

NATURALEZA Y PROPAGACIÓN DE LA LUZ

33



Vemos un arco iris cuando llueve frente a nosotros y el Sol está a nuestra espalda. Forman el arco rayos de luz solar que cambian de dirección tres veces: los rayos se refractan, o doblan, cuando entran en una gota de lluvia; después se reflejan en la parte posterior de la gota; y finalmente se refractan de nuevo al salir de la gota. Vemos colores porque las diferentes longitudes de onda se refractan formando ángulos diferentes, un fenómeno que se conoce como dispersión.

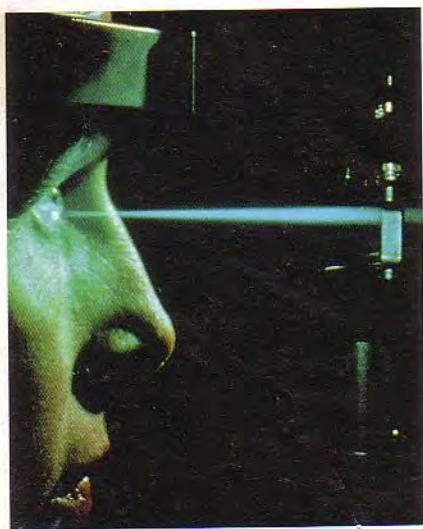
¿A qué se debe el segundo arco iris tenue que aparece por fuera del primario? ¿Por qué el orden de sus colores es inverso al de los colores del arcoiris primario?

Cualquiera que tenga ojos para percibir los colores puede gozar de los lagos azules, los desiertos color ocre, 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 de otras ondas electromagnéticas, podemos obtener una apreciación más profunda del mundo visible. El conocimiento de las propiedades de la luz nos permite comprender el color azul del cielo y el diseño de dispositivos ópticos como los telescopios, microscopios, cámaras fotográficas, anteojos y el ojo humano. Los mismos principios básicos de la óptica también yacen en el corazón de desarrollos modernos como el láser, las fibras ópticas, los hologramas, las computadoras ópticas y las nuevas técnicas de formación de imágenes con fines médicos.

La importancia de la óptica para la física, la ciencia y la ingeniería en general, es tan grande, que dedicaremos los siguientes cuatro capítulos a su estudio. En este capítulo comenzaremos con el estudio de las leyes de reflexión y refracción y los conceptos de espaciamiento, polarización y dispersión luminosa. Sobre la marcha, compararemos las diversas descripciones de la luz en términos de partículas, rayos y ondas, y presentaremos el principio de Huygens, un eslabón importante que enlaza los puntos de vista basados en rayos y ondas. En el capítulo 34, utilizaremos la descripción de la luz en términos de rayos para comprender cómo funcionan los espejos y las lentes, y veremos cómo se utilizan estos espejos y lentes en instrumentos ópticos como las cámaras, microscopios y telescopios. En los capítulos 35 y 36 exploraremos más a fondo las características ondulatorias de la luz.



33.1 Un elemento calentador eléctrico emite principalmente radiación infrarroja. Pero si su temperatura es suficientemente alta, también emite una cantidad discernible de luz visible.



33.2 Los cirujanos oftalmólogos utilizan láseres para reparar retinas desprendidas y para cauterizar vasos sanguíneos en las retinopatías. Las pulsaciones de luz azul verdosa de un láser de argón son ideales para este propósito, pues atraviesan la parte transparente del ojo sin dañarla pero son absorbidas por los pigmentos rojos de la retina.

33.1 | Naturaleza de la luz

Hasta la época de Isaac Newton (1642–1727), la mayoría de los científicos pensaba que la luz consistía en corrientes de partículas (llamadas *corpúsculos*) emitidas por fuentes de luz. Galileo y otros intentaron (sin éxito) medir la rapidez de la luz. Alrededor de 1665 comenzaron a descubrirse indicios de las propiedades *ondulatorias* de la luz. Para la primera mitad del siglo XIX, las pruebas de que la luz es una onda habían llegado a ser muy convincentes.

En 1873, James Clerk Maxwell predijo la existencia de ondas electromagnéticas y calculó su rapidez de propagación, como vimos en el capítulo 32. Este adelanto, aunado al trabajo experimental de Heinrich Hertz iniciado en 1887, demostró de forma concluyente que la luz es, en efecto, una onda electromagnética.

Sin embargo, la concepción ondulatoria de la luz no ofrece una visión completa sobre su naturaleza. Varios efectos asociados con la emisión y absorción de luz ponen de manifiesto un aspecto corpuscular, en cuanto a que la energía transportada por las ondas de luz está contenida en paquetes discretos llamados *fotones* o *cuantos*. Desde 1930 ha sido posible conciliar estas propiedades ondulatorias y corpusculares, aparentemente contradictorias, gracias al desarrollo de la electrodinámica cuántica, una teoría completa que incluye tanto las propiedades ondulatorias como las corpusculares. La *propagación* de la luz se describe mejor mediante un 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 longitudes de onda diferentes. A temperaturas suficientemente altas, toda la materia emite una cantidad luz visible para ser autoluminosa; un cuerpo muy caliente se ve “al rojo vivo” (figura 33.1) o “al rojo blanco”. Así pues, la materia caliente, cualquiera que sea su forma, es una fuente de luz. Algunos ejemplos conocidos son la llama de una vela, las brasas incandescentes de una fogata, las espiras de un calentador eléctrico y el filamento de una lámpara incandescente (que por lo regular funciona a una temperatura de alrededor de 3000°C).

También se produce luz durante las descargas eléctricas a través de gases ionizados. La luz azulosa de las lámparas de arco de mercurio, la luz naranja amarillenta de las lámparas de vapor de sodio y los diversos colores de los anuncios de “neón” son muy conocidos. Una variante de la lámpara de arco de mercurio es la lámpara *fluorescente* (figura 30.7). Esta fuente de luz utiliza un *recubrimiento fosforescente* para convertir la radiación ultravioleta de un arco de mercurio en luz visible. Debido a esta conversión, las lámparas fluorescentes convierten la energía eléctrica en luz con mayor eficiencia que las lámparas incandescentes.

Una fuente de luz que ha alcanzado una gran popularidad en los últimos cuarenta años es el *láser*. En casi todas las fuentes de luz, ésta es emitida de forma independiente por distintos átomos en el interior de la fuente; en un láser, en cambio, los átomos son inducidos para que emitan luz de un modo coherente, más cooperativo. El resultado es un haz de radiación muy estrecho que puede ser sumamente intenso y que se approxima mucho más a ser *monocromático*, es decir de una sola frecuencia, que la luz de cualquier otra fuente. Los médicos utilizan láseres para practicar microcirugías. En los reproductores de CD y en las computadoras se emplean láseres para leer la información codificada en un disco compacto o CD-ROM; en la industria, para cortar acero y para fundir materiales con un alto punto de fusión. Además de éstas, los láseres tienen muchas otras aplicaciones (figura 33.2).

Sin importar cuál sea su fuente, la radiación electromagnética viaja en el vacío a la rapidez de la luz. La primera demostración de que la rapidez de la luz no es infinita fue realizada en 1676 por el astrónomo danés Ole Rømer, con base en observaciones del movimiento de uno de los satélites de Júpiter. La primera medición terrestre satisfactoria de la rapidez de la luz fue efectuada por el científico francés Armand Fizeau en 1849, usando un haz de luz reflejado, interrumpido por un disco rotatorio con muescas. Jean Foucault, en Francia, y Albert A. Michelson, en Estados Unidos, llevaron a la práctica versiones más refinadas de este experimento en el siglo XIX.

Con base en el análisis de todas las mediciones efectuadas hasta 1983, el valor más probable para la rapidez de la luz en ese año era de

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

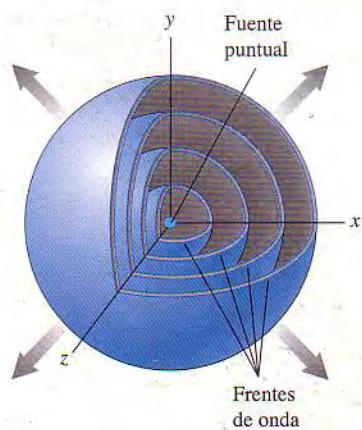
Como explicamos en la sección 1.3, la definición del segundo con base en el reloj de cesio es precisa hasta una parte en 10 billones (10^{13}). Hasta 1983 la definición del metro era mucho menos precisa, alrededor de cuatro partes en mil millones (10^9). Todo intento por medir la rapidez de la luz con mayor precisión tropezaba con esta limitante. Por esta razón, en noviembre de 1983 la Conferencia General de Pesos y Medidas *redefinió* el metro al definir precisamente la rapidez de la luz en el vacío como 299,792,458 m/s. Hoy en día el metro se define como la distancia que recorre la luz en un tiempo de 1/299,792,458 s, con el segundo definido por medio del reloj de cesio.

Ondas, frentes de onda y rayos

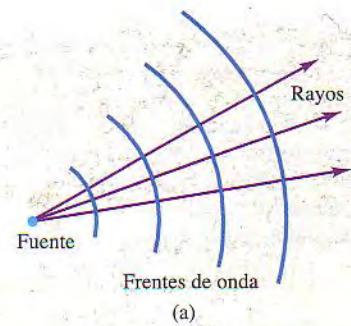
Es frecuente el uso del concepto de **frente de onda** para describir la propagación de las ondas. Presentamos este concepto en la sección 32.2 para describir el borde de ataque de una onda. En términos más generales, definimos un frente de onda como *el lugar geométrico de todos los puntos adyacentes en los cuales la fase de vibración de una magnitud física, asociada con la onda, es la misma*. Es decir, en cualquier instante, todos los puntos de un frente de onda están en la misma parte de su ciclo de variación.

Cuando dejamos caer una piedra en un estanque en calma, los círculos en expansión formados por las crestas de onda, al igual que los círculos formados por los valles de onda intermedios, son frentes de onda. De forma análoga, cuando se propagan ondas de sonido en aire inmóvil desde una fuente puntual, o cuando se propaga la radiación electromagnética a partir de un emisor puntual, toda superficie esférica concéntrica con la fuente es un frente de onda, como se muestra en la figura 33.3. De manera habitual, en los diagramas de movimiento de ondas dibujamos sólo partes de algunos pocos frentes de onda, y solemos elegir frentes de onda consecutivos que tienen la misma fase y, por tanto, están separados por una longitud de onda, como las crestas de las olas en el agua. De forma análoga, un diagrama de ondas sonoras podría mostrar sólo las “crestas de presión”, esto es, las superficies sobre las cuales la presión es máxima, y un diagrama de ondas electromagnéticas podría mostrar sólo las “crestas” donde el campo eléctrico o magnético es máximo.

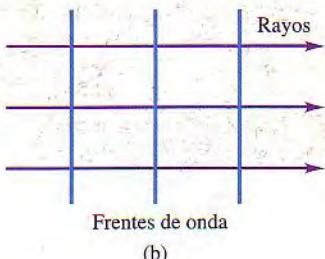
A menudo haremos uso de diagramas que muestran la forma de los frentes de onda o sus secciones transversales en cierto plano de referencia. Por ejemplo, cuando una fuente pequeña de luz irradia ondas electromagnéticas, podemos representar los frentes de onda como superficies esféricas concéntricas con la fuente o, como en la figura 33.4a, mediante las intersecciones circulares de estas superficies con el plano del diagrama. Muy lejos de la fuente, donde el radio de las esferas ya es muy grande, una sección de una superficie esférica puede ser considerada como un plano, y se tiene entonces una onda plana como las que analizamos en las secciones 32.2 y 32.3 (figura 33.4b).



33.3 Los frentes de onda esféricos se propagan de modo uniforme en todas direcciones a partir de una fuente puntual en un medio inmóvil, como el aire quieto, que tiene las mismas propiedades en todas las regiones y en todas direcciones. Las ondas electromagnéticas en un vacío también se propagan como aquí se muestra.



(a)



(b)

33.4 Frentes de onda (azules) y rayos (morados). (a) Cuando los frentes de onda son esféricos, los rayos irradian desde el centro de las esferas. (b) Cuando los frentes de onda son planos, los rayos son paralelos.

Para describir las direcciones de propagación de la luz, suele ser conveniente representar una onda de luz mediante **rayos** en vez de frentes de onda. Los rayos fueron empleados 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 luz*. 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 con propiedades idénticas en todas sus regiones y en todas direcciones), los rayos son siempre líneas rectas normales a los frentes de onda. En una superficie límitrofe entre dos materiales, por ejemplo, en la superficie de una hoja de vidrio en 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 ofrecen muchas oportunidades para advertir la interacción entre las descripciones de la luz basadas en rayos, ondas y partículas. La rama de la óptica en la cual la descripción de rayos resulta adecuada se conoce como **óptica geométrica**; la rama que se ocupa específicamente del comportamiento ondulatorio es llamada **óptica física**. Este capítulo y el siguiente conciernen principalmente a la óptica geométrica. En los capítulos 35 y 36 estudiaremos los fenómenos ondulatorios y la óptica física.

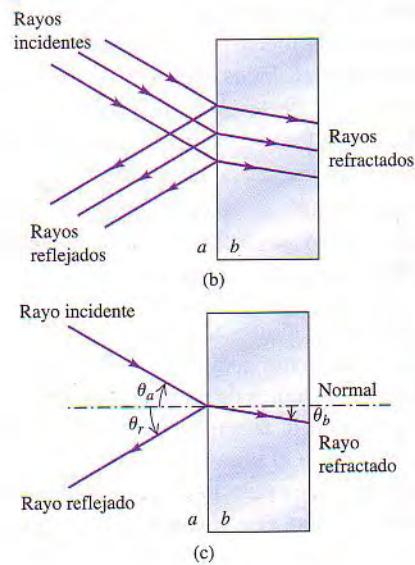
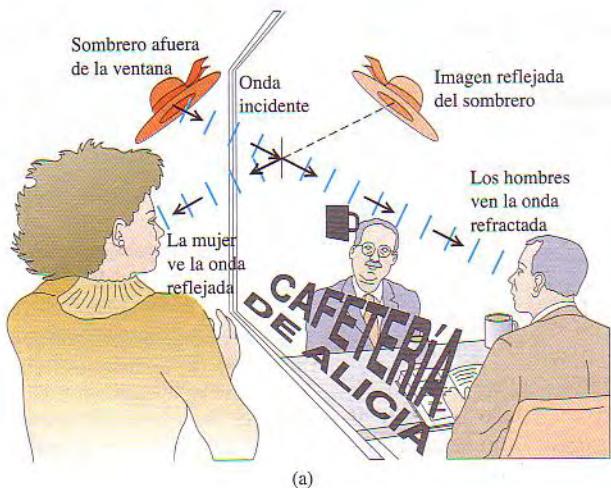
- 33.5** (a) Una onda plana se refleja en parte, y en parte se refracta, en la frontera entre dos medios (en este caso, aire y vidrio). La luz que alcanza el interior del restaurante se refracta dos veces: una al entrar en el vidrio, y otra más al salir de éste. (b) Las ondas en el aire del exterior y en el vidrio de (a) se representan por medio de rayos. (c) Para simplificar, se dibuja sólo un ejemplo de un rayo incidente, un rayo reflejado y un rayo refractado. En el caso que aquí se muestra, el material *b* tiene un índice de refracción mayor que el material *a* ($n_b > n_a$), y el ángulo θ_b es más pequeño que θ_a .

