

05.1-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. Hasta la época de Newton, la mayoría de los científicos pensaban que la luz consistía en corrientes de partículas (llamadas *corpúsculos*) *emitidas por las fuentes luminosas*.

Teoría corpuscular de Newton: partículas de la luz eran emitidas por la fuente luminosa y estimulaba sentido de la vista al entrar en los ojos. Explicaba la reflexión y la refracción.

Sobre fines del siglo XVII comenzaron a descubrirse evidencias de las propiedades *ondulatorias de la luz*.

1678 Christian Huygens: demostró que una teoría de ondas de luz podría también explicar la reflexión y la refracción (**teoría ondulatoria**).

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, como vimos.

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.

NATURALEZA DE LA LUZ

Las **fuentes fundamentales** de toda la **radiación electromagnética** son las **cargas eléctricas aceleradas**.

Todos los cuerpos emiten radiación electromagnética como resultado del movimiento térmico de sus moléculas (**radiación térmica**), *es una mezcla de diferentes longitudes de onda*.

A altas temperaturas, toda la materia emite suficiente luz visible para ser luminosa por sí misma: la llama de una vela, las brasas calientes de una fogata, la bobina de un calentador doméstico y el filamento de una lámpara incandescente.

La luz también se produce durante descargas eléctricas a través de gases ionizados: el brillo azulado de las lámparas de arco de mercurio, la luz amarillo naranja de las lámparas de vapor de sodio.

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*.

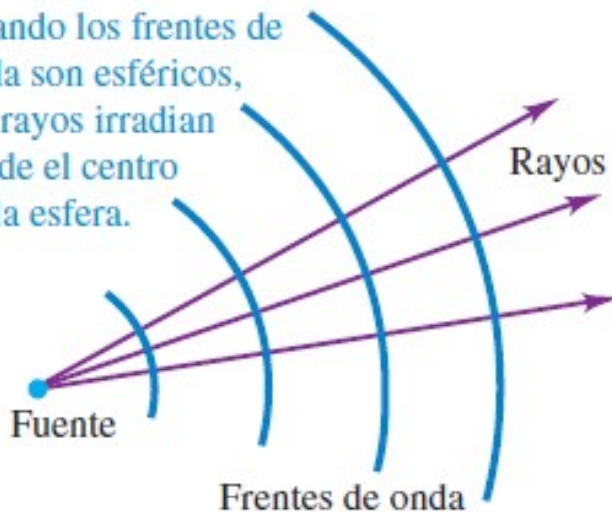
Sin importar cuál sea su fuente, la radiación electromagnética viaja en el vacío con la misma rapidez: $c = 2,99792458 \times 10^8 \text{ m/s}$.



Ondas, frentes de onda y rayos

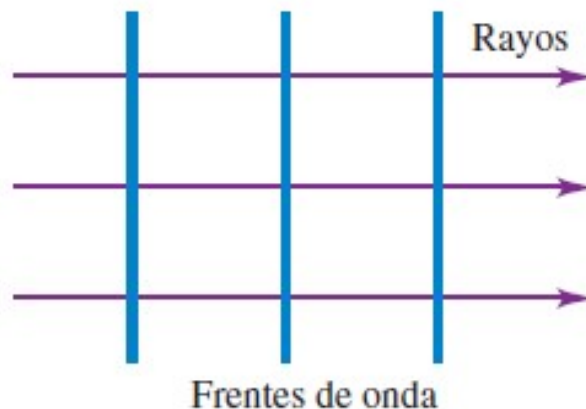
a)

Cuando los frentes de onda son esféricos, los rayos irradian desde el 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.



El **frente de onda** se define como *el lugar geométrico de todos los puntos adyacentes en los cuales la fase de vibración de una cantidad 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.

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.

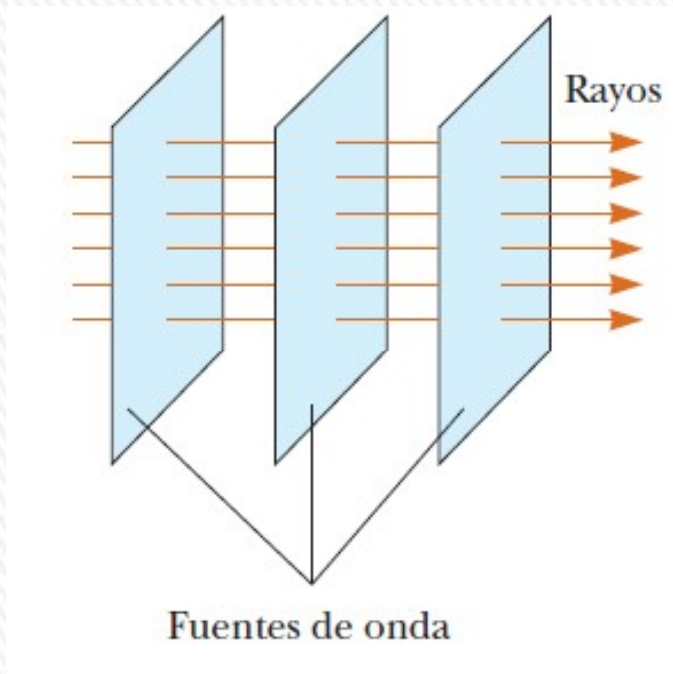
Los rayos se utilizaron para describir la luz mucho tiempo antes de que su naturaleza ondulatoria estuviera firmemente establecida.

