

# Óptica

BACHILLERATO UNIVERSITARIO

José Alberto Alvarado Lemus  
Pablo Valdés Castro  
José Bibiano Varela Nájera





## **DIRECTORIO**

**Dr. Víctor Antonio Corrales Burgueño**  
Rector

**DR. José Alfredo Leal Orduño**  
Secretario General

**LAE y MA Manuel de Jesús Lara Salazar**  
Secretario de Administración y Finanzas

**Q.F.B. Ofelia Loiza Flores**  
Director de Servicios Escolares

**Dr. Armando Flórez Arco**  
Director de DGE

**Dr. José Alberto Alvarado Lemus  
Dr. Pablo Valdes Castro  
Dr. José Bibiano Varela Nájera**

# **Óptica**

**Bachillerato universitario**

Prohibida la reproducción total o parcial de esta obra, por cualquier medio, sin autorización escrita del autor.

# Óptica

Bachillerato universitario

**Dr. José Alberto Alvarado Lemus**  
**Dr. Pablo Valdes Castro**  
**Dr. José Bibiano Varela Nájera**

Diseño de Portada: Dr. José Alberto Alvarado Lemus  
Diseño de interiores: Dr. José Alberto Alvarado Lemus  
Revisión Técnica: Dr. José Bibiano Varela Nájera

Primera edición 2012

Once Ríos Editores  
Río Usumacinta 821 Col. Industrial Bravo  
Culiacán, Sinaloa, México

3000 ejemplares

Impreso en México  
*Printed in Mexico*

# Contenido Temático

Alineado al programa de estudio de Óptica, plan 2009  
del Bachillerato de la Universidad Autónoma de Sinaloa,  
con enfoque en competencias.

**Competencia** es la capacidad de movilizar reflexivamente saberes integrados de un contexto a otro, para resolver exitosamente problemas a lo largo de la vida.

Las **competencias** integran el saber pensar, el saber decir, el saber hacer y el querer hacer.

# 1



## Ondas

1.1. Concepto de Onda y algunos de sus tipos	15
1.2. Magnitudes básicas que caracterizan a las ondas periódicas	20
1.2.1. Período y frecuencia	20
1.2.2. Velocidad de la onda	21
1.2.3. Longitud de onda	22
1.2.4. Amplitud de una onda que se propaga	25
1.3. Fenómenos que identifican a las ondas	26
1.3.1. Reflexión y refracción de ondas	26
1.3.2. Difracción	27
1.3.3. Interferencia	28
1.4. Efecto Doppler	29
1.5. Actividades de sistematización y consolidación	33
1.5.1. Sopa de letras con palabras clave del capítulo	33
1.5.2. Conexión de conceptos e ideas	34
1.5.3. Crucigrama	35
1.5.4. Actividades de repaso	36
1.5.5. Ejercicios de repaso	37

# 2



## Naturaleza y propagación de la luz

2.1. Introducción	41
2.2. Naturaleza de la luz	42
2.3. Propagación de la luz	49
2.4. Velocidad de la luz	53
2.5. Actividades de sistematización y consolidación	58
2.5.1. Sopa de letras con palabras clave del capítulo	58
2.5.2. Conexión de conceptos e ideas	59
2.5.3. Crucigrama	60
2.5.4. Actividades de repaso	61
2.5.5. Ejercicios de repaso	63

# 3



## Óptica geométrica

3.1. Reflexión de la luz	67
3.1.1. Leyes de la reflexión	69
3.1.2. Imágenes formadas mediante un espejo plano	71
3.2. Refracción de la luz	73
3.2.1. Leyes de la refracción	74
3.2.2. Imágenes formadas mediante refracción de la luz	78
3.2.3. Reflexión total interna	79
3.3. Lentes y espejos esféricos	81
3.3.1. Tipos de lentes y espejos esféricos	82
3.3.2. Rayos característicos en lentes y espejos esféricos	84
3.4. Formación de imágenes mediante lentes y espejos esféricos	87
3.4.1. Formación de imágenes mediante lentes convergentes	88
3.4.1.1. La cámara fotográfica	88
3.4.1.2. El ojo humano	91
3.4.1.3. La lupa	95
3.4.1.4. El microscopio óptico	99
3.4.1.5. El telescopio refractor	101
3.4.2. Formación de imágenes mediante espejos cóncavos	106
3.4.2.1. El espejo de aumento	106
3.4.2.2. El telescopio reflector	108
3.5. Actividades de sistematización y consolidación	112
3.5.1. Sopa de letras con palabras clave del capítulo	112
3.5.2. Conexión de conceptos e ideas	113
3.5.3. Crucigrama	114
3.5.4. Actividades de repaso	115
3.5.5. Ejercicios de repaso	118



# 4



## Óptica física

4.1. Espectro de colores de la luz.	
Dispersión cromática	123
4.1.1. El arco iris	127
4.2. Interferencia de la luz	128
4.3. Difracción de la luz	139
4.4. Polarización de la luz	147
4.5. Comportamiento corpuscular de la luz	152
4.5.1. Efecto fotoeléctrico	152
4.5.2. Efecto Compton	158
4.5.3. Otros efectos y aplicaciones del comportamiento corpuscular de la luz	160
4.5.3.1. Cámara fotográfica digital	160
4.5.3.2. Acción química de la luz	161
4.6. Actividades de sistematización y consolidación	165
4.6.1. Sopa de letras con palabras clave del capítulo.	165
4.6.2. Conexión de conceptos e ideas.	166
4.6.3. Crucigrama.	167
4.6.4. Actividades de repaso.	168
4.6.5. Ejercicios de repaso.	171

# 5



## Actividades prácticas

5.1. Actividades prácticas para la casa o el aula	175
5.1.1. Ondas	175
5.1.2. Naturaleza y propagación de la luz	178
5.1.3. Óptica geométrica	183
5.1.4. Óptica física	188
5.2. Prácticas de laboratorio	191
5.2.1. Magnitudes básicas que caracterizan a las ondas periódicas	192
5.2.2. Fenómenos que caracterizan a las ondas	195
5.2.3. Propagación de la luz	198
5.2.4. Segunda ley de la refracción	201
5.2.5. Formación de imágenes mediante una lente convergente	204
5.2.6. Interferencia de ondas luminosas	207
5.2.7. Difracción de ondas luminosas	210

# Presentación

A estudiantes y profesores.

El presente libro forma parte de los materiales curriculares preparados para apoyar la introducción del Plan 2009 en el bachillerato de la Universidad Autónoma de Sinaloa. Está dedicado a una de las ramas básicas de la física, la Óptica. Durante su estudio, los estudiantes no solo reafirman y enriquecen conceptos y habilidades desarrollados en asignaturas precedentes, sino que amplían su visión del mundo. En particular, se familiarizan con la naturaleza electromagnética de la luz y la idea de que puede tener tanto un comportamiento ondulatorio como corpuscular; explican numerosos fenómenos del mundo que los rodea; estudian el principio óptico del funcionamiento del ojo humano y de dispositivos de gran utilidad, como la fibra óptica, el microscopio y el telescopio.

De este modo, Óptica contribuye a ampliar la cultura general de los estudiantes, al tiempo que los prepara para continuar carreras universitarias de diversos perfiles.

El material del libro se ha estructurado alrededor de tres preguntas centrales: *¿Qué es la luz?*, *¿Cómo se propaga?*, *¿Cuáles son algunas importantes aplicaciones de la Óptica?* Para responder las dos primeras es indispensable conocer qué son las ondas y sus características básicas, de ahí que el libro comience con el estudio de ellas. En el segundo capítulo, Naturaleza y Propagación de la Luz, se da una respuesta general a las tres preguntas para luego profundizar en ellas en los otros dos capítulos, Óptica Geométrica y Óptica Física.

El enfoque didáctico del libro es consecuente con el empeño de la Universidad Autónoma de Sinaloa de reestructurar el currículo de bachillerato en base a competencias. El propósito es que los alumnos alcancen un nivel de integración de conocimientos, procedimientos, actitudes y valores, que les permita desempeñarse eficazmente en la vida social y en sus estudios futuros. Esto requiere que a lo largo del curso, realicen una serie de actividades especialmente concebidas para ello. Por eso, acompañando al texto del libro, se ha incluido un gran número de preguntas, actividades

a realizar y ejercicios resueltos. Luego, al final de cada capítulo, aparecen otras actividades que complementan a las anteriores y ayudan a consolidar y sistematizar lo estudiado. Se ha previsto además un apartado dedicado a actividades prácticas, el cual debe facilitar la labor de los maestros en esa dirección, y ayudar así a rescatar un aspecto esencial de la formación de los alumnos, lamentablemente relegado en los últimos años. La idea central es que el libro sea, más allá de un libro de texto, un material de trabajo, pues solo reflexionando profundamente sobre lo leído, planteándose interrogantes y realizando numerosas actividades teóricas y prácticas alrededor del material, es decir, trabajando conscientemente, podrán los alumnos adquirir las competencias que se esperan.

Por último, nos parece necesario subrayar, que realizar con efectividad un enfoque del proceso de enseñanza-aprendizaje dirigido a la formación de competencias, no será posible si dicho proceso no es acompañado por un sistema de evaluación acorde con las competencias declaradas y las actividades desarrolladas.

Los autores

---

1

# Ondas







## Ondas

En este curso estudiaremos la **Óptica, rama de la física que investiga los fenómenos relacionados con la luz**. A lo largo de él prestaremos atención a tres preguntas centrales:

*¿Qué es la luz?, ¿Cómo se propaga?, ¿Cuáles son algunas importantes aplicaciones de la Óptica?*

Desde la antigüedad el hombre se planteó la primera pregunta. Contestarla resultó una tarea particularmente difícil y a lo largo de la historia de la física se dio más de una respuesta. Una de ellas consistió en que la luz es una onda, y posteriormente se precisó que dicha onda es electromagnética. Por eso, comenzaremos el estudio de la Óptica esclareciendo qué es una onda y sus características básicas.

De modo que entre las cuestiones clave que examinaremos en esta primera unidad están la siguientes:

*¿Qué son las ondas y cuál es la importancia que tienen en el mundo que nos rodea? ¿Cuáles son algunos de sus tipos más comunes? ¿Qué magnitudes las caracterizan? ¿Cuáles son los fenómenos que las identifican?*

Comenzaremos intentando responder las primeras dos preguntas.

### 1.1. Concepto de Onda y algunos de sus tipos

En el curso de Mecánica te relacionaste con las **oscilaciones**. Como recordarás, se llaman así a los cambios que experimenta una magnitud alrededor de determinado valor.

Muchas oscilaciones se transmiten de un lugar a otro. Ejemplos comunes de ello son las que provocamos al agitar un extremo de una cuerda tensa (Fig. 1.1) y las producidas al tocar la superficie del agua con algún cuerpo (Fig. 1.2). Otros casos más complejos, pero de suma importancia,





¿Podría transmitirse un sonido de un lugar a otro en la superficie de la Luna? ¿Y una onda de radio?



¿Cómo convencerías a otra persona de que en la situación de la figura 1.1 se transmite energía de un extremo al otro de la cuerda?

son la propagación de los temblores de tierra, del sonido, de las oscilaciones originadas en las antenas transmisoras de radio y televisión.

**Se denomina *onda* a la propagación de perturbaciones, en especial oscilaciones, de un lugar a otro.**

**Una característica distintiva de las ondas es que el cambio producido en un lugar se transmite a otro sin necesidad de desplazar cuerpo o partícula alguna del primer sitio al segundo.**

Por ejemplo, en los casos de la propagación de oscilaciones en la cuerda tensa (Fig. 1.1) y en el agua (Fig. 1.2), no se desplazan porciones suyas en la dirección en que avanza la oscilación.



Fig. 1.1. Transmisión de oscilaciones en una cuerda tensa.



Fig. 1.2. Transmisión de oscilaciones en la superficie del agua.

Las ondas electromagnéticas (luminosas, de radio y televisión, etc.) representan propagación de campos eléctricos y magnéticos y en este caso tampoco se trasladan partículas de un lugar a otro.



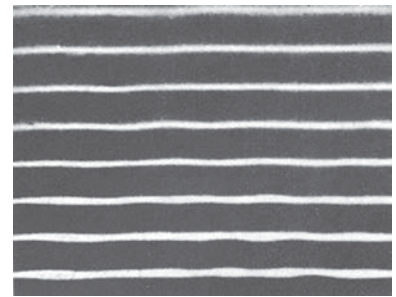


Las ondas en una cuerda y en la superficie del agua, las ondas sonoras y las sísmicas son ejemplos de **ondas mecánicas**. Las ondas luminosas, las de radio y las de televisión, son **electromagnéticas**. Mientras que las mecánicas requieren de un medio para propagarse, las electromagnéticas pueden hacerlo en el vacío.

**Aunque las ondas, sean mecánicas o electromagnéticas, no transportan partículas de una región a otra, sí transportan energía.** Así, en el ejemplo de la figura 1.1, la energía comunicada mediante la mano al extremo de la cuerda se transmite a lo largo de ésta hasta su otro extremo.

Dos nociones habitualmente utilizadas al referirse a las ondas son el **frente de onda** y la **dirección de propagación** de la onda, también denominada **rayo**. En el caso de la figura 1.2 el frente de onda es circular y en el de la figura 1.3, recto. **El frente de onda y la dirección de propagación, o rayo, son perpendiculares entre sí.**

Con ayuda de las ondas es posible transmitir de un lugar a otro, además de energía, **información**, lo cual es cotidianamente aprovechado por los animales y seres humanos para comunicarse.



**Fig. 1.3.** Ondas de frente recto, generadas al introducir reiteradamente el borde recto de una barra de madera en agua.

La propagación de la luz emitida por un bombillo de linterna es una onda. ¿Qué forma tiene el frente de esta onda?

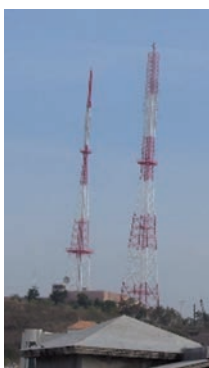
Sobre la superficie del agua de una vasija sitúa pedacitos de poliestireno (frigolit). Toca la superficie del agua con la punta de un dedo. ¿Cómo argumentarías que: a) la energía comunicada al agua al tocarla se transmite de un lugar a otro, b) la energía se transmite de un lugar a otro sin que el agua se desplace del primer sitio al segundo?



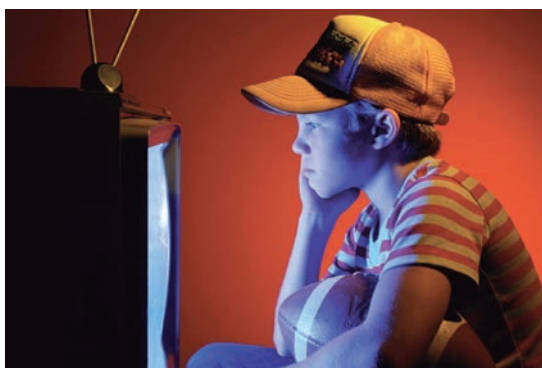
Los componentes básicos de un sistema habitual de comunicación pueden ser resumidos como sigue: a) fuente de información, b) codificador, c) transmisor, d) receptor, e) decodificador, f) destinatario.



Fuente de información



Transmisor



Receptor

Destinatario

El sistema funciona gracias a la transmisión de energía, e información, mediante ondas. Por ejemplo, cuando una persona habla delante de un micrófono y otras la escuchan frente a la radio o televisor, inicialmente la información se transmite de la persona al micrófono mediante ondas sonoras, luego del centro transmisor al receptor mediante ondas electromagnéticas y, por último, del receptor a la persona que escucha, nuevamente a través de ondas sonoras. La antena transmisora emite oscilaciones electromagnéticas que se propagan y son captadas por la antena del receptor. Simplificadamente puede decirse que al sintonizar determinada emisora o canal de televisión, lo que se hace es variar ciertas características de sus circuitos eléctricos, con el fin de ajustar su frecuencia propia a la de las oscilaciones que transmite la emisora.

En el sistema anteriormente descrito, intervienen ondas de distintos tipos, no solo por la **naturaleza** de ellas (mecánica y electromagnética), sino también por la **dirección** en que se producen las oscilaciones.

Cuando las oscilaciones tienen lugar en dirección perpendicular a la de propagación, la onda se llama **transversal** y si se realizan en la misma dirección que la de propagación, entonces se denomina **longitudinal**.



La onda a lo largo de la cuerda tensa de la figura 1.1, o la producida al hacer oscilar el extremo de un resorte “gusano” perpendicularmente a su longitud (Fig. 1.4a), son ejemplos simples de una onda transversal. Las ondas electromagnéticas, en particular la luz, también son transversales, porque los campos eléctrico y magnético que las forman oscilan en direcciones perpendiculares a la de propagación.

Explica con tus palabras a qué se llama onda transversal y a qué, onda longitudinal.



¿Sería posible que la onda sonora hiciera oscilar la membrana del tímpano del oído humano si fuera transversal? Argumenta

La figura 1.4b muestra la transmisión de una onda longitudinal en un resorte “gusano”. En este caso las oscilaciones se realizan agitando el extremo del resorte hacia delante y hacia atrás, o sea, en la misma dirección de la propagación. En este ejemplo la oscilación consiste en la alternancia de compresiones y estiramientos del resorte y la onda, en la transmisión de ese proceso a lo largo de él. Algo similar es lo que ocurre con las ondas sonoras en el aire, lo único que en este caso lo que se comprime y dilata son porciones de aire.



**Fig. 1.4.** En un mismo medio se pueden producir ondas longitudinales y transversales. a) Onda transversal, la oscilación se produce moviendo el resorte hacia un lado y hacia el otro, mientras que la dirección de la propagación es hacia adelante. b) Onda longitudinal, la oscilación se produce moviendo el resorte hacia delante y hacia atrás, es decir, en la misma dirección que la de propagación.

En los sismos se producen diversos tipos de ondas, entre ellas longitudinales y transversales. Las primeras viajan a mayor velocidad que las segundas y son las transversales las responsables de los mayores daños.

En el siguiente apartado abordamos la tercera cuestión formulada al inicio de la unidad: *¿Qué magnitudes caracterizan a las ondas?*





## 1.2. Magnitudes básicas que caracterizan a las ondas periódicas

Nos limitaremos a analizar **ondas periódicas**, es decir, la **propagación de perturbaciones u oscilaciones generadas periódicamente**, cada un intervalo de tiempo determinado.

Dos de las magnitudes fundamentales que caracterizan a tales ondas son el **período** y la **frecuencia**.

¿Recuerdas en qué consiste un fenómeno periódico? ¿Y una oscilación periódica? Describe ejemplos.



### 1.2.1. Período y frecuencia

**Período** es el intervalo de tiempo al cabo del cual se repite un fenómeno periódico, en el caso que estamos examinando, la generación de perturbaciones u oscilaciones. La mayoría de las veces ese intervalo de tiempo es pequeño y resulta difícil medirlo directamente. Por eso, muchas veces para determinar el período se mide el tiempo  $t$  en que se generan  $n$  perturbaciones u oscilaciones y se calcula mediante la ecuación:

$$T = \frac{t}{n}$$

**Frecuencia** es la rapidez con que se repite un fenómeno periódico. De ahí que si las perturbaciones u oscilaciones se repiten  $n$  veces en el tiempo  $t$ , la frecuencia viene dada por la ecuación:

$$f = \frac{n}{t}$$

En el sistema internacional de unidades (SI), la unidad de la frecuencia es el hertz (Hz), siendo éste igual 1/s.

De las dos ecuaciones anteriores se ve que una puede calcularse como el recíproco de la otra:

$$T = \frac{1}{f} \quad \text{ó} \quad f = \frac{1}{T}$$



**1.2.2. Velocidad de la onda**

Como las ondas consisten en **perturbaciones u oscilaciones que se propagan**, una magnitud fundamental para caracterizarlas es la **velocidad**.

La tabla 1.1 evidencia que **la velocidad de la onda depende de su naturaleza y también de las características del medio en que se propaga**.

Así, por ejemplo, en la tabla puede apreciarse que la velocidad de las ondas sonoras y sísmicas, que son ondas mecánicas, es muy inferior a la de las ondas luminosas y de radio, que son electromagnéticas. A su vez, las ondas sísmicas y sonoras, siendo ambas mecánicas, difieren notablemente en sus velocidades; incluso la velocidad de la propia onda sonora depende de si la propagación se realiza en gas, líquido o sólido, y también de la temperatura. Como muestra la tabla, la velocidad de la luz tampoco es la misma, por ejemplo, en el aire que en el vidrio.

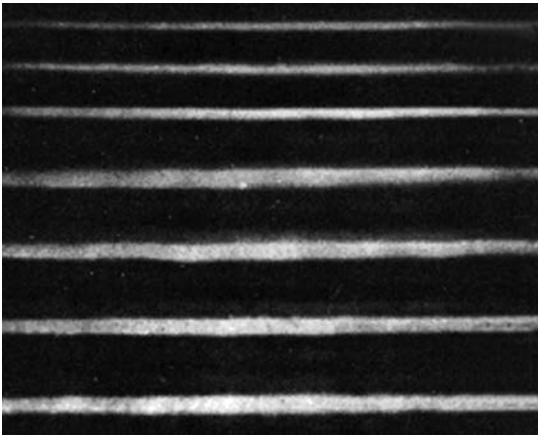
Cuando tiene lugar una descarga eléctrica atmosférica, primero vemos el relámpago y solo un tiempo después escuchamos el trueno. ¿Cómo se explica esto? ¿Cómo podrías estimar la distancia a que ocurrió la descarga eléctrica?



**Tabla 1.1.** Velocidad aproximada de ciertas ondas en determinados medios.

TIPO DE ONDA Y MEDIO	VELOCIDAD APROXIMADA
Onda sonora en el aire a 10 °C	337 m/s
Onda sonora en el aire a 28 °C	348 m/s
Onda sonora en el agua	1 500 m/s
Onda sonora en el acero	5 000 m/s
Ondas sísmicas	4 – 14 km/s
Onda luminosa en el vidrio	200 000 km/s
Onda de radio en el vacío o en el aire	300 000 km/s
Onda luminosa en el vacío o en el aire	300 000 km/s

La figura 1.5 pone de manifiesto la dependencia de la velocidad de la onda respecto a las características del medio en el caso de ondas que se propagan en la superficie del agua. Cuando la onda pasa a una zona de menor profundidad, lo cual constituye para ellas un medio con características



**Fig. 1.5.** Ondas de frente recto en la superficie del agua, las cuales pasan de una zona más profunda (parte inferior) a otra menos profunda (parte superior).

diferentes, disminuye su velocidad, lo que se evidencia por el acortamiento de la distancia entre las ondulaciones.

**La velocidad de propagación de la onda también puede depender de su frecuencia.** En el capítulo Óptica Física veremos que precisamente esta dependencia es la que da lugar al espectacular fenómeno de separación de una haz de luz habitual en una serie de haces de colores, denominado **dispersión cromática**, el cual ha sido esquematizado en la portada de este libro.

Si las ondas representadas en la figura 1.5 tienen una velocidad de 30 cm/s en la parte inferior, ¿cuál será su velocidad en la parte superior?



¿Qué pruebas pudieras dar de que la velocidad del sonido en el aire no depende de forma apreciable de su frecuencia?

### 1.2.3. Longitud de onda

En un período, es decir, en el intervalo de tiempo desde que se genera una perturbación u oscilación hasta que se genera la siguiente, la oscilación que se ha emitido y está propagándose recorre cierta distancia, denominada **longitud de onda**, la cual habitualmente se representa por la letra griega  $\lambda$  (lambda) (Fig. 1.6). De este modo:



Se llama *longitud de onda* a la distancia recorrida por la oscilación en un período.

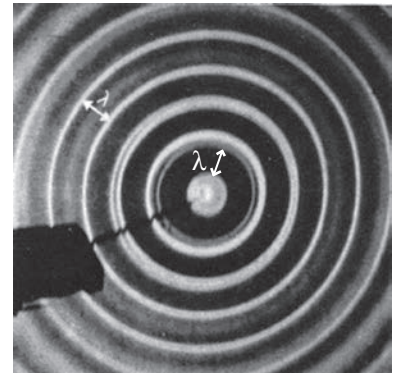
En el caso de la figura 1.6, la distancia entre ondulaciones consecutivas, o longitud de onda, permanece la misma, porque la velocidad de propagación es constante; en cambio, en la experiencia de la figura 1.5 dicha distancia varía, debido a que la velocidad de propagación cambia de una zona a otra.

Si la velocidad de la onda es constante ( $v$ ), entonces su longitud de onda puede calcularse, simplemente mediante la ecuación:

$$\lambda = vT$$

Y puesto que el período ( $T$ ) y la frecuencia ( $f$ ) son uno el recíproco del otro, también es posible escribir la ecuación en la forma:

$$\lambda = \frac{v}{f}$$



**Fig. 1.6.** Ondas generadas introduciendo reiteradamente el extremo de un objeto en agua. Se ha indicado la distancia recorrida por las oscilaciones ( $\lambda$ ) en un período.

**Ejemplo 1.1.** Un pescador nota que las olas pasan la proa de su bote anclado cada 4.0 s. Éste mide que la distancia entre dos crestas es de 10.0 m. ¿Qué tan rápido están viajando las olas?



Para calcular la velocidad de la onda, los datos que se proporcionan son el período temporal ( $T$ ), es decir el tiempo de llegada entre cresta y cresta a la proa, que es de 4.0 s y la longitud de onda de las olas que es  $\lambda = 10.0$  m. La ecuación que relaciona la velocidad de la onda con la longitud de onda y el período es:

$$v = \frac{\lambda}{T} = \frac{10.0 \text{ m}}{4.0 \text{ s}} = 2.5 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Las olas viajan con una rapidez de 2.5 m/s.



**Ejemplo 1.2.** En una zona en que la temperatura es de 28 °C una onda acústica tiene una frecuencia de 262 Hz. ¿Qué separación existe entre las compresiones?

La distancia entre las compresiones es la longitud de onda  $\lambda$ . La ecuación que relaciona la velocidad de la onda con la longitud de onda y la frecuencia es:

$$v = \lambda f$$

En la Tabla 1.1 se muestra que la velocidad de las ondas sonoras en el aire, cuando está a una temperatura de 28 °C, es  $v = 348$  m/s. La distancia de separación entre las compresiones  $\lambda$  se obtiene al despejar

$$\lambda = \frac{v}{f} = \frac{348 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{262 \frac{1}{\text{s}}} = 1.33 \text{ m}$$

Las compresiones están separadas 1.33 m.

**Ejemplo 1.3.** En el ejemplo anterior, suponga que la separación de las compresiones es de 1.0 m, ¿Cuál es la frecuencia de las ondas de sonido que se propagan por el aire?

La frecuencia  $f$  del sonido se puede calcular al despejar de la ecuación:

$$v = \lambda f$$

Ahora la longitud de onda es  $\lambda = 1.0$  m y la velocidad de la onda es  $v = 348$  m/s. Así,

$$f = \frac{v}{\lambda} = \frac{348 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{1.0 \text{ m}} = 348 \text{ s}^{-1} = 348 \text{ Hz}$$

La frecuencia de las ondas es de 348 Hz.





### 1.2.4. Amplitud de una onda que se propaga

De Mecánica 1 conoces que la amplitud de las oscilaciones de una magnitud es la máxima desviación que experimenta medida a partir del valor alrededor del cual oscila.

Pero cuando se tiene una onda, es decir una perturbación u oscilación propagándose, la amplitud por lo general disminuye al aumentar la distancia al generador que la produce. En efecto, si en el extremo de una cuerda horizontal tensa y larga, provocamos una oscilación y observamos detenidamente su propagación, advertiremos que su amplitud decrece a medida que se aleja. En este caso ello se debe a la resistencia que ofrece el aire al movimiento vertical de las porciones de la cuerda según se propaga la oscilación, y a cierta “fricción interna” entre las porciones de la propia cuerda. El resultado es que una parte de la energía de la oscilación se disipa, disminuyendo su amplitud. Durante la propagación de ondas sonoras y electromagnéticas también tiene lugar disipación de energía, el medio absorbe una parte de la energía de las ondas.

**El fenómeno en el cual parte de la energía de la onda se transforma en energía interna del medio se denomina *absorción*.**

Cuando se trata de ondas en dos dimensiones, como las que se propagan en la superficie del agua, o lo que es más habitual y tiene mayor interés práctico, de la propagación de ondas sonoras o electromagnéticas en el espacio, la amplitud disminuye por otra causa que puede resultar más importante que la absorción: la energía de la oscilación se distribuye en una región cada vez mayor.

Consideremos, por ejemplo, la propagación de oscilaciones originadas en un punto de la superficie del agua (Véase las figuras 1.2 y 1.6). Al principio, las oscilaciones están distribuidas en una circunferencia de radio muy pequeño alrededor de un punto, pero a medida que se propagan, dicha circunferencia se va ampliando, con lo cual el número de porciones de la superficie del agua que oscilan crece. Esto significa que la energía inicial de la oscilación se

Para producir ondas de mayor longitud de onda que en la figura 1.6, ¿aumentarías o disminuirías la frecuencia con que se introduce el objeto en agua?



Observa que en la figura 1.5, las franjas claras que representan a las ondulaciones se hacen más tenues en la parte superior ¿Por qué?



distribuye en una región cada vez mayor. En consecuencia, va disminuyendo la energía que corresponde a cada porción, y con ello la amplitud de la onda.

En el próximo apartado abordamos la última cuestión planteada al inicio de la unidad, la cual es clave para la comprensión de la naturaleza de la luz. *¿Cuáles son los fenómenos que identifican a la ondas?*

### 1.3. Fenómenos que indentifican a las ondas

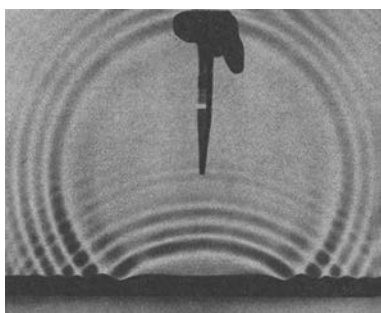
Ya hemos mencionado dos de los fenómenos que pueden tener lugar durante la propagación de las ondas: la dependencia de la velocidad de propagación respecto a la frecuencia de la onda (que, como hemos dicho, en el caso de un haz de luz puede conducir a su separación en haces de diversos colores) y la disminución de la amplitud de la onda, debida a la absorción de parte de su energía y a la distribución de ella en una región cada vez mayor.

Ahora describiremos brevemente otros cuatro fenómenos característicos de las ondas: **reflexión**, **refracción**, **difracción** e **interferencia**. Los dos últimos se consideran el sello que identifica a las ondas.

#### 1.3.1. Reflexión y refracción de ondas

**Cuando una onda incide sobre un cuerpo, simultáneamente pueden ocurrir los fenómenos de absorción, reflexión y refracción.** Generalmente se hace más notable uno u otro fenómeno, en dependencia de las características del cuerpo sobre el que incide la onda.

**Se denomina *reflexión de la onda* al fenómeno que tiene lugar cuando parte de la onda que incide sobre la superficie de separación entre dos medios es devuelta.**



**Fig. 1.7.** Reflexión de ondas circulares en la pared de un recipiente.

Si has provocado ondas en la superficie del agua de un recipiente, probablemente habrás notado la reflexión de ellas en sus paredes (Fig. 1.7). El eco se debe a la reflexión de las ondas sonoras, y la formación de imágenes en los espejos, a la reflexión de ondas luminosas. En los locales



especializados en grabación de sonidos, las paredes se preparan de tal modo que buena parte de las ondas sonoras sean absorbidas, evitando de ese modo reflexiones múltiples y el denominado efecto de reverberación.

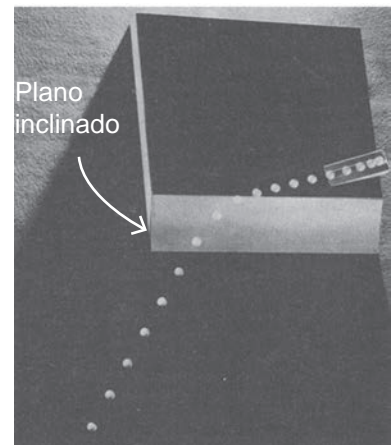
**Se llama *refracción* al fenómeno de transmisión de la onda de un medio a otro con el consiguiente cambio de su velocidad.**

Excepto en el caso que la onda incide perpendicularmente a la superficie de separación entre los dos medios, el cambio de velocidad al pasar de uno origina una modificación en la dirección de su propagación.

No obstante la importancia de la reflexión y la refracción, **son los fenómenos de difracción e interferencia los que constituyen el sello distintivo de las ondas.** Ciertos cuerpos también pueden exhibir reflexión y refracción al incidir sobre determinada superficie. Así, todos sabemos que una pelota de goma lanzada contra el piso es reflejada por éste. Por otra parte, una esferita que rueda sobre cierta superficie puede “refractarse”, es decir cambiar su velocidad, y la dirección de su movimiento, al pasar a otra superficie situada en un nivel inferior (Fig. 1.8). Pero los que sí no ocurren (aunque sí tienen lugar con partículas subatómicas, como electrones, protones y otras) son los fenómenos de difracción e interferencia.

### 1.3.2. Difracción

De la vida cotidiana conocemos que al hablar en el interior de una habitación con la puerta abierta, el sonido se escucha en el exterior no solo justamente enfrente de la puerta, sino también en lugares a la izquierda y a la derecha de ella. Este hecho se debe a una característica esencial de la propagación de las ondas: se desvían al pasar por los bordes de una abertura o un obstáculo. La figura 1.9 ilustra esta característica para el caso de ondas en la superficie del agua. El frente de onda, inicialmente recto, se transforma en circular al atravesar la abertura y la onda alcanza lugares situados no solo frente a ella, sino que también a la izquierda y a la derecha. En la zona



**Fig. 1.8.** “Refracción” de una esferita que rueda sobre cierta superficie, al pasar a otra superficie situada en un nivel inferior.

¿Por qué puede decirse que la esferita de la figura 1.8 se “refracta”?



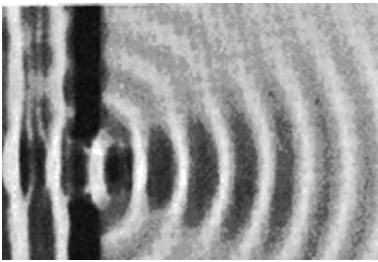


Fig. 1.9. Difracción de ondas de frente recto al incidir sobre una abertura.

de la izquierda, el rayo o dirección de propagación de la onda es perpendicular a la barrera que tiene la abertura, pero en la zona de la derecha, tiene múltiples direcciones. Un chorro de partículas habituales que se hiciera pasar a través de una abertura, no exhibiría semejante desviación en la dirección de su movimiento.

**La desviación de las ondas al pasar por una abertura o el borde de un obstáculo se denomina *difracción*.**

### 1.3.3. Interferencia

Se llama *interferencia* a la combinación de dos o más ondas en un punto.



La figura 1.10 muestra el bello patrón que forman dos ondas circulares que se propagan en la superficie del agua cuando interfieren. Para obtener ese patrón estable se requiere que la frecuencia de ambas ondas sea la misma. En la figura se aprecia una sucesión de ondulaciones circulares atravesadas por una serie de líneas, denominadas **líneas nodales**. Se observan zonas en que, debido al efecto combinado de ambas ondas, se produce un reforzamiento de las ondulaciones del agua. La interferencia en estas zonas se llama **constructiva**. En cambio, en las líneas nodales tiene lugar una cancelación del efecto de una onda con el de la otra. En este caso la interferencia se denomina **destructiva**.

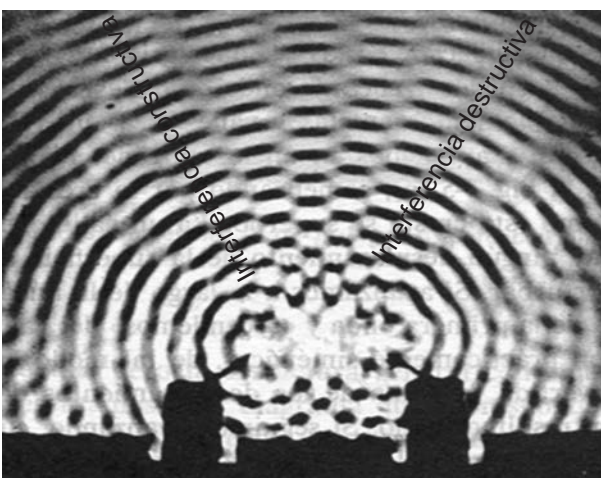


Fig. 1.10. Esquema dibujado a mano de dos ondas circulares que interfieren (figura superior) y patrón de interferencia de las ondas circulares en el agua (figura inferior).



## 1.4. Efecto Doppler

No es difícil comprender que **la frecuencia de la onda está determinada por el emisor de las oscilaciones y no depende del medio en que se propaga**, ni por tanto de la velocidad de la onda. Así, si el emisor produce, por ejemplo, diez oscilaciones cada segundo, al cabo de cierto tiempo en otros puntos también se producirán diez oscilaciones cada segundo, independientemente de las características del medio.

Pero si el emisor (E) o el receptor (R) de ondas están en movimiento respecto al medio, entonces la frecuencia que registra el receptor es diferente a la producida por el emisor. Este fenómeno se conoce como **efecto Doppler**. Se denominó así en honor al físico y matemático austriaco Christian Doppler (1803-1853), quién describió dicho efecto por primera vez en 1842.

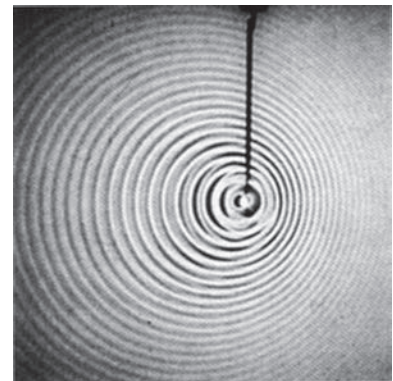
**Se denomina efecto Doppler al efecto de variación de la frecuencia registrada por el receptor respecto a la frecuencia del emisor, debido al movimiento de la fuente o el receptor con relación al medio.**

La foto de la figura 1.11 muestra ondas que se propagan en el agua cuando el emisor se está moviendo hacia la derecha. Nota que en la zona de la izquierda la longitud de onda es mayor que en la de la derecha.

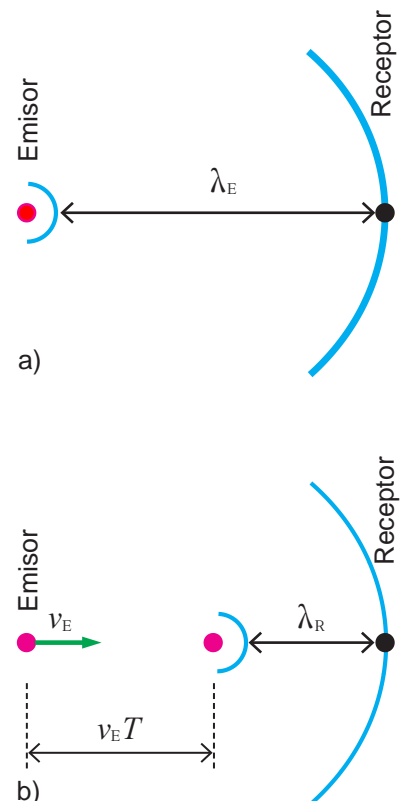
Examinemos el efecto Doppler en el caso particular en que el receptor está en reposo y el emisor se mueve directamente hacia él.

Consideremos que en la figura 1.12 el receptor se encuentra a la derecha del emisor y que este último se mueve con velocidad  $v_E$ . Entonces, si la longitud de onda cuando el emisor estaba en reposo era  $\lambda_E$  (Fig. 1.12a), ahora que está en movimiento, el receptor registrará una longitud de onda menor  $\lambda_R$  (Fig. 1.12b):

$$\lambda_R = \lambda_E - v_E T$$



**Fig. 1.11.** Variación de la longitud de onda debido al movimiento del emisor hacia la derecha.



**Fig. 1.12.** Disminución de la longitud de onda debido al movimiento del emisor.



En esta ecuación,  $T$  es el período de la onda y  $v_E T$  la distancia que avanza en ese intervalo de tiempo. Puesto que la velocidad de la onda que se propaga hacia el receptor continúa siendo la misma, pero su longitud de onda ha disminuido, ello implica que la frecuencia que registra el receptor,  $f_R = v/\lambda_R$ , será mayor.

Calculemos dicha frecuencia  $f_R$  en función de la frecuencia  $f_E$  del emisor.

Dividiendo la ecuación para la longitud de onda entre la velocidad de la onda,  $v$ , tenemos:

$$\frac{\lambda_R}{v} = \frac{\lambda_E}{v} - \frac{v_E T}{v}$$

$$\text{O sea } \frac{1}{f_R} = \frac{1}{f_E} - \left(\frac{v_E}{v}\right) \frac{1}{f_E}$$

$$\text{De donde } \frac{1}{f_R} = \frac{1}{f_E} \left(1 - \frac{v_E}{v}\right) = \frac{1}{f_E} \left(\frac{v - v_E}{v}\right)$$

$$\text{de aquí que } f_R = f_E \left(\frac{v}{v - v_E}\right)$$

Si el emisor se mueve alejándose del receptor, como ocurriría si en la figura 1.11 el receptor se encontrara a la izquierda del emisor y no a su derecha, entonces la longitud de onda es mayor que cuando estaba en reposo:

$$\lambda_R = \lambda_E + v_E T$$

y la frecuencia registrada por el receptor es menor, concretamente:

$$f_R = f_E \left(\frac{v}{v + v_E}\right)$$

De este modo, si el emisor está en movimiento, la frecuencia registrada por el receptor es:

$$f_R = f_E \left(\frac{v}{v \mp v_E}\right),$$

donde el signo menos corresponde al movimiento del



emisor acercándose al receptor y el signo más al movimiento alejándose de él.

Probablemente has percibido alguna vez el efecto Doppler sonoro. Cuando una ambulancia pasa junto a nosotros a gran velocidad y se aleja, el sonido de su sirena cambia de cierto tono a otro más grave, lo que indica que su frecuencia ha disminuido. Mientras la ambulancia se acerca, el sonido se escucha más agudo que si estuviera en reposo y, por el contrario, cuando se aleja se escucha más grave.



a) Ambos observadores en la banqueta perciben el sonido de la ambulancia que está parada con igual frecuencia. b) Efecto Doppler: el observador hacia el que se dirige la ambulancia oye un sonido de mayor frecuencia, mientras el que está detrás, uno de menor frecuencia.

El efecto Doppler puede producirse no solo debido al movimiento de la fuente, sino también del receptor. En el caso de la propagación de ondas mecánicas, por ejemplo ondas sonoras, esto da lugar a una ecuación de dependencia de la frecuencia registrada por el receptor diferente a la anterior.

Pero cuando se trata de ondas electromagnéticas en el vacío, es totalmente equivalente considerar el movimiento del emisor respecto al receptor que el de éste respecto al emisor. En ese caso se tiene una única ecuación.

El efecto Doppler ha sido muy importante en astronomía. En particular, las estrellas representan emisores de luz en movimiento. De modo que si la luz es una onda y la estrella se mueve alejándose de nuestro planeta con cierta velocidad, entonces la frecuencia de la luz emitida por la estrella parecerá menor desde la Tierra. Este fenómeno, conocido como “corrimiento hacia el rojo”, fue apreciado ya en 1912 para varias galaxias, y confirmó la idea de que el universo no es estático, que las galaxias se alejan a grandes velocidades. Esta idea ha sido una de las más trascendentales de la ciencia.

A partir del efecto Doppler es posible incluso determinar la velocidad de alejamiento de las galaxias. Cabe señalar



El espectro de la radiación solar procedente del borde izquierdo del Sol muestra un “desplazamiento hacia el rojo”, mientras que el de la radiación procedente de su borde derecho experimenta un “desplazamiento hacia el violeta”. ¿Qué conclusión puede extraerse de este hecho?





que cuando se trata de cuerpos celestes que se mueven a velocidades que no es posible considerar pequeñas comparadas con la velocidad de la luz, la ecuación anterior no puede utilizarse, la ecuación correcta debe ser obtenida teniendo en cuenta la teoría especial de la relatividad.

**Ejemplo 1.4.** En el espectro de absorción de la galaxia Virgo se observa que la radiación de frecuencia  $7.622 \times 10^{14}$  Hz correspondiente al Calcio, aparece “desplazada hacia el rojo”. La frecuencia registrada es, aproximadamente  $7.59 \times 10^{14}$  Hz. a) Determina la velocidad con que se aleja la galaxia. b) ¿Qué fracción de la velocidad de la luz representa la velocidad de Virgo?

a) Como el emisor, que en este caso es Virgo, se aleja, la ecuación que debemos utilizar es:

$$f_R = f_E \left( \frac{v}{v + v_E} \right),$$

donde en este caso  $f_E$  es la frecuencia de la radiación en Virgo,  $f_R$  la frecuencia registrada en la Tierra,  $v$  la velocidad de la luz en el vacío y  $v_E$  la velocidad con que se aleja Virgo, que es lo que debemos calcular. Resolviendo para  $v_E$ , tenemos:

$$v_E = \frac{f_E - f_R}{f_R} v$$

Y sustituyendo los valores:

$$v_E = \frac{7.622 \times 10^{14} \text{ Hz} - 7.59 \times 10^{14} \text{ Hz}}{7.59 \times 10^{14} \text{ Hz}} (2.998 \times 10^8 \text{ m})$$

$$v_E = 1.26 \times 10^6 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

En el valor de la velocidad de la luz es suficiente emplear cuatro cifras significativas, es decir, una más que el valor que tiene menor número de ellas.

b) La velocidad de Virgo representa, aproximadamente,

$$\frac{1.26 \times 10^6 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{3 \times 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}} = 0.004$$

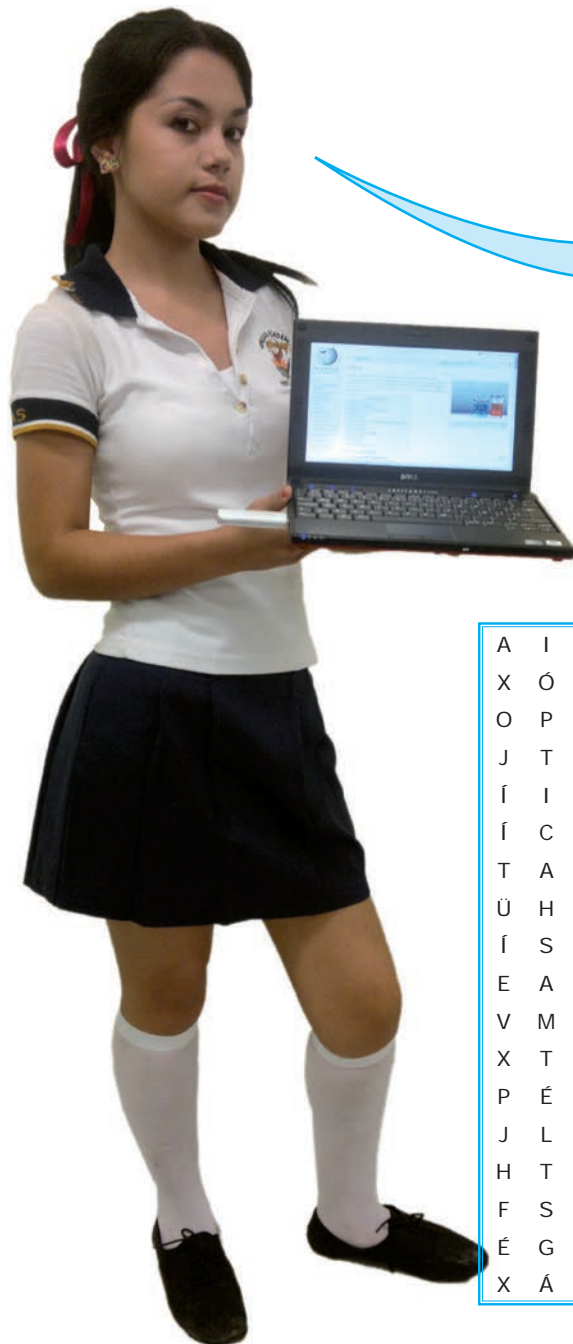
de la velocidad de la luz, o sea solo alrededor del 0.4%. Esta es la razón por la cual en este caso no es necesario utilizar la ecuación relativista para el efecto Doppler.





1.5. Actividades de sistematización y consolidación

1.5.1. Sopa de letras con palabras clave del capítulo



Escribe cada palabra en Wikipedia o en Encarta y da un vistazo a lo que encuentres.

- Absorción
- Amplitud
- Difracción
- Doppler
- Emisor
- Espejismo
- Frecuencia
- Galaxia
- Interferencia
- Luz
- Onda
- Óptica
- Oscilación
- Período
- Receptor
- Reflexión
- Refracción
- Velocidad

A	I	C	N	E	U	C	E	R	F	Q	G	A	E	G	V	E	K
X	Ó	Ú	B	M	A	B	S	O	R	C	I	Ó	N	I	Ú	Ñ	W
O	P	É	Ü	M	C	Ú	M	X	Ú	V	W	L	K	L	F	T	Y
J	T	F	E	S	W	S	Ú	G	V	C	O	D	O	Í	R	E	P
Í	I	X	C	T	I	R	E	D	A	I	X	A	L	A	G	F	W
Í	C	G	N	J	Ü	L	Y	O	S	C	I	L	A	C	I	Ó	N
T	A	I	E	Í	Y	W	H	Ñ	L	B	D	L	E	N	K	C	X
Ü	H	P	U	U	O	A	J	U	C	N	O	T	N	O	N	D	A
Í	S	C	M	C	R	R	P	Ú	O	U	V	F	Ó	J	Q	A	M
E	A	I	C	N	E	R	E	F	R	E	T	N	I	A	R	D	P
V	M	Ü	K	W	F	R	E	L	P	P	O	D	C	E	W	I	L
X	T	G	L	B	R	W	V	L	N	X	Ñ	Ó	C	U	J	C	I
P	É	Y	U	Ñ	A	N	É	G	B	O	H	E	A	T	O	O	T
J	L	U	Z	L	C	G	Z	L	G	M	P	Ü	R	J	N	L	U
H	T	T	K	Ó	C	B	Y	G	Ñ	T	L	I	F	X	Ñ	E	D
F	S	R	O	S	I	M	E	T	O	Ó	B	É	I	X	A	V	S
É	G	E	É	L	Ó	G	J	R	U	Ü	X	Á	D	S	R	P	M
X	Á	N	D	H	N	Ó	I	X	E	L	F	E	R	U	S	J	O





### 1.5.2. Conexión de conceptos e ideas

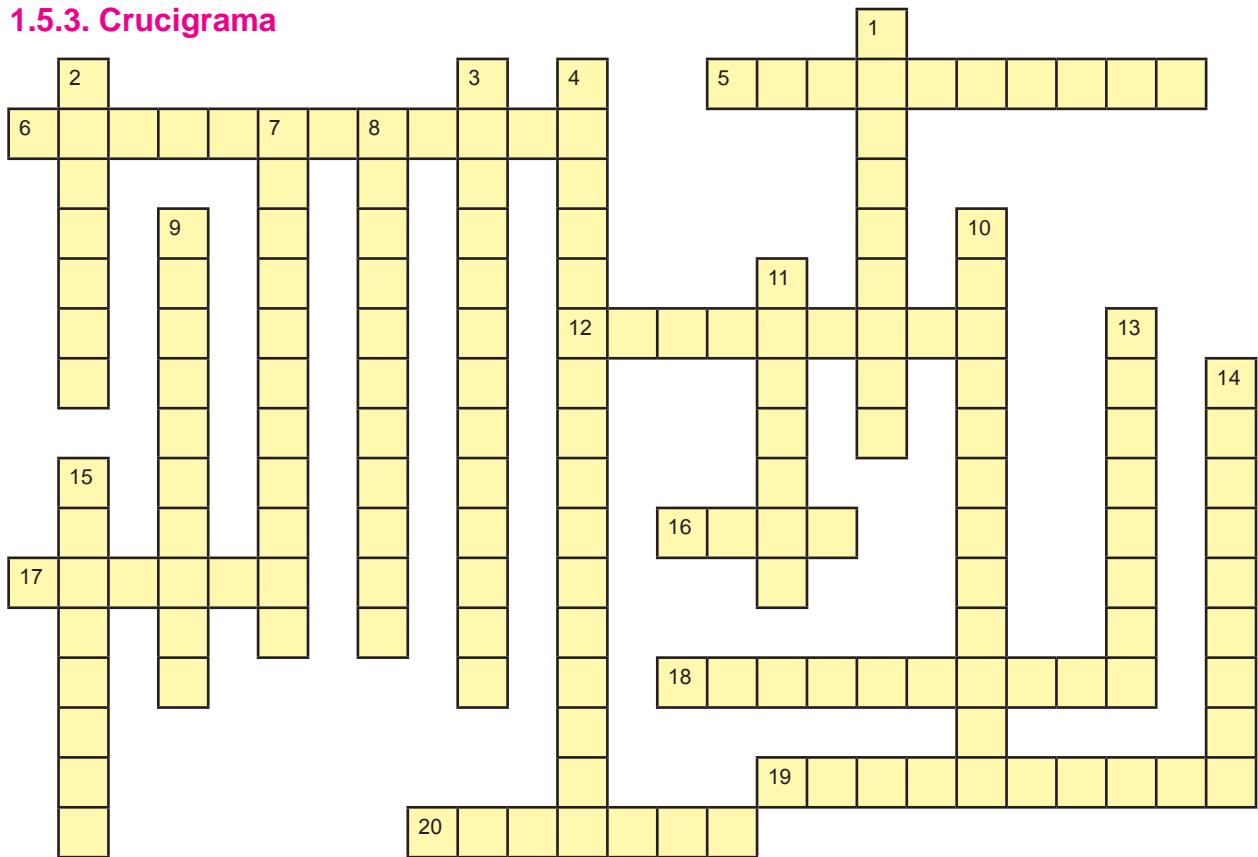
1. Desviación de las ondas al encontrar obstáculos o aberturas:  Efecto Doppler.
  2. Magnitud que resulta de multiplicar la longitud de onda y la frecuencia de una onda:  Ondas mecánicas.
  3. Distancia que recorre la oscilación en un período:  Difracción.
  4. La luz, las ondas de radio y televisión son ejemplos de:  Rayo .
  5. El sonido y los terremotos son ejemplos de:  Corrimiento hacia el rojo.
  6. Combinación de dos o más ondas en un punto:  Longitud de onda.
  7. Nombre que recibe la dirección de propagación de las ondas:  Velocidad de onda.
  8. Variación de la frecuencia registrada debida al movimiento relativo entre el emisor y el receptor de ondas.  Onda longitudinal.
  9. Componente básico de un sistema de comunicación.  Ondas electromagnéticas.
  10. Denominación de la onda cuando las oscilaciones se realizan en la misma dirección que la de propagación.  Interferencia destructiva.
  11. Cancelación del efecto de una onda con el efecto de otra.  Interferencia.
  12. Disminución de la frecuencia registrada en la Tierra para la luz emitida por una estrella, cuando ésta se aleja.  Receptor.
- Onda transversal.

Una persona está frente a una bocina que emite cierto sonido. Si comienza a soplar un fuerte viento en dirección de la bocina hacia la persona, ¿cambiarán la velocidad del sonido, su frecuencia y su longitud de onda?





1.5.3. Crucigrama



Horizontales

- 5. Cambios que experimenta una magnitud alrededor de determinado valor.
- 6. Adjetivo que caracteriza a las ondas cuando las oscilaciones tienen lugar en la misma dirección que la de propagación.
- 12. Fenómeno que tiene lugar cuando parte de la onda que incide sobre cierta superficie es devuelta.
- 16. Propagación de oscilaciones de un lugar a otro.
- 17. Parte de la física que estudia los fenómenos relacionados con la luz.
- 18. Componente básico de un sistema de comunicación.
- 19. Fenómeno el cual consiste en que parte de la onda que incide en la superficie de separación entre dos medios es transmitida y ocurre un cambio en su velocidad.
- 20. Sistema formado por cientos o miles de millones de estrellas.

Verticales

- 1. Sinónimo de oscilación.
- 2. Nombre del efecto de variación de la frecuencia registrada por el receptor respecto a la emitida, debida al movimiento relativo entre el emisor y el receptor.
- 3. Combinación de dos o más ondas en un punto.
- 4. Tipo de onda no mecánica de acuerdo a su naturaleza.
- 7. Adjetivo que caracteriza a las ondas cuando las oscilaciones tienen lugar en dirección perpendicular a la de propagación.
- 8. Adjetivo que caracteriza a la interferencia de ondas cuando sus efectos se cancelan.
- 9. Desviación de las ondas al pasar por el borde de un obstáculo o abertura.
- 10. Adjetivo que caracteriza a la interferencia de ondas cuando sus efectos se refuerzan.
- 11. Intervalo de tiempo al cabo del cual se repite cierto fenómeno.
- 13. Componente básico de un sistema de comunicación.
- 14. Fenómeno que consiste en la transformación de parte de la energía de la onda en energía interna del medio donde se propaga.
- 15. Magnitud característica de la onda que habitualmente decrece durante su propagación.





#### 1.5.4. Actividades de repaso

1. Explica desde el punto de vista de la energía, por qué cuando el sonido se propaga en medios abiertos, por ejemplo en el aire circundante, su intensidad disminuye mucho al aumentar la distancia respecto a la fuente. ¿Cómo pudiera transmitirse el sonido de un lugar a otro con menor disminución de su intensidad?
2. Las señales televisivas que se emiten en cierto lugar no llegan con suficiente potencia a regiones distantes y deben ser utilizadas estaciones “repetidoras”. Menciona algunas razones para ello.
3. Se sabe que la duración de una descarga eléctrica atmosférica (rayo) es de tan solo fracciones de segundo. ¿Por qué entonces el sonido que la acompaña (trueno) se prolonga durante un tiempo mucho mayor?
4. Intenta esclarecer los términos “onda larga” y “onda corta”, a veces utilizados al referirse a las transmisiones radiales.
5. Describe ejemplos en los que se pongan de manifiesto la absorción y la reflexión del sonido.
6. Provoca ondas en la superficie de un agua tranquila y estudia su reflexión sobre distintos cuerpos.
7. ¿Por qué al hablar frente a un objeto que parece impedir el paso del sonido a través de él, como es el caso de una gruesa columna, de todos modos se escucha el sonido del otro lado?
8. La contaminación ambiental es producida no sólo por desechos vertidos al ambiente, sino también en forma de ondas. Reflexiona acerca de las fuentes de contaminación ambiental por ondas sonoras y electromagnéticas y menciona algunos de los perjuicios que acarrea.
9. La luz emitida por ciertas estrellas de la Vía Láctea presenta un “desplazamiento hacia el violeta”. a) ¿A qué conclusión se puede llegar acerca del movimiento de esas estrellas? b) ¿Podrían pertenecer tales estrellas a otra galaxia?
10. Elabora un esquema o cuadro sinóptico que refleje los conceptos e ideas esenciales estudiados y las relaciones entre ellos.
11. Escribe un resumen de las ideas y ecuaciones esenciales estudiadas en el capítulo.





### 1.5.5. Ejercicios de repaso

1. Se generan ondas como las de la figura 1.5, introduciendo en agua el borde de una regla 15 veces en 3.0 segundos. ¿Cuál es a) el periodo de las ondas, b) su frecuencia?

**Respuesta:** a) 0.20 s, b) 5.0 Hz

2. A cierta profundidad, la velocidad de las ondas superficiales en el agua es 20 cm/s ¿Cuál será la longitud de onda de ellas, si el generador se introduce en el agua cada 0.5 s? Si la profundidad se hace menor, ¿aumentará o disminuirá la velocidad?

