Física II
4302112

Lucy V. C. Assali

Escritório: Edifício Alessandro Volta, Bloco C, sala 210.
Fone: 3091-7041 (celular:98346-3882)
e-mail: lassali@if.usp.br

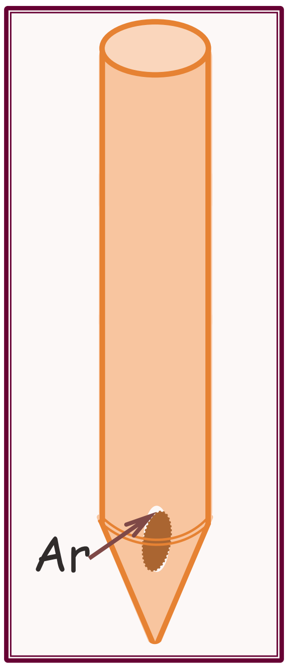
Som

$2^{\underline{a}}$ Parte

Lucy V. C. Assali

Fontes Sonoras: Colunas de Ar

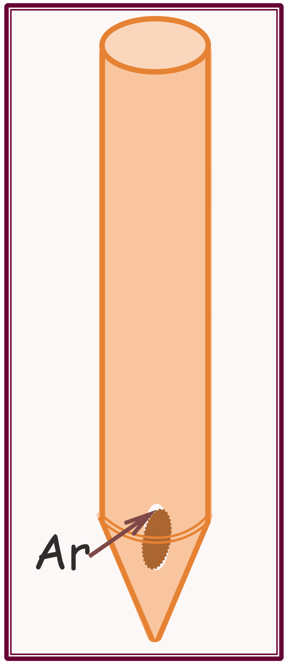
Ondas sonoras estacionárias podem ser geradas em um tubo ou coluna de ar, como aquelas geradas em instrumentos de sopro. Elas são resultado da interferência entre ondas longitudinais sonoras se propagando em sentidos contrários. A relação entre a fase da onda incidente, gerada em uma extremidade do tubo, e da onda refletida na outra extremidade depende de esta estar fechada ou aberta, como vimos na corda com extremidade fixa ou livre.



Vamos tomar um tubo cilíndrico aberto na sua extremidade, como um tubo de órgão, onde o ar soprado, através dos foles, produz a excitação da onda sonora. A entrada do ar pela abertura do tubo gera um antinodo (máximo) da onda de deslocamento. O tipo de onda estacionária que será gerada depende de a outra extremidade do tubo estar fechada ou aberta.

Lucy V. C. Assali

Fontes Sonoras: Colunas de Ar



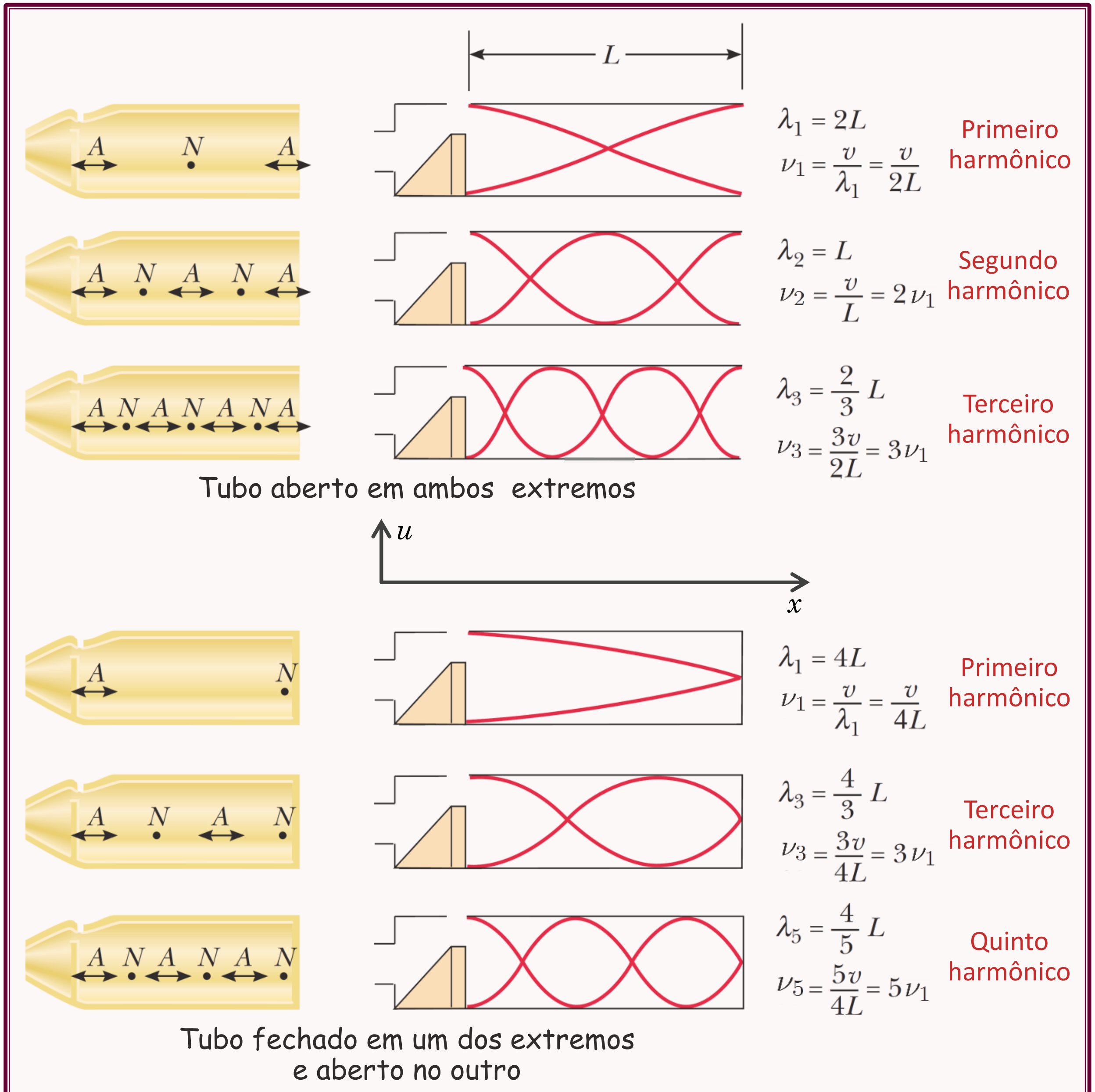
⇒ *Se outra extremidade fechada*: o deslocamento se anula nessa extremidade (nodo da onda de deslocamento) e a onda de deslocamento refletida está defasada de 180º com a onda incidente. Como a onda de pressão está em quadratura com a de deslocamento, uma extremidade fechada corresponde a um antinodo (máximo) da onda de pressão.

⇒ *Se outra extremidade aberta*: a pressão total deve permanecer constante (igual à P_{atm}) na interface tubo/meio ambiente, de modo que a variação da pressão se anula, o que corresponde a um nodo (mínimo) da onda de pressão e, portanto, a um antinodo (máximo) da onda de deslocamento (onda refletida está em fase com a incidente) .

