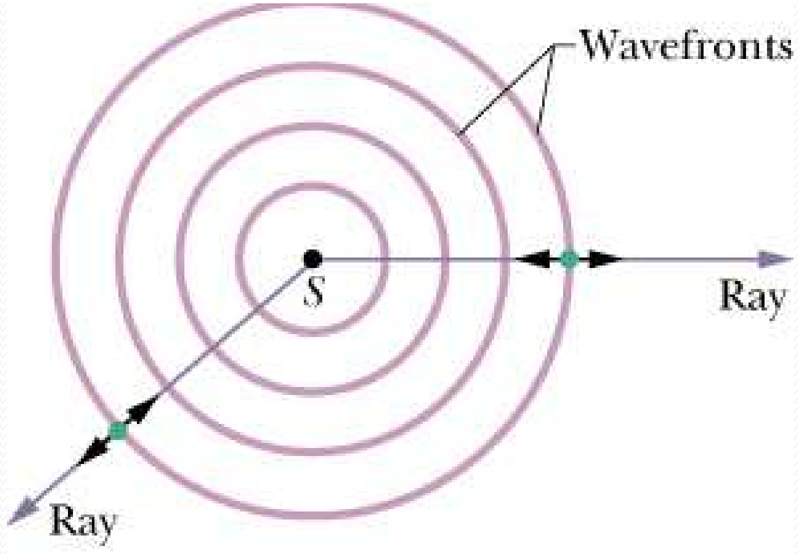
Cap. 17 Ondas II

17.1 Introdução

As ondas sonoras são a base de incontáveis estudos científicos em muitas áreas: fisiologia da fonação e audição, tratamento acústico de ambientes, ondas de choque na aviação, ruídos produzidos pelo corpo humano pode indicar problemas no funcionamento de órgãos, localização da fonte de emissão sonora.



17.2 Ondas Sonoras

São ondas longitudinais, que se propagam num meio material. Podem ser utilizadas em prospecção sísmica (localização de poços de petróleo), em localização por sonar (navios, submarinos), na exploração de partes moles do corpo humano (ultra-som), etc.

A figura ao lado mostra uma onda sonora se propagando a partir de uma fonte pontual. As frentes de onda formam esferas centradas em S; os raios são radiais partindo de S. As setas duplas pequenas indicam que os elementos do meio oscilam paralelamente aos raios. Nas proximidades de uma fonte pontual, as frentes de ondas são esféricas e se espalham nas três dimensões.

17.3 A Velocidade do Som

A velocidade de qualquer onda mecânica depende tanto das propriedades inerciais do meio quanto das suas propriedades elásticas. De acordo com o que foi visto para a corda,

$$v = \sqrt{\frac{\tau}{\mu}} = \sqrt{\frac{prop.\ \ elástica}{prop.\ \ inercial}}$$

Quando uma onda sonora se propaga através do ar, a propriedade que determina o quanto um elemento de um meio modifica seu volume quando a pressão sobre ele varia, é o **módulo de elasticidade volumétrica B.**

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

A unidade de B também é Pascal (Pa). O sinal (-) foi incluído de modo que B seja sempre positivo.

- Substituindo τ por B e μ por ρ, obtemos:

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

Velocidade do som.

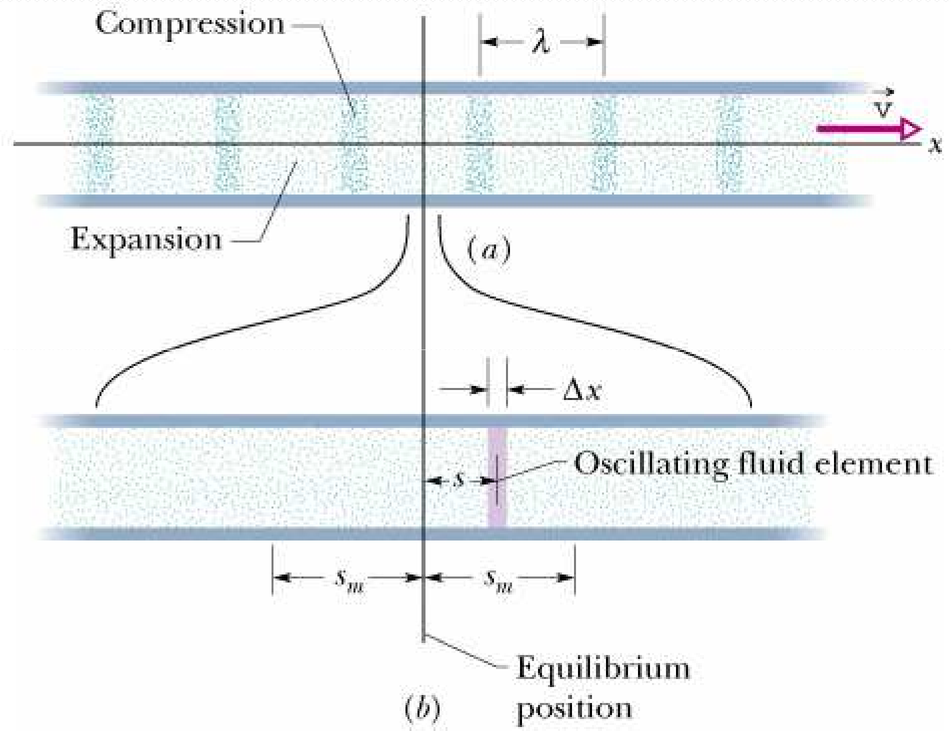
Onde B é a elasticidade volumétrica e ρ é a densidade do meio.

Esta equação pode ser deduzida aplicando-se as leis de Newton.

