

NATURALEZA Y PROPAGACIÓN DE LA LUZ

33



? Estas herramientas de dibujo están hechas de plástico transparente, pero en ellas aparecen los colores de un arco iris cuando se las coloca entre dos filtros especiales llamados polarizadores. ¿Qué es lo que produce los colores?

METAS DE APRENDIZAJE

Al estudiar este capítulo, usted aprenderá:

- Qué son los rayos de luz y cómo se relacionan con los frentes de onda.
- Las leyes que gobiernan la reflexión y la refracción de la luz.
- Las circunstancias en las que la luz se refleja totalmente en una interfaz.
- Cómo hacer luz polarizada a partir de luz ordinaria.
- Cómo ayuda el principio de Huygens a analizar los fenómenos de reflexión y refracción.

Quiquiera que tenga ojos para percibir los colores puede gozar de los lagos azules, los desiertos ocreos, los bosques verdes y los arco iris multicolores. Pero al estudiar la rama de la física llamada **óptica**, que se ocupa del comportamiento de la luz y otras ondas electromagnéticas, es posible alcanzar una apreciación más profunda del mundo visible. El conocimiento de las propiedades de la luz nos permite entender el color azul del cielo, el diseño de dispositivos ópticos tales como telescopios, microscopios, cámaras, anteojos y el ojo humano. Los mismos principios básicos de la óptica se encuentran en el corazón de los equipos modernos como el láser, la fibra óptica, los hologramas, las computadoras ópticas y las novedosas técnicas para obtener imágenes con fines médicos.

La importancia de la óptica para la física en particular y para la ciencia e ingeniería en general es tan grande que dedicaremos los siguientes cuatro capítulos a su estudio. En este capítulo comenzaremos con el análisis de las leyes de la reflexión y refracción y los conceptos de dispersión y polarización de la luz. Sobre la marcha compararemos las distintas descripciones posibles de la luz en términos de partículas, rayos y ondas, y presentaremos el principio de Huygens, un eslabón importante que relaciona los puntos de vista basados en rayos y ondas. En el capítulo 34 usaremos la descripción de la luz en términos de rayos para entender cómo funcionan los espejos y las lentes, y veremos cómo se usan éstos en instrumentos ópticos tales como cámaras, microscopios y telescopios. Exploraremos las características ondulatorias de la luz con más detalle en los capítulos 35 y 36.

33.1 La naturaleza de la luz

Hasta la época de Isaac Newton (1642-1727), la mayoría de científicos pensaban que la luz consistía en corrientes de partículas (llamadas *corpúsculos*) emitidas por las fuentes luminosas. Galileo y otros intentaron (sin éxito) medir la rapidez de la luz.

Alrededor de 1665, comenzaron a descubrirse evidencias de las propiedades *ondulatorias* de la luz. A principios del siglo XIX, las evidencias de que la luz es una onda se habían vuelto muy convincentes.

En 1873 James Clerk Maxwell predijo la existencia de ondas electromagnéticas y calculó su rapidez de propagación, como se vio en el capítulo 32. Este avance, así como el trabajo experimental que inició en 1887 Heinrich Hertz, demostró en forma concluyente que la luz en verdad es una onda electromagnética.

Las dos personalidades de la luz

Sin embargo, la concepción ondulatoria de la luz no ofrece una visión completa sobre su naturaleza. Varios efectos asociados con su emisión y absorción revelan un aspecto de partícula, en el sentido en que la energía transportada por las ondas luminosas se encuentra contenida en paquetes discretos llamados *fotones* o *cuantos*. Estas propiedades aparentemente contradictorias de onda y partícula se conciliaron a partir de 1930 con el desarrollo de la electrodinámica cuántica, una teoría integral que incluye tanto las propiedades ondulatorias como corpusculares. La *propagación* de la luz se describe mejor con el modelo ondulatorio, pero para comprender la emisión y la absorción se requiere un enfoque corpuscular.

Las fuentes fundamentales de toda la radiación electromagnética son las cargas eléctricas en movimiento acelerado. Todos los cuerpos emiten radiación electromagnética como resultado del movimiento térmico de sus moléculas; esta radiación, llamada *radiación térmica*, es una mezcla de diferentes longitudes de onda. A temperatura suficientemente alta, toda la materia emite suficiente luz visible para ser luminosa por sí misma; un cuerpo muy caliente parece estar al “rojo vivo” (figura 33.1) o al “rojo blanco”. Así, la materia caliente en cualquiera de sus formas es una fuente luminosa. Algunos ejemplos conocidos son la llama de una vela, las brasas incandescentes de una fogata, las bobinas de un calentador doméstico y el filamento de una lámpara incandescente (que, por lo general, opera a una temperatura cercana a los 3000 °C).

La luz también se produce durante las descargas eléctricas a través de gases ionizados. El brillo azuloso de las lámparas de arco de mercurio, la luz amarillo naranja de las lámparas de vapor de sodio y los distintos colores de los anuncios de “neón” nos resultan familiares. Una variación de la lámpara de arco de mercurio es la lámpara *fluorescente* (véase la figura 30.7). Esta fuente luminosa emplea un *recubrimiento fosforescente* para convertir la radiación ultravioleta de un arco de mercurio en luz visible. Esta conversión hace que las lámparas fluorescentes sean más eficientes que las incandescentes para transformar energía eléctrica en luz.

Una fuente luminosa que ha adquirido importancia en los últimos 40 años es el *láser*. En la mayoría de fuentes luminosas, la luz es emitida de forma independiente por diferentes átomos dentro de la fuente; en contraste, en un láser los átomos son inducidos a emitir luz en forma cooperativa y coherente. El resultado es un haz muy angosto de radiación que puede llegar a tener una enorme intensidad y que está mucho más cerca de ser *monocromático* o de una sola frecuencia, en comparación con la luz de cualquier otra fuente. Los rayos láser se utilizan en medicina para hacer microcirugía, en reproductores de discos compactos y computadoras para leer la información codificada en un disco compacto o en el CD-ROM; también se emplean en la industria para cortar acero y para fundir materiales con puntos de fusión elevados, y en muchas otras aplicaciones (figura 33.2).

Sin importar cuál sea su fuente, la radiación electromagnética viaja en el vacío con la misma rapidez. Como vimos en las secciones 1.3 y 32.1 la rapidez de la luz en el vacío es

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

o 3.00×10^8 m/s, con tres cifras significativas. La duración de un segundo está definida por el reloj de cesio (véase la sección 1.3), y un metro se define como la distancia que recorre la luz en $1/299,792,458$ s.

Ondas, frentes de onda y rayos

A menudo se utiliza el concepto de **frente de onda** para describir la propagación de las ondas. Presentamos este concepto en la sección 32.2 para describir el borde frontal de una onda. De manera más general, un frente de onda se define como *el lugar geométrico de todos los puntos adyacentes en los cuales la fase de vibración de una can-*

33.1 Un elemento calentador eléctrico emite radiación infrarroja primaria. Pero si su temperatura es suficientemente elevada también emite una cantidad apreciable de luz visible.



33.2 Los cirujanos oftalmólogos usan láseres para reparar retinas desprendidas y para cauterizar vasos sanguíneos en retinopatías. Las pulsaciones de luz azul verdosa son ideales para este propósito, pues atraviesan la parte transparente del ojo sin causar daño, pero son absorbidos por los pigmentos rojos de la retina.



idad física asociada con la onda es la misma. Es decir, en cualquier instante, todos los puntos del frente de onda están en la misma parte de su ciclo de variación.