Como no caso da corda, a interferência entre as ondas incidente e refletida dá origem a ondas estacionárias, que dão origem aos modos normais de vibração da coluna de ar contida no tubo ⇒ Ondas sonoras estacionárias

Lucy V. C. Assali

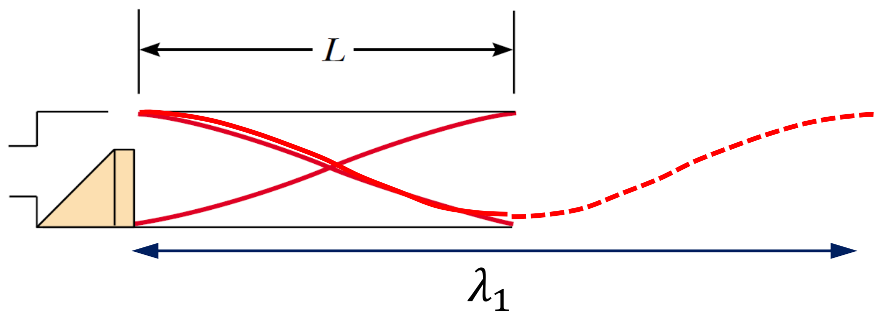
Fontes Sonoras: Colunas de Ar



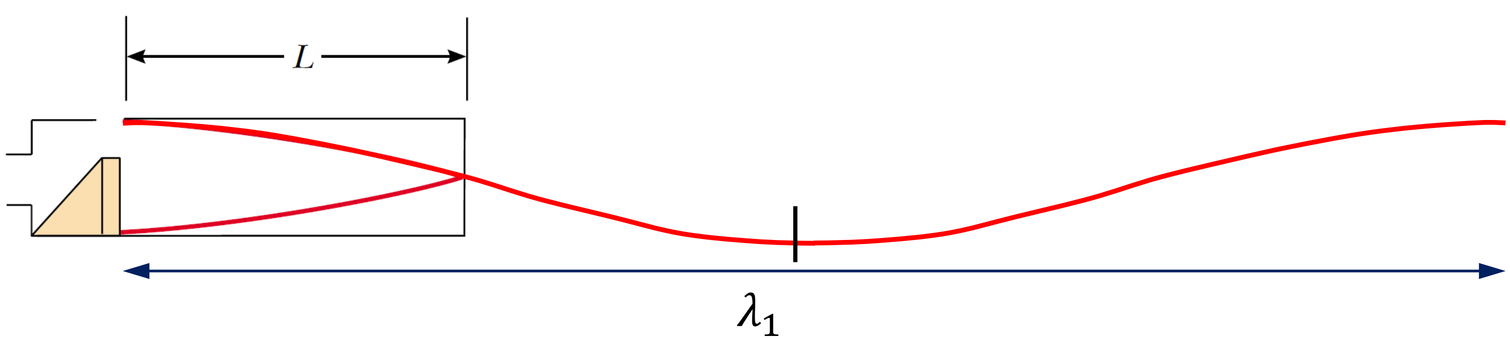
Lucy V.C. Assali

Fontes Sonoras: Colunas de Ar

Tubo aberto em ambos extremos



Tubo fechado em um dos extremos e aberto no outro

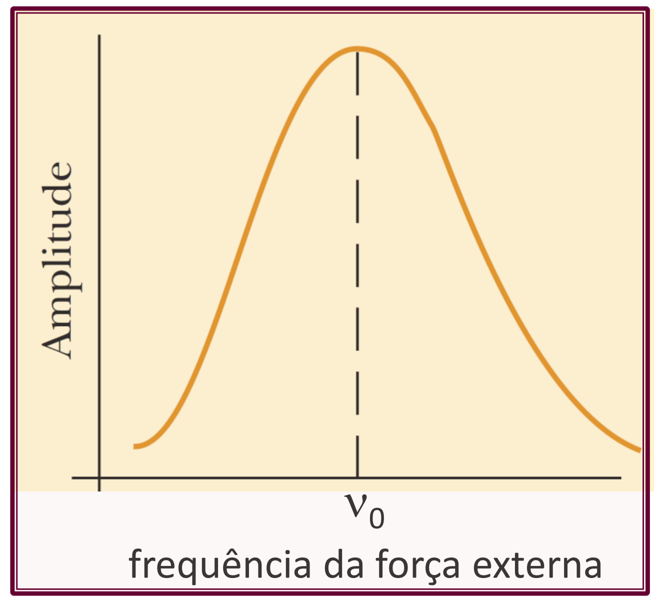


Lucy V. C. Assali

Ressonância

Vimos que um sistema é capaz de oscilar em um ou mais modos normais de vibração. Se uma força externa periódica é aplicada neste tipo de sistema, a amplitude do movimento resultante é maior do que uma das frequências naturais do sistema. Este fenômeno, já conhecido de vocês (mola-bloco, pêndulo, etc.), é chamado de ressonância. No caso de ondas estacionárias, o sistema pode ter um grande conjunto de frequências naturais e pode exibir grandes amplitudes quando direcionadas, pela força externa, em qualquer de suas frequências naturais. Essas frequências são conhecidas como frequências de ressonância.

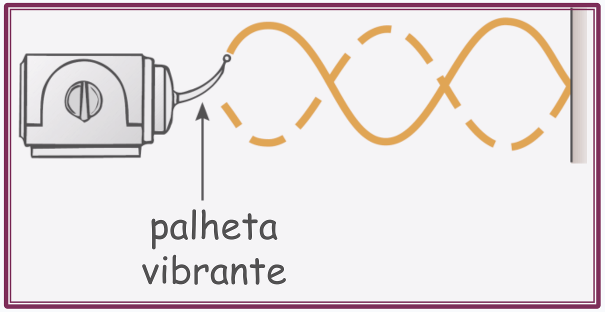
⇒ A figura mostra um gráfico da resposta (amplitude), de uma sistema oscilante, à diferentes frequências da força externa, onde uma das frequências do sistema é ν_0. A amplitude de oscilação é máxima na frequência de ressonância ν_0.



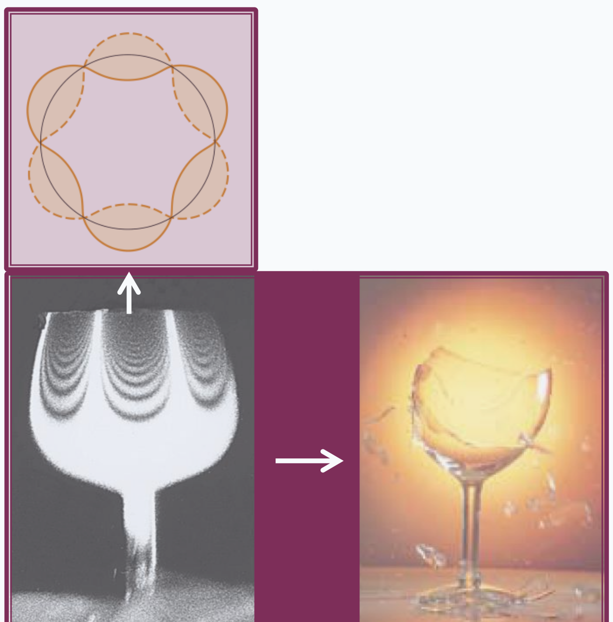
Lucy V. C. Assali

Ressonância

Exemplos de Ressonância:



Quando a frequência da palheta vibrante é igual a uma das frequências naturais da onda da corda, ondas estacionárias são produzidas e a corda oscila com uma grande amplitude. No caso da ressonância mostrada na figura, a onda gerada está em fase com a onda refletida e a corda absorve energia da palheta. Se a frequência da palheta não é igual à de um dos modos naturais da corda, então as oscilações têm pequena amplitude e exibem um perfil não estável.