Evalúe su comprensión

Algunos cristales *no* son isotrópicos: la luz viaja a través del cristal con mayor rapidez en ciertas direcciones que en otras. En un cristal donde la luz *se* propaga con la misma rapidez en las direcciones *x* y *z*, pero con mayor rapidez en la dirección *y*, ¿seguirían siendo esféricos los frentes de onda de la figura 33.3? De no serlo, ¿cuál sería su apariencia?

33.2 | Reflexión y refracción

En esta sección utilizaremos el modelo de la luz basado en *rayos* para explorar dos de los aspectos más importantes de su propagación: la **reflexión** y la **refracción**. En general, cuando una onda luminosa incide en una interfaz lisa que separa dos



materiales transparentes (como aire y vidrio o agua y vidrio), parte de la onda se *refleja* y parte se *refracta* (transmite) en el segundo material, como se muestra en la figura 33.5a. Por ejemplo, cuando desde la calle miramos a través de la ventana de un restaurante, vemos un reflejo de la escena de la calle, pero una persona que está dentro del restaurante puede ver hacia afuera la misma escena, a través de la ventana, porque la luz le llega por refracción.

Los segmentos de ondas planas que se muestran en la figura 33.5a se pueden representar mediante paquetes de rayos que forman *haces* de luz (figura 33.5b). Por simplicidad, solemos dibujar un solo rayo en cada haz (figura 33.5c). El representar estas ondas como rayos es la base de la óptica geométrica. Para comenzar, estudiaremos el comportamiento de un rayo individual.

Describimos la dirección de los rayos incidentes, reflejados y refractados (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 muestra en la figura 33.5c. Si la interfaz es áspera, tanto la luz transmitida como la luz reflejada se dispersan en múltiples direcciones, y no existe un único ángulo de transmisión o de reflexión. La reflexión en un ángulo definido desde una superficie muy lisa se denomina **reflexión especular** (de la palabra latina que significa “espejo”); la reflexión dispersa desde una superficie áspera se llama **reflexión difusa**. Esta distinción se muestra en la figura 33.6. Ambos tipos de reflexión pueden ocurrir ya sea con materiales transparentes o con materiales *opacos* que no transmiten la luz. La inmensa mayoría de los objetos de nuestro entorno (ropa, plantas, otras personas y este libro, entre otros) son visibles para nosotros porque reflejan la luz de manera difusa desde su superficie. Nuestro interés principal se centra, sin embargo, en la reflexión especular desde una superficie muy lisa, como la del vidrio, el plástico o el metal pulimentado. A menos que se indique otra cosa, al hablar de “reflexión” siempre nos referiremos a una reflexión *especular*.

El **índice de refracción** de un material óptico (también conocido como **índice de refringencia**), que se denota con n , desempeña un papel central en la óptica geométrica. Es la razón de la rapidez de la luz c en el vacío respecto a su rapidez v dentro del material.

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

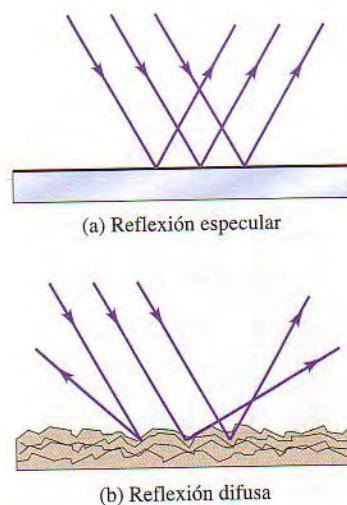
La luz siempre se propaga *más lentamente* dentro de un material que en el vacío, por lo que el valor de n en cualquier medio que no sea el vacío siempre es mayor que la unidad. En el vacío, $n = 1$. Dado que n es la razón entre dos valores de rapidez, es un número puro sin unidades. (La relación entre el valor de n y las propiedades eléctricas y magnéticas de un material se describe en la sección 32.3).

CUIDADO Tenga presente que la rapidez de onda v es *inversamente proporcional* al índice de refracción n . Mientras mayor sea el índice de refracción de un material, *menor* será la rapidez de onda dentro de ese material. ¡Olvidar este punto da lugar a serias confusiones!

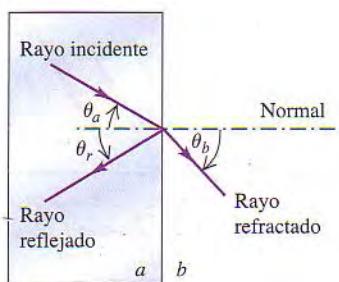
Leyes de reflexión y refracción

Los estudios experimentales de la dirección de los rayos incidentes, reflejados y refractados, en una interfaz lisa entre dos materiales ópticos desembocan en las conclusiones siguientes:

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 límitrofe entre los dos materiales.



33.6 Dos tipos de reflexión.



33.7 Reflexión y refracción en el caso donde el material *b* tiene un índice de refracción más pequeño que el material *a* ($n_b < n_a$). El ángulo de refracción θ_b es mayor que el ángulo de incidencia θ_a . Compárese con la figura 33.5c, la cual ilustra la situación donde $n_b > n_a$.



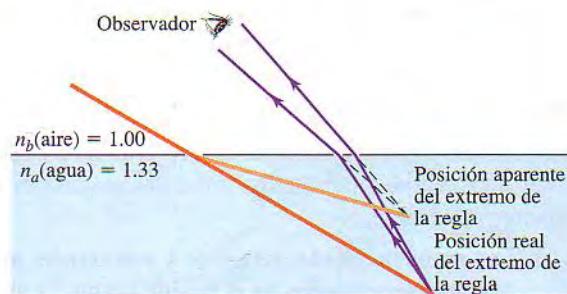
15.1 Reflexión y refracción

15.3 Aplicaciones de la refracción

33.8 (a) En realidad, esta regla es recta, pero parece que se dobla en la superficie del agua. (b) Los rayos luminosos provenientes de cualquier objeto sumergido se doblan apartándose de la normal cuando emergen en el aire. Visto por un observador arriba de la superficie del agua, el objeto parece hallarse mucho más cerca de la superficie de lo que está en realidad.



(a)



(b)

Siempre dibujaremos los diagramas de rayos de modo 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, reflejado, y la normal yacen todos en el mismo plano, se conoce como la **ley de reflexión**.

3. Para la luz monocromática, y dado un par 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 ambos ángulos se han medido desde la normal a la superficie, es igual a la **razón inversa de los índices de refracción**:

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

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

Este resultado experimental, junto con la observación de que los rayos incidente y refractado, así como la normal, yacen todos en el mismo plano, se llama **ley de refracción** o **ley de Snell**, en honor del científico holandés Willebrod Snell (1591–1626). Existen ciertas dudas acerca de si Snell descubrió esta ley efectivamente. El descubrimiento de que $n = c/v$ vino mucho tiempo después.

Aunque estos resultados se observaron por primera vez de forma experimental, es posible deducirlos teóricamente a partir de una descripción ondulatoria de la luz. Esto lo haremos en la sección 33.7.

Las ecuaciones (33.3) y (33.4) muestran que cuando un rayo pasa de un material (*a*) a otro material (*b*) con un índice de refracción más grande ($n_b > n_a$) y, por lo tanto, con una rapidez de onda menor, el ángulo θ_b respecto a la normal es **más pequeño** en el segundo material que el ángulo θ_a en el primero; en consecuencia, el rayo se desvía *hacia* la normal (figura 33.5c). Cuando el segundo material tiene un índice de refracción **más pequeño** que el del primer material ($n_b < n_a$) y, por tanto, una rapidez de onda mayor, el rayo se desvía *alejándose* de la normal (figura 33.7). Esto explica por qué una regla o un popote sumergidos en el agua parecen doblarse; los rayos luminosos provenientes de abajo de la superficie cambian de dirección en la interfaz del aire y el agua, de modo que los rayos parecen provenir de una posición situada arriba de su punto de origen real (figura 33.8). Un efecto similar explica la apariencia del Sol durante el crepúsculo (figura 33.9).

Un caso especial importante es la refracción que tiene lugar en una interfaz entre el vacío, cuyo índice de refracción es la unidad por definición, y un material. Cuando un rayo pasa del vacío a un material (b), de tal manera 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 modo que $n_a > 1$ y $n_b = 1$, el rayo siempre se desvía *alejándose* de la normal.

No importa cuáles sean los materiales a ambos lados de la interfaz, el rayo transmitido no se desvía en el caso especial de la incidencia *normal*, donde el rayo incidente es perpendicular a la interfaz, de modo que $\theta_a = 0$ y $\sin \theta_a = 0$. De acuerdo con la ecuación (33.4), esto significa que θ_b también es igual a cero, por lo que el rayo transmitido es asimismo perpendicular a la interfaz.

Las leyes de reflexión y refracción se cumplen independientemente del lado de la interfaz del cual provenga el rayo incidente. Si un rayo de luz se aproxima a la interfaz de la figura 33.5c o 33.7 desde la derecha en vez de la izquierda, hay también un rayo reflejado y uno refractado; estos dos rayos, el rayo incidente y la normal a la superficie yacen de nuevo en el mismo plano. Además, la trayectoria de un rayo refractado es *reversible*; es decir, sigue el mismo camino para ir de b a a que para ir de a a b . [Esto puede comprobarse mediante la ecuación (33.4)]. Dado que los rayos reflejado e incidente forman el mismo ángulo respecto a la normal, la trayectoria de un rayo reflejado también es reversible. Es por esto que, cuando vemos los ojos de otra persona en un espejo, ellos también nos ven.

La *intensidad* de los rayos reflejado y refractado depende del ángulo de incidencia, de los dos índices de refracción y de la polarización (esto es, de la dirección del vector de campo eléctrico) del rayo incidente. La fracción reflejada es mínima cuando la incidencia es normal ($\theta_a = 0^\circ$), en cuyo caso es de alrededor del 4% si la interfaz es entre aire y vidrio. Esta fracción aumenta con el ángulo de incidencia, hasta llegar al 100% que se da con una incidencia rasante, cuando $\theta_a = 90^\circ$.

Las ecuaciones de Maxwell permiten predecir la amplitud, intensidad, fase y estados de polarización de las ondas reflejadas y refractadas. Sin embargo, un análisis de esta naturaleza queda fuera del alcance de esta obra.

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

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

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



(a)



(b)

33.9 (a) El índice de refracción del aire es ligeramente mayor que 1; por esta razón, los rayos luminosos del Sol poniente se desvían hacia abajo al entrar en nuestra atmósfera. (En esta figura se ha exagerado el efecto). (b) La luz que proviene de la extremidad 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 de las capas bajas de la atmósfera. En consecuencia, el Sol poniente se ve achatado en la dirección vertical.

El índice de refracción del aire a la temperatura y presión normales es de alrededor de 1.0003, y por lo regular lo tomaremos como exactamente la unidad. El índice de refracción de un gas aumenta conforme su densidad se incrementa. La mayor parte de los vidrios que se utilizan en instrumentos ópticos tienen índices de refracción de 1.5 a 2.0. Pocas sustancias tienen índices más grandes; un ejemplo es el diamante, con 2.417.

Índice de refracción y aspectos ondulatorios de la luz

Hemos analizado cómo cambia la dirección de un rayo de luz cuando pasa de un material a otro cuyo índice de refracción es diferente. También es importante ver qué ocurre con las características *ondulatorias* de la luz cuando esto sucede.

Primero, la frecuencia f de la onda no cambia al pasar de un material a otro. Es decir, el número de ciclos de onda que llegan por unidad de tiempo debe ser igual al número de ciclos que salen por unidad de tiempo; esto equivale a afirmar que la superficie limítrofe no crea ni destruye ondas.

Segundo, la longitud de onda λ de la onda es diferente, en general, en los distintos materiales. Esto se debe a que en cualquier material $v = \lambda f$; dado que f es la misma en cualquier material así como en el vacío, y v es siempre menor que la rapidez de onda c en el vacío, λ también disminuye como corresponde. Por consiguiente, 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 lo anterior, $f = c/\lambda_0 = v/\lambda$. Si combinamos esto con la ecuación (33.1), $n = c/v$, encontramos 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 primer material a un segundo material con un índice de refracción mayor, de modo que $n_b > n_a$, la rapidez de onda disminuye. La longitud de onda $\lambda_b = \lambda_0/n_b$ en el segundo material es entonces más corta que la longitud de onda $\lambda_a = \lambda_0/n_a$ en el primer material. Si, por el contrario, el segundo material tiene un índice de refracción más pequeño que el del primer material, de modo que $n_b < n_a$, entonces la rapidez de onda aumenta. En tal caso la longitud de onda λ_b en el segundo material es más larga que la longitud de onda λ_a en el primer material. Esto es intuitivamente razonable; 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

Reflexión y refracción

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

PLANTEAR el problema siguiendo estos pasos:

1. En los problemas de óptica geométrica en los que intervengan rayos y ángulos, siempre comience dibujando un diagrama grande y bien definido. Identifique todos los ángulos e índices de refracción conocidos.
2. Determine cuáles son las variables que se buscan.

EJECUTAR la solución como sigue:

1. Aplique las leyes de reflexión [ecuación (33.2)] y refracción [ecuación (33.4)]. Recuerde medir siempre los ángulos de incidencia, reflexión y refracción a partir de la *normal* a la superficie donde se producen la reflexión y la refracción, *nunca* a partir de la superficie misma.
2. En muchos casos será necesario aplicar un poco de geometría o trigonometría simple para obtener las relaciones angulares. La suma de los ángulos interiores de un triángulo es de 180° , un ángulo y su complemento difieren en 180° , etcétera. Pregúntese: “¿De qué información dispongo?”, “¿Qué necesito saber para hallar este ángulo?” o “¿Qué otros ángulos u otras magnitudes puedo calcular con base en la información proporcionada en el problema?”

3. Recuerde que la frecuencia de la luz no cambia al pasar de un material a otro, pero la longitud de onda cambia de acuerdo con la ecuación (33.5).

EVALUAR la respuesta: En problemas que involucran refracción, compruebe que la dirección de la refracción sea razonable. Si el segundo material tiene un índice de refracción mayor que

el del primer material, el rayo refractado se desvía hacia la normal y el ángulo de refracción es menor que el ángulo de incidencia. Si el primer material tiene un índice de refracción más grande, el rayo refractado se desvía apartándose de la normal, y el ángulo de refracción es mayor que el ángulo de incidencia. ¿Concuerdan sus resultados con estas reglas?

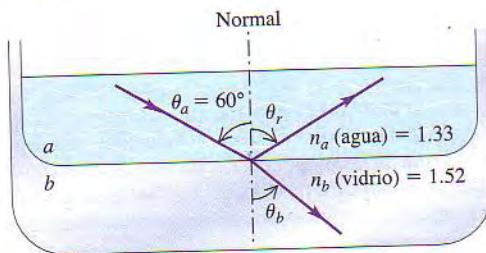
Ejemplo 33.1

Reflexión y refracción

En la figura 33.10, el material *a* es agua y el material *b* es vidrio con un índice de refracción de 1.52. Si el rayo incidente forma un ángulo de 60° respecto a la normal, halle la dirección de los rayos reflejado y refractado.

SOLUCIÓN

IDENTIFICAR Y PLANTEAR: La figura 33.10 muestra los rayos y ángulos correspondientes a esta situación. Las variables que se bus-



33.10 Reflexión y refracción de la luz al pasar de agua a vidrio.

can son el ángulo de reflexión θ_r y el ángulo de refracción θ_b . Dado que n_b es mayor que n_a , el ángulo de refracción debe ser menor que el ángulo de incidencia θ_a ; esto se muestra 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 correspondiente al rayo incidente; por lo tanto, $\theta_r = \theta_a = 60.0^\circ$.