A Velocidade do Som	
Meio	Velocidade (m/s)
Gases	
Ar(0^0C)	331
Ar (20^0C)	343
Hélio	965
Hidrogênio	1284
Líquidos	
Água (0^0C)	1402
Água (20^0C)	1482
Água do mar (20^0C sal. 3,5%)	1522
Sólidos	
Alumínio	6420
Aço	5941
Granito	6000

17.4 Ondas Sonoras Progressivas

A figura abaixo mostra (**a**) uma onda sonora se propagando com velocidade através de um tubo longo cheio de ar, produzindo um padrão periódico de expansões e compressões do ar.



(b) Uma vista expandida horizontalmente de uma pequena porção do tubo, observa-se um elemento de ar de espessura Δx que oscila para a esquerda e para a direita em *mhs* em torno de sua posição de equilíbrio.

Os deslocamentos do elemento de ar pode ser descrito pela função:

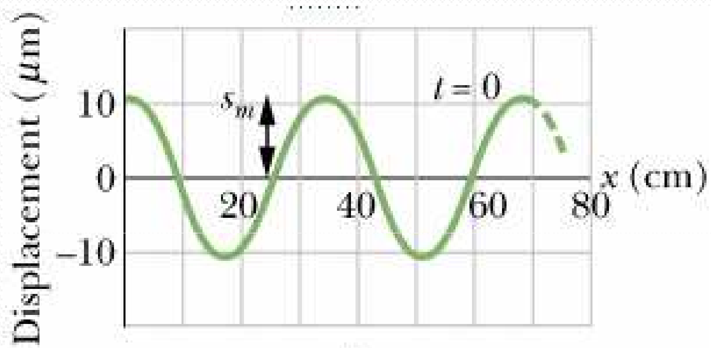
$$S(x,t) = s_m \cos(kx - \omega t)$$

Quando uma onda se move, a pressão do ar em qualquer posição varia senoidalmente, $\Delta p(x,t) = \Delta p_m sen(kx - \omega t)$

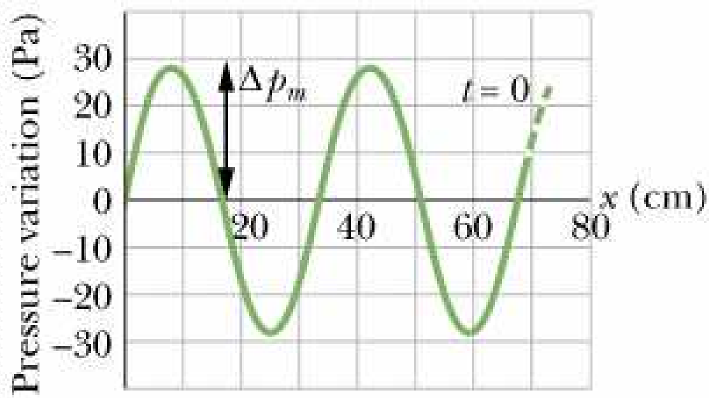
A amplitude de pressão Δp_m está relacionada com a amplitude de deslocamento S_m por:

$$\Delta p_m = (v\rho\omega)s_m$$

Na figura ao lado, pode-se notar que o deslocamento e a variação de pressão estão defasados de π/2 rad=90º. Assim, por exemplo, a variação de pressão Δp será nula quando houver um máximo do deslocamento.



(a)



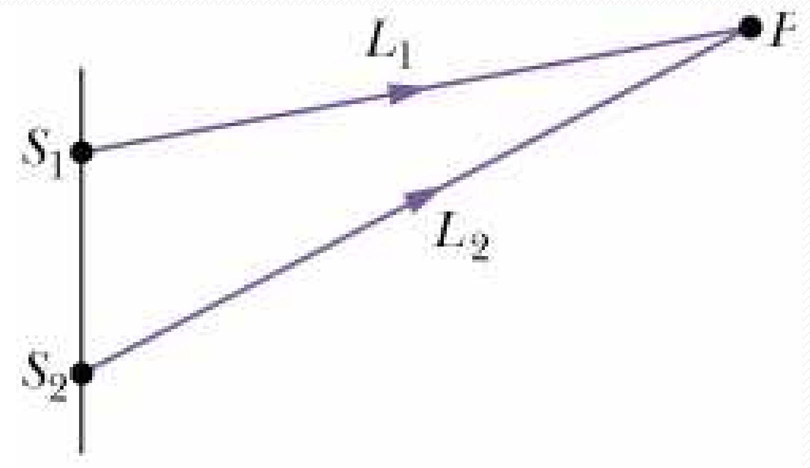
(b)

Exemplo 1:

A amplitude máxima de pressão $\boldsymbol{\Delta p_m}$ que o ouvido humano pode suportar em sons altos é cerca de 28Pa (que é muito menor que a pressão normal do ar de aproximadamente 10^5Pa). Qual é a amplitude de deslocamento $\mathbf{S_m}$ para tal som no ar de densidade ρ=1,21kg/m^3, com uma freqüência de 1000Hz e uma velocidade de 343m/s?

17.5 Interferência

Considere duas fontes pontuais S_1 e S_2 que estão em fase e têm o mesmo comprimento de onda λ. Assim, dizemos que as próprias fontes estão em fase; ou seja, quando as ondas emergem das fontes, seus deslocamentos são sempre idênticos.



