

19-NATURALEZA DE LA LUZ Y LEYES DE ÓPTICA GEOMÉTRICA



Esta fotografía muestra un arco iris secundario con los colores invertidos. La aparición del arco iris depende de tres fenómenos ópticos: reflexión, refracción y dispersión



Christiaan Huygens

Físico y astrónomo holandés (1629-1695). Es conocido por sus aportaciones a los campos de la óptica y la dinámica. Para él, la luz consistía en un tipo de movimiento vibratorio que se dispersa y produce la sensación de luz cuando incide en los ojos. Con base en esta teoría, dedujo las leyes de la reflexión y la refracción y explicó el fenómeno de doble refracción.

NATURALEZA DE LA LUZ

Galileo y otros científicos intentaron (sin éxito) medir la rapidez de la luz.

Ole Roemer en 1676 obtuvo un valor de 214.000 km/s, Bradley en 1728: 301.000 km/s (métodos astronómicos) y luego Fizeau en 1849: 315.000 km/s .

Hasta la época de Newton, la mayoría de los científicos, incluyéndolo, pensaban que la luz consistía en corrientes de partículas *emitidas por las fuentes luminosas* (**teoría corpuscular**). Explicaba la reflexión y la refracción.

Hacia fines del siglo XVII aparecen evidencias de las propiedades *ondulatorias de la luz* (**teoría ondulatoria**): 1678 Christian Huygens: demostró que una teoría de ondas de luz podría también explicar la reflexión y la refracción...

A principios del siglo XIX, la evidencia de que la luz es una onda se había vuelto muy convincente.

1801, Thomas Young demostró que, bajo condiciones apropiadas, los rayos de luz se interfieren unos con otros: comportamiento que no podía ser explicado en aquel tiempo por una teoría de partículas.

1847- Faraday supone a la luz como una “vibración electromagnética”

En 1873 James Clerk Maxwell predijo la existencia de ondas electromagnéticas y calculó su rapidez de propagación, que coincidía con el medido para la luz.

Esto junto con el trabajo experimental que inició en 1887 Hertz, demostró en forma concluyente que la luz en verdad es una onda electromagnética.



NATURALEZA DE LA LUZ

Modelo ondulatorio y la teoría clásica del electromagnetismo explicaban la mayoría de las propiedades de la luz, no podían explicar otros experimentos posteriores, como el **efecto fotoeléctrico** (Hertz): cuando incide luz sobre una superficie metálica, a veces se expulsan electrones de la superficie.

Entre las dificultades que surgieron mostraban que la energía cinética de un electrón expulsado es independiente de la intensidad de la luz.

Einstein (1905) **teoría del efecto fotoeléctrico** aplicando modelo de acuerdo con el **concepto de Cuantización de Planck** (1900)

El modelo de cuantización supone que la energía de una onda luminosa está presente en **“partículas” llamadas fotones**; *por tanto, se dice que la energía está cuantizada. Según la teoría de Einstein, la energía de un fotón es proporcional a la frecuencia de la onda electromagnética: $E = hf$ donde la constante de proporcionalidad $h = 6,63 \times 10^{-34} \text{ J.s}$ es la constante de Planck.*

*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 las corpusculares**.*

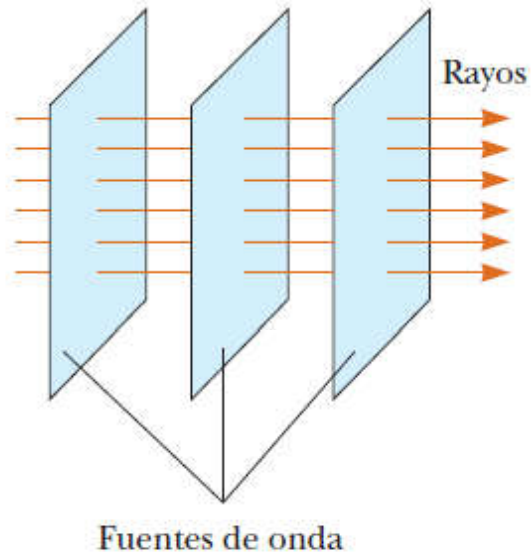
La propagación de la luz se describe mejor con el modelo ondulatorio, pero para comprender la emisión y la absorción se requiere un enfoque corpuscular.

Doble naturaleza de la luz: en algunos casos exhibe características de una onda y en otras de una partícula.

APROXIMACIÓN DE UN RAYO EN ÓPTICA GEOMÉTRICA

Para describir las direcciones en las que se propaga la luz, a menudo conviene representar una onda luminosa por medio de **rayos**.

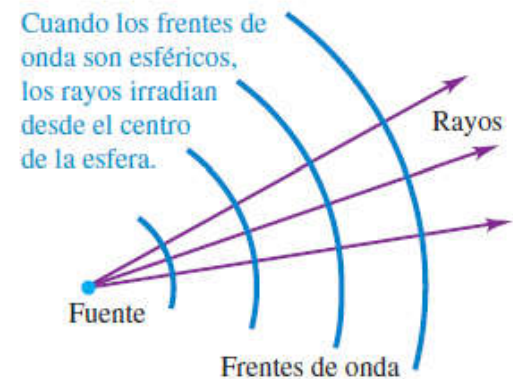
En la teoría corpuscular de la luz, los rayos son las trayectorias de las partículas, en el ondulatorio, es **una línea imaginaria a lo largo de la dirección de propagación de la onda**.



Óptica geométrica: modelo de propagación de la luz:

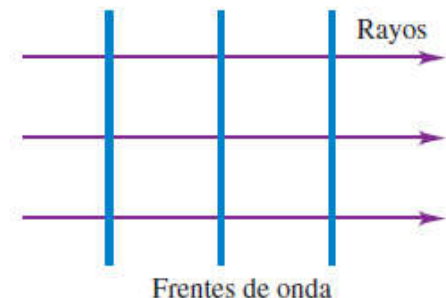
se desplaza en una dirección fija y en línea recta cuando pasa por un medio uniforme, y cambia su dirección cuando se encuentra con un medio diferente o si las propiedades ópticas del medio no son uniformes.

a)



b)

