RESUMEN

HUYGENS

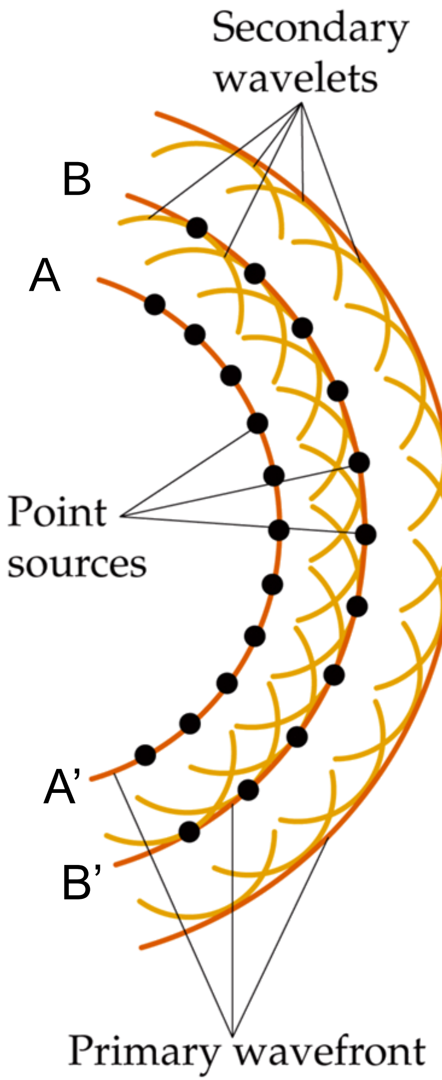
FERMAT

Deducción de las leyes de reflexión y refracción

Las leyes de reflexión y refracción pueden deducirse mediante el principio de Huygens o mediante el principio de Fermat.

Principio de Huygens

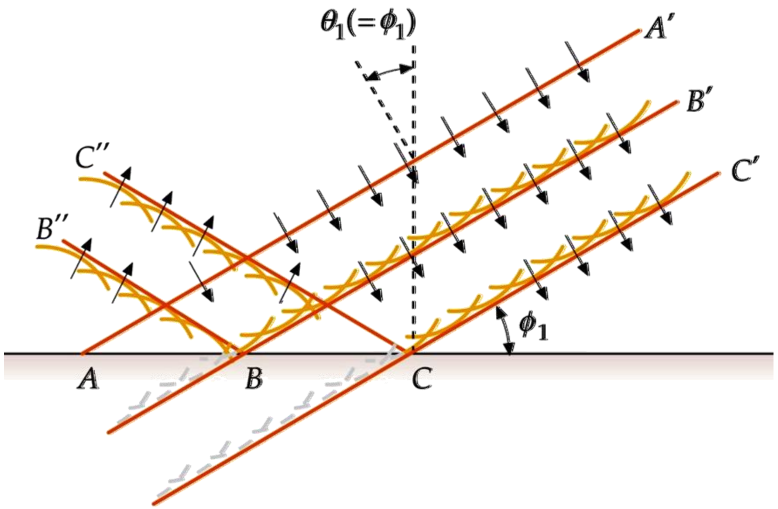
Cada punto de un frente de onda primario sirve como foco (o fuente) de ondas esféricas secundarias que avanzan con una velocidad y frecuencia igual a las de la onda primaria. El frente de onda primario al cabo de un cierto tiempo es la envolvente de estas ondas elementales.

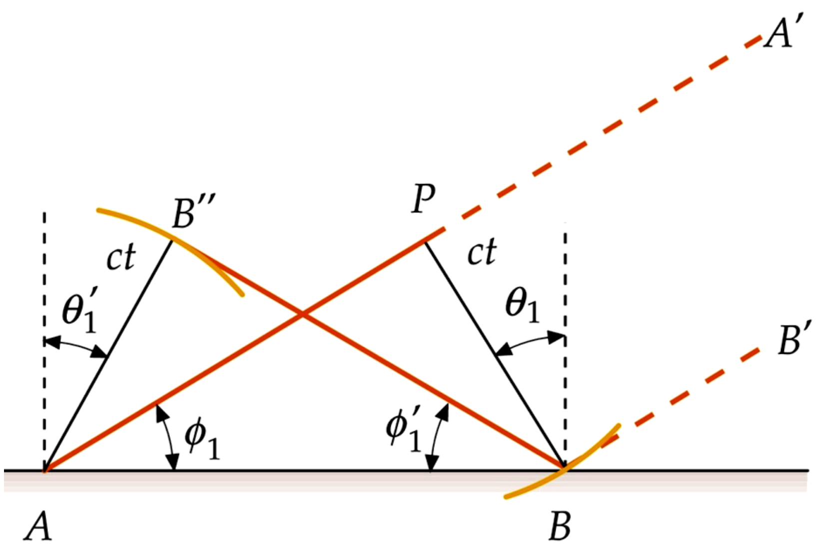


Christiaan Huygens (1629 – 1695)

