

TÍTULO: *Propagación de la luz*

OBJETIVOS:

- Estudiar la forma en que se propaga la luz así como la velocidad con que lo hace.

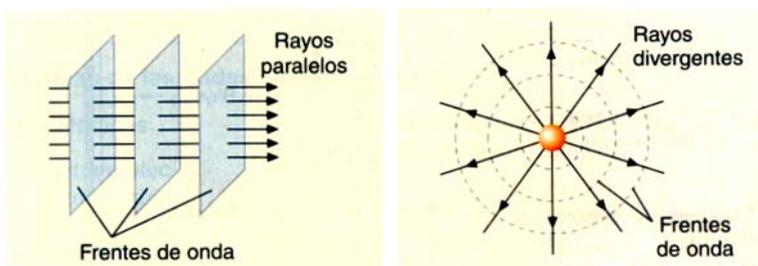
DESARROLLO CONCEPTUAL

La explicación definitiva de la propagación de las ondas luminosas se debe a Maxwell al desarrollar la teoría de las ondas electromagnéticas. Con anterioridad fue descrita empíricamente mediante dos principios muy interesantes debidos a Huygens y Fermat (1601-1665).

El Principio de Huygens es un método geométrico según el cual cada punto de un frente o superficie de onda primario se transforma en fuente o foco de ondas secundarias que avanzan con la velocidad y frecuencia igual a las de las ondas primarias, de manera que el frente de ondas primarios, transcurrido un tiempo se convierte en la envolvente de estas ondas elementales. Es decir, cada punto del nuevo frente de onda se forma a partir del frente de onda primitivo gracias a la superposición de las ondas elementales, que pronto fue modificado por Kirchhoff proporcionando una base matemática definitiva que era una consecuencia de la ecuación de ondas enunciada por Maxwell. El principio de Huygens permite deducir las leyes de la reflexión y de la refracción así como la difracción por una rendija.

Según el Principio de Fermat, la trayectoria seguida por la luz para ir de un punto a otro lo hace de manera que el tiempo empleado para el recorrido sea siempre un mínimo. Mediante este principio se explica satisfactoriamente las leyes de la reflexión y de la refracción.

Para describir la propagación de la luz se recurre al rayo de luz o rayo luminoso que es una línea perpendicular a la superficie de la onda y determina la dirección de propagación de la misma.



Velocidad de propagación de la luz.-

Son muchos los intentos realizados para medir la velocidad de la luz. A partir del siglo XVII los procedimientos utilizados se pueden considerar científicos no tanto por la bondad del resultado como por la explicación de los errores cometidos. Se diferencian entre métodos astronómicos (la luz recorre grandes

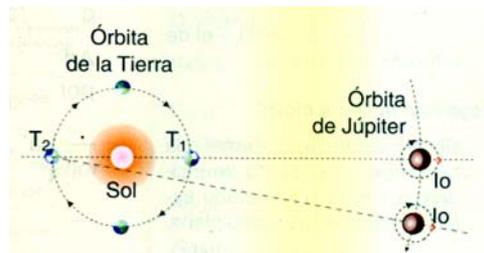
distancias) y terrestres (recorre distancias más pequeñas y existe mayor precisión en el instrumental utilizado).

La velocidad de la luz es $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, es una constante importante en Física.

Ejemplo: método astronómico (Roemer).-

El resultado obtenido para la velocidad de la luz por Roemer (1644-1710) difiere del reconocido actualmente pero tiene el mérito de ser el primero el demostrar que dicho valor es finito.

Su procedimiento consiste en medir el período orbital de un satélite de Júpiter (Io) para ello recurre al intervalo de tiempo transcurrido entre dos eclipses consecutivos. Sus medidas le hacen pensar que el resultado era variable pues aumentaba cuando la Tierra se alejaba de Júpiter y disminuía cuando se aproximaba a él. La explicación que dio se fundaba en que al aumentar la distancia entre la Tierra y Júpiter, la luz que procede del satélite recorre una distancia mayor.