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



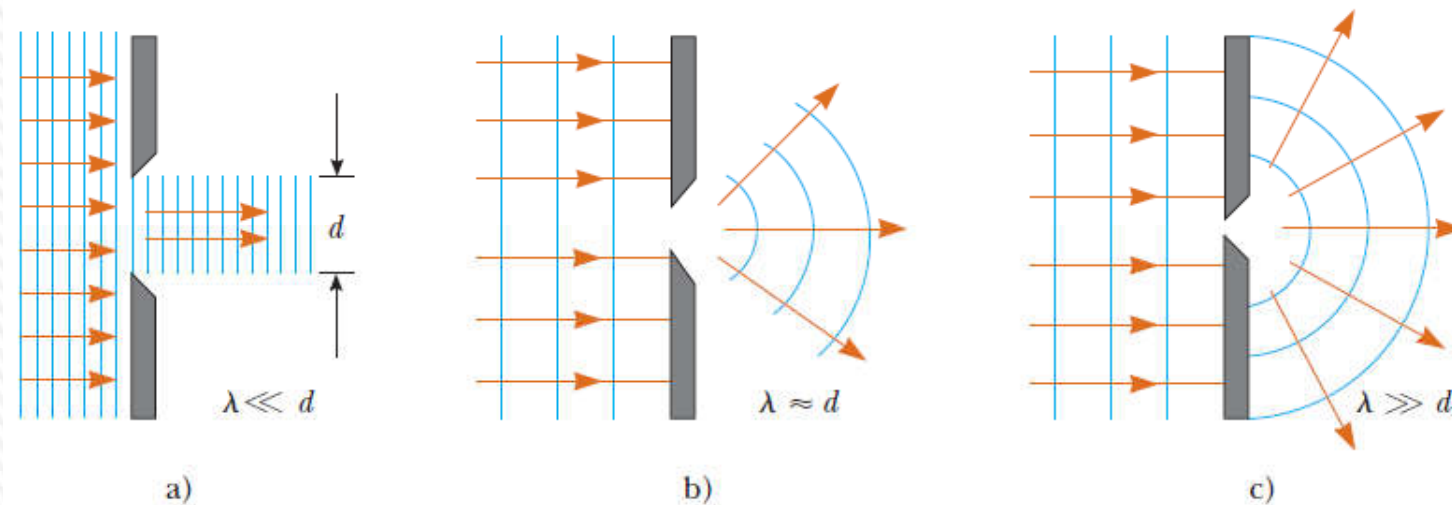
Aproximación de un rayo: los rayos de una onda determinada son líneas rectas perpendiculares a los frentes de onda, para una onda plana.

$c = 2,99792458 \times 10^8$ m/s (valor adoptado como exacto, define el metro) en el vacío para cualquier frecuencia.

APROXIMACIÓN DE UN RAYO EN ÓPTICA GEOMÉTRICA

Comportamiento de la onda al encontrar barrera con abertura circular (d) según tamaño relativo con λ .

Óptica geométrica: aproximación del rayo y suposición de que $\lambda \ll d$. Muy buena aproximación para estudio de espejos, lentes, prismas e instrumentos ópticos asociados, por ejemplo telescopios, cámaras y anteojos.



Onda plana de longitud λ incide sobre barrera en la que hay una abertura de diámetro d .

a) Cuando $\lambda \ll d$, los rayos siguen en una trayectoria en línea recta, y la aproximación de rayo continúa siendo válida. Existen sombras nítidas.

b) Cuando $\lambda \approx d$, los rayos se extienden después de pasar por la abertura (**difracción**), sin “respetar” una trayectoria rectilínea..

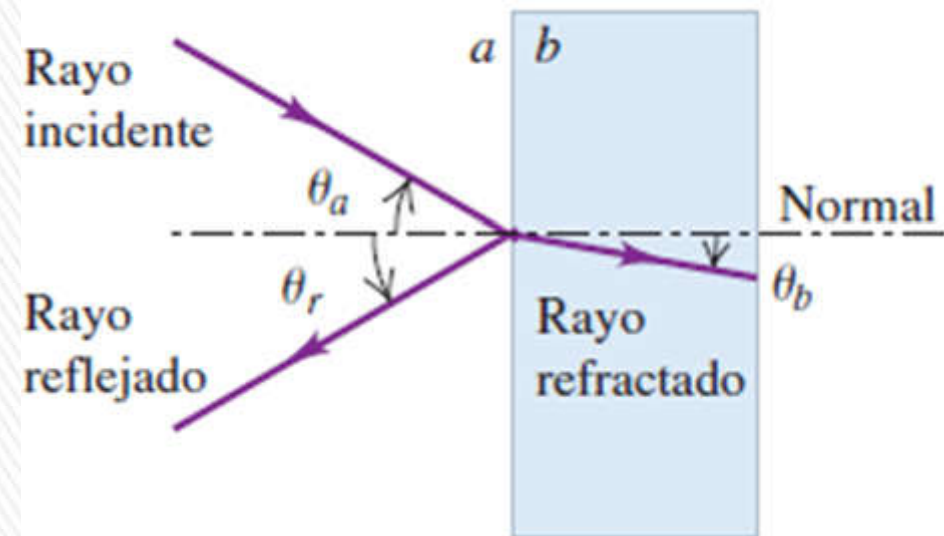
c) Cuando $\lambda \gg d$, la abertura se comporta como fuente puntual que emite ondas esféricas.

REFLEXIÓN Y REFRACCIÓN

Usamos modelo de la luz basado en *rayos para analizar* la propagación de la luz y su **reflexión y refracción**.

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

Direcciones de todos los rayos incidente, reflejado y refractado (transmitido) en interfase lisa entre dos materiales ópticos se describen a través de los ángulos que forman con la *normal (perpendicular) a la superficie en el punto de incidencia*.

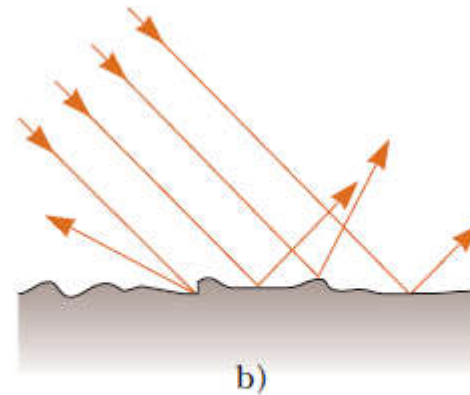
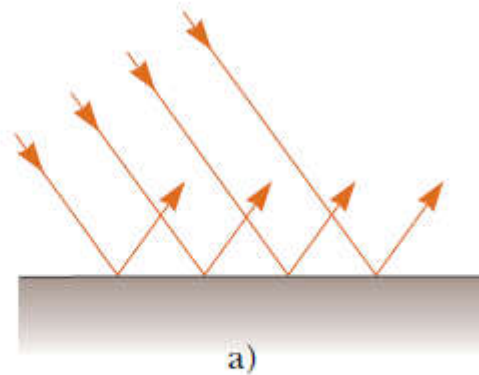


Reflexión especular: incidencia sobre superficie lisa (espejo) y los rayos reflejados son paralelos entre sí.

Reflexión difusa: si la superficie reflectora es rugosa, la superficie refleja los rayos no como un conjunto paralelo sino en varias direcciones.

Una superficie se comporta como superficie lisa mientras las variaciones de superficie son mucho menores que la longitud de onda de la luz incidente.

REFLEXIÓN Y REFRACCIÓN



Cortesía de Henry Leap y Jim Lehman.



a) reflexión especular, todos los rayos reflejados son paralelos entre sí, y
b) reflexión difusa, los rayos reflejados viajan en direcciones aleatorias.
c) y d) Fotografías de reflexión especular y difusa con luz láser.

REFLEXIÓN Y REFRACCIÓN

El **índice de refracción** de un material óptico (también llamado **índice refractivo**), denotado con n , es la razón entre la rapidez c de la luz en el vacío y la rapidez v de la luz en el material:

$$c = 2,99792458 \times 10^8 \text{ m/s}$$

$$n \equiv \frac{\text{rapidez de la luz en el vacío}}{\text{rapidez de la luz en el medio}} \equiv \frac{c}{v}$$

La rapidez de la luz en cualquier material es *menor que en el vacío y depende de la frecuencia... disminuye en gral. con la frecuencia*
 La luz se desplaza a su máxima rapidez en el vacío (c) y no depende de la frecuencia.

