

PARTE SEIS

Luz

Propiedades de la luz



Roy Unruh demuestra la conversión de la energía luminosa en energía eléctrica, con modelos de vehículos impulsados por energía solar.



La luz es lo único que vemos. El sonido es lo único que escuchamos.

¡EUREKA!

La luz es lo único que realmente podemos ver. Pero, ¿qué es la luz? Sabemos que durante el día, la fuente principal de luz es el Sol, y la fuente secundaria es la claridad del cielo. Hay otras fuentes muy frecuentes, como el fuego, los filamentos incandescentes de las bombillas eléctricas y el gas resplandeciente en los tubos fluorescentes. La luz se origina en el movimiento acelerado de los electrones. Es un fenómeno electromagnético, y es sólo una parte diminuta de un todo mucho mayor: una amplia gama de ondas electromagnéticas llamada *espectro electromagnético*. Comenzaremos a estudiar la luz investigando sus propiedades electromagnéticas. En el siguiente capítulo estudiaremos su apariencia: el color. En el capítulo 28 veremos cómo se comporta, es decir, cómo refleja y refracta. Después, en el capítulo 29, aprenderemos la naturaleza ondulatoria de la luz; y en los capítulos 30 y 31 examinaremos su naturaleza cuántica.

Ondas electromagnéticas

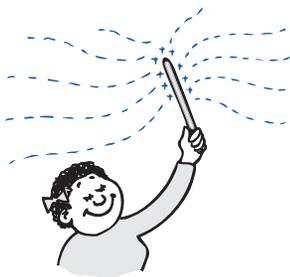


FIGURA 26.1

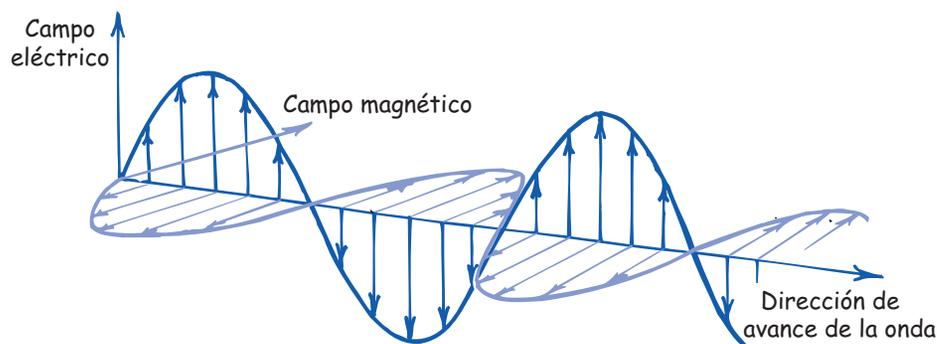
Agita un objeto cargado eléctricamente y producirás una onda electromagnética.

Agita el extremo de una vara dentro de agua en reposo, y producirás ondas en su superficie. Asimismo, si agitas una vara con carga a uno y otro lados dentro de un espacio vacío, producirás ondas electromagnéticas en el espacio. Esto se debe a que la carga en movimiento en realidad es una corriente eléctrica. ¿Qué rodea a una corriente eléctrica? La respuesta es un campo magnético. ¿Qué rodea a una corriente eléctrica que cambia? La respuesta es un campo magnético que cambia. Recuerda que, en el capítulo anterior, un campo magnético que cambia genera un campo eléctrico; es la inducción electromagnética. Si el campo magnético oscila, el campo eléctrico que genera también oscila. ¿Y qué hace un campo eléctrico que oscila? Según la contraparte de Maxwell a la ley de Faraday de la inducción electromagnética, induce un campo magnético que oscila. Los campos eléctrico y magnético que vibran se regeneran entre sí y forman una **onda electromagnética**, que emana (se aleja) de la carga vibratoria. Sucede que sólo tiene una rapidez, con la cual los campos eléctrico y magnético conservan un equilibrio perfecto, reforzándose entre sí mientras llevan energía por el espacio. Veamos por qué sucede así.

FIGURA 26.2

Figura interactiva

Los campos eléctrico y magnético de una onda electromagnética son perpendiculares entre sí y a la dirección del movimiento de la onda. (Véase la sección a color al final del libro.)



Velocidad de una onda electromagnética

Cuando una nave espacial viaja puede aumentar o reducir su rapidez, aun cuando los motores estén apagados, porque la gravedad la puede acelerar hacia adelante o hacia atrás. Pero una onda electromagnética que viaja por el espacio nunca cambia su rapidez. No es que la gravedad no actúe sobre la luz; de hecho sí actúa. La gravedad puede cambiar la frecuencia de la luz, o desviarla; pero no puede cambiar su rapidez. ¿Qué es lo que mantiene a la luz moviéndose siempre con la misma rapidez invariable en el espacio vacío? La respuesta tiene que ver con la inducción electromagnética y la conservación de la energía.

Si la luz fuera más despacio cada vez, su campo eléctrico cambiante generaría un campo magnético más débil, que a la vez generaría un campo eléctrico más débil, y así sucesivamente, hasta que la onda se extinguiera. No se transferiría energía de un lugar a otro. En consecuencia, la luz no se puede desacelerar.

Si la luz incrementara su rapidez, el campo eléctrico cambiante generaría un campo magnético más intenso que, a la vez, generaría un campo eléctrico más fuerte, y así sucesivamente, alcanzando una intensidad de campo cada vez mayor y también una energía cada vez mayor: es una clara imposibilidad con respecto a la conservación de la energía. Sólo hay una rapidez en la que la inducción mutua continúa en forma indefinida, con la que no se pierde ni se gana energía. A partir de sus ecuaciones de la inducción electromagnética, James Clerk Maxwell calculó que el valor de esta rapidez crítica es 300,000 kilómetros por segundo. En sus cálculos sólo usó las constantes de su ecuación, que se determinaban con experimentos sencillos de laboratorio usando campos eléctricos y magnéticos. No usó la rapidez de la luz. ¡Encontró la rapidez de la luz!

Maxwell inmediatamente se dio cuenta de que había descubierto la solución de uno de los grandes misterios del Universo: la naturaleza de la luz. Descubrió que la luz visible tan sólo es radiación electromagnética dentro de determinado intervalo de frecuencias: de 4.3×10^{14} a 7×10^{14} vibraciones por segundo. Esas ondas activan las “antenas eléctricas” en la retina. Las ondas de menor frecuencia se ven rojas; y las de alta frecuencia, violetas.¹ Al mismo tiempo, Maxwell se dio cuenta de que la radiación electromagnética de *cualquier* frecuencia se propaga con la misma rapidez que la de la luz visible.



James Clerk Maxwell
(1831-1879)

¹ Se acostumbra a describir el sonido y la radio por la *frecuencia*, y a la luz por la *longitud de onda*. Sin embargo, en este libro conservaremos el único concepto de frecuencia para describir la luz.



La luz es energía transportada por una onda electromagnética que emiten electrones en vibración.

¡EUREKA!



En el espacio vacío, hay luz, pero no sonido. En el aire, la luz viaja un millón de veces más rápido que el sonido.

¡EUREKA!

EXAMÍNATE

¿La rapidez invariable de las ondas electromagnéticas en el vacío es una consecuencia notable de algún principio básico de la física?

El espectro electromagnético

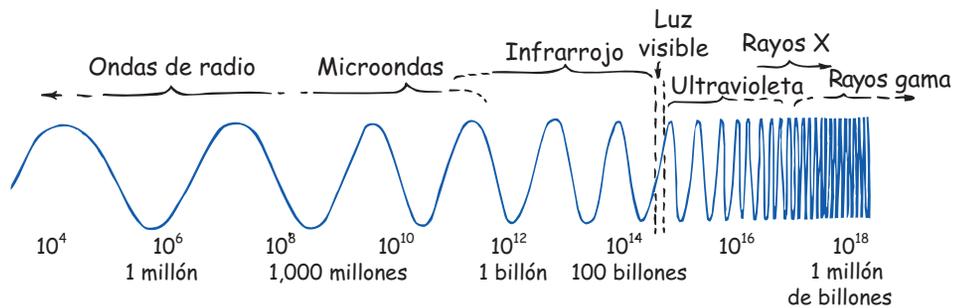
En el vacío, las ondas electromagnéticas se mueven a la misma rapidez, y difieren entre sí por la frecuencia. La clasificación de las ondas electromagnéticas por su frecuencia es el **espectro electromagnético** (figura 26.3). Se han detectado ondas electromagnéticas de frecuencia tan baja como 0.01 hertz (Hz). Las ondas electromagnéticas de varios miles de hertz (kHz) se consideran ondas de radio de muy baja frecuencia. Un millón de hertz (MHz) está a la mitad del cuadrante de un radio de AM. La banda de TV, de ondas de muy alta frecuencia (VHF) comienza en unos 50 MHz; en tanto que las ondas de radio de FM van de 88 a 108 MHz. Después vienen las frecuencias ultra-altas (UHF), seguidas de las microondas, más allá de las cuales están las ondas infrarrojas, que a menudo se llaman “ondas caloríficas”. Todavía más adelante está la luz visible, que forma menos de la millonésima parte del 1% del espectro electromagnético medido. La luz de frecuencia mínima que podemos ver es la roja. Las frecuencias máximas de la luz visible tienen casi el doble de la frecuencia del rojo y son violetas. Las frecuencias todavía mayores son del ultravioleta. Esas ondas de mayor frecuencia son las que causan quemaduras al asolearse. Las frecuencias mayores que el ultravioleta se extienden hasta las regiones de los rayos X y los rayos gamma. No hay límites definidos entre las regiones, que en realidad se traslapan entre sí. Sólo para clasificarlo, el espectro se divide en esas regiones.

Los conceptos y las relaciones que describimos antes al estudiar el movimiento ondulatorio (capítulo 18) también se aplican aquí. Recuerda que la frecuencia de una onda es igual a la frecuencia de la fuente vibratoria. Aquí sucede lo mismo: la frecuencia de una onda electromagnética, al vibrar y propagarse por

FIGURA 26.3

Figura interactiva

El espectro electromagnético es un intervalo continuo de ondas, que va desde las ondas de radio hasta los rayos gamma. Los nombres descriptivos de sus partes sólo son una clasificación histórica, porque todas las ondas tienen la misma naturaleza; difieren principalmente en la frecuencia y la longitud de onda. Todas se propagan a la misma rapidez



COMPRUEBA TU RESPUESTA

El principio básico que hace que la luz y todas las demás radiaciones electromagnéticas se propaguen a una rapidez fija es la conservación de la energía.

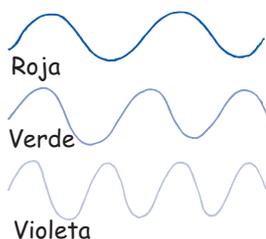

FIGURA 26.4

Figura interactiva

Longitudes de onda relativas de la luz roja, verde y violeta. La luz violeta tiene casi el doble de frecuencia que la luz roja, y la mitad de su longitud de onda. (Véase la sección a color al final del libro.)



Antes de la llegada de los hornos de microondas, existían los infrarrojos, a los que simplemente se llamaba “hornos”.

¡EUREKA!

el espacio, es idéntica a la frecuencia de la carga oscilatoria que la generó.² Las diversas frecuencias corresponden a diversas longitudes de onda: las ondas de baja frecuencia tienen grandes longitudes de onda, y las ondas de alta frecuencia tienen longitudes de ondas cortas. Por ejemplo, como la rapidez de la onda es 300,000 kilómetros por segundo, una carga eléctrica que oscile una vez por segundo (1 hertz) producirá una longitud de onda de 300,000 kilómetros. Eso se debe a que sólo se generó una longitud de onda en 1 segundo. Si la frecuencia de oscilación fuera 10 hertz, se formarían 10 ondas en 1 segundo, y la longitud de onda correspondiente sería de 30,000 kilómetros. Una frecuencia de 10,000 hertz produciría una longitud de onda de 30 kilómetros. Así, cuanto mayor sea la frecuencia de la carga vibratoria, su radiación tendrá menor longitud de onda.³

Tendemos a pensar que el espacio está “vacío”, pero sólo porque no podemos ver las figuras de las ondas electromagnéticas que atraviesan cada parte de nuestro alrededor. Naturalmente que vemos algunas de ellas en forma de luz. Esas ondas sólo forman una microporción del espectro electromagnético. No percibimos las ondas de radio, que nos abarcan en todo momento. Los electrones libres de todo trozo de metal en la superficie terrestre danzan continuamente al ritmo de esas ondas. Se agitan al unísono, y **los electrones son impulsados hacia arriba y hacia abajo, en las antenas transmisoras de radio y de televisión. Un receptor de radio o de televisión es tan sólo un aparato que clasifica y amplifica estas diminutas corrientes.** Hay radiación por doquier. Nuestra primera impresión del Universo es de materia y de vacío, pero el Universo es en realidad un denso mar de radiación, donde están suspendidos algunos concentrados ocasionales.

EXAMÍNATE

- ¿Es correcto decir que una onda de radio es una onda luminosa de baja frecuencia?
- ¿Una onda de radio es también una onda sonora?

Materiales transparentes (opcional)



Luz y materiales transparentes

La luz es una onda electromagnética portadora de energía, que emana de los electrones vibratorios en los átomos. Cuando se transmite la luz a través de la materia, algunos de los electrones en ella son forzados a vibrar. De esta manera, las

COMPRUEBA TUS RESPUESTAS

Tanto la de radio como la luminosa son ondas electromagnéticas que se originan en las vibraciones de los electrones. Las ondas de radio tienen menores frecuencias que las ondas luminosas, por lo que una onda de radio puede considerarse como una onda de luz de baja frecuencia (y una onda luminosa como una onda de radio de alta frecuencia). Pero una onda sonora es una vibración mecánica de la materia, y no es electromagnética. Una onda sonora es básicamente distinta de una onda electromagnética. Por consiguiente, una onda de radio definitivamente no es una onda sonora.

² Es una regla de la física clásica, válida cuando las cargas oscilan distancias grandes en comparación con el tamaño de un átomo (por ejemplo, en una antena de radio). En la física cuántica se permiten excepciones. La radiación emitida por un solo átomo o molécula puede ser de frecuencia distinta a la de la carga oscilatoria dentro del átomo o molécula.

³ La relación es $c = f\lambda$, donde c es la rapidez (constante) de la onda, f es la frecuencia y λ es la longitud de onda.

FIGURA 26.5

Así como una onda sonora puede forzar la vibración de un receptor de sonido, una onda luminosa puede forzar a los electrones a vibrar en los materiales.

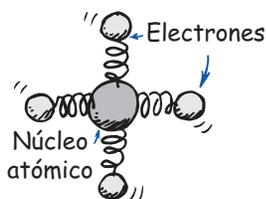


FIGURA 26.6

Los electrones de los átomos en el vidrio tienen ciertas frecuencias naturales, y se pueden modelar como partículas unidas al núcleo atómico mediante resortes.

vibraciones del emisor se transmiten y son vibraciones en el receptor. Es una forma parecida a como se transmite el sonido (figura 26.5).

Entonces, la forma en que un material receptor responde cuando le llega luz, depende de la frecuencia de ésta y de la frecuencia natural de los electrones en el material. La luz visible vibra a frecuencia muy alta, unos 100 billones de veces por segundo (10^{14} hertz). Si un objeto cargado va a responder a esas vibraciones ultrarápidas, debe tener poca inercia, muy poca. Como la masa de los electrones es tan diminuta, pueden vibrar con esa frecuencia.

Los materiales como el vidrio y el agua permiten que la luz se propague por ellos en líneas rectas. Se dice que son **transparentes** a la luz. Para entender cómo pasa la luz por un material transparente, imagina los electrones en los átomos de materiales transparentes como si estuvieran unidos a su núcleo con resortes (figura 26.6).⁴ Cuando una onda luminosa incide en ellos, sus electrones se ponen en vibración.

Los materiales que son elásticos responden más a vibraciones de determinadas frecuencias que a otras (capítulo 20). Los timbres de campana suenan a determinada frecuencia, los diapasones vibran a determinada frecuencia, y también los electrones de los átomos y las moléculas. Las frecuencias naturales de vibración de un electrón dependen de lo fuertemente que esté enlazado con su átomo o molécula. Los distintos átomos o moléculas tienen diferentes “intensidades de resorte”. Los electrones de los átomos en el vidrio tienen una frecuencia natural de vibración en la región del ultravioleta. En consecuencia, cuando las ondas ultravioleta llegan al vidrio, se presenta la resonancia y la vibración de los electrones crece hasta grandes amplitudes, del mismo modo que cuando se empuja a un niño a la frecuencia de resonancia del columpio aumenta la amplitud del vaivén. La energía que recibe cualquier átomo en el vidrio la reemite, o la pasa por choques, a los átomos vecinos. Los átomos resonantes en el vidrio pueden retener la energía de la luz ultravioleta durante un tiempo bastante grande, unas 100 millonésimas de segundo. Durante este tiempo, el átomo describe 1 millón de vibraciones y choca con los átomos vecinos, cediendo su energía en forma de calor. Por todo lo anterior, el vidrio no es transparente a los rayos ultravioleta.

A menores frecuencias de las ondas, como las de la luz visible, los electrones de los átomos en el vidrio son forzados a vibrar, pero con menor amplitud. Retienen menos tiempo la energía, con menos probabilidades de choque con los



Los átomos son como diapasones ópticos que resuenan a determinadas frecuencias.

¡EUREKA!

⁴ Desde luego, los electrones no están unidos con resortes. En realidad su “vibración” es orbital, al moverse en torno al núcleo; no obstante, el “modelo de resortes” ayuda a entender la interacción de la luz con la materia. Los físicos inventan esos modelos conceptuales para explicar la naturaleza, en particular en su nivel microscópico. El valor de un modelo no sólo reside en si es “cierto”, sino en si es útil. Un buen modelo no sólo coincide y explica las observaciones, sino que también pronostica qué puede suceder. Si las predicciones del modelo son contrarias a lo que sucede, normalmente se refina o se abandona ese modelo. El modelo simplificado que presentamos aquí, de un átomo cuyos electrones vibran como si estuvieran en resorte, y con un intervalo de tiempo entre la absorción y la reemisión de energía, es muy útil para entender cómo pasa la luz por los sólidos transparentes.

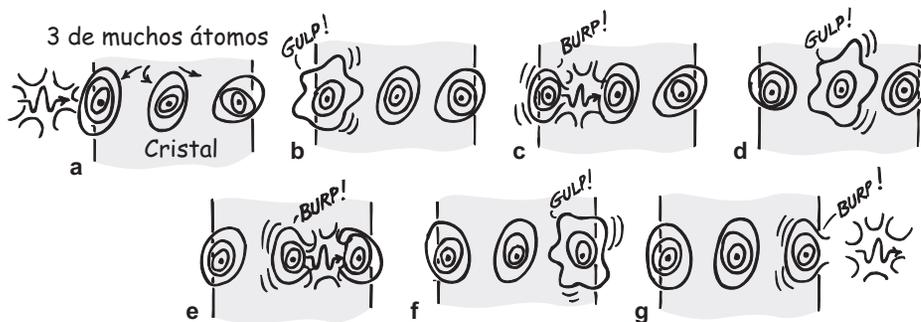


FIGURA 26.7

Una onda de luz visible que incide en una lámina de vidrio pone a vibrar a los átomos, que a la vez producen una cadena de absorciones y reemisiones. Así pasa la energía luminosa por el material y sale por la otra cara. Debido a las demoras entre absorciones y reemisiones, la luz se propaga por el vidrio con más lentitud que por el espacio vacío.

Ver: <https://youtu.be/CUjt36SD3h8>

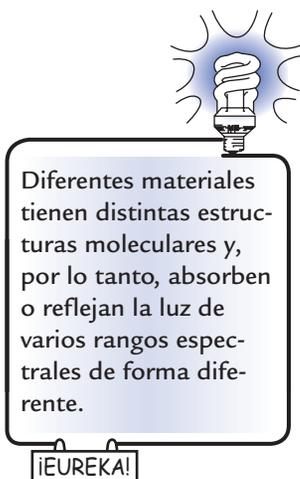
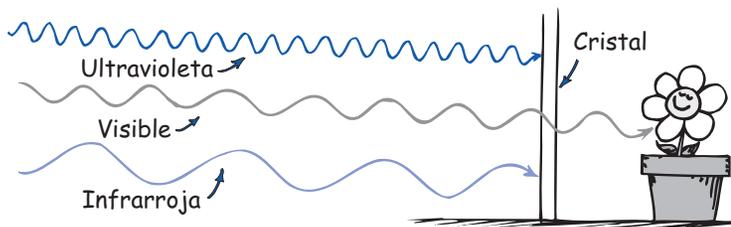


FIGURA 26.8

El vidrio bloquea tanto la luz infrarroja como la ultravioleta, pero es transparente a la luz visible. (Véase la sección a color al final del libro.)



⁵ El valor aceptado en la actualidad es de 299,792 km/s, que se redondea a 300,000 km/s. (Equivale a 186,000 mi/s.)

EXAMÍNATE

1. ¿Por qué el vidrio es transparente a la luz visible, pero opaco a la ultravioleta y a la infrarroja?
2. Imagina que mientras cruzas un recinto te detienes en forma momentánea varias veces, para saludar a las personas que están “en tu onda”. ¿Cómo se parece eso a la luz que se propaga por el vidrio?
3. ¿Y en qué sentido no se parece?

Materiales opacos (opcional)



Los rayos ultravioleta de longitud de onda más larga, llamados UV-A, están cerca de la luz visible en el espectro y son inofensivos. Los rayos ultravioleta de longitud de onda corta, llamados UV-C, serían dañinos si llegaran a nosotros, pero la capa de ozono de la atmósfera se encarga de detenerlos casi por completo. Los rayos ultravioleta de longitud de onda intermedia, UV-B, son los que provocan daños en los ojos, quemaduras y cáncer en la piel.

¡EUREKA!

La mayoría de los objetos que nos rodean son **opacos**, es decir, absorben la luz y no la reemiten. Los libros, las mesas, las sillas y las personas son opacos. Las vibraciones que la luz comunica a sus átomos y moléculas se convierte en energía cinética aleatoria, en energía interna. Se calientan un poco.

Los metales son opacos. Como los electrones externos de los átomos de los metales no están enlazados con algún átomo determinado, vagan libremente con poca dificultad por todo el material (es la causa de que los metales conduzcan tan bien la electricidad y el calor). Cuando la luz llega a un metal y pone a vibrar a esos electrones libres, su energía no “salta” de un átomo a otro en el material, sino que se refleja. Es la causa de que los metales tengan brillo.

La atmósfera terrestre es transparente a una parte de la luz ultravioleta, a toda la luz visible y a una parte de la luz infrarroja, pero es opaca a la luz ultravioleta de alta frecuencia. La pequeña parte de radiación ultravioleta que pasa es la causa de las quemaduras por asolearse. Si penetrara toda esta radiación literalmente estaríamos fritos. Las nubes son semitransparentes al ultravioleta, y en consecuencia uno puede quemarse la piel incluso en un día nublado. La piel oscura absorbe la luz ultravioleta antes de que pueda penetrar demasiado; mientras que en la piel blanca dicha luz penetra más. Con la exposición suave y gradual,

COMPRUEBA TUS RESPUESTAS

1. Como la frecuencia natural de las vibraciones de los electrones en el vidrio es igual que la frecuencia de la luz ultravioleta, se presenta la resonancia cuando las ondas del ultravioleta llegan al vidrio. La energía absorbida pasa a otros átomos en forma de calor, y no se remite como luz; esto hace que el vidrio sea opaco a las frecuencias del ultravioleta. En el intervalo de la luz visible, las vibraciones forzadas de los electrones en el vidrio tienen menores amplitudes y son más sutiles; además, hay reemisión de luz (en vez de generación de calor) y el vidrio es transparente. La luz infrarroja de menor frecuencia hace que resuenen moléculas completas y no los electrones. De nuevo, se genera calor y el vidrio es opaco a la infrarroja.
2. Tu rapidez promedio al cruzar el recinto es menor que la que sería en un salón vacío, por las demoras asociadas a las paradas momentáneas. Asimismo, la rapidez de la luz en el vidrio es menor que en el aire, por las demoras causadas por las interacciones de la luz con átomos en su camino.
3. Al atravesar el recinto tú eres quien inicia y termina el trayecto. Eso no se parece al caso de la luz, porque según nuestro modelo de la luz que pasa por un material transparente, la luz que absorbe el primer electrón que se pone a vibrar no es igual que la que se reemite, aun cuando ambas, como gemelos idénticos, no se puedan distinguir.

FIGURA 26.9

Los metales brillan porque la luz que les llega pone a vibrar a los electrones libres, que luego emiten sus “propias” ondas luminosas en forma de reflexión.



la piel blanca puede broncearse e incrementar la protección contra la luz ultravioleta. Ésta no sólo es dañina para la piel, sino también para los ojos y para los techos asfaltados de las construcciones. Ahora ya sabes por qué estos techos se cubren con arena.

¿Has notado que las cosas se ven más oscuras cuando están húmedas que cuando están secas? La luz que incide en una superficie seca rebota directamente hacia los ojos; en tanto que si llega a una superficie mojada rebota *dentro* de la región mojada transparente, antes de llegar a los ojos. ¿Qué sucede en cada rebote? ¡Absorción! Entonces, una superficie mojada tiene más absorción y se ve más oscura.

Sombras

A menudo a un haz delgado de luz se le llama *rayo*. Cuando estamos parados a la luz del Sol, algo de ella se detiene mientras que otros rayos siguen, en una trayectoria rectilínea. Arrojam, o producimos una **sombra**, es decir, una región donde no llegan los rayos de luz. Si estamos cerca de nuestra sombra, ésta tiene contornos nítidos porque el Sol está muy lejos. Una fuente luminosa grande y lejana o una fuente pequeña y cercana pueden producir una sombra nítida. Una fuente luminosa grande y cercana produce una sombra algo difusa (figura 26.10).

FIGURA 26.10

Una fuente luminosa pequeña produce una sombra más definida que una fuente más grande.

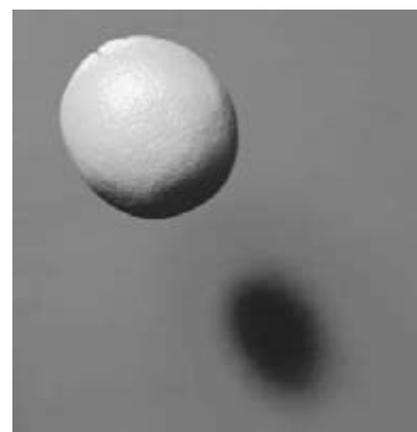
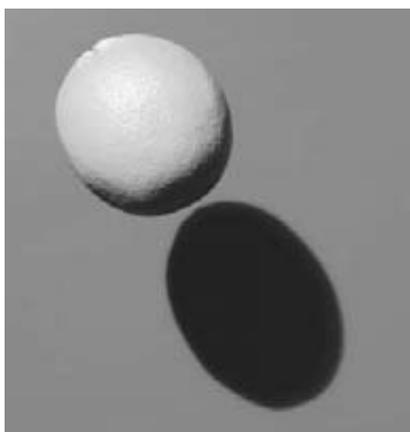




FIGURA 26.11

Un objeto cerca de una pared produce una sombra definida, porque la luz que proviene de direcciones un poco diferentes no se extiende mucho detrás del objeto. Al alejarse el objeto de la pared, se forman penumbras y la sombra se vuelve más pequeña. Cuando el objeto está todavía más alejado, la sombra es menos definida. Cuando el objeto está muy alejado (no se muestra) no se ve sombra porque se mezclan todas las penumbras y forman una mancha grande.

En general, hay una parte negra en el interior y una parte más clara que rodea los contornos de una sombra. A una sombra total se le llama **umbra** y a una sombra parcial se le llama **penumbra**. Aparece la penumbra cuando se bloquea algo de la luz, pero llega otra luz. Eso puede suceder cuando es bloqueada la luz de una fuente y llega la luz de otra fuente (figura 26.11). También hay penumbra cuando la luz de una fuente amplia es bloqueada sólo parcialmente.

Tanto la Tierra como la Luna arrojan sombras cuando les llega la luz solar. Cuando la trayectoria de alguno de esos cuerpos se cruza con la sombra producida por el otro, ocurre un eclipse (figura 26.12). Un efecto espectacular de la sombra y la penumbra lo vemos cuando la sombra de la Luna cae sobre la Tierra, durante un **eclipse solar**. A causa del gran tamaño del Sol, sus rayos forman un cono produciendo la sombra, y una penumbra que la rodea (figura 26.13). Si quedas en la parte de la sombra, estarás a oscuras durante el día, en un eclipse total. Si quedas en la penumbra estarás en un eclipse parcial, porque verás al Sol en forma de Luna creciente.⁶ En un **eclipse lunar** la Luna pasa por la sombra que produce la Tierra.

EXAMÍNATE

1. ¿Qué clase de eclipse, solar o lunar, o ambos, es peligroso contemplar sin protección en los ojos?
2. ¿Por qué es más común ver eclipses lunares que solares?

⁶ Se previene a las personas para que no vean al Sol durante un eclipse solar, porque el brillo y la luz ultravioleta de la luz solar directa son dañinos a los ojos. Este buen consejo a veces es mal comprendido, por quienes creen que la luz solar es más dañina durante el eclipse. Pero ver al Sol cuando está alto en el cielo es dañino, haya o no eclipse solar. De hecho, ver al Sol completo es más dañino que cuando una parte de la Luna lo bloquea. La razón de divulgar estas precauciones especiales durante un eclipse es simplemente que hay más personas interesadas en ver al Sol durante el evento.

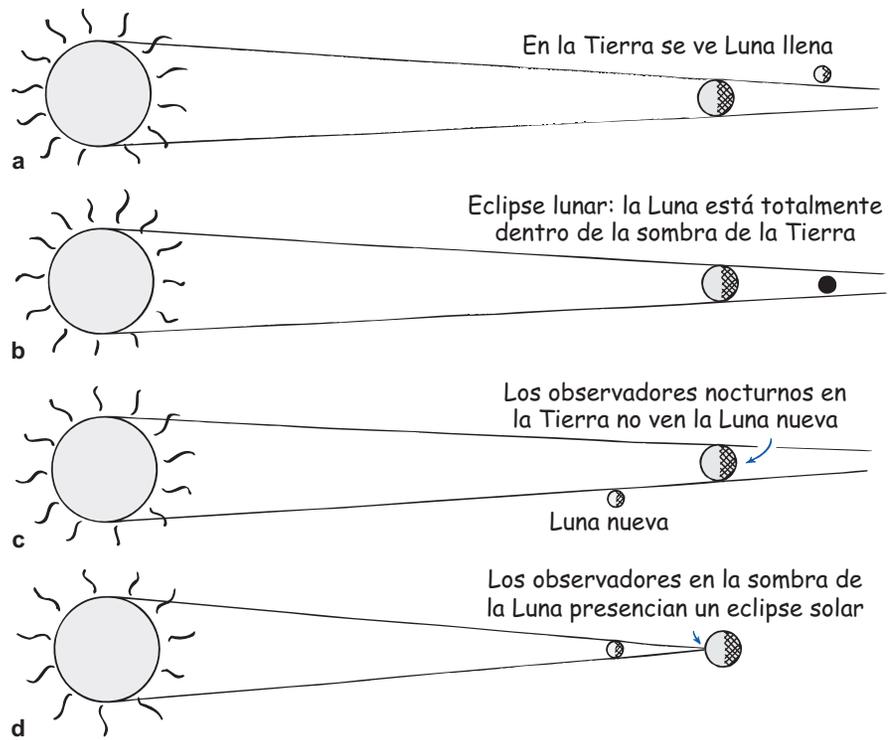


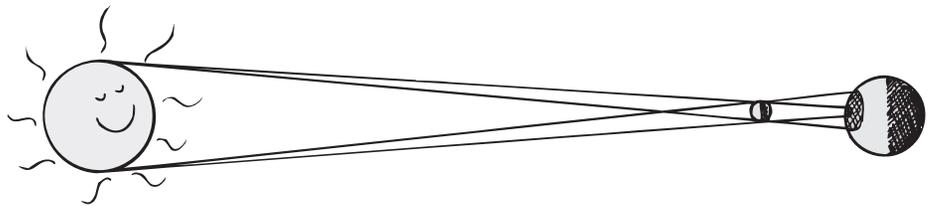
FIGURA 26.12 [Figura interactiva](#)

a) Cuando la Tierra está entre el Sol y la Luna, se ve una Luna llena. b) Cuando este alineamiento es perfecto, la Luna está en la sombra de la Tierra y se produce un eclipse lunar. c) Cuando la Luna está entre el Sol y la Tierra, se ve Luna nueva. d) Cuando este alineamiento es perfecto, la sombra de la Luna cae sobre parte de la Tierra y se produce un eclipse solar.

FIGURA 26.13

[Figura interactiva](#)

Detalle de un eclipse solar. Los observadores que están en la sombra ven un eclipse total. Los observadores que están en la penumbra ven un eclipse parcial. La mayoría de los observadores terrestres no ven eclipse alguno.



COMPRUEBA TUS RESPUESTAS

1. Sólo es perjudicial ver un eclipse solar en forma directa, porque uno ve directamente al Sol. Durante un eclipse lunar se ve una Luna muy oscura. No es totalmente negra porque la atmósfera de la Tierra funciona como lente y desvía algo de la luz solar hacia la región de la sombra. Es interesante el hecho de que sea la luz de los crepúsculos rojos y de las auroras alrededor del mundo, y por eso la Luna parece tener un débil tono rojo profundo durante un eclipse lunar.
2. La sombra de la Luna es relativamente pequeña en la Tierra, y abarca una parte muy pequeña de la superficie terrestre. De este modo, sólo hay relativamente pocas personas en la sombra de la Luna, en un eclipse solar. Pero la sombra de la Tierra abarca la totalidad de la Luna durante un eclipse lunar total, por lo que todos quienes vean el cielo nocturno verán la sombra de la Tierra sobre la Luna.

Visión de la luz: el ojo (opcional)

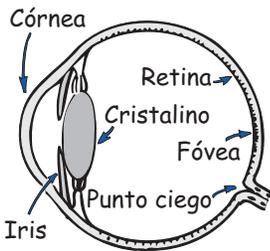


FIGURA 26.14
El ojo humano.

La luz es lo único que vemos con el instrumento óptico más notable que se conoce: el ojo. En la figura 26.14 se presenta un diagrama del ojo humano.

La luz entra al ojo por la cubierta transparente llamada *córnea*, que produce 70% de la desviación necesaria de la luz antes de que pase por la pupila (que es una abertura en el iris). A continuación la luz pasa por una lente, que sólo proporciona la desviación adicional para que las imágenes de los objetos cercanos queden enfocadas en la capa que está en el fondo del ojo. Esta capa es la *retina*, y es sensible en extremo, y hasta en fecha muy reciente era más sensible a la luz que cualquier detector artificial fabricado. Diferentes partes de la retina reciben luz proveniente de diferentes partes del campo visual exterior. La retina no es uniforme. Hay una mancha en el centro de nuestro campo de visión, que es la *fóvea*. En ella se puede captar mucho mayor detalle que en las partes laterales del ojo. También hay un lugar en la retina donde los nervios sacan toda la información por el nervio óptico: es el *punto ciego*. Puedes demostrar que tienes un punto ciego en cada ojo si sostienes este libro con el brazo extendido, cierras el ojo izquierdo y ves la figura 26.15 sólo con el ojo derecho. Podrás ver el punto redondo y la X a esa distancia. Si ahora acercas con lentitud el libro hacia los ojos, con el ojo derecho fijo en el punto, llegarás a una posición a unos 20 a 25 centímetros del ojo donde desaparecerá la X. Ahora repite lo anterior con el ojo izquierdo abierto y viendo esta vez a la X, y el punto desaparecerá. Cuando tienes los dos ojos abiertos no te enteras de tu punto ciego, principalmente porque un ojo “llena” la parte a la que el otro está ciego. Es sorprendente que el cerebro completa la vista “esperada” cuando se tiene un ojo abierto. Repite el ejercicio de la figura 26.15 con diversos objetos pequeños en varios fondos. Observa que en lugar de no ver nada, el cerebro rellena con el fondo adecuado. Así, no sólo no ves lo que hay, ¡sino también ves lo que no hay!

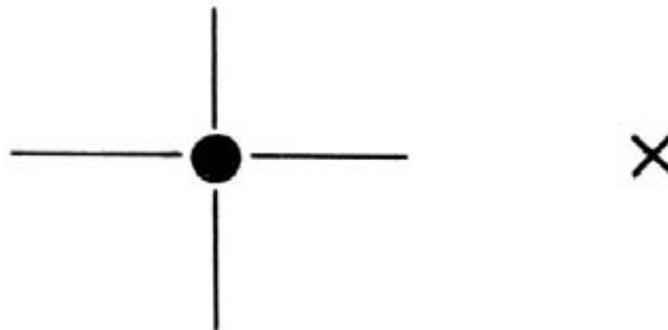
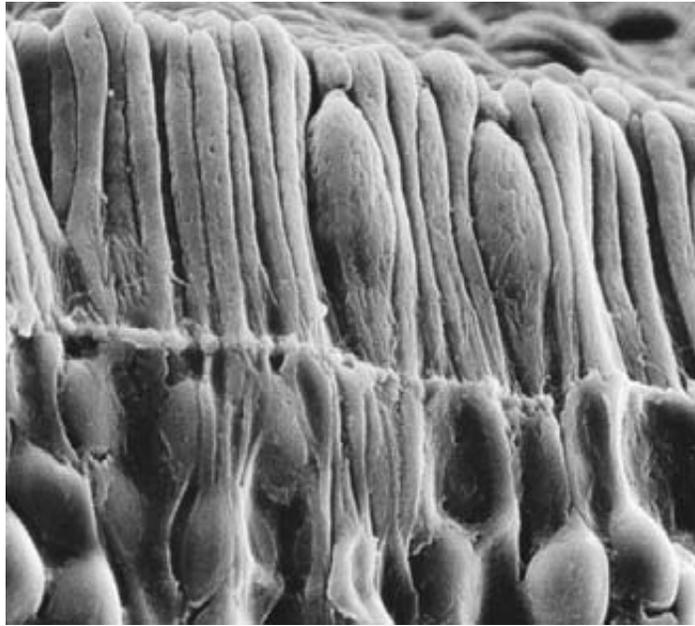


FIGURA 26.15
Experimento del punto ciego. Cierra el ojo izquierdo y ve el punto con el ojo derecho. Ajusta la distancia, y determina el punto ciego que borra la X. Cambia de ojo y ve la X, y el punto desaparece. ¿Completa el cerebro colocando las líneas cruzadas donde estaba el punto?

FIGURA 26.16

Imagen ampliada de los bastones y los conos en el ojo humano.



La retina está formada por diminutas antenas que resuenan con la luz que les llega. Hay dos clases de antenas: los bastones y los conos (figura 26.16). Como sus nombres lo indican, algunas de las antenas tienen forma de bastón y otras tienen forma de cono. Hay tres clases de conos: los que se estimulan con luz de baja frecuencia, los que se estimulan con luz de frecuencia intermedia y los que se estimulan con luz de mayor frecuencia. Los bastones predominan en la periferia de la retina; en tanto que las tres clases de conos son más densos hacia la fóvea. Los conos son muy densos en la fóvea misma, y como están empaquetados tan estrechamente, son mucho más finos, o angostos, ahí más que en cualquier otra parte de la retina. La visión de los colores se debe a los conos. En consecuencia, percibimos el color con más agudeza enfocando una imagen en la fóvea, donde no hay bastones. Los primates y cierta especie de ardillas terrestres son los únicos mamíferos que tienen tres clases de conos, y tienen una visión total de los colores. Las retinas de los demás mamíferos están formadas principalmente por bastones, que sólo son sensibles a la luz o a la oscuridad, como una fotografía o película en blanco y negro.

En el ojo humano, la cantidad de conos disminuye al alejarse de la fóvea. Es interesante el hecho de que el color de un objeto desaparece si se percibe con visión periférica. Se puede hacer la prueba haciendo que un amigo entre a la periferia de tu visión con algunos objetos de colores brillantes. Encontrarás que puedes ver primero los objetos y después percibes sus colores.

Otro hecho interesante es que la periferia de la retina es muy sensible al movimiento. Aunque nuestra visión es deficiente en el raballo del ojo, ahí tenemos sensibilidad a lo que se mueva. Estamos “programados” para ver algo que se agite en los lados de nuestro campo visual, función que debió tener importancia en nuestro desarrollo evolutivo. Pide a un amigo que agite los objetos con colores brillantes cuando los ponga en la periferia de tu campo de visión. Si apenas puedes ver los objetos cuando se agitan, pero no los puedes ver cuando se mantienen inmóviles, no podrás decir de qué color son (figura 26.17). ¡Haz la prueba!

**FIGURA 26.17**

En la periferia de tu visión sólo puedes ver un objeto y su color si se está moviendo.

Otra cosa que distingue a los bastones y a los conos es la intensidad de la luz a la que responden. Los conos requieren más energía que los bastones para poder “disparar” un impulso por el sistema nervioso. Si la intensidad luminosa es muy baja, lo que vemos no tiene color. Vemos bajas intensidades con los bastones. La visión adaptada a la oscuridad se debe casi totalmente a los bastones, mientras que la visión con mucha iluminación se debe a los conos. Por ejemplo, vemos que las estrellas son blancas. Sin embargo, la mayoría de las estrellas tienen colores brillantes. Con una fotografía con tiempo de exposición, las estrellas se ven rojas y anaranjadas rojas, que son las “más frías”; y azules y azul-violeta las “más calientes”. Sin embargo, la luz estelar es muy débil como para activar los conos receptores del color en la retina. Vemos entonces las estrellas con los bastones y las percibimos como blancas o, cuando más, sólo con un color débil. Las mujeres tienen un umbral un poco menor de activación de los conos, y pueden ver más colores que los hombres. Así que, si ella dice que las estrellas son de colores y él dice que no, ¡probablemente ella tenga razón!

Se ha determinado que los bastones “ven” mejor que los conos hacia el extremo azul del espectro de colores. Los conos pueden ver un rojo profundo donde los bastones no ven luz alguna. La luz roja puede ser negra, de acuerdo con los bastones. Así, si tienes objetos de dos colores, por ejemplo, azul y rojo, el azul aparecerá mucho más brillante que el rojo en luz mortecina, aunque el rojo pueda ser mucho más brillante que el azul, vistos a la luz brillante. El efecto es muy interesante. Haz la siguiente prueba: en un cuarto oscuro toma una revista o algo que tenga colores, y antes de saber con seguridad de qué colores se trata, intenta decir cuáles son las zonas más claras y más oscuras. A continuación enciende la luz. Verás un notable cambio entre los colores más brillantes y los más opacos.⁷

Los bastones y los conos de la retina no están conectados en forma directa con el nervio óptico sino, algo muy interesante, están conectados con muchas otras células que están a la vez interconectadas. Mientras que muchas de esas células están interconectadas, sólo unas cuantas conducen la información al nervio óptico. A través de esas interconexiones, cierta cantidad de información procedente de varios receptores visuales se combina y se “digiere” en la retina. De esta forma, se “medita” la señal luminosa, antes de ir al nervio óptico y luego al cuerpo principal del cerebro. Así, algo del funcionamiento cerebral se lleva a cabo en el ojo mismo. El ojo hace algo de nuestro “pensamiento”.

A este pensamiento lo traiciona el iris, la parte coloreada del ojo que se dilata y se contrae, y regula el tamaño de la pupila, admitiendo más o menos luz conforme cambia la intensidad de ésta. También sucede que el tamaño relativo del aumento o contracción se relaciona con nuestras emociones. Si vemos, olemos, gustamos u oímos algo agradable, nuestras pupilas aumentan de tamaño en forma automática. Si vemos, olemos, gustamos u oímos algo repugnante, nuestras pupilas se contraen también en forma automática. ¡Muchos jugadores de cartas revelan la mano que les tocó por el tamaño de sus pupilas! (El estudio del tamaño de la pupila en función de las actitudes se llama *pupilometría*.)

La luz más brillante que puede percibir el ojo humano sin dañarse tiene un brillo 500 veces mayor que el brillo mínimo perceptible. Ve hacia una lámpara encendida y después ve hacia un clóset sin iluminación. La diferencia en intensidad de la luz puede ser mayor que un millón a uno. Debido a un efecto llamado



Ella te ama...



¿Ella no te ama?

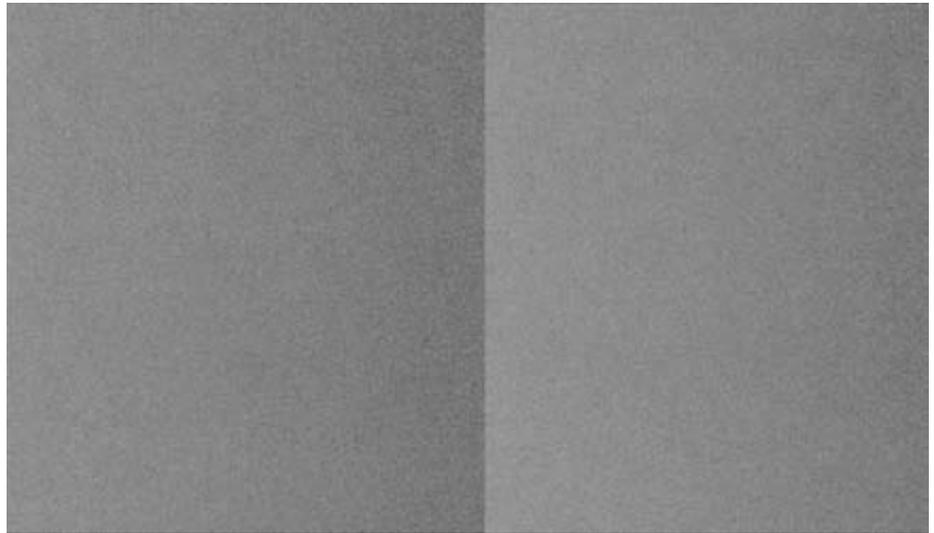
FIGURA 26.18

El tamaño de la pupila depende de tu estado de ánimo.

⁷ Este fenómeno se llama *efecto Purkinje*, por el fisiólogo checo que lo descubrió.

FIGURA 26.19

Los dos rectángulos tienen igual brillo. Cubre la frontera entre ellos con un lápiz y compruébalo.

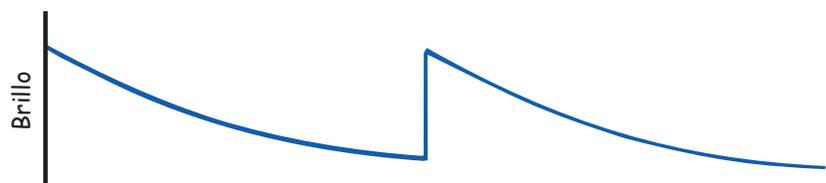


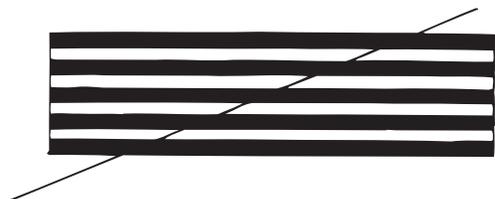
inhibición lateral no percibimos las diferencias reales de brillo. Los lugares más brillantes en nuestro campo visual no pueden eclipsar el resto, porque siempre que una célula receptora en nuestra retina manda una fuerte señal de brillo a nuestro cerebro, también indica a las células vecinas que aminoren sus respuestas. De este modo, emparejamos nuestro campo visual, lo cual nos permite percibir detalles en zonas muy brillantes y también en zonas muy oscuras. (La película fotográfica no es tan buena para hacer esto. Al fotografiar una escena con fuertes diferencias de intensidad se pueden sobreexponer en unas zonas y subexponer en otras.) La inhibición lateral exagera la diferencia en brillo en las orillas de los lugares de nuestro campo visual. Las orillas, por definición, separan una cosa de otra. Así acentuamos las diferencias. El rectángulo gris a la izquierda de la figura 26.19 parece más oscuro que el de la derecha, cuando vemos la frontera que lo separa. Pero cubre esa frontera con un lápiz o con el dedo, y se ven de igual brillo. Se debe a que ambos rectángulos sí *son* de igual brillo; cada uno tiene tono de más claro a más oscuro, yendo de izquierda a derecha. El ojo se concentra en la frontera donde la orilla oscura del rectángulo izquierdo se junta con la parte clara del rectángulo derecho, y el sistema ojo-cerebro supone que el resto del rectángulo es igual. Damos atención a la frontera e ignoramos el resto.

Cuestiones que ponderar: ¿la forma en que el ojo distingue las orillas y hace hipótesis acerca de lo que hay más allá se parece a la forma en que a veces hacemos juicios acerca de otras culturas y otras personas? ¿No tendemos a exagerar, en la misma forma, las diferencias en la superficie mientras ignoramos las semejanzas y las sutiles diferencias del interior?

FIGURA 26.20

Gráfica de niveles de brillo para los rectángulos de la figura 26.19.

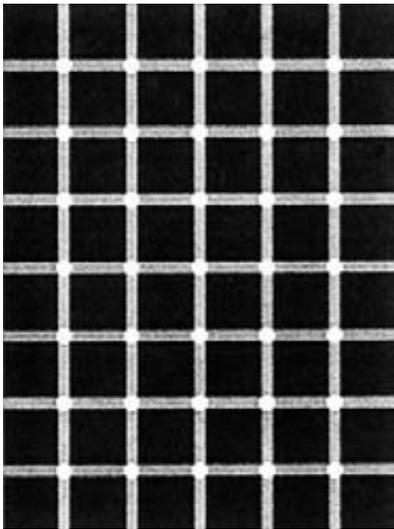




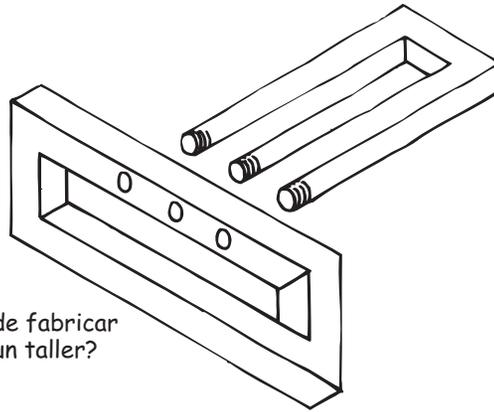
¿Realmente es discontinua la línea inclinada?



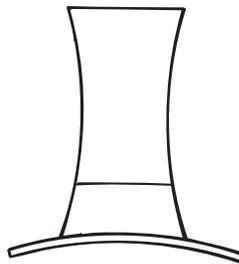
¿Realmente son menos altas las rayas de la derecha?



¿Puedes contar los puntos negros?



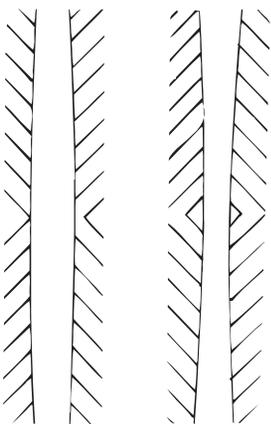
¿Se puede fabricar esto en un taller?



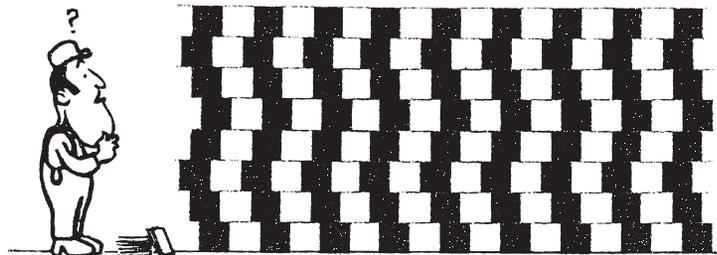
¿Es mayor la altura de la copa que el diámetro del ala?



