

MOVIMIENTO ONDULATORIO

Imagina que cogemos con la mano una cuerda por un extremo y la empezamos a agitar de arriba a abajo.



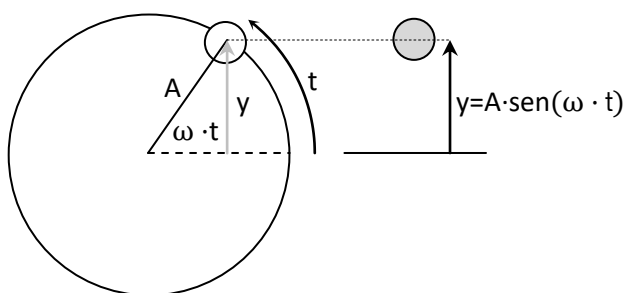
Existen dos movimientos, el de la mano que es la que produce la onda y el movimiento de cada una de las partículas de la cuerda.

A. Movimiento de la mano (FOCO):

La mano sigue un movimiento armónico simple. La posición de la mano en cualquier instante la podemos calcular mediante la fórmula del MAS:

$$y = A \cdot \text{sen}(\omega \cdot t)$$

¿Por qué esta fórmula?



El movimiento de una partícula (la GRIS) que sigue un MAS (se mueve de arriba a abajo) es el mismo que el movimiento *vertical* que sigue una partícula (la BLANCA) que se mueve con un movimiento circular con una velocidad angular ω .

La partícula gris y la blanca están siempre a la misma altura, por lo que la posición “y” será la misma para ambas.

$$y = A \cdot \text{sen}(\omega \cdot t)$$

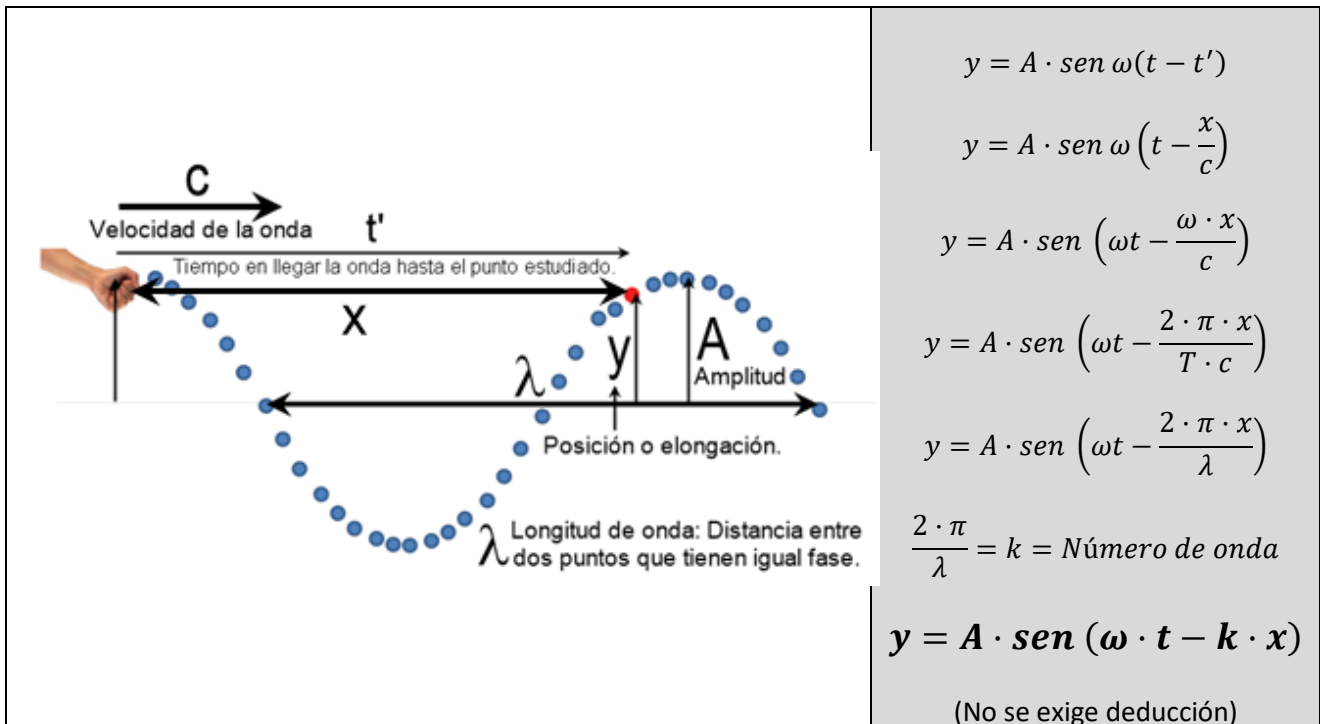
B. Movimiento de cada partícula de la cuerda:

Está claro que al agitar la cuerda observaremos que cada uno de los puntos que forman la cuerda se mueven de arriba a abajo de la misma manera que se mueve la mano. Hemos generado una onda.

Nuestro propósito es obtener una fórmula con la que calcular la posición “y” de cualquier punto de la cuerda en un instante dado, “t”.

Ondas

Lo que sí observamos es que el movimiento que sigue un punto cualquiera de la cuerda es el mismo movimiento que realiza mi mano pero con un cierto retraso, t' . Ese retraso será el tiempo que tarda la onda en llegar a ese punto y recibir la orden de que tiene que moverse como la mano.



$$y = A \cdot \text{sen } (\omega \cdot t - k \cdot x)$$

Importante: El signo (-) del paréntesis significa que la onda se dirige hacia la derecha. En el caso de que la onda se desplazase hacia la izquierda (ya no habría ese retraso) sería:

$$y = A \cdot \text{sen } (\omega \cdot t + k \cdot x)$$

Algunas magnitudes que nos serán necesarias:

y = Elongación o posición.

A = Amplitud (es el máximo desplazamiento).

λ = Longitud de onda.

k = Número de onda.

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

ω = Frecuencia angular o pulsación.

T = Periodo (Tiempo que tarda la mano o cualquier punto de la cuerda en realizar un ciclo completo).

f = Frecuencia (Número de ciclos completos que realiza en un segundo).

