Física 3

(2/2016)

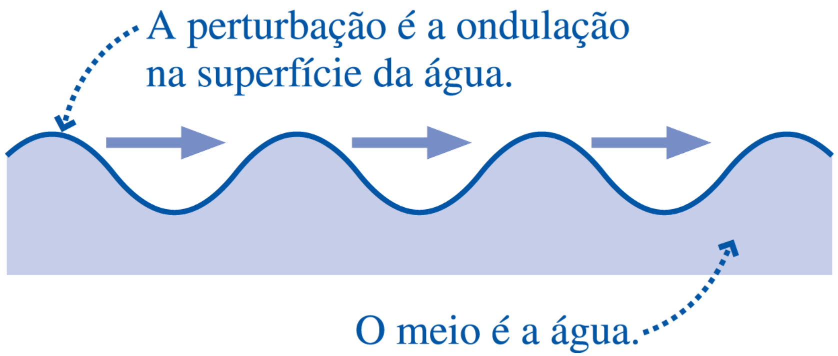
Cap 20 - Ondas Progressivas

Ondas Progressivas

- O que são: ‘Perturbações organizadas que se propagam com velocidade bem-definida”

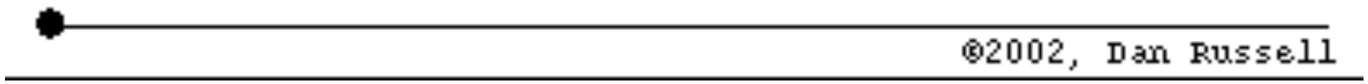
- Podem se propagar em um meio material (ex: ondas mecânicas, ondas sonoras), ou até mesmo no vácuo (ex: ondas eletromagnéticas, ondas gravitacionais)

- Transportam energia e informação, mas *não* tranportam o material do meio onde se propagam



Ondas Transversais

Perturbação perpendicular ao sentido de propagação



Ex: Ondas numa corda, ondas eletromagnéticas,

video: http://www.acs.psu.edu/drussell/Demos/waves-intro/waves-intro.html

Teste Conceitual

Uma onda transversal está viajando para a direita em uma corda horizontal. Quando a onda passa por um ponto da corda, ele

A) realiza um movimento retilíneo para a direita

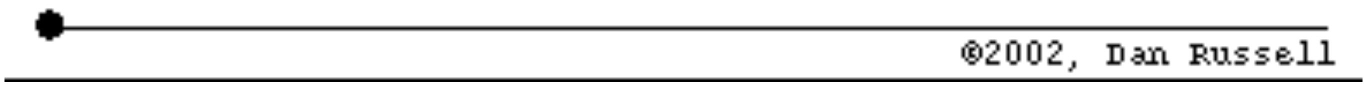
B) oscila de um lado para o outro na direção horizontal

C) oscila de um lado para o outro na direção vertical

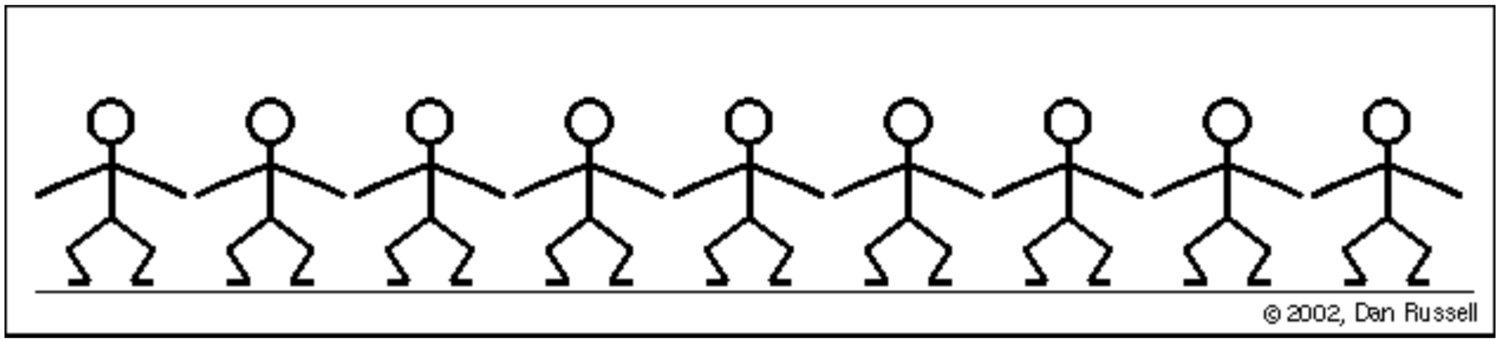
D) realiza um movimento circular uniforme

Ondas Transversais

Perturbação perpendicular ao sentido de propagação



Ex: Ondas numa corda, ondas eletromagnéticas,

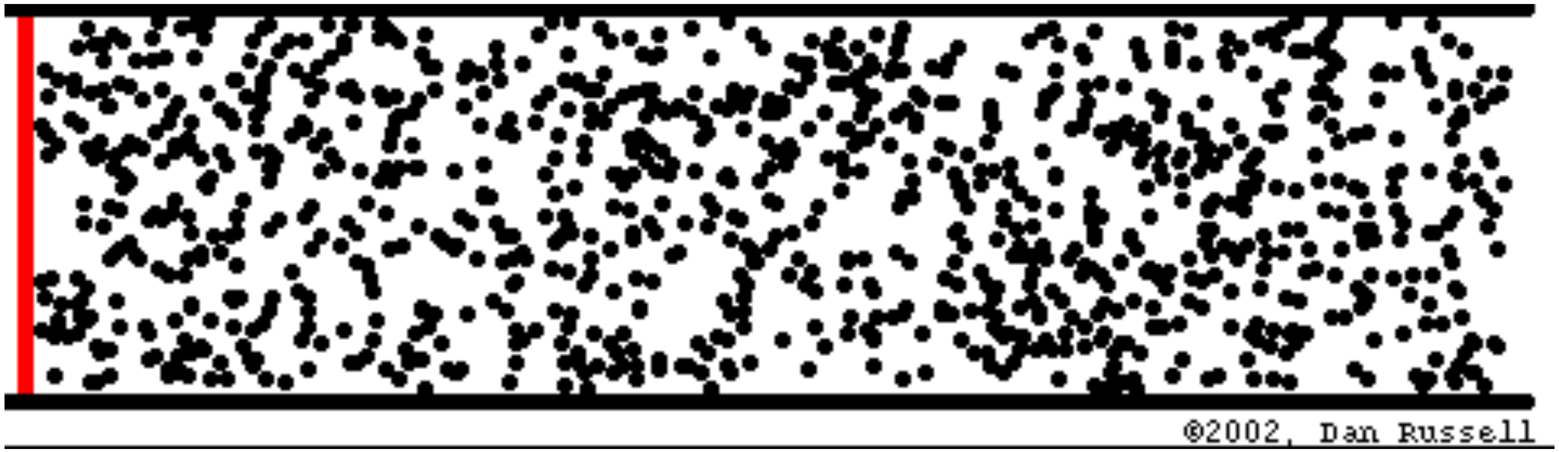


Ex: “Ola” num estádio

videos: http://www.acs.psu.edu/drussell/Demos/waves-intro/waves-intro.html

Ondas Longitudinais

Perturbação paralela ao sentido de propagação



Ex: ondas sonoras, ondas de choque

http://www.acs.psu.edu/drussell/Demos/waves-intro/waves-intro.html

Teste Conceitual

Uma onda longitudinal está viajando para a direita em um tubo de gás horizontal. Quando a onda passa por uma molécula do gás, ela

A) se move em linha reta para a direita

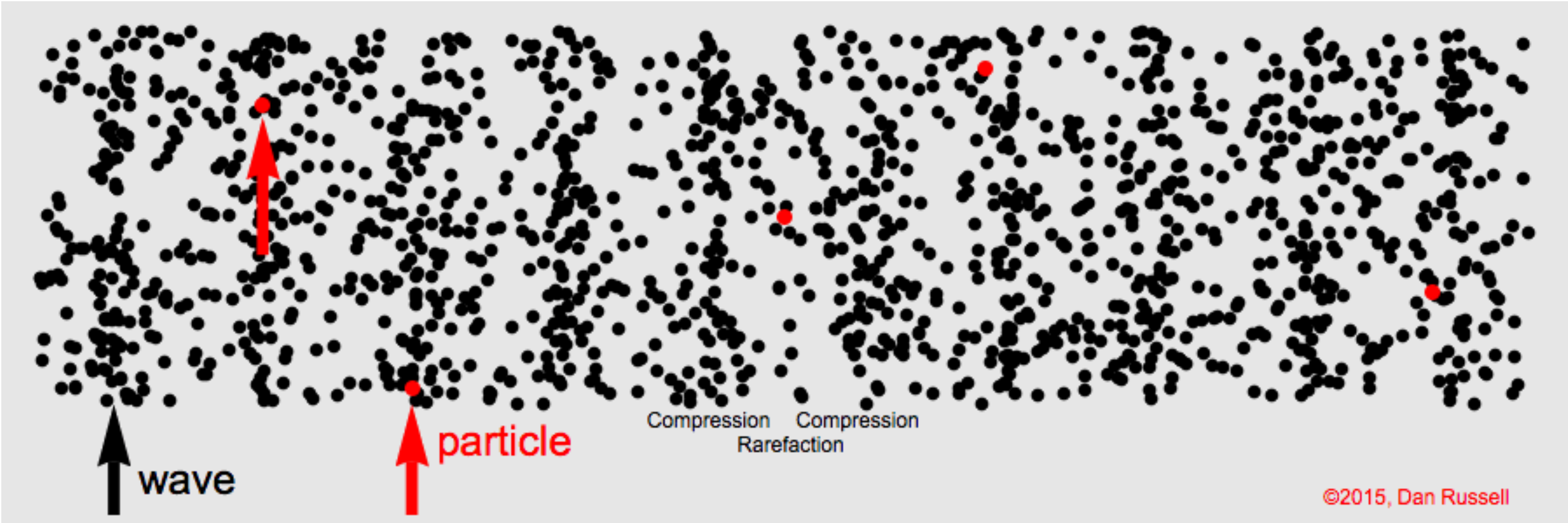
B) oscila de um lado para o outro na direção horizontal

C) oscila de um lado para o outro na direção vertical

D) realiza um movimento circular uniforme

Ondas Longitudinais

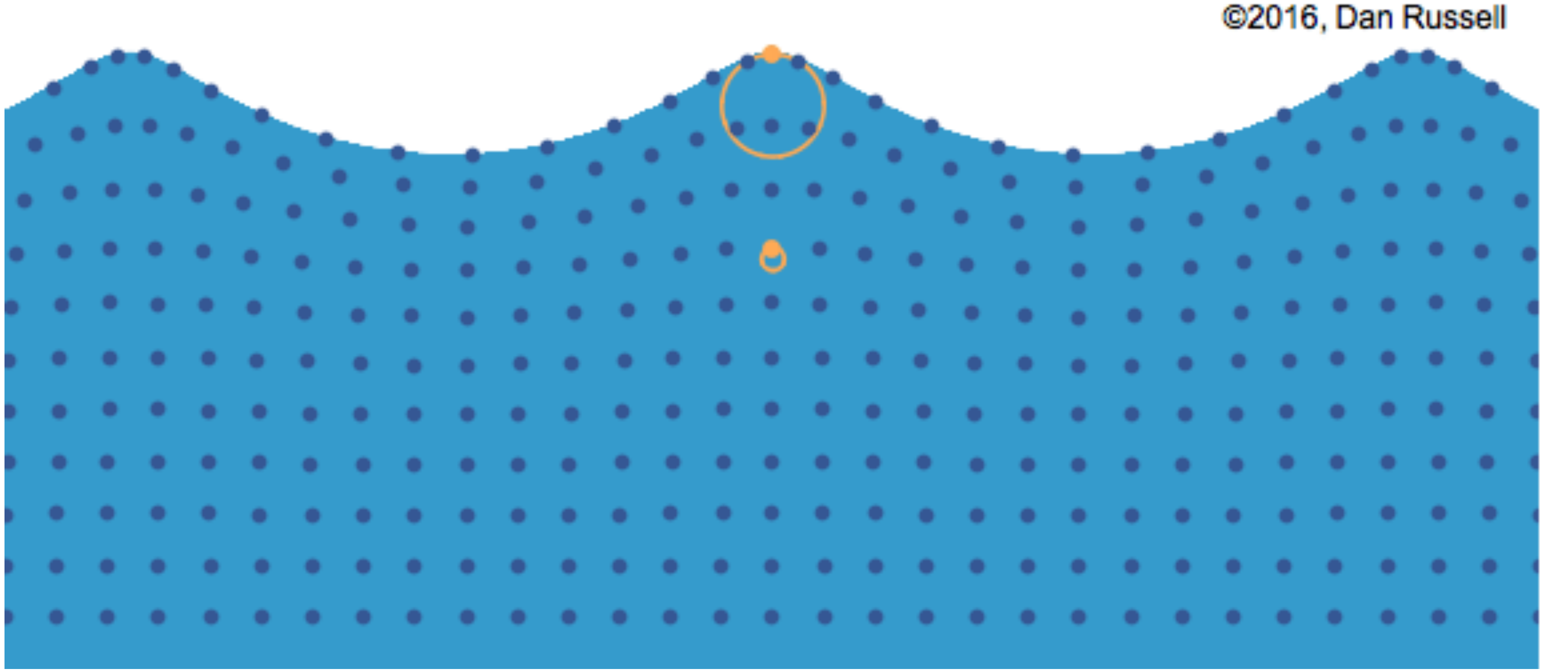
Perturbação paralela ao sentido de propagação



video: http://www.acs.psu.edu/drussell/Demos/waves/wavemotion.html

Obs: também existem ondas mais complicadas

Perturbação parte transversal e parte longitudinal



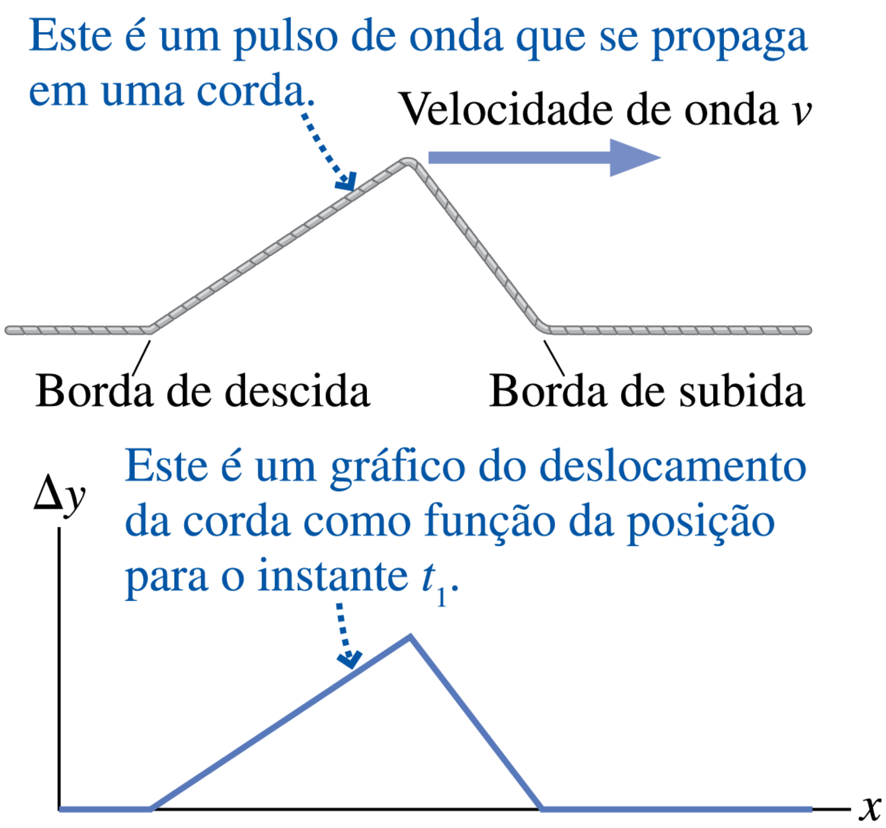
Ex: ondas de água, ondas superficiais em sólidos

