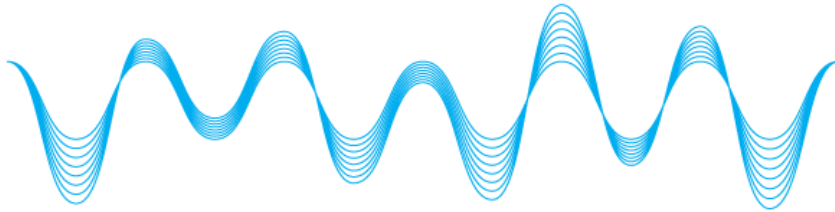


Módulo 04 - Física da Fala e da Audição

Ondas Sonoras

Prof.Dr. Edmilson J.T. Manganote

Motivações? O que podemos aprender com o estudo das ondas sonoras?

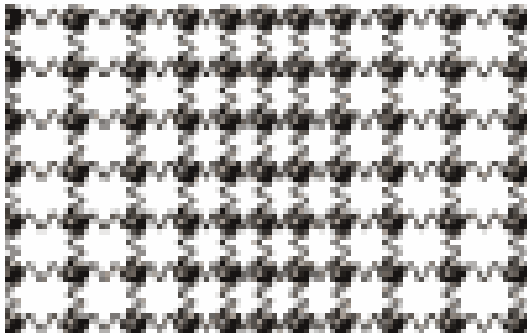
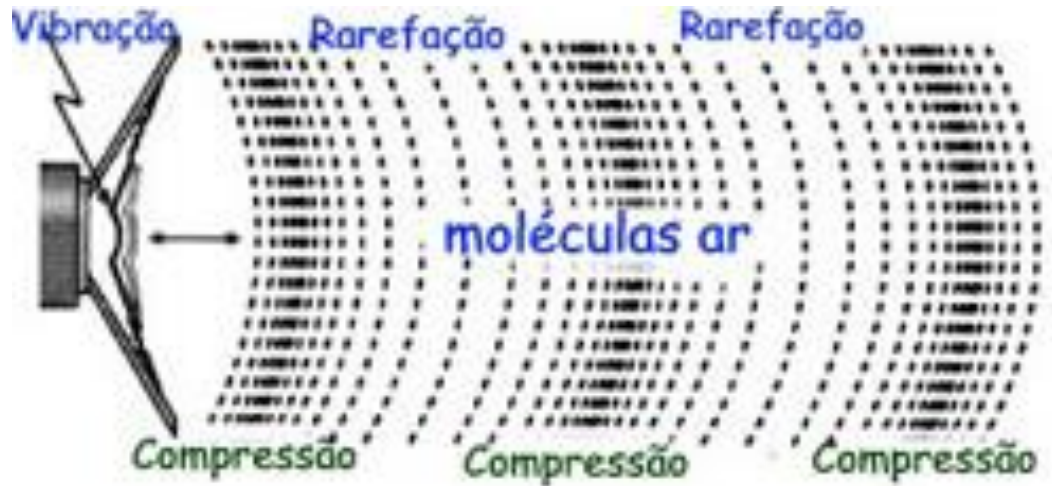
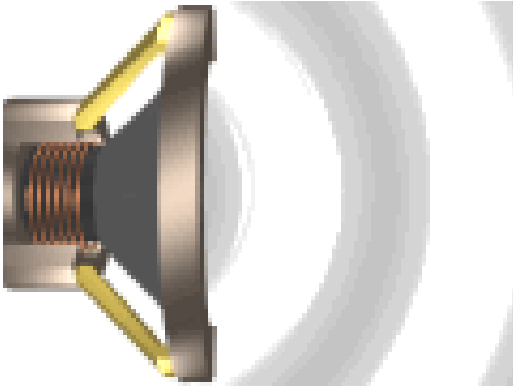


Como a fala é produzida?
Como corrigir os defeitos de dicção?
Como reduzir a perda de audição?
Por que uma pessoa ronca?



