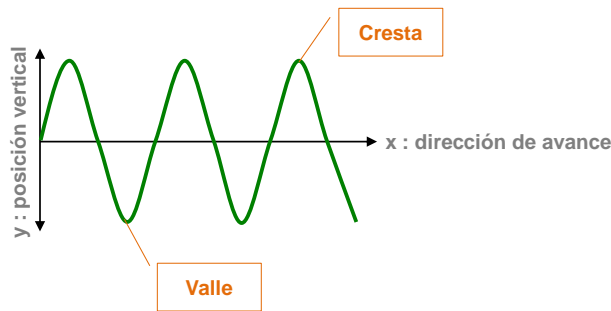


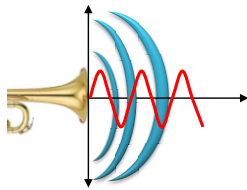


### Concepto de Onda

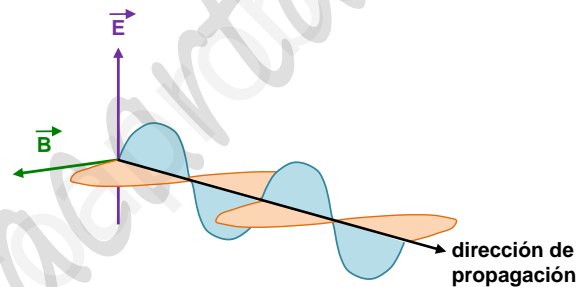
Onda es una forma de **transmisión** de la **energía**. Es la propagación de una perturbación en un medio. Una onda transporta energía y cantidad de movimiento, pero **no materia**.



En el caso de las **ondas sonoras**, lo que se representa es la variación de la presión del aire, en función de la distancia al foco emisor o del tiempo. Si dicha variación es periódica:



En el caso de **ondas electromagnéticas** (luz) el campo eléctrico ( $\vec{E}$ ) y el campo magnético ( $\vec{B}$ ) varían de forma oscilatoria con el tiempo y la distancia:



### Clasificación

#### Según necesiten o no un medio material para propagarse

##### Mecánicas

Se propagan siempre en un medio material elástico (donde las partículas devuelven la energía que reciben: muelle, cuerda, aire, agua)

##### Electromagnéticas

Transmisión de energía electromagnética mediante la propagación de dos campos oscilatorios, el eléctrico y el magnético, que no requiere medio físico ya que son variaciones periódicas del estado eléctrico y magnético del espacio, y por eso se propagan también en el vacío.

#### Según el nº de dimensiones en que se propaga

##### Unidimensionales

Cuerda

##### Bidimensionales

Agua

##### Tridimensionales

Ondas esféricas (en medio isótropo: propiedades idénticas en todas direcciones): sonido, luz.

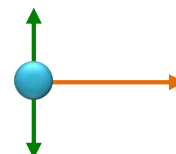
#### Según relación entre la dirección de perturbación y la de propagación

##### Longitudinales

Su dirección de propagación es paralela a la dirección de la oscilación que provoca en las partículas del medio perturbado. Sonoras.

##### Transversales

Su dirección de propagación es perpendicular a la dirección de la oscilación que provoca en las partículas del medio perturbado. Cuerda, Electromagnéticas.



Si la perturbación es instantánea se origina una única onda (**pulso**), si la perturbación es continua se genera un tren de ondas (**onda viajera**).

### Ondas Mecánicas

Para que una onda mecánica se propague, el **medio** debe tener **elasticidad** (aparecen fuerzas restauradoras cuando una porción del medio es apartada de su posición de equilibrio) e **inercia** (explica el tipo de movimiento debido a la perturbación). Ambas propiedades determinan la velocidad de propagación.

#### Velocidad de las Ondas Mecánicas

*No hay que confundir la velocidad de propagación de la perturbación (cte en el tiempo una vez ha sido emitida por el foco) con la velocidad de vibración de las partículas oscilantes (en función del tiempo).*

La velocidad de propagación de una onda depende de las propiedades del medio por el que se transmite. Si el movimiento ondulatorio se propaga en un medio homogéneo e isótropo (mismas propiedades físicas en todas las direcciones), su velocidad es la misma en todas las direcciones. En este caso, todos los puntos equidistantes del foco, en el que se inicia la perturbación, se encuentran en fase y constituyen un frente de ondas, que resulta ser una **onda esférica**.

