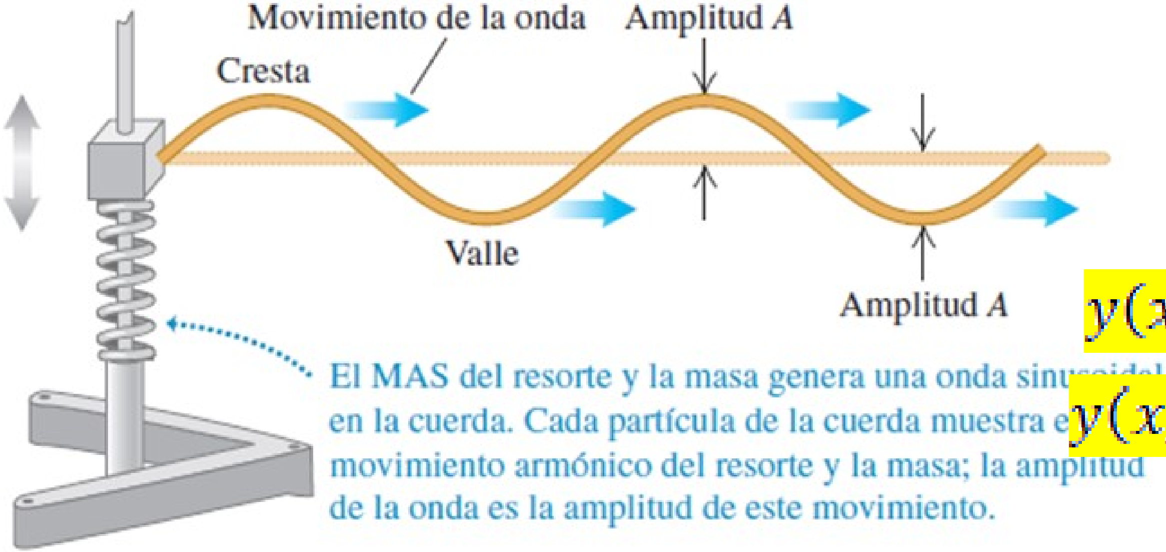
Repaso de lo visto anteriormente



Onda transversal periódica: en una cuerda tensa. Expresiones correspondientes a una onda transversal periódica:

$$y(x,t) = A\sin(kx \pm \omega t + \varphi)$$

$$y(x,t) = A\cos(kx \pm \omega t + \varphi')$$

Parámetros: frecuencia (f), periodo (T), velocidad (v), longitud de onda (λ), amplitud (A); número de onda (k), constante de fase (φ)

Velocidad de la onda *es v = λ/T= λ.f*

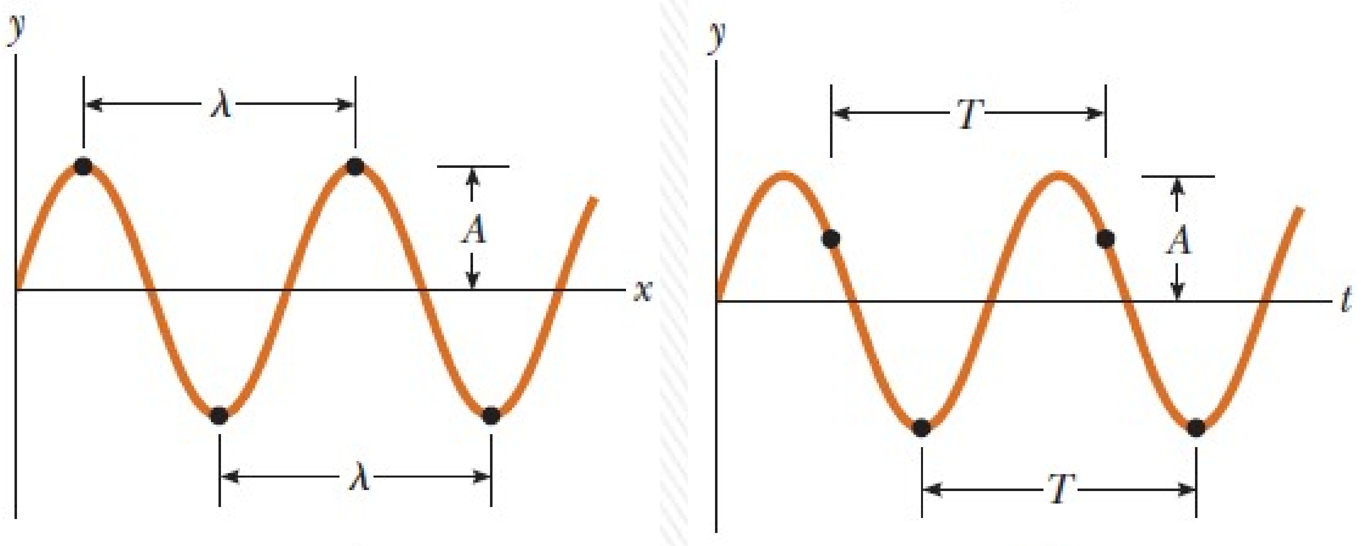
$$k = \frac{2\pi}{\lambda}$$

*Cuando una **onda sinusoidal** pasa a través de un medio, todas las partículas del medio experimentan movimiento armónico simple con la misma frecuencia.*

$$y(x,t) = A\cos\left(2\pi\left(\frac{x}{\lambda} - ft\right)\right) = A\cos\left(2\pi\left(\frac{x}{\lambda} - \frac{t}{T}\right)\right) = A\cos(kx - \omega t)$$

$$y(x,t) = A\cos\left[\omega\left(\frac{x}{v} + t\right)\right] = A\cos\left[2\pi f\left(\frac{x}{v} + t\right)\right] = A\cos\left[2\pi\left(\frac{x}{\lambda} + \frac{t}{T}\right)\right] = A\cos(kx + \omega t)$$

Repaso de lo visto anteriormente



a) b)

Parámetros en la visualización espacial (*x*-*y*) y temporal (*t* - *y*)

Velocidad transversal y aceleración transversal: son las correspondientes a cada elemento de la cuerda en su movimiento vertical, según el eje y.

Si: $y(x,t) = A\sin(kx \pm \omega t + \varphi)$ $\quad v_y = \dfrac{\partial y}{\partial t} = +\omega A\cos(kx + \omega t + \varphi)$

$$a_y = \frac{\partial v_y}{\partial t} = -\omega^2 \sin(kx \pm \omega t + \varphi)$$

Si: $y(x,t) = A\cos(kx \pm \omega t + \varphi)$ $\quad v_y = \dfrac{\partial y}{\partial t} = \mp\omega A\sin(kx \pm \omega t + \varphi)$

$$a_y = \frac{\partial v_y}{\partial t} = -\omega^2 \cos(kx \pm \omega t + \varphi)$$

Velocidad de propagación de una onda en una cuerda:

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

F es la tensión de la cuerda y μ la densidad de masa lineal (m/L)

Repaso de lo visto anteriormente

INTERFERENCIA DE ONDAS

Interferencia: fenómeno en el que dos o más ondas se superponen para formar una onda resultante. Se cumple el principio de superposición o linealidad:

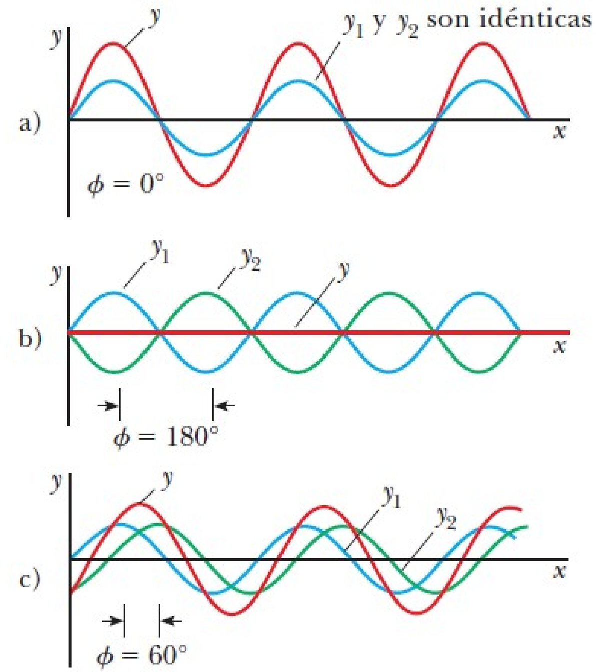
$y(x,t) = y_1(x,t) + y_2(x,t)$

SUPERPOSICIÓN DE ONDAS SINUSOIDALES

$$y_1 = A\sin(kx - \omega t)$$

$$y_2 = A\sin(kx - \omega t + \phi)$$

$$y = 2A\cos\left(\frac{\phi}{2}\right)\sin\left(kx - \omega t + \frac{\phi}{2}\right)$$

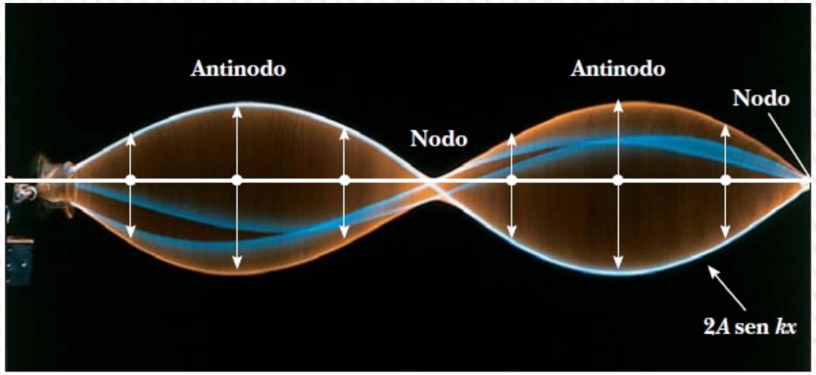


EFECTO DE LOS LÍMITES

Extremo FIJO: reflexión INVERTIDA
Extremo LIBRE: Rreflexión NO INVERTIDA

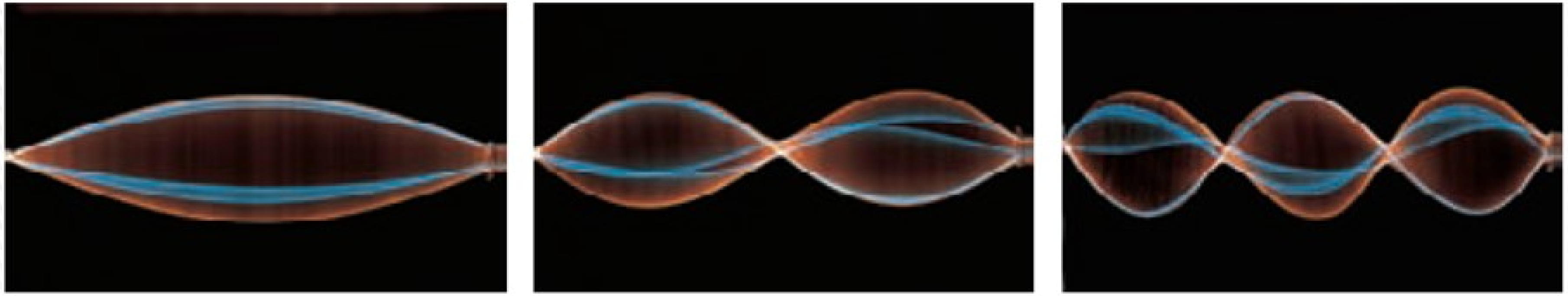
ONDAS ESTACIONARIAS

Interferencia de dos ondas idénticas que viajan en direcciones opuestas en el mismo medio: $y_1 = A$ sen $(kx - \omega t)$ $y_2 = A$ sen $(kx + \omega t)$



y = (2A sen(kx)) cos (ωt)

Repaso de lo visto anteriormente



Ondas estacionarias en una cuerda estirada: al aumentar la frecuencia de oscilación disminuye la longitud de onda…

Cuerda de longitud *L fija en ambos extremos:* se establecen ondas estacionarias por la superposición continua de ondas incidentes y reflejadas desde los extremos. Existe una **condición frontera**: los extremos están fijos tienen desplazamiento cero (son nodos), por lo que la cuerda tiene un número de patrones de oscilación naturales discretos, llamados **modos normales (con una frecuencia característica) .**

Sólo se permiten ciertas frecuencias de oscilación: **cuantización.**

Solamente puede existir una onda estacionaria si su longitud de onda satisface:

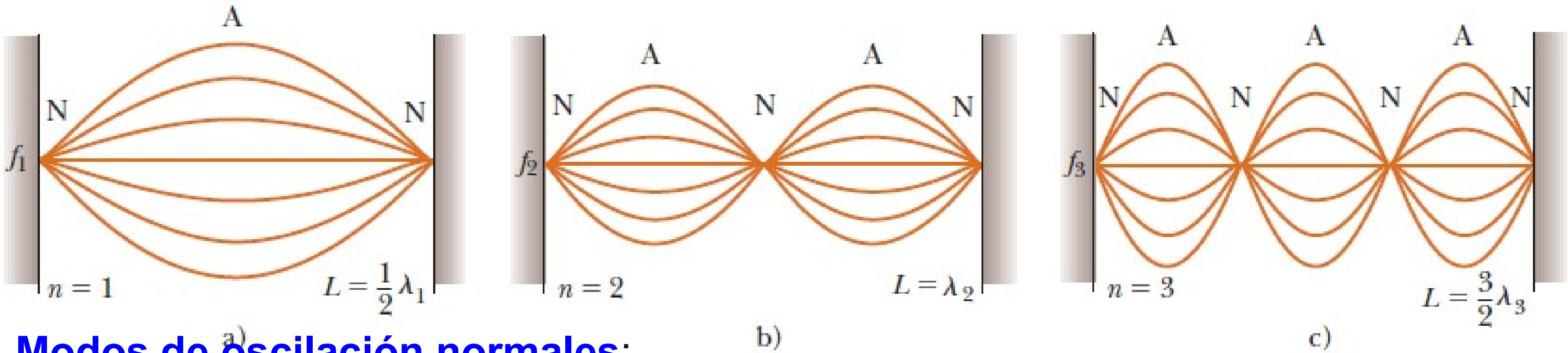
$$L = n\frac{\lambda}{2}$$

$$\lambda_n = \frac{2L}{n} \quad (n = 1, 2, 3, \ldots) \qquad \text{(cuerda fija en ambos extremos)}$$

Pueden existir ondas en la cuerda si la longitud de onda no es igual a uno de estos valores; sin embargo, no puede haber un patrón de onda estacionaria con nodos y antinodos, y la onda total no puede ser estacionaria.

Repaso de lo visto anteriormente

ONDAS ESTACIONARIAS EN CUERDA FIJA EN AMBOS EXTREMOS



Modos de oscilación normales:

1er. modo normal: 2 nodos en extremos y 1 antinodo en medio (1 bucle): $\lambda_1 = 2L$.

2do.modo normal: cuerda vibra en dos bucles. $\lambda_2 = L$.

