ONDAS II

Princípio da superposição

Duas ondas :

$y_1(x,t)$ **e** $y_2(x,t)$

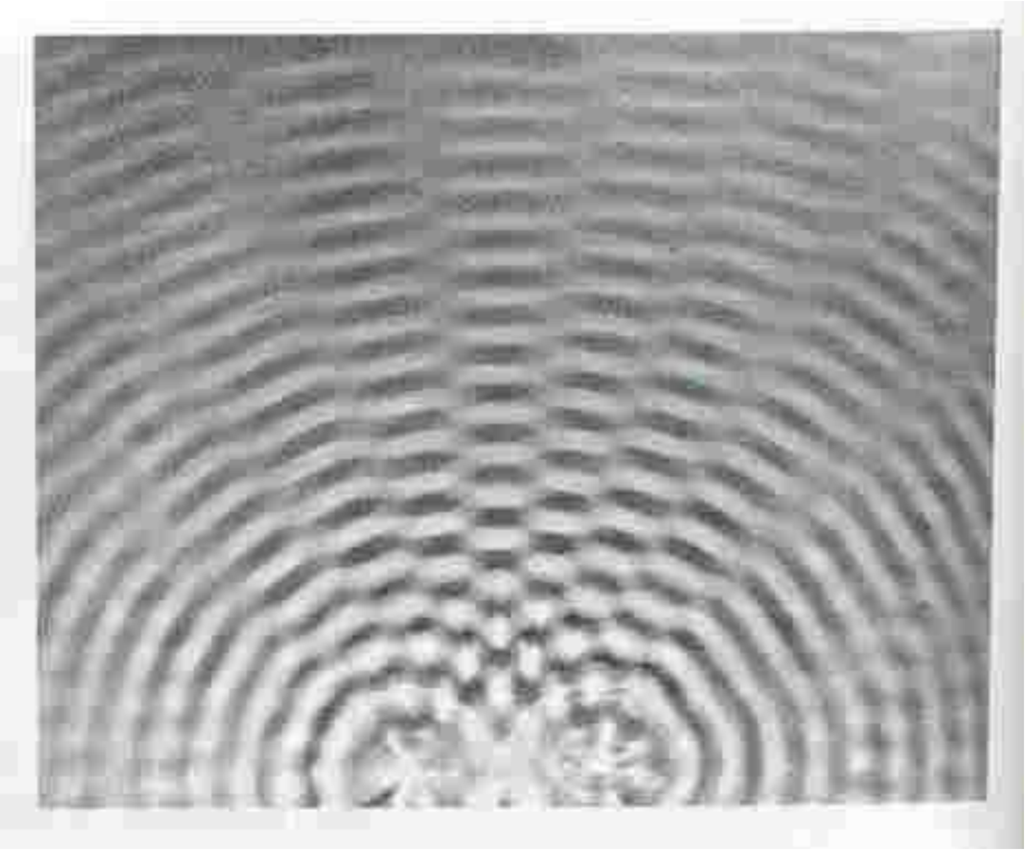
SE as duas ondas existem numa corda simultaneamente,

Onda resultante

$$y(x,t) = y_1(x,t) + y_2(x,t)$$

Consequência direta do fato da
Equação da Onda ser uma Equação Diferencial Linear.

