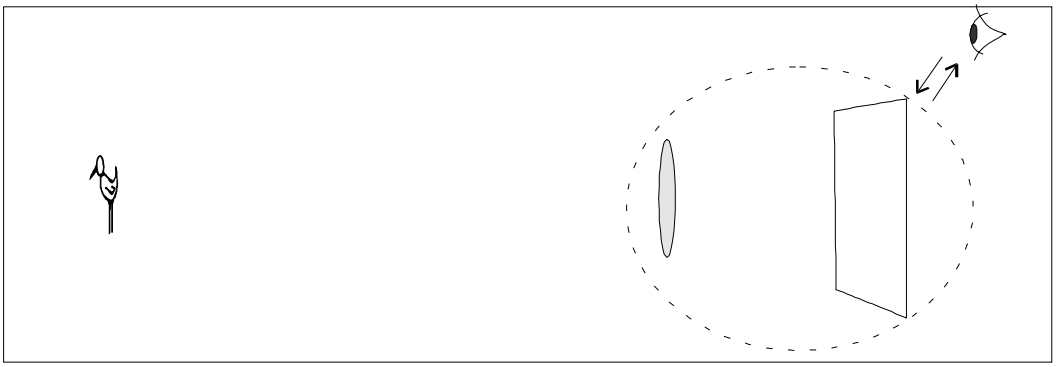




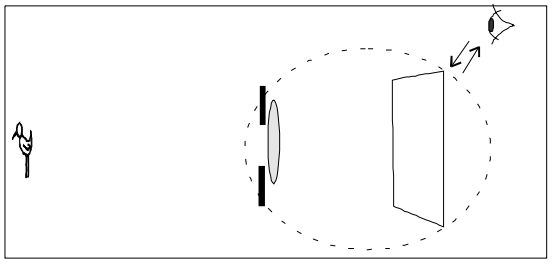
A.22 *En nuestro modelo de ojo, la retina es una pantalla que se encuentra en una posición fija. Explicad, dibujando diagramas de rayos, cómo podemos ver nítidos objetos situados a diferentes distancias, es decir, cómo es posible que se forme la imagen de un objeto en la retina cuando se encuentra a distintas distancias del ojo.*

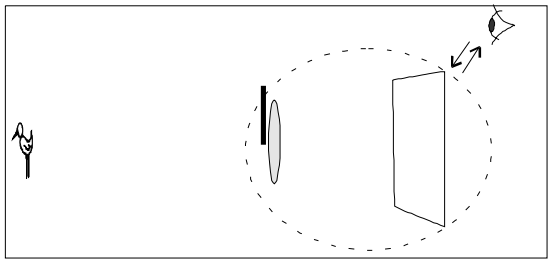
Hasta ahora hemos considerado la formación de la imagen en un sistema lente-pantalla en el caso más sencillo, cuando el objeto es puntual, debemos hacer extensivo estos razonamientos a los casos habituales de objetos extensos.

A.23 *Realizad un diagrama de rayos que explique la formación de imágenes extensas en un sistema lente-pantalla. Explicad con este modelo de ojo humano, cómo podemos apreciar la forma, el tamaño o la lejanía de los objetos que vemos.*



A.24 *El diafragma del iris regula inconscientemente (dilatando más o menos la pupila) la cantidad de luz que entra en el ojo humano ¿Cómo afecta a la imagen que se forma en una pantalla un diafragma situado delante de la lente y que tape parte de ella? Realizad diagramas explicativos con los distintos diafragmas que aparecen en los esquemas siguientes.*





A.25 *Diseñad y realizad experiencias para probar que los diafragmas que tapan parte de la lente no afectan a la posición, ni al tamaño de la imagen sino sólo a su luminosidad.*

Comentarios A.20-A.26: Con estas actividades se formalizará el modelo de visión de Kepler y el proceso de construcción de la imagen óptica. En A.20 los estudiantes, a partir de las experiencias realizadas en A.19, podrán inferir que las lentes convergentes concentran la luz emitida por un punto en otro punto de la pantalla. Si la luz emitida por una fuente puntual era dibujada como haz divergente, después de atravesar la lente debe convertirse en convergente para formar la imagen. En ese esquema es necesario advertirles que deben trazar un haz divergente de luz procedente del punto O' hasta el ojo, ya que el ojo ve esa imagen porque se comporta como ese mismo sistema óptico.