3er. modo normal $\lambda_3 = 2L/3$; *cuerda vibra en 3 bucles.*

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

Frecuencias naturales (f_n) asociadas con los modos de oscilación ($f = v/\lambda$) *donde la rapidez de onda v es la misma para todas las frecuencias.*

$$f_n = \frac{v}{\lambda_n} = \frac{v}{2L}n = \frac{n}{2L}\sqrt{\frac{T}{\mu}} \qquad n = 1, 2, 3, \ldots$$

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

Frecuencia fundamental

Frecuencias modos restantes: son múltiplos enteros de la frecuencia fundamental:

$f_n = n.f_1$

$$f_1 = \frac{v}{2L} \qquad f_n = n\frac{v}{2L}$$

Forman una **serie armónica, los modos normales se llaman armónicos.**

EJEMPLO: Ejercicio 4.1.11

Un alambre de acero de 25,0 g de masa y 1,35 m de longitud se coloca en un bajo de tal modo que la distancia desde el peine hasta el puente es de 1,10 m.
a) Calcule la densidad lineal de la cuerda.
b) ¿Qué velocidad de onda sobre la cuerda producirá la frecuencia fundamental deseada de la cuerda de Mi: 41,2 Hz?
c) Calcule la tensión requerida para obtener la frecuencia apropiada.
d) Calcule la longitud de onda de la vibración de la cuerda.
e) ¿Cuál es la longitud de onda del sonido producido en el aire? (Suponga que la velocidad del sonido en el aire es de 343 m/s.)

a) La densidad de masa lineal vale: $\mu = \dfrac{m}{L'} = \dfrac{0{,}025\ kg}{1{,}35\ m} = 0{,}0185\ kg/m$

μ = 0,0185 kg/m = 18,5 g/m

b) $f_1 =$ 41,2 Hz

La longitud efectiva vale: L= 1,10 m.

La longitud de onda para a frecuencia fundamental vale:

$\lambda_1 = 2L = 2(1{,}10) = 2{,}20$ m

Por tanto la velocidad de la onda debe valer:

$v = f.\lambda = f_1.\lambda_1 = (41{,}2)\,(2{,}20) = 90{,}64$ m/s **v = 90,6 m/s**

c) Como $v = \sqrt{\dfrac{F}{\mu}}$ resulta $F = \mu v^2 = (0{,}0185)\,(90{,}64)^2 = 152{,}14\ N$

F = 152 N

EJEMPLO: Ejercicio 4.1.11

Un alambre de acero de 25,0 g de masa y 1,35 m de longitud se coloca en un bajo de tal modo que la distancia desde el peine hasta el puente es de 1,10 m.

a) Calcule la densidad lineal de la cuerda.

b) ¿Qué velocidad de onda sobre la cuerda producirá le frecuencia fundamental deseada de la cuerda de Mi, 41,2 Hz?

c) Calcule la tensión requerida para obtener la frecuencia apropiada.

d) Calcule la longitud de onda de la vibración de la cuerda.

e) ¿Cuál es la longitud de onda del sonido producido en el aire? (Suponga que la velocidad del sonido en el aire es de 343 m/s.)

d) La longitud de onda de la vibración de la cuerda vale $\lambda_1 = 2{,}20$ m **λ_1 = 2,20 m**

e) Al cambiar el medio, lo que se mantiene constante es la frecuencia, por tanto la longitud de onda en el aire valdrá:

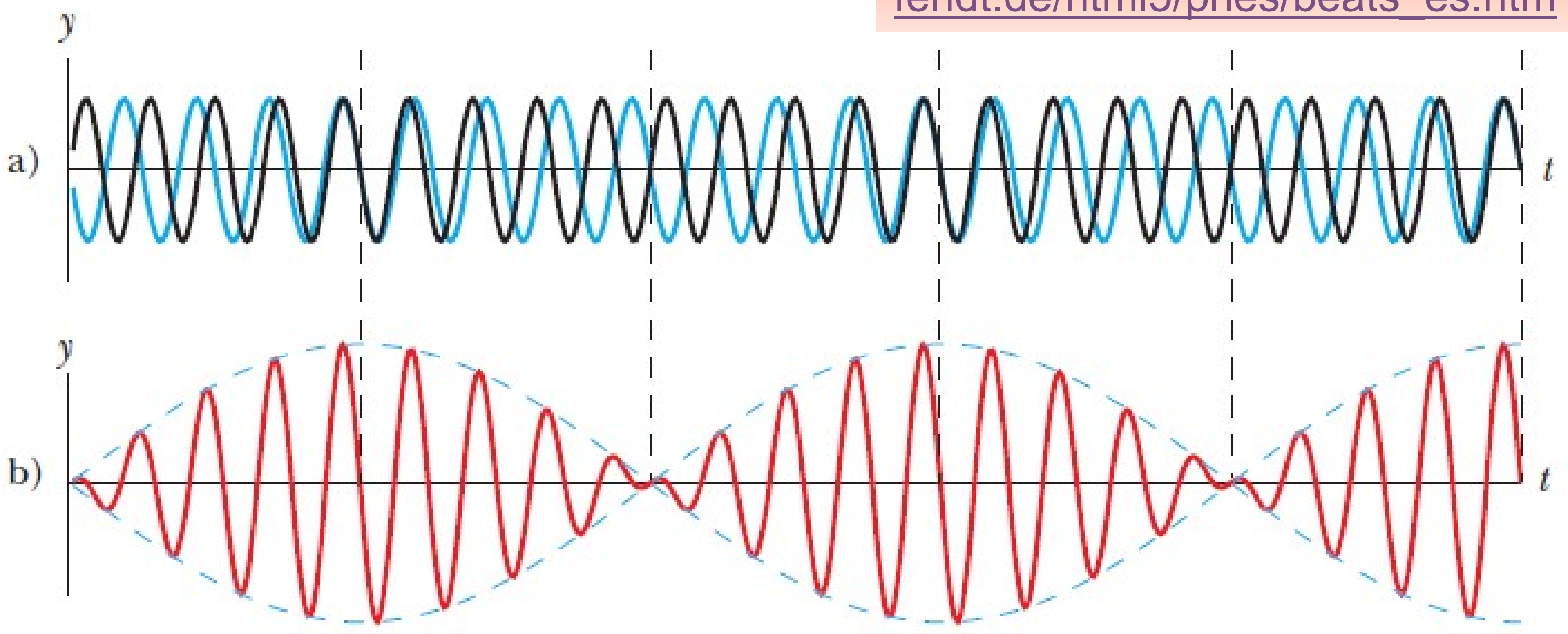
$$\lambda_{aire} = \frac{v_{aire}}{f_1} = \frac{343}{41{,}2} = 8{,}3252\ m$$

λ_{aire} = 8,33 m

PULSACIONES O BATIDOS

Batido o pulsación: variación periódica en intensidad en un punto dado debido a la superposición de dos ondas que tienen frecuencias ligeramente diferentes. Es una interferencia temporal.

ANIMACIÓN: https://www.walter-fendt.de/html5/phes/beats_es.htm



Los batidos se forman por superposición dos ondas de frecuencias ligeramente diferentes.
a) Ondas individuales.
b) Onda combinada.
La **onda envolvente (línea punteada) representa el batimiento** de los sonidos combinados.