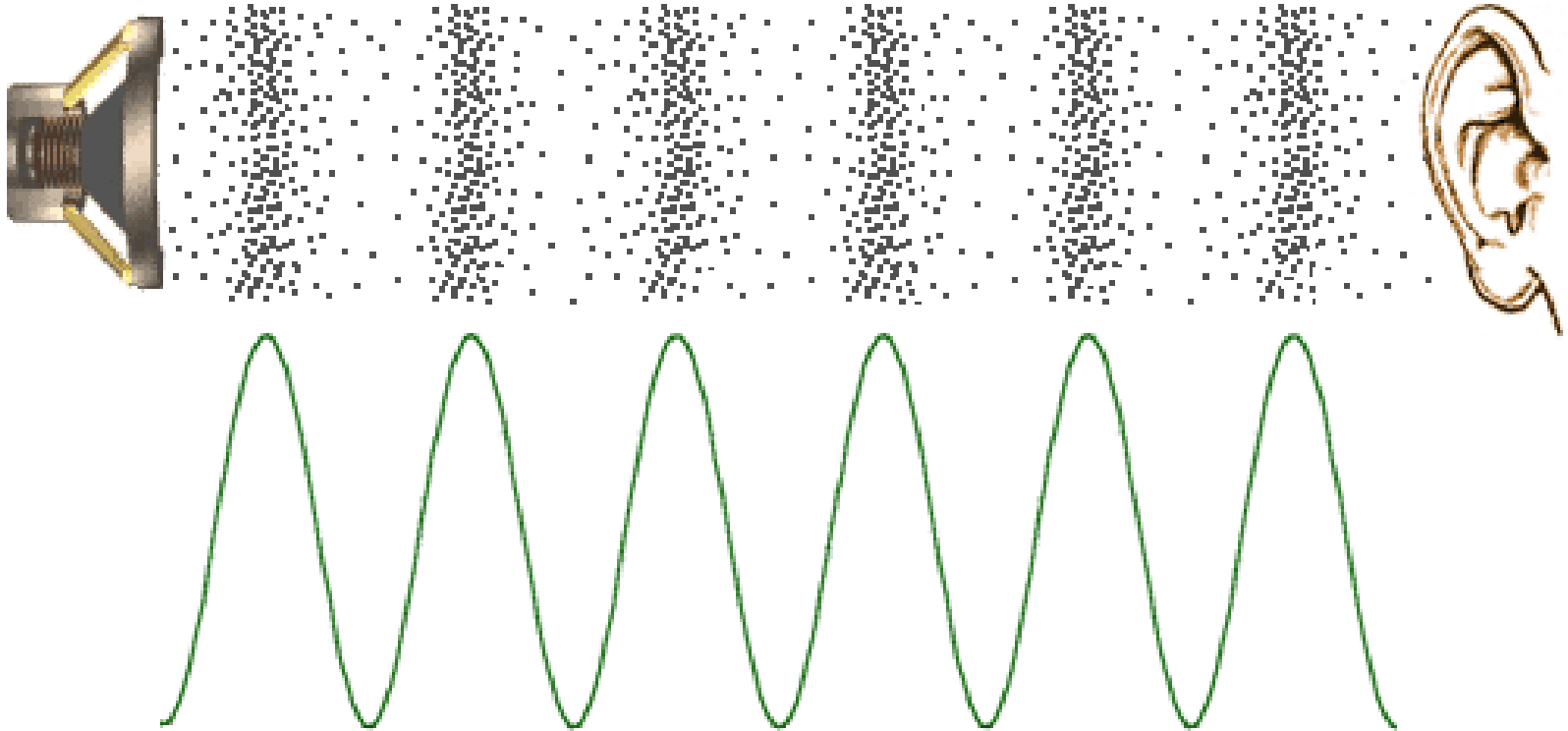
Como melhorar a acústica de um ambiente?
Como reduzir o nível de ruído?
Como reproduzir sons com a máxima fidelidade?
E as ondas de choque produzidas pelos jatos supersônicos?
Descobrir a localização de uma pessoa através do som por ela produzido?

Ondas Sonoras



Onda Longitudinal - O deslocamento das moléculas de ar é paralelo à direção de propagação da onda.

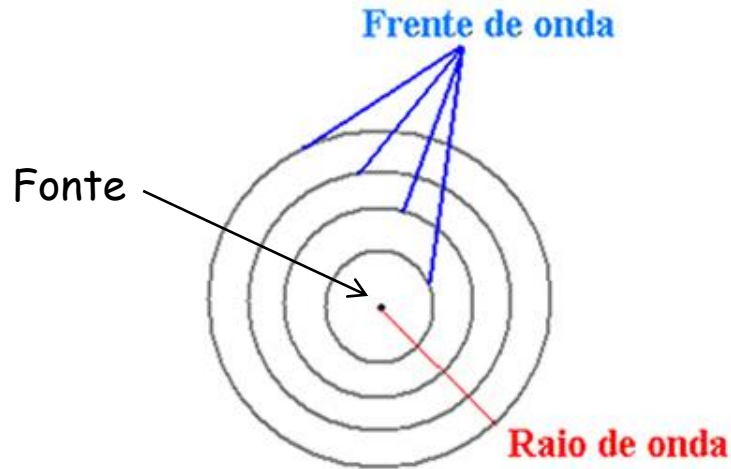
Ondas Sonoras



Como descrever o comportamento?

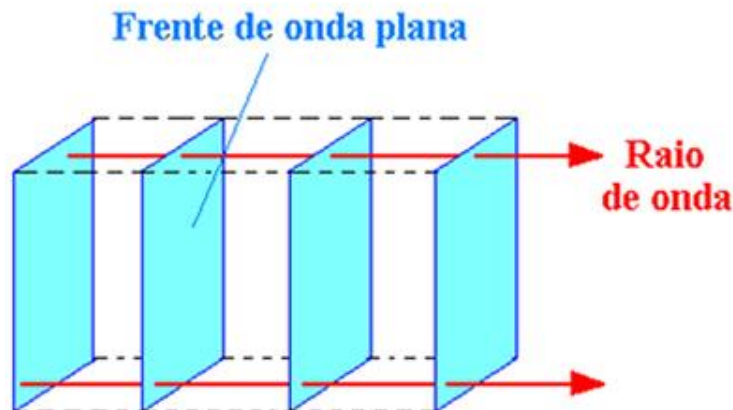
$$u(x, t) = U \cos(kx - \omega t + \delta)$$

Ondas Sonoras



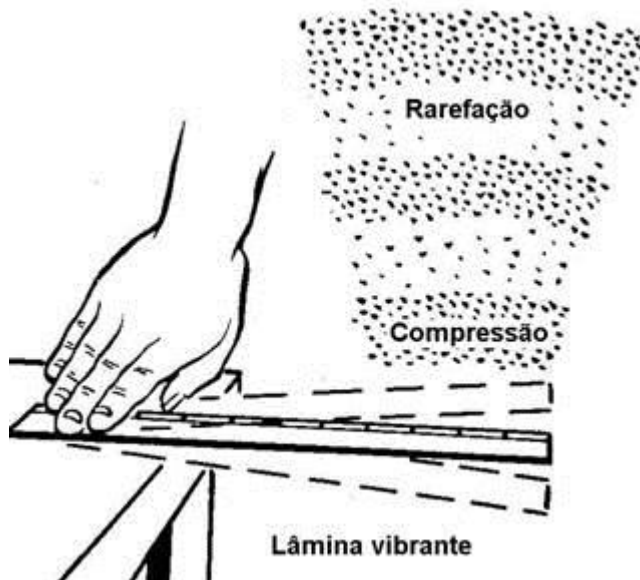
Frentes de onda são superfícies nas quais as oscilações produzidas pelas ondas sonoras tem o mesmo valor.

