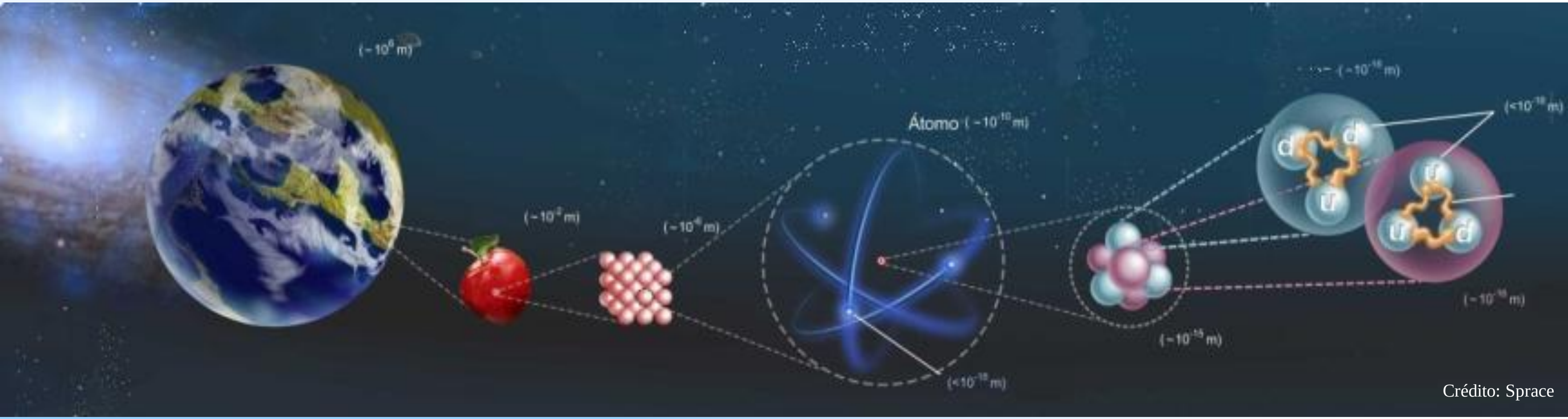
Universidade Federal do ABC

BCK0103: FÍSICA QUÂNTICA

1º Quadrimestre de 2024



Crédito: Sprace

Prof. Marcelo Augusto Leigui de Oliveira
CCNH – UFABC
leigui@ufabc.edu.br

Ondas e Partículas

Ondas e Partículas

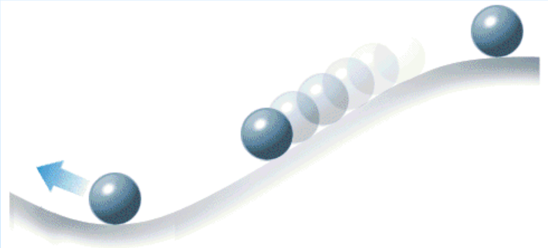
Partículas: pequenas distribuições de matéria capazes de transportar energia.

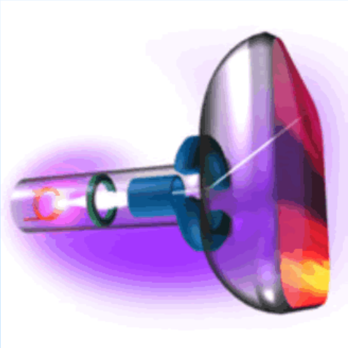
Ondas: largas distribuições de energia que se propagam sem transportar matéria.

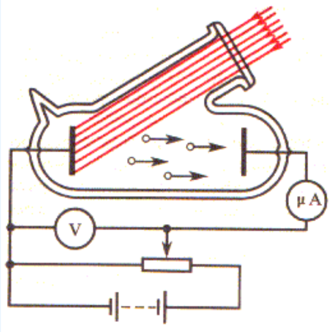
Ondas e Partículas

Partículas: pequenas distribuições de matéria capazes de transportar energia.

Ex: pedra em vôo, carro numa estrada, elétrons num tubo de raios catódicos, fóton (efeito fotoelétrico).





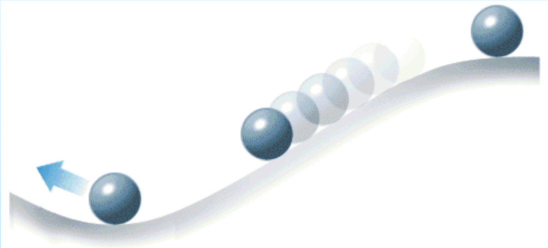


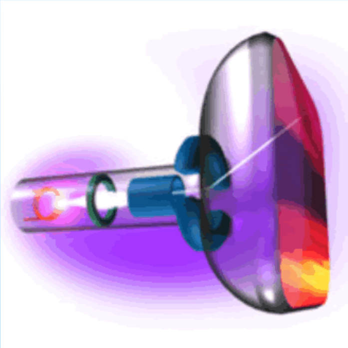
Ondas: largas distribuições de energia que se propagam sem transportar matéria.

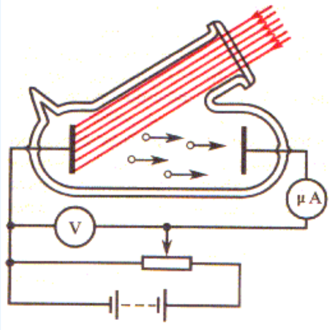
Ondas e Partículas

Partículas: pequenas distribuições de matéria capazes de transportar energia.

Ex: pedra em vôo, carro numa estrada, elétrons num tubo de raios catódicos, fóton (efeito fotoelétrico).