Para deducir la **ley de reflexión** a partir del principio de Huygens, consideremos una onda plana que se acerca a una *superficie reflectante plana.*

onda plana reflejada en un espejo plano





- el frente de onda *A´* incide inicialmente en el espejo en el punto *A*
- el efecto de la superficie reflectante consiste en ***cambiar la dirección*** de propagación de las ondas secundarias que inciden en ella
- después de un tiempo *t*, la onda secundaria de Huygens procedente del punto *P* incide en el espejo en el punto *B* y la de *A* alcanza el punto *B"*
- los triángulos *APB* y *BB"A* son congruentes

AB

AB" = BP = ct

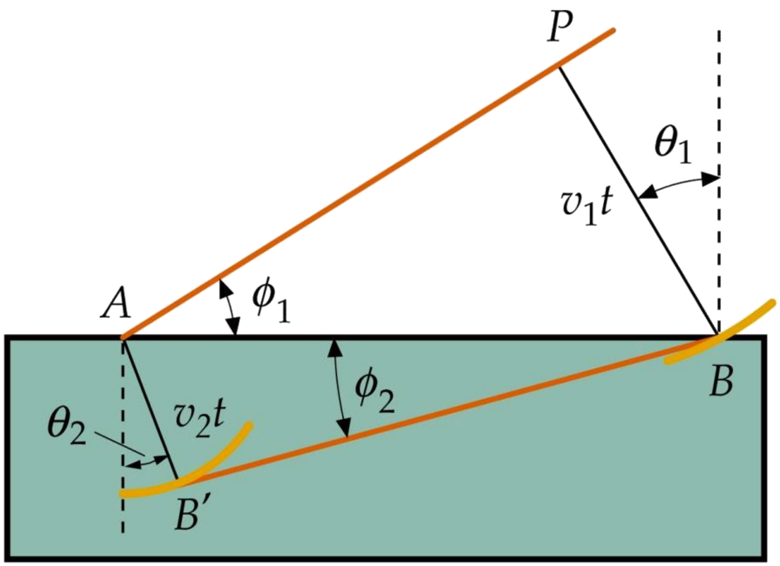
$$\boxed{\theta_1' = \theta_1}$$

ley de reflexión

Si los lados correspondientes de dos ángulos son perpendiculares entre sí, los ángulos son iguales.

La **ley de refracción** se deduce con un procedimiento similar.

onda plana que incide sobre una superficie plana aire-vidrio



$$\operatorname{sen}\phi_1 = \frac{v_1 t}{AB}$$

$$AB = \frac{v_1 t}{\operatorname{sen}\phi_1} = \frac{v_1 t}{\operatorname{sen}\theta_1}$$

$$\operatorname{sen}\phi_2 = \frac{v_2 t}{AB}$$

$$AB = \frac{v_2 t}{\operatorname{sen}\phi_2} = \frac{v_2 t}{\operatorname{sen}\theta_2}$$

$$\frac{1}{v_1}\operatorname{sen}\theta_1 = \frac{1}{v_2}\operatorname{sen}\theta_2$$

n_1 for c/v_1 n_2 for c/v_2.

$$\boxed{n_1 \operatorname{sen}\theta_1 = n_2 \operatorname{sen}\theta_2}$$

ley de Snell

La propagación de la luz se puede también describir por el principio de Fermat.

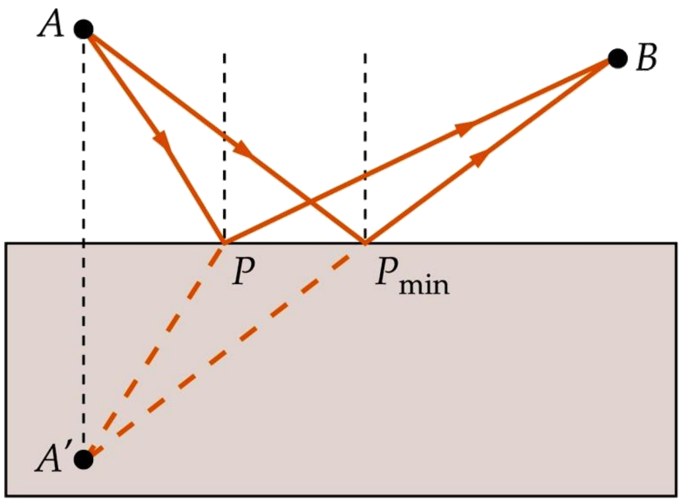
Principio de Fermat

La trayectoria seguida por la luz para pasar de un punto a otro es aquella para la cual el tiempo de recorrido es un mínimo. O lo que es mismo, la luz tiende a recorrer el camino óptico por el que tarda el mínimo tiempo.

