Universidad Nacional de Córdoba

FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS, FÍSICAS y NATURALES

CÁTEDRA DE FÍSICA III

Dr. Ing. Gabriel Correa Perelmuter
gabriel.correa@unc.edu.ar

Repaso de Ondas y Ondas Electromagnéticas

Ubicación del tema en el programa

- Unidad 1: ESTUDIO DE LOS GASES
- Unidad 2: TRANSMISIÓN DEL CALOR
- Unidad 3: PRIMER PRINCIPIO DE LA TERMODINÁMICA
- Unidad 4: SEGUNDO PRINCIPIO Y ENTROPÍA
- Unidad 5: TEORÍA CINÉTICA DE LOS GASES
- Unidad 6: LEYES DEL MOVIMIENTO ONDULATORIO
- Unidad 7: ONDAS SONORAS Y ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS
- Unidad 8: ÓPTICA FÍSICA. INTERFERENCIA. DIFRACCIÓN. POLARIZACIÓN
- Unidad 9: FÍSICA ATÓMICA
- Unidad 10: EL NÚCLEO ATÓMICO
- Unidad 11: LASER

1

6.1 Diversas clasificaciones de las ondas. Funciones de onda. Idea de análisis por Fourier.
6.2 Onda viajera. Ecuación de la doble periodicidad. Representación gráfica.
6.3 Ecuación diferencial de las ondas viajeras.
6.4 Cálculo de la velocidad de propagación para ondas longitudinales y ondas transversales.
6.5 Ondas estacionarias. Armónicas. Ejemplos de ondas estacionarias.
6.6 Velocidad de fase y velocidad de grupo.

2

7.1 Ondas mecánicas. Tipos de ondas. Ondas viajeras. Energía e intensidad en el movimiento ondulatorio.
7.2 Ondas sonoras. Velocidad del sonido. Niveles de intensidad, el decibel. Campo de audición, espectro sonoro.
7.3 Efecto Doppler en acústica y óptica.
7.4 Mediciones en acústica, Tubo de Qüinke y Tubo de Kundt. Resonador de Helmotz
7.5 Ondas electromagnéticas.

Condiciones de la materia

¿Cuáles son los horarios de los teóricos?

Lunes de 14 a 17:15 hs

¿Cuáles son los horarios de los prácticos?

Comisión 2.2 : **Martes 14.00 a 17:30 hs.**
Comisión 2.1 : **Jueves de 17 a 19:30 hs.**
Comisión 2.3 : **Viernes 17.00 a 20:00 hs.**

Instancias evaluativas

- dos parciales teóricos.
- dos parciales prácticos (resolución de problemas).
- Presentación de los Informes de Laboratorio.

Se puede recuperar sólo un parcial teórico.
Se puede recuperar sólo un parcial práctico.
Se pueden reformular sólo una vez los Informes de Laboratorio.

Condición del Estudiante

Estudiante con promoción total: Calificación con 6(seis) o más en los cuatro parciales. Tener aprobados los Informes de Laboratorio.

Estudiante con promoción de la parte práctica. Calificación con 6(seis) o más en los dos parciales prácticos realizados. Tener aprobados los Informes de Laboratorio.

Estudiante regular : Calificación con 4(cuatro) o más en dos parciales realizado en teórico o práctico. Aprobados los Informes de Laboratorio.

Estudiante que reparcializa:
Sólo Estudiantes regulares: Quienes hayan aprobado los teóricos sólo deberán rendir los parciales prácticos y Quienes hayan aprobado los prácticos sólo deberán rendir los parciales teóricos

Estudiantes que hayan aprobado los Prácticos de laboratorio en años anteriores se les guardará la nota

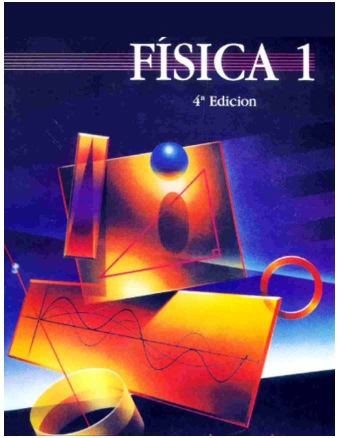
Cátedra de FÍSICA III

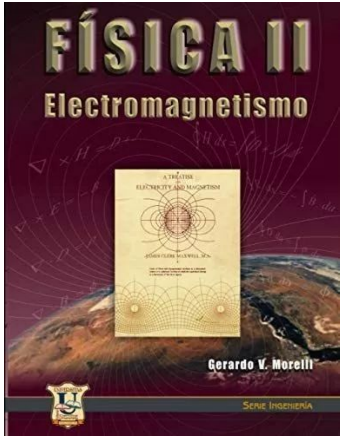
Esquema de clases FÍSICA III					
1	05/08/24	09/08/24	Repaso Ondas- Ondas estacionarias - Ondas sonoras. Ondas Electromagnéticas-	Gabriel Correa	Ondas estacionarias - Ondas viajeras
2	12/8/24	16/8/24	Interferencia en doble rendija y en láminas delgadas	Carlos Sosa	Ondas sonoras- Ondas Electromagnéticas y polarización
3	19/8/24	23/8/24	Difracción – Red de difracción -Polarización	Carlos Sosa	Interferencia en doble rendija y en láminas delgadas
4	26/08/24	30/08/2024	Relatividad especial (Parte I)	José Sánchez	Difracción – Red de difracción
5	02/09/2024	06/09/24	Relatividad especial (Parte II)	José Sánchez	Relatividad especial (Parte I)
6	09/09/24	13/09/24	Transferencia de Calor – Termodinámica	Gabriel Correa	Termodinámica (parte I)
7	16/09/24	20/9/24	Termodinámica	Gabriel Correa	Termodinámica (parte II)
	23/09/2024	27/09/2024	1° PARCIAL teórico		Repaso
	30/09/2024		FERIADO		1er parcial
8	07/10/24	11/10/24	Estudio de los Gases	Gabriel Correa	Estudio de los Gases
9	14/10/24	18/10/24	Cuántica	Gabriel Correa	Cuántica
10	21/10/24	25/10/24	Núcleo atómico - Radioactividad	Adriana Chautemps	Núcleo atómico - Radioactividad
11	28/10/24	01/11/24	Núcleo atómico - Radioactividad	Adriana Chautemps	Núcleo atómico - Radioactividad
	04/11/2024	08/11/24	2° PARCIAL Práctico – 2° PARCIAL teórico		2° PARCIAL Práctico –
	11/11/24	15/11/24	Recuperaciones parciales 1 o 2		Recuperatorio

Bibliografía

- David Halliday and Robert Resnick. Física. Parte 2. Compañía Editorial Continental, Ciudad de México, 4ta edición,
- Sears, Zemansky, Young. Física Universitaria con moderna, volumen 2. 2009, 12ª ed. Addison Wesley
- Serway and Jewett, Física para ciencias e ingeniería volumen 2, 2019, 10 ed, CENGAGE
- Morelli. Electromagnetismo. 2003, Científica universitaria

Software de referencia:
Simulink(MATLAB)
https://es.mathworks.com/products/simulink.html
eXeLearning: https://exelearning.net/
Supercharged
https://education.mit.edu/project/supercharged/
http://kyleforinash.altervista.org/Ondas/Electromagnetic2JS.html





Objetivo de la clase

- Repasar principio de Ondas: Ondas estacionarias - Ondas sonoras (Física I y Física II)

- Ondas Electromagnéticas (FísicaII):
  Se explora cómo los principios del electromagnetismo predicen la existencia de ondas electromagnéticas, las cuales se manifiestan en fenómenos como la luz, la radio y los rayos X. Esta comprensión ha impulsado desarrollos en tecnologías de comunicación y optoelectrónica

Tipos de ondas

Ondas mecánicas

Una **onda mecánica** es una perturbación que viaja por un material o una sustancia que es el medio de la onda.

- Sonido, Ondas en agua, Ondas en cuerdas

Ondas Electromagnéticas

No requieren de un medio material para su propagación (pueden hacerlo en el vacío).

