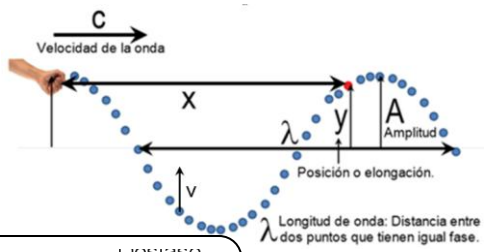
## LAS ONDAS




$$y = A \cdot sen\,(\omega \cdot t \mp k \cdot x + \varphi)$$

Desfase

Fase

$\begin{cases} - \text{ La onda va hacia la derecha.} \\ + \text{ La onda va hacia la izquierda.} \end{cases}$

**Algunas magnitudes que serán necesarias:**

**y=** Elongación o posición.

**A**= Amplitud (es el máximo desplazamiento).

**λ**= Longitud de onda.

**k**= Número de onda ($m^{-1}$)

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

**x**= Distancia desde el foco (la mano) a un punto de la cuerda.

**φ**= Desfase (depende de dónde esté la mano al comenzar a vibrar la cuerda. Si está en y=0 entonces φ=0).

**ω**= Frecuencia angular o pulsación (rad/s)

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

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

**f**= Frecuencia (Número de ciclos completos que realiza en un segundo). Se mide en hercios (Hz) o $s^{-1}$.

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

**c**= Velocidad de la onda.

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

Recuerda:

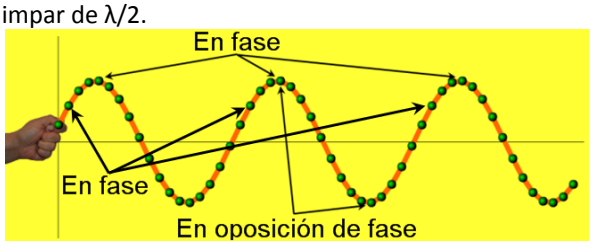
$$\boldsymbol{sen\,\alpha = cos\,(\alpha - \frac{\pi}{2})} \rightarrow A \cdot sen\,(\omega \cdot t - k \cdot x) = A \cdot cos\,(\omega \cdot t - k \cdot x - \tfrac{\pi}{2})$$

**Ejercicio:** a) ¿Qué significa que dos puntos de la dirección de propagación de una onda armónica estén en fase o en oposición de fase? ¿Qué distancia les separaría en cada caso?

Solución:

Dos puntos están en concordancia de fase si la diferencia entre sus distancias al foco emisor es un múltiplo entero de λ.

Dos puntos están en oposición de fase si la diferencia entre sus distancias al foco emisor es un múltiplo impar de λ/2.




**Ejercicio:** Una onda armónica de amplitud 0,3 m se propaga hacia la derecha por una cuerda con una velocidad de 2 m $s^{-1}$ y un periodo de 0,125 s. Determine la ecuación de la onda correspondiente sabiendo que el punto x = 0 m de la cuerda se encuentra a la máxima altura para el instante inicial, justificando las respuestas.

Solución:

y=A·sen(ωt-kx) (signo "-" ya que va hacia la derecha)

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = \frac{2\pi}{0{,}125} = 50{,}3\,\frac{rad}{s}$$

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{2\pi}{c \cdot T} = \frac{2\pi}{2 \cdot 0{,}125} = 25{,}1\ m^{-1}$$

Así pues:

$$y=0{,}3 \cdot sen(50{,}3 \cdot t - 25{,}1 \cdot x + \varphi)$$

Como en x=0 y t=0 el valor de y=A:

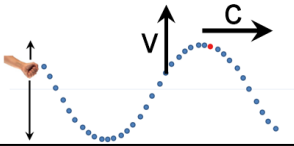
$$0{,}3 = 0{,}3 \cdot sen(50{,}3 \cdot 0 - 25{,}1 \cdot 0 + \varphi);$$

$$1 = sen\,\varphi;\ \text{entonces}\ \varphi = \pi/2$$

La ecuación de la onda será:

$$y=0{,}3 \cdot sen(50{,}3 \cdot t - 25{,}1 \cdot x + \pi/2)$$

## VELOCIDAD DE PROPAGACIÓN DE UNA ONDA Y VELOCIDAD DE VIBRACIÓN DE UN PUNTO MATERIAL




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

*Velocidad de vibración o de oscilación.*

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

*Velocidad de propagación de una onda.*

**Ejercicio: a)** Calcula la velocidad de vibración máxima y cuando la alcanzará de una partícula de una cuerda que se encuentra a 3m del foco y vibra según:

$$y=0{,}6 \cdot sen(\pi \cdot t - \pi/2 \cdot x)$$

b) ¿Cuál es la velocidad de la onda?