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.**

APROXIMACIÓN DE UN RAYO EN ÓPTICA GEOMÉTRICA

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 ya sea en espacio o en tiempo.



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.

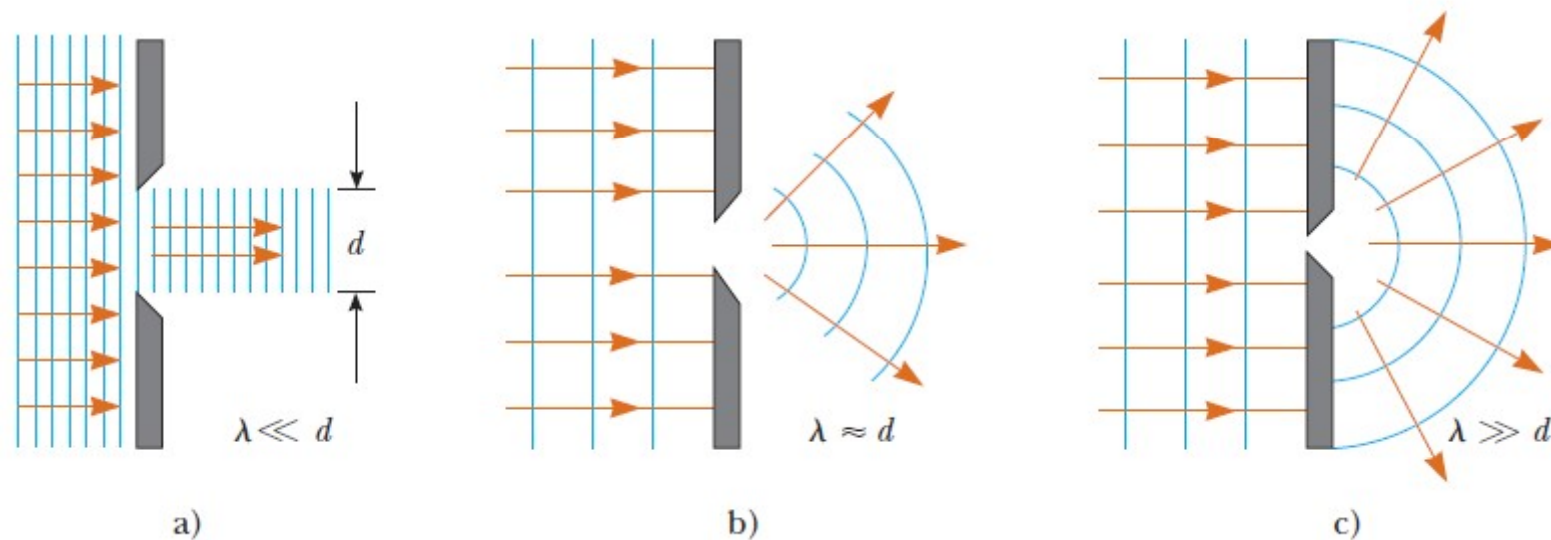
Onda plana que se propaga a la derecha. Los rayos, que siempre apuntan en la dirección de propagación de la onda, son rectas perpendiculares a los frentes de onda.



APROXIMACIÓN DE UN RAYO EN ÓPTICA GEOMÉTRICA

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

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

REFLEXIÓN Y REFRACCIÓN

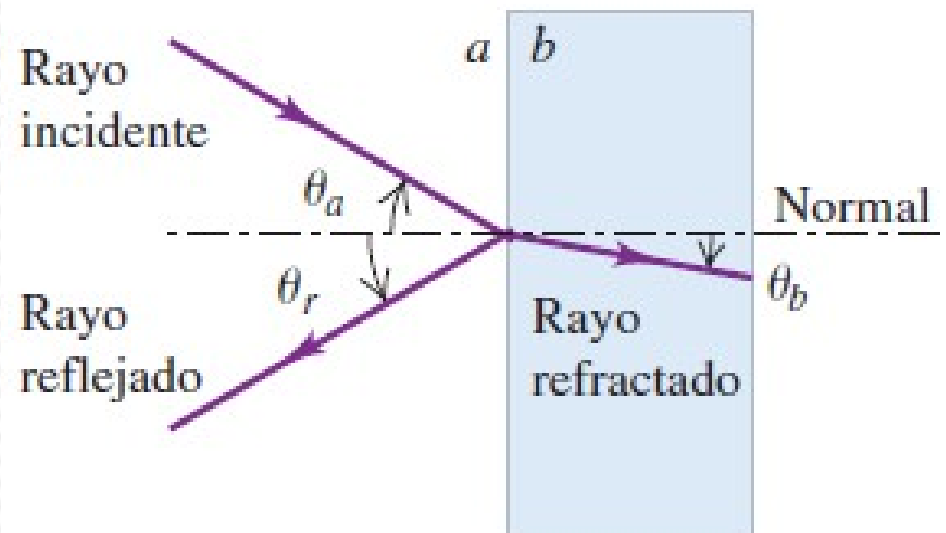
Usaremos el modelo de la luz basado en *rayos para explorar dos de los aspectos más importantes de la propagación de la luz: la reflexión y la refracción.*

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*, como se ilustra en la figura.

