<u>Física IV</u>

Ondas Acústicas

Prof. Dr. Lucas Barboza Sarno da Silva

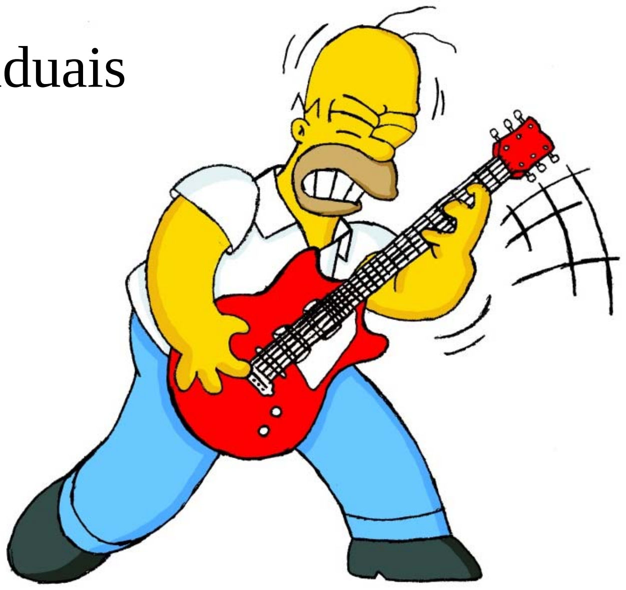
Ondas Acústicas

- Uma onda longitudinal
- Se propaga em qualquer meio (gases, sólidos ou líquidos)
- Velocidade depende das propriedades do meio

Vibrações das partículas do meio provocando variações da densidade e pressão na direção de propagação.

Deslocamentos longitudinais das moléculas individuais em relação as posições de equilíbrio

Regiões de altas e baixas pressões **condensações** e **rarefações,** respectivamente.



Ondas mecânicas longitudinais

Diferentes domínios de frequência

1) **Ondas audíveis** (20 e 20.000 Hz)
Instrumentos musicais, cordas vocais humana, alto-falantes.

2) **Ondas infra-sônicas**, abaixo do limiar de audição
Ondas dos terremotos, por exemplo.

3) **Ondas ultra-sônicas**, acima do domínio de audibilidade
Podem ser gerados pela indução de vibrações num cristal de quartzo mediante um campo elétrico alternado externo.

Transdutor

Qualquer dispositivo que transforma uma forma de energia em outra.

Exemplos:

- Alto-falantes
- Cristais de quartzo
- Fonógrafo

Alguns dispositivos podem utilizar ondas ultra-sônicas, como por exemplo na construção de limpadores ultra-sônicos e para navegação subaquática.

Velocidade das ondas

De modo geral, todas as ondas mecânicas têm velocidades:

$$v = \sqrt{\frac{propriedade\ elática}{propriedade\ inercial}}$$

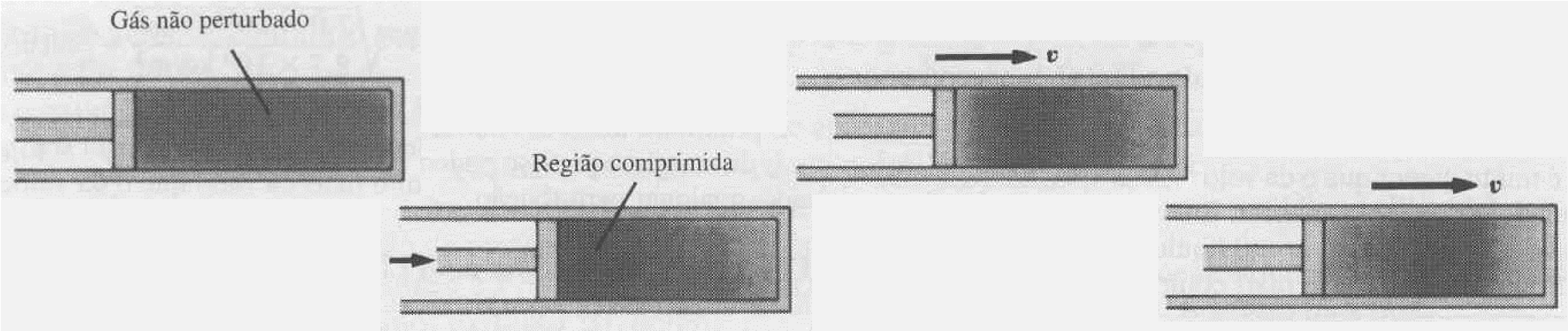
Por exemplo:

Velocidade de **ondas em cordas:**

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

- F é a tensão na corda
- μ é a massa específica da corda

Velocidade das ondas acústicas



As **ondas acústicas** são ondas de compressão que se propagam num meio compressível.

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

Onde, B é o módulo de compressibilidade $\longrightarrow$ $B = -\dfrac{\Delta P}{\Delta V / V}$

Exemplo:

Ondas acústicas numa barra metálica

Quando uma barra metálica é atingida, numa extremidade, por um golpe de martelo, um pulso longitudinal se propaga por ela com a velocidade

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

onde Y é o módulo de Young do metal, definido pelo quociente entre a tensão longitudinal e a deformação longitudinal. Achar a velocidade do som na barra de alumínio.