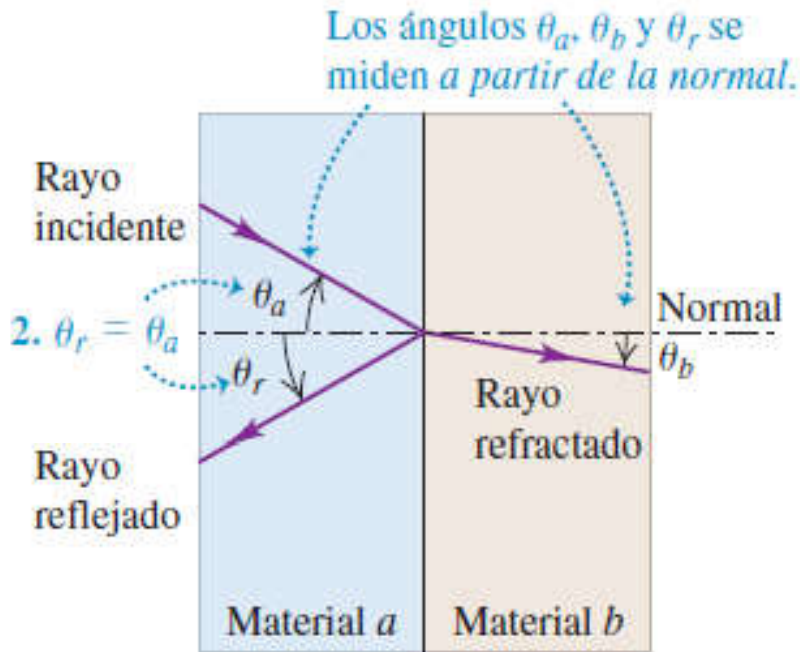
Índices de refracción			
Sustancia	Índice de refracción	Sustancia	Índice de refracción
<i>Sólidos a 20°C</i>		<i>Líquidos a 20°C</i>	
Circonio cúbico	2.20	Benceno	1.501
Diamante (C)	2.419	Disulfuro de carbono	1.628
Fluorita (CaF ₂)	1.434	Tetracloruro de carbono	1.461
Cuarzo fundido (SiO ₂)	1.458	Alcohol etílico	1.361
Fosfato de galio	3.50	Glicerina	1.473
Vidrio, sin plomo	1.52	Agua	1.333
Vidrio, con plomo	1.66		
Hielo (H ₂ O)	1.309	<i>Gases a 0°C, 1 atm</i>	
Poliestireno	1.49	Aire	1.000 293
Cloruro de sodio (NaCl)	1.544	Dióxido de carbono	1.000 45

Nota: Todos los valores son para luz cuya longitud de onda sea de 589 nm en el vacío.



REFLEXIÓN Y REFRACCIÓN

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



3. Cuando un rayo de luz monocromática cruza la interfase 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

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

Leyes de reflexión y refracción

Experimentalmente se probó que:

1. Los **rayos incidente, reflejado y refractado**, y la **normal** se encuentran todos en el **mismo plano (plano de incidencia)**, que es perpendicular al plano de la superficie de frontera entre los dos materiales.
2. Para la luz monocromática y para un par dado de materiales, a y b , en *lados* opuestos de la interfase, se cumple que:

$$\theta_r = \theta_a \quad \text{Ley de reflexión}$$

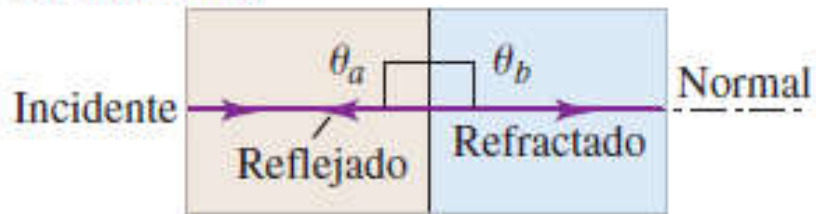
3. Para la luz monocromática y para un par dado de materiales, a y b , en *lados* opuestos de la interfase,

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

Ley de refracción o de Snell

REFLEXIÓN Y REFRACCIÓN

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



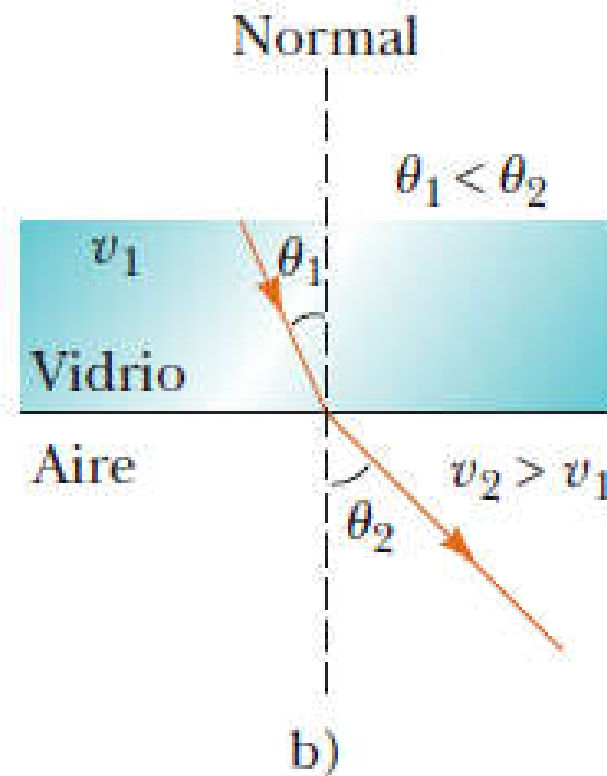
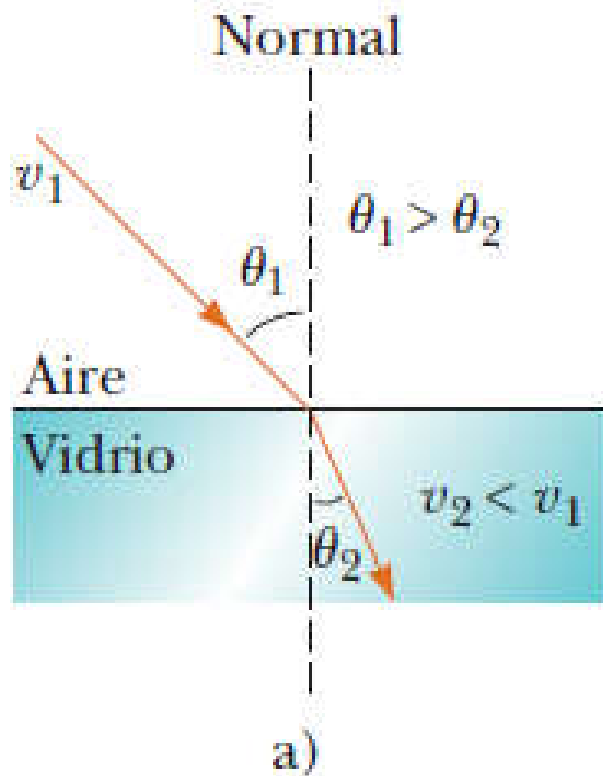
Sin importar cuáles sean los materiales a cada lado de la interfase, en el caso de incidencia *normal* el rayo transmitido no se desvía en absoluto.

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.

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.

La ley de la refracción explica por qué una regla o una pajilla parcialmente sumergidos parecen estar doblados; los rayos de luz que provienen de un lugar por debajo de la superficie cambian de dirección al pasar por la interfase aire-agua, de manera que los rayos parecen provenir de una posición por arriba de su punto de origen real. Un efecto similar explica la apariencia de los atardeceres.

