Escola Tècnica Superior d'Enginyeries Industrial i Aeronàutica de Terrassa
UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

Departament de Física i Enginyeria Nuclear
UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

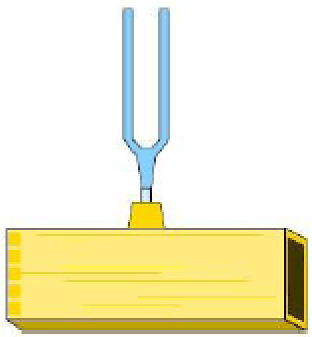
Modulo II: Ondas

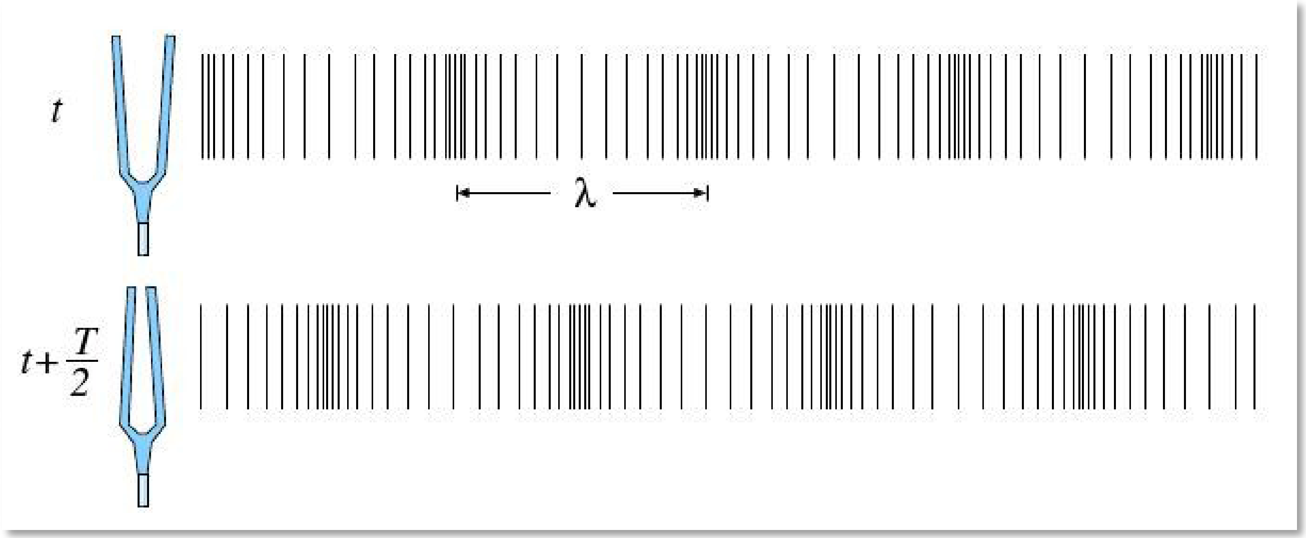
1. Introducción a las Ondas
2. Ondas en cuerdas
3. **Ondas sonoras y acústica**

3.1. Ondas en un fluido
3.2. Potencia y Intensidad de una onda
3.3. Atenuación por la distancia
3.4. Percepción del sonido y decibelios
3.5. Efecto Doppler y ondas de choque
3.6. Interferencia y Difracción
3.7. Reflexión y refracción de ondas sonoras
3.8. Ondas sonoras estacionarias

Bibliografía: Tipler y Mosca, 6a edición, Capítulo 15
Física con Ordenador de Angel Franco García:
http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/ondas/MovOndulatorio.html

3.1 Ondas armónicas en un fluido (líquido o gas)





- Las ondas sonoras **armónicas** son generadas por una **fuente** (foco emisor: altavoz, diapasón, cuerda de piano, etc) que vibra efectuando un **MAS**.
- La fuente hace que las moléculas vecinas también oscilen (longitudinalmente) efectuando un MAS alrededor de sus posiciones de equilibrio.
- Las moléculas vecinas a la fuente chocan a su vez con otras moléculas haciéndolas oscilar y se propaga la onda.

Ondas en un fluido

- En un fluido (líquido o gas) se producen y se propagan ondas longitudinales (ondas sonoras o acústicas).
- Son desplazamientos longitudinales de las moléculas, que se transmiten por colisiones con las moléculas vecinas.
- La velocidad de propagación de estas ondas depende de las propiedades del fluido (presión, temperatura, densidad, etc.)

- En un ***líquido***

  B = módulo de compresibilidad (N/m^2)

  ρ = densidad del fluido (Kg/m^3)

$$\boxed{v = \sqrt{B / \rho}}$$

- En un ***gas***

$$\boxed{v = \sqrt{\gamma P / \rho}}$$

  γ = constante adiabática del gas (adimensional)

  ρ = densidad del gas (Kg/m^3)

  P = presión del gas (Pa=N/m^2)

- En un ***gas ideal***

$$\boxed{v = \sqrt{\gamma RT / M}}$$

  T = temperatura en ºK

  R = 8.314 J/(mol ºK)

  M = masa molecular

Velocidad de ondas sonoras

En el aire:

$$v = \sqrt{\gamma\, RT / M}$$

γ =1.4

T = temperatura en grados Kelvin: ***T*** (ºK) = ***T***(ºC) + 273

R = constante universal de los gases: ***R*** = 8.314 J/(mol ºK)

M = masa molecular del gas. Para el aire, ***M*** = 0.029 kg/mol

$\Rightarrow$ La velocidad del sonido en el aire a 0ºC y a 20 ºC es **331 m/s y 343 m/s**

En el agua:

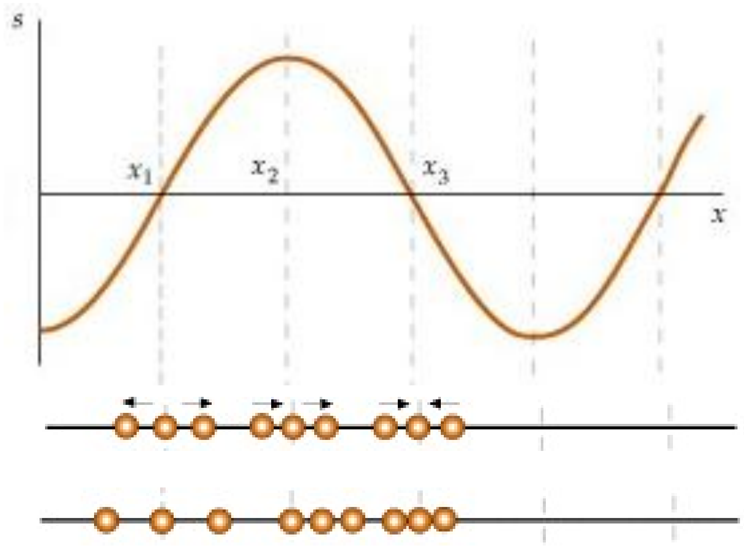
$$v = \sqrt{B / \rho}$$

B=2.1x10^9Pa

ρ=1000 kg/m^3: **v =1450 m/s**

Ondas sonoras en un fluido

- Los desplazamientos de las moléculas tienen la dirección del movimiento de la onda ***longitudinal*** y dan lugar a ***variaciones de la densidad y de la presión***.



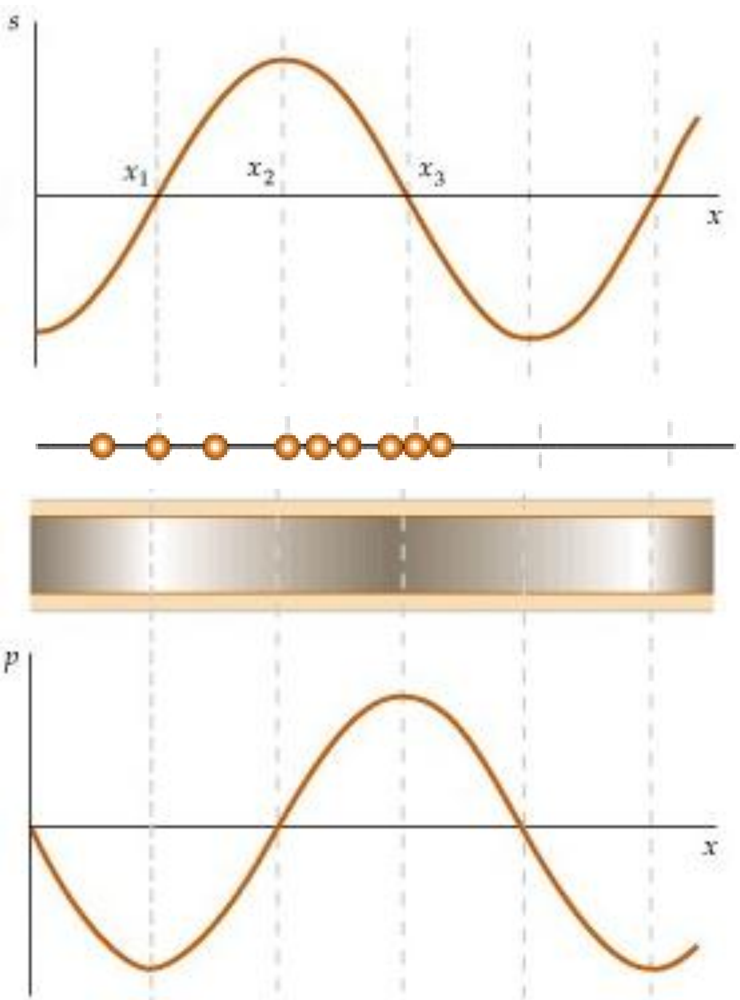
Desplazamiento longitudinal de las moléculas en un cierto instante (respecto a su posición de equilibrio).

Las flechas indican la dirección de las velocidades de las moléculas.

Posición de las moléculas en un instante posterior

La densidad de moléculas es máxima en x_3 y mínima en x_1

Relación entre el desplazamiento de las moléculas y la presión y la densidad del gas



$$s = s_0 \cos(kx - \omega t)$$

Onda de desplazamiento

El cambio de densidad del gas es proporcional al **cambio de presión** (**sobrepresión**) y está desfasado 90º respecto al cambio de posición.

$$p = p_0 \cos(kx - \omega t - \pi/2)$$

Onda de sobrepresión

Los nodos de la onda de sobrepresión son vientres de la onda de desplazamiento y viceversa.

Se puede demostrar:
ρ= densidad de masa

$$\boxed{p_0 = v\omega\rho\, s_0}$$

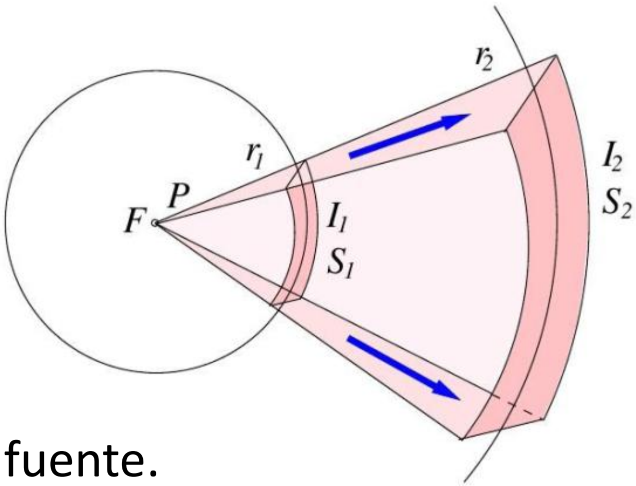
3.2 Potencia, intensidad y densidad de energía de una onda

- Potencia media: energía por unidad de tiempo emitida por el foco de la onda (promedio temporal)

$$\boxed{P = \left\langle \frac{\Delta E}{\Delta t} \right\rangle}$$

- Intensidad de una onda: potencia media emitida por unidad de área normal a la dirección de propagación de la onda.

$$\boxed{I = \frac{P}{S}}$$



En una onda circular o esférica,
la intensidad decrece con la distancia a la fuente.

- Densidad de energía: energía por unidad de volumen

$$\boxed{\eta = \frac{\Delta E}{\Delta V}}$$

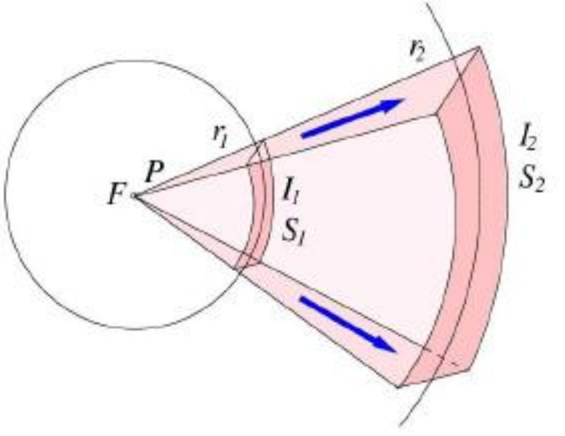
3.3 Atenuación con la distancia al foco

Onda circular

$$I = \frac{P}{2\pi\, r}$$

La intensidad de una **onda plana circular** es inversamente proporcional a la distancia al foco.

Onda esférica

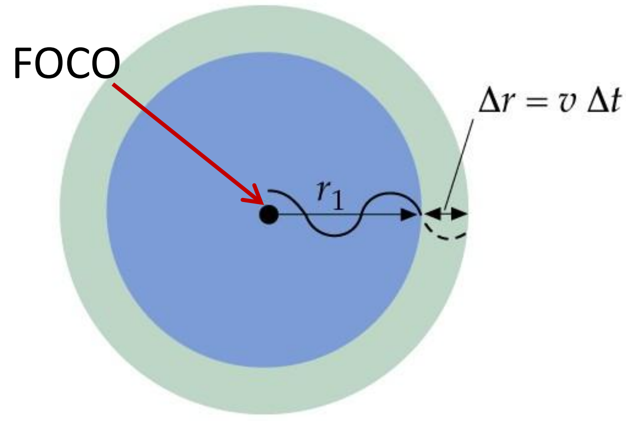


$$I = \frac{P}{4\pi\, r^2}$$

La intensidad de una **onda esférica** es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia al foco.