- Rayos (gama, x), radiación térmica, emisión de Luz

N° dimensiones propagación

unidimensionales, bidimensionales, tridimensionales

Las ondas **transportan energía,** pero **no materia**

En función de su periodicidad

Ondas periódicas: movimiento con repetición cíclica.
Ondas no periódicas: producidas por una perturbación de modo

Dirección entre oscilación y propagación

Onda transversal -Onda longitudinal -Onda mixta

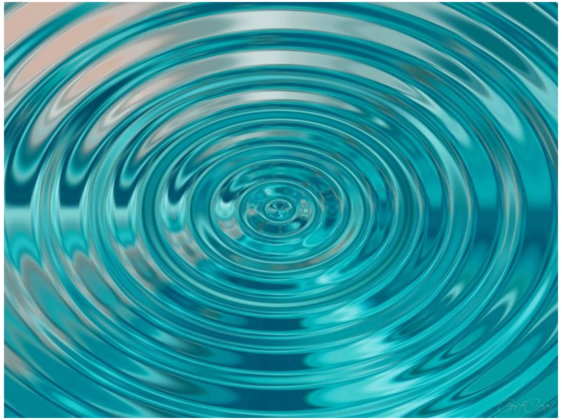
Ondas mecánicas

Una **onda mecánica** es una perturbación que viaja por un material o una sustancia que es el medio de la onda.

El **movimiento** real de cualquier **partícula** de agua individual es **pequeño**.

La **propagación de energía** mediante una perturbación como ésta se conoce como movimiento ondulatorio mecánico.

una piedra que se suelta

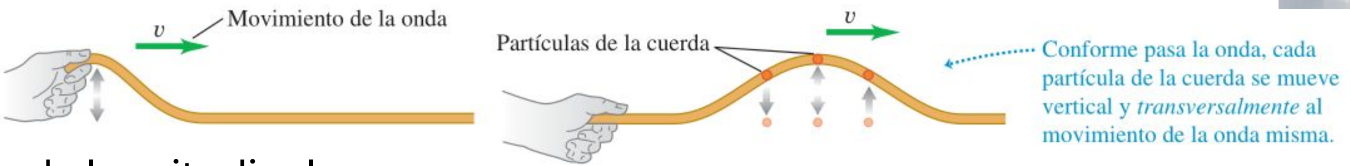


- La rapidez de la onda no es la rapidez con que se mueven las partículas cuando son perturbadas por la onda
- Para poner en movimiento cualesquiera de estos sistemas, debemos aportar energía realizando trabajo mecánico sobre el sistema

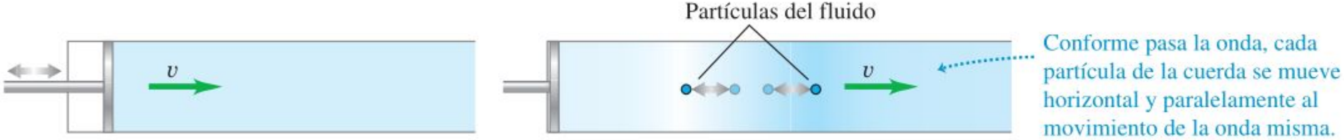
Ondas mecánicas

Al viajar la onda por el **medio**, las partículas que constituyen el medio sufren desplazamientos de varios tipos, dependiendo de la naturaleza de la onda

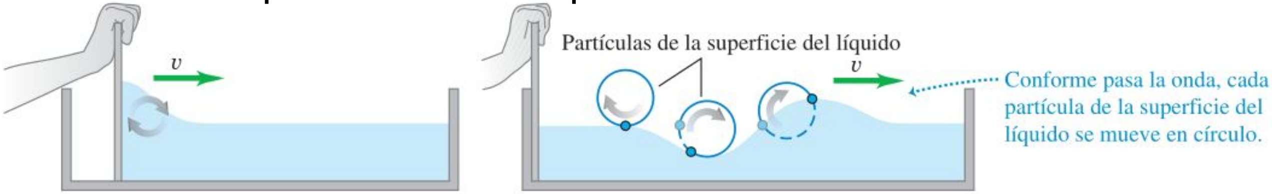
Onda transversal



Onda longitudinal



Ondas en la superficie de un líquido



Ondas mecánicas

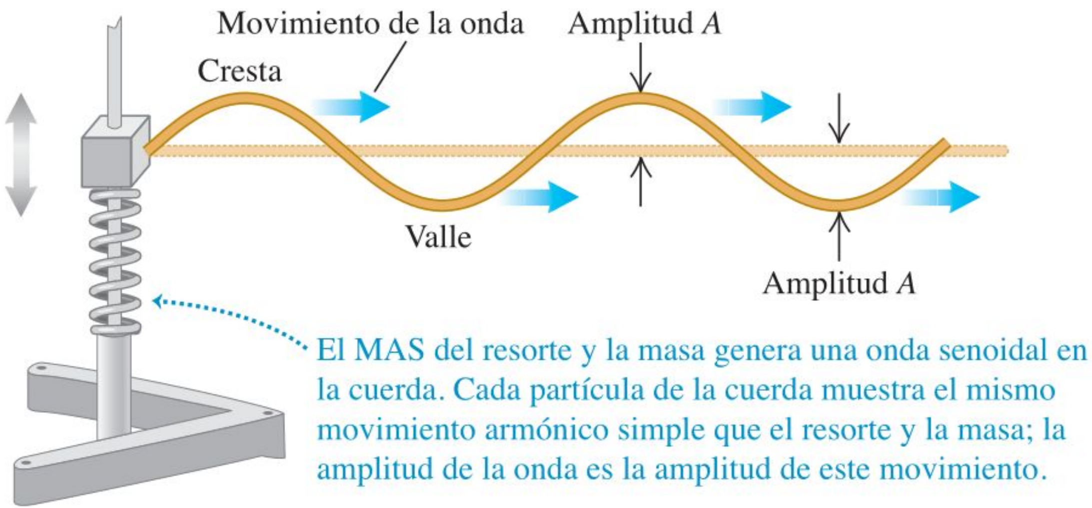
Ondas transversales periódicas

La onda producida es una sucesión simétrica de crestas y valles

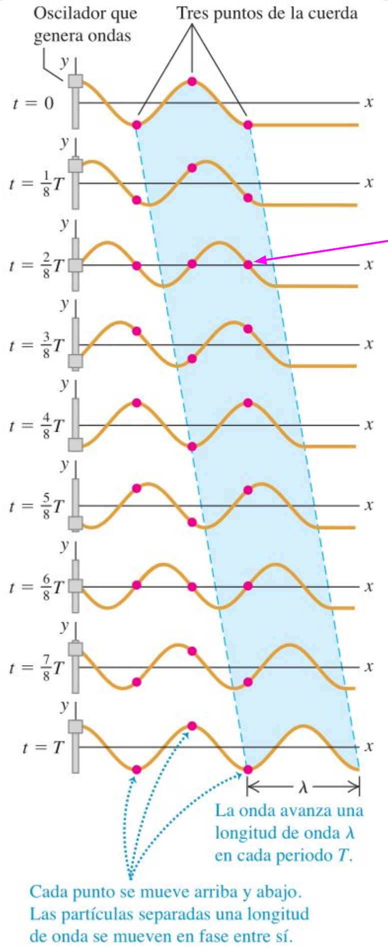
Ondas periódicas con movimiento armónico simple son fáciles de analizar; las llamamos **ondas senoidales.**

movemos verticalmente la cuerda con un movimiento armónico simple (MAS) con:

- amplitud A
- frecuencia f
- *frecuencia angular* $w=2\pi f$
- *periodo* $T = 1/f = 2\pi/w$



Ondas transversales periódicas



Cada punto oscila verticalmente alrededor de su posición de equilibrio con movimiento armónico simple

Cuando una onda senoidal pasa por un medio, todas las partículas del medio sufren movimiento armónico simple con la misma f

El patrón de onda viaja con rapidez constante *v* y avanza una longitud de onda λ en el lapso de un periodo *T*

