La naturaleza de la luz

La luz visible forma parte del espectro electromagnético, luego el comportamiento o propiedades de la luz visible puede ser extendido a todo el espectro.

En particular la luz visible es importante porque el ser humano tiene dos receptores electromagnéticos: los ojos!

La longitud de onda en el centro del espectro visible es $\lambda = 5550$ Å $1Å = 10^{-10}$ mt

y varía entre $4300\,Å < \lambda < 6900\,Å$

IR   UV

Como vimos antes la velocidad de las ondas electromagnéticas es,

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} \approx 3\,10^8 \ m/s$$

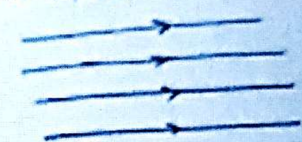
que corresponde a la velocidad de la luz, que medida por Evanson et al (1974) resulta,

$$c = 299792{,}4574 \pm 0.0012 \ km/s$$

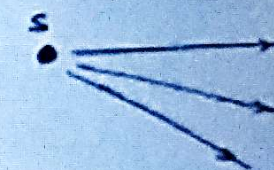
Representación de la luz

La representación de la luz es a través de lo que denominamos rayos de luz que pueden representar una onda plana o una onda esférica.

En el caso de una onda plana los rayos se representan paralelos entre sí

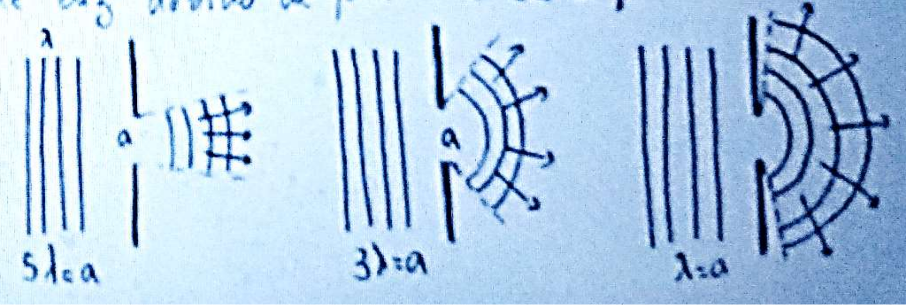


Cuando tenemos una fuente puntual las ondas son esféricas, estas ondas tienen un punto de emisión S y su frente de onda es una superficie esférica concéntrica con el punto de emisión.



óptica geométrica

La noción del rayo de luz para representar la luz es útil, sin embargo no es posible "aislar" un rayo de luz debido al fenómeno de difracción



la óptica geométrica, donde la luz es representada con rayos de luz corresponde al caso donde $a \gg \lambda$.

Índice de refracción

El índice de refracción de cualquier medio óptico se define como la relación entre la velocidad de la luz en el vacío dividido la velocidad de la luz en ese medio, es decir:

$$n = \frac{c}{v} \quad \begin{array}{l} \leftarrow \text{velocidad de la luz en el vacío} \\ \leftarrow \text{velocidad de la luz en un medio} \end{array}$$

Los valores de n respecto del vacío son listados en la Tabla:

medio	n
Agua	1.33
Alcohol etílico	1.36
Aire	1.0003
Vidrio	1.52
ClNa	1.53

puede observarse que $n_{aire} \approx 1$, es decir que el índice de refracción respecto del aire tendrá valores muy parecidos a los de la Tabla.

Camino óptico

El camino o distancia que recorre un haz de luz en un medio resulta,

$$d = v t$$

como por definición

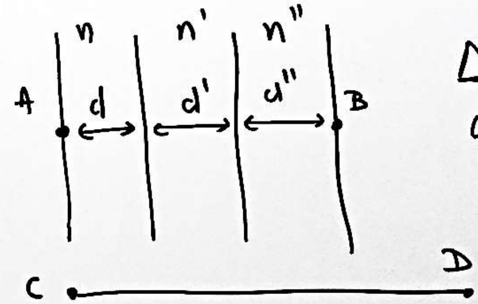
$$n = \frac{c}{v} \Rightarrow v = \frac{c}{n} \Rightarrow d = \frac{ct}{n}$$

denominamos camino óptico al producto

$$\Delta = n d = c t$$

y representa la distancia que recorre el haz en el vacío en el tiempo que recorre la distancia d en un medio dado.

