

La propagación de la luz

1. Introducción

La luz es una onda electromagnética. Sin embargo, muchos aspectos de las ondas luminosas se pueden comprender sin considerar su carácter electromagnético. En efecto, la luz se propaga según líneas rectas a las que llamamos rayos.

Un **rayo** es una línea imaginaria dibujada en la dirección en la cual se propagan las ondas que es perpendicular a los vectores que definen el campo eléctrico y el campo magnético de la onda.

La luz viaja en línea recta con velocidad constante en un medio homogéneo e isótropo: los faros de un coche, el haz luminoso de una linterna o la formación de sombras nos indican que la luz se propaga en línea recta. Son a estas líneas lo que llamamos rayos.

A lo largo de la historia, se presentaron varias teorías que intentaron explicar la naturaleza de la luz. Algunas de ellas fueron:

- Teoría Corpuscular (Newton 1764). La luz está formada por minúsculas partículas emitidas por un foco luminoso, y al llegar al ojo producen la sensación luminosa. Por esa teoría se podían explicar los fenómenos de reflexión, difracción y la existencia de colores.
- Teoría ondulatoria de Huygens (1660). Huygens postulo el carácter ondulatorio de la luz formada por ondas longitudinales y que necesitaban de un medio natural para propagarse (**éter lumínico**). Explicaba todos los fenómenos conocidos de la luz excepto la difracción.
- Teoría ondulatoria de Fresnel. Una serie de trabajos realizados por Fresnel y Foucault pusieron de manifiesto el carácter ondulatorio de la luz formada por ondas transversales. Explicaba todos los fenómenos conocidos hasta el momento pero seguía reconociendo la existencia de éter lumínico.
- Teoría electromagnética de la luz. En 1864, Maxwell estableció el carácter ondulatorio de la luz, formada por ondas electromagnéticas, es decir, la propagación de un campo eléctrico y un campo magnético perpendiculares entre sí y perpendiculares a la dirección de propagación.

$$E = E_0 \text{sen}(\omega t - kx);$$

$$B = B_0 \text{sen}(\omega t - kx);$$

$$\frac{E}{B} = \frac{E_0}{B_0} = c = 3 \cdot 10^8 \text{ m / s}$$

- Teoría corpuscular de Einstein. La teoría de Maxwell explicaba todos los fenómenos de la luz. Sin embargo, tras las experiencias del efecto Compton y el efecto fotoeléctrico se reabrió el debate sobre la naturaleza de la luz. El efecto fotoeléctrico consiste en la emisión de electrones por parte de algunos metales al incidir sobre su superficie una radiación luminosa con una frecuencia determinada. Einstein postuló la existencia de pequeños corpúsculos a los que denominó fotones, cada uno de ellos con una energía dada por la fórmula:

$$E = h \cdot \nu$$

h : constante de Planck $\rightarrow h = 6,62 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$

ν : frecuencia

- Carácter dual de la luz. Finalmente en 1924, De Broglie estableció el carácter dual de la luz, pues según las diversas experiencias que realizó pudo ver como la luz presentaba un comportamiento como una onda (en los fenómenos de reflexión, refracción o interferencias) o como un corpúsculo (efecto fotoeléctrico o efecto Compton). Sin embargo estos comportamientos no suceden nunca simultáneamente.

2. Velocidad de la luz en el vacío

La velocidad de la luz es tan grande que hasta finales del siglo XVII se aceptaba que su propagación era instantánea, es decir, que su velocidad era casi infinita.

El primer astrónomo en rebatir esta teoría fue O. Roemer en 1676, observando que el tiempo transcurrido entre dos eclipses consecutivos de uno de los satélites de Júpiter dependía de la posición en que se encontraba la Tierra y Júpiter. Tras varias mediciones Roemer obtuvo la primera aproximación para la velocidad de la Tierra, obteniendo un valor de:

$$c \sim 2,1 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

Bradley en 1772 logró una medición más precisa mediante un método astronómico que se base en el cambio de la posición aparente de las estrellas en función de la velocidad de la Tierra.

En la actualidad, el valor aceptado para la velocidad de la luz en el vacío es:

$$c = 2,9979 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

Por tanto, se puede emplear el valor de $3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ sin cometer un error importante. La velocidad de la luz en el aire es prácticamente la misma que en el vacío.

3. Índice de refracción

La velocidad de la luz no es siempre la misma ya que depende del medio transparente en el que se propague.

Se denomina **índice de refracción absoluto** en un medio material, a la relación entre la velocidad de la luz en el vacío c y la velocidad en dicho medio v :

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

Como la velocidad de la luz es menor en cualquier medio material que en el vacío, los índices de refracción absolutos son mayores que la unidad.

