Curso 2023/24

FUNDAMENTOS FÍSICOS PARA INGENIERÍA

GRADO EN INGENIERÍA EN INTELIGENCIA ARTIFICIAL

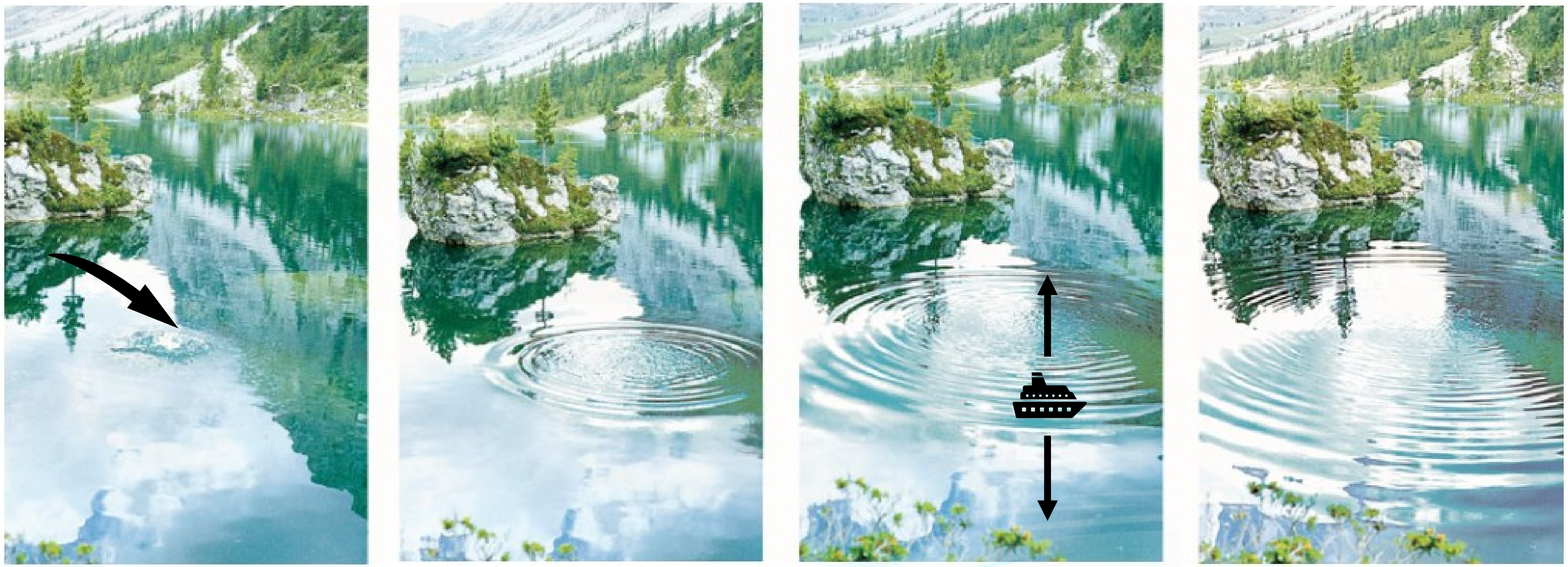
TEMA 6. MOVIMIENTO ONDULATORIO

Manuel Gutiérrez Ramírez

Departamento de Física, Ingeniería de Sistemas y Teoría de la Señal
Universidad de Alicante

Contenidos

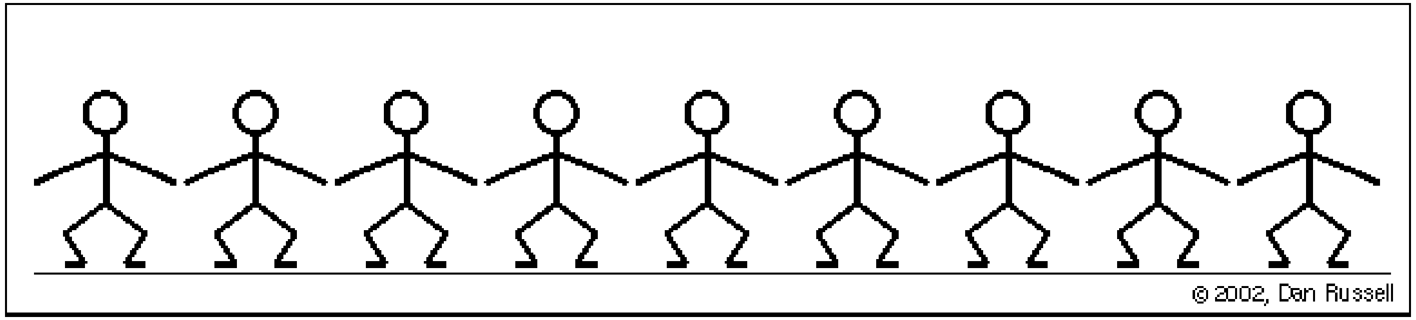
6.1. Introducción



La energía se transfiere en la distancia, pero la materia no

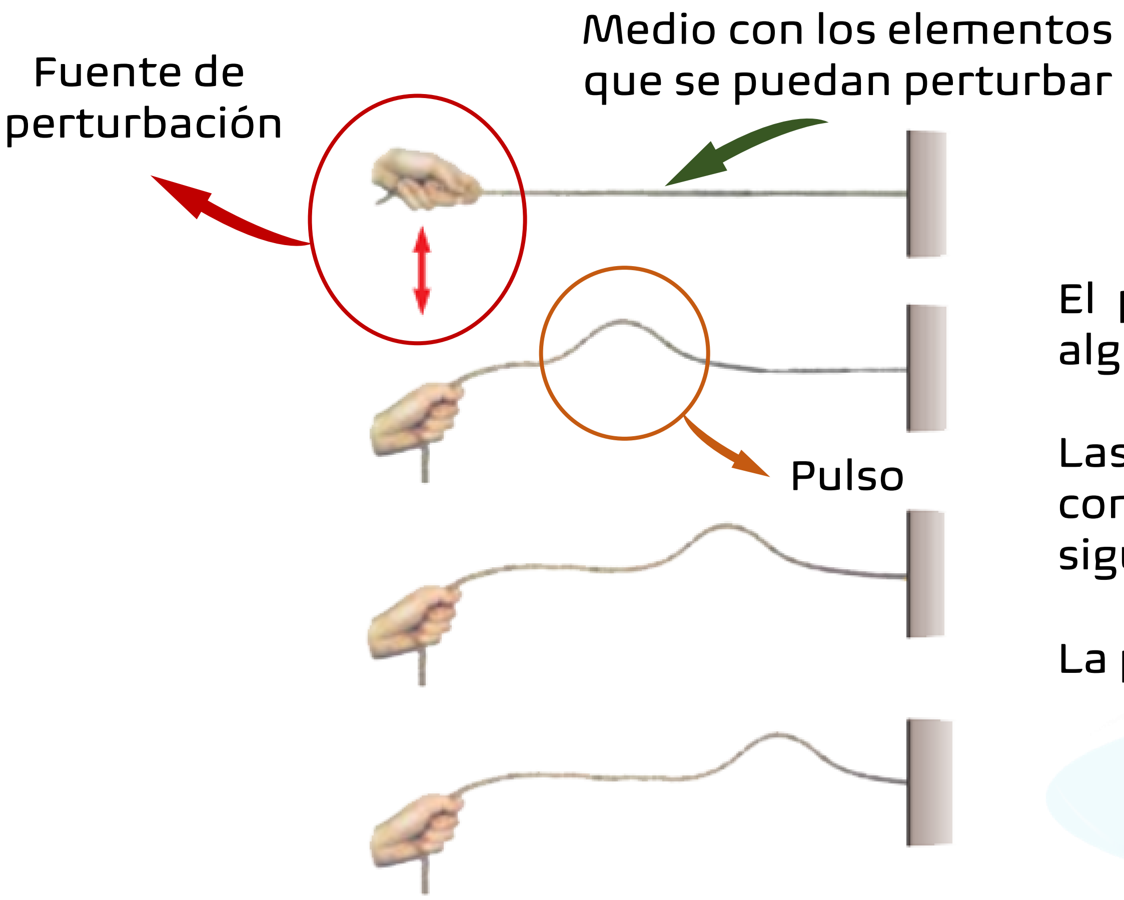
6.1. Introducción

Onda: perturbación que se propaga en el tiempo y en el espacio sin transferencia de materia, pero transportando energía



Contenidos

6.2. Propagación de las ondas



El pulso se inicia por una fuerza externa que actúa sobre alguna parte del cuerpo y lo deforma.

Las fuerzas restauradoras elásticas dentro del cuerpo comunican esta alteración inicial de una parte del cuerpo a la siguiente

La perturbación se propaga gradualmente a lo largo del medio

6.2. Propagación de las ondas

Onda periódica ⇛ Su origen es una perturbación continua y oscilante ⇛ La fuente es una oscilación

Si la fuente oscila con MAS y el medio es elástico

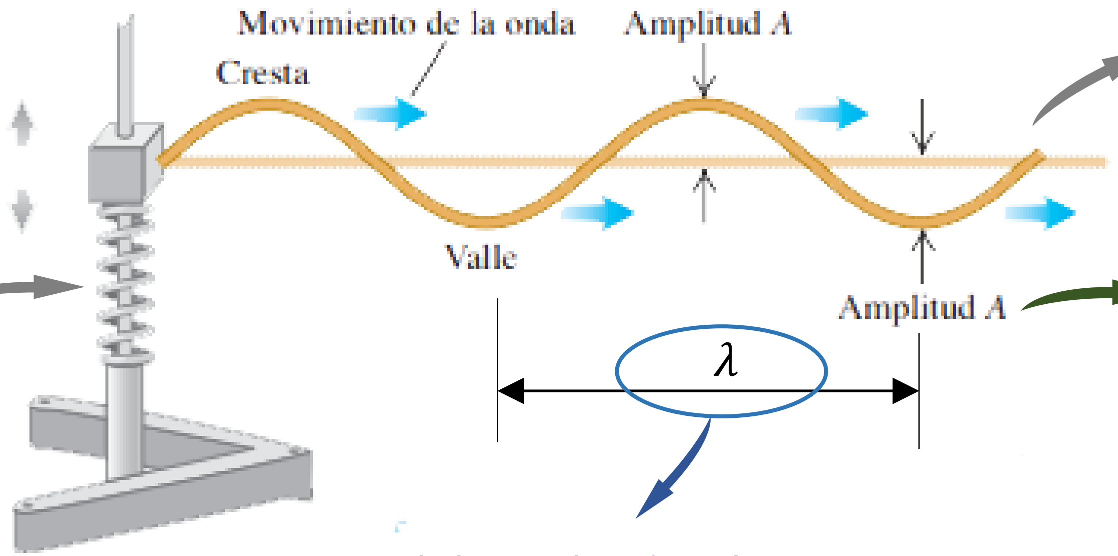
La forma de la onda será sinusoidal tanto en el espacio como en el tiempo ⇛ Onda armónica

La onda tendrá la forma de un sen o cos en función de la posición

El movimiento de un pequeño segmento del medio será un MAS

6.2. Propagación de las ondas

Muelle con MAS
Genera una onda armónica



Cada partícula de la cuerda describe el mismo MAS que el muelle

La amplitud A de la onda es la amplitud del MAS del muelle

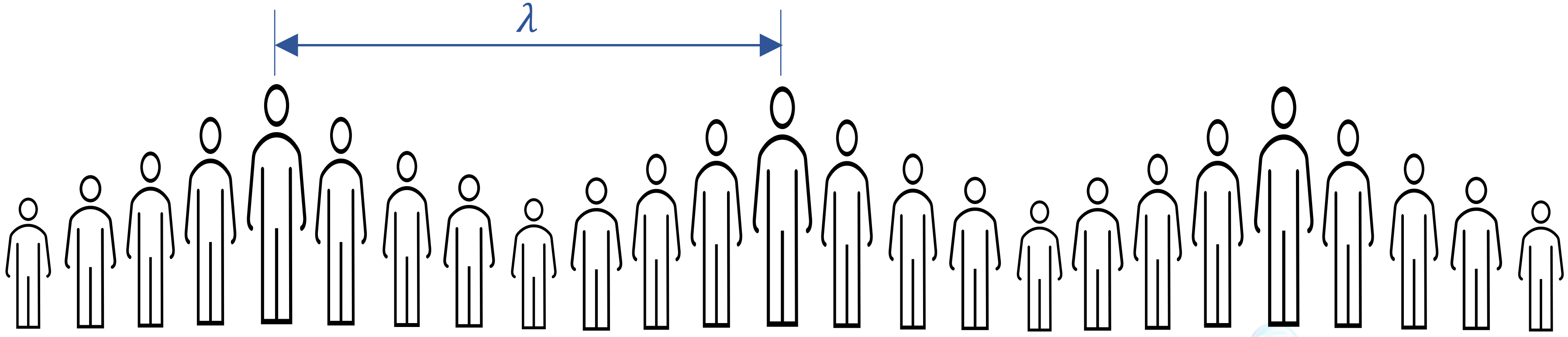
Longitud de onda ≫ distancia entre un punto y el siguiente que repite forma

La onda avanza una λ en cada periodo T con una velocidad constate v ≫ $\boxed{v = \frac{\lambda}{T} = \lambda f}$

No confundir la velocidad de la onda v con la velocidad de una partícula del medio por el que se propaga dicha onda