Em certos casos as moléculas do meio podem realizar um MCU!

video: http://www.acs.psu.edu/drussell/Demos/waves/wavemotion.html

Ondas em 1D: descrição matemática

Em um instante **fixo** do tempo (t=0, p. ex,), uma onda é descrita por uma função da posição no espaço, **D = f(x),** que representa a perturbação em cada ponto com respeito à sua condição de equilíbrio



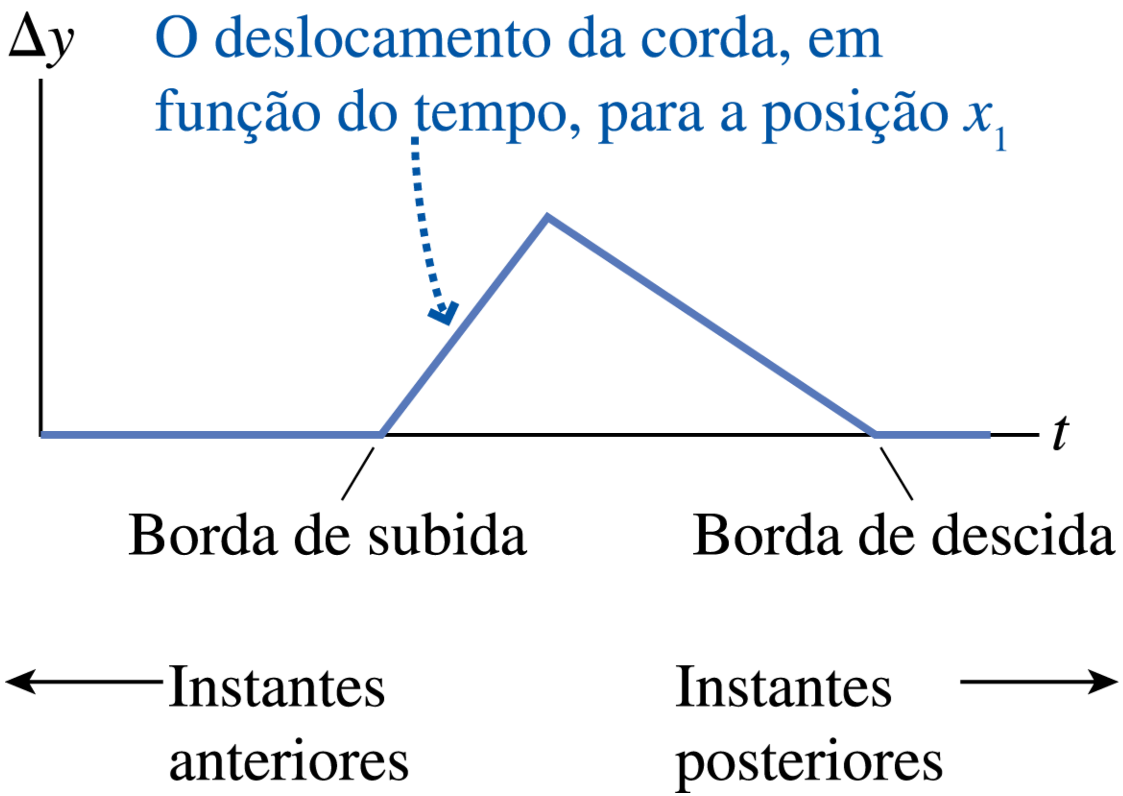
Ex: onda transversal numa corda:

$D = \Delta y = f(x)$ representa a altura da corda no ponto x com respeito à altura de equilíbrio

"gráfico instantâneo" da onda

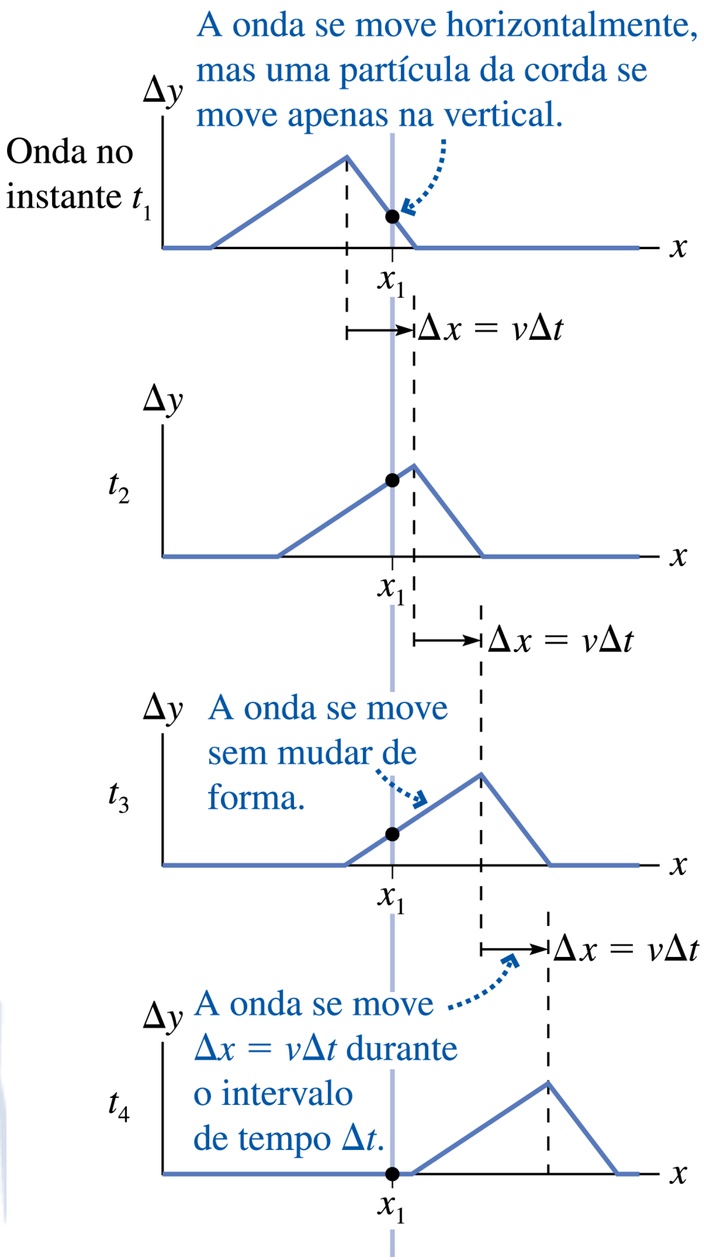
Ondas em 1D: descrição matemática

Por outro lado, em cada ponto x **fixo** do espaço podemos também descrever como o seu deslocamento varia no tempo com respeito à sua condição de equilíbrio ("gráfico história" do ponto x)



Intuitivamente, esse gráfico é uma versão 'espelhada' do gráfico instantaneo da onda

Ondas em 1D: descrição matemática



Mais geralmente, dizemos que uma onda se move para a direita com **velocidade v** quando a perturbação que estava em cada ponto x no instante t=0 passa a estar no ponto x + vt no instante t

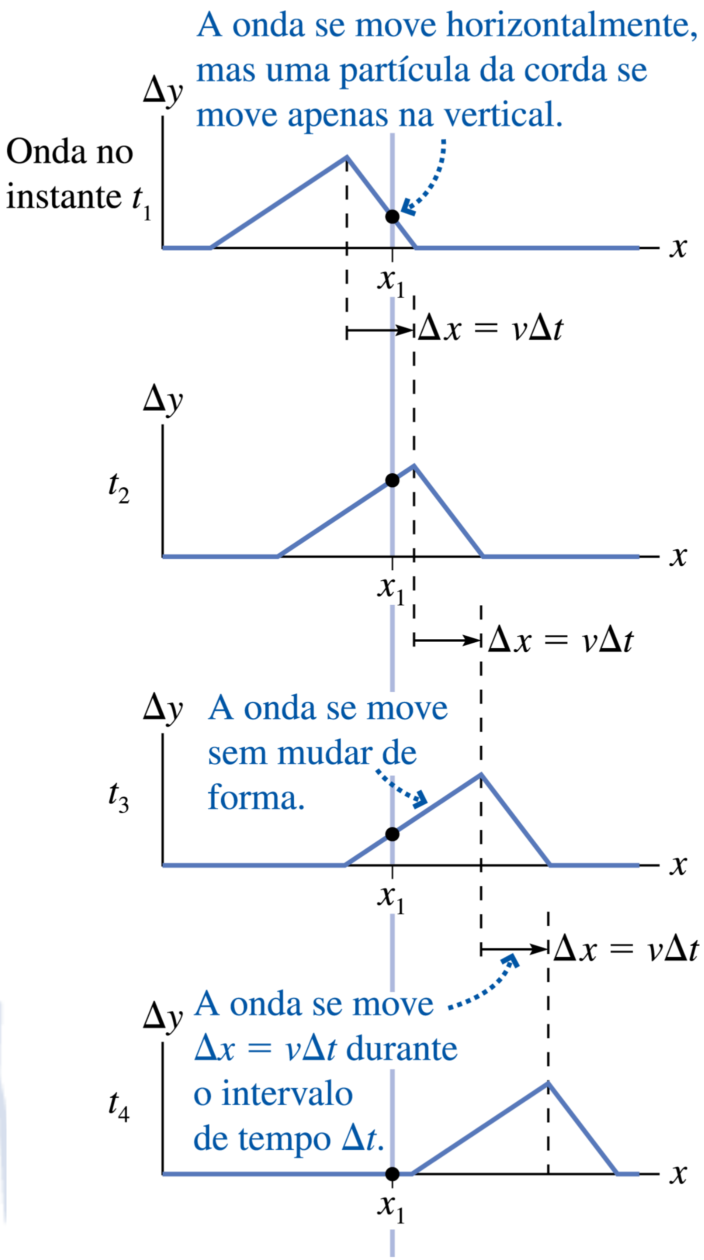
Se chamarmos de **D(x,t)** a perturbação do ponto x no instante t, temos então:

$$D(x+vt,t) = D(x, 0)$$

Reescrevendo para o ponto x' = x – vt:

$$D(x',t) = D(x'-vt,0) = D(x'-vt)$$

Ondas em 1D: descrição matemática



Como o ponto x' acima pode ser qualquer um, concluímos:

QUALQUER função de x e t que possa ser escrita na forma

$$D(x,t) = f(x - vt)$$

representa uma onda propagando para a direita com velocidade v

Obs: se a onda se desloca para a esquerda, então

$$D(x,t) = f(x + vt)$$

Teste Conceitual

Para uma dada onda transversal em uma corda, o deslocamento é descrito por

$$\mathbf{D(x, t) = \mathit{f}\,(x - \mathit{at})}$$

onde f é uma função dada e a é uma constante positiva. Qual das seguintes sentenças **não** é correta?

A) A forma de onda não muda enquanto a onda se move ao longo da corda.
B) A onda se move na direção x positiva.
C) A velocidade da onda é a**.**
D) A velocidade da onda é x/t.

Teste Conceitual

Para uma dada onda transversal em uma corda, o deslocamento é descrito por

$$\mathbf{D(x,\ t) = \boldsymbol{f}\,(x - \boldsymbol{at})}$$

onde f é uma função dada e a é uma constante positiva. Qual das seguintes sentenças **não** é correta?

A) A forma de onda não muda enquanto a onda se move ao longo da corda.
B) A onda se move na direção x positiva.
C) A velocidade da onda é a.
D) A velocidade da onda é x/t.

Teste Conceitual

Considere as seguintes funções

$$D_1(x,t) = A\,(x^2 - 2axt + a^2t^2)$$

$$D_2(x,t) = A\,\text{sen}\,(x - at^2)$$

$$D_3(x,t) = A\,(x^2 - a^2t^2)$$

Qual dessas funções representa uma onda se propagando sem deformação para a direita com velocidade constante?

