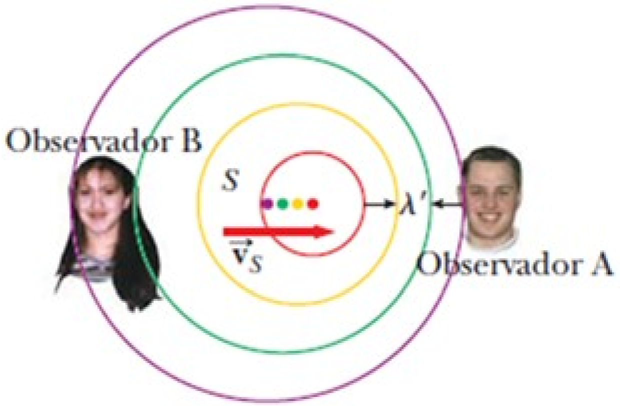
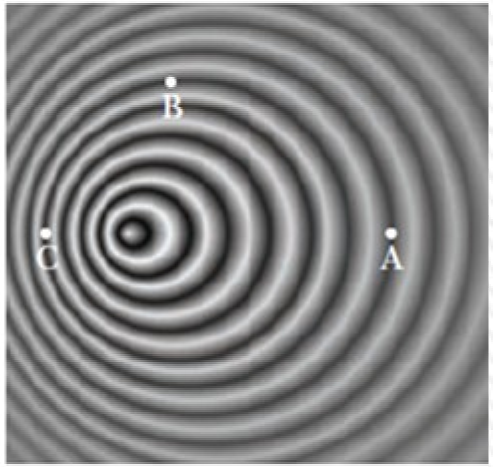
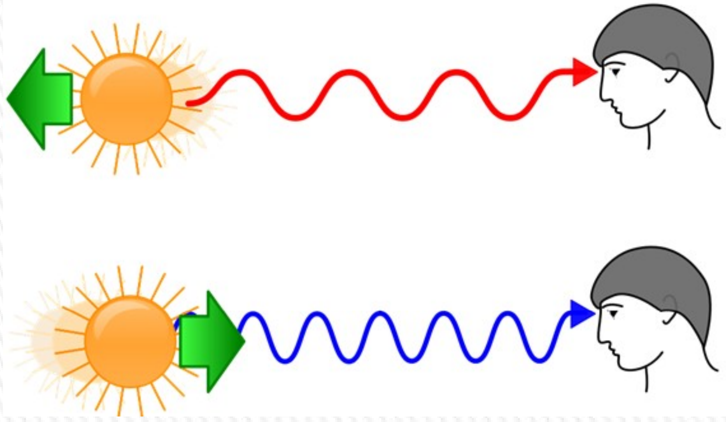
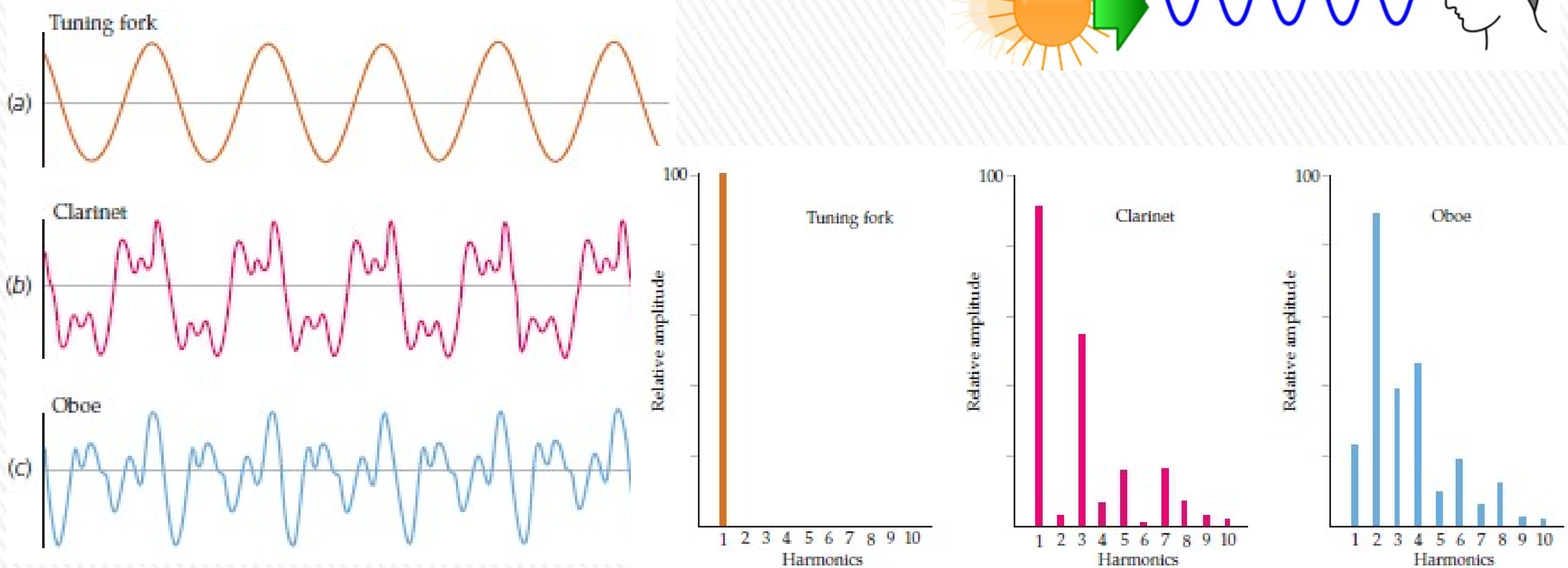
11- ONDAS SONORAS





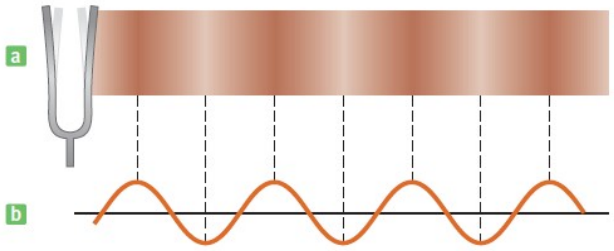




ONDAS SONORAS

Las **ondas de sonido o acústicas** son **ondas mecánicas longitudinales**, que tienen su fuente en un objeto que vibra.
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.

1) ***Ondas audibles*** *dentro intervalo sensibilidad oído* humano (20 Hz a 20Khz)
2) ***Ondas infrasónicas*** *frecuencias por abajo del* intervalo audible.
3) ***Ondas ultrasónicas*** *tienen frecuencias* por arriba del alcance audible.



