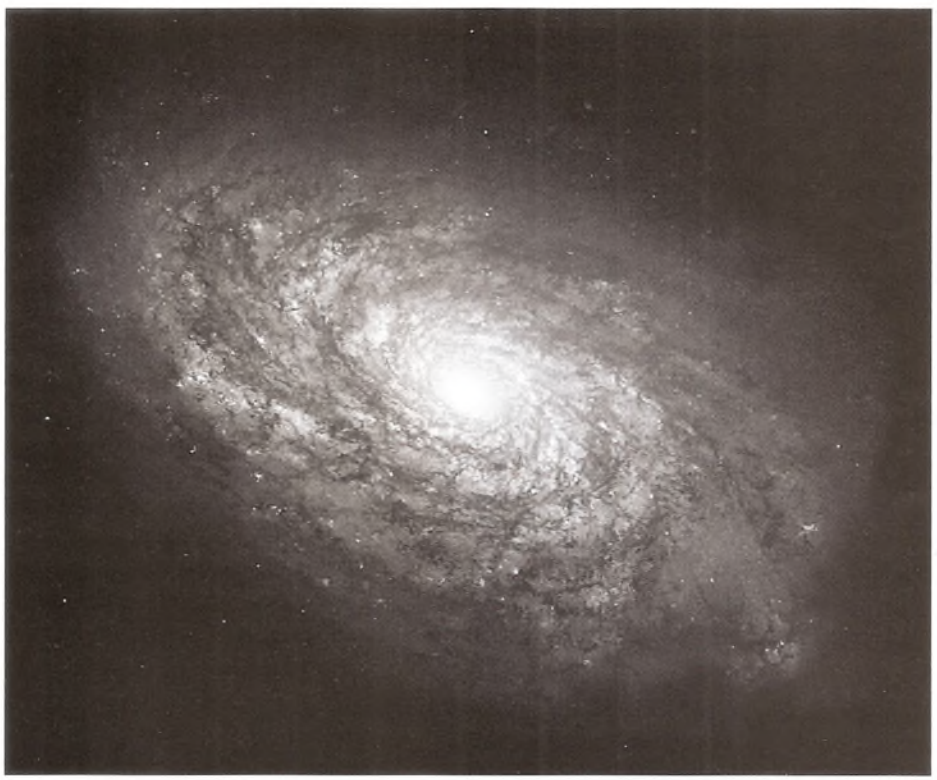
33 Luz e iluminación



El telescopio del Hubble capturó esta lista de la galaxia espiral, NGC 4414. Con base en mediciones meticulosas y precisas de la luminosidad, los astrónomos pudieron determinar que la luz proveniente de esta galaxia requirió más de 60 000 000 de años para llegar a la Tierra. En este capítulo estudiaremos la luz como la región visible en un espectro de ondas electromagnéticas. (*Fotografía por Hubble Heritage Team [AURA/STS CI/NASA].*)

Objetivos

Cuando termine de estudiar este capítulo el alumno:

1. Analizará la investigación histórica acerca de la naturaleza de la luz y explicará por qué la luz a veces se comporta como onda y otras veces como partícula.
2. Describirá las grandes clasificaciones en el espectro electromagnético que se basan en la frecuencia, la longitud de onda o la energía.
3. Escribirá y aplicará fórmulas para mostrar la relación entre la velocidad, la longitud de onda y la frecuencia; y entre la energía y la frecuencia en el caso de la radiación electromagnética.
4. Describirá diversos experimentos que permiten hacer una estimación razonable de la rapidez de la luz.
5. Ilustrará con dibujos su comprensión de la formación de sombras, diferenciando *umbra* (sombra) y *penumbra*.
6. Demostrará que comprende los conceptos de *flujo luminoso*, *intensidad luminosa* e *iluminación*, y resolverá problemas similares a los que aparecen en este texto.

Una barra de hierro en reposo sobre una mesa se encuentra en equilibrio térmico con todo lo que está a su alrededor. Por su apariencia externa uno jamás sospecharía que internamente está activa. Todos los objetos emiten continuamente energía térmica radiante que está relacionada con su temperatura. La barra está en equilibrio térmico tan sólo porque irradia y absorbe energía con la misma proporción. Si se rompe el equilibrio al poner un extremo de la barra en contacto con una llama, la barra se vuelve más activa en su interior y emite energía térmica con mayor rapidez. Mientras el calentamiento continúa hasta alcanzar más o menos 600°C, parte de la radiación emitida desde la barra se torna *visible*; lo cual significa que afecta nuestro sentido de la vista. El color de la barra se torna rojo claro y se va volviendo más brillante a medida que se le suministra más calor.

La energía radiante emitida por este objeto, antes que dicho efecto se haga visible, consiste en ***ondas electromagnéticas*** de longitudes de onda mayores que la correspondiente a la luz roja. Las ondas de ese tipo se conocen como ***rayos infrarrojos***, lo que significa "por debajo del rojo". Si la temperatura de la barra se incrementa hasta aproximadamente 1500°C, se pone al rojo blanco, lo que indica una extensión aún más amplia de la energía radiante en la ***región visible***.

Este ejemplo establece las bases para nuestro estudio sobre la ***luz***. La naturaleza de la luz no es fundamentalmente distinta de la naturaleza u otros tipos de radiaciones electromagnéticas, por ejemplo, el calor, las ondas de radio o la radiación ultravioleta. La característica que distingue a la luz de otras radiaciones es su energía.

La luz es radiación electromagnética capaz de afectar el sentido de la vista.

El contenido de energía de la luz visible varía de aproximadamente 2.8×10^{-19} J a casi 5.0×10^{-19} J.

33.1 ¿Qué es la luz?

La respuesta a esta pregunta ha sido en extremo huidiza a través de la historia de la ciencia. La larga búsqueda para encontrar tal respuesta es un ejemplo que nos sirve de modelo con el fin de ilustrar el procedimiento científico aplicable en la resolución de un problema. Cada una de las hipótesis que surgieron con miras a explicar la naturaleza de la luz se puso a prueba, tanto lógica como experimentalmente. La afirmación de los filósofos de la antigüedad acerca de que el ojo emitía los rayos visuales hasta llegar al objeto percibido fracasó desde el punto de vista lógico y también en el plano experimental.

A fines del siglo XVII se propusieron dos teorías para explicar la naturaleza de la luz: la teoría de partículas (corpuscular) y la teoría ondulatoria. El principal defensor de la teoría corpuscular fue sir Isaac Newton. La teoría ondulatoria era apoyada por Christian Huygens (1629-1695), un matemático y científico holandés 13 años mayor que Newton. Cada una de esas teorías intentaba explicar las características de la luz observadas en esa época. Tres de estas importantes características se resumen a continuación:

1. *Propagación rectilínea:* La luz viaja en línea recta.
2. *Reflexión:* Cuando la luz incide en una superficie lisa, regresa a su medio original.
3. *Refracción:* La trayectoria de la luz cambia cuando penetra a un medio transparente.

De acuerdo con la teoría corpuscular, las partículas muy pequeñas, de masa insignificante, eran emitidas por fuentes luminosas tales como el Sol o una llama. Estas partículas viajaban hacia fuera de la fuente en líneas rectas con enorme rapidez. Cuando las partículas entraban al ojo, se estimulaba el sentido de la vista. La propagación rectilínea se explicaba fácilmente en términos de partículas. En realidad, uno de los más fuertes argumentos en favor de la teoría corpuscular se basó en esta propiedad. Se pensaba que las partículas producían sombras con contornos bien definidos como se muestra en la figura 33.1a, mientras que las ondas pueden flexionarse alrededor de los bordes. Dicha flexión de las ondas, como muestra la figura 33.1b, se llama ***difracción***.

Las sombras nítidas que se forman bajo los rayos luminosos hicieron pensar a Newton que la luz se debía componer de partículas. Huygens, por otra parte, explicó que la flexión de las ondas acuáticas y las ondas sonoras alrededor de los obstáculos se apreciaba fácilmente debido a sus grandes longitudes de onda. Él razonaba que si la luz era en realidad una serie de ondas

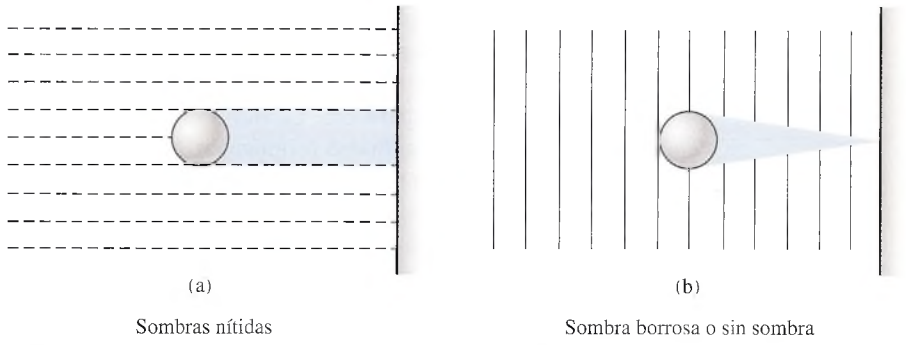


Figura 33.1 Un poderoso argumento en apoyo de la teoría corpuscular de la materia es la formación de sombras nítidas. Se sabe que las ondas se flexionan cuando encuentran obstáculos en su trayectoria.

con una longitud de onda corta, daría lugar a una sombra bien definida puesto que el grado de flexión sería pequeño.

Era difícil explicar por qué las partículas que viajaban en líneas rectas provenientes de gran número de direcciones podían cruzarse sin estorbarse entre sí. En un trabajo publicado en 1690, Huygens escribió:

> Si, además, prestamos atención y valoramos la extraordinaria rapidez con que la luz se propaga en todas direcciones, tomando en cuenta el hecho de que proviene de direcciones diferentes e incluso opuestas, los rayos se penetran sin obstaculizarse, por lo que podemos entender que siempre que veamos un objeto luminoso, esto no puede deberse a la transmisión de materia que nos llega desde el objeto, como si fuera un proyectil o una flecha volando a través del aire.

Huygens explicó la propagación de la luz en términos del movimiento de una perturbación a través de la distancia entre una fuente y el ojo. Basó su argumento en un principio sencillo que aún es útil en la actualidad para describir la propagación de la luz. Suponga que se deja caer una piedra en un estanque de agua en reposo. Se produce una perturbación que se mueve en una serie de ondas concéntricas, alejándose del lugar del impacto. La perturbación continúa incluso después de que la piedra toca el fondo del estanque. Ese tipo de ejemplo indujo a Huygens a postular que las perturbaciones que se producen en todos los puntos a lo largo de un frente de onda en movimiento en un instante determinado, pueden considerarse como fuentes para el frente de onda en el siguiente instante. El principio de Huygens establece lo siguiente:

> Cada punto de un frente de onda que avanza puede considerarse una fuente de ondas secundarias llamadas ondeletas. La nueva posición del frente de onda envuelve a las ondeletas emitidas desde todos los puntos del frente de onda en su posición previa.

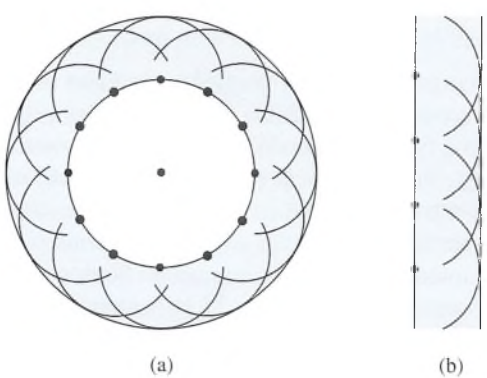


Figura 33.2 El principio de Huygens (a) para una onda esférica y (b) para una onda plana.

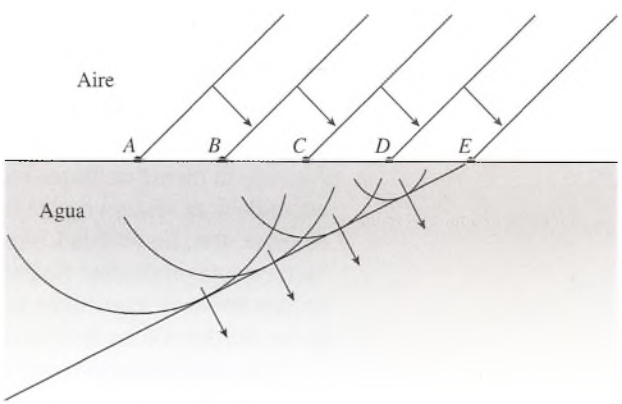


Figura 33.3 Explicación de Huygens acerca de la refracción en términos de la teoría ondulatoria.

La aplicación de este principio se ilustra en la figura 33.2 para los casos frecuentes de una onda plana y de una onda circular.

El principio de Huygens tuvo un particular éxito para explicar la reflexión y la refracción. La figura 33.3 muestra cómo se puede utilizar este principio para explicar la flexión de la luz al pasar del aire al agua. Cuando las ondas planas golpean la superficie del agua con cierto ángulo, los puntos *A*, *C* y *E* se vuelven las fuentes de nuevas ondeletas. La envoltura de estas ondeletas secundarias indica un cambio en la dirección. Se puede elaborar un esquema similar para explicar la reflexión.

La reflexión y la refracción se explicaron fácilmente en términos de la teoría corpuscular. Las figuras 33.4 y 33.5 ilustran los modelos que se pueden usar para explicar la reflexión y la refracción sobre la base de corpúsculos minúsculos. La existencia de partículas perfectamente elásticas de masa insignificante que rebotan de una superficie elástica podrían explicar la reflexión regular de la luz en superficies lisas. La refracción puede ser análoga al cambio de dirección de una pelota que rueda al encontrarse una pendiente. Esta explicación requería que las partículas de luz viajaran más rápido en el medio de refracción, mientras que la teoría ondulatoria necesitaba que la luz viajara más despacio en el medio de refracción. Newton aceptó que si pudiera demostrar que la luz viaja más lentamente en un medio material de lo que tarda en el aire, tendría que abandonar la teoría corpuscular. No fue sino hasta mediados del siglo XIX cuando Jean Foucault demostró en forma convincente que la luz viaja más lentamente en agua que en el aire.

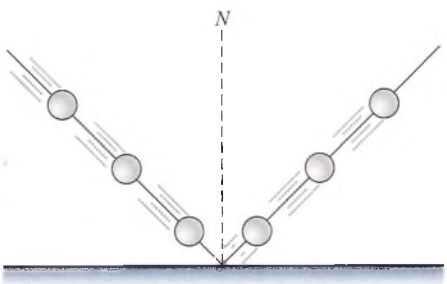


Figura 33.4 Explicación de la reflexión en términos de la teoría corpuscular de la luz.

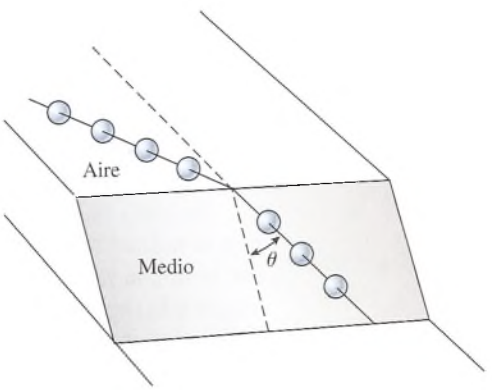


Figura 33.5 La refracción de la luz cuando pasa del aire a otro medio explicada por medio de un ejemplo mecánico.

33.2 Propagación de la luz

El descubrimiento de la interferencia y la difracción en 1801 y en 1816 inclinó el debate en favor de la teoría ondulatoria de Huygens. Sin duda, la interferencia y la difracción se podían explicar únicamente en términos de la teoría ondulatoria. Sin embargo, aún quedaba un problema sin resolver. Se creía que todos los fenómenos ondulatorios requerían de la existencia de un medio de transmisión. Así, por ejemplo, ¿cómo podían viajar las ondas a través del vacío si no había nada más que "vibrara"? Además, ¿cómo podría la luz llegar a la Tierra desde el Sol o desde otras estrellas a través de millones de millas de espacio vacío? Para evitar esta contradicción, los físicos postularon la existencia de un "éter transportador de luz". Se pensó que este medio universal, que lo penetraba todo, llenaba todo el espacio entre y dentro de todos los cuerpos materiales. Pero, ¿cuál era la naturaleza de ese éter? Con seguridad no podía ser un gas, un sólido o un líquido que obedeciera las leyes físicas conocidas en ese tiempo. Sin embargo, no podía desecharse la teoría ondulatoria tomando en cuenta las pruebas de la interferencia y la difracción. No parecía haber opción posible salvo definir el éter como "lo que transporta la luz".

En 1865, un físico escocés, James Clerk Maxwell, emprendió la tarea de determinar las propiedades de un medio que pudiera transportar luz y además tomar parte en la transmisión de calor y energía eléctrica. Su trabajo demostró que *una carga acelerada puede radiar ondas electromagnéticas en el espacio*. Maxwell explicó que la energía en una onda electromagnética

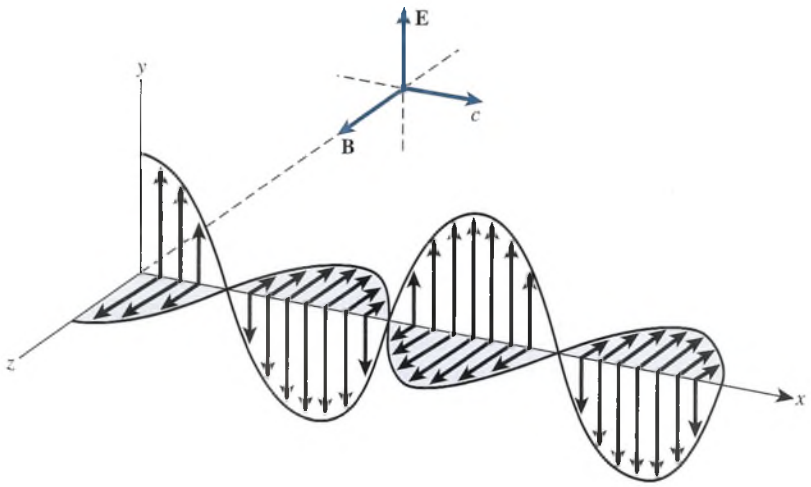


Figura 33.6 La teoría electromagnética sostiene que la luz se propaga como campos transversales oscilatorios. La energía se divide por igual entre los campos eléctrico **E** y magnético **B**, que son perpendiculares entre sí.

se divide por igual entre los campos eléctricos y magnéticos que son perpendiculares entre sí. Ambos campos oscilan en forma perpendicular a la dirección de propagación de la onda, como muestra la figura 33.6. Por tanto, una onda luminosa no tendría que depender de una materia que vibrara. Se propagaría mediante campos oscilatorios transversales. Una onda de ese tipo "surgiría" de los alrededores de una carga acelerada y cruzaría el espacio con la velocidad de la luz. Las ecuaciones de Maxwell predijeron que el calor y la acción eléctrica, al igual que la luz, se propagaban a la rapidez de la luz como perturbaciones electromagnéticas.

En 1885 H.R. Hertz logró confirmar experimentalmente la teoría de Maxwell, al probar que la radiación de la energía electromagnética puede ocurrir *a cualquier frecuencia*. Es decir, la luz, la radiación térmica y las ondas de radio son de la misma naturaleza, y todas ellas viajan a la rapidez de la luz (3×10^8 m/s). Todos los tipos de radiación pueden ser reflejados, enfocados mediante lentes, polarizados, etcétera. Parecía que la naturaleza ondulatoria de la luz no podía ya ser puesta en duda.

La confirmación de la teoría electromagnética despejó el camino para la caída del postulado del "éter transportador de luz". En 1887, A. A. Michelson, un físico estadounidense, demostró en forma contundente que la velocidad de la luz es constante, independientemente del movimiento de la fuente. No pudo encontrar ninguna diferencia entre la rapidez de la luz al viajar en dirección al movimiento de la Tierra y al viajar en dirección opuesta a dicho movimiento. Las personas que estén interesadas en estudiar más a fondo este análisis, deben analizar el *experimento de Michelson-Morley*. Más tarde, Einstein interpretó los resultados de Michelson, lo que significó que el concepto de éter debía ser abandonado en favor de espacio completamente vacío.

Maxwell pudo mostrar que la rapidez de cualquier onda electromagnética se relaciona con la permeabilidad μ y que la permitividad ϵ del medio en el cual viaja. Para el espacio libre, hemos mostrado que estos valores son

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}\ \text{N} \cdot \text{s}^2/\text{C}^2 \qquad \text{y} \qquad \epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12}\ \text{C}^2/\text{N} \cdot \text{m}^2$$

La velocidad de la luz puede determinarse a partir de

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} \tag{33.1}$$

La sustitución de las constantes revela que la velocidad de la luz es

$$c = 2.99792458 \times 10^8\ \text{m/s} \tag{33.2}$$

Como las ondas electromagnéticas viajan a la misma rapidez que la correspondiente a la luz, el tratamiento de la luz como onda electromagnética está sustentado.

Con la redefinición del metro en 1983, el estándar internacional para la medición de la luz se volvió la distancia recorrida por la luz en un tiempo de 1/299 792 458 s medido por

un reloj de cesio. Esta definición estableció la velocidad exacta de la luz como una constante universal igual en el valor dado en la ecuación (33.2). Aproximaciones útiles son 3×10^8 m/s y 186 000 mi/s. Estos valores se pueden utilizar en la mayoría de los cálculos físicos sin temor a cometer un error significativo.

33.3 Espectro electromagnético

FÍSICA HOY

La energía más baja de la luz visible se encuentra en el rojo. Debido a los fotones de energía baja del rojo, es menos probable que ocurran reacciones químicas no deseadas en la película expuesta con rojo que con otros colores. Ésta es la razón por la que la luz roja se usa en los cuartos oscuros fotográficos.

Actualmente, se sabe que el intervalo de frecuencias del espectro electromagnético es enorme. En la figura 33.7 se presenta un esquema de dicho espectro. La longitud de onda λ de la radiación electromagnética está relacionada con su frecuencia f mediante la ecuación general

$$c = f\lambda \tag{33.3}$$

donde c es la velocidad de la luz (3×10^8 m/s). En términos de longitudes de onda, el minúsculo segmento del espectro electromagnético conocido como *región visible* comprende de 0.00004 a 0.00007 cm.

Debido a las pequeñas longitudes de onda de la radiación luminosa, es más conveniente definir unidades de medida menores. Una unidad común es el ***nanómetro*** (nm).

Un nanómetro (1 nm) se define como la milmillonésima parte de un metro.

$$1 \text{ nm} = 10^{-9}\text{m} = 10^{-7} \text{ cm}$$

La región visible del espectro electromagnético se extiende desde 400 nm para la luz violeta hasta aproximadamente 700 nm para la luz roja. Otras unidades antiguas son el *milimicrón* ($m\mu$), que es igual al nanómetro, y el *angstrom* (Å), que es igual a 0.1 nm.

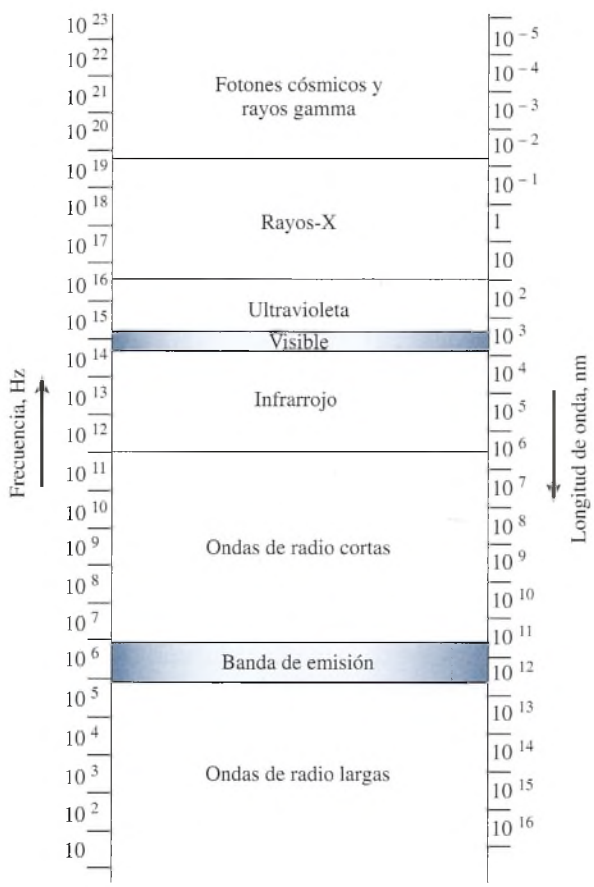


Figura 33.7 Espectro electromagnético.

Ejemplo 33.1 La longitud de onda de la luz amarilla de una llama de sodio es de 589 nm. Calcule su frecuencia.

Solución: La frecuencia se calcula a partir de la ecuación (33.1).

$$f = \frac{c}{\lambda} = \frac{3 \times 10^8 \text{ m/s}}{589 \times 10^{-9} \text{ m}}$$
$$= 5.09 \times 10^{14} \text{ Hz}$$

Newton fue el primero en estudiar detalladamente la región visible dispersando la "luz blanca" a través de un prisma. En orden de longitudes de onda crecientes, los colores del espectro son: violeta (450 nm), azul (480 nm), verde (520 nm), amarillo (580 nm), anaranjado (600 nm) y rojo (640 nm). Quien haya visto un arco iris se ha dado cuenta de los efectos que tienen diferentes longitudes de onda de la luz sobre el ojo humano.

