AULAS 20 - SOM (RESUMO DO CAPÍTULO 6 Moysés Nussenzveig)

Profª Nair Stem

Instituto de Física da USP

Natureza do Som

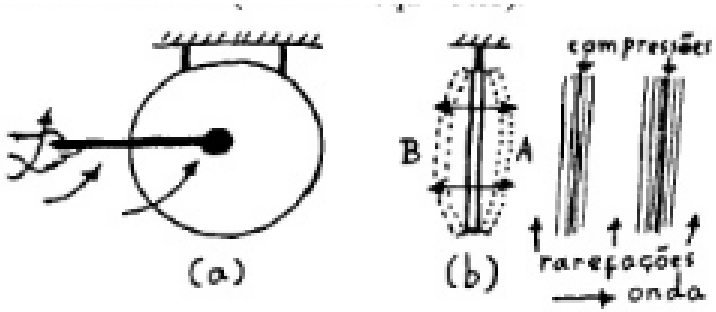
- O som necessita de um meio material para ser transmitido gasoso, líquido ou sólido (atmosfera, água, terra).
- ***Efeitos Ondulatórios (onda longitudinal)***:

⇒Reflexão do som – eco

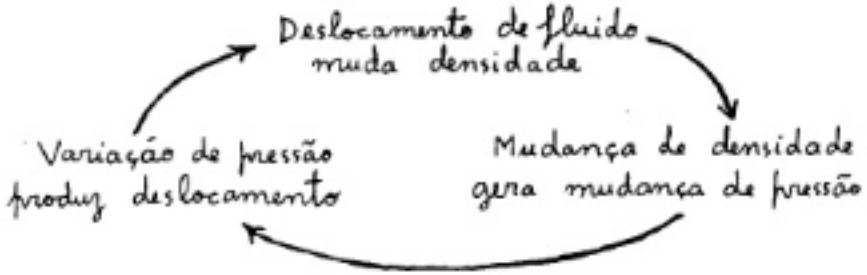
⇒Fenômenos de interferência (batimentos...)

⇒Velocidade finita (ex: intervalo de tempo decorrido entre o clarão do trovão e o ruído do trovão).

Mecanismo de propagação do som



Gongo vibrando entre posições extremas A e B

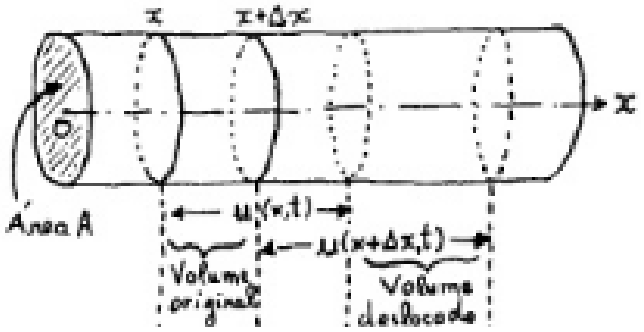


Mecanismo de propagação

Ciclo: O deslocamento do ar muda a densidade do ar => mudança de pressão (compressão ou descompressão) => a pressão produz o deslocamento da camada de ar contígua.

Deslocamento - densidade

- Onda unidimensional longitudinal propagando-se dentro de um tubo cilíndrico com secção transversal de área A.



- u(x,t) -> deslocamento sofrido pelas partículas do fluído na secção transversal de coordenada x no instante t.
- Volume antes do deslocamento V=A[(x+Δx)-x)]=AΔx
- Volume após o deslocamento $V + \Delta V = A\Delta x\left(1 + \frac{\partial u}{\partial x}\right) \Rightarrow \Delta V = A\Delta x \frac{\partial u(x,t)}{\partial x} \Rightarrow \frac{\Delta V}{V} = \frac{\partial u}{\partial x}(x,t)$

- A variação da densidade pode ser obtida pela diferenciação: ρ=M/V=>dρ=-ρdV/V

- $\Delta\rho/\rho = -\Delta V/V = -\frac{\partial u}{\partial x}(x,t) = \frac{\rho - \rho_o}{\rho} = \frac{\delta}{\rho} = \frac{\delta}{\rho_0} \Rightarrow \delta = \rho - \rho_o = -\rho_o \frac{\partial u}{\partial x}(x,t)$

Equação de Onda

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

Lembre-se que u(x,t) se desloca na direção x (onda longitudinal)

Neste caso v, a velocidade de propagação do som está correlacionada portanto com a pressão e a densidade:

$$v = \sqrt{(\partial P / \partial \rho)_0}$$

Velocidade do Som no Ar

- As compressões e expansões numa onda sonora que se propaga no ar são rápidas, não ocorrendo tempo suficiente para a temperatura se uniformizar (sem troca de calor com ambiente => processo adiabático).

$$v = \sqrt{\gamma R T / m}$$

Ver dedução de fórmula no livro do Moysés Nussenzveig

A velocidade do som num gás é independente da pressão e cresce com raiz da temperatura.

⇒m é a massa molecular

⇒Para o ar g é aproximadamente 1,4

⇒R é constante dos gases = 8,314510 J/K.mol

Velocidade do som no ar = 344m/s (T=20^{o}C)

Velocidade do Som na Água

- Na água o processo está correlacionado com o módulo de elasticidade volumétrico, B (o inverso da compressibilidade). Observe que qto mais compressível um fluído for, maior será a variação percentual do volume.

$B \approx 2{,}2 \times 10^9\ \mathrm{N/m^2}$ Módulo de elasticidade da água

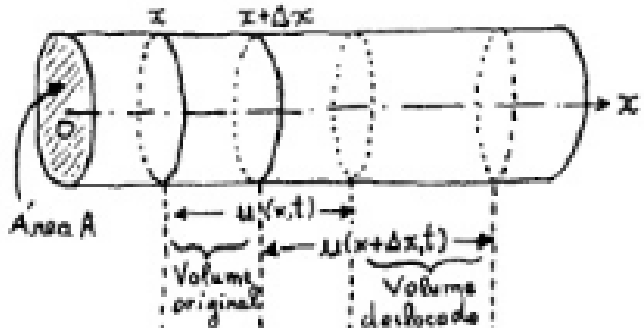
$$v = \sqrt{B/\rho_0}$$ Velocidade do som na água

ρ_o=1x10^3 kg/m^3 – densidade da água => v=1483m/s

Ondas Sonoras Harmônicas. Intensidade

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

Equação de onda



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

Onda harmônica progressiva se propagando no tubo

Ver Apêndice

Comprimento de Onda/ Onda de pressão

- $\lambda = v\tau = v/\nu$

A frequência para sons audíveis varia entre aproximadamente 20Hz e 20KHz, como no ar v=340m/s => λ varia entre aproximadamente 1,7cm e 17m.