¿Qué dice este letrero?



¿Son paralelas las líneas verticales?



¿Quedaron huecos los tabiques?

FIGURA 26.21 Ilusiones ópticas.

Resumen de términos

Eclipse lunar Evento en el que la Luna pasa por la sombra de la Tierra.

Eclipse solar Evento en el que la Luna bloquea la luz solar, y la sombra de la Luna cae sobre una parte de la Tierra.

Espectro electromagnético Intervalo de ondas electromagnéticas cuya frecuencia va desde las ondas de radio hasta los rayos gamma.

Onda electromagnética Onda portadora de energía emitida por una carga vibratoria (frecuentemente electrones) formada por campos eléctricos y magnéticos que oscilan y que se regeneran entre sí.

Opaco Término aplicado a materiales que absorben la luz sin reemitirla y, por consiguiente, a través de los cuales no puede pasar la luz.

Penumbra Sombra parcial que aparece donde algo de la luz, pero no toda, se bloquea.

Sombra Región oscura que aparece cuando los rayos de luz son bloqueados por un objeto.

Transparente Término aplicado a materiales a través de los cuales la luz puede pasar en línea recta.

Umbra La parte más oscura de una sombra donde se bloquea la luz.

Lecturas sugeridas

Falk, D. S., D.R. Brill y D. Stork. *Seeing the Light: Optics in Nature*. Nueva York: Harper & Row, 1986.

Para más sobre ilusiones, véase ww.michalebach.de/ot

Preguntas de repaso

Ondas electromagnéticas

1. ¿Qué induce un *campo magnético que varía*?
2. ¿Qué induce un *campo eléctrico que varía*?
3. ¿Qué produce una onda electromagnética?

Velocidad de una onda electromagnética

4. ¿Por qué, según la conservación de la energía, una onda electromagnética en el espacio nunca desacelera?
5. ¿Por qué, según la conservación de la energía, una onda electromagnética en el espacio nunca acelera?
6. ¿Qué contienen y transportan los campos eléctricos y magnéticos?

El espectro electromagnético

7. ¿Cuál es la diferencia principal entre una *onda de radio* y la *luz visible*? ¿Y entre la luz visible y un rayo X?
8. ¿Qué parte o cuánto del espectro electromagnético medido ocupa la luz visible?
9. ¿Qué color tiene la luz visible de las frecuencias mínimas visibles? ¿Y en las frecuencias máximas?
10. ¿Cómo se compara la frecuencia de una onda de radio con la de los electrones vibratorios que la producen?
11. ¿Cómo se relaciona la longitud de onda de la luz visible con su frecuencia?
12. ¿Cuál es la longitud de una onda cuya frecuencia es de 1 Hz y se propaga a 300,000 km/s?
13. ¿En qué sentido decimos que el espacio exterior en realidad no está vacío?

Materiales transparentes

14. El sonido que proviene de un diapasón puede hacer que otro diapasón vibre. ¿Cuál es el efecto análogo en la luz?
15. ¿En qué región del espectro electromagnético está la frecuencia de resonancia de los electrones en el vidrio?
16. ¿Cuál es el destino de la energía en la luz ultravioleta que incide en un vidrio?
17. ¿Cuál es el destino de la energía en la luz visible que incide en un vidrio?
18. ¿Cómo se compara la frecuencia de la luz reemitida en un material transparente con la de la luz que estimula la reemisión?
19. ¿Cómo se compara la rapidez promedio de la luz en el vidrio con su rapidez en el vacío?
20. ¿Por qué a las ondas infrarrojas se les llama con frecuencia *ondas de calor*?

Materiales opacos

21. ¿Por qué los materiales se calientan cuando los ilumina la luz?
22. ¿Por qué los metales son brillantes?
23. ¿Por qué los objetos mojados se ven normalmente más oscuros que los objetos secos?

Sombras

24. Describe la diferencia entre *sombra* (umbr) y *penumbra*.
25. ¿La Tierra y la Luna siempre producen sombras? ¿Qué se produce cuando una pasa por la sombra de la otra?

Visión de la luz: el ojo

26. Explica la diferencia entre los bastones y los conos del ojo, y entre sus funciones.

Proyectos

1. Compara el tamaño de la Luna sobre el horizonte y cuando está en lo alto del cielo. Una forma de hacerlo es extender el brazo y sujetar diversos objetos que apenas la bloqueen. Busca hasta que encuentres uno del tamaño exacto, quizás un lápiz o una pluma gruesos. Verás que el objeto tendrá menos de un centímetro, dependiendo de la longitud de los brazos. ¿La Luna es mayor cuando está cerca del horizonte?
2. ¿Cuál ojo es el que usamos más? Para hacer la prueba, apunta con un dedo hacia arriba mientras tienes el brazo extendido. Con ambos ojos abiertos, ve algún objeto lejano junto al dedo. Ahora cierra el ojo derecho. Si parece que el dedo salta hacia la derecha, quiere decir que usas más el ojo derecho. Haz lo anterior con compañeros que sean diestros y zurdos. ¿Hay alguna correlación entre el ojo dominante y la mano dominante?



Ejercicios

1. Un amigo te dice, de forma enfático, que la luz es lo único que podemos ver. ¿Está en lo correcto?
2. Además, tu amigo dice que la luz se produce por la conexión entre la electricidad y el magnetismo. ¿Está en lo correcto?
3. ¿Cuál es la fuente fundamental de radiación electromagnética?
4. ¿Cuáles tienen la mayor longitud de onda: la luz visible, los rayos X o las ondas de radio?
5. ¿Cuál tiene longitudes de onda más cortas, la ultravioleta o la infrarroja? ¿Cuál tiene las mayores frecuencias?
6. ¿Cómo es posible tomar fotografías en la oscuridad completa?
7. Exactamente, ¿qué es lo que ondula en una onda luminosa?
8. Se escucha a las personas hablar de la “luz ultravioleta” y de la “luz infrarroja”. ¿Por qué son engañosos esos términos? ¿Por qué es menos probable escuchar acerca de la “luz de radio” y de la “luz de rayos X”?
9. Sabiendo que el espacio interplanetario consiste en vacío, ¿cuál es tu evidencia de que las ondas electromagnéticas pueden viajar por el vacío?
10. ¿Cuál es la principal diferencia entre un rayo gamma y un rayo infrarrojo?
11. ¿Cuál es la rapidez de los rayos X en el vacío?
12. ¿Qué viaja con mayor rapidez en el vacío, un rayo infrarrojo o un rayo gamma?
13. Tu amigo te dice que las microondas y la luz ultravioleta tienen diferentes longitudes de onda, pero viajan por el espacio a la misma rapidez. ¿Estás de acuerdo con él? ¿Por qué?
14. Tu amigo te dice que cualquier onda de radio viaja considerablemente más rápido que cualquier onda sonora. ¿Estás de acuerdo con él? ¿Por qué?
15. Tu amigo te dice que el espacio exterior, en vez de estar vacío, está abarrotado de ondas electromagnéticas. ¿Estás de acuerdo con él? ¿Por qué?
16. Las señales de longitud de onda de radio y televisión son más largas o más cortas, que las ondas detectables por el ojo humano?
17. Imagina que una onda luminosa y una sonora tienen la misma frecuencia. ¿Cuál tiene la mayor longitud de onda?
18. ¿Qué requiere un medio físico para propagarse: luz, sonido o ambos? Explica.
19. ¿Las ondas de radio se propagan a la rapidez del sonido, a la rapidez de la luz, o a una rapidez intermedia?
20. Cuando los astrónomos observan una explosión de supernova en una galaxia lejana, lo que ven es un aumento repentino y simultáneo en la luz visible y en otras formas de radiación electromagnética. ¿Eso es una prueba que respalde la idea de que la rapidez de la luz es independiente de la frecuencia? Explica por qué.
21. ¿Qué es igual acerca de las ondas de radio y de luz visible? ¿Qué es diferente acerca de ellas?
22. Un láser de helio-neón emite luz de 633 nanómetros (nm) de longitud de onda. La longitud de onda de un láser de argón es de 515 nm. ¿Cuál láser emite la luz de mayor frecuencia?
23. ¿Por qué esperas que la rapidez de la luz sea un poco menor en la atmósfera que en el vacío?
24. Si disparas una bala que atraviese un árbol, se desacelerará dentro del tronco y saldrá a una rapidez menor que la rapidez con la que entró. Entonces, ¿la luz también desacelera al pasar por el vidrio y sale con menor rapidez? Defiende tu respuesta.
25. Imagina que una persona pueda caminar sólo con determinado paso; ni más rápido ni más lento. Si tomas el tiempo de su caminata ininterrumpida al cruzar un recinto de longitud conocida, podrás calcular su rapidez al caminar. Sin embargo, si se detiene en forma momentánea al caminar, para saludar a otras personas en el recinto, el tiempo adicional que duraron sus interacciones breves origina una rapidez *promedio* al cruzar el recinto, y esa rapidez es menor que la

- de caminata. ¿En qué se parece lo anterior al caso de la luz que atraviesa el vidrio? ¿Y en qué son diferentes?
26. ¿El vidrio es transparente a luz de frecuencias que coinciden con sus propias frecuencias naturales? Explica por qué.
 27. Las longitudes de onda cortas de la luz visible interactúan con más frecuencia con los átomos en el vidrio que las de mayor longitud de onda. ¿Ese tiempo de interacción tiende a aumentar o a disminuir la rapidez promedio de la luz en el vidrio?
 28. ¿Qué determina si un material es transparente u opaco?
 29. Puedes resultar con quemaduras de Sol en un día nublado, pero no te quemarás a través de un vidrio, aunque el día esté muy soleado. ¿Por qué?
 30. Imagina que la luz solar incide en un par de anteojos para leer y un par de anteojos oscuros para el sol. ¿Cuáles anteojos crees que se van a calentar más? Defiende tu respuesta.
 31. ¿Por qué un avión que vuela muy alto casi no produce sombra, o no produce sombra en el suelo; mientras que uno que vuela bajo produce una sombra bien definida?
 32. Sólo algunas de las personas que ocupan el “lado de día” en la Tierra pueden presenciar un eclipse solar, mientras que todas las personas que ocupan el “lado de noche” pueden presenciar un eclipse lunar. ¿Por qué?
 33. Los eclipses lunares siempre son eclipses en luna llena. Esto es, la Luna siempre está llena inmediatamente antes y después de que la sombra de la Tierra pasa sobre ella. ¿Por qué? ¿Por qué nunca veremos un eclipse lunar cuando haya luna creciente, menguante o nueva?
 34. ¿Los planetas proyectan sombras? ¿Cómo lo compruebas?
 35. En 2004 el planeta Venus pasó entre la Tierra y el Sol. ¿Qué clase de eclipse ocurrió, si fue el caso?
 36. ¿Qué evento astronómico verían unos observadores en la Luna en el momento en que en la Tierra se viera un eclipse lunar? ¿Y en el momento en que en la Tierra se viera un eclipse solar?
 37. La luz que procede de un lugar donde concentras tu atención llega a la fovea, que sólo contiene conos. Si deseas observar una fuente luminosa débil, por ejemplo una estrella débil, ¿por qué no debes ver la fuente *directamente*?
 38. ¿Por qué les falta color a los objetos iluminados por la luz de la Luna?
 39. ¿Por qué no vemos colores en la periferia de nuestra visión?
 40. De acuerdo con lo que viste en la figura 26.15, ¿tu punto ciego está al lado de la fovea que da a la nariz o hacia el otro lado?
 41. Cuando tu novia(o) te sujeta y te mira con pupila contraída y dice “te amo”, ¿le crees?
 42. ¿Se puede deducir que una persona con pupilas grandes en general es más feliz que una con pupilas pequeñas? Si no es el caso, ¿por qué?
 43. La intensidad de la luz disminuye de acuerdo con el inverso del cuadrado de la distancia a la fuente. ¿Quiere decir eso que se pierde la energía luminosa? Explica por qué.
 44. La luz de una lámpara de destello en fotografía se debilita al aumentar la distancia, siguiendo la ley del inverso del cuadrado. Comenta acerca de un pasajero que toma una foto panorámica desde un avión que vuela muy alto sobre una ciudad, usando su *flash*.
 45. En los barcos la profundidad del mar se determina haciendo rebotar en él ondas de sonar y midiendo el tiempo en el viaje de ida y vuelta. ¿Cómo se hace (en forma parecida) en algunos aviones para determinar su distancia al suelo?
 46. El planeta Júpiter está más de cinco veces más alejado del Sol que la Tierra. ¿Cómo aparece el brillo del Sol a esta mayor distancia?
 47. Cuando ves el cielo nocturno, algunas estrellas brillan más que otras. ¿Puedes decir correctamente que las estrellas más brillantes emiten más luz? Defiende tu respuesta.
 48. Cuando ves una galaxia lejana a través de un telescopio, ¿por qué estás viendo hacia atrás en el tiempo?
 49. Cuando vemos el Sol, lo vemos como era hace 8 minutos. Así, sólo podemos ver el Sol “en el pasado”. Cuando ves el dorso de tu mano, ¿lo ves “ahora” o “en el pasado”?
 50. La “visión 20/20” es una medida arbitraria; quiere decir que puedes leer lo que una persona promedio puede leer a una distancia de 20 pies a la luz del día. ¿Cuál es esa distancia en metros?

Problemas

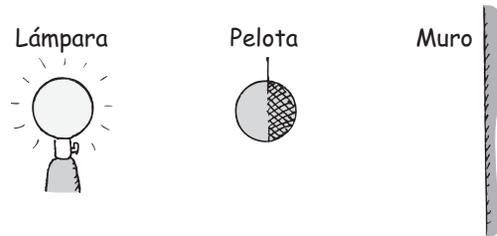
1. En 1675 el astrónomo danés Olaus Roemer midió las horas de aparición de una de las lunas de Júpiter, saliendo de detrás del planeta, en sus revoluciones sucesivas en torno a ese planeta, y tomó nota de las demoras en esas apariciones, a medida que la Tierra se alejaba de Júpiter; llegó a la conclusión de que la luz tarda 22 minutos adicionales para recorrer los 300,000,000 de kilómetros del diámetro de la órbita de la Tierra en torno al Sol. ¿Qué valor aproximado de la rapidez de la luz calculó Roemer a partir de esos datos? ¿En cuánto se diferencia del valor moderno? (La medición de Roemer, aunque no era exacta según los estándares actuales, fue la primera demostración de que la luz viaja a una rapidez finita, no infinita.)
2. En uno de los experimentos de Michelson, un haz procedente de un espejo giratorio recorrió 15 km

hasta un espejo estacionario. ¿Cuánto tiempo pasó para que regresara al espejo giratorio?

- El Sol está a 1.50×10^{11} metros de la Tierra. ¿Cuánto tarda la luz del Sol en llegar a la Tierra? ¿Cuánto tarda en cruzar el diámetro de la órbita de la Tierra? Compara tu resultado con el tiempo que midió Roemer en el siglo XVII (problema 1).
- ¿Cuánto tarda un impulso de luz de láser en llegar a la Luna, reflejarse y llegar a la Tierra?
- La estrella más cercana, aparte de nuestro Sol, es Alpha Centauri, que está a 4.2×10^{16} metros de distancia. Si hoy recibiéramos un mensaje de radio emitido desde esa estrella, ¿hace cuánto se hubiera enviado?
- La longitud de onda de la luz de sodio amarilla, en el aire, es 589 nm. ¿Cuál es su frecuencia?
- La luz azul-verdosa tiene una frecuencia aproximada de 6×10^{14} Hz. Usa la ecuación $c = f\lambda$ para calcular la longitud de onda de esa luz en el aire. ¿Cómo se compara esa longitud de onda con el tamaño de un átomo, que es de aproximadamente 10^{-10} m?
- La longitud de onda de la luz cambia al pasar de un medio a otro, mientras que la frecuencia permanece constante. ¿La longitud de onda es mayor o menor en el agua que en el aire? Explícalo en términos de la ecuación rapidez = frecuencia \times longitud de onda. Una luz amarillo-verdosa tiene 600 nm (6×10^{-7} m) de longitud de onda en el aire. ¿Cuál es su

longitud de onda en el agua, donde la luz se propaga al 75% de su rapidez en el aire? ¿Y en plexiglás donde se propaga a 67% de su rapidez en el aire?

- Determinada instalación de radar se usa para rastrear los aviones y transmite radiación electromagnética de 3 cm de longitud de onda. a) ¿Cuál es la frecuencia de esta radiación, medida en miles de millones de hertz (GHz)? b) ¿Cuál es el tiempo necesario para que un impulso de ondas de radar llegue a un avión que está a 5 km de distancia y regresen?
- Una pelota con el mismo diámetro que el de una lámpara se sujeta a media distancia entre la lámpara y un muro, como se ve en el esquema. Traza los rayos luminosos, en forma parecida a los de la figura 26.13, y demuestra que el diámetro de la sombra en el muro es igual al de la pelota, y que el diámetro de la penumbra es tres veces mayor que el de la pelota.



Color



El autor del manual de laboratorio Paul Robinson produce una diversidad de colores cuando lo iluminan una lámpara roja, una verde y una azul. (Véase la sección a color al final del libro.)

Las rosas son rojas y las violetas son azules; los colores intrigan tanto a los artistas como a los físicos. Para el físico los colores de los objetos no están en las sustancias de los objetos mismos, ni siquiera en la luz que emiten o reflejan. El color es una experiencia fisiológica, y está en el ojo de quien lo percibe. Así, cuando decimos que la luz que procede de una rosa es roja, en sentido estricto queremos decir que *aparece* roja. Muchos organismos, incluyendo las personas con trastornos de captación de colores, no ven que la rosa sea roja.

Los colores que percibimos dependen de la frecuencia de la luz que vemos. Las luces de distintas frecuencias son percibidas como de distintos colores; la luz de frecuencia mínima que podemos detectar parece roja a la mayoría de las personas, y la frecuencia máxima como violeta. Entre ellas, está la cantidad infinita de tonos que forman el espectro de colores del arco iris. Por convención, esos tonos se agrupan en los siete colores que son rojo, anaranjado, amarillo, verde, azul, índigo y violeta. Estos colores juntos dan el aspecto de blanco. La luz blanca del Sol está formada por todas las frecuencias visibles.

Reflexión selectiva

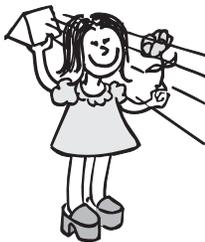
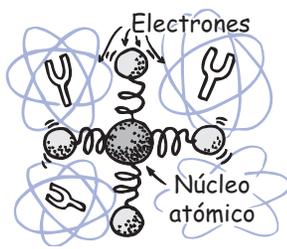


FIGURA 27.1

Los colores de las cosas dependen de los colores de la luz que los ilumina.

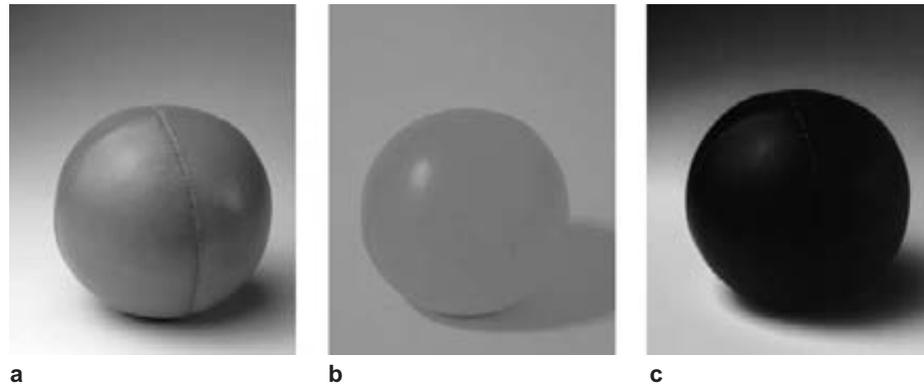
A excepción de las fuentes luminosas, como lámparas, láseres y tubos de descarga en gas (que examinaremos en el capítulo 30), la mayoría de los objetos que nos rodean reflejan la luz, en vez de emitirla. Sólo reflejan parte de la luz que les llega, la parte que produce su color. Por ejemplo, una rosa no emite luz, más bien la refleja (figura 27.1). Si la luz solar pasa por un prisma y colocamos una rosa roja intensa en diversas partes del espectro, los pétalos parecen cafés o negros en todas las partes del espectro, excepto en el rojo. En la parte roja del espectro los pétalos se ven rojos, pero el tallo y las hojas verdes se ven negros. Eso demuestra que los pétalos rojos tienen la capacidad de reflejar la luz roja, pero no otros colores. Asimismo, las hojas verdes tienen la capacidad de reflejar la luz verde, pero no otros colores. Cuando la rosa se ilumina con luz blanca, los pétalos se ven rojos y las hojas se ven verdes, porque los pétalos reflejan la parte roja de la luz blanca, y las hojas reflejan la parte verde. Para entender por qué los objetos reflejan colores específicos de luz, debemos dirigir nuestra atención al átomo.

La luz se refleja en los objetos en forma parecida a como el sonido se “refleja” en un diapasón cuando lo pone a vibrar otro diapasón cercano.

**FIGURA 27.2**

Los electrones externos de un átomo vibran y resuenan igual que lo harían pesos unidos a resortes. En consecuencia, los átomos y las moléculas se comportan como si fueran diapasones ópticos.

Un diapason puede hacer que otro vibre, aun cuando no coincidan sus frecuencias, aunque sería a amplitudes mucho menores. Lo mismo sucede con los átomos y las moléculas. Los electrones externos que zumban en torno al núcleo del átomo pueden ponerse a vibrar mediante los campos eléctricos de las ondas electromagnéticas.¹ Una vez en vibración, esos electrones mandan sus propias ondas electromagnéticas, igual que los diapasones acústicos que vibran mandan sus propias ondas sonoras.

**FIGURA 27.3**

a) La bola roja vista bajo luz blanca. El color rojo se debe a que la bola refleja sólo la parte roja de la luz que la ilumina. El resto de la luz es absorbida por la superficie. b) La bola roja vista bajo luz roja. c) La bola roja vista bajo luz verde. La bola aparece negra porque la superficie absorbe la luz verde: no hay fuente de luz roja para reflejarla. (Véase la sección a color al final del libro.)

**FIGURA 27.4**

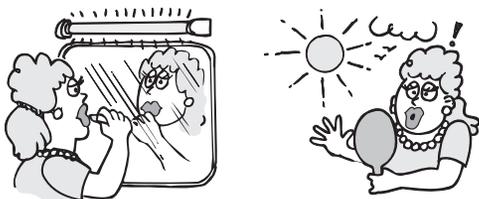
La mayoría de la piel del conejo refleja la luz de todas las frecuencias y aparece como blanca a la luz solar. Lo negro de la piel del conejo absorbe toda la energía radiante de la luz solar que le llega y por ende es negra. (Véase la sección a color al final del libro.)

Los distintos materiales tienen distintas frecuencias de absorción y emisión de radiación. En un material, los electrones oscilan con facilidad en ciertas frecuencias; en otro, oscilan con facilidad en distintas frecuencias. En las distintas frecuencias de resonancia, donde las amplitudes de oscilación son grandes, se absorbe la luz; pero a las frecuencias menores y mayores que las de resonancia, la luz se reemite. Si el material es transparente, la luz reemitida lo atraviesa. Si el material es opaco, la luz regresa al medio de donde vino. Eso es la reflexión.

Normalmente, un material absorbe la luz de algunas frecuencias y refleja el resto. Si absorbe la mayoría de la luz visible que le llega, pero refleja el rojo por ejemplo, aparecerá rojo. Es la causa de que los pétalos de las rosas rojas sean rojos, y que su tallo sea verde. Los átomos de los pétalos absorben toda la luz visible, excepto la roja que reflejan; los átomos del tallo absorben toda la luz excepto la verde, que reflejan. Un objeto que refleja luz de todas las frecuencias visibles, como la parte blanca de esta página, es del mismo color que la luz que le llega. Si un material absorbe toda la luz que recibe, no refleja luz y es negro.

Es interesante que los pétalos de la mayoría de las flores amarillas, como los narcisos, reflejan el verde y el rojo, además del amarillo. Los narcisos amarillos reflejan una amplia banda de frecuencias. Los colores que reflejan la mayoría de los objetos no son puros, de una sola frecuencia, sino que están formados por un intervalo de frecuencias.

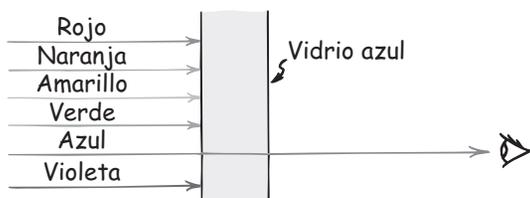
¹ Las palabras *oscilación* y *vibración* indican movimiento periódico, es decir, el movimiento que se repite con regularidad.


FIGURA 27.5

El color depende de la fuente luminosa. (Véase la sección a color al final del libro.)

Un objeto sólo puede reflejar frecuencias que estén presentes en la luz que lo ilumina. En consecuencia, el aspecto del color de un objeto depende de la clase de luz que lo ilumine. Por ejemplo, una lámpara incandescente emite más luz en las frecuencias menores que en las mayores, y los rojos que se ven con esa luz se intensifican. En una tela que sólo sea un poco roja, se ve más el rojo bajo una lámpara incandescente que bajo una lámpara fluorescente. Las lámparas fluorescentes son más ricas en las frecuencias más altas, por lo que bajo ellas se intensifican los azules. Por lo general se define el color “verdadero” de un objeto es el que tiene a la luz del día. Así, cuando vayas de compras, el color de una prenda que veas con luz artificial no será exactamente su color real (figura 27.5).

Transmisión selectiva


FIGURA 27.6

Sólo la energía con la frecuencia de la luz azul es la que se transmite. La energía de las demás frecuencias es absorbida, y calienta al vidrio. (Véase la sección a color al final del libro.)

El color de un objeto transparente depende del color de la luz que transmita. Un trozo de vidrio rojo parece rojo porque absorbe todos los colores que forman la luz blanca, excepto el rojo, que es el que *transmite*. Asimismo, un trozo de vidrio azul parece azul porque transmite principalmente luz azul, y absorbe la luz de los demás colores que lo iluminan. El trozo de vidrio contiene colorantes o *pigmentos*, que son partículas finas que absorben en forma selectiva luz de determinadas frecuencias y transmiten selectivamente luz de otras frecuencias. Desde un punto de vista atómico, los electrones de los átomos de pigmento absorben en forma selectiva la luz de ciertas frecuencias. De molécula a molécula en el vidrio se reemite la luz de otras frecuencias. La energía de la luz absorbida aumenta la energía cinética de las moléculas y el vidrio se calienta. El vidrio ordinario de las ventanas es incoloro, porque transmite igualmente bien luz de todas las frecuencias visibles.

EXAMÍNATE

1. Cuando la luz roja llega a una rosa roja, ¿por qué se calientan más las hojas que los pétalos?
2. Cuando llega luz verde a una rosa roja, ¿por qué los pétalos se ven negros?
3. Si sujetas una fuente pequeña de luz blanca entre ti y un trozo de vidrio rojo, verás dos reflexiones en el vidrio: una desde la cara delantera y otra desde la superficie trasera. ¿Qué color tiene cada reflexión?

COMPRUEBA TUS RESPUESTAS

1. Las hojas absorben la luz roja, y no la reflejan, y por ello se calientan más.
2. Los pétalos absorben la luz verde, y no la reflejan. Como el verde es el único color que ilumina la rosa, y como el verde no contiene rojo que se pueda reflejar, la rosa no refleja color alguno y aparece negra.
3. La reflexión de la cara delantera es blanca, porque la luz no penetra en el vidrio coloreado lo suficiente para que se absorba la luz que no sea roja. Sólo la luz roja llega a la superficie trasera, porque los pigmentos del vidrio absorben todos los demás colores y, por ello, la reflexión en la cara trasera es roja.

Mezcla de luces de colores



Todos los colores juntos producen el blanco. La ausencia total de color es el negro.

¡EUREKA!



Cúspide verde-amarela de la luz solar



Sombras coloreadas

El hecho de que la luz blanca del Sol esté formada por todas las frecuencias visibles se demuestra con facilidad haciéndola pasar por un prisma, y observando el espectro con los colores del arco iris. La intensidad de la luz solar varía con la frecuencia, y es más intensa en la parte amarilla-verde del espectro. Es interesante observar que los ojos han evolucionado y llegado a tener la sensibilidad máxima en estas frecuencias. Es la causa de que los nuevos carros de bomberos estén pintados de amarillo-verde, en especial en los aeropuertos, donde la visibilidad resulta fundamental. Nuestra sensibilidad a la luz amarillo-verde también es la causa de que por la noche veamos mejor con iluminación de lámparas de vapor de sodio, con luz amarilla, que con iluminación de lámparas ordinarias de filamento de tungsteno con el mismo brillo.

La distribución gráfica de brillo en función de la frecuencia se llama *curva de radiación* de la luz solar (figura 27.7). La mayoría de los blancos que produce la luz solar reflejada comparten esta distribución de frecuencias.

Todos los colores combinados forman el blanco. Es interesante el hecho de que la percepción del blanco también se obtenga combinando sólo luces roja, verde y azul. Esto se entiende mejor dividiendo la curva de radiación solar en tres regiones, como en la figura 27.8. En los ojos hay tres clases de receptores de color en forma de cono. La luz del tercio inferior de la distribución espectral estimula los conos sensibles a las frecuencias bajas, y se ve roja; la luz en el tercio intermedio estimula los conos sensibles a las frecuencias intermedias y se ve verde; la luz en el tercio de frecuencia alta estimula los conos sensibles a mayores frecuencias y se ve azul. Cuando se estimulan por igual las tres clases de conos vemos el blanco.

Al proyectar luces roja, verde y azul en una pantalla, se produce blanco donde se enciman las tres luces. Cuando dos de los tres colores se traslapan se produce otro color (figura 27.9). En el idioma de los físicos, las luces de colores que se traslapan se *suman* entre sí. Así, se dice que la luz roja, verde y azul *se suma* y *produce luz blanca*, y que dos colores cualesquiera de esos tres se suman y producen otro color. Diversas cantidades de los colores rojo, verde y azul –los colores a los cuales son sensibles cada una de las tres clases de nuestros conos– producen cualquier color del espectro. Por tal razón, el rojo, el verde y el azul se llaman **colores primarios aditivos**. Un examen cuidadoso de la imagen en la mayoría de los cinescopios de la **TV en color** indica que es un conjunto de man-

FIGURA 27.7

La curva de radiación de la luz solar es una gráfica del brillo en función de la frecuencia. La luz solar es más brillante en la región del amarilla-verde, a la mitad del intervalo visible. (Véase la sección a color al final del libro.)

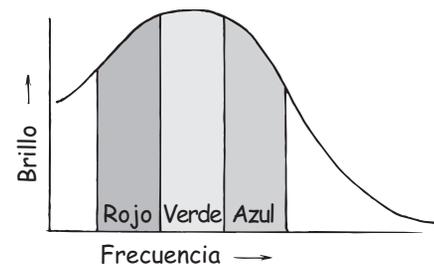
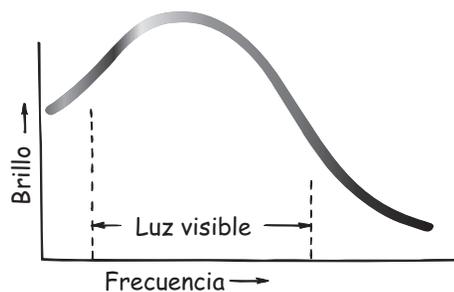


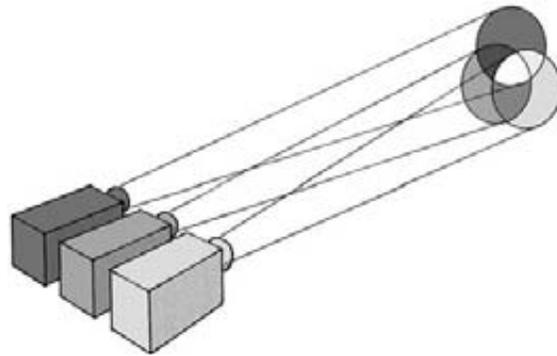
FIGURA 27.8

Curva de radiación de la luz solar dividida en tres regiones: roja, verde y azul. Se trata de los colores primarios aditivos. (Véase la sección a color al final del libro.)

FIGURA 27.9

Figura interactiva

Adición de colores, mezclando luces de color. Cuando los tres proyectores iluminan una pantalla blanca con luces roja, verde y azul, las partes superpuestas producen distintos colores. El blanco se produce donde se traslapan las tres luces. (Véase la sección a color al final del libro.)



Es interesante hacer notar que el “negro” que vemos en las escenas más oscuras en la pantalla de TV es simplemente el color de la superficie del cinescopio por sí sola, que es más un gris claro que negro. Como nuestros ojos son sensibles al contraste con las partes iluminadas de la pantalla, vemos este gris como negro.

¡EUREKA!



FIGURA 27.10

Figura interactiva

La pelota de golf blanca parece blanca cuando la iluminan luces roja, verde y azul de igual intensidad. ¿Por qué las sombras de esa pelota son cian, magenta y amarilla? (Véase la sección a color al final del libro.)

chas diminutas, cada una con menos de un milímetro de diámetro. Cuando se enciende la pantalla, algunas de las manchas son rojas, unas verdes y otras azules; las mezclas de esos colores primarios, vistas a cierta distancia, forman la gama completa de colores y además el blanco.

Colores complementarios

Vemos lo que sucede cuando se combinan los tres colores primarios aditivos:

Rojo + Azul = Magenta (morado)

Rojo + Verde = Amarillo

Azul + Verde = Cian (azul verdoso)

El magenta es el opuesto del verde, el cian es el opuesto del rojo y el amarillo es el opuesto del azul. Ahora, cuando se suman los colores opuestos se obtiene blanco.

Magenta + Verde = Blanco (= Rojo + Azul + Verde)

Amarillo + Azul = Blanco (= Rojo + Verde + Azul)

Cian + Rojo = Blanco (= Azul + Verde + Rojo)

Cuando se suman dos colores y se produce blanco, los colores se llaman **colores complementarios**. Cada matiz tiene un color complementario que, sumado a él, produce blanco.

El hecho de que un color y su complemento se combinen para producir luz blanca, se aprovecha muy bien al iluminar los escenarios. Por ejemplo, cuando las luces azul y amarilla llegan a los actores, producen el efecto de la luz blanca, excepto en los lugares donde está ausente uno de los colores, por ejemplo, en las sombras. La sombra producida por una lámpara, digamos que la azul, se ilumina con la lámpara amarilla y parece amarilla. Asimismo, la sombra que produce la lámpara amarilla parece azul. Es un efecto muy interesante.

Eso se ve en la figura 27.10, donde una pelota de golf está iluminada por luces roja, verde y azul. Observa las sombras que produce la pelota. La sombra de en medio está producida por la lámpara verde y no es negra porque está iluminada por las luces roja y azul, que forman el magenta. La sombra que produce la luz azul parece amarilla, porque está iluminada por las luces roja y verde. ¿Puedes ver por qué la luz que produce la luz roja parece cian?

EXAMÍNATE

1. De acuerdo con la figura 27.9, determina los complementos del cian, del amarillo y del rojo.
2. Rojo + azul = ____.
3. Blanco - rojo = ____.
4. Blanco - azul = ____.

Mezcla de pigmentos de colores

Todo artista sabe que si se mezclan pinturas de colores rojo, verde y azul, el resultado no será blanco, sino un café oscuro sucio. Las pinturas roja y verde no se combinan para formar el amarillo, como en la regla de combinación de luces de colores. La mezcla de pigmentos en las pinturas y los tintes es totalmente distinta que la mezcla de las luces. Los pigmentos son partículas diminutas que absorben colores específicos. Por ejemplo, los pigmentos que producen el color rojo absorben el cian, su color complementario. Así, algo pintado de rojo absorbe principalmente al cian, y es la causa de que refleje el rojo. De hecho, de la luz blanca se ha *restado* el cian. Algo pintado de azul absorbe el amarillo, por lo que refleja todos los colores excepto el amarillo. Si al blanco le quitas el amarillo obtienes azul. Los colores magenta, cian y amarillo son los **primarios sustractivos**. La diversidad de colores que ves en las fotografías en color se forman con puntos magenta, cian y amarillo. La luz ilumina el libro, y de la luz que se refleja se restan luces de algunas frecuencias. Las reglas de sustracción de color son distintas de las de adición de color.

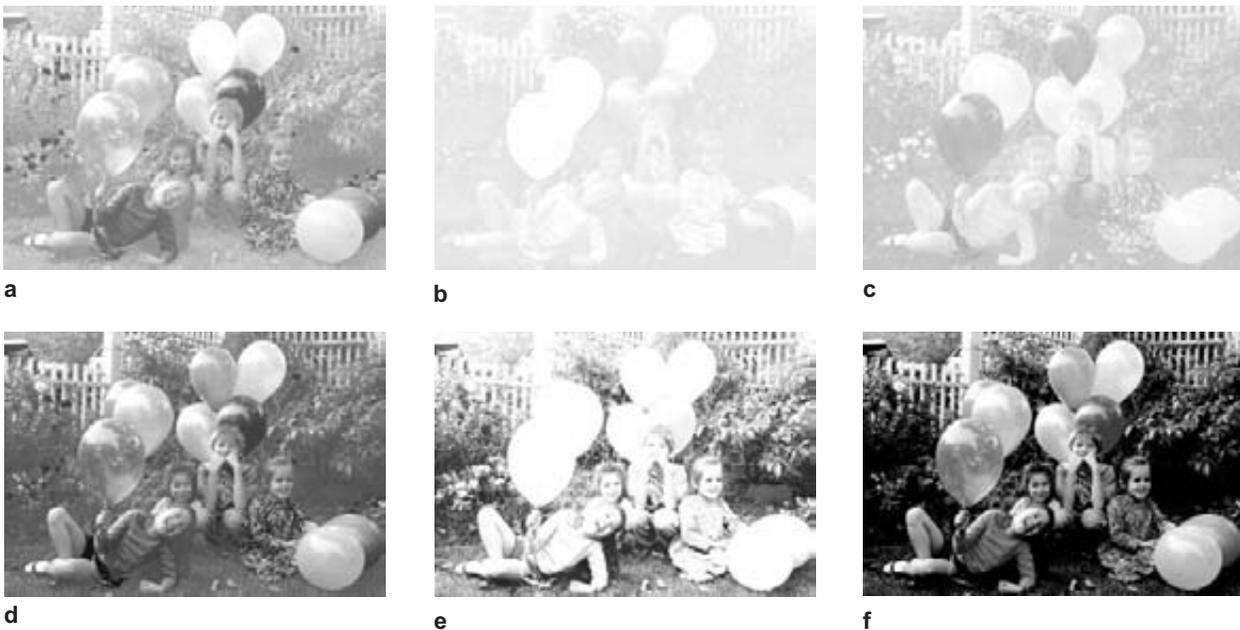


FIGURA 27.11

Sólo se usan tintas de cuatro colores para imprimir las imágenes y las fotografías en color: *a*) magenta, *b*) amarillo, *c*) cian y negro. Cuando se combinan magenta, amarillo y cian, producen lo que se ve en *d*). Al agregar el negro *e*) se produce la imagen terminada, *f*). (Véase la sección a color al final del libro.)

FIGURA 27.12

Los colorantes y los pigmentos, como en las tres transparencias que se ven aquí, absorben y sustraen con eficacia la luz de algunas frecuencias y sólo transmiten parte del espectro. Los colores primarios sustractivos son amarillo, magenta y cian. Cuando la luz blanca pasa por tres filtros de esos colores, se bloquea (se sustrae) la luz de todas las frecuencias y se produce el negro. Donde sólo se traslapan el amarillo y el cian, se resta la luz de todas las frecuencias, excepto la verde. Diversas proporciones de amarillo, cian y magenta producen casi cualquier color del espectro. (Véase la sección a color al final del libro.)

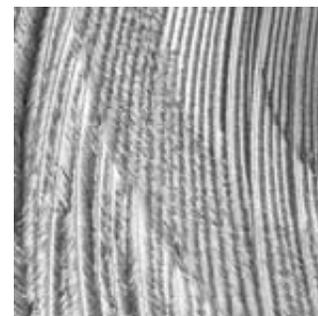
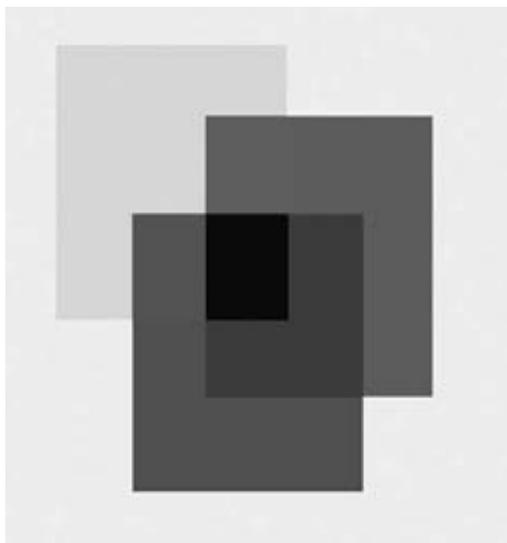


FIGURA 27.13

Los ricos colores de un periwinkito representan muchas frecuencias de la luz. Sin embargo, la fotografía sólo es una mezcla de amarillo, magenta, cian y negro. (Véase la sección a color al final del libro.)

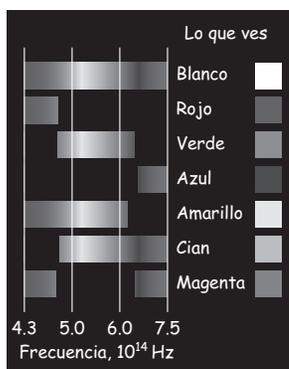


FIGURA 27.14

Intervalos aproximados de frecuencias que percibimos como colores primarios aditivos, y colores primarios sustractivos. (Véase la sección a color al final del libro.)

La **impresión en color** es una aplicación interesante de la mezcla de colores. De la imagen que se quiere imprimir se toman tres fotografías (separaciones de color): una a través de un filtro magenta, otra a través de un filtro amarillo y la tercera a través de un filtro cian. Cada uno de los tres negativos tiene una distribución distinta de zonas expuestas, que corresponden al filtro que se usó y a la distribución de los colores en la ilustración original. A través de esos negativos se hace pasar luz que llega a placas metálicas, con un tratamiento especial para retener la tinta de impresión sólo en las áreas que se expusieron a la luz. La deposición de la tinta se regula en distintas partes de la placa, mediante puntos diminutos. Las **impresoras de inyección de tinta** depositan diversas combinaciones de tintas magenta, cian, amarilla y negra. Examina los colores de cualquier imagen impresa con una lupa y verás cómo los puntos traslapados de esos colores dan la apariencia de muchos colores más. O examina de cerca un anuncio.

Vemos que todas las reglas de adición y de sustracción de color pueden deducirse de las figuras 27.9, 27.10 y 27.12.

Cuando vemos los colores en una pompa de jabón, observamos el cian, el magenta y el amarillo de forma predominante. ¿Qué nos dice esto? ¿Nos dice que se han sustraído algunos colores primarios de la luz blanca original! (La forma en que sucede esto se explica en el capítulo 29.)

Por qué el cielo es azul (opcional)



No todos los colores son el resultado de la adición o sustracción de luces. Algunos colores como el azul del cielo, son el resultado de dispersiones selectivas. Imagina el caso similar del sonido: Si un haz de determinada frecuencia acústica se dirige hacia un diapasón de frecuencia similar, el diapasón se pone a vibrar, y

COMPRUEBA TUS RESPUESTAS

1. Rojo, azul, cian.
2. Magenta.
3. Cian.
4. Amarillo.

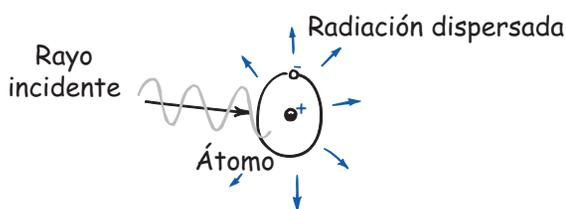


FIGURA 27.15

Un rayo de luz llega a un átomo y aumenta el movimiento de los electrones en el átomo. Los electrones vibratorios reemiten la luz en varias direcciones. La luz se dispersa.



¿No es verdad que saber por qué el cielo es azul y por qué las puestas de Sol dan tonalidades rojizas *acrecienta* su hermosura? El conocimiento no les resta belleza.

¡EUREKA!



FIGURA 27.16

Cuando el aire está limpio, la dispersión de la luz de alta frecuencia produce un cielo azul. Cuando el aire está lleno de partículas de mayor tamaño que las moléculas, también se dispersa la luz de menor frecuencia, que se suma a la azul y produce un cielo blanquecino. (Véase la sección a color al final del libro.)

cambia la dirección del haz en múltiples direcciones. El diapason *dispersa* el sonido. Ocurre un proceso similar con la dispersión de la luz en átomos y partículas muy alejadas entre sí, como en la atmósfera.²

Recuerda la figura 27.2, donde vimos que los átomos se comportan en forma muy parecida a diapasones diminutos, y reemiten las ondas luminosas que les llegan. Las moléculas y los grupos de átomos más numerosos hacen lo mismo.

Cuanto más diminuta sea la partícula, emitirá mayor cantidad de luz de mayor frecuencia. Se parece a la forma en que las campanas pequeñas suenan con notas más agudas que las campanas grandes. Las moléculas de nitrógeno y oxígeno que forman la mayoría de la atmósfera funcionan como diminutas campanas que “suenan” con frecuencias altas cuando las energiza la luz solar. Al igual que el sonido de las campanas, la luz reemitida sale en todas direcciones. Cuando la luz se reemite en todas direcciones se dice que se *dispersa*.

De las frecuencias visibles de la luz solar, el nitrógeno y el oxígeno de la atmósfera dispersan principalmente el violeta, seguido del azul, el verde, el amarillo, el naranja y el rojo, en ese orden. El rojo se dispersa la décima parte del violeta. Aunque la luz violeta se dispersa más que la azul, los ojos no son muy sensibles a la luz violeta. En consecuencia, lo que predomina en nuestra visión es la luz azul dispersada y vemos un cielo azul.

El azul celeste varía en los distintos lugares y bajo distintas condiciones. Un factor principal es el contenido de vapor de agua en la atmósfera. En los días claros y secos, el azul del cielo es mucho más profundo que en los días claros con mucha humedad. En países donde la atmósfera superior es excepcionalmente seca, como en Italia y en Grecia, los cielos son de un bello azul que ha inspirado a los pintores durante siglos. Cuando la atmósfera contiene grandes cantidades de partículas de polvo o de otros materiales, mayores que las moléculas de oxígeno y de nitrógeno, también dispersa fuertemente la luz de las frecuencias menores.



FIGURA 27.17

En las plumas de un azulejo no hay pigmentos azules. En lugar de ello hay diminutas células alveolares en las barbas de esas plumas, que dispersan la luz, principalmente la luz de alta frecuencia. Así, un azulejo es azul por la misma razón por la que el cielo es azul: por la dispersión. (Véase la sección a color al final del libro.)

² A esta clase de dispersión se le llama *dispersión de Rayleigh*, y sucede siempre que las partículas dispersoras son mucho menores que la longitud de onda de la luz incidente, y que tienen resonancias a mayores frecuencias que las de la luz dispersada. La dispersión es mucho más complicada que lo que exponemos de manera simplificada aquí.

Esto hace que el cielo sea menos azul, y tenga una apariencia blanquecina. Después de una fuerte lluvia, cuando se han lavado las partículas, el cielo se vuelve de un azul más profundo.

La neblina grisácea del cielo sobre las grandes ciudades se debe a las partículas emitidas por los motores de los automóviles y camiones, así como por las fábricas. Aun en marcha mínima, un motor normal de automóvil emite más de 100 mil millones de partículas por segundo. La mayoría son invisibles, pero funcionan como centros diminutos en los cuales se adhieren otras partículas. Son los principales dispersores de la luz de menor frecuencia. Las partículas más grandes entre las anteriores más bien absorben, y no reemiten la luz, y se produce una neblina café. ¡Caramba!

Por qué los crepúsculos son rojos (opcional)



El hollín atmosférico calienta la atmósfera terrestre al absorber luz; mientras enfría ciertas regiones al bloquear la luz solar, impidiendo así que llegue a la superficie. Partículas de hollín en el aire provocan fuertes lluvias en unas regiones, y sequías y tormentas de arena en otras.

¡EUREKA!

La luz que no se dispersa es la luz que se transmite. Como la luz roja, anaranjada y amarilla es la que menos se dispersa en la atmósfera, la luz de tal baja frecuencia se transmite mejor por el aire. El rojo, que se dispersa menos y en consecuencia se transmite más, pasa por más atmósfera que cualquier otro color. Así, cuanto más gruesa sea la atmósfera atravesada por un rayo de luz solar, da más tiempo a que se dispersen todos los componentes de mayor frecuencia de la luz. Eso quiere decir que la luz que mejor la atraviesa es la roja. Como se observa en la figura 27.18, la luz solar atraviesa más atmósfera en el crepúsculo, y es la razón por la que los crepúsculos (y las auroras) se ven rojos.

A mediodía, la luz atraviesa una cantidad mínima de atmósfera para llegar a la superficie terrestre. Sólo se dispersa una pequeña parte de la luz solar, la de alta frecuencia, lo bastante como para que el Sol se vea amarillento. Al avanzar el día y al bajar el Sol en el cielo, se alarga la trayectoria de sus rayos en la atmósfera, y de ellos se dispersa cada vez más luz violeta y azul. La eliminación del violeta y el azul hace que la luz transmitida sea más roja. El Sol se vuelve cada vez más rojo, pasando por el amarillo y el anaranjado, y por último al rojo-anaranjado cuando se oculta. Los crepúsculos y las auroras son muy coloridos después de las erupciones volcánicas, porque hay más abundancia en el aire de partículas mayores que las moléculas del aire.³

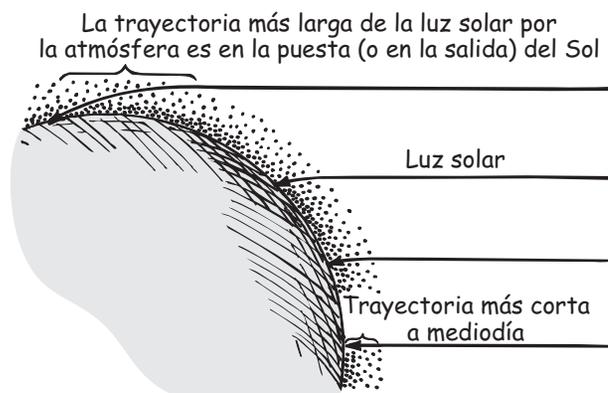


FIGURA 27.18

Figura interactiva

Un rayo de Sol debe viajar por más atmósfera en el crepúsculo que a mediodía. En consecuencia, se dispersa más luz azul del rayo en la puesta del Sol que a mediodía. Para cuando el rayo de luz inicialmente blanca llega al suelo, sólo sobrevive la luz de las frecuencias inferiores, y produce un crepúsculo rojo.