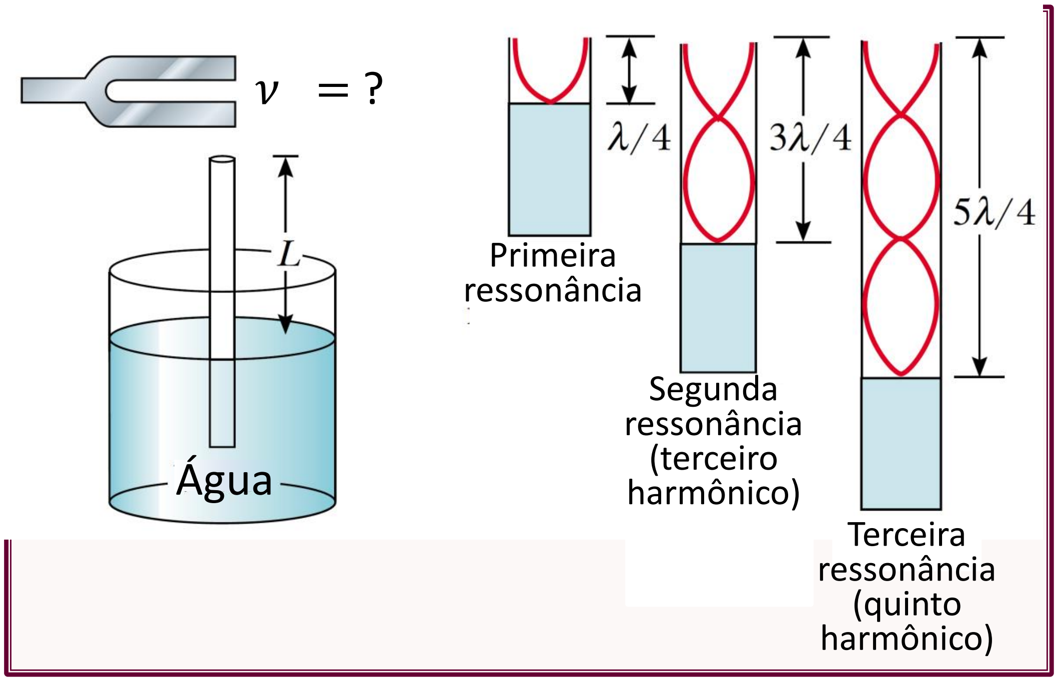


Alguns cantores conseguem quebrar uma taça de vinho mantendo, por vários segundos, uma certa frequência em sua voz. A figura mostra uma vista lateral de uma taça vibrando devido a uma onda sonora, onde está mostrado o perfil da onda estacionária na boca da taça, como vista de cima. Um número inteiro de comprimentos de onda se ajustam ao redor da circunferência da boca da taça, mostrado esquematicamente, acima da taça, para uma das frequências naturais, onde a amplitude está bastante exagerada. Se a amplitude se torna muito grande, ampliada pela ressonância com o som da voz humana, a taça quebra.

Lucy V. C. Assali

Fontes Sonoras: Colunas de Ar

A verificação experimental dos resultados mostrados para as ondas estacionárias geradas em colunas de ar pode ser feita através de uma experiência de ressonância, utilizando um aparato simples, mostrado abaixo. Um tubo vertical, aberto em ambas extremidades, é parcialmente submerso em água e um diapasão vibrando em uma frequência desconhecida é colocado perto do topo do tubo. O comprimento L da coluna de ar pode ser ajustado movendo-se o tubo verticalmente. As ondas geradas pelo diapasão são reforçadas quando L corresponde a uma das frequências ressonantes do tubo.



Apesar de a extremidade do tubo, submersa na água, ser aberta, para deixar a água entrar, a superfície da água atua como uma parede e este aparato representa um tubo fechado em uma das extremidades. Assim, a frequência fundamental é

$$\nu_1 = \mathrm{v}_s/4L$$

Lucy V. C. Assali

Fontes Sonoras: Colunas de Ar

Vamos supor que para um certo tubo, o menor valor de L para o qual ocorre um pico na intensidade do som é $L_{mín} = 9$ cm. Com isso, vamos calcular a frequência do som emitido pelo diapasão. Sabendo este valor, vamos encontrar o valor de L para as próximas duas frequências de ressonância, adotando v $=$ 343 m/s para a velocidade do som no ar.

$$\boxed{\nu = \frac{v}{4L} = \frac{343}{4(0,09)} = 953 \text{ Hz}}$$

frequência da onda sonora emitida pelo diapasão

$$\boxed{\lambda = 4L = 4(0,09) = 0,36 \text{ m}}$$

comprimento de onda da onda sonora emitida pelo diapasão

$$\boxed{L = \frac{3\,\lambda}{4} = \frac{3(0,36)}{4} = 0,27 \text{ m}}$$

comprimento do tubo de ar para se obter a segunda frequência de ressonância

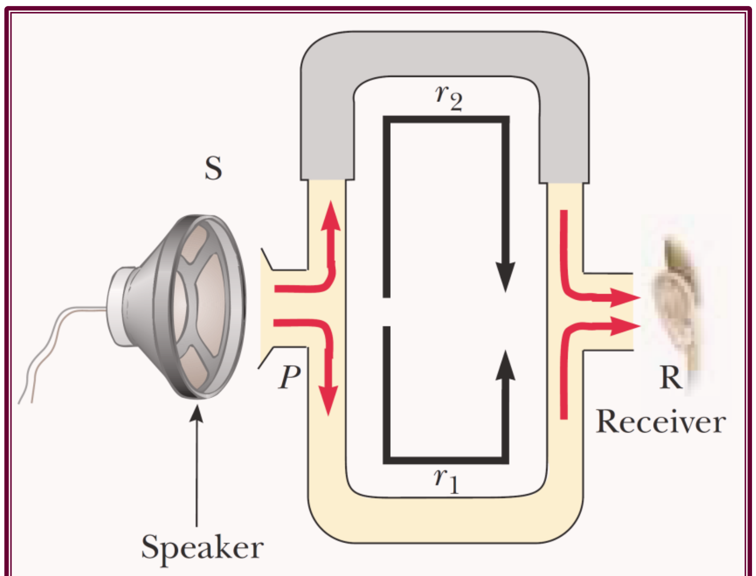
$$\boxed{L = \frac{5\,\lambda}{4} = \frac{5(0,36)}{4} = 0,45 \text{ m}}$$