Cuando arrojamos una piedra en un estanque tranquilo, los círculos de expansión formados por las crestas de onda, al igual que los círculos formados por los valles de onda intermedios, son los frentes de onda. De manera similar, cuando las ondas de sonido viajan en el aire desde una fuente puntual, o cuando la radiación electromagnética se propaga desde un emisor puntual, cualquier superficie esférica concéntrica con respecto a la fuente es un frente de onda, como se ilustra en la figura 33.3. En los diagramas del movimiento ondulatorio, por lo general, sólo se dibujan partes de unos cuantos frentes de onda, y a menudo se eligen frentes de onda consecutivos que tengan la misma fase y que, por lo tanto, estén separados por una longitud de onda, como las crestas de las olas en el agua. De manera similar, un diagrama de ondas sonoras sólo muestra las “crestas de presión”, que son las superficies sobre las cuales la presión es máxima, y un diagrama de ondas electromagnéticas sólo indica las “crestas” en las que el campo eléctrico o magnético es máximo.

Será frecuente que usemos diagramas para mostrar las formas de los frentes de onda o sus secciones transversales en algún plano de referencia. Por ejemplo, cuando se irradian ondas electromagnéticas desde una pequeña fuente luminosa, es posible representar los frentes de onda como superficies esféricas concéntricas con respecto a la fuente o, como se aprecia en la figura 33.4a, mediante las intersecciones circulares de estas superficies con el plano del diagrama. Lejos de la fuente, donde los radios de las esferas son muy grandes, una sección de superficie esférica se puede considerar como un plano, y así surge una onda plana como las que se examinaron en las secciones 32.2 y 32.3 (figura 33.4b).

Para describir las direcciones en las que se propaga la luz, a menudo conviene representar una onda luminosa por medio de **rayos** y no por frentes de onda. Los rayos se utilizaron para describir la luz mucho tiempo antes de que su naturaleza ondulatoria estuviera firmemente establecida. En la teoría corpuscular de la luz, los rayos son las trayectorias de las partículas. Desde el punto de vista ondulatorio un rayo es una línea imaginaria a lo largo de la dirección de propagación de la onda. En la figura 33.4a los rayos son los radios de los frentes de onda esféricos, y en la figura 33.4b son las líneas rectas perpendiculares a los frentes de onda. Cuando las ondas viajan en un material isotrópico homogéneo (un material que tiene las mismas propiedades en todas las regiones y en todas direcciones), los rayos siempre son líneas rectas normales a los frentes de onda. En una superficie de frontera entre dos materiales, como la superficie de una placa de vidrio en el aire, la rapidez de la onda y la dirección de un rayo pueden cambiar, pero los segmentos de rayo en el aire y en el vidrio son líneas rectas.

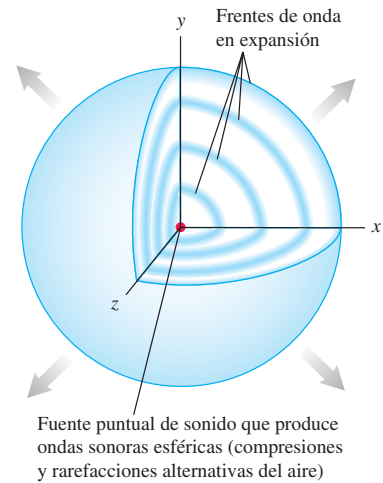
Los siguientes capítulos darán al lector muchas oportunidades de ver la interrelación de las descripciones de la luz como rayo, onda y partícula. La rama de la óptica en la cual resulta adecuada la descripción de rayos se llama **óptica geométrica**; la rama que se ocupa específicamente del comportamiento ondulatorio se llama **óptica física**. Este capítulo y el siguiente tratan sobre todo con la óptica geométrica. En los capítulos 35 y 36 estudiaremos fenómenos ondulatorios y la óptica física.

MP **Evalúe su comprensión de la sección 33.1** Algunos cristales *no son* isotrópicos: la luz viaja a través del cristal con una rapidez mayor en ciertas direcciones que en otras. En un cristal en que la luz viaja con la misma rapidez en las direcciones x y z , pero con una rapidez mayor en la dirección y , ¿cuál sería la forma de los frentes de onda producidos por una fuente luminosa en el origen? i) Esférica, como la que se ilustra en la figura 33.3; ii) elipsoidal, aplanada a lo largo del eje y ; iii) elipsoidal, estirada a lo largo del eje y .

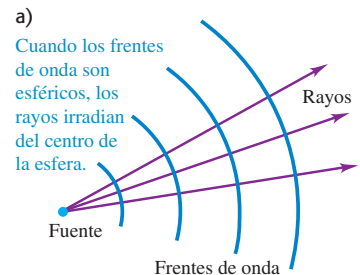
33.2 Reflexión y refracción

En esta sección usaremos el modelo de la luz basado en *rayos* para explorar dos de los aspectos más importantes de la propagación de la luz: **reflexión** y **refracción**. Cuando una onda luminosa incide en una interfaz lisa que separa dos materiales transparentes (como el aire y el vidrio o el agua y el vidrio), la onda en general es *reflejada* parcialmente y también *refractada* (transmitida) parcialmente hacia el segundo material, como se ilustra en la figura 33.5a. Por ejemplo, cuando usted mira a través de la ventana de un restaurante desde la calle, observa una reflexión de la escena en la calle, pero una persona en el interior del restaurante puede ver a través de la ventana la misma escena conforme la luz la alcanza por refracción.

33.3 Los frentes de onda esféricos de sonido se propagan de manera uniforme en todas direcciones desde una fuente puntual en un medio sin movimiento, como aire tranquilo, que tenga las mismas propiedades en todas las regiones y en todas las direcciones. Las ondas electromagnéticas en el vacío también se propagan como se ilustra aquí.

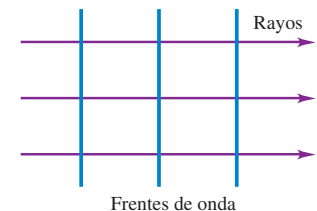


33.4 Frentes de onda (en color azul) y rayos (púrpura).



b)

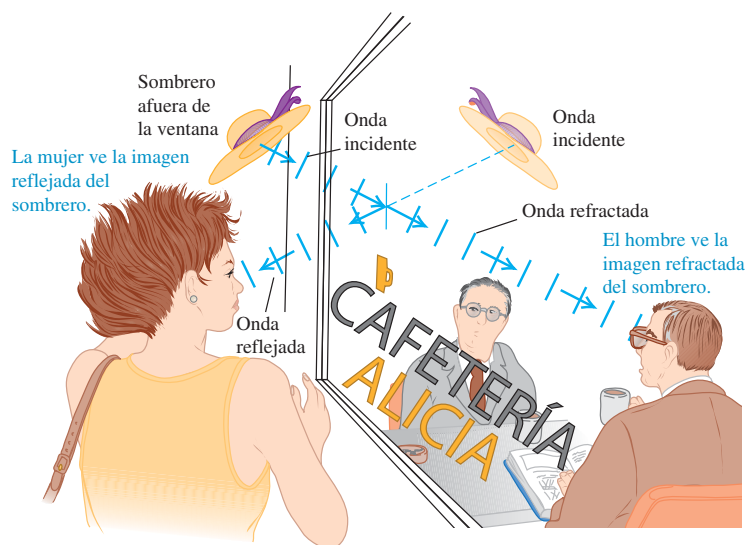
Cuando los frentes de onda son planos, los rayos son perpendiculares a los frentes de onda y paralelos entre sí.