Si tenemos distintos medios



$$\Delta = n d + n' d' + n'' d'' = \overline{CD}$$

donde

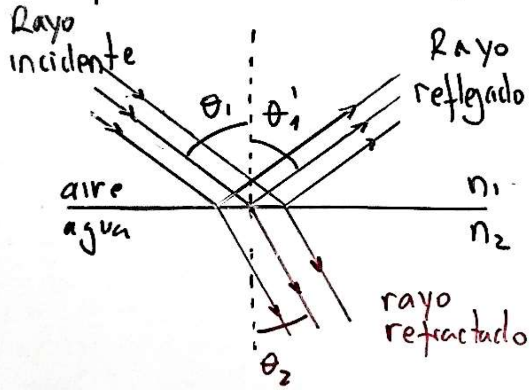
$$\overline{CD} > \overline{AB}$$

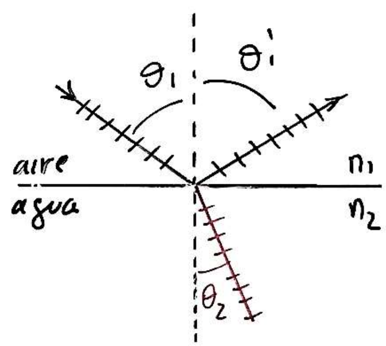
y $\overline{AB}$ es la distancia que recorre el haz en el medio

Leyes de reflexión y refracción

Vamos a describir la reflexión de las ondas electromagnéticas en una superficie plana, por ejemplo vidrio, agua, etc.

Supongamos una superficie de agua sobre la que incide un haz de luz.





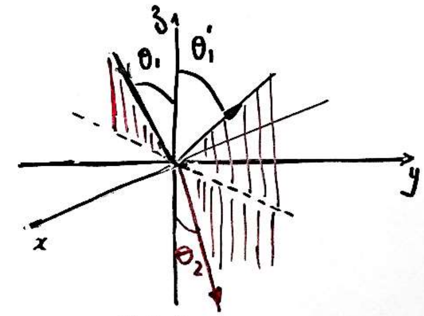
El haz de luz es en parte reflejado y parte refractado, es decir sigue su camino en el agua aunque cambia de dirección.

En todo este proceso el haz de luz se comporta como una onda plana, es decir el frente de onda es $\perp$ a la dirección de incidencia.

Tanto θ_1, θ_1' y θ_2 son medidos respecto de la normal.

Las leyes que gobiernan la reflexión y la refracción pueden obtenerse de resultados experimentales y son:

1- Los rayos reflejados y refractados se encuentran en el mismo plano que forman el haz incidente y la normal.



2- En la reflexión

$$\theta_1 = \theta_1'$$

3- En la refracción resulta que,

$$\frac{\text{sen}\,\theta_1}{\text{sen}\,\theta_2} = \text{cte}$$

Este resultado se lo conoce como ley de Snell

Más aún se encuentra que la constante es la relación entre los índices de refracción del aire y el agua, es decir

$$\frac{\text{sen}\,\theta_1}{\text{sen}\,\theta_2} = \frac{n_2}{n_1}$$

es decir que

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

Como sabemos que

$$n_1 = \frac{c}{v_1} \quad y \quad n_2 = \frac{c}{v_2}$$

Podemos escribir la ley de Snell como,

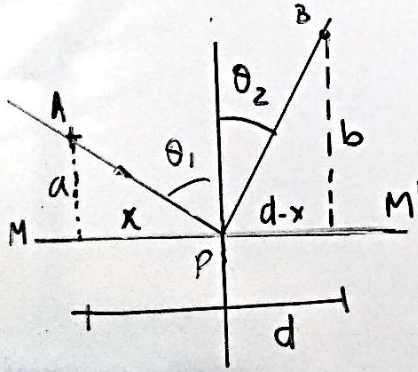
$$\frac{c}{v_1} \operatorname{sen} \theta_1 = \frac{c}{v_2} \operatorname{sen} \theta_2 \quad \Rightarrow$$

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

Deducción de las leyes de reflexión y refracción a partir del principio de Fermat.