Si un medio tiene un índice de refracción absoluto mayor que otro se dice que es más refringente que él.

Cabe destacar que el índice de refracción de un material depende de la longitud de onda de la luz utilizada. En el vacío, la velocidad de la luz es la misma para las distintas longitudes de onda, pero no ocurre cuando la luz se propaga en un medio material. De hecho, en cualquier otro medio la velocidad de la luz depende de la **longitud de onda**. Cuando la luz se propaga en un medio material, la frecuencia no varía, se mantiene constante. Por lo tanto, si cambia la velocidad ($v = \lambda f$) es porque está variando la longitud de onda.

Si llamamos λ_0 a la longitud de onda de una radiación luminosa en el vacío, c a su velocidad y f a su frecuencia, se cumple:

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

Al propagarse en un medio material a la velocidad v , como su frecuencia no varía, la longitud de onda será:

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

y puesto que el índice de refracción siempre es mayor que uno, la longitud de onda será menor que en el vacío.

Para comparar la velocidad de la luz en dos medios distintos cuyos índices de refracción absolutos son n_1 y n_2 , se emplea el índice de refracción relativo $n_{2,1}$ del medio 2 con respecto al medio 1.

$$n_{2,1} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{c/v_2}{c/v_1} = \frac{v_1}{v_2}$$
$$n_{2,1} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{\lambda_0/\lambda_2}{\lambda_0/\lambda_1} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2}$$

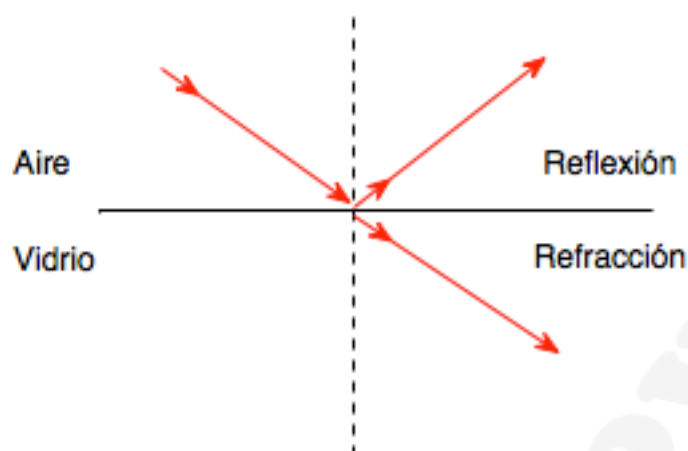
Por tanto, los índices de refracción son inversamente proporcionales a las velocidades de la luz en dichos medios y a las longitudes de onda.

Cuando un medio tiene mayor índice de refracción, la luz se propaga en ese medio a menor velocidad y su longitud de onda es más pequeña.

4. Reflexión de la luz

Cuando una onda incide sobre la superficie de separación de dos medios distintos, una parte se refleja y vuelve al mismo medio en que se propagaba y otra parte pasa al segundo medio, en donde se transmite y se absorbe parcialmente. La luz, que es una onda, se comporta de igual forma. La luz que se refleja cambia de dirección pero conserva la misma velocidad.

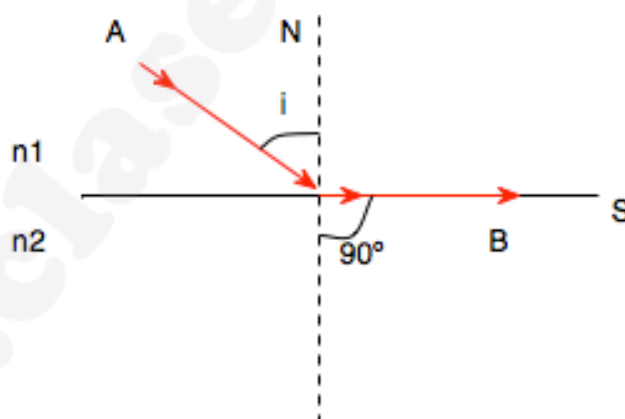
La luz que se propaga en el segundo medio cambia de dirección y de velocidad, es la refracción de la luz.



Consideremos un foco luminoso A y uno de sus rayos emitidos que incide sobre una superficie metálica S. El ángulo i que el rayo incidente forma con la normal N a la superficie de incidencia recibe el nombre de **ángulo de incidencia**, y el ángulo r que forma el rayo reflejado con la normal se denomina **ángulo de reflexión**.