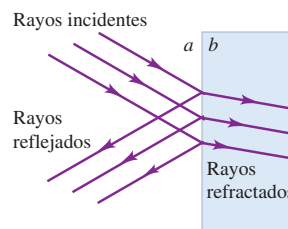
- 15.1 Reflexión y refracción
- 15.3 Aplicaciones de la refracción

33.5 a) Una onda plana es en parte reflejada y en parte refractada en la frontera entre dos medios (en este caso, aire y vidrio). La luz que alcanza el interior de la cafetería es refractada dos veces, una cuando entra al vidrio y otra al salir de éste. b) y c) ¿Cómo se comporta la luz en la interfaz entre el aire afuera de la cafetería (material a) y el vidrio (material b)? Para el caso que se ilustra, el material b tiene un índice de refracción mayor que el del material a ($n_b > n_a$) y el ángulo θ_b es más pequeño que θ_a .

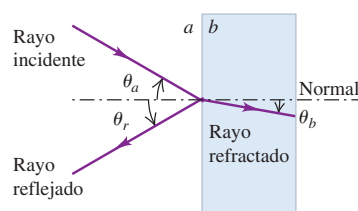
a) Ondas planas reflejadas y refractadas en una ventana



b) Las ondas en el aire del exterior y el vidrio representadas por rayos



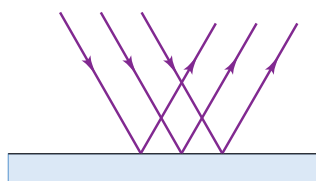
c) Representación simplificada para ilustrar sólo un conjunto de rayos



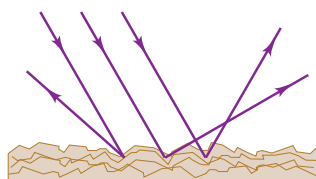
Los segmentos de ondas planas que se ilustran en la figura 33.5a pueden representarse por paquetes de rayos que forman *haces* de luz (figura 33.5b). Para simplificar, es frecuente que se dibuje un solo rayo de cada haz (figura 33.5c). La representación de estas ondas en términos de rayos es la base de la óptica geométrica. Comenzaremos nuestro estudio con el comportamiento de un rayo individual.

33.6 Dos tipos de reflexión.

a) Reflexión especular



b) Reflexión difusa



Describamos las direcciones de los rayos incidente, reflejado y refractado (transmitidos) en una interfaz lisa entre dos materiales ópticos en términos de los ángulos que forman con la *normal* (perpendicular) a la superficie en el punto de incidencia, como se ilustra en la figura 33.5c. Si la interfaz es rugosa, tanto la luz transmitida como la reflejada se dispersan en varias direcciones y no hay un ángulo único de transmisión o reflexión. La reflexión con un ángulo definido desde una superficie muy lisa se llama **reflexión especular** (del vocablo latino que significa “espejo”). La reflexión dispersa a partir de una superficie áspera se llama **reflexión difusa**. Esta diferencia se ilustra en la figura 33.6. Ambas clases de reflexión ocurren con materiales transparentes o con materiales *opacos* que no transmiten la luz. La gran mayoría de objetos en el ambiente (ropa, plantas, personas y este libro) son visibles porque reflejan la luz en una forma difusa desde sus superficies. Sin embargo, nuestro interés principal se centra en la reflexión especular a partir de una superficie muy lisa, como vidrio, plástico o metal muy pulido. A menos que se especifique otra cosa, cuando hablemos de “reflexión” siempre nos referiremos a la reflexión *especular*.

El **índice de refracción** de un material óptico, denotado por n , desempeña un papel central en la óptica geométrica. Es la razón entre la rapidez de la luz c en el vacío y la rapidez de la luz v en el material:

$$n = \frac{c}{v} \quad (\text{índice de refracción}) \quad (33.1)$$

La luz siempre viaja con *más lentitud* en un material que en el vacío, por lo que el valor de n en cualquier material que no sea el vacío siempre es mayor que la unidad. Para el vacío, $n = 1$. Como n es una razón entre dos valores de rapidez, es un número

sin unidades. (La relación entre el valor de n y las propiedades eléctricas y magnéticas de un material se describe en la sección 32.3.)

CUIDAD La rapidez de las ondas y el índice de refracción Recuerde que la rapidez de las ondas v es *inversamente* proporcional al índice de refracción n . Cuanto mayor sea el índice de refracción de un material, *menor* será la rapidez de la onda en ese material. ¡Olvidar este punto puede originar serias confusiones! ■

Leyes de reflexión y refracción

Los estudios experimentales de las direcciones de los rayos incidentes, reflejados y refractados en una interfaz lisa entre dos materiales ópticos condujeron a las siguientes conclusiones (figura 33.7):

1. Los rayos incidente, reflejado y refractado, así como la normal a la superficie, yacen todos en el mismo plano. El plano de los tres rayos es perpendicular al plano de la superficie de frontera o límite entre los dos materiales. Siempre se dibujan los diagramas de los rayos de manera que los rayos incidente, reflejado y refractado estén en el plano del diagrama.
2. El ángulo de reflexión θ_r es igual al ángulo de incidencia θ_a para todas las longitudes de onda y para cualquier par de materiales. Es decir, en la figura 33.5c,

$$\theta_r = \theta_a \quad (\text{ley de reflexión}) \quad (33.2)$$

Esta relación, junto con la observación de que los rayos incidente y reflejado y la normal yacen en el mismo plano, se conoce como **ley de reflexión**.

3. Para la luz monocromática y para un par dado de materiales, a y b , en lados opuestos de la interfaz, la razón de los senos de los ángulos θ_a y θ_b , donde los dos ángulos están medidos a partir de la normal a la superficie, es igual al inverso de la razón de los dos índices de refracción:

$$\frac{\sin \theta_a}{\sin \theta_b} = \frac{n_b}{n_a} \quad (33.3)$$

o bien,

$$n_a \sin \theta_a = n_b \sin \theta_b \quad (\text{ley de refracción}) \quad (33.4)$$

Este resultado experimental, junto con la observación de que los rayos incidente y refractado, así como la normal, se encuentran en el mismo plano se llama **ley de refracción** o **ley de Snell**, en honor del científico holandés Willebrord Snell (1591-1626). Actualmente hay algunas dudas de que Snell la haya descubierto en realidad. El descubrimiento de que $n = c/v$ fue muy posterior.

Si bien estos resultados fueron observados primero en forma experimental, es posible obtenerlos teóricamente a partir de la descripción ondulatoria de la luz, como veremos en la sección 33.7.

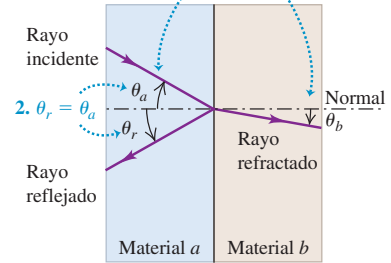
Las ecuaciones (33.3) y (33.4) indican que cuando un rayo pasa de un material a hacia otro material b que tiene un mayor índice de refracción ($n_b > n_a$) y, por lo tanto, una menor rapidez de onda, el ángulo θ_b que forma con la normal es *más pequeño* en el segundo material que el ángulo θ_a en el primero; por consiguiente, el rayo se desvía *hacia* la normal (figura 33.8a). Cuando el segundo material tiene un *menor* índice de refracción que el primero ($n_b < n_a$) y, por lo tanto, una mayor rapidez de onda, el rayo se desvía *alejándose* de la normal (figura 33.8b).

Sin importar cuáles sean los materiales en cada lado de la interfaz, en el caso de una incidencia *normal* el rayo transmitido no se desvía en absoluto (figura 33.8c). En este caso $\theta_a = 0$, y $\sin \theta_a = 0$, por lo que de acuerdo con la ecuación (33.4), θ_b también es igual a cero, de manera que el rayo transmitido también es normal a la interfaz.

