

Física 2 – Ciências Moleculares

Caetano R. Miranda ***AULA 19 – 14/05/2025***

crmiranda@usp.br



Cronograma revisado

CRONOGRAMA TENTATIVO - FÍSICA II - CCM					
DATA	aula n°	Segundas (16h - 18h)	aula n°	Quartas (09h - 12h)	DATA
24/2	1	Apresentação do curso	2	Projeto - Definição	26/2
3/3	Feriado	Carnaval	Feriado	Carnaval	5/3
10/3	3	Revisão matemática	4	Projeto - Ideação	12/3
17/3	5	DEMO 1 - Pressão	6	Estática dos Fluidos	19/3
24/3	7	DEMO 2 - Hidrodinâmica	8	Hidrodinâmica	26/3
31/3	9	DEMO 3 - Hidrodinâmica II	10	Hidrodinâmica	2/4
7/4	11	Revisão - P1	12	PROVA 1	9/4 ENTREGA 1
14/4	Feriado	Semana Santa	Feriado	Semana Santa	16/4
21/4	Feriado	Tiradentes	13	Oscilações I	23/4
28/4	14	DEMO 4 - Corda vibrante / Molas / Ondulatória	15	Oscilações II	30/4
5/5	16	Ondas	17	Ondas	7/5
12/5	18	DEMO 5 - Barulhinho bom	19	Som	14/5
19/5	20	DEMO 6 - Fenômenos Térmicos e Gases	21	Revisão - P2	21/5 ENTREGA 2
26/5	22	DEMO 7 - Máquinas térmicas	23	PROVA 2	28/5
2/6	24	Primeira Lei e Gases	25	Segunda Lei	4/6
9/6	26	Projeto	27	Projeto	11/6
16/6	Feriado	Corpus Christi	Feriado	Corpus Christi	18/6
23/6	28	DEMO 8 - Cinética & Mecânica Estatística	29	Cinética dos Gases e Mecânica Estatística	25/6 ENTREGA 3
30/6	30	Apresentações	31	PROVA SUB / VISTA	2/7

Ondas periódicas

$$\psi(x, t) = A \sin(\omega t \pm kx)$$

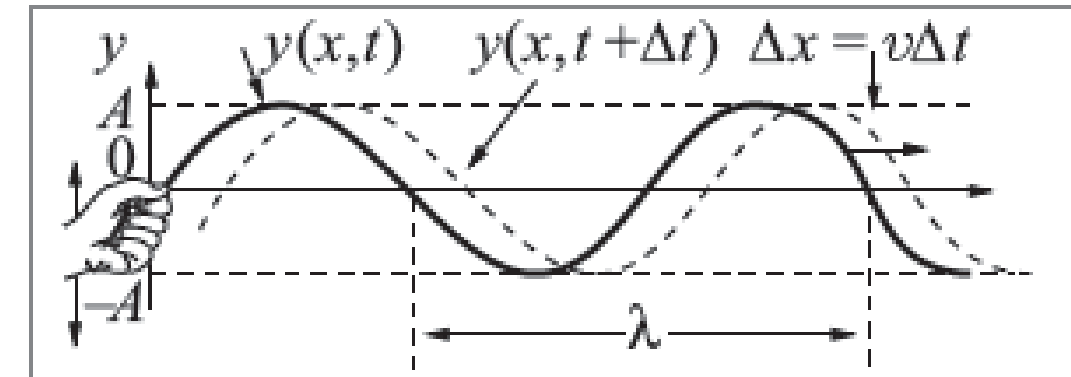
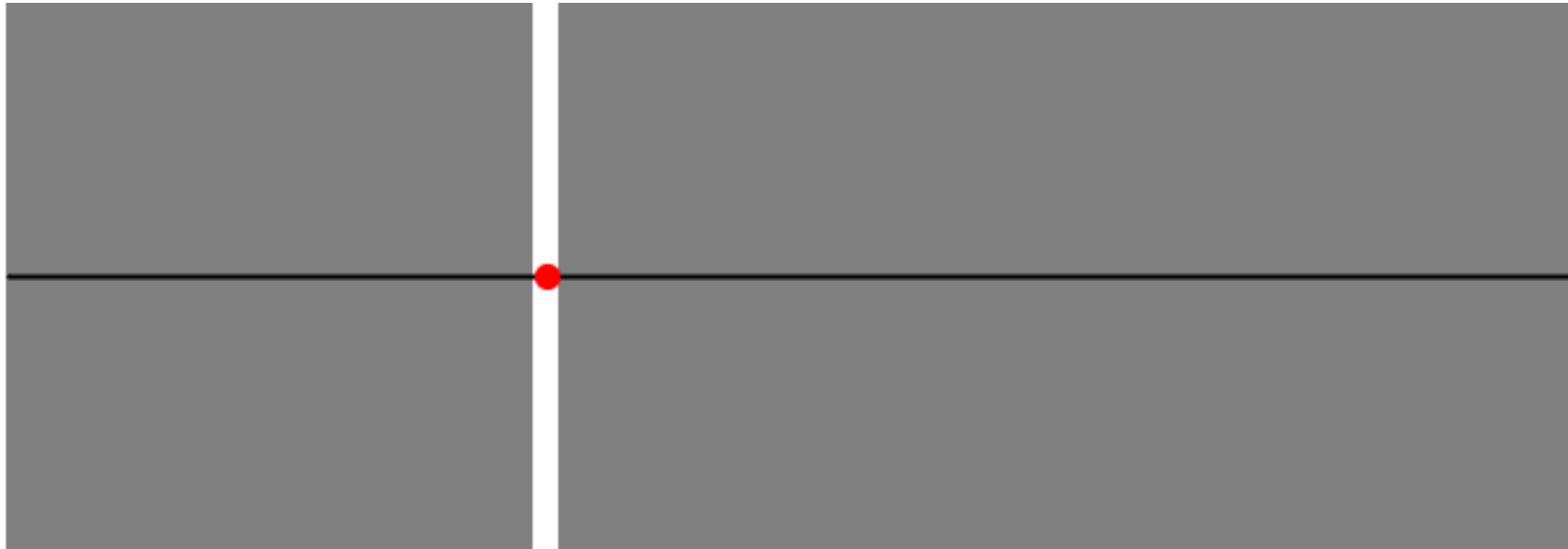
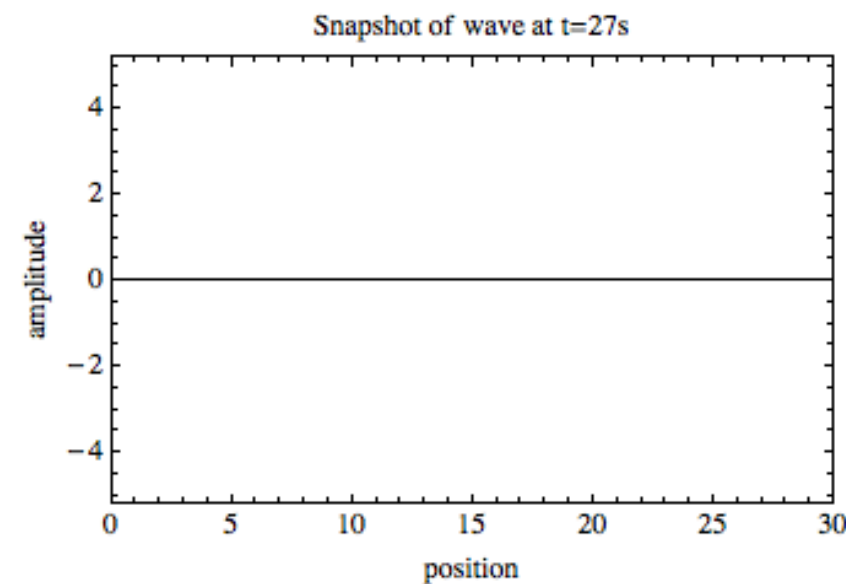
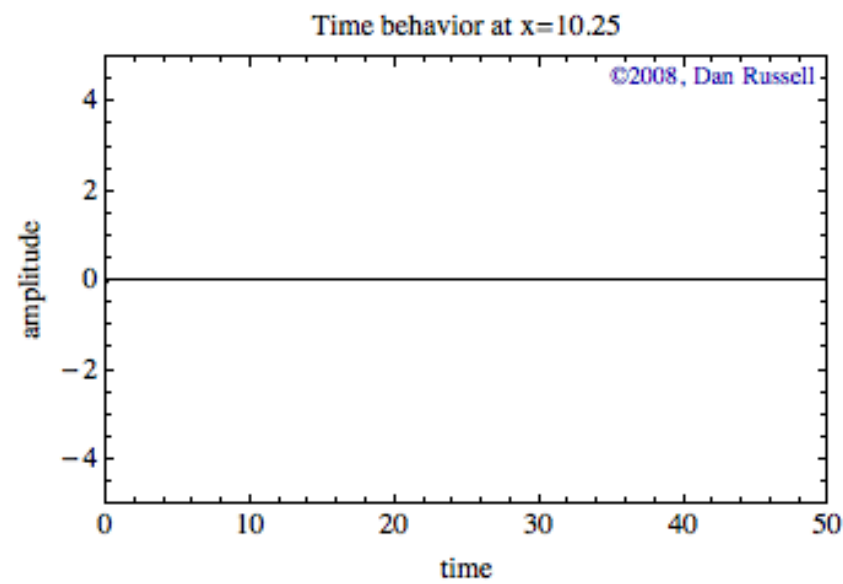
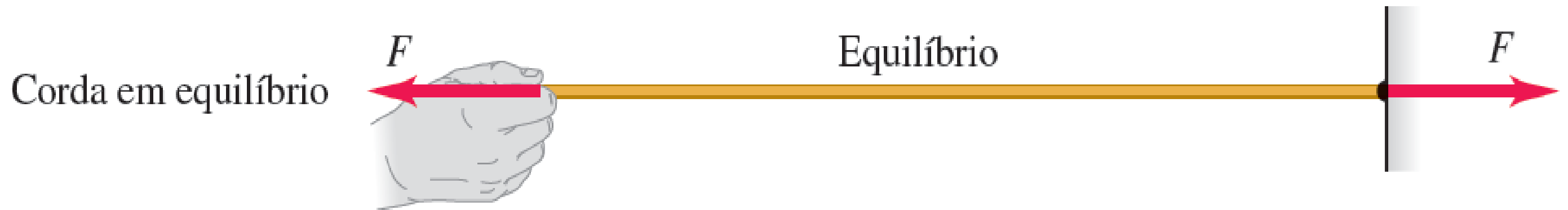


Figura 5.7 Onda harmônica.



Velocidade de uma onda transversal

- Uma das principais propriedades de qualquer onda é sua **velocidade de propagação**.
- As grandezas físicas que determinam a velocidade de uma onda transversal em uma corda são a **tensão na corda** e sua **massa por unidade de comprimento**.
- Propagação de uma onda transversal em uma corda:



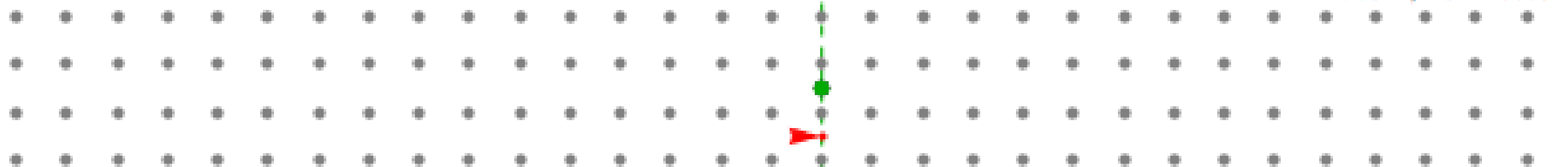
Propagação da onda





displacement

©2017, Dan Russell



particle velocity

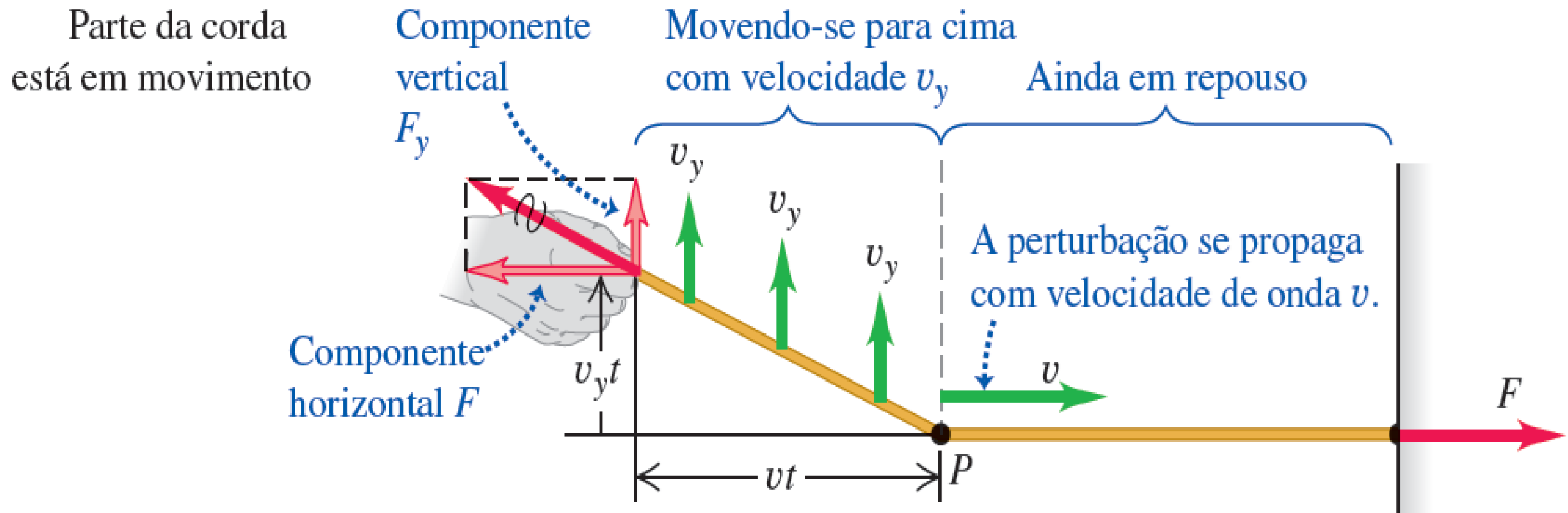


pressure



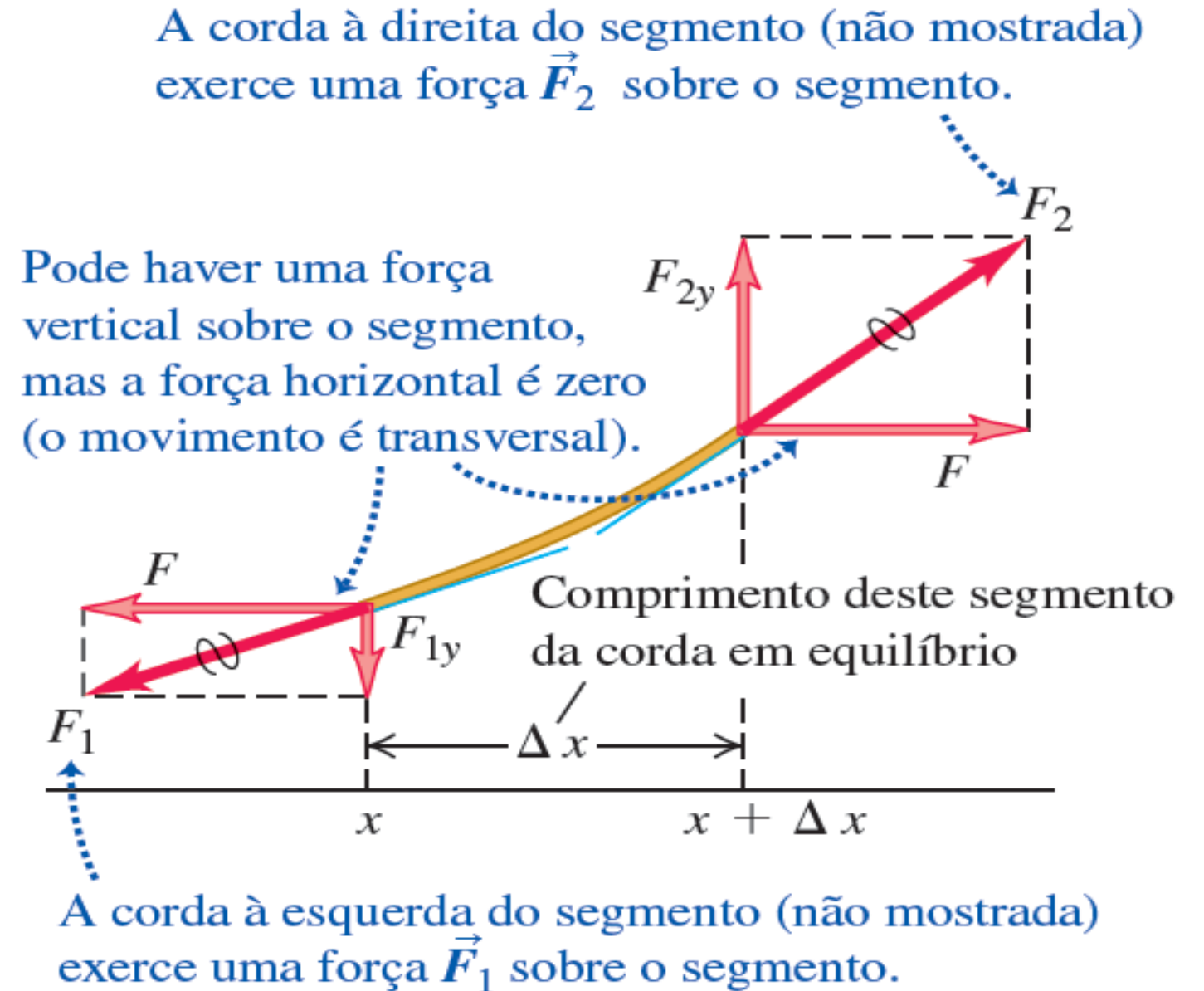
Velocidade de uma onda transversal

- Propagação de uma onda transversal em uma corda:



Velocidade de uma onda transversal

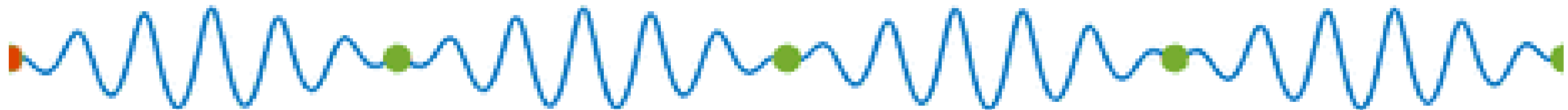
- Diagrama do corpo livre para um segmento de corda.
- A força em cada extremidade da corda é tangente a ela no ponto onde a força é aplicada:



Velocidade de uma onda transversal

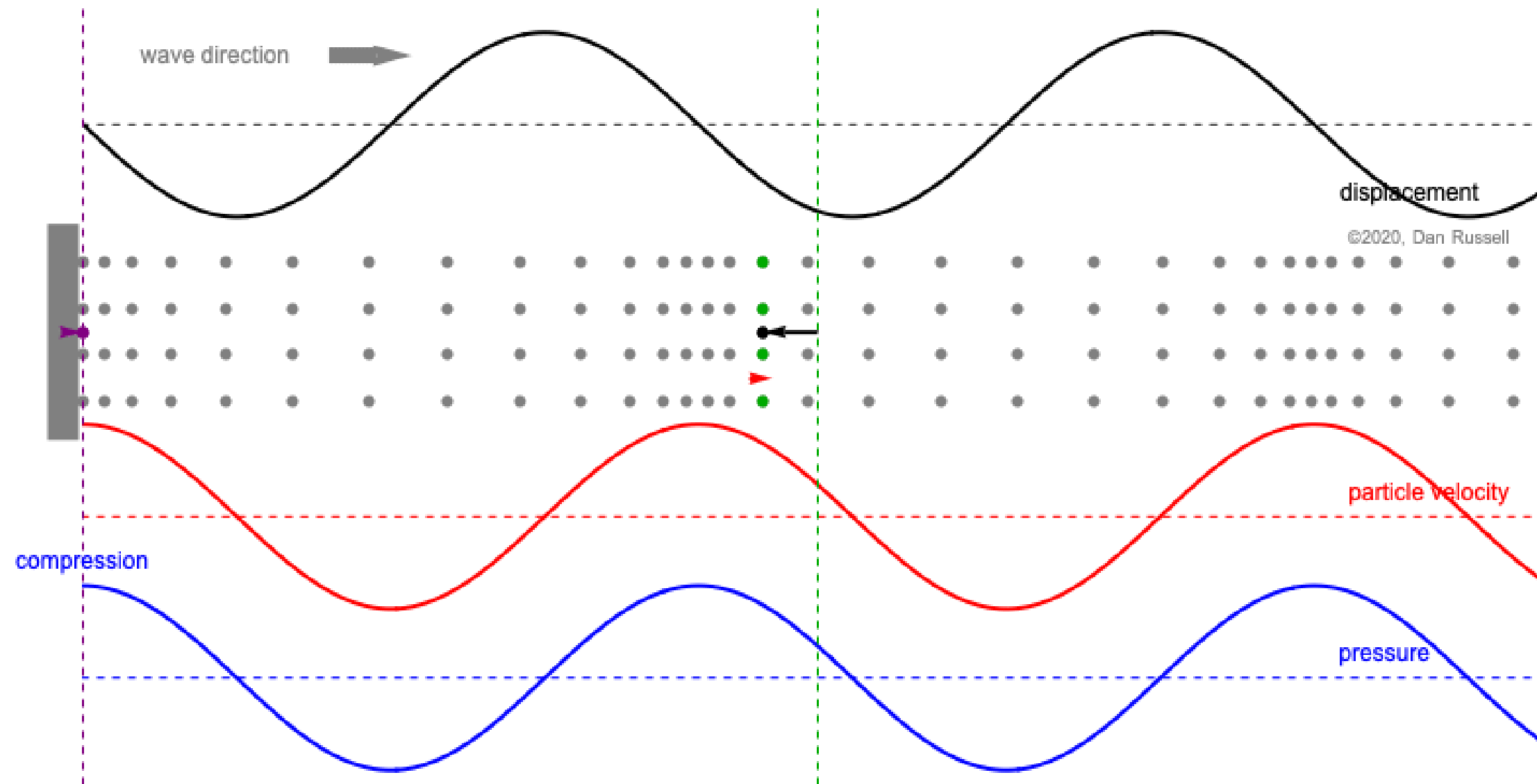
- É interessante que, para muitos tipos de ondas mecânicas, inclusive ondas em uma corda, a expressão para a velocidade de onda possui a mesma forma geral:

$$v = \sqrt{\frac{\text{Força restauradora devolvendo o sistema ao equilíbrio}}{\text{Inércia resistindo à volta ao equilíbrio}}}$$



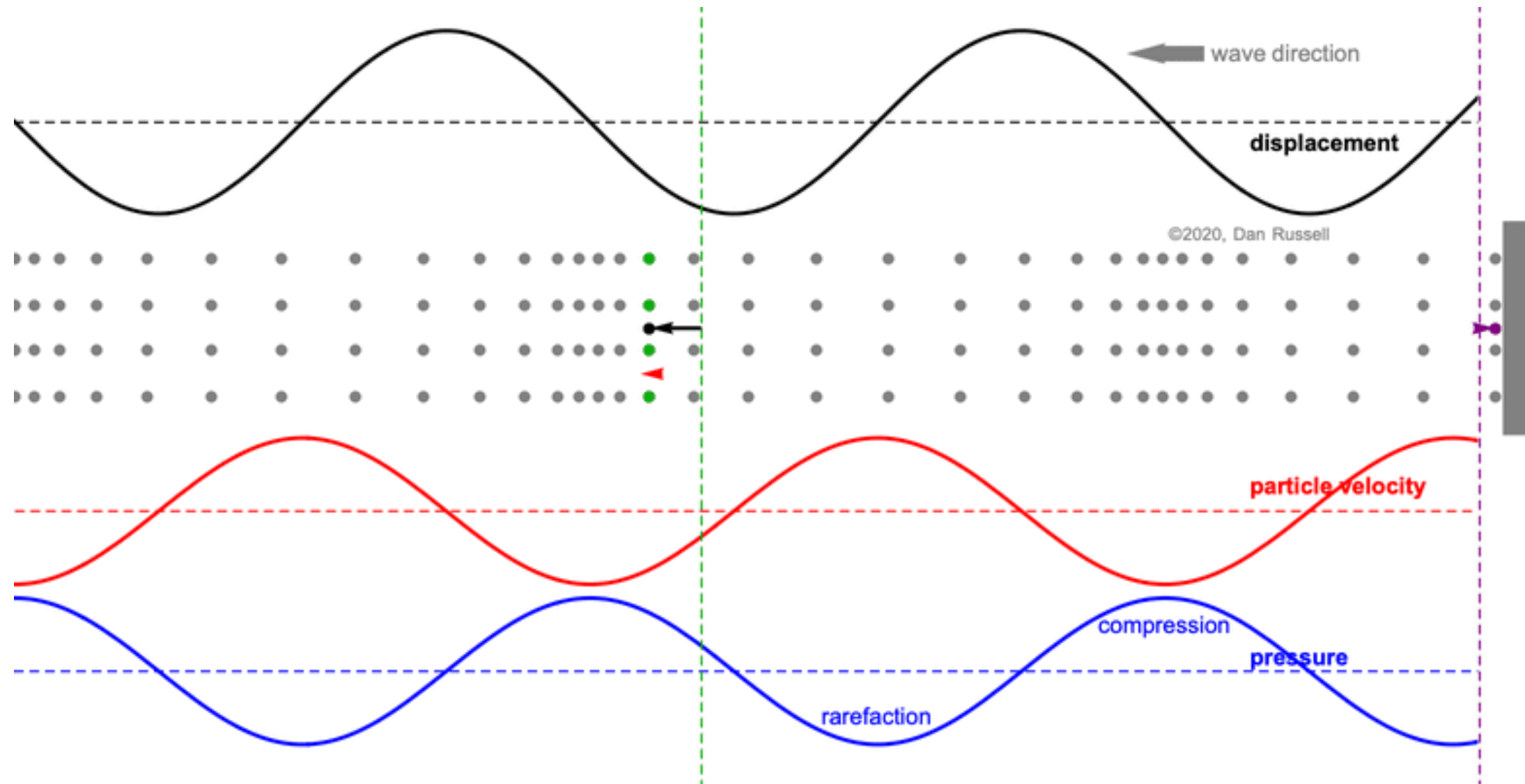
Grupo
Fase

Velocidade



Esta animação mostra uma onda longitudinal senoidal viajando na direção positiva (para frente), da esquerda para a direita.
A velocidade e a pressão da partícula estão em fase; a velocidade positiva máxima (movendo-se para a direita) ocorre quando a pressão é positiva (compressão).