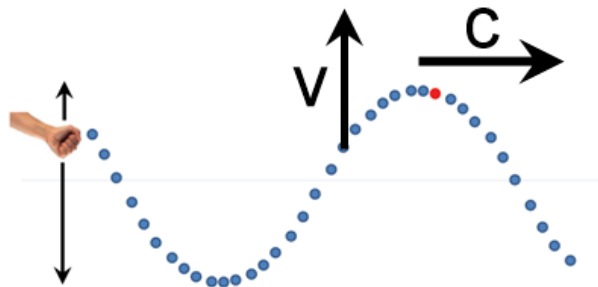
$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f = \frac{2 \cdot \pi}{T}$$

$$T = \frac{1}{f}$$

c = Velocidad de una onda

$$c = \frac{\lambda}{T}$$

Velocidad de propagación de una onda y velocidad de oscilación de una partícula del medio.



En una onda se distinguen dos velocidades, la velocidad de la onda, c (velocidad con la que se propaga una cresta de la cuerda), y la velocidad con la que se mueve un punto de la cuerda, v .

Para la **velocidad de una onda, c** :

$$c = \frac{\lambda}{T}$$

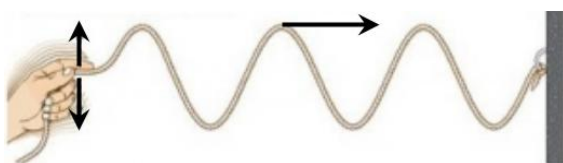
Para la **velocidad de oscilación** de una partícula de la cuerda, agua, aire, etc:

$$v = \frac{dy}{dt} = A \cdot \omega \cdot \cos(\omega t - kx)$$

TIPOS DE ONDAS

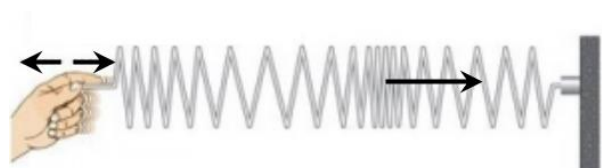
Ondas transversales

Aquí la dirección de la perturbación es perpendicular a la dirección de propagación de la onda. **La luz** es una onda **transversal**.



Ondas longitudinales

En estas ondas la dirección de la perturbación es la misma que la dirección de propagación de la onda. **El sonido** es una onda **longitudinal**.



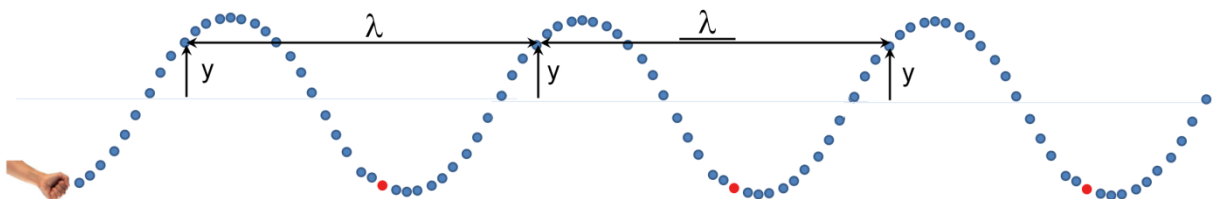
PERIODICIDAD EN EL ESPACIO Y EN EL TIEMPO DE UNA ONDA

La función seno es una función que obtiene valores comprendidos entre -1 y +1 pasando por el 0.

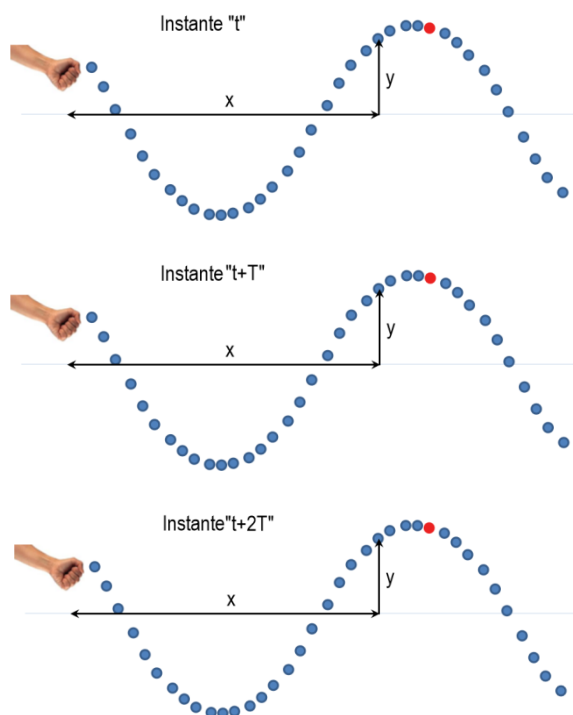
Si observamos la ecuación de una onda:

$$y = A \cdot \text{sen}(\omega \cdot t - k \cdot x)$$

Podemos deducir que en un instante dado de tiempo (hacemos, por ejemplo, una fotografía instantánea de una cuerda vibrando) el valor de la posición “y” se repite cada cierta distancia, λ .



De la misma manera podemos decir que a una distancia “x” del foco el valor de “y” de una partícula de la cuerda se repite cada cierto tiempo, T.



Se dice, por tanto, que **una onda es doblemente periódica, en el espacio y en el tiempo** porque se repiten las posiciones “y” cada cierto tiempo, T, y cada cierto espacio, λ .

Ejemplo: Una onda posee un número de onda, $k=3\text{m}^{-1}$ y una frecuencia, $f=4\text{ Hz}$. ¿A qué distancia y cada cuánto tiempo se repite la misma posición?

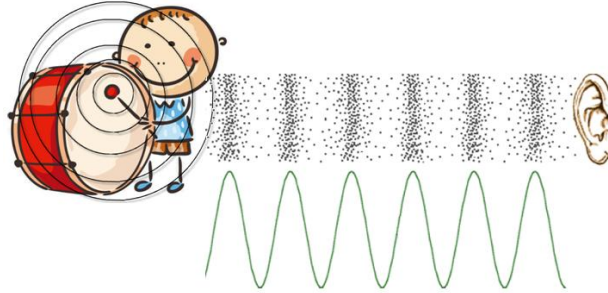
En una onda la posición, y, se repite cada λ m y cada T segundos, luego:

$$\lambda = \frac{2 \cdot \pi}{k} = \frac{2 \cdot \pi}{3} = 2,1 \text{ m}$$

$$T = \frac{1}{f} = \frac{1}{4} = 0,25 \text{ s}$$

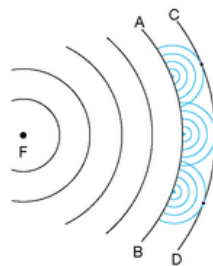
UNA ONDA TRANSPORTA ENERGÍA PERO NO TRANSPORTA MATERIA

Supongamos que toco un tambor.



