



ce
pre
UNI

Física

CICLO
PREUNIVERSITARIO
2023-1





ce
pre
UNI

Física

ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS

ce
pre
UNI

CAMPO ELECTROMAGNÉTICO

El **campo electromagnético** es aquella propiedad que adquiere el espacio que rodea a una carga eléctrica.

En sistemas de referencia donde la carga eléctrica está en reposo, sólo se observa la componente eléctrica de este campo.

Sin embargo no podemos afirmar que esta carga está en reposo respecto a todos los sistemas de referencia, este campo, en general tiene componentes eléctrica y magnética, ambas generadas por la carga.

Como las componentes eléctrica y magnética pueden **existir en cualquier medio incluso en el vacío**, entonces lo mismo ocurre con el **campo electromagnético**.

Los experimentos de inducción electromagnética de Faraday muestran que un **campo magnético variable** en el tiempo (el cual se generado por una corriente eléctrica variable en el tiempo) **puede inducir una f.e.m. donde el campo eléctrico asociado es perpendicular a la orientación del campo magnético variable**).

Dicho **campo eléctrico** puede generar movimiento de cargas (una corriente eléctrica) la cual a su vez **genera un campo magnético perpendicular a la orientación de la corriente**, en concordancia con el experimento de Oersted.

Por lo tanto una corriente eléctrica variable en el tiempo (es decir cargas aceleradas) genera **campo electromagnético** cuyas componentes eléctrica y magnética son variables en el tiempo y mutuamente perpendiculares.

ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS (O.E.M.)

La carga, que es fuente de campo electromagnético, aplica fuerza sobre otras cargas que ingresen a este campo. Dado que esta fuerza puede realizar trabajo concluimos que la carga fuente distribuye su energía en el campo electromagnético.

Recordando que una onda transporta energía, entonces cuando una onda electromagnética se propaga, las componentes $\vec{E}$ y $\vec{B}$ del campo electromagnético varían mientras viaja por dicho medio.

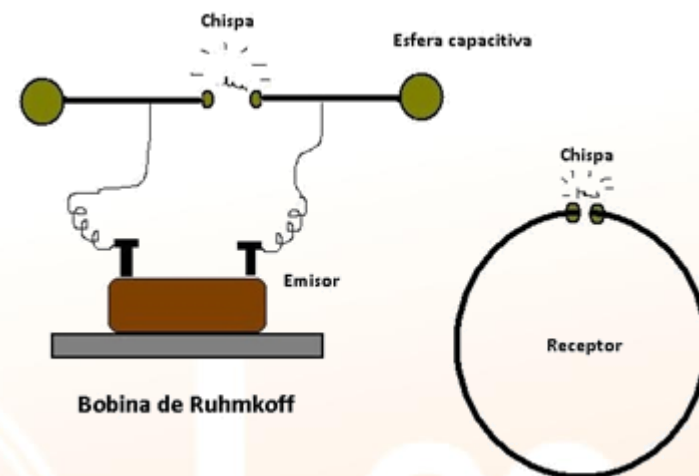
Como las cargas eléctricas aceleradas generan campo electromagnético cuyas componentes $\vec{E}$ y $\vec{B}$ varían en el tiempo, concluimos que las cargas eléctricas aceleradas generan ondas electromagnéticas.

Características de las ondas electromagnéticas

En 1865, James C. Maxwell publicó un artículo titulado “Una teoría dinámica del campo electromagnético” en el que aparecieron por primera vez las ecuaciones hoy mundialmente famosas y conocidas como “Ecuaciones de Maxwell”. Estas ecuaciones expresan de una manera concisa y elegante todas las leyes fenomenológicas sobre electricidad y magnetismo que se habían formulado desde el siglo XVIII, entre ellas las leyes de ampere, de Faraday y de Lenz.

La teoría de Maxwell predecía la generación de ondas electromagnéticas en el laboratorio. Esta posibilidad fue llevada a cabo por el físico alemán Heinrich Hertz en 1887, ocho años después del fallecimiento de Maxwell, mediante la construcción de un oscilador como emisor y de un resonador como receptor.

Trabajando con una fuente alterna de 10 MHz y con el receptor situado a una distancia de alrededor de 30 m del radiador, Hertz observó que saltaba una chispa entre las esferas del detector, con lo que demostró que las ondas electromagnéticas ¡efectivamente existen!