#### Cuerda

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

T: tensión de la cuerda: propiedad elástica: N

$\mu$ : densidad lineal: propiedad inercial:  $\frac{m}{L} = \frac{kg}{m}$

#### Gas

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

$\gamma$ : coeficiente adiabático del gas:  $\gamma_{aire}=1.4$

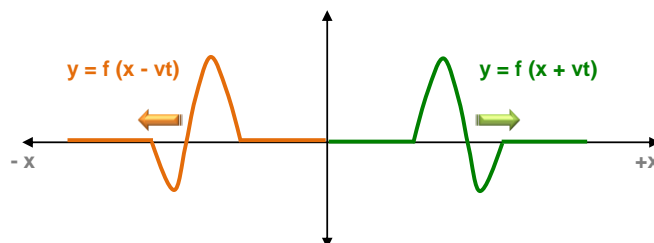
R: cte de los gases ideales:  $8.31 \text{ J/mol} \cdot K$

M: masa molecular del gas

#### Ecuación de Propagación de las Ondas Mecánicas

Una función de onda es aquella expresión matemática que expresa la propagación de una onda en función de la coordenada de la dirección de avance y del tiempo:  $y = f(x, t)$ .

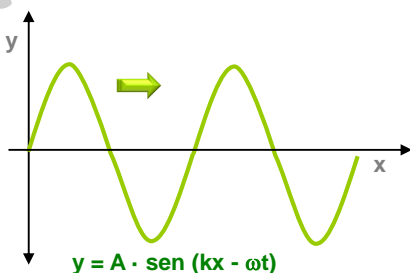
$$y = f(x \pm v \cdot t)$$



### Ondas Armónicas o Senoidales

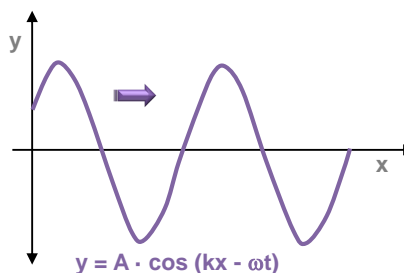
Tienen como origen la perturbación mediante el **MAS** generado por un **oscilador armónico**. Se propagan en una sola dimensión, en un medio sin amortiguamiento y su frente de onda es plano: ondas armónicas **planas**.

$$y(x, t) = A \cdot \text{sen } k(x \pm v \cdot t)$$



A: amplitud

$$y(x, t) = A \cdot \text{cos } k(x \pm v \cdot t)$$



k: cte número de onda

v: velocidad de propagación



### Parámetros Constantes de una Onda Armónica

- **Amplitud de onda (A: m).**- valor máximo de la elongación y de las partículas del medio en su oscilación.
- **Longitud de onda (λ: m).**- distancia mínima entre **dos puntos** consecutivos que se hallan en el mismo estado de vibración.
- **Periodo (T: seg):** tiempo que emplea el movimiento ondulatorio en avanzar una λ, o bien el tiempo que emplea **un punto** cualquiera afectado por la perturbación en efectuar una oscilación completa.
- **Frecuencia (f: s<sup>-1</sup>, Hz).**- nº de ondas que pasan por un punto del medio en un segundo o nº de oscilaciones que efectúa un punto del medio por unidad de tiempo.
- **Velocidad de propagación (v: m/s)** - desplazamiento realizado por la onda en la unidad de tiempo.
- **Número de onda (k)** - nº de λ que hay en una distancia 2π.