Principio de Fermat: Un rayo luminoso que viaja de un punto a otro seguirá una trayectoria tal que comparada con trayectorias vecinas, el tiempo empleado en recorrerlo es mínimo, máximo o invariable (es decir estacionario).

Reflexión



la longitud del rayo que va desde A hasta B resulta:

$$l = \sqrt{a^2 + x^2} + \sqrt{b^2 + (d-x)^2}$$

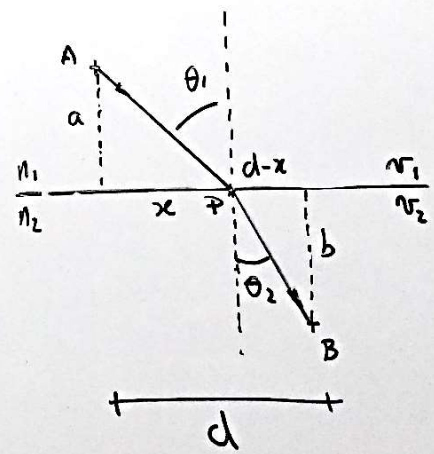
donde x es el punto donde el rayo toca la superficie. Como el tiempo t tiene que ser mínimo y $t = \frac{l}{v}$ y v es cte en el medio, tenemos que hacer

$$\frac{dl}{dx} = \frac{x}{\sqrt{a^2+x^2}} - \frac{(d-x)}{\sqrt{b^2+(d-x)^2}} = 0$$

$$\Rightarrow \quad \frac{x}{\sqrt{a^2+x^2}} = \frac{(d-x)}{\sqrt{b^2+(d-x)^2}} \quad \Rightarrow \quad \operatorname{sen} \theta_1 = \operatorname{sen} \theta_2$$

$$\therefore \quad \boxed{\theta_1 = \theta_2}$$

Refracción



El tiempo que utiliza el haz de luz para pasar de A a B resulta:

$$t = \frac{l_1}{v_1} + \frac{l_2}{v_2}$$

Como $n = \frac{c}{v} \Rightarrow v = \frac{c}{n}$

$$t = \frac{n_1 l_1}{c} + \frac{n_2 l_2}{c}.$$

$$t = \frac{n_1 l_1 + n_2 l_2}{c} = \frac{l}{c}$$

donde l es el camino óptico del rayo. De acuerdo al principio de Fermat como t tiene que ser mínimo, es equivalente a buscar el mínimo de l.

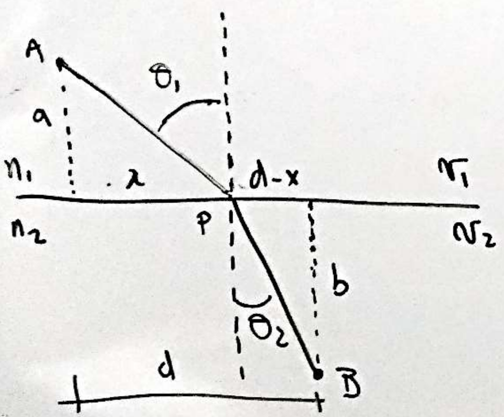
$$l = n_1 l_1 + n_2 l_2 = n_1\sqrt{a^2+x^2} + n_2\sqrt{b^2+(d-x)^2}$$

Si hacemos la derivada,

$$\frac{dl}{dx} = n_1 \underbrace{\frac{x}{\sqrt{a^2+x^2}}}_{\text{sen}\,\theta_1} - n_2 \underbrace{\frac{(d-x)}{\sqrt{b^2+(d-x)^2}}}_{\text{sen}\,\theta_2} = 0$$

$\Rightarrow$

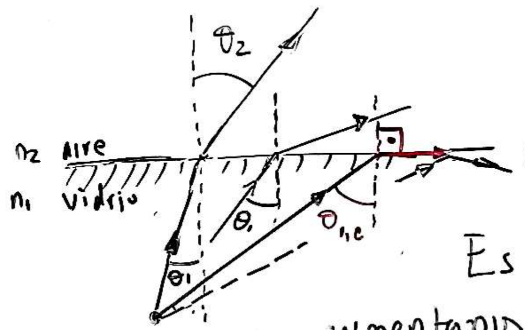
$$\boxed{n_1 \,\text{sen}\,\theta_1 = n_2 \,\text{sen}\,\theta_2}$$



