

TEMA

10

Refracción de la luz



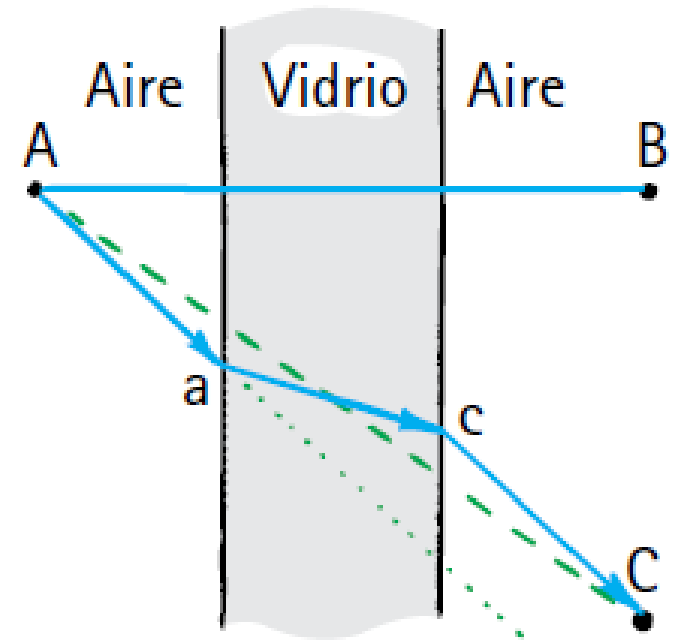
Resultado de aprendizaje: Especifica las leyes que rigen la refracción de la luz mediante la descripción de sus principios y ecuaciones con el fin de comprender su aplicación en fenómenos ópticos y en el diseño de dispositivos ópticos

Índice de refracción

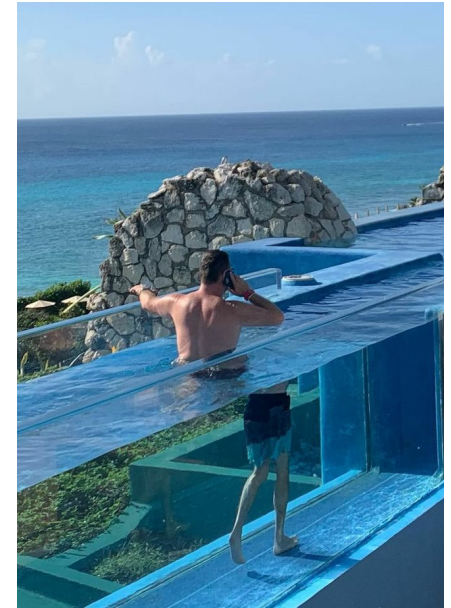
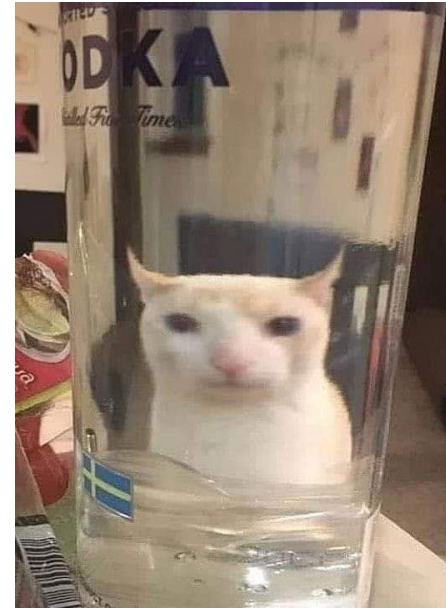
La luz viaja con distintas rapideces en diferentes materiales. Viaja a 300 000 km/s en el vacío, con una rapidez un poco menor en el aire, y a tres cuartos de dicha rapidez en el agua.

Cuando la luz se dobla al pasar de manera oblicua de un medio a otro, el proceso se llama **refracción**.

Es común observar que un rayo de luz se doble y tome una ruta más larga cuando encuentra vidrio o agua en un ángulo oblicuo. No obstante, la trayectoria más larga tomada es, a pesar de ello, la trayectoria que necesita el tiempo mínimo. Una trayectoria en línea recta tardaría un tiempo más prolongado.