Raios são retas perpendiculares às frentes de onda que indicam sua direção de propagação



Nas proximidades da fonte as frentes de onda são **esféricas**. Para distâncias maiores, elas são aproximadamente **planas**.

Natureza do Som



Deslocamento de fluido
muda a densidade

Mudança de densidade
gera mudança de pressão

Variação de pressão
produz deslocamento

Natureza do Som

$$p(x,t) = -\rho_0 v^2 \frac{\partial u}{\partial x}$$

Deslocamento do fluido (u)
muda a densidade

$$\frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = 0$$

pressão (p) que volta
a produzir variação
no deslocamento

densidade (δ) que, por sua vez,
gera mudança na pressão

$$p(x,t) = -\rho_0 v^2 \delta(x,t)$$

$$\delta(x,t) = \rho - \rho_0 = -\rho_0 \frac{\partial u}{\partial x}$$

A Velocidade do Som

Substância	Temperatura (°C)	Velocidade do som (m / s)
Gases		
Ar	0	331
Ar	20	343
Ar	100	387
Dióxido de Carbono	0	259
Oxigênio	0	316
Helio	0	965
Líquidos		
Clorofórmio	20	1 004
Etanol	20	1 162
Mercúrio	20	1 450
Água Fresca	20	1 482
Sólidos		
Cobre	-	5 010
Vidro Pirex	-	5 640
Aço	-	5 960
Berílio	-	12 870

A Velocidade do Som

$$v = \sqrt{\frac{\text{fator elastico}}{\text{fator de inercia}}}$$

—————→ Energia Potencial
—————→ Energia Cinética

$$v = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad \text{ou} \quad v = \sqrt{\frac{B}{\rho}}$$

Ondas em sólidos Ondas em líquidos

E é o módulo elástico do material; ρ é a densidade; B é o **módulo de elasticidade volumétrico**:

$$B = - \frac{\Delta p}{\Delta V/V}$$

A Velocidade do Som

A Velocidade do Som em Gases

$$v = \sqrt{\left(\frac{\partial P}{\partial \rho}\right)_0} = \sqrt{\gamma \frac{P_0}{\rho_0}}$$

Laplace (1816) - As compressões e expansões numa onda sonora são tão rápidas que não dá tempo para que a temperatura se uniformize: não chega a haver trocas de calor, ou seja, o processo é adiabático.

$$v = \sqrt{\gamma \frac{RT}{m}}$$

Para uma massa M de gás
de massa molecular m

Exemplo: Ar a 0°C

$$P_0 = 1\text{atm} \approx 1,013 \times 10^5 \text{ N/m}^2$$

$$\rho_0 \approx 1,293 \text{ kg/m}^3$$

$$\gamma \approx 1,4$$

$$v \approx 332 \text{ m/s}$$

A Velocidade do Som - Alternativa

A velocidade depende, como vimos, da temperatura. Para a propagação do som através do ar, a relação aproximada entre a velocidade da onda e a temperatura do ar pode ser utilizada:

$$v = 331 \sqrt{1 + \frac{T_{ar}}{273}}$$


T_{ar} é a temperatura do ar em graus Celsius
331 m/s é a velocidade do som a zero graus Celsius

Ondas Sonoras Harmônicas

Onda sonora harmônica progressiva

$$u(x, t) = U \cos(kx - \omega t + \delta)$$

Onda de pressão correspondente à onda de deslocamento


$$p(x, t) = -\rho_0 v^2 \frac{\partial u}{\partial t}(x, t)$$
$$p(x, t) = P \sin(kx - \omega t + \delta)$$

onde $P = \rho_0 v^2 k U$

Ondas Sonoras Harmônicas

Intensidade

Energia média transmitida através da secção, por unidade de tempo e área

Como calcular?

$$F = p(x, t)A = PA \sin(kx - \omega t + \delta)$$

$$\text{Potência} = Fv = F \frac{\partial u}{\partial t} = \omega A P U \sin^2(kx - \omega t + \delta)$$

$$\text{Intensidade} = I = \frac{1}{A} \left\langle F \frac{\partial u}{\partial t} \right\rangle = \frac{1}{2} \omega P U$$

Ondas Sonoras Harmônicas

$$\textit{Intensidade} = I = \frac{1}{A} \left\langle F \frac{\partial u}{\partial t} \right\rangle = \frac{1}{2} \omega P U$$