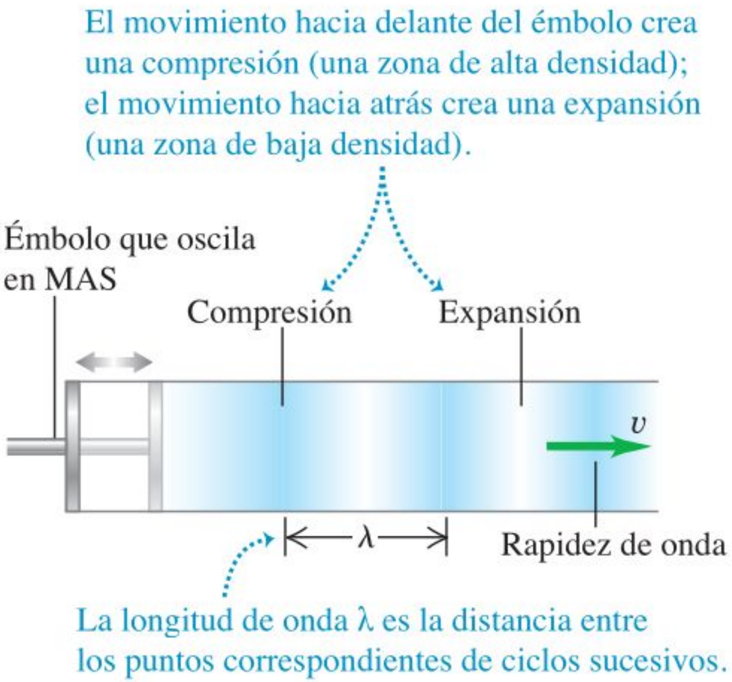
$$v=\lambda/T \text{ o } v=\lambda.f$$

$$\to f=1/T$$

La longitud de un patrón de onda completo es la distancia entre una cresta y la siguiente, o de un valle al siguiente

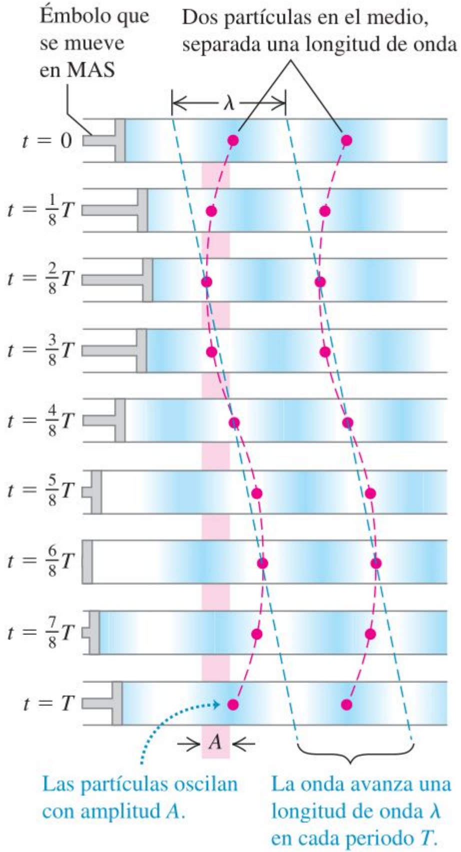
Llamamos a esta distancia longitud de onda, denotada con **λ**

Ondas periódicas longitudinales

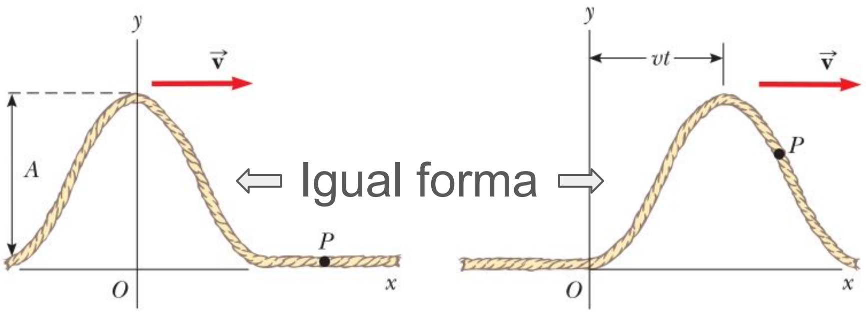


Al igual que la onda transversal senoidal en un periodo T la onda longitudinal de la figura viaja una longitud de onda **λ** a la derecha

la ecuación fundamental
v =**λ**.f
se cumple para las ondas longitudinales igual que para las transversales y, de hecho, para todos los tipos de ondas periódicas



Descripción matemática de una onda



a) Pulso en $t = 0$

b) Pulso en el tiempo t

f(x,t) función de onda

La función ***y***, a veces llamada función de onda, depende de las dos variables ***x*** y ***t***

La función de onda ***y(x, t)*** representa la coordenada *y*, la posición transversal, de cualquier elemento ubicado en la posición ***x*** en cualquier tiempo ***t***.

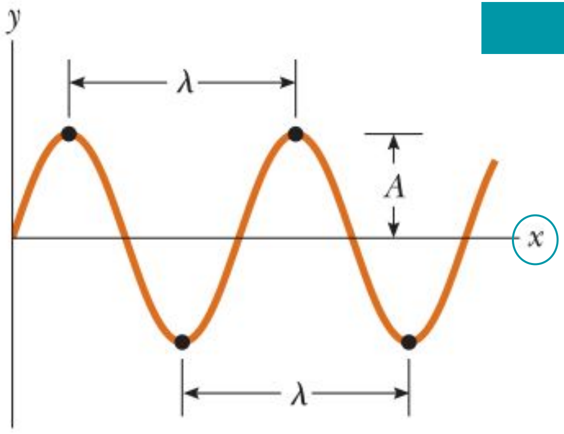
$$y(x, t) = f(x - vt)$$

La onda viaja a la derecha

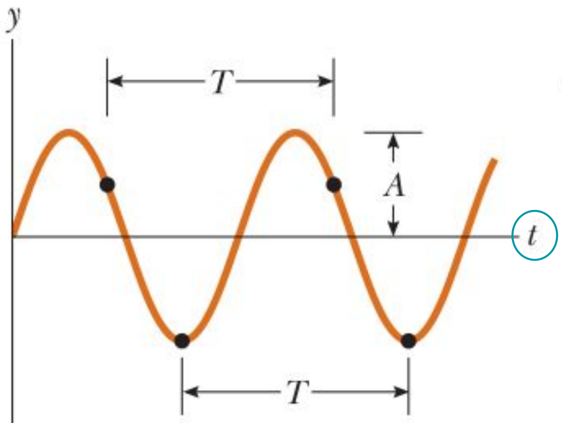
$$y(x, t) = f(x + vt)$$

La onda viaja a la izquierda

modelo de onda progresiva



a)



Las ondas viajan con una rapidez específica, y esta rapidez depende de las propiedades del medio perturbado

$$y(x, 0) = A \operatorname{sen} ax$$ función de onda (sinusoidal)

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

$$x = \lambda/2.$$

El siguiente valor de x para el que y es cero

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

$$y(x, 0) = A \operatorname{sen}\left(\frac{2\pi}{\lambda}x\right)$$

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

Ecuación general de la onda

número de onda angular k

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

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

Frecuencia angular

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

Rapidez de una onda sinusoidal

$$v = \lambda f$$

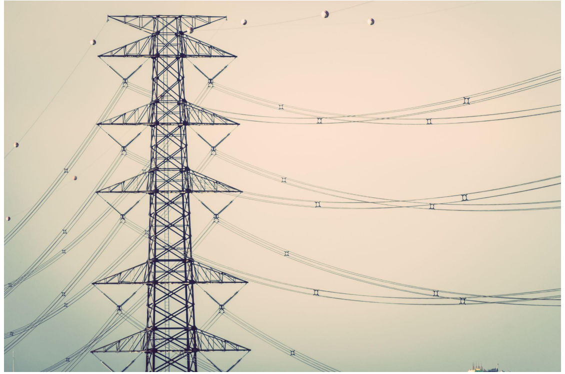
$$v = \frac{\omega}{k}$$

Función de onda para una onda sinusoidal

$$y = A \operatorname{sen}(kx - \omega t)$$

rapidez o velocidad de ondas en cuerdas

$$\sqrt{\frac{\text{Propiedad elástica}}{\text{Propiedad inercial}}}$$



De la función de onda podemos obtener una expresión para la velocidad transversal de cualquier partícula en una onda transversal, que llamaremos v_y

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

$$v_y = \left.\frac{dy}{dt}\right]_{x=\text{constante}} = \frac{\partial y}{\partial t} = -\omega A \cos(kx - \omega t)$$