³ Los crepúsculos y las auroras serían mucho más coloridos si en el aire hubiera más abundancia de partículas mayores que las moléculas. Eso sucedió en todo el mundo, durante los tres años que siguieron a la erupción del volcán Krakatoa en 1883, cuando se dispersaron en toda la atmósfera partículas de tamaños en el dominio de las micras, en abundancia. Esto sucedió en menor grado después de la erupción del Monte Pinatubo, de Las Filipinas, en 1991. ¿Cuál sigue?

PRÁCTICA DE FÍSICA

Puedes simular un crepúsculo con una pecera llena de agua donde viertas unas cuantas gotas de leche. A continuación ilumina la pecera con una linterna sorda y verás que desde un lado se ve azulosa. Las partículas de leche

dispersan las frecuencias mayores de la luz en el haz. La luz que sale por el lado opuesto de la pecera tendrá un tinte rojizo. Es la luz que no fue dispersada.

Los colores de los crepúsculos se apegan a nuestras reglas de mezcla de colores. Cuando de la luz blanca se resta el azul, el color complementario que queda es el amarillo. Cuando se resta el violeta, que es de mayor frecuencia, el color complementario que resulta es el anaranjado. Cuando se resta el verde, de frecuencia intermedia, queda el magenta. Las combinaciones de los colores producidos varían de acuerdo con las condiciones atmosféricas, que cambian de un día para otro y nos proporcionan una diversidad de crepúsculos para admirarlos.

EXAMÍNATE

1. Si las moléculas de la atmósfera dispersaran más la luz de baja frecuencia que luz de alta frecuencia, ¿de qué color sería el cielo? ¿De qué color serían las puestas de sol?
2. Las montañas lejanas se ven azulosas. ¿Cuál es la fuente de ese azul? (*Sugerencia:* ¿qué hay entre nosotros y las montañas que vemos?)
3. Las montañas nevadas y lejanas reflejan mucha luz y son muy brillantes. Las muy lejanas se ven amarillentas. ¿Por qué? (*Sugerencia:* ¿qué le sucede a la luz blanca reflejada al ir desde las montañas hasta nosotros?)

COMPRUEBA TUS RESPUESTAS

1. Si se dispersara la luz de baja frecuencia, el cielo al mediodía parecería rojo-naranja. En la puesta del Sol, se dispersarían más rojos por la mayor longitud de la trayectoria de la luz solar, y la que llegara a nosotros sería principalmente azul y violeta. Así, ¡los crepúsculos serían azules!
2. Si vemos hacia las montañas lejanas es muy poca la luz de ellas que nos llega, y predomina el azul de la atmósfera entre ellas y nosotros. El azul que atribuimos a las montañas es en realidad el azul del “cielo” a bajas alturas, ¡que está entre nosotros y las montañas!
3. Las montañas nevadas y brillantes se ven amarillentas porque el azul de la luz blanca que reflejan hacia nosotros se dispersa en el camino. Para cuando la luz nos llega, es débil en las altas frecuencias y fuerte en las bajas frecuencias y, por consiguiente, es amarillenta. A mayores distancias, mayores que a las que normalmente se ven las montañas, parecerían anaranjadas, por la misma razón que los crepúsculos se ven anaranjados.

¿Por qué vemos el azul dispersado cuando el fondo es oscuro, pero no cuando es claro? Porque la luz azul dispersada es débil. Un color débil se percibe contra un fondo oscuro, pero no contra un fondo claro. Por ejemplo, cuando vemos desde la superficie terrestre hacia la relativa oscuridad del espacio, la atmósfera es azul celeste. Pero los astronautas de arriba ven hacia abajo a través de la misma atmósfera y no ven el mismo azul en las regiones claras de la Tierra.

Por qué las nubes son blancas (opcional)



FIGURA 27.19

Una nube está formada por gotitas de agua de distintos tamaños. Las más diminutas dispersan la luz azul; un poco más grandes dispersan la luz verde y otras todavía más grandes dispersan la luz roja. El resultado es una nube blanca. (Véase la sección a color al final del libro.)

Las nubes están formadas por gotitas de agua de distintos tamaños. Esas gotitas de distintos tamaños producen una variedad de frecuencias dispersadas: las más diminutas dispersan más el azul que los demás colores; las gotas un poco mayores dispersan frecuencias un poco mayores, por ejemplo, el verde; y las gotas más grandes dispersan más el rojo. El resultado general es una nube blanca. Los electrones, cercanos entre sí dentro de una gotita, vibran juntos y en fase, lo cual da como resultado mayor intensidad de la luz dispersa que cuando la misma cantidad de electrones vibran por separado. En consecuencia, ¡las nubes son luminosas!

Cuando la variedad de gotitas es mayor, absorbe mucha de la luz que les llega, y entonces la intensidad que se dispersa es menor. Eso contribuye a la oscuridad de nubes formadas por gotas más grandes. Si las gotitas aumentan más de tamaño, caen como gotas de lluvia.

La siguiente vez que te encuentres admirando un cielo azul intenso, o deleitándote con las formas de las nubes brillantes, o contemplando una bella puesta del Sol, piensa en los diminutos diapasones ópticos que vibran; ¡así apreciarás más las maravillas cotidianas de la naturaleza!

Por qué el agua es azul verdosa (opcional)

Con frecuencia, al mirar la superficie de un lago o del mar, vemos un bello azul profundo. Pero ése no es el color del agua, es el color reflejado del cielo. El color mismo del agua, que puedes apreciar al mirar un trozo de material blanco bajo el agua, es un azul verdoso pálido.

Aunque el agua es transparente a la luz de casi todas las frecuencias visibles, absorbe mucho las ondas infrarrojas. Esto es porque las moléculas de agua resuenan en las frecuencias del infrarrojo. La energía de las ondas infrarrojas se transforma en energía interna en el agua, y es la causa de que la luz solar caliente al agua. Las moléculas de agua resuenan algo en el rojo visible, por lo que la luz roja es absorbida un poco más que la luz azul en el agua. La luz roja se reduce a la cuarta parte de su intensidad inicial al pasar por 15 metros de agua. Cuando la luz solar penetra en más de 30 metros de agua, tiene muy poca luz roja. Cuando se retira el rojo de la luz blanca, ¿qué color queda? Esta pregunta se puede plantear de otra forma: ¿cuál es el color complementario del rojo? El color comple-

FIGURA 27.20

El agua es cian porque absorbe la luz roja. La espuma de las olas es blanca porque, como las nubes, está formada por gotitas de agua de distintos tamaños que dispersan luz de todas las frecuencias visibles. (Véase la sección a color al final del libro.)





FIGURA 27.21

El azul extraordinario del lago de las Montañas Rocosas canadienses se debe a la dispersión de partículas extremadamente diminutas de rendijas glaciales suspendidas en el agua. (Véase la sección a color al final del libro.)

mentario del rojo es el cian, que es el azul verdoso. En el agua de mar, el color de todo lo que se ve a través de ella es azul verdoso.

Muchos cangrejos y otras criaturas marinas que parecen negros en aguas profundas se ven rojos al subir a la superficie. A mayores profundidades, el rojo y el negro se ven igual. Aparentemente, el mecanismo evolutivo de la selección no pudo distinguir entre el negro y el rojo a esas profundidades del mar.

Mientras que el color verde azulado del agua es producto de la absorción selectiva de la luz, el estupendo azul vívido de los lagos en las Montañas Rocosas canadienses se debe a la dispersión.⁴ Los lagos se alimentan del agua de deshielo de los glaciares, la cual contiene partículas diminutas como rendijas, conocidas como harina de las rocas, que permanecen suspendidas en el agua. La luz se dispersa desde estas diminutas partículas y le da al agua su estupendo y vívido color (figura 27.21). (A los turistas que fotografían estos lagos se les aconseja que le digan a quienes las revelan que *no* ajusten el color de las imágenes al azul “real”!)

Es muy interesante el hecho de que el color que vemos no existe en el mundo que nos rodea. Está en nuestras mentes. El mundo está lleno de vibraciones, es decir, de ondas electromagnéticas que estimulan la sensación de colores cuando las vibraciones interactúan con las antenas receptoras en forma de cono que hay en la retina. Qué bueno que haya interacciones entre los ojos y el cerebro que produzcan los bellos colores que vemos.

⁴ La dispersión de la luz en partículas pequeñas y muy distanciadas entre sí, en los iris de los ojos azules, es la causa de su color, y no los pigmentos. La absorción de pigmentos es la causa de los ojos cafés.

Resumen de términos

Colores complementarios Dos colores cualesquiera que al sumarse produzcan luz blanca.

Colores primarios aditivos Tres colores –rojo, azul y verde– que cuando se suman en ciertas proporciones producen cualquier otro color de la parte visible del espectro electromagnético, y se pueden mezclar por igual para producir el blanco.

Colores primarios sustractivos Los tres colores de pigmentos absorbentes –magenta, amarillo y cian–, que cuando se mezclan en ciertas proporciones reflejan cualquier otro color de la parte visible del espectro electromagnético.

Lecturas sugeridas

Murphy, Pat y Paul Doherty. *The Color of Nature*. San Francisco: Chronicle Books, 1996.

Preguntas de repaso

1. ¿Cuál es la relación de la frecuencia de la luz y su color?

Reflexión selectiva

2. ¿Qué sucede cuando los electrones externos en torno al núcleo del átomo encuentran ondas electromagnéticas?

3. ¿Qué le sucede a la luz cuando llega a un material cuya frecuencia natural es igual a la frecuencia de esa luz?

4. ¿Qué le sucede a la luz cuando llega a un material cuya frecuencia natural es mayor o menor que la frecuencia de esa luz?

Transmisión selectiva

5. ¿De qué color es la luz que se transmite por un trozo de vidrio rojo?
6. ¿Qué es un *pigmento*?
7. ¿Qué se calienta con más rapidez en la luz solar, un trozo de vidrio incoloro, o uno con color? ¿Por qué?

Mezcla de luces de colores

8. ¿Cuál es la prueba para afirmar que la luz blanca está formada por todos los colores del espectro?
9. ¿Cuál es el color de la frecuencia máxima de la radiación de luz solar?
10. ¿Cuál es el color de la luz para el que los ojos son más sensibles?
11. ¿Qué es una *curva de radiación*?
12. ¿Qué intervalos de frecuencia de la curva de radiación ocupan las luces roja, verde y azul?
13. ¿Por qué el rojo, el verde y el azul se llaman *colores primarios aditivos*?

Colores complementarios

14. ¿Cuál es el color que resulta de combinar luces roja y cian de igual intensidad?
15. ¿Por qué el rojo y el cian se llaman colores complementarios?

Mezcla de pigmentos de colores

16. Cuando algo está pintado de rojo, ¿qué color absorbe más?
17. ¿Cuáles son los colores primarios sustractivos?
18. Si con una lupa ves las ilustraciones a todo color, verás tres colores de tinta más el negro. ¿Cuáles son esos colores?

Por qué el cielo es azul

19. ¿Qué interacciona más con los sonidos agudos, las campanas pequeñas o las grandes?
20. ¿Qué interacciona más con la luz de alta frecuencia, partículas pequeñas o partículas grandes?
21. ¿Por qué es incorrecto decir que el cielo es azul debido a que las moléculas de oxígeno y nitrógeno son de color azul?
22. ¿Por qué a veces el cielo parece blanquecino?

Por qué los crepúsculos son rojos

23. ¿Por qué el Sol se ve rojizo en la aurora y en el ocaso, pero no a mediodía?
24. ¿Por qué varía el color de los crepúsculos de un día para otro?

Por qué las nubes son blancas

25. ¿Cuál es la prueba de que en una nube hay gotas de distintos tamaños?
26. ¿Cuál es el efecto en el color de una nube, cuando contiene muchas gotas extragrandes?

Por qué el agua es azul verdosa

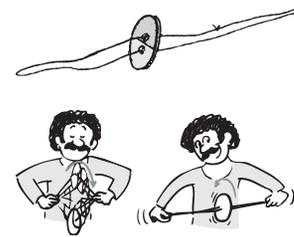
27. ¿Qué parte del espectro electromagnético se absorbe más en el agua?
28. ¿Qué parte del espectro electromagnético visible se absorbe más en el agua?
29. ¿Qué color se produce al restar luz roja de la luz blanca?
30. ¿Por qué el agua se ve cian?

Proyectos

1. Observa con detenimiento un trozo de papel de color, durante más o menos 45 segundos. Después mira una superficie blanca. Los conos de la retina, receptores del color del papel, se fatigaron y ves una imagen persistente del color complementario

cuando miras la superficie blanca. Eso se debe a que los conos fatigados mandan una señal más débil al cerebro. Todos los colores producen blanco, pero todos los colores menos uno producen el color complementario del que falta. ¡Haz la prueba!

2. Corta un disco de cartoncillo con algunos centímetros de diámetro. Haz dos orificios a un lado del centro, lo suficientemente grandes como para que pase por ellos un cordón, como se muestra en el esquema. Gira el disco, para que la cuerda se enrolle como la banda de hule de un avión de juguete. Luego estira el cordón, tirando de él en los extremos, y el disco girará. Si la mitad del disco es de color amarillo y la otra mitad es azul, cuando gire los colores se mezclarán y se verán casi blancos (lo puro



del blanco dependerá de los tonos de los colores). Haz la prueba con otros colores complementarios.

3. Construye un tubo de cartón cubierto en cada extremo con una hoja metálica. Con un lápiz perfora un orificio en cada extremo, uno de unos tres milímetros de diámetro y el otro con el doble de diámetro que el anterior. Por el agujero pequeño mira a través del tubo objetos de colores contra el fondo negro del tubo. Verás colores muy distintos de los que aparecen contra los fondos ordinarios.
4. Escribe una carta a tu abuelita y cuéntale qué detalles has aprendido que expliquen por qué el cielo es azul, los crepúsculos son rojos y las nubes son blancas. Analiza si esta información incrementa, mantiene igual o disminuye tu percepción de la belleza de la naturaleza.

Ejercicios

1. ¿Qué color de la luz visible tiene la máxima longitud de onda? ¿Y la mínima?
2. ¿Por que la pintura roja es de este color?
3. En una tienda de ropa que sólo tiene iluminación fluorescente, una cliente insiste en sacar los vestidos a la luz del día, en la entrada, para comprobar el color. ¿Tiene razón? ¿Por qué?

4. ¿Por qué las hojas de una rosa roja se calientan más que los pétalos cuando las ilumina la luz roja? ¿Qué tiene que ver esto con las personas que, en medio del caluroso desierto, usan ropa blanca?
5. Si por algún motivo la luz solar fuera verde y no blanca, ¿qué color de ropa sería el más adecuado para los días muy calurosos? ¿Para los días muy fríos?
6. ¿Por qué no mencionamos al negro y al blanco entre los colores?
7. ¿Por qué los interiores de los instrumentos ópticos son negros?
8. Los carros de bomberos eran rojos. En la actualidad, muchos de ellos son amarillos con verde. ¿Por qué ese cambio?
9. ¿Cuál es el color de las pelotas normales de tenis y por qué?
10. La curva de radiación del Sol (figura 27.8) muestra que la luz más brillante del Sol es amarillo-verde. Entonces, ¿por qué vemos blanquecina la luz solar en vez de amarillo-verde?
11. ¿Qué color tendría una tela roja si la iluminara la luz solar? ¿Y si la iluminara un letrero de neón? ¿Una luz cian?
12. ¿Por qué una hoja de papel blanco parece blanca en la luz blanca, roja en la luz roja, azul en la luz azul, etcétera, para todos los colores.
13. Se cubre un reflector de teatro de modo que no transmita la luz azul de su filamento, que está al blanco vivo. ¿Qué color tiene la luz que sale de esa candileja?
14. ¿Cómo podrías usar los reflectores en un teatro, para que las prendas amarillas de los actores cambiaran de repente a negras?
15. Imagina que una pantalla blanca se ilumina con dos linternas sordas, una que pasa por un vidrio azul y la otra que pasa por un vidrio amarillo. ¿Qué color aparece en la pantalla cuando se traslapan las dos luces? Imagina que en vez de esto, las dos hojas de vidrio se colocan en el haz de una sola linterna. ¿Qué sucede?
16. ¿Una TV en color funciona con adición de colores o con sustracción de colores? Defiende tu respuesta.
17. En una pantalla de TV, las regiones (puntos) de materiales fluorescentes en rojo, verde y azul son iluminadas con diversas intensidades para producir un espectro completo de colores. ¿Qué puntos se activan para producir el amarillo? ¿Y el magenta? ¿Y el blanco?
18. ¿Qué colores de tinta usan las impresoras de inyección para producir toda la gama de colores? ¿Tales colores se forman por adición de color o por sustracción de color?
19. A continuación vemos una foto de la autora de física Suzanne Lyons, con su hijo Tristan de rojo y su hija Simone de verde. Abajo está el negativo de la foto,



- donde esos colores se ven distintos. ¿Cuál es tu explicación?
20. Tu amigo te dice que la mezcla de pintura magenta y amarilla producirá un color rojo, porque el magenta es una combinación de rojo y azul, el amarillo es una combinación de rojo y verde, y el color en común es el rojo. ¿Estás de acuerdo con él? ¿Por qué?
 21. Las luces del alumbrado público que utilizan lámparas de vapor de sodio de alta presión producen luz que principalmente es amarilla con algo de rojo. ¿Por qué las patrullas de policía de color azul oscuro no son recomendables en una comunidad que usa tales lámparas?
 22. ¿Qué color se transmite al pasar la luz blanca a través de filtros cian y magenta, uno tras otro?
 23. Al asolearte en la playa te quemas los pies. Entra al agua y míralos. ¿Por qué no se ven tan rojos como cuando estaban fuera del agua?
 24. ¿Por qué la sangre de los buceadores lesionados en aguas profundas se ve de un verde casi negro en las fotografías submarinas tomadas con luz natural, pero roja cuando se usan lámparas de destello?
 25. Viendo la figura 27.9, completa las siguientes ecuaciones:
 - Luz amarilla + luz azul = luz _____.
 - Luz verde + luz _____ = luz blanca.
 - Magenta + amarillo + cian = luz _____.
 26. Fíjate en la figura 27.9, para ver si las tres afirmaciones siguientes son correctas. A continuación llena el último espacio. (Todos los colores se combinan por adición de las luces.)
 - Rojo + verde + azul = blanco.
 - Rojo + verde = amarillo = blanco - azul.
 - Rojo + azul = magenta = blanco - verde.
 - Verde + azul = cian = blanco - _____.

27. Tu amigo te dice que las luces roja y cian producen luz blanca porque el cian es verde + azul, y por ende, rojo + verde + azul = blanco. ¿Estás de acuerdo con él? ¿Por qué?
28. ¿En cuál de los siguientes casos un plátano maduro se verá negro: cuando se ilumina con luz roja, luz amarilla, luz verde o luz azul?
29. Cuando a la tinta roja seca sobre una lámina de vidrio le llega luz blanca, el color que se transmite es rojo. Pero el color que se refleja no es rojo. ¿Cuál es?
30. Contempla fijamente la bandera de Estados Unidos. A continuación ve hacia alguna zona blanca sobre la pared. ¿Qué colores ves en la imagen de la bandera que aparece en la pared?
31. ¿Por qué no podemos ver las estrellas durante el día?
32. ¿Por qué el cielo es de azul más oscuro cuando se observa a grandes altitudes? (*Sugerencia: ¿de qué color es el “cielo” en la Luna?*)
33. En la Luna no hay atmósfera que produzca dispersión de la Luz. ¿Cómo se ve el cielo de la Luna durante el día cuando se observa desde la superficie lunar?
34. ¿Se pueden ver las estrellas desde la Luna durante el “día”, cuando brilla el Sol?
35. ¿Cuál es el color de la puesta de Sol cuando se mira desde la Luna?
36. En la playa te puedes quemar con el Sol estando bajo la sombra. ¿Cómo lo explicas?
37. A veces, los pilotos usan anteojos que transmiten la luz amarilla y absorben la luz de la mayoría de los demás colores. ¿Por qué de este modo ven con más claridad?
38. ¿La luz se propaga con más rapidez por la atmósfera inferior que por la atmósfera superior?
39. ¿Por qué el humo de una fogata se ve azul contra los árboles cerca del suelo, pero amarillo contra el cielo?
40. Tu amigo te dice que la razón de que las montañas oscuras distantes parezcan azules es porque estás viendo el cielo que hay entre las montañas. ¿Estás de acuerdo con él? ¿Por qué?
41. Comenta esta afirmación: “¡Ah, esa bella puesta de Sol, tan roja, tan sólo son los colores sobrantes que no fueron dispersados al atravesar la atmósfera!”
42. Si el cielo de cierto planeta del sistema solar fuera normalmente anaranjado, ¿de qué color serían los crepúsculos allí?
43. Las emisiones volcánicas arrojan cenizas finas en el aire, que dispersan la luz roja. ¿Qué color tiene la Luna llena a través de esas cenizas?
44. Las partículas diminutas, al igual que las campanas chicas, dispersan más las ondas de alta frecuencia que las de baja frecuencia. Las partículas grandes, al igual que las campanas grandes, dispersan principalmente ondas de baja frecuencia. Las partículas y las campanas de tamaño intermedio dispersan principalmente frecuencias intermedias. ¿Qué tiene eso que ver con la blancura de las nubes?
45. ¿Por qué la espuma de la cerveza de raíz es blanca, mientras que el resto de la bebida tiene un color café oscuro?
46. Las partículas muy grandes, como las gotas de agua, absorben más radiación de la que dispersan. ¿Qué tiene eso que ver con la oscuridad de las nubes de tormenta?
47. ¿Cómo parecería la blancura de la nieve, si la atmósfera terrestre tuviera un grosor varias veces mayor?
48. La atmósfera de Júpiter tiene más de 1,000 km de espesor. Desde la superficie de ese planeta, ¿esperarías ver un Sol blanco?
49. ¿Las auroras rojas ocurren por la misma razón que los crepúsculos rojos. Sin embargo, por lo general éstos son más coloridos que aquéllas, en especial cerca de zonas urbanas. ¿Cómo lo explicarías?
50. Explicas a un niño en la playa por qué el color del agua es cian. El niño apunta a las crestas blancas de las olas que rompen, y te pregunta por qué son blancas. ¿Qué le contestarías?

Reflexión y refracción



Peter Hopkinson despierta el interés de su clase con su estrafalaria demostración con espejos. Esta parado sobre ambas piernas y luego levanta su pierna derecha, mientras su pierna izquierda, que no se ve, le brinda apoyo detrás del espejo.

La mayoría de los objetos que vemos a nuestro alrededor no emiten su propia luz. Son visibles porque reemiten la luz que llega a su superficie desde una fuente primaria, como el Sol o una lámpara, o desde una fuente secundaria, como el cielo iluminado. Cuando la luz llega a la superficie de un material se remite sin cambiar de frecuencia, o se absorbe en el material y se convierte en calor.¹ Se dice que la luz se *refleja* cuando regresa al medio de donde vino; es el proceso de **reflexión**. Cuando la luz pasa de un material transparente a otro, se dice que se *refracta*; es el proceso es **refracción**. En general hay cierto grado de reflexión, refracción y absorción cuando la luz interactúa con la materia. En este capítulo no tendremos en cuenta la luz que se absorbe y se convierte en energía térmica, y nos concentraremos en la luz que continúa siendo luz al llegar a una superficie.

Reflexión

Cuando esta página se ilumina con la luz solar o la luz de una lámpara, los electrones de los átomos en el papel y la tinta vibran con más energía, en respuesta a los campos eléctricos oscilantes de la luz que ilumina. Los electrones energizados reemiten la luz que te permite ver la página. Cuando la página es iluminada con luz blanca, el papel parece blanco, lo cual indica que los electrones reemiten todas las frecuencias visibles. Hay muy poca absorción. Con la tinta la historia es diferente. Excepto por un poco de reflexión, absorbe todas las frecuencias visibles y, en consecuencia, aparece negra.

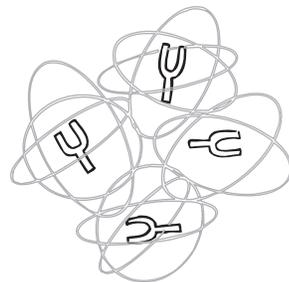


FIGURA 28.1

La luz interactúa con los átomos, como el sonido interactúa con los diapasones.

¹ Otro destino menos común es su absorción y reemisión a menores frecuencias. Es la fluorescencia (capítulo 30).

Principio del tiempo mínimo (óptica geométrica)

Sabemos que por lo general la luz se propaga en línea recta. Al ir de un lugar a otro, la luz toma el camino más eficiente, y se propaga en línea recta. Eso es cierto cuando no hay nada que obstruya el paso de la luz entre los puntos que se consideran. Si la luz se refleja en un espejo, el cambio de trayectoria, que de otra manera sería recta, se describe con una fórmula sencilla. Si la luz se refracta, como cuando pasa del aire al agua, otra fórmula describe la desviación de la luz respecto a la trayectoria rectilínea. Antes de estudiar la luz con esas fórmulas, examinaremos primero una idea básica de todas las fórmulas que describen las trayectorias de la luz. Esa idea fue formulada por el físico francés Pierre Fermat, más o menos en 1650, y se llama **principio de Fermat del tiempo mínimo**. Su idea es la siguiente: entre todas las trayectorias posibles que podría seguir la luz para ir de un punto a otro, toma la que requiere *el tiempo más corto*.

Ley de la reflexión

El principio del tiempo mínimo nos permite entender la reflexión. Imagina la siguiente situación. En la figura 28.2 vemos dos puntos, A y B, y un espejo plano ordinario abajo. ¿Cómo ir de A a B en el tiempo mínimo? La respuesta es bastante sencilla: ¡ir de A a B en línea recta! Pero si agregamos la condición de que la luz debe llegar al espejo en el camino de A a B, en el tiempo mínimo, la respuesta no sería tan fácil. Una forma sería ir tan rápido como sea posible de A al espejo y después a B, como se muestra en las líneas continuas de la figura 28.3. Esto forma una trayectoria corta al espejo, pero una muy larga del espejo hasta B. Si en lugar de ello examinamos un punto en el espejo un poco más hacia la derecha, aumentaremos un poco la primera distancia; pero disminuirá mucho la segunda distancia, por lo que la longitud total de la trayectoria indicada por las líneas punteadas y, en consecuencia, el tiempo de recorrido, es menor. ¿Cómo se puede determinar el punto exacto en el espejo con el cual el tiempo es mínimo? Con un truco geométrico se puede determinar muy bien.

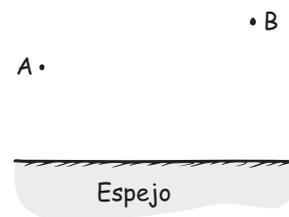


FIGURA 28.2

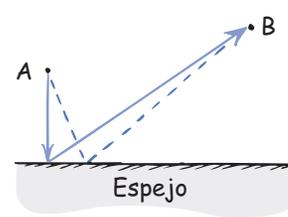


FIGURA 28.3

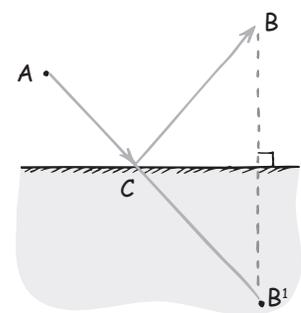


FIGURA 28.4

² Este material y muchos de los ejemplos del tiempo mínimo se adaptaron de R. P. Feynman, R. B. Leighton y M. Sands, *The Feynman Lectures of Physics*, vol. 1, cap. 26 (Reading, Mass: Addison-Wesley, 1963).

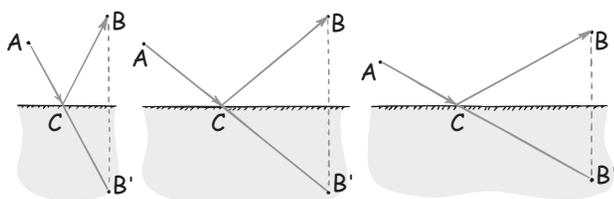


FIGURA 28.5 Reflexión.

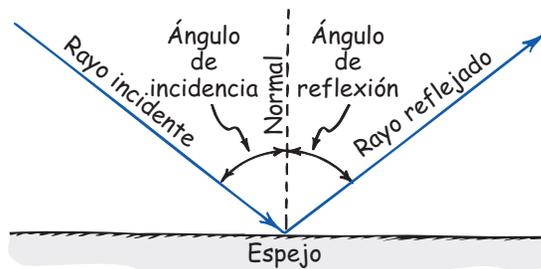


FIGURA 28.6 [Figura interactiva](#)
La ley de reflexión.

En el lado opuesto del espejo determinamos un punto artificial, B' , a la misma distancia “atrás” y abajo del espejo que el punto B está arriba del mismo (figura 28.4). Es bastante sencillo determinar la distancia mínima entre A y este punto artificial B' : es una línea recta. Entonces, esta línea recta llega al espejo en el punto C , y es el punto preciso de reflexión para la distancia mínima y, en consecuencia, la trayectoria de tiempo mínimo para que la luz vaya de A a B . Al examinar la figura se observa que la distancia de C a B es igual a la distancia de C a B' . Vemos que la longitud de la trayectoria de A a B' pasando por C es igual a la longitud de la trayectoria de A a B que se refleja en el punto C .

Con un examen más detenido, y algo de deducciones geométricas, se demostrará que el ángulo de la luz incidente de A a C es igual al ángulo de reflexión de C a B . Es la **ley de la reflexión** y es válida para todos los ángulos (figura 28.5):

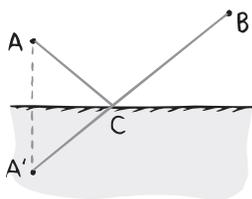
El ángulo de incidencia es igual al ángulo de reflexión.

La ley de reflexión se ilustra con flechas que representan rayos de luz en la figura 28.6. En vez de medir los ángulos de los rayos incidente y reflejado respecto a la superficie reflectora, se acostumbra medirlos respecto a una línea perpendicular al plano de la superficie reflectora. A esta línea imaginaria se le llama la *normal*. El rayo incidente, la normal y el rayo reflejado están en un mismo plano.

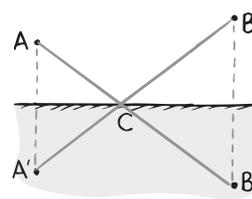
EXAMÍNATE

Las construcciones de los puntos artificiales B' en las figuras 28.4 y 28.5 muestran cómo la luz llega al punto C al reflejarse de A a B . Con una construcción así demuestra que la luz que se origina en B y se refleja en A también llega al mismo punto C .

COMPRUEBA TU RESPUESTA



Traza un punto artificial A' a la misma distancia detrás del espejo que la distancia de A al espejo; luego traza una recta de B a A' para determinar C , como se ve a la izquierda. Las dos construcciones están superpuestas a la derecha, y muestran que C es común a ambas. Vemos que la luz seguirá el mismo camino al ir en dirección contraria. Siempre que veas en un espejo los ojos de alguien, ten la seguridad que también puede ver los tuyos.



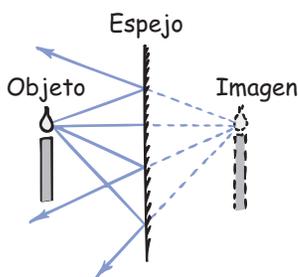


FIGURA 28.7
Una imagen virtual se forma detrás del espejo y está en la posición donde convergen los rayos reflejados (líneas punteadas).

Espejos planos

Imagina que una vela se coloca frente a un espejo plano. Los rayos de luz parten de la llama en todas direcciones. La figura 28.7 sólo muestra cuatro de un número infinito de rayos que salen de uno del número infinito de puntos de la llama. Cuando esos rayos llegan al espejo, se reflejan en ángulos iguales a sus ángulos de incidencia. Los rayos divergen de la llama y al reflejarse divergen del espejo. Esos rayos divergentes parecen emanar de determinado punto detrás del espejo (donde las líneas punteadas se intersecan). Un observador ve una imagen de la llama en ese punto. En realidad, los rayos de luz no vienen de ese punto, por lo que se dice que se trata de una *imagen virtual*. Está tan atrás del espejo como el objeto está frente a él, y la imagen y el objeto tienen el mismo tamaño. Cuando te ves al espejo, por ejemplo, el tamaño de tu imagen es el mismo que el tamaño que tendría tu gemelo si estuviera atrás del espejo la misma distancia que estás tú frente al espejo, siempre que el espejo sea plano (esos espejos se llaman *espejos planos*).

Cuando el espejo es curvo, los tamaños y las distancias de objeto e imagen ya no son iguales. En este libro no describiremos los espejos curvos, excepto para decir que en ellos sigue siendo válida la ley de reflexión. Un espejo curvo se comporta como una sucesión de espejos planos, cada uno con una orientación angular un poco distinta del que está junto a él. En cada punto, el ángulo de incidencia es igual al ángulo de reflexión (figura 28.9). Observa que un espejo curvo, a diferencia de un espejo plano, las normales (que se indican con líneas punteadas a la izquierda del espejo) en distintos puntos de la superficie, no son paralelas entre sí.

Ya sea el espejo plano o curvo, el sistema ojo-cerebro no puede, en general, ver la diferencia entre un objeto y su imagen reflejada. Así, la ilusión de que existe un objeto detrás de un espejo (o en algunos casos frente a un espejo cóncavo)



Tu imagen está tan lejana del espejo como tú lo estás de él. Como si tu gemelo estuviera parado frente a ti a la misma distancia, detrás de un cristal al aro.

¡EUREKA!

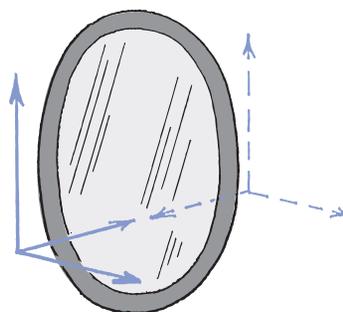


FIGURA 28.8

La imagen de Marjorie está a la misma distancia detrás del espejo que la distancia de ella al espejo. Observa que ella y la imagen tienen el mismo color de ropa, es la prueba de que la luz no cambia de frecuencia al reflejarse. Es interesante el hecho de que el eje izquierda-derecha no se invierte ni tampoco el eje arriba-abajo. El eje que *se invierte*, como se ve a la derecha es el de frente-atrás. Es la causa de que vea que la mano izquierda esté frente a la mano derecha de la imagen. (Véase la sección a color al final del libro.)

FIGURA 28.9

a) La imagen virtual formada por un espejo *convexo* (un espejo que se curva hacia afuera) es menor que el objeto y está más cercana al espejo que el objeto.

b) Cuando el objeto está cerca de un espejo *cóncavo* (un espejo que se curva hacia adentro, como una “cueva”), la imagen virtual es mayor y está más alejada del espejo que el objeto. En cualquier caso, la ley de reflexión sigue siendo válida para cada rayo.

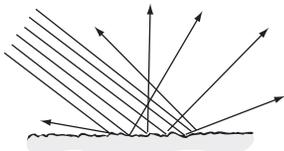
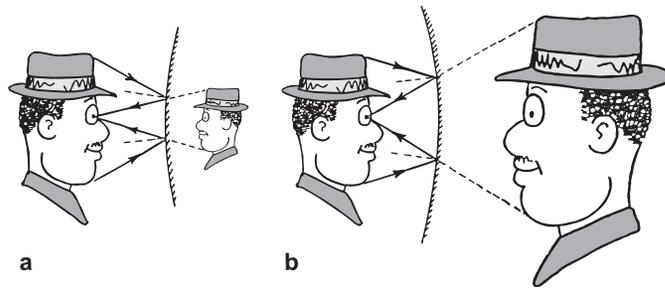


FIGURA 28.10

Reflexión difusa. Aunque cada rayo se rige por la ley de reflexión, los muchos y distintos ángulos en la superficie áspera a la que llegan los rayos causan la reflexión en muchas direcciones.

sólo se debe a que la luz que procede del objeto entra al ojo exactamente de la misma forma física en que entraría, si el objeto realmente estuviera en el lugar de su imagen.

EXAMÍNATE

1. ¿Qué pruebas tienes para respaldar la afirmación de que la frecuencia de la luz no cambia en una reflexión?
2. Si deseas tomar una foto de tu imagen parándote a 5 m frente a un espejo plano, ¿a qué distancia debes ajustar la cámara para obtener una foto con mejor definición?

Sólo parte de la luz que llega a una superficie se refleja. Por ejemplo, en una superficie de vidrio transparente, y para incidencia normal (luz perpendicular a la superficie), sólo se refleja cerca de 4% de la luz en cada superficie; mientras que en una superficie limpia y pulida de aluminio o de plata, se refleja más o menos 90% de la luz incidente.

Reflexión difusa

Cuando la luz incide en una superficie áspera se refleja en muchas direcciones. A esto se le llama **reflexión difusa** (figura 28.10). Si la superficie es tan lisa que las distancias entre las elevaciones sucesivas de ella son menores que más o menos un octavo de la longitud de onda de la luz, hay muy poca reflexión difusa, y se dice que la superficie está *pulida*. En consecuencia, una superficie puede estar pulida para radiación de gran longitud de onda, pero no pulida para luz de corta longitud de onda. El “plato” de malla de alambre que se ve en la figura 28.11 es muy áspero para las ondas de luz visible; no se parece a un espejo. Pero para las ondas de radio de gran longitud de onda está “pulida” y, por lo tanto, es un excelente reflector.



FIGURA 28.11

El plato parabólico de malla abierta es un reflector difuso para luz de corta longitud de onda, pero para las ondas de radio, con mayor longitud de onda, es una superficie pulida.

COMPRUEBA TUS RESPUESTAS

1. El color de una imagen es idéntico al del objeto que la produce. Mírate en un espejo, y verás que no cambia el color de tus ojos. El hecho de que el color sea igual es prueba de que la frecuencia de la luz no cambia en la reflexión.
2. Ajusta la cámara a 10 m. El caso es el mismo a aquel en que estás a 5 m frente a una ventana abierta y ves a tu gemelo parado a 5 m detrás de la ventana.



FIGURA 28.12
Vista muy aumentada de la superficie de un papel ordinario. (Véase la sección a color al final del libro.)

La luz que se refleja de esta página es difusa. El papel puede ser liso para una onda de radio, pero para una onda luminosa es áspero. Los rayos de luz que llegan a este papel se encuentran con millones de superficies planas diminutas orientadas en todas direcciones. La luz incidente, en consecuencia, se refleja en todas direcciones. Esta circunstancia es deseable. Nos permiten ver objetos desde cualquier dirección o posición. Por ejemplo, puedes ver la carretera frente a ti por la noche, debido a la reflexión difusa de la superficie del pavimento. Cuando el pavimento está mojado hay menos reflexión difusa y es más difícil de ver. La mayoría de lo que nos rodea lo vemos por su reflexión difusa.

Un caso indeseable en relación con la reflexión difusa es el de la imagen fantasma que se ve en una TV cuando la señal rebota en edificios y otras obstrucciones. Para la recepción de la antena, esta diferencia en longitudes de trayectoria de la señal directa y la señal reflejada produce una pequeña demora. La imagen fantasma suele estar desplazada a la derecha, que es la dirección de barrido del cineoscopio de TV, porque la señal reflejada llega a la antena receptora después que la señal directa. Con varias reflexiones se pueden producir varios fantasmas.

Refracción

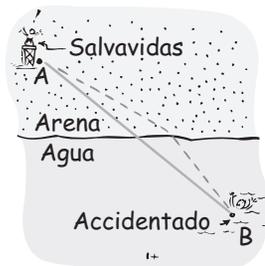


FIGURA 28.13
Refracción.

Recuerda que en el capítulo 26 explicamos que el promedio de la rapidez de la luz es menor en el vidrio y en otros materiales, que en el espacio vacío. La luz viaja a distintas rapidezces en diferentes materiales.³ Se propaga a 300,000 kilómetros por segundo en el vacío; a una rapidez un poco menor por el aire, y a unas tres cuartas partes de ese valor en el agua. En un diamante se propaga a más o menos el 40% de su rapidez en el vacío. Como se mencionó al inicio de este capítulo, cuando la luz se desvía oblicuamente al pasar de uno a otro medios, a tal desviación se le llama **refracción**. Es común observar que un rayo de luz se desvía y alarga su trayectoria cuando llega a un vidrio o al agua, formando un ángulo. Sin embargo, la trayectoria más larga es la que requiere menor tiempo. Una trayectoria recta necesitaría más tiempo. Esto se puede ilustrar con el siguiente caso.

Imagina que eres un salvavidas en una playa, y que ves a una persona que tiene dificultades dentro del agua. En la figura 28.13 están las posiciones relativas de ti, de la costa y de la persona con problemas. Estás en el punto A y la persona está en el punto B. Puedes ir más rápido corriendo que nadando. ¿Deberías ir en línea recta hasta la persona? Pensándolo bien verás que no sería lo óptimo ir en línea recta, porque aunque te tardes un poco más corriendo por la playa, ahorrarías bastante tiempo al nadar menor distancia en el agua. La trayectoria de mínimo tiempo se indica con las líneas punteadas, y es claro que no coincide con la trayectoria de la mínima distancia. La cantidad de flexión en la costa depende, naturalmente, de cuánto más rápido puedas correr que nadar. La situación es

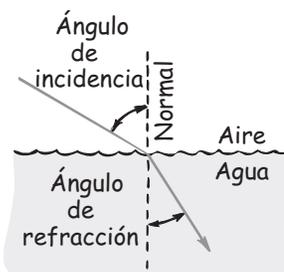


FIGURA 28.14
Figura interactiva

Refracción

³ La cantidad en que difiere la rapidez de la luz en distintos medios y en el vacío se expresa por el índice de refracción, n , del material:

$$n = \frac{\text{rapidez de la luz en el vacío}}{\text{rapidez de la luz en el material}}$$

Por ejemplo, la rapidez de la luz en un diamante es 124,000 km/s, y así el índice de refracción del diamante es

$$n = \frac{300,000 \text{ km/s}}{124,000 \text{ km/s}} = 2.42$$

Para el vacío, $n = 1$.

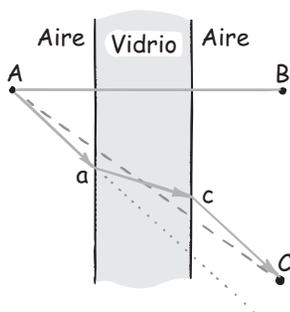


FIGURA 28.15

Refracción a través del vidrio. Aunque la línea punteada A-C es el camino más corto, la luz va por un camino un poco más largo por el aire, desde A hasta a, y luego por un camino más corto a través del vidrio hasta c, y después llega a C. La luz que sale está desplazada, pero es paralela a la luz incidente.

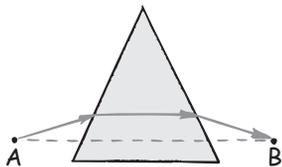


FIGURA 28.16

Un prisma.

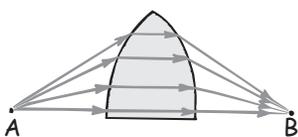


FIGURA 28.17

Un prisma curvado.

similar con un rayo de luz que incide en un cuerpo de agua, como se ve en la figura 28.14. El ángulo de incidencia es mayor que el ángulo de refracción, una cantidad que depende de las rapidezces relativas de la luz en el aire y en el agua.

EXAMÍNATE

Imagina que nuestro salvavidas del ejemplo fuera una foca, en vez de un ser humano. ¿Cómo cambiaría su trayectoria de tiempo mínimo de A a B?

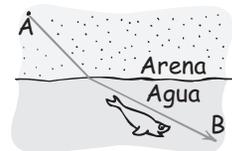
Veamos lo que pasa en el vidrio grueso de una ventana, como en la figura 28.15. Cuando la luz va el punto A, atraviesa el vidrio y llega al punto B, su trayectoria será una recta. En este caso, la luz llega al vidrio perpendicularmente, y vemos que la distancia mínima tanto a través del aire como del vidrio equivale al tiempo mínimo. Pero, ¿y la luz que va del punto A al punto C? ¿Seguirá la trayectoria rectilínea indicada por la línea punteada? La respuesta es *no*, porque si lo hiciera tardaría más en el vidrio, donde tiene menos rapidez que en el aire. En cambio, la luz seguirá una trayectoria menos inclinada para atravesar el vidrio. El tiempo ahorrado al tomar la trayectoria más corta por el vidrio compensa el tiempo adicional necesario para recorrer la trayectoria un poco más larga por el aire. La trayectoria total es la que requiere el tiempo mínimo. El resultado es un desplazamiento paralelo del rayo de luz, porque los ángulos de entrada y de salida del vidrio son iguales. Observarás este desplazamiento al ver a través de un vidrio grueso en sentido oblicuo. Cuanto más se aparte tu visual de la perpendicular, el desplazamiento será más pronunciado.

Otro ejemplo interesante es el prisma, en el que no hay caras paralelas opuestas en el vidrio (figura 28.16). La luz que va del punto A al punto B no sigue la trayectoria rectilínea indicada con la línea punteada, porque tardaría demasiado tiempo en el vidrio. En cambio, la luz irá por la trayectoria indicada con la línea continua —una trayectoria que es bastante mayor en el aire—, y pasará por una sección más delgada del vidrio, para llegar hasta el punto B. Con este razonamiento cabría pensar que la luz debería acercarse más al vértice superior del prisma, para buscar el espesor mínimo del vidrio. Pero si lo hiciera, la distancia mayor por el aire daría como resultado un tiempo total mayor de recorrido. La trayectoria que se sigue es la trayectoria del tiempo mínimo.

Es interesante destacar que si a las caras de un prisma se les da la curvatura adecuada, se podrán tener muchas trayectorias de tiempo igual desde un punto A en un lado, hasta un punto B en el lado opuesto (figura 28.17). La curva disminuye el espesor del vidrio en forma adecuada para compensar las distancias adicionales que recorre la luz hasta los puntos más cercanos a la cúspide. Para las posiciones adecuadas de A y de B, y con la curvatura correcta en las superficies de este prisma modificado, todas las trayectorias de la luz se recorren exactamente en el mismo tiempo. En este caso, toda la luz de A que llega a la superficie del vidrio se enfocará en el punto B.

COMPRUEBA TU RESPUESTA

La foca puede nadar más rápido de lo que puede arrastrarse por la arena, y su trayectoria se desviaría como se observa en la figura; es el mismo caso de cuando la luz sale del fondo de un vaso con agua y entra en el aire.



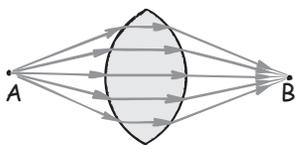


FIGURA 28.18
Una lente convergente.

Vemos que esta forma sólo es la mitad superior de una lente convergente (figura 28.18; más adelante en este capítulo se describirá con más detalle).



FIGURA 28.19
Debido a la refracción atmosférica, cuando el Sol está cerca del horizonte, parece que está más alto en el cielo.



FIGURA 28.20
La forma del Sol se distorsiona debido a la refracción diferencial. (Véase la sección a color al final del libro.)

Siempre que contemplamos una puesta de Sol, lo vemos varios minutos después de que ha bajado del horizonte. La atmósfera terrestre es delgada arriba y densa abajo. Como la luz viaja con más rapidez en el aire enrarecido que en el aire denso, la luz solar nos puede llegar con más rapidez si, en vez de sólo recorrer una línea recta, evita el aire más denso y toma una trayectoria más alta y más larga para penetrar en la atmósfera con mayor inclinación (figura 28.19). Como la densidad de la atmósfera cambia en forma gradual, la trayectoria de la luz se flexiona también en forma gradual, y toma la forma de una curva. Es interesante el hecho de que esta trayectoria de tiempo mínimo permite tener días un poco más largos. Además, cuando el Sol (o la Luna) está cerca del horizonte, los rayos de la orilla inferior se flexionan más que los de la orilla superior, y se produce un acortamiento del diámetro vertical, lo cual hace que el Sol parezca elíptico (figura 28.20).

Espejismos (opcional)

Todos hemos visto los espejismos que se producen al conducir un automóvil sobre asfalto caliente. Parece que el cielo se refleja en el agua que hay a lo lejos sobre la carretera; pero al llegar al lugar, vemos que el asfalto está seco. ¿Qué es lo que sucede? El aire está muy caliente muy cerca de la superficie del asfalto, y está más frío arriba. La luz se propaga con más rapidez por el aire caliente, menos denso, que por el aire frío y más denso de arriba. Así, la luz, en vez de llegarnos desde el cielo en línea recta, también tiene trayectorias de tiempo mínimo en las que baja hasta la parte más caliente que está cerca del asfalto, durante cierto tiempo, antes de llegar a nuestros ojos (figura 28.21). Un espejismo no es, como mucha gente cree en forma equivocada, un “truco de la mente”. Un espejismo se produce con luz real y se puede fotografiar, como en la figura 28.22.

FIGURA 28.21
La luz procedente del cielo incrementa su rapidez en el aire cerca del asfalto, porque el aire es más caliente y menos denso que el que está arriba. Cuando la luz roza la superficie y se desvía hacia arriba, el observador ve un espejismo.

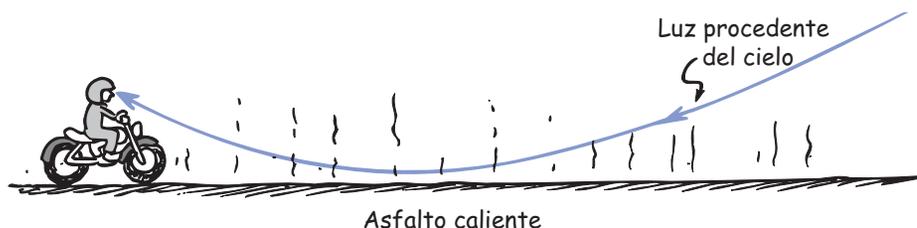




FIGURA 28.22

Un espejismo. Los aparentes charcos en la carretera no son reflexión del cielo en el agua, sino más bien refracción de la luz procedente del cielo a través del aire más caliente y menos denso cercano a la superficie del pavimento. (Véase la sección a color al final del libro.)

Cuando vemos un objeto sobre una estufa caliente, o sobre pavimento caliente, notamos un efecto ondulatorio. Esto se debe a las distintas trayectorias de tiempo mínimo de la luz, al pasar por distintas temperaturas y en consecuencia a través de aire de distintas densidades. El titilar de las estrellas es resultado de fenómenos parecidos en el cielo, cuando la luz atraviesa capas inestables en la atmósfera.

EXAMÍNATE

Si la rapidez de la luz fuera igual en el aire a temperaturas y densidades distintas, ¿los días seguirían siendo un poco más largos, cintilarían las estrellas en el cielo, habría espejismos y el Sol se vería un poco aplastado al ocultarse?

En los ejemplos anteriores, ¿cómo es que la luz “sabe” qué condiciones existen y qué compensaciones se requieren para que la trayectoria sea de tiempo mínimo? Cuando se acerca a una ventana en determinado ángulo, ¿cómo sabe la luz que tiene que viajar un poco más en el aire para ahorrar tiempo al tomar un ángulo menos inclinado y, por lo tanto, una trayectoria más corta a través del vidrio? Cuando se acerca a un prisma o a unos lentes, ¿cómo sabe la luz que debe viajar una mayor distancia en el aire para atravesar la parte más delgada del vidrio? ¿Cómo sabe la luz solar cómo viajar sobre la atmósfera una distancia adicional para tomar un atajo por el aire más denso, y así ahorrar tiempo? ¿Cómo sabe la luz del cielo que puede llegarnos en un tiempo mínimo si se inclina hacia el pavimento caliente, antes de subir hacia nuestros ojos? Parece que el principio del tiempo mínimo no es causal. Es como si la luz tuviera una mente propia, que pueda “sentir” todas las trayectorias posibles, calcular los tiempos en cada una y elegir la que requiere menos tiempo. ¿Es así? Con todo lo intrigante que parezca, hay una explicación más sencilla que no asigna previsión a la luz: que la refracción es una consecuencia de que la luz tiene distinta rapidez promedio en diferentes medios.