Solución:

$$v = \frac{dy}{dt} = 0{,}6 \cdot \pi \cdot cos\left(\pi \cdot t - \frac{\pi}{2} \cdot x\right)$$

$v_{máx}$ será cuando el coseno valga ±1:

$$v_{máx} = \pm 0{,}6 \cdot \pi\ m/s$$

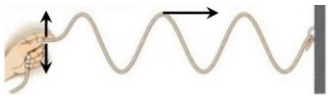
El coseno será ±1 cuando $\pi \cdot t - \frac{\pi}{2} \cdot 3 = n \cdot \pi$

t=n+3/2 siendo n=0,1,2,3…

b) c=λ/T=ω/k=2 m/s

### Ondas transversales

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



Ejemplo: Luz, una cuerda

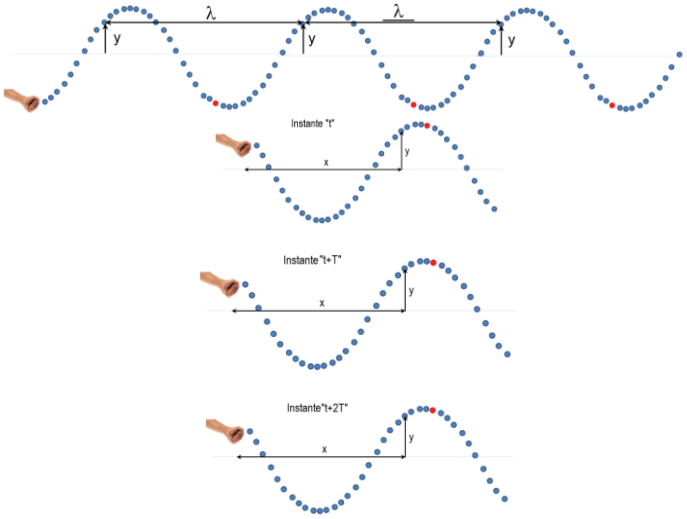
### Ondas longitudinales

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**.

Ejemplo: Sonido

## PERIODICIDAD DE UNA ONDA EN EL ESPACIO Y EN EL TIEMPO

**La misma posición "y" se repite cada cierta distancia (λ) y cada cierto tiempo (T).**




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

En una onda la posición, y, se repite cada $\lambda$ m y cada T segundos, luego:

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

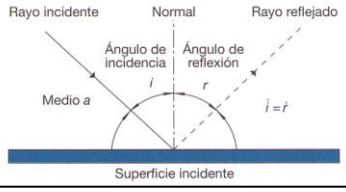
$$T = \frac{1}{f} = \frac{1}{4} = 0{,}25\ s$$

## PRINCIPIO DE HUYGENS

***"Todo punto de un frente de ondas se convierte en un foco emisor de nuevas ondas".***

## REFLEXIÓN

***Consiste en el cambio de dirección de una onda pero sigue propagándose en el mismo medio.***




**Leyes de Snell** de la reflexión:

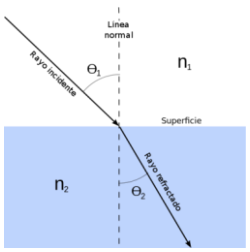
**1. El rayo incidente, la normal y el rayo reflejado están en el mismo plano.**

**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.

## REFRACCIÓN

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

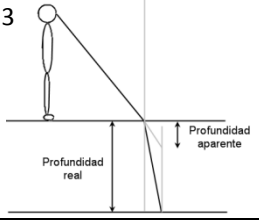



**Ejemplo:** a) Discute razonadamente la veracidad de la siguiente afirmación: "Cuando una onda incide en la superficie de separación de dos medios, las ondas reflejada y refractada tienen igual frecuencia e igual longitud de onda que la onda incidente".
Solución: Igual frecuencia sí pero la refractada tendrá diferente λ.

