



# Física III (sección 3) (230006-230010) Ondas, Óptica y Física Moderna

Profesor: M. Antonella Cid  
Departamento de Física, Facultad de Ciencias  
Universidad del Bío-Bío

**Carreras:** Ingeniería Civil Civil, Ingeniería Civil  
Mecánica, Ingeniería Civil Industrial

# Ejemplo

- Considere una fuente conectada a dos parlantes separados 2.3 [m]. Una persona está sentada frente a uno de los parlantes a 1.2 [m] de éste. Los parlantes emiten tonos puros de longitud  $\lambda$  y las ondas están en fase al salir de los parlantes. ¿Para qué longitudes de onda la persona oirá un mínimo de intensidad?

# Interferencia de ondas de sonido

## *Interferencia Constructiva:*

$$\Delta r = |r_1 - r_2| = n\lambda, \quad n = 0, 1, 2, \dots$$

Las ondas están en fase en el receptor. Se detecta un máximo en la intensidad de sonido. En términos de la constante de fase  $\phi$ , se presenta interferencia constructiva cuando:  $\phi = 2n\pi$ ,  $n = 0, 1, 2, \dots$

## *Interferencia Destructiva:*

$$\Delta r = |r_1 - r_2| = (2n + 1)\frac{\lambda}{2}, \quad n = 0, 1, 2, \dots$$

Las ondas están completamente fuera de fase en el receptor. Se detecta un mínimo en la intensidad de sonido. En términos de la constante de fase  $\phi$ , se presenta interferencia destructiva cuando:  $\phi = (2n + 1)\pi$ ,  $n = 0, 1, 2, \dots$

# Ondas de sonido estacionarias

Es posible encontrar ondas de sonido estacionarias para determinadas frecuencias de vibración. La frecuencia de vibración depende de si tratamos con un tubo abierto o cerrado. Las ondas estacionarias se generan con una onda de sonido viajera incidente y la onda reflejada en el extremo del tubo en el cual se propaga la onda.

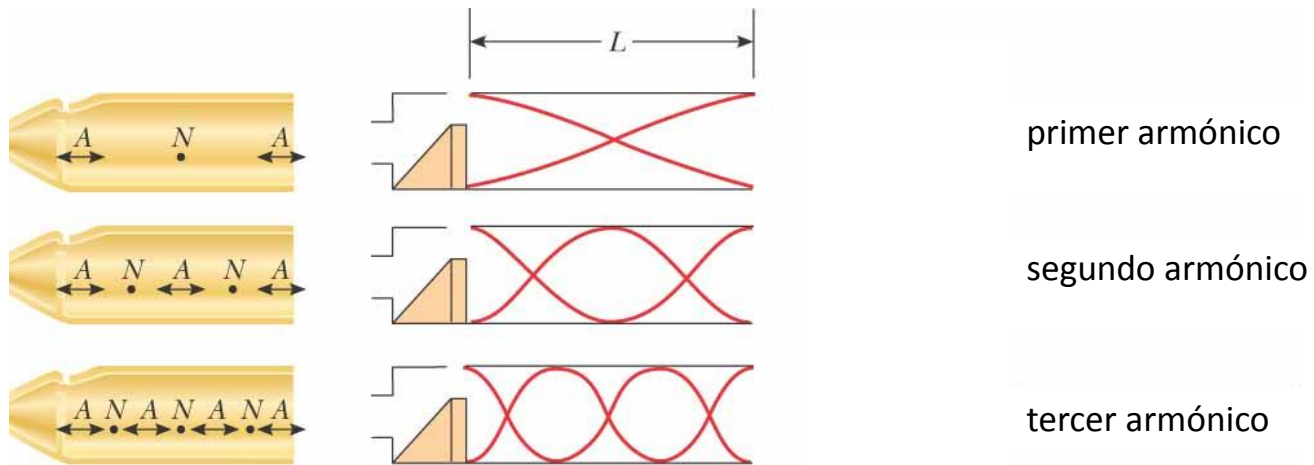
En un *tubo abierto* el extremo corresponde aproximadamente a un antinodo de desplazamiento y un nodo de presión, la presión en el extremo abierto corresponde a la presión atmosférica (cuando el tubo está en contacto con el aire). En el extremo de un tubo abierto hay un cambio en la forma del medio, allí el medio es libre de moverse en una región más grande.