Atendiendo a la **Ley de Snell** de la reflexión, se tiene que:

- El rayo incidente, la normal y el rayo reflejado se encuentran en el mismo plano.
- El ángulo de incidencia es igual al ángulo de reflexión.

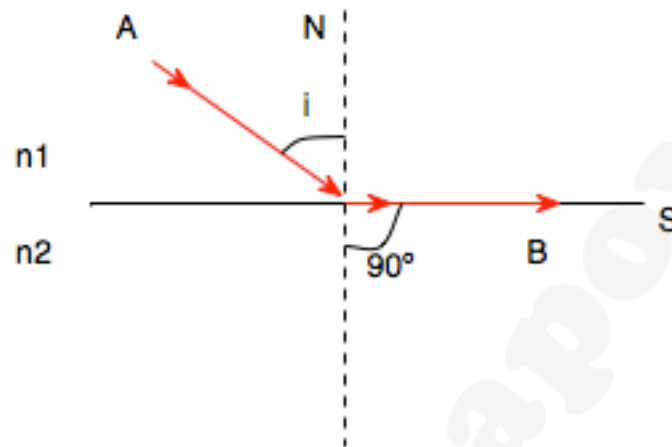


5. Refracción de la luz

La luz se propaga en línea recta y con velocidad constante en un medio homogéneo pero cuando llega a la superficie de separación de dos medios transparentes, una parte penetra en el segundo medio cambiando de dirección y de velocidad de propagación.

Este cambio de dirección de propagación de un rayo de luz cuando entra oblicuamente en un medio se conoce como **refracción**. La deformación aparente de los objetos sumergidos en el agua se explica mediante este fenómeno.

Supongamos un foco luminoso puntual A situado en un medio con índice de refracción n_1 en el que la velocidad de la luz es v_1 y uno de los rayos AO emitidos por el foco incide en la superficie de otro medio de índice de refracción n_2 en el que la velocidad de la luz es v_2 . El ángulo i que forma el rayo incidente con la norma N se denomina **ángulo de incidencia** y el ángulo r que forma el rayo refractado con la normal se llama **ángulo de refracción**.



Snell comprobó experimentalmente las leyes de refracción:

- El rayo incidente, la norma y el rayo refractado se encuentran en el mismo plano.
- La relación entre el seno del ángulo de incidencia y el seno del ángulo de refracción es una constante característica de los dos medios.

Esta constante es igual al índice de refracción del segundo medio con respecto al primero, o también, al cociente entre las velocidades de la luz en el primer medio y en el segundo:

$$\frac{\text{sen}(i)}{\text{sen}(r)} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{v_1}{v_2}$$

Si la luz pasa de un medio a otro con mayor índice de refracción el rayo refractado se acerca a la normal:

$$n_2 > n_1 \rightarrow \text{sen}(i) > \text{sen}(r) \rightarrow i > r$$

Si ocurre al contrario, el rayo refractado se aleja de la normal:

$$n_2 < n_1 \rightarrow \text{sen}(i) < \text{sen}(r) \rightarrow i < r$$

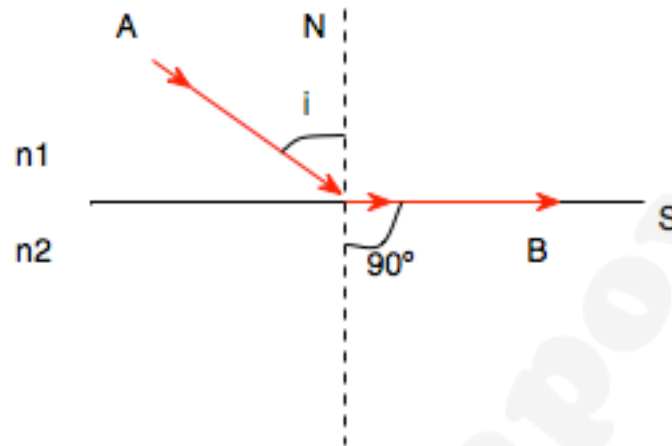
Por tanto, la segunda **Ley de Snell** puede expresarse como:

$$n_1 \text{sen}(i) = n_2 \text{sen}(r)$$

Ángulo Límite

Si un rayo de luz pasa de un medio de mayor índice a otro de menor índice el ángulo refractado como hemos visto se aleja de la normal.

Para un determinado ángulo, al que denominaremos como **ángulo límite**, el ángulo de refracción es de 90° .