comprimento do tubo de ar para se obter a terceira frequência de ressonância

Lucy V. C. Assali

Interferência de Ondas

Um dispositivo acústico simples para demonstrar o fenômeno de interferência para ondas sonoras está ilustrado na figura. Uma onda sonora emitida pelo *speaker* (S) se propaga pelo tubo e é separada em dois. As duas ondas, que se superpõem no lado oposto, são detectadas pelo *receiver* (R). O tamanho do caminho r_1 é fixo e o do r_2 pode ser variado (deslocamento do tubo em formato de U) . Quando a diferença de caminho $\Delta r = |r_2 - r_1| = n\lambda \;\; (n = 0,1,2,\cdots)$, as duas ondas chegam em fase em R, para qualquer t, interferindo construtivamente, produzindo um máximo de intensidade. Se r_2 é ajustado tal que $\Delta r = n\lambda/2$ (n ímpar), as duas ondas estarão defasadas exatamente de π, interagindo destrutivamente, e nenhum som é detectado em R. Esta experiência demonstra que a diferença de fase entre duas ondas pode existir, mesmo que elas tenham sido geradas pela mesma fonte, quando elas se propagam através de caminhos de comprimentos diferentes.



Lucy V. C. Assali

Interferência de Ondas

É usual expressar a diferença de caminho em termos da fase φ entre as duas ondas. Como a diferença de um comprimento de onda corresponde a uma fase de 2π, então podemos escrever

$$\frac{\varphi}{2\pi} = \frac{\Delta r}{\lambda} \Longrightarrow \Delta r = \frac{\varphi}{2\pi}\,\lambda$$

Usando a noção de diferença de caminho percorrido pelas ondas, podemos expressar as condições para interferência construtiva e interferência destrutiva. Se a diferença de caminho é um múltiplo de $\lambda/2$, então a fase é $\varphi = 2n\pi$ $(n = 0,1,2,\cdots)$ e a interferência é <u>construtiva</u>. Se a diferença de caminho for um múltiplo ímpar de $\lambda/2$, então $\varphi = (2n+1)\pi$ $(n = 0,1,2,\cdots)$ e a interferência é <u>destrutiva</u>.

Interferência Construtiva

$$\boxed{\varphi = 2n\pi \Longleftrightarrow \Delta r = (2n)\,\frac{\lambda}{2}}$$

Interferência Destrutiva

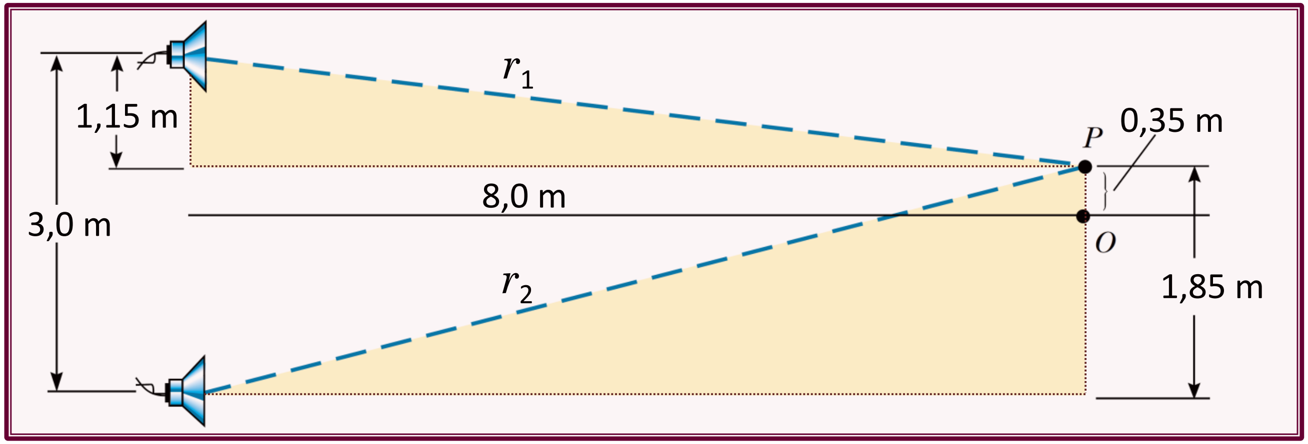
$$\boxed{\varphi = (2n+1)\pi \Longleftrightarrow \Delta r = (2n+1)\,\frac{\lambda}{2}}$$

$$(n = 0, 1, 2, 3, \ldots)$$

Lucy V. C. Assali

Interferência de Ondas

Exemplo: Dois alto falantes estão separados pela distância de 3,0 m e estão ligados em uma mesma fonte oscilante. Um ouvinte, originalmente na posição O, desloca-se para o ponto P e alcança o primeiro mínimo de intensidade do som. Qual é a frequência da fonte? (usar $\mathrm{v}_{som} = 343$ m/s)



Pela geometria da figura podemos encontrar os valores de r_1 e r_2:

$$r_1 = \sqrt{(8,0)^2 + (1,15)^2} = 8,08 \text{ m} \qquad r_2 = \sqrt{(8,0)^2 + (1,85)^2} = 8,21 \text{ m}$$

$$\Delta r = r_2 - r_1 = 0,13 = \frac{\lambda}{2} \Longrightarrow \lambda = 0,26 \text{ m}$$

primeiro mínimo

$$\boxed{\nu = \frac{v}{\lambda} = \frac{343}{0,26} = 1,3 \text{ kHz}}$$

Lucy V. C. Assali

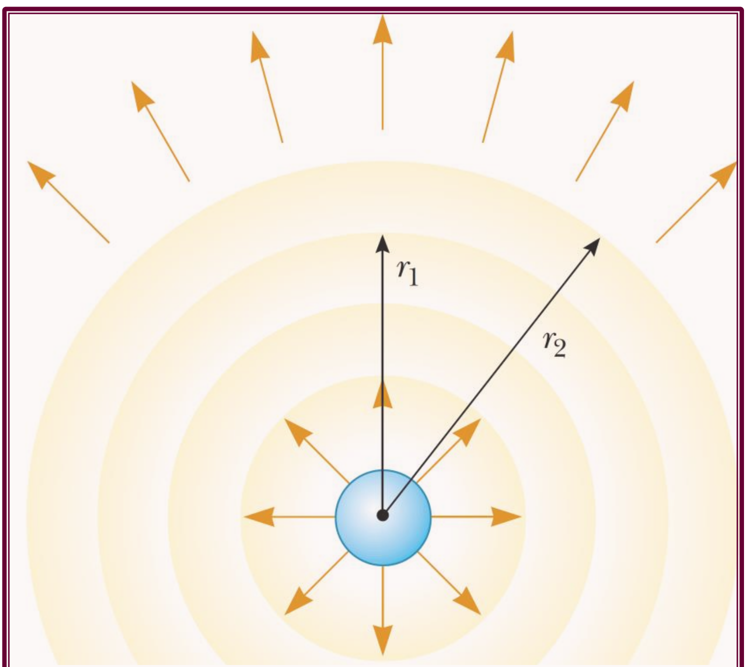
Ondas Esféricas e Planas

Se um corpo esférico ou puntiforme oscila de modo que seu raio varia harmonicamente com o tempo, uma onda sonora esférica é produzida, propagando energia igualmente em todas as direções. Sabendo a potência média emitida pelo corpo ($\bar{P}$), a intensidade da onda é