Causa de la refracción

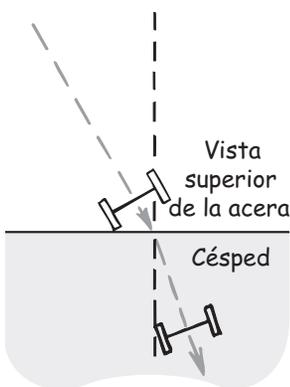


FIGURA 28.23

La dirección de las ruedas cambia cuando una va más lenta que la otra.

La refracción sucede cuando la rapidez promedio de la luz *cambia* al pasar de un medio transparente a otro. Esto se entenderá mejor si imaginamos la acción de un par de ruedas de un carrito de juguete, montadas en un eje pero no unidas a él, y el carrito rueda suavemente cuesta abajo por un pasillo y después llega al césped. Si las ruedas entran al césped formando un ángulo (figura 28.23), serán desviadas de su trayectoria rectilínea. La dirección de las ruedas se indica con la línea punteada. Observa que al llegar al césped, donde las ruedas giran con mayor lentitud por la resistencia del césped, la rueda izquierda se desacelera primero. Eso se debe a que llega al césped mientras que la rueda derecha todavía está sobre el pasillo liso. La rueda derecha, más rápida, tiende a girar en torno a la izquierda, más lenta, porque durante el mismo intervalo de tiempo esa rueda derecha recorre más distancia que la izquierda. Esta acción desvía la dirección de

COMPRUEBA TU RESPUESTA

No.

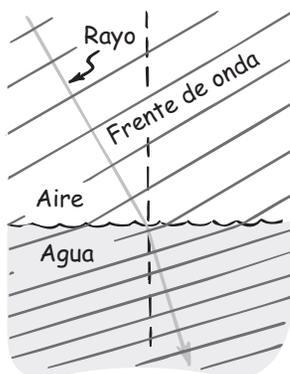


FIGURA 28.24
La dirección de las ondas luminosas cambia cuando una parte de cada una va más lenta que la otra parte.

rodadura de las ruedas, hacia la “normal”, que es la línea punteada delgada perpendicular al borde entre el césped y el pasillo en la figura 28.23.

Una onda luminosa se desvía en forma parecida, como se muestra en la figura 28.24. Observa la dirección de la luz, representada por la flecha continua (el rayo de luz) y también nota los *frentes de onda* en ángulo recto al rayo de luz. (Si la fuente luminosa estuviera cerca, los frentes de onda se verían como segmentos de círculos; pero si suponemos que el lejano Sol es la fuente, los frentes de onda forman prácticamente líneas rectas.) Los frentes de onda son siempre perpendiculares a los rayos de luz. En la figura, la onda llega a la superficie del agua formando un ángulo, por lo que la parte izquierda de la onda va más lenta en el agua; mientras que la parte que todavía está en el aire viaja a la rapidez c . El rayo o haz de luz queda perpendicular al frente de onda y se flexiona en la superficie, de la misma manera que las ruedas cambian de dirección cuando pasan de la acera al césped. En ambos casos, la desviación es una consecuencia de un cambio de rapidez.⁴

La cambiante rapidez de la luz permite tener una explicación ondulatoria de los espejismos. En la figura 28.25 se ven algunos frentes de onda característicos, de un rayo que comienza en la copa de un árbol en un día caluroso. Si las temperaturas del aire fueran iguales, la rapidez promedio de la luz sería igual en todas las partes del aire; la luz que se dirige al suelo llegaría a éste. Pero el aire está más caliente y es menos denso cerca del suelo, y los frentes de onda ganan rapidez al bajar, lo cual los hace desviarse hacia arriba. Así, cuando el observador mira hacia abajo ve la copa del árbol. Esto es un espejismo.

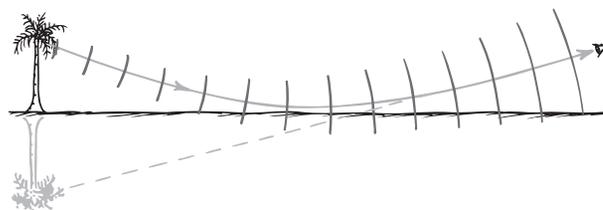


FIGURA 28.25
Una explicación ondulatoria de un espejismo. Los frentes de onda de la luz se propagan con más rapidez en el aire caliente cerca del suelo, y se curvan hacia arriba.

La refracción de la luz es responsable de muchas ilusiones. Una de ellas es el doblez aparente de una vara parcialmente sumergida en agua. La parte sumergida parece más cercana a la superficie de lo que realmente está. Asimismo, cuando observas un pez en el agua, parece que está más cerca de la superficie (figura 28.27). Debido a la refracción, los objetos sumergidos parecen estar aumentados. Si vemos directo hacia abajo en el agua, un objeto sumergido a 4 metros parecerá estar sólo a 3 metros de profundidad.

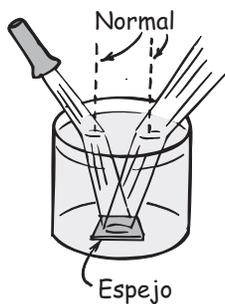
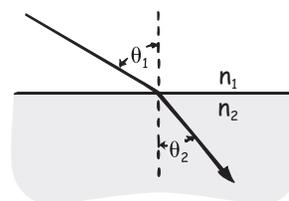


FIGURA 28.26
Cuando la luz disminuye su rapidez al pasar de un medio a otro, por ejemplo cuando pasa del aire al agua, se refracta acercándose a la normal. Cuando aumenta su rapidez al pasar de un medio a otro, como cuando pasa de agua a aire, se refracta alejándose de la normal.

⁴ La ley de refracción, en su forma cuantitativa, se llama *ley de Snell*, y se le acredita al astrónomo y matemático holandés del siglo XVII W. Snell; es $n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$, donde n_1 y n_2 son los índices de refracción de los medios en ambos lados de la superficie, y θ_1 y θ_2 son los respectivos ángulos de incidencia y de refracción. Si se conocen tres de esos valores, el cuarto se calcula con esta ecuación.



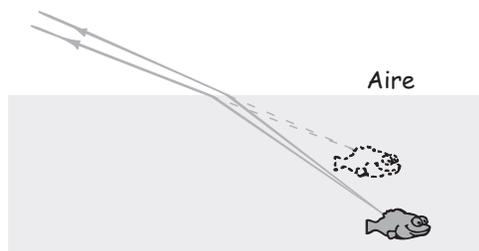


FIGURA 28.27

Debido a la refracción, un objeto sumergido parece estar más cerca de la superficie de lo que realmente está.

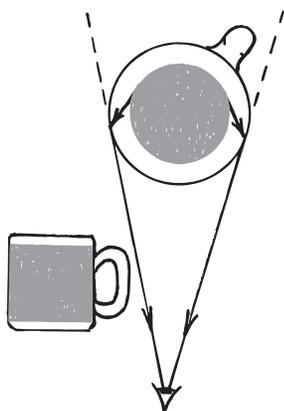


FIGURA 28.28

Debido a la refracción, el tarro parece tener más bebida de la que realmente tiene.

Vemos que la desviación de la luz en la superficie del agua se interpreta en al menos dos formas. Podemos decir que la luz sale del pez y llega al ojo del observador en el tiempo mínimo, tomando una trayectoria más corta al subir hacia la superficie del agua, y una trayectoria más larga en el aire. Según esta apreciación, el tiempo mínimo establece el camino que se sigue. O bien, podemos decir que las ondas de luz se dirigen hacia arriba, formando un ángulo respecto a la superficie del agua, tal que se flexionan ordenadamente al aumentar su rapidez cuando salen al aire, y que esas ondas son las que llegan al ojo del observador. Desde este punto de vista, el cambio de rapidez del agua al aire es el que establece la trayectoria que se sigue, y sucede que esa trayectoria es la del tiempo mínimo. Sea cual fuere el punto de vista que tomemos, los resultados serán iguales.

EXAMÍNATE

Si la rapidez de la luz fuera igual en todos los medios, ¿seguiría ocurriendo refracción al pasar la luz de un medio a otro?

Dispersión

Sabemos que la rapidez promedio de la luz es menor que c en un medio transparente; la disminución depende de la naturaleza del medio y de la frecuencia de la luz. La rapidez de la luz en un medio transparente depende de su frecuencia. Recuerda que en el capítulo 26 explicamos que se absorbe la luz, cuya frecuencia coincide con la frecuencia natural o de resonancia de los osciladores electrónicos en los átomos y las moléculas del medio transparente, y que la luz de frecuencia cercana a la de resonancia interacciona más seguido con la secuencia de absorción y reemisión y, por lo tanto, se propaga más despacio. Como la frecuencia natural, o de resonancia, de la mayoría de los materiales transparentes está en la región ultravioleta del espectro, la luz de mayor frecuencia se propaga con más lentitud que la de menor frecuencia. La luz violeta se propaga aproximadamente 1% más lentamente en el vidrio que la luz roja. Las ondas luminosas correspondientes a colores intermedios entre el rojo y el violeta se propagan con sus propias rapideces intermedias.

Como las distintas frecuencias de la luz se propagan a rapideces distintas en materiales transparentes, se refractan de forma distinta. Cuando la luz blanca se refracta dos veces, como en un prisma, se nota bien la separación de los distintos colores que la forman. A esta separación de la luz en colores ordenados por su frecuencia se le llama *dispersión* (figura 28.29). Es lo que permitió a Isaac Newton formar un espectro cuando sostenía un prisma en la luz solar.

COMPRUEBA TU RESPUESTA

No.

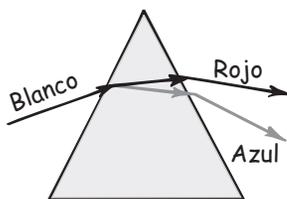


FIGURA 28.29

La dispersión mediante un prisma hace visible los componentes de la luz blanca. (Véase la sección a color al final del libro.)

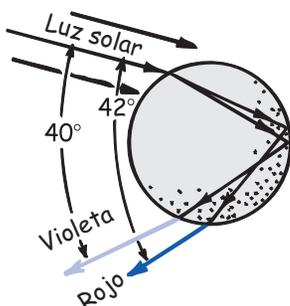


FIGURA 28.30

Dispersión de la luz solar por una sola gota de lluvia.



Arcoiris (opcional)

Un ejemplo muy espectacular de la dispersión son los arcoiris. Para ver un arcoiris, el Sol debe estar iluminando una parte del cielo, y que haya gotas de agua en una nube o que caigan en forma de lluvia, en la parte contraria del cielo. Cuando damos la espalda al Sol, vemos el espectro de colores, que forma un arco. Desde un avión, cerca del medio día, el arco forma un círculo completo. Todos los arcoiris serían totalmente circulares, si no se interpusiera el suelo.

Los bellos colores de los arcoiris se forman por la dispersión de la luz solar en millones de gotitas esféricas de agua, que funcionan como prismas. Lo entenderemos mejor si examinamos una sola gota de lluvia, como se ve en la figura 28.30. Sigue el rayo de luz solar que entra a la gota cerca de la superficie superior. Algo de la luz se refleja allí (no se indica) y el resto penetra al agua donde se refracta. En esta primera refracción, la luz se dispersa y forma un espectro de colores; el violeta se desvía más y el rojo menos. Al llegar al lado contrario de la gota, cada color se refracta en parte y sale al aire (no se indica) y parte se refleja al agua. Al llegar a la superficie inferior de la gota, cada color se refleja de nuevo (no se indica) y se refracta también al aire. Esta segunda refracción se parece a la de un prisma, donde la refracción en la segunda superficie aumenta la dispersión que ya se produjo en la primera superficie.

En realidad se producen dos refracciones y una reflexión cuando el ángulo entre el rayo que llega y el rayo que sale tiene cualquier valor entre 0° y 42° (el de 0° corresponde a una inversión completa, de 180° , de la luz). Sin embargo, la intensidad de la luz se concentra mucho cerca del ángulo máximo de 42° , que es lo que se muestra en la figura 28.30.

Aunque cada gota dispersa todo el espectro de colores, un observador sólo puede ver la luz concentrada de un solo color de cualquier gota (figura 28.31). Si la luz violeta de una sola gota llega al ojo de un observador, la luz roja de la misma le llega más bajo, hacia los pies. Para ver la luz roja se deben buscar las gotas más arriba en el cielo. El color rojo se verá cuando el ángulo entre un rayo de luz solar y la luz que regresa de una gota es de 42° . El color violeta se observa cuando el ángulo entre los rayos de luz y la luz que regresa es de 40° .

¿Por qué la luz que dispersan las gotas de lluvia forma un arco? La respuesta implica un poco de razonamiento geométrico. En primer lugar, un arcoiris no es el arco bidimensional y plano que parece. Se ve plano por la misma razón que una explosión de fuegos artificiales en el cielo se ve como un disco: porque no tenemos indicadores de la distancia. El arcoiris que ves en realidad es un cono tridimensional, con la punta (el vértice) en los ojos (figura 28.32). Imagina un cono de vidrio, como los conos de papel con los que a veces tomas agua. Si sujetas ese cono con la punta hacia el ojo, ¿qué verías? Podrías ver que el vaso es un círculo.

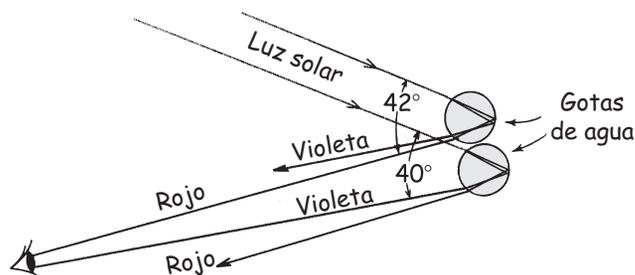


FIGURA 28.31

La luz solar que incide en dos gotas de lluvia, tal como se ve, emerge de ellas en forma de luz dispersada. El observador ve la luz roja de la gota de arriba y la luz violeta de la gota de abajo. Son millones de gotas las que producen todo el espectro de la luz blanca.

FIGURA 28.32

Cuando el ojo está entre el Sol (no se ve; está fuera hacia la izquierda) y una región con gotas de agua, el arcoíris que ves es el borde de un cono tridimensional que se extiende por la región de las gotas de agua. (Innumerables capas de gotas de agua forman innumerables arcos bidimensionales, como los cuatro que se indican aquí.) (Véase la sección a color al final del libro.)

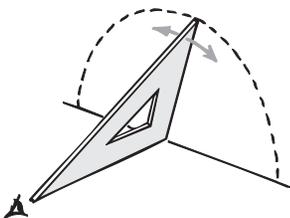
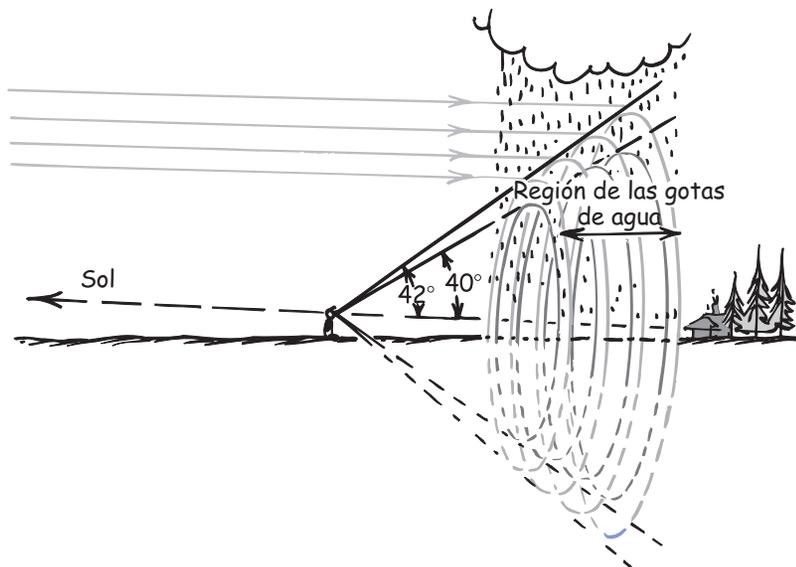


FIGURA 28.33

Sólo las gotas de agua que están en la línea punteada dispersan la luz roja hacia el observador formando un ángulo de 42° ; en consecuencia, la luz forma un arco.

Es igual con un arcoíris. Todas las gotas que dispersan la luz hacia *ti* están en una forma: un cono de distintas capas con gotas que dispersan el rojo hacia tu ojo en el lado externo, el naranja debajo del rojo, el amarillo debajo del naranja, y así todos los colores hasta el violeta en la superficie cónica interna. Cuanto más gruesa sea la región de las gotas de agua, la capa cónica a través de la cual ves será más gruesa, y el arcoíris será más luminoso.

Para verlo con más detalle, sólo examina la desviación de la luz roja. Ves el rojo cuando el ángulo que forman los rayos incidentes de la luz solar y los rayos dispersados forman un ángulo de 42° . Naturalmente, los rayos se dispersan 42° en las gotas que hay en todo el cielo y en todas direcciones: hacia arriba, hacia abajo y hacia los lados. Sin embargo, la única luz roja que *tú* ves es la de las gotas que están en un cono con un ángulo de 42° entre el eje y el lado. El ojo está en el vértice de ese cono, como se ve en la figura 28.33. Para ver el violeta, diriges tu vista a 40° del eje del cono (de manera que el espesor del cono en el párrafo anterior es variable: muy delgado en la punta y más grueso al aumentar la distancia desde la punta).

Tu cono de visión que interseca la nube de gotas y crea tu arcoíris es distinto del de una persona junto a ti. Así, cuando un amigo dice: “¡Mira qué bello arcoíris!”, puedes contestarle: “Bueno, hazte a un lado para que pueda verlo también.” Cada quien ve su propio y personal arcoíris.

Algo más sobre los arcoíris: un arcoíris te da la cara de una sola vez, por la falta de indicadores de distancia que mencionamos antes. Cuando te mueves, el arcoíris se mueve contigo. De este modo, nunca podrás acercarte al lado de un arcoíris, ni verlo de cerca, como en el esquema exagerado de la figura 28.32. *No puedes* llegar a su extremo. De ahí la expresión “busca la olla de oro en el extremo del arcoíris”, que significa perseguir algo que nunca se podrá alcanzar.

A menudo se observa un arcoíris más grande, secundario, que envuelve al arco primario. No lo describiremos aquí, excepto para indicar que se forma en circunstancias similares, y que es el resultado de doble reflexión dentro de las gotas de lluvia (figura 28.34). Por esta reflexión adicional (y la pérdida de refracción adicional), el arco secundario es mucho más tenue, y sus colores están invertidos.



FIGURA 28.34

Dos refracciones y una reflexión en las gotitas de agua producen luz en todos los ángulos, hasta unos 42° , con la intensidad concentrada donde vemos el arcoiris entre 40° y 42° . No sale luz de una gotita de agua en ángulos mayores que 42° , a menos que sufra dos o más reflexiones dentro de la gota. Entonces, el cielo brilla más dentro del arcoiris que fuera de él. Observa el tenue arcoiris secundario a la derecha del primario. (Véase la sección a color al final del libro.)

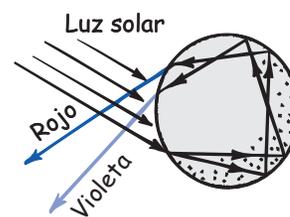


FIGURA 28.35

La doble reflexión en una gota produce un arcoiris secundario. (Véase la sección a color al final del libro.)

EXAMÍNATE



1. Si apuntas hacia una pared con el brazo extendido de modo que forme un ángulo de 42° respecto al muro, y giras el brazo describiendo un círculo completo y manteniendo el ángulo de 42° respecto al muro, ¿qué forma describe el brazo? Si tuvieras un gis en la mano, ¿qué figura trazarías en la pared?
2. Si la luz viajara a la misma rapidez en las gotas de lluvia que en el aire, ¿tendríamos arcoiris?

Reflexión interna total

Algún día que te des una ducha, llena la tina y sumérgete en ella con una linterna sorda adecuada para bucear (a prueba de agua). Apaga la luz del baño. Enciende la linterna sumergida, y dirige el haz directo hacia arriba, y luego inclínala con lentitud. Observa cómo disminuye la intensidad de la luz que sale, y cómo se refleja más luz en la superficie del agua hacia el fondo de la tina. Llegarás a un determinado ángulo, llamado *ángulo crítico*, donde observarás que ya no sale luz al aire sobre la superficie. La intensidad de la luz que sale se reduce a cero, y la luz tiende a “rasgar” la superficie del agua. El **ángulo crítico** es el ángulo mínimo de incidencia en un medio, en el cual la luz se refleja totalmente. Cuando la linterna sorda se inclina más allá del ángulo crítico (que es 48° respecto a la normal, para el agua), observarás que toda la luz se refleja y regresa a la tina. Es la **reflexión interna total**. La luz que llega a la superficie entre el agua y el aire obedece la ley de reflexión: el ángulo de incidencia es igual al ángulo de reflexión. La única luz que sale de la superficie del agua es la que se refleja en forma difusa desde el fondo de la tina. Esta secuencia se ve en la figura 28.37.

COMPRUEBA TUS RESPUESTAS

1. Tu brazo describe un cono y el gis traza un círculo. Es igual con los arcoiris.
2. No.

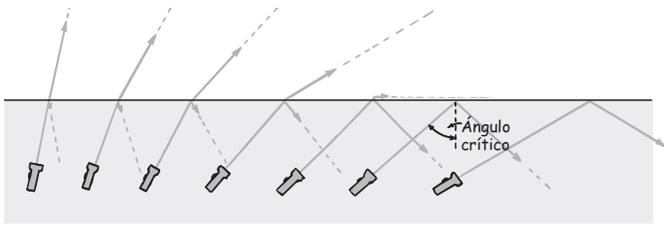


FIGURA 28.36 [Figura interactiva](#)

La luz emitida dentro del agua se refracta en parte y se refleja parcialmente en la superficie. Las líneas punteadas muestran la dirección de la luz y la longitud de las flechas indica las proporciones de la luz refractada y reflejada. Más allá del ángulo crítico se refleja totalmente hacia el agua (reflexión interna total).

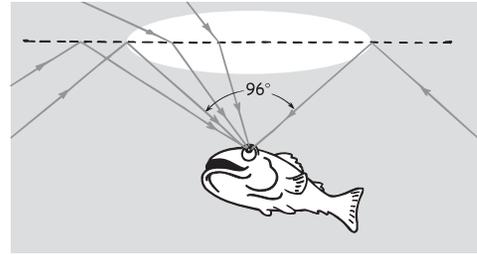
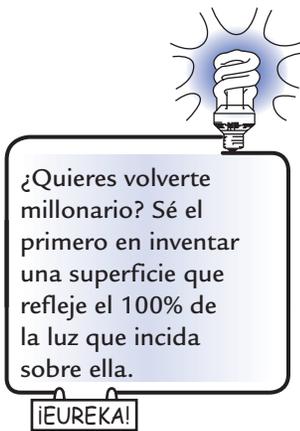


FIGURA 28.37

Un observador bajo el agua ve un círculo de luz, cuando la superficie está tranquila. Fuera de un cono de 96° (dos veces el ángulo crítico), un observador ve una reflexión del interior o del fondo del agua.



La proporción de la luz que se refracta y la que se refleja internamente se indica con las longitudes relativas de las flechas.

La reflexión interna total se presenta en materiales donde la rapidez de la luz dentro de ellos es menor que fuera de ellos. La rapidez de la luz es menor en el agua que en el aire, por lo que todos los rayos de luz que desde el agua llegan a la superficie, forman ángulos de incidencia de 48° o más, y se reflejan y regresan al agua. Así, tu pez favorito en la tina ve un panorama reflejado de los lados y el fondo de la tina al mirar hacia arriba. Directamente arriba ve una perspectiva comprimida del mundo exterior (figura 28.37). La vista de 180° de un horizonte a otro en el exterior se ve en un ángulo de 96° , que es del doble del ángulo crítico. A los objetivos fotográficos que en forma parecida comprimen una perspectiva se les llaman *objetivos* o **lentes de ojo de pescado**, y se usan en fotografía para obtener efectos especiales.

La reflexión interna total se presenta en el vidrio rodeado por aire, porque la rapidez de la luz en el vidrio es menor que en el aire. El ángulo crítico para el vidrio es más o menos 43° , dependiendo de la clase de vidrio. Entonces, la luz que en el vidrio incide en la superficie, formando con ella un ángulo mayor que 43° , se refleja totalmente a su interior. Más allá de este ángulo, la luz no escapa y toda se refleja de nuevo hacia el vidrio, aun cuando la superficie externa esté sucia o polvosa. De aquí la utilidad de los prismas de vidrio (figura 28.38). Antes de entrar al prisma, se pierde un poco de luz por reflexión, pero una vez dentro, la reflexión en las caras inclinadas en 45° es total: de 100%. En cambio, los espejos plateados o aluminizados sólo reflejan 90% de la luz incidente. Por eso, en muchos instrumentos ópticos se usan prismas en vez de espejos.

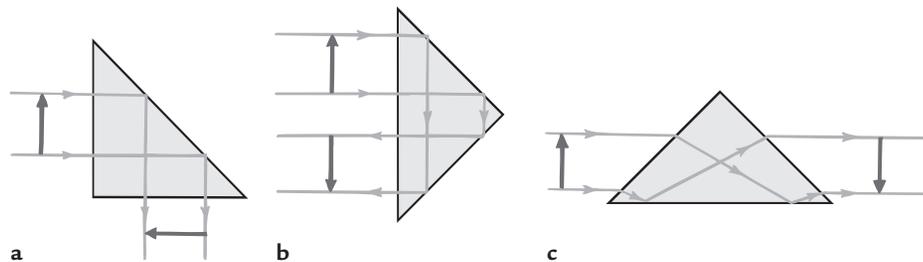


FIGURA 28.38

Reflexión interna total en un prisma. El prisma cambia la dirección del rayo de luz *a*) en 90° , *b*) en 180° y *c*) no la cambia. Observa que, en todos los casos, la orientación de la imagen es distinta de la orientación del objeto.

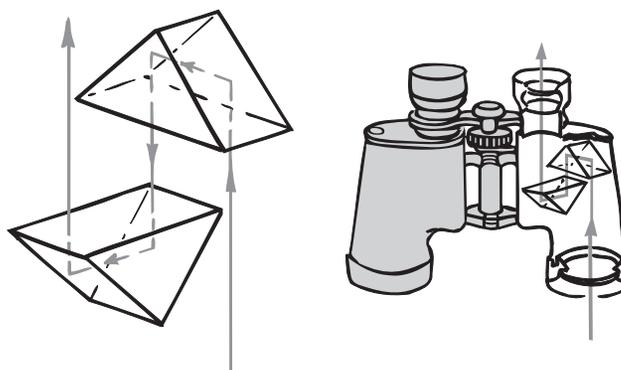


FIGURA 28.39
Reflexión interna total en un par de prismas que se utiliza en los binoculares.

En la figura 28.39 se ve un par de prismas que reflejan cada uno 180° la luz que les llega. En los binoculares se usan pares de prismas para alargar la trayectoria de la luz entre las lentes, eliminando con ello la necesidad de usar tubos largos. Así, unos binoculares compactos son tan efectivos como un telescopio más largo. Otra ventaja de los prismas es que mientras que se invierte la imagen de un telescopio recto, en los binoculares es derecha, por la reflexión en los prismas.

El ángulo crítico en el diamante es más o menos 24.5° , menor que el de cualquier otra sustancia conocida. El ángulo crítico varía un poco para los distintos colores, porque la rapidez de la luz varía un poco para los distintos colores. Una vez que la luz entra a un diamante tallado, la mayoría de ella incide sobre las caras traseras formando ángulos mayores que 24.5° , y se refleja internamente en su totalidad (figura 28.40). Debido al gran descenso de rapidez de la luz al entrar a un diamante, su refracción es muy pronunciada, y debido a la dependencia entre la rapidez y la frecuencia, hay mucha dispersión. Se produce todavía más dispersión al salir la luz por las muchas facetas. En consecuencia, se ven destellos inesperados de toda una gama de colores. Es interesante que cuando esos destellos son lo bastante angostos como para que sólo los vea un ojo a la vez, el diamante “destella”.

También, el funcionamiento de las **fibras ópticas**, o tubos de luz, se basa en la reflexión interna total (figura 28.41). Una fibra óptica “lleva por un tubo” la luz de un lugar a otro, por una serie de reflexiones internas totales, en forma parecida a como una bala rebota conforme pasa por un tubo de acero. Los rayos de luz rebotan contra las paredes internas, siguiendo los cambios de dirección y vueltas de la fibra. Las fibras ópticas se usan en lámparas de mesa decorativas, y para iluminar los instrumentos en los tableros de los automóviles con una sola lámpara. Los dentistas las usan con linternas para hacer que la luz llegue donde desean. Se usan haces de estas fibras delgadas y flexibles de vidrio o de plástico, para ver lo que sucede en lugares inaccesibles, como en el interior del motor o el

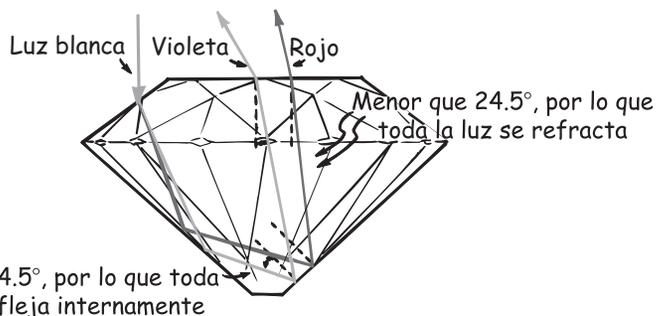


FIGURA 28.40
Trayectorias de la luz en un diamante. Los rayos que llegan a la superficie interna con ángulos mayores que el ángulo crítico se reflejan internamente y salen por refracción en la superficie superior. (Véase la sección a color al final del libro.)



Una de las muchas bellezas que nos ofrece la física es la tonalidad rojiza de un eclipse total de Luna, que es el resultado de la refracción en los crepúsculos y auroras que rodean por completo a la Tierra.

¡EUREKA!

Mayor que 24.5° , por lo que toda la luz se refleja internamente

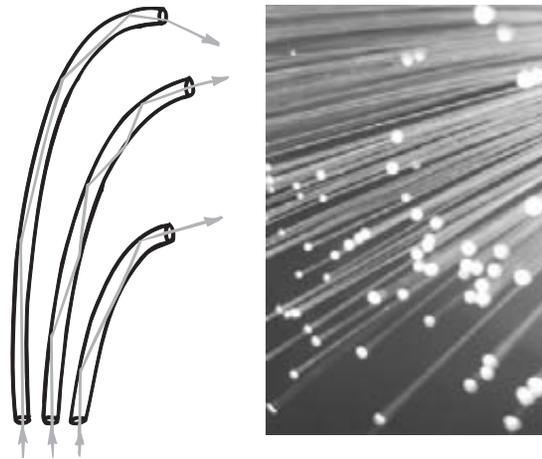


FIGURA 28.41

La luz “va por un tubo” desde abajo, en una sucesión de reflexiones internas totales, hasta que sale por los extremos superiores. (Véase la sección a color al final del libro.)

estómago de un paciente. Pueden hacerse lo bastante pequeñas para introducirse en los vasos sanguíneos o por los conductos estrechos de nuestro organismo, como la uretra. La luz pasa por algunas fibras, llega e ilumina la escena, y regresa por otras fibras.

Las fibras ópticas tienen importancia en las comunicaciones, porque permiten contar con una alternativa práctica a los cables y alambres de cobre. En muchos lugares hay fibras delgadas de vidrio que ya reemplazan a cables de cobre gruesos, voluminosos y costosos, para transportar miles de conversaciones telefónicas simultáneas entre centrales telefónicas principales. En muchos aviones se alimentan señales de control desde el piloto a las superficies de control (los alerones) mediante fibras ópticas. Las señales se envían mediante modulaciones en la luz de un láser. A diferencia de la electricidad, la luz es indiferente a la temperatura y a las fluctuaciones de los campos magnéticos vecinos, por lo que la señal es más clara. También, la probabilidad de que sea desviada por intrusos es mucho menor.

Lentes



Estudiar cómo funcionan las lentes es un aprendizaje activo. No experimentar con las lentes mientras aprendemos acerca de ellos es como tomar clases de natación sin meterse al agua.

¡EUREKA!

Un caso muy práctico de la refracción son las **lentes**. Se puede comprender una lente analizando trayectorias de tiempos iguales, como hicimos antes, o se puede suponer que está formada por un conjunto de varios prismas y bloques de vidrio en el orden indicado en la figura 28.42. Los prismas y los bloques refractan los rayos paralelos de luz que les llegan, de manera que convergen hacia un punto (o divergen de éste). El arreglo que muestra la figura 28.42a hace converger a la luz, y a esa lente se le llama **convergente**. Observa que es más gruesa en su parte media.

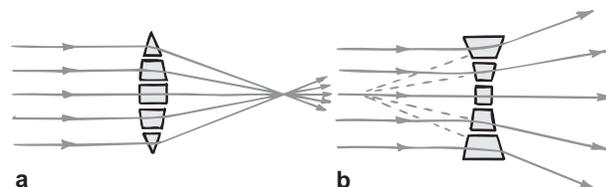
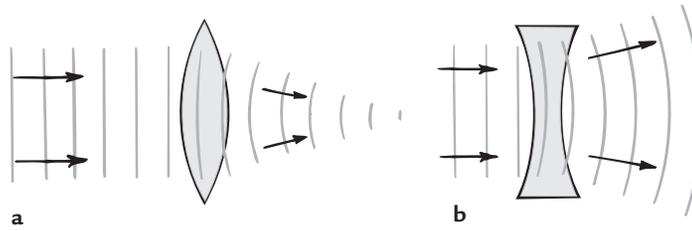


FIGURA 28.42

Una lente se puede considerar como un conjunto de bloques y de prismas.
 a) Una lente convergente.
 b) Una lente divergente.

FIGURA 28.43

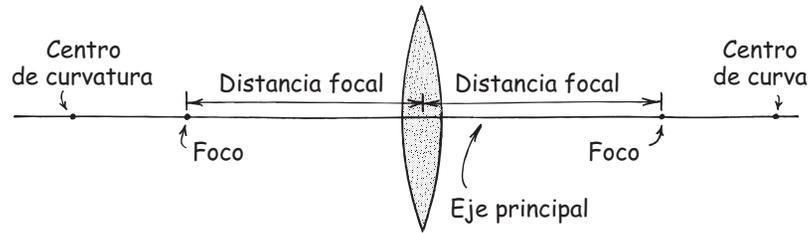
Los frentes de onda se propagan con más lentitud en el vidrio que en el aire.
 a) Las ondas se retardan más en el centro de la lente, y resulta la convergencia.
 b) Las ondas se retardan más en los bordes, y se produce la divergencia.



El arreglo del inciso b) es diferente. La parte media es más delgada que las orillas, y hace que la luz diverja. A esa lente se le llama **lente divergente**. Observa que los prismas hacen diverger a los rayos incidentes en una forma que los hace parecer que provienen de un solo punto frente a la lente. En ambas lentes, la máxima desviación de los rayos ocurre en los prismas más alejados, porque tienen el ángulo mayor entre las dos superficies refractoras. No hay desviación alguna exactamente en el centro, porque en esa parte las caras del vidrio son paralelas entre sí. Desde luego, las lentes reales no se fabrican con prismas como muestra la figura 28.42; se fabrican de una sola pieza de vidrio, con superficies que por lo general se tallan en forma esférica. En la figura 28.43 se observa cómo las lentes lisas refractan las ondas que les llegan.

FIGURA 28.44

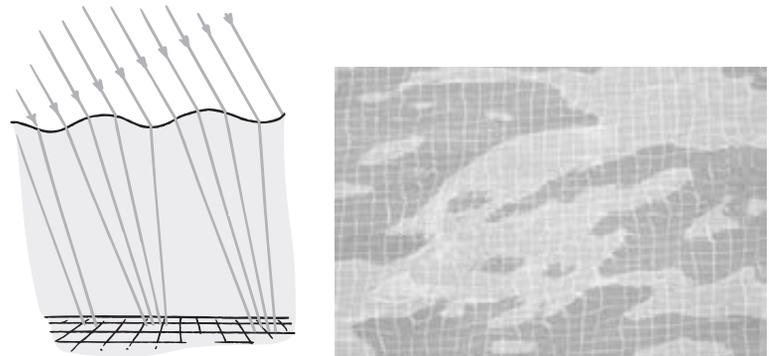
Propiedades fundamentales de una lente convergente.



Algunos puntos clave para describir las lentes se muestran en la figura 28.44, para una lente convergente. El *eje principal* de una lente es la línea que une los centros de curvatura de sus superficies. El *foco* es el punto donde converge un haz de luz, paralelo al eje principal. Los rayos paralelos que no son paralelos al eje principal se enfocan en puntos arriba o abajo del foco. Todos los puntos posibles así definidos forman un *plano focal*. Como una lente tiene dos superficies, tiene dos focos y dos planos focales. Cuando la lente de una cámara se ajusta para captar objetos lejanos, la película está en el plano focal, detrás de las lentes en la cámara. La *distancia focal* de la lente es la que hay entre su centro y cualesquiera de los focos.

FIGURA 28.45

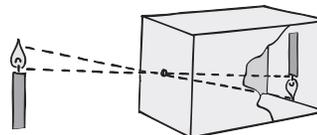
Las figuras móviles de zonas claras y oscuras en el fondo del estanque son el resultado de la superficie dispareja del agua, que se comporta como una cubierta de lentes ondulantes. De igual modo que vemos el fondo de la alberca variando de brillo, un pez que viera hacia arriba, hacia el Sol, también vería que cambia el brillo. Como en la atmósfera hay irregularidades análogas, vemos que las estrellas centellean. (Véase la sección a color al final del libro.)



PRÁCTICA DE FÍSICA

Elabora una sencilla cámara oscura (estenopeica). Corta y quita una cara de una caja de cartón pequeña, y cúbrela con papel de dibujo semitransparente (albanene o de China). Con un alfiler perfora un orificio, bien hecho, en la cara opuesta (si el cartón es grueso, puedes hacer el orificio en un trozo de hoja de aluminio pegado sobre una abertura mayor en el cartón). Dirige la cámara hacia un objeto brillante en un cuarto oscuro y verás su imagen de cabeza en el papel. Cuanto más diminuto sea el orificio, la imagen será más oscura, pero más nítida. Si en un cuarto oscuro cambias el papel por película fotográfica virgen, cúbrela por detrás para que no le llegue la luz y cubre el orificio de alfiler con un cartón desmontable. Estás listo para tomar una foto. Los tiempos de

exposición son distintos, y dependen principalmente de la clase de película y de la cantidad de luz. Prueba con distintos tiempos de exposición, comenzando con unos 3 segundos. También haz la prueba con cajas de distintos tamaños. El objetivo de una cámara comercial es mucho mayor que el orificio de alfiler y, en consecuencia, admite más luz en menos tiempo; de ahí viene el nombre de las *fotos instantáneas*.



Formación de imagen por una lente

En este momento, hay luz que se refleja desde tu cara y va hacia esta página. Por ejemplo, la luz que se refleja en la frente llega a todas las partes de esta página. Sucede lo mismo con la luz que se refleja en la barbilla. Cada parte de la página está iluminada con luz reflejada de la frente, la nariz, la barbilla y todas las demás partes de tu cara. No ves una imagen de tu cara en la página porque hay demasiado traslape de la luz. Pero si pones una barrera con un orificio de alfiler entre tu cara y la página, la luz que parte de tu frente y llega a la página no se traslapa con la que te sale del mentón. Es igual para el resto de la cara. Al no haber esas superposiciones, se forma una imagen de tu cara en la página. Será muy oscura, porque es muy poca la luz que la cara refleja y que a la vez pasa por el orificio de alfiler. Para ver la imagen debes proteger esta página de otras fuentes de luz. Lo mismo sucede con el florero y las flores de la figura 28.46b.⁵

Las primeras cámaras no tenían lentes, y admitían la luz por un orificio pequeño. En la figura 28.46b y c puedes ver por qué la imagen que se forma está invertida (de cabeza) siguiendo los rayos de muestra.



Haz un orificio en una hoja de papel, sostenlo frente a la luz solar, de manera que la imagen solar sea del mismo tamaño que una moneda sobre el suelo, y luego calcula cuántas monedas cabrían entre el suelo y el agujero. Ése es el número de diámetros solares que cabrían en una distancia entre la Tierra y el Sol. (¿Recuerdas esto del capítulo 1?)

¡EUREKA!

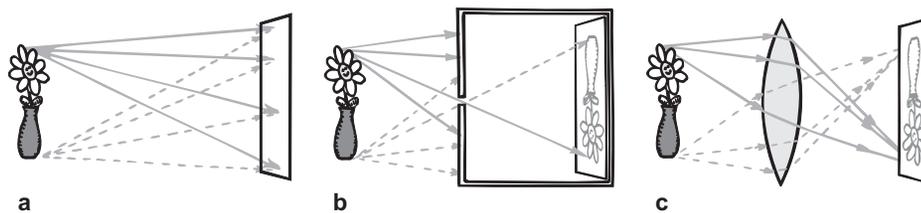


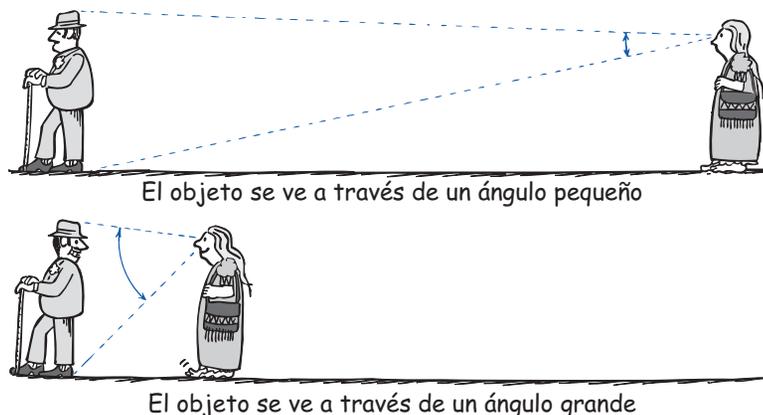
FIGURA 28.46 Figura interactiva

Formación de la imagen. a) No aparece imagen en el muro, porque los rayos de todas las partes del objeto se enciman en todas las partes del muro. b) Una sola abertura pequeña en una barrera evita que los rayos traslapados lleguen al muro; se forma una imagen difusa e invertida. c) Una lente hace converger los rayos en el muro sin que se encimen; como hay más luz, la imagen es más brillante.

⁵ De manera cuantitativa, para relacionar las distancias del objeto con las distancias de la imagen se utiliza la ecuación de la lente delgada

$$\frac{1}{d_o} + \frac{1}{d_i} = \frac{1}{f} \text{ o bien, } d_i = \frac{d_o f}{d_o - f}$$

donde d_o es la distancia al objeto desde la lente, d_i es la distancia a la imagen desde la lente y f es la distancia focal de la lente



El objeto se ve a través de un ángulo pequeño

El objeto se ve a través de un ángulo grande

FIGURA 28.47

¿Sabes por qué la imagen en la figura 28.46b está de cabeza? ¿Es cierto que cuando revelas e imprimes tus fotografías, están todas de cabeza?

¡EUREKA!

Se requerían largos tiempos de exposición por la pequeña cantidad de luz que admitía el orificio pequeño. Si éste fuera un poco más grande, admitiría más luz, pero los rayos se encimarían y producirían una imagen borrosa. Un orificio demasiado grande permitiría demasiado traslape y no se formaría imagen discernible. Es donde entra una lente convergente (figura 28.46c). La lente hace que la luz converja hacia la pantalla sin que haya el indeseable encimamiento de los rayos. Mientras que las primeras cámaras oscuras (estenopeicas) sólo se podían usar con objetos inmóviles, por el largo tiempo de exposición que se requería, con una lente se pueden fotografiar objetos en movimiento, porque el tiempo de exposición es corto y, como se dijo antes, debido a esto las fotografías que toman las cámaras con lente se llaman *instantáneas*.

El uso más sencillo de una lente convergente es en una **lupa**. Para entender cómo funciona, imagina la manera en que examinas los objetos cercanos y lejanos. Sin ayuda en la visión, un objeto lejano se ve dentro de un ángulo relativamente angosto; en tanto que un objeto cercano se ve dentro de un ángulo de visión más amplio (figura 28.47). Para ver los detalles de un objeto pequeño debes acercarte todo lo posible, para que tu ángulo de visión sea el máximo. Pero el ojo no puede enfocar estando muy cerca. Es donde entran en acción las lupas. Cuando se acerca al objeto, una lupa proporciona una imagen clara que sin ella se vería borrosa.

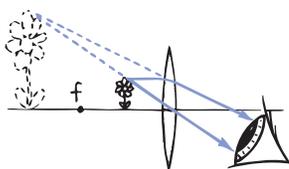


FIGURA 28.48

Cuando un objeto está cerca de una lente convergente (menor a su distancia focal f), la lente funciona como lupa y produce una imagen virtual. La imagen se ve más grande y más alejada de la lente que el objeto.

Al usar una lupa la sujetamos cerca del objeto que deseamos examinar. Esto se debe a que una lente convergente proporciona una imagen aumentada y derecha, sólo cuando el objeto está dentro del foco (figura 28.48). Si se pone una pantalla a la distancia de la imagen, no se forma imagen, porque no hay luz que se dirija hacia el lugar de la imagen. Sin embargo, los rayos que llegan al ojo se comportan *como si* provinieran de la posición de la imagen. A esta imagen la llamamos **imagen virtual**.

Cuando el objeto está suficientemente alejado y más allá del foco de una lente convergente, se forma una **imagen real**, en vez de una imagen virtual. La figura 28.49 muestra un caso donde una lente convergente forma una imagen real en la pared. Esa imagen real está invertida, o de cabeza. Se aprovecha un arreglo parecido para proyectar transparencias y películas en una pantalla, así como para proyectar una imagen real en la película de una cámara. Las imágenes reales producidas con una sola lente siempre están invertidas.

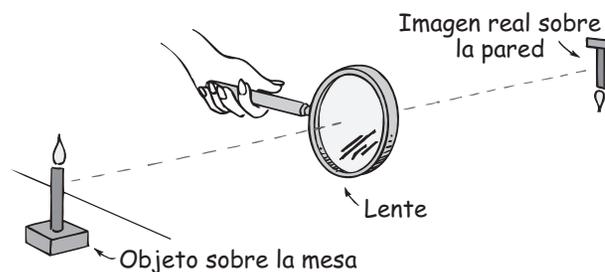


FIGURA 28.49

Cuando un objeto está lejos de una lente convergente (más allá de su foco), se forma una imagen real e invertida.



FIGURA 28.50
Una lente divergente forma una imagen virtual y derecha de la niña y su mascota.

Una lente divergente, cuando se usa sola, produce una imagen virtual reducida. No importa lo alejado que esté el objeto. Cuando una lente divergente se usa sola, la imagen siempre será virtual, derecha y más pequeña que el objeto. A menudo, una lente divergente se usa como “buscador” en una cámara. Cuando miras el objeto que vas a fotografiar a través de esa lente, lo que ves es una imagen virtual que tiene más o menos las mismas proporciones que saldrán en la fotografía.

EXAMÍNATE

1. ¿Por qué la mayoría de la fotografía en la figura 28.50 está fuera de foco?
2. ¿Cuando se cubren a la mitad las lentes de un proyector de diapositivas, ¿qué sucede con la imagen que proyecta en la pantalla?

Defectos de las lentes (opcional)

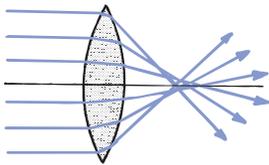


FIGURA 28.51
Aberración de esfericidad.

Ninguna lente produce una imagen perfecta. A las distorsiones de la imagen se les llama **aberraciones**. Si se combinan las lentes de ciertas formas, las aberraciones se pueden reducir al mínimo. Por tal razón, la mayoría de los instrumentos ópticos usan lentes compuestas, cada una de las cuales está formada por varias lentes simples, en vez de lentes sencillas.

La *aberración de esfericidad* se debe a que la luz que pasa por las orillas de una lente se enfoca en un lugar un poco distinto de donde se enfoca la luz que está cerca del centro de la lente (figura 28.51). Eso se puede corregir cubriendo las orillas de una lente, como un diafragma en una cámara. La aberración de esfericidad se corrige en los buenos instrumentos ópticos mediante una combinación de lentes.

La *aberración cromática* se debe a que la luz de distintos colores tiene distintas rapidezces y en consecuencia distintas refracciones en la lente (figura 28.52). En una lente simple (como en un prisma), los distintos colores de la luz no quedan enfocados en el mismo lugar. Las *lentes acromáticas*, que son una combinación de lentes simples de distintas clases de vidrios, corrigen este defecto.

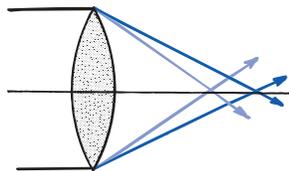


FIGURA 28.52
Aberración cromática.

La pupila cambia de tamaño para regular la cantidad de luz que le entra. La visión es más aguda cuando la pupila es más pequeña, porque entonces la luz sólo pasa por la parte central del cristalino, donde las aberraciones de esfericidad y cromática son mínimas. Además, el ojo funciona más como una cámara oscura (esteno-peica), por lo que se requiere un enfoque mínimo para tener una imagen nítida. Ves mejor con luz brillante, porque bajo esa luz las pupilas son más pequeñas.

COMPRUEBA TUS RESPUESTAS

1. La niña, su mascota y sus imágenes virtuales son “objetos” para el objetivo de la cámara que tomó esta fotografía. Como los objetos están a distintas distancias de la lente, sus respectivas imágenes están a diferentes distancias con respecto a la película de la cámara. Así, sólo se pudo enfocar una. Lo mismo sucede con los ojos. No puedes enfocar objetos cercanos y lejanos al mismo tiempo.
2. La imagen de una lente cubierta a la mitad es más oscura porque se forma con la mitad de la luz. Lo importante aquí es que ello no significa que se forme sólo la mitad de la imagen. La imagen completa, aunque más oscura, está aún ahí. (Más rayos demostrarían esto, en vez de los pocos que elegimos en la figura 28.46 para señalar la ubicación de la imagen.)



Si usas anteojos y alguna vez los has extraviado, o si te resulta difícil leer las letras pequeñas, trata de mirar de reojo o, aún mejor, trata de sostener un orificio pequeño (en un trozo de papel) frente a uno de tus ojos y cerca de la página de un libro. Distinguirás con claridad las letras y, como estás cerca del texto, éste se agrandará. ¡Inténtalo y compruébalo!

¡EUREKA!

El *astigmatismo* es un defecto causado cuando la córnea es más curva en una dirección que en otra, algo así como el costado de un barril. Por este defecto el ojo no forma imágenes nítidas. El remedio es usar anteojos con lentes cilíndricas que tengan más curvatura en una dirección que en otra.

EXAMÍNATE

1. Si la luz se propagara con la misma rapidez en el vidrio y en el aire, ¿las lentes de vidrio alterarían la dirección de los rayos de luz?
2. ¿Por qué hay aberración cromática en la luz que atraviesa una lente, pero no en la luz que se refleja de un espejo?