Hertz interpreta que estas chispas que aparecen al mismo tiempo en el emisor y receptor corresponden a puntos del espacio por donde pasa la onda y que están en fase por lo que los 30 m representan la longitud de onda, y como la frecuencia con la que opera el emisor es 10 MHz = 10^7 Hz

$$\Rightarrow v_{\text{OEM aire}} = \lambda \nu = (30 \text{ m})(10^7 \text{ Hz}) = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$$

Las siguientes características de las ondas electromagnéticas están referidas a cuando estas se propagan en un medio homogéneo (material o vacío)

- Cuando las **O.E.M.** se propagan, sus **componentes $\vec{E}$ y $\vec{B}$** (las cuales indican el cambio en las componentes del campo electromagnético) **son perpendiculares entre sí y oscilan en fase.**
- Las **O.E.M.** son **transversales** (la dirección de **propagación de la onda es perpendicular** a la dirección de oscilación de **$\vec{E}$ y $\vec{B}$**).
- La **orientación** de la **velocidad de la O.E.M.** es la misma que la de **$\vec{E} \times \vec{B}$.**
- La **rapidez** de la **O.E.M.** se puede **calcular** como **$|\vec{v}_{OEM}| = \frac{|\vec{E}|}{|\vec{B}|}$**

- Pero la rapidez de toda onda depende de las propiedades del medio. En el caso de las O.E.M. esas propiedades son la permitividad eléctrica (ϵ) y la permeabilidad magnética (μ), de modo que

$$|\vec{v}_{\text{OEM medio}}| = v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon\mu}}$$

- En el vacío, todas las O.E.M. tienen la misma rapidez de propagación. Como $1/(4\pi\epsilon_0) = 9 \times 10^9 \text{ N}\cdot\text{m}^2/\text{C}^2 \Rightarrow 1/\epsilon_0 = 36\pi \times 10^9$. luego

$$|\vec{v}_{\text{OEM vacío}}| = c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0\mu_0}} = \sqrt{\frac{1}{\epsilon_0} \times \frac{1}{\mu_0}} = \sqrt{36\pi \times 10^9 \times \frac{1}{4\pi \times 10^{-7}}}$$

$$\therefore |\vec{v}_{\text{OEM vacío}}| = c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$$

Ondas electromagnéticas armónicas

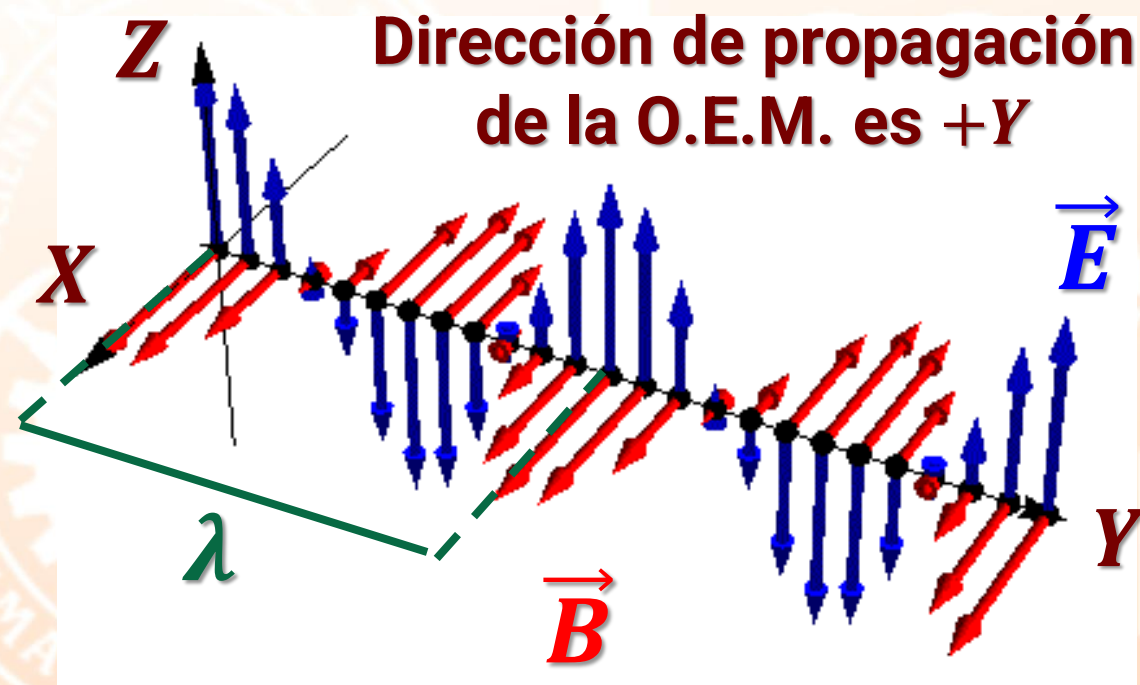
Son producidas por cargas eléctricas oscilantes. Estudiaremos estas ondas a una distancia mucho más grande que el tamaño de la fuente (es decir una fuente puntual) de manera que a esa distancia una pequeña porción del frente de onda pueda considerarse una superficie plana.