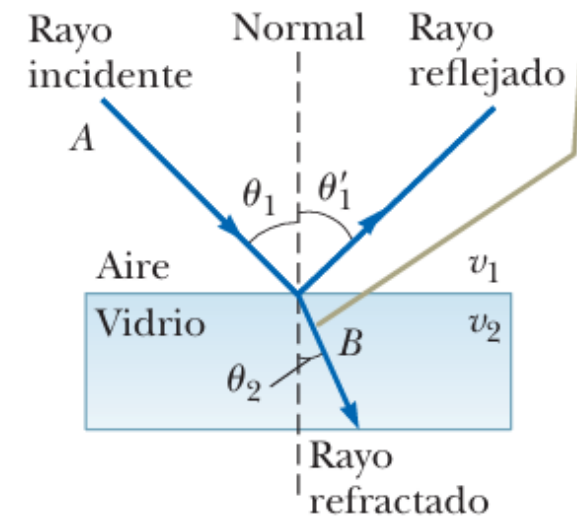
Estos son algunos ejemplos de la refracción de la luz en la vida cotidiana.



Cuando una onda luminosa incide en una interfase lisa que separa dos materiales transparentes (como el aire y el vidrio, o el agua y el vidrio), la onda en general se *refleja parcialmente* y también se *refracta* (se transmite) parcialmente hacia el segundo material.



El rayo refractado se dobla hacia la normal porque $v_2 < v_1$. Todos los rayos y la normal se encuentran en el mismo plano.



La luz frena cuando entra en un medio transparente. La cantidad en la que difiere la rapidez de la luz de su rapidez en el vacío está dada por el **índice de refracción**, n , del material:

$$\text{Índice de refracción de un material óptico } n = \frac{c}{v}$$

Rapidez de la luz en el vacío

Rapidez de la luz en el material

El índice de refracción es una cantidad adimensional. Como la luz siempre viaja con más lentitud en un material que en el vacío, el valor de n en cualquier material que no sea el vacío siempre es mayor que la unidad.

PUNTO DE CONTROL:

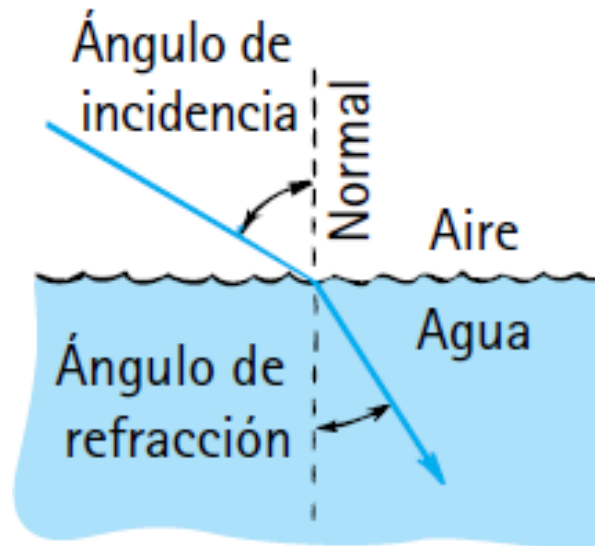
Usted se encuentra en la orilla de un lago y observa un apetitoso pez que nada a cierta distancia debajo de la superficie. (a) Si quiere atrapar al pez, ¿debe lanzar el arpón **i.** más arriba, **ii.** más abajo o **iii.** directamente hacia la posición aparente del pez? (b) Si en lugar del arpón usara 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?

Ley de Snell

El fenómeno de la refracción cumple con dos leyes básicas:

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

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



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

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

Aunque es más común expresar esta igualdad mediante la **ley de Snell**, la cual dicta:

Ley de Snell:

Ángulo de incidencia desde la normal

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

Ángulo de refracción desde la normal

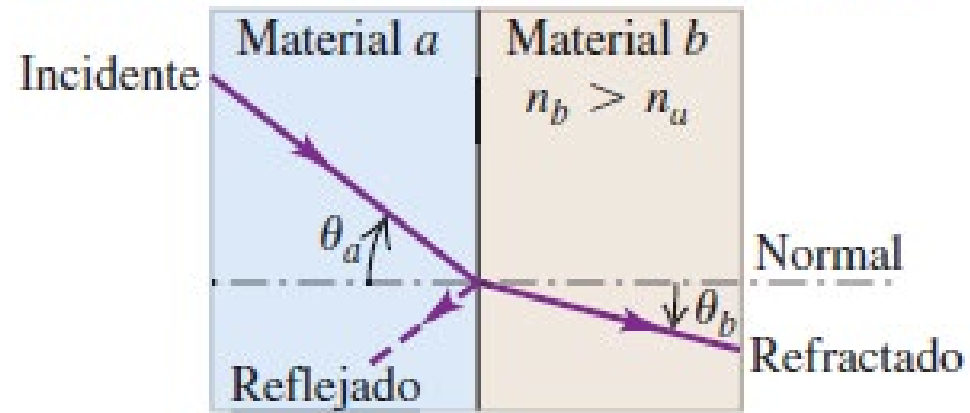
Índice de refracción del material con luz incidente

Índice de refracción del material con luz refractada

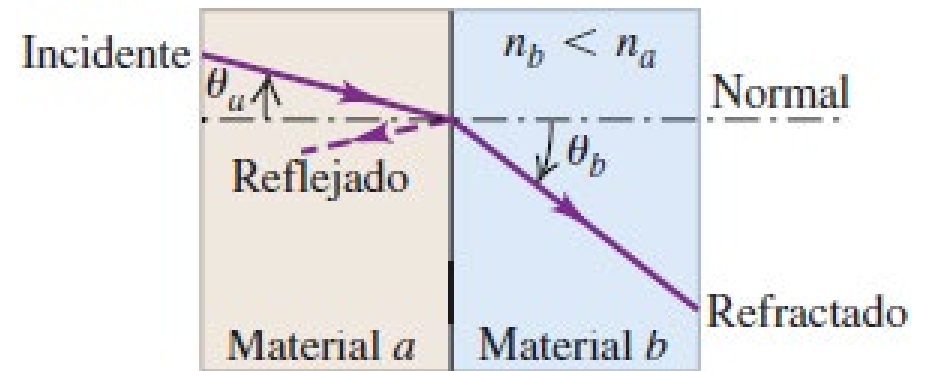
Puesto que el seno de un ángulo aumenta al aumentar el ángulo, se ve un incremento en el índice de refracción provoca una disminución en el ángulo, y viceversa.

Durante la refracción, pueden ocurrir tres casos:

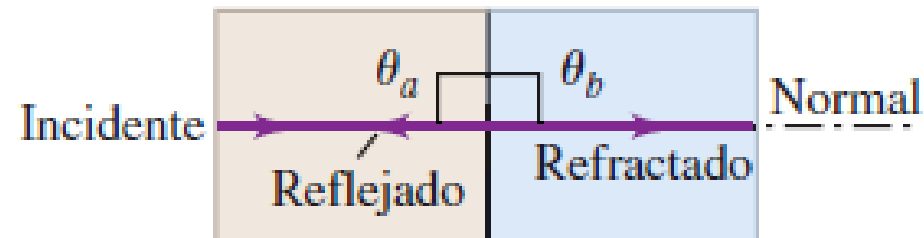
a) Un rayo que entra a un material con *mayor* índice de refracción se desvía *hacia* la normal.