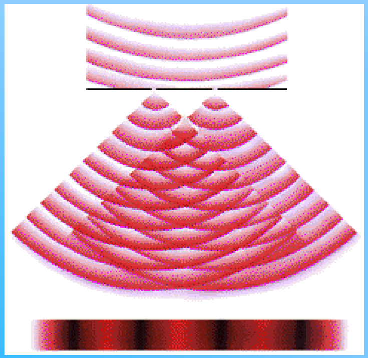


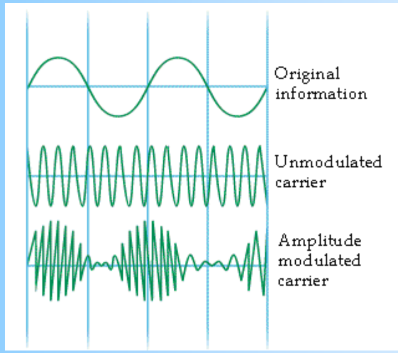


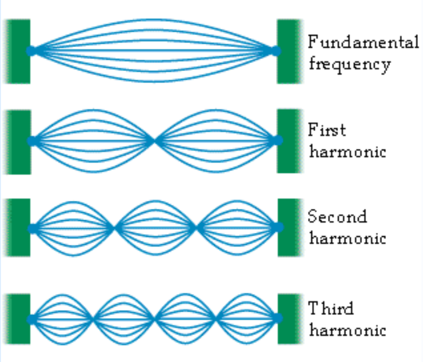


Ondas: largas distribuições de energia que se propagam sem transportar matéria.

Ex: onda numa corda, som, elétron numa rede cristalina, luz.



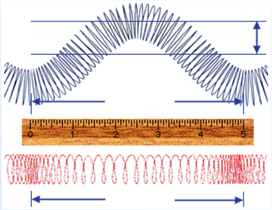


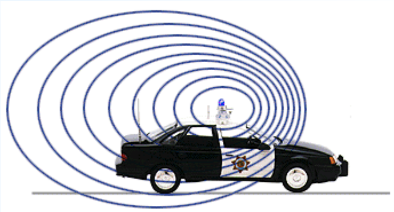


Tipos de Ondas

Tipos de Ondas

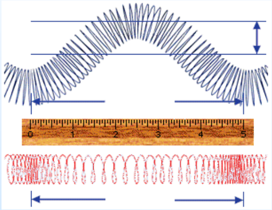
1. Ondas mecânicas: ondas que se propagam num meio material. Ex: ondas numa corda, som, ondas sísmicas.

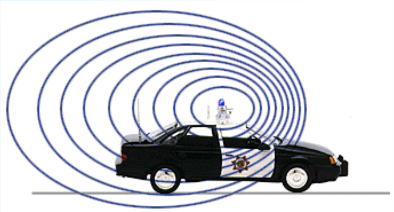




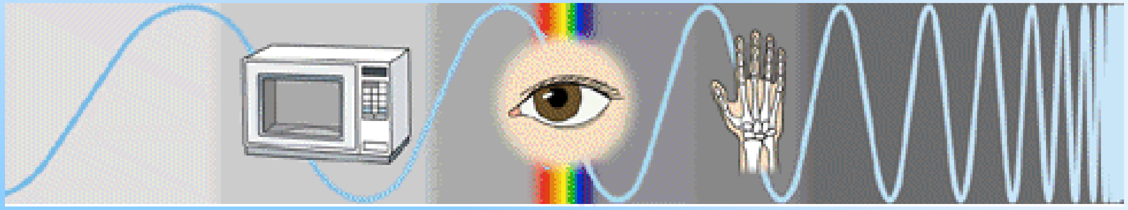
Tipos de Ondas

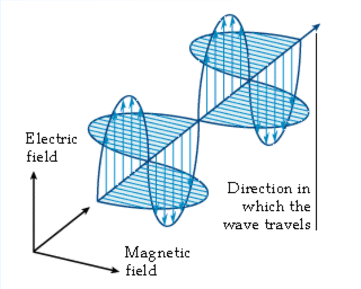
1. Ondas mecânicas: ondas que se propagam num meio material. Ex: ondas numa corda, som, ondas sísmicas;





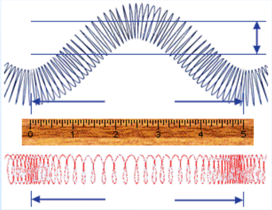
2. Ondas eletromagnéticas: oscilações de **E** e **B** que se propagam no vácuo a velocidade c=299 792 458 m/s ou em meios materiais.



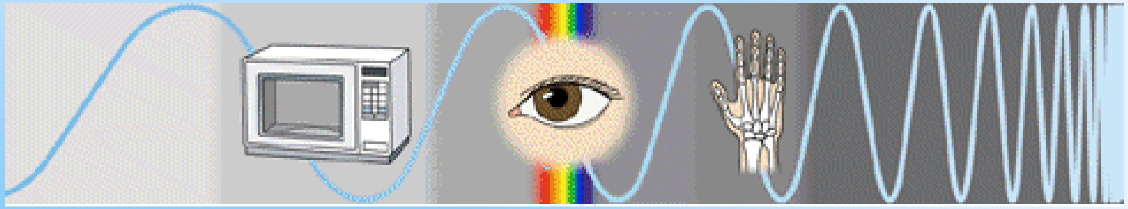


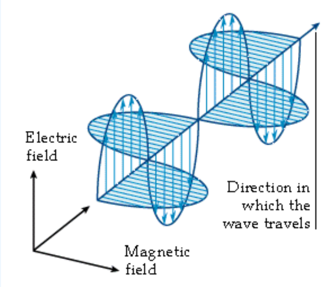
Tipos de Ondas

1. Ondas mecânicas: ondas que se propagam num meio material. Ex: ondas numa corda, som, ondas sísmicas;