PULSACIONES O BATIDOS (BATIMIENTOS)

Dos ondas de igual amplitud que viajan a través de un medio con frecuencias ligeramente diferentes f_1 *y* f_2 Elijo un punto de modo que *kx =π/2:*

$$y_1 = A\sin\left(\frac{\pi}{2} - \omega_1 t\right) = A\cos(2\pi f_1 t) \qquad y_2 = A\sin\left(\frac{\pi}{2} - \omega_2 t\right) = A\cos(2\pi f_2 t)$$

La onda resultante vale: $$y = y_1 + y_2 = A[\cos(2\pi f_1 t) + \cos(2\pi f_2 t)]$$

Usando la relación trigonométrica: $$\cos a + \cos b = 2\cos\left(\frac{a-b}{2}\right)\cos\left(\frac{a+b}{2}\right)$$

Resulta: $$y = \left[2A\cos 2\pi\left(\frac{f_1 - f_2}{2}\right)t\right]\cos 2\pi\left(\frac{f_1 + f_2}{2}\right)t$$

Onda resultante: una frecuencia efectiva igual a la frecuencia promedio $(f_1 + f_2)/2$ *multiplicada por una* ***onda* envolvente** conocida por la expresión entre corchetes:

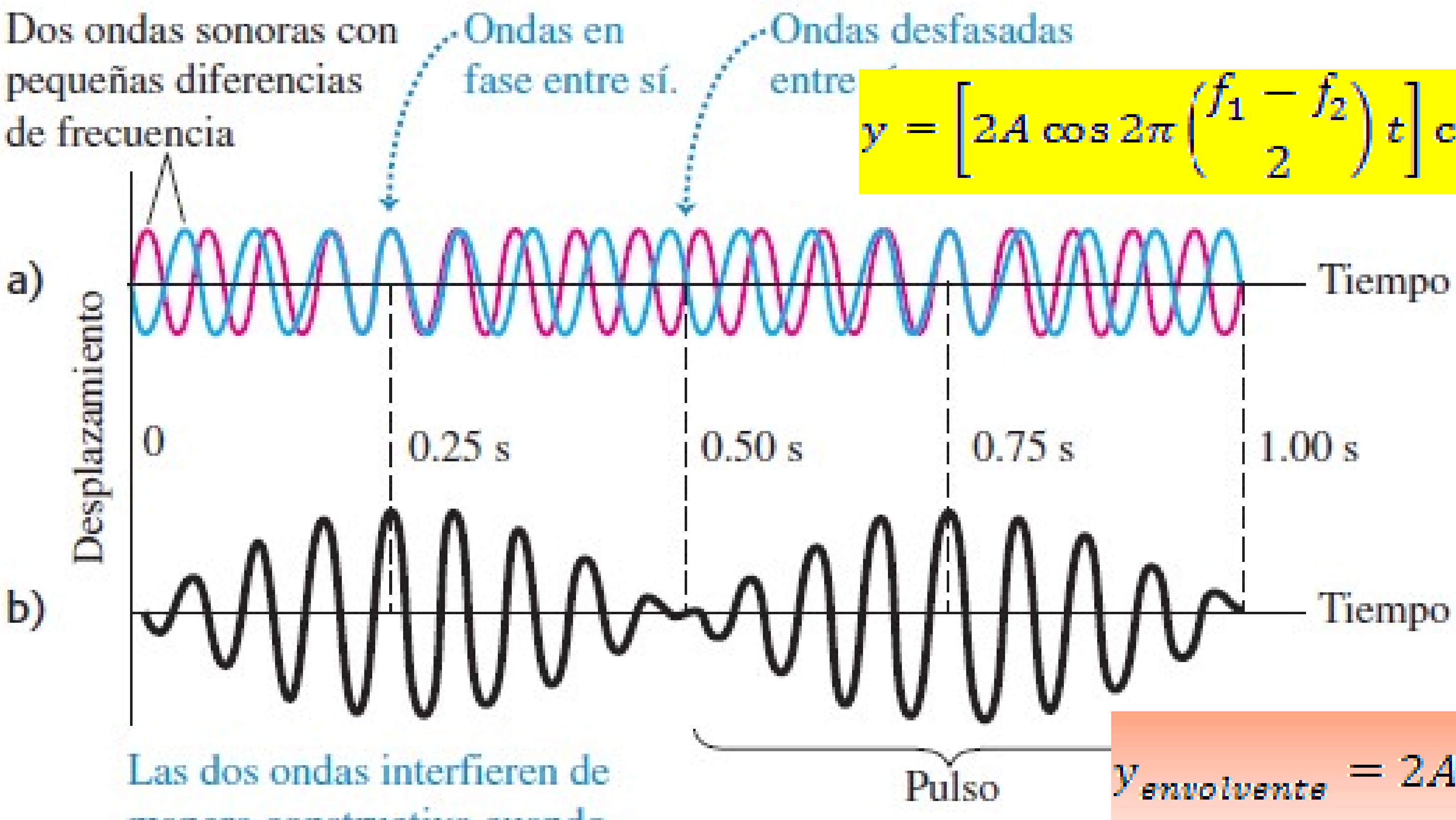
$$y_{envolvente} = 2A\cos 2\pi\left(\frac{f_1 - f_2}{2}\right)t$$

Hay un máximo en la amplitud siempre que: $$\cos 2\pi\left(\frac{f_1 - f_2}{2}\right)t = \pm 1$$

Como hay *dos máximos en cada periodo de la onda envolvente y como la amplitud* varía con la frecuencia como $(f_1 - f_2)/2$*, el número de batimientos por segundo, o la* **frecuencia de batido** f_{batido} ***es el doble de este valor****. Es decir,*

$$f_{batido} = |f_1 - f_2|$$

PULSACIONES O BATIDOS (BATIMIENTOS)



$$y = \left[2A\cos 2\pi\left(\frac{f_1 - f_2}{2}\right)t\right]\cos 2\pi\left(\frac{f_1 + f_2}{2}\right)t$$

$$y_{envolvente} = 2A\cos 2\pi\left(\frac{f_1 - f_2}{2}\right)t$$

$$f_{batido} = |f_1 - f_2|$$

Las dos ondas interfieren de manera constructiva cuando están en fase, y de manera destructiva cuando están medio de fase. La intensidad de la onda resultante sube y baja, fo

Los pulsos son fluctuaciones de la amplitud producidas por dos ondas sonoras con pequeñas diferencias de frecuencia (16 Hz y 18 Hz, en este ejemplo).

a) *Ondas individuales.*

b) *Onda resultante* formada por superposición de las dos ondas. La frecuencia del pulso 18 Hz -16 Hz = 2 Hz. (periodo igual a 0,50 segundos)

PULSACIONES O BATIDOS (BATIMIENTOS)

En resumen: La superposición de ondas de frecuencias f_1 y f_2 muy cercanas entre sí produce un fenómeno particular denominado **pulsación (o batido)**.

Para el sonido, nuestro sistema auditivo no es capaz de percibir separadamente las dos frecuencias presentes, sino que se percibe una frecuencia única promedio $(f_1 + f_2)/2$, pero que cambia en amplitud a una frecuencia de $f_2 - f_1$.

Ejemplo: si superponemos dos ondas senoidales de 300 Hz y 304 Hz, nuestro sistema auditivo percibirá un único sonido cuya frecuencia corresponde a una onda de 302 Hz y cuya amplitud varía con una frecuencia de 4 Hz (es decir, cuatro veces por segundo).

04.4-SONIDO (parte I)

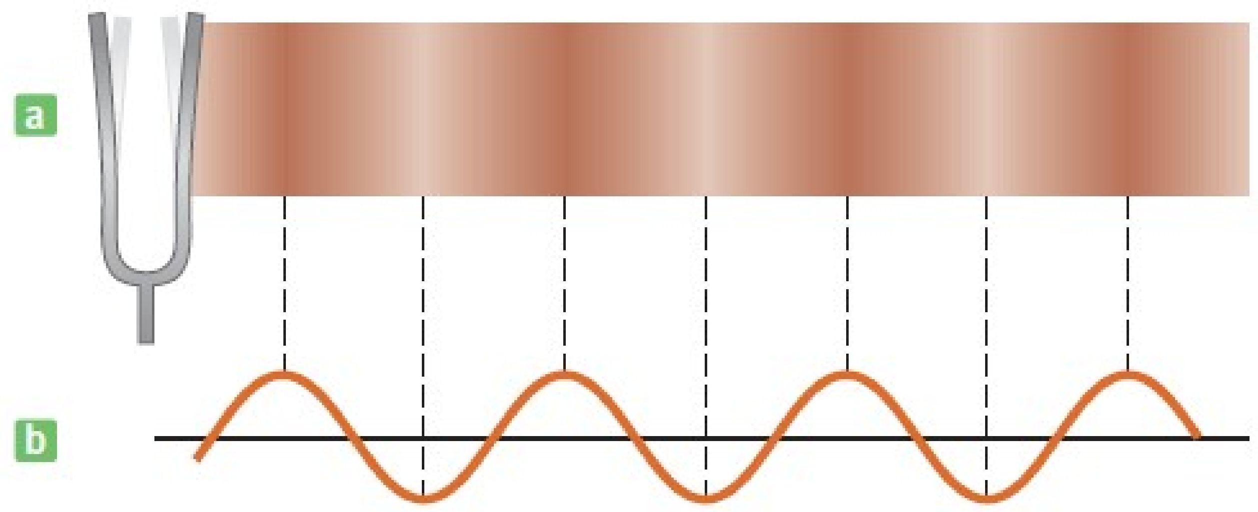
Los oídos humanos evolucionaron para detectar ondas sonoras e interpretarlas, como la música o el habla. Algunos animales, como este joven zorro orejas de murciélago, tienen oídos adaptados para detectar sonidos muy débiles.