O deslocamento do fluido produz uma variação na densidade, δ (como definido anteriormente.

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

Por sua vez a variação de densidade produz uma variação de pressão, p:

$$p = \left(\frac{\partial P}{\partial \rho}\right)_o \delta = -\rho_o \left(\frac{\partial P}{\partial \rho}\right)_o \frac{\partial u}{\partial x} = -\rho_o \mathbf{v}^2 \frac{\partial u}{\partial x} = \delta\, \mathbf{v}^2$$

Onde a velocidade: $\mathbf{v} = \left(\frac{\partial P}{\partial \rho}\right)_o^{1/2}$

Onda de pressão

O deslocamento do fluido produz uma variação na densidade, $\delta=\rho-\rho_o$ (como definido anteriormente).

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

Por sua vez a variação de densidade produz uma variação de pressão, p= (P-p_o):

$$p(x,t) = \left(\frac{\partial P}{\partial \rho}\right)_o \delta = -\rho_o \left(\frac{\partial P}{\partial \rho}\right)_o \frac{\partial u}{\partial x} = -\rho_o \mathbf{v}^2 \frac{\partial u}{\partial x} = \delta\, \mathbf{v}^2$$

Onde a velocidade: $\mathbf{v} = \left(\frac{\partial P}{\partial \rho}\right)_o^{1/2}$

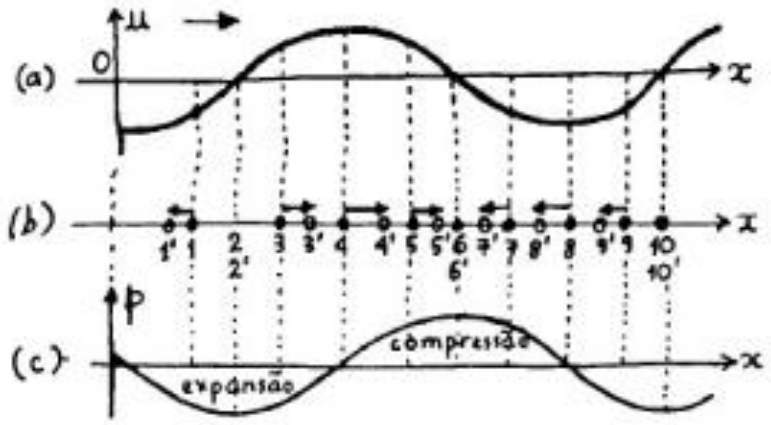
$$p(x,t) = -\rho_o \mathbf{v}^2 \frac{\partial u}{\partial x} = \delta\, \mathbf{v}^2$$

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

$$p(x,t) = Psen(kx - wt + \delta)$$

$$P = \rho_o \mathbf{v}^2 kU$$

Onda de Pressão/ Intensidade



As ondas de deslocamento e de pressão estão defasadas entre si de 90º .

- Por exemplo, as partículas 1 e 3, se deslocam para 1´ e 3´ (expansão), e a dois permanece imóvel.
- As partículas 4 e 6 se deslocam para a direita (compressão)

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

$$p(x,t) = Psen(kx - wt + \delta)$$

Intensidade: $I = \frac{1}{2}\rho_o v w^2 U^2$ ou $I = \frac{1}{2}\frac{P^2}{\rho_o v}$

Ver Apêndice

Unidade: $I = \frac{1}{2}\rho_o v w^2 U^2 \left(\frac{kg}{m^3}\frac{m}{s}\frac{rad^2}{s^2}m^2\right) = \left(\frac{N}{ms}\right) = \left(\frac{Nm}{m^2 s}\right) = \left(\frac{J}{m^2 s}\right) = \left(\frac{W}{m^2}\right)$

Análise dimensional

Exemplo: Ondas Sonoras Esféricas

- Considere ondas sonoras sendo emitidas em todas as direções, uniformemente. A) Qual a intensidade das ondas sonoras a uma distância r da fonte, se esta emite energia a uma taxa P? Calcule a intensidade para r=2,50m e P=250W.
- ***SOLUÇÃO:***
- EM ONDAS ESFÉRICAS A INTENSIDADE CAI COM O INVERSO DO QUADRADO DA DISTÂNCIA
- $I=P/(4\pi r^2)=25/(4\pi\ 2{,}5^2)=318 mW/m^2$

ONDAS SONORAS ESFÉRICAS

- (b) Como a amplitude sonora depende da distância r?

$$I = \frac{1}{2}\rho_o v w^2 U^2 = \frac{P}{4\pi r^2} \Rightarrow U = \frac{1}{r}\sqrt{\frac{P}{2\pi\rho_0 v w^2}}$$

Note que a medida que a onda se espalha, sua amplitude diminui com o inverso da distância da fonte.

Para uma descrição mais detalhada das ondas em mais dimensões – Ler Moysés Nussenzveig – vol 2 – item 6.5.

Limiar

- Limiar de audibilidade corresponde à intensidade de som mais fraco que pode ser ouvido, e depende da frequência. $\nu=10^3 s^{-1} \Rightarrow I_o=10^{-12} W/m^2$.
- Limiar de sensação dolorosa corresponde à intensidade sonora máxima que nosso ouvido pode tolerar (abaixo, temos a sensação de som; e acima, dor) => $I_m=1 W/m^2$.
- Unidade em nível de intensidade é o bel (homenagem a Graham Bell) – decibel= 0.1 bel, e toma-se como referência o valor de intensidade I_o (nível 0 de intensidade).

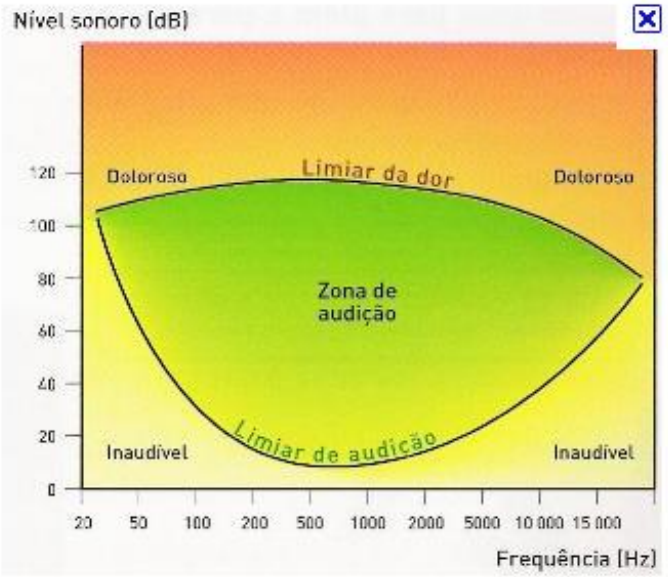
$$\alpha = 10 \log_{10} (I / I_0) \text{ db (= decibéis)}$$