A **diferença de percurso** até o ponto é P dada por:

$$\Delta L = |L_2 - L_1|$$

A diferença de fase Φ no ponto P se relaciona com a diferença de percurso pela relação:

$$\frac{\phi}{2\pi} = \frac{\Delta L}{\lambda}$$ de onde $$\phi = \frac{\Delta L}{\lambda} 2\pi$$

A interferência será completamente construtiva quando:

$$\phi = m(2\pi)$$ **Para m=0,1, 2, ...** (INTERFERÊNCIA COMP. CONSTRUTIVA)

Isto ocorre quando: $$\frac{\Delta L}{\lambda} = 0,1,2,... \Rightarrow \Delta L = \lambda,\ 2\lambda,\ 3\lambda$$

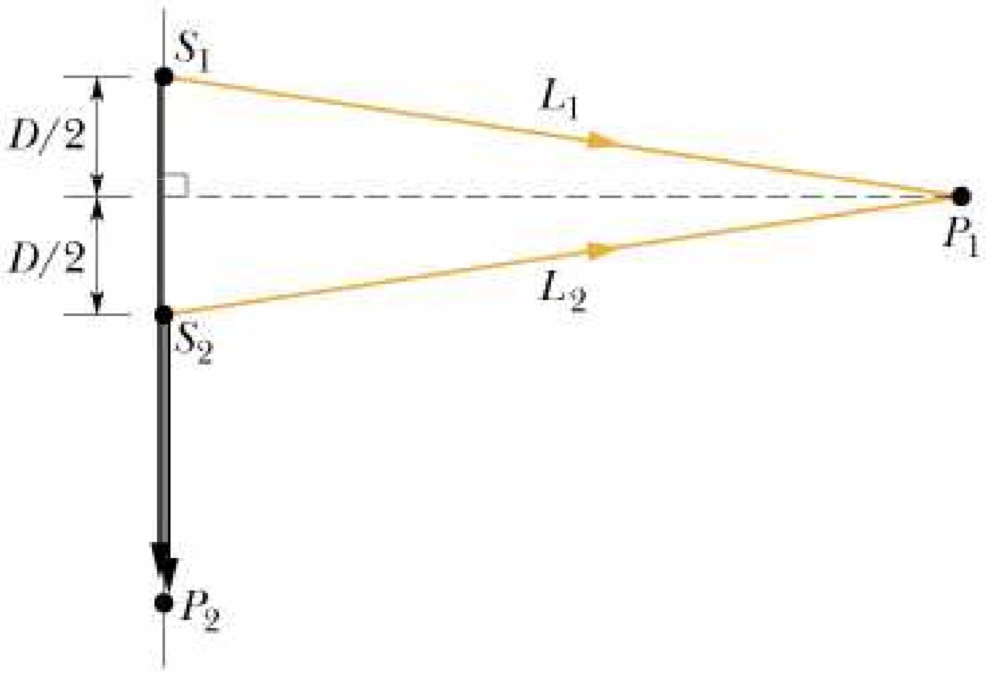
- Para interferência completamente destrutiva

$$\phi = (2m+1)\pi$$ **Para m=0, 1, 2, 3, ...**

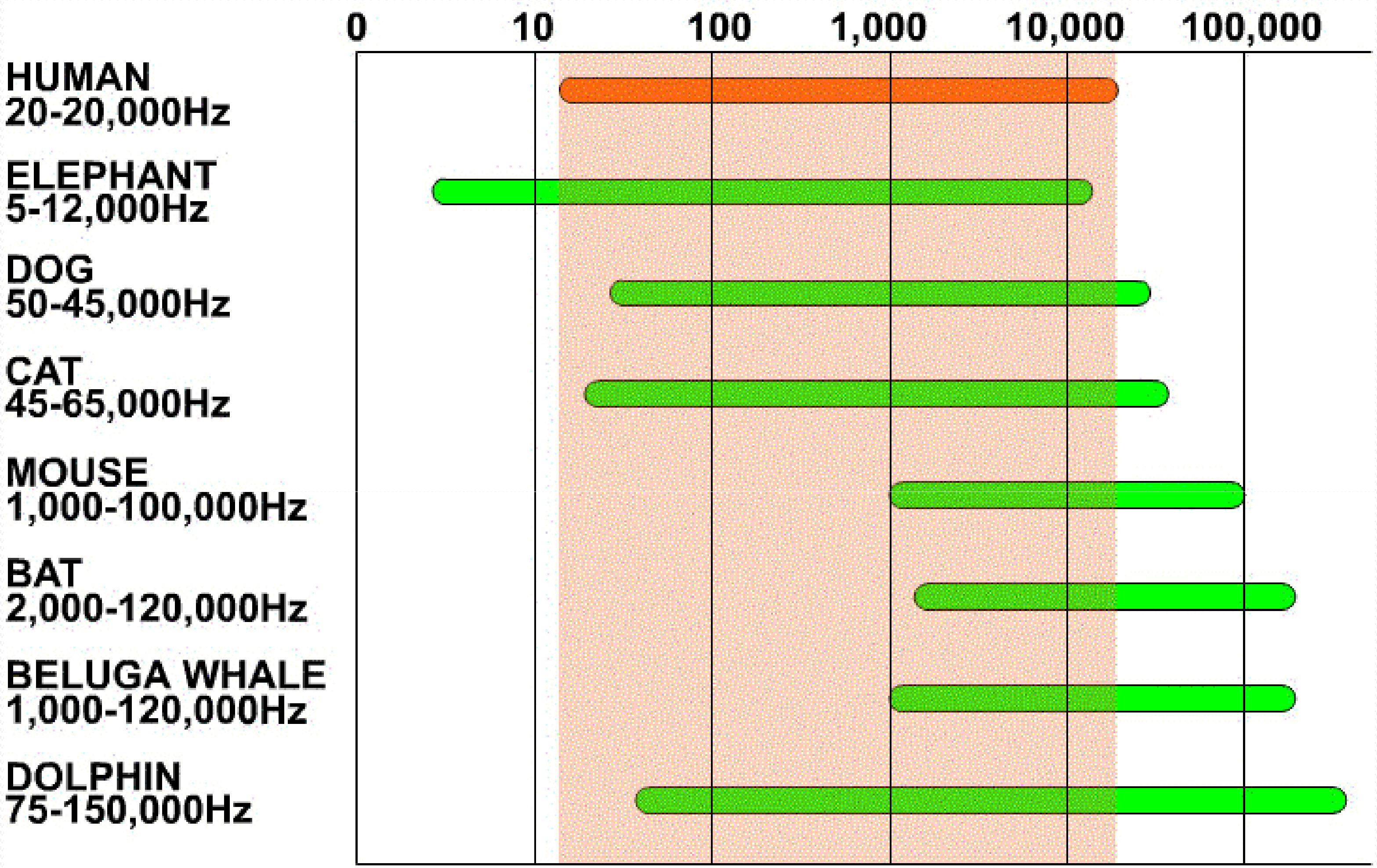
Isto ocorre quando: $$\frac{\Delta L}{\lambda} = 0,5;\ 1,5;\ 2,5;\ldots \Rightarrow \Delta L = 0,5\lambda;\ 1,5\lambda;\ 2,5\lambda\ldots$$