El ***camino óptico***, definido como ***el espacio en el que la luz emplea menos tiempo en su recorrido***, no siempre coincide con el de menor distancia.

Construcción geométrica para la deducción de la ley de la reflexión a partir del principio de Fermat

¿En qué punto *P* de la figura debe incidir la luz sobre el espejo de forma que el recorrido entre los puntos *A* y *B* se realice en el menor tiempo posible?



- la luz se mueve dentro del mismo medio
- el tiempo será mínimo cuando la distancia sea mínima

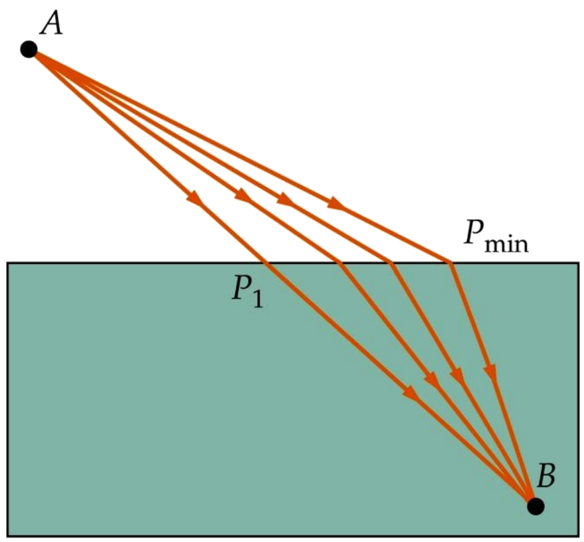
$$L_{A'PB} = L_{APB}$$

$$L_{A'PB} = \text{mínima} \Rightarrow$$

$$\boxed{\theta_1' = \theta_1}$$

ley de reflexión

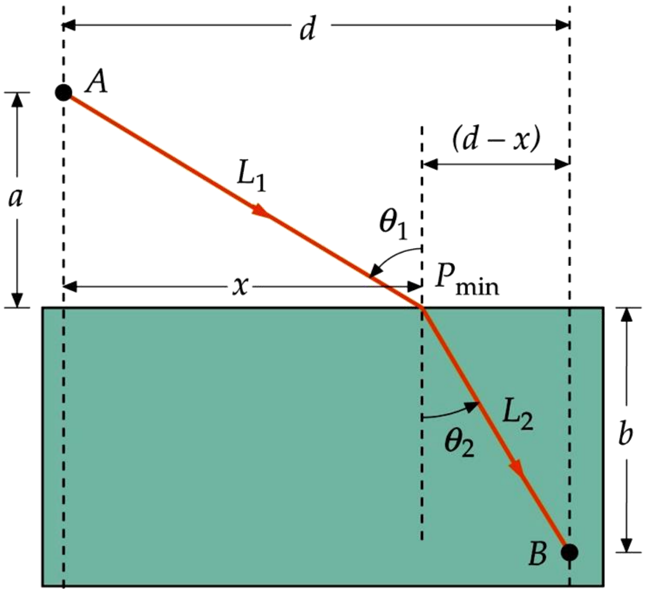
Construcción geométrica para la obtención de la ley de la refracción a partir del principio de Fermat



- trayectos posibles para que la luz se propague desde le punto A en el aire hasta el punto B en el vidrio

- $AP_1B \neq$ menor tiempo de recorrido

- $AP_{min}B$ = mínimo tiempo



L_1, n_1, L_2, n_2

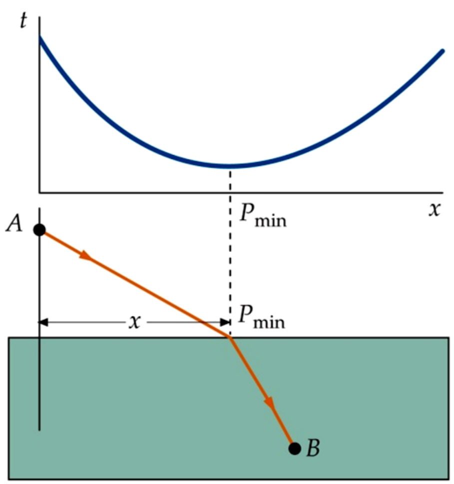
$$t = \frac{L_1}{v_1} + \frac{L_2}{v_2} = \frac{L_1}{c/n_1} + \frac{L_2}{c/n_2} = \frac{n_1 L_1}{c} + \frac{n_2 L_2}{c}$$

