VIBRACIONES Y ONDAS

Física.

TEMA 1.

2º Bachillerato.
Física

Física.

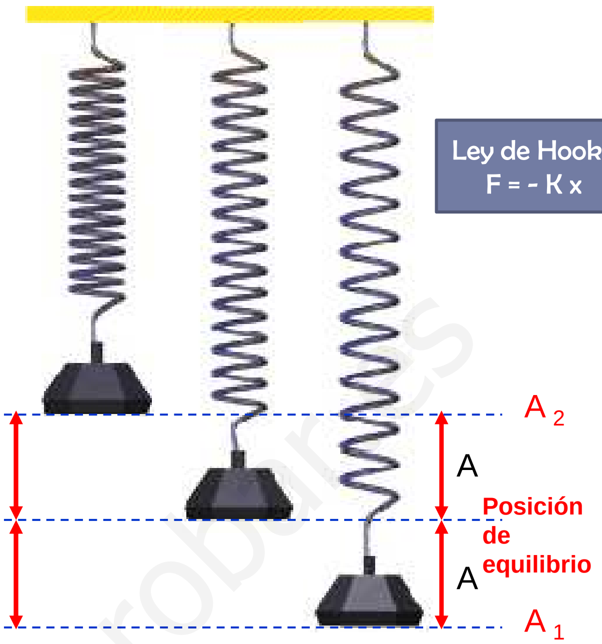
ESQUEMA DE LA UNIDAD

- **1. EL MOVIMIENTO VIBRATORIO ARMÓNICO SIMPLE (M.A.S)**
    - **1.1 DINAMICA DEL M.A.S**
- **2. ENERGÍA DEL M.A.S**
- **3. EJEMPLO DE OSCILADOR ARMÓNICO: EL PÉNDULO.**
- **4. EL CONCEPTO DE ONDA.**
- **5. ONDAS ARMÓNICAS.**
- **6. ENERGÍA E INTENSIDAD DE LAS ONDAS.**
- **7. SUPERPOSICIÓN DE ONDAS. INTERFERENCIAS.**
- **8. ONDAS ESTACIONARIAS.**
- **9. PRINCIPIO DE HUYGENS. DIFRACCIÓN, REFLEXIÓN Y REFRACCIÓN.**
- **10. EL SONIDO.**
    - **10.1 CUALIDADES DEL SONIDO.**
- **11. EFECTO DOPPLER.**

1 MOVIMIENTO VIBRATORIO ARMONICO SIMPLE (M.A.S)

Descripción cinemática del m.a.s.

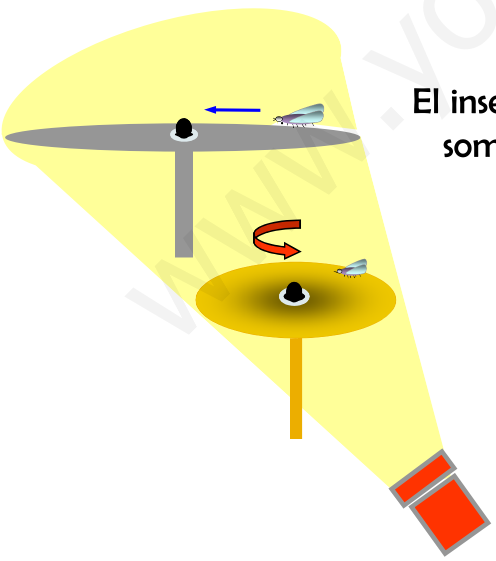
- Un sistema constituye un **oscilador armónico** cuando "oscila" entre dos puntos A_1 y A_2 equidistantes, situados a ambos lados de la posición de equilibrio.
- **Al acercarse al punto de equilibrio**, el cuerpo aumenta su velocidad, pasando por él, a la velocidad máxima.
- **Al alejarse** del punto de equilibrio, va disminuyendo su velocidad, de forma que en los extremos se detiene y cambia el sentido del movimiento, a la velocidad máxima.



Ley de Hooke
$F = - K x$

➢ Cada vez que el cuerpo vuelve a la posición de partida moviéndose en el mismo sentido, decimos que ha efectuado una oscilación y en ello ha invertido un tiempo constante, el período.

1 MOVIMIENTO VIBRATORIO ARMÓNICO SIMPLE (M.A.S) (II)



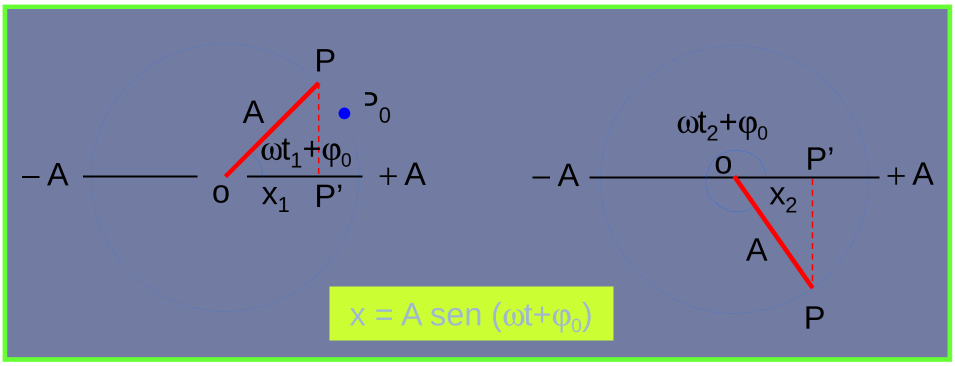
El insecto posee un MCU, pero ¿cómo es el movimiento de su sombra?. Inicialmente solo podemos decir que es rectilíneo

Pero según lo visto anteriormente podemos ver que realmente es un m.a.s. **El m.a.s se puede considerar como la proyección del m.c.u**

➢ Una partícula describe un ***movimiento vibratorio u oscilatorio*** cuando se desplaza sucesivamente a un lado y a otro de su posición de equilibrio repitiendo a intervalos regulares de tiempo sus variables cinemáticas (posición, velocidad, aceleración….)

1 MOVIMIENTO VIBRATORIO ARMONICO SIMPLE (M.A.S) (III)

Ecuación del movimiento vibratorio armónico simple



- La ecuación de un m.v.a.s. se obtiene a partir de la proyección de un movimiento circular sobre una recta
  - Si la proyección se realiza sobre el eje x, resulta: $x = A \cos (\omega t+\varphi_0)$
  - Si la proyección se realiza sobre el eje y, resulta: $y = A \,\text{sen}\, (\omega t+\varphi_0)$
- **Elongación x:** Distancia en un instante dado al punto de equilibrio
- **Amplitud A:** Elongación máxima. El valor de x varía entre -A y +A
- **Fase θ:** Describe el movimiento angular en el punto P. $\theta = (\omega t+\varphi_0)$
- **Fase inicial φ_0:** Determina la elongación inicial: $x_0 = x\ (t = 0) = A \,\text{sen}\, \varphi_0$

Si sale desde el punto de equilibrio $x_0 = 0 \rightarrow \varphi_0 = 0$. Si sale desde un Extremo $x_0 = A \rightarrow \varphi_0 = \pi/2$.

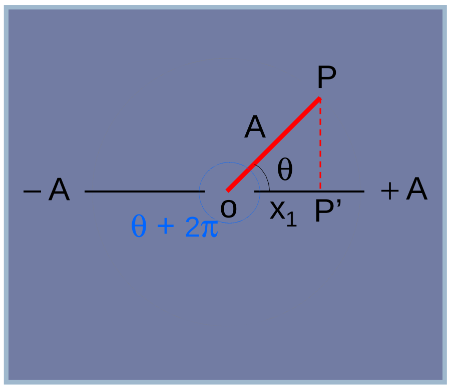
1 MOVIMIENTO VIBRATORIO ARMONICO SIMPLE (M.A.S) (IV)

Características del m.a.s. como movimiento periódico

- Los movimientos que se repiten en intervalos de tiempos iguales se denominan **periódicos**
- Dado que: $\text{sen}\, \theta = \text{sen}\, (\theta + 2\pi)$

$$\left.\begin{array}{l} \text{sen}\, \theta = \text{sen}\, (\theta + 2\pi) \\ x = A \,\text{sen}\, \omega t = A \,\text{sen}\, (\omega t + 2\pi) \end{array}\right\} \Rightarrow$$

$$x = A \,\text{sen}\, \omega \left(t + \frac{2\pi}{\omega} \right)$$



- El m.a.s. **se repite cada período**: $T = \dfrac{2\pi}{\omega}$
- **El período (T)** es el tiempo que tarda en repetirse una posición en dicho movimiento. Se mide en segundos (s)
- **La frecuencia (f)** es la inversa del período e indica el número de veces que se repite una posición en cada segundo. Se mide en (s^{-1}) o Hertzios (Hz)

$$f = \frac{1}{T} \rightarrow f = \frac{\omega}{2\pi} \rightarrow \omega = 2\pi f$$

- **La frecuencia angular o pulsación (ω)** se mide en (radianes/segundo)

1 MOVIMIENTO VIBRATORIO ARMONICO SIMPLE (M.A.S) (V)

Velocidad en el movimiento vibratorio armónico simple

- Derivando la ecuación general del m.a.s., $x = A\ \text{sen}\ (\omega t + \varphi_0)$ resulta:

$$\boxed{v = \frac{dx}{dt} = A\omega \cos(\omega t + \varphi_0)}$$

$$\text{sen}^2\alpha + \cos^2\alpha = 1 \Rightarrow \cos(\omega t + \varphi_0) = \sqrt{1 - \text{sen}^2(\omega t + \varphi_0)}$$

$$\Rightarrow$$

$$v = \pm A\omega\sqrt{1 - \text{sen}^2(\omega t + \varphi_0)} = \pm\omega\sqrt{A^2 - A^2\,\text{sen}^2(\omega t + \varphi_0)}$$

El columpio se detiene en los extremos. En el centro alcanza su máxima velocidad

- Como $x = A\ \text{sen}\ (\omega t+\varphi_0) \Rightarrow x^2 = A^2\ \text{sen}^2\ (\omega t+\varphi_0)$

$$V = \pm\omega\sqrt{A^2 - x^2}$$

- La velocidad es máxima cuando $x = 0$

$$V_{máx} = A\,\omega$$

1 MOVIMIENTO VIBRATORIO ARMONICO SIMPLE (M.A.S) (VI)

Aplicación al cálculo de la x, v, T, A y frecuencia del m.a.s.