Hay que recordar que la frecuencia de oscilación ω proporciona la fuente

$$\omega = 2\pi\nu$$

Y que el número de onda k (no confundir con el vector unitario $\hat{k}$)

$$k = \frac{2\pi}{\lambda}$$



La componente $\vec{E}$ de la O.E.M. viene dada por

$$\vec{E} = E_{\max} \text{Sen}(\underbrace{ky - \omega t}_{+Y}) \hat{k}$$

Amplitud de la componente $\vec{E}$ de la O.E.M.

Dirección de propagación de la O.E.M. En este caso es $+Y$

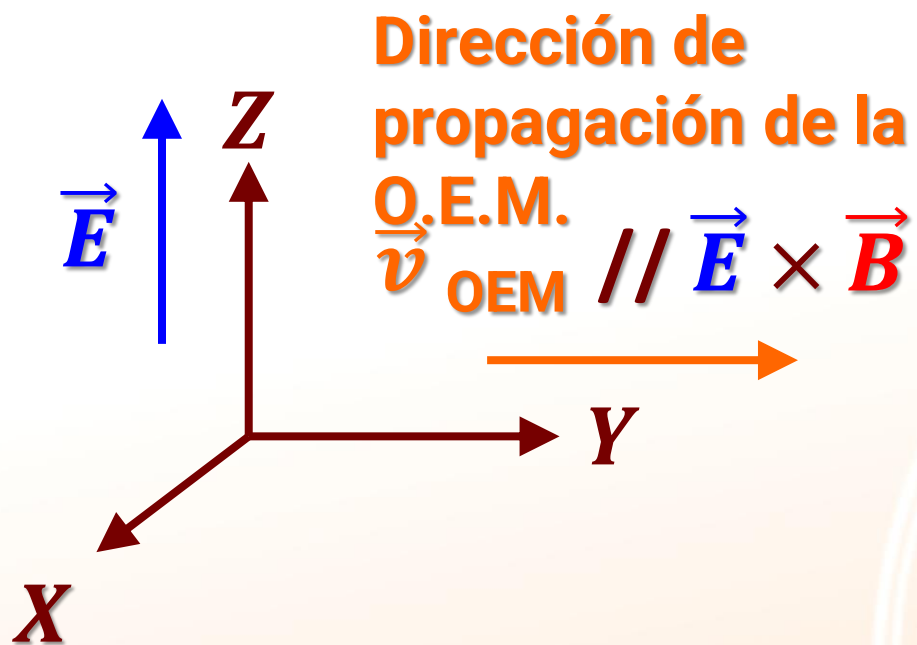
Dirección de oscilación de la componente $\vec{E}$ de la O.E.M

Para obtener la componente $\vec{B}$ de la O.E.M. Procedemos de la siguiente forma:

Como oscilan en fase, entonces $\vec{B} = B_{\max} \text{Sen}(ky - \omega t) \hat{u}$

$$\text{Como } |\vec{v}_{\text{OEM}}| = \lambda \nu = \frac{|\vec{E}|}{|\vec{B}|} = \frac{E_{\max} |\text{Sen}(ky - \omega t)|}{B_{\max} |\text{Sen}(ky - \omega t)|} \Rightarrow B_{\max} = \frac{E_{\max}}{\lambda \nu}$$

- Y para hallar la orientación de la componente $\vec{B}$ de la O.E.M.



$\vec{B}$ es perpendicular tanto a $\vec{E}$ como a $\vec{v}_{OEM}$

$$\vec{v}_{OEM} // \vec{E} \times \vec{B}$$

$$\hat{j} // \hat{k} \times \hat{i}$$

Con todo lo obtenido, finalmente la componente $\vec{B}$ de la O.E.M. viene dada por

$$\vec{B} = B_{\max} \text{Sen}(\textcolor{teal}{ky} - \omega t) \hat{i}$$

Densidad de energía electromagnética

Recordemos que la carga distribuye su energía en el campo electromagnético que produce. Vimos en el caso de un condensador que la energía está almacenado en el campo eléctrico, campo contenido en el volumen limitado por el condensador.