La membrana de ese instrumento empezará a vibrar y dicha vibración juntará y separará las moléculas de aire. El efecto será el mismo que cuando estamos en una concentración de gente y alguien en el centro empieza a empujar de forma intermitente. Las personas colindantes empujarán a su vez a sus vecinas y así se propagará la onda, en el caso del tambor y el aire se trata del sonido.

Lo que sí está claro es que la energía que posee el foco (el palillo del tambor) se transferirá a todas las moléculas colindantes y ellas, a su vez tendrán que transferir la energía que les toque a sus moléculas vecinas.



La energía total de un foco (el palillo) que se mueve con MAS viene dada por la fórmula:

$$E = \frac{1}{2} k \cdot A^2$$

En el caso de una varilla que vibre y que golpee repetidamente el tambor:

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} = 2 \cdot \pi \cdot f$$

k es la constante elástica de la varilla y m es la masa de la esfera del palillo que golpea el tambor.

Despejando k:

$$k = 4 \cdot \pi^2 \cdot f^2 \cdot m$$

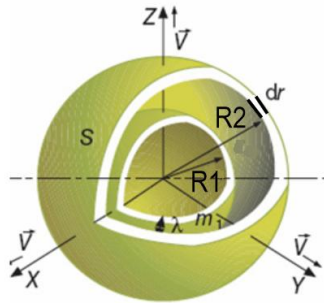
Ondas

Si sustituimos en la expresión de la Energía de una onda:

$$E = \frac{1}{2} 4 \cdot \pi^2 \cdot f^2 \cdot m \cdot A^2$$

$$E = 2 \cdot \pi^2 \cdot f^2 \cdot m \cdot A^2$$

Es muy importante tener en cuenta por el Principio de Huygens que la energía inicial del foco (palillo) se reparte entre las partículas colindantes del medio, y que cada una de esas partículas vibrará igual que el foco (tendrá la misma frecuencia) comportándose como nuevos focos. La energía de cada uno de esos focos también vendrá dada por la expresión anterior sólo que “m” y “A” serán diferentes.



Se observa que la energía que transporta cada partícula del medio depende del cuadrado de la frecuencia y del cuadrado de la amplitud.

En el caso del sonido vemos por tanto que una delgada capa esférica de aire transporta la misma energía que otra de radio superior.

$$E_1 = E_2$$

$$2 \cdot \pi^2 \cdot f^2 \cdot m_1 \cdot A_1^2 = 2 \cdot \pi^2 \cdot f^2 \cdot m_2 \cdot A_2^2$$

$$2 \cdot \pi^2 \cdot f^2 \cdot 4 \cdot \pi \cdot R_1^2 \cdot \rho \cdot A_1^2 = 2 \cdot \pi^2 \cdot f^2 \cdot 4 \cdot \pi \cdot R_2^2 \cdot \rho \cdot A_2^2$$

$$R_1^2 \cdot A_1^2 = R_2^2 \cdot A_2^2$$

$$R_1 \cdot A_1 = R_2 \cdot A_2$$

Por esta razón disminuye la amplitud al alejarnos del foco:



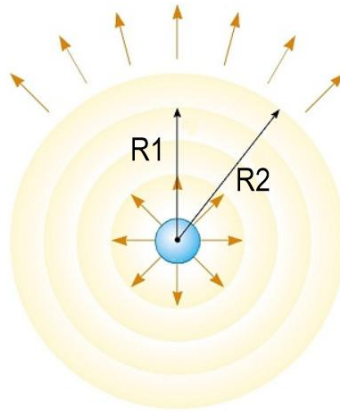
INTENSIDAD DE UNA ONDA

Se define intensidad de una onda a la energía que transmite una onda por unidad de tiempo y por unidad de superficie.

$$I = \frac{E}{t \cdot S} = \frac{P}{S}$$

P= potencia (en vatios, W)

Si nos centramos en el sonido que es una onda que se propaga esféricamente por el aire:



$$I = \frac{P}{4 \cdot \pi \cdot R^2}$$

Como **la potencia** en una onda esférica **se mantiene constante**, para dos distancias tenemos:

$$I_1 = \frac{P}{4 \cdot \pi \cdot R_1^2} \qquad I_2 = \frac{P}{4 \cdot \pi \cdot R_2^2}$$

Por lo tanto:

$$I_1 \cdot R_1^2 = I_2 \cdot R_2^2$$

O bien:

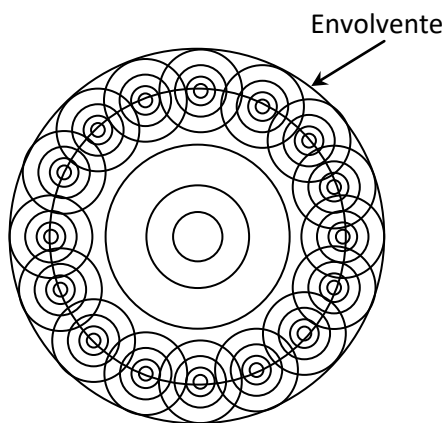
$$I \cdot R^2 = \text{constante}$$

O sea, a mayor distancia del foco la intensidad de la onda se hace menor. A ese fenómeno se le conoce como **Atenuación**.

PRINCIPIO DE HUYGENS

“Todo punto de un frente de ondas se convierte en un foco emisor de nuevas ondas”.

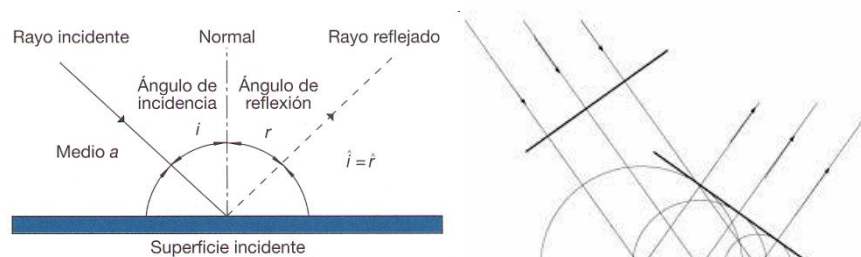
La envolvente de todos esos frentes de onda dan lugar al frente de onda de la onda total, tal y como se representa a continuación:



Con el principio de Huygens se explican muchos de los fenómenos característicos que producen las ondas:

Reflexión

Cambio de dirección de una onda pero sigue propagándose en el mismo medio.



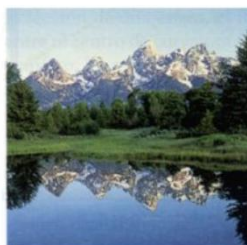
Leyes de Snell de la reflexión:

1. El rayo incidente, la normal y el rayo reflejado están en el mismo plano.
2. El ángulo de incidencia es igual que el ángulo de reflexión.