De los trazados gráficos requeridos en A.21 pretendemos que los estudiantes comprendan que la imagen óptica sólo se forma para una única posición de la pantalla, lo que con posterioridad será utilizado para comprender las causas de las anomalías visuales como la miopía e hipermetropía.

En A.22 se requiere comparar los trazados gráficos de formación de la imagen en un sistema lente-pantalla de distancia dada cuando la lente es poco convergente (cuyo centro es delgado) y cuando la lente es más convergente (cuyo centro es más grueso). En el primer caso el objeto estará alejado y en el segundo más cerca.. En estos trazados se simulará el funcionamiento de acomodación del ojo ya que el cristalino es una lente convergente de curvatura variable por lo que se puede formar la imagen en la retina para varias distancias del objeto. Deberá recordarse que estas representaciones son la explicación de las observaciones realizadas en el apartado D) de la A.19.

A partir de A.23, los esquemas del sistema lente-pantalla están envueltos en un círculo de puntos para representar que se trata de la modelización realizada para el ojo humano. Para formar la imagen de un objeto extenso se deberá ayudar a los alumnos recordándoles la idealización que hicimos en A.12 en la que, para explicar la formación sombras y penumbras con una fuente extensa, debimos idealizarla como un conjunto de fuentes puntuales. Así pues, la imagen de un punto del extremo superior del objeto se formará en la parte inferior de la pantalla (como observamos en el apartado C de la A.19) y la de un punto del extremo inferior del objeto en la parte superior de la pantalla. Dado que el sistema óptico lente-pantalla con que hemos modelizado el ojo humano forma la imagen invertida y, sin embargo, no lo vemos así, es necesario introducir que la sensación de la visión se elabora, en último término, en el cerebro, conectado mediante el nervio óptico a la retina del ojo.

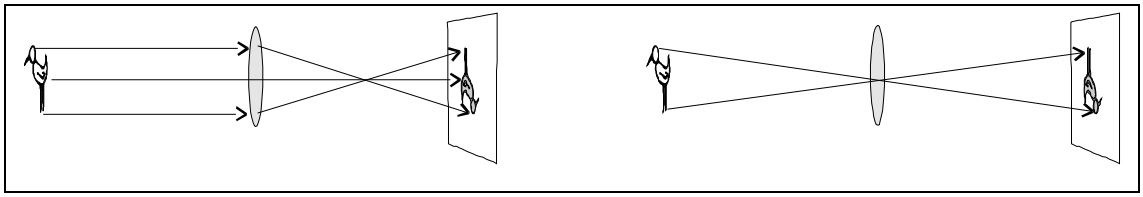
Por otro lado es necesario advertir que la imagen óptica que dibujamos en la pantalla del sistema óptico para representar lo que el ojo ve en ella no es una especie de objeto tenue pegado en ella, sino que se trata de una distribución puntos donde se concentran la luz emitida por el objeto después de atravesar la lente y, por tanto, esa imagen únicamente tiene sentido por la existencia del ojo de observador. Si éste cerrara los ojos, en la pantalla, no podríamos representar la imagen de ningún objeto; allí sólo existen, en los diferentes puntos, concentraciones de diferentes tipos de luz con diferentes intensidades

Para este nivel de enseñanza, dado que lo realmente importante es el fundamento de la imagen óptica que explica cómo vemos, no es necesario introducir las características de los trazados gráficos para localizar la posición de la imagen ni su

tamaño. En todo caso, dado que en este curso se conoce la posición de la pantalla donde se ve la imagen, para determinar gráficamente su tamaño se les puede dar la siguiente información adicional: experimentalmente se comprueba que hay una línea imaginaria que une cualquier punto del objeto con su punto imagen que pasa por el centro de la lente.

Al formalizar la construcción gráfica de la imagen óptica a partir de haces divergentes de luz emitidos por cada punto del objeto, la resolución de la A.24 se hace evidente con tal de trazar haces más estrechos en función del diafragma situado delante de la lente. Experimentalmente es fácilmente observable que el único cambio en la imagen cuando se tapa, por ejemplo, media lente es una menor luminosidad, sin afectar el tamaño de la imagen ni la posición de la pantalla donde se localiza. De hecho, el iris del ojo es un simple diafragma que regula la cantidad de luz que entra en el ojo.