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

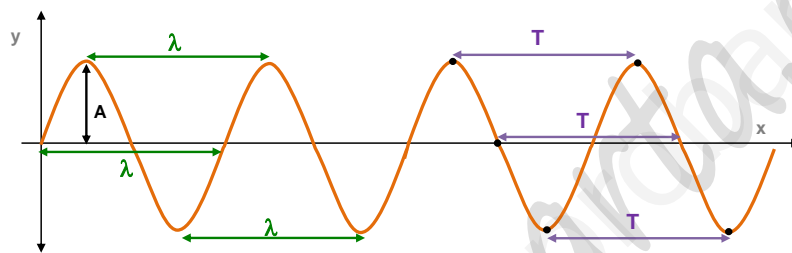
$$f = \frac{1}{T}$$

$$v = \lambda \cdot f$$

$$\lambda = v \cdot T$$

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

$$k = \frac{2\pi}{v \cdot T} \rightarrow \omega = \frac{2\pi}{T} \rightarrow k = \frac{\omega}{v}$$



### Ecuación de una Onda Armónica

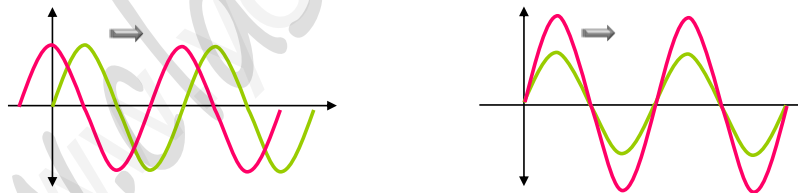
#### Sentido (+) eje X

$$y(x, t) = A \cdot \text{sen}(\omega t - kx + \delta_0)$$

#### Sentido (-) eje X

$$y(x, t) = A \cdot \text{sen}(\omega t + kx + \delta_0)$$

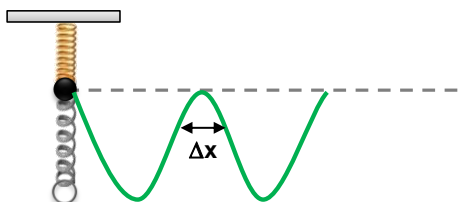
Las partículas separadas por un nº entero de λ (x, x+λ, x+2λ, x+3λ, ...) están en **fase**. Si se encuentran separadas por un número impar de medias λ (x, x+λ/2, ...) están en **oposición de fase**.



Los estados de vibración de una partícula para tiempos que difieren un nº entero de T (t, t+T, t+2T, ...) están en fase. Si los tiempos difieren un nº impar de semiperiodos (t, t+T/2, ...) están en oposición de fase.

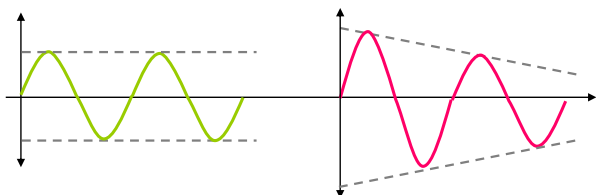
### Energía de una Onda Armónica

Cuando una partícula del medio es alcanzada por un movimiento ondulatorio, la energía que posee es **cinética**, porque está en movimiento, y **potencial elástica**, porque su posición es debida a una fuerza recuperadora.



$$\Delta E_m = 2\pi^2 \cdot \rho \cdot S \cdot v_p \cdot \Delta t \cdot f^2 \cdot A^2$$

- La energía transmitida en una onda armónica es directamente proporcional al cuadrado de la frecuencia y al de la amplitud.
- Si no se disipa energía en el medio de transmisión de la onda unidimensional, la amplitud permanece cte, si no, la amplitud resulta amortiguada.



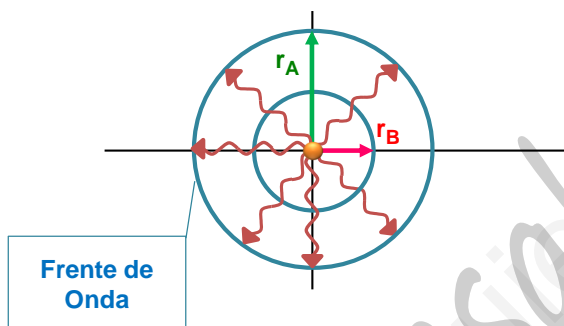
$$P = \frac{\Delta E_m}{\Delta t} = 2\pi^2 \cdot \rho \cdot S \cdot v_p \cdot f^2 \cdot A^2$$

- La potencia de una onda armónica es directamente proporcional a su velocidad de propagación y al cuadrado de la frecuencia y de la amplitud.