Velocidade

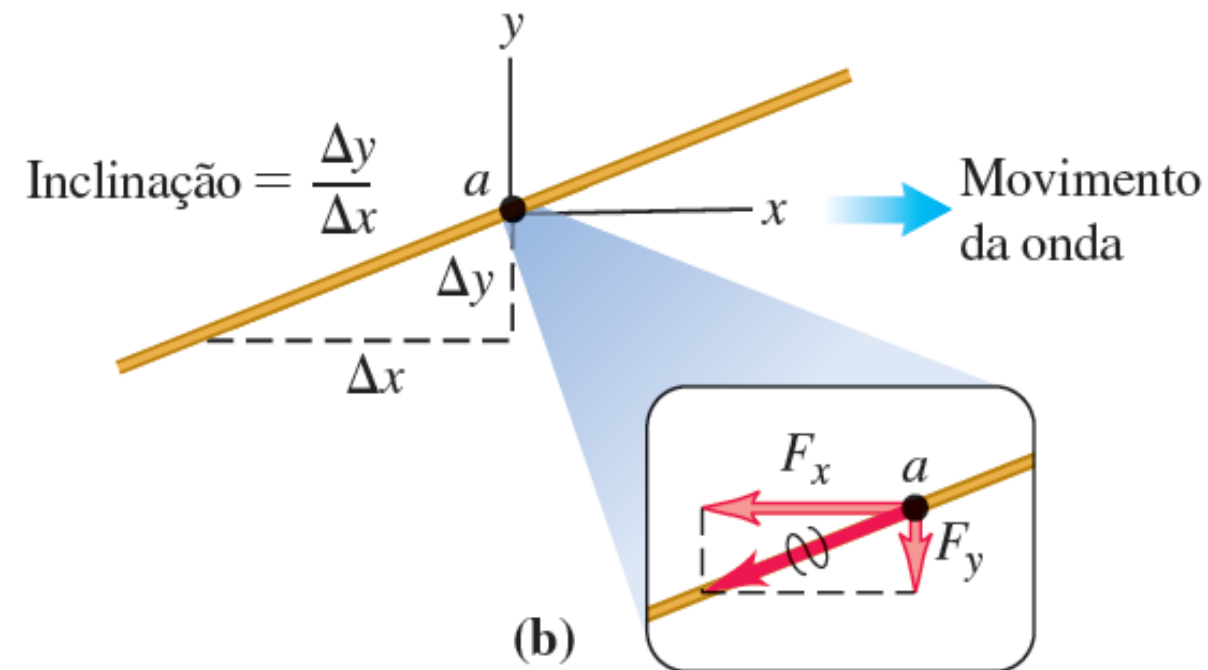


Esta animação mostra uma onda longitudinal senoidal viajando da direita para a esquerda na direção negativa.

A velocidade e a pressão da partícula estão agora em fase oposta; a velocidade positiva (movendo-se para a direita) ocorre quando a pressão é negativa (rarefação).

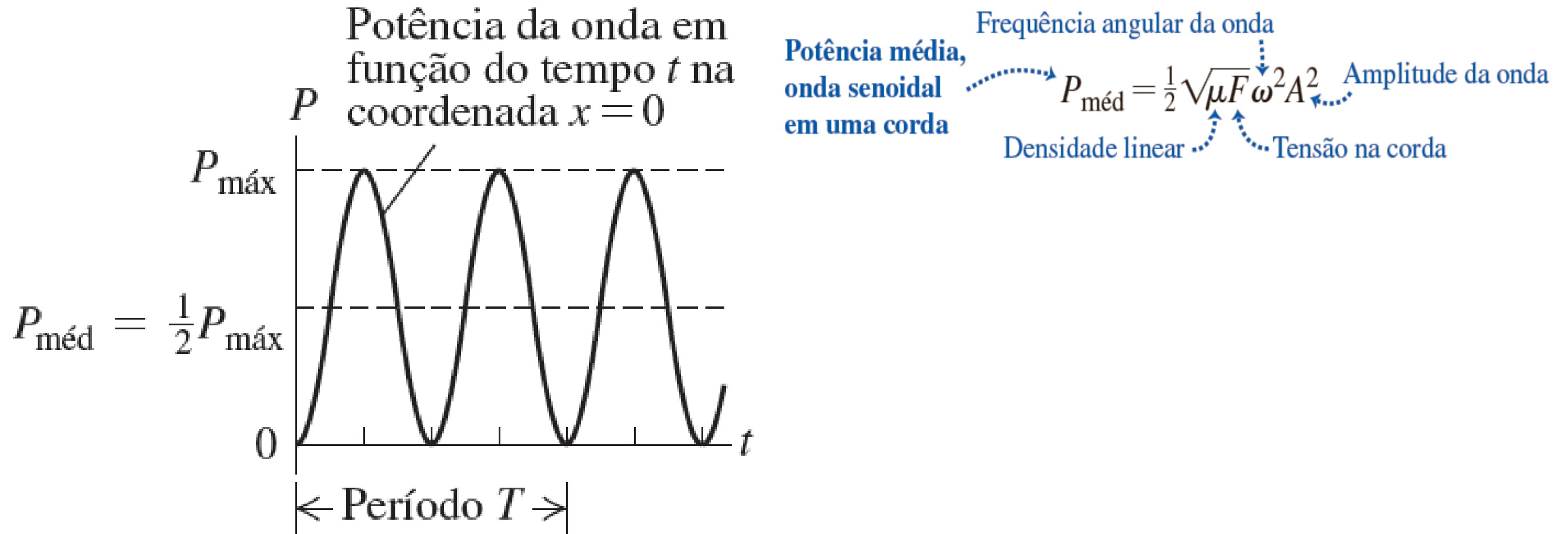
Energia no movimento ondulatório

- Todo **movimento ondulatório** possui uma **energia** associada a ele.
- São exemplos a energia que recebemos da luz solar e os efeitos destrutivos dos terremotos e das grandes ondas de uma ressaca.
- Como a energia é transferida de uma parte da corda para outra?



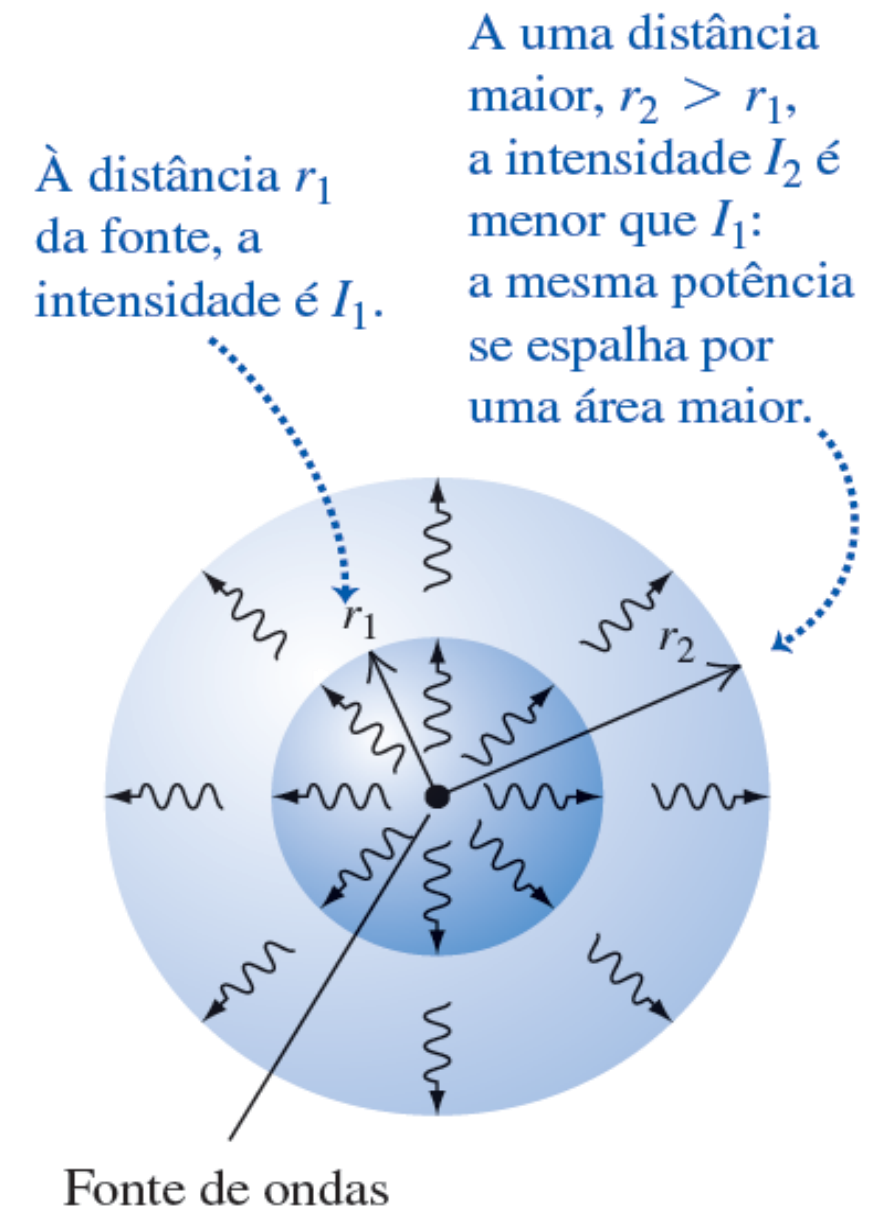
Energia no movimento ondulatório

- A potência nunca é negativa, o que significa que a energia nunca flui no sentido contrário à propagação da onda:



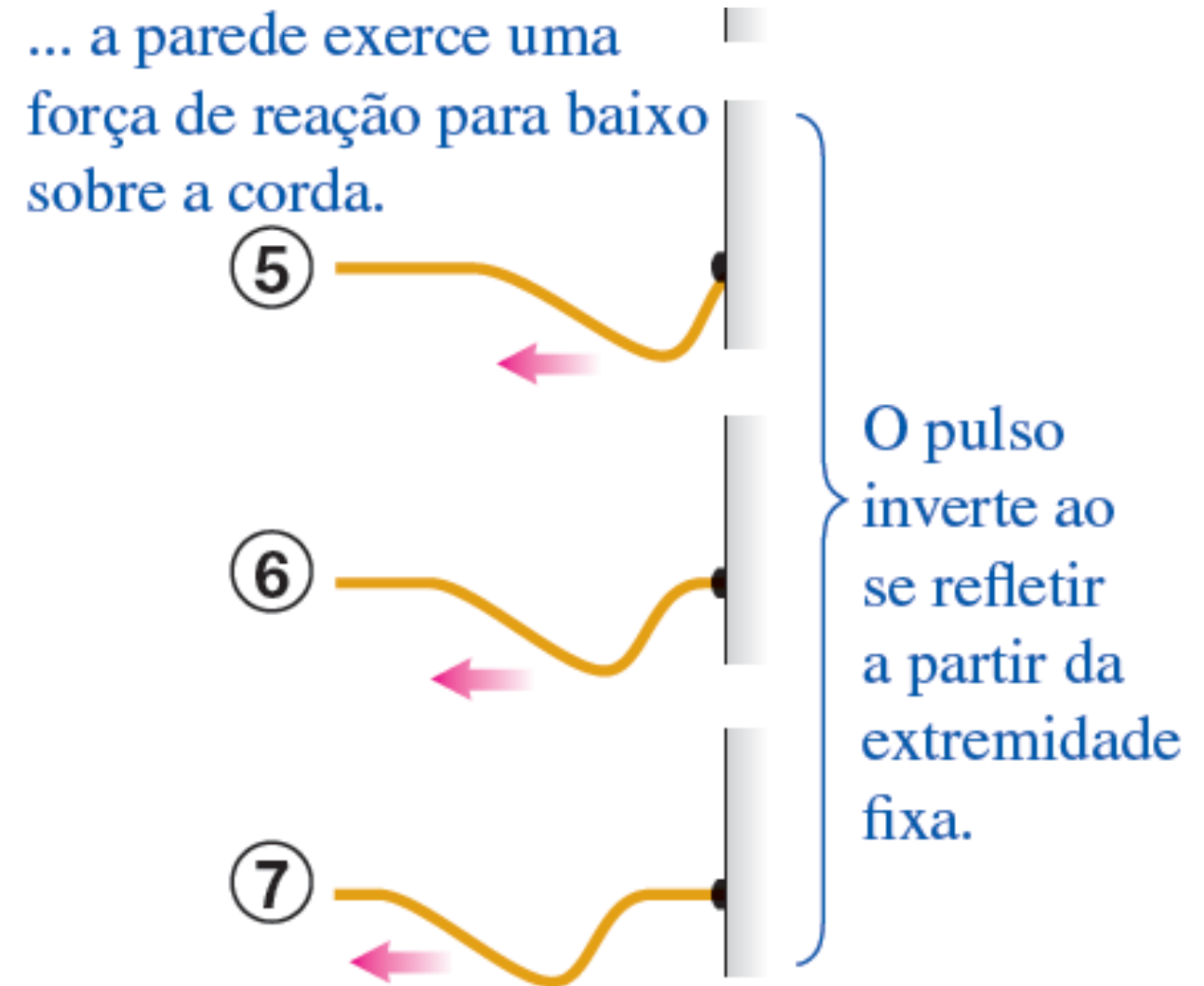
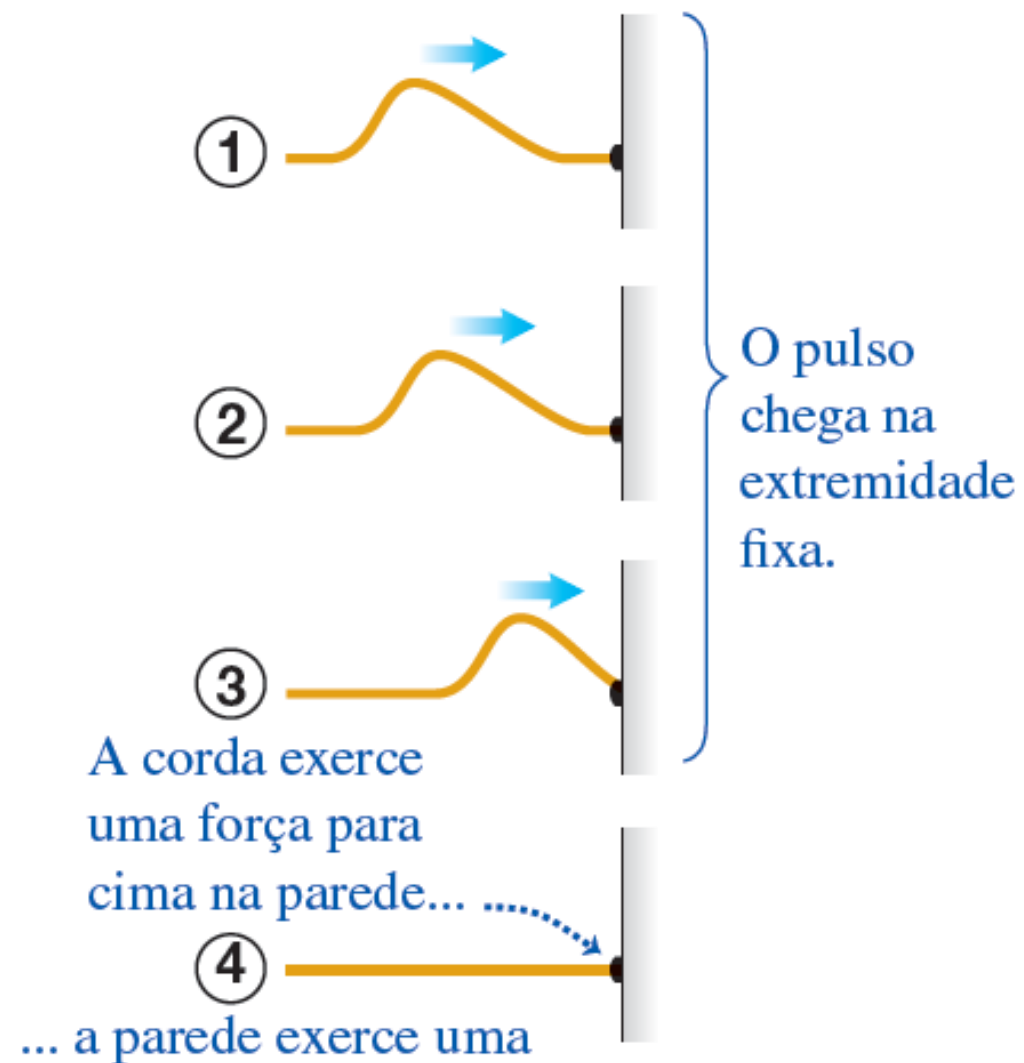
Energia no movimento ondulatório

- Definimos a intensidade da onda (simbolizada pela letra I) como a taxa média de tempo em que a energia é transportada pela onda, por unidade de área, sobre uma superfície perpendicular à direção de propagação.
- Quanto maior a distância de uma fonte de ondas, maior a área sobre a qual a potência da onda é distribuída e menor a intensidade da onda.



Interferência de ondas

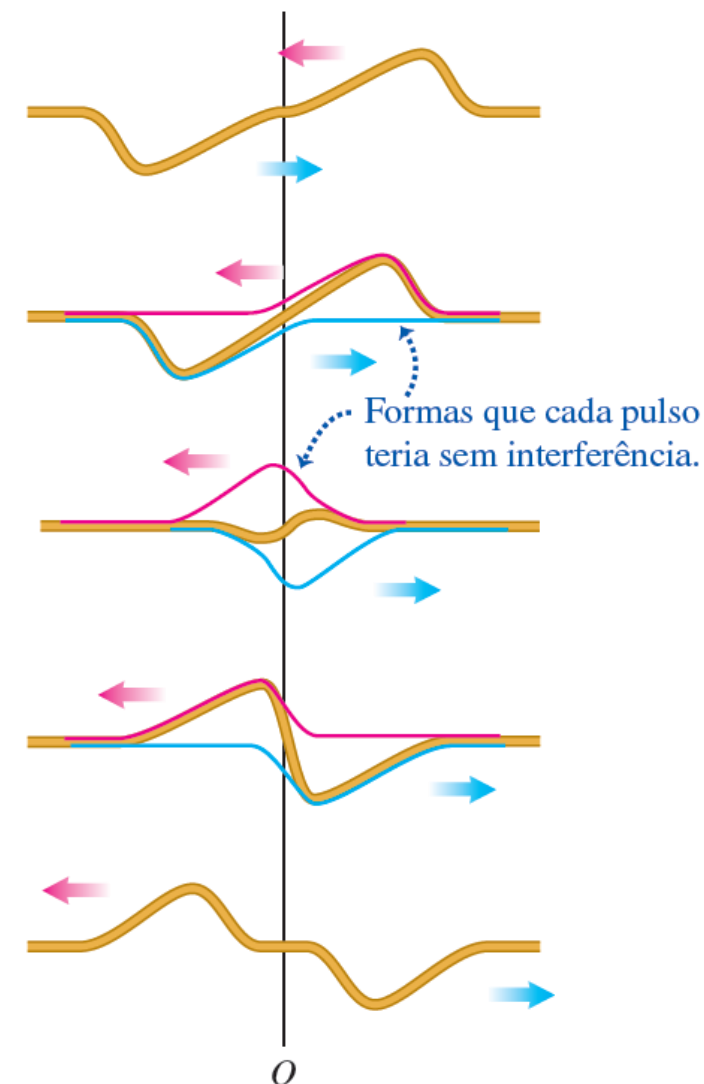
- Há interferência quando duas ou mais ondas passam pela mesma região ao mesmo tempo.



Condições de contorno de uma corda

- As condições na extremidade da corda, como um suporte rígido ou a ausência completa da força transversal, denominam-se **condições de contorno** (ou de limite).

À medida que os pulsos se superpõem, o deslocamento da corda em qualquer ponto é a soma algébrica do deslocamento decorrente dos pulsos individuais.



Princípio da superposição

- A combinação de dois pulsos separados em um mesmo ponto para obter um deslocamento resultante é um exemplo do **princípio da superposição**:
- Quando duas ondas se superpõem, o deslocamento resultante em qualquer ponto da corda em qualquer instante é obtido somando-se os deslocamentos individuais que cada ponto deveria ter caso o outro deslocamento não existisse.

**Princípio da
superposição:**

Funções de onda de duas ondas superpostas

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

Função de onda da onda combinada = soma das funções de onda individuais

Interferência de Ondas - Superposição de dois pulsos de onda de direção oposta

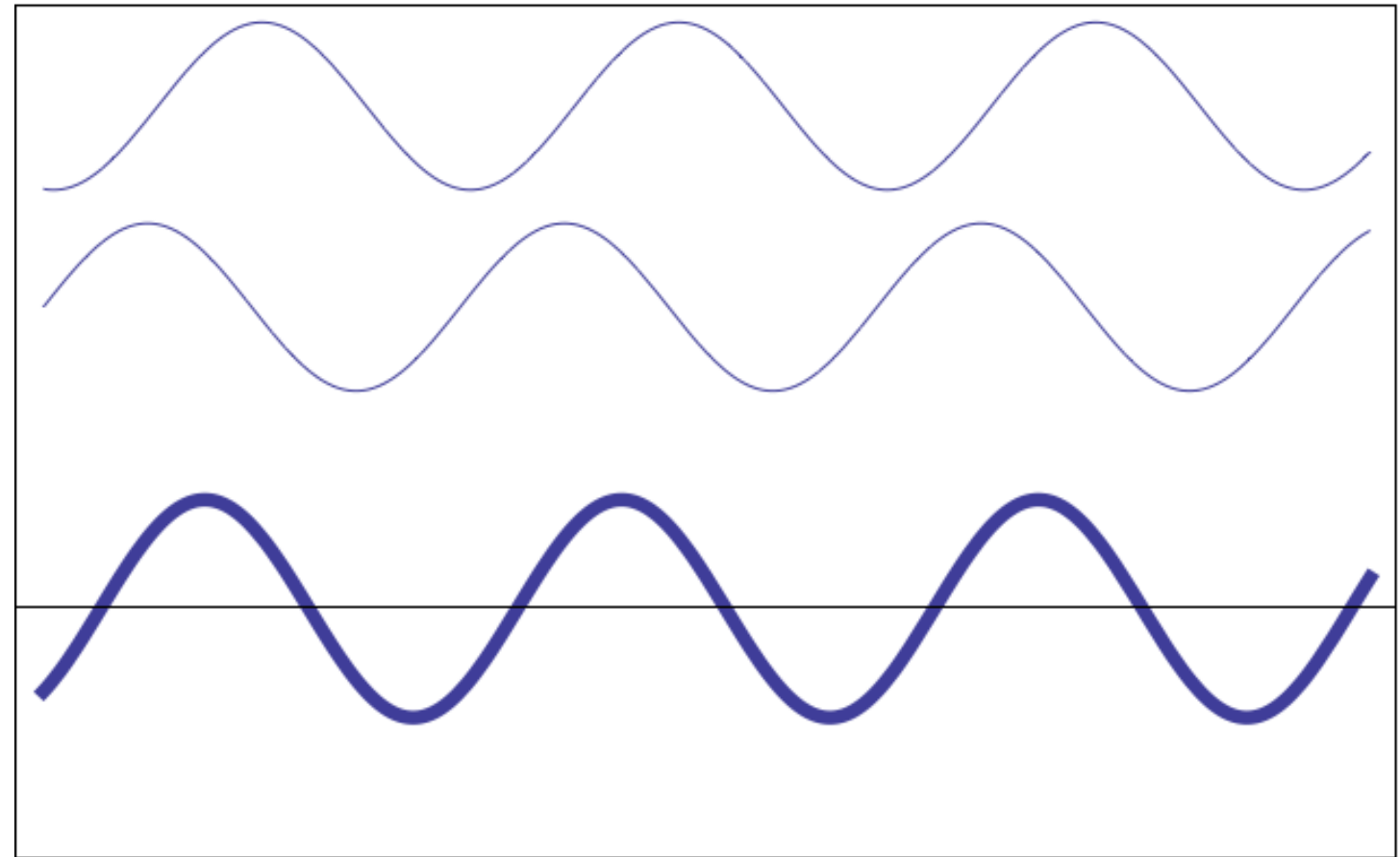


Interferência de Ondas - Interferência Construtiva e Destrutiva

$$y(x, t) = y_m \sin(kx - \omega t) + y_m \sin(kx - \omega t + \phi) = 2y_m \cos(\phi/2) \sin(kx - \omega t + \phi/2)$$

in-phase ($\phi = 0$)

opposite-phase ($\phi = 180^\circ$)



Interferência de Ondas -Duas ondas senoidais viajando em direções opostas criam uma onda estacionária

$$y(x, t) = y_m \sin(kx - \omega t) + y_m \sin(kx + \omega t) = 2y_m \cos(\omega t) \sin(kx)$$

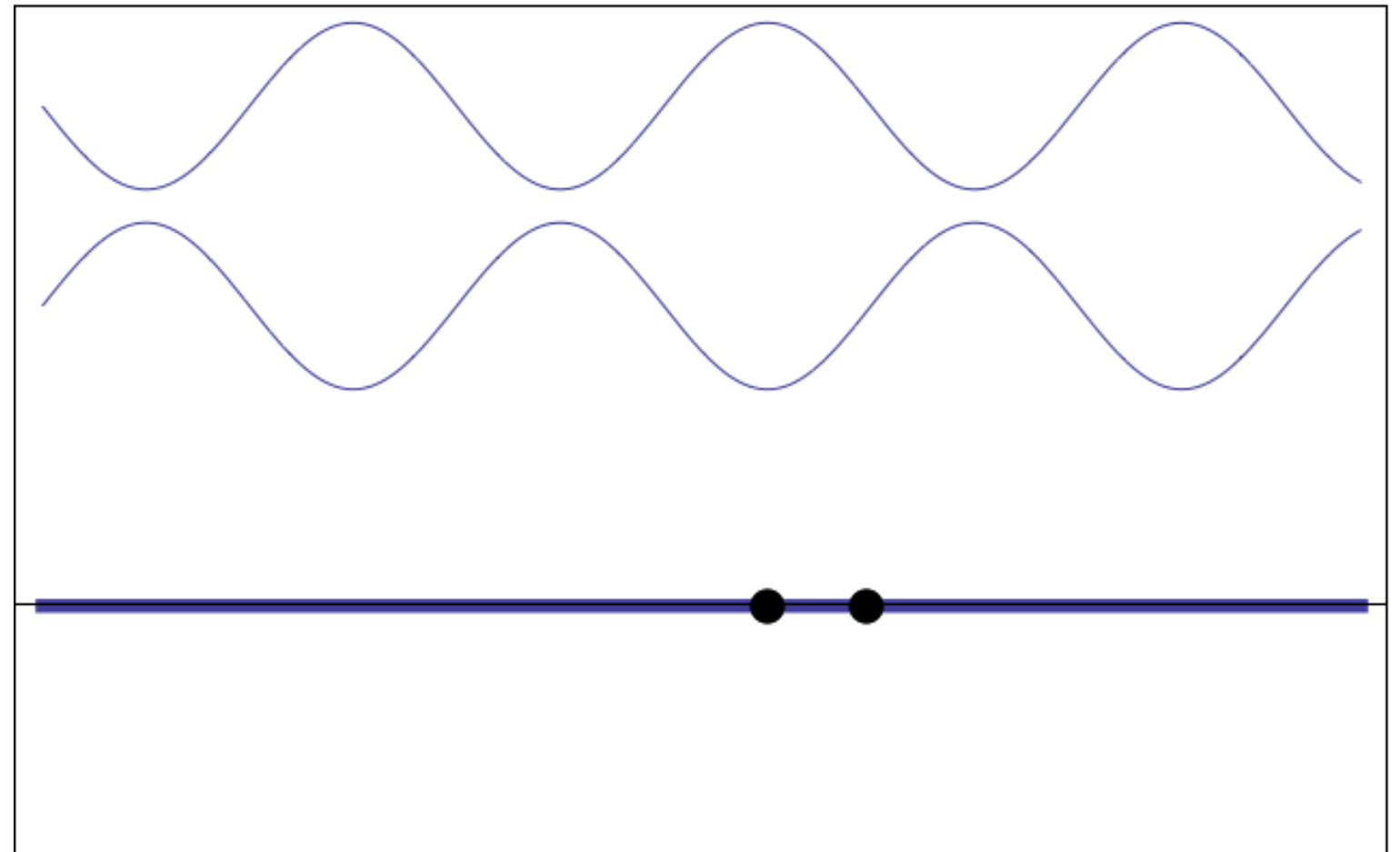
A amplitude da onda em função da posição é

$$2y_m \sin(kx)$$

Esta amplitude não viaja, mas fica parada e oscila para cima e para baixo de acordo com

$$\cos(\omega t)$$

Característica das ondas estacionárias são locais com deslocamento máximo (**antinós**) e locais com deslocamento zero (**nós**).