En la actualidad, una opción para quienes tienen mala visión es usar anteojos. Éstos probablemente se comenzaron a usar en China y en Italia, a fines del siglo XIII. (Es curioso que el telescopio fuera inventado sólo hasta 300 años después. Si en el intermedio alguien vio los objetos a través de un par de lentes alineados y separados, por ejemplo, fijos en los extremos de un tubo, no dejó registro.) Hace poco tiempo surgió una alternativa al uso de anteojos y lentes de contacto. Ahora la tecnología láser permite a los cirujanos oftalmólogos “raspar” la córnea, hasta dejarla con una forma adecuada para la visión normal. En el mundo del futuro el uso de anteojos y lentes de contacto, cuando menos para los jóvenes, será algo del pasado. Realmente vivimos en un mundo que cambia rápidamente. Y eso puede ser benéfico.

COMPRUEBA TUS RESPUESTAS

1. No.
2. Las diferentes frecuencias se propagan con distintas rapidezces en un medio transparente y, en consecuencia, se refractan con distintos ángulos, lo cual produce aberración cromática. Sin embargo, los ángulos de reflexión de la luz no tienen nada que ver con su frecuencia. Un color se refleja igual que todos los demás. En consecuencia, en los telescopios se prefieren los espejos a las lentes, porque en los espejos no hay aberración cromática.

Resumen de términos

Aberración Distorsión de una imagen producida por una lente, la cual está presente hasta cierto grado en todos los sistemas ópticos.

Ángulo crítico Ángulo de incidencia mínimo dentro de un medio donde un rayo de luz se refleja totalmente.

Imagen real Imagen formada por los rayos de luz que convergen en el lugar de la imagen. Una imagen real, a diferencia de una imagen virtual, se puede mostrar en una pantalla.

Imagen virtual Imagen formada por los rayos de luz que no convergen en el lugar de la imagen.

Lente convergente Lente que es más gruesa en la parte central que en los bordes, haciendo que los rayos paralelos se unan o se enfoquen.

Lente divergente Lente que es más delgada en la parte central que en los bordes, haciendo que los rayos paralelos diverjan desde un punto.

Ley de la reflexión El ángulo de reflexión es igual al ángulo de incidencia.

Principio de Fermat del tiempo mínimo La luz toma la trayectoria que requiere el tiempo mínimo, para ir de un lugar a otro.

Reflexión El regreso de los rayos de luz en una superficie.

Reflexión difusa Reflexión en direcciones irregulares desde una superficie irregular.

Reflexión interna total Reflexión total de la luz que viaja por un medio más denso y llega a la frontera con un medio menos denso, formando un ángulo mayor que el ángulo crítico.

Refracción Desviación oblicua de un rayo de luz al pasar de un medio transparente a otro.

Lecturas sugeridas

Bohren, Craig F. *Clouds in a Glass of Beer*. Nueva York: Wiley, 1987.

Bohren, Craig F. *What Light Through Yonder Window Breaks?* Nueva York: Wiley, 1991.

Greenler, R. *Rainbows, Halos, and Glories*. Nueva York: Cambridge University Press, 1980.

Greenler, R. *Chasing the Rainbow: Recurrences in the Life of a Scientist*. Nueva York: Cambridge University Press, 2000.

Preguntas de repaso

1. Explica la diferencia entre *reflexión* y *refracción*.

Reflexión

2. ¿La luz incidente que llega a un objeto cómo afecta el movimiento de los electrones en los átomos del objeto?
3. ¿Qué hacen los electrones en un objeto iluminado cuando son forzados a vibrar con mayor energía?

Principio del tiempo mínimo

4. ¿Cuál es el principio de Fermat del tiempo mínimo?

Ley de la reflexión

5. Explica la ley de la reflexión.

Espejos planos

6. En relación con la distancia de un objeto frente a un espejo plano, ¿a qué distancia se encuentra la imagen detrás del espejo?
7. ¿Qué fracción de la luz que llega directa a una lámina de vidrio se refleja en la primera superficie?

Reflexión difusa

8. ¿Puede pulirse una superficie para reflejar unas ondas pero otras no?

Refracción

9. La luz se desvía al pasar de un medio a otro en dirección oblicua a la superficie que los separa, y toma un camino un poco más largo para ir de un

punto a otro punto. ¿Qué tiene que ver ese camino más largo con el tiempo de recorrido de la luz?

10. ¿Cómo se compara el ángulo con el que llega la luz al vidrio de una ventana con el ángulo con el que sale por el otro lado?
11. ¿Cómo se compara el ángulo con el que llega un rayo de luz a un prisma con el ángulo que forma al salir por la otra cara?
12. ¿La luz viaja más rápido por aire ligero o por aire denso? ¿Qué tiene que ver esa diferencia de rapidez con la duración de un día?

Espejismos

13. ¿Un espejismo es producido por la reflexión o por la refracción?

Causa de la refracción

14. Cuando un carrito rueda por una acera lisa y pasa a un césped, la interacción de la rueda con las hojas del pasto desacelera aquélla. ¿Qué desacelera a la luz cuando pasa del aire al vidrio o al agua?
15. ¿Cuál es la relación entre la refracción y los cambios de la rapidez de la luz en un material?
16. ¿La refracción de la luz hace que una alberca parezca más o menos profunda?

Dispersión

17. ¿Qué sucede con la luz de determinada frecuencia cuando llega a un material cuya frecuencia natural es igual a la frecuencia de la luz?
18. ¿Qué se propaga con menos rapidez en el vidrio, la luz roja o la luz violeta?

Arcoiris

19. ¿Una sola gota de lluvia iluminada por la luz del Sol desvía la luz de un solo color, o dispersa un espectro de colores?
20. ¿El espectador observa un solo color o un espectro de colores que provienen de una sola gota lejana?
21. ¿Por qué un arcoiris secundario es más tenue que un arcoiris primario?

Reflexión interna total

22. ¿Qué quiere decir *ángulo crítico*?
23. ¿En el interior del vidrio a qué ángulo se refleja totalmente la luz? ¿Y en el interior del diamante a qué ángulo se refleja totalmente la luz?
24. La luz se propaga normalmente en línea recta, pero “se dobla” en una fibra óptica. Explica por qué.

Lentes

25. Explica la diferencia entre una *lente convergente* y una *lente divergente*.
26. ¿Qué es la *distancia focal* de una lente?

Formación de imagen por una lente

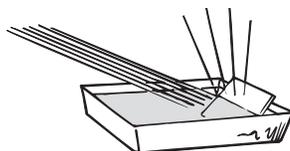
27. Explica la diferencia entre una *imagen virtual* y una *imagen real*.
28. ¿Qué clase de lente se pueden utilizar para producir una imagen real? ¿Y una imagen virtual?

Defectos de las lentes

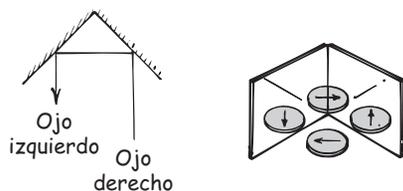
29. ¿Por qué la visión es más nítida cuando las pupilas están muy cerradas?
30. ¿Qué es astigmatismo y cómo se corrige?

Proyectos

1. Escribe una carta a tu abuelita donde la convanzas de que para que vea su imagen de cuerpo completo en un espejo, éste sólo debe tener la mitad de la altura de ella. Explícale también el intrigante papel de la distancia en un espejo de la mitad de su tamaño. Quizá si le envías algunos esquemas sencillos te ayude a lograr tu cometido.
2. Puedes producir un espectro si colocas una bandeja con agua a la luz solar. Recarga un espejo de bolsillo contra el borde de la bandeja, y ajústala hasta que el espectro aparezca en el muro o el techo. ¡Ajá, ya tienes un espectro sin usar un prisma!



3. Coloca dos espejos de bolsillo formando un ángulo recto y coloca una moneda entre ellos. Verás cuatro monedas. Cambia el ángulo de los espejos y fíjate cuántas imágenes de las monedas puedes ver. Con los espejos en ángulo recto, mírate la cara. A continuación guiña un ojo. ¿Qué ves? Ahora te ves como los demás te ven. Sujeta una página impresa frente a los espejos dobles, y observa la diferencia de su aspecto con el de la reflexión de un solo espejo.



4. Mírate en un par de espejos que formen ángulo recto entre sí. Te verás como los demás te ven. Gira los espejos, siempre en ángulo recto entre sí. ¿Gira también tu imagen? Ahora coloca los espejos para que formen un ángulo de 60° , y mírate en

ellos. De nuevo gira los espejos y observa si también gira tu imagen. ¿Asombroso?



5. Determina los aumentos de una lente enfocándola en las líneas de un papel rayado. Cuenta los espacios entre las líneas que caben en el espacio aumentado, y será el aumento de la lente. Puedes hacer lo mismo con binoculares y una pared de ladrillo lejana. Sujeta los binoculares de tal modo que sólo veas los ladrillos por uno de los oculares, mientras que con el otro ojo los veas directamente. El número de ladrillos que veas con el ojo y quepan en un ladrillo visto con los binoculares es el aumento del instrumento.



6. Ve las reflexiones de las luces del techo en las dos superficies de unos anteojos, y verás dos imágenes distintas y fascinantes. ¿Por qué son diferentes?

Ejercicios

1. El principio de Fermat es de tiempo mínimo, y no de distancia mínima. ¿Se aplicaría la distancia mínima también en la reflexión? ¿Y en la refracción? ¿Por qué tus respuestas son distintas?
2. En este capítulo iniciamos con la imagen de un profesor de física que parece estar suspendido sobre una mesa. Y no lo está. Explica cómo se crea esta ilusión.
3. El ojo en el punto P ve hacia el espejo. ¿Cuál de las tarjetas numeradas puede ver reflejada en el espejo?



- El vaquero Joe quiere disparar a un asaltante haciendo rebotar una bala en una placa metálica pulida como espejo. Para hacerlo, ¿ simplemente debería apuntar a la imagen reflejada del asaltante? Explica por qué.
- Con frecuencia, los camiones tienen letreros atrás que dicen “si no puedes ver mis espejos, yo no te puedo ver”. Explica los procesos físicos que intervienen aquí.
- ¿Por qué las letras al frente de algunos vehículos están “al revés”?

AMBULANCIA

- Cuando te ves en el espejo y agitas la mano derecha, tu bella imagen agita la mano izquierda. Entonces, ¿por qué no se agitan los pies de tu imagen cuando agitas la cabeza?
- Los espejos retrovisores de los automóviles no están recubiertos en la primera superficie, y están plateados en la superficie trasera. Cuando el espejo se ajusta en forma correcta, la luz que llega de atrás se refleja en la superficie plateada y va hacia los ojos del conductor. Está bien. Pero no está tan bien durante la noche, con la luz deslumbrante de los autos que vienen atrás. Este problema se resuelve porque el vidrio del espejo tiene forma de cuña (ve el esquemita). Cuando el espejo se inclina un poco hacia arriba, a su posición “nocturna”, la luz deslumbrante se dirige hacia el toldo del automóvil y se aleja de los ojos del conductor. Sin embargo, el conductor puede seguir viendo en el espejo los vehículos que vienen atrás. Explica por qué.



- Para reducir el resplandor de los alrededores, las ventanas de algunas tiendas por departamentos están inclinadas con el lado inferior hacia adentro, en vez de ser verticales. ¿Cómo se reduce así el resplandor?
- Una persona en un cuarto oscuro que ve por una ventana puede mirar con claridad a una persona que esté afuera a la luz del día; mientras que la persona en el exterior no puede ver a la persona dentro del cuarto oscuro. Explica por qué.
- ¿Cuál sería la ventaja de tener páginas mate (sin brillo) en este libro, en vez de usarlas con una superficie más brillante?
- ¿Qué clase de superficie de asfalto se ve con más facilidad al conducir por la noche, una áspera con piedras o una tan lisa como espejo? Explica por qué. ¿Por qué es difícil ver la carretera frente a ti cuando conduces el automóvil en una noche lluviosa?

- ¿Cuántos espejos se utilizaron para crear la siguiente fotografía, que tomó el profesor de física Fred Myers cuando estaba con su hija McKenzie?



- ¿Cuál debe ser la altura mínima de un espejo plano para que te veas de cuerpo completo en él?
- En la pregunta anterior, ¿qué efecto tiene la distancia entre tú y el espejo plano? (¡Haz la prueba!)
- Sujeta un espejo de bolsillo con el brazo extendido y observa qué tanto de tu cara puedes ver. Para ver más de la cara, ¿deberías acercarte al espejo, alejarlo o tener un espejo más grande? (¡Haz la prueba!)
- En un espejo empañado limpia sólo lo suficiente para ver tu cara completa. ¿Qué altura tiene el área limpiada en comparación con la dimensión vertical de tu cara?
- El diagrama siguiente muestra a una persona y su gemela a distancias iguales en las caras opuestas de un muro delgado. Imagina que se va a hacer una ventana en el muro, para que cada gemela mire el cuerpo completo de la otra. Indica el tamaño y el lugar de la ventana más pequeña que se pueda hacer en el muro para tener esa vista completa. (Sugerencia: traza rayos desde la coronilla de cada gemela hasta los ojos de la otra. Haz lo mismo con los pies de cada una hasta los ojos de la otra.)



- ¿Puedes decir si una persona tiene miopía o hipermetropía al ver cómo su cara aparece en sus anteojos. ¿Cuando los ojos de una persona se ven aumentados, la persona tiene miopía o hipermetropía?

20. Vemos un pájaro y su reflexión. ¿Por qué en la reflexión no se ven las patas del ave?



21. ¿Por qué la luz reflejada del Sol o de la Luna parecen una columna en el cuerpo de agua, como se ve en la figura? ¿Cómo se verían si la superficie del agua fuera perfectamente lisa?

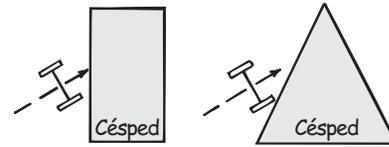


22. ¿Qué error hay en la caricatura de un señor viéndose en el espejo? (Pide a un amigo que imite la caricatura, y ve lo que sucede.)

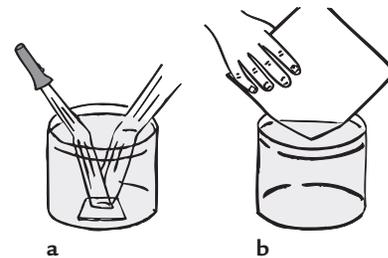


23. Un par de carritos de juguete ruedan en dirección oblicua, desde una superficie lisa hacia dos céspedes, uno rectangular y otro triangular, como se ve en la figura. El suelo está un poco inclinado, para que

después de desacelerarse en el césped, las ruedas se vuelvan a acelerar al salir a la superficie lisa. Termina cada esquema indicando algunas posiciones de las ruedas dentro de los céspedes y cuando pasen al otro lado, indicando así la dirección del recorrido.



24. Tu amigo te dice que la longitud de onda de las ondas es menor en el agua que en el aire, y que la figura 28.24 es una prueba de ello. ¿Estás de acuerdo con él? ¿Por qué?
25. Un pulso de luz roja y uno de luz azul entran a un bloque de vidrio, normal a su superficie y al mismo tiempo. Estrictamente hablando, después de atravesar el bloque ¿cuál pulso sale primero?
26. Durante un eclipse lunar, la Luna no está totalmente negra, sino con frecuencia tiene un color rojo intenso. Explica lo que sucede en términos de la refracción en los ocasos y las auroras en todo el mundo.
27. Coloca un tubo de ensayo dentro de agua, y podrás verlo. Llénalo con aceite de soya limpio y quizá ya no lo veas. ¿Qué te dice eso acerca de la rapidez de la luz en el aceite y en el vidrio?
28. Un haz de luz se desvía como se ve en *a*) mientras que los bordes del cuadrado sumergido se desvían como se muestra en *b*) ¿Se contradicen estas figuras? Explica por qué.



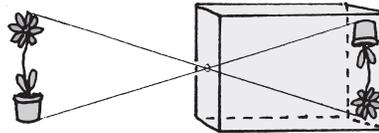
29. Si al estar parado a la orilla de un río quieres pescar con arpón a un pez que está frente a ti, ¿deberías apuntar hacia arriba o hacia abajo del pez, o directamente hacia él? Si en lugar de ello pudieras atrapar al pez con un rayo láser, ¿deberías apuntar hacia arriba o hacia abajo del pez, o directamente hacia él? Defiende tus respuestas.
30. Si el pez del ejercicio anterior fuera pequeño y azul, y la luz del rayo láser fuera roja, ¿qué correcciones harías? Explica por qué.
31. Cuando un pez mira hacia arriba en un ángulo de 45° , ¿ve el cielo o sólo la reflexión del fondo? Defiende tu respuesta.

32. Los rayos de luz en el agua que van hacia la superficie, formando ángulos mayores de 48° con la normal, se reflejan totalmente. Ninguno de los rayos más allá de los 48° se refracta y sale al exterior. ¿Y al revés? ¿Hay un ángulo en el cual los rayos de luz en el aire, que lleguen a una superficie del agua, se reflejen totalmente? ¿O algo de la luz se refractará desde todos los ángulos?
33. Si fueras a mandar un rayo láser a una estación espacial sobre la atmósfera y justo encima del horizonte, ¿apuntarías el rayo láser arriba, abajo o hacia la estación espacial visible? Defiende tu respuesta.
34. Cuando observas el espejismo del “agua sobre la carretera”, ¿exactamente que estás viendo?
35. ¿Cómo se explican las grandes sombras producidas por las patas delgadas del zancudo?



36. Cuando estás parado de espaldas al Sol, ves un arcoiris en forma de arco circular. ¿Podrías moverte hacia un lado y ver el arcoiris con la forma de un segmento de elipse, y no como segmento de círculo (como parece indicar la figura 28.32)? Defiende tu respuesta.
37. Dos observadores separados entre sí no ven el “mismo” arcoiris. Explica por qué.
38. Un arcoiris visto desde un avión puede formar un círculo completo. ¿Dónde aparecerá la sombra del avión? Explica por qué.
39. ¿En qué se parece un arcoiris al halo que a veces se ve que rodea a la Luna en una noche en que cae una helada? ¿En qué se diferencian los arcoiris y los halos?
40. Las cubiertas de alberca, de plástico transparente, llamadas *láminas de calefacción solar* tienen miles de pequeñas lentes formados por burbujas llenas de aire. En los anuncios se dice que las burbujas en esas láminas enfocan el calor del Sol en el agua, y elevan su temperatura. ¿Crees que las burbujas de esas láminas dirijan más energía solar hacia el agua? Defiende tu respuesta.
41. La intensidad promedio de la luz solar, medida con un fotómetro (medidor de intensidad luminosa) en el fondo de la alberca de la figura 28.46, ¿sería distinta si el agua estuviera en calma?
42. Cuando los ojos se sumergen en agua, ¿la desviación de los rayos de luz del agua a los ojos es mayor, menor o igual que en el aire?

43. ¿Por qué los *goggles* permiten que un nadador bajo el agua enfoque con más claridad lo que está mirando?
44. Si un pez usara *goggles* sobre la superficie del agua, ¿por qué su visión sería mejor si estuvieran llenos de agua?
45. ¿Un diamante bajo el agua destella más o menos que en el aire? Defiende tu respuesta.
46. Cubre la mitad superior del objetivo de una cámara. ¿Qué efecto tiene eso sobre las fotografías que se toman?
47. ¿Qué sucedería a la imagen que proyectan unos lentes sobre una pantalla, si se cubriera la mitad de los lentes? (¡Haz la prueba!)
48. ¿Cómo podría hacerse una lente convergente para las ondas sonoras? (Hay una lente así en el Exploratorium de San Francisco.)
49. ¿Tendrían aumento los telescopios refractores y los microscopios, si la luz tuviera la misma rapidez en el vidrio y en el aire? Explica por qué.
50. Hay menos diferencia entre la rapidez de la luz en el vidrio y en el agua, de la que hay entre la rapidez de la luz en el vidrio y en el aire. ¿Ello significa que una lupa aumentará o reducirá los objetos cuando se utilice debajo del agua, en vez de en el aire?
51. Las ondas no se traslapan en la imagen de una cámara oscura (estenopeica). ¿Tal característica contribuye a la nitidez o a lo difuso de la imagen?



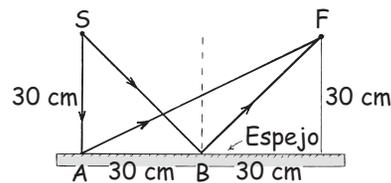
52. ¿Por que la nitidez de una imagen en una cámara oscura no depende de la posición de la pantalla de visión?
53. Mientras que las cámaras oscuras brindan imágenes nítidas, las cámaras que tienen objetivos con grandes aberturas son convenientes para cámaras de aviones-espía que viajan a gran altura. ¿Por qué?
54. ¿Puedes tomar una foto de tu imagen en un espejo plano y enfocar la cámara en tu imagen y en el marco del espejo al mismo tiempo? Explica por qué.
55. En términos de distancia focal, ¿a qué distancia está la película atrás de la lente de la cámara, al tomar fotos de objetos lejanos?
56. ¿Por qué debes poner al revés las diapositivas en un proyector?
57. La imagen que produce una lente convergente está de cabeza y nuestros ojos están equipados con lentes convergentes. ¿Esto significa que las imágenes que vemos están de cabeza en nuestras retinas? Explica por qué.

- 58. La imagen que produce una cámara de lentes convergentes está de cabeza. ¿Esto significa que las fotografías que toman las cámaras están de cabeza? Explica por qué.
- 59. ¿Los mapas de la Luna están de cabeza? Explica por qué.
- 60. ¿Por qué las personas de edad avanzada que no usan anteojos deben leer los libros más lejos que la gente joven?

Problemas

- 1. Demuestra, con un diagrama sencillo, que cuando un espejo con un rayo fijo que incide en él gira determinado ángulo, el rayo reflejado gira un ángulo dos veces mayor. (Este aumento del desplazamiento al doble hace que sean más evidentes las irregularidades en los vidrios ordinarios de ventana.)
- 2. Una mariposa, al nivel de los ojos, está a 20 cm frente a un espejo plano. Estás detrás de la mariposa, a 50 cm del espejo. ¿Cuál es la distancia entre el ojo y la imagen de la mariposa en el espejo?
- 3. Si tomas una fotografía de tu imagen en un espejo plano, ¿a cuántos metros debes enfocar si estás a 2 metros frente al espejo?
- 4. Imagina que caminas hacia un espejo a 2 m/s. ¿Con qué rapidez se acercan tú y la imagen entre sí? (La respuesta *no es* a 2 m/s.)
- 5. Cuando la luz llega perpendicularmente al vidrio, se refleja en cada superficie más o menos el 4%. ¿Cuánta luz se transmite a través de una lámina de vidrio?

- 6. Ningún vidrio es perfectamente transparente. Principalmente debido a las reflexiones, un 92% de la luz atraviesa una lámina promedio de vidrio transparente de ventana. La pérdida de 8% no se nota cuando sólo es una lámina, pero sí se nota a través de varias láminas. ¿Cuánta luz transmite una ventana “con vidrio doble” (una que tiene dos hojas de vidrio)?
- 7. El diámetro del Sol forma un ángulo de 0.53° con respecto a la Tierra. ¿Cuántos minutos tarda el Sol en recorrer un diámetro solar en el cenit (el Sol directamente arriba de nosotros)? Recuerda que tarda 24 horas, o 1440 minutos, en recorrer 360° . ¿Cómo se compara tu respuesta con el tiempo que tarda el Sol en desaparecer desde que la orilla inferior toca el horizonte en el crepúsculo? (¿La refracción influyó sobre tu respuesta?)
- 8. Imagina dos formas en las que la luz, hipotéticamente, va del punto de partida S, hasta el destino F, pasando por un espejo: reflejándose en el punto A o reflejándose en el punto B. Como la luz se propaga con rapidez fija por el aire, la trayectoria de tiempo mínimo también será la de distancia mínima. Demuestra, con cálculos, que la trayectoria SBF es más corta que la trayectoria SAF. ¿Cómo tiende este resultado a sustentar el principio del tiempo mínimo?



Ondas luminosas



Jennie McKelvie demuestra que un tanque de ondas funciona muy bien en Nueva Zelanda.

Lanza una piedra a un estanque tranquilo y en la superficie del agua se forman ondas. Golpea un diapasón y las ondas sonoras se propagan por todas direcciones. Enciende un fósforo y las ondas luminosas se expanden, en forma parecida, por todas direcciones (a la enorme rapidez de la luz, de 300,000 kilómetros por segundo). En este capítulo estudiaremos la naturaleza ondulatoria de la luz. En el siguiente, veremos que también la luz tiene una naturaleza de partículas. Aquí investigaremos algunas de las propiedades ondulatorias de la luz: difracción, interferencia y polarización.

Principio de Huygens

Aunque se considera que Galileo fue quien primero diseñó un péndulo para hacer funcionar engranes, fue el holandés Christian Huygens quien construyó el primer reloj de péndulo. Sin embargo, se recuerda más a Huygens por sus ideas acerca de las ondas.¹ Las crestas de las ondas que se ven en la figura 29.1 forman círculos concéntricos, llamados *frentes de onda*. Huygens propuso que los frentes de las ondas luminosas que se propagan desde una fuente puntual se pueden considerar como crestas encimadas de ondas secundarias diminutas (figura 29.2), es decir, los frentes de onda están formados por frentes de onda más pequeños. A esta idea se le llama **principio de Huygens**.



FIGURA 29.1
Ondas en el agua.

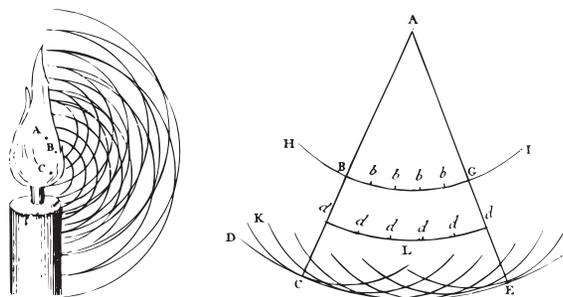


FIGURA 29.2

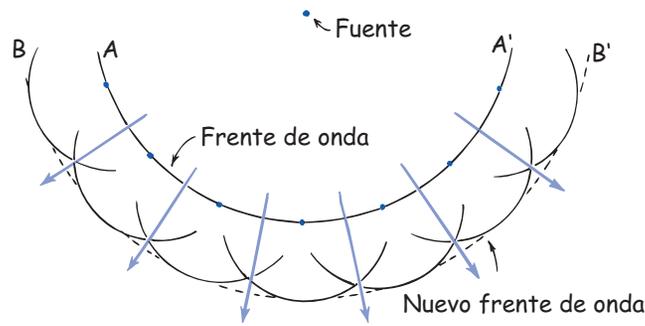
Estos dibujos se tomaron del libro *Tratado sobre la luz* de Huygens. La luz de A se propaga en frentes de onda, y cada punto del frente se comporta como si fuera una nueva fuente de ondas. Las ondas secundarias que comienzan en b, b, b, b forman un nuevo frente de onda (d, d, d, d); las ondas secundarias que comienzan en d, d, d, d forman otro frente de onda nuevo (DCEF).

¹ En 1665, 13 años antes de que Huygens publicara su hipótesis acerca de los frentes de onda, el físico inglés Robert Hooke propuso una teoría ondulatoria de la luz.

FIGURA 29.3

Figura interactiva

El principio de Huygens aplicado a un frente de onda esférico.



Examina el frente de onda esférico de la figura 29.3. Se puede ver que si todos los puntos a lo largo del frente de onda AA' son fuentes de nuevas ondas, unos momentos después las nuevas ondas encimadas formarán una nueva superficie BB', la cual se considera la envolvente de todas las ondas pequeñas. En la figura sólo se indican unas cuantas de la cantidad infinita de ondas pequeñas que se originan en fuentes puntuales secundarias a lo largo de AA', que se combinan y producen la envolvente continua BB'. A medida de que se extiende la onda, sus segmentos parecen menos curvos. A mucha distancia de la fuente original, las ondas casi forman un plano, como lo hacen, por ejemplo, las ondas que proceden del Sol. En la figura 29.4 se observa una construcción con ondas pequeñas de Huygens, para frentes de onda planos. Vemos las leyes de la reflexión y la refracción ilustradas mediante el principio de Huygens, en la figura 29.5.

FIGURA 29.4

Figura interactiva

El principio de Huygens aplicado a un frente de onda plano.

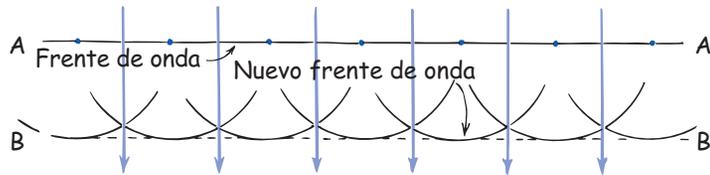
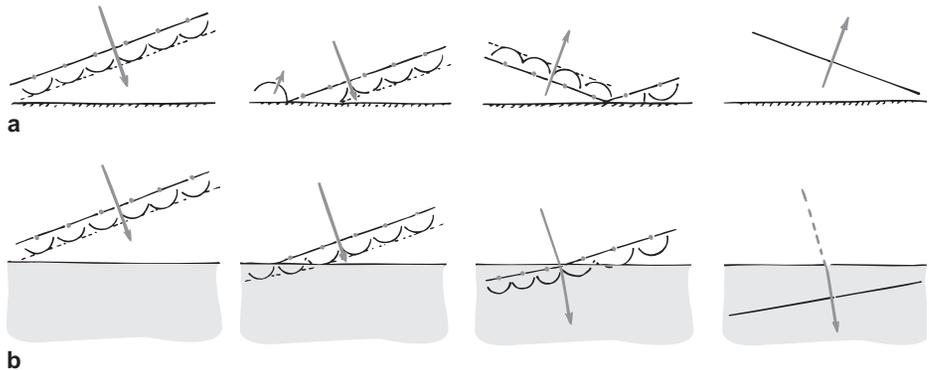


FIGURA 29.5

El principio de Huygens aplicado a a) la reflexión y b) a la refracción.



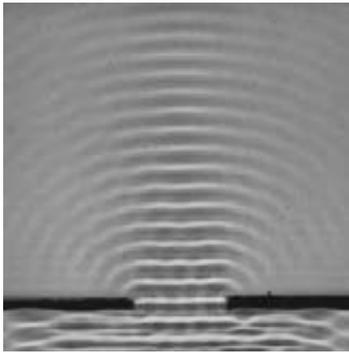
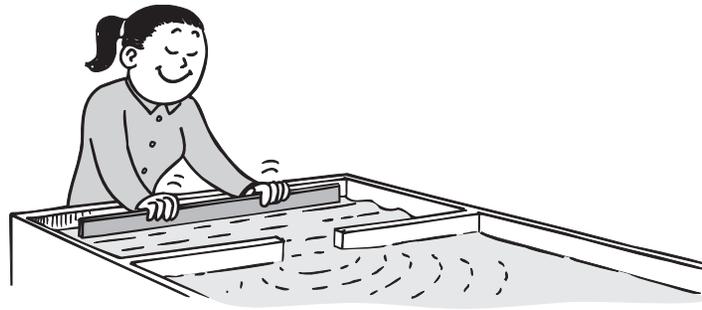
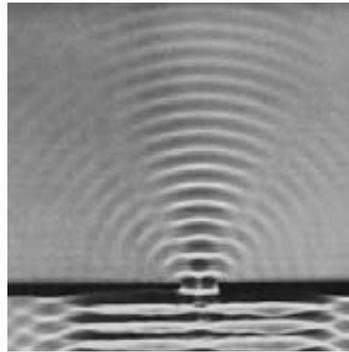
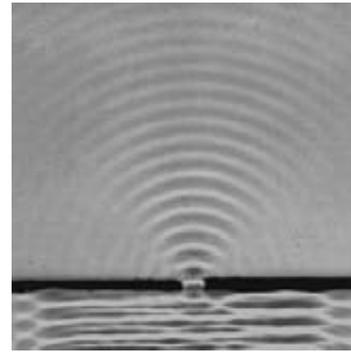
De nuevo, un rayo de luz siempre es perpendicular a su frente de onda.

¡EUREKA!

Se pueden generar ondas planas en el agua sumergiendo y sacando una regla horizontal, por ejemplo, una regla de un metro (figura 29.6). Las imágenes de la figura 29.7 son vistas superiores de un tanque de ondas donde las ondas planas inciden sobre aberturas de diversos tamaños (no se ve la regla). En la figura 29.7a, donde la abertura es ancha, se ve que las ondas planas continúan a través de la abertura

FIGURA 29.6

La regla de un metro oscilante produce ondas planas en el tanque de agua. El agua que oscila en la abertura funciona como fuente de ondas que se reparten en el otro lado de la barrera. El agua se difracta por la abertura.

**a****b****c****FIGURA 29.7**

Ondas planas que pasan por aberturas de varios tamaños. Cuanto menor sea la abertura, mayor será la desviación de las ondas hacia las orillas; en otras palabras, será mayor la difracción.

sin cambiar, excepto en los extremos, donde se desvían hacia la región sombreada, como indica el principio de Huygens. A medida que se hace más angosto el ancho de la abertura, como en la figura 29.7b, se transmite cada vez menos la onda incidente, y se hace más pronunciada la propagación de las ondas hacia la región sombreada. Cuando la abertura es pequeña en comparación con la longitud de la onda incidente, como en la figura 29.7c, se vuelve muy notoria la validez de la idea de Huygens, de que cada parte de un frente de onda se puede considerar como una fuente de nuevas ondas pequeñas. Cuando las ondas inciden en la abertura angosta, se ve con facilidad que el agua que sube y baja en la abertura funciona como una fuente “puntual” de nuevas ondas que se dispersan en el otro lado de la barrera. Se dice que las ondas se *difractan* cuando se propagan en la región de la sombra.

Difracción

En el capítulo anterior vimos que la luz se puede desviar de su trayectoria rectilínea normal, tanto por reflexión como por refracción. Ahora veremos otra forma en que se desvía. A toda desviación de la luz por otro mecanismo que no sea reflexión y refracción se le llama **difracción**. La difracción de las ondas planas que se muestra en la figura 29.7 sucede en todas las clases de ondas, incluyendo las ondas luminosas.

FIGURA 29.8

Figura interactiva

a) La luz produce una sombra nítida con algo de confusión en los bordes, cuando la abertura es grande en comparación con la longitud de onda de la luz. b) Cuando la abertura es muy angosta, se nota más la difracción, y la sombra se hace más difusa.

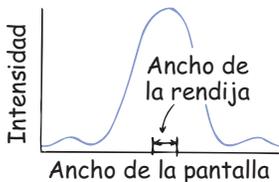
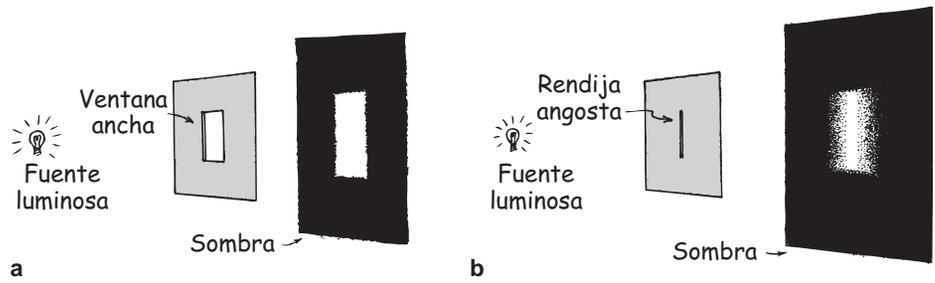


FIGURA 29.9

Interpretación gráfica de la luz difractada por una sola rendija angosta.

Cuando la luz pasa por una abertura grande en comparación con la longitud de onda de la luz, forma una sombra como la que se ve en la figura 29.8a. Se ve una frontera bastante nítida entre las zonas de luz y la sombra. Pero si se hace pasar luz a través de una rendija delgada, hecha con una navaja de rasurar en una pieza de cartón opaco, se ve que la luz se difracta (figura 29.8b). Desaparece entonces la frontera nítida entre las áreas iluminadas y la sombra, y la luz se propaga como en abanico, produciendo una área iluminada que se debilita hasta llegar a la oscuridad, sin bordes bien definidos. La luz se difractó.

En la figura 29.9 se muestra una gráfica de la distribución de la intensidad de la luz difractada por una sola rendija delgada. Debido a la difracción, hay un aumento gradual de intensidad luminosa, en vez de un cambio abrupto de sombra a luz. Una fotocelda que recorriera la pantalla sentiría un cambio gradual desde falta de luz hasta luz máxima. (En realidad, hay unas franjas débiles de intensidad a ambos lados de la figura principal; en breve veremos que son una prueba de que la interferencia, que es más pronunciada con doble rendija o con varias rendijas.)

La difracción no se limita a rendijas ni aberturas pequeñas en general, sino se puede ver en todas las sombras. Al fijarse bien, aun la sombra más nítida es un tanto difusa en su borde. Cuando la luz es de un solo color (monocromática), la difracción puede producir *franjas o bandas de difracción* en la orilla de la sombra, como en la figura 29.10. Con la luz blanca, las bandas se mezclan entre sí y forman una zona difusa en el borde de la sombra.

La cantidad de difracción depende de la longitud de la onda, en comparación con el tamaño de la obstrucción que causa la sombra. Las ondas más largas se difractan más. Son mejores para llenar las sombras, y es la causa de que los sonidos de las sirenas de niebla sean de ondas largas y de baja frecuencia, para que lleguen a todos los “puntos ciegos”. Sucede igual con las ondas de radio de la banda normal de AM que son muy largas, en comparación con el tamaño de la mayoría de los objetos en sus trayectorias. En esta banda, la longitud de onda de las ondas va desde 180 hasta 550 metros, y las ondas se desvían con facilidad rodeando las construcciones y otros objetos que las estorben. Una onda de radio de gran longitud de onda no “ve” una casa relativamente pequeña que esté en su camino; pero una de onda corta sí la ve. Las ondas de radio de la banda de FM van de 2.8 a 3.4 metros, y no se desvían bien al rodear los edificios. Ésta es una de las razones por la que la recepción de FM suele ser deficiente en lugares donde la AM se escucha bien y fuerte. En el caso de la recepción de radio no se desea “ver” objetos en el camino de las ondas, por lo que la difracción ayuda mucho.

La difracción no ayuda tanto para ver objetos muy pequeños con un microscopio. Si el tamaño del objeto es más o menos el mismo de la longitud de onda de la luz, la difracción difumina la imagen. Si el objeto es menor que la longitud de onda de la luz, no se puede ver. Toda la imagen se pierde por difracción. Ningún

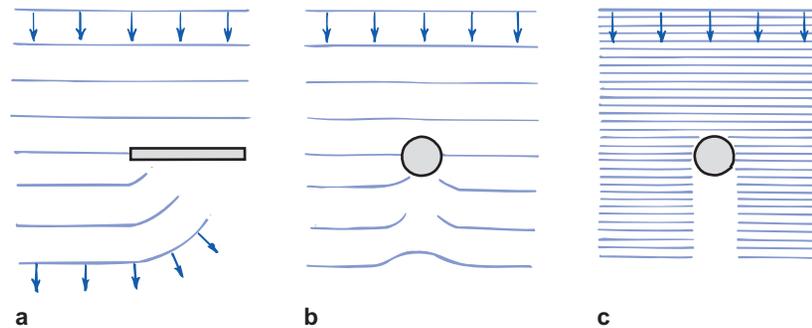


FIGURA 29.10

Las bandas de difracción se ven en las sombras producidas con luz láser monocromática (de una sola frecuencia). Estas franjas se llenarían con una multitud de otras franjas, si la fuente fuera de luz blanca.

FIGURA 29.11

a) Las ondas tienden a esparcirse en la región de la sombra. b) Cuando la longitud de onda es más o menos del mismo tamaño que el objeto, se llena la sombra pronto. c) Cuando la longitud de onda es corta en relación con el tamaño del objeto, se produce una sombra más definida.



aumento ni perfección del diseño del microscopio le puede ganar a este límite fundamental de la difracción.

Para reducir al mínimo este problema, los microscopistas iluminan los objetos diminutos con haces de electrones, en vez de hacerlo con luz. En relación con las ondas luminosas, los haces de electrones tienen longitudes de onda extremadamente cortas. En los **microscopios electrónicos** se aprovecha el hecho de que toda la materia tiene propiedades ondulatorias: un haz de electrones tiene una longitud de onda menor que la de la luz visible. En un microscopio electrónico, se usan campos eléctricos y magnéticos en vez de lentes para enfocar y aumentar las imágenes.

El hecho de que se puedan ver detalles más finos con longitudes de onda menores lo emplea muy bien el delfín, al explorar su ambiente con ultrasonido. Los ecos del sonido de gran longitud de onda le proporcionan una imagen general de los objetos que lo rodean. Para examinar más detalles, el delfín emite sonidos de menor longitud de onda. El delfín siempre ha hecho en forma natural lo que los médicos sólo pudieron hacer hasta fechas recientes con los dispositivos de imágenes ultrasónicas.

EXAMÍNATE

¿Por qué un microscopista usa luz azul y no blanca para iluminar los objetos que está viendo?

Interferencia

En la figura 29.12 se ven imágenes espectaculares de la difracción. El físico Chuck Manka las hizo colocando película fotográfica en la sombra de un tornillo, iluminada con luz láser. En ambas figuras se ven unas bandas, que son producidas por **interferencia**, que ya analizamos en el capítulo 19. Repasamos la interferencia constructiva y destructiva en la figura 29.13. Vemos que la suma o *superposición* de un par de ondas idénticas y en fase entre sí produce una onda de la misma frecuencia, pero con el doble de amplitud. Si las ondas están desfasadas exactamente media longitud de onda, al superponerse se anulan por completo. Si están fuera de fase en otras cantidades se produce anulación parcial.

COMPRUEBA TU RESPUESTA

Hay menos difracción con la luz azul, por lo que el microscopista ve más detalle (así como un delfín investiga el detalle fino en su ambiente con ecos de sonido de longitud de onda ultracorta).

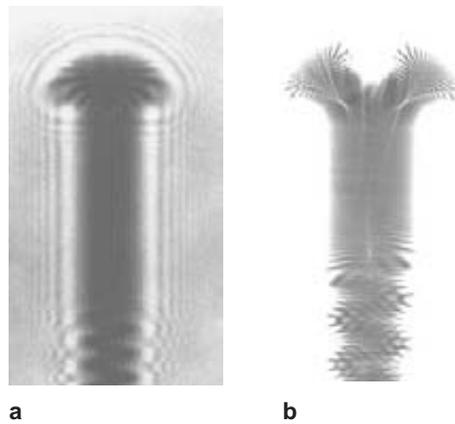
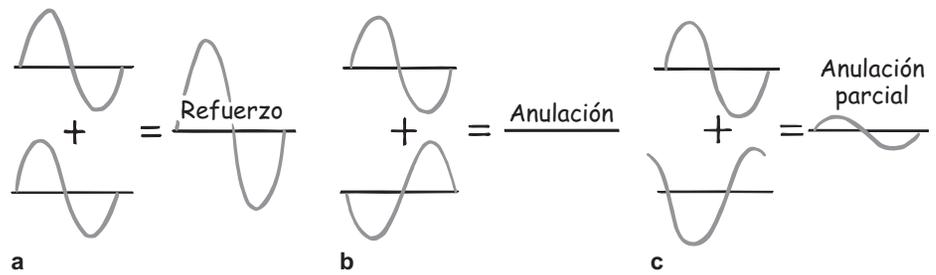


FIGURA 29.12

a) La sombra de un tornillo en luz de láser muestra bandas de interferencia destructiva de la luz difractada. *b)* Una exposición más larga muestra bandas dentro de la sombra, producidas por interferencia constructiva y destructiva.

FIGURA 29.13

Interferencia de las ondas.



La interferencia de las ondas en el agua se ve con mucha frecuencia, y se muestra en la figura 29.14. En algunos lugares, las crestas se enciman con crestas; mientras que en otras, las crestas se enciman con los valles de otras ondas.

FIGURA 29.14

Interferencia de las ondas en el agua. (Véase la sección a color al final del libro.)



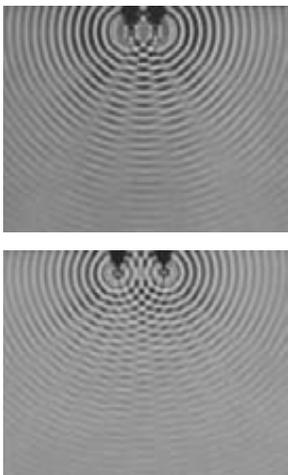


FIGURA 29.15
Patrones de interferencia de ondas superpuestas procedentes de dos fuentes vibratorias.

En condiciones controladas con más cuidado se producen figuras interesantes cuando dos fuentes ondulatorias se ponen lado a lado (figura 29.15). Se dejan caer gotas de agua a una frecuencia controlada en tanques poco profundos llenos de agua (tanques de ondas), y las ondas se fotografían desde arriba. Observa que las zonas de interferencia constructiva y destructiva se extienden hasta los bordes rectos de los tanques de ondas, y la cantidad y el tamaño de esas regiones dependen de la distancia entre las fuentes de las ondas y de la longitud de onda (o frecuencia) de las mismas. La interferencia no se limita a las ondas en el agua, que se ven con facilidad, sino es una propiedad de todas las ondas.

En 1810 el físico y médico inglés Thomas Young demostró en forma muy convincente la naturaleza ondulatoria de la luz, al realizar su ya famoso experimento de interferencia.² Encontró que la luz que pasa por dos agujeros próximos hechos con alfiler, se recombina y produce bandas de claridad y oscuridad en una pantalla frente a ellos. Las bandas claras se forman cuando una cresta de la onda luminosa que pasó por un agujero y una cresta de la onda luminosa que pasó por el otro agujero llegan, al mismo tiempo, a la pantalla. Las bandas oscuras se forman cuando una cresta de una onda y un valle de la otra llegan al mismo tiempo. La figura 29.16 muestra el dibujo de Young del patrón de las ondas superpuestas procedentes de las dos fuentes. Cuando este experimento se hace con dos rendijas cercanas en lugar de agujeros de alfiler, las imágenes de las bandas son rectas (figura 29.18).

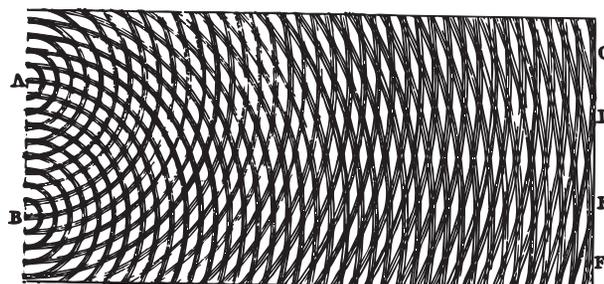


FIGURA 29.16
Dibujo original de Thomas Young, de un patrón de interferencia con dos fuentes. Los círculos oscuros representan crestas de onda; en tanto que los espacios en blanco entre las crestas representan los valles. Se produce interferencia constructiva donde las crestas se enciman con las crestas o los valles se enciman con los valles. Las letras C, D, E y F indican regiones de interferencia destructiva.

FIGURA 29.17
Las bandas claras se producen cuando las ondas desde ambas rendijas llegan en fase; las zonas oscuras son el resultado de la superposición de ondas que están fuera de fase.



² Thomas Young ya leía con fluidez a los 2 años; a los 4 ya había leído dos veces la Biblia. A los 14 sabía ocho idiomas. En su vida adulta fue médico y científico, y contribuyó a la comprensión de los fluidos, el trabajo y la energía, así como las propiedades elásticas de los materiales. Fue quien hizo los primeros avances en el desciframiento de los jeroglíficos egipcios. ¡Sin duda Thomas Young fue una persona muy brillante!

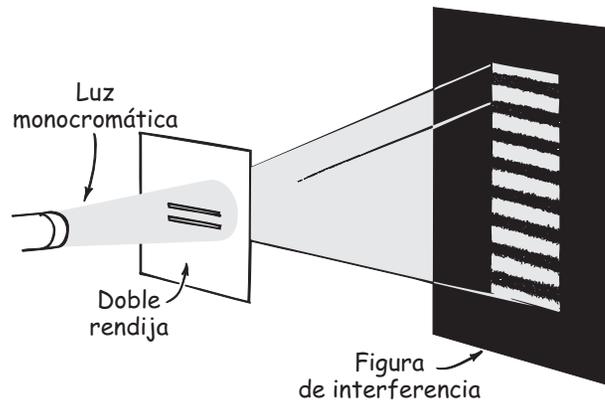


FIGURA 29.18

Figura interactiva

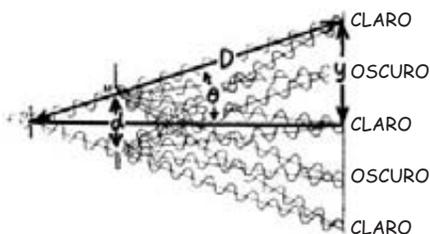
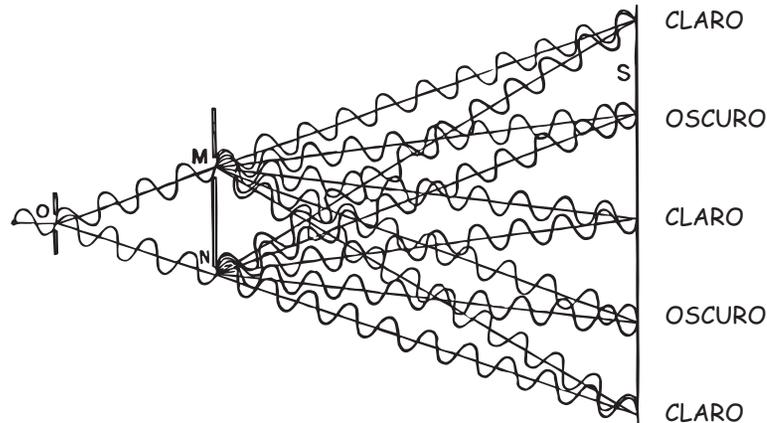
Cuando la luz monocromática pasa por dos rendijas muy cercanas entre sí, se produce un patrón de bandas de interferencia

En la figura 29.19 se ve la forma en que se producen bandas claras y oscuras debidas a las distintas longitudes de trayectoria desde las dos rendijas hasta la pantalla.³ Para la banda central clara, las trayectorias desde las dos rendijas tienen la misma longitud, por lo que las ondas llegan en fase y se refuerzan entre sí. Las bandas oscuras a cada lado de la banda central se deben a que una trayectoria es más larga (o más corta) en media longitud de onda, por lo que las ondas llegan desfasadas por media longitud de onda. Los otros conjuntos de bandas oscuras se presentan donde las trayectorias difieren en múltiplos impares de media longitud de onda: $3/2$, $5/2$, etcétera.

FIGURA 29.19

Figura interactiva

La luz que procede de O pasa por las rendijas M y N, y produce un patrón de interferencia en la pantalla



³ En el laboratorio puedes determinar la longitud de onda de la luz usando medidas basadas en la figura 29.19. La ecuación para la primera interferencia máxima fuera del centro, de dos o más rendijas, es

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

donde λ es la longitud de onda de la luz que se difracta, d es la distancia entre las rendijas adyacentes, y θ es el ángulo entre líneas de la franja central de luz y de la primera franja de interferencia constructiva fuera del centro. En el diagrama, $\sin \theta$ es la razón de la distancia y entre la distancia D , donde y es la distancia en la pantalla entre la franja central de la luz y la primera franja de interferencia constructiva en cualquier lado. D es la distancia de la franja a las rendijas (la cual, en la práctica, es mucho más grande de lo que se muestra aquí).