Dados:
$Y = 7{,}0 \times 10^{10}$ N/m²
$\rho = 2{,}7 \times 10^{3}$ kg/m³

Exemplo:

Velocidade do som num líquido

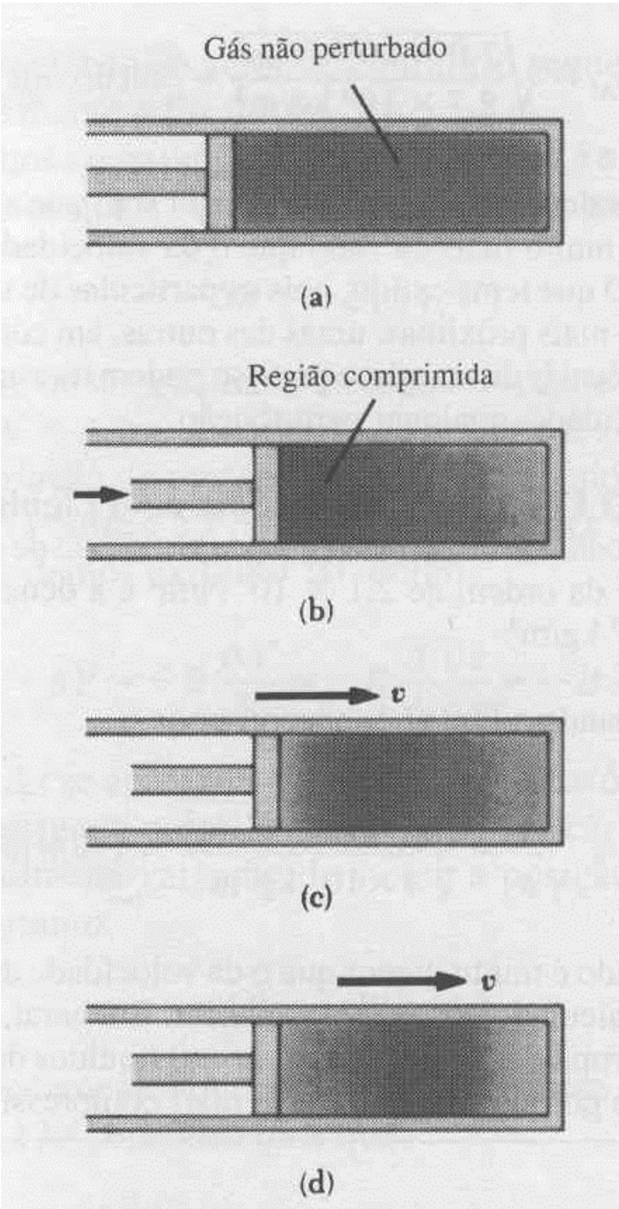
Achar a velocidade do som na água, cujo módulo de compressibilidade é da ordem de 2,1 x 10^9 N/m^2 e a densidade em torno de 10^3 Kg/m^3.

Velocidade do som

TABELA 17.1 Velocidade do Som em Vários Meios

Meio	v (m/s)
Gases	
Ar (0°C)	331
Ar (20°C)	343
Hidrogênio (0°C)	1.286
Oxigênio (0°C)	317
Hélio (0°C)	972
Líquidos a 25°C	
Água	1.493
Álcool metílico	1.143
Água do mar	1.533
Sólidos	
Alumínio	5.100
Cobre	3.560
Ferro	5.130
Chumbo	1.322
Borracha vulcanizada	54

Movimento de um pulso através de um meio compressível

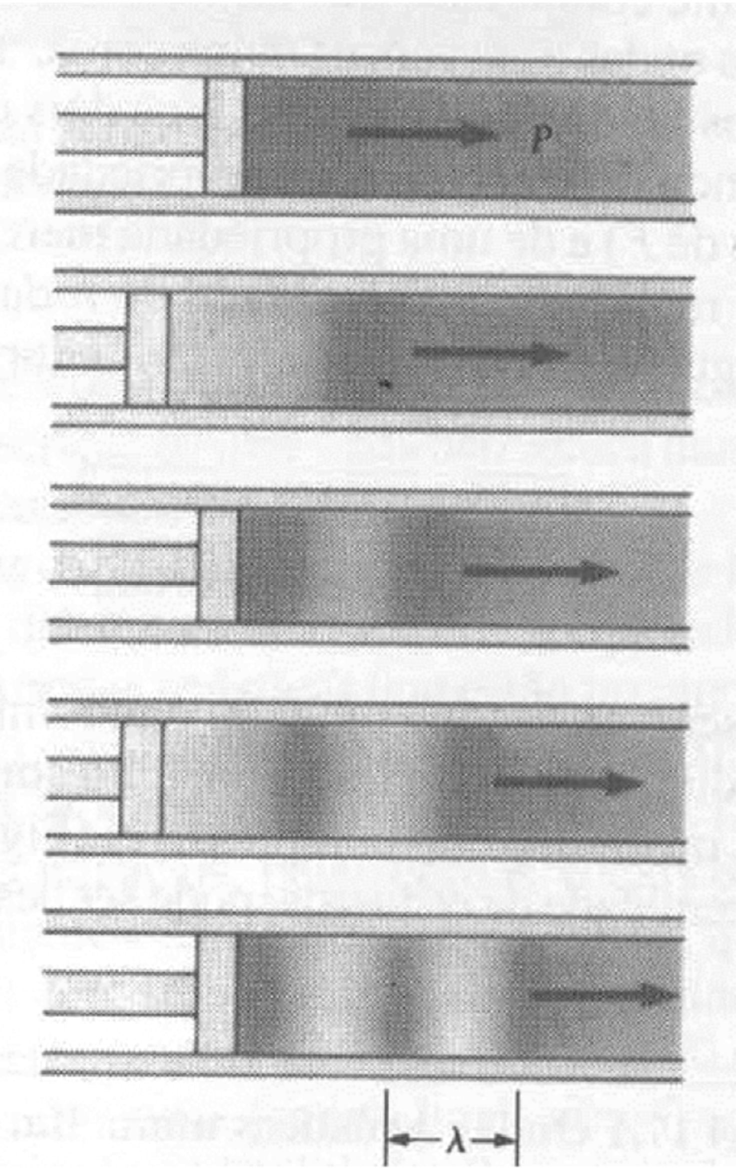


Ondas acústicas harmônicas

A região comprimida é chamada **<u>condensação</u>** (densidade e pressão acima dos valores de equilíbrio).