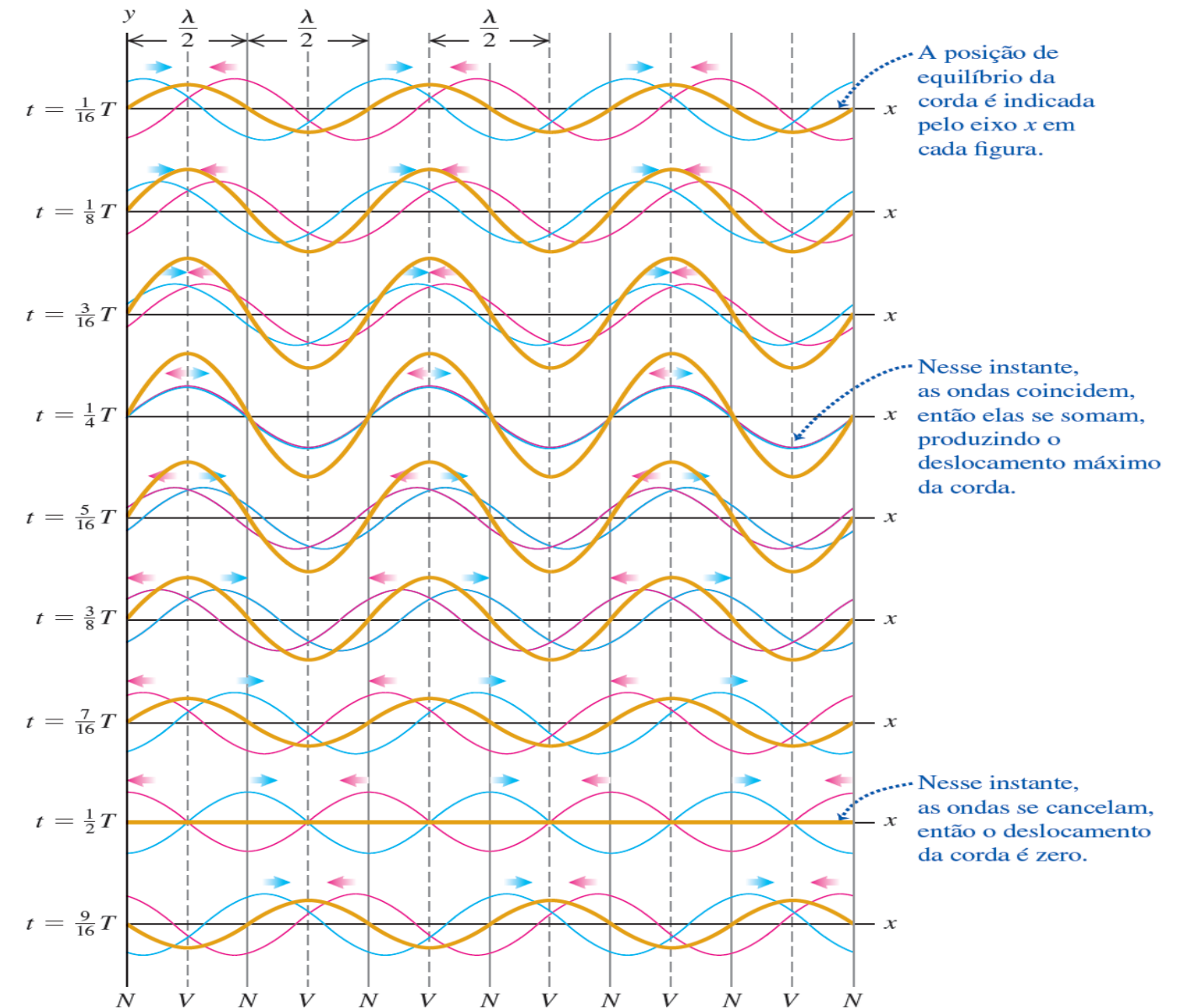


Dispersão

[Dispersion Examples: Normal Dispersion \(falstad.com\)](http://falstad.com)

Ondas sonoras estacionárias em uma corda

- Formação de uma onda estacionária:



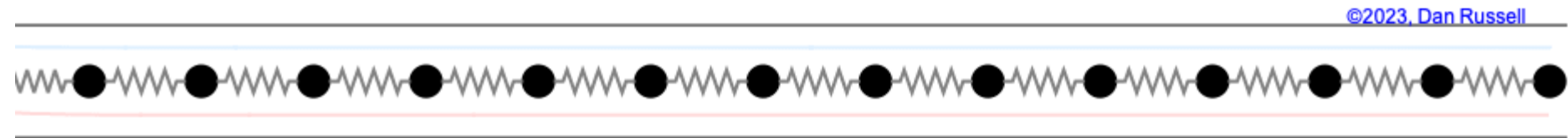
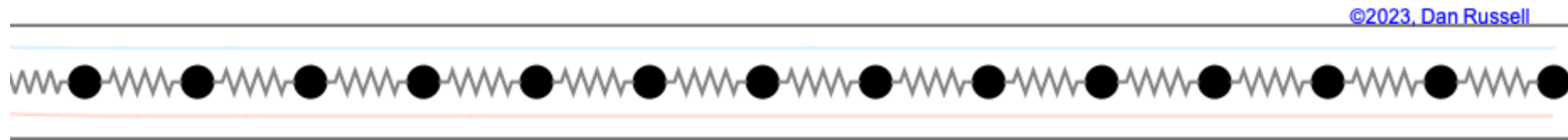
Física 2 – Ciências Moleculares

Caetano R. Miranda ***AULA 21 – 24/04/2024***

crmiranda@usp.br



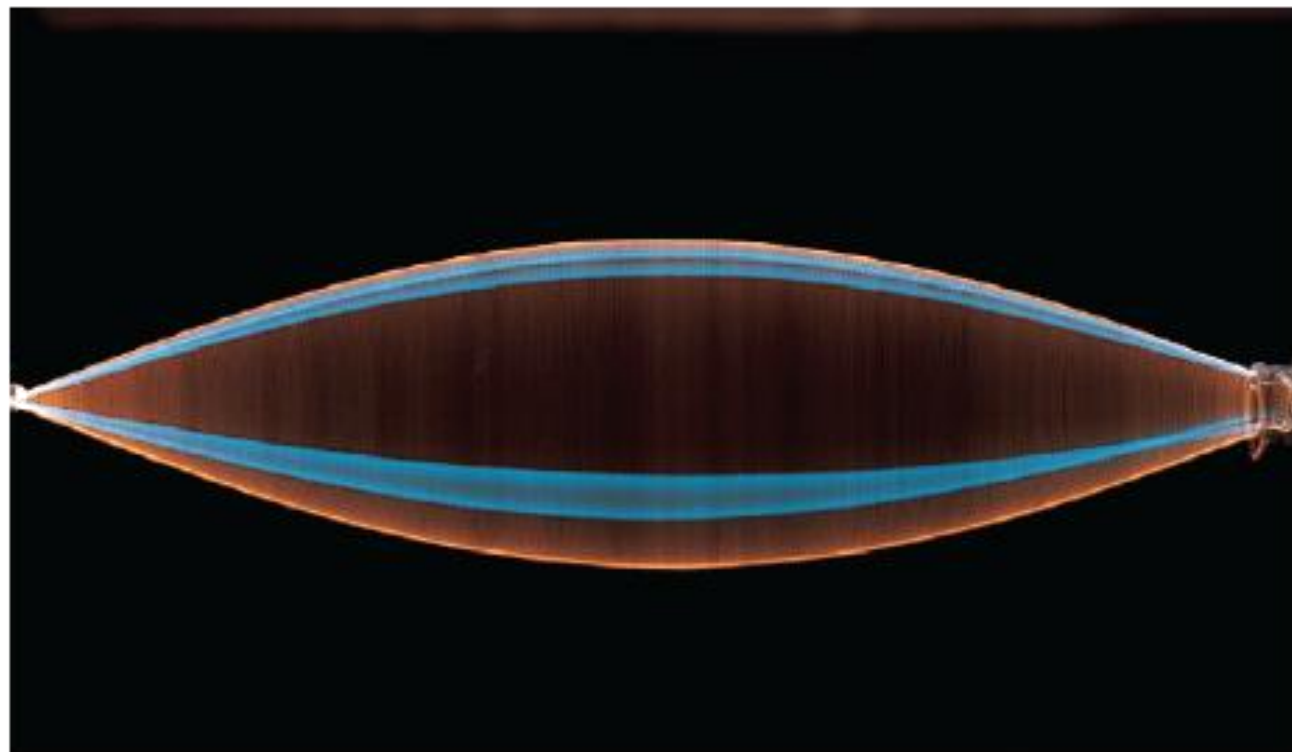
Ondas



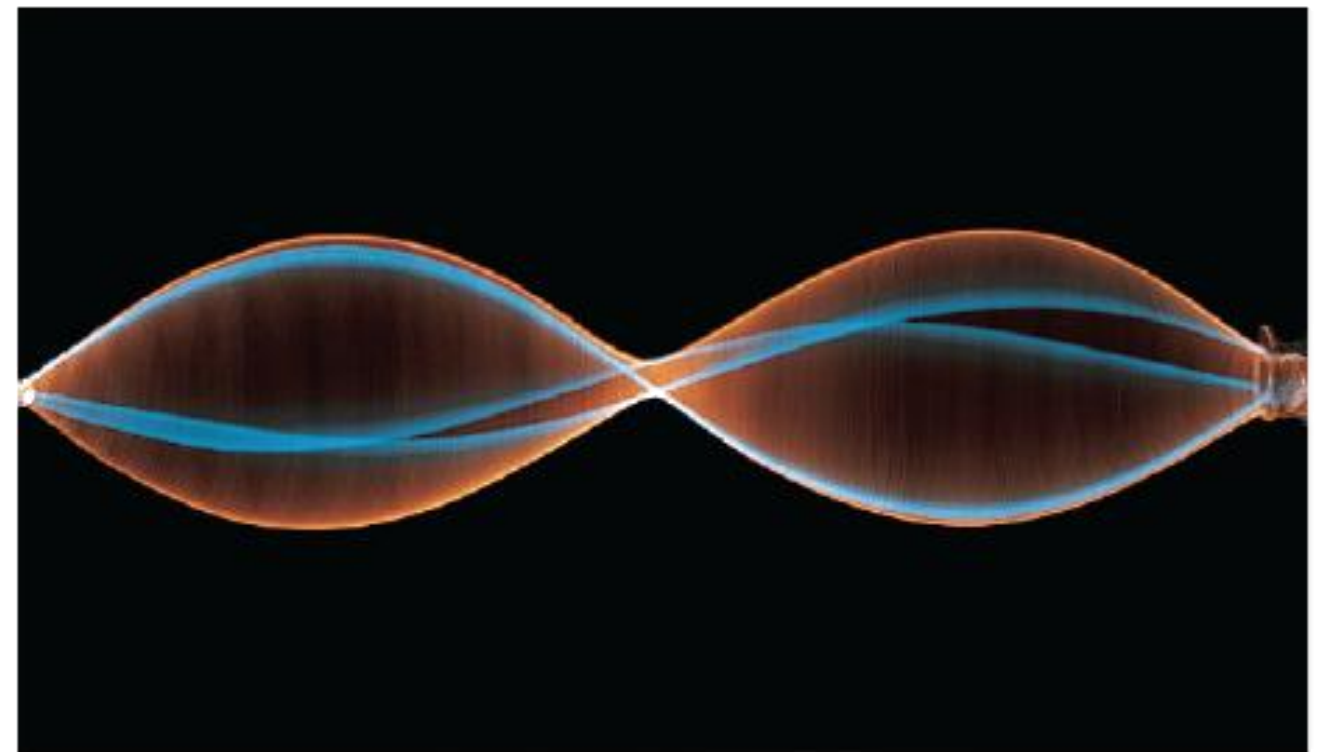
Ondas sonoras estacionárias em uma corda

- Tempos de exposição de ondas estacionárias em uma corda esticada:

(a) A corda tem meio comprimento de onda.



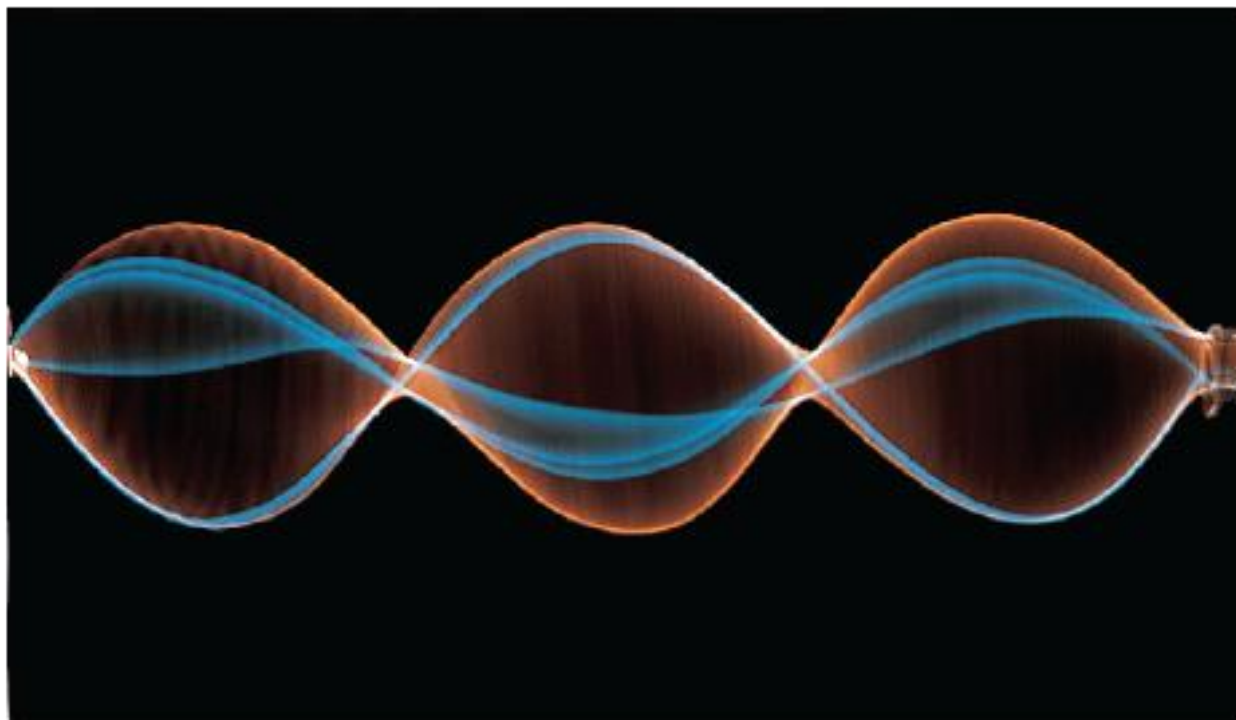
A corda tem um comprimento de onda.



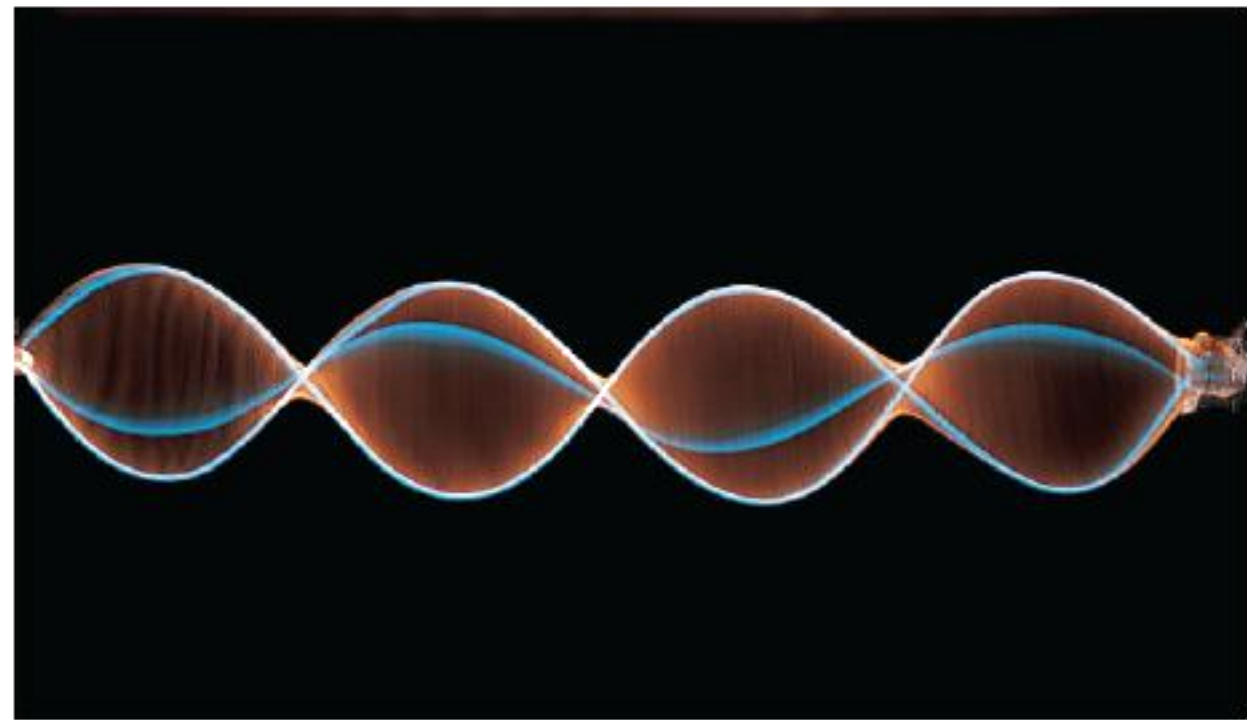
Ondas sonoras estacionárias em uma corda

- Tempos de exposição de ondas estacionárias em uma corda esticada:

(c) A corda tem comprimento de onda de um e meio.



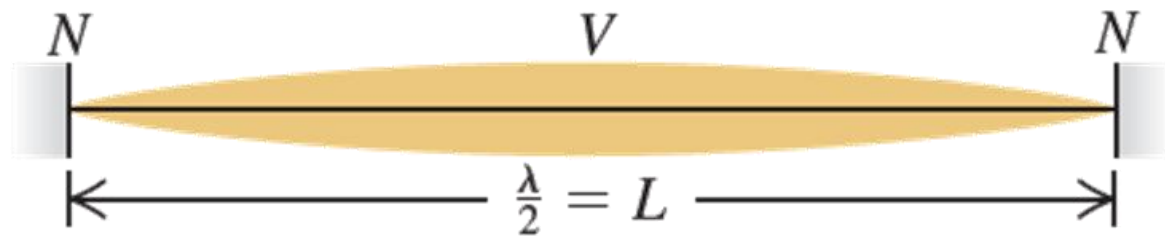
(d) A corda tem dois comprimentos de onda.



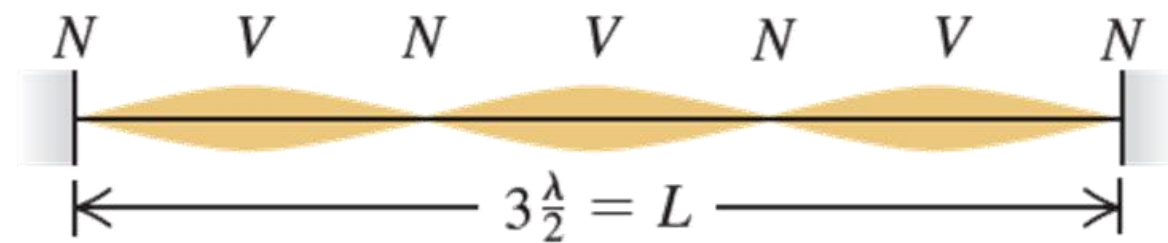
Modos normais de uma corda

- Um **modo normal** de um sistema oscilante é um movimento no qual todas as partículas do sistema se movem **senoidalmente** com a mesma frequência.

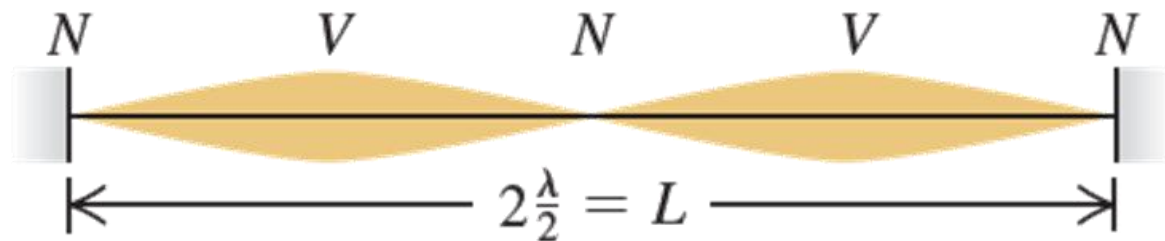
(a) $n = 1$: frequência fundamental, f_1



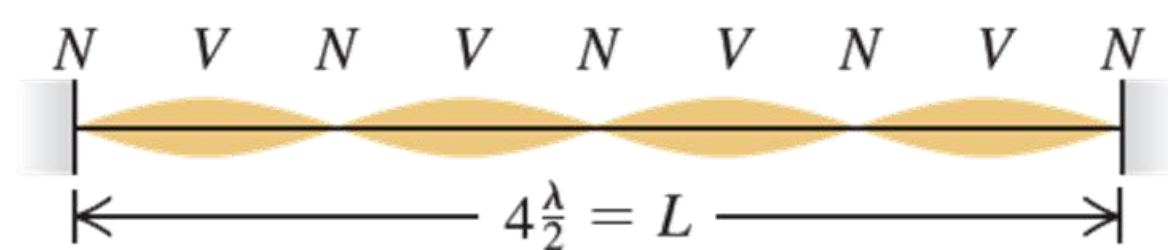
(c) $n = 3$: terceiro harmônico, f_3 (segundo sobretom)



(b) $n = 2$: segundo harmônico, f_2 (primeiro sobretom)



(d) $n = 4$: quarto harmônico, f_4 (terceiro sobretom)



Equação da Corda vibrante

Modos normais de uma corda vibrante

Modos normais de vibração:

Sistema físico em vibração: apenas algumas vibrações são permitidas (modos normais de vibração)

CASO 1: Corda vibrante

Corda com extremidades fixas ($x=0$ e $x=l$)

Vibrações: comprimento múltiplo inteiro do meio comprimento de onda da vibração

$L = n \cdot \lambda / 2$ com $n=1,2,3,\dots$

Monocórdios - Dan ban (Vietnam)

- Berimbau

Modos normais de uma corda vibrante

Coordenadas x (comprimento horizontal) e y (afastamento entre a posição da corda em um instante t e sua posição no equilíbrio):

$$y = A \cdot \text{SIN}(k \cdot x)$$

condições de contorno: $y=0$ para $x=0$ e $x = l$

Solução: $k \cdot l = n \cdot \pi$

Mas $l = n \cdot \lambda / 2$ pois $k = 2 \cdot \pi / \lambda$

Modos de vibração:

$$y_n = a_n \cdot \text{SIN}(x \cdot n \cdot \pi / \lambda), \text{ com } n=0,1,2,3, \dots$$

Modos normais de uma corda vibrante

A equação da corda vibrante pode ser generalizada como:

$$\partial^2 y / \partial x^2 - 1/v^2 \cdot \partial^2 y / \partial t^2 = 0$$

$$Y(0,t) = y(l,t) = 0$$

Por separação de variáveis:

$$y(x,t) = u(x) \cdot e^{-i\omega t}$$

Implicando em:

$$d^2 u / dx^2 + k^2 \cdot u = 0, \text{ com } k^2 = \omega^2 / v^2$$

$$\text{e } u(0) = u(l) = 0$$

Modos normais de uma corda vibrante

As soluções podem ser dadas na forma:

$$y_n = a_n \sin(n \cdot \pi \cdot x / l) e^{-i \omega_n t}$$

onde $k_n = n \cdot \pi / l$ e $\omega_n = k_n \cdot v$ com $n=1,2,3, \dots$

Como a equação é linear, toda combinação linear das funções é solução

$$y(x,t) = \text{Somatório } (y_n) \qquad y(x,t) = \sum_{n=1}^{\infty} b_n \sin\left(\frac{n \pi}{l} x\right) \cos\left(\frac{n \pi}{l} v t + \delta_n\right)$$

Análise de Fourier

Princípio de superposição

$$y(x, t) = \sum_{n=1}^{\infty} b_n \operatorname{sen}\left(\frac{n\pi}{l} x\right) \cos\left(\frac{n\pi}{l} v t + \delta_n\right)$$

Velocidade

$$\frac{\partial y}{\partial t}(x, t) = - \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{n\pi}{l} v\right) b_n \operatorname{sen}\left(\frac{n\pi}{l} x\right) \operatorname{sen}\left(\frac{n\pi}{l} v t + \delta_n\right)$$