A) D_1
B) D_2
C) D_3
D) Nenhuma delas

Teste Conceitual

Considere as seguintes funções

$$D_1(x,t) = A\,(x^2 - 2axt + a^2t^2)$$

$$D_2(x,t) = A\,\text{sen}\,(x - at^2)$$

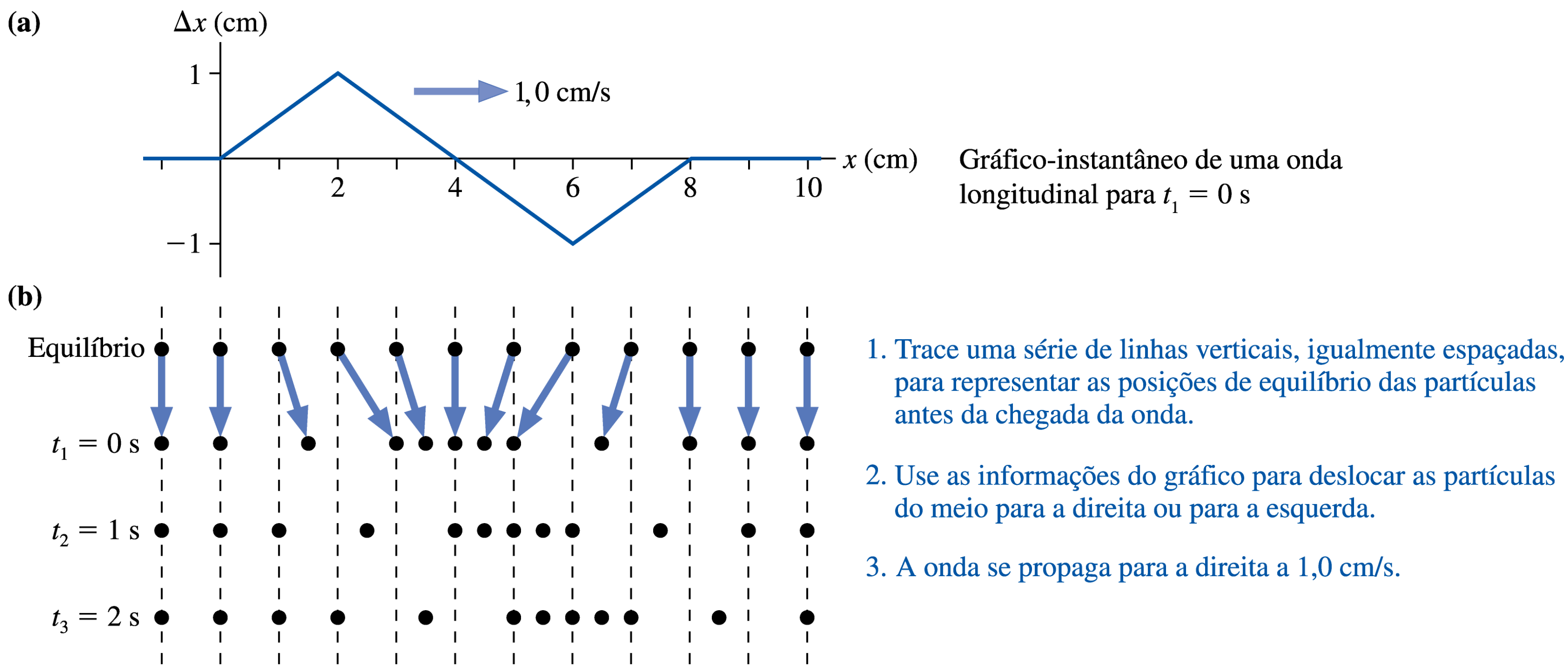
$$D_3(x,t) = A\,(x^2 - a^2t^2)$$

Qual dessas funções representa uma onda se propagando sem deformação para a direita com velocidade constante?

A) D_1
B) D_2
C) D_3
D) Nenhuma delas

Ondas em 1D: descrição matemática

Obs: O tratamento é o mesmo no caso de uma onda longitudinal, com a única diferença de que **D(x,t) agora** descreve o deslocamento horizontal do ponto x no instante t,



Um caso particular:
Velocidade de propagação de uma onda em uma corda

Vamos deduzir a forma da velocidade v das ondas em uma corda, a menos de uma constante, por **análise dimensional:**

1. v tem de depender das propriedades relevantes de uma corda. Só há 3 possíveis: sua massa M, seu comprimento L, e a tração T aplicada nela. Assim:

$$v = cte \; T^a \; M^b \; L^c$$

2. Determinamos a,b,c igualando as dimensões físicas (unidades) dos 2 lados:

$$m/s = [kg.m/s]^a \; [kg]^b \; m^c$$

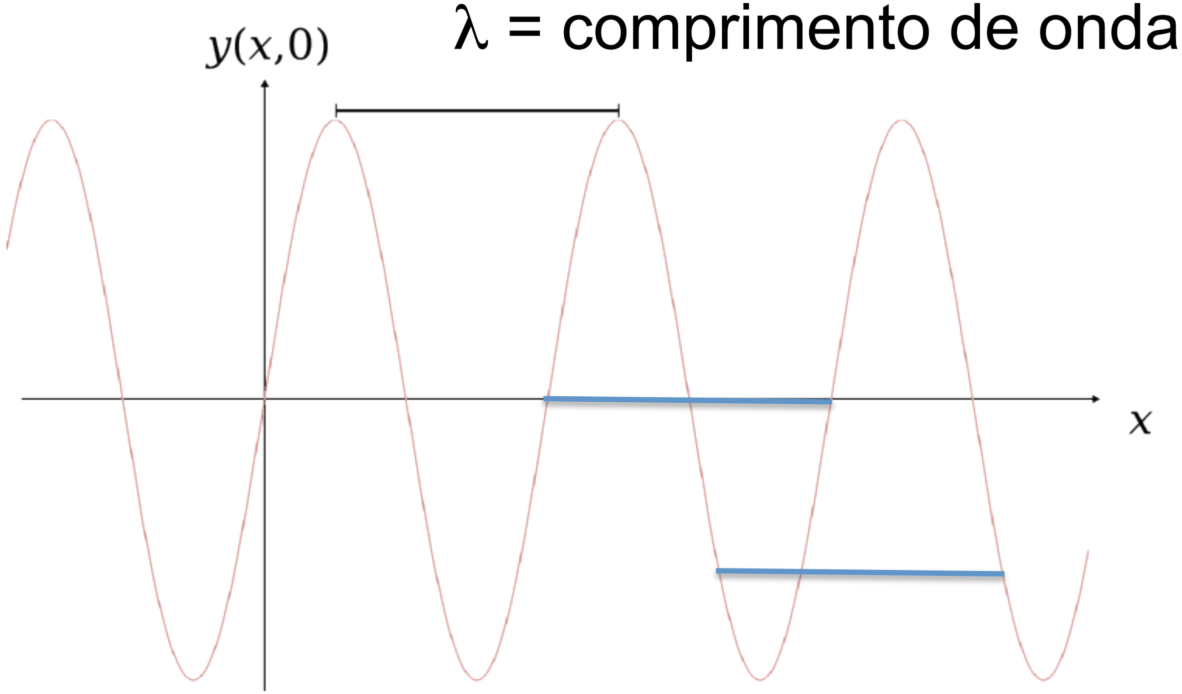
3. Solução: a = c = ½, b = -½ . Definindo ainda a **densidade linear** μ = M / L :

$$\boxed{\mathbf{v = cte \; (T / \mu)^{1/2}}}$$

(Uma análise mais completa da física de uma corda (v. livro) revela que cte = 1)

Ondas Senoidais: gráfico instantâneo

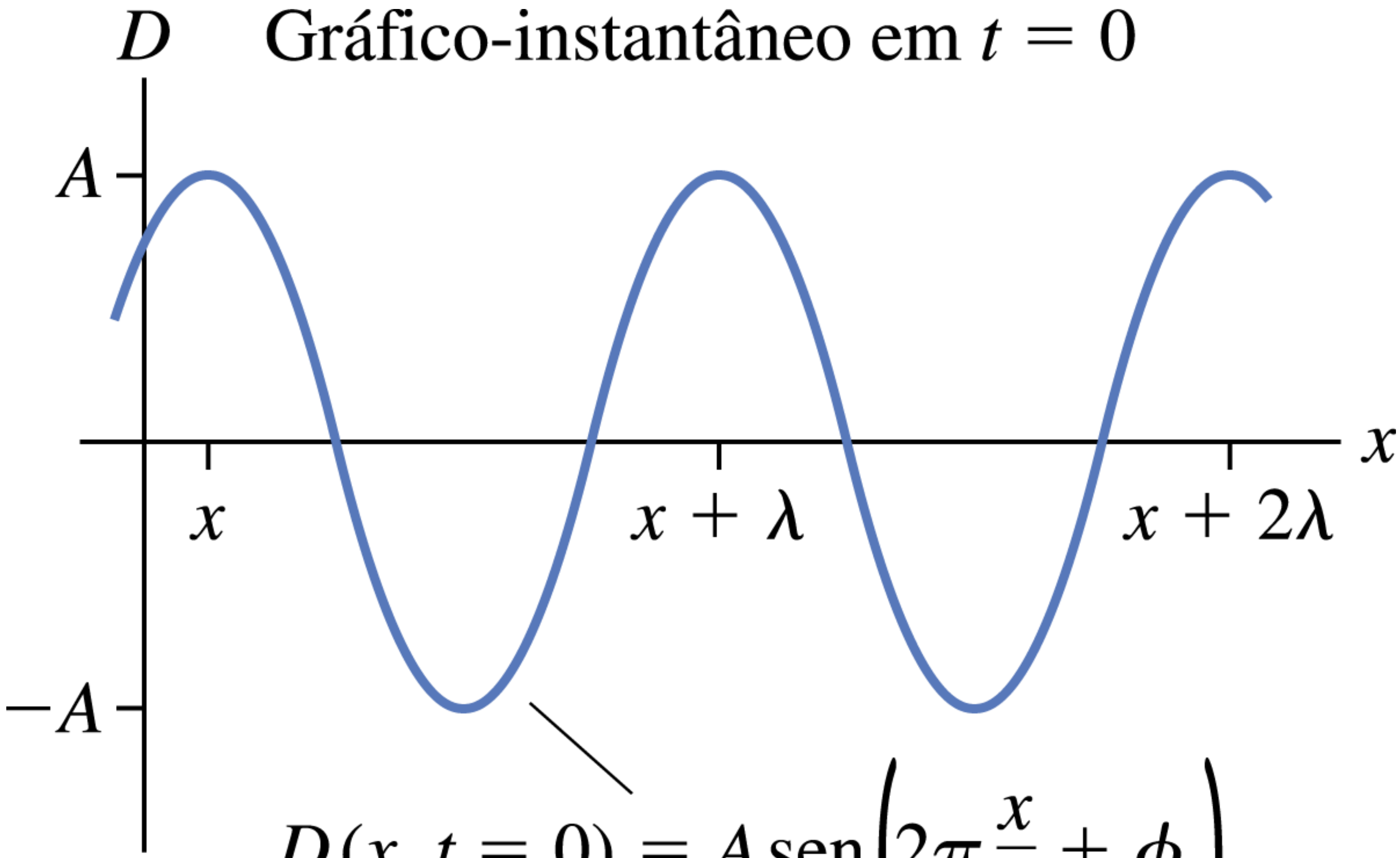
λ = comprimento de onda: $y(x+\lambda, 0) = y(x, 0)$



Dada uma onda senoidal, um comprimento de onda é a distância entre dois pontos adjacentes que têm a mesma **fase.**

Este pontos podem ser duas cristas, dois vales, ou quaisquer dois que estejam no mesmo ponto do ciclo.

Ondas Senoidais: gráfico instantâneo

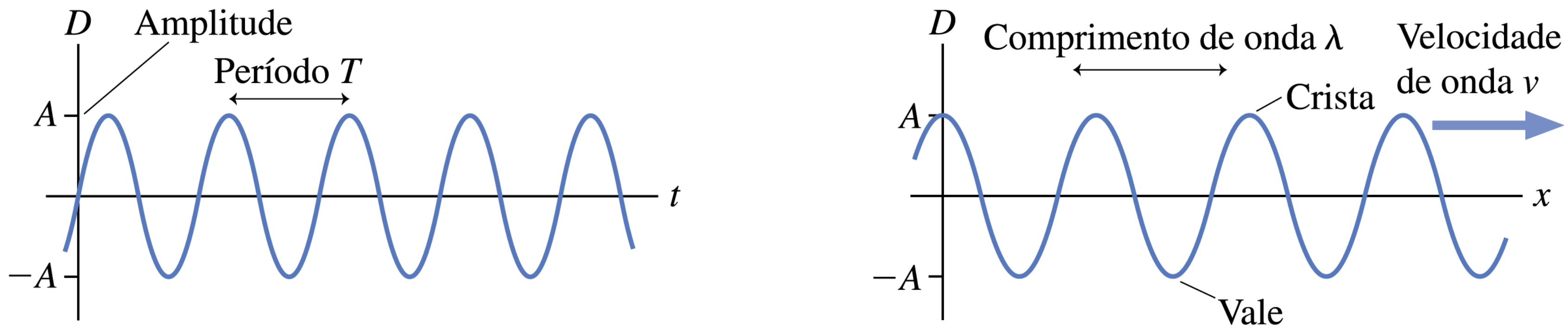


$$D(x, t = 0) = A\,\text{sen}\left(2\pi\frac{x}{\lambda} + \phi_0\right)$$

φ_0 = **fase inicial**: diz em que parte da oscilação a onda está quando x = t = 0

Ondas Senoidais: gráfico história

(a) O gráfico-história para um ponto do espaço **(b)** O gráfico-instantâneo para um instante do tempo



Um **período T** é a quantidade mais curta **de tempo** para a qual cada ponto do meio retorna (periodicamente) à sua fase inicial

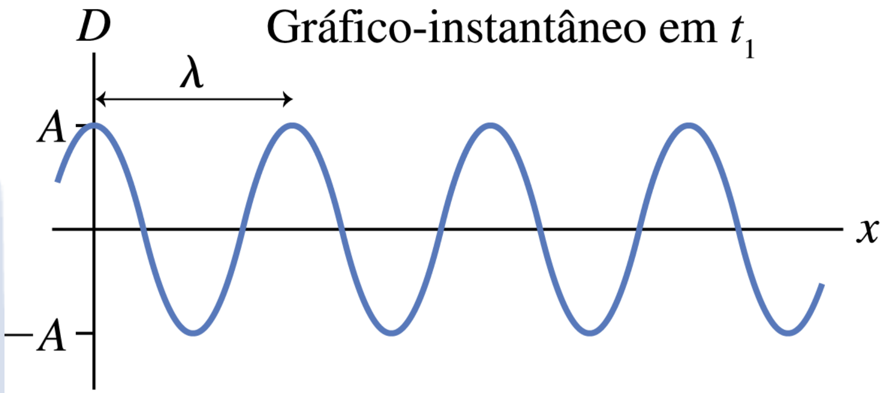
Ex: se esta for uma onda numa corda, cada ponto da corda realiza um MHS vertical de período T (obs: demonstração mais adiante)

Como a onda se desloca precisamente a distância λ no tempo T, segue que

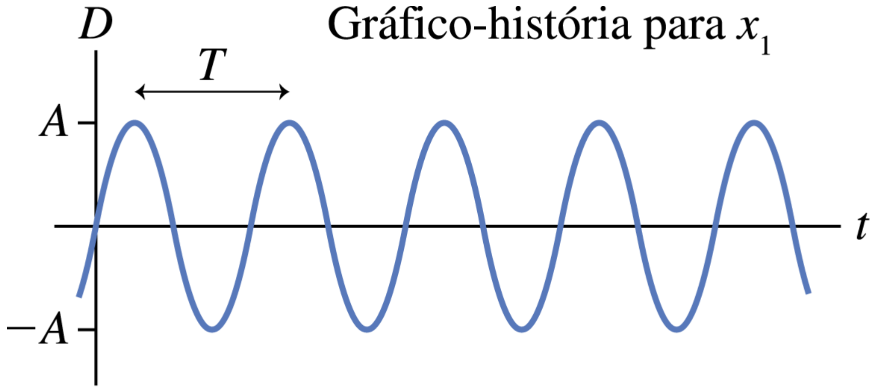
$$v = \lambda / T = \lambda f$$ [válido <u>apenas</u> p/ ondas periódicas]

Ondas Senoidais – expressão geral

$$D(x,t) = D(x - vt, 0) = A\sin\left(\frac{2\pi\,(x - vt)}{\lambda} + \phi_0\right)$$



Se t for fixado, $D(x, t_1) = A\,\mathrm{sen}(kx - \omega t_1 + \phi_0)$ resulta num gráfico-instantâneo senoidal em um instante do tempo, t_1. Ele se repete a cada λ m.