REFRACCIÓN DE LA LUZ



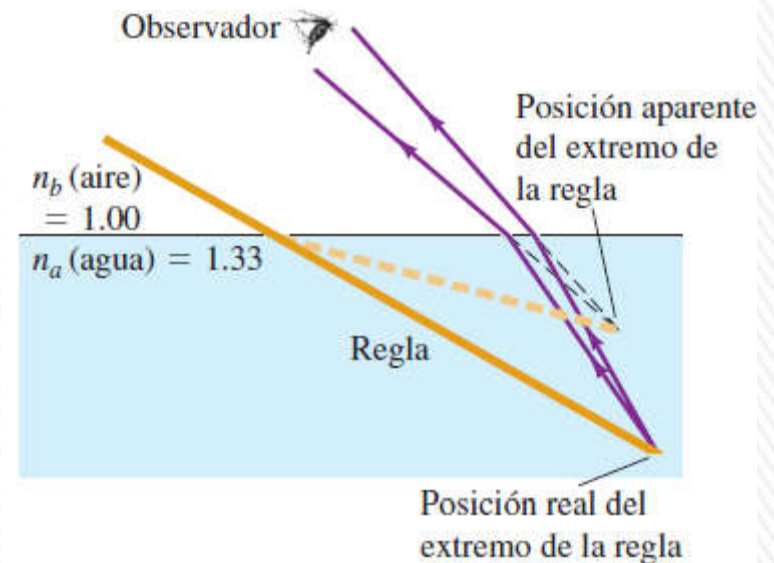
- a) Cuando un haz de luz pasa del aire al vidrio, la luz disminuye su velocidad al entrar a éste y su trayectoria se dobla hacia la normal.
- b) Cuando el haz se mueve del vidrio al aire, la luz aumenta su velocidad al entrar al aire y su trayectoria se dobla alejándose de la normal.

REFRACCIÓN DE LA LUZ

a) Una regla recta sumergida a la mitad en agua



b) ¿Por qué se ve doblada la regla?



a) La regla en realidad es recta, pero parece que se dobla al entrar 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 afuera de la superficie del agua, el objeto parece estar mucho más cerca de la superficie de lo que en realidad está.

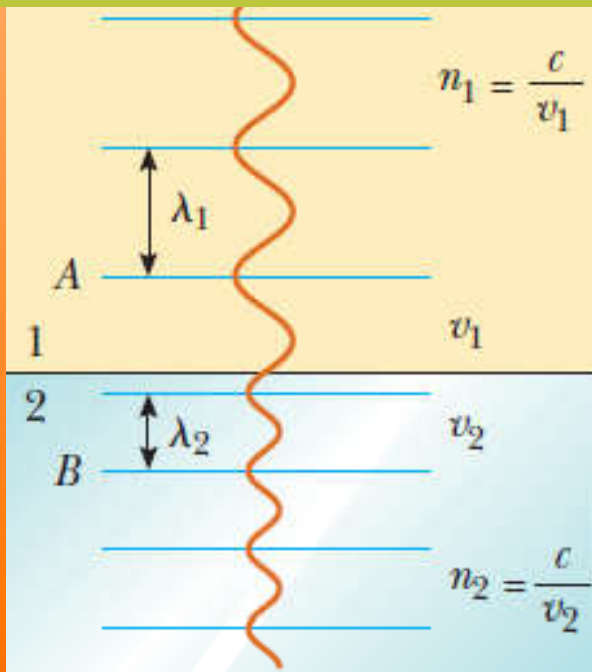
REFRACCIÓN DE LA LUZ



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.

Índice de refracción y aspectos ondulatorios de la luz



n el índice de refracción, es un número sin dimensiones mayor que 1 porque $v < c$.
 n es igual a la unidad para el vacío.

Cuando la luz pasa de un medio a otro, su frecuencia no cambia, pero sí lo hace su longitud de onda.

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.

La longitud de onda λ , 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.

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

Un medio se dice que es ópticamente más denso que otro si su índice de refracción es mayor.

REFLEXIÓN INTERNA TOTAL

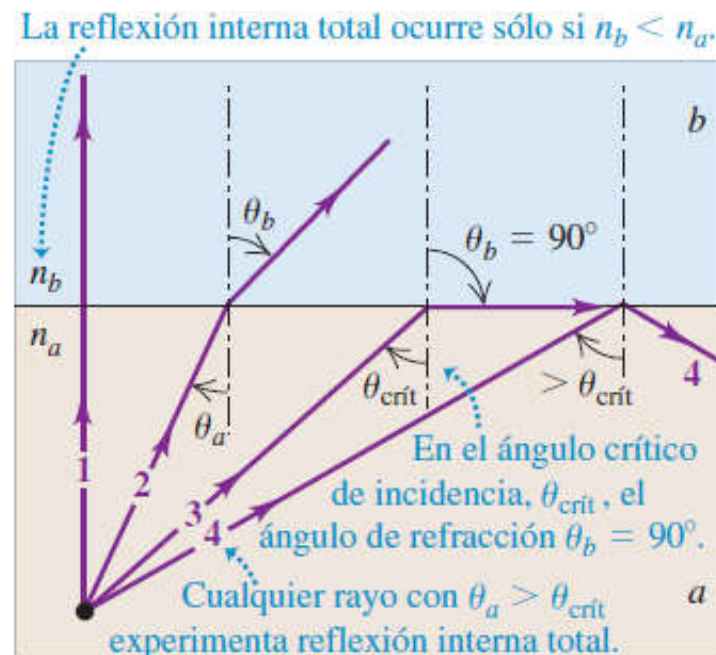
PHET: https://phet.colorado.edu/sims/html/bending-light/latest/bending-light_es.html

La luz es parcialmente reflejada y parcialmente transmitida en una interfase entre dos materiales con distintos índices de refracción.

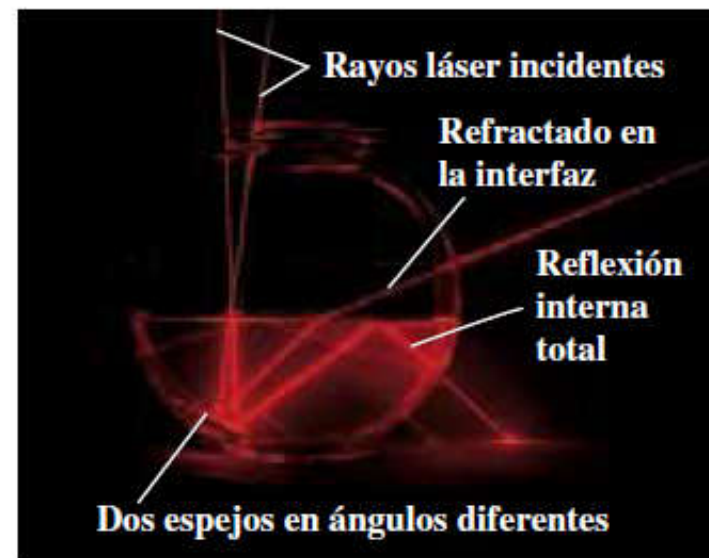
Sin embargo, en ciertas circunstancias, *toda la luz se puede reflejar en la interfase, sin que se transmita nada de ella*, aun si el segundo material es transparente.