Exemplo 2:

A figura ao lado mostra duas fontes pontuais S_1 e S_2, que estão em fase e separadas pela distância D=1,5λ, emitem ondas sonoras idênticas de comprimento de onda λ. (a) Qual é a diferença de percurso das ondas e no ponto P_1, que se situa sobre a perpendicular que passa pelo ponto médio da distância D, a uma distância maior que do que D das fontes? Que tipo de interferência ocorre em P_1? (b) Quais são a diferença de percurso e o tipo da interferência no ponto P_2?



Onda sonora



- **Onda longitudinal mecânica**
- **Propagam-se a partir de uma fonte pontual**
- **Pulsos e/ou ondas progressivas**

17.6 Intensidade e Nível Sonoro

- **Intensidade** ***I*** de uma onda sonora em uma superfície é a taxa média, por unidade de área, com que a energia é transferida pela onda através da superfície, que matematicamente será escrita por:

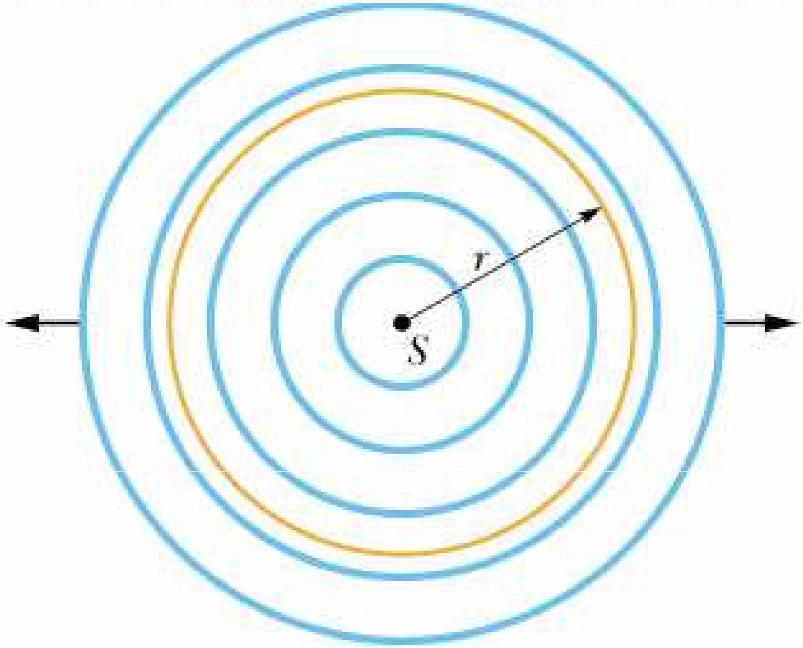
$$I = \frac{P}{A}$$

Onde P é a taxa temporal de transferência da energia (Potência) da onda sonora e A é a área da superfície que intercepta o som. A intensidade I está relacionada à amplitude do deslocamento Sm da onda sonora por:

$$I = \frac{1}{2}\rho v \omega^2 s_m^2$$

Variação da Intensidade com a Distância

A forma como a intensidade varia com a distância a partir de uma fonte sonora real é normalmente complexa. Em algumas situações, podemos ignorar ecos e supor que a fonte sonora é pontual que emite o som *isotropicamente* – isto é, com a mesma intensidade em todas as direções.



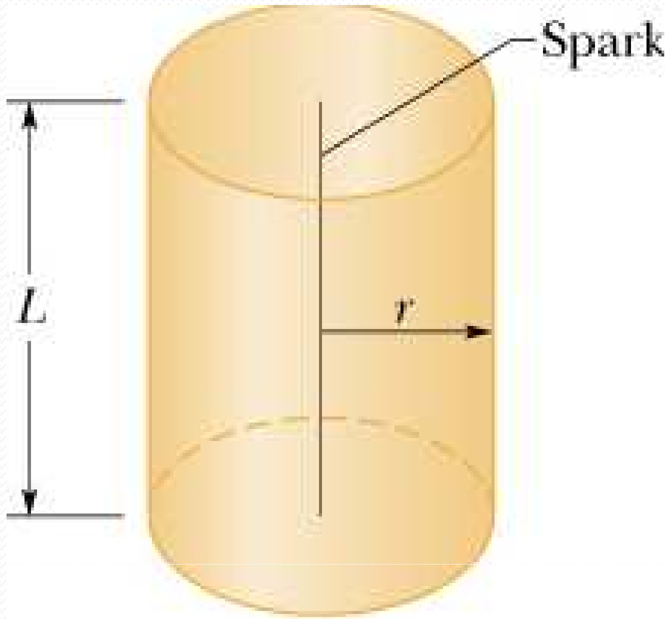
Supondo que a energia mecânica das ondas sonoras seja conservada enquanto elas se espalham a partir desta fonte e que uma esfera imaginária de raio *r* seja centrada na fonte, conforme a figura ao lado. Deste modo, a taxa temporal com que a energia é emitida pela fonte, deve ser igual a taxa temporal com que a energia atravessa a esfera.