Nível de Intensidade (bel)

$$\alpha = 10 \log_{10} (I / I_0) \text{ db (= decibéis)}$$

Damos a seguir alguns exemplos típicos de nível sonoro (ordens de grandeza):

Limiar de audibilidade	0 db
Murmúrio	20 db
Música suave	40 db
Conversa comum	65 db
Rua barulhenta	90 db
Avião próximo	100 db

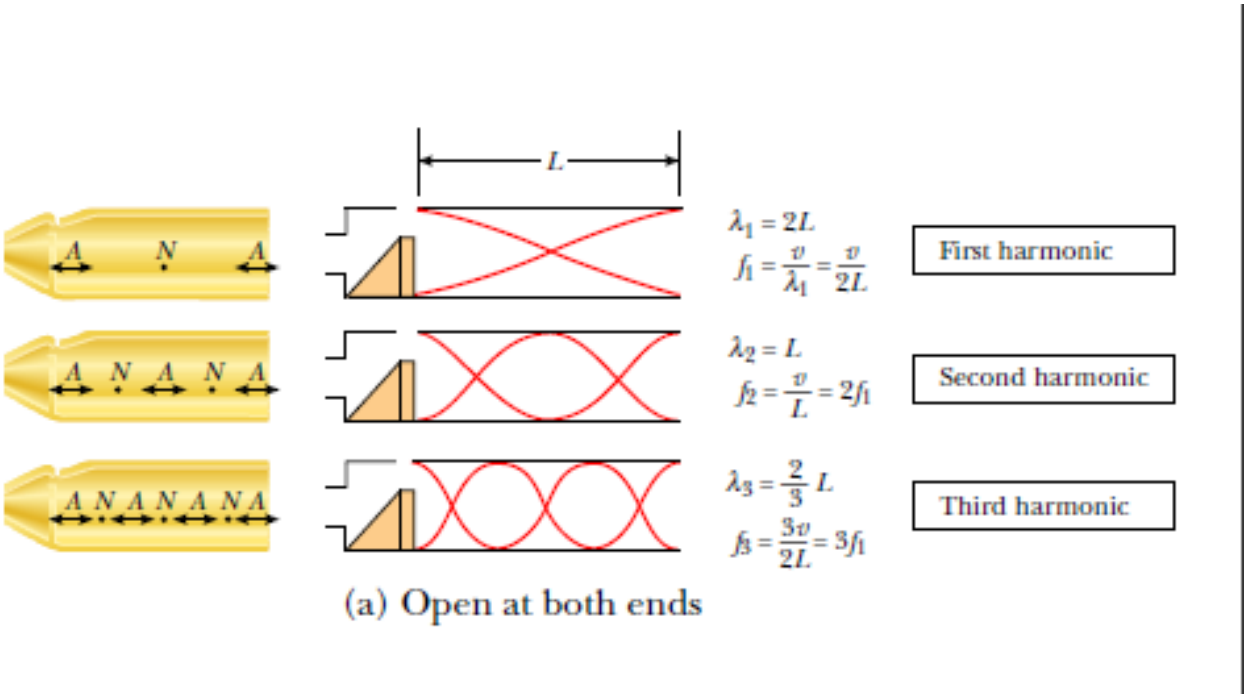


Unidade de Intensidade:

$$I = \frac{1}{2}\rho_o \forall w^2 U^2 \left(\frac{kg}{m^3}\frac{m}{s}\frac{rad^2}{s^2}m^2\right) = \left(\frac{N}{ms}\right) = \left(\frac{Nm}{m^2 s}\right) = \left(\frac{J}{m^2 s}\right) = \left(\frac{W}{m^2}\right)$$

Colunas de Ar – Tubo Aberto

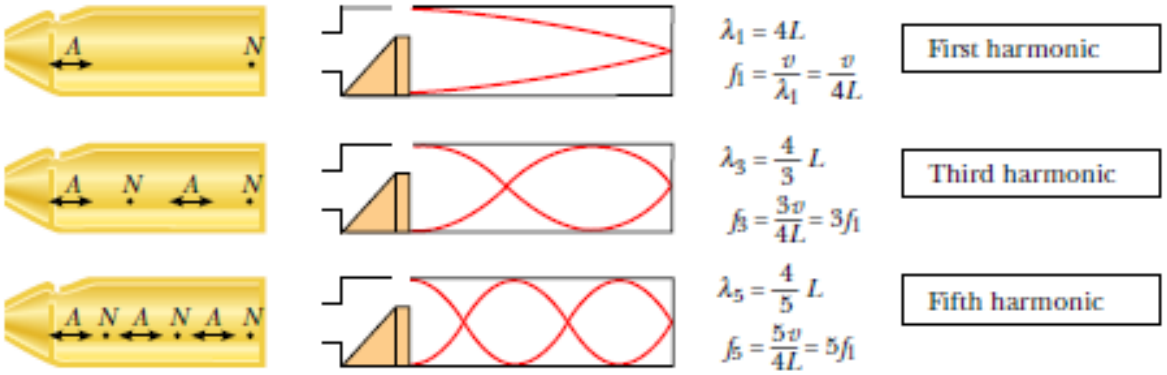
A interferência entre as ondas incidente e refletida da origem a ondas estacionárias => similarmente ás cordas passamos a ter modos normais de vibração. Qdo as extremidades do tubo é aberta, as ondas nas extremidade têm o seu máximo.



Note que a frequência fudamental $\nu 1 = v/2L$, $\nu_n = nv/(2L) = n\nu_1$,

Colunas de Ar – Tubo Fechado em Uma Extremidade

Qdo uma das extremidades do tubo é aberta, as ondas na extremidade fechada tem o seu mínimo.