**Respuesta:** 10 cm, disminuirá.

3. Cierta equipo genera sonido con una frecuencia de 1000 Hz. ¿Dónde será mayor la frecuencia de las oscilaciones, en el aire o en el agua? ¿Y la longitud de onda? Utiliza la tabla 1.1 para calcular los valores de longitud de onda en cada caso.

**Respuesta:** Es la misma, 0.348 m, 1.5 m

4. Las oscilaciones a las que es sensible el oído humano, denominadas sonoras, tienen frecuencias que están entre unos 20 Hz y 20 000 Hz (20 kHz). Calcula el rango de longitudes de onda correspondientes a la propagación de las ondas sonoras en el aire.

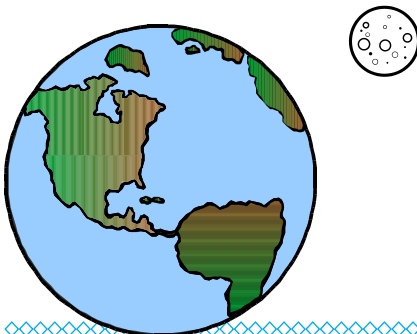
**Respuesta:** 17.4 m, 17.4 mm

5. ¿Cuáles serán las longitudes de onda en el aire y en el agua de un sonido cuya frecuencia es de 440 Hz?

**Respuesta:** 0.79 m, 3.4 m

6. Al analizar el espectro de la luz proveniente de cierta galaxia se encontró una longitud de onda de  $4.36 \times 10^{-7}$  m para una radiación que en reposo es de  $4.34 \times 10^{-7}$  m. a) ¿La galaxia se está acercando o alejando de la Tierra? b) ¿Cuál es el valor de la velocidad de la galaxia respecto a la Tierra? c) ¿Es razonable utilizar las ecuaciones para el efecto Doppler no relativista?

**Respuesta:** a) Se aleja, b)  $1.38 \times 10^6$  m/s c) si.



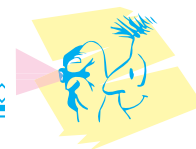


# 2 Naturaleza y propagación de la luz









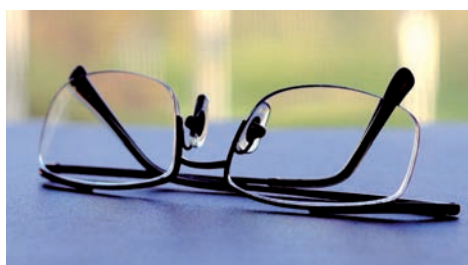
## Naturaleza y propagación de la luz

### 2.1. Introducción

En este capítulo iniciamos el estudio de la Óptica como tal. En particular, abordaremos, aunque de un modo general, dos de las preguntas centrales de este curso: *¿Qué es la luz?* y *¿Cómo se propaga?* Veremos que en la solución de estas cuestiones participaron científicos sobresalientes y que las respuestas fueron evolucionando con el desarrollo de la ciencia.

Los fenómenos relacionados con la luz tienen gran importancia en la vida del hombre y en general en nuestro planeta. Se afirma que más del 80% de la información que posee la mayoría de las personas es adquirida a través del ojo, por medio de la luz. Por otra parte, el hombre ha creado numerosos equipos, en cuyo funcionamiento se emplea la luz, entre ellos el microscopio, el telescopio, la fibra óptica, el láser. Sin la luz, en particular la luz solar, serían imposibles importantes procesos que han ocurrido y ocurren en la naturaleza, como la formación de combustibles fósiles, la fotosíntesis de las plantas, el ciclo del agua.

En la figura 2.1 se muestran imágenes de importantes dispositivos ópticos y en la Tabla 2.1 se reseñan algunos hechos relevantes relacionados con la luz.



**Fig. 2.1.** Ejemplos de dispositivos ópticos frecuentemente utilizados.



**Tabla 2.1.** Algunos hechos relevantes relacionados con la luz.

Primeras ideas acerca de la reflexión de la luz y aplicación de ellas a espejos	Euclides, s. III a.n.e
Mediciones de ángulos de incidencia y de refracción	Ptolomeo, s. II d.n.e
Idea de que la luz procedente de los objetos forma una imagen de ellos en el ojo	Alhazen, s. XI
Desarrollo de lentes para mejorar la visión	s. XIII
Microscopio de varias lentes	Hacia 1600
Primer telescopio astronómico	Galileo, 1609
Ley de la refracción	Snell, 1621
Explicación de la formación de la imagen en la retina del ojo	Kepler, s. XVII
Primeras experiencias sobre difracción de la luz	Grimaldi, 1665
Descubrimiento de células, corpúsculos de la sangre, bacterias, mediante el microscopio	1665 -1680
Descomposición de la luz en haces de diferentes colores	Newton (1666-1672)
Primeros datos (astronómicos) a partir de los cuales se calculó la velocidad de la luz	Roemer, 1676
Fundamentación de la teoría ondulatoria de la luz	Huygens, 1690
Publicación de "Óptica" por Isaac Newton	1705
Realización e interpretación de experimentos de interferencia de la luz	Young, 1801
Primera cámara fotográfica	1826
Medición de la velocidad de la luz en la Tierra	Fizeau, 1849
Descubrimiento del efecto fotoeléctrico	Hertz, 1887
Confirmación de la naturaleza electromagnética de la luz	1888.
Refutación de la noción de éter luminífero. Hipótesis cuántica de la luz	Einstein, 1905
Inventión del láser	Maiman, 1960
Comunicación mediante fibras ópticas entre oficinas, ciudades, continentes	1977, 1985, 1990
Puesta en órbita del telescopio espacial Hubble	1990



**Sir Isaac Newton** (1642-1727). Entre otros aportes, dedujo la ley de la gravitación universal, inventó el cálculo infinitesimal y realizó experimentos sobre la naturaleza de la luz y el color.

## 2.2. Naturaleza de la luz

En este apartado intentamos una respuesta, al menos inicial, a la pregunta *¿Qué es la luz?*

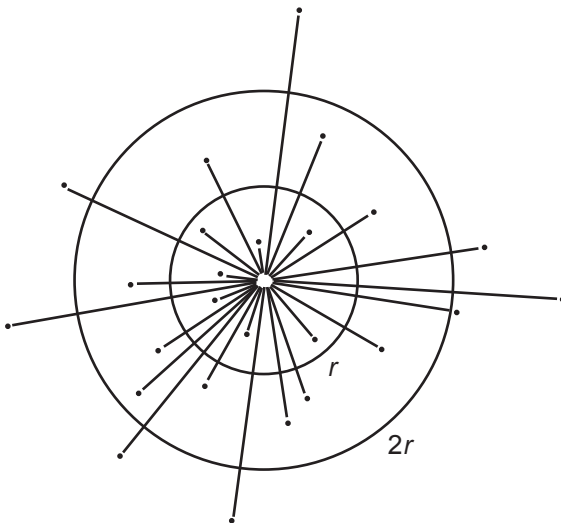
En el siglo XVII, algunos científicos, como Isaac Newton (1642-1727), suponían que la luz está compuesta de **corpúsculos** o partículas, mientras que otros, como Christiaan Huygens (1629-1695), consideraban que es una **onda**.

Newton imaginaba que las fuentes luminosas emiten corpúsculos muy livianos que se desplazan a gran velocidad y en línea recta. Según él, la intensidad de la fuente luminosa es proporcional a la cantidad de corpúsculos emitida en determinado intervalo de tiempo.



La hipótesis anterior permite explicar el decrecimiento de la iluminación de una pequeña fuente al aumentar la distancia.

Así, supongamos que la iluminación de la superficie es directamente proporcional a la cantidad de partículas que llega a ella por unidad de área en la unidad de tiempo. Si la cantidad de partículas emitida por la fuente en la unidad de tiempo es  $N_o$ , entonces, a una distancia  $r$  de la fuente las partículas se encontrarán distribuidas en una esfera de área  $4\pi r^2$  (Fig. 2.2), por lo que la cantidad que corresponde a la unidad de área es solo  $N_o/4\pi r^2$ . De aquí se infiere que la iluminación decrece con el cuadrado de la distancia, lo cual se ve confirmado por los experimentos.



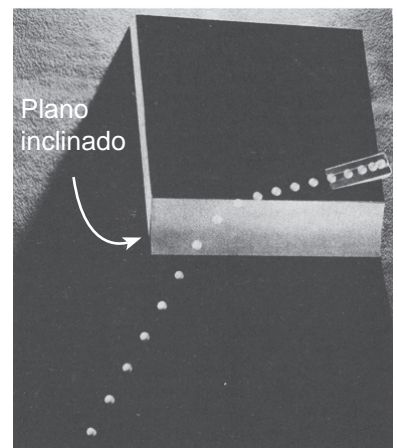
**Fig. 2.2.** La cantidad  $N_o$  de partículas emitidas por una fuente puntual en la unidad de tiempo, se distribuye en un área esférica cada vez mayor  $r$ . A la distancia  $r$  corresponden  $N_o/4\pi r^2$  partículas por unidad de área.

Para Newton, la reflexión de la luz era semejante al choque perfectamente elástico de una bola con cierta superficie.

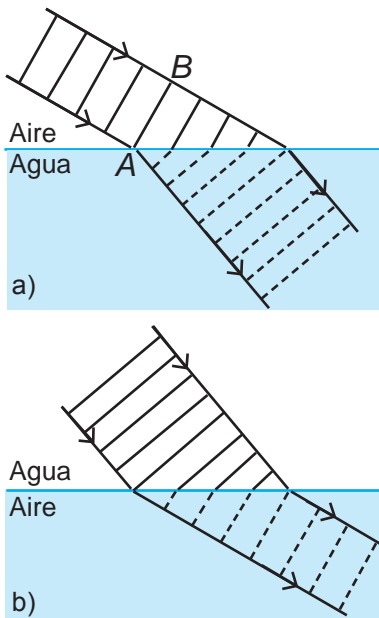
La refracción de la luz al pasar de un medio a otro más denso la explicaba suponiendo que al incidir en la superficie de separación, la atracción de las partículas del medio más denso origina un aumento en la componente de la velocidad perpendicular a la superficie. En la figura 2.3 se ilustra el modelo corpuscular de la “refracción”: una esferita pasa de cierta superficie a otra de menor elevación, con el consiguiente aumento de velocidad.



**Christiaan Huygens** (1629-1695). Introdujo y desarrolló la teoría ondulatoria de la luz en el siglo XVII.



**Fig. 2.3.** Ilustración del modelo corpuscular de la refracción: una esferita que rueda sobre cierta superficie aumenta su velocidad al pasar a otra superficie situada en un nivel inferior.



**Fig. 2.4.** La parte del frente de onda que penetra en un medio distinto: a) disminuye su velocidad y se retrasa, b) aumenta su velocidad y se adelanta.



**Thomas Young** (1773-1829). Entre otros aportes a la física, realizó e interpretó experimentos de interferencia luminosa, que apoyaron el modelo ondulatorio de la luz.

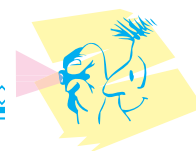
En cierto modo, el modelo corpuscular daba una explicación de la reflexión y la refracción separadamente, pero cuando se trataba de esclarecer la ocurrencia simultánea de ambos fenómenos se hacía complicado. Por otra parte, la hipótesis corpuscular considera que la luz aumenta su velocidad al pasar del aire a otros medios, y las mediciones de velocidad de la luz en agua y otros líquidos, realizadas en la segunda mitad del siglo XIX, mostraron que, por el contrario, disminuía.

De esta forma, **el modelo corpuscular de la luz permite explicar de modo general una serie de fenómenos ópticos, sin embargo, al entrar en los detalles se complica, o falla.**

Por su parte, el modelo ondulatorio también explica la dependencia de la iluminación con la distancia, y como la reflexión y refracción de la luz. Así, la iluminación puede suponerse dependiente de la amplitud de la onda, la cual, como vimos en el capítulo anterior, en el caso de ondas circulares y esféricas disminuye con la distancia, debido a la distribución de las oscilaciones en una región cada vez mayor. Vimos, además, que al llegar a la superficie de separación entre dos medios, las ondas pueden reflejarse y también transmitirse, cambiando su velocidad y dirección de propagación.

Para explicar la desviación que tiene lugar cuando la onda incide formando cierto ángulo con la superficie de separación, Huygens supuso que la parte del frente de onda que penetra en un medio distinto adquiere diferente velocidad, debido a lo cual puede retrasarse (Fig. 2.4a), o adelantarse (Fig. 2.4b), respecto a la otra parte.

El experimento de interferencia de la luz realizado por Thomas Young (1773-1829) en 1801, el cual estudiaremos detalladamente en el capítulo cuatro, y la explicación detallada que Augustin Fresnel (1788-1827) dio de la difracción de la luz, apoyaron la teoría ondulatoria. Posteriormente, el desarrollo de la teoría electromagnética en las décadas de 1870 y 1880 mostró que la luz puede considerarse una onda electromagnética.

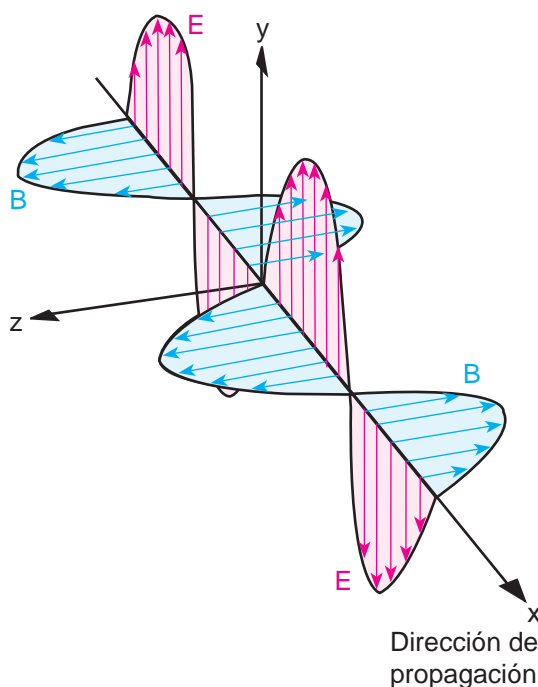


Todo lo anterior parecía confirmar definitivamente el modelo ondulatorio de la luz, desarrollado por Huygens y sus seguidores. **A finales del siglo XIX la mayoría de los físicos había desechado el modelo corpuscular y consideraban a la luz una onda electromagnética.**

Las ondas electromagnéticas consisten en la propagación de campos eléctrico y magnético oscilatorios. Son ondas transversales, porque las direcciones en que se producen las oscilaciones de los campos son perpendiculares a la de propagación (Fig. 2.5). Como ya sabes, la velocidad de propagación de ellas en el aire es aproximadamente 300000 km/s, en otros medios es menor, pero de todos modos muy grande.

Las ondas electromagnéticas se clasifican en varios tipos, atendiendo a determinados rangos de sus frecuencias (Fig. 2.6). Así, en orden creciente de frecuencia tenemos: las ondas de radio habituales, de baja y alta frecuencia; las ondas de FM y de televisión; las microondas; la radiación infrarroja; la luz visible; la radiación ultravioleta; los rayos X; los rayos gamma. Esta gama de ondas electromagnéticas es lo que se conoce como **espectro de las ondas electromagnéticas**. Hasta alrededor de 1880 no se tenía conciencia de ellas. En esa década se llegó al convencimiento de que la luz es una onda electromagnética y Heinrich Hertz produjo las ondas que hoy denominamos ondas de radio. Los rayos X fueron descubiertos en 1895, los rayos gamma se detectaron por primera vez como emisiones de sustancias radioactivas naturales (uranio, radio, etcétera).

Si la luz puede ser considerada una onda electromagnética, como por ejemplo las de radio o televisión, entonces ¿a qué se deben sus diferencias con éstas? La clave de la respuesta está en las palabras **frecuencia y longitud de onda**.



**Fig. 2.5.** Representación esquemática de las oscilaciones de los campos eléctrico (E) y magnético (B) en una onda electromagnética.

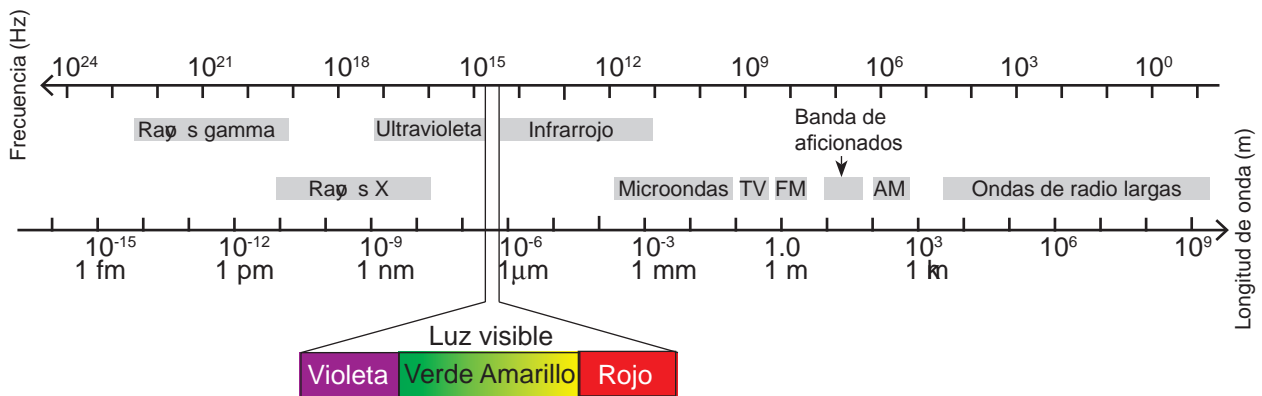


Fig. 2.6. Espectro de ondas electromagnéticas, mostrando la región visible.

De modo similar que el oído humano solo detecta ondas de frecuencias entre unos 20 Hz y 20 kHz, el ojo humano únicamente es sensible a las ondas electromagnéticas de frecuencias que están aproximadamente entre  $4.3 \times 10^{14}$  Hz y  $7.5 \times 10^{14}$  Hz, o lo que es equivalente, de longitudes de ondas entre unos 700 nm y 400 nm ( $1 \text{ nm} = 1 \times 10^{-9} \text{ m}$ ), Fig. 2.6.

**Se denomina *luz*, o *luz visible*, aquella parte del espectro de las ondas electromagnéticas a la que el ojo humano es sensible, es decir, que es capaz de producir la visión.**

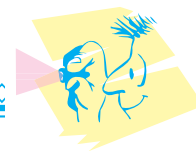


**James Clerk Maxwell** (1831-1879). Fue uno de los científicos más importantes del siglo XIX. Entre sus aportes está el haber mostrado la naturaleza electromagnética de luz.

En el rango de ondas electromagnéticas visibles hay toda una gama de diferentes frecuencias, que al incidir en el ojo producen las sensaciones de los diversos colores a que estamos acostumbrados: rojo, anaranjado, amarillo, verde, azul, índigo (añil) y violeta. Los colores representan, pues, a los efectos de la percepción luminosa, algo similar que los tonos (agudos, bajos) en lo que se refiere a la percepción sonora.

**La luz habitual es una mezcla de ondas electromagnéticas de múltiples frecuencias.**

Las ondas electromagnéticas de frecuencias inferiores a las que provocan la sensación de rojo se denominan **infrarrojas** y las de frecuencias superiores a las que producen la sensación de violeta, **ultravioleta**.



**Ejemplo 2.1.** Encuentre la longitud de onda de la luz roja con una frecuencia de  $4.7 \times 10^{14}$  Hz. Compárela con la longitud de una onda de radio de 60 Hz.

Entre la frecuencia y la longitud de onda existe una estrecha relación, a cada frecuencia corresponde determinada longitud de onda y viceversa. Ellas se relacionan por medio de la velocidad de propagación:

$$v = \frac{\lambda}{T} = \lambda f$$

De aquí que  $\lambda = \frac{v}{f}$

El valor de la velocidad de la luz podemos considerarlo, aproximadamente,  $3.0 \times 10^8$  m/s. De modo que al sustituir los valores en la ecuación:

$$\lambda = \frac{3.0 \times 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{4.7 \times 10^{14} \text{ Hz}} = 6.38 \times 10^{-7} \text{ m} = 638 \text{ nm}$$

La longitud de onda de la onda de radio es:

$$\lambda' = \frac{v}{f'} = \frac{3.0 \times 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{60 \text{ Hz}} = 5 \times 10^6 \text{ m} = 5000 \text{ km}$$

La comparación la hacemos tomando la razón de las dos longitudes de onda:

$$\frac{\lambda'}{\lambda} = \frac{5.0 \times 10^6 \text{ m}}{6.38 \times 10^{-7} \text{ m}} = 7.8 \times 10^{12}$$

O sea, la longitud de onda de la onda de radio de 60 Hz es, aproximadamente, 7.8 billones de veces mayor que la longitud de onda de la luz roja.

Pese al rotundo éxito que hacia la década de 1880 había alcanzado el modelo ondulatorio de la luz, muy pronto surgieron serias dificultades.

En aquella época, la onda electromagnética se consideraba similar a una onda mecánica y, por tanto, se suponía que era indispensable un medio para su propagación. Ese medio lo llamaban **éter luminífero**, y se pensaba que es una sustancia sutil que ocupa todo el espacio y penetra todos los cuerpos.



**Albert Einstein** (1879-1955). En 1905 mostró que la noción de éter luminífero es innecesaria; también formuló la hipótesis acerca del comportamiento cuántico de la luz.

Realiza un breve resumen de la evolución de las interpretaciones de la naturaleza de la luz. Señala algunas limitaciones de los modelos corpuscular y ondulatorio.



No había evidencia experimental alguna de la existencia del éter luminífero y los físicos se esforzaban por encontrarla. Sin embargo, los experimentos realizados con este propósito por Michelson y Morley en 1887, dieron un resultado negativo. No obstante, era tal la convicción de que las ondas necesitan un medio para propagarse, que no se creyó en la inexistencia del éter luminífero que sugerían los experimentos y se elaboraron complicadas interpretaciones de los resultados experimentales obtenidos, a fin de preservar la idea de su existencia.

En 1905, en su famoso trabajo acerca de la teoría especial de la relatividad, “*Sobre la electrodinámica de los cuerpos en movimiento*”, Einstein mostró que la noción de éter luminífero es superflua: **la luz a diferencia de las ondas mecánicas, no requiere de medio alguno para propagarse.**

Por otra parte, en la propia década de 1880, **una serie de experimentos relativos al efecto fotoeléctrico mostraron que la luz posee ciertas propiedades que no pueden ser explicadas suponiendo que es una onda.** Y de nuevo fue Einstein quien en el propio año 1905, en el trabajo “*Sobre un punto de vista heurístico acerca del surgimiento y transformación de la luz*”, formuló la hipótesis de su comportamiento en forma de **cuantos**. Aunque a veces éstos se identifican con corpúsculos, como los imaginados por Newton, entre ellos existe una diferencia esencial. Los corpúsculos se refieren a porciones de sustancia que pueden estar en reposo, mientras que los cuantos ni son de sustancia ni es posible encontrarlos en reposo.

**En realidad, la luz manifiesta un comportamiento ondulatorio o cuántico, en dependencia de la situación de que se trate.**

En este apartado hemos respondido, parcialmente, a una de las cuestiones fundamentales de la Óptica, ¿*Qué es la luz?*; en el cuarto capítulo, Óptica Física, continuaremos profundizando en la respuesta a esta pregunta. A continuación comenzaremos a responder otra de las cuestiones clave de la Óptica, ¿*Cómo se propaga la luz?*





### 2.3. Propagación de la luz

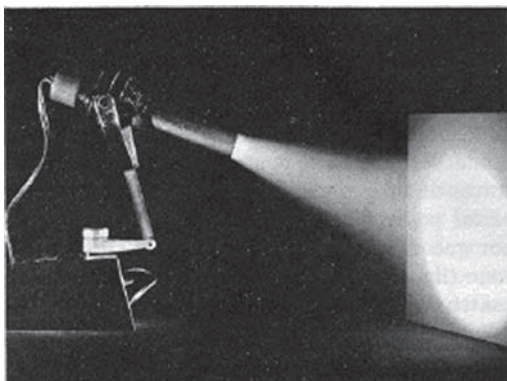
Para evitar que la luz de un foco nos deslumbre, interponemos entre él y nuestros ojos una libreta, una mano u otro objeto opaco. Éste y otros hechos de la vida cotidiana sugieren que **en el aire que nos rodea, la luz se propaga en línea recta**. Si no fuese así, entonces la luz del foco no podría llegar a nuestros ojos.

Una manera sencilla de mostrar la propagación rectilínea de la luz es como sigue:

Toma una hoja de papel y confecciona con ella un cono (Fig. 2.7); dirige la abertura mayor sobre un foco y coloca la palma de tu otra mano cerca de la abertura menor. Verás una zona circular iluminada en la palma de tu mano. Esta zona circular corresponde a la prolongación del cono hasta la mano. Si la luz no viajara en línea recta, la zona iluminada en la palma de la mano podría ser diferente: mayor, menor, irregular.

**Las líneas rectas que indican la dirección de propagación de la luz es decir de la onda luminosa, se denominan rayos de luz.**

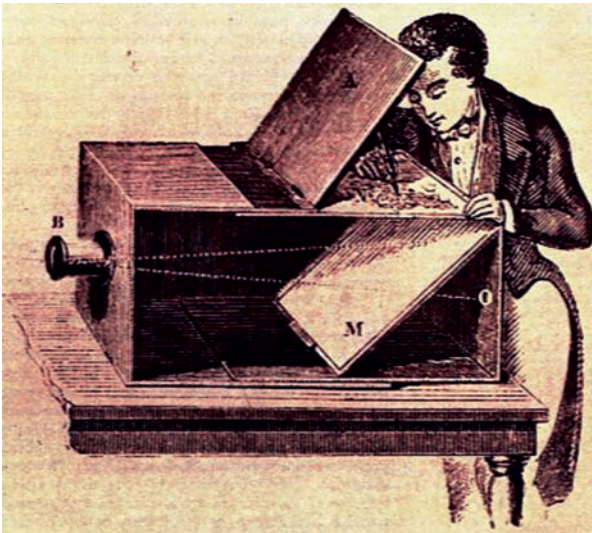
La luz de un foco se propaga en el espacio en todas direcciones, pero con frecuencia limitamos la zona de su propagación, como por ejemplo en la experiencia con el cono de papel, o en la experiencia ilustrada en la figura 2.8. Esa zona dentro de la cual se propaga la luz se denomina **haz de luz**. Los bordes rectos del haz luminoso de la figura 2.8 apoyan la idea de que la luz viaja en línea recta.



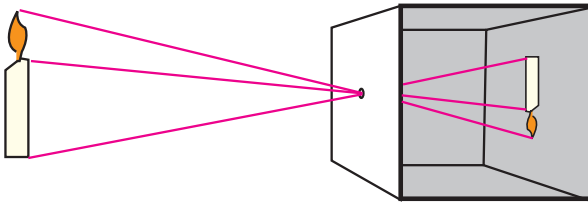
**Fig. 2.8.** Haz de luz de una linterna. Al introducir partículas de polvo en el aire se hace visible en la oscuridad.



**Fig. 2.7.** La zona circular iluminada en la palma de la mano corresponde a la prolongación del cono hasta la mano.



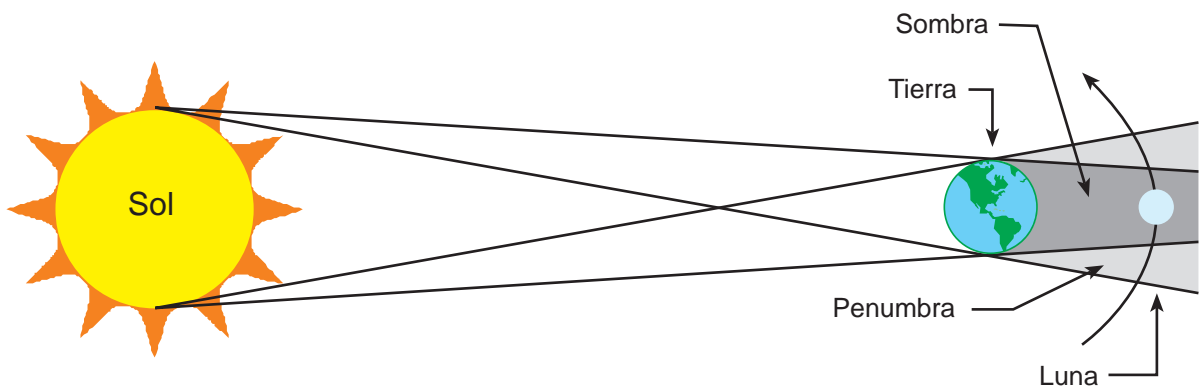
Cámara oscura de finales del siglo XVIII. Utilizada para reproducciones de paisajes y en arquitectura.



Esquema de una cámara oscura. A través del pequeño orificio en una de las caras de la cámara, penetra luz procedente de los objetos, proyectando la imagen de estos sobre la cara opuesta.

La idea de la propagación rectilínea de la luz constituye una de las más antiguas en la Óptica. Aunque se atribuye a Euclides (300 a.n.e.), probablemente era conocida y utilizada mucho antes. Permite explicar numerosos hechos, como la formación de sombras, los eclipses, la formación de imágenes en una **cámara oscura** (antecesora de la cámara fotográfica) y otros. De ella nació el habitual procedimiento de comprobar la rectitud de los objetos alineándolos con nuestro ojo. Pero, **al igual que otras ondas, la luz no siempre se propaga en línea recta.**

En los ejemplos analizados anteriormente hemos supuesto que el medio en el cual se propaga la luz es **homogéneo, o sea que tiene las mismas propiedades en todos sus puntos.** En estas condiciones, las ondas, incluida la luz, se transmiten en línea recta. Sin embargo, **nuestro entorno es de por sí no homogéneo**, está repleto de cuerpos diversos, que actúan sobre la luz y otras ondas de distintos modos, en particular, desviándolas de su dirección de propagación, como estudiamos en la unidad anterior.



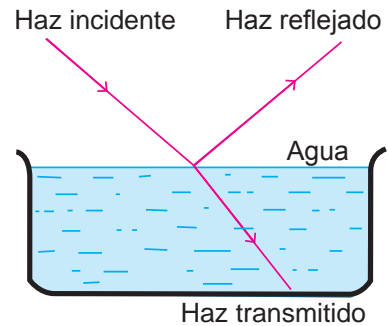
Un eclipse de Luna se produce cuando la Tierra se interpone entre el Sol y la Luna, y su sombra oscurece la Luna. Cuando la Luna entra en el cono de sombra de la Tierra, se produce un eclipse total de Luna.



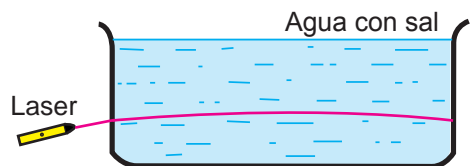
Ya sabemos que cuando las ondas inciden sobre los cuerpos, una parte puede ser reflejada, otra absorbida y otra transmitida, desviándose de su dirección inicial de propagación. Ello puede ser claramente apreciado en el caso de la luz. Si se hace incidir con cierta inclinación un haz de luz sobre un cuerpo de vidrio o la superficie de agua (Fig. 2.9), se observa un haz reflejado y, además, otro que se transmite. Ambos tienen una dirección diferente a la inicial. Los hechos examinados anteriormente permiten concluir que:

**En los medios transparentes y homogéneos, la luz se propaga en línea recta, pero en los no homogéneos puede desviarse.**

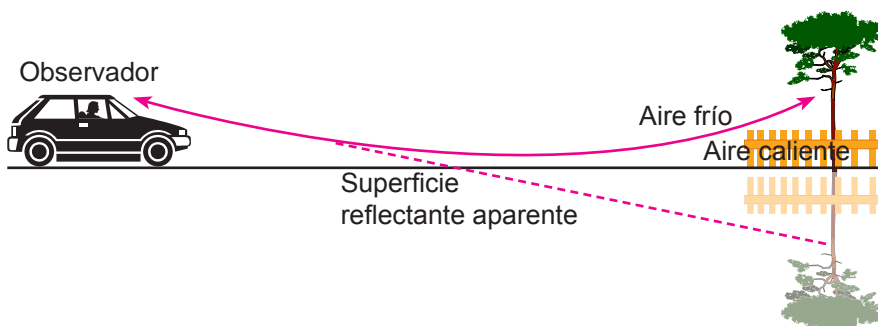
La figura 2.10 muestra el esquema de una cubeta que contiene una solución de agua con sal, cuya densidad disminuye al aumentar la altura. Debido a esto, la trayectoria del haz de luz que penetra por la izquierda no es rectilínea. Algo similar tiene lugar cuando una carretera asfaltada se calienta mucho, provocándonos el espejismo, o ilusión óptica, de que, a lo lejos, hay como si fuera agua en ella. En este caso sucede a la inversa que en la experiencia de la figura 2.10, la densidad del aire cerca del asfalto aumenta con la altura, debido a lo cual, ciertos haces procedentes de objetos lejanos, que normalmente incidirían sobre la carretera, son desviados hacia arriba antes de llegar a ella y ser absorbidos por el asfalto.



**Fig. 2.9.** Trayectoria de la luz al incidir en la superficie del agua. El medio aire-agua, considerado en conjunto, no es homogéneo.

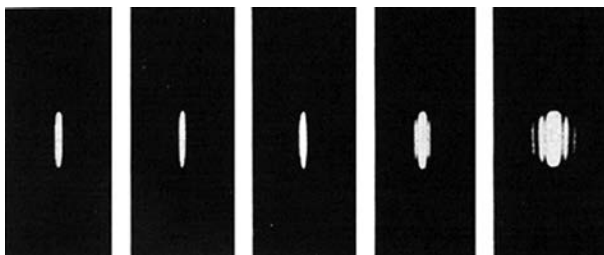


**Fig. 2.10.** Desviación de un estrecho haz de luz al atravesar una solución de agua con sal cuya densidad disminuye al aumentar la altura.



Dibujo (muy exagerado) de un espejismo en la carretera.





**Fig. 2.11.** Manchas luminosas producidas en una pantalla por un mismo haz de luz que incide sobre varias rendijas. De izquierda a derecha las rendijas se hacen cada vez más estrechas, pero, paradójicamente, las dos manchas del extremo derecho son más anchas.

Cuando nos sentamos alrededor de una fogata y observamos las caras de las personas que tenemos en frente, notamos ciertas deformaciones. ¿Cómo se explica esto?



La desviación de la luz de su propagación rectilínea puede tener lugar también en otras situaciones, de cierto modo inesperadas. Así, la experiencia nos dice que es posible obtener un estrecho haz luminoso, haciéndolo incidir sobre una rendija y que mientras menor sea el ancho de ésta, más estrecho será el haz. Esto sugiere la posibilidad de obtener un haz tan fino como queramos, disminuyendo el ancho de la rendija. De ahí que con frecuencia un rayo de luz se interprete –

erróneamente- como un haz cuyo ancho se disminuye indefinidamente. Pero paradójicamente, **al intentar disminuir el ancho del haz estrechando la rendija, se llega a un punto a partir del cual comienza a obtenerse justamente lo contrario: el ensanchamiento del haz** (Fig. 2.11). Si el haz se “abre” al atravesar la rendija, ello significa que la luz no conserva su dirección de propagación inicial. Este sorprendente resultado se debe a la difracción, fenómeno que ya conociste en el capítulo anterior y en el cual profundizaremos en el capítulo cuatro.

La difracción de la luz al pasar por un orificio fue observada ya por Francesco Grimaldi, un sacerdote jesuita, a mediados del siglo XVII. Newton explicó el resultado del experimento de Grimaldi a partir del modelo corpuscular, suponiendo que los corpúsculos luminosos interactúan con el borde del orificio y argumentó que si la luz fuese una onda, la desviación hubiese sido mayor.

Newton no tuvo en cuenta que la mayor o menor desviación de una onda al pasar por un orificio depende de su frecuencia, y que la pequeña desviación observada en el caso de la luz se debe a que su frecuencia es muy grande.

Otra importante cuestión de la Óptica, que forma parte de la pregunta *¿Cómo se propaga la luz?*, es la de su velocidad de propagación. Esta cuestión la abordamos en el siguiente apartado.



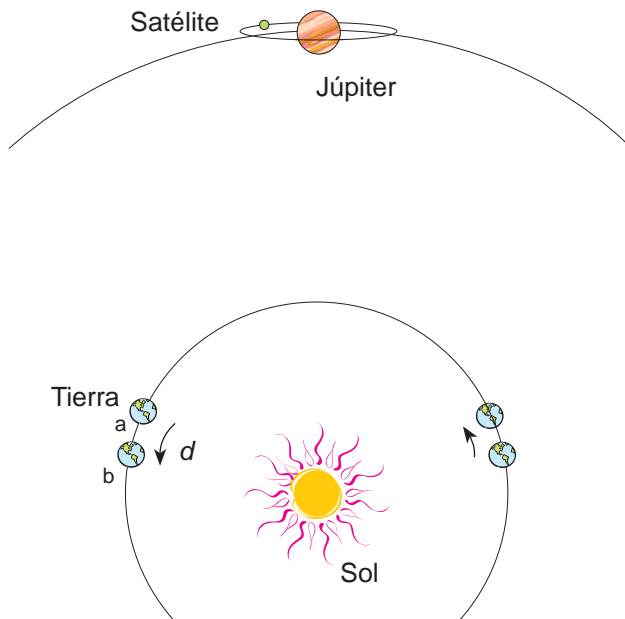
## 2.4. Velocidad de la luz

Galileo Galilei (1564-1642) intentó comprobar que la luz no se propaga instantáneamente de un lugar a otro, sin embargo, no contaba con los medios técnicos necesarios para ello.

El astrónomo danés Olaus Röemer (1644-1710) fue el primero en mostrar, a partir de observaciones astronómicas, que la velocidad de la luz es finita, conclusión que ha sido de trascendental importancia para la ciencia. Advirtió que, medido desde la Tierra, el período de los satélites de Júpiter varía con la época del año. Röemer supuso correctamente que esto no era una irregularidad en el movimiento de los satélites, sino un efecto debido a que en el intervalo que dan la vuelta a Júpiter, la Tierra puede alejarse del planeta o acercarse a él. En la figura 2.12 se ha hecho una representación esquemática de la situación. Supongamos que la Tierra se está moviendo en la parte izquierda de su órbita, alejándose de Júpiter, y que cuando se encuentra en (a) se ve aparecer al satélite (en realidad



**Galileo Galilei** (1564-1642). Estaba convencido de que la velocidad de la luz es muy grande, pero finita. Realizó grandes aportes a la física, la astronomía y, en general a la ciencia.



**Fig. 2.12.** Esquema que ayuda a comprender la aparente irregularidad en el período de uno de los satélites de Júpiter. En la parte izquierda de la órbita de la Tierra su período parece mayor que el real y en la parte derecha menor.



**Olaus Röemer** (1644-1710). A partir de observaciones astronómicas, mostró que la luz se propaga a velocidad finita. Basándose en los datos obtenidos por él, fue calculada por primera vez la velocidad de la luz.



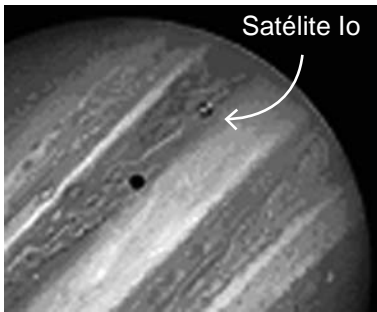


Foto de Júpiter, su satélite más cercano a él, lo y la sombra de éste, tomada por el Telescopio Espacial Hubble.

el satélite debió haber salido de detrás de Júpiter mucho antes, pues para verlo aparecer la luz tuvo que haber viajado una distancia del orden de  $10^{12}$  m). Cuando se vea aparecer nuevamente al satélite, la Tierra se encontrará en (b), porque esta vez la luz habrá tenido que recorrer la distancia anterior, más otra adicional  $d$ . Esta distancia adicional recorrida por la luz hace que el período del satélite parezca mayor. Si la Tierra se está moviendo en la parte derecha de la órbita acercándose a Júpiter, el efecto es contrario, el período del satélite parecerá menor que el real. A partir de datos obtenidos por Röemer se calculó para la velocidad de la luz alrededor de  $2 \times 10^8$  m/s.

**Ejercicio 2.2.** El período de Io, uno de los satélites de Júpiter, es 16.69 días. Sin embargo, cuando en su órbita alrededor del Sol, la Tierra se mueve alejándose de Júpiter (Fig. 2.12), el periodo que se aprecia es mayor. Este período observado desde la Tierra llega a exceder al real en unos 143 segundos. Determina la velocidad de la luz a partir de esta información. Considera que la velocidad de la Tierra en su órbita alrededor del Sol es 29.8 km/s.

El máximo período de Io se aprecia cuando la Tierra está en una porción tal de su órbita alrededor del Sol, que se mueve alejándose de Júpiter aproximadamente en la dirección de la línea entre ella y Júpiter. En ese caso, en el intervalo de tiempo desde que Io da la vuelta a Júpiter (16.69 días), la Tierra se ha alejado de Júpiter una distancia:

$$d = vT = \left(29.8 \frac{\text{km}}{\text{s}}\right) \left(16.69 \text{ día} \times \frac{24 \text{ hora}}{1 \text{ día}} \times \frac{3600 \text{ s}}{1 \text{ hora}}\right) = 4.30 \times 10^7 \text{ km}$$

Para observar desde la Tierra la nueva aparición de Io, la luz debe recorrer esa distancia adicional, en lo que invierte 143 s, dando la impresión que el período de Io ha aumentado. La velocidad a que la luz recorre esa distancia, es decir, la velocidad de la luz, es:

$$c = \frac{4.30 \times 10^7 \text{ km}}{143 \text{ s}} = 3 \times 10^5 \frac{\text{km}}{\text{s}} = 3 \times 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$



En 1849, el físico francés Fizeau (1819-1896) logró por primera vez medir la velocidad de la luz mediante una experiencia realizada en la Tierra. Determinó el tiempo empleado por la luz en hacer el recorrido de ida y vuelta entre la terraza de su casa y el vidrio de la ventana de una casa en la cual se reflejaba, situada sobre una colina a unos 8 km . Para determinar ese intervalo de tiempo, colocó una rueda dentada que giraba a gran velocidad delante del haz luminoso. Luego reguló la velocidad de la rueda de modo que la luz que pasaba entre sus dientes tuviera justo el tiempo de llegar hasta la ventana y volver antes de ser ocultada por el siguiente diente. Conociendo la velocidad de rotación de la rueda, Fizeau obtuvo para la velocidad de la luz  $315300 \text{ km /s}$ .



**Armand Fizeau** (1819-1896). El primero en medir la velocidad de la luz en la Tierra.

Foucault (1819-1868) perfeccionó el método de Fizeau, sustituyendo la rueda dentada por un sistema de espejos en rotación, y obtuvo un valor de  $298000000 \text{ m/s}$ .

Sin embargo, fue Michelson quien obtuvo un valor prácticamente igual al hoy aceptado. Como valor aproximado suele tomarse  $300000 \text{ km /s}$ . Para proporcionar una idea de lo que representa este valor, digamos que un objeto que se mueva con tal velocidad podría dar casi siete y media vueltas alrededor de la Tierra en tan solo un segundo.

Los experimentos realizados por Michelson y Morley en 1887, como ya hemos dicho, sugirieron que el supuesto éter lumínico en el cual se propaga la luz no existe y que la velocidad de ésta en el aire es prácticamente constante.

Hoy se tiene la certeza de que:

**La velocidad de la luz en el vacío es constante, independiente de la velocidad de la fuente que la emite, y representa un valor límite.**

Así, al ver los faros de un carro que avanza hacia nosotros, el sentido común nos dice que la velocidad de la luz que apreciamos debe ser la suma de la relativa al carro más la del carro respecto a nosotros. Sin embargo, en realidad es la misma, ya esté el carro en reposo o en movimiento.



**Jean-Bernard-Leon Foucault** (1819-1868). Realizó importantes trabajos sobre la velocidad de la luz.





**Albert A. Michelson** (1852-1931). Midió la velocidad de la luz y, junto con Morley, realizó experimentos a fin de comprobar la existencia del éter lumínico. Estos experimentos dieron un resultado negativo.

Es tal la confianza que se tiene en la constancia de la velocidad de la luz en el vacío, que se adoptó como definición un valor para ella: 299792458 m/s. A partir de este valor, en 1981 se redefinió el metro como la longitud que recorre la luz en el vacío en un intervalo de tiempo de  $1/299792458$  de segundo.

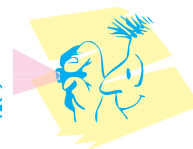
Para medir distancias astronómicas frecuentemente se utiliza una unidad de longitud llamada **año luz (A.L.)**, que es la distancia recorrida por la luz en el vacío en un año. Ella equivale, aproximadamente, a  $9.5 \times 10^{15}$  m. La estrella visible más cercana a la Tierra, Alpha Centauri, está a 4.3 años luz, lo que significa que la luz procedente de ella tarda 4.3 años en llegar a la Tierra.

Nuestro sistema solar se encuentra en la galaxia denominada Vía Láctea, cuyo diámetro es de unos 100 000 años luz y el Sol está situado a 30 000 años luz del centro de esta galaxia. La galaxia más próxima a nosotros, Andrómeda, dista dos millones de años luz. Eso significa que si se produce una explosión en alguna estrella de esa galaxia, no será sino hasta después de dos millones de años que registraremos la explosión aquí en la Tierra.

En este capítulo hemos considerado dos de las cuestiones fundamentales de la Óptica, *¿Qué es la luz?* y *¿Cómo se propaga?* Vimos que la respuesta a la primera pregunta ha evolucionado a lo largo de la historia de la ciencia. Muchos fenómenos pueden ser explicados suponiendo que la luz es una onda electromagnética, pero la interpretación de otros requiere retomar el modelo corpuscular de Newton en una nueva forma, en la cual las porciones no son partículas de sustancia, sino cuantos de luz.

En lo que se refiere a la segunda pregunta llegamos a la conclusión que, en los medios homogéneos la luz se propaga en línea recta pero en los no homogéneos puede desviarse. Un ejemplo sorprendente de este último caso lo constituye el fenómeno de la difracción. Por otra parte, conociste que la velocidad de propagación de la luz no solo es finita, sino que además es constante, independiente de la velocidad con que se mueve la fuente que la emite.





En los siguientes capítulos ampliaremos las respuestas a las dos preguntas anteriores. En el que sigue a continuación, la naturaleza de la luz no aparecerá como relevante y al considerar su propagación trataremos los haces estrechos como líneas o rayos. Esta parte de la Óptica comúnmente se denomina **Óptica Geométrica**. En el otro capítulo ahondaremos en fenómenos luminosos que tienen lugar a una escala menor que la habitual, es decir, cuando la luz incide sobre aberturas o cuerpos de dimensiones muy pequeñas y cuando interacciona con los átomos. En este caso será indispensable considerar la naturaleza de la luz, su comportamiento ondulatorio o corpuscular. Esta parte de la Óptica generalmente se denomina **Óptica Física**.





2.5. Actividades de sistematización y consolidación

2.5.1. Sopa de letras con palabras clave del capítulo

Escribe cada palabra en Wikipedia o en Encarta y da un vistazo a lo que encuentres.

- Óptica
- Luz
- Láser
- Microscopio
- Telescopio
- Éter
- Onda
- Corpúsculo
- Frecuencia
- Reflexión
- Espectro
- Infrarroja
- Ultravioleta
- Refracción
- Ray
- Haz
- Eclipse
- Espejismo
- Interferómetro
- Año-Luz

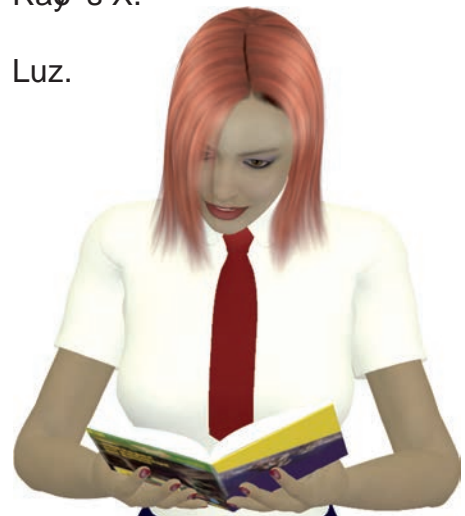


N	T	U	Ú	<b>Ó</b>	<b>P</b>	<b>T</b>	<b>I</b>	<b>C</b>	<b>A</b>	M	F	L	H	Ñ	Í	O	O
Ñ	Á	A	E	T	Ú	E	E	Ñ	Q	G	U	V	F	J	R	Ñ	N
Z	H	X	J	I	V	R	K	F	Ñ	Z	U	F	R	T	H	C	D
É	X	E	Ó	L	R	Ü	R	G	U	U	Y	É	E	G	Z	A	A
Y	B	Y	Á	I	B	A	K	L	R	O	Ó	M	C	E	H	T	É
W	Q	J	N	F	S	X	O	S	R	I	Ó	D	U	K	Á	E	O
F	O	Ü	S	A	W	Ñ	L	T	V	R	S	Ñ	E	Í	O	L	Í
Ü	L	D	T	D	A	R	C	V	E	X	B	V	N	Z	M	O	Á
É	U	J	É	H	O	E	E	F	Ñ	C	G	Ú	C	E	S	I	D
X	C	S	A	K	P	L	R	F	C	A	U	Ó	I	S	I	V	Y
M	S	Z	É	S	Á	E	K	Ü	R	Ó	F	R	A	P	J	A	R
U	Ú	Ú	E	S	T	F	É	D	W	A	E	Á	W	I	E	R	A
B	P	I	E	N	D	A	E	D	T	T	C	F	K	L	P	T	Y
V	R	R	I	Y	S	F	S	V	É	U	D	C	Á	C	S	L	O
C	O	Ñ	R	E	F	L	E	X	I	Ó	N	Y	I	E	E	U	X
A	C	O	I	P	O	C	S	E	L	E	T	J	Ü	Ó	B	A	Í
O	V	F	Ñ	M	I	C	R	O	S	C	O	P	I	O	N	Ñ	G
E	F	R	Z	Í	M	H	Ú	A	J	O	R	R	A	R	F	N	I



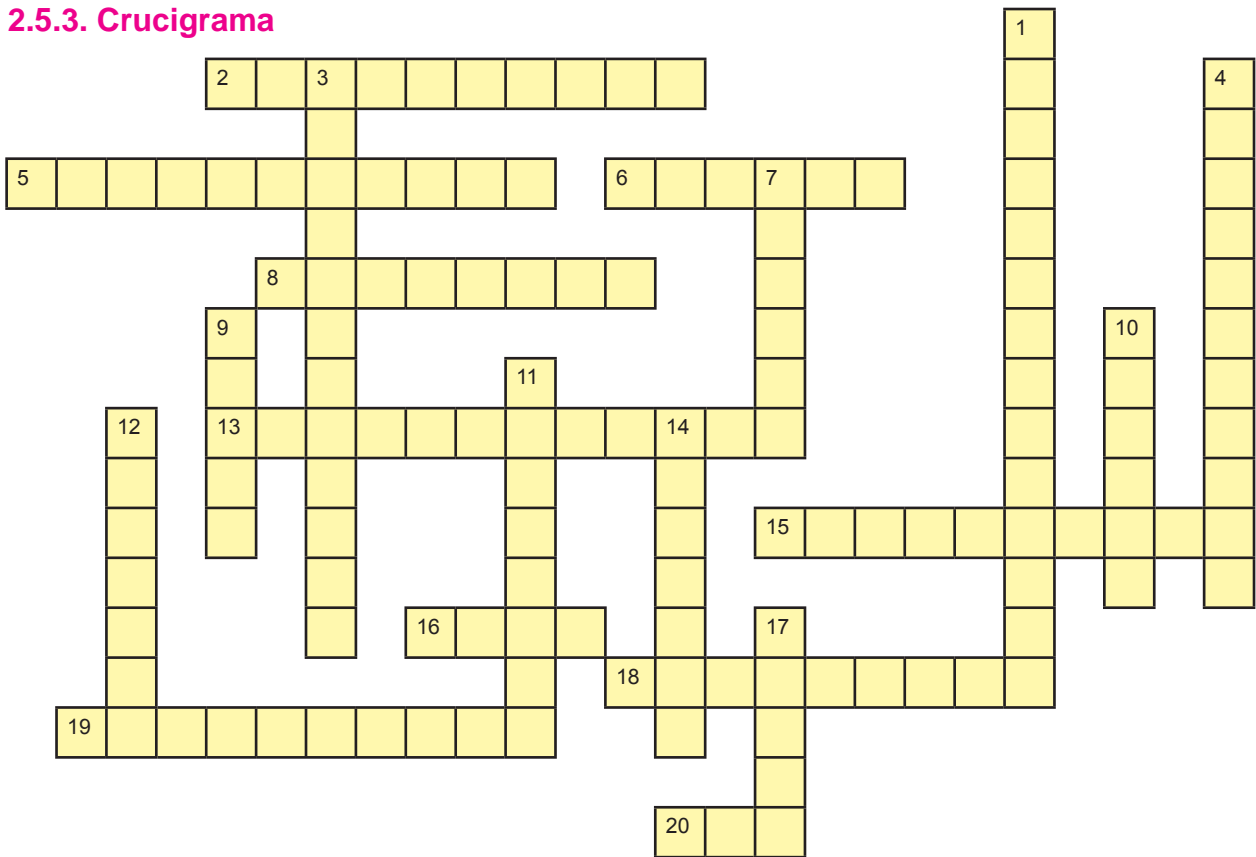
**2.5.2. Conexión de conceptos e ideas**

1. Fenómeno cuya explicación dio lugar a la hipótesis acerca de la naturaleza cuántica de la luz. ( ) Christiaan Huygens.
2. Científico que desarrolló el modelo corpuscular de la luz. ( ) Isaac Newton.
3. Parte del espectro de ondas electromagnéticas a la que es sensible el ojo humano. ( ) Ondas de radio.
4. Científico que desarrolló el modelo ondulatorio de la luz. ( ) Suponía que la velocidad de propagación de la luz es muy grande, pero finita.
5. Modelo de la luz el cual supone que su velocidad disminuye al pasar del aire a otro medio más denso. ( ) Ondulatorio.
6. Galileo Galilei. ( ) El primero en mostrar, a partir de observaciones astronómicas, que la velocidad de la luz es finita.
7. Olaus Röemer. ( ) Corpuscular.
8. Armand Fizeau. ( ) Colocó una rueda dentada delante de un haz luminoso, de modo que los dientes bloqueaban la luz y los espacios intermedios la dejaban pasar.
9. Ondas electromagnéticas de mayor longitud de onda que la luz. ( ) Efecto Fotoeléctrico.
10. Ondas electromagnéticas de menor longitud de onda que la luz. ( ) Rayos X.
11. Modelo de la luz el cual supone que su velocidad aumenta al pasar del aire a otro medio más denso. ( ) Luz.





### 2.5.3. Crucigrama

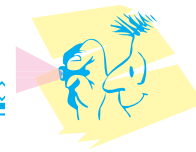


#### Horizontales

2. Ondas electromagnéticas de frecuencias inferiores a la del color rojo.
5. Modelo que considera a la luz una onda.
6. Unidad de distancia compuesta de dos palabras, que consiste en la distancia recorrida por la luz en un año.
8. Gama de ondas electromagnéticas de diferentes frecuencias.
13. Ondas electromagnéticas de frecuencias superiores a las de color violeta.
15. Rapidez con que se realizan las oscilaciones.
16. Medio en el cual se suponía que se propaga la luz.
18. Ilusión óptica debida a la refracción de la luz en la atmósfera.
19. Fenómeno que tiene lugar cuando la luz pasa de un medio a otro y cambia su velocidad de propagación.
20. Parte del espectro de las ondas electromagnéticas a que el ojo humano es sensible.

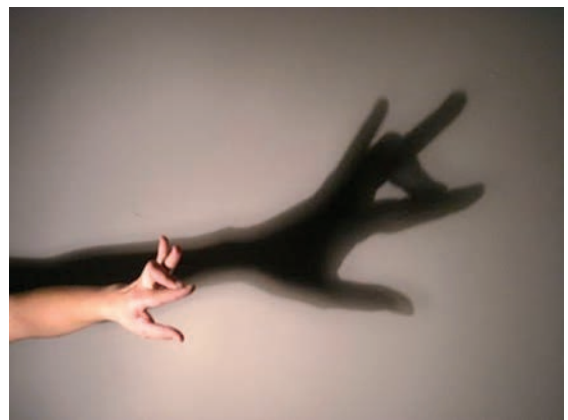
#### Verticales

1. Nombre de importante dispositivo óptico.
3. Proceso mediante el cual las plantas verdes absorben energía en forma de luz y la transforman en energía química.
4. Modelo que considera que las fuentes luminosas emiten corpúsculos muy livianos que se desplazan a gran velocidad y en línea recta.
7. Nombre de la letra griega utilizada para representar la longitud de onda de las ondas.
9. Uno de los científicos que más contribuyó al desarrollo de la teoría ondulatoria de la luz.
10. Parte de la Física que estudia los fenómenos relativos a la luz.
11. Científico que demostró que la noción de éter luminífero es innecesaria y formuló la hipótesis acerca del comportamiento cuántico de la luz.
12. Ondas electromagnéticas comprendidas en el rango de longitudes de onda entre 400 y 700 nanómetros.
14. Ocultamiento de un astro o parte de él por otro.
17. Unidad de medida de la frecuencia.



### 2.5.4. Actividades de repaso

1. ¿Cómo explican la refracción de la luz los modelos corpuscular y ondulatorio? ¿Qué dificultad tiene la explicación que ofrece el modelo corpuscular?
2. Examina la figura 2.6 y menciona ejemplos de radiaciones de frecuencias a) inferiores a la de la luz de color rojo, b) superiores a la de la luz de color violeta.
3. Seguramente sabes que la prolongada exposición a los rayos solares puede resultar dañina para la salud, entre otras cosas, debido a las radiaciones ultravioletas procedentes del Sol. ¿Cómo explicarías qué es la radiación ultravioleta?
4. Las frecuencias de las ondas que corresponden a la luz visible están alrededor de  $5.5 \times 10^{14}$  Hz. Muchos sonidos habituales tienen frecuencias en el entorno de 10 kHz. Compara dichas frecuencias. ¿Cuántas veces mayor es la frecuencia de la luz que la del sonido?
5. Reflexiona acerca de la importancia de las ondas electromagnéticas en el universo y, en especial, para los seres humanos.
6. Representa esquemáticamente un pequeño bombillo y algunos rayos que indiquen la dirección de propagación de la luz emitida por su filamento. ¿Qué forma tendrá el frente de la onda luminosa que procede del bombillo?
7. Un objeto se coloca en el camino de la luz procedente de un foco, dando lugar a zonas de sombra y de penumbra en una pared. Si se coloca el ojo en la zona de sombra, ¿se verá el foco? ¿Y si el ojo se coloca en la zona de penumbra?
8. Explica por qué la mayoría de las sombras que observamos diariamente no tienen los bordes bien definidos.
9. ¿Por qué en un día totalmente nublado, los postes, casas u otros objetos no dan lugar a sombras?
10. Busca en un diccionario el significado de la palabra homogéneo. Ilustra mediante ejemplos concretos dicho significado.
11. ¿Por qué el agua de la cubeta de la figura 1.5 del capítulo 1 no puede considerarse un medio homogéneo, a los efectos de las ondas que se propagan en su superficie?





12. En la experiencia de la figura 2.9, ¿además de la reflexión y transmisión de la luz, tendrá lugar la absorción de parte de ella? Argumenta tu respuesta.
13. Describe diversas situaciones en que la luz se propague en línea recta y otras en que no.



14. Busca el significado de la palabra “espejismo” e indaga acerca de ellos. Explica con tus propias palabras en qué consisten.
15. Como sabes, la densidad de la atmósfera disminuye con la altura. Por eso, a la luz del Sol que penetra en ella al amanecer o al atardecer, le sucede algo parecido que al haz de luz del experimento de la figura 2.10. Eso hace que los días sean varios minutos más largos. Explica por qué, con ayuda de un esquema.