Una partícula lleva el movimiento dado por la expresión $x = 5\ \text{sen}\left(2t + \frac{\pi}{4}\right)$. Calcular:

a) La posición cuando t = 0,1 s

b) La velocidad en ese instante

c) El período, la amplitud y la frecuencia

a) Cálculo de la posición cuando t = 0,1 s

$$x = 5\ \text{sen}\left(2t + \frac{\pi}{4}\right) = 5\ \text{sen}\left(2\,.\,0{,}1 + \frac{\pi}{4}\right) = 4{,}167 \Rightarrow \quad x = 4{,}167\ \text{m}$$

b) Cálculo de la velocidad en ese instante

$$x = 10\cos\left(2t + \frac{\pi}{4}\right) = 10\cos\left(2\,.\,0{,}1 + \frac{\pi}{4}\right) = 5{,}525 \Rightarrow \quad v = 5{,}525\ \text{m/s}$$

c) Cálculo del período, amplitud y frecuencia

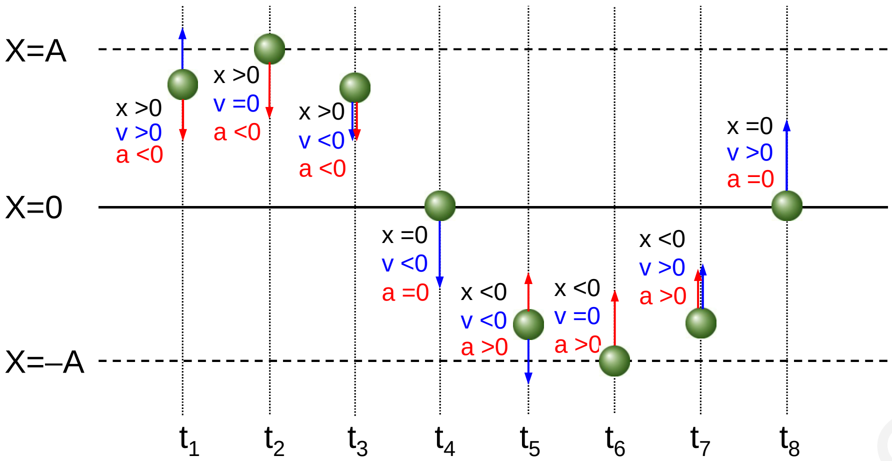
Período: $T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{2\pi}{2} = \pi \Rightarrow$ $T = \pi$ s

Amplitud: $A = 5$ m

Frecuencia: $f = \frac{1}{T} = \frac{1}{\pi} \Rightarrow$ $f = \frac{1}{\pi}\,Hz$

1 MOVIMIENTO VIBRATORIO ARMONICO SIMPLE (M.A.S) (VII)

Aceleración del movimiento vibratorio armónico simple



- ***Derivando*** la ecuación de la velocidad: $v = A\,\omega\,\cos(\omega t + \varphi_0)$ resulta:

$$a = \frac{dv}{dt} = \frac{d^2x}{dt^2} = -A\omega^2\,sen\,(\omega t + \varphi_0)$$

Como $x = A\,sen\,(\omega t + \varphi_0)$ $\Rightarrow$ $a = -\omega^2 x$

- ***El valor máximo*** se alcanza en los extremos, en los que $x = \pm A$ $\Rightarrow$ $a_{máx} = \pm\omega^2 A$

Es proporcional a la elongación, máxima en los extremos y nula en el centro

1 MOVIMIENTO VIBRATORIO ARMONICO SIMPLE (M.A.S) (VIII)

Aplicación al cálculo de la velocidad y aceleración máxima

Calcula los valores máximos de la velocidad y de la aceleración de un punto dotado de movimiento armónico simple de amplitud 10 cm y período 2 s

Partiendo de la ecuación general para la posición del punto dotado de m.v.a.s., al efectuar la primera derivada se obtiene la velocidad, y al efectuar la segunda derivada se obtiene la aceleración

La posición: $x = A\,sen\,(\omega t + \varphi)$

La velocidad: $v = A\,\omega \cdot \cos(\omega t + \varphi)$

La aceleración: $a = -A\,\omega^2 \cdot sen\,(\omega t + \varphi)$

a) Cálculo de la velocidad máxima:

$$V_{máx} = A \cdot \omega$$

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = \frac{2\pi}{2} = \pi \quad rad/s$$

$\Rightarrow$ $V_{máx} = 0{,}10 \cdot \pi = 0{,}314\ m/s$

b) Cálculo de la aceleración máxima:

$a_{máx} = A \cdot \omega^2 \Rightarrow a_{máx} = 0{,}10 \cdot \pi^2\ \ m/s^2$

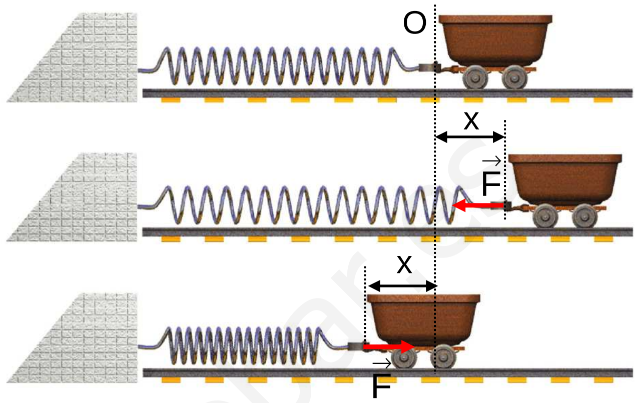
1.1 DINÁMICA DEL M.A.S

Dinámica del movimiento vibratorio armónico simple

- Según la ley de Hooke: $F = -kx$
- Por la segunda ley de Newton: $F = m\,a = -m\,\omega^2\,x$

$\Rightarrow$ $k = m\,\omega^2$

- Si $x = 0 \Rightarrow F = 0$ (no aparecen fuerzas)
- Si el móvil se encuentra fuera de la posición de equilibrio, la ***fuerza*** que actúa sobre él está dirigida desde el punto en que se encuentra a la posición de equilibrio



- La fuerza tiene el **sentido contrario al desplazamiento**

$$\left.\begin{array}{l} T = \dfrac{2\pi}{\omega} \\ \omega = \sqrt{\dfrac{k}{m}} \end{array}\right\} \Rightarrow T = 2\pi\sqrt{\dfrac{m}{k}}$$

$$f = \frac{1}{T} \Rightarrow f = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{k}{m}}$$

El ***período y la frecuencia*** de un oscilador sometido a una fuerza elástica depende de su ***constante recuperadora*** y de su ***masa***, pero no depende de la amplitud del movimiento.

2 ENERGÍA DEL M.A.S

Física.

Energía cinética del oscilador armónico

- Aplicando la definición de energía cinética:

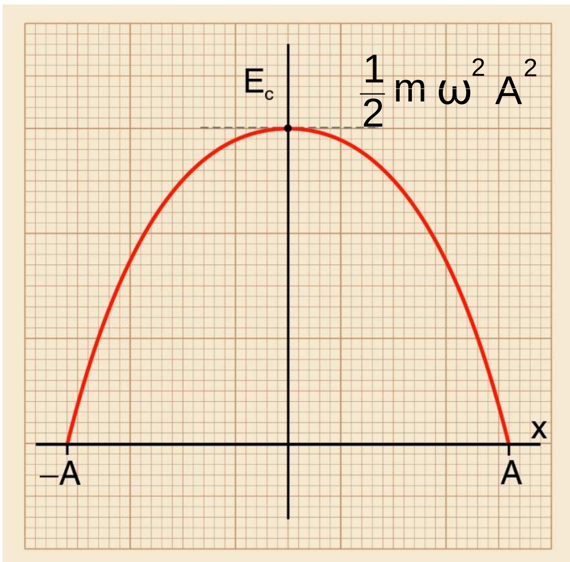
$$E_c = \frac{1}{2}\,m\,v^2 = \frac{1}{2}\,m\,\omega^2\,A^2\cos^2(\omega t + \varphi_0)$$

- Por las relaciones trigonométricas:

$$E_c = \frac{1}{2}\,m\,\omega^2\left[A^2 - x^2\right]$$

- Si $x = 0 \Rightarrow$ **energía cinética máxima**

$$E_{c,máx} = \frac{1}{2}\,m\,\omega^2\,A^2$$



2 ENERGÍA DEL M.A.S (II)

Energía potencial del oscilador armónico

- Por tratarse de fuerzas centrales:

$$W = dE_p = -F\,dx = kx\,dx$$

- Integrando entre dos posiciones A y B:

$$E_{P,B} - E_{P,B} = \int_{x_A}^{x_B} k\,x\,dx = \frac{1}{2}k\,x_B^2 - \frac{1}{2}k\,x_A^2$$