ONDAS SONORAS

Las **ondas de sonido o acústicas** son el ejemplo más importante de ondas longitudinales.

Cualquier onda acústica tiene su fuente en un objeto que vibra: un clarinete por una lengüeta que vibra, un tambor por la vibración del parche tenso en la parte superior, un piano por las cuerdas que vibran y un cantante por la vibración de las cuerdas vocales.

Las ondas acústicas son ondas longitudinales que viajan a través de un medio, tal como el aire.



A medida que el diapasón vibra, se forma una sucesión de compresiones y rarefacciones que salen del diapasón.

El patrón resultante en el aire es parecido al de la figura.

Se puede usar una curva sinusoidal para representar una onda acústica.

Hay crestas en la onda sinusoidal en los puntos donde la onda acústica tiene compresiones, y depresiones donde tiene rarefacciones.

ONDAS SONORAS

Ondas mecánicas longitudinales que viajan con una rapidez que depende de las propiedades del medio, haciendo vibrar los elementos del medio produciendo cambios en la densidad y presión en la dirección del movimiento de la onda.

Si la fuente de las ondas sonoras vibra sinusoidalmente, las variaciones de presión también son sinusoidales.
Descripción matemática de ondas sonoras sinusoidales es muy parecida a las ondas sinusoidales en cuerdas.

1) Ondas audibles *dentro intervalo sensibilidad oído* humano (20 Hz a 20Khz)

2) Ondas infrasónicas *frecuencias por abajo del* intervalo audible.

Elefantes usan ondas infrasónicas para comunicarse mutuamente, aún cuando estén separados por varios kilómetros.

3) Ondas ultrasónicas *tienen frecuencias* por arriba del alcance audible.

Los perros escuchan el sonido ultrasónico que emite un silbato, para los humanos es imposible detectarlo. Se usan para la formación de imagen médica (ecografías).

ONDAS SONORAS

MURCIÉLAGOS…. Y la ecolocalización

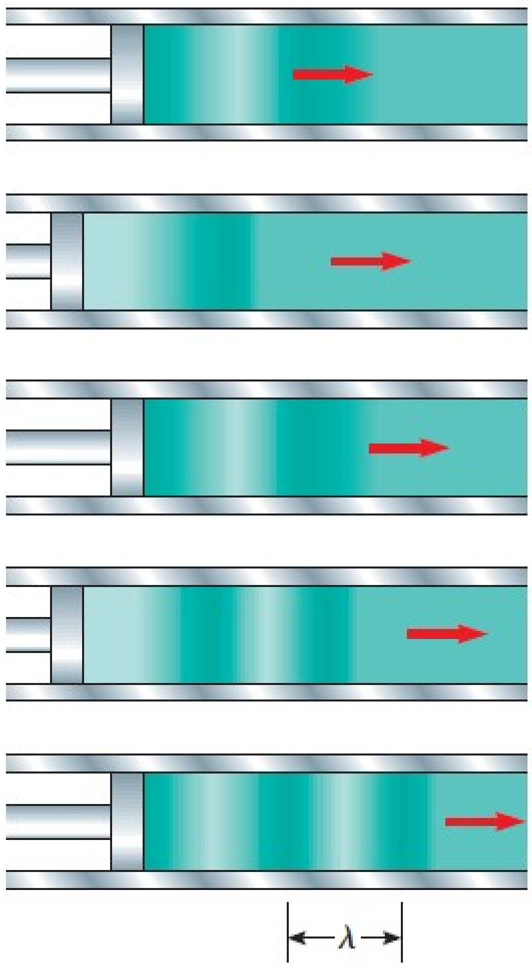
El murciélago es casi ciego y evita los obstáculos y localiza sus presas mediante ondas sonoras. Emite una serie de chillidos de alta frecuencia y detecta el tiempo que demora las ondas en volver después de ser reflejadas por el objeto.

Un murciélago puede detectar sonido a frecuencias de 120 KHz.
La longitud de onda correspondiente vale:
$\lambda = v/f = (340 \text{ m/s})/(120.000 \text{ Hz}) = 2{,}87 \times 10^{-3}$ m

¿Por qué usan frecuencias tan altas y longitudes de ondas tan cortas?

Una onda sólo puede ser perturbada por objetos comparables a una longitud de ondas o mayores, mientras que objetos más pequeños no originan ninguna perturbación.

ONDAS SONORAS PERIÓDICAS



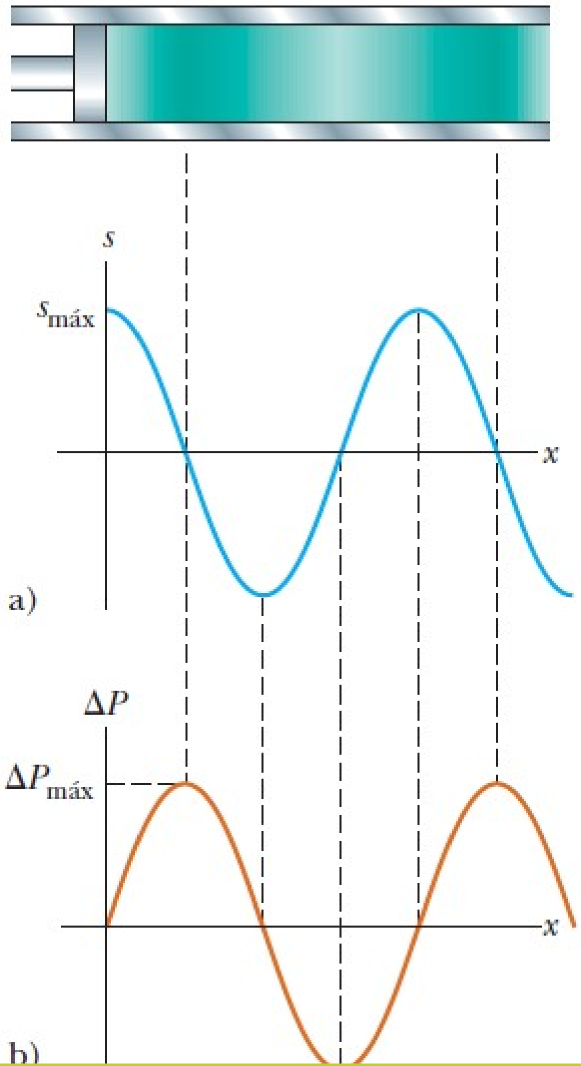
Onda sonora periódica unidimensional en tubo con gas, generado por pistón en oscilación en un extremo. Región comprimida se forma cuando el pistón empuja en el tubo, se mueve a través del tubo, y comprime continuamente la región justo enfrente de ella misma. Cuando el pistón retrocede, el gas enfrente de él se expande y la presión y la densidad en esta región caen por abajo de sus valores de equilibrio **(enrarecimiento).** Ambas regiones se mueven a la rapidez del sonido en el medio. **La distancia entre dos compresiones sucesivas (o dos enrarecimientos sucesivos) es igual a la longitud de onda λ de la onda sonora**.