Mostraremos que: **Intensidad = Densidad de energía × velocidad de la onda**

Intensidad y densidad de energía



Volume of shell $= Av\ \Delta t$

- Consideramos una onda esférica que a tiempo *t* alcanzo el radio r_1.
- La energía de la onda es la energía de las partículas que están en la región $r<r_1$ y efectúan un MAS de **amplitud s_0** y **frecuencia ω**. En la región exterior a r_1 las partículas están en reposo.
- Luego de un intervalo de tiempo Δt la onda avanza una distancia $\Delta r = v\Delta t$ y las partículas que están en esta región comienzan a hacer un MAS.
- En el tiempo Δt la variación de la energía de la onda es igual a la energía de las partículas que comienzan a hacer el MAS (contenidas en la región gris).

$$\Delta E = \frac{1}{2}\Delta m \omega^2 s_0^2$$

$$\Delta m = \rho \Delta V = \rho A v \Delta t$$

$$\Delta E = \frac{1}{2}(\rho A v \Delta t)\omega^2 s_0^2$$

$$I = \frac{P}{A} = \frac{\Delta E / \Delta t}{A} = \frac{1}{2}\rho v \omega^2 s_0^2$$

$$\eta = \frac{\Delta E}{\Delta V} = \frac{1}{2}\frac{\Delta m}{\Delta V}\omega^2 s_0^2 = \frac{1}{2}\rho\omega^2 s_0^2$$

$$\boxed{I = \eta v}$$

- La intensidad y la densidad de energía son proporcionales **al cuadrado de la amplitud** de la onda (s_0)

Ejercicios

1. El diafragma de un altavoz de 30 cm de diámetro vibra con una frecuencia de 1 kHz y una amplitud de 0.02 mm. Suponiendo que las moléculas de aire próximas al diafragma tienen esta misma amplitud de vibración, determinar (a) la amplitud de la oscilación de la presión justo delante del diafragma, (b) la intensidad sonora en esta posición y (c) la potencia acústica emitida. (d) Si el sonido se emite uniformemente en la semiesfera anterior, determinar la intensidad a 5 m del altavoz. Densidad del aire: 1.29 kg/m^3; velocidad del sonido en el aire = 340 m/s.

2. Una onda longitudinal de frecuencia 100 Hz se propaga por una barra homogénea de sección 12x10^{-4} m^2 y densidad 4000 kg/m^3. Si la amplitud de la onda es 8.0x10^{-6} m, ¿cuál es la densidad de energía (en J/m^3) en la barra?
a) 6.06x10^{-5} b) 1.40 c) 0.0103 d) 0.0505 e) ninguna de las anteriores

3.4 Percepción del sonido: nivel de intensidad β

- El oído humano es capaz de detectar frecuencias entre 20 Hz y 20kHz
- Por debajo de 16Hz: ***infrasonidos***.
- Por encima de 20 kHz: ***ultrasonidos***.
- Algunos animales pueden detectar frecuencias en ultrasonido o infrasonido.
- Nuestra percepción de la variación de un sonido no es proporcional a la variación de la intensidad del sonido sino a la **variación relativa** de la intensidad:

$$d\beta = C_1 \frac{dI}{I} \qquad\qquad C_1 = 10$$

- β = nivel de intensidad en decibelios
- Umbral de audición de sonido:

$$\boxed{\beta = 10 \ \log_{10} \frac{I}{I_0}}$$

$\boldsymbol{I}_0 = 10^{-12}$ W/m$^2 \Rightarrow \boldsymbol{I}=\boldsymbol{I}_0$, $\beta=0$

- Limite superior de sonidos (sin daño al oído): $\boldsymbol{I}$ = 1W/m^2, β=120 dB

Ejemplo: un material absorbente del sonido atenúa el nivel de intensidad en 30 dB. ¿ en que factor disminuye la intensidad del sonido? *Respuesta: en 10^{-3}*

Nivel de intensidad de algunos sonidos

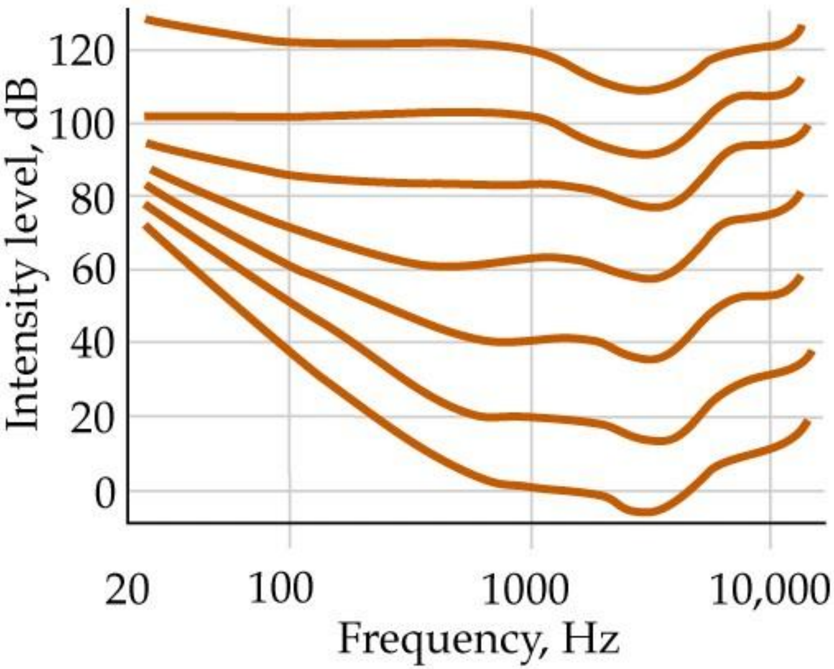
140 dB	**Umbral del dolor**
130 dB	Avión despegando
120 dB	Motor de avión en marcha
110 dB	Concierto
100 dB	Perforadora eléctrica
90 dB	Tráfico
80 dB	Tren
70 dB	Aspiradora
50/60 dB	Aglomeración de gente
40 dB	Conversación
20 dB	Biblioteca
10 dB	Respiración tranquila
0 dB	**Umbral de audición**

Curvas de sonoridad y sonómetro

• La sensibilidad del oído depende de la frecuencia de sonido.

Curvas de sonoridad: nivel de intensidad en función de la frecuencia para sonidos de igual sensación sonora.

• La sonoridad (***S***) mide la "sensación sonora".
• La unidad Sonoridad es "fon" (Fonio) y es igual al número de dB de un sonido de 1000 Hz que origine la misma sensación sonora.



- El **sonómetro** es un instrumento de medida que sirve para medir niveles de intensidad sonora.
- Compuesto por un micrófono + circuito electrónico + display.

Modulo II: Ondas

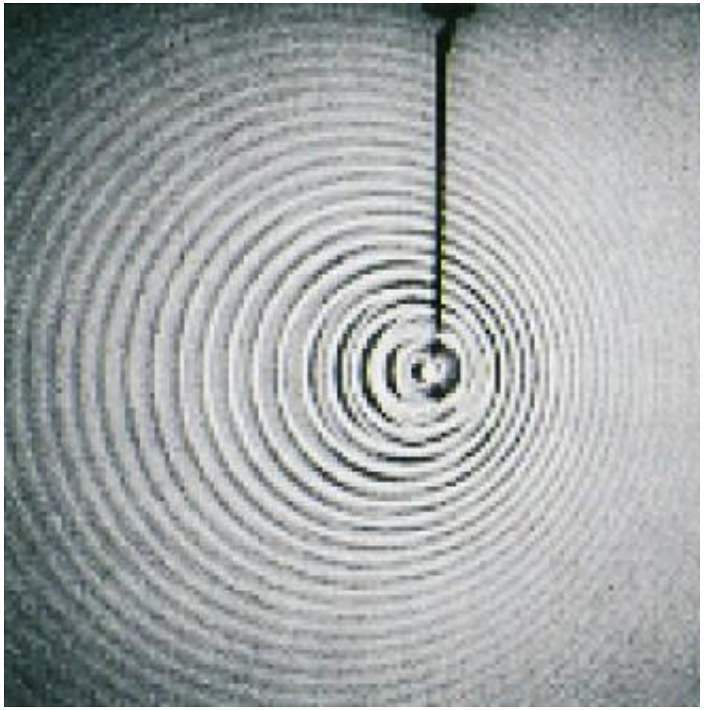
1. Introducción a las Ondas
2. Ondas en cuerdas
3. **Ondas sonoras y acústica**

3.1. Ondas sonoras en un fluido
3.2. Intensidad de una onda
3.3. Atenuación por la distancia
3.4. Percepción del sonido y decibelios
3.5. Efecto Doppler y ondas de choque
3.6. Interferencia y Difracción
3.7. Reflexión y refracción de ondas sonoras
3.8. Ondas sonoras estacionarias

Bibliografía: Tipler y Mosca, 6a edición, Capítulos 15 y 16, 31 y 33
Física con Ordenador de Angel Franco García:
http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/ondas/MovOndulatorio.html

3.5 Efecto Doppler

Ondas en una cubeta producidas por un foco que se mueve hacia la derecha. Los frentes de onda se encuentran mas próximos delante del foco y mas separados detrás del foco.



$$\boxed{\lambda = \frac{v}{f}}$$

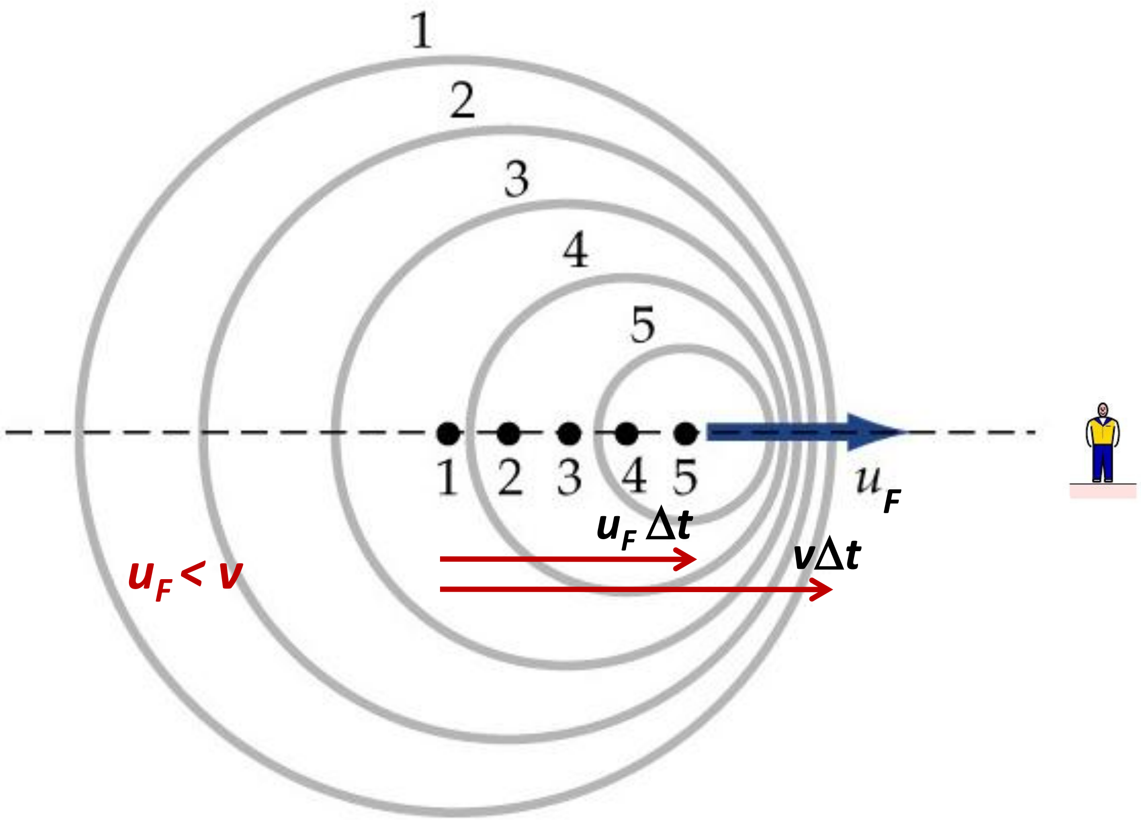
- Efecto del movimiento del foco: **cambio de la longitud de onda** $\Rightarrow$ **cambio de la frecuencia**
- **Delante del foco** los frentes están más juntos: menor longitud de onda $\Rightarrow$ mayor frecuencia
- **Detrás del foco** los frentes están mas espaciados: mayor longitud de onda $\Rightarrow$ menor frecuencia

Efecto Doppler

- Cuando un foco que emite ondas y un observador que las recibe tienen un movimiento relativo, la frecuencia recibida, $\boldsymbol{f_R}$, por el receptor no es la misma que la frecuencia emitida, $\boldsymbol{f_F}$, por el foco.
- Cuando el observador y la fuente se acercan entre si, $\boldsymbol{f_R} > \boldsymbol{f_F}$.
- Cuando se alejan entre si, $\boldsymbol{f_R} < \boldsymbol{f_F}$
- Ejemplo: cambio de tono de la bocina de un coche cuando este se acerca o se aleja de nosotros.
- En el análisis que haremos consideramos que el medio en que se propaga la onda esta en reposo y, respecto del medio, las velocidades del foco emisor, del receptor y de propagación de la onda son $\boldsymbol{u_F}$, $\boldsymbol{u_R}$ y $\boldsymbol{v}$ respectivamente.
- Asumimos que $\boldsymbol{u_F < v}$ y $\boldsymbol{u_R < v}$
- Estudiaremos tres casos:

  - foco móvil y receptor fijo
  - foco fijo y receptor móvil
  - foco móvil y receptor móvil

Caso 1: receptor fijo, foco móvil



- En un intervalo de tiempo Δt el foco emite N ondas de período T_F y frecuencia $f_F = 1/T_F$.
- Se cumple que:

$$N = \Delta t / T_F = f_F\,\Delta t$$

- Delante de la fuente, estas N ondas están contenidas en una distancia $(v - u_F)\,\Delta t$
- Detrás de la fuente, están contenidas en una distancia $(v + u_F)\,\Delta t$.
- λ = distancia/N

Los frentes de onda están numerados según la posición donde estaba el foco cuando el frente fue emitido.