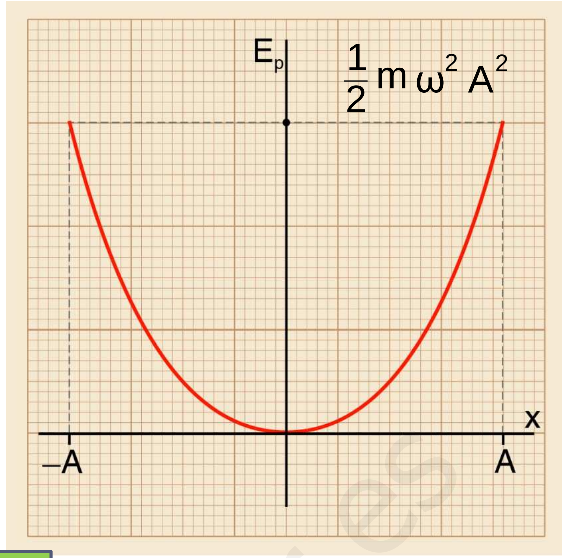
- **Para cada posición**, la E_p es de la forma:

$$E_P = \frac{1}{2} m\,\omega^2 A^2\,sen^2(\omega t + \varphi_0)$$

$$\boxed{E_p = \frac{1}{2} m\,\omega^2 x^2}$$

- **Es máxima** cuando sen $(\omega t + \varphi_0) = \pm 1$

$$\boxed{E_{P,\,máx} = \frac{1}{2} m\,\omega^2 A^2}$$

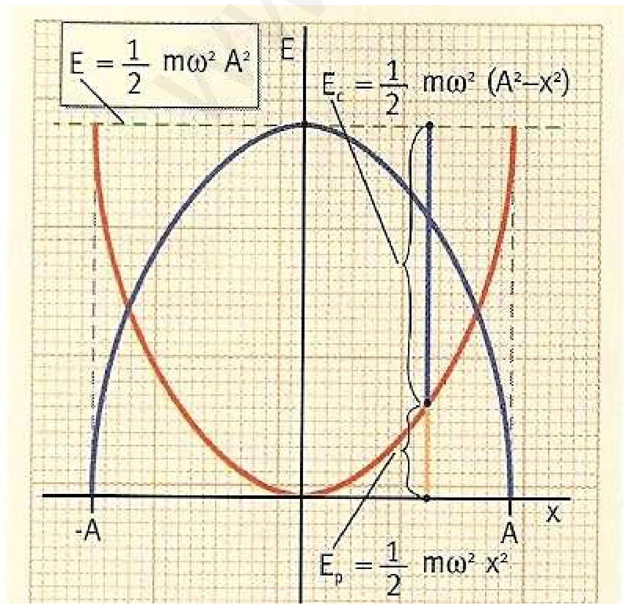


2 ENERGÍA DEL M.A.S (III)

Conservación de la energía mecánica en el oscilador armónico

- La energía total que tiene el oscilador armónico en cada instante **es la suma de la energía cinética y potencial**

$$E = E_p + E_c = \frac{1}{2} m\,\omega^2 A^2\,sen^2(\omega t + \varphi_0) + \frac{1}{2} m\,\omega^2 A^2 \cos^2(\omega t + \varphi_0)$$



- Sacando factor común:

$$E = \frac{1}{2} m\,\omega^2 A^2 \left[\underbrace{\cos^2(\omega t + \varphi_0) + sen^2(\omega t + \varphi_0)}_{1}\right]$$

- Simplificando:

$$\boxed{E = E_p + E_c = \frac{1}{2} m\,\omega^2 A^2}$$

En el oscilador armónico, la energía mecánica permanece constante en cualquier instante

2 ENERGÍA DEL M.A.S (IV)

Aplicación al cálculo de energías de un m.a.s.

Un oscilador de 2 kg tiene una frecuencia de 40 Hz, una amplitud de 3 m y comienza su movimiento en la posición de equilibrio. ¿En qué posición se encuentra cuando su energía potencial es la mitad de su energía cinética?

- La frecuencia angular de este movimiento es: $\omega = 2\pi\,\nu = 80\,\pi$ rad/s
- Si la $E_c = 2E_p$ la energía total es: $E = \frac{1}{2} m\,\omega^2 A^2 = E_c + E_p = 3\,E_p$

  de donde la E_p será: $E_p = \frac{1}{6} m\,\omega^2 A^2$
- Como en general, la expresión de la E_p es: $E_p = \frac{1}{2} m\,\omega^2 x^2$
- Igualando y simplificando ambas expresiones: $x^2 = \frac{A^2}{3} \Rightarrow$ $x = \sqrt{3}$ m

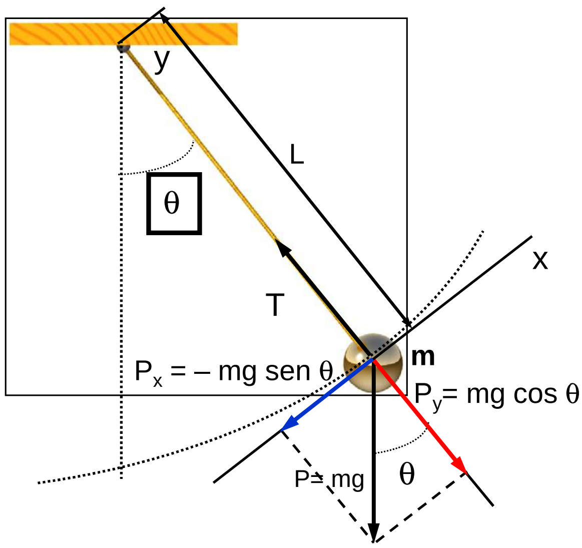
3 EJEMPLO DE OSCILADOR ARMONICO: EL PÉNDULO.

El péndulo simple como oscilador armónico

- Consiste en un ***hilo inextensible de masa despreciable*** suspendida de un extremo; del otro pende un cuerpo de masa **m** considerado **puntual**
- Puede considerarse como un m.a.s. si la separación de A del punto de equilibrio es tan pequeña como para **despreciar la curvatura de la trayectoria**

  Eje Y: $T - P_y = m\,a_n$

  Eje X: $P_x = m\,a_x \Rightarrow -mg\,\text{sen}\,\theta = m\,a_x$



- Simplificando resulta: $-g\,\text{sen}\,\theta = a_x$
- Para **ángulos pequeños**, $\text{sen}\,\theta = \theta$

$$\left.\begin{array}{l} -g\,\text{sen}\,\theta = a_x \\ \text{sen}\,\theta = \theta \end{array}\right\} \Rightarrow a_x = -g\,\theta$$

- Sustituyendo el ángulo por el arco:

$$\left.\begin{array}{l} \theta L = x \Rightarrow a_x = -\frac{g}{L} x \\ a = -\omega^2 x \end{array}\right\} \Rightarrow \omega^2 = \frac{g}{L}$$

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{L}{g}}$$

El **período** T de la oscilación pendular.

3 EJEMPLO DE OSCILADOR ARMONICO: EL PÉNDULO (II)

Estudio energético del péndulo

- Cuando el péndulo está parado **en uno de los extremos de su trayectoria**, toda la energía almacenada es $E_p = mgh$
- **Al pasar por el punto más bajo** de su trayectoria, toda la energía almacenada es E_C

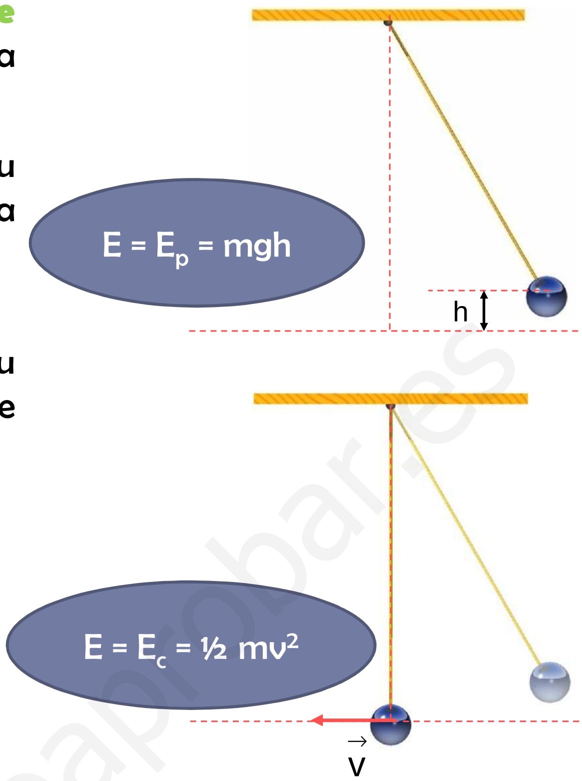
$$E_c = \frac{1}{2} m v^2$$

- **La suma de ambas** indica el valor de su energía en cualquier punto intermedio de su trayectoria

$$E = E_P + E_C = m g h + \frac{1}{2} m v^2$$

- La **relación** entre su altura máxima y la velocidad es:

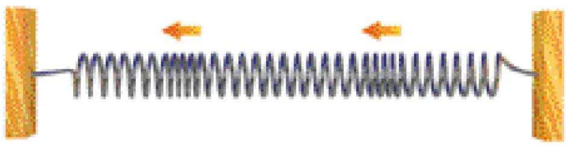
$$m g h = \frac{1}{2} m v^2 \Rightarrow \boxed{v = \sqrt{2gh}}$$



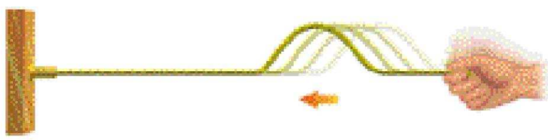
4 EL CONCEPTO DE ONDA.