Los rayos inciden en la superficie del segundo material b con índice n_b , donde $n_a > n_b$.
Los materiales a y b podrían ser agua y aire, respectivamente: $\sin \theta_b = \frac{n_a}{n_b} \sin \theta_a$

a) Reflexión interna total



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



REFLEXIÓN INTERNA TOTAL

$\sin \theta_b = \frac{n_a}{n_b} \sin \theta_a$ como $n_a / n_b > 1$, $\sin \theta_b > \sin \theta_a$;
el rayo se desvía apartándose de la normal.

Hay un valor de θ_a menor que 90° para el cual $\sin \theta_b = 1$ y $\theta_b = 90^\circ$.

El ángulo de incidencia para el cual el rayo refractado emerge en forma tangencial a la superficie se llama **ángulo crítico** ($\theta_{crít.}$).

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 ubicado en la parte superior: queda atrapado en el material de la parte inferior y se refleja por completo en la frontera de la superficie: reflexión interna total.

Solo ocurre si la incidencia del rayo es desde un material con mayor índice de refracción: $n_b < n_a$ (por ejemplo del agua al aire, pero nunca al revés)

$$\sin \theta_{crít.} = \frac{n_b}{n_a}$$

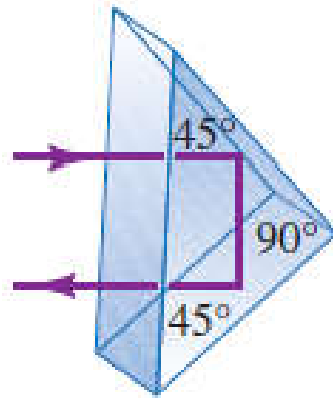
La reflexión interna total ocurrirá si el ángulo de incidencia θ_a es *mayor o igual* que $\theta_{crít.}$

Aplicaciones de la reflexión interna total

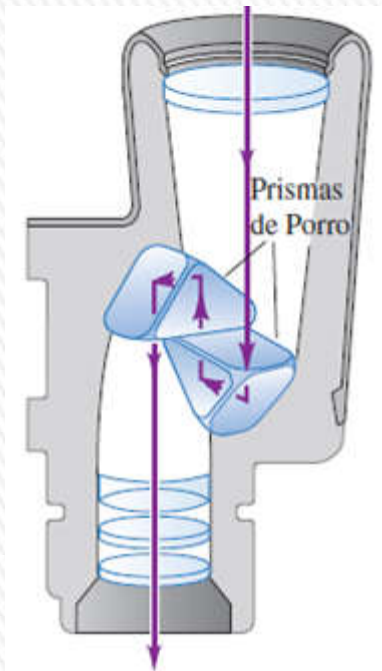
Vidrio de índice de refracción es $n = 1,52$,
la luz que se propaga dentro de este vidrio encuentra una interfase vidrio-aire, el ángulo crítico es

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

La luz se reflejará totalmente si incide en la superficie vidrio-aire con un ángulo de $41,1^\circ$ 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.

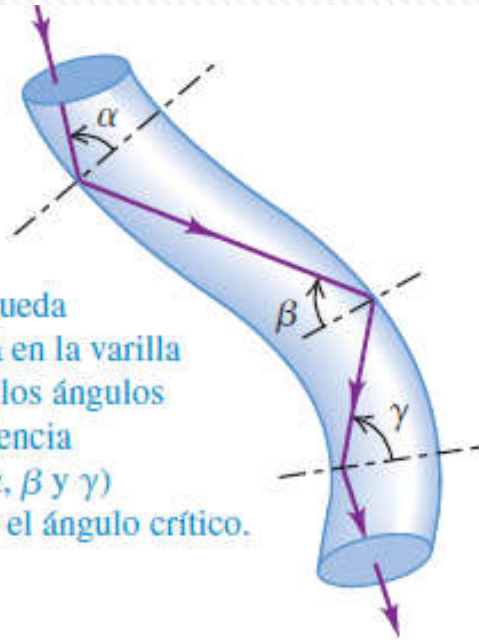


Si el rayo incidente está orientado como se ilustra, la reflexión interna total ocurre en las caras a 45° (porque para una interfase vidrio-aire, $\theta_{\text{crít}} = 41.1$).



Aplicaciones de la reflexión interna total

FIBRAS ÓPTICAS -ENDOSCOPIOS



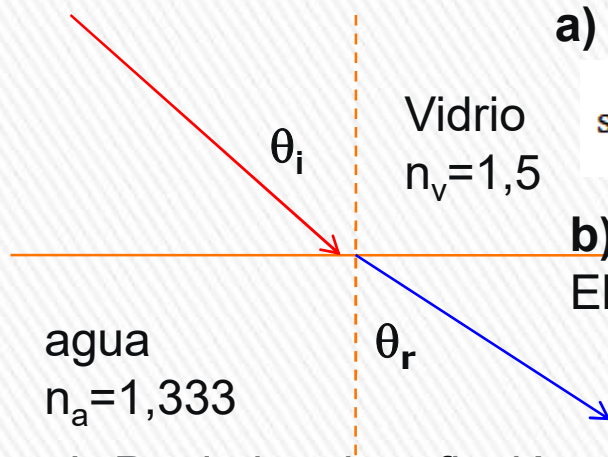
La luz queda atrapada en la varilla si todos los ángulos de incidencia (como α , β y γ) exceden el ángulo crítico.

33.16 Transmisión de imágenes por un haz de fibras ópticas.



EJEMPLO: Ejercicio 5.1

- a) Un rayo de luz incide desde el vidrio en una superficie vidrio-agua formando un ángulo de 45° . Hallar el ángulo de refracción si el índice de refracción del vidrio es de 1,5.
- b) ¿Cuál es el ángulo crítico para la reflexión total de la luz que pasa desde un vidrio de índice de refracción 1,5 al aire?
- c) Un rayo de luz incide desde el aire al agua con un ángulo de 30° respecto a la normal. Parte de la luz se refleja y parte se refracta. Hallar los ángulos de ambos rayos. ¿Qué cambiaría si el rayo incidiera con el mismo ángulo pero desde el agua al aire?



a) Ley de Snell: $n_v \sin \theta_i = n_a \sin \theta_r$ $\sin \theta_r = \frac{n_v}{n_a} \sin \theta_i$

$\sin \theta_r = \frac{1,5}{1,333} \sin 45^\circ = 0,7956941$ $\theta_r = 52,72^\circ$

$\theta_r = 53^\circ$

- b) Considero que el índice de refracción del aire vale 1,00. El ángulo crítico está dado para este caso por:

$\theta_{\text{crít.}} = \sin^{-1} \left(\frac{n_{\text{aire}}}{n_{\text{vidrio}}} \right) = \sin^{-1} \left(\frac{1,00}{1,50} \right) = 41,81^\circ$

$\theta_{\text{crít.}} = 42^\circ$

- c) Por la ley de reflexión, el ángulo reflejado es igual al incidente $\theta_{\text{reflejado}} = 30^\circ$

$\theta_{\text{reflejado}} = 30^\circ$

Ley de Snell: $n_{\text{aire}} \sin \theta_i = n_{\text{agua}} \sin \theta_r$

$\sin \theta_r = \frac{n_{\text{aire}}}{n_{\text{agua}}} \sin \theta_i = \frac{1,00}{1,33} \sin 30^\circ = 0,3750938$ $\theta_r = 22,03$

$\theta_r = 22^\circ$

Si la incidencia es desde el agua al aire tendríamos que:

$\sin \theta_r = \frac{n_{\text{agua}}}{n_{\text{aire}}} \sin \theta_i = \frac{1,00}{1,33} \sin 30^\circ = 0,6665$ $\theta_r = 41,80^\circ$

$\theta_r = 42^\circ$

DISPERSIÓN

Luz blanca superposición de ondas con λ que se extienden a través de todo el espectro visible (400 a 700 nm) (ó incluso 380-780 nm).