6.2. Propagación de las ondas

"Ola" en un estadio → se desplaza el gesto, pero no las personas



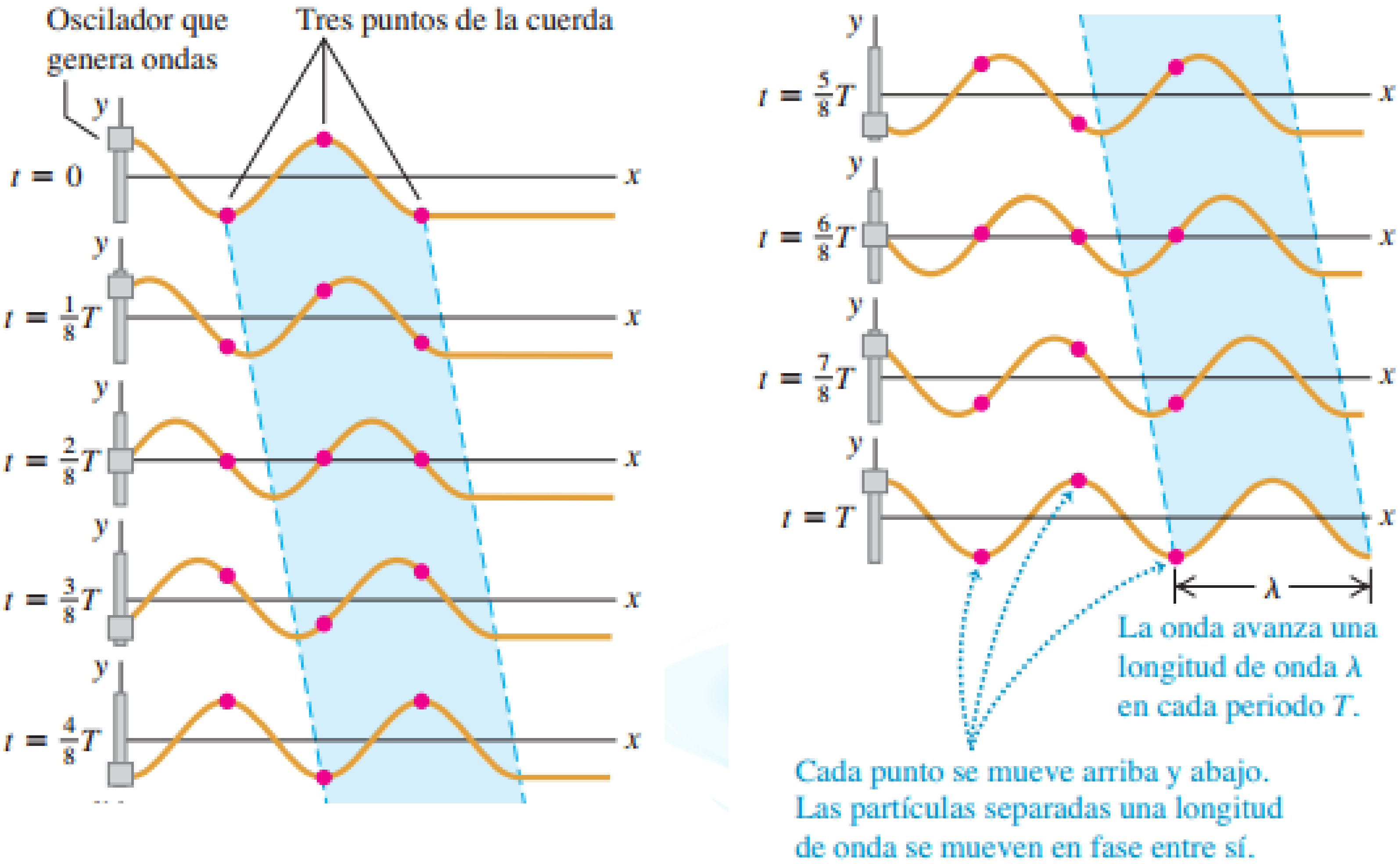
λ : Periodo de repetición espacial

Distancia entre dos personas levantadas, o entre dos…

T : Periodo de repetición temporal

Tiempo que tarda una persona en volver a levantarse, o en volver a…

6.2. Propagación de las ondas



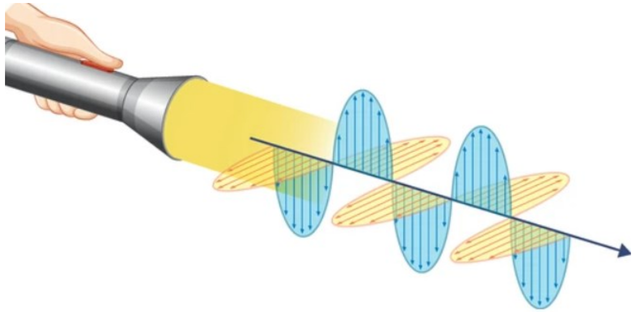
Contenidos

6.3. Tipos de ondas

- Según el medio en el que se propagan:

Mecánicas: perturbación en un medio material
Ej. Ondas en el agua, ondas sísmicas, de sonido.

Electromagnéticas: no requieren un medio material
Ej. Luz, rayos X, ondas de radio



Formación de una onda mecánica requiere:

Una fuente de perturbación (*Ej. piedra que cae al agua, dedo pulsando una cuerda de guitarra*)

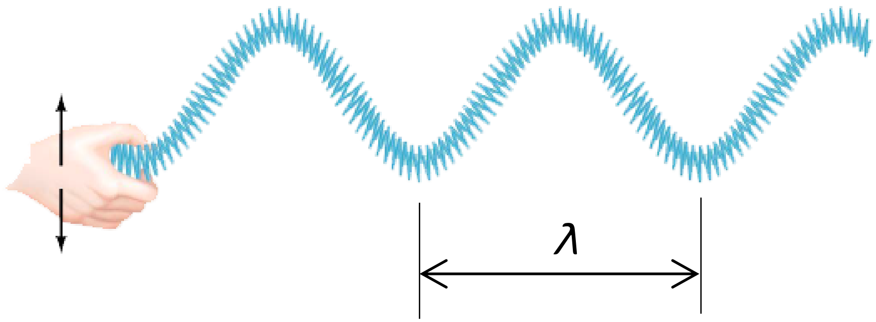
Un medio que pueda ser perturbado (*agua, cuerda de la guitarra*)

Mecanismo físico de interacción entre partículas del medio (*fuerzas de atracción-repulsión*)

6.3. Tipos de ondas

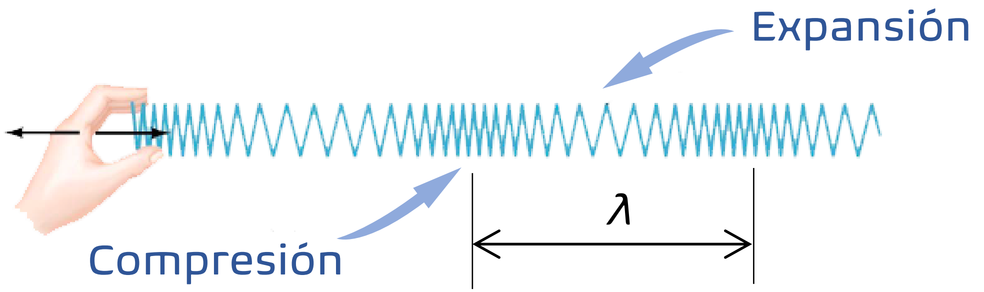
- Según la dirección del desplazamiento de las partículas del medio respecto de la dirección de propagación:

Transversales



Las partículas del medio se mueven perpendiculares a la dirección de propagación de la onda

Longitudinales



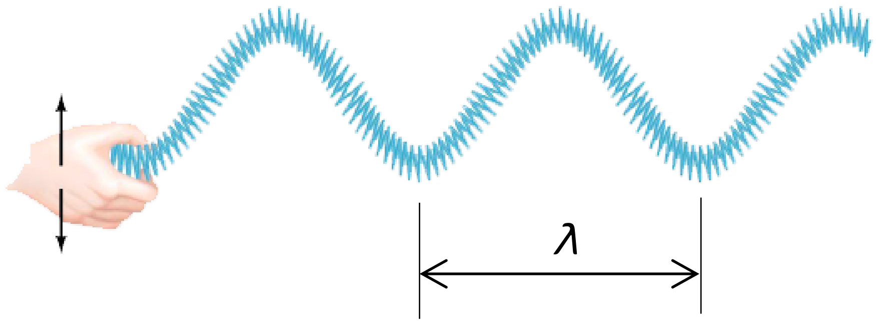
Las partículas del medio vibran a lo largo de la dirección de la propagación de la onda

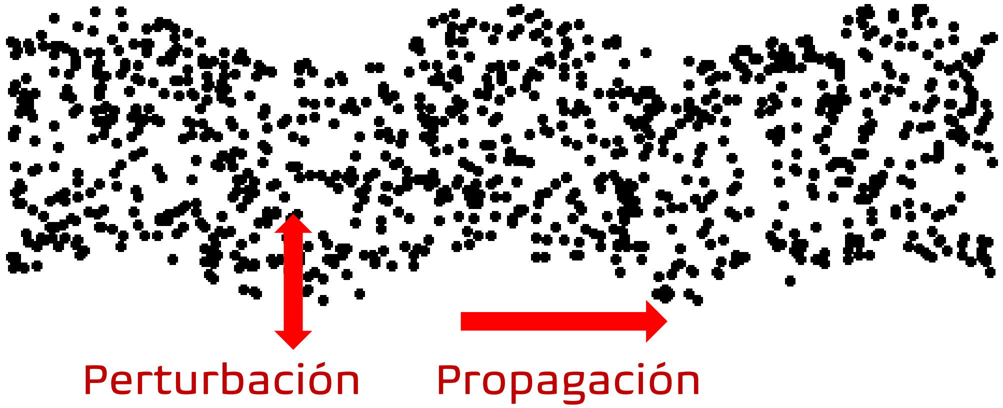
Las compresiones y expansiones corresponden a las crestas y valles de una onda transversal

6.3. Tipos de ondas

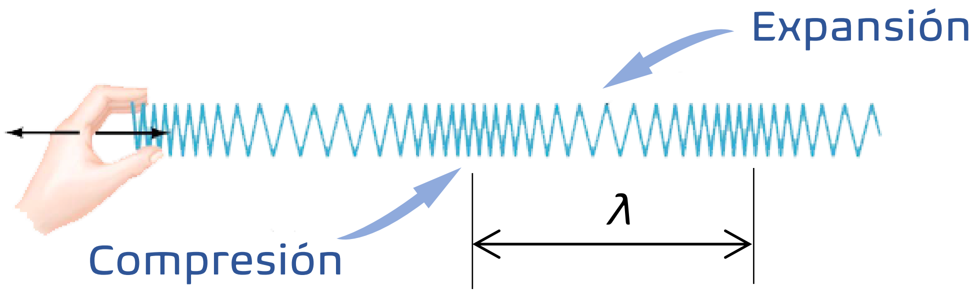
- Según la dirección del desplazamiento de las partículas del medio respecto de la dirección de propagación:

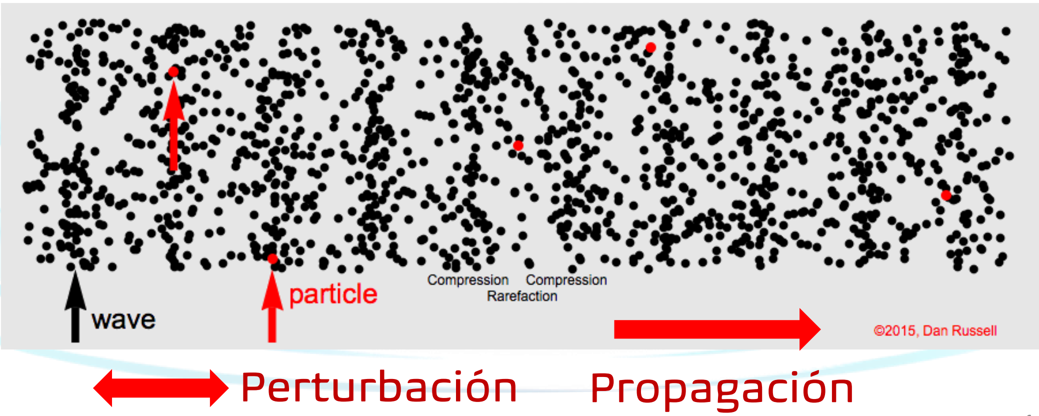
Transversales





Longitudinales

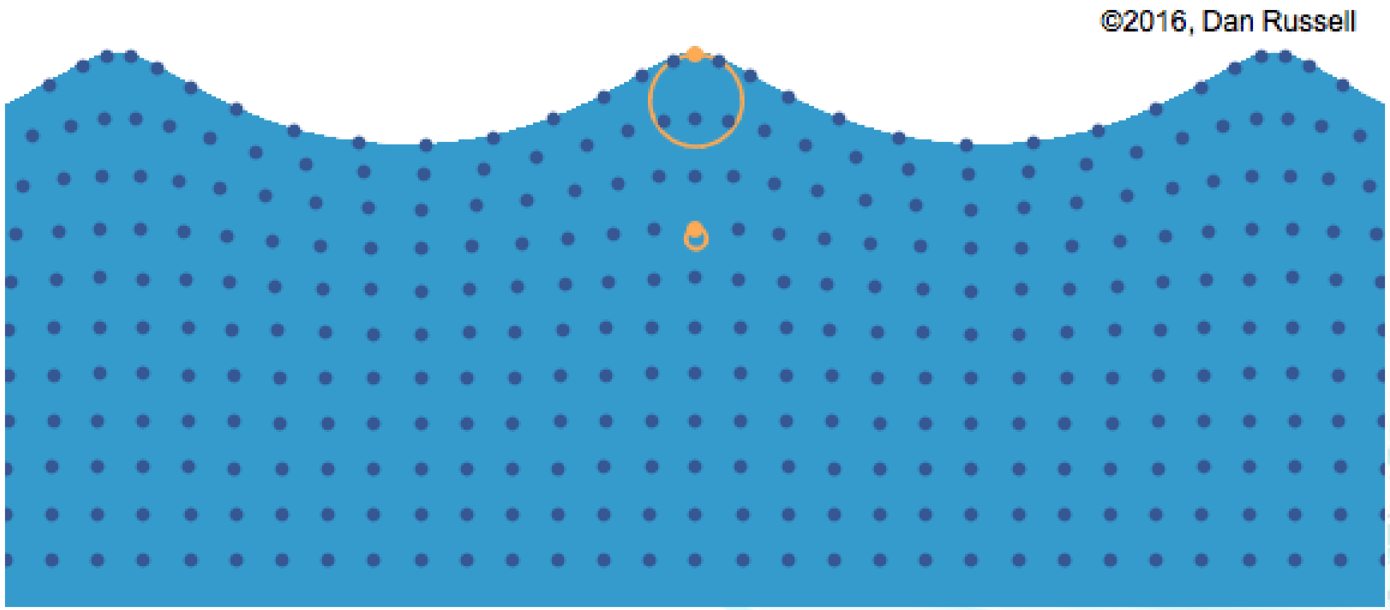




6.3. Tipos de ondas

- Según la dirección del desplazamiento de las partículas del medio respecto de la dirección de propagación:

Onda con componente transversal y longitudinal

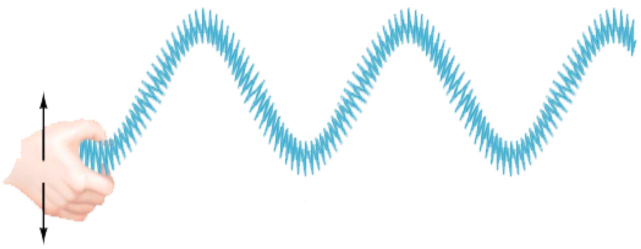


6.3. Tipos de ondas

- Según la forma del frente de ondas:

Lugar geométrico que une todos los puntos que, en un instante dado, se encuentran en idéntico estado de vibración (tienen igual fase). Están separados por una longitud de onda

Unidimensionales

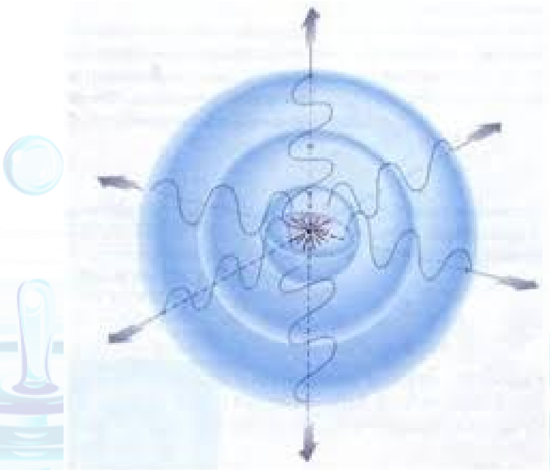


Los frentes de onda son líneas rectas paralelas entre sí

Bidimensionales

Los frentes de onda son circunferencias concéntricas con la fuente

Tridimensionales



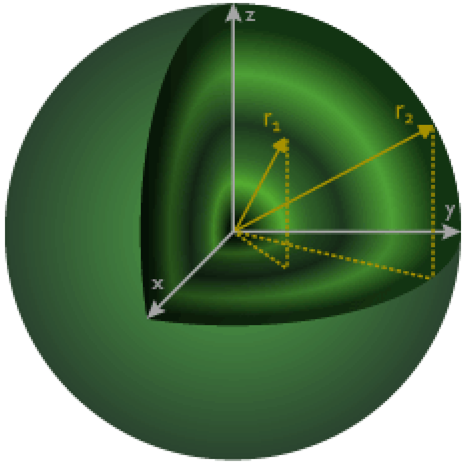
Los frentes de ondas son esferas concéntricas con la fuente

6.3. Tipos de ondas

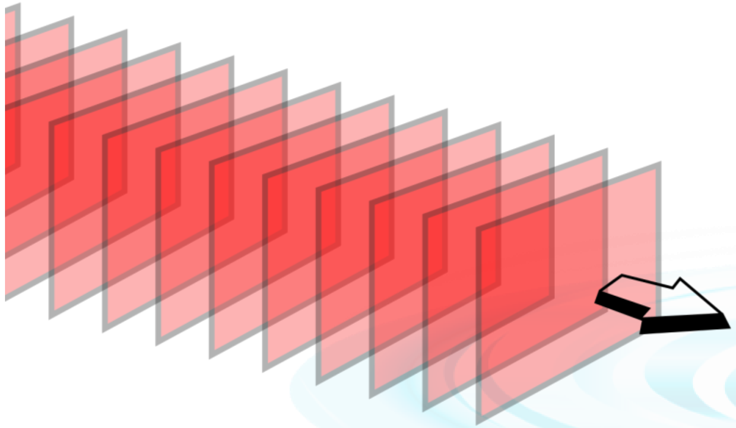
- Según la forma del frente de ondas:

Lugar geométrico que une todos los puntos que, en un instante dado, se encuentran en idéntico estado de vibración (tienen igual fase)

Tridimensionales



Frente de ondas esférico



Frente de ondas plano

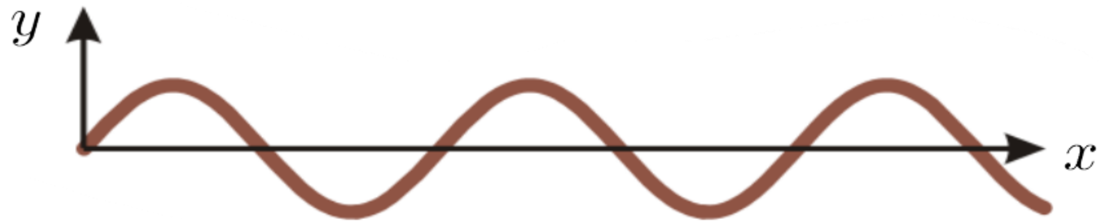
Frente de ondas cilíndrico

Contenidos

6.4. Ecuación de onda armónica

- En un instante fijo t_o hay una oscilación espacial:

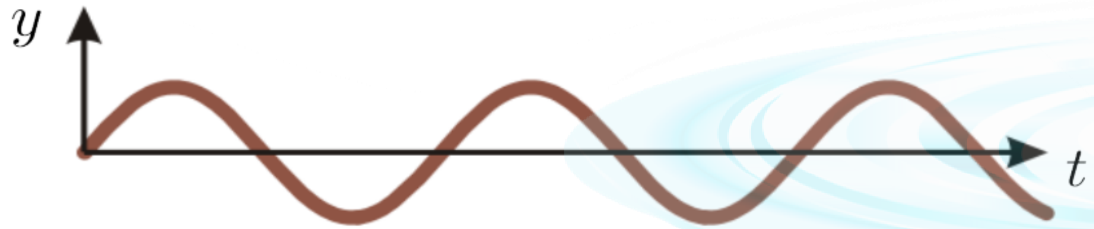
$t = t_o$



$\rightarrow y(x, t_o)$

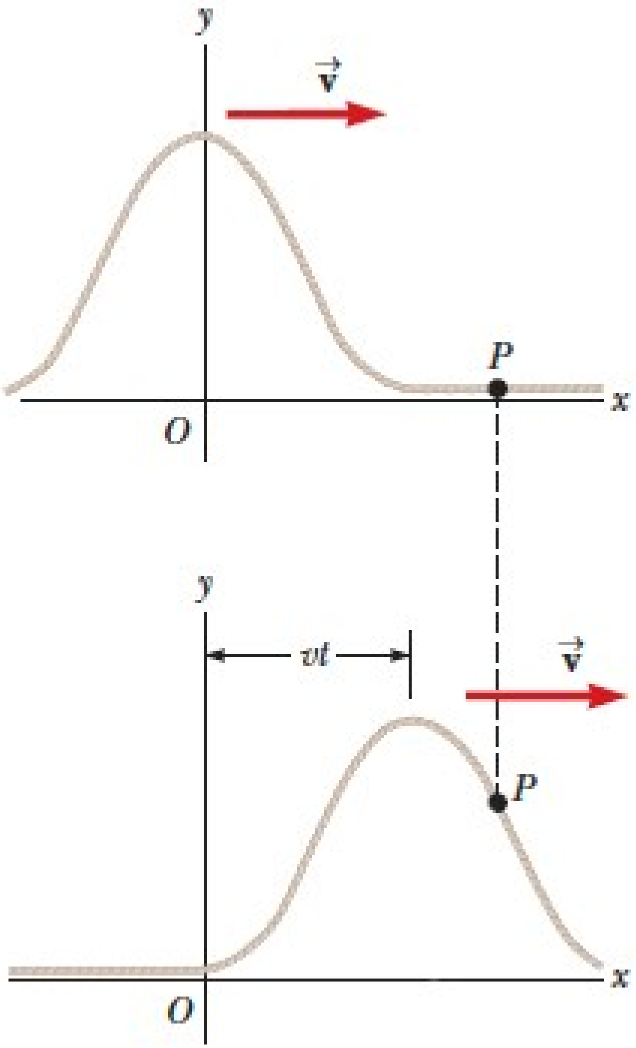
- En un punto fijo x_o hay una oscilación en el tiempo:

$x = x_o$



$\rightarrow y(x_o, t)$

6.4. Ecuación de onda armónica



Para tiempo $t = 0$ ⮞ $y(x,0) = f(x)$

Velocidad del pulso ⮞ $v = \dfrac{x}{t}$ | La forma del pulso no cambia en el tiempo

Para tiempo t ⮞ $y(x,t)$ ⮞ $y(x,t) = f(x - vt, 0)$

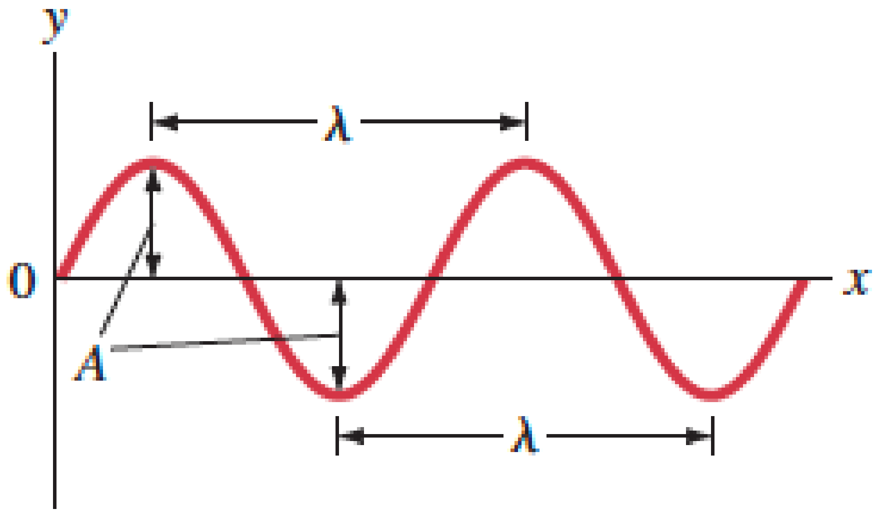
Se puede representar la posición transversal y para todas las posiciones y tiempos, medida en un marco estacionario con el origen en O:

$$y(x,t) = f(x - vt)$$

Si el pulso se mueve hacia la izquierda ⮞ $y(x,t) = f(x + vt)$

$y(x,t)$ ⮞ Función de onda

6.4. Ecuación de onda armónica



$y(x,0) = A\text{sen}(ax)$ | a: constante a determinar

$y(0{,}0) = A\text{sen}(a \cdot 0) = 0$

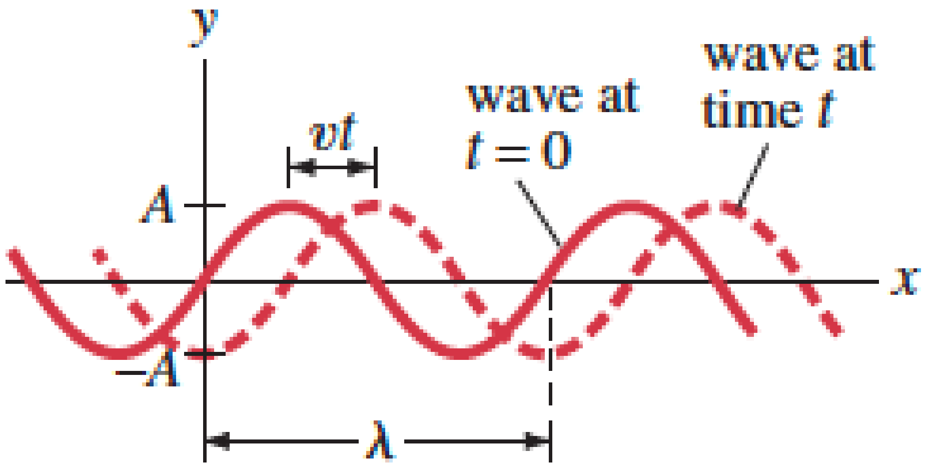
Siguiente valor de x para el que $y(x,0) = 0$ ⪢ $x = \frac{\lambda}{2}$

$y\left(\frac{\lambda}{2}, 0\right) = A\text{sen}\left(a\frac{\lambda}{2}\right) = 0$ ⪢ $a\frac{\lambda}{2} = \pi$ ⪢ $a = \frac{2\pi}{\lambda}$

Para $t = 0$ ⪢ $y(x,0) = A\text{sen}\left(\frac{2\pi}{\lambda}x\right)$

6.4. Ecuación de onda armónica

Para un tiempo t ⮞ La onda se ha movido hacia la derecha una distancia vt



$$y(x,t) = A\mathrm{sen}\left[\frac{2\pi}{\lambda}(x - vt)\right]$$

Onda viaja hacia la derecha

$$v = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{\lambda}{T} = \lambda f \quad ⮞ \quad y(x,t) = A\mathrm{sen}\left[2\pi\left(\frac{x}{\lambda} - \frac{t}{T}\right)\right]$$

Si la onda viaja hacia la izquierda ⮞ $y(x,t) = A\mathrm{sen}\left[2\pi\left(\frac{x}{\lambda} + \frac{t}{T}\right)\right]$

6.4. Ecuación de onda armónica

Número de onda $\Rightarrow$ $k = \dfrac{2\pi}{\lambda} \quad \left(\dfrac{\mathrm{rad}}{\mathrm{m}}\right)$

$v = \lambda f \Rightarrow \omega = 2\pi f = 2\pi \dfrac{v}{\lambda} \Rightarrow \omega = vk$

$$y(x,t) = A\mathrm{sen}\left[2\pi\left(\frac{x}{\lambda} \mp \frac{t}{T}\right)\right] \longrightarrow \boxed{y(x,t) = A\mathrm{sen}(kx \mp \omega t + \varphi)}$$