El concepto general de movimiento ondulatorio

- Al desplazar un trozo del muelle **en sentido longitudinal** y soltarlo, se produce una oscilación que se propaga a todas las partes del muelle comenzando a oscilar



- Si en una cuerda tensa horizontal, se hace vibrar uno de sus extremos, la altura de ese punto **varía periódicamente**



- Un movimiento ondulatorio **es la propagación de una perturbación** de alguna magnitud física a través del espacio. Se suele denominar **onda** a la propia perturbación
- El movimiento ondulatorio **no transporta materia**, lo que se propaga es la perturbación
- Las partículas del medio alcanzadas por ésta, **vibran alrededor de su posición de equilibrio**

Un movimiento ondulatorio es una forma de transmisión de energía, sin transporte neto de materia, mediante la propagación de alguna perturbación. Esta perturbación se denomina onda.

4 EL CONCEPTO DE ONDA (II)

Clasificación de las ondas según su naturaleza.

El medio de propagación de las olas que son ondas mecánicas, es el océano.

- **Mecánicas:** Son las ondas que **necesitan un medio material** que sirva de soporte a la perturbación que se propaga. Son ondas mecánicas el sonido y las ondas que se propagan en la superficie del agua, en una cuerda o en un muelle.

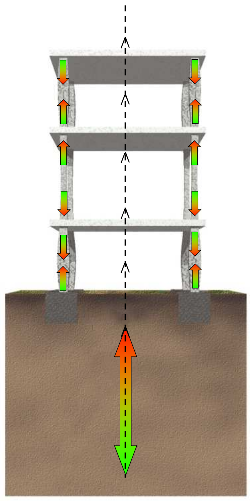
- **Electromagnéticas:** Son ondas que **no necesitan un medio material** para su propagación; pueden propagarse en el vacío. Los rayos X, la luz visible o los rayos ultravioleta son ejemplos de ondas electromagnéticas.

Las ondas mecánicas precisan un medio material para su propagación; las ondas electromagnéticas pueden propagarse en el vacío

4 EL CONCEPTO DE ONDA (III)

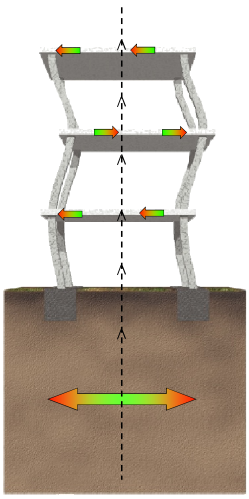
Clasificación de las ondas según la dirección de propagación

LONGITUDINALES

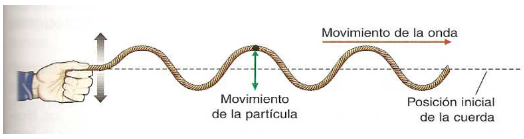


- La dirección de propagación coincide con la dirección de la perturbación

El sonido, las ondas sísmicas P y las que se propagan en un muelle, son ondas longitudinales



TRANSVERSALES



- La dirección de propagación es perpendicular a la dirección en que tiene lugar la perturbación

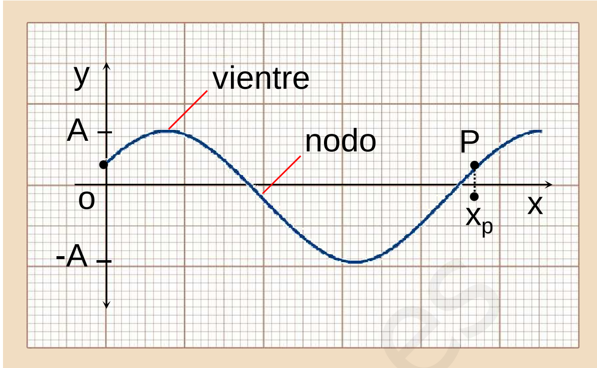
Las ondas en una cuerda, las ondas electromagnéticas y las ondas sísmicas S, son ondas transversales

5 ONDAS ARMÓNICAS.

Ondas armónicas. Función de onda

- Una onda armónica es la **propagación de una perturbación** originada por un **m.a.s.**

- Su forma se corresponde con una **función armónica** (seno o coseno)
- Los puntos que en un instante tiene elongación máxima se denominan **vientres**
- Aquellos que tienen elongación nula se denominan **nodos**



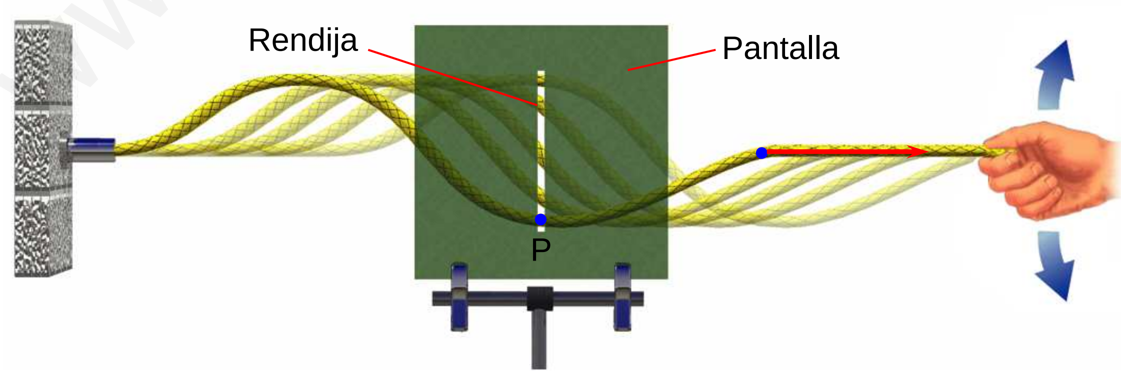
✓ **La función de onda** es la ecuación que describe un movimiento ondulatorio y representa el valor de la elongación para cada punto del medio en función del tiempo.

- **La elongación** del punto O en cualquier instante t es: $y_0(t) = A\,sen\,(\omega t + \varphi_o)$
- **La ecuación de onda** o función de onda es: $$y(x,t) = A\,sen\,(\omega t - kx + \varphi_o)$$
- **K es el numero de ondas:** $k = \frac{2\pi}{\lambda}\left(\frac{rad}{m}\right)$
- $(\omega t - kx + \varphi_o)$ **Es la fase de onda.**

5 ONDAS ARMÓNICAS (II)

Período temporal

- También denominado **período (T)** es el intervalo de tiempo que transcurre entre dos estados idénticos y sucesivos de la perturbación en un punto
- Coincide con el período del m.a.s. del foco de la perturbación

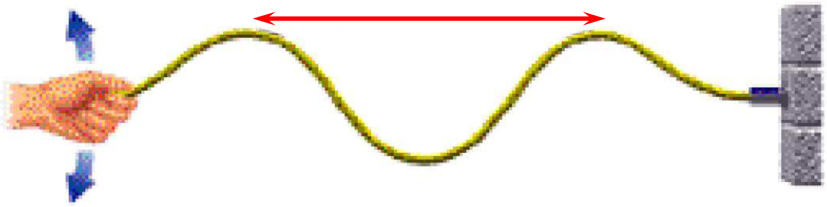


- Al colocar una pantalla con una rendija perpendicular a la cuerda, lo que equivale a hacer x constante, se observa como el punto P describe un m.a.s.
- Si se tiene un punto P a una distancia x del foco vibrante, la función de onda para x constante es: $\xi(x, t) = \xi(t)$. **La elongación de P solo depende de t**

5 ONDAS ARMÓNICAS (III)

Longitud de onda

- La longitud de onda (λ) es el intervalo de longitud entre dos puntos sucesivos que se encuentran en idéntico estado de perturbación



- Características de una onda :

  amplitud **(A)**
  período **(T)**
  longitud de onda **(λ)**
  frecuencia **(f)** que es la inversa del período
  velocidad de propagación **(v)**

$$\mathbf{v} = \frac{x}{t} = \frac{\lambda}{\mathbf{T}} = \lambda \, f$$

6 ENERGÍA E INTENSIDAD DE LAS ONDAS.

Expresión de la intensidad de una onda

- Una onda **transporta energía** desde el foco emisor al medio. Para caracterizar la propagación de la energía por la onda se define la magnitud denominada intensidad
- La **intensidad de una onda** en un punto es la energía que pasa en cada unidad de tiempo por la unidad de superficie situada perpendicularmente a la dirección de propagación
- La intensidad **es una potencia por unidad de superficie** $I = \frac{E}{S\,t} = \frac{P}{S}$
- La unidad de intensidad es $W\ m^{-2}$
- Se llama **amortiguación** a la disminución de la amplitud de una onda.
- Una onda se amortigua a medida que avanza, por dos causas: **la absorción** del medio y **la atenuación** con la distancia

El tipo de material con que se revisten las paredes de las salas de audición musical, condiciona la cantidad de sonido que se recibe, ya que absorben de diferente grado las ondas sonoras.

6 ENERGÍA E INTENSIDAD DE LAS ONDAS (II)

Amortiguación de ondas: atenuación

Atenuación

- Se producen ondas esféricas cuyo frente se propaga en todas direcciones del espacio
- Este fenómeno se produce aunque no haya disipación de energía al medio, y se debe exclusivamente a una cuestión geométrica
- La intensidad de la onda esférica en el punto B_1 que dista r_1 del foco emisor F es:

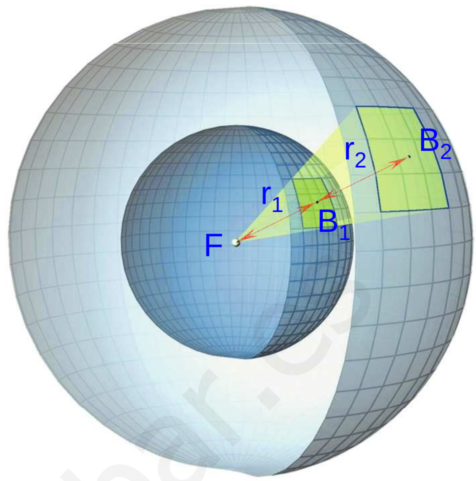
$$I_1 = \frac{P}{4\pi r_1^2}$$

- Y en el punto B_2 que dista r_2 del foco emisor F :

$$I_2 = \frac{P}{4\pi r_2^2}$$

- Por tanto, $\frac{I_1}{I_2} = \frac{r_2^2}{r_1^2} \Rightarrow \frac{A_1}{A_2} = \frac{r_2}{r_1}$

Como la Energía es proporcional al cuadrado de la amplitud, también debe serlo la intensidad.