La rapidez de la luz en el vacío es la misma para todas las λ , pero en la materia varía con λ .

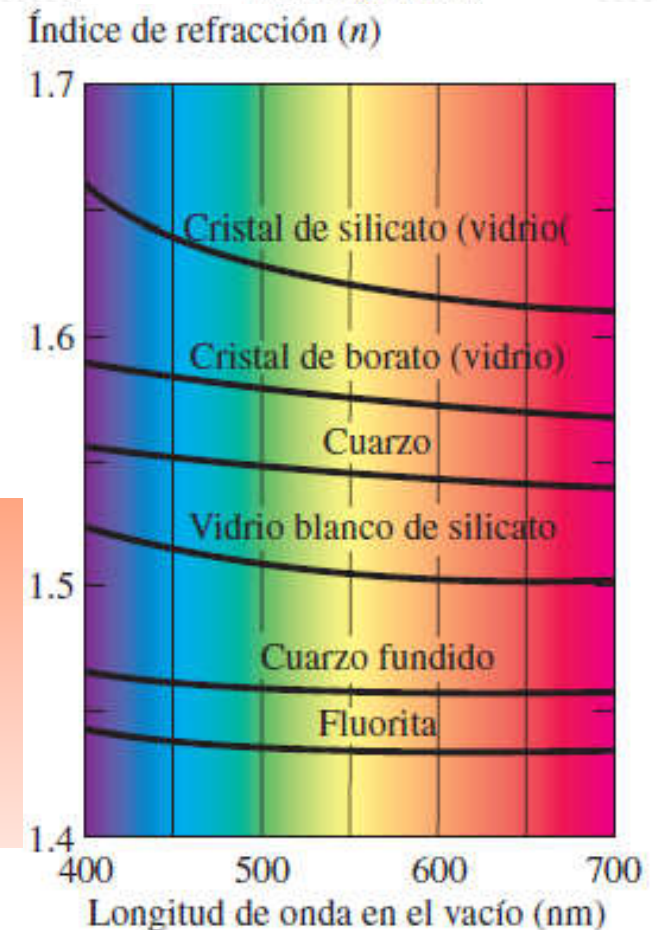
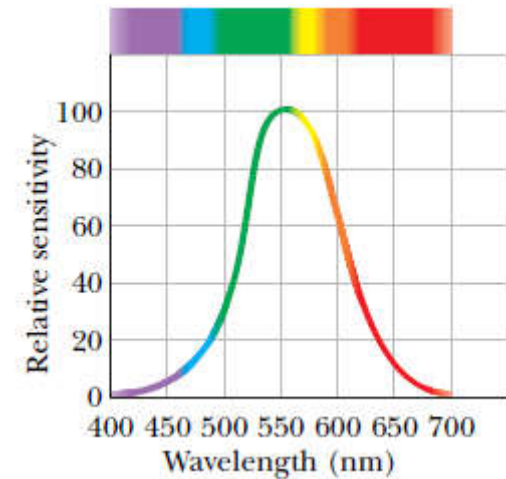
Índice de refracción (n) de un material depende de λ : **dispersión.**

Variación del índice de refracción n con λ .
En gral. n disminuye al aumentar λ .

Como n depende de λ , por la ley de Snell luces de diferentes λ se refractan a diferentes ángulos cuando inciden sobre un material.

Cuando un haz de *luz blanca* (combinación de todas las longitudes de onda visibles) incide en un prisma 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, cian, azul y violeta.



DISPERSIÓN

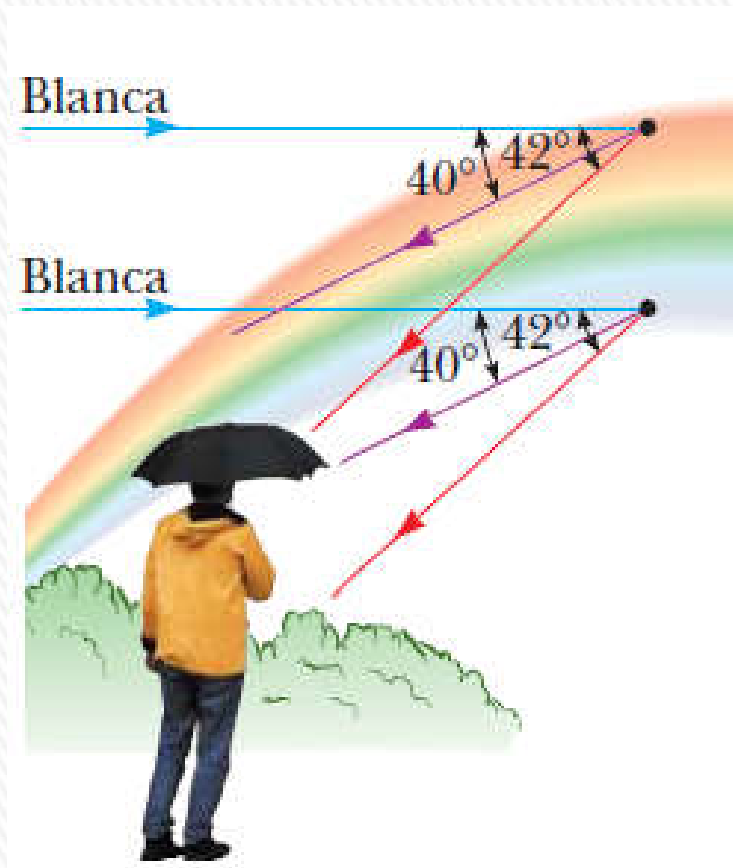
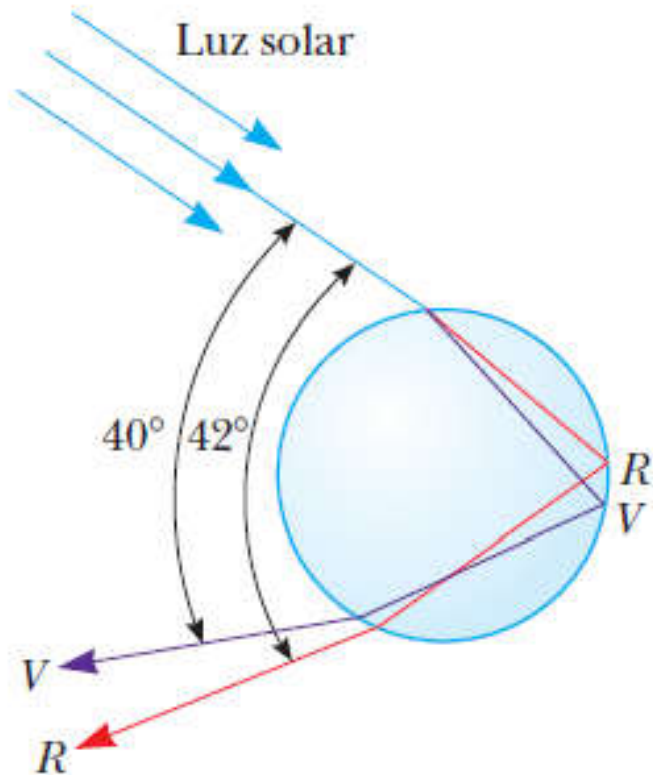


rojo	618-780 nm
anaranjado	581-618 nm
amarillo	570-581 nm
verde	497-570 nm
cian	476-497 nm
azul	427-476 nm
violeta	380-427 nm

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

No hay límites exactos en el espectro visible: un típico ojo humano responderá a longitudes de onda de 390 a 750 nm aunque algunas personas pueden ser capaces de percibir longitudes de onda desde 380 hasta 780 nm.