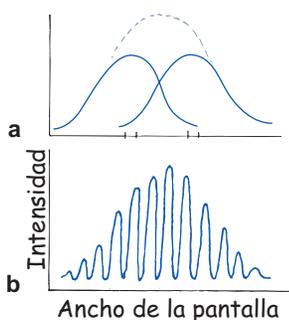


FIGURA 29.20

La luz que se difracta por cada una de las dos rendijas no forma una superposición de intensidades, como se sugiere en *a*). La distribución de intensidades, debido a la interferencia, es la que se muestra en *b*)

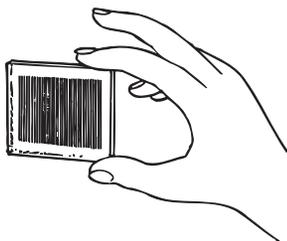


FIGURA 29.21

Debido a la interferencia que causa, una rejilla de difracción dispersa la luz en sus colores. Se puede usar en un espectrómetro, en vez de un prisma.

Supongamos que al realizar este experimento con doble rendija cubrimos una de ellas, de manera que la luz sólo pase por la que está descubierta. Entonces, la luz se dispersará e iluminará la pantalla formando un solo patrón de difracción, como describimos antes (figuras 29.8*b* y 29.9). Si cubrimos la otra rendija y dejamos pasar luz sólo por la que acabamos de descubrir, obtendremos la misma iluminación en la pantalla, sólo que un poco desplazada, por la diferencia en el lugar de la rendija. Si no supiéramos más, esperaríamos que con ambas rendijas abiertas, el patrón sólo fuera la suma de los patrones de difracción con una rendija, como se sugiere en la figura 29.20*a*. Pero no sucede así. En cambio, el patrón que se forma es de bandas claras y oscuras alternadas, como se ve en *b*. Es un patrón de interferencia. Por cierto, la interferencia de las ondas luminosas no crea ni destruye energía; tan sólo la distribuye.

EXAMÍNATE

1. Si se iluminaran las dos rendijas con luz monocromática (de una sola frecuencia) roja, ¿las franjas estarían a mayores o a menores distancias, que si se iluminaran con luz monocromática azul?
2. ¿Por qué es importante usar luz monocromática?

Los patrones de interferencia no se limitan a una o dos rendijas. Una multitud de rendijas muy cercanas forma una *rejilla de difracción*. Estas rejillas, como los prismas, dispersan la luz blanca en sus colores. Mientras que un prisma separa los colores de la luz por refracción, una rejilla de difracción los separa por interferencia. Las rejillas se usan en instrumentos llamados *espectrómetros*, que describiremos en el siguiente capítulo, y con más frecuencia en objetos como bisutería y en etiquetas adheribles para los parachoques de automóviles. Tales materiales también se guían por surcos pequeños que difractan la luz en un espectro de colores brillante. Estas rejillas también se ven en las plumas de algunas aves que dispersan los colores, y en los bellos colores dispersos por los agujeros microscópicos en la superficie reflectora de un disco compacto.

Interferencia en película delgada con luz monocromática

Otra forma de producir bandas de interferencia es por reflexión de la luz en ambas caras de una película delgada. Una demostración sencilla se hace con una fuente de luz monocromática y un par de láminas de vidrio. Una lámpara de vapor de sodio es una buena fuente de luz monocromática. Las dos láminas de vidrio se colocan una sobre otra, como se observa en la figura 29.22. Entre las placas, en una orilla de ellas, se pone una hoja muy delgada de papel. De esta forma se produce una película de aire muy delgada, en forma de una cuña, entre las placas. Si el ojo tiene una

COMPRUEBA TUS RESPUESTAS

1. A mayor distancia. En la figura 29.19 puedes ver que una trayectoria un poco más larga y, en consecuencia, más desplazada de la rendija de entrada a la pantalla, sería el resultado de que las ondas de luz roja fueran más largas.
2. Si la luz de diversas longitudes de onda se difractara en las rendijas, las franjas oscuras de una longitud de onda se llenarían con las franjas claras de otra, y no se obtendría un patrón definido de bandas. Si no lo has comprendido, pide a tu profesor que lo demuestre.

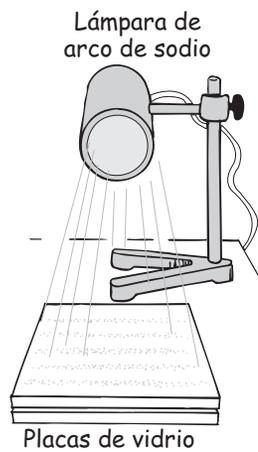


FIGURA 29.22
Bandas de interferencia producidas cuando la luz monocromática se refleja en dos placas de vidrio, con una cuña de aire entre ellas.

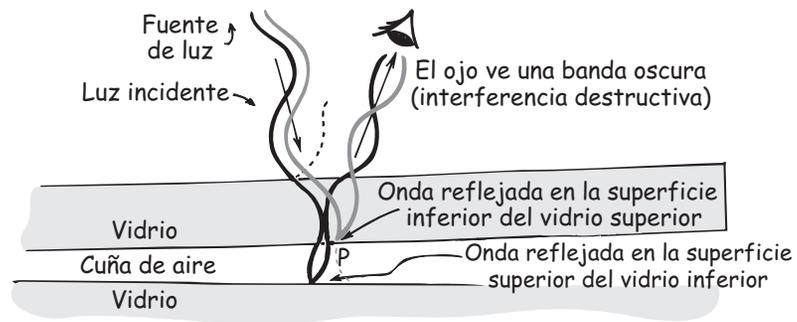


FIGURA 29.23
Reflexión en las superficies superior e inferior de una “película delgada de aire”.

posición tal que pueda ver la imagen reflejada de la lámpara, esa imagen no será continua, sino que estará formada por bandas oscuras y claras.

La causa de esas bandas es la interferencia entre las dos ondas reflejadas del vidrio, en las superficies superior e inferior de la cuña de aire, como se muestra en el diagrama exagerado de la figura 29.23. La luz que se refleja del punto P llega al ojo siguiendo dos caminos distintos. En uno de esos caminos, la luz se refleja en la parte superior de la cuña de aire; en la otra trayectoria, se refleja en el lado inferior. Si el ojo se enfoca en el punto P, ambos rayos llegan al mismo lugar de la retina. Pero esos rayos recorrieron distintas distancias y se pueden encontrar en fase o desfasados, dependiendo del espesor de la cuña de aire; esto es, dependiendo de cuánto más haya recorrido un rayo en comparación con el otro. Cuando vemos toda la superficie del vidrio, se ven regiones claras y oscuras alternadas; las partes oscuras están donde el espesor del aire es el adecuado para producir interferencia destructiva; y las partes claras son donde la cuña de aire tiene el espesor adecuado, mayor o menor, para causar refuerzo de la luz. Así, las bandas oscuras y claras son causadas por la interferencia de las ondas luminosas reflejadas en las dos caras de la película delgada.⁴

Si las superficies de las placas de vidrio que se usan son perfectamente planas, las bandas son uniformes. Pero si no son perfectamente planas, las bandas se distorsionan. La interferencia de la luz permite contar con un método extremadamente sensible para comprobar qué tan plana es una superficie. Se dice que las superficies que producen bandas uniformes son ópticamente planas: sus irregularidades son pequeñas en comparación con la longitud de onda de la luz visible (figura 29.24).

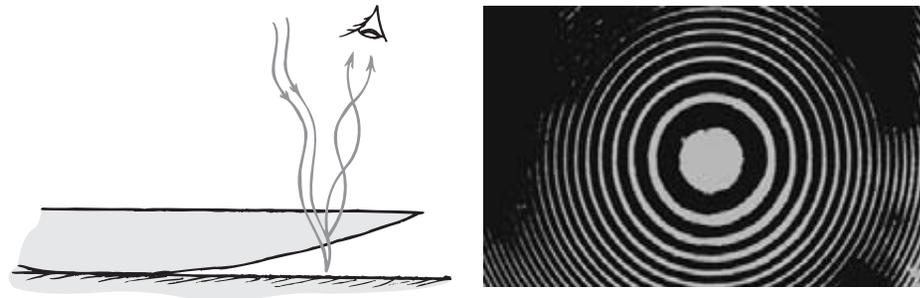
Cuando sobre una placa ópticamente plana se coloca una lente plana por arriba y con una ligera curvatura convexa por abajo, y se ilumina desde arriba con luz monocromática, se produce una serie de anillos claros y oscuros. A este patrón se le llama *anillos de Newton* (figura 29.25). Estos anillos claros y oscuros



FIGURA 29.24
Planos ópticos para probar qué tan planas son las superficies.

⁴ Los desplazamientos de fase en algunas superficies reflectoras también contribuyen a la interferencia. En aras de la sencillez y la brevedad, nuestra explicación de este tema se limitará a esta nota al pie. En resumen, cuando la luz en un medio se refleja en la superficie de un segundo medio, en el que su rapidez es menor (cuando tiene mayor índice de refracción), hay un desplazamiento de fase de 180° (esto es, de media longitud de onda). Sin embargo, no sucede desplazamiento de fase cuando el segundo medio transmite la luz a mayor rapidez (y tiene menor índice de refracción). En nuestro ejemplo de la cuña de aire no sucede desplazamiento de fase por reflexión en la superficie superior aire-vidrio, y sí sucede un desplazamiento de 180° en la superficie inferior entre aire y vidrio. Así, en el vértice de la cuña de aire, donde su espesor tiende a cero, el desplazamiento de fase produce la anulación y la cuña es oscura. De igual manera sucede con una burbuja de jabón, tan delgada que su espesor sea bastante menor que la longitud de onda de la luz. Es la causa de que partes de una película muy delgada parezcan negras. Se anulan las ondas de todas las frecuencias.

FIGURA 29.25
Anillos de Newton.



ros están formados por bandas del mismo tipo que las que se producen en superficies planas. Permiten probar con precisión el tallado de los lentes.

EXAMÍNATE

¿En qué serían distintos los espacios entre los anillos de Newton al iluminar con luz roja y después con luz azul?

Colores de interferencia debidos a la reflexión en películas delgadas



Los colores de las pompas de jabón son el resultado de la interferencia de la luz que reflejan las superficies interior y exterior de la película de jabón. Cuando un color se anula, lo que vemos es su color complementario.

¡EUREKA!

Todos hemos visto el bello espectro de colores que refleja una pompa de jabón o la gasolina en una calle mojada. Esos colores se producen por *interferencia* de ondas luminosas. A este fenómeno se le suele llamar *iridiscencia*, y se observa en películas transparentes delgadas.

Una burbuja de jabón parece iridiscente en la luz blanca, cuando su espesor es, más o menos, igual al de la longitud de onda de la luz. Las ondas luminosas reflejadas por las superficies externas e internas de la película recorren distancias diferentes. Cuando la ilumina la luz blanca, la película puede tener el espesor adecuado en un lugar para causar la interferencia destructiva de, por ejemplo, la luz amarilla. Cuando se resta la luz amarilla de la luz blanca, la mezcla que queda parecerá tener el color complementario del amarillo (el azul). En otro lugar, donde la película es más delgada, se podría anular un color diferente por interferencia y la luz visible será su color complementario. Lo mismo sucede con la gasolina sobre una calle mojada (figura 29.26). La luz se refleja en la superficie superior de la gasolina y también en la superficie de la interfaz entre gasolina y agua. Si el espesor de la gasolina es tal que se anule el azul, como parece indicar la figura, su superficie se verá amarilla. Esto se debe a que se resta el azul del blanco y queda el color complementario, que es el amarillo. Así, los diferentes colores corresponden a distintos espesores de la película delgada, que forman un vívido “mapa topográfico”, debido a diferencias microscópicas de “elevaciones” de las superficies.

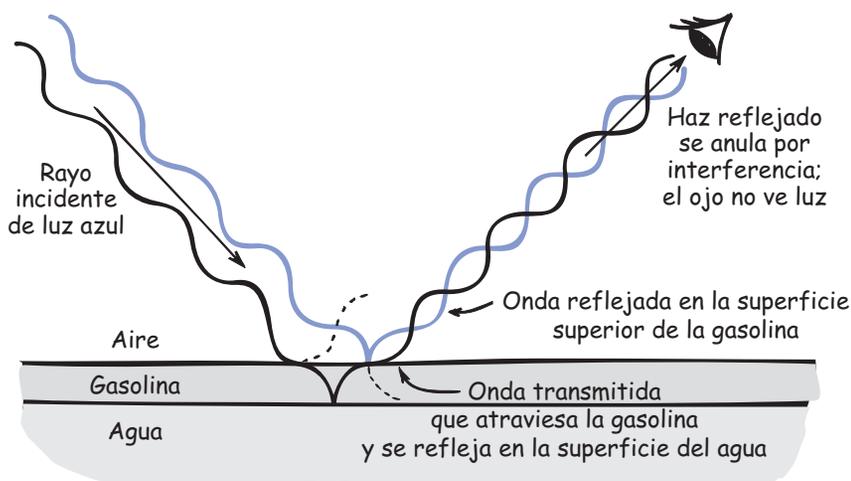
Desde una perspectiva más amplia, se pueden ver distintos colores aun cuando el espesor de la película de gasolina sea uniforme. Eso tiene que ver con el

COMPRUEBA TU RESPUESTA

Los anillos estarían más distanciados con la luz roja, de mayor longitud de onda, que con las ondas más cortas de la luz azul. ¿Hay alguna razón geométrica para esto?

FIGURA 29.26

La película delgada de gasolina tiene exactamente el espesor correcto para anular las reflexiones de la luz azul procedente de las superficies superior e inferior. Si la película fuera más delgada, quizá se anularía el violeta, con menor longitud de onda. (Se representa una onda en negro para indicar cómo se desfasa respecto a la otra onda en la reflexión.)



espesor aparente de la película: la luz que llega al ojo procedente de distintas partes de la superficie se refleja con distintos ángulos y atraviesa distintos espesores. Por ejemplo, si la luz incide a un ángulo rasante, el rayo que llega a la superficie inferior de la gasolina recorre una mayor distancia. En este caso se anularán las ondas más largas y aparecerán distintos colores.

La vajilla que se lava con jabonadura y que se enjuaga mal tiene una capa delgada de jabón. Sujeta un plato mal enjuagado y explora con él una fuente luminosa, en forma tal que puedas ver los *colores de interferencia*. Luego gíralo a una nueva posición, viendo la misma parte del plato, y cambiará el color. La luz que se refleja en la superficie inferior de la película transparente de jabón anula a la luz que se refleja en la superficie superior. Las ondas luminosas de distintas longitudes se anulan en distintos ángulos. Los colores de interferencia se observan mejor en las burbujas de jabón (figura 29.27). Observarás que esos colores son, principalmente, azul-verdoso, magenta y amarillo, debido a la anulación de los primarios rojo, verde y azul.

La interferencia permite contar con un método para medir longitudes de onda de la luz y de otras radiaciones electromagnéticas. También hace posible medir distancias extremadamente cortas con gran exactitud. Los instrumentos más exactos que se conocen para medir distancias pequeñas son los *interferómetros*, que emplean el principio de la interferencia.



FIGURA 29.27

El autor de física Bob Greenler muestra los colores de interferencia con *grandes* burbujas. ¿Por qué los colores de las burbujas son primarios sustractivos? (Véase la sección a color al final del libro.)

PRÁCTICA DE FÍSICA

Este experimento lo puedes hacer en la tarja de una cocina. Sumerge una taza de café de color oscuro (los colores oscuros permiten ver mejor los colores de interferencia) en un detergente para lavar trastes; sácala y sostenla acostada. Ve la luz reflejada de la película de jabón que cubre la boca. Aparecen colores en movimiento, cuando el jabón se escurre y forma una cuña que se hace más gruesa en la parte inferior. La parte superior se adelgaza, hasta el grado que aparece negra. Esto te dice que su espesor es menor que un cuarto de la longitud de las ondas más cortas de la luz visible. Sea cual fuere su longitud de onda, la luz que se refleja en la superficie interna

invierte su fase y se une con la luz que se refleja en la superficie externa, y la anula. La película se vuelve pronto tan delgada que se rompe.



EXAMÍNATE

En la columna de la izquierda están los colores de algunos objetos. En la columna de la derecha hay varias formas de producir esos colores. Relaciona las dos columnas.

- | | |
|----------------------|-------------------------|
| 1. Narciso amarillo. | a) Interferencia. |
| 2. Cielo azul. | b) Reflexión selectiva. |
| 3. Arcoiris. | c) Refracción. |
| 4. Burbuja de jabón. | d) Dispersión. |

Polarización

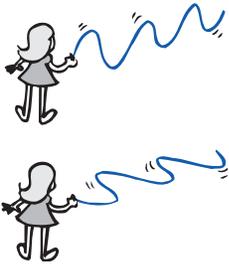


FIGURA 29.28

Una onda plano polarizada vertical y una onda plano polarizada horizontal.

La interferencia y la difracción son la mejor prueba de que la luz es ondulatoria. Como vimos en el capítulo 19, las ondas pueden ser longitudinales o transversales. Las ondas sonoras son longitudinales, lo cual significa que el movimiento de vibración es *a lo largo* de la dirección de propagación de la onda. Pero cuando movemos una cuerda tensa, como en la figura 28.29, el movimiento vibratorio que se transmite por ella es perpendicular o *transversal* a la cuerda. Las ondas longitudinales y transversales tienen efectos de interferencia y difracción. Entonces, ¿las ondas luminosas son longitudinales o transversales? La **polarización** de las ondas luminosas demuestra que son transversales.

Si movemos hacia arriba y hacia abajo el extremo de una cuerda tensa, como en la figura 29.28, la onda transversal recorre la cuerda en un plano. Se dice que esa onda es *plano polarizada*,⁵ lo cual quiere decir que las ondas se propagan por la cuerda confinadas en un solo plano. Si movemos la cuerda hacia arriba y hacia abajo, produciremos una onda plano polarizada verticalmente. Si la movemos hacia los lados, produciremos una onda plano polarizada horizontalmente.

COMPRUEBA TUS RESPUESTAS

1-b; 2-d; 3-c; 4-a.

⁵ La luz también puede estar polarizada circular y elípticamente, que son combinaciones de polarizaciones transversales. Pero no estudiaremos esos casos.

FIGURA 29.29

a) Una onda plano polarizada en dirección vertical procede de una carga vibratoria en sentido vertical. b) Una onda plano polarizada en dirección horizontal procede de una carga que vibra horizontalmente.

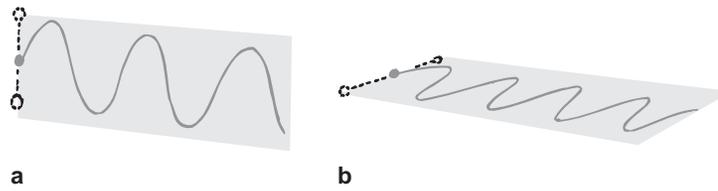
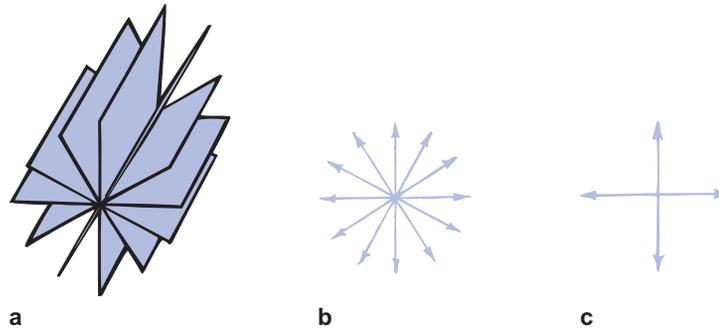


FIGURA 29.30

Representación de ondas plano polarizadas. Los vectores eléctricos, en a y en b, representan la parte eléctrica de la onda electromagnética.



Un solo electrón vibratorio puede emitir una onda electromagnética plano polarizada. El plano de polarización coincidirá con la dirección de vibración del electrón. Entonces, un electrón que acelera en dirección vertical emite luz que está polarizada verticalmente, mientras que uno que acelere horizontalmente emite luz que está polarizada horizontalmente (figura 29.29).

Una fuente común de luz, como una lámpara incandescente, una fluorescente, la llama de una vela o una luz de arco, emite luz que no está polarizada. Esto se debe a que no hay una dirección preferente de aceleración de los electrones que emiten la luz. Los planos de vibración podrían ser tan numerosos como los electrones que aceleran y los producen. En la figura 29.30a se representan algunos planos. Se pueden representar todos esos planos mediante líneas radiales (figura 29.30b) o, en forma más sencilla, con vectores en dos direcciones perpendiculares entre sí (figura 29.30c), como si hubiéramos descompuesto todos los vectores de la figura 29.30b en sus componentes horizontales y verticales. Este esquema sencillo representa la luz no polarizada. La luz polarizada se representaría con un solo vector.

Todos los cristales transparentes de forma natural distinta a la cúbica tienen la propiedad de transmitir la luz de un sentido de polarización en forma distinta a la que tiene otra polarización. Ciertos cristales⁶ no sólo dividen la luz no polarizada en dos rayos internos, polarizados en ángulos rectos entre sí, sino también absorben fuertemente un haz y transmiten el otro (figura 29.31). La turmalina es uno de esos cristales, pero por desgracia la luz transmitida es de color. Sin embargo, la herapatita hace lo mismo sin coloraciones. Los cristales microscópicos de la herapatita se incrustan entre láminas de celulosa, con alineamiento uniforme, y se usan para fabricar los **filtros Polaroid**. Algunas películas Polaroid están formadas por ciertas moléculas alineadas, en vez de cristales diminutos.⁷

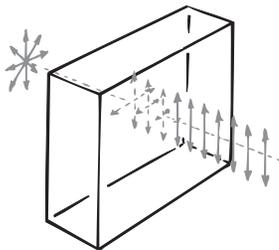


FIGURA 29.31

Un componente de la luz incidente no polarizada queda absorbido y la luz que sale está polarizada.

⁶ Se llaman *dicroicos*.

⁷ Esas moléculas son de yodo polimérico, en una lámina de alcohol polivinílico o polivinileno.

FIGURA 29.32

La similitud con una cuerda ilustra el efecto de los filtros polarizadores cruzados.

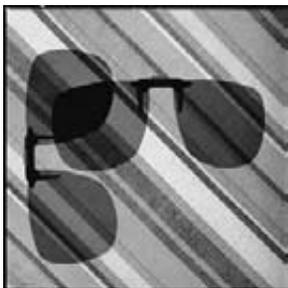
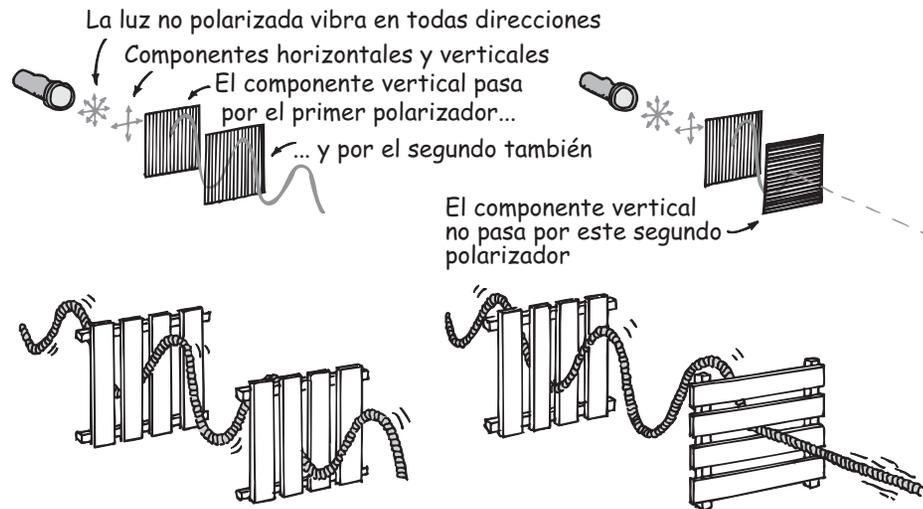


FIGURA 29.33

Los **anteojos Polaroid** para sol bloquean la luz con vibración horizontal. Cuando se enciman los lentes en ángulo recto, no pasa la luz por ellos. (Véase la sección a color al final del libro.)

Si ves una luz no polarizada a través de un filtro polarizador podrás, girar el filtro en cualquier dirección y la luz se verá igual. Pero si esa luz está polarizada, entonces, a medida que giras el filtro, bloquearás cada vez más la luz, hasta bloquearla por completo. Un filtro polarizador ideal transmite el 50% de la radiación no polarizada que le llega. Naturalmente, ese 50% que pasa está polarizado. Cuando se disponen dos filtros polarizados, de tal manera que estén alineados sus ejes de polarización, la luz pasará por ambos (figura 29.32). Si sus ejes están en ángulo recto entre sí (se dice que así los filtros están *cruzados*) no pasa luz por el par. (En realidad sí pasa algo de luz de longitudes menores de onda, pero no en forma importante.) **Cuando se usan en pares los filtros polarizadores, al primero en el trayecto de la luz se le llama *polarizador* y al segundo *analizador*.**

Gran parte de la luz reflejada en superficies no metálicas está polarizada. Un buen ejemplo es la que sale de un vaso de vidrio o del agua. Excepto cuando incide perpendicularmente, el rayo reflejado contiene más vibraciones paralelas a la superficie reflectora, mientras que el rayo transmitido contiene más vibraciones en ángulo recto a la superficie reflectora (figura 29.34). Sucede lo mismo cuando se lanzan piedras rasantes sobre el agua, que rebotan en ella. Cuando chocan con las caras paralelas a la superficie, se reflejan o rebotan con facilidad; pero si llegan al agua con las caras inclinadas respecto al agua, se “refractan” y penetran al agua.

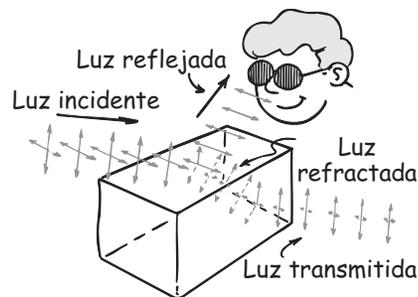


FIGURA 29.34

La mayoría del resplandor de las superficies no metálicas está polarizado. Aquí vemos que los componentes de la luz incidente que son paralelos a la superficie se reflejan, y los perpendiculares a la superficie la atraviesan y entran al medio. Como la mayoría del resplandor que vemos procede de superficies horizontales, los ejes de polarización de los anteojos Polaroid.

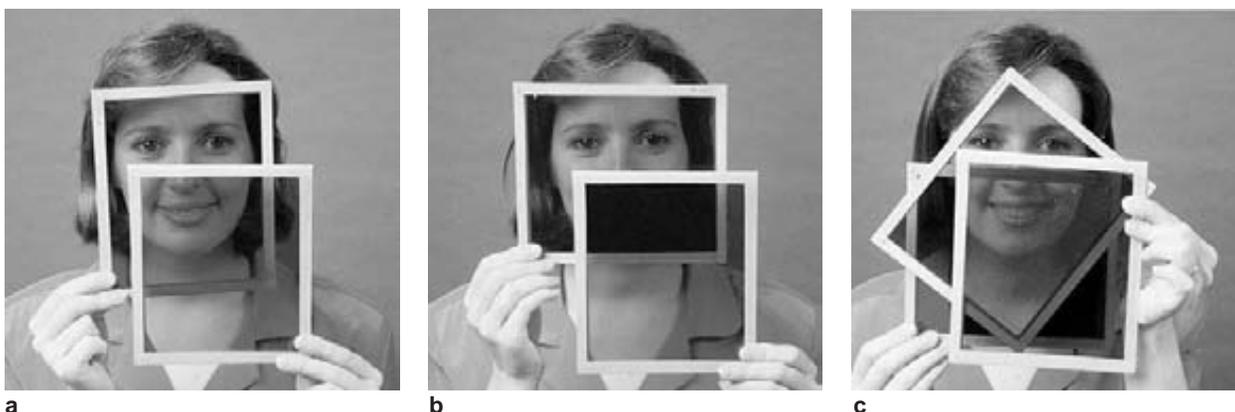

FIGURA 29.35

Figura interactiva

La luz se transmite cuando los ejes de los filtros polarizadores están alineados *a*), pero se absorbe cuando Ludmila gira uno para que los ejes queden perpendiculares entre sí *b*). Cuando introduce un tercer filtro polarizado oblicuo entre los dos anteriores, que están cruzados, de nuevo se transmite la luz *c*). ¿Por qué? (Para obtener la respuesta, después de meditar el problema, consulta el apéndice D, “Más sobre vectores”.) (Véase la sección a color al final del libro.)



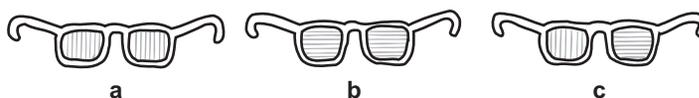
La polarización ocurre sólo con las ondas transversales. De hecho, es una forma confiable de saber si una onda es transversal o longitudinal.

¡EUREKA!

El resplandor de las superficies reflectoras puede disminuirse mucho usando lentes Polaroid para sol. Los ejes de polarización de los lentes son verticales, porque la mayoría del resplandor se refleja en superficies horizontales. Unos anteojos polarizados bien alineados nos permiten ver en tres dimensiones proyecciones de películas estereoscópicas, o de diapositivas, sobre una pantalla plana.

EXAMÍNATE

¿Cuáles anteojos son los mejores para los conductores de automóvil? (Las líneas indican los ejes de polarización.)



Visión tridimensional (opcional)

La visión en tres dimensiones depende principalmente del hecho de que los ojos den sus impresiones en forma simultánea (o casi), y cada ojo vea la escena desde un ángulo un poco distinto. Para convencerte de que cada ojo ve una perspectiva distinta, coloca un dedo en forma vertical, con el brazo extendido, y ve cómo parece desplazar su posición de izquierda a derecha, respecto al fondo, cuando



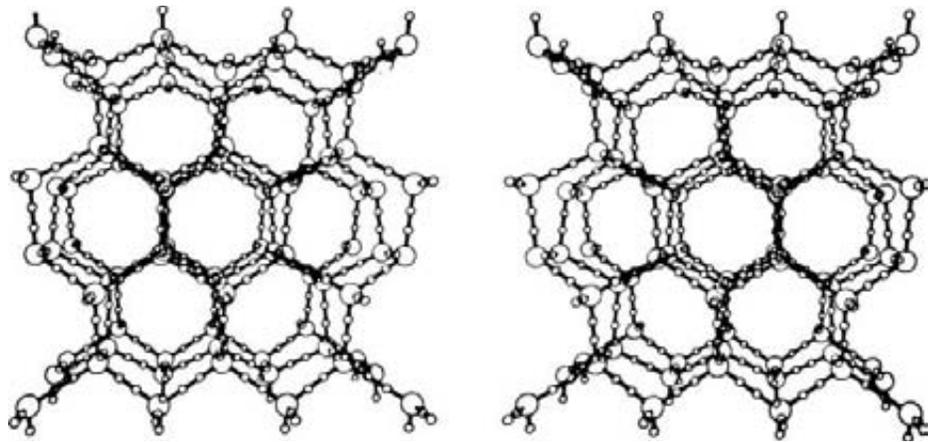
Luz polarizada y vista en 3-D

COMPRUEBA TU RESPUESTA

Los anteojos *a* son los más adecuados, porque los ejes verticales bloquean la luz polarizada horizontalmente, que forma gran parte del resplandor que despiden las superficies horizontales. Los anteojos *c* son adecuados para ver películas en tercera dimensión.

FIGURA 29.36

La estructura cristalina del hielo en estereoscopia. Verás la profundidad cuando tu cerebro combine lo que capta el ojo izquierdo al ver la figura de la izquierda, y el ojo derecho al ver la figura de la derecha. Para verlo, antes de observar esta página enfoca los ojos para ver de lejos. Sin cambiar el foco ve la página, y cada figura aparecerá doble. Entonces ajusta el foco para que las dos imágenes interiores se encimen y formen una imagen central compuesta. La práctica hace al maestro. (Si haces bizco para tratar de encimar las figuras ¡se invierten lo cercano y lo lejano!)



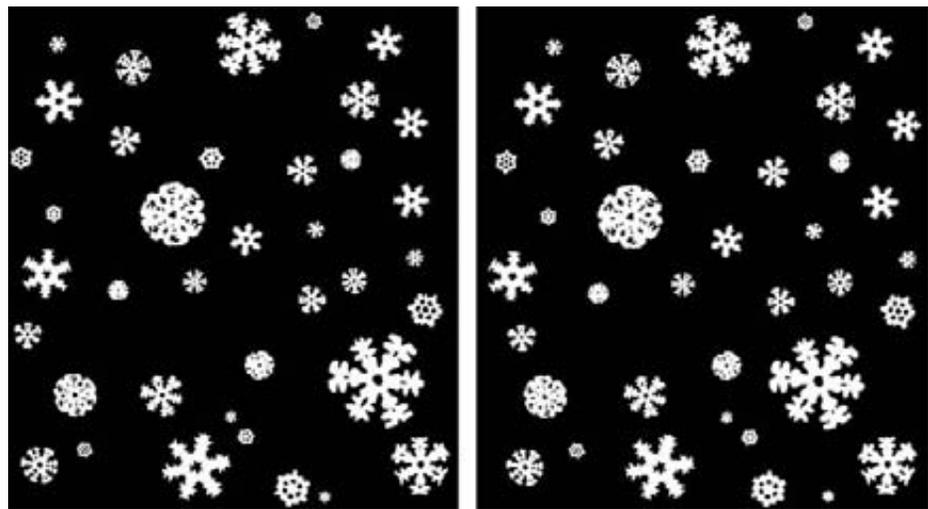
cierras cada ojo en forma alterna. La figura 29.36 representa una vista estereoscópica de la estructura cristalina del hielo.

El conocido visor estereoscópico de mano (figura 29.39) simula el efecto de la profundidad. En él, se colocan dos transparencias fotográficas tomadas desde posiciones un poco distintas. Al verlas al mismo tiempo, el arreglo es tal que el ojo izquierdo ve la escena que se fotografió desde la izquierda, y el ojo derecho la ve fotografiada desde la derecha. El resultado es que los objetos de la escena producen relieve en la perspectiva correcta, dando una profundidad aparente. El dispositivo se fabrica de tal modo que cada ojo vea la parte correcta. No hay posibilidad de que un ojo vea ambas tomas. Si quitas las diapositivas del cartón donde están montadas, y las proyectas usando dos proyectores para que se sobrepongan las dos vistas, se produce una figura borrosa.



El fondo cósmico de microondas llena todo el espacio y llega a nosotros procedente de todas direcciones. Es un eco del Big Bang que dio origen al Universo hace unos 14,000 millones de años. Hallazgos recientes indican que esta radiación está polarizada. Las observaciones de la polarización no se alteran con la gravedad y permiten dar una mirada clara y detallada a los orígenes del Cosmos.

¡EUREKA!

**FIGURA 29.37**

Vista estereoscópica de cristales de nieve. Mírala igual que la figura 29.36.

La prueba de todo conocimiento es el experimento.
 El experimento es el *único juez* de la “verdad” científica.

Richard P. Feynman

La prueba de todo conocimiento es el experimento.
 El experimento es el *único juez* de la “verdad” científica.

Richard F Feynman

FIGURA 29.38

Con los ojos enfocados para ver a la distancia, los renglones segundo y cuarto se ven más lejanos. Si haces *bizco*, esos renglones se verán más cercanos.

Esto se debe a que cada ojo observa en forma simultánea ambas vistas. Aquí es donde entran los filtros polarizadores. Si los colocas frente a los proyectores de tal modo que uno esté horizontal y el otro vertical, y contemplas la imagen polarizada con anteojos polarizados en las mismas orientaciones, cada ojo captará la vista adecuada, como en el visor estereoscópico (figura 29.40). Entonces verás una imagen en tres dimensiones.

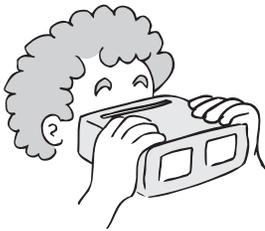


FIGURA 29.39
 Un visor estereoscópico.

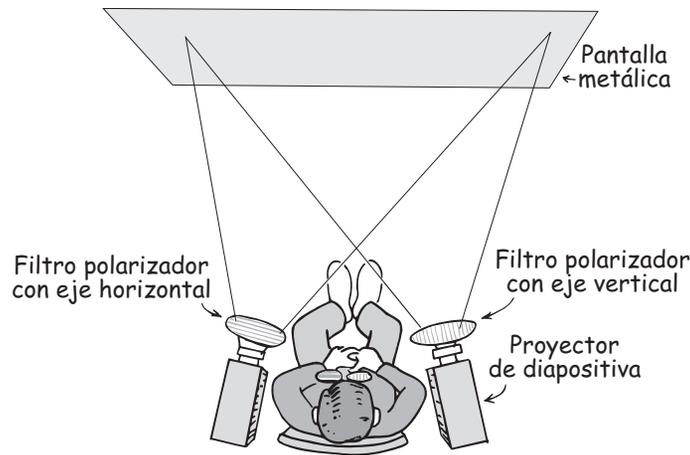
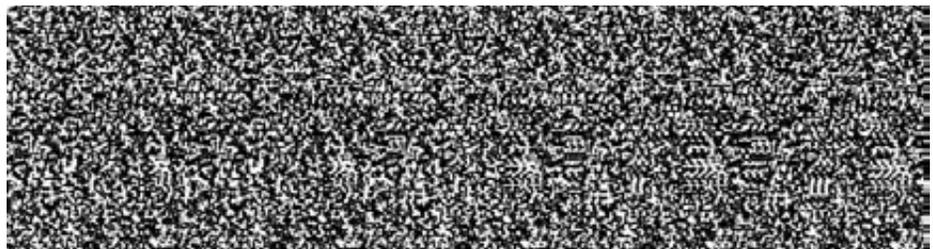


FIGURA 29.40

Una sesión de transparencias con filtros polarizadores. El ojo izquierdo sólo ve la luz polarizada del proyector de la izquierda, y el ojo derecho sólo ve la luz del proyector de la derecha, y ambas figuras se funden en el cerebro y producen la sensación de profundidad.

También se ve profundidad en los estereogramas generados por computadora, como el de la figura 29.41. Aquí, las figuras un poco distintas no son evidentes a primera vista. Usa el procedimiento con que viste las figuras estereoscópicas anteriores. Una vez dominada la técnica de visión, ve al centro comercial y aprecia la diversidad de estereogramas en los carteles y en los libros.

FIGURA 29.41
 Un estereograma generado por computadora.



Holografía (opcional)

Quizás el ejemplo más notable de la interferencia sea el **holograma**, que es una placa fotográfica bidimensional iluminada con luz de láser, que te permite ver una representación fiel de una escena en tres dimensiones. Dennis Gabor inventó el holograma en 1947, 10 años antes de inventarse los láseres. *Holo* quiere decir “todo” en griego, y *grama* significa “mensaje” o “información”. Un holograma contiene todo el mensaje o toda la figura. Cuando lo ilumina una luz láser, la imagen es tan realista que puedes realmente ver por detrás de las aristas de objetos en la imagen, y ver los lados.

En la fotografía ordinaria se usa una lente para formar la imagen de un objeto en una película fotográfica. La luz reflejada por cada punto del objeto es dirigida por la lente sólo hasta un punto correspondiente en la película. Toda la luz que llega a la película proviene sólo del objeto que se está fotografiando. Sin embargo, en el caso de la holografía, no se utiliza una lente formadora de imagen. En vez de ello, cada punto del objeto que se “fotografía” refleja la luz *a toda* la placa fotográfica, por lo que toda la placa queda expuesta a la luz que reflejan todas las partes del objeto. Lo más importante es que la luz que se usa para hacer un holograma debe ser de una sola frecuencia, y todas sus partes deben estar exactamente en fase: debe ser luz *coherente*. Por ejemplo, si se usara luz blanca, las bandas de difracción para una frecuencia se ocultarían con las de otras frecuencias. Sólo un láser puede producir con facilidad esa luz (en el siguiente capítulo describiremos los láseres con detalle). Los hologramas se hacen con luz de láser.

Una fotografía convencional es una grabación de una imagen; pero un holograma es una grabación del patrón de interferencia que resulta de la combinación de dos conjuntos de frentes de onda. Un conjunto de frentes de onda se forma con la luz reflejada por el objeto, y el otro conjunto es de un *haz de referencia* que se desvía del haz que ilumina y se manda en forma directa a la placa fotográfica (figura 29.42). La fotografía, al revelarla, no tiene imagen que se pueda reconocer. Es simplemente un enredo de líneas onduladas, áreas diminutas con bandas de densidad variable, y oscuras donde los frentes de onda procedentes del objeto y del haz de referencia llegaron en fase, y claras donde llegaron desfasadas. El holograma es un patrón fotográfico de bandas microscópicas de interferencia.

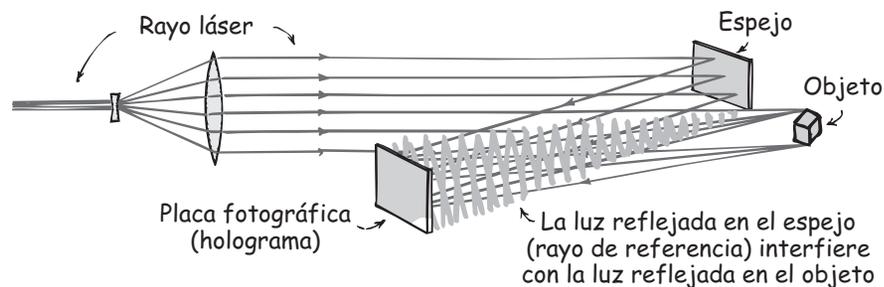
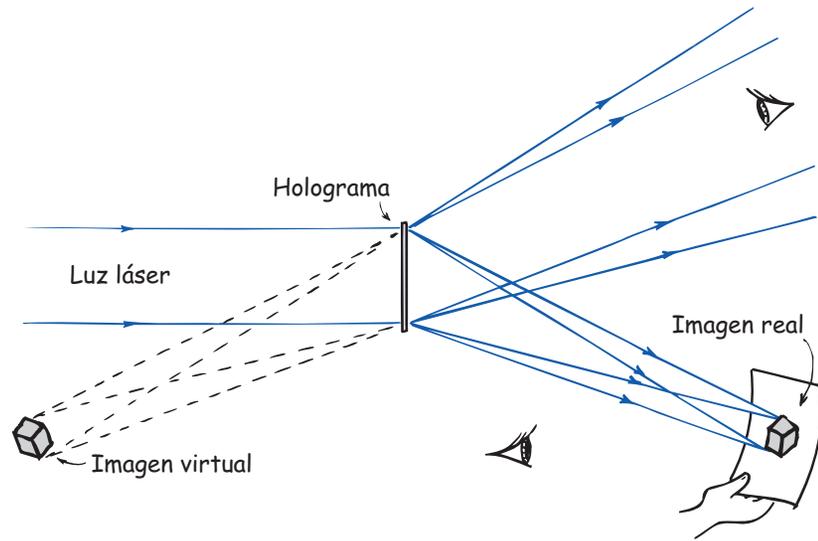


FIGURA 29.42

Esquema simplificado de la producción de un holograma. La luz láser que expone la placa fotográfica consiste en dos partes: el rayo de referencia reflejado en el espejo, y la luz reflejada en el objeto. Los frentes de onda de esas dos partes se interfieren y producen bandas microscópicas en la placa fotográfica. Entonces, la placa expuesta y revelada es un holograma. (Véase la sección a color al final del libro.)

FIGURA 29.43

Cuando la luz láser se transmite por el holograma, la divergencia de la luz difractada produce una imagen tridimensional que se puede ver a través del holograma, como cuando se ve a través de la ventana. Es una *imagen virtual*, porque sólo parece estar atrás del holograma, como tu imagen virtual en un espejo. Al enfocar los ojos puedes ver todas las partes de la imagen virtual, las cercanas y las lejanas, bien enfocadas. La luz convergente difractada produce una *imagen real* frente al holograma, que se puede proyectar en una pantalla. Como la imagen es tridimensional, no la puedes ver toda bien enfocada, en una sola posición de la pantalla plana.



Cuando un holograma se coloca en un haz de luz coherente, las bandas microscópicas difractan la luz y producen frentes de onda, de forma idéntica a las de los frentes de onda originales que reflejó el objeto. Cuando se ven a ojo o con cualquier instrumento óptico, los frentes de onda difractados producen el mismo efecto que los originales. Miras al holograma y ves una imagen completa, realista y tridimensional, como si estuvieras viendo el objeto original por la ventana. La profundidad se hace evidente cuando mueves la cabeza y ves por los lados del objeto, o cuando bajas la cabeza y ves por debajo del objeto. Las fotografías holográficas son extremadamente realistas.

Es interesante el hecho de que si el holograma se toma en película fotográfica, la puedes cortar a la mitad y seguir viendo la imagen completa en cada mitad. Y puedes cortar de nuevo a la mitad, una y otra vez. Esto se debe a que cada parte del holograma ha recibido y registrado la luz de todo el objeto. Asimismo, la luz fuera de una ventana abierta llena toda la ventana, de modo que puedes ver al exterior desde cada parte de la ventana abierta. Como en un área diminuta quedan grabadas grandes cantidades de información, la película que se usa para los hologramas debe tener un grano mucho más fino que la película fotográfica ordinaria de grano fino. El almacenamiento óptico de información a través de hologramas se está aplicando mucho en las computadoras.

Es todavía más interesante el aumento (amplificación) holográfico. Si se ven hologramas hechos con luz de onda corta, con una luz de onda más larga, la imagen que resulta está aumentada en la misma proporción que las longitudes de onda. Los hologramas tomados con rayos X se podrían aumentar miles de veces al verlos con luz visible, con los arreglos geométricos adecuados. Como los hologramas no requieren lentes, son especialmente atractivas las posibilidades de un microscopio de rayos X.

Y en cuanto a la televisión, las pantallas bidimensionales tus hijos quizá las consideren como curiosidades, así como tú consideras los viejos radios de los abuelos.

La luz es fascinante, en especial cuando se difracta en las bandas de interferencia de un holograma.

Resumen de términos

Difracción La desviación de la luz que pasa en torno a un obstáculo o a través de una rendija delgada, haciendo que se esparza la luz.

Holograma Un patrón de interferencia microscópica, bidimensional, que produce imágenes ópticas tridimensionales.

Interferencia El resultado de la superposición de distintas ondas, por lo general con la misma longitud. Se produce interferencia constructiva cuando hay refuerzo de cresta con cresta; se produce interferencia destructiva cuando hay anulación entre crestas y valles. La interferencia de algunas longitudes de ondas luminosas produce los llamados *colores de interferencia*.

Polarización El alineamiento de las vibraciones eléctricas transversales de la radiación electromagnética. Se dice que esas ondas de vibraciones alineadas son o están *polarizadas*.

Principio de Huygens Todo punto de un frente de onda se puede considerar como una nueva fuente de ondas pequeñas, que se combinan y producen el siguiente frente de onda, y los puntos de este último son fuentes de las ondas que siguen, y así sucesivamente.

Lecturas sugeridas

Falk. D. S., D. R. Brill y D. Stork, *Seeing the Light: Optics in Nature*. Nueva York: Harper & Row, 1985.

Preguntas de repaso

Principio de Huygens

1. Según Huygens, ¿cómo se comporta cada punto de un frente de onda?
2. ¿Las ondas planas que inciden en una pequeña abertura en una barrera se extenderán o continuarán en forma de ondas planas?

Difracción

3. ¿La difracción es más pronunciada a través de una abertura pequeña que a través de una grande?
4. Para una abertura de tamaño determinado, ¿la difracción es más pronunciada para una longitud de onda mayor que para una longitud de onda menor?
5. ¿Qué se difracta con más facilidad en torno a las construcciones, las ondas de radio AM o las de FM? ¿Por qué?

Interferencia

6. ¿Se restringe la interferencia sólo a algunas clases de ondas, o sucede con todo tipo de ellas?
7. ¿Qué demostró exactamente Thomas Young en su famoso experimento con la luz?

Interferencia en película delgada con un solo color

8. ¿Qué explica las bandas claras y oscuras, cuando la luz monocromática se refleja en un par de láminas de vidrio, una sobre otra?
9. ¿Qué quiere decir que una superficie es *ópticamente plana*?
10. ¿Cuáles la causa de los anillos de Newton?

Colores de interferencia debidos a la reflexión en películas delgadas

11. ¿Qué produce la iridiscencia?
12. ¿Qué produce el espectro de colores que se ven en los derrames de gasolina sobre las calles mojadas? ¿Por qué no se ven cuando la calle está seca?
13. ¿Qué explica los distintos colores en una pompa de jabón o en una capa de gasolina sobre el agua?
14. ¿Por qué los colores de interferencia son principalmente azul verdoso (cian), magenta y amarillo?

Polarización

15. ¿Qué fenómeno distingue a las ondas longitudinales de las transversales?
16. ¿La polarización es característica de todas las clases de ondas?
17. ¿Cómo se compara la dirección de polarización de la luz con la dirección de vibración del electrón que la produce?
18. ¿Por qué la luz pasa por un par de filtros polarizadores cuando están alineados los ejes, pero no cuando los ejes están perpendiculares entre sí?
19. ¿Cuánta luz ordinaria transmite un filtro Polaroid?
20. Cuando la luz *ordinaria* incide formando un ángulo con el agua, ¿qué puedes decir acerca de la *luz reflejada*?

Visión tridimensional

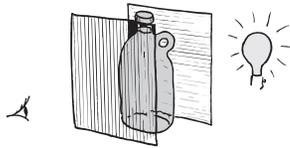
21. ¿Por qué no percibirías la profundidad si examinaras dos copias de diapositivas ordinarias con un visor estereoscópico (figura 29.39), y no cuando examinas los pares de transparencias tomadas con una cámara estereoscópica?
22. ¿Qué papel juegan los filtros polarizadores en una proyección de transparencias en 3-D (tercera dimensión)?

Holografía

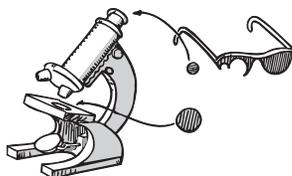
23. ¿En qué difiere un holograma de una fotografía convencional?
24. ¿En qué difiere la *luz coherente* de la luz ordinaria?
25. ¿Cómo se puede obtener un aumento holográfico?

Proyectos

1. Con una hoja de rasurar corta una ranura en una tarjeta, y ve a través de ella, hacia una fuente luminosa. Puedes variar el tamaño de la abertura si doblas un poco la tarjeta. ¿Ves las bandas de interferencia? Haz la prueba con dos rendijas cercanas entre sí.
2. La próxima vez que estés en la tina, haz espuma y observa los colores en cada burbuja diminuta de la luz de la lámpara del techo, reflejadas en ellas. Observa que las distintas burbujas reflejan diferentes colores, debido a los distintos espesores de la película de jabón. Compara los distintos colores que veas, en diferentes ángulos, reflejados en las mismas burbujas. Verás que son distintos, porque lo que tú ves ¡depende de un punto de vista!
3. Cuando uses anteojos de Sol Polaroid, observa el resplandor de una superficie no metálica, como el asfalto o un cuerpo de agua. Inclina la cabeza de lado a lado y nota cómo cambia la intensidad del resplandor, a medida que haces variar la magnitud del componente del vector eléctrico alineado con el eje de polarización de los anteojos. También observa la polarización de distintas partes del cielo, teniendo los anteojos en las manos y haciéndolos girar.
4. Coloca una fuente de luz blanca en una mesa, frente a ti. Luego coloca una hoja de Polaroid frente a la fuente, una botella de miel de maíz frente a la hoja, y una segunda hoja de Polaroid frente a la botella. Mira a través de las hojas de Polaroid a uno y otro lados de la melaza, y notarás colores espectaculares conforme hagas girar una de las hojas.