Para hallar la dirección del rayo refractado, se aplica la ley de Snell [ecuación (33.4)] con $n_a = 1.33$, $n_b = 1.52$ y $\theta_a = 60.0^\circ$. El resultado es

$$\begin{aligned} n_a \operatorname{sen} \theta_a &= n_b \operatorname{sen} \theta_b \\ \operatorname{sen} \theta_b &= \frac{n_a}{n_b} \operatorname{sen} \theta_a = \frac{1.33}{1.52} \operatorname{sen} 60.0^\circ = 0.758 \\ \theta_b &= 49.3^\circ \end{aligned}$$

EVALUAR: El índice de refracción del segundo material es mayor que el del primero. Por lo tanto, el rayo refractado se desvía hacia la normal conforme la onda se retarda al penetrar en el segundo material, y $\theta_b < \theta_a$.

Ejemplo 33.2

Índice de refracción del ojo

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

SOLUCIÓN

IDENTIFICAR Y PLANTEAR: Las ideas clave en este caso son la definición del índice de refracción, $n = c/v$; la relación entre el índice de refracción y la longitud de onda [ecuación (33.5)], y la relación $v = \lambda f$ entre la rapidez de onda, la longitud de onda y la frecuencia.

EJECUTAR: El índice de refracción del aire es muy cercano a la unidad; por tanto, suponemos que las longitudes de onda en el aire y en

el vacío son iguales. Por tanto, la longitud de onda λ en el material está dada por la ecuación (33.5) con $\lambda_0 = 633$ nm:

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

Este índice de refracción es aproximadamente igual al del agua. Por tanto, $n = c/v$ da lo siguiente:

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

Por último, puesto que $v = \lambda f$,

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

EVALUAR: Adviértase que, si bien la rapidez y la longitud de onda tienen valores diferentes en el aire y el humor acuoso, la *frecuencia* en el aire, f_0 , es igual a 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 de que, cuando una onda luminosa pasa de un material a otro, la frecuencia de la onda no cambia.

Ejemplo 33.3

Un rayo se refleja dos veces

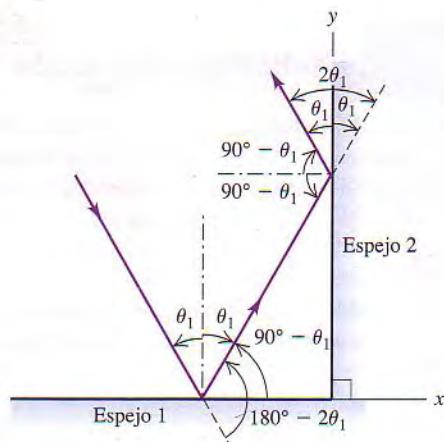
Se tienen dos espejos perpendiculares uno al otro. Un rayo que viaja en un plano perpendicular a ambos espejos se refleja en uno de ellos y luego en el otro, como se muestra en la figura 33.11. ¿Cuál es la dirección final del rayo respecto a su dirección original?

SOLUCIÓN

IDENTIFICAR Y PLANTEAR: En esta situación se producen dos reflexiones; por tanto, debemos aplicar dos veces la ley de reflexión.

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

EVALUAR: Un punto de vista equivalente es que la reflexión especular invierte el signo de la componente de velocidad de la luz perpendicular a la superficie, pero deja intactas las demás componentes. Lo invitamos a verificar esto en detalle. También deberá ser capaz de utilizar este resultado para demostrar que, cuando un rayo de luz es reflejado sucesivamente por tres espejos que forman el vértice de un cubo (un “reflector de vértice”), su dirección final es también opuesta a su dirección original. Este principio se utiliza extensamente en las lentes de luces traseras y en los letreros de carretera para mejorar



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

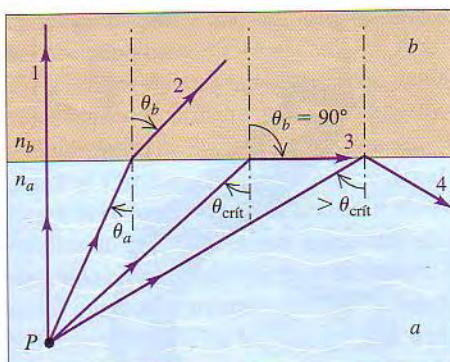
la visibilidad nocturna. Los astronautas del Apolo colocaron arreglos de reflectores de vértice en la luna. Por medio de rayos láser reflejados en estos arreglos, se ha podido medir la distancia de la Tierra a la Luna con una aproximación de 0.15 m.

Evalué su comprensión

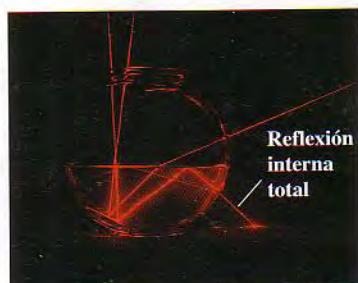
Parado en la orilla de un lago, usted avista un apetitoso pez que nada a cierta distancia bajo la superficie del agua. Si se propone arpónear el pez, ¿debe apuntar el arpón más arriba, más abajo, o directamente hacia la posición aparente del pez? ¿Hacia dónde tendría que apuntar, en cambio, si utiliza un láser de alta potencia para matar y cocinar simultáneamente el pez?

33.3 | Reflexión interna total

Hemos descrito cómo se refleja y transmite la luz parcialmente en una interfaz entre dos materiales con índices de refracción diferentes. Sin embargo, en ciertas circunstancias, se puede reflejar *toda* la luz en la interfaz, sin que nada de ella se transmita, aunque el segundo material sea transparente. La figura 33.12a muestra cómo ocurre esto. Se muestran varios rayos que irradian desde una fuente puntual P en el material a con índice de refracción n_a . Los rayos inciden en la superficie



(a)



(b)

33.12 (a) Reflexión interna total. El ángulo de incidencia con el que el ángulo de refracción es de 90° recibe el nombre de ángulo crítico: esto se cumple en el caso del rayo 3. Para mayor claridad, se omiten las partes reflejadas de los rayos 1, 2 y 3. (b) Los rayos de luz láser entran en el agua de la pecera desde arriba; son reflejados en el fondo por espejos inclinados en ángulos ligeramente distintos. Un rayo sufre reflexión interna total en la interfaz aire/agua.

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

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

Puesto que n_a/n_b es mayor que la unidad, $\sin \theta_b$ es más grande que $\sin \theta_a$; el rayo se desvía *apartándose de la normal*. Por consiguiente, debe haber cierto valor de θ_a menor que 90° con el que la ley de Snell da $\sin \theta_b = 1$ y $\theta_b = 90^\circ$. Esto corresponde al rayo 3 del diagrama, que emerge apenas rozando la superficie a un ángulo de refracción de 90° . Compárese el diagrama de la figura 33.12a con la fotografía de rayos de luz de la figura 33.12b.

El ángulo de incidencia con que emerge el rayo refractado tangente a la superficie se llama **ángulo crítico**, y se denota con $\theta_{\text{crít}}$. (Un análisis más detallado con base en las ecuaciones de Maxwell muestra que, a medida que el ángulo de incidencia se approxima 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, calculado con base en 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 al material superior; queda atrapado en el material inferior y se refleja totalmente en la superficie límitrofe. Esta situación, conocida como **reflexión total interna**, se presenta sólo cuando un rayo incide en la superficie de un segundo material cuyo índice de refracción es *más pequeño* que el del material en el que se propaga el rayo.

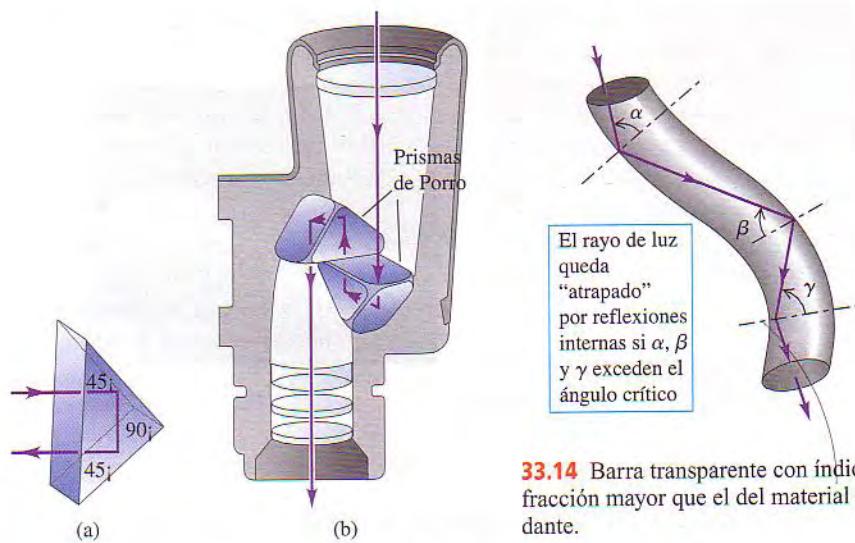
Podemos hallar el ángulo crítico de dos materiales determinados fijando $\theta_b = 90^\circ$ ($\sin \theta_b = 1$) en la ley de Snell. Tenemos entonces que

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

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

A manera de ejemplo, en el caso de una superficie vidrio-aire con $n = 1.52$ en el vidrio,

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



33.13 (a) Reflexión interna total en un prisma de Porro. (b) Combinación de dos prismas de porro en binoculares.

33.14 Barra transparente con índice de refracción mayor que el del material circundante.

La luz que se propaga adentro de este vidrio se reflejará totalmente si incide en la superficie vidrio-aire con un ángulo de 41.1° o más. Debido a que el ángulo crítico es un poco menor de 45° , es posible utilizar un prisma con ángulos de 45° - 45° - 90° como superficie totalmente reflectante. Como reflectores, los prismas totalmente reflectantes ofrecen ciertas ventajas sobre las superficies metálicas, como los espejos ordinarios de vidrio recubierto. En tanto que ninguna superficie metálica refleja el 100% de la luz que incide en ella, un prisma puede reflejar totalmente la luz. Las propiedades reflejantes de un prisma tienen las ventajas adicionales de ser permanentes y no deteriorarse por empañamiento.

Un prisma de 45° - 45° - 90° , utilizado como en la figura 33.13a, recibe el nombre de prisma de *Porro*. La luz entra y sale en ángulo recto con respecto a la hipotenusa, y se refleja totalmente en cada una de las caras más cortas. El cambio total de dirección de los rayos es de 180° . En los binoculares suelen emplearse combinaciones de dos prismas de Porro, como en la figura 33.13b.

La brillantez del diamante se debe en gran medida a su alto índice de refracción ($n = 2.417$) y a su correspondiente ángulo crítico grande. La luz que entra en un diamante tallado se refleja internamente en su totalidad en las facetas de la superficie trasera, y después emerge de la superficie frontal. Los “diamantes de imitación”, como los circones cúbicos, se fabrican a partir de materiales cristalinos menos costosos con índices de refracción comparables al del diamante.

Cuando un haz de luz entra por un extremo de una barra transparente (figura 33.14), la luz se refleja internamente en su totalidad si el índice de refracción de la barra es mayor que el del material circundante. La luz queda “atrapada” dentro de la barra incluso cuando ésta es curva, siempre y cuando la curvatura no sea muy grande. A las barras de este tipo se les llama en ocasiones *tubos de luz*. Un haz de finas fibras de vidrio o plástico se comporta del mismo modo y tiene la ventaja de ser flexible. Un haz puede consistir en miles de fibras individuales, cada una con un diámetro del orden de 0.002 a 0.01 mm. Si las fibras forman un haz de modo que las posiciones relativas de los extremos sean las mismas (o imágenes especulares) en ambos extremos, el haz puede transmitir una imagen, como se muestra en la figura 33.15.

Los dispositivos de fibras ópticas han encontrado una extensa variedad de aplicaciones médicas en los instrumentos llamados *endoscopios*, que pueden ser insertados directamente en los bronquios, la vejiga, el colon, etcétera, para llevar a cabo exámenes visuales directos. Se puede incluir un haz de fibras en una aguja



33.15 Transmisión de imágenes por un haz de fibras ópticas.

hipodérmica para estudiar los tejidos y los vasos sanguíneos a una gran profundidad por debajo de la piel.

Las fibras ópticas también tienen aplicación en los sistemas de comunicación, en los cuales se utilizan para transmitir un rayo láser modulado. La rapidez con la que una onda (de luz, radio, o lo que sea) puede transmitir información es proporcional a la frecuencia. Para comprender el porqué en términos cualitativos, considere la modulación de la onda por el recorte de algunas de las crestas de onda. Supóngase que cada cresta representa un dígito binario, de modo que una cresta recortada representa un cero, y una cresta intacta, un uno. El número de dígitos binarios que podemos transmitir por unidad de tiempo es, por tanto, proporcional a la frecuencia de la onda. Las ondas de luz infrarroja y visible tienen una frecuencia mucho mayor que las ondas de radio, por lo que un rayo láser modulado puede transmitir una cantidad enorme de información por medio de un solo cable de fibra óptica.

Otra ventaja de las fibras ópticas es que se pueden hacer más delgadas que el alambre de cobre convencional, y esto permite empaquetar más fibras en un cable de un diámetro determinado. En consecuencia, se pueden enviar señales más nítidas (por ejemplo, líneas telefónicas diferentes) por un mismo cable. Como los cables de fibras ópticas son aislantes eléctricos, son inmunes a la interferencia eléctrica provocada por rayos y otras fuentes, y no permiten corrientes indeseables entre la fuente y el receptor. Por éstas y otras razones, los cables de fibras ópticas desempeñan un papel cada vez más importante en la comunicación a larga distancia por teléfono, televisión e Internet.

Ejemplo conceptual 33.4

Periscopio con fugas

El periscopio de un submarino utiliza dos prismas totalmente reflectantes de 45° – 45° – 90° con reflexión interna total en los lados adyacentes a los ángulos de 45° . Se presenta una fuga, y el prisma inferior queda cubierto de agua. Explique por qué el periscopio ya no funciona.

SOLUCIÓN

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

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

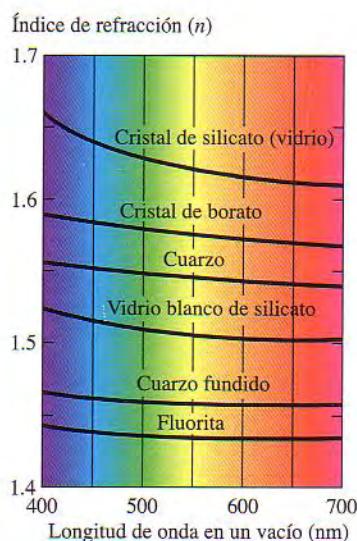
El ángulo de incidencia de 45° correspondiente a un prisma totalmente reflectante es menor que el ángulo crítico de 61° ; por tanto, no hay reflexión total interna en la frontera entre el vidrio y el agua. La mayor parte de la luz se transmite al agua, y muy poca se refleja de regreso hacia el prisma.

Evalue su comprensión

Considere la luz que se propaga en una fibra óptica. ¿Por qué la luz no sufre reflexión interna total cuando alcanza el extremo de la fibra, la cual le impediría salir?

*33.4 | Dispersión

La luz blanca ordinaria es una superposición de ondas con longitudes de onda que abarcan todo el espectro visible. La rapidez de la luz *en un vacío* es la misma para todas las longitudes de onda, pero la rapidez en una sustancia material es diferente en el caso de longitudes de onda diferentes. Por consiguiente, 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 respecto a la longitud de onda recibe el nombre de dispersión.