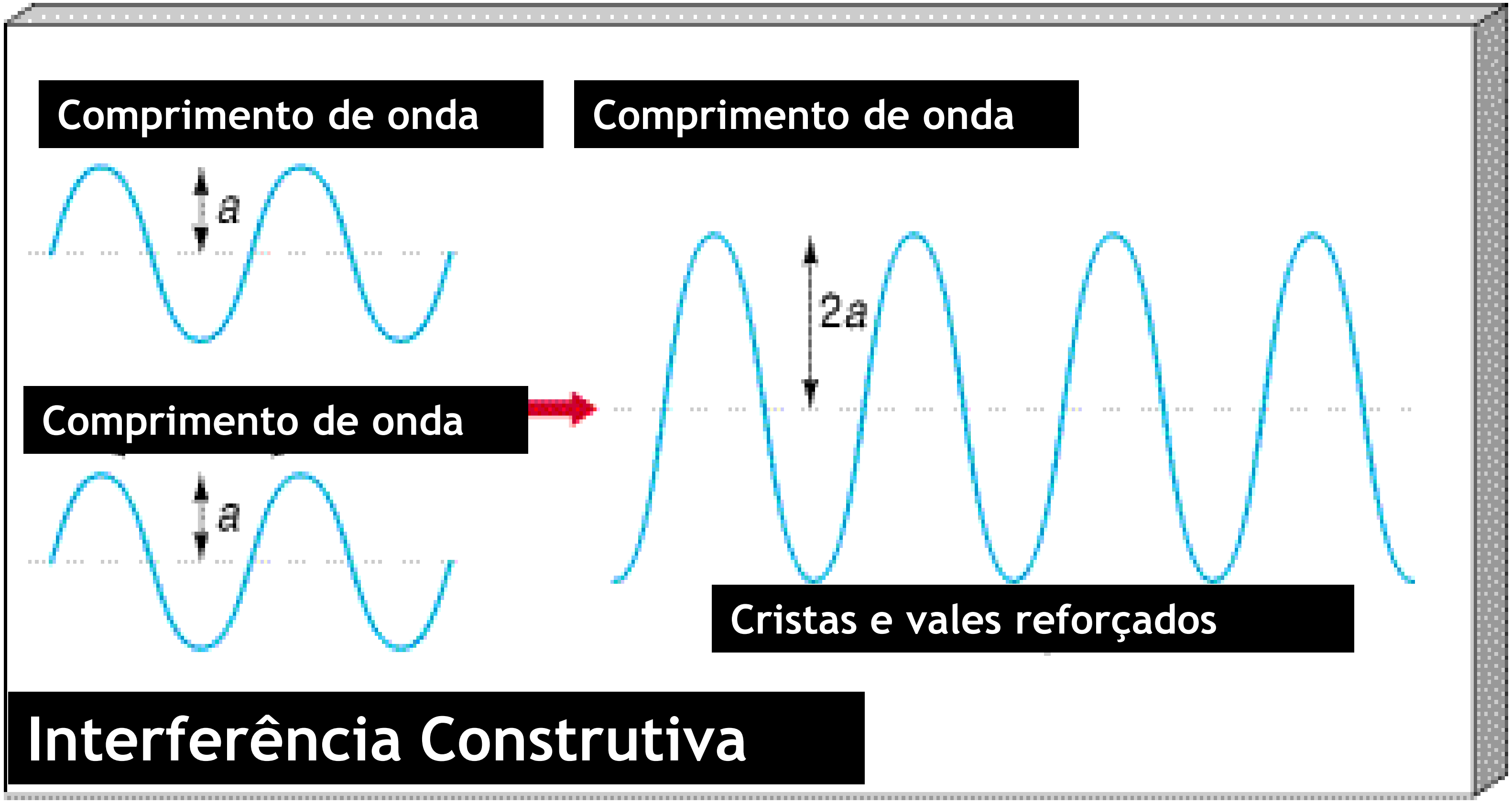
Interferência



Duas ondas na superfície da água

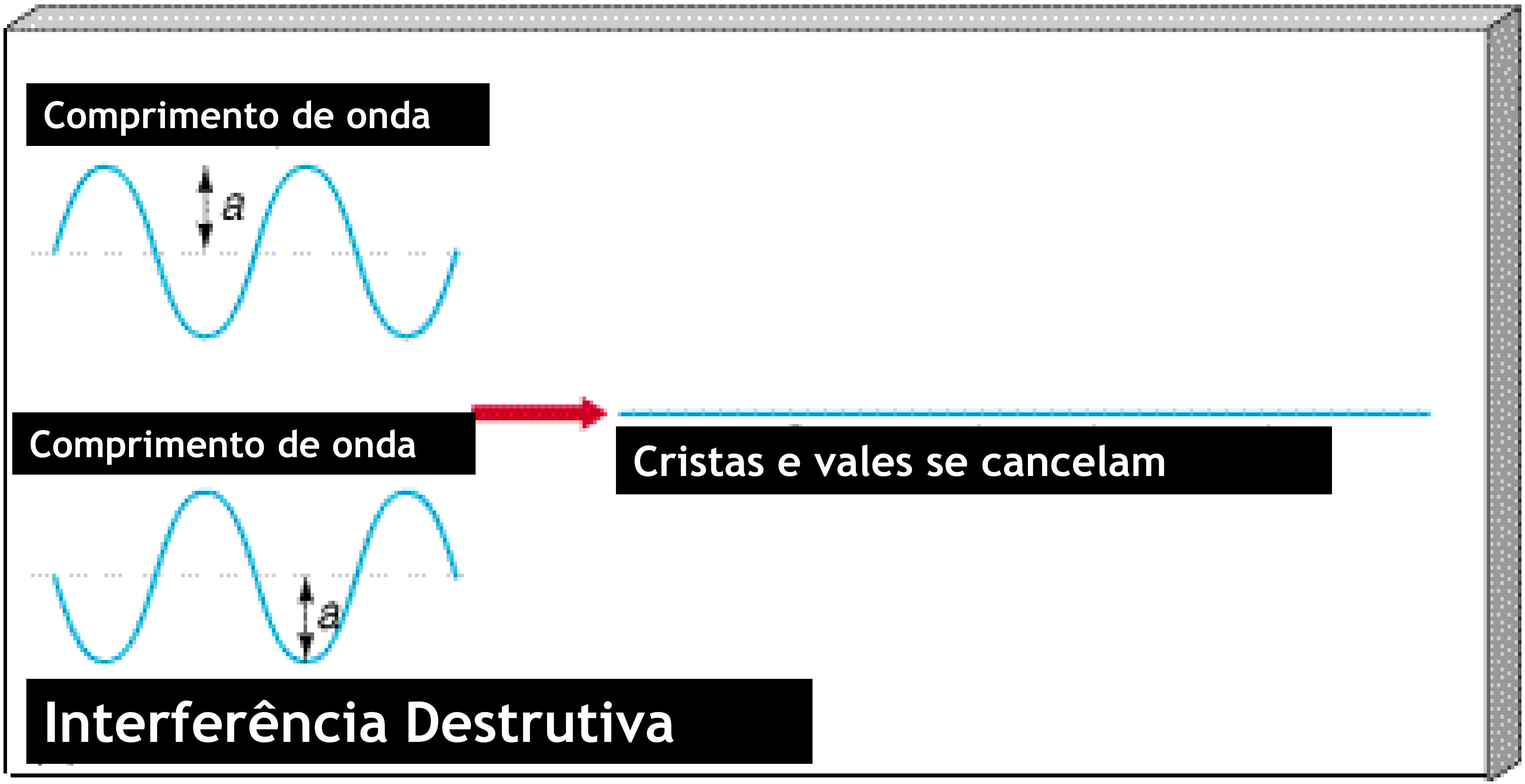
Interferência construtiva

Diferença de fase entre as duas ondas = ZERO



INTERFERÊNCIA DESTRUTIVA

Diferença de fase entre as duas ondas = ½ λ



Interferência

$$y_1(x,t) = A\sin(kx - \omega t)$$

$$y_2(x,t) = A\sin(kx - \omega t + \phi)$$

$$y(x,t) = y_1(x,t) + y_2(x,t) = A\sin(kx - \omega t) + A\sin(kx - \omega t + \phi)$$

ϕ**: Diferença de fase entre as ondas**

$$sen\,a + sen\,b = 2\cos\left(\frac{a-b}{2}\right)\sin\left(\frac{a+b}{2}\right)$$

$$y(x,t) = 2A\cos\left(\frac{\phi}{2}\right)\sin\left(kx - \omega t + \frac{\phi}{2}\right)$$

Interferência

amplitude

fase

$$y(x,t) = 2A\cos\left(\frac{\phi}{2}\right)\sin\left(kx - \omega t + \frac{\phi}{2}\right)$$

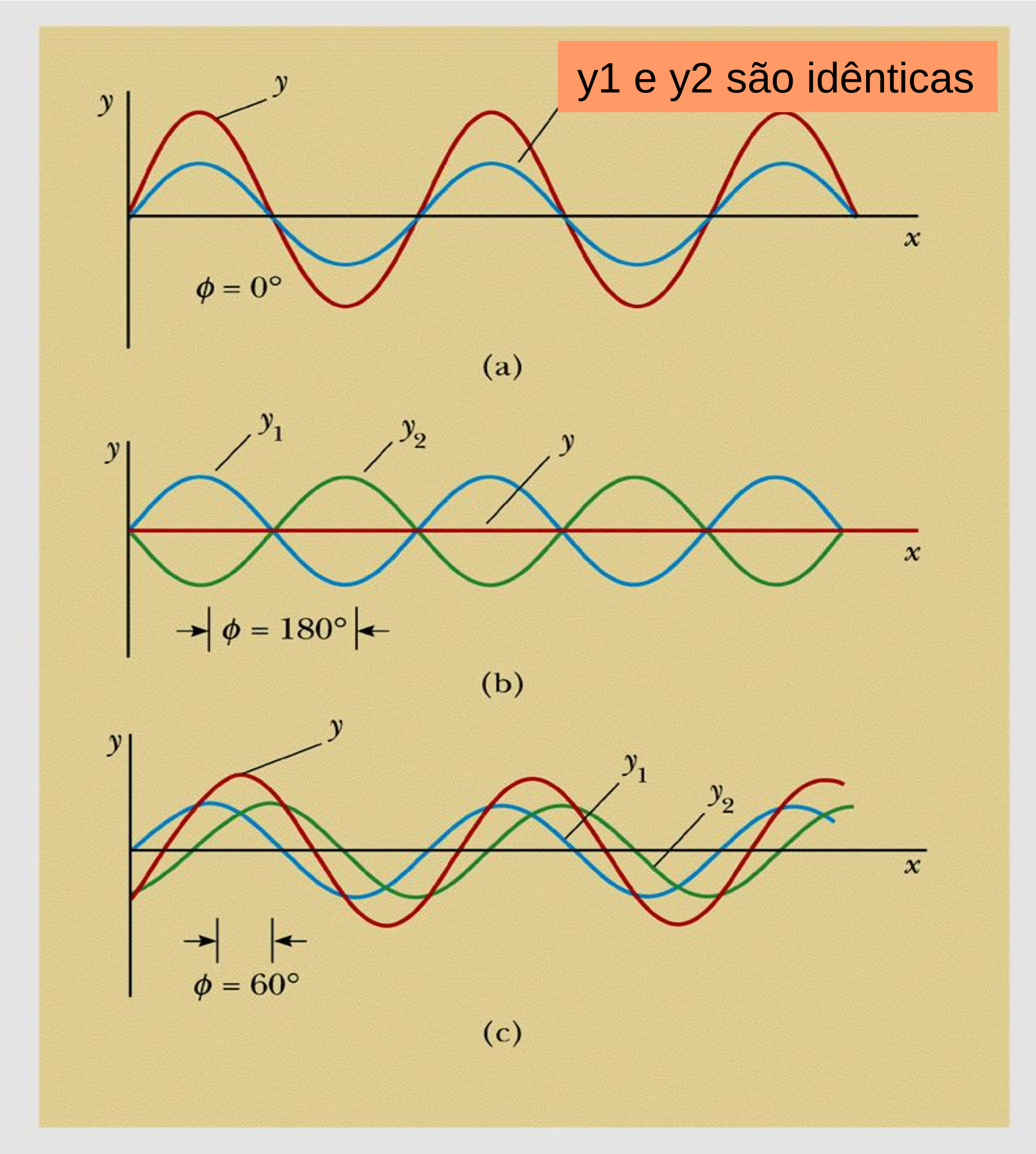
SE $\phi = 0 \rightarrow$ Amplitude = 2A