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



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

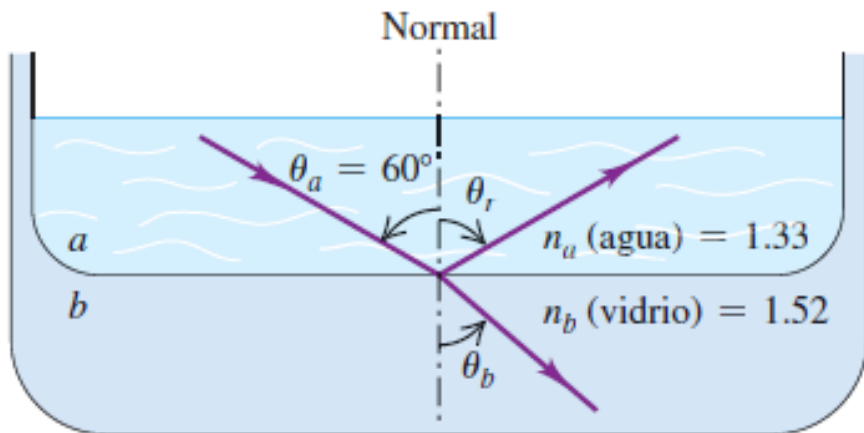


Ejemplo 10.1

La luz pasa del agua al aire con un ángulo de incidencia de 35° . ¿Cuál será el ángulo de refracción si el índice de refracción del agua es 1,33?

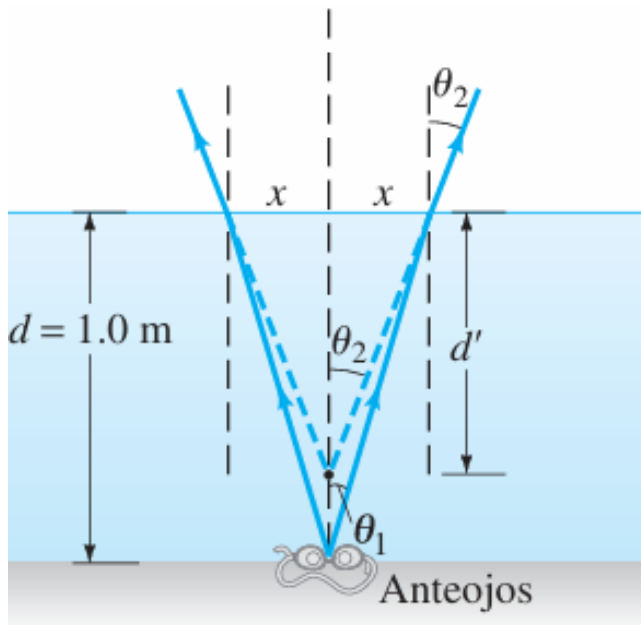
Ejemplo 10.2

En la figura, el material a es agua, y el material b es 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.



Ejemplo 10.3

Un nadador soltó sus anteojos protectores en el fondo de una alberca en la zona poco profunda, marcada con 1 m de profundidad. Pero los anteojos no parecen estar a esa profundidad. ¿A qué profundidad parecen estar los antejos cuando se observa en línea recta hacia el fondo del agua?



Actividades en clase

1. Calcule la rapidez de la luz en (a) vidrio crown, (b) diamante, (c) agua y (d) alcohol etílico.
R.: (a) 2×10^8 m/s; (b) $1,24 \times 10^8$ m/s; (c) $2,26 \times 10^8$ m/s; (d) $2,21 \times 10^8$ m/s

2. La luz pasa del agua al aire. Esta sale al aire formando un ángulo de 32° con la superficie horizontal del agua. ¿Cuál es el ángulo de incidencia dentro del agua?

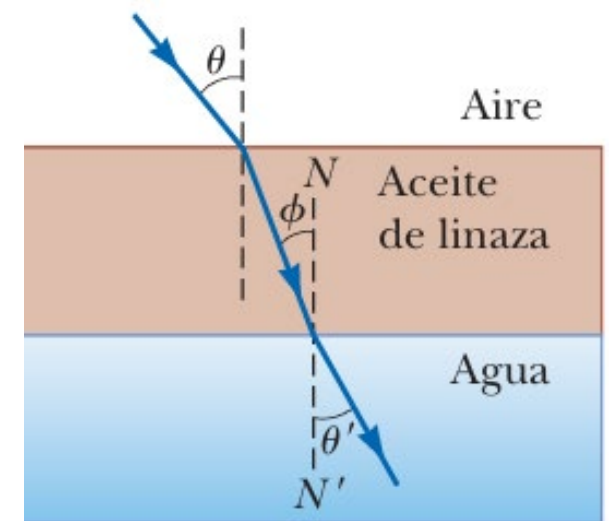
R.: $39,6^\circ$

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

R.: 1,43

4. El haz de luz refractado que se muestra en la figura forma un ángulo $\phi = 20^\circ$ con la línea normal NN' en aceite de linaza. El índice de refracción del aceite de linaza es 1,48. Determine los ángulos (a) θ y (b) θ' .