Se x for fixado, $D(x_1, t) = A\,\mathrm{sen}(kx_1 - \omega t + \phi_0)$ resulta num gráfico-história em um ponto do espaço, x_1. Ele se repete a cada T s.

Ondas Senoidais – expressão geral

$$D(x,t) = D(x-vt,0) = A\sin\left(\frac{2\pi\,(x-vt)}{\lambda} + \phi_0\right)$$

Def: $$k \equiv \frac{2\pi}{\lambda} \qquad\qquad \omega \equiv 2\pi f = \frac{2\pi v}{\lambda}$$

Podemos reescrever a expressão na forma mais ‘limpa’

$$\boxed{D(x,t) = A\sin\left(kx - \omega t + \phi_0\right)}$$

Ondas Senoidais

Teste Conceitual

O deslocamento de uma onda senoidal é dado por

$$D(x,t) = A\,\mathrm{sen}(kx - \omega t).$$

A sua velocidade é então dada por

A) k / ω
B) $\omega \cdot k$
C) ω / k
D) $\omega - k$

Dica: olhe as unidades físicas de ω e k.
Que combinação delas dá a unidade de velocidade?

Ondas Senoidais

Teste Conceitual

O deslocamento de uma onda senoidal é dado por

$$D(x,t) = A\ \mathrm{sen}(kx - \omega t).$$

A sua velocidade é então dada por

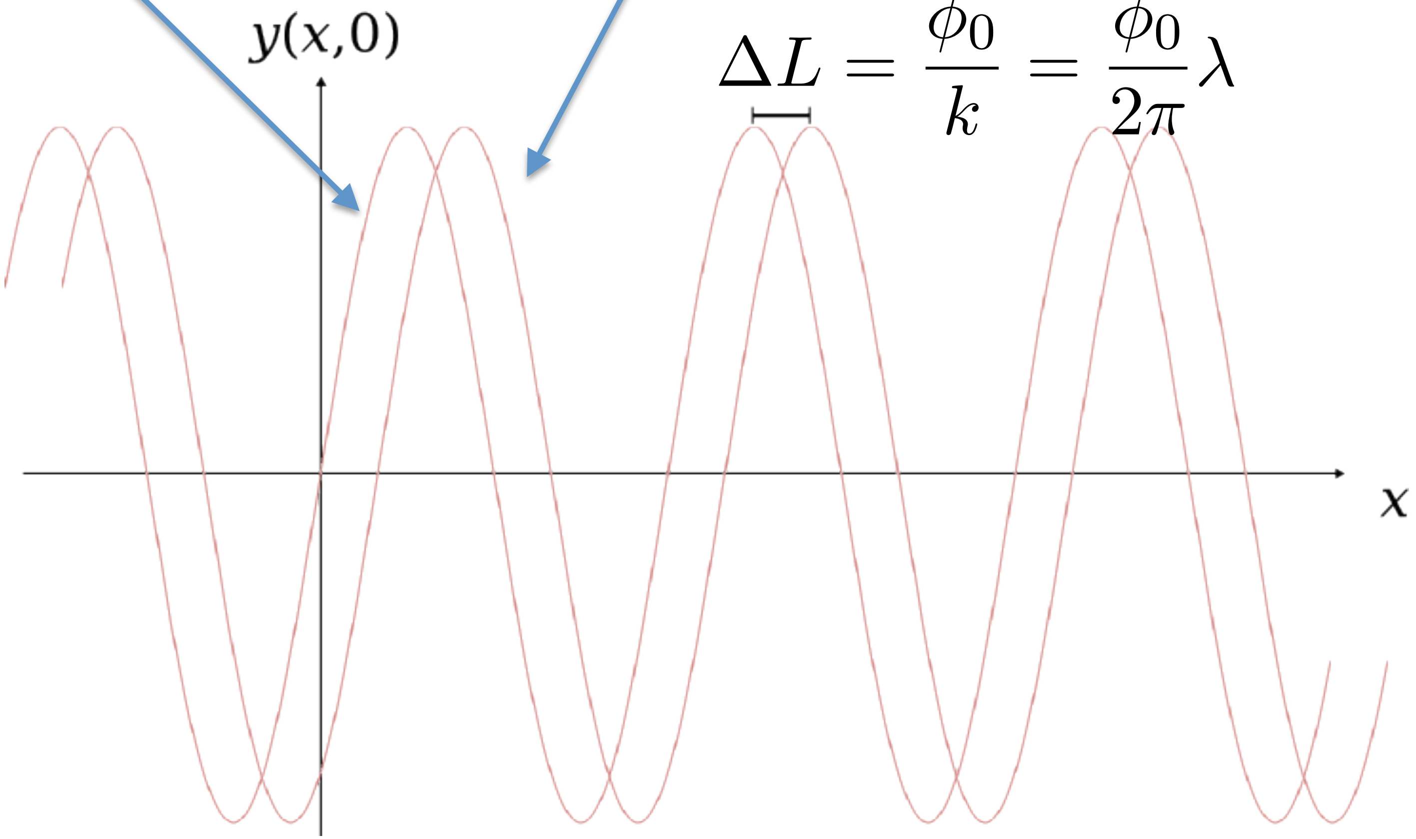
A) k / ω
B) $\omega \cdot k$
C) ω / k
D) $\omega - k$

Diferença de fase entre duas ondas

$$y_2(x,0) = A\sin(kx - \varphi_0)$$
$$= A\sin\left(k\left(x - \frac{\phi_0}{k}\right)\right)$$

$$y_1(x,0) = A\sin(kx)$$

$$\Delta L = \frac{\phi_0}{k} = \frac{\phi_0}{2\pi}\lambda$$



Interpret. 1: $\varphi_0 / 2\pi$ mede a <u>distância espacial</u> entre as duas ondas, em unidades de λ

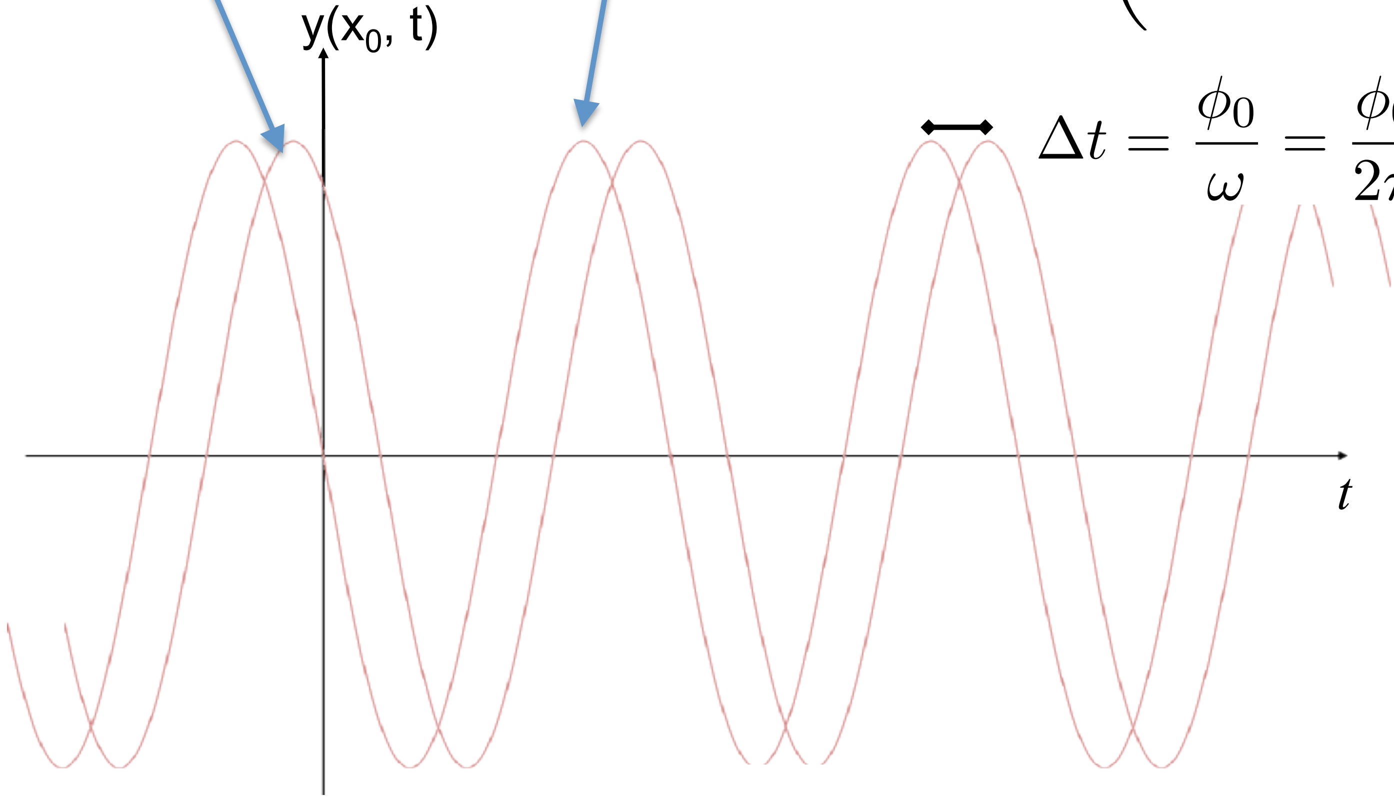
Diferença de fase entre duas ondas

$$y_2(x_0, t) = A\sin(kx_0 - \omega t - \phi_0)$$

$$= A\sin\left(kx_0 - \omega\left(t + \frac{\phi_0}{\omega}\right)\right)$$

$$y_1(x_0, t) = A\sin(kx_0 - \omega t)$$

$$\Delta t = \frac{\phi_0}{\omega} = \frac{\phi_0}{2\pi}T$$



Interpret. 2: $\varphi_0 / 2\pi$ mede a <u>distância temporal</u> entre as duas ondas, em unidades de T

Teste Conceitual

Considere as ondas $y_1(x,t) = A \text{ sen } (kx - \omega t + \varphi)$ e $y_2(x,t) = B \cos (kx - \omega t + \varphi)$.
É correto dizer que

A) A diferença de fase entre y_1 e y_2 é $\varphi_0 = \pi/2$, sendo que a onda y_1 está adiantada ¼ de ciclo com respeito à onda $y_{2.}$

B) A diferença de fase entre y_1 e y_2 é $\varphi_0 = \pi/2$, sendo que a onda y_2 está adiantada ¼ de ciclo com respeito à onda $y_{1.}$

C) A diferença de fase entre y_1 e y_2 é φ_0 = zero (as duas ondas estão em fase)

D) A diferença de fase entre y_1 e y_2 é $\varphi_0 = \varphi$, sendo que qual das duas está adiantada depende do sinal de φ.

Teste Conceitual

Considere as ondas $y_1(x,t) = A \operatorname{sen}(kx - \omega t + \varphi)$ e $y_2(x,t) = B \cos(kx - \omega t + \varphi)$.
É correto dizer que

A) A diferença de fase entre y_1 e y_2 é $\varphi_0 = \pi/2$, sendo que a onda y_1 está adiantada ¼ de ciclo com respeito à onda y_2.

B) A diferença de fase entre y_1 e y_2 é $\varphi_0 = \pi/2$, sendo que a onda y_2 está adiantada ¼ de ciclo com respeito à onda y_1.

C) A diferença de fase entre y_1 e y_2 é φ_0 = zero (as duas ondas estão em fase)

D) A diferença de fase entre y_1 e y_2 é $\varphi_0 = \varphi$, sendo que qual das duas está adiantada depende do sinal de φ.

Velocidade dos pontos de uma onda transversa (ex: corda)

A equação

$$y(x,t) = Asen[kx - \omega t + \phi]$$

Fornece o deslocamento vertical de cada ponto da onda. Portanto:

$$\boxed{v_y(x,t) = \frac{\partial y}{\partial t}(x,t) = -\omega A \cos\left[kx - \omega t + \phi_0\right]}$$

(velocidade de deslocamento vertical de cada ponto da onda)

obs: v_y NÃO é o mesmo que $v_{onda} = \lambda f = \omega/k$!

varia com o ponto
e o instante

uniforme no espaço e
constante no tempo

Velocidade dos pontos de uma onda transversa (ex: corda)

A equação

$$y(x,t) = Asen[kx - \omega t + \phi]$$

Fornece o deslocamento vertical de cada ponto da onda. Portanto:

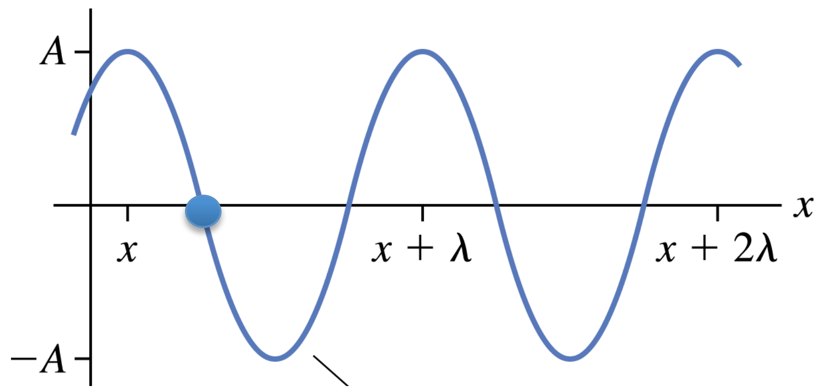
$$v_y(x,t) = \frac{\partial y}{\partial t}(x,t) = -\omega A \cos\left[kx - \omega t + \phi_0\right]$$

$$a_y(x,t) = \frac{\partial^2 y}{\partial t^2}(x,t) = -\omega^2 A \,\mathrm{sen}\left[kx - \omega t + \phi_0\right]$$
$$= -\omega^2 y(x,t)$$

(**aceleração** do deslocamento vertical de cada ponto da onda)

Cada ponto de uma corda descreve um MHS vertical!