16. Si miras a las estrellas notarás que parecen titilar. ¿Cómo explicarías esto?
17. ¿Por qué es común pensar que la luz se propaga de un lugar a otro instantáneamente?
18. Haz un breve resumen histórico acerca del conocimiento de la velocidad de propagación de la luz.



19. Elabora un esquema o cuadro sinóptico que refleje los conceptos e ideas esenciales estudiados y las relaciones entre ellos.
20. Escribe un resumen de las ideas y ecuaciones esenciales estudiadas en el capítulo.



**2.5.5. Ejercicios de repaso**

1. A través de un tubo de cartón de 30 cm de largo y 3 cm de diámetro se mira una tira de papel de longitud 1 m colocada en una pared. ¿A qué distancia debes alejarte para que puedas ver completamente la tira?

Respuesta: 10 m

2. Compara la velocidad de la luz con la velocidad del sonido.

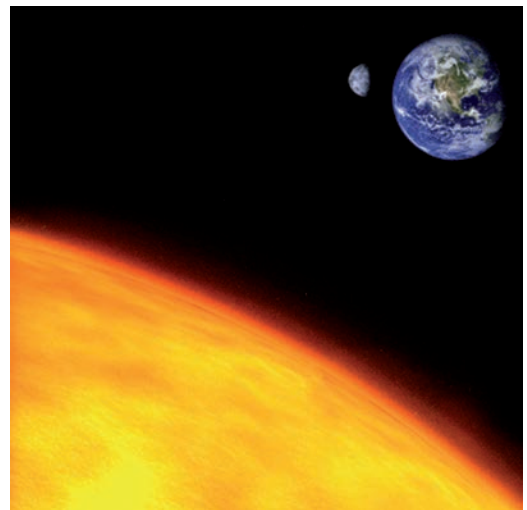
Respuesta: La de la luz es  $8.8 \times 10^5$  veces mayor

3. Calcula el tiempo que demora la luz del Sol en llegar hasta nosotros, si se sabe que éste se encuentra a  $1.50 \times 10^8$  km.

Respuesta: 8 min y 20 s.

4. La estrella más cercana a la Tierra después del Sol, Alfa Centauro, se encuentra a 4.3 años luz. ¿A qué distancia, expresada en metros, se encuentra?

Respuesta:  $4 \times 10^{16}$  m.



5. El avión experimental no tripulado X - 43 ha roto el récord de velocidad para un motor de propulsión atmosférica al volar brevemente a unos 7 700 kilómetros por hora, o siete veces por encima de la velocidad del sonido, según ha informado la NASA. Compare la velocidad de la luz con la velocidad del avión X - 43.

Respuesta: La de la luz es  $1.4 \times 10^5$  veces mayor

6. Encuentre la longitud de onda de la luz amarilla cuya frecuencia es  $f = 5.17 \times 10^{14}$  Hz.

Respuesta:  $\lambda = 580$  nm

7. Encuentre la longitud de onda de microondas de frecuencia  $1 \times 10^{10}$  Hz.

Respuesta: 3 cm

8. La distancia entre la Tierra y el Sol es  $1.5 \times 10^{11}$  m. ¿Cuánto tarde la Luz en viajar del Sol a la Tierra?

Respuesta: 500 s







# 3 Óptica geométrica







## Óptica geométrica

En la unidad anterior viste que en los medios homogéneos la luz se propaga en línea recta, pero que en los no homogéneos puede desviarse. Esto te permitió responder una serie de preguntas, por ejemplo: ¿cómo se forman las sombras?, ¿en qué consisten los eclipses?, ¿cómo se explican los espejismos? Sin embargo, para explicar la formación de imágenes mediante espejos y lentes y, lo que es más importante, comprender el funcionamiento de valiosos dispositivos ópticos, se requiere ir más allá y estudiar ciertas leyes que se cumplen durante la reflexión y refracción de la luz.

En esta unidad examinaremos las siguientes cuestiones clave:

*¿En qué consisten las leyes de la reflexión y refracción de la luz? ¿Cómo se explica la formación de ciertas imágenes a partir de las leyes de la reflexión y la refracción? ¿Qué trayectoria siguen los rayos al incidir en lentes y espejos esféricos? ¿Cómo se explica la formación de imágenes mediante lentes y espejos esféricos? ¿Cuál es el principio de funcionamiento óptico del ojo humano y de instrumentos como la lupa, el microscopio y el telescopio?*

En consecuencia, en este capítulo profundizaremos en la respuesta que hemos dado a la pregunta *¿Cómo se propaga la luz?* y, además, abordaremos la tercera pregunta planteada al iniciar el curso, *¿Cuáles son algunas importantes aplicaciones de la Óptica?*

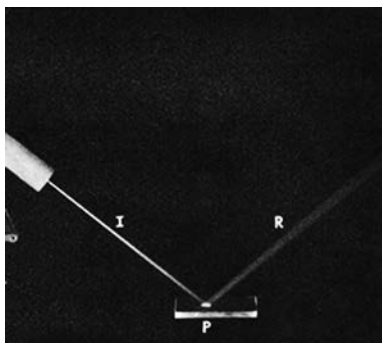
Al describir estas regularidades y aplicaciones, utilizaremos diagramas y ecuaciones que se apoyan en el trazado de líneas rectas y el uso de la geometría. De ahí el nombre de **Óptica Geométrica** que recibe esta parte de la Óptica.

### 3.1. Reflexión de la luz

Pese a que por lo común asociamos la reflexión de la luz exclusivamente con espejos y superficies pulimentadas, ella

¿Cómo es posible que si la luz del Sol no penetra directamente en el aula, percibamos tanta claridad dentro de ella?





**Fig. 3.1.** Reflexión regular o especular. Ocurre en una dirección bien definida.



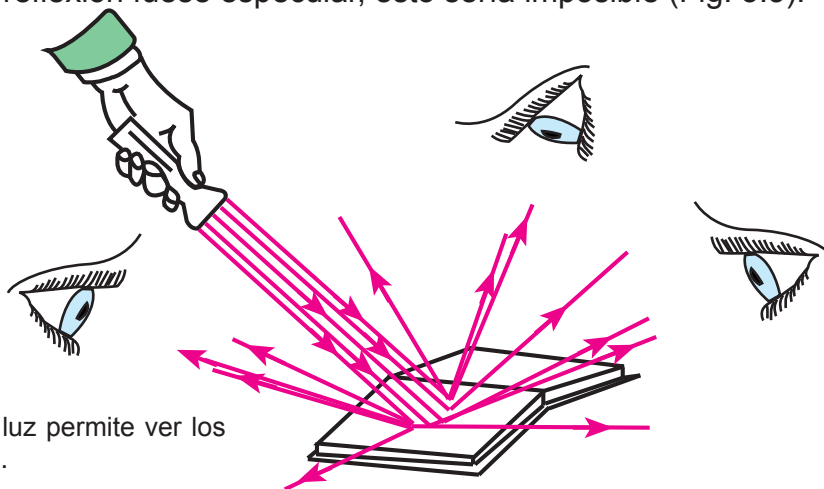
**Fig. 3.2.** Reflexión irregular o difusa. Ocurre en variadas direcciones.

es un fenómeno muchísimo más extendido. Es, además, esencial para la visibilidad de los cuerpos que nos rodean.

Pueden verse ciertos cuerpos, digamos, el Sol, las estrellas, las lámparas, gracias a que emiten luz por sí mismos y ésta llega hasta nuestros ojos; pero la inmensa mayoría de los cuerpos –las paredes de la habitación, los árboles, la Luna, el libro que leemos, el lápiz con que escribimos, etcétera– son visibles sólo en virtud de que **reflejan** la luz que reciben. La proporción de luz reflejada difiere de un cuerpo a otro. Es debido a esto que, por ejemplo, en una habitación semioscura vemos unos cuerpos mejor que otros.

Los cuerpos que emiten luz por sí mismos se denominan **fuentes de luz propia** y, los que la reflejan, **fuentes de luz reflejada**.

La reflexión puede tener características diferentes, dependiendo de la superficie sobre la que incide la luz. Así, si un haz de luz incide sobre una superficie muy lisa, como la de un espejo o la superficie del agua, la reflexión tiene lugar en una dirección bien definida y se dice que es regular, o **especular** (término que deriva de espejo) (Fig. 3.1). Por el contrario, si la superficie no es lisa, la reflexión se produce en muy variadas direcciones y se llama irregular, o **difusa** (Fig. 3.2). **La reflexión de la luz que ocurre en la inmensa mayoría de los cuerpos que nos rodean es difusa y gracias a esto es que llega hasta nuestros ojos y podemos verlos**, aun cuando cambiemos de lugar. Si la reflexión fuese especular, esto sería imposible (Fig. 3.3).



**Fig. 3.3.** La reflexión difusa de la luz permite ver los objetos desde distintas direcciones.



**3.1.1. Leyes de la reflexión**

Como acabamos de señalar, la reflexión difusa es de gran importancia en nuestra vida diaria, pero puesto que tiene lugar en variadas direcciones, no podemos distinguir en ella regularidades o leyes; en cambio, en la reflexión especular sí. Examinemos, pues, la reflexión en un **espejo**. Este es uno de los **dispositivos ópticos** más simples. Los antiguos egipcios y griegos ya los empleaban, aunque no de vidrio, sino de metal pulimentado.

Indaga acerca de la fabricación y utilización de espejos a lo largo de la historia de la civilización.

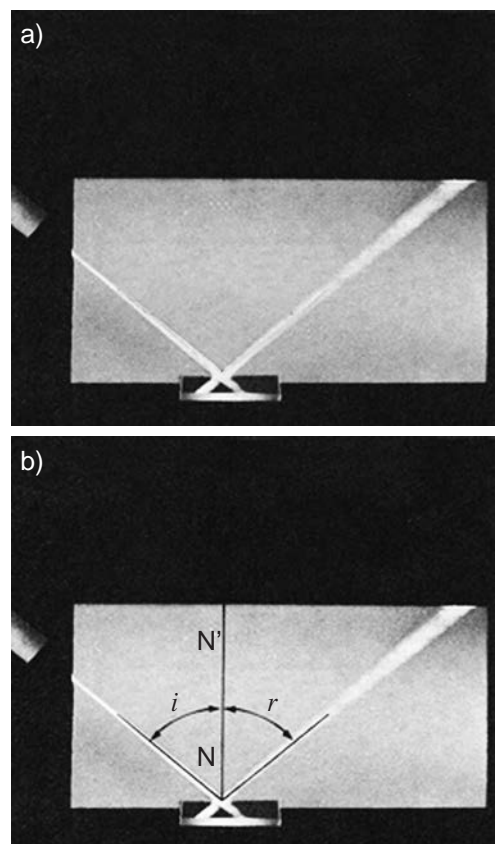


Sabemos que al hacer incidir un haz de luz sobre un espejo, la dirección del haz reflejado depende de la dirección del haz incidente. Cabe pues preguntarse: *¿Cómo se relaciona la dirección del haz reflejado con la del incidente?*

Las direcciones de los haces pueden registrarse con ayuda de un pedazo de cartulina blanca. Luego de varios ensayos, advertiremos que solo es posible registrar las “huellas” de ambos haces en la cartulina, cuando ésta es perpendicular a la superficie del espejo (Fig. 3.4a). Este resultado es una expresión de la **primera ley de la reflexión**:

**El rayo reflejado está en el plano que contiene al rayo incidente y es perpendicular al espejo.**

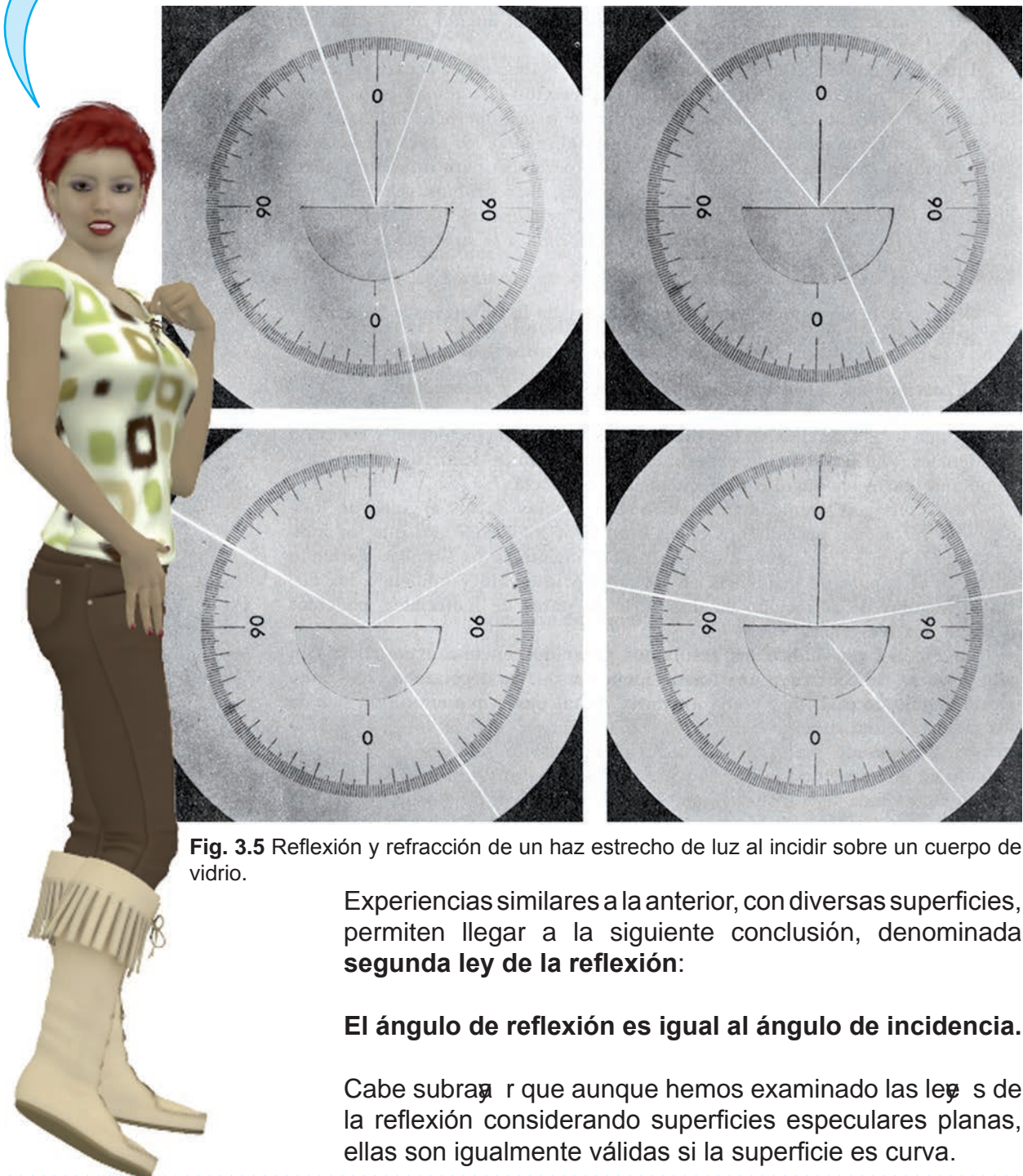
Las direcciones de los haces en la cartulina pueden indicarse por medio del ángulo que forman con el espejo, no obstante, **lo usual es medir los ángulos respecto a la línea perpendicular (normal) al espejo en el punto de incidencia (NN')** (Fig. 3.4b). El ángulo que forma el rayo incidente con dicha línea se llama **ángulo de incidencia ( $i$ )** y el que forma el rayo reflejado, **ángulo de reflexión ( $r$ )**. El rango en que estos ángulos puede variar es, por supuesto, desde  $0^\circ$  hasta  $90^\circ$ .



**Fig. 3.4.** a) El rayo reflejado está en el plano que contiene al rayo incidente y es perpendicular al espejo. b) Los ángulos de incidencia y reflexión se miden respecto a la línea perpendicular al espejo en el punto de incidencia.

Determina los ángulos de incidencia y de reflexión en cada caso de la figura 3.5.

Consideremos ahora la figura 3.5. En ella se muestra un fino haz de luz láser que incide sobre la superficie de un cuerpo de vidrio con diferentes inclinaciones. Midiendo los ángulos de incidencia y de reflexión es posible establecer la relación entre ellos.



**Fig. 3.5** Reflexión y refracción de un haz estrecho de luz al incidir sobre un cuerpo de vidrio.

Experiencias similares a la anterior, con diversas superficies, permiten llegar a la siguiente conclusión, denominada **segunda ley de la reflexión**:

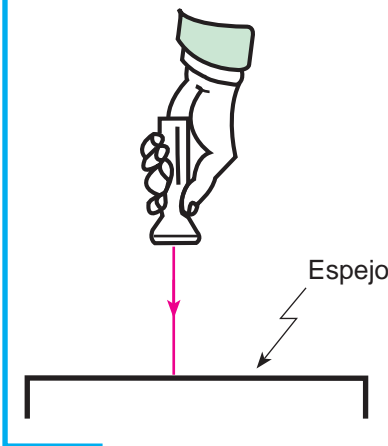
**El ángulo de reflexión es igual al ángulo de incidencia.**

Cabe subrayar que aunque hemos examinado las leyes de la reflexión considerando superficies especulares planas, ellas son igualmente válidas si la superficie es curva.



Fíjate además que si sobre el cuerpo de la figura 3.4 hiciésemos incidir la luz según la dirección del haz reflejado, entonces, de acuerdo con la segunda ley de la reflexión, realizaría el recorrido exactamente inverso, emergiendo del cuerpo de vidrio según la dirección que tenía el haz incidente. Este resultado se conoce como **reversibilidad de la trayectoria de la luz**.

**Ejemplo 3.1.** Una persona hace incidir un haz de luz sobre un espejo perpendicularmente a su superficie, como se ilustra en la figura. a) ¿Cuál es el valor del ángulo de incidencia de la luz sobre el espejo? b) ¿Cuál es la dirección del haz reflejado?



a) Puesto que el ángulo de incidencia es el formado por el rayo incidente y la normal a la superficie,  $i = 0$ , que según se dice en el enunciado del problema, la luz incide perpendicularmente al espejo.

b) De las leyes de la reflexión sabemos que el ángulo de reflexión es igual al de incidencia, así que  $r = i = 0$ . Esto significa que el haz reflejado también está dirigido según la normal a la superficie, pero por supuesto, del espejo hacia la linterna.

¿Cómo se explican las imágenes que vemos al mirar hacia un espejo plano?

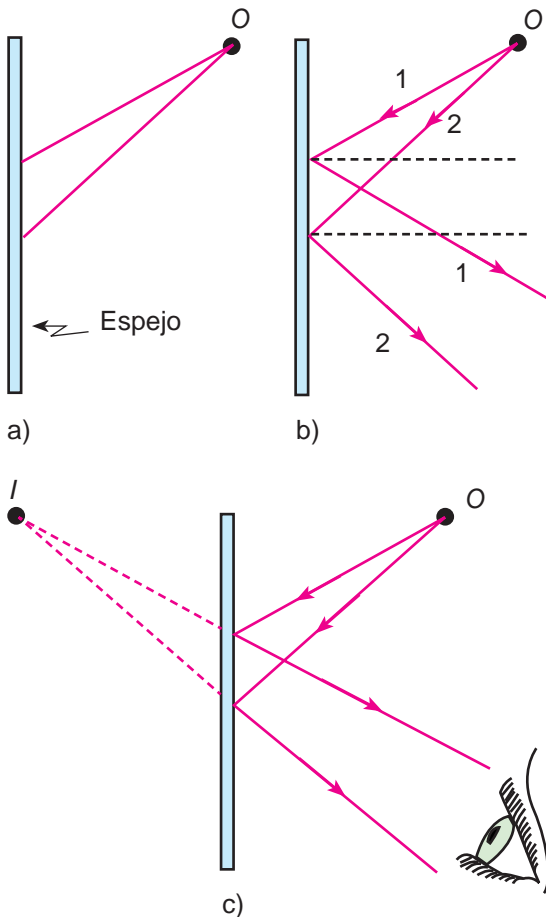
### 3.1.2. Imágenes formadas mediante un espejo plano

En este apartado responderemos a la pregunta *¿Cómo se explica la formación de ciertas imágenes mediante las leyes de la reflexión?*

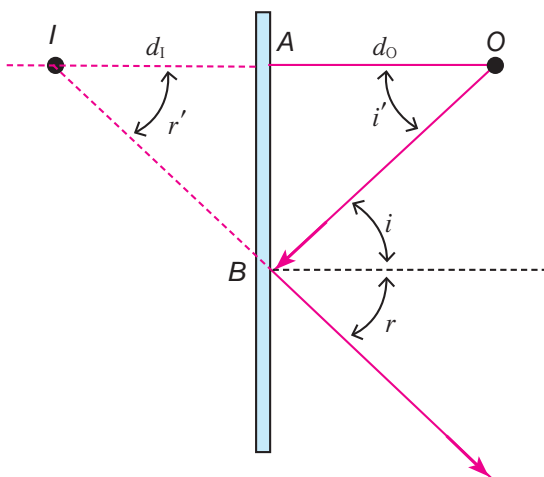
No limitaremos a analizar la formación de imágenes mediante un espejo plano.

Consideremos primeramente un objeto muy pequeño,  $O$ , situado frente a un espejo plano (Fig. 3.6a). Hemos representado un haz de luz que diverge de él e incide en el espejo. Si utilizamos la segunda ley de la reflexión, podemos encontrar cuál es la trayectoria que sigue el haz después de reflejarse. Para esto es suficiente aplicar la ley a los rayos 1 y 2 que forman los bordes del haz (Fig. 3.6b). Cuando se coloca el ojo como se muestra en la figura 3.5c,





**Fig. 3.6** Esquema que ayuda a comprender la formación de la imagen de un pequeño cuerpo mediante un espejo plano.



**Fig. 3.7.** En un espejo plano la distancia de la imagen al espejo es igual a la distancia del objeto al espejo.

el haz parece provenir del punto  $I$ . Debido a esto, se produce la sensación de que el objeto está situado en ese punto.

Lo que vemos en  $I$  se denomina **imagen del objeto**, pero puesto que en ese punto realmente no hay tal imagen, se dice que es una **imagen virtual**.

Nota que la imagen virtual se forma en la **intersección de las prolongaciones** de los rayos reflejados.

Si entre la infinidad de posibles haces que divergen de  $O$  escogemos uno que tenga un borde perpendicular al espejo (Fig. 3.7), entonces podemos encontrar fácilmente cómo se relaciona la distancia de la imagen al espejo,  $d_i$ , con la distancia del objeto al espejo  $d_o$ .

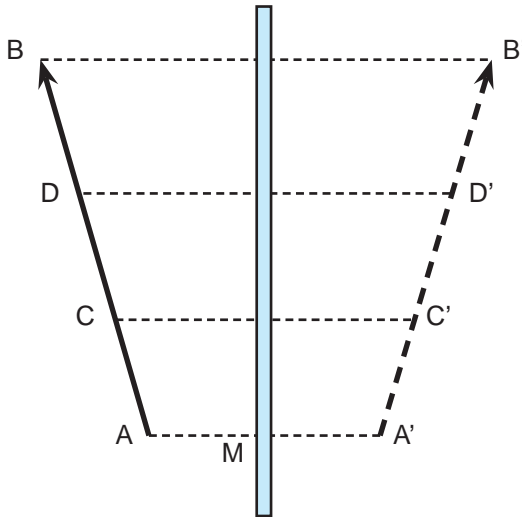
De acuerdo con la segunda ley de la reflexión  $r = i$ . Por otra parte  $i' = i$  y  $r' = r$ , de donde  $i' = r'$ . De este modo, los triángulos  $OAB$  e  $IAB$  tienen sus ángulos iguales y el lado  $AB$  común, por lo que son iguales. De ahí que  $d_i = d_o$ . Esto significa que la imagen se percibe situada a igual distancia del espejo que el objeto.

Por supuesto, los cuerpos habituales no son como el del ejemplo descrito, puntuales. Para construir la imagen de un cuerpo que no es puntual, se le considera formado por infinidad de puntos y se utiliza lo aprendido anteriormente. En el problema resuelto a continuación se muestra cómo hacer esto en un caso simple.





**Ejemplo 3.2.** En la figura 3.8 se muestra un objeto extenso AB frente a un espejo plano. Determina la imagen que veríamos.



**Fig. 3.8.** Construcción de la imagen de un objeto extenso, observada mediante un espejo plano.

Consideremos la flecha formada por una serie de puntos, como A, B, C, D. Aplicando a cada uno de ellos la conclusión obtenida anteriormente de que la imagen se aprecia situada a la misma distancia del espejo que el objeto, encontramos los puntos correspondientes A', B', C' y D'. Por lo tanto, la imagen del objeto AB es A'B'. Observa que la imagen es del mismo tamaño que el objeto y simétrica respecto a la superficie del espejo.

### 3.2. Refracción de la luz

Como ya sabes, cuando un haz de luz incide en la superficie de separación entre dos medios no solo se refleja, una parte de la luz puede ser absorbida, otra reflejada y, si el nuevo medio es transparente, otra parte transmitida con diferente velocidad de propagación, es decir **refractada** (Fig. 3.5). Examinaremos ahora qué relación hay entre la dirección del haz incidente y la del haz refractado, en otras palabras responderemos la pregunta *¿En qué consisten las leyes de la refracción?*

¿Cómo se relaciona la dirección del haz refractado con la del incidente?





¿Cómo depende el ángulo de refracción del ángulo de incidencia?



**Willebrord Snell** (1580 - 1626). Matemático y astrónomo holandés, quien encontró la ecuación que relaciona los ángulos de incidencia y de refracción. Dicha ecuación lleva su nombre.

### 3.2.1. Leyes de la refracción

Los ensayos con instalaciones como las de las figuras 3.5 conducen a una primera conclusión relativa a la relación entre la dirección del haz refractado y el incidente, denominada **primera ley de la refracción**. Ella es similar a la encontrada en el caso de la reflexión:

**El rayo refractado está en el plano determinado por el rayo incidente y la perpendicular a la superficie en el punto de incidencia.**

Ya vimos cuáles son los denominados ángulos de incidencia y de reflexión. De modo semejante, se llama ángulo de refracción al formado entre el rayo refractado y la normal a la superficie en el punto de incidencia.

Desde principios de nuestra era se disponía de datos de ángulos de incidencia y refracción, pero hallar una ecuación que sintetizara la relación entre dichos ángulos y, por tanto, que permitiera prescindir de tablas con estos datos para diferentes materiales, no fue tarea fácil. Pasó más de un millar de años, hasta que en 1621 el matemático holandés Willebrord Snell (1580-1626) encontró tal ecuación. Años más tarde Descartes la expresó en la forma que hoy la conocemos. Esto representó un notable avance en la óptica geométrica.

Realizando mediciones en la figura 3.5, puedes verificar que para el vidrio de esa figura, cualquiera que sea el ángulo de incidencia se cumple que:

$$\frac{\text{sen } i}{\text{sen } r} = 1.50$$

Si en lugar de vidrio se tratara de agua, se tendría:

$$\frac{\text{sen } i}{\text{sen } r} = 1.33$$

Si trata de otros materiales, se tienen otros valores, lo cual permite identificar el material a partir del valor de dicho cociente.



Tales cocientes constituyen una medida de cuánto disminuye la velocidad de la luz al pasar del aire a cierto material, una medida de la refracción. Debido a ello se denominan **índice de refracción** del material.

En la tabla 3.1 se muestran los índices de refracción ( $n$ ) de varios materiales.

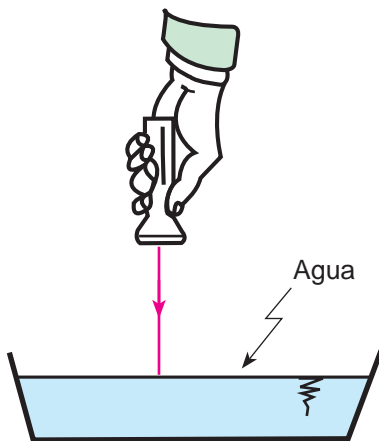
**Tabla 3.1.** Índices de refracción de diferentes materiales.

Índices de refracción	
Sustancia	$n$
Vacío	1
Aire	1.0003
Hielo	1.31
Agua	1.33
Alcohol etílico	1.36
Glicerina	1.47
Vidrio crown (de zinc)	1.52
Sal de cocina	1.54
Cuarzo	1.54
Disulfuro de carbono	1.63
Circonio ( $ZrO_2 \cdot SiO_2$ )	1.92
Diamante	2.42
Rutilo ( $TiO_2$ )	2.8

En cada uno de los cuatro casos representados en la figura 3.5, realiza mediciones de los ángulos de incidencia y los correspondientes ángulos de refracción. Construye una tabla con los valores de:  $i$ ,  $r$ ,  $\text{sen } i$ ,  $\text{sen } r$  y  $\text{sen } i / \text{sen } r$ .

¿A qué conclusión puede llegarse a partir de los resultados obtenidos?

Un estrecho haz de luz incide perpendicularmente a la superficie de separación entre dos medios transparentes ¿cuál es el ángulo de refracción?





Un estrecho haz de luz llega al agua con un ángulo de incidencia de  $30^\circ$ . Dibuja un esquema de la situación descrita y calcula el ángulo de refracción.



En general, la **ley de Snell** para el paso de la luz del aire a otro material es:

$$\frac{\text{sen } i}{\text{sen } r} = n$$

Esta ecuación también puede expresarse como:

$$\text{sen } i = n \text{sen } r$$

Pero cuando la luz procede de un medio distinto al aire, entonces la ecuación correcta es:

$$n_1 \text{sen } i = n_2 \text{sen } r$$

donde  $n_1$  es el índice de refracción del medio desde el cual incide la luz y  $n_2$  el del medio en el que penetra. Ésa es la forma más común de escribir la ley de Snell, o **segunda ley de la refracción**.

Como hemos dicho, cuanto mayor sea la disminución de velocidad de la luz al pasar del aire a determinado medio, tanto mayor será el índice de refracción de éste. Concretamente, si designamos la velocidad de la luz en el vacío —o en el aire, ya que sus valores son muy similares— por  $c$ , entonces su velocidad en un medio de índice de refracción  $n$  es:

$$v = \frac{c}{n}$$

Esto significa, por ejemplo, que en el agua la velocidad de la luz es 1.33 veces menor que en el vacío, y en el vidrio común alrededor de 1.5 veces menor.

¿Cuál será el valor de la velocidad de la luz en el diamante?



**Ejemplo 3.3.** Un haz luminoso incide desde el aire sobre cierto cuerpo transparente, formando un ángulo de  $30^\circ$  con la normal a la superficie en el punto de incidencia. Si el ángulo de refracción es  $22^\circ$ : a) ¿cuál es el índice de refracción del cuerpo?, b) ¿cuál es la velocidad de la luz en él?, c) ¿de qué medio podría tratarse?

a) De acuerdo con la ley de Snell:

$$n_1 \text{sen } i = n_2 \text{sen } r$$

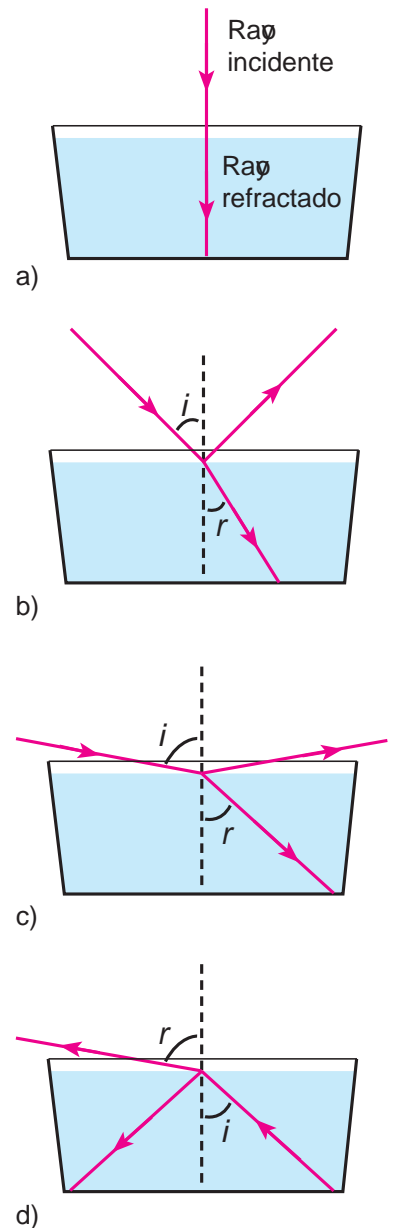
En este caso el medio 1 es aire, por lo que  $n_1 = 1$ . De aquí que:

$$n_2 = \frac{n_1 \text{sen } i}{\text{sen } r} = \frac{(1) \text{sen } 30^\circ}{\text{sen } 22^\circ} = 1.33$$

b) La velocidad de la luz en dicho medio será:

$$v = \frac{c}{n_2} \approx \frac{3.0 \times 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{1.33} = 2.3 \times 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

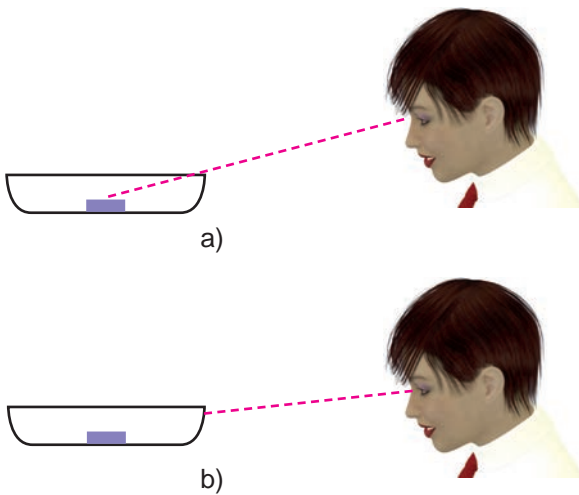
c) Podría tratarse de agua, o algún material con índice de refracción muy similar al de ella.



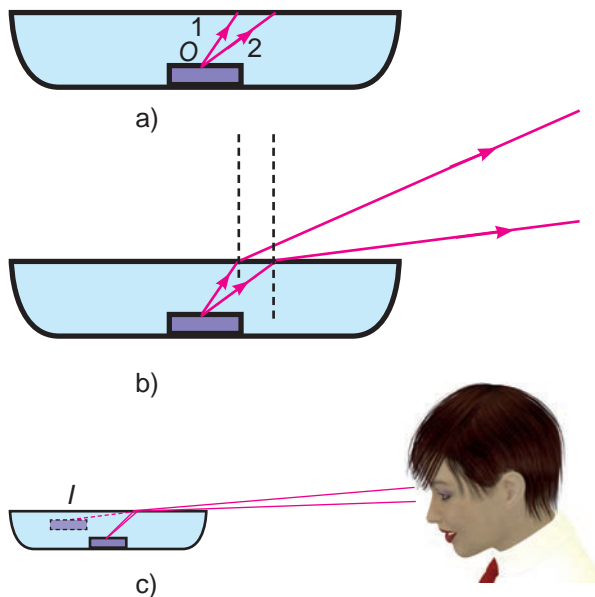
La figura 3.9 ilustra algunas situaciones de interés relacionadas con la ley de Snell. Si el ángulo de incidencia es  $0^\circ$ , el de refracción también es  $0^\circ$  (Fig. 3.9a). A medida que aumenta el ángulo de incidencia, también aumenta el de refracción (Fig. 3.9a, b y c). Cuando el haz de luz pasa de un medio a otro que tiene mayor índice de refracción (por ejemplo, del aire al agua o al vidrio), su velocidad disminuye y el haz refractado se acerca a la normal a la superficie de separación entre los medios en el punto de incidencia (Fig.3.9b y c). Y a la inversa, si el haz pasa de un medio a otro con menor índice de refracción (por ejemplo, del agua o vidrio al aire), su velocidad aumenta y el haz refractado se aleja de la normal (Fig.3.9d). Observa que las trayectorias que determinan los rayos incidente y refractado son las mismas en (c) y en (d), solo que tienen sentido inverso. La refracción también cumple con la **reversibilidad de la trayectoria de la luz**.

**Fig. 3.9.** Esquema que ilustra diversas situaciones relacionadas con la ley de Snell.





**Fig. 3.10.** a) Una moneda situada en un platillo es visible. b) Al bajar la cabeza poco a poco, llega un momento en que la moneda deja de verse, pero si se vierte agua en el platillo, vuelve a ser visible.



**Fig. 3.11.** Representación esquemática (no a escala) que ayuda a comprender el aparente cambio de posición de una moneda al verter agua en el plato en que se encuentra.

A continuación responderemos a la pregunta *¿Cómo se explica la formación de cierta imágenes mediante las leyes de la refracción?*

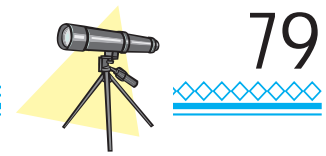
### 3.2.2. Imágenes formadas mediante refracción de la luz

Colócate frente a un plato en el cual se ha situado una moneda (Fig. 3.10a). Baja la cabeza poco a poco hasta que la moneda deje de verse (Fig. 3.10b). Si ahora viertes agua en el plato, la moneda se hará visible nuevamente. *¿Cómo se explica esto?*

Para responder la pregunta anterior procederemos de modo similar que al interpretar la formación de imágenes mediante espejos: trazaremos la trayectoria de un haz de luz que diverge de algún punto del objeto.

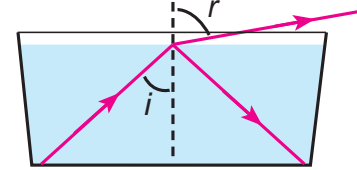
En la figura 3.11a se ha representado un haz que diverge del punto  $O$  de la moneda. Tracemos las líneas perpendiculares a la superficie del agua en los puntos de incidencia de los rayos 1 y 2 (Fig. 3.11b). Como la luz pasa del agua al aire, los rayos refractados deben alejarse de las líneas perpendiculares que hemos trazado. Al colocar el ojo como se muestra en la figura 3.11c, sobre él incide un haz de luz divergente. El ojo percibe este haz como procedente del punto  $I$ , produciéndose así la sensación de que la moneda se encuentra en ese lugar. Ésta es una **imagen virtual**, similar a las formadas mediante espejos planos, se forma en la intersección de las prolongaciones de los rayos refractados.

La aparente disminución de la profundidad de un recipiente al verter agua en él, también se debe a la refracción de la luz, cuando procedente de su fondo pasa al aire.

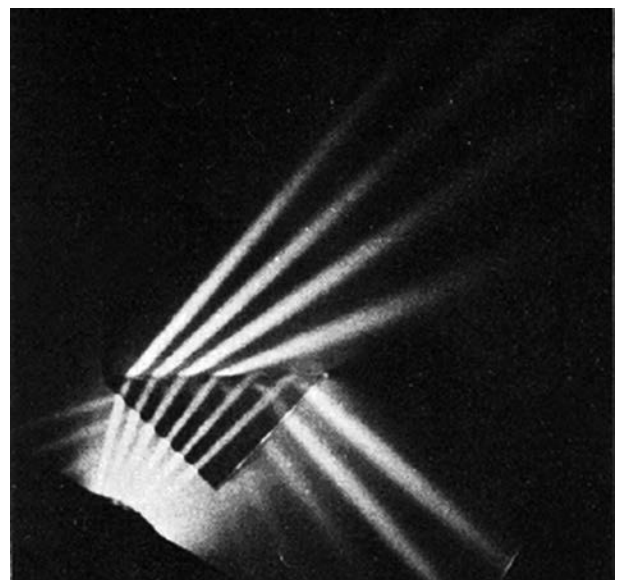


**3.2.3. Reflexión total interna**

Si en la situación representada en la figura 3.12a continuamos aumentando el ángulo de incidencia, pronto el ángulo de refracción será  $90^\circ$ . ¿Qué sucederá con el rayo refractado si aumentamos todavía más el ángulo de incidencia? ¿Desaparecerá? ¿Aparecerá otro rayo en el interior del cuerpo, además del reflejado? El experimento de la figura 3.12b conduce a la respuesta. Una serie de haces de luz que penetran desde la izquierda en un prisma y, luego de atravesarlo e incidir en su superficie superior, dan lugar a haces que salen nuevamente al aire. Observa, sin embargo, cómo los dos haces del extremo derecho no originan haces refractados. Los haces que en los casos de la parte izquierda emergían del prisma ahora han desaparecido y en el interior, aparte de los reflejados, no aparecen otros haces. Pero fíjate que la intensidad de los haces reflejados ahora es mayor que en los casos de la parte izquierda.



**Fig. 3.12a.** Esquema que ilustra a un haz que pasa de un medio a otro con menor índice de refracción.



**Fig. 3.12b.** Haces luminosos procedentes de la izquierda que inciden en un prisma. Los dos del extremo derecho no dan lugar a haces refractados, sino solo reflejados, cuya intensidad aumenta.

**Este fenómeno, en el cual la luz incide en la superficie de separación entre dos medios transparentes y no da lugar a refracción, se denomina *reflexión total interna* y el ángulo de incidencia a partir del cual tiene lugar, *ángulo límite*, o *crítico*.**

Nota que, a diferencia de la 2ª ley de la reflexión, **en la 2ª ley de la refracción los valores de  $i$  y  $r$  no siempre pueden variar en el intervalo  $0^\circ - 90^\circ$ .** Cuando la luz pasa de cierto medio a otro de mayor índice de refracción (por ejemplo, del aire al vidrio),  $i$  puede variar entre  $0^\circ$  y  $90^\circ$ , mientras que  $r$  lo hace en un intervalo menor. Por su parte, si la luz se transmite a un medio de menor índice de refracción (por ejemplo, del vidrio al aire), entonces,

Argumenta desde el punto de vista de la energía por qué es comprensible que al ocurrir la reflexión total interna aumente la intensidad luminosa del haz reflejado.





Da alguna razón para que el fenómeno de la “reflexión total interna” se haya denominado de ese modo.



**Fig. 3.13.** Esquema de la reflexión total interna en una fibra óptica.

a partir de cierto valor de  $i$  (ángulo límite o crítico), deja de tener lugar el paso de la luz a dicho medio, o sea, no hay refracción y, por tanto, pierde sentido la ley de Snell.

**La reflexión total interna de la luz solo ocurre cuando ésta incide sobre la superficie de separación entre dos medios, procedente del medio de mayor índice de refracción.**

El ángulo límite correspondiente a la refracción de la luz al pasar de cierto medio a otro puede ser determinado a partir de la ley de Snell. Dado que el ángulo de refracción que corresponde al ángulo límite  $\theta_L$  es  $90^\circ$ , se tiene:

$$n_1 \text{sen} \theta_L = n_2 \text{sen} 90^\circ$$

y como  $\text{sen} 90^\circ = 1$ , queda

$$n_1 \text{sen} \theta_L = n_2$$

De aquí que  $\text{sen} \theta_L = \frac{n_2}{n_1}$ , por tanto

$$\theta_L = \text{sen}^{-1} \left( \frac{n_2}{n_1} \right)$$

Un sencillo cálculo muestra que el ángulo límite para el fenómeno de la refracción al pasar la luz del agua ( $n_1 = 1.33$ ) al aire ( $n_2 = 1$ ) es  $\theta_L \approx 48.8^\circ$ . ¡Compruébalo sustituyendo los datos en la ecuación! Esto significa que para valores del ángulo de incidencia mayores que éste, no tiene lugar el fenómeno de la refracción, y todo el haz de luz es reflejado.

La reflexión total interna de la luz es utilizada en la construcción de las denominadas **fibras ópticas** (conductores de luz), las cuales han encontrado gran aplicación en muchas técnicas médicas y en las comunicaciones. El esquema de la figura 3.13 ilustra el principio en que se basa la conducción de la luz en una fibra óptica. Por uno de los extremos de un finísimo tubo de un material muy transparente, que apenas absorbe la luz, entra un haz luminoso y luego de múltiples reflexiones internas sale por el otro extremo. En el dibujo se ha exagerado el diámetro del fino tubo a fin de ilustrar





las diversas reflexiones que tienen lugar en su interior, el grueso de una fibra óptica habitual es similar al de un cabello (Fig. 3.14).

Indaga, por ejemplo en una enciclopedia, acerca de las aplicaciones de las fibras ópticas en medicina y en las comunicaciones.

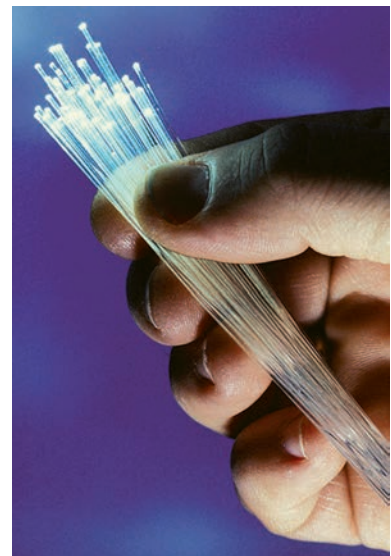
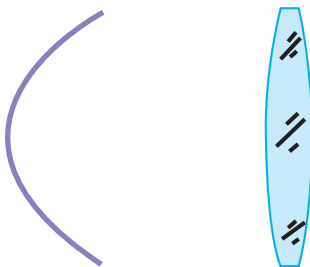


Fig. 3.14. El diámetro de una fibra óptica habitual es similar al de un cabello humano.

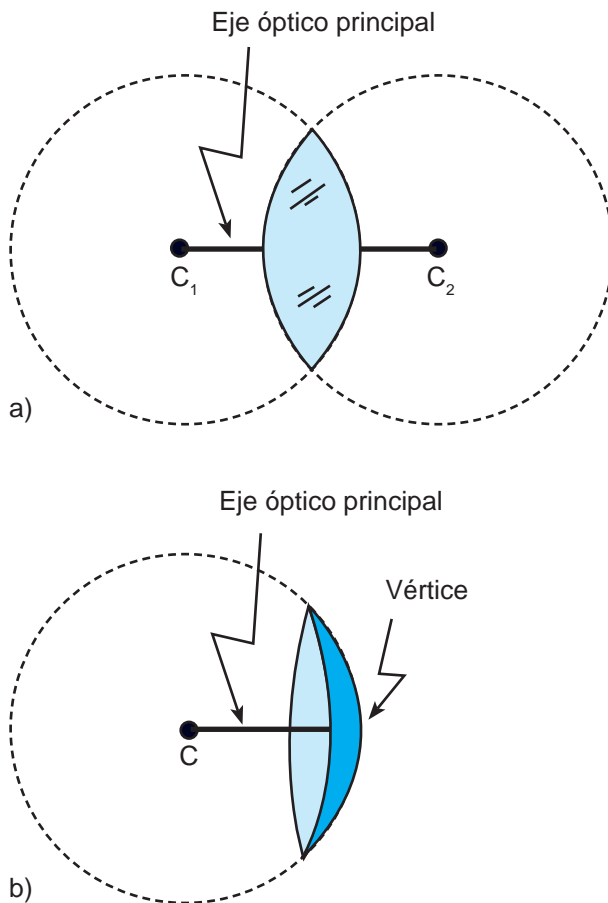
### 3.3. Lentes y espejos esféricos

En la mayoría de los dispositivos ópticos (lupas, microscopios, proyectores, cámaras fotográficas, telescopios y otros muchos) se utilizan **lentes** y ciertos **espejos curvos**. Aunque es posible emplear las leyes de la reflexión y la refracción para trazar la trayectoria que siguen los haces luminosos al incidir sobre ellos, esto resulta muy engorroso. Por suerte, en muchos de estos espejos y lentes, ciertos rayos, denominados **característicos**, o **notables**, siguen trayectorias peculiares, las que han sido resumidas en unas pocas reglas, fáciles de recordar y utilizar. Se trata de lentes y espejos cuyas superficies tienen una forma esférica o próxima a ella.



Intenta trazar la trayectoria que sigue un haz luminoso al incidir sobre el espejo curvo de la figura. Repite la operación para el caso de la lente. ¿Es cómodo trazar la trayectoria de los rayos utilizando las leyes de la reflexión y la refracción?





**Fig. 3.15.** Esferas a las que pertenecen las superficies de: a) una lente, b) un espejo.

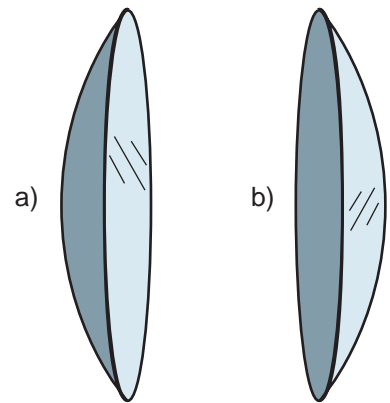
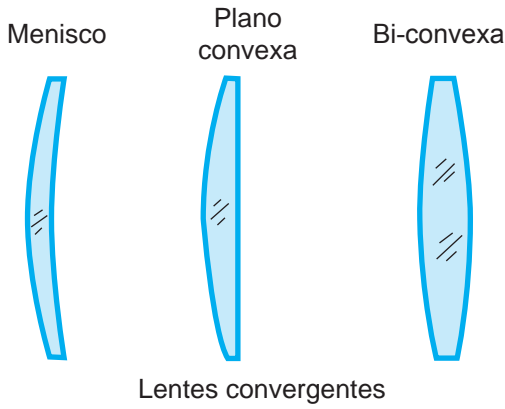
### 3.3.1. Tipos de lentes y espejos esféricos

En la figura 3.15 se han representado las esferas a las cuales pertenecen las superficies de una lente y de un espejo esféricos. En las lentes, a la línea imaginaria que pasa por los centros de las esferas a las cuales pertenecen sus superficies se le llama **eje óptico principal**. En los espejos, se denomina así a la línea que pasa por su vértice y el centro de la esfera.

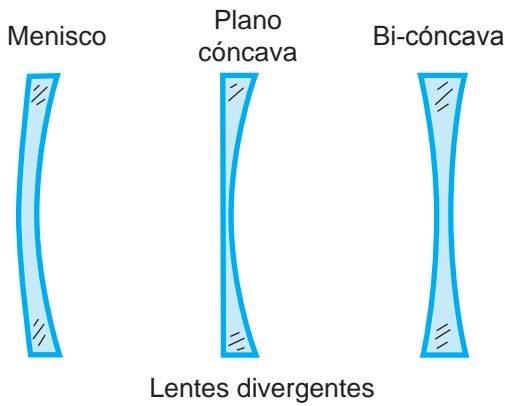
Las primeras lentes fueron esferas de vidrio llenas de agua. Eran empleadas en la antigüedad para encender fuego. Actualmente se construye una gran variedad de lentes esféricas, principalmente de vidrio y plástico. Ellas pueden ser **convergentes** o **divergentes**. Estos nombres se deben a que los rayos luminosos paralelos, por ejemplo los solares, cuando atraviesan las primeras convergen, mientras que cuando atraviesan las segundas divergen. Cuando la superficie de una lente está en contacto con el aire, como es habitual, es posible distinguir con facilidad si es convergente o divergente: si la zona central es más gruesa que los extremos, la lente es convergente y, por el contrario, si es más estrecha, divergente. En la figura 3.16 se han representado algunos tipos de lentes. Las de la parte superior son convergentes y las de la inferior, divergentes. Pueden ser simétricas o no.

Los espejos esféricos pueden ser **cóncavos** o **convexos**. Se denomina cóncavo si la parte reflectora de la superficie esférica es la interna (Fig. 3.17a) y convexo, si es la externa (Fig. 3.17b). Los espejos cóncavos también pudieran denominarse **convergentes** y los convexos, **divergentes**, porque los rayos luminosos paralelos que se reflejan en los primeros convergen y los que se reflejan en los segundos divergen.





**Fig. 3.17.** Espejos esféricos: a) cóncavo, b) convexo.



Una cuchara pulida pudiera funcionar como un espejo. ¿Cuál de sus caras lo haría como un espejo cóncavo y cuál como convexo?

**Fig. 3.16.** Esquemas de lentes.



Comprueba qué tipo de lente, convergente o divergente, es el utilizado en: a) una lupa, b) los anteojos de algunas de las personas con las que te relacionas.



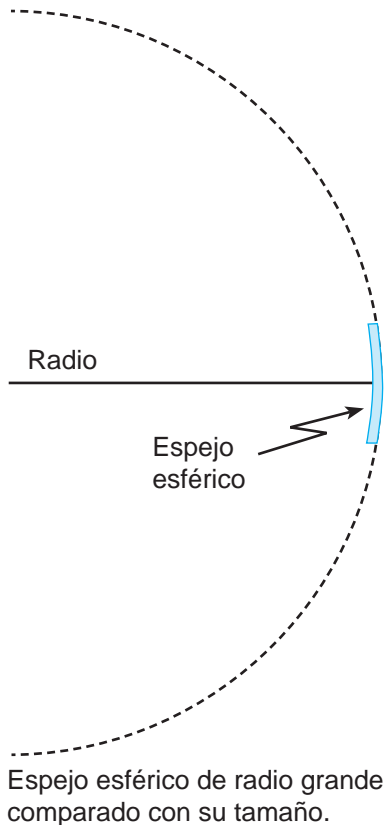


### 3.3.2. Rayos principales en lentes y espejos esféricos

En este apartado intentaremos responder a la pregunta:

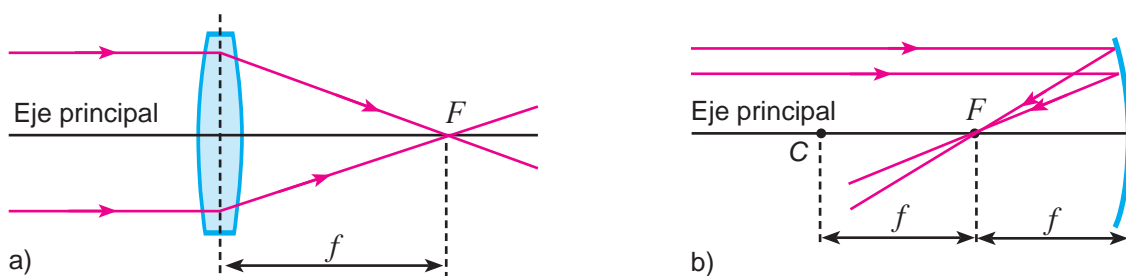
*¿Qué trayectoria siguen los rayos al incidir en lentes y espejos esféricos?*

Estudiaremos la trayectoria que siguen solo ciertos rayos característicos, denominados **rayos principales**, o notables. Nos limitaremos al caso de **lentes convergentes simétricas** y de **espejos cóncavos** (¿A cuáles de los esquemas de las figuras 3.16 y 3.17 corresponden tales lentes y espejos?). Por otra parte, cabe advertir que algunas de las regularidades que a continuación describiremos son en realidad aproximadas. No obstante, se cumplen con gran exactitud para lentes y espejos esféricos de radios grandes comparados con el tamaño de la lente (lente “delgada”), o del espejo.



1. Los rayos que inciden paralelamente al eje óptico principal de la lente o espejo, convergen en un punto situado sobre dicho eje (Fig. 3.18a y b).

Esta propiedad se tiene en cuenta, al emplear lentes y espejos esféricos con el propósito de concentrar la luz procedente de determinadas fuentes, por ejemplo del Sol, las estrellas, etc.



**Fig. 3.18.** Trayectoria de los rayos que inciden paralelamente al eje óptico de: a) una lente esférica, b) un espejo esférico.

El punto en el cual convergen los rayos paralelos al eje óptico se denomina **foco principal** ( $F$ ) y la distancia que hay entre él y la lente o el espejo, **distancia focal** ( $f$ ).



Puede demostrarse que, en los espejos esféricos que estamos considerando, el foco principal se encuentra aproximadamente en el punto medio entre el centro de la superficie esférica y el vértice del espejo (Fig. 3.18b). Ello posibilita ubicar fácilmente el foco en el esquema de un espejo esférico.

Entre la capacidad de una lente para hacer converger la luz y su distancia focal, existe una relación inversa. Por eso, se llama **poder convergente** de una lente al inverso de su distancia focal. Cuando la distancia focal se expresa en metros, el poder convergente se obtiene directamente en **dioptrías**. Así, una lente para corregir la visión de 50 cm de distancia focal, posee un poder convergente de:

$$\frac{1}{0.50 \text{ m}} = 2.0 \text{ dioptrías.}$$

2. Los rayos que pasan por el foco, o que parten de él, después de incidir sobre la lente o espejo se propagan paralelamente al eje óptico principal (Fig. 3.19a y b).

Esta propiedad era de esperarse, pues se refiere a un recorrido del rayo de luz inverso al descrito en el punto anterior y otras veces ya hemos encontrado que se cumple la reversibilidad de la trayectoria de la luz. Se utiliza esta propiedad en la construcción de muchos proyectores de luz (faros de navegación, faros de automóviles, proyectores de diapositivas, etc.).

Toma una lente convergente (sirven una lupa y algunas lentes para corregir la visión) y ensaya la concentración de luz solar mediante ella. Determina, aproximadamente, la distancia focal de la lente. Si la lente es relativamente grande y su distancia focal pequeña, entonces tal vez puedas encender un pedazo de papel con ella.

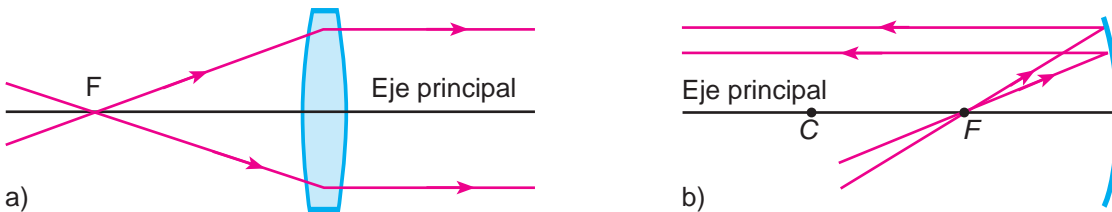
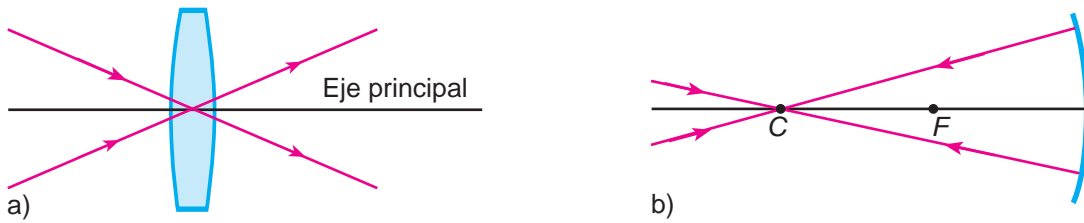


Fig. 3.19. Trayectoria de los rayos que pasan por el foco de: a) una lente, b) un espejo esférico.

3. Los rayos que inciden en el centro de la lente (Fig. 3.20a), y en el caso del espejo los que inciden sobre él después de pasar por el centro de su superficie esférica (Fig. 3.20b), no cambian de dirección.





**Fig. 3.20.** Trayectoria de los rayos que: a) inciden en el centro de la lente, b) pasan por el centro de la superficie esférica a que pertenece el espejo.