Autoevaluación 2. *Con frecuencia, para explicar la imagen formada por una lente convergente y que se ve en una pantalla, se realizan trazados de rayos incorrectos como los siguientes:*



Con el modelo de visión y el concepto de imagen óptica que hemos elaborado, explicad por qué no pueden ser considerados correctos. En concreto analizad por qué esos diagramas no explican:

a) que la imagen óptica se forme en una única posición
b) que el tamaño de la imagen que se ve no dependa de que exista un diafragma que pueda tapar parte de la lente.

A.26 *Realizad una recapitulación de tema que estamos estudiando en donde se recoja:*

a) ¿qué problema hemos planteado?
b) ¿qué estrategia hemos seguido?
c) ¿cómo explicamos la visión directa de los objetos?
d) ¿qué hipótesis hemos realizado respecto a las fuentes luminosas, al comportamiento de la luz y al comportamiento del ojo?
e) ¿qué problemas vamos a abordar como consecuencia del modelo de visión directa elaborado?

Comentarios autoevaluación y A.26:. En la actividad de autoevaluación, los alumnos tienen oportunidad de enfrentarse a los trazados gráficos de la imagen

óptica que, posiblemente, harían ellos antes de la enseñanza que aquí venimos desarrollando. Al tener ocasión de analizar las carencias de estos esquemas, se está profundizando en la coherencia del concepto de la imagen óptica según el modelo de visión de Kepler. Recordemos que estos son los esquemas mayoritarios encontrados por la investigación didáctica (Galili y Hazan 2000a) y por nosotros mismos en alumnos antes y después de la enseñanza habitual de la óptica geométrica.

Al llegar a este punto del tema se ha completado el modelo de visión de Kepler y los alumnos pueden someterlo a pruebas tratando de explicar cómo vemos los objetos al mirarlos directamente. Es conveniente recapitular lo avanzado hasta aquí resaltando y justificando los aspectos más importantes del modelo de visión elaborado, así como los problemas que quedan por resolver (Osborne et al., 2003; Bartholomew et al., 2004). De la misma forma que actuamos en la recapitulación solicitada en A.17, recogeremos sus trabajos y ofreceremos "la recapitulación del profesor" donde los estudiantes tendrán ocasión de revisar sus avances, carencias y errores.

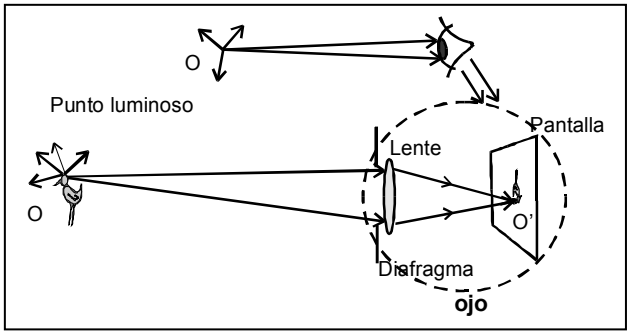
Recapitulación de las principales ideas sobre cómo vemos

Con el trabajo realizado hasta aquí hemos intentado elaborar un modelo de visión que explique **cómo vemos** los objetos al mirarlos directamente. Para abordar este problema, la estrategia seguida ha consistido en:

1º Analizar las relaciones y el comportamiento del objeto que vemos, la luz y el ojo del observador.

2º Una vez que hemos clarificado estas relaciones, hemos abordado qué hace el ojo con la luz que le llega para explicar cómo vemos.

Históricamente, el modelo de visión que hemos construido, fue publicado por el científico y astrónomo Johannes Kepler en 1604. En su trabajo, Kepler, se encargó de argumentar en contra de ideas antiguas, existentes desde 2000 años antes y que hasta entonces no fueron cuestionadas. Esencialmente, las ideas novedosas que introdujo y las características del modelo de visión de Kepler son las siguientes:



- 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.
- La luz es una entidad física que se propaga en el espacio a 300.000 km/s, 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. 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.
- 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).

El modelo de visión de Kepler que hemos reelaborado explica la visión directa de los objetos, aunque no profundiza en cómo se elabora la sensación en el cerebro ya que, por ejemplo, no sabemos por qué se perciben los objetos derechos y no invertidos como la imagen formada en la pantalla de la retina. Además, para completar el modelo de visión y aumentar su validez, deberemos mostrar si, con él, podemos explicar, también, la 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.