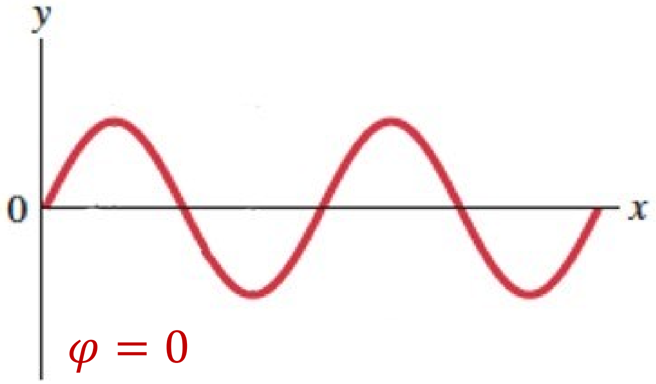
φ : Constante de fase

$(kx \mp \omega t + \varphi)$: fase

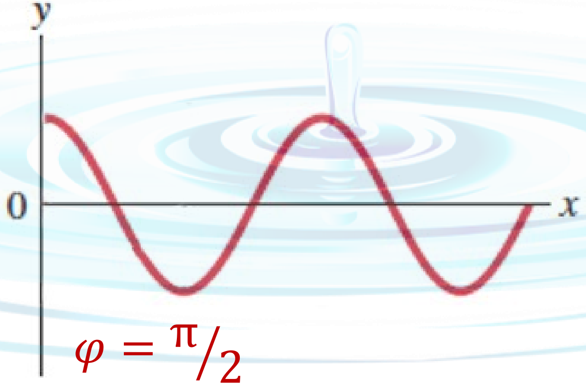
Signo $-$: onda viaja en sentido de x creciente

Signo $+$: onda viaja en sentido de x decreciente

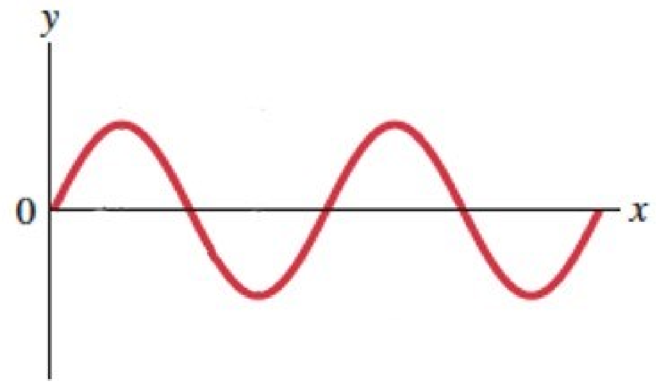
$$y(x,t) = A\mathrm{sen}(kx - \omega t)$$



$$y(x,t) = A\mathrm{sen}\left(kx - \omega t + {}^{\pi}/_{2}\right) = A\cos(kx - \omega t)$$



6.4. Ecuación de onda armónica



Onda viaja hacia la derecha

$$y(x,t) = A\mathrm{sen}(kx - \omega t + \varphi)$$

Velocidad y aceleración de cualquier punto P del medio (la coordenada x permanece constante)

$$v_y = \left.\frac{dy}{dt}\right|_{x=const} = -A\omega\cos(kx - \omega t + \varphi) \quad v_{y,max} = A\omega$$

$$a_y = \left.\frac{dv_y}{dt}\right|_{x=const} = -A\omega^2\mathrm{sen}(kx - \omega t + \varphi) \quad a_{y,max} = A\omega^2$$

6.4. Ecuación de onda armónica

El 26 de diciembre de 2004 ocurrió un intenso terremoto en las costas de Sumatra, y desencadenó un tsunami con olas inmensas. Gracias a los satélites que observaron esas olas desde el espacio, se pudo establecer que había 800 km de la cresta de una ola a la siguiente, y que el tiempo entre una y otra fue de 1.0 hora. ¿Cuál fue la velocidad de esas olas en m/s y en km/h?

La distancia entre las crestas de las olas ➤ λ

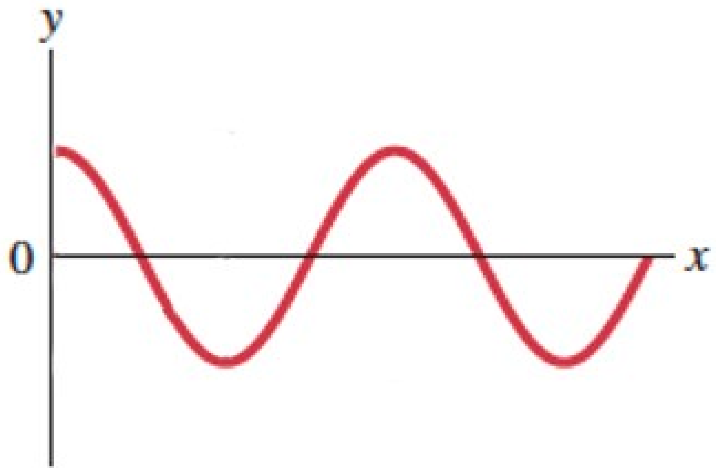
$$v = \lambda f \quad ➤ \quad v = \frac{\lambda}{T} = \frac{800}{1.0} = 800 \ \mathrm{km/h} = 220 \, \mathrm{m/s}$$

6.4. Ecuación de onda armónica

Una persona mueve una cuerda cuyo extremo esta unido a una pared hacia arriba y abajo senoidalmente, con una frecuencia de 2.00 Hz y una amplitud de 0.075 m. La velocidad de la onda es 12.0 m/s. En el instante inicial, el extremo sujeto por la persona tiene desplazamiento positivo máximo y está en reposo. Suponer que no hay rebotes de las ondas generadas.

a) Calcular la amplitud, la frecuencia angular, el periodo, la longitud de onda y el número de onda.
b) Obtener una función de onda que describa el movimiento.
c) Escribir las ecuaciones para el desplazamiento, en función del tiempo, del extremo que sujeta la persona y de un punto a 3.00 m de ese extremo.

a)



$$T = {}^{1}/_{f} = 0.500\ s$$

$$v = \lambda f \quad \gg \quad \lambda = {}^{v}/_{f} = {}^{12.0}/_{2.00} = 6.00\ \text{m}$$

$$k = {}^{2\pi}/_{\lambda} = {}^{2\pi}/_{6.00} = 1.05\ \text{rad/m}$$

6.4. Ecuación de onda armónica

Una persona mueve una cuerda cuyo extremo esta unido a una pared hacia arriba y abajo senoidalmente, con una frecuencia de 2.00 Hz y una amplitud de 0.075 m. La velocidad de la onda es 12.0 m/s. En el instante inicial, el extremo sujeto por la persona tiene desplazamiento positivo máximo y está en reposo. Suponer que no hay rebotes de las ondas generadas.

a) Calcular la amplitud, la frecuencia angular, el periodo, la longitud de onda y el número de onda.
b) Obtener una función de onda que describa el movimiento.
c) Escribir las ecuaciones para el desplazamiento, en función del tiempo, del extremo que sujeta la persona y de un punto a 3.00 m de ese extremo.

b) Tomamos como sentido positivo de x aquel en que se propaga la onda

$$y(x,t) = A\cos\left[2\pi\left(\frac{x}{\lambda} - \frac{t}{T}\right)\right] = 0.075\cos\left[2\pi\left(\frac{x}{6.00} - \frac{t}{0.500}\right)\right] = 0.075\cos(1.05x - 12.6t)$$

6.4. Ecuación de onda armónica

Una persona mueve una cuerda cuyo extremo esta unido a una pared hacia arriba y abajo senoidalmente, con una frecuencia de 2.00 Hz y una amplitud de 0.075 m. La velocidad de la onda es 12.0 m/s. En el instante inicial, el extremo sujeto por la persona tiene desplazamiento positivo máximo y está en reposo. Suponer que no hay rebotes de las ondas generadas.

a) Calcular la amplitud, la frecuencia angular, el periodo, la longitud de onda y el número de onda.
b) Obtener una función de onda que describa el movimiento.
c) Escribir las ecuaciones para el desplazamiento, en función del tiempo, del extremo que sujeta la persona y de un punto a 3.00 m de ese extremo.

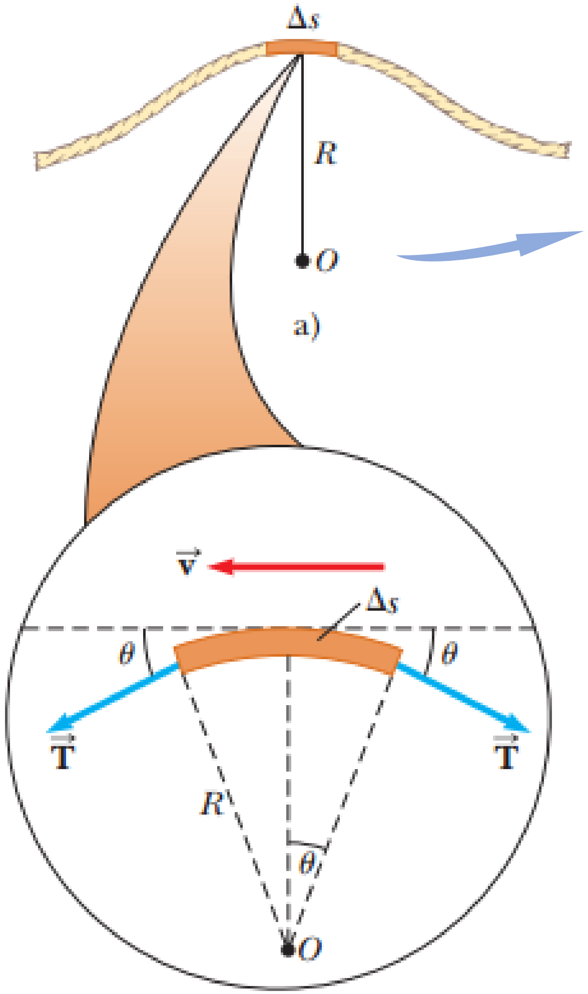
c) $$y(0,t) = 0.075\cos(-12.6t) = 0.075\cos(12.6t)$$

$$y(3.00,t) = 0.075\cos\left[2\pi\left(\frac{3.00}{6.00} - \frac{t}{0.500}\right)\right] = 0.075\cos(\pi - 12.6t) = -0.075\cos(12.6t)$$

Contenidos

6.5. Velocidad de las ondas: transversales y longitudinales

Velocidad de ondas transversales



Sistema de referencia inercial diferente que se mueve junto con el pulso con la misma v ⮞ El pulso está en reposo en este sistema de referencia inercial

Fuerza radial total sobre el elemento Δs ⮞ $F_r = 2T\mathrm{sen}(\theta) \approx 2T\theta$

Masa del elemento Δs ⮞ $m = \mu\Delta s = 2\mu R\theta$

Densidad lineal de masa

$$2\theta = \frac{\Delta s}{R}$$

$$F_r = ma = m\frac{v^2}{R} \quad ⮞ \quad 2T\theta = \frac{2\mu R\theta v^2}{R} \quad ⮞ \quad \boxed{v = \sqrt{\frac{T}{\mu}}}$$

6.5. Velocidad de las ondas: transversales y longitudinales

Velocidad de ondas longitudinales

La velocidad de una onda longitudinal tiene una forma similar a la de una onda transversal en una cuerda

$$v = \sqrt{Factor\ que\ vuelve\ el\ sistema\ al\ equilibrio / Factor\ de\ inercia\ que\ resiste\ la\ vuelta\ al\ equilibrio}$$

Para una onda longitudinal que viaja por una varilla sólida larga $\boxed{v = \sqrt{E/\rho}}$

E: Modulo de Young del material
ρ: densidad del material

Para una onda longitudinal que viaja un líquido o gas $\boxed{v = \sqrt{B/\rho}}$

B: Modulo de volumen
ρ: densidad del material

Constante que describe como de resistente es una sustancia a la compresión

6.5. Velocidad de las ondas: transversales y longitudinales

Un oscilador armónico simple en el punto $x = 0$ genera una onda en una cuerda. El oscilador opera con una frecuencia de 40.0 Hz y una amplitud de 3.00 cm. La cuerda tiene una densidad lineal de masa de 50.0 g/m y se le estira con una tensión de 5.00 N.

a) Determinar la velocidad de la onda.
b) Calcular la longitud de onda.
c) Describir la función $y(x,t)$ de la onda. Suponer que el oscilador tiene su desplazamiento máximo hacia arriba en el instante $t = 0$ s.
d) Calcular la aceleración transversal máxima de las partículas de la cuerda.
e) ¿Es razonable despreciar la aceleración de la gravedad en el caso de esta onda?

a) $$v = \sqrt{\frac{T}{\mu}} = \sqrt{\frac{5.00}{0.0500}} = 10.0\ \mathrm{m/s}$$

b) $$\lambda = {}^{v}/_{f} = {}^{10.0}/_{40.0} = 0.250\ \mathrm{m}$$

c) $$k = {}^{2\pi}/_{\lambda} = {}^{2\pi}/_{0.250} = 8.00\pi\ \mathrm{rad/m} \quad \Big| \quad \omega = 2\pi f = 80.0\pi\ \mathrm{rad/s}$$

$$y(x,t) = A\mathrm{sen}\left(kx - \omega t + {}^{\pi}/_{2}\right) = 3.00\mathrm{sen}\left(8.00\pi x - 80.0\pi t + {}^{\pi}/_{2}\right)$$

6.5. Velocidad de las ondas: transversales y longitudinales

Un oscilador armónico simple en el punto $x = 0$ genera una onda en una cuerda. El oscilador opera con una frecuencia de 40.0 Hz y una amplitud de 3.00 cm. La cuerda tiene una densidad lineal de masa de 50.0 g/m y se le estira con una tensión de 5.00 N.

a) Determinar la velocidad de la onda.
b) Calcular la longitud de onda.
c) Describir la función $y(x,t)$ de la onda. Suponer que el oscilador tiene su desplazamiento máximo hacia arriba en el instante $t = 0$ s.
d) Calcular la aceleración transversal máxima de las partículas de la cuerda.
e) ¿Es razonable despreciar la aceleración de la gravedad en el caso de esta onda?

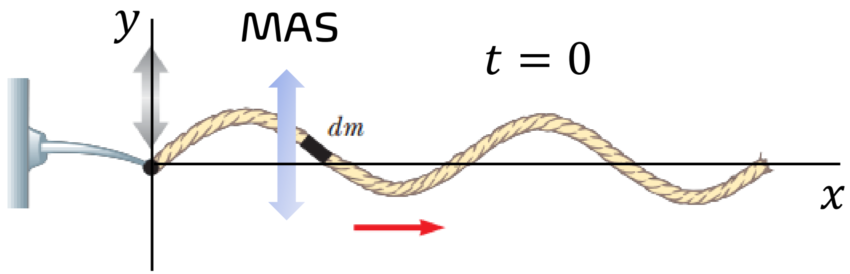
d) $a_{y,max} = A\omega^2 = 3.00 \cdot (80.0\pi)^2 = 1890 \text{ m/s}^2$

e) $a_{y,max} \gg g$

Contenidos

6.6. Transporte de energía en ondas

A medida que las ondas viajan a través de un medio, la energía se transfiere como energía vibratoria de una partícula a otra del medio. Transporte de energía unidimensional.