Interferência construtiva

Se $\phi = \pi \rightarrow$ Amplitude = 0

Interferência destrutiva

Interferência



Interferência construtiva

Interferência destrutiva

Interferência intermediária

Interferência

ONDAS LUMINOSAS

Construtiva

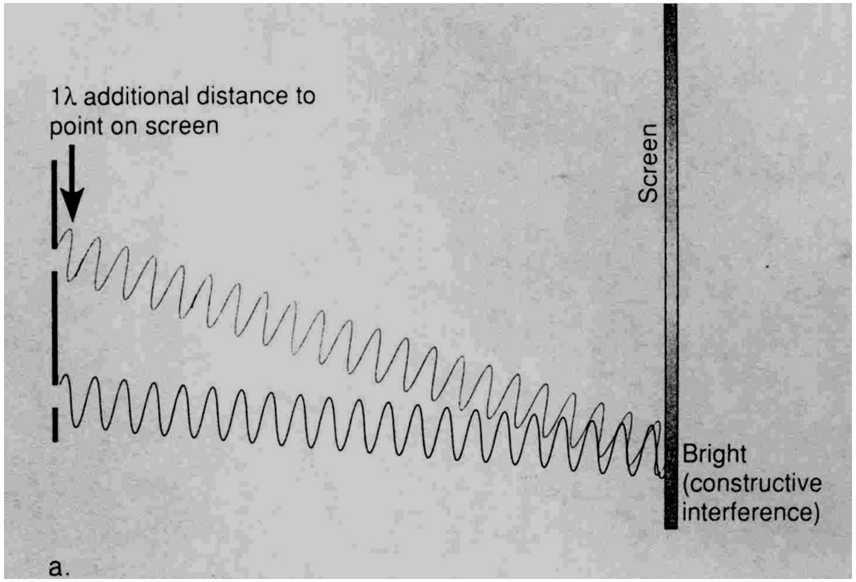
Diferença de caminho

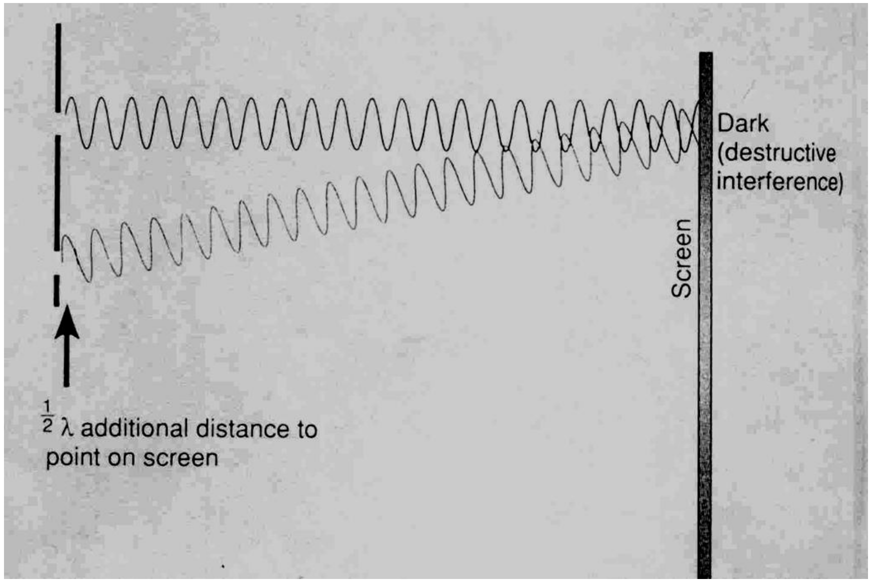
= múltiplos de λ

Destrutiva

Diferença de caminho

= múltiplos de $\lambda/2$

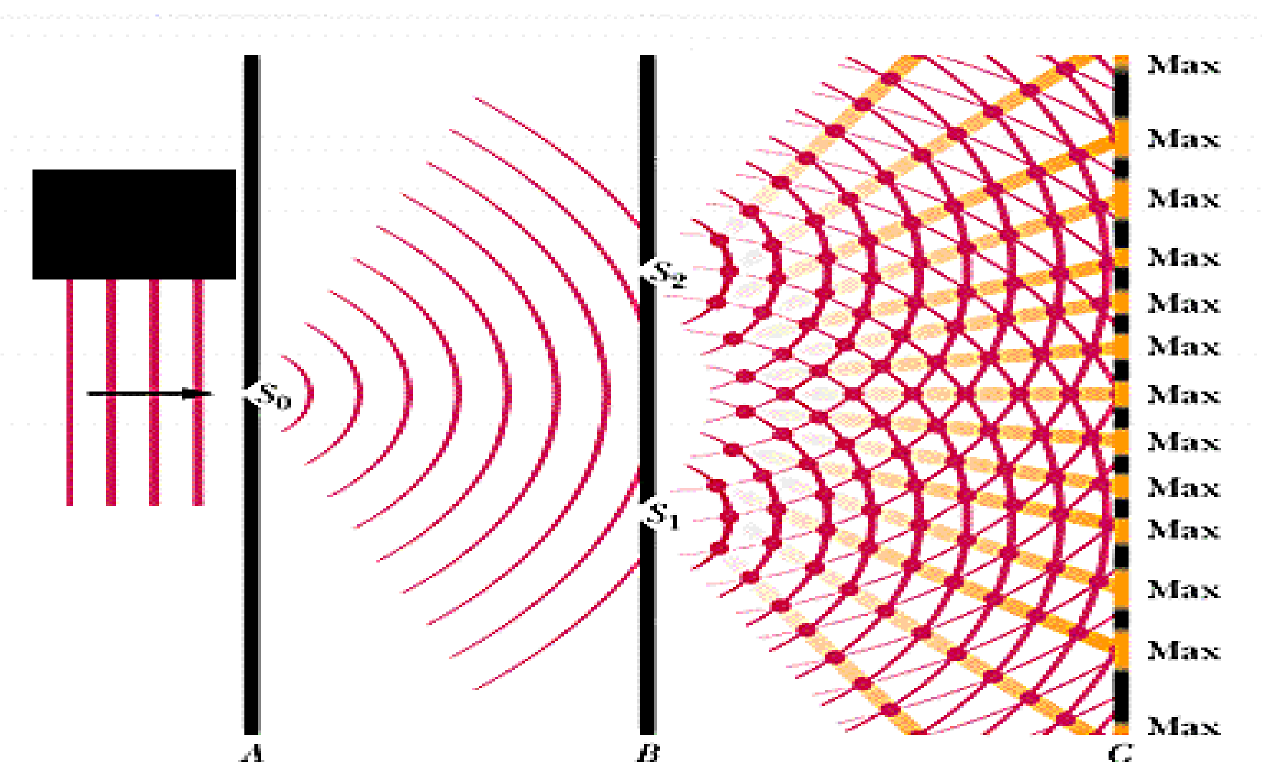


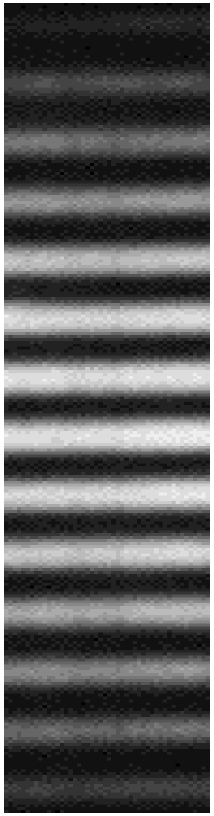


Interferência

ONDAS LUMINOSAS

Experimento de Young
Fenda dupla





Reflexão de ondas

Diferença da ”impedância” característica dos meios

Quanto maiores a diferença de impedância maior a fração de energia refletida e menor a fração de energia transmitida.

Reflexão de ondas

Corda com uma extremidade fixa:

Pulso refletido invertido ao pulso incidente

Cordas com uma extremidade solta

Pulso refletido igual ao pulso incidente.

Reflexão de ondas

Reflexão em uma
interface suave-dura

Há mudança de fase

Reflexão em uma
interface dura-suave

Não há mudança de fase

Ondas estacionárias

Duas ondas idênticas propagando em sentidos opostos:

$$y_1(x,t) = A\sin(kx - \omega t)$$

$$y_2(x,t) = A\sin(kx + \omega t)$$

$$y(x,t) = 2A\sin(kx)\cos(\omega t)$$

A forma de onda não se move para a esquerda nem para a direita; as posições dos máximos e mínimos não variam com o tempo