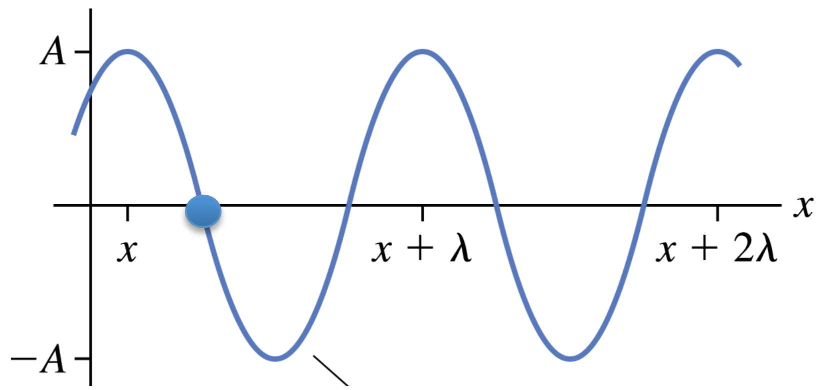
Teste Conceitual



No ponto indicado de uma onda senoidal numa corda propagando para a direita, o vetor velocidade do material da corda

A) Atinge um máximo e aponta para cima
B) Atinge um máximo e aponta para baixo
C) Atinge um máximo e aponta para a direita
D) Vale zero

Teste Conceitual



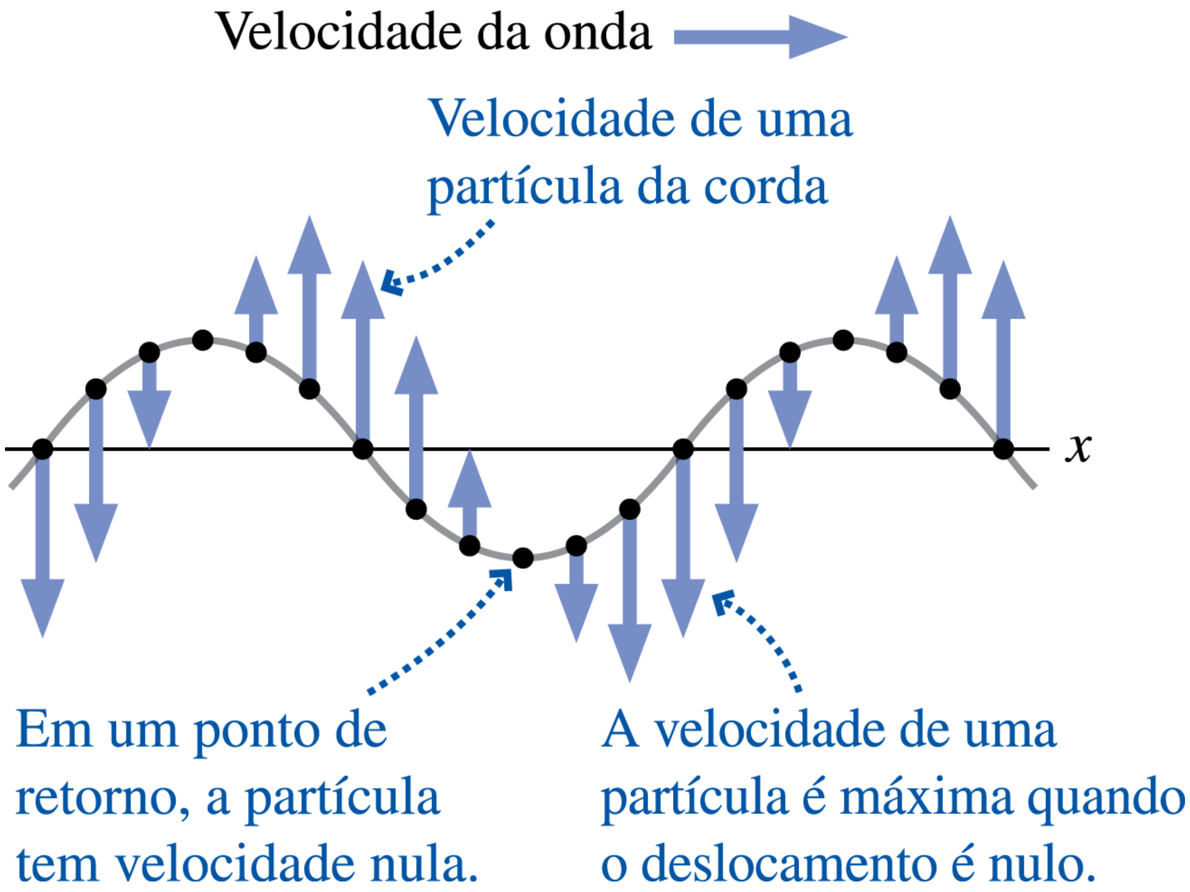
No ponto indicado de uma onda senoidal numa corda propagando para a direita, o vetor velocidade do material da corda

A) Atinge um máximo e aponta para cima
B) Atinge um máximo e aponta para baixo
C) Atinge um máximo e aponta para a direita
D) Vale zero

Ondas Senoidais

$$y(x,t) = Asen[kx - \omega t + \phi]$$

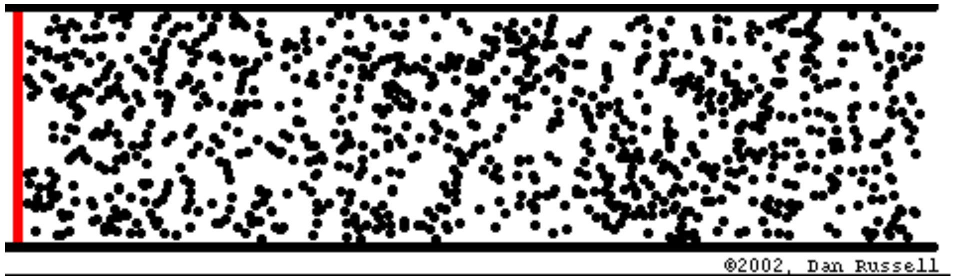
$$v_y(x,t) = \frac{\partial y}{\partial t}(x,t) = -\omega A \cos\left[kx - \omega t + \phi_0\right]$$



Exemplo: Ondas sonoras

- Sua existência é uma consequência da forma como materiais (sólidos, líquidos ou gases) respondem a deformações súbitas.

- Em gases, por exemplo, um deslocamento súbito de uma porção do gás gera um aumento localizado na pressão, o qual gera o deslocamento de uma nova camada de gás, e assim por diante



- Analisando esse processo com as mesmas ferramentas termodinâmicas que já utilizamos, pode-se mostrar que

$$v_{som} = \sqrt{\gamma \cdot \frac{P}{\rho}} = \sqrt{\frac{\gamma \cdot R \cdot T}{M_{molar}}}$$

(P. ex: o fator γ aparece pois essas compressões e rarefações são rápidas, portanto *adiabáticas)*

Ex: para ar (78% $^{28}N_2$ e 22% $^{32}O_2$) a 293K: v_{som} = 343 m/s !

Exemplo: Ondas eletromagnéticas

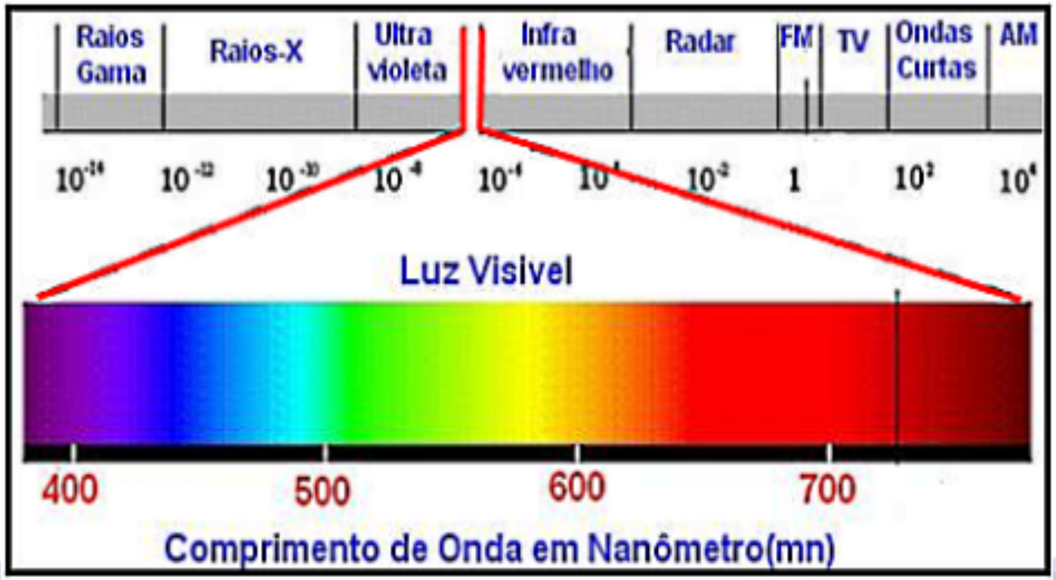
- Sua existência é uma consequência das equações de Maxwell: uma variação no campo elétrico gera outra no campo magnético, a qual por sua vez gera uma nova variação no campo elétrico, e assim por diante

- Se propagam no vácuo com velocidade $c = \dfrac{1}{\sqrt{\mu_0 \varepsilon_0}} = 3,0 \times 10^8 m/s$

- Podem ser detectadas e manipuladas numa vasta faixa de comprimentos de onda, que formam o **espectro eletromagnético**

- Apenas uma estreita faixa desse espectro corresponde à luz visível

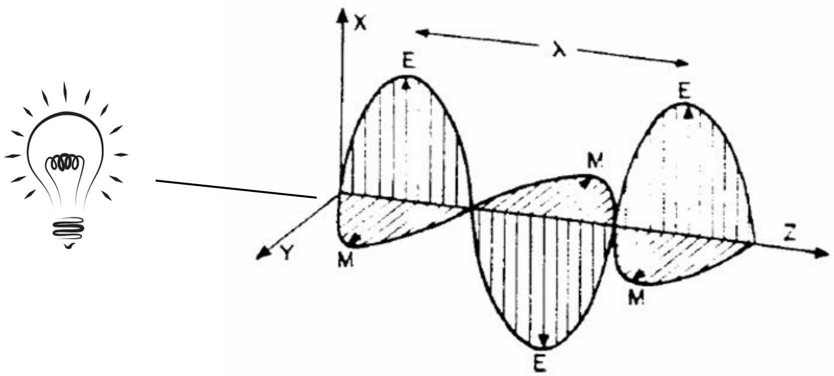
Violeta(400nm)



Vermelho(700nm)

Ondas Eletromagnéticas

Luz



A velocidade da luz em um meio material é caracterizada pelo **índice de refração**

$$n = \frac{v_{luz}^{vácuo}}{v_{luz}^{material}} = \frac{c}{v} \geq 1 \; !$$

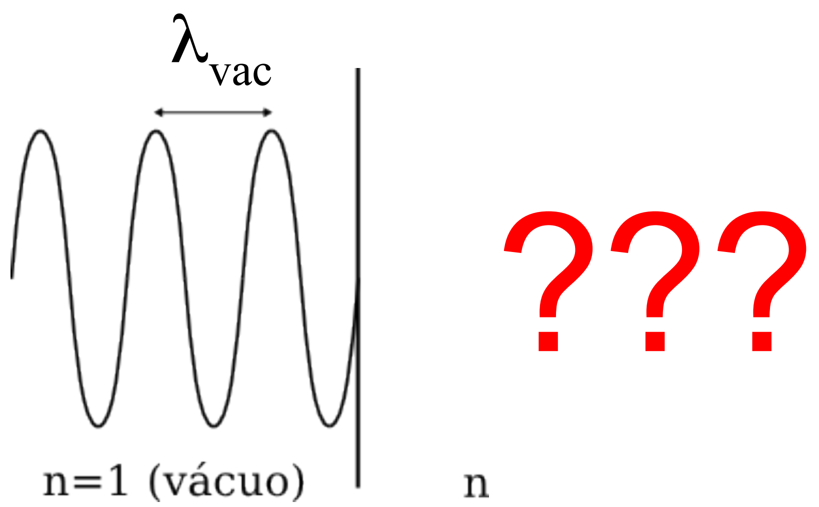
Exemplos:

n=1 (vácuo)
n=1,0003 (ar)
n=1,33 (água)
n=1,50 (vidro)
n=2,42 (diamante)

Ondas Eletromagnéticas

Se a velocidade da onda EM varia ao passar de um meio para o outro, o que ocorre com a sua frequência e comprimento de onda?

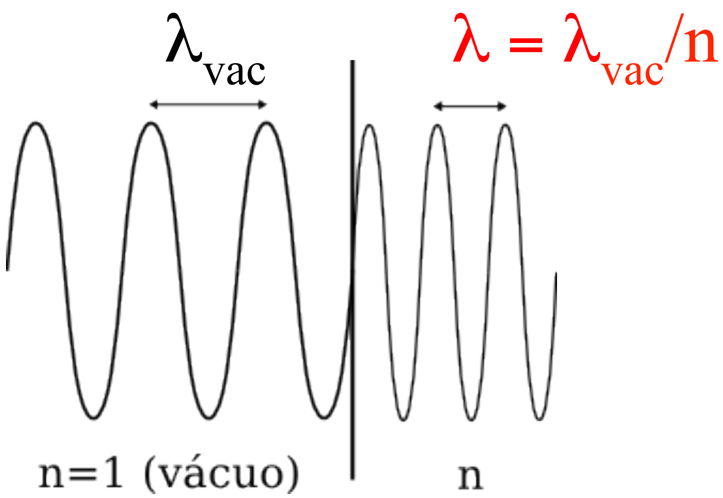
A) Só a frequência varia
B) Só o comprimento de onda varia
C) Ambos variam
D) Nenhum deles varia



Ondas Eletromagnéticas

Se a velocidade da onda EM varia ao passar de um meio para o outro, o que ocorre com a sua frequência e comprimento de onda?

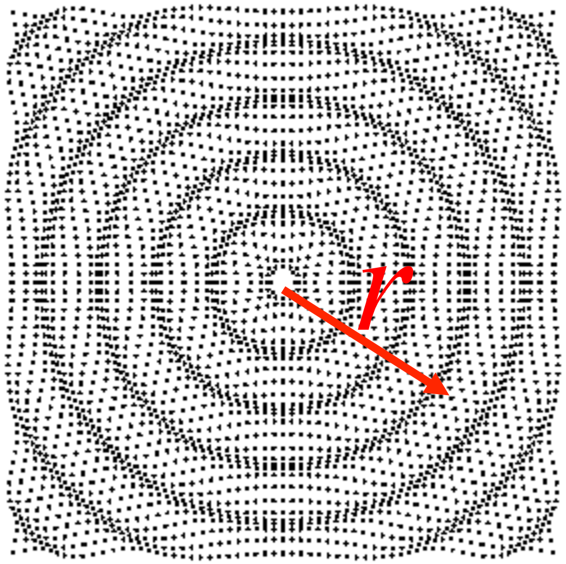
A) Só a frequência varia
B) Só o comprimento de onda varia
C) Ambos variam
D) Nenhum deles varia



A frequência da onda é a frequência da fonte. Ela não varia quando a onda passa de um meio para outro.