R.: (a) $30,4^\circ$; (b) $22,3^\circ$



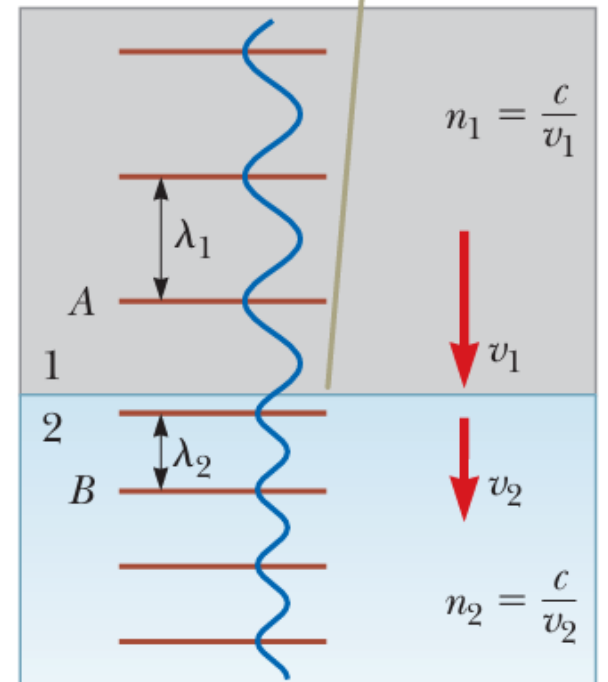
Longitud de onda y refracción

Se ha tratado a la reflexión y la refracción mediante el modelo de rayos, pero recordemos que la luz también tiene una naturaleza ondulatoria, por lo que es necesario analizar qué ocurre en estos fenómenos.

Para ello, consideraremos dos cosas:

- En primer lugar, la frecuencia f de una onda no cambia cuando pasa de un material a otro.
- En segundo lugar, la longitud de onda λ , en general, es diferente en distintos materiales.

Cuando una onda se mueve del medio 1 al medio 2, cambia su longitud de onda, pero su frecuencia permanece constante.



Dado que en cualquier material $v = \lambda f$, que f es la misma en cualquier material, y que v debe ser menor que la rapidez de la luz, entonces:

$$f = \frac{c}{\lambda_0} = \frac{v}{\lambda}$$

Donde λ_0 es la longitud de onda de la luz en el vacío (o en el aire dado que $n_{\text{aire}} \approx 1$) y c es el valor de la rapidez de la luz. Como además $n = c/v$, entonces:

$$\frac{c}{v} = \frac{\lambda_0}{\lambda}$$

Longitud de onda de la luz en un material:

$$\lambda = \frac{\lambda_0}{n}$$

Longitud de onda de la luz en el vacío

Índice de refracción del material

PUNTO DE CONTROL:

¿Qué evidencia sustenta la afirmación de que la frecuencia de la luz no cambia al momento de reflejarse?

Ejemplo 10.4

Un rayo de luz, de 589 nm de longitud de onda, que viaja a través de aire, incide sobre una lámina plana y uniforme de vidrio sin plomo con un ángulo de 30° con la normal. Determinar: (a) el ángulo de refracción; (b) la rapidez de esta luz una vez que entra al vidrio; (c) la longitud de onda de esta luz en el vidrio.