En un *tubo cerrado* el extremo cerrado corresponde a un nodo de desplazamiento debido a que en el extremo cerrado la pared no permite el movimiento longitudinal de las moléculas de aire. La onda reflejada está  $\pi$  [rad] fuera de fase con la onda incidente. Este punto corresponde a un antinodo de presión (puesto que la presión y el desplazamiento están  $\frac{\pi}{2}$  [rad] fuera de fase).

# Tubo abierto

En este caso la condición es que se presenten antinodos de desplazamiento en los extremos

$$\lambda_n = \frac{2L}{n}, \quad f_n = \frac{v}{\lambda_n} = \frac{vn}{2L}, \quad n = 1, 2, 3, \dots$$



Tubo abierto en ambos extremos

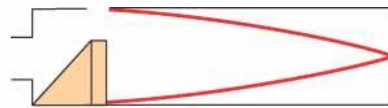
© 2004 Thomson/Brooks Cole



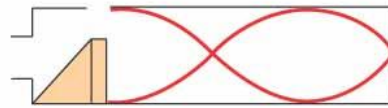
# Tubo cerrado

En este caso la condición es que se presente 1 nodo de desplazamiento en el extremo cerrado y un antinodo de desplazamiento en el extremo abierto

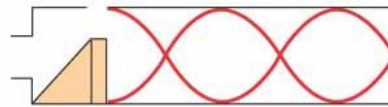
$$\lambda_n = \frac{4L}{n}, \quad f_n = \frac{v}{\lambda_n} = \frac{vn}{4L}, \quad n = 1, 3, 5, \dots$$



primer armónico



tercer armónico



quinto armónico

Tubo cerrado en un extremo

© 2004 Thomson/Brooks Cole



# Ejercicio

- Considere un tubo de resonancia como el utilizado en el primer laboratorio. Usted genera ondas estacionarias al interior del tubo con un parlante que vibra a  $15\,000$  [Hz] colocado en uno de los extremos del tubo. Si con el micrófono y el osciloscopio logra determinar que la separación entre 2 máximos de vibración corresponde a  $1.15$  [cm]. Determine la temperatura del aire al interior del tubo.
- Si usted realiza el mismo experimento en agua (la velocidad de las ondas de sonido en agua es  $1493$  [m/s] a  $25$  [°C]), ¿a qué frecuencia debería generar las ondas de sonido para obtener ondas estacionarias de la misma longitud de onda?



# Intensidad de Sonido en decibeles

- Los sonidos más débiles que el oído humano puede detectar a una frecuencia de 1000 [Hz] corresponden a una intensidad de  $10^{-12} \left[ \frac{W}{m^2} \right]$  denominada **umbral de audición**. Los sonidos más fuertes que el oído puede tolerar a esta frecuencia corresponden a una intensidad de conocido como el **umbral del dolor**  $1 \left[ \frac{W}{m^2} \right]$ .
- Como el oído humano puede detectar un amplio rango de intensidades, se escoge una escala logarítmica para indicar la intensidad de sonido