Los segmentos de ondas planas *pueden representarse por paquetes de rayos que forman haces de luz o para simplificar, es frecuente que se dibuje un solo rayo de cada haz.*

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

c) Representación simplificada para ilustrar solo un conjunto de rayos



REFLEXIÓN Y REFRACCIÓN

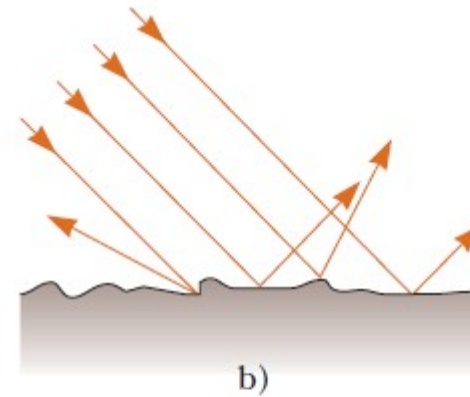
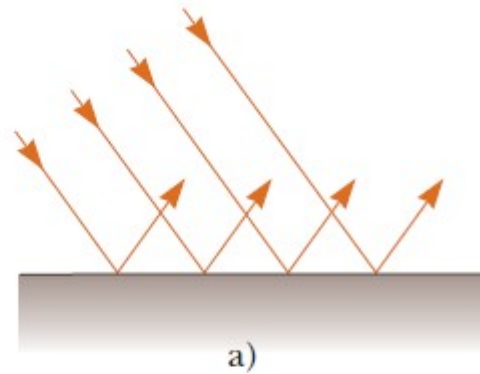
Cuando un rayo de luz que se desplaza en un medio encuentra una frontera con otro medio, parte de la luz incidente se refleja (y parte se transmite).

Reflexión especular: los rayos del haz de luz inciden sobre una superficie reflectora lisa, semejante a espejo, los rayos reflejados son paralelos entre sí. La dirección de un rayo reflejado está en el plano perpendicular a la superficie reflectora que contiene al rayo incidente.

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.

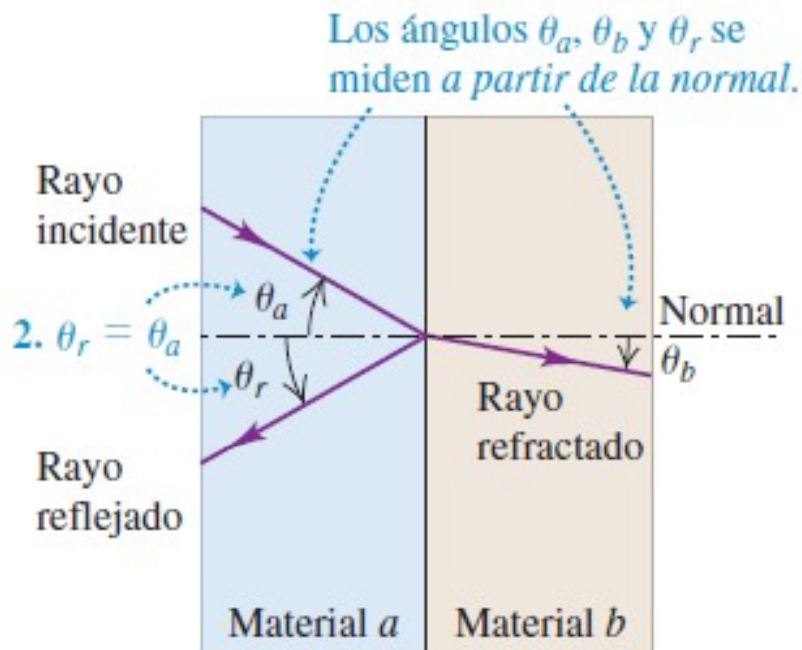
Índices de refracción

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

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

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:

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

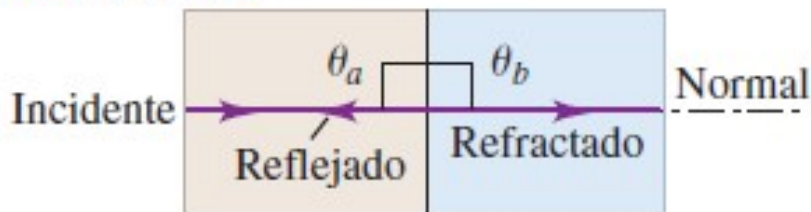
3. Para la luz monocromática y para un par dado de materiales, *a* y *b*, en *lados* opuestos de la interfase,

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

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.