**Ejemplo:** Una antena de radar emite en el vacío radiación electromagnética de longitud de onda 0,03 m, que penetra en agua con un ángulo de incidencia de 20º respecto a la normal. Su velocidad en el agua se reduce al 80 % del valor en el vacío. Calcule el periodo, la longitud de onda y el ángulo de refracción en el agua. c = $3 \cdot 10^8$ m s$^{-1}$. Sol:T=$10^{-10}$s; λ=$2{,}4 \cdot 10^{18}$m; r̂=15,88º

**Ejemplo:** Sea un recipiente con agua cuya superficie está cubierta por una capa de aceite. Realice un diagrama que indique la trayectoria de los rayos de luz al pasar del aire al aceite y después al agua. Si un rayo de luz incide desde el aire sobre la capa de aceite con un ángulo de 20º, determine el ángulo de refracción en el agua. ¿Con qué velocidad se desplazará la luz por el aceite? c = $3 \cdot 10^8$ m s$^{-1}$; $n_{aire}$ = 1; $n_{aceite}$ = 1,45; $n_{agua}$ = 1,33
Solución: r agua= 14,9º; v aceite= $2{,}07 \cdot 10^8$m/s

**Ejemplo: Desde un** objeto en el fondo de una piscina de 1m de profundidad sale un rayo de luz que llega a la superficie formando un ángulo de 15º con la normal, ¿cuál es el ángulo de refracción en el aire?; (ii) calcule la profundidad aparente a la que se encuentra el objeto. naire = 1; nagua = 1,33
Solución: r=20,13º;
$h_{aparente}$= 0,73m



***"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.***

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

**Leyes de Snell de la refracción:**

1. El rayo incidente, la normal y el rayo refractado están en el mismo plano.
2. $n_1 \cdot \text{sen } i = n_2 \cdot \text{sen } r$

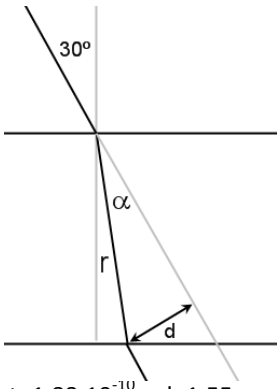
**En la refracción la onda cambia de velocidad cuando pasa de un medio a otro.**

**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:** Sobre una de las caras de una lámina de vidrio de caras paralelas y espesor 8 cm, colocada horizontalmente en el aire, incide un rayo de luz con un ángulo de 30º respecto de la normal. Calcule el tiempo que tarda la luz en atravesar la lámina y el desplazamiento horizontal, con respecto a la normal en el punto de incidencia, que experimenta el rayo al emerger por la otra cara de la lámina de vidrio.

$c = 3 \cdot 10^8$ m $s^{-1}$; $n_{aire} = 1$; $n_{vidrio} = 1,5$

Solución:



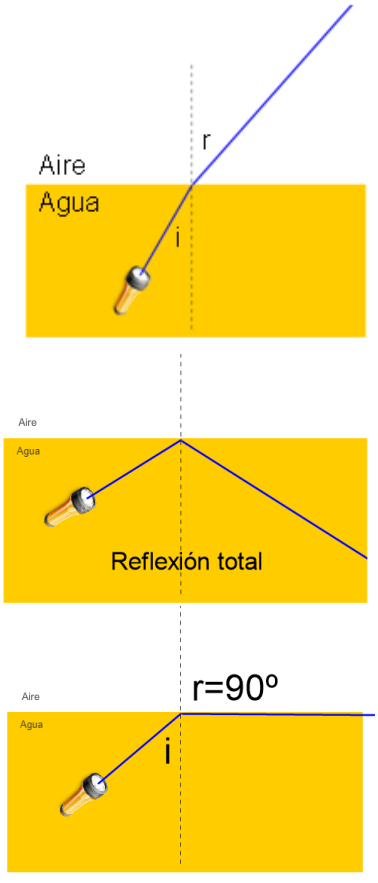

$t = 1,88 \cdot 10^{-10}$ s; d=1,55cm

Calcula primero r, luego el espacio que recorre dentro del vidrio, finalmente calcula "d" utilizando α.