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

onde **$4\pi r^2$** é a área da esfera.

Exemplo 3:

Uma centelha elétrica salta ao longo de uma linha reta de comprimento L=10m, emitindo um pulso sonoro que se propaga radialmente para fora a partir da centelha (chamada de fonte linear de som). A potência de emissão é P_s=1,6 x 10^4 w . (a) Qual é a intensidade I do som quando ele alcança uma distância r=12m a partir da centelha? (b) com que taxa temporal P_d a energia sonora é interceptada por um detector acústico de área A_d=2cm², dirigido para a centelha e localizado a uma distância r=12m da centelha?



Escala Decibel

O ouvido humano capta sons com amplitudes de deslocamentos que variam de 10^{-5}m (mais forte) até cerca de 10^{-11}m (mais fraco). A razão entre as intensidades nesses dois limites é de 10^{12} , pois a intensidade do som varia com o quadrado da amplitude. Por ser um intervalo tão grande, utiliza-se a escala logarítmica.

Considere a relação y=log x , com x e y variáveis. Se multiplicarmos x por 10, y aumenta de 1 unidade. Visualizando,

$$y' = \log 10x = \log 10 + \log x = 1 + y$$

Analogamente, se multiplicarmos por 10^{12}, aumentará de 12 unidades.

Desta forma, em vez de falarmos da intensidade da onda sonora, é muito mais conveniente falarmos de seu **nível sonoro *β***, definido como:

$$\boxed{\beta = (10dB)\log \frac{I}{I_0}}$$

$dB = decibel$ e $I_0 = 10^{-12} W/m^2$

Intensidade e Nível Sonoro

Exemplo 4:

Muitos roqueiros veteranos sofrem de perda aguda da audição por causa dos altos níveis sonoros que eles suportam durante anos tocando música próximo ao alto-falantes ou ouvindo música em fones de ouvido. Alguns, com Ted Nugent, não conseguem mais escutar por um ouvido lesionado. Outros, como Peter Townshend do The Who, possuem uma sensação de ruído contínuo (tinido). Recentemente, vários roqueiros, como Lars Ulrich da Banda Metalica, começaram a usar proteções especiais nos ouvidos durante as apresentações. Se um protetor de ouvido diminui o nível sonoro das ondas por 20dB, qual é a razão entre a intensidade final I_f e a intensidade I_i inicial ?

17.7 Fontes de Sons Musicais

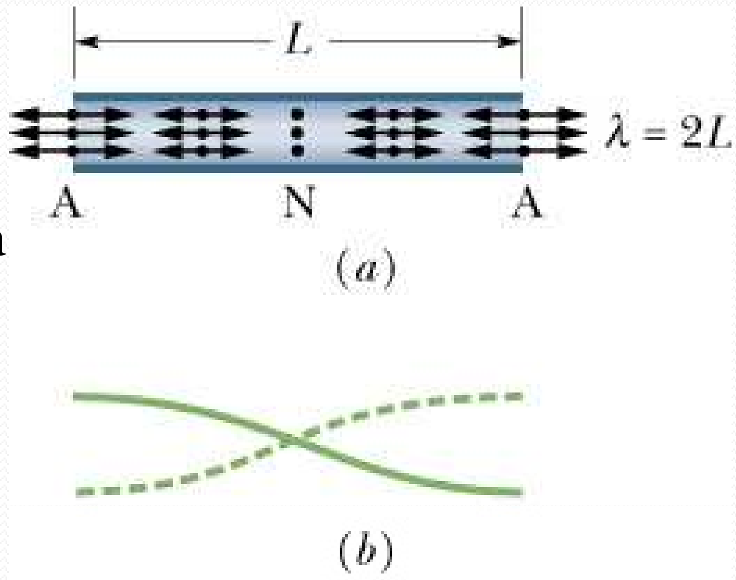
Cordas vibrantes (violão, piano, violino);

Membranas (timbale, tambor, repique, cuíca);

Colunas de ar (flauta, oboé, tubo de órgão, cornetas);

Blocos de madeira ou barras de aço (marimba xilofone).

A **maioria dos instrumentos envolve mais do que uma parte oscilante** (violão= cordas e caixa de ressonância).

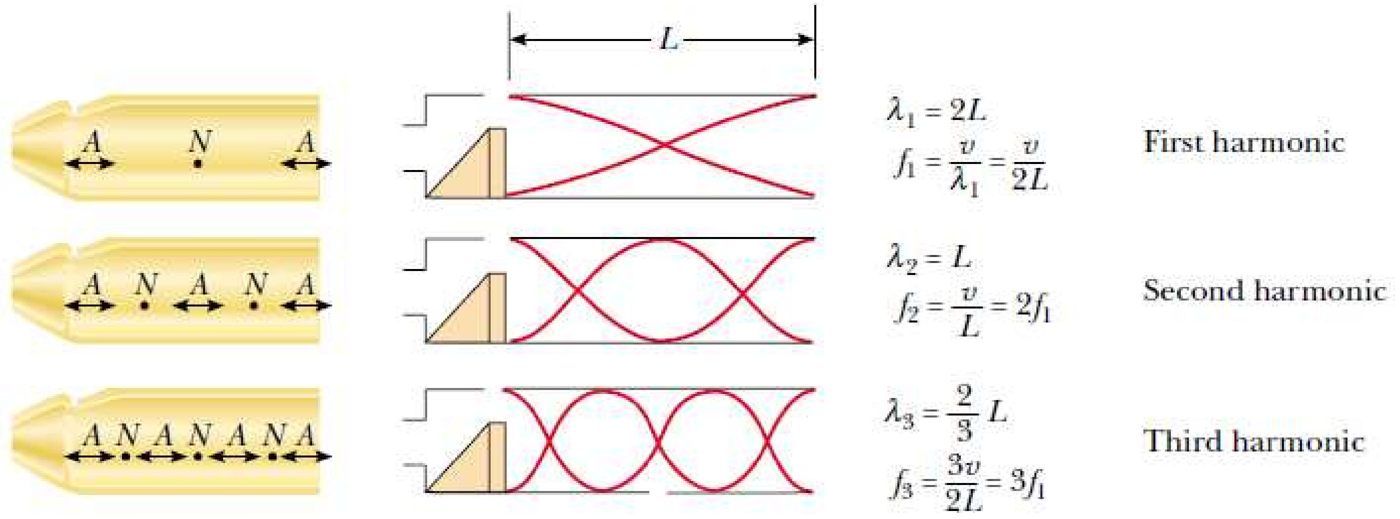


(a)
(b)