33.7 Las leyes de reflexión y refracción.

1. Los rayos incidente, reflejado y refractado, así como la normal a la superficie, yacen todos en el mismo plano.

Los ángulos θ_a , θ_b y θ_r se miden a partir de la normal.



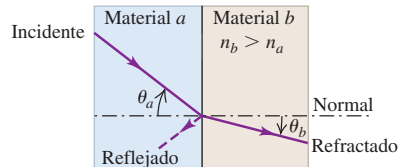
3. Cuando un rayo de luz monocromática cruza la interfaz entre dos materiales dados a y b , los ángulos θ_a y θ_b se relacionan con los índices de refracción de a y b por medio de

$$\frac{\sin \theta_a}{\sin \theta_b} = \frac{n_b}{n_a}$$

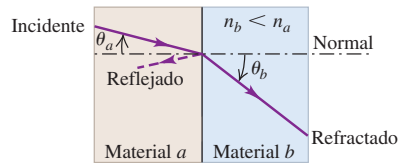
33.8 Refracción y reflexión en tres casos. a) El material b tiene un índice de refracción mayor que el material a .

- a) El material b tiene un índice de refracción mayor que el material a .
- b) El material b tiene un índice de refracción menor que el material a .
- c) El rayo de luz incidente es normal a la interfaz entre los materiales.

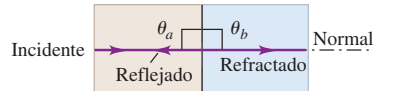
a) Un rayo que entra a un material con *mayor* índice de refracción se desvía *hacia* la normal.



b) Un rayo que entra a un material con *menor* índice de refracción se desvía *alejándose* de la normal.



c) Un rayo orientado a lo largo de la normal no se desvía, sin importar cuáles sean los materiales.

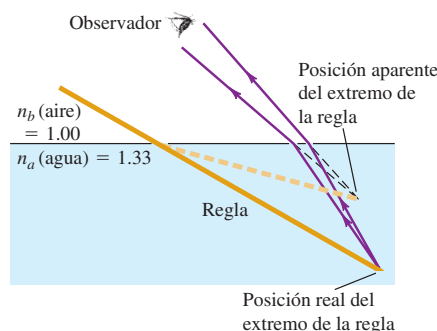


33.9 a) Esta regla en realidad es recta, pero parece que se dobla en la superficie del agua. b) Los rayos de luz provenientes de cualquier objeto sumergido se desvían alejándose de la normal cuando salen al aire. Desde el punto de vista de un observador situado sobre la superficie del agua, el objeto parece estar mucho más cerca de la superficie de lo que en realidad está.

a) Una regla recta sumergida a la mitad en agua



b) ¿Por qué se ve doblada la regla?



La ecuación (33.2) indica que θ_r también es igual a cero, así que el rayo reflejado viaja de regreso a lo largo de la misma trayectoria que el rayo incidente.

La ley de la refracción explica por qué una regla o una pajilla parcialmente sumergidas parecen estar dobladas; los rayos de luz que provienen de un lugar por debajo de la superficie cambian de dirección al pasar por la interfaz aire-agua, de manera que los rayos parecen provenir de una posición por arriba de su punto de origen real (figura 33.9). Un efecto similar explica la aparición de los atardeceres (figura 33.10).

Un caso especial muy importante es la refracción que ocurre en la interfaz entre un material y el vacío, para el cual el índice de refracción, por definición, es la unidad. Cuando un rayo pasa del vacío al material b , de forma que $n_a = 1$ y $n_b > 1$, el rayo siempre se desvía *hacia* la normal. Cuando un rayo pasa de un material al vacío, de forma que $n_a > 1$ y $n_b = 1$, el rayo siempre se desvía *alejándose* de la normal.

Las leyes de reflexión y refracción se aplican sin importar de qué lado de la interfaz proviene el rayo incidente. Si en la figura 33.8a o 33.8b un rayo de luz se acerca a

33.10 a) El índice de refracción del aire es ligeramente mayor que 1; por esta razón, los rayos luminosos del Sol cuando se oculta se desvían hacia abajo cuando entran a la atmósfera. (El efecto se exagera en esta figura.) b) La luz que proviene del extremo inferior del Sol (la parte que parece estar más cerca del horizonte) sufre una refracción más intensa, pues pasa a través del aire más denso en las capas bajas de la atmósfera. Como resultado, cuando el Sol se oculta, se ve achatado en la dirección vertical. (Véase el problema 33.55.)



la interfaz desde la derecha y no desde la izquierda, una vez más habrá rayos reflejados y refractados; estos dos rayos, el rayo incidente y la normal a la superficie de nuevo quedan en el mismo plano. Además, la trayectoria de un rayo refractado es *reversible*: sigue la misma trayectoria cuando va de b a a que cuando va de a a b . [Usted puede verificar esto mediante la ecuación (33.4).] Como los rayos reflejado e incidente forman el mismo ángulo con la normal, la trayectoria de un rayo reflejado también es reversible. Por esa razón, cuando usted ve los ojos de alguien en un espejo, la persona observada también lo puede mirar a usted.

La *intensidad* de los rayos reflejado y refractado dependen del ángulo de incidencia, de los dos índices de refracción y de la polarización (es decir, de la dirección del vector del campo eléctrico). La fracción reflejada es mínima cuando la incidencia es normal ($\theta_a = 0^\circ$), donde es alrededor del 4% para una interfaz aire-vidrio. Esta fracción se incrementa al aumentar el ángulo de incidencia hasta llegar al 100%, que se da con una incidencia límite, cuando $\theta_a = 90^\circ$.

Es posible usar las ecuaciones de Maxwell para pronosticar la amplitud, intensidad, fase y estados de polarización de las ondas reflejadas y refractadas. Sin embargo, ese análisis está más allá de nuestro alcance.

El índice de refracción no sólo depende de la sustancia, sino también de la longitud de onda de la luz. La dependencia de la longitud de onda se llama *dispersión*, la cual estudiaremos en la sección 33.4. En la tabla 33.1 se presentan los índices de refracción de varios sólidos y líquidos para una longitud de onda particular de luz amarilla.

El índice de refracción del aire a temperatura y presión estándar es alrededor de 1.0003 y, por lo general, lo tomaremos como si fuera exactamente igual a 1. El índice de refracción de un gas se incrementa conforme su densidad aumenta. La mayor parte de los vidrios que se utilizan en los instrumentos ópticos tienen índices de refracción entre 1.5 y 2.0. Unas cuantas sustancias tienen índices más grandes; un ejemplo de esto es el diamante, con 2.417.

Tabla 33.1 Índice de refracción con luz de amarilla sodio ($\lambda_0 = 589 \text{ nm}$)

Sustancia	Índice de refracción, n
Sólidos	
Hielo (H_2O)	1.309
Fluorita (CaF_2)	1.434
Poliestireno	1.49
Sal de roca (NaCl)	1.544
Cuarzo (SiO_2)	1.544
Circonio ($\text{ZrO}_2 \cdot \text{SiO}_2$)	1.923
Diamante (C)	2.417
Fabulita (SrTiO_3)	2.409
Rutilo (TiO_2)	2.62
Vidrios (valores comunes)	
Blanco (Crown)	1.52
Cristal ligero	1.58
Cristal mediano	1.62
Cristal denso	1.66
Cristal de lantano	1.80
Líquidos a 20 °C	
Metanol (CH_3OH)	1.329
Agua (H_2O)	1.333
Etanol ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$)	1.36
Tetracloruro de carbono (CCl_4)	1.460
Aguarrás	1.472
Glicerina	1.473
Benceno	1.501
Disulfuro de carbono (CS_2)	1.628

Índice de refracción y aspectos ondulatorios de la luz

Hemos estudiado la forma en que la dirección de un rayo de luz cambia cuando pasa de un material a otro con distinto índice de refracción. También es importante ver lo que ocurre con las características *ondulatorias* de la luz cuando eso sucede.