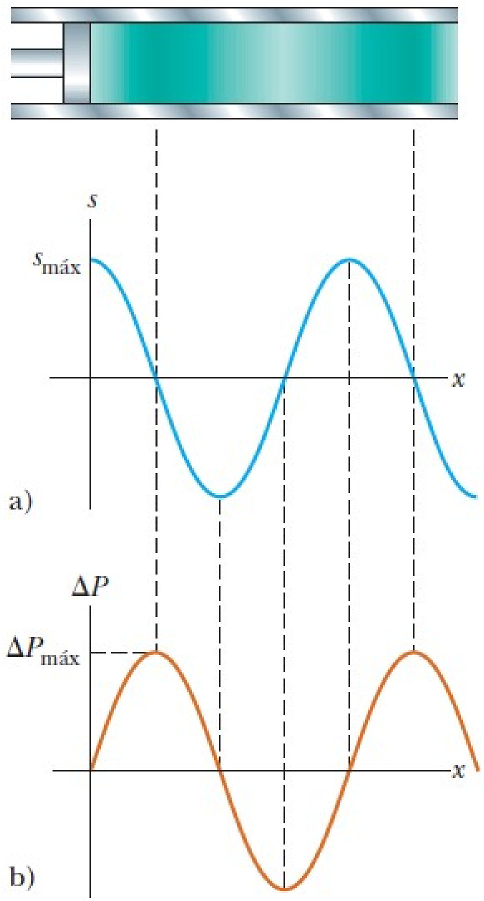
A medida que el diapasón vibra, se forma una sucesión de compresiones y rarefacciones que salen del diapasón. El patrón resultante en el aire es parecido al de la figura

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.

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



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 $\Delta P = 0$

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

Extremo abierto (de columna de aire)**:** es un **antinodo de desplazamiento** (aproximadamente) ya que los elementos de aire tienen completa libertad de movimiento y un **nodo de presión** (la presión en este extremo permanece constante a presión atmosférica).

Murciélagos y la ecolocalización- Son casi ciegos y evitan 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.

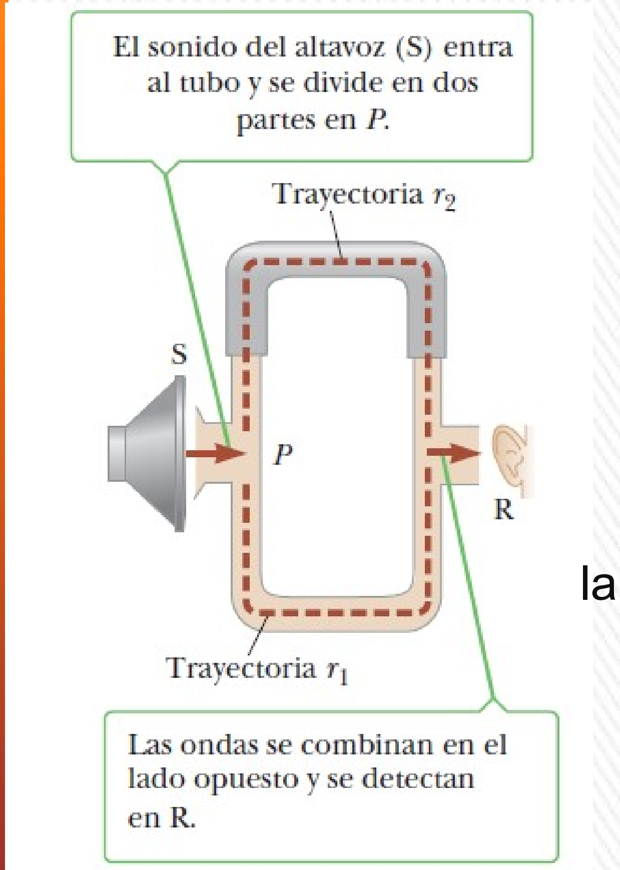
La longitud de onda correspondiente vale: $\lambda = v/f = (340)(120.000 \text{ Hz}) = 2{,}87\times 10^{-3}$ m

ONDAS SONORAS

¿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.

INTERFERENCIA DE ONDAS SONORAS



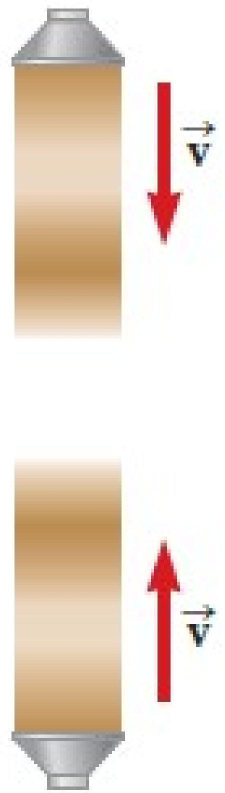
interferencia constructiva:

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

interferencia destructiva:

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

ONDAS SONORAS ESTACIONARIAS



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

la superposición de estas dos ondas nos da:

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

función de una **onda estacionaria**

ONDAS ESTACIONARIAS de SONIDO

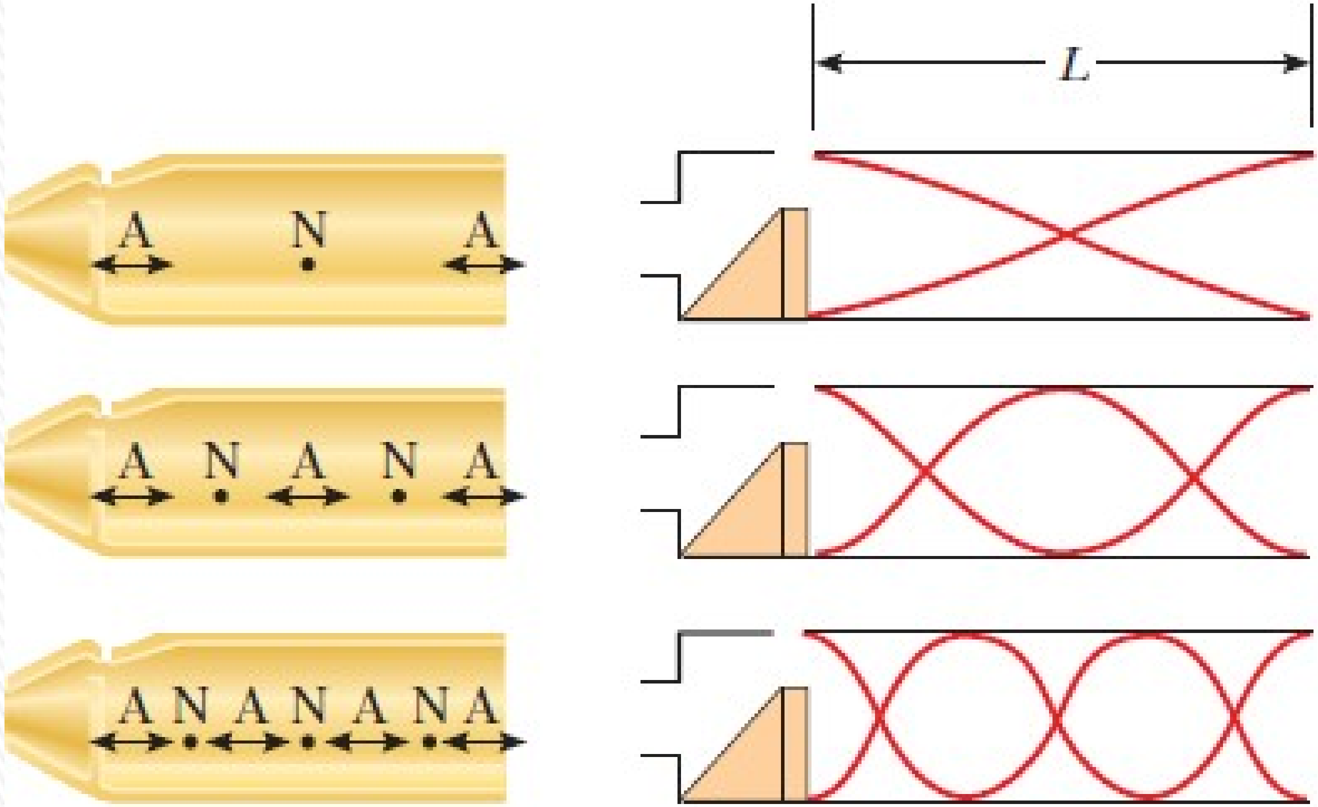
Es posible generar ondas estacionarias en un tubo de aire; por ejemplo un tubo de órgano, como resultado de la interferencia entre ondas acústicas que se desplazan en sentidos opuestos.
La relación entre la onda incidente y la onda reflejada depende de que el extremo reflector del tubo esté abierto o 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 de desplazamiento** en él porque el movimiento de aire está restringido.
Si e**l extremo** está **abierto**, los elementos de aire tienen completa libertad de movimiento y existe un **antinodo de desplazamiento.**