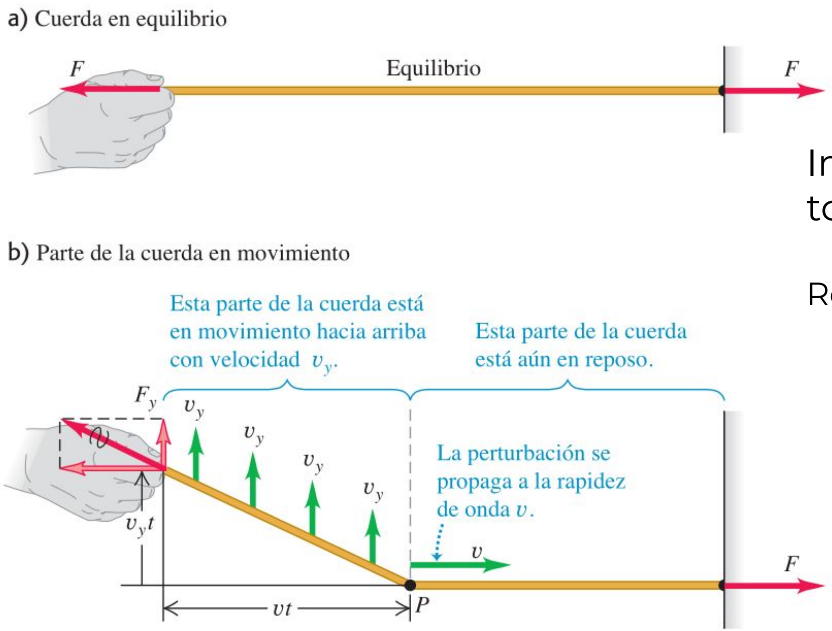
$$a_y(x,t) = \frac{\partial^2 y(x,t)}{\partial t^2} = -\omega^2 A\cos(kx - \omega t) = -\omega^2 y(x,t)$$

$$\frac{\partial^2 y(x,t)}{\partial x^2} = -k^2 A\cos(kx - \omega t) = -k^2 y(x,t)$$

$$\omega = vk$$

$$\frac{\partial^2 y(x,t)/\partial t^2}{\partial^2 y(x,t)/\partial x^2} = \frac{\omega^2}{k^2} = v^2 \qquad \text{y}$$

$$\frac{\partial^2 y(x,t)}{\partial x^2} = \frac{1}{v^2}\frac{\partial^2 y(x,t)}{\partial t^2} \qquad \text{(ecuación de onda)}$$



impulso de la fuerza F_y hasta el instante t es $F_y t$

$$F_y t = m v_y$$

Impulso = al cambio en la componente transversal total del momento lineal

Relación de triángulos → $$\frac{F_y}{F} = \frac{v_y t}{vt} \qquad F_y = F\frac{v_y}{v}$$

$$\text{Impulso transversal} = F_y t = F\frac{v_y}{v}t$$

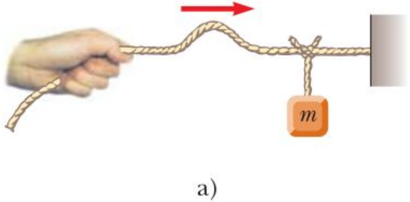
$$\text{Momento lineal transversal} = (\mu v t)v_y$$

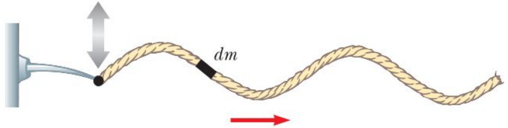
$$F\frac{\cancel{v_y}}{v}\cancel{t} = \mu v \cancel{t}\cancel{v_y}$$

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

La tensión en la cuerda es T o F y su masa por unidad de longitud es μ

Potencia de la onda

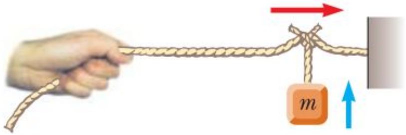




energía cinética

$$dK = \tfrac{1}{2}(dm)v_y^{\,2}$$

$$dK = \tfrac{1}{2}(\mu dx)v_y^{\,2}$$



$$dK = \tfrac{1}{2}\mu[-\omega A \cos(kx - \omega t)]^2\, dx = \tfrac{1}{2}\mu\omega^2 A^2 \cos^2(kx - \omega t)\, dx$$

$$t = 0, \Longrightarrow dK = \tfrac{1}{2}\mu\omega^2 A^2 \cos^2(kx)\, dx$$

$$K_\lambda = \int dK = \int_0^\lambda \tfrac{1}{2}\mu\omega^2 A^2 \cos^2(kx)\, dx = \tfrac{1}{2}\mu\omega^2 A^2 \int_0^\lambda \cos^2(kx)\, dx$$

$$= \tfrac{1}{2}\mu\omega^2 A^2 \left[\tfrac{1}{2}x + \frac{1}{4k}\,\mathrm{sen}\, 2kx\right]_0^\lambda = \tfrac{1}{2}\mu\omega^2 A^2\left[\tfrac{1}{2}\lambda\right] = \tfrac{1}{4}\mu\omega^2 A^2 \lambda$$

$$\boxed{k \equiv \frac{2\pi}{\lambda}}$$

energía potencial

$$U_\lambda = \tfrac{1}{4}\mu\omega^2 A^2 \lambda$$

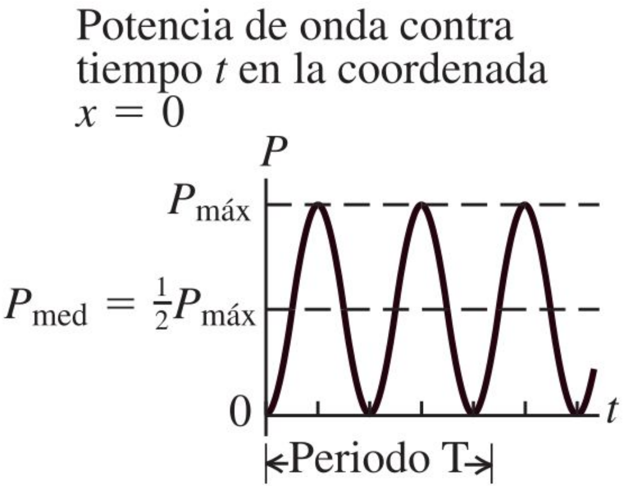
$$E_\lambda = U_\lambda + K_\lambda = \tfrac{1}{2}\mu\omega^2 A^2 \lambda$$

$$\mathcal{P} = \frac{T_{\mathrm{OM}}}{\Delta t} = \frac{E_\lambda}{T} = \frac{\tfrac{1}{2}\mu\omega^2 A^2 \lambda}{T} = \tfrac{1}{2}\mu\omega^2 A^2\left(\frac{\lambda}{T}\right)$$

Potencia de la onda

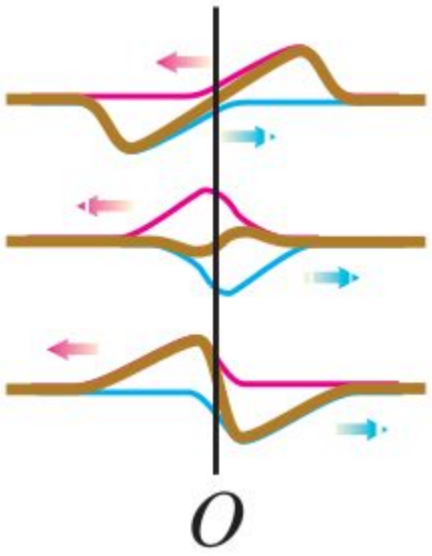
Potencia de onda:
En el caso de una onda mecánica senoidal, la potencia media Pmed es proporcional al cuadrado de la amplitud de la onda y al cuadrado de la frecuencia. En el caso de ondas que se propagan en tres dimensiones, la intensidad de la onda I es inversamente proporcional a la distancia de la fuente.

$$\mathcal{P} = \frac{1}{2}\mu\omega^2 A^2 v$$



Superposición de ondas:

Una onda que llega a una frontera del medio de propagación se refleja. El principio de superposición indica que el desplazamiento de onda total en cualquier punto donde se traslapan dos o más ondas es la suma de los desplazamientos de las ondas individuales.