El espectro electromagnético es continuo; no hay separaciones entre una forma de radiación y otra. Los límites establecidos son arbitrarios y dependen de nuestra capacidad para percibir directamente una pequeña porción y para descubrir y medir las porciones que quedan fuera de la región visible.

El primer descubrimiento de radiación con longitudes de onda mayores que las correspondientes a la luz roja fue hecho por William Herschel en 1800. Estas ondas actualmente se conocen como radiación térmica y se les llama ***ondas infrarrojas***.

Poco después del descubrimiento de las ondas infrarrojas, se observó también la radiación de longitudes de onda más cortas que la luz visible. Estas ondas, ahora conocidas como ***ondas ultravioleta***, se descubrieron por su relación con el efecto que tienen sobre ciertas reacciones químicas.

La extensión de la región infrarroja con mayores longitudes de onda no se conoció en la mayor parte del siglo XIX. Por fortuna, la teoría electromagnética de Maxwell abrió la puerta al descubrimiento de muchas otras clasificaciones de radiación. El espectro de las ondas electromagnéticas en la actualidad se ha dividido por conveniencia en ocho regiones principales, que aparecen en la figura 33.7: (1) ondas largas de radio, (2) ondas cortas de radio, (3) la región infrarroja, (4) la región visible, (5) la región ultravioleta, (6) rayos X, (7) rayos gamma y (8) fotones cósmicos.

33.4 La teoría cuántica

Los trabajos de Maxwell y de Hertz respecto al establecimiento de la naturaleza electromagnética de las ondas de luz fueron en realidad uno de los hechos más trascendentes en la historia de la ciencia. No sólo explicaron la naturaleza de la luz, sino que dieron paso a una enorme variedad de ondas electromagnéticas. Resultó sorprendente que tan sólo dos años después de que Hertz verificara las ecuaciones de onda de Maxwell, la teoría ondulatoria de la luz haya tenido que enfrentar un nuevo reto. En 1887, Hertz observó que una chispa eléctrica podía saltar más fácilmente entre dos esferas cargadas cuando sus superficies estaban iluminadas por la luz que provenía de otra chispa. Este fenómeno, conocido como ***efecto fotoeléctrico***, se demostró mediante el aparato que se muestra en la figura 33.8. Un haz de luz incide sobre la superficie metálica *A* en un tubo al vacío. Los electrones emitidos por la luz son enviados al colector *B* por medio de baterías externas. El flujo de electrones se detecta mediante un dispositivo llamado *amperímetro*. El efecto fotoeléctrico es un desafío para la explicación en términos de la teoría ondulatoria. En realidad, la emisión de electrones puede explicarse más fácilmente a través de la antigua teoría corpuscular. Sin embargo, tampoco quedaban dudas acerca de las propiedades ondulatorias. La ciencia se enfrentó a una paradoja sorprendente.

El efecto fotoeléctrico, junto con otros experimentos que incluían la emisión y absorción de energía radiante, no podía explicarse únicamente mediante la teoría de las ondas electromagnéticas de Maxwell. En un esfuerzo por lograr observaciones experimentales que apoyaran la teoría, Max Planck, un físico alemán, publicó su *hipótesis cuántica* en 1901. Él encontró que los problemas con la teoría de la radiación se basaban en la suposición de que la energía radiaba en forma continua. Se postuló que la energía electromagnética se absorbía o emitía en paquetes

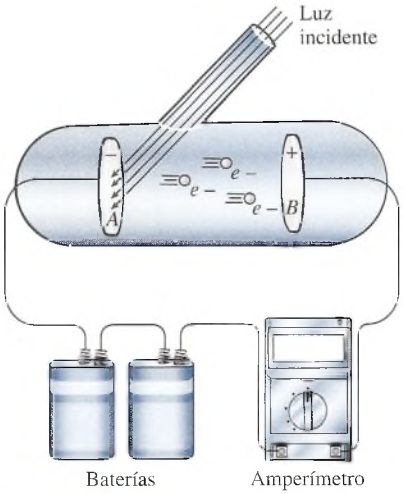


Figura 33.8 El efecto fotoeléctrico.

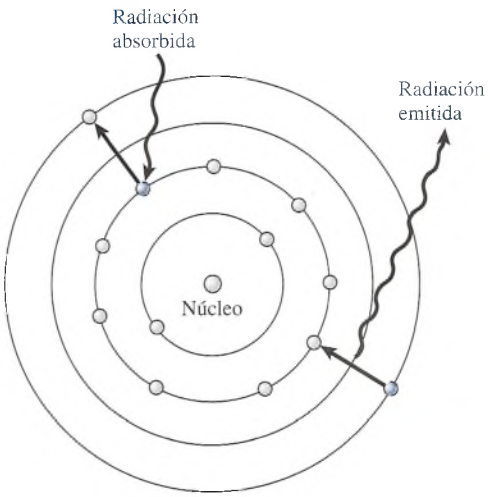


Figura 33.9 El histórico átomo de Bohr es una manera útil de visualizar las transiciones entre los niveles de energía.

discretos, o *cuantos*. El contenido de energía de estos cuantos, o ***fotones*** como fueron llamados, es proporcional a la frecuencia de la radiación. La ecuación de Planck se puede escribir como

$$E = hf \tag{33.4}$$

donde E = energía del fotón
f = frecuencia del fotón
h = factor de proporcionalidad llamado *constante de Planck* $(6.626 \times 10^{-34}\ \text{J} \cdot \text{s})$

En 1905, Einstein amplió la idea propuesta por Planck y postuló que la energía en un haz de luz no se difunde en forma continua a través del espacio. Al suponer que la energía luminosa se concentra en pequeños paquetes (fotones) cuyo contenido de energía está dado por la ecuación de Planck, Einstein fue capaz de predecir el efecto fotoeléctrico matemáticamente. Por fin, la teoría se reconcilió con la observación experimental.

Por consiguiente, tal parece que la luz es *dual*. La teoría ondulatoria se conserva ya que se considera que el fotón tiene una frecuencia y una energía proporcional a la frecuencia. En la práctica actual se utiliza la teoría ondulatoria cuando se estudia la propagación de la luz. Por otra parte, la teoría corpuscular es necesaria para describir la interacción de la luz con la materia. Podemos pensar en la luz como energía radiante transportada por fotones y transmitida por un campo ondulatorio.

El origen de los fotones de luz no se comprendió sino hasta que Niels Bohr propuso en 1913 un modelo para el átomo basándose en la ***teoría cuántica***. Bohr postuló que los electrones se pueden mover alrededor del núcleo de un átomo únicamente en ciertas órbitas o *niveles de energía discretos*, como se aprecia en la figura 33.9. Se dijo que los átomos estaban *cuantizados*. Si en alguna forma se le suministra energía a los átomos, por ejemplo en forma de calor, los electrones orbitales pueden saltar a una órbita superior. Algún tiempo después, estos electrones excitados caerán de nuevo a su nivel original, liberando tantos fotones de energía como los que hayan sido absorbidos originalmente. Aunque el modelo de Bohr no es correcto en sentido estricto, estableció las bases para comprender la emisión y la absorción de radiación electromagnética en unidades cuánticas.

33.5 Rayos de luz y sombras

Una de las primeras propiedades de la luz que se estudiaron fue la propagación rectilínea y la formación de sombras. Instintivamente, confiamos mucho en esta propiedad para estimar dichas distancias, direcciones y formas. La formación de sombras nítidas se aprovecha en un reloj solar para medir el tiempo. En esta sección estudiaremos cómo se predice la formación de sombras.

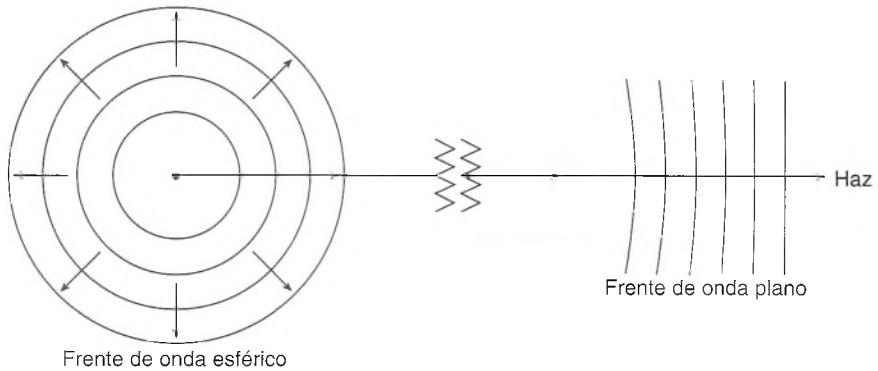


Figura 33.10 Un rayo es una línea imaginaria, trazada perpendicularmente a los frentes de onda que avanzan, lo que indica la dirección de la propagación de la luz.

De acuerdo con el principio de Huygens, cada punto en un frente de onda en movimiento puede considerarse como una fuente de ondeletas secundarias. El frente de onda en cualquier instante es la envoltura de estas ondeletas. Por tanto, la luz emitida en todas direcciones por medio de la fuente puntual de luz en la figura 33.10, puede representarse por una serie de frentes de onda esféricos que se mueven alejándose de la fuente a la rapidez de la luz. Para nuestros propósitos, una ***fuente puntual*** de luz es aquella cuyas dimensiones son pequeñas en comparación con las distancias estudiadas. Observe que los frentes de onda esféricos se vuelven prácticamente fuentes de onda planos en cualquier dirección específica a distancias muy alejadas de la fuente. Una línea recta imaginaria trazada perpendicularmente a los frentes de onda en la dirección de los frentes de onda en movimiento se llama ***rayo***. Por supuesto, hay un número infinito de rayos que parten de la fuente puntual.

Cualquier objeto de color oscuro absorbe luz, pero uno blanco absorbe casi toda la luz que recibe. La luz que no es absorbida cuando golpea un objeto, es reflejada o transmitida. Si toda la luz que incide sobre un objeto se refleja o se absorbe, se dice que el objeto es *opaco*. Puesto que la luz no puede pasar a través de un cuerpo opaco, se producirá una sombra en el espacio situado atrás del objeto. La sombra formada por una fuente puntual de luz se ilustra en la figura 33.11. Puesto que la luz se propaga en líneas rectas, los rayos que emergen de la fuente pasan por los bordes del objeto opaco formando una sombra nítida proporcional a la forma del objeto. Esa región en la cual no penetra la luz se llama ***umbra*** o ***sombra***.

Si la fuente de luz es de tipo extendido y no puntual, la sombra consistirá en dos porciones, como muestra la figura 33.12. La porción interior no recibe luz de la fuente y por tanto es *umbra*. La porción exterior se denomina ***penumbra***. Un observador dentro de la penumbra podría ver una porción de la fuente pero no toda la fuente. Un observador situado fuera de ambas regiones podría ver toda la fuente. Los eclipses solares y lunares pueden estudiarse mediante construcciones de sombra similares.

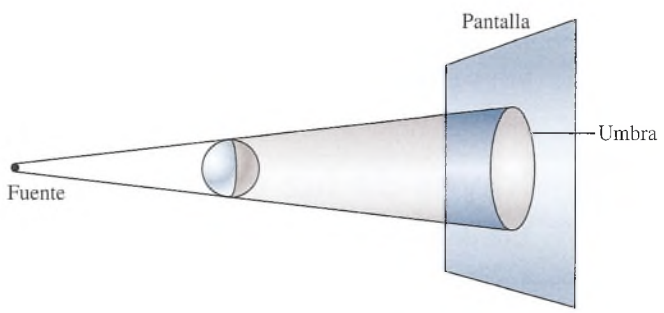


Figura 33.11 Sombra formada por una fuente puntual de luz.

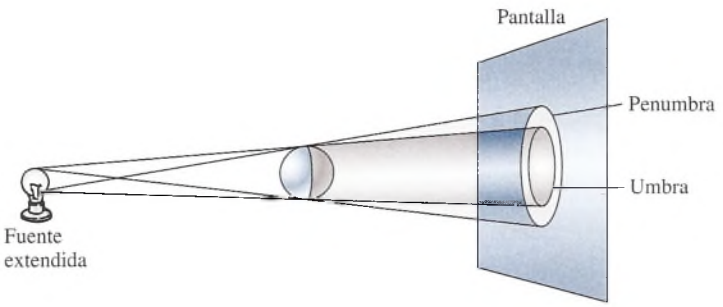


Figura 33.12 Sombras formadas por una fuente de luz extendida.

33.6 Flujo luminoso

La mayoría de las fuentes de luz emiten energía electromagnética distribuida en múltiples longitudes de onda. Se suministra energía eléctrica a una lámpara, la cual emite radiación. Esta energía radiante emitida por la lámpara por unidad de tiempo se llama potencia radiante o ***flujo radiante***. Sólo una pequeña porción de esta potencia radiante se encuentra en la región visible: en la región entre 400 y 700 nm y se llama ***flujo luminoso***. El sentido de la vista depende tan sólo de la energía radiada visible o *luminosa*, por unidad de tiempo.

> El flujo luminoso es la parte de la potencia radiante total emitida por una fuente de luz que es capaz de afectar el sentido de la vista.

En una lámpara común de luz incandescente, sólo aproximadamente el 10 por ciento de la energía radiante es flujo luminoso. La mayor parte de la potencia radiante no es luminosa.

El ojo humano no es sensible de igual manera a todos los colores. En otras palabras, iguales potencias radiantes de diferentes longitudes de onda no producen la misma brillantez. Una lámpara de luz verde de 40 W se ve más brillante que una lámpara de luz azul de 40 W. La figura 33.13 muestra una gráfica que indica la respuesta del ojo a diversas longitudes de onda. Observe que la curva de sensibilidad tiene forma de campana centrada aproximadamente en la región media del espectro visible. En condiciones normales, el ojo es más sensible a la luz verde-amarilla de longitud de onda de 555 nm. La sensibilidad decae rápidamente para longitudes de onda más largas y más cortas.

Si la unidad elegida para el flujo luminoso debe corresponder a la respuesta sensitiva del ojo humano, es preciso definir una nueva unidad. El watt (W) no es suficiente debido a que las sensaciones visuales no son las mismas para colores diferentes. Lo que se necesita es una unidad que mida la *brillantez*. Dicha unidad es el *lumen* (lm), el cual se determina por comparación con una fuente patrón.

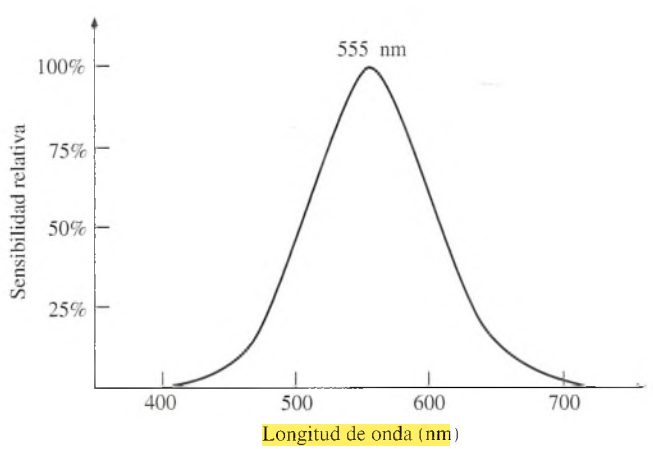


Figura 33.13 Curva de sensibilidad.

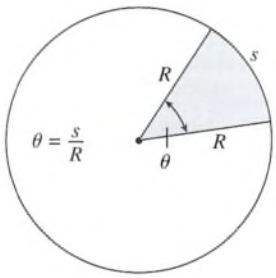


Figura 33.14 Definición de ángulo plano θ expresado en radianes.

Para comprender la definición de un lumen en términos de la fuente patrón, debemos primero desarrollar el concepto de un ángulo sólido. Un ángulo sólido en ***estereorradianes*** (sr) se define en la misma forma que un ángulo plano se define en radianes. En la figura 33.146 el ángulo θ en radianes es

$$\theta = \frac{s}{R} \qquad \text{rad} \tag{33.5}$$

donde s es la longitud del arco y R es el radio. En forma similar se define el ángulo sólido Ω en la figura 33.15. Éste puede pensarse como la abertura del extremo de un cono subtendido por un segmento de área sobre la superficie esférica.

Un estereorradián (sr) es el ángulo sólido subtendido en el centro de una esfera por un área A sobre su superficie que es igual al cuadrado de su radio R.

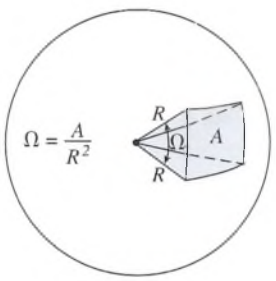


Figura 33.15 Definición de ángulo sólido Ω en estereorradianes.

En general, el ángulo sólido en estereorradianes está dado por

$$\Omega = \frac{A}{R^2} \qquad \text{sr} \tag{33.6}$$

El estereorradián, igual que el radián, es una cantidad adimensional.

Del mismo modo que hay 2π rad en un círculo completo, se puede demostrar por medio de la ecuación (33.6) que hay 4π sr en una esfera completa.

$$\Omega = \frac{A}{R^2} = \frac{4\pi R^2}{R^2} = 4\pi \text{ sr}$$

Observe que el ángulo sólido es independiente de la distancia de la fuente. Hay 4π sr en una esfera, independientemente de la longitud de su radio.

Ejemplo 33.2

¿Qué ángulo sólido se subtiende en el centro de una esfera de 8 m de diámetro por medio de un área de 1.5 m² sobre su superficie?

Solución: De la ecuación (33.6) queda

$$\Omega = \frac{A}{R^2} = \frac{1.5 \text{ m}^2}{(4 \text{ m})^2}; \qquad \Omega = 0.0938 \text{ sr}$$

Ahora estamos en condiciones de aclarar la definición de una unidad que mide al flujo luminoso. El ***lumen*** se define por comparación con una fuente patrón reconocida internacionalmente.

Un lumen (lm) es el flujo luminoso (o potencia radiante visible) emitida desde una abertura de 1/60 cm² de una fuente patrón e incluido dentro de un ángulo sólido de 1 sr.

La fuente patrón consiste en un recipiente hueco que se mantiene a la temperatura de solidificación del platino, aproximadamente 1773°C. En la práctica es más conveniente usar lámparas incandescentes estándar que han sido calibradas por comparación con el patrón.

Otra definición conveniente de lumen utiliza la curva de sensibilidad (figura 33.13) como base para establecer el flujo luminoso. Al relacionarla con la fuente patrón, 1 lm se define en función de la potencia radiante de la luz verde-amarilla.

Un lumen es equivalente a 1/680 W de luz verde-amarilla de 555 nm de longitud de onda.

Para determinar el flujo luminoso emitido por luz de diferente longitud de onda, debe usarse la curva de luminosidad a fin de compensar la sensibilidad visual.

Ejemplo 33.3

Una fuente de luz roja monocromática (600 nm) produce una potencia radiante visible de 4 W. ¿Cuál es el flujo luminoso en lúmenes?

Plan: El flujo luminoso puede estimarse por medio del estudio de la curva de luminosidad. Sabemos que la curva alcanza su punto máximo a 680 lúmenes por watt para la luz verde-amarilla (555 nm). El porcentaje del descenso de la intensidad relativa para la luz roja puede estimarse a partir de la curva de luminosidad (véase la figura 33.13) y usarse para calcular el flujo luminoso.

Solución: Si la luz fuera verde-amarilla (555 nm) en vez de roja, tendría un flujo luminoso F dado por

$$F = (680 \text{ lm/W})(4 \text{ W}) = 2720 \text{ lm}$$

A partir de la curva de sensibilidad, la luz roja tiene una longitud de onda de 600 nm y produce aproximadamente el 59 por ciento de la respuesta obtenida con la luz verde-amarilla. Así pues, el flujo luminoso que emana de la fuente de luz roja es

$$F = (0.59)(2720 \text{ lm}) = 1600 \text{ lm}$$

El flujo luminoso con frecuencia se calcula en el laboratorio determinando la iluminación que produce sobre un área de superficie conocida.

33.7 Intensidad luminosa

La luz viaja radialmente hacia afuera en líneas rectas desde una fuente que es pequeña en comparación con sus alrededores. Para una fuente de luz de ese tipo, el flujo luminoso incluido en un ángulo sólido Ω permanece igual a cualquier distancia de la fuente. Por tanto, con frecuencia es más útil hablar del *flujo por unidad de ángulo sólido* que hablar simplemente del flujo total. La cantidad física que expresa esta relación se llama ***intensidad luminosa***.

La intensidad luminosa I de una fuente de luz es el flujo luminoso F emitido por unidad de ángulo sólido Ω.

$$I = \frac{F}{\Omega} \tag{33.7}$$

La unidad de intensidad es el *lumen por estereorradián* (lm/sr), llamada *candela* (cd). La candela o ***bujía***, como a veces se le llama, se originó cuando el patrón internacional quedó definido en términos de la cantidad de luz emitida por la llama de cierta bujía. Este patrón no resultó adecuado y se reemplazó finalmente por el patrón de platino.

La mayor parte de las fuentes de luz proyecta luz en una dirección en particular. Una ***fuente isotrópica*** es aquella que emite luz de manera uniforme en todas direcciones. Podemos establecer una expresión para calcular el flujo total emitido por una fuente isotrópica al considerar que el ángulo sólido para dicha fuente debe ser 4π sr. El flujo F, a partir de la ecuación (33.7), sería

$$F = \Omega I = 4\pi I \qquad \textit{Fuente isotrópica} \tag{33.8}$$

Por ejemplo, si la intensidad luminosa de una fuente de luz es *1 candela* (1 lm/sr), el flujo luminoso que sale de la fuente sería 4π *lúmenes*.

Ejemplo 33.4

Un proyector de luz está equipado con una lámpara de 40 cd que concentra un haz de luz sobre una pared vertical. El haz cubre un área de 9 m^2 de la pared, y el proyector está situado a 20 m de dicha pared. Calcule la intensidad luminosa del proyector.

Plan: Primero calcularemos el flujo total F que sale de una fuente isotrópica, suponiendo que el haz de luz no está concentrado en lo absoluto. Luego supondremos que todo este flujo se concentra en el ángulo sólido subtendido por el área de 9 m^2 sobre la pared. La intensidad I será el flujo para ese ángulo sólido.

Solución: El flujo total emitido por la lámpara de 40 cd se calcula a partir de la ecuación (33.7).

$$F = 4\pi I = (4\pi)(40 \text{ cd}) = 160\pi \text{ lm}$$

Este flujo total se concentra por medio de reflectores y lentes en un ángulo sólido determinado por

$$\Omega = \frac{A}{R^2} = \frac{9 \text{ m}^2}{(20 \text{ m})^2} = 0.0225 \text{ sr}$$

La intensidad del haz se encuentra a partir de la ecuación (33.7).

$$I = \frac{F}{\Omega} = \frac{160\,\pi \text{ lm}}{0.0225 \text{ sr}} = 2.23 \times 10^4 \text{ cd}$$

Observe que las unidades de intensidad (cd) y las unidades de flujo (lm) son iguales desde el punto de vista dimensional. Esto es cierto debido a que el ángulo sólido en estereorradianes es adimensional.

33.8 Iluminación

Si la intensidad de la fuente aumenta, el flujo luminoso transmitido a cada unidad de área vecina a la fuente también aumenta. La superficie aparece más brillante. En la medición de la eficiencia luminosa, el ingeniero se interesa en la densidad del flujo luminoso sobre una superficie. Esto nos lleva entonces a analizar la ***iluminación*** de una superficie.

La iluminación E de una superficie A se define como el flujo luminoso F por unidad de área.

$$E = \frac{F}{A} \tag{33.9}$$

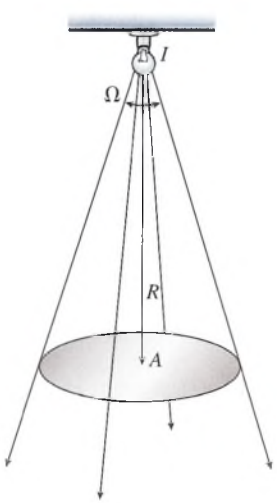


Figura 33.16 Cálculo de la iluminación de una superficie perpendicular al flujo luminoso incidente.

Cuando el flujo F se mide en lúmenes y el área A en metros cuadrados, la iluminación E tiene las unidades de *lúmenes por metro cuadrado* o *lux* (lx). Cuando A se expresa en pies cuadrados, E se da en *lúmenes por pies cuadrados*. Al lumen por pie cuadrado a veces se le denomina *pie-candela*.

La aplicación directa de la ecuación (33.9) requiere de un conocimiento del flujo luminoso que incide en una superficie dada. Desafortunadamente, el flujo de fuentes de luz comunes es difícil de determinar. Por esta razón, la ecuación (33.9) se usa con más frecuencia para calcular el flujo cuando A se conoce, y E se calcula a partir de la intensidad medida.