Análise de Fourier

$$y(x, 0) = y_0(x) = \sum_{n=1}^{\infty} c_n \operatorname{sen}\left(\frac{n\pi}{l} x\right) \quad (0 \leq x \leq l)$$

$$\frac{\partial y}{\partial t}(x, 0) = y_1(x) = \sum_{n=1}^{\infty} d_n \operatorname{sen}\left(\frac{n\pi}{l} x\right)$$

Condições:

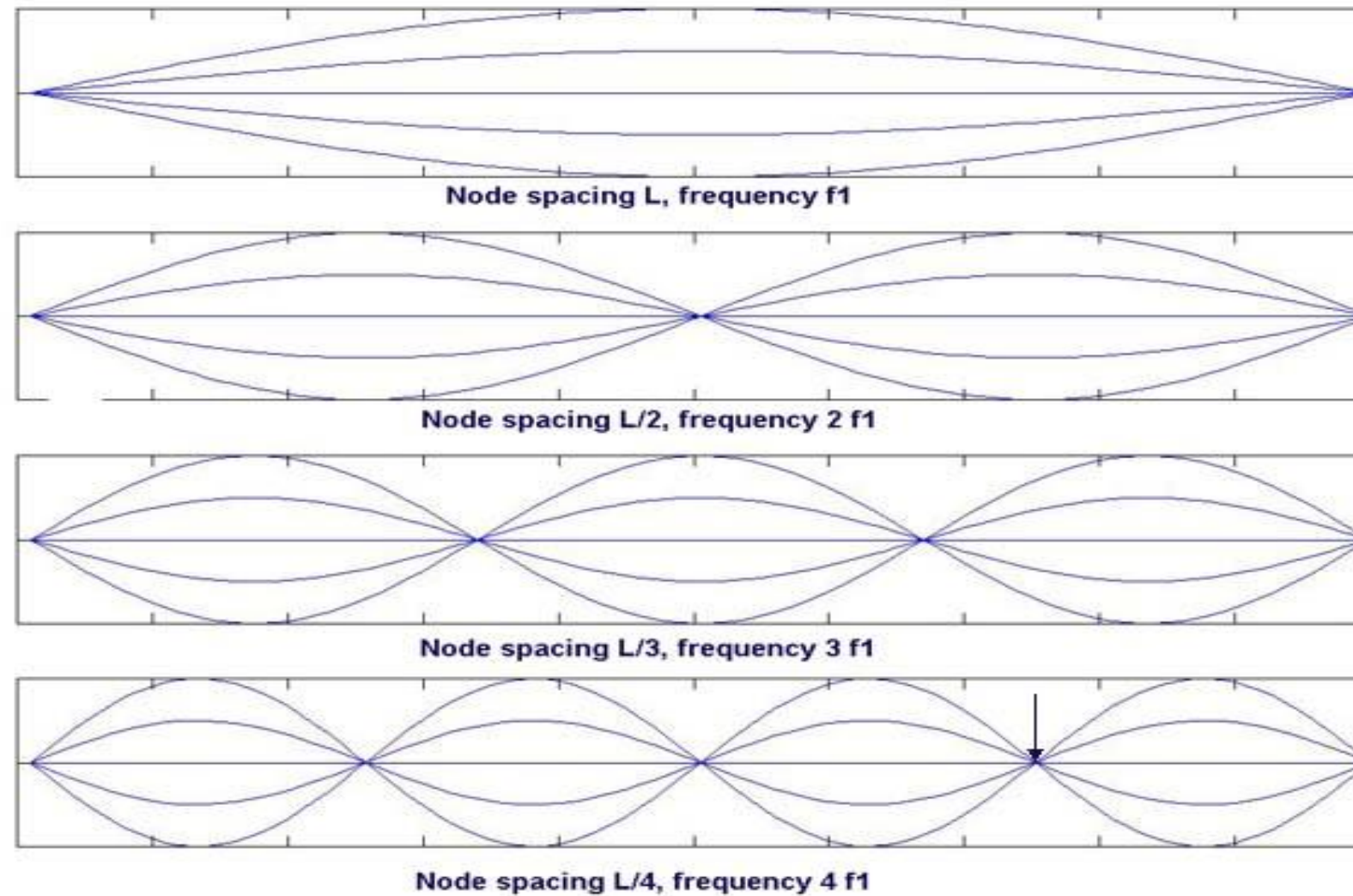
$$y(x, 0) = y_0(x)$$

$$\frac{\partial y}{\partial t}(x, 0) = y_1(x)$$

$$c_n = b_n \cos \delta_n$$

$$d_n = -\frac{n\pi v}{l} b_n \operatorname{sen} \delta_n$$

Modos normais de uma corda vibrante



Demonstração – corda vibrante

[Loaded String Simulation \(falstad.com\)](http://falstad.com)

Vibrações em uma membrana

Os modos vibracionais de uma membrana retangular (lados a e b) são as soluções da equação de ondas em 2-D:

$$\partial^2 z / \partial x^2 + \partial^2 z / \partial y^2 - 1/v^2 \cdot \partial^2 z / \partial t^2 = 0$$

com as condições:

$$z(0,y,t) = z(a,y,t) = z(x,0,t) = z(x,b,t) = 0$$

Soluções:

$$z(x,y,t) = \text{Sum}\{a_{n_1 n_2} \cdot \sin(x \cdot n_1 \cdot \pi/a) \cdot \sin(y \cdot n_2 \cdot \pi/b) e^{-i\omega_{n_1 n_2} t}\}$$

Membrana retangular

[Rectangular Membrane Applet \(falstad.com\)](http://falstad.com/rectmem)

Vibrações em uma membrana

Os modos vibracionais de uma membrana circular são as soluções da equação de ondas em 2-D:

$$1/r \frac{\partial}{\partial r} (r \frac{\partial z}{\partial r}) + 1/r^2 \frac{\partial^2 z}{\partial \phi^2} - 1/v^2 \cdot \frac{\partial^2 z}{\partial t^2} = 0$$

com as condições:

$$z(R, \phi, t) = 0$$

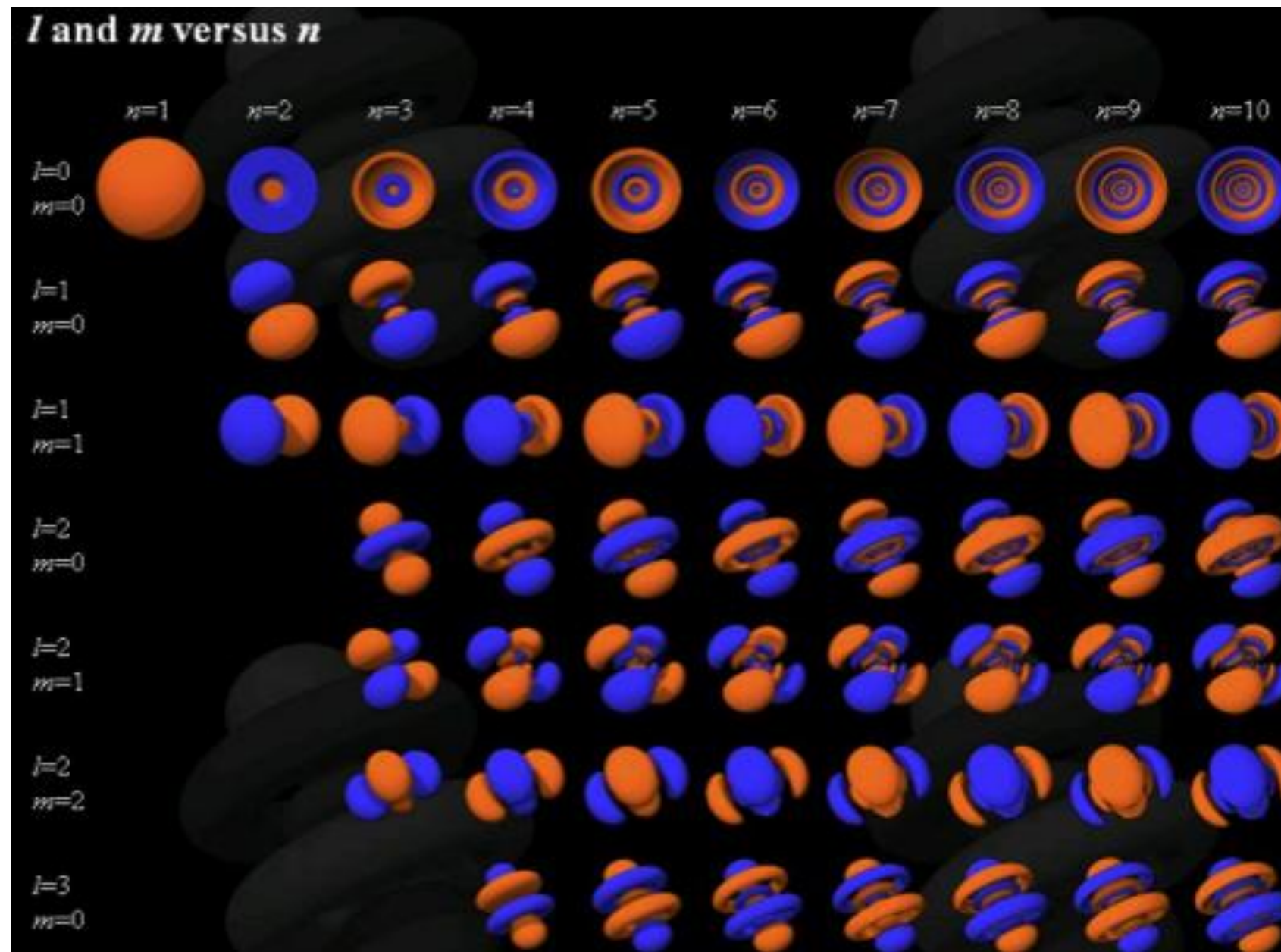
Soluções:

Funções de Bessel

Membrana circular

[Circular Membrane Applet \(falstad.com\)](http://falstad.com/circular)

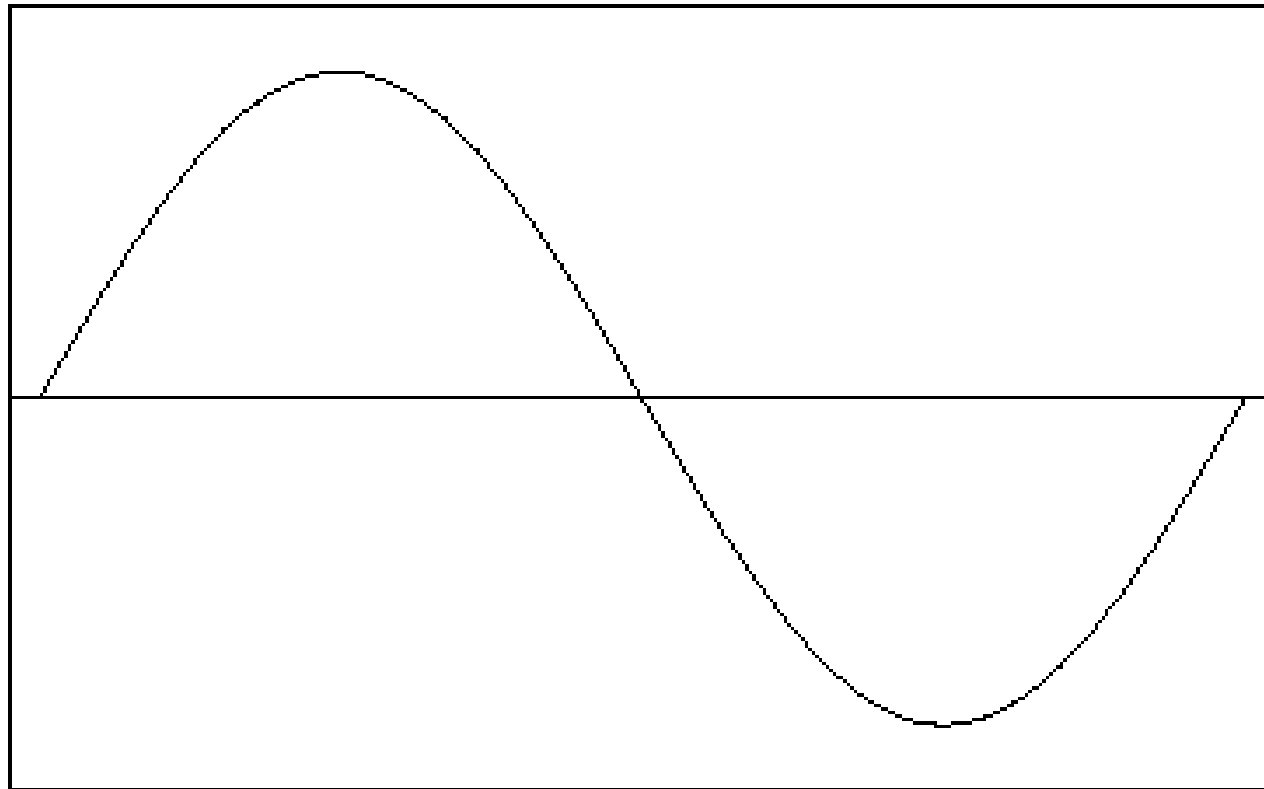
Potencial de Coulomb



Laboratório (Cuba de Ondas)

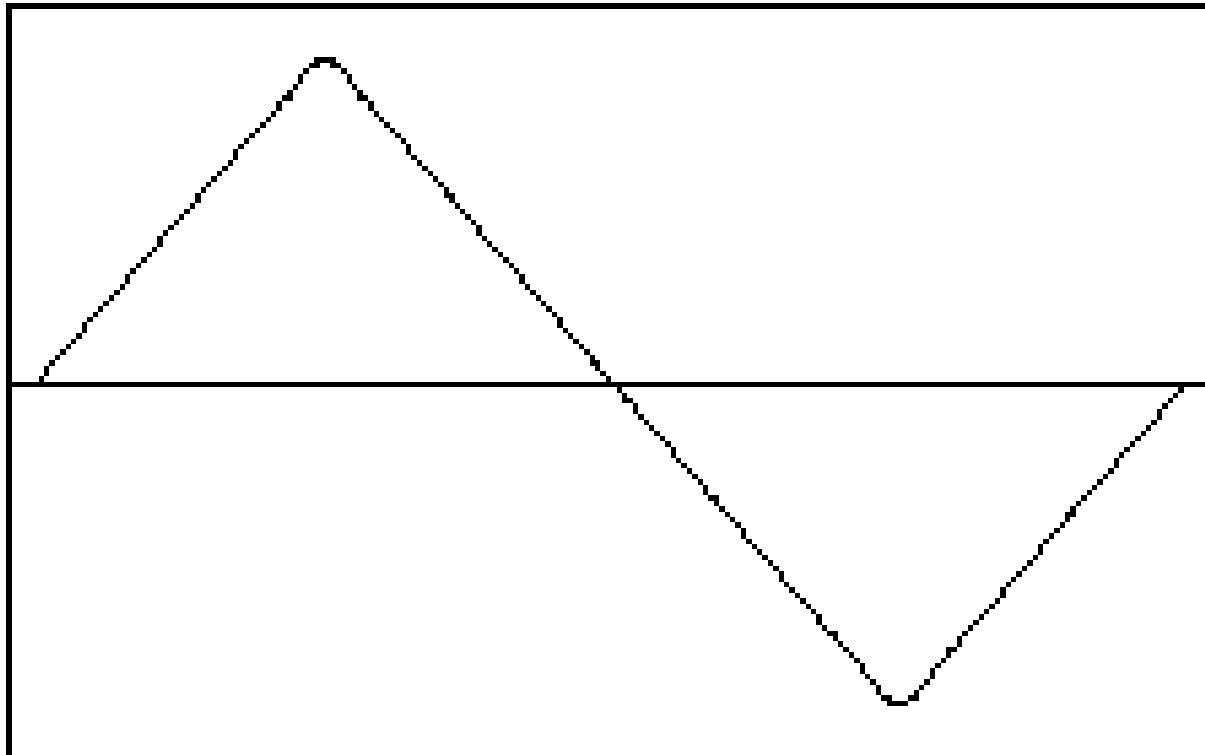
[Ripple Tank Simulation \(falstad.com\)](http://falstad.com/ripple)

Fourier – onda quadrada

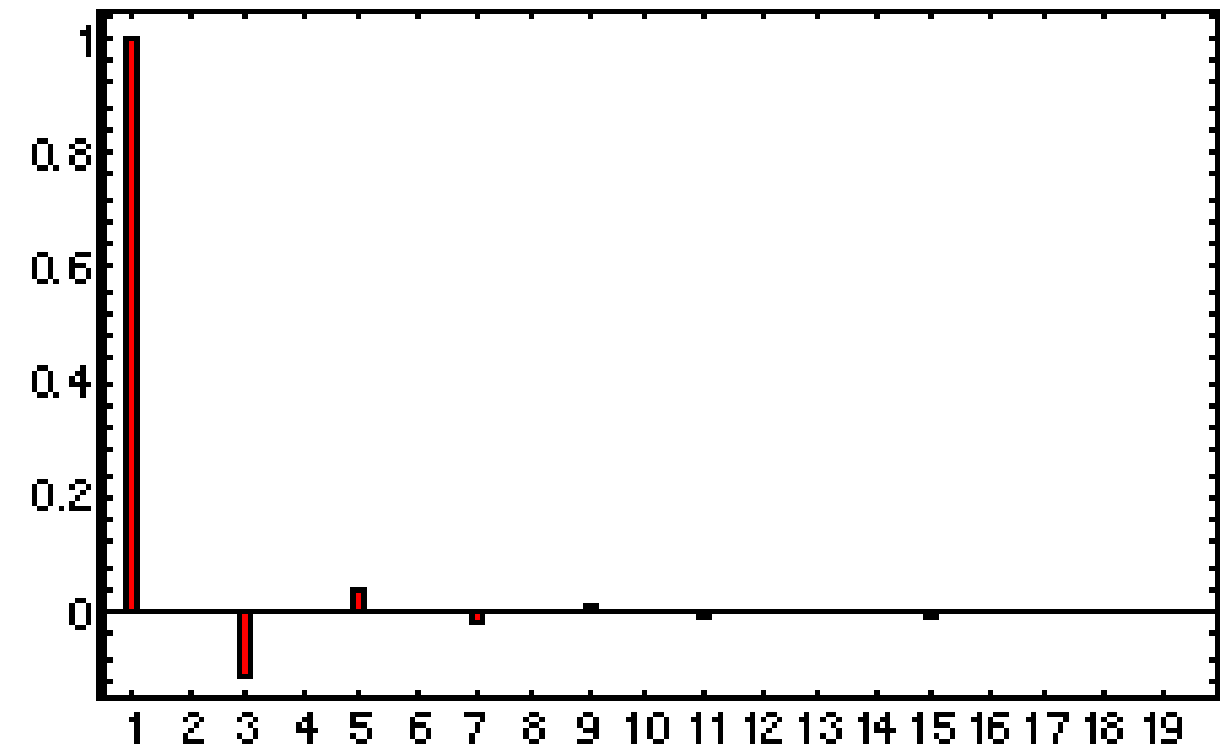


Onda triangular

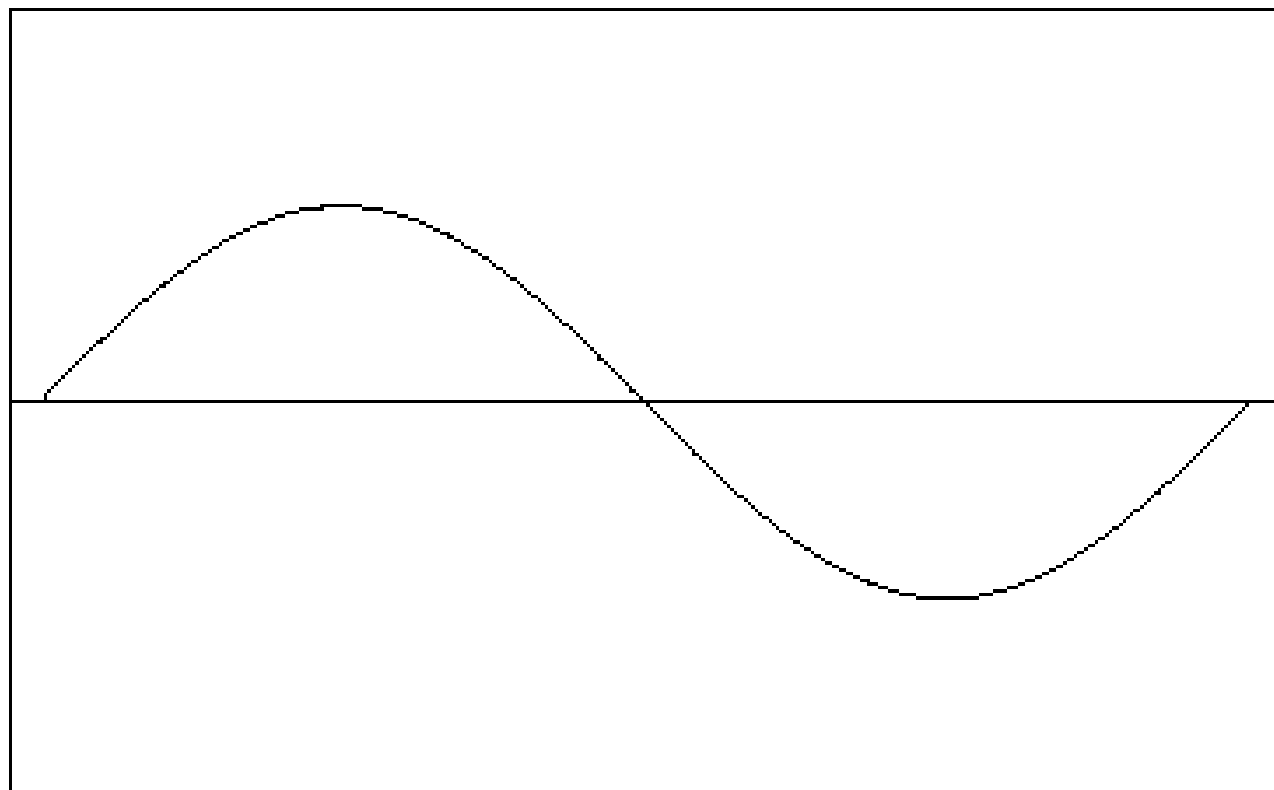
Sum Wave



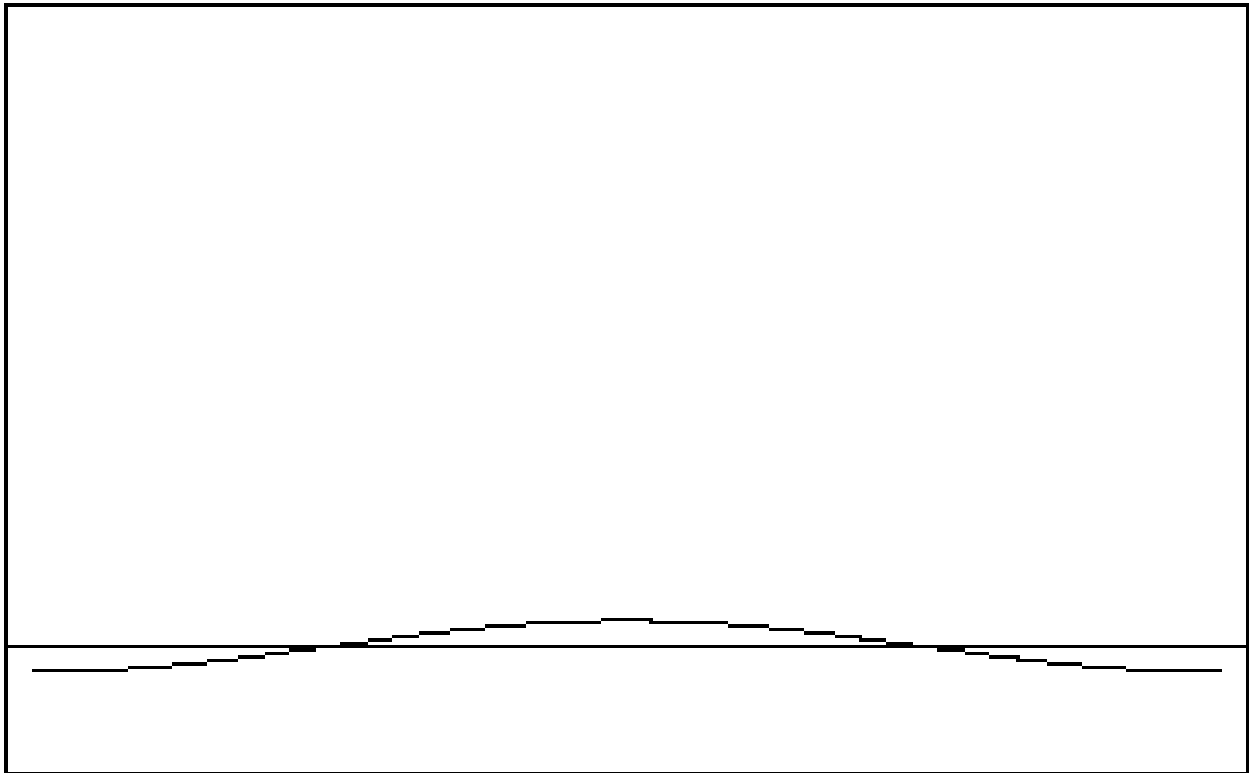
Frequency Spectrum



Dente de serra



Pulso



Física 2 – Ciências Moleculares

Caetano R. Miranda ***AULA 19 – 14/05/2025***

**Um barulhinho bom: inspirações
entre música e física**



O músico e o físico



Vantagens

Podemos ouvir vários sons simultaneamente →

Multidimensional

Treinado para seguir **ritmo** e **altura** → melhor para detectar variações abruptas, transitórias, ou sutis

Seletivo → pode-se seguir um determinado canal ou cortar outros

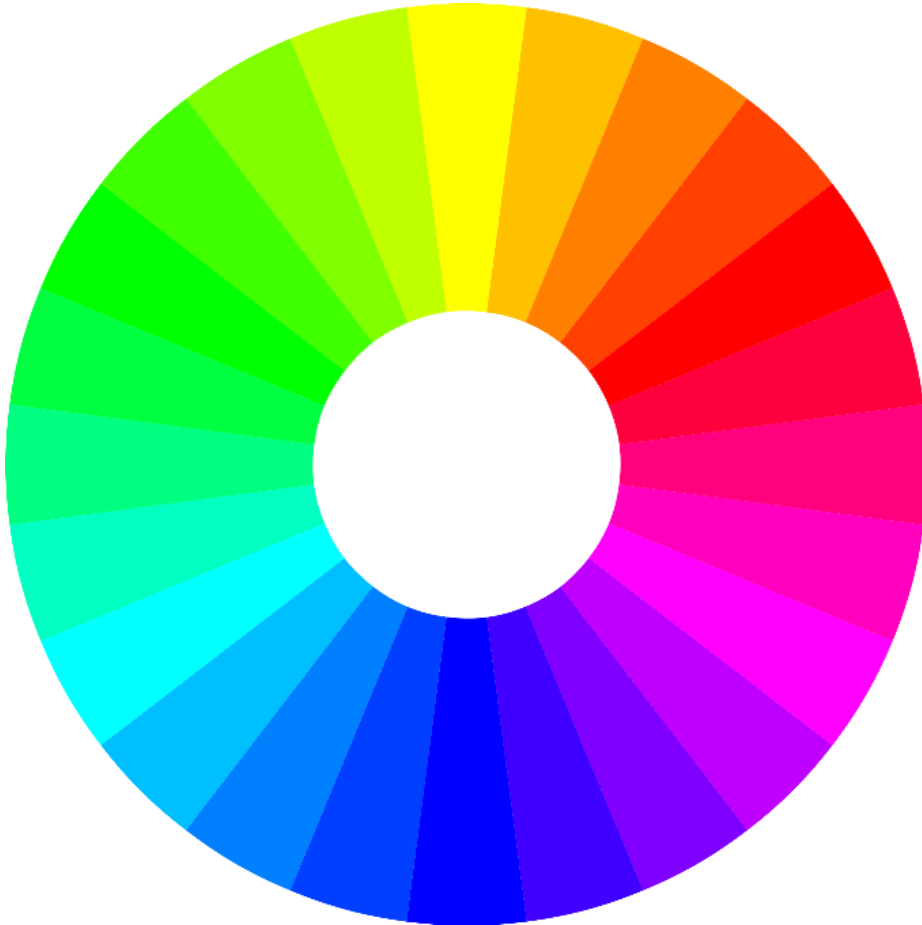
Experiência constante → “sem piscar” ou “olhar para o lado”

O som pode ser adicionado (mais dados) sem aumentar a sobrecarga visual

Localização espacial, impacto emocional e realismo.