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

Como $\bar{P}$ é o mesmo para qualquer superfície esférica centrada na fonte, as intensidades I_1 e I_2 para as distâncias r_1 e r_2 são

$$I_1 = \frac{\bar{P}}{4\pi r_1^2} \qquad \text{e} \qquad I_2 = \frac{\bar{P}}{4\pi r_2^2}$$



Desse modo, a razão entre as intensidades fica

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

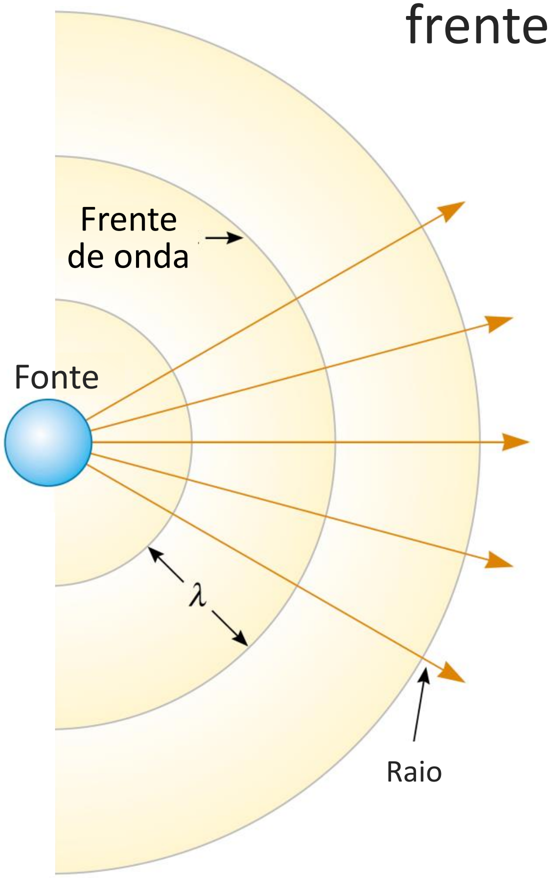
mostrando que a amplitude da onda varia com $1/r$. Assim, a função de onda que representa uma onda esférica harmônica progressiva tem a forma

$$\phi(\vec{r}, t) = \frac{A}{r}\cos(\vec{k}\cdot\vec{r} - \omega t + \delta)$$

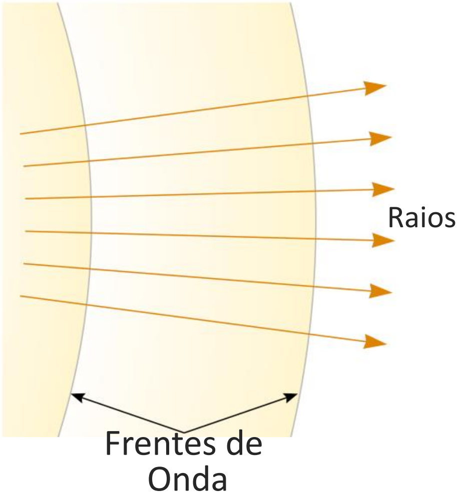
Lucy V. C. Assali

Ondas Esféricas e Planas

É conveniente representar ondas esféricas como uma série de arcos círculares concêntricos com a fonte, onde cada arco representa uma superfície onde a fase da onda é constante e é chamado de frente de onda. A distância entre duas frentes de onda adjacentes é o comprimento de onda e as linhas radiais apontando para fora da fonte são chamadas de raios.



Uma pequena porção da frente de onda, longe da fonte, mostra que os raios que passam através da frente de onda são quase paralelos entre si, e a frente de onda é quase planar.



Lucy V. C. Assali

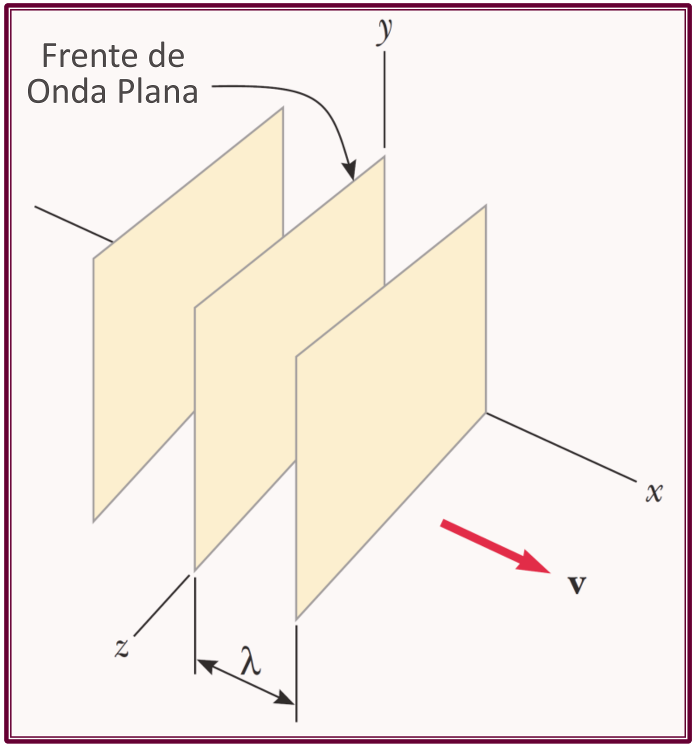
Ondas Esféricas e Planas

Para distâncias grandes da fonte, quando comparadas com o comprimento de onda, podemos aproximar a frente de onda por um plano. Qualquer pequena porção da onda esférica, longe da fonte, pode ser considerada como uma onda plana. A propagação de uma onda plana pode ser representada pelas frentes de onda paralelas entre si e representadas no eixo cartesiano.

Assumindo a direção de propagação no eixo x, as frentes de onda planas são paralelas ao plano yz . Neste caso, a função de onda depende só de x e t e tem a forma idêntica à de uma onda progressiva em uma dimensão

$$\phi(x,t) = A\cos(kx - \omega t + \delta)$$

e a intensidade é a mesma para todos os pontos no plano que representa a frente de onda da onda plana.