As regiões de baixa pressão são chamadas de **<u>rarefações</u>** (densidade e pressão abaixo dos valores de equilíbrio).

As duas regiões se movem com uma velocidade do som nesse meio.



Deslocamento harmônico

$$s(x,t) = s_m \cos(kx - \omega t)$$

s_m é o deslocamento máximo em relação ao equilíbrio (amplitude do deslocamento)

k é o número de onda

ω a frequência angular

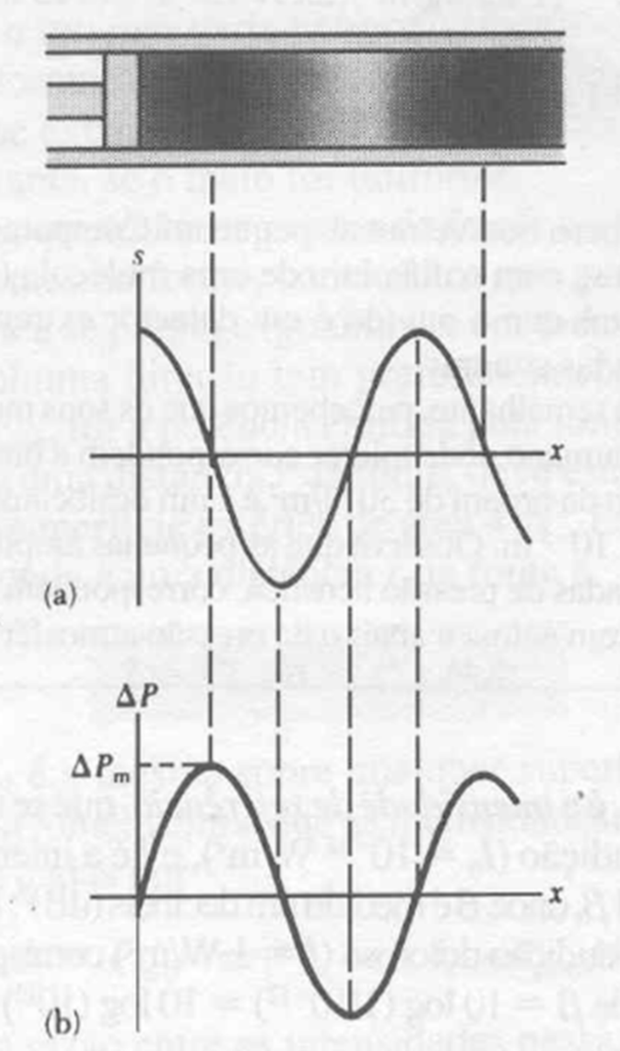
Variação da pressão do gás

$$\Delta P = \Delta P_m sen(kx - \omega t)$$

$\Delta P_m = \rho v \omega s_m \longrightarrow$ é variação máxima de pressão em relação ao equilíbrio (amplitude de pressão)

$\omega s_m \longrightarrow$ é a velocidade longitudinal máxima do meio em frente ao pistão

Então, uma onda acústica pode ser considerada como:



uma onda de deslocamento

$$s(x,t) = s_m \cos(kx - \omega t)$$

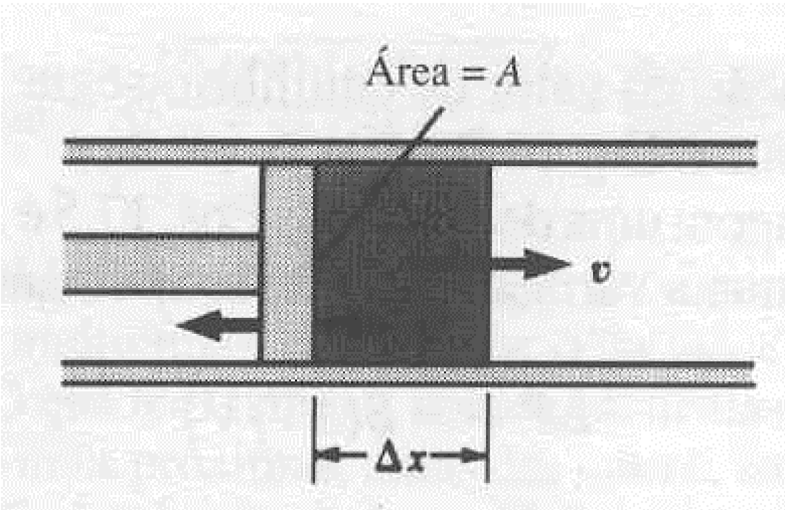
ou

uma onda de pressão

$$\Delta P = \Delta P_m sen(kx - \omega t)$$

A variação de pressão é máxima quando o deslocamento for nulo e o deslocamento é máximo quando a variação de pressão for nula.

Energia e Intensidade das ondas acústicas harmônicas



Potência:

$$P = \frac{1}{2}\rho A v\left(\omega s_{máx}\right)^2$$

Intensidade:

$$I = \frac{\Delta P_{máx}{}^{2}}{2\rho v}$$

Exemplo:

O som mais débil que o ouvido humano pode perceber, na frequência de 1.000 Hz, corresponde a uma intensidade da ordem de 10^{-12} W/m² (é o limiar de audição). Da mesma forma, o som mais forte que o ouvido pode tolerar corresponde a uma intensidade da ordem de 1 W/m² (o limiar de audição dolorosa). Determinar as amplitudes de pressão e os deslocamentos máximos associados a esses dois limites.

Dados: $v_{ar} = 343$ m/s
$\rho_{ar} = 1{,}20$ kg/m³

Nível do som (Intensidade)

Nível do som: $\beta = 10\log\left(\frac{I}{I_0}\right)$ $[dB]$ decibéis

- Limiar de audição ($I_0 = 10^{-12}$ W/m²)
- Limiar de audição dolorosa ($I = 1$ W/m²)

Danos ao ouvido sempre que exceder a 90 dB.