En función de la distancia x:

$$L_1^2 = a^2 + x^2 \qquad \text{y} \qquad L_2^2 = b^2 + (d - x)^2$$

Puede verse la curva del tiempo en función de x. Para el valor de x en que el tiempo es mínimo, la pendiente de esta curva es cero:

$$\frac{dt}{dx} = 0$$



Derivando respecto a x e igualando el resultado a cero:

$$\frac{dt}{dx} = \frac{1}{c}\left(n_1 \frac{dL_1}{dx} + n_2 \frac{dL_2}{dx}\right) = 0$$

Calculando tenemos:

$$2L_1 \frac{dL_1}{dx} = 2x \qquad \text{o} \qquad \frac{dL_1}{dx} = \frac{x}{L_1}$$

Pero x/L_1 es precisamente el $sen\,\theta_1$ el ángulo de incidencia. Por lo tanto,

$$\frac{dL_1}{dx} = \mathbf{sen}\,\theta_1$$

Análogamente, $$2L_2\frac{dL_2}{dx} = 2(d - x)(-1)$$

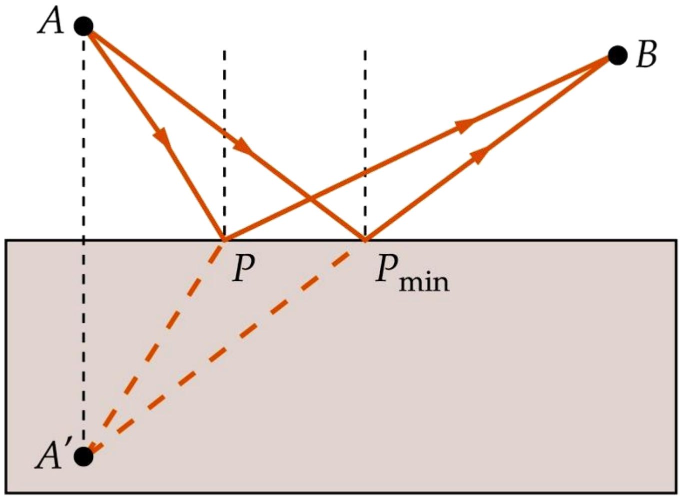
o bien $$\frac{dL_2}{dx} = -\frac{d - x}{L_2} = -\ \mathbf{sen}\,\theta_2$$ donde θ_2 es el ángulo de refracción

De aquí que la ecuación $$\frac{dt}{dx} = \frac{1}{c}\left(n_1\frac{dL_1}{dx} + n_2\frac{dL_2}{dx}\right) = 0$$ se pueda escribir:

Sustituyendo obtenemos, $$n_1\ \mathbf{sen}\,\theta_1 + n_2(-\mathbf{sen}\,\theta_2) = 0$$

$$\boxed{n_1\ \mathbf{sen}\,\theta_1 = n_2\ \mathbf{sen}\,\theta_2}$$ **ley de refracción o ley de Snell**

El tiempo es un mínimo en el punto en que los ángulos de incidencia y de refracción obedecen la ley de Snell.