Lucy V. C. Assali

Ondas Esféricas e Planas

Exemplo: Uma fonte sonora puntiforme emite ondas com uma potência média de 80 W. Encontrar a intensidade a uma distância de 3,0 m da fonte e a distância para a qual o nível de intensidade sonora é 40 db.

$$\boxed{I = \frac{\overline{P}}{4\pi r^2} = \frac{80}{4\pi(3)^2} = 0,707\ \mathrm{W/m^2}}$$

$$\beta = 10\log\left(\frac{I}{I_0}\right) = 40\ \mathrm{db},\ \text{onde}\ I_0 = 10^{-12}\ \mathrm{W/m^2} \Longrightarrow \log I - \log(10^{-12}) = \frac{40}{10}$$

$$\log I = 4 - 12 = -8 \Longrightarrow I = 10^{-8}\ \mathrm{W/m^2} \quad \text{e}$$

$$\boxed{r = \sqrt{\frac{\overline{P}}{4\pi I}} = \sqrt{\frac{80}{4\pi\times 10^{-8}}} = 2,52\times 10^{4}\ \mathrm{m}}$$

Observação: Na distância de 3,0 m da fonte o nível de intensidade sonora é de aproximadamente 120 db

Lucy V. C. Assali

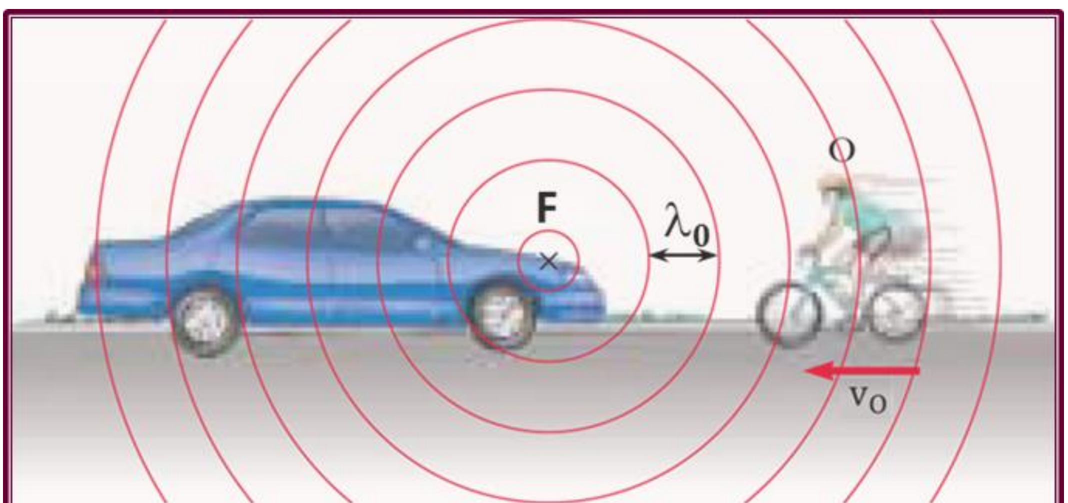
Ondas Sonoras: Efeito Doppler

A sirene de uma ambulância ou o apito de um trem soam mais agudos quando estão se aproximando (maior frequência) e mais graves (menor frequência) quando estão se afastando do observador. Para velocidades menores que a velocidade do som este efeito é chamado de **Efeito Doppler**

1) Fonte (**F**) em repouso em relação ao meio (ar) e observador (**O**) em movimento com velocidade v_O. O número de cristas de onda emitidas, por unidade de tempo, pela buzina do carro é $\nu_0 = 1/\tau = v_s/\lambda_0$

⇒ Se **O** está se aproximando de **F**, **O** detecta um número de cristas de onda, por unidade de tempo, diferente, pois no intervalo de tempo unitário, **O** percorreu uma distância v_O. Assim, **O** detecta mais cristas de onda, tal que

$$\nu = \frac{v_O}{\lambda_0} + \frac{v_s}{\lambda_0}$$



levando à

$$\boxed{\nu = \nu_0 \left[1 + \frac{v_O}{v_s}\right] > \nu_0}$$

Lucy V. C. Assali

Ondas Sonoras: Efeito Doppler

$\Rightarrow$ Se **O** está se afastando de **F**, **O** detecta menos cristas de onda, tal que

$$\nu = -\frac{\mathrm{v}_O}{\lambda_0} + \frac{\mathrm{v}_s}{\lambda_0}$$

$$\Downarrow$$

$$\boxed{\nu = \nu_0 \left[1 - \frac{\mathrm{v}_O}{\mathrm{v}_s}\right] < \nu_0}$$

Unindo os dois resultados temos que, se a <u>fonte está em repouso</u> e o <u>observador em movimento, em relação ao meio (ar)</u>, com velocidade v_O, a frequência detectada pelo observador é

$$\boxed{\nu = \nu_0 \left[1 \pm \frac{\mathrm{v}_O}{\mathrm{v}_s}\right]}$$

$+$ se aproximando

$-$ se afastando

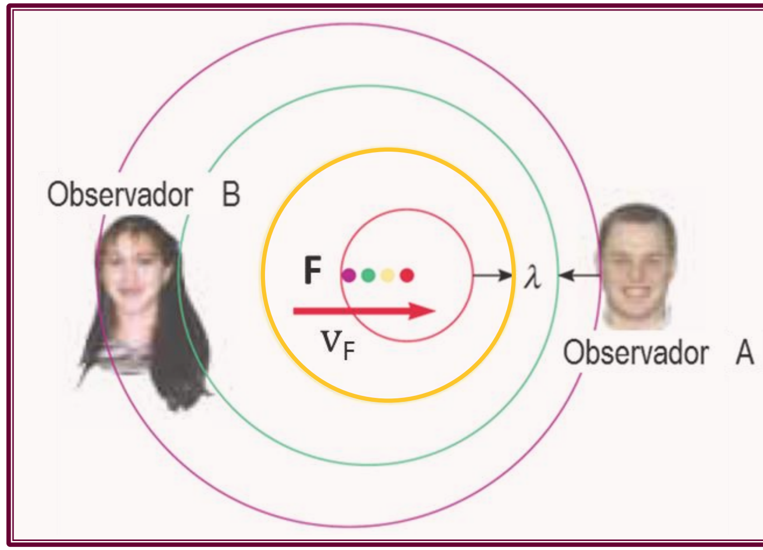
Ondas Sonoras: Efeito Doppler

2) Observador em repouso em relação ao meio (ar) e fonte (**F**) em movimento com velocidade $\mathrm{v_F}$

$\Rightarrow$ Observador A em repouso em relação ao meio (ar): Se T_0 for o intervalo de tempo entre duas cristas, então, neste intervalo de tempo, a fonte terá se deslocado $\mathrm{v_F}\,T_0$ e

$$\lambda = \mathrm{v}_s T_0 - \mathrm{v_F} T_0 = \lambda_0 \left[1 - \frac{\mathrm{v}_F}{\mathrm{v}_s}\right] < \lambda_0$$

$$\boxed{\nu = \frac{\nu_0}{\left[1 - \frac{\mathrm{v}_F}{\mathrm{v}_s}\right]} > \nu_0}$$



$\Rightarrow$ Observador B em repouso em relação ao meio (ar): a frequência detectada é menor que a emitida pela fonte e

$$\boxed{\nu = \frac{\nu_0}{\left[1 + \frac{\mathrm{v}_F}{\mathrm{v}_s}\right]} < \nu_0}$$