7 SUPERPOSICIÓN DE ONDAS. INTERFERENCIAS.

Superposición de ondas. Principio de superposición

- Cuando **n** movimientos ondulatorios, descritos cada uno de ellos por su ecuación de ondas ξ_i, inciden simultáneamente en un punto, **la función de onda resultante es la suma de las funciones de onda** de cada uno de ellos:

$$\xi = \xi_1 + \xi_2 + \ldots + \xi_n = \Sigma \xi_i$$

Este proceso de adición matemática de funciones de onda armónicas, se denomina superposición

- **Permite calcular la función de onda resultante** cuando varios movimientos ondulatorios coinciden al mismo tiempo en un punto, pero conlleva la dificultad de sumar funciones trigonométricas en el caso de las ondas armónicas. Para salvar este inconveniente, Fresnel elaboró un método denominado **construcción de Fresnel** que permite tratar las ondas como vectores

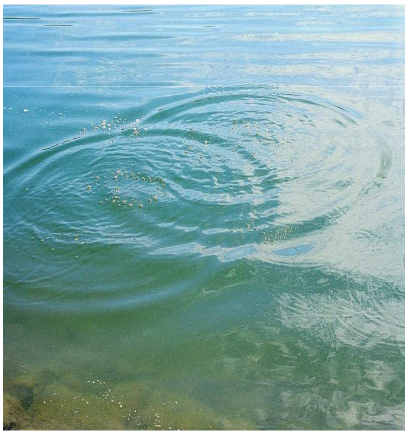
7 SUPERPOSICIÓN DE ONDAS. INTERFERENCIAS (II)

Interferencias

- Los fenómenos de interferencia ocurren cuando un punto del espacio es alcanzado simultánea-mente por dos o más ondas

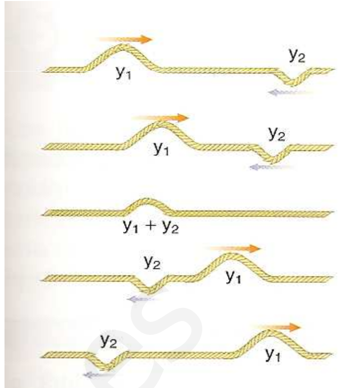
- Aunque las funciones de onda se sumen, sus efectos físicos no son aditivos, lo que da lugar a los fenómenos de interferencia

- La suma de varias perturbaciones en un punto puede dar como resultado una perturbación nula
  Ejemplo: luz + luz = oscuridad



Interferencias en la superficie del agua.

Sus efectos físicos no son aditivos.

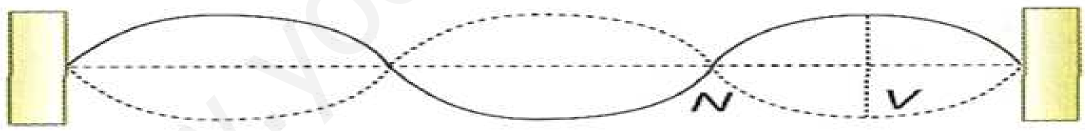


Cuando las dos ondas se separan después de la interferencia, continúan su propagación sin sufrir modificación alguna.

- Como la función de onda ξ depende de la posición x y del tiempo t, los fenómenos de interferencias pueden estudiarse en el espacio o en el tiempo

Un punto de un medio alcanzado simultáneamente por dos ondas que se propagan por él experimenta una vibración que es suma de las que experimentaría si fuera alcanzado por cada una de las ondas por separado.

8 ONDAS ESTACIONARIAS.



Ondas estacionarias como interferencia de una onda incidente y de la onda reflejada.

- Hasta ahora hemos supuesto que las ondas se propagan en **medios abiertos** o ilimitados. Un medio se considera abierto cuando la propagación no encuentra ningún obstáculo que refleje las ondas hacia la fuente emisora.

- Si un tren de ondas se encuentra con una frontera, la **parte reflejada interfiere** con la parte incidente del tren de ondas. Este fenómeno origina ondas estacionarias.

- **Cuando en un medio elástico interfieren dos ondas armónicas de la misma frecuencia, amplitud, velocidad y naturaleza, que se propagan en la misma dirección y sentidos opuestos, se forma una onda estacionaria.**

- Por ejemplo, en la **cuerda de una guitarra** se generan ondas estacionarias; las ondas que se forman en dicha cuerda se reflejan en los extremos fijos de tal manera que en todo momento existen ondas moviéndose en ambos sentidos (Ver figura)

- **Estas ondas reciben el nombre de estacionarias porque el perfil de la onda no se desplaza debido a que existen puntos fijos o nodos N, para los cuales la amplitud es cero y otros, llamados vientres, V, para los cuales es máxima.**

8 ONDAS ESTACIONARIAS (II)

Ondas estacionarias

- Las ondas estacionarias se forman al interferir dos ondas de iguales características que se propagan en la misma dirección pero en sentidos contrarios
- Se deben a la reflexión en el límite de separación de dos medios diferentes de una onda confinada en un espacio determinado (ondas en la cuerda de una guitarra)
- Se denominan estacionarias porque dan lugar a un patrón de vibración estacionario
- Las ecuaciones de las ondas que interfieren son:

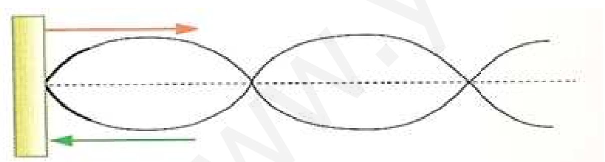
$$\xi_1 = A_1 \text{ sen } (\omega t - kx) \qquad \xi_2 = A_2 \text{ sen } (\omega t + kx)$$

- La onda resultante ξ es: $\xi = \xi_1 + \xi_2 = A_1 \text{ sen } (\omega t - kx) + A_2 \text{ sen } (\omega t + kx)$
- Para determinar esta ecuación de onda hay que tener en cuenta las condiciones de límite. Un límite puede ser fijo (como en una cuerda con uno de sus extremos clavado a una pared), o libre (como el extremo abierto de un tubo de órgano)

  - En un límite fijo: la onda estacionaria presenta un nodo porque las partículas no pueden vibrar
  - En un límite libre: la onda estacionaria presenta un vientre porque las partículas vibran

8 ONDAS ESTACIONARIAS (III)

Ejemplo de cómo obtener la ecuación de onda estacionaria para una cuerda.



Formación de ondas estacionarias en una cuerda fija por un extremo.

- Sea $y_1(x,t) = A \cdot \text{sen } (\omega t + kx)$ la onda que se propaga en una cuerda. Esta onda al llegar al punto fijo se reflejará produciéndose en ella un cambio de fase de 180 º de forma que la elongación resultante en ese punto sea cero (Ver figura). Por tanto, la onda reflejada tendrá la ecuación $y_2(x,t) = -A \cdot \text{sen } (\omega t - kx)$. De la superposición de estas dos ondas, incidente y reflejada, resulta la onda estacionaria siguiente.

$$y(x,t) = y_1(x,t) + y_2(x,t)$$

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

Teniendo en cuenta la relación trigonométrica: sen a – sen b = 2 sen (a-b/2) cos (a+ b/2)

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

Ecuación de la onda estacionaria.

8 ONDAS ESTACIONARIAS (IV)

Sucesión de nodos del ejemplo

- Ecuación de onda Estacionaria $y(x,t) = 2A \cdot \text{sen}(kx) \cdot \cos(\omega t)$
- Esta ecuación la podemos expresar de la siguiente forma:

  $y(x,t) = A_r \cdot \cos(\omega t)$, siendo $A_r = 2A \cdot \text{sen}(kx)$ la **amplitud resultante.**

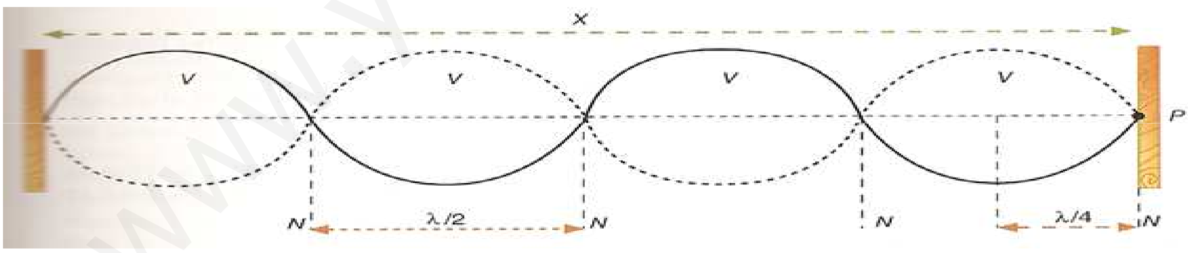
- Se trata de la ecuación de un m.a.s. Todos los puntos de la cuerda están animados de movimiento armónico sin que el perfil de la onda se desplace. La amplitud de una onda estacionaria depende exclusivamente de la localización de las partículas en el medio.
- Los puntos de máxima amplitud reciben el nombre de vientres y los puntos de amplitud nula se llaman nodos.
- En el caso de los nodos, $A_r = 0$. Por tanto, sen kx = 0 → kx = nπ.
  - $(2\pi/\lambda)x = n\pi$ ➔ $x = n(\lambda/2)$
- Si empezamos a contar la distancia desde el punto P en donde se produce la reflexión:

  n = 0 → x = 0 **primer nodo; está situado en el punto P**
  n = 1 → x = λ/2 **segundo nodo**
  n = 2 → x = λ **tercer nodo, etc.**

- **La distancia entre nodos consecutivos es media longitud de onda.**

8 ONDAS ESTACIONARIAS (V)

Sucesión de vientres del ejemplo



Formación de ondas estacionarias en una cuerda fija por los dos extremos.