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 de desplazamiento**.
Ambos extremos son antinodos de desplazamiento.



1er. modo normal: dos antinodos adyacentes en los extremos equivale a media longitud de onda:
λ_1 = 2L= 2L/1

2do. modo normal:

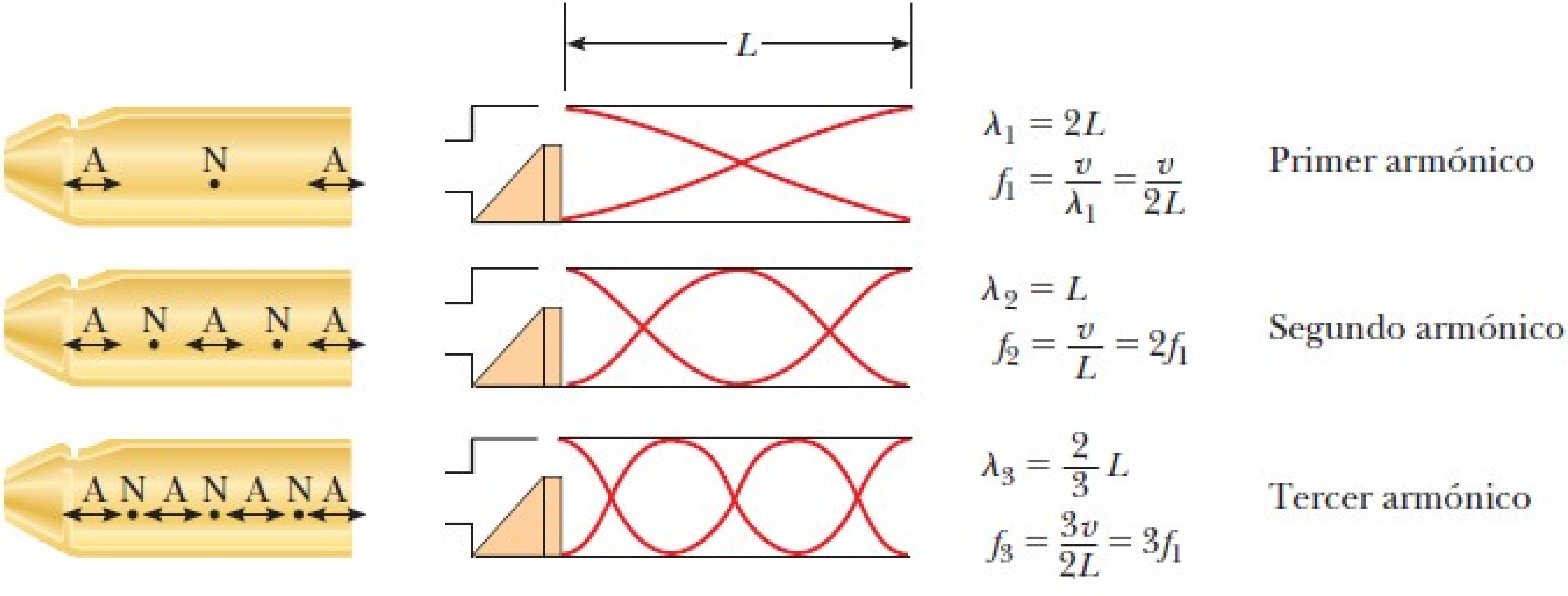
λ_2 = L= 2L/2

3er. modo normal:
λ_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



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.