Delante de la fuente: $\lambda_R = (v - u_F)\,\Delta t / N$
Detrás de la fuente: $\lambda_R = (v + u_F)\,\Delta t / N$

Caso 1: *observador fijo, foco móvil*

$$\lambda_R = (v \mp u_F)\frac{\Delta t}{N}$$ (Receptor delante de la fuente **-** , detrás de la fuente **+**)

- Usando: ***N=f*$_F$ *Δt***

$$\lambda_R = \frac{v \mp u_F}{f_F} = \frac{v\left(1 \mp \frac{u_F}{v}\right)}{f_F}$$

- Usando: **λ = *v/f***

$$\frac{v}{f_R} = \frac{v\left(1 \mp \frac{u_F}{v}\right)}{f_F} \Rightarrow \boxed{f_R = \frac{f_F}{1 \mp \frac{u_F}{v}}}$$

- La frecuencia que mide un observador delante de la fuente es:

  (foco aproximándose) $$f_R = \frac{f_F}{1 - u_F / v}$$

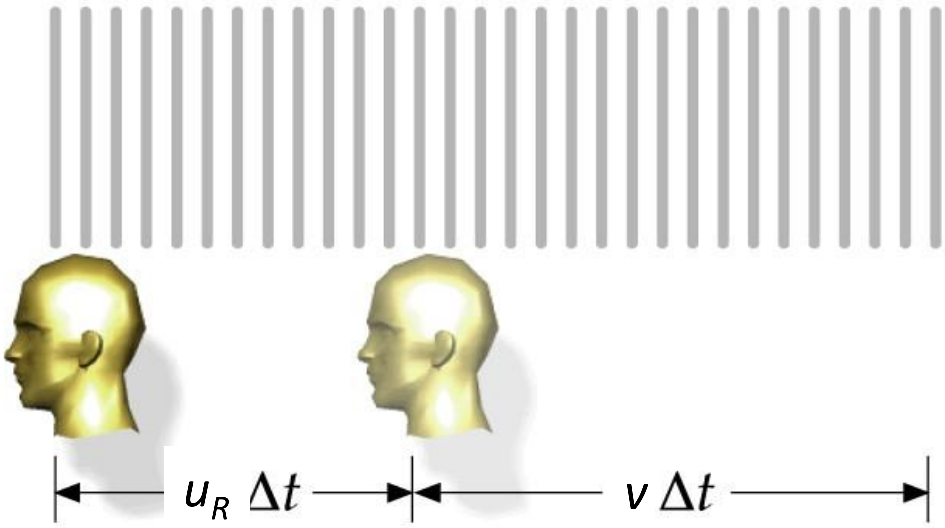
- Detrás de la fuente:

  (foco alejándose) $$f_R = \frac{f_F}{1 + u_F / v}$$

Caso 2: *receptor móvil, foco fijo*

Cuando el observador esta *quieto*, el numero de frentes de onda, ***N***, que le llegan en un intervalo de tiempo ***Δt*** es el contenido en la distancia ***vΔt***

$$N = \frac{v\Delta t}{\lambda}$$



Cuando el observador se **acerca** al foco con velocidad ***u_R***, (se mueve en sentido opuesto a la onda) atraviesa un numero adicional de frentes de onda, los contenidos en la distancia ***u_R Δt***

$$N = (v + u_R)\Delta t / \lambda$$

El período que mide el receptor es: $T_R = \dfrac{\Delta t}{N} = \dfrac{\lambda}{v + u_R}$

La frecuencia que mide el receptor cuando se acerca al foco es: $f_R = \dfrac{v + u_R}{\lambda}$

Si se aleja: $f_R = \dfrac{v - u_R}{\lambda}$

$$f_R = \frac{v \pm u_R}{\lambda} = \frac{v}{\lambda}\left(1 \pm \frac{u_R}{v}\right) = f_F\left(1 \pm \frac{u_R}{v}\right)$$

Caso 3: *receptor y foco móviles*

(+ si el receptor se acerca al foco)

(- si el foco se acerca al receptor)

$$\left.\begin{aligned} f_R &= \frac{v}{\lambda_R}\left(1 \pm \frac{u_R}{v}\right) \\ \lambda_R &= \frac{v}{f_F}\left(1 \mp \frac{u_F}{v}\right) \end{aligned}\right\} \quad f_R = f_F \frac{\left(1 \pm \frac{u_R}{v}\right)}{\left(1 \mp \frac{u_F}{v}\right)}$$

$$\Rightarrow \boxed{\frac{f_R}{v + u_R} = \frac{f_F}{v + u_F}}$$

u_R y ***u_F*** son positivas en el sentido Receptor → Foco (cuando R se aproxima a F y cuando F se aleja de R)

- Las ecuaciones que hemos visto son válidas en el sistema de referencia en que el medio de propagación de la onda (aire, agua, etc) está en reposo.
- Si ***u_R*** y ***u_F*** son velocidades que no tienen la dirección receptor – fuente, hay que sustituirlas por las componentes en la dirección del receptor – fuente.
- Si <u>el ***medio*** en que se propagan las ondas se mueve</u> con velocidad ***v_m*** <u>respecto al sistema de referencia</u> (ejemplo: el sistema de referencia fijo en tierra, las ondas sonoras se propagan en aire y sopla viento) : en las ecuaciones hay que sustituir la velocidad de propagación de la onda por $v \to v_m + v$

Ejemplos

1 La frecuencia de la bocina de un coche parado es 400 Hz. Si el coche se mueve a 34 m/s (≈122 km/h) a través de aire en reposo hacia un receptor en reposo, determinar (a) la longitud de onda y la frecuencia observada por el receptor. Si el coche esta parado y un receptor se mueve a 34 m/s hacia el coche, determinar (c) la frecuencia observada. Velocidad del sonido en el aire: 343 m/s. *Resp: a) 0.77 m, b) 445 Hz, c) 440 Hz*

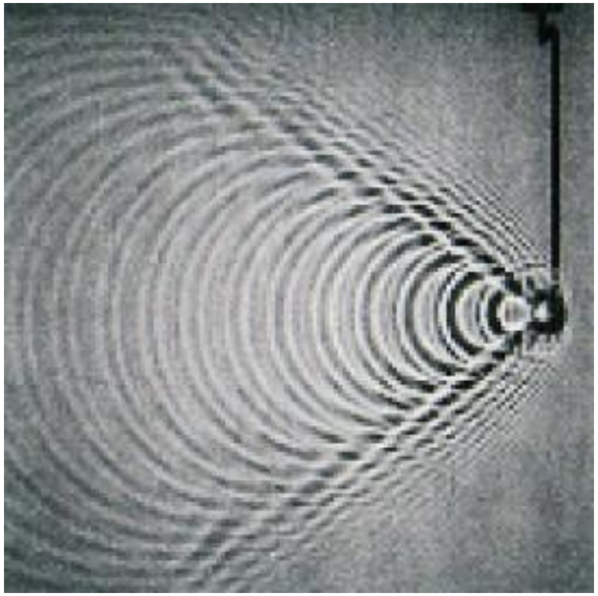
2 La frecuencia del silbato de un tren parado es 500 Hz. Determinar la frecuencia con la que un observador oirá el silbato si el tren se acerca a 100 km/h. *Resp: 540.5 Hz*

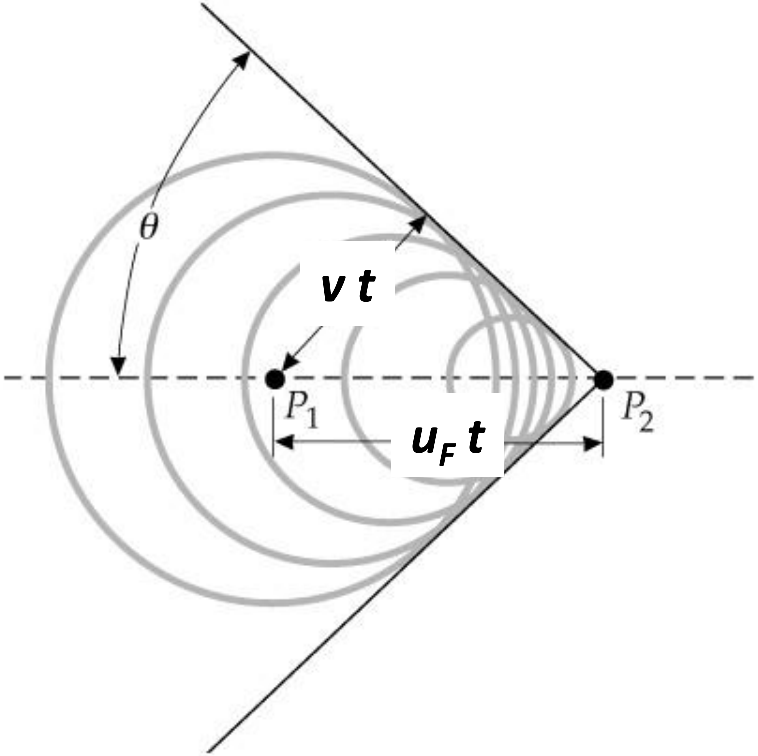
3 Un barco se acerca a un acantilado, y para medir su velocidad se hace sonar la sirena y se mide la frecuencia de las ondas reflejadas. Si la sirena del barco emite a 150 Hz, y el eco le llega a 155 Hz, determinar la velocidad del barco. *Resp: 20,2 km/h*

4 Una sirena de 1000 Hz emite sonido acercándose desde la posición que ocupa un observador en reposo hacia un acantilado a 10 m/s. Cuál es la frecuencia de las pulsaciones que recibirá el observador?. *Resp: 60 Hz*

Ondas de Choque

Ondas en una cubeta cuando el foco se mueve con velocidad mayor que la onda, ***$u_F > v$***





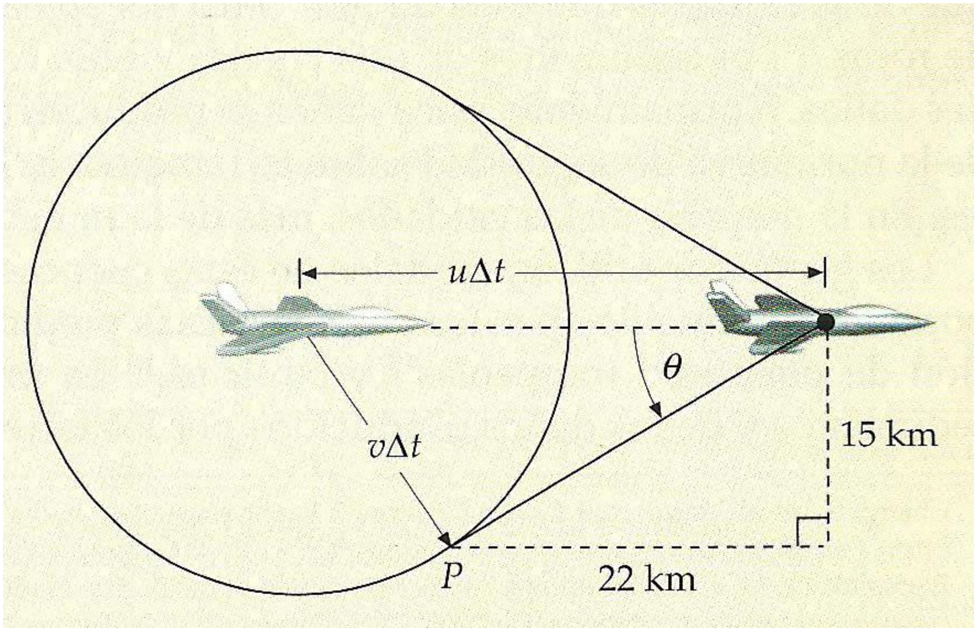
$$\boxed{\sin\theta = \frac{v}{u_F}}$$

Ejemplos:

- sonido de un avión supersónico. **Número de Mach** = ***$u_F/v > 1$***
- la onda de proa producidas por un barco.

Ejemplo

Un avión supersónico vuela a una altura de 15 km moviéndose hacia la derecha. En el punto P el sonido del avión se escucha cuando el avión se encuentra a 22 km de dicho punto como indica la figura. ¿Cual es la velocidad del avión? Velocidad del sonido en el aire: 343 m/s. *Resp: 609 m/s.*



Modulo II: Ondas

1. Introducción a las Ondas
2. Ondas en cuerdas
3. **Ondas sonoras y acústica**

3.1. Ondas sonoras en un fluido
3.2. Intensidad de una onda
3.3. Atenuación por la distancia
3.4. Percepción del sonido y decibelios
3.5. Efecto Doppler y ondas de choque
3.6. Interferencia y Difracción
3.7. Reflexión y refracción de ondas sonoras
3.8. Ondas sonoras estacionarias

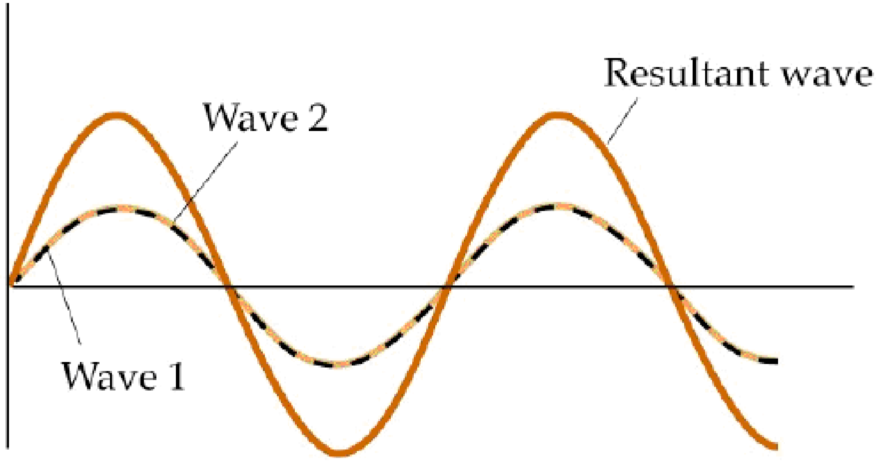
Bibliografía: Tipler y Mosca, 6a edición, Capítulo 15
Física con Ordenador de Angel Franco García:
http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/ondas/MovOndulatorio.html

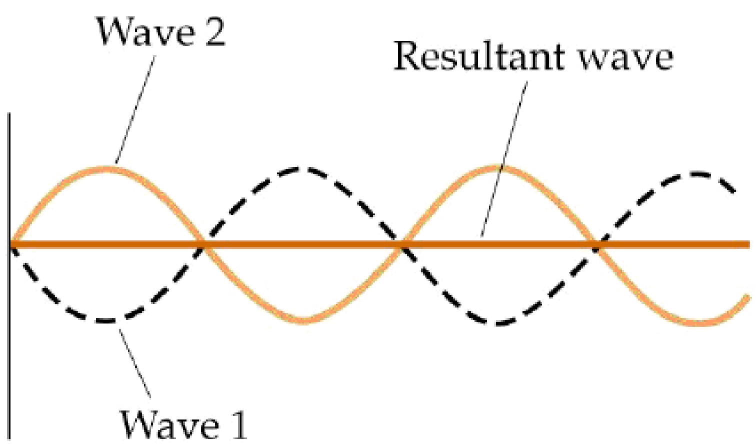
3.6 Interferencia de ondas armónicas

Interferencia: superposición de dos o mas ondas que se encuentran en un punto del espacio.