$$\beta = 10 \log \left( \frac{I}{I_0} \right) [dB]$$

$$I_0 = 10^{-12} \left[ \frac{W}{m^2} \right]$$

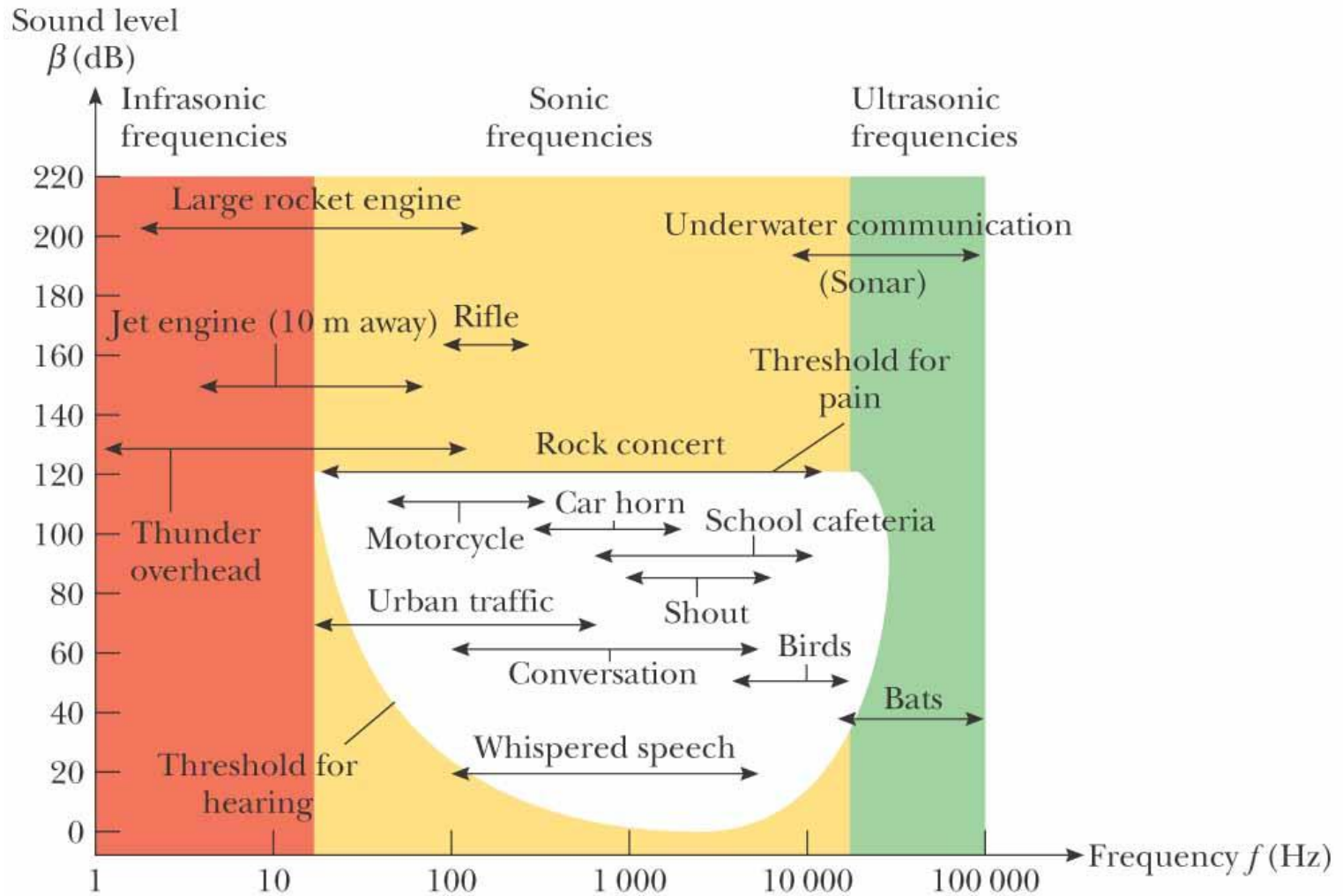
El umbral del dolor corresponde a...

El umbral de audición corresponde a...



# Ejemplo

- Dos máquinas idénticas están ubicadas a la misma distancia de un trabajador. La intensidad del sonido entregado por cada máquina en la ubicación del trabajador es de  $2 \times 10^{-7} [W/m^2]$ . Encuentre la intensidad del sonido en dB en la ubicación del trabajador cuando opera una máquina y cuando operan las dos.
- Como regla, duplicar el volumen (que depende en general de la intensidad y la frecuencia) corresponde a un incremento de 10 [dB] de intensidad. Si en el ejemplo, el volumen se duplica, ¿cuántas máquinas estarían operando?