Ondas estacionárias

Amplitude depende de x

Variação temporal

$$y(x,t) = 2A\sin(kx)\cos(\omega t)$$

NÃO tem termo *(kx-ωt)* → NÃO é uma onda progressiva

→ É uma onda estacionária

Pontos de amplitude nula

$$kx = 0, \pi, 2\pi, \ldots\ldots$$

NÓS

Pontos de amplitudes máxima

$$kx = \frac{\pi}{2}, \frac{3\pi}{2}, \frac{5\pi}{2}, \ldots\ldots$$

ANTI-NÓS

Formação de Ondas Estacionárias

Onda incidente

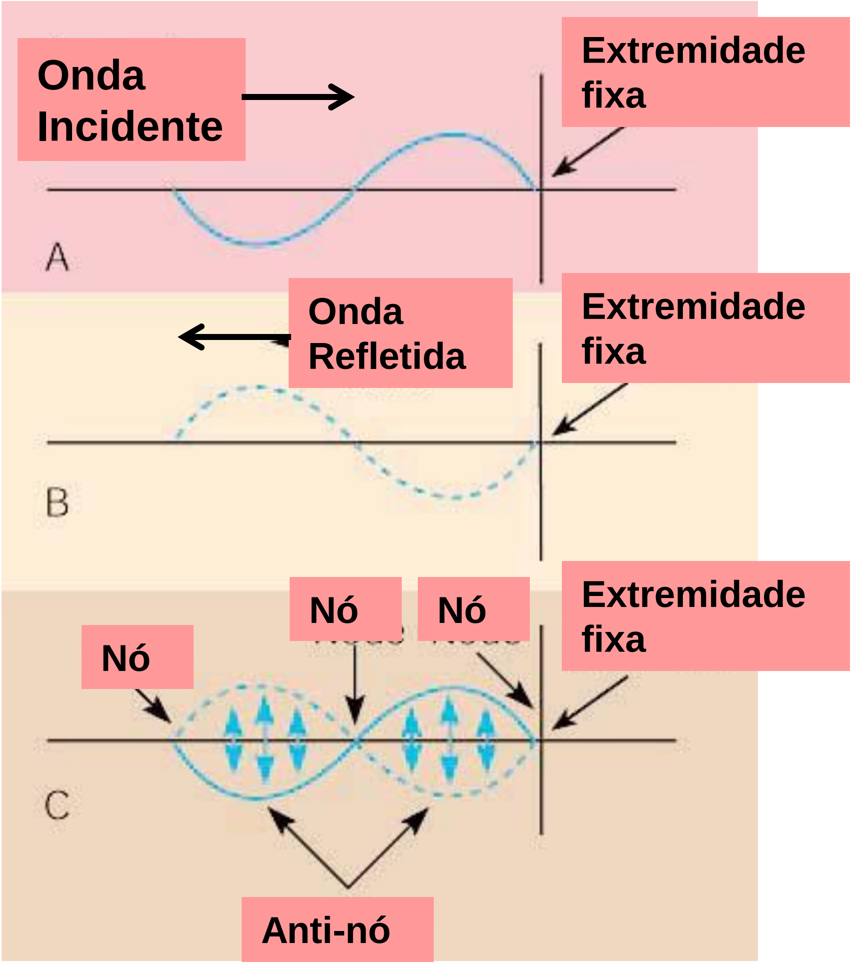
em extremidade fixa

+

Onda refletida

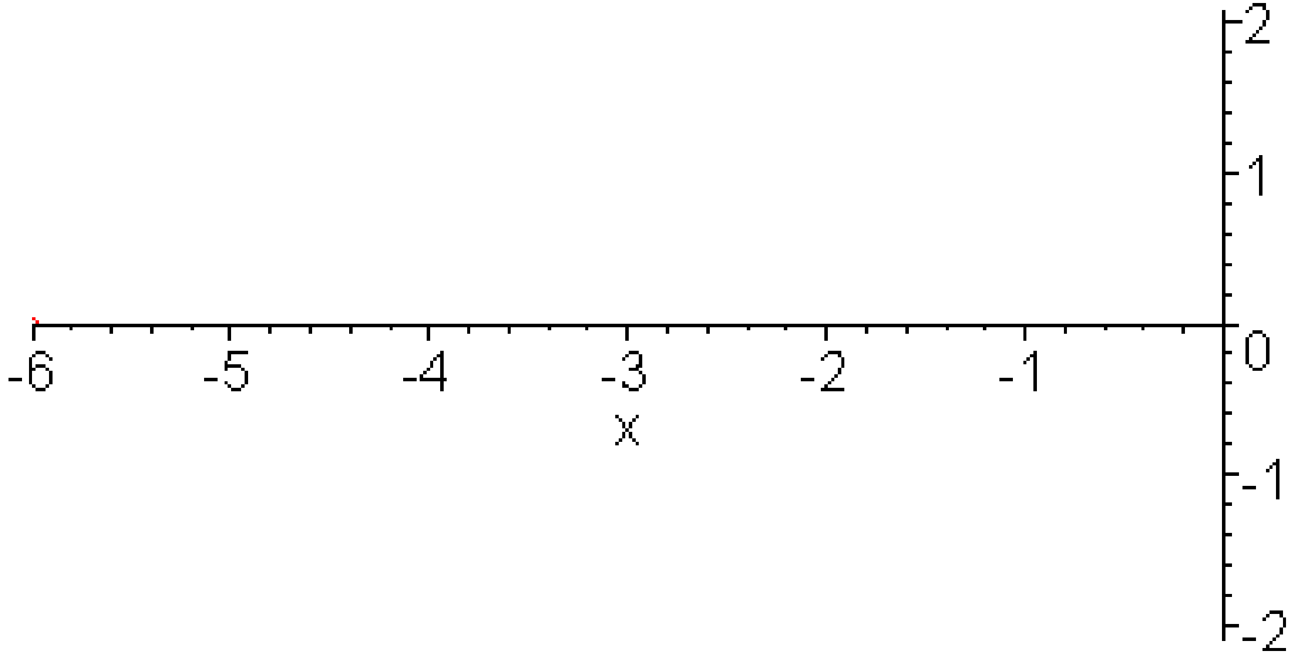
mesma amplitude e frequência

= Onda estacionária



Onda estacionária com 1 λ de comprimento: 3 nós e 2 anti-nós

Formação de ondas estacionárias

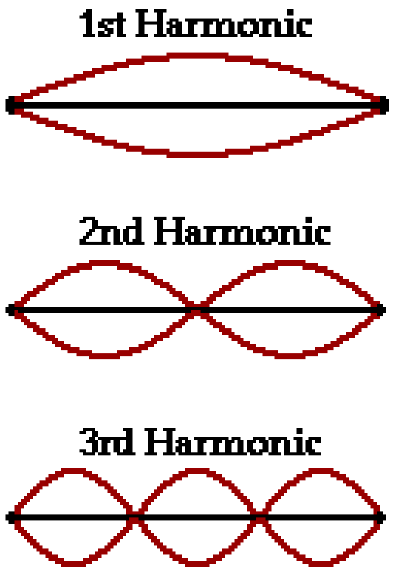


Ondas estacionárias

CORDAS VIBRANTES

Ondas estacionárias : RESSONÂNCIAS

CONDIÇÃO: extremidades fixas = NÓS



SE não satisfaz CONDIÇÃO :

Interferências destrutivas

Ressonâncias

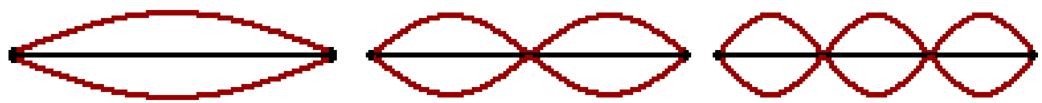
Comprimentos de onda / Frequências ressonantes:

$$L = n\frac{\lambda}{2} \qquad n = 1, 2, 3, \ldots$$

$$\lambda_n = \frac{2L}{n} \qquad f_n = \frac{v}{\lambda_n} = \frac{nv}{2L}$$

As 3 menores frequencias da corda do violão

1º harmônico	2º harmônico	3º harmônico

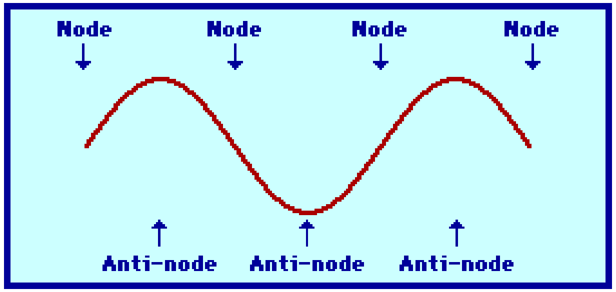


1º harmônico	2º harmônico	3º harmônico
$L = \frac{1}{2}\lambda \xrightarrow{\text{algebra}} \lambda = \frac{2}{1}L$	$L = \frac{2}{2}\lambda \xrightarrow{\text{algebra}} \lambda = \frac{2}{2}L$	$L = \frac{3}{2}\lambda \xrightarrow{\text{algebra}} \lambda = \frac{2}{3}L$

Menor frequência: FREQUÊNCIA FUNDAMENTAL

Demais frequências: SOBRETONS / HARMÔNICAS

Ressonâncias



Para certas frequencias a interferência produz uma onda estacionária (modo de oscilação), com nós e grandes anti-nós.
A CORDA RESSOA PARA ESTAS FREQUENCIAS.

Se a corda é excitada em uma frequencia que não é a frequencia de ressonância, NÃO HÁ FORMAÇÃO DE ONDA ESTACIONÁRIA.

Exemplo

A tecla mais aguda de um piano tem uma frequência 150 vezes maior que a corda mais grave. Se o comprimento da corda mais aguda é 5 cm, quanto seria o comprimento da corda mais grave se elas tivessem a mesma densidade linear de massa e a mesma tensão?

Se μ e T iguais $\rightarrow$ velocidade iguais

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

$$f = \frac{v}{2L}$$

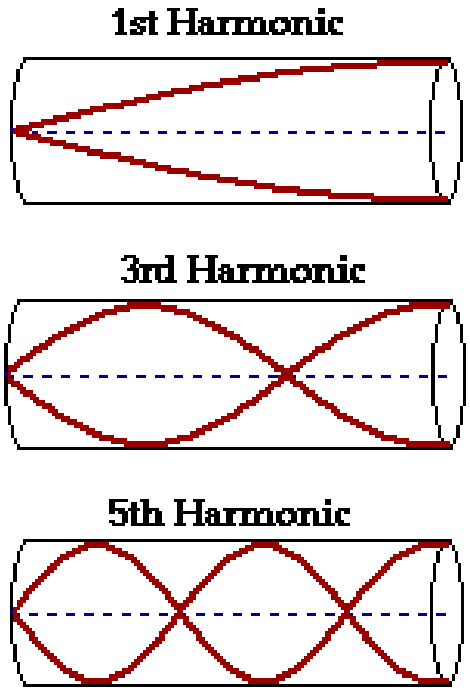
$$\frac{L_g}{L_a} = \frac{f_a}{f_g}$$

$$L_g = L_a \frac{f_a}{f_g} = 5 \times 150 = 750 \text{ cm} = 7{,}5 \text{ m}$$

As cordas mais graves são mais pesadas para evitar que sejam muito compridas. ($\downarrow v \rightarrow \uparrow \mu$ >>> $\downarrow v \rightarrow \downarrow f$)

Ondas estacionárias : tubos

TUBO com 1 extremidade aberta e 1 fechada

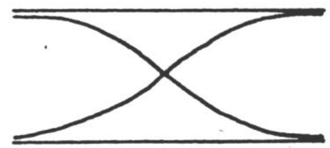


$$L = \frac{n\lambda_n}{4} \qquad \lambda_n = \frac{4L}{n} \qquad f_n = \frac{nv}{4L} = n\, f_1$$

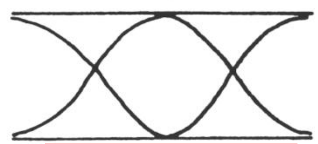
$$n = 1, 3, 5, \ldots$$

Ondas estacionárias : tubos

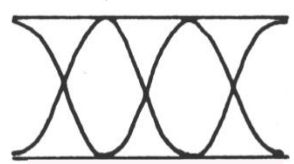
TUBO com 2 extremidade abertas



Fundamental
1º. harmônico



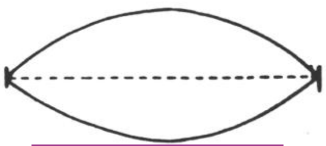
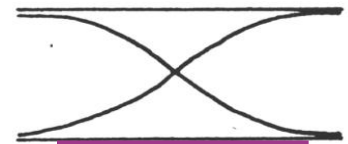
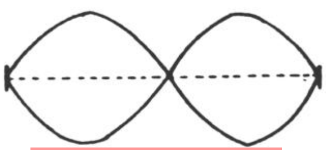
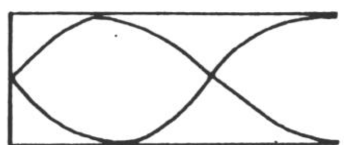
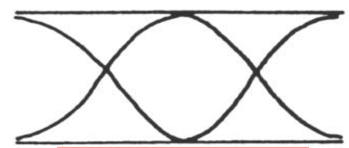
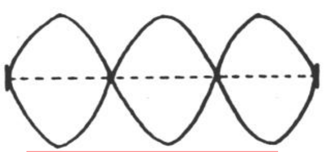
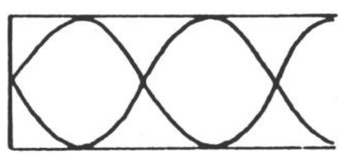
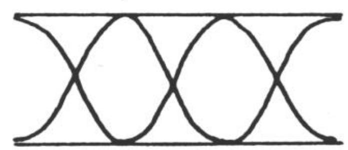
1º. Tom acima
2º. harmônico



2º. Tom acima
3º. harmônico

$$L = \frac{n\lambda_n}{2} \qquad \lambda_n = \frac{2L}{n} \qquad f_n = \frac{nv}{2L} = n\, f_1 \qquad n = 1,\, 2,\, 3, \ldots$$

Ondas estacionárias

Corda vibrante	Tubo Fechado	Tubo Aberto
 **Fundamental** **1º. harmônico**	 **Fundamental** **1º. harmônico**	 **Fundamental** **1º. harmônico**
 **1º. Tom acima** **2º. harmônico**	 **1º. Tom acima** **3º. harmônico**	 **1º. Tom acima** **2º. harmônico**
 **2º. Tom acima** **3º. harmônico**	 **2º. Tom acima** **5º. harmônico**	 **2º. Tom acima** **3º. harmônico**
Os deslocamentos dos nós acorrem em cada final da corda	**Os deslocamentos dos nós acorrem no final fechado do tubo e dos anti-nos no final aberto do tubo**	**Os deslocamentos dos anti-nós acorrem em cada final do tubo aberto**