La densidad de energía en ese caso, considerando que el medio entre las placas era el vacío es

$$u_E = \frac{\text{Energía}}{\text{Volumen}} = \frac{1}{2} \epsilon_0 |\vec{E}|^2$$

De modo que, si se tratase de la componente $\vec{E}$ de una O.E.M. Propagándose en un medio de permitividad eléctrica ϵ , la densidad de energía por parte de dicha componente es $u_E = \frac{1}{2} \epsilon |\vec{E}|^2$

La rapidez de la O.E.M. está dada por $|\vec{v}_{OEM}| = \frac{|\vec{E}|}{|\vec{B}|} = \frac{1}{\sqrt{\epsilon\mu}} \Rightarrow \epsilon|\vec{E}|^2 = \frac{|\vec{B}|^2}{\mu}$

De este modo $u_E = \frac{1}{2} \epsilon |\vec{E}|^2 = \frac{|\vec{B}|^2}{2\mu} = u_M$, es decir la componente magnética $\vec{B}$ transporta la misma cantidad de energía que la componente eléctrica $\vec{E}$ de la O.E.M. ($u_{EM} = u_E + u_M = 2u_E$)

Podemos calcular el valor promedio de la densidad de energía para una O.E.M. Armónica en un periodo de oscilación de la fuente. Considerando que la componente $\vec{E} = E_{\max} \text{Sen}(ky - \omega t) \hat{u}$

$$\langle u_{EM} \rangle = 2\langle u_E \rangle = 2 \times \frac{1}{2} \epsilon \langle |\vec{E}|^2 \rangle = \epsilon E_{\max}^2 \underbrace{\langle \text{Sen}^2(ky - \omega t) \rangle}_{1/2} = \frac{1}{2} \epsilon E_{\max}^2 = \frac{B_{\max}^2}{2\mu}$$

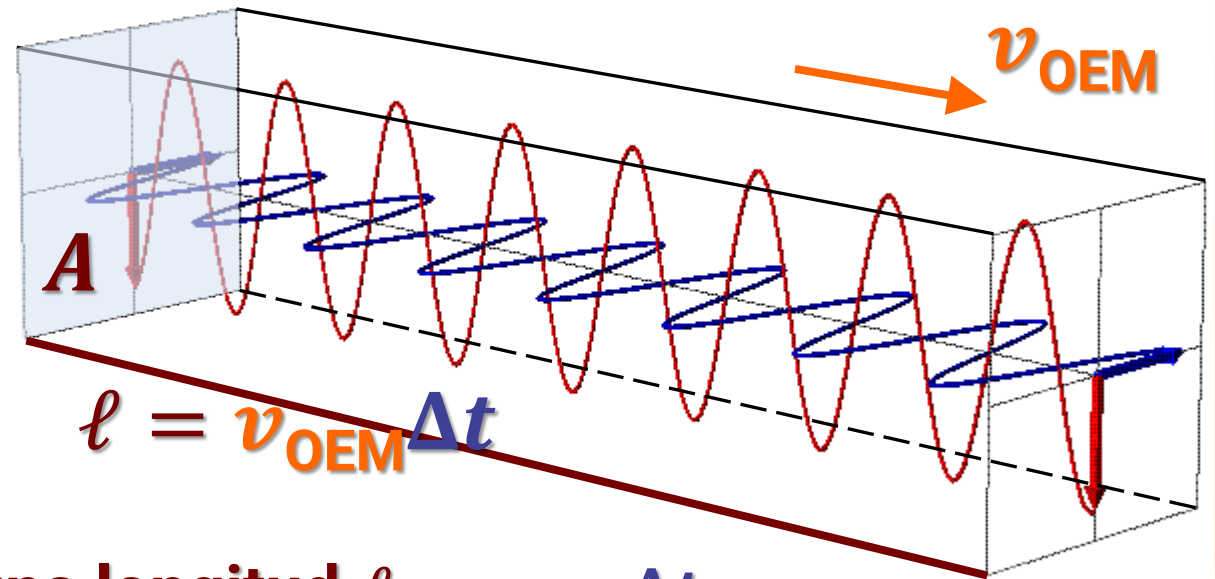
Intensidad de onda electromagnética

Recordemos que la intensidad de una onda viene dada por

$$I = \frac{\text{Energía}}{\text{Área} \times \text{Tiempo}}$$

En un Δt , las O.E.M recorrerán una longitud $\ell = v_{\text{OEM}} \Delta t$

Si consideramos que en ese tiempo Δt las O.E.M. Atraviesan un área A , transportando una energía E_{OEM} , dicha energía estaría en el volumen $A\ell = Av_{\text{OEM}} \Delta t$



Así podemos expresar la intensidad de la O.E.M. como

$$I_{\text{OEM}} = \frac{E_{\text{OEM}}}{A \Delta t} \times \frac{v_{\text{OEM}}}{v_{\text{OEM}}} = \frac{E_{\text{OEM}}}{\underbrace{A v_{\text{OEM}} \Delta t}_{\text{Volumen}}} v_{\text{OEM}} = u_{\text{EM}} v_{\text{OEM}}$$

Calculamos el valor promedio de la intensidad de la O.E.M. para una O.E.M. armónica en un periodo de oscilación de la fuente. Considerando que la componente $\vec{E} = E_{\text{max}} \text{Sen}(ky - \omega t) \hat{u}$

$$\langle I_{\text{OEM}} \rangle = \langle u_{\text{EM}} \rangle v_{\text{OEM}} = \frac{1}{2} \epsilon E_{\text{max}}^2 v_{\text{OEM}} = \frac{B_{\text{max}}^2}{2\mu} v_{\text{OEM}}$$

ÍNDICE DE REFRACCIÓN

Recordemos que cuando una onda incide en la frontera que separa dos medios materiales, la parte de dicha onda que logra pasar al otro medio se denomina onda refractada o transmitida, la cual tiene diferente rapidez que la onda incidente.