TABELA 17.2 Níveis de Som de Algumas Fontes em Decibéis

Fonte de Som	β(dB)
Avião a jato, nas proximidades	150
Martelo pneumático; metralhadora	130
Sirena; concerto de *rock*	120
Metrô; ceifadeira de potência	100
Tráfego pesado	80
Aspirador a vácuo	70
Conversação normal	50
Mosquito zumbindo	40
Sussurro	30
Folhas farfalhantes	10
Limiar da audição	0

Ondas esféricas e ondas planas

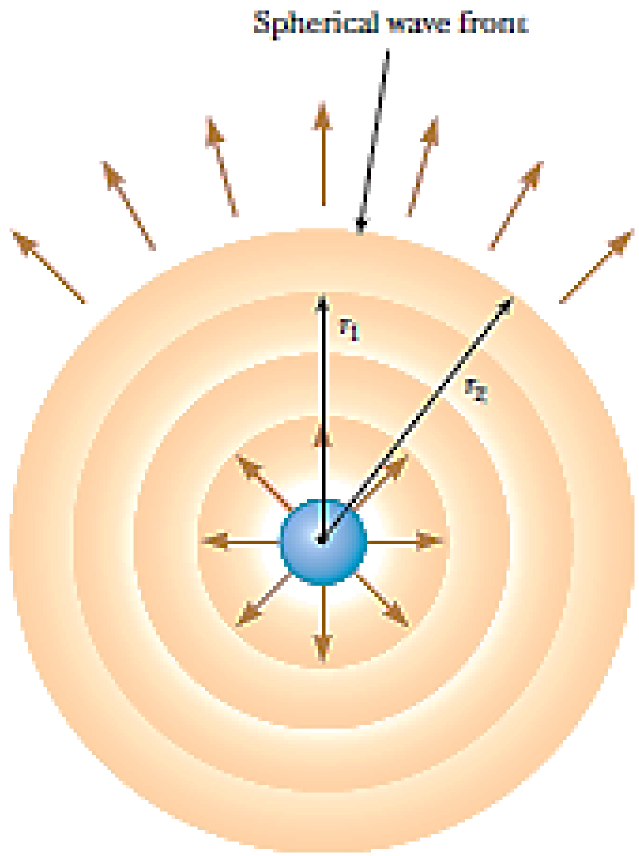
- Energia se propaga igualmente em todas as direções.

- Se $P_{méd}$ for a potência emitida pela fonte, então a uma distância r ela deve estar distribuída sobre uma superfície esférica $4\pi r^2$.

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

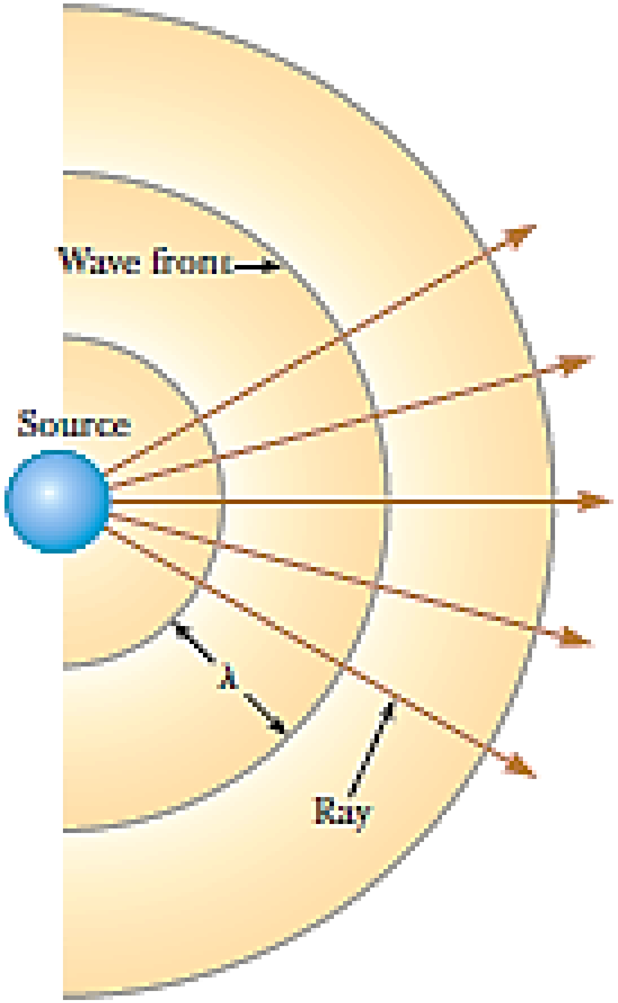
$$I_1 = \frac{P_{méd}}{4\pi r_1^2} \qquad I_2 = \frac{P_{méd}}{4\pi r_2^2}$$

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{r_2^2}{r_1^2}$$



Se um corpo esférico pulsar, ou oscilar, periodicamente, de modo que seu raio varie harmonicamente com o tempo, provoca a formação de ***frentes de onda esféricas****.*

Ondas esféricas e ondas planas



- **Representação:** arcos circulares concêntricos à fonte
- Cada arco representa uma superfície onde a fase da onda é uma constante. Essa superfície é a frente de fase, ou **frente de onda**.
- A distância entre frentes de fase adjacentes é igual ao **comprimento de onda** $\boldsymbol{\lambda}$.
- As retas radiais que saem da fonte são os **raios**.

$$\psi(r,t)=\left(S_0/r\right)sen(kr-\omega t)$$

Exemplo:

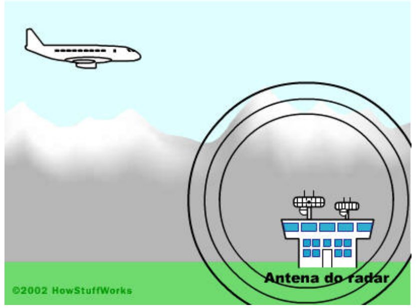
Uma fonte sonora emite ondas acústicas com uma potência de 80 W. Admitindo que a fonte seja puntiforme, ache:

(a) a intensidade a uma distância de 3 m da fonte.