Ejemplo 10.5

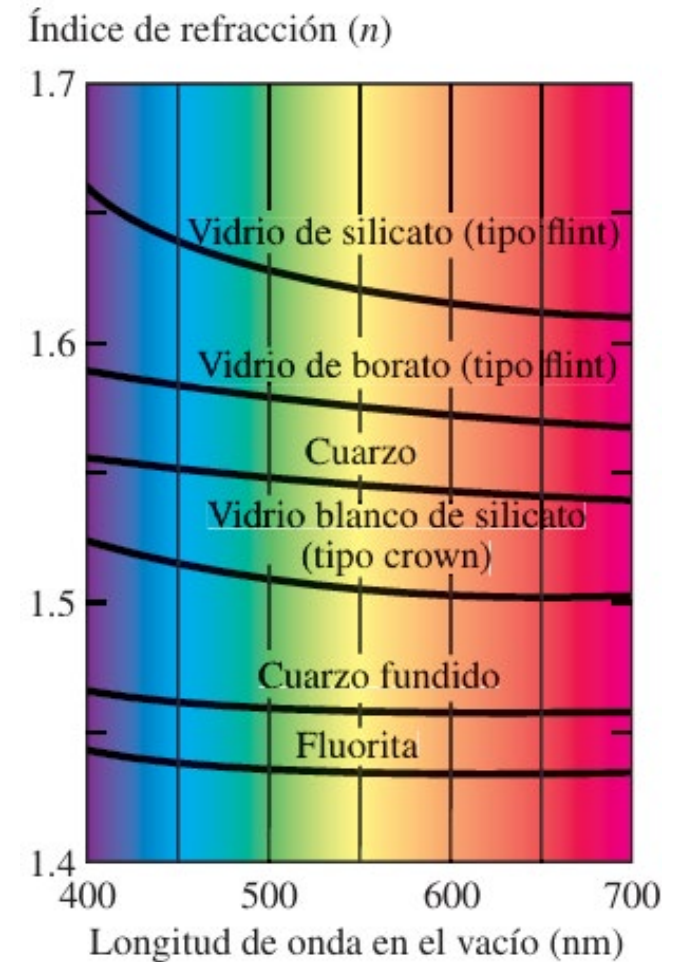
La longitud de onda de la luz roja de un láser de helio-neón es de 633 nm en el aire, y de 474 nm en el humor acuoso del globo ocular. Calcule el índice de refracción del humor acuoso, además de la rapidez y la frecuencia de la luz en esta sustancia.

Dispersión

Una propiedad importante del índice de refracción n es que, para un material determinado, el índice varía con la longitud de onda de la luz que pasa por el material, como muestra la figura. Este comportamiento se denomina **dispersión**.

Como n es una función de la longitud de onda, la ley de la refracción de Snell indica que luces de diferentes longitudes de onda se refractan a diferentes ángulos cuando inciden sobre un material.

El índice de refracción generalmente disminuye con una longitud de onda creciente. Por ejemplo, esto significa que la luz violeta se refracta más que la luz roja cuando transita dentro de un material.



Ahora suponga que un haz de luz blanca (combinación de todas las longitudes de onda visibles) incide en un prisma, como se ilustra en la figura.

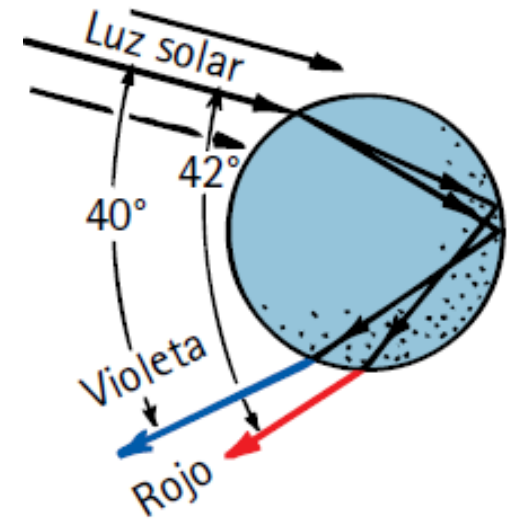
El ángulo de desviación depende de la longitud de onda. Los rayos que emergen se dispersan en una serie de colores conocida como **espectro visible**.

Estos colores, en orden de longitud de onda decreciente, son rojo, naranja, amarillo, verde, azul y violeta. Newton demostró que cada color tiene un ángulo particular de desviación y que los colores se pueden recombinar para formar la luz blanca original.



La dispersión de luz en un espectro se comprueba con mayor claridad en la naturaleza con la formación de un arco iris, el cual es visto frecuentemente por un observador que está situado entre el Sol y una zona con lluvia. Para comprender cómo se forma, considere la figura.