En primer lugar, la frecuencia f de la onda no cambia cuando pasa de un material a otro. Es decir, el número de ciclos de la onda que llegan por unidad de tiempo debe ser igual al número de ciclos que salen por unidad de tiempo; esto significa que la superficie de frontera no puede crear ni destruir ondas.

En segundo lugar, la longitud de onda λ de la onda, en general, es diferente en distintos materiales. Esto se debe a que en cualquier material $v = \lambda f$; como f es la misma en cualquier material que en el vacío y v siempre es menor que la rapidez c de la onda en el vacío, λ también se reduce en forma correspondiente. Así, la longitud de onda λ de la luz en un material es *menor que* la longitud de onda λ_0 de la misma luz en el vacío. De acuerdo con el análisis anterior, $f = c/\lambda_0 = v/\lambda$. Al combinar esto con la ecuación (33.1), $n = c/v$, se encuentra que

$$\lambda = \frac{\lambda_0}{n} \quad (\text{longitud de onda de la luz en un material}) \quad (33.5)$$

Cuando una onda pasa de un material a otro con mayor índice de refracción, de manera que $n_b > n_a$, la rapidez de la onda disminuye. La longitud de onda $\lambda_b = \lambda_0/n_b$ en el segundo material es, por consiguiente, más corta que la longitud de onda $\lambda_a = \lambda_0/n_a$ del primer material. Si en vez de ello, el segundo material tiene un índice de refracción menor que el primero, de manera que $n_b < n_a$, entonces la rapidez de la onda se incrementa. Así, la longitud de onda λ_b en el segundo material es más larga que la longitud de onda λ_a en el primero. Esto tiene sentido intuitivamente; las ondas se “comprimen” (la longitud de onda se acorta) si la rapidez de onda disminuye, y se “estiran” (la longitud de onda se alarga) si la rapidez de onda aumenta.

Estrategia para resolver problemas 33.1 Reflexión y refracción



IDENTIFICAR *los conceptos relevantes:* Será necesario aplicar las ideas de esta sección, agrupadas en el tema *óptica geométrica*, siempre que la luz encuentre una frontera entre dos materiales diferentes. En general, parte de la luz se refleja de regreso hacia el primer material y parte se refracta hacia el segundo. Estas ideas se aplican a la radiación electromagnética de todas las frecuencias y longitudes de onda, no sólo a la luz visible.

PLANTEAR *el problema* de acuerdo con los siguientes pasos:

1. En los problemas de óptica geométrica que implican rayos y ángulos *siempre* comience por hacer un diagrama grande y bien definido. Indique todos los ángulos conocidos e índices de refracción.
2. Determine las variables buscadas.

EJECUTAR *la solución* como sigue:

1. Aplique las leyes de reflexión, ecuación (33.2), y refracción, ecuación (33.4). Siempre recuerde medir los ángulos de incidencia, reflexión y refracción a partir de la *normal* a la superficie donde ocurren la reflexión y refracción, *nunca* a partir de la superficie misma.

2. Será frecuente que tenga que usar algo de geometría o trigonometría elemental al trabajar con relaciones angulares. La suma de los ángulos interiores de un triángulo es 180° , un ángulo y su complemento difieren en 180° , etcétera. Pregúntese, “¿de qué información dispongo?”, “¿qué necesito saber para encontrar éste ángulo?” o “¿qué otros ángulos u otras cantidades puedo calcular con la información que se da en el problema?”
3. Recuerde que la frecuencia de la luz no cambia cuando pasa de un material a otro, pero la longitud de onda cambia de acuerdo con la ecuación (33.5).

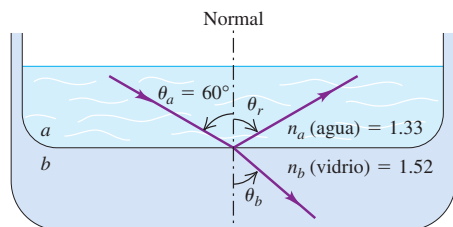
EVALUAR *la respuesta:* En problemas que impliquen refracción, compruebe que la dirección de la refracción tenga sentido. Si el segundo material tiene un mayor índice de refracción que el primero, el rayo refractado se desvía hacia la normal, y el ángulo refractado es más pequeño que el ángulo de incidencia. Si el primer material tiene un índice de refracción más grande, el rayo refractado se desvía alejándose de la normal y el ángulo refractado es mayor que el ángulo de incidencia. ¿Sus resultados concuerdan con estas reglas?

Ejemplo 33.1 Reflexión y refracción

En la figura 33.11 el material *a* es agua y el material *b* es un vidrio con índice de refracción de 1.52. Si el rayo incidente forma un ángulo de 60° con la normal, determine las direcciones de los rayos reflejado y refractado.

SOLUCIÓN

IDENTIFICAR: Éste es un problema de óptica geométrica. Se da el ángulo de incidencia y el índice de refracción de cada material, y se necesita calcular los ángulos de reflexión y refracción.

33.11 Reflexión y refracción de luz que pasa del agua al vidrio.

PLANTEAR: La figura 33.11 muestra los rayos y ángulos de esta situación. Las incógnitas son el ángulo de reflexión θ_r y el ángulo de refracción θ_b . Como n_b es mayor que n_a , el ángulo refractado debe ser más pequeño que el ángulo de incidencia θ_a ; esto se ilustra en la figura.

EJECUTAR: De acuerdo con la ecuación (33.2), el ángulo que forma el rayo reflejado con la normal es el mismo que el del rayo incidente, por lo tanto, $\theta_r = \theta_a = 60.0^\circ$.

Para determinar la dirección del rayo refractado se usa la ley de Snell, ecuación (33.4), con $n_a = 1.33$, $n_b = 1.52$ y $\theta_a = 60.0^\circ$. Se obtiene

$$n_a \sin \theta_a = n_b \sin \theta_b$$

$$\sin \theta_b = \frac{n_a}{n_b} \sin \theta_a = \frac{1.33}{1.52} \sin 60.0^\circ = 0.758$$

$$\theta_b = 49.3^\circ$$

EVALUAR: El segundo material tiene un mayor índice de refracción que el primero, igual que la situación que se ilustra en la figura 33.8a. Por lo tanto, el rayo refractado se desvía hacia la normal conforme la onda se hace más lenta al entrar en el segundo material y $\theta_b < \theta_a$.

Ejemplo 33.2 Índice de refracción en el ojo

La longitud de onda de la luz roja de un láser de helio-neón es de 633 nm en el aire, pero de 474 nm en el humor acuoso del globo ocular. Calcule el índice de refracción del humor acuoso y la rapidez y frecuencia de la luz en esta sustancia.

SOLUCIÓN

IDENTIFICAR: Las ideas clave aquí son la relación entre el índice de refracción n y la rapidez de onda d , y la relación entre el índice de refracción y la longitud de onda λ .

PLANTEAR: Se usa la definición de índice de refracción que se dio en la ecuación (33.1), $n = c/v$, así como en la ecuación (33.5), $\lambda = \lambda_0/n$.

También será de ayuda la relación $v = \lambda f$ entre la rapidez de onda, la longitud de onda y su frecuencia.