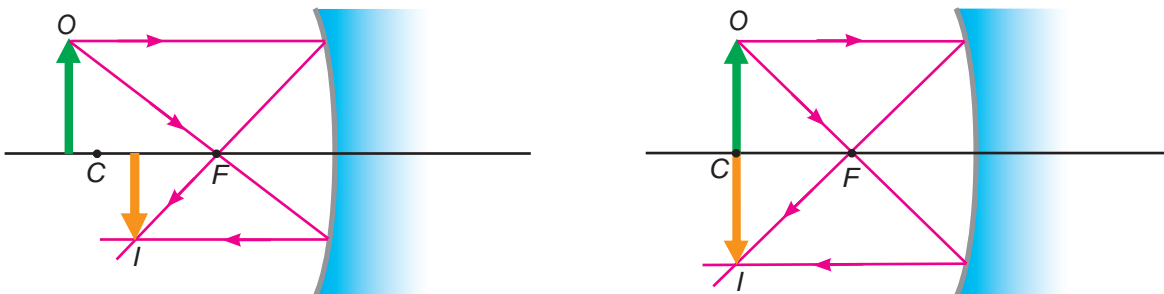
De acuerdo con la segunda ley de la refracción, los rayos que inciden sobre la superficie de la lente representada en la figura 3.19a deben desviarse al pasar del aire al vidrio. ¿Por qué entonces en el texto se afirma que dichos rayos no cambian de dirección al atravesar la lente?

Justifica a partir de la segunda ley de la reflexión, la trayectoria que siguen los rayos en la figura 3.19b, luego de reflejarse en el espejo.

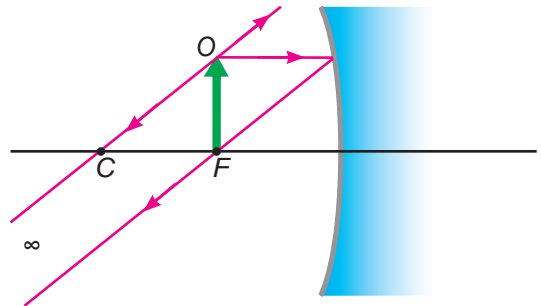
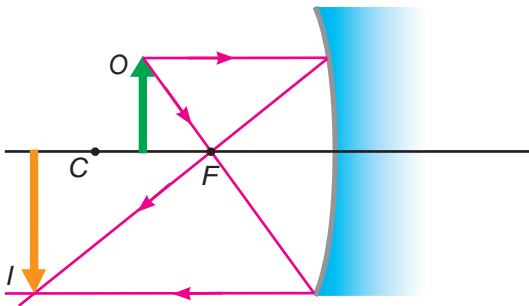


Determina, aproximadamente, las dioptrías de unas lentes utilizadas para corregir la visión y compara el valor obtenido con el previsto.

**Posición de la imagen en relación al objeto en un espejo cóncavo.**

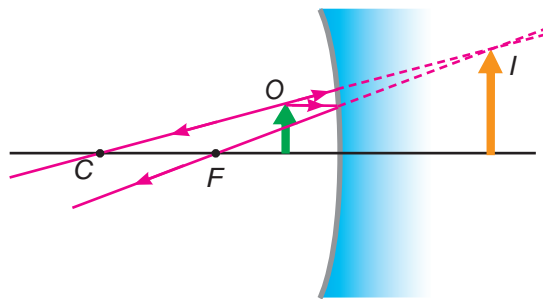


1. Objeto situado a una distancia mayor del centro de curvatura. La imagen es real, invertida y situada entre el centro y el foco. Su tamaño es menor que el objeto.
2. Objeto situado en el centro de curvatura. La imagen es real, invertida y situada en el mismo punto. Su tamaño igual que el objeto.



3. Objeto situado entre el centro de curvatura y el foco. La imagen es real, invertida y situada a la izquierda del centro de curvatura. Su tamaño es mayor que el objeto.

4. Objeto situado en el foco del espejo. Los rayos reflejados son paralelos y la imagen se forma en el infinito.



5. Objeto situado entre el foco y el vértice del espejo. La imagen es virtual, y conserva su orientación. Su tamaño es mayor que el del objeto.

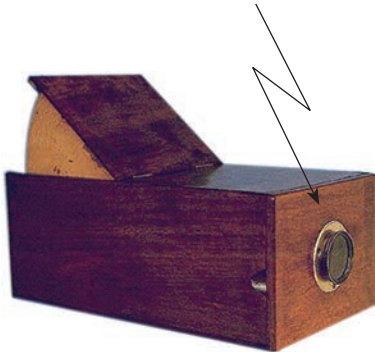
### 3.4. Formación de imágenes mediante lentes y espejos esféricos

En este apartado consideraremos dos cuestiones clave: *¿Cómo se explica la formación de imágenes mediante lentes y espejos esféricos?* y *¿Cuál es el principio de funcionamiento óptico del ojo humano y de instrumentos como la lupa, el microscopio y el telescopio?* Las abordaremos simultáneamente, pues están estrechamente relacionadas: la función del ojo y de los instrumentos mencionados es, precisamente, la formación de imágenes.





Lente convergente



**Fig. 3.21.** Cámara oscura construida en el siglo XIX, la cual utiliza una lente convergente.

¿Cómo ocurre la formación de la imagen por medio de la lente?

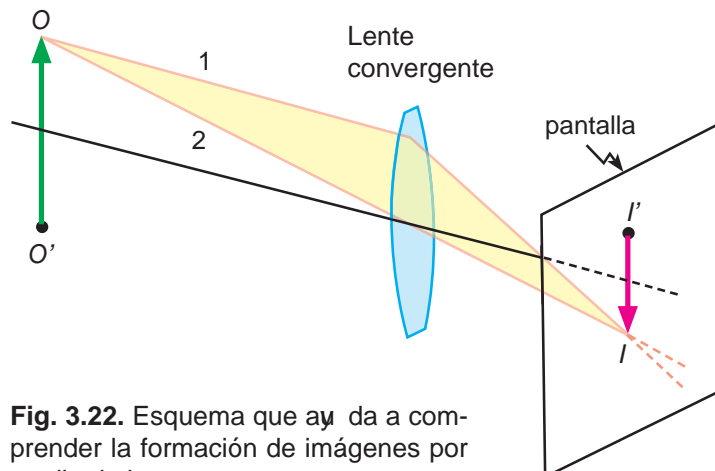


### 3.4.1. Formación de imágenes mediante lentes convergentes

#### 3.4.1.1. La cámara fotográfica

Antecesora de la cámara fotográfica fue la **cámara oscura**, con la cual ya te familiarizaste. Si con el propósito de aumentar la cantidad de luz que penetra en una cámara oscura, su pequeño orificio se hace más y más grande, pronto la imagen se torna borrosa (Intenta explicar por qué). Sin embargo, si en el lugar del orificio situamos una lente convergente (Fig. 3.21), y el fondo de la cámara está a la distancia requerida de ella, lograremos aumentar la cantidad de luz que penetra en la cámara y, al propio tiempo, obtener una imagen nítida del objeto. Al colocar una película fotográfica en el fondo de la cámara se tiene ya un modelo de la primera cámara fotográfica.

A fin de facilitar el análisis, consideraremos un objeto muy simple, digamos, uno que tiene forma de flecha. En la figura 3.22 se ha representado la flecha y, a su derecha y alejada de ella, una lente convergente. Examinemos, como en ocasiones anteriores, la trayectoria de un haz de luz que diverge de algún punto del objeto, digamos, de la punta de la flecha ( $O$ ) e incide sobre la lente. El haz puede ser cualquiera que parta de  $O$  y llegue a la lente, sin embargo, ya que conocemos la trayectoria que siguen los **rayos principales**, escojamos uno cuyos bordes sean dos de estos rayos, por ejemplo, el 1, que incide paralelamente



**Fig. 3.22.** Esquema que ayuda a comprender la formación de imágenes por medio de lentes convergentes.





al eje óptico de la lente y el 2, que pasa por su centro. Estos rayos se cortan en el punto  $I$ . Insistimos, hemos seleccionado dos **rayos principales** porque conocemos de antemano la trayectoria que seguirán, pero cualquier otro haz divergente que parta de  $O$  y atravesase la lente, también convergerá en el punto  $I$ . De este modo, en el punto  $I$  se forma una imagen de la punta de la flecha.

Puedes comprobar por tí mismo que dos rayos principales que partan del punto  $O'$ , convergen en el punto  $I'$ . Ello significa que la imagen del otro extremo de la flecha se forma en  $I'$ . Nota que la imagen es invertida y real, no virtual. La imagen es real porque se forma en la intersección de los rayos refractados, sin necesidad de realizar sus prolongaciones.

Si en  $I'$  se coloca una pantalla, la imagen podrá verse con nitidez. Al variar la distancia entre el objeto y la lente, también varía el lugar donde se forma la imagen. Por eso, para que se forme nítidamente se precisa que la distancia entre la lente y la pantalla sea la requerida. Esto puede lograrse desplazando la pantalla, o la lente.

En la cámara fotográfica la película sensible actúa como pantalla donde se forma la imagen y la lente es la que se acerca o aleja de ella para lograr una imagen nítida.

Las cámaras fotográficas actuales poseen numerosos aditamentos, que permiten tomar fotografías de gran calidad, en particular no utilizan una sola lente para formar las imágenes en la película, sino un sistema de ellas, denominado **objetivo**. Sin embargo, este actúa como una lente convergente.

En el caso de la cámara fotográfica, la imagen formada por la lente es de menor tamaño que el objeto. Pero las lentes convergentes también pueden formar imágenes mayores que el objeto, ello depende de la distancia a que este se encuentra de la lente. A medida que el objeto se desplaza hacia el foco de la lente, el tamaño de la imagen crece, y cuando está situado a una distancia  $2f$  de ella, es igual al del objeto. Para posiciones del objeto próximas al foco de la lente, la imagen es muy grande (Fig. 3.23).

Profundiza acerca de la fotografía en una enciclopedia: su origen, importancia, tipos de cámaras, funcionamiento de una cámara común.



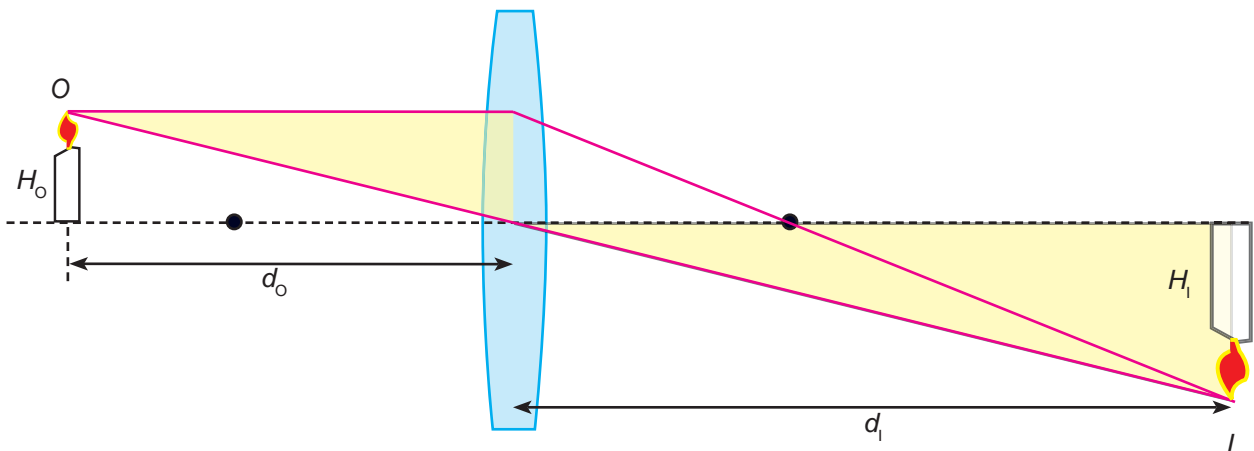


Fig. 3.23. Formación de una imagen real aumentada, por medio de una lente convergente.

Realizando mediciones en la figura 3.23, comprueba que el aumento lineal de la vela puede ser calculado como  $A = d_i/d_o$

Se denomina **aumento lineal**, o ampliación, al cociente entre el tamaño de la imagen y el tamaño del objeto. Así, si designamos por  $H_i$  el tamaño de la imagen y por  $H_o$  el del objeto, el aumento lineal es:

$$A = \frac{H_i}{H_o}$$

El “aumento” producido en una cámara fotográfica es menor que la unidad, porque la imagen es de menor tamaño que el objeto. En cambio, el de la lente objetivo de un microscopio común puede ser de decenas de veces mayor.

La geometría de la figura 3.23 esclarece la relación que hay entre el aumento y las distancias del objeto,  $d_o$ , y la imagen,  $d_i$ , a la lente. Los triángulos que se han sombreado a la izquierda y a la derecha de la lente, son semejantes (¿Por qué?). De ahí que:

$$A = \frac{H_i}{H_o} = \frac{d_i}{d_o}$$

Toma una lente convergente (pueden servir una lupa y algunas lentes de corregir la visión, etc.) y averigua, o determina, su distancia focal. Ensayar la formación de imágenes de diversos objetos: una lámpara, una ventana, algún objeto bien iluminado, etc. Como pantalla puedes utilizar algún material translúcido o, simplemente, una hoja de papel blanco. Estudia lo que sucede con la imagen al variar las distancias entre el objeto, la lente y la pantalla y trata de explicar los resultados mediante un esquema de la situación y el trazado de rayos principales. Resume tus conclusiones.





3.4.1.2. El ojo humano

Tiene la forma de un globo aproximadamente esférico, de diámetro 2.3-2.5 cm (Fig. 3.24). Los medios transparentes que lo constituyen (córnea, humor acuoso, cristalino y humor vítreo) actúan, en conjunto, como una lente convergente de 1.7 cm de distancia focal, aproximadamente. La luz penetra en el ojo por la pupila, la cual es una abertura que hay en el iris. Mientras menor sea la iluminación de los objetos que observamos, mayor será la abertura de la pupila. Este mecanismo de regulación se realiza automáticamente, sin que seamos conscientes de ello. El cristalino funciona como una lente. En la retina, la cual constituye una especie de pantalla, se forma una imagen invertida del objeto que miramos. La sensación visual se produce cuando la luz incide en las terminaciones nerviosas de la retina.

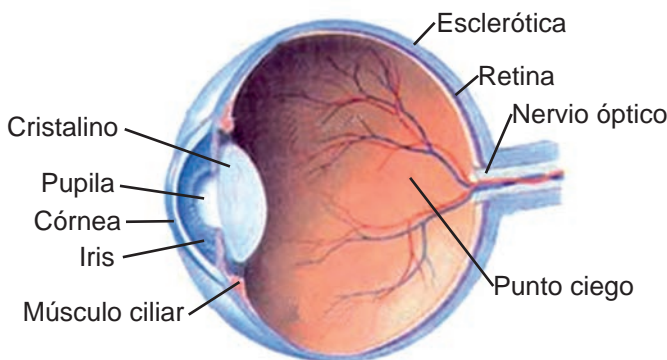


Fig. 3.24. Representación esquemática del interior del ojo humano.

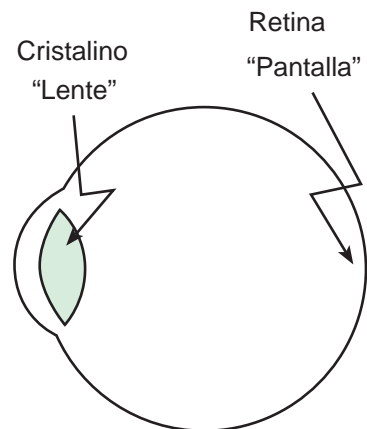


Fig. 3.25. Representación esquemática del ojo humano desde el punto de vista óptico.

Desde el punto de vista óptico, el ojo humano puede representarse como en el esquema de la figura 3.25. La distancia entre la "lente" y la "pantalla" es fija y no varía al mirar objetos lejanos o cercanos. ¿Cómo es posible, entonces, que se logre formar una imagen nítida del objeto que miramos, para distancias muy diferentes entre él y el ojo?

Compara entre sí la formación de imágenes en una cámara fotográfica y en la retina del ojo humano.





Cuando un adulto con visión normal acerca mucho un objeto a sus ojos, lo ve “desenfocado”. ¿Cómo se explica esto? ¿Por qué, a medida que aumenta la edad, muchas personas tienden a alejar los objetos para poder verlos bien, o de lo contrario utilizan lentes?



En los miopes, la imagen nítida de los objetos alejados se forma delante de la retina del ojo; en los hipermétropes se formaría fuera del globo del ojo, detrás de la retina. Para corregir estos defectos se utilizan, respectivamente, lentes divergentes y convergentes. Explica el papel de dichas lentes.

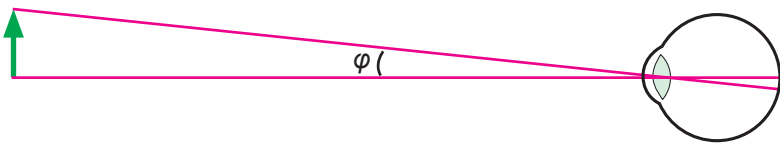
A medida que acercamos el objeto que miramos al ojo, mediante un acto reflejo (involuntario), los músculos ciliares se contraen y aumenta la curvatura del cristalino, haciendo que la “lente” sea más convergente. De otro modo veríamos el objeto desenfocado, pues su imagen nítida se formaría en un lugar más allá de la retina. Este proceso se denomina **acomodamiento del ojo**, y explica por qué no es posible ver con nitidez objetos cercanos y lejanos simultáneamente. Un niño con visión normal puede enfocar bien a una distancia tan corta como 7 - 8 cm, pero al aumentar la edad de la persona, el cristalino se va endureciendo y las posibilidades de visión cercana disminuyen, lo cual debe ser corregido con ayuda de lentes. Como promedio, la distancia mínima a que un adulto con visión normal puede enfocar sin dificultad es 25 cm. Esta distancia suele denominarse “punto cercano”.

La experiencia muestra que mientras mayor sea la distancia desde la cual observamos un objeto, menores parecen sus dimensiones y peor vemos sus detalles. ¿Cómo se explica esto?

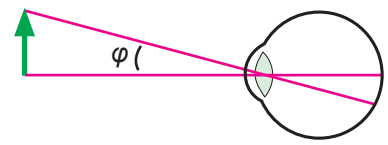
**El tamaño aparente de un objeto y la visibilidad de sus detalles están determinados por el tamaño de su imagen en la retina del ojo.**

En la figura 3.26 se representa un mismo objeto, pero situado a diferentes distancias del ojo. En el caso (b) el objeto parece mayor, porque la imagen que se forma en la retina también es mayor. Por otra parte, mientras más amplia sea esta imagen, mayor será el número de terminaciones nerviosas de la retina que participa en la sensación visual y, por eso, mejor se verán los detalles. A medida que disminuye el tamaño de la imagen en la retina, van desapareciendo los detalles que distinguimos.

**El tamaño de la imagen de un objeto en la retina del ojo depende del ángulo bajo el cual se observa el objeto, dicho ángulo crece según el objeto se acerca al ojo.**



a)



b)

**Fig. 3.26.** El tamaño aparente de un mismo objeto es mayor en (b) que en (a), porque el ángulo  $\varphi$  bajo el cual se observa y, por tanto, su tamaño en la retina del ojo, es mayor.

De acuerdo con el análisis realizado, para ver mejor los detalles de un objeto podemos acercarlo al ojo, a fin de aumentar el ángulo bajo el cual lo vemos, y el tamaño de su imagen en la retina. Sin embargo, no siempre es posible acercarnos a los objetos que observamos, como por ejemplo, en el caso de los astros o de la cima de una montaña. Por otra parte, aún en aquellos casos en que es posible, el acercamiento está limitado por la capacidad de acomodamiento del ojo para enfocar una imagen nítida en la retina. Como hemos dicho, en una persona adulta con visión normal, la distancia mínima a que el ojo puede realizar el acomodamiento de forma natural, llamada “mínima distancia de visión distinta” o “punto cercano” es, como promedio, de unos 25 cm.

Con el propósito de resolver las dificultades mencionadas, se emplean ciertos instrumentos ópticos, como la lupa, el microscopio y el telescopio, cuyo funcionamiento examinamos en los apartados que siguen.

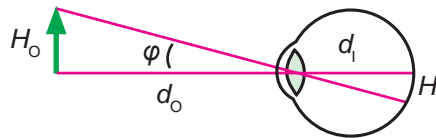


Sostén una moneda lo más alejada que puedas de tus ojos. Acércala poco a poco y observa cómo cada vez se ven mejor sus detalles. ¿Cuál es la distancia mínima a que puedes enfocar?





**Ejemplo 3.4.** Determina el ángulo bajo el cual se observa una regla de 1.00 m de alto y el tamaño que tendrá su imagen en la retina del ojo, cuando se encuentra a una distancia de: a) 10.0 m, b) 20.0 m. Considera que la distancia entre la “lente” del ojo y la retina es de unos 2.0 cm.



a) De acuerdo con la figura, la tangente del ángulo bajo el cual se observa la regla es:

$$\tan \varphi = \frac{H_o}{d_o},$$

donde  $H_o$  es la altura de la regla y  $d_o$  su distancia al ojo. Por consiguiente:

$$\varphi = \tan^{-1}\left(\frac{1.00 \text{ m}}{10.0 \text{ m}}\right) = 5.71^\circ$$

Para los triángulos exterior e interior al ojo de la figura se tiene:

$$\frac{H_i}{H_o} = \frac{d_i}{d_o}$$

donde  $H_i$  es el tamaño de la imagen en la retina y  $d_i$  la distancia entre la “lente” del ojo y la retina. Por lo tanto, el tamaño de la imagen en la retina es:

$$H_i = \frac{H_o}{d_o} d_i = \left(\frac{1.00 \text{ m}}{10.0 \text{ m}}\right)(0.02 \text{ m}) = 2.0 \text{ mm}$$

$$\text{b) } \varphi = \tan^{-1}\left(\frac{1.00 \text{ m}}{20.0 \text{ m}}\right) = 2.86^\circ$$

y

$$H_i = \left(\frac{1.00 \text{ m}}{20.0 \text{ m}}\right)(0.02 \text{ m}) = 1.0 \text{ mm}$$

En la figura 3.26a la distancia a que está la regla es el doble que en la 3.26b y el ángulo de observación la mitad. Esta relación de proporcionalidad inversa entre el ángulo bajo el cual se ve el objeto y la distancia a que se encuentra tiene lugar cuando los ángulos de observación son pequeños, como generalmente ocurre en la práctica. En efecto, en tal caso el ángulo expresado en radianes es  $\varphi \approx H_o/d_o$ , donde se aprecia la mencionada relación de proporcionalidad inversa.

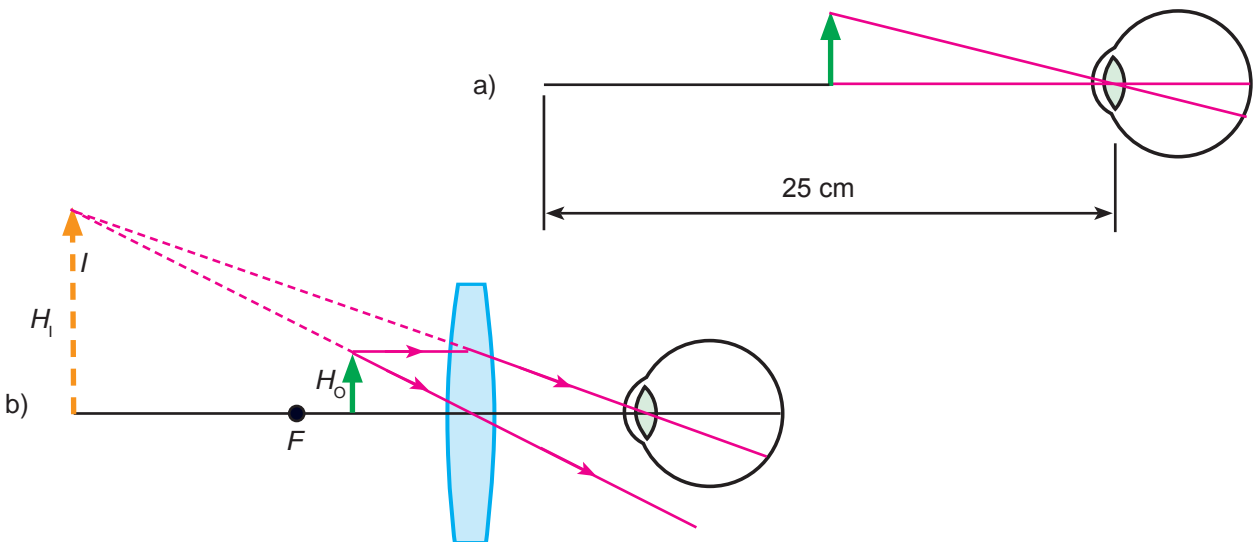
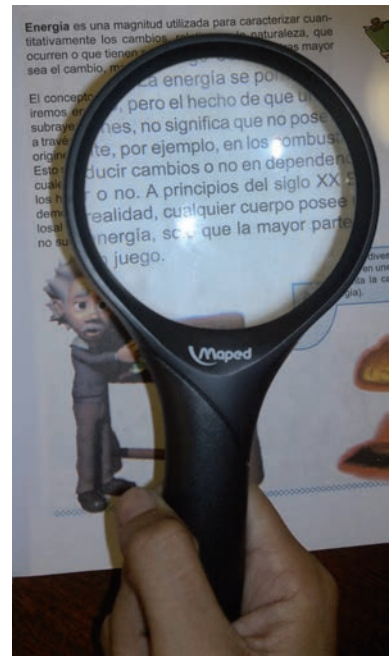


3.4.1.3. La lupa

Denominada también **microscopio simple**, en su variante más elemental consiste solamente en una lente convergente, a veces llamada **lente de aumento**.

En la figura 3.27a se ha representado un objeto (una flecha) a una distancia del ojo mucho menor de 25 cm. Como sabemos, a esa distancia el ojo adulto normal tiene dificultad para acomodar, por lo que el objeto se verá “desenfocado”.

En esas condiciones, intercalemos una lupa entre el objeto y el ojo, de tal modo que el objeto quede entre la lente y su foco (Fig. 3.27b). El esquema muestra un haz de luz que diverge de la punta de la flecha. A fin de trazar con facilidad la trayectoria del haz, lo hemos escogido de tal modo que sus bordes sean dos rayos principales: el que incide paralelo al eje óptico de la lente y el que pasa por su centro. El esquema muestra que los haces que llegan al ojo parecen provenir de un objeto como el  $I$ , originándose por eso la **imagen virtual** de que la flecha se encuentra en ese lugar.



**Fig. 3.27.** a) El ojo adulto normal tiene dificultad para la “acomodación” cuando el objeto que mira se encuentra a menos de 25 cm. b) La lupa corrige esta situación, haciendo que los haces parezcan provenir de un lugar más alejado; al propio tiempo, aumenta el ángulo de observación y, con ello, el tamaño de la imagen en la retina.



Intenta medir en la práctica el aumento producido mediante una lupa.



¿En que caso será mayor el aumento que puede producir una lupa, cuando la utiliza un niño, o un adulto, ambos con visión normal?

De este modo, la lupa provoca dos efectos básicos: 1) aumenta el ángulo de observación y, con ello, el tamaño de la imagen en la retina y 2) los haces inciden en el ojo como si proviniesen de un objeto situado a una distancia mayor, a la cual el ojo puede acomodar sin dificultad. En consecuencia, en la retina se forma una imagen aumentada y enfocada del objeto, con lo cual sus detalles se ven mejor.

Anteriormente vimos que una lente convergente forma imágenes reales e invertidas cuando el objeto se coloca a una distancia de ella mayor que la distancia focal, como por ejemplo, en la cámara fotográfica y la retina del ojo. Ahora hemos encontrado que **si el objeto se sitúa entre la lente y su foco, puede originar imágenes virtuales derechas.**

¿Cómo determinar mediante una ecuación el aumento de una lupa?

El aumento de una lente convergente utilizada a modo de lupa no puede ser calculado del mismo modo que en el caso de imágenes reales, hallando la razón entre el tamaño de la imagen y el del objeto. El efecto que se produce es no solo de aumento de tamaño, sino también de alejamiento. El tamaño que apreciamos está determinado por el tamaño de la imagen en la retina del ojo. De ahí que:

**El aumento de una lupa viene dado por el cociente entre los tamaños de las imágenes formadas en la retina del ojo cuando el objeto se observa con la lupa y cuando se observa sin ella a la mínima distancia a que el ojo enfoca cómodamente:**

$$A = \frac{h_L}{h_d}$$

En esta fórmula  $h_L$  es el tamaño de la imagen en la retina al observar el objeto con la lupa y  $h_d$  al observarlo directamente.

El tamaño de la imagen en la retina, y por tanto el aumento, depende de la posición del objeto respecto a la lupa. Los mayores tamaños se logran cuando el objeto queda muy próximo a su foco. Por su parte, el tamaño de la imagen





al observar directamente el objeto depende de la distancia a que éste se coloca del ojo. En este caso, el mayor tamaño sin esfuerzo del ojo se alcanza cuando el objeto está situado a la menor distancia a que el ojo enfoca cómodamente. Pero como ya sabes, esta distancia varía con la persona y la edad. Debido a las razones anteriores, el “aumento nominal” de una lupa se calcula suponiendo que el objeto está situado próximo a su foco y que se trata de un ojo adulto promedio, para el cual la mínima distancia a que puede enfocar cómodamente es 25 cm. En la figura 3.28 se ha representado tal situación.

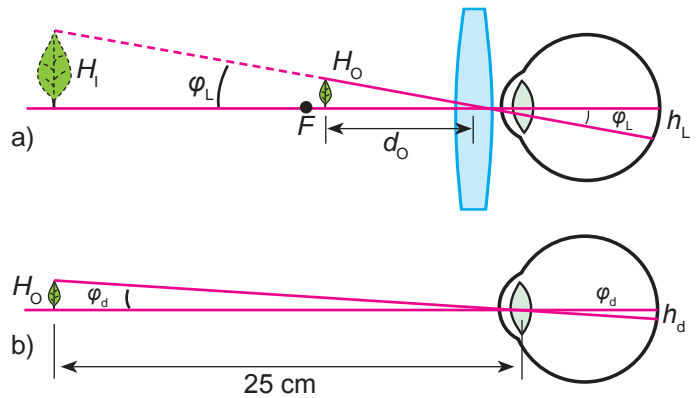


Fig. 3.28. Objeto visto: a) a través de una lupa y b) directamente y a 25 cm del ojo

Como la lupa se emplea para observar objetos o detalles pequeños, los ángulos de observación también son pequeños y, por eso, entre ellos y el tamaño de la imagen en la retina existe una relación que es aproximadamente de proporcionalidad. En otras palabras:

$$A = \frac{h_i}{h_d} \approx \frac{\varphi_L}{\varphi_d}$$

Debido a que este aumento viene dado por el cociente entre los ángulos de observación, se denomina **aumento angular**. Recuerda que el correspondiente a las imágenes reales se llama **aumento lineal**.

Por otra parte, también debido a la pequeñez de los ángulos de observación, en el esquema de la figura 3.28a, para los triángulos exteriores al ojo se tiene:

$$\varphi_d \approx \frac{H_o}{25 \text{ cm}} \quad \text{y} \quad \varphi_L \approx \frac{H_o}{d_o}$$

Por consiguiente: 
$$A \approx \frac{\varphi_L}{\varphi_d} = \frac{25 \text{ cm}}{d_o}$$

Como al calcular el aumento nominal se supone que el objeto está muy próximo al foco de la lupa,  $d_o \approx f$ . Por consiguiente, el aumento de la lupa para un ojo adulto





normal promedio es:  $A \approx \frac{25 \text{ cm}}{f}$

Esta ecuación es coherente con el hecho de que mientras menor sea la distancia focal  $f$  de la lupa mayor es su aumento.

En realidad, con una lupa pueden obtenerse aumentos algo superiores a los dados por la fórmula anterior. Un análisis detenido de la figura 3.28b muestra que si el objeto se separa del foco aproximándose a la lente, el ángulo de observación  $\phi$  crece y, por tanto, también el aumento de la lupa. No obstante, esto conduce a que la imagen se aproxime al ojo y esta aproximación para un ojo adulto normal promedio no puede ser menor de 25 cm. Por eso, en el adulto con visión normal, el máximo aumento posible se alcanza cuando el objeto se coloca entre la lente y su foco, de tal modo que la imagen virtual se ve a 25 cm del ojo. Puede demostrarse que en este caso el aumento es:

$$A \approx \frac{25 \text{ cm}}{f} + 1$$

Mediante lupas se consigue aumentar el tamaño aparente de objetos pequeños hasta alrededor de 25 veces. Cabe advertir, no obstante, que para aumentos mayores de 5-10 veces, las imágenes se deforman y es necesario hacer uso del microscopio.

**Ejemplo 3.5.** Un adulto con visión normal utiliza una lente convergente de distancia focal 3.0 cm como lupa. Calcula: a) el aumento cuando coloca el objeto muy próximo al foco de la lente y b) el máximo aumento que puede lograr.

a) Cuando el objeto se coloca muy próximo al foco de la lente el aumento es

$$A \approx \frac{25 \text{ cm}}{f} \approx \frac{25 \text{ cm}}{3.0 \text{ cm}} = 8.3$$

b) El máximo aumento se logra cuando la imagen se ve a 25 cm del ojo. En este caso el aumento es

$$A \approx \frac{25 \text{ cm}}{f} + 1 \approx 9.3$$



3.4.1.4. El microscopio óptico

Se emplea para obtener grandes aumentos (de varios cientos de veces). Está compuesto, básicamente, por dos sistemas ópticos convergentes, cuyo funcionamiento conjunto puede interpretarse del siguiente modo. Uno de los sistemas, denominado **objetivo**, forma una imagen real aumentada del objeto; el otro sistema, llamado **ocular**, se utiliza en calidad de lupa para observar la imagen formada por el primero. Se realizan así dos ampliaciones sucesivas.

En la figura 3.29 se ha representado la formación de una imagen mediante un modelo de microscopio en que el objetivo y el ocular son simples lentes convergentes. El objeto es la pequeña flecha dibujada en la parte inferior del esquema. Para simplificar el diagrama, solo se han trazado haces que ayudan a comprender la formación de la imagen de la punta de la flecha. Como en otras ocasiones, los bordes de estos haces son dos rayos principales, esta vez el paralelo al eje óptico y el central. El haz que diverge de la punta de la flecha objeto, luego de atravesar la lente objetivo, forma una imagen real de dicha punta. La imagen completa de la flecha,  $I$ , es invertida y aumentada. Por su parte, el haz que diverge de la punta de esta imagen real, atraviesa la lente ocular, que actúa como lupa, y al incidir en el ojo produce una imagen virtual de dicha punta. La imagen virtual completa de la flecha,  $I'$ , es derecha respecto a la anterior y también aumentada.

El aumento global de un microscopio es el producto de los aumentos producidos por el ocular y el objetivo:

$$A = A_{oc} A_{ob}$$

En los oculares y objetivos de los microscopios aparecen indicados sus aumentos en la forma: 5x, 10x, 50x, lo que significa que la imagen aumenta 5, 10, 50 veces su tamaño.

¿Cómo determinar por medio de ecuaciones dichos aumentos?

Indaga acerca de la importancia de los microscopios y sus diferentes tipos.

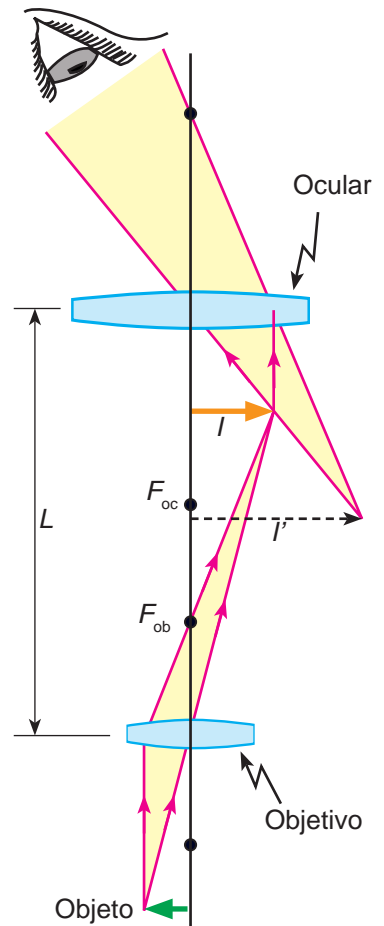


Fig. 3.29. Modelo simple de microscopio óptico.



Si suponemos que, como es habitual al utilizar la lupa, el objeto observado mediante el ocular (en este caso la imagen real  $l$ ) se encuentra muy próximo a su foco, entonces, para el aumento del ocular podemos utilizar la ecuación  $\frac{1}{f} = \frac{1}{d_o} + \frac{1}{d_i}$  conocida de la lupa:

$$A_{oc} \approx \frac{25 \text{ cm}}{f_{oc}}$$

Por su parte, el aumento producido por el objetivo es como el de la imagen real formada por una lente convergente:

$$A_{ob} = \frac{d_i}{d_o}$$

donde  $d_o$  y  $d_i$  son, respectivamente, las distancias del objeto y su imagen real a la lente. Algunas consideraciones permiten asignar valores determinados a  $d_i$  y  $d_o$ .

En primer lugar, como hemos supuesto que la imagen real se forma muy cerca del foco del ocular,  $F_{oc}$ , entonces del diagrama se ve que  $d_i \approx L - f_{oc}$ , donde  $L$  es la distancia entre el objetivo y el ocular (aproximadamente igual a la longitud del cañón del microscopio). Por otra parte, al enfocar el microscopio, comúnmente el objeto queda situado muy próximo al foco del objetivo, con lo cual  $d_o \approx f_{ob}$ . De este modo:

$$A_{ob} = \frac{d_i}{d_o} \approx \frac{L - f_{oc}}{f_{ob}}$$



**Ejemplo 3.6.** Se utilizan el ocular de 10x y el objetivo de 50x de un microscopio compuesto. La distancia entre ellos es 17 cm. Determina: a) el aumento global del microscopio y b) las distancias focales del ocular y el objetivo.

a) El aumento global del microscopio es el producto de los aumentos del ocular y el objetivo:

$$A = (10x)(50x) = 500x$$

b) El aumento del ocular es  $A_{oc} \approx \frac{25 \text{ cm}}{f_{oc}}$

Por consiguiente, su distancia focal es

$$f_{oc} = \frac{25 \text{ cm}}{A_{oc}} = \frac{25 \text{ cm}}{10} = 2.5 \text{ cm}$$

Por su parte, el aumento del objetivo es

$$A_{ob} \approx \frac{L - f_{oc}}{f_{ob}}$$

De aquí que

$$f_{ob} \approx \frac{L - f_{oc}}{A_{ob}} = \frac{17 \text{ cm} - 2.5 \text{ cm}}{50} = 0.29 \text{ cm} \approx 3 \text{ mm}$$

Nótese la distancia focal tan pequeña que posee el objetivo de un microscopio.

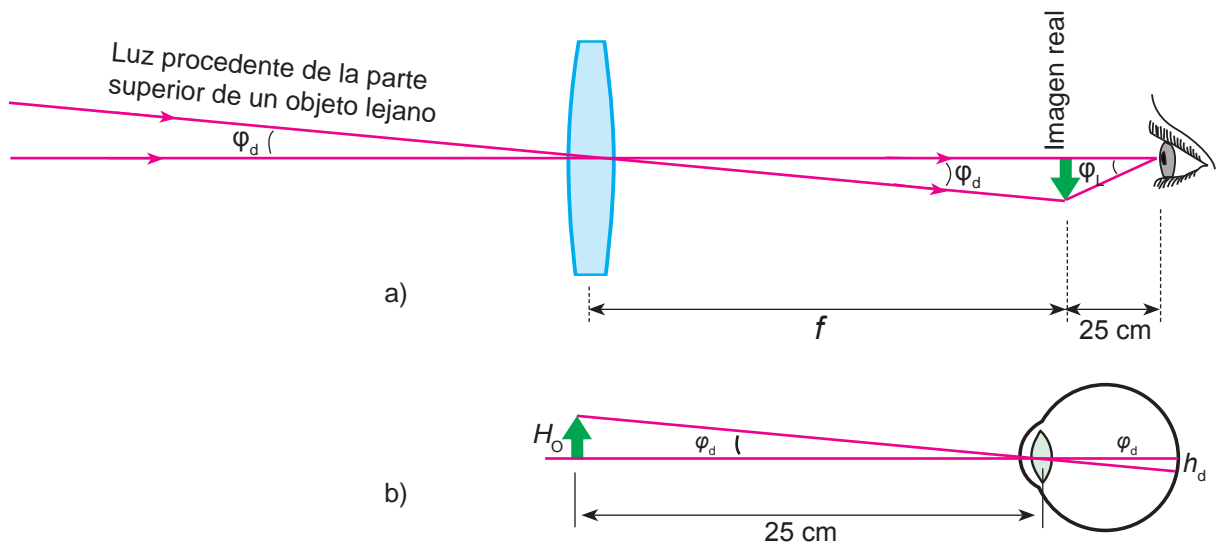
### 3.4.1.5. El telescopio refractor

Existen variados tipos de telescopios refractores, que se emplean con diferentes propósitos. Se utilizan para observaciones astronómicas, terrestres e incluso en los teatros (gemelos). El telescopio se denomina **refractor** cuando sus componentes fundamentales son lentes, en los que, como ya sabes, tiene lugar la refracción de la luz.

La variante más elemental estaría constituida por una sola lente convergente. Si el objeto está muy alejado, como ocurre generalmente, entonces cerca de su foco se forma una pequeña imagen del objeto, real e invertida (Fig. 3.30). Pese a su pequeñez, el ángulo  $\varphi_L$  bajo el cual se observa esta imagen formada por la lente es mayor que el ángulo



$\varphi_d$  al mirar el objeto directamente. De ahí que la imagen formada en la retina también sea más grande, dando lugar al aumento (Fig. 3.30).



**Fig. 3.30.** Esquema de la formación de una imagen: a) mediante un telescopio de una sola lente y b) directamente y a 25 cm del ojo.

Nota que como la imagen se forma muy próxima al foco de la lente, si ésta hubiese tenido mayor distancia focal que la representada, entonces la imagen se habría formado más lejos de ella y su tamaño hubiese sido mayor. Mientras mayor sea la distancia focal de la lente, mayor será el tamaño de la imagen, el ángulo  $\varphi_L$  bajo el cual se observa y, en consecuencia, el aumento que se produce. Calculemos dicho aumento en función de la distancia focal de la lente.

Como ya sabemos, el aumento de la imagen en la retina está determinado por el aumento angular:

$$A = \frac{\varphi_L}{\varphi_d}$$

Y puesto que los ángulos de observación son pequeños, podemos escribir

$$\varphi_L \approx \frac{H_i}{25 \text{ cm}} \quad \text{y} \quad \varphi_d \approx \frac{H_o}{f}$$





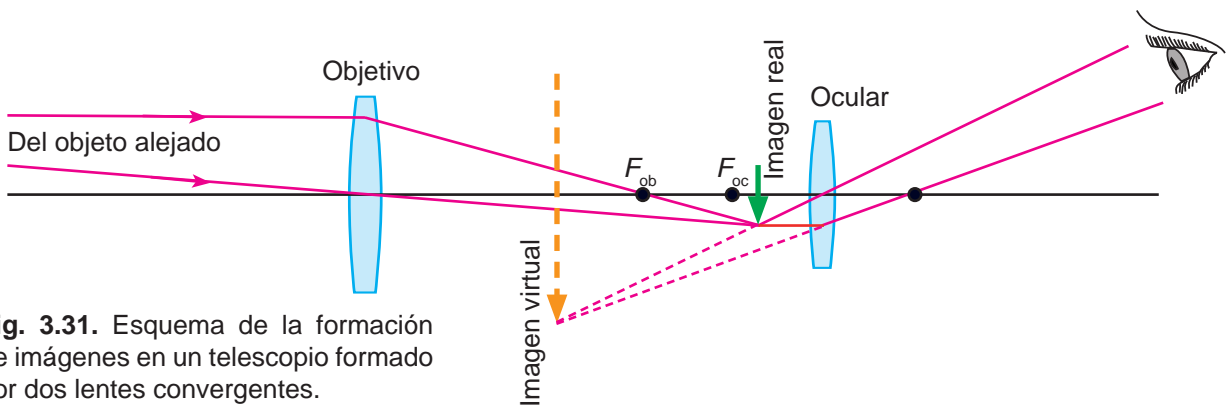
Por consiguiente:

$$A = \frac{\varphi_L}{\varphi_d} \approx \frac{f}{25 \text{ cm}}$$

Nota que esta expresión del aumento es inversa a la de la lupa.

Puedes comprobar que para obtener un aumento, por ejemplo, de tan solo 4 veces, se requeriría una lente de distancia focal 1 m, y para que sea de 100 veces, la distancia focal debería ser 25 m. Ya que la imagen se formaría aproximadamente a esas distancias de la lente, tales telescopios serían extremadamente largos, y nada prácticos. Este problema puede resolverse de modo similar que en el microscopio, realizando una segunda amplificación mediante otra lente que actúa como lupa.

En la figura 3.31 se ha representado el esquema de la formación de imágenes en un telescopio astronómico constituido por dos lentes convergentes. Este modelo de telescopio se llama **kepleriano**. Al igual que en el microscopio, una lente se denomina **objetivo** y la otra **ocular**.



**Fig. 3.31.** Esquema de la formación de imágenes en un telescopio formado por dos lentes convergentes.

El objetivo forma una imagen real del objeto lejano muy cerca de su foco, cuyo aumento es, como acabamos de ver:

$$A_{ob} \approx \frac{f_{ob}}{25 \text{ cm}}$$





A su vez, esta imagen real es observada mediante el ocular, que como en la lupa habitual, se coloca de tal modo que la imagen observada quede muy cerca de su foco. Sabemos que en este caso el aumento es:

$$A_{oc} = \frac{25 \text{ cm}}{f_{oc}}$$

Por consiguiente, el aumento global del telescopio Kepleriano es:

$$A = A_{oc} A_{ob} \approx \left( \frac{25 \text{ cm}}{f_{oc}} \right) \left( \frac{f_{ob}}{25 \text{ cm}} \right) = \frac{f_{ob}}{f_{oc}}$$

$$A = \frac{f_{ob}}{f_{oc}}$$

Nota que mientras mayor sea la distancia focal del objetivo en comparación con la del ocular, mayor será el aumento global del telescopio.

Puesto que en este modelo de telescopio, la imagen formada por el objetivo está muy próxima a su foco y el ocular se sitúa de modo que su foco también quede muy cerca de dicha imagen, ambos focos prácticamente se superponen. Esto significa que la distancia entre las lentes es aproximadamente igual a la suma de sus distancias focales, es decir a  $f_{ob} + f_{oc}$ . Conocer esto tiene importancia práctica a la hora de armar un telescopio Kepleriano.

Consigue dos lentes convergentes cuyas distancias focales difieran notablemente entre sí. Colócalas (preferiblemente dentro de un tubo de cartulina) a una distancia una de otra aproximadamente igual a la suma de sus distancias focales. Mira a través de ellas hacia un objeto lejano. Para lograr una imagen nítida, acerca o aleja ligeramente una lente a la otra. Calcula el aumento del "telescopio" que has construido.







**Ejemplo 3.7.** Para armar un telescopio astronómico Kepleriano se dispone de dos lentes convergentes, de distancias focales 70.0 cm y 3.0 cm. a) ¿A qué distancia entre sí deben colocarse las lentes? b) ¿Cuál de ellas utilizarías como objetivo y cuál como ocular? c) Calcula el aumento producido por cada lente y el aumento global del telescopio.

a) Como el telescopio se dirigirá a un objeto lejano, la imagen real del objetivo se formará cerca de su foco. Si se quiere colocar el ocular de tal modo que su foco quede próximo a dicha imagen, entonces la distancia entre las lentes debe ser:

$$70.0 \text{ cm} + 3.0 \text{ cm} = 73.0 \text{ cm}$$

b) El aumento global de un telescopio Kepleriano es

$$A = \frac{f_{ob}}{f_{oc}}$$

Por consiguiente, solo se obtiene un aumento mayor de 1 al utilizar la lente de mayor distancia focal como objetivo.

c) El aumento producido por el objetivo es:

$$A_{ob} \approx \frac{f_{ob}}{25 \text{ cm}} = \frac{70 \text{ cm}}{25 \text{ cm}} = 2.8 \text{ veces}$$

el producido por el ocular

$$A_{oc} \approx \frac{25 \text{ cm}}{f_{oc}} = \frac{25 \text{ cm}}{3.0 \text{ cm}} \approx 8.3 \text{ veces}$$

y el aumento global

$$A = \frac{f_{ob}}{f_{oc}} = \frac{70 \text{ cm}}{3.0 \text{ cm}} \approx 23 \text{ veces}$$

Mientras más grande sea el diámetro del objetivo del telescopio, mayor será la cantidad de luz procedente del objeto que es utilizada para formar la imagen y, por consiguiente, más clara se verá. De hecho, el parámetro más importante de los grandes telescopios astronómicos es el diámetro de su objetivo y, por eso, con frecuencia se caracterizan por este parámetro. En la práctica, es difícil y muy costosa la fabricación de lentes de más de 1 m de diámetro. Por eso, los telescopios astronómicos modernos



Argumenta con ayuda de un esquema, por qué mientras mayor sea el diámetro del objetivo de un telescopio, mayor será la cantidad de luz procedente del objeto que es utilizada para formar la imagen.



emplean en calidad de objetivo espejos cóncavos y no lentes. Los telescopios refractores con los objetivos grandes fueron construidos a finales del siglo XIX. El objetivo del telescopio refractor de luz visible más grande posee un diámetro de 1.02 m.

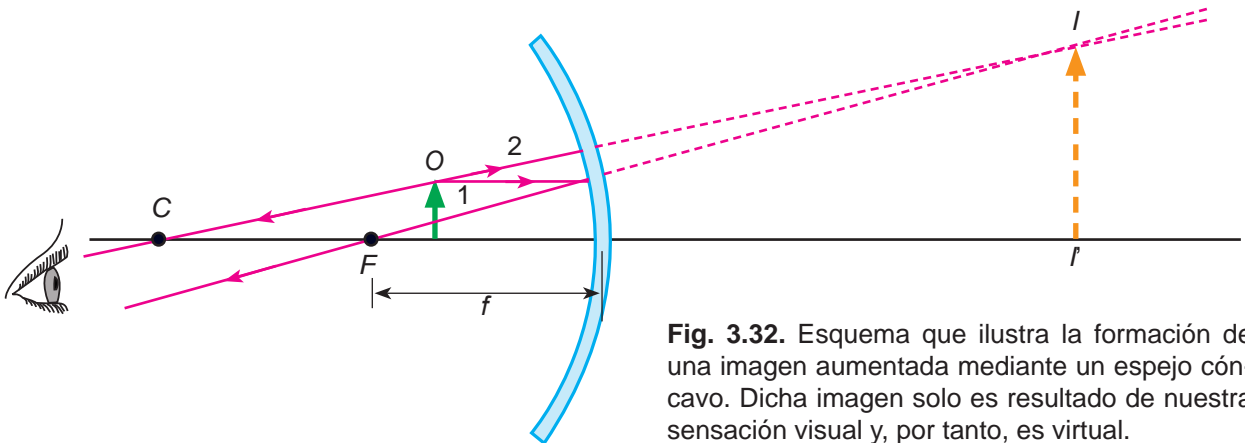
A continuación examinamos la formación de imágenes mediante espejos cóncavos.

### 3.4.2. Formación de imágenes mediante espejos cóncavos

#### 3.4.2.1. El espejo de aumento

Como sabes, los espejos comunes, planos, producen una imagen que tiene el mismo tamaño que el objeto. Sin embargo, con frecuencia se emplean espejos curvos a fin de obtener imágenes aumentadas y apreciar detalles que de otro modo no serían visibles. Ejemplos de éstos son, el pequeño espejito utilizado por los odontólogos para examinar la boca, o ciertos espejos usados durante el maquillaje, los cuales proporcionan una imagen aumentada del cutis. *¿Cómo se explica la formación de tales imágenes aumentadas?*

En la figura 3.32 se ha representado un objeto en forma de flecha, situado entre el vértice de un espejo cóncavo y su foco. Consideremos, como otras veces, la trayectoria de un haz de luz que diverge de algún punto del objeto, por ejemplo, de la punta de la flecha  $O$ . Reiteramos, el haz puede ser cualquiera que se refleje en el espejo, pero como conocemos la trayectoria que siguen los **rayos principales**, escogemos uno cuyos bordes sean dos de estos rayos, digamos, el 1, que incide paralelamente al eje óptico del espejo y el 2, cuya dirección pasa por su centro óptico. Tales rayos se cortan en el punto  $I$ . Los haces que llegan al ojo procedentes de diversos puntos de la flecha parecen provenir de la flecha  $I'$ , y por eso se produce la sensación de que se encuentra en ese lugar. Esa es una **imagen virtual** de la flecha, pues se forma en la intersección de las prolongaciones de los rayos reflejados.



**Fig. 3.32.** Esquema que ilustra la formación de una imagen aumentada mediante un espejo cóncavo. Dicha imagen solo es resultado de nuestra sensación visual y, por tanto, es virtual.

Nota que el espejo cóncavo utilizado como espejo de aumento funciona de modo parecido a la lupa. Si mediante un espejo plano intentamos apreciar mejor algún detalle de nuestra cara, aproximándonos cada vez más al espejo, llegará un momento en que no podremos enfocar adecuadamente, pues al acercarnos, la imagen también se acerca al ojo y éste no puede realizar el **acomodamiento**. El espejo cóncavo provoca los dos efectos mencionados en el caso de la lupa:

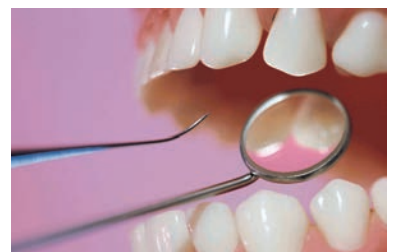
- 1) Aumenta el ángulo de observación y, en consecuencia, el tamaño de la imagen en la retina y
- 2) Los haces inciden en el ojo como si proviniesen de un objeto situado a una distancia mayor de 25 cm, a la cual el ojo puede acomodar.

De modo similar que la lupa, el espejo cóncavo funciona en calidad de espejo de aumento cuando el objeto se coloca entre él y su foco, como se dibujó en la figura 3.32.

La ecuación para calcular el aumento que produce un espejo cóncavo cuando se utiliza como espejo de aumento, es similar que para la lupa. Si se supone que el objeto está muy próximo al foco del espejo, dicha ecuación es:

$$A \approx \frac{25 \text{ cm}}{f}$$

En este caso  $f$  es la distancia focal del espejo.





**Ejemplo 3.8.** Un espejo para maquillarse se ha diseñado de tal modo que tiene un radio de curvatura de 38 cm. a) ¿Cuál es su distancia focal? b) ¿Cuál será el aumento que produce, si la cara se coloca muy cerca de su foco y la visión de la persona es normal?

a) Para un espejo esférico:

$$f = \frac{R}{2} = \frac{38 \text{ cm}}{2} = 19 \text{ cm}$$

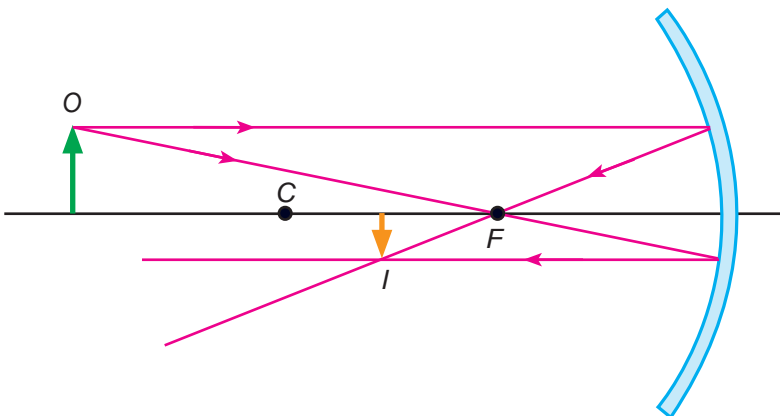
b) Cuando la cara está muy próxima al foco del espejo el aumento es:

$$A \approx \frac{25 \text{ cm}}{f} \approx 1.3$$

### 3.4.2.2. El Telescopio reflector

Un telescopio se denomina **reflector** si su objetivo es un espejo cóncavo, en lugar de una lente.

De forma similar que una lente convergente, un espejo cóncavo puede originar no solo imágenes virtuales, sino también reales, en dependencia de la distancia a que se encuentre el objeto del espejo. Cuando el objeto está situado entre el foco y el espejo, puede dar lugar a una imagen virtual, como acabamos de ver en el caso del espejo de aumento, pero si se encuentra a una distancia del espejo mayor que su distancia focal, entonces puede formar imágenes reales.

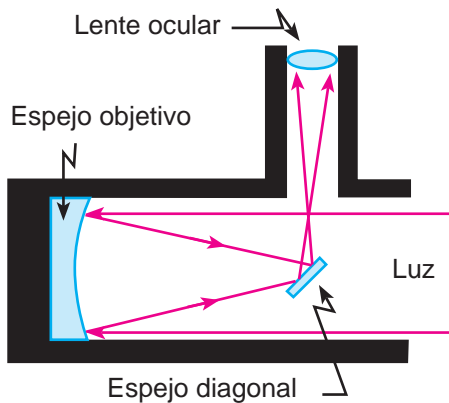


**Fig. 3.33.** Esquema que ilustra la formación de una imagen real mediante un espejo cóncavo.

La figura 3.33 ilustra la formación de la imagen real de una flecha situada a una distancia del espejo mayor que su distancia focal. Como haz luminoso que diverge de la punta de la flecha e incide en el espejo se ha seleccionado uno cuyos bordes son, el rayo paralelo al eje óptico del espejo y el rayo que pasa por su foco.



En la figura 3.34 se muestra un esquema del telescopio reflector construido por primera vez por Newton, alrededor de 1668. El aumento del telescopio de Newton era de 38 veces y el diámetro de su espejo cóncavo tan solo de varios centímetros.



En 1668, Isaac Newton construyó el primer telescopio reflector, el cual producía un aumento de 38 veces.

**Fig. 3.34.** Esquema de un telescopio reflector, construido por primera vez por Newton.

El espejo cóncavo del telescopio de Newton tiene la misma función que la lente del telescopio refractor: formar una imagen real del objeto, para luego ser observada mediante el ocular.

Las ecuaciones para calcular en el telescopio reflector los aumentos del objetivo, del ocular y el aumento global, son similares a las del telescopio refractor:

$$A_{ob} \approx \frac{f_{ob}}{25 \text{ cm}}$$

$$A_{oc} \approx \frac{25 \text{ cm}}{f_{oc}}$$

$$A = A_{oc} A_{ob} \approx \frac{f_{ob}}{f_{oc}}$$

Solo que en este caso  $A_{ob}$  y  $f_{ob}$  son el aumento y la distancia focal de su espejo cóncavo, el cual funciona como objetivo.