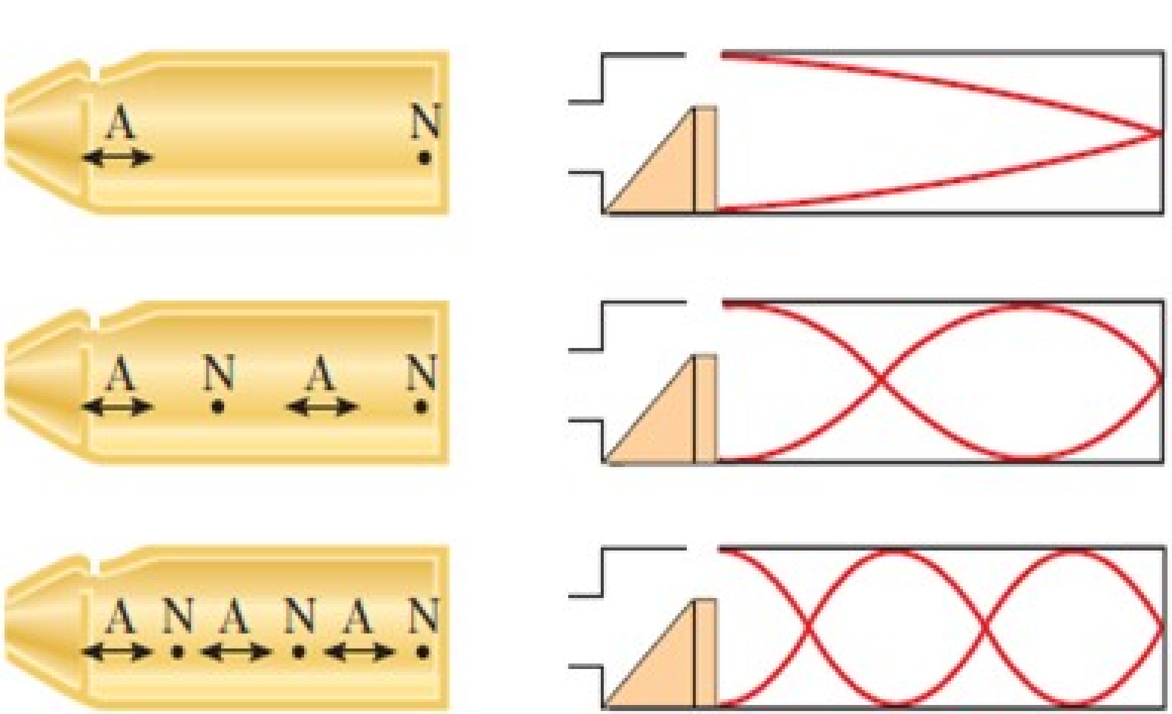
ONDAS ESTACIONARIAS EN COLUMNAS DE AIRE

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: $\lambda_1 = 4L$

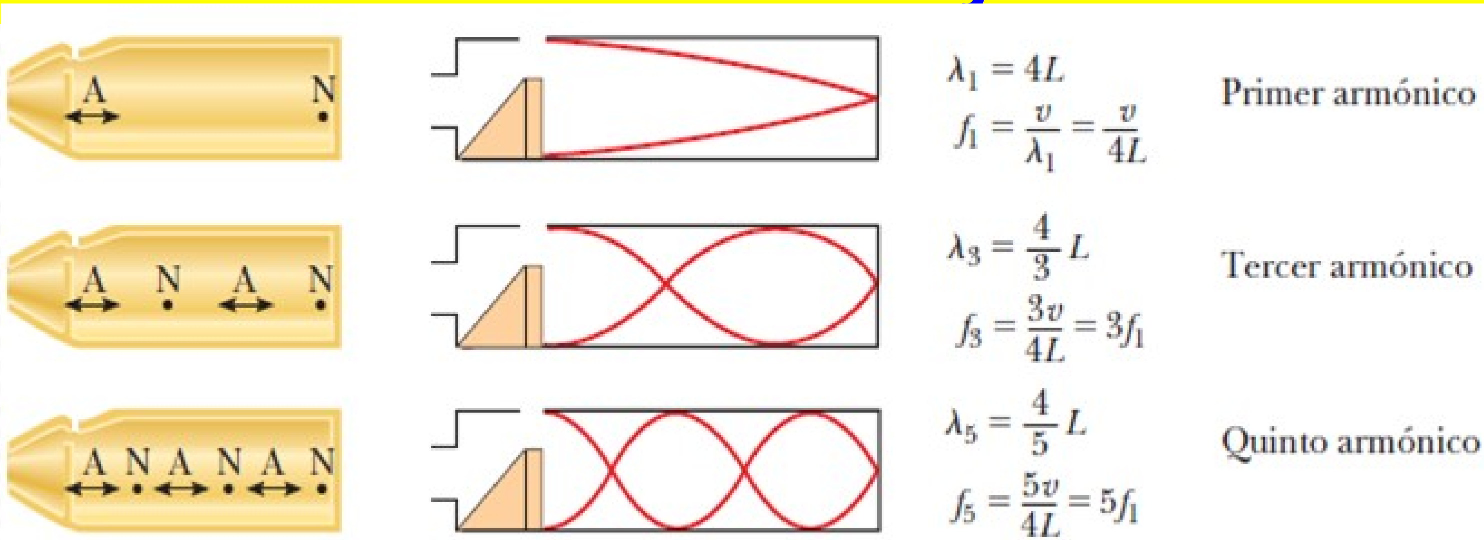
2do. modo normal:
$L = 3\lambda_2/4$
$\lambda_2 = 4L/3$

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

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

ONDAS ESTACIONARIAS EN COLUMNAS DE AIRE

Tubo con un extremo abierto y otro cerrado



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

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

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

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

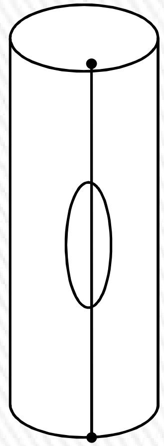
Tubo cerrado en un extremo, frecuencias naturales forman una serie armónica que incluye sólo múltiplos enteros impares de la frecuencia fundamental.

EJEMPLO- Ejercicio 4.2.2

Un instrumento musical consiste de un tubo cerrado en los dos extremos, con una apertura en la pared lateral, y una cuerda estirada fuera y paralela al tubo tal que pasa sobre la apertura. La cuerda y el tubo tienen la misma longitud de 50 cm. Al tocar la cuerda, los primeros 5 armónicos son excitados apreciablemente. Los armónicos de la cuerda dan lugar a un sonido fuerte solo si su frecuencia es cercana a una frecuencia resonante del tubo. La tensión en la cuerda es 588 N y su masa es 10 g.

a) ¿Cuáles son las frecuencias de los armónicos que están amplificados de esta manera?

b) ¿Cuáles serían las frecuencias si uno de los extremos del tubo se abre?



La cuerda tiene sus dos extremos fijos, por lo que aparecerán ondas estacionarias cuyas frecuencias (armónicas) están dadas por:

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

Debo conocer la velocidad con que se propagan las ondas en la cuerda:

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

Para la cuerda: L= 0,50 m   m= 10 g = 0,010 kg   T= 588 N

$$\mu = \frac{m}{L} = \frac{0{,}010\,kg}{0{,}50\,m} = 0{,}020\,kg/m$$

$$v = \sqrt{\frac{T}{\mu}} = \sqrt{\frac{588}{0{,}020}} = 171\,m/s$$ (171,46 m/s)

$$f_n = n\frac{v}{2L} = n\frac{171}{2(0{,}50)}$$

f_1 = 1,7×10² Hz; f_2 = 3,4×10² Hz; f_3 = 5,1×10² Hz

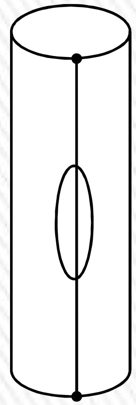
f_4 = 6,9×10² Hz; f_5 = 8,6×10² Hz;

EJEMPLO- Ejercicio 4.2.2

Un instrumento musical consiste de un tubo cerrado en los dos extremos, con una apertura en la pared lateral, y una cuerda estirada fuera y paralela al tubo tal que pasa sobre la apertura. La cuerda y el tubo tienen la misma longitud de 50 cm. Al tocar la cuerda, los primeros 5 armónicos son excitados apreciablemente. Los armónicos de la cuerda dan lugar a un sonido fuerte solo si su frecuencia es cercana a una frecuencia resonante del tubo. La tensión en la cuerda es 588 N y su masa es 10 g.

a) ¿Cuáles son las frecuencias de los armónicos que están amplificados de esta manera?

b) ¿Cuáles serían las frecuencias si uno de los extremos del tubo se abre?



