
FACTORES DE CONVERSIÓN DE UNIDADES

Longitud

1 m = 100 cm = 1000 mm = $10^6 \mu\text{m}$ = 10^9nm
1 km = 1000 m = 0.6214 mi
1 m = 3.281 ft = 39.37 in
1 cm = 0.3937 in
1 in. = 2.540 cm
1 ft = 30.48 cm
1 yd = 91.44 cm
1 mi = 5280 ft = 1.609 km
1 Å = 10^{-10}m = 10^{-8}cm = 10^{-1}nm
1 milla náutica = 6080 ft
1 año luz = $9.461 \times 10^{15} \text{m}$

Área

1 cm² = 0.155 in²
1 m² = 10^4cm^2 = 10.76 ft²
1 in² = 6.452 cm²
1 ft = 144 in² = 0.0929 m²

Volumen

1 litro = 1000 cm³ = 10^{-3}m^3 = 0.03531 ft³ = 61.02 in³
1 ft³ = 0.02832 m³ = 28.32 litros = 7.477 galones
1 galón = 3.788 litros

Tiempo

1 min = 60 s
1 h = 3600 s
1 d = 86,400 s
1 año = 365.24 d = $3.156 \times 10^7 \text{s}$

Ángulo

1 rad = 57.30° = $180^\circ/\pi$
1° = 0.01745 rad = $\pi/180 \text{rad}$
1 revolución = 360° = $2\pi \text{rad}$
1 rev/min (rpm) = 0.1047 rad/s

Rapidez

1 m/s = 3.281 ft/s
1 ft/s = 0.3048 m/s
1 mi/min = 60 mi/h = 88 ft/s
1 km/h = 0.2778 m/s = 0.6214 mi/h
1 mi/h = 1.466 ft/s = 0.4470 m/s = 1.609 km/h
1 furlong/14 días = $1.662 \times 10^{-4} \text{m/s}$

Aceleración

1 m/s² = 100 cm/s² = 3.281 ft/s²
1 cm/s² = 0.01 m/s² = 0.03281 ft/s²
1 ft/s² = 0.3048 m/s² = 30.48 cm/s²
1 mi/h · s = 1.467 ft/s²

Masa

1 kg = 10³ g = 0.0685 slug
1 g = $6.85 \times 10^{-5} \text{slug}$
1 slug = 14.59 kg
1 u = $1.661 \times 10^{-27} \text{kg}$
1 kg tiene un peso de 2.205 lb cuando $g = 9.80 \text{m/s}^2$

Fuerza

1 N = 10⁵ dinas = 0.2248 lb
1 lb = 4.448 N = $4.448 \times 10^5 \text{dinas}$

Presión

1 Pa = 1 N/m² = $1.450 \times 10^{-4} \text{lb/in}^2$ = 0.209 lb/ft²
1 bar = 10⁵ Pa
1 lb/in² = 6895 Pa
1 lb/ft² = 47.88 Pa
1 atm = $1.013 \times 10^5 \text{Pa}$ = 1.013 bar
= 14.7 lb/in² = 2117 lb/ft²
1 mm Hg = 1 torr = 133.3 Pa

Energía

1 J = 10⁷ ergs = 0.239 cal
1 cal = 4.186 J (con base en caloría de 15°)
1 ft · lb = 1.356 J
1 Btu = 1055 J = 252 cal = 778 ft · lb
1 eV = $1.602 \times 10^{-19} \text{J}$
1 kWh = $3.600 \times 10^6 \text{J}$

Equivalencia masa-energía

1 kg ↔ $8.988 \times 10^{16} \text{J}$
1 u ↔ 931.5 MeV
1 eV ↔ $1.074 \times 10^{-9} \text{u}$

Potencia

1 W = 1 J/s
1 hp = 746 W = 550 ft · lb/s
1 Btu/h = 0.293 W

CONSTANTES NUMÉRICAS

Constantes físicas fundamentales*

Nombre	Símbolo	Valor
Rapidez de la luz	c	2.99792458×10^8 m/s
Magnitud de carga del electrón	e	$1.60217653(14) \times 10^{-19}$ C
Constante gravitacional	G	$6.6742(10) \times 10^{-11}$ N · m ² /kg ²
Constante de Planck	h	$6.6260693(11) \times 10^{-34}$ J · s
Constante de Boltzmann	k	$1.3806505(24) \times 10^{-23}$ J/K
Número de Avogadro	N_A	$6.0221415(10) \times 10^{23}$ moléculas/mol
Constante de los gases	R	8.314472(15) J/mol · K
Masa del electrón	m_e	$9.1093826(16) \times 10^{-31}$ kg
Masa del protón	m_p	$1.67262171(29) \times 10^{-27}$ kg
Masa del neutrón	m_n	$1.67492728(29) \times 10^{-27}$ kg
Permeabilidad del espacio libre	μ_0	$4\pi \times 10^{-7}$ Wb/A · m
Permitividad del espacio libre	$\epsilon_0 = 1/\mu_0 c^2$	$8.854187817 \dots \times 10^{-12}$ C ² /N · m ²
	$1/4\pi\epsilon_0$	$8.987551787 \dots \times 10^9$ N · m ² /C ²

Otras constante útiles

Equivalente mecánico del calor		4.186 J/cal (15° caloría)
Presión atmosférica estándar	1 atm	1.01325×10^5 Pa
Cero absoluto	0 K	-273.15 °C
Electrón volt	1 eV	$1.60217653(14) \times 10^{-19}$ J
Unidad de masa atómica	1 u	$1.66053886(28) \times 10^{-27}$ kg
Energía del electrón en reposo	$m_e c^2$	0.510998918(44) MeV
Volumen del gas ideal (0 °C y 1 atm)		22.413996(39) litros/mol
Aceleración debida a la gravedad (estándar)	g	9.80665 m/s ²

*Fuente: National Institute of Standards and Technology (<http://physics.nist.gov/cuu>). Los números entre paréntesis indican incertidumbre en los dígitos finales del número principal; por ejemplo, el número 1.6454(21) significa 1.6454 ± 0.0021 . Los valores que no indican incertidumbre son exactos.

Datos astronómicos†

Cuerpo	Masa (kg)	Radio (m)	Radio de la órbita (m)	Periodo de la órbita
Sol	1.99×10^{30}	6.96×10^8	—	—
Luna	7.35×10^{22}	1.74×10^6	3.84×10^8	27.3 d
Mercurio	3.30×10^{23}	2.44×10^6	5.79×10^{10}	88.0 d
Venus	4.87×10^{24}	6.05×10^6	1.08×10^{11}	224.7 d
Tierra	5.97×10^{24}	6.38×10^6	1.50×10^{11}	365.3 d
Marte	6.42×10^{23}	3.40×10^6	2.28×10^{11}	687.0 d
Júpiter	1.90×10^{27}	6.91×10^7	7.78×10^{11}	11.86 y
Saturno	5.68×10^{26}	6.03×10^7	1.43×10^{12}	29.45 y
Urano	8.68×10^{25}	2.56×10^7	2.87×10^{12}	84.02 y
Neptuno	1.02×10^{26}	2.48×10^7	4.50×10^{12}	164.8 y
Plutón‡	1.31×10^{22}	1.15×10^6	5.91×10^{12}	247.9 y

†Fuente: NASA Jet Propulsion Laboratory Solar System Dynamics Group (<http://ssd.jpl.nasa.gov>) y P. Kenneth Seidelmann, ed., *Explanatory Supplement to the Astronomical Almanac* (University Science Books, Mill Valley, CA, 1992), pp. 704-706. Para cada cuerpo, "radio" es el radio en su ecuador y "radio de la órbita" es la distancia media desde el Sol (en el caso de los planetas) o desde la Tierra (en el caso de la Luna).

‡En agosto de 2006 la Unión Astronómica Internacional reclasificó a Plutón y a otros pequeños objetos que giran en órbita alrededor del Sol como "planetas enanos".

CONTENIDO BREVE

Electromagnetismo

21	Carga eléctrica y campo eléctrico	709
22	Ley de Gauss	750
23	Potencial eléctrico	780
24	Capacitancia y dieléctricos	815
25	Corriente, resistencia y fuerza electromotriz	846
26	Circuitos de corriente directa	881
27	Campo magnético y fuerzas magnéticas	916
28	Fuentes de campo magnético	957
29	Inducción electromagnética	993
30	Inductancia	1030
31	Corriente alterna	1061
32	Ondas electromagnéticas	1092

Óptica

33	Naturaleza y propagación de la luz	1121
34	Óptica geométrica	1157
35	Interferencia	1207
36	Difracción	1234

Física moderna

37	Relatividad	1268
38	Fotones, electrones y átomos	1307
39	La naturaleza ondulatoria de las partículas	1349
40	Mecánica cuántica	1375
41	Estructura atómica	1401
42	Moléculas y materia condensada	1433
43	Física nuclear	1468
44	Física de partículas y cosmología	1509

APÉNDICES

A	El sistema internacional de unidades	A-1
B	Relaciones matemáticas útiles	A-3
C	El alfabeto griego	A-4
D	Tabla periódica de los elementos	A-5
E	Factores de conversión de unidades	A-6
F	Constantes numéricas	A-7
	Respuestas a los problemas con número impar	A-9

NATURALEZA Y PROPAGACIÓN DE LA LUZ

33



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

METAS DE APRENDIZAJE

Al estudiar este capítulo, usted aprenderá:

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

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

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

33.1 La naturaleza de la luz

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

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

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

Las dos personalidades de la luz

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

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

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

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

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

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

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

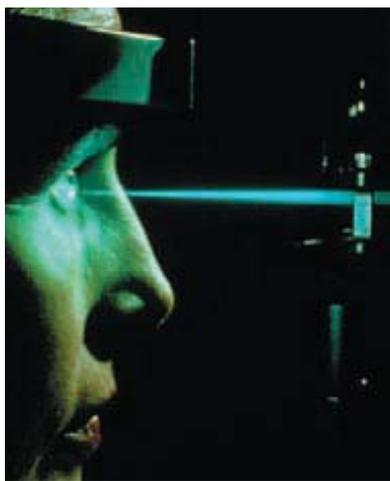
Ondas, frentes de onda y rayos

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

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



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



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

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

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

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

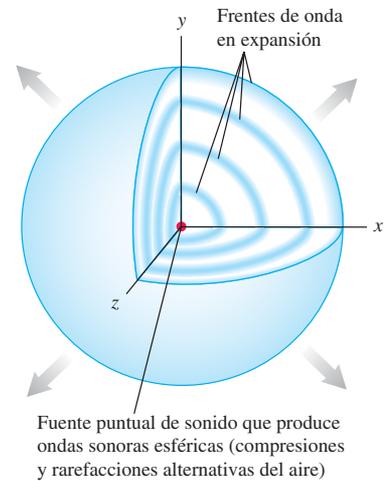
Los siguientes capítulos darán al lector muchas oportunidades de ver la interrelación de las descripciones de la luz como rayo, onda y partícula. La rama de la óptica en la cual resulta adecuada la descripción de rayos se llama **óptica geométrica**; la rama que se ocupa específicamente del comportamiento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

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

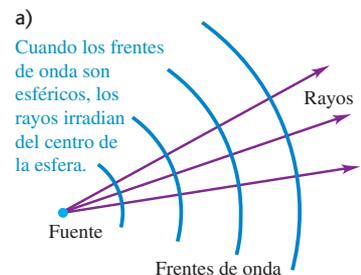
33.2 Reflexión y refracción

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

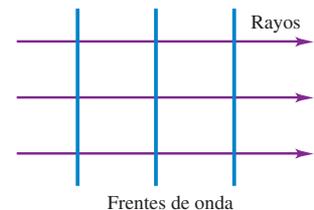
33.3 Los frentes de onda esféricos de sonido se propagan de manera uniforme en todas direcciones desde una fuente puntual en un medio sin movimiento, como aire tranquilo, que tenga las mismas propiedades en todas las regiones y en todas las direcciones. Las ondas electromagnéticas en el vacío también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



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



a) Cuando los frentes de onda son esféricos, los rayos irradian del centro de la esfera.



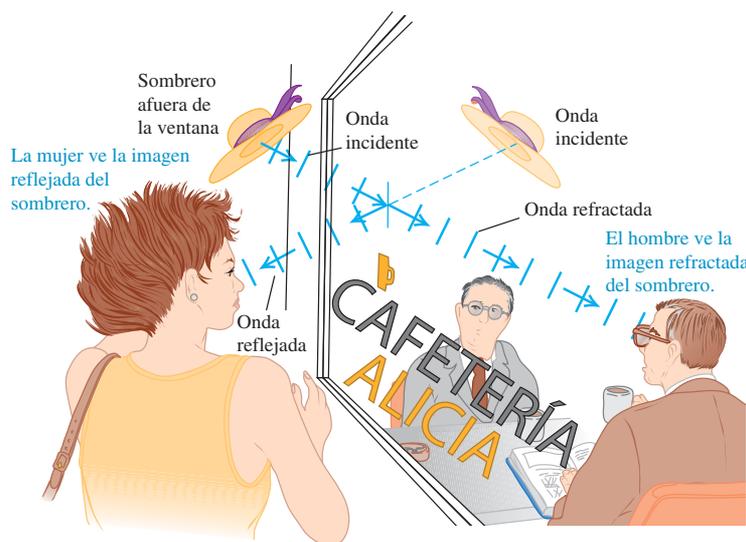
b) Cuando los frentes de onda son planos, los rayos son perpendiculares a los frentes de onda y paralelos entre sí.



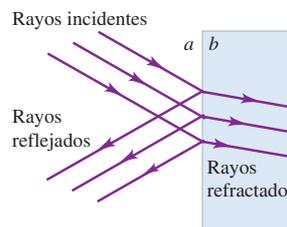
- 15.1 Reflexión y refracción
- 15.3 Aplicaciones de la refracción

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

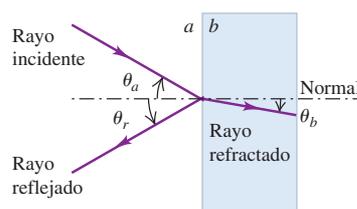
a) Ondas planas reflejadas y refractadas en una ventana



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



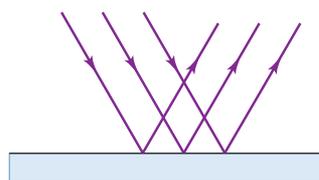
c) Representación simplificada para ilustrar sólo un conjunto de rayos



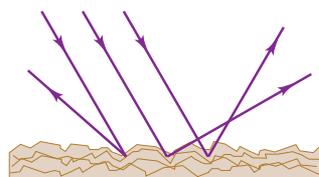
Los segmentos de ondas planas que se ilustran en la figura 33.5a pueden representarse por paquetes de rayos que forman *haces* de luz (figura 33.5b). Para simplificar, es frecuente que se dibuje un solo rayo de cada haz (figura 33.5c). La representación de estas ondas en términos de rayos es la base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

33.6 Dos tipos de reflexión.

a) Reflexión especular



b) Reflexión difusa



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

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

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

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

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

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

Leyes de reflexión y refracción

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

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

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

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

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

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

o bien,

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

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

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

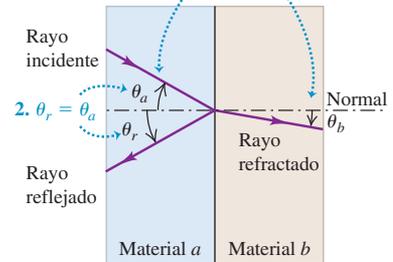
Las ecuaciones (33.3) y (33.4) indican que cuando un rayo pasa de un material a hacia otro material b que tiene un mayor índice de refracción ($n_b > n_a$) y, por lo tanto, una menor rapidez de onda, el ángulo θ_b que forma con la normal es *más pequeño* en el segundo material que el ángulo θ_a en el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

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

33.7 Las leyes de reflexión y refracción.

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

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



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

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

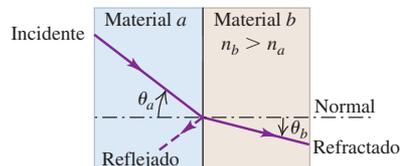
33.8 Refracción y reflexión en tres casos. a) El material b tiene un índice de refracción mayor que el material a .

b) El material b tiene un índice de refracción menor que el material a .

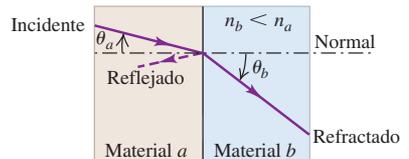
c) El rayo de luz incidente es normal a la interfaz entre los materiales.

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

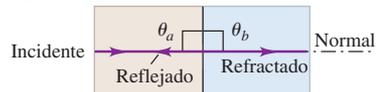
b) Un rayo que entra a un material con *menor* índice de refracción se desvía *alejándose* de la normal.