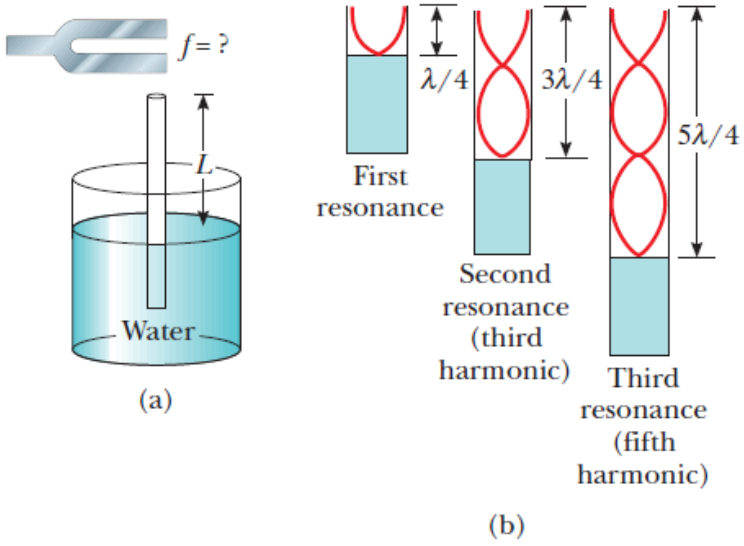


(b) Closed at one end, open at the other

$L = n\lambda/4$, $\lambda = 4L/n$, $\nu = nv/(4L)$, n = ímpar.

Exemplo:Um instrumento simples para demonstrar a ressonância em um tubo

Um tubo longo, vertical, aberto nas duas extremidades, é submerso parcialmente em um recipiente com água, e um diapasão vibrando com frequência desconhecida é colocado perto deste tubo. O comprimento L da coluna de ar é ajustado verticalmente movendo-se o tubo verticalmente. As ondas sonoras geradas pelo diapasão são reforçadas quando o comprimento da coluna de ar corresponde a uma das frequências de ressonância do tubo. Para determinado tubo, o menor valor de L para o qual ocorre um pico na intensidade sonora é 9cm. A partir desta medida, determine a frequência do diapasão e o valor de L para os dois modos ressonantes seguintes.



Searway - Jewett

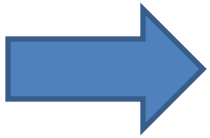
Solução

(a)

- A superfície da água na parte inferior do tubo age como uma barreira nessa extremidade, e temos então o modelo de um tubo com extremidade fechada e outra aberta. Neste modelo, o modo fundamental tem frequência v/4L (onde L é o comprimento do tubo a partir da extremidade aberta até a superfície da água).
- ν_1=v/4L =343/4(0.09)=953Hz => modo fundamental com λ=4L=0.360m

(b) Os modos correspondentes às demais ressonâncias (lembre-se que $\nu_n = nv/4L$ para n=1,3,5...) para L FIXO. Neste caso a frequência da fonte é a mesma (a do diapasão), quem será ajustado será o L.

=>Lembre-se que $\lambda_1 = 4L$ (fundamental), $\lambda_3 = (4/3)\ L$ (3º harmônico) e $\lambda_5 = (4/5)\ L$ (5º harmônico)

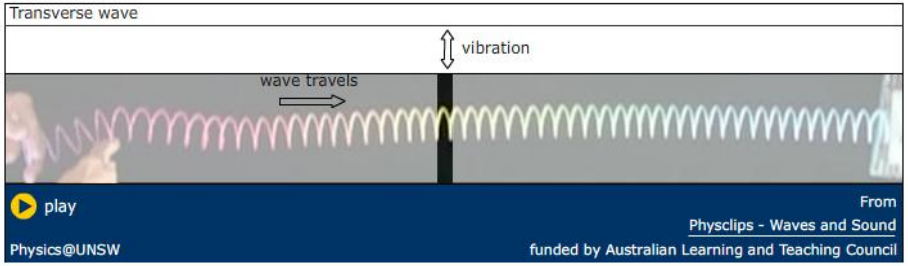


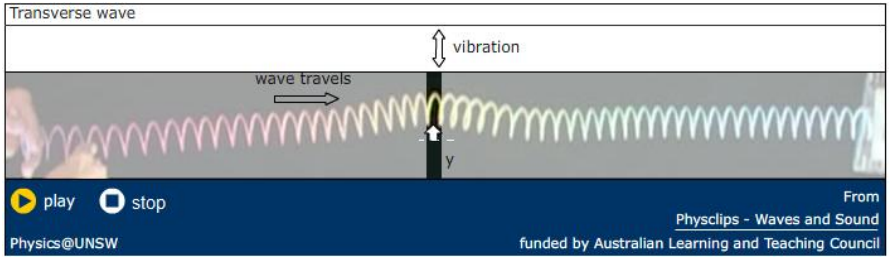
Para o 3º harmônico o L ajustado será:
$L = 3\lambda/4 = 0.270m$

Para o 5º harmônico o L ajustado será:
$L = 5\lambda/4 = 0.450m$

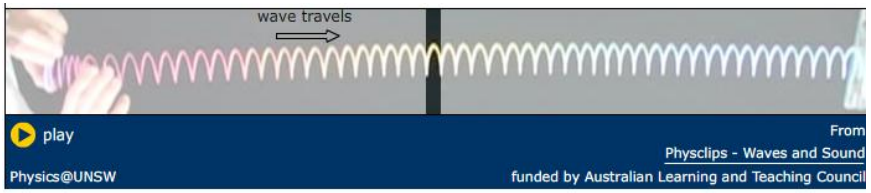
APÊNDICE AULA 20

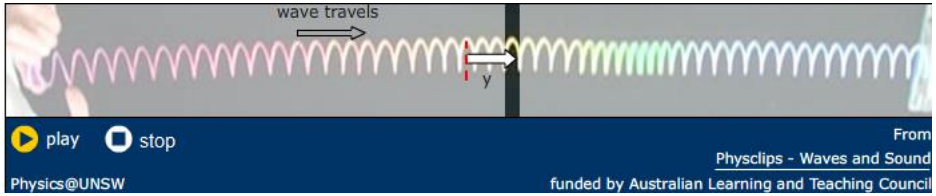
Demonstração:
Transversal x Longitudinal