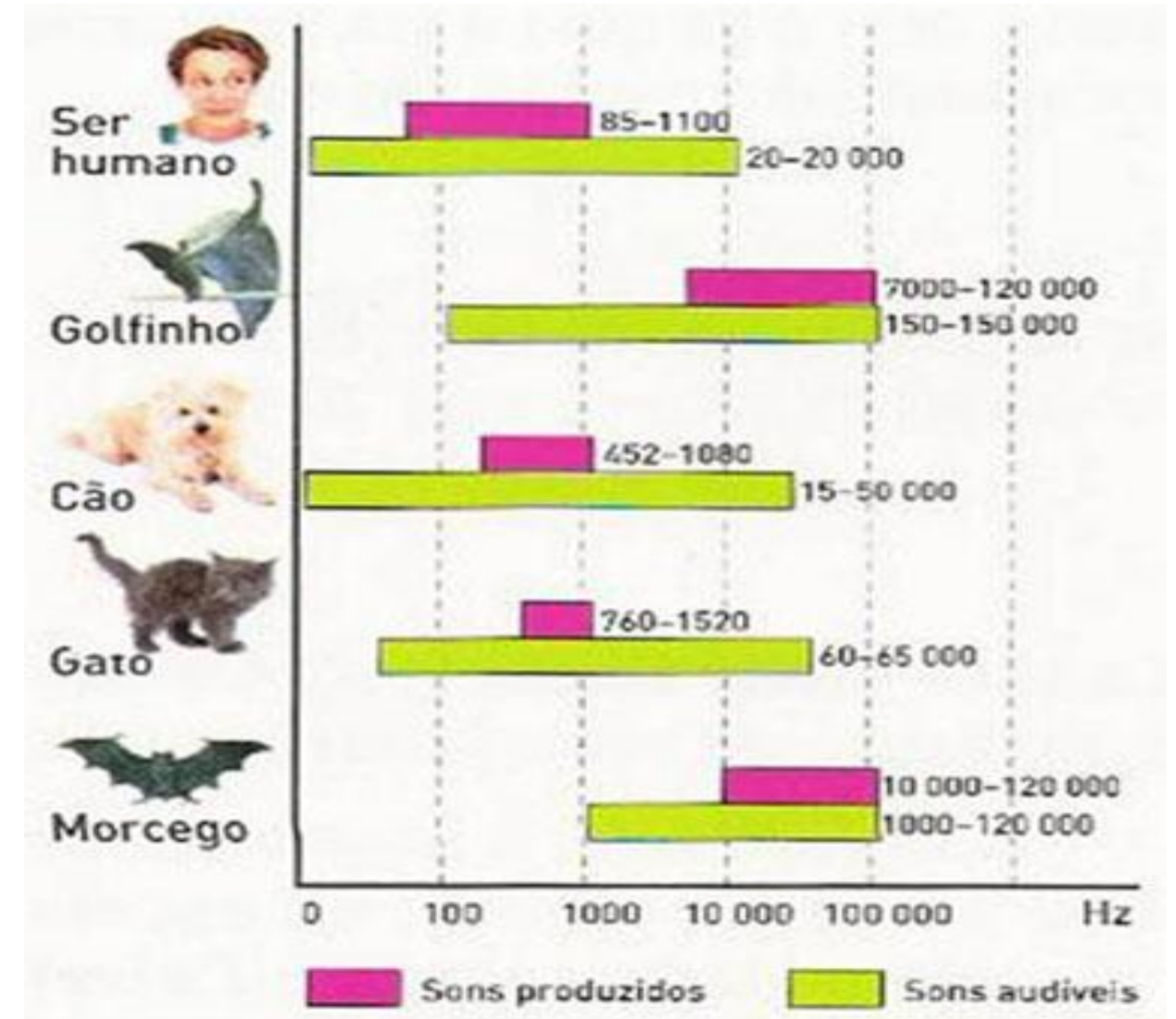
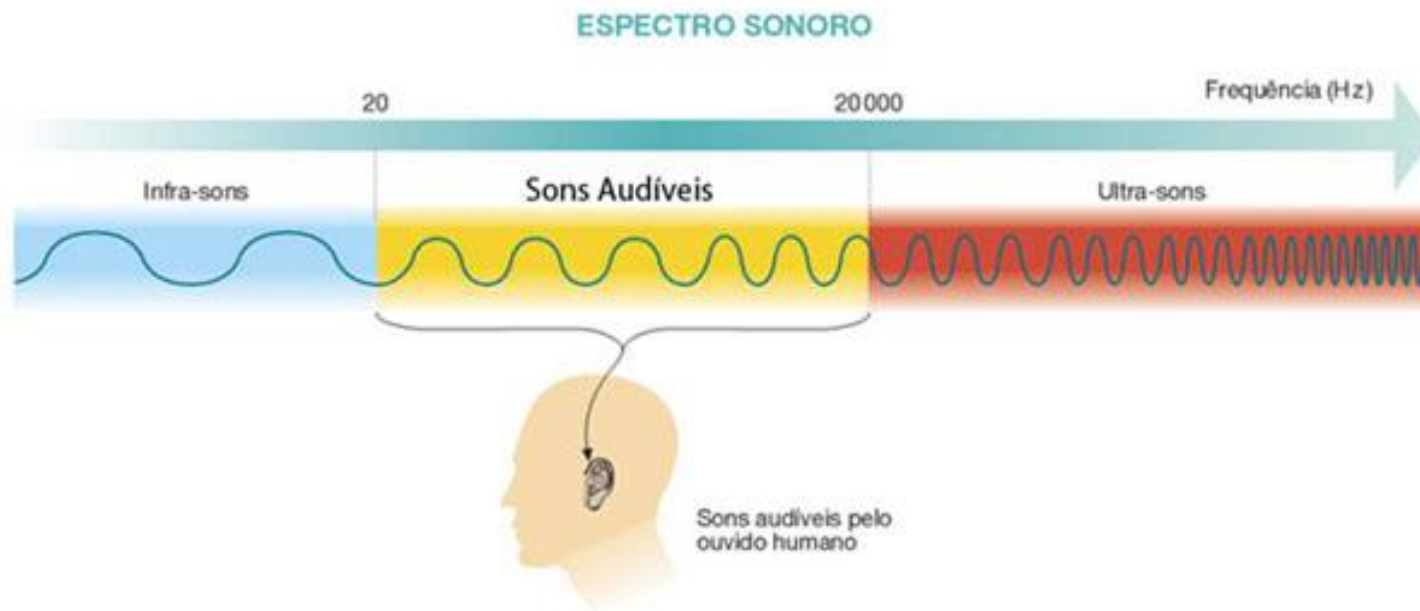
Paleta de Som

Location (Spatialisation)	
Loudness (Amplitude)	»AAAAAAAAAAAAA
Pitch: Relative Highness/Lowness Register (Frequency Band)	CDEFGAHC CDEFGAHCDEFGAHCDEF
Melody (sequence of sounds)	CDEFG CEDFG
Timbre: Sound quality (e.g. different instruments) Attack/Decay (often decides timbre)	A ʌ A A ʌ 
Rhythm: Duration (of sound and pauses) Rate of change	 



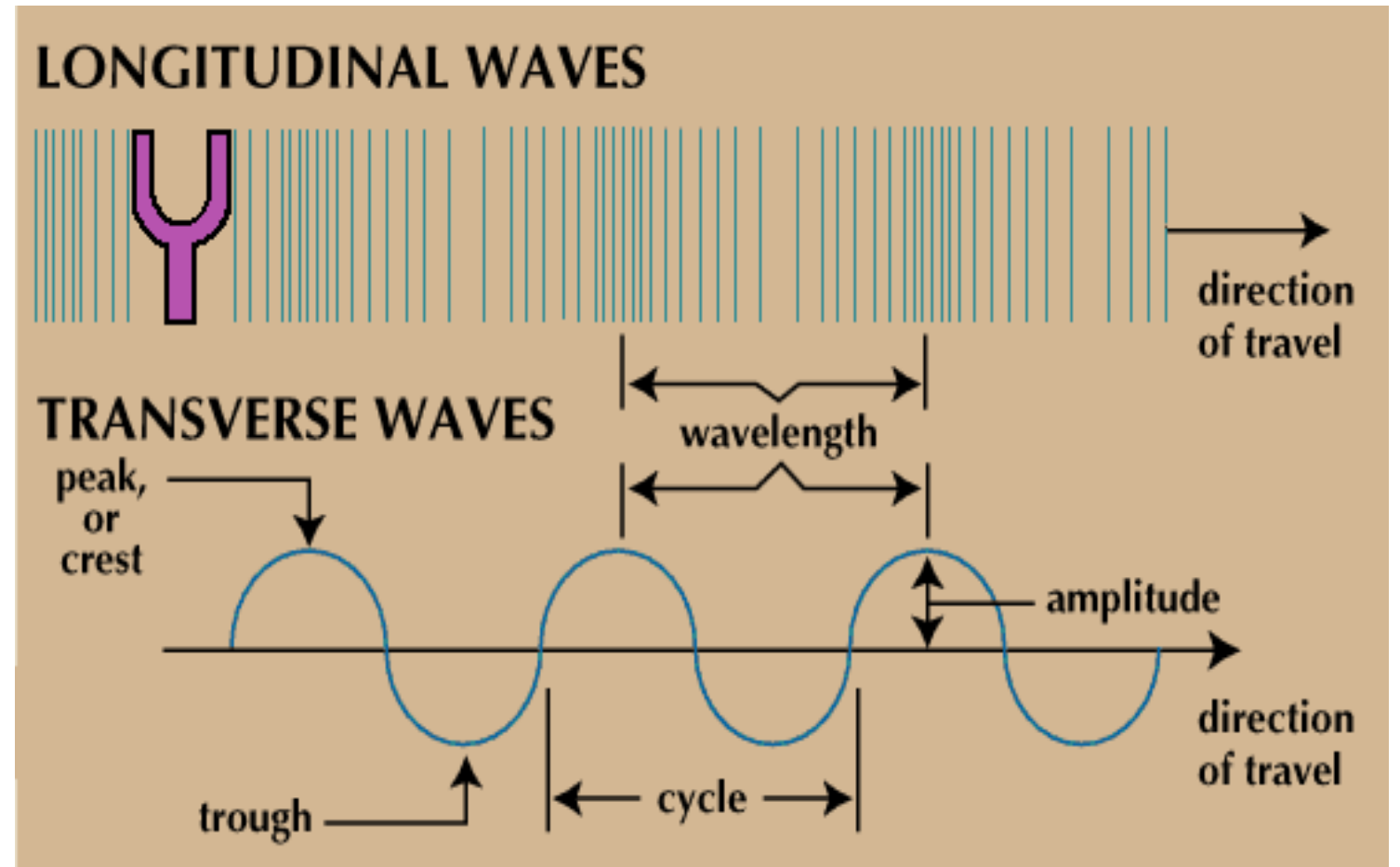
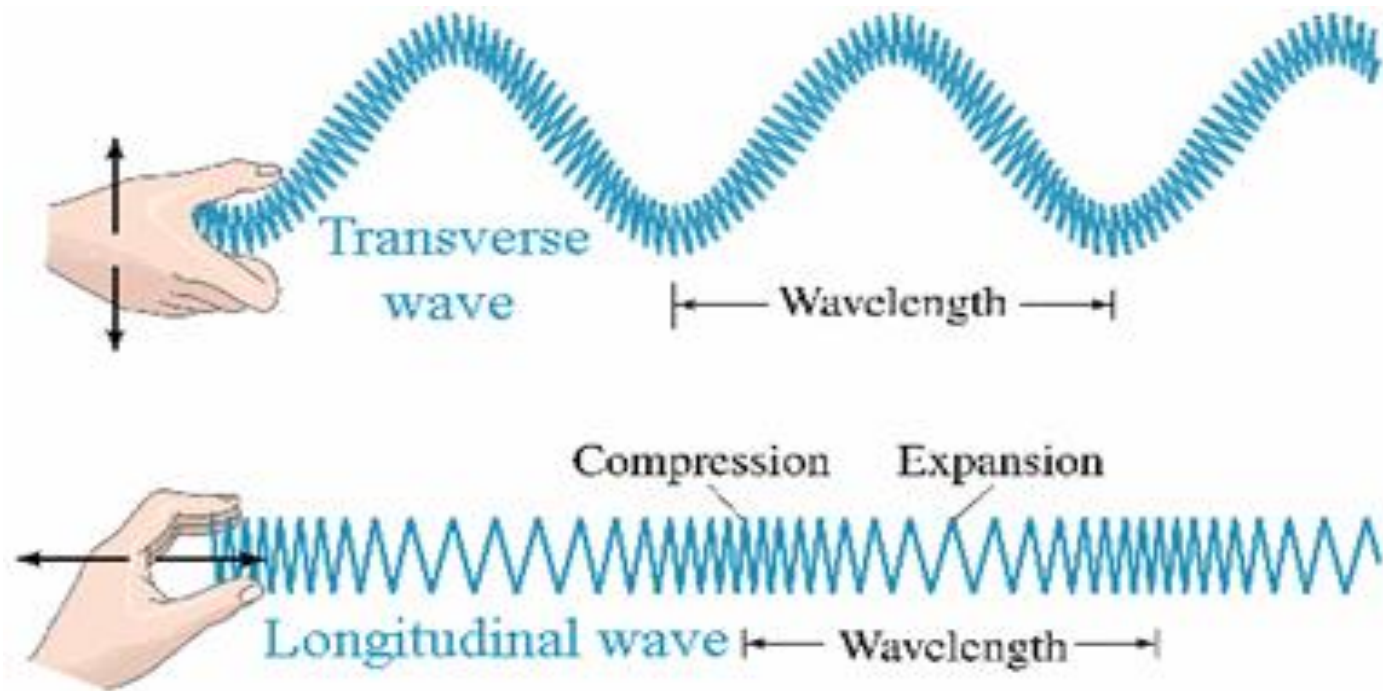
Extracted from “Sonification in computational physics”
by Katharina Vogt – SysMus08 - Based on xSonify

Espectro sonoro

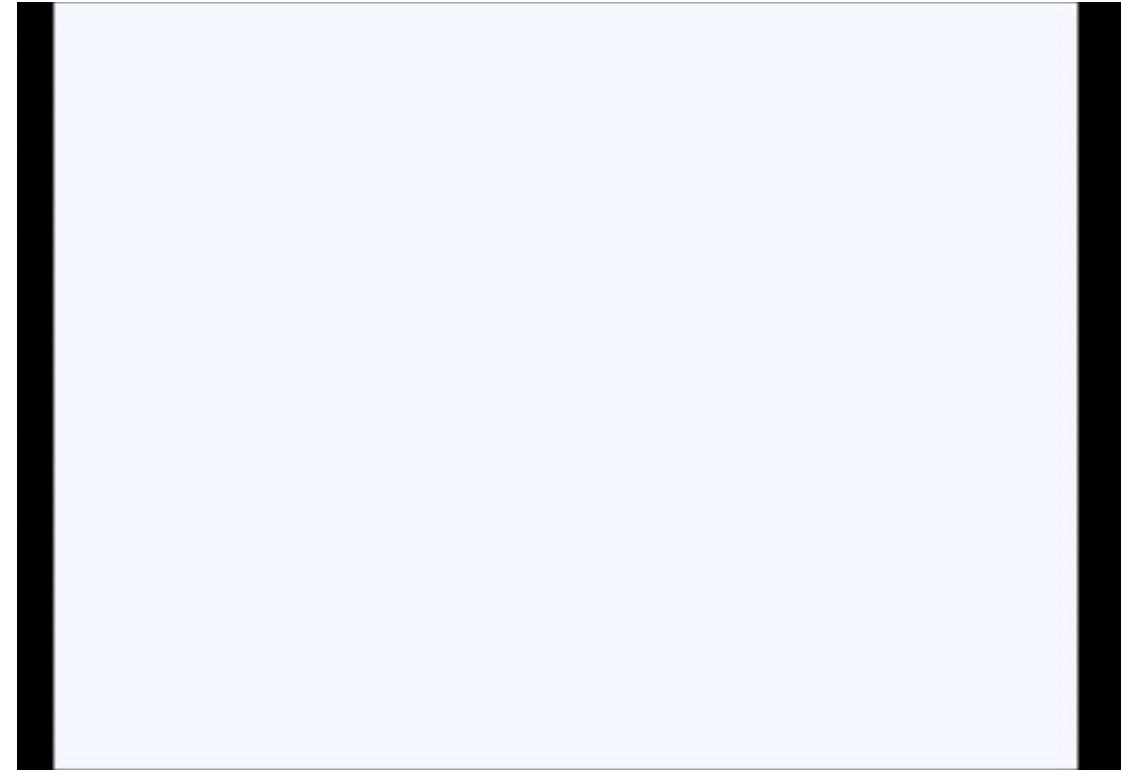
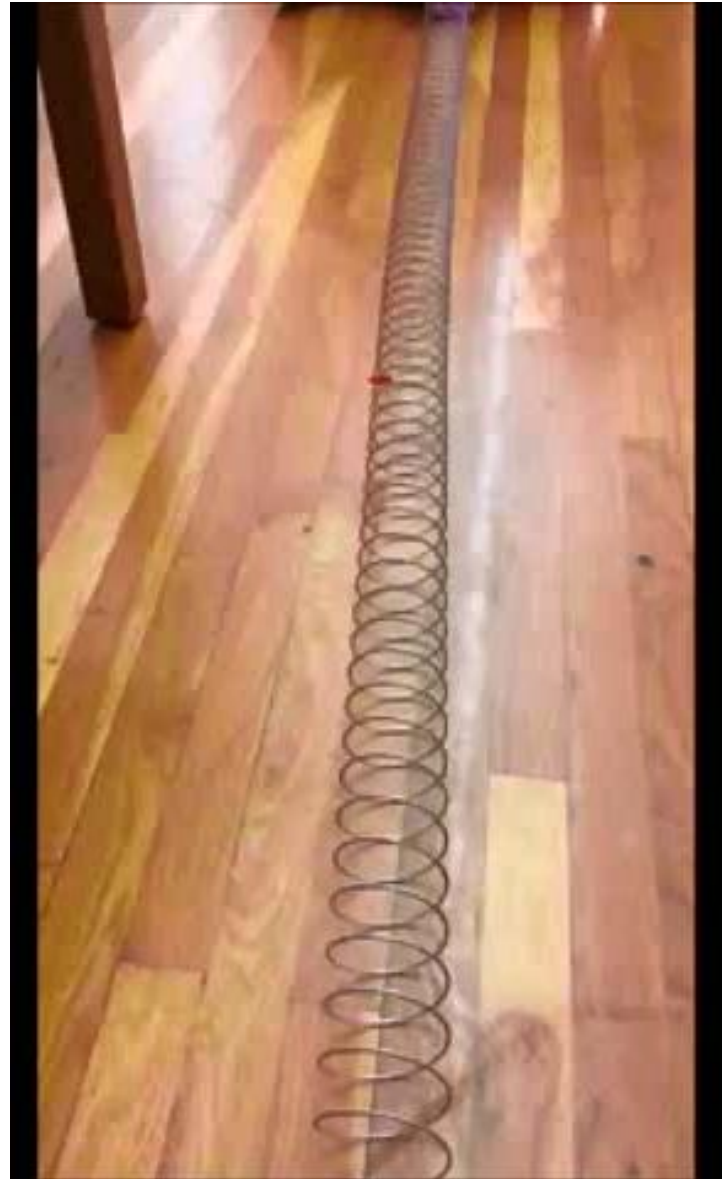


BASES FÍSICAS DO SOM

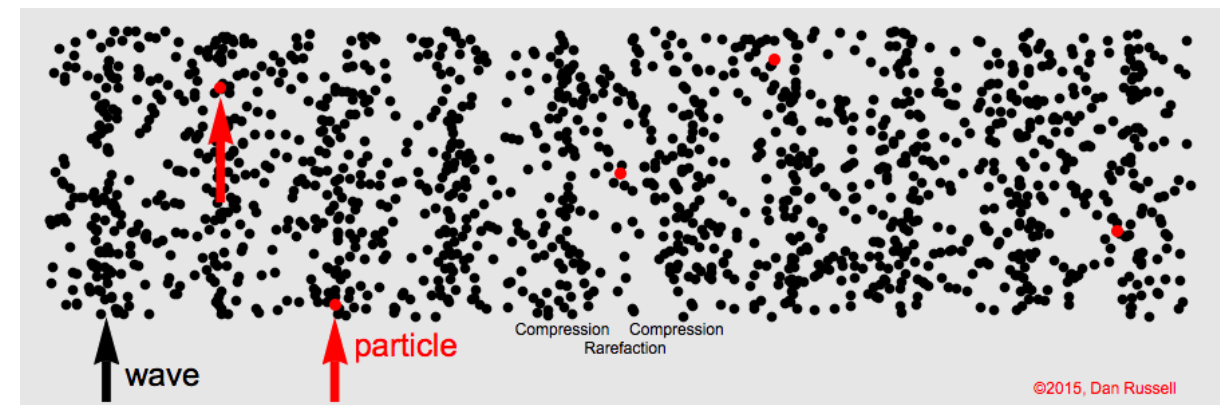
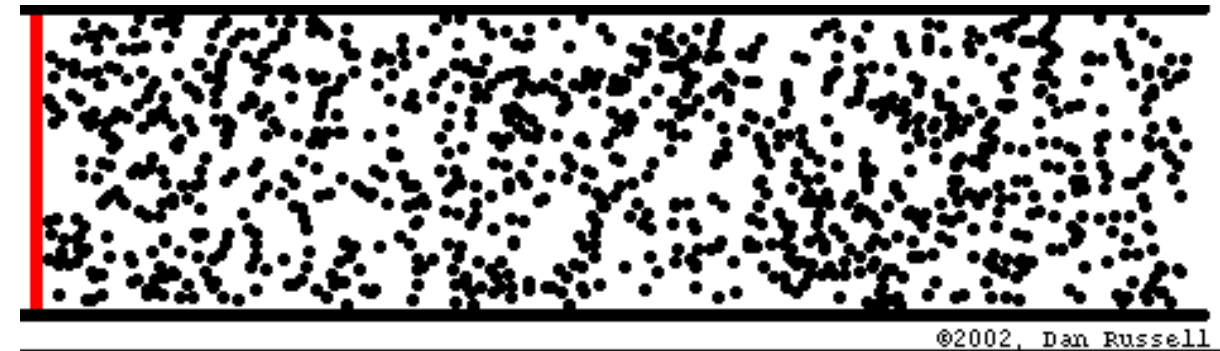
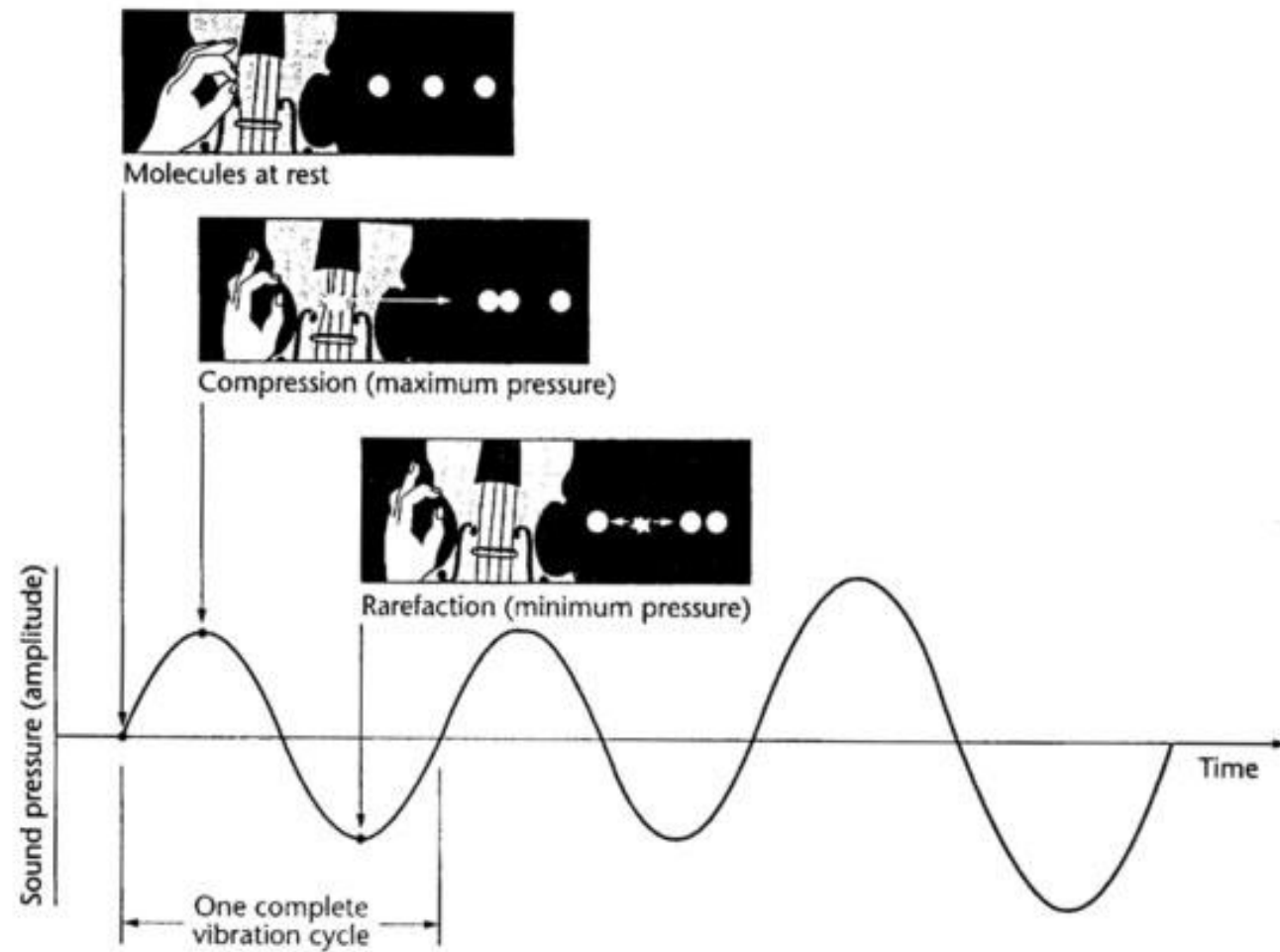
Ondas