© 2004 Thomson/Brooks Cole



# Ejercicios

- Una cuerda de guitarra de 60,0 cm de longitud y 6,00 g de masa esta sometida a una tensión de 50 [N]. ¿Cuál es la frecuencia armónica más alta que puede escuchar una persona con un límite superior de audición de 20 [kHz]?
- Si se determina que dos frecuencias naturales adyacentes de un tubo de órgano (semi-abierto) son 550 [Hz] y 650 [Hz], calcule la frecuencia fundamental y la longitud de este tubo ( $v_{sonido} = 340$  [m/s])
- Se emiten ondas de sonido esféricas uniformemente en todas direcciones a partir de una fuente puntual, siendo 25 [W] la potencia irradiada. ¿Cuál es la intensidad en dB a 2.5 [m] de la fuente?

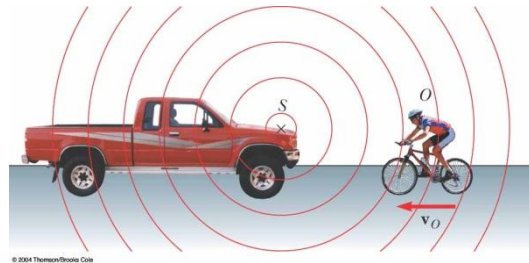
# Efecto Doppler (1842)

- Todos hemos notado que el sonido de un tren cambia cuando éste se mueve pasando por nuestra posición.
- La frecuencia del sonido es más alta cuando el tren se aproxima que cuando se aleja
- Este fenómeno se conoce como *Efecto Doppler*.
- Este principio se utiliza para determinar la rapidez de un automóvil en una carretera y también para determinar las velocidades de las estrellas.



# Efecto Doppler

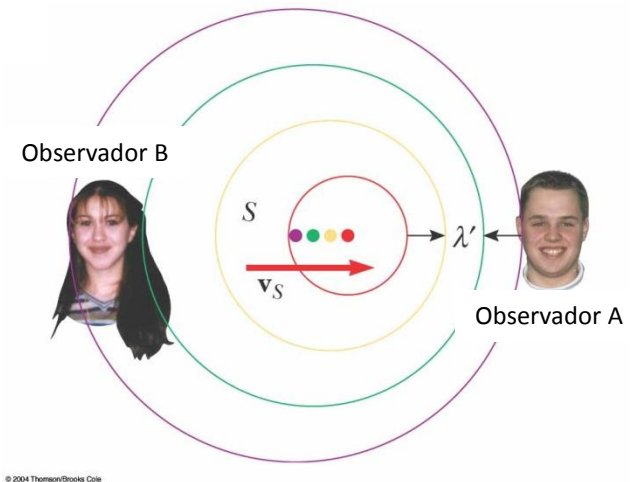
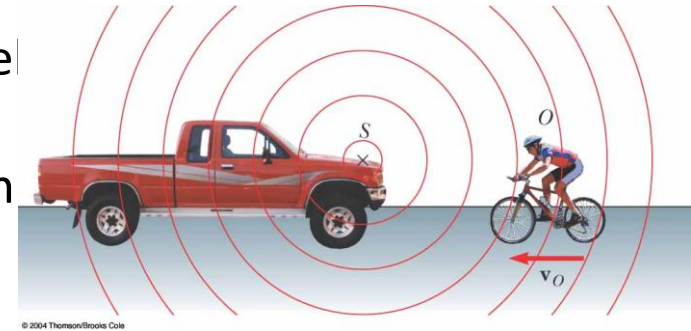
- Si una fuente puntual emite ondas de sonido y el medio de propagación es uniforme, las ondas se mueven con la misma rapidez en todas direcciones: radialmente alejándose de la fuente, este patrón corresponde a un frente de ondas esférico