EJECUTAR: El índice de refracción del aire está muy cerca de la unidad, por lo que supondremos que las longitudes de onda en el aire y el vacío son las mismas. Así, la longitud de onda λ en el material está dada por la ecuación (33.5) con $\lambda_0 = 633$ nm.

$$\lambda = \frac{\lambda_0}{n} \quad n = \frac{\lambda_0}{\lambda} = \frac{633 \text{ nm}}{474 \text{ nm}} = 1.34$$

Esto es aproximadamente el mismo índice de refracción que el del agua. Por lo tanto, $n = c/v$ da

$$v = \frac{c}{n} = \frac{3.00 \times 10^8 \text{ m/s}}{1.34} = 2.25 \times 10^8 \text{ m/s}$$

Por último, a partir de $v = \lambda f$,

$$f = \frac{v}{\lambda} = \frac{2.25 \times 10^8 \text{ m/s}}{474 \times 10^{-9} \text{ m}} = 4.74 \times 10^{14} \text{ Hz}$$

EVALUAR: Advierta que si bien la rapidez y la longitud de onda tienen diferentes valores en el aire y en el humor acuoso, la frecuencia en el aire, f_0 , es igual que la frecuencia f en el humor acuoso:

$$f_0 = \frac{c}{\lambda_0} = \frac{3.00 \times 10^8 \text{ m/s}}{633 \times 10^{-9} \text{ m}} = 4.74 \times 10^{14} \text{ Hz}$$

Esto ilustra la regla general que establece que cuando una onda luminosa pasa de un material a otro, la frecuencia de la onda permanece sin cambio.

Ejemplo 33.3 Un rayo reflejado dos veces

Dos espejos están perpendiculares entre sí. Un rayo que viaja en un plano perpendicular con respecto a los dos espejos se refleja en uno de ellos y luego en el otro, como se ilustra en la figura 33.12. ¿Cuál es la dirección final del rayo en relación con su dirección original?

SOLUCIÓN

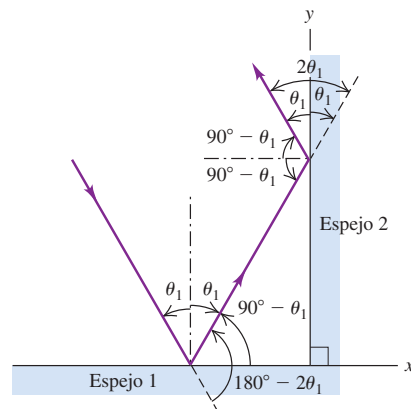
IDENTIFICAR: Este problema se relaciona sólo con la ley de reflexión.

PLANTEAR: Hay dos reflexiones en esta situación, por lo que se debe aplicar la ley de la reflexión dos veces.

EJECUTAR: Para el espejo 1, el ángulo de incidencia es θ_1 , y esto es igual al ángulo de reflexión. La suma de los ángulos interiores en el triángulo que se ilustra en la figura es 180° , por lo que vemos que los ángulos de incidencia y reflexión para el espejo 2 son ambos de $90^\circ - \theta_1$. El cambio total en la dirección del rayo después de las dos reflexiones es, por lo tanto, $2(90^\circ - \theta_1) + 2\theta_1 = 180^\circ$. Es decir, la dirección final del rayo es opuesta a su dirección original.

EVALUAR: Un punto de vista alternativo es que la reflexión especular invierte el signo de la componente de la velocidad de la luz perpendicular a la superficie, pero deja los otros componentes inalterados. Se invita al lector a que verifique esto con detalle. También deberá ser capaz de usar este resultado para demostrar que cuando un rayo de luz se refleja sucesivamente en tres espejos que forman la esquina de un cubo (un "reflector de vértice"), su dirección final, de nuevo, es opuesta a su dirección original. Este principio se usa mucho en las lentes de luces traseras y en los reflectores de las bicicletas para mejorar su visibilidad

33.12 Un rayo que se desplaza en el plano xy . La primera reflexión cambia el signo de la componente y de su velocidad, y la segunda reflexión cambia el signo de la componente x . En el caso de un rayo diferente que tuviera una componente z de velocidad, se podría usar un tercer espejo (perpendicular a los dos que se ilustran) para cambiar el signo de esa componente.



nocturna. Los astronautas del Apolo colocaron arreglos de reflectores de vértice en la Luna. Por medio de los rayos láser que se reflejaban en tales arreglos, se logró medir la distancia entre la Tierra y la Luna con una aproximación de 0.15 m.

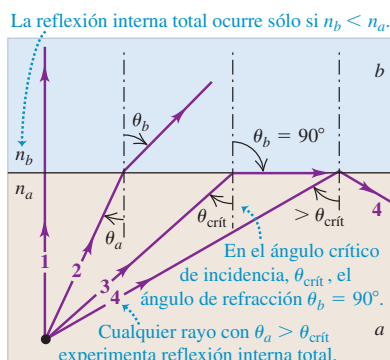
Evalúe su comprensión de la sección 33.2 Usted se encuentra en la orilla de un lago y observa un apetitoso pez que nada a cierta distancia por debajo de la superficie. a) Si quiere atrapar al pez, ¿debe lanzar el arpón i) más arriba, ii) más abajo o iii) directamente hacia la posición aparente del pez? b) Si en vez del arpón usara un rayo láser potente que le permitiera matar y cocinar al pez al mismo tiempo, ¿debería disparar el rayo láser i) más arriba, ii) más abajo o iii) directamente hacia la posición aparente del pez?

33.3 Reflexión interna total

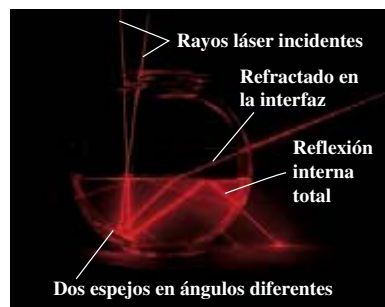
Hemos descrito la forma en que la luz se refleja y se transmite parcialmente en una interfaz entre dos materiales con distintos índices de refracción. Sin embargo, en ciertas circunstancias, toda la luz se puede reflejar en la interfaz, sin que se transmita nada de ella, aun si el segundo material es transparente. La figura 33.13a muestra la forma en que esto ocurre. Se ilustran varios rayos que salen de una fuente puntual en el material a con índice de refracción n_a . Los rayos inciden en la superficie del segundo

33.13 a) Reflexión interna total. El ángulo de incidencia para el que el ángulo de refracción es 90° se llama ángulo crítico; éste es el caso para el rayo 3. Las porciones reflejadas de los rayos 1, 2 y 3 se omiten por claridad. b) Los rayos de luz láser entran al agua en la pecera desde arriba; se reflejan en el fondo en los espejos inclinados con ángulos ligeramente distintos. Un rayo experimenta reflexión interna total en la interfaz aire-agua.

a) Reflexión interna total



b) Reflexión interna total demostrada con un láser, espejos y agua en una pecera



material b con índice n_b , donde $n_a > n_b$. (Por ejemplo, los materiales a y b podrían ser agua y aire, respectivamente.) Según la ley de Snell de la refracción,

$$\text{sen } \theta_b = \frac{n_a}{n_b} \text{sen } \theta_a$$

Como n_a/n_b es mayor que la unidad, $\text{sen } \theta_b$ es mayor que $\text{sen } \theta_a$; el rayo se desvía *apartándose* de la normal. Así, debe haber algún valor de θ_a *menor que* 90° para el cual la ley de Snell da $\text{sen } \theta_b = 1$ y $\theta_b = 90^\circ$. Esto se ilustra con el rayo 3 en el diagrama, que emerge apenas rozando la superficie con un ángulo de refracción de 90° . Compare el diagrama en la figura 33.13a con la fotografía de los rayos de luz en la figura 33.13b.