Ondas Bidimensionais - 2D

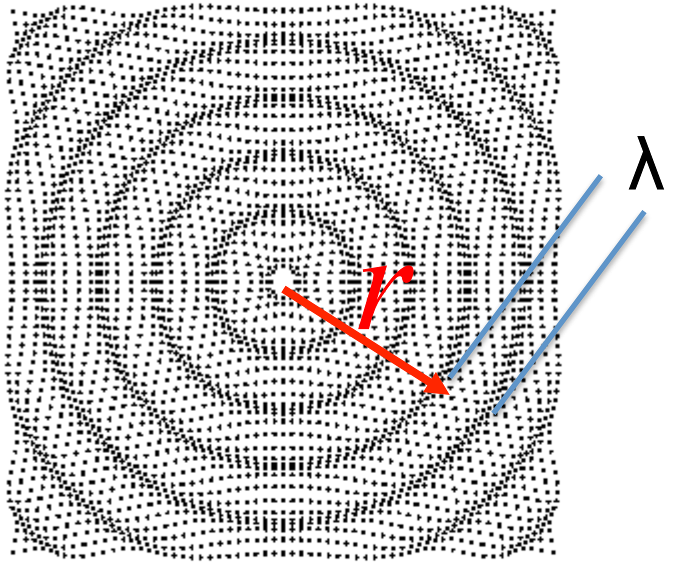
Ondas Bidimensionais - 2D



$$y(r,t) = A(r)sen[kr - \omega t + \phi]$$

$r \rightarrow$ distância em relação a fonte

Ondas Bidimensionais - 2D



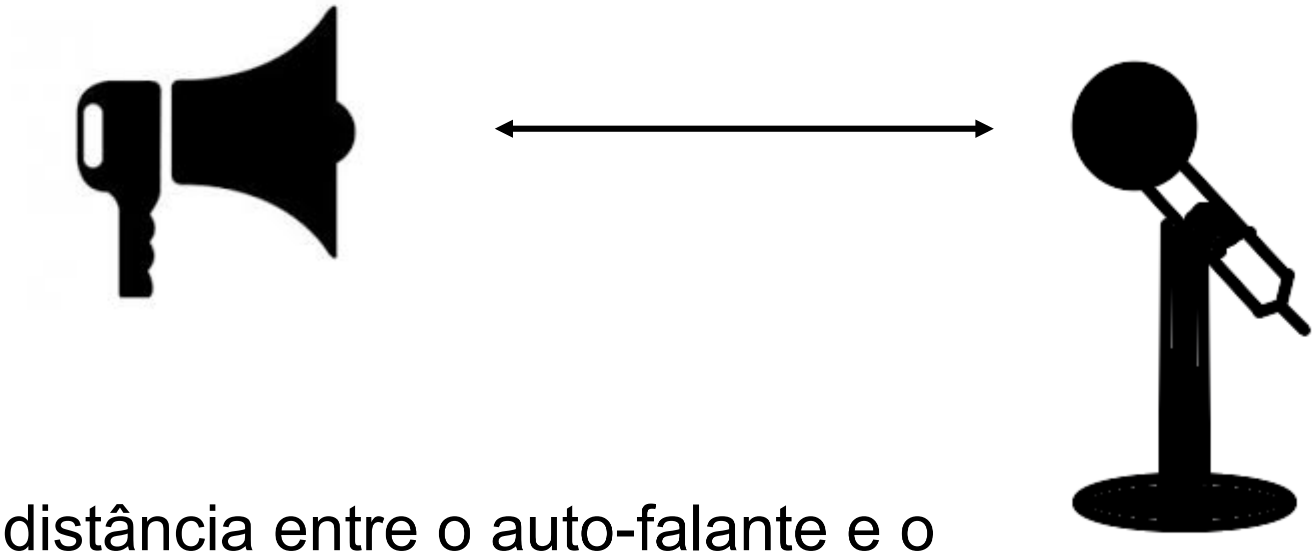
Frentes de onda são as cristas da onda.
Na direção radial, elas são separadas por um λ

$$y(r,t) = \boxed{A(r)} sen[kr - \omega t + \phi]$$

OBS: normalmente a Amplitude depende da distância à fonte!

Uma onda transporta energia...

Experiência cotidiana



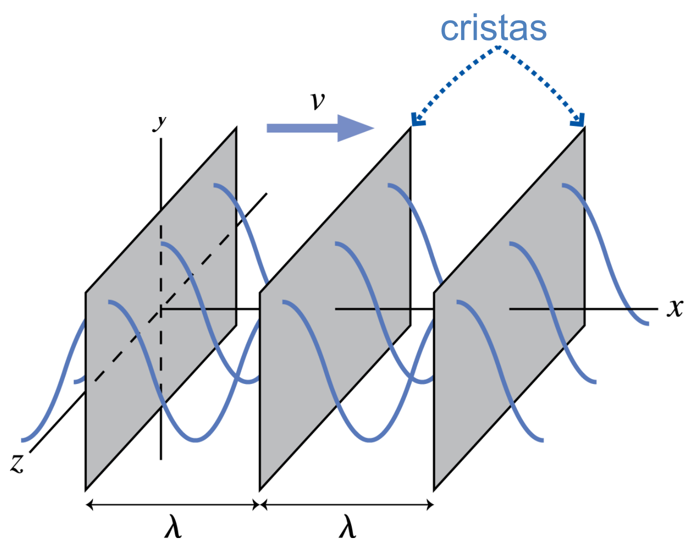
Qto maior a distância entre o auto-falante e o menor a intensidade do som captado.

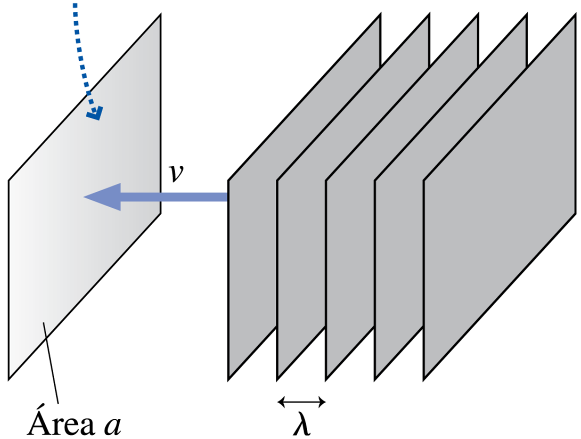
Uma onda transporta energia...

Potência → taxa, em Watts (J/s), pela qual a onda transfere energia.

A **potência** só depende da fonte. e se refere à onda como um todo

Intensidade → Potência por unidade de área transversa





Uma onda transporta energia...

Intensidade = Potência / Área

Pela Cons. de energia:
Em 1D, a intensidade é constante ao longo da onda, mas em 2D ou 3D, ela diminui com o aumento da distância entre a fonte o o ponto de observação

1D: $I(r) \propto P_{fonte}$

2D: $I(r) \propto P_{fonte} / 2 \pi r$

3D: $I(r) = P_{fonte} / 4 \pi r^2$

Intensidade e amplitude

Recorde que num oscilador harmonico a energia total (cinética + potencial) é **proporcional ao quadrado** da amplitude de oscilação:

$$E_{tot} = \tfrac{1}{2}\, kx^2 + \tfrac{1}{2}\, mv^2 = \tfrac{1}{2}\, k\, A^2$$

Pode-se demonstrar (não temos tempo aqui…) que algo semelhante ocorre em qualquer onda: a intensidade num dado ponto da onda é sempre proporcional ao quadrado da sua amplitude naquele ponto:

$$I = \text{cte.}\, A^2$$

Teste Conceitual

Uma pedra cai em um lago. O que acontece com a altura das ondas circulares geradas na superfície à medida em que elas se afastam do ponto de origem?

A) Fica constante

B) Cai em proporção com a distância

C) Cai em proporção com o quadrado da distância

D) Cai em proporção com a raiz quadrada da distância

Teste Conceitual

Uma pedra cai em um lago. O que acontece com a altura das ondas circulares geradas na superfície à medida em que elas se afastam do ponto de origem?

A) Fica constante

B) Cai em proporção com a distância

C) Cai em proporção com o quadrado da distância

D) Cai em proporção com a raiz quadrada da distância

O que são decibéis?

- O ouvido humano é capaz de perceber sons numa enorme faixa de intensidades

$\sim 10\ W/m^2$

"Limiar de audição"
(Intensidade mínima)

"Limiar da dor"
(Intensidade máxima)

$I_0 = 10^{-12}\ W/m^2$

- Curiosamente, estudos psicológicos indicam que o cérebro processa estímulos de forma aproximadamente *logarítmica*

Sensação ~ cte . log (Intensidade)

"A sensação é proporcional ao logaritmo da excitação"
"lei" de Weber-Fechner

O que são decibéis?

Escala Decibel: escala logarítmica de intensidade, tenta capturar a sensação subjetiva de 'volume'

"nível de ruído"
(adimensional)

$$\boxed{\beta \equiv [10dB] \cdot \log_{10}\left(\frac{I}{I_0}\right)}$$

(onde $I_0 = 10^{-12}\ W/m^2$)

Ex: $I = I_0 \leftrightarrow \beta = 0\ dB$

Ex: $I = 10^{-5}\ W/m^2 \leftrightarrow \beta = 70\ dB$

Resumindo: um aumento de 10db corresponde a multiplicar por 10 a intensidade da fonte de ruido

Teste Conceitual

A intensidade de uma onda sonora A é 100 vezes a de outra onda sonora B. Outra forma de dizer isso é que o som da onda A é

A) 2dB maior que o da onda B

B) 10dB maior que o da onda B

C) 20dB maior que o da onda B

D) 100dB maior que o da onda B

$$\beta \equiv [10dB] \cdot \log_{10}(\frac{I}{I_0})$$

Teste Conceitual

A intensidade de uma onda sonora A é 100 vezes a de outra onda sonora B. Outra forma de dizer isso é que o som da onda A é

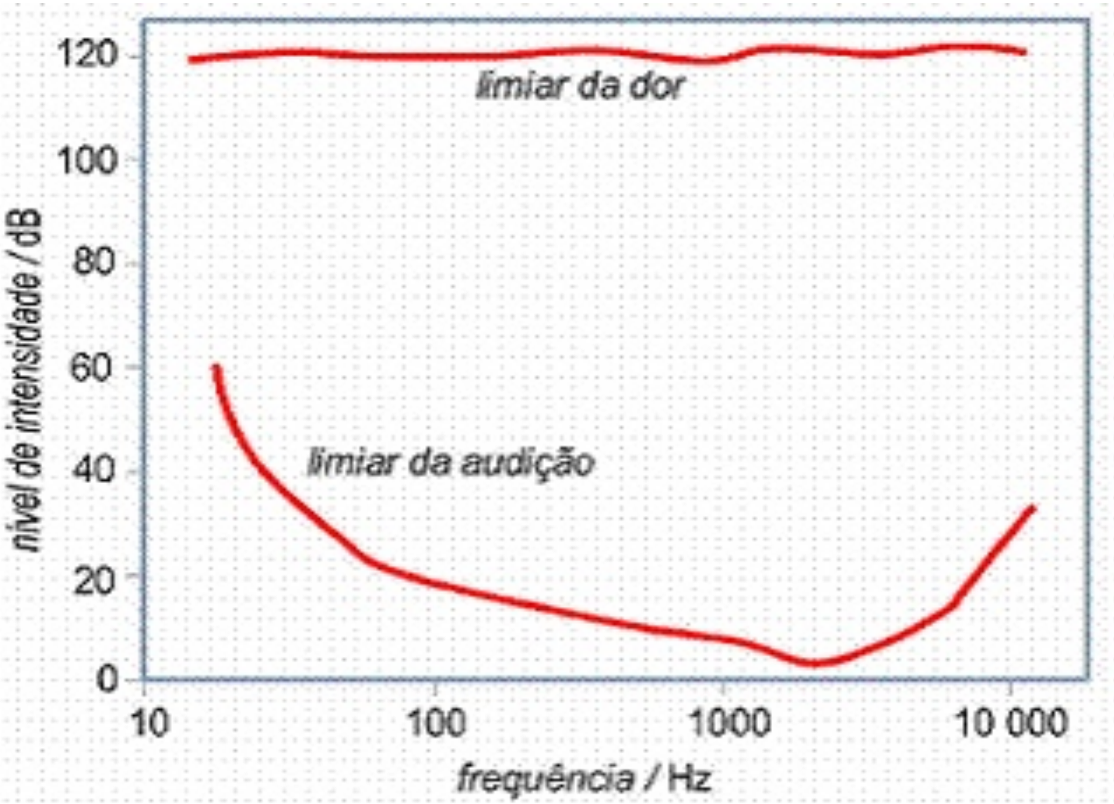
A) 2dB maior que o da onda B

B) 10dB maior que o da onda B

$$\beta \equiv [10dB] \cdot \log_{10}(\frac{I}{I_0})$$

C) 20dB maior que o da onda B

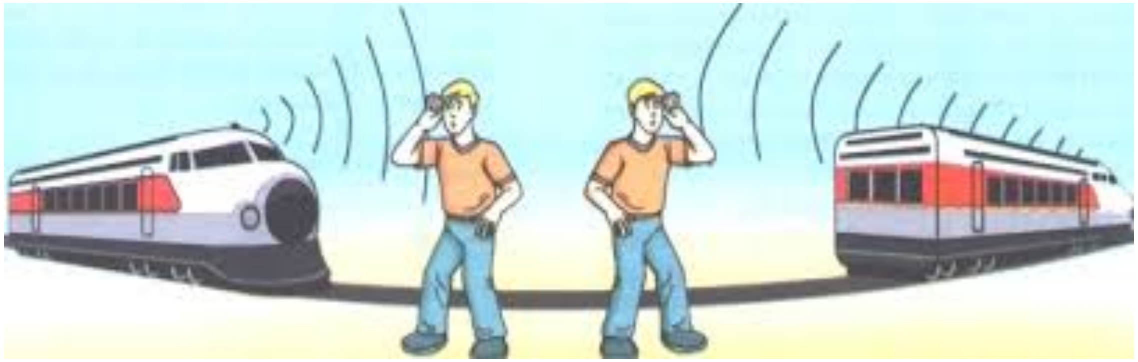
D) 100dB maior que o da onda B



nível de intensidade / dB
120
100
80
60
40
20
0
limiar da dor
limiar da audição
10
100
1000
10 000
frequência / Hz

Efeito Doppler (1842)