- El efecto Doppler ocurre porque la **velocidad relativa** entre el observador y el emisor depende de la dirección de viaje y de la rapidez del observador
- Cuando el observador se mueve hacia la fuente, la rapidez relativa es mayor que la rapidez de propagación, lo que conduce a un incremento de la frecuencia
- Cuando el observador se aleja de la fuente, la rapidez relativa es más baja, al igual que la frecuencia

# Efecto Doppler

- Un frente de ondas esférico se representa en el cuaderno como círculos concéntricos con la fuente. Cada arco representa una superficie en la cual la fase de la onda es constante. La distancia entre frentes de onda adyacentes corresponde a la longitud de onda
- Consideremos una fuente estacionaria que emite ondas de sonido (fuente en reposo respecto al medio de propagación) y un observador en movimiento
- Consideremos una fuente en movimiento y un observador estacionario



# Observador móvil, fuente en reposo

Dado que la fuente está estática, la longitud de onda es constante

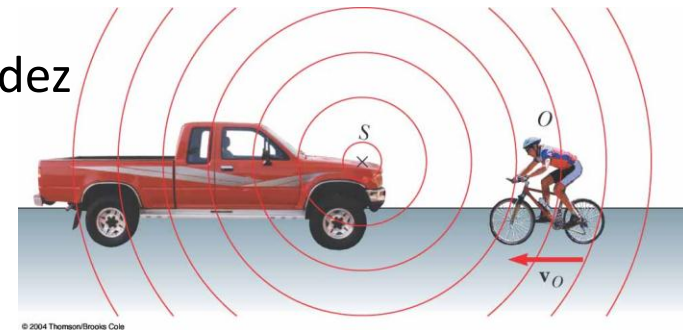
Si el observador se mueve **hacia la fuente**, la rapidez de las ondas relativa al observador es mayor:

$$v' = v + v_0$$

rapidez de propagación que mide el observador en movimiento

rapidez de propagación que mide un observador en reposo

rapidez con la cual se mueve el observador



$$v = \lambda f$$

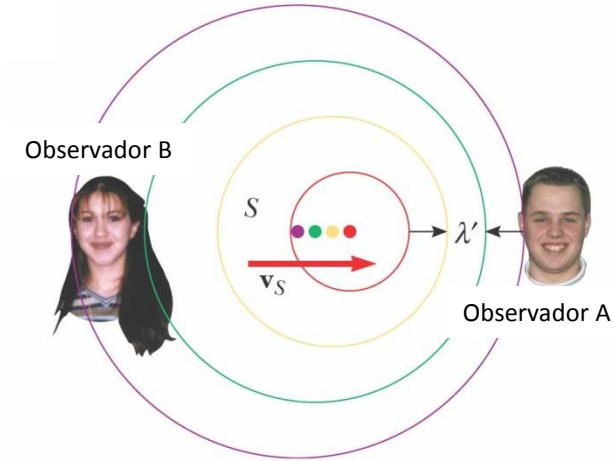
El observador mide una frecuencia mayor si se acerca a la fuente

$$f' = \frac{v'}{\lambda} = \frac{v + v_0}{\lambda} = \left( \frac{v + v_0}{v} \right) f$$

Si el observador **se aleja de la fuente**, la frecuencia medida por el observador sería menor y  $v_0 < 0$

# Observador en reposo, fuente móvil

Si la fuente se mueve ***hacia el observador***, la longitud de onda medida por el observador es más corta que la longitud de onda emitida por la fuente. Durante cada vibración la fuente se mueve una distancia  $v_F T = \frac{v_F}{f}$  donde  $T$  es el período de la vibración. La longitud de onda medida por el observador es:



© 2004 ThomsonBrooks Cole

$$\lambda' = \lambda - \Delta\lambda = \lambda - \frac{v_F}{f}$$

← rapidez de la fuente

$$v_F T = \frac{v_F}{f}$$

$$f' = \frac{v'}{\lambda'} = \frac{v}{\lambda - \frac{v_F}{f}} = \left( \frac{v}{v - v_F} \right) f$$

El observador mide una frecuencia mayor si la fuente se acerca

Si la fuente ***se aleja del observador***, la frecuencia medida por el observador decrece y  $v_F < 0$ .