Para entender la relación entre intensidad e iluminación, consideremos una superficie A a una distancia R de una fuente puntual de intensidad I, como muestra la figura 33.16. El ángulo sólido Ω subtendido por la superficie de la fuente es

$$\Omega = \frac{A}{R^2}$$

donde el área A es perpendicular a la luz emitida. Si el flujo luminoso forma un ángulo θ con la normal de la superficie, como muestra la figura 33.17 debemos considerar el área proyectada $A \cos \theta$. Ésta representa el área efectiva que el flujo "ve". Por tanto, el ángulo sólido, en general, se puede determinar a partir de

$$\Omega = \frac{A \cos \theta}{R^2}$$

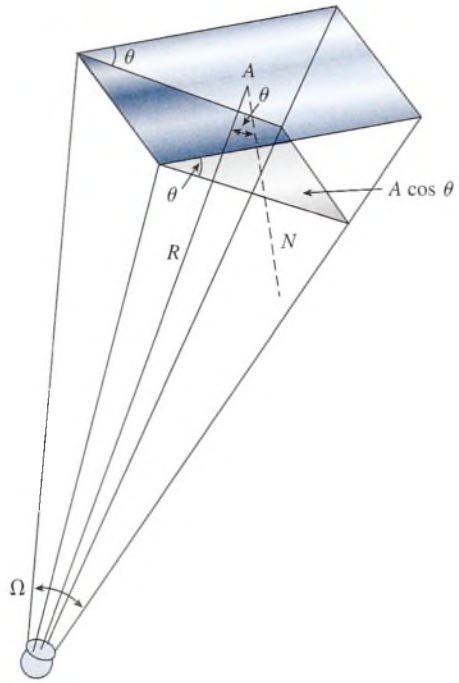


Figura 33.17 Cuando una superficie forma un ángulo θ con el flujo luminoso incidente, la iluminación E es proporcional a la componente $A \cos \theta$ de la superficie perpendicular al flujo luminoso.

Al despejar el flujo luminoso F de la ecuación (33.7), obtenemos

$$F = I\Omega = \frac{IA \cos \theta}{R^2} \tag{33.10}$$

Ahora ya es posible expresar la iluminación como una función de la intensidad. Sustituyendo la ecuación (33.10) en la ecuación que define la iluminación nos queda

$$E = \frac{F}{A} = \frac{IA \cos \theta}{AR^2}$$

o bien

$$E = \frac{I \cos \theta}{R^2} \tag{33.11}$$

Para el caso especial en el que la superficie es normal al flujo, $\theta = 0°$, y la ecuación (33.11) se simplifica a

$$E = \frac{I}{R^2} \qquad \textit{Superficie normal} \tag{33.12}$$

Debe verificar que las unidades de *candela por metro cuadrado* sean equivalentes dimensionalmente a las unidades de *lúmenes por metro cuadrado* o *lux*.

Ejemplo 33.5

Una lámpara incandescente de 100 W tiene una intensidad luminosa de 125 cd ¿Cuál es la iluminación de una superficie situada a 3 ft abajo de la lámpara?

Solución: Sustituyendo directamente en la ecuación (33.12), obtenemos

$$E = \frac{I}{R^2} = \frac{125 \text{ cd}}{(3 \text{ ft})^2} = 13.9 \text{ lm/ft}^2$$

Ejemplo 33.6

Una lámpara de filamento de tungsteno cuya intensidad es de 300 cd está situada a 2.0 m de una superficie de 0.25 m^2 de área. El flujo luminoso forma un ángulo de 30° con la normal a la superficie. (a) ¿Cuál es la iluminación? (b) ¿Cuál es el flujo luminoso que choca contra la superficie?

Plan: Observe la figura 33.17 y note que la iluminación disminuye con el cuadrado de la distancia. Al multiplicar por el coseno del ángulo dado, tendremos el área efectiva penetrada por el flujo. Podemos entonces calcular la iluminación y el flujo.

Solución (a): La iluminación se determina directamente a partir de la ecuación (33.11).

$$E = \frac{I\cos\theta}{R^2} = \frac{(300\text{ cd})(\cos 30°)}{(2\text{ m})^2} = 65\text{ lx}$$

Solución (b): El flujo que incide en la superficie se calcula despejando F de la ecuación (33.9). De modo que

$$F = EA = (65\text{ lx})(0.25\text{ m}^2)$$
$$= 16.2\text{ lm}$$

Las ecuaciones anteriores que incluyen la iluminación y la intensidad luminosa son formulaciones matemáticas de la *ley del recíproco del cuadrado*, que puede enunciarse en la siguiente forma:

> La iluminación de una superficie es proporcional a la intensidad luminosa de una fuente de luz puntual y es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia.

Si la luz que ilumina una superficie se eleva al doble de su altura original, la iluminación será solamente la cuarta parte del total. Si se triplica la distancia de la lámpara, la iluminación se reduce a una novena parte del total. En la figura 33.18 se ilustra esta relación del recíproco del cuadrado.

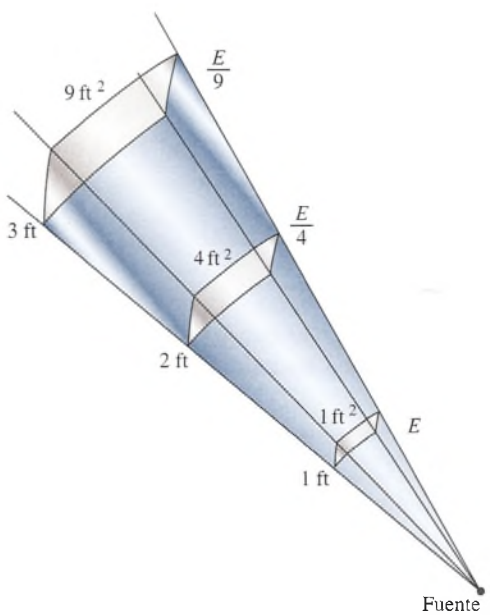


Figura 33.18 La intensidad luminosa I es constante para un ángulo sólido dado Ω. Sin embargo, la iluminación E (flujo por unidad de área) disminuye en proporción al cuadrado de la distancia a la fuente de luz.

Resumen y repaso

Resumen

La investigación sobre la naturaleza de la luz sigue su marcha, pero los experimentos demuestran que la luz se comporta a veces como partículas y otras veces como una onda. La teoría moderna sostiene que la luz es una radiación electromagnética y que su energía radiante se transporta por medio de fotones que viajan por un campo ondulatorio. Las principales ideas y fórmulas presentadas en este capítulo aparecen resumidas a continuación.

- La longitud de onda λ de la radiación electromagnética está relacionada con su frecuencia f según la siguiente ecuación general:

$$c = f\lambda \qquad c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$$

- El rango de longitudes de onda que corresponde a la luz visible abarca desde 400 nm para el violeta, hasta 700 nm en el caso del rojo.

$$1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m} \qquad \textit{El nanómetro se usa para medir longitudes de onda.}$$

- La energía de los fotones luminosos es proporcional a la frecuencia.

$$E = hf \qquad E = \frac{hc}{\lambda} \qquad h = 6.626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$$

  La constante h es la *constante de Planck*.
- El *flujo luminoso* ha sido definido como la parte de la potencia radiante total emitida por una fuente de luz, que es capaz de afectar el sentido de la visión. En virtud de que la percepción y la sensibilidad visuales varían de uno a otro individuos, es necesario definir la intensidad luminosa en términos de una fuente estándar y un ángulo sólido bien definido (el estereorradián). En comparación con esas normas, podemos precisar la iluminación de superficies, que es tan importante para el diseño de centros de trabajo en la industria.
- La *intensidad luminosa* de una fuente de luz es el flujo luminoso F por unidad de ángulo sólido Ω. El *flujo luminoso* es la potencia radiante en la región visible y su unidad de medición es el *lumen*.

$$1 \text{ lm} = \frac{1}{680} \text{ W} \quad \text{para luz de 555 nm} \qquad \textit{El lumen}$$

$$\Omega = \frac{A}{R^2} \qquad \textit{Ángulo sólido en estereorradianes}$$

$$I = \frac{F}{\Omega} \qquad \textit{Intensidad luminosa} \ (1 \text{ cd} = 1 \text{ lm/sr})$$

- En el caso de una fuente isotrópica, es decir, la que emite luz en todas las direcciones, el flujo luminoso es

$$F = 4\pi I \qquad \textit{Fuente isotrópica}$$

- La iluminación E de una superficie A se define como el flujo luminoso por unidad de área.

$$E = \frac{F}{A} \qquad E = \frac{I \cos\theta}{R^2} \qquad \textit{Iluminación} \ (\text{lm/m}^2), \text{ lx}$$

Conceptos clave

candela 653
difracción 643
efecto fotoeléctrico 648
estereorradián 652
flujo luminoso 651
flujo radiante 651
fotones 649
fuente isotrópica 653
fuente puntual 650
iluminación 654
intensidad luminosa 653
lumen 652
luz 643
nanómetro 647
onda electromagnética 643
onda infrarroja 648
onda ultravioleta 648
penumbra 650
rayo de luz 650
rayo infrarrojo 643
región visible 643
teoría cuántica 649
umbra 650

Preguntas de repaso

33.1. ¿En qué consiste la naturaleza dual de la luz? ¿En qué aspectos la luz se comporta como partículas? ¿En qué aspectos la luz se comporta como una onda?

33.2. Explique de qué manera la energía de una onda electromagnética depende de su frecuencia y cómo ésta depende de la longitud de onda.

33.3. Cuando la luz pasa del vidrio al aire, su energía en el vidrio es la misma que su energía en el aire. ¿También su frecuencia es la misma? ¿Qué podemos decir de su longitud de onda? Explique sus respuestas.

33.4. En los hornos de microondas, la televisión y el radar usan ondas electromagnéticas comprendidas entre las infrarrojas y las ondas de radio. Compare la energía, la frecuencia y las longitudes de onda que corresponden a esas ondas con la energía, la frecuencia y las longitudes de onda de la radiación visible.

33.5. Repase la definición de radián y comente cuál es la semejanza entre el estereorradián para medir ángulos sólidos y el radián que mide ángulos planos. ¿Cuántos radianes contiene un círculo completo? ¿Cuántos estereorradianes hay en una esfera completa?

33.6. Elabore un diagrama para ilustrar un eclipse solar e indique las regiones de umbra y penumbra. Si observa un eclipse parcial de Sol, ¿se encuentra usted en la región de umbra o en la penumbra?

33.7. ¿Puede usted justificar la siguiente definición de lumen? *Un lumen es igual al flujo luminoso que incide en una superficie de un metro cuadrado, estando todos los puntos de dicha superficie a 1 metro de una fuente puntual uniforme de 1 candela.*

33.8. Una unidad más antigua era el *pie-candela*, definido como la iluminación E que recibe una superficie de 1 ft^2 colocada a una distancia de 1 ft de una fuente de luz de 1 cd. Explique por qué esta definición es equivalente a la que hemos dado en este texto.

33.9. Describa la distribución del flujo luminoso que proviene de una lámpara incandescente. ¿Por qué ese tipo de lámpara no es una fuente isotrópica?

33.10. Comente los factores que afectan la iluminación que recibe una mesa en un taller de máquinas.

33.11. A veces se habla de iluminación en términos de *densidad de flujo*. Explique por qué puede ser apropiado utilizar ese término.

33.12. La *fotometría* es la ciencia de medir la luz. La intensidad de una fuente luminosa se puede determinar por medio del fotómetro ilustrado en la figura 33.19. La intensidad luminosa I_x de una fuente desconocida se calcula comparándola visualmente con una fuente patrón de intensidad conocida I_s. Si las distancias desde cada una de las fuentes se ajustan para que la mancha de aceite reciba la misma iluminación de cada una de las fuentes, la intensidad desconocida I_x se puede calcular aplicando la ley del recíproco del cuadrado. Obtenga usted la ecuación de la fotometría

$$\frac{I_x}{r_x^2} = \frac{I_s}{r_s^2} \qquad \textit{Ecuación de la fotometría} \qquad \textbf{(33.13)}$$

donde r_s es la distancia de la fuente patrón y r_x es la distancia de la fuente desconocida.

33.13. Si se desea comparar dos lámparas de 40 W por medio del fotómetro, ¿tendrán que estar forzosamente a la misma distancia de la mancha de aceite?

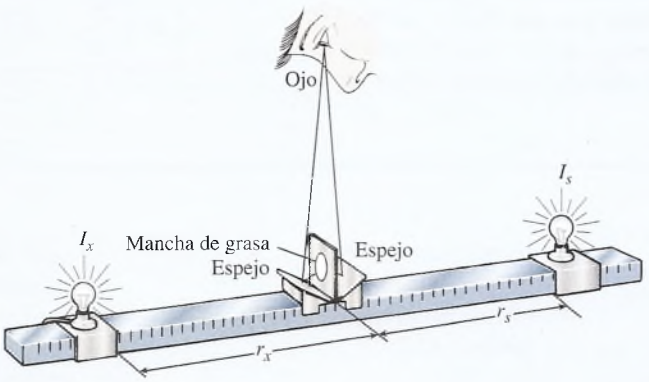


Figura 33.19 El fotómetro de mancha de aceite se usa para medir la intensidad de una fuente de luz desconocida, mediante la comparación con una fuente patrón (estándar).

Problemas

Sección 33.2 La propagación de la luz y Sección 33.3 El espectro electromagnético

33.1. Un espectrómetro infrarrojo explora las longitudes de onda desde 1 hasta 16 μm. Exprese este rango en función de las frecuencias de los rayos infrarrojos. Resp. 1.88×10^{13} a 30.0×10^{13}

33.2. ¿Cuál es la frecuencia de la luz violeta cuya longitud de onda es de 410 nm?

33.3. Un radiador de microondas que se utiliza para medir la rapidez de los automóviles emite una radiación cuya frecuencia es 1.2×10^9 Hz. ¿Cuál es la longitud de onda? Resp. 250 mm

33.4. ¿Cuál es el rango de frecuencia de la luz visible?

33.5. Si la constante de Planck h es igual a 6.626×10^{-34} Js, ¿Cuál es la energía de una luz cuya longitud de onda es 600 nm? Resp. 3.31×10^{-19} J

33.6. ¿Cuál es la frecuencia de una luz cuya energía es 5×10^{-19} J?

33.7. La frecuencia de la luz verde-amarilla es 5.41×10^{-14} Hz. Exprese la longitud de onda de esa luz en nanómetros y en angstroms. Resp. 555 nm, 5 550 A

33.8. ¿Cuál es la longitud de onda de una luz cuya energía es 7×10^{-19} J?

33.9. El Sol está aproximadamente 93 millones de millas de la Tierra. ¿Cuánto tiempo tarda la luz emitida por el Sol en llegar hasta nosotros en la Tierra? Resp. 8.33 min

33.10. Una rayo láser de helio-neón tiene una frecuencia de 4.74×10^{-14} Hz y una potencia de 1 mW. ¿Cuál es el número promedio de fotones por segundo propagados por este rayo?

33.11. La luz que llega hasta nosotros desde la estrella más cercana, Alfa Centauro, tarda 4.3 años en su recorrido. ¿Cuál es esa distancia en millas? ¿Y en kilómetros? Resp. 2.53×10^{13} mi, 4.07×10^{13} km

33.12. Una nave espacial que vuela en torno de la Luna a una distancia de 384 000 km de la Tierra se comunica por radio con una base terrestre. ¿Cuánto tiempo transcurre entre el envío y la recepción de la señal?

33.13. Una nave espacial envía una señal que tarda 20 min en llegar a la Tierra. ¿A qué distancia está la nave espacial de la Tierra? Resp. 3.60×10^{11} m

Sección 33.5 Rayos de luz y sombras

33.14. La sombra proyectada en una pantalla que se encuentra a 4 m de distancia de una fuente puntual de luz tiene 60 cm de altura. ¿Cuál será la altura del objeto que la proyecta, colocado a 1 m de la fuente de luz y a 3 m de la sombra?

33.15. Una fuente luminosa puntual está colocada a 15 cm de una regla de 6 cm dispuesta en posición vertical. Calcule la longitud de la sombra que proyecta la regla en una pared que está a 40 cm de ésta. Resp. 22.0 cm

33.16. ¿A qué distancia al frente de una fuente puntual de luz se debe colocar un plato de 80 mm de diámetro para que proyecte una sombra de 400 mm de diámetro a una distancia de 2 m de la fuente de luz?

33.17. La luz de una fuente luminosa de 40 mm de diámetro pasa a través de un pequeño orificio hecho en la parte superior de una caja de cartón colocada a 2 m de la fuente. ¿Cuál es el diámetro de la imagen que se forma en el fondo de la caja si la altura de ésta es de 60 mm? Resp. 1.20 mm

***33.18.** Una lámpara está cubierta con una caja a la cual se le ha recortado una estrecha ranura de 20 mm de largo para que la luz pueda pasar a través de ella. Un objeto de 30 mm de altura se interpone frente a la luz que sale de la ranura, a una distancia de 500 mm. Calcule la longitud de la umbra y de la penumbra que se formarán en una pantalla colocada a 1.50 m de la ranura.

Sección 33.8 Iluminación

33.19. ¿Cuál es el ángulo sólido subtendido en el centro de una esfera de 3.20 m de diámetro por un área de 0.5 m^2 localizada sobre su superficie? Resp. 0.195 sr

33.20. Un ángulo sólido de 0.080 sr está subtendido en el centro de una esfera de 9.00 cm de diámetro por un área A en la superficie de la esfera. ¿Cuál es dicha área?

33.21. Una lámina de metal de $8\frac{1}{2} \times 11$ cm está iluminada por una fuente de luz colocada a 1.3 m directamente encima de la lámina. ¿Cuál es el flujo luminoso que incide en el metal si la fuente tiene una intensidad de 200 cd? ¿Cuál es el flujo luminoso total emitido por la fuente de luz? Resp. 1.11 lm, 2 510 lm

33.22. Una fuente monocromática de luz verde-amarilla (555 nm) de 40 W ilumina una superficie de 0.5 m^2 desde una distancia de 1.0 m. ¿Cuál es la intensidad luminosa de la fuente y cuántos lúmenes inciden sobre dicha superficie?

33.23. ¿Cuál es la iluminación producida por una fuente de 200 cd sobre una superficie colocada a 4.0 m de distancia? Resp. 12.5 lx

33.24. Una lámpara colocada a 2 m de una superficie pequeña produce sobre ella una iluminación de 100 lx. ¿Cuál es la intensidad de la fuente?

33.25. La cubierta de una mesa de 1 m de ancho y 2 m de largo está a 4.0 m de distancia de una lámpara. Si sobre esta superficie inciden 40 lm de flujo, ¿cuál es la iluminación E de la superficie? Resp. 20.0 lx

33.26. ¿Dónde deberá colocar la lámpara del problema 33.25 para que la iluminación resultante se duplique?

***33.27.** Una fuente puntual de luz se localiza en el centro de una esfera de 70 mm de diámetro. Hay un orificio en la superficie de la esfera por el cual el flujo puede pasar a través de un ángulo sólido de 0.12 sr. ¿Cuál es el diámetro de esa abertura? Resp. 13.7 mm

Problemas adicionales

33.28. Cuando una luz cuya longitud de onda es 550 nm pasa del aire a una delgada placa de vidrio y vuelve a salir al aire, la frecuencia permanece constante, pero la rapidez de la luz a través del vidrio se reduce a 2×10^8 m/s. ¿Cuál es la longitud de onda dentro del vidrio?

33.29. Se desea comparar una fuente luminosa estándar de 30 cd con una lámpara de intensidad desconocida utilizando un fotómetro de mancha de aceite (examine la figura 33.19). Las dos fuentes luminosas se colocan a 1 m de distancia y la mancha de aceite se desplaza hacia la luz estándar. Cuando la mancha de aceite está a 25 cm de la fuente luminosa estándar, la iluminación es igual en ambos lados. Calcule la intensidad desconocida. Resp. 270 cd

33.30. ¿Dónde se deberá colocar la mancha de aceite del problema 33.29 para que la iluminación procedente de la fuente luminosa desconocida sea exactamente el doble de la iluminación procedente de la fuente estándar?

33.31. La iluminación sobre una superficie es de 80 lx cuando ésta se encuentra a 3 m de la fuente luminosa. ¿A qué distancia recibirá dicha superficie una iluminación de 20 lx? Resp. 6.00 m

33.32. Una lámpara está suspendida 9 m sobre una calle y produce una iluminación de 35 lx sobre un punto colocado exactamente debajo de la misma. Calcule la intensidad luminosa de la lámpara.

***33.33.** Una fuente monocromática de luz verde-amarilla (555 nm) de 60 W ilumina una superficie de 0.6 m^2 desde una distancia de 1.0 m. ¿Cuál es el ángulo sólido suspendido en dicha fuente? ¿Cuál es la intensidad luminosa de la fuente?
Resp. 0.60 sr, 68 000 cd

***33.34.** ¿A qué distancia de una pared una lámpara de 35 cd producirá la misma iluminación que una lámpara de 80 cd colocada a 4.0 m de dicha pared?

***33.35.** ¿Cuánto será necesario bajar una pequeña lámpara para duplicar la iluminación que produce en un objeto colocado a 80 cm directamente debajo de ella?
Resp. 23.4 cm

***33.36.** Calcule la iluminación que una fuente luminosa de 74 cd produce sobre una superficie de 140 cm^2 si la normal a dicha superficie forma un ángulo de 38° con el flujo luminoso.

***33.37.** La cubierta de una mesa circular se encuentra 4 m debajo y 3 m a la izquierda de una lámpara que emite 1800 lm. ¿Qué iluminación recibe la superficie de la mesa? ¿Cuál es el área de la superficie de la mesa si inciden sobre ella 3 lm de flujo?
Resp. 4.58 lx, 0.655 m^2

***33.38.** ¿Qué ángulo θ entre el flujo y una recta normal a una superficie hará que la iluminación sobre dicha superficie se reduzca a la mitad sin que la distancia de la fuente luminosa sufra cambio alguno?

***33.39.** Toda la luz procedente de un reflector se capta y enfoca sobre una pantalla de 0.30 m^2 de superficie. ¿Cuál deberá ser la intensidad luminosa del reflector para producir una iluminación de 500 lx?
Resp. 150 cd

***33.40.** Una lámpara de 300 cd está suspendida 5 m sobre el borde izquierdo de una mesa. Calcule la iluminación que recibe un pequeño pedazo de papel colocado a una distancia horizontal de 2.5 m del borde de la mesa. Resp. 8.59 lx

Preguntas para la reflexión crítica

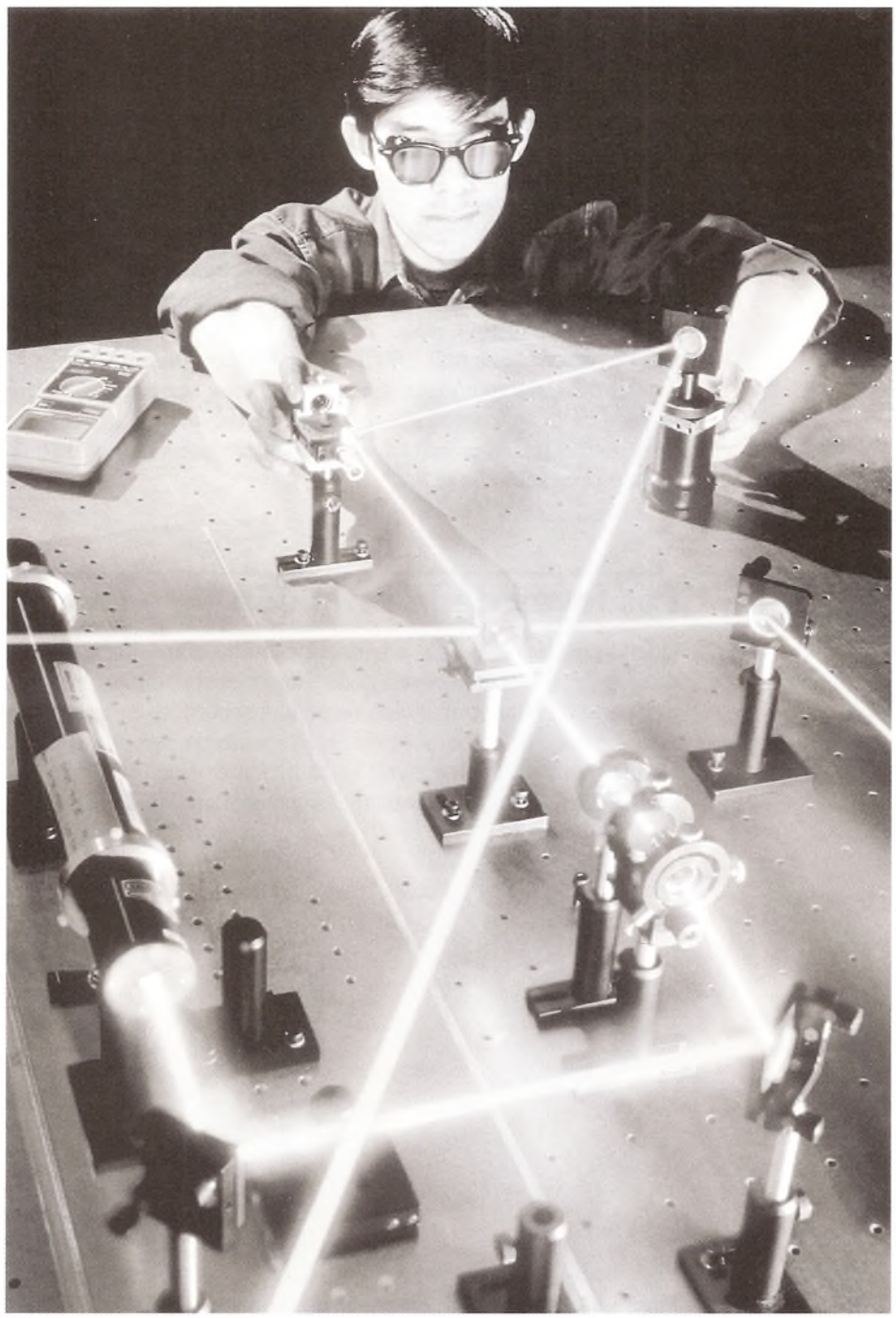
***33.41.** Una radiodifusora transmite a una frecuencia de 1150 kHz; un haz de luz roja tiene una frecuencia de 4.70×10^{14} Hz, y un rayo ultravioleta tiene una frecuencia de 2.4×10^{16} Hz. ¿Cuál tiene la mayor longitud de onda? ¿Cuál tiene más energía? ¿Cuál es la longitud de onda de cada una de esas ondas electromagnéticas?
Resp. radio, ultravioleta, 261 m, 639 nm, 12.5 nm

***33.42.** Una fuente luminosa desconocida *A* colocada a 80 cd de una pantalla produce la misma iluminación que una fuente luminosa estándar de 30 cd colocada en el punto *B* situado a 30 cm de la pantalla. ¿Cuál es la intensidad luminosa de la fuente de luz desconocida?