Energía cinética asociada a $\mathrm{d}m$ $\quad \mathrm{d}K = \frac{(\mathrm{d}m)v_y^2}{2} = \frac{\mathrm{d}x\mu v_y^2}{2}$

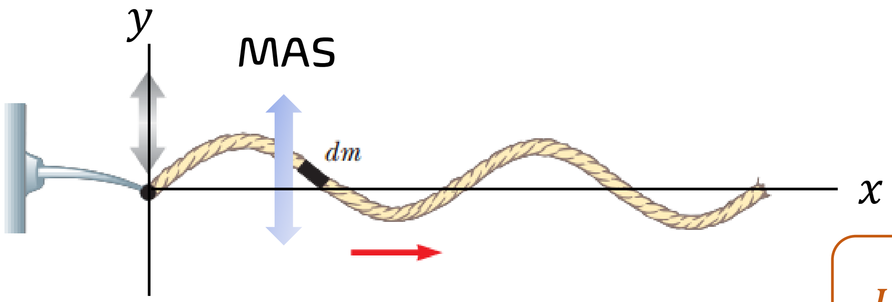
$$v_y = -A\omega\cos(kx - \omega t + \varphi) \longrightarrow \mathrm{d}K = \frac{\mathrm{d}x\mu v_y^2}{2} = \frac{\mu}{2}[A\omega\cos(kx - \omega t + \varphi)]^2\mathrm{d}x \xrightarrow{t=0} \mathrm{d}K = \frac{\mu}{2}A^2\omega^2\cos^2(kx + \varphi)\mathrm{d}x$$

K total en una longitud de onda $\quad \boxed{K_\lambda = \frac{\mu}{2}A^2\omega^2\int_0^\lambda \cos^2(kx + \varphi)\mathrm{d}x = \frac{\mu}{4}A^2\omega^2\lambda}$

$$\cos^2(\theta) = \frac{1}{2} + \frac{1}{2}\cos(2\theta)$$

6.6. Transporte de energía en ondas

A medida que las ondas viajan a través de un medio, la energía se transfiere como energía vibratoria de una partícula a otra del medio. Transporte de energía unidimensional.



Energía potencial asociada a $\mathrm{d}m$ es debida a:

- Desplazamiento de la posición de equilibrio
- Fuerzas restauradoras de elementos colindantes

$$\boxed{U_\lambda = \frac{\mu}{4} A^2 \omega^2 \lambda}$$

Energía total en una longitud de onda de la onda

$$\boxed{E_\lambda = K_\lambda + U_\lambda = \frac{1}{2} \mu A^2 \omega^2 \lambda}$$

Potencia asociada a la onda mecánica

$$\boxed{P = \frac{E_\lambda}{T} = \frac{1}{2} \mu A^2 \omega^2 \frac{\lambda}{T} = \frac{1}{2} \mu A^2 \omega^2 v}$$

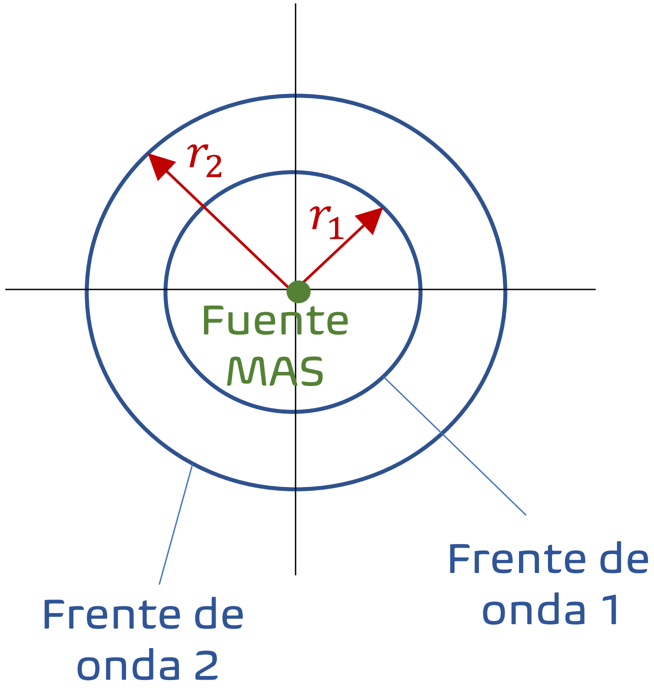
6.6. Transporte de energía en ondas

Una cuerda es tensada con una fuerza de 80.0 N. Si sobre esta cuerda se quieren generar ondas sinusoidales con una amplitud de 6.00 cm y frecuencia de 60.0 Hz ¿Cuánta potencia se debe suministrar sabiendo que $\mu = 5.00 \cdot 10^{-2}$ kg/m?

$$P = \frac{1}{2}\mu A^2\omega^2 v \xrightarrow{v = \sqrt{T/\mu}} P = \frac{1}{2}A^2\omega^2\sqrt{T\mu} \xrightarrow{\omega = 2\pi f} P = 2A^2\omega^2\sqrt{T\mu}$$

$$P = 2A^2\pi^2 f^2\sqrt{T\mu} = 2(6.00 \cdot 10^{-2}\pi \cdot 60)^2\sqrt{80.0 \cdot 5.00 \cdot 10^{-2}} = 512 \text{ W}$$

6.6. Transporte de energía en ondas



Ondas bidimensionales ⮞ Frente de ondas circular

Se propaga en medio isótropo (igual en todas las direcciones)

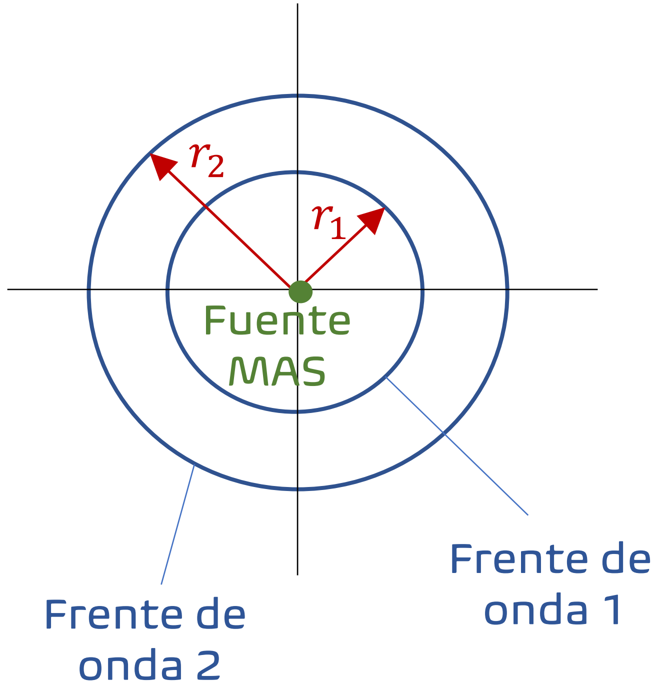
La energía transmitida en una onda circular por la fuente al medio se reparte a lo largo de los frentes de onda.

Principio de conservación de la energía

La E se transmite circularmente a través de las muchas partículas que constituyen los sucesivos frentes de ondas que se van formando

La energía de dos frentes de ondas cualesquiera es la misma

6.6. Transporte de energía en ondas



Ondas bidimensionales ⮞ Frente de ondas circular

$$E_{Frente1} = \frac{1}{2} m_{Frente1} \omega^2 {A_1}^2 = \mu \pi r_1 \omega^2 {A_1}^2$$

$$\mu = \frac{m_{Frente1}}{l} \quad ⮞ \quad m_{Frente1} = \mu l = 2\pi r_1 \mu$$

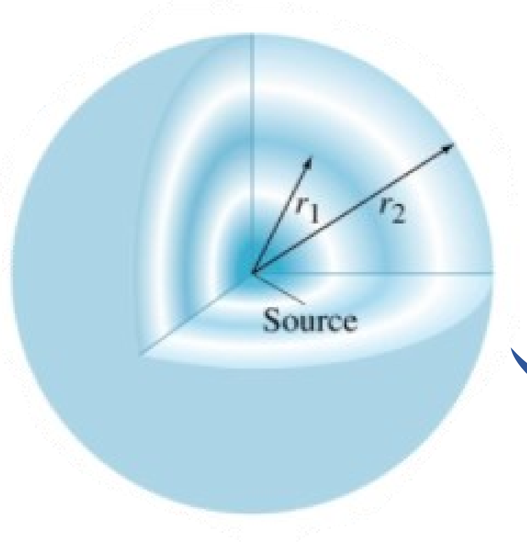
$$E_{Frente2} = \frac{1}{2} m_{Frente2} \omega^2 {A_1}^2 = \mu \pi r_2 \omega^2 {A_2}^2$$

Energía se conserva ⮞ $E_{Frente1} = E_{Frente2} = const$ ⮞ $r_1 {A_1}^2 = r_2 {A_2}^2$

$$\boxed{rA^2 = const \quad ⮞ \quad A \propto \frac{1}{\sqrt{r}}}$$

La amplitud decrece a medida que nos alejamos de la fuente emisora

6.6. Transporte de energía en ondas



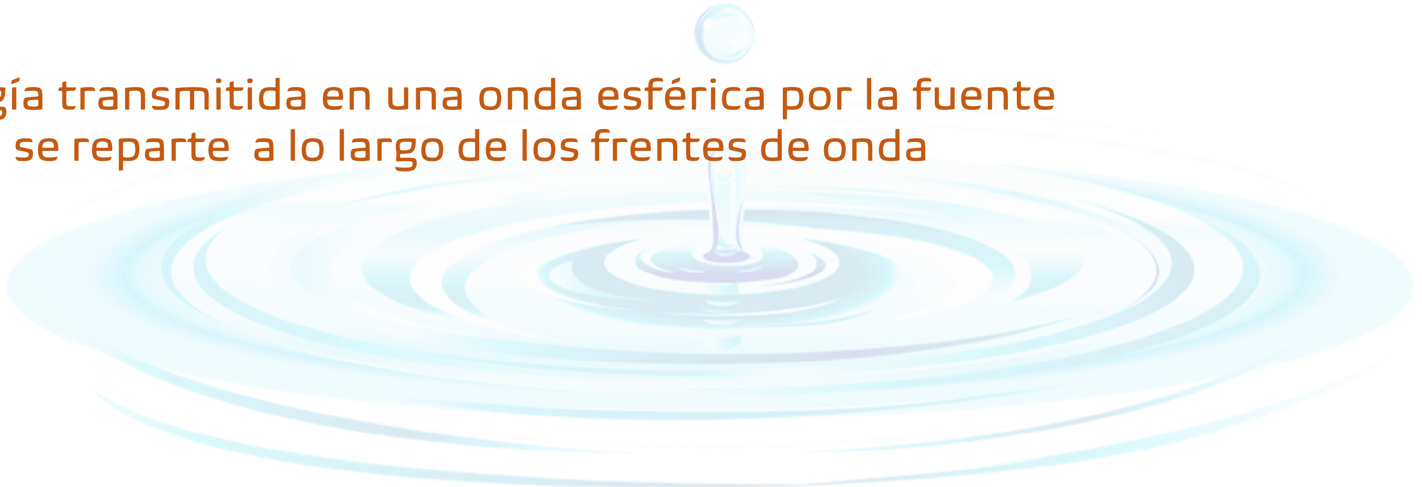
Si una onda fluye desde la fuente en todas las direcciones, es una onda tridimensional

Ondas sonoras en el aire, ondas sísmicas en la Tierra, luz

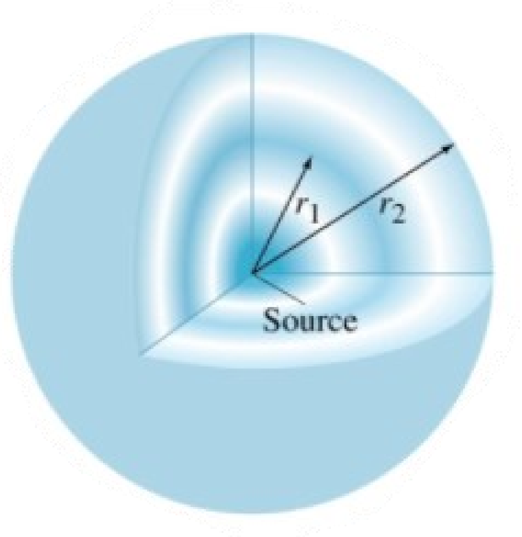
Transporte de energía en las tres dimensiones espaciales

Medio es isótropo (igual en todas las direcciones) Onda es esférica

La energía transmitida en una onda esférica por la fuente al medio se reparte a lo largo de los frentes de onda



6.6. Transporte de energía en ondas



Si una onda fluye desde la fuente en todas las direcciones, es una onda tridimensional

Densidad superficial de masa $\quad \rho = \dfrac{m}{S} \longrightarrow m_{Frente1} = \rho S = 4\pi {r_1}^2 \rho$

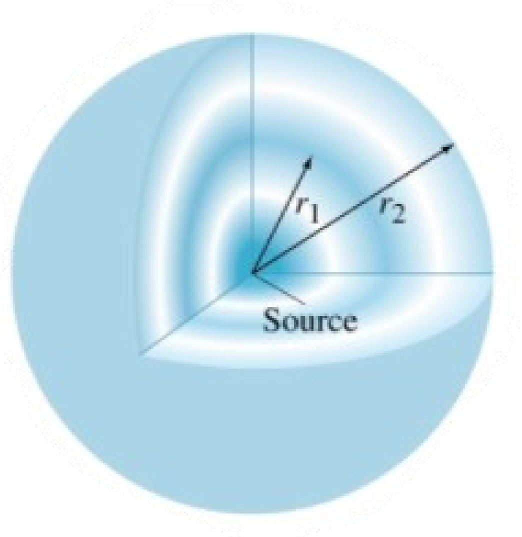
$$E_{Frente1} = 2\rho\pi {r_1}^2 \omega^2 {A_1}^2 \quad \Big| \quad E_{Frente2} = 2\rho\pi {r_2}^2 \omega^2 {A_2}^2$$