La reflexión puede ser nítida o difusa, dependiendo del grado de pulimento de la superficie, o sea, si está lisa o rugosa.

Reflexión nítida o especular

En superficies perfectamente lisas



Los rayos reflejados salen en una misma dirección

Reflexión difusa

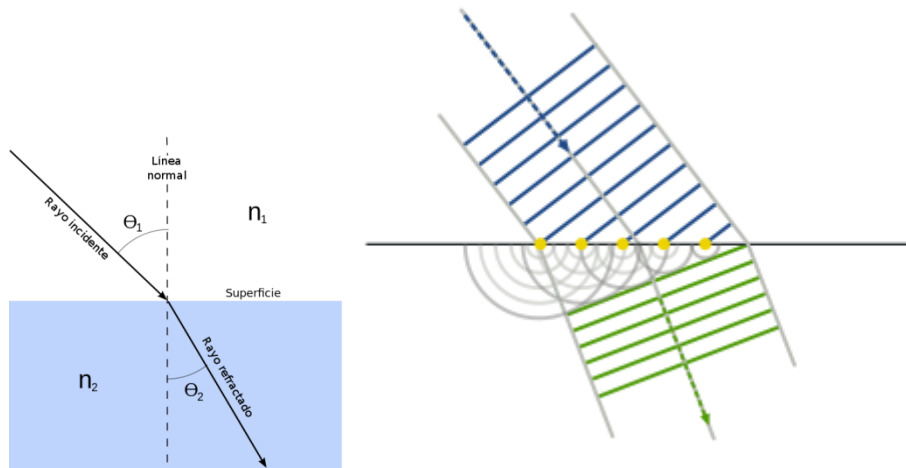
En superficies rugosas



Los rayos reflejados salen en todas las direcciones

Refracción

Cambio de dirección de una onda pasando a propagarse por otro medio.



“n” es el índice de refracción y se define como el cociente entre la velocidad de la luz en el vacío y la velocidad de la luz en un determinado medio.

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

En el caso del agua:

$$n_{agua} = 1,33$$

O sea:

$$1,33 = \frac{c}{v_{agua}}$$

Leyes de Snell de la refracción:

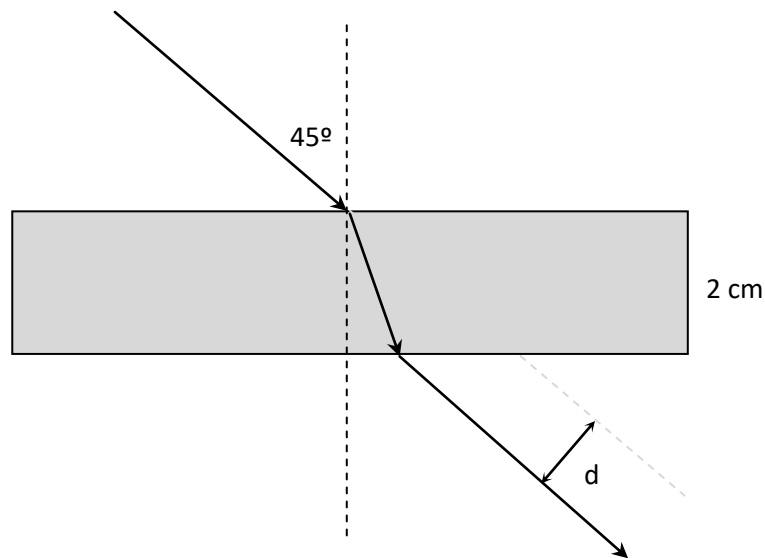
1. El rayo incidente, la normal y el rayo refractado están en el mismo plano.

$$2. \quad n_1 \cdot \sin i = n_2 \cdot \sin r$$

En la refracción la onda cambia de velocidad cuando pasa de un medio a otro.

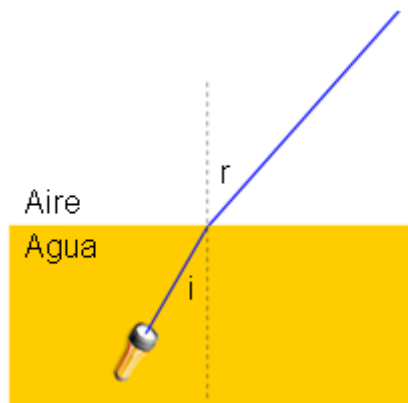
Importante: Cuando un rayo de luz pasa de un medio a otro de índice de refracción mayor (del aire al agua, por ejemplo) el rayo refractado se acerca a la normal.

Ejemplo: Un rayo de luz pasa del aire y entra en una lámina plana de vidrio formando un ángulo de 45° con la normal. Si la lámina tiene un espesor de 2 cm, calcula qué distancia se desvía una vez vuelve a salir al aire. Dato: $n_{\text{vidrio}} = 1,52$

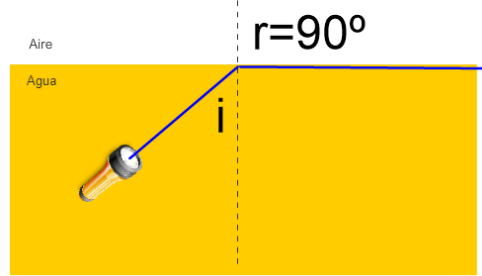


ÁNGULO LÍMITE Y REFLEXIÓN TOTAL

Imagina que estás dentro de una piscina con un puntero láser y diriges un rayo hacia el exterior. Como el rayo pasa de un medio con un índice de refracción mayor a otro medio, el aire, con un índice de refracción menor el rayo se separará de la normal.



Si sigo inclinando el puntero de forma que aumente el ángulo de incidencia, i , llegará un momento en el que el rayo no salga del agua. En ese momento al ángulo de incidencia se le llama **ángulo límite**:

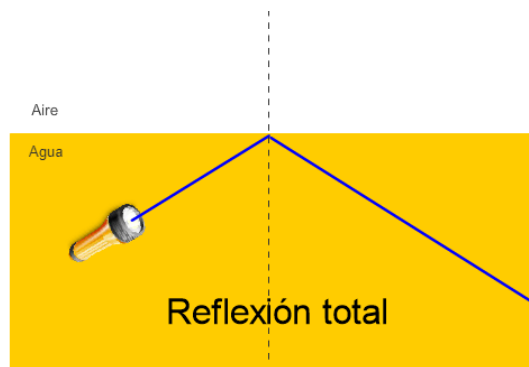


i = Ángulo límite.