El ángulo de incidencia para el cual el rayo refractado emerge en forma tangencial a la superficie se llama **ángulo crítico**, y se denota con $\theta_{\text{crít}}$. (Un análisis más detallado con las ecuaciones de Maxwell demuestra que conforme el ángulo de incidencia se aproxima al ángulo crítico, la intensidad transmitida tiende a cero.) Si el ángulo de incidencia es *mayor* que el ángulo crítico, el seno del ángulo de refracción, de acuerdo con la ley de Snell, tendría que ser mayor que la unidad, lo cual es imposible. Más allá del ángulo crítico, el rayo *no puede* pasar hacia el material superior: queda atrapado en el material inferior y se refleja por completo en la superficie de frontera. Esta situación, llamada **reflexión interna total**, sólo ocurre cuando un rayo incide sobre la interfaz con un segundo material cuyo índice de refracción es *menor* que el del material por el que viaja el rayo.

Es posible encontrar el ángulo crítico para dos materiales dados si se iguala $\theta_b = 90^\circ$ ($\text{sen } \theta_b = 1$) en la ley de Snell. De esta forma, se tiene

$$\text{sen } \theta_{\text{crít}} = \frac{n_b}{n_a} \quad (\text{ángulo crítico para la reflexión interna total}) \quad (33.6)$$

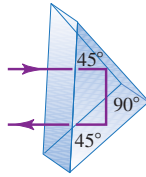
La reflexión interna total ocurrirá si el ángulo de incidencia θ_a es mayor o igual que $\theta_{\text{crít}}$.

Aplicaciones de la reflexión interna total

La reflexión interna tiene numerosos usos en la tecnología óptica. Por ejemplo, considere un vidrio cuyo índice de refracción es $n = 1.52$. Si la luz que se propaga dentro de este vidrio encuentra una interfaz vidrio-aire, el ángulo crítico es:

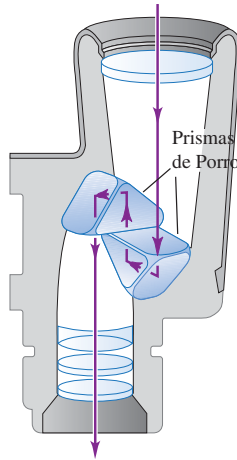
$$\text{sen } \theta_{\text{crít}} = \frac{1}{1.52} = 0.658 \quad \theta_{\text{crít}} = 41.1^\circ$$

a) Reflexión interna total en un prisma de Porro



Si el rayo incidente está orientado como se ilustra, la reflexión interna total ocurre en las caras a 45° (porque para una interfaz vidrio-aire, $\theta_{\text{crit}} = 41.1^\circ$).

b) Los binoculares utilizan prismas de Porro para reflejar la luz hacia el ocular



La luz *se reflejará totalmente* si incide en la superficie vidrio-aire con un ángulo de 41.1° o mayor. Puesto que el ángulo crítico es un poco menor de 45° , es posible usar un prisma con ángulos de $45^\circ-45^\circ-90^\circ$ como superficie totalmente reflectante. Como reflectores, los prismas totalmente reflectantes tienen ciertas ventajas sobre las superficies metálicas, como los espejos comunes recubiertos de vidrio. Puesto que ninguna superficie metálica refleja el 100% de la luz que incide sobre ella, un prisma puede reflejar *totalmente* la luz. Las propiedades reflectantes de un prisma tienen las ventajas adicionales de ser permanentes y no deteriorarse por empañamiento.

Un prisma de $45^\circ-45^\circ-90^\circ$, usado como en la figura 33.14a, se llama prisma de *Porro*. La luz entra y sale en ángulos rectos con respecto a la hipotenusa y se refleja totalmente en cada una de las caras más cortas. El cambio total de la dirección de los rayos es de 180° . Es frecuente que los binoculares usen combinaciones de dos prismas de Porro como en la figura 33.14b.

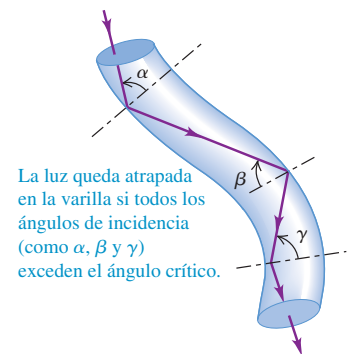
Cuando un rayo de luz entra por un extremo de una varilla transparente (figura 33.15), la luz se refleja por completo internamente si el índice de refracción de la varilla es mayor que el del material circundante. La luz queda "atrapada" dentro de la varilla aun si ésta se curva, siempre que la curvatura no sea muy marcada. Una varilla con estas características en ocasiones recibe el nombre de *tubo de luz*. Un haz de finas fibras de vidrio o de plástico se comporta del mismo modo y tiene la ventaja de ser flexible. Un haz consiste en miles de fibras individuales, cada una del orden de 0.002 a 0.01 mm de diámetro. Si las fibras se ensamblan en el haz de manera que las posiciones relativas de sus extremos sean las mismas (o imágenes especulares) en ambos extremos, el haz puede transmitir una imagen, como se aprecia en la figura 33.16.

Los equipos de fibra óptica tienen muchas aplicaciones médicas en los instrumentos llamados *endoscopios*, que se insertan directamente en los tubos bronquiales, la vejiga, el colon y otros órganos para efectuar un examen visual directo. Un haz de fibra se puede encerrar en una aguja hipodérmica para estudiar los tejidos y vasos sanguíneos que hay debajo de la piel.

La fibra óptica también tiene aplicaciones en los sistemas de comunicación, en los que se usa para transmitir un rayo láser modulado. La rapidez con la que una onda (ya sea de luz, de radio o de otro tipo) puede transmitir información es proporcional a la frecuencia. Para comprender por qué en términos cualitativos, considere la modulación (modificación) de la onda por medio del recorte de algunas de sus crestas. Suponga que cada cresta representa un dígito binario: una cresta recortada representa un 0 y una cresta sin modificar representa un 1. El número de dígitos binarios que podemos transmitir por unidad de tiempo es, por consiguiente, proporcional a la frecuencia de la onda. Las ondas de luz infrarroja y visible tienen una frecuencia mucho mayor que las ondas de radio, de manera que un rayo láser modulado puede transmitir una cantidad enorme de información a través de un solo cable de fibra óptica.

33.14 a) Reflexión interna total en un prisma de Porro. b) Combinación de dos prismas de Porro en los binoculares.

33.15 Varilla transparente con índice de refracción mayor que el del material circundante.



La luz queda atrapada en la varilla si todos los ángulos de incidencia (como α , β y γ) exceden el ángulo crítico.

33.16 Transmisión de imágenes por un haz de fibras ópticas.



33.17 Para maximizar su brillo, los diamantes se cortan de manera que haya una reflexión interna total sobre sus superficies posteriores.



Otra ventaja de las fibras ópticas es que se pueden hacer más delgadas que el alambre de cobre convencional, por lo que se pueden agrupar más fibras en un cable de un diámetro dado. Así, más señales distintas (por ejemplo, diferentes líneas telefónicas) se pueden enviar por el mismo cable. Como los cables de fibra óptica son aislantes eléctricos, son inmunes a la interferencia eléctrica proveniente de los relámpagos y otras fuentes, y no permiten corrientes indeseables entre el emisor y el receptor. Por éstas y otras razones, los cables de fibra óptica tienen un papel cada vez más importante en la telefonía de larga distancia, la televisión y la comunicación por Internet.