Quando a onda produzida numa corda ou tubo coincidir com o comprimento da corda ou do tubo, ocorre ressonância e é produzida uma onda estacionária na corda ou tubo.

O padrão de onda estacionária mais simples num tubo com as duas extremidades abertas é mostrado na figura ao lado, chamado de **modo fundamental** ou **primeiro harmônico**.

Tubo com as duas extremidades abertas



(a) Open at both ends

De um modo mais geral, as freqüências de ressonância para um tubo de comprimento L com as **duas extremidades abertas** correspondem aos comprimentos de onda,

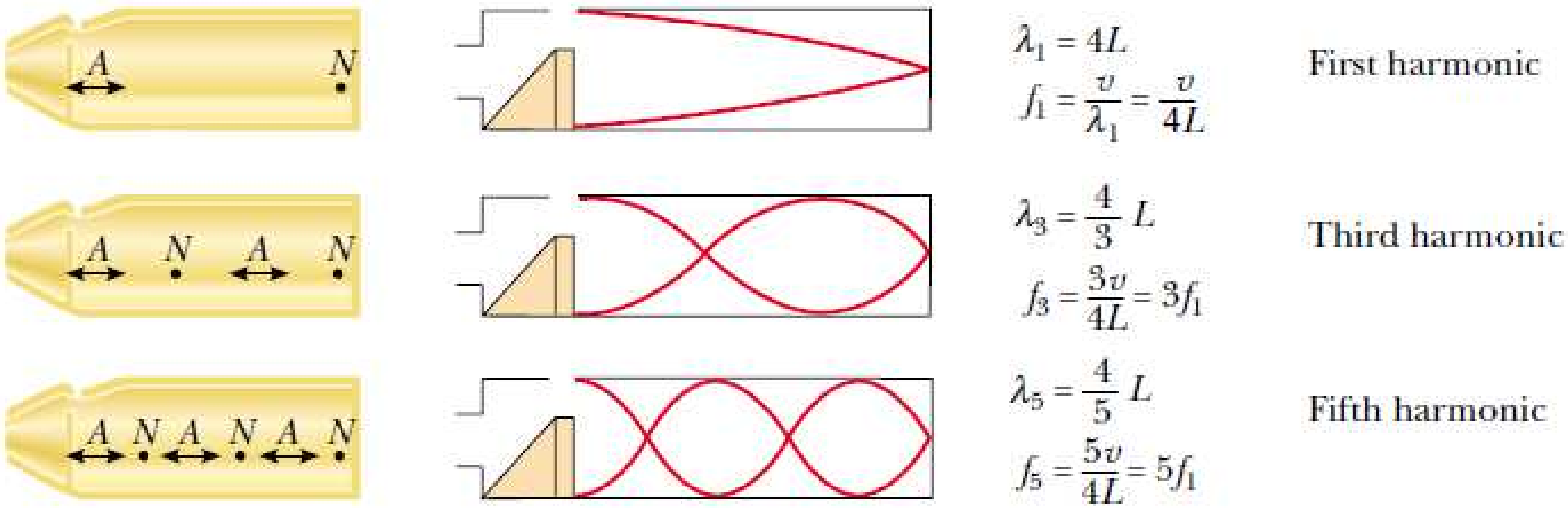
$$\lambda = \frac{2L}{n}$$ para $$n = 1,2,3,4,...$$

n é chamado nº de harmônico. As freqüências de ressonância deste tubo são:

$$f = \frac{v}{\lambda} = \frac{nv}{2L}$$ para $$n = 1,2,3,4,...$$

(TUBO COM AS DUAS EXTREMIDADES ABERTAS)

Tubo com uma das extremidades abertas



(b) Closed at one end, open at the other

Para um tubo **com uma das extremidades abertas** e a outra fechada teremos:

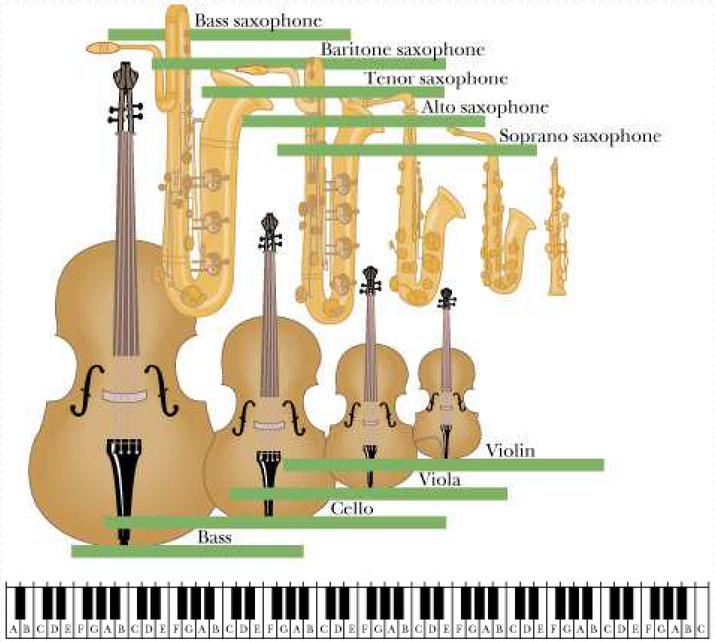
$$\lambda = \frac{4L}{n} \quad \text{para} \quad n = 1, 3, 5, 7, \ldots$$

com freqüências de ressonância:

$$f = \frac{v}{\lambda} = \frac{nv}{4L} \quad \text{para} \quad n = 1, 3, 5, 7, \ldots$$