$$\textit{Intensidade} = I = \frac{1}{2} \rho_0 v \omega^2 U^2$$

Ou

$$\textit{Intensidade} = I = \frac{1}{2} \frac{P^2}{\rho_0 v}$$

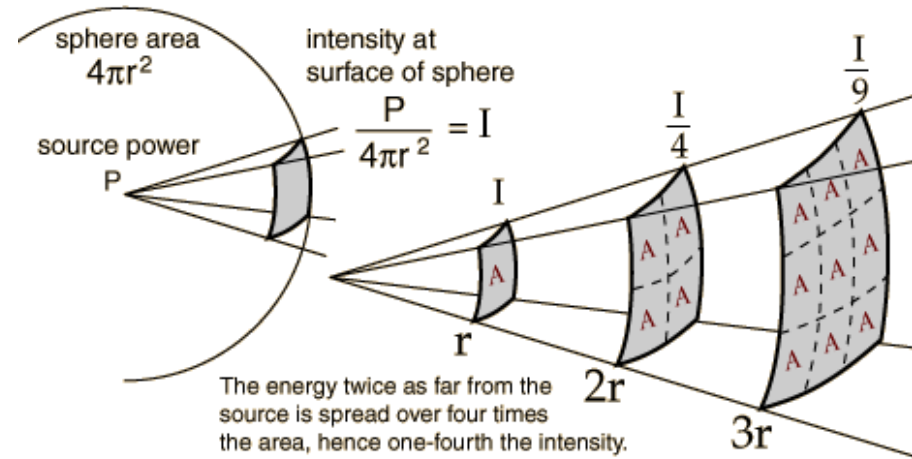
Intensidade em 3-D

Ondas transportam energia !

Intensidade I de uma onda:

- Potência transportada por unidade de área perpendicular ao fluxo de energia.

$$I = \frac{\text{Potencia}}{\text{area}} = \frac{\text{energia/tempo}}{\text{area}}$$

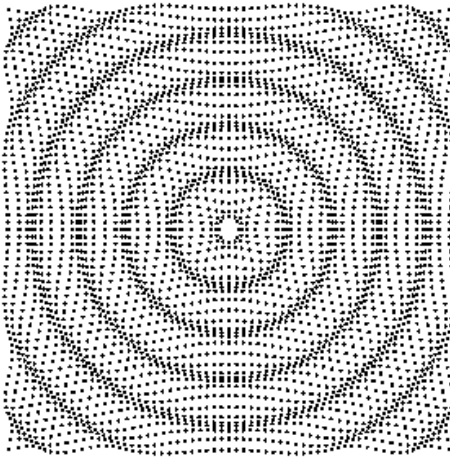


Mas, como a energia é proporcional à amplitude ao quadrado:

$$I \propto A^2$$

Intensidade em 3-D

No caso de ondas esféricas (a energia flui para todas as direções):



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

$$I = \frac{1}{2} \rho_0 v \omega^2 U^2$$

U: amplitude de deslocamento da onda sonora,

Por exemplo, quando a distância é duplicada, a intensidade é reduzida de $\frac{1}{4}$ do seu valor anterior! (e a amplitude também vai diminuir com a distância).

Ondas Sonoras Harmônicas

Limiar da audibilidade

$$f = 10^3 \text{ s}^{-1} \longrightarrow I_0 = 10^{-12} \text{ W} / \text{m}^2$$

Para $\rho_0 \approx 1,3 \text{ kg} / \text{m}^3$
 $v \approx 340 \text{ m} / \text{s}$ $\longrightarrow P \approx 3 \times 10^{-5} \text{ N} / \text{m}^2$

A amplitude de deslocamento associada é $U_0 \approx 1,1 \times 10^{-11} \text{ m}$

Limiar da dor $\longrightarrow I_m \approx 1 \text{ W} / \text{m}^2$
 $U_m \approx 1,1 \times 10^{-5} \text{ m}$

Ondas Sonoras Harmônicas

Nível de Intensidade Sonora (Weber e Fechner)

$$\alpha = 10 \log \left(\frac{I}{I_0} \right) db (= \text{decibel})$$

Exemplos:

Limiar da audibilidade	0 dB
Murmúrio	20 dB
Música suave	40 dB
Conversa comum	65 dB
Rua barulhenta	90 dB
Avião próximo	100 dB
Limiar da dor	120 dB

Níveis de Intensidade e Pressão

Nível de Pressão Sonora - Sound pressure level, dB

$$\text{SPL} = 10 \log [(P/P_{\text{ref}})^2] = 20 \log (P/P_{\text{ref}})$$

$$\text{onde } P_{\text{ref}} = 2 \times 10^{-5} \text{ N/m}^2$$

Nível de Intensidade Sonora - Sound intensity level, dB

$$\text{SIL} = 10 \log (I/I_{\text{ref}})$$

$$\text{onde } I_{\text{ref}} = 10^{-12} \text{ Watt/m}^2$$

Nível de Potência Sonora - Sound power level, dB

$$\text{SWL} = 10 \log (W/W_{\text{ref}})$$

$$\text{onde } W_{\text{ref}} = 10^{-12} \text{ Watts}$$

Combinando níveis de Ruído

- Qual é o efeito de adicionar um novo equipamento em um local ruidoso?
- Você quer ajustar uma medida de ruído devido a um ruído do ambiente?
- Você está interessado em prever o resultado de uma combinação de fontes de ruído?

Você não pode obter as respostas simplesmente adicionando decibels:

Você deve somar Intensidades!

Combinando níveis de Ruído

1. Converta os decibels em razões de intensidade ou potência
2. Some ou subtraia as intensidades relativas
3. Converta para decibels

Combinando níveis de Ruído

Tabela aproximada:

Diferença entre sons (dB)	Somar ao maior
0 a 1	3
> 1 a 4	2
> 4 a 9	1
Mais que 9	0

Combinando níveis de Ruído

Diferença entre sons (dB)	Somar ao maior
0 a 1	3
> 1 a 4	2
> 4 a 9	1
Mais que 9	0

Exemplo: Três motores estão funcionando em uma sala. $M1 = 92$ dB; $M2 = 89$ dB, $M3 = 93$ dB. Qual é o ruído total esperado em dB?