(b) a distância em que o som se reduz a um nível de 40 dB.

Efeito Doppler

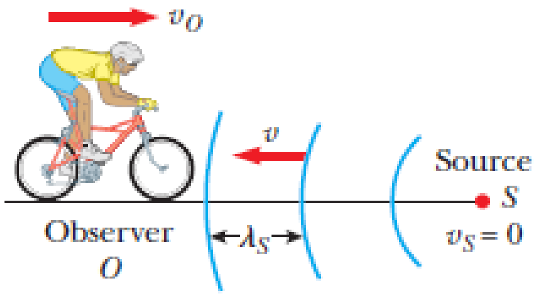
Em geral, o efeito Doppler é observado sempre que há um movimento relativo entre a fonte e o observador. Quando a fonte e o observador se aproximam, um do outro, a frequência do som ouvido é mais elevada que a frequência da fonte. Quando a fonte e o observador se afastam um do outro, o observador ouve um som de frequência mais baixa que a frequência da fonte.



Exemplo: Determinação do movimento relativo das estrelas, das galáxias e de outros corpos celestes.

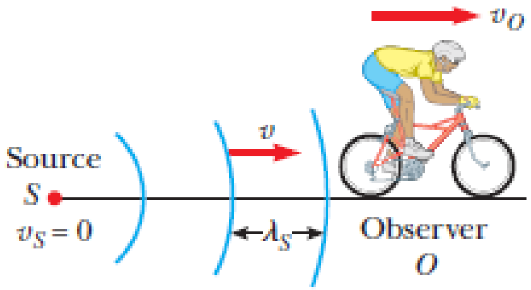
O observador se movimenta e a fonte de som se encontra imóvel

Observador aproxima-se da fonte



$$f' = f\left(\frac{v_{som} + v_{observador}}{v_{som}}\right)$$

Observador afasta-se da fonte

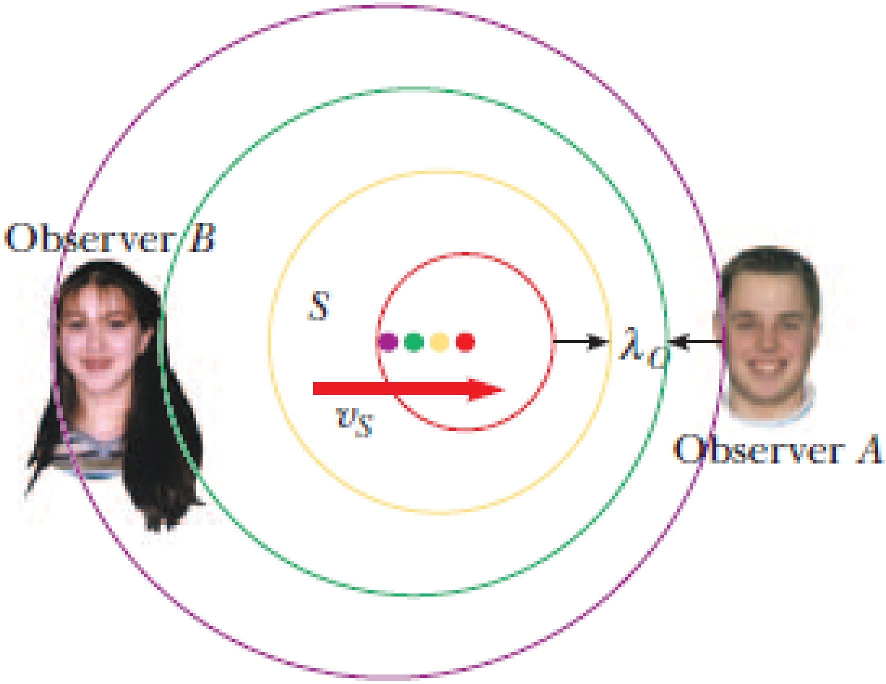


$$f' = f\left(\frac{v_{som} - v_{observador}}{v_{som}}\right)$$

Modo geral: $f' = f\left(\frac{v_{som} \pm v_{observador}}{v_{som}}\right)$

- \+ Observador se aproxima da fonte
- \- Observador se afasta da fonte

A fonte se movimenta e o observador permanece em repouso



$$f' = f\left(\frac{v_{som}}{v_{som} \mp v_{fonte}}\right)$$

- \- Fonte se aproxima do observador
- \+ Fonte se afasta do observador

A fonte e observador em movimento

$$f' = f\left(\frac{v_{som} \pm v_{observador}}{v_{som} \mp v_{fonte}}\right)$$

Os sinais superiores ($+\ v_{observador}$ e $-\ v_{fonte}$) se referem ao movimento de aproximação e os sinais inferiores ($-\ v_{observador}$ e $+\ v_{fonte}$) designam o movimento de afastamento.