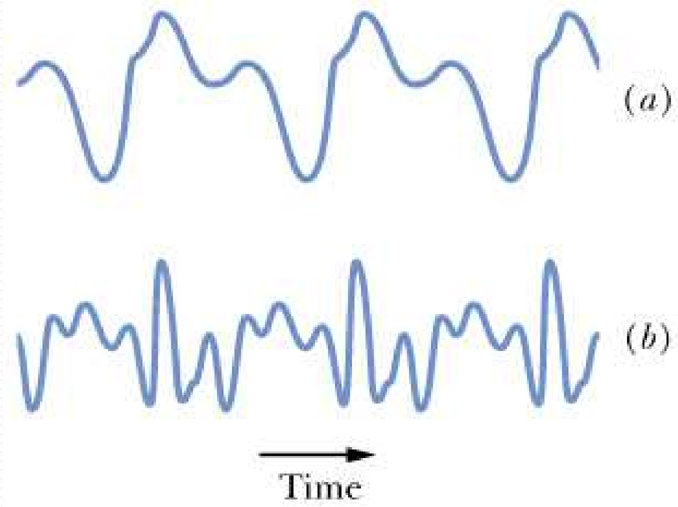
(TUBO COM UMA EXTREMIDADE ABERTA)

O comprimento de um instrumento musical reflete a faixa de freqüências sobre a qual o instrumento é projetado para funcionar.



Timbre:

Diferentes instrumentos produzem diferentes ondas resultantes, mesmo que toquem a mesma nota musical, como por exemplo, a figura ao lado: (a) flauta e (b) oboé.

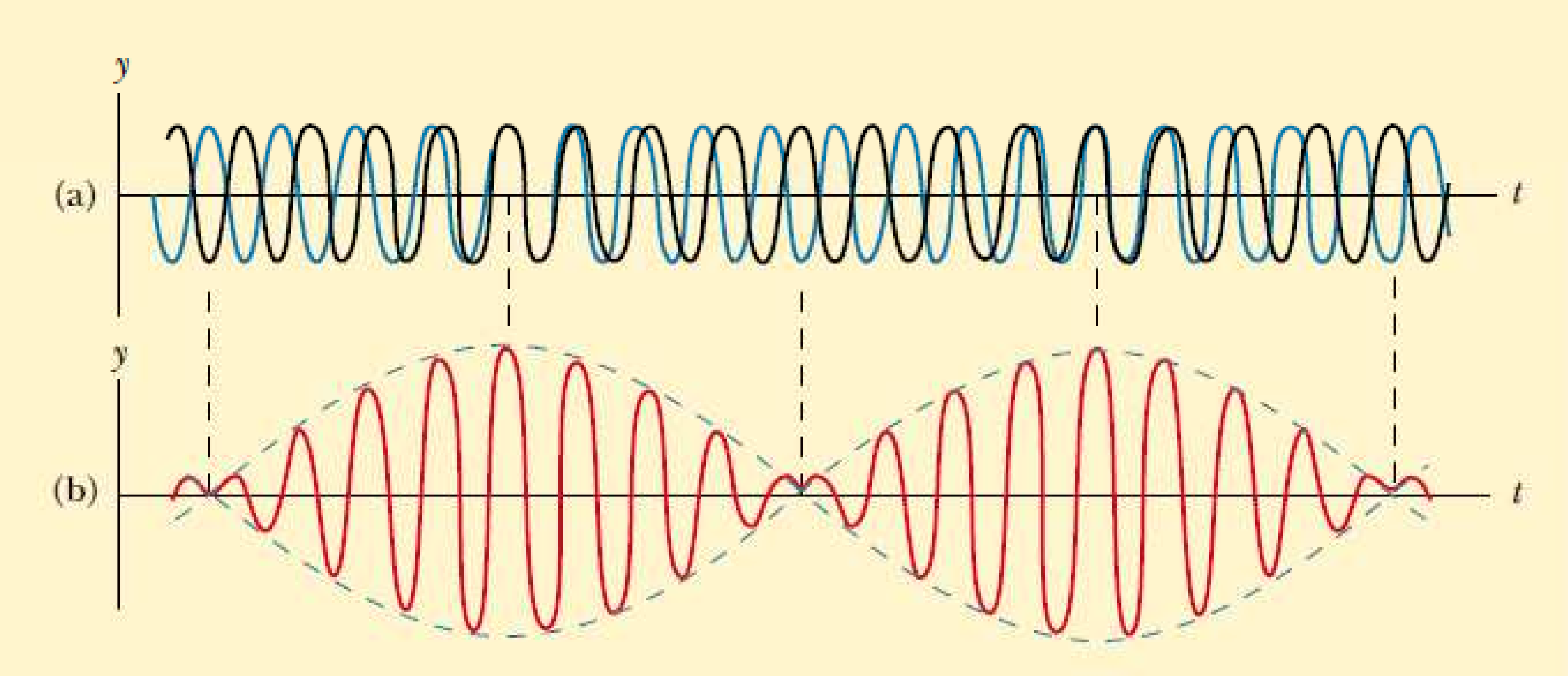


Exemplo 5:
Ruídos de fundo de baixa intensidade em uma sala produzem ondas estacionárias em um tubo de papelão de comprimento L=67,0cm com as duas extremidades abertas. Suponha que a velocidade do som no ar dentro do tubo seja 343m/s. (a) Qual a freqüência do som proveniente do tubo que você ouve? (b) Se você encostar seu ouvido contra uma das extremidades do tubo, que freqüência fundamental você escutará vinda do tubo?