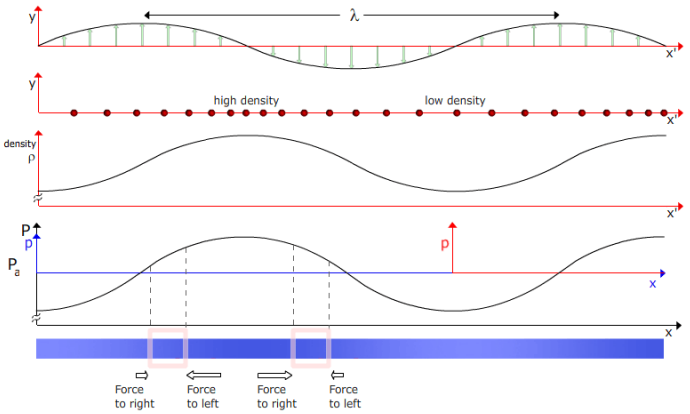


Transversal





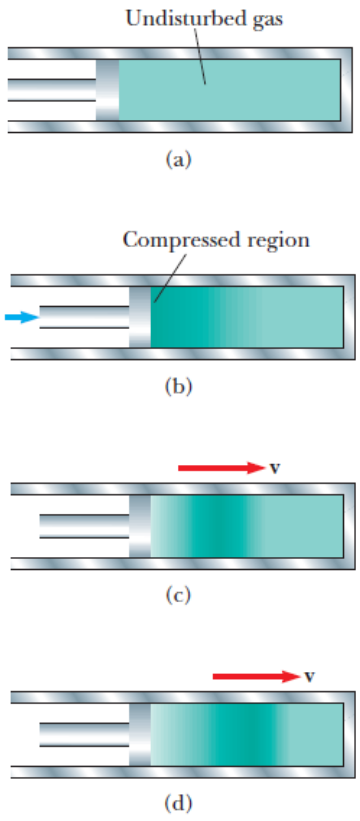
Longitudinal



http://www.animations.physics.unsw.edu.au/jw/sound-pressure-density.htm

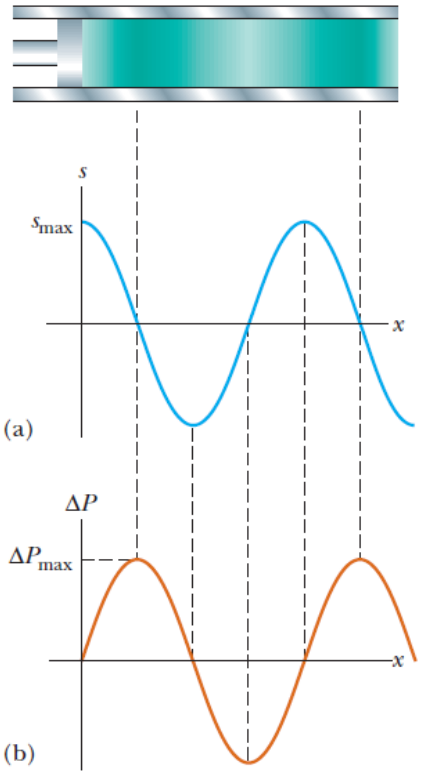
Onda Senoidal Longitudinal se Propagando através de um tubo cheio de um gás compressível

Serway/Jewett; Principles of Physics, 3/e
Figure 13.18



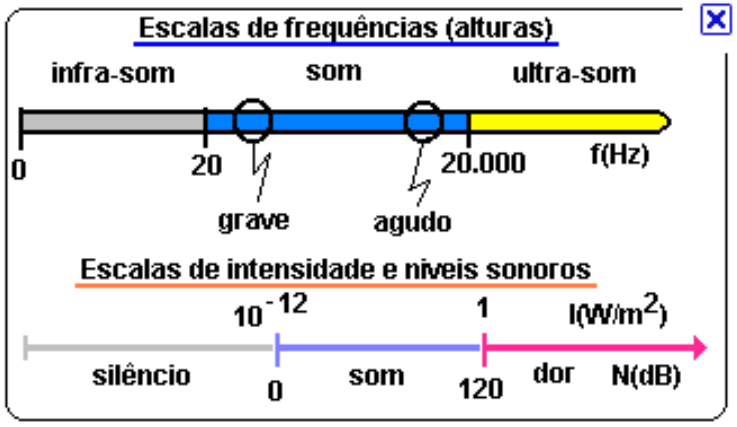
a) Na figura da esquerda, as ondas longitudinais estão se propagando em um tubo cheio de gás. A fonte é um pistão.
b) Na figura da direita, as regiões mais escuras representam regiões de compressão, e pressão mais alta, compare os gráficos.

Serway/Jewett; Principles of Physics, 3/e
Figure 13.19



Sons Musicais

- Distinção entre um som musical e um ruído é a periodicidade (não necessariamente uma onda senoidal, mas deve ser periódica).
- Altura de um som musical permite distinguir entre sons mais graves de agudos (qto maior o ν, mais agudo é o som).



Sons Musicais

- Notas musicais correspondem a sons com certas frequências bem determinadas. O intervalo entre duas notas musicais é determinado pela razão entre as frequências.

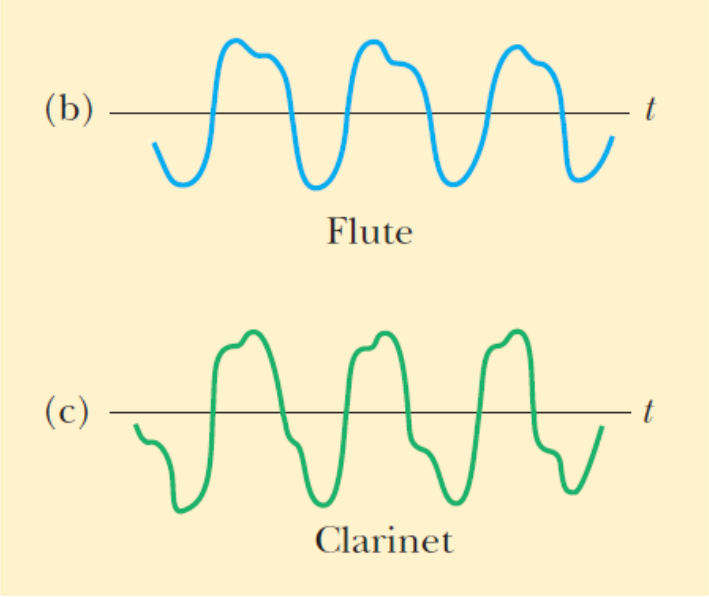
Nota	dó	ré	mi	fá	sol	lá	si	dó
ν_n / ν_1	1	9/8 (segunda)	5/4 (terça)	4/3 (quarta)	3/2 (quinta)	5/3 (sexta)	15/8 (sétima)	2 (oitava)
ν_n / ν_{n-1}		9/8	10/9	16/15	9/8	10/9	9/8	16/15