La reflexión interna total también desempeña un papel importante en el diseño de joyería. El brillo del diamante se debe en gran medida a su alto índice de refracción ($n = 2.417$) y a un pequeño ángulo crítico correspondiente. La luz que entra a través de un diamante cortado se refleja por completo internamente en las facetas de su superficie posterior, y luego sale por la superficie anterior (figura 33.17). Las gemas “imitación de diamante” como el circón cúbico, están elaboradas con materiales cristalinos menos caros y con índices de refracción comparables.

Ejemplo conceptual 33.4 Un periscopio con fugas

El periscopio de un submarino usa dos prismas totalmente reflectantes de $45^\circ-45^\circ-90^\circ$ con reflexión interna total en los lados adyacentes a ángulos de 45° . Se presenta una fuga y el prisma inferior queda cubierto por el agua. Explique por qué el periscopio deja de funcionar.

SOLUCIÓN

El ángulo crítico correspondiente a agua ($n_a = 1.33$) sobre vidrio ($n_v = 1.52$) es

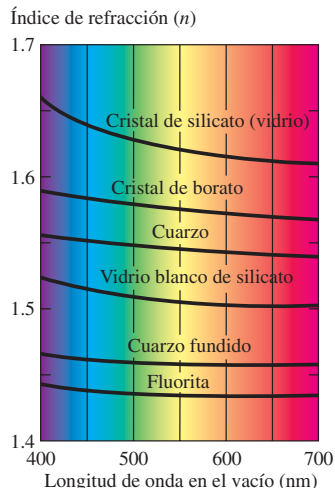
$$\theta_{\text{crit}} = \arcsen \frac{1.33}{1.52} = 61.0^\circ$$

El ángulo de 45° de incidencia para un prisma totalmente reflectante es *más pequeño* que el ángulo crítico de 61° , así que no hay reflexión interna total en la frontera vidrio-agua. La mayor parte de la luz se transmite en el agua, y muy poca se refleja de regreso al prisma.

Evalúe su comprensión de la sección 33.3 ¿En cuál de las siguientes situaciones hay reflexión interna total? i) Luz que se propaga en agua ($n = 1.33$) incide en una interfaz agua-aire con un ángulo de incidencia de 70° ; ii) luz que se propaga en vidrio ($n = 1.52$) incide en una interfaz vidrio-agua con un ángulo de incidencia de 70° ; iii) luz que se propaga en agua incide en una interfaz agua-vidrio con un ángulo de incidencia de 70° .



33.18 Variación del índice de refracción n con la longitud de onda en distintos materiales transparentes. El eje horizontal muestra la longitud de onda λ_0 de la luz en el vacío; la longitud de onda en el material es igual a $\lambda = \lambda_0/n$.



*33.4 Dispersión

La luz blanca ordinaria es una superposición de ondas con longitudes que se extienden a través de todo el espectro visible. La rapidez de la luz en el vacío es la misma para todas las longitudes de onda, pero la rapidez en una sustancia material es diferente para distintas longitudes de onda. En consecuencia, el índice de refracción de un material depende de la longitud de onda. La dependencia de la rapidez de onda y del índice de refracción con respecto a la longitud de onda se llama **dispersión**.

La figura 33.18 muestra la variación del índice de refracción n con la longitud de onda en algunos materiales ópticos comunes. Observe que el eje horizontal de la figura es la longitud de onda de la luz en el vacío, λ_0 ; la longitud de onda en el material está dada por la ecuación (33.5), $\lambda = \lambda_0/n$. En la mayoría de los materiales el valor de n disminuye al aumentar la longitud de onda y disminuir la frecuencia; por lo tanto, n aumenta al disminuir la longitud de onda y aumentar la frecuencia. En un material de ese tipo, la luz de mayor longitud de onda tiene una rapidez mayor que la luz de longitud de onda más corta.

La figura 33.19 muestra un rayo de luz blanca que incide sobre un prisma. La desviación (cambio de dirección) producida por el prisma aumenta al incrementarse el índice de refracción y la frecuencia y al disminuir la longitud de onda. La luz violeta es la que se desvía en mayor grado, y la roja es la que se desvía menos; otros colores están en posiciones intermedias. Cuando sale del prisma, la luz se dispersa en un rayo



33.19 Dispersión de la luz a través de un prisma. La banda de colores se llama espectro.

con forma de abanico, como se ilustra. Se dice que la luz se *dispersa* en un espectro. La cantidad de dispersión depende de la *diferencia* entre los índices de refracción para la luz violeta y para la luz roja. En la figura 33.18 se observa que para una sustancia como la fluorita, la diferencia entre los índices para el rojo y el violeta es pequeña, y la dispersión también será pequeña. Una mejor elección del material para un prisma cuya finalidad es generar un espectro sería el cristal de silicato, para el que hay una mayor diferencia en el valor de n entre el rojo y el violeta.

Como se mencionó en la sección 33.3, el brillo del diamante se debe en parte a su inusual índice de refracción tan grande; otro factor importante es su gran dispersión, el cual ocasiona que la luz que entra al diamante salga como un espectro multicolor. Los cristales de rutilo y de titanato de estroncio, los cuales se producen en forma sintética, tienen alrededor de ocho veces la dispersión del diamante.

Arco iris

Cuando usted presencia la belleza de un arco iris, como el de la figura 33.20a, observa los efectos combinados de la dispersión, la refracción y la reflexión. La luz del Sol proveniente de atrás del observador entra en una gota de agua, se refleja (parcialmente) en la superficie posterior de la gota, y se refracta otra vez al salir de ella (figura 33.20b). Los rayos de luz que entran por el punto medio de la gota se reflejan directamente de regreso. Todos los demás rayos salen de la gota con un ángulo Δ con respecto al rayo medio, y muchos rayos se “apilan” en el ángulo Δ . Lo que se ve es un disco de luz de radio angular Δ con centro en el punto en el cielo que está opuesto al Sol; debido al “apilamiento” de los rayos luminosos, el disco tiene su brillo máximo alrededor de su borde, el cual vemos como el arco iris (figura 33.20c). Como ninguna luz llega al ojo en ángulos mayores que Δ , el cielo parece oscuro afuera del arco iris (véase la figura 33.20a). El valor del ángulo Δ depende del índice de refracción del agua que forma las gotas, el cual a la vez depende de la longitud de onda (figura 33.20d). El disco brillante de luz roja es un poco mayor que el de luz naranja, que a la vez es algo mayor que el de la luz amarilla y así sucesivamente. Como resultado, usted ve al arco iris como una banda de colores.

En muchos casos es posible ver un segundo arco iris más grande. Éste es el resultado de la dispersión, la refracción y *dos* reflexiones en la superficie posterior de la gota (figura 33.20e). Cada vez que un rayo de luz incide en la superficie posterior, parte de la luz se refracta hacia fuera de la gota (no se muestra en la figura 33.20); después de dos de tales incidencias, relativamente poca luz queda dentro de la gota y, por eso, el arco iris secundario es notablemente más tenue que el arco iris primario. Así como un espejo colocado frente a un libro invierte las letras impresas, la segunda reflexión invierte la secuencia de colores en el arco iris secundario. Se puede observar este efecto en la figura 33.20a.

33.5 Polarización

La *polarización* es una característica de todas las ondas transversales. Este capítulo trata sobre la luz, pero para presentar algunos conceptos básicos acerca de la polarización, volvamos a las ondas transversales en una cuerda que estudiamos en el capítulo 15.