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



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

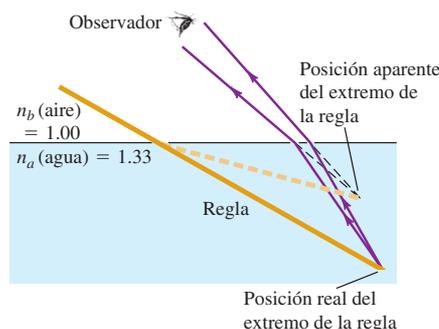


33.9 a) Esta regla en realidad es recta, pero parece que se dobla en la superficie del agua. b) Los rayos de luz provenientes de cualquier objeto sumergido se desvían alejándose de la normal cuando salen al aire. Desde el punto de vista de un observador situado sobre la superficie del agua, el objeto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

a) Una regla recta sumergida a la mitad en agua



b) ¿Por qué se ve doblada la regla?



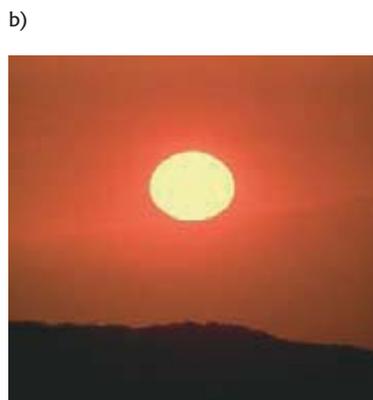
La ecuación (33.2) indica que θ_r también es igual a cero, así que el rayo reflejado viaja de regreso a lo largo de la misma trayectoria que el rayo incidente.

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

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

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

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



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

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

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

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

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

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

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

Índice de refracción y aspectos ondulatorios de la luz

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

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

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

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

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

Estrategia para resolver problemas 33.1 Reflexión y refracción



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

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

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

EJECUTAR *la solución* como sigue:

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

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

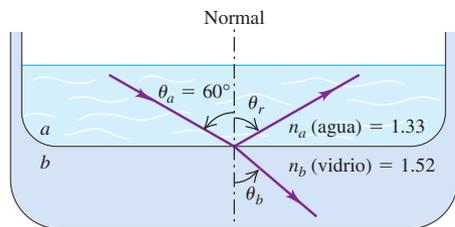
EVALUAR *la respuesta:* En problemas que impliquen refracción, compruebe que la dirección de la refracción tenga sentido. Si el segundo material tiene un mayor índice de refracción que el primero, el rayo refractado se desvía hacia la normal, y el ángulo refractado es más pequeño que el ángulo de incidencia.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

Ejemplo 33.1 Reflexión y refracción

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

SOLUCIÓN

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

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

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

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

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

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

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

Ejemplo 33.2 Índice de refracción en el ojo

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

SOLUCIÓN

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Ejemplo 33.3 Un rayo reflejado dos veces

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

SOLUCIÓN

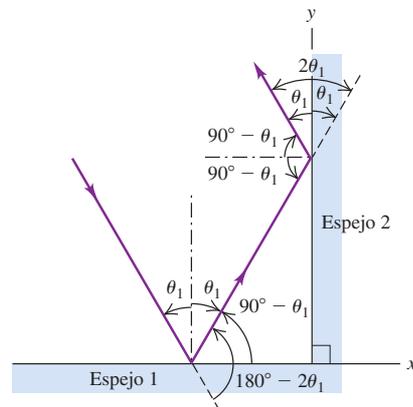
IDENTIFICAR: Este problema se relaciona sólo con la ley de reflexión.

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

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

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

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



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

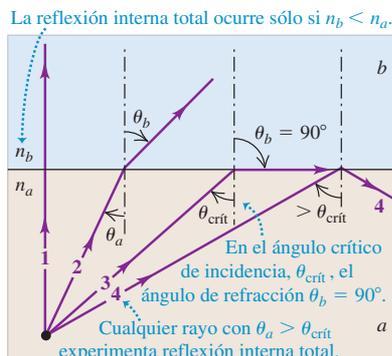
Evalúe su comprensión de la sección 33.2 Usted se encuentra en la orilla de un lago y observa un apetitoso pez que nada a cierta distancia por debajo de la superficie. a) Si quiere atrapar al pez, ¿debe lanzar el arpón i) más arriba, ii) más abajo o iii) directamente hacia la posición aparente del pez?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

33.3 Reflexión interna total

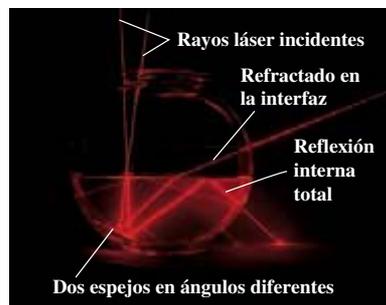
Hemos descrito la forma en que la luz se refleja y se transmite parcialmente en una interfaz entre dos materiales con distintos índices de refracción. Sin embargo, en ciertas circunstancias, toda la luz se puede reflejar en la interfaz, sin que se transmita nada de ella, aun si el segundo material es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

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

a) Reflexión interna total



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



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

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

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

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

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

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

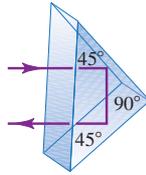
La reflexión interna total ocurrirá si el ángulo de incidencia θ_a es mayor o igual que $\theta_{\text{crít}}$.

Aplicaciones de la reflexión interna total

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

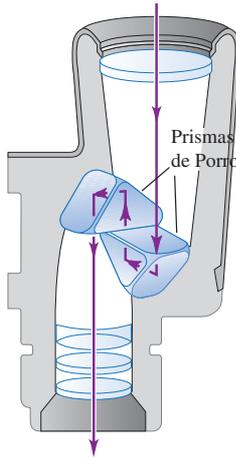
$$\text{sen } \theta_{\text{crít}} = \frac{1}{1.52} = 0.658 \quad \theta_{\text{crít}} = 41.1^\circ$$

a) Reflexión interna total en un prisma de Porro



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

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



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

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

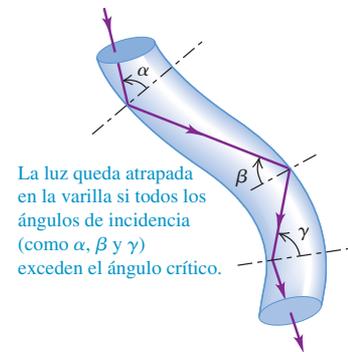
Cuando un rayo de luz entra por un extremo de una varilla transparente (figura 33.15), la luz se refleja por completo internamente si el índice de refracción de la varilla es mayor que el del material circundante. La luz queda "atrapada" dentro de la varilla aun si ésta se curva, siempre que la curvatura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

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

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

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

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



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

33.16 Transmisión de imágenes por un haz de fibras ópticas.



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



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

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

Ejemplo conceptual 33.4 Un periscopio con fugas

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

SOLUCIÓN

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

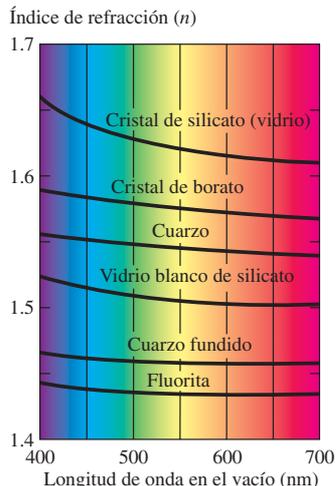
$$\theta_{\text{crit}} = \arcsen \frac{1.33}{1.52} = 61.0^\circ$$

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

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



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



*33.4 Dispersión

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

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

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



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

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

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

Arco iris

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

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

33.5 Polarización

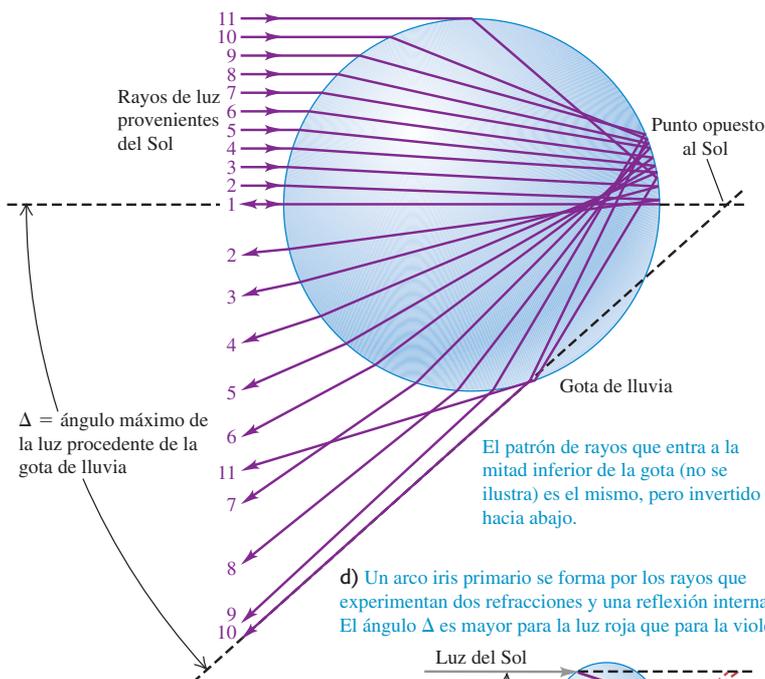
La *polarización* es una característica de todas las ondas transversales. Este capítulo trata sobre la luz, pero para presentar algunos conceptos básicos acerca de la polarización, volvamos a las ondas transversales en una cuerda que estudiamos en el capítulo 15.

33.20 Cómo se forma el arco iris.

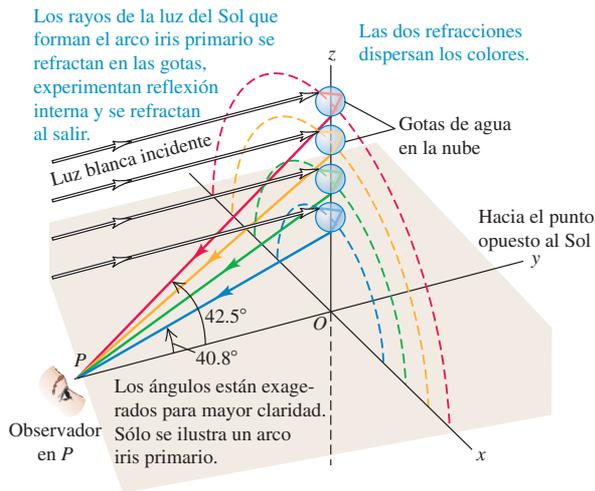
a) Arco iris doble



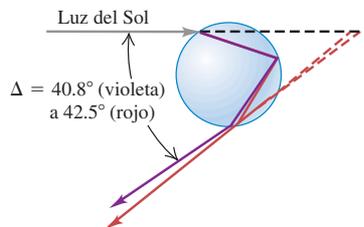
b) Trayectorias de rayos de luz que entran por la mitad superior de una gota de lluvia



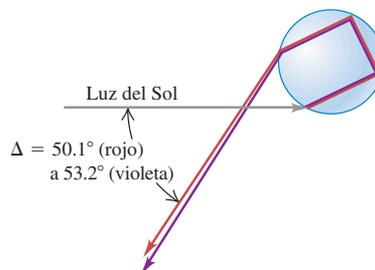
c) Formación de un arco iris. En esta ilustración, el Sol está directamente detrás del observador en P .



d) Un arco iris primario se forma por los rayos que experimentan dos refracciones y una reflexión interna. El ángulo Δ es mayor para la luz roja que para la violeta.



e) Un arco iris secundario se forma por los rayos que experimentan dos refracciones y dos reflexiones internas. El ángulo Δ es mayor para la luz violeta que para la roja.

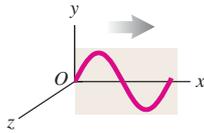


En el caso de una cuerda que esté en equilibrio a lo largo del eje x , los desplazamientos pueden ocurrir a lo largo de la dirección y , como en la figura 33.21a. En este caso, la cuerda siempre queda en el plano xy . Pero los desplazamientos pueden ser a lo largo del eje z como en la figura 33.21b; en tal caso, la cuerda siempre se encuentra en el plano xz .

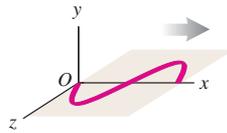
Cuando una onda sólo tiene desplazamientos en y , se dice que está **linealmente polarizada** en la dirección y ; una onda con desplazamientos sólo en z está linealmente polarizada en esa dirección. Para las ondas mecánicas es posible construir un **filtro polarizador**, o **polarizador** simplemente, que permita que sólo pasen ondas con cierta dirección de polarización. En la figura 33.21c la cuerda puede deslizarse verticalmente

33.21 a), b) Ondas polarizadas en una cuerda. c) Formación de una onda polarizada en una cuerda a partir de otra no polarizada por medio de un filtro polarizador.

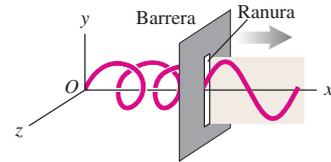
a) Onda transversal linealmente polarizada en la dirección y



b) Onda transversal linealmente polarizada en la dirección z



c) La ranura funciona como filtro polarizador dejando pasar solamente los componentes polarizados en la dirección y.



en la ranura sin fricción, pero no es posible ningún movimiento horizontal. Este filtro deja pasar ondas polarizadas en la dirección y, pero bloquea las ondas polarizadas en la dirección z.

Este mismo lenguaje se puede aplicar a las ondas electromagnéticas, las cuales también presentan polarización. Como se vio en el capítulo 32, una onda electromagnética es *transversal*; los campos eléctrico y magnético fluctuantes son perpendiculares entre sí y con respecto a la dirección de propagación. Siempre se define 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 de los electrones en los materiales y no a las fuerzas magnéticas. Así, se dice que la onda electromagnética descrita por la ecuación (32.17),

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

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

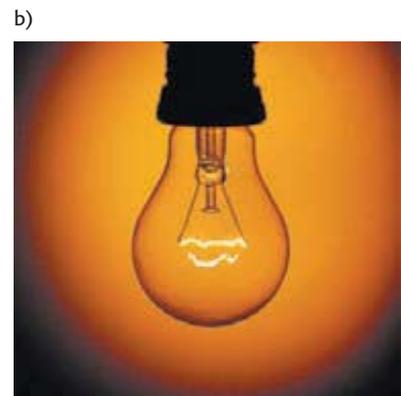
está polarizada en la dirección y porque el campo eléctrico sólo tiene componente y.

CAUTION El significado de “polarización” Es poco afortunado el hecho de que la misma palabra, “polarización”, que se usa para describir la dirección de \vec{E} en una onda electromagnética también se utilice para describir el desplazamiento de la carga eléctrica dentro de un cuerpo, como el que ocurre en respuesta a la proximidad de otro cuerpo con carga; en la sección 21.2 se describió esta última clase de polarización (véase la figura 21.7). El lector debe recordar que aun cuando estos dos conceptos tengan el mismo nombre, no describen el mismo fenómeno. ■

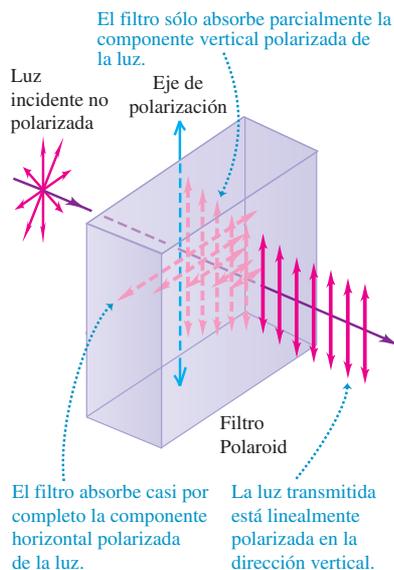
Filtros polarizadores

Las ondas emitidas por un transmisor de radio, por lo general, están linealmente polarizadas. Las antenas verticales que se usan para la transmisión de radio emiten ondas que, en un plano horizontal alrededor de la antena, están polarizadas en dirección vertical (paralelas a la antena; figura 33.22a). Las antenas de televisión en los techos tienen elementos horizontales en Estados Unidos y verticales en Gran Bretaña, ya que las ondas transmitidas tienen diferentes polarizaciones.

33.22 a) Los electrones en la antena de color rojo y blanco oscilan verticalmente y producen ondas electromagnéticas verticalmente polarizadas que se propagan desde la antena en dirección horizontal. (Las pequeñas antenas grises son para transmitir señales de telefonía inalámbrica.)
 b) No importa cómo esté orientada esta bombilla eléctrica, el movimiento aleatorio de los electrones en el filamento produce ondas luminosas no polarizadas.



33.23 Un filtro Polaroid iluminado por luz natural no polarizada (ilustrado por los vectores \vec{E} que apuntan en todas las direcciones perpendiculares a la dirección de propagación). La luz transmitida está linealmente polarizada a lo largo del eje de polarización (ilustrado por los vectores \vec{E} a lo largo de la dirección de polarización solamente).