Ya lo hemos visto: ***la teoría es la misma que para ondas en una cuerda***: la **interferencia** es ***constructiva*** o ***destructiva*** dependiendo de la diferencia de fase entre las ondas.

Superposición de dos ondas armónicas de igual frecuencia procedentes del mismo foco

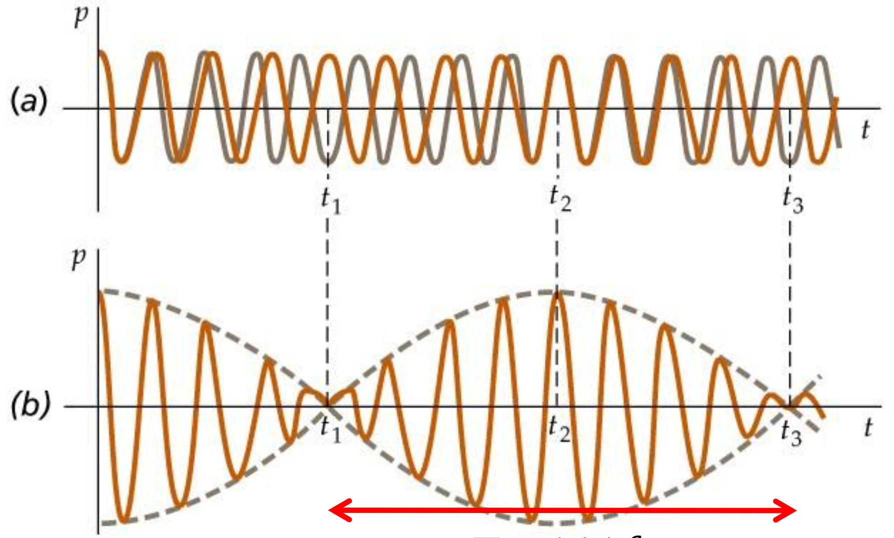




Batidos o Pulsaciones: Suma de ondas de frecuencias distintas pero muy próximas

Dos ondas que tienen frecuencias muy próximas.

Suma de las dos ondas.

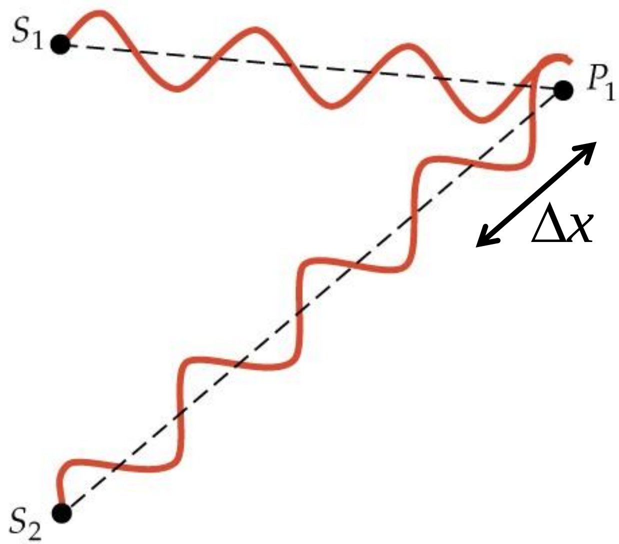


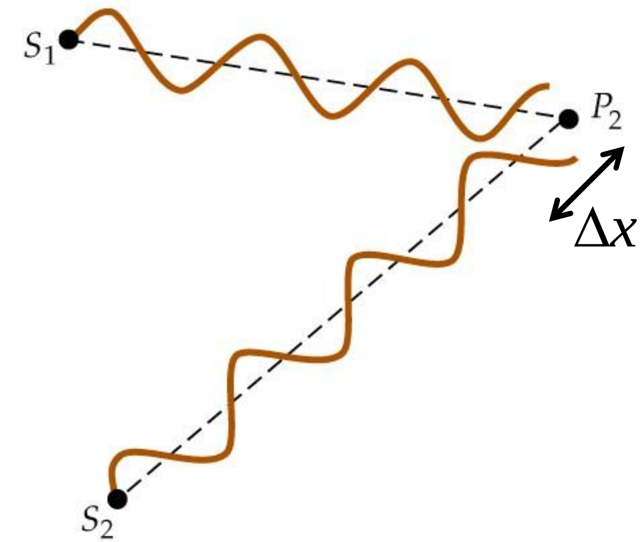
$$A\cos(\omega_1 t) + A\cos(\omega_2 t) = 2A\cos\left(\frac{\omega_1 - \omega_2}{2}t\right)\cos\left(\frac{\omega_1 + \omega_2}{2}t\right) = \underbrace{2A\cos\left(\frac{\Delta\omega}{2}t\right)}_{A_{ef}(t)}\cos(\omega t)$$

Ejemplo: Cuando se golpea un diapasón de 440 Hz (nota la) y al mismo tiempo se pulsa la cuerda desafinada de una guitarra que debe dar la nota la, se escuchan 3 pulsaciones por segundo. Luego de tensar un poco mas la cuerda, se escuchan 6 pulsaciones por segundo. ¿Cual era la frecuencia de la cuerda antes de tensarla? *Resp: 443 Hz.*

Interferencia: superposición de dos o mas ondas que se encuentran en un punto del espacio.

Superposición de dos ondas de igual frecuencia procedentes de dos focos distintos en fase





Interferencia constructiva:

$$\boxed{\Delta x = n\lambda \quad n = 0,1,2,3,\ldots}$$

Interferencia destructiva:

$$\boxed{\Delta x = (n + 1/2)\lambda \quad n = 0,1,2,3,\ldots}$$

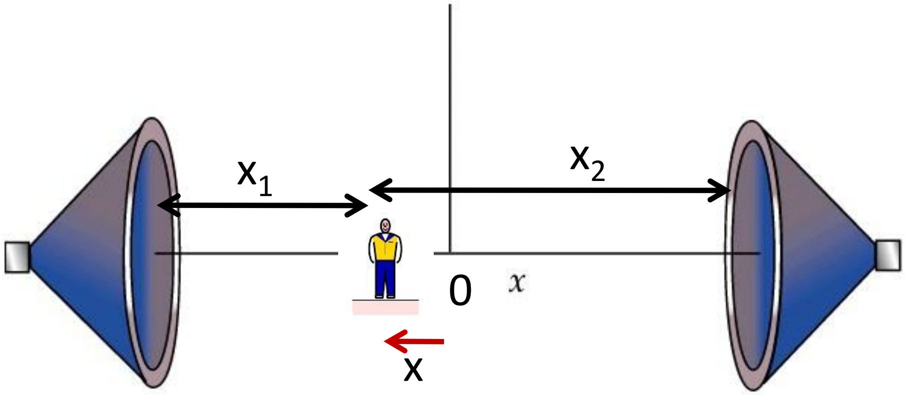
Δx es la diferencia de la longitud de los caminos recorridos por las dos ondas hasta llegar al observador

Ejemplo

Dos altavoces enfrentados entre si a una distancia de 180 cm están accionados por un oscilador común de audio a 686 Hz. Localizar los puntos entre los altavoces a lo largo de la línea que los une, para los cuales la intensidad del sonidos es máxima y mínima. Despreciar la variación de intensidad del sonido con la distancia y usar 340 m/s para la velocidad del sonido

$$\lambda = \frac{v}{f} = 50\,\mathrm{cm}$$

$$\Delta x = |x_2 - x_1|$$



Máximos $\Delta x = n\lambda$

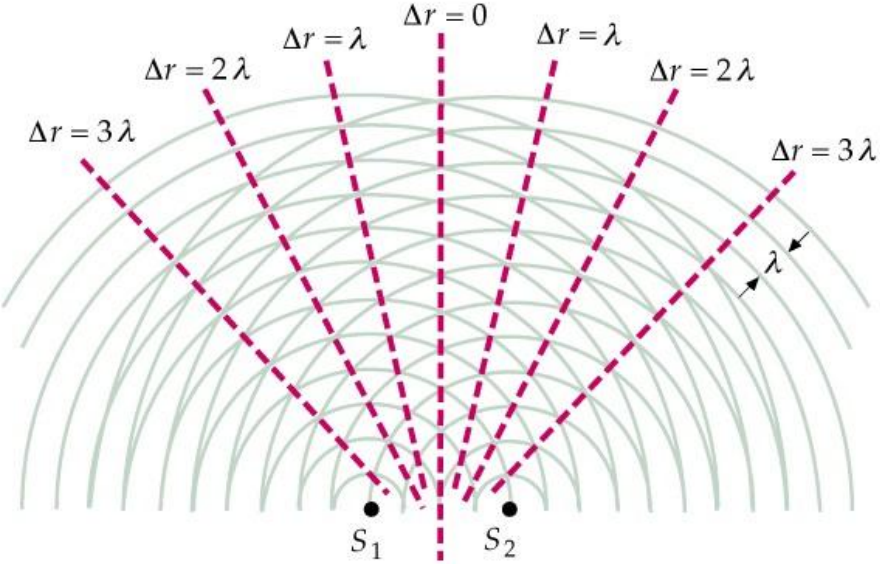
$$x_{\max} = \pm\frac{n\lambda}{2}$$

Mínimos $\Delta x = \left(n + \frac{1}{2}\right)\lambda$

$$x_{\min} = \pm\frac{(2n+1)\lambda}{4}$$

Interferencia de dos focos en fase y que emiten ondas de igual frecuencia

Ondas en una cubeta producidas por dos focos que oscilan con igual frecuencia y en fase.



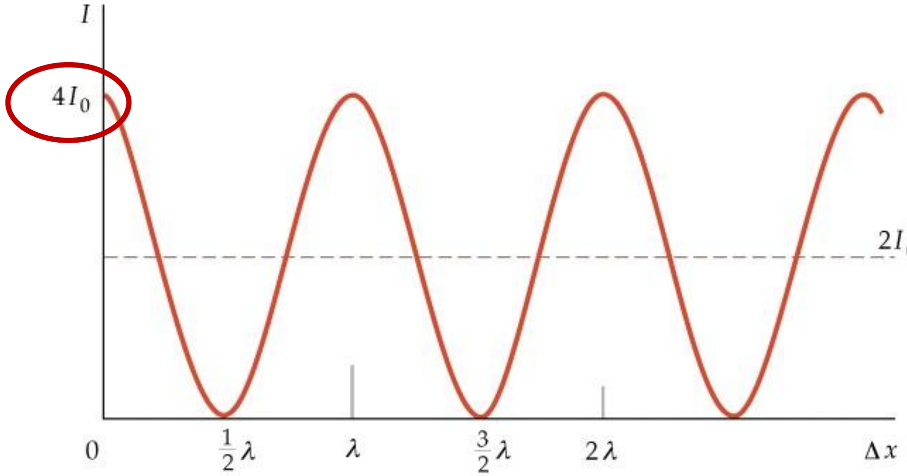
(b)

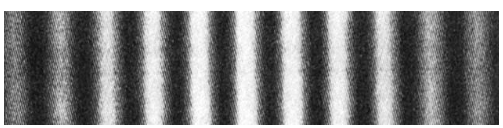
En los puntos donde se cortan las circunferencias (líneas rojas punteadas) la interferencia es **constructiva**: las distancias recorridas desde las dos fuentes son tales que la diferencia de caminos es:

$$\Delta x = n\lambda \quad n = 0,1,2,3,\ldots$$

Interferencia de dos focos en fase

Patrón de interferencia: máximos y mínimos (de sonido, de luz, etc) según la distancia de cada punto a las dos fuentes.





Grafica de la intensidad de la onda en función de la diferencia de caminos a las dos fuentes de intensidad I_0 cada una que emiten ondas en fase.

Se suman las amplitudes de las ondas, $A=A_1+A_2$.

La intensidad de la onda resultante es

$$I=(A_1+A_2)^2 = A_1^2+A_2^2 + 2A_1A_2 \neq I_1+I_2$$

Coherencia

Para que dos focos que emiten ondas produzcan un **patrón de interferencia** no es necesario que emitan ondas en fase. Si están desfasadas $\lambda/2$ las posiciones de los máximos y mínimos se intercambian

- en los puntos en que $\Delta x = n\lambda$, la interferencia será destructiva porque la diferencia de fase de los focos es $\lambda/2$
- en los puntos en que $\Delta x = (n+1/2)\lambda$, la interferencia será constructiva porque la diferencia de fase de los focos se compensa con $\lambda/2$ en la diferencia de caminos.

Para que haya un **patrón de interferencia** la diferencia de fase entre dos focos tiene que ser **constante en el tiempo**.

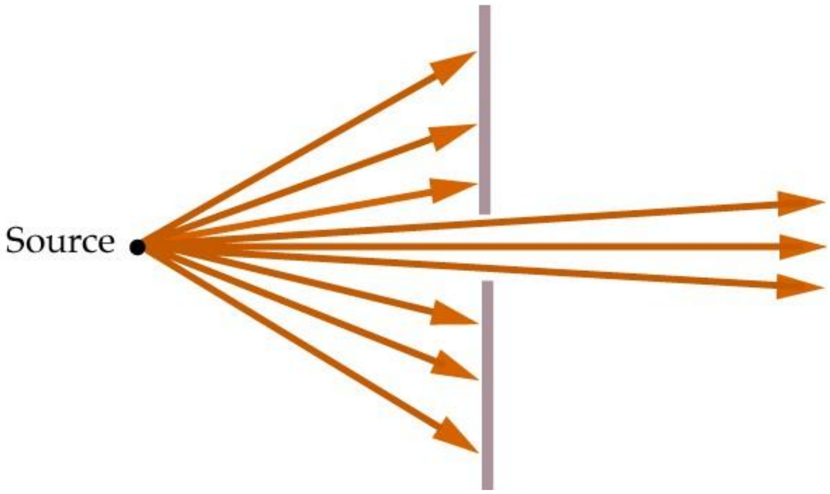
Cuando la diferencia de fase es constante en el tiempo se dice que los dos focos son **coherentes**.

Se obtienen dos focos acústicos coherentes usado dos altavoces con la misma señal y el mismo amplificador.