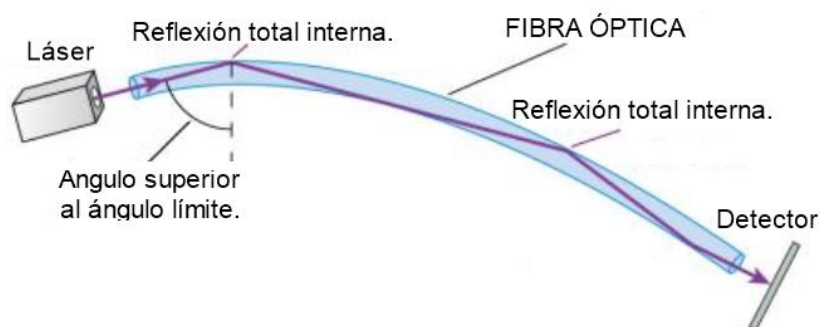
$$n_1 \cdot \text{sen } i = n_2 \cdot \text{sen } 90$$

$$i = \text{Arcsen}\left(\frac{n_2}{n_1}\right)$$

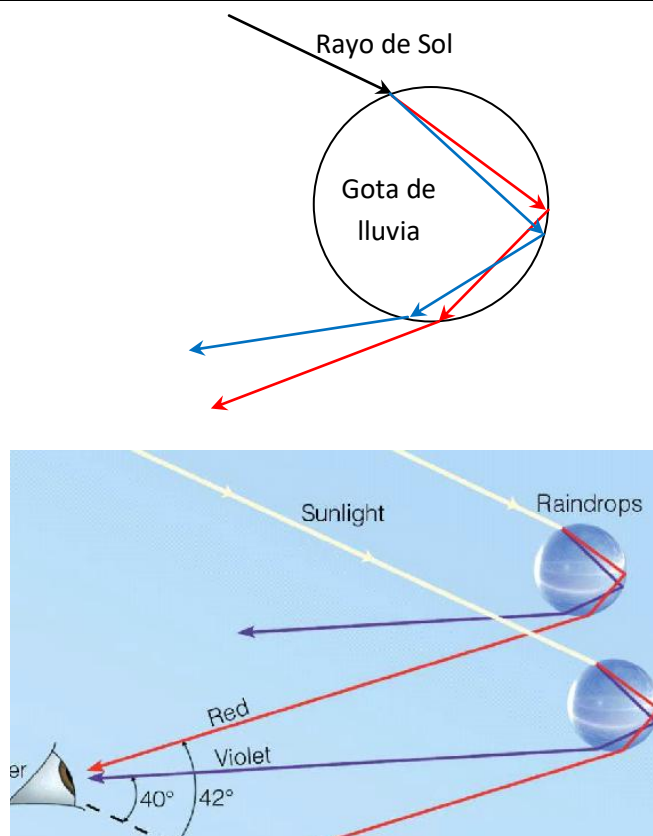
Si continúo aumentando el ángulo de incidencia no se produce refracción y el rayo incidente rebota produciéndose **la reflexión total**:



Una aplicación de la reflexión total es la **fibra óptica**:



Otra consecuencia de la reflexión total es **el arco iris**:



Cuando la luz del Sol entra en la gota de agua de lluvia (refracción y dispersión) después se producen dos reflexiones totales y vuelven a salir de ella los colores separados.

1. **Ejemplo:** Un rayo de luz sale de una disolución de azúcar y continúa propagándose por el aire formando un ángulo de 35° con la normal. (15 puntos; 5 el apartado A y 10 el apartado B).
 Datos: $n_{\text{aire}}=1$; $n_{\text{disolución}}=1,52$; $c=3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$

A. Calcula el ángulo de incidencia.

Aplicando las leyes de la refracción de Snell:

$$n_{\text{azúcar}} \cdot \sin \hat{i} = n_{\text{aire}} \cdot \sin \hat{r}$$

Sustituyendo:

$$1,52 \cdot \sin \hat{i} = 1 \cdot \sin 35^\circ;$$

$$\sin \hat{i} = \frac{\sin 35^\circ}{1,52} = 0,3774;$$

$$\hat{i} = \arcsen 0,3774 = 22,17^\circ$$

B. ¿Cuál sería el ángulo límite para este líquido?

El ángulo límite sería el ángulo de incidencia que le corresponde un ángulo de refracción de 90°

$$n_{\text{azúcar}} \cdot \sin \hat{i} = n_{\text{aire}} \cdot \sin 90^\circ$$

Sustituyendo:

$$1,52 \cdot \sin \hat{i} = 1 \cdot \sin 90^\circ;$$

$$\sin \hat{i} = \frac{1}{1,52} = 0,6579;$$

$$\hat{i} = \arcsen 0,6579 = 41,14^\circ$$

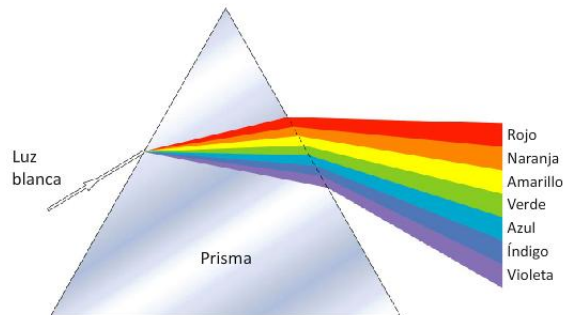
Dispersión

Consiste en la separación de la luz blanca en los distintos colores que la forman.

Paso de luz blanca por un prisma:

La luz blanca está formada por luces de muchas frecuencias (colores).

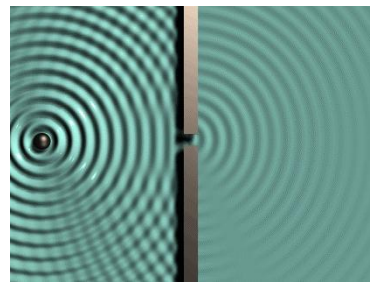
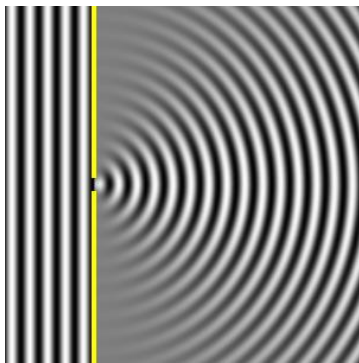
En el vacío y en el aire todos van a la misma velocidad ($c=3 \cdot 10^8$ m/s), pero al pasar a otro medio como es un vidrio, cristal, etc, cada radiación (color) se mueve a diferente velocidad provocando que todas esas radiaciones (colores) se separen dando lugar al arco iris (**DISPERSIÓN**).