Ondas



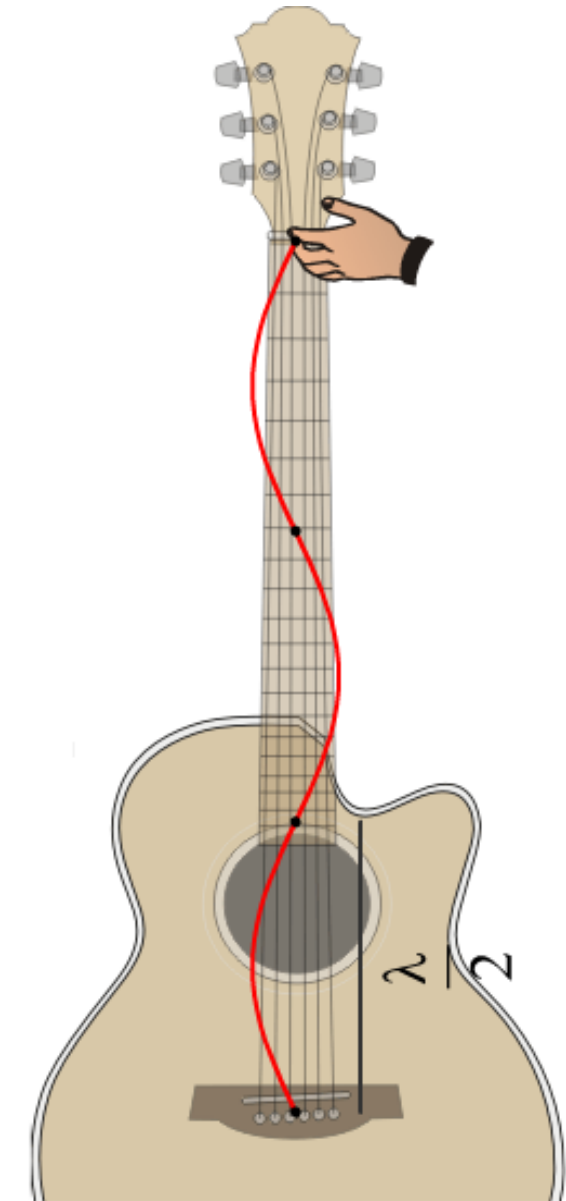
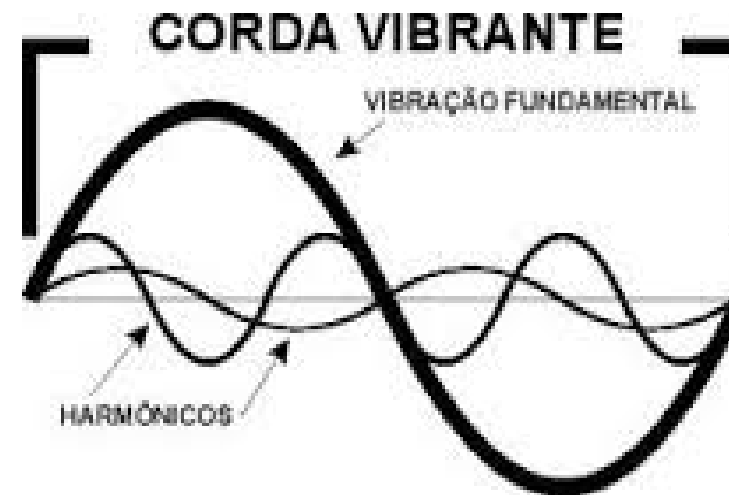
Som



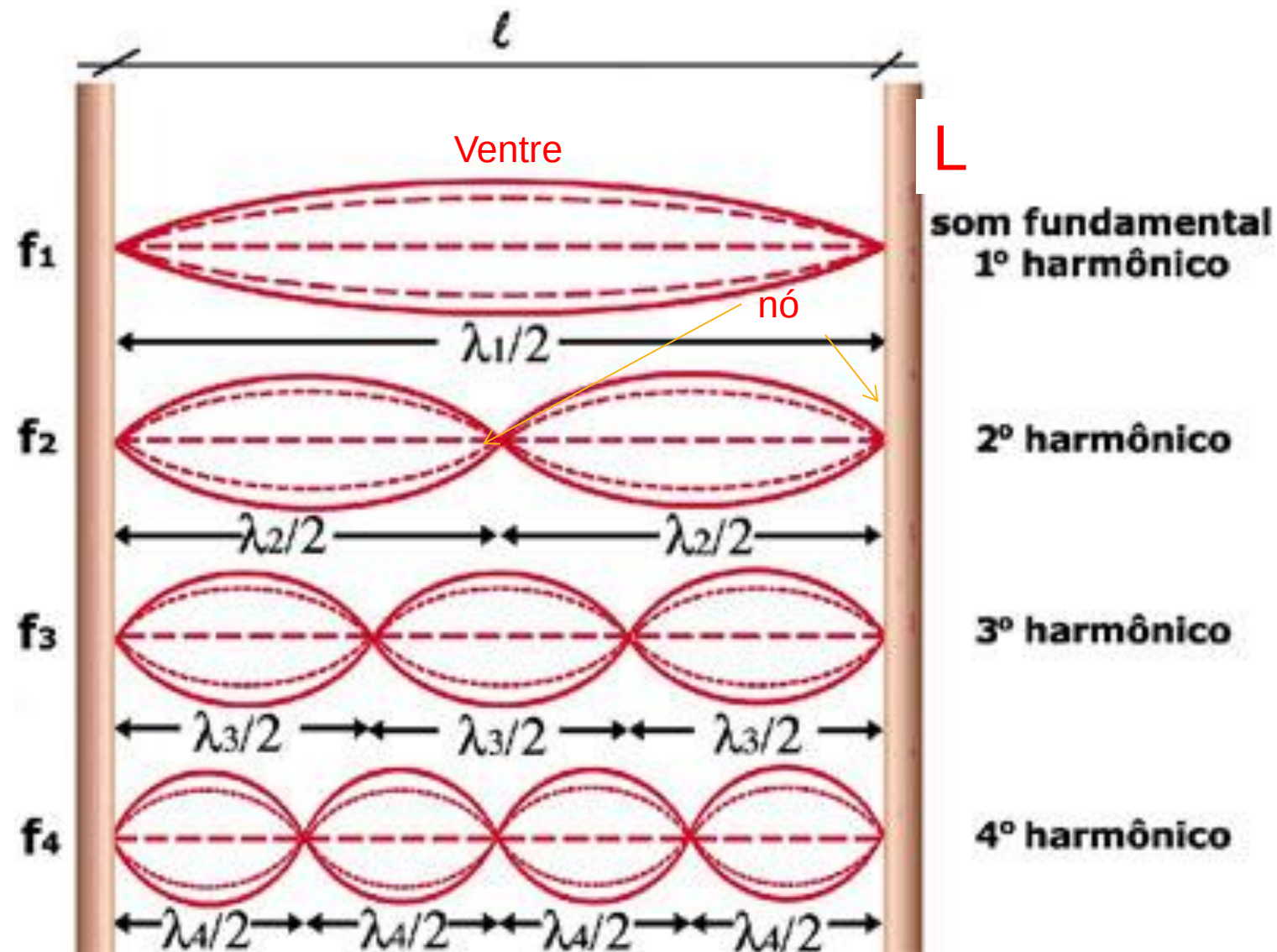
A corda vibrante

- Um fio tensionado submetido a uma vibração externa pode entrar em estado de ressonância.
- As frequências nas quais a ressonância é observada dependerá de alguns parâmetros.
 - Comprimento do fio (L)
 - Massa do fio (M)
 - Densidade linear do fio ($\mu = M/L$)
 - Tensão aplicada (T)
 - O modo de vibração (n)
 - Condições de contorno.

$$\Psi(x, t) = A \sin(\omega t \pm kx)$$



Modos normais de vibração de um fio de comprimento L .



$$n \frac{\lambda_n}{2} = L \quad \omega_n = \frac{2\pi}{\lambda_n} v = n\pi \frac{v}{L}$$

$$n = 1 \\ \lambda = 2L$$

$$n = 2 \\ \lambda = L$$

$$n = 3 \\ \lambda = 2L/3$$

Onda harmônica

- Fundamental – Onda harmônica
- A primeira é uma onda senoidal em **440Hz**.
- O segundo adiciona um harmônico em **880Hz**.
- A terceira adiciona outro harmônico em **1760 Hz**.



SOM PELA MÚSICA

Parâmetros sonoros

Intensidade (volume)

Duração

Altura

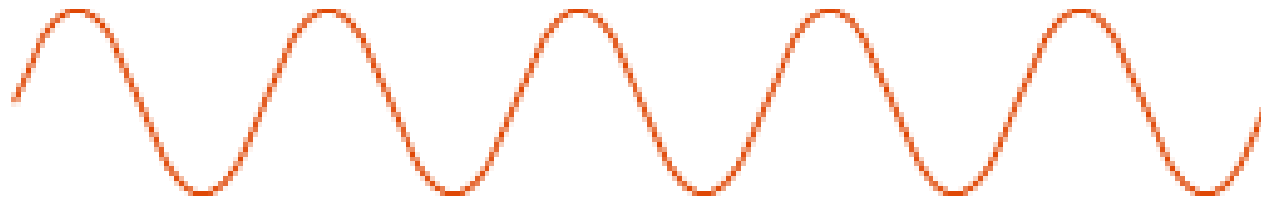
Timbre

O ruído envolve várias frequências e mudanças aleatórias tanto na frequência quanto amplitude

Noise



Tone



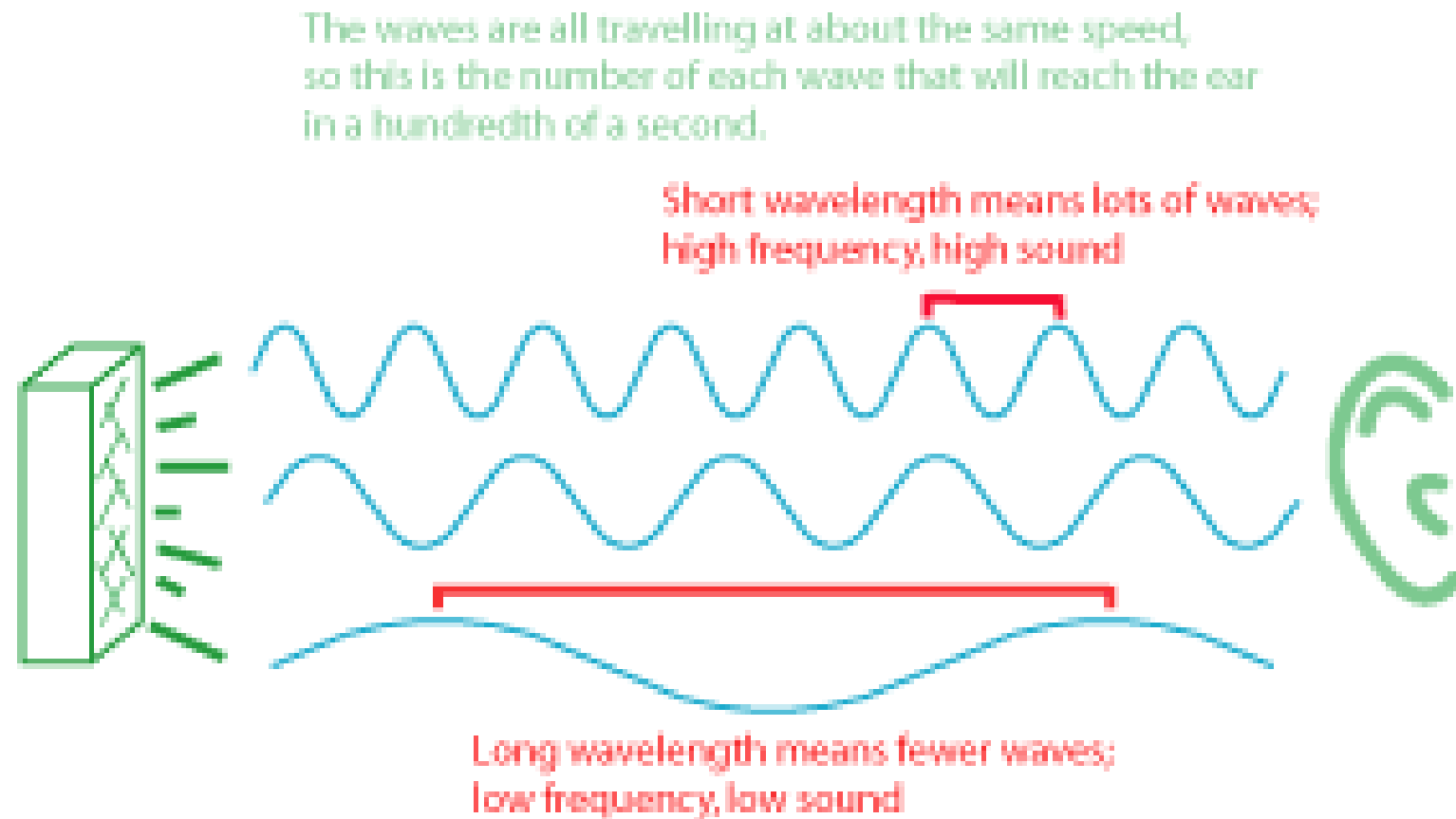
Parâmetros sonoros pela música

Intensidade (volume)
Duração
Altura
Timbre

A frequência dos comprimentos de onda determina a “altura” do tom. (PITCH)

Frequency

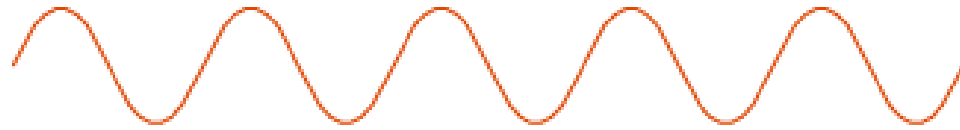
The **longer** the wavelength,
the **lower** the frequency,
and the **lower** the sound.



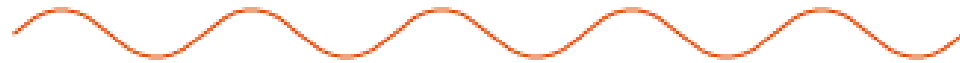
Parâmetros sonoros pela música

Intensidade (volume)
Duração
Altura
Timbre

Higher
Amplitude



Lower
Amplitude



Higher
Amplitude



Lower
Amplitude

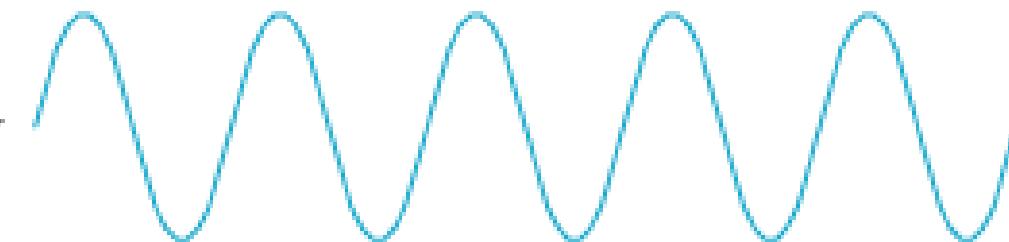


A amplitude afeta o volume de um tom - quanto maior a amplitude, mais alto.

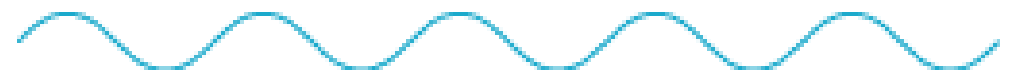
Amplitude

The **bigger the difference** in the highs and lows of the waves, the **louder the sound**.

Louder



Softer



Parâmetros sonoros pela música

A dinâmica é o termo musical para a amplitude (nível de volume) da música.

mf "mezzo forte" (pronounced "MET-so FOR-tay") = medium loud

f "forte" (pronounced "FOR-tay") = loud

ff "fortissimo" = very loud

fff "fortississimo" = very, very loud

ffff and so on

mp "mezzo piano" = medium soft

p "piano" = soft

pp "pianissimo" = very soft

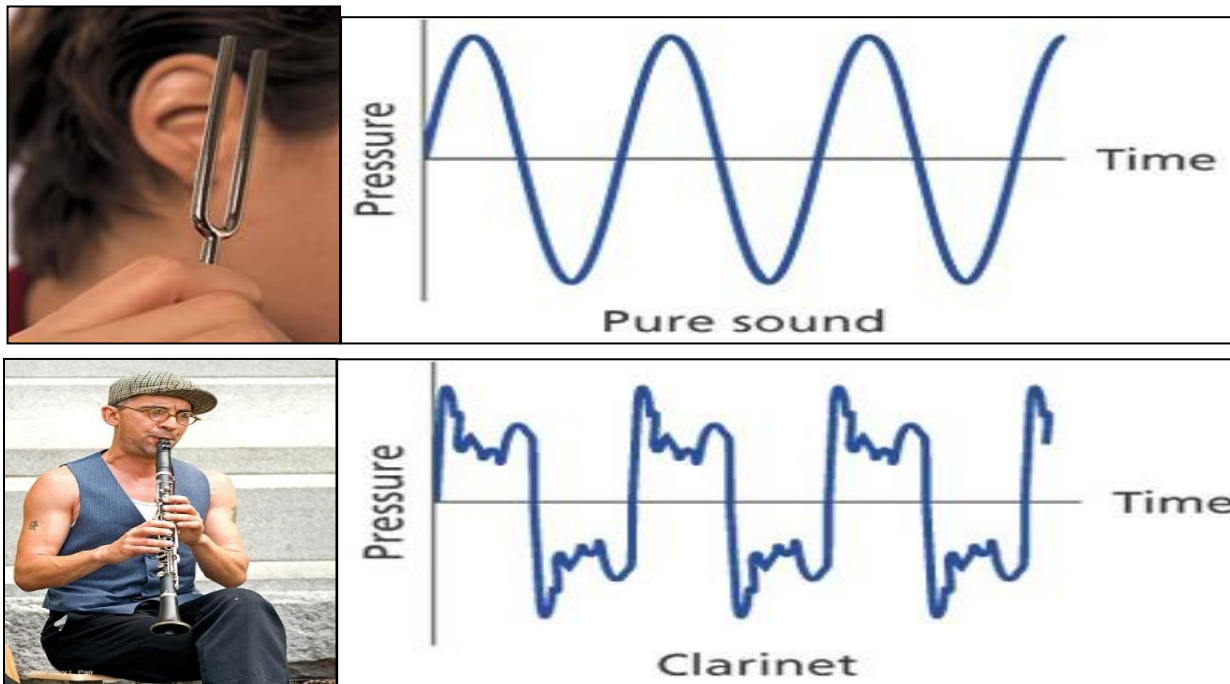
ppp "pianississimo" = very, very soft

pppp and so on

Timbre

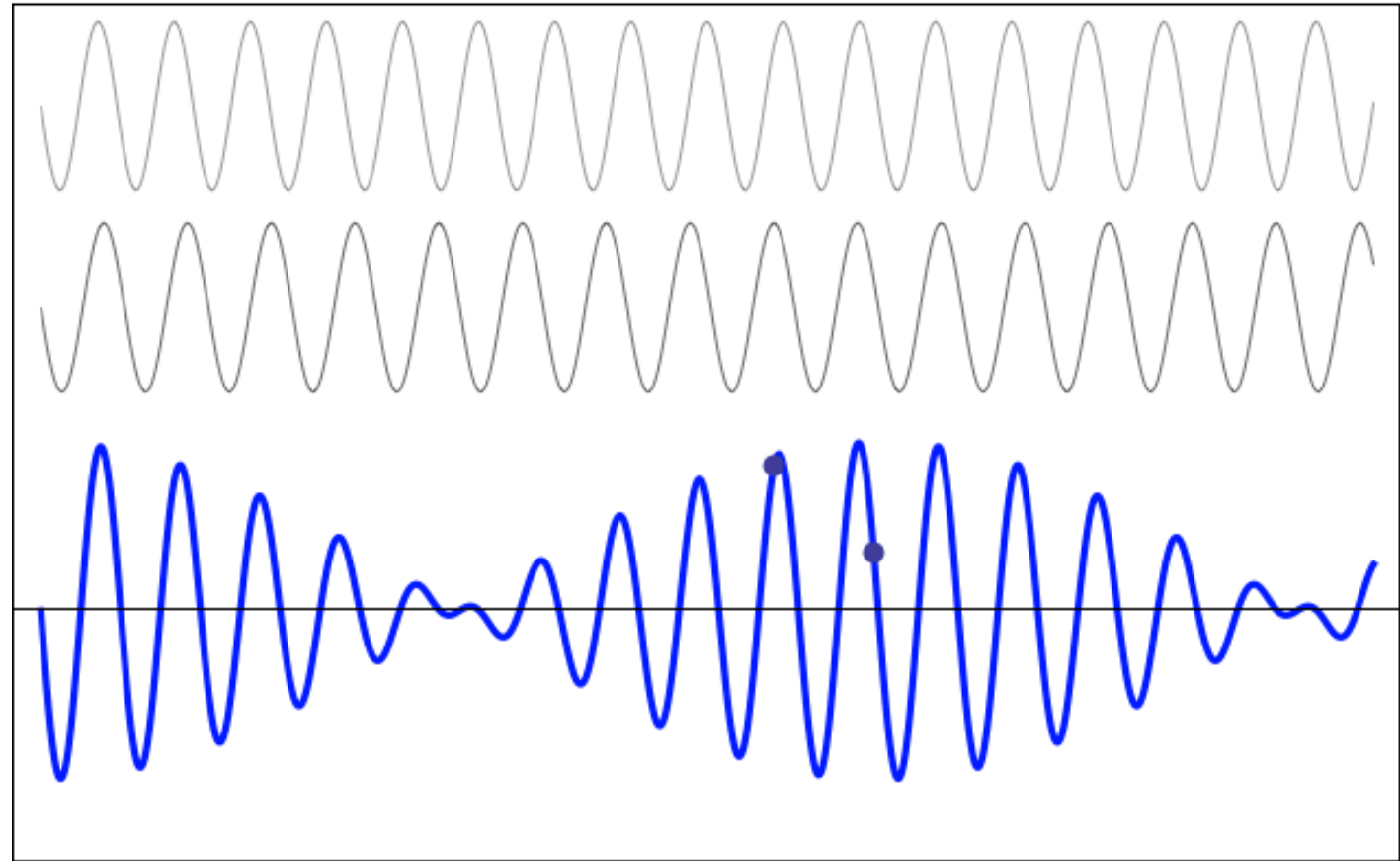
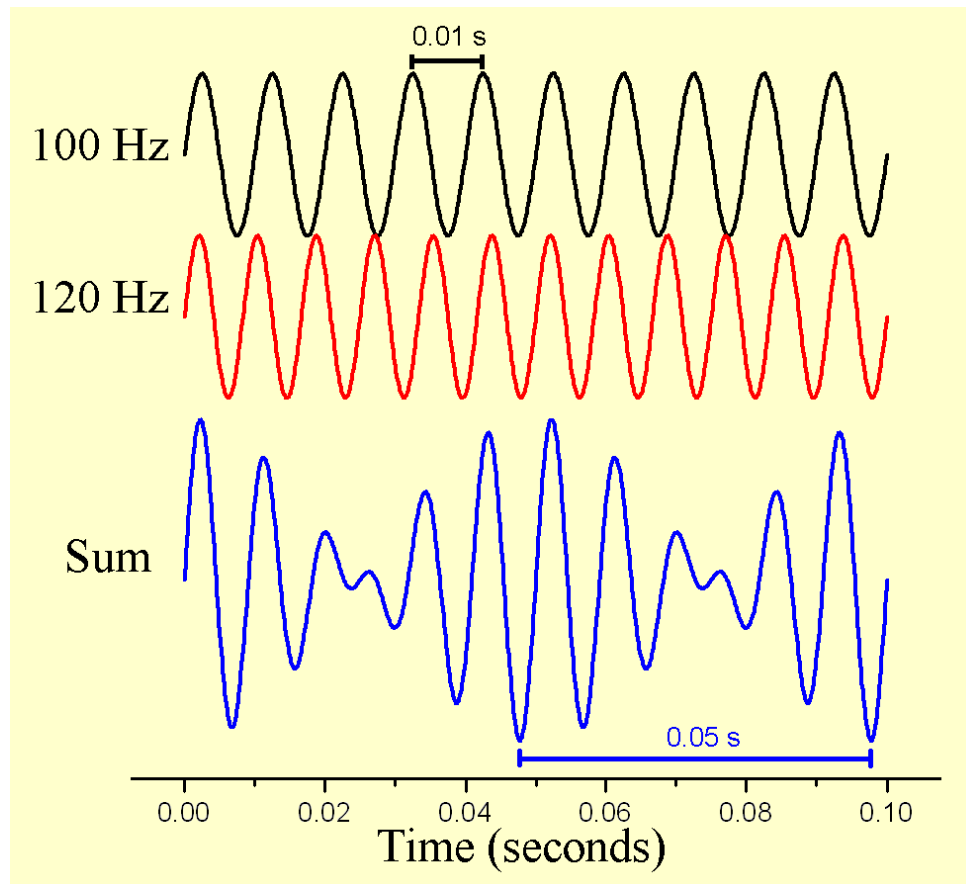
Um dos elementos básicos da música é chamado de cor, ou timbre.

O timbre inclui todos os aspectos de um som não correlacionados a quão alto ou baixo é, quão estridente ou baixo, ou quão longo ou curto.