**Ejemplo 3.9.** La imagen de una porción de la superficie de la Luna aparece aumentada 100 veces en un telescopio astronómico reflector. Se sabe que la distancia focal de su ocular es 3.5 cm. a) Determina los aumentos del ocular y del objetivo. b) ¿Cuál es la distancia focal y el radio de curvatura de su espejo objetivo?

a) El aumento del ocular es:

$$A_{oc} = \frac{25 \text{ cm}}{f_{oc}} = \frac{25 \text{ cm}}{3.5 \text{ cm}} \approx 7.1$$

Puesto que el aumento global es

$$A = A_{oc} A_{ob} = 100$$

el del objetivo es

$$A_{ob} = \frac{100}{A_{oc}} \approx 14$$

b) El aumento del espejo objetivo es

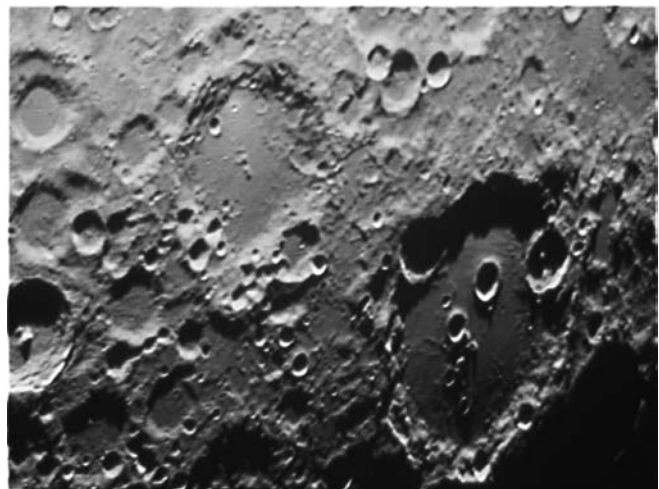
$$A_{ob} \approx \frac{f_{ob}}{25 \text{ cm}}$$

por lo que su distancia focal es:

$$f_{ob} \approx A_{ob} (25 \text{ cm}) = (14)(25 \text{ cm}) = 3.5 \text{ m}$$

Su radio de curvatura es

$$R = 2f_{ob} \approx 7.0 \text{ m}$$



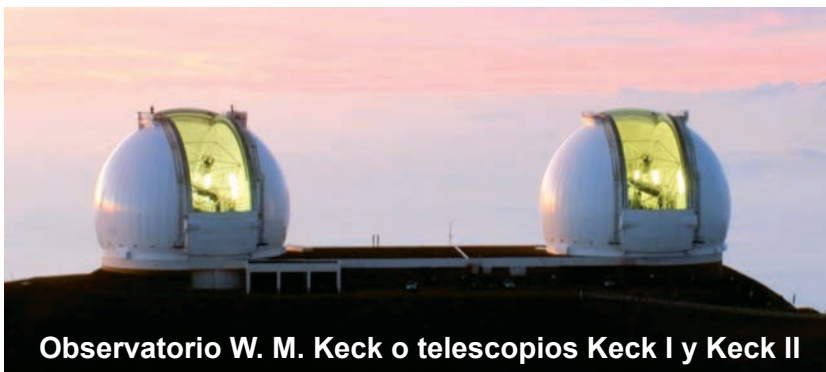
En la actualidad se han instalado numerosos telescopios reflectores, con espejos cóncavos de varios metros de diámetro. En 1990 se puso en órbita alrededor de la Tierra el telescopio Hubble, cuyo espejo principal tiene un diámetro de 2.4 m. Pronto fue descubierto que debido a un error en su fabricación, el espejo no enfocaba bien, y en 1993 fue enviada una misión espacial que le instaló algunos dispositivos de corrección óptica. El espejo del Gran Telescopio de Canarias -el mayor del mundo hasta el año 2011- tiene un diámetro de 10.4 m. Se proyectan telescopios con espejos de 30 y 40 m de diámetro, lo que representará un enorme salto en sus tamaños.



Mediante los telescopios reflectores pueden obtenerse detalles del Sol, la Luna, los planetas y de otros cuerpos celestes relativamente cercanos. Pero las estrellas se encuentran tan lejanas, que aún con los más potentes telescopios, la imagen que se forma de ellas es extremadamente pequeña, debido a lo cual no es posible distinguir detalles. Lo que aumenta el telescopio en este caso no son, pues, los detalles, sino **la cantidad de luz que llega al ojo**. Su espejo concentra una cantidad de luz proveniente de las estrellas, millones de veces mayor que la pupila del ojo. Como resultado, la iluminación de la retina también es varios millones de veces mayor, lo que hace posible observar estrellas tan débiles o lejanas que no se distinguen a simple vista. Adicionalmente, muchas observaciones astronómicas no se realizan directamente mediante el ojo, sino utilizando películas fotográficas y tiempos de exposición largos. Esto permite registrar objetos celestes que nuestro ojo no es capaz de apreciar.

Calcula cuántas veces mayor es el diámetro del espejo del telescopio Keck comparado con el de la pupila de un ojo común.

Indaga acerca de importantes datos obtenidos mediante el telescopio espacial Hubble.



Observatorio W. M. Keck o telescopios Keck I y Keck II



Telescopio espacial Hubble



### 3.5. Actividades de sistematización y consolidación

#### 3.5.1. Sopa de letras con palabras clave del capítulo

Escribe cada palabra en Wikipedia o en Encarta y da un vistazo a lo que encuentres.

- |             |                 |
|-------------|-----------------|
| Aumento     | Luz             |
| Cóncavo     | Microscopio     |
| Convergente | Objetivo        |
| Difusa      | Objeto          |
| Especular   | Ocular          |
| Espejo      | Ra <del>y</del> |
| Fuente      | Reflexión       |
| Haz         | Refracción      |
| Imagen      | Telescopio      |
| Lente       | Virtual         |
| Lupa        |                 |



Í	I	D	Á	M	O	Ú	K	A	Ú	Z	A	H	Ü	V	O	N	T
R	H	S	B	B	T	E	L	E	S	C	O	P	I	O	É	N	E
H	Á	I	J	E	F	Ó	O	J	E	P	S	E	Í	Z	Ó	E	J
Ü	Ü	E	S	S	C	Ó	N	C	A	V	O	M	Ñ	I	X	C	R
M	T	Ó	T	P	G	V	Á	S	K	Y	I	B	X	B	Z	Ú	A
O	E	R	J	E	C	O	N	V	E	R	G	E	N	T	E	N	Y
E	T	F	C	C	K	F	M	F	K	J	L	K	Z	O	E	D	O
T	N	É	O	U	Y	T	J	P	Ñ	F	W	I	X	G	Á	B	F
N	E	P	B	L	O	Z	Á	M	E	L	N	F	A	B	G	M	J
E	L	P	Í	A	O	A	Ó	R	A	W	Ó	M	G	P	Ú	J	Ú
U	N	Z	R	R	L	G	A	U	Ó	É	I	E	P	B	G	O	I
F	E	N	K	A	L	U	T	C	Q	Ñ	C	S	G	R	G	D	Q
H	L	L	L	S	M	R	O	I	P	O	C	S	O	R	C	I	M
W	U	U	É	E	I	Ó	Y	I	Q	O	A	X	Z	J	S	F	B
U	C	Z	N	V	T	É	Y	P	E	Ú	R	L	Í	D	A	U	Í
Ú	M	T	B	Á	C	D	O	Y	N	V	F	N	R	P	Ñ	S	P
M	O	B	J	E	T	I	V	O	C	Y	E	Ü	U	G	Ú	A	U
Ú	I	Ñ	A	N	S	O	C	U	L	A	R	L	R	K	L	Q	H



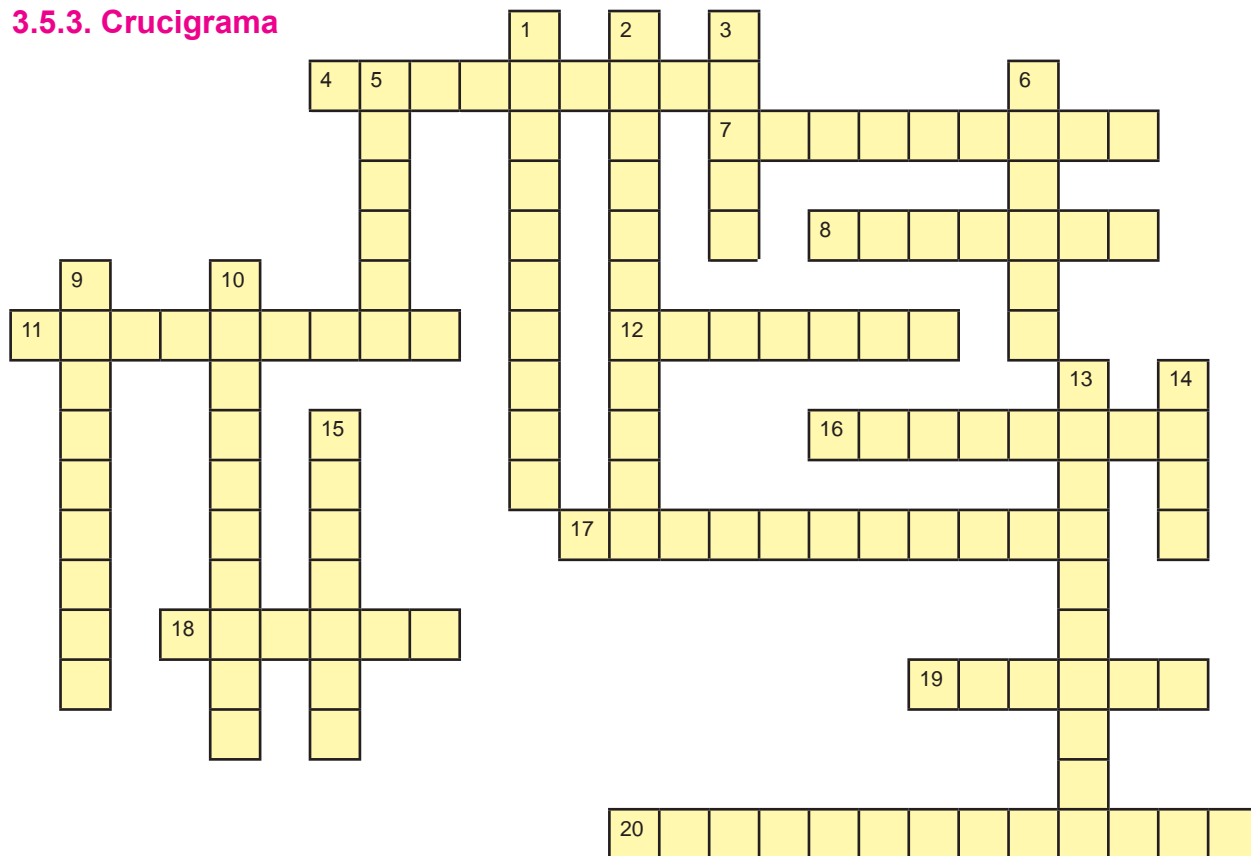


**3.5.2. Conexión de conceptos e ideas**

1. Óptica geométrica. ( ) Se obtiene del cociente entre el tamaño de la imagen y el tamaño del objeto.
2. Primera ley de la reflexión. ( ) El rayo reflejado está en el plano que contiene el rayo incidente y es perpendicular a la superficie del espejo.
3. Ecuación que expresa la segunda ley de la reflexión. ( ) Representan el grado de capacidad de hacer converger haces de luz. En el caso de una lente, el inverso de la distancia focal en metros es llamada de ésta manera.
4. Primera ley de la refracción. ( ) El rayo refractado está en el plano determinado por el rayo incidente y la perpendicular a la superficie en el punto de incidencia.
5. Segunda ley de la refracción. ( )  $n_1 \text{sen } i = n_2 \text{sen } r$
6. ¿Qué es la imagen virtual de un espejo plano? ( ) Es la línea que une los puntos centrales de las esferas a que pertenecen las superficies de la lente y el espejo.
7. ¿En qué consiste el índice de refracción de un material? ( ) Las lentes y los espejos esféricos.
8. ¿En qué consiste la reflexión total interna? ( )  $r = i$
9. ¿A qué se llama eje óptico principal de una lente y un espejo esférico, respectivamente? ( ) Es la comparación entre la rapidez de la luz en el vacío y la rapidez de la luz en el medio material considerado.
10. ¿Qué instrumentos ópticos tienen la modalidad de ser convergentes o divergentes? ( ) Imagen de un objeto que se forma en la intersección de las prolongaciones de los rayos reflejados o refractados.
11. ¿Qué son las dioptrías? ( ) Parte de la óptica que se aplica en el trazado de haces y rayos.
12. ¿Cuál es el aumento lineal en las lentes convergentes? ( ) Contracción o relajación de los músculos ciliares del ojo que provocan una variación en la curvatura del cristalino para un enfoque adecuado.
13. Acomodamiento del ojo. ( ) Se obtiene al calcular el cociente entre la distancia focal del objetivo y la distancia focal del ocular.
14. ¿Cuál es el aumento de una lupa? ( ) Se obtiene al tomar el producto de los aumentos producidos por el ocular y el objetivo de la misma.
15. ¿Cuál es el aumento global de un microscopio óptico? ( ) Se denomina así al instrumento óptico que permite ver detalles de objetos alejados y cuyos componentes principales son lentes.
16. ¿Qué es un telescopio refractor? ( ) Se obtiene al calcular el cociente entre el ángulo bajo el cual se observa un objeto o mediante la lupa y el ángulo bajo el que se observa sin ella.
17. ¿Cuál es el aumento proporcionado por un telescopio refractor? ( ) Se denomina así al instrumento óptico que permite ver detalles de objetos alejados y cuyo objetivo consiste en un espejo cóncavo.
18. ¿Qué es un telescopio reflector? ( ) Es el fenómeno en el cual, la luz incidente en la superficie de separación entre dos medios transparentes, no da lugar a la refracción.
19. ¿Cuál es el aumento proporcionado por un telescopio reflector? ( ) Se obtiene al calcular el cociente entre la distancia focal y la distancia mínima a la cual el ojo adulto normal puede enfocar sin dificultad.



## 3.5.3. Crucigrama



## Horizontales

4. Fenómeno el cual consiste en que parte de la luz que incide sobre la superficie de un cuerpo es devuelta al medio del cual procede.
7. Adjetivo que caracteriza a las lentes y espejos cuyos superpies son esferas.
8. Tipo de aumento que caracteriza a una lupa.
11. Tipo de telescopio cuyo objetivo está constituido por un espejo curvo.
12. Calificativo del espejo constituido por la parte interior de una superficie esférica.
16. Nombre del componente óptico de un microscopio o telescopio que se dirige hacia el objeto que se desea observar.
17. Lente en la cual los rayos que inciden paralelos a su eje óptico convergen después de atravesarla.
18. Tipo de reflexión que se produce al incidir la luz sobre una superficie rugosa.
19. Tipo de aumento que caracteriza la relación entre el tamaño de un objeto y el de una imagen real de él.
20. Proceso que consiste en el aumento involuntario de la curvatura del cristalino del ojo humano, a fin de enfocar los objetos que miramos.

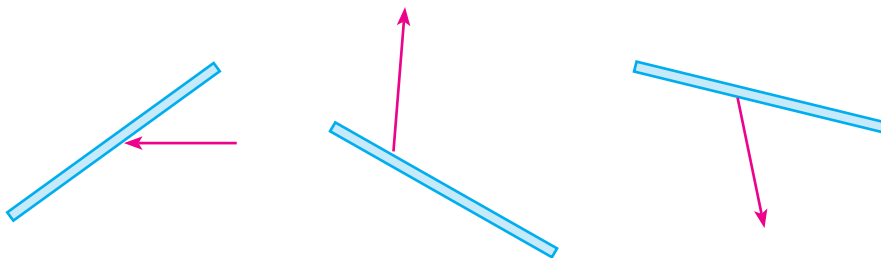
## Verticales

1. Fenómeno que consiste en la transmisión de la luz de un medio a otro transparente, en el que se produce un cambio de su velocidad de propagación.
2. Dispositivo óptico empleado para lograr grandes aumentos de objetos cercanos.
3. Apellido de la persona quien encontró la ecuación que relaciona el ángulo de incidencia con el ángulo de refracción.
5. Superficie lisa y pulida que refleja la luz en una dirección bien definida.
6. Nombre del componente óptico de un microscopio o telescopio, donde se aplica el ojo.
9. Tipo de telescopio cuyos componentes básicos son lentes.
10. Calificativo de aquella parte de la Óptica que se apoya en el trazado de líneas rectas y el uso de la geometría.
13. Lente en la cual los rayos que inciden paralelos a su eje óptico divergen luego de atravesarla.
14. Punto donde convergen los rayos que inciden paralelos al eje óptico de una lente convergente o un espejo cóncavo.
15. Calificativo que recibe la imagen que apreciamos cuando miramos un objeto a través de un espejo plano.



**3.5.4. Actividades de repaso**

1. La mayor parte de la luz que percibimos procede de fuentes de luz reflejada. ¿Sucedo algo similar con los sonidos?
2. ¿Por qué el vidrio ordinario se vuelve mate cuando se frota con esmeril?
3. En un día soleado, mira hacia el exterior a través de una ventana o puerta de vidrio; esta parecerá completamente transparente, casi invisible. Si la observación se repite por la noche, los objetos de la habitación se verán reflejados en el vidrio ¿Cómo se explica la diferencia entre lo que se observa de día y de noche?
4. En un espejo ordinario, ¿la reflexión es absolutamente especular? Argumenta tu respuesta.
5. Un haz de luz penetra en una caja por un orificio practicado en su pared frontal y sale por otro en la pared opuesta. Si dentro de la caja el aire está limpio, ¿se verá el haz luminoso cuando se mira el interior de la caja a través de un orificio en su pared lateral? ¿Y si la caja se llena de humo? Explica tus respuestas.
6. Cuando en una habitación tratamos de escribir algo con solo la luz de una vela, puede ay dar si colocamos detrás de ésta un espejo. ¿Por qué?
7. En la figura se ha representado un espejo plano en diferentes posiciones y las direcciones de los haces incidentes o reflejados. Completa los esquemas trazando las direcciones de los haces incidentes o reflejados que faltan.

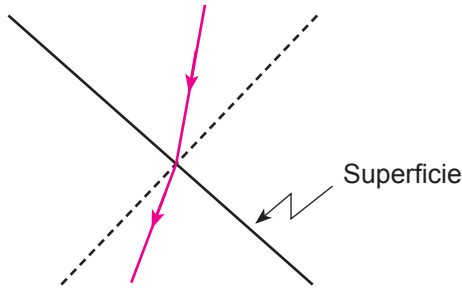


8. Localiza las posiciones de las imágenes de los objetos representados en las figuras.

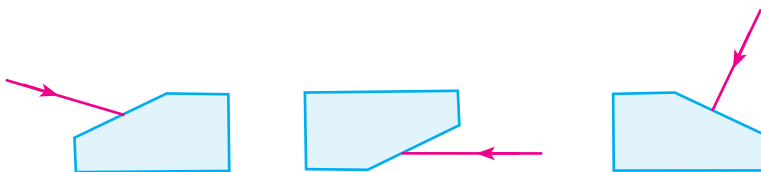




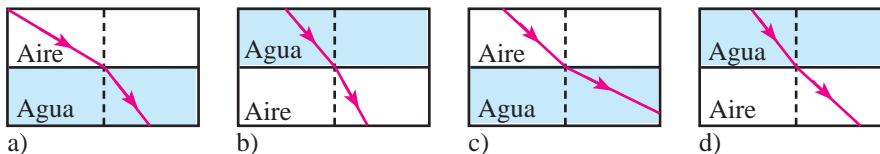
9. En el siguiente esquema, ¿cuál es el ángulo de incidencia y cuál el de refracción?



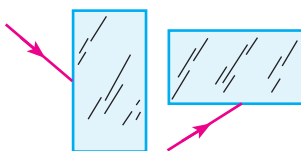
10. En la figura se muestran varios rayos luminosos que inciden sobre las superficies planas de algunos pedazos de vidrio. a) Representa los rayos reflejados. b) Representa, aproximadamente, los rayos refractados.



11. A continuación se muestran varios esquemas de dos porciones, una de aire y otra de agua, la superficie de separación entre ellas y las posibles trayectorias de los rayos incidentes y refractados. ¿Cuáles podrían ser correctos y cuáles no? Argumenta tu respuesta.



12. En la figura se han representado dos cuerpos de vidrio sobre los cuales inciden sendos haces luminosos. Utilizando la segunda ley de la refracción, continúa en cada caso la trayectoria aproximada del haz hasta salir del vidrio.



13. Una piscina parece tener menor profundidad llena de agua que vacía. ¿Cómo se explica esto?

14. Describe algún procedimiento para determinar la velocidad de la luz en un cuerpo transparente.



15. ¿A qué distancia de la película fotográfica estará la lente convergente de una cámara fotográfica cuando se fotografía un objeto muy alejado?
16. Una cámara fotográfica forma sobre la película la imagen del rostro de una persona. Explica, valiéndote de un dibujo, por qué la imagen del paisaje que se divisa a lo lejos, detrás de la persona, no es nítida. ¿Hacia dónde habría que desplazar el objetivo de la cámara para que la imagen del paisaje fuese nítida? ¿Sería nítida la imagen del rostro en ese caso?
17. El ojo humano es muy parecido a una cámara fotográfica, sin embargo, cuando se deja abierto el obturador de la cámara y el objeto se mueve delante de ella, la fotografía aparece borrosa. ¿Por qué no vemos borrosos los objetos que se mueven frente a nosotros?
18. Un objeto se encuentra muy alejado de una lente. Describe cómo cambian el tamaño y la posición de la imagen real del objeto según se acerca a la lente.
19. Por medio de una lente se obtiene la imagen real de una lámpara en una pantalla. ¿Cómo variará la imagen si se tapa la mitad derecha de la lente?
20. Construye la imagen de una flecha formada por una lente convergente cuya distancia focal es 5 cm. Considera los casos en que la flecha se sitúa a: a) 10 cm y b) 7 cm. Describe las características de la imagen en cada caso. ¿Cuántas veces mayor (o menor) es la imagen comparada con el objeto?
21. Como sabes, para ver la imagen real formada mediante una lente convergente puede utilizarse una pantalla. ¿Es posible hacer lo mismo con una imagen virtual? ¿Pueden ser fotografiadas esas imágenes?
22. Muestra mediante un diagrama de rayos que el aumento de la imagen real formada por un espejo cóncavo es menor que la unidad si el objeto se encuentra a mayor distancia del espejo que su centro de curvatura y que es mayor que la unidad cuando se encuentra entre ese punto y su foco.
23. Los observatorios astronómicos suelen ubicarse en zonas alejadas de las ciudades y elevadas. Da algunas razones para ello.
24. Elabora un esquema o cuadro sinóptico que refleje los principales conceptos e ideas de este capítulo y las relaciones entre ellos.
25. Escribe un resumen de las ideas y ecuaciones esenciales estudiadas en el capítulo.





### 3.5.5. Ejercicios de repaso

1. Utilizando la ley de Snell, determina el índice de refracción del líquido contenido en la vasija de la figura 3.9.

Respuesta: 1.3.

2. Un haz luminoso llega desde el aire a cierto medio transparente con un ángulo de incidencia de  $40.0^\circ$ . Si el ángulo de refracción es  $25.4^\circ$ , a) ¿cuál es el índice de refracción del material, b) ¿cuál es la velocidad de la luz en él?

Respuesta: a) 1.50 b)  $2.0 \times 10^8$  m/s.

3. Un haz luminoso que se propaga en el aire, llega a la superficie de un cuerpo transparente con un ángulo de incidencia de  $60^\circ$ . Se observa que el haz reflejado es perpendicular al refractado. Determina el índice de refracción del cuerpo.

Respuesta: 1.7.

4. Si los rayos solares bajo el agua forman un ángulo de  $25^\circ$  con la vertical, ¿A qué ángulo por encima del horizonte se encuentra el Sol?

Respuesta:  $34.2^\circ$ .

5. El ángulo límite para la superficie de separación entre el aire y cierto líquido es  $42.8^\circ$ . ¿Cuál es el índice de refracción del líquido?

Respuesta: 1.47.

6. Si la distancia focal de una lente es 40 cm, ¿cuántas dioptrías tiene? A una persona le prescribieron lentes de 2.0 dioptrías, ¿cuál es la distancia focal de esas lentes?

Respuesta: 2.5 dioptrías; 50 cm.

7. Un adulto de visión normal utiliza una lupa de 8.0 cm de distancia focal. ¿Cuál es el máximo aumento que puede lograr? Si su hijo es capaz de enfocar sin dificultad objetos situados a 12 cm del ojo, ¿cuál será el máximo aumento que logra con esa lupa?

Respuesta: 4.1 veces; 3 veces.

8. Una lupa está catalogada como de 3x para un ojo normal y cuando el objeto se sitúa muy próximo a su foco. ¿Cuál será el aumento que produce al utilizarla de esa forma: a) una persona que no enfoca correctamente a menos de 40 cm, b) un niño que puede enfocar a 15 cm?

Respuesta: a) 4.8 veces; b) 8 veces





9. En el laboratorio de biología se utiliza un microscopio óptico compuesto, el cual tiene un ocular de 5x y un objetivo de 50x. La distancia entre ellos es de 17 cm. Determina: a) el aumento global del microscopio, b) la distancia focal del ocular, c) la distancia focal del objetivo.

Respuesta: a) 250x b) 5.0 cm; c) 0.24 cm.

10. Para armar un telescopio kepleriano se dispone de dos lentes convergentes de distancias focales 50.0 cm y 2.50 cm, respectivamente. a) ¿A qué distancia aproximada deben colocarse una de la otra? b) ¿cuál es el aumento global del telescopio. c) ¿cuáles son los aumentos del objetivo y del ocular?

Respuesta: a) 52.5 cm; b) 20 veces; c) 2 veces, 10 veces.

11. Un espejo cóncavo tiene radio de curvatura de 40.0 cm. a) ¿Cuál es su distancia focal? b) ¿Cuál será el aumento que produce cuando a través del espejo se mira un objeto situado muy cerca de su foco?

Respuesta: a) 20 cm; b) 1.25 veces.



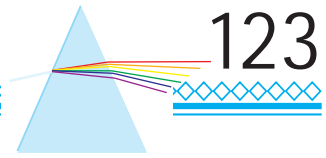




# 4 Óptica física







## Óptica física

En el capítulo anterior estudiaste los conceptos y regularidades principales de la **Óptica Geométrica**. Para esa parte de la Óptica no es relevante la naturaleza de la luz. En este capítulo estudiaremos la denominada **Óptica Física** que, por el contrario, considera fenómenos que no pueden ser explicados sin tener en cuenta dicha naturaleza. Examinaremos fenómenos en que la luz se comporta como onda y fenómenos en que se comporta como si tuviera una estructura corpuscular. Profundizaremos así en la respuesta a una de las preguntas centrales del curso, *¿Qué es la luz?*, cuyo análisis iniciamos en la segunda unidad. Al propio tiempo, continuaremos enriqueciendo la respuesta a la tercera pregunta central del curso: *¿Cuáles son algunas importantes aplicaciones de la Óptica?*

Entre las cuestiones clave a responder en esta unidad estarán:

*¿Cómo explicar la variada coloración que apreciamos en los objetos que nos rodean? ¿Qué condiciones se requieren para observar los fenómenos de interferencia y difracción de la luz? ¿Cómo determinar la longitud de onda de la luz a partir de dichos fenómenos? ¿En qué consiste el fenómeno de la polarización de la luz y cuáles son algunas de sus aplicaciones? ¿Qué fenómenos ponen de manifiesto el comportamiento corpuscular de la luz y cuáles son algunas de sus aplicaciones?*

### 4.1. Espectro de colores de la luz Dispersión cromática

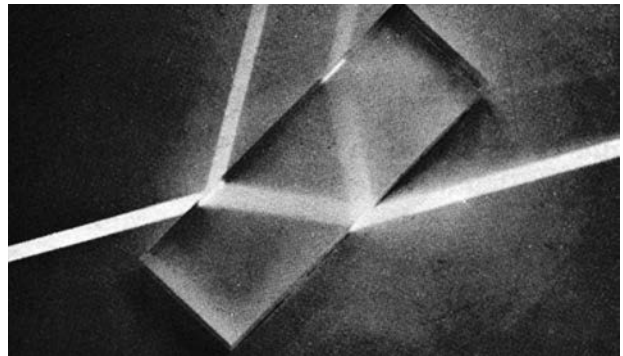
Comenzaremos con algunas interrogantes que tal vez te hayas planteado alguna vez. La luz que incide sobre las paredes de la habitación y la hoja de papel en la que escribes procede de una misma lámpara. ¿Por qué entonces las paredes son rosadas, verdes, azules, etc., y la hoja de papel blanca? ¿Por qué varios objetos iluminados con la misma luz del Sol son unos rojos y otros verdes, azules, etcétera.?



Las respuestas a estas preguntas se relacionan con la interpretación de la luz como una gama de ondas electromagnéticas, a las que corresponden diferentes colores. En 1666 Newton obtuvo el espectro de los colores que forman la luz, haciendo incidir sobre un prisma la luz solar procedente de la rendija de una persiana (Fig. 4.1). ¿Por qué emplear un prisma?



**Fig. 4.1.** Figura alegórica a varios aportes de Newton. Entre ellos, el telescopio reflector y la descomposición de la luz mediante un prisma.



**Fig. 4.2.** Haz de luz que incide desde la izquierda sobre un bloque de vidrio de caras paralelas. El haz que emerge a la derecha del bloque tiene la misma dirección que el incidente.

En la foto de la figura 4.2, comprueba que el haz que emerge de la cara derecha del bloque de vidrio tiene la misma dirección que el incidente.

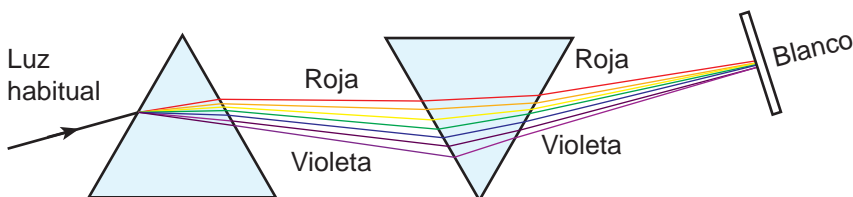


La foto de la figura 4.2 muestra un haz de luz que incide desde la izquierda sobre un bloque de vidrio de caras paralelas. Se aprecian haces reflejados en ambas caras del bloque y un haz que emerge de su cara derecha. Al penetrar en el bloque, la luz se desvía hacia abajo, pero luego, al salir por la cara de la derecha, experimenta otra desviación igual hacia arriba; el resultado es que el haz emerge del bloque con la misma dirección que el haz inicial. Sin embargo, si las caras del bloque no son paralelas, como es el caso del prisma (Fig. 4.3), la segunda desviación puede añadirse a la primera y el haz sale con una considerable desviación respecto a la inicial. Y es esto precisamente lo que se requiere para separar los colores.

**La desviación de la luz en el prisma lleva asociados el ensanchamiento del haz y la separación de los colores que lo componen (Fig. 4.3). Este fenómeno se conoce como *dispersión cromática*, o de colores, de la luz**

La idea de que la luz es una mezcla de ondas correspondientes a diversos colores se ve reforzada por el

hecho de que, al reunir los haces de colores mediante un segundo prisma, invertido respecto al primero, se obtiene nuevamente luz habitual (Fig. 4.4).



**Fig. 4.4.** La luz habitual se separa en haces de colores mediante un prisma y luego, mediante otro prisma, los haces se reúnen nuevamente, dando lugar otra vez a la luz habitual.

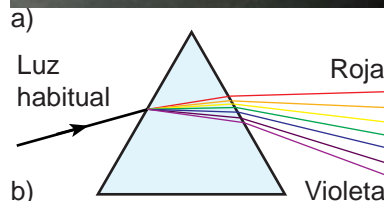
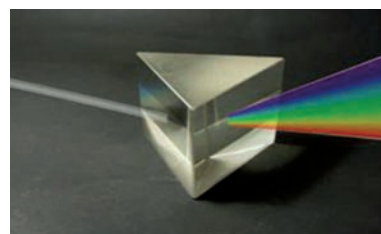
Los haces de colores se separan, o reúnen, al atravesar un prisma, porque experimentan distintas desviaciones. Esto se debe a que **las velocidades de los haces en el medio en que se propagan no son iguales para todos los colores**. Los haces de colores cercanos al violeta tienen velocidades menores que los de colores cercanos al rojo y, por eso, el índice de refracción ( $n = c/v$ ) en el primer caso es algo mayor que en el segundo. La diferencia, no obstante, es muy pequeña, por ejemplo, el vidrio crown posee un índice de refracción para el violeta de 1.532 y para el rojo de 1.513. En las tablas de índices de refracción, como la 3.1, suelen darse valores promedios, correspondientes a la mezcla de haces de colores que componen la luz habitual; el valor promedio para el vidrio crown es 1.52.

**La diferente velocidad de propagación de los haces de colores se explica, a su vez, por la dependencia de dicha velocidad con la frecuencia de la onda:** en el vidrio, a mayor frecuencia de la onda luminosa (región violeta), menor velocidad de propagación.

**Tabla 4.1.** Longitudes de onda de la luz visible.

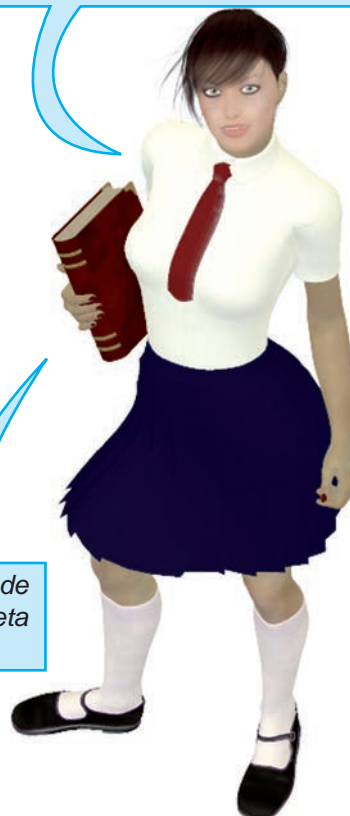
400 a 436 nm	Violeta
436 a 450 nm	Añil (Índigo)
450 a 495 nm	Azul
495 a 566 nm	Verde
566 a 589 nm	Amarillo
589 a 627 nm	Naranja
627 a 700 nm	Rojo

Calcula las velocidades de la luz roja y de la luz violeta en el vidrio crown.



**Fig. 4.3.** Luz habitual que incide sobre un prisma: a) ensanchamiento del haz, b) representación esquemática de la separación de los colores que componen el haz.

Describe hechos de la vida cotidiana que apoyen la idea de que la luz habitual está formada por una mezcla de luces de diferentes colores.





**Ejemplo 4.1.** Un estrecho haz de luz habitual llega a un pedazo de vidrio crown con un ángulo de incidencia de  $60.0^\circ$ , ¿cuál es el ángulo que forman entre sí los haces rojo y violeta en el interior del pedazo de vidrio?

La segunda ley de la refracción, o ley de Snell, es:

$$n_1 \text{sen } i = n_2 \text{sen } r$$

Como la luz pasa del aire al vidrio,  $n_1 = 1$ , de donde

$$\text{sen } r = \frac{\text{sen } i}{n_2} \quad \text{y} \quad r = \text{sen}^{-1}\left(\frac{\text{sen } i}{n_2}\right)$$

Para la luz violeta,  $r = \text{sen}^{-1}\left(\frac{\text{sen } 60.0^\circ}{1.532}\right)$  y  $r = 34.4^\circ$

Para la luz roja,  $r = \text{sen}^{-1}\left(\frac{\text{sen } 60.0^\circ}{1.513}\right)$  y  $r = 34.9^\circ$

Por consiguiente, el ángulo entre ambos haces es, aproximadamente,  $34.9^\circ - 34.4^\circ = 0.5^\circ$

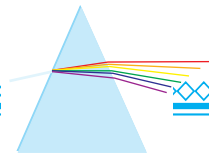
Fíjate lo pequeño que es el ángulo formado entre los haces rojo y violeta. Si el pedazo de vidrio es un prisma, entonces, al pasar la luz nuevamente al aire, el ángulo entre los haces aumentará un poco más, y a cierta distancia del prisma podrán apreciarse claramente los colores rojo y violeta separados.



*En una habitación oscura, ¿con luz de cuáles colores podría iluminarse un pedazo de tela roja para que no sea invisible?*

Ahora que hemos corroborado la idea de que la luz habitual está compuesta por haces de colores, responderemos la pregunta planteada al inicio de este capítulo acerca de cómo explicar la variada coloración que apreciamos en los objetos que nos rodean, pese a ser iluminados con la misma luz. El color que percibimos en un objeto está determinado por los colores del espectro luminoso que son absorbidos y reflejados. **Un objeto parece rojo cuando refleja la luz roja mejor que la de otros colores; verde, cuando refleja mejor la luz verde, etcétera.**

A diferencia de la luz habitual, que tiene componentes de muy diversos colores, **la luz monocromática es aquella formada por un solo color.** Es decir, que tiene una sola longitud de onda.



**Ejemplo 4.2.** Un objeto se ve blanco cuando está expuesto a la luz habitual. ¿Cuál será su color cuando se coloca en una habitación oscura y se enciende una luz monocromática: a) verde, b) roja?

Puesto que el objeto se ve blanco cuando se expone a la luz, esto significa que refleja todos los colores; así pues: a) si se le ilumina con luz verde reflejará el color verde y b) cuando se enciende la luz roja se verá rojo.

**Ejemplo 4.3.** Un objeto iluminado por la luz del Sol se ve amarillo. ¿Cuál será su color si lo colocamos en un cuarto oscuro y encendemos una luz monocromática azul?

Puesto que el objeto se ve amarillo cuando incide luz blanca, se entiende ello significa que absorbe todos los colores excepto el amarillo, el cual refleja muy bien. Si se le coloca en un cuarto oscuro y se enciende luz monocromática azul, el objeto absorberá dicha luz, por lo que se observará oscuro.

En los ejemplos anteriores podemos notar que el color de un objeto no solo depende del objeto mismo, es decir de sus propiedades físicas y químicas, sino también del color de la luz con que se le ilumina.

### 4.1.1. El arco iris

Uno de los fenómenos de la naturaleza más fascinantes y que todo el mundo ha observado es la formación del arco iris (Fig. 4.5). Por lo general vemos un arco iris si el Sol asoma por nuestra espalda durante una lluvia; aunque también puede apreciarse cuando la luz solar incide sobre las pequeñas gotas de agua esparcidas por una manguera. La explicación de los detalles de la formación del arco iris no es una cuestión elemental. Por eso nos limitaremos solo a la idea básica que permite comprender la aparición de los colores del espectro.

En la figura 4.6 hemos esquematizado dos gotas de agua, la dirección en que incide la luz solar sobre ellas y el ojo que observa el fenómeno. Cuando un haz de luz solar penetra en una gota, ocurre una refracción, luego una reflexión en su lado



**Fig. 4.5.** Un arco iris se forma cuando las gotas de lluvia descomponen la luz solar en los colores que la integran.

Haz un esquema de rayos reflejados y refractados que se obtienen al considerar a una gota de agua en forma esférica.



opuesto y después nuevamente otra refracción al salir la luz de la gota. La primera refracción separa algo los colores y la segunda aún más. Como resultado de ello, el haz de luz que penetró en la gota, ahora sale de ella como un haz divergente de varios colores. En el ojo solo penetra una pequeña parte de ese haz. A modo de ejemplo, en la figura se han representado entrando al ojo, la parte roja del haz que procede de la gota superior y la parte violeta del que procede de la gota inferior. La llegada al ojo de haces de colores procedentes de diversas gotas es lo que da origen al espectro de colores que apreciamos.

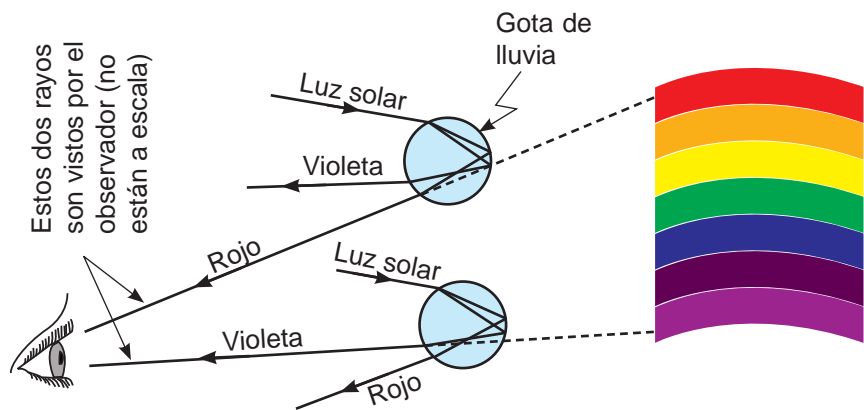


Fig. 4.6. Diagrama de rayos que explica como se forma un arcoiris.

En los dos apartados que siguen abordaremos las preguntas clave: *¿Qué condiciones se requieren para poder observar los fenómenos de interferencia y difracción de la luz?* y *¿Cómo determinar la longitud de onda de la luz?*

## 4.2. Interferencia de la luz

En el primer capítulo vimos que se llama interferencia a la combinación de dos o más ondas. Examinemos qué ocurre cuando un haz de luz se cruza en el camino de otro, combinándose con él. Para hacer más visible la experiencia podemos emplear haces de diferentes colores, digamos, uno azul y otro rojo. Si, por ejemplo, proyectamos el haz azul sobre una pantalla y luego hacemos que el rojo se cruce en su camino (Fig. 4.7), no advertiremos cambio alguno en el color azul de la pantalla, ni en su iluminación.



Esto sugiere que **los haces luminosos no se modifican al cruzarse, que se comportan de modo independiente.**

En efecto, la luz que llega a nuestros ojos procedente de un objeto cualquiera, inevitablemente se cruza en su camino con la emitida por otros muchos cuerpos y, sin embargo, esto no la altera. De lo contrario veríamos al objeto que miramos con un aspecto o color diferente cada vez que cambiaran los que lo rodean.

Esta es una característica de las ondas en general. Así, en el espacio que nos rodea, unas ondas sonoras se cruzan constantemente con otras, y lo mismo puede decirse de las ondas de radio o televisión emitidas por una antena; pero ello no distorsiona los sonidos que oímos cuando una persona nos habla, ni la transmisión de la radio o la televisión.

¿Y qué sucede en la propia zona donde tiene lugar el cruce de las ondas?

Para intentar responder esta pregunta recordemos lo que ocurre cuando interfieren dos ondas que se propagan en la superficie del agua. En este caso se forma un diagrama con zonas en que el efecto de ambas ondas se cancela, denominadas líneas nodales, y zonas en que el efecto se refuerza (Fig. 4.8).

Podríamos imaginar una experiencia análoga con la luz, empleando como generadores de ondas dos pequeños focos luminosos. Sin embargo, si bien las ondas en el agua pueden observarse desde diferentes direcciones, e incluso fotografiarse, las luminosas no. Para ver un efecto análogo con ondas luminosas necesitaríamos interponer en su camino los ojos, o una pantalla, de modo que la luz incida sobre ellos. Si hacemos esto, cabría esperar que se observen zonas de oscuridad correspondientes a la cancelación de los efectos de ambas ondas, alternadas con zonas claras correspondientes al reforzamiento de ellas.

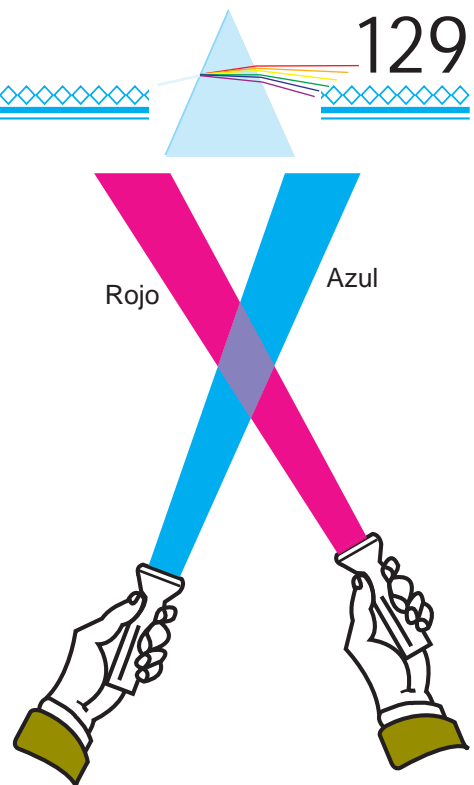


Fig. 4.7. Los haces luminosos no se modifican al cruzarse entre sí.

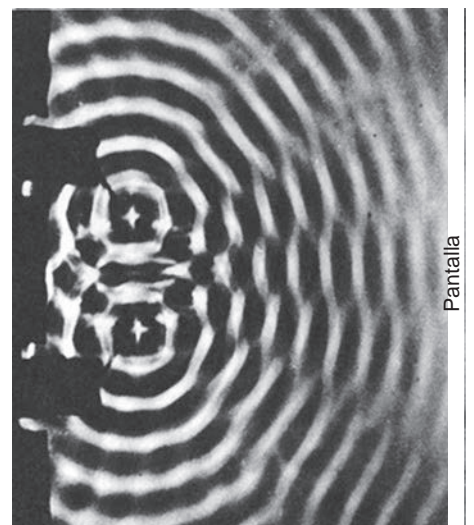
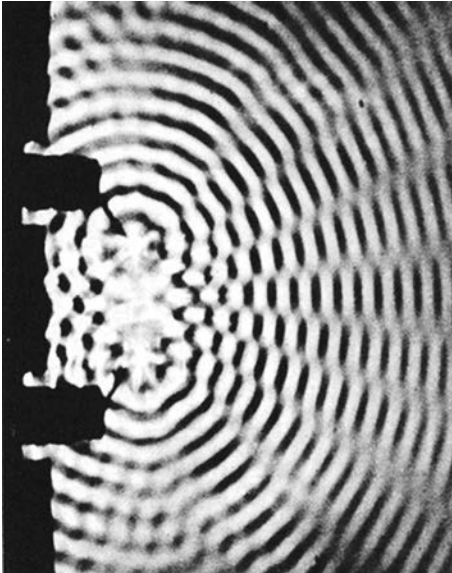


Fig. 4.8. Diagrama de interferencia de dos ondas en el agua. Se ha indicado dónde habría que colocar una pantalla en el caso de ondas luminosas.



No obstante, al realizar la experiencia, no se observa el resultado esperado ¿Por qué?

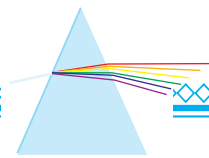


**Fig. 4.9.** Diagrama de interferencia de dos ondas en el agua para una frecuencia mayor que en la experiencia de la figura 4.8.

En primer lugar, es necesario tener en cuenta que la frecuencia de las ondas luminosas es muy grande. En la figura 4.9 se muestra un diagrama de interferencia con ondas en el agua de una frecuencia mayor que en la figura 4.8. Observa que ahora el número de zonas de reforzamiento de las ondulaciones es mayor y las separaciones entre dichas zonas menor. Si aumenta todavía más la frecuencia, el número de zonas sigue creciendo y la separación entre ellas disminuyendo. La frecuencia de las ondas en la figura 4.9 apenas duplica a la frecuencia de las ondas en la figura 4.8, pero puedes imaginar lo que sucedería en el caso de ondas luminosas, cuyas frecuencias son unas  $10^{14}$  veces mayores que las frecuencias de las ondas de las figuras 4.8 y 4.9: simplemente, el número de zonas sería tan grande y la separación entre ellas tan pequeña, que la pantalla se vería uniformemente iluminada.

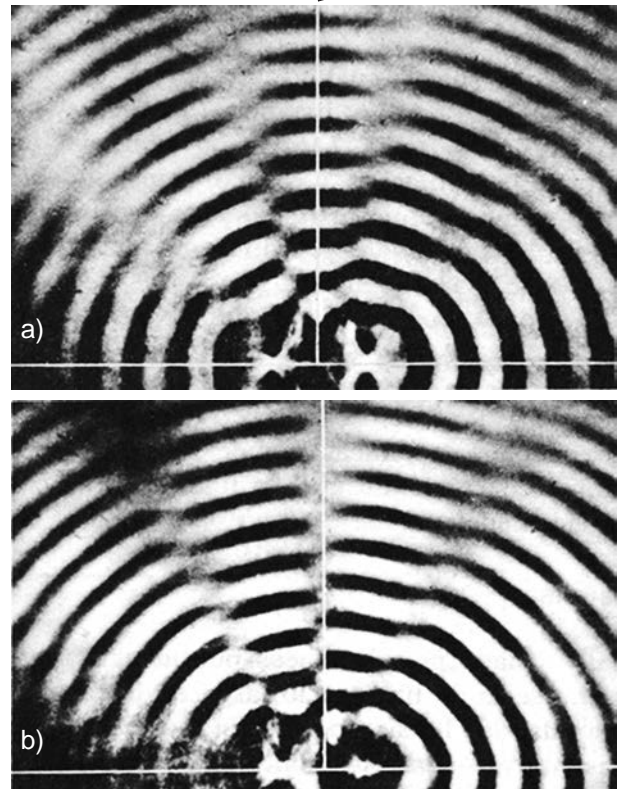
La dificultad mencionada para ver las zonas claras y oscuras puede ser superada colocando la pantalla a una gran distancia de los pequeños focos, a fin de que aumente la separación entre las zonas, u observando la pantalla con una lente de aumento. Sin embargo, ni siquiera con estas medidas es posible ver el diagrama de interferencia luminosa.

La razón es que los focos luminosos no están “sincronizados” entre sí, como en el caso de los dos generadores de ondas en las experiencias de las figuras 4.8 o 4.9. En éstas, los focos producen ondas de la misma frecuencia que, además, son generadas simultáneamente, mientras que en los focos luminosos no ocurre así. La luz habitual es producida por multitud de átomos que, cada vez que emiten, lo hacen por un tiempo muy breve, de unos  $10^{-8}$  s; en consecuencia, **la luz de los focos habituales está formada por numerosas emisiones aleatorias, por lo que no puede dar lugar a un diagrama de interferencia estable.**



Zona central

Podría pensarse en utilizar dos láseres. Estos son fuentes que emiten establemente, porque sus átomos lo hacen coordinadamente, pero de todos modos, la frecuencia de la luz producida por uno de los láseres no sería estrictamente igual a la de la luz producida por el otro, y los focos seguirían sin estar sincronizados. Para comprender lo que sucede en este caso, volvamos a considerar las ondas en el agua. En la figura 4.10a, ambos generadores se están introduciendo en el agua simultáneamente y la zona central es de reforzamiento de las ondulaciones o interferencia constructiva; pero en la figura 4.10b, el generador de la derecha se introduce siempre determinado tiempo después que el de la izquierda y la zona central es de cancelación o interferencia destructiva. Si los generadores fuesen independientes y sus frecuencias distintas, unas veces se introducirían simultáneamente en el agua y otras veces no. Por consiguiente, las condiciones variarían continuamente entre aquellas que darían lugar a un diagrama como el de la figura 4.10a y el de las que originarían otro como el de la figura 4.10b. El resultado es que no se formaría un diagrama de interferencia estable.



**Fig. 4.10.** Diagramas de interferencia de dos ondas en el agua: a) los generadores se están introduciendo en el agua simultáneamente, b) el generador de la derecha se introduce siempre determinado tiempo después que el de la izquierda.

En 1801 Thomas Young realizó por primera vez un experimento que permitía observar un diagrama de interferencia luminosa; empleó una ingeniosa y sencilla instalación que resuelve los problemas descritos anteriormente. Young hizo pasar luz solar por un pequeño orificio (Fig. 4.11), el cual actuaba en calidad de foco. En el camino del haz luminoso procedente de ese foco, colocó una barrera con otros dos pequeños orificios, muy próximos entre sí. De este modo, las ondas luminosas que llegan a esos dos orificios tienen la misma procedencia, por lo que las ondas que emergen de ellos poseen igual frecuencia



y, además, todo cambio que se produzca en uno, también se produce en el otro. En el experimento de Young, los dos orificios son los análogos de los dos generadores de ondas en el agua. Si se coloca una pantalla alejada de ellos, entonces es posible observar el diagrama de interferencia.

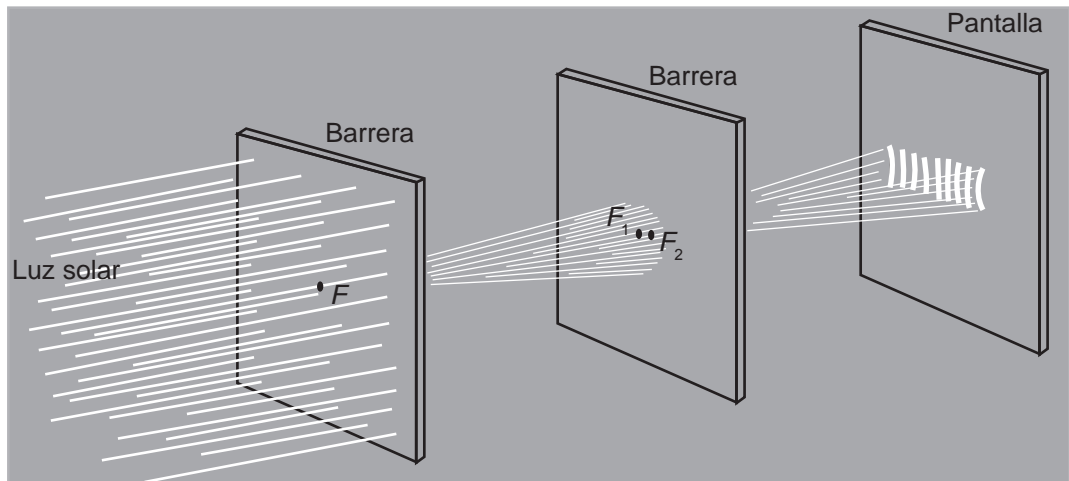


Fig. 4.11. Esquema simplificado del experimento de Young.

En la actualidad puede realizarse un experimento similar al de Young con relativa facilidad. En lugar del primer orificio es posible utilizar un “puntero láser”. En una habitación oscura se hace incidir la luz del láser sobre dos pequeños orificios, practicados mediante un alfiler en un pedazo de cartulina, lo más próximos entre sí que se pueda. Como pantalla sirve otra cartulina, colocada a cierta distancia de los orificios. El diagrama se ve mejor si se utiliza una lupa. En la figura 4.12 se ha realizado una representación esquemática del camino seguido por las ondas luminosas en la experiencia descrita. Observa que los frentes de las ondas que emergen de los orificios no son rectos, sino circulares, como sabes, ello se debe al fenómeno de la difracción.

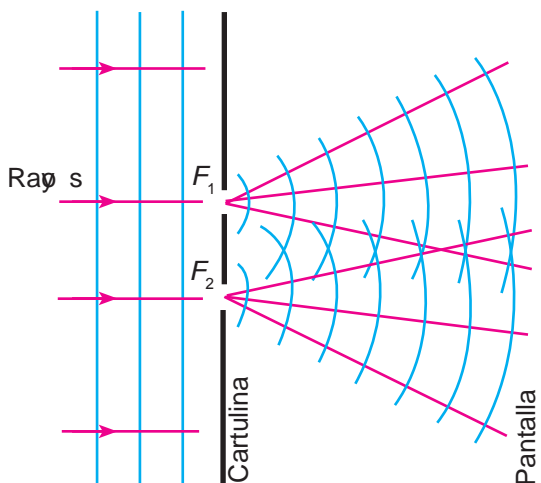
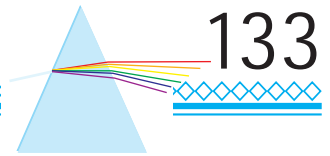


Fig. 4.12. Representación esquemática de las ondas luminosas en una experiencia similar a la de Young.



El experimento de Young también puede realizarse con rendijas, en lugar de orificios. En la figura 4.13 se muestra la fotografía de un diagrama de interferencia luminosa obtenido con dos rendijas rectas, muy estrechas y próximas entre sí. En calidad de pantalla se utilizó una película fotográfica.



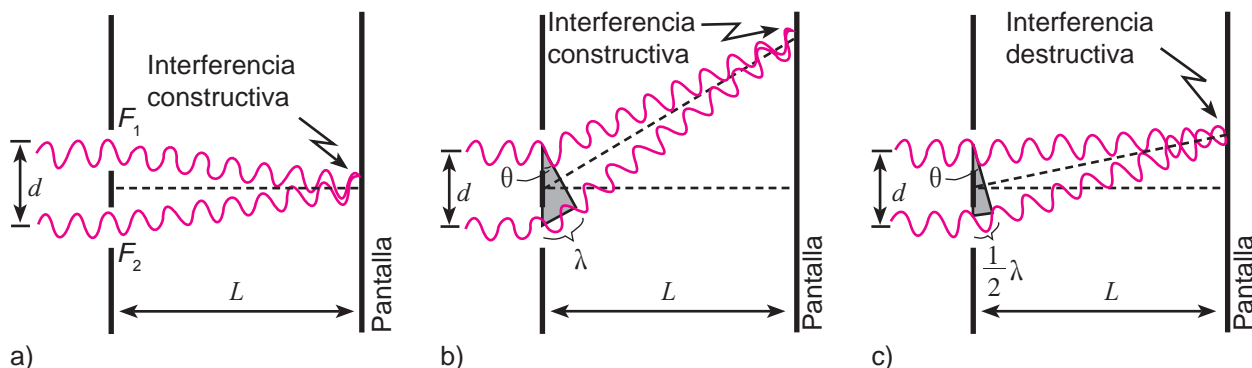
**Fig. 4.13.** Fotografía de un diagrama de interferencia de luz roja, obtenido con dos rendijas.

**Las fuentes que producen ondas de la misma frecuencia y que, además, lo hacen simultáneamente, o con una diferencia de tiempo constante, se denominan *fuentes coherentes*.**

Las fuentes de las figuras 4.10a y 4.10b son coherentes. Las constituidas por los dos orificios en el experimento de Young y en el experimento de la figura 4.12, también son coherentes.

Obtengamos ahora una ecuación que permita determinar la longitud de onda de la luz a partir de un experimento como el de Young. En la figura 4.14 se han representado esquemáticamente tres casos de ondas que viajan de los orificios a la pantalla. En realidad, debido a la difracción, las ondas emergen en un abanico de direcciones y llegan a todos los puntos de una amplia zona de la pantalla, pero en los esquemas solo hemos considerado tres puntos: el central, que equidista de los orificios (Fig. 4.14a) y los situados a distancias del centro tales, que los caminos recorridos por las ondas difieren entre sí en  $\lambda$  (Fig. 4.14b) y en  $\frac{1}{2}\lambda$  (Fig. 4.14c).



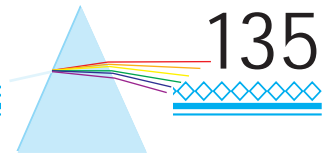


**Fig. 4.14.** Representación esquemática de la interferencia de ondas luminosas. En la pantalla se produce, en a) y b) un reforzamiento de las ondas, es decir, interferencias constructivas y en c) una cancelación de ellas, o sea, interferencia destructiva.

En el primer caso ocurre una **interferencia constructiva**, las amplitudes de las ondas se suman, dando lugar a una franja iluminada en esa zona. Se tienen además interferencias constructivas, y por tanto zonas iluminadas, cuando los caminos recorridos por las ondas difieren en  $\lambda$ , como en el segundo caso, y también cuando difieren en  $2\lambda$ ,  $3\lambda$ ,  $4\lambda$ ,... o sea, en un número entero de longitudes de onda. En el tercer caso se produce **interferencia destructiva**, las amplitudes de las ondas se cancelan, originando una franja oscura en esa zona de la pantalla. También ocurren interferencias destructivas, y por consiguiente aparecen zonas oscuras en la pantalla, cuando los caminos recorridos por las ondas difieren en  $3\lambda/2$ ,  $5\lambda/2$ ,  $7\lambda/2$ ..., es decir, en un número impar de semilongitudes de ondas.