Tenlo claro, *los colores se mueven a la misma velocidad en el aire y en el vacío pero no así en otros medios.*

Difracción

Fenómeno consistente en la propiedad de las ondas de poder seguir su movimiento aunque lo impida aparentemente un obstáculo. Las ondas bordean los obstáculos.

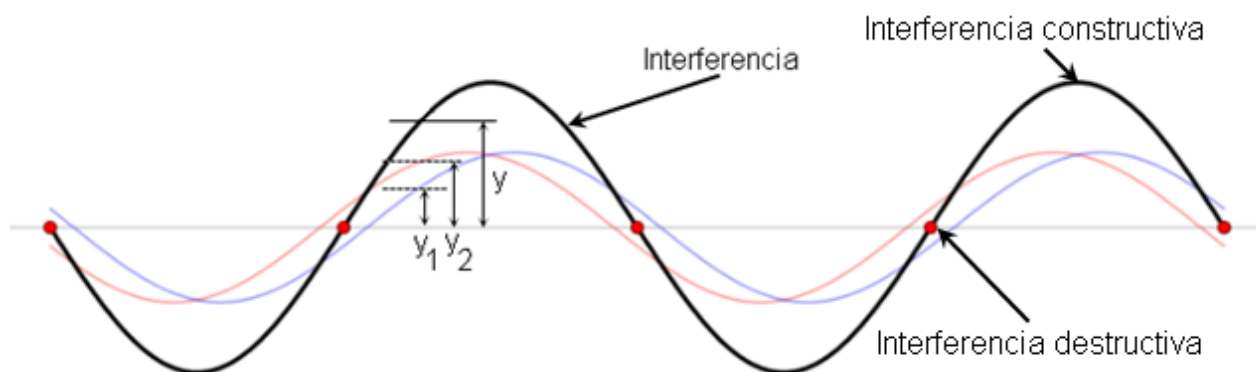


Interferencias

Onda que se produce cuando se suman dos o más ondas.

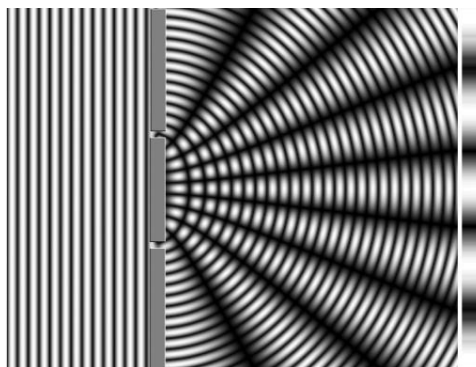
Cuando un frente de ondas plano llega a una pared con dos orificios cada uno de ellos se comporta como un foco de una nueva onda. Se producirán pues dos ondas que interfieren a la derecha de la pared.

El resultado es una nueva onda llamada interferencia donde la posición de un punto cualquiera del medio se calcula sumando los efectos que producirían las dos ondas por separado.



$$y = y_1 + y_2$$

Hay zonas donde se suman los efectos de ambas ondas (interferencia constructiva) y zonas donde la posición "y total" es cero (interferencia destructiva).



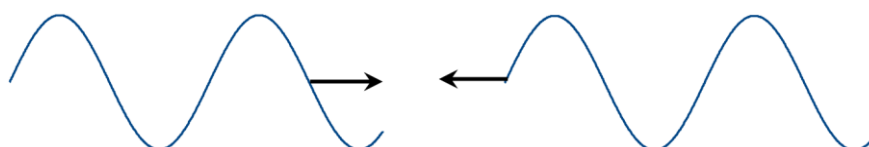
Un caso particular de interferencias son las ondas estacionarias:

ONDAS ESTACIONARIAS

En las ondas estacionarias interfieren dos ondas iguales.

Pueden interferir de diferente manera:

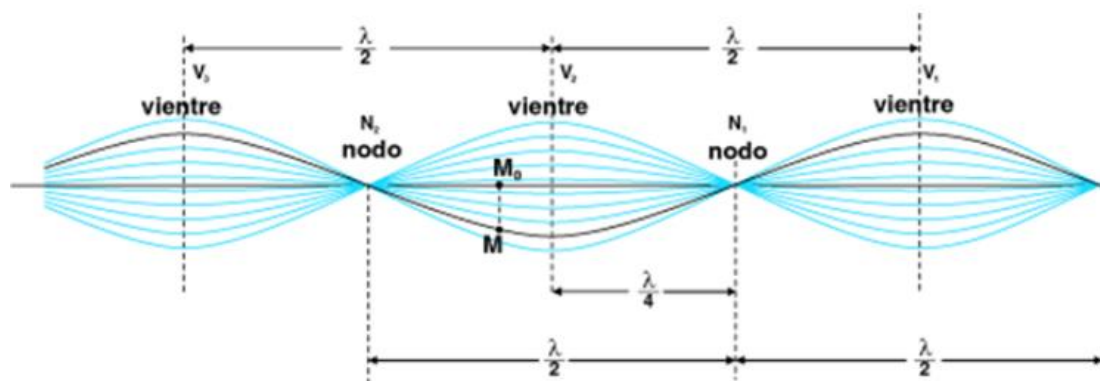
A) Cuando dos ondas iguales se dirigen una hacia la otra y se produce la interferencia:



B) Cuando una cuerda se ata a la pared por un extremo y empiezo a agitarla por el otro extremo. Aquí la onda incidente interfiere con la reflejada.

Desarrollemos el primer caso (A).

La onda estacionaria que se produce tiene el siguiente aspecto:



Aquí:

$$y_1 = A \cdot \text{sen}(\omega t - kx)$$

$$y_2 = A \cdot \text{sen}(\omega t + kx)$$

La ecuación de la onda estacionaria será:

$$y = y_1 + y_2 = 2A \cdot \cos(kx) \cdot \text{sen}(\omega t)$$

Ecuación de una onda estacionaria.

Si nos fijamos en la anterior expresión vemos que guarda mucho parecido con la ecuación de un MAS ($y=A \cdot \text{sen } \omega \cdot t$).

El término $2A \cdot \cos(kx)$ se corresponde con la amplitud de la onda estacionaria.

$$A' = 2A \cdot \cos(kx)$$

Hay dos zonas características en una onda estacionaria, los **vientres** (donde A' es máxima) y los **nodos** (donde $A'=0$).

¿Dónde se encontrarán los vientres?