DISPERSIÓN



Trayectoria de luz solar a través de una gota esférica de lluvia. La luz que sigue esta trayectoria contribuye al arco iris visible.

Formación de un arco iris visto por un observador situado con el Sol a su espalda.

DISPERSIÓN

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 anterior. 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: primero es refractado en la superficie frontal de la gota, ahí la luz violeta tiene la mayor desviación y la luz roja la menor. 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. 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° . 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 otra 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.

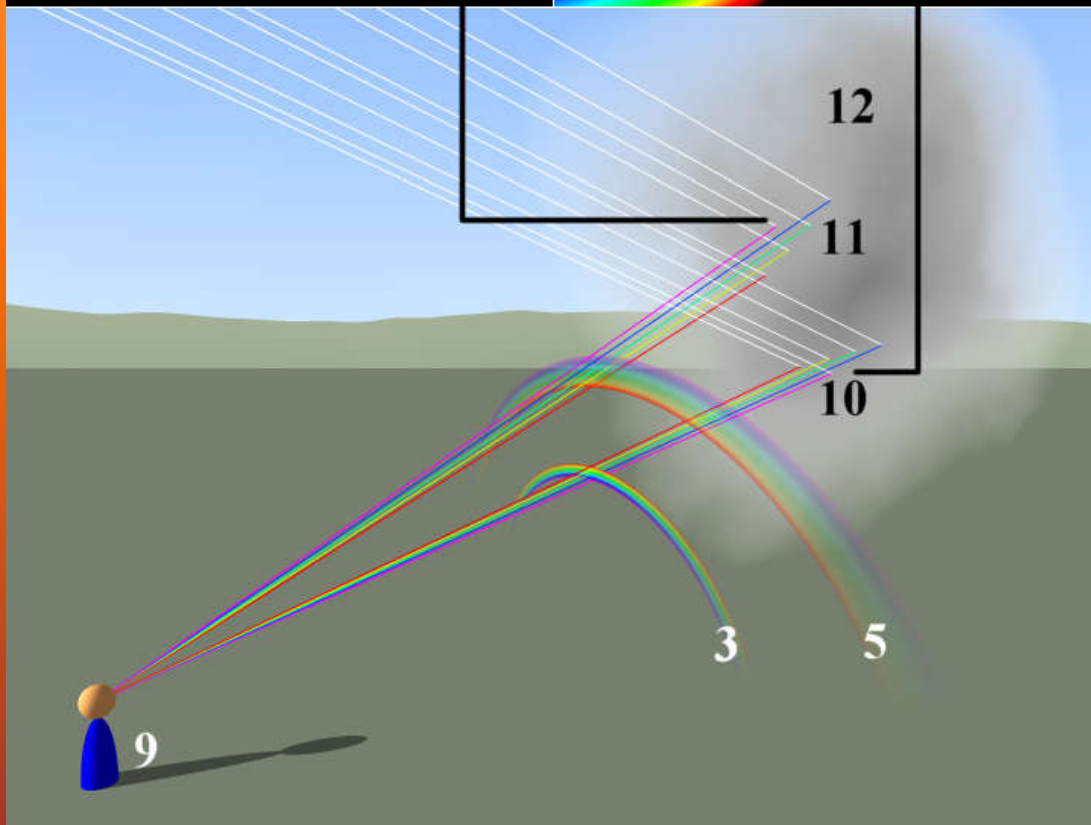
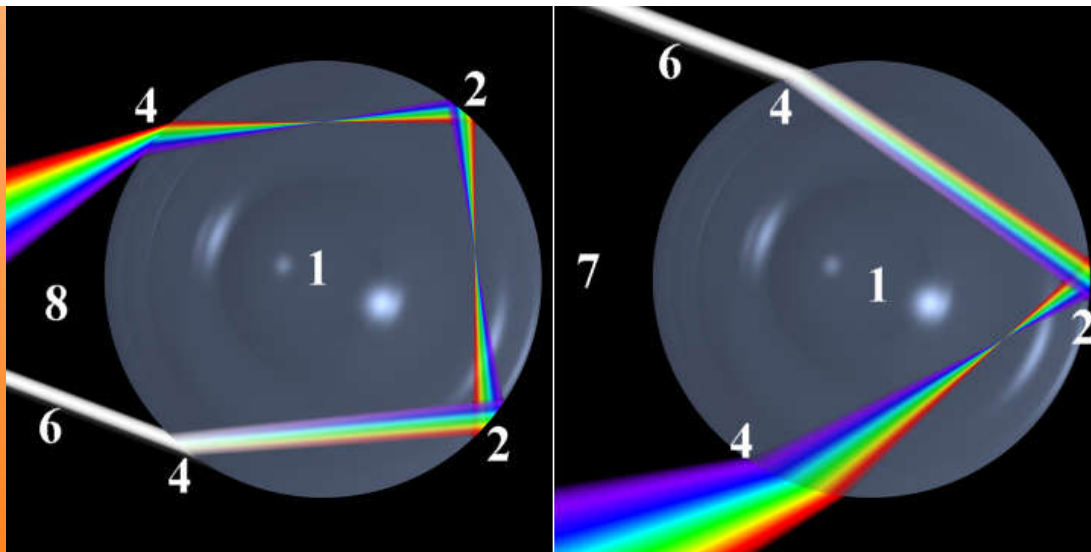


Diagrama que muestra como se forman los arco iris primarios y secundarios debido a la descomposición de la luz blanca en gotitas esféricas:

1. Gotitas esféricas
2. Lugares donde ocurre el reflejo interno de la luz
3. Arco iris primario
4. Lugares donde ocurre la refracción de la luz.
5. Arco iris secundario
6. Rayos entrantes de luz blanca
7. **Recorrido de la luz que forma el arco iris primario**
8. **Recorrido de la luz que forma el arco iris secundario**
9. Observador
10. Región que forma el arco iris primario
11. Región que forma el arco iris secundario
12. Zona en la atmósfera llena de incontables diminutas gotitas esféricas

EJEMPLO: Ejercicio 5.5

Haga este sencillo experimento por su cuenta.

Tome dos tazas opacas, coloque una moneda en el fondo de cada taza cerca del borde, y llene una taza con agua.