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

La figura 33.16 muestra la variación del índice de refracción n con la longitud de onda en algunos materiales ópticos comunes. Adviértase que el eje horizontal de esta figura se refiere a la longitud de onda de la luz *en un vacío*, λ_0 ; la longitud de onda en el material está dada por la ecuación (33.5): $\lambda = \lambda_0/n$. En casi todos los materiales el valor de n disminuye al aumentar la longitud de onda y disminuir la frecuencia; por tanto, n aumenta al disminuir la longitud de onda y aumentar la frecuencia. En un material de este tipo, la luz de longitud de onda más larga es más rápida que la luz de longitud de onda más corta.

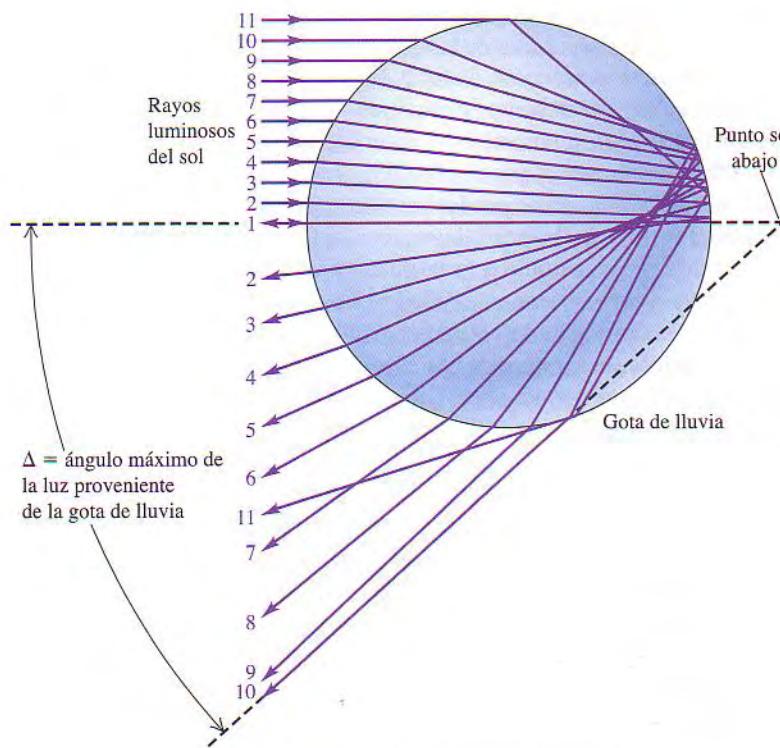
La figura 33.17 muestra un rayo de luz blanca que incide en un prisma. La desviación (cambio de dirección) provocada por el prisma crece al aumentar el índice de refracción y la frecuencia y disminuir la longitud de onda. La luz violeta es la que se desvía en mayor grado, y la roja, la que se desvía menos; los demás colores ocupan posiciones intermedias. Al salir del prisma, la luz se extiende en un haz con forma de abanico, como se muestra. Se dice que la luz se ha *dispersado* en un espectro. El grado de dispersión depende de la *diferencia* entre los índices de refracción de la luz violeta y la luz roja. En la figura 33.16 podemos ver que, en el caso de una sustancia como la fluorita, la diferencia entre los índices correspondientes al rojo y al violeta es pequeña, y la dispersión también lo es. Una mejor opción de material para un prisma cuyo propósito es crear un espectro sería el cristal de silicato, el cual presenta una diferencia más grande de valores de n entre el rojo y el violeta.

Como mencionamos en la sección 33.3, la brillantez de un diamante se debe en parte a su índice de refracción excepcionalmente grande; otro factor importante es su gran dispersión, debido a la cual la luz blanca que penetra en un diamante emerge en forma de un espectro multicolor. Los cristales de rutilo y de titanato de estroncio, que se producen sintéticamente, presentan alrededor de ocho veces más dispersión que el diamante.

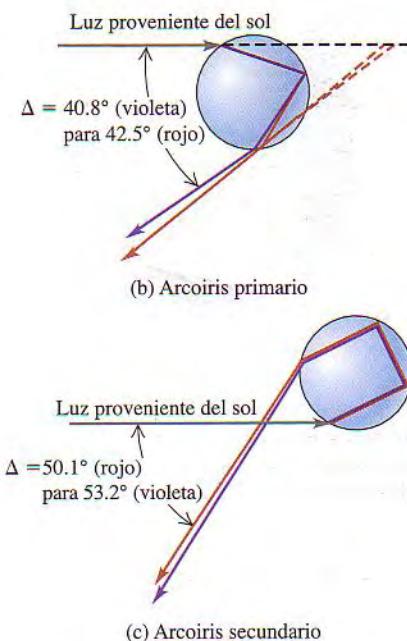
Cuando se experimenta la belleza de un arcoíris, como en la fotografía inicial de este capítulo, se observan los efectos combinados de la dispersión, la refracción y la reflexión. La luz solar proveniente de atrás del observador entra en una gotita de agua, se refleja (parcialmente) en la superficie posterior de la gotita, y se refracta de nuevo al salir de la gotita (Fig. 33.18a). Los rayos de luz que entran por el punto medio de la gotita se reflejan directamente de regreso. Todos los demás rayos salen de la gota dentro de un ángulo Δ respecto a ese rayo medio, con muchos de ellos “apilados” en un ángulo Δ . Lo que vemos es un disco de luz de radio angular Δ centrado en el punto sol abajo (el punto del cielo opuesto al sol); debido al “apilamiento” de rayos de luz, el disco es más brillante en torno a su borde, el cual vemos como un arcoíris. Debido a que ninguna luz alcanza el ojo desde ángu-



33.17 Dispersión de la luz por un prisma. La banda de colores recibe el nombre de espectro.



(a) Trayectorias de los rayos que entran en la mitad superior de la gota de lluvia (para mayor claridad, no se muestran los rayos que entran en la mitad inferior)

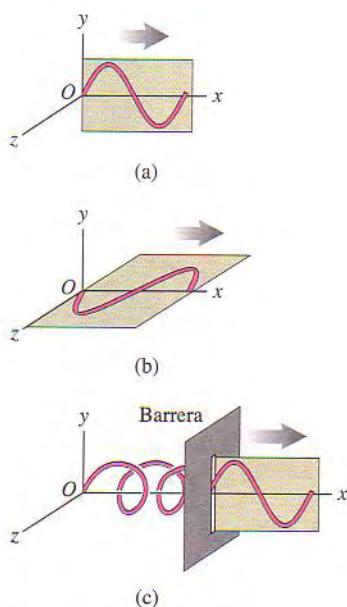


33.18 Los arco iris se forman por refracción, reflexión y dispersión en gotas de agua.

(a) Trayectorias de los rayos luminosos que entran en la mitad superior de una gota de lluvia. (La distribución de los rayos que entran en la mitad inferior es la misma, aunque volteada al revés). Todos los rayos emergen dentro de un ángulo Δ a partir del punto sol abajo. El ángulo Δ es el radio angular del arcoiris. (b) Los colores del arcoiris se deben a la dispersión. El rojo aparece *por fuera* del arcoiris primario. (c) El rojo aparece *por dentro* del arcoiris secundario, más tenue.

los mayores que Δ , el cielo aparece oscuro afuera del arcoiris (véase la fotografía inicial de este capítulo). El valor del ángulo Δ depende del índice de refracción del agua de las gotas de lluvia, el cual, a su vez, depende de la longitud de onda (Fig. 33.18b). El disco brillante de luz roja es ligeramente más grande que el de luz anaranjada, y éste, a su vez, es un poco mayor que el de luz amarilla, y así sucesivamente. En consecuencia, vemos el arcoiris como una banda de colores.

En muchos casos se puede ver un segundo arcoiris más grande, como el que aparece en la fotografía inicial de este capítulo. Éste es el resultado de la dispersión, la refracción y *dos* reflexiones en la superficie posterior de la gotita (Fig. 33.18c). Cada vez que un rayo de luz incide en la superficie posterior, parte de la luz se refracta hacia afuera de la gota (no se muestra en la figura 33.18); después de dos incidencias de este tipo, queda relativamente poca luz adentro de la gota, y es por ello que el arcoiris secundario es notoriamente más tenue que el arcoiris primario. Del mismo modo que un espejo puesto ante un libro invierte las letras impresas, así la segunda reflexión invierte el orden de los colores en el arcoiris secundario. Este efecto se observa en la fotografía inicial del capítulo.



33.19 (a) Onda transversal en una cuerda, polarizada en la dirección y . (b) Onda polarizada en la dirección z . (c) Una barrera con una ranura vertical sin fricción actúa como filtro polarizador. Permite el paso de las componentes polarizadas en la dirección y , pero impide el de las que están polarizadas en la dirección z .

33.5 | Polarización

La **polarización** es una característica de todas las ondas transversales. Este capítulo lo trata acerca de la luz; sin embargo, para presentar algunos conceptos básicos de polarización, volvamos por un momento a las ondas transversales que estudiamos en el capítulo 15. En una cuerda que en el equilibrio yace a lo largo del eje de las x en equilibrio, los desplazamientos pueden ser a lo largo de la dirección y , como en la figura 33.19a. En este caso la cuerda siempre se halla en el plano xy . Pero el desplazamiento podría ser en cambio a lo largo del eje de las z , como en la figura 33.19b; en tal caso la cuerda siempre estaría en el plano xz .

Cuando una onda tiene sólo desplazamientos y , decimos que está **linealmente polarizada** en la dirección y ; una onda con sólo desplazamientos z está linealmente polarizada en la dirección z . En el caso de las ondas mecánicas podemos construir un **filtro polarizador**, o simplemente **polarizador**, que sólo permite el paso de ondas con cierta dirección de polarización. En la figura 33.19c la cuerda puede deslizarse verticalmente en la ranura sin fricción, pero todo movimiento horizontal es imposible. Este filtro deja pasar las ondas polarizadas en la dirección y , pero impide el paso de las que están polarizadas en la dirección z .

Este mismo lenguaje es aplicable a las ondas electromagnéticas, que también presentan polarización. Como vimos en el capítulo 32, una onda electromagnética es una onda *transversal*; los campos eléctrico y magnético fluctuantes son perpendiculares uno al otro y a la dirección de propagación. Siempre definimos la dirección de polarización de una onda electromagnética como la dirección del vector de campo *eléctrico* \vec{E} , no del campo magnético, porque muchos detectores comunes de ondas electromagnéticas responden a las fuerzas eléctricas sobre los electrones de los materiales, no a las fuerzas magnéticas. Por consiguiente, de la onda electromagnética descrita por la ecuación (32.17),

$$\vec{E}(x, t) = \hat{j}E_{\max} \cos(kx - \omega t)$$

$$\vec{B}(x, t) = \hat{k}B_{\max} \cos(kx - \omega t)$$

se dice que está polarizada en la dirección y porque el campo eléctrico tiene sólo una componente y .

CUIDADO Es poco afortunado el hecho de que la misma palabra "polarización" que se utiliza para describir la dirección de \vec{E} en una onda electromagnética también se emplee para describir el desplazamiento de carga eléctrica dentro de un cuerpo, como el que ocurre en respuesta a la proximidad de un cuerpo con carga; en la sección 21.2 describimos este tipo de polarización (véase la Fig. 21.7). Debemos recordar que, si bien estos conceptos llevan el mismo nombre, no describen el mismo fenómeno.

Filtros polarizadores

Por lo regular, las ondas que emite un transmisor de radio están linealmente polarizadas. Las antenas verticales de varilla que se utilizan con los teléfonos celulares de automóvil emiten ondas que, en un plano horizontal en torno a la antena, están polarizadas en la dirección vertical (paralela a la antena). Las antenas de televisión que se colocan en los techos tienen elementos horizontales en Estados Unidos y elementos verticales en Gran Bretaña porque las ondas transmitidas tienen diferente polarización.

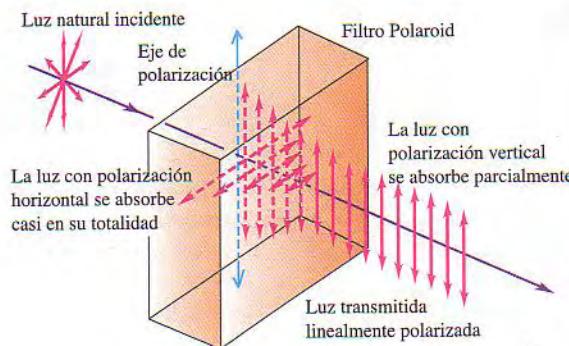
La situación es diferente en el caso de la luz visible. La luz proveniente de fuentes ordinarias, como las bombillas eléctricas incandescentes y los sistemas de luz

fluorescente, *no* está polarizada. Las “antenas” que irradian ondas luminosas son las moléculas que constituyen las fuentes. Las ondas que emite una molécula cualquiera pueden estar linealmente polarizadas, como las de una antena de radio. Sin embargo, toda fuente real de luz contiene un número enorme de moléculas orientadas al azar, por lo que la luz emitida es una mezcla aleatoria de ondas linealmente polarizadas en todas las direcciones transversales posibles. La luz de este tipo se describe como **luz no polarizada** o **luz natural**. Para crear luz polarizada a partir de luz natural no polarizada se necesita un filtro análogo a la ranura para ondas mecánicas de la figura 33.19c.

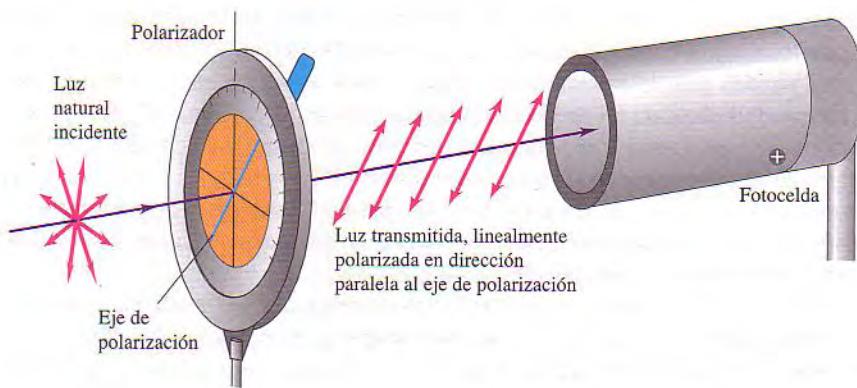
Los filtros polarizadores para ondas electromagnéticas tienen diferentes detalles de construcción, según la longitud de onda de que se trate. En el caso de microondas con una longitud de onda de unos pocos centímetros, un buen polarizador es una serie de alambres conductores paralelos muy próximos entre sí y aislados unos de otros. (Algo así como una parrilla para asar carne en la que el anillo metálico externo se ha sustituido por un anillo aislante). Los electrones tienen libertad de movimiento a lo largo de los alambres conductores, y se mueven en respuesta a una onda cuyo campo \vec{E} es paralelo a los alambres. Las corrientes resultantes en los alambres disipan energía por calentamiento de I^2R ; la energía disipada proviene de la onda, por lo que la amplitud de toda onda que pasa a través de la rejilla se reduce considerablemente. Las ondas cuyo \vec{E} está orientado perpendicularmente a los alambres pasan prácticamente intactas, pues los electrones no se pueden desplazar a través del aire que separa los alambres. En consecuencia, una onda que atravesie un filtro de esta naturaleza quedará polarizada principalmente en la dirección perpendicular a los alambres.