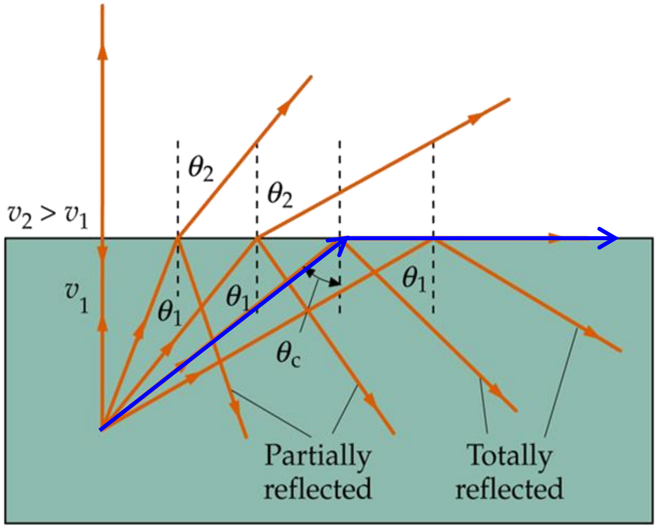


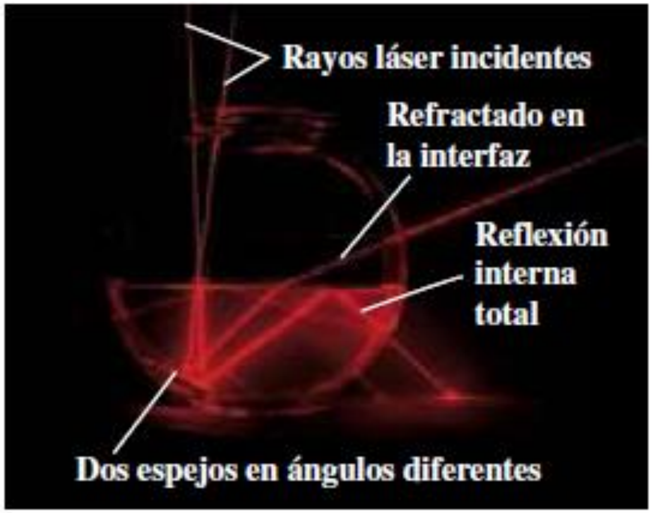
Principio de reversibilidad

El principio de Fermat habla sólo del camino y no de la dirección, por lo que un rayo que vaya de B a A seguirá la misma ruta que uno que vaya de A a B.

Reflexión total interna

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. Esta situación, llamada **reflexión total interna**, sólo ocurre cuando *un rayo incide sobre la interfaz con un segundo material cuyo índice de refracción es* ***menor*** *que el del material*.





$$\boxed{n_1 \, \mathbf{sen}\,\theta_1 = n_2 \, \mathbf{sen}\,\theta_2}$$

$$n_1 / n_2 > 1$$

$$\theta_2 = 90°$$

$$\text{sen } \theta_2 = 1$$

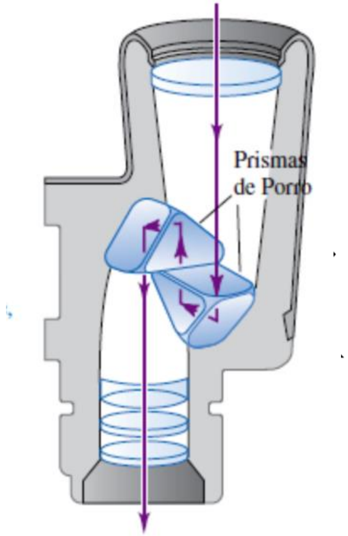
$$\boxed{\text{sen } \theta_{crit} = (n_2 / n_1)}$$

ángulo crítico para la reflexión total interna

$$\boldsymbol{\theta_i > \theta_c \Rightarrow \text{TIR}}$$

Aplicaciones de TIR

La reflexión interna tiene numerosos usos en la tecnología óptica. Consideremos 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:



$$\operatorname{sen}\theta_{\text{crít}} = \frac{1}{1.52} = 0.658 \qquad \theta_{\text{crít}} = 41.1°$$

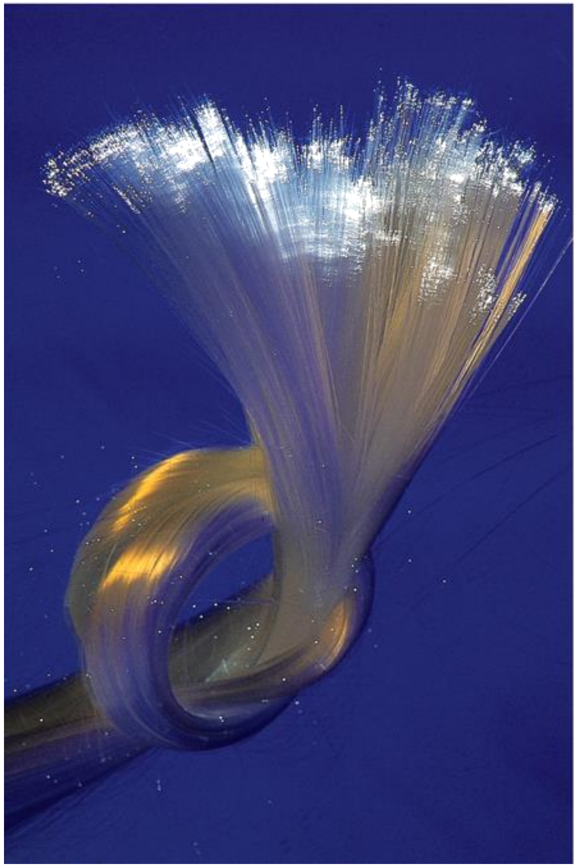
- la luz entra y sale en ángulos rectos con respecto a la hipotenusa y se refleja totalmente en cada una de las caras más cortas. El cambio total de la dirección de los rayos es de 180°.