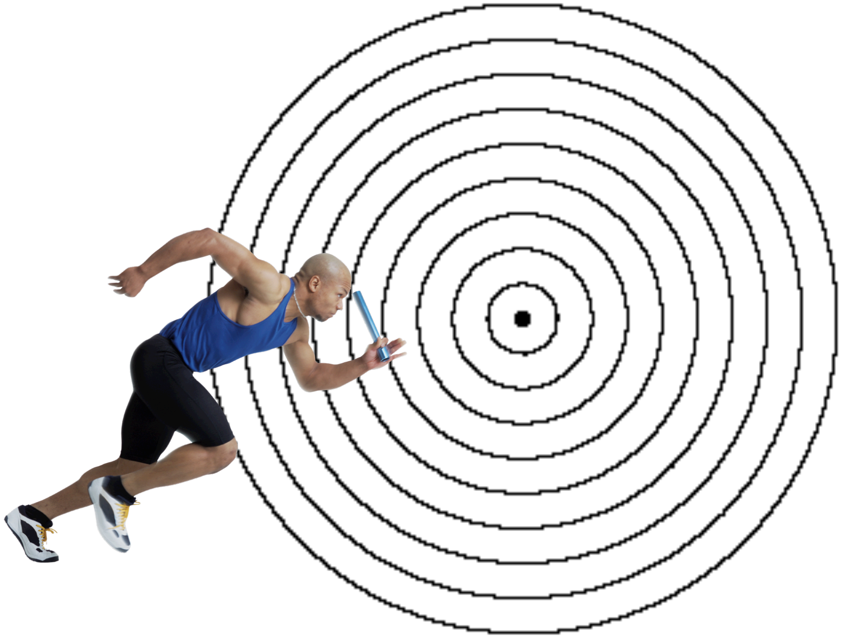
Variação na frequência das ondas percebidas por um observador se movendo com respeito a uma ‘fonte’ que emite ou reflete as ondas em sua direção



- Se observador e fonte **se aproximam**: a frequência percebida é **maior** (mais aguda) **que a emitida**

- Se observador e fonte **se afastam**: a frequência percebida é **menor** (mais grave) **que a emitida**

Efeito Doppler – parte 1: efeito do movimento do observador



fonte de frequência f_0 , em repouso c/ respeito ao meio de propagação

freq. percebida
pelo observador:

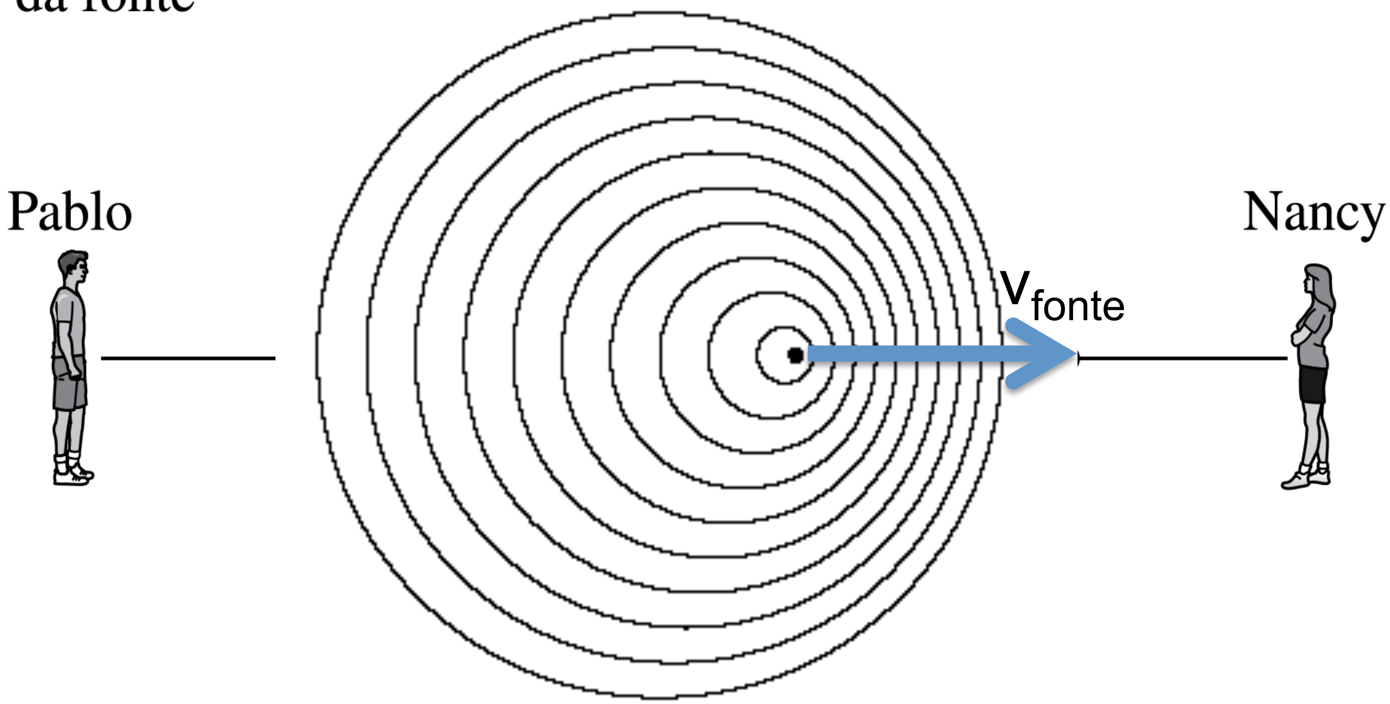
$$f' = \left(\frac{v^{onda} \mp v^{obs}}{v^{onda}} \right) f_0$$

f' < f_0 se o observador estiver se movendo na direção para longe da fonte

f' > f_0 se o observador estiver se movendo em direção à fonte

Efeito Doppler – parte 2: efeito do movimento <u>da fonte</u>

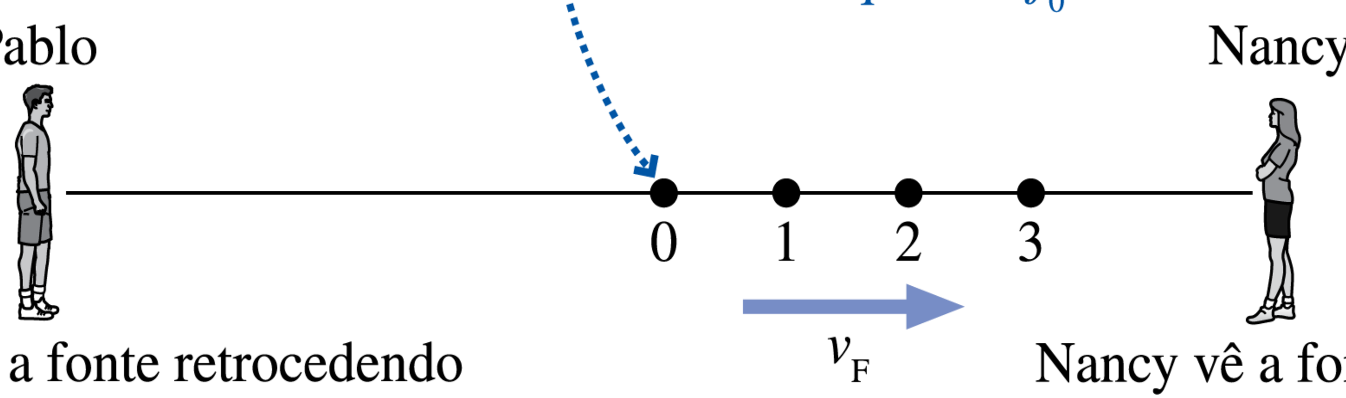
(a) Movimento da fonte



Efeito Doppler – parte 2: efeito do movimento <u>da fonte</u>

(a) Movimento da fonte

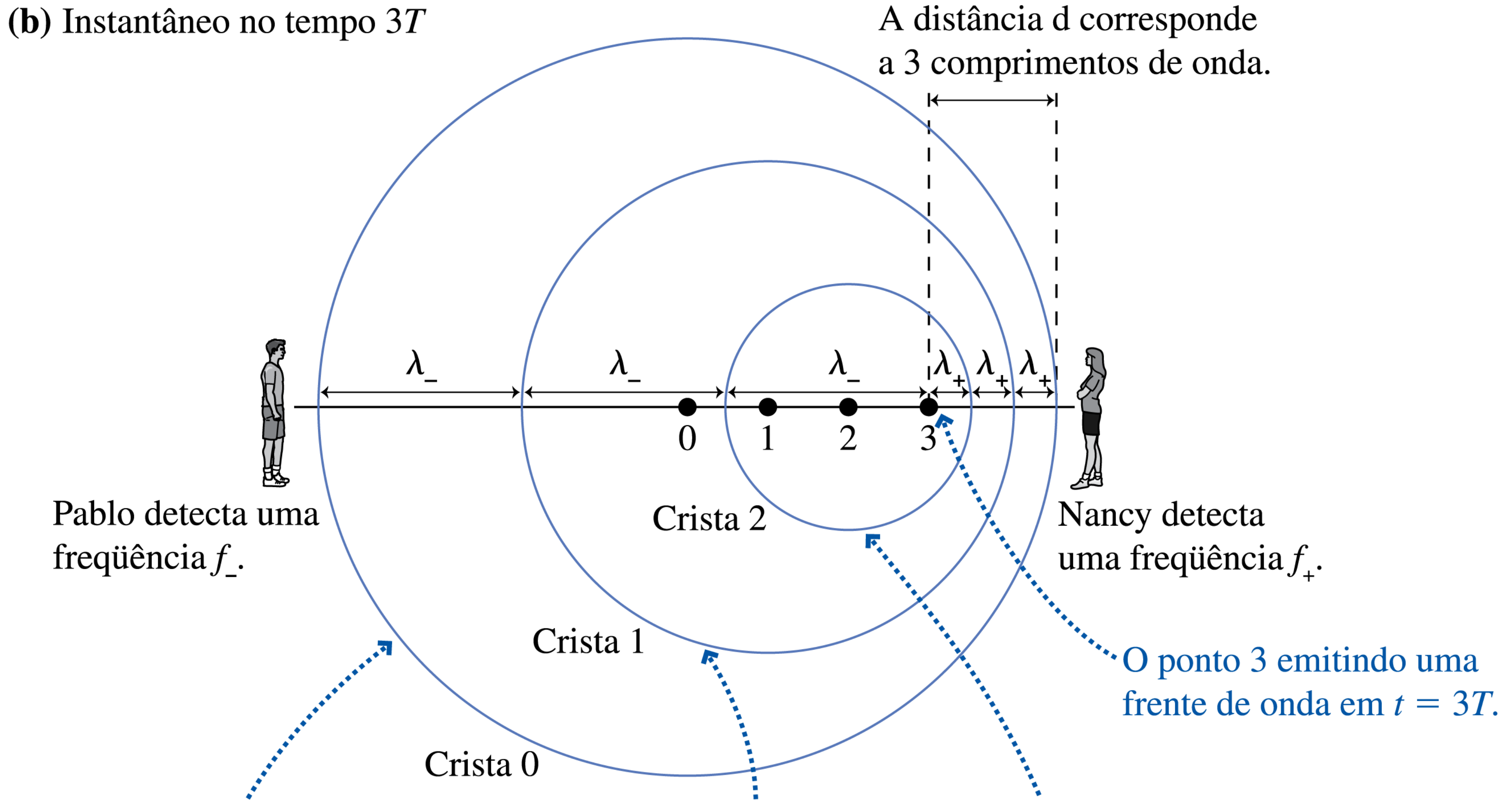
Os pontos correspondem às posições da fonte em $t = 0, T, 2T$ e $3T$.
A fonte emite uma freqüência f_0.



Pablo vê a fonte retrocedendo com uma velocidade v_F.

Nancy vê a fonte se aproximando com uma velocidade v_F.

Efeito Doppler – parte 2: efeito do movimento da fonte

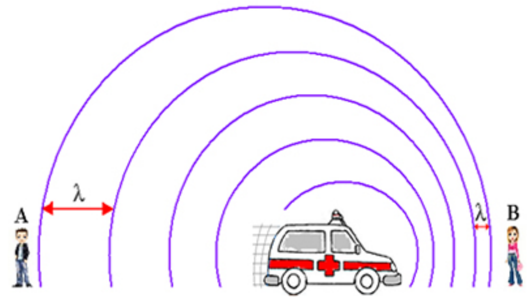


A crista 0 foi emitida em $t = 0$. A frente de onda é um círculo de raio $3\lambda_0$ centrado no ponto 0.

A crista 1 foi emitida em $t = T$. A frente de onda é um círculo de raio $2\lambda_0$ centrado no ponto 1.

A crista 2 foi emitida em $t = 2T$. A frente de onda é um círculo de raio λ_0 centrado no ponto 2.

Efeito Doppler – parte 2: efeito do movimento da fonte



$$f' = \left(\frac{v^{onda}}{v^{onda} \pm v^{fonte}} \right) f_0$$

f' < f_0 se a fonte estiver se movendo na direção para longe do observador

f' > f_0 se a fonte estiver se movendo em direção ao observador

Efeito Doppler

Resultado geral: para observador e fonte ambos em movimento, a frequência observada é:

$$f' = \left(\frac{v^{onda} \pm v^{obs}}{v^{onda} \mp v^{fonte}} \right) f_0$$

Se o observador estiver se movendo na direção para longe da fonte

Se o observador estiver se movendo em direção à fonte

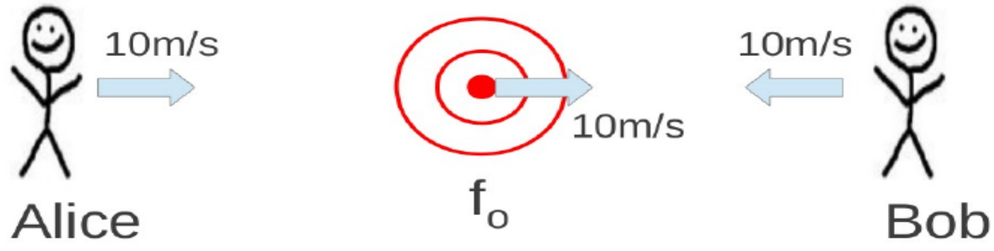
Se a fonte estiver se movendo na direção para longe do observador

Se a fonte estiver se movendo em direção ao observador

Teste Conceitual

Alice e Bob estão ouvindo uma fonte sonora que se move para a direita com respeito ao ar. Eles também se movem como indicado. Compare as frequências que cada um ouve.

A) $f_{Alice} = f_o > f_{Bob}$
B) $f_{Alice} = f_o < f_{Bob}$
C) $f_{Alice} < f_o < f_{Bob}$
D) $f_{Alice} < f_o = f_{Bob}$

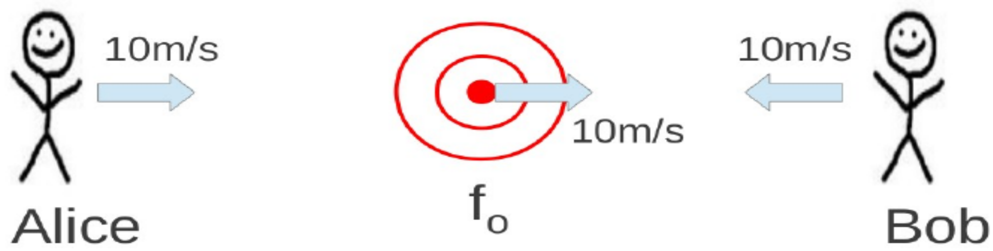


$$f'_{\mathrm{Bob}} = \left(\frac{v^{onda} \mp v^{obs}}{v^{onda} \pm v^{fonte}} \right) f_0$$

Teste Conceitual

Alice e Bob estão ouvindo uma fonte sonora que se move para a direita com respeito ao ar. Eles também se movem como indicado. Compare as frequências que cada um ouve.