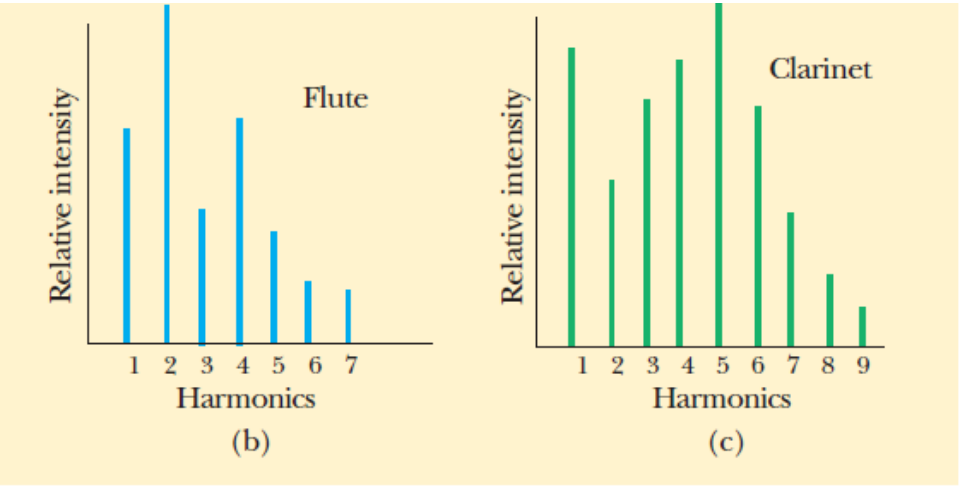
$\nu 2/\nu 1=2$ => 1/8 de intervalo

Timbre

- Nosso ouvido reconhece com a mesma nota lá duas ondas sonoras periódicas de mesma frequência, embora os perfis de onda correspondentes sejam distintos. Compare as ondas sonoras emitidas por uma flauta e um clarinete a seguir.
- Outra dica: http://www.animations.physics.unsw.edu.au/jw/sound-pitch-loudness-timbre.htm

Padrões de Onda Não Senoidais





Os padrões de onda na maioria dos instrumentos não são senoidais e cada instrumento possui o próprio padrão característico. **CONTUDO, ELAS SÃO PERIÓDICAS.** Por exemplo, a flauta e a clarineta produzem muitas frequências, incluindo a fundamental e os outros harmônicos.

AULA 21 – EFEITO DOPPLER, CONE DE MACH E EFEITO DOPPLER RELATIVÍSTICO

Compare:
Fonte Parada com Fonte em Movimento

Fonte em Movimento

http://www.youtube.com/watch?v=Kg9F5pN5tlI

Carros se movendo em relação a um observador parado na estrada

Carro se aproximando de um observador parado na estrada – frequência maior que da fonte

Carro se afastando do observador – frequência menor que da fonte.

POR QUE??????????

http://www.youtube.com/watch?v=Kg9F5pN5tlI

FONTE EM REPOUSO

- Considere u, como velocidade do observador. Suponha que a fonte sonora em repouso emita som de frequência $\nu_o=1/T_o=>\nu_o=v/\lambda_o$. Onde ν_o é o número de cristas de onda emitidas por unidade de tempo.

OBSERVADOR SE APROXIMANDO DA FONTE EM REPOUSO

Se observador se move em direção à fonte com velocidade u, a velocidade do som observada será maior do que a do som no ar:

$v_{rel}=v+u$

Velocidade do som no ar

Velocidade do observador

A frequência observado pelo observador que se aproxima:

$$\nu = \frac{v_{rel}}{\lambda} = \frac{v+u}{\lambda}$$

$$\nu = \frac{\nu_O}{\nu_O}\left(\frac{v+u}{\lambda_o}\right) = \frac{\nu_O}{\frac{v}{\lambda_o}}\left(\frac{v+u}{\lambda_o}\right) \Rightarrow \nu = \nu_O\left(1+\frac{u}{v}\right)$$

ν é mais aguda que νo.

OBSERVADOR SE AFASTANDO DA FONTE EM REPOUSO

Se observador se AFASTA DA fonte com velocidade u, a velocidade do som observada será maior do que a do som no ar:

$v_{rel}=v-u$

Velocidade do som no ar

Velocidade do observador

A frequência observado pelo observador que se aproxima:

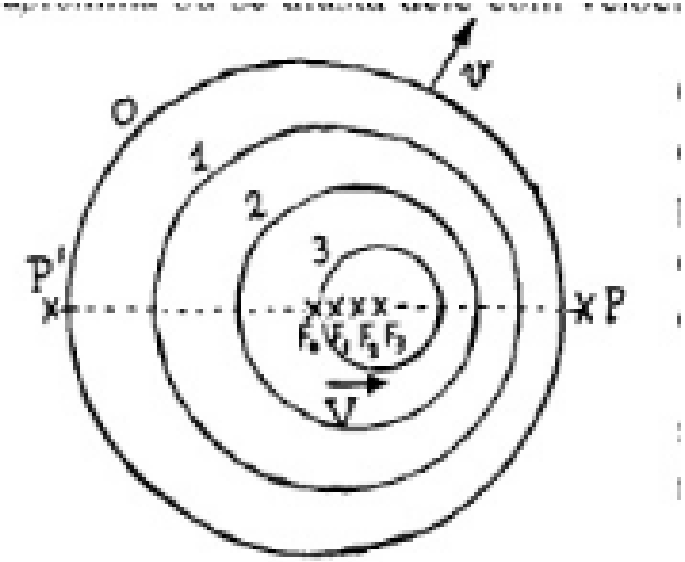
$$\nu = \frac{v_{rel}}{\lambda} = \frac{v-u}{\lambda}$$

$$\nu = \frac{\nu_O}{\nu_O}\left(\frac{v-u}{\lambda_o}\right) = \frac{\nu_O}{\frac{v}{\lambda_o}}\left(\frac{v-u}{\lambda_o}\right) \Rightarrow \nu = \nu_O\left(1-\frac{u}{v}\right)$$

ν é mais GRAVE que νo.

FONTE EM MOVIMENTO

Suponha um observador em repouso, e a fonte se aproxima ou se afasta dele com velocidade V.



Fonte se aproximando do observador P

- Cristas de ondas consecutivas emitidas pela fonte Fo, F1, F2, F3, em intervalos de tempo To entre cada duas cristas consecutivas.
- Durante o intervalo To, a fonte com velocidade V se deslocou VTo.