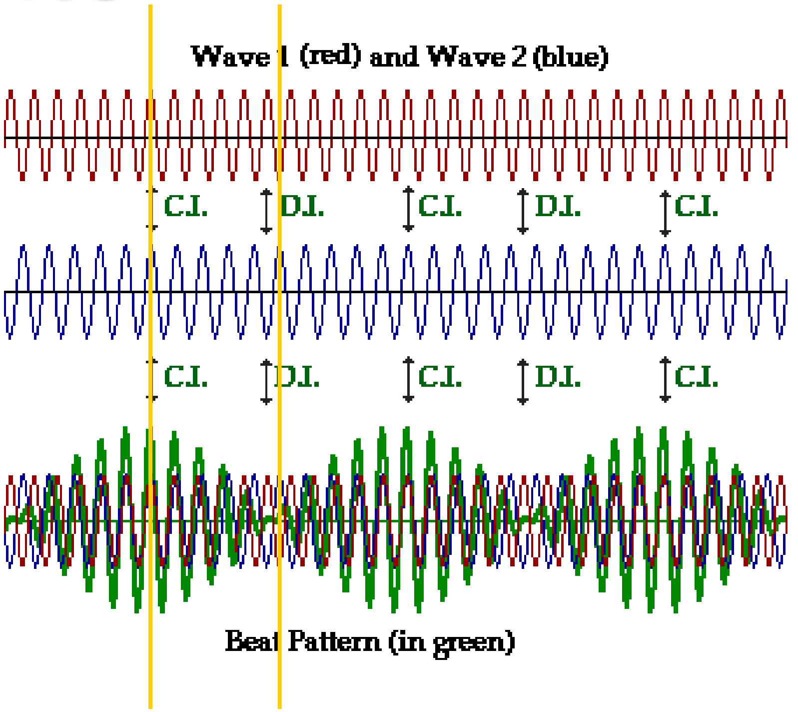
Batimento

$$y_1 = A\sin(2\pi f_1 t)$$

+

$$y_1 = A\sin(2\pi f_2 t)$$

$f_1 \approx f_2$



$$y = \left[2A\cos\left(2\pi\left(\frac{f_1 - f_2}{2}\right)t\right)\right]\sin\left(2\pi\left(\frac{f_1 + f_2}{2}\right)t\right)$$

"AMPLITUDE" modulada por função envelope com freqüência

$$\left(\frac{f_1 + f_2}{2}\right) \approx f_1 \approx f_2$$

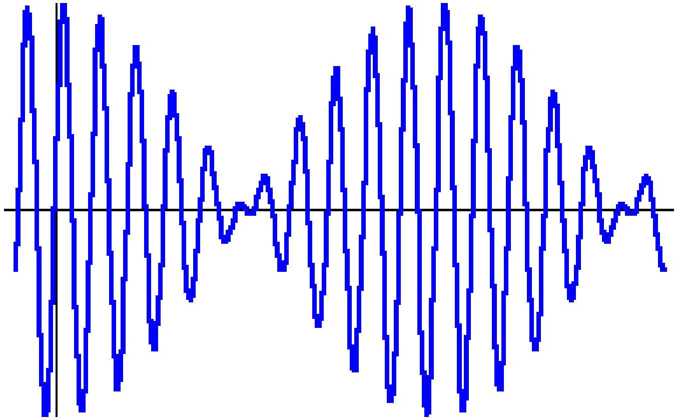
$$2\times\left(\frac{f_1 - f_2}{2}\right) \approx 0$$

positiva ou negativa

$$f_1 - f_2 = f_{bat}$$

FREQ. DE BATIMENTO

Batimento



$$f_1 - f_2 = f_{bat}$$

Variação periódica da Intensidade :
Soma de 2 ONDAS com
frequências quase iguais

Afinação de instrumentos musicais

330 Hz + 331 Hz : freqüencia de batimento = 1 Hz
330 Hz + 340 Hz : freqüencia de batimento = 10 Hz

**Quanto maior a freqüência de batimento
mais desafinado está o instrumento.**

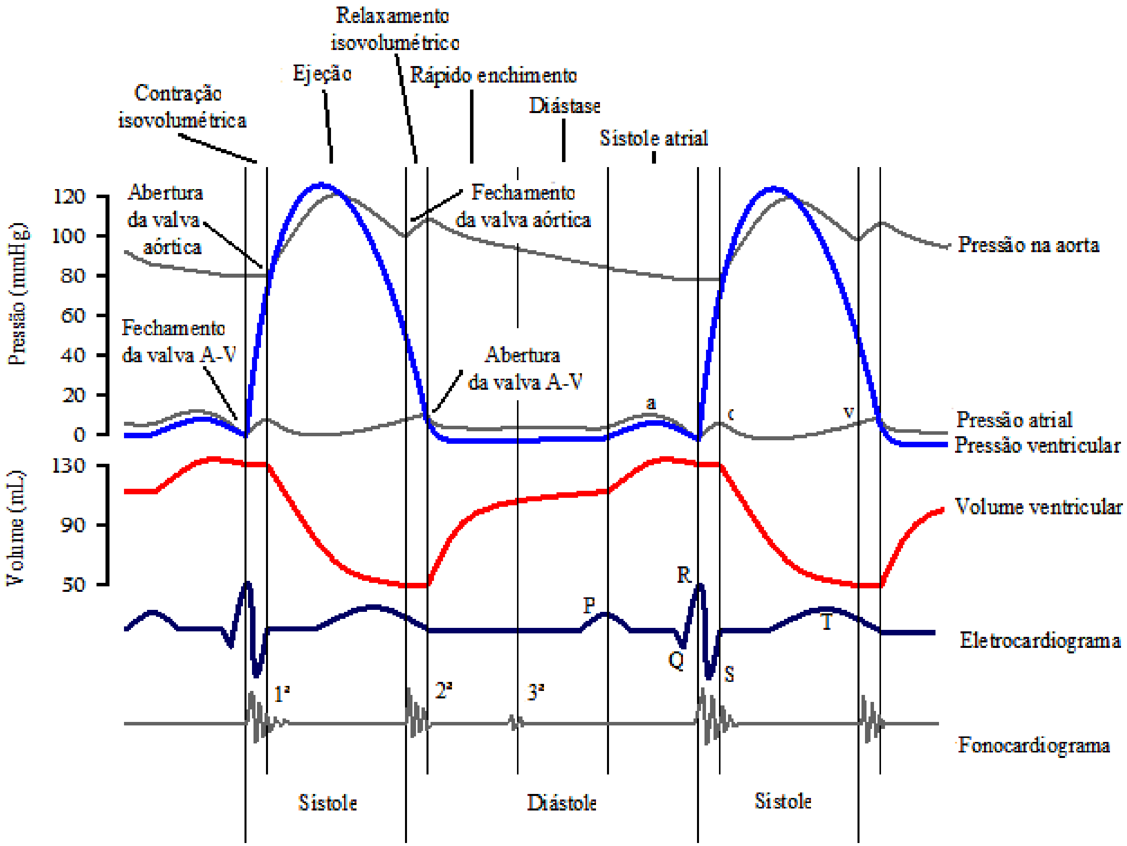
Batimento

Escutamos, com a diferença de alguns minutos, dois sons cujas frequencias são muito próximas, ex. 552 e 564 Hz, temos dificuldade de distinguí-los.

Quando os dois sons chegam ao nosso ouvido simultaneamente ouvimos um som cuja frequencia é 558 Hz (média), mas percebemos também uma grande variação na intensidade do som, que aumenta e diminui alternadamente.

Esta variação na intensidade do som é chamada de **batimento, que se repete a uma frequencia de 12 Hz (564-552).**

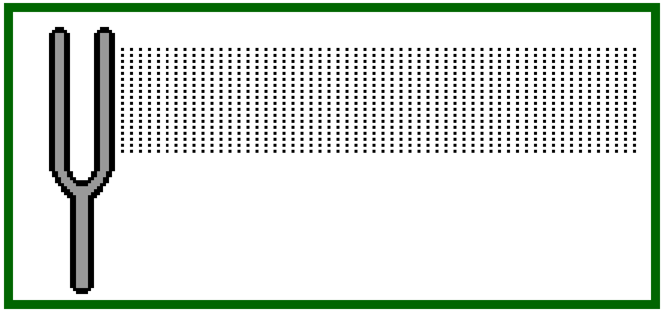
Batimento Cardíaco



Ciclo cardíaco é o termo referente aos eventos relacionados ao **fluxo** e **pressão sanguíneos** que ocorrem desde o início de um batimento cardíaco até o próximo batimento.

http://pt.wikipedia.org/wiki/Ciclo_card%C3%ADaco

Som



INFRASOM: f < 20 Hz

SOM: audição humana : 20 Hz < f < 20.000 Hz

ULTRASOM: f > 20,000 Hz

ONDAS DE SOM

DESLOCAMENTO

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

PRESSÃO

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

$$p(x,t) = \wp \sin(kx - \omega t + \phi)$$

$$\wp = \rho_0 v^2 k U$$

Ondas de Deslocamento e Pressão:
Defasadas de 90^0

SOM : INTENSIDADE

Força

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

$$\wp = \rho_0 v \omega U$$

Potência

$$P = F\frac{\partial u}{\partial t} = \omega A \wp U \sin^2(kx - \omega t + \phi)$$

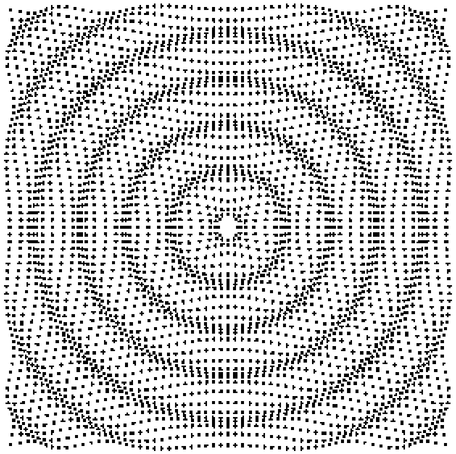
Intensidade

$$I = \frac{\overline{P}}{A} = \frac{1}{2}\omega \wp U$$

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

SOM : INTENSIDADE

ONDA 3D esférica



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

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

SE potência constante e
distância da fonte duplicada:

intensidade reduz a 1/4

e amplitude reduz a 1/2

Terremoto

Quando ocorre um terremoto, basicamente dois tipos de onda se formam:

- ondas P, que são ondas longitudinais (compressivas);

- ondas S que são ondas transversais (cisalhantes).