A fin de examinar mejor ciertas relaciones geométricas, hemos entresacado una porción del esquema de la figura 4.14b, la cual aparece en la Fig. 4.15. El pequeño triángulo sombreado, en general no es un triángulo rectángulo, pero observa que si la distancia entre las fuentes ( $d$ ) es muy pequeña comparada con la distancia a la pantalla ( $L$ ), como ocurre en el experimento de Young, entonces puede considerarse como tal. En este caso es posible escribir la diferencia de caminos entre las ondas como  $d \sin \theta$ . De ahí que para las interferencias constructivas, o zonas claras, se tiene:

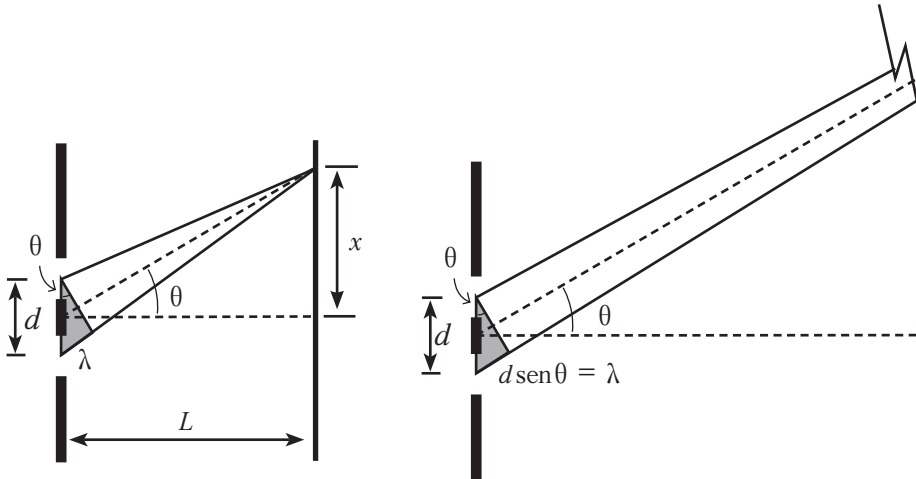
$$d \sin \theta = n\lambda$$



donde  $n = 0, 1, 2, 3, \dots$  ( $n = 0$  corresponde a la franja central).

$$d \sin \theta = (2n + 1) \frac{\lambda}{2}$$

donde  $n = 0, 1, 2, 3, \dots$  ( $n = 0$  corresponde a la primera franja oscura).



**Fig. 4.15.** Si  $L$  es mucho mayor que  $d$ , el pequeño triángulo sombreado se aproxima a un triángulo rectángulo y la diferencia entre los caminos de las ondas a la pantalla puede escribirse  $d \sin \theta$ .

Cualquiera de las dos ecuaciones anteriores permite determinar la longitud de onda de la luz. De ellas se ve que si se conoce la separación  $d$  entre las rendijas, basta medir la desviación angular  $\theta$  de cierta franja, clara u oscura, para poder calcular la longitud de onda  $\lambda$ . Pero, ¿cómo hallar  $\theta$ ? En el esquema de la figura 4.15 advertimos que

$$\theta = \tan^{-1} \left( \frac{x}{L} \right),$$

donde  $x$  es la distancia de la franja dada a la línea central. A continuación se analiza un ejemplo que ilustra el procedimiento descrito.





**Ejemplo 4.4.** Se hizo incidir luz monocromática sobre dos rendijas separadas entre sí 0.50 mm y se formó un diagrama de interferencia en una pantalla situada a 2.50 m frente a las rendijas. En el diagrama se determinó que la octava franja clara estaba a una distancia de 26.4 mm del centro. Encuentra: a) la desviación angular de dicha franja respecto a la línea central, b) la longitud de onda de la luz y su color.

$$a) \theta = \tan^{-1}\left(\frac{x}{L}\right) = \tan^{-1}\left(\frac{26.4 \times 10^{-3} \text{ m}}{2.50 \text{ m}}\right).$$

De donde,  $\theta = 0.605^\circ$ .

b) Como se trata de una franja clara, la ecuación que debemos emplear es:

$d \text{sen} \theta = n\lambda$ , con  $n = 8$ . De aquí que:

$$\lambda = \left(\frac{d}{n}\right) \text{sen} \theta = \left(\frac{0.50 \times 10^{-3} \text{ m}}{8}\right) \text{sen}(0.605^\circ) = 6.6 \times 10^{-7} \text{ m}$$

es decir, alrededor de 660 nm. La luz utilizada tenía color rojo (tabla 4.1).



Pese a que las ecuaciones anteriores permiten determinar la longitud de onda de la luz, por lo general en la práctica resulta más cómodo emplear otra ecuación.

En las figuras 4.14 y 4.15 representamos el ángulo  $\theta$  y la distancia  $x$  exageradamente, con el propósito de hacer más comprensible la explicación, pero en realidad, el ancho total del diagrama de interferencia observado en la pantalla suele ser mucho menor que la distancia  $L$  entre ésta y las rendijas. Éste es el caso del ejemplo resuelto anteriormente, en que la distancia a la pantalla es de 2.50 m y la distancia a la octava franja clara de tan solo 26.4 mm. En tales situaciones puede considerarse que  $\text{sen} \theta = \tan \theta$  (Fig. 4.16).

Con ayuda de una calculadora, comprueba que para el ángulo de  $0.605^\circ$  obtenido en el ejemplo 4.4,  $\text{sen} \theta \approx \tan \theta$ . Repite las pruebas para otros ángulos mayores.





De este modo, si llamamos  $x_n$  a la distancia entre la línea central del diagrama y la  $n$ -ésima franja clara, u oscura, podemos escribir:

$$\text{sen } \theta = \frac{x_n}{L}$$

Y la ecuación para las franjas claras,  $d \text{sen } \theta = n\lambda$ , queda:

$$\frac{dx_n}{L} = n\lambda$$

De donde:  $x_n = \frac{nL\lambda}{d}$

Por su parte, de la ecuación para las franjas oscuras,

$$d \text{sen } \theta = (2n + 1) \frac{\lambda}{2}, \text{ se obtiene: } \frac{dx_n}{L} = (2n + 1) \frac{\lambda}{2}$$

y de aquí

$$x_n = \frac{L}{d} (2n + 1) \frac{\lambda}{2}$$

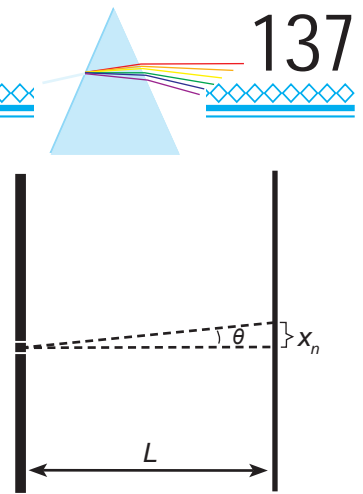
De aquí que el espaciado entre franjas vecinas claras, o entre franjas vecinas oscuras, es:

$$\Delta x = x_{n+1} - x_n = \frac{L\lambda}{d}$$

Y la longitud de onda:

$$\lambda = \frac{d}{L} \Delta x$$

*Realiza detalladamente las operaciones algebraicas requeridas para comprobar que en la experiencia de Young, el espaciado entre las franjas es  $\Delta x = L\lambda / d$ .*



**Fig. 4.16.** Si el ancho del diagrama de interferencia es mucho menor que  $L$ , entonces  $\text{sen } \theta = \tan \theta = x_n/L$ .





**Ejemplo 4.5.** Considera la misma situación del ejemplo 4.4, pero que en lugar de medir la distancia de la octava franja al centro del diagrama, se determinó que 10 franjas ocupaban un tramo de 33 mm.

El espaciado entre franjas luminosas consecutivas es:

$$\frac{33 \text{ mm}}{10} = 3.3 \text{ mm}$$

Por consiguiente, para la longitud de onda se tiene:

$$\lambda = \frac{d}{L} \Delta x = \frac{0.50 \times 10^{-3} \text{ m}}{2.50 \text{ m}} (3.3 \times 10^{-3} \text{ m}) = 6.6 \times 10^{-7} \text{ m}$$

o sea, alrededor de 660 nm que, como era de esperar, coincide con el resultado obtenido en el ejemplo 4.4.



*Sugiere algún procedimiento óptico para medir la distancia entre dos rendijas estrechas muy próximas una a otra.*

Como has visto, **el experimento de Young evidencia la relación que hay entre los colores que componen la luz habitual y las longitudes de onda, e inclusive permite medir éstas.** Por eso, en el momento en que Young se realizó constituía una contundente confirmación del comportamiento ondulatorio de la luz. Pese a ello, sus resultados solo fueron aceptados más de una década después, cuando se realizaron estudios detallados de la difracción.

### 4.3. Difracción de la luz

Desde el primer capítulo te has estado relacionando con el fenómeno de la difracción. Incluso, el experimento de Young y su variante descrita en el esquema de la figura 4.12 serían imposibles sin ella. El frente de onda que incide sobre las rendijas es prácticamente plano, pero gracias a la difracción, de ellas emergen haces divergentes, sin lo cual no podrían combinarse. En este apartado profundizaremos en este fenómeno.

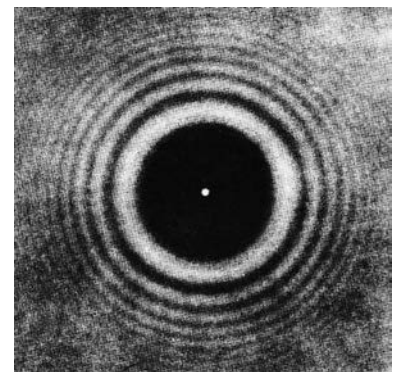
Augustín Fresnel (1788-1827) uno de los científicos que más contribuyó al estudio de las ondas, presentó en 1819 una teoría ondulatoria de la luz que explicaba los fenómenos de interferencia y difracción. Siméon Poisson (1781-1840), partidario del modelo corpuscular, argumentó en contra, señalando que de acuerdo con la teoría de Fresnel, la luz procedente de una fuente puntual que incidiera sobre un disco opaco debería dar lugar a una zona iluminada en el centro de la sombra, lo que nunca se había observado. Poisson retó a Fresnel a realizar el experimento. El experimento fue llevado a cabo por François Arago (1786-1853) ¡y en el centro de la sombra se observó el punto brillante! (Fig. 4.17). A ese punto brillante le quedó el nombre de **punto de Poisson**.

Observa que en la figura 4.17, además del punto de Poisson, aparecen franjas claras y oscuras más allá de la zona de sombra. Ellas recuerdan a las franjas de interferencia producidas por dos rendijas. Y en efecto, se deben a las interferencias constructivas y destructivas de las ondas luminosas difractadas en el contorno del disco. Una figura de este tipo, formada debido a la difracción, se denomina **diagrama de difracción**.

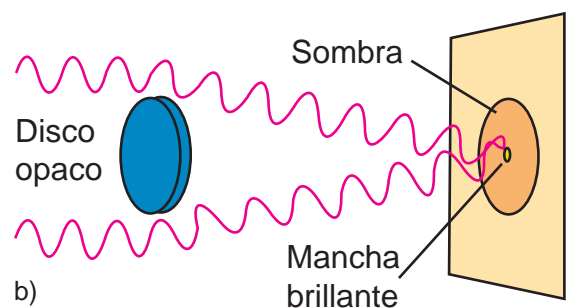
**Es posible apreciar diagramas de difracción alrededor de cualquier objeto de bordes bien definidos, siempre que sean iluminados con una fuente puntual (de dimensiones muy pequeñas comparadas**



**Augustín Fresnel (1788-1827).** Físico francés. Uno de los científicos que más contribuyó al desarrollo del modelo ondulatorio de la luz.

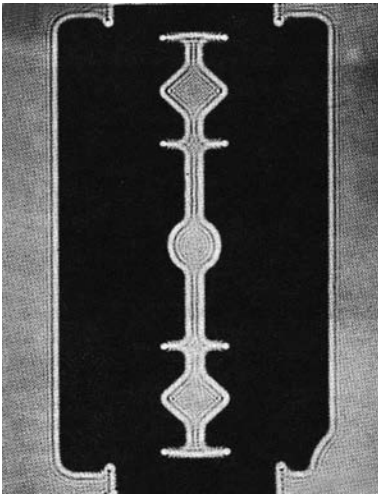


a)



b)

**Fig. 4.17.** a) Punto de Poisson en la sombra de un disco. b) Representación alegórica a lo que ocurre con las ondas luminosas en el borde del disco.



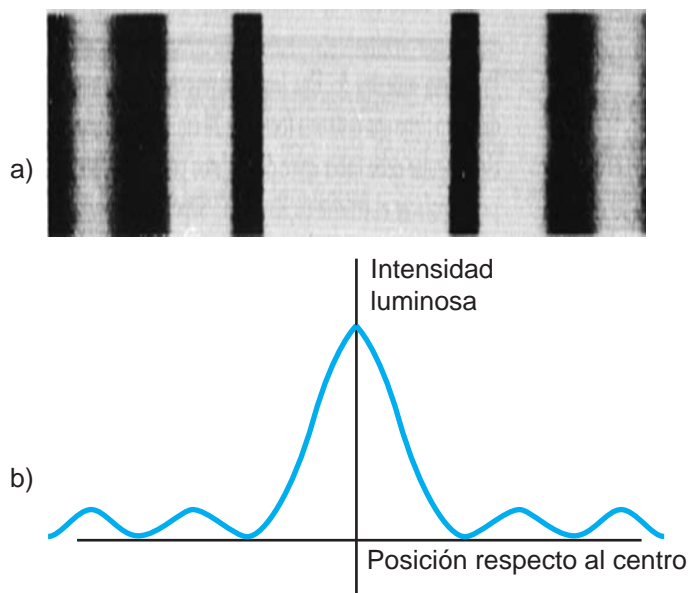
**Fig. 4.18.** Diagrama de difracción producido al incidir luz sobre una navaja de afeitar.

Observa un diagrama de difracción. Forma una rendija estrecha entre dos dedos y, acercándola a un ojo, mira a través de ella un foco lejano. Puedes obtener mejores rendijas practicando hendiduras con una navaja en un pedazo de cartulina opaca, o en papel de aluminio.



con la distancia al objeto). En la figura 4.18 se muestra el diagrama de difracción producido por el contorno de una navaja de afeitar. Normalmente este efecto no es notado, debido a que las fuentes luminosas habituales no son puntuales y la luz procedente de sus diversos puntos enmascara la difracción. Por otra parte, si la fuente se aleja mucho para que actúe como puntual, entonces la luz que llega a la pantalla puede ser muy débil como para que se pueda apreciar el diagrama.

Como ya sabes, la difracción también se produce cuando la luz incide sobre aberturas. En el capítulo 2 se describió una experiencia que evidencia esto (Fig 2.11), y unos párrafos más arriba en este propio apartado hemos subrayado que sin ella sería imposible el experimento de Young. Pero las experiencias de difracción con una rendija muestran, además, que se forma un diagrama de franjas claras y oscuras (Fig. 4.19a), que tiene parecido con el de la interferencia para dos rendijas. En este caso la región brillante central es ancha y a ambos lados de ella se forma una serie de zonas claras, cada vez menos intensas, alternadas con zonas oscuras. La figura 4.19b muestra



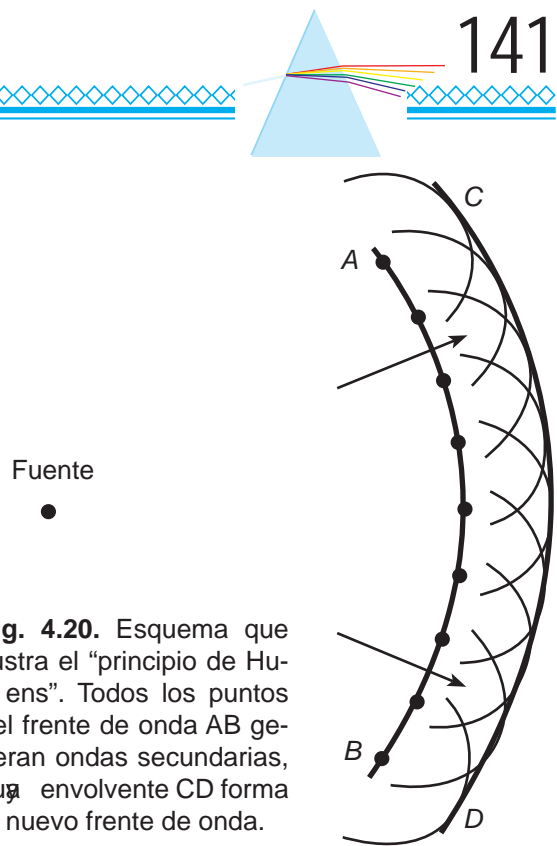
**Fig. 4.19.** a) Diagrama de difracción producido al iluminar una rendija estrecha. b) Gráfica que da una idea de la intensidad luminosa en función de la distancia a la línea central para dicho diagrama.

una gráfica que da una idea de cómo varía la intensidad luminosa en función de la posición de las franjas respecto al centro del diagrama.

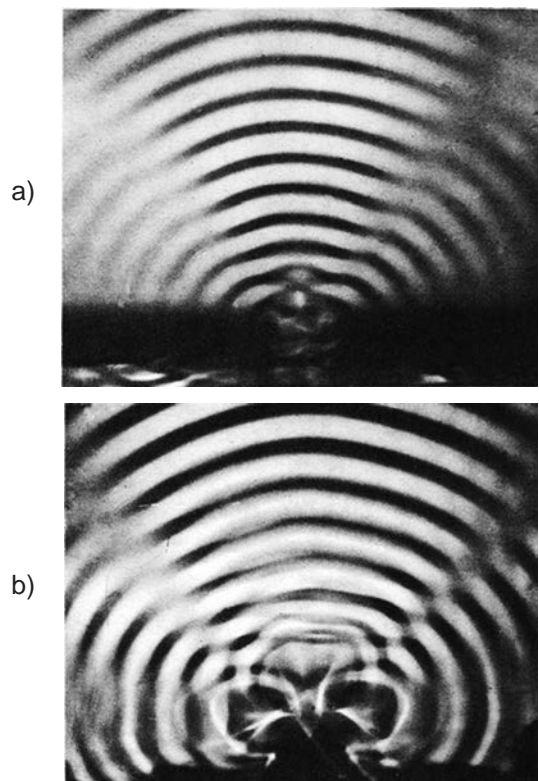
En un experimento como de Young, pero con dos rendijas estrechas, cada una de las rendijas da lugar a un diagrama de difracción como el de la figura 4.19. El diagrama de interferencia que se observa es debido a la combinación de las zonas centrales claras correspondientes a la difracción en cada rendija. Las otras zonas claras de los diagramas de difracción de cada rendija también interfieren, pero generalmente la luz es muy débil para que ello pueda ser apreciado.

La similitud entre los diagramas de interferencia con dos rendijas y de difracción por una sola, sugiere una estrecha relación entre la interpretación de un fenómeno y el otro. Esta relación puede ser establecida si se considera, como en su época hizo Huygens para explicar fenómenos ondulatorios, que **todos los puntos de un frente de onda se comportan como generadores de ondas secundarias, cuya envolvente da lugar al nuevo frente** (Fig. 4.20). Este procedimiento para predecir la posición futura de un frente de onda se conoce como **principio de Huygens**.

De acuerdo con lo anterior, **cuando un frente de onda llega a una abertura, pudieran imaginarse en ella una serie de focos distribuidos en toda su extensión**. La figura 4.21 muestra dos diagramas muy similares, obtenidos con ondas en el agua, pero el (a) corresponde a la difracción en una abertura, mientras que el (b) a las interferencias de las ondas producidas por varios generadores situados en línea. La similitud de estos diagramas apoya la idea de Huygens.



**Fig. 4.20.** Esquema que ilustra el “principio de Huygens”. Todos los puntos del frente de onda AB generan ondas secundarias, cuya envolvente CD forma el nuevo frente de onda.



**Fig. 4.21.** Diagramas obtenidos con ondas en el agua: a) difracción en una abertura, b) interferencia de las ondas producidas por varios generadores colocados en línea.

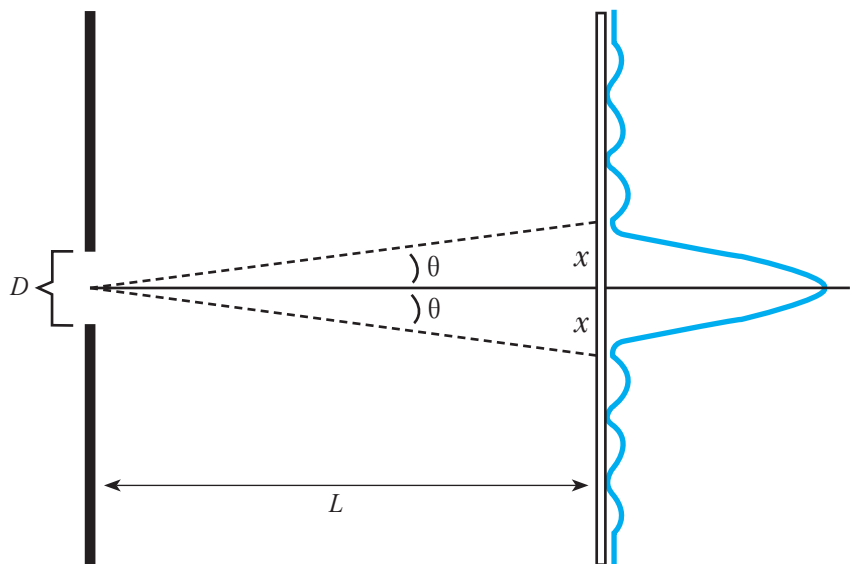


A partir de la interpretación anterior es posible obtener para la difracción en una rendija, las ecuaciones que relacionan las desviaciones angulares de las franjas claras y oscuras con la longitud de onda y el ancho de la rendija.

Así, en un diagrama de difracción por una rendija, para las franjas oscuras contiguas con la franja central se tiene:

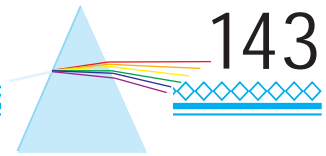
$$D \sin \theta = \lambda$$

Donde  $D$  es el ancho de la rendija y  $\theta$  la separación angular de la primera franja oscura respecto a la línea central (Fig. 4.22).



**Fig. 4.22.** Difracción en una rendija. Se ilustran las separaciones angulares ( $\theta$ ) y lineales ( $x$ ) de las primeras franjas oscuras respecto a la línea central.

La ecuación anterior es suficiente para extraer interesantes conclusiones. En particular, evidencia que mientras menor sea el ancho  $D$  de la rendija, mayor será la separación angular  $\theta$  de las primeras franjas oscuras respecto a la línea central y, por consiguiente, mayor el ángulo abarcado por la zona central iluminada. En el siguiente ejemplo se ilustra esto con datos concretos.



**Ejemplo 4.6.** Se hace incidir luz roja de 650 nm de longitud de onda sobre una rendija y se forma un diagrama de difracción en una pantalla situada a 50.0 cm. Encuentra el ancho de la franja central, en grados y en centímetros, cuando el ancho de la rendija es: a) 0.10 mm, b)  $1.0 \times 10^{-3}$  mm.

El ancho angular de la franja central está determinado por las separaciones angulares  $\theta$  de las franjas oscuras a cada lado suyo. Como sabes:

$$D \sin \theta = \lambda, \text{ de aquí que } \sin \theta = \frac{\lambda}{D}$$

Por consiguiente:

$$\text{a) } \sin \theta = \frac{650 \times 10^{-9} \text{ m}}{0.10 \times 10^{-3} \text{ m}}$$

De donde  $\theta = 0.37^\circ$ . El ancho en grados de la franja central es  $2\theta$ , es decir,  $0.74^\circ$ .

$$\text{En la figura 4.22, } \tan \theta = \frac{x}{L},$$

donde  $x$  es la distancia de la línea central a la primera franja oscura. De aquí que:

$$x = L \tan \theta = (50.0 \text{ cm})(\tan 0.37^\circ) = 0.32 \text{ cm}$$

Por consiguiente, el ancho de la franja central es

$$2(0.32 \text{ cm}) = 0.64 \text{ cm}$$

$$\text{b) En este otro caso, } \sin \theta = \frac{650 \times 10^{-9} \text{ m}}{1 \times 10^{-6} \text{ m}}$$

Por lo que el ancho en grados de la franja central es  $2\theta = 81^\circ$

La distancia de la línea central a la primera franja oscura es

$$x = L \tan \theta = (50.0 \text{ cm})(\tan 40.5^\circ) = 42.7 \text{ cm}$$

Por consiguiente, el ancho de la franja central es  $2(42.7 \text{ cm}) = 85 \text{ cm}$

Observa que en el caso (b) la región de la pantalla iluminada por la franja central es mucho más amplia que en el caso (a) (alrededor de 130 veces más ancha). Sin embargo, la iluminación es mucho menor, ya que la cantidad de luz que pasa por la rendija es muy pequeña y el área de la pantalla en que se distribuye mucho mayor.



En el ejemplo anterior calculamos el ancho de la zona central de un diagrama de difracción para luz de una longitud de onda determinada y una rendija dada, sin embargo, también es posible utilizar una rendija para determinar la longitud de onda de la luz.

Así, puesto que  $\lambda = D \sin \theta$ , si se conoce el ancho  $D$  de la rendija, basta determinar  $\theta$  para poder calcular  $\lambda$ . De la figura 4.22 se ve que dicho ángulo es  $\theta = \tan^{-1}(x/L)$ , donde  $x$  es la distancia de la línea central a la zona oscura y  $L$  la distancia de la rendija a la pantalla. A continuación mostramos cómo determinar  $\lambda$  mediante un ejemplo concreto.

**Ejemplo 4.7.** Un haz de luz monocromática incide sobre una rendija de 0.10 mm de ancho y forma un diagrama de difracción en una pantalla situada a 2.00 m de distancia. El ancho de la franja central del diagrama es 2.50 cm. Determina la longitud de onda de la luz.

Como el ancho de la franja central es 2.5 cm, la distancia del centro del diagrama a la primera zona oscura es

$$x = \frac{2.5 \text{ cm}}{2} = 1.25 \text{ cm}$$

Por consiguiente,

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{x}{L}\right) = \tan^{-1}\left(\frac{1.25 \times 10^{-2} \text{ m}}{2.00 \text{ m}}\right) = 0.36^\circ$$

De aquí que,

$$\lambda = D \sin \theta = (0.10 \times 10^{-3} \text{ m})(\sin 0.36^\circ) = 6.2 \times 10^{-7} \text{ m},$$

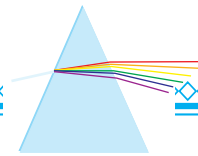
o sea, aproximadamente 620 nm.

Observa que en este ejemplo  $x$  es mucho menor que  $L$ . Por eso, el ángulo  $\theta$  también pudo haberse calculado, expresado en radianes, como

$$\theta = \frac{x}{L} = \frac{1.25 \times 10^{-2} \text{ m}}{2.00 \text{ m}} = 0.0062 \text{ rad},$$

que equivale al valor  $0.36^\circ$ , hallado anteriormente.

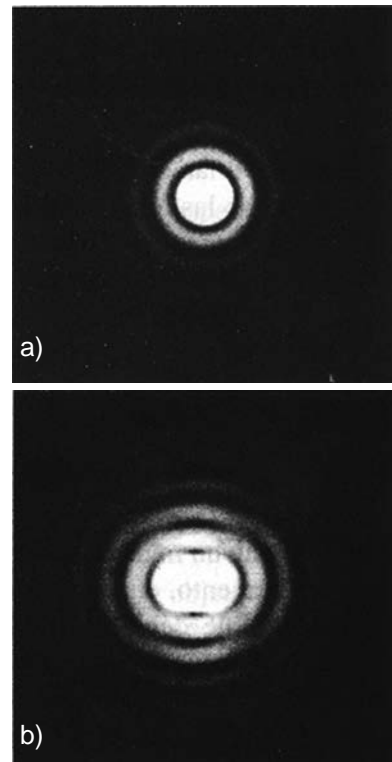




**El fenómeno de la difracción impone un límite a los aumentos que pueden lograrse con los microscopios y telescopios.** Hemos visto que cuando la luz incide sobre aberturas (Fig. 2.11 y 4.19a), u obstáculos (Fig. 4.17 y 4.18), cerca de los bordes de la mancha luminosa, o de la sombra, formada en una pantalla, se aprecian franjas claras y oscuras debidas a la difracción. Las lentes de microscopios y telescopios también tienen bordes que dan lugar a difracción.

En la figura 4.23a se muestra la fotografía, muy ampliada, de la imagen de un objeto que puede considerarse puntual, formada mediante una lente. Observa que aparece una mancha central, rodeada de una serie de franjas. La figura 4.23b presenta las imágenes de dos objetos como el anterior, próximos entre sí. Nota que, aunque los objetos están separados, sus imágenes no. Este ejemplo ilustra lo que puede suceder con las imágenes de los puntos de un objeto si, buscando apreciar sus detalles, se elevan progresivamente el aumento y la proximidad de los puntos observados: llega un límite en que sus imágenes se superponen y no es posible distinguir un punto de otro. En tal caso pudiera pensarse que se están viendo detalles del objeto, cuando en realidad se trata de detalles del diagrama de difracción. Si las imágenes de dos puntos de un objeto formadas mediante un instrumento óptico no son distinguibles, se dice que el instrumento no las puede **resolver**. El **poder de resolución** de los microscopios y telescopios disminuye con el diámetro del objetivo y con el aumento de la longitud de onda de la luz utilizada.

Como sabes, los microscopios de grandes aumentos poseen objetivos de pequeños diámetros; el poder de resolución de ellos está limitado por el fenómeno de la difracción. Los mejores microscopios de luz visible son capaces de resolver puntos separados una distancia de  $2 \times 10^{-7}$  m, es decir, unos 200 nm. De modo general puede decirse que mediante un microscopio no es posible resolver detalles menores que la longitud de onda de la luz que utiliza. Por eso, con el propósito de aumentar la resolución, se han diseñado microscopios de luz ultravioleta y de otros tipos.



**Fig. 4.23.** Imágenes de objetos que pueden considerarse puntuales, formadas mediante una lente: a) un solo objeto, b) dos objetos muy próximos entre sí.

*Indaga acerca del uso de otros tipos de microscopio, diferentes al de luz visible.*





**Fig. 4.24.** Radiotelescopio del observatorio de Arecibo, Puerto Rico. Su diámetro es muy grande para disminuir el efecto de la difracción.

Los grandes telescopios de luz visible poseen diámetros considerables y no están limitados por la difracción, sino por otros factores, como la turbulencia de la atmósfera y las aberraciones. El propósito de construir telescopios de luz visible con objetivos cada vez más grandes no ha sido, pues, eliminar el efecto de la difracción, sino como ya conociste en el capítulo anterior, aumentar la cantidad de luz que reciben. En cambio, en los radiotelescopios, que no se ven afectados por la turbulencia de la atmósfera y, sobre todo, que trabajan con longitudes de ondas que son

decenas o cientos de miles de veces mayores que la de la luz visible, sí es muy importante tener en cuenta el efecto de la difracción y aumentar el diámetro de su objetivo. El radiotelescopio del observatorio de Arecibo, en Puerto Rico, tiene 305 metros de diámetro (Fig. 4.24).

Hemos estudiado los dos fenómenos distintivos de las ondas, la interferencia y la difracción. La explicación en el primer cuarto del siglo XIX de los diagramas de interferencia y difracción de la luz a partir de la teoría de Huygens-Fresnel y la obtención de resultados coherentes entre sí al determinar longitudes de onda mediante uno y otro fenómeno, reafirmaron el modelo ondulatorio y resquebrajaron el modelo corpuscular. Young y Fresnel también aportaron la base para interpretar a la luz como una onda transversal. **El fenómeno que pone de manifiesto el carácter transversal de las ondas luminosas se denomina polarización.** En el próximo apartado abordaremos la cuestión *¿Qué es la polarización de la luz y cuáles son algunas de sus aplicaciones?*

4.4. Polarización de la luz

Para comprender en qué consiste la polarización, nos valdremos de una comparación entre las ondas luminosas y una onda que se propaga en una cuerda. Como sabes, ésta es **transversal**, porque las oscilaciones se realizan perpendicularmente a la dirección de propagación. Sin embargo, siendo perpendiculares a la dirección de propagación, las oscilaciones en una cuerda pueden tener lugar en múltiples direcciones. En la fig. 4.25 se han representado dos de estas posibles direcciones de las oscilaciones: en (a) se realizan en dirección vertical y en (b) en dirección horizontal. En ambos casos se dice que la onda está **polarizada en un plano**, o **linealmente**. En (a) la onda está polarizada en un plano vertical y en (b) en un plano horizontal.

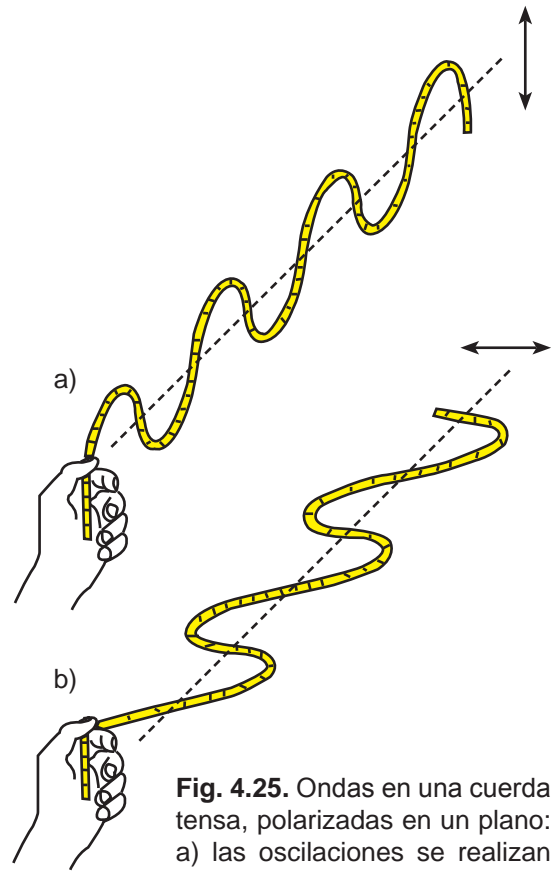


Fig. 4.25. Ondas en una cuerda tensa, polarizadas en un plano: a) las oscilaciones se realizan en dirección vertical, b) las oscilaciones se realizan en dirección horizontal.

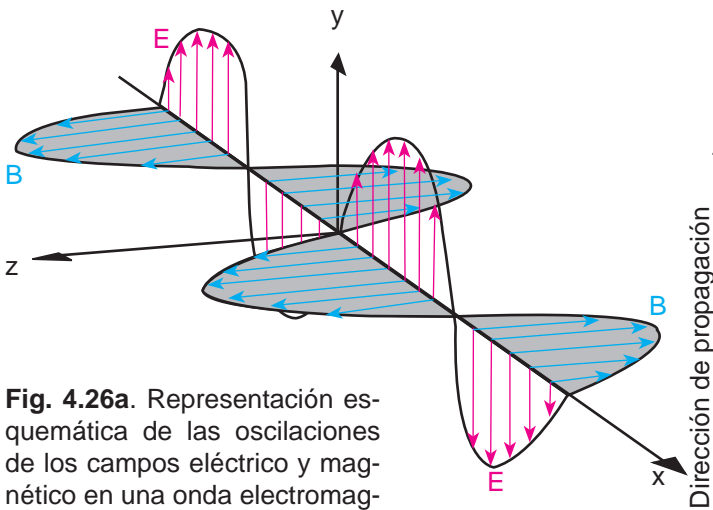


Fig. 4.26a. Representación esquemática de las oscilaciones de los campos eléctrico y magnético en una onda electromagnética polarizada.

En la figura 4.26a se ha representado una onda electromagnética polarizada linealmente. Observa que las oscilaciones del campo eléctrico se realizan solamente en el plano vertical y las del campo magnético en el plano horizontal. Sin embargo, a diferencia de las ondas que provocamos en una cuerda, las cuales de por sí están polarizadas, **las ondas luminosas generadas por las fuentes habituales no están polarizadas**. Las oscilaciones de los campos eléctrico y magnético se realizan perpendicularmente a

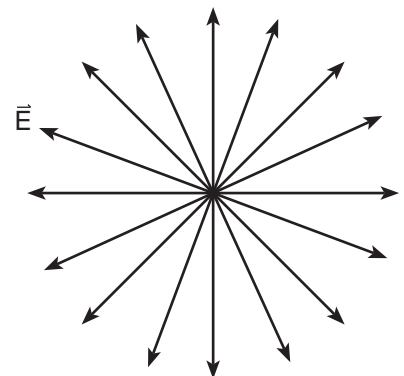
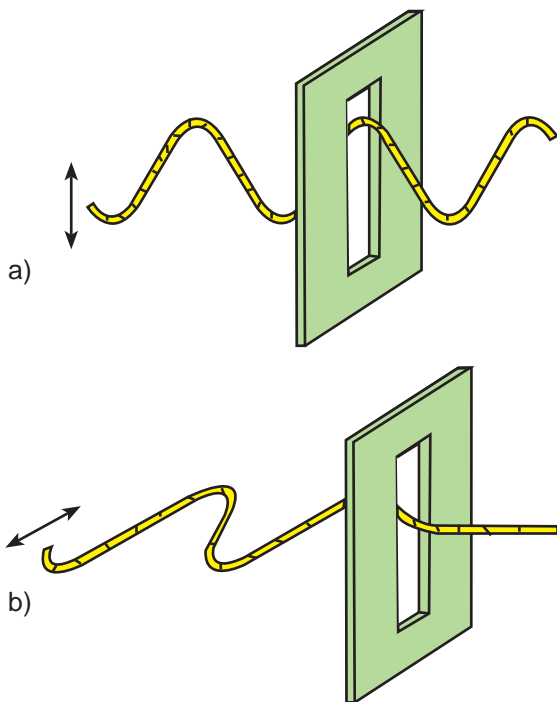


Fig. 4.26b. Representación esquemática de las direcciones del campo eléctrico en una onda luminosa que no está polarizada. Se ha supuesto que la luz se propaga perpendicularmente al plano de la figura, ya sea hacia adentro o hacia fuera.



**Fig. 4.27.** Ondas polarizadas en una cuerda, que inciden sobre una ranura vertical: a) La polarizada verticalmente atraviesa la ranura, b) la polarizada horizontalmente prácticamente no atraviesa la ranura.

*Intenta argumentar el hecho de que un polarizador ideal absorba la mitad de la luz no polarizada.*



Si en el camino de la onda que se propaga en una cuerda colocamos un tablero con una ranura (Fig. 4.27), entonces, en dependencia del plano en que esté polarizada la onda, pasará o no a través de la ranura. En el caso representado en la figura 4.27, la onda polarizada verticalmente puede pasar, mientras que la polarizada horizontalmente no.

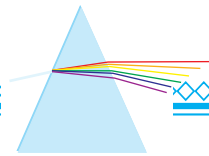
Existen materiales, naturales como la turmalina y artificiales como los **polaroid**, que actúan sobre la luz de modo parecido a las ranuras en el caso de la onda que se propaga en la cuerda, dejan pasar solo las componentes de las oscilaciones electromagnéticas en determinada dirección. La luz habitual que incide sobre tales materiales emerge de ellos polarizada, por lo que dichos materiales se denominan **polarizadores** y a veces también **polaroides**.

**La dirección en que el polarizador deja pasar casi sin atenuar las oscilaciones del campo eléctrico de la onda luminosa se denomina eje del polarizador.**

la dirección de propagación, pero en infinitud de direcciones. En la figura 4.26b se ha hecho una representación esquemática del campo eléctrico en una onda electromagnética no polarizada.

La luz de las fuentes luminosas es originada por las emisiones de los átomos. Individualmente éstos emiten luz polarizada, pero cada emisión dura un brevísimo intervalo de tiempo (el orden de  $10^{-8}$  s). Por tanto, la luz producida por una fuente procede de una enorme cantidad de átomos, cada uno de los cuales emite luz polarizada en los más diversos planos. Por eso el resultado final es luz que no está polarizada.

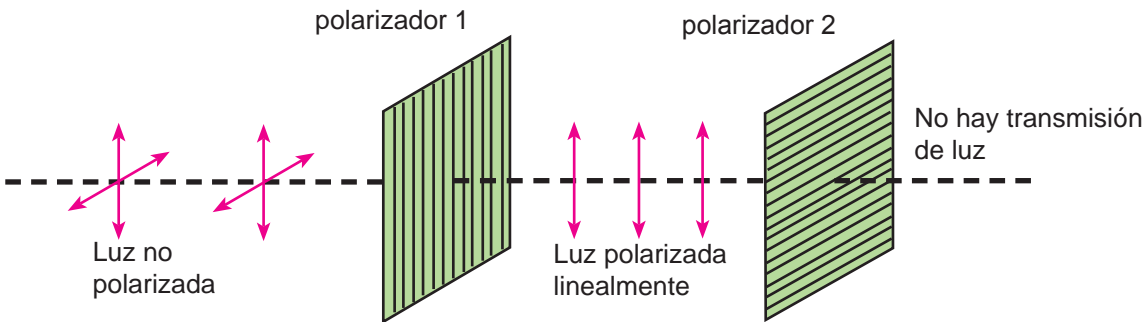
**En un láser, los átomos emiten sincronizadamente entre ellos. Por eso, la luz que producen no solo tiene una frecuencia única, sino que también está polarizada en una sola dirección.**



El esquema de la figura 4.28 ilustra la acción de dos polarizadores. El polarizador 1 se ha situado con su eje de polarización en posición vertical, por lo que solo deja pasar las componentes de las oscilaciones del campo eléctrico en esa dirección y la luz emerge de ella polarizada en un plano vertical.

**Un polarizador ideal absorbe la mitad de la luz no polarizada que incide sobre él.**

Si el polarizador 2 se orienta con su eje horizontal, o sea, formando  $90^\circ$  con el del polarizador 1, el campo eléctrico oscilatorio no podrá atravesarlo y de él no emerge luz. En cambio, si el eje del segundo polarizador forma cualquier otro ángulo con el eje del primero o, entonces sí pasará cierta cantidad de luz.

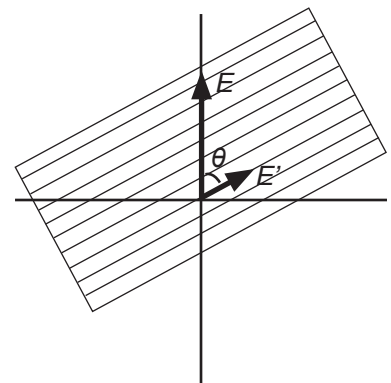


**Fig. 4.28.** Dos polarizadores, uno frente al otro. La cantidad de luz que pasa por el polaroid 2 depende del ángulo entre sus ejes.

*¿Cómo se relaciona la intensidad de la luz que emerge del segundo polarizador, del ángulo formado entre los ejes de los polarizadores?*

El segundo polarizador deja pasar solo la componente del campo eléctrico oscilatorio según su eje. Así, si  $E$  es la amplitud de dicho campo (Fig. 4.29) y  $\theta$  el ángulo que forma con el eje del polarizador, entonces la amplitud de las oscilaciones del campo eléctrico que atraviesa el segundo polarizador es:

$$E' = E \cos \theta$$



**Fig. 4.29.** Representación esquemática de luz polarizada en la dirección vertical, la cual incide sobre un polaroid cuyo eje forma un ángulo  $\theta$  con la dirección de polarización.





**Etienne Malus** (1775-1812). Realizó estudios sobre polarización de la luz y obtuvo empíricamente una ley que hoy lleva su nombre.

Si se elevan al cuadrado ambos miembros de la ecuación se tiene:

$$E'^2 = E^2 \cos^2 \theta$$

Y como la intensidad luminosa  $I$  es proporcional al cuadrado de la amplitud del campo eléctrico queda:

$$I' = I \cos^2 \theta$$

donde  $I$  es la intensidad de la luz que incide sobre el segundo polarizador e  $I'$  la intensidad de la que emerge de él.

El resultado anterior fue encontrado experimentalmente por Etienne Malus (1775-1812) en 1809, por lo que se conoce con el nombre de **ley de Malus**. Como luz polarizada, Malus utilizó la reflejada por un vidrio, la que se polariza parcialmente al reflejarse en él, y un mineral hacía las veces del segundo polarizador de la figura 4.28.

**Ejemplo 4.8.** Un haz de luz normal incide sobre un polarizador con su eje orientado verticalmente. La luz que procede de él se hace incidir sobre un segundo polarizador, cuyo eje forma  $60^\circ$  con el eje del primero. a) ¿Cuál es la dirección de polarización de la luz que emerge del segundo? b) Compara su intensidad con la de la luz normal inicial.

a) La luz que emerge del primer polarizador está polarizada en un plano vertical. A través del segundo solo pasa la componente del campo eléctrico de la luz que tiene la dirección de su eje. Por consiguiente, la luz emergerá polarizada en un plano que forma  $60^\circ$  con la vertical. Observa que el segundo polarizador cambia la dirección de polarización de la luz.

b) Sea  $I_0$  la intensidad de la luz que incide sobre el primer polarizador. Si éste es ideal, la intensidad  $I_1$  de la luz que emerge de él es aproximadamente la mitad:  $I_1 = \frac{1}{2}I_0$ . A su vez, el segundo polarizador reduce esta intensidad según la ecuación  $I_2 = I_1 \cos^2 \theta$ . Por consiguiente:

$I_2 = \frac{1}{2}I_0 \cos^2 60^\circ = \frac{I_0}{8}$ . O sea, la intensidad de la luz que emerge del segundo polarizador es la octava parte de la intensidad de la luz inicial.

En la luz reflejada, el grado de polarización depende del material de la superficie reflectora y del ángulo con que la luz incide sobre ella. Para un ángulo de incidencia de  $0^\circ$ , es decir, cuando la luz llega perpendicularmente a la superficie reflectora, la polarización es nula. En cambio, para cierto ángulo de incidencia diferente de  $0^\circ$  la polarización puede ser incluso completa.

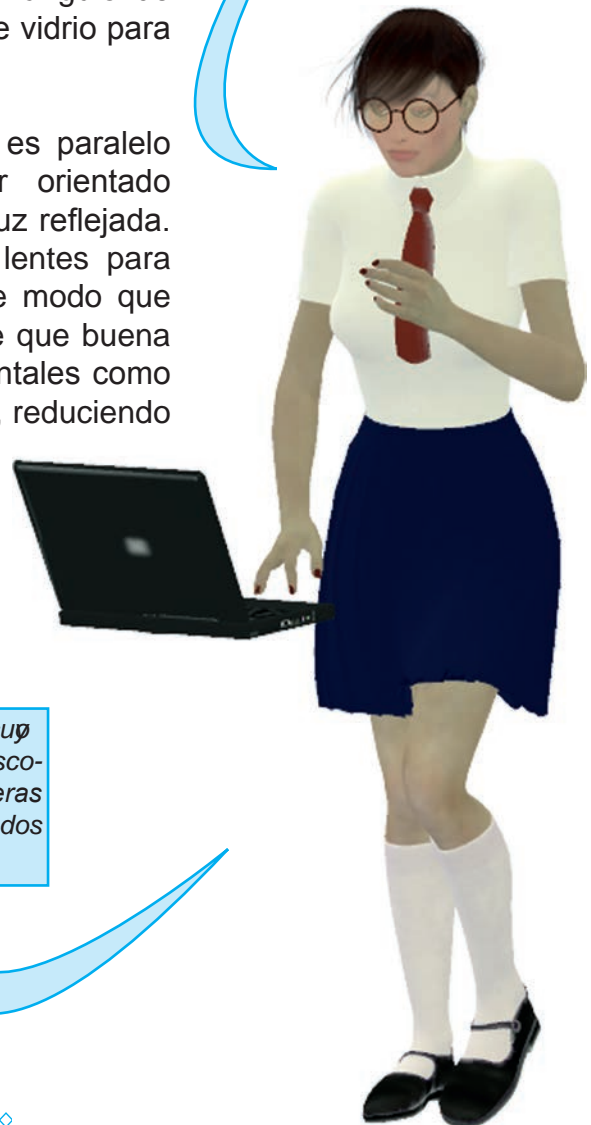
**Cuando la polarización de la luz por reflexión es completa, el rayo reflejado y el rayo refractado son mutuamente perpendiculares.**

Si la luz incide en la superficie de agua desde el aire, la polarización completa tiene lugar para un ángulo de incidencia de  $53^\circ$  y si incide en la superficie de vidrio para un ángulo de incidencia de  $56^\circ$ .

El plano de polarización de la luz reflejada es paralelo a la superficie reflectora. Un polarizador orientado adecuadamente puede absorber parte de la luz reflejada. Precisamente en este hecho se basan las lentes para sol Polaroid. Tales lentes están alineadas de modo que el eje de polarización es vertical, lo cual hace que buena parte de la luz reflejada en superficies horizontales como carreteras, agua, etc., sea absorbida por ellas, reduciendo el resplandor.

*Por medio de unas lentes Polaroid, comprueba que la polarización de la luz solar reflejada en un charco de agua depende del ángulo de incidencia.*

*Se tiene un polarizador cuyo eje de polarización desconoces. ¿Cómo pudieras determinarlo? Describe dos posibles procedimientos.*





## 4.5. Comportamiento corpuscular de la luz

Todos los fenómenos luminosos examinados hasta ahora pueden ser explicados interpretando a la luz como una onda. Sin embargo, esta interpretación falla al intentar comprender otra serie de fenómenos. En este apartado estudiaremos algunos de esos otros fenómenos y veremos que es posible explicarlos suponiendo que la luz está formada por corpúsculos. Responderemos así la última pregunta clave de esta unidad:

*¿Qué fenómenos ponen de manifiesto el comportamiento corpuscular de la luz y cuáles son algunas de sus aplicaciones?*

*Resume los fenómenos luminosos estudiados hasta ahora y argumenta por qué en el texto se dice que pueden ser explicados interpretando a la luz como una onda.*



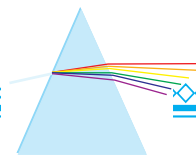
### 4.5.1. Efecto fotoeléctrico

El **efecto fotoeléctrico** fue el primer fenómeno que mostró que la luz no siempre podía ser tratada como onda y que debía ser considerada como un haz de corpúsculos.

En 1887 Heinrich Hertz generó por primera vez ondas electromagnéticas en un laboratorio. Mediante un alto voltaje, Hertz provocaba una descarga eléctrica entre dos electrodos (emisor), generando así una onda electromagnética que se propagaba en el espacio. A cierta distancia de esos electrodos colocaba otros dos similares (receptor), entre los que se producía una descarga eléctrica al llegar a ellos la onda electromagnética procedente de los primeros. A fin de apreciar mejor la descarga que se producía entre los electrodos receptores, los encerró en una caja para lograr oscurecimiento. Entonces advirtió que la separación entre los electrodos podía ser mayor cuando estaban iluminados que cuando no lo estaban.

Durante los años siguientes otros científicos también observaron y estudiaron el efecto fotoeléctrico. Se llegó a





la conclusión que la luz hace que los átomos y moléculas emitan electrones.

**Se llama efecto fotoeléctrico al fenómeno que consiste en la emisión de electrones por un material, debido a la absorción de energía de la radiación electromagnética.**

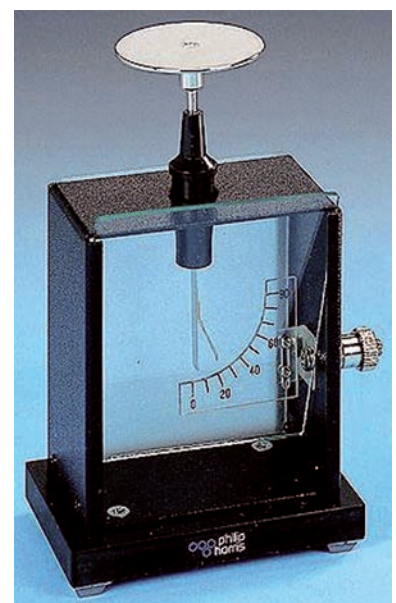
Los electrones emitidos en el efecto fotoeléctrico se denominan **fotoelectrones**.

*Indaga en Internet sobre la historia del descubrimiento del efecto fotoeléctrico.*

Se distinguen dos tipos de efecto fotoeléctrico, interno y externo. En el **efecto fotoeléctrico externo** la radiación incide sobre la superficie de un material y los fotoelectrones son emitidos a su exterior.

Un simple electroscopio con una placa de metal en su parte superior puede poner de manifiesto el efecto fotoeléctrico externo. Si luego de cargarlo negativamente se ilumina la placa metálica con luz ultravioleta, el electroscopio se descarga. Sin embargo, **la descarga ocurre con muchísima mayor rapidez cuando la carga de la placa es negativa.**

Esta experiencia sugiere que al incidir luz ultravioleta sobre la placa metálica, ésta emite electrones.



**Fig. 4.30.** Si el electroscopio se carga negativamente y se hace incidir radiación ultravioleta sobre su placa metálica, se descarga rápidamente.

*¿Y la descarga del electroscopio en la experiencia de la figura 4.30, no pudiera deberse a que la radiación ultravioleta extrae electrones de las moléculas del aire, ionizándolo y haciéndolo conductor?*

*Eso influye, pero la conductividad del aire es igual cuando el electroscopio tiene carga positiva que negativa, y resulta que se descarga mucho más rápidamente en este segundo caso, lo que indica que se emiten electrones.*





Un hecho significativo es que cuando la placa metálica se ilumina con luz diferente a la ultravioleta, por ejemplo roja, el electroscopio mantiene su carga, aun cuando la intensidad de la luz sea grande.

Esto evidencia que **el efecto fotoeléctrico ocurre o no, en dependencia de la frecuencia de la luz lo que contradice su interpretación como onda.**

En efecto, según el modelo ondulatorio de la luz, ésta consiste en oscilaciones de campo eléctrico y campo magnético, y cualquiera que sea la frecuencia de las oscilaciones, siempre que la intensidad luminosa sea suficientemente elevada, el campo eléctrico oscilatorio debiera provocar la emisión de electrones.

Experimentos más delicados muestran que **en el efecto fotoeléctrico, la energía máxima que adquieren los electrones emitidos es independiente de la intensidad de la luz**, lo que también contradice el modelo ondulatorio.

Si la luz se comportara como onda, entonces al aumentar la intensidad luminosa crecería la magnitud de su campo eléctrico oscilatorio y los electrones emitidos debieran salir con mayor energía.

Los experimentos muestran, además, que **en el efecto fotoeléctrico la emisión de electrones tiene lugar desde el mismo instante que incide la luz**, lo que tampoco concuerda con su interpretación como onda.

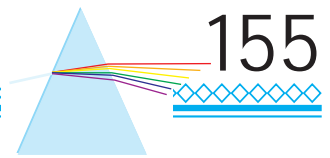
Según el modelo ondulatorio, el electrón emitido obtiene su energía del campo eléctrico oscilatorio, por lo que si la intensidad luminosa es suficientemente pequeña, debiera transcurrir un tiempo en que el electrón va acumulando energía hasta adquirir la necesaria para escapar del cuerpo.

De este modo, el modelo ondulatorio de la luz no explica las características del efecto fotoeléctrico. En 1905 Albert Einstein planteó una audaz hipótesis:

**La luz a veces se comporta como si su energía**



**Albert Einstein** (1879-1955). La fotografía es de 1905, año en que publicó varios trabajos científicos fundamentales, entre ellos el relativo a la explicación del efecto fotoeléctrico, que le valió el Premio Nobel de Física en 1921.



estuviese concentrada en paquetes. La energía de estos paquetes es  $hf$ , donde  $f$  es la frecuencia de la luz y  $h = 6.63 \times 10^{-34}$  Js es una constante, conocida como constante de Planck.

Einstein llamó a esos paquetes cuantos de luz y en la actualidad se denominan **fotones**. Por la explicación del efecto fotoeléctrico se le otorgó el Premio Nobel de Física en 1921.

*Indaga en Internet acerca de la vida y obra de Albert Einstein.*

La hipótesis de Einstein permite comprender las características del efecto fotoeléctrico mencionadas anteriormente. Así, la ocurrencia o no del efecto en dependencia de la frecuencia de la luz y no de su intensidad se explica como sigue. Los electrones libres de un metal están ligados a él por un campo eléctrico, y para ser extraídos se requiere comunicarles cierta energía mínima. Si la frecuencia de la luz es tal que los fotones poseen una energía  $hf$  menor que esa, entonces al colisionar con los electrones no pueden comunicarle la necesaria para salir del cuerpo y el efecto fotoeléctrico no tiene lugar.

El hecho de que la energía máxima que adquieren los electrones emitidos no dependa de la intensidad de la luz, tampoco tiene dificultad para ser explicado con la hipótesis de Einstein. Un aumento de dicha intensidad significa un aumento en el número de fotones que incide, pero no de la energía de ellos individualmente. Por consiguiente, la energía máxima que un electrón puede obtener al colisionar con un fotón depende solo de la energía de los fotones,  $hf$ , es decir, de la frecuencia de la radiación.

*La intensidad de la luz no determina la ocurrencia o no del efecto fotoeléctrico, ni la energía máxima que pueden adquirir los fotoelectrones, ¿en que pudiera influir entonces?*





El comienzo de la emisión de electrones desde el mismo instante que incide la luz también puede ser entendido fácilmente a partir de la idea de Einstein. El electrón que es emitido recibe la energía necesaria para escapar en cuanto el fotón colisiona con él y no durante un proceso paulatino de acumulación de energía como considera la teoría ondulatoria.

Cabe señalar que en el efecto fotoeléctrico, cuando el fotón choca con el electrón, desaparece. Su energía se invierte, una parte, en la salida del electrón, y otra que ésta se realiza en contra de la fuerza de atracción que lo liga al cuerpo, y otra parte, en energía cinética del electrón. Einstein sintetizó la conservación de la energía durante el efecto fotoeléctrico en una ecuación:

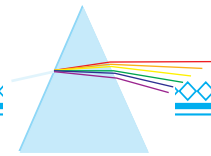
$$hf = W + E_c$$

donde  $hf$  es, como hemos dicho, la energía del fotón,  $W$  es la energía mínima requerida para extraer al electrón del cuerpo, llamada **trabajo de extracción**, o función trabajo, la cual depende del material de que se trate y  $E_c$  la energía cinética del electrón emitido.

Si  $hf < W$ , obviamente los fotones no pueden comunicar a los electrones la energía necesaria para que escapen de la superficie del cuerpo, pero si  $hf > W$ , entonces el excedente de energía respecto a la necesaria para escapar, aparece en forma de energía cinética de ellos.

Es preciso señalar que no todos los fotoelectrones abandonan la superficie del cuerpo con energía cinética  $E_c$ , algunos van hacia su interior y nunca salen, otros lo hacen después de haber perdido parte de la energía adquirida en colisiones con átomos, por lo que llegan al exterior con una energía menor. Solo unos pocos salen al exterior del cuerpo con la energía cinética  $E_c$ . Ésta es la energía máxima con que pueden salir.

En el efecto **fotoeléctrico interno**, a diferencia del externo, los electrones emitidos por los átomos permanecen en el interior del material. El efecto fotoeléctrico interno se



utiliza durante el funcionamiento de diversos dispositivos semiconductores, como fotorresistencias, fotodiodos y fototransistores.

El efecto fotoeléctrico, externo e interno, está presente en numerosos desarrollos tecnológicos. Es la base del funcionamiento de celdas solares utilizadas en calculadoras, naves cósmicas y paneles solares. Se emplea en dispositivos de control del alumbrado público, en el funcionamiento de las puertas de los elevadores, en alarmas contra robos y contra incendios, cámaras digitales y otros muchos dispositivos.



*Indaga sobre las aplicaciones tecnológicas del efecto fotoeléctrico.*

**Ejemplo 4.9.** a) Calcula la energía de los fotones correspondientes a luz roja de frecuencia  $4.5 \times 10^{14}$  Hz. b) ¿Cuántas veces mayor que esa energía es la de los fotones correspondientes a luz ultravioleta de frecuencia  $9.0 \times 10^{14}$  Hz?, ¿cuántas veces mayor que la de los fotones correspondientes a los rayos X de frecuencia  $1.8 \times 10^{18}$  Hz?

a) La energía de los fotones viene dada por la ecuación  $E = hf$ , de ahí que la de los fotones correspondientes a luz roja de frecuencia  $4.5 \times 10^{14}$  Hz es:

$$E = (6.63 \times 10^{-34} \text{ Js})(4.5 \times 10^{14} \text{ Hz}) = 3.0 \times 10^{-19} \text{ J}$$

b) La energía de los fotones es proporcional a la frecuencia de la radiación correspondiente. Por eso, para determinar cuántas veces mayor es la energía de un fotón respecto a la de otro, basta calcular cuántas veces mayor es la frecuencia.