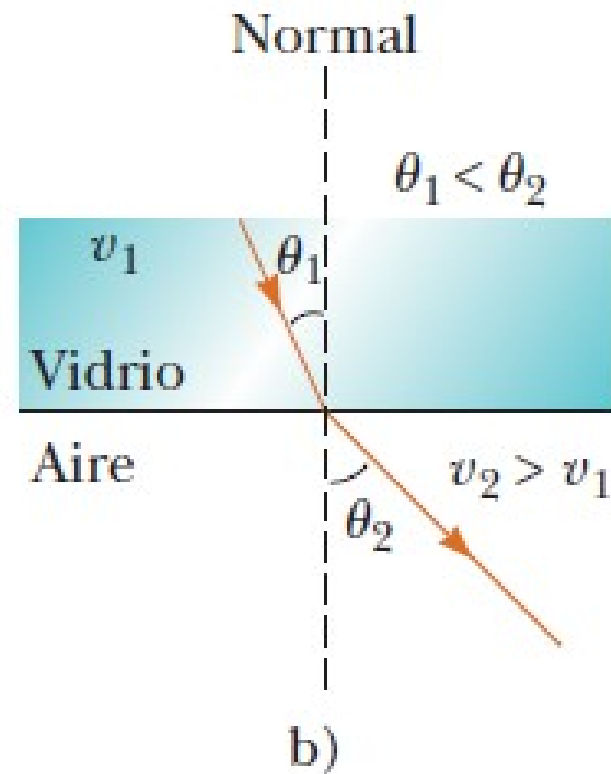
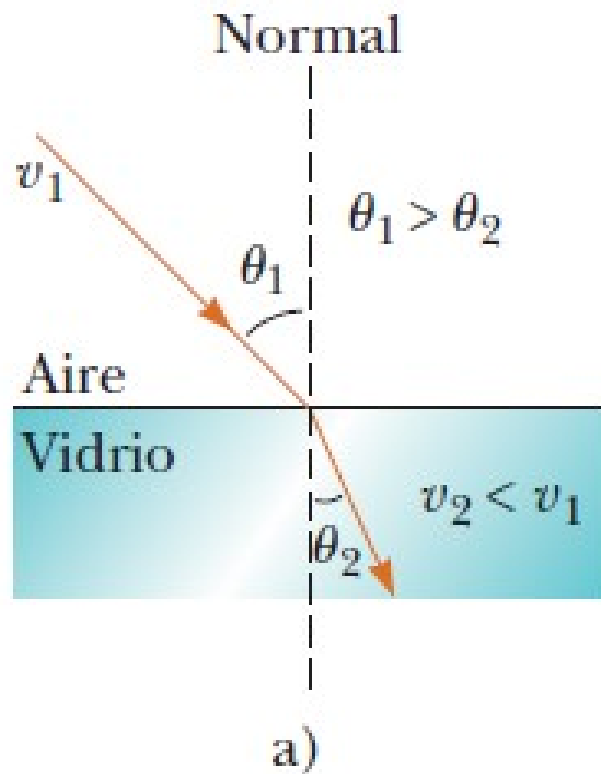
Sin importar cuáles sean los materiales a cada lado de la interfase, en el caso de incidencia *normal* el rayo transmitido no se desvía en absoluto.

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.

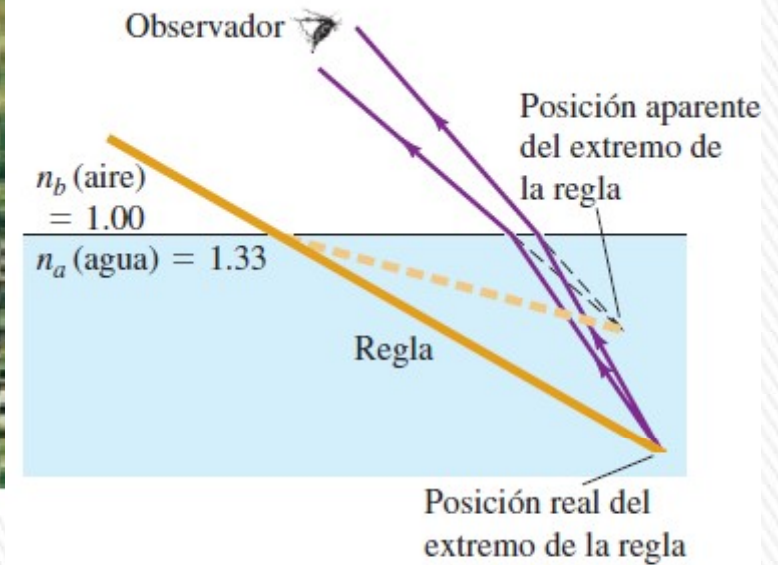
b) Cuando el haz se mueve del vidrio al aire, la luz aumenta su velocidad al entrar al aire y su trayectoria se dobla alejándose de la normal.