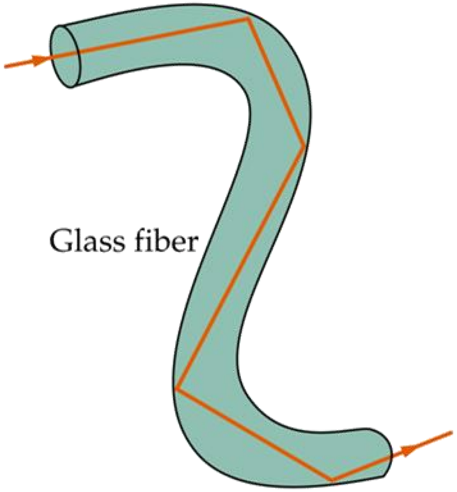
La reflexión interna total también desempeña un papel importante en el diseño de joyería.El brillo del diamante se debe en gran medida a su alto índice de refracción (n = 2.417) y a un pequeño ángulo crítico correspondiente.

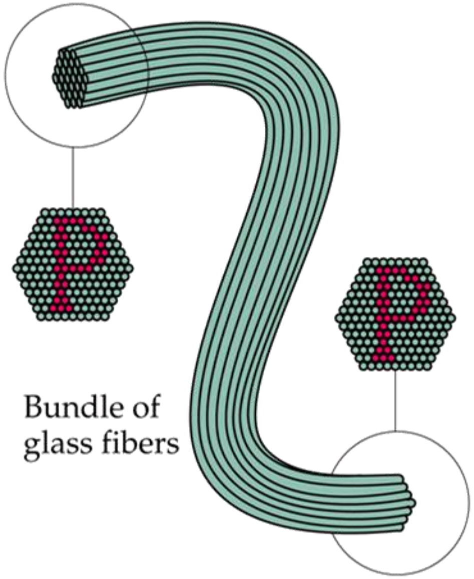
- la luz que entra a través de un diamante cortado se refleja por completo internamente en las facetas de su superficie posterior, y luego sale por la superficie anterior.

Fibras ópticas

Una aplicación interesante de la TIR es la transmisión de un haz de luz a lo largo de una **fibra óptica** que es una *fibra de vidrio transparente, delgada y larga.*

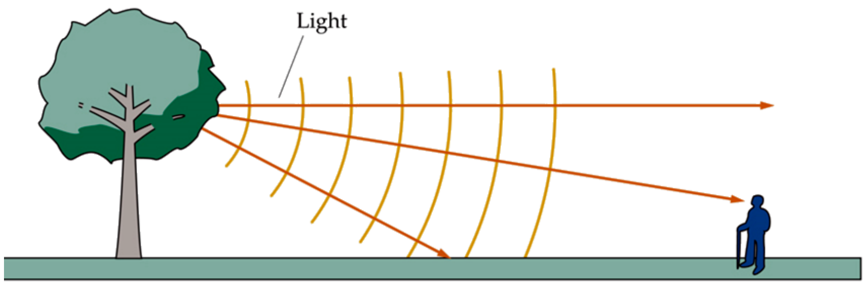


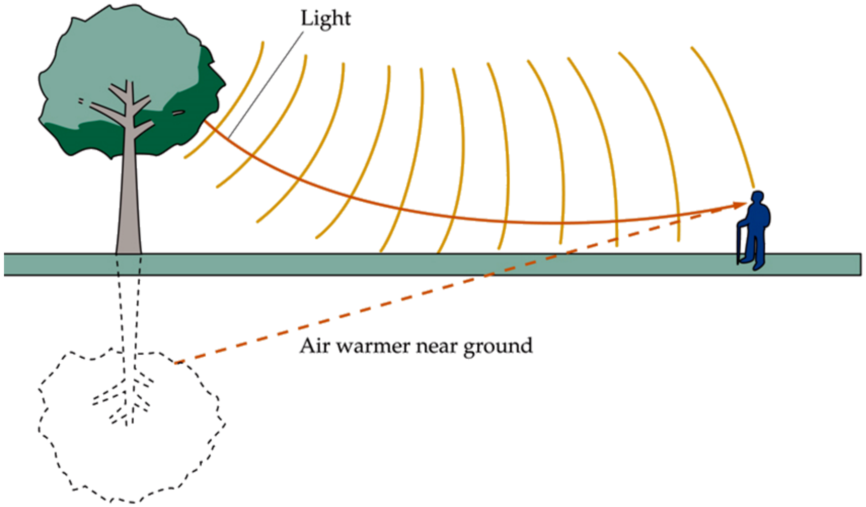




Los equipos de fibra óptica tienen aplicaciones *en medicina y en sistemas de telecomunicación.*