Cualquier elemento pequeño del medio se mueve con movimiento armónico simple paralelo a la dirección de la onda.

s(x, t) posición de un elemento pequeño en relación con su posición de equilibrio:

$$s(x,t) = s_{max}\cos(kx - \omega t)$$

ONDAS SONORAS PERIÓDICAS



$$s(x,t) = s_{max}\cos(kx - \omega t)$$

Variación en la presión del gas ΔP *vista desde el valor de equilibrio también es* periódica

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

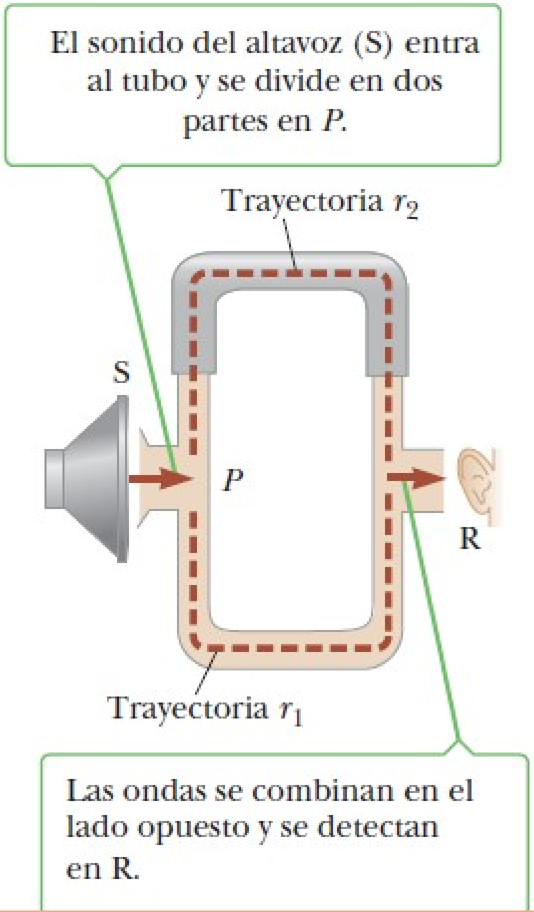
la amplitud de presión *$\Delta P_{máx}$*, *que es el cambio máximo en presión desde el valor* de equilibrio, vale: $\Delta P_{max} = \rho v \omega s_{max}$

La onda de presión está 90° fuera de fase con la onda de desplazamiento, es decir ¼ de ciclo (es decir un desfasaje de $\pi/2$).

ΔP es un máximo cuando el $s = 0$,
$s = s_{max}$ es un máximo cuando $\Delta P = 0$

a) Amplitud de desplazamiento y
b) b) amplitud de presión en función de la posición para una onda longitudinal sinusoidal

INTERFERENCIA DE ONDAS SONORAS



Las ondas de sonido se pueden interferir una con otra, Se puede visualizar con el dispositivo mostrado.
El sonido de un altavoz en S es enviado hacia un tubo *P, donde hay una bifurcación. El sonido se divide y sigue dos trayectorias separadas* que se indican con flechas. La mitad del sonido se desplaza hacia arriba y la otra mitad hacia abajo. Finalmente, los dos sonidos se unen en una abertura donde una persona coloca su oído.
Si las dos trayectorias r_1 *y* r_2 *tienen la misma longitud, las ondas* que entran en el tubo se van a separar en dos mitades, recorrerán las dos trayectorias y luego se combinarán otra vez en el oído.
Esta reunión de las dos ondas produce ***interferencia constructiva*** *y, por lo tanto, la persona escucha un sonido fuerte.*

Si la trayectoria superior se ajusta a toda una longitud de onda más larga que la trayectoria inferior, vuelve a ocurrir la interferencia constructiva de las dos ondas y el sonido fuerte se detecta en el receptor.
En general, **si la diferencia de trayectoria r_2 - r_1 es cero o un múltiplo entero de longitudes de onda,** entonces hay **interferencia constructiva:**

$$|r_2 - r_1| = n\lambda \quad (n = 0, 1, 2, 3 \ldots)$$

INTERFERENCIA DE ONDAS SONORAS

Si la longitud de la trayectoria r_2 *se ajusta de modo que la trayectoria superior* sea la mitad de una longitud de onda *más larga que la trayectoria inferior* r_1, *la* onda sonora que entra y se divide recorre las dos trayectorias como antes, pero ahora la onda a lo largo de la trayectoria superior debe recorrer una distancia equivalente a la mitad de una longitud de onda más que la onda que se mueve a lo largo de la trayectoria inferior.

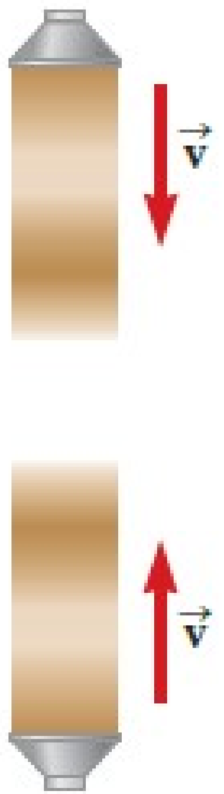
En consecuencia, la cresta de una onda se encuentra con la depresión de la otra cuando se unen en el receptor, causando que las dos ondas se cancelen una con otra.

Ocurre una *interferencia destructiva total, y no se detecta sonido en el receptor.*

En general*,* ***si la diferencia de trayectorias*** $r_2 - r_1$ ***es ½, 1 ½. 2 ½, …*****longitudes de onda, ocurre interferencia destructiva:**

$$|r_2 - r_1| = \left(n + \frac{1}{2}\right)\lambda \quad (n = 0, 1, 2, 3 \ldots)$$

ONDAS ESTACIONARIAS de SONIDO



Supongamos que tenemos dos parlantes y que emiten ondas sonoras de la misma frecuencia y amplitud.
En esta situación dos ondas idénticas viajan en sentidos opuestas en el mismo medio. Dichas ondas se combinan de acuerdo con el modelo de ondas en interferencia.
Puedo considerar funciones de onda para dos ondas sinusoidales transversales que tengan la misma amplitud, frecuencia y longitud de onda pero que viajen en sentidos opuestos en el mismo medio:

$$y_1 = A\sin(kx - \omega t) \qquad y_2 = A\sin(kx + \omega t)$$

Como vimos anteriormente, la superposición de estas dos ondas nos da:

$$y = (2A\sin kx)\cos\omega t$$

Esta ecuación representa la función de onda de una **onda estacionaria.**
Una onda estacionaria, como la de una cuerda, que representa un patrón de oscilación *con un contorno estacionario que resulta de la superposición de dos ondas idénticas* que viajan en sentidos opuestos.

ONDAS ESTACIONARIAS de SONIDO

Es posible generar ondas estacionarias en un tubo de aire; por ejemplo un tubo de órgano, como resultado de la interferencia entre ondas acústicas que se desplazan en sentidos opuestos.

La relación entre la onda incidente y la onda reflejada depende de que el extremo reflector del tubo esté abierto o cerrado.

Una parte de la onda acústica es reflejada hacia el tubo incluso en un extremo abierto.

Si un extremo está cerrado, debe existir un nodo en él porque el movimiento de aire está restringido.

Si el extremo está abierto, los elementos de aire tienen completa libertad de movimiento y existe un antinodo

Extremo cerrado (de columna de aire)**:** es un **nodo de desplazamiento** y **antinodo de presión** (punto de máxima variación de presión).