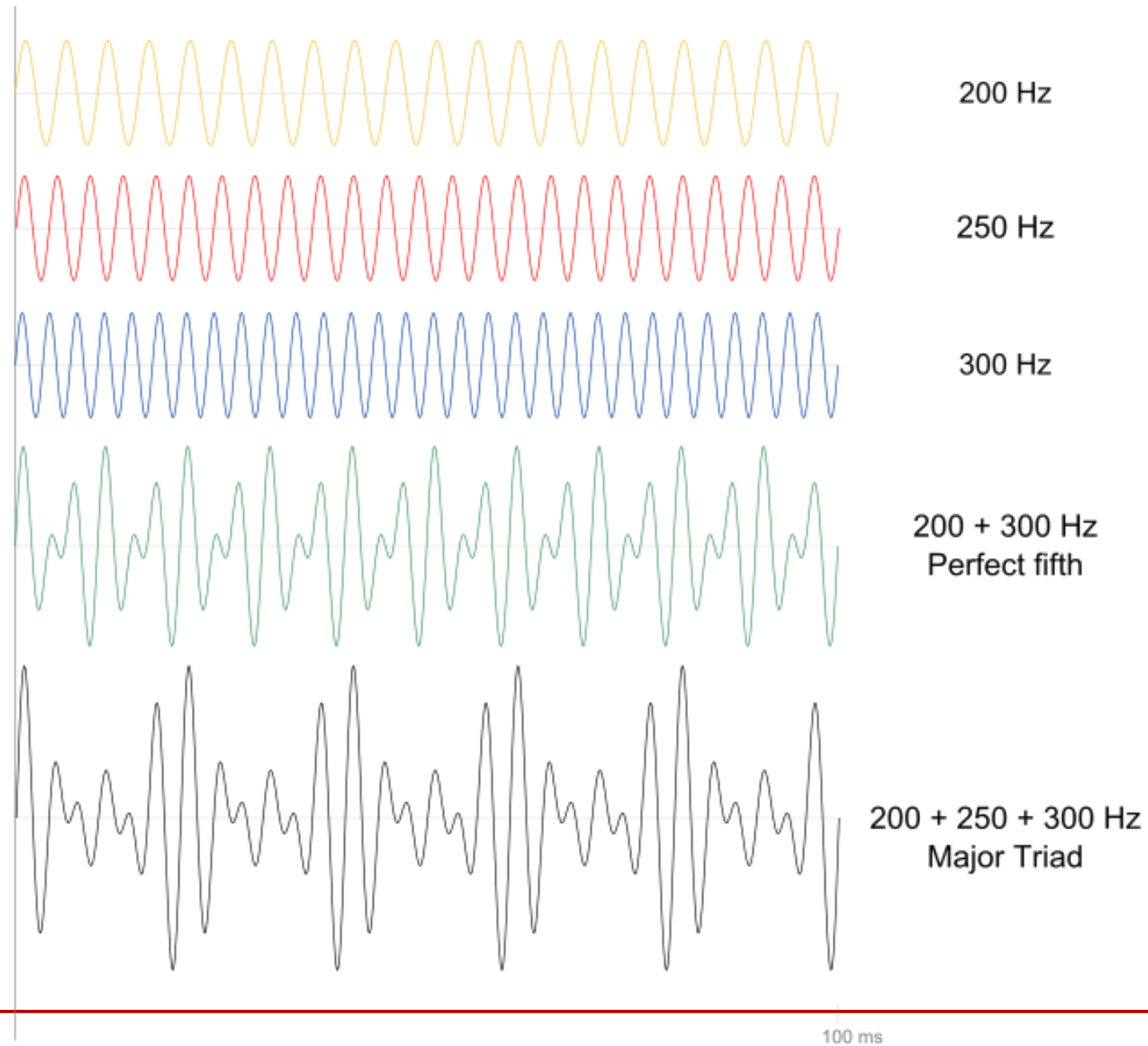


Interferência construtiva de frequências múltiplas
(o fundamental e vários harmônicos)

Tons puros com atraso



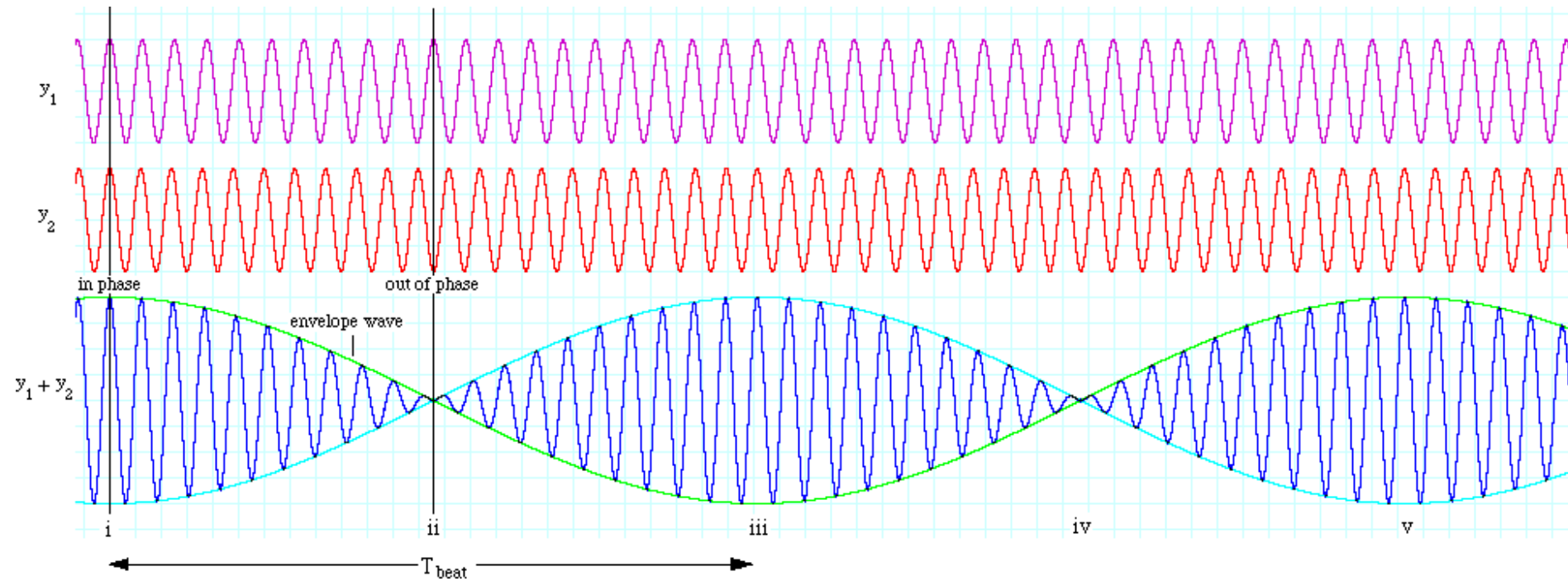
Batimentos e notas musicais



Experimento - Batimentos

- | | | |
|----|----------------|---|
| 1. | 400 & 400.5 Hz | 1 batimento a cada 2 segundos |
| 2. | 400 & 401 Hz | 1 batimento por segundo |
| 3. | 400 & 403 Hz | 3 batimentos por segundo |
| 4. | 400 & 410 Hz | 10 batimentos por segundo |
| 5. | 400 & 420 Hz | você |
| 6. | 400 & 430 Hz | ainda consegue ouvir... |
| 7. | 400 & 440 Hz | os batimentos de interferência ? |
| 8. | 400 & 450 Hz | Razão da frequência 9:8 é um tom maior. |
| 9. | 400 & 480 Hz | Razão da frequência 6:5 é uma terça menor |
| 10 | 400 & 500 Hz | Razão da frequência 5:4 é uma terça maior |
| 11 | 400 & 533 Hz | Razão da frequência 4:3 quarta perfeita |
| 12 | 400 & 600 Hz | Razão da frequência 3:2 quinta perfeita |
| 13 | 400 & 667 Hz | Razão da frequência 5:3 sexta maior |
| 14 | 400 & 800 Hz | Razão da frequência 2:1 oitava |
-

Batimentos e notas musicais



$$Y_{\text{total}} = \{2A \cos(2\pi \Delta f/2)\} * \cos(2\pi f_{\text{av}})$$

o número de batimentos por segundo é igual a diferença de frequência entre as duas ondas que interferem

Intervalos diatônicos

<i>Intervalo puro</i>	<i>Razão pura</i>	<i>Equivalente Decimal</i>
Unisono	1/1	1
Oitava	2/1	2
Quinta perfeita	3/2	1.5
Quarta perfeita	4/3	1.33333333333333...
Sexta Maior	5/3	1.66666666666666...
Terça Maior	5/4	1.25
Terça Menor	6/5	1.2
Sexta Menor	8/5	1.6
Segunda maior	9/8	1.125
Sétima maior	16/9	1.77777777777777...
Segunda menor	16/15	1.06666666666666...
Tritom	45/32 or 62/45	1.40625 or 1.42222222222222...

Dual-Tone Multi-Frequency

Dual-Tone Multi-Frequency (DTMF)
table of frequency combinations

"High Group" frequencies [Hz]

	1209	1336	1477	1633	
"Low Group" frequencies [Hz]	697	1	2	3	A (Row 1)
	770	4	5	6	B (Row 2)
	852	7	8	9	C (Row 3)
	941	*	0	#	D (Row 4)
	(Column 1)	(Column 2)	(Column 3)	(Column 4)	

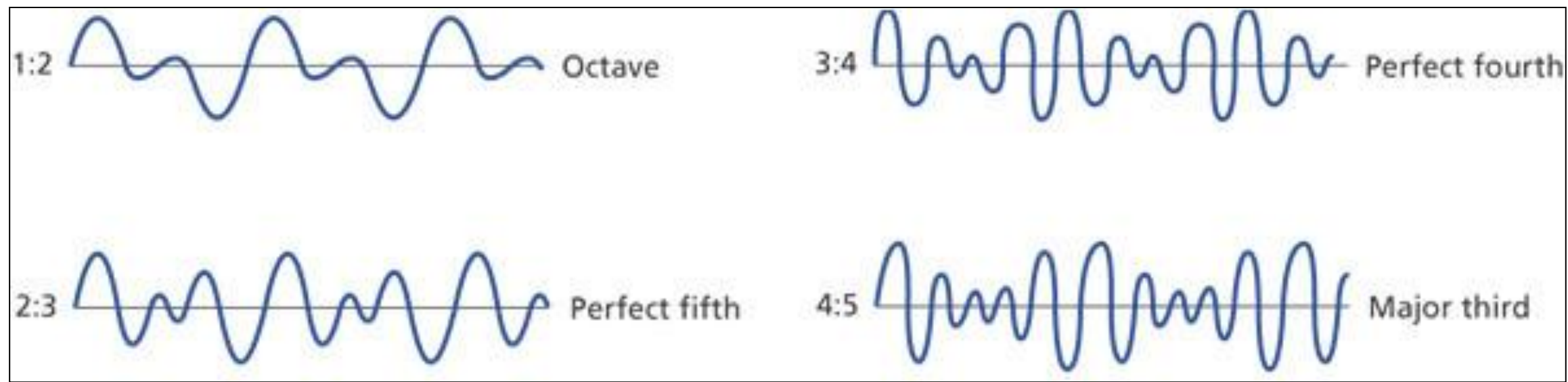
Desafinando ...

*“Se você insiste em classificar
Meu comportamento de anti-musical
Eu mesmo mentindo devo argumentar
Que isto é Bossa Nova, isto é muito natural”*

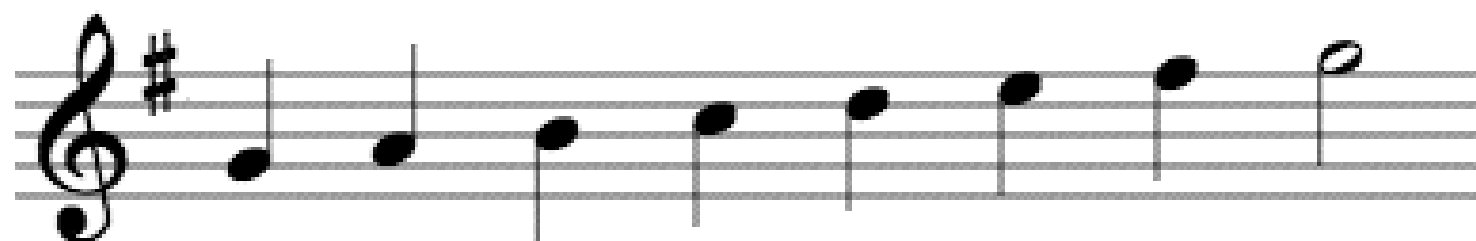
Consonância - quando uma combinação de sons tem um som agradável

Dissonância - quando uma combinação de sons tem um som desagradável

Culturas distintas têm diferentes definições e percepções
consonância e dissonância



Experimento - Escala musical



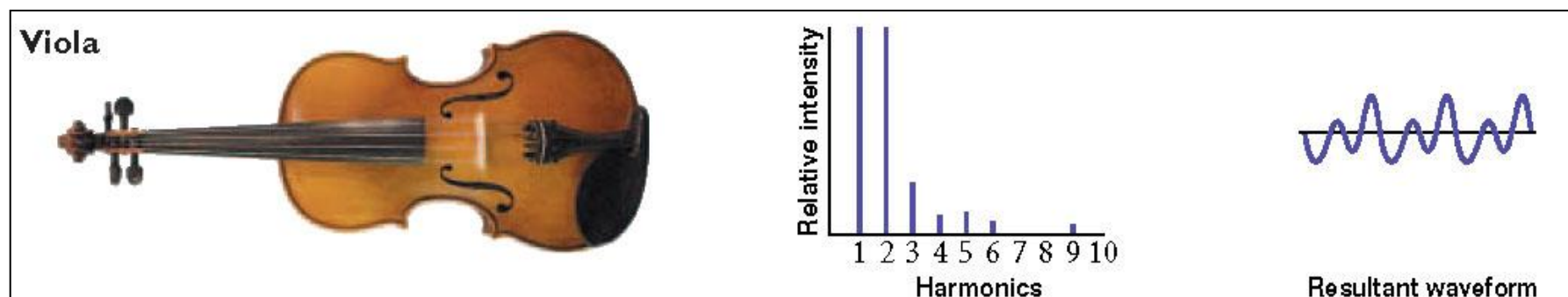
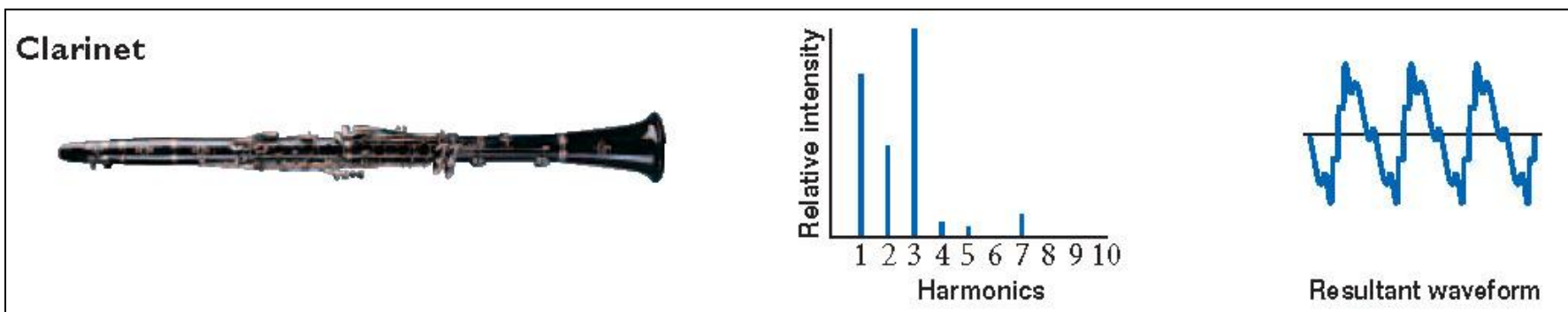
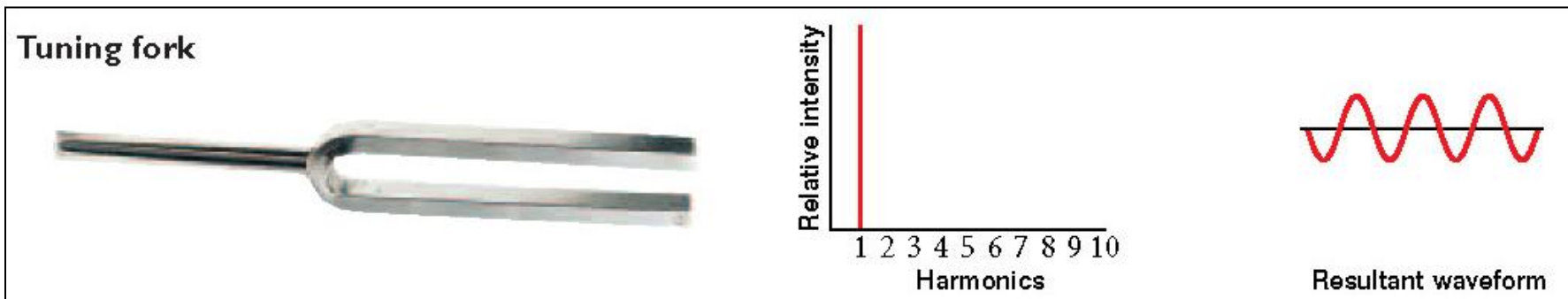
1:1 9:8 5:4 4:3 3:2 5:3 15:8 2:1
1st 2nd 3rd 4th 5th 6th 7th octave

Escala cromática

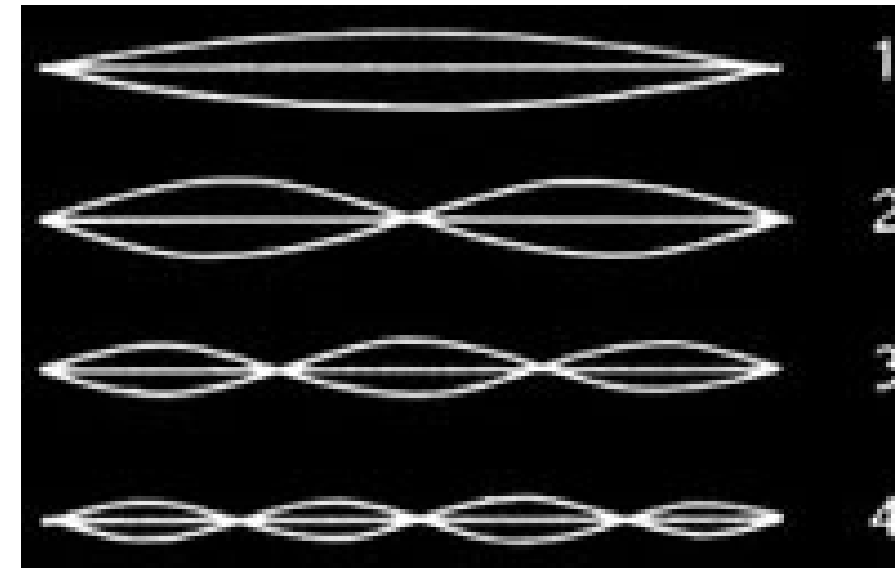
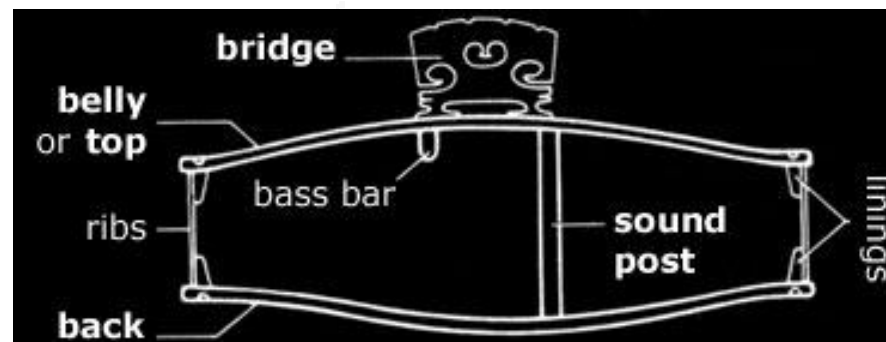
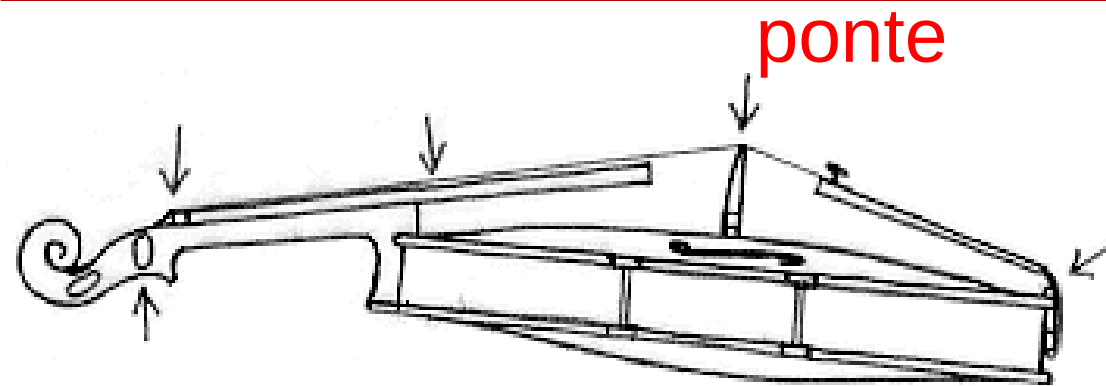
Nota	Dó	Dó#	Ré	Ré#	Mi	Fá	Fá#	Sol	Sol#	Lá	Lá#	Si
Intervalo temperado	1,0000	1,0595	1,1225	1,1892	1,2600	1,3348	1,4142	1,4983	1,5874	1,6818	1,7818	1,8877
Intervalo natural	1,0000		1,1250 = 9/8		1,250 = 5/4	1,3333 = 4/3		1,5000 = 3/2		1,6666 = 5/3		1,8750 = 15/8

A FÍSICA DE “ALGUNS” INSTRUMENTOS MUSICAIS

Instrumentos musicais



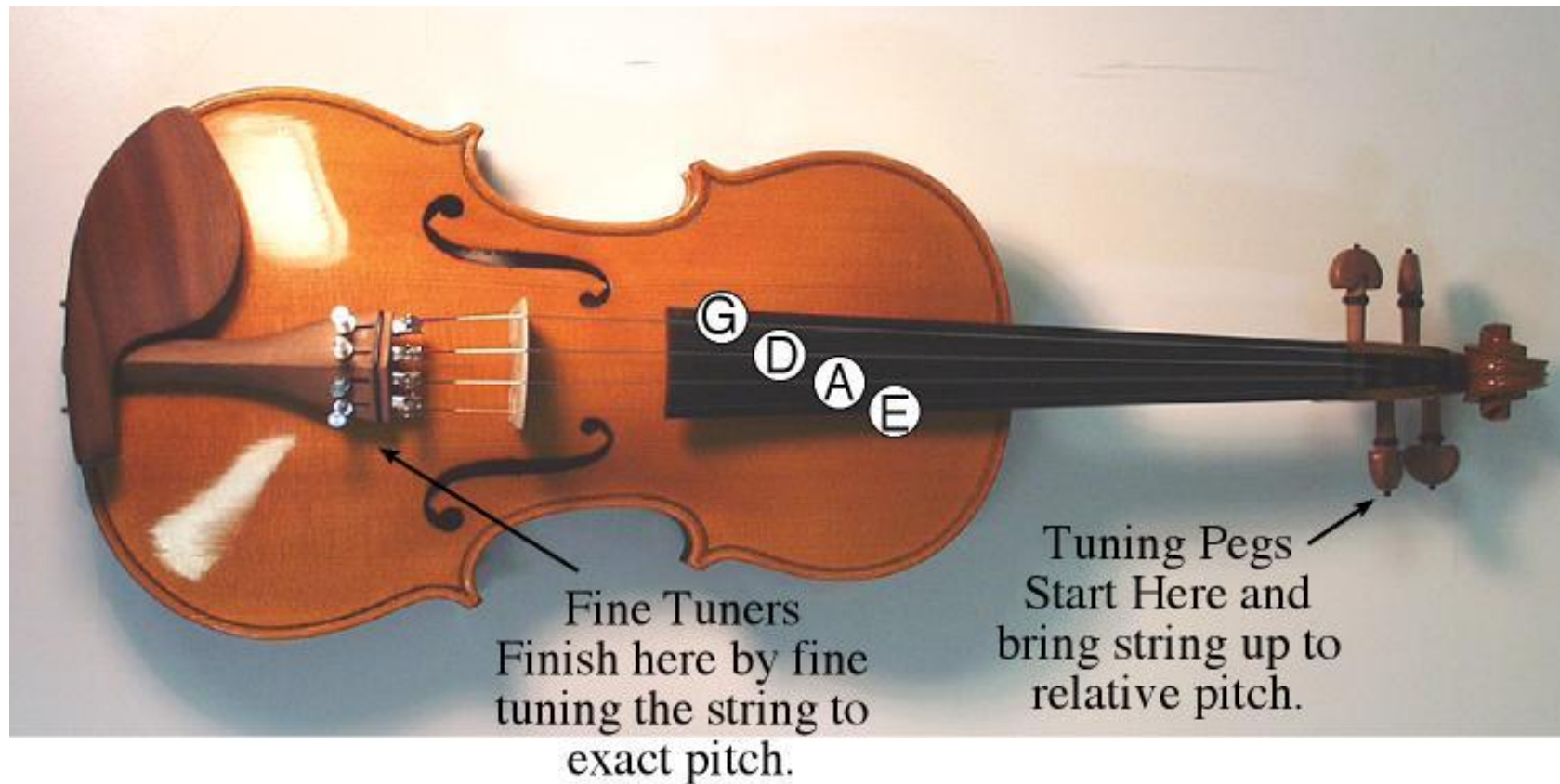
Instrumentos de arco



- O atrito da passagem do arco sobre as cordas, faz com que elas vibrem com diferentes modos harmônicos
- A energia é transferida de cordas para barriga através da ponte.
- A barriga e as costas do violino (via som) vibram.
- O som se propaga do violino através dos orifícios F

O violino é uma caixa de ressonância de madeira que amplifica a ondas sonoras das vibrações das cordas sobre ele esticadas .