**Ondas Armónicas Circulares**

Conforme se propagan y se alejan del foco emisor, su amplitud decrece:

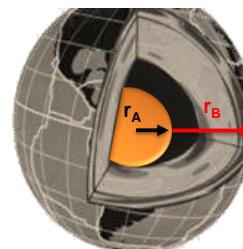
$$A \propto \frac{1}{\sqrt{r}}$$



**Ondas Armónicas Esféricas**

Conforme se propagan y se alejan del foco emisor, su amplitud decrece:

$$A \propto \frac{1}{r}$$



La intensidad de una onda es la energía que atraviesa por unidad de tiempo una superficie unidad perpendicular a la dirección de propagación de la onda:

$$I = \frac{P}{S} = \frac{P}{4 \cdot \pi \cdot r^2} = \frac{\Delta E_m}{\Delta t \cdot S} = 2\pi^2 \cdot \rho \cdot v_p \cdot f^2 \cdot A^2 \rightarrow I \propto \frac{1}{r^2} \quad \left( \frac{\text{J}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}} = \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \right)$$



## Estudio Cualitativo

### Principio de Huygens

- Todo punto de un medio hasta el cual llega una perturbación se comporta como un foco emisor de ondas secundarias que se propagan en la dirección de la perturbación.
- La superficie tangente a todas las ondas secundarias en un momento dado, constituye el frente de ondas.

#### Reflexión

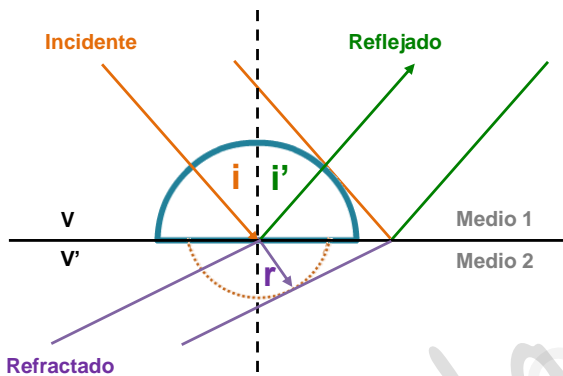
$$\hat{i} = \hat{i}'$$

#### Refracción

$$v' > v \rightarrow \hat{r} > \hat{i}$$

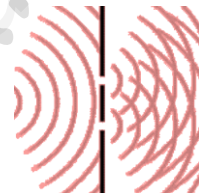
$$v' < v \rightarrow \hat{r} < \hat{i}$$

**Ley de Snell:**  $\frac{\sin \hat{i}}{\sin \hat{r}} = \frac{v_1}{v_2} \rightarrow n_1 \cdot \sin \hat{i} = n_2 \cdot \sin \hat{r}$



#### Difracción

Ocurre cuando la onda se encuentra con un obstáculo o rendija y modifica su dirección de propagación.



### Principio de Superposición

*"La perturbación que se produce en un punto por 2 o más ondas, es igual a la suma algebraica de las perturbaciones que se producen en dicho punto por cada una de las ondas consideradas de modo aislado"*

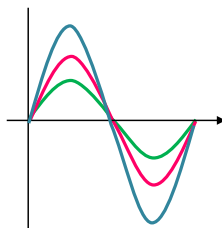
#### Interferencia entre Ondas Armónicas

$$\left. \begin{aligned} y_1 &= A \sin(kx - \omega t) \\ y_2 &= A \sin(kx - \omega t - \delta) \end{aligned} \right\} y_1 + y_2 \rightarrow y = 2A \sin\left(kx - \omega t - \frac{\delta}{2}\right) \cdot \cos\left(\frac{\delta}{2}\right)$$

- La onda resultante es armónica y tienen la misma  $\lambda$  y frecuencia que las ondas individuales.
- La amplitud resultante depende de la diferencia de fase entre las ondas individuales.