5. En un microscopio con luz polarizada podrás ver los espectaculares con colores de interferencia. Cualquier microscopio, hasta uno de juguete, se puede convertir en un microscopio polarizador, colocando una pieza de Polaroid dentro del ocular y pegando la otra en la platina del microscopio. Estira varias piezas de envolturas de plástico sobre una diapositiva, y conforme gires el ocular los colores irán cambiando.



6. Haz algunas diapositivas para proyector pegando celofán arrugado a trozos de Polaroid, del tamaño de la diapositiva. (También prueba con bandas de celofán o de envoltura de plástico pegadas a distintos ángulos.) Proyéctalas en una pantalla grande, o en una pared blanca, y haz girar un segundo Polaroid, un poco mayor, frente al lente del proyector, al ritmo de tu música favorita. ¡Tendrás tu propio equipo de luz y sonido!

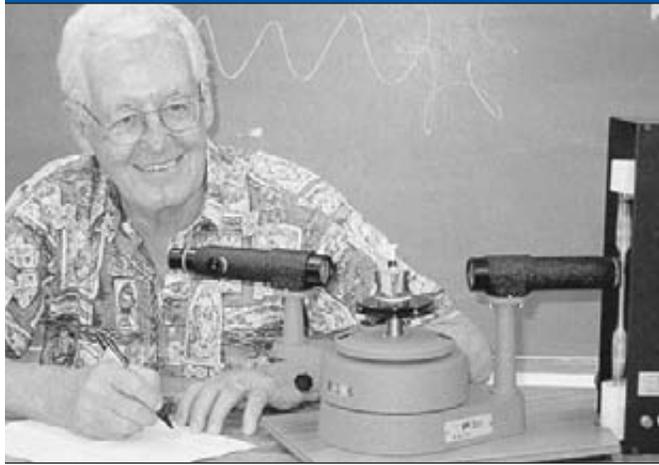
Ejercicios

1. ¿Por qué la luz solar que ilumina la Tierra se puede aproximar con ondas planas, mientras que la de una lámpara cercana no?
2. En nuestro ambiente cotidiano, la difracción es mucho más evidente en las ondas sonoras que en las ondas luminosas. ¿Por qué?
3. ¿Por qué las ondas de radio se difractan en torno a los edificios, mientras que las ondas luminosas no?
4. ¿Por qué las emisiones de TV en el intervalo de VHF (muy alta frecuencia) se reciben con más facilidad en zonas de mala recepción, que las emisiones en la región de UHF (ultra alta frecuencia)? (Sugerencia: la UHF tiene mayores frecuencias que la VHF.)
5. ¿Puedes imaginar una razón por la que los canales de TV de número bajo pueden dar mejores imágenes en regiones de recepción deficiente de TV? (Sugerencia: los canales bajos representan menores frecuencias de portadora.)
6. Las longitudes de onda de las señales de TV, para los canales 2 a 13 normales de VHF van de unos 5.6 hasta 1.4 metros. Las señales de la nueva TV de alta definición están en la banda UHF, con longitudes de onda bastante menores que 1 metro. ¿Esas longitudes de onda menores aumentarán o disminuirán la recepción en las "áreas de sombra" (suponiendo que no hay cable)?
7. Dos altavoces a una distancia aproximada de 1 metro emiten tonos puros de la misma frecuencia y sonoridad. Cuando un escucha pasa frente a ellos, en una trayectoria paralela a la línea que los une, oye que el sonido alterna de fuerte a débil. ¿Qué está sucediendo?
8. En el ejercicio anterior, sugiere una trayectoria para que el escucha que la siga camine sin oír los sonidos fuertes y débiles alternadamente.
9. ¿En qué se parecen las bandas de interferencia a la intensidad variable del sonido que percibes al pasar frente a un par de altavoces que emitan el mismo sonido?
10. ¿En cuánto deberían diferir en longitud un par de rayos de luz de una fuente común, para producir interferencia destructiva?
11. Una luz ilumina dos rendijas pequeñas y próximas, y produce un patrón de interferencia en una pantalla más adelante. ¿En qué será diferente la distancia

- entre las bandas producidas por luz roja y por luz azul?
12. Con un arreglo de doble rendija se producen bandas de interferencia con la luz amarilla del sodio. Para producir bandas más cercanas, ¿se debe usar luz roja o luz azul?
 13. Cuando la luz blanca se difracta al pasar por una rendija delgada, como en la figura 29.8b, los distintos colores se difractan en distintas cantidades, de manera que en la orilla de la figura aparece un arcoiris de colores. ¿Qué color se difracta con un ángulo mayor? ¿Qué color con el ángulo menor?
 14. ¿Cuál dará franjas más anchas en el experimento con dos rendijas cercanas, la luz roja o la luz azul? (guía tu razonamiento con la figura 29.19).
 15. ¿Dónde se darán franjas más anchas en el experimento con dos rendijas cercanas, en el agua o en el aire? (guía tu razonamiento con la figura 29.19).
 16. Si la diferencia en la longitud de la trayectoria entre dos haces idénticos y coherentes es de dos longitudes de onda cuando llegan a una pantalla, ¿producirán una mancha clara o una oscura?
 17. ¿Cuál producirá franjas de luz más anchas al pasar a través de una rejilla de difracción, la de un láser de luz verde o la de un láser de luz azul?
 18. Cuando la trayectoria reflejada en una superficie de una película delgada es una longitud de onda completa, diferente en longitud de la trayectoria reflejada en la otra superficie y no hay cambio de fase, resultará una interferencia constructiva o una destructiva?
 19. ¿Cuando la trayectoria reflejada en una superficie de una película delgada es media longitud de onda diferente en longitud de la trayectoria reflejada en la otra superficie y no hay cambio de fase, resultará una interferencia constructiva o una destructiva?
 20. ¿Cuando la trayectoria reflejada en una superficie de una película delgada es media longitud de onda diferente en longitud de la trayectoria reflejada en la otra superficie y hay un cambio de fase de 180° , ¿por qué la película aparecerá negra?
 21. Se produce un patrón de bandas cuando pasa luz monocromática por un par de rendijas delgadas. ¿Se produciría ese mismo patrón con tres rendijas delgadas y paralelas? ¿Y con miles de esas rendijas? Menciona un ejemplo que apoye tus respuestas.
 22. Imagina que colocas una rejilla de difracción frente a la lente de una cámara, y que tomas una foto del alumbrado público encendido. ¿Qué crees que verás en la fotografía?
 23. ¿Qué sucede a la distancia entre las franjas de interferencia cuando se aumenta la separación de las dos rendijas?
 24. ¿Por qué el experimento de Young es más efectivo con rendijas que con agujeros de alfiler?
 25. ¿En qué de lo siguiente se forma color por refracción: pétalos de flores, arcoiris, pomos de jabón? ¿Y por reflexión selectiva? ¿Y por interferencia en película delgada?
 26. Los colores de los pavos reales y de los colibríes no se deben a pigmentos, sino a elevaciones en las capas superficiales de sus plumas. ¿Mediante qué principio físico tales elevaciones producen colores?
 27. Las alas de colores de muchas mariposas se deben a pigmentaciones; pero en otras como en la mariposa *morfo*, los colores no se deben a pigmentaciones. Cuando el ala se ve desde distintos ángulos, sus colores cambian. ¿Cómo se producen esos colores?
 28. ¿Por qué los colores iridiscentes de algunas ostras (como las abalón o acamaya) cambian al verlas desde distintas posiciones?
 29. Cuando los platos no se enjuagan bien después de lavarlos, se reflejan distintos colores en sus superficies. Explica cómo y por qué.
 30. ¿Por qué los colores de interferencia se notan más en películas delgadas que en películas gruesas?
 31. ¿La luz de dos estrellas que estén muy cercanas producirá un patrón de interferencia? Explica por qué.
 32. Si ves los patrones de interferencia en una película delgada de aceite o gasolina sobre agua, observarás que los colores forman anillos completos. ¿Cómo se parecen esos anillos a las curvas de nivel de un mapa topográfico?
 33. Debido a la interferencia entre ondas, una película de aceite sobre el agua es amarilla, para los observadores directamente arriba, en un avión. ¿De qué color la ve un buceador directamente abajo de ella?
 34. Para el telescopio espacial Hubble, ¿qué luz (roja, verde, azul o ultravioleta) es mejor para ver los detalles finos de los cuerpos astronómicos lejanos?
 35. La luz polarizada es parte de la naturaleza, pero el sonido polarizado no. ¿Por qué?
 36. Normalmente, las pantallas digitales de los relojes y otros aparatos son polarizadas. ¿Qué problema se presenta al usar también lentes polarizados para sol?
 37. ¿Por qué un filtro polarizador ideal transmite el 50% de la luz incidente no polarizada?
 38. ¿Por qué un filtro polarizador ideal transmite entre el 0% y el 100% de la luz polarizada incidente?
 39. ¿Qué porcentaje de la luz transmiten dos filtros polarizadores, uno tras otro, con sus ejes de polarización alineados? ¿Con sus ejes perpendiculares entre sí?
 40. ¿Cómo puedes determinar el eje de polarización de una sola lámina de filtro Polaroid?

41. ¿Por qué los anteojos polarizados reducen el resplandor, mientras que los no polarizados sólo bajan la cantidad total de luz que llega a los ojos?
42. Para eliminar el resplandor de la luz procedente de un piso pulido, el eje de un filtro polarizador, ¿debe estar horizontal o vertical?
43. La mayoría del resplandor de las superficies no metálicas está polarizado, y el eje de polarización es paralelo a la superficie reflectora. ¿Esperarías que el eje de polarización de los anteojos polarizados fuera vertical u horizontal? ¿Por qué?
44. ¿Cómo se puede usar una sola lámina Polaroid para demostrar que la luz del cielo está parcialmente polarizada? (Es interesante que, a diferencia de los humanos, las abejas y muchos insectos pueden distinguir la luz polarizada, y usan esta facultad para navegar.)
45. La luz no pasa a través de un par de láminas Polaroid con ejes perpendiculares. Pero si entre las dos se intercala una tercera (con su eje a 45° con los de las otras dos), algo de luz logra pasar. ¿Por qué?
46. ¿Por qué cuando te paras cerca de una pintura tienes mayor sentido del volumen viéndola con un ojo y no con dos? (Si no lo has notado, ve las pinturas de cerca con un ojo y nota la diferencia.)
47. ¿Por qué la holografía práctica tuvo que esperar a la llegada del láser?
48. ¿Cómo se obtienen las ampliaciones con los hologramas?
49. ¿Cuál de los siguientes fenómenos es más fundamental para la holografía: interferencia, reflexión selectiva, refracción o todos los anteriores?
50. Si estás viendo un holograma y cierras un ojo, ¿percibirás todavía la profundidad? Explica por qué.

Emisión de la luz



George Curtis separa la luz de una fuente de argón en sus frecuencias componentes, con un espectroscopio.

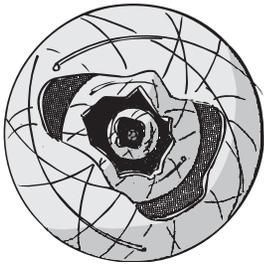


FIGURA 30.1

Vista simplificada de los electrones en órbita, en capas distintas en torno al núcleo de un átomo.

Si se inyecta energía a una antena metálica en forma tal que hiciera que los electrones libres vibraran de aquí para allá algunos cientos de miles de veces por segundo, se emitiría una onda de radio. Si se pudiera hacer que los electrones libres vibraran de aquí para allá del orden de un billón de billón de veces por segundo se emitiría una onda de luz visible. Pero la luz no se produce en las antenas metálicas, ni en forma exclusiva en las antenas atómicas por las oscilaciones de los electrones en los átomos, como vimos en los capítulos anteriores. Ahora podemos distinguir entre la luz reflejada, refractada, dispersada y difractada por los objetos, y la luz emitida por éstos. En este capítulo estudiaremos la física de las fuentes luminosas, es decir, la física de la *emisión* de la luz.

En los detalles de la emisión de luz por los átomos intervienen las transiciones de los electrones, de estados de mayor energía a estados de menor energía dentro del átomo. Este proceso de emisión se puede entender en términos del conocido modelo planetario del átomo, que examinamos en el capítulo 10. Así como cada elemento se caracteriza por la cantidad de electrones que ocupan las capas que rodean su núcleo atómico, también cada elemento posee su distribución característica de capas electrónicas o estados de energía. Dichos estados sólo se encuentran a ciertos radios y ciertas energías. Como esos estados sólo pueden tener ciertas energías, se dice que son estados *discretos*. A esos estados discretos se les llama *estados cuánticos*, y los trataremos en los dos capítulos siguientes. Por ahora, sólo nos ocuparemos de su papel en la emisión de la luz.

Excitación

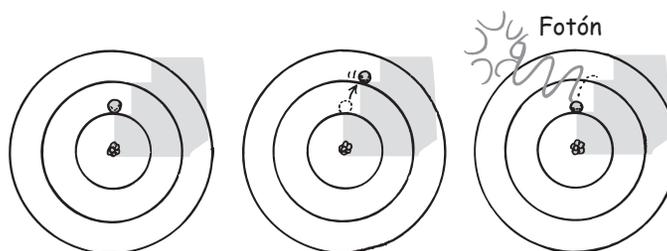
Un electrón más alejado de su núcleo tiene mayor energía potencial eléctrica con respecto al núcleo, que uno más cercano. Se dice que el electrón más distante está en un estado de energía mayor, o más elevado. En cierto sentido, ello se parece a la energía de una puerta de resorte o a la de un martinete. Cuanto más se abra la puerta, la energía potencial del resorte será mayor; cuanto más se suba el pilón del martinete, su energía potencial gravitacional será mayor.

Cuando un electrón se eleva por cualquier medio a un estado de energía mayor, se dice que el átomo o el electrón están *excitados*. La posición superior del electrón sólo es momentánea, porque igual que la puerta de resorte que se abrió, pronto regresa a su estado de energía mínima. El átomo pierde la energía

FIGURA 30.2

Figura interactiva

Cuando un electrón en un átomo salta a una órbita superior, el átomo se excita. Cuando el electrón regresa a su órbita original, el átomo se desexcita y emite un fotón de luz.



adquirida temporalmente, cuando el electrón regresa a un nivel más bajo y emite energía radiante. El átomo tuvo los procesos de **excitación** y de **des-excitación**.

Así como cada elemento eléctricamente neutro tiene su propia cantidad de electrones, cada elemento también tiene su propio conjunto característico de niveles de energía. Los electrones que bajan de niveles de energía mayores a menores en un átomo excitado emiten, con cada salto, un impulso palpitante de radiación electromagnética llamado *fotón*, cuya frecuencia se relaciona con la transición de energía en el salto. Nos imaginamos que ese fotón es un corpúsculo localizado de energía pura, es decir, una “partícula” de luz, que es expulsada del átomo. La frecuencia del fotón es directamente proporcional a su energía. En notación abreviada,

$$E \sim f$$

Cuando se introduce la constante de proporcionalidad h , esto se transforma en la ecuación exacta

$$E = hf$$

donde h es la constante de Planck (que veremos en el próximo capítulo). Por ejemplo, un fotón de un haz de luz roja, lleva una cantidad de energía que corresponde a su frecuencia. Otro fotón con el doble de frecuencia tiene el doble de energía y se encuentra en el ultravioleta del espectro. Si se excitan muchos átomos en un material, se emiten demasiados fotones, con diversidad de frecuencias que corresponden a los varios y distintos niveles en que se excitaron. Esas frecuencias corresponden a los colores característicos de la luz de cada elemento químico.

La luz que se emite en los letreros luminosos es un resultado muy conocido de la excitación. Los diversos colores en el letrero corresponden a la excitación de diferentes gases, aunque se acostumbra llamar a todos ellos de “neón”. Sólo la luz roja es la del neón. En los extremos del tubo de vidrio que contiene al neón gaseoso hay electrodos. De esos electrodos se desprenden electrones, que salen despedidos yendo y viniendo a grandes rapideces debido a un alto voltaje de ca. Millones de los electrones de alta rapidez vibran de un lado a otro dentro del tubo de vidrio, y chocan contra millones de átomos, haciendo que los electrones suban a órbitas de mayor nivel de energía, una cantidad de energía igual a la disminución de la energía cinética del electrón que los bombardeó. Esta energía se irradia después en forma de la luz roja característica del neón, cuando los electrones regresan a sus órbitas estables. El proceso sucede y se repite muchas veces, conforme los átomos de neón sufren ciclos de excitación y desexcitación. El resultado general de este proceso es la transformación de energía eléctrica en energía radiante.

Los colores de varias llamas se deben a la excitación. Los átomos en ella emiten colores característicos de las distancias entre los niveles de energía. Por ejemplo, cuando se coloca sal común en una llama, se produce el color amarillo característico del sodio. Cada elemento, excitado en una llama o por cualquier método, emite un color o colores propios característicos.



Excitar un átomo es como intentar patear un balón para sacarlo de una zanja. Patearlo suavemente no lo lograrás, porque el balón caerá nuevamente dentro. Sólo una patada con la energía correcta es suficiente para hacer que el balón salga de la zanja. Lo mismo ocurre con la excitación de los átomos.

¡EUREKA!

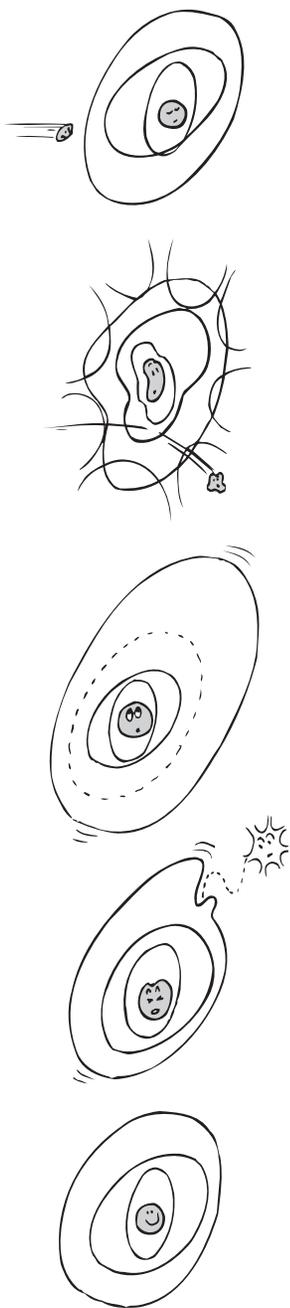


FIGURA 30.3
Excitación y desexcitación.

Las luminarias del alumbrado público son otro ejemplo. Las calles ya no se alumbran con lámparas incandescentes, sino que ahora se iluminan con la luz emitida por gases, por ejemplo, el vapor de mercurio. Dicha luz no sólo es más brillante, sino que también es menos costosa. Mientras que la mayoría de la energía en una lámpara incandescente se convierte en calor, la mayoría de la energía que entra a una lámpara de vapor de mercurio se convierte en luz. La luz de esas lámparas es rica en azules y violetas y, en consecuencia, es de un “blanco” distinto del de la luz de una lámpara incandescente. Pregunta al profesor si tiene un prisma o una rejilla de difracción que te preste. Mira una lámpara de la calle a través del prisma o la rejilla, y aprecia lo discreto de los colores, que indica lo discreto de los niveles atómicos. También observa que los colores de distintas lámparas de vapor de mercurio son idénticos, lo que indica que los átomos del mercurio son idénticos.

La excitación se aprecia en las auroras boreales. Los electrones de alta rapidez que se originan en el viento solar chocan contra los átomos y las moléculas de la atmósfera superior. Emiten luz exactamente como lo hacen en un tubo de neón. Los diversos colores de la aurora corresponden a la excitación de gases diferentes: los átomos de oxígeno producen un color blanco verdoso, las moléculas de nitrógeno producen violeta y rojo, y los iones de nitrógeno producen un color azul violeta. Las emisiones de las auroras no se limitan a la luz visible, sino que también tienen radiación infrarroja, ultravioleta y de rayos X.

El proceso de excitación y desexcitación se puede describir muy bien sólo con la mecánica cuántica. Si se trata de examinar el proceso en términos de la física clásica, se incurrirá en contradicciones. Clásicamente, una carga eléctrica acelerada produce radiación electromagnética. ¿Explica eso la emisión de luz por los átomos excitados? Un electrón sí es acelerado en una transición desde un nivel de energía más alto a uno más bajo. Así como los planetas interiores del sistema solar tienen mayores rapidezces orbitales que los que están en órbitas externas, los electrones de las órbitas internas del átomo tienen mayores rapidezces. Un electrón adquiere rapidez al caer a menores niveles de energía. Está bien, ¡el electrón que acelera irradia un fotón! Cuidado, esto no está tan bien, ya que el electrón siempre sufre aceleración (la aceleración centrípeta) en cualquier órbita que se encuentre, cambie o no niveles de energía. De acuerdo con la física clásica, debería irradiar energía en forma continua. Pero no lo hace. Todos los intentos de explicar la emisión de la luz por un átomo excitado usando el modelo clásico han resultado infructuosos. Simplemente diremos que se emite luz cuando un electrón en un átomo da un “salto cuántico”, de un nivel de energía mayor a uno menor, y que la energía y la frecuencia del fotón emitido se describen con la ecuación $E = hf$.

EXAMÍNATE

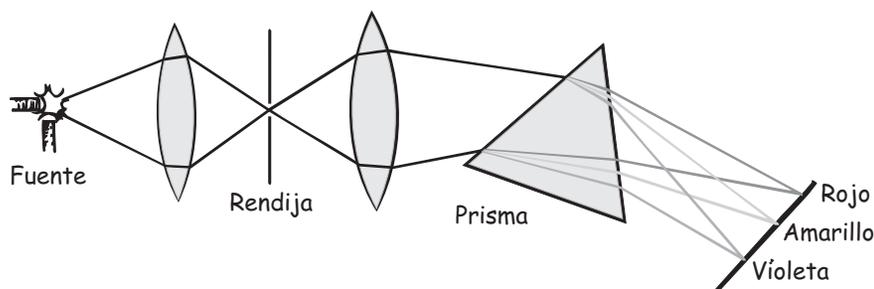
Imagina que un amigo opina que para tener un funcionamiento de máxima calidad, los átomos del neón gaseoso en el interior de un tubo de neón se reemplacen periódicamente por átomos frescos, porque la energía de los átomos tiende a consumirse por la excitación continua, y se produce luz cada vez menos intensa. ¿Qué le dices?

COMPRUEBA TU RESPUESTA

Los átomos de neón no ceden energía alguna que no se les imparta con la corriente eléctrica en el tubo y, por lo tanto, no se “agotan”. Cualquier átomo individual se puede excitar y volver a excitar sin límite. Si la luz se debilita cada vez más, es porque se deba a una fuga. Por lo demás, no se gana nada al cambiar el gas en el tubo, porque un átomo “fresco” es indistinguible de uno “usado”. Ninguno de los dos tiene edad y ambos son más viejos que el sistema solar.

FIGURA 30.4

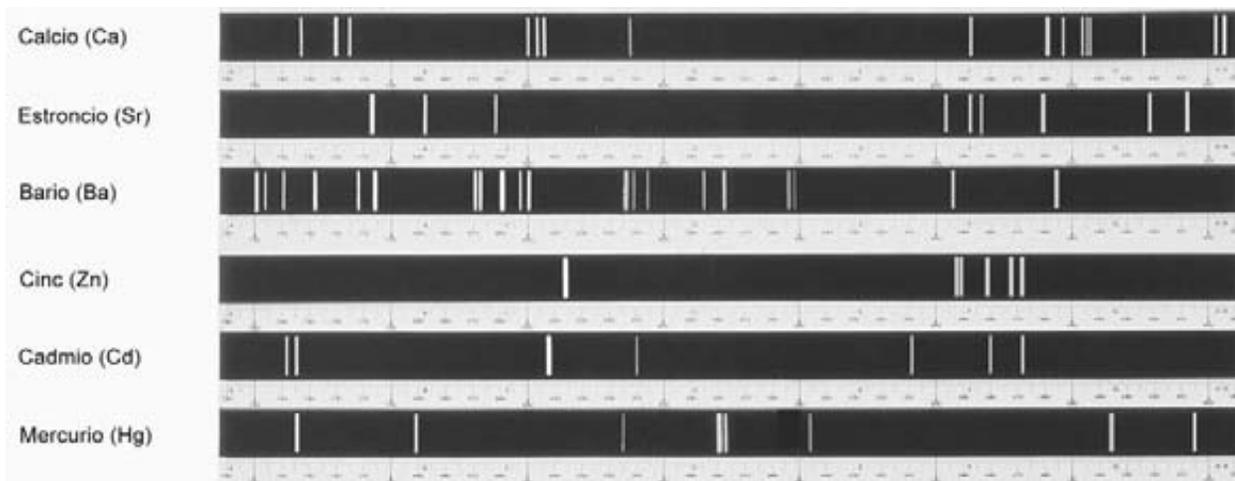
Espectroscopio sencillo. Las imágenes de la rendija iluminada se proyectan en una pantalla y forman un patrón de líneas. La distribución espectral es característica de la luz que ilumina la rendija. (Véase la sección a color al final del libro.)



Espectros de emisión

Todo elemento tiene una distribución característica de niveles electrónicos de energía y, en consecuencia, emite luz con su propia distribución de frecuencias, es decir, su **espectro de emisión**, cuando se excita. Esta distribución se observa al hacer pasar la luz por una rendija delgada, y después pasa por un prisma y se enfoca en una pantalla. A ese arreglo de rendija, sistema óptico de enfoque y prisma (o rejilla de difracción) se le llama **espectroscopio**, que es uno de los instrumentos más útiles para la ciencia moderna (figura 30.4).

Cada color componente se enfoca en una posición definida, de acuerdo con su frecuencia, y forma una imagen de la rendija sobre la pantalla, película fotográfica o algún detector adecuado. Las imágenes de la rendija, de colores distintos, se llaman *líneas espectrales*. En la figura 30.5 se muestran algunas líneas espectrales típicas, identificadas por sus longitudes de onda. Se acostumbra a indicar los colores por sus longitudes de onda y no por sus frecuencias. Una frecuencia determinada corresponde a una longitud de onda definida.¹


FIGURA 30.5

[Figura interactiva](#)

Patrones de espectros de algunos elementos. (Véase la sección a color al final del libro.)

¹ Recuerda que en el capítulo 19 vimos que $v = f\lambda$, donde v es la rapidez de la onda, f es la frecuencia de la onda y λ (lambda) es la longitud de la onda. Para la luz, v es la constante c , por lo que a partir de $c = f\lambda$ se ve la relación entre la frecuencia y la longitud de onda, que es $f = c/\lambda$ y que $\lambda = c/f$.

Si la luz emitida por una lámpara de vapor de sodio se analiza en un espectroscopio, predomina una sola línea amarilla, una sola imagen de la rendija. Si disminuye el ancho de la rendija podremos notar que esta raya en realidad está formada por dos líneas muy cercanas. Esas líneas corresponden a las dos frecuencias predominantes de la luz emitida por los átomos de sodio excitados. El resto del espectro se ve negro. (En realidad, hay muchas otras líneas, con frecuencia demasiado tenues como para que las observe el ojo en forma directa.)

Lo mismo sucede con todos los vapores incandescentes. La luz de una lámpara de vapor de mercurio produce un par de líneas brillantes cercanas (pero en distintos lugares que las de sodio): una línea verde muy intensa, y varias líneas azules y violetas. Un tubo de neón produce un patrón de líneas más complicado. Se ve que la luz emitida por cada elemento en fase de vapor produce su propia y característica distribución de líneas. Esas líneas corresponden a las transiciones de electrones entre los niveles atómicos de energía, y son tan características de cada elemento como las huellas digitales son características de las personas. En consecuencia, el espectroscopio se usa mucho en los análisis químicos.

La siguiente vez que notes evidencia de excitación atómica, quizá la llama verde producida cuando se pone un trozo de cobre en un fuego, entorna los ojos y ve si te puedes imaginar a los electrones saltando de un nivel de energía a otro, en un patrón característico del átomo que se excita, que es patrón que produce un color exclusivo de ese átomo. ¡Es lo que está sucediendo!



Los espectros atómicos son las huellas digitales de los átomos.

¡EUREKA!

EXAMÍNATE

Los espectros no son manchas informes de luz, sino están formados por líneas definidas y rectas. ¿Por qué?

Incandescencia

La luz que se produce como consecuencia de altas temperaturas tiene la propiedad de **incandescencia** (palabra latina que quiere decir “calentarse”). Puede tener un tinte rojizo, como el de una resistencia de tostador; o un tinte azulado, como el de una estrella muy caliente. También puede ser blanco, como la lámpara incandescente común. Lo que hace que la luz incandescente sea distinta de la luz de un tubo de neón o de una lámpara de vapor de mercurio, es que contiene una cantidad infinita de frecuencias, repartidas uniformemente en todo el espectro. ¿Quiere decir eso que una cantidad infinita de niveles de energía es lo que caracteriza a los átomos de tungsteno que forman el filamento de una lámpara incandescente? La respuesta es no; si el filamento se vaporizara y después se excitara, el gas de tung-

COMPRUEBA TU RESPUESTA

Las líneas espectrales tan sólo son imágenes de la rendija, que a su vez es una abertura recta a través de la cual se admite la luz antes de dispersarse en el prisma (o en la rejilla de difracción). Cuando se ajusta la rendija para hacer más angosta su abertura, se pueden resolver (distinguir entre sí) líneas muy cercanas. Una rendija más ancha admite más luz, lo cual permite una detección más fácil de la energía radiante menos luminosa. Pero el ancho perjudica la resolución, porque las líneas muy cercanas se confunden entre sí.



FIGURA 30.6
El sonido de una campana aislada se escucha con una frecuencia clara y distinta, mientras que el sonido que procede de una caja llena de campanas es discordante. Del mismo modo se nota la diferencia entre la luz emitida por átomos en el estado gaseoso y los átomos en el estado sólido.

teno emitiría una cantidad finita de frecuencias, y produciría un color azulado en general. La luz emitida por átomos alejados entre sí, en la fase gaseosa, es muy distinta a la que emiten los mismos átomos muy cercanos y empacados en la fase sólida. Esto se parece a las diferencias en el sonido de campanas alejadas entre sí, y el sonido de las mismas campanas atiborradas en una caja (figura 30.6). En un gas, los átomos están alejados entre sí. Los electrones sufren transiciones entre los niveles de energía dentro de un átomo, y casi no los afecta la presencia de los átomos cercanos. Pero cuando los átomos están muy cercanos, como en un sólido, los electrones de las órbitas externas hacen transiciones no sólo entre los niveles de energía de sus átomos “padres”, sino también con los de los átomos vecinos. Van rebotando en dimensiones mayores que las de un solo átomo, y el resultado es que pueden hacer una variedad infinita de transiciones y, por consiguiente, la cantidad de frecuencias de energía radiante es infinita.

Como cabría esperar, la luz incandescente depende de la temperatura, porque es una forma de la radiación térmica. En la figura 30.7 se ve una gráfica de la energía irradiada dentro de amplios límites de frecuencias, para dos temperaturas distintas. Recuerda que explicamos la curva de radiación para la luz solar en el capítulo 26, y que describimos la radiación de un cuerpo negro en el capítulo 15. A medida que el sólido se calienta más, hay más transiciones de alta energía, y se emite radiación de mayor frecuencia. En la parte más brillante del espectro, la frecuencia predominante de la radiación emitida, o *frecuencia del máximo*, es directamente proporcional a la temperatura absoluta del emisor:

$$\bar{f} \sim T$$

La raya encima de la f indica la frecuencia del máximo de intensidad, porque la fuente incandescente emite radiaciones de muchas frecuencias. Si la temperatura (en kelvins) de un objeto sube al doble, también se duplica la frecuencia de la intensidad máxima de la radiación emitida. Las ondas electromagnéticas de la luz violeta tienen casi el doble de frecuencia que las ondas de la luz roja. En consecuencia, una estrella caliente y violeta tiene casi el doble de la temperatura de una estrella caliente y roja.² La temperatura de los cuerpos incandescentes, ya sean estrellas o los interiores de los hornos, se determina midiendo la frecuencia (o el color) de la máxima intensidad de la energía radiante que emiten.

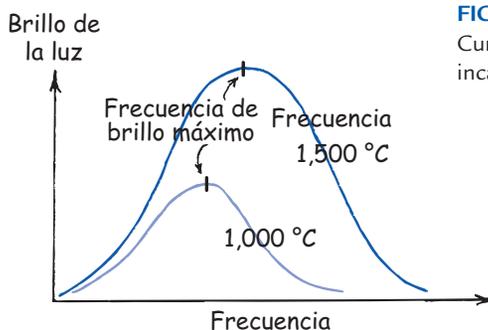


FIGURA 30.7 [Figura interactiva](#)
Curvas de radiación de un sólido incandescente.

² Si sigues estudiando este tema, verás que la “rapidez” con la que un objeto irradia energía (la potencia de su radiación) es proporcional a la cuarta potencia de su temperatura en kelvins. Así, cuando se duplica la temperatura, sube al doble la frecuencia de la energía radiante, pero sube 16 veces la rapidez de emisión de la energía radiante.

EXAMÍNATE

De acuerdo con las curvas de radiación de la figura 30.7, ¿qué emite la mayor frecuencia promedio de energía radiante, la fuente de 1000 °C o la de 1500 °C? ¿Cuál emite más energía radiante?

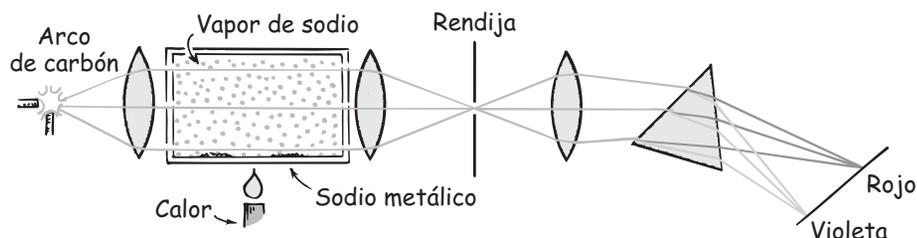
Espectros de absorción (opcional)

Cuando se observa la luz blanca de una fuente incandescente con un espectroscopio, se aprecia un espectro continuo que forma todo el arcoiris. Sin embargo, si entre la fuente incandescente y el espectroscopio se coloca un gas, al mirar con detenimiento se verá que el espectro ya no es continuo. Es un **espectro de absorción**, y hay líneas oscuras distribuidas en él; esas líneas oscuras contra un fondo con los colores del arcoiris son como líneas de emisión inversas. Son las *líneas de absorción*.

FIGURA 30.8

Figura interactiva

Arreglo experimental para demostrar el espectro de absorción de un gas. (Véase la sección a color al final del libro.)



Los átomos absorben la luz, y también la emiten. Un átomo absorbe más la luz que tenga las frecuencias a las que esté sintonizado: algunas de las mismas frecuencias de las que emite. Cuando se hace pasar un haz de luz blanca por un gas, los átomos de éste absorben luz de ciertas frecuencias que haya en el rayo. Esta luz absorbida se vuelve a irradiar, pero en *todas* direcciones, en vez de sólo en la dirección del rayo incidente. Cuando la luz que queda en el haz se reparte en el espectro, las frecuencias que fueron absorbidas aparecen como líneas oscuras contra el espectro, por lo demás continuo. Las posiciones de esas líneas oscuras corresponden exactamente con las de las líneas de un espectro de emisión del mismo gas (figura 30.9).



FIGURA 30.9

Espectros de emisión y de absorción.

COMPRUEBA TU RESPUESTA

La fuente que irradia a 1500 °C emite las mayores frecuencias promedio, lo cual se ve por la prolongación de la curva hacia la derecha. La fuente de 1500 °C es la más brillante, y también emite más energía radiante, como se ve por su mayor altura.



La galaxia Andrómeda se acerca hacia nosotros, y emite luz hacia la Tierra que tiene un corrimiento hacia el azul.

¡EUREKA!

Aunque el Sol es una fuente de luz incandescente, el espectro que produce no es continuo, cuando se le examina con detenimiento. Hay muchas líneas de absorción, llamadas *líneas de Fraunhofer*, en honor del óptico y físico bávaro Joseph von Fraunhofer, quien las observó por primera vez y las cartografió con exactitud. Se encuentran líneas parecidas en los espectros producidos por las estrellas. Esas líneas indican que el Sol y las estrellas están rodeados por una atmósfera de gases más fríos, que absorben algunas de las frecuencias de la luz que proviene del cuerpo principal. El análisis de esas líneas revela la composición química de las atmósferas de esas fuentes. Al examinar los análisis se ve que los elementos en las estrellas son los mismos que existen en la Tierra. Un caso interesante se vio cuando en el eclipse solar de 1868 el análisis espectroscópico de la luz solar mostraba algunas líneas espectrales distintas de todas las que se conocían en la Tierra. Esas líneas identificaron un nuevo elemento, que se llamó *helio*, en honor a Helios, el dios griego del Sol. Se descubrió el helio en el Sol, y después en la Tierra. ¿Qué opinas?

Se puede calcular la rapidez de las estrellas estudiando los espectros que emiten. Así como una fuente de sonido en movimiento produce un corrimiento Doppler en la altura de su tono (capítulo 19), una fuente luminosa en movimiento produce un corrimiento Doppler en la frecuencia de su luz. La frecuencia (¡no la rapidez!) de la luz que emite una fuente que se acerca es mayor que la de una fuente estacionaria, mientras que la de una fuente que se aleja es menor que la estacionaria. Las líneas espectrales correspondientes se desplazan hacia el extremo rojo del espectro cuando las fuentes retroceden. Como el Universo se está expandiendo, casi todas las galaxias muestran un corrimiento hacia el rojo en sus espectros.

En el capítulo 31 explicaremos cómo los espectros de los elementos nos permiten determinar su estructura atómica.

Fluorescencia

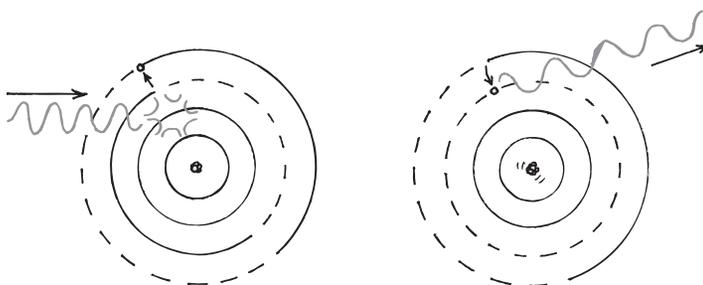
Vemos entonces que la agitación y el bombardeo térmico por partículas, como electrones de alta rapidez, no son los únicos medios para impartir a un átomo una energía de excitación. Un átomo puede excitarse al absorber un fotón de luz. De acuerdo con la ecuación $E = hf$, la luz de alta frecuencia, como la ultravioleta, que está fuera del espectro visible, produce más energía por fotón que la luz de baja frecuencia. Hay muchas sustancias que sufren excitación cuando se iluminan con luz ultravioleta.

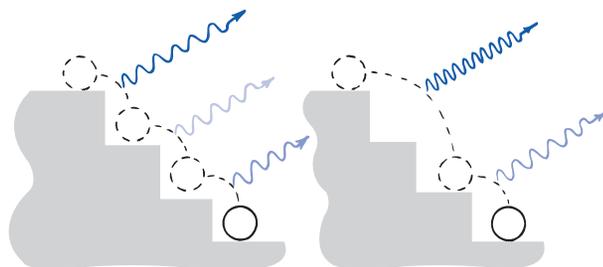
Muchos materiales que son excitados por luz ultravioleta, al desexcitarse emiten luz visible. Esta acción en los materiales se llama **fluorescencia**. En ellos, un fotón de luz ultravioleta excita el átomo y sube un electrón a un nivel más alto de energía. En este salto cuántico hacia arriba, el átomo posiblemente pase por

FIGURA 30.10

Figura interactiva

En la fluorescencia, la energía del fotón ultravioleta absorbido impulsa al electrón de un átomo hasta un estado de mayor energía. Cuando el electrón regresa después a un estado intermedio, el fotón emitido tiene menos energía y, en consecuencia, menor frecuencia que el fotón ultravioleta.



**FIGURA 30.11**

Un átomo excitado se puede desexcitar en varias combinaciones de saltos. (Véase la sección a color al final del libro.)

**FIGURA 30.12**

Crayones fluorescentes en varios colores bajo luz ultravioleta. (Véase la sección a color al final del libro.)

una serie de estados intermedios de energía. Así, al desexcitarse, puede hacer saltos más pequeños y emitir fotones con menos energía.

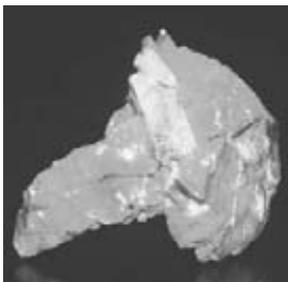
Este proceso de excitación y desexcitación es como subir de un brinco una pequeña escalera y bajar después con uno o dos escalones a la vez, en vez de dar un salto desde arriba hasta abajo. Como la energía del fotón que se libera en cada escalón, es menor que la energía total que contenía originalmente el fotón ultravioleta, se emiten fotones de menor frecuencia. Así, al alumbrar el material con luz ultravioleta, se hace que brille con un color rojo, amarillo o el que sea característico del mismo. Los colorantes fluorescentes se usan en pinturas y telas para hacerlos resplandecer al ser bombardeados con fotones ultravioleta de luz solar. Son los colores Day-Glo, espectaculares cuando se iluminan con una lámpara de rayos ultravioleta.

EXAMÍNATE

¿Por qué es imposible que un material fluorescente emita luz ultravioleta al ser iluminado por luz infrarroja?

Los detergentes que afirman dejar las prendas “más blancas que el blanco” usan el principio de la fluorescencia. Contienen un colorante fluorescente que convierte la luz ultravioleta del Sol en luz visible azulada, y así las prendas teñidas en esta forma parecen reflejar más luz azul de la que deberían. Es lo que hace que las prendas se vean más blancas.³

La próxima vez que visites un museo de historia natural, ve a la sección de geología y fíjate en los minerales iluminados con luz ultravioleta (figura 30.13). Observarás que los distintos minerales irradian colores diferentes. Era de esperarse, porque los minerales están formados por distintos elementos, los cuales a la vez tienen distintos conjuntos de niveles electrónicos de energía. Observar los minera-

**FIGURA 30.13**

La roca contiene los minerales fluorescentes calcita y willemita, los cuales, bajo la luz ultravioleta, son claramente visibles como rojo y verde, respectivamente. (Véase la sección a color al final del libro.)

COMPRUEBA TU RESPUESTA

La energía de los fotones producidos sería mayor que la de los fotones que llegaron, lo cual violaría la ley de la conservación de la energía.

³ Es interesante que los mismos detergentes se vendan en México y algunos otros países, pero se ajustan para dar un efecto más cálido, más rosado.



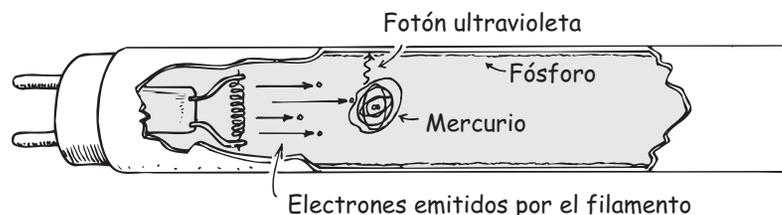
les irradiando es una bella experiencia visual, que todavía es más bella cuando se integra a tus conocimientos de los sucesos submicroscópicos en la naturaleza. Los fotones ultravioleta de alta energía chocan contra los minerales, causando la excitación de los átomos en su estructura. Las frecuencias de la luz que ves corresponden a diminutas distancias entre niveles de energía, a medida de que ésta descende como en una cascada. Cada átomo excitado emite frecuencias características, y no hay dos minerales distintos que emitan luz exactamente con el mismo color. La belleza está tanto en la vista como en la mente de quien la aprecia.

Lámparas fluorescentes

La lámpara fluorescente común consiste en un tubo cilíndrico de vidrio, con electrodos en cada extremo (figura 30.14). En la lámpara, como en un tubo de un letrero de neón, los electrones se desprenden de uno de los electrodos y son forzados a vibrar de aquí para allá a grandes rapidez dentro del tubo, a causa del voltaje de corriente alterna. El tubo está lleno de vapor de mercurio, a muy baja presión, que se excita debido al impacto de los electrones de alta rapidez. Gran parte de la luz emitida está en la región del ultravioleta. Es el proceso primario de la excitación. El proceso secundario se produce cuando la luz ultravioleta llega a los *fósforos*, que son materiales harinosos que están en la superficie interior del tubo. Los fósforos se excitan por la absorción de los fotones ultravioleta y fluorescen, emitiendo una multitud de fotones de menor frecuencia que se combinan para producir luz blanca. Se pueden usar distintos fósforos para producir diversos colores o “texturas” de la luz.

FIGURA 30.14

Un tubo fluorescente. El gas del tubo emite luz ultravioleta (UV) al ser excitado por una corriente eléctrica alterna. A la vez, la luz ultravioleta excita el fósforo en la superficie interna del tubo de vidrio, y el fósforo emite luz blanca.



Fosforescencia

Cuando son excitados, algunos cristales y también algunas moléculas orgánicas grandes quedan en un estado de excitación durante largo tiempo. A diferencia de lo que sucede en los materiales fluorescentes, en este caso los electrones son impulsados a órbitas más externas donde se quedan “atorados”. En consecuencia, pasa cierto tiempo entre el proceso de excitación y desexcitación. Los materiales que tienen esta peculiar propiedad se llaman **fosforescentes**. Un buen ejemplo es el del elemento fósforo, empleado en las carátulas de reloj luminosas y en otros objetos que brillan en la oscuridad. En esos materiales, los átomos o las moléculas son excitados por la luz visible incidente. Más que desexcitarse de inmediato, como los materiales fluorescentes, muchos de los átomos quedan en un *estado metaestable*, es decir, un estado prolongado de excitación, que a veces dura horas; aunque la mayoría se desexcita rápidamente. Si se elimina la fuente de excitación, por ejemplo, si se apagan todas las luces, se ve un brillo residual cuando millones de átomos sufren una desexcitación espontánea.

Una pantalla de TV es un poco fosforescente y su resplandor baja rápidamente, pero con la lentitud suficiente como para que los barridos sucesivos de la imagen se confundan entre sí. El brillo residual de algunos interruptores domésticos puede durar más de una hora. Es lo mismo con los relojes luminosos, excitados por la luz visible. Algunos relojes brillan en forma indefinida en la oscuridad, no porque tengan largo tiempo de desexcitación, sino porque contienen radio u otro material radiactivo que suministra continuamente energía y mantiene activo el proceso de excitación. Ya no se ven con frecuencia esos relojes, por el riesgo potencial que representa el material radiactivo para el usuario, en especial si está en un reloj de pulso o en uno de bolsillo.⁴

Muchas creaturas, desde las bacterias hasta las luciérnagas y otros animales más grande como las medusas, excitan químicamente algunas moléculas en sus organismos, que emiten luz. Se dice que esos seres son *bioluminiscentes*. En ciertas condiciones, algunos peces se vuelven luminiscentes al nadar, pero quedan en la oscuridad cuando están quietos. Bancos de estos peces pasan inadvertidos cuando no se mueven, pero cuando están alterados iluminan las profundidades con luces repentinas, formando una suerte de fuegos artificiales en las profundidades del mar. El mecanismo de la *bioluminiscencia* se está investigando en la actualidad para tener una mejor comprensión de él.

Láseres (opcional)

Los fenómenos de excitación, fluorescencia y fosforescencia están presentes en el funcionamiento de un instrumento por demás misterioso, el láser (*light amplification by stimulated emission of radiation*, amplificación de la luz por emisión estimulada de radiación).⁵ Aunque el primer láser fue inventado en 1958, el concepto de emisión estimulada fue adelantado por Albert Einstein en 1917. Para entender cómo funciona un láser debemos explicar primero la luz coherente.

La luz emitida por una lámpara ordinaria es incoherente, es decir, se emiten fotones de muchas frecuencias y fases de vibración. La luz es tan incoherente como las huellas en el piso de algún auditorio cuando una multitud de personas pasa sobre él. Un haz de luz incoherente se dispersa después de un corto tiempo, haciéndose cada vez más ancho y menos intenso conforme aumenta la distancia que recorre.

FIGURA 30.15

La luz blanca incoherente contiene ondas de muchas frecuencias (y longitudes de onda) que están desfasadas entre sí. (Véase la sección a color al final del libro.)



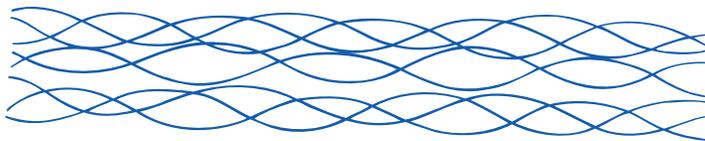
Aun cuando se filtrara el rayo para que quedara formado por ondas de una sola frecuencia (monocromático), seguiría siendo incoherente, porque las ondas están desfasadas entre sí. El rayo se extiende y se vuelve más débil conforme aumenta la distancia.

⁴ Sin embargo, una forma radiactiva del hidrógeno, llamada *tritio*, mantiene iluminados los relojes sin riesgo alguno. Esto se debe a que la energía de su radiación no es la suficiente para penetrar en el metal o en el plástico del estuche.

⁵ Una palabra formada por las iniciales de una frase se llama *acrónimo*.

FIGURA 30.16

La luz de una sola frecuencia y longitud de onda todavía contiene muchas fases mezcladas.



Un haz de fotones con las mismas frecuencia, fase y dirección –esto es, un haz de fotones que son copias idénticas entre sí– es *coherente*. Un haz de luz coherente se dispersa y se debilita muy poco.⁶

FIGURA 30.17

Luz coherente: todas las ondas son idénticas y están en fase.



Un láser es un dispositivo que produce un rayo de luz coherente. Cada láser tiene una fuente de átomos, llamados medio activo, que pueden ser de gas, líquido o sólido (el primer láser construido fue de cristal de rubí). Los átomos en el medio son excitados hasta llegar a estados metaestables por una fuente externa de energía. Cuando la mayoría de los átomos del medio están excitados, un solo fotón de un átomo que sufra una desexcitación puede iniciar una reacción en cadena. Ese fotón choca contra otro átomo y lo estimula a emitir, y así sucesivamente, y se produce luz coherente. La mayoría de esa luz se emite al principio en todas direcciones. Sin embargo, la luz que viaja a lo largo del eje del láser es reflejada en espejos que reflejan en forma selectiva la luz de la longitud de onda deseada. Un espejo es totalmente reflector, mientras que el otro es parcialmente reflector. Las ondas reflejadas se refuerzan entre sí, después de cada viaje redondo por reflexión entre los espejos, y así se establece un estado de resonancia de ida y vuelta, donde la luz se acumula hasta llegar a una intensidad considerable. La luz que escapa por el extremo con espejo más transparente es la que forma el rayo láser.

Además de los láseres de gas y de cristal, hay otras clases de láseres: de vidrio, químicos, líquidos y de semiconductor. Los modelos actuales producen haces que van desde el infrarrojo hasta el ultravioleta. Algunos se pueden sintonizar a diversos intervalos de frecuencias. Existe la esperanza de tener disponible un láser de rayos X.