Los modos normales para un tubo con ambos extremos cerrados, son iguales a los correspondientes a uno con ambos extremos abiertos, ya que tiene un nodo en c/u de los extremos, por lo que la longitud de onda del primer modo vale: λ_1=2L (igual que cuando ambos extremos están cerrados).

Considero que la velocidad del sonido en el aire vale v_s = 343 m/s.

$$f_n = n\frac{v_s}{2L}$$

$$f_n = n\frac{v_s}{2L} = n\frac{343}{2\,(0{,}50)}$$

Los primeros armónicos son:

f_1 = 3,4×10^2 Hz; f_2 = 6,9×10^2 Hz; f_3 = 1,0×10^3 Hz

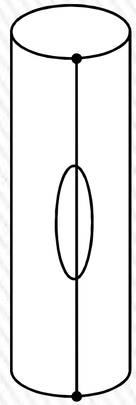
Se amplificarían los siguientes armónicos: 3,4×10^2 Hz, 6,9×10^2 Hz

EJEMPLO- Ejercicio 4.2.2

Un instrumento musical consiste de un tubo cerrado en los dos extremos, con una apertura en la pared lateral, y una cuerda estirada fuera y paralela al tubo tal que pasa sobre la apertura. La cuerda y el tubo tienen la misma longitud de 50 cm. Al tocar la cuerda, los primeros 5 armónicos son excitados apreciablemente. Los armónicos de la cuerda dan lugar a un sonido fuerte solo si su frecuencia es cercana a una frecuencia resonante del tubo. La tensión en la cuerda es 588 N y su masa es 10 g.

a) ¿Cuáles son las frecuencias de los armónicos que están amplificados de esta manera?

b) ¿Cuáles serían las frecuencias si uno de los extremos del tubo se abre?



Si ahora el tubo tiene uno de los extremos abierto, las frecuencias de los modos normales están dados por:

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

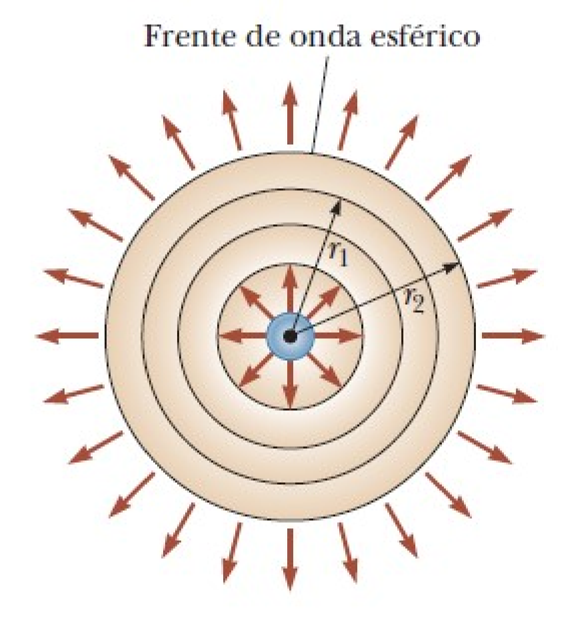
$$f_{2n-1} = (2n-1)\frac{v_s}{4L} = (2n-1)\frac{343}{4(0{,}50)} =$$

Los primeros armónicos son:

***f_1* = 1,7×10^2 Hz; *f_3* = 5,1×10^2 Hz; *f_5* = 8,6×10^2 Hz…**

Se amplificarían los siguientes armónicos: 1,7×10^2 Hz, 5,1×10^2 Hz y 8,6×10^2 Hz

ONDAS ESFÉRICAS Y PUNTUALES



Pequeño objeto esférico oscilante: su radio cambia periódicamente, produce una **onda esférica.**
Debido a que todos los puntos en una esfera que vibra se comportan de la misma forma, la energía en una onda esférica se propaga igualmente en todas direcciones. Esto significa que ninguna dirección tiene preferencia sobre otra.

Si P_{prom} *es* la potencia promedio emitida por la fuente a cualquier distancia *r de la fuente,* la energía se distribuye sobre una superficie esférica de área $4\pi r^2$, *suponiendo que* no hay ninguna absorción por el medio.

Intensidad del sonido a una distancia *r de la fuente es:*

$$I = \frac{P_{prom}}{A} = \frac{P_{prom}}{4\pi r^2}$$

El hecho de que *I varíe en relación con* $1/r^2$ es un resultado del supuesto de que una pequeña fuente (algunas veces llamada **fuente puntual)** emite una **onda esférica.**

Intensidad *I de una onda, o potencia por unidad de área* *se define como la* rapidez a la cual la energía (es decir la potencia) transportada por la onda se transfiere a través de una unidad de área *A perpendicular a la dirección de viaje de la onda:*

NIVEL SONORO EN DECIBELES

Sonidos más débiles que el oído humano puede detectar a una frecuencia de 1.000 Hz : intensidad de aproximadamente **$1{,}00 \times 10^{-12}$ W/m²** (***umbral de audición)***.

Los sonidos más fuertes que el oído tolera a esta frecuencia corresponden a una intensidad de aproximadamente **1,00 W/m²**, el ***umbral de dolor.***

Como el intervalo es tan amplio, es conveniente usar una escala logarítmica, donde el **nivel sonoro β** se define mediante la ecuación:

$$\beta \equiv 10 \log \left(\frac{I}{I_0} \right)$$

I_0 es la intensidad de referencia (umbral de audición) (**$I_0 = 1{,}00 \times 10^{-12}$ W/m²**)
I intensidad en W/ m² que corresponde el nivel de sonido β, donde **β** se mide en **decibeles (dB).**
En esta escala, el umbral de dolor (I_0= *1,00 W/m²) corresponde a un nivel sonoro de 120* dB.