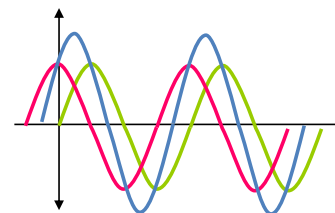
#### **En Fase o desfase $\delta = 2\pi, 4\pi, \dots$**

$$\delta = 0 \rightarrow A' = 2A$$



#### **En Desfase $0 < \delta < \pi$**

$$A' = 2A \cos \frac{\delta}{2}$$



Quando dos ondas con desfase nulo interfieren lo hacen de forma **constructiva**. Cuando están en oposición de fase lo hacen de forma **destruktiva**.

La interferencia es **constructiva** cuando la diferencia entre las distancias recorridas por las ondas es un múltiplo entero de la longitud de onda. En los puntos donde se cumpla esta condición, se producen **máximos**:

$$\Delta d = n \cdot \lambda \rightarrow n = 1, 2, 3, \dots$$

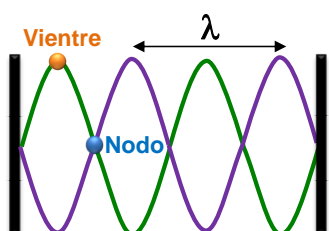
La interferencia es **destruktiva** cuando la diferencia entre las distancias recorridas por las ondas es de media la longitud de onda o un múltiplo impar de la misma. En los puntos donde se cumpla esta condición, las ondas se anulan mutuamente, produciéndose **mínimos**:  $\Delta d = (2n + 1) \cdot \frac{\lambda}{2}$

### Ondas Estacionarias

Cuando se produce una perturbación a lo largo del tiempo en uno de los extremos, se genera un tren de ondas que se refleja en el otro extremo, así se produce un fenómeno de superposición entre ondas idénticas que se propagan en el **mismo medio** en **sentidos opuestos**.

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

- La amplitud es función de la posición (x), de modo que determinados puntos oscilan con amplitud máxima y otros no oscilan.
- La frecuencia es igual a la de las ondas armónicas que se superponen.
- La longitud de onda es la distancia vientre-vientre o nodo-nodo



#### Localización

##### Nodos

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

$$x_{\text{nodo-nodo}} = \frac{\lambda}{2}$$

##### Vientres o Antinodos

$$x = (2n + 1) \cdot \frac{\lambda}{4}$$

### Frecuencias de Ondas Estacionarias en una cuerda fija por ambos extremos

Los armónicos son las frecuencias que dan lugar al establecimiento de ondas estacionarias:

		<b>n</b>	<b>Longitud de onda</b> $\left(\lambda = \frac{2L}{n}\right)$	<b>Frecuencia</b> $\left(f = \frac{n \cdot v_{\text{sonido}}}{2 \cdot L}\right)$
<b>Primer armónico, fundamental</b>		1	$\lambda = 2L$	$f_0 = \frac{v_{\text{sonido}}}{2 \cdot L}$
<b>Segundo armónico</b>		2	$\lambda = L$	$f'' = \frac{v_{\text{sonido}}}{L}$
<b>Tercer armónico</b>		3	$\lambda = \frac{2L}{3}$	$f''' = \frac{3 \cdot v_{\text{sonido}}}{2 \cdot L}$
<b>Cuarto armónico</b>		4	$\lambda = \frac{L}{2}$	$f'''' = \frac{2 \cdot v_{\text{sonido}}}{L}$

Por tanto, la condición que cumplen las ondas estacionarias que pueden formarse en una cuerda de longitud L fija por ambos extremos, es:

$$L = n \cdot \frac{\lambda}{2} \rightarrow \left(\lambda = \frac{v}{f}\right) \rightarrow f = n \cdot \frac{v}{2L} \rightarrow f = \frac{n}{2 \cdot L} \cdot \sqrt{\frac{T}{\mu}}$$

### Explicación gráfica del aspecto de una onda estacionaria

La existencia de nodos (puntos que no oscilan) implica que una onda estacionaria, a diferencia de las viajeras, **no transporta energía** de un punto a otro, sino que la energía se confina. A los vientres le corresponden máximos de energías mientras que los nodos tienen energía nula. Sin embargo, la energía total es la suma de las energías de las ondas que dan lugar a la onda estacionaria.