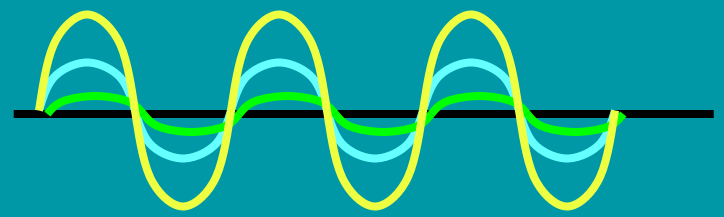


$$y(x,t) = y_1(x,t) + y_2(x,t)$$

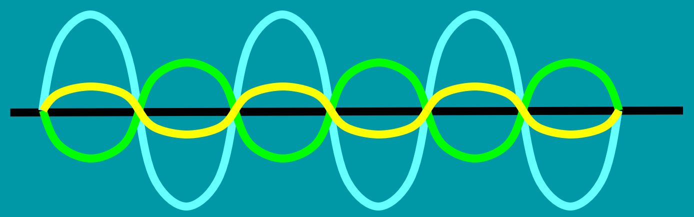
(principio de superposición)

El principio de superposición

- Cuando en el mismo medio existen dos o más ondas (**azul y verde**), cada onda se mueve como si las otras estuvieran ausentes.
- El desplazamiento resultante de estas ondas en cualquier punto es la onda suma algebraica (**amarillo**) de los dos desplazamientos.



Interferencia constructiva



Interferencia destructiva

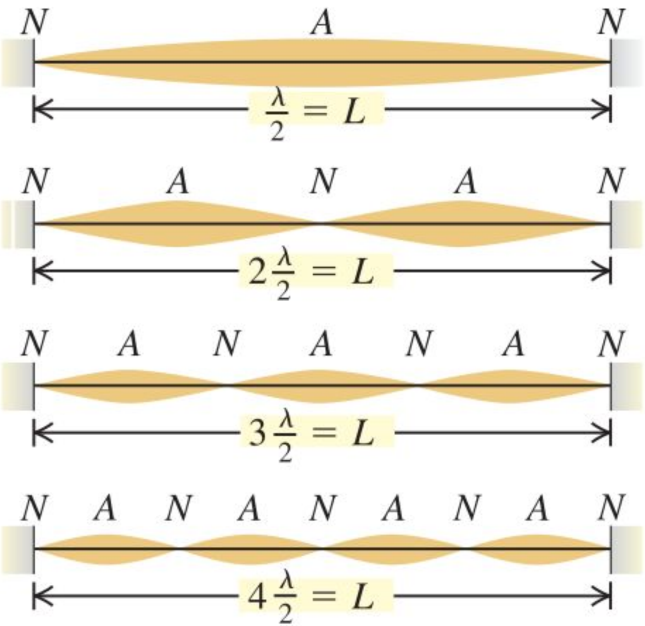
Ondas sonoras estacionarias y modos normales

Cuando una onda senoidal se refleja de un extremo fijo o libre de una cuerda estirada, las ondas incidente y reflejada se combinan para formar una onda senoidal estacionaria que contiene nodos y antinodos. Dos nodos adyacentes están separados una distancia $\lambda/2$, lo mismo que dos antinodos adyacentes.

$$y(x, t) = (A_{SW} \operatorname{sen} kx) \operatorname{sen} \omega t$$

Onda estacionaria en una cuerda, extremo fijo en x=0

$$f_n = n\frac{v}{2L} = nf_1 \quad (n = 1, 2, 3, \ldots)$$



Si ambos extremos de una cuerda con longitud L están fijos, sólo puede haber ondas estacionarias si L es un múltiplo entero de $\lambda/2$. Cada frecuencia y su patrón de vibración asociado se denomina modo normal. La frecuencia más baja f_1 es la frecuencia fundamental

$$f_1 = \frac{1}{2L}\sqrt{\frac{F}{\mu}}$$

Ondas sonoras

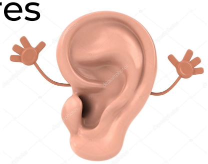
El sonido es una onda mecánica longitudinal que viaja a través de un medio elástico.

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

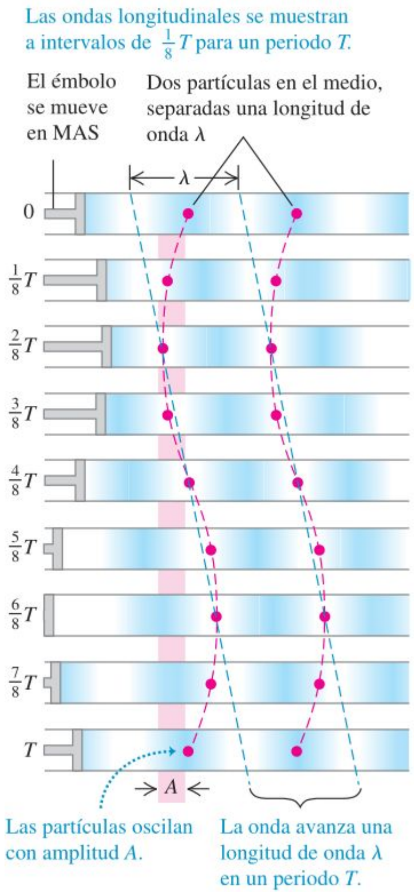
Muchas cosas vibran en el aire, lo que produce una onda sonora.

La amplitud A es el máximo desplazamiento de una partícula del medio con respecto a su posición de equilibrio. Por lo tanto, A también se conoce como amplitud de desplazamiento

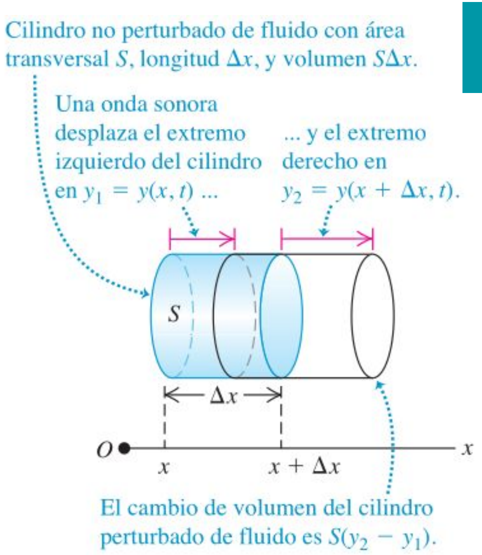
El oído humano es sensible a las ondas en el intervalo de frecuencias de 20 a 20,000 Hz, llamada gama audible, pero también usamos el término sonido para ondas similares con frecuencias mayores (ultrasónicas) y menores (infrasónicas)



Las ondas sonoras también pueden describirse en términos de variaciones de presión en diversos puntos



Ondas sonoras como fluctuaciones de presión



$$\Delta V = S(y_2 - y_1) = S[y(x + \Delta x, t) - y(x, t)]$$

$$\frac{dV}{V} = \lim_{\Delta x \to 0} \frac{S[y(x + \Delta x, t) - y(x, t)]}{S\Delta x} = \frac{\partial y(x, t)}{\partial x}$$

B: módulo de volumen

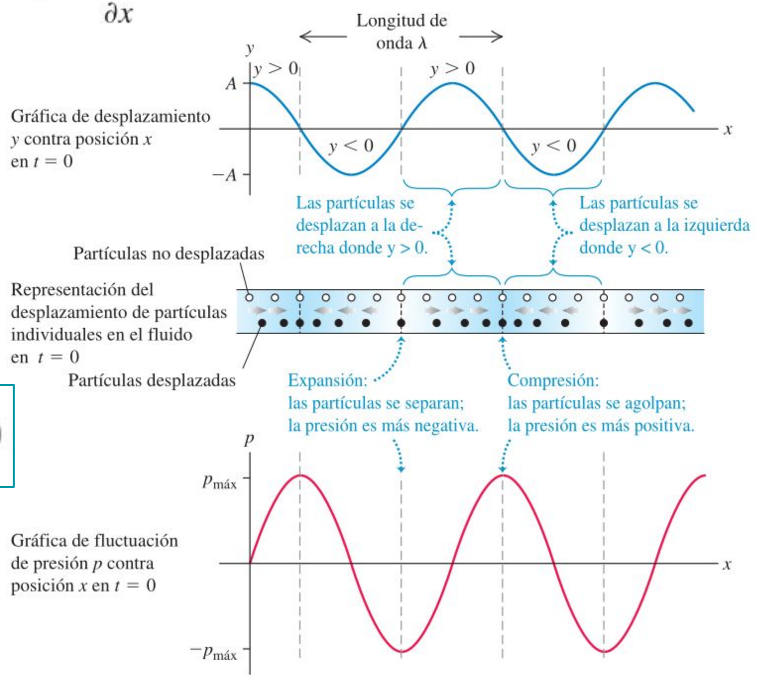
$$p(x, t) = -B\frac{\partial y(x, t)}{\partial x}$$