El láser no es una fuente de energía. Es tan sólo un convertidor de energía que aprovecha el proceso de la emisión estimulada para concentrar cierta fracción de su energía (normalmente, el 1%) en forma de energía radiante, de una sola frecuencia y que tiene una sola dirección. Al igual que todos los dispositivos, un láser no puede producir más energía de la que se le suministra.

Los láseres tienen diversas aplicaciones en cirugía. Hacen cortes limpios. La luz láser puede ser lo bastante intensa y concentrada como para permitir a los cirujanos oftalmólogos “soldar” retinas desprendidas y ponerlas en su lugar, sin hacer incisión alguna. Simplemente la luz se enfoca en la región donde se va a soldar.

Si bien las longitudes de onda de radio son de cientos de metros y las de la televisión son de algunos centímetros, las longitudes de onda de la luz láser se miden en millonésimas de centímetro. En consecuencia, las frecuencias de la luz



Un rayo láser no es visible a menos que se disperse por el aire. Tal como sucede con la luz solar o la de la luna, lo que se observa son las partículas del medio de dispersión, no el rayo mismo. Cuando el rayo golpea una superficie difusa, parte de él se dispersa hacia tus ojos como un punto.

¡EUREKA!

⁶ Lo angosto de un rayo láser se ve cuando se fija uno en un conferencista que produce una mancha roja diminuta y brillante en una pantalla, al usar un “apuntador” láser. Se ha mandado luz de un láser intenso a la Luna, desde donde se ha reflejado y detectado su regreso a la Tierra.

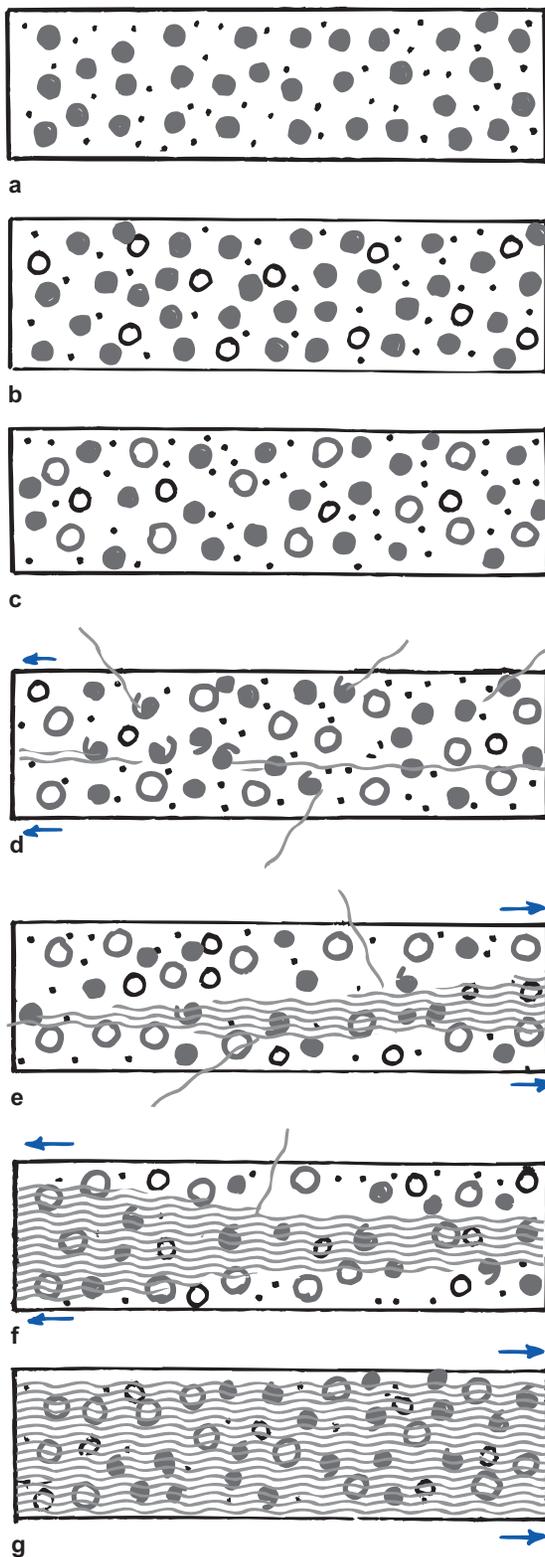


FIGURA 30.18

Acción en un láser de helio-neón.

a) El láser consiste en un tubo angosto de Pyrex que contiene una mezcla de gases a baja presión, formada por 85% de helio (puntos pequeños) y 15% de neón (puntos grandes).

b) Cuando por el tubo pasa una corriente producida por un alto voltaje, excita los átomos de helio y de neón hasta sus estados excitados normales, que de inmediato se desexcitan, excepto un estado del helio que se caracteriza por un retardo prolongado para desexcitarse; es decir, alcanza un *estado metaestable*. Como este estado es relativamente estable, se forma una cantidad apreciable de átomos de helio excitados (círculos negros abiertos). Esos átomos vagan por el tubo, y son fuente de energía para el neón, que tiene un estado metaestable difícil de alcanzar, muy cercano a la energía del helio excitado.

c) Cuando los átomos excitados de helio chocan contra átomos de neón en su estado de energía mínima (estado fundamental), el helio cede su energía al neón, que es impulsado a su estado metaestable (círculos abiertos de color más grandes). Este proceso continúa y pronto la cantidad de átomos excitados de neón es mayor que la de los átomos de neón excitados en niveles de menor energía. Esta población invertida de hecho está esperando irradiar su energía.

d) Al final algunos átomos de neón se desexcitan e irradian fotones rojos en el tubo. Cuando esta energía radiante pasa a otros átomos excitados de neón, éstos son estimulados a emitir fotones exactamente en fase con la energía radiante que estimuló la emisión. Los fotones salen del tubo en direcciones irregulares, haciendo que tenga un brillo de color.

e) Los fotones que se mueven en dirección paralela al eje del tubo se reflejan en espejos paralelos con recubrimiento especial en los extremos del tubo. Los fotones reflejados estimulan la emisión de fotones de otros átomos de neón, y con ello producen una avalancha de fotones que tienen las mismas frecuencia, fase y dirección.

f) Los fotones van de ida y vuelta entre los espejos, y se amplifican en cada pasada.

g) Algunos "se salen" de uno de los espejos, que sólo es parcialmente reflector. Son los que forman el rayo láser.



FIGURA 30.19

(Izquierda) Un láser de helio-neón. (Derecha) Los láseres son herramienta común en la mayoría de los laboratorios escolares.



FIGURA 30.20

La identificación distintiva de este libro es el código de barras que aparece en sus forros.

láser son mucho mayores que las de radio o de televisión. Así, la luz láser puede conducir una cantidad enorme de mensajes agrupados en una banda de frecuencias muy estrecha. Se pueden llevar a cabo comunicaciones con un rayo láser a través del espacio, de la atmósfera, o por medio de fibras ópticas que se pueden doblar como los cables.

El láser funciona en las cajas de los supermercados, donde las máquinas lectoras exploran el código universal de producto (UPC), un símbolo impreso en forma de código de barras en los paquetes y en los forros de este libro (figura 30.20). La luz láser es reflejada en los espacios entre las barras y se convierte en una señal eléctrica, a medida que se escanea el símbolo. La señal tiene un valor alto cuando se refleja en una zona de espacio claro o blanco, y tiene un valor bajo cuando se refleja en una barra oscura o negra. La información sobre el grosor y las distancias entre las barras se “digitaliza” (se convierte a los 1 y 0 del código binario) y una computadora la procesa.

Los topógrafos, los ingenieros y los arquitectos usan la luz láser reflejada para medir las distancias. Los científicos ambientales usan láseres para medir y detectar contaminantes en los gases de escape. Los distintos gases absorben luz con longitudes de onda características, y dejan sus “huellas digitales” en un rayo reflejado de luz láser. La longitud de onda específica y la cantidad de luz absorbida se analizan con ayuda de una computadora, y se produce una tabulación inmediata de los contaminantes.

Los láseres enriquecen una tecnología totalmente nueva, cuyos beneficios sólo se han comenzado a aprovechar. Parece ser ilimitado el futuro de las aplicaciones de los láseres.

Resumen de términos

Espectro de absorción Espectro continuo, como el de la luz blanca, interrumpido por líneas o bandas oscuras debidas a la absorción de la luz de ciertas fre-

cuencias, por una sustancia a través de la cual pasa la energía radiante.

Espectro de emisión Distribución de longitudes de onda de la luz producida por una fuente luminosa.

Espectroscopio Instrumento óptico que separa la luz en las longitudes de onda que la forman, en forma de líneas espectrales.

Excitación Proceso de impulsar a uno o más electrones de un átomo o molécula desde un nivel inferior de energía a uno superior. Un átomo en un estado excitado normalmente decaerá (se desexcitará) rápidamente y pasará a un estado inferior emitiendo un fotón. La energía del fotón es proporcional a su frecuencia: $E = hf$.

Fluorescencia Propiedad que tienen ciertas sustancias de absorber la radiación de una frecuencia y reemitir radiación de menor frecuencia. Sucede cuando un átomo pasa a un estado excitado y pierde su energía en dos o más saltos de bajada hacia estados inferiores de energía.

Fosforescencia Una clase de emisión de luz igual que la fluorescencia, a excepción de una demora entre la excitación y la desexcitación, que produce un brillo posterior o residual. La demora se debe a que los átomos se excitan a niveles de energía que no decaen rápidamente. El brillo residual puede durar desde fracciones de segundo hasta horas, o hasta días, dependiendo de la clase de material, su temperatura y otros factores.

Incandescencia Estado de brillar a alta temperatura, causado por los electrones que rebotan distancias mayores que el tamaño de un átomo y emiten energía radiante en ese proceso. La frecuencia de intensidad máxima de la energía radiante es proporcional a la temperatura absoluta de la sustancia que se calienta:

$$\bar{f} \sim T$$

Láser Amplificación de la luz por emisión estimulada de radiación (*light amplification by stimulated emission of radiation*). Instrumento óptico que produce un haz de luz monocromática coherente.

Preguntas de repaso

1. Si se ponen a vibrar los electrones a algunos cientos de miles de hertz se emiten ondas de radio. ¿Qué clase de ondas se emitirían si los electrones se pusieran a vibrar a algunos miles de billones de hertz?
2. ¿Qué quiere decir que un estado de energía sea *discreto*?

Excitación

3. ¿Qué tiene la mayor energía potencial con respecto al núcleo atómico, los electrones en las capas electrónicas interiores, o los de las capas exteriores?
4. ¿Qué quiere decir que un átomo está *excitado*?
5. ¿Qué nombre se le da a un solo pulso de radiación electromagnética?
6. ¿Cuál es la relación entre la *diferencia de energía* de niveles de energía y la *energía del fotón* que se emite por una transición entre esos niveles?

7. ¿Cómo se relaciona la *energía* de un fotón con su frecuencia de vibración?
8. ¿Cuál tiene la mayor *frecuencia*, la luz roja o la luz azul? ¿Cuál tiene mayor *energía* por fotón, la luz roja o la luz azul?
9. Un electrón pierde algo de su energía cinética cuando bombardea a un átomo de neón en un tubo de vidrio. ¿En qué se transforma esa energía?
10. ¿Un átomo de neón puede excitarse más de una vez en un tubo de vidrio?
11. ¿Qué representa la variedad de colores de la llama de un trozo de madera en llamas?
12. ¿Qué convierte mayor porcentaje de su energía en calor, una lámpara incandescente o una lámpara de vapor de mercurio?

Espectros de emisión

13. ¿Qué es lo que tiene cada elemento que lo hace emitir luz con sus propios colores característicos?
14. ¿Qué es un *espectroscopio* y qué hace?
15. ¿Por qué los colores de la luz en un espectroscopio aparecen como líneas?

Incandescencia

16. ¿Cuál es el “color” de todas las frecuencias de la luz visible mezcladas por igual?
17. Cuando un gas brilla, emite colores discretos. Cuando un sólido brilla, los colores se mezclan. ¿Por qué?
18. ¿Cómo se relaciona la frecuencia de intensidad máxima con la temperatura de una fuente incandescente?

Espectros de absorción

19. ¿En qué difiere la apariencia de un espectro de absorción de la de un espectro de emisión?
20. ¿Qué son las líneas de Fraunhofer?
21. ¿Cómo se descubrió el helio?
22. ¿Cómo pueden afirmar los astrofísicos que una estrella se aleja de la Tierra o se acerca a ella?

Fluorescencia

23. Menciona tres formas en que se pueden excitar los átomos.
24. ¿Por qué es más eficaz la luz ultravioleta que la infrarroja para hacer que flúorezcan ciertos materiales?

Lámparas fluorescentes

25. Explica la diferencia entre los procesos de excitación primaria y secundaria que se realizan en una lámpara fluorescente.
26. ¿Qué es lo que permite a una lámpara fluorescente emitir luz blanca?

Fosforescencia

27. Explica la diferencia entre *fluorescencia* y *fosforescencia*.
28. ¿Qué es lo que causa el brillo residual de los materiales fosforescentes?
29. ¿Qué es un *estado metaestable*?

Láseres

30. Explica la diferencia entre *luz monocromática* y *luz coherente*.
31. ¿En qué difiere la avalancha de fotones en un rayo láser de las hordas de fotones emitidas por una lámpara incandescente?
32. Un amigo dice que los científicos de cierto país han desarrollado un láser que produce mucho más energía que la que se le suministra. Tu amigo pide opiniones al respecto. ¿Qué le contestarías?

Proyectos

1. Escribe una carta a tu abuelita donde le expliques cómo las lámparas, las llamas y los láseres emiten luz. Cuéntale porque los colorantes y las pinturas fluorescentes son tan impresionantemente vívidos cuando se iluminan con una lámpara de luz ultravioleta. Además, háblale sobre las diferencias y similitudes entre la fluorescencia y la fosforescencia.
2. Pide al profesor que te preste una rejilla de difracción. Las que abundan más se ven como una transparencia fotográfica, y la luz que las atraviesa o que se refleja en ellas se difracta en sus colores componentes, mediante miles de líneas finamente grabadas. Mira a través de la rejilla, hacia la luz de una lámpara de alumbrado de vapor de sodio. Si es una de baja presión, verás la bella “línea” espectral amarilla que predomina en la luz de sodio (en realidad, son dos líneas muy juntas). Si la lámpara del alumbrado es redonda, verás círculos en vez de líneas; ahora que si lo ves a través de una rendija cortada en un cartoncillo, verás las líneas. Es más interesante lo que sucede con las lámparas de vapor de sodio que ahora su uso es más frecuente: las de alta presión. A causa de los choques de los átomos excitados, verás un espectro borroso que casi es continuo, casi como el de una lámpara incandescente. En el lugar del amarillo donde cabría esperar la línea del sodio, está una zona oscura. Es la banda de absorción del sodio. Se debe al sodio más frío que rodea la región de emisión, que tiene alta presión. Deberás verla como a una cuadro de distancia para que la línea, o círculo, sea lo suficientemente pequeña como para que permita mantener la resolución. Haz la prueba. ¡Es muy fácil!

Ejercicios

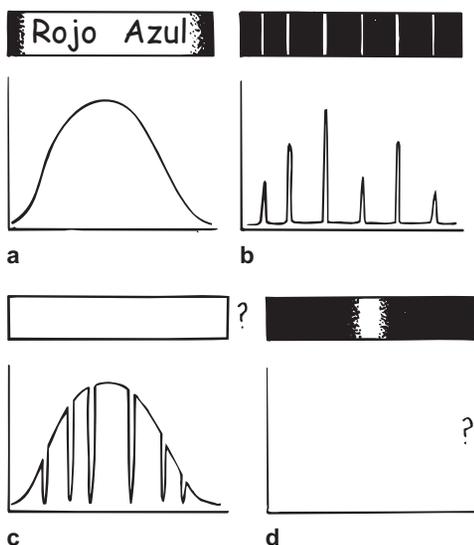
1. ¿Por qué un fotón de rayos gamma tiene más energía que uno de rayos X?
2. ¿Alguna vez has presenciado un incendio y notado que con frecuencia al quemarse los distintos materiales, se producen llamas de diferentes colores? ¿Por qué sucede eso?
3. Cuando los electrones de una sustancia hacen una transición determinada de niveles de energía, se emite luz verde. Si la misma sustancia emitiera luz

azul, ¿correspondería a un cambio de energía mayor o menor en el átomo?

4. La luz ultravioleta causa quemaduras, mientras que la luz visible, aunque sea de mayor intensidad, no las causa. ¿Por qué?
5. Si sube al doble la frecuencia de la luz, sube al doble la energía de cada uno de sus fotones. Si sube al doble la longitud de onda de la luz, ¿qué pasa con la energía del fotón?
6. ¿Por qué si a un letrero de neón no se le “agotan” los átomos excitados produce luz cada vez de menor intensidad?
7. Un investigador quiere obtener líneas espectrales que sean cada vez más delgadas. ¿Con qué cambio en el espectroscopio logrará su objetivo?
8. Si se pasara la luz por un agujero redondo en vez de por una rendija delgada en un espectroscopio, ¿cómo aparecerían las “líneas” espectrales? ¿Cuál es el inconveniente de un agujero en comparación con una rendija?
9. Si se usa un prisma o una rejilla de difracción para comparar la luz roja de un tubo de neón ordinario y la luz roja de un láser de helio y neón, ¿qué diferencia notable se aprecia?
10. ¿Cuál es la evidencia de la afirmación de que existe hierro en la relativamente fría capa exterior del Sol?
11. ¿Cómo se podrían distinguir las líneas de Fraunhofer del espectro de la luz solar, debidas a absorción en la atmósfera solar, de las líneas debidas a la absorción por gases en la atmósfera terrestre?
12. ¿De qué forma especifica la luz que llega de galaxias y estrellas distantes le dice a los astrónomos que los átomos del Universo tienen las mismas propiedades de los que hay en la Tierra?
13. ¿Qué diferencia aprecia un astrónomo entre el espectro de emisión de un elemento en una estrella que se aleja, y el espectro del mismo elemento en el laboratorio? (*Sugerencia:* esto se relaciona con información del capítulo 19.)
14. Una estrella caliente azul tiene más o menos el doble de temperatura que una estrella roja fría. Pero las temperaturas de los gases en los letreros luminosos son más o menos las mismas, ya sea que emitan luz roja o luz azul. ¿Cómo lo explicas?
15. ¿Qué tiene mayor energía, un fotón de luz infrarroja, de luz visible o de luz ultravioleta?
16. ¿Se presenta excitación atómica en los sólidos, igual que en los gases? ¿En qué difiere la energía radiante de un sólido incandescente de la energía radiante emitida por un gas excitado?
17. Las lámparas de vapor de sodio a baja presión emiten espectros de línea con longitudes de onda bien definidas, pero las lámparas de vapor de sodio de baja presión emiten luz cuyas líneas están más dispersas. Relaciona esto con el espectro continuo de las longitudes de onda emitidas por los sólidos.
18. El filamento de una lámpara es de tungsteno. ¿Por qué se obtiene un espectro continuo en vez de un

espectro de las líneas de tungsteno, cuando se pasa la luz de una lámpara incandescente por un espectroscopio?

19. ¿Cómo puede tener tantas líneas el espectro del hidrógeno, si sólo tiene un electrón?
20. Si un gas absorbente reemite la luz que absorbe, ¿por qué hay líneas oscuras en un espectro de absorción? Esto es, ¿por qué no la luz reemitida simplemente llena los lugares oscuros?
21. Si los átomos de una sustancia absorben luz ultravioleta y emiten luz roja, ¿qué sucede con la energía “que falta”?
22. a) Se hace pasar la luz de una fuente incandescente por vapor de sodio, y luego se examina con un espectroscopio. ¿Cuál es la apariencia del espectro?
b) Se apaga la fuente incandescente y se calienta el sodio hasta que resplandece. ¿Cómo se compara el espectro del vapor de sodio con el espectro que se observó antes?
23. Tu amigo dice que si la luz ultravioleta puede activar el proceso de *fluorescencia*, también debería poder activarlo la luz infrarroja. ¿Qué le responderías? ¿Por qué?
24. Cuando cae la luz ultravioleta sobre ciertos colorantes, se emite luz visible. ¿Por qué no sucede esto cuando la luz infrarroja ilumina esos colorantes?
25. ¿Por qué las telas que fluorescen al exponerlas a la luz ultravioleta son tan blancas a la luz solar?
26. ¿Por qué distintos minerales fluorescentes emiten distintos colores cuando se iluminan con luz ultravioleta?
27. ¿En qué se parece el hecho de abrir empujando una puerta de resorte al proceso de la fosforescencia?
28. Cuando cierto material se ilumina con luz visible, los electrones saltan de estados de energía más bajos a más altos en los átomos del material. Cuando los ilumina la luz ultravioleta, los átomos se ionizan, y algunos de ellos expulsan electrones. ¿Por qué las dos clases de iluminación producen resultados tan diferentes?
29. El precursor del láser manejaba microondas, en vez de luz visible. ¿Qué querrá decir *máser*?
30. El primer láser estaba formado por una barra de rubí (rojo) activada por una lámpara de destello (un *flash*) que emite luz verde. ¿Por qué no funcionaría un láser formado por una barra de cristal verde y una lámpara de destello que emite luz roja?
31. Un láser de laboratorio tiene una potencia de sólo 0.8 mW (8×10^{-4} W). ¿Por qué esto parece más potente que la luz de una bombilla de 100 W?
32. ¿En qué difieren las avalanchas de fotones de un rayo láser de las hordas de fotones emitidas por una lámpara incandescente?
33. En el funcionamiento de un láser de helio-neón, ¿por qué es importante que el estado metaestable del helio tenga una vida relativamente larga? (¿Cuál sería el efecto de que este estado se desexcitara muy rápidamente?) (Consulta la figura 30.18.)
34. En el funcionamiento de un láser de helio-neón, ¿por qué es importante que el estado metaestable del átomo de helio coincida mucho con el nivel de energía de un estado metaestable del neón, más difícil de obtener?
35. Un amigo dice que los científicos de cierto país han desarrollado un láser que produce mucho más energía que la que se le suministra. Tu amigo pregunta lo que piensas sobre esta especulación. ¿Qué le contestarías?
36. Un láser no puede dar más energía de la que se le suministre. Sin embargo, un rayo láser puede producir pulsos de luz con más potencia que la potencia que se requiere para hacerlo funcionar. Explica por qué.
37. En la ecuación $\bar{f} \sim T$, ¿qué son \bar{f} y T ?
38. Sabemos que un filamento de lámpara a 2,500 K irradia luz blanca. ¿También irradia energía cuando está a la temperatura ambiente?
39. Sabemos que el Sol irradia energía. ¿Irradia energía también la Tierra? En caso afirmativo, ¿cuál es la diferencia entre esas radiaciones?
40. Como todo objeto tiene cierta temperatura, cualquier objeto irradia energía. Entonces, ¿por qué no podemos ver los objetos en la oscuridad?
41. Si continuamos calentando un trozo de metal, inicialmente a temperatura ambiente, en un cuarto oscuro, comenzará a resplandecer visiblemente. ¿Cuál será su primer color visible, y por qué?
42. Podemos calentar un trozo de metal al rojo vivo y al blanco vivo. ¿Lo podremos calentar hasta el azul vivo?
43. ¿Cómo se comparan las temperaturas superficiales de las estrellas rojas, azules y blancas?
44. Si ves una estrella roja, podrás asegurar que su intensidad máxima está en la región del infrarrojo. ¿Por qué? Y si ves una estrella “violeta”, puedes estar seguro de que su intensidad máxima está en el ultravioleta. ¿Por qué?
45. Las estrellas “verdes” no se ven verdes, sino blancas. ¿Por qué? (*Sugerencia:* examina la curva de radiación de la figura 27.7.)
46. El inciso *a*) del siguiente esquema muestra una curva de radiación de un sólido incandescente y su espectro, obtenido con un espectroscopio. El inciso *b*) muestra la “curva de radiación” de un gas excitado y su espectro. El inciso *c*) muestra la curva producida cuando se intercala un gas frío entre una fuente incandescente y el espectroscopio; queda pendiente el espectro para que lo traces tú. El inciso *d*) muestra el espectro de una fuente incandescente, vista a través de un vidrio verde; debes trazar la curva de radiación correspondiente.



47. Examina sólo cuatro de los niveles de energía de cierto átomo, que se ven en el diagrama adjunto. ¿Cuántas líneas espectrales producirán todas las transiciones posibles entre esos niveles? ¿Cuál transición corresponde a la máxima frecuencia de la luz emitida? ¿Y cuál a la mínima frecuencia?

n = 4 _____
 n = 3 _____
 n = 2 _____

n = 1 _____

48. Un electrón se desexcita desde el cuarto nivel cuántico del diagrama de arriba, al tercero y después directamente al estado fundamental. Se emiten dos fotones. ¿Cómo se compara la suma de sus frecuencias con la frecuencia de un solo fotón, que se emita por desexcitación desde el cuarto nivel directamente hasta el estado fundamental?
49. Para las transiciones descritas en el ejercicio anterior, ¿hay alguna relación entre las longitudes de onda de los fotones emitidos?
50. Imagina que los cuatro niveles de energía del ejercicio 47 estuvieran a las mismas distancias. ¿Cuántas líneas espectrales se obtendrían?

Problema

En el diagrama, la diferencia de energía entre los estados A y B es el doble de la diferencia entre los estados B y C. En una transición (salto cuántico) de C a B, un electrón emite un fotón de 600 nm de longitud de onda. a) ¿Cuál será la longitud de la onda que se emite cuando el electrón salta de B a A? b) ¿Y cuando salta de C a A?

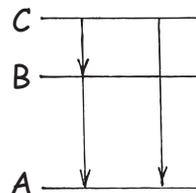


FIGURA 26.2

Figura interactiva 

Los campos eléctrico y magnético de una onda electromagnética son perpendiculares entre sí y a la dirección del movimiento de la onda.

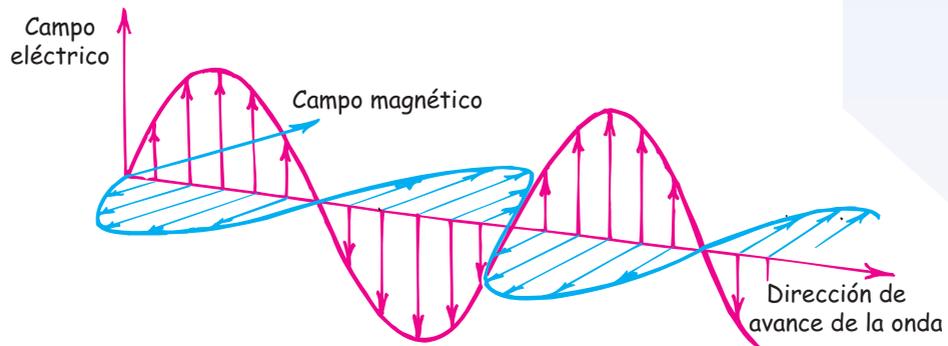


FIGURA 26.4

Figura interactiva

Longitudes de onda relativas de la luz roja, verde y violeta. La luz violeta tiene casi el doble de frecuencia que la luz roja, y la mitad de su longitud de onda.

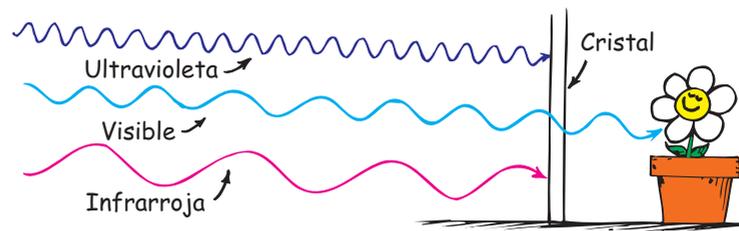
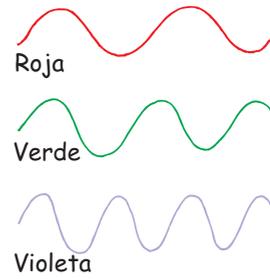


FIGURA 26.8

El vidrio bloquea tanto la luz infrarroja como la ultravioleta, pero es transparente a la luz visible.



El autor del manual de laboratorio Paul Robinson produce una diversidad de colores cuando lo iluminan una lámpara roja, una verde y una azul.



a



b



c

FIGURA 27.3

a) La bola roja vista bajo luz blanca. El color rojo se debe a que la bola refleja sólo la parte roja de la luz que la ilumina. El resto de la luz es absorbida por la superficie. b) La bola roja vista bajo luz roja. c) La bola roja vista bajo luz verde. La bola aparece negra porque la superficie absorbe la luz verde: no hay fuente de luz roja para reflejarla.



FIGURA 27.4

La mayoría de la piel del conejo refleja la luz de todas las frecuencias y aparece como blanca a la luz solar. Lo negro de la piel del conejo absorbe toda la energía radiante de la luz solar que le llega y por ende es negra.

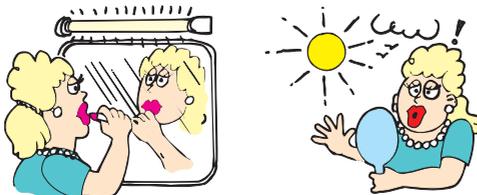


FIGURA 27.5

El color depende de la fuente luminosa.

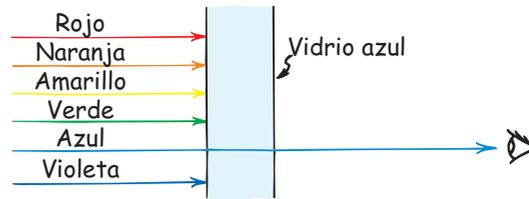


FIGURA 27.6

Sólo la energía con la frecuencia de la luz azul es la que se transmite. La energía de las demás frecuencias es absorbida, y calienta al vidrio.

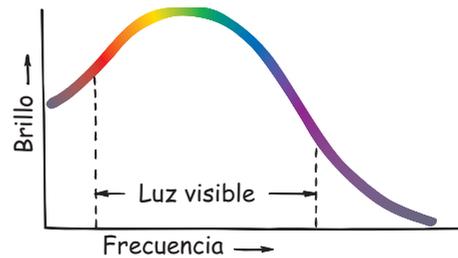


FIGURA 27.7

La curva de radiación de la luz solar es una gráfica del brillo en función de la frecuencia. La luz solar es más brillante en la región del amarilla-verde, a la mitad del intervalo visible.

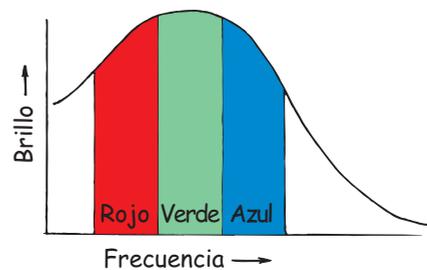


FIGURA 27.8

Curva de radiación de la luz solar dividida en tres regiones: roja, verde y azul. Se trata de los colores primarios aditivos.

FIGURA 27.9

Figura interactiva

Adición de colores, mezclando luces de color. Cuando los tres proyectores iluminan una pantalla blanca con luces roja, verde y azul, las partes superpuestas producen distintos colores. El blanco se produce donde se traslapan las tres luces.

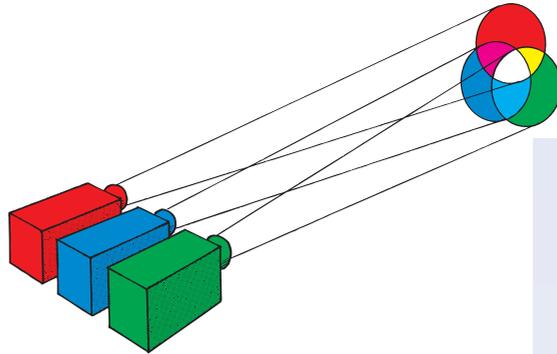


FIGURA 27.10

Figura interactiva

La pelota de golf blanca parece blanca cuando la iluminan luces roja, verde y azul de igual intensidad. ¿Por qué las sombras de esa pelota son cian, magenta y amarilla?



a



b



c



d



e



f

FIGURA 27.11

Sólo se usan tintas de cuatro colores para imprimir las imágenes y las fotografías en color: a) magenta, b) amarillo, c) cian y negro. Cuando se combinan magenta, amarillo y cian, producen lo que se ve en d). Al agregar el negro e) se produce la imagen terminada, f).

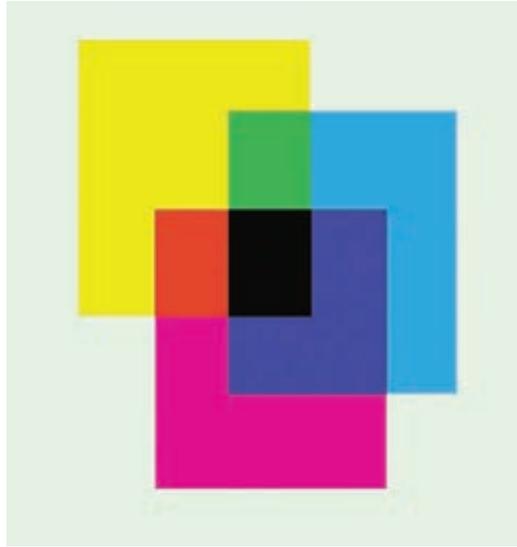


FIGURA 27.12

Los colorantes y los pigmentos, como en las tres transparencias que se ven aquí, absorben y sustraen con eficacia la luz de algunas frecuencias y sólo transmiten parte del espectro. Los colores primarios sustractivos son amarillo, magenta y cian. Cuando la luz blanca pasa por tres filtros de esos colores, se bloquea (se sustrae) la luz de todas las frecuencias y se produce el negro. Donde sólo se traslapan el amarillo y el cian, se resta la luz de todas las frecuencias, excepto la verde. Diversas proporciones de amarillo, cian y magenta producen casi cualquier color del espectro.

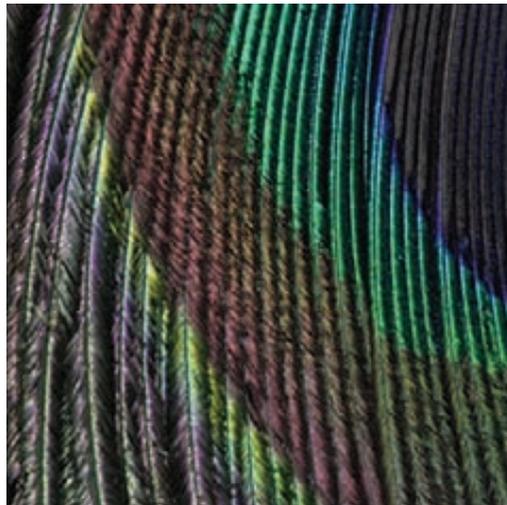


FIGURA 27.13

Los ricos colores de un periquito representan muchas frecuencias de la luz. Sin embargo, la fotografía sólo es una mezcla de amarillo, magenta, cian y negro.

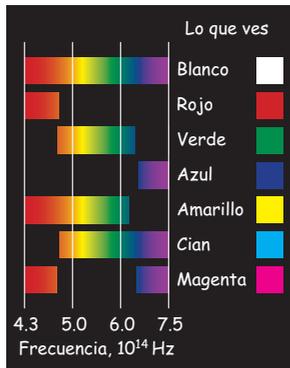


FIGURA 27.14

Intervalos aproximados de frecuencias que percibimos como colores primarios aditivos, y colores primarios sustractivos.

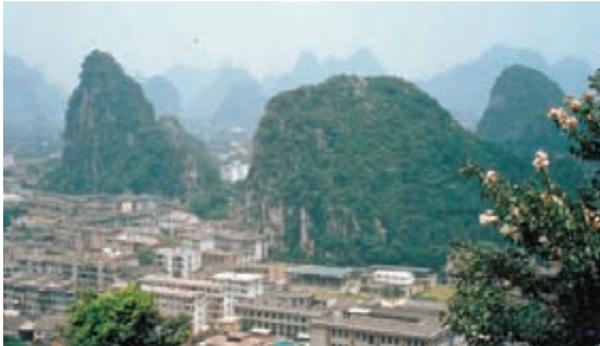


FIGURA 27.16

Cuando el aire está limpio, la dispersión de la luz de alta frecuencia produce un cielo azul. Cuando el aire está lleno de partículas de mayor tamaño que las moléculas, también se dispersa la luz de menor frecuencia, que se suma a la azul y produce un cielo blanquecino.



FIGURA 27.17

En las plumas de un azulejo no hay pigmentos azules. En lugar de ello hay diminutas células alveolares en las barbas de esas plumas, que dispersan la luz, principalmente la luz de alta frecuencia. Así, un azulejo es azul por la misma razón por la que el cielo es azul: por la dispersión.



FIGURA 27.19

Una nube está formada por gotitas de agua de distintos tamaños. Las más diminutas dispersan la luz azul; un poco más grandes dispersan la luz verde y otras todavía más grandes dispersan la luz roja. El resultado es una nube blanca.



FIGURA 27.20

El agua es cian porque absorbe la luz roja. La espuma de las olas es blanca porque, como las nubes, está formada por gotitas de agua de distintos tamaños que dispersan luz de todas las frecuencias visibles.

FIGURA 27.21

El azul extraordinario del lago de las Montañas Rocosas canadienses se debe a la dispersión de partículas extremadamente diminutas de rendijas glaciales suspendidas en el agua.





FIGURA 28.8

La imagen de Marjorie está a la misma distancia detrás del espejo que la distancia de ella al espejo. Observa que ella y la imagen tienen el mismo color de ropa, es la prueba de que la luz no cambia de frecuencia al reflejarse. Es interesante el hecho de que el eje izquierda-derecha no se invierte ni tampoco el eje arriba-abajo. El eje que *se invierte*, como se ve a la derecha es el de frente-atrás. Es la causa de que vea que la mano izquierda esté frente a la mano derecha de la imagen.

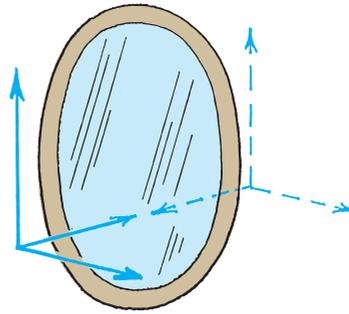


FIGURA 28.12

Vista muy aumentada de la superficie de un papel ordinario.

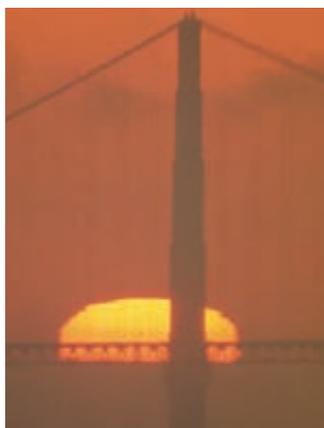


FIGURA 28.20

La forma del Sol se distorsiona debido a la refracción diferencial.

FIGURA 28.22

Un espejismo. Los aparentes charcos en la carretera no son reflexión del cielo en el agua, sino más bien refracción de la luz procedente del cielo a través del aire más caliente y menos denso cercano a la superficie del pavimento.



FIGURA 28.29

La dispersión mediante un prisma hace visible los componentes de la luz blanca.

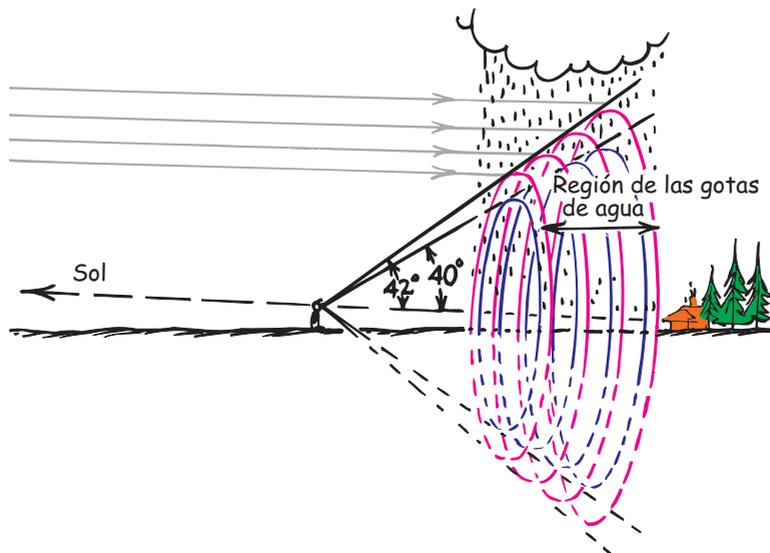
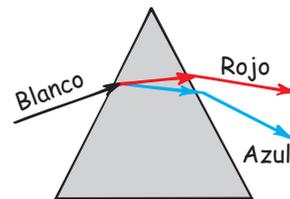


FIGURA 28.32

Cuando el ojo está entre el Sol (no se ve; está fuera hacia la izquierda) y una región con gotas de agua, el arcoiris que ves es el borde de un cono tridimensional que se extiende por la región de las gotas de agua. (Innumerables capas de gotas de agua forman innumerables arcos bidimensionales, como los cuatro que se indican aquí.)



FIGURA 28.34

Dos refracciones y una reflexión en las gotitas de agua producen luz en todos los ángulos, hasta unos 42° , con la intensidad concentrada donde vemos el arcoiris entre 40° y 42° . No sale luz de una gotita de agua en ángulos mayores que 42° , a menos que sufra dos o más reflexiones dentro de la gota. Entonces, el cielo brilla más dentro del arcoiris que fuera de él. Observa el tenue arcoiris secundario a la derecha del primario.

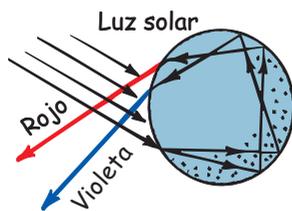


FIGURA 28.35

La doble reflexión en una gota produce un arcoiris secundario.

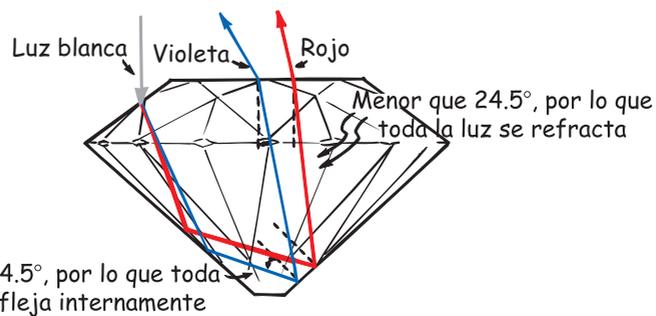


FIGURA 28.40

Trayectorias de la luz en un diamante. Los rayos que llegan a la superficie interna con ángulos mayores que el ángulo crítico se reflejan internamente y salen por refracción en la superficie superior.

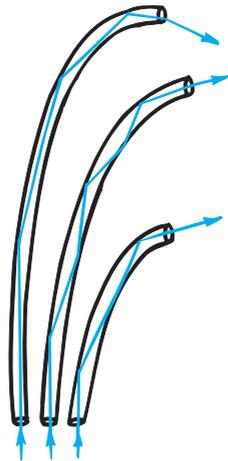


FIGURA 28.41

La luz “va por un tubo” desde abajo, en una sucesión de reflexiones internas totales, hasta que sale por los extremos superiores.

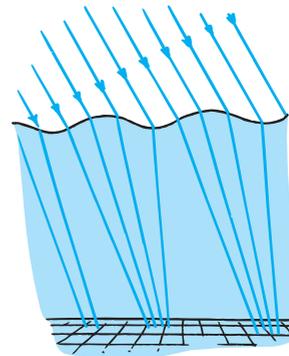


FIGURA 28.45

Las figuras móviles de zonas claras y oscuras en el fondo del estanque son el resultado de la superficie dispareja del agua, que se comporta como una cubierta de lentes ondulantes. De igual modo que vemos el fondo de la alberca variando de brillo, un pez que viera hacia arriba, hacia el Sol, también vería que cambia el brillo. Como en la atmósfera hay irregularidades análogas, vemos que las estrellas centellean.



FIGURA 29.14
Interferencia de las ondas en el agua.



FIGURA 29.27
El autor de física Bob Greenler muestra los colores de interferencia con *grandes* burbujas. ¿Por qué los colores de las burbujas son primarios sustractivos?



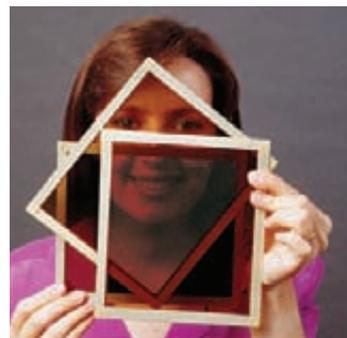
FIGURA 29.33
Los anteojos Polaroid para sol bloquean la luz con vibración horizontal. Cuando se enciman los lentes en ángulo recto, no pasa la luz por ellos.



a



b



c

FIGURA 29.35

Figura interactiva

La luz se transmite cuando los ejes de los filtros polarizadores están alineados *a*), pero se absorbe cuando Ludmila gira uno para que los ejes queden perpendiculares entre sí *b*). Cuando introduce un tercer filtro polarizado oblicuo entre los dos anteriores, que están cruzados, de nuevo se transmite la luz *c*). ¿Por qué? (Para obtener la respuesta, después de meditar el problema, consulta el apéndice D, “Más sobre vectores”.)

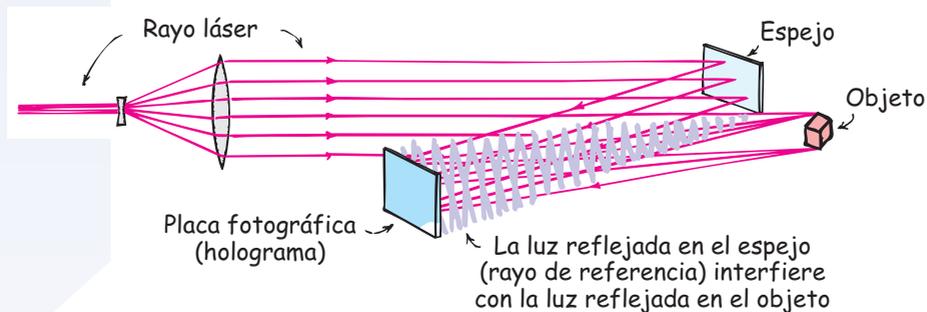


FIGURA 29.42

Esquema simplificado de la producción de un holograma. La luz láser que expone la placa fotográfica consiste en dos partes: el rayo de referencia reflejado en el espejo, y la luz reflejada en el objeto. Los frentes de onda de esas dos partes se interfieren y producen bandas microscópicas en la placa fotográfica. Entonces, la placa expuesta y revelada es un holograma.

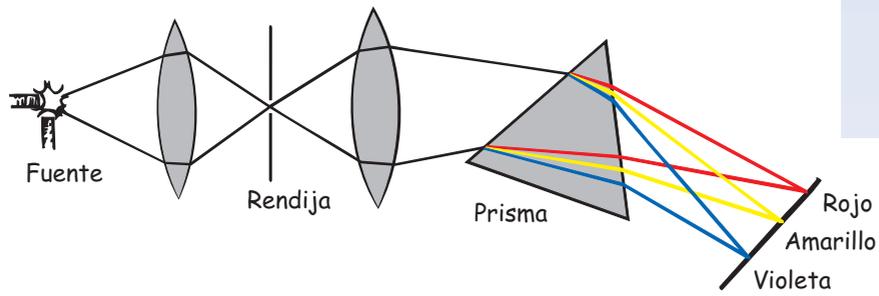


FIGURA 30.4

Espectroscopio sencillo. Las imágenes de la rendija iluminada se proyectan en una pantalla y forman un patrón de líneas. La distribución espectral es característica de la luz que ilumina la rendija.

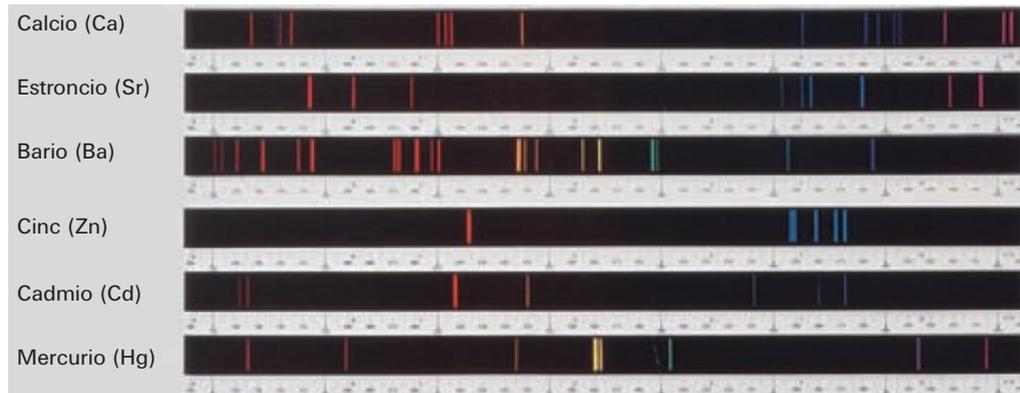


FIGURA 30.5

[Figura interactiva](#)

Patrones de espectros de algunos elementos.

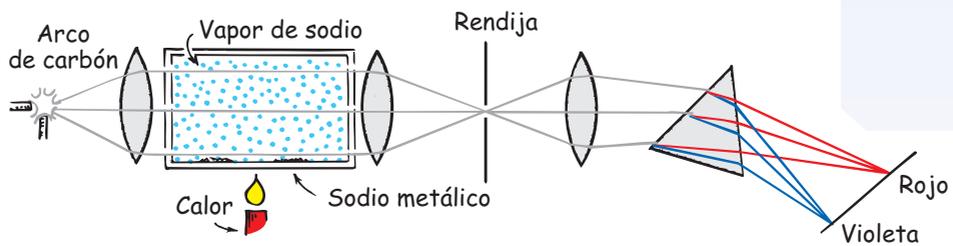


FIGURA 30.8

[Figura interactiva](#)

Arreglo experimental para demostrar el espectro de absorción de un gas.

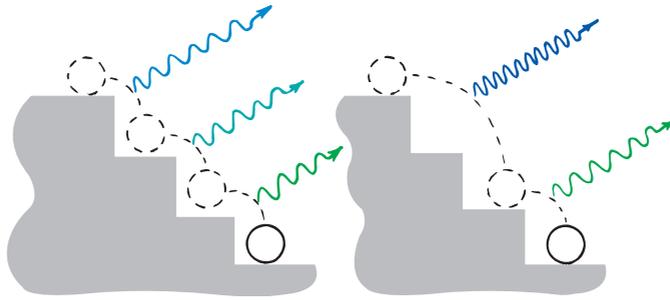


FIGURA 30.11

Un átomo excitado se puede desexcitar en varias combinaciones de saltos.



FIGURA 30.12

Crayones fluorescentes en varios colores bajo luz ultravioleta.

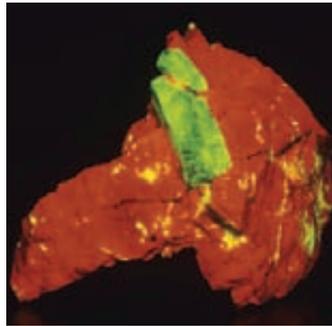


FIGURA 30.13

La roca contiene los minerales fluorescentes calcita y willemite, los cuales, bajo la luz ultravioleta, son claramente visibles como rojo y verde, respectivamente.



FIGURA 30.15

La luz blanca incoherente contiene ondas de muchas frecuencias (y longitudes de onda) que están desfasadas entre sí.