REFRACCIÓN DE LA LUZ

a) Una regla recta sumergida a la mitad en agua



b) ¿Por qué se ve doblada la regla?



Si la luz incide desde un medio ópticamente menos denso a un medio más denso, la fase se invierte.

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.

REFLEXIÓN Y REFRACCIÓN

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) del rayo incidente.*

La parte reflejada es mínima cuando la incidencia es normal ($\theta_a = 0^\circ$); *en tal caso, es alrededor del 4% para una interfase 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, la intensidad, la fase y los estados de polarización de las ondas reflejadas y refractadas.

Si la luz incide desde un medio ópticamente menos denso (aire) a un medio más denso (agua), la fase se invierte (es decir se le suma π radianes)

El índice de refracción no solo depende de la sustancia, sino también de la longitud de onda de la luz. La dependencia de la longitud de onda se llama **dispersión**.

El índice de refracción del aire a temperatura y presión estándares es de alrededor de 1,0003, y por lo general lo tomaremos como si fuera exactamente igual a 1.

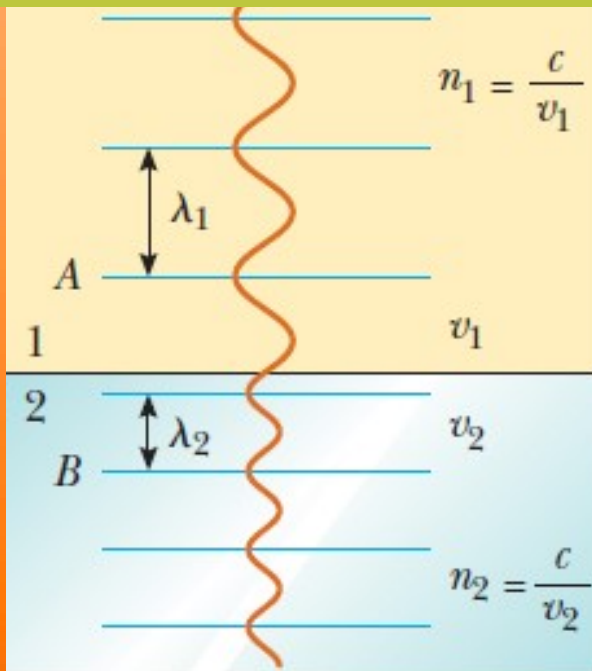
El índice de refracción de un gas se incrementa conforme su densidad aumenta.

La mayoría 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 mayores; un ejemplo de esto es el diamante, con 2,417



Índice de refracción y aspectos ondulatorios de la luz



Por definición, n el índice de refracción, es un número sin dimensiones mayor que la unidad 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

Vimos que 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.

La figura muestra la forma en que ocurre.

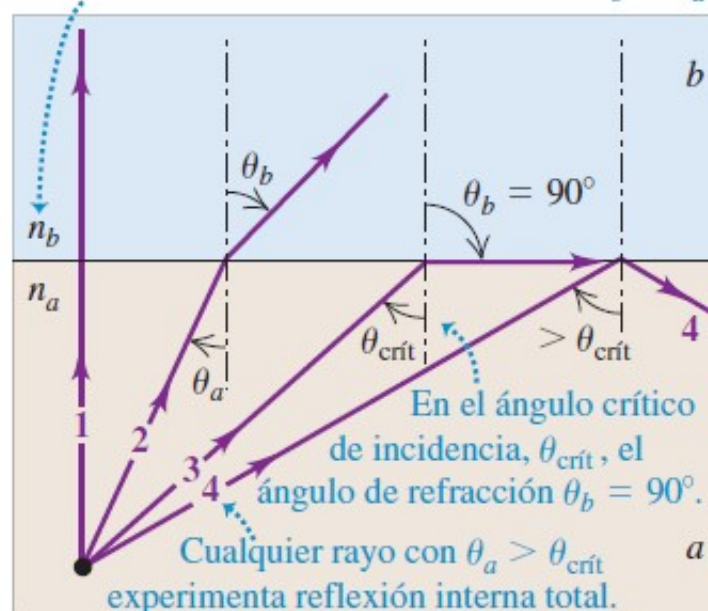
Los rayos inciden en la superficie del segundo material b con índice n_b , donde $n_a > n_b$

Los materiales a y b podrían ser agua y aire, respectivamente:

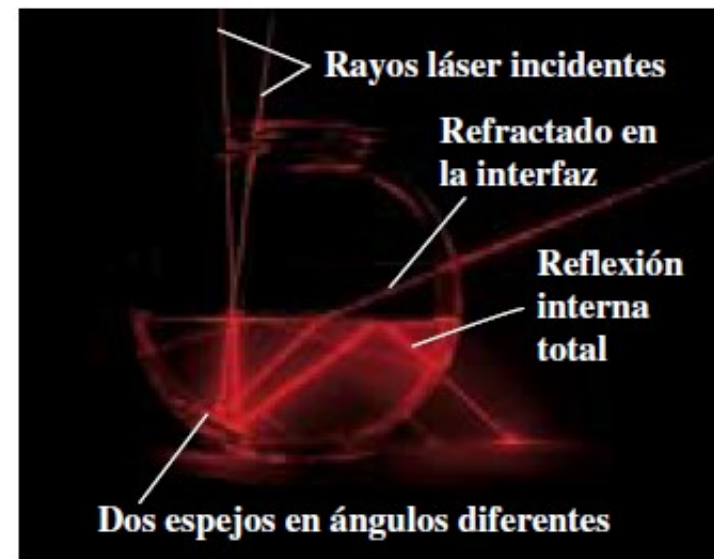
$$\sin \theta_b = \frac{n_a}{n_b} \sin \theta_a$$

a) Reflexión interna total

La reflexión interna total ocurre sólo si $n_b < n_a$.



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.

Así, debe haber algún 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**, y se denota con $\theta_{\text{crít.}}$.

Un análisis más detallado usando 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 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.

Esta situación, llamada **reflexión interna total**, solo ocurre cuando un rayo en el material *a* incide sobre un segundo material *b* cuyo índice de refracción es *menor que el del material a* (es decir, $n_b < n_a$).

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

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

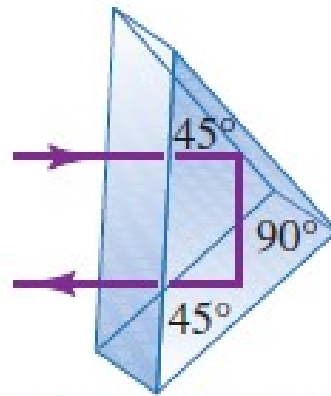
La reflexión interna total tiene numerosas aplicaciones en la tecnología óptica.

Por ejemplo, para un vidrio cuyo índice de refracción es $n = 1,52$.

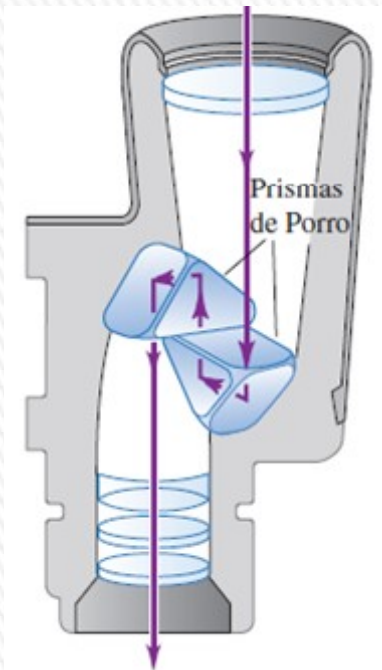
Si la luz que se propaga dentro de este vidrio encuentra una interfase vidrio-aire, el ángulo crítico es

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

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.

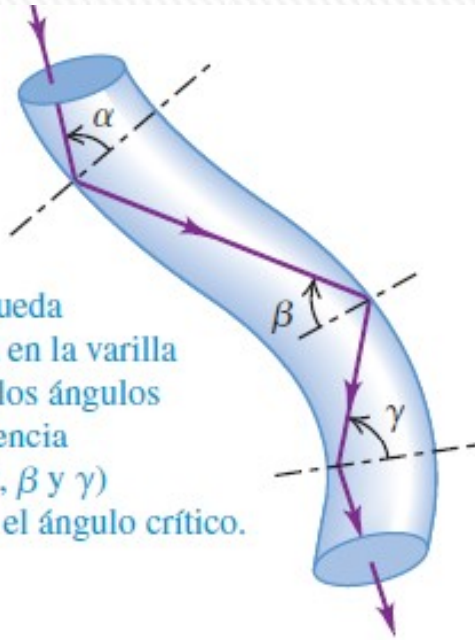


Si el rayo incidente está orientado como se ilustra, la reflexión interna total ocurre en las caras a 45° (porque para una interfase vidrio-aire, $\theta_{\text{crít}} = 41.1$).



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.



DISPERSIÓN

La luz blanca ordinaria es una superposición de ondas con longitudes de onda 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 de la longitud de onda se llama **dispersión**.