Energía se conserva $\quad E_{Frente1} = E_{Frente2} = const \quad {r_1}^2 {A_1}^2 = {r_2}^2 {A_2}^2$

$$\boxed{r^2 A^2 = const \quad A \propto \frac{1}{r}}$$

La amplitud decrece a medida que nos alejamos de la fuente emisora

6.6. Transporte de energía en ondas



Si una onda fluye desde la fuente en todas las direcciones, es una onda tridimensional

Intensidad ⪢ $I = \dfrac{P}{S}\left(\dfrac{\mathrm{W}}{\mathrm{m}^2}\right)$

I en esfera de radio r_1 ⪢ $\boxed{I_1 = \dfrac{P}{4\pi r_1^2}}$

I en esfera de radio r_2 ⪢ $\boxed{I_2 = \dfrac{P}{4\pi r_2^2}}$

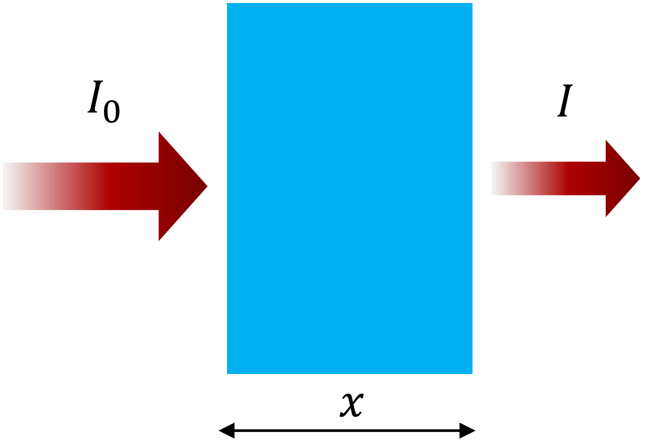
No se absorbe energía entre las dos esferas ⪢ $\boxed{\dfrac{I_1}{I_2} = \left(\dfrac{r_2}{r_1}\right)^2 = \left(\dfrac{A_1}{A_2}\right)^2}$

La intensidad de la onda disminuye a medida que nos alejamos de la fuente emisora

Atenuación ⪢ Disminución de la intensidad a medida que la onda se aleja del foco emisor debido al reparto de energía entre los frentes de onda con superficies cada vez mayores

6.6. Transporte de energía en ondas

Absorción ⪢ La Intensidad de una onda mecánica disminuye debido a efectos disipativos del medio de propagación (rozamiento). En una onda electromagnética la reducción de la intensidad es debida a la interacción con la materia.



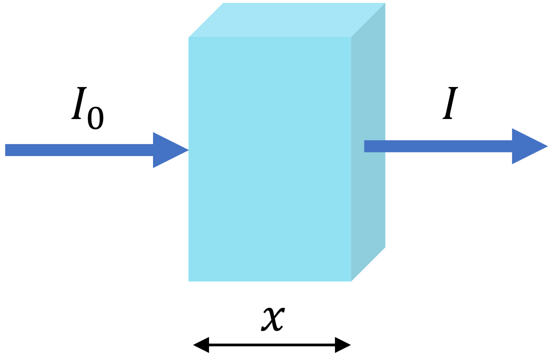
$$\mathrm{d}I = -\alpha I \mathrm{d}x$$

α: Coeficiente de absorción del material

$$\int_{I_0}^{I} \frac{dI}{I} = -\int_0^x \alpha dx \quad ⪢ \quad \boxed{I = I_0 e^{-\alpha x}}$$

6.6. Transporte de energía en ondas

La función de onda correspondiente a una onda plana que se propaga en un medio viene dada por la expresión $\Psi(x,t) = 10sen[\pi(10t - 2x + 0.5)]$ donde x y Ψ se miden en cm y t en segundos. Si durante el movimiento ondulatorio se reduce su intensidad inicial un 20% al atravesar un medio absorbente de 10 cm de espesor, ¿qué espesor del mismo medio atravesaría para reducir su intensidad inicial en un 10%?



$$I = I_0 e^{-\alpha x}$$

$$x = 0.10\ \mathrm{m} \Rightarrow I = 0.8 I_0 \Rightarrow \alpha$$

$$x' = ?\ m \Rightarrow I = 0.9 I_0$$

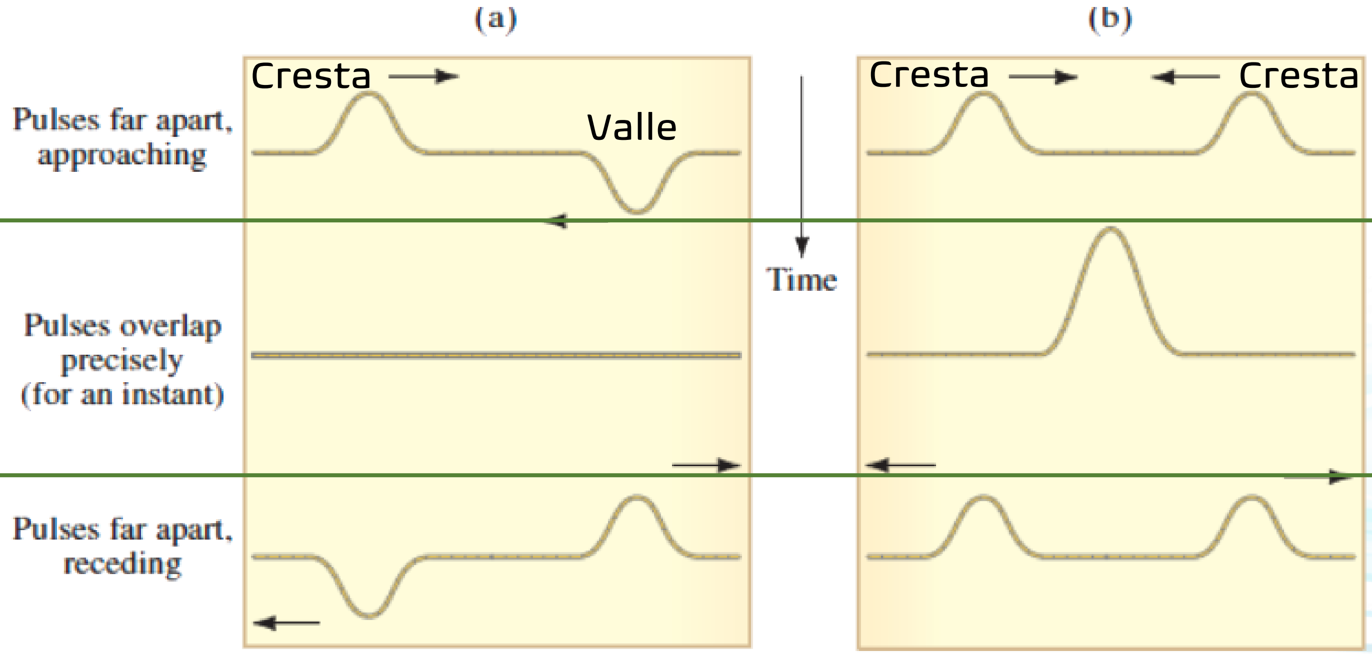
Contenidos

6.7. Interferencia. Principio de superposición

Muchos fenómenos ondulantes interesantes de la naturaleza no pueden describirse con una sola onda viajera

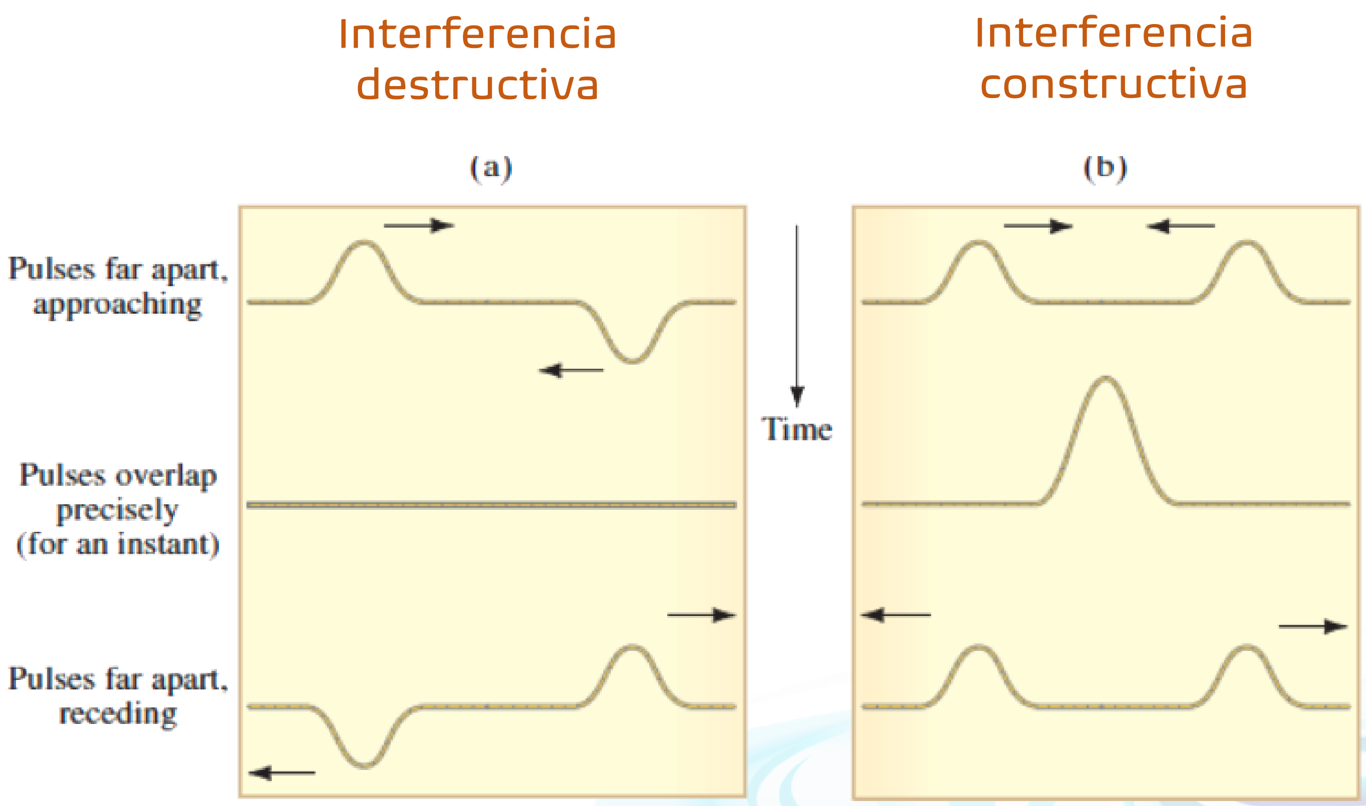
Se deben analizar en términos de una combinación de ondas ➤ Interferencia

¿Qué sucede cuando dos ondas pasan por la misma región del espacio al mismo tiempo?



El desplazamiento resultante es la suma algebraica de sus desplazamientos separados

6.7. Interferencia. Principio de superposición

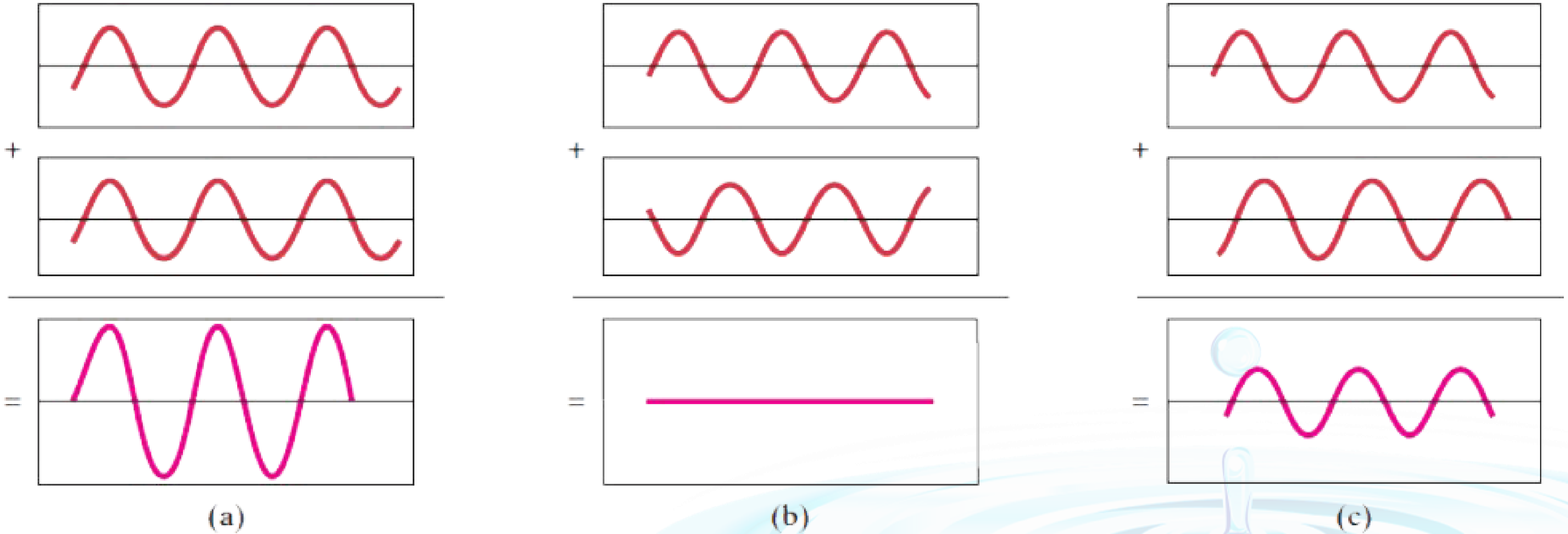


Desplazamientos opuestos en el instante en que se cruzan. Su suman da cero

Desplazamiento resultante es mayor que el desplazamiento de cada pulso separado

6.7. Interferencia. Principio de superposición

Fase ➤ Describe las posiciones relativas de las crestas



Las ondas están en fase

Las ondas están completamente desfasadas

Interferencia parcialmente destructiva

6.7. Interferencia. Principio de superposición

Superposición de ondas sinusoidales

Principio de superposición

Si dos o más ondas se mueven a través de un medio, el valor resultante de la función de onda en cualquier punto es la suma algebraica de los valores de las funciones de onda de las ondas individuales