- O intervalo entre as cristas de onda: $\lambda = \nu T_o - VT = \lambda_o - VT_o$

$$\lambda = \underbrace{\nu T_o}_{\lambda_o} - V T_o = \lambda_o \left(1 - \frac{V}{v} \right)$$

Deslocamento da fonte

Para o observador P´ do qual a fonte se afasta

$$\lambda' = vT_0 + VT_0 = \lambda_0\left(1 + \frac{V}{v}\right)$$

Deslocamento da fonte

OBSERVADOR PARADO

Como as cristas continuam se propagando com velocidade v o número que atinge os observadores:

P => $\nu = v/\lambda$ (onda se aproximando) $\Rightarrow$ $\nu = \dfrac{v}{\lambda_o\left(1 - \dfrac{V}{v}\right)} \Rightarrow \nu = \dfrac{\nu_o}{\left(1 - \dfrac{V}{v}\right)}$

P´=> $\nu = v/\lambda'$ (onda se afastando) $\Rightarrow$ $\nu = \dfrac{v}{\lambda_o\left(1 + \dfrac{V}{v}\right)} \Rightarrow \nu = \dfrac{\nu_o}{\left(1 + \dfrac{V}{v}\right)}$

FONTE E OBSERVADOR EM MOVIMENTO

	Se aproximando	Se afastando
O movimento da fonte altera o comprimento de onda (observador parado):	$\lambda = \lambda_o\left(1-\frac{V}{v}\right)$	$\lambda = \lambda_o\left(1+\frac{V}{v}\right)$
O movimento do observador com a fonte parada, altera a frequência por ele encontrada:	$\nu = \nu_O\left(1+\frac{u}{v}\right)$	$\nu = \nu_O\left(1-\frac{u}{v}\right)$

Superposição dos efeitos

Se aproximando	Se afastando
$\nu = \nu_O \frac{\left(1+\frac{u}{v}\right)}{\left(1-\frac{V}{v}\right)}$	$\nu = \nu_O \frac{\left(1-\frac{u}{v}\right)}{\left(1+\frac{V}{v}\right)}$

Exemplo Sirene de ambulância e carro em movimento (observador)

Sirene com frequência 400Hz, v som=343m/s, vcarro=24.6m/s, vambulância=33.5m/s

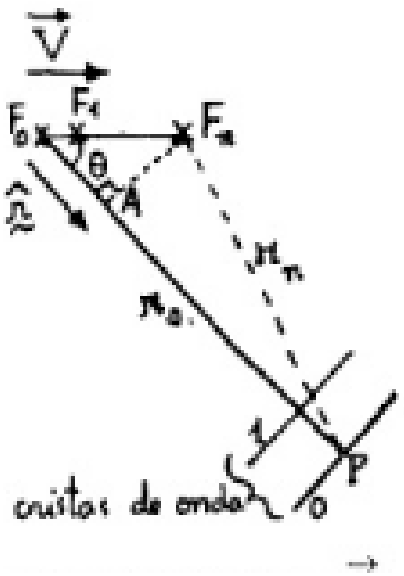
Se aproximando

$$\nu = \nu_O \frac{\left(1 + \frac{u}{v}\right)}{\left(1 - \frac{V}{v}\right)} = (400)\frac{(343 + 24.6)}{(343 - 33.5)} = 475Hz$$

Se afastando

$$\nu = \nu_O \frac{\left(1 - \frac{u}{v}\right)}{\left(1 + \frac{V}{v}\right)} = (400)\frac{(343 - 24.6)}{(343 + 33.5)} = 338Hz$$

Movimento em uma direção qualquer



Suponha que ro é suficientemente grande para que a distância da fonte ao ponto de observação ro=FoP, de forma que as ondas que atingem P sejam planas.

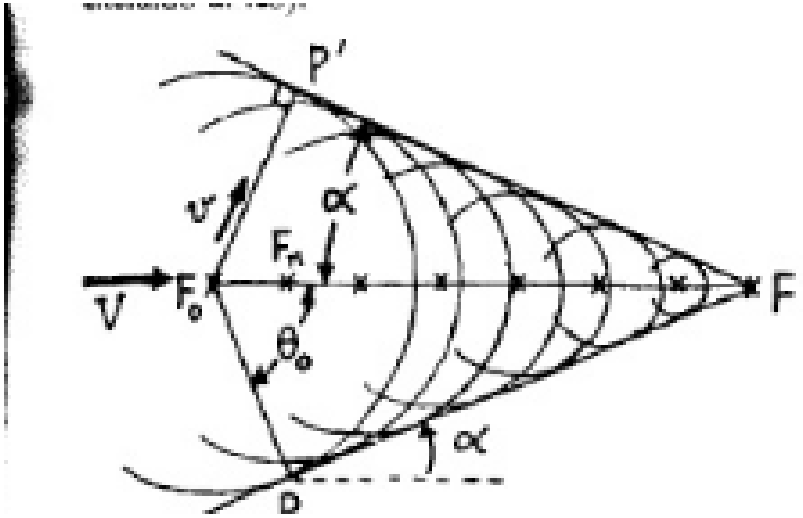
$$\vec{V}_r = (\vec{V} \cdot \hat{r})\,\hat{r} = V\cos\theta\,\hat{r}$$

Deslocamento da fonte paralelo às frentes de onda V=0, cosΘ=90º.

Componente radial (aponta na direção do observador), a frequência :

$$\nu = \frac{\nu_0}{1 - \frac{V\cos\theta}{v}}$$

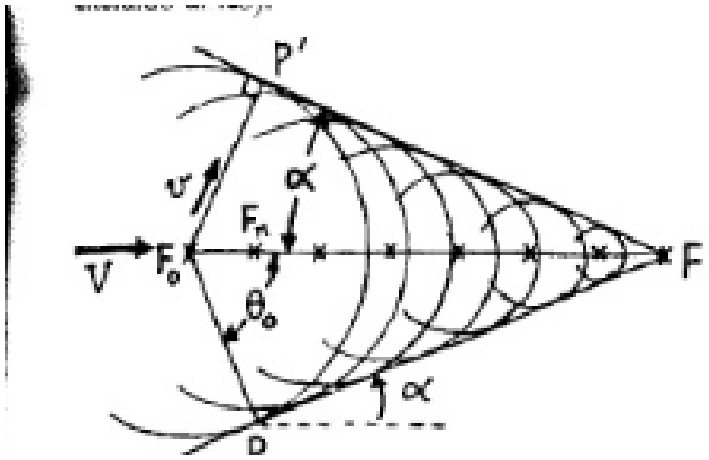
CONE DE MACH



Suponha que a fonte se mova com uma velocidade de onda supersônica, V>v e ao invés de permanecer dentro das frentes de onda geradas por ela , a fonte vai passando à frente delas.

O que acontece?

Cone de Mach



Suponha que a fonte se mova com uma velocidade de onda supersônica, V(velocidade da fonte)>v (velocidade das cristas de onda) e ao invés de permanecer dentro das frentes de onda geradas por ela , a fonte vai passando à frente delas.

Após tempo t, a frente Fo tem um raio FoP=vt e a frente que se deslocou até F com raio FoF=Vt.

Todas as ondas geradas ente F e Fo ficam contidas dentro de um cone com vértice Fe eixo FFo.