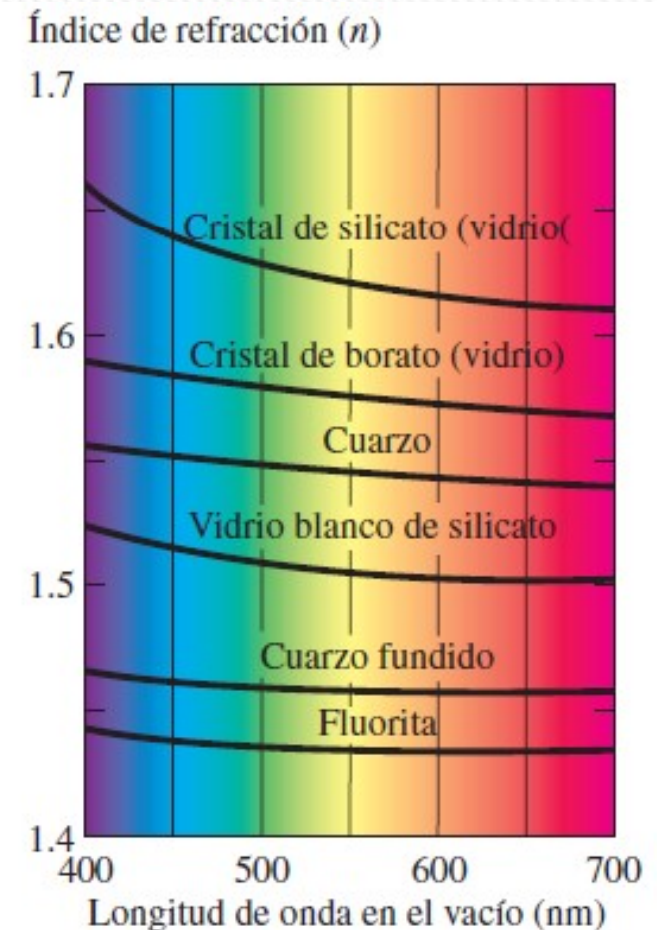
La figura muestra la variación del índice de refracción n con la longitud de onda en algunos materiales ópticos comunes.

En la mayoría de los materiales, el valor de n disminuye al aumentar la longitud de onda.

Como n es una función de la longitud de onda, la ley de Snell indica que luces de diferentes longitudes de onda 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, azul y violeta.



DISPERSIÓN

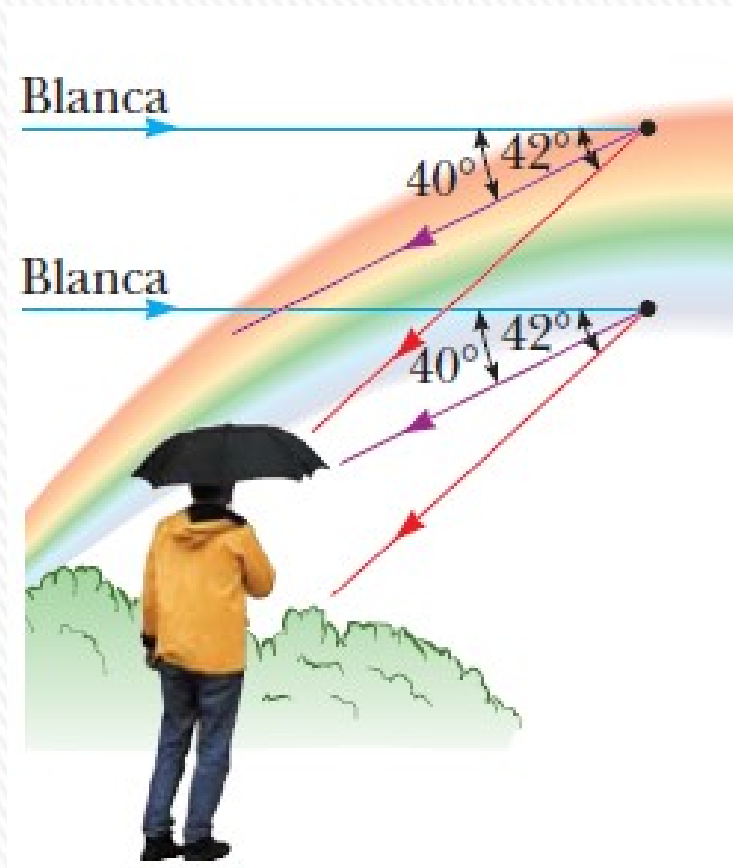
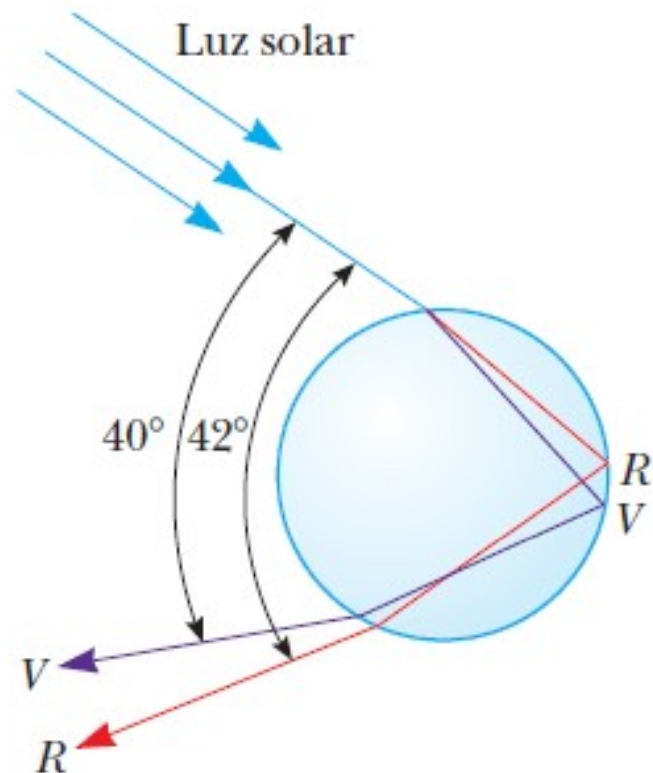