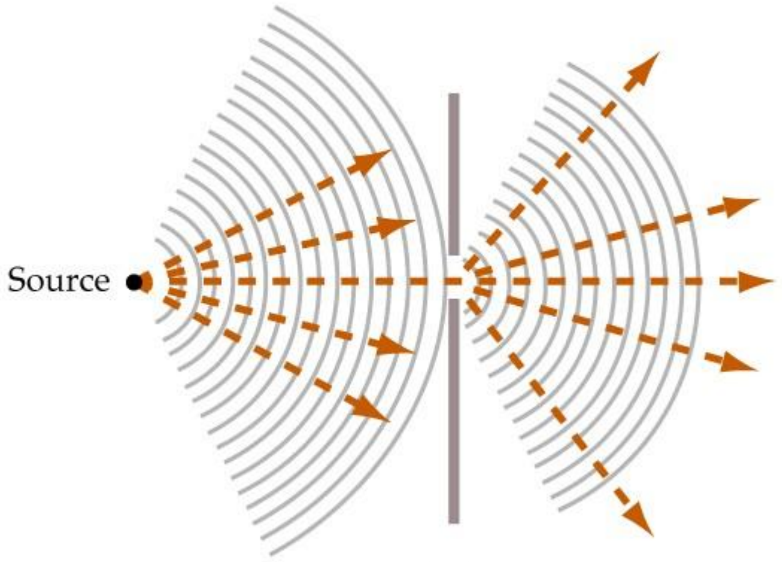
Cuando la diferencia de fase no es constante: los focos son **incoherentes**. En ese caso no generan un patrón de interferencia, y la intensidad de la onda resultante es la **suma** de las intensidades de cada onda, $I = I_1 + I_2$.

Difracción

- Cuando una onda encuentra un obstáculo, se produce el fenómeno denominado difracción, por el cual la onda tiende a rodear el objeto.
- La difracción es un fenómeno ondulatorio u una diferencia fundamental entre un haz de partículas (clásicas) y una onda.



Cuando un haz de partículas llega a un obstáculo (pantalla con una rendija), las partículas que atraviesan por la rendija no cambian de dirección. Detrás del obstáculo no hay partículas.

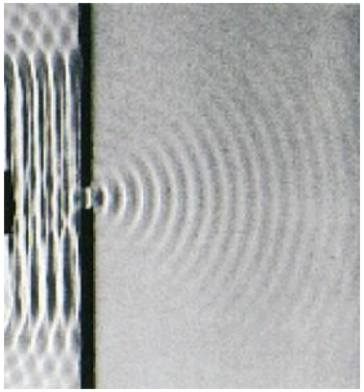


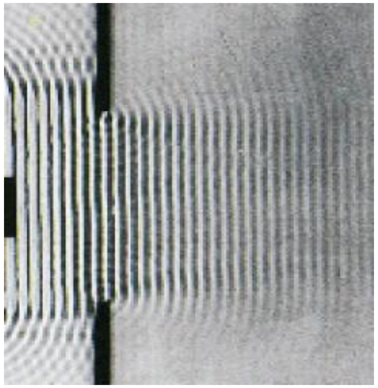
Cuando una onda llega a un obstáculo (pantalla con una rendija), la rendija actúa como fuente de ondas y emite ondas en todas las direcciones.

Difracción

- La importancia de la difracción depende del tamaño del obstáculo (a) y λ

$a \leq \lambda$



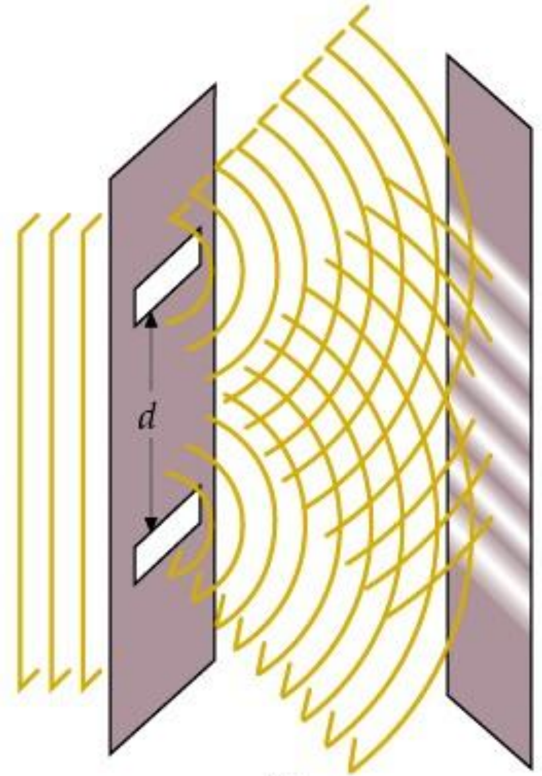


$a >> \lambda$

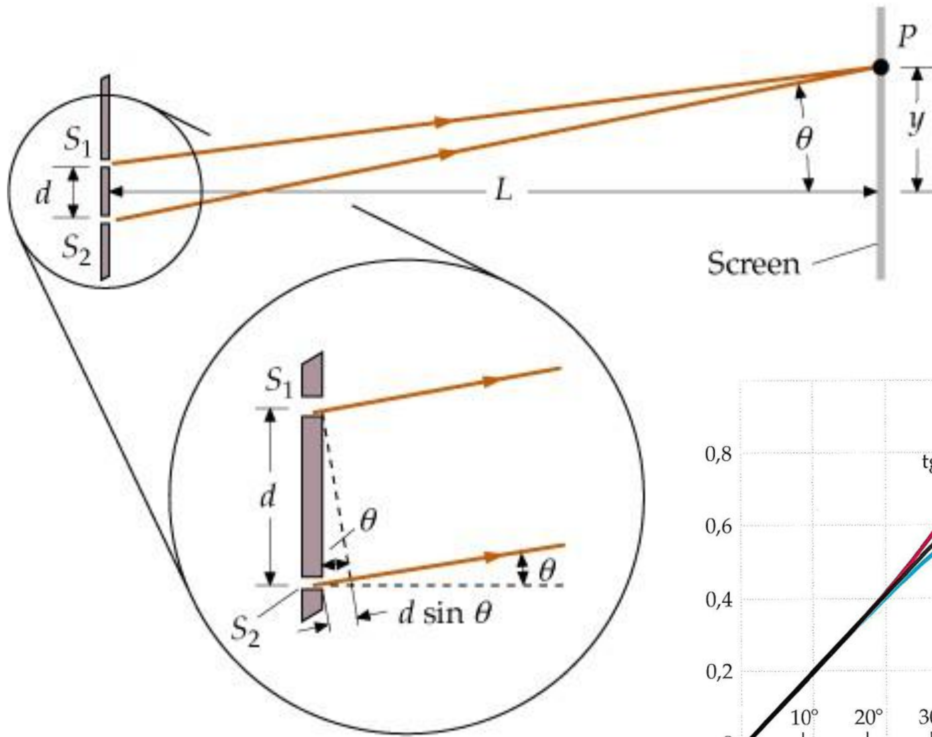
- Ondas sonoras: entre 20 Hz y 20 KHz; v = 340 m/s $\Rightarrow \lambda \sim 0.02 - 20$ m

  $\Rightarrow$ La difracción de ondas sonoras es importante.
- En cambio la luz visible tiene λ mucho mas pequeña y el fenómeno de difracción no es apreciable a simple vista (la luz parece viajar en línea recta).
- Los fenómenos de reflexión y difracción de ondas se usan para localizar objetos.
- Ejemplos: sistemas de ***sonar*** (*sound navigation and ranging*) para detectar perfiles de objetos sumergidos (aparatos para detectar bancos de peces, aplicaciones medica en ecografía, etc).
- El error en la ubicación del objeto es del orden de λ

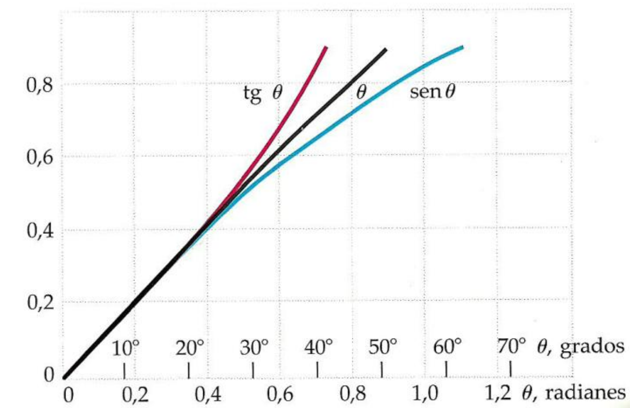
Diagrama de interferencia de dos rendijas



(a)



(b)



Interferencia constructiva (máximo de sonido, de luz) cuando:

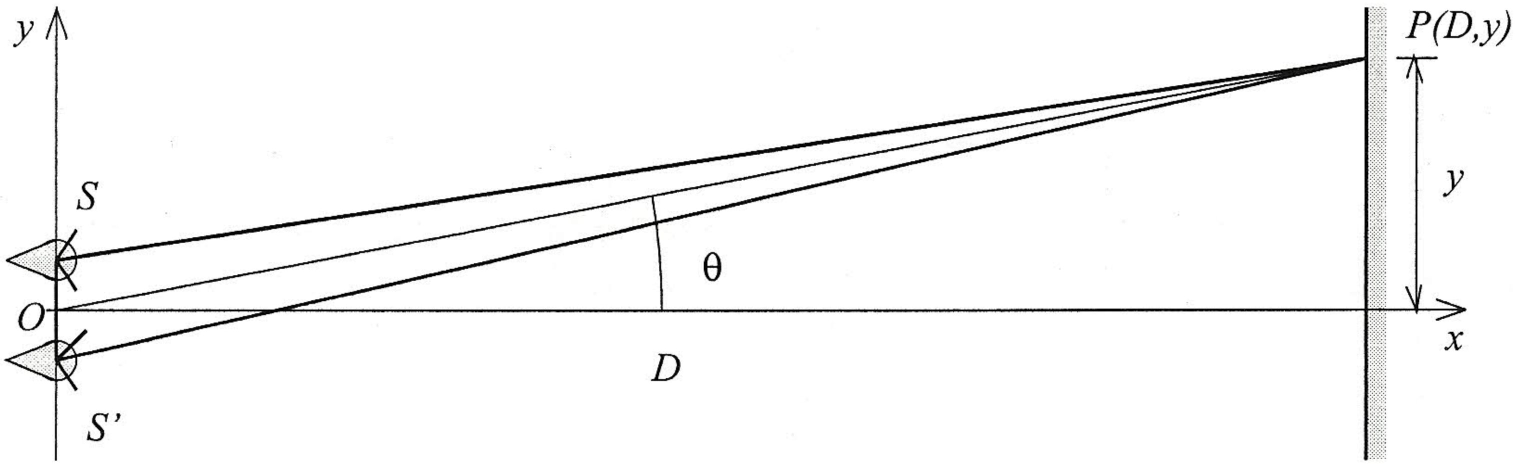
$$\Delta x = d \sin\theta = n\lambda \quad n = 0,1,2,3,\ldots$$

Aproximación de ángulo pequeño:

$$\sin\theta \approx \tan\theta = y / L$$

Ejemplo

[t]Mediante un amplificador de audiofrecuencia se hacen emitir en fase sonidos de frecuencia f a dos altavoces que se encuentran sobre el eje y (véase la figura), uno, el S, en $y = +d/2$, y el otro, S', en $y = -d/2$.



Un observador se desplaza desde $y = 0$ a lo largo de una recta paralela al eje y pero separada una distancia D muy grande de éste. Demostrar que el observador escuchará los máximos de intensidad sonora a las distancias $y = y_M = m\frac{D}{d}\frac{c}{f}$, siendo $m = 0, 1, 2, \ldots$ y c la velocidad del sonido. Aplicar al caso concreto: $f = 600$ Hz, $d = 2$ m, $D = 20$ m. Con estas d y D, ¿para qué frecuencia f' la distancia entre dos máximos consecutivos de intensidad es de 3 m?

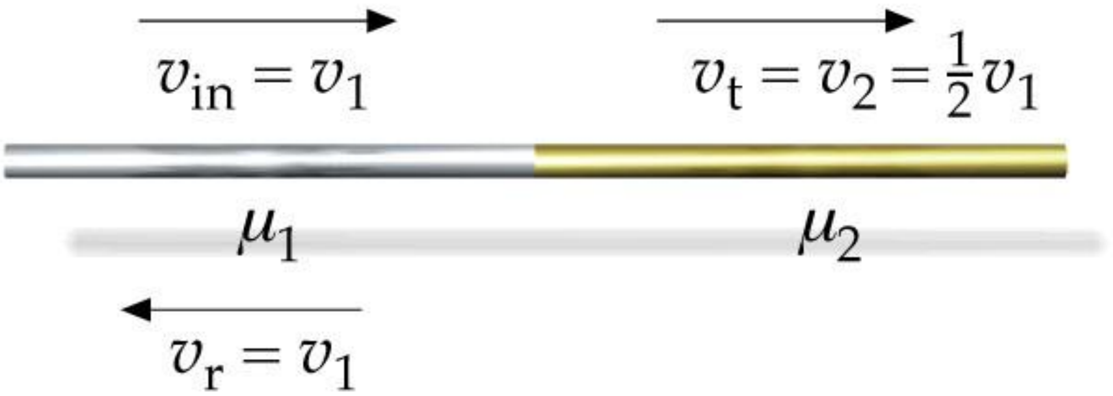
Sol.: $f' = 1133$ Hz

3.7 Reflexión y Refracción de ondas sonoras

Primero un repaso: Cuando vimos cuerdas, vimos que cuando una onda en una cuerda pasa a otra cuerda de características físicas diferentes (y por lo tanto, la velocidad de la onda es diferente), parte de la onda se trasmite y parte se refleja.