El filtro polarizador más común para luz visible es un material conocido por su nombre comercial de Polaroid, el cual se utiliza extensamente en la fabricación de lentes de sol y filtros polarizadores para lentes fotográficos. Inventado originalmente por el científico estadounidense Edwin H. Land, este material contiene sustancias que presentan **dicroísmo**, una absorción selectiva en la que uno de los componentes polarizados se absorbe mucho más intensamente que el otro (Fig. 33.20). Un filtro Polaroid transmite el 80% o más de la intensidad de las ondas polarizadas paralelamente a cierto eje del material, conocido como **eje de polarización**, pero sólo el 1% o menos de las ondas polarizadas perpendicularmente a este eje. En cierto tipo de filtro Polaroid, unas moléculas de cadena larga contenidas en el filtro están orientadas con su eje perpendicular al eje de polarización; estas moléculas absorben preferentemente la luz que está polarizada a lo largo de ellas, de forma muy parecida a los alambres conductores de un filtro polarizador para microondas.

Un filtro polarizador *ideal* permite el paso del 100% de la luz incidente que está polarizada en la dirección del eje de polarización, pero bloquea totalmente la luz polarizada perpendicularmente a este eje. Un dispositivo de esta naturaleza es



33.20 Filtro Polaroid iluminado por luz natural no polarizada (se muestra mediante vectores \vec{E} que apuntan en todas las direcciones perpendiculares a la dirección de propagación). Las componentes de \vec{E} perpendiculares al eje de polarización son absorbidas por el filtro, y la luz que se transmite está linealmente polarizada (se muestra mediante vectores \vec{E} sólo a lo largo de la dirección de polarización).

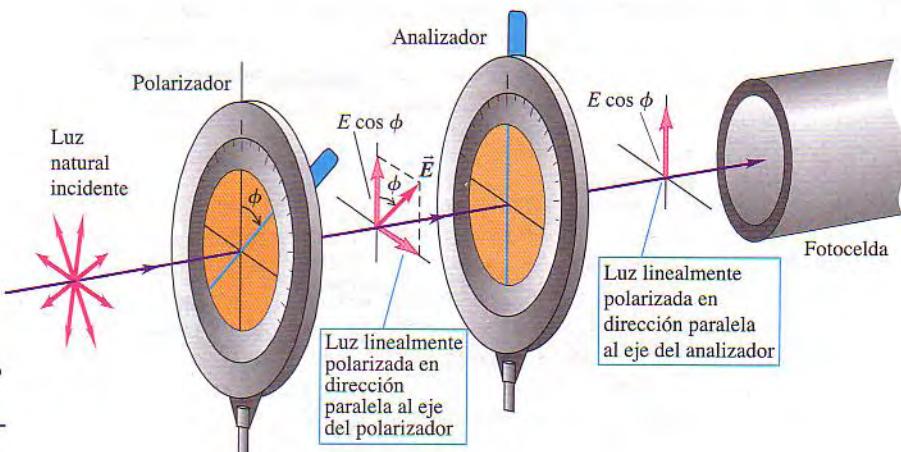


33.21 En el filtro polarizador incide luz natural no polarizada. La intensidad de la luz linealmente polarizada que se transmite, medida por la fotocelda, es la misma con todas las orientaciones del filtro polarizador. En el caso de un filtro polarizador ideal, la intensidad transmitida es la mitad de la intensidad incidente.

imposible de lograr, pero el concepto es útil para aclarar las ideas básicas. En el análisis que sigue supondremos que todos los filtros polarizadores son ideales. En la figura 33.21, la luz no polarizada incide sobre un filtro polarizador plano. La línea azul representa el eje de polarización. El vector \vec{E} de la onda incidente se puede representar en términos de las componentes paralela y perpendicular al eje de polarización; sólo se transmite la componente de \vec{E} paralela al eje de polarización. En consecuencia, la luz que emerge del polarizador está linealmente polarizada en la dirección paralela al eje de polarización.

Cuando incide luz no polarizada en un polarizador ideal, como en la figura 33.21, la intensidad de la luz transmitida es *exactamente la mitad* de intensidad de la luz incidente no polarizada, no importa cómo esté orientado el eje de polarización. La razón es la siguiente. Podemos resolver el campo \vec{E} de la onda incidente en una componente paralela al eje de polarización y una componente perpendicular a él. Debido a que la luz incidente es una mezcla aleatoria de todos los estados de polarización, estas dos componentes, en promedio, son iguales. El polarizador ideal transmite únicamente la componente paralela al eje de polarización, por lo que sólo se transmite la mitad de la intensidad incidente.

¿Qué ocurre cuando la luz linealmente polarizada que emerge de un polarizador pasa a través de un segundo polarizador, como en la figura 33.22? Considérese el caso general en el que el eje de polarización del segundo polarizador, o *analizador*, forma un ángulo ϕ con el eje de polarización del primer polarizador. Pode-



33.22 Un analizador ideal transmite sólo la componente paralela a su dirección de transmisión (es decir, a su eje de polarización).

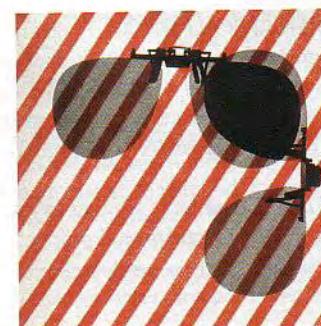
mos resolver en dos componentes la luz linealmente polarizada que ha transmitido el primer polarizador, como se muestra en la figura 33.22, una paralela y la otra perpendicular al eje del analizador. Sólo la componente paralela, cuya amplitud es $E \cos \phi$, es transmitida por el analizador. La intensidad transmitida es máxima cuando $\phi = 0$, y es cero cuando el polarizador y el analizador se *cruzan* de modo que $\phi = 90^\circ$ (Fig. 33.23). Para establecer la dirección de polarización de la luz transmitida por el primer polarizador, se hace girar el analizador hasta que la intensidad medida por la fotocelda de la figura 33.22 es de cero; en ese momento el eje de polarización del primer polarizador es perpendicular al del analizador.

Para hallar la intensidad transmitida a valores intermedios del ángulo ϕ , recordemos que, según lo expuesto acerca de la energía en el capítulo 32, la intensidad de una onda electromagnética es proporcional al *cuadrado* de la amplitud de la onda [véase la ecuación (32.29)]. La razón de la *amplitud* transmitida respecto a la incidente es $\cos \phi$; por tanto, la razón de la *intensidad* transmitida respecto a la incidente es $\cos^2 \phi$. Por consiguiente, la intensidad de la luz transmitida a través del analizador es

$$I = I_{\max} \cos^2 \phi \quad (33.7)$$

(ley de Malus, luz polarizada que pasa a través de un analizador)

donde I_{\max} es la intensidad máxima de la luz transmitida (en $\phi = 0$) e I es la cantidad transmitida en el ángulo ϕ . Esta relación, descubierta de forma experimental por Etienne Louis Malus en 1809, se conoce como la **ley de Malus**. La ley de Malus se aplica *sólo* si la luz incidente que pasa a través del analizador ya está linealmente polarizada.



33.23 Estas fotografías muestran lo que se ve a través de lentes de sol Polaroid cuyos ejes de polarización están alineados ($\phi = 0$, arriba) y cuyos ejes son perpendiculares ($\phi = 90^\circ$, abajo). La intensidad transmitida es máxima cuando los ejes están alineados; la intensidad es cero cuando los ejes son perpendiculares.

Estrategia para resolver problemas

Polarización lineal

IDENTIFICAR los conceptos (pertinentes) relevantes: Recuerde que en toda onda electromagnética, incluso en las ondas luminosas, la dirección del campo \vec{E} es la dirección de polarización y es perpendicular a la dirección de propagación. Cuando se trabaja con polarizadores, en realidad se está tratando con componentes de \vec{E} paralelas y perpendiculares al eje de polarización. En tales casos es aplicable todo lo que sabemos acerca de las componentes de vectores.

PLANTEAR el problema siguiendo estos pasos:

1. Como en el caso de los problemas de óptica geométrica, lo primero que se debe hacer es dibujar un diagrama grande y pulcro. Identifique todos los ángulos conocidos, incluso los ángulos de todos y cada uno de los ejes de polarización.
2. Halle las variables que se buscan.

EJECUTAR la solución como sigue:

1. Recuerde que un polarizador sólo deja pasar las componentes de campo eléctrico paralelas a su eje de polarización.
2. Si la luz incidente está linealmente polarizada y tiene una amplitud E y una intensidad I_{\max} , la luz que pasa a través de un polarizador ideal tiene una amplitud $E \cos \phi$ y una inten-

sidad $I_{\max} \cos^2 \phi$, donde ϕ es el ángulo entre la dirección de polarización incidente y el eje de polarización del filtro.

3. La luz no polarizada es una mezcla al azar de todos los estados de polarización posibles, por lo que, en promedio, tiene componentes iguales en cualesquiera de las dos direcciones perpendiculares. Cuando pasa a través de un polarizador ideal, la luz no polarizada se convierte en luz linealmente polarizada con la mitad de la intensidad incidente. La luz lineal y parcialmente polarizada es una superposición de luz linealmente polarizada y luz no polarizada.
4. La intensidad (potencia promedio por unidad de área) de una onda es proporcional al *cuadrado* de su amplitud. Si resulta que dos ondas difieren en términos de amplitud de acuerdo a un factor determinado, sus intensidades difieren de acuerdo al cuadrado de ese factor.

EVALUAR la respuesta: Compruebe que la respuesta no tenga errores obvios. Si sus resultados indican que la intensidad de la luz que emerge de un polarizador es mayor que la intensidad de la luz incidente, algo anda mal: un polarizador no agrega energía a una onda luminosa.

Ejemplo
33.5

Dos polarizadores combinados

En la figura 33.22 la luz incidente no polarizada tiene una intensidad I_0 . Halle las intensidades transmitidas por los polarizadores primero y segundo si el ángulo entre los ejes de los dos filtros es de 30° .

SOLUCIÓN

IDENTIFICAR Y PLANTEAR: El diagrama que necesitamos ya ha sido dibujado en la figura 33.22. Conocemos la intensidad I_0 de la luz natural incidente y el ángulo $\phi = 30^\circ$ entre los ejes de polarización. Las variables que buscamos son las intensidades de la luz que emerge del primer polarizador y del segundo.

EJECUTAR: Como ya se explicó, la intensidad de la luz linealmente polarizada que transmite el primer filtro es $I_0/2$. De acuerdo con

la ecuación (33.7) con $\phi = 30^\circ$, el segundo filtro reduce la intensidad por un factor de $\cos^2 30^\circ = \frac{3}{4}$. Por tanto, la intensidad transmitida por el segundo polarizador es

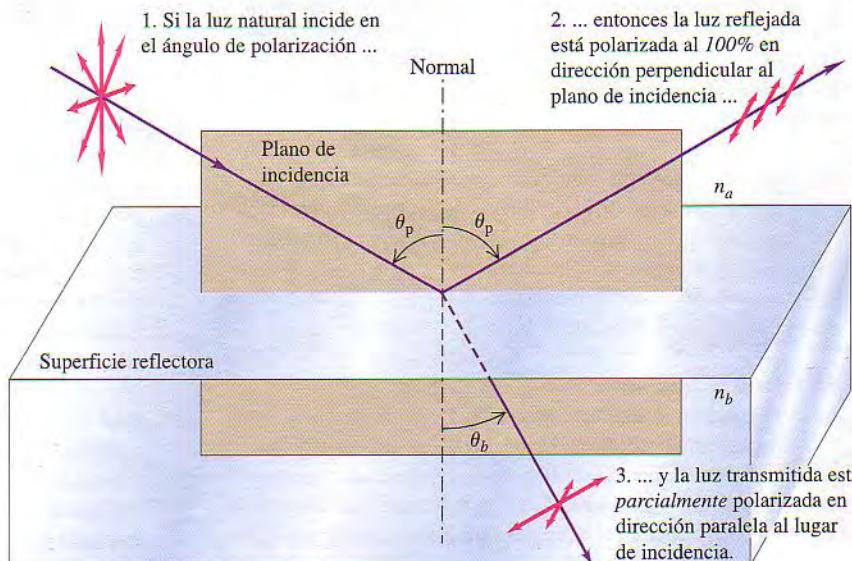
$$\left(\frac{I_0}{2}\right)\left(\frac{3}{4}\right) = \frac{3}{8} I_0$$

EVALUAR: Adviértase que la intensidad disminuye después de cada paso a través de un polarizador. La única situación donde la intensidad transmitida *no* disminuye es aquella en que el polarizador es ideal (de modo que no absorbe nada de la luz que pasa a través de él) y la luz incidente está linealmente polarizada a lo largo del eje de polarización, por lo que $\phi = 0$.

Polarización por reflexión

La luz no polarizada se puede polarizar, ya sea de forma parcial o total, por *reflexión*. En la figura 33.24, luz natural no polarizada incide sobre una superficie reflectora entre dos materiales ópticos transparentes; el plano que contiene los rayos incidente y reflejado y la normal a la superficie se llama **plano de incidencia**. Con casi cualquier ángulo de incidencia, las ondas cuyo vector de campo eléctrico \vec{E} es perpendicular al plano de incidencia (esto es, paralelo a la superficie reflectora) se reflejan con más intensidad que aquellas cuyo \vec{E} yace en este plano. En este caso la luz reflejada está *parcialmente polarizada* en la dirección perpendicular al plano de incidencia.

Pero a cierto ángulo de incidencia, denominado **ángulo de polarización** θ_p , la luz cuyo \vec{E} yace en el plano de incidencia *no se refleja en absoluto*, sino que se refracta en su totalidad. A este mismo ángulo de incidencia, una parte de la luz cuyo \vec{E} es perpendicular al plano de incidencia se refleja, y otra parte se refracta. La luz *reflejada*, por tanto, está *totalmente polarizada* perpendicularmente al plano de incidencia, como se muestra en la figura 33.24. La luz *refractada* está *parcial-*



33.24 Cuando incide luz sobre una superficie reflectora en el ángulo de polarización, la luz reflejada está linealmente polarizada.

mente polarizada en dirección paralela a este plano; la luz refractada es una mezcla de la componente paralela al plano de incidencia, toda la cual se refracta, y el resto de la componente perpendicular.

En 1812 el científico británico Sir David Brewster descubrió que, cuando el ángulo de incidencia es igual al ángulo de polarización θ_p , el rayo reflejado y el rayo refractado son mutuamente perpendiculares (Fig. 33.25). En este caso el ángulo de refracción θ_b se convierte en el complemento de θ_p , de modo que $\theta_b = 90^\circ - \theta_p$. De acuerdo con la ley de refracción,

$$n_a \sin \theta_p = n_b \sin \theta_b$$

de donde resulta que

$$n_a \sin \theta_p = n_b \sin(90^\circ - \theta_p) = n_b \cos \theta_p$$

$$\tan \theta_p = \frac{n_b}{n_a} \quad (\text{ley de Brewster del ángulo de polarización}) \quad (33.8)$$

Esta relación se conoce como **ley de Brewster**. Aunque fue descubierta de forma experimental, también se *deduce* de un modelo ondulatorio a partir de las ecuaciones de Maxwell.