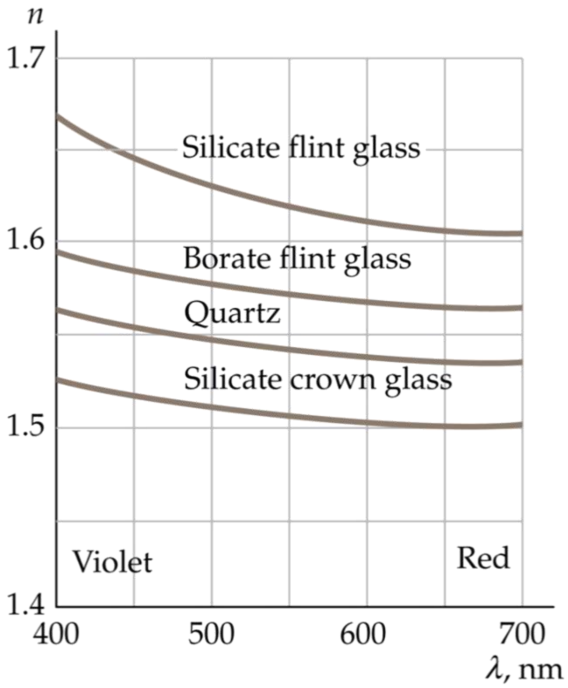
Los ***espejismos*** ofrecen un ejemplo interesante del principio de Huygens en acción. Cuando la superficie del pavimento o la arena del desierto se calientan mucho por la acción de los rayos solares, cerca de la superficie se forma una capa de aire caliente, menos densa y de menor ***n***.

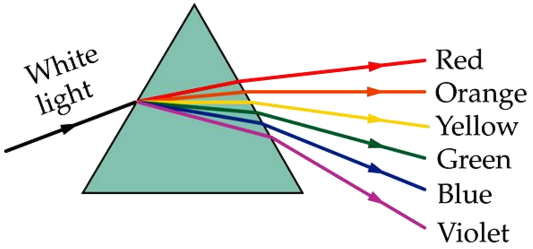


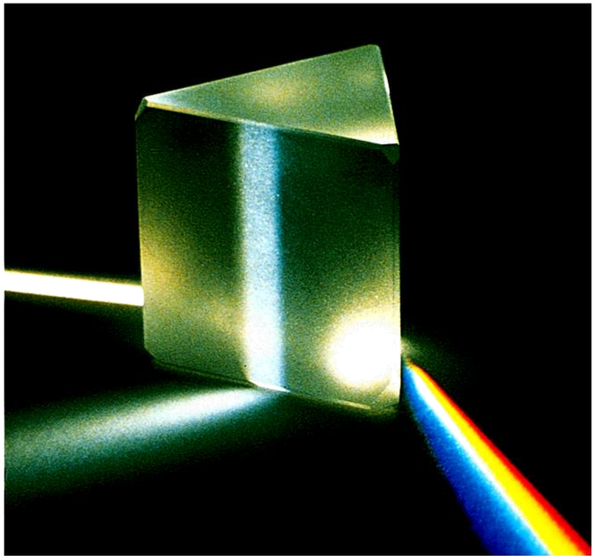


Dispersión

El índice de refracción de un material tiene una ligera dependencia con la longitud de onda. *Esta dependencia del índice de refracción con la longitud de onda se denomina* ***dispersión***.