INTENSIDAD DE LAS ONDAS SONORAS

Niveles sonoros

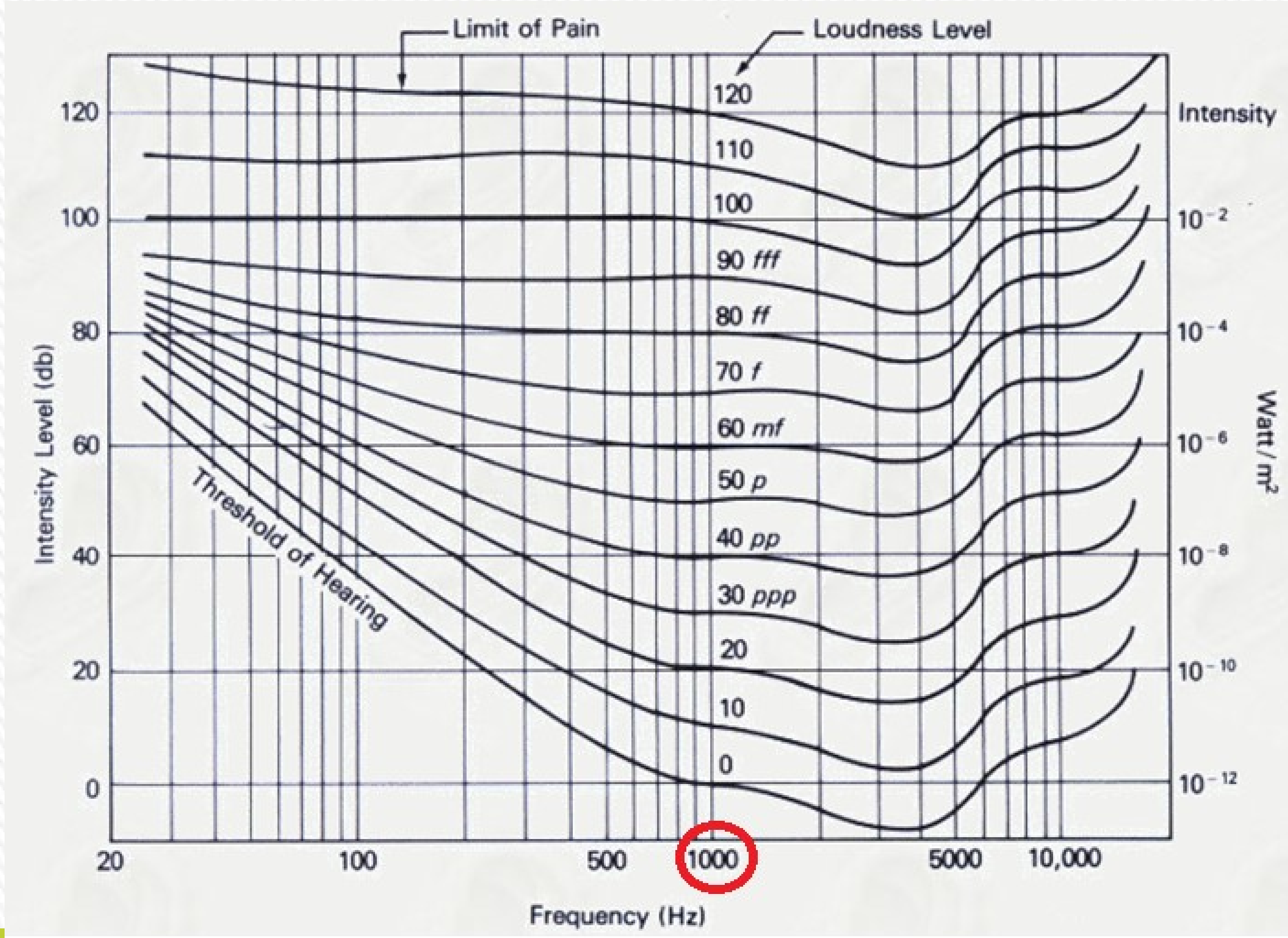
Fuente del sonido	β (dB)
Avión jet cercano	150
Martillo hidráulico; ametralladora	130
Sirena; concierto de rock	120
Transporte subterráneo; podadora potente	100
Congestionamiento de tránsito	80
Aspiradora	70
Conversación normal	50
Zumbido de mosquito	40
Susurro	30
Hojas meciéndose	10
Umbral de audición	0

Límite higiénico laboral para 8 hs.: 80 dBA

En Montevideo se consideran ruidos molestos los que superan los 45 dB (decibeles) entre las 7.00 y las 22.00 horas, y 39 dB entre las 22.00 y las 7.00, medidos dentro de una casa

Decibelio A (dBA): unidad de nivel sonoro medido con un filtro previo que quita parte de las bajas y las muy altas frecuencias. De esta manera, después de la medición se filtra el sonido para conservar solamente las frecuencias más dañinas para el oído, razón por la cual la exposición medida en dBA es un buen indicador del riesgo auditivo y vital.

RESPUESTA AUDITIVA



Umbral de audición: intensidad mínima necesaria para que un sonido de una frecuencia dada empiece a ser audible (curva inferior).

Umbral de sensación dolorosa: se experimenta una sensación de cosquilleo cuando los huesecillos vibran en forma tan fuerte que chocan con las paredes del oído medio. El intervalo de la audición normal se halla entre estas dos curvas.

EJEMPLOS- Ejercicios del repartido

4.2.3- Si el nivel de intensidad del habla de una persona es de 50 dB, ¿cuál es el nivel de intensidad cuando 10 personas a la vez hablan de la misma manera?

$$\beta_1 = 10\log\left(\frac{I_1}{I_0}\right) = 50\ dB$$

La intensidad del sonido de 10 personas será 10 veces que el de una persona (I_1): $I_2 = 10\ I_1$.

$$\beta_2 = 10\log\left(\frac{I_2}{I_0}\right) = 10\log\left(\frac{10I_1}{I_0}\right) = 10\log 10 + 10\log\left(\frac{I_1}{I_0}\right) = 10 + \beta_1 = 60\ dB$$

4.2.4- Una persona hablando emite sonido con una potencia de 10^{-5} W. ¿Cuál es la máxima distancia a la cual otra persona puede escuchar su voz? (Supongamos que no hay otro sonido tapándolo ni absorción del sonido por el aire).

El límite auditivo corresponde a una intensidad $I_0 = 1{,}0\times10^{-12}$ W/m²

$$I_0 = \frac{\mathcal{P}}{4\pi r^2} \quad \Rightarrow r = \sqrt{\frac{\mathcal{P}}{4\pi I_0}} = \sqrt{\frac{10^{-5}}{4\pi 10^{-12}}} = \sqrt{\frac{10^7}{4\pi}} = 892\ m$$

EFECTO DOPPLER

Si un vehículo se mueven mientras hacen sonar su bocina, la frecuencia del sonido que se oye es más alta (más agudo) cuando el vehículo se acerca y más baja cuando se aleja (más grave).

Este fenómeno es un ejemplo del ***efecto Doppler.***

Se oye el mismo efecto si el oyente se mueve y la bocina está fija: la frecuencia es más alta cuando nos acercamos a la fuente y más baja cuando nos alejamos.

Aunque el efecto Doppler se asocia más a menudo con el sonido, es común a todas las ondas, incluyendo las de luz (corrimiento hacia el rojo de galaxias que se alejan). Por ejemplo, el movimiento relativo de la fuente y el observador produce un corrimiento de frecuencia en las ondas luminosas.