La situación es diferente para la luz visible. La luz de fuentes ordinarias, como las bombillas eléctricas incandescentes y las lámparas fluorescentes, *no* está polarizada (figura 33.22b). Las “antenas” que irradian ondas luminosas son las moléculas que constituyen las fuentes. Las ondas emitidas por cualquier molécula pueden estar linealmente polarizadas, como las de una antena de radio. Pero cualquier fuente luminosa real contiene un número enorme de moléculas con orientaciones al azar, por lo que la luz emitida es una mezcla aleatoria de ondas linealmente polarizadas en todas las direcciones transversales posibles. Esa luz se llama **luz no polarizada** o **luz natural**. Para crear luz polarizada a partir de luz natural no polarizada se requiere un filtro análogo a la ranura para ondas mecánicas en la figura 33.21c.

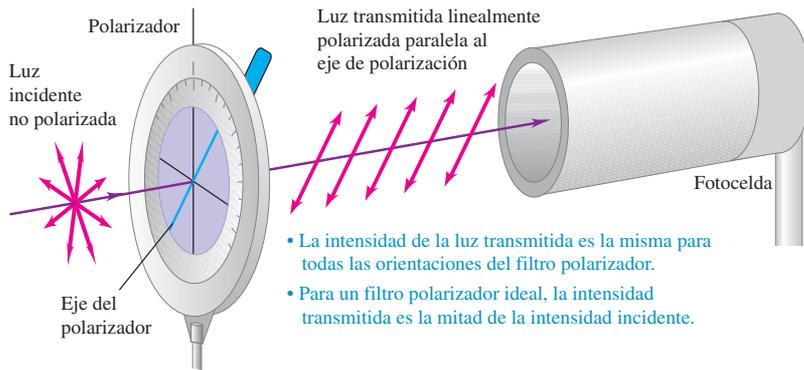
Los filtros polarizadores para las ondas electromagnéticas tienen diferentes detalles de construcción, dependiendo de la longitud de onda. Para las microondas con longitud de onda de unos cuantos centímetros, un buen polarizador es un arreglo de alambres conductores estrechamente espaciados y paralelos, que estén aislados uno de otro. (Piense en una parrilla para asar carne en la que el anillo metálico exterior se ha sustituido por un anillo aislante.) Los electrones tienen libertad de movimiento a lo largo de la longitud de los alambres conductores y lo harán en respuesta a una onda cuyo campo \vec{E} sea 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 cualquier onda que pase a través de la rejilla se reduce considerablemente. Las ondas con \vec{E} orientado en forma perpendicular a los alambres pasan prácticamente intactas, ya que los electrones no se pueden desplazar a través del aire que separa los alambres. Por consiguiente, una onda que pase a través de un filtro de este tipo quedará polarizada sobre todo en la dirección perpendicular a los alambres.

El filtro polarizador más común para la luz visible es el material conocido con el nombre comercial de Polaroid, que se usa mucho en los anteojos de sol y en los filtros polarizadores para lentes de cámaras fotográficas. Este material, desarrollado por primera vez por el científico estadounidense Edwin H. Land, incorpora sustancias que presentan **dicroísmo**, la absorción selectiva en la que una de las componentes polarizadas se absorbe con mucha más intensidad que la otra (figura 33.23). Un filtro Polaroid transmite el 80% o más de la intensidad de una onda que esté polarizada en forma paralela a cierto eje en el material, llamado **eje de polarización**, pero sólo el 1% o menos de las ondas polarizadas perpendiculares a ese eje. En un tipo de filtro Polaroid hay moléculas de cadena larga dentro del filtro que están orientadas con su eje perpendicular al eje de polarización; estas moléculas absorben preferentemente luz polarizada a lo largo de ellas, en forma muy parecida a los alambres conductores de un filtro polarizador para microondas.

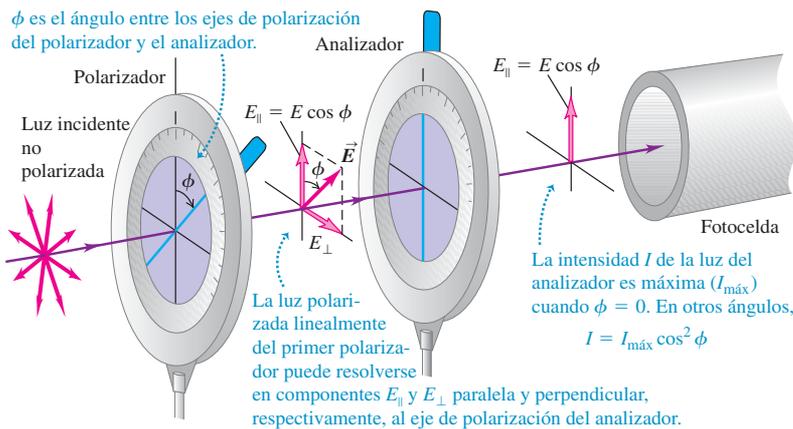
Uso de filtros polarizadores

Un filtro polarizador *ideal* deja pasar el 100% de la luz incidente que esté polarizada en la dirección del eje de polarización del filtro, pero bloquea completamente toda la luz polarizada en forma perpendicular a ese eje. Tal dispositivo es una idealización imposible, pero el concepto es útil para aclarar algunas ideas fundamentales. En la siguiente explicación supondremos que todos los filtros polarizadores son ideales. En la figura 33.24 la luz no polarizada es incidente sobre un filtro polarizador plano. El eje de polarización está representado por la línea azul. El vector \vec{E} de la onda incidente se puede representar en términos de las componentes paralela y perpendicular al eje polarizador; sólo se transmite la componente de \vec{E} paralela al eje de polarización. Así, la luz que sale del polarizador está linealmente polarizada en forma paralela al eje de polarización.

Cuando la luz polarizada incide en un polarizador ideal como el de la figura 33.24, la intensidad de la luz transmitida es *exactamente la mitad* que la de la luz incidente no polarizada, sin importar cómo se oriente 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 otra perpendicular a éste. Como la luz incidente es una mezcla aleatoria de todos los estados de polarización, estas dos componentes son iguales en promedio. El polarizador ideal transmite sólo la componente que sea paralela al eje de polarización, por lo que sólo se transmite la mitad de la intensidad incidente.



33.24 La luz natural no polarizada incide sobre el filtro no polarizador. La fotocelda (o celda fotovoltaica) mide la intensidad de la luz linealmente polarizada que se transmite.



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

¿Qué pasa cuando la luz linealmente polarizada que sale de un polarizador pasa a través de un segundo polarizador, como se ilustra en la figura 33.25? Considere el caso general en el cual el eje de polarización del segundo polarizador, o *analizador*, forma un ángulo ϕ con el eje de polarización del primer polarizador. Podemos resolver la luz linealmente polarizada que es transmitida por el primer polarizador en dos componentes, como se aprecia en la figura 33.25, una paralela y la otra perpendicular al eje del analizador. Sólo la componente paralela, con amplitud $E \cos \phi$, es transmitida por el analizador. La intensidad transmitida es máxima cuando $\phi = 0$, y es igual a cero cuando el polarizador y el analizador están *cruzados* de manera que $\phi = 90^\circ$ (figura 33.26). Para determinar la dirección de polarización de la luz transmitida por el primer polarizador, se hace girar el analizador hasta que la fotocelda de la figura 33.25 mida una intensidad de cero; el eje de polarización del primer polarizador es, entonces, perpendicular al del analizador.



33.26 Estas fotos muestran la visión a través de anteojos Polaroid cuyos ejes de polarización están alineados ($\phi = 0$; izquierda) y perpendiculares ($\phi = 90^\circ$; imagen derecha). La intensidad transmitida es máxima cuando los ejes están alineados, y es cero cuando los ejes están perpendiculares.

Para determinar la intensidad transmitida en valores intermedios del ángulo ϕ , recordemos nuestra explicación acerca de la energía en la sección 32.4, donde dijimos que la intensidad de una onda electromagnética es proporcional al *cuadrado* de la amplitud de la onda [véase la ecuación (32.29)]. La razón entre la *amplitud* transmitida y la incidente es $\cos \phi$, por lo que la razón entre la *intensidad* transmitida y la incidente es $\cos^2 \phi$. Así, la intensidad de la luz transmitida a través del analizador es

$$I = I_{\text{máx}} \cos^2 \phi \quad (\text{ley de Malus, luz polarizada que pasa a través de un analizador}) \quad (33.7)$$

donde $I_{\text{máx}}$ es la intensidad máxima de la luz transmitida (en $\phi = 0$), e I es la cantidad transmitida con el ángulo ϕ . Esta relación, que descubrió experimentalmente Etienne Louis Malus en 1809, se llama **ley de Malus**. La ley de Malus *sólo* se aplica si la luz incidente que pasa a través del analizador ya está linealmente polarizada.

Estrategia para resolver problemas 33.2

Polarización lineal



IDENTIFICAR *los conceptos relevantes:* Recuerde que en todas las ondas electromagnéticas, incluidas las ondas luminosas, la dirección del campo \vec{E} es la dirección de polarización y es perpendicular a la dirección de propagación. Cuando se trabaje con polarizadores, en realidad se está tratando con componentes de \vec{E} paralelas y perpendiculares al eje de polarización. Todos los conocimientos sobre las componentes de los vectores resultan aplicables aquí.

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

1. Al igual que en los problemas de óptica geométrica, *siempre* comience por hacer un diagrama grande y nítido. Indique en el papel todos los ángulos conocidos, incluidos los ángulos de todos los ejes de polarización.
2. Determine las variables buscadas.

EJECUTAR *la solución* como sigue:

1. Recuerde que un polarizador sólo deja pasar componentes del campo eléctrico paralelas a su eje de polarización.
2. Si la luz incidente está linealmente polarizada y tiene amplitud E e intensidad $I_{\text{máx}}$, la luz que pasa a través de un polarizador tiene

amplitud $E \cos \phi$ e intensidad $I_{\text{máx}} \cos^2 \phi$, donde ϕ es el ángulo entre la dirección de polarización incidente y el eje de polarización del filtro.

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

EVALUAR *la respuesta:* Compruebe su respuesta en busca de errores obvios. Si los resultados dicen que la luz que sale de un polarizador tiene mayor intensidad que la luz incidente, algo es incorrecto: un polarizador no puede agregar energía a una onda luminosa.

Ejemplo 33.5 Combinación de dos polarizadores

En la figura 33.25, la luz incidente no polarizada tiene intensidad I_0 . Determine las intensidades transmitidas por los polarizadores primero y segundo si el ángulo entre los ejes de los dos filtros es de 30° .

SOLUCIÓN

IDENTIFICAR: En este problema interviene un polarizador (un filtro polarizador en el que la luz no polarizada brilla, lo que produce luz polarizada) y un analizador (un segundo filtro polarizador en el cual la luz polarizada brilla).

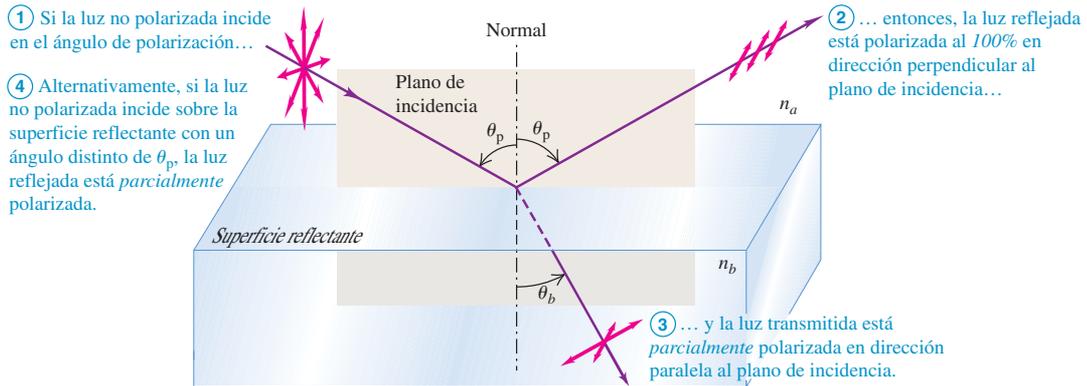
PLANTEAR: El diagrama de esta situación se presenta en la figura 33.25. Se da la intensidad I_0 de la luz incidente natural y el ángulo $\phi = 30^\circ$ entre los ejes de polarización. Nuestras incógnitas son las intensidades de la luz que sale del primer polarizador y de la luz que sale del segundo.

EJECUTAR: Como ya se explicó, la intensidad de la luz linealmente polarizada transmitida por el primer filtro es $I_0/2$. De acuerdo con la ecuación (33.7) con $\phi = 30^\circ$, el segundo filtro reduce la intensidad en un factor de $\cos^2 30^\circ = \frac{3}{4}$. Por lo 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: Note que la intensidad disminuye después de cada paso a través de un polarizador. La única situación en la que la intensidad transmitida *no* disminuye es aquella en que el polarizador es ideal (de manera 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, de manera que $\phi = 0$.

33.27 Cuando la luz incide en una superficie reflectante en el ángulo de polarización, la luz reflejada está linealmente polarizada.



Polarización por reflexión

La luz no polarizada se puede polarizar, ya sea en forma parcial o total, por *reflexión*. En la figura 33.27, la luz natural no polarizada incide sobre una superficie reflectante 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**. Para la mayoría de los ángulos de incidencia, las ondas para las que el vector de campo eléctrico \vec{E} es perpendicular al plano de la incidencia (es decir, es paralelo a la superficie reflectante) se reflejan con más intensidad que aquellas cuyo \vec{E} yace en ese plano. En tal caso, la luz reflejada está *parcialmente polarizada* en la dirección perpendicular al plano de incidencia.

Pero en cierto ángulo particular de incidencia, llamado el **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 por completo. A ese mismo ángulo de incidencia, la luz cuyo \vec{E} es perpendicular al plano de incidencia se refleja parcialmente y la otra parte se refracta. Por consiguiente, la luz *reflejada* está *completamente* polarizada en forma perpendicular al plano de incidencia, como se ilustra en la figura 33.27. La luz *refractada* (transmitida) está *parcialmente* polarizada en forma 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 perpendiculares entre sí (figura 33.28). En este caso, el ángulo de refracción θ_b se vuelve el complemento de θ_p , por lo 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

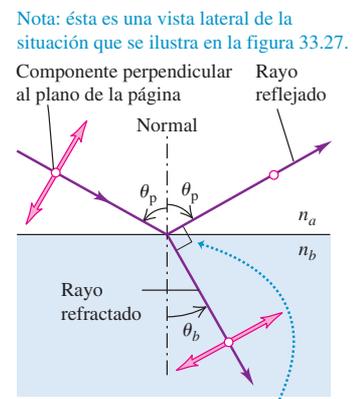
$$n_a \sin \theta_p = n_b \sin(90^\circ - \theta_p) = n_b \cos \theta_p$$

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

Esta relación se conoce como **ley de Brewster**. Aunque se descubrió en forma experimental, también puede *deducirse* a partir de un modelo de onda empleando las ecuaciones de Maxwell.

La polarización por reflexión es la razón por la que los filtros polarizadores se usan tanto en los anteojos de sol (figura 33.26). Cuando la luz solar se refleja en una superficie horizontal, el plano de incidencia es vertical, y la luz reflejada contiene una

33.28 La importancia del ángulo de polarización. Los círculos abiertos representan una componente de \vec{E} que es perpendicular al plano de la figura (el plano de incidencia) y paralela a la superficie que separa los dos materiales.



Cuando la luz incide en el ángulo de polarización con una superficie, los rayos reflejado y refractado son perpendiculares entre sí y

$$\tan \theta_p = \frac{n_b}{n_a}$$

preponderancia de luz que está polarizada en la dirección horizontal. Cuando la reflexión ocurre en una carretera asfáltica lisa o en la superficie de un lago, produce una reverberación indeseable. La visión mejora si se elimina esa reverberación. El fabricante hace que el eje de polarización del material de los anteojos sea vertical, por lo que muy poca de la luz polarizada horizontalmente que se refleja en la carretera se transmite a los ojos. Los anteojos también reducen la intensidad general de la luz transmitida a un poco menos del 50% de la intensidad de la luz incidente no polarizada.

Ejemplo 33.6 Reflexión en la superficie de una alberca

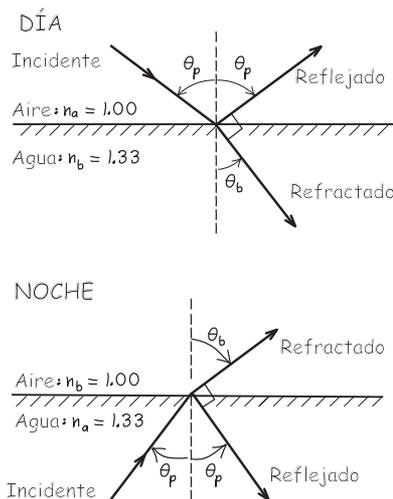
La luz del Sol se refleja en la superficie lisa de una alberca sin personas en su interior. *a)* ¿Con qué ángulo de reflexión se polariza completamente la luz? *b)* ¿Cuál es el ángulo correspondiente de refracción para la luz que se transmite (se refracta) en el agua? *c)* De noche se enciende un reflector subacuático en la alberca. Repita los incisos *a)* y *b)* para los rayos del reflector que llegan a la superficie desde abajo.