Procede midiendo el período del satélite cuando la Tierra se encuentra en T_1 y averigua el momento en que debía producirse un eclipse al cabo de medio año cuando la Tierra se encuentra en T_2 . Aprecia un retraso en la observación del eclipse corresponde con el tiempo empleado por la luz en recorrer la distancia desde T_1 a T_2 , esto es, el diámetro de la órbita terrestre $3 \cdot 10^{11} \text{ m}$. Este retraso es de 16,5 minutos y, por tanto, el valor de c es:

$$c = \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{3 \cdot 10^{11}}{22.60} = 2,3 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

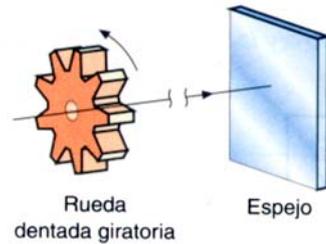
Ejemplo: método terrestre (Fizeau).-

El experimento diseñado por Fizeau (1819-1896) hace pasar un haz luminoso entre dos dientes consecutivos de una rueda dentada giratoria (720 dientes) que después se refleja en un espejo situado a 8,36 km de la rueda regresando por la misma trayectoria. Cuando la velocidad de rotación de la rueda era pequeña, la luz reflejada era detenida por el siguiente diente de ésta.

Para averiguar la velocidad de la luz es necesario conocer la velocidad angular de la rueda dentada para que la luz atravesase, con exactitud, por la abertura siguiente de la rueda. Como la velocidad angular de la rueda es 25,2 rps el tiempo que transcurre desde que la luz atraviesa la rueda hasta que regresa es

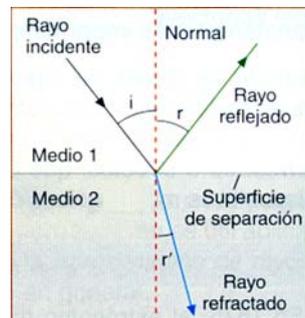
$$\Delta t = \frac{\Delta \varphi}{\omega} = 5,5 \cdot 10^{-5} \text{ s} \therefore c = \frac{\Delta s}{\Delta t} = 3,1 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

resultado superior al que considerado correcto.



Reflexión y refracción de la luz.-

Cuando una onda luminosa alcanza la superficie de separación de dos medios de distinta naturaleza pero transparentes, una parte de la onda se refleja y otra parte se refracta. Así cuando un rayo incidente llega a la superficie de separación, cambia de dirección, y se propaga en el primer medio constituyendo el rayo reflejado mientras que otro rayo atraviesa la superficie y se propaga en el segundo medio, rayo refractado, desviándose de la dirección de propagación del rayo incidente.



Leyes de reflexión de la luz.-

- El rayo incidente, la normal a la superficie en el punto de incidencia y el rayo reflejado se encuentran en el mismo plano.
- Los ángulos de incidencia y de reflexión son iguales.

Leyes de refracción de la luz.-

- El rayo incidente, la normal a la superficie en el punto de incidencia y el rayo refractado se encuentran situados en el mismo plano.
- La razón entre el seno del ángulo de incidencia i y el del ángulo de refracción r es una constante que viene expresada por la razón entre las velocidades de propagación de los rayos en los dos medios. Es decir,

$$\frac{\text{sen}i}{\text{sen}r} = \frac{v_1}{v_2}$$

Conviene recordar las siguientes cuestiones:

- La velocidad de la luz es mayor en el vacío que en los medios materiales.
- La velocidad de una onda luminosa que se propaga en el vacío no depende de la longitud de onda de la misma, es constante. Por el contrario, en los medios materiales la velocidad si depende del medio.
- La frecuencia de las ondas luminosas coincide en el vacío con la que posee en los medios materiales. No sucede lo mismo con los medios materiales.

Índice de refracción.- La velocidad de la luz en un medio material se caracteriza por el denominado índice de refracción.

Se denomina índice de refracción absoluto n de un medio es el cociente entre la velocidad de la luz en el vacío c y la velocidad v de propagación en dicho medio

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

En el vacío, el índice de refracción es igual a la unidad, valor que, en buena aproximación, coincide con la del aire. En los restantes medios materiales, el índice de refracción siempre es mayor que la unidad ($c > v$).