La amplitud de las tres ondas se relacionan por:

$$\boxed{\begin{aligned} s_r &= r s_{in} \\ s_t &= t s_{in} \end{aligned}}$$



Donde:

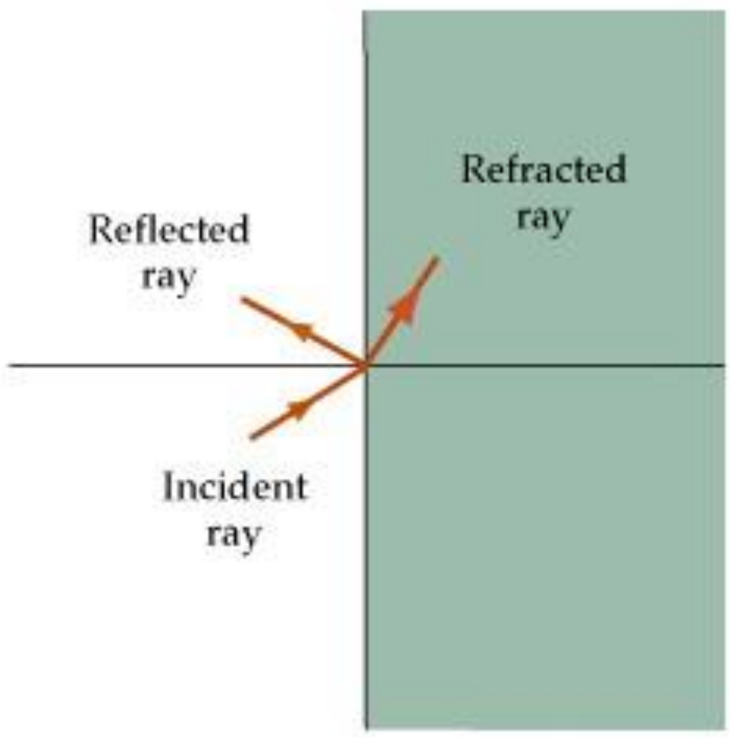
$$\boxed{\begin{aligned} r &= \frac{v_2 - v_1}{v_2 + v_1} \\ t &= \frac{2v_2}{v_2 + v_1} \end{aligned}}$$

<u>Relaciones de Fresnel</u>: valen para todas las ondas que se reflejan y se trasmiten en dos medios diferentes (en barras, en cuerdas, acústicas, electromagnéticas, etc), cuando la onda incide ***normal*** a la superficie de separación de los dos medios.

Reflexión y Refracción: incidencia oblicua

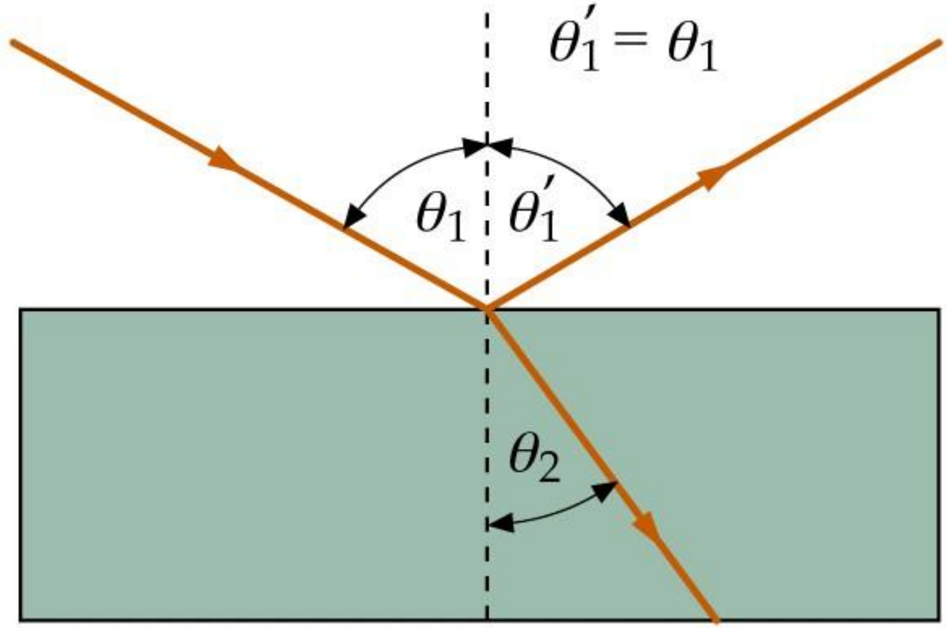
- Consideramos ahora ondas sonoras (lo que veremos también vale para todo tipo de onda) que inciden sobre una superficie limite entre dos medios en los cuales la velocidad de la onda es diferente.
- Ejemplo: onda sonora en el aire que choca contra una superficie solida o líquida.

- El rayo reflejado forma con la normal el mismo ángulo que el rayo incidente
- El rayo trasmitido se desvía.
- Se denomina refracción al cambio de dirección del rayo trasmitido
- El rayo transmitido se acerca o se aleja de la normal dependiendo de la velocidad de la onda en el segundo medio.



Ley de Snell de la Refracción

$$\boxed{\frac{1}{v_1}\sin\theta_1 = \frac{1}{v_2}\sin\theta_2}$$



- Cuando la velocidad de la onda en el segundo medio es mayor que en el medio incidente, $v_2 > v_1$

$$\sin\theta_2 = \frac{v_2}{v_1}\sin\theta_1$$

$$\Rightarrow \sin\theta_2 > \sin\theta_1 \Rightarrow \theta_2 > \theta_1$$

- Cuando $v_2 > v_1$ el rayo que describe la dirección de propagación de la onda en el segundo medio se desvía **alejándose** de la normal,

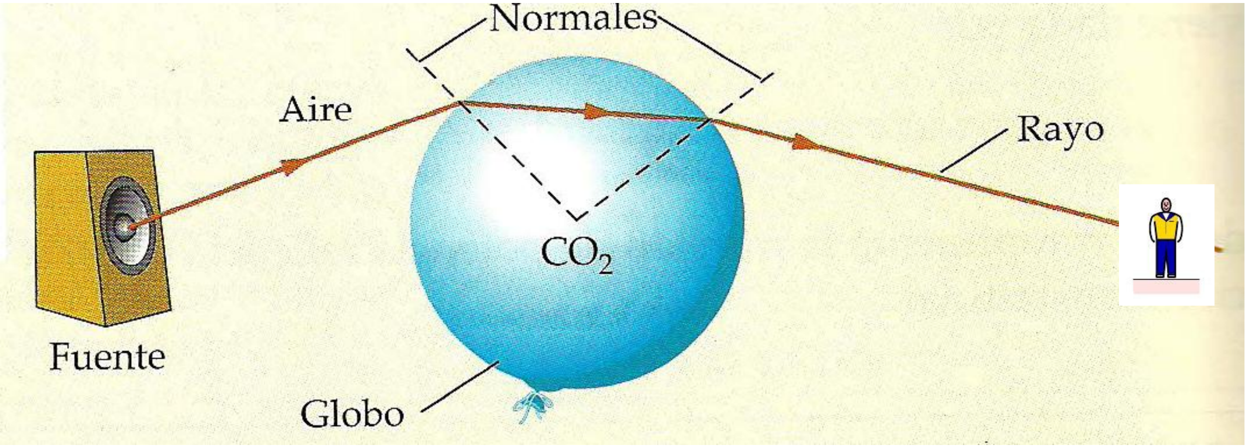
- Cuando $v_2 < v_1$ el rayo que describe la dirección de propagación de la onda en el segundo medio se desvía **acercándose** ala normal.

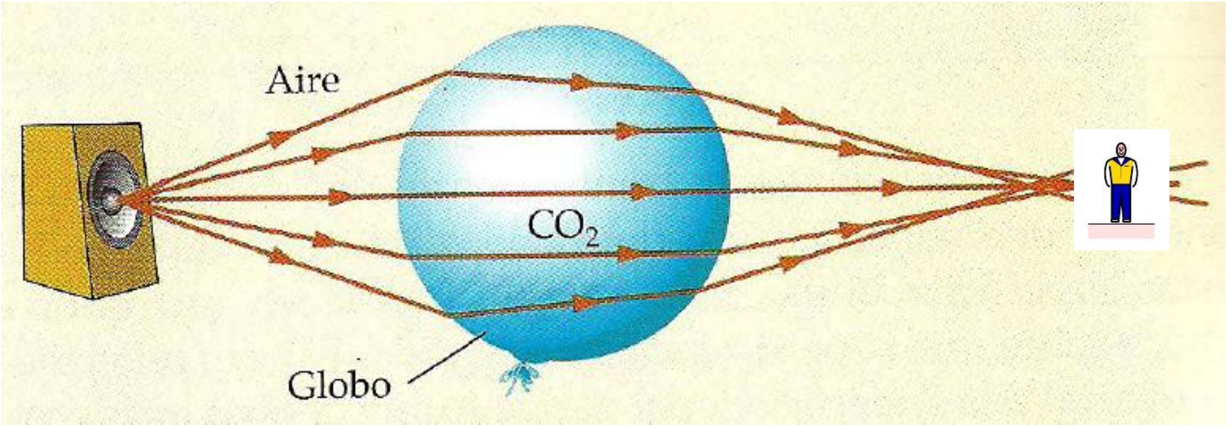
Ejemplo

Una práctica popular de física consiste en colocar un globo lleno de dióxido de carbono entre un altavoz y un observador. El observador escucha el ruido mas fuerte cuando se coloca el globo que cuando se quita.

El sonido viaja mas rápido en el aire que en CO_2.

$\Rightarrow$ El primer rayo refractado (entra al globo) se acerca a la normal, y el segundo se aleja (sale del globo).





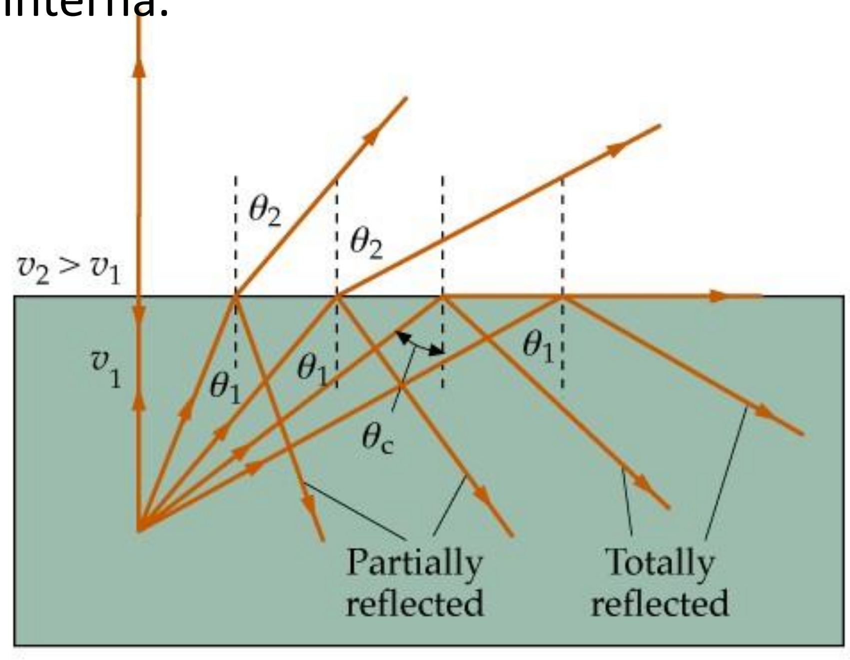
Reflexión total interna

- Cuando $v_2 > v_1$ el rayo que describe la dirección de propagación de la onda en el segundo medio se desvía **alejándose** de la normal.
- Existe un ángulo de incidencia crítico (llamado **ángulo de Brewsler**) para el cual el ángulo de refracción es de 90º.
- Para ángulos mayores al ángulo critico, desaparece el rayo refractado, fenómeno que se llama reflexión total interna.

$$\frac{1}{v_1}\sin\theta_1 = \frac{1}{v_2}\sin\theta_2$$

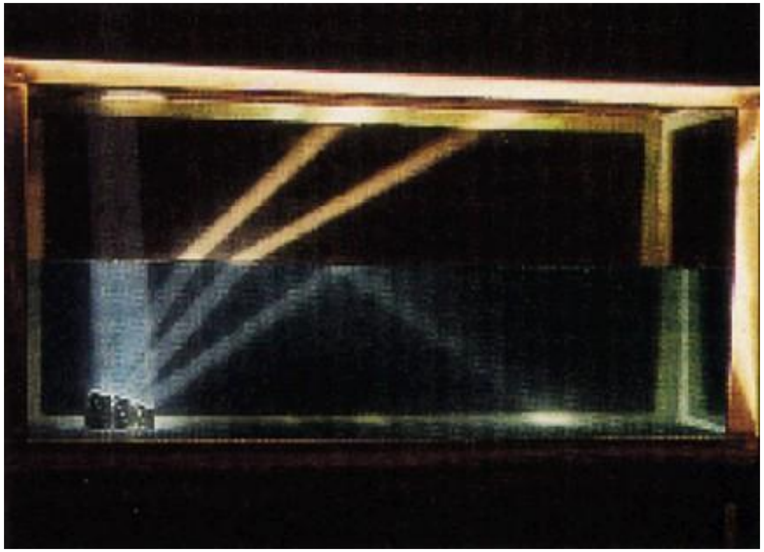
$$\theta_1 = \theta_c \Rightarrow \theta_2 = \pi/2$$

$$\Rightarrow \sin\theta_c = \frac{v_1}{v_2}$$



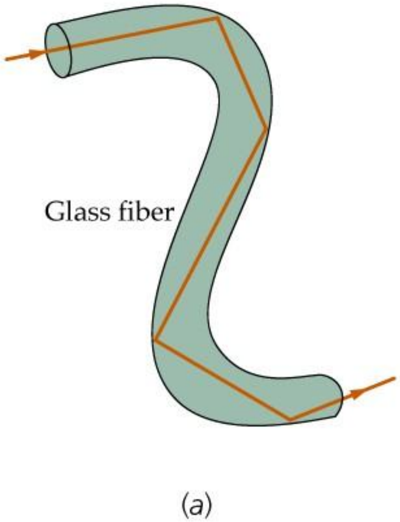
(a)

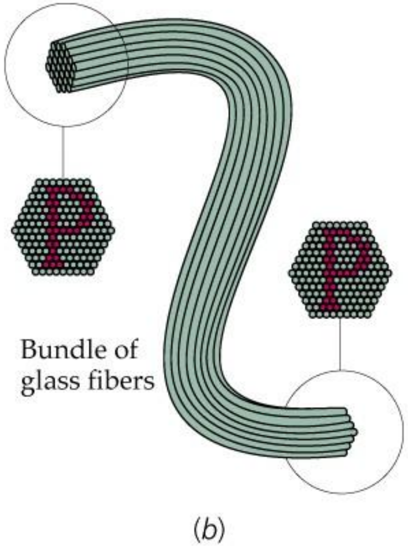
Reflexión total interna de luz

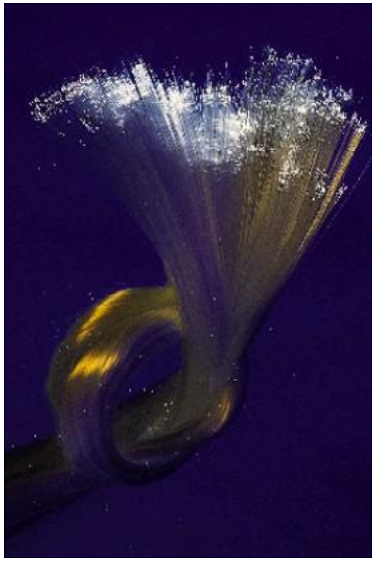


Reflexión total interna de ondas de luz en la superficie **agua-aire**

Fibras ópticas: aplican la reflexión total interna de ondas de luz en la superficie **vidrio-aire**