SOLUCIÓN

IDENTIFICAR: Este problema se relaciona con la polarización por reflexión en una interfaz aire-agua en los incisos *a)* y *b)*, y en una interfaz agua-aire en el inciso *c)*.

PLANTEAR: La figura 33.29 presenta los esquemas de los rayos de luz para la situación en el día [incisos *a)* y *b)*] y en la noche [inciso *c)*]. En el inciso *a)* se busca el ángulo de polarización de la luz

33.29 Diagrama para este problema.



que primero está en el aire y después en el agua; esto se encuentra con la ley de Brewster, ecuación (33.8). En el inciso *b)* se desea determinar el ángulo de la luz refractada para esta situación. En el inciso *c)* de nuevo se desea calcular el ángulo de polarización, pero para la luz que primero viaja en el agua y después en el aire. De nuevo se utiliza la ecuación (33.8) para determinar ese ángulo.

EJECUTAR: *a)* La parte superior de la figura 33.29 ilustra la situación durante el día. Como la luz pasa del aire al agua, se tiene que $n_a = 1.00$ (aire) y $n_b = 1.33$ (agua). De acuerdo con la ecuación (33.8),

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

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

$$\begin{aligned}\theta_p + \theta_b &= 90^\circ \\ \theta_b &= 90^\circ - 53.1^\circ = 36.9^\circ\end{aligned}$$

c) La situación durante la noche se ilustra en la parte inferior de la figura 33.29. Ahora la luz *primero* viaja en el agua, y después en el aire, por lo que $n_a = 1.33$ y $n_b = 1.00$. De nuevo, utilizando la ecuación (33.8) se obtiene

$$\begin{aligned}\theta_p &= \arctan \frac{1.00}{1.33} = 36.9^\circ \\ \theta_b &= 90^\circ - 36.9^\circ = 53.1^\circ\end{aligned}$$

EVALUAR: La respuesta para el inciso *b)* se puede comprobar con la ley de Snell, $n_a \sin \theta_a = n_b \sin \theta_b$, o bien,

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

Advierta que los dos ángulos de polarización que se obtuvieron en los incisos *a)* y *c)* suman 90° . Esto *no* es casualidad; ¿sabe usted por qué?

Polarización circular y elíptica

La luz y otro tipo de radiación electromagnética también tienen polarización *circular* o *elíptica*. Para presentar estos conceptos, volvamos una vez más a las ondas mecánicas en una cuerda estirada. En la figura 33.21, suponga que 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. Si reflexionamos un poco, vemos que la onda resultante se encuentra en un plano orientado a 45° con respecto a los ejes *y* y *z* (es decir, en un plano que forma un ángulo de 45° con los planos *xy* y *xz*). La amplitud de la onda resultante es más grande

en un factor de $\sqrt{2}$ que el de cualquiera de las ondas componentes, y la onda resultante está linealmente polarizada.

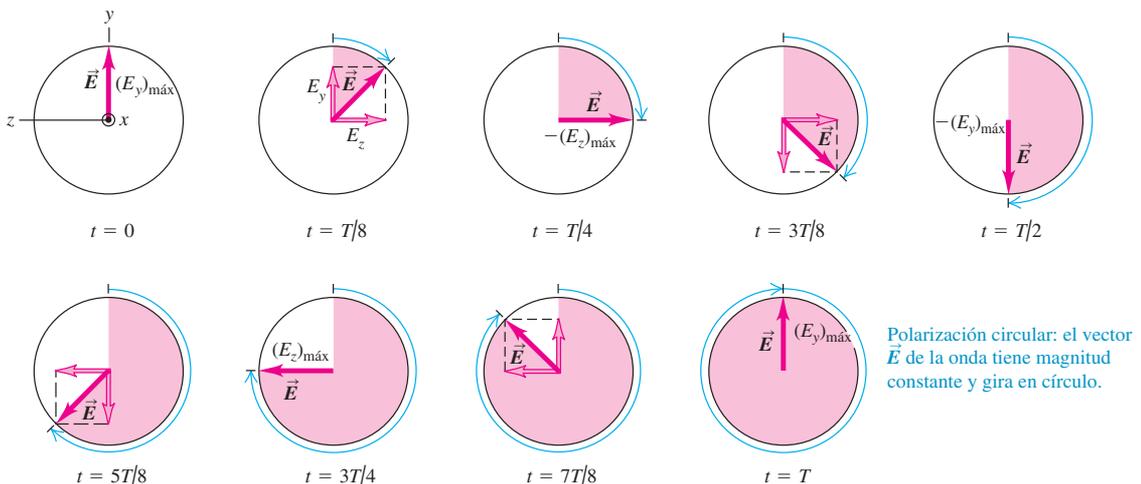
Pero ahora suponga que las dos ondas de igual amplitud difieren en su fase por un cuarto de ciclo. En ese caso, el movimiento resultante de cada punto corresponde a una superposición de dos movimientos armónicos simples en ángulo recto, con una diferencia de fase de un cuarto de ciclo. El desplazamiento y en un punto es máximo en los momentos en que el desplazamiento z es igual a 0 y viceversa. El movimiento de la cuerda como un todo entonces ya no tiene lugar en un solo plano. Puede demostrarse que cada punto de la cuerda se mueve en un *círculo* en un plano paralelo al plano yz . Puntos sucesivos de la cuerda tienen diferencias de fases sucesivas, y el movimiento de la cuerda en conjunto tiene el aspecto de una hélice giratoria. Esto se ilustra a la izquierda del filtro polarizador que aparece en la figura 33.21c. Esta superposición particular de dos ondas linealmente polarizadas se llama **polarización circular**. Por convención, se dice que la onda está *circularmente polarizada por la derecha* cuando el sentido del movimiento de una partícula en la cuerda, para un observador que mira *hacia atrás* a lo largo de la dirección de propagación, es el *sentido horario*; se dice que la onda está *circularmente polarizada por la izquierda* si el sentido del movimiento es el inverso.

La figura 33.30 presenta la situación análoga para una onda electromagnética. Están superpuestas 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 que el vector \vec{E} en cada punto tiene magnitud constante, pero *gira* en torno a la dirección de propagación. La onda de la figura 33.30 se propaga hacia el lector y el vector \vec{E} parece girar en el sentido horario, por lo que se denomina onda electromagnética *circularmente polarizada por la derecha*. Si en vez de ello, el vector \vec{E} de una onda que va hacia usted parece girar en el sentido antihorario, se llama onda electromagnética *circularmente polarizada por la izquierda*.

Si la diferencia de fase entre las dos ondas componentes es distinta de un cuarto de ciclo, o si las dos ondas componentes tienen amplitudes diferentes, entonces cada punto de la cuerda traza no un círculo, sino una *elipse*. En este caso, se dice que la onda está **elípticamente polarizada**.

En el caso de ondas electromagnéticas con frecuencias de radio, se puede crear una polarización circular o elíptica mediante dos antenas situadas 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 la luz, el desplazamiento de fase se introduce empleando un material que presente *birrefringencia*, es decir, que tenga diferentes índices de refracción ante distintas direcciones de polarización. Un ejemplo conocido es el de la calcita (CaCO_3). Cuando un cristal de calcita se orienta en forma

33.30 Polarización circular de una onda electromagnética que se desplaza paralelamente al eje x . La componente y de \vec{E} se retrasa un cuarto de ciclo con respecto a la componente z . Esta diferencia de fase da por resultado una polarización circular por la derecha.



33.31 Análisis de tensiones fotoelásticas de un modelo de la sección transversal de una catedral gótica. La construcción de mampostería que se usaba en esta clase de edificaciones tenía una gran resistencia a la compresión, pero muy poca a la tensión (véase la sección 11.4). Los vientos intensos y un refuerzo inadecuado con contrafuertes provocaban en ocasiones esfuerzos de tensión en elementos estructurales normalmente comprimidos, los cuales han sido causa de varios derrumbes estrepitosos.



apropiada en un haz de luz no polarizada, su índice de refracción (con una longitud de onda en el vacío de 589 nm) es 1.658 con una dirección de polarización, y 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 cuando ingresan al material, en general, ya no estarán en fase cuando salgan. 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*. Esa placa también convierte la luz circularmente polarizada en luz linealmente polarizada. ¿Podría usted probarlo? (Véase el problema 33.43.)

Fotoelasticidad

Algunos materiales ópticos que normalmente no tienen birrefringencia, adquieren esta propiedad cuando se someten a esfuerzo mecánico. Ésta es la base de la ciencia de la *fotoelasticidad*. Es posible analizar los esfuerzos en vigas, chapas de calderas, dientes de engranes y pilares de las catedrales elaborando un modelo transparente del objeto, por lo general con un material plástico, para luego someterlo a esfuerzos y examinarlo entre un polarizador y un analizador en posición cruzada. Con estos métodos ópticos se han estudiado distribuciones de esfuerzos muy complicadas.

La figura 33.31 presenta la fotografía de un modelo fotoelástico sometido a esfuerzos. La luz polarizada que entra al modelo se puede concebir como si tuviera una componente a lo largo de las dos direcciones del plástico birrefringente. Como estas dos componentes viajan a través del plástico con diferente rapidez, la luz que sale por el otro lado del modelo puede tener una dirección general distinta de polarización. Entonces, algo de esta luz transmitida será capaz de pasar a través del analizador aun cuando su eje de polarización forme un ángulo de 90° con el eje del polarizador, y las áreas sometidas a esfuerzo en el plástico aparecerán como puntos brillantes. La cantidad de birrefringencia es distinta para longitudes de onda diferentes; de ahí los distintos colores de luz. El color que aparece en cada ubicación de la figura 33.31 es aquél para el que la luz transmitida está más cerca de estar polarizada a lo largo del eje de polarización del analizador.

Evalúe su comprensión de la sección 33.5 Suponga que usted toma una fotografía de un edificio de oficinas muy alto, iluminado por la luz solar. Con la finalidad de reducir al mínimo las reflexiones de las ventanas del edificio, coloca un filtro polarizador en la lente de la cámara. ¿Cómo debería orientar el filtro? i) con el eje del polarizador vertical; ii) con el eje del polarizador horizontal; iii) cualquier orientación reducirá al mínimo las reflexiones; iv) ninguna orientación tendrá un efecto apreciable.

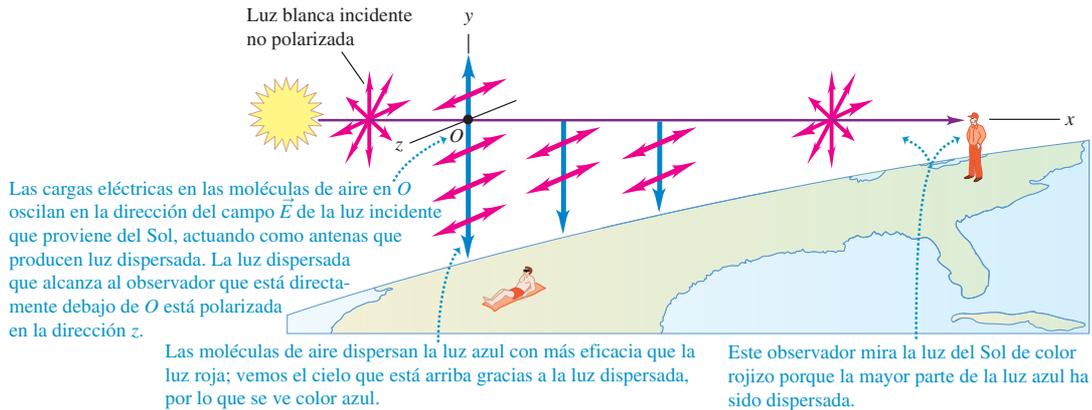


*33.6 Dispersión de la luz

El cielo es azul. Los atardeceres son rojos. La luz del cielo está parcialmente polarizada; ésa es la razón por la que el cielo se ve más oscuro desde ciertos ángulos que desde otros cuando se ve a través de anteojos Polaroid de sol. Como se verá, un solo fenómeno es el responsable de todos estos efectos.

Cuando usted mira el cielo durante el día, la luz que observa es la del Sol que ha sido absorbida y vuelta a irradiar en diferentes direcciones. Este proceso se llama **dispersión**. (Si la Tierra no tuviera atmósfera, el cielo se vería tan negro durante el día como durante la noche, tal como lo ve un astronauta en el espacio o en la Luna; se vería la luz del Sol sólo mirándolo directamente, y las estrellas serían visibles durante el día.) La figura 33.32 muestra algunos de los detalles del proceso de dispersión. La luz del Sol, que no está polarizada, llega desde el lado izquierdo a lo largo del eje x y pasa sobre un observador que mira verticalmente hacia arriba a lo largo del eje y . (Nosotros observamos la situación lateralmente.) Considere que las moléculas de la atmósfera terrestre se localizan en el punto O . El campo eléctrico en el haz de luz solar hace vibrar las cargas eléctricas de estas moléculas. Como la luz es una onda trans-

33.32 Cuando la persona que toma el sol a la izquierda de la ilustración mira hacia arriba, ve la luz solar polarizada, de color azul, que ha sido dispersada por las moléculas de aire. El observador a la derecha ve luz rojiza, no polarizada, si mira hacia el Sol.



versal, la dirección del campo eléctrico en cualquier componente de la luz solar se encuentra en el plano yz y el movimiento de las cargas tiene lugar en ese plano. No hay campo, y por lo tanto no hay movimiento de cargas, en la dirección del eje x .

Una onda de luz incidente coloca las cargas eléctricas de las moléculas en el punto O en vibración a lo largo de la línea de \vec{E} . Esta vibración se resuelve en dos componentes, una a lo largo del eje y y la otra a lo largo del eje 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 están a lo largo de los ejes y y 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 32.3 en la sección 32.1.) Así, la “antena” a lo largo del eje y no envía ninguna luz al observador ubicado directamente debajo de ella, aunque emite luz en otras direcciones. De esta forma, la única luz que llega al observador proviene de las otras “antenas” moleculares correspondientes a la oscilación de carga a lo largo del eje z . Esta luz está linealmente polarizada, con su campo eléctrico a lo largo del eje z (paralelo a la “antena”). Los vectores rojos sobre el eje y y abajo del punto O en la figura 33.32 indican la dirección de polarización de la luz que llega al observador.

Conforme el haz original de luz solar pasa a través de la atmósfera, su intensidad disminuye a medida que su energía pasa a la luz dispersa. El análisis detallado del proceso de dispersión revela que la intensidad de la luz dispersada por las moléculas del aire se incrementa en proporción a la cuarta potencia de la frecuencia (inversamente a la cuarta potencia de la longitud de onda). Así, la razón de la intensidad para los dos extremos del espectro visible es $(700 \text{ nm}/400 \text{ nm})^4 = 9.4$. En términos generales, la luz dispersada contiene nueve veces más luz azul que roja, y por eso el cielo es azul.

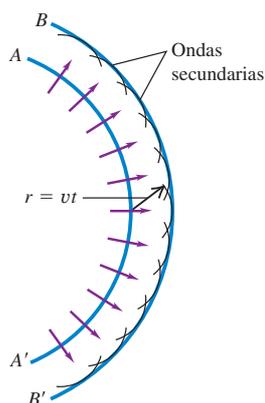
Las nubes contienen una gran concentración de gotas de agua o cristales de hielo, que también dispersan la luz. Como esta concentración es elevada, la luz que pasa a través de una nube tiene muchas más oportunidades de dispersarse que la luz que pasa a través de un cielo despejado. En consecuencia, luz de *todas* las longitudes de onda termina por ser dispersada fuera de la nube, y por eso la nube es de color blanco (figura 33.33). La leche se ve blanca por la misma razón; la dispersión se debe a los glóbulos de grasa de la leche. Si se diluye leche mezclándola con agua suficiente, la concentración de los glóbulos de grasa será tan baja que sólo se dispersará luz azul de manera significativa; por eso, tal disolución se verá azul, y no blanca. (La leche sin grasa, que también tiene una concentración muy baja de glóbulos, se ve azulosa por esa misma razón.)

Cerca del ocaso, cuando la luz del Sol tiene que recorrer una distancia más larga a través de la atmósfera de la Tierra, una fracción sustancial de luz azul es eliminada por la dispersión. La luz blanca menos la luz azul se ve de color amarillo o rojo. Esto explica el tono amarillo o rojo que es frecuente ver durante el ocaso (como puede constatar el observador en el extremo derecho de la figura 33.32).

33.33 Las nubes son blancas porque dispersan con mucha eficacia la luz solar de todas las longitudes de onda.

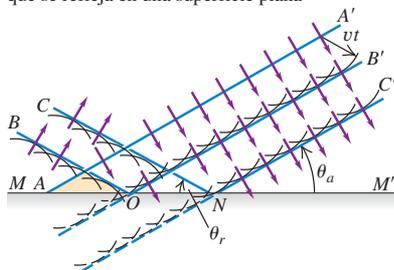


33.34 Aplicación del principio de Huygens al frente de onda AA' para construir un nuevo frente de onda BB' .

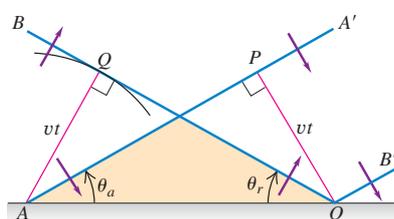


33.35 Aplicación del principio de Huygens para deducir la ley de la reflexión.

a) Posiciones sucesivas de una onda plana AA' que se refleja en una superficie plana



b) Detalle ampliado de a)



Puesto que la luz del cielo está parcialmente polarizada, los polarizadores son útiles en fotografía. El cielo que aparece en una fotografía se puede oscurecer si se orienta el eje del polarizador de manera que sea perpendicular a la dirección predominante de polarización de la luz dispersada. La luz con mayor grado de polarización proviene de aquellas partes del cielo que están a 90° con respecto al Sol; por ejemplo, del cenit cuando el Sol está en el horizonte durante el amanecer o el ocaso.