***33.43.** La iluminación que una fuente luminosa produce sobre una superficie colocada 3.40 m debajo de ella es de 20 lx. Calcule la intensidad de la fuente luminosa. ¿Qué distancia debajo de la fuente luminosa se duplicará la iluminación? ¿También el flujo luminoso se duplicará en esa ubicación?
Resp. 231 cd, 2.40 m, no

***33.44.** La iluminación de una fuente isotrópica es E_A en un punto *A* localizado sobre una tabla que se encuentra 30 cm exactamente debajo de la fuente. ¿A qué distancia horizontal de *A* sobre la cubierta de la mesa se reducirá la iluminación a la mitad?

34 Reflexión y espejos



La luz láser se utiliza para estudiar las propiedades de reflexión de la luz. Observe que el ángulo de reflexión es igual al de incidencia cuando la dirección del haz luminoso cambia varias veces. (*Fotografía © Firefly Productions/Corbis.*)

Objetivos

Cuando termine de estudiar este capítulo el alumno:

1. Demostrará, mediante definiciones e ilustraciones, que ha comprendido los términos siguientes: *imágenes virtuales*, *imágenes reales*, *espejo convergente*, *espejo divergente*, *amplificación*, *longitud focal* y *aberración esférica*.
2. Usará técnicas de trazado de rayos para construir imágenes formadas por espejos esféricos.
3. Predecirá matemáticamente la naturaleza, el tamaño y la ubicación de imágenes formadas en espejos esféricos.
4. Determinará la amplificación o la *longitud focal* de espejos esféricos mediante métodos matemáticos y experimentales.

El ojo responde a la luz. Es posible ver los objetos gracias a la luz, ya sea por la que emite el objeto o por la que se refleja en él. Ahora tenemos conocimientos generales de la naturaleza de la luz y hemos estudiado objetos luminosos y métodos para medir la luz que emiten.

Si bien todo tipo de luz se origina en una fuente de energía, por ejemplo, el Sol, una lámpara eléctrica o una vela encendida, la mayor parte de la que vemos en el mundo físico resulta de luz reflejada. En este capítulo nos ocuparemos de las leyes que describen cómo regresa la luz a su medio original como resultado de incidir sobre una superficie. Aunque este fenómeno, llamado *reflexión*, puede interpretarse en términos de la teoría ondulatoria electromagnética de Maxwell, es más sencillo describirla siguiendo la trayectoria de *rayos* luminosos.

El tratamiento en forma de rayos, que se conoce generalmente como ***óptica geométrica***, se basa en la aplicación del principio de Huygens. Recuerde que los rayos de luz son líneas imaginarias trazadas en forma perpendicular a los frentes de onda que avanzan en la dirección de la propagación de la luz.

34.1 Las leyes de la reflexión

Cuando la luz incide en la frontera o límite entre dos medios, por ejemplo aire y vidrio, se pueden presentar una o varias de estas tres situaciones. Como se muestra en la figura 34.1, una parte de la luz que incide sobre una superficie de vidrio se refleja y otra parte penetra en éste. La luz que entra en el vidrio es absorbida parcialmente y la parte restante se transmite. La luz transmitida en general sufre un cambio de dirección, lo cual se conoce como ***refracción***. En este capítulo nos ocuparemos únicamente del fenómeno conocido como reflexión.

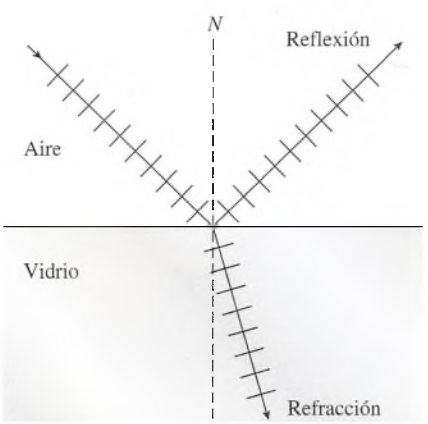
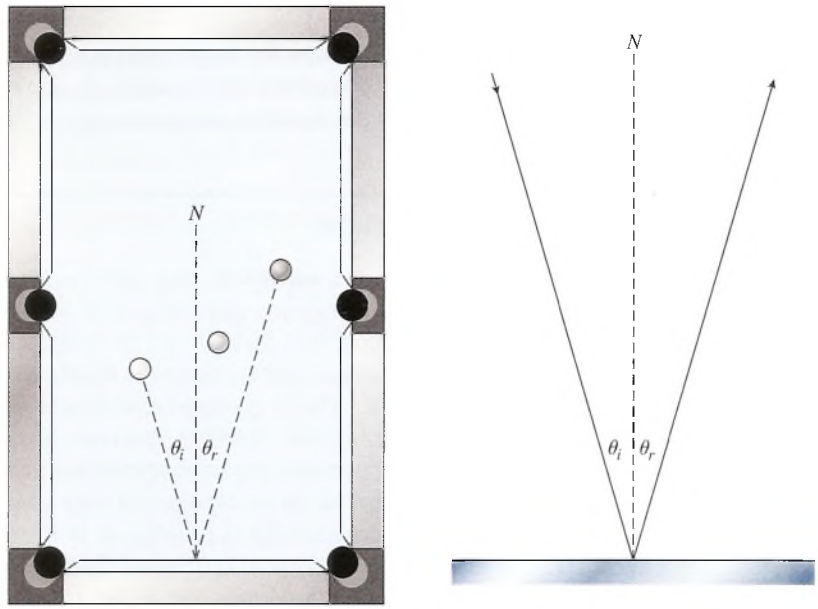


Figura 34.1 Cuando la luz incide en la frontera de dos medios, puede ser reflejada, refractada o absorbida.



(a) (b)

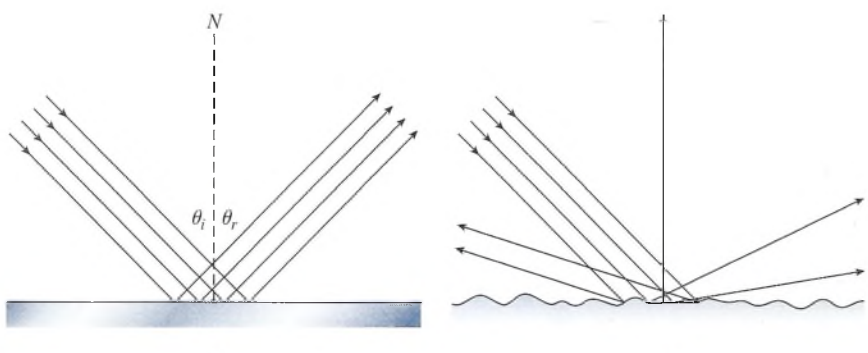
Figura 34.2 La reflexión de la luz sigue la misma trayectoria que cabría esperar en el caso de una bola de billar que rebota. El ángulo de incidencia θ_i es igual al ángulo de reflexión θ_r.

La reflexión de la luz obedece a la misma ley general de la mecánica que rige otros fenómenos de rebote; es decir, el ángulo de incidencia es igual al ángulo de reflexión. Por ejemplo, consideremos la mesa de billar de la figura 34.2a. Para golpear la pelota negra de la derecha es necesario localizar un punto sobre el borde de la mesa, de tal modo que el ángulo de incidencia, θ_i sea igual que el de reflexión, θ_r. De igual forma, la luz reflejada en una superficie lisa, como en la figura 34.2b, tiene sus ángulos de incidencia y de reflexión iguales. Los ángulos θ_i y θ_r se miden respecto a la normal a la superficie. Se pueden enunciar dos leyes básicas de la reflexión:

El ángulo de incidencia es igual al ángulo de reflexión.

El rayo incidente, el rayo reflejado y la normal a la superficie se encuentran en el mismo plano.

La reflexión de la luz procedente de una superficie pulida, en la figura 34.3a, se llama ***reflexión regular*** o ***especular***. La luz que incide sobre la superficie de un espejo o vidrio se refleja especularmente. Si toda la luz incidente que golpea una superficie se reflejara de esta



(a) (b)

Figura 34.3 (a) Reflexión especular, (b) reflexión difusa.

manera, no podríamos ver la superficie. Únicamente veríamos imágenes de otros objetos. Es la ***reflexión difusa*** (figura 34.3b) la que nos permite ver una superficie. Una superficie irregular o áspera esparce y dispersa la luz incidente, lo que da por resultado que se ilumine la superficie. La luz reflejada por ladrillos, concreto o periódicos es ejemplo de la reflexión difusa.

34.2 Espejos planos

Se denomina *espejo* una superficie muy pulida que forma imágenes debido a la reflexión especular de la luz. Los espejos que cuelgan de las paredes de nuestras casas son en general ***espejos planos***, y conocemos bien el tipo de imágenes que se forman en ellos. En todos los casos, la imagen parece estar a la misma distancia, detrás del espejo, que la distancia a la que se halla el objeto real delante del espejo. Como se muestra en la figura 34.4, las imágenes también aparecen invertidas en el sentido derecha-izquierda. Cualquier persona que haya aprendido a anudarse la corbata o a aplicarse maquillaje mirándose en un espejo está muy consciente de estos efectos.

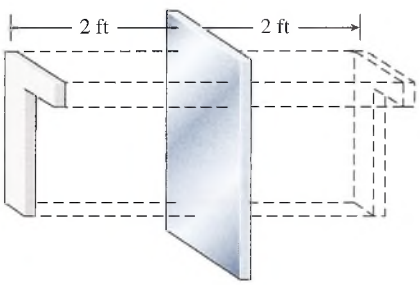


Figura 34.4 Las imágenes que se forman en los espejos planos aparecen invertidas de derecha a izquierda.

Para comprender el proceso de la formación de imágenes en un espejo plano, consideremos primero la imagen I formada por los rayos emitidos desde el punto O en la figura 34.5. Vemos que se han trazado cuatro rayos luminosos que parten de la fuente puntual de luz. El rayo luminoso OV es reflejado sobre sí mismo por el espejo. Puesto que la luz reflejada parece haber recorrido la misma distancia que la luz incidente, la imagen se forma a una distancia igual, detrás del espejo, cuando se observa a lo largo de la normal a la superficie de reflexión. Cuando la luz reflejada se ve en el espejo desde cierto ángulo, la conclusión es la misma: la distancia a la imagen q es igual a la distancia al objeto p. Esto es cierto porque el ángulo θ es igual al ángulo θ' en la figura. Por ello, es posible decir que

> Para un espejo plano, la distancia al objeto es igual en magnitud a la distancia a la imagen.

$$p = q \qquad \textit{Espejo plano} \qquad \textbf{(34.1)}$$

Ahora consideremos la imagen formada por un objeto extendido, como aparece en la figura 34.6. Podemos imaginar un objeto extendido como formado por muchos objetos puntuales distribuidos de acuerdo con la forma y el tamaño del objeto. Cada punto tendrá una imagen puntual situada a igual distancia atrás del espejo. Se deduce que la imagen tendrá el mismo tamaño y forma que el objeto. Sin embargo, la derecha y la izquierda estarán invertidas, como ya se dijo.

Observe que las imágenes formadas por el espejo plano son, en realidad, producto de la reflexión de objetos reales. Las imágenes en sí mismas no son reales porque la luz no pasa a través de ellas. Esas imágenes que ante nuestros ojos *parecen* estar formadas por rayos de luz, pero que en realidad no existen, se denominan ***imágenes virtuales***. En cambio, una ***imagen real*** es aquella formada por rayos de luz verdaderos.

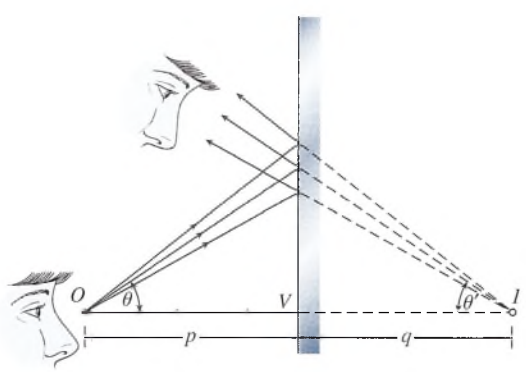


Figura 34.5 Construcción de la imagen de un objeto puntual formada por un espejo plano.

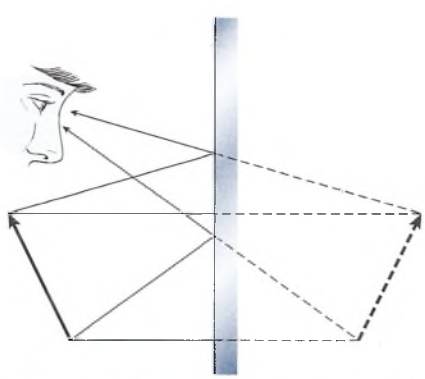


Figura 34.6 Imagen de un objeto extendido.

Una imagen virtual es la que parece estar formada por luz que proviene de la imagen, pero que en realidad no es atravesada por ningún rayo de luz.

Una imagen real está formada por rayos de luz reales que la atraviesan. Las imágenes reales se pueden proyectar en una pantalla.

Puesto que las imágenes virtuales no se forman por rayos de luz reales, no se pueden proyectar en una pantalla.

Las imágenes reales no pueden formarse por un espejo plano debido a que la luz reflejada en una superficie plana diverge. Pero si un espejo plano forma imágenes virtuales que no existen físicamente, ¿cómo es que podemos verlas? La respuesta completa a esta cuestión debe esperar hasta que se estudie la refracción y las lentes. Sin embargo, en la figura 34.7 se presenta una respuesta preliminar, que sirve también para demostrar los dos tipos de imágenes. El ojo aprovecha el principio de refracción para lograr que converja la luz reflejada que *parece* provenir de la imagen virtual. Una imagen *real*, por tanto, se proyecta sobre la retina del ojo. Esta imagen, formada por rayos de luz reflejados, reales, es interpretada por el cerebro como si se hubiera originado a partir de un punto situado atrás del espejo. El cerebro está condicionado para la propagación rectilínea de la luz. Se le engaña cuando de alguna forma se hace que la luz cambie de dirección. Las personas que dudan que el cerebro pueda estar condicionado para interpretar imágenes deberían intentar anudarle a alguien la corbata sin mirar al espejo. En este caso, el objeto real parece menos natural que su imagen virtual.

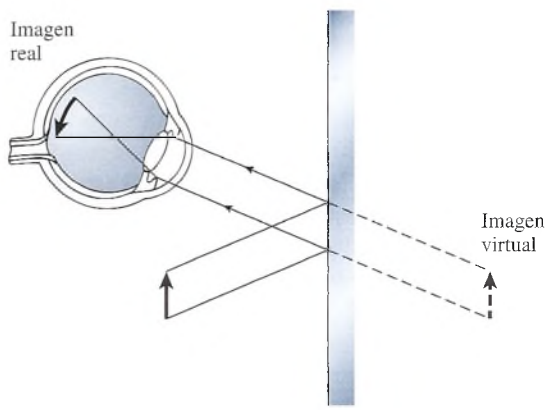


Figura 34.7 La imagen formada por un espejo plano es virtual. Esas imágenes aparecen ante nuestros ojos como si estuvieran colocadas detrás del espejo.

34.3 Espejos esféricos

Los mismos métodos geométricos aplicados a la reflexión de la luz desde un espejo plano pueden utilizarse para un espejo curvo. El ángulo de incidencia sigue siendo igual que el ángulo de reflexión, pero la normal a la superficie cambia en cada punto a lo largo de dicha superficie. De esto resulta una relación complicada entre el objeto y su imagen.

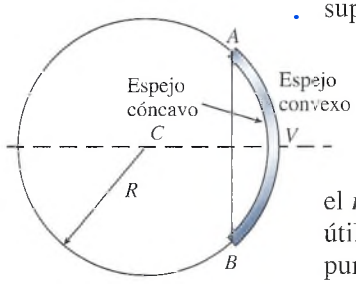


Figura 34.8 Definición de términos para los espejos esféricos.

La mayoría de los espejos curvos usados en aplicaciones prácticas son esféricos. Un ***espejo esférico*** es el que puede considerarse como una parte de una esfera reflejante. Los dos tipos de espejos esféricos se ilustran en la figura 34.8. Si el interior de la superficie esférica es la superficie reflejante, se dice que el espejo es ***cóncavo***. Si la porción exterior es la superficie reflejante, el espejo es ***convexo***. En cualquier caso, R es el ***radio de curvatura*** y C es el *centro de curvatura* de los espejos. El segmento AB, que es útil frecuentemente en problemas de óptica, se llama la ***abertura lineal*** del espejo. La línea punteada CV, que pasa por el centro de curvatura y por el centro topográfico o *vértice* del espejo se conoce como el *eje* del espejo.

Examinemos ahora la reflexión de la luz en una superficie esférica. Como un caso sencillo, suponga un haz de rayos de luz paralelos que inciden sobre una superficie cóncava, como

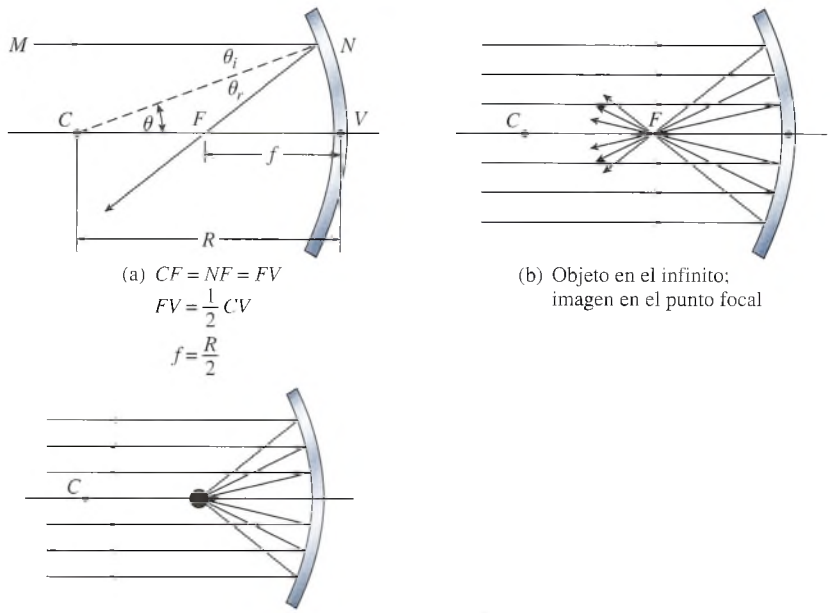


Figura 34.9 Punto focal de un espejo convergente (superficie cóncava): (a) la longitud focal es la mitad del radio de curvatura; (b) el objeto se encuentra en el infinito y la imagen en el punto focal; (c) el objeto está en el punto focal y la imagen en el infinito.

se ilustra en la figura 34.9. En virtud de que el espejo es perpendicular al eje en su vértice V, un rayo de luz CV se refleja de regreso sobre sí mismo. En realidad, cualquier rayo de luz que avanza a lo largo de un radio del espejo se refleja de regreso sobre sí mismo. El rayo de luz paralelo MN es reflejado de modo que el ángulo de incidencia θ_i sea igual al ángulo de reflexión θ_r. Ambos ángulos se miden respecto al radio CN. La geometría de la reflexión es tal, que el rayo reflejado pasa a través del punto F sobre el eje a la mitad del camino entre el centro de curvatura C y el vértice V. El punto F, en el cual convergen los rayos luminosos paralelos, se conoce como el *punto focal* del espejo. A la distancia de F a V se le llama la ***longitud focal*** f. Como ejercicio conviene demostrar, a partir de la figura 34.9a, que

$$f = \frac{R}{2} \tag{34.2}$$

La longitud focal f de un espejo cóncavo es igual a la mitad de su radio de curvatura R.

Todos los rayos de luz de un objeto distante, por ejemplo el Sol, convergen en el punto focal F, como se muestra en la figura 34.9b. Por eso a los espejos cóncavos frecuentemente se les llama ***espejos convergentes***. El punto focal se encuentra experimentalmente haciendo que converja la luz del Sol en un punto sobre un trozo de papel. El punto a lo largo del eje del espejo donde la imagen formada sobre el papel es más brillante corresponderá al punto focal del espejo.

Puesto que los rayos de luz son reversibles, si una fuente de luz está colocada en el punto focal de un espejo convergente su imagen se formará a una distancia infinita. Dicho de otra forma, el haz de luz emergente será paralelo al eje del espejo, como aparece en la figura 34.9c.

Un principio similar es válido para un espejo convexo, como se ilustra en la figura 34-10. Observe que el haz de luz paralelo que incide en una superficie convexa, diverge. Los rayos de luz reflejados *parecen* provenir del punto F situado detrás del espejo, pero ningún rayo de luz pasa realmente a través de él. Aun cuando el punto focal es virtual la distancia VF se sigue llamando la *longitud focal* del espejo convexo. En vista de que los rayos de luz reales divergen cuando inciden sobre una superficie de este tipo, a los espejos convexos se les llama ***espejos divergentes***. La ecuación (34.2) también se aplica a un espejo convexo. Sin embargo,

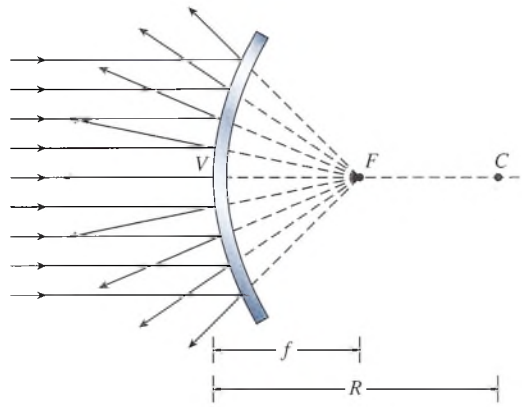


Figura 34.10 Punto focal de un espejo divergente (superficie convexa).

para ser congruentes con la teoría (que se expondrá posteriormente), la longitud focal f y el radio R deben considerarse negativos en el caso de los espejos divergentes.

34.4 Imágenes formadas por espejos esféricos

El mejor método para comprender la formación de imágenes por medio de espejos es a través de la óptica geométrica, o *trazado de rayos*. Este método consiste en considerar la reflexión de unos cuantos rayos divergentes a partir de algún punto de un objeto O que *no* se encuentre en el eje del espejo. El punto en el que se intersecarán todos esos rayos reflejados determina la ubicación de la imagen. Analizaremos ahora tres rayos cuyas trayectorias pueden trazarse fácilmente. Cada uno de los rayos se ilustra, tanto para un espejo convergente (cóncavo) en la figura 34.11, como para uno divergente (convexo) en la figura 34.12.

Rayo 1: Un rayo paralelo al eje del espejo pasa a través del punto focal de un espejo cóncavo o parece provenir del punto focal de un espejo convexo.

Rayo 2: Un rayo que pasa por el punto focal de un espejo cóncavo o que se dirige al punto focal de un espejo convexo se refleja paralelamente al eje del espejo.

Rayo 3: Un rayo que avanza a lo largo de un radio del espejo es reflejado a lo largo de su trayectoria original.

En una situación específica, sólo se necesitan dos de estos tres rayos para ubicar la imagen de un punto. Si se eligen los rayos que proceden de un punto extremo del objeto, la imagen restante

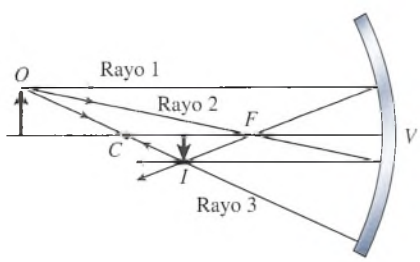


Figura 34.11 Principales rayos para la construcción gráfica de las imágenes formadas por espejos convergentes (cóncavos).