Em um terremoto natural de origem tectônica, o foco das ondas se dá ao longo das superfícies que estão se deslizando, havendo produção de uma taxa elevada de ondas S.

Em uma explosão nuclear a fonte é compacta, localizada e se irradia numa frente de onda esférica, produzindo mais ondas compressionais P do que ondas S, transversais.

Isto faz com que a razão P/S de um sismograma produzido por explosão nuclear subterrânea seja mais elevada do que em terremotos naturais.

EXEMPLO

Se a intensidade de um terremoto de ondas tipo P a 100 km da fonte é 1 MW/m^2, qual será a intensidade a 400 km do epicentro?

A intensidade cai com o quadrado da distância

$I(400 \text{ km}) = (1/4)^2 \times I(100 \text{ km}) = 6{,}2\times10^4 \ W/m^2$

A situação é diferente para uma onda unidimensional, pois nesse caso a área é constante e portanto I também é constante.

Percepção sonora

Limiar de audibilidade

→ $I_0 = 10^{-12}$ W/m^2

Variação ~ 10^{12}

Limiar de dor

→ $I_m = 1$ W/m^2

Decibel

Nível de intensidade em deciBels (dB) :

$$dB = 10 \times \log(I/I_o)$$

$I_o = 10^{-12}\ Wm^{-2}$ - Intensidade de Referência

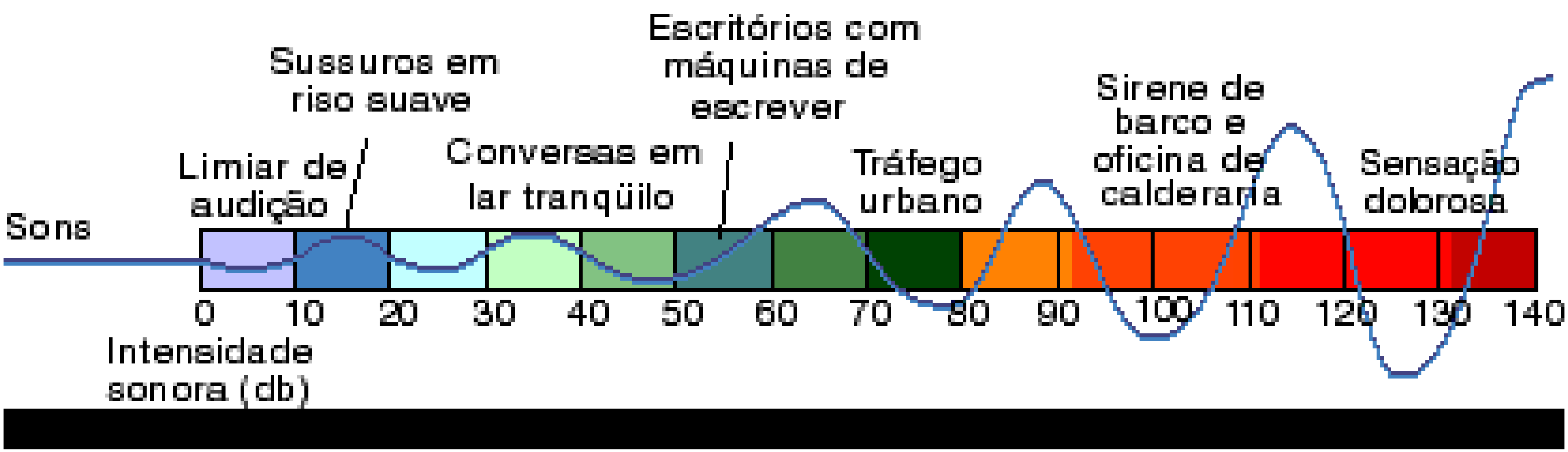
1 deciBel = 0,1 Bel

Homenagem a Alexandre Graham Bel, inventor do telefone.

Decibel

$dB = 10 \times \log(I/I_o)$ $\qquad$ $I_o = 10^{-12}\ Wm^{-2}$

$I_o\ (Wm^{-2})$:	10^{-12}	10^{-11}	10^{-10}	…..	10^{-1}	1
dB :	0	10	20	…..	110	120

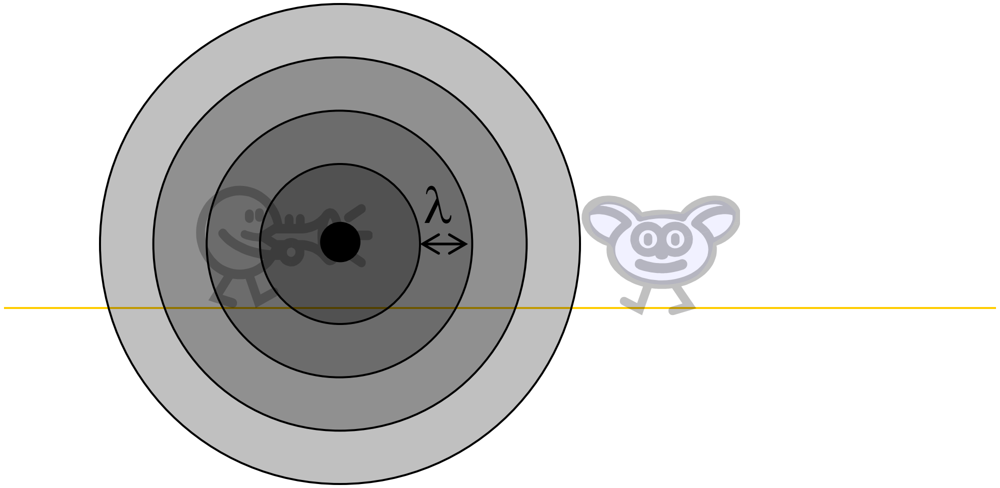


Efeito Doppler

Variação da frequência de uma onda devido ao movimento relativo entre a fonte e observador.

Efeito Doppler

Fonte parada e observador parados



$$f = \frac{v_{som}}{\lambda}$$

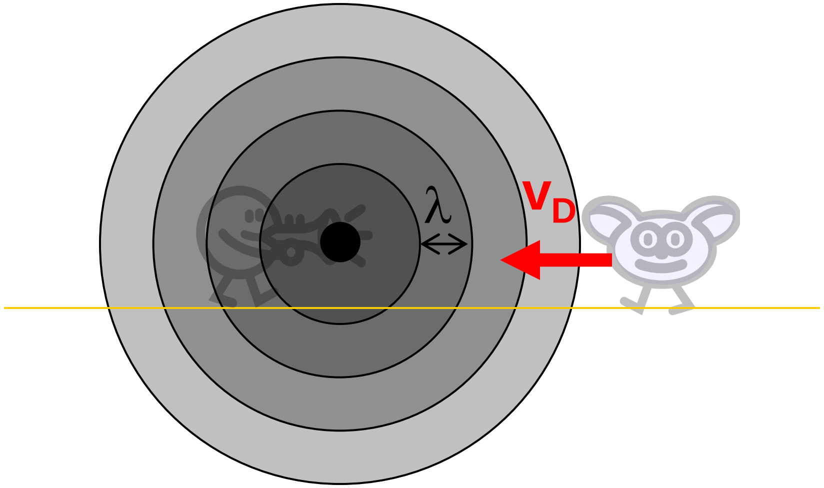
Observador em Movimento

Muda a velocidade de interceptação da onda

A frequencia ouvida é a taxa com o qual o observador intercepta as frentes de onda