Un rayo de luz de Sol (luz blanca) incide por arriba en una gota de agua en la atmósfera y es refractado y reflejado de la siguiente manera:

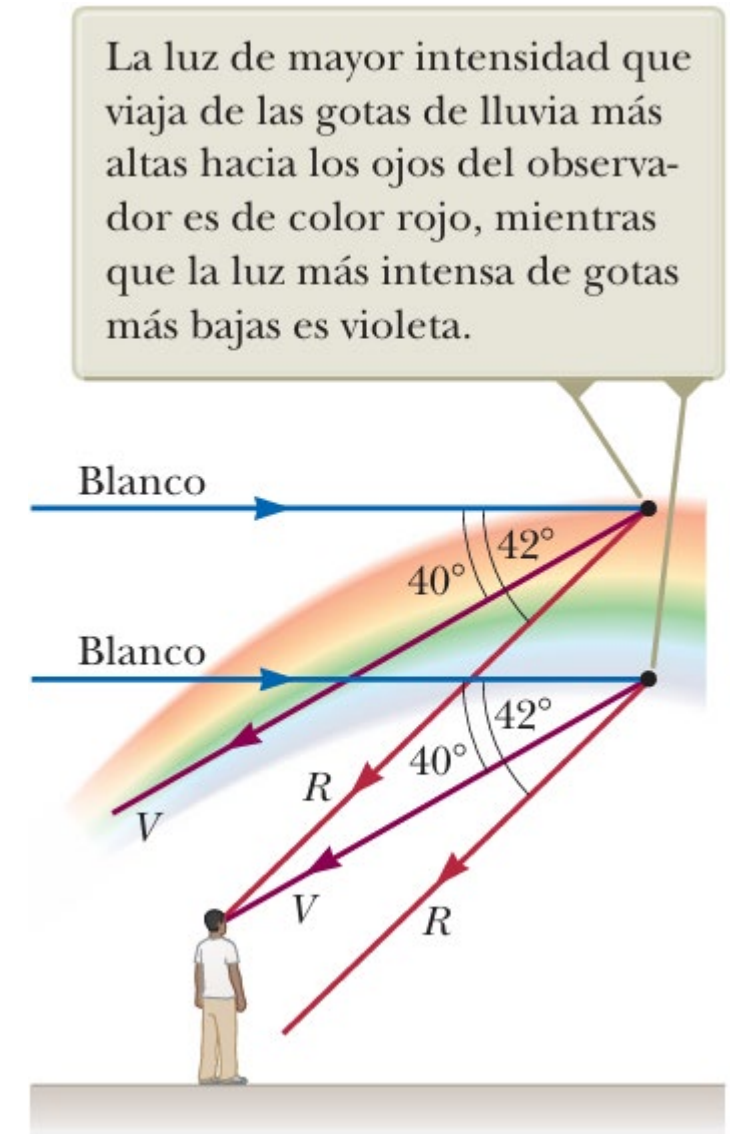


1. Primero es refractado en la superficie frontal de la gota, ahí la luz violeta tiene la mayor desviación y la luz roja la menor.
2. En la superficie posterior de la gota, la luz se refleja y regresa a la superficie frontal, donde otra vez se somete a refracción cuando pasa del agua al aire.
3. Los rayos dejan la gota tal que el ángulo entre la luz blanca incidente y el más intenso rayo violeta de retorno es de 40° y el ángulo entre la luz blanca incidente y el rayo rojo más intenso de retorno es de 42° .
4. Esta pequeña diferencia angular entre los rayos de retorno hace posible que se vea un arco de colores.