Recordamos

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

$$\boxed{p(x, t) = BkA\,\mathrm{sen}(kx - \omega t)}$$

Al propagarse una onda sonora a lo largo del eje x, los extremos izquierdo y derecho sufren desplazamientos distintos y_1 y y_2, respectivamente



la cantidad BkA representa la máxima fluctuación de presión, que llamamos amplitud de presión y denotamos con

$$p_{máx} = BkA \qquad \text{(onda sonora senoidal)}$$

Rapidez de las ondas sonoras

$$v = \sqrt{\frac{\text{Fuerza de restitución que vuelve el sistema al equilibrio}}{\text{Inercia que se opone al retorno al equilibrio}}}$$

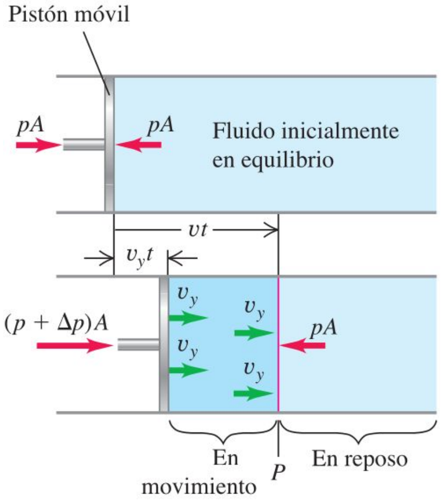
$$\text{Momento lineal longitudinal} = (\rho v t A) v_y$$

$$B = \frac{-\text{Cambio de presión}}{\text{Cambio fraccionario de volumen}} = \frac{-\Delta p}{-A v_y t / A v t}$$

$$\Delta p = B \frac{v_y}{v} \qquad \text{Impulso longitudinal} = \Delta p A t = B \frac{v_y}{v} A t$$

$$B \frac{v_y}{v} A t = \rho v t A v_y$$

$$v = \sqrt{\frac{B}{\rho}}$$



$$v = \sqrt{\frac{Y}{\rho}} \quad \text{(rapidez de una onda longitudinal en una varilla sólida)}$$

$$v = \sqrt{\frac{\gamma R T}{M}} \quad \text{(rapidez del sonido en un gas ideal)}$$

Intensidad del sonido

$$v_y(x,t) = \frac{\partial y(x,t)}{\partial t} = \omega A \operatorname{sen}(kx - \omega t)$$

$$p(x,t)v_y(x,t) = [BkA \operatorname{sen}(kx - \omega t)][\omega A \operatorname{sen}(kx - \omega t)]$$

$$= B\omega k A^2 \operatorname{sen}^2(kx - \omega t)$$

La intensidad es, por definición, el valor promedio de $p(x,t)v_y(x,t)$

$$I = \frac{1}{2} B\omega k A^2 \qquad \omega = vk \text{ y } v^2 = B/\rho$$

$$I = \frac{1}{2}\sqrt{\rho B}\,\omega^2 A^2 \qquad \text{(intensidad de una onda sonora senoidal)}$$

El nivel de intensidad de sonido b de una onda sonora

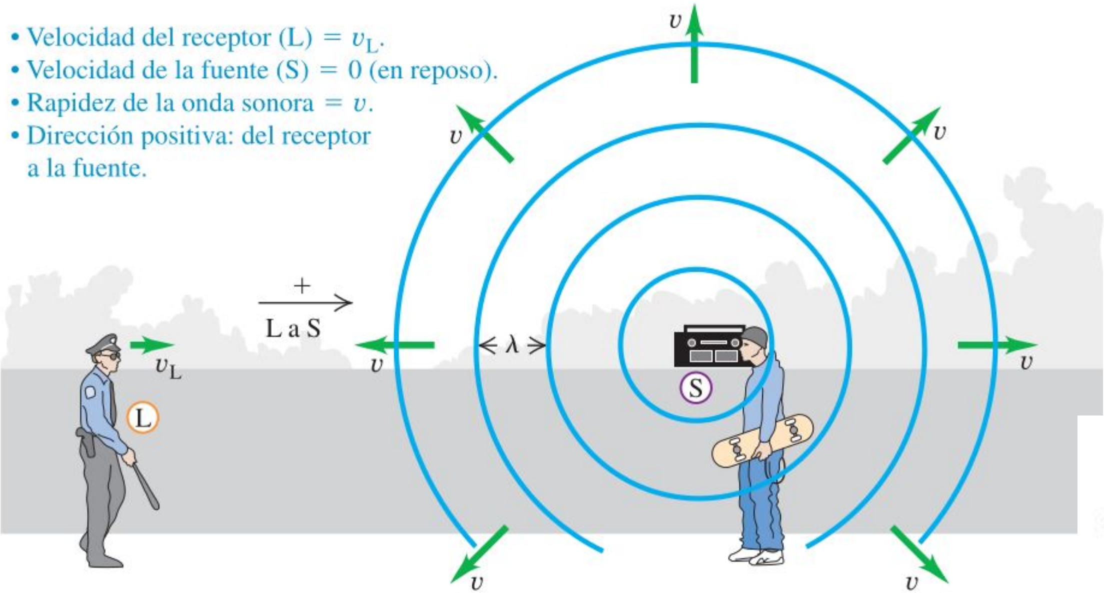
$$\beta = (10\text{ dB}) \log \frac{I}{I_0}$$

I_0 es una intensidad de referencia que se toma como 10^{-12} W/m2, aprox el umbral de la audición humana a 1000 Hz

El efecto Doppler

Receptor en movimiento

- Velocidad del receptor (L) = v_L.
- Velocidad de la fuente (S) = 0 (en reposo).
- Rapidez de la onda sonora = v.
- Dirección positiva: del receptor a la fuente.



La fuente emite una onda sonora con frecuencia f_S

$$\lambda = v/f_S$$

rapidez de propagación relativa al receptor de $(v + v_L)$

Un receptor que se mueve hacia una fuente estacionaria oye una frecuencia más alta que la frecuencia fuente, porque la rapidez de la onda relativa al receptor es mayor que la rapidez de la onda relativa al medio v

$$f_L = \frac{v + v_L}{\lambda} = \frac{v + v_L}{v/f_S}$$

$$f_L = \left(\frac{v + v_L}{v}\right) f_S = \left(1 + \frac{v_L}{v}\right) f_S$$

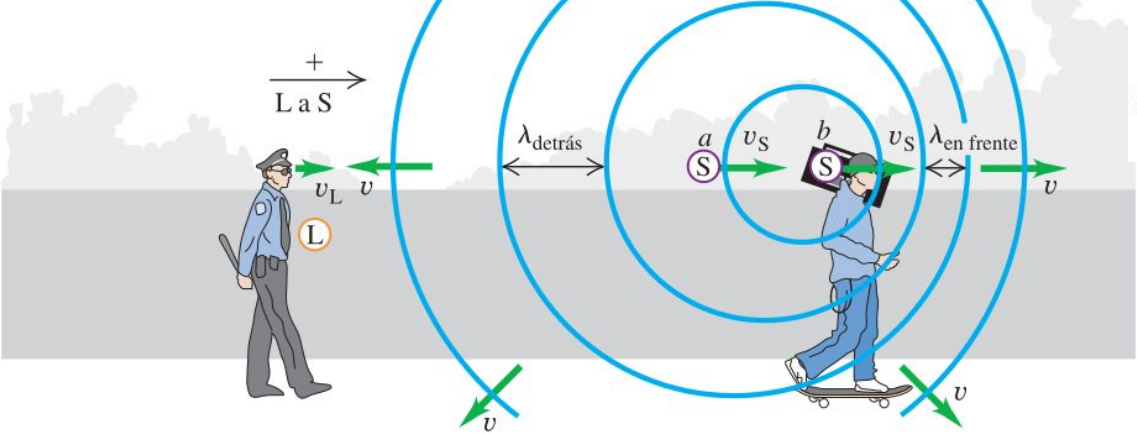
(receptor móvil, fuente estacionaria)

El efecto Doppler

Fuente en movimiento y receptor en movimiento

$$\lambda_{\text{al frente}} = \frac{v}{f_S} - \frac{v_S}{f_S} = \frac{v - v_S}{f_S} \quad \text{(longitud de onda adelante de una fuente móvil)}$$

- Velocidad del receptor (L) $= v_L$.
- Velocidad de la fuente (S) $= v_S$.
- Rapidez de la onda sonora $= v$.
- Dirección positiva: del receptor a la fuente.