Fonte parada e observador em movimento

APROXIMANDO-SE



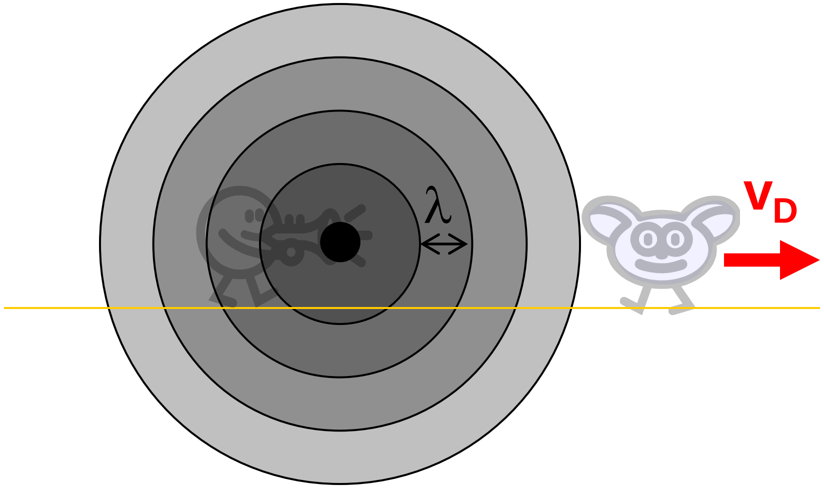
$$f' = \frac{v_{som} + v_D}{\lambda}$$

Frequencia percebida maior

$$f' = f\,\frac{(v_{som} + v_D)}{v_{som}}$$

Fonte parada e observador em movimento

AFASTANDO-SE



$$f' = \frac{v_{som} - v_D}{\lambda}$$

Frequencia percebida menor ➡

$$f' = f\,\frac{(v_{som} - v_D)}{v_{som}}$$

Fonte em Movimento

Muda o comprimento de onda

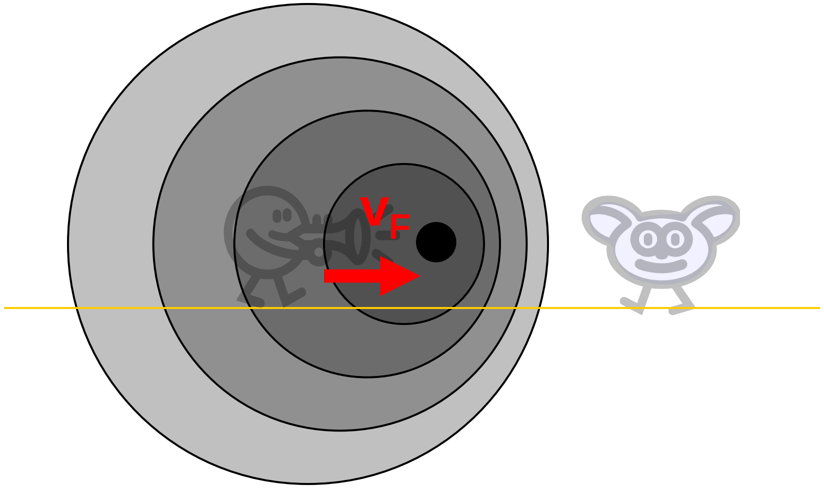
A frequencia ouvida é a taxa com o qual o observador intercepta as frentes de onda

Fonte em movimento e observador parado

$$f = \frac{v_{som}}{\lambda}$$

$$T = \frac{1}{f} = \frac{\lambda}{v_{som}}$$

APROXIMANDO-SE



$$\lambda = v_{som} T$$

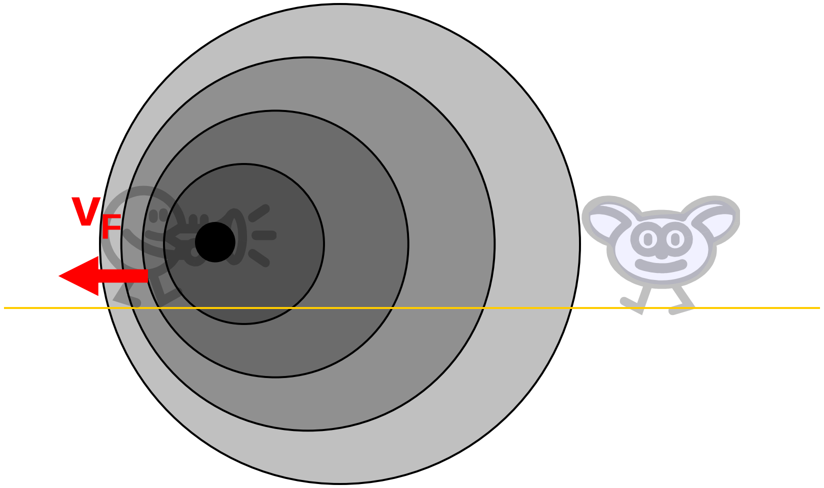
$$f' = \frac{v_{som}}{\lambda'} = \frac{v_{som}}{(v_{som} - v_F)T}$$

Comprimento de onda percebido diminui

Frequencia percebida aumenta ➡ $$f' = f \frac{v_{som}}{(v_{som} - v_F)}$$

Fonte em movimento e observador parado

AFASTANDO-SE



$$f' = \frac{v_{som}}{\lambda'} = \frac{v_{som}}{(v_{som} + v_F)T}$$

Comprimento de onda percebido aumenta

Frequencia percebida diminui

$$f' = f\,\frac{v_{som}}{(v_{som} + v_F)}$$

Efeito Doppler

CASO GERAL

$$f' = f\frac{(v_{som} \pm v_D)}{(v_{som} \mp v_F)}$$

Aproximando-se
Afastando-se

Detetor e Fonte se APROXIMAM

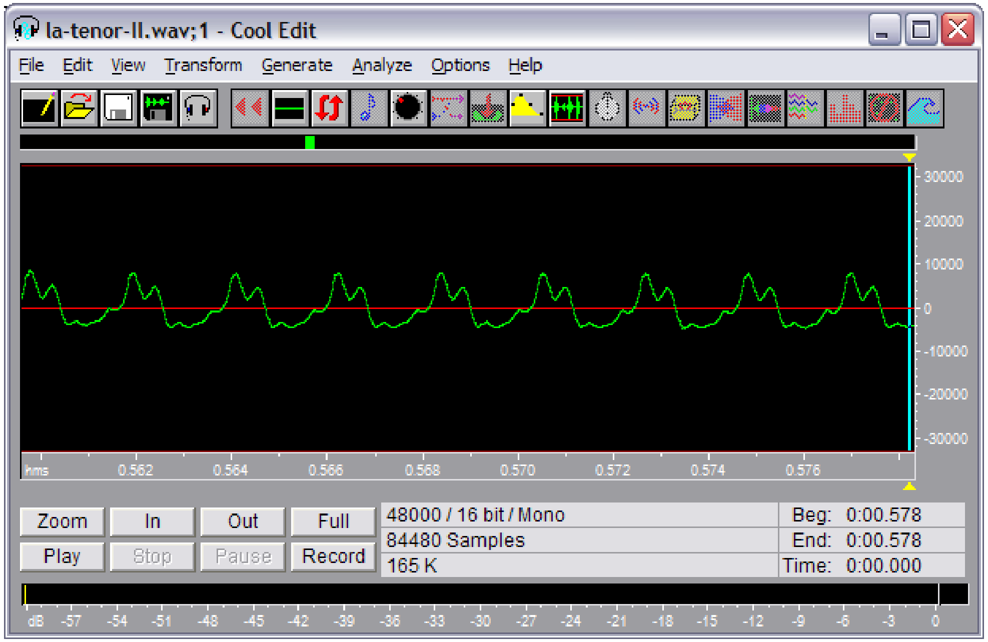
Frequência AUMENTA

Questão

Um apito de trem em repouso tem uma frequência de 3000 Hertz. Se você está parado e percebe uma frequência de 3010 Hertz, então você conclui que...

- *a) O trem está se distanciando de você.*
- *b) O trem está se aproximando de você.*
- *c) O som do apito ecoou.*
- *d) Não é dada informação suficiente.*

Sons musicais



Intensidade: amplitude da onda

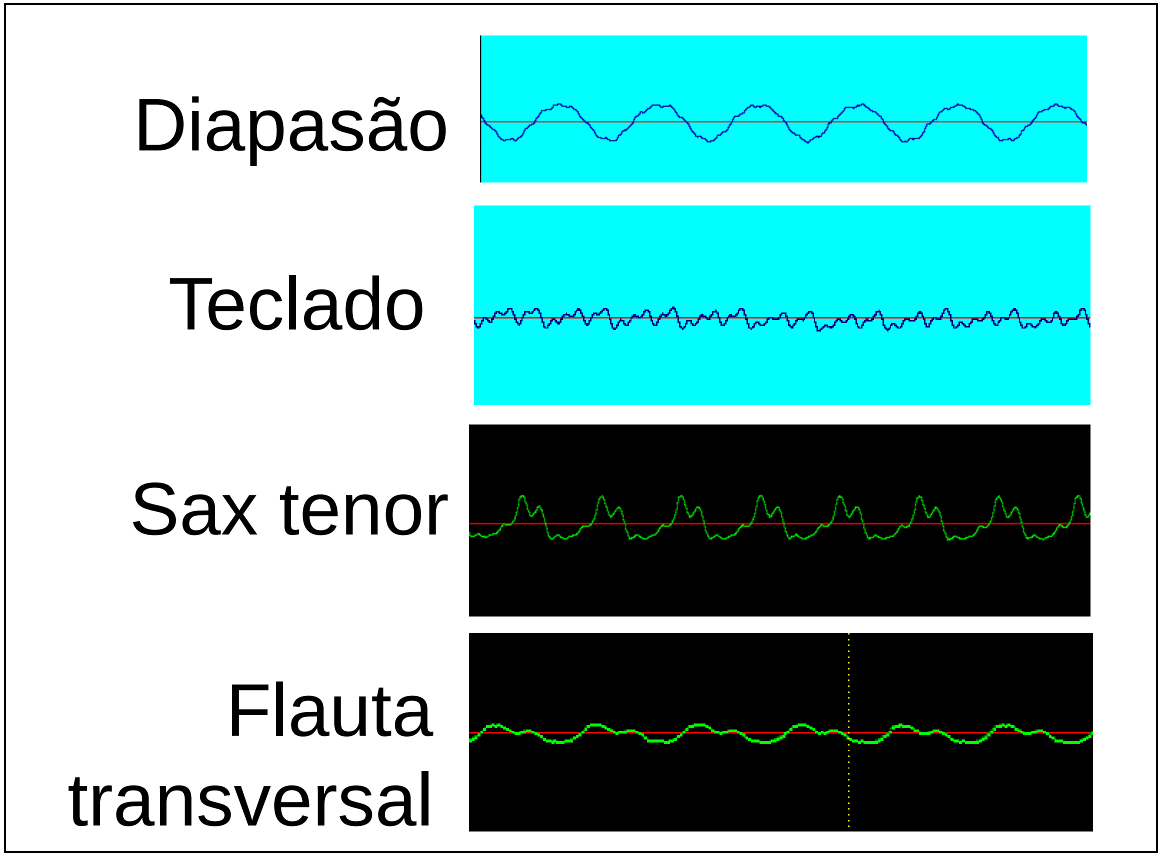
Tom: grave baixa f – agudo alta f

Timbre: mesma notas de diferentes instrumentos : intensidade relativa dos harmônicos