- Los vientres, $A_r = 1$. Por tanto, sen kx = 1 → kx = (2n + 1) π/2.
  - $(2\pi/\lambda)x = (2n+1)\,\pi/2$ ➔ $x = (2n+1)(\lambda/4)$
- Si empezamos a contar la distancia desde el punto P en donde se produce la reflexión:

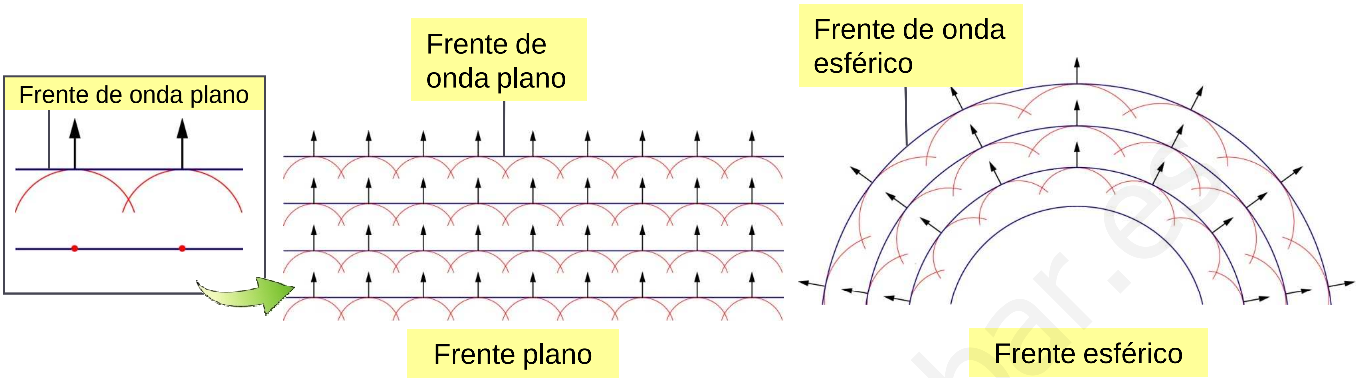
  n = 0 → x = λ/4 **primer vientre; está situado a λ/4 del punto P**
  n = 1 → x = 3λ/2 **segundo nodo**
  n = 2 → x = 5λ/2 **tercer nodo, etc.**

- **La distancia entre vientres consecutivos es media longitud de onda.**

9 PRINCIPIO DE HUYGENS. DIFRACCIÓN, REFLEXIÓN Y REFRACCIÓN.

Principio de Huygens

- Se denomina **frente de onda** a la superficie formada por todos los puntos que son alcanzados por una onda al mismo tiempo; en consecuencia, todos los puntos de un frente de onda tienen la misma fase
- Las líneas perpendiculares al frente de onda en cada punto se llaman **rayos**



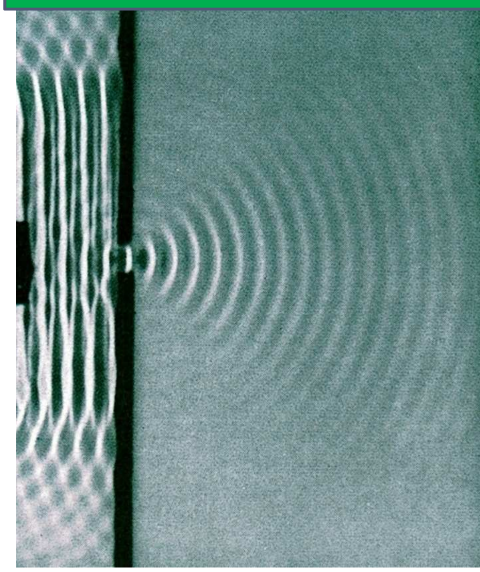
Principio de Huygens. Todo punto de un frente de onda se convierte en un centro puntual productor de ondas elementales secundarias, de igual velocidad y frecuencia que la onda inicial, cuya superficie envolvente constituye un nuevo frente de onda.

9 PRINCIPIO DE HUYGENS. DIFRACCIÓN, REFLEXIÓN Y REFRACCIÓN (II)

Difracción

- Un observador percibe la luz de un foco aunque no pueda verlo directamente, y oye los sonidos de un altavoz aunque se encuentre detrás de un obstáculo
- Este fenómeno se denomina **difracción**
- La difracción de ondas se produce cuando la onda se encuentra con un obstáculo cuyo tamaño es del mismo orden de magnitud que su longitud de onda. El obstáculo puede ser una rendija, un borde recto, un disco, una abertura, etc; un conjunto de rendijas con una anchura adecuada se llama **red de difracción**
- Puede observarse la difracción de ondas en la superficie del agua si se disponen dos estanques comunicados por una abertura; al producir una perturbación en uno de ellos, se observa que al llegar a la abertura de separación se propaga por el segundo medio, de acuerdo con el principio de Huygens

Difracción de ondas planas en la cubeta de ondas.



- **La difracción de la luz no es apreciable a simple vista** porque los obstáculos deben ser muy pequeños (del orden de la longitud de onda de la luz: 400-700 nm)

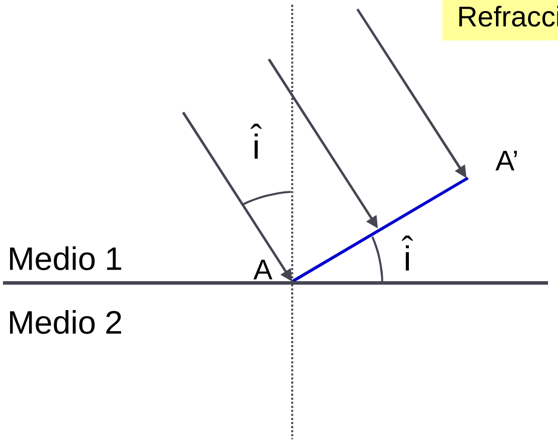
✓ **La difracción** es la desviación en la propagación rectilínea de las ondas, cuando éstas atraviesan una abertura o pasan próximas a un obstáculo.

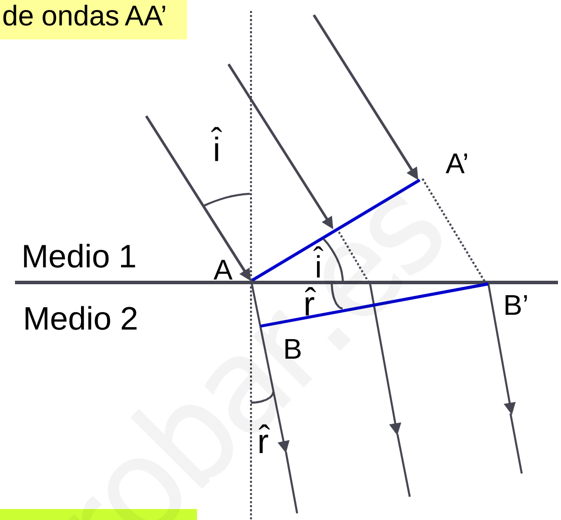
9 PRINCIPIO DE HUYGENS. DIFRACCIÓN, REFLEXIÓN Y REFRACCIÓN (III)

Refracción de ondas

- La refracción de ondas consiste en el **cambio de dirección de propagación al pasar la onda de un medio a otro diferente**. Si el medio no permite la transmisión de una onda a través de él, se dice que es un medio **opaco** para ese movimiento ondulatorio

Refracción de un frente de ondas AA'





$$t_{AB} = t_{A'B'} \Rightarrow \frac{AB}{v_2} = \frac{A'B'}{v_1}$$
$$AB = AB' \operatorname{sen} \hat{r}$$
$$A'B' = AB' \operatorname{sen} \hat{i}$$
$$\Rightarrow \frac{\operatorname{sen} \hat{i}}{v_1} = \frac{\operatorname{sen} \hat{r}}{v_2}$$

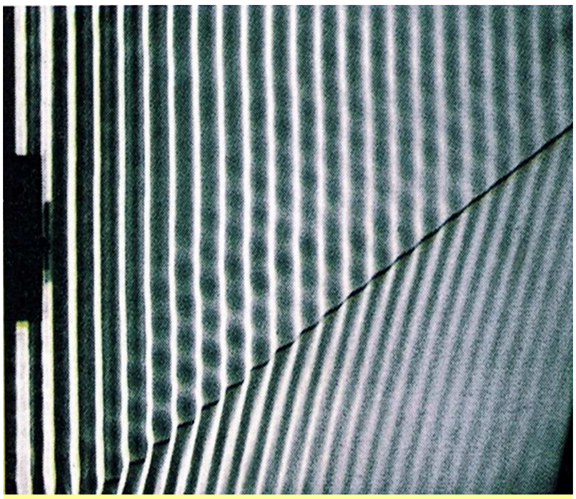
(Ley de Snell)

9 PRINCIPIO DE HUYGENS. DIFRACCIÓN, REFLEXIÓN Y REFRACCIÓN (IV)

Leyes de la refracción

- La dirección de incidencia de las ondas, la dirección de salida y la normal a la superficie de separación de ambos medios están en un mismo plano
- El ángulo de incidencia y el ángulo de refracción están relacionados por:

$$\frac{\operatorname{sen} \hat{i}}{v_1} = \frac{\operatorname{sen} \hat{r}}{v_2}$$