En los vientres A' obtiene el valor máximo.

A' será máxima cuando $\cos(kx)=\pm 1$

Eso ocurrirá cuando $k \cdot x = 0, \pi, 2\pi, 3\pi, 4\pi$, etc

O sea, ocurrirá cuando $k \cdot x = n \cdot \pi$ ($n = 0, 1, 2, 3, \dots$)

Teniendo en cuenta que $k = \frac{2\pi}{\lambda}$

$$\frac{2\pi}{\lambda} \cdot x = n \cdot \pi$$

Luego, los vientres se encontrarán a una distancia $x = n \cdot \frac{\lambda}{2}$ ($n = 0, 1, 2, \dots$)

¿Dónde se encontrarán los nodos?

En los nodos A' obtiene el valor 0.

Ondas

A' será 0 cuando $\cos(kx) = 0$

Eso ocurrirá cuando $k \cdot x = \pi/2, 3\pi/2, 5\pi/2, 7\pi/2$, etc

O sea, ocurrirá cuando $k \cdot x = (2n+1) \cdot \pi/2$ ($n = 0, 1, 2, 3, \dots$)

Teniendo en cuenta que $k = \frac{2\pi}{\lambda}$

$$\frac{2\pi}{\lambda} \cdot x = (2n + 1) \cdot \pi/2$$

Luego, los nodos se encontrarán a una distancia $x = (2n + 1) \cdot \frac{\lambda}{4}$ ($n = 0, 1, 2, \dots$)

No es raro encontrarnos con esta otra expresión:

$$y = 2A \cdot \sin(kx) \cdot \cos(\omega t)$$

La deducción de dónde se encuentran los nodos y vientres para esa ecuación se hace igual.

Aquí los vientres se encontrarán cuando $\sin(kx) = \pm 1$ y los nodos cuando $\sin(kx) = 0$

EL SONIDO

Hemos visto que el sonido es una onda longitudinal.

La velocidad del sonido por un medio material depende de las características de ese medio material.

En el caso de la propagación del sonido por un gas:

$$v = \sqrt{\frac{\gamma \cdot R \cdot T}{M}}$$

γ = Coeficiente de dilatación adiabática del gas (1,4 para el aire).

R = Constante de los gases ideales ($R = 8,314 \text{ J/mol} \cdot \text{K}$)

T = Temperatura.

M = Masa molecular del aire (0,029 kg/mol para el aire)

Vemos pues que la velocidad del sonido depende de las características del gas.

En el caso de que el sonido se propague por una cuerda tensa la velocidad depende de la tensión de la cuerda y de la densidad lineal de la cuerda, μ :

$$v = \sqrt{\frac{T}{\mu}}$$

El sonido posee tres características: Tono, timbre e intensidad.

Tono

Está relacionado con la frecuencia. Los sonidos agudos se relacionan con una frecuencia mayor y los graves con una frecuencia menor.

La velocidad del sonido es de 340 m/s aproximadamente a 20°C con una humedad del 50% y a nivel del mar.

Intensidad sonora y nivel de intensidad sonora

La intensidad sonora (sonoridad) es la intensidad de esa onda tal y como la hemos explicado con anterioridad:

$$I = \frac{E}{t \cdot S} = \frac{P}{S}$$

El ser humano, no es capaz de oír sonidos con una intensidad inferior a 10^{-12} W/m^2 . Ese valor constituye el **UMBRAL DE AUDICIÓN**.

El máximo lo constituye una intensidad de 1 W/m^2 que representaría el **UMBRAL DEL DOLOR**.

En lugar de utilizar la intensidad sonora se utiliza el **NIVEL DE INTENSIDAD SONORA, B**, con el fin de utilizar números más sencillos.

Para el cálculo de B se utiliza la expresión:

$$B = 10 \cdot \log \frac{I}{10^{-12}}$$

(decibelios, dB)

Intensidad y nivel de intensidad sonora de algunos sonidos comunes ($I_0=10^{-12} \text{ W/m}^2$)			
Fuente	I/I_0	dB	Descripción
	10^0	0	Umbral de audición
Respiración normal	10^1	10	Escasamente audible
Rumor de hojas	10^2	20	
Conversación en voz muy baja (a 5m)	10^3	30	Apenas audible
Biblioteca	10^4	40	
Oficina tranquila	10^5	50	Poco ruidoso
Conversación normal (a 1m)	10^6	60	
Tráfico denso	10^7	70	
Oficina ruidosa con máquinas; fábrica del tipo medio	10^8	80	
Camión pesado (a 15 m); Cataratas del Niágara	10^9	90	La exposición constante daña al oído
Tren del metro antiguo	10^{10}	100	
Ruido de construcción (a 3m)	10^{11}	110	
Concierto de rock con amplificadores a 2m despegue de un reactor (a 60 m)	10^{12}	120	Umbral del dolor
Remachadora neumática; ametralladora	10^{13}	130	
Despegue de un reactor (cercano)	10^{15}	150	
Motor de cohete grande (cercano)	10^{18}	180	

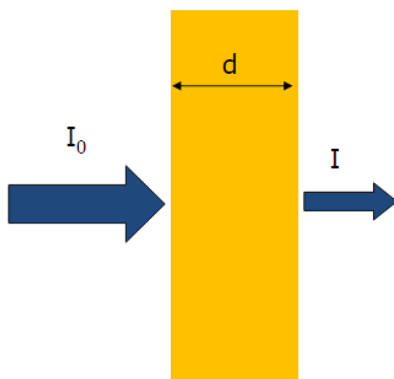
Ejercicio:

El ladrido de un perro supone alrededor de 1 m/W de potencia.

- Si esta potencia se distribuye uniformemente en todas direcciones (onda esférica), ¿cuál es el nivel de intensidad del sonido a una distancia de 5 m ?
- ¿Cuál sería el nivel de intensidad de dos perros ladrando al mismo tiempo si cada uno de ellos desarrolla una potencia de 1 m/W . (Nota: Aquí se suman las potencias)

Absorción

Este fenómeno consiste en la disminución de la intensidad de una onda cuando atraviesa un material.