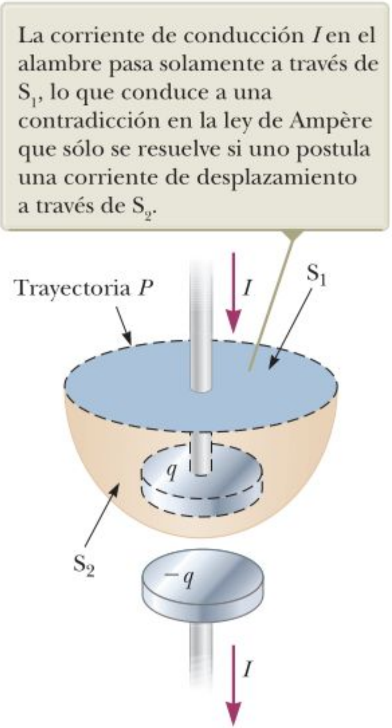


$$\lambda_{\text{detrás}} = \frac{v + v_S}{f_S} \quad \text{(longitud de onda atrás de una fuente móvil)}$$

$$f_L = \frac{v + v_L}{\lambda_{\text{detrás}}} = \frac{v + v_L}{(v + v_S)/f_S}$$

expresa la frecuencia f_L oída por el receptor en términos de la frecuencia f_S de la fuente

Ondas Electromagnéticas



La comprensión de las ondas electromagnéticas ha llevado a muchos sistemas de comunicación prácticos, incluidos la radio, la televisión, los sistemas de telefonía celular, la conectividad inalámbrica a internet y la optoelectrónica

ley de Ampère

$$\oint \vec{\mathbf{B}} \cdot d\vec{\mathbf{s}} = \mu_0 I$$

cuando la trayectoria se considera como la frontera de S_2

$$\oint \vec{\mathbf{B}} \cdot d\vec{\mathbf{s}} = 0$$

Por tanto, ¡se tiene una situación contradictoria que surge de la discontinuidad de la corriente! ¡La ley de Ampère da dos respuestas diferentes para las dos superficies!

Ley de Ampère-Maxwell


James Clerk Maxwell
Físico teórico escocés (1831-1879)

Maxwell resolvió este problema al postular un término adicional en el lado derecho de la ley de Ampère, que incluye un factor llamado corriente de desplazamiento I_d que se define como

$$I_d \equiv \epsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt}$$

$\boldsymbol{\varepsilon}_0$ es la permitividad del espacio libre

$$\Phi_E \equiv \int \vec{\mathbf{E}} \cdot d\vec{\mathbf{A}}$$ flujo eléctrico

$$\oint \vec{\mathbf{B}} \cdot d\vec{\mathbf{s}} = \mu_0(I + I_d) = \mu_0 I + \mu_0\epsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt}$$

Ecuaciones de Maxwell y los descubrimientos de Hertz

Ley de Gauss ▶ $$\oint \vec{\mathbf{E}} \cdot d\vec{\mathbf{A}} = \frac{q}{\epsilon_0}$$ relaciona un campo eléctrico con la distribución de carga que lo produce

Ley de Gauss del magnetismo ▶ $$\oint \vec{\mathbf{B}} \cdot d\vec{\mathbf{A}} = 0$$ el flujo magnético neto a través de una superficie cerrada es cero. No existen monopolos magnéticos

Ley de Faraday ▶ $$\oint \vec{\mathbf{E}} \cdot d\vec{\mathbf{s}} = -\frac{d\Phi_B}{dt}$$ la ley de Faraday es la corriente inducida en una espira conductora colocada en un campo magnético variable en el tiempo

Ley de Ampère-Maxwell ▶ $$\oint \vec{\mathbf{B}} \cdot d\vec{\mathbf{s}} = \mu_0 I + \epsilon_0 \mu_0 \frac{d\Phi_E}{dt}$$

Ley de fuerza de Lorenz ▶ $$\vec{\mathbf{F}} = q\vec{\mathbf{E}} + q\vec{\mathbf{v}} \times \vec{\mathbf{B}}$$

Ecuaciones de Maxwell y los descubrimientos de Hertz


Heinrich Rudolf Hertz
Físico alemán (1857-1894)

imaginemos una región del espacio que no contiene cargas ni corrientes

Estas ecuaciones sugieren que los campos eléctricos y magnéticos pueden existir en un espacio libre de carga y corriente

$$\oint \vec{\mathbf{E}} \cdot d\vec{\mathbf{A}} = 0$$

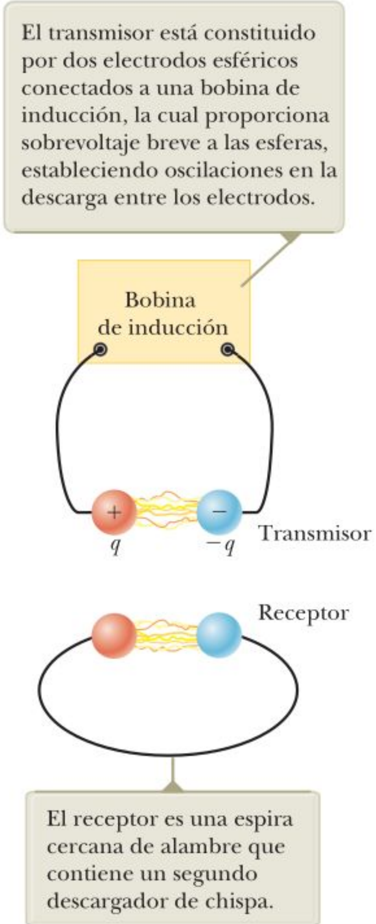
$$\oint \vec{\mathbf{B}} \cdot d\vec{\mathbf{A}} = 0$$

una variación de tiempo en un campo B genera un campo E y viceversa

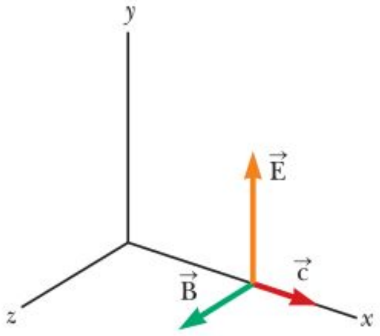
$$\oint \vec{\mathbf{E}} \cdot d\vec{\mathbf{s}} = -\frac{d\Phi_B}{dt}$$

$$\oint \vec{\mathbf{B}} \cdot d\vec{\mathbf{s}} = \epsilon_0 \mu_0 \frac{d\Phi_E}{dt}$$

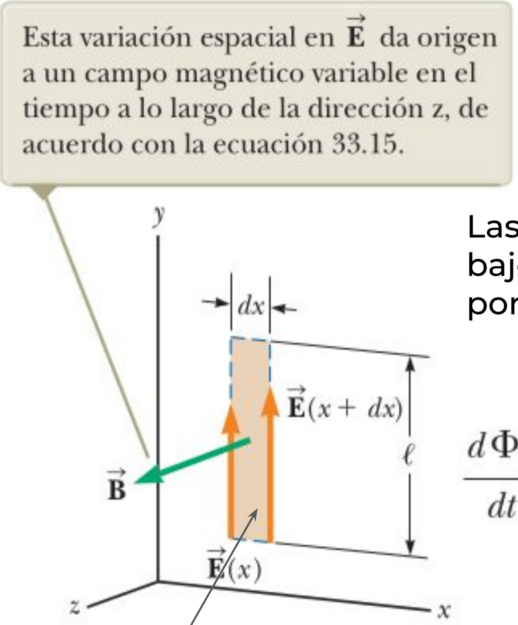
En el espacio vacío, donde q = 0 e I = 0, la solución a estas dos ecuaciones muestra que la rapidez a la cual se desplazan las ondas electromagnéticas es igual a la rapidez medida de la luz. Este resultado permitió a Maxwell predecir que las ondas de luz son una forma de radiación electromagnética



Ondas electromagnéticas planas



Campos eléctricos y magnéticos de una onda electromagnética que viaja a la velocidad c en la dirección x positiva. Los vectores de campo se muestran en un instante de tiempo y en una posición en el espacio



integral de línea de $\vec{\mathbf{E}} \cdot d\vec{\mathbf{s}}$ alrededor de este rectángulo en el sentido del reloj.