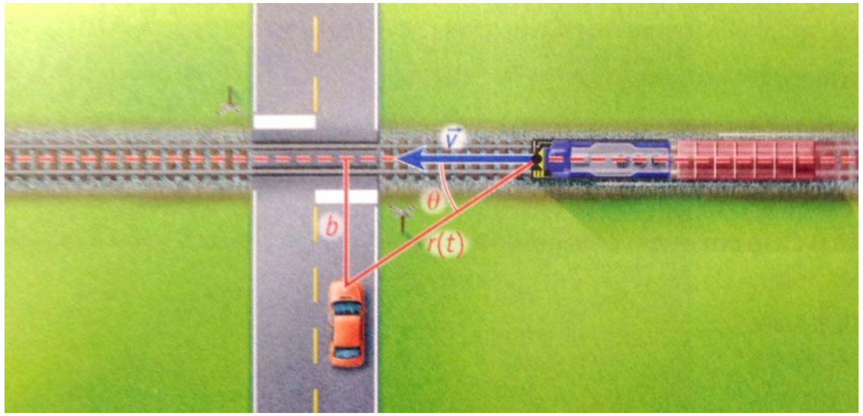
<u>Dica para resolução de problemas:</u> A palavra aproximação se associa à elevação da frequência observada. A palavra afastamento está associada decréscimo da frequência observada.

Exemplo:

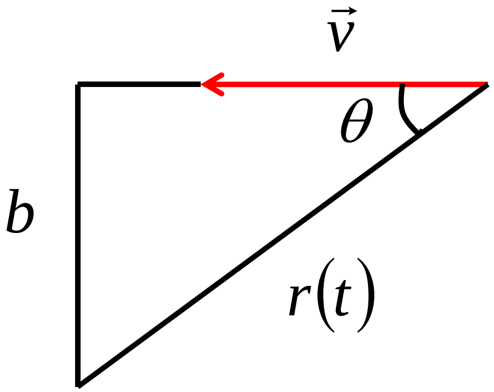
Apito de trem em movimento

Um trem se move com uma velocidade de 40 m/s, emitindo um apito cuja frequência é 440 Hz. Determinar a frequência percebida por um observador estacionário quando o trem dele se aproxima e depois se afasta, sempre apitando.

Efeito Doppler em duas dimensões



- $t = 0$, o instante de tempo em que o trem se encontra o mais próximo possível do carro
- $t < 0$, o trem ainda está se aproximando
- $t > 0$, o trem está se afastando



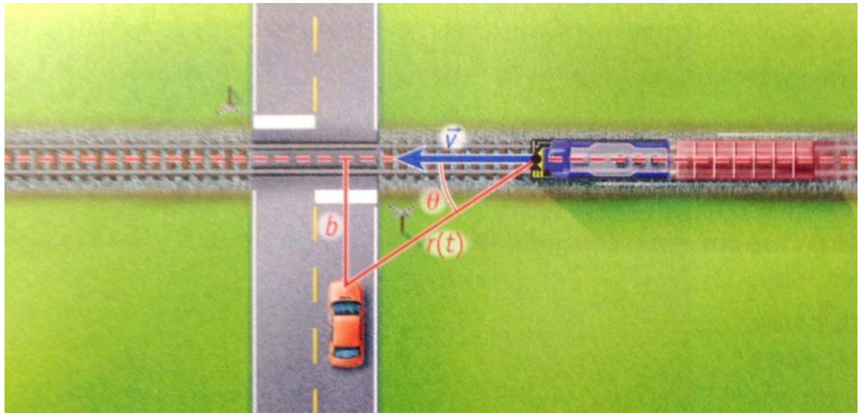
$$v_{fonte}(t) = v\cos\theta(t) = \frac{v^2 t}{\sqrt{b^2 + v^2 t^2}}$$

$$r(t) = \sqrt{b^2 + v^2 t^2}$$

$$\cos\theta(t) = \frac{vt}{r(t)} = \frac{vt}{\sqrt{b^2 + v^2 t^2}}$$

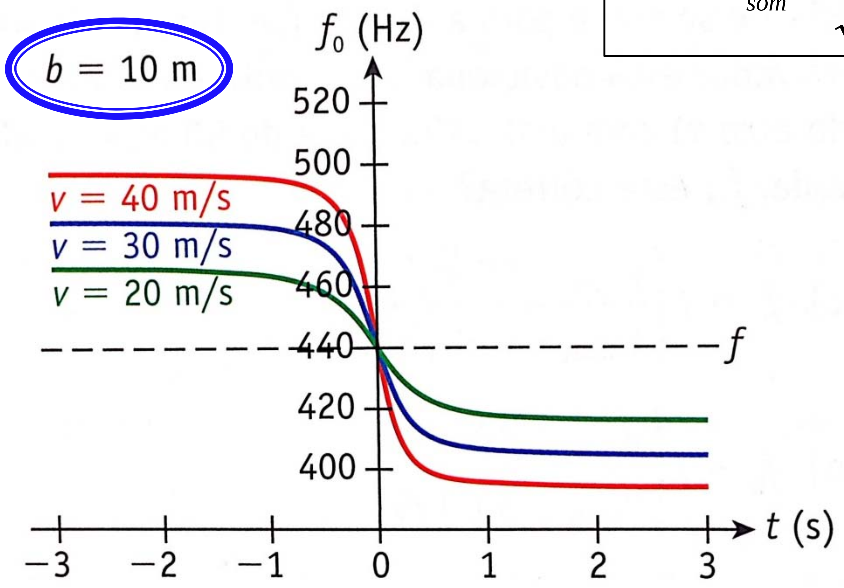
$$\boxed{f' = f\,\frac{v_{som}}{v_{som} \mp \dfrac{v^2 t}{\sqrt{b^2 + v^2 t^2}}}}$$