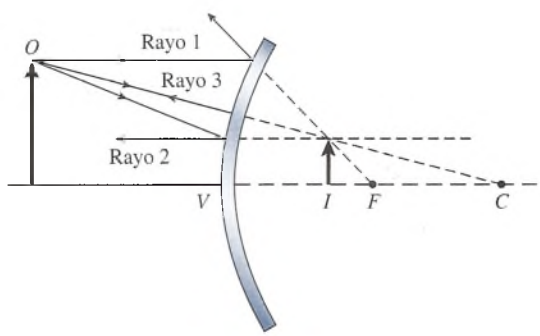


Figura 34.12 Principales rayos para la construcción gráfica de las imágenes reflejadas por espejos divergentes (convexos).

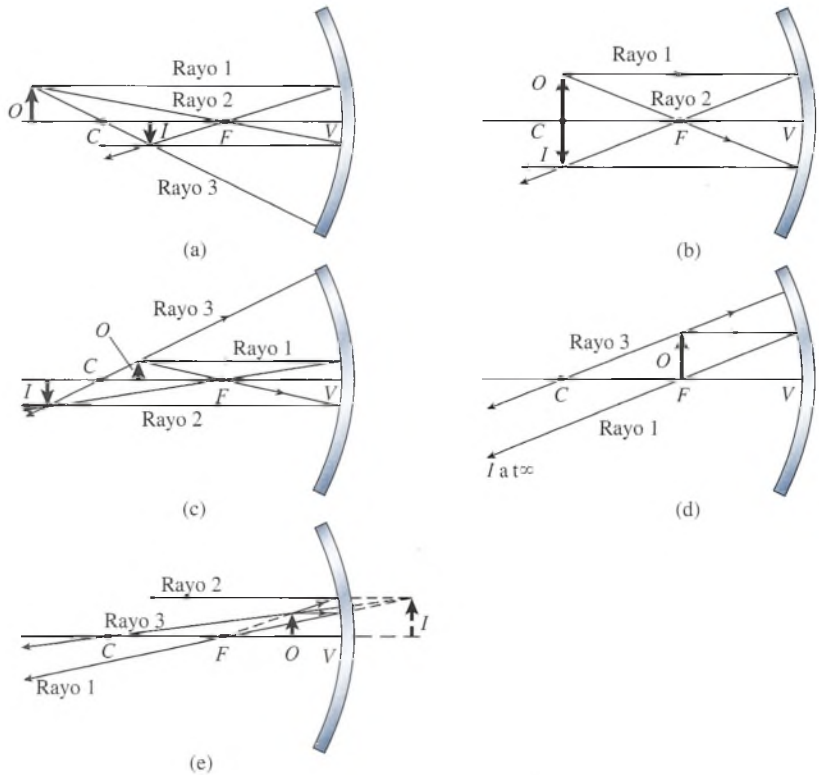


Figura 34.13 Imágenes formadas por un espejo convergente para las siguientes distancias del objeto: (a) más lejos que el centro de curvatura C, (b) en C, (c) entre C y la longitud focal F, (d) en F, y (e) dentro de F.

se puede completar generalmente por simetría. En las figuras, las líneas discontinuas se usan para identificar los rayos y las imágenes virtuales.

Para ilustrar el método gráfico y al mismo tiempo visualizar algunas de las imágenes que pueden presentarse, consideremos ahora varias imágenes formadas por un espejo cóncavo. En la figura 34.13a se ilustra la imagen formada por un objeto O colocado fuera del centro de curvatura del espejo. Observe que la imagen se ha formado entre el punto focal F y el centro de curvatura C. En este caso, la imagen es *real*, *invertida* y *más pequeña* que el objeto.

En la figura 34.13b, el objeto O se ubica en el centro de curvatura C. El espejo cóncavo forma una imagen en el centro de curvatura que es *real*, *invertida* y *del mismo tamaño* que el objeto.

En la figura 34.13c, el objeto O se ubica entre C y F. Al trazar los rayos correspondientes se observa que la imagen se forma más allá del centro de curvatura. Dicha imagen es *real*, *invertida* y *mayor* que el objeto.

Cuando el objeto se encuentra en el punto focal F, todos los rayos reflejados son paralelos (véase la figura 34.13d). Por el hecho de que los rayos reflejados jamás se intersecarán, por más que se prolonguen en cualquier dirección, no se formará ninguna imagen. (Algunas personas prefieren decir que en este caso la distancia a la imagen es infinita.)

Cuando el objeto se localiza dentro del punto focal F, como se muestra en la figura 34.13e, *parece* que la imagen está detrás del espejo. Esto puede advertirse si se prolongan los rayos reflejados hasta un punto situado detrás del espejo. Por tanto, la imagen es *virtual*. Observe también que la imagen es *alargada* y no invertida. En este caso, la ***amplificación*** es el mismo principio que se aplica en los espejos para afeitarse y en otros donde se forman imágenes virtuales amplificadas.

Por otra parte, todas las imágenes que se forman en espejos *convexos* tienen las mismas características. Como ya se mostró en la figura 34.12, se trata de imágenes *virtuales*, *no invertidas* y *de tamaño reducido*. El resultado de esto es que ofrecen un campo de visión más amplio y explica muchos de los usos de los espejos convexos. Los espejos retrovisores de los automóviles suelen ser convexos para ofrecer una capacidad visual máxima. En algunas tiendas se instalan grandes espejos convexos en lugares estratégicos porque ofrecen una visión panorámica muy útil para detectar ladrones.

34.5 La ecuación del espejo

Ahora que ya tenemos una idea de las características de las imágenes y cómo se forman, conviene desarrollar un procedimiento analítico de la formación de imágenes. Considere la reflexión de la luz de un objeto puntual O, como se ilustra en la figura 34.14 para un espejo cóncavo. El rayo OV es incidente a lo largo del eje del espejo y se refleja sobre sí mismo. El rayo OM se selecciona arbitrariamente y avanza hacia el espejo con un ángulo α formado con el eje del espejo. Este rayo es incidente en un ángulo θ_i y se refleja con un ángulo igual θ_r. Los rayos de luz reflejados en M y en V cruzan al punto I, formando una imagen del objeto. Tanto la distancia al objeto p como la distancia a la imagen q se miden a partir del vértice del espejo y se indican en la figura. La imagen en I es una imagen *real*, puesto que se forma por medio de rayos luminosos verdaderos que pasan por ella.

Consideremos ahora la imagen formada por un objeto más largo OA, como se muestra en la figura 34.15. La imagen del punto O se encuentra en I, como antes. Trazando los rayos a partir de la punta de la flecha podemos dibujar la imagen de A a B. El rayo AM pasa por el centro de curvatura y se refleja de regreso sobre sí mismo. Un rayo AV que incide en el vértice del espejo forma los ángulos iguales θ_i y θ_r. Los rayos VB y AM cruzan B, formando una imagen de la punta de la flecha en ese punto. El resto de la imagen IB se puede construir trazando rayos similares para los puntos correspondientes en el objeto OA. Observe que la imagen es *real* e *invertida*.

Las cantidades siguientes se identifican en la figura 34.15.

$$\text{Distancia al objeto} = OV = p$$
$$\text{Distancia a la imagen} = IV = q$$
$$\text{Radio de curvatura} = CV = R$$
$$\text{Tamaño del objeto} = OA = y$$
$$\text{Tamaño de la imagen} = IB = y'$$

Ahora intentemos relacionar estas cantidades. A partir de la figura se observa que los ángulos OCA y VCM son iguales. Si denotamos este ángulo con α podemos escribir

$$\tan\alpha = \frac{y}{p-R} = \frac{-y'}{R-q}$$

de donde

$$\frac{-y'}{y} = \frac{R-q}{p-R} \tag{34.3}$$

El tamaño de la imagen y' es negativo porque está invertido en la figura. De forma similar, los ángulos θ_i y θ_r en la figura son iguales, de modo que

$$\tan\theta_i = \tan\theta_r \qquad \frac{y}{p} = \frac{-y'}{q} \tag{34.4}$$

Al combinar las ecuaciones (34.3) y (34.4) se obtiene

$$\frac{-y'}{y} = \frac{q}{p} = \frac{R-q}{p-R} \tag{34.5}$$

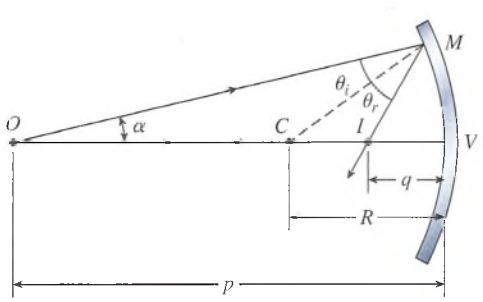


Figura 34.14 En un espejo convergente se forma una imagen puntual a partir de un objeto puntual.

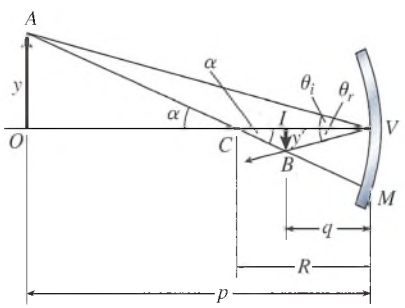


Figura 34.15 Deducción de la ecuación del espejo.

Reordenando los términos se obtiene esta importante relación

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = \frac{2}{R} \tag{34.6}$$

Esta relación se conoce como la ***ecuación del espejo***. A menudo se escribe en términos de la longitud focal f del espejo, en lugar de hacerlo respecto al radio de curvatura. Si recordamos que $f = R/2$, podemos volver a escribir la ecuación (34.6) como

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = \frac{1}{f} \tag{34.7}$$

Se puede realizar una deducción similar en el caso de un espejo convexo, y aplicamos la misma ecuación, siempre que se adopte la convención del signo apropiada. Las distancias al objeto y a la imagen, p y q, respectivamente, deben considerarse *positivas* para objetos reales y *negativas* para objetos e imágenes virtuales. El radio de curvatura R y la longitud focal f deben considerarse *positivos* para espejos convergentes (cóncavos) y *negativos* para espejos divergentes (convexos).

Ejemplo 34.1

¿Cuál es la longitud focal de un espejo convergente cuyo radio de curvatura es de 20 cm? ¿Cuál es la naturaleza y la ubicación de una imagen formada por el espejo si un objeto se encuentra a 15 cm del vértice del espejo?

Plan: La *naturaleza* de una imagen se determina contestando estas tres preguntas básicas: (1) ¿está *de pie* o *de cabeza*?; (2) ¿está *ampliada* o *reducida*?; (3) ¿es *real* o *virtual*? Es posible responder a estas interrogantes de manera gráfica mediante óptica geométrica o bien matemáticamente por medio de la convención de signos. Primero, para aproximarnos al problema esbozaremos un diagrama similar al descrito por la figura 34.13c. La longitud focal del espejo convergente es la mitad del radio de curvatura, cuyo valor se proporciona. Con esta información y la distancia al objeto, dato que también se conoce, podemos resolver la distancia a la imagen como la única incógnita en la ecuación del espejo.

Solución: Después de elaborar un diagrama de trazo de rayos para el ejemplo (véase la figura 34.13), se observa que la imagen es *real* (se forma delante del espejo), está *invertida* (de cabeza) y *ampliada*. La longitud focal es positiva para un espejo *convergente* y puesto que

$$f = \frac{R}{2} = \frac{+20\text{ cm}}{2}; \qquad f = +10\text{ cm}$$

La distancia al objeto, p, es $+15$ cm; luego, la distancia a la imagen se determina resolviendo explícitamente para q en la ecuación del espejo

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = \frac{1}{f}; \qquad q = \frac{pf}{p - f}$$

Al sustituir $f = +10$ cm y $p = +15$ cm se obtiene

$$q = \frac{(15\text{ cm})(10\text{ cm})}{15\text{ cm} - 10\text{ cm}} = +30\text{ cm}$$

El signo positivo de q comprueba que la imagen es *real*. Nótese que no fue necesario convertir la longitud en unidades del SI, ya que todas eran las mismas.

La sustitución directa en la ecuación del espejo es sencilla, pero suele ser mejor resolver algebraicamente para la cantidad desconocida (incógnita) y luego sustituir la información que se conoce. Los signos de los valores sustituidos son una de las fuentes de error más importantes.

En el grueso de los problemas relativos a los espejos alguna de las formas siguientes puede serle útil

$$p = \frac{qf}{q - f} \qquad q = \frac{pf}{p - f} \qquad f = \frac{pq}{p + q} \tag{34.8}$$

La convención de signos que ha de seguirse para la ecuación del espejo requiere que se entienda cabalmente si los objetos y las imágenes son reales o virtuales. Recuerde que las imágenes *reales* se forman por rayos de luz verdaderos y deben hallarse *frente* al espejo. Por su parte, las imágenes virtuales parecen situarse *detrás* de él. A veces se presenta un *objeto virtual*, que es cuando una imagen virtual, formada por un espejo, se convierte en el objeto de otro en problemas que suponen más de una reflexión. Es raro que esto suceda, y la distancia al objeto es casi siempre positiva. Enseguida se resume la convención de signos:

1. La distancia al objeto p es positiva para objetos reales y negativa para objetos virtuales.
2. La distancia a la imagen q es positiva para imágenes reales y negativa para imágenes virtuales.
3. El radio de curvatura R y la longitud focal f son positivos para espejos convergentes y negativos para espejos divergentes.

Esta convención se aplica únicamente a los valores numéricos sustituidos en la ecuación del espejo. Las cantidades q, p, y f han de conservar sus signos sin cambio alguno, hasta el momento en que se realiza la sustitución.

Ejemplo 34.2 Determine la posición y describa la imagen si un objeto está colocado a 4 cm de un espejo convexo cuya longitud focal es de 6 cm.

Plan: Las imágenes formadas en un espejo divergente son virtuales, no invertidas y son reducciones. El diagrama de rayos adecuado semejará al de la figura 34.12. Si aplicamos la ecuación del espejo podremos determinar la ubicación de la imagen.

Solución: Si recordamos que la longitud focal es negativa en los espejos divergentes, podemos sustituir $f = -6$ cm y $p = 4$ cm en la ecuación del espejo

$$q = \frac{pf}{p - f} = \frac{(4\text{ cm})(-6\text{ cm})}{4\text{ cm} - (-6\text{ cm})}$$

$$= \frac{-24\text{ cm}^2}{10\text{ cm}} = -2.4\text{ cm}$$

Puesto que la distancia a la imagen es negativa, se confirma que la imagen es *virtual*.

34.6 Amplificación

Las imágenes formadas por los espejos esféricos pueden ser más grandes, más chicas o iguales en tamaño que los objetos reflejados en ellos. La razón del tamaño de la imagen al tamaño del objeto es la *amplificación M* del espejo.

$$\textit{Ampliación} = \frac{\textit{tamaño de la imagen}}{\textit{tamaño del objeto}} = \frac{y'}{y} \tag{34.9}$$

El *tamaño* se refiere a *cualquier* dimensión lineal: alto, ancho, diámetro e incluso una marca en el objeto. Recurriendo a la ecuación (34.5) y a la figura 34.15 se obtiene la siguiente relación útil

$$M = \frac{y'}{y} = \frac{-q}{p} \qquad \textit{Ecuación de la ampliación} \tag{34.10}$$

donde q es la distancia a la imagen y p es la distancia al objeto. Una característica muy útil de la ecuación (34.10) es que una *imagen invertida siempre tendrá un aumento o amplificación negativa, y una imagen en posición normal (no invertida) tendrá siempre una amplificación positiva.*

Ejemplo 34.3

Una fuente de luz de 6 cm de altura se halla a 60 cm de un espejo cóncavo cuya longitud focal es de 20 cm. Determine la naturaleza, el tamaño y la ubicación de la imagen.

Plan: Esbozaremos un diagrama de rayos semejante al de la figura 34.13a, con el objeto situado más allá del centro de curvatura. El esbozo mostrará que la imagen es real, está invertida y también amplificada. Debemos comprobar estas conclusiones con los signos adecuados en la solución. Enseguida, organizaremos la información que ya se tiene y usaremos las ecuaciones del espejo y de la amplificación para determinar la ubicación y el tamaño de la imagen.

Solución: Puesto que $f = +20$ cm y $p = 60$ cm, se tiene que

$$q = \frac{pf}{p - f} = \frac{(60\text{ cm})(20\text{ cm})}{60\text{ cm} - 20\text{ cm}}$$

$$= \frac{1200\text{ cm}^2}{40\text{ cm}} = +30\text{ cm}$$

La distancia a la imagen es positiva, lo que confirma que se trata de una imagen real. Ahora, el tamaño de la imagen se establece resolviendo para y' en la ecuación de la amplificación

$$M = \frac{y'}{y} = \frac{-q}{p} \qquad \text{o} \qquad y' = \frac{-qy}{p}$$

$$y' = \frac{(-30\text{ cm})(6\text{ cm})}{60\text{ cm}} = -3\text{ cm}$$

El signo negativo comprueba que la imagen está invertida (de cabeza). Observe que la amplificación es de $-1/2$.

Estrategia para resolver problemas

Reflexión y espejos

1. Lea el problema con todo detalle y trace una línea horizontal que represente el eje del espejo. Indique, por medio de puntos en el eje del espejo, la ubicación del radio R y la longitud focal f del espejo. (Recuerde que $f = R/2$). Dibuje el espejo cóncavo o convexo como una línea curva, y ponga en posición al objeto indicado con una flecha derecha (punta hacia arriba) en su lugar aproximado frente al espejo.
2. Elabore un diagrama geométrico que muestre la trayectoria de los rayos para tener una representación visual del problema. Es suficiente con un esbozo, a menos que el problema requiera una solución gráfica.
3. Escriba una lista de las cantidades conocidas, teniendo cuidado de asignar el signo apropiado a cada valor. El radio y la longitud focal son *positivos para los espejos convergentes y negativos para los divergentes*. Las distancias a la imagen q son *positivas* cuando se refieren a *imágenes reales* y *negativas* cuando se refieren a *imágenes virtuales*. El tamaño de la imagen y' es *positivo* para *imágenes normales (de pie)* y *negativo* para *imágenes invertidas (de cabeza)*.
4. Use las ecuaciones siguientes para realizar las sustituciones convenientes y resolver para las cantidades desconocidas (incógnitas). No confunda los signos de operación (suma o resta) con los signos de sustitución.

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = \frac{1}{f} \qquad M = \frac{y'}{y} = \frac{-q}{p}$$

$$f = \frac{R}{2}$$

5. Puede ser necesario eliminar una incógnita resolviendo en forma simultánea las ecuaciones del espejo y la de la amplificación.

Ejemplo 34.4

En un experimento de laboratorio, se desea formar una imagen que tenga la mitad de la longitud de un objeto. ¿Cuán lejos ha de colocarse éste de un espejo divergente de 40 cm de radio?

Plan: La longitud focal es la mitad del radio, así que $f = -20$ cm. El signo negativo es necesario en el caso de espejos divergentes. La dificultad de este problema radica en que se desconoce el valor de p y de q. Sin embargo, estas dos incógnitas aparecen tanto en la ecuación

de la amplificación como en la del espejo. La resolución simultánea de ambas ecuaciones nos permitirá eliminar la distancia a la imagen q, a fin de determinar la distancia al objeto p.

Solución: Como siempre, trazaremos un diagrama de rayos del problema, que será semejante al de cualquier espejo divergente (véase la figura 34.12). La imagen debe ser virtual, normal y reducida. La imagen de pie significa que la amplificación es positiva (+1/2). Con la ecuación del espejo se obtiene

$$M = \frac{-q}{p} = +\frac{1}{2} \qquad \text{o} \qquad q = \frac{-p}{2}$$

Ahora es posible hallar otra expresión para q a partir de la ecuación del espejo

$$q = \frac{pf}{p - f}$$

Como las dos expresiones para q han de ser equivalentes es posible escribir

$$\frac{pf}{p - f} = \frac{-p}{2} \qquad \text{o} \qquad \frac{f}{p - f} = \frac{-1}{2}$$

La solución para q es

$$\begin{aligned} 2f &= -1(p - f) \\ 2f &= -p + f \\ p &= f - 2f \\ p &= -f \end{aligned}$$

Por tanto, la distancia al objeto es

$$p = -f = -(-20 \text{ cm}); \qquad p = +20 \text{ cm}$$

Cuando se coloca la imagen a una distancia del espejo divergente igual a la longitud focal, el tamaño de esa imagen será la mitad que el del objeto.

34.7 Aberración esférica

En la práctica, los espejos esféricos forman imágenes razonablemente nítidas siempre que sus aberturas sean pequeñas comparadas con sus longitudes focales. Cuando se usen espejos grandes, sin embargo, algunos de los rayos que provienen de los objetos inciden cerca de los bordes externos y son enfocados a diferentes puntos sobre el eje. Este defecto de enfoque, ilustrado en la figura 34.16, se conoce como ***aberración esférica***.

Un ***espejo parabólico*** no presenta este defecto. Teóricamente, los rayos luminosos paralelos que inciden en un reflector parabólico se enfocarán en un solo punto sobre el eje del espejo, como aparece en la figura 34.17. Una pequeña fuente de luz ubicada en el punto focal de un reflector parabólico es el principio usado en muchos reflectores y faros buscadores. El haz emitido por uno de estos aparatos es paralelo al eje del reflector.

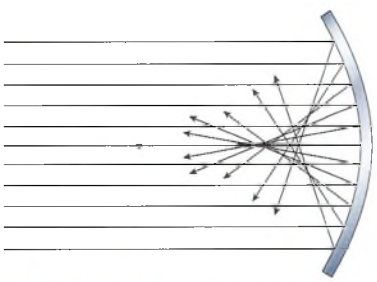


Figura 34.16 Aberración esférica.

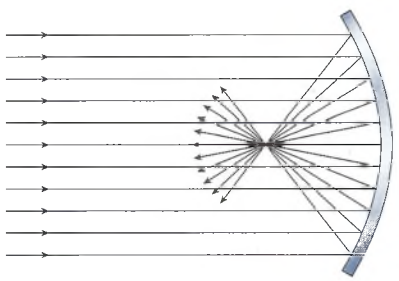


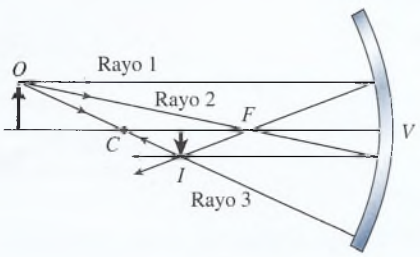
Figura 34.17 Un reflector parabólico enfoca toda la luz paralela incidente en el mismo punto.

Resumen y repaso

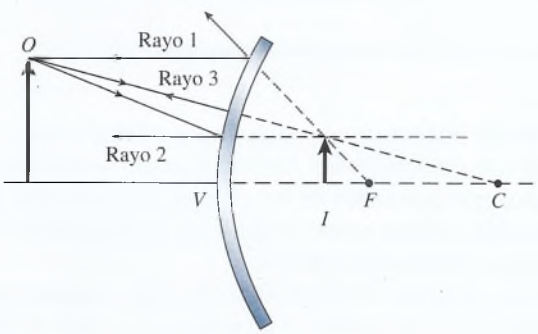
Resumen

En este capítulo estudiamos las propiedades reflejantes de los espejos esféricos convergentes y divergentes. La distancia focal y el radio de curvatura de estos espejos determinan la naturaleza y el tamaño de las imágenes formadas por ellos. La aplicación de las fórmulas y las ideas expuestas en este capítulo son necesarias para comprender el funcionamiento y la manera de utilizar muchos instrumentos técnicos. A continuación se resumen los principales conceptos.

- La formación de imágenes por medio de espejos esféricos se puede visualizar más fácilmente con técnicas basadas en el trazado de rayos. Los tres rayos principales se mencionan a continuación. Tome como referencia la figura 34.18a cuando se trate de espejos convergentes y la figura 34.18b en el caso de espejos divergentes.



(a)



(b)

Figura 34.18 Trayectorias de los rayos para (a) un espejo convergente y (b) un espejo divergente.

Rayo 1: Un rayo paralelo al eje del espejo pasa por el punto focal de un espejo cóncavo o parece provenir del punto focal de un espejo convexo.
Rayo 2: Un rayo que pasa por el punto focal de un espejo cóncavo o que avanza hacia el punto focal de un espejo convexo se refleja en dirección paralela al eje del espejo.
Rayo 3: Un rayo que avanza sobre un radio del espejo se refleja siguiendo su misma trayectoria original.

- Antes de enumerar las *ecuaciones de espejos*, es conveniente repasar el significado de los símbolos y las convenciones de signos.