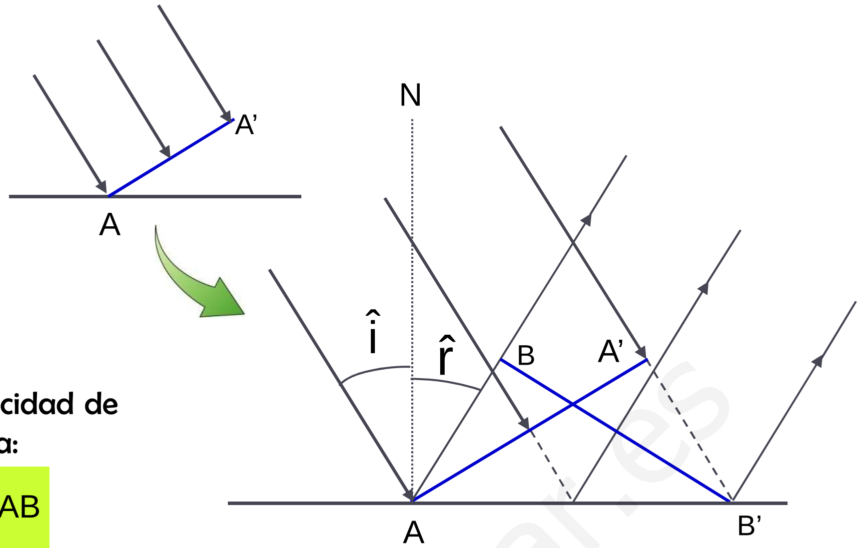


Refracción en la cubeta de ondas

9 PRINCIPIO DE HUYGENS. DIFRACCIÓN, REFLEXIÓN Y REFRACCIÓN (V)

Reflexión de ondas

- La reflexión de ondas es el cambio de la dirección de propagación al incidir la onda en el límite de separación de dos medios diferentes; después de la reflexión, la onda continua su propagación en el mismo medio



- Como $t_{A'B'} = t_{AB}$, siendo v la velocidad de propagación de las ondas, resulta:

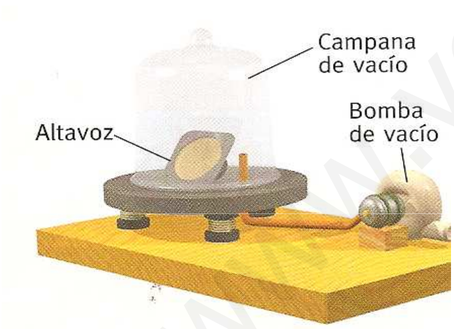
$$\frac{A'B'}{v} = \frac{AB}{v} \Rightarrow A'B' = AB$$

- Los triángulos AA'B' y AA'B son iguales, y también lo serán los ángulos $\hat{i}$ y $\hat{r}$

Leyes de la reflexión

- La dirección de incidencia de la onda, la dirección de salida y la normal a la superficie de separación de ambos medios están en un mismo plano
- El ángulo de incidencia es igual al ángulo de reflexión

10. EL SONIDO.



El sonido no se propaga en el vacío.

- La **acústica** es la ciencia que estudia la producción, la propagación y la recepción del sonido.

- **Producción del sonido:** Cuando un **foco emisor**, como una campana o una cuerda vocal, vibra, las **vibraciones se transmiten a las partículas del medio contiguas** al foco. Las partículas del medio se separan y aproximan periódicamente; se producen así comprensiones y dilataciones que se propagan a través del medio. De esta manera se origina una **onda sonora**.

- **Propagación del sonido:** Las ondas sonoras necesitan un medio en el que propagarse, por lo que son **ondas mecánicas**. Se propagan en la misma dirección en la que tienen lugar las comprensiones y dilataciones del medio: son **ondas longitudinales**.

Fig. 3.1. *El sonido se produce por la vibración del cuerpo sonoro.*

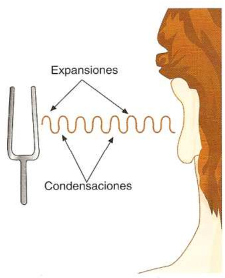


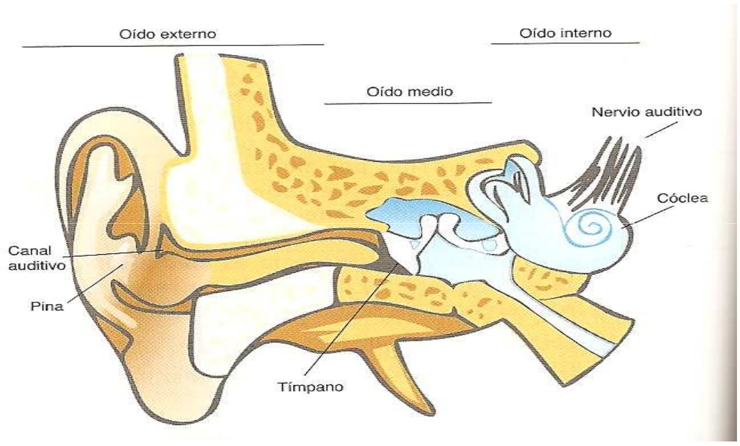
Fig. 3.5. *Propagación del sonido desde un diapasón que vibra.*

La velocidad de propagación de las ondas sonoras depende de la distancia entre las partículas del medio; por tanto, es en general mayor en los sólidos que en los líquidos, y en estos, a su vez, mayor que en los gases.

El sonido está producido por las vibraciones de un foco emisor.

Las ondas sonoras son mecánicas y longitudinales.

10. EL SONIDO (II)

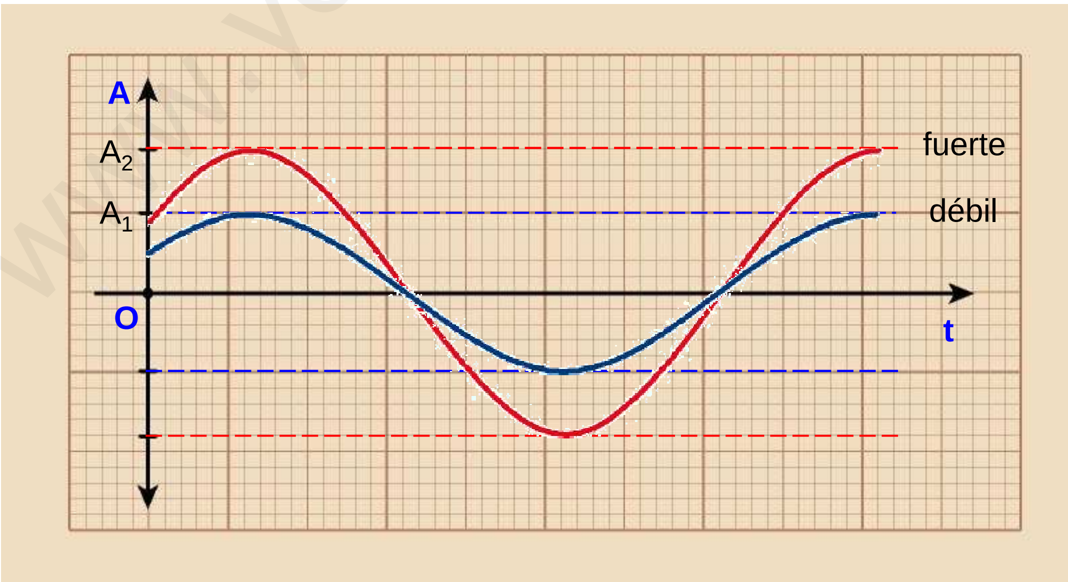


- **Recepción del sonido:** Cuando una onda sonora alcanza el oído, la vibración que produce en la membrana auditiva provoca una reacción en el nervio auditivo que da lugar al proceso de audición. El **sistema nervioso humano** produce la sensación auditiva para frecuencias comprendidas entre 16 y 20.000 Hz. Por encima de 20 KHz se encuentran los ultrasonidos.

- La sensación auditiva está relacionada con el fenómeno de la **resonancia**. Todo cuerpo tiene una frecuencia natural o propia de vibración; cuando un objeto es alcanzado por una onda de frecuencia igual a la frecuencia propia del cuerpo, este comienza a vibrar; y se dice que el cuerpo y el sonido están en resonancia. El **oído humano** contiene fibras de diferente longitud con frecuencias propias entre 16 Hz y 20 KHz.

10.1 CUALIDADES DEL SONIDO.

Intensidad sonora

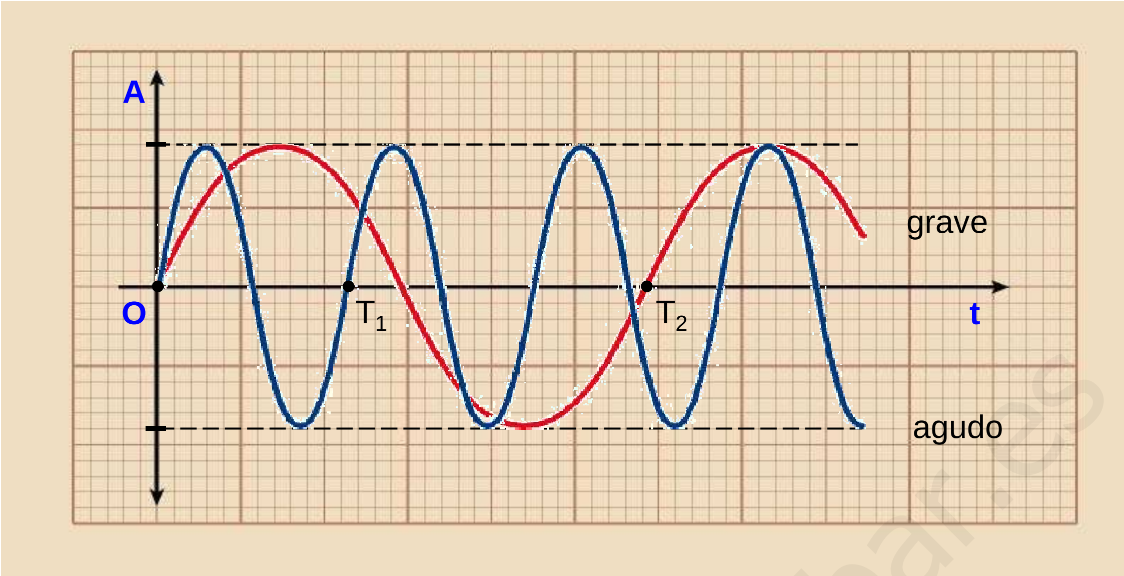


- **La intensidad sonora** es la cantidad de sensación auditiva que produce un sonido
- Según su **sonoridad**, los sonidos se perciben como **fuertes o débiles**