Definimos el índice de refracción como la razón entre la rapidez de la O.E.M. propagándose en el vacío y la rapidez de la O.E.M. propagándose en un medio material.

$$n = \frac{|\vec{v}_{\text{OEM vacío}}|}{|\vec{v}_{\text{OEM medio}}|} = \frac{c}{v}$$

Como la luz propagándose en el vacío es la entidad física con la mayor rapidez registrada en la naturaleza, el índice de refracción n es mayor o igual que 1, siendo 1 su valor si el medio en cuestión es el mismo vacío.

Además depende de la longitud de onda. Sin embargo si se trabaja con fuente que emite luz monocromática (es decir radiación de una sola longitud de onda) el índice de refracción sólo dependería del medio.

En la siguiente tabla se muestran índices de refracción de distintos medios usando luz amarilla del sodio ($\lambda = 589,6 \text{ nm}$).

Medio	n
Vacío	1
Aire (a condiciones normales)	1,0002926
Agua	1,3330
Cuarzo	1,544
Vidrio (común)	1,45
Cloruro de sodio	1,544
Diamante	2,43

$$\text{Si } n_1 > n_2 \Rightarrow \frac{c}{v_1} > \frac{c}{v_2} \Rightarrow v_2 > v_1$$

Para O.E.M. armónicas

$$v_2 > v_1 \Rightarrow \lambda_2 v > \lambda_1 v \\ \Rightarrow \lambda_2 > \lambda_1$$

$$n = \frac{c}{v} = \frac{\lambda_{\text{vacío}} v}{\lambda_{\text{medio}} v} = \frac{\lambda_{\text{vacío}}}{\lambda_{\text{medio}}}$$

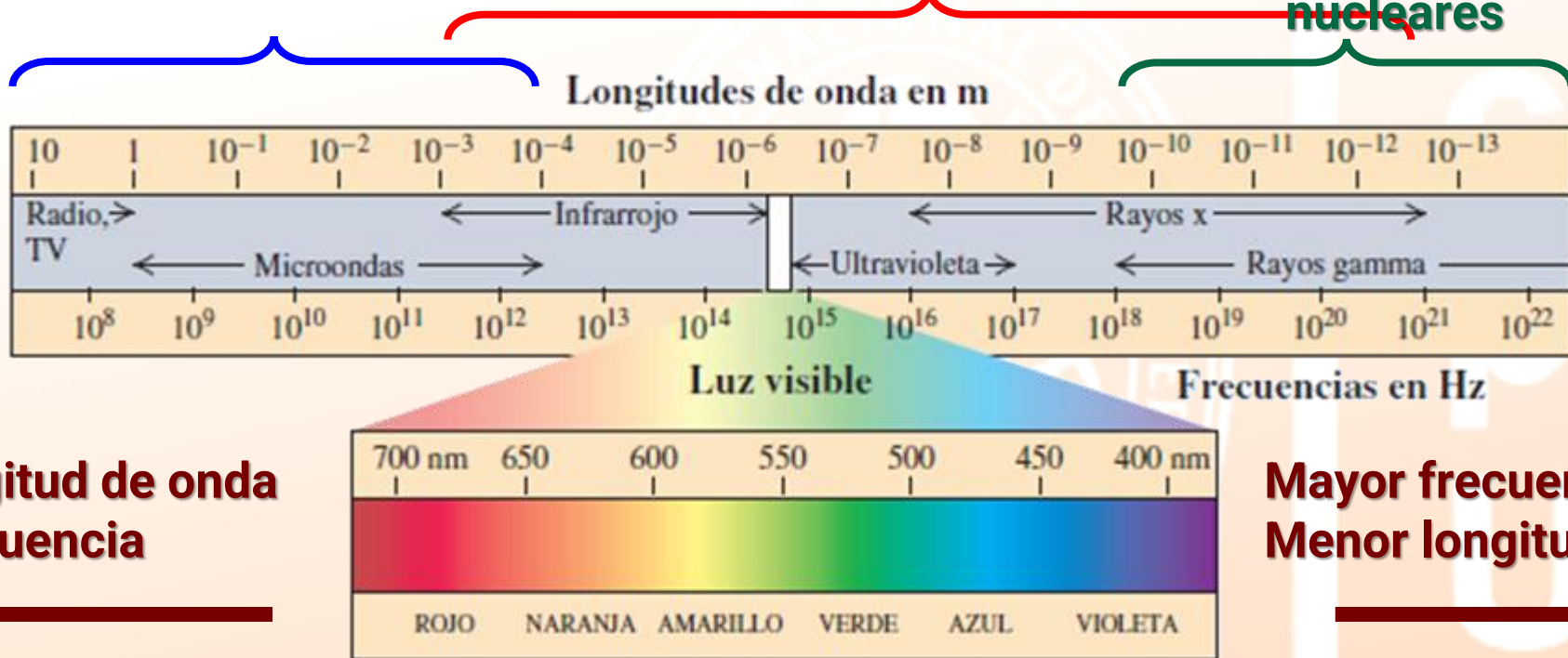
ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO

Clasificación de las ondas electromagnéticas de acuerdo al proceso que las genera.

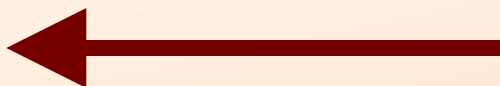
Cargas eléctricas oscilantes

Transiciones
electrónicas

Transiciones
nucleares



Mayor longitud de onda
Menor frecuencia



Mayor frecuencia
Menor longitud de onda



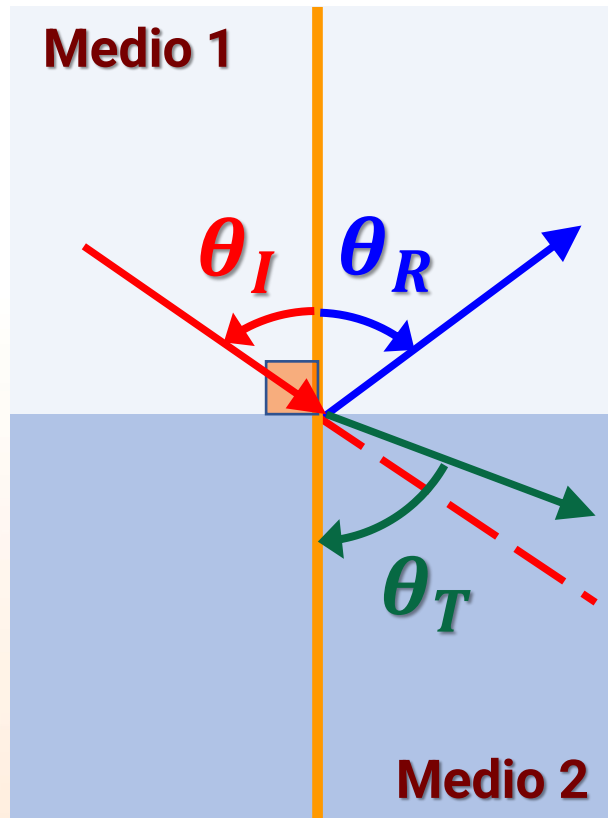
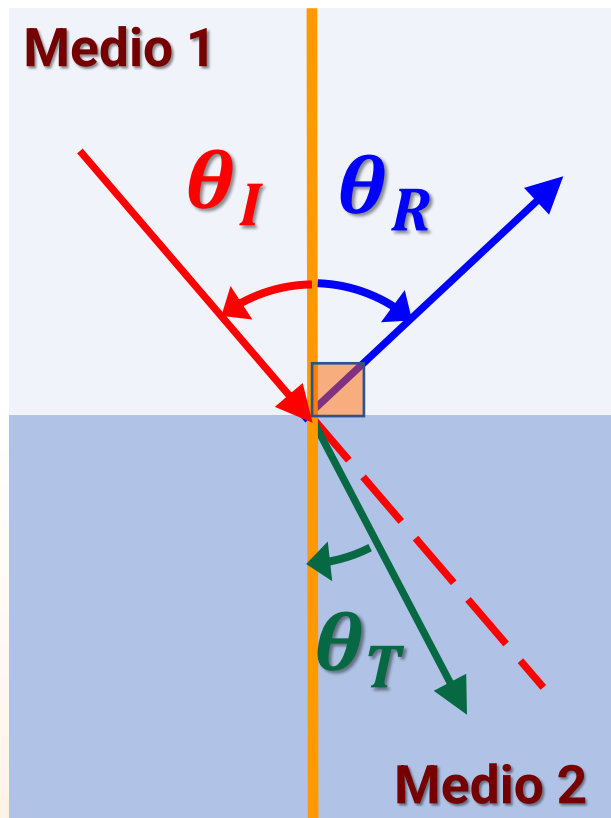
REFLEXIÓN Y REFREACCIÓN DE LA LUZ

Para el estudio de la reflexión y refracción de la luz usaremos el concepto de rayo luminoso: es una aproximación del comportamiento que corresponde a las ondas electromagnéticas cuando los objetos involucrados son de tamaño mucho mayor que la longitud de onda.