R = radio de curvatura,
+ para convergentes, − para divergentes

f = distancia focal,
+ para convergentes, − para divergentes

p = distancia al objeto,
+ para un objeto real, − para uno virtual

q = distancia a la imagen,
+ para imágenes reales, − para las virtuales

y = tamaño del objeto,
+ si está de pie, − si aparece invertido

y' = tamaño de la imagen,
+ si está de pie, − si está invertida

M = amplificación, + tanto si está de pie o invertida

- Las ecuaciones de espejos pueden aplicarse tanto a los espejos esféricos convergentes (cóncavos) como a los divergentes (convexos):

$$f = \frac{R}{2} \qquad M = \frac{y'}{y} = \frac{-q}{p}$$

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = \frac{1}{f} \quad \textit{Ecuación del espejo}$$

- Otras formas de la última ecuación son:

$$p = \frac{qf}{q - f} \qquad q = \frac{pf}{p - f} \qquad f = \frac{pq}{p + q}$$

Conceptos clave

aberración esférica 673
abertura lineal 665
amplificación 668
cóncavo 665
convexo 665
ecuación del espejo 670
espejo convergente 666
espejo divergente 666
espejo esférico 665
espejo parabólico 673
espejo plano 664
imagen real 664
imagen virtual 664
longitud focal 666
óptica geométrica 662
radio de curvatura 665
reflexión difusa 664
reflexión especular (regular) 663
refracción 662

Preguntas de repaso

34.1. Comente esta afirmación: no es posible "mirar" la superficie de un espejo perfecto.

34.2. Demuestre por medio de un diagrama que los rayos divergentes que provienen de una fuente puntual de luz parecen desviarse de un punto virtual después de reflejarse en una superficie plana.

34.3. ¿Es posible proyectar sobre una pantalla la imagen de un objeto real por medio de un espejo plano? ¿Con un espejo convexo? ¿Con un espejo cóncavo?

34.4. Enuncie las leyes de la reflexión y explique cómo pueden demostrarse en un laboratorio.

34.5. Aplique la ecuación del espejo para demostrar que la imagen de un objeto colocado a una distancia infinita se forma en el punto focal de un espejo esférico.

34.6. Aplique la ecuación del espejo para demostrar que la imagen de un objeto ubicado en el punto focal de un espejo cóncavo se sitúa en el infinito.

34.7. Aplique la ecuación del espejo y demuestre que, con un espejo plano, la distancia a la imagen es igual en magnitud a la distancia al objeto. ¿Cuál es la amplificación en un espejo plano?

34.8. En un espejo cóncavo para afeitarse, ¿se logrará una mayor amplificación cuando el objeto esté más cerca del punto focal o cuando esté más cerca del vértice? Compruebe su conclusión por medio de diagramas.

34.9. ¿Los objetos que se mueven más cerca del vértice de un espejo convexo producen imágenes virtuales más grandes o más pequeñas? Explique su respuesta con diagramas.

34.10. Sin mirar la figura 34.13 construya las imágenes que forma un espejo cóncavo cuando el espejo está (a) más allá de C, (b) en C, (c) entre C y F, (d) en F y (e) entre F y V. Comente la naturaleza y el tamaño relativo de cada imagen.

34.11. En una mesa de laboratorio hay varios espejos esféricos pequeños. Explique cómo distinguiría los espejos divergentes de los convergentes sin necesidad de tocarlos.

34.12. Con objetos reales, ¿es posible construir una imagen invertida usando un espejo divergente? ¿Qué puede decir acerca de la amplificación en los espejos divergentes?

34.13. Supongamos que usted desea elegir un espejo para afeitarse que produzca la máxima amplificación posible sin invertir la imagen. ¿La distancia focal del espejo influye en el grado de amplificación que éste produce? Explique su respuesta.

34.14. Dos espejos esféricos cóncavos tienen la misma distancia focal, pero la abertura lineal de uno de ellos es mayor. ¿Cuál de ellos produce una imagen más nítida? ¿Por qué?

34.15. Demuestre cómo es posible que un espejo plano forme una imagen real si la luz que proviene del objeto se hace converger primero por medio de un espejo cóncavo.

Problemas

Sección 34.2 Espejos planos

34.1. Un hombre de 1.80 m de estatura está parado a 1.2 m de un espejo plano grande. ¿Qué altura tendrá su imagen? ¿Qué distancia hay entre él y ésta?

Resp. 1.80 m, 2.40 m

34.2. ¿Cuál es la menor distancia focal que se requiere para que una mujer de 1.68 m de estatura pueda mirar en él su imagen completa?

***34.3.** Un espejo plano se aleja de una persona inmóvil con una rapidez de 30 km/h. ¿Cuán rápido parece moverse la imagen de esa persona en dirección opuesta?

Resp. 60 km/h

***34.4.** La palanca óptica es un dispositivo de medición muy sensible que aprovecha los minúsculos giros de un espejo plano para medir pequeñas desviaciones. En la figura 34.19 se ilustra este aparato. Cuando el espejo está en la posición 1, el rayo de luz sigue la trayectoria IVR_1. Si el espejo gira un ángulo θ hasta la posición 2, el rayo seguirá la trayectoria IVR_2. Demuestre que el haz reflejado gira describiendo un ángulo de 2θ, que es el doble del ángulo que ha descrito el espejo al girar.

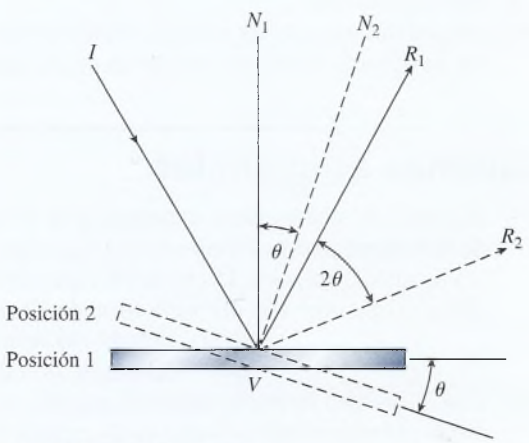


Figura 34.19 La palanca óptica.

Sección 34.3 Espejos esféricos

34.5. Una lámpara de 3 cm de alto se coloca a 20 cm frente a un espejo cóncavo que tiene un radio de curvatura de 15 cm. Calcule la naturaleza, el tamaño y la ubicación de la imagen correspondiente. Haga el diagrama de los rayos respectivo.
Resp. Real, $y' = -1.8$ cm, $q = +12$ cm

34.6. Un espejo esférico cóncavo tiene una distancia focal de 20 cm. ¿Cuáles son la naturaleza, el tamaño y la ubicación de la imagen que se forma cuando un objeto de 6 cm de altura se coloca a 15 cm de este espejo?

34.7. Un lápiz de 8 cm de largo se coloca a 10 cm de un espejo divergente que tiene 30 cm de radio. Determine la naturaleza, el tamaño y la ubicación de la imagen que se forma. Haga el diagrama de rayos.
Resp. Virtual, $y' = +4.80$ cm, $q' = -6.00$ cm

34.8. Un espejo esférico convexo tiene una distancia focal de 25 cm. ¿Cuáles son la naturaleza, el tamaño y la ubicación de la imagen de un objeto de 5 cm de alto ubicado a 30 cm del espejo?

34.9. Un objeto de 5 cm de altura se coloca a medio camino entre el punto focal y el centro de curvatura de un espejo esférico cóncavo que tiene 30 cm de radio. Calcule la ubicación y la amplificación de la imagen. Resp. $q = +45$ cm, $M = -2.00$

34.10. Una fuente luminosa de 4 cm de altura se coloca frente a un espejo esférico cóncavo cuyo radio mide 40 cm. Calcule la naturaleza, el tamaño y la ubicación de las imágenes que se forman con las siguientes distancias al objeto: (a) 60 cm, (b) 40 cm, (c) 30 cm, (d) 20 cm y (e) 10 cm. Trace los diagramas de rayos apropiados.

***34.11.** ¿A qué distancia de un espejo esférico cóncavo de 30 cm de radio habrá que colocar un objeto para que se forme una imagen invertida amplificada a 60 cm del espejo? Resp. $p = 20$ cm

Sección 34.6 Amplificación

34.12. ¿Cuál es la amplificación de un objeto que está colocado a 10 cm de un espejo, cuya imagen no está invertida y parece estar ubicada 40 cm detrás del espejo? ¿El espejo es divergente o convergente?

34.13. Una esfera de Navidad tiene una superficie plateada y su diámetro es de 3 in. ¿Cuál es la amplificación de un objeto colocado a 6 in de la superficie de ese adorno? Resp. +0.111

34.14. ¿Qué tipo de espejo se necesita para formar una imagen en una pantalla colocada a 2 m de distancia cuando un objeto se coloca a 12 cm frente al espejo? ¿Cuál es la amplificación?

***34.15.** Un espejo cóncavo para afeitarse tiene una distancia focal de 520 mm. ¿A qué distancia de él se debe colocar un objeto para que la imagen no aparezca invertida y tenga el doble de su tamaño real?
Resp. 260 mm

***34.16.** Si se desea una amplificación de +3, ¿a qué distancia del espejo del problema 34.15 deberá colocarse el rostro que ha de afeitarse?

***34.17.** Un objeto se coloca a 12 cm de la superficie de un espejo esférico. Si se forma una imagen no invertida de un tercio del tamaño del objeto, ¿cuál es el radio del espejo? ¿El espejo es convergente o divergente?
Resp. −6.00 cm, divergente

***34.18.** Un espejo esférico cóncavo tiene un radio de 30 cm y forma una imagen invertida sobre una pared a 90 cm de distancia. ¿Cuál es la amplificación?

Problemas adicionales

34.19. ¿Cuáles son la naturaleza, el tamaño y la ubicación de la imagen que se forma cuando un objeto de 6 cm de alto se coloca a 15 cm de un espejo esférico cóncavo que tiene una distancia focal de 20 cm?
Resp. Virtual, no invertida, $q = -60$ cm, $y' = +24$ cm

34.20. Una imagen no invertida tiene una amplificación de +0.6. ¿El espejo que la forma es divergente o convergente? ¿Cuál es la distancia al objeto si la distancia a la imagen es de −12 cm?

34.21. Un objeto está colocado a 50 cm de un espejo convergente que tiene 40 cm de radio. ¿Cuáles son la distancia a la imagen y la amplificación?
Resp. $q = +33.3$ cm, $M = -0.667$

34.22. ¿Cuál es la distancia focal de un espejo divergente si la imagen de un objeto ubicado a 200 mm de su superficie parece estar a una distancia de 120 mm detrás del espejo?

34.23. Una esfera de plata tiene 4.0 cm de diámetro. Localice la imagen de un objeto de 6 cm de longitud colocado a 9 cm de la superficie de la esfera. ¿Cuál es la amplificación? Resp. −9.00 mm, +0.100

34.24. Un objeto de 80 mm de altura se coloca a 400 mm frente a un espejo divergente cuyo radio es de −600 mm. Determine la naturaleza, el tamaño y la ubicación de la imagen.

***34.25.** Un objeto de 10 cm de altura ha sido colocado a 20 cm de un espejo esférico. Si se forma una imagen

no invertida de 5 cm de altura, ¿cuál es la distancia focal del espejo? Resp. $f = -20$ cm

*34.26. ¿Cuál es la amplificación si la imagen de un objeto se sitúa a 15 cm de un espejo divergente cuya distancia focal es de −20 cm?

*34.27. Un objeto se encuentra a 200 mm del vértice de un espejo esférico convexo que tiene 400 mm de radio. ¿Cuál es la amplificación del espejo? Resp. $M = +1/2$

*34.28. Un espejo esférico convexo tiene −60 cm de radio. ¿A qué distancia se debe colocar un objeto para que la imagen tenga un tercio del tamaño del objeto?

*34.29. ¿Cuál debe ser el radio de curvatura de un espejo esférico convexo para que produzca una imagen que corresponda a la cuarta parte de la longitud de un objeto ubicado a 40 in del espejo? Resp. $q = -26.7$ in

*34.30. Un espejo convexo tiene una distancia focal de −500 mm. Si un objeto se coloca a 400 mm del vértice, ¿cuál es la amplificación?

*34.31. Con un espejo esférico se forma una imagen real a 18 cm de la superficie. La imagen tiene el doble de tamaño que el objeto. Calcule la ubicación del objeto y la distancia focal del espejo. Resp. $p = 9.00$ cm, $f = 6.00$ cm

*34.32. Un espejo colocado a 2 m de un objeto produce una imagen no invertida alargada tres veces. ¿El espejo es divergente o convergente? ¿Cuál es el radio del espejo?

*34.33. La amplificación de un espejo es −0.333. ¿Dónde se ha colocado el objeto si su imagen se forma sobre una cartulina a 540 mm del espejo? ¿Cuál es la distancia focal? Resp. $p = 1.62$ m, $f = +405$ mm

*34.34. ¿Cuál debe ser el radio de curvatura de un espejo cóncavo para que produzca una imagen de la cuarta parte del tamaño de un objeto colocado a 50 cm del espejo?

*34.35. Un espejo esférico para afeitarse produce una amplificación de +2.5 cuando se coloca un objeto a 15 cm de su superficie. ¿Cuál es la distancia focal del espejo? Resp. $f = +25$ cm

Preguntas para la reflexión crítica

34.36. Un jugador de beisbol de 6 ft de estatura se coloca a una distancia de 30 ft frente a un espejo plano. La distancia desde la parte más alta de su gorra hasta sus ojos es de 8 in. Trace un diagrama que muestre la ubicación de las imágenes que se formarán de sus pies y de la punta de su gorra. ¿Cuál es la longitud mínima que debe tener el espejo para que él pueda ver su imagen completa? Si se aproxima 10 m más al espejo, ¿cuál será la nueva distancia entre el objeto y la imagen? Resp. 36 in, 40 ft

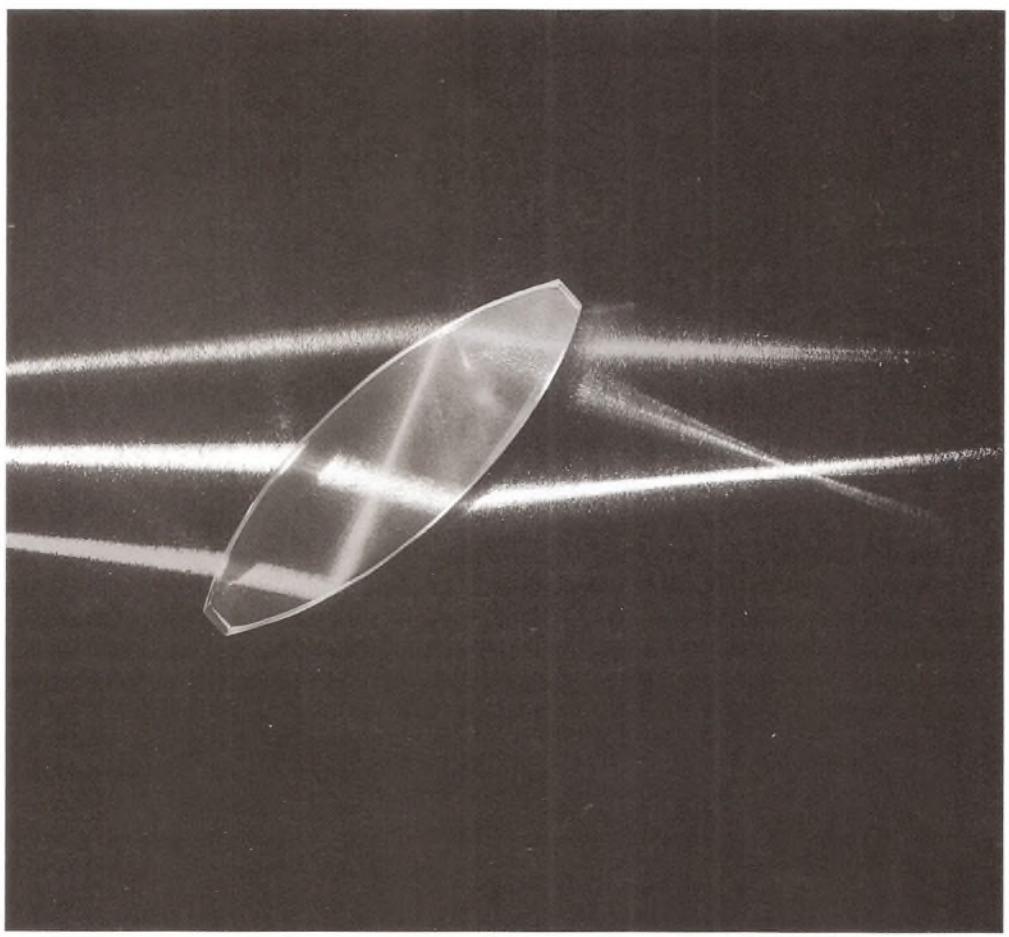
*34.37. La Luna tiene 3 480 km de diámetro y está a 3.84×10^8 m de la Tierra. Un telescopio sobre la Tierra utiliza un espejo esférico de 8.00 m de radio para formar una imagen de ese satélite. ¿Cuál es el diámetro de la imagen así formada? ¿Cuál es la amplificación del espejo?

*34.38. Una imagen de 60 mm de longitud se forma sobre una pared a 2.3 m de una fuente luminosa de 20 mm de alto. ¿Cuál es la distancia focal de este espejo? ¿Es divergente o convergente? ¿Cuál es la amplificación? Resp. 862 mm, convergente, −3.00

*34.39. Obtenga una fórmula para calcular la distancia focal de un espejo en función de la distancia p al objeto y la amplificación M. Aplique esa fórmula al problema 34.25. Encuentre una relación similar que permita calcular la distancia q a la imagen en función de M y p. Aplíquela al problema 34.33.

*34.40. Un espejo cóncavo de 800 mm de radio se coloca frente a frente con un espejo plano de 600 mm. Una fuente de luz colocada en el punto medio entre los espejos se acondiciona de manera que la luz se refleje primero en la superficie cóncava. ¿Cuáles son la posición y la amplificación de la imagen formada después de haberse reflejado en el espejo plano? (*Sugerencia:* considere la imagen formada por el primer espejo como el objeto para el segundo espejo.) Resp. 1.8 m detrás del espejo plano, +4.00

35 Refracción



La refracción y la reflexión interna total de los rayos de luz se observan en esta fotografía como tres rayos de luz que pasan a través de una lente biconvexa. En este capítulo estudiaremos las leyes de la refracción y las condiciones para la reflexión interna total.

Objetivos

Cuando termine de estudiar este capítulo el alumno:

1. Definirá el *índice de refracción* y expresará tres leyes que describen el comportamiento de la luz refractada.
2. Aplicará la ley de Snell para resolver problemas que impliquen la transmisión de la luz en dos o más medios.
3. Determinará el cambio de velocidad o de longitud de onda de la luz cuando se mueve de un medio a otro.
4. Explicará los conceptos de *reflexión interna total* y *ángulo crítico*, y utilizará estas ideas para resolver problemas similares a los que aparecen en este texto.

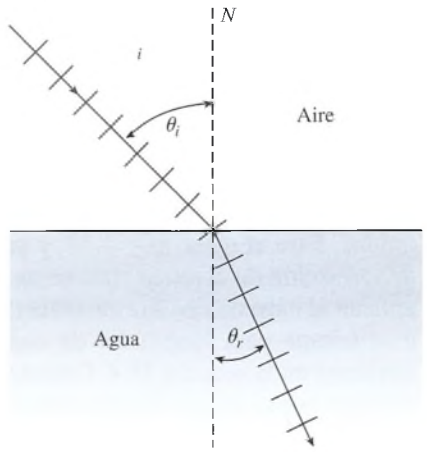


Figura 35.1 Refracción de un frente de onda en la frontera entre dos medios.

La luz se propaga en línea recta a rapidez constante en un medio uniforme. Si cambia el medio, la rapidez también cambiará y la luz viajará en línea recta a lo largo de una nueva trayectoria. La desviación de un rayo de luz cuando pasa oblicuamente de un medio a otro se conoce como ***refracción***. El fundamento de la refracción se ilustra en la figura 35.1 para el caso de una onda de luz que se propaga del aire al agua. El ángulo θ_i que se forma entre el haz incidente y la normal a la superficie se conoce como *ángulo de incidencia*. Al ángulo θ_r formado entre el haz refractado y la normal se le llama *ángulo de refracción*.

La refracción explica fenómenos cotidianos como la aparente distorsión de los objetos que se sumergen en agua parcialmente. En la figura 35.2a, la varilla parece flexionarse en la superficie del agua; y el pez de la figura 35.2b parece estar más cerca de la superficie de lo que en realidad se encuentra. En este capítulo estudiaremos las propiedades de los medios refractivos y se desarrollarán las ecuaciones para predecir su efecto sobre los rayos luminosos incidentes.

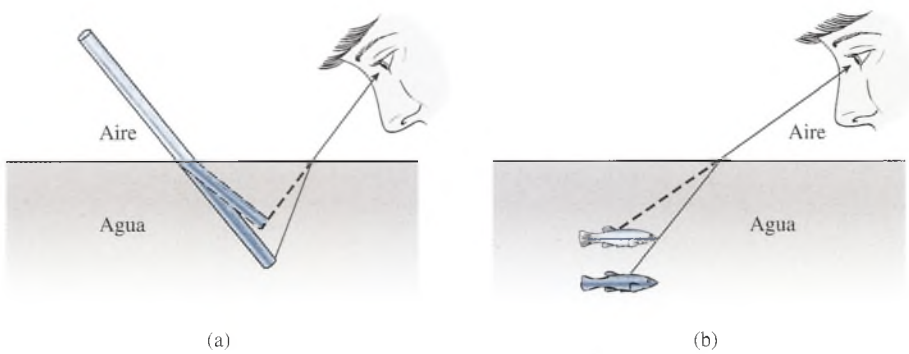


Figura 35.2 La refracción es la causante de la distorsión de estas imágenes. (a) La varilla parece estar flexionada. (b) Este pez parece más cerca de la superficie de lo que está en realidad.

35.1 Índice de refracción

La velocidad de la luz dentro de una sustancia material es generalmente menor que la velocidad en el espacio libre, donde es de 3×10^8 m/s. En el agua la velocidad de la luz es de casi 2.25×10^8 m/s, lo cual es casi equivalente a las tres cuartas partes de su velocidad en el aire. La luz viaja aproximadamente a dos tercios de esa velocidad en el vidrio, o sea a unos 2×10^8 m/s. La razón de la velocidad de la luz c en el vacío entre la velocidad v de la luz en un medio particular se llama el ***índice de refracción*** n para ese material.

El índice de refracción n de un material particular es la razón de la velocidad de la luz en el espacio libre respecto a la velocidad de la luz a través del material.

$$n = \frac{c}{v} \qquad \textit{Índice de refracción} \qquad \textbf{(35.1)}$$

El índice de refracción es una cantidad adimensional y generalmente es mayor que la unidad. Para el agua, $n = 1.33$, y para el vidrio, $n = 1.5$. La tabla 35.1 muestra los índices de refracción de diversas sustancias de uso común. Observe que los valores allí señalados se aplican al caso de una luz amarilla (589 nm). La velocidad de la luz en sustancias materiales es diferente para longitudes de onda distintas. Este efecto, conocido como ***dispersión***, se analizará en la sección 35.4. Cuando la longitud de onda de la luz no se especifica, es común suponer que el índice corresponde al que tendría una luz amarilla.

Tabla 35.1

Índice de refracción de la luz amarilla, con longitud de onda de 589 nm

Sustancia	n	Sustancia	n
Agua	1.33	Fluorita	1.43
Alcohol etílico	1.36	Glicerina	1.47
Benceno	1.50	Hielo	1.31
Circón	1.92	Sal de roca	1.54
Cuarzo	1.54	Vidrio	1.33
Diamante	2.42	Crown	1.52
Disulfuro de carbono	1.63	Flint (de roca)	1.63

Ejemplo 35.1 Calcule la velocidad de la luz amarilla en un diamante cuyo índice de refracción es 2.42.

Plan: El índice de refracción es la razón de la velocidad de la luz en el espacio libre respecto a la velocidad en el medio, así que podemos resolver para esa velocidad mediante sustitución.

Solución: A partir de la ecuación (35.1) tenemos

$$n = \frac{c}{v} \quad \text{o} \quad v = \frac{c}{n}$$

$$v = \frac{3 \times 10^8 \text{ m/s}}{2.42} = 1.24 \times 10^8 \text{ m/s}$$

35.2 Las leyes de refracción

Desde la antigüedad se conocen y se aplican dos leyes básicas de refracción. Estas leyes se enuncian como sigue y se ilustran en la figura 35.3:

El rayo incidente, el rayo refractado y la normal a la superficie se encuentran en el mismo plano.

La trayectoria de un rayo refractado en la interfase entre dos medios es exactamente reversible.

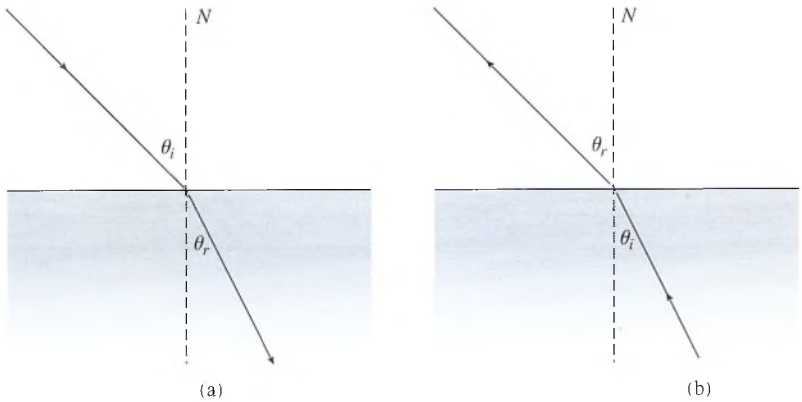


Figura 35.3 (a) El rayo incidente, el rayo refractado y la normal a la superficie están en el mismo plano. (b) Los rayos refractados son reversibles.