Lucy V. C. Assali

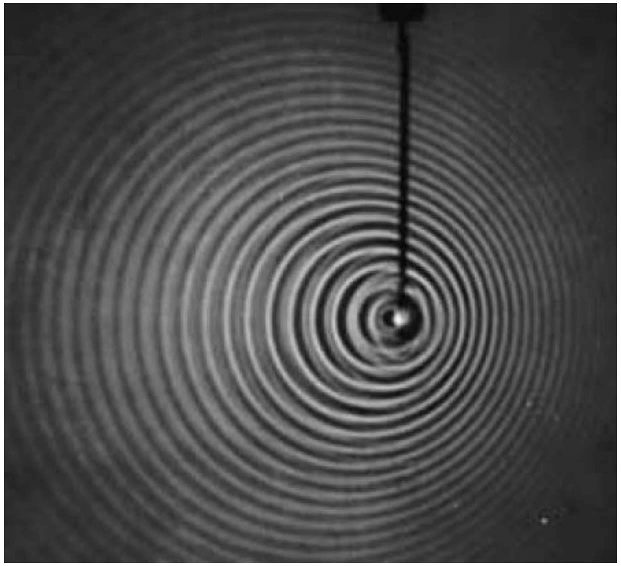
Ondas Sonoras: Efeito Doppler

Unindo os dois resultados temos que, se o observador está em repouso e a fonte em movimento em relação ao meio (ar), com velocidade $\mathrm{v_F}$, a frequência detectada pelo observador é

$$\boxed{\nu = \frac{\nu_0}{\left[1 \mp \frac{\mathrm{v_F}}{\mathrm{v}_s}\right]}}$$

$-$ se aproximando

$+$ se afastando



Efeito Doppler na água, com fonte se movendo para a direita com velocidade v

Lucy V. C. Assali

Ondas Sonoras: Efeito Doppler

Fonte (v_F) e Observador (v_O) em movimento em relação ao meio (ar)

$$\boxed{\nu = \nu_0 \left\{ \frac{\left[1 \pm \frac{v_O}{v_s}\right]}{\left[1 \mp \frac{v_F}{v_s}\right]} \right\}}$$

ou

$$\boxed{\nu = \nu_0 \left\{ \frac{v_s \pm v_O}{v_s \mp v_F} \right\}}$$

$v_s \Longrightarrow$ velocidade do som no meio

$v_O \Longrightarrow$ velocidade do observador

$v_F \Longrightarrow$ velocidade da fonte

sinais superiores: aproximação

sinais inferiores: afastamento

Lucy V. C. Assali

Ondas Sonoras: Cone de Mach

Aviões viajando com velocidades supersônicas produzem ondas de choque, que são responsáveis pelo barulho do estrondo sônico (*sonic boom*) que ouvimos. A onda de choque contém uma grande energia concentrada na superfície do cone, que corresponde às grandes variações de pressão.

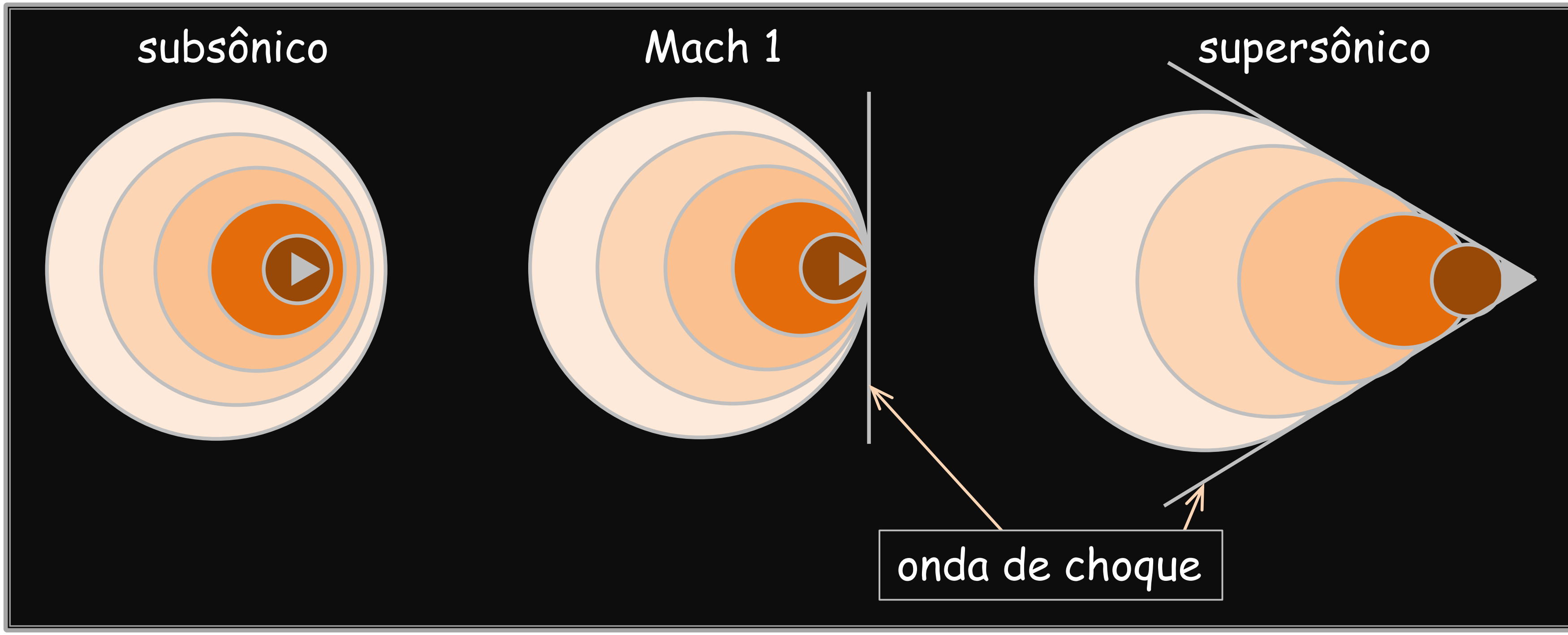
⇒ Se $V_{avião} < \mathrm{v}_{som}$ (subsônica): as ondas de pressão viajam mais rápido, espalhando-se para todos os lados, inclusive à frente do avião. Assim, o som vai sempre na frente.

⇒ Se $V_{avião} = \mathrm{v}_{som}$ (Mach 1): $V_{avião}$ = velocidade de deslocamento de suas ondas de pressão, ele estará comprimindo o ar à sua frente e acompanhando as ondas de pressão com a mesma velocidade de sua propagação, resultando num acúmulo de ondas no nariz do avião. Se o avião persistir com essa velocidade exata por algum tempo, à sua frente se formaria uma verdadeira muralha de ar, pois todas as ondas formadas ainda continuariam no mesmo lugar em relação ao avião. Esse fenômeno é conhecido como Barreira Sônica.

⇒ Se $V_{avião} > \mathrm{v}_{som}$ (supersônica): Se o avião continuar a acelerar, ultrapassando a velocidade do som, ele estará deixando para trás as ondas de pressão que vai produzindo. Um avião só pode atingir velocidades supersônicas se, entre outras coisas, sua aceleração permitir uma passagem rápida pela velocidade de Mach 1, evitando a formação da Barreira Sônica.