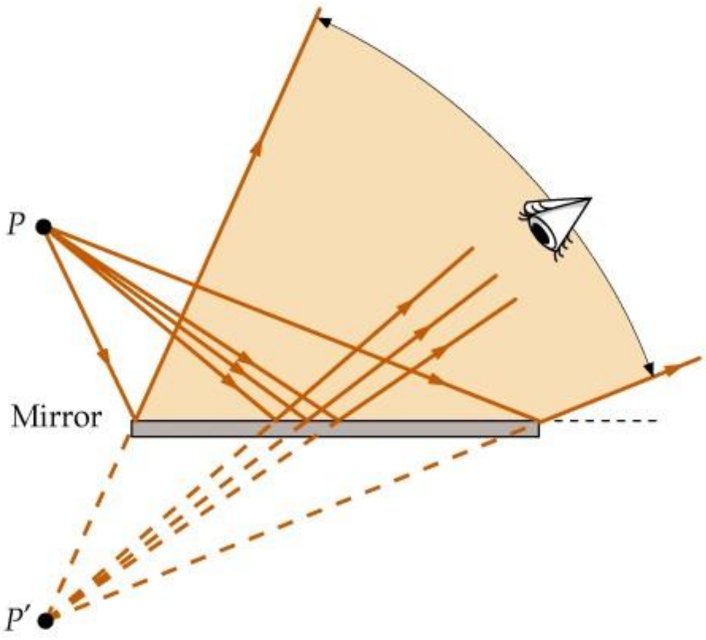






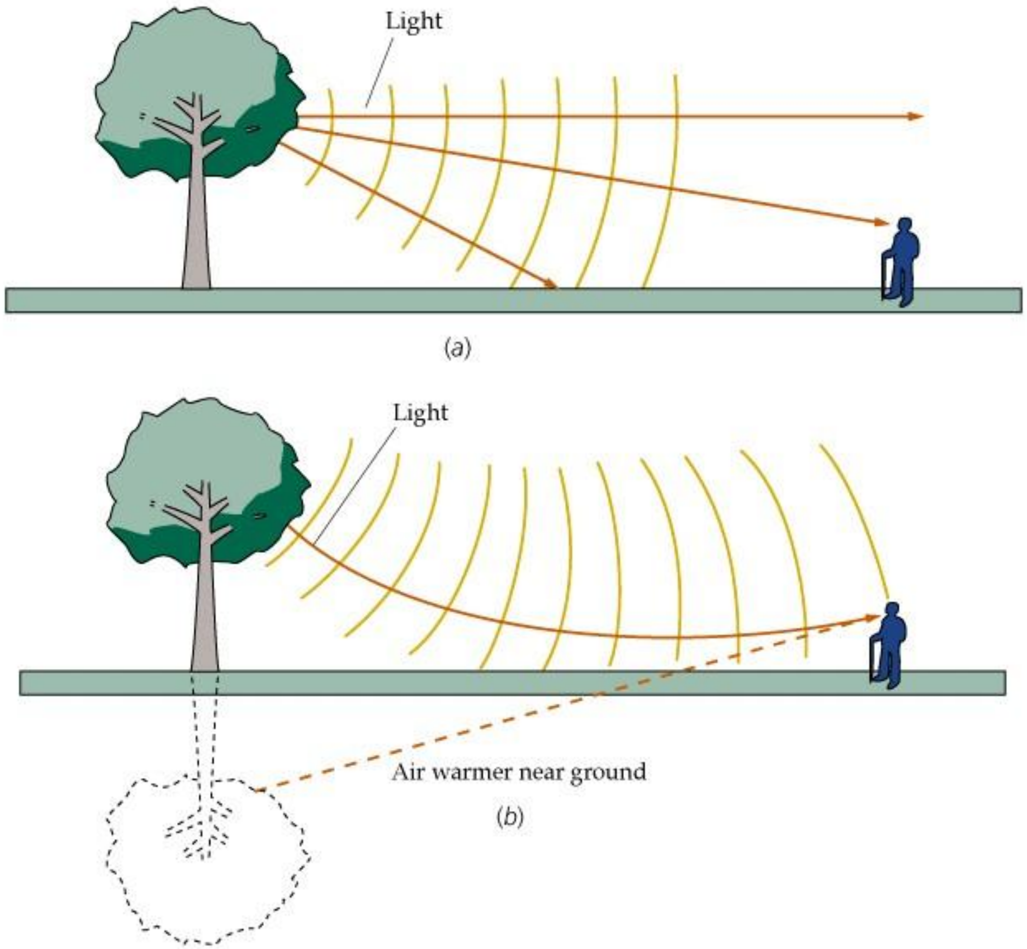
Una sola fibra óptica del diámetro de un cabello puede transmitir información de audio o video equivalente a 32000 voces hablando simultáneamente.

Ejemplo: reflexión de ondas en un espejo



Después de la reflexión, los rayos parecen proceder del punto P’ (imagen de P)

Ejemplo: espejismo producido por aire caliente mas cerca del suelo



Modulo II: Ondas

1. Introducción a las Ondas
2. Ondas en cuerdas
3. **Ondas sonoras y acústica**

3.1. Ondas sonoras en un fluido
3.2. Intensidad de una onda
3.3. Atenuación por la distancia
3.4. Percepción del sonido y decibelios
3.5. Efecto Doppler y ondas de choque
3.6. Interferencia y Difracción
3.7. Reflexión y refracción de ondas sonoras
3.8. Ondas sonoras estacionarias

Bibliografía: Tipler y Mosca, 6a edición, Capítulo 15
Física con Ordenador de Angel Franco García:
http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/ondas/MovOndulatorio.html

3.8 Ondas sonoras estacionarias

- Ondas estacionarias (teoría ya vista en cuerdas): superposición de dos ondas armónicas *de igual amplitud y frecuencia* que viajan en sentidos opuestos:

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

$$y(x,t)=\frac{y_m}{2}\sin(kx-\omega t)+\frac{y_m}{2}\sin(kx+\omega t) \Rightarrow \boxed{y(x,t)=y_m\sin(kx)\cos(\omega t)}$$

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

$$y(x,t)=\frac{y_m}{2}\cos(kx-\omega t)+\frac{y_m}{2}\cos(kx+\omega t) \Rightarrow \boxed{y(x,t)=y_m\cos(kx)\cos(\omega t)}$$

$$\operatorname{sen} A \pm \operatorname{sen} B = 2\operatorname{sen}\left[\frac{1}{2}(A\pm B)\right]\cos\left[\frac{1}{2}(A\mp B)\right]$$

$$\cos A + \cos B = 2\cos\left[\frac{1}{2}(A+B)\right]\cos\left[\frac{1}{2}(A-B)\right]$$

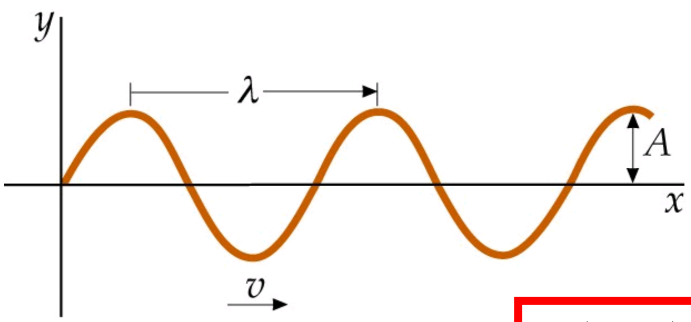
$$\cos A - \cos B = 2\operatorname{sen}\left[\frac{1}{2}(A+B)\right]\operatorname{sen}\left[\frac{1}{2}(B-A)\right]$$

$$\operatorname{sen}(A\pm B) = \operatorname{sen} A\cos B \pm \cos A \operatorname{sen} B$$

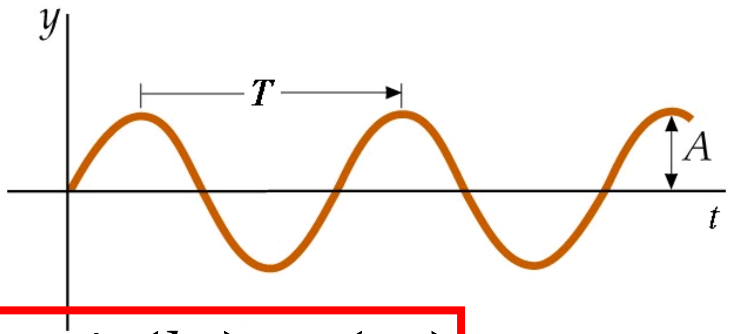
$$\cos(A\pm B) = \cos A\cos B \mp \operatorname{sen} A \operatorname{sen} B$$

Ondas sonoras estacionarias

Periodicidad espacial
(foto)



Periodicidad temporal



$$\boxed{y(x,t) = y_m \sin(kx)\cos(\omega t)}$$

- Cada punto efectúa un MAS
- La amplitud del MAS depende de la posición (**nodos** = puntos donde la amplitud es 0, **vientres** = puntos donde la amplitud es máxima)
- Dos puntos x_1 y x_2 cualesquiera tienen una diferencia de fase 0 (oscilan en fase), o de π (oscilan en antifase)
- La distancia entre un nodo y un vientre consecutivos es $\lambda/4$

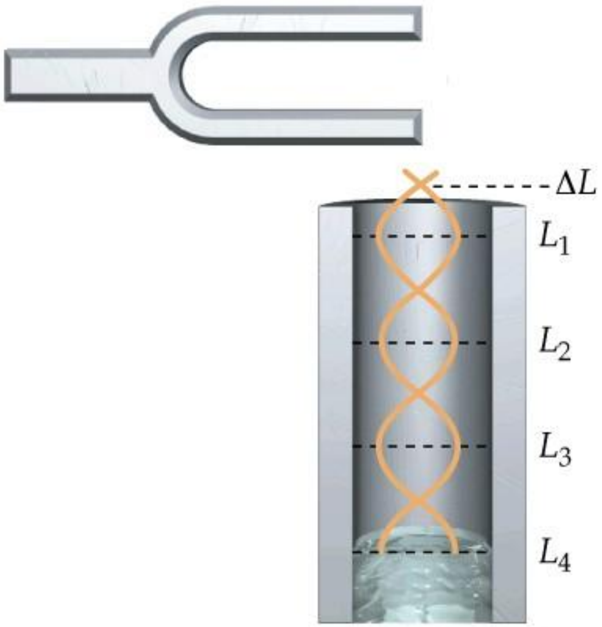
Ondas sonoras estacionarias en un tubo

- En un tubo con **ambos extremos abiertos**, la presión en los extremos es igual a la presión atmosférica y no varia.

  $\Rightarrow$ Existe un nodo de presión en cada extremo del tubo.
- Como la onda de desplazamiento y la onda de presión están desfasadas $\pi/2$ ($\lambda/4$)

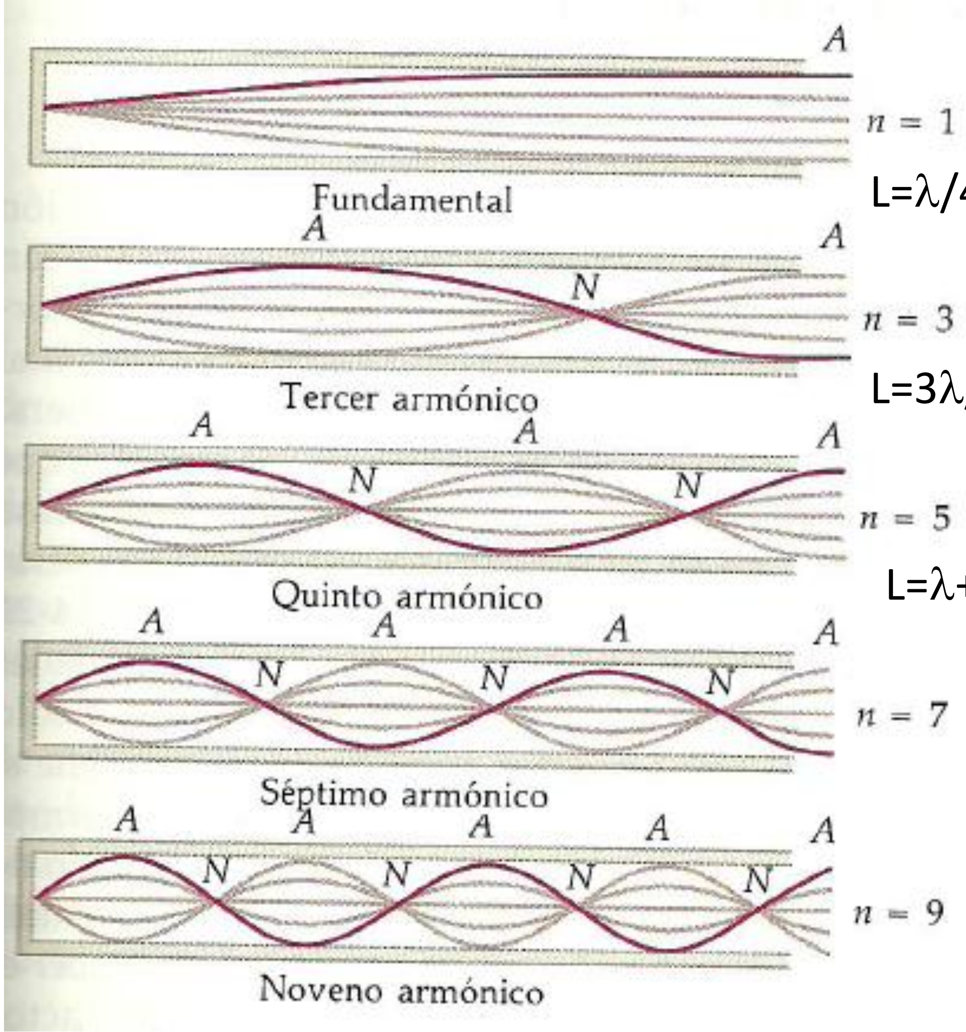
  $\Rightarrow$ Existe un vientre de desplazamiento en cada extremo del tubo.