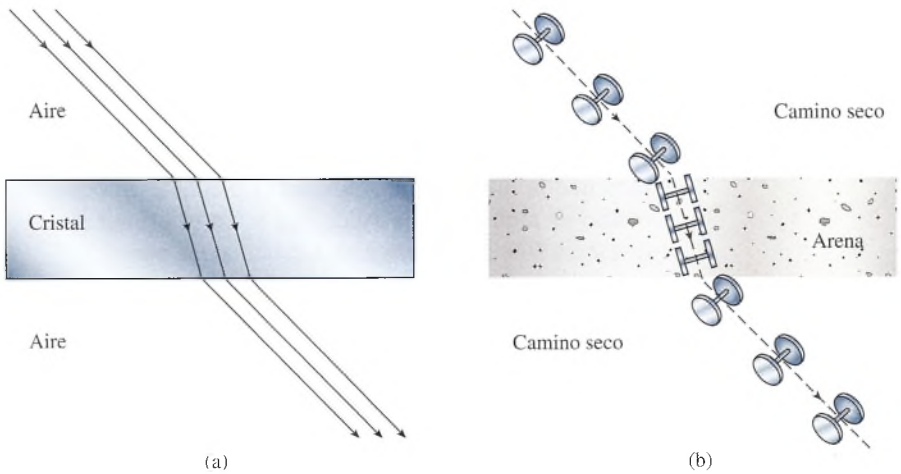


Figura 35.4 (a) El desplazamiento lateral de la luz al pasar por vidrio. (b) Una analogía mecánica.

Estas dos leyes se demuestran fácilmente mediante la observación y la experimentación. Sin embargo, desde el punto de vista práctico, es mucho más importante entender y predecir el *grado* de flexión que ocurre.

Para entender cómo un cambio de velocidad de la luz puede alterar la trayectoria de ésta a través de un medio, consideremos la analogía mecánica que se muestra en la figura 35.4. En la figura 35.4a, la luz que incide sobre una lámina de vidrio primero sufre una desviación hacia la normal mientras pasa a través del medio más denso, y luego se desvía alejándose de la normal al retornar al aire. En la figura 35.4b la acción de ruedas que encuentran a su paso una franja de arena se asemeja al comportamiento de la luz. Al aproximarse a la arena, una de las ruedas la toca primero y disminuye su rapidez. La otra rueda continúa a la misma rapidez, provocando que el eje forme un nuevo ángulo. Cuando ambas ruedas están en la arena, de nuevo se mueven en línea recta con velocidad uniforme. La primera rueda que entra en la arena es también la primera en salir de ella, y aumenta su rapidez al dejar la franja de arena. Por tanto, el eje regresa a su dirección original. La trayectoria del eje es análoga a la trayectoria de un frente de onda.

El cambio en la dirección de la luz al entrar en otro medio se puede analizar con la ayuda de un diagrama de frente de onda como el de la figura 35.5. Una onda plana en un medio de índice de refracción n_1 choca con la superficie plana de un medio cuyo índice de refracción es n_2. Al ángulo de incidencia se le denomina θ_2. En la figura, se supone que el segundo medio tiene una densidad óptica mayor que el primero ($n_2 > n_1$). Un ejemplo de lo anterior se presenta cuando la luz pasa del aire ($n_1 = 1$) al agua ($n_2 = 1.33$). La línea AB representa el frente de onda en un tiempo $t = 0$ justamente cuando entra en contacto con el medio 2. La recta CD

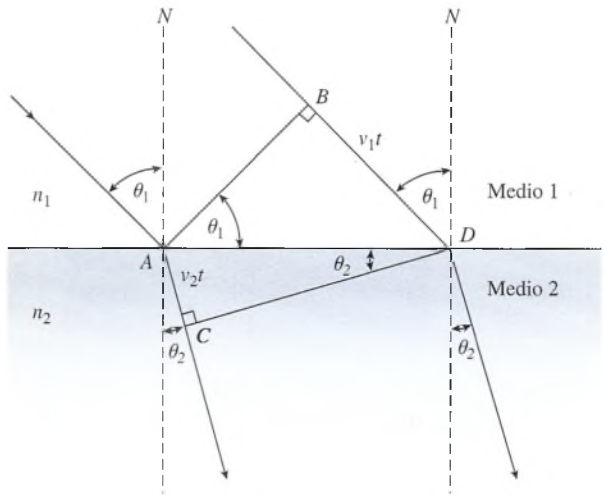


Figura 35.5 Deducción de la ley de Snell.

representa el mismo frente de onda después del tiempo t requerido para entrar totalmente al segundo medio. La luz se desplaza de B a D en el medio 1 en el mismo tiempo t requerido para que la luz viaje de A a C en el medio 2. Suponiendo que la velocidad v_2 en el segundo medio es menor que la velocidad v_1 en el primer medio, la distancia AC será menor que la distancia BD. Estas longitudes están dadas por

$$AC = v_2 t \qquad BD = v_1 t$$

Se puede demostrar por geometría que el ángulo BAD es igual a θ_1 y que el ángulo ADC es igual a θ_2, como se indica en la figura 35.5. La recta AD forma una hipotenusa que es común a los dos triángulos ADB y ADC. Partiendo de la figura,

$$\operatorname{sen}\theta_1 = \frac{v_1 t}{AD} \qquad \operatorname{sen}\theta_2 = \frac{v_2 t}{AD}$$

Al dividir la primera ecuación entre la segunda obtenemos

$$\frac{\operatorname{sen}\theta_1}{\operatorname{sen}\theta_2} = \frac{v_1}{v_2} \tag{35.2}$$

La razón del seno del ángulo de incidencia con respecto al seno del ángulo de refracción es igual a la razón de la velocidad de la luz en el medio incidente respecto a la velocidad de la luz en el medio de refracción.

Esta regla fue descubierta por el astrónomo danés Willebrord Snell en el siglo XVII, y se llama en su honor ***ley de Snell***. Una forma alternativa para esta ley se obtiene expresando las velocidades v_1 y v_2 en términos de los índices de refracción de los dos medios. Recuerde que

$$v_1 = \frac{c}{n_1} \qquad \text{y} \qquad v_2 = \frac{c}{n_2}$$

Utilizando estas relaciones en la ecuación (35.2), escribimos

$$n_1 \operatorname{sen}\theta_1 = n_2 \operatorname{sen}\theta_2 \tag{35.3}$$

Puesto que el seno de un ángulo aumenta al aumentar el ángulo, vemos que un incremento en el índice de refracción provoca una disminución en el ángulo, y viceversa.

Ejemplo 35.2

La luz pasa del agua al aire con un ángulo de incidencia de 35°. ¿Cuál será el ángulo de refracción si el índice de refracción del agua es 1.33?

Plan: El ángulo de refracción θ_{aire} puede determinarse a partir de la ley de Snell.

Solución: Dado que $n_{aire} = 1.0$, $n_{agua} = 1.33$ y $\theta_{aire} = 35°$, tenemos

$$\begin{aligned} n_{aire} \operatorname{sen} \theta_{aire} &= n_{agua} \operatorname{sen} \theta_{agua} \\ (1.0) \operatorname{sen} \theta_{aire} &= (1.33) \operatorname{sen} 35° \\ \operatorname{sen} \theta_{aire} &= 0.763 \\ \theta_{aire} &= 49.7° \end{aligned}$$

El índice de refracción en el aire (1.0) fue *menor* que el del agua (1.33), así que el ángulo refractado en el aire es mayor que el ángulo de incidencia.

Ejemplo 35.3

Un rayo de luz en el agua ($n_{agua} = 1.33$) incide a un ángulo de 40° sobre una lámina de vidrio que está en el fondo de un contenedor, como muestra la figura 35.6. Si el rayo refractado forma un ángulo de 33.7° con la normal, ¿cuál es el índice de refracción del vidrio?

Plan: El agua es el medio incidente, y el vidrio es el medio refractado. Dados los ángulos y el índice para el agua, podemos aplicar la ley de Snell para calcular el índice del vidrio.

Solución: Sustituyendo $n_{agua} = 1.33$, $\theta_{agua} = 40°$ y $\theta_v = 33.7°$, obtenemos

$$\begin{aligned} n_v \operatorname{sen} \theta_v &= n_{agua} \operatorname{sen} \theta_{agua} \\ n_v \operatorname{sen} 33.7° &= (1.33) \operatorname{sen} 40° \\ n_v &= \frac{(1.33) \operatorname{sen} 40°}{\operatorname{sen} 33.7°} \\ n_v &= 1.54 \end{aligned}$$

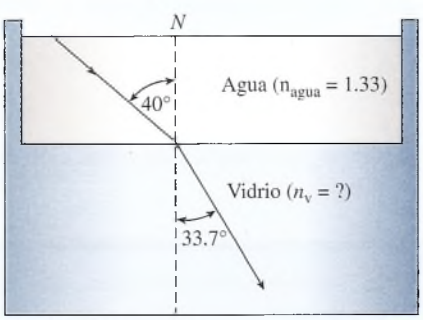


Figura 35.6

35.3 Longitud de onda y refracción

Hemos visto que la luz disminuye su velocidad cuando pasa a un medio de mayor ***densidad óptica***. ¿Qué sucede con la longitud de onda de la luz cuando entra a un nuevo medio? En la figura 35.7, la luz viaja en el aire a una velocidad c y se encuentra con un medio a través del cual se propaga a una rapidez menor v_m. Cuando regresa al aire, de nuevo viaja a la velocidad c de la luz en el aire. Esto no viola la conservación de la energía porque la energía de una onda luminosa es

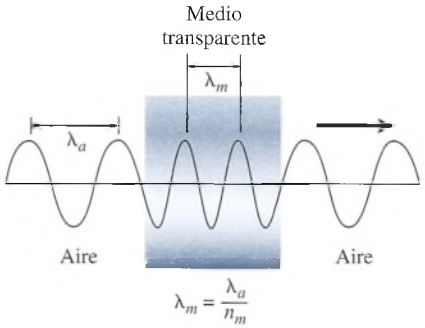


Figura 35.7 La longitud de onda de la luz se reduce cuando ésta entra en un medio de mayor densidad óptica.

proporcional a su frecuencia. La frecuencia f es la misma dentro del medio que fuera de él. Para comprobar que lo anterior es cierto, considere que la frecuencia es el número de ondas que pasan por cualquier punto en la unidad de tiempo. El mismo número de ondas que sale del medio en un segundo es el que entra al medio en una unidad de tiempo. Por tanto, la frecuencia dentro del medio no cambia. La velocidad se relaciona con la frecuencia y la longitud de onda mediante

$$c = f\lambda_a \qquad \text{y} \qquad v_m = f\lambda_m \tag{35.4}$$

donde c y v_m son la velocidad en el aire y dentro del medio, y λ_a y λ_m son las longitudes de onda respectivas. Puesto que la velocidad disminuye dentro del medio, la longitud de onda dentro del medio debe disminuir proporcionalmente para que la frecuencia permanezca constante. Dividiendo la primera ecuación entre la segunda en la ecuación (35.4) queda

$$\frac{c}{v_m} = \frac{f\lambda_a}{f\lambda_m} = \frac{\lambda_a}{\lambda_m}$$

Si se sustituyen $v_m = c/n_m$, obtenemos

$$n_m = \frac{\lambda_a}{\lambda_m}$$

Por tanto, la longitud de onda λ_m dentro del medio se reduce a

$$\lambda_m = \frac{\lambda_a}{n_m} \tag{35.5}$$

donde n_m es el índice de refracción del medio y λ_a es la longitud de onda de la luz en el aire.

Ejemplo 35.4

Una luz roja monocromática, con una longitud de onda de 640 nm, pasa del aire a una placa de vidrio cuyo índice de refracción es 1.5. ¿Cuál será la longitud de onda de la luz dentro de este medio?

Plan: La longitud de onda será menor en el vidrio debido a la rapidez reducida de la luz.

Solución: La sustitución directa en la ecuación (35.5) nos da

$$\lambda_v = \frac{\lambda_a}{n_v} = \frac{640 \text{ nm}}{1.5}; \qquad \lambda_v = 427 \text{ nm}$$

La longitud de onda en el vidrio indica que el color es azul. Si usted está observando este efecto, ¿por qué el color sigue pareciendo ser rojo?

Suponga que un rayo de luz monocromática en un medio 1 entra en el medio 2. Debemos recordar que las cuatro relaciones siguientes son iguales. En otras palabras, podemos establecer dos relaciones cualesquiera como iguales para formar una ecuación con el fin de calcular un valor desconocido buscado.

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{\operatorname{sen}\theta_2}{\operatorname{sen}\theta_1} = \frac{v_2}{v_1} = \frac{\lambda_2}{\lambda_1} \tag{35.6}$$

Observe que todas las relaciones excepto una son la razón para el medio 2 al medio 1. El orden se invierte *sólo* para los índices de refracción, es decir, n_1/n_2.

35.4 Dispersión

Ya hemos mencionado que la velocidad de la luz en diferentes sustancias varía según las longitudes de onda. Definimos el índice de refracción como la razón de la velocidad c en el espacio libre a la velocidad dentro del medio.

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

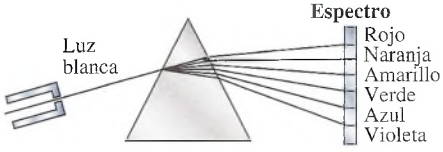


Figura 35.8 Dispersión de la luz por medio de un prisma.

Los valores que se presentan en la tabla 35.1 son válidos sólo en el caso de la luz monocromática amarilla (589 nm). La luz con una longitud de onda diferente, como la luz azul o la luz roja, daría como resultado un índice de refracción ligeramente diferente. La luz roja viaja con mayor rapidez, dentro de un medio específico, que la luz azul. Esto se puede demostrar haciendo pasar luz blanca a través de un prisma de cristal, como en la figura 35.8. Debido a las diferente rapidez dentro del medio, el haz se *dispersa* en sus colores componentes.

La dispersión es la separación de la luz en las longitudes de onda que la componen.

De un experimento así, podemos concluir que la luz blanca es en realidad una mezcla de luz, compuesta de varios colores. La proyección de un haz disperso se conoce como ***espectro***.

35.5 Refracción interna total

Puede presentarse un fenómeno fascinante conocido como ***refracción interna total***, cuando la luz pasa, en forma oblicua, de un medio a otro de menor densidad óptica. Para entender este fenómeno, consideremos una fuente de luz sumergida en un medio 1, como se ilustra en la figura 35.9. Observe los cuatro rayos A, B, C y D, que divergen de la fuente sumergida. El rayo A pasa al medio 2 en dirección normal a la interfase. El ángulo de incidencia y el ángulo de refracción valen cero en este caso especial. El rayo B incide con un ángulo θ_1 y se refracta alejándose de la normal con un ángulo θ_2. El ángulo θ_2 es mayor que θ_1 porque el índice de refracción para el medio 1 es

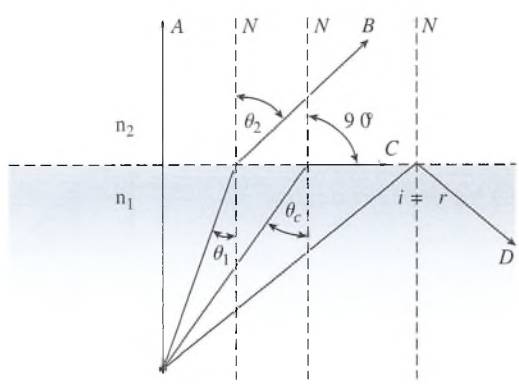


Figura 35.9 Ángulo crítico de incidencia.

mayor que para el medio 2 ($n_1 > n_2$). Cuando el ángulo de incidencia θ_1 aumenta, el ángulo de refracción θ_2 también aumenta hasta que el rayo refractado C emerge en forma tangencial a la superficie. El ángulo de incidencia θ_c en el cual esto ocurre, se conoce como el ***ángulo crítico***.

El ángulo crítico θ_c es el ángulo de incidencia límite en un medio más denso, que da por resultado un ángulo de refracción de 90°.

Un rayo que se aproxime a la superficie con un ángulo mayor que el ángulo crítico se refleja de nuevo al interior del medio 1. El rayo D en la figura 35.9 no pasa al medio de arriba, sino que en la interfase *se refleja internamente en forma total*. Este tipo de reflexión obedece a las mismas leyes que cualquier otro tipo de reflexión; esto significa que el ángulo de incidencia es igual al ángulo de reflexión. La reflexión interna total puede ocurrir únicamente cuando la luz incidente procede de un medio de mayor densidad ($n_1 > n_2$).

El ángulo crítico para dos medios determinados se puede calcular a partir de la ley de Snell.

$$n_1 \operatorname{sen} \theta_c = n_2 \operatorname{sen} \theta_2$$

donde θ_c es el ángulo crítico y $\theta_2 = 90°$. Simplificando, escribimos

$$n_1 \operatorname{sen} \theta_c = n_2(1)$$

o bien,

$$\operatorname{sen} \theta_c = \frac{n_2}{n_1} \qquad \textit{Ángulo crítico} \qquad \textbf{(35.7)}$$

Puesto que el seno del ángulo crítico nunca puede ser mayor que 1, el índice de refracción n_1 para el medio incidente debe ser mayor que el índice n_2 para el medio refractado. Si éste no fuera el caso, la luz se reflejaría en la interfase, de regreso al medio incidente.

Ejemplo 35.5

¿Cuál es el ángulo crítico para una superficie vidrio-aire si el índice de refracción del vidrio es 1.5?

Solución: Sustituyendo en forma directa en la ecuación (35.7) tenemos

$$\operatorname{sen} \theta_c = \frac{n_a}{n_v} = \frac{1.0}{1.5} = 0.667$$

$$\theta_c = 42°$$

El hecho de que el ángulo crítico para el vidrio sea de 42° permite el empleo de prismas a 45° en gran número de instrumentos ópticos. Dos de esas aplicaciones se ilustran en la figura 35.10. En la figura 35.10a se puede obtener una reflexión de 90° con poca pérdida de intensidad. En la figura 35.10b a 180° se obtiene una desviación. En cada caso, la reflexión interna total ocurre debido a que todos los ángulos de incidencia son de 45° y, por tanto, mayores que el ángulo crítico.

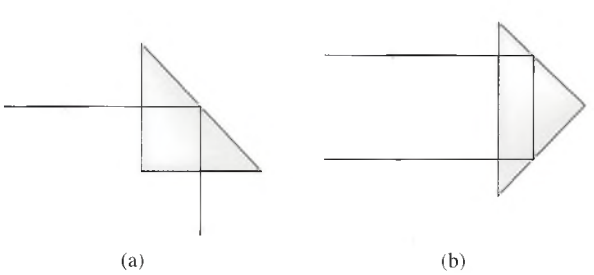


Figura 35.10 Los prismas de ángulo recto hacen uso del principio de reflexión interna total para desviar la trayectoria de la luz.

35.6 Fibras ópticas y aplicaciones

La aplicación de fibras ópticas en comunicaciones ha dado por resultado una explosión en la información. La fibra óptica tiene un ancho de banda mayor que el alambre de cobre, lo que significa que se puede transmitir más información durante un periodo fijo. Este incremento en la capacidad de transportar información proporciona nuevas e importantes posibilidades, incluyendo la televisión interactiva y selecciones de canal por cable, entre miles de aplicaciones.

Aun cuando es fácil percibir cómo la fibra óptica está cambiando el mundo que nos rodea, quizá nos sorprenda saber que esta habilidad para transmitir información depende principalmente de un solo fenómeno físico: la *reflexión interna total*. Como se estudió en las secciones previas, la reflexión interna total es el resultado del paso de la luz a través de un medio para encontrarse con un segundo medio de menor densidad óptica. Una fibra óptica consiste en dos medios de ese tipo.

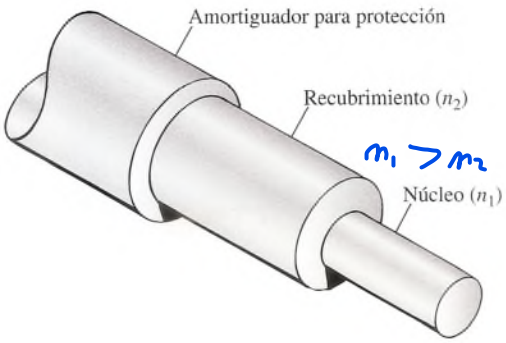


Figura 35.11 Estructura básica de una fibra óptica. El índice de refracción para el núcleo (n_1) debe ser mayor que el índice de refracción para el recubrimiento (n_2).

La estructura de una fibra óptica se ilustra en la figura 35.11. Observe que el núcleo de la fibra se utiliza como el medio de transmisión, mientras que el recubrimiento sirve para contener la señal transmitida. Esto significa que el núcleo debe tener un índice de refracción mayor que el índice del recubrimiento ($n_1 > n_2$).

Utilizando el modelo de propagación de rayos, podemos pensar en la propagación de señales a través de una fibra como si se tratara de rayos de luz. Tal como ilustra la figura 35.12, cada rayo tiene un ángulo de incidencia fijo con la frontera núcleo/recubrimiento. Mientras los haces de luz tengan un ángulo de incidencia igual o mayor que el ángulo crítico de la fibra, la señal quedará confinada en la fibra. (*Nota:* Por el hecho de que una fibra óptica es en realidad una guía de ondas cilíndrica, la luz puede propagarse únicamente en ella con ángulos específicos mayores que el ángulo crítico. Estos ángulos específicos se pueden determinar resolviendo las ecuaciones de onda apropiadas.)

Como se mencionó anteriormente, las fibras ópticas han jugado un papel importante en la expansión de la comunicación. En lo fundamental, las comunicaciones a través de fibra óptica consisten en el envío de información desde una fuente hasta su destino por medio de la transmisión de pulsos de luz. Esto es análogo a la práctica histórica de las comunicaciones de una embarcación a otra, usando la clave Morse. Cuando un barco deseaba comunicarse con otro, una fuente de luz se apagaba y se encendía en una secuencia que ambas partes entendían. Este principio se puede extender a las comunicaciones mediante fibra óptica, donde se han creado numerosos y muy eficientes esquemas para la codificación de datos. El esquema de codificación elegido depende de la aplicación específica y de las consideraciones de costos.

Usar la fibra óptica en sistemas de comunicación tiene múltiples ventajas. Entre las más importantes se cuentan la inmunidad a la interferencia electromagnética, una protección de datos más eficiente, mayor rapidez de transmisión y un aumento en la amplitud de banda de la señal. Estas ventajas hacen que la fibra óptica sea el medio de comunicación obligatorio para el futuro.

Si bien es cierto que las comunicaciones son el campo predominante de las fibras ópticas, esta tecnología tiene muchas otras aplicaciones. La figura 35.13 ilustra un sensor del nivel de fluidos. En este sensor se aprovecha el comportamiento de la luz cuando pasa por diferentes medios. Observe que al extremo de la fibra se le ha dado una forma especial para esta apli-

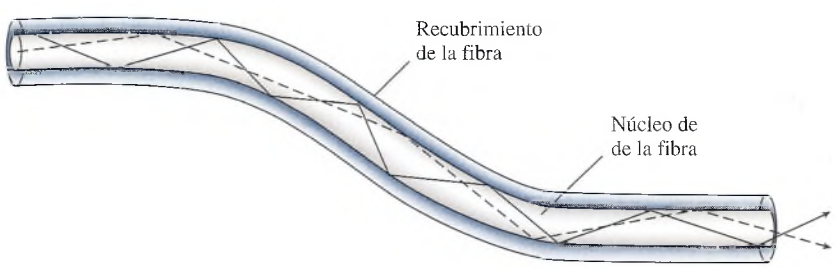


Figura 35.12 Modelo de rayos que permite explicar la forma en que se propaga la luz a través de una fibra óptica. Mientras las curvas sean lo suficientemente suaves como para que el ángulo de incidencia sea mayor que el ángulo crítico, la luz transmitida por la fibra sufrirá una reflexión interna total.

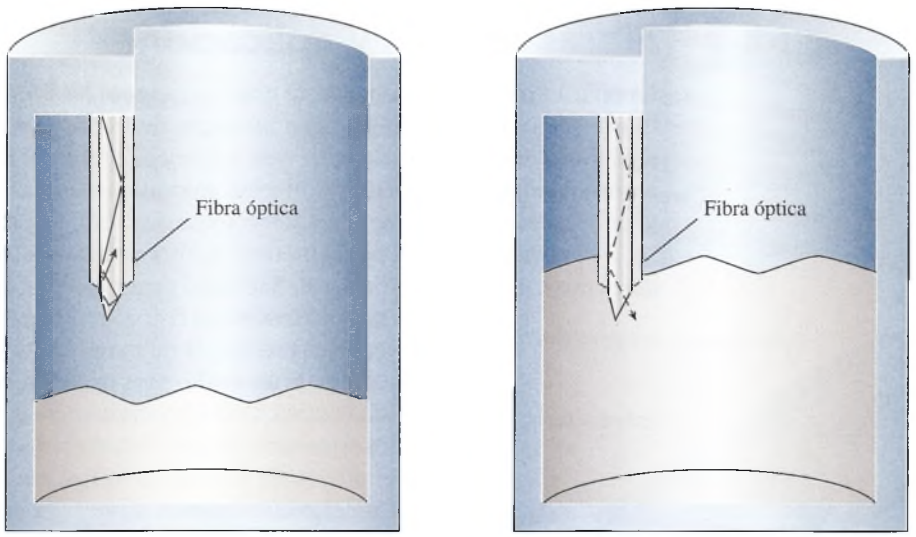


Figura 35.13 Sensor del nivel de fluidos fabricado con fibra óptica.