Para dos medios transparentes e isótropos diferentes se puede establecer una relación entre los índices de refracción y las velocidades en que se propaga la onda luminosa en esos medios.

$$n_1 = \frac{c}{v_1} \therefore n_2 = \frac{c}{v_2} \rightarrow \frac{n_2}{n_1} = \frac{v_1}{v_2}$$

El índice de refracción también se puede expresar en función de las longitudes de onda, sin más que expresar la velocidad en función de la longitud de onda. Así, por ejemplo, si λ_0 es la longitud de onda de una radiación luminosa en el vacío y λ corresponde a la longitud de onda en un medio cualquiera, podemos escribir

$$n = \frac{c}{v} = \frac{\lambda_0 \cdot v}{\lambda \cdot v} = \frac{\lambda_0}{\lambda}$$

pues la frecuencia es independiente del medio. Además, como $n > 1$, la longitud de onda de una radiación en un medio cualquiera es menos que su longitud de onda en el vacío.

Se denomina índice de refracción relativo del medio 2 respecto al medio 1 al cociente entre los correspondientes índices de refracción absolutos

$$n_{21} = \frac{n_1}{n_2}$$

Teniendo presente la segunda ley de la refracción, resulta, la ley de Snell,

$$n_{21} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{\text{sen}i}{\text{sen}r} \rightarrow n_1 \cdot \text{sen}i = n_2 \text{sen}r$$

Ángulo límite y reflexión total.- Cuando la luz pasa de un medio a otro cuyo índice de refracción sea menor, entonces se refracta separándose o alejándose de la normal. Al incidir con un ángulo mayor, el ángulo de refracción también se hace mayor, de manera que cuando para un cierto ángulo de incidencia que se llama ángulo límite, el ángulo de refracción es de 90° . Por tanto, el ángulo límite L se corresponde con aquel ángulo de incidencia cuyo ángulo de refracción es de 90° ,

$$n_1 \cdot \text{sen}L = n_2 \text{sen}90^\circ \rightarrow \text{sen}L = \frac{n_2}{n_1} = n_{21}$$

para ángulos de incidencia mayores, la luz se refleja totalmente y a este fenómeno se le conoce como de reflexión total.

EJEMPLOS

Un rayo de luz incide desde el vidrio ($n = 1,52$) sobre una superficie de separación con el aire. Averiguar: a) el ángulo de refracción sabiendo que el ángulo de incidencia es de 30° . b) el ángulo límite.

Resolución:

a) La ley de Snell nos permite escribir $n_1 \cdot \sin 30^\circ = n_2 \cdot \sin r$, luego

$$1,52 \cdot \frac{1}{2} = 1 \cdot \sin r \rightarrow \sin r = \frac{1,52 \cdot 1}{2} = 0,76 \rightarrow r \cong 49^\circ$$

b) $\sin L = \frac{n_2}{n_1} = \frac{1}{1,52} = 0,65 \rightarrow L \cong 41^\circ$

EJERCICIO DE AUTOCOMPROBACIÓN

Un rayo de luz incide formando un ángulo de 40° con la normal, sobre la superficie de separación de dos medios cuyos ángulos de refracción son, respectivamente, 1,3 y 1,5. Calcular el ángulo de refracción cuando este rayo luminoso pasa del primer medio al segundo y cuando lo hace del segundo al primero.

Resolución.- En el primer caso pasa del medio de índice de refracción 1,3 al medio que tiene un índice de 1,5, siendo el ángulo de incidencia de 40° , luego

$$\sin \alpha_1 = \frac{1,3}{1,5} \sin 40^\circ \rightarrow \alpha_1 \cong 34^\circ$$

análogamente, para el segundo caso escribimos

$$\sin \alpha_2 = \frac{1,5}{1,3} \sin 40^\circ \rightarrow \alpha_2 \cong 48^\circ$$

REFERENCIAS:

- Tipler, O.P., Física Universitaria (2 vol), Barcelona: Reverté, 1987
- Cromer, A., Física en la Ciencia y en la Industria, Barcelona: Reverté, 1998
- Mengual, J.I., Física al alcance de todos, Madrid: Pearson-Alhambra, 2006.

AUTOR:

- Joaquín Summers Gámez