Extremo abierto (de columna de aire)**:** es un **antinodo de desplazamiento** (aproximadamente) y un **nodo de presión** (la presión en este extremo permanece constante a presión atmosférica).

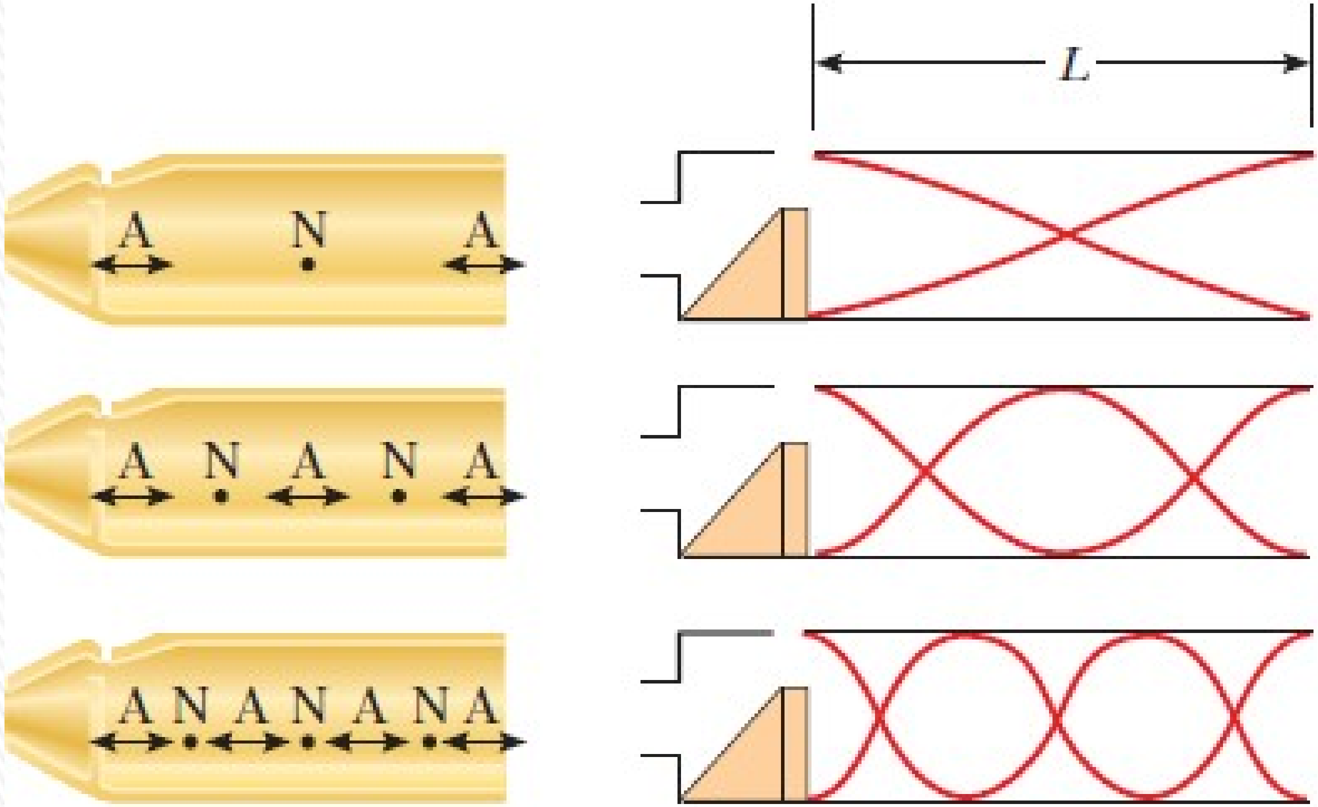
Con las **condiciones frontera** de nodos o antinodos en los extremos de la columna de aire, se tiene un **conjunto de modos normales de oscilación** (como para la cuerda fija en ambos extremos)

Por lo tanto, la **columna de aire tiene frecuencias cuantizadas**

ONDAS ESTACIONARIAS EN COLUMNAS DE AIRE

Tubo abierto en ambos extremos

Si el **extremo está abierto**, los elementos de aire tienen completa libertad de movimiento y existe **un antinodo**.
Ambos extremos son antinodos de desplazamiento.



1er. modo normal: dos antinodos adyacentes equivale a media longitud de onda: $\lambda_1 = 2L$

2do. modo normal:

$\lambda_2 = L = 2L/2$

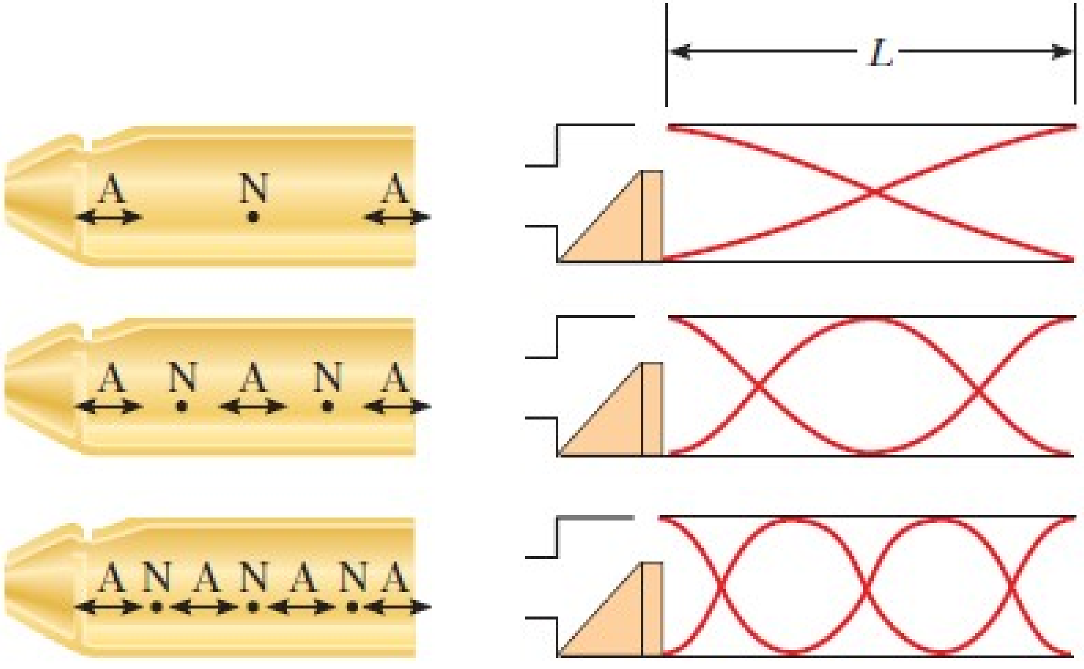
3er. modo normal:

$\lambda_3 = 2L/3$

$$f_1 = \frac{v}{\lambda_1} = \frac{v}{2L} \qquad f_2 = \frac{v}{\lambda_2} = \frac{v}{L} \qquad f_3 = \frac{v}{\lambda_3} = \frac{3v}{2L}$$

ONDAS ESTACIONARIAS EN COLUMNAS DE AIRE

Tubo abierto en ambos extremos



$\lambda_1 = 2L$

$f_1 = \frac{v}{\lambda_1} = \frac{v}{2L}$

Primer armónico

$\lambda_2 = L$

$f_2 = \frac{v}{L} = 2f_1$

Segundo armónico

$\lambda_3 = \frac{2}{3}L$

$f_3 = \frac{3v}{2L} = 3f_1$

Tercer armónico

a) Abierto en ambos extremos

$$f_1 = \frac{v}{2L}$$

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

$$\lambda_n = \frac{2L}{n} \qquad f_n = n\frac{v}{2L}$$

Las frecuencias naturales de oscilación forman una serie armónica que incluye todos los múltiplos enteros de la frecuencia fundamental.