Decifrando o violino



Cada corda tem uma massa diferente e frequência fundamental f_0 (altura)

G3 (196 Hz) - vibra mais devagar - grave e imponente

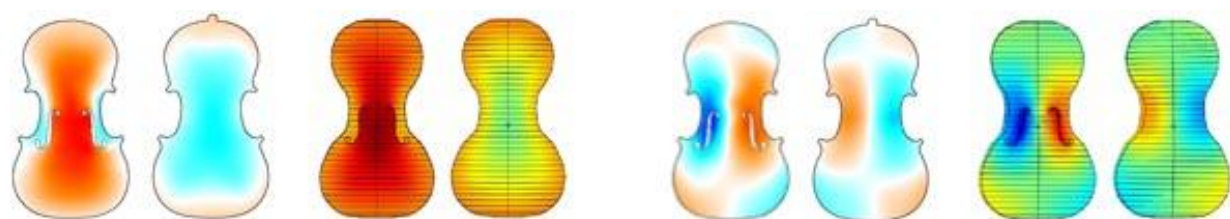
D4 (293 Hz) - sonoridade profunda

A4 (440 Hz) - sugere doçura e delicadeza

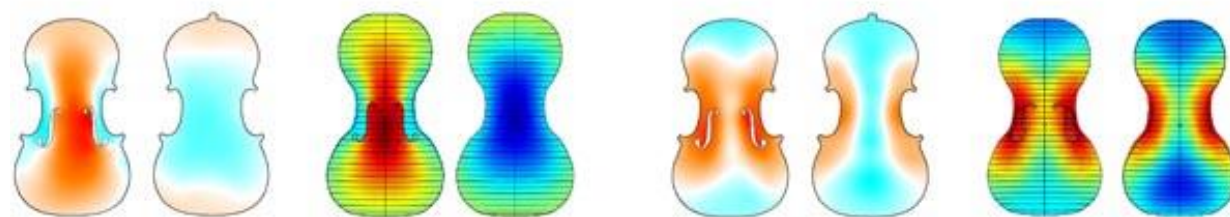
E5 (660 Hz) - um fio de aço fino: vibra mais rapidamente - brilhante e incisiva

Frequência - controlada pelo comprimento da corda, tensão, temperatura.

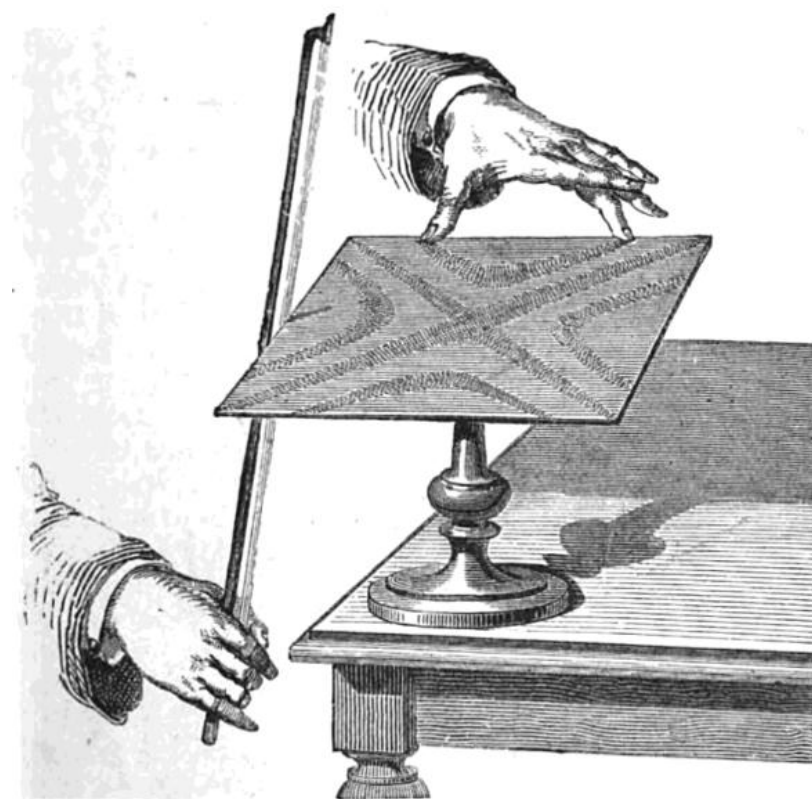
Modos vibracionais do violino



243 Hz A0 262 Hz 394 Hz CBR 376 Hz

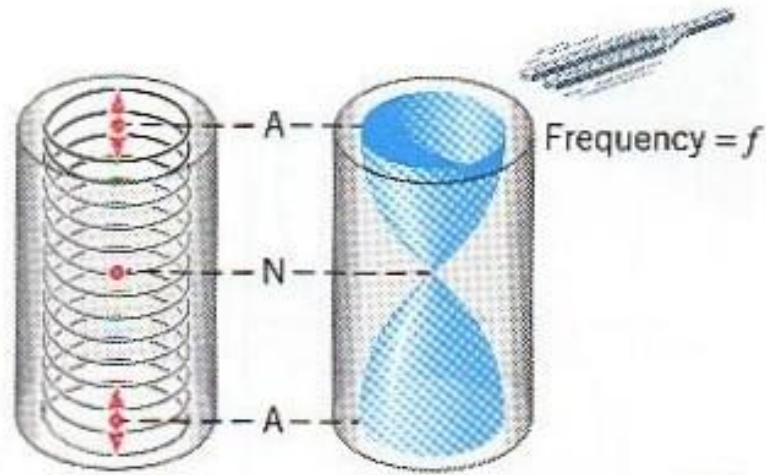


403 Hz B1- 397 Hz 562 Hz B1+ 558 Hz

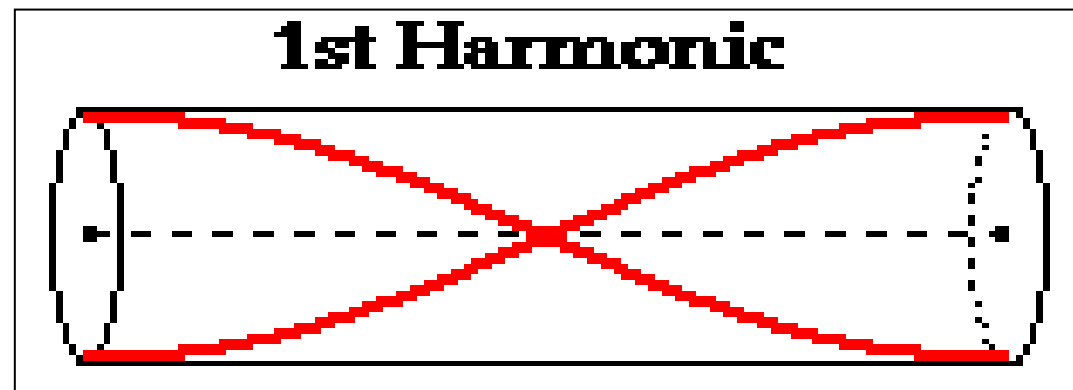


Ernst Chladni

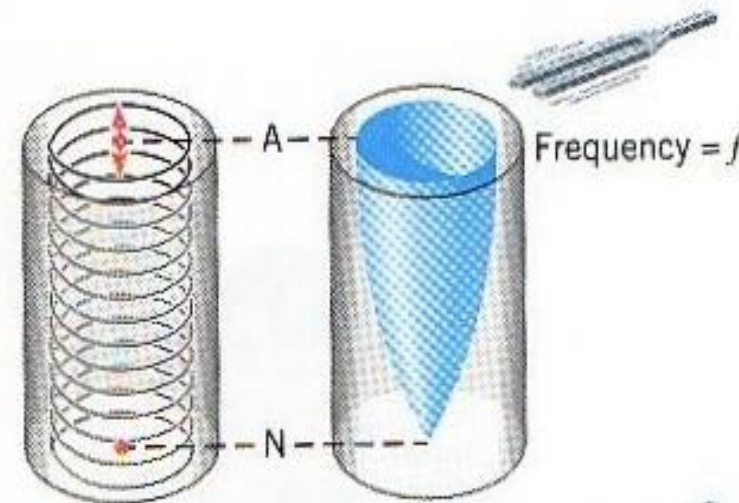
Instrumentos de sopro (colunas de ar)



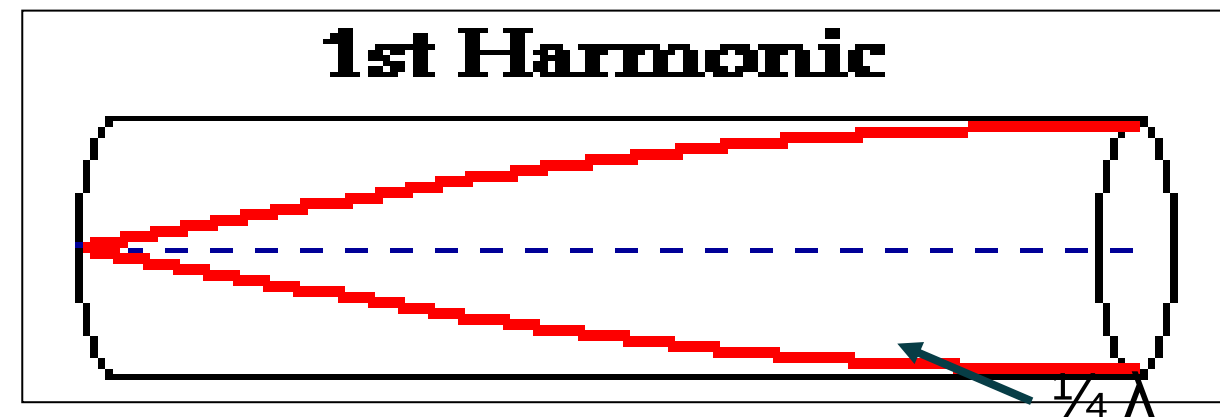
Extremidades abertas = anti-nós do deslocamento
Extremidades fechadas = nós de deslocamento



O comprimento de onda para a frequência fundamental é duas vezes o comprimento do tubo



Extremidades abertas = nós do deslocamento
Extremidades fechadas = anti-nós de deslocamento

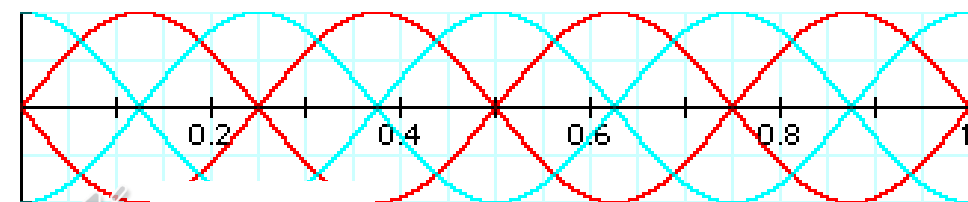
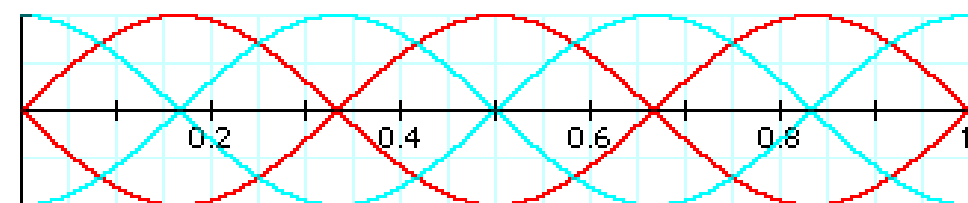
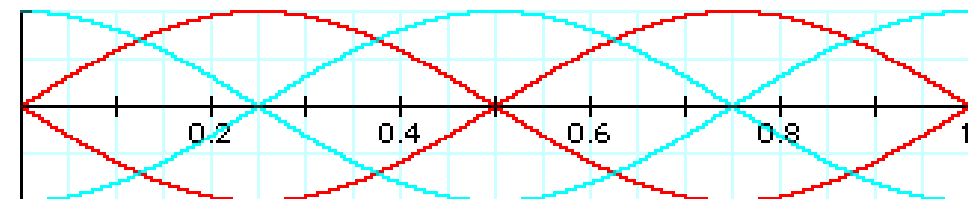
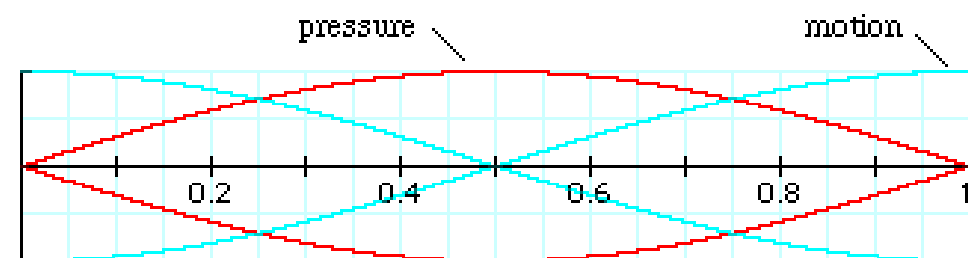


O comprimento de onda para a frequência fundamental é quatro vezes o comprimento do tubo

Instrumentos de sopro



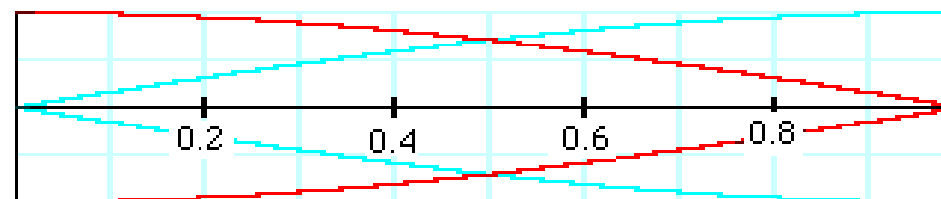
IR



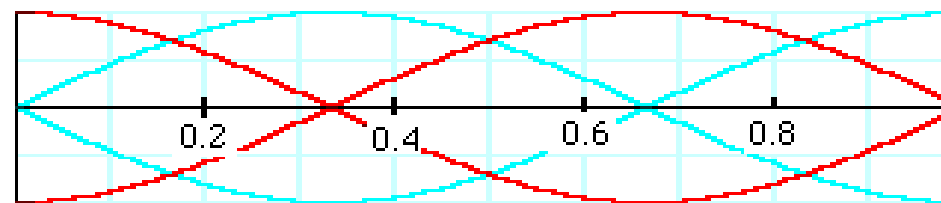
Flauta



IR



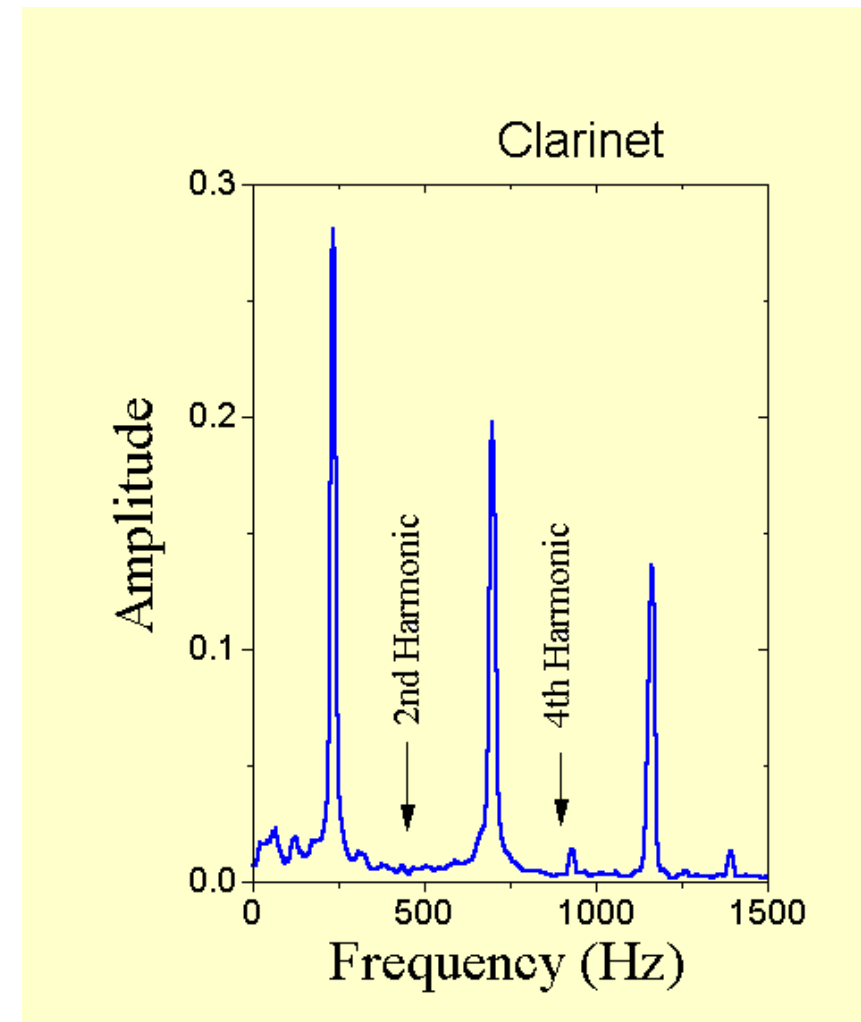
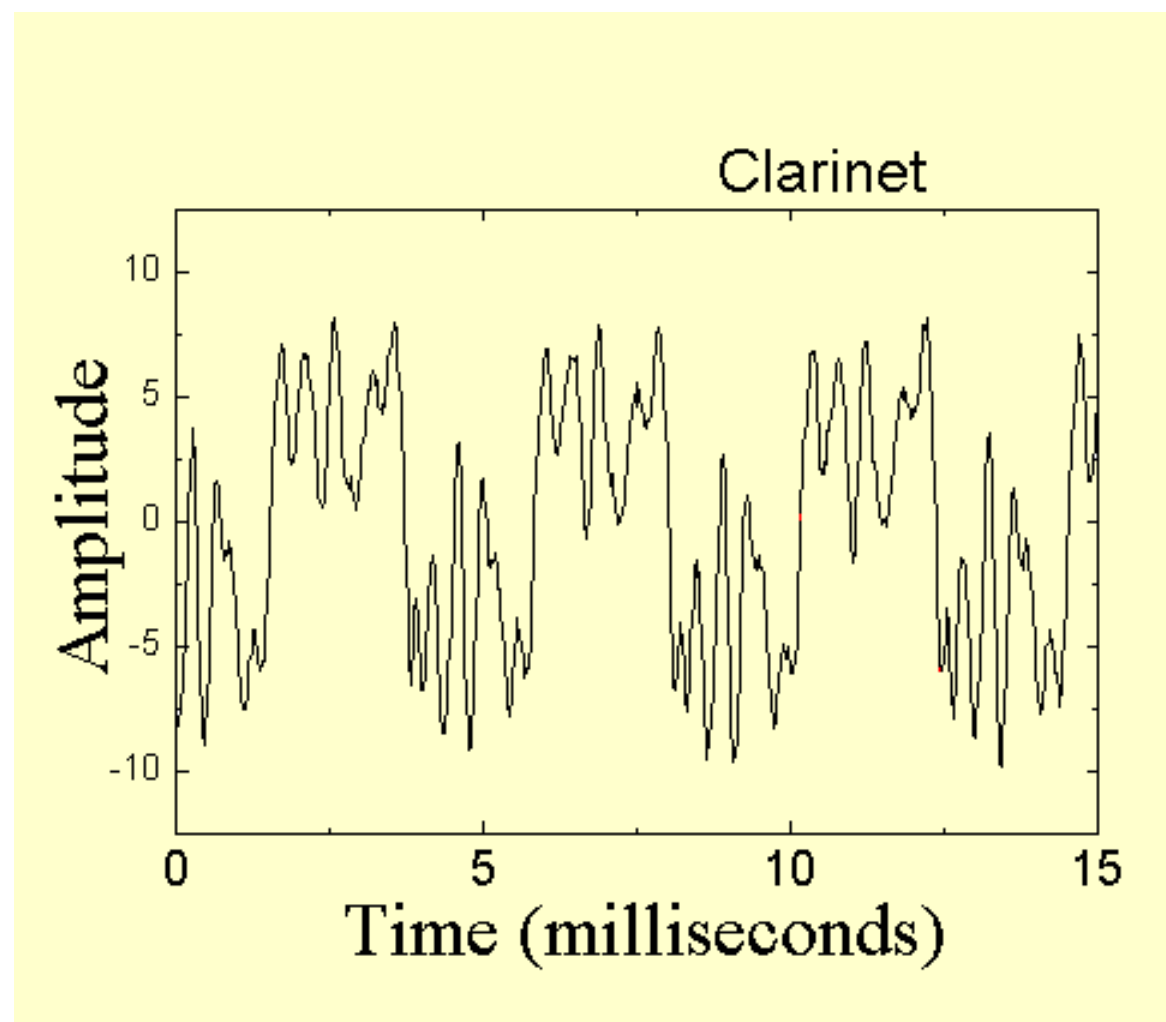
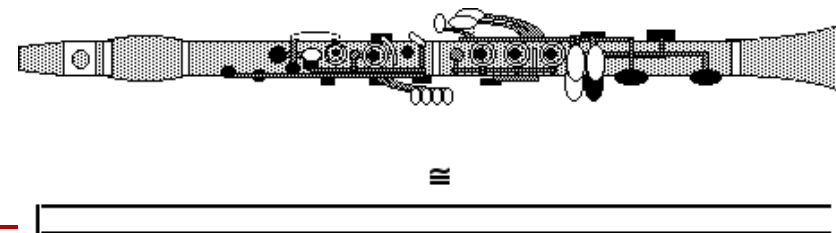
Ausência dos harmônicos pares



Clarinete

www.phys.unsw.edu.au/music

Instrumentos de sopro



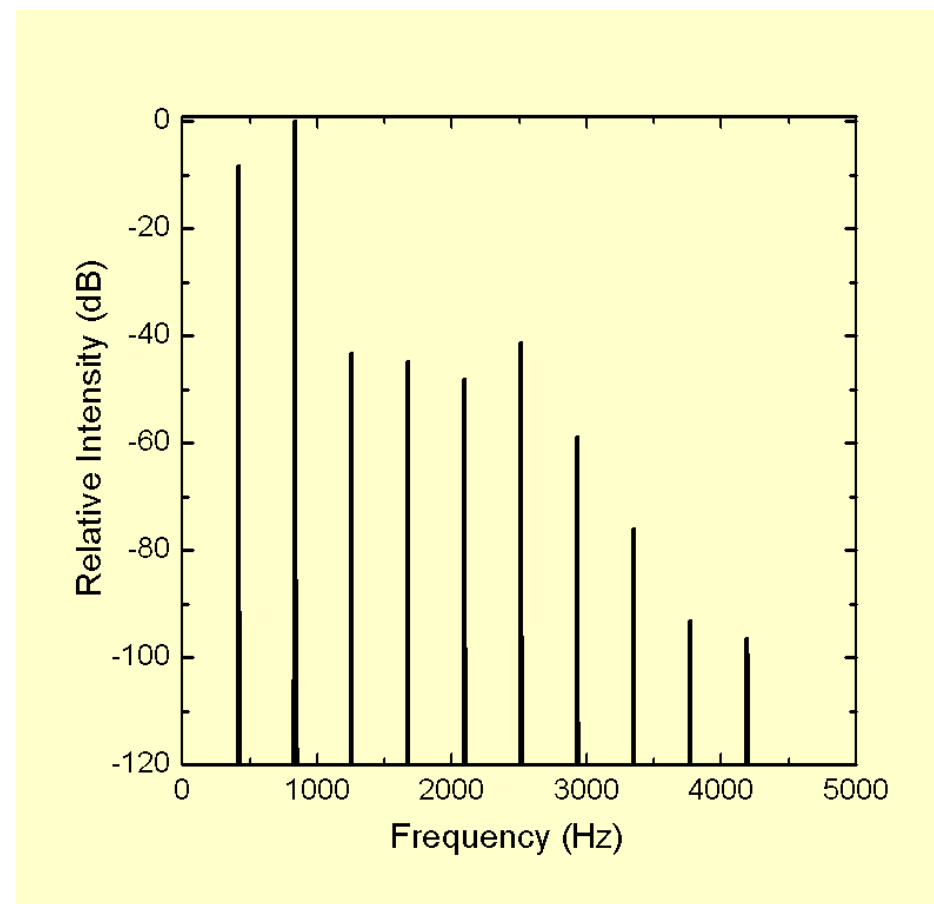
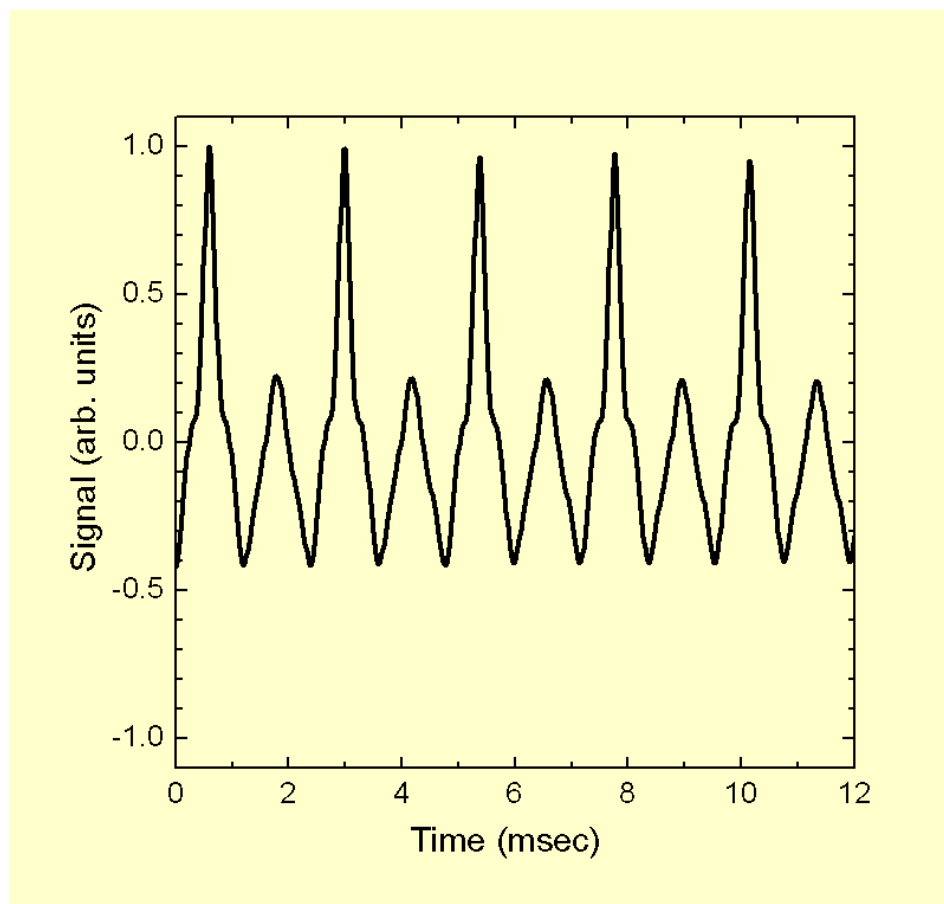
Ausência dos harmônicos pares no espectro

A ausência é mesmo harmônica é (parte de) o que é responsável pelo som "quente" ou "escuro" de um clarinete em comparação com o som "brilhante" de um saxofone.

Instrumentos de sopro



Saxofone



Ausência dos harmônicos pares no espectro

A ausência desses harmônicos é a responsável pelo som "quente" ou "escuro" de um clarinete em comparação com o som "brilhante" de um saxofone.