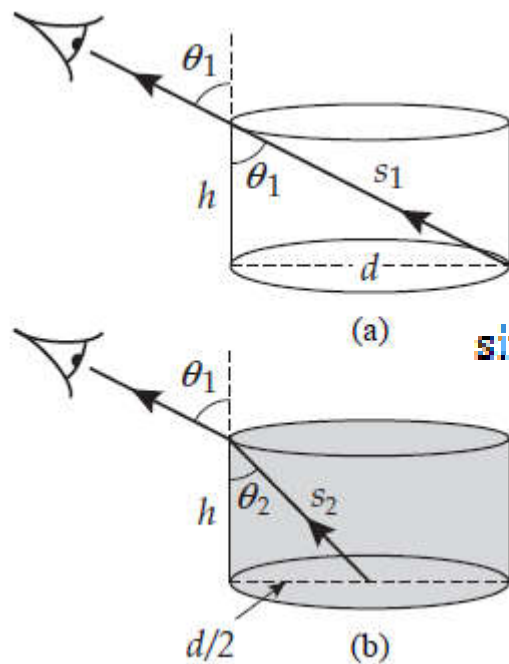
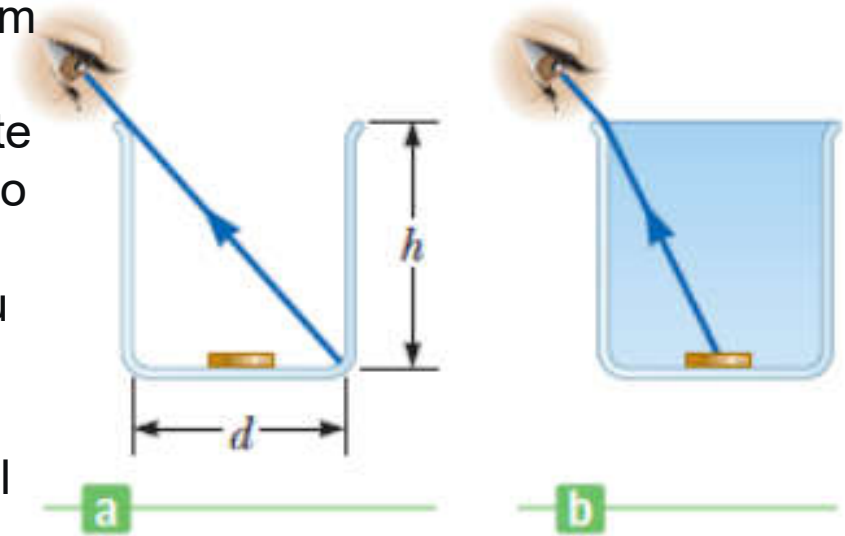
A continuación, vea las tazas desde un lado en algún ángulo de modo que la moneda en el agua sea apenas visible, como se muestra en la figura de la izquierda.

Tenga en cuenta que la moneda en aire no es visible, como se muestra a la derecha en la figura.



EJEMPLO: Ejercicio 5.5

Una lata cilíndrica tiene un diámetro $d = 25,0$ cm y una altura $h = 25,0$ cm. Un observador se coloca de tal manera que puede ver únicamente la parte más distante del fondo (figura a). Luego se vierte líquido dentro de la lata y cuando alcanza el borde, el observador, sin cambiar su posición original, alcanza precisamente a ver una pequeña moneda que se encuentra centrada en el fondo de la lata (figura b). ¿Cuál es el índice de refracción del líquido?



Asumo n del aire como 1,00.

Por la ley de Snell: $n_{\text{aire}} \sin \theta_1 = n \sin \theta_2$

$$n = \frac{n_{\text{aire}} \sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} \quad \sin \theta_1 = \frac{d}{s_1} = \frac{d}{\sqrt{h^2 + d^2}}$$

$$\sin \theta_2 = \frac{d/2}{s_2} = \frac{d}{2\sqrt{h^2 + \left(\frac{d}{2}\right)^2}} \quad n = \frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{d}{\sqrt{h^2 + d^2}} \frac{2\sqrt{h^2 + \left(\frac{d}{2}\right)^2}}{d} = \frac{2\sqrt{h^2 + \left(\frac{d}{2}\right)^2}}{\sqrt{h^2 + d^2}}$$

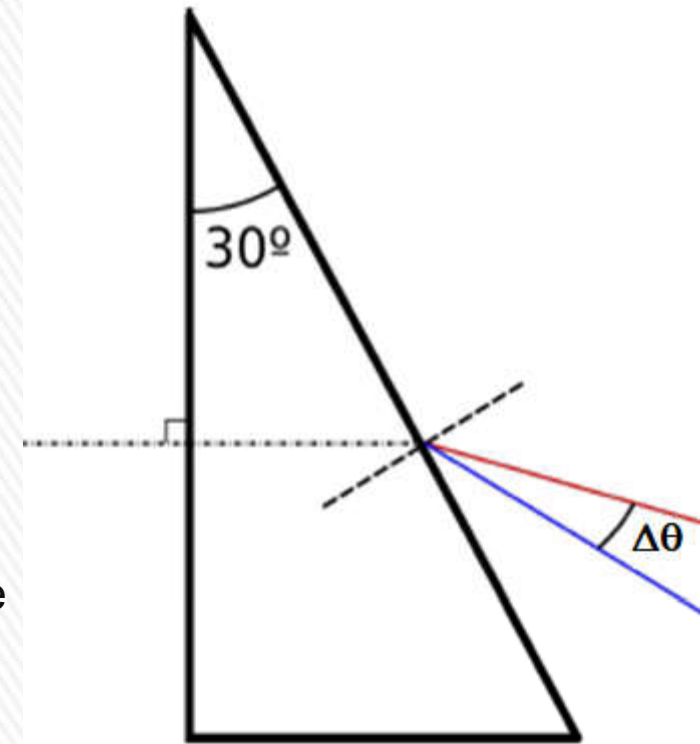
$$n = \frac{2\sqrt{h^2 + \left(\frac{d}{2}\right)^2}}{\sqrt{h^2 + d^2}} = \frac{2\sqrt{25,0^2 + \left(\frac{25,0}{2}\right)^2}}{\sqrt{25,0^2 + 25,0^2}} = 1,5811$$

$n = 1,58$

EJEMPLO: Ejercicio 5.7.a

Prismas a) Luz blanca entra en un prisma de vidrio de sección triangular. Incide perpendicularmente a la cara delantera y es refractada en la cara trasera. El ángulo entre las caras es de $30,0^\circ$. Si el índice de refracción del vidrio es $n_A = 1,525$ para la luz azul ($\lambda = 450 \text{ nm}$) y $n_R = 1,512$ para luz roja ($\lambda = 650 \text{ nm}$) ¿cuál es el ángulo entre la luz roja y la luz azul después de pasar por el prisma?

Por la ley de Snell: $n_{\text{vidrio}} \sin \theta_1 = n_{\text{aire}} \sin \theta_2 = \sin \theta_2$
Para todos los colores, el ángulo de incidencia desde el vidrio vale $\theta_1 = 30,0^\circ$
Para c/u de los colores se cumple:



$$\theta_{\text{rojo}} = \sin^{-1}(n_{\text{rojo}} \sin \theta_1) = \sin^{-1}(n_{\text{rojo}} \sin 30,0^\circ) = \sin^{-1}(0,500 \times n_{\text{rojo}})$$

$$\theta_{\text{rojo}} = \sin^{-1}(0,500 \times n_{\text{rojo}}) = \sin^{-1}(0,500 \times 1,512) = 49,1128^\circ$$

$$\theta_{\text{azul}} = \sin^{-1}(0,500 \times n_{\text{azul}}) = \sin^{-1}(0,500 \times 1,525) = 49,6851^\circ$$

$$\Delta\theta = 0,572^\circ$$