## 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.**

$$n_1 \cdot sen\ i = n_2 \cdot sen\ 90$$

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

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 (ver al margen)**

**IMPORTANTE**

**Ejemplo:** Un rayo de luz sale de una disolución de azúcar y continúa propagándose por el aire formando un ángulo de 35º con la normal.

**a) Calcula** el ángulo de incidencia.

**b)** ¿Cuál sería el ángulo límite para este líquido?

Datos: naire=1; ndisolución=1,52; $c = 3 \cdot 10^8$ m/s

Solución:

a) Aplicando las leyes de la refracción de Snell:

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

Sustituyendo:

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

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

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

b) El ángulo límite sería el ángulo de incidencia que le corresponde un ángulo de refracción de 90º

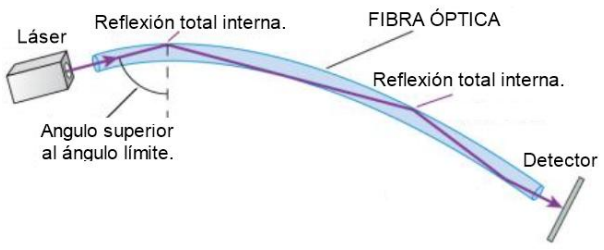
$$n_{azúcar} \cdot \text{sen}\hat{i} = n_{aire} \cdot \text{sen } 90^\circ$$

Sustituyendo:

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

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

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



## DISPERSIÓN

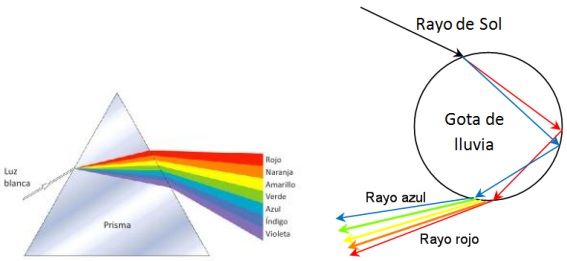
***Consiste en la separación de la luz blanca en los distintos colores que la forman.***

**Paso de luz blanca por un prisma:**

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

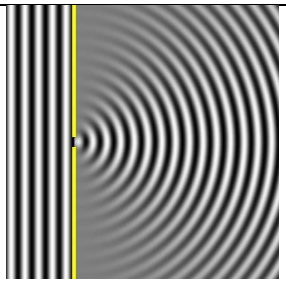
En el vacío y en el aire todos van a la misma velocidad ($c=3\cdot10^8$ m/s), pero al pasar a otro medio como es un vidrio, agua, cuarzo, etc, cada radiación (color) se mueve a diferente velocidad provocando que todas esas radiaciones (colores) se separen dando lugar al arco iris (**DISPERSIÓN**).

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***.



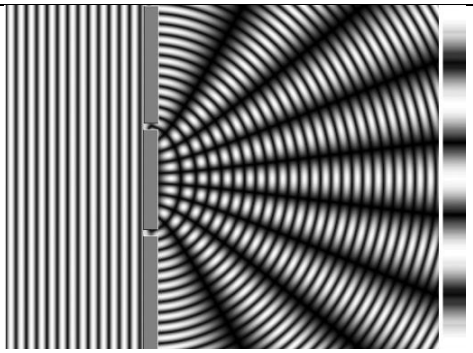
## INTERFERENCIAS

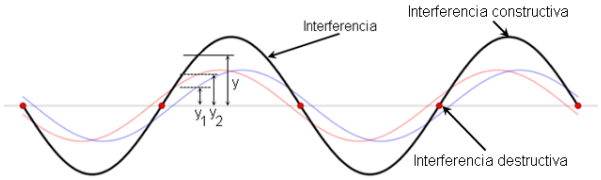
***Onda que se produce cuando se suman dos o más ondas.***

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.

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






$$y = y_1 + y_2$$

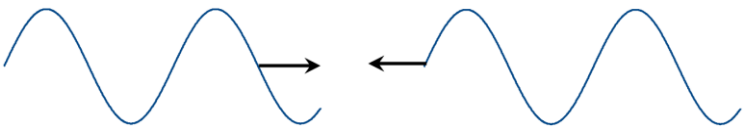
## ONDAS ESTACIONARIAS

Son un caso particular de interferencias.

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:



Aquí:

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

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

B) Otra manera de crearla (la más sencilla utilizando una cuerda) sería atándola a la pared por un extremo y empiezo a agitarla por el otro extremo. Aquí la onda incidente interfiere con la reflejada.