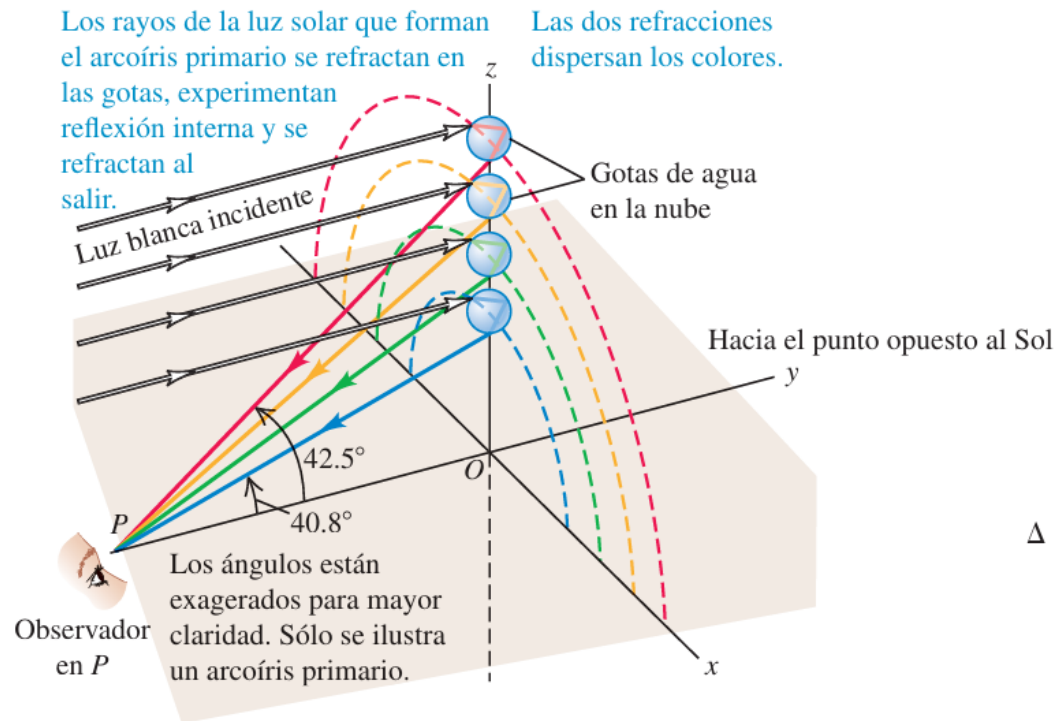
Ahora suponga que un observador mira un arco iris, como se muestra en la figura.

Si se observa una gota de lluvia en el cielo, la luz roja más intensa que retorna de la gota llega al observador porque es la que más se desvía y la luz violeta más intensa pasa sobre el observador porque es la que menos se desvía. En consecuencia, el observador ve esta gota de color rojo.

Del mismo modo, una gota más baja en el cielo dirigiría la más intensa luz violeta hacia el observador y se vería de color violeta. (La luz roja más intensa de esta gota pasaría por debajo de los ojos del observador y no sería visible.) La más intensa luz de otros colores del espectro llegaría al observador desde gotas de lluvia que estuvieran entre estas dos posiciones extremas.



En muchos casos, es posible ver un segundo arcoíris más grande. El arcoíris secundario es más tenue que el arco iris primario y sus colores están invertidos, surge de la luz que provoca dos reflexiones desde la superficie interior antes de salir de la gota de lluvia.



PUNTO DE CONTROL:

Si la luz viajara con la misma rapidez en las gotas de lluvia que en el aire, ¿todavía habría arcoíris? Explique su respuesta.

Ejemplo 10.6

Un haz de luz que contiene longitudes de onda roja y violeta incide sobre una losa de cuarzo en un ángulo de incidencia de 50° . El índice de refracción de cuarzo es de 1,455 a 600 nm para la luz roja y de 1,468 a 410 nm para la luz violeta. Encuentre la dispersión de la losa, que se define como la diferencia entre los ángulos de refracción para las dos longitudes de onda.

Actividades en clase

1. 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 1,47? (b) ¿Cuál es la longitud de onda de estas ondas en el líquido? **R.: (a) $2,04 \times 10^8$ m/s; (b) 442 nm**
2. La luz cuya longitud de onda es de 650 nm en un vidrio determinado tiene una rapidez de $1,7 \times 10^8$ m/s. (a) ¿Cuál es el índice de refracción de ese vidrio? (b) ¿Cuál es la longitud de onda de esa luz en el aire? **R.: (a) 1,76; (b) 1150 nm**
3. Los índices de refracción de la luz violeta ($\lambda = 400$ nm) y de la luz roja ($\lambda = 700$ nm) en el diamante son 2,46 y 2,41 respectivamente. Un rayo de luz que viaja a través del aire incide sobre la superficie del diamante en un ángulo de $53,5^\circ$ respecto a la normal. Calcule la separación angular entre estos dos colores de luz en el rayo refractado.
R.: $0,41^\circ$