Para la luz ultravioleta y la luz roja consideradas:

$$\frac{9.0 \times 10^{14} \text{ Hz}}{4.5 \times 10^{14} \text{ Hz}} = 2$$

Por consiguiente, la energía de los fotones de la luz ultravioleta es dos veces mayor que la de los fotones de luz roja.

Para los rayos X y la luz roja:

$$\frac{1.8 \times 10^{18} \text{ Hz}}{4.5 \times 10^{14} \text{ Hz}} = 4.0 \times 10^3$$

Por tanto, la energía de los fotones de los rayos X es  $4.0 \times 10^3$  veces mayor que la de los fotones de la luz roja.



**Ejemplo 4.10.** Imagina que la placa del electroscopio de la figura 4.30 es de zinc y que se ilumina con luz ultravioleta de frecuencia  $2.7 \times 10^{15}$  Hz. El trabajo de salida del zinc es  $6.4 \times 10^{-19}$  J. ¿Cuál es la energía cinética máxima que pueden tener los electrones que escapan de la placa?

La ecuación de conservación de la energía es:

$$hf = W + E_c$$

De ahí que la energía cinética máxima que pueden adquirir es:

$$E_c = hf - W = (6.63 \times 10^{-34} \text{ Js})(2.7 \times 10^{15} \text{ Hz}) - 6.4 \times 10^{-19} \text{ J} = 1.15 \times 10^{-18} \text{ J}$$

En comparación con el número total de electrones que escapan del zinc, son pocos los que tienen esa energía. Muchos de ellos pierden parte de la energía adquirida antes de salir, en colisiones con átomos que encuentran en el camino.

#### 4.5.2. Efecto Compton

El **efecto Compton** es otro fenómeno que no puede ser explicado interpretando la radiación electromagnética como onda. Constituye una contundente prueba de su comportamiento corpuscular. Se denomina así en honor de Arthur Holly Compton, quien fue el primero en estudiar dicho efecto, lo que le valió Premio Nobel de Física en 1927.



**Arthur Holly Compton** (1892-1962). En 1923 descubrió el efecto que hoy lleva su nombre, lo cual confirmó que los rayos X pueden tener un comportamiento corpuscular. Por este descubrimiento se le otorgó el Premio Nobel de Física en 1927.

En 1923 Compton hizo incidir un haz de rayos X de determinada frecuencia sobre grafito, como consecuencia de lo cual se produjo emisión de electrones y radiación dispersada. De acuerdo con el modelo ondulatorio, las oscilaciones del campo eléctrico de los rayos X deben forzar oscilaciones en los electrones del grafito y estos emitir radiación de la misma frecuencia que la incidente. Sin embargo, no es esto lo que se observa, **además de radiación de igual frecuencia que la incidente, se registran radiaciones de menores frecuencias, es decir de menores energías.** Este resultado no puede ser comprendido cuando la radiación electromagnética se interpreta como onda, en cambio el modelo corpuscular ofrece una explicación completa. Veamos, cualitativamente, en qué consiste esta explicación.

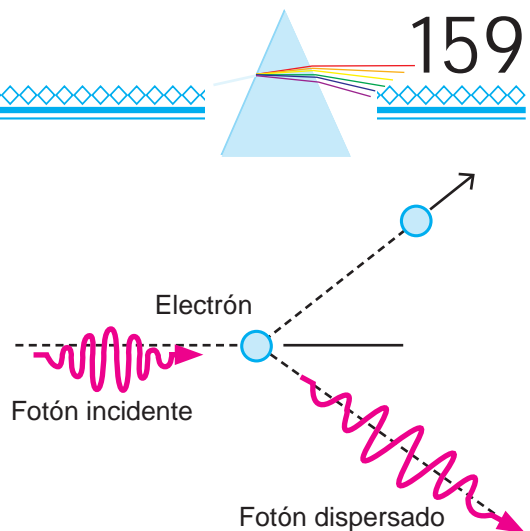
El esquema de la figura 4.31 representa un electrón en reposo y la radiación incidente, que según el modelo corpuscular puede ser interpretada como un fotón. Los fotones correspondientes a los rayos X tienen una energía miles de veces mayor que los correspondientes a la luz ultravioleta. Por eso, a diferencia del efecto fotoeléctrico descrito anteriormente, en este caso cuando el fotón colisiona con el electrón no desaparece, sino que solo cede parte de su energía. En consecuencia, **después de la colisión la frecuencia correspondiente al fotón es menor que antes.**

*¿Por qué puede decirse que el esquema de la figura 4.31 se basa en el modelo corpuscular de la radiación electromagnética?*

De acuerdo con lo anterior, la mayor pérdida de energía del fotón debe producirse cuando la colisión con el electrón sea frontal y como consecuencia de ello el fotón retroceda. Por eso es de esperar que la radiación dispersada de menor frecuencia se detecte en la misma dirección y sentido contrario que la radiación incidente. Por su parte, las menores pérdidas de energía de los fotones tendrían lugar cuando las colisiones con los electrones apenas los desviaran de la dirección incidente. Esto significa que en una dirección próxima a la de la radiación incidente, debe detectarse radiación dispersada de frecuencia cercana a la de ella.

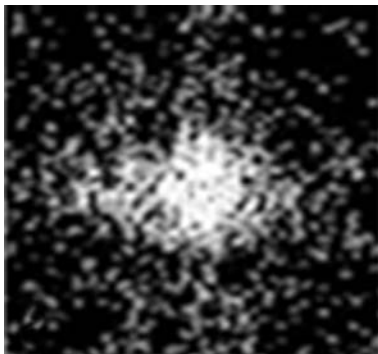
De este modo, el modelo corpuscular, al considerar la acción de la radiación electromagnética sobre el electrón como una colisión entre dos corpúsculos (Fig. 4.31), permite entender la dependencia entre la frecuencia de la radiación dispersada y su dirección.

*Explica con tus palabras la dependencia que tiene lugar en el experimento de Compton entre la frecuencia de la radiación dispersada y su dirección.*



**Fig. 4.31.** Esquema simplificado del efecto Compton. a) Un fotón de rayos X incide sobre un electrón. b) el fotón transmite parte de su energía al electrón. La mayor pérdida de energía del fotón ocurre cuando el choque con el electrón es frontal.





**Fig. 4.32.** Luz muy débil que incide en el chip de una cámara fotográfica digital. La iluminación no es uniforme, como predice el modelo ondulatorio. A unos pixeles llega luz y a otros no, como se concluye del comportamiento corpuscular.

*La experiencia de la figura 4.32 no me convence de la estructura corpuscular de la luz. Los puntos luminosos aislados pudieran deberse a que unos pixeles tienen mayor sensibilidad que otros.*



### 4.5.3. Otros efectos y aplicaciones del comportamiento corpuscular de la luz

#### 4.5.3.1. Cámara fotográfica digital

Para los científicos contemporáneos de Einstein fue difícil aceptar su hipótesis acerca de que la luz podía considerarse un flujo de fotones. Pero en la actualidad las evidencias del comportamiento corpuscular de la luz son fáciles de encontrar. Una de ellas se obtiene mediante una cámara fotográfica digital. Esta consta de un chip que tiene su superficie dividida en diminutos cuadraditos sensibles a la luz, denominados **pixeles**.

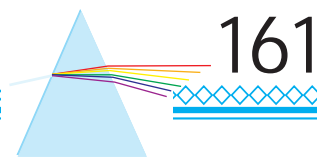
Las fotografías de la figura 4.32 fueron tomadas dejando pasar una débil luz en una cámara digital. La luz se atenuó insertando en su camino láminas que absorben parte de ella, similares a las utilizadas en las gafas para sol. En la primera foto la luz era muy tenue, pero en la segunda su intensidad se redujo aún más.

Si al incidir en el chip de la cámara fotográfica la luz se comportara como onda, entonces cuando disminuyera su intensidad la fotografía debiera verse más tenue pero uniformemente iluminada. No obstante, lo que se ve es que algunos pixeles se activaron mientras que otros no. Es como si el chip hubiese sido “bombardeado” con diminutos corpúsculos de luz.

*Sí, pero con la propia cámara puede verificarse si lo que dices es así o no. ¿De qué modo?*





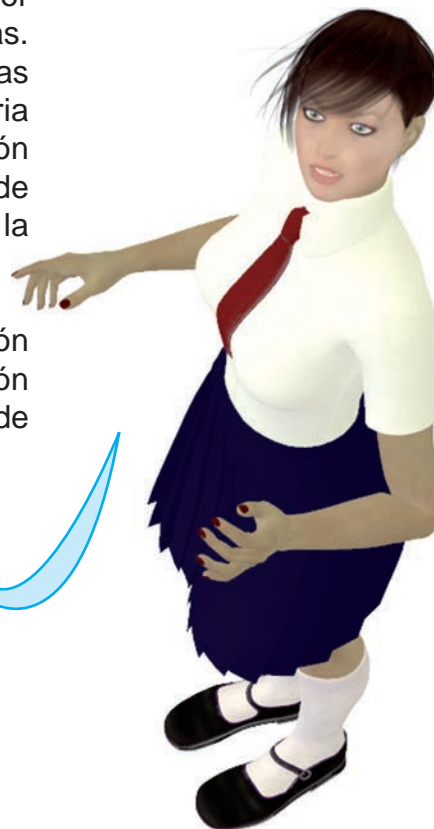


### 4.5.3.2. Acción química de la luz

La acción química de la luz es otra prueba de su comportamiento corpuscular, la absorción de fotones por átomos y moléculas puede provocar reacciones químicas. En general, una reacción química se inicia cuando las moléculas adquieren la energía de activación necesaria para ello. Así, por ejemplo, podemos iniciar la combustión de gas mediante una chispa o calor. Cuando la energía de activación es producida por radiación electromagnética, la reacción se denomina **reacción fotoquímica**.

Para la transformación de una molécula mediante la acción de radiación electromagnética la energía  $hf$  del fotón que colisiona con ella debe ser mayor que su energía de activación.

*Algunas medicinas se envasan en frascos oscuros. ¿Para qué será esto?*



**Fotosíntesis.** El ejemplo más común de la acción química de la luz es la **fotosíntesis**, en la cual gracias a la energía de activación de los fotones, las plantas transforman dióxido de carbono y agua en glucosa y emiten oxígeno. Para verificar la emisión de oxígeno puede realizarse una sencilla experiencia. En un recipiente profundo con agua se coloca una planta acuática, la cual se cubre con un embudo transparente (Fig. 4.33). En el tubo del embudo se coloca un tubo de ensayo y mediante una fina manguera se extrae el aire de su interior para que penetre el agua. Si el recipiente se sitúa a la luz del sol, se observan pequeñas burbujas. A fin de verificar que el gas formado es oxígeno, se extrae el tubo con cuidado, de modo que el gas de su interior no escape. Al acercar una pajilla apenas encendida y dejar escapar el gas, la pajilla se inflama vivamente.



**Fig. 4.33.** Una planta produce oxígeno al ser iluminada, lo que pone de manifiesto la acción química de la luz.



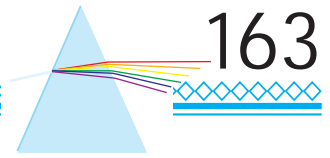


**Visión de colores.** La visión de los objetos que nos rodean es posible gracias a la acción química de la luz. En la retina del ojo hay células denominadas **conos** (alrededor de 6 millones) y otras llamadas **bastoncillos** (alrededor de 120 millones). Dichas células contienen moléculas que al absorber fotones desencadenan reacciones químicas, generando impulsos eléctricos que son registrados por el cerebro. Mediante los conos diferenciamos los colores y distinguimos objetos pequeños cuando hay buena iluminación. Los bastoncillos, por su parte, permiten ver con pequeña iluminación, pero no diferenciar los colores. En los seres humanos los conos son de tres tipos, uno que absorbe fotones de mayor energía (responsable del color azul), otro que absorbe fotones de menor energía (responsable del color amarillo) y un tercer tipo que absorbe fotones todavía de menor energía (responsables del color rojo).

**Formación y disociación de ozono atmosférico.** El ozono de la denominada **capa de ozono** de la atmósfera terrestre se forma por la acción de la radiación ultravioleta. Los fotones de ésta, al chocar con las moléculas de oxígeno ( $O_2$ ), les proporcionan la energía necesaria para disociarse en dos átomos. Estos átomos son altamente reactivos y pueden a su vez reaccionar con otras moléculas de oxígeno para dar lugar a ozono ( $O_3$ ). Pero los propios fotones de radiación ultravioleta provocan la disociación de las moléculas de ozono, haciendo que de ellas se desprenda un átomo de oxígeno. Se establece así un equilibrio dinámico en el que se forma y disocia ozono a cuenta de los fotones de radiación ultravioleta absorbidos. De este modo, la capa de ozono atmosférico actúa como una especie de filtro para la radiación ultravioleta, impidiendo el paso de buena parte de ella. Sin ese filtro la vida en la Tierra sería imposible.



*Indaga acerca de las consecuencias de la exposición a radiación ultravioleta de alta frecuencia.*



Lamentablemente, el equilibrio natural entre formación y disociación de ozono atmosférico se ha visto afectado por la presencia de contaminantes, entre los que sobresalen los compuestos clorofluorocarbonados (CFCs) y los óxidos de nitrógeno. Los primeros se conocen con el nombre comercial de freones y son utilizados en sistemas de refrigeración y la fabricación de materiales desechables. Se emiten a la atmósfera y ascienden hasta la capa de ozono, descomponiéndose al absorber fotones correspondientes a la radiación ultravioleta. Los átomos de cloro que resultan, actúan como catalizadores en la descomposición del ozono, y puesto que en realidad no se utilizan, cada uno puede contribuir a destruir decenas de miles de moléculas de ozono antes de pasar a formar parte de otro compuesto. Los óxidos de nitrógeno también se descomponen por la radiación solar, dando lugar a óxido nítrico, que igualmente actúa como catalizador en la destrucción del ozono.

La destrucción del ozono de la estratosfera más rápidamente de lo que se regenera, ha dado lugar al **agujero de la capa de ozono**.

*Resume cómo la acción química de la radiación solar junto a las emisiones de ciertos gases, han dado lugar al agujero en la capa de ozono.*

Aunque la energía que un fotón transmite a una molécula al ser absorbido por ella es relativamente pequeña, resulta grande comparada con la que se le transmite al calentar un cuerpo normalmente. El ejemplo que sigue a continuación ilustra esto.





**Ejemplo 4.11.** Estima en cuántos grados sería necesario elevar la temperatura de cierto cuerpo para que la energía cinética que como promedio se comunica a una de sus moléculas sea igual a la que le transmite un fotón de luz habitual al ser absorbido por ella. Considera que la frecuencia de la luz habitual es  $5 \times 10^{14}$  Hz. La constante de Boltzman es  $1.38 \times 10^{-23} \text{ JK}^{-1}$ .

La energía cinética media de las moléculas es  $\frac{3}{2}kT$ . Por consiguiente, al elevar la temperatura de un cuerpo en  $\Delta T$  la energía cinética que como promedio se comunica a una de sus moléculas es  $\frac{3}{2}k\Delta T$ . Por su parte, la energía que un fotón le transmite a una molécula al ser absorbido por ella es  $hf$ . De ahí que para que estas energías sean iguales:

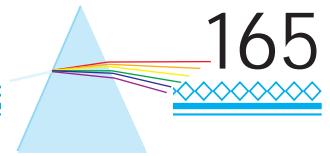
$$\frac{3}{2}k\Delta T = hf,$$

de donde

$$\Delta T = \frac{2}{3} \frac{hf}{k} = \frac{2(6.63 \times 10^{-34} \text{ Js})(5 \times 10^{14} \text{ s}^{-1})}{3(1.38 \times 10^{-23} \text{ JK}^{-1})}$$

Por tanto:  $\Delta T \approx 1.6 \times 10^4 \text{ K}$

De este modo, para transmitir a una molécula una energía cinética similar a la que le comunica un fotón de luz habitual al ser absorbido por ella, sería necesario elevar la temperatura del cuerpo, ¡en unos 16000 K, o grados Celsius!



4.6. Actividades de sistematización y consolidación

4.6.1. Sopa de letras con palabras clave del capítulo

Escribe cada palabra en Wikipedia o en Encarta y da un vistazo a lo que encuentres.

- Coherente
- Compton
- Difracción
- Dispersión
- Einstein
- Espectro
- Fotoelectrón
- Fotón
- Fotosíntesis
- Frecuencia
- Fresnel
- Hertz
- Interferencia
- Láser
- Luz
- Microscopio
- Polarización
- Polaroid
- Prisma
- Radiotelescopio
- Reflexión
- Rendija
- Resolución
- Snell
- Transversal
- Ultravioleta
- Young



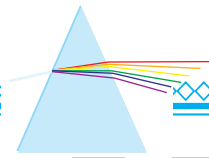
J	W	É	I	O	É	I	H	E	R	T	Z	C	D	M	N	N	R
F	Y	K	H	I	Ü	Y	S	Ó	Y	V	A	A	I	N	I	C	E
Ó	O	J	Ñ	P	P	P	Z	M	L	A	I	Á	O	Ó	E	O	S
L	E	S	Ú	O	E	M	Ü	E	I	N	C	S	R	I	T	H	O
A	Á	N	Q	C	P	E	N	C	Ó	N	N	I	A	C	S	E	L
T	Ü	S	T	S	Z	S	N	T	Y	Ó	E	S	L	C	N	R	U
E	V	R	E	O	E	E	O	S	O	I	R	E	O	A	I	E	C
L	O	S	C	R	U	F	Ó	Y	U	X	E	T	P	R	E	N	I
O	H	Z	F	C	X	N	X	L	N	E	F	N	Ó	F	V	T	Ó
I	F	T	E	I	Ü	R	O	W	G	L	R	Í	X	I	W	E	N
V	V	R	R	M	H	Ü	L	Ü	Á	F	E	S	E	D	N	S	O
A	F	O	I	P	O	C	S	E	L	E	T	O	I	D	A	R	T
R	J	I	A	J	I	D	N	E	R	R	N	T	M	Ü	U	Y	P
T	N	Ó	I	S	R	E	P	S	I	D	I	O	H	P	L	D	M
L	O	A	M	S	I	R	P	W	Á	Y	K	F	U	U	Q	L	O
U	F	O	T	O	E	L	E	C	T	R	Ó	N	Z	H	S	C	C
S	N	E	L	L	P	O	L	A	R	I	Z	A	C	I	Ó	N	Á
P	L	A	S	R	E	V	S	N	A	R	T	Í	F	É	F	Z	G



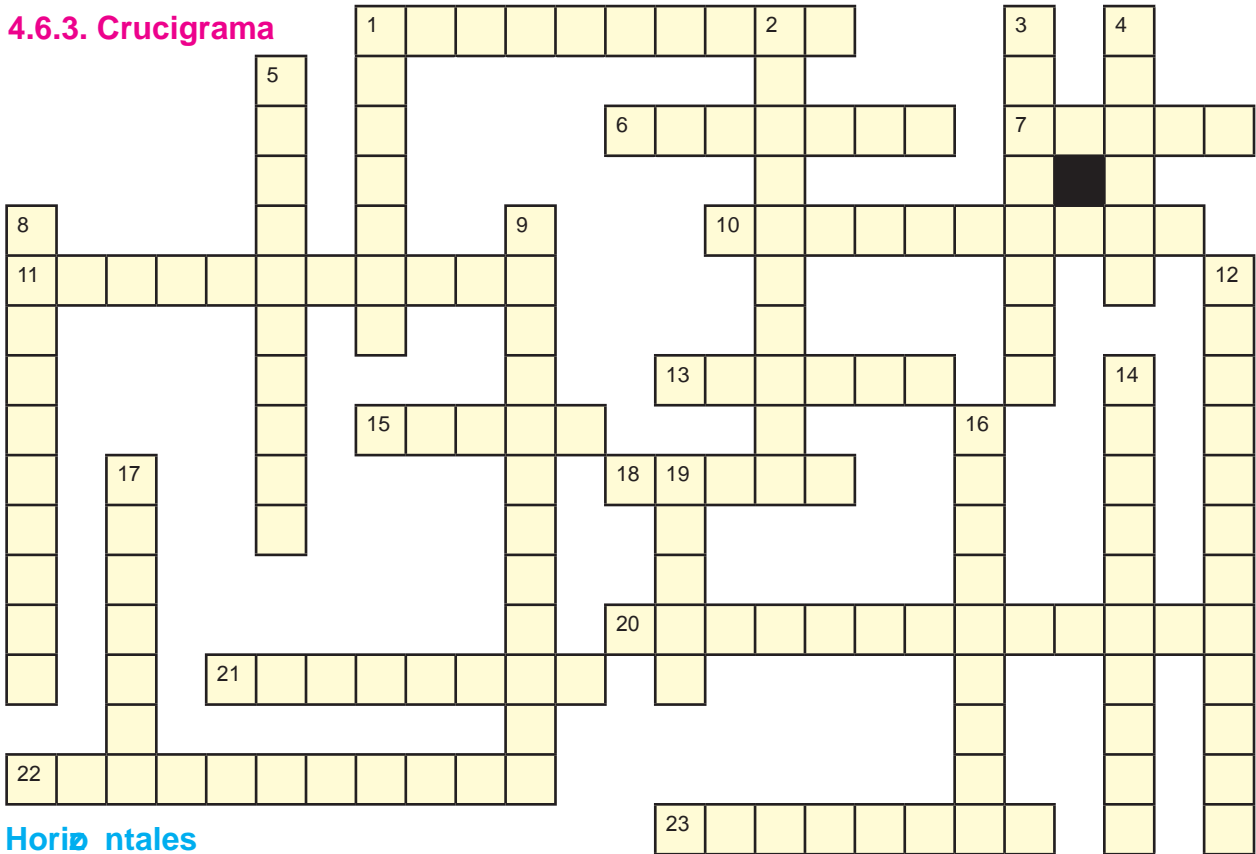


#### 4.6.2. Conexión de conceptos e ideas

1. Parte de la óptica que explica los fenómenos luminosos teniendo en cuenta la naturaleza de la luz. ( ) Acción química de la luz.
2. Fenómeno que consiste en la separación de los colores que componen un haz de luz. ( ) Augustín Fresnel.
3. Uno de los científicos que en el siglo XVII obtuvo el espectro de colores de la luz solar mediante un prisma. ( ) Capa de Ozono.
4. Científico que por primera vez realizó experimentos de interferencia luminosa. ( ) Christiaan Huygens.
5. Fuentes que producen ondas de la misma frecuencia y que, además, las producen simultáneamente, o con una diferencia de tiempo constante. ( ) Coherentes.
6. Fenómeno al cual se debe que un haz de luz de rayos paralelos que incide sobre una rendija estrecha emerge de ella como un haz divergente. ( ) Difracción.
7. Fenómeno que tiene lugar cuando los haces luminosos procedentes de dos rendijas muy estrechas se combinan dando lugar a un diagrama de franjas claras y oscuras. ( ) Dispersión cromática.
8. Científico a partir de cuya teoría se predijo que la luz que incida sobre un disco opaco circular, procedente de una fuente puntual, debe dar lugar a un punto luminoso en el centro de su sombra. ( ) Efecto Compton.
9. Científico que ideó el procedimiento de considerar todos los puntos de un frente de onda como generadores de ondas secundarias, cuya envolvente da lugar a un nuevo frente. ( ) Efecto fotoeléctrico.
10. Fenómeno que pone de manifiesto el carácter transversal de las ondas luminosas. ( ) Interferencia.
11. Dispositivo que produce luz coherente y polarizada. ( ) Isaac Newton.
12. Dispositivo en que es muy importante tener en cuenta el efecto de la difracción en su objetivo. ( ) Láser.
13. Capacidad de un instrumento óptico para formar imágenes separadas de dos puntos del objeto observado. ( ) Óptica física.
14. Emisión de electrones por un material debida a la absorción de radiación electromagnética. ( ) Poder de resolución.
15. Emisión de electrones y de radiación dispersada con frecuencias diferentes a la que incide sobre un material. ( ) Polarización.
16. Región de la estratosfera terrestre que absorbe gran parte de la radiación ultravioleta proveniente del Sol. ( ) Radiotelescopio.
17. Transformación de moléculas mediante radiación electromagnética. ( ) Thomas Young.



4.6.3. Crucigrama



Horizontales

1. Se dice de la luz en la cual el campo eléctrico oscila siempre en la misma dirección.
6. Apellido del científico a partir de cuya teoría se predijo que la luz que incide sobre un disco opaco circular, procedente de una fuente puntual, debe dar lugar a un punto luminoso en el centro de su sombra.
7. Dispositivo que produce luz intensa, coherente y polarizada.
10. Adjetivo que califica a la rama de la Óptica cuyos diagramas y ecuaciones se apoyan en el trazado de líneas rectas.
11. Modelo de la luz que prevaleció en el siglo XIX.
13. Dispositivo utilizado para observar la dispersión cromática de la luz.
15. Apellido del científico que observó por primera vez el efecto fotoeléctrico.
18. Apellido del científico que por primera vez realizó un experimento de interferencia luminosa.
20. Fenómeno que se pone de manifiesto en el experimento de Young.
21. Apellido del científico que explicó el efecto fotoeléctrico.
22. Tipo de interferencia que da lugar a las zonas oscuras en un diagrama de interferencia.
23. Si las imágenes de dos puntos de un objeto, formadas mediante un instrumento óptico, son distinguibles, entonces se dice que el instrumento las puede.

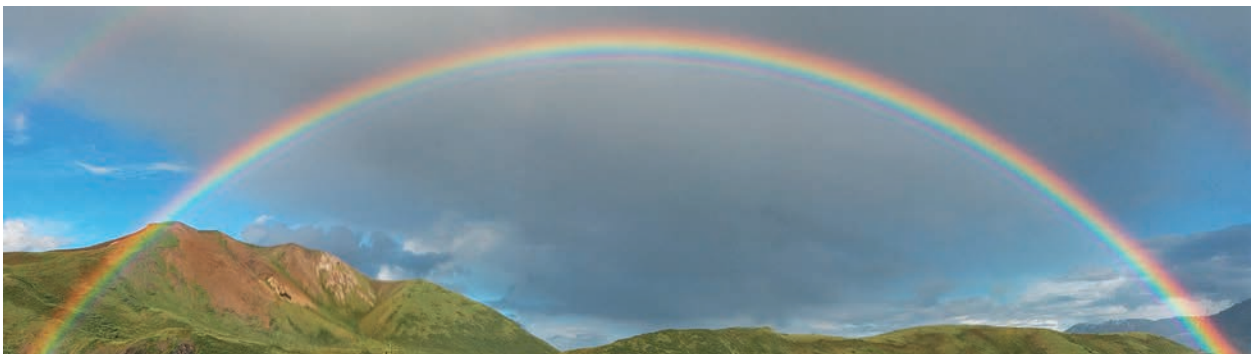
Verticales

1. Apellido que dio nombre al punto luminoso que se forma en el centro de la sombra de un disco, cuando sobre él incide luz procedente de una fuente puntual.
2. Fenómeno que pone de manifiesto la separación de los colores que componen un haz de luz.
3. Tipo de material artificial utilizado para polarizar la luz.
4. Adjetivo que califica a la rama de la Óptica que explica los fenómenos teniendo en cuenta la naturaleza de la luz.
5. Fenómeno óptico que se trata de atenuar aumentando el diámetro de los radiotelescopios.
8. Orientación del plano de polarización de la luz solar polarizada por reflexión en un lago.
9. Tipo de interferencia que da lugar a las zonas luminosas en un diagrama de interferencia.
12. Fenómeno que pone de manifiesto el carácter transversal de las ondas luminosas.
14. Fenómeno que da lugar al punto de Poisson.
16. Tipo de fuente luminosa que hacen posible observar un diagrama estable de interferencia.
17. Nombre que actualmente reciben los "paquetes" en que puede suponerse concentrada la radiación electromagnética.
19. Gas que forma una capa en la estratosfera la cual actúa como filtro para la radiación ultravioleta procedente del Sol.



#### 4.6.4. Actividades de repaso

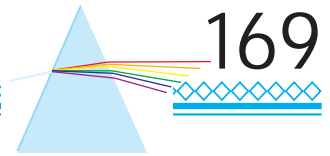
1. Confecciona un mapa conceptual que conecte y ramifique conceptos e ideas como los siguientes: modelo ondulatorio de la luz, modelo corpuscular, dispersión cromática, interferencia, difracción, polarización, efecto fotoeléctrico, efecto Compton, acción química de la luz.
2. Responde, resumidamente, las preguntas formuladas al inicio del capítulo: ¿Cómo explicar la variada coloración que apreciamos en los objetos que nos rodean? ¿Qué condiciones se requieren para observar los fenómenos de interferencia y difracción de la luz? ¿Cómo determinar la longitud de onda de la luz a partir de dichos fenómenos? ¿En qué consiste el fenómeno de la polarización de la luz y cuáles son algunas de sus aplicaciones? ¿Qué fenómenos ponen de manifiesto el comportamiento corpuscular de la luz y cuáles son algunas de sus aplicaciones?
3. Explica e ilustra mediante ejemplos: a) la dispersión cromática de la luz, b) la formación del arco iris, c) la independencia de los haces luminosos, d) el efecto fotoeléctrico, e) el efecto Compton, f) la formación de la capa de ozono.



4. ¿Por qué a veces la luz se describe como haces y rayos y otras veces como una onda? Ejemplifica en qué casos se utilizan tales descripciones.
5. ¿Por qué cuando un haz de luz habitual pasa a través de un pedazo de vidrio con caras paralelas no se separa en haces de diferentes colores, como ocurre en un prisma.
6. Un haz de luz roja que se propaga en el aire penetra en un bloque de vidrio. ¿Cómo afecta esto a su velocidad, longitud de onda, frecuencia y color?
7. Ocasionalmente se observa la explosión de una estrella, cuya luz, como sabes, tarda muchos años en llegar a la Tierra. La explosión se ve como una luz blanca brillante y no como una sucesión de colores. ¿Qué indica esto acerca de la dependencia entre la velocidad de propagación de la luz en el vacío y su frecuencia?







8. En una lente convergente, ¿será rigurosamente igual su distancia focal para la luz roja que para la luz violeta? ¿Cuál esperarías que sea mayor? ¿Qué efecto puede tener esto?
9. ¿De qué colores son los haces luminosos que mejor reflejan: a) una hoja de papel blanco, b) una tela roja, c) una hoja de papel negro?



10. Un haz de luz habitual, después de atravesar un vidrio de color azul, aparece también azul ¿Cómo se explica esto?

11. En una hoja blanca está escrita la palabra Excelente con tinta roja y la palabra Aprobado con tinta azul. Se dispone de dos vidrios, uno rojo y otro azul, ¿a través de cuál de ellos deberá mirarse para ver la palabra Excelente?

12. ¿Por qué no es posible observar un diagrama de interferencia utilizando dos focos luminosos habituales, digamos, los faros de un automóvil?

13. ¿Qué cambio ocurriría en el diagrama de interferencia obtenido en el experimento de Young si se realizara bajo el agua?
14. ¿Qué ondas, las de radio o televisión se difractarán más al encontrar una montaña? Argumenta tu respuesta.
15. Podemos escuchar un sonido proveniente de algún lugar situado al doblar una esquina, pero no podemos ver quién lo produce sin asomarnos. ¿Cómo se explica esto, si tanto el sonido como la luz son ondas?
16. Explica por qué los diagramas de difracción son difíciles de observar cuando la fuente no puede considerarse puntual.
17. ¿Qué sucede con el diagrama de difracción de la luz que incide en una rendija si: a) disminuye el ancho de la rendija, b) aumenta la longitud de onda de la luz?
18. ¿Por qué es imposible diseñar un microscopio de luz visible para observar las moléculas de una célula?



19. ¿Qué color de luz visible daría mejor resolución en un microscopio?
20. ¿Qué ventajas puede tener el uso de grandes espejos como objetivos de los telescopios astronómicos?
21. Explica con tus palabras en qué difiere la luz de una lámpara habitual de la luz polarizada.

22. ¿Cómo determinar si unas lentes para sol son polarizadoras o no?

23. La luz normal no pasa a través de dos láminas polarizadoras cruzadas, pero si entre ellas se coloca otra lámina polarizadora de tal modo que su eje forme  $45^\circ$  con los ejes de las primeras, entonces sí pasa luz. ¿Cómo se explica esto?

24. ¿Cambia la energía de los fotones de un haz de luz que pasa de un medio transparente a otro, digamos, del aire al vidrio? Argumenta.



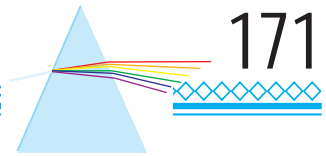
25. Para manipular materiales fotográficos, en los “cuartos oscuros” suele utilizarse luz roja. ¿A qué se deberá esto?
26. Una superficie emite fotoelectrones cuando sobre ella incide luz verde, pero no los emite cuando la luz es amarilla. ¿Emitirá electrones cuando sea iluminada con: a) luz roja, b) luz azul? Argumenta.

27. Dos lámparas de igual potencia luminosa emiten una radiación ultravioleta y la otra radiación infrarroja. ¿Cuál de ellas emite mayor cantidad de fotones por segundo?



28. Imagina que manteniendo la misma intensidad luminosa que en la segunda fotografía de la figura 4.32, quiere obtenerse una fotografía que aparezca uniformemente iluminada, ¿qué podría hacerse?

29. Algunos medicamentos se envasan en frascos oscuros. ¿Para qué se hará esto?



**4.6.5. Ejercicios de repaso**

1. Para el vidrio “crown”, ¿en qué porcentaje es mayor la velocidad de la luz roja que la de la luz violeta?

Respuesta: 1.3%

2. Un estrecho haz de luz natural llega a un pedazo de vidrio crown con un ángulo de incidencia de  $60.0^\circ$ , ¿cuáles son las desviaciones de los haces rojo y violeta respecto a la dirección inicial?

Respuesta:  $25.1^\circ$  y  $25.6^\circ$ .

3. Cada vez que un átomo de la infinidad que forman el filamento de una bombilla eléctrica emite luz, la emisión dura alrededor de  $10^{-8}$  s. ¿Qué longitud ocupan los trenes de ondas emitidos?

Respuesta: Alrededor de 3 m.

4. Se hace pasar luz de una lámpara de filamento incandescente por un filtro de color y luego a través de dos rendijas estrechas separadas 0.30 mm. En el diagrama que se forma en una pantalla situada a 2.00 m de las rendijas, se observan 15 franjas luminosas en un tramo de 42 mm ¿Cuál es la longitud de onda de la luz después de pasar por el filtro? ¿Qué color tiene?

Respuesta:  $4.2 \times 10^{-7}$  m, violeta.

5. Luz roja de 680 nm incide sobre dos rendijas estrechas muy próximas entre sí, dando lugar a un diagrama de interferencia cuyas franjas oscuras están espaciadas 3.3 mm. Al utilizar la misma instalación, pero con luz de otro color, el espaciado entre las franjas fue de 2.1 mm. ¿Qué longitud de onda tenía la luz utilizada en la segunda ocasión? ¿Cuál era su color?

Respuesta:  $4.3 \times 10^{-7}$  m, violeta.

6. Luz monocromática de 633 nm incide sobre una rendija. Si la abertura angular de la franja central es  $6.0^\circ$ , ¿cuál es el ancho de la rendija?

Respuesta: 0.012 mm.

7. Una persona se encuentra en un salón lejos de su puerta y hace sonar un silbato de 800 Hz. Si la puerta da a un patio y tiene un ancho de 1.0 m, estima la abertura angular de la zona en la cual se escuchará claramente el sonido en el patio. No consideres las reflexiones del sonido que pueden tener lugar en el interior del salón.

Respuesta:  $52^\circ$ .

8. Luz violeta de 400 nm incide sobre una rendija, formando una franja central de 4.0 cm de ancho sobre una pantalla situada a 5.00 m. Determina el ancho de la rendija.

Respuesta: 0.10 mm.





9. Dos láminas polarizadoras están alineadas de modo que la intensidad de la luz que emerge de ellas es máxima. ¿Qué ángulo debe rotarse una de las láminas polarizadoras para que la intensidad se reduzca a la mitad?

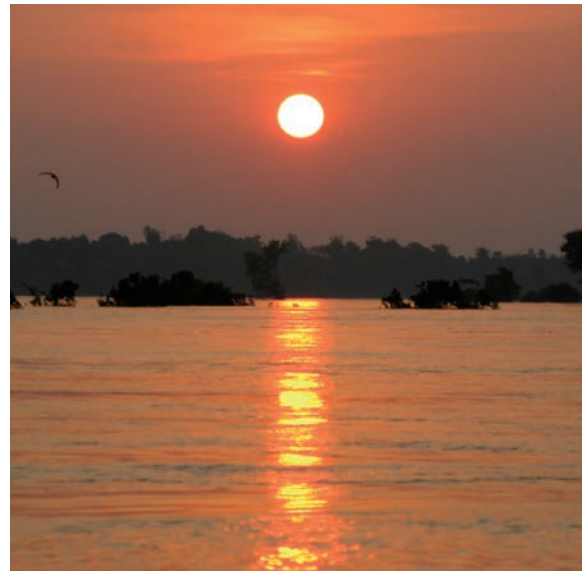
Respuesta:  $45^\circ$ .

10. Luz normal no polarizada incide consecutivamente sobre dos láminas polarizadoras. Determina qué fracción de la intensidad luminosa inicial representa la intensidad de la luz transmitida si: a) los ejes de las láminas polarizadoras son perpendiculares entre sí; b) se coloca una tercera lámina polarizadora entre las dos primeras, de modo que su eje forma  $45^\circ$  con el de las otras; c) la tercera lámina se coloca frente a las otras dos.

Respuesta: a) 0, b)  $1/8$ , c) 0.

11. ¿Bajo qué ángulo por encima del horizonte se observará el Sol, cuando su luz reflejada en la superficie de un lago tranquilo alcanza su máxima polarización?

Respuesta:  $37^\circ$ .



12. Para disociar una molécula de oxígeno en sus dos átomos se requiere una energía de  $8.2 \times 10^{-19}$  J. a) ¿Cuál es la mínima frecuencia de la radiación electromagnética que puede proporcionar la energía para ello? b) ¿A qué longitud de onda corresponde? c) ¿A qué región del espectro pertenece dicha radiación?

Respuesta:  $1.2 \times 10^{15}$  Hz, b)  $2.4 \times 10^{-7}$  m, c) ultravioleta.

13. El "trabajo de salida" de cierto material es  $3.7 \times 10^{-19}$  J. Determina la máxima energía cinética con que pueden salir los fotoelectrones cuando sobre su superficie incide radiación de frecuencia  $3.0 \times 10^{15}$  Hz.

Respuesta:  $1.6 \times 10^{-18}$  J.

14. Una lámpara de 100 W emite el 1% de su energía en la región visible del espectro de radiación electromagnética. De qué orden será la cantidad de fotones que emite cada segundo. Considera que la frecuencia de la luz visible es, en términos medios,  $6 \times 10^{14}$  Hz.

Respuesta: del orden de  $10^{18}$  fotones cada segundo.

# 5 Actividades prácticas







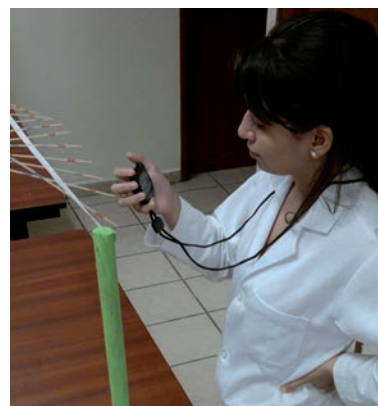
## Actividades prácticas

Las actividades prácticas son parte esencial del aprendizaje de la Física. Durante ellas se enriquecen con experiencia concreta determinados conocimientos y se obtienen otros; se aprende a razonar a partir de condiciones reales; se desarrollan habilidades para la medición, el manejo de instrumentos y el procesamiento e interpretación de datos; se gana experiencia en la elaboración de informes acerca del trabajo realizado. En resumen, se adquieren conocimientos, habilidades y métodos de trabajo que no es posible obtener mediante otras actividades. A continuación se incluye un conjunto de actividades prácticas sobre Ondas y Óptica, estrechamente relacionadas con el material del texto. Se han agrupado en dos apartados, en el primero se proponen actividades sencillas, que pueden ser realizadas en la casa o el aula. Éstas no exigen realizar mediciones precisas ni evaluar la incertidumbre de los resultados. Su objetivo fundamental es utilizar los conceptos básicos estudiados para analizar reflexivamente diversas situaciones prácticas, así como desarrollar algunas habilidades. El segundo apartado está dedicado a las prácticas de laboratorio, las cuales, como su nombre indica, deben ser realizadas en el laboratorio, con el instrumental adecuado. En varias de ellas se presta atención a las mediciones y a la evaluación de la incertidumbre de los resultados.

### 5.1. Actividades prácticas para la casa o el aula

#### 5.1.1. Ondas

**1. Onda transversal.** Consigue una cinta elástica de unos 3 metros de longitud y una buena cantidad de palitos iguales. Pega los palitos por su parte central a la tira elástica, con separación entre ellos de 4-5 cm. Fija los extremos de la tira elástica a postes, de modo que quede estirada y proporciónale un impulso transversal al último palito de uno de los extremos. Observa la propagación de la perturbación y su reflexión al llegar al otro extremo. Mide el tiempo empleado en ir de un extremo a otro y determina su velocidad de propagación. ¿Dependerá la velocidad de propagación de la tensión de la tira elástica? Verifica tu respuesta.





## 2. Ondas que se propagan en la superficie del agua.

a) Vierte agua en una charola hasta unos pocos milímetros del fondo. Genera ondas de frente circular en la superficie del agua tocándola con la punta de un dedo. También ensaya la producción de ondas de frente recto dando pequeños pero bruscos giros a un cilindro de madera apoyado en el fondo de la bandeja. b) Coloca un pequeño pedazo de poliestireno expandido (frigoalit) en el agua y provoca ondas sobre su superficie.



¿Se desplaza el pedazo de poliestireno en la dirección en que se propagan las ondas?  
c) Genera un pulso de frente recto de modo que la dirección de su propagación forme cierto ángulo con uno de los lados de la bandeja y observa el fenómeno de la reflexión.



## 3. Velocidad de las ondas que se propagan en la superficie del agua.

Genera un pulso de frente recto como en la actividad anterior y luego de medir el intervalo de tiempo que demora en recorrer cierta distancia, determina su velocidad de propagación. Para aumentar el intervalo de tiempo medido, puedes dejar que se refleje en el borde de la bandeja y considerar el viaje de ida y vuelta. Realiza varias mediciones y halla un promedio de los valores obtenidos. A continuación añade agua a la bandeja de modo que su nivel sobre el fondo sea bastante mayor y repite las mediciones. ¿En qué caso es mayor la velocidad de las ondas, en agua más profunda o menos profunda?







**4. Estimación de la velocidad del sonido en el aire.** Localiza una pared alta y ancha (por ejemplo de frontón). Ve hasta el lugar con un amigo y mediante una cinta métrica midan la distancia desde la pared hasta un punto lo más alejado posible de ella. Párete en el punto y dando palmadas periódicamente, intenta sincronizar el sonido de las palmadas con el eco originado en la pared. Cuando consigas esto, tu amigo debe medir el intervalo de tiempo que transcurre entre varias palmadas. A partir de los datos obtenidos calcula la velocidad del sonido en el aire.



**5. "Teléfono" simple.** Realiza un pequeño orificio en el fondo de dos vasos de frigorif. Pasa un hilo de varios metros de longitud a través de los orificios y haz nudos en sus extremos. Mientras tú y un amigo sostienen los vasos de tal modo que el hilo quede tenso, habla en voz baja en el interior de tu vaso y comprueba si tu amigo escucha a través del otro vaso.





**6. Efecto Doppler.** Ve con alguna persona que tenga un carro a alguna carretera o área de estacionamiento donde puedan sonar el claxon. Párate fuera del carro y pide a la persona que suene el claxon del carro mientras pasa frente a ti. Ensayen con diferentes velocidades. ¿Qué pasa con la frecuencia del sonido que percibes? ¿Cómo se explica esto?



### 5.1.2. Naturaleza y propagación de la luz

**7. Espectro de colores de la luz solar.** Vierte agua en una bandeja hasta unos diez centímetros de su fondo y sitúa un espejito recostado a su pared, como se muestra en la fotografía. Haz que la luz solar incida sobre el espejito y se refleje en él. Manipula el espejito hasta proyectar el espectro de colores de la luz solar en una pared o en un pedazo de cartulina blanca. ¿Cómo se explica la aparición de diversos colores a partir de la luz solar?

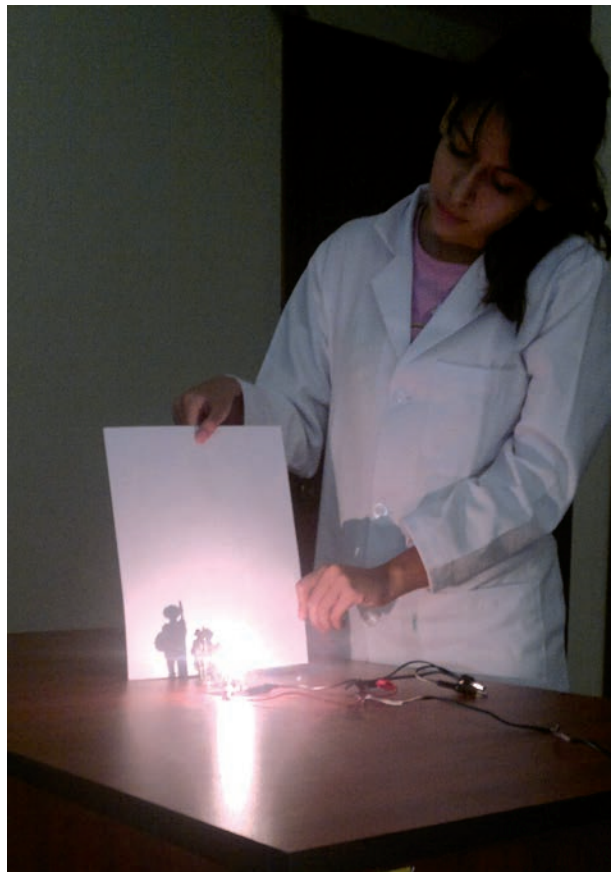




**8. Propagación rectilínea de la luz.** Sitúa varios alfileres en posición vertical, de modo que estén en una línea recta. Si cierras un ojo y colocas el otro en línea con los alfileres, el primero de los alfileres impide ver el resto. ¿Por qué esto apoya la idea de que en los medios homogéneos la luz se propaga en línea recta?

**9. Formación de sombras.** Utiliza como fuente luminosa un bombillo de filamento incandescente, de vidrio transparente. Sitúa un cuerpo opaco entre la fuente luminosa y una hoja de papel. a) ¿Qué sucedería con la forma de la sombra del cuerpo si la luz no se propagase en línea recta? b) Ensayar cómo varía el tamaño de la sombra en dependencia de las distancias entre la fuente, el cuerpo y la

pantalla. c) Explica los resultados obtenidos con ayuda de un esquema.





**10. Simulación de eclipses.** Simula un eclipse de Luna y otro de Sol utilizando un bombillo para representar al Sol y dos cuerpos esféricos, uno mayor que otro, para representar a la Tierra y a la Luna (por ejemplo una esfera de frigolit y una pequeña bola de plastilina). Ilumina el cuerpo esférico mayor mediante el bombillo y mueve el pequeño alrededor de él en una circunferencia.



**11. Estimación del diámetro de la Luna.** Una mañana en que la Luna se vea prácticamente completa, toma una regla y con el brazo bien extendido mide su diámetro aparente y la distancia de la regla a tus ojos. Representa en un esquema a la Luna y a los rayos que procedentes de ella pasan por los extremos del diámetro aparente medido y llegan al ojo. Utiliza dicho esquema y los resultados de las mediciones realizadas, para estimar el diámetro de la Luna conociendo que está a unos 380 000 km de nosotros.



**12. Cámara oscura.** Una variante consiste en utilizar un cilindro de cartón (de algún envase, o construido por ti) de alrededor de 10 cm de largo. Cubre uno de sus extremos con un pedazo de material traslúcido (sirve un pedazo recortado de algunas bolsas utilizadas en las tiendas, el cual fijas al cilindro por medio de una liga). El otro extremo del cilindro lo tapas con un pedazo de cartón en cuyo centro realizas un orificio de 2-3 mm de diámetro mediante un alfiler. Si diriges la parte del orificio hacia una ventana u objeto bien iluminado, podrás ver su imagen en el material traslúcido. Describe las características de la imagen y explica su formación por medio de un esquema y el trazado de rayos.



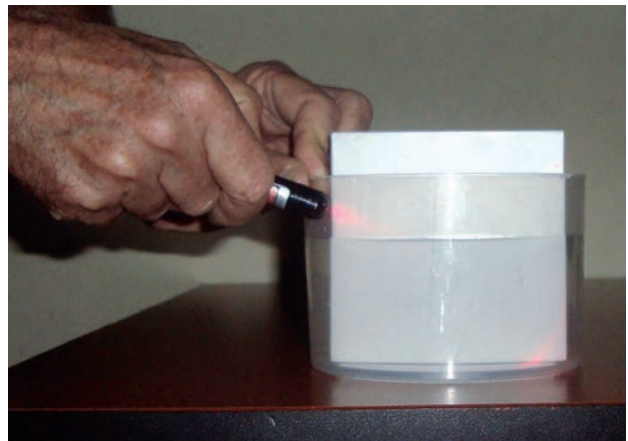
Describe las características de la imagen y explica su formación por medio de un esquema y el trazado de rayos. ¿Por qué al aumentar el tamaño del orificio, la imagen es más brillante pero menos nítida, desenfocada?

**13. Aumento producido gracias a un pequeño orificio.** Acerca los ojos a la pantalla de una computadora hasta ver las letras borrosas y luego, cerrando una mano en puño y haciendo con ella una especie de tubo con un pequeño orificio, mira nuevamente las letras. Otra variante consiste en preparar un pedazo de cartulina con pequeño orificio y mirar a través de él y desde muy cerca un texto de letra pequeña. ¿Cómo se explican el aumento de tamaño y de nitidez al mirar a través de pequeños orificios?

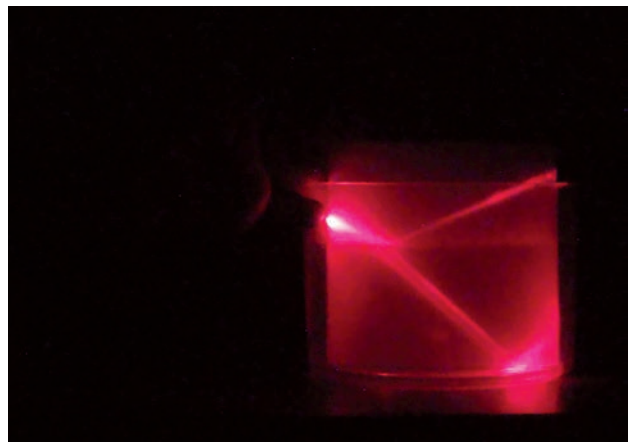




**14. Determinación del aumento producido por un pequeño orificio.** En un pedazo de papel blanco traza dos pequeñas líneas separadas 2 mm entre sí y en otro pedazo dos líneas separadas 2 cm. Mediante un ojo observarás las líneas de 2 mm a través de un pequeño orificio y mediante el otro ojo observarás las líneas de 2 cm directamente. Aproximando el papel con las líneas de 2 mm al orificio, logra que la imagen de las líneas obtenida con un ojo coincida con la obtenida por el otro. ¿Qué aumento se obtiene al observar a través del pequeño orificio? Traza un esquema de rayos que explique dicho aumento.



**15. Propagación no rectilínea de la luz.** Llena un vaso transparente con agua y coloca verticalmente dentro de él un rectángulo de plástico blanco. Haz incidir el haz de luz de un puntero láser en la superficie del agua de modo que sea rasante al rectángulo plástico y deje en él su "huella". ¿Qué sucede con la dirección de propagación de la luz al penetrar en el agua? *Atención: La luz láser no debe incidir directamente en los ojos, pues puede dañarlos.*





### 5.1.3. Óptica geométrica

**16 Reflexiones especular y difusa.** En una habitación oscura coloca un pequeño espejo sobre una hoja de papel, de modo que su superficie especular quede perpendicular a la hoja. Dirige el haz de luz de una linterna sobre el espejo, de forma que deje su “huella” en la hoja de papel. Ahora sustituye el espejo por una porción de hoja blanca y repite la operación. Señala diferencias entre la reflexión en un caso y en el otro. ¿Cómo se explican estas diferencias? Argumenta la importancia de las reflexiones difusa y especular en nuestras vidas.



**17. Visibilidad de los objetos que nos rodean.** En una habitación semioscura observa una hoja de papel blanco, otra de papel negro mate y una lámina de vidrio. Cuál se ve mejor y cuál peor. ¿Cómo se explica esto? ¿Qué características tiene la luz reflejada en cada uno de los tres cuerpos?

**18. Formación de imagen mediante un espejo plano.** Coloca un portaobjetos de microscopio sobre una hoja de papel blanco de modo que su superficie sea perpendicular a la hoja. A un lado del portaobjetos y cerca de él, traza una crucecita en el papel. Advierte la imagen de la crucecita del otro lado del portaobjetos. ¿Por qué pese a que el portaobjetos es transparente, actúa como un espejo? ¿Cómo son las distancias del objeto al espejo y de este a la imagen? ¿Cómo pudieras utilizar una instalación similar a esta para calcar un dibujo?



**19. Refracción de la luz.** a) Sitúate frente a un platillo en el cual se ha colocado una moneda. Baja la cabeza poco a poco hasta que la moneda deje de verse. Si ahora viertes agua en el platillo, la moneda se hará visible nuevamente. ¿Cómo se explica esto? b) Vierte agua en un vaso e introduce un lápiz parcialmente en ella. Mira el lápiz lateralmente y casi rasante a la superficie del agua. Explica lo observado.

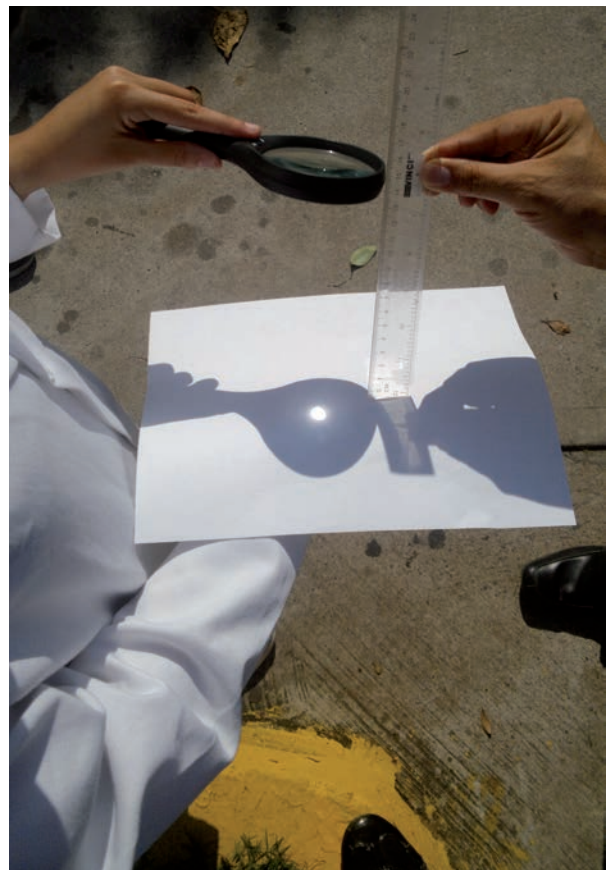






**20. Reflexión total interna.** Introduce un lápiz dentro de un tubo de ensayo y a su vez éste dentro de un vaso con agua. Mira hacia el lápiz a través del agua del vaso. ¿Puedes verlo? ¿Cómo se explica esto?

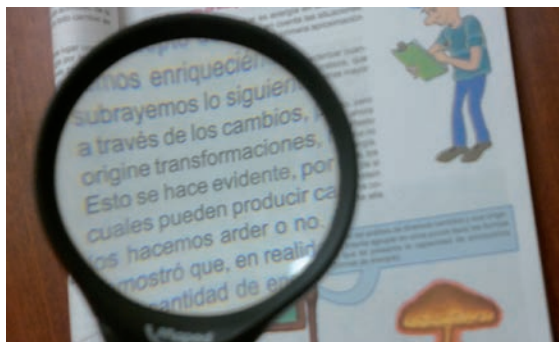
**21. Distancia focal de una lente convergente.** Consigue una lente convergente (pueden servir una lupa, o algunas lentes para corregir la visión) y ensaya la concentración de luz solar mediante ella. a) Determina la distancia focal de la lente. b) Calcula su poder convergente (en dioptrías) y compáralo con el nominal.



**22. Formación de imágenes mediante una lente convergente.** Toma una lente y obtén las imágenes de una lámpara, una ventana, algún objeto bien iluminado, etc. Como pantalla puedes utilizar una hoja de papel blanco o algún material traslúcido (sirve el material de algunas bolsas de las tiendas). Estudia lo que ocurre con la imagen al variar las distancias entre el objeto, la lente y la pantalla y trata de explicar los resultados mediante un esquema de la situación y el trazado de rayos característicos.



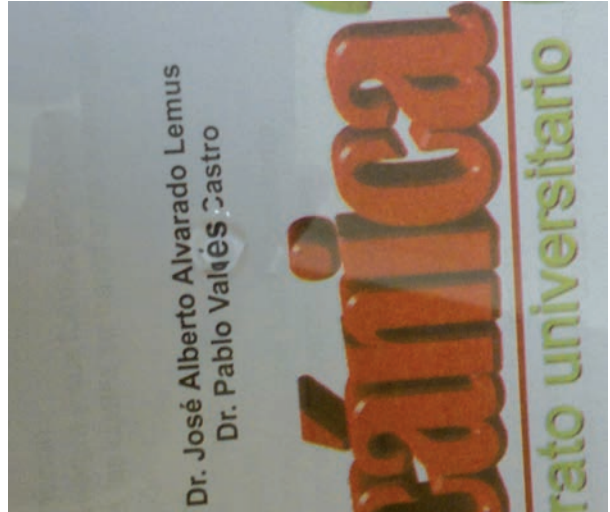
**23. Distancia mínima a que el ojo enfoca cómodamente.** Aproxima poco a poco este libro a la cara, hasta que las letras de su texto dejen de enfocarse bien. La distancia a que se encuentra el texto de los ojos se denomina “mínima distancia de visión distinta” y también “punto próximo”. ¿Cuál es tu mínima distancia de visión distinta?



**24. Aumento que se obtiene con una lupa.** Traza varias líneas paralelas en una hoja de papel blanco a 0.50 cm unas de otras y observa las líneas simultáneamente a través de la lupa y directamente. ¿Cuántas líneas vistas a través de la lupa se ubican en el espacio que ocupan, por ejemplo, 5 líneas vistas directamente? Calcula el aumento que obtienes con la lupa.



**25. Gota de agua como lupa.** Coloca una gota de agua sobre una lámina de vidrio. Observa algún pequeño objeto a través de ella y del vidrio.



**26. El telescopio refractor más simple.** El telescopio refractor más simple consta de una sola lente convergente. Consigue una lente de poder convergente 1 - 1.5 dioptrías. ¿Cuál es su distancia focal? Con el brazo extendido, dirige la lente hacia un objeto bien lejano y obsérvalo a través de ella. Para lograr un gran aumento con semejante “telescopio” éste tendría que ser muy largo ¿Por qué? ¿Cómo se resuelve esta dificultad en el telescopio de Kepler?

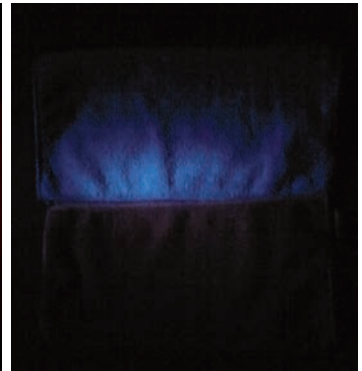


**27. Formación de imágenes en espejos cóncavo y convexo.** Observa tu cara reflejada en las partes interior y exterior de la cuchara grande y bien pulida. Compara las características de las imágenes formadas en ambos casos.