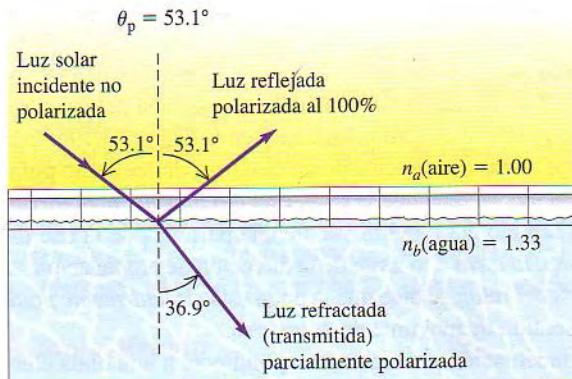
La polarización por reflexión es la razón del uso extendido de filtros polarizadores en los anteojos de sol (Fig. 33.23). Cuando la luz solar se refleja en una superficie horizontal, el plano de incidencia es vertical, y la luz reflejada contiene preponderantemente luz polarizada en dirección horizontal. Cuando la reflexión tiene lugar en la superficie lisa de una carretera de asfalto o en la superficie de un lago, crea una reverberación indeseable. La visión mejora si se elimina esta reverberación. El fabricante coloca en posición vertical el eje de polarización del material del lente, con lo cual consigue que muy poca de la luz horizontalmente polarizada que se refleja en el camino se transmita a los ojos. Los lentes también reducen la intensidad total de la luz transmitida a un poco menos del 50% de la intensidad de la luz incidente no polarizada.

Ejemplo 33.6

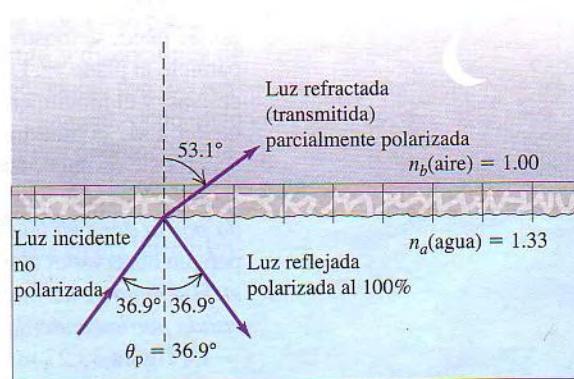
Reflexión de la superficie de una alberca

Se refleja luz solar en la superficie lisa de una alberca sin nadadores.
a) ¿A qué ángulo de reflexión está la luz totalmente polarizada?

b) ¿Cuál es el ángulo de refracción correspondiente de la luz que se transmite en el agua? c) Por la noche se enciende un reflector subacuá-

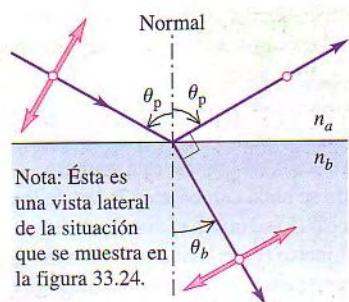


(a)



(b)

33.26 Luz que incide en la interfaz agua/aire en el ángulo de polarización (a) desde el lado del aire; (b) desde el lado del agua.



33.25 Cuando incide luz en el ángulo de polarización, los rayos reflejado y refractado son mutuamente perpendiculares. Los círculos abiertos representan una componente de \vec{E} perpendicular al plano de la figura (el plano de incidencia) y paralela a la superficie que separa los dos materiales.

tico en la alberca. Repita los incisos (a) y (b) con respecto a los rayos del reflector que inciden en la superficie lisa desde abajo.

SOLUCIÓN

IDENTIFICAR Y PLANTEAR: En el inciso (a) se busca el ángulo de polarización de luz que está primero en aire y después en agua; este ángulo se halla con base en la ley de Brewster [ecuación (33.8)]. En el inciso (b) se busca el ángulo de la luz refractada en esta situación. En el inciso (c) se busca una vez más el ángulo de polarización, pero en este caso de luz que está primero en agua y luego en aire. Una vez más, el ángulo se determina por medio de la ecuación (33.8).

EJECUTAR: a) Dado que la luz pasa de aire a agua, tenemos $n_a = 1.00$ (aire) y $n_b = 1.33$ (agua). Según la ecuación (33.8),

$$\theta_p = \arctan \frac{n_b}{n_a} = \arctan \frac{1.33}{1.00} = 53.1^\circ$$

Los ángulos se muestran en la figura 33.26a.

b) La luz incidente tiene el ángulo de polarización, de modo que los rayos reflejado y refractado son perpendiculares; por tanto,

$$\theta_p + \theta_b = 90^\circ$$

$$\theta_b = 90^\circ - 53.1^\circ = 36.9^\circ$$

c) Ahora la luz está *primero* en el agua y después en el aire; por tanto, $n_a = 1.33$ y $n_b = 1.00$. Aplicando de nuevo la ecuación (33.8) se obtiene

$$\theta_p = \arctan \frac{1.00}{1.33} = 36.9^\circ$$

$$\theta_b = 90^\circ - 36.9^\circ = 53.1^\circ$$

Los ángulos se muestran en la figura 33.26b.

EVALUAR: Podemos comprobar la respuesta al inciso (b) mediante la ley de Snell, $n_a \sin \theta_a = n_b \sin \theta_b$, o

$$\begin{aligned} \sin \theta_b &= \frac{n_a \sin \theta_p}{n_b} = \frac{1.00 \sin 53.1^\circ}{1.33} = 0.600 \\ \theta_b &= 36.9^\circ \end{aligned}$$

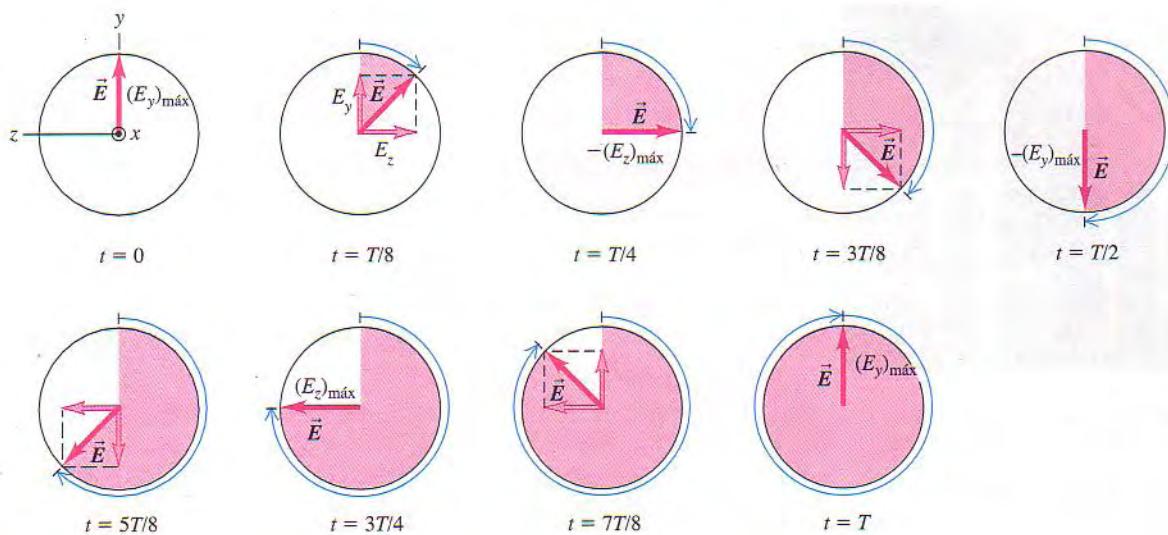
Adviértase que los dos ángulos de polarización hallados en los incisos (a) y (c) suman 90° . Esto *no* es accidental; ¿sabe usted por qué?

Polarización circular y elíptica

La luz y otras radiaciones electromagnéticas también pueden tener polarización *circular* o *elíptica*. Con el propósito de presentar estos conceptos, regresemos una vez más a las ondas mecánicas en una cuerda estirada. Supóngase que, en la figura 33.19, las dos ondas linealmente polarizadas de los incisos (a) y (b) están en fase y tienen la misma amplitud. Cuando se superponen, cada punto de la cuerda tiene desplazamientos y y z simultáneos de igual magnitud. Con un poco de reflexión vemos que la onda resultante yace en un plano orientado a 45° respecto a los ejes y y z (esto es, en un plano que forma un ángulo de 45° con los planos xy y xz). La amplitud de la onda resultante es más grande, por un factor de $\sqrt{2}$, que la de cualquiera de las ondas componentes, y la onda resultante está linealmente polarizada.

Supóngase ahora, en cambio, que las dos ondas de igual amplitud difieren en cuanto a su fase en un cuarto de ciclo. Entonces el movimiento resultante corresponde a una superposición de dos movimientos armónicos simples en ángulo recto, con una diferencia de fase de un cuarto de ciclo. El desplazamiento y en un punto es máximo en los momentos en que el desplazamiento z es cero, y viceversa. En estas condiciones, el movimiento de la cuerda en conjunto ya no tiene lugar en un solo plano. Se puede demostrar que cada punto de la cuerda describe un *círculo* en un plano paralelo al plano yz . Los puntos sucesivos de la cuerda tienen diferencias de fase sucesivas, y el movimiento global de la cuerda tiene la apariencia de una hélice en rotación. Esto se muestra a la izquierda del filtro polarizador en la figura 33.19c. Esta superposición particular de dos ondas linealmente polarizadas se conoce como **polarización circular**. Por convención, se dice que la onda está *circularmente polarizada por la derecha* cuando el sentido del movimiento de una partícula de la cuerda, para un observador que *mira hacia atrás* a lo largo de la dirección de propagación, es *en el sentido de las manecillas del reloj*; se dice que la onda está *circularmente polarizada por la izquierda* si el sentido de movimiento es inverso.

La figura 33.27 muestra la situación análoga correspondiente a una onda electromagnética. Se superponen dos ondas sinusoidales de igual amplitud, polarizadas en las direcciones y y z y con una diferencia de fase de un cuarto de ciclo. El resultado es una onda en la cual el vector \vec{E} tiene en cada punto una magnitud constante, pero *gira* en torno a la dirección de propagación. Si la onda de la figu-



33.27 Polarización circular de una onda electromagnética que se desplaza paralelamente al eje de las x . La componente y de \vec{E} se retrasa un cuarto de ciclo respecto a la componente z . Esta diferencia de fase da por resultado una polarización por la derecha si la onda se propaga hacia el observador (en la dirección x positiva).

ra 33.27 se propaga hacia el observador, se trata de una onda electromagnética circularmente polarizada por la derecha.

Si la diferencia de fase entre las dos ondas componentes es otra distinta de un cuarto de ciclo, o si las dos ondas componentes tienen diferente amplitud, entonces cada punto de la cuerda no describe un círculo, sino una *ellipse*. Se dice que la onda resultante está **elípticamente polarizada**.

En el caso de ondas electromagnéticas con frecuencias de radio, se puede crear una polarización circular o elíptica mediante dos antenas en ángulo recto, alimentadas por el mismo transmisor pero con una red desplazadora de fase que introduce la diferencia de fase apropiada. En el caso de la luz, se introduce un desplazamiento por medio de un material que presenta *birrefringencia*, esto es, que muestra diferentes índices de refracción ante direcciones de polarización distintas. Un ejemplo común es la calcita (CaCO_3). Cuando se orienta correctamente un cristal de calcita en un haz de luz no polarizada, su índice de refracción (con una longitud de onda en vacío de 589 nm) es de 1.658 con cierta dirección de polarización y de 1.486 con la dirección perpendicular. Cuando dos ondas de igual amplitud y direcciones de polarización perpendiculares entran en un material de este tipo, viajan con diferente rapidez. Si están en fase al entrar en el material, entonces, en general, ya no están en fase al salir. Si el cristal tiene el espesor justo para introducir una diferencia de fase de un cuarto de ciclo, entonces el cristal convierte la luz linealmente polarizada en luz circularmente polarizada. Un cristal de este tipo recibe el nombre de *placa de cuarto de onda*, y también convierte luz circularmente polarizada en luz linealmente polarizada. ¿Podría usted probarlo? (Véase el problema 33.50).

Fotoelasticidad

Ciertos materiales ópticos que normalmente no son birrefringentes adquieren esta propiedad al ser sometidos a un esfuerzo mecánico. Ésta es la base de la ciencia de la *fotoelasticidad*. Es posible analizar los esfuerzos en vigas, chapas de caldera, dientes de engrane y pilares de catedrales construyendo un modelo transparente del



33.28 Análisis fotoelástico de esfuerzos de un modelo de la sección transversal de una catedral Gótica. La construcción de mampostería que se utilizaba en este tipo de edificios tenía una gran resistencia a la compresión, pero muy poca a la tensión. Un refuerzo inadecuado con contrafuertes y los vientos intensos provocaban en ocasiones esfuerzos de tensión en elementos estructurales normalmente comprimidos, los cuales han sido causa de varios derrumbes espectaculares.

33.29 El observador que toma el sol en el oeste ve luz solar que ha sufrido una dispersión luminosa de 90° . Esta luz dispersa está linealmente polarizada y contiene principalmente luz del extremo azul del espectro. La luz solar blanca pierde esta luz azul al atravesar la atmósfera, y en la luz transmitida que ve el observador en el este predomina la luz del extremo rojo del espectro.

objeto, por lo regular de algún material plástico, sometiéndolo a esfuerzos y examinándolo entre un polarizador y un analizador en posición cruzada. Estos métodos ópticos permiten estudiar distribuciones de esfuerzos muy complicadas. La figura 33.28 es una fotografía de un modelo fotoelástico sometido a esfuerzos.

Evalué su comprensión

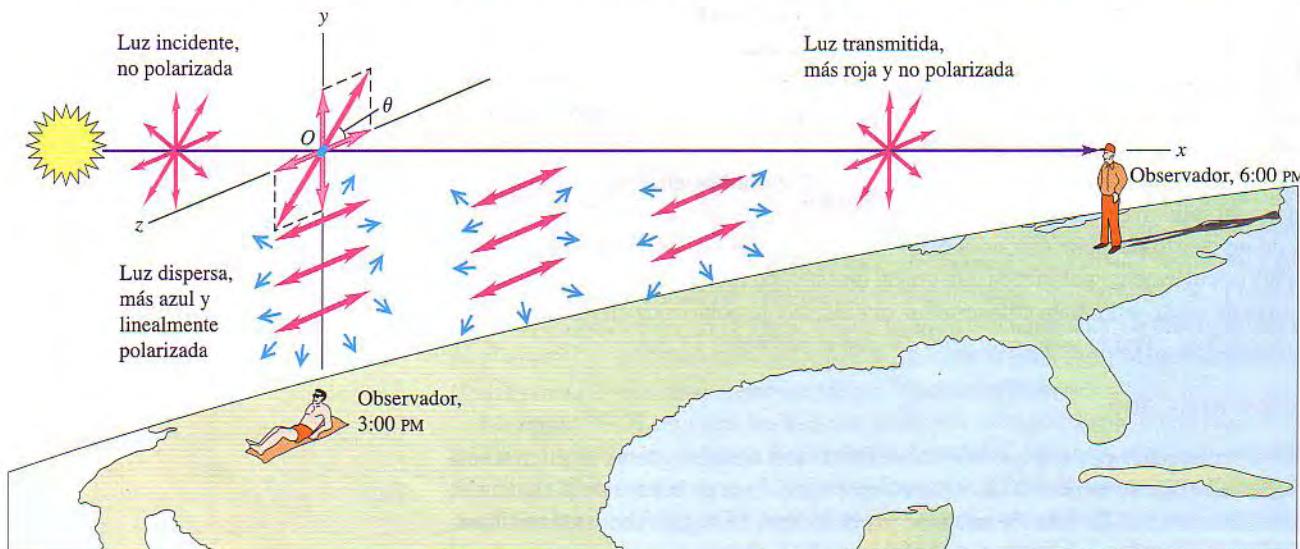
¿Por qué razón querría un fotógrafo utilizar un filtro Polaroid para fotografiar un edificio alto iluminado por el Sol?