Si las dos ondas viajan hacia la derecha y tienen la misma f, λ y A, pero difieren en fase, sus funciones de onda individuales serán

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

$$y_2 = A\mathrm{sen}(kx - \omega t + \varphi)$$

Onda resultante

$$y = y_1 + y_2 = A[\mathrm{sen}(kx - \omega t) + \mathrm{sen}(kx - \omega t + \varphi)]$$

$$\mathrm{sen}(a) + \mathrm{sen}(b) = 2\cos\left(\frac{a-b}{2}\right)\mathrm{sen}\left(\frac{a+b}{2}\right)$$

$$\boxed{y = 2A\cos\left({}^{\varphi}/_{2}\right)\mathrm{sen}\left(kx - \omega t + {}^{\varphi}/_{2}\right)}$$

6.7. Interferencia. Principio de superposición

Superposición de ondas sinusoidales

$$y = 2A\cos\left({}^{\varphi}/_{2}\right)\operatorname{sen}\left(kx - \omega t + {}^{\varphi}/_{2}\right)$$

Amplitud

La función de onda resultante también es sinusoidal y tiene la misma f y λ que las ondas individuales

Sí $\varphi = 0$ ⮞ $\cos\left({}^{\varphi}/_{2}\right) = 1$ ⮞ Amplitud onda resultante = $2A$

Las crestas de las dos ondas están en las mismas ubicaciones en el espacio y se dice que las ondas están en todas partes en fase ⮞ Interferencia constructiva

Interferencia constructiva ⮞ $\cos\left({}^{\varphi}/_{2}\right) = \pm 1$ ⮞ $\varphi = n\pi; \quad n = 0,2,4 \ldots$

6.7. Interferencia. Principio de superposición

Superposición de ondas sinusoidales

$$y = 2A\cos\left({}^{\varphi}/_{2}\right)\mathrm{sen}\left(kx - \omega t + {}^{\varphi}/_{2}\right)$$

Amplitud

Interferencia destructiva $\Rightarrow$ $\cos\left({}^{\varphi}/_{2}\right) = 0$ $\Rightarrow$ $\varphi = n\pi; \quad n = 1,3,5\ldots$

Las crestas de una onda ocurren en las mismas posiciones que los valles de la segunda onda

La onda resultante tiene amplitud cero en todas partes

6.7. Interferencia. Principio de superposición

Superposición de ondas sinusoidales

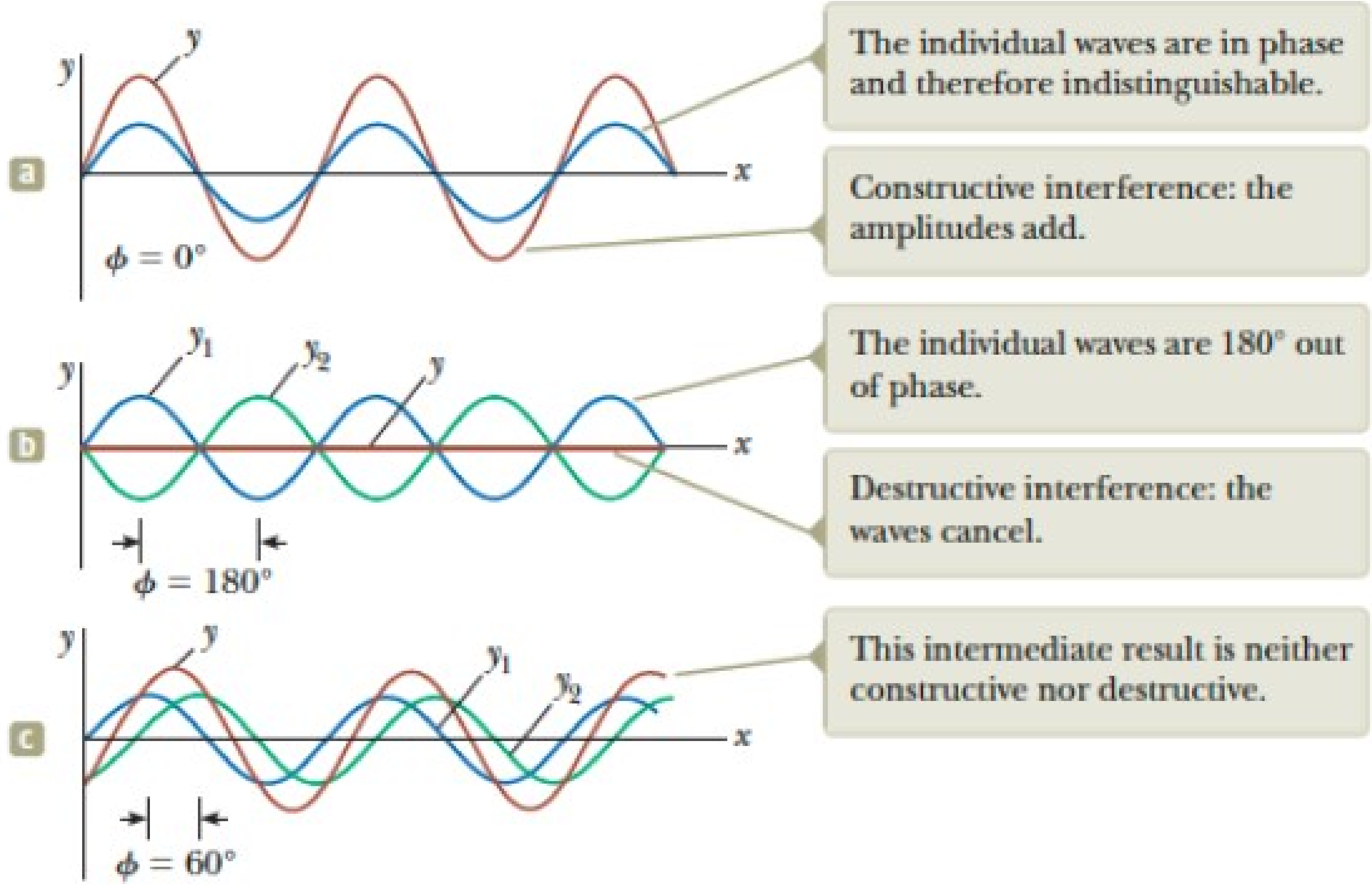
$$y = 2A\cos\left({}^{\varphi}/_{2}\right)\operatorname{sen}\left(kx - \omega t + {}^{\varphi}/_{2}\right)$$

Amplitud

Sí $\cos\left({}^{\varphi}/_{2}\right) \neq 0$ y $\cos\left({}^{\varphi}/_{2}\right) \neq \pm 1$ ⪢ La onda resultante tiene una amplitud cuyo valor está entre 0 y $2A$

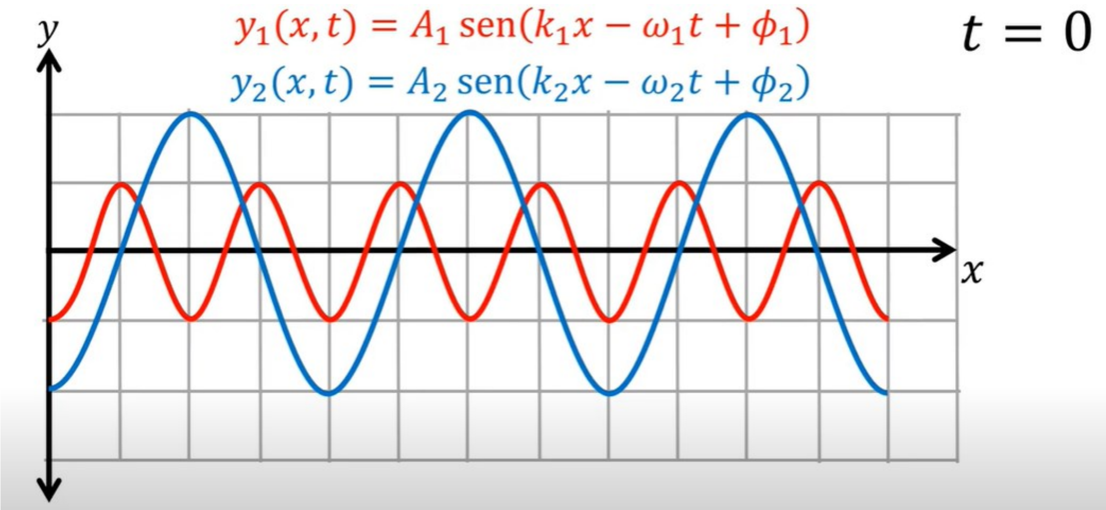
6.7. Interferencia. Principio de superposición

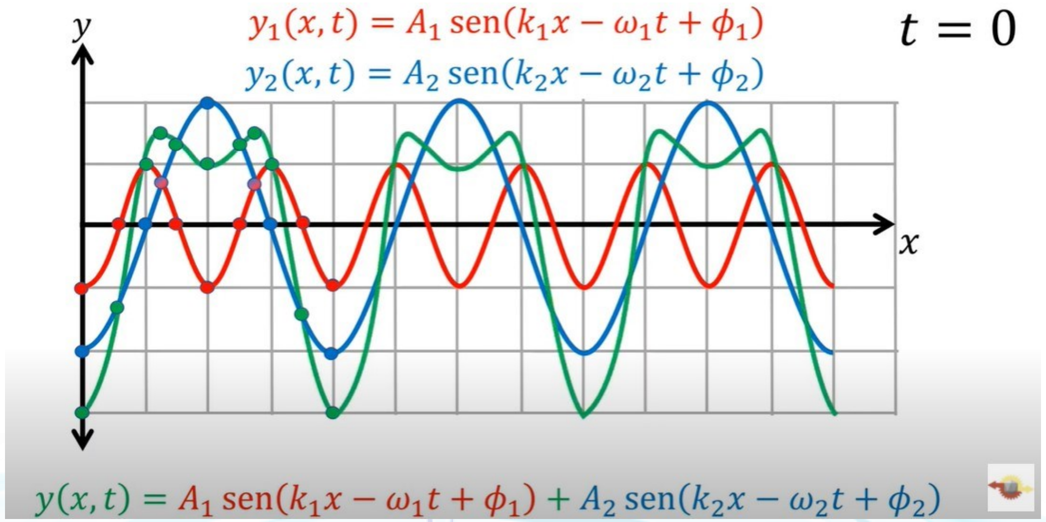
Superposición de ondas sinusoidales



6.7. Interferencia. Principio de superposición

Superposición de ondas sinusoidales





Contenidos

6.8.1. Introducción

Ondas sonoras → Ondas mecánicas longitudinales que se propagan en un medio material

Sólido, líquido o gas

Fuente de sonido
Es un objeto vibrante

Energía se transfiere desde la fuente en forma de ondas sonoras longitudinales en el aire u otro material

Receptor
(oído, micrófono)

Si la fuente vibra con MAS

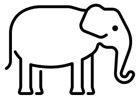
Se producen cambios en densidad y presión a lo largo de la dirección del movimiento de la onda

Las variaciones de presión son sinusoidales

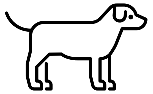
6.8.1. Introducción

Ondas sonoras

Audibles (20 – 20000 Hz) → Intervalo de sensibilidad del oído humano

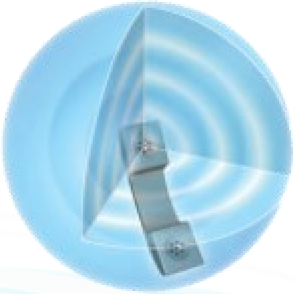


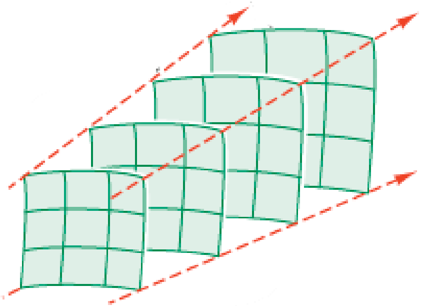
Infrasónicas (< 20 Hz) → Por debajo del intervalo audible



Ultrasónicas (> 20000 Hz) → Por encima del intervalo audible

Las ondas sonoras suelen dispersarse en todas direcciones a partir de la fuente de sonido, con una amplitud que depende de la dirección y la distancia a dicha fuente





A una gran distancia de la fuente, los frentes de onda esféricos de una onda de sonido pueden considerarse casi planos (zona pequeña del espacio)

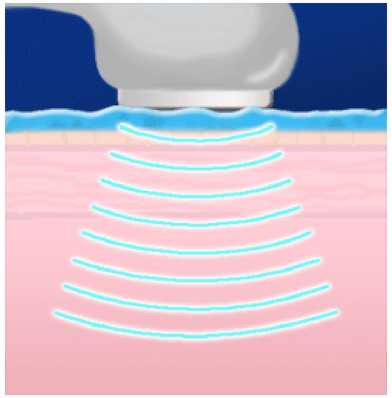
Ondas planas → Frentes de onda planos y paralelos

6.8.1. Introducción

Ondas ultrasónicas de muy alta frecuencia no se propagan bien en el aire

Se propagan fácilmente a través de líquidos y sólidos

Esta propiedad se ha aprovechado en aplicaciones de ultrasonido



Ecografía: Emplea ondas de ultrasonido de una frecuencia de aproximadamente 10^6 Hz

Microscopios acústicos: Emplean ondas de ultrasonido de una frecuencia superior a 10^9 Hz para producir imágenes muy ampliadas de pequeñas muestras de materiales

6.8.1. Introducción

Fuentes de ondas infrasónicas → Terremotos, truenos, volcanes y ondas producidas por la vibración de maquinaria pesada

Puede ser particularmente problemática para los trabajadores

Actúan de manera resonante, provocando movimiento e irritación de los órganos del cuerpo

Las ondas infrasónicas que se producen en una tormenta pueden ayudar a predecir tornados