El efecto Doppler se usa por ejemplo en los sistemas de radar policíacos para medir la rapidez de los vehículos o los astrónomos para determinar la rapidez de estrellas, galaxias y otros objetos celestes en relación con la Tierra.

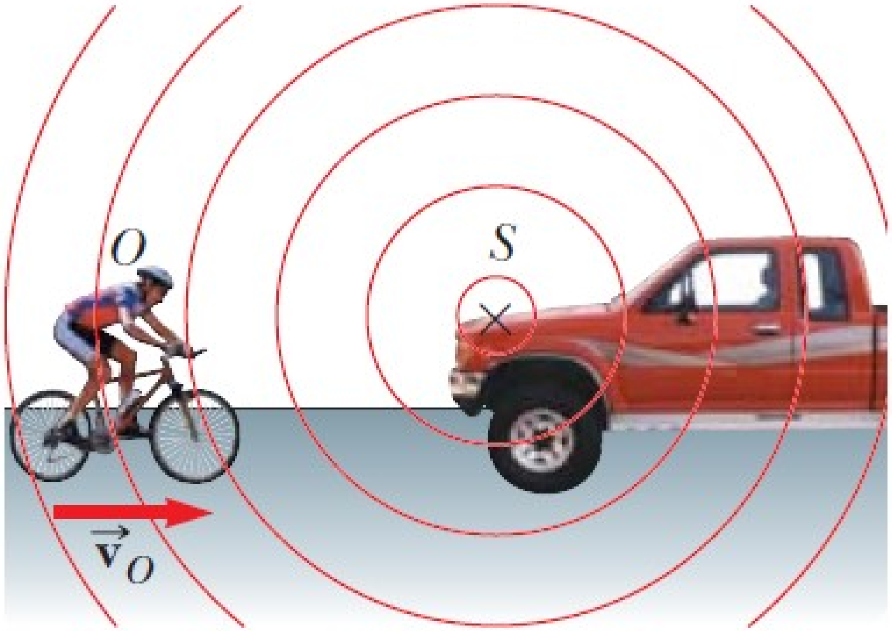
Nos restringiremos al efecto Doppler aplicado al sonido y supondremos que el aire está inmóvil y que todas las medidas de la velocidad están hechas en relación con este medio inmóvil.

La velocidad v_O corresponde al observador, v_S *es la velocidad de la fuente y v es la velocidad del sonido.*

Efecto Doppler - Apps. de Física Walter Fendt:
https://www.walter-fendt.de/html5/phes/dopplereffect_es.htm

EFECTO DOPPLER

Observador se mueve hacia la fuente



La longitud de onda no cambia.
Se percibe una frecuencia mayor.

Rapidez relativa de las ondas respecto al observador: $v' = v + v_O$

La longitud de onda no cambia, entonces detecta una frecuencia f':

$$f' = \frac{v'}{\lambda} = \frac{v + v_0}{\lambda} = \frac{v + v_0}{\frac{v}{f}} = \frac{v + v_0}{v} f$$

$$f' = \frac{v + v_0}{v} f$$

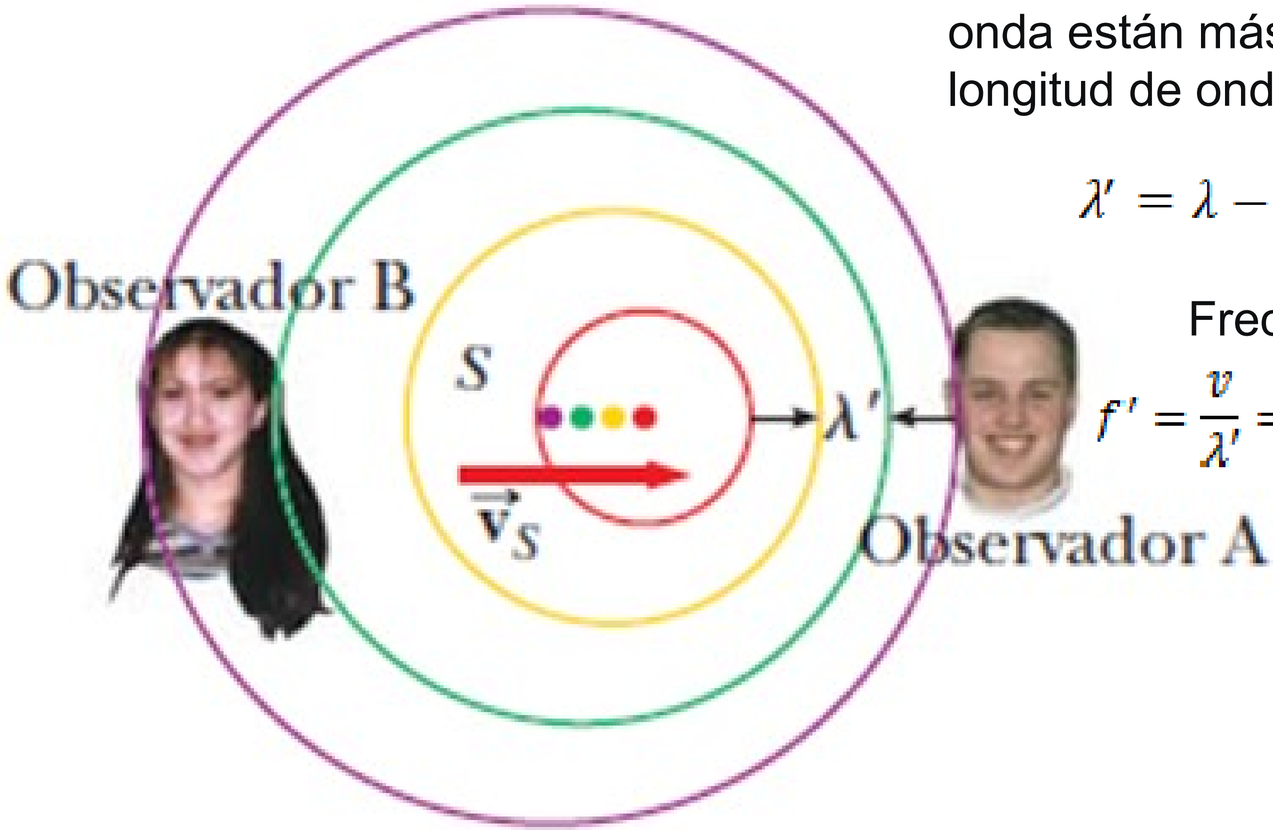
Un observador O (el ciclista) se mueve con una rapidez v_0 hacia una fuente puntual estable S, la bocina de una camioneta estacionada.
El observador escucha una frecuencia f' mayor que la frecuencia de la fuente.