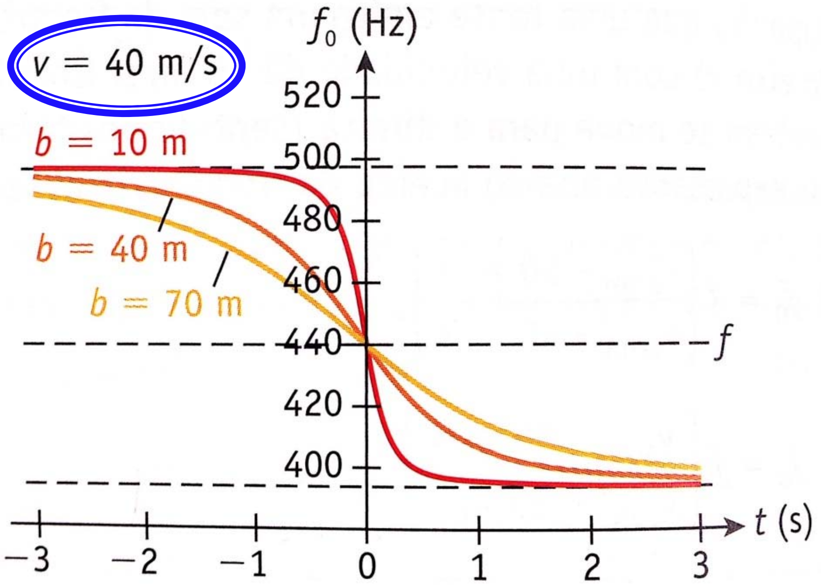
Efeito Doppler em duas dimensões



- $t = 0$, o instante de tempo em que o trem se encontra o mais próximo possível do carro
- $t < 0$, o trem ainda está se aproximando
- $t > 0$, o trem está se afastando

$$f' = f \frac{v_{som}}{v_{som} \mp \dfrac{v^2 t}{\sqrt{b^2 + v^2 t^2}}}$$

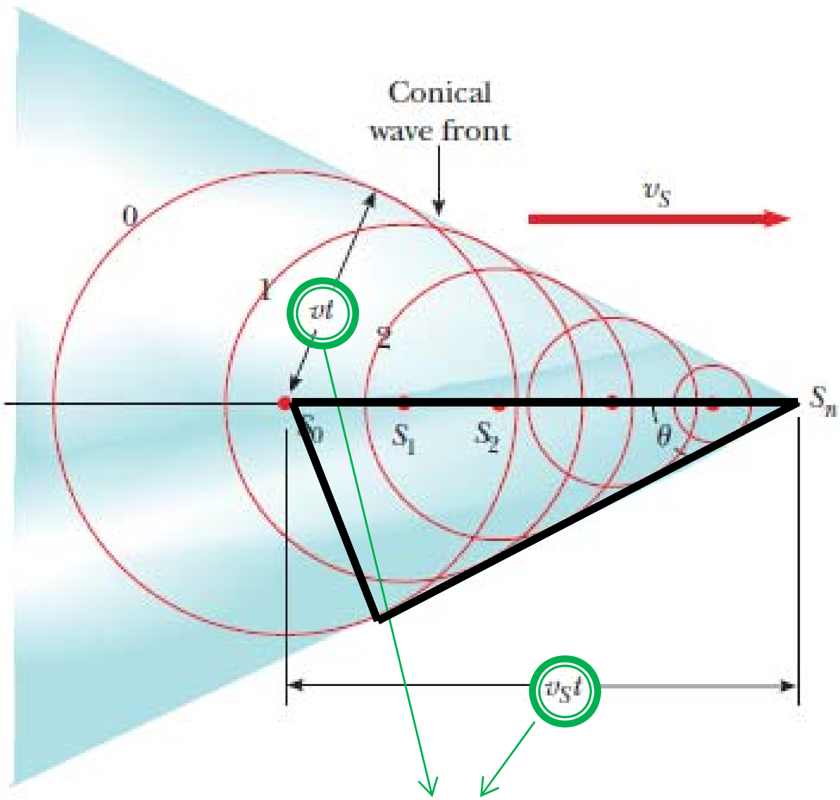




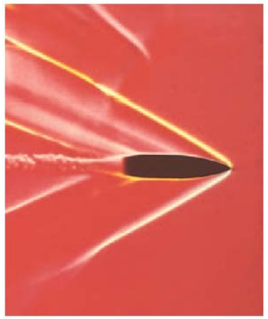
Ondas de choque

Quando a velocidade da fonte v_s é maior que a velocidade da onda v.

$$v_s > v$$



Mesmo intervalo de tempo



A reta traçada de S_n, tangente à frente de onda centrada em S_0, também é tangente a todas as frentes de onda geradas em instantes intermediários

A envoltória das ondas é um cone cujo ângulo do vértice 2θ fica definido por:

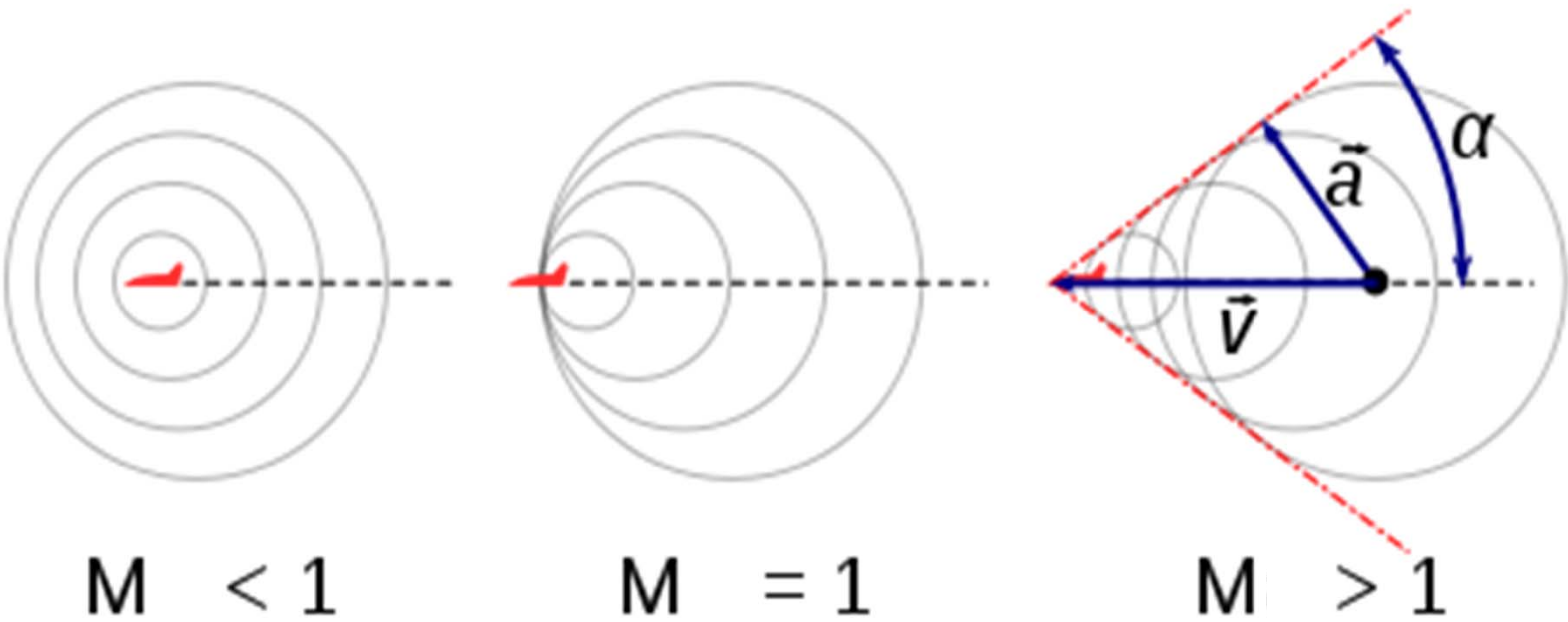
$$sen\theta = \frac{v}{v_s}$$

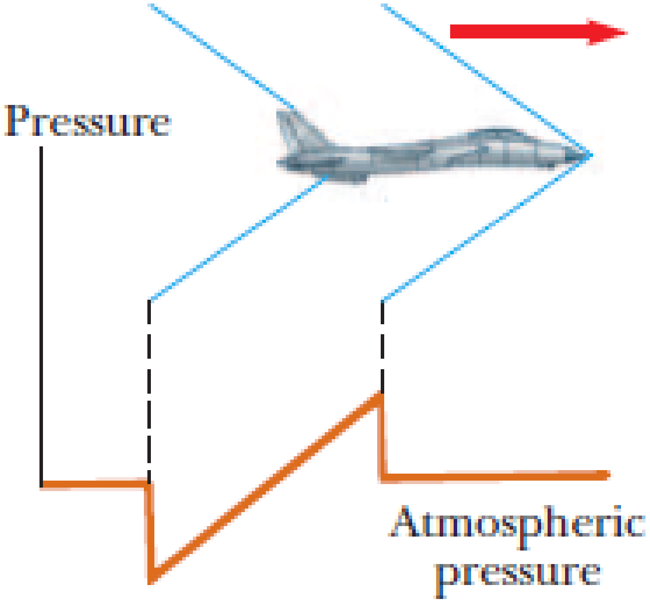
Número de Mach $\longrightarrow$ $M = \dfrac{v_s}{v}$

$$\boxed{\textbf{Número de Mach:} \quad M = \frac{v_s}{v}}$$

$v_s \rightarrow$ velocidade do objeto

$v \rightarrow$ velocidade do meio





- Qual a velocidade desse avião supersônico?

$$sen\theta = \frac{v}{v_s}$$

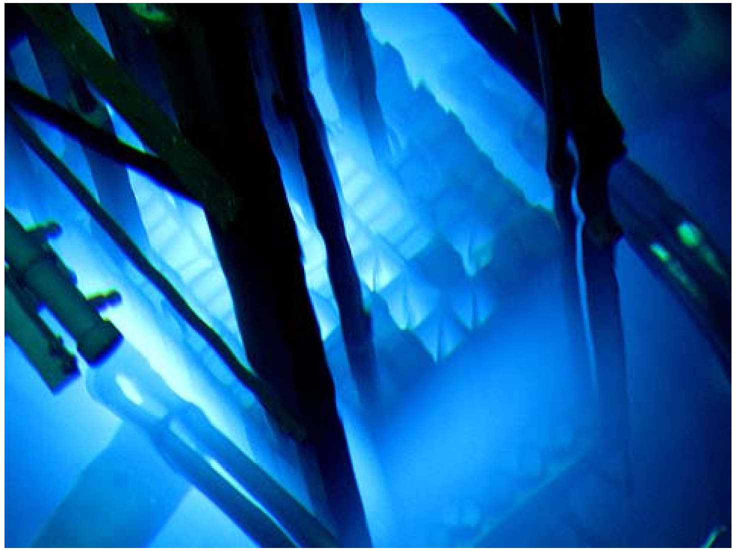
Vulcão em erupção

Explosão de uma bomba de hidrogênio

Ondas de choque provocada por uma embarcação que navega com velocidade superior à velocidade das ondas superficiais na água.

Seria possível observar ondas de choque envolvendo a luz?

A radiação de Cherenkov pode ser emitida quando uma fonte como o próton ou elétron de alta energia, movendo-se com uma velocidade próxima a da luz, penetrar em um meio, como a água, onde a velocidade da luz é significativamente menor do que a da partícula. Neste caso, a fonte estará se movendo com uma velocidade maior que a da luz naquele meio, e um com de Mach poderá se formar. Os detectores de partícula modernos fazem uso dessa radiação. A medição do ângulo de emissão permite que seja calculada a velocidade da partícula que emitiu a radiação.



Radiação de Cherenkov (brilho violeta) proveniente do núcleo de um reator nuclear.

Fonte: W. Bauer; G. D. Westfall e H. Dias, 2013.