Ordenar: 89, 92, 93

$$92 - 89 = 3; 92 + 2\text{dB} = 94$$

$$94 - 93 = 1; 94 + 3\text{ dB} = 97\text{ dB}$$

Combinando Níveis de Ruído

Diferença entre sons (dB)	Somar ao maior
0 a 1	3
> 1 a 4	2
> 4 a 9	1
Mais que 9	0

Exemplo: Você está reorganizando uma área e coloca três equipamentos juntos. Eq1 = 88 dB; Eq2 = 85 dB, Eq3 = 85 dB. Qual é o ruído total estimado em dB?

Ordenar: 85, 85, 88

$$85 - 85 = 0; 85 + 3\text{dB} = 88$$

$$88 - 88 = 0; 88 + 3\text{ dB} = 91\text{ dB}$$

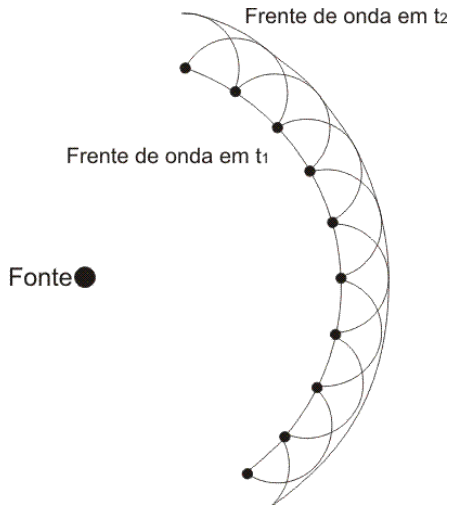
Praticando...

Exercício: Ultra-som à frequência de 4.50 MHz é usado para examinar tumores nos tecidos internos. (a) Qual o comprimento de onda no ar dessas ondas sonoras? (b) Se a velocidade do som no tecido é de 1500 m/s, qual o comprimento de onda das ondas no tecido?

Exercício: Uma fonte de ondas sonoras tem uma potência de $1.00 \mu\text{W}$. Se for uma fonte pontual (a) qual a intensidade a 3.00 m de distância e (b) qual o nível do som em decibéis a essa distância?

Exercício: Uma nota de frequência 300 Hz tem uma intensidade de $1.00 \mu\text{W}/\text{m}^2$. Qual a amplitude das oscilações do ar, causadas por este som?

O Princípio de Huygens



Cada ponto de uma frente de ondas comporta-se como fonte puntiforme de novas ondas (Huygens, 1678)

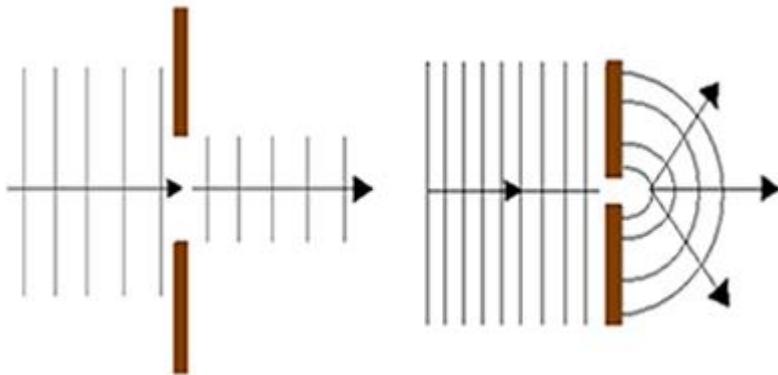


Christian Huygens
1629 - 1695

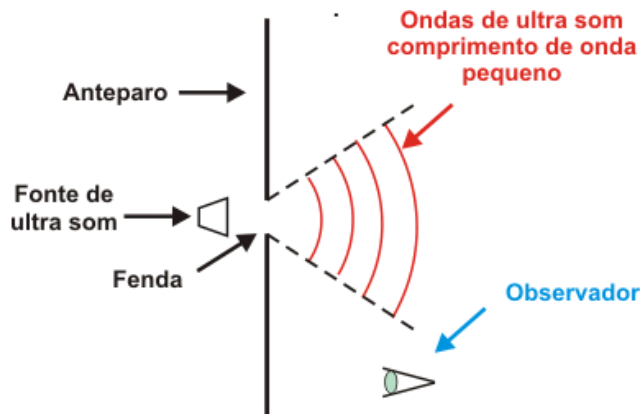
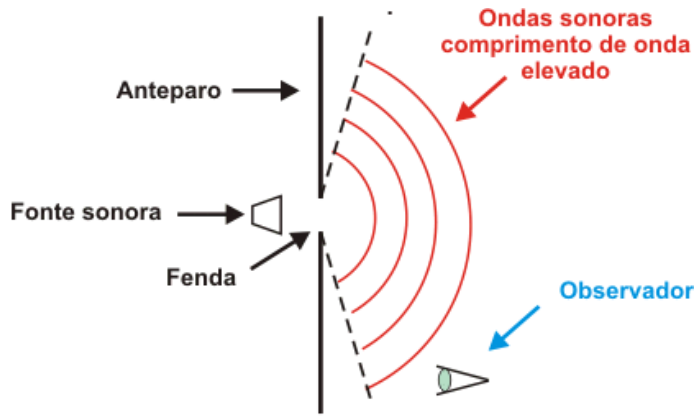
Difração

É o desvio ou espalhamento que uma onda apresenta, contornando ou transpondo obstáculos em seu caminho.

A difração será tanto mais intensa quanto maior for o comprimento de onda quando comparado ao tamanho do obstáculo.