Contenidos

6.8.2. Propagación del sonido

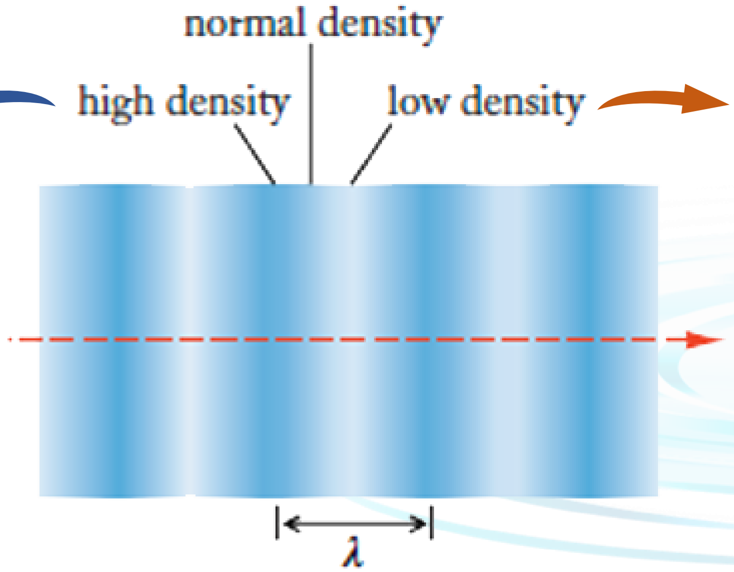
El sonido no puede viajar en ausencia de materia

No se puede escuchar una campana que suena dentro de un recipiente en donde se ha hecho vacío

El sonido no puede viajar a través de los confines vacíos del espacio exterior

Onda de sonido en el aire en un instante de tiempo

Compresión

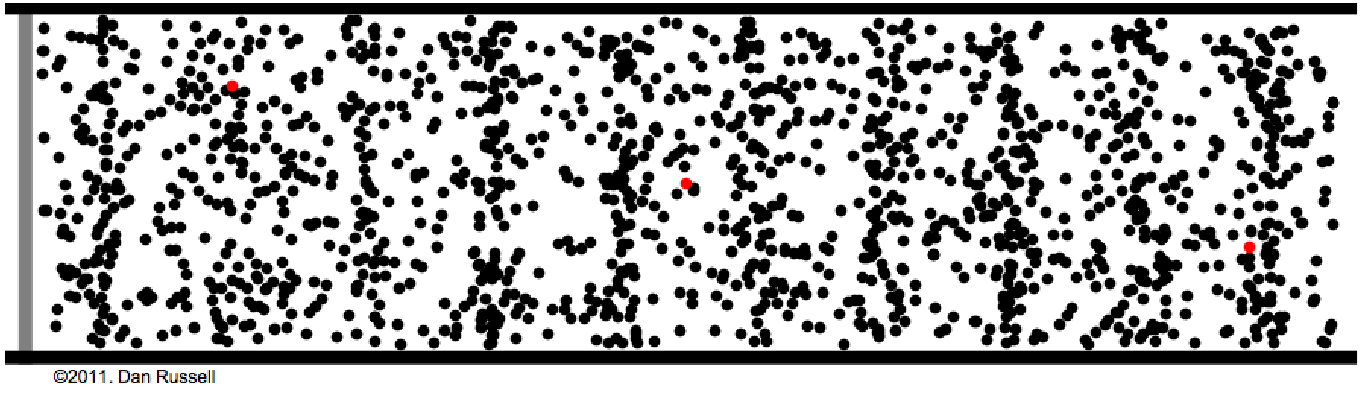


Expansión

Las zonas alternas de baja densidad y alta densidad viajan hacia la derecha, alejándose de la fuente.

El aire no viaja. Las moléculas de aire simplemente oscilan de un lado a otro.

6.8.2. Propagación del sonido



Las moléculas de aire oscilan hacia adelante y hacia atrás a lo largo de la dirección de propagación de la onda sonora

La fuerza restauradora que impulsa estas oscilaciones proviene de la presión del aire

Zonas de mayor densidad molecular → Mayor P

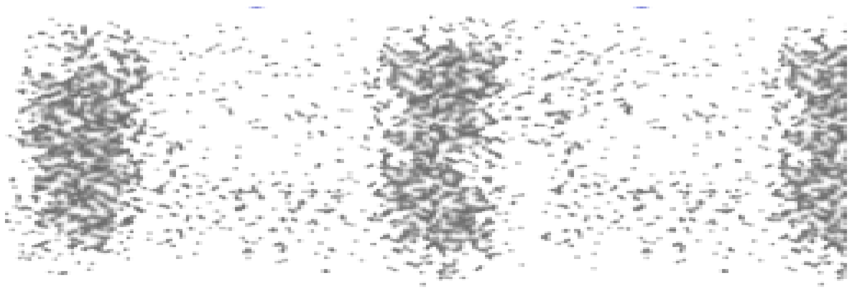
Zonas de menor densidad molecular → Menor P

Mantiene la densidad uniforme

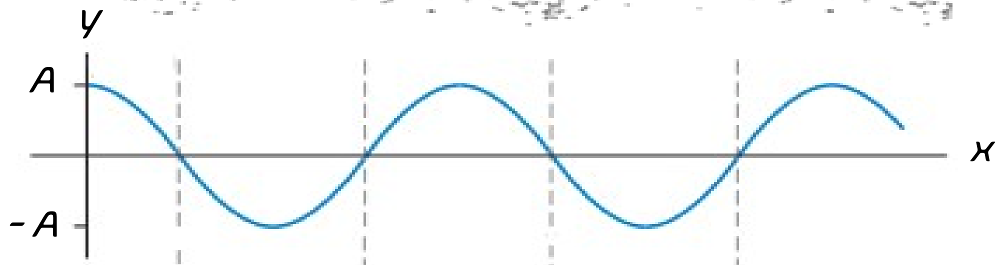
Se opone a la "deformación" del aire

Otorga al aire la elasticidad necesaria para permitir la propagación de una onda

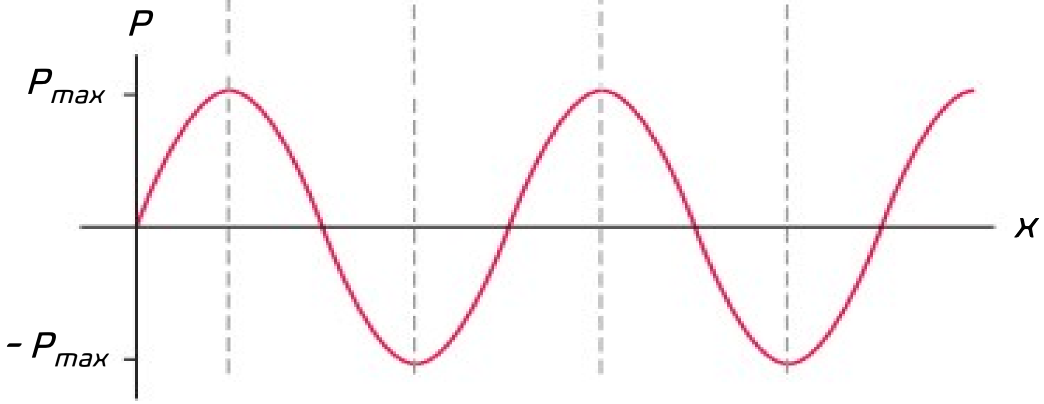
6.8.2. Propagación del sonido



Desplazamiento y en función de la posición $x(t=0)$



Variación de la P en función de la posición $x(t=0)$



Las zonas de densidad máxima y mínima en la onda coinciden con zonas de desplazamiento cero de las moléculas desde el equilibrio

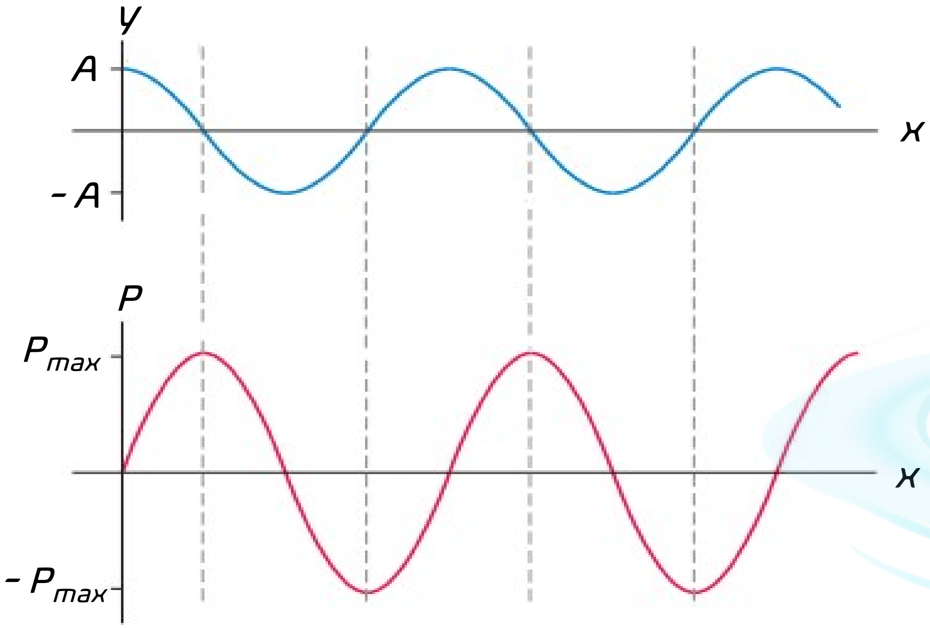
La onda de desplazamiento está desfasada un cuarto de longitud de onda con la onda de presión

6.8.2. Propagación del sonido

Una onda sonora se puede describir con una función de onda $y(x, t)$

Se pueden analizar en términos de variaciones de presión

- Las ondas longitudinales a menudo se denominan ondas de presión
- La variación de presión suele ser más fácil de medir que el desplazamiento



$$y(x, t) = A\cos(kx - \omega t)$$

Amplitud de presión

$$P(x, t) = P_{max}\,\mathrm{sen}(kx - \omega t)$$

6.8.2. Propagación del sonido

La velocidad del sonido (longitudinal) en un medio depende de las propiedades de elasticidad del fluido

$$v = \sqrt{Factor\ que\ vuelve\ el\ sistema\ al\ equilibrio / Factor\ de\ inercia\ que\ resiste\ la\ vuelta\ al\ equilibrio}$$

Velocidad del sonido en un sólido $v_{sol} = \sqrt{\dfrac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}} \longrightarrow v = \sqrt{E/\rho}$ Varilla sólida larga

E: Modulo de Young ; ν: Coeficiente de Poisson ; ρ: Densidad

Velocidad del sonido en un fluido (líquido o gas) $v_{fluido} = \sqrt{B/\rho} \longleftarrow B = -V\dfrac{\Delta P}{\Delta V}$

Módulo de volumen

Sonido viajando a través del aire Dependencia con la T del aire $\longrightarrow v(T) = 331\sqrt{1+\dfrac{T}{273}}$

°C

Velocidad del sonido en aire a 0 °C (m/s)

6.8.2. Propagación del sonido

Medio	v (m/s)	Medio	v (m/s)	Medio	v (m/s)
Gases		**Líquidos a 25°C**		**Sólidos**[a]	
Hidrógeno (0°C)	1 286	Glicerol	1 904	Vidrio Pyrex	5 640
Helio (0°C)	972	Agua de mar	1 533	Hierro	5 950
Aire (20°C)	343	Agua	1 493	Aluminio	6 420
Aire (0°C)	331	Mercurio	1 450	Latón	4 700
Oxígeno (0°C)	317	Queroseno	1 324	Cobre	5 010
		Alcohol metílico	1 143	Oro	3 240
		Tetracloruro de carbono	926	Lucita	2 680
				Plomo	1 960
				Caucho	1 600

[a] Los valores conocidos son para propagación de ondas longitudinales en medios volumétricos. Las magnitudes de velocidad para ondas longitudinales en barras delgadas son menores, y las magnitudes de velocidad de ondas transversales en volumen son aún más pequeñas.

$$v_{solidos} > (2-4)v_{líquidos} > (10-15)v_{gases}$$

Contenidos

6.8.3. Intensidad del sonido

La intensidad se define como la energía transportada por una onda por unidad de tiempo a través de una unidad de área perpendicular al flujo de energía

$$I = \frac{dE}{dt \cdot S} = \frac{P}{S}\left(\frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m}^2}\right)$$

Energía emitida desde una fuente puntual se distribuye por igual en todas las direcciones → Onda esférica

Propiedades de las ondas sonoras = Propiedades de las ondas esféricas

- La potencia acústica de una fuente de sonido es constante y solo depende de las características de la fuente
- La intensidad es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia

$$\boxed{I = \frac{P}{4\pi r^2}}$$

6.8.3. Intensidad del sonido

Sonidos más débiles que el oído humano puede detectar a una $f = 1000\ \text{Hz}$ ⮞ $I_0 = 1.00 \cdot 10^{-12}\ \text{W/m}^2$

Umbral de audición

Sonidos más fuertes que el oído humano tolera a una $f = 1000\ \text{Hz}$ ⮞ $I = 1.00\ \text{W/m}^2$

Umbral del dolor

Amplio intervalo de intensidades que puede detectar el oído → Los niveles de intensidad del sonido se especifican normalmente en una escala logarítmica

Nivel de intensidad sonora ⮞ $\boxed{\beta = 10\log\left(\frac{I}{I_0}\right)}$ → Decibeles (dB)

I_0: Intensidad de referencia (Umbral de audición)

Un decibel es 1/10 de un bel, unidad llamada así en honor de Alexander Graham Bell (el inventor del teléfono)

6.8.3. Intensidad del sonido

Fuente o descripción del sonido	Nivel de intensidad del sonido, β (dB)	Intensidad, I (W/m^2)
Avión militar a reacción a 30 m	140	10^2
Umbral del dolor	120	1
Remachador	95	3.2×10^{-3}
Tren elevado	90	10^{-3}
Tráfico urbano intenso	70	10^{-5}
Conversación ordinaria	65	3.2×10^{-6}
Automóvil silencioso	50	10^{-7}
Radio con volumen bajo en el hogar	40	10^{-8}
Murmullo normal	20	10^{-10}
Susurro de hojas	10	10^{-11}
Umbral del oído a 1000 Hz	0	10^{-12}