- Esto se cumple si asumimos que la onda es unidimensional, lo cual es cierto si el diámetro del tubo es << que λ. En ese caso el nodo de presión esta muy cerca del extremo abierto del tubo.
- En la práctica los nodos de presión están ligeramente mas allá de los extremos del tubo.
- Ejemplo: ondas en el tubo de un órgano.
- Las frecuencias de resonancia del tubo dependen de su longitud y de que sus extremos estén abiertos o cerrados.



Tubo abierto en un extremo:

La onda de desplazamiento tiene un vientre en el extremo abierto



L=λ/4

L=3λ/4

L=λ+λ/4

$$\boxed{y(x,t) = y_m \sin(kx)\cos(\omega t)}$$

$$k_n L = n\frac{\pi}{2} \quad n = 1,3,5\ldots$$

$$\frac{2\pi}{\lambda_n} L = n\frac{\pi}{2} \quad \Rightarrow \lambda_n = \frac{4L}{n}$$

$$\Rightarrow \lambda_1 = 4L$$

$$f_n = \frac{v}{\lambda_n}$$

Frecuencia **fundamental** (frecuencia más baja)

$$\boxed{f_1 = \frac{v}{4L}}$$

Frecuencias **armónicas**: múltiplos **impares** de la fundamental:

$$\boxed{f_n = nf_1 \quad n = 3,5,\ldots}$$

Tubo abierto en ambos extremos

Onda de desplazamiento tiene un vientre en cada extremo abierto

$$\boxed{y(x,t) = y_m \cos(kx)\cos(\omega t)}$$

$$k_n L = n\pi \quad n = 1,2,3\ldots$$

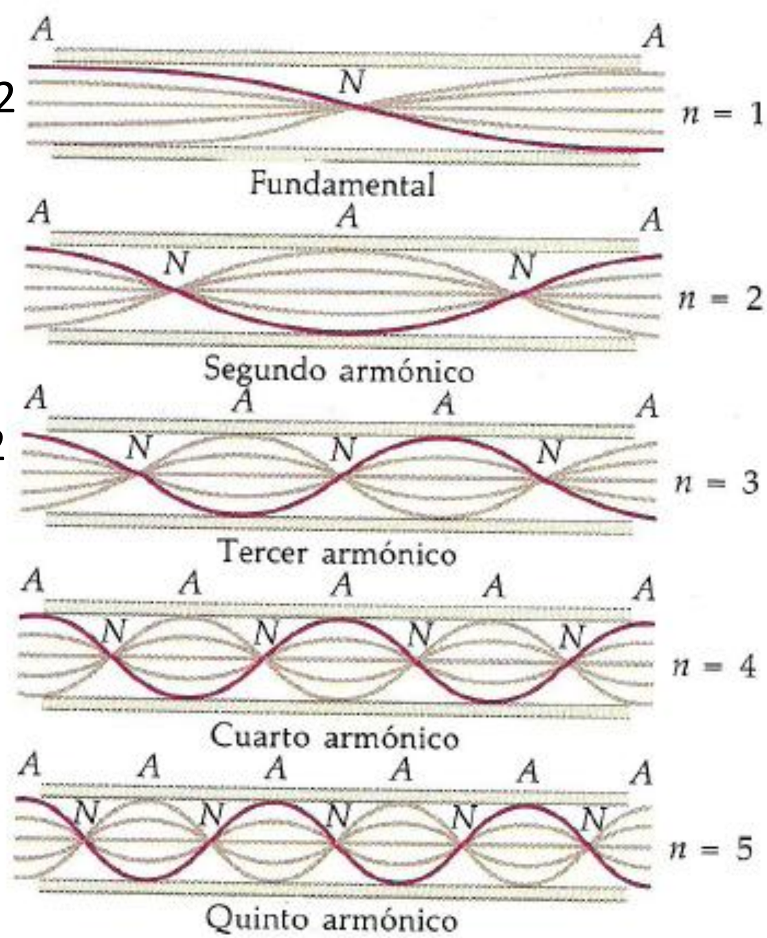
$$\frac{2\pi}{\lambda_n} L = n\pi \;\Rightarrow \lambda_n = \frac{2L}{n}$$

$$\Rightarrow \lambda_1 = 2L$$

Frecuencia fundamental $\boxed{f_1 = \frac{v}{2L}}$

Frecuencias armónicas: **todos** los múltiplos de la fundamental:

$$\boxed{f_n = n f_1 \quad n = 2,3,4\ldots}$$

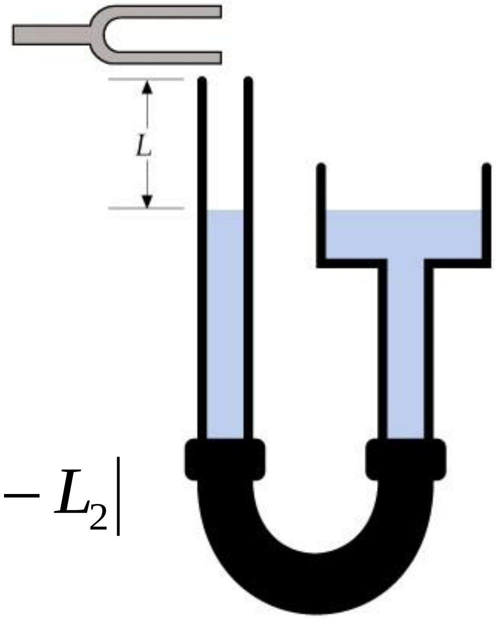


Ejercicios

1) Un tubo de órgano con ambos extremos abiertos tiene una longitud efectiva de 1 m. Si la velocidad del sonido es 340m/ ¿cuáles son las frecuencias (a) y las longitudes de onda permitidas (b) en el caso de las ondas estacionarias en ese tubo?

2) Un tubo de instrumento musical, con un extremo abierto y otro cerrado, tiene dos resonancias o armónicos consecutivos para las frecuencias de 2200 Hz y 3080 Hz. Determinar cuanto vale la longitud del tubo, sabiendo que la velocidad del sonido dentro del tubo es de 340 m/s.

Determinación de la velocidad del sonido



- Se usa un diapasón de frecuencia ***f*** conocida.
- Se mueve el tubo de la derecha hasta encontrar dos resonancias consecutivas para longitudes $\boldsymbol{L_1}$ y $\boldsymbol{L_2}$
- La velocidad del sonido en el aire es $v = f\lambda$
- Como v y f son constantes, λ también
- La diferencia entre dos resonancias consecutivas es $\lambda/2$ (tubo con un extremo abierto) $\Rightarrow \lambda = 2\left|L_1 - L_2\right|$

Ejemplo: Con un diapasón de 500 Hz aparecen resonancias cuando el nivel del agua esta a distancias 16 cm, 50.5 cm, 85 cm y 119.5 cm de la parte superior del tubo. a) ¿Cuál es la velocidad del sonido en el aire? b) ¿a que distancia del extremo del tubo esta el antinodo de desplazamiento?

Resumen

Ondas sonoras

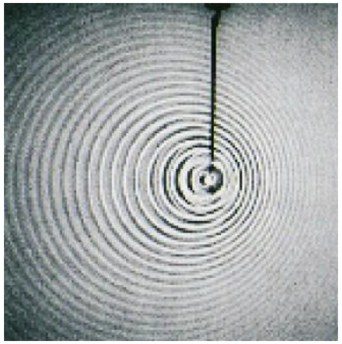
- Son ondas longitudinales de desplazamiento de las moléculas del aire o del fluido y de cambio de presión.
- En una onda sonora armónica la onda de desplazamiento y la onda de presión están desfasadas $\pi/2$
- El oído humano es sensible a ondas sonoras de frecuencias entre 20 Hz y 20 kHz.
- La amplitud de la onda de presión (p_0) y de la onda de desplazamiento (s_0) se relacionan por $p_0 = \rho \omega v s_0$
- La densidad de energía de la onda sonora es $\eta = \frac{1}{2} \rho \omega^2 s_0^2$
- La intensidad de una onda es $I = \text{Potencia/Area}$
- La intensidad de una onda y la densidad de energía están relacionadas: $I = \eta v$
- El nivel de intensidad de una onda en decibelios es $\beta = 10 \log_{10} \frac{I}{I_0}$

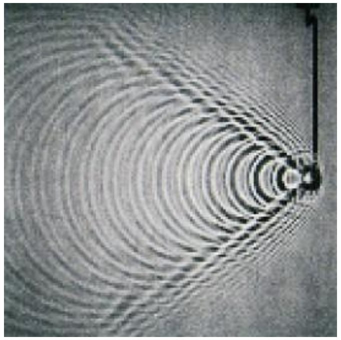
  donde $\boldsymbol{I_0} = 10^{-12}$ W/m^2 es el umbral de audición

Resumen

Efecto Doppler y ondas de choque

- Cuando un foco y un receptor están en movimiento relativo, la frecuencia recibida es mayor que la frecuencia emitida cuando su separación disminuye (y menor cuando su separación aumenta) $$\frac{f_R}{v+u_R}=\frac{f_F}{v+u_F}$$ donde las velocidades son + en el sentido observador-fuente
- Cuando la velocidad del foco es mayor que la velocidad de la onda, las ondas detrás del foco están confinadas en un cono de ángulo θ donde $\sin\theta=\frac{v}{u_F}$
- El numero de Mach es igual al cociente entre u_F y v.
- Las ondas de choque ocurren cuando el numero de Mach es > 1.





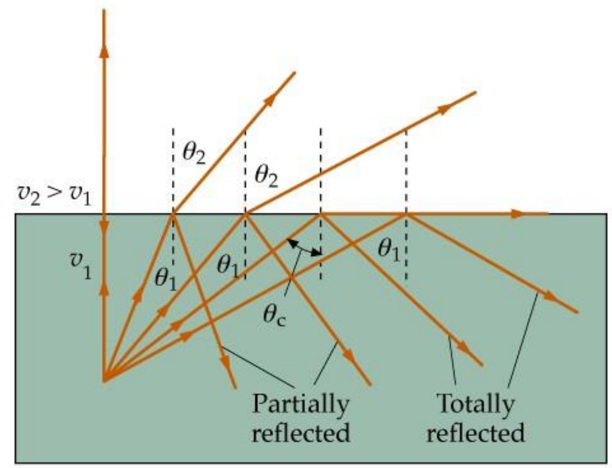
Resumen

Reflexión y refracción

- Cuando una onda incide sobre una superficie que separa dos regiones de diferente velocidad de onda, una parte de la onda se refleja y otra se transmite.
- El rayo reflejado forma un ángulo con la normal igual al ángulo de incidencia.
- El rayo refractado forma un ángulo con la normal tal que : $$\frac{\sin\theta_1}{v_1} = \frac{\sin\theta_2}{v_2}$$
- Cuando la onda pasa a un medio de mayor velocidad y con un ángulo de incidencia θ_1 tal que $$\sin\theta_2 = \frac{v_2}{v_1}\sin\theta_1 > 1$$

  no hay rayo refractado

  (la onda incidente se refleja totalmente).

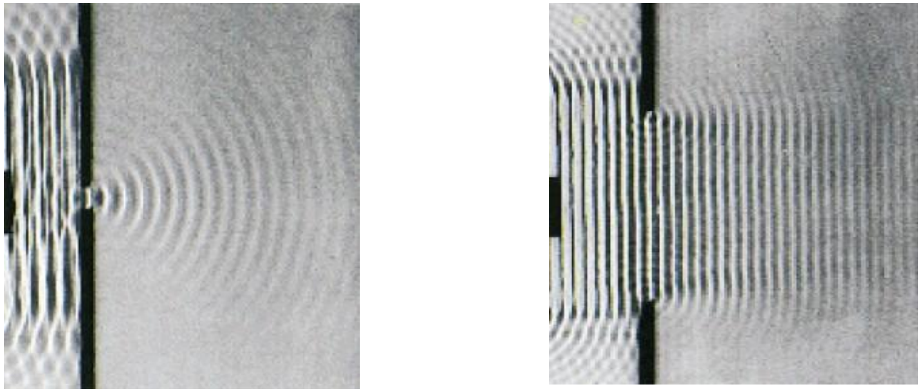


(a)

Resumen

Difracción

- Cuando una onda encuentra un obstáculo, en la parte posterior al obstáculo el frente de ondas se perturba.
- La difracción es apreciable con objetos de tamaño comparable a la longitud de onda. Para objetos de tamaño > λ, la difracción es apreciable a distancias cercanas al objeto (unas pocas λs); lejos del objeto el frente de ondas no se perturba.



Resumen

Superposición e interferencia

- Suma de dos ondas de igual amplitud y frecuencia con distinta fase:

$$y_0 \cos(kx-\omega t) + y_0 \cos(kx-\omega t+\phi) = 2y_0 \cos(\phi/2)\cos(kx-\omega t)$$

- ϕ=n(2π) $\Rightarrow$ interferencia constructiva
- ϕ=(2n+1)(π) $\Rightarrow$ interferencia destructiva
- Pulsaciones o batidos: resultan de la superposición de dos ondas con frecuencias parecidas. La frecuencia de las pulsaciones es igual a la diferencia de frecuencia de las dos ondas.
- Si dos ondas llegan a un punto recorriendo diferentes trayectos, tendrán una diferencia de fase **ϕ=kΔx=2π(Δx)/λ**, a la cual hay que sumar (eventualmente) la diferencia de fase de los focos.

Resumen

Ondas estacionarias

- Cuando las ondas están confinadas en una cierta región del espacio se producen ondas estacionarias a **ciertas** frecuencias y longitudes de onda.
- Resultan de la superposición de dos ondas viajeras en direcciones opuestas:

$$y_0 \cos(kx - \omega t) + y_0 \cos(kx + \omega t) = 2 y_0 \cos(kx) \cos(\omega t)$$

- Todos los puntos oscilan haciendo un MAS, la diferencia de fase entre dos puntos cualesquiera es 0 o π.
- La frecuencia fundamental es la frecuencia mas baja.
- Si hay nodos en x=0 y x=L (cuerda fija en ambos extremos, tubo abierto en ambos extremos)

$$L = \frac{n\lambda_n}{2} \quad n = 1,2,3\ldots$$

- Si hay un nodo en x=0 y un vientre en x=L (cuerda fija en un extremo, tubo abierto en un extremo)

$$L = \frac{n\lambda_n}{4} \quad n = 1,3,5\ldots$$