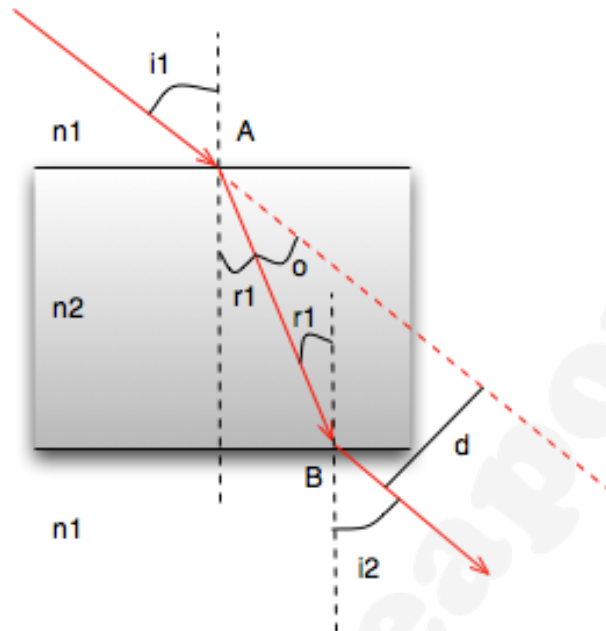
Aplicando la ley de Snell para calcular el valor de dicho ángulo límite se tiene que:

$$n_1 \text{sen}(\hat{L}) = n_2 \text{sen}(90^\circ) \rightarrow \text{sen}(\hat{L}) = \frac{n_2}{n_1} = n_{2,1}$$

Para ángulos mayores que el ángulo límite se produce el fenómeno de **reflexión total**, no hay ángulo refractado y toda la luz se refleja, por lo que todo el rayo se conduce por el mismo medio.

6. Lámina de caras planas y paralelas

Cuando un haz de luz monocromática incide sobre una lámina transparente de caras planas y paralelas se refracta en ambas caras de la lámina.



Si la lámina de índice de refracción n_2 está situada en un medio de índice de refracción n_1 según la ley de Snell se cumple que:

Primer rayo: $n_1 \text{sen}(i_1) = n_2 \text{sen}(r_1)$

Segundo rayo: $n_2 \text{sen}(r_2) = n_1 \text{sen}(i_2)$

Combinando las ecuaciones se obtiene:

$$n_1 \text{sen}(i_1) = n_1 \text{sen}(i_2) \rightarrow \text{sen}(i_1) = \text{sen}(i_2) \rightarrow i_1 = i_2$$

Es decir, el rayo luminoso emerge de la lámina paralelo al rayo incidente.

Para obtener el desplazamiento lateral d del rayo emergente con respecto al rayo incidente se tiene que:

$$\text{sen}(o) = \frac{d}{AB}$$

$$\cos(r_1) = \frac{s}{AB}$$

$$o = i_1 - r_1$$

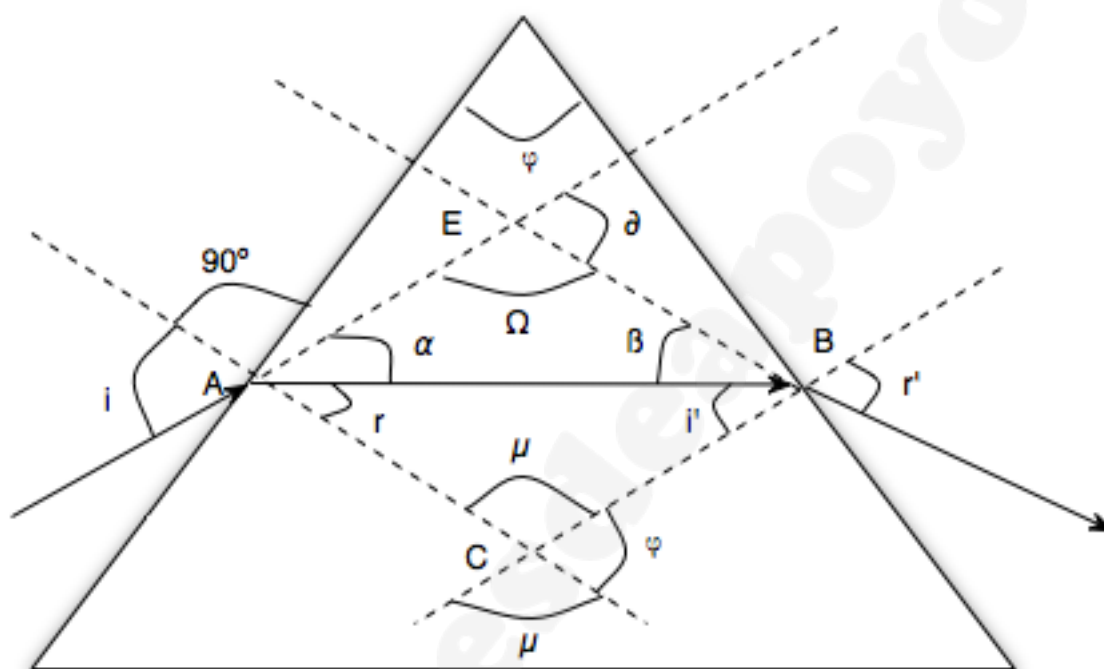
$$d = AB \text{sen}(o) = \frac{s}{\cos(r_1)} \text{sen}(o) = \frac{s}{\cos(r_1)} \text{sen}(i_1 - r_1)$$