Las aportaciones de lo alto y bajo del rectángulo son cero porque E es perpendicular a d_s

$$\frac{d\Phi_B}{dt} = \ell\, dx \left.\frac{dB}{dt}\right|_{\text{constante } x} = \ell\, dx \frac{\partial B}{\partial t}$$

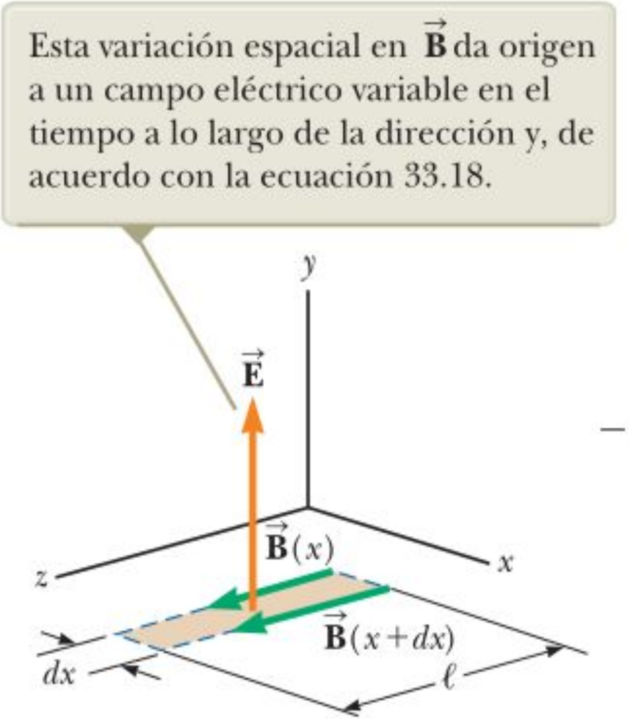
lado derecho del rectángulo

$$E(x + dx) \approx E(x) + \left.\frac{dE}{dx}\right|_{\text{constante } t} dx = E(x) + \frac{\partial E}{\partial x}\, dx$$

$$\oint \vec{\mathbf{E}} \cdot d\vec{\mathbf{s}} = \left[E(x) + \frac{\partial E}{\partial x} dx\right]\ell - [E(x)]\ell \approx \ell\left(\frac{\partial E}{\partial x}\right) dx$$

$$\ell\left(\frac{\partial E}{\partial x}\right) dx = -\ell\, dx \frac{\partial B}{\partial t}$$

$$\frac{\partial E}{\partial x} = -\frac{\partial B}{\partial t}$$



$$\oint \vec{\mathbf{B}} \cdot d\vec{\mathbf{s}} = [B(x)]\ell - \left[B(x) + \frac{\partial B}{\partial x}dx\right]\ell \approx -\ell\left(\frac{\partial B}{\partial x}\right) dx$$

El flujo eléctrico a través del rectángulo es $\Phi_E = E\ell\,dx,$

$$\frac{\partial \Phi_E}{\partial t} = \ell\ dx\frac{\partial E}{\partial t}$$

$$-\ell\left(\frac{\partial B}{\partial x}\right) dx = \mu_0 \epsilon_0\, \ell\ dx \left(\frac{\partial E}{\partial t}\right)$$

$$\frac{B}{\partial x} = -\mu_0\epsilon_0 \frac{\partial E}{\partial t}$$

la derivada de la ecuación respecto a x

$$\ell\left(\frac{\partial E}{\partial x}\right) dx = -\ell\, dx\frac{\partial B}{\partial t}$$

$$\frac{\partial^2 E}{\partial x^2} = -\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{\partial B}{\partial t}\right) = -\frac{\partial}{\partial t}\left(\frac{\partial B}{\partial x}\right) = -\frac{\partial}{\partial t}\left(-\mu_0\epsilon_0 \frac{\partial E}{\partial t}\right)$$

$$\boxed{\frac{\partial^2 E}{\partial x^2} = \mu_0\epsilon_0 \frac{\partial^2 E}{\partial t^2}}$$

integral de línea de $\vec{\mathbf{B}} \cdot d\vec{\mathbf{s}}$ alrededor de este rectángulo en el sentido de giro reloj.

Ondas electromagnéticas planas

$$\frac{\partial^2 E_y(x,t)}{\partial x^2} = \boxed{\epsilon_0 \mu_0} \frac{\partial^2 E_y(x,t)}{\partial t^2}$$

Como el campo eléctrico E_y debe satisfacer esta ecuación, se comporta como una onda con una configuración que viaja por el espacio con rapidez definida

tiene la misma forma que la ecuación general de onda

$$\frac{\partial^2 y(x,t)/\partial t^2}{\partial^2 y(x,t)/\partial x^2} = \frac{\omega^2}{k^2} = v^2 \qquad \text{y}$$

$$\frac{\partial^2 y(x,t)}{\partial x^2} = \boxed{\frac{1}{v^2}} \frac{\partial^2 y(x,t)}{\partial t^2} \qquad \text{(ecuación de onda)}$$

la rapidez de la onda v está dada por

$$\frac{1}{v^2} = \epsilon_0 \mu_0$$

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}$$

Campos eléctrico y magnético sinusoidales ▶

$$E = E_{\text{máx}} \cos\,(kx - \omega t)$$

$$B = B_{\text{máx}} \cos\,(kx - \omega t)$$

$E_{\text{máx}}$ y $B_{\text{máx}}$ son los valores máximos de los campos

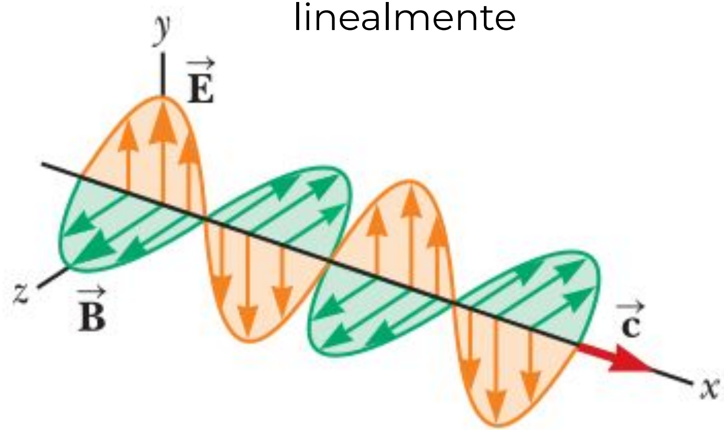
El número de onda angular es $k = 2\pi/\lambda$

λ es la longitud de onda (modelo de onda viajera)

Frecuencia angular es $= 2\pi f,$

$$\frac{\omega}{k} = \frac{2\pi f}{2\pi/\lambda} = \lambda f = c$$

onda polarizada linealmente



Campos eléctrico y magnético sinusoidales

derivadas parciales de las ecuaciones (respecto a x) y (respecto a t)

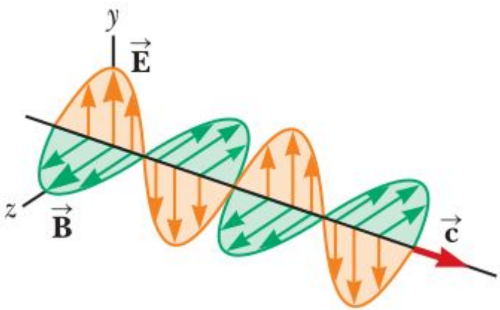
$$\frac{\partial E}{\partial x} = -kE_{\text{máx}} \operatorname{sen}(kx - \omega t)$$

$$\frac{\partial B}{\partial t} = \omega B_{\text{máx}} \operatorname{sen}(kx - \omega t)$$

Recordamos

$$\ell\left(\frac{\partial E}{\partial x}\right) dx = -\ell\, dx \frac{\partial B}{\partial t}$$

$$\frac{\partial E}{\partial x} = -\frac{\partial B}{\partial t}$$



$$kE_{\text{máx}} = \omega B_{\text{máx}}$$

$$\frac{E_{\text{máx}}}{B_{\text{máx}}} = \frac{\omega}{k} = c$$

$$\frac{E_{\text{máx}}}{B_{\text{máx}}} = \frac{E}{B} = c$$

en todo instante, la razón de la magnitud del campo eléctrico con la magnitud del campo magnético en una onda electromagnética es igual a la rapidez de la luz

Preguntas?

Próxima clase

Interferencia en doble rendija y en láminas delgadas