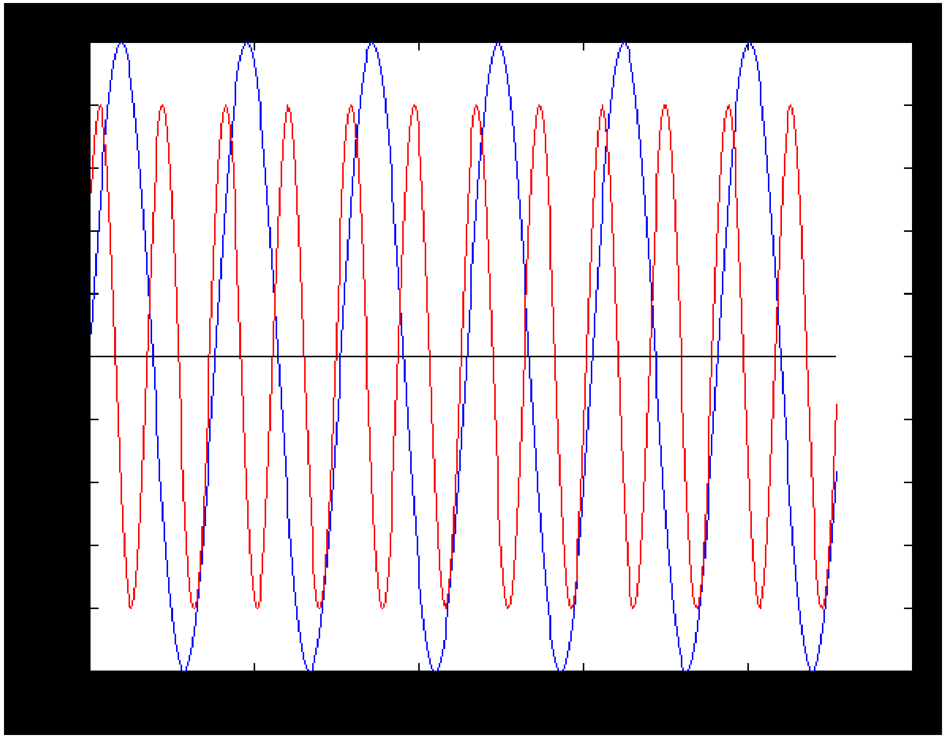
Timbre

TIMBRE: Resposta em Freqüência : Espectro
Intensidade relativa dos hârmonicos

Nota La: 440 Hz

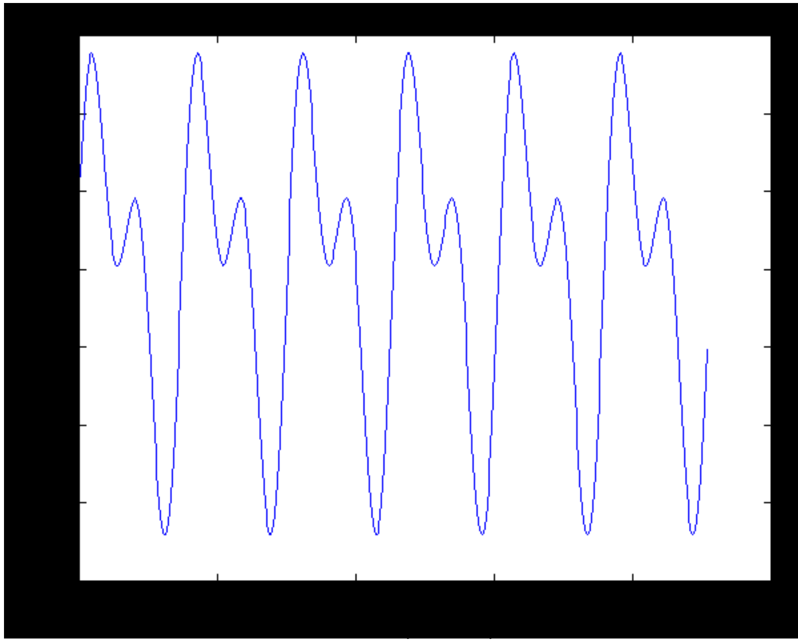


TIMBRE



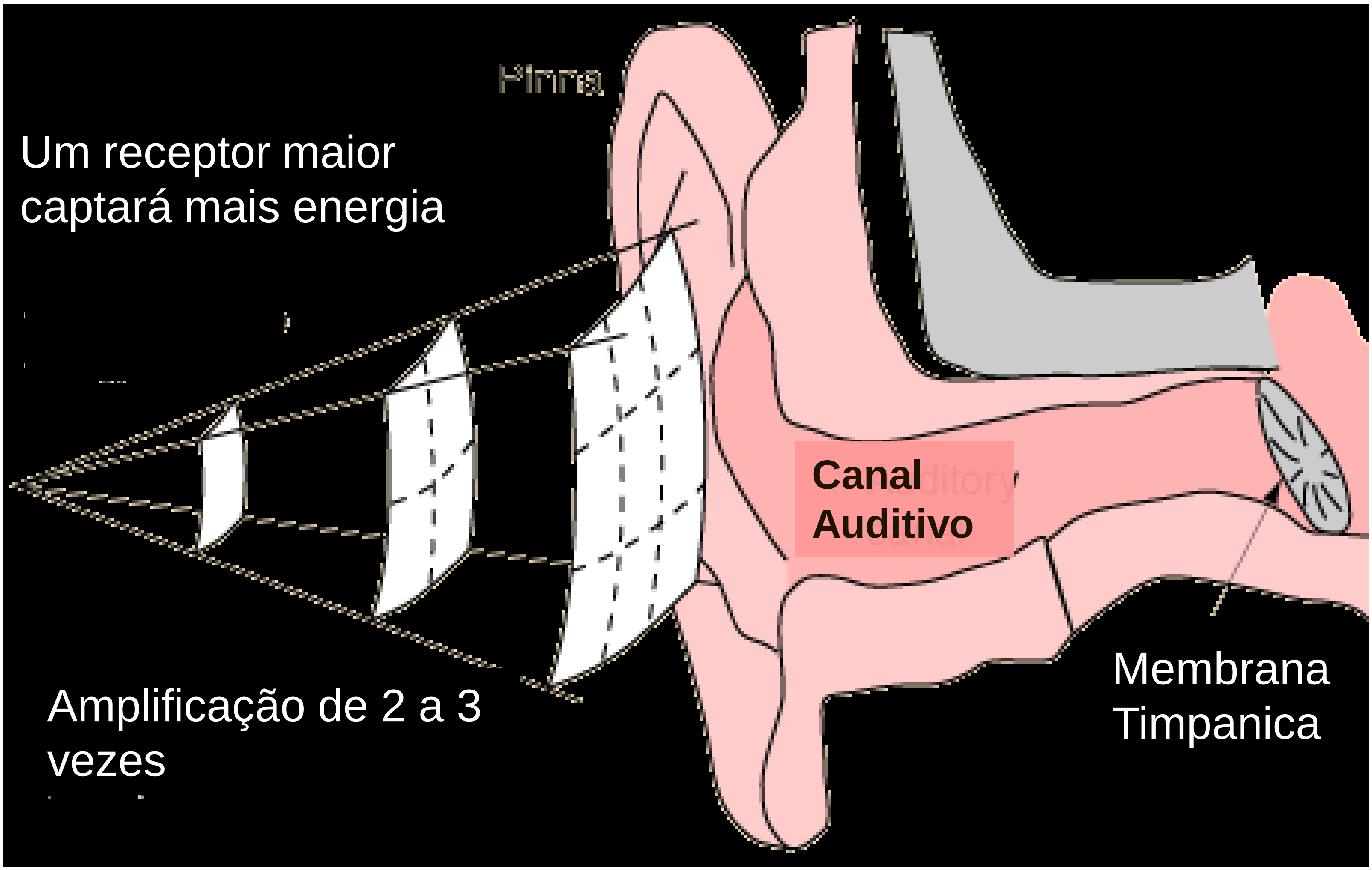
Azul 262 Hz

Vermelho 524 Hz

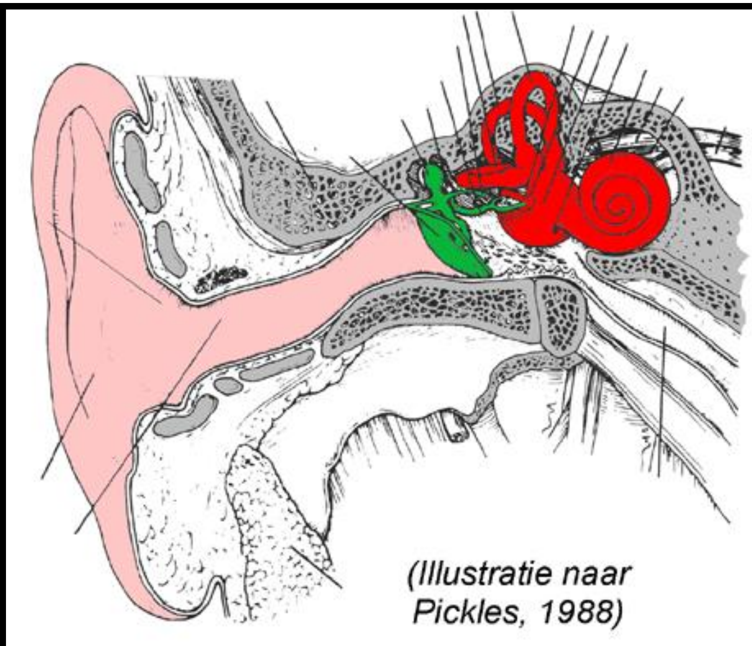


Som complexo

FUNÇÃO DA ORELHA



Ouvido



Ouvido externo
Ondas estacionárias e ressonância

“atuador"

Análise de Fourier

Cóclea

A cóclea funciona como um analisador de freqüências