# Caso general

Frecuencia  
que mide el  
observador

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

Frecuencia  
que emite  
la fuente

$$v_0 > 0$$

el observador se acerca a la fuente

$$v_0 < 0$$

el observador se aleja de la fuente

$$v_F > 0$$

la fuente se acerca al observador

$$v_F < 0$$

la fuente se aleja del observador



# Ejemplo

- Un reloj despertador suena con una frecuencia de 600 [Hz]. Una mañana el reloj despertador se descompone y no es posible apagarlo, el dueño de mal humor lo deja caer desde su la ventana en un cuarto piso a 15 [m] de altura. ¿Cuál será la frecuencia que oirá la persona justo antes de que el reloj impacte el piso?

# Ondas de Choque

La fuente se mueve desde  $S_0$  a  $S_n$  en un tiempo  $t$

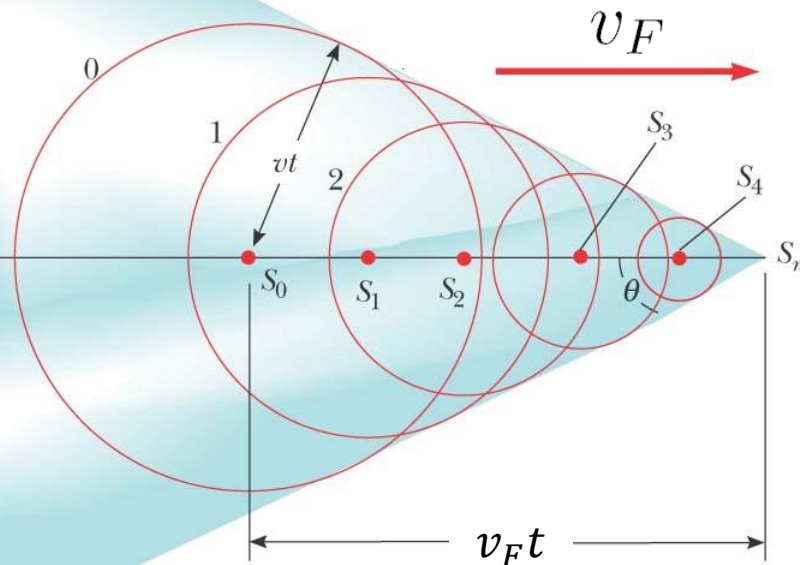
En este caso se tiene la particularidad de que la rapidez de la fuente es mayor que la rapidez de propagación de las ondas en el medio

$$v_F > v$$

Todos los frentes de onda quedan “envueltos” por un cono, el cual es tangente a los frentes de onda emitidos entre 0 y  $t$ . Se tiene la relación:

$$\sin \theta = \frac{vt}{v_F t} = \frac{v}{v_F}$$

El número de Mach se define como:  $\frac{v_F}{v}$





# Ejercicios

- Un tren se mueve paralelo a una carretera con una rapidez constante de  $20 \text{ [m/s]}$ . Un auto viaja en la misma dirección que el tren con una rapidez de  $40 \text{ [m/s]}$ . La bocina del auto suena a una frecuencia de  $510 \text{ [Hz]}$  y el silbato del tren a una frecuencia de  $320 \text{ [Hz]}$ .
  - Cuando el auto está detrás del tren, ¿qué frecuencia escucha el ocupante del auto para el silbato del tren?
  - Después que el auto pasa y está delante del tren, ¿qué frecuencia escucha un pasajero del tren para la bocina del auto?

# Ejercicios

- Estando de pie en un cruce peatonal, una persona escucha un sonido de 560 Hz de frecuencia proveniente de la sirena de una ambulancia que se aproxima. Después que pasa la ambulancia, la frecuencia escuchada de la sirena es de 480 Hz. Determine la rapidez de la ambulancia a partir de estas observaciones.