La reflexión es un fenómeno conocido y analizado desde la Grecia Clásica.

La refracción es un fenómeno que ocurre una onda al pasar de un medio a otro. La O.E.M. experimenta un cambio de velocidad al pasar a un medio con distinto índice de refracción. Esta desviación en la dirección de propagación se explica por medio de la ley de Snell. Sin embargo, el descubrimiento de un manuscrito revela que el árabe Ibn Sahl había llegado a las mismas conclusiones que el holandés Snell seis siglos antes (entre los años 983 y 985).

Línea normal a la superficie en el punto donde incide la luz.



θ_I : Ángulo que forma el rayo incidente con la normal.

θ_R : Ángulo que forma el rayo reflejado con la normal.

θ_T : Ángulo que forma el rayo refractado o transmitido con la normal.

- Todos los rayos de luz y la normal pertenecen al mismo plano, y
- Todos los ángulos pertenecen al primer cuadrante

Experimental, estos ángulos están relacionados de la siguiente manera

$$\theta_I = \theta_R$$

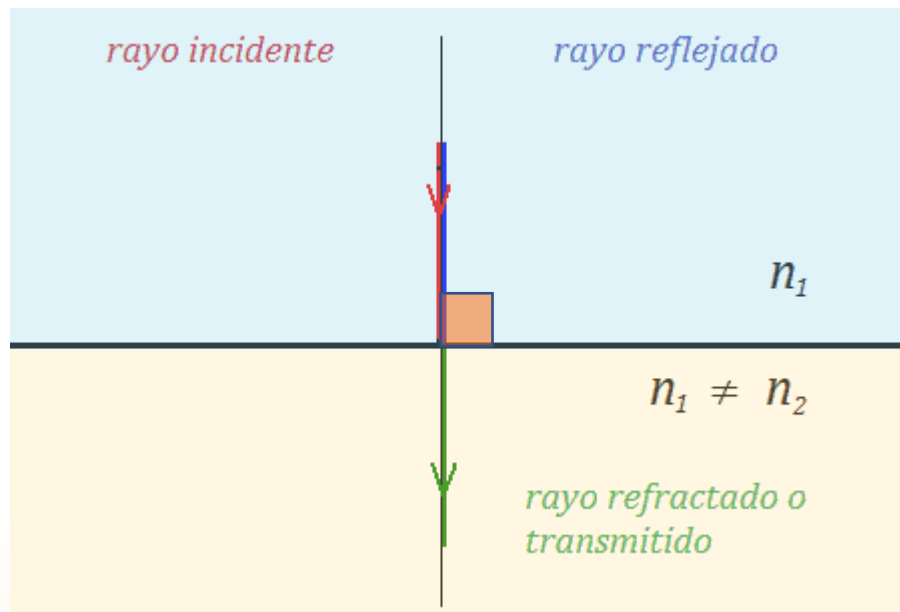
$$n_1 \text{Sen}\theta_I = n_2 \text{Sen}\theta_T$$

Como los ángulos $\in$ al primer cuadrante, cuadrante donde la función seno es creciente, entonces a mayor ángulo, mayor seno del ángulo

$$\text{Si } \alpha > \beta \Rightarrow \text{Sen}\alpha > \text{Sen}\beta \Rightarrow n_1 \underbrace{\text{Sen}\alpha}_{\text{mayor}} = n_2 \underbrace{\text{Sen}\beta}_{\text{menor}} \Rightarrow n_1 < n_2$$

Es decir, el índice de refracción del medio donde esta ubicado el rayo es menor cuando el ángulo que forma dicho rayo con la normal es mayor, y viceversa.

Además $\frac{n_1}{n_2} = \text{cte.} = \frac{\text{Sen}\theta_T}{\text{Sen}\theta_I}$ implica que si aumentamos el ángulo de incidencia, también lo hará el ángulo de transmisión.