Siendo AB la distancia entre los puntos de incidencia de los rayos (es decir, la distancia recorrida por el rayo dentro de la lámina) y s el grosor de la lámina.

7. Prisa Óptico

Se llama prisa óptico a todo medio transparente limitado por dos superficies planas no paralelas. El ángulo que forman las superficies del prisa lo denominaremos φ o ángulo de refringencia.

El índice de refracción del prisa es n y suponemos que se encuentra en el aire con índice de refracción 1.



En primer lugar veremos como se han deducido el resto de ángulos en el dibujo.

El ángulo α es el que forma la prolongación del rayo incidente sobre el prisma con la normal. Lo mismo ocurre para el ángulo β .

Por otra parte el ángulo φ del prisa es igual al que se forma en el punto C del prisa (intersección de la prolongación de las normales). Esto es así porque si atendemos al paralelogramo formado por el vértice del prisma y los puntos A, B y C, sus ángulos deben de sumar 360° . Entonces, sabiendo que en el punto A y B los ángulos valen 90 grados (pues se forman con la normal en el punto de corte de los rayos i y r') tenemos que:

$$360^\circ = 90^\circ + 90^\circ + \mu + \varphi \rightarrow \mu + \varphi = 180^\circ (1)$$

Y por tanto en el punto C el ángulo es el mismo que el del prisma φ . Además, fijándonos en el triángulo ABC tenemos la siguiente igualdad:

$$180 = r + i' + \mu (2)$$

Juntando las igualdades 1 y 2 se tiene que:

$$\varphi = r + i'$$

Además, el valor del ángulo δ denominado ángulo de desviación (y que está formado por las prolongaciones del rayo incidente y del rayo emergente) lo obtenemos mediante el triángulo ABE. En dicho triángulo se tiene que:

$$\left. \begin{array}{l} 180 = \alpha + \beta + \Omega \\ 180 = \delta + \Omega \end{array} \right\} \delta = \alpha + \beta$$

Finalmente es claro que:

$$\begin{aligned} i &= \alpha + r \rightarrow \alpha = i - r \\ r' &= \beta + i' \rightarrow \beta = r' - i' \end{aligned}$$

Juntando esto con el valor de δ y φ se tiene que:

$$\delta = \alpha + \beta = i - r + r' - i' = i + r' - (r + i') = i + r' - \varphi$$

Se puede comprobar matemáticamente que la desviación será mínima cuando los ángulos de incidencia y de emergencia son iguales, es decir $i = r'$. Esto implica que dentro del prisma la trayectoria del rayo luminoso es paralela a la base del prisma. En estas condiciones se cumple:

$$\begin{aligned} i = r' &\rightarrow r = i' \rightarrow \varphi = r + i' = 2r \\ \delta_{\min} &= 2i - \varphi \end{aligned}$$

En lo que respecta al valor de los ángulos r , i' y r' los calcularemos mediante la Ley de Snell:

$$\begin{aligned} 1^{\text{a}} \text{ cara} : 1 \cdot \text{sen}(i) &= n \text{sen}(r) \rightarrow \text{sen}(r) = \frac{\text{sen}(i)}{n}; \\ 2^{\text{a}} \text{ cara} : n \text{sen}(i') &= 1 \text{sen}(r') \rightarrow \text{sen}(r') = n \text{sen}(i'); \end{aligned}$$

8. Dispersión de la luz

La dispersión de la luz es la descomposición de la luz más compleja en otras luces más simples al atravesar un prisma óptico debido a su diferente índice de refracción según su longitud de onda.

Al pasar la luz blanca por el prisma las distintas luces que la componen se separan por tener diferentes velocidades en el prisma.

La luz roja se propaga con mayor velocidad por lo que será menos desviada mientras que el violeta por tener menos velocidad será la más desviada.