*33.6 | Dispersión luminosa

El cielo es azul. Los atardeceres son rojos. La luz cenital está polarizada parcialmente; es por ello que el cielo se ve más oscuro desde ciertos ángulos que desde otros cuando se mira a través de lentes de sol Polaroid. Resulta que la causa de todos estos efectos es un solo fenómeno.

Cuando miramos el cielo diurno, la luz que vemos es luz solar que ha sido absorbida y luego vuelta a irradiar en diversas direcciones. Este proceso se llama **dispersión luminosa**. (Si la Tierra no tuviera atmósfera, el cielo se vería tan negro durante el día como por la noche, tal como lo ve un astronauta en el espacio o en la Luna; veríamos la luz solar sólo al mirarla directamente, y las estrellas serían visibles de día). La figura 33.29 muestra algunos detalles del proceso de dispersión luminosa. La luz solar, que no está polarizada, llega por la izquierda a lo largo del eje de las x y pasa por arriba de un observador que mira verticalmente hacia lo alto a lo largo del eje de las y . (Estamos observando la situación lateralmente). Considérense las moléculas de la atmósfera terrestre situadas en el punto O . El campo eléctrico del haz de luz solar pone a vibrar las cargas eléctricas de estas moléculas. Como la luz es una onda transversal, la dirección del campo eléctrico de cualquier componente de la luz solar yace en el plano yz , y el movimiento de las cargas tiene lugar en este plano. No hay campos y , y, por tanto, tampoco movimiento de cargas, en la dirección del eje de las x .

Una onda de luz incidente con su campo \vec{E} a un ángulo θ respecto al eje de las z pone a vibrar las cargas de las moléculas a lo largo de la línea de \vec{E} , como lo indica la flecha de dos puntas que pasa por el punto O . Podemos resolver esta vibración en dos componentes, una a lo largo del eje de las y y la otra a lo largo del eje



de las z . Cada componente de la luz incidente produce el equivalente de dos “antenas” moleculares que oscilan con la misma frecuencia que la luz incidente y ya-cen a lo largo de los ejes de las y y de las z .

En el capítulo 32 mencionamos que una carga oscilante, como las de una antena, no irradian en la dirección de su oscilación. (Véase la figura 32.2 de la sección 32.1). Por consiguiente, la “antena” a lo largo del eje de las y no envía luz alguna al observador que está directamente abajo de ella, aunque sí emite luz en otras direcciones. Por tanto, la única luz que alcanza a este observador proviene de la otra “antena” molecular que corresponde a la oscilación de carga a lo largo del eje de las z . Esta luz está linealmente polarizada, con su campo eléctrico a lo largo del eje de las z (paralelo a la “antena”). Los vectores rojos sobre el eje de las y por debajo del punto O de la figura 33.29 muestran la dirección de polarización de la luz que llega al observador.

Conforme el haz original de luz solar atraviesa la atmósfera, su intensidad disminuye a medida que su energía pasa a la luz dispersa. El análisis pormenorizado del proceso de dispersión luminosa muestra que la intensidad de la luz dispersada en las moléculas de aire aumenta en proporción a la cuarta potencia de la frecuencia (inversamente respecto a la cuarta potencia de la longitud de onda). Por consiguiente, la razón de intensidades correspondiente a los dos extremos del espectro visible es $(700 \text{ nm}/400 \text{ nm})^4 = 9.4$. En términos aproximados, la luz dispersa contiene nueve veces más luz azul que luz roja, y es por ello que el cielo es azul.

Las nubes contienen una gran concentración de gotitas de agua o cristales de hielo, que también dispersan la luz. Debido a esta elevada concentración, la luz que atraviesa la nube tiene muchas más oportunidades de dispersarse que la luz que atraviesa un cielo despejado. En consecuencia, la luz de *todas* las longitudes de onda termina por ser dispersada fuera de la nube, y por esta razón la nube se ve blanca (Fig. 33.30). La leche parece blanca por la misma razón; la dispersión luminosa se debe a los glóbulos de grasa de la leche. Si se diluye leche mezclándola con agua suficiente, la concentración de glóbulos de grasa se reduce a tal grado que básicamente sólo se dispersa la luz azul; la solución diluida se ve de color azul, no blanca. (La leche sin grasa, que también tiene una concentración muy pequeña de glóbulos, se ve un poco azulosa por esta misma razón).

Cerca del ocaso, cuando la luz solar debe recorrer una gran distancia a través de la atmósfera terrestre, se pierde por dispersión luminosa una fracción considerable de la luz azul. La luz blanca sin luz azul se ve amarilla o roja. Esto explica la tonalidad amarilla o roja que solemos ver al ponerse el Sol (y que es vista por el observador de la extrema derecha de la figura 33.29).

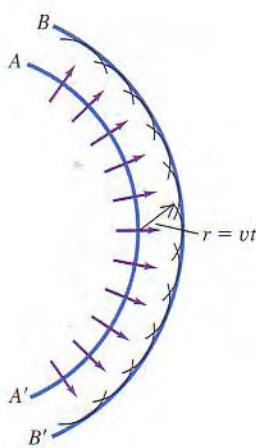
Debido a que la luz cenital está parcialmente polarizada, los polarizadores son útiles en fotografía. Se puede oscurecer el cielo en una fotografía orientando el eje de polarización de modo que sea perpendicular a la dirección predominante de polarización de la luz dispersa. La luz polarizada en más alto grado proviene de partes del cielo que están a 90° del sol; por ejemplo, del cenit cuando el Sol está en el horizonte al amanecer o al atardecer.

33.7 | Principio de Huygens

Las leyes de reflexión y refracción de los rayos luminosos que presentamos en la sección 33.2 fueron descubiertas de forma experimental mucho antes que se estableciese sobre bases firmes la naturaleza ondulatoria de la luz. Sin embargo, podemos *deducir* estas leyes a partir de consideraciones referentes a las ondas y demostrar que son congruentes con la naturaleza ondulatoria de la luz. El mismo tipo de análisis que utilizaremos aquí tendrá una importancia fundamental en los capítulos 35 y 36, en nuestro estudio de la óptica física.



33.30 Las nubes son blancas porque dispersan eficientemente la luz solar de todas las longitudes de onda.

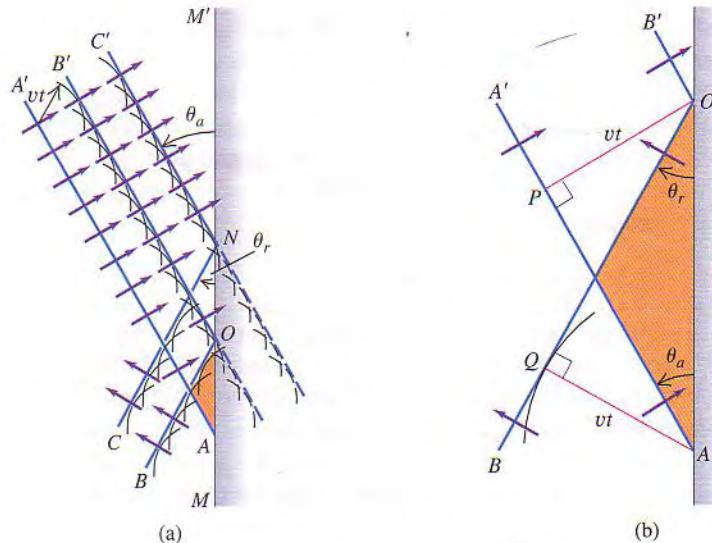


33.31 Aplicación del principio de Huygens al frente de onda AA' para construir un nuevo frente de onda BB' .

Comenzaremos con un principio conocido como **principio de Huygens**. Este principio, enunciado originalmente por el científico holandés Christiaan Huygens en 1678, es un método geométrico para hallar, a partir de la forma conocida de un frente de onda en un instante determinado, la forma del frente de onda en cierto momento subsiguiente. Huygens supuso que todo punto de un frente de onda se puede considerar como la fuente de onditas secundarias que se extienden en todas direcciones con rapidez igual a la de la propagación de la onda. El nuevo frente de onda en un momento posterior se halla entonces construyendo una superficie tangente a las onditas secundarias, también conocida como *la envolvente* de las onditas. Todos los resultados que se obtienen a partir del principio de Huygens también se obtienen con base en las ecuaciones de Maxwell. Así pues, no se trata de un principio independiente, pero suele resultar muy conveniente para realizar cálculos con fenómenos ondulatorios.

En la figura 33.31 se ilustra el principio de Huygens. El frente de onda original AA' viaja hacia afuera a partir de una fuente, como lo indican las flechas pequeñas. Nos proponemos hallar la forma del frente de onda al cabo de un intervalo de tiempo t . Sea v la rapidez de propagación de la onda; por tanto, en un tiempo t la onda recorre una distancia vt . Construyamos varios círculos (trazos de onditas esféricas) de radio $r = vt$, centrados en puntos a lo largo de AA' . El trazo de la envolvente de estas onditas, que es el nuevo frente de onda, es la curva BB' . Suponemos que la rapidez v es la misma en todos los puntos y en todas direcciones.

Para deducir la ley de reflexión a partir del principio de Huygens, considérese una onda plana que se aproxima a una superficie reflectora plana. En la figura 33.32a las líneas AA' , OB' y NC' representan posiciones sucesivas de un frente de onda que se acerca a la superficie MM' . El punto A del frente de onda AA' acaba de llegar a la superficie reflectora. Podemos aplicar el principio de Huygens para hallar la posición del frente de onda al cabo de un intervalo de tiempo t . Con puntos situados sobre AA' como centros, dibujamos varias onditas secundarias de radio vt . Las onditas que nacen cerca del extremo superior de AA' se extienden sin encontrar obstáculos, y su envolvente proporciona la porción OB' del nuevo frente de onda. Si la superficie reflectora no estuviese ahí, las onditas que se originan cerca del extremo inferior de AA' alcanzarían de forma análoga las posiciones que muestran los arcos circulares discontinuos. Por el contrario, estas onditas inciden en la superficie reflectora.



33.32 (a) Posiciones sucesivas de una onda plana AA' que se refleja en una superficie plana. (b) Detalle ampliado de (a).

El efecto de la superficie reflectora consiste en *cambiar la dirección* de propagación de las ondas que inciden en ella, de modo que parte de una onda que habría penetrado la superficie se encuentra en realidad a la izquierda de ella, como lo muestran las líneas continuas. La primera de estas ondas está centrada en el punto A ; la envolvente de todas estas ondas reflejadas es la porción OB del frente de onda. El trazo del frente de onda completo en este instante es el segmento de arco BOB' . Una construcción análoga proporciona la línea CNC' del frente de onda al cabo de otro intervalo t .

De acuerdo con la geometría plana el ángulo θ_a entre el *frente de onda* incidente y la *superficie* es el mismo que entre el *rayo* incidente y la *normal* a la superficie y es, por tanto, el ángulo de incidencia. De modo análogo, θ_b es el ángulo de reflexión. Para hallar la relación entre estos ángulos, consideremos la figura 33.32b. A partir de O trazamos $OP = vt$, perpendicular a AA' . Ahora OB , por construcción, es tangente a un círculo de radio vt con centro en A . Si trazamos AQ de A al punto de tangencia, los triángulos APO y OQA son congruentes porque son triángulos rectángulos con el lado AO en común y con $AQ = OP = vt$. El ángulo θ_a es, por tanto, igual al ángulo θ_b , y tenemos la ley de reflexión.

Podemos deducir la ley de *refracción* por un procedimiento similar. En la figura 33.33 consideraremos un frente de onda, representado por la línea AA' , cuyo punto A acaba de llegar a la superficie límitrofe SS' entre dos materiales transparentes a y b , con índices de refracción n_a y n_b y rapidez de onda v_a y v_b . (En la figura no se muestran las ondas *reflejadas*; éstas se comportan exactamente como en la figura 33.32). Podemos aplicar el principio de Huygens para hallar la posición de los frentes de onda refractados al cabo de un tiempo t .

Con los puntos sobre AA' como centros, dibujamos varias ondas secundarias. Las que se originan cerca del extremo superior de AA' viajan con rapidez v_a y, al cabo de un intervalo de tiempo t , son superficies esféricas de radio $v_a t$. La onda que nace en el punto A , sin embargo, se propaga en el segundo material b con rapidez v_b , y en el tiempo t es una superficie esférica de radio $v_b t$. La envolvente de las ondas derivadas del frente de onda original es el plano cuyo trazo es el segmento de arco BOB' . Una construcción similar permite obtener el trazo CPC' al cabo de un segundo intervalo t .

Los ángulos θ_a y θ_b , entre la superficie y los frentes de onda refractados son el ángulo de incidencia y el ángulo de refracción, respectivamente. Para hallar la relación entre los ángulos, véase la figura 33.33b. Dibújese $OQ = v_a t$, perpendicular a AO , y dibújese $AB = v_b t$, perpendicular a BO . Del triángulo rectángulo AOQ ,

$$\sin \theta_a = \frac{v_a t}{AO}$$

y del triángulo rectángulo AOB ,

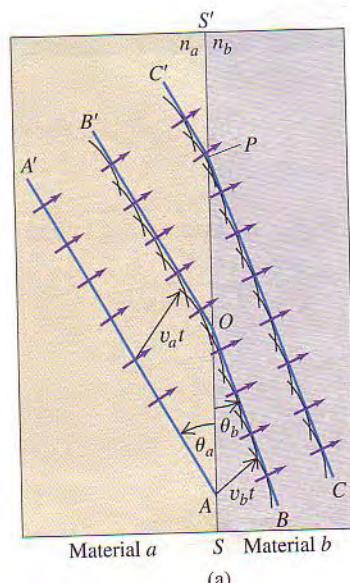
$$\sin \theta_b = \frac{v_b t}{AO}$$

Combinando ambas expresiones hallamos que

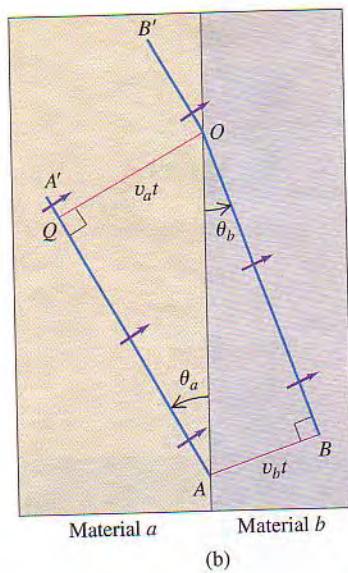
$$\frac{\sin \theta_a}{\sin \theta_b} = \frac{v_a}{v_b} \quad (33.9)$$

Hemos definido el índice de refracción n de un material como la razón de la rapidez de la luz c en un vacío respecto a su rapidez v en el material: $n_a = c/v_a$ y $n_b = c/v_b$. Por tanto,

$$\frac{n_b}{n_a} = \frac{c/v_b}{c/v_a} = \frac{v_a}{v_b}$$



(a)



(b)

33.33 (a) Posiciones sucesivas de una onda plana AA' que se refracta en una superficie plana. (b) Detalle ampliado de (a). Se muestra el caso $v_b < v_a$.

y podemos reformular la ecuación (33.9) como

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

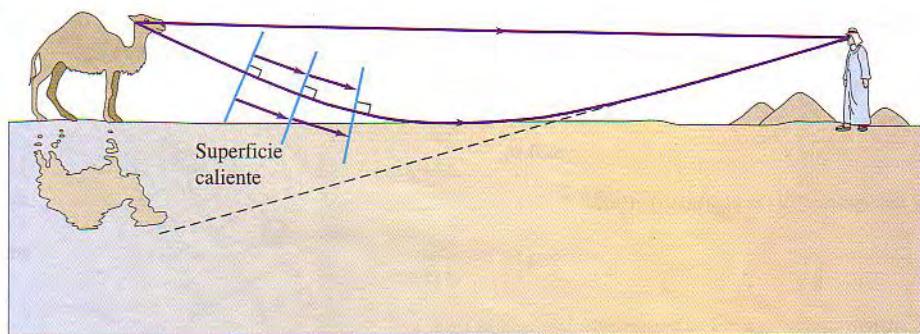
o bien,

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

la cual reconocemos como la ley de Snell [ecuación 33.4)]. De este modo hemos deducido la ley de Snell a partir de una teoría ondulatoria. También podríamos optar por considerar la ley de Snell como un resultado experimental que define el índice de refracción de un material; en ese caso este análisis contribuye a confirmar la relación $v = c/n$ de la rapidez de la luz en un material.