A) $f_{Alice} = f_o > f_{Bob}$
B) $f_{Alice} = f_o < f_{Bob}$
C) $f_{Alice} < f_o < f_{Bob}$
D) $f_{Alice} < f_o = f_{Bob}$

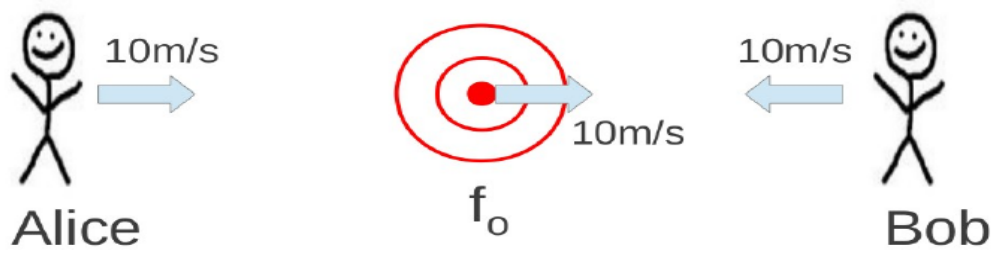


$$f'_{\text{Alice}} = \left(\frac{v^{onda} \mp v^{obs}}{v^{onda} \pm v^{fonte}} \right) f_0$$

Teste Conceitual

Alice e Bob estão ouvindo uma fonte sonora que se move para a direita com respeito ao ar. Eles também se movem como indicado. Compare as frequências que cada um ouve.

A) $f_{Alice} = f_o > f_{Bob}$
B) $f_{Alice} = f_o < f_{Bob}$
C) $f_{Alice} < f_o < f_{Bob}$
D) $f_{Alice} < f_o = f_{Bob}$



$$f'_{\text{Alice}} = \left(\frac{v^{onda} \mp v^{obs}}{v^{onda} \pm v^{fonte}} \right) f_0$$

Teste Conceitual

Alice está parada em relação a uma fonte emitindo som de frequência f. De repente começa a ventar no sentido da fonte para Alice. O que acontece com o som que Alice escuta?

A) Sua velocidade fica igual, mas a frequência aumenta e o comprimento de onda diminui
B) Sua velocidade e frequência aumentam
C) Sua velocidade e comprimento de onda aumentam
D) Sua velocidade, frequência e compr. de onda aumentam

obs: aqui falamos da velocidade do som *com respeito a Alice*

Teste Conceitual

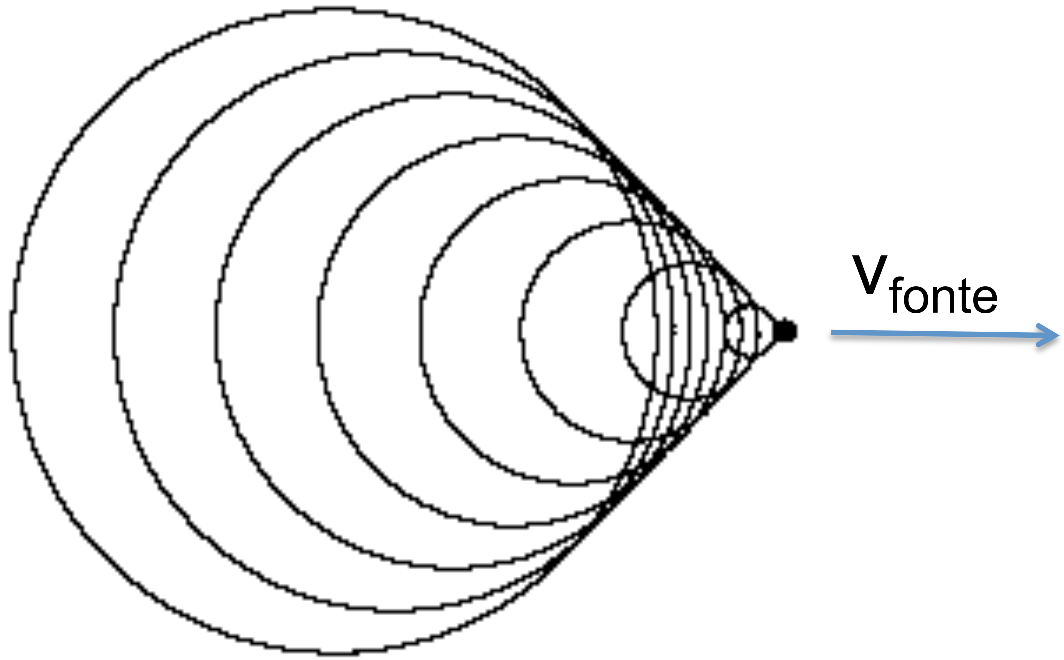
Alice está parada em relação a uma fonte emitindo som de frequência f. De repente começa a ventar no sentido da fonte para Alice. O que acontece com o som que Alice escuta?

A) Sua velocidade fica igual, mas a frequência aumenta e o comprimento de onda diminui
B) Sua velocidade e frequência aumentam
C) Sua velocidade e comprimento de onda aumentam
D) Sua velocidade, frequência e compr. de onda aumentam

A velocidade do som ouvido por Alice é maior que antes, pois a vel. 'normal' do som. v_{som} é calculada *com respeito ao referencial onde o meio de propagação (o ar) está parado.* Se este ar se deslocar em relação a Alice (ie, estiver ventando), as ondas chegarão mais rápido a ela (com velocidade $v_{som} + v_{vento}$)

Mas a frequencia ouvida por Alice não muda: para ver por que, coloque-se no referencial que acompanha o vento. Nesse referencial, Alice e a fonte estão se movendo com velocidade v_{vento}. Mas como vimos no ultimo exemplo, se ambos se movem isto não altera a frequencia de recebimento.

Fontes supersônicas



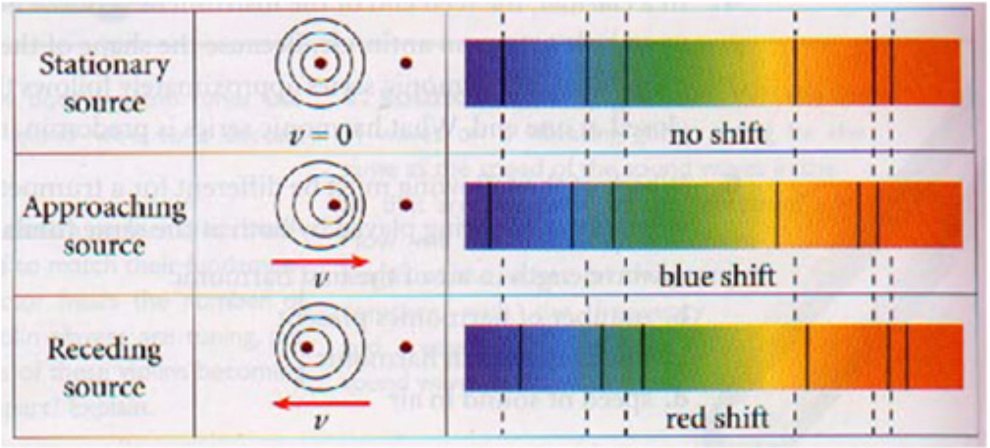
Se $v_{fonte} > v_{onda}$, as frentes de onda se acumulam, formando uma **onda de choque**

(múltiplas cristas chegando ao mesmo tempo)

"Estrondo" produzido por aviões supersônicos

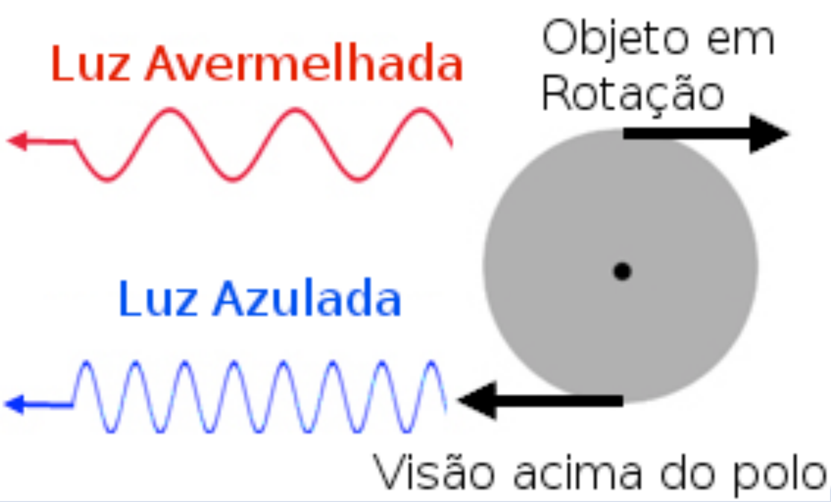
Efeito Doppler com luz

Cores específicas (ou ‘linhas espectrais’) ficam ‘*desviadas para o vermelho’* (freq. reduz) qdo a fonte se afasta do observador ou ‘desviadas *para o azul’* (freq. aumenta) qdo a fonte se apoxima.

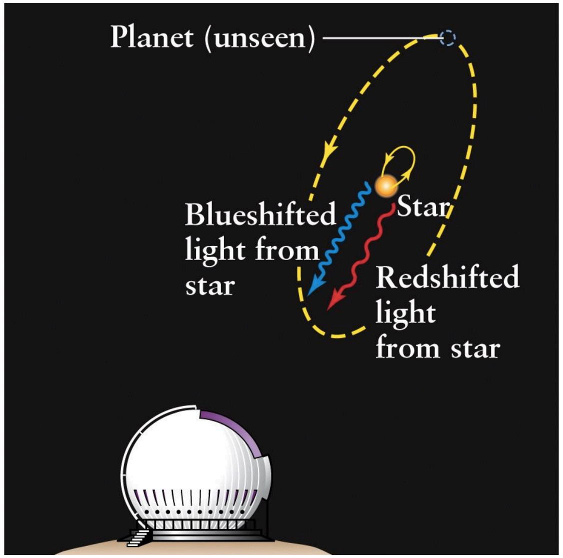


Obs: Neste caso a expressão matemática da mudança de frequência é **diferente** daquela que deduzimos acima, pois a luz obedece à Teoria da Relatividade de Einstein (não vamos discutir aqui a expressão correta)

Aplicação: medir a velocidade
de rotação do Sol ou de estrelas

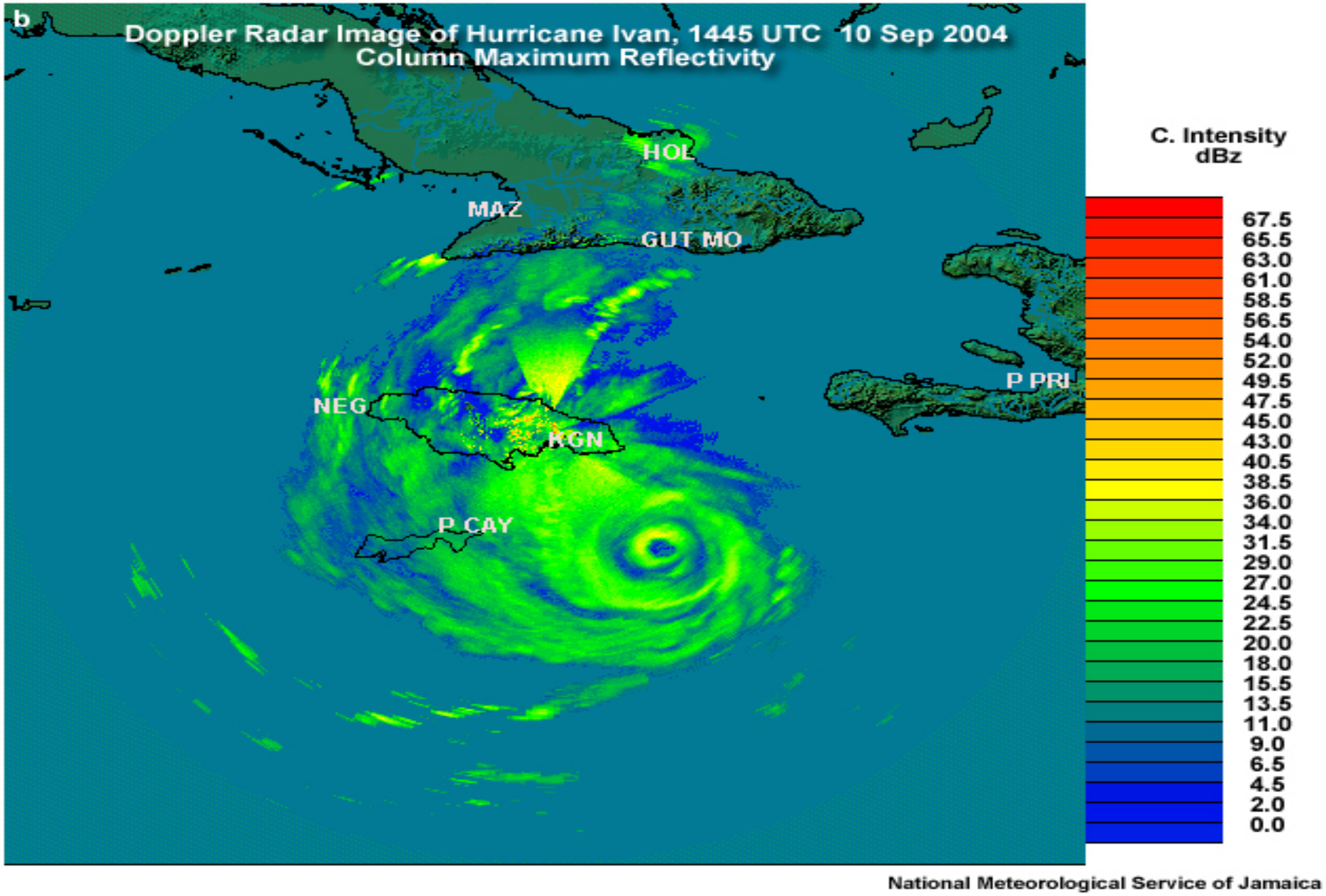


Aplicação: detecção de planetas extrasolares



Efeito Doppler com ondas eletromagnéticas

Aplicação: detecção da velocidade de ventos e objetos via radar (ondas de rádio)



Efeito Doppler com luz

Mapa de galáxias conhecidas (cada ponto é uma galáxia!)

Aplicação:
Medir a **expansão do Universo!**

Verifica-se que quanto mais distante está uma galáxia, maior o seu desvio para o vermelho, ie, mais rapidamente está se afastando de nós !!