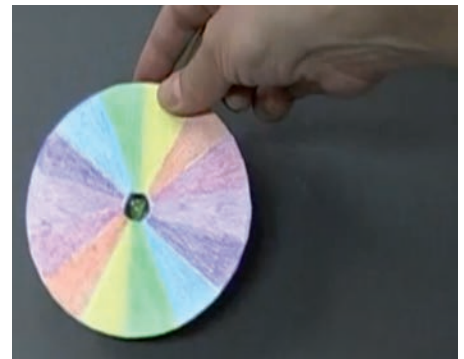


### 5.1.4. Óptica física

**28. Colores de los objetos que nos rodean.** En una habitación bien oscura coloca próximos entre sí un pedazo de tela roja y otro de tela azul. Luego de cubrir el vidrio de una linterna con celofán rojo, dirige la luz de ella hacia los pedazos de tela de modo que ilumine ambos. ¿Se ven los dos pedazos de tela claramente? Repite la experiencia pero esta vez cubriendo el vidrio de la linterna con el celofán azul. Cómo se explican los resultados obtenidos?



**29. Composición de colores: disco de Newton.** Sobre un CD en desuso pega un círculo de papel blanco de sus mismas dimensiones. Divide el círculo en 14 secciones iguales y colorea 7 secciones consecutivas con los colores del espectro: rojo, anaranjado, amarillo, verde, azul, añil y violeta y luego las 7 siguientes del mismo modo. Pega una canica en el orificio del CD. Apoya la canica sobre una superficie plana y haz girar disco lo más rápidamente que puedas. ¿Qué sucede con los diversos colores del disco? Da una explicación del fenómeno. El éxito de la experiencia depende del matiz de los colores utilizados y de la rapidez con que gira el disco. Idea otras formas de hacer girar el disco de Newton más rápidamente.

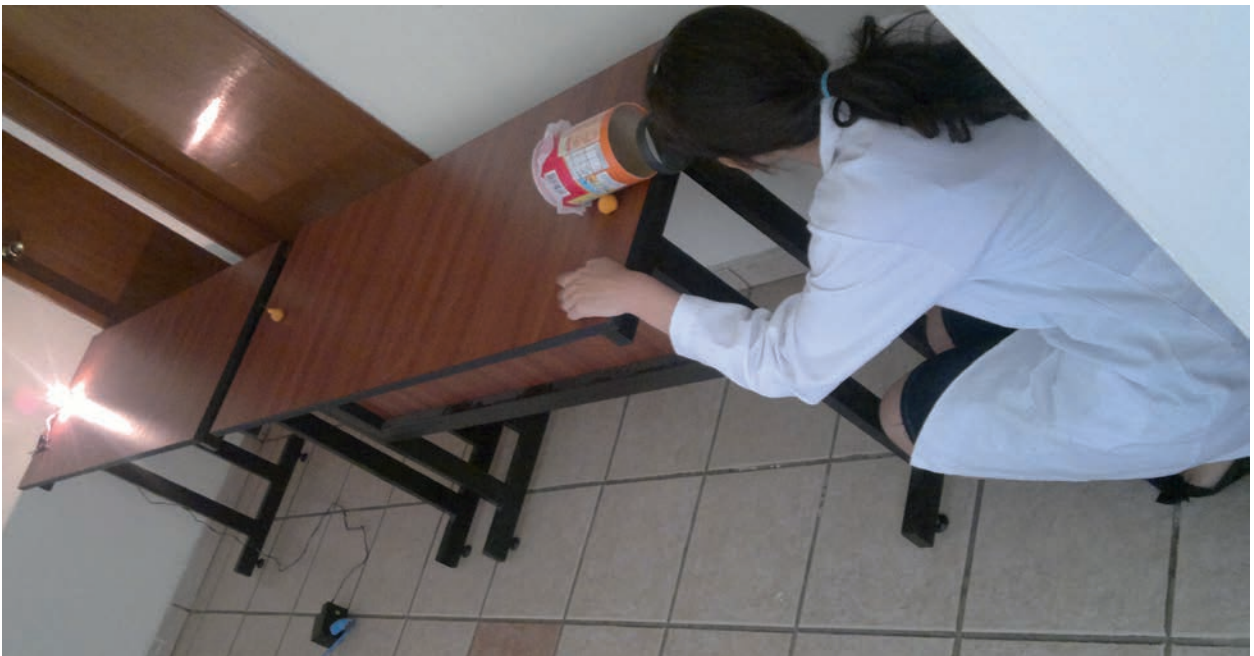




- 30. Difracción de la luz al pasar por una abertura.** Puedes ensayar varias variantes:
- Forma una V con los dedos índice y medio de una de tus manos y aproxímalos a un ojo. Mira una lámpara bien alejada y junta los dedos hasta dejar una rendija muy estrecha entre ellos. Describe lo que observas.
  - Coloca un trozo de papel de aluminio sobre una superficie plana y haz una rendija en él mediante una navaja. Aproximando el papel de aluminio a un ojo, mira hacia la lámpara alejada.
  - Busca dos navajas de las antiguas y junta sus filos de modo que formen una rendija. Mira a través de ella hacia la lámpara. Observa lo que sucede al variar el ancho de la rendija.



**31. Difracción de la luz al incidir sobre un obstáculo.** Consigue un bombillo de linterna de bulbo liso, así como pilas y cables para encenderlo. A modo de obstáculo puedes emplear un alfiler de cabeza grande. En una habitación oscura sitúa el alfiler verticalmente a unos 2 m del bombillo. Como pantalla para obtener la sombra del alfiler puedes utilizar un pedazo de material traslúcido (sirve el material de algunas bolsas de las tiendas). Mientras más alejada esté la pantalla del alfiler, mayor será su sombra, pero en cambio disminuirá el contraste entre luz y sombra. Por eso colocarás el material traslúcido a más de un metro del alfiler y observarás la sombra mediante una lupa. Nota que en lugar de una sombra bien definida se forman una serie de líneas brillantes y oscuras.



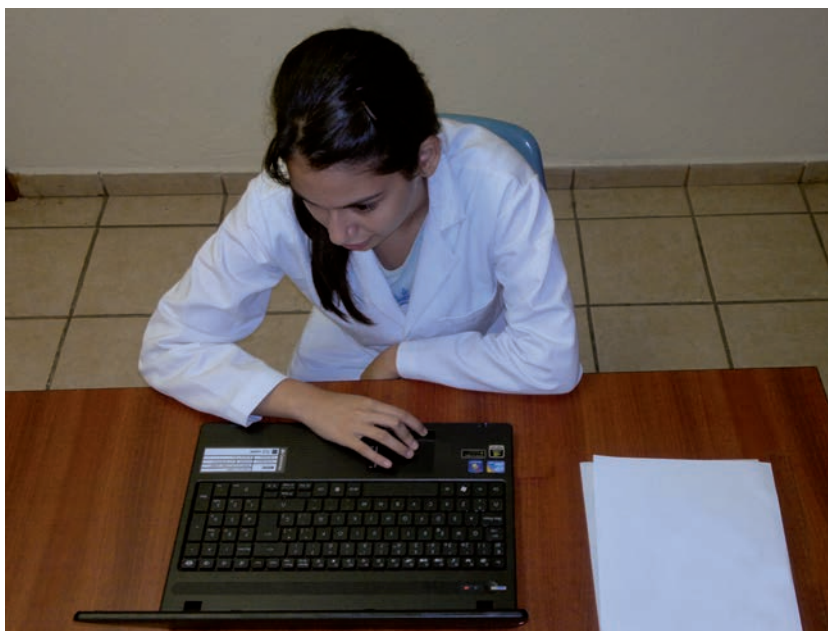


## 5.2. Prácticas de laboratorio

Las prácticas de laboratorio se caracterizan por la manipulación de diferentes materiales y la realización de mediciones, pero no se reducen a ello. Un aspecto importante es la preparación previa de los estudiantes para el trabajo en el laboratorio. Durante esa preparación deben comprender la problemática que abordarán y el objetivo de la práctica, saber deducir las ecuaciones que utilizarán, así como conocer el contenido del trabajo que van a realizar. No menos importante que lo anterior es la labor posterior a la sesión de trabajo en el laboratorio: la realización de cálculos, el análisis de la incertidumbre de los resultados, las respuestas a las preguntas formuladas y, por supuesto, la elaboración del informe o reporte de la práctica.

El **informe de cada práctica** debe estar formado por tres partes fundamentales: una, donde se exponen la problemática abordada en la práctica y su objetivo; otra, donde se realiza el esquema de la situación estudiada, se reportan los resultados de las mediciones realizadas, se analiza el origen de la posible incertidumbre de ellos y se responden las preguntas formuladas; la última parte consiste en unas breves conclusiones donde se hace una valoración de los resultados obtenidos y del procedimiento empleado y se proponen variantes para mejorar el trabajo.

Para la mayoría de las prácticas que se incluyen a continuación se requerirá oscurecer el laboratorio lo más que se pueda. Ello facilitará la realización de las observaciones y mediciones.



### 5.2.1. Magnitudes básicas que caracterizan a las ondas periódicas

**Introducción.** En dependencia de la situación de que se trate, la luz puede manifestar un comportamiento ondulatorio o corpuscular. De ahí que el estudio de las características de las ondas tenga particular interés para la Óptica. Desde el punto de vista de la luz como onda, ella ocupa una pequeña región del espectro de ondas electromagnéticas. Se distingue de otras ondas electromagnéticas, como las “térmicas”, las utilizadas en las telecomunicaciones o los rayos X y gamma, solo por su frecuencia.

En esta práctica y en la siguiente te familiarizarás con características básicas de las ondas. Entre las magnitudes que permiten diferenciar unas de otras están, el período, la frecuencia, la longitud de onda y la velocidad de propagación.

El **objetivo** de esta práctica es que te familiarices con magnitudes que caracterizan a las ondas, utilizando como ejemplo ondas que se propagan en la superficie del agua.



**Materiales e instrumentos:** cubeta de ondas; generador de ondas periódicas de frente recto; fuente de corriente para alimentar el motorcito del generador y potenciómetro para regular su frecuencia; lámpara de filamento para iluminar la cubeta desde arriba; estroboscopio de mano; cilindro de madera para generar pulsos de frente recto; cartulina blanca que hace las veces de pantalla; cronómetro (pueden utilizarse los de celulares o de relojes pulsera); cinta métrica o regla graduada; cámara fotográfica (puede utilizarse la de celulares)

1. Estudia el apartado 1.2 del libro de texto.
2. Pulsos que se propagan en la superficie del agua.

Vierte agua en la cubeta hasta alrededor de 0.5 cm de su fondo y luego nivélala para que tenga la misma profundidad en todas sus partes. Coloca la cartulina debajo de la cubeta e ilumina desde arriba la superficie del agua con la lámpara. Toca el agua con la punta de un dedo y observa en la cartulina la imagen de los pulsos que se propagan.











¿Qué forma tienen y cuál es su dirección de propagación?

Apoya el cilindro de madera en el fondo de la cubeta e imprímele un brusco pero pequeño giro. ¿Qué forma tienen los pulsos y cuál es la dirección de propagación?



Las franjas claras que se observan en la cartulina se deben a las ondulaciones de la superficie del agua. Las crestas contribuyen a concentrar la luz que las atraviesan y los valles a separarla. Luego de estudiar los capítulos 2 y 3 comprenderás por qué.

3. Período, frecuencia, longitud de onda y velocidad de propagación de las ondas.

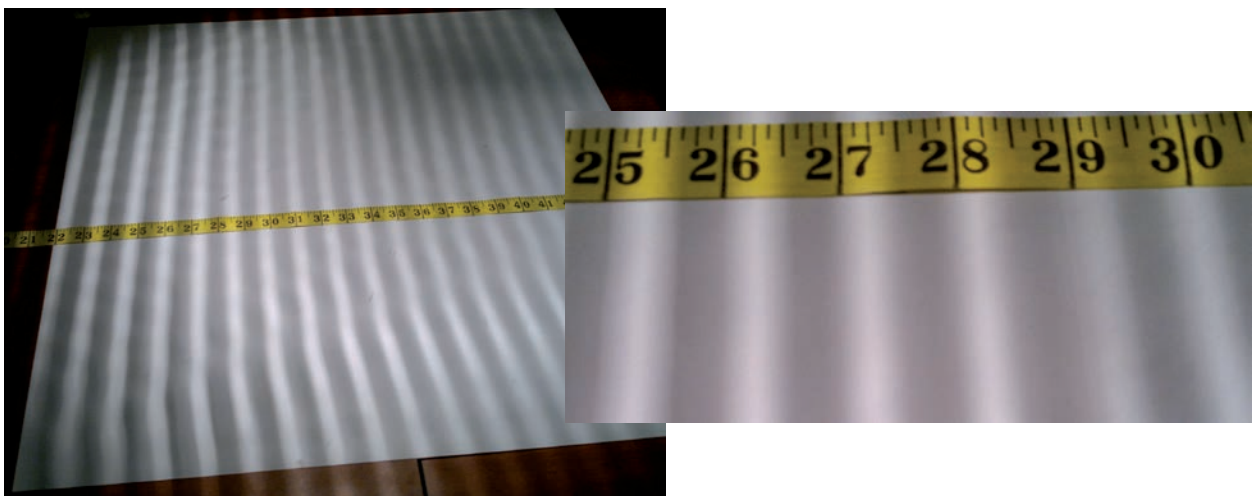
Dispón el generador de ondas en la cubeta. Ajusta el potenciómetro para que la frecuencia sea baja. Prepara el estroboscopio de mano con 2-4 rendijas, hazlo girar y a través de él observa en la cartulina la imagen de las ondas que se propagan. Ajusta la frecuencia de rotación que le imprimes al estroboscopio hasta que las ondas parezcan “detenidas”. Mientras tanto, otro estudiante mide el tiempo que demora el estroboscopio en dar, digamos, 10 vueltas.



¿Cuál es el período de las ondas? Repite la operación 5 veces y halla un promedio. Anota el resultado y su incertidumbre.

¿Cuál es la frecuencia de las ondas?

Para medir la longitud de onda colocas dos lápices sobre la cartulina, paralelamente al frente de onda y a cierta distancia uno de otro y mides dicha distancia. Mirando a través del estroboscopio y haciéndolo girar de modo que las franjas parezcan “detenidas”, puedes determinar cuántas franjas brillantes se ubican entre los lápices. A partir de los resultados obtenidos, calcula la distancia entre franjas brillantes. Otra variante más simple consiste en tomar una fotografía de las franjas y la cinta métrica en la cartulina, determinar en la foto la distancia entre varias franjas y a partir de ahí calcular la separación entre ellas.



Utilizando los resultados obtenidos para la distancia entre franjas y el período, calcula la velocidad de propagación de las ondas. Para determinar la incertidumbre emplea la fórmula:

$$\frac{u(v)}{v} = \sqrt{\left(\frac{u(d)}{d}\right)^2 + \left(\frac{u(t)}{t}\right)^2}$$

Presta atención a que la separación entre franjas en la cartulina no coincide con la longitud de onda, pues ella está aumentada respecto a la distancia entre las ondulaciones en el agua. ¿Cómo determinar ese aumento? ¿Cuál es la longitud de onda?

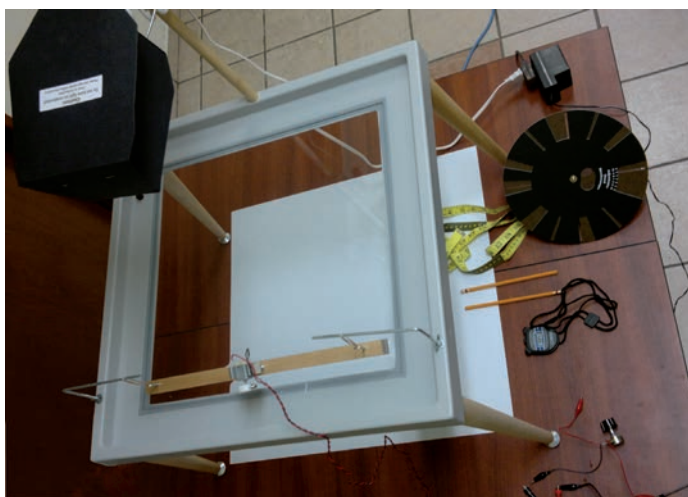


### 5.2.2. Fenómenos que caracterizan a las ondas

**Introducción.** En esta práctica continuarás el estudio de las ondas iniciado en la práctica anterior. Entre los fenómenos que las caracterizan están la absorción, reflexión, refracción, difracción e interferencia. Estos dos últimos constituyen el sello distintivo de las ondas.

El **objetivo** de la práctica es que te familiarices con los fenómenos que caracterizan a las ondas, utilizando como ejemplo ondas que se propagan en la superficie del agua.

**Materiales e instrumentos:** cubeta de ondas; cilindro de madera; generador de ondas periódicas de frente recto y de frente circular; fuente de corriente para alimentar el motorcito del generador de ondas y potenciómetro para regular su frecuencia; lámpara de filamento para iluminar la cubeta desde arriba; lámina de vidrio rectangular; barras de parafina; cartulina blanca que hace las veces de pantalla.



1. Estudia el apartado 1.3 del libro de texto.
2. Disminución de la amplitud de una onda al propagarse.

Vierte agua en la cubeta hasta alrededor de 0.5 cm de su fondo y luego nivélala para que tenga la misma profundidad en todas sus partes. Coloca la cartulina debajo de la cubeta e ilumina desde arriba la superficie del agua con la lámpara.

Apoya el cilindro de madera en el fondo de la cubeta y proporciónale un pequeño pero brusco giro. Observa cómo disminuye la amplitud del pulso al propagarse. ¿Cómo se explica esto? Ahora toca la superficie del agua con la yema de un dedo. ¿Cómo se explica la disminución de la amplitud del pulso al propagarse?

3. Reflexión de las ondas.

Genera un pulso de frente recto mediante el cilindro de madera y hazlo incidir con diferentes ángulos sobre una barrera o una de las paredes de la cubeta. Observa el fenómeno de la reflexión.

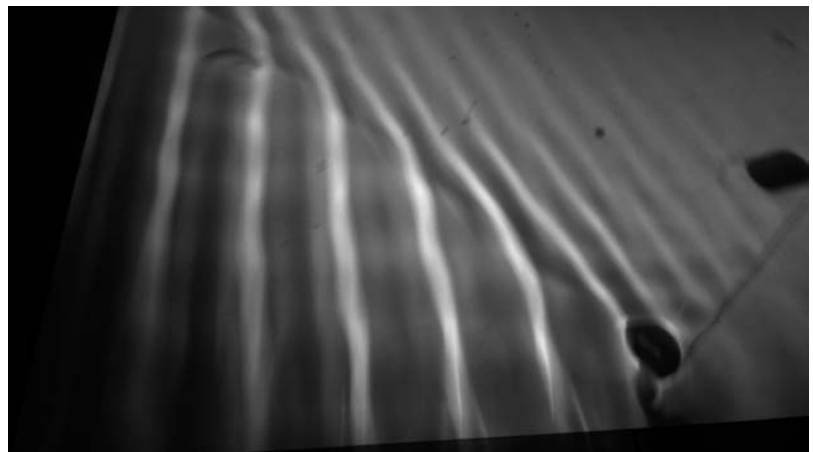
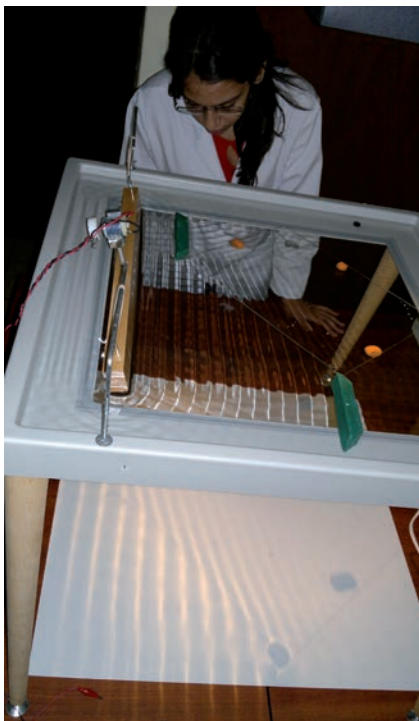


#### 4. Refracción de las ondas.

Dispón el generador de ondas de frente recto en la cubeta. Añade agua en la cubeta hasta que su superficie alcance alrededor de 1.5 cm del fondo. Coloca la lámina de vidrio rectangular en la cubeta sobre pequeños apoyos (pueden ser de plastilina), de modo que su superficie sobresalga del agua ligeramente y que uno de sus lados forme cierto ángulo con el generador de ondas. Añade agua hasta que la lámina de vidrio quede cubierta con una capa de unos 2 mm. De este modo se tienen dos zonas de agua, una más profunda que otra, con propiedades que las diferencian. La onda pasará así de un “medio” a otro.

Pon en funcionamiento el generador y mediante el estroboscopio, observa la imagen de las ondas en la cartulina. ¿Qué sucede con la dirección de propagación de la onda al pasar de un medio a otro? ¿Cómo se explica? ¿Qué sucede con la longitud de onda y con la frecuencia al pasar de un medio a otro?

#### 5. Difracción de ondas.



Coloca dos barreras de parafina delante del generador de ondas de frente recto, de modo que dejen una abertura entre ellas. Pon en funcionamiento el generador y observa el paso de la onda a través de la abertura. ¿Sigue siendo recto el frente de ondas después de atravesar la abertura? ¿Cuál es la dirección de propagación de las ondas antes y después de pasar por la abertura?

ondas antes y después de pasar por la abertura?

A continuación modifica la frecuencia de las ondas. ¿Cómo varía el diagrama que se observa en la cartulina?

Ahora, con una frecuencia fija, aumenta y disminuye el tamaño de la abertura. ¿Cómo varía el diagrama en la cartulina?



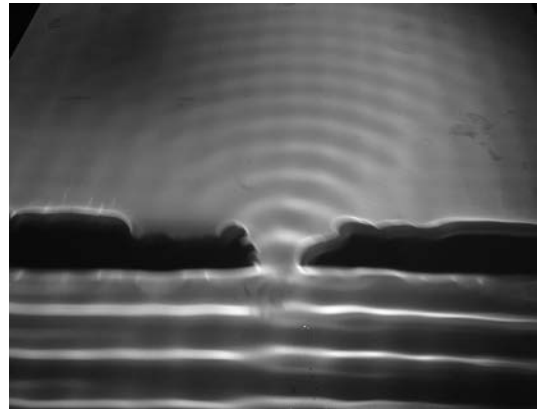
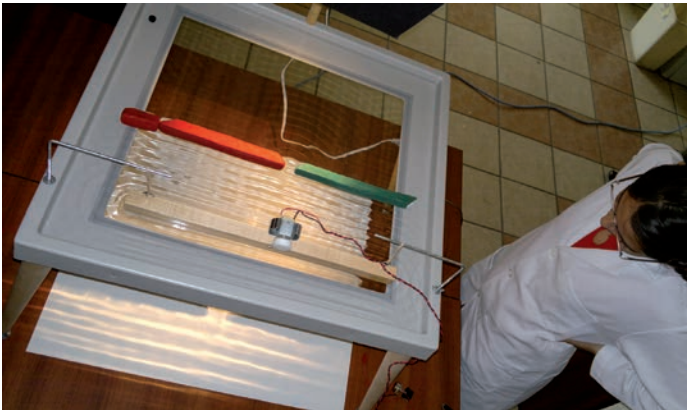












Resume los resultados de las observaciones realizadas.

Sitúa una pequeña barrera de parafina delante del generador de ondas de frente recto, haz funcionar el generador y observa el diagrama en la cartulina. ¿Queda definida la “sombra” del obstáculo en el extremo opuesto al generador? ¿Continúan las ondas su trayectoria rectilínea a cada lado del obstáculo?

Modifica la frecuencia de las ondas. ¿Cómo varía el diagrama en la cartulina?

Resume los resultados de las observaciones realizadas.

#### 6. Interferencia de dos ondas.

Fija al generador de ondas una de las esferitas para producir ondas circulares y ponlo en funcionamiento. Observa la propagación de ondas de frente circular.

Ahora fija la otra esferita al generador, hazlo funcionar y observa el diagrama que se forma. ¿Cuáles zonas son de interferencia constructiva y cuáles de interferencia destructiva? ¿Cómo varía el diagrama al modificar la frecuencia?

Modifica ahora la distancia entre las esferitas generadoras de ondas sin variar la frecuencia, ¿Qué sucede con el diagrama?

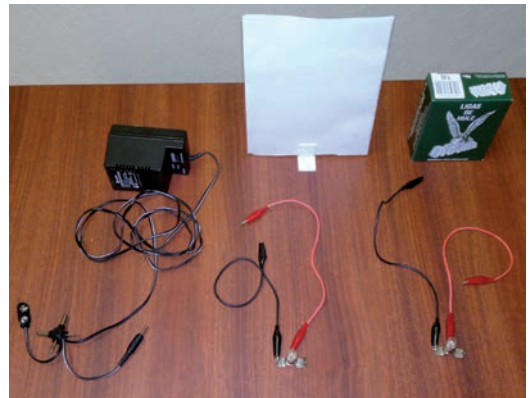


### 5.2.3. Propagación de la luz

**Introducción.** En los medios homogéneos la luz se propaga en línea recta y en los no homogéneos puede desviarse de la propagación rectilínea. El medio que nos rodea en su conjunto es no homogéneo, está repleto de objetos que poseen las más diversas propiedades, los cuales actúan sobre la luz desviándola de la propagación rectilínea. Sin embargo, determinadas regiones, consideradas por separado, son aproximadamente homogéneas. De ahí que una serie de fenómenos ópticos pueden ser explicados asumiendo que la luz se propaga en línea recta.

El **objetivo** de esta práctica es familiarizarse con fenómenos que evidencian la propagación rectilínea de la luz.

**Materiales e instrumentos:** dos bombillos tipo de linterna; fuente de corriente y cables de conexión para encender los bombillos; pequeña caja; diafragma con abertura en forma de letra *L* (la abertura se cubre con material traslúcido, para lo cual puede servir el material de algunas bolsas de las empleadas en las tiendas); lámpara para iluminar el diafragma con la letra *L*; diafragma con un orificio de 2-3 mm de diámetro; banco óptico; jinetillos para fijar los dispositivos al banco óptico; pantallas opaca y traslúcida; cinta métrica.



#### 1. Formación de sombra y de penumbra.

Coloca un bombillo sobre la mesa y a cierta distancia de él sitúa la pequeña caja. Enciende el bombillo y obtén la sombra de la caja en la pantalla. Describe cómo varía su tamaño al variar la posición de la caja y de la pantalla. Realiza un esquema de la situación y traza los rayos que permitan explicar lo observado.





Explica a partir del resultado anteriormente obtenido, por qué al colocar un objeto, por ejemplo este libro, debajo de una lámpara fluorescente, la sombra que se forma no tiene bordes definidos.

Ahora sitúa un segundo bombillo al lado del primero. Observa la sombra cuando enciendes cada bombillo por separado y luego cuando están los dos encendidos. Localiza en la pantalla las zonas de sombra y de penumbra. Realiza un esquema de la situación y traza los rayos que permitan explicar el fenómeno.



## 2. Formación de imágenes mediante un orificio.

Fija el diafragma con la abertura en forma de  $L$  a la lámpara y sitúa ésta en un extremo del banco óptico. A unos 10 cm del diafragma con la letra, sitúa el diafragma que tiene el pequeño orificio. Localiza la imagen de la letra  $L$  en la pantalla translúcida. ¿Cómo es la imagen, derecha o invertida, mayor o menor que la letra? Describe cómo cambia su tamaño al acercar o alejar el diafragma con el orificio al diafragma con la letra  $L$ .



Realiza un esquema de la situación y traza los rayos que permitan explicar lo observado. Señala en el esquema las longitudes  $H_o$  de la letra y  $H_i$  de su imagen en la pantalla, y las distancias  $d_o$  del orificio a la letra y  $d_i$  del orificio a su imagen.

Mide  $H_o$ ,  $H_i$ ,  $d_o$  y  $d_i$  y anota los resultados y la incertidumbre de ellos.

Calcula el aumento  $A = \frac{H_i}{H_o}$  y su incertidumbre. Para determinar la incertidumbre utiliza la fórmula:

$$\frac{u(A)}{A} = \sqrt{\left(\frac{u(H_i)}{H_i}\right)^2 + \left(\frac{u(H_o)}{H_o}\right)^2}$$

También calcula el cociente  $\frac{d_i}{d_o}$  y su incertidumbre.

Compara los resultados obtenidos para ambos cocientes.











### 5.2.4. Segunda ley de la refracción

**Introducción.** Desde antes de nuestra era ya era conocido que la luz puede desviarse al pasar de un medio a otro, e incluso se habían realizado mediciones de ángulos de incidencia y refracción. No obstante, fue solo en 1621 que Willebrord Snell, matemático holandés, encontró un modo de relacionar analíticamente dichos ángulos. Más tarde Descartes expresó esa relación en la forma que hoy la conocemos. Tal relación entre los ángulos de incidencia y de refracción cuando un haz de luz incide en la superficie de separación entre dos medios transparentes se denomina segunda ley de la refracción y también, en honor a Willebrord Snell, ley de Snell:

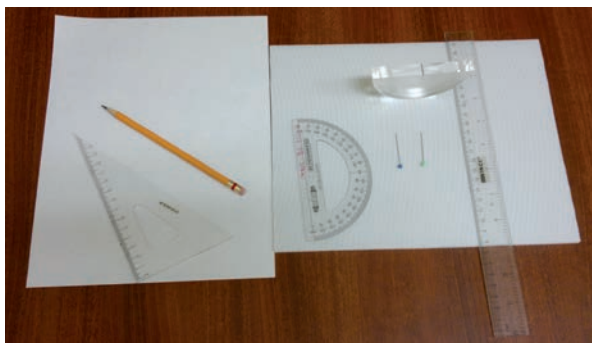
$$n_1 \operatorname{sen} i = n_2 \operatorname{sen} r$$

donde  $n_1$  y  $n_2$  son números, denominados índices de refracción, los cuales caracterizan desde el punto de vista óptico a los medios:  $n_1$  al medio desde el que incide la luz y  $n_2$  al medio que pasa la luz.

El índice de refracción del vacío se define como 1 y los índices de refracción de otros medios se miden con relación a él. El índice de refracción del aire es prácticamente 1.

El **objetivo fundamental de la práctica es verificar el cumplimiento de la segunda ley de la refracción y determinar el índice de refracción de cierto material.**

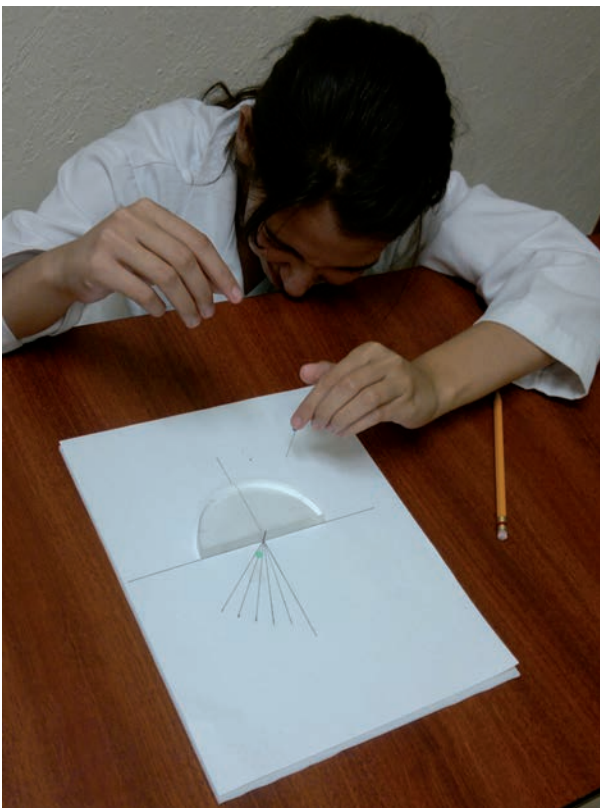
**Materiales e instrumentos:** cuerpo de plástico (o de vidrio) de forma semicircular, transportador, regla, dos alfileres, hoja de papel, pedazo de cartón.



1. Repasa el apartado 3.2.1 del libro.
2. En el centro del lado recto del cuerpo semicircular realiza con un marcador un fino trazo, perpendicular a las caras planas del cuerpo. Coloca el pedazo de cartón en la mesa y encima de él la hoja de papel. Utilizando la regla y el transportador, traza en la hoja dos líneas que se crucen y sean perpendiculares entre sí. A continuación

traza líneas que partan de la intersección de las dos primeras y formen ángulos de  $10^\circ$ ,  $20^\circ$ ,  $30^\circ$  y  $40^\circ$  con una de ellas. Sitúa el cuerpo semicircular sobre el papel de modo que su borde recto quede alineado con una de las líneas. Asegúrate que el trazo realizado en el cuerpo semicircular quede junto al punto de intersección de las líneas.

2. Clava un alfiler a 3-4 cm del borde recto del cuerpo semicircular, justamente frente al trazo realizado en él. ¿Cuál es el ángulo de incidencia de un rayo de luz que procedente del alfiler incide sobre el trazo? Clava el segundo alfiler cerca del borde semicircular del cuerpo, de modo que se vea alineado con la imagen de primero y el trazo realizado en el cuerpo. ¿Cuál es el ángulo de refracción correspondiente al rayo que procede del primer alfiler?

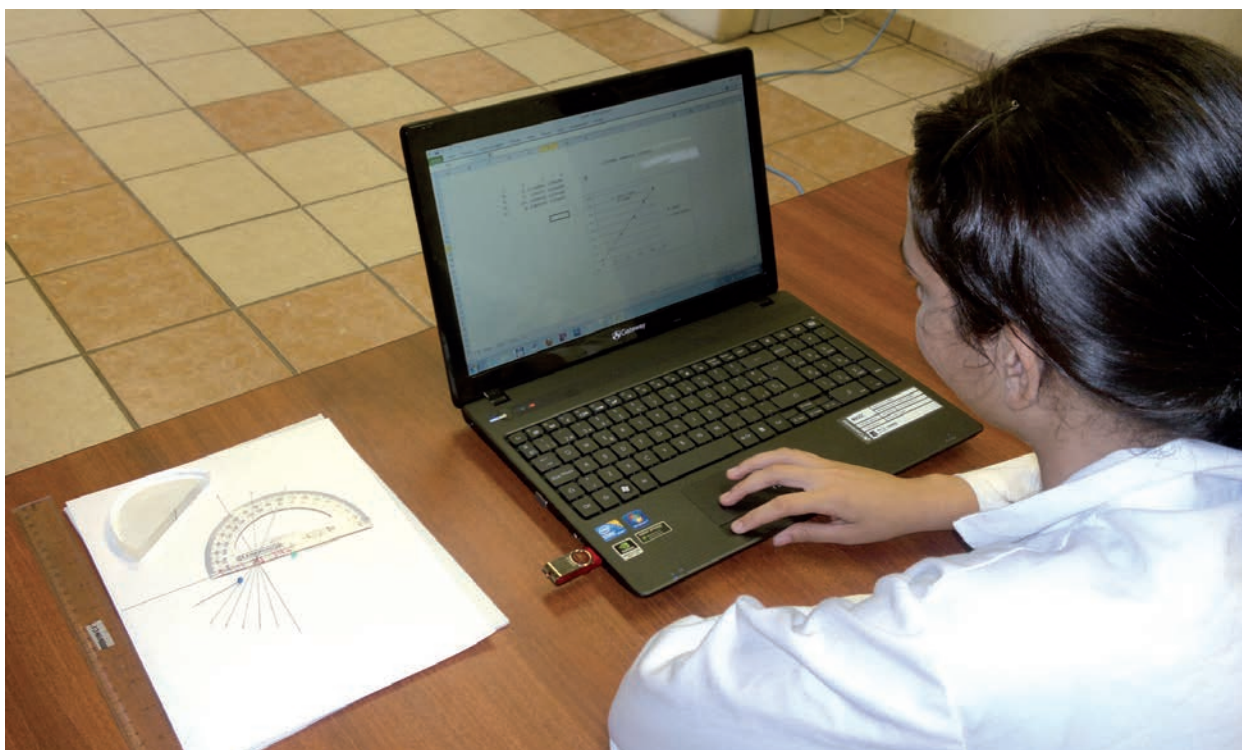


Ahora desplaza el primer alfiler para que el ángulo de incidencia del rayo que llega al trazo sea  $10^\circ$ . Nuevamente coloca el segundo alfiler de tal modo que se vea alineado con la imagen del primero y con el trazo. Realiza una marca en la posición del alfiler. Repite la operación para ángulos de incidencia de  $20^\circ$ ,  $30^\circ$  y  $40^\circ$ . Después traza líneas que pasen por las marcas realizadas y van hasta el punto de intersección de las otras.



3. Mide los ángulos de refracción correspondientes a cada ángulo de incidencia y construye una tabla de 6 columnas:  $i$ ,  $r$ ,  $\text{sen } i$ ,  $\text{sen } r$ ,  $i/r$  y  $\text{sen } i/\text{sen } r$ . ¿Qué conclusión puedes extraer de los datos de la tabla? Halla el valor medio de los valores obtenidos para el cociente  $\text{sen } i/\text{sen } r$ . ¿Cuál es el índice de refracción del material del cuerpo semicircular?

4. Utilizando una computadora, en un mismo sistema de ejes coordenados construye los gráficos de  $i$  vs.  $r$  y de  $\text{sen } i$  vs.  $\text{sen } r$ . Haz que el software coloque la ecuación correspondiente al gráfico  $\text{sen } i$  vs.  $\text{sen } r$  en la pantalla. ¿Qué forma tienen los gráficos? ¿Cuál es el índice de refracción que se obtiene a partir de este procedimiento? ¿Son coherentes estos resultados con los del punto 3?





### 5.2.5. Formación de imágenes mediante una lente convergente

**Introducción.** La formación de imágenes mediante lentes convergentes es parte esencial del funcionamiento del ojo humano y de útiles instrumentos ópticos como la cámara fotográfica, la lupa, el microscopio y el telescopio refractor, entre otros. Si el objeto está situado a una distancia de la lente mayor que su distancia focal, la imagen es real y si está a una distancia de ella menor que la distancia focal, la imagen es subjetiva, virtual.

Una característica importante de los instrumentos ópticos mencionados es el aumento o amplificación que se obtiene mediante ellos. En las imágenes reales dicho aumento se denomina **aumento lineal** y se calcula como el cociente entre el tamaño de la imagen  $H_i$  y el tamaño del objeto  $H_o$ , es decir:

$$A = \frac{H_i}{H_o}$$

Puede demostrarse (véase la figura 3.23 del libro de texto) que el aumento lineal también es igual al cociente entre la distancia  $d_i$  de la lente a la imagen y la distancia  $d_o$  de la lente al objeto, o sea:

$$A = \frac{d_i}{d_o}$$

Cuando la lente se utiliza como lupa, el objeto que se observa se sitúa entre la lente y el foco. En este caso la imagen no es real, sino subjetiva y el aumento está dado por la razón entre el tamaño de la imagen formada en la retina al mirar sin la lente a la distancia mínima a que el ojo puede enfocar cómodamente y su tamaño en la retina al mirarlo a través de la lente. Como el tamaño de la imagen en la retina está determinado por el ángulo bajo el cual se observa el objeto, este aumento se denomina **aumento angular**. Dicho aumento puede ser evaluado mirando simultáneamente al objeto sin lupa y con ella y comparando los tamaños de las imágenes que se forman en ambos casos.

El **objetivo** de esta práctica es estudiar la formación de imágenes mediante una lente convergente y determinar el aumento lineal de una imagen real obtenida con ella y el aumento angular al utilizarla como lupa.

**Materiales e instrumentos:** lente convergente (sirve una lupa); diafragma con una abertura en forma de letra  $L$  (la abertura se cubre con material traslúcido, para lo cual puede servir el material de algunas bolsas de las empleadas en las tiendas); lámpara para iluminar el diafragma con la letra  $L$ ; pantalla; cinta métrica; cinta adhesiva.





1. Repasa el apartado 3.4.1 del libro de texto, en particular lo relativo a la cámara fotográfica, el ojo humano y la lupa.
2. Ensayá la formación de imágenes reales mediante una lente convergente.

Fija el diafragma con la abertura en forma de  $L$  a la lámpara y sitúa ésta en un extremo de la mesa. A cierta distancia coloca la lente y localiza la imagen de la letra  $L$  en la pantalla. ¿Cómo es la imagen, derecha o invertida? Describe cómo cambian su posición y tamaño al acercar o alejar la lente a la letra  $L$ .

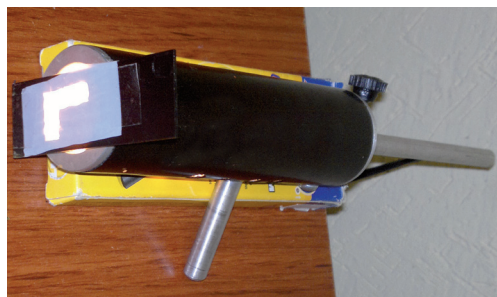


Realiza un esquema de la situación y traza los rayos característicos que permitan explicar lo observado.

3. Determina el aumento de una imagen real obtenida con la lente convergente.

Extiende la cinta a lo largo de la mesa, de modo que el cero de su escala quede junto a la letra  $L$ . Para que la cinta métrica no se mueva, puedes fijarla a la mesa utilizando trozos de cinta adhesiva. Sitúa la lente y la pantalla junto a la cinta métrica, a cierta distancia una de la otra y de la letra  $L$ . Obtén la mayor imagen que puedas de la letra, sin que la pantalla sobrepase el extremo de la cinta. Asegúrate que la imagen esté bien enfocada.

Mide la longitud  $H_o$  de la letra  $L$ , la longitud  $H_i$  de su imagen en la pantalla, la distancia  $d_o$  de la lente a la letra y la distancia  $d_i$  de la lente a la imagen y anota los resultados con sus incertidumbres. Presta atención a que en la incertidumbre al medir  $d_i$  interviene no solo el mero acto de medición, sino además el hecho de que no es posible establecer





con exactitud la posición de la pantalla para la cual se obtiene la imagen más nítida.

Calcula el aumento lineal  $A = H_i/H_o$  y escribe el resultado con su incertidumbre. Para determinar ésta utiliza la fórmula:

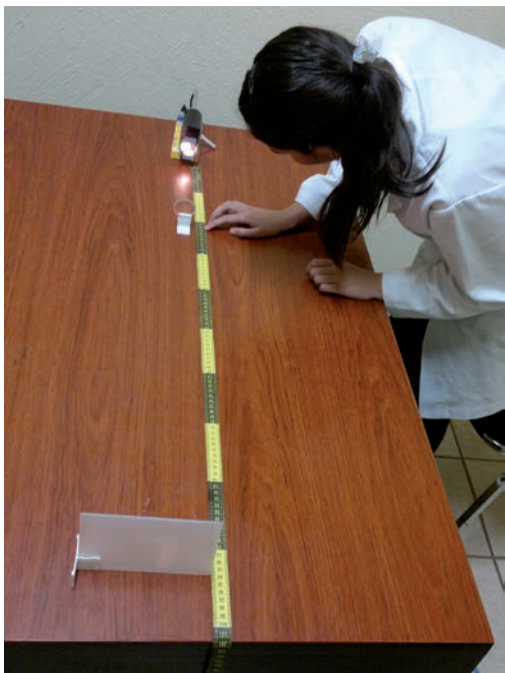
$$\frac{u(A)}{A} = \sqrt{\left(\frac{u(H_i)}{H_i}\right)^2 + \left(\frac{u(H_o)}{H_o}\right)^2}$$

También calcula el cociente  $d_i/d_o$  y su incertidumbre.

Compara los resultados obtenidos para ambos cocientes.

4. Analiza la formación de imágenes mediante una lente utilizada como lupa.

Observa las letras de este texto con la lente. Primeramente sostienes la lente muy cerca de las letras y después la alejas lentamente hasta que la imagen comience a perder nitidez. ¿La imagen que se forma de las letras es real o virtual? ¿Cuál es la posición de las letras relativa al foco de la lente? Observa las letras primero con el ojo cerca de la lupa y después lejos de ella. ¿Qué características diferencian a las imágenes en uno y otro caso?



5. Determina el aumento de la lente utilizada como lupa.

Traza varias líneas paralelas en una hoja de papel blanco, a 0.50 cm unas de otras. Simultáneamente observa las líneas a través de la lupa y directamente. ¿Cuántas líneas vistas a través de la lupa se ubican en el espacio que ocupan, por ejemplo, 4 líneas vistas directamente? Calcula el aumento que obtienes con la lupa.



### 5.2.6. Interferencia de ondas luminosas

**Introducción.** Se denomina interferencia a la combinación de dos o más ondas. Si las ondas que se combinan tienen la misma frecuencia y, además, ésta permanece constante, entonces se obtiene un patrón de interferencia estable: lugares en que el efecto de ambas ondas se cancela y lugares en que se refuerza. En la figura 4.5 del texto se muestra semejante patrón en el caso de dos ondas que se propagan en la superficie de agua e interfieren.

En el caso de la figura 4.5 es relativamente fácil controlar la frecuencia y garantizar que la de ambas ondas sea la misma y permanezca constante. Sin embargo, cuando se trata de la luz el asunto es más complejo, ya que no es posible un riguroso control de las emisiones luminosas que realizan los átomos. Sin embargo, en 1801 Thomas Young ideó un experimento muy ingenioso que permite superar esta dificultad y obtener así un patrón estable de interferencia de dos ondas luminosas. El esquema del experimento se muestra en la figura 4.8 del texto.

El **objetivo** fundamental de esta práctica es determinar la longitud de onda de luz roja y de luz azul utilizando una variante del experimento de Young.



**Materiales e instrumentos:** Lámpara de filamento recto; tubo de cartón con una abertura, para colocar dentro de él la lámpara; lámina de vidrio ennegrecida, con una rendija doble; un pedazo de celofán rojo y otro azul; liga; cinta métrica; regla; soporte con doble nuez y pinza para sujetar la regla; pie de rey con apreciación de 0.02 cm (o en su defecto tornillo micrométrico); 5-10 navajas de afeitar de las antiguas, de doble filo.

1. Repasa el apartado 4.2 del libro. Explica con tus palabras por qué para obtener un patrón estable de interferencia de dos ondas se requiere que: a) la frecuencia de ambas sea la misma y b) dicha frecuencia permanezca constante. Estudia los ejemplos resueltos 4.2 y 4.3.

2. Cubre la lámpara con el tubo de cartón y enciéndela. Sitúate a unos dos metros de ella, aproxima bien la doble rendija a uno de tus ojos y mira el filamento de la lámpara. ¿Qué observas?





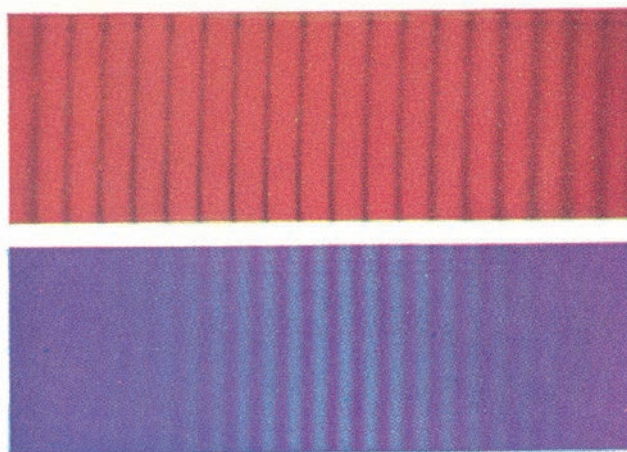
3. ¿Qué forma aproximada tiene la porción del frente de onda de la luz que llega a las rendijas? ¿Tendrán la misma frecuencia los haces luminosos luego de atravesar las rendijas? Argumenta. Compara la situación de este experimento con la del experimento de Young, cuyo esquema aparece en la figura 4.8.

4. ¿Dónde se forma el patrón de zonas brillantes y oscuras originado por la interferencia de los haces luminosos que atraviesan las rendijas? Traza un esquema de rayos que permita comprender cómo se forma la imagen del patrón de interferencia cuando miras hacia el filamento a través de las dos rendijas.

5. Ahora determinarás las longitudes de onda de luz roja y de luz azul. Utilizando la liga tapa la abertura del tubo de cartón con el celofán rojo. Para calcular la longitud de onda emplearás la misma fórmula que en el ejemplo 4.5:

$$\lambda = \frac{d}{L} \Delta x$$

donde  $d$  es la separación entre las rendijas, pero a diferencia del ejemplo 4.5, ahora  $L$  no es la distancia de las rendijas a la pantalla, sino de ellas a la lámpara, y  $\Delta x$  no es la separación entre franjas en un patrón de interferencias real, sino en la imagen virtual de dicho patrón. Explica por qué.



La distancia  $d$  entre las rendijas se determina en la actividad opcional descrita más adelante en el punto 8 de esta guía, o de lo contrario es proporcionada por el profesor. La distancia  $L$  entre la lámpara y las rendijas se mide mediante la cinta métrica. Para determinar la separación  $\Delta x$  entre las franjas de interferencia puedes proceder del siguiente modo.

Recorta dos pequeñas tiras de papel blanco, dóblalas por sus mitades y móntalas “a caballo” en el borde de la regla. La regla así preparada se fija encima de la lámpara con ayuda del soporte, de modo que las tiras queden iluminadas. Desplazando las tiras





de papel sobre el borde de la regla y alejándote o acercándote a la lámpara, se logra ubicar un número determinado de franjas entre las tiras de papel. Midiendo la distancia entre las tiras de papel se determina el valor de  $\Delta x$ .

A partir de los valores de  $d$ ,  $L$  y  $\Delta x$  calcula la longitud de onda de la luz roja. Escribe el resultado con su incertidumbre. Para calcular ésta utiliza la fórmula:

$$\frac{u(\lambda)}{\lambda} = \sqrt{\left(\frac{u(d)}{d}\right)^2 + \left(\frac{u(L)}{L}\right)^2 + \left(\frac{u(\Delta x)}{\Delta x}\right)^2}$$

Repite el procedimiento para luz azul.

6. Compara los resultados obtenidos con los que se reportan en los libros para la luz roja y la luz azul.

7. (Actividad opcional). Determina la separación de las rendijas. Las rendijas fueron confeccionadas raspando la lámina de vidrio ennegrecida mediante dos navajas que se sostienen apretadamente una al lado de la otra. Junta un número determinado de navajas similares a las utilizadas para confeccionar las rendijas y mediante el pie de rey (o un tornillo micrométrico) mide el espesor del conjunto. Calcula el espesor promedio de una navaja. ¿Cuál es, aproximadamente, la distancia entre las rendijas?



### 5.2.7. Difracción de ondas luminosas

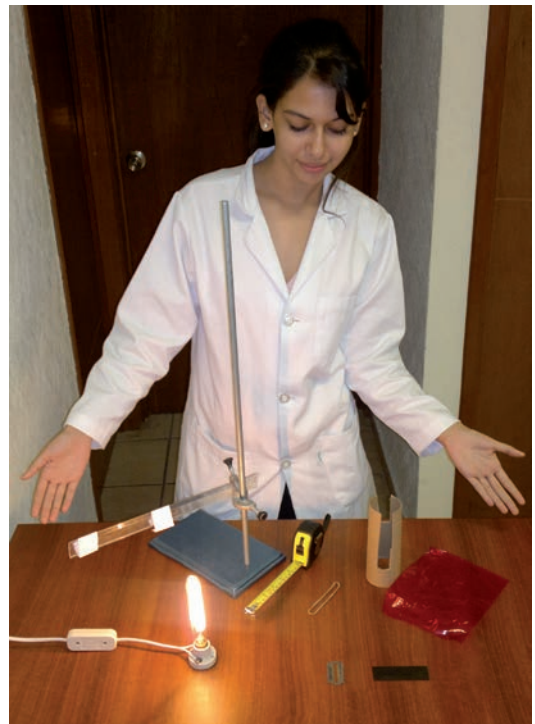
**Introducción.** Se denomina **difracción** a la desviación de las ondas al pasar por los bordes de una abertura o un obstáculo. La figura 1.9 muestra la difracción de ondas que se propagan en la superficie del agua cuando atraviesan una abertura. Inicialmente la dirección de propagación es perpendicular a la barrera interpuesta en el camino de las ondas, pero luego de atravesar la abertura la dirección cambia.

El fenómeno de la difracción está presente en nuestra vida diaria, aunque habitualmente no nos percatamos que se trata de él. Así, debido a la difracción del sonido, al hablar en el interior de una habitación con la puerta abierta, en el exterior se escucha no solo frente a la puerta, sino también en lugares a la izquierda y a la derecha de ella. Al formar una rendija entre dos dedos y mirar a través de ella una lámpara lejana, se observa una serie de franjas, lo cual también es debido a la difracción. Incluso el experimento de Young, realizado en la práctica anterior, sería imposible sin la difracción. El frente de onda que incide sobre las dos rendijas es prácticamente plano, pero debido a la difracción, los frentes que emergen de ellas son esféricos, lo que hace posible que se crucen y tenga lugar la interferencia (Fig. 4.9).

El **objetivo** fundamental de la práctica es analizar el fenómeno de la difracción en una rendija estrecha y, a partir de mediciones, determinar el ancho de la rendija.

**Materiales e instrumentos:** Lámpara de filamento recto; tubo de cartón con una abertura (para colocar dentro de él la lámpara); lámina de vidrio ennegrecida con una rendija; celofán rojo; liga; cinta métrica; regla; soporte con doble nuez para sujetar la regla.

1. Repasa el apartado 4.3 del libro y estudia el ejemplo 4.5.
2. Cubre la lámpara con el tubo de cartón y enciéndela. Sitúate a unos dos metros de ella, aproxima bien la rendija a uno de tus ojos y mira el filamento de la lámpara. ¿Qué observas? ¿Se trata de una imagen real o virtual? ¿Dónde se forma realmente el diagrama de difracción? Traza un esquema de rayos que permita comprender la formación de la imagen del diagrama de difracción.





3. Determina el ancho de la rendija. Rodea el tubo de cartón con el celofán rojo. Utilizarás la misma fórmula que en los ejemplos 4.4 y 4.5:

$$D \sin \theta = \lambda,$$

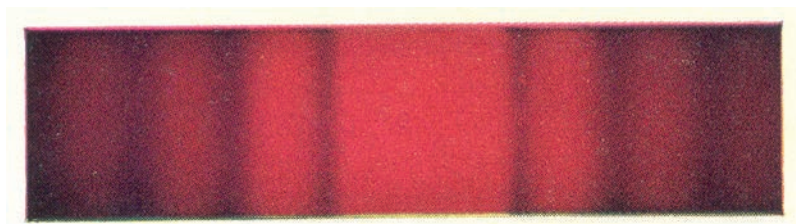
El esquema de la figura 4.19 esclarece el significado de las magnitudes involucradas en esta fórmula.  $D$  es el ancho de la rendija,  $\lambda$  la longitud de onda de la luz y  $\theta$  la separación angular, respecto a la línea central, de la primera franja oscura a la derecha o la izquierda de la franja central. Puesto que  $\theta$  es muy pequeño, es posible considerar  $\sin \theta \approx \tan \theta$  y escribir:

$$D \tan \theta = \lambda$$

Del esquema de la figura 4.19 se ve que  $\tan \theta = x/L$ . De ahí que  $Dx/L = \lambda$ , de donde finalmente:

$$D = \frac{L}{x} \lambda$$

Pero a diferencia de la situación de la figura 4.19, en nuestro caso  $L$  no es la distancia de las rendijas a la pantalla, sino de ellas a la lámpara y  $x$  no es la separación entre la línea central y las franjas oscuras en el patrón de difracción real, sino en su imagen virtual. Explica por qué.



La longitud de onda  $\lambda$  de la luz roja se determinó en la práctica de laboratorio anterior, la distancia  $L$  entre la lámpara y las rendijas se mide directamente mediante la cinta métrica. Para determinar la distancia  $x$  procedes de modo similar que en la práctica anterior.

Dobla dos tiras de papel por sus mitades y colócalas "a caballo" en el borde de la regla. Con ayuda del soporte, sitúa la regla así preparada encima de la lámpara. Desplazando las tiras de papel sobre el borde de la regla y alejándote o acercándote a la lámpara, ubica entre ellas a las franjas oscuras a la derecha y a la izquierda de la franja brillante



central. Midiendo la distancia entre las tiras se determina el valor de  $x$ .

A partir de los valores de  $\lambda$ ,  $L$  y  $x$  calcula el ancho  $D$  de la rendija.

Para calcular la incertidumbre del resultado obtenido utiliza la fórmula:

$$\frac{u(D)}{D} = \sqrt{\left(\frac{u(L)}{L}\right)^2 + \left(\frac{u(x)}{x}\right)^2 + \left(\frac{u(\lambda)}{\lambda}\right)^2}$$



## Bibliografía

- Alvarado, J.A., Valdés, P. y Caro, J.J. (2009). *Mecánica 1: Bachillerato Universitario*. México: Once Ríos.
- Alvarado, J.A., Valdés, P. y Varela, J.B. (2011). *Electromagnetismo: Bachillerato Universitario*. México: Once Ríos.
- Alvarenga, B. y Máximo, A. (1998). *Física General con experimentos sencillos*. México: Oxford.
- Giancoli, D. (2002). *Física: Principios con aplicaciones*. México: Prentice-Hall Hispanoamericana.
- Gutiérrez, C. (2002). *Física 1: Un enfoque didáctico*. México: McGraw-Hill.
- Haber-Schaim y otros (1975). *Física PSSC\**. España: Reverté.
- Hecht, E. y Zajac, A. (1986) *Óptica*. E.U.A: Addison-Wesley Iberoamericana.
- Hewitt, P. (1999). *Conceptos de Física*. México: Limusa.
- Hewitt, P. (2004). *Física conceptual*. México: Pearson.
- Holton, G. (1993). *Introducción a los conceptos y teorías de las ciencias físicas*. España: Reverté.
- Lea, S. y Burke, R. (1998). *Física: La naturaleza de las cosas Vol. I*. México: Thomson.
- Malacara, D. (1989). *Óptica básica*. México: Secretaría de Educación Pública y Fondo de Cultura Económica.
- Microsoft (2005). *Encarta 2006 Biblioteca Premium DVD*.
- Mosqueira, S. (1983). *Cosmografía y Astrofísica*. México: Patria.
- Pérez, H. (2002). *Física General*. México: Publicaciones Cultural.
- Resnick, R. y otros. (2002). *Física Vol. 2*. México: Continental.
- Slisko, J. (2003). *Física 2: El encanto de pensar*. México: Prentice Hall.
- Tipler, P. (1999). *Física para la ciencia y la tecnología*. Volumen 1. España: Editorial Reverté.
- Tippens, P. (1988). *Física: Conceptos y Aplicaciones*. México: McGraw Hill.
- Wilson, J. (1996). *Física*. México: Pearson.

## ÓPTICA

de *José Alberto Alvarado Lemus,*  
*Pablo Valdés Castro y José Bibiano Varela Nájera*

Esta obra se terminó de imprimir en el mes de enero de 2012 en los talleres gráficos de ***Servicios Editoriales Once Ríos, S.A. de C.V.***, Río Usumacinta 821, Col. Industrial Bravo, C.P. 80120, Culiacán, Sinaloa. Tel. (667) 712-2950.

Esta edición consta de 3,000 ejemplares.



# Materiales didácticos para desarrollar competencias

alineados a los planes  
y programas de estudio

Plan 2009 I



Las competencias integran el saber pensar,  
el saber decir, el saber hacer y el querer hacer.