**Ejemplo:** Indique qué características deben tener dos ondas que se propagan por una cuerda tensa con sus dos extremos fijos para que su superposición origine una onda estacionaria.

Solución: a) La amplitud, frecuencia y $\lambda$ deben ser iguales.

La onda incidente interferirá con la reflejada

$$y_1 = A \cdot sen(\omega t - kx)$$ Onda incidente

$$y_2 = -A \cdot sen(\omega t + kx)$$ Onda reflejada

**Ejemplo:** En una cuerda tensa con sus extremos fijos se ha generado una onda cuya ecuación es:

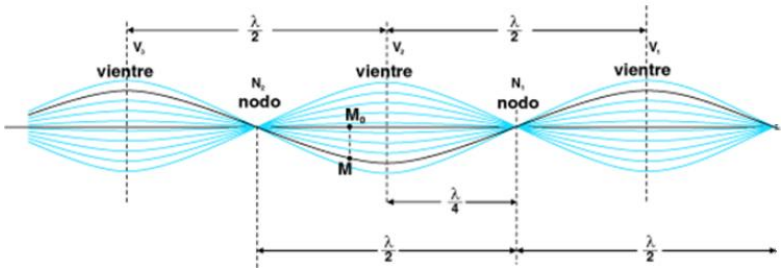
$$y(x,t) = 2 \text{ sen } [(\pi/4)\, x] \cos (8\pi t) \text{ (SI)}$$

Determine la amplitud de un punto de la cuerda situado a 1m del foco y la velocidad de propagación de dicha onda, así como el periodo y la frecuencia de las oscilaciones. ¿Dónde se encontraría el primer vientre?, ¿y el primer nodo?

Calcula la expresión con la que podemos calcular la velocidad de oscilación de una partícula y calcula la velocidad máxima de un punto de la cuerda situado a 2m del foco.

Solución:

La onda estacionaria que se produce tiene el siguiente aspecto:




La ecuación de la onda estacionaria será:

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

Ecuación de una onda estacionaria.

No es raro encontrarnos con esta otra expresión:

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

**Da igual una que otra**

Si nos fijamos en la expresión $2A \cdot cos(kx) \cdot sen(\omega t)$ vemos que guarda mucho parecido con la ecuación de un MAS (y=A·sen ω·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).

$$y(x,t) = \underbrace{2 \text{ sen } [(\pi/4)\, x]}_{\text{Amplitud}} \cos(8\pi t)$$

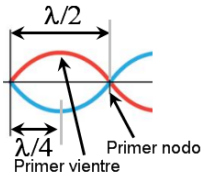
$A'=2\cdot\text{sen}[(\pi/4)\cdot 1]=1{,}41\text{m}$

$$c = \frac{\lambda}{T} = \frac{\omega}{k} = \frac{8\pi}{\pi/4} = 32\text{m/s}$$

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{2\pi}{8\pi} = 0{,}25\text{s}$$

$f=1/T=1/0{,}25=4$ Hz

El primer nodo se encontrará a $\lambda/2$ y el primer vientre a $\lambda/4$:




$$v = \frac{dy}{dt} = -2 \cdot 8 \cdot \pi \cdot \text{sen}\left[\left(\frac{\pi}{4}\right)x\right] \text{sen}(8\pi t)$$

Esta es la expresión con la que podremos calcular la velocidad de oscilación o velocidad de vibración de un punto de la cuerda.

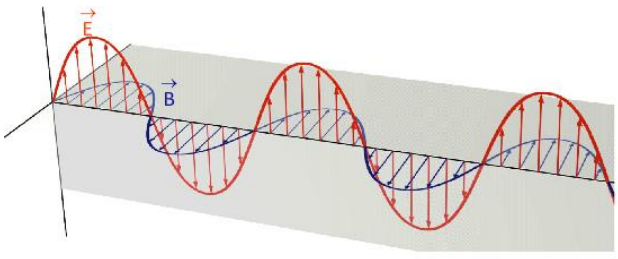
La velocidad máxima de cualquier punto (partícula) de la cuerda será cuando sen(8πt) valga ±1:

$v_{máx}=-16\cdot\pi\cdot\text{sen}[(\pi/4)\cdot 2]\cdot(\pm 1)=16\pi$ m/s

**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).

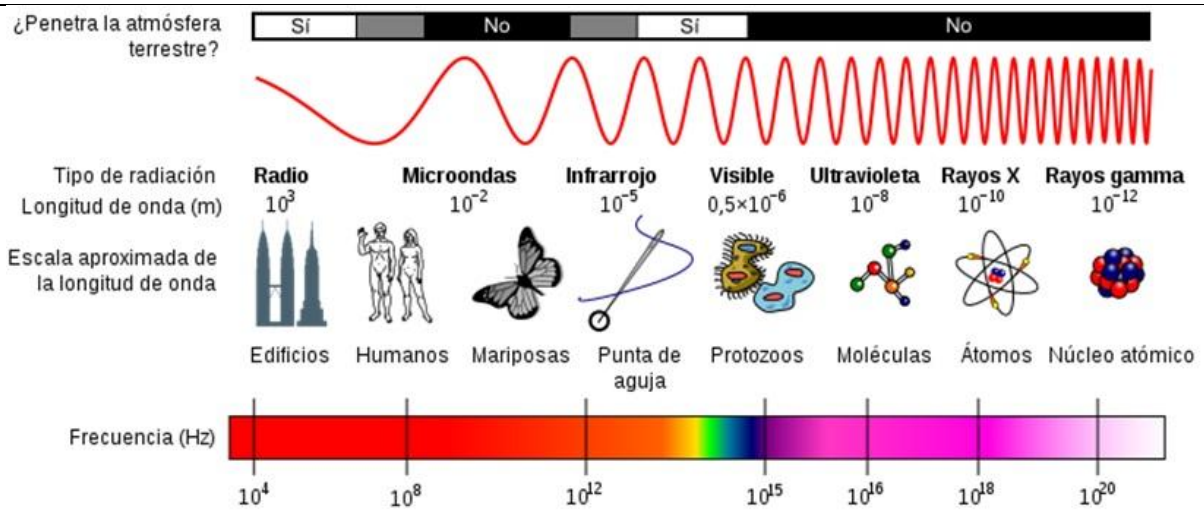
Existe otro tipo de luz que no podemos detectar con nuestros ojos. Nuestros ojos sólo pueden ver una estrecha franja de todas las radiaciones electromagnéticas (la luz).




La luz está constituida por dos campos, el campo eléctrico ($\vec{E}$) y el magnético ($\vec{B}$), ambos perpendiculares entre si y ambos propagándose como una onda transversal.

Las ondas electromagnéticas **son ONDAS TRANSVERSALES.**

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




Cualquier radiación electromagnética en el vacío y en el aire se propaga a:

$$\mathbf{c = 3\cdot10^{8}\ m/s}$$

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

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

**Ejemplo:** Una onda electromagnética que se desplaza por un medio viene descrita por la siguiente ecuación:

$$y(x,t) = 0{,}5 \text{ sen } (3\cdot10^{10}\, t - 175\, x) \text{ (SI)}$$

Calcule el periodo, la longitud de onda y el índice de refracción del medio por el que se propaga, justificando sus respuestas.
Solución:

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

$$T = \frac{2\cdot\pi}{3\cdot10^{10}}$$

$T = 2{,}09\cdot10^{-10}$ s

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

$$\lambda = \frac{2\cdot\pi}{175}$$

$\lambda = 0{,}036$ m

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

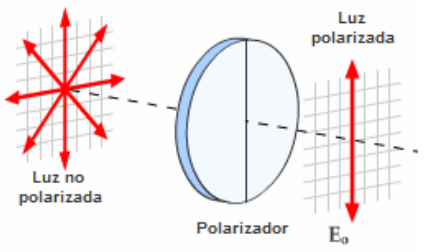
$$n = \frac{c}{\lambda/T}$$

$$n = \frac{3\cdot10^{8}}{\frac{0{,}036}{2{,}09\cdot10^{-10}}}$$

n= 1,742

**POLARIZACIÓN**

Los vectores $\vec{E}$ y $\vec{B}$ de la radiación electromagnética perpendiculares entre si, 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.**

**Ejemplo**: a) Explique la naturaleza de las ondas electromagnéticas e indique las distintas zonas en las que se divide el espectro electromagnético, indicando al menos una aplicación de cada una de ellas.