33.7 Principio de Huygens

Las leyes de reflexión y refracción de los rayos de luz que presentamos en la sección 33.2 fueron descubiertas de manera empírica mucho antes de que la naturaleza ondulatoria de la luz se hubiera establecido sobre bases firmes. Sin embargo, es posible *deducir* esas leyes a partir de consideraciones referentes a las ondas y demostrarse que son congruentes con la naturaleza ondulatoria de la luz. El mismo tipo de análisis que usamos aquí tendrá importancia central en los capítulos 35 y 36 cuando estudiemos óptica física.

Comenzaremos con el llamado **principio de Huygens**. Este principio, establecido por primera vez por el científico holandés Christiaan Huygens en 1678, es un método geométrico para encontrar, a partir de la forma conocida de un frente de onda en un instante determinado, la forma que tiene ese frente de onda cierto tiempo después. Huygens supuso que **todo punto de un frente de onda puede considerarse la fuente de ondas secundarias que se dispersan en todas direcciones con rapidez igual a la rapidez de la propagación de la onda original**. El nuevo frente de onda en un momento posterior se obtiene entonces construyendo una superficie *tangente* a las ondas secundarias, conocida como *envolvente* de esas ondas. Todos los resultados que se obtienen con el principio de Huygens también se obtienen a partir de las ecuaciones de Maxwell, de manera que no se trata de un principio independiente, y a menudo resulta muy útil para efectuar cálculos con fenómenos ondulatorios.

El principio de Huygens se ilustra en la figura 33.34. El frente de onda original AA' viaja hacia fuera de la fuente, como señalan las flechas. Queremos obtener la forma del frente de onda después de transcurrido un intervalo t de tiempo. Sea v la rapidez de propagación de la onda; por lo tanto, en un tiempo t la onda recorre una distancia vt . Construimos varios círculos (trazos de las ondas esféricas secundarias) con radio $r = vt$ con centro en los puntos a lo largo AA' . El trazo de la envolvente de estas ondas secundarias, que ahora 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.

La reflexión y el principio de Huygens

Para deducir la ley de reflexión a partir del principio de Huygens, consideremos una onda plana que se acerca a una superficie reflectante plana. En la figura 33.35a, las rectas AA' , OB' y NC' representan posiciones sucesivas de un frente de onda que avanza hacia la superficie MM' . El punto A sobre el frente de onda AA' acaba de llegar a la superficie reflectante. Podemos aplicar el principio de Huygens para encontrar la posición del frente de onda después de transcurrido un intervalo de tiempo t . Con los puntos sobre AA' como centros, se dibujan varias ondas secundarias con radio vt . Las ondas secundarias que se originan cerca del extremo superior de AA' se dispersan sin encontrar obstáculos, y su envolvente da la parte OB' del nuevo frente de onda. Si la superficie reflectante no estuviera ahí, las ondas secundarias que se originan cerca del extremo inferior de AA' alcanzarían de manera similar las posiciones mostradas por los arcos circulares discontinuos. En vez de ello, estas ondas secundarias inciden en la superficie reflectante.

El efecto de la superficie reflectante consiste en *cambiar la dirección* de propagación de las ondas secundarias que inciden en ella, por lo que parte de una onda secundaria que hubiera penetrado en la superficie en realidad se encuentra a la izquierda de ella, como lo ilustran las líneas continuas. La primera de tales ondas secundarias tiene su centro en el punto A ; la envolvente de todas las ondas secundarias reflejadas es la parte OB del frente de onda. El trazo del frente de onda completo en este instante es la línea quebrada BOB' . Una construcción similar genera la línea CNC' para el frente de onda después de transcurrido otro intervalo t .

Gracias a la geometría plana sabemos que el ángulo θ_a entre el frente de onda incidente y la superficie es el mismo que aquél entre el rayo incidente y la normal a la superficie, de manera que corresponde al ángulo de incidencia. De forma similar, θ_r es el ángulo de reflexión. Para encontrar la relación entre estos ángulos, consideremos la figura 33.35b. A partir de O se dibuja $OP = vt$, perpendicular a AA' . Ahora OB , por construcción, es tangente a un círculo de radio vt con centro en A . Si se dibuja AQ desde A hacia el punto de tangencia, los triángulos APO y OQA son congruentes porque son triángulos rectángulos con el lado AO en común y con $AQ = OP = vt$. Por lo tanto, el ángulo θ_a es igual al ángulo θ_r , y tenemos así la ley de la reflexión.

La refracción y el principio de Huygens

La ley de la refracción se deduce mediante un procedimiento similar. En la figura 33.36a consideremos un frente de onda representado por la recta AA' , para el cual el punto A acaba de llegar a la superficie de frontera 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 . (Las ondas reflejadas no se ilustran en la figura; éstas se comportan exactamente como en la figura 33.35.) Podemos aplicar el principio de Huygens para determinar la posición de los frentes de onda refractados después de cierto intervalo 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, después de cierto intervalo de tiempo t , son superficies esféricas de radio $v_a t$. Sin embargo, la onda secundaria que se origina en el punto A viaja 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 secundarias desde el frente de onda original es el plano cuyo trazo es la línea quebrada BOB' . Una construcción similar da como resultado el trazo CPC' después de un segundo intervalo t .

Los ángulos θ_a y θ_b entre la superficie y los frentes de onda incidente y refractado son el ángulo de incidencia y el de refracción, respectivamente. Para encontrar la relación entre esos ángulos, consulte la figura 33.36b. Dibujamos $OQ = v_a t$ perpendicular a AQ , y $AB = v_b t$ perpendicular a BO . Del triángulo rectángulo AOQ resulta,

$$\text{sen } \theta_a = \frac{v_a t}{AO}$$

y del triángulo rectángulo AOB ,

$$\text{sen } \theta_b = \frac{v_b t}{AO}$$

Éstos se combinan y se obtiene

$$\frac{\text{sen } \theta_a}{\text{sen } \theta_b} = \frac{v_a}{v_b} \tag{33.9}$$

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

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

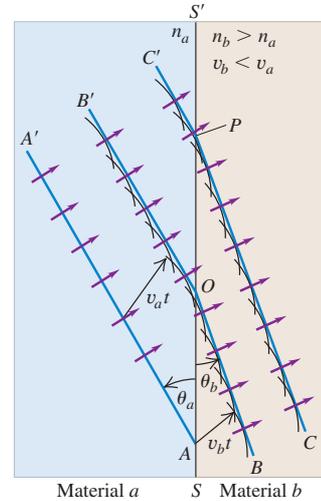
y la ecuación (33.9) se rescribe como

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

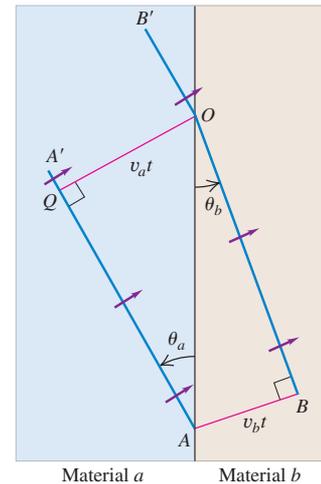
que reconocemos como la ley de Snell, ecuación (33.4). Así, hemos obtenido la ley de Snell a partir de una teoría ondulatoria. De forma alternativa elegimos considerar la ley de Snell como un resultado experimental que define el índice de refracción de un

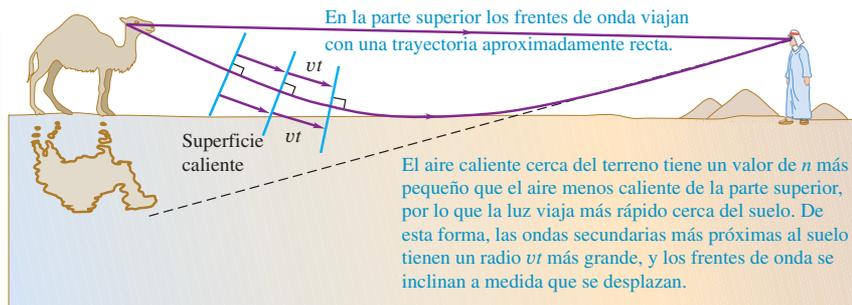
33.36 Aplicación del principio de Huygens para deducir la ley de la refracción. Se presenta el caso $v_b < v_a$ ($n_b > n_a$).

a) Posiciones sucesivas de una onda plana AA' que se refracta una superficie plana



b) Detalle ampliado de a)



33.37 Formación de un espejismo.

material; en tal caso, este análisis ayuda 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 la superficie del pavimento o la arena del desierto se calientan mucho por la acción de los rayos solares, cerca de la superficie se forma una capa de aire caliente, menos densa y de menor n . La rapidez de la luz es un poco mayor en el aire caliente cerca del suelo, las ondas secundarias de Huygens tienen radios ligeramente más grandes, los frentes de onda se inclinan levemente, y los rayos que se dirigen hacia la superficie con un ángulo de incidencia grande (casi de 90°) se flexionan como se ilustra en la figura 33.37. La luz lejos del terreno se desvía menos y viaja casi en línea recta. El observador mira el objeto en su posición natural, con una imagen invertida debajo, como si estuviera en una superficie reflectante horizontal. Aun cuando la turbulencia del aire caliente impide que se forme una imagen invertida clara, la mente del viajero sediento interpreta la superficie aparentemente reflectante como un cuerpo de agua.

Es importante recordar que las ecuaciones de Maxwell son las relaciones fundamentales de la propagación de las ondas electromagnéticas, pero es notable que el principio de Huygens se anticipara dos siglos al análisis de Maxwell, quien estableció la base teórica del principio de Huygens. Cada punto de una onda electromagnética, con sus campos eléctrico y magnético variables en el tiempo, actúa como fuente de una onda continua, según predicen las leyes de Ampère y de Faraday.

Evalúe su comprensión de la sección 33.7 El sonido viaja más rápido en el aire caliente que en el aire frío. Imagine un frente meteorológico que corre de norte a sur, con el aire cálido al oeste del frente y el aire frío en el este. Una onda sonora que viajara en dirección noreste en el aire caliente encuentra a este frente. ¿Cómo cambiará la dirección de la onda de sonido al pasar al aire frío? i) La dirección de la onda se desviará hacia el norte; ii) la dirección se desviará hacia el este; iii) la dirección de la onda no cambiará. ■

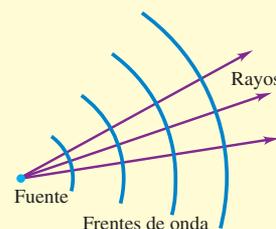
CAPÍTULO 33 RESUMEN

La luz y sus propiedades: La luz es una onda electromagnética. Cuando es emitida o absorbida también presenta propiedades de partícula. Es emitida por cargas eléctricas en aceleración. La rapidez de la luz en el vacío es una constante física fundamental.

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

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

Un frente de onda es una superficie de fase constante; los frentes de onda se desplazan con rapidez igual a la de propagación de la onda. Un rayo es una línea recta 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 cambia, pero la longitud de onda y la rapidez de onda pueden cambiar. El índice de refracción n de un material es la razón entre la rapidez de la luz en el vacío c y su rapidez v en el material. Si λ_0 es la longitud de onda en el vacío, la misma onda tiene una longitud más corta λ en un medio con un índice de refracción n . (Véase el ejemplo 33.2.)

La variación del índice de refracción n con la longitud de onda λ se llama dispersión. Por lo general, n disminuye cuando λ aumenta.

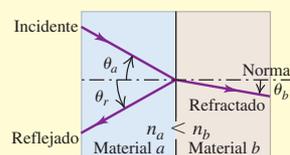
Reflexión y refracción: En una interfaz lisa entre dos materiales ópticos, los rayos incidente, reflejado y refractado, así como la normal a la interfaz, yacen todos en un solo plano llamado plano de incidencia. La ley de reflexión establece que los ángulos de incidencia y refracción son iguales. La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

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

(ley de reflexión)

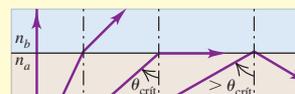
$$n_a \sin \theta_a = n_b \sin \theta_b \quad (33.4)$$

(ley de refracción)



Reflexión interna total: Cuando un rayo viaja en un material de índice de refracción mayor n_a hacia un material con menor índice n_b , ocurre la reflexión interna total en la interfaz cuando el ángulo de incidencia excede el ángulo crítico θ_{crit} . (Véase el ejemplo 33.4.)

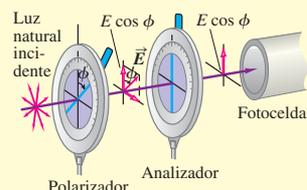
$$\sin \theta_{\text{crit}} = \frac{n_b}{n_a} \quad (33.6)$$



Polarización de la luz: La dirección de polarización de una onda electromagnética linealmente polarizada es la dirección del campo \vec{E} . Un filtro polarizador deja pasar ondas linealmente polarizadas a lo largo de su eje de polarización y bloquea aquellas perpendicularmente polarizadas con respecto a ese eje. Cuando luz polarizada con intensidad $I_{\text{máx}}$ incide en un filtro polarizador que se usa como analizador, la intensidad I de la luz transmitida a través del analizador 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.) Cuando se superponen dos ondas linealmente polarizadas con una 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 contenga la dirección de propagación, sino que describe círculos o elipses en planos perpendiculares a la dirección de propagación.

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

(ley de Malus)

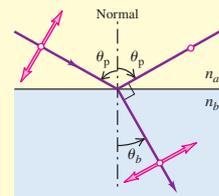


La luz es dispersada por las moléculas del aire. La luz dispersada está parcialmente polarizada.

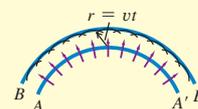
Polarización por reflexión: Cuando luz no polarizada incide en una interfaz entre dos materiales, la ley de Brewster establece que la luz reflejada está completamente polarizada en forma perpendicular al plano de incidencia (paralela a la interfaz) si el ángulo de incidencia es igual al ángulo de polarización θ_p . (Véase el ejemplo 33.6.)

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

(ley de Brewster)



Principio de Huygens: El principio de Huygens establece que si se conoce la posición de un frente de onda en cierto instante, entonces la posición del frente en un momento posterior se puede construir imaginando el frente como una fuente de ondas secundarias. El principio de Huygens se puede usar para deducir las leyes de la reflexión y la refracción.



Términos clave

óptica, 1121
frente de onda, 1122
rayo, 1123
óptica geométrica, 1123
óptica física, 1123
reflexión, 1123
refracción, 1123
reflexión especular, 1124
reflexión difusa, 1124
índice de refracción, 1124

ley de la reflexión, 1125
ley de la refracción (ley de Snell), 1125
ángulo crítico, 1130
reflexión interna total, 1130
dispersión, 1132
linealmente polarizada, 1134
filtro polarizador (polarizador), 1134
luz no polarizada (luz natural), 1136
dicroísmo, 1136
eje de polarización, 1136

ley de Malus, 1138
plano de incidencia, 1139
ángulo de polarización, 1139
ley de Brewster, 1139
polarización circular, 1141
polarización elíptica, 1141
dispersión, 1142
principio de Huygens, 1144

Respuesta a la pregunta de inicio de capítulo ?

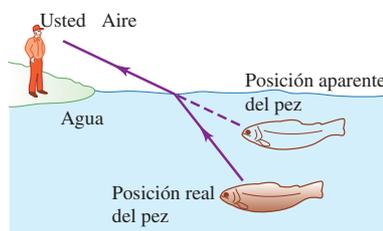
Éste es el mismo efecto que se ilustra en la figura 33.31. Las herramientas de dibujo están colocadas entre dos filtros polarizadores cuyos ejes de polarización son perpendiculares. En los sitios en que el plástico transparente está sometido a esfuerzo, se vuelve birrefringente; es decir, la luz viaja a través de él con una rapidez que depende de su polarización. El resultado es que la luz que sale del plástico tiene una polarización distinta que la de la luz que entra. Un punto en el plástico se ve brillante si la luz que sale tiene la misma polarización que el segundo filtro polarizador. La cantidad de birrefringencia depende de la longitud de onda de la luz, así como de la cantidad de esfuerzo que se ejerce sobre el plástico, por lo que en diferentes lugares del plástico se observan distintos colores.

Respuestas a las preguntas de evalúe su comprensión

33.1 Respuesta: iii) Las ondas viajan más lejos en la dirección y que en las otras direcciones en una cantidad de tiempo dada, de manera que los frentes de onda están alargados en la dirección y .