Los espejismos ofrecen un ejemplo interesante del principio de Huygens en acción. Cuando el sol calienta intensamente la superficie del pavimento o la arena del desierto, se forma una capa de aire caliente, menos densa y de n menor, en el aire más caliente próximo a la superficie. La rapidez de la luz es un poco mayor en el aire caliente cerca del suelo, las onditas de Huygens tienen radios ligeramente más grandes, los frentes de onda se inclinan un poco, y los rayos que se dirigían hacia la superficie con un ángulo de incidencia grande (cercano a los 90°) se doblan como se muestra en la figura 33.34. La luz que viaja más lejos del suelo se desvía menos y viaja casi en línea recta. El observador ve el objeto en su posición natural, con una imagen invertida abajo de él, como si lo viera en una superficie horizontal reflectiva. Incluso cuando la turbulencia del aire caliente impide que se forme una imagen invertida clara, la mente del viajero sedento puede interpretar la superficie reflectora aparente como una capa de agua.

Es importante tener en mente que las ecuaciones de Maxwell son las relaciones fundamentales de la propagación de ondas electromagnéticas. Pero es un hecho notable que el principio de Huygens se haya adelantado dos siglos al análisis de Maxwell. Cada punto de una onda electromagnética, con sus campos eléctrico y magnético variables con el tiempo, actúa como una fuente de la onda que continúa, como lo predicen las leyes de Ampere y de Faraday.



33.34 Se observa un espejismo porque las onditas próximas a la superficie caliente tienen radios de magnitud vt ligeramente mayores; en consecuencia, los frentes de onda se inclinan y los rayos se doblan de forma gradual.

Evalue su comprensión

Explique de qué modo la figura 33.33a demuestra que la longitud de onda disminuye cuando una onda entra en un material con un índice de refracción mayor.

RESUMEN

La luz es una onda electromagnética. Cuando se emite o se absorbe, también manifiesta propiedades de partícula. Es emitida por cargas eléctricas aceleradas. La rapidez de la luz es una constante física fundamental.

Un frente de onda es una superficie de fase constante; los frentes de onda se desplazan con una rapidez igual a la rapidez de propagación de la onda. Un rayo es una línea a lo largo de la dirección de propagación, perpendicular a los frentes de onda. La representación de la luz por medio de rayos es la base de la óptica geométrica.



Cuando se transmite luz de un material a otro, la frecuencia de la luz no se altera, pero la longitud de onda y la rapidez de onda pueden cambiar. El índice de refracción n de un material es la razón de la rapidez de la luz en un vacío c respecto a su rapidez v en un material. Si λ_0 es la longitud de onda en un vacío, la misma onda tiene una longitud de onda λ más corta en un medio con un índice de refracción n . (Véase el ejemplo 33.2).

$$n = \frac{c}{v} \quad (33.1)$$

$$\lambda = \frac{\lambda_0}{n} \quad (33.5)$$

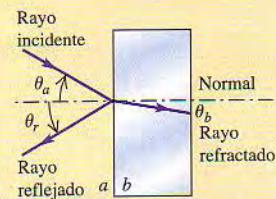
En una interfaz lisa entre dos materiales ópticos, los rayos incidente, reflejado y refractado, así como la normal a la interfaz, yacen todos en un solo plano llamado plano de incidencia. La ley de reflexión establece que los ángulos de incidencia y de reflexión son iguales. La ley de refracción relaciona los ángulos de incidencia y de refracción con los índices de refracción de los materiales. Los ángulos de incidencia, reflexión y refracción siempre se miden a partir de la normal a la superficie. (Véanse los ejemplos 33.1 y 33.3).

$$\theta_r = \theta_a \quad (33.2)$$

(ley de reflexión)

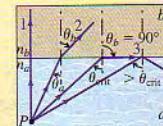
$$n_a \sin \theta_a = n_b \sin \theta_b \quad (33.4)$$

(ley de refracción)



Cuando un rayo se propaga en un material de índice de refracción mayor n_a hacia un material de índice más pequeño n_b , hay reflexión total interna en la interfaz cuando el ángulo de incidencia excede el ángulo crítico θ_{crit} . (Véase el ejemplo 33.4).

$$\sin \theta_{\text{crit}} = \frac{n_b}{n_a} \quad (33.6)$$



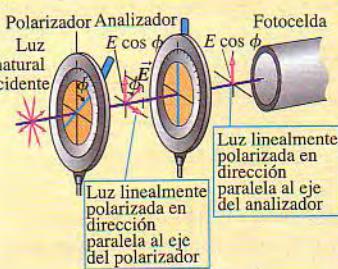
La variación del índice de refracción n con la longitud de onda λ recibe el nombre de dispersión. Por lo regular, n disminuye al aumentar λ .



La dirección de polarización de una onda electromagnética linealmente polarizada coincide con la dirección del campo \vec{E} . Un filtro polarizador permite el paso de las ondas linealmente polarizadas a lo largo de su eje de polarización, y bloquea las ondas polarizadas en dirección perpendicular a ese eje. Cuando incide luz polarizada de intensidad $I_{\text{máx}}$ en un filtro polarizador que se utiliza como analizador, la intensidad I de la luz transmitida a través del polarizador depende del ángulo ϕ entre la dirección de polarización de la luz incidente y el eje de polarización del analizador. (Véase el ejemplo 33.5).

$$I = I_{\text{máx}} \cos^2 \phi \quad (33.7)$$

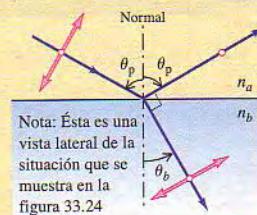
(ley de Malus)



Cuando incide luz no polarizada en una interfaz entre dos materiales, la ley de Brewster establece que la luz reflejada se polariza totalmente en dirección perpendicular al plano de incidencia (paralela a la interfaz) si el ángulo de incidencia es igual al ángulo de polarización θ_p . (Véase el ejemplo 33.6).

$$\tan \theta_p = \frac{n_b}{n_a} \quad (33.8)$$

(ley de Brewster)

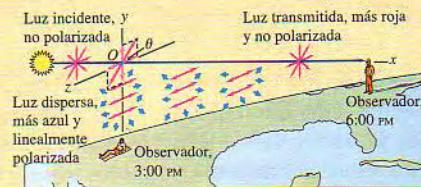


Nota: Ésta es una vista lateral de la situación que se muestra en la figura 33.24

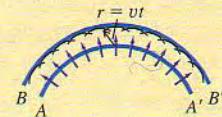
Cuando se superponen dos ondas linealmente polarizadas con cierta diferencia de fase, el resultado es luz circular o elípticamente polarizada. En este caso el vector \vec{E} no está confinado a un plano que contiene la dirección de propagación, sino que describe círculos o elipses en planos perpendiculares a la dirección de propagación.



Las moléculas de aire dispersan la luz. La luz dispersa está parcialmente polarizada.



El principio de Huygens establece que si se conoce la posición de un frente de onda en cierto instante, se puede construir la posición del frente en el instante siguiente imaginando el frente de onda como una fuente de ondas secundarias. El principio de Huygens permite deducir las leyes de reflexión y refracción.



Términos clave

ángulo crítico, 1257
ángulo de polarización, 1266
dicroísmo, 1263
dispersión, 1259
eje de polarización, 1263
esparcimiento, 1270
filtro polarizador (polarizador), 1262
frente de onda, 1249

índice de refracción, 1251
ley de Brewster, 1267
ley de Malus, 1265
ley de reflexión, 1252
ley de refracción (ley de Snell), 1252
luz no polarizada (luz natural) 1263
óptica física, 1250

óptica geométrica, 1250
óptica, 1247
plano de incidencia, 1266
polarización circular, 1268
polarización elíptica, 1269
polarización lineal, 1262
principio de Huygens, 1272
rayo, 1250
reflexión, 1250

reflexión difusa, 1251
reflexión especular, 1251
reflexión total interna, 1257
refracción, 1250

Notas

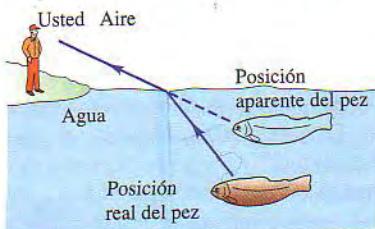
Respuesta a la pregunta inicial del capítulo

El arco iris secundario se debe a los rayos de luz que se reflejan *dos veces* en el interior de una gota de lluvia antes de salir de ella. Los rayos luminosos se dan la vuelta en la segunda reflexión, y esto invierte el orden de los colores. Véase la figura 33.18c.

Respuestas a las preguntas de Evalué su comprensión

Sección 33.1 Los frentes de onda no serían esféricos, porque las ondas no se propagan con la misma rapidez en todas direcciones. Las ondas avanzan más en la dirección y en un intervalo de tiempo dado que en otras direcciones; en consecuencia, los frentes de onda se alargan en la dirección *y*.

Sección 33.2 Como se muestra en la figura, los rayos luminosos provenientes del pez se doblan alejándose de la normal cuando pasan del agua ($n = 1.33$) al aire ($n = 1.00$). En consecuencia, el pez parece estar más arriba en el agua de lo que está en realidad. Por tanto, debe apuntar el arpón *más abajo* de la posición aparente del pez. Si utiliza un rayo láser, deberá apuntar *hacia* la posición aparente del pez: el haz de luz láser sigue el mismo camino de usted al pez que la luz ordinaria sigue del pez a usted (aunque en sentido opuesto).



Sección 33.3 La luz incide en la superficie del extremo de la fibra a un ángulo pequeño con respecto a la normal, como muestra la figura 33.14. Por tanto, no puede haber reflexión total interna, pues ésta requiere un ángulo de incidencia grande (mayor que el ángulo crítico), y la luz escapa de la fibra.

Sección 33.5 La luz solar que se refleja en las ventanas del edificio alto está parcialmente polarizada. A fin de reducir lo más posible los reflejos en la fotografía, el fotógrafo utiliza un filtro Polaroid ante la lente. El filtro está orientado con su eje de polarización perpendicular a la dirección de polarización dominante de la luz reflejada.

Sección 33.7 Si el tiempo t necesario para que un frente de onda se desplace de AA' a BB' es un periodo de la onda, entonces la distancia entre estos frentes de onda es de una longitud de onda. La figura 33.33a muestra que la separación entre frentes de onda sucesivos es menor en el material *b*, en el que el índice de refracción es más grande y la rapidez de onda es menor, que en el material *a*. Por consiguiente, la longitud de onda es menor en el material *b*. Un análisis más detallado muestra que la longitud de onda cambia de acuerdo con la ecuación (33.3).

Preguntas para análisis

P33.1 La luz tarda alrededor de ocho minutos en viajar del Sol a la Tierra. ¿La retarda apreciablemente la atmósfera terrestre? Explique su respuesta.

P33.2 La luz solar o la luz de las estrellas que atraviesa la atmósfera terrestre siempre se dobla hacia la vertical. ¿Por qué? ¿Significa esto que una estrella no se halla realmente donde parece estar? Explique su respuesta.

P33.3 Por lo regular, el Sol y la Luna se ven aplazados inmediatamente antes de ponerse. ¿Guarda relación este fenómeno con la refracción en la atmósfera terrestre (mencionada en la pregunta 33.2)? Explique su respuesta.

P33.4 Una estudiante afirma que, debido a la refracción en la atmósfera terrestre (véase la pregunta 33.2), es posible ver el Sol después que se ha puesto y, por tanto, el día es más largo que lo que sería si la Tierra no tuviese atmósfera. En primer lugar, ¿qué quiere decir al afirmar que se puede ver el Sol después que se ha puesto? En segundo, comente acerca de la validez de su conclusión.

P33.5 Cuando sube aire caliente desde un radiador o conducto de calefacción, los objetos que están detrás de él parecen temblar u ondular. ¿Cuál es la causa de este fenómeno?

P33.6 A veces, al mirar a través de una ventana, vemos dos imágenes reflejadas ligeramente desplazadas una de la otra. ¿A qué se debe esto?

P33.7 Un rayo de luz en el aire incide en una superficie de vidrio. ¿Existe un intervalo de ángulos a los que hay reflexión total interna? Explique su respuesta.

P33.8 Cuando incide luz en una interfaz entre dos materiales, el ángulo del rayo refractado depende de la longitud de onda, mas no el ángulo del rayo reflejado. ¿Por qué?

P33.9 Una vendedora de un mostrador de mercancía rebajada afirma que cierto par de lentes de sol tiene filtros Polaroid; usted sospecha que los lentes son simplemente de plástico coloreado. ¿Cómo podría saber la verdad con certeza?

P33.10 ¿Tiene sentido hablar acerca de la polarización de una onda *longitudinal*, como una onda sonora, por ejemplo? ¿Por qué?

P33.11 ¿Cómo se puede establecer la dirección del eje de polarización de un solo polarizador?

P33.12 Se ha propuesto incorporar filtros polarizadores a los parabrisas y faros de automóvil a fin de reducir el resplandor de las luces que vienen de frente al conducir de noche. ¿Daría buen resultado esta medida? ¿Cómo habría que disponer los ejes de polarización? ¿Qué ventajas tendría este plan? ¿Y qué desventajas?

P33.13 Cuando se coloca una hoja de envoltura de plástico para alimentos entre dos polarizadores cruzados, no se transmite la luz. Cuando se estira la hoja en una dirección, pasa un poco de luz a través de los polarizadores cruzados. ¿Qué es lo que ocurre?

P33.14 Si usted se sienta en la playa y mira hacia el mar a través de lentes de sol Polaroid, los lentes ayudan a reducir la reverberación de la luz solar que se refleja en el agua. Pero si se acuesta de costado en la playa, es poco lo que se reduce la reverberación. Explique a qué se debe la diferencia.

P33.15 Cuando incide la luz no polarizada en dos polarizadores cruzados, no se transmite luz. Una estudiante afirma que si se inserta un tercer polarizador entre los otros dos, habrá cierta transmisión. ¿Es razonable esto? ¿Cómo es posible que la adición de un tercer filtro aumente la transmisión?

P33.16 En la figura 33.29, si la luz que se dispersa hacia afuera del haz incidente está polarizada, ¿por qué el haz transmitido no está también polarizado parcialmente?