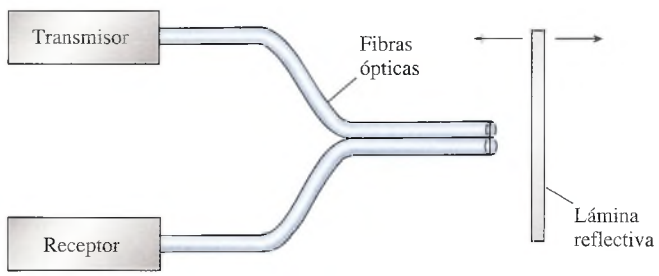


Figura 35.14 Sensor de desplazamiento de fibra óptica.

cación, de modo que cuando está expuesta al aire (a causa del bajo nivel de fluido) la mayor parte de la luz transmitida por la fibra se refleja de regreso. En cambio, cuando el fluido que está siendo detectado cubre el extremo de la fibra, el valor del índice del fluido se aproxima más al índice del núcleo de la fibra, por lo cual se reduce la cantidad de luz reflejada. La variación en la luz reflejada se utiliza para determinar el nivel del fluido.

Otro uso posible de la fibra óptica es un sensor de desplazamiento. Este sensor se basa en el comportamiento de dispersión de la luz cuando sale del extremo de una fibra. Con este sensor, la distancia entre los extremos de la fibra y la lámina reflectiva se puede medir como se indica en la figura 35.14. Cuando la lámina se mueve alejándose de los extremos de la fibra, se refleja menos luz de la fibra transmisora a la fibra receptora. Por el contrario, cuando la lámina se acerca a los extremos de la fibra, se refleja más luz en la fibra receptora. Este nivel de variación de la intensidad receptora se aprovecha para determinar la posición de la lámina.

En medicina, la fibra óptica está causando un gran impacto, tanto en lo que se refiere al diagnóstico como en materia de tratamiento. Con propósitos de diagnóstico, un dispositivo conocido como endoscopio de fibra óptica permite inspeccionar visualmente los órganos internos. En este dispositivo se utilizan dos fibras ópticas, una para iluminar el área de interés y la otra para transmitir la imagen que está siendo observada. Cuando se conecta a un monitor de video, este dispositivo permite a los médicos ver lo que anteriormente requería de cirugía exploratoria.

En lo que se refiere a tratamiento, las arterias obstruidas pueden ser despejadas usando el sistema LASTAC (angioplastia transluminal reforzada por láser). En este sistema, la luz de láser se transmite a través de una fibra óptica que se inserta en una arteria obstruida. El láser evapora la placa de obstrucción, despejando la arteria. Con este tratamiento se evita frecuentemente la cirugía mayor.

35.7 ¿Es lo mismo ver que creer?

En vista de que estamos acostumbrados a que la luz se propague en línea recta, la refracción y la reflexión interna total a menudo nos presentan imágenes increíbles. La refracción atmosférica contribuye a múltiples ilusiones que se conocen como *espejismos*. La figura 35.15 proporciona dos ejemplos de tales ilusiones. En la figura 35.15a vemos que una capa de aire caliente, en contacto con el suelo también caliente, es menos densa que las capas de aire frío que están arriba de ella. Por consiguiente, la luz que proviene de los objetos distantes se refracta hacia arriba, por lo cual éstos aparecen invertidos.

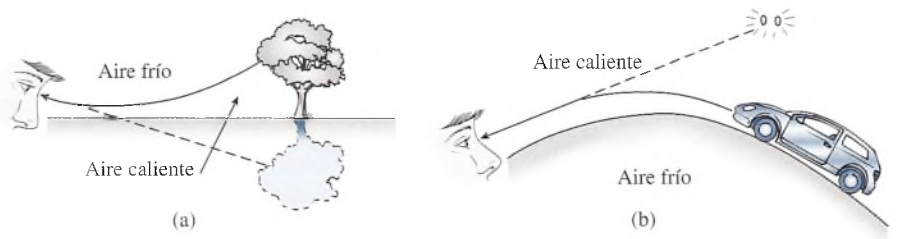


Figura 35.15 La refracción atmosférica es la causante del espejismo en (a) y explica el fenómeno de los *destellos luminosos* (espejismo) en (b).

Por la noche, a veces se presenta la situación contraria: la capa de aire frío se encuentra debajo de otras capas más calientes. Las luces de un automóvil como muestra la figura 35.15b parecen *destellos luminosos* (espejismos) en el aire. Muchos científicos opinan que algunos de los objetos voladores no identificados (OVNIS) observados a través de los siglos, pueden explicarse en términos de la refracción atmosférica.

Varias combinaciones de la refracción y la reflexión interna total fueron la causa de la extraña fotografía que aparece en la figura 35.16. La foto fue tomada con una cámara colocada bajo el agua, enfocando a una muchacha que estaba sentada en el borde de la piscina y tenía los pies sumergidos en el agua. En la figura 35.17 se explica gráficamente este fenómeno. La parte superior de la fotografía fue el resultado de la refracción en la superficie; en la parte del centro, la inversión de las piernas fue una ilusión producida por la reflexión interna total en la superficie del agua. La parte inferior de la fotografía es la única imagen que no muestra distorsión, puesto que las piernas se ven en forma directa dentro del mismo medio.

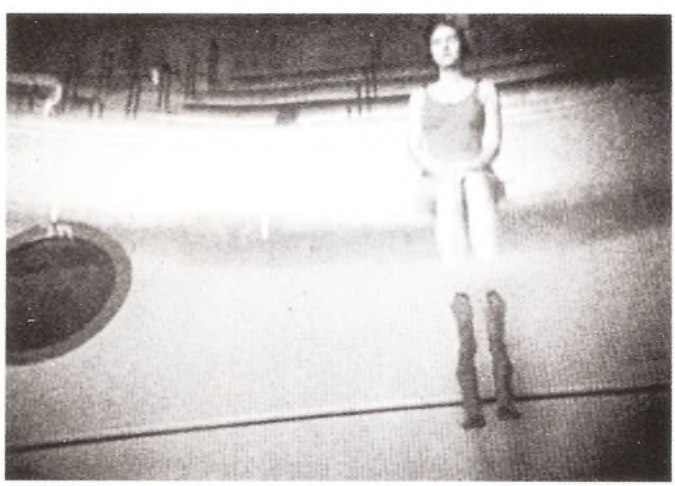


Figura 35.16 Esta fotografía tomada con una cámara colocada bajo el agua nos muestra una curiosa imagen de una muchacha sentada en el borde de una piscina. (*Foto tomada de la película didáctica* Introduction to Optics, *Education Development Center*.)

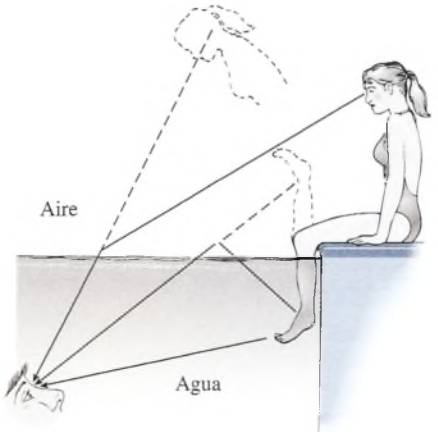


Figura 35.17 Una combinación de la refracción, reflexión y reflexión interna total induce a nuestros ojos a cometer un error de apreciación.

35.8 Profundidad aparente

La refracción es la causa de que un objeto sumergido en un líquido de mayor índice de refracción nos parezca más cercano a la superficie de lo que realmente está. Este curioso efecto se ilustra en la figura 35.18. El objeto O parece estar en I debido a la refracción de la luz desde el objeto. La ***profundidad aparente*** se representa por q, y la profundidad real se simboliza por p. Aplicando la ley de Snell a la superficie se obtiene

$$\frac{\operatorname{sen}\theta_1}{\operatorname{sen}\theta_2} = \frac{n_2}{n_1} \tag{35.8}$$

Si podemos relacionar la razón de los índices de refracción con las profundidades real y aparente, contaremos con una relación útil para predecir las profundidades aparentes de los objetos sumergidos. Partiendo de la figura 35.18, se observa que

$$\angle AOB = \theta_1 \qquad \text{y} \qquad \angle AIB = \theta_2$$

y que

$$\operatorname{sen}\theta_1 = \frac{d}{OA} \qquad \operatorname{sen}\theta_2 = \frac{d}{IA}$$

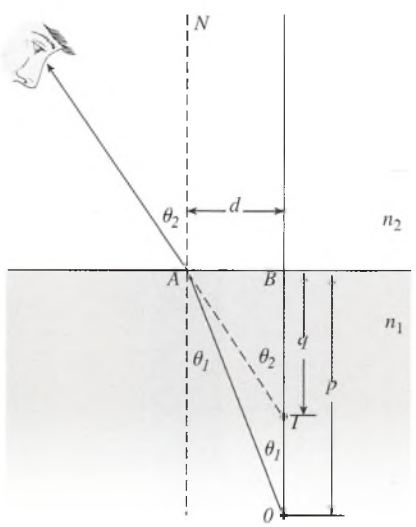


Figura 35.18 Relación entre la profundidad aparente y la profundidad real.

Usando esta información en la ecuación (35.8), obtenemos

$$\frac{\operatorname{sen}\theta_1}{\operatorname{sen}\theta_2} = \frac{d/OA}{d/IA} = \frac{IA}{OA} \tag{35.9}$$

Si nos ocupamos tan sólo de los rayos en posición casi vertical, los ángulos θ_1 y θ_2 serán pequeños, por lo que se pueden aplicar las siguientes aproximaciones:

$$OA \approx p \qquad \text{y} \qquad IA \approx q$$

Al aplicar estas aproximaciones a las ecuaciones (35.8) y (35.9), escribimos

$$\frac{\operatorname{sen}\theta_1}{\operatorname{sen}\theta_2} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{q}{p}$$

$$\frac{\textit{Profundidad aparente } q}{\textit{Profundidad real } p} = \frac{n_2}{n_1} \tag{35.10}$$

Ejemplo 35.6

Una moneda se encuentra en reposo en el fondo de un recipiente lleno de agua ($n_{\text{agua}} = 1.33$). La distancia aparente de la moneda a la superficie es de 9 cm. ¿Qué profundidad tiene el recipiente?

Plan: Consideramos que la profundidad aparente es la imagen virtual q de la moneda y no la profundidad real p. Podemos calcular p a partir de los índices de refracción dados.

Solución: Al resolver para p en la ecuación (35.10) obtenemos la profundidad real del contenedor.

$$\frac{q}{p} = \frac{n_a}{n_{\text{agua}}} \qquad \text{o} \qquad p = \frac{qn_{\text{agua}}}{n_a}$$

$$p = \frac{(9\text{ cm})(1.33)}{(1.0)} = 12\text{ cm}$$

La profundidad aparente es aproximadamente tres cuartas partes de la profundidad real.

Resumen y repaso

Resumen

La *refracción* ha sido definida como la desviación de un rayo de luz cuando pasa oblicuamente de un medio a otro. Hemos visto que el grado de desviación se puede predecir tomando como base el cambio registrado en la velocidad o el índice de refracción conocido de cada medio. Los conceptos de refracción, ángulo crítico, dispersión y reflexión interna desempeñan un papel importante en el funcionamiento de muchos instrumentos. Los principales conceptos expuestos en este capítulo se resumen a continuación.

- El índice de refracción de un material dado es la razón entre la velocidad de la luz c en el espacio libre y la velocidad de la luz v a través del medio.

$$n = \frac{c}{v} \qquad c = 3 \times 10^8 \text{ m/s} \qquad \textit{Índice de refracción}$$

- Cuando la luz incidente que proviene del medio 1 se refracta dentro del medio 2, la ley de Snell se puede escribir en las dos formas siguientes (véase la figura 35.19):

$$n_1 \operatorname{sen}\theta_1 = n_2 \operatorname{sen}\theta_2 \qquad \frac{v_1}{v_2} = \frac{\operatorname{sen}\theta_1}{\operatorname{sen}\theta_2} \qquad \textit{Ley de Snell}$$

- Cuando la luz procedente del medio 1 entra en el medio 2, su longitud de onda se modifica por el hecho de que el índice de refracción es diferente.

$$\frac{\lambda_1}{\lambda_2} = \frac{n_2}{n_1} \qquad \lambda_2 = \frac{n_1\lambda_1}{n_2}$$

- El ángulo crítico θ_c es el ángulo máximo de incidencia procedente de un medio que todavía es capaz de producir refracción (a 90°) en el interior de otro medio de frontera (límite). A partir de esta definición, tenemos

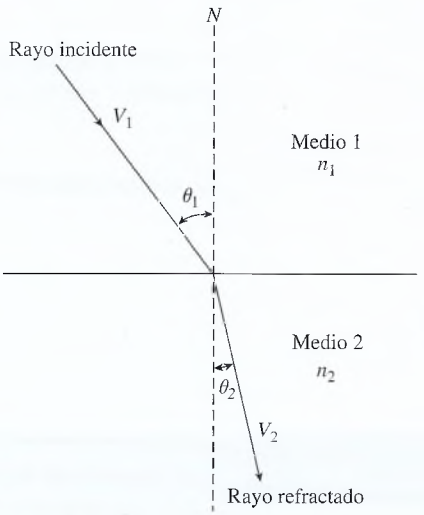


Figura 35.19 Ley de Snell.

$$\operatorname{sen}\theta_c = \frac{n_2}{n_1} \qquad \textit{Ángulo crítico}$$

- La refracción es la causa de que un objeto introducido en un medio se observe a diferente profundidad cuando se mira desde arriba en otro medio.

$$\frac{\textit{Profundidad aparente } q}{\textit{Profundidad real } p} = \frac{n_2}{n_1}$$

Conceptos clave

ángulo crítico 686
densidad óptica 683
dispersión 680
índice de refracción 679
ley de Snell 682
espectro 685
profundidad aparente 690
reflexión interna total 685
refracción 679

Preguntas de repaso

35.1. Enuncie tres leyes de la refracción y demuestre cómo pueden comprobarse en el laboratorio.

35.2. ¿El índice de refracción es constante para un medio en particular? Explique su respuesta.

35.3. Explique cómo se prolonga el día a causa de la refracción atmosférica.

35.4. Se coloca una moneda en el fondo de una cubeta, de manera que no sea posible verla cuando se mira desde arriba bajo cierto ángulo. Demuestre por medio de diagramas por qué la moneda se vuelve visible cuando la cubeta se llena de agua.

35.5. ¿Los objetos de densidad óptica más alta tienen ángulos críticos más grandes o más pequeños cuando están rodeados de aire?

35.6. A partir de los temas expuestos en este capítulo, explique por qué un diamante es mucho más brillante que una copia del mismo hecha de vidrio.

35.7. Explique por qué los prismas en ángulo recto son reflectores más eficientes que las superficies reflejadas.

35.8. ¿Por qué se perciben colores en la luz de los destellos de un diamante?

35.9. Un niño está de pie dentro de una piscina de profundidad uniforme y el nivel del agua le cubre hasta la cintura. ¿Por qué da la impresión de que el niño se encuentra en la parte más profunda de la piscina?

35.10. La longitud de onda λ de cierta fuente de radiación se incrementa a 2λ. Si el índice de refracción medido inicialmente fue de 1.5, ¿cuál será su valor cuando la longitud de onda se duplique?

35.11. ¿Cuál es el ángulo crítico para un trozo de vidrio de forma irregular sumergido en un líquido que tiene el mismo índice de refracción que aquél? ¿Por qué el vidrio sigue siendo invisible en este caso?

Problemas

Sección 35.1 Índice de refracción

35.1. La rapidez de la luz en cierto medio transparente es de 1.6×10^8 m/s. ¿Cuál es el índice de refracción en dicho medio? Resp. 1.88

35.2. Si la rapidez de la luz se reduce en un tercio, ¿cuál será el índice de refracción del medio a través del cual viaja dicha luz?

35.3. Calcule la rapidez de la luz en (a) vidrio crown, (b) diamante, (c) agua y (d) alcohol etílico.
Resp. 2.00×10^8 m/s, 1.24×10^8 m/s, 2.26×10^8 m/s, 2.21×10^8 m/s

35.4. Si la luz viaja a 2.1×10^8 m/s en un medio transparente, ¿cuál es el índice de refracción dentro de dicho medio?

Sección 35.2 Las leyes de la refracción

35.5. La luz incidente tiene un ángulo de 37° cuando pasa del aire al cristal de roca ($n = 1.6$). ¿Cuál es el ángulo de refracción dentro del cristal de roca? Resp. 22.1°

35.6. Un haz de luz forma un ángulo de 60° con la superficie del agua. ¿Cuál es su ángulo de refracción al entrar en el agua?

35.7. La luz pasa del agua ($n = 1.33$) al aire. El haz sale al aire formando un ángulo de 32° con la superficie horizontal del agua. ¿Cuál es el ángulo de incidencia dentro del agua? Resp. 39.6°

35.8. La luz incide en el aire a 60° y se refracta entrando a un medio desconocido con un ángulo de 40°. ¿Cuál es el índice de refracción del medio desconocido?

35.9. La luz pasa del medio A al medio B formando un ángulo de 35° con la frontera horizontal entre ambos. Si el ángulo de refracción también es de 35°, ¿cuál es el índice de refracción relativo entre los dos medios? Resp. 1.43

35.10. La luz que incide procedente del aire a 45° se refracta en un medio transparente a un ángulo de 34°. ¿Cuál es el índice de refracción de este material?

***35.11.** Un rayo de luz que proviene del aire (figura 35.20) incide en agua ($n = 1.33$) con un ángulo de 60°. Después de pasar por el agua, entra en el vidrio ($n = 1.50$) y por último sale de nuevo al aire. Calcule el ángulo de salida. Resp. 60°.

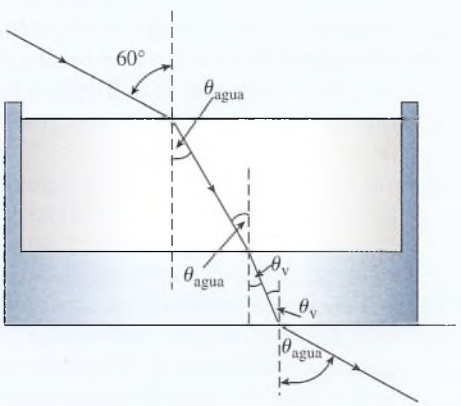


Figura 35.20

***35.12.** Demuestre que, independientemente del número de capas paralelas de medios diferentes que atraviese la luz, el ángulo de entrada y el ángulo de salida final serán iguales siempre que el medio inicial y el final también sean iguales.

Sección 35.5 Longitud de onda y refracción

35.13. La longitud de onda de la luz de sodio es de 589 nm en el aire. Calcule su longitud de onda en glicerina. Resp. 401 nm

35.14. La longitud de onda disminuye 25 por ciento al pasar del aire a un medio desconocido. ¿Cuál es el índice de refracción de este último medio?

35.15. Un haz de luz tiene una longitud de onda de 600 nm en el aire. ¿Cuál es la longitud de onda de esta luz cuando penetra en vidrio ($n = 1.50$)?
Resp. 400 nm

35.16. La luz roja (520 nm) se convierte en luz azul (478 nm) cuando entra en un líquido. ¿Cuál es el índice de refracción de ese líquido? ¿Cuál es la velocidad de la luz en dicho líquido?

***35.17.** Un rayo de luz monocromática cuya longitud de onda es de 400 nm en el medio A entra con un ángulo de 30° respecto a la frontera de otro medio B. Si el rayo se refracta en un ángulo de 50°, ¿cuál es su longitud de onda en el medio B? Resp. 613 nm

Sección 35.5 Reflexión interna total

35.18. ¿Cuál es el ángulo crítico para la luz que pasa del cuarzo ($n = 1.54$) al agua ($n = 1.33$)?

35.19. El ángulo crítico para un medio determinado en relación con el aire es de 40°. ¿Cuál es el índice de refracción de ese medio? Resp. 1.56

35.20. Si el ángulo crítico de incidencia para una superficie líquido-aire es de 46°, ¿cuál es el índice de refracción del líquido?

35.21. ¿Cuál es el ángulo crítico en relación con el aire para (a) el diamante, (b) el agua y (c) el alcohol etílico? Resp. 24.4°, 48.8°, 47.3°

35.22. ¿Cuál es el ángulo crítico para el cristal de roca sumergido en alcohol etílico?

***35.23.** Un prisma de ángulo recto como el que vemos en la figura 35.10a está sumergido en agua. ¿Cuál es el índice de refracción mínimo necesario para que el material logre una reflexión interna total?
Resp. 1.88

Problemas adicionales

35.24. El ángulo de incidencia es de 30° y el ángulo de refracción es de 26.3°. Si el medio incidente es agua, ¿cuál podría ser el medio de refracción?

35.25. La rapidez de la luz en un medio desconocido es de $2.40 = 10^8$ m/s. Si la longitud de la luz en ese medio desconocido es 400 nm, ¿cuál es su longitud de onda en el aire? Resp. 500 nm

35.26. Un rayo de luz incide en una lámina de vidrio formando un ángulo de 30° con la superficie del vidrio. Si el ángulo de refracción también es de 30°, ¿cuál es el índice de refracción del vidrio?

35.27. Un haz de luz incide en una superficie plana que separa dos medios cuyos índices son 1.6 y 1.4. El ángulo de incidencia es de 30° en el medio que tiene el índice más alto. ¿Cuál es el ángulo de refracción?
Resp. 34.85°

35.28. Al pasar del vidrio ($n = 1.50$) al agua ($n = 1.33$), ¿cuál es el ángulo crítico para que se produzca la reflexión interna total?

35.29. La luz cuya longitud de onda es de 650 nm en un vidrio determinado tiene una rapidez de 1.7×10^8 m/s. ¿Cuál es el índice de refracción de ese vidrio? ¿Cuál es la longitud de onda de esa luz en el aire?
Resp. 1.76, 1 146 nm

35.30. El ángulo crítico para una sustancia determinada rodeada de aire es de 38°. ¿Cuál es el índice de refracción de esa sustancia?

35.31. El agua de una piscina tiene 2 m de profundidad. ¿Qué tan profunda le parece a una persona que la mira hacia abajo en dirección vertical? Resp. 1.50 m

35.32. Una placa de vidrio ($n = 1.50$) se coloca encima de una moneda sobre una mesa. La moneda parece estar 3 cm debajo de la parte superior de la placa de vidrio. ¿Cuál es el espesor de dicha placa?

Preguntas para la reflexión crítica

***35.33.** Suponga que un rayo de luz horizontal incide en una de las caras de un prisma equilátero de vidrio ($n = 1.50$) como muestra la figura 35.21. ¿Con qué ángulo θ saldrá el rayo por el otro lado? Resp. 77.1°

***35.34.** ¿Cuál es el ángulo de incidencia mínimo en la primera cara del prisma de la figura 35.21 para que el haz se refracte al salir al aire por la segunda cara? (Los ángulos de mayor magnitud no producen una reflexión interna total en la segunda cara.)

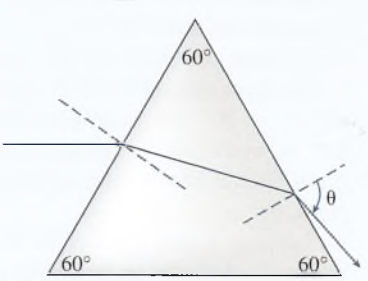


Figura 35.21

*35.35. La luz que pasa a través de una placa de un material transparente cuyo espesor es t sufre un desplazamiento lateral d, como muestra la figura 35.22. Calcule el desplazamiento lateral si la luz pasa a través de vidrio rodeado de aire. El ángulo de incidencia θ_1 es 40° y el vidrio ($n = 1.50$) tiene 2 cm de espesor.

Resp. 5.59 mm

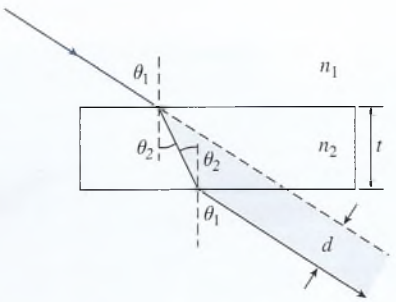


Figura 35.22

*35.36. Un bloque de vidrio de forma rectangular ($n = 1.54$) está sumergido por completo en agua ($n = 1.33$). Un haz de luz que pasa por el agua penetra en una de las caras verticales del bloque de vidrio con un ángulo de incidencia θ_1 y se refracta dentro del vidrio, después de lo cual avanza hasta la superficie superior del bloque. ¿Cuál es el ángulo mínimo θ_1 que debe formar la luz con dicha cara para que el haz no salga por la parte superior del bloque de vidrio?

*35.37. Demuestre que el desplazamiento lateral de la figura 35.22 se puede calcular mediante

$$d = t \operatorname{sen} \theta_1 \left(1 - \frac{n_1 \cos \theta_1}{n_2 \cos \theta_2} \right)$$

Aplique esta relación para verificar la respuesta a la pregunta 35.35.