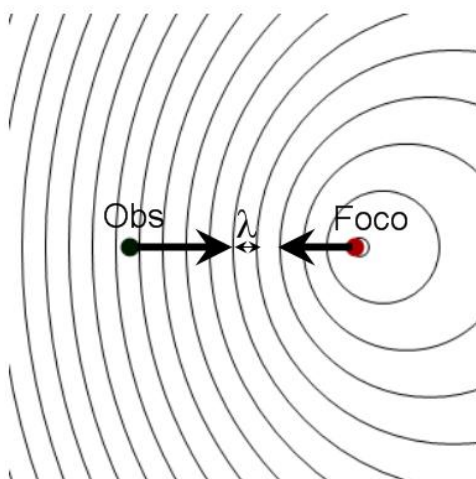
La disminución de intensidad dependerá de la naturaleza del material, de lo intensa que sea la onda y también del grosor del material.

$$I = I_0 \cdot e^{-\beta \cdot d}$$

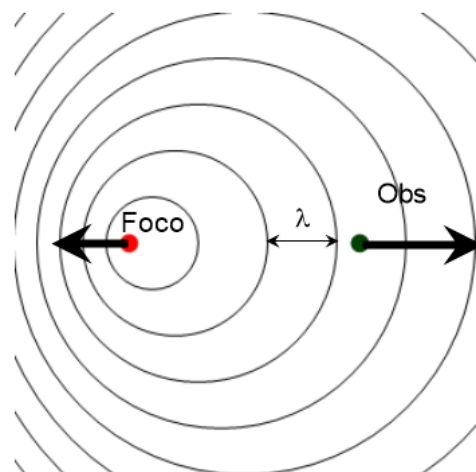
β = Coeficiente de absorción.

Efecto Doppler

Todos hemos percibido cómo el sonido de la sirena cambia cuando una ambulancia se acerca y luego se aleja.



Cuando se acerca, la longitud de onda se acorta con lo que **percibimos el sonido con una frecuencia mayor**.

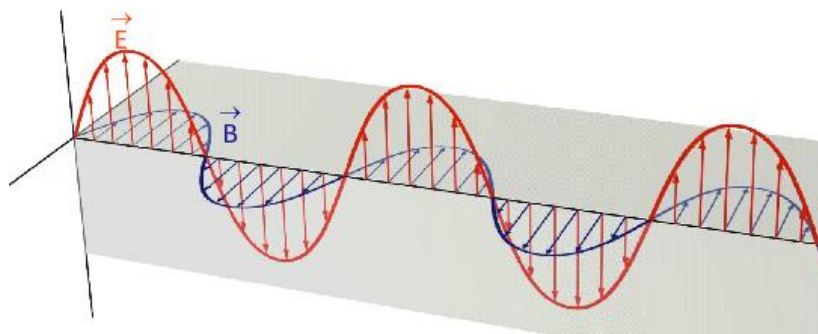


En cambio cuando se aleja la longitud de onda aumenta y **percibimos el sonido con una frecuencia menor** (más grave).

ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS

La luz es una onda electromagnética pero la luz no sólo abarca la luz que vemos con nuestros ojos (luz visible o colores).

Existe otro tipo de luz que no podemos detectar con nuestros ojos. Nuestros ojos sólo pueden ver una estrecha franja de todas las radiaciones electromagnéticas (la luz).

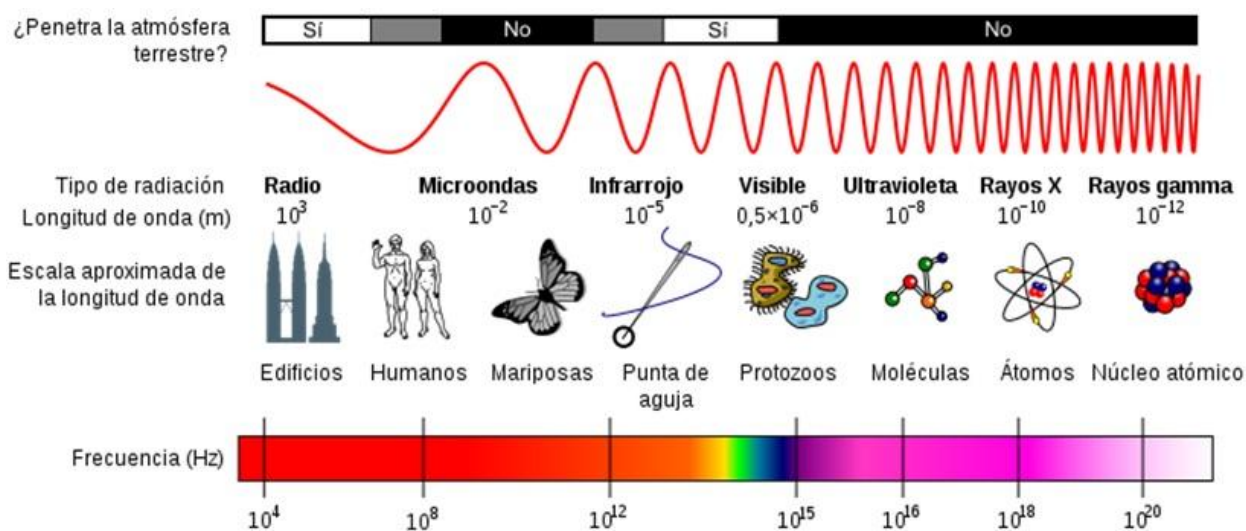


La luz está constituida por dos campos, el eléctrico y el magnético, ambos perpendiculares entre si y ambos propagándose como una onda.

En lugar de hablar de desplazamientos, “y” hablamos de $\vec{E}$ y $\vec{B}$.

Las ondas electromagnéticas **son ONDAS TRANSVERSALES**.

El conjunto de luces o radiaciones electromagnéticas se conoce como **ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO**.



Cualquier radiación electromagnética se propaga a la velocidad de la luz.

$$c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

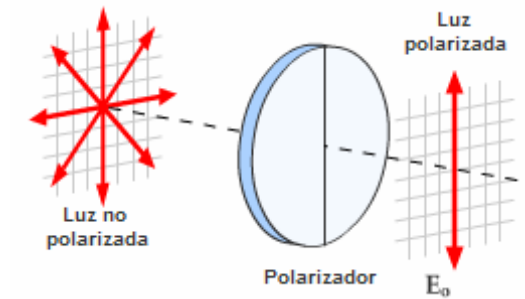
La radiación visible abarca las longitudes de onda comprendidas entre los 400-700 nm.

Ondas

Las ondas electromagnéticas pueden dar lugar al fenómeno de la polarización.

Polarización

Los vectores $\vec{E}$ y $\vec{B}$ de la radiación electromagnética vibran en todas direcciones.



Si en su camino colocamos un polarizador (lámina con una rendija lineal) sólo dejará pasar aquellas componentes de $\vec{E}$ y $\vec{B}$ que puedan pasar por dicha rendija. La luz que pasa se dice que está polarizada.

La polarización sólo se puede dar en ondas transversales.