Cuando la luz incide normalmente a la superficie, todos los rayos son paralelos a la normal, por lo que

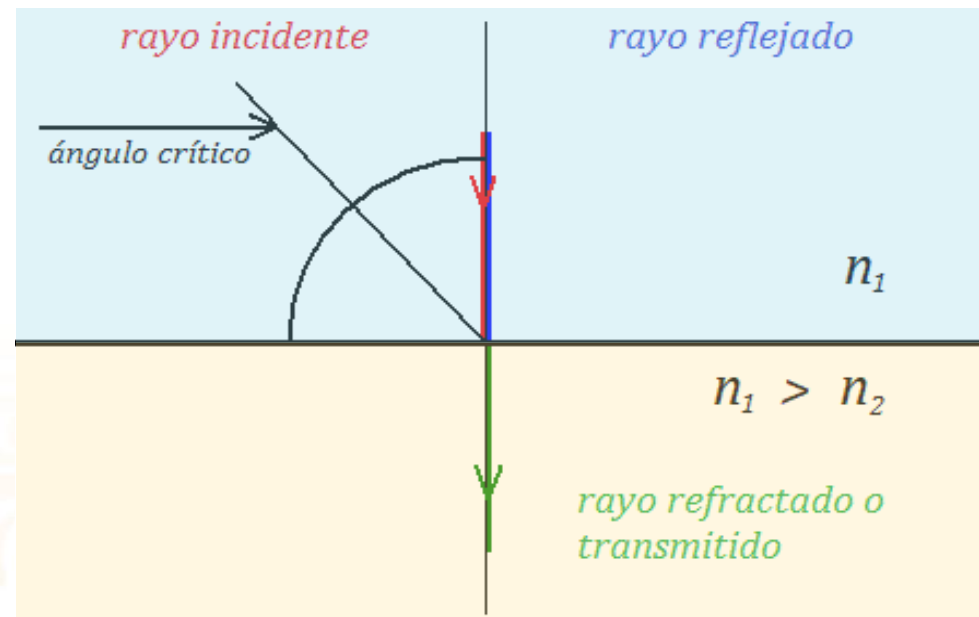
$$\theta_I = \theta_R = \theta_T = 0$$

Cuando el índice de refracción del rayo incidente es menor, el ángulo de incidencia θ_I es mayor y por lo tanto el ángulo de transmisión θ_T es menor. Si aumentamos el ángulo de incidencia, aumentamos el ángulo de transmisión pero siempre será menor.

Pero cuando el índice de refracción del rayo incidente es mayor, θ_I menor y por lo tanto el θ_T es mayor. Si aumentamos θ_I , aumentamos θ_T pero siempre será mayor, llegando este primero a 90° .

En dicha situación el rayo transmitido es paralelo a la superficie y el valor del **ángulo de incidencia recibe el nombre de ángulo crítico**.

Si seguimos aumentando el ángulo de incidencia el rayo transmitido desaparece y la luz se refleja totalmente (**Reflexión total interna**).

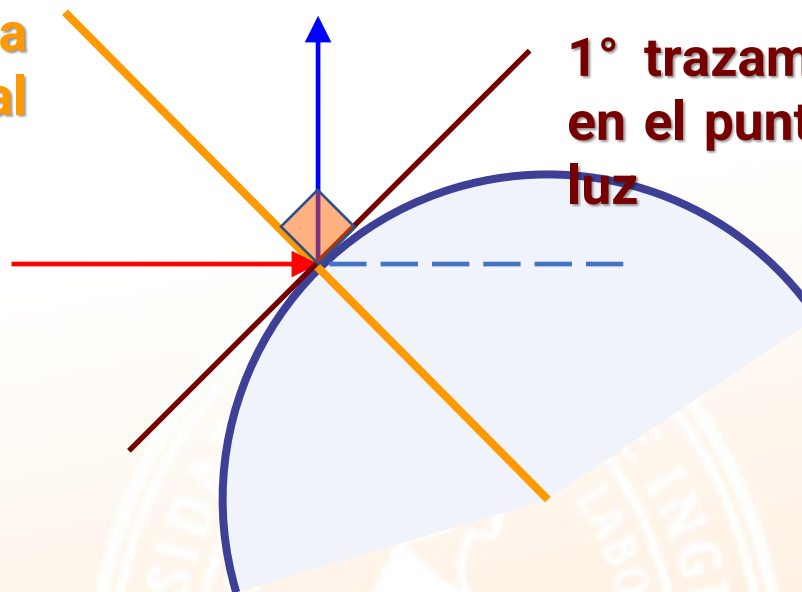


Cuando la luz incide con el ángulo crítico, el ángulo de transmisión es 90°

$$n_1 \text{Sen} \theta_{\text{critico}} = n_2 \text{Sen} 90^\circ$$

Para el trazado de los rayos luego que la luz incide sobre una superficie curva se procede de la siguiente manera:

2° formando 90° con la línea tangente trazamos la normal en el punto de incidencia



1° trazamos la línea tangente en el punto de incidencia de la luz

Y si el ángulo de incidencia fuese el ángulo crítico, el rayo transmitido estaría en la línea tangente.

En el caso de una superficie con radio de curvatura constante, la línea normal es la línea radial, por lo que la normal se trazaría desde el centro de curvatura hacia el punto donde incide la luz.