Si en cambio el observador se aleja de la fuente:

$$f' = \frac{v - v_0}{v} f$$

EFECTO DOPPLER

Fuente en movimiento (velocidad v_S) y observadores en reposo



Para el observador A los frentes de onda están más juntos y se acorta la longitud de onda en un valor $\Delta\lambda = v_S.T$

$$\lambda' = \lambda - \Delta\lambda = \lambda - v_s T = \lambda - \frac{v_s}{f}$$

Frecuencia percibida por A

$$f' = \frac{v}{\lambda'} = \frac{v}{\lambda - \frac{v_s}{f}} = \frac{v}{\frac{v}{f} - \frac{v_s}{f}} = \frac{v}{v - v_s} f$$

$$f' = \frac{v}{v - v_s} f$$

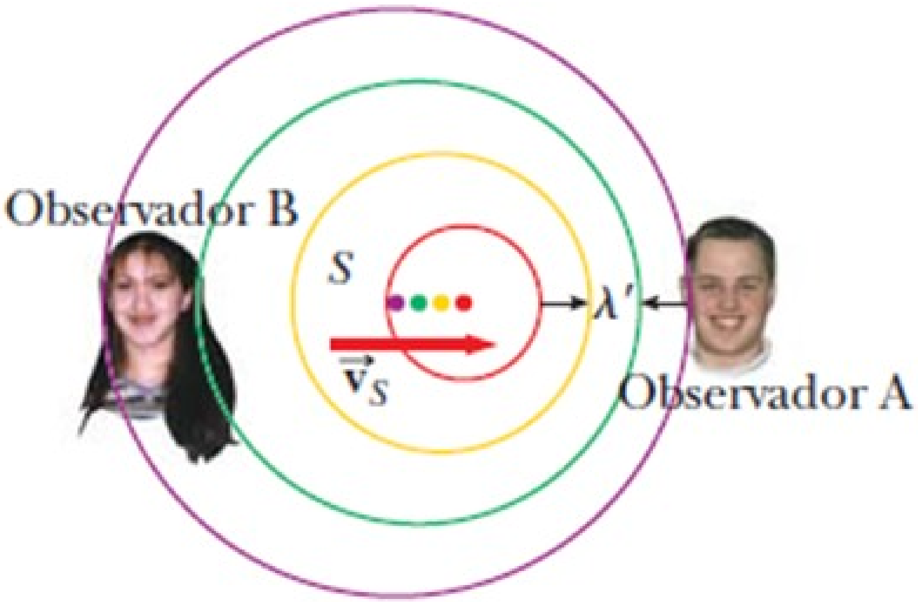
(fuente acercándose)

Si la fuente se aleja del observador estacionario (B) que mide una λ' *mayor* que λ y escucha una frecuencia:

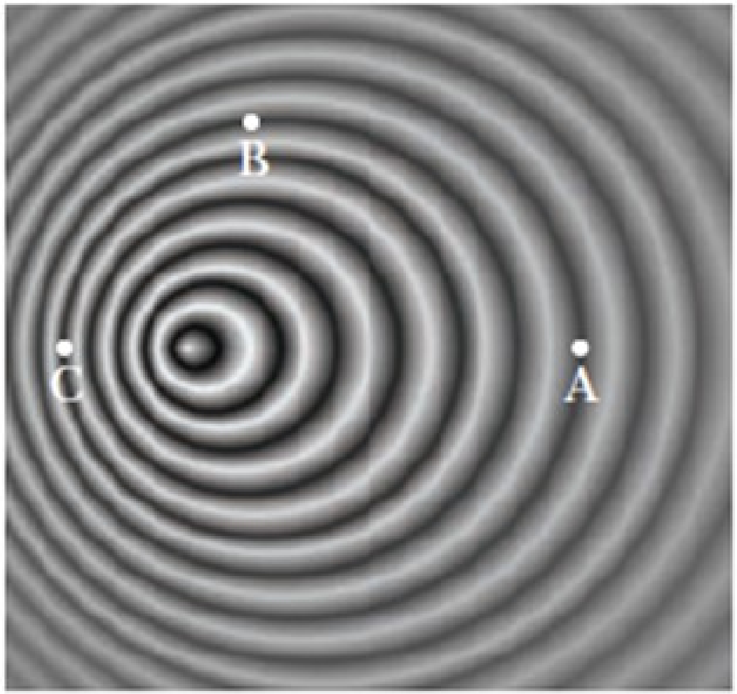
$$f' = \frac{v}{v + v_s} f$$

EFECTO DOPPLER

Fuente en movimiento (velocidad v_S) y observadores en reposo



a)



b)

a) Una fuente *S* se mueve con una rapidez v_S hacia un observador estable A y se aleja de un observador estable B. El observador A escucha una frecuencia mayor y el observador B una frecuencia reducida.

b) El efecto Doppler en el agua, observado en un tanque de ondas. Una fuente puntual que se mueve con rapidez v_S.

EFECTO DOPPLER

Se pueden combinar los dos casos, para usar una única ecuación:

$$f' = \frac{v + v_0}{v - v_s} f$$

En esta expresión se deben usar los signos de las velocidades de la siguiente forma:

***v_0* es positiva si el observador se acerca a la fuente**, si se aleja es negativa

***v_S* es positiva si la fuente se acerca al observador**, si se aleja es negativa

El valor positivo de se usa para el movimiento del observador o de la fuente hacia el otro acercándose, asociada con el aumento de la frecuencia percibida.
El valor negativo se usa para el movimiento de uno alejándose del otro, asociada con una disminución de la frecuencia percibida.

EJEMPLO- Ejercicio 4.2.9

Un auto de policía que suena una sirena con una frecuencia de 1200 Hz viaja a 126 km/h . Otro automóvil viaja en sentido contrario a una velocidad de 72,0 km/h. Considere que la velocidad del sonido en el aire vale 343 m/s. ¿Cuánto vale, en Hz, la diferencia entre la frecuencia que percibe el conductor del auto antes y después de que lo pase el auto de policía?

v = 343 m/s f = 1.200 Hz v_S= 126 km/h = 35,0 m/s v_O= 72.0 km/h = 20,0 m/s

Antes de cruzarse, se están aproximando por lo que la frecuencia que percibe el conductor del auto f_A estará dada por:

$$f_A = \frac{v + v_O}{v - v_s} f = \frac{343 + 20{,}0}{343 - 35{,}0}(1.200\,Hz) = 1.414{,}29\,Hz$$

Después de cruzarse, el conductor del auto percibe una frecuencia f_D que estará dada por:

$$f_D = \frac{v - v_O}{v + v_s} f = \frac{343 - 20{,}0}{343 + 35{,}0}(1.200\,Hz) = 1.025{,}40\,Hz$$

$\Delta f = f_A - f_D$ = 1414,29-1025,40 =388,89 Hz

Δf = 389 Hz