O ângulo de abertura ou ângulo de Mach pode ser obtido por: senα=v/V

Condição para o deslocamento supersônico (número de Mach): V/v>1

CONE DE MACH

Ondas em um pequeno entorno da posição F_o detectadas no ponto P, dividindo FoFn em n intervalos iguais correspondentes a intervalos de tempos iguais Δt:

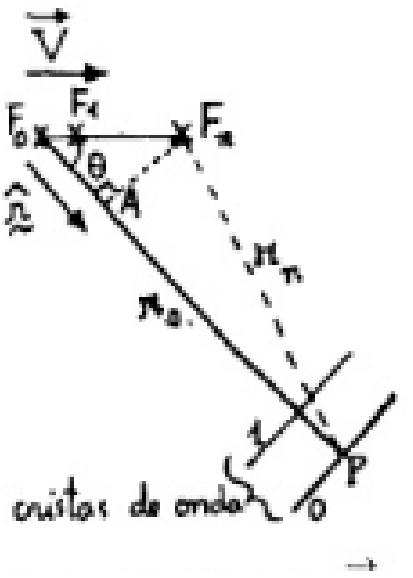
Tempo que onda emitida de Fo em t=0 chega no ponto P => $t_o = r_o / v$

A frente de onda emitida de Fn em $t = n\Delta t$ chega em P no instante:

$$t_n = n\,\Delta t + \frac{r_n}{v}$$

Instante em que foi emitida

Pergunta: quem é rn no Cone de Mach?



$$r_n \approx r_0 - \overline{F_0 A} = r_0 - \underbrace{\overline{F_0 F_n}}_{V \cdot n \Delta t} \cos\theta$$

Substituindo em:

$$t_n = n\Delta t + \frac{r_n}{v}$$

$$t_n = n\Delta t + \underbrace{\frac{r_0}{v}}_{t_0} - n\Delta t \frac{V}{v}\cos\theta$$

$$t_n - t_0 = n\Delta t\left(1 - \frac{V}{v}\cos\theta\right)$$

Cone de Mach – Avião Supersônico

Mach Cone

Em forma de cone onda de choque gerada por um avião supersônico.

EXISTE UM ÂNGULO QO EM QUE TODAS AS FRENTES DE ONDA CHEGAM EM P NO MESMO INSTANTE to, PRODUZINDO UMA ONDA DE CHOQUE QUE ATINGE O PONTO DE OBSERVAÇÃO.

$$t_n - t_0 = n\,\Delta t\left(1 - \frac{V}{v}\cos\theta\right)$$

tn=to

$$\cos\theta_0 = \frac{v}{V} = \operatorname{sen}\alpha \quad \{ \quad \theta_0 = \frac{\pi}{2} - \alpha$$

http://translate.google.com.br/translate?hl=pt-BR&langpair=en%7Cpt&u=http://bestphysicsvideos.blogspot.com/2011/01/mach-cone.html

EFEITO DOPPLER RELATIVÍSTICO (item 4.9 da apostila / Moysé vol 4 – item 6.8)

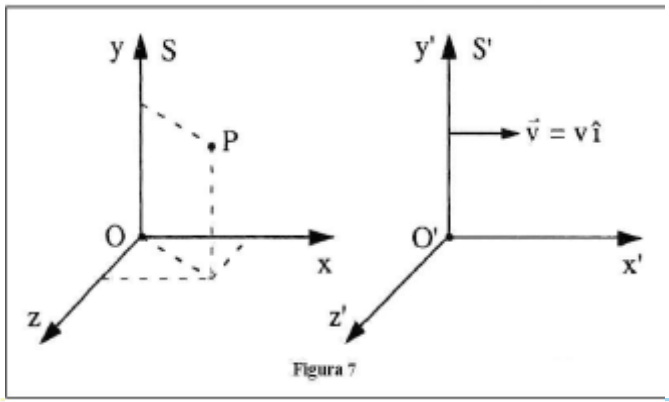


Figura 7

$$t = \gamma(v)\left(t' + \frac{vx'}{c^2}\right) = \frac{T_0}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

$$x = \gamma(v)(x' + vt) = \frac{vT_0}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

Uma fonte em repouso na origem O´ do sistema S´emite pulsos de modo periódico. Considere dois pulso emitidos: a) o primeiro é emitido em t´=0 e o segundo em t´=T0.
Estes pulsos são recebidos por um observador em repouso na origem O do Sistema S em t=0 (o primeiro) e o segundo:

=> Onde no segundo pulso x´=0 e t´=To para os observadores de S´.

Efeito Doppler Relativístico

O segundo pulso foi emitido em x:

$$x=\gamma(v)(x'+vt)=\frac{vT_0}{\sqrt{1-v^2/c^2}}$$

Será detectado pelo observador na origem de S após o intervalo de tempo

$$\Delta t=\frac{x}{c}=\frac{vT_0}{c}\frac{1}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$$

Intervalo de tempo entre recepção do primeiro pulso em x=0 (t=0) e a do segundo pulso em x=0 será : $t+\Delta t$

$$T=t+\Delta t=\frac{T_0+vT_0/c}{\sqrt{1-v^2/c^2}}=T_0\left(\frac{1+v/c}{1-v/c}\right)^{1/2}$$

Frequência

Em S´: $\nu_0 = \frac{1}{T_0}$

Em S: $\nu = \frac{1}{T} = \nu_0 \left[\frac{\left(1 - \frac{v}{c}\right)}{\left(1 + \frac{v}{c}\right)} \right]^{1/2}$

Afastando-se v>0=> ν<νO

Aproximando-se v<0=> ν>νo

Não é possível identificar quem está em movimento.

APÊNDICE AULA 21

Barco se movendo em um mar tranquilo

Suponha um mar tranquilo, com ondas em um período de 2s.

a) Barco Parado. Ondas se movendo para esquerda. As ondas atingem o barco de 2s em 2s.

b) Barco se movendo em direção das ondas. Ao ligar o cronômetro você observa que a onda vai atingi-lo em menos que 2s => frequência aumenta.

$$\nu = \nu_O \left(1 + \frac{u_{barco}}{v_{ondas}} \right)$$

a) Barco se movendo em sentido contrário as ondas => frequência diminui (período maior)

$$\nu = \nu_O \left(1 - \frac{u_{barco}}{v_{ondas}} \right)$$

Serway/Jewett; Principles of Physics, 3/e
Figure 13.20

(a)

(b)

(c)

Harcourt, Inc. items and derived items copyright © 2002 by Harcourt, Inc.

Universo em Expansão

http://www.youtube.com/watch?v=CfGknFX6Yro

Estrela se aproximando de nós (fonte se aproximando)

Estrela se afastando de nós

Evidencia do universo em expansão => deslocamento para o vermelho.

Relativamente próxima

Relativamente mais distante

Galáxia se afastando com velocidade maior=> vermelho mais evidente