Exemplo 6: A seção de drenagem de um bueiro de 1,23 m de comprimento, faz um barulho uivando quando o vento sopra. (a) Determine as freqüências dos três primeiros harmônicos do bueiro se ele estiver aberto em ambas as extremidades. Considere 343 m/s, como a velocidade do som no ar. (b) Quais são as três freqüências mais baixas naturais do bueiro se ele estiver fechado numa extremidade?

17.8 Batimentos

- Se escutarmos, com uma diferença de alguns minutos, dois sons cujas freqüências são 552 e 564 Hz, possivelmente não conseguiremos distinguir um do outro. No entanto, se os dois sons alcançarem os nossos ouvidos simultaneamente, o que iremos escutar será um som cuja freqüência é de 558 Hz, que é a média das duas freqüências. Escutaremos também uma variação na intensidade deste som – **um batimento** - lento e periódico que se repete a uma freqüência de 12Hz, ou seja, a diferença entre as duas freqüência originais.



As batidas são formados pela combinação de duas ondas de frequências ligeiramente diferentes. **(a)** As ondas individuais. **(b)** A onda combinada tenha uma amplitude (linha tracejada) que oscila no tempo.

Vamos supor que as variações temporais dos deslocamentos das duas ondas sejam:

$s_1 = s_m \cos \omega_1 t$ e $s_2 = s_m \cos \omega_2 t$ onde $\omega_1 > \omega_2$

Pelo princípio da superposição: $s = s_1 + s_2 = s_m(\cos \omega_1 t + \cos \omega_2 t)$

De acordo com a identidade trigonométrica,

$$\cos\alpha + \cos\beta = 2\cos\left[\frac{1}{2}(\alpha - \beta)\right]\cos\left[\frac{1}{2}(\alpha + \beta)\right]$$

Podemos escrever o
Deslocamento resultante como: $s = 2s_m \cos\left[\frac{1}{2}(\omega_1 - \omega_2)t\right]\cos\left[\frac{1}{2}(\omega_1 + \omega_2)t\right]$

Se definirmos $\omega' = \frac{1}{2}(\omega_1 - \omega_2)$ $\omega = \frac{1}{2}(\omega_1 + \omega_2)$

Teremos: $s(t) = [2s_m \cos \omega' t]\cos \omega t$

Com freqüência de batimento dada por $f_{bat} = f_1 - f_2$

Exemplo 7:

A maioria dos pássaros vocaliza usando apenas um dos dois lados dos seus órgãos vocais, chamado *siringe*. Os pingüins imperadores, entretanto, vocalizam usando os dois lados simultaneamente. Cada lado produz ondas acústicas estacionárias na garganta e na boca do pássaro, como em um tubo com as duas extremidades abertas. Suponha que a freqüência do primeiro harmônico produzido pela extremidade A seja $f_{1A}=432Hz$ e que a freqüência do primeiro harmônico produzido pela extremidade B seja $f_{1B}=371Hz$. Qual é a freqüência de batimento entre estas duas freqüências de primeiro harmônico e entre as duas frequências de segundo harmônico?

17.9 Efeito Doppler

Efeito em que se observam variações de freqüência quando a fonte e/ou o detector estão em movimento. Ocorre também em ondas eletromagnéticas. Neste estudo, consideraremos apenas as ondas sonoras e tomaremos como sistema de referência a massa de ar através da qual as ondas se propagam.

Se o detector ou a fonte estiver se movendo, ou se ambos estiverem em movimento, a freqüência emitida ***f*** e a freqüência detectada ***f'*** são relacionadas por

$$f' = f\,\frac{v \pm v_D}{v \mp v_S}$$

v é a velocidade do som no ar;
v_D é a velocidade do detector em relação ao ar;
v_S é a velocidade da fonte em relação ao ar.

..\Pen Drive\pen drive 2008\simuladores\ph11br\dopplereff_br.htm

Os sinais –

Se o detector se move em direção à fonte, o sinal é positivo no numerador (aumento na freqüência);

Se o detector se afasta da fonte, o sinal é negativo no numerador (redução na freqüência);

Se o detector estiver estacionário $\boldsymbol{v_D=0}$;

Se a fonte se mover em direção ao detector, o sinal é negativo no denominador (aumento na freqüência);

Se a fonte se afasta do detector, o sinal é positivo no denominador (redução na freqüência);

Se a fonte estiver estacionária $\boldsymbol{v_s=0}$.

Resumindo:

Aproximação- significa **aumento** de freqüência;

Afastamento- significa **decréscimo** na freqüência;

Resumo:

$$f'_{aparente} = f_{original}\,\frac{\left(v_{da\,onda} \pm v_{observador}\right)}{\left(v_{da\,onda} \pm v_{fonte}\right)}$$

O Sinal da velocidade do observador e da fonte é determinado colocando-se um eixo positivo orientado do observador para a fonte.

Exemplo 8:

Um foguete se move com uma velocidade de **242m/s** (através do ar em repouso) diretamente em direção a um poste estacionário enquanto emite ondas sonoras de freqüência ***f=1250Hz***. (a) Qual a freqüência medida por um detector preso ao poste? (b) Parte do som que atinge o poste é refletida de volta ao foguete como um eco. Qual a freqüência detectada no foguete para esse eco?

Exemplo 9 - 51) Uma ambulância com uma sirene emitindo um som de freqüência 1600Hz alcança e ultrapassa um ciclista pedalando uma bicicleta a 2,44m/s. Após ser ultrapassado, o ciclista escuta uma freqüência de 1590Hz. Qual é a velocidade da ambulância?