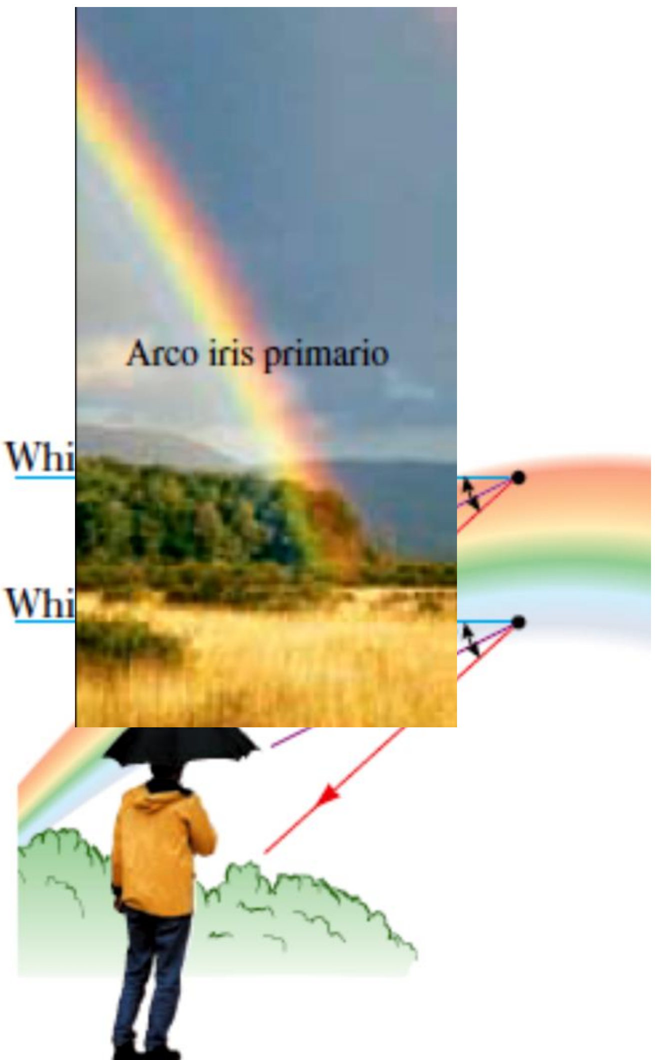


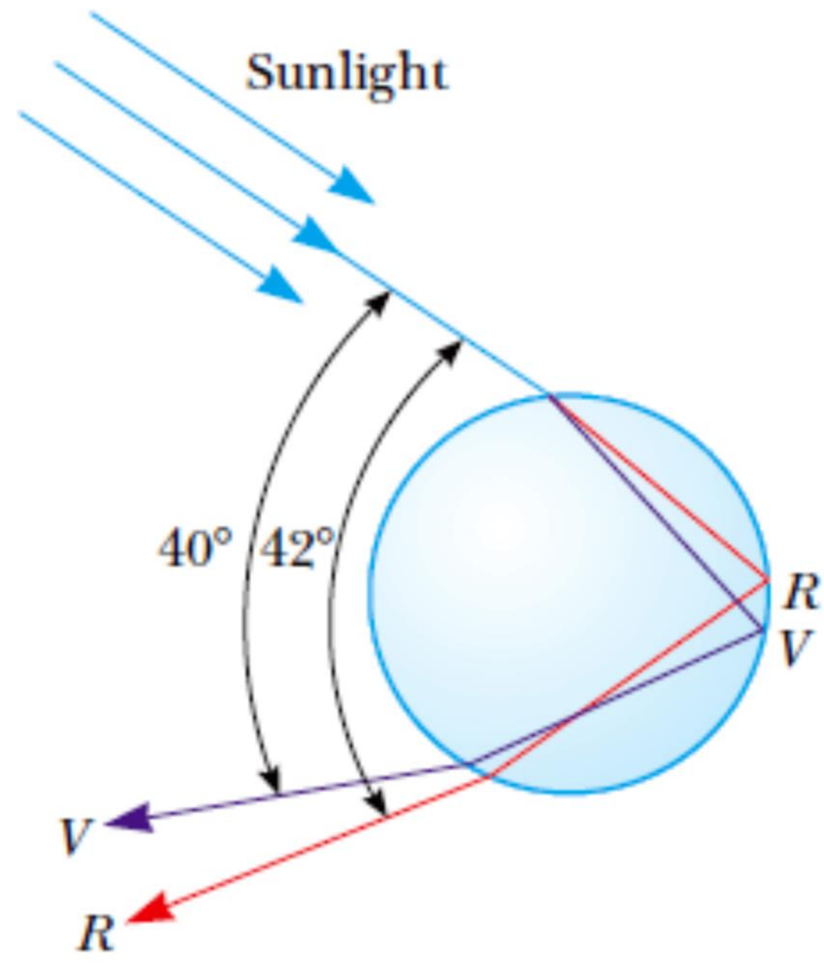




La desviación (cambio de dirección) producida por el prisma aumenta al incrementarse el índice de refracción y la frecuencia y al disminuir la longitud de onda.

El **arco iris** es un ejemplo conocido de dispersión, en este caso la dispersión de la luz solar por refracción en gotas de agua. 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.





n_{agua}