rojo	618-780 nm
anaranjado	581-618 nm
amarillo	570-581 nm
verde	497-570 nm
cian	476-497 nm
azul	427-476 nm
violeta	380-427 nm

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. 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.

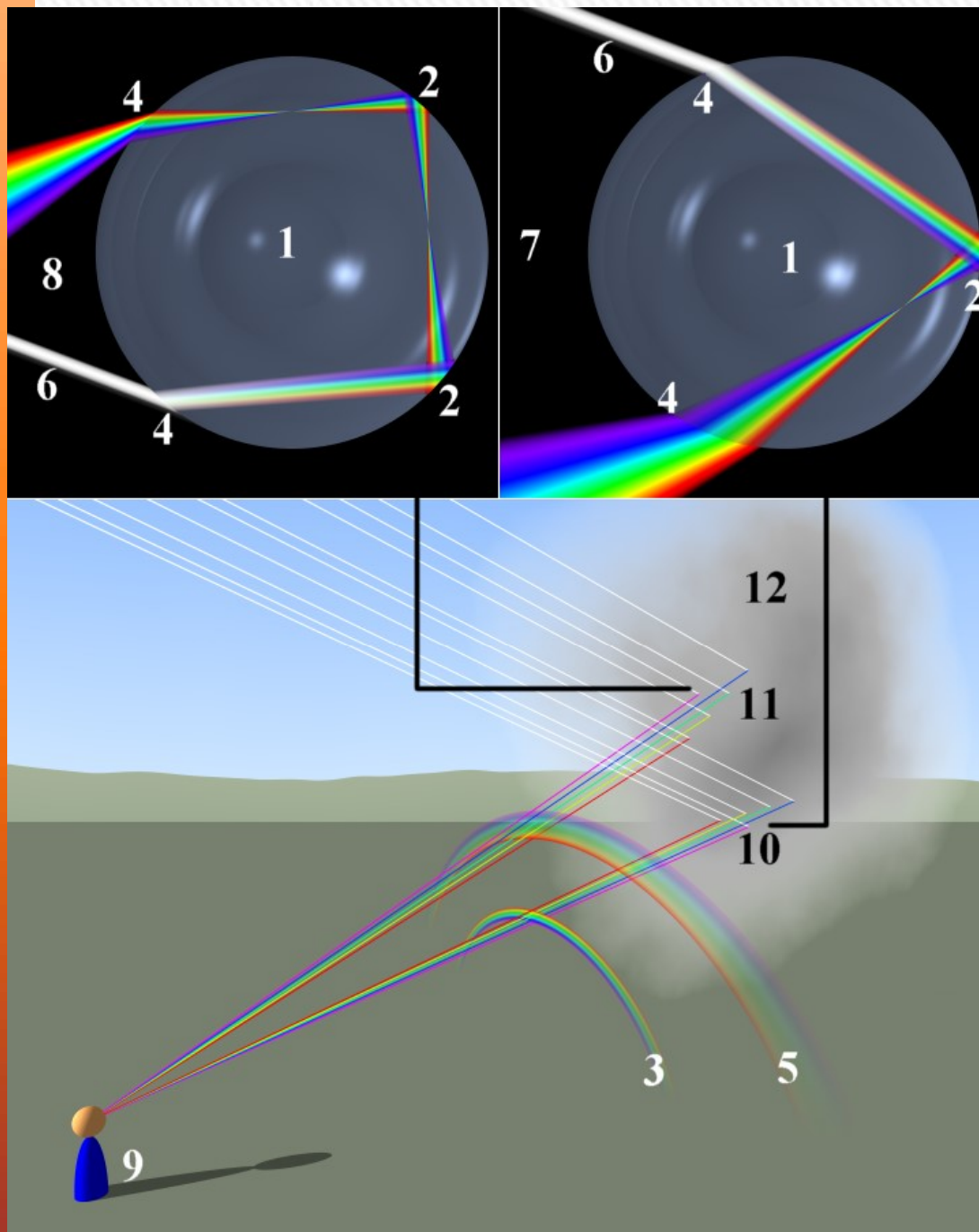


Diagrama que muestra como se forman los arco iris primarios y secundarios debido a la descomposición de luz blanca en gotitas esféricas:

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