Difração

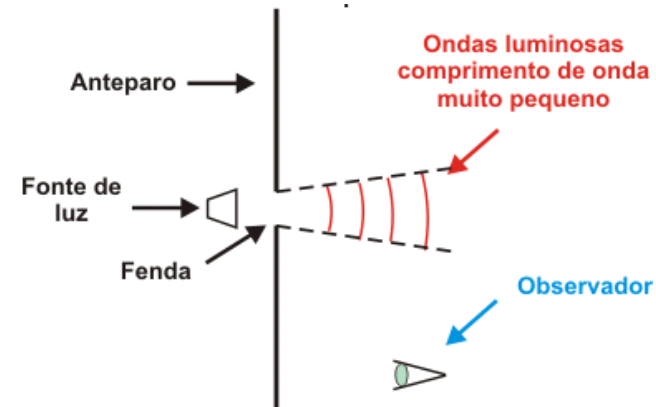


Na prática...

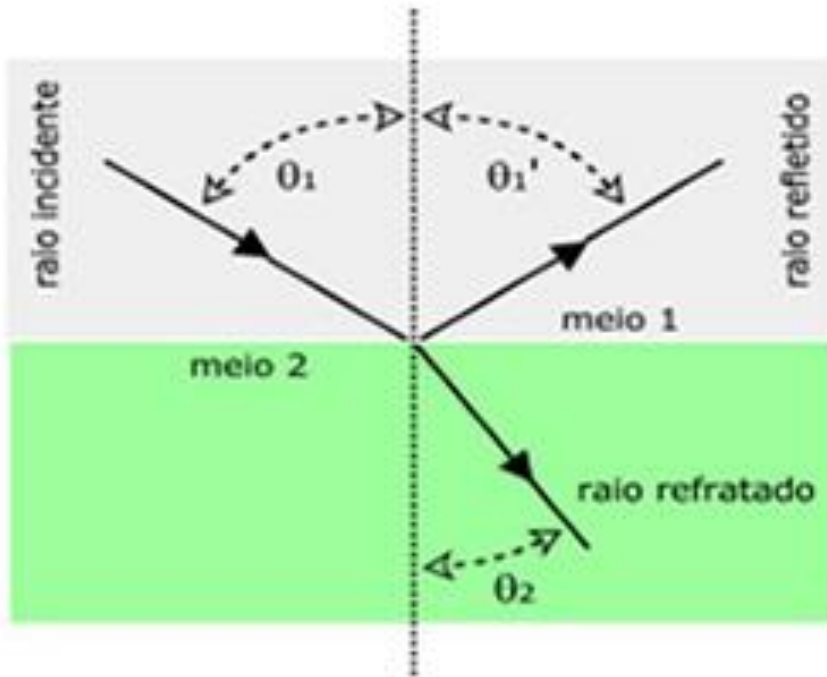
Objetos que são menores que $1/6$ do comprimento de onda são 'transparentes' ao som.

Objetos com tamanhos comparáveis ao comprimento de onda espalham ou difratam a onda sonora.

Objetos com tamanhos de mais de 5-10 comprimentos de onda refletem a onda sonora.



Reflexão e Refração



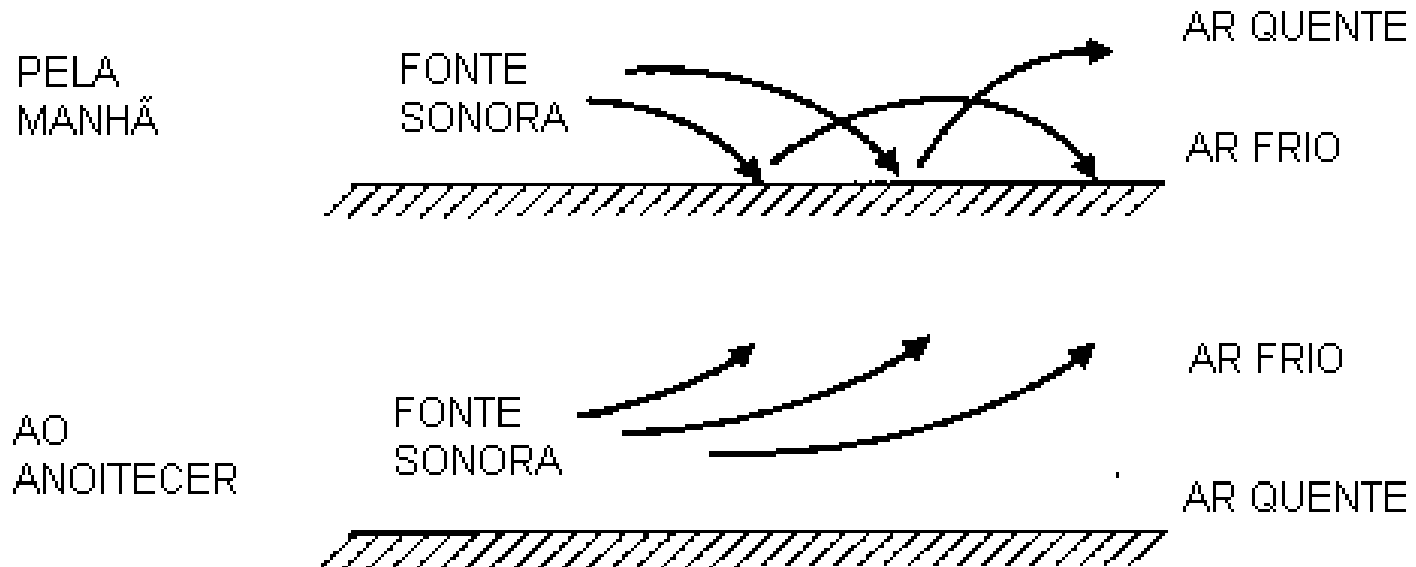
Lei da Reflexão

$$\theta_1' = \theta_1$$

Lei da Refração (Lei de Snell)