Lucy V. C. Assali

Ondas Sonoras: Cone de Mach



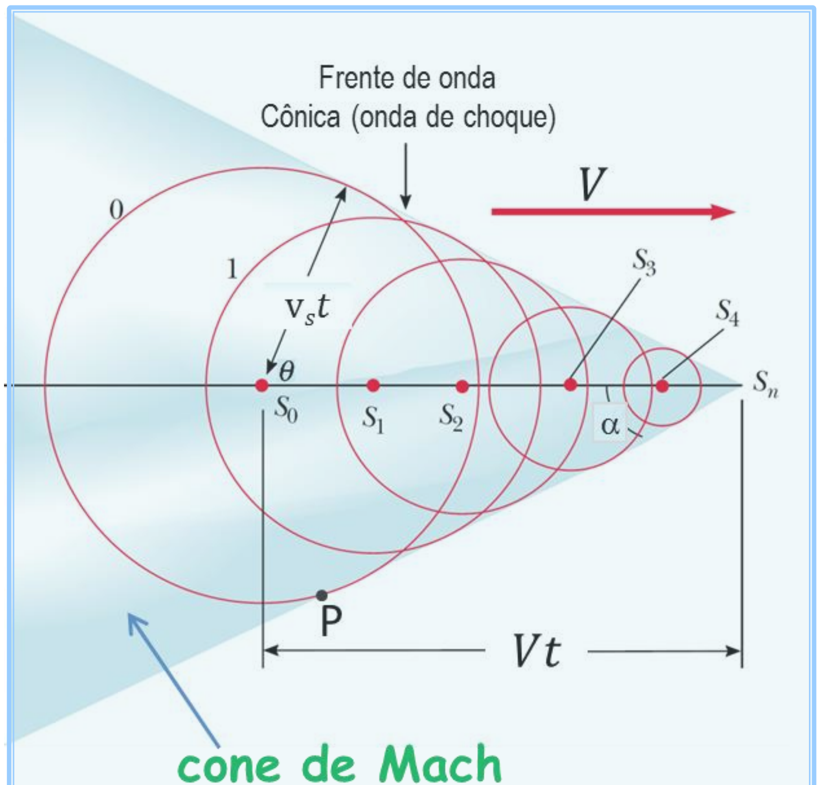
Quando o ar em fluxo supersônico é comprimido, sua pressão e densidade aumentam, formando uma onda de choque. Em vôo supersônico (com velocidades acima de Mach 1), o avião produz inúmeras ondas de choque, sendo mais intensas as que se originam no nariz do avião, nas partes dianteira e posterior das asas e na parte terminal da fuselagem.

Lucy V. C. Assali

Ondas Sonoras: Cone de Mach

Fonte com velocidade supersônica: $V > v_s$

Os círculos, na figura, representam as frentes de onda esféricas emitidas pela fonte, em vários instantes, durante o seu movimento. A fonte passa à frente das frentes de onda por ela geradas. Em $t = 0$ a fonte está em S_0 e em um instante posterior t, a frente de onda gerada e centrada em S_0 alcança o raio $v_s t$, enquanto nesse mesmo intervalo de tempo a fonte viaja a distância Vt alcançando a posição S_n , onde a frente de onda tem raio zero.



A linha desenhada, de S_n até a frente de onda centrada em S_0, é tangente a todas as frentes de onda geradas em tempos intermediários. Assim, vemos que o envelope dessas frentes de ondas é um cone cuja metade do ângulo do ápice (α), conhecido como **ângulo de Mach**, é dado por

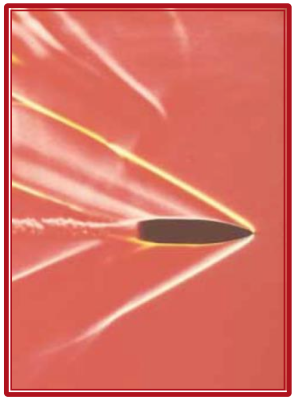
$$\operatorname{sen}\alpha = \frac{v_s t}{Vt} = \frac{v_s}{V}$$

Lucy V. C. Assali

Ondas Sonoras: Cone de Mach

A razão V/v_s é conhecida como **número de Mach** e a frente de onda cônica produzida quando $V > \mathrm{v}_s$ (velocidades supersônicas) é conhecida como onda de choque.

O análogo ao cone de Mach, nas ondas sobre a superfície de um lago, é a esteira em forma de V deixada por um barco com velocidade maior que a velocidade das ondas da superfície da água.

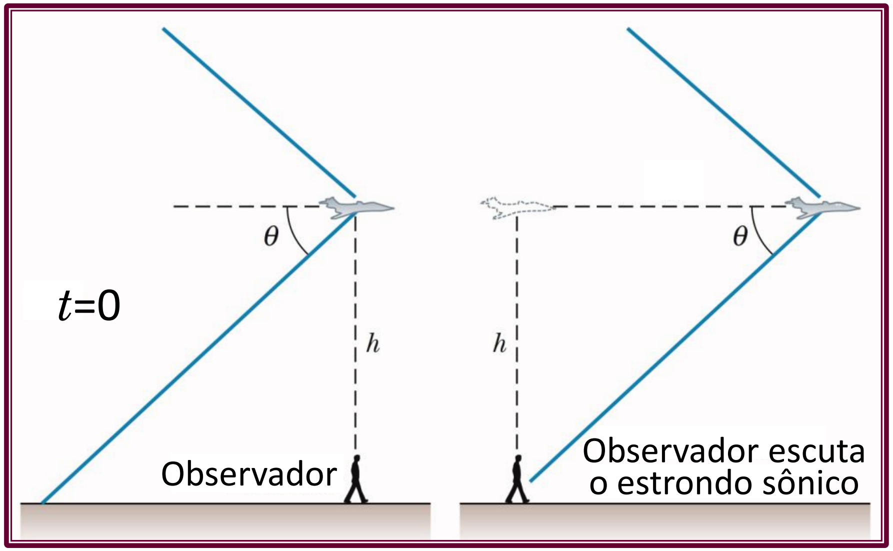


Fotografia estromboscópica de uma bala movendo-se com velocidade supersônica através do ar quente acima de uma vela, onde observa-se a onda de choque nas proximidades da bala.

Lucy V. C. Assali

Ondas Sonoras: Cone de Mach

As ondas de choque geradas por um avião em vôo supersônico atingirão o solo depois da passagem do avião que as está produzindo, pois esse é mais veloz. Um observador no solo ouvirá um forte estampido assim que as ondas de choque o alcançarem. Esse estampido é conhecido como 'estrondo sônico', e sua intensidade depende de vários fatores, tais como dimensões do avião, forma do avião, velocidade do vôo e altitude. Esse fenômeno pode, em certas circunstâncias, ser forte o suficiente para produzir danos materiais no solo, como quebra de vidros, rachaduras em paredes, muros e outros estragos. Essas possibilidades limitam a operação de vôos em velocidades supersônicas sobre os continentes.



Lucy V.C. Assali