33.2 Respuestas: a) ii, b) iii) Como se aprecia en la figura, los rayos de luz que provienen del pez se desvían alejándose de la normal cuando pasan del agua ($n = 1.33$) al aire ($n = 1.00$). Como resultado, el pez parece estar más cerca de la superficie del agua de lo que realmente está.

Por lo tanto, se debe apuntar el arpón *más abajo* de la posición aparente del pez. Si se utiliza un rayo láser, se debe apuntar *hacia* la posición aparente del pez: el haz de luz láser seguiría la misma trayectoria que va de usted al pez que la luz ordinaria que va del pez a usted (aunque en sentido opuesto).



33.3 Respuestas: i), ii) La reflexión interna total ocurre sólo si se cumplen dos condiciones: n_b debe ser menor que n_a , y el ángulo crítico θ_{crit} (donde $\text{sen } \theta_{\text{crit}} = n_b/n_a$) debe ser más pequeño que el ángulo de incidencia θ_a . En los primeros dos casos se satisfacen ambas condiciones: los ángulos críticos son i) $\theta_{\text{crit}} = \text{sen}^{-1}(1/1.33) = 48.8^\circ$ y ii) $\theta_{\text{crit}} = \text{sen}^{-1}(1.33/1.52) = 61.0^\circ$, los dos son más pequeños que $\theta_a = 70^\circ$. En el tercer caso, $n_b = 1.52$ es mayor que $n_a = 1.33$, por lo que la reflexión interna total no puede ocurrir a ningún ángulo de incidencia.

33.5 Respuesta: ii) La luz solar reflejada en las ventanas del edificio alto está parcialmente polarizada en la dirección vertical, ya que cada ventana yace en un plano vertical. El filtro Polaroid enfrente de la lente está orientado con su eje de polarización perpendicular a la dirección de polarización dominante de la luz reflejada.

33.7 Respuesta: ii) El principio de Huygens se aplica a las ondas de todas clases, incluidas las sonoras. Por consiguiente, esta situación es

exactamente la que se ilustra en la figura 33.36, donde el material a representa el aire caliente, el material b representa el aire frío en el que las ondas viajan con más lentitud, y la interfaz entre los materiales representa el frente del aire. El norte se encuentra hacia la parte superior de la figura y el este hacia la derecha, así que la figura 33.36 indica que los rayos (que señalan la dirección de propagación) se desvían hacia el este.

PROBLEMAS

Para las tareas asignadas por el profesor, visite www.masteringphysics.com



Preguntas para análisis

P33.1. La luz tarda cerca de ocho minutos en viajar del Sol a la Tierra. ¿La atmósfera terrestre la retrasa en forma apreciable? Explique su respuesta.

P33.2. La luz del Sol o de las estrellas que pasan a través de la atmósfera de la Tierra siempre se desvía hacia la vertical. ¿Por qué? ¿Significa esto que una estrella no se encuentra en realidad donde parece estar? Explique su respuesta.

P33.3. Un haz de luz pasa de un material a otro. En términos *físicos*, explique *por qué* cambia la longitud de onda, pero no la frecuencia ni el periodo.

P33.4. Un estudiante afirma que debido a la refracción atmosférica (véase la pregunta para análisis P33.2), el Sol puede verse después de que se ha puesto y que entonces el día es más largo de lo que sería si la Tierra no tuviera atmósfera. En primer lugar, ¿qué quiere decir el estudiante con que el Sol se puede ver después de que se puso? Luego, comente la validez de esa conclusión.

P33.5. Cuando sale aire caliente de un radiador o un conducto caliente, los objetos tras él parecen vibrar u ondular. ¿Cuál es la causa de esto?

P33.6. Idee experimentos directos para medir la rapidez de la luz en un vidrio dado empleando *a)* la ley de Snell, *b)* la reflexión interna total, *c)* la ley de Brewster.

P33.7. A veces, al mirar a través de una ventana, se observan dos imágenes reflejadas desplazadas ligeramente una con respecto a la otra. ¿A qué se debe esto?

P33.8. Si se mira desde abajo hacia la superficie del agua en un acuario, se verá un reflejo invertido de los peces en la superficie de ésta. Explique cómo sucede esto.

P33.9. Un rayo de luz en el aire incide en una superficie de vidrio. ¿Hay algún intervalo de ángulos para los cuales ocurre la reflexión total? Explique su respuesta.

P33.10. Cuando la luz incide en una interfaz entre dos materiales, el ángulo del rayo refractado depende de la longitud de onda, pero el ángulo del rayo reflejado no. ¿Por qué es así?

P33.11. Un vendedor afirma que cierto par de anteojos tiene filtros Polaroid; usted sospecha que los vidrios tan sólo son plástico teñido. ¿Cómo podría saberlo con certeza?

P33.12. ¿Tiene sentido hablar acerca de la polarización de una onda *longitudinal* como las del sonido? ¿Por qué?

P33.13. ¿Cómo se puede determinar la dirección del eje de polarización de un polarizador único?

P33.14. Se ha propuesto que los parabrisas de los automóviles y los faros deberían tener filtros polarizadores con la finalidad de disminuir el resplandor de las luces cuando los vehículos se acercan de frente mientras se maneja de noche. ¿Funcionaría esto? ¿Cómo habría que disponer los ejes de polarización? ¿Qué ventajas tendría esta medida? ¿Qué desventajas?

P33.15. Cuando se coloca una hoja de envoltura de plástico para comida entre dos polarizadores cruzados, no se transmite luz. Cuando la hoja se estira en una dirección, algo de luz pasa a través de los polarizadores cruzados. ¿Qué es lo que pasa?

P33.16. Si usted se sienta en la playa y mira al océano a través de unos anteojos Polaroid, éstos le ayudan a reducir el resplandor de la luz solar que se refleja en el agua. Pero si se recuesta de costado en la playa, es poco lo que se reduce la reverberación. Explique a qué se debe la diferencia.

P33.17. Cuando la luz no polarizada incide en dos polarizadores cruzados, no se transmite luz. Un estudiante afirmó que si se insertaba un tercer polarizador entre los otros dos, habría algo de transmisión. ¿Tiene sentido esto? ¿Cómo podría un tercer filtro *incrementar* la transmisión?

P33.18. Para las antenas antiguas de “tipo conejo”, es posible alterar la calidad de la recepción considerablemente con sólo cambiar la orientación de la antena. ¿Por qué?

P33.19. En la figura 33.32, si la luz que se dispersa hacia fuera del rayo incidente está polarizada, ¿por qué el haz transmitido no está también polarizado parcialmente?

P33.20. Usted toma un baño de sol ya avanzada la tarde, cuando el Sol está relativamente bajo en el cielo del hemisferio occidental. Está acostado sobre su espalda, y ve directamente hacia arriba a través de sus anteojos Polaroid. Para reducir al mínimo la cantidad de luz del cielo que llega a sus ojos, ¿cómo debería recostarse: con sus pies hacia el norte, el este, el sur, el oeste o en alguna otra dirección? Explique su razonamiento.

P33.21. La luz dispersada del cielo azul está muy polarizada debido a la naturaleza del proceso de dispersión que se describió en la sección 33.6. Pero la luz dispersada de las nubes blancas *no* está polarizada por lo general. ¿Por qué?

P33.22. La bruma atmosférica se debe a las gotas de agua o partículas de humo (“smog”). Esa niebla reduce la visibilidad porque dispersa la luz, por lo que la luz procedente de objetos distantes se hace aleatoria y las imágenes son indistinguibles. Explique por qué la visibilidad a través de la niebla mejora si se usan anteojos teñidos de rojo, los cuales eliminan la luz azul por filtración.

P33.23. La explicación que se dio en la sección 33.6 para el color del Sol cuando se oculta debería aplicarse igualmente al Sol *cundo sale*, ya que la luz solar viaja la misma distancia a través de la atmósfera para llegar a los ojos de un observador durante el amanecer o durante el ocaso; sin embargo, lo común es que los atardeceres sean más rojos que los amaneceres. ¿Por qué? (*Sugerencia:* considere que partículas de todas clases en la atmósfera contribuyen a la dispersión.)

P33.24. El principio de Huygens también se aplica a las ondas sonoras. Durante el día, la temperatura de la atmósfera disminuye conforme aumenta la altitud con respecto al suelo. Pero en la noche, cuando el suelo se enfría, hay una capa de aire justo arriba de la superficie en la cual la temperatura *aumenta* con la altitud. Use esto para explicar por qué las ondas sonoras procedentes de fuentes distantes se oyen con más claridad en la noche que en el día. (*Sugerencia:* considere que la rapidez del sonido aumenta al incrementarse la temperatura. Use las ideas descritas en la figura 33.37 para la luz.)

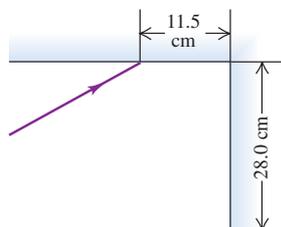
P33.25. Las ondas en el agua, ¿pueden reflejarse y refractarse? Dé algunos ejemplos. ¿El principio de Huygens se aplica a las ondas en el agua? Explique su respuesta.

Ejercicios

Sección 33.2 Reflexión y refracción

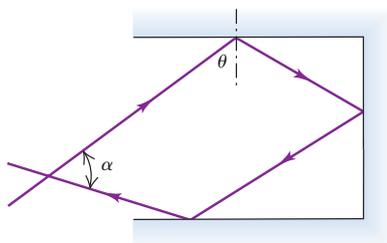
33.1. Dos espejos planos se intersecan en ángulos rectos. Un rayo láser incide en el primero de ellos en un punto situado a 11.5 cm de la intersección, como se ilustra en la figura 33.38. ¿Para qué ángulo de incidencia en el primer espejo el rayo incidirá en el punto medio del segundo (que mide 28.0 cm de largo) después de reflejarse en el primer espejo?

Figura 33.38 Ejercicio 33.1.



33.2. Tres espejos planos se intersecan en ángulos rectos. Un haz de luz láser incide en el primero de ellos con un ángulo θ con respecto a la normal (figura 33.39). *a)* Demuestre que cuando este rayo se refleja en los otros dos espejos y cruza el rayo original, el ángulo α entre los dos rayos será $\alpha = 180^\circ - 2\theta$. *b)* ¿Para qué ángulo θ los rayos serán perpendiculares cuando se crucen?

Figura 33.39 Ejercicio 33.2.



33.3. Un haz de luz tiene una longitud de onda de 650 nm en el vacío. *a)* ¿Cuál es la rapidez de esta luz en un líquido cuyo índice de refracción a esta longitud de onda es de 1.47? *b)* ¿Cuál es la longitud de onda de estas ondas en el líquido?

33.4. Luz con frecuencia de 5.80×10^{14} Hz viaja en un bloque de vidrio cuyo índice de refracción es de 1.52. ¿Cuál es la longitud de onda de la luz *a)* en el vacío *b)* en el vidrio?

33.5. Un haz de luz viaja a 1.94×10^8 m/s en el cuarzo. La longitud de onda de la luz en el cuarzo es de 355 nm. *a)* ¿Cuál es el índice de refracción del cuarzo a esta longitud de onda? *b)* Si esta misma luz viaja a través del aire, ¿cuál es su longitud de onda?

33.6. Luz de cierta frecuencia tiene una longitud de onda de 438 nm en el agua. ¿Cuál es su longitud de onda en el benceno?

33.7. Un haz paralelo de luz en el aire forma un ángulo de 47.5° con la superficie de una placa de vidrio que tiene un índice de refracción de 1.66. *a)* ¿Cuál es el ángulo entre la parte reflejada del haz y la superficie del vidrio? *b)* ¿Cuál es el ángulo entre el haz reflejado y la superficie del vidrio?

33.8. Utilizando un láser de pulsos rápidos y circuitos electrónicos cronométricos, usted observa que la luz viaja 2.50 m dentro de una varilla de plástico en 11.5 ns. ¿Cuál es el índice de refracción del plástico?

33.9. Luz que viaja en el aire incide sobre la superficie de un bloque de plástico con un ángulo de 62.7° con respecto a la normal y se desvía de manera que forma un ángulo de 48.1° con la normal en el plástico. Determine la rapidez de la luz en el plástico.

33.10. *a)* Un tanque que contiene metanol tiene paredes con espesor de 2.50 cm hechas de vidrio con índice de refracción de 1.550. Luz procedente del aire exterior incide en el vidrio a un ángulo de 41.3° con la normal al vidrio. Calcule el ángulo que forma la luz con la normal en el metanol. *b)* El tanque se vacía y se vuelve a llenar con un líquido desconocido. Si la luz que incide al mismo ángulo que en el inciso *a)* entra en el líquido del tanque a un ángulo de 20.2° con respecto a la normal, ¿cuál es el índice de refracción del líquido desconocido?

33.11. *a)* A través de tres bloques paralelos con diferentes espesores e índices de refracción, pasa luz que incide en el primer bloque y finalmente se refracta en el tercero. Demuestre que el bloque de en medio no tiene efecto en la dirección final de la luz. Es decir, demuestre que la dirección de la luz en el tercer bloque es la misma que si la luz pasara directamente del primero al tercero. *b)* Generalice este resultado a una pila de N bloques. ¿Qué es lo que determina la dirección final de la luz en el último bloque?

33.12. Una placa de vidrio horizontal de lados paralelos tiene índice de refracción de 1.52 y está en contacto con la superficie de agua en un tanque. Un rayo que llega desde arriba a través del aire forma un ángulo de incidencia de 35.0° con la normal a la superficie superior del vidrio. *a)* ¿Qué ángulo forma el rayo refractado en el agua con la normal a la superficie? *b)* ¿Cómo depende este ángulo del índice de refracción del vidrio?

33.13. En cierto material con índice de refracción n , un rayo de luz tiene frecuencia f , longitud de onda λ y rapidez v . ¿Cuáles son la frecuencia, longitud de onda y rapidez de esta luz *a)* en el vacío y *b)* en un material con índice de refracción n' ? En cada caso exprese sus respuestas en términos sólo de f , λ , v , n y n' .

33.14. Demuestre que un rayo de luz reflejado desde un espejo plano gira un ángulo de 2θ cuando el espejo gira un ángulo θ en torno a un eje perpendicular al plano de incidencia.

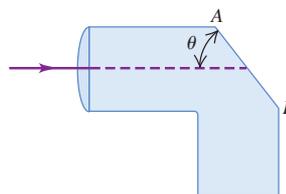
33.15. Un rayo de luz incide sobre una superficie plana que separa dos hojas de vidrio con índices de refracción de 1.70 y 1.58. El ángulo de incidencia es de 62.0° y el rayo se origina en el vidrio con $n = 1.70$. Calcule el ángulo de refracción.

33.16. En el ejemplo 33.1 la interfaz agua-vidrio es horizontal. Si en vez de ello, la interfaz estuviera inclinada 15.0° sobre la horizontal, con el lado derecho más alto que el izquierdo, ¿cuál sería el ángulo con respecto a la vertical que formaría el rayo en el vidrio? (El rayo en el agua todavía tiene un ángulo de 60.0° con respecto a la vertical.)

Sección 33.3 Reflexión interna total

33.17. Tubo de luz. Entra luz a un tubo sólido hecho de plástico con un índice de refracción de 1.60. La luz viaja en forma paralela a la parte superior del tubo (figura 33.40). Se desea cortar la cara AB de manera que toda la luz se refleje de regreso hacia el tubo después de que incide por primera vez en esa cara. *a)* ¿Cuál es el valor máximo de θ si el tubo está en el aire? *b)* Si el tubo se sumerge en agua, cuyo índice de refracción es de 1.33, ¿cuál es el máximo valor que puede tener θ ?

Figura 33.40 Ejercicio 33.17.



33.18. Un haz de luz que viaja dentro de un cubo de vidrio sólido con índice de refracción de 1.53 incide en la superficie del cubo desde su

interior. *a)* Si el cubo está en el aire, ¿cuál es el ángulo mínimo con la normal dentro del vidrio con la que esta luz *no* entraría en el aire en esta superficie? *b)* ¿Cuál sería el ángulo mínimo en el inciso *a)* si el cubo se sumergiera en agua?

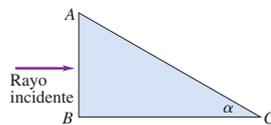
33.19. El ángulo crítico para la reflexión interna total en una interfaz líquido-aire es de 42.5° . *a)* Si un rayo de luz que viaja por el líquido tiene un ángulo de incidencia en la interfaz de 35.0° , ¿qué ángulo forma el rayo refractado en el aire con respecto a la normal? *b)* Si un rayo de luz que viaja en el aire tiene un ángulo de incidencia con la interfaz de 35.0° , ¿qué ángulo forma el rayo refractado en el líquido con respecto a la normal?

33.20. Al finalizar la serie de óperas de Wagner que lleva por título *El Anillo de los Nibelungos*, Brunilda quita el anillo de oro del cadáver de Sigfrido y lo arroja al río Rin, donde se va al fondo. Si se supone que el anillo es suficientemente pequeño en comparación con la profundidad del río como para considerarlo un punto, y que el río Rin tiene 10.0 m de profundidad en la parte en que cae la joya, ¿cuál es el área del círculo más grande en la superficie del agua adonde podría llegar luz emitida por el anillo y salir del agua?