$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = n_{12} = \frac{v_1}{v_2}$$

Refração



EFEITOS DA DIFERENÇA DE TEMPERATURA
ENTRE CAMADAS DE AR NA PROPAGAÇÃO DO SOM

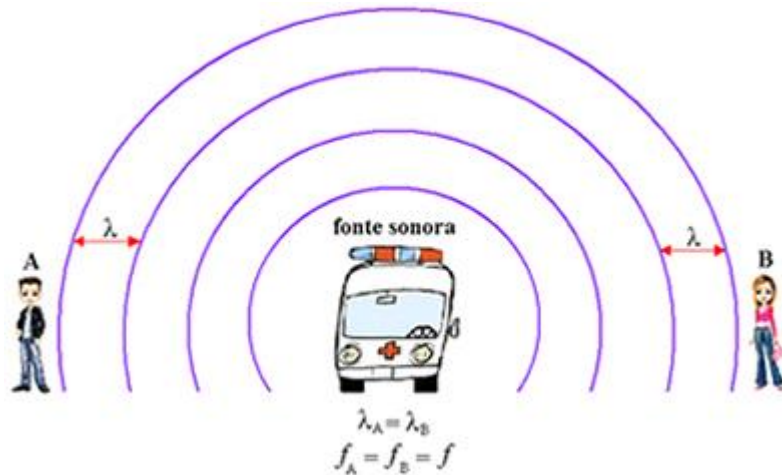
Efeito Doppler

Por que a sirene de uma ambulância soa mais aguda quando ela está se aproximando de nós e mais grave quando está se afastando?



Efeito Doppler

Fonte em repouso



Fonte
Parada

$$f = f_0 \left(1 \pm \frac{v_{obs}}{v_{som}} \right)$$

+ para aproximação
- para afastamento

Observador (A ou B) com velocidade v_{obs}
se aproximando da fonte

$$f = \frac{v_{som}}{\lambda} + \frac{v_{obs}}{\lambda} = f_0 \left(1 + \frac{v_{obs}}{v_{som}} \right)$$

Observador (A ou B) com velocidade v_{obs}
se afastando da fonte

$$f = \frac{v_{som}}{\lambda} - \frac{v_{obs}}{\lambda} = f_0 \left(1 - \frac{v_{obs}}{v_{som}} \right)$$

Efeito Doppler

Fonte em Movimento

Fonte com velocidade v_F se aproximando do Observador B

$$\lambda' = v_{som}T - v_F T = \lambda \left(1 - \frac{v_F}{v_{som}} \right)$$

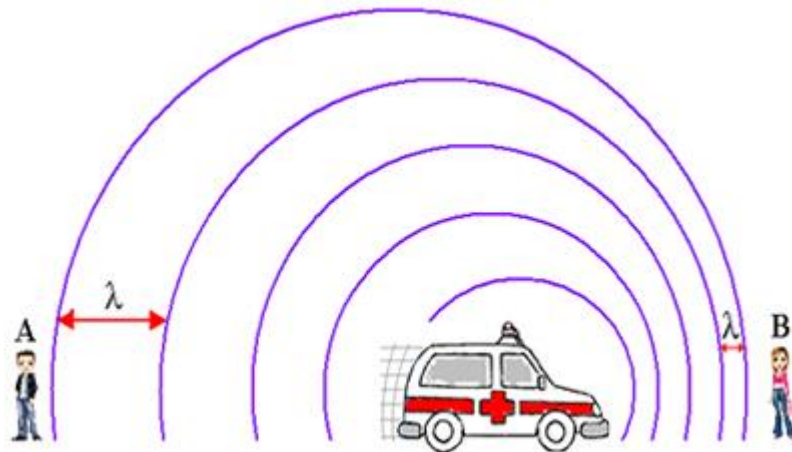
Fonte com velocidade v_F se afastando do Observador A

$$\lambda' = v_{som}T + v_F T = \lambda \left(1 + \frac{v_F}{v_{som}} \right)$$

Observador
Parado

$$f = \frac{f_0}{1 \mp \frac{v_F}{v_{som}}}$$

- para aproximação
+ para afastamento



Efeito Doppler

Fonte e Observador em Movimento

Combinação das duas situações discutidas anteriormente:

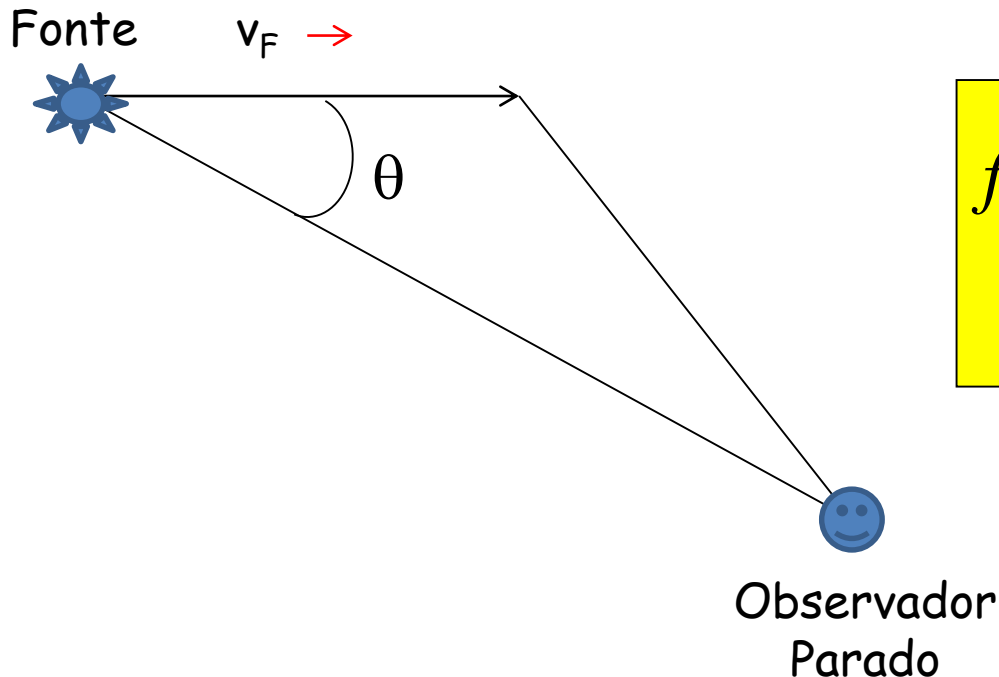
Fonte
e Observador
Móveis

$$f = f_0 \left(\frac{1 \pm \frac{v_{obs}}{v_{som}}}{1 \mp \frac{v_F}{v_{som}}} \right)$$

Sinais Superiores (Inferiores)
para Aproximação (Afastamento)

Efeito Doppler

Fonte em movimento numa direção qualquer

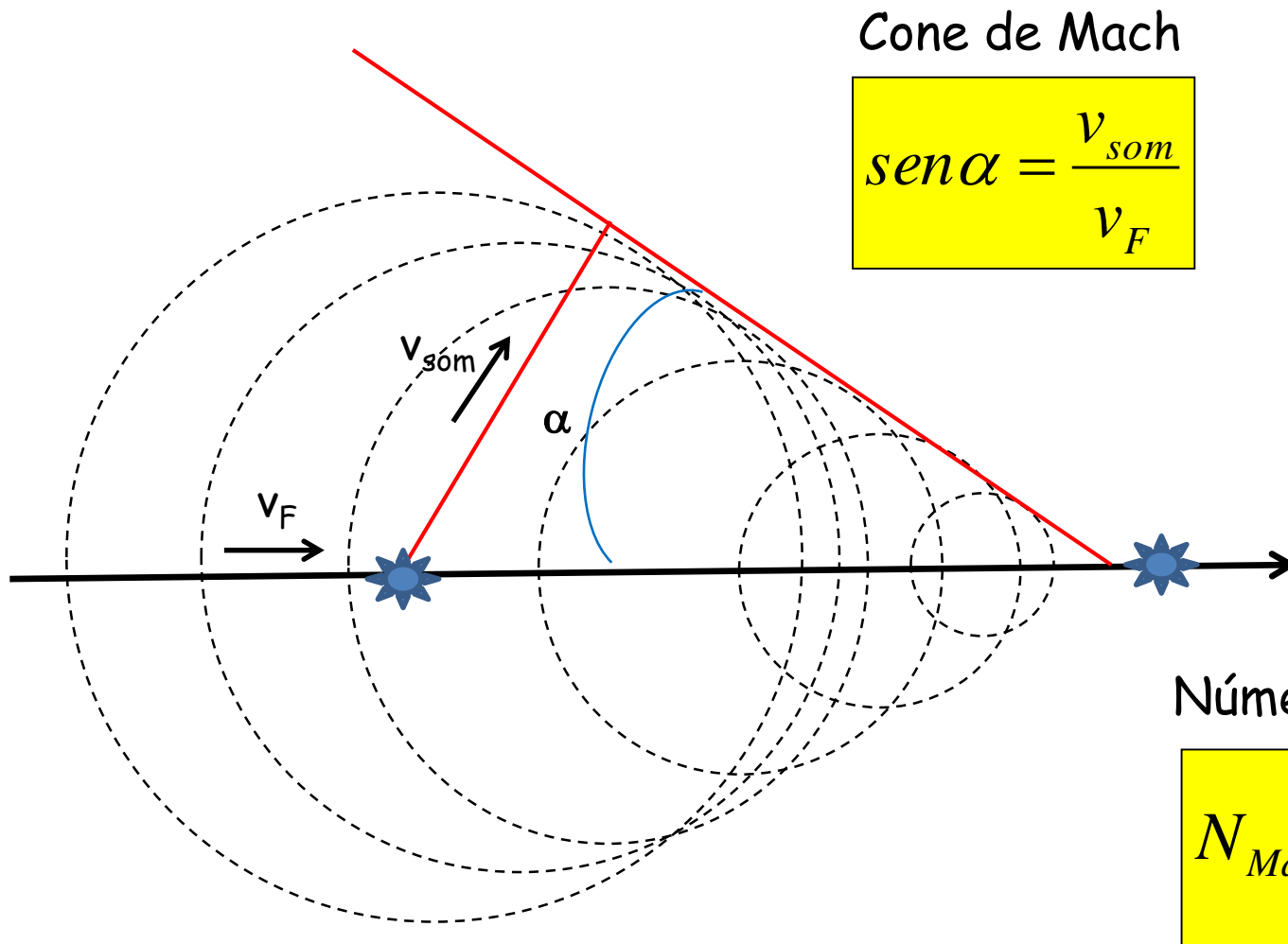


$$f = \frac{f_0}{1 - \frac{v_F \cos \theta}{v_{som}}}$$

Cone de Mach



Ernst Mach
1838 - 1916



Cone de Mach

$$\text{sen } \alpha = \frac{v_{som}}{v_F}$$

Número de Mach

$$N_{Mach} = \frac{v_F}{v_{som}}$$

Cone de Mach

• Mach 0

• Mach 0,7

• Mach 1

• Mach 1,3

Cone de Mach