Para una misma frecuencia, a mayor intensidad, mayor amplitud de onda sonora

10.1 CUALIDADES DEL SONIDO (II)

Tono

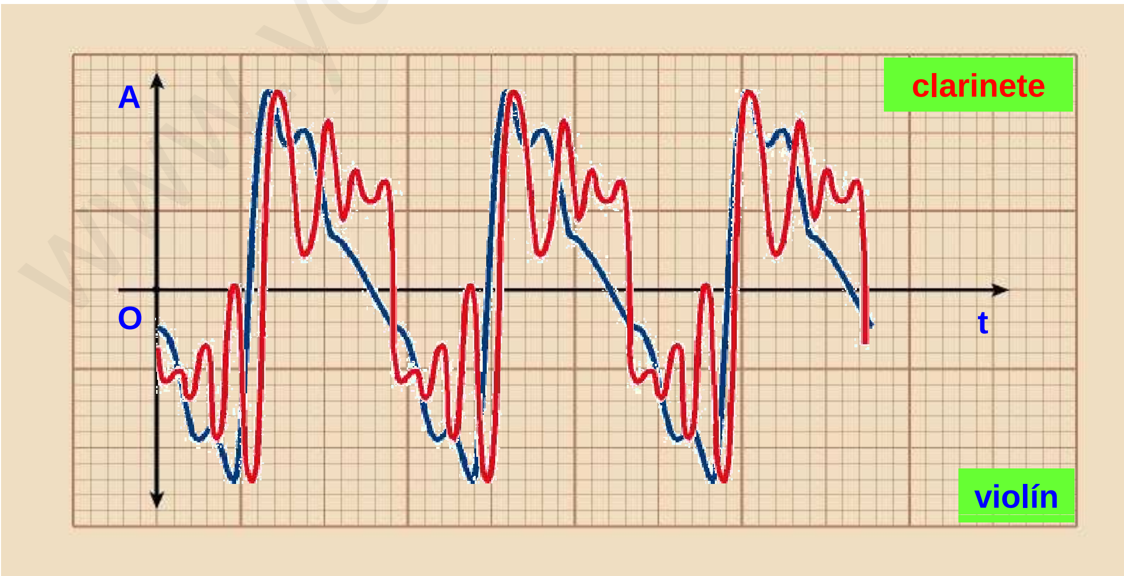


- Permite distinguir entre sonidos **graves y agudos**, y está relacionado con la frecuencia
- Los de **mayor frecuencia** se perciben como **agudos** , y los de menor, como **graves**

La frecuencia es igual al número de compresiones y dilataciones que tienen lugar en un punto del medio cada segundo

10.1 CUALIDADES DEL SONIDO (III)

Timbre



- Permite al oído humano **distinguir entre dos notas iguales** (misma intensidad y tono) emitidas por distintos focos sonoros (Ej. Distintos instrumentos).
- **Ningún foco emisor, ejecuta una vibración armónica pura**, sino una vibración armónica de frecuencia determinada (ν) acompañada de un conjunto de vibraciones de frecuencias múltiplos de la fundamental, 2 ν, 3 ν, ... denominados **armónicos**

10.1 CUALIDADES DEL SONIDO (IV)

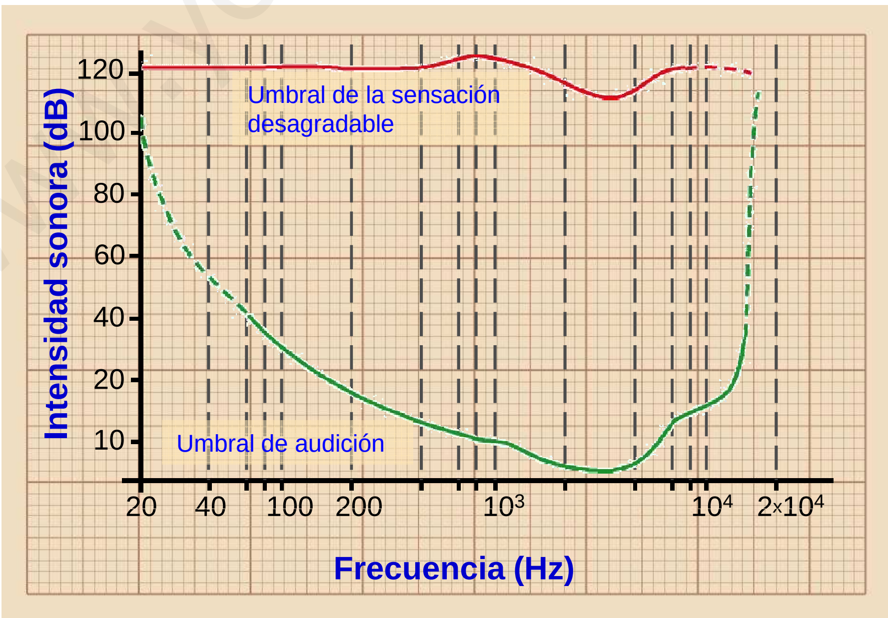
Sensación sonora. Escala decibélica

- La **intensidad sonora** depende de la onda y de su frecuencia. Se mide en dB en la escala decibélica (escala logarítmica)
- El nivel de intensidad sonora β se define como: $\beta = \log \frac{I}{I_0} \Rightarrow \beta_{db} = 10 \log \frac{I}{I_0}$ $I_o = 10^{-12}$ Intensidad umbral

Intensidad sonora de algunos sonidos habituales			
Fuente sonora	Intensidad sonora en W m^{-2}		Intensidad sonora en dB
	10^{-12}	Umbral de audición	0
Respiración normal	10^{-11}	Apenas audible	10
Murmullo de hojas	10^{-10}		20
Susurros a 5 m	10^{-9}		30
Casa tranquila	10^{-8}		40
Oficina tranquila	10^{-7}		50
Voz humana a 1 m	10^{-6}		60
Calle con tráfico intenso	10^{-5}		70
Fábrica	10^{-4}		80
Ferrocarril	10^{-2}		100
Grandes altavoces a 2 m	10^{0}	Umbral de dolor	120
Despegue de un reactor	10^{2}		140

10.1 CUALIDADES DEL SONIDO (V)

Contaminación sonora



- **El umbral de audición** es la intensidad sonora mínima de los sonidos audibles
- **El umbral de dolor** es la intensidad por encima de la cual la audición se torna dolorosa
- **Medidas para prevenir** la contaminación sonora: preventivas, paliativas y educativas

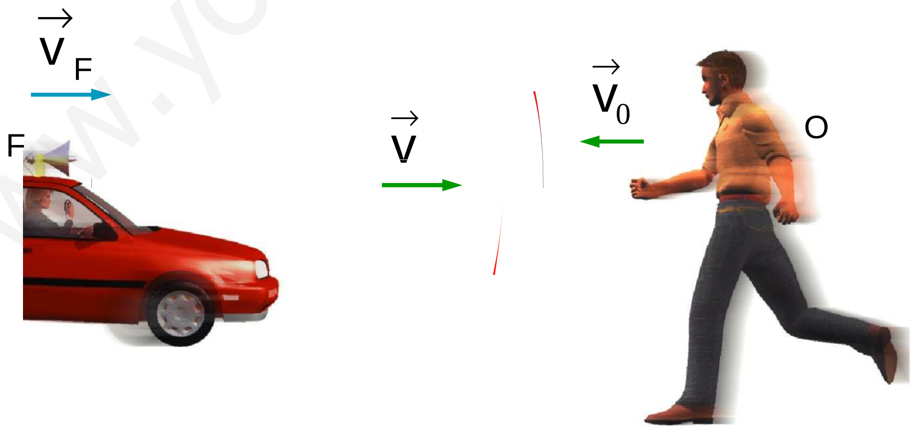
11 EFECTO DOPPLER.

Efecto Doppler

- Un sonido emitido por un foco (como el silbato de un tren o la bocina de un automóvil) que **se acerca al observador** que escucha **se percibe más agudo** (de mayor frecuencia) que cuando el foco está en reposo
- Y al contrario, **cuando el foco se aleja, se oye un sonido más grave** (de menor frecuencia)
- Este fenómeno fue descrito por primera vez por Christian Doppler en 1843

El efecto Doppler es un fenómeno ondulatorio que se produce cuando hay un movimiento relativo entre un foco emisor de ondas y un observador. La frecuencia percibida por el observador es distinta de la frecuencia emitida por el foco. (Debido a que el tiempo que transcurre entre el principio y fin de la onda es diferente en receptor y emisor a causa de la movilidad de los focos)

11 EFECTO DOPPLER (II)



- Si **tanto el observador como el foco se mueven**, con velocidades respectivas v_O y v_F, la frecuencia medida por el observador cuando se acercan el uno y al otro es:

$$f' = f\left(\frac{v + v_0}{v - v_F}\right)$$

- Los signos de las velocidades corresponden a foco y observador acercándose, como en la figura; si uno de ellos se aleja del otro, bastará cambiar el signo de su velocidad.