Reflexión interna total

Veamos el caso donde la luz se propaga de un medio denso (vidrio) hacia una superficie que separa el vidrio de un medio menos denso (aire)

En este caso n_1 (vidrio) $> n_2$ (aire) $\Rightarrow$ usando la ley de Snell



$$\text{sen}\,\theta_2 = \frac{n_1}{n_2}\,\text{sen}\,\theta_1$$

como $\frac{n_1}{n_2} > 1 \Rightarrow \boxed{\theta_2 > \theta_1}$

Es decir que a medida que aumentamos θ_1, $\exists$ un valor $\theta_{1,c}$ tal que $\theta_2 = 90°$, donde

$$n_1 \,\text{Sen}\,\theta_{1,c} = n_2 \underbrace{\text{sen}\,90°}_{=1} = n_2$$

$$\Rightarrow \boxed{\text{Sen}\,\theta_{1,c} = \frac{n_2}{n_1}}$$

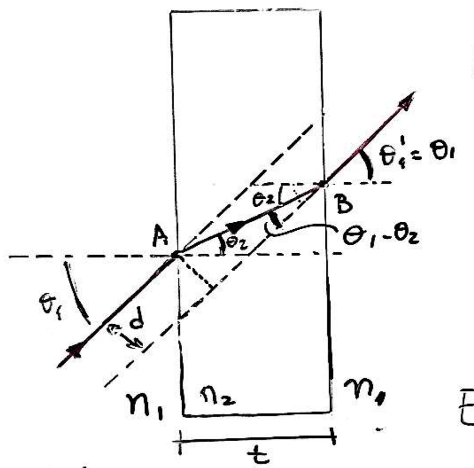
En el caso de la superficie vidrio/aire

$$\text{sen}\,\theta_{1,c} = \frac{1}{1.5} = 0.667 \Rightarrow \boxed{\theta_{1,c} = 41.8°}$$

$\theta_1 < \theta_{1,c}$ tenemos refracción

$\theta_1 > \theta_{1,c}$ " reflexión total

Ejemplo: Prisma de vidrio de caras paralelas



En el punto A aplicamos la ley de Snell,

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

$$\Rightarrow \operatorname{sen} \theta_2 = \frac{n_1}{n_2} \operatorname{sen} \theta_1 \quad (1)$$

En el punto B aplicamos la ley de Snell

$$n_2 \operatorname{sen} \theta_2 = n_1 \operatorname{sen} \theta_1' \quad (2)$$

reemplazamos (1) en (2) y resulta,

$$\cancel{n_2} \frac{\cancel{n_1}}{\cancel{n_2}} \operatorname{sen} \theta_1 = \cancel{n_1} \operatorname{sen} \theta_1' \Rightarrow \boxed{\theta_1 = \theta_1'}$$

El haz que sale en el punto B es paralelo al haz incidente en el punto A pero desplazado una distancia d.

Para calcular d tenemos que

$$\operatorname{sen}(\theta_1 - \theta_2) = \frac{d}{l}$$

Como,

$$\operatorname{sen}(\theta_1 - \theta_2) = \operatorname{sen} \theta_1 \cos \theta_2 - \operatorname{sen} \theta_2 \cos \theta_1$$

$$d = l \left(\operatorname{sen} \theta_1 \cos \theta_2 - \operatorname{sen} \theta_2 \cos \theta_1 \right)$$

por otro lado

$$l \cos \theta_2 = t \Rightarrow l = \frac{t}{\cos \theta_2}$$

$$d = t \left(\operatorname{sen} \theta_1 - \operatorname{sen} \theta_2 \frac{\cos \theta_1}{\cos \theta_2} \right)$$

A partir de la ley de Snell

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

$$\boxed{d = t \operatorname{sen} \theta_1 \left(1 - \frac{n_1}{n_2} \frac{\cos \theta_1}{\cos \theta_2} \right)}$$

Si $\theta_1 \ll$ también lo es θ_2 $\Rightarrow \cos \theta_1 \approx 1$, $\cos \theta_2 \approx 1$, $\operatorname{sen} \theta_1 \approx \theta_1$

además $n_1 \approx 1$ (aire) y
$n_2 = n$

resulta que $\boxed{d \approx t\, \theta_1 \left(\frac{n-1}{n} \right)}$