Idéntico a las frecuencias de una cuerda con extremos fijos, pero *v en esta ecuación es la rapidez* del sonido en el aire.

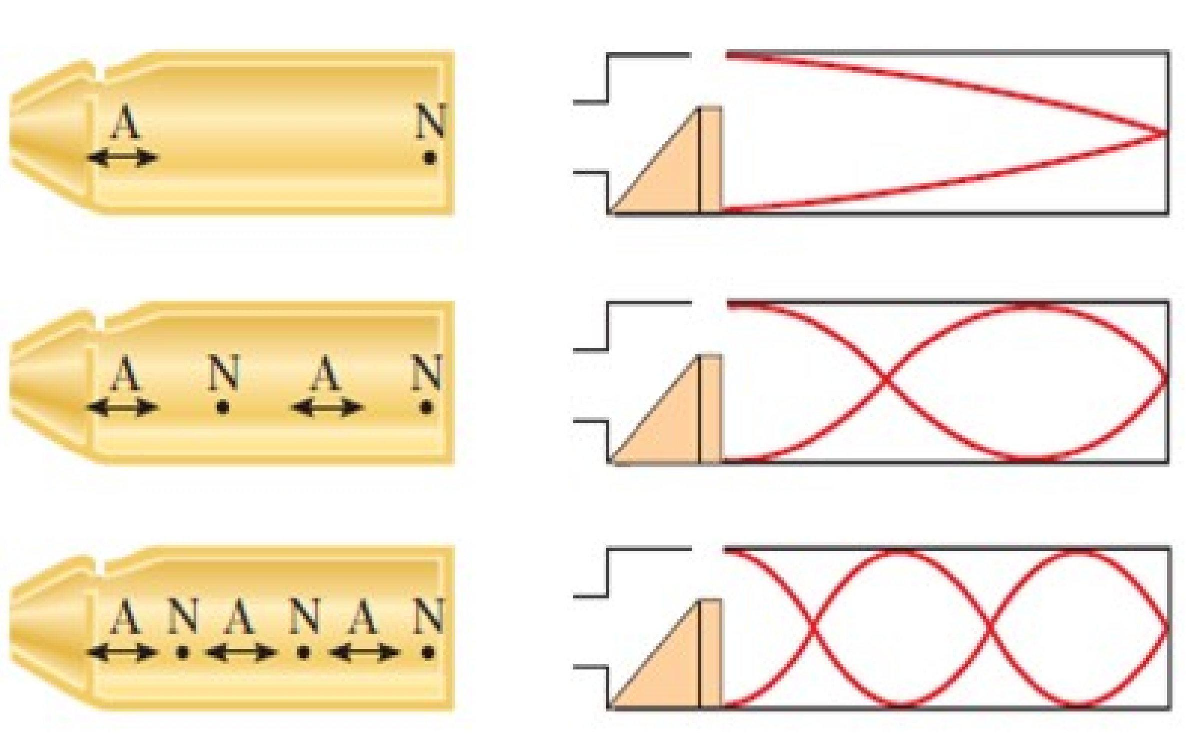
ONDAS ESTACIONARIAS EN COLUMNAS DE AIRE

Tubo con un extremo abierto y otro cerrado

Extremo cerrado: debe existir un **nodo** en él porque el movimiento de aire está restringido.

Extremo abierto: elementos de aire tienen completa libertad de movimiento y existe un **antinodo**

Nodo de desplazamiento en extremo cerrado y antinodo en el abierto.



1er. modo normal: nodo y antinodo adyacentes equivale a cuarta longitud de onda: $\lambda_1 = 4L$

2do. modo normal:
$L = 3\lambda_2/4$
$\lambda_2 = 4L/3$

3er. modo normal:
$L = 5\lambda_3/4$
$\lambda_3 = 4L/5$

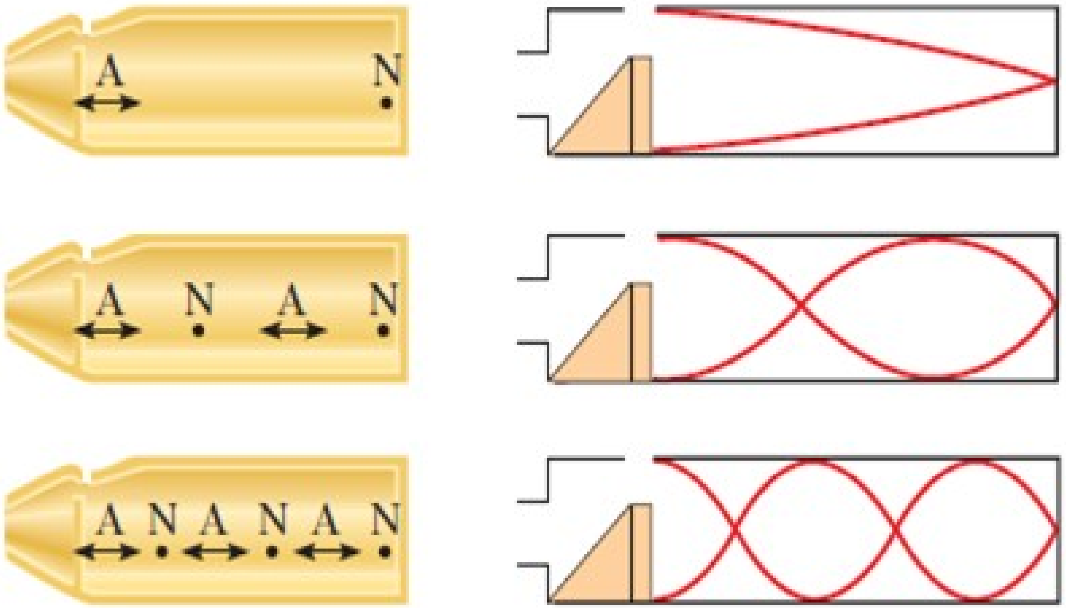
$$\lambda_1 = 4L\ ;\ \lambda_2 = \frac{4L}{3}\ ;\ \lambda_3 = \frac{4L}{5} \ldots\ \lambda_n = \frac{4L}{2n-1} \qquad n = 1,2,3\ldots$$

ONDAS ESTACIONARIAS EN COLUMNAS DE AIRE

https://www.youtube.com/watch?v=o62aR0rgtuE

Video: Los armónicos en un tubo

Tubo con un extremo abierto y otro cerrado



$\lambda_1 = 4L$

$f_1 = \frac{v}{\lambda_1} = \frac{v}{4L}$

Primer armónico

$\lambda_3 = \frac{4}{3}L$

$f_3 = \frac{3v}{4L} = 3f_1$

Tercer armónico

$\lambda_5 = \frac{4}{5}L$

$f_5 = \frac{5v}{4L} = 5f_1$

Quinto armónico

$$\lambda_1 = 4L\ ;\ \lambda_2 = \frac{4L}{3}\ ;\ \lambda_3 = \frac{4L}{5} \ldots\ \lambda_n = \frac{4L}{2n-1} \qquad n = 1,2,3\ldots$$

$$f_1 = \frac{v}{\lambda_1} = \frac{v}{4L}\ ;\ f_2 = \frac{v}{\lambda_2} = \frac{3v}{4L}\ ;\ f_3 = \frac{5v}{4L} \ldots\ f_n = \frac{(2n-1)v}{4L} \qquad n = 1,2,3\ldots$$

$$f_{2n-1} = (2n-1)\frac{v}{4L} \qquad n = 1, 2, 3, \ldots$$

Los armónicos superiores tienen frecuencias $3f_1$, $5f_1$, . .

Tubo cerrado en un extremo, frecuencias naturales forman una serie armónica que incluye sólo múltiplos enteros impares de la frecuencia fundamental.