33.21. Un rayo de luz viaja por un cubo de vidrio que está totalmente sumergido en agua. Usted descubre que si el rayo incide sobre la interfaz vidrio-agua a un ángulo mayor de 48.7° con respecto a la normal, ninguna luz se refracta en el agua. ¿Cuál es el índice de refracción del vidrio?

33.22. A lo largo la cara *AB* de un prisma de vidrio con índice de refracción de 1.52, incide luz, como se ilustra en la figura 33.41. Calcule el valor más grande que puede tener el ángulo α sin que se refracte ninguna luz hacia fuera del prisma por la cara *AC* si el prisma está inmerso *a)* en aire y *b)* en agua.

Figura 33.41 Ejercicio 33.22.



33.23. Un rayo de luz en un diamante (índice de refracción de 2.42) incide sobre una interfaz con aire. ¿Cuál es el ángulo máximo que puede formar el rayo con la normal sin reflejarse totalmente de regreso hacia el diamante?

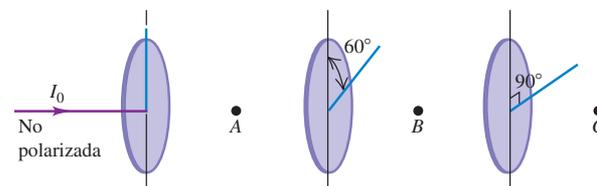
Sección 33.4 Dispersión

33.24. Un haz de luz incide en una hoja de vidrio a un ángulo de 57.0° con respecto a la normal en el aire. Usted observa que la luz roja forma un ángulo de 38.1° con la normal en el vidrio, mientras que la luz violeta forma un ángulo de 36.7° . *a)* ¿Cuáles son los índices de refracción de este vidrio para los colores de luz mencionados? *b)* ¿Cuál es la rapidez de la luz roja y violeta en el vidrio?

Sección 33.5 Polarización

33.25. Un haz de luz no polarizada con intensidad I_0 pasa a través de una serie de filtros polarizadores ideales con sus direcciones de polarización giradas en diferentes ángulos, como se aprecia en la figura 33.42. *a)* ¿Cuál es la intensidad de la luz (en términos de I_0) en los puntos *A*, *B* y *C*? *b)* Si se elimina el filtro de en medio, ¿cuál será la intensidad de la luz en el punto *C*?

Figura 33.42 Ejercicio 33.25.



33.26. Luz que viaja a través de agua incide en una placa de vidrio a un ángulo de incidencia de 53.0° ; una parte del haz se refleja y otra se refracta. Si las partes reflejada y refractada forman un ángulo de 90.0° entre sí, ¿cuál es el índice de refracción del vidrio?

33.27. Un haz paralelo de luz no polarizada en el aire incide con ángulo de 54.5° (con respecto a la normal) sobre una superficie plana de vidrio. El haz reflejado está linealmente polarizado por completo. *a)* ¿Cuál es el índice de refracción del vidrio? *b)* ¿Cuál es el ángulo de refracción del haz transmitido?

33.28. Luz con intensidad original I_0 pasa a través de dos filtros polarizadores ideales que tienen sus ejes de polarización orientados como se ilustra en la figura 33.43. Se desea ajustar el ángulo ϕ de manera que la intensidad en el punto *P* sea igual a $I_0/10$. *a)* Si la luz original no está polarizada, ¿cuál debe ser el valor de ϕ ? *b)* Si la luz original está linealmente polarizada en la misma dirección que el eje de polarización del primer polarizador que alcanza la luz, ¿cuánto debe valer ϕ ?

Figura 33.43 Ejercicio 33.28.



33.29. Un haz de luz polarizada pasa a través de un filtro polarizador. Cuando el ángulo entre el eje de polarización del filtro y la dirección de polarización de la luz es θ , la intensidad del haz que sale es I . Si se desea que ahora la intensidad sea de $I/2$, ¿cuál debe ser el ángulo (en términos de θ) entre el ángulo de polarización del filtro y la dirección original de polarización de la luz?

33.30. El índice de refracción de cierto vidrio es de 1.66. ¿A qué ángulo de incidencia estará totalmente polarizada la luz que se refleja en la superficie de este vidrio si está inmerso en *a)* aire y *b)* agua?

33.31. Sobre dos filtros polarizadores incide luz no polarizada con intensidad de 20.0 W/cm^2 . El eje del primer filtro está a un ángulo de 25.0° en sentido antihorario con respecto a la vertical (visto en la dirección en que viaja la luz), y el eje del segundo filtro está a 62.0° en sentido antihorario con respecto a la vertical. ¿Cuál es la intensidad de la luz una vez que ha pasado a través del segundo polarizador?

33.32. Un polarizador y un analizador están orientados de manera que se transmita la cantidad máxima de luz. ¿A qué fracción de su valor máximo se reduce la intensidad de la luz transmitida cuando el analizador se gira *a)* 22.5° , *b)* 45.0° , *c)* 67.5° ?

33.33. Tres filtros polarizadores. Tres filtros polarizadores están apilados con los ejes de polarización del segundo y el tercero a 45.0° y 90.0° , respectivamente, con respecto al eje del primero. *a)* Si sobre la pila de polarizadores incide luz no polarizada de intensidad I_0 , determine la intensidad y el estado de polarización de la luz que sale de cada filtro. *b)* Si se retira el segundo filtro, ¿cuál es la intensidad de la luz que emerge de cada uno de los filtros que permanecen?

33.34. Tres filtros polarizadores están apilados con los ejes de polarización del segundo y el tercero a 23.0° y 62.0° , respectivamente, en relación con el eje del primero. Si luz no polarizada incide sobre la pila, la luz tiene una intensidad de 75.0 W/cm^2 una vez que atraviesa la pila. Si la intensidad de la luz incidente se mantiene constante, ¿cuál es la intensidad de la luz una vez que ha pasado por la pila si se retira el segundo polarizador?

*Sección 33.6 Dispersión de la Luz

33.35. Un haz de luz blanca pasa a través de una capa aire con espesor uniforme. Si la intensidad de la luz dispersada en el medio de la parte

verde del espectro visible es I , calcule la intensidad (en términos de I) de la luz polarizada en el medio de a) la parte roja del espectro y b) la parte violeta del espectro. Consulte la tabla 32.1.

Sección 33.7 Principio de Huygens

33.36. Doblamiento en las esquinas. Las partículas en movimiento no “doblan” las esquinas, pero las ondas sí. Para ver por qué, suponga que un frente de onda plana incide en la arista de un objeto afilado mientras se mueve de manera perpendicular a la superficie (figura 33.44). Con base en el principio de Huygens, demuestre que esta onda se desviará alrededor de la arista superior del objeto. (Nota: este efecto, llamado *difracción*, se observa en las ondas en el agua, pero también ocurre con la luz, como se verá en los capítulos 35 y 36. Sin embargo, en la vida cotidiana no resulta muy evidente debido a la longitud de onda muy corta de la luz visible.)

Figura 33.44 Ejercicio 33.36.



Problemas

33.37. Reflector de vértice. El vértice interior de un cubo está cubierto con espejos que forman un reflector de vértice (véase el ejemplo 33.3 de la sección 33.2). Un rayo de luz se refleja sucesivamente en cada uno de tres espejos perpendiculares entre sí; demuestre que su dirección final siempre es exactamente la opuesta de su dirección inicial.

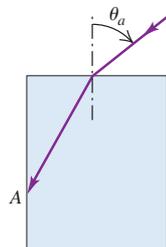
33.38. Un haz de luz se dirige paralelo al eje de un tubo cilíndrico hueco. Cuando el tubo sólo contiene aire, la luz tarda 8.72 ns recorrerlo en toda su longitud, pero cuando el tubo se llena de gelatina transparente el recorrido dura 2.04 ns más. ¿Cuál es el índice de refracción de la gelatina?

33.39. Luz que se propaga en un material con índice de refracción n_1 incide a un ángulo θ_1 con respecto a la normal en la interfaz con un bloque de material que tiene caras paralelas e índice de refracción n_2 . Después de que la luz pasa a través de ese material, se refracta en otro con índice de refracción n_3 con el que forma un ángulo θ_3 con respecto a la normal. *a)* Calcule θ_3 en términos de θ_1 , así como los índices de refracción de los materiales. *b)* Ahora se invierte el rayo en el tercer material, de manera que incida sobre la interfaz n_3 a n_2 con el ángulo θ_3 que se obtuvo en el inciso *a)*. Demuestre que cuando la luz se refracta en el material con índice de refracción n_1 , el ángulo que forma con la normal es θ_1 . Esto demuestra que el rayo refractado es reversible. *c)* ¿Los rayos reflejados son reversibles? Explique su respuesta.

33.40. En un laboratorio de física, un haz de luz con longitud de onda de 490 nm se propaga en aire de un láser a una fotocelda en 17.0 ns. Cuando se coloca un bloque de vidrio de 0.840 m de espesor ante el haz de luz, de manera que éste incida a lo largo de la normal a las caras paralelas del bloque, la luz tarda 21.2 ns en viajar del láser a la fotocelda. ¿Cuál es la longitud de onda de la luz en el vidrio?

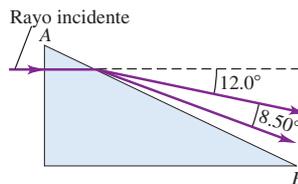
33.41. Un rayo de luz incide desde el aire sobre un bloque sólido transparente cuyo índice de refracción es n . Si $n = 1.38$, ¿cuál es el ángulo de incidencia *más grande* θ_a para el que ocurrirá la reflexión interna total en la cara vertical (punto A en la figura 33.45)?

Figura 33.45 Problema 33.41.



33.42. Un rayo de luz en el aire incide en el prisma rectangular que se ilustra en la figura 33.46. Este rayo consiste en dos longitudes de onda diferentes. Cuando emerge por la cara AB, se ha dividido en dos rayos diferentes que divergen entre sí 8.50°. Determine el índice de refracción del prisma para cada una de las dos longitudes de onda.

Figura 33.46 Problema 33.42.



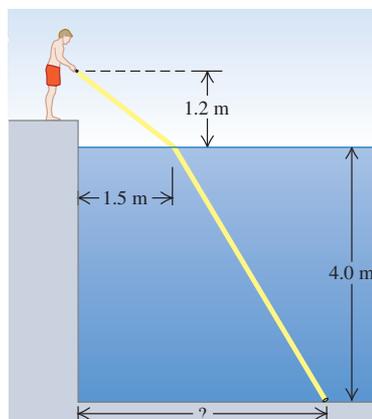
33.43. Una placa de un cuarto de onda convierte luz linealmente polarizada en luz circularmente polarizada. Demuestre que una placa de un cuarto de onda también convierte luz circularmente polarizada en luz linealmente polarizada.

33.44. Una placa de vidrio de 2.50 mm de espesor, con índice de refracción de 1.40, se coloca entre una fuente puntual de luz con longitud de onda de 540 nm (en el vacío) y una pantalla. La distancia de la fuente a la pantalla es de 1.80 cm. ¿Cuántas longitudes de onda hay entre la fuente y la pantalla?

33.45. Las antiguas placas fotográficas estaban hechas de vidrio con una emulsión fotosensible en la superficie anterior. Esta emulsión era algo transparente. Cuando una fuente puntual brillante se enfocaba sobre la parte anterior de la placa, la fotografía revelada mostraba un halo alrededor de la imagen del punto. Si la placa de vidrio mide 3.10 mm de espesor y los halos tienen radio interior de 5.34 nm, ¿cuál es el índice de refracción del vidrio? (*Sugerencia:* considere que la luz del punto que incide en la superficie anterior se dispersa en todas direcciones gracias a la emulsión. Algo de ella se refleja totalmente en la superficie posterior de la placa y regresa a la superficie anterior.)

33.46. Después de un largo día de viaje, tarde por la noche, usted nada en la piscina del hotel donde se hospeda. Cuando se retira a su habitación, se da cuenta de que perdió la llave en la alberca. Consigue una linterna potente y camina alrededor de la alberca dirigiendo la luz hacia ella. La luz ilumina la llave, que yace en el fondo de la alberca, cuando sostiene la linterna a 1.2 m de la superficie del agua y dirigida hacia la superficie a una distancia horizontal de 1.5 m desde el borde (figura 33.47). Si el agua en ese punto tiene 4.0 m de profundidad, ¿a qué distancia del borde de la alberca se encuentra la llave?

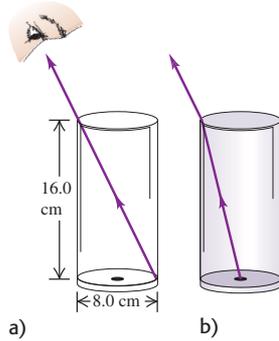
Figura 33.47 Problema 33.46.



33.47. Usted observa sobre el borde de un vaso con lados verticales, de manera que el borde superior está alineado con el borde opuesto del fondo (figura 33.48a). El vaso es un cilindro hueco de paredes delgadas, de 16.0 cm de alto y 8.0 cm de diámetro en sus partes superior e inferior. Mientras usted mantiene la vista en la misma posición, un

amigo suyo llena el vaso con un líquido transparente, y entonces usted ve una moneda pequeña en el centro del fondo del vaso (figura 33.48b). ¿Cuál es el índice de refracción del líquido?

Figura 33.48 Problema 33.47.



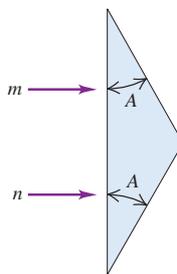
33.48. Un vaso de precipitados con fondo de espejo se llena con un líquido cuyo índice de refracción es 1.63. Un haz luminoso incide en la superficie del líquido a un ángulo de 42.5° con respecto a la normal. ¿A qué ángulo en relación con la normal saldrá el haz luminoso del líquido después de bajar a través del líquido, reflejarse en el fondo de espejo y regresar a la superficie?

33.49. Una capa delgada de hielo ($n = 1.309$) flota en la superficie del agua ($n = 1.333$) que hay en una cubeta. Un rayo de luz que sale del fondo de ésta viaja hacia arriba a través del agua. *a)* ¿Cuál es el ángulo máximo con respecto a la normal que el rayo puede formar en la interfaz hielo-agua sin dejar de salir al aire arriba del hielo? *b)* ¿Cuál es este ángulo una vez que el hielo se ha fundido?

33.50. Un prisma de $45^\circ-45^\circ-90^\circ$ está sumergido en agua. Un rayo de luz incide en dirección normal sobre una de sus caras más cortas. ¿Cuál es el índice de refracción mínimo que debe tener el prisma si este rayo debe reflejarse totalmente dentro del vidrio en la cara larga del prisma?

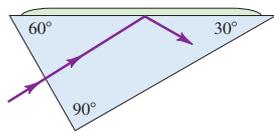
33.51. El prisma que se ilustra en la figura 33.49 tiene un índice de refracción de 1.66, y los ángulos A son de 25.0° . Dos rayos de luz m y n entran paralelos al prisma. ¿Cuál es el ángulo entre ellos una vez que salen?

Figura 33.49 Problema 33.51.



33.52. Sobre la cara corta de un prisma de $30^\circ-60^\circ-90^\circ$ incide luz con una dirección normal (figura 33.50). Se coloca una gota de líquido en la hipotenusa del prisma. Si el índice del prisma es de 1.62, calcule el índice máximo que puede tener el líquido sin que la luz deje de reflejarse en su totalidad.

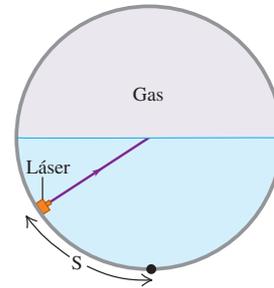
Figura 33.50 Problema 33.52.



33.53. Un tanque cilíndrico horizontal de 2.20 m de diámetro está lleno de agua hasta la mitad. El espacio sobre el agua se encuentra lleno de un gas presurizado con índice de refracción desconocido. Un equipo emisor de luz láser pequeño se mueve a lo largo del fondo curvado

del agua y lanza un rayo hacia el centro de la superficie del agua (figura 33.51). Usted observa que cuando el láser ha recorrido una distancia $S = 1.09$ m o más (medida a lo largo de la superficie curva) desde el punto más bajo del agua, la luz no pasa al gas. *a)* ¿Cuál es el índice de refracción del gas? *b)* ¿Cuánto tiempo tarda el haz de luz en viajar del equipo emisor al borde del tanque cuando i) $S > 1.09$ m y ii) $S < 1.09$ m?

Figura 33.51 Problema 33.53.



33.54. Un cubo grande de vidrio tiene un reflector metálico en una de sus caras y agua en una cara adyacente (figura 33.52). Un haz de luz incide sobre el reflector, como se ilustra en la figura. Usted observa que conforme se incrementa en forma gradual el ángulo del haz de luz, si $\theta \geq 59.2^\circ$ no entra luz al agua. ¿Cuál es la rapidez de la luz en este vidrio?

Figura 33.52 Problema 33.54.

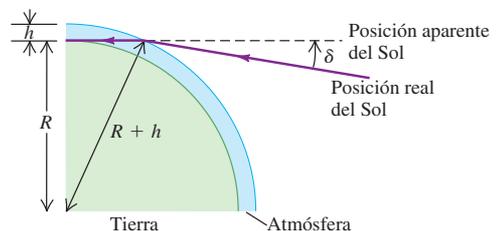


33.55. Cuando el Sol sale o se oculta y parece estar justo sobre el horizonte, en realidad está *debajo de éste*. La explicación de esta aparente paradoja es que la luz solar se desvía un poco cuando entra a la atmósfera terrestre, como se ilustra en la figura 33.53. Como nuestra percepción se basa en la idea de que la luz viaja en líneas rectas, la percibimos como si viniera desde una posición aparente que forma un ángulo δ sobre la posición verdadera del Sol. *a)* Para simplificar, suponga que la atmósfera tiene densidad uniforme y, por lo tanto, índice de refracción uniforme n , y se extiende a una altura h por encima de la superficie de la Tierra, punto en el cual se desvanece de manera abrupta. Demuestre que el ángulo δ está dado por

$$\delta = \arcsen\left(\frac{nR}{R+h}\right) - \arcsen\left(\frac{R}{R+h}\right)$$

donde $R = 6378$ km es el radio de la Tierra. *b)* Calcule δ con $n = 1.0003$ y $h = 20$ km. ¿Cómo se compara esto con el radio angular del

Figura 33.53 Problema 33.55.



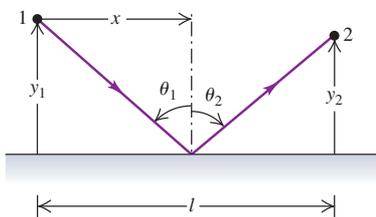
Sol, que es de aproximadamente un cuarto de grado? (En realidad, los rayos de luz proveniente del Sol se desvían de manera gradual, no abrupta, ya que la densidad y el índice de refracción de la atmósfera cambian poco a poco con la altitud.)

33.56. Principio de Fermat del tiempo mínimo. Un rayo de luz que viaja con rapidez c sale del punto 1, como se ilustra en la figura 33.54, y se refleja al punto 2. El rayo incide en la superficie reflectante a una distancia horizontal x del punto 1. *a)* Demuestre que el tiempo t que se requiere para que la luz viaje de 1 a 2 es

$$t = \frac{\sqrt{y_1^2 + x^2} + \sqrt{y_2^2 + (l - x)^2}}{c}$$

b) Obtenga la derivada de t con respecto a x e iguálela a cero para demostrar que el tiempo alcanza su valor *mínimo* cuando $\theta_1 = \theta_2$, que es la ley de reflexión y corresponde a la trayectoria real que sigue la luz. Éste es un ejemplo del *principio de Fermat del tiempo mínimo*, que dice que entre todas las trayectorias posibles entre dos puntos, la que sigue un rayo de luz es aquella para el que el tiempo de recorrido es *mínimo*. (En realidad, hay ciertos casos en los que el tiempo es máximo, y no mínimo.)

Figura 33.54 Problema 33.56.

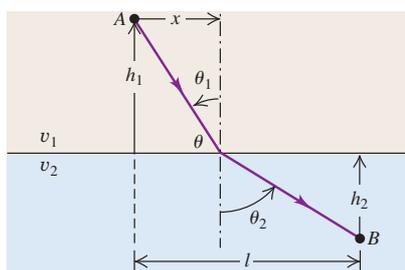


33.57. Un rayo de luz va del punto A, en un medio en el que la rapidez de la luz es v_1 , al punto B en el que la rapidez es v_2 (figura 33.55). El rayo incide en la interfaz a una distancia horizontal x a la derecha del punto A. *a)* Demuestre que el tiempo requerido para que la luz vaya de A a B es

$$t = \frac{\sqrt{h_1^2 + x^2}}{v_1} + \frac{\sqrt{h_2^2 + (l - x)^2}}{v_2}$$

b) Obtenga la derivada de t con respecto a x e iguálela a cero para demostrar que este tiempo alcanza su valor *mínimo* cuando $n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$. Ésta es la ley de Snell y corresponde a la trayectoria real que toma la luz. Éste es otro ejemplo del principio de Fermat del tiempo mínimo (véase el problema 33.56).

Figura 33.55 Problema 33.57.

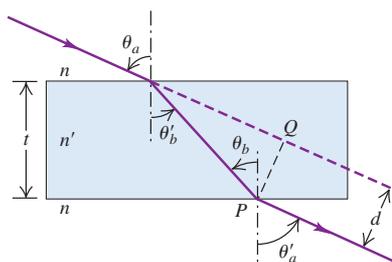


33.58. Sobre la superficie superior de una placa transparente incide luz que viaja por el aire con un ángulo θ_a (figura 33.56); las superficies de la placa son planas y paralelas entre sí. *a)* Demuestre que $\theta_a = \theta'_a$. *b)* Demuestre que esto se cumple para cualquier número de diferentes placas paralelas. *c)* Pruebe que el desplazamiento lateral d del haz que sale está dado por la relación

$$d = t \frac{\sin(\theta_a - \theta'_b)}{\cos \theta'_b}$$

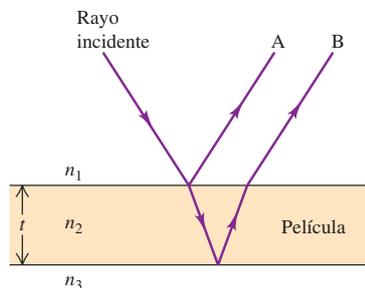
donde t es el espesor de la placa. *d)* Un rayo de luz incide con ángulo de 66.0° sobre la superficie de una placa de vidrio de 2.40 cm de espesor e índice de refracción de 1.80. El medio a cualquiera de sus lados es aire. Calcule el desplazamiento entre los rayos incidente y emergente.

Figura 33.56 Problema 33.58.



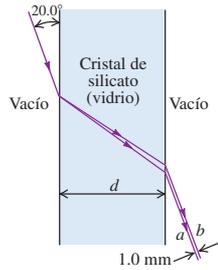
33.59. La luz que viaja hacia abajo incide sobre una película horizontal de espesor t , como se ilustra en la figura 33.57. El rayo incidente se divide en dos rayos, A y B. El rayo A se refleja en la parte superior de la película, y el rayo B se refleja en el fondo de la película para luego refractarse de regreso en el material que está encima de la película. Si la película tiene caras paralelas, demuestre que los rayos A y B terminan paralelos uno con respecto al otro.

Figura 33.57 Problema 33.59.



33.60. Se dirige un haz delgado de luz blanca hacia una placa plana de vidrio a un ángulo de 20.0° con respecto a la superficie de la lámina. Debido a la dispersión del vidrio, el haz se extiende como se ilustra en el espectro de la figura 33.58. En la figura 33.18 aparece la gráfica del índice de refracción del vidrio en función de la longitud de onda. *a)* Los rayos a y b que aparecen en la figura 33.58 corresponden a los extremos del espectro visible. ¿Cuál corresponde al rojo y cuál al violeta? Explique su razonamiento. *b)* ¿Para qué espesor d de la lámina de vidrio el espectro tendrá 1.0 mm de ancho, como se ilustra (véase el problema 33.58)?

Figura 33.58 Problema 33.60.

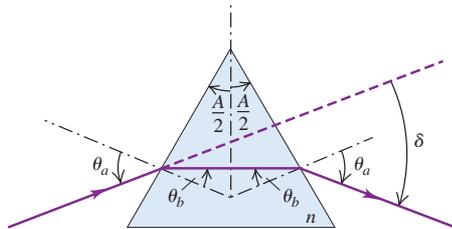


33.61. Ángulo de desviación. El ángulo de incidencia θ_a que se ilustra en la figura 33.59 se eligió de manera que la luz pase de manera simétrica a través del prisma, el cual tiene índice de refracción n y ángulo A en el vértice. *a)* Demuestre que el ángulo de desviación δ (aquel que hay entre las direcciones inicial y final del rayo) está dado por

$$\sin \frac{A + \delta}{2} = n \sin \frac{A}{2}$$

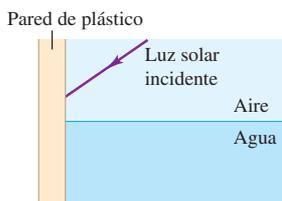
(Cuando la luz atraviesa en forma simétrica, como se ilustra, el ángulo de desviación es mínimo.) *b)* Utilice el resultado del inciso *a)* para encontrar el ángulo de desviación de un rayo de luz que pasa simétricamente por un prisma que tiene tres ángulos iguales ($A = 60.0^\circ$) y $n = 1.52$. *c)* Cierta tipo de vidrio tiene un índice de refracción de 1.61 para la luz roja (700 nm) y 1.66 para la luz violeta (400 nm). Si los dos colores pasan de manera simétrica, como se describió en el inciso *a)*, y si $A = 60.0^\circ$, encuentre la diferencia entre los ángulos de desviación para ambos colores.

Figura 33.59 Problema 33.61.



33.62. Un haz de luz solar no polarizada incide con un ángulo desconocido sobre la pared vertical de plástico de un tanque de agua. Algo de la luz se refleja en la pared y entra en el agua (figura 33.60). El índice de refracción de la pared de plástico es 1.61. Si se observa que la luz que se refleja desde la pared hacia el agua está completamente polarizada, ¿qué ángulo forma el haz con la normal dentro del agua?

Figura 33.60 Problema 33.62.



33.63. Un haz de luz que viaja horizontalmente tiene una componente no polarizada con intensidad I_0 y otra componente polarizada con in-

tensidad I_p . El plano de polarización de la componente polarizada está orientado con un ángulo θ con respecto a la vertical. Los datos de la siguiente tabla dan la intensidad medida a través de un polarizador con orientación ϕ con respecto a la vertical. *a)* ¿Cuál es la orientación de la componente polarizada? (Es decir, ¿cuál es el ángulo θ ?) *b)* ¿Cuáles son los valores de I_0 e I_p ?

ϕ (°)	I_{total} (W/m ²)	ϕ (°)	I_{total} (W/m ²)
0	18.4	100	8.6
10	21.4	110	6.3
20	23.7	120	5.2
30	24.8	130	5.2
40	24.8	140	6.3
50	23.7	150	8.6
60	21.4	160	11.6
70	18.4	170	15.0
80	15.0	180	18.4
90	11.6		

33.64. Cierta material birrefringente tiene índices de refracción n_1 y n_2 para las dos componentes perpendiculares de luz linealmente polarizada que lo atraviesan. Las longitudes de onda correspondientes son $\lambda_1 = \lambda_0/n_1$ y λ_0/n_2 , donde λ_0 es la longitud de onda en el vacío. *a)* Para que el cristal funcione como placa de un cuarto de onda, el número de longitudes de onda de cada componente en el interior del material debe diferir en $\frac{1}{4}$. Demuestre que el espesor mínimo de una placa de un cuarto de onda debe ser

$$d = \frac{\lambda_0}{4(n_1 - n_2)}$$

b) Calcule el espesor mínimo de una placa de un cuarto de onda hecha de siderita ($\text{FeO} \cdot \text{CO}_2$) si los índices de la refracción son $n_1 = 1.875$ y $n_2 = 1.635$, y la longitud de onda en el vacío es $\lambda_0 = 589$ nm.

Problemas de desafío

33.65. Considere dos vibraciones con la misma amplitud y frecuencia, pero distinta fase, una a lo largo del eje x ,

$$x = a \sin(\omega t - \alpha)$$

y la otra a lo largo del eje y ,

$$y = a \sin(\omega t - \beta)$$

Éstas se pueden escribir como sigue:

$$\frac{x}{a} = \sin \omega t \cos \alpha - \cos \omega t \sin \alpha \quad (1)$$

$$\frac{y}{a} = \sin \omega t \cos \beta - \cos \omega t \sin \beta \quad (2)$$

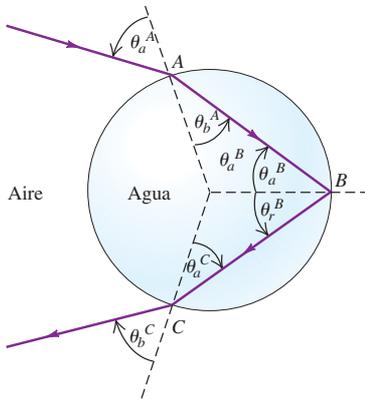
a) Multiplique la ecuación (1) por $\sin \beta$, y la ecuación (2) por $\sin \alpha$, y luego reste las ecuaciones resultantes. *b)* Multiplique la ecuación (1) por $\cos \beta$ y la ecuación (2) por $\cos \alpha$, y después reste las ecuaciones que resultan. *c)* Eleve al cuadrado y sume los resultados de los incisos *a)* y *b)*. *d)* Obtenga la ecuación $x^2 + y^2 - 2xy \cos \delta = a^2 \sin^2 \delta$, donde $\delta = \alpha - \beta$. *e)* Use el resultado anterior para justificar cada uno de los diagramas de la figura 33.61 (en la siguiente página). En la figura el ángulo dado es la diferencia de fase entre dos movimientos armónicos simples con las mismas frecuencia y amplitud, uno horizontal (sobre el eje x) y el otro vertical (sobre el eje y). Así, la figura muestra el movimiento resultante de la superposición de los dos movimientos armónicos perpendiculares.

Figura 33.61 Problema de desafío 33.65.

0	$\frac{\pi}{4}$	$\frac{\pi}{2}$	$\frac{3\pi}{4}$	π	$\frac{5\pi}{4}$	$\frac{3\pi}{2}$	$\frac{7\pi}{4}$	2π

33.66. Un arco iris se produce por la reflexión de la luz solar en gotas esféricas de agua en el aire. La figura 33.62 presenta un rayo que se refracta en una gota en el punto A , se refleja en la superficie posterior de la gota en el punto B y se refracta de regreso al aire en el punto C . Los ángulos de incidencia y refracción, θ_a y θ_b , se muestran en los puntos A y C , y los ángulos de incidencia y reflexión θ_a y θ_r , se presentan en el punto B . *a)* Demuestre que $\theta_a^B = \theta_b^A$, $\theta_a^C = \theta_b^A$ y $\theta_b^C = \theta_a^A$. *b)* Demuestre que el ángulo en radianes entre el rayo antes de entrar a la gota en A y después de salir en C (la desviación angular total del rayo) es $\Delta = 2\theta_a^A - 4\theta_b^A + \pi$. (*Sugerencia:* encuentre la desviación angular que ocurre en A , B y C , y súmelas para obtener Δ .) *c)* Con base en la

Figura 33.62 Problema de desafío 33.66.



ley de Snell escriba Δ en términos de θ_a^A y n , el índice de refracción del agua en la gota. *d)* Un arco iris se formará cuando la desviación angular Δ sea estacionaria en el ángulo de incidencia θ_a^A , es decir, cuando $d\Delta/d\theta_a^A = 0$. Si esta condición se satisface, todos los rayos con ángulos de incidencia cercanos a θ_a^A serán enviados de regreso en la misma dirección y producirán una zona brillante en el cielo. Sea θ_1 el valor de θ_a^A para el que esto ocurre. Demuestre que $\cos^2 \theta_1 = \frac{1}{3}(n^2 - 1)$. [*Sugerencia:* le será de ayuda la fórmula de derivación $d(\arcsen u(x))/dx = (1 - u^2)^{-1/2}(du/dx)$.] *e)* El índice de refracción en el agua es 1.342 para la luz violeta y 1.330 para la luz roja. Utilice los resultados de los incisos *c)* y *d)* para obtener θ_1 y Δ para la luz violeta y para la roja. ¿Concuerdan sus resultados con los ángulos que se muestran en la figura 33.20d? Cuando usted observa un arco iris, ¿qué color aparece más alto sobre el horizonte, el rojo o el violeta?

33.67. Un arco iris secundario se forma cuando la luz incidente experimenta dos reflexiones internas en una gota esférica de agua, como se aprecia en la figura 33.20e. (Véase el problema de desafío 33.66). *a)* En términos del ángulo de incidencia θ_a^A y el índice de refracción n de la gota, ¿cuál es la desviación angular Δ del rayo? Es decir, ¿cuál es el ángulo entre el rayo antes de que entre a la gota y después de que sale de ésta? *b)* ¿Cuál es el ángulo de incidencia θ_2 para el que la derivada de Δ con respecto al ángulo de incidencia θ_a^A es igual a cero? *c)* Los índices de refracción para la luz roja y la violeta en el agua están dados en el inciso *e)* del problema de desafío 33.66. Utilice los resultados de los incisos *a)* y *b)* para encontrar θ_2 y Δ para la luz violeta y para la roja. ¿Concuerdan sus resultados con los ángulos que se ilustran en la figura 33.20e? Cuando usted observa un arco iris secundario, ¿cuál color está más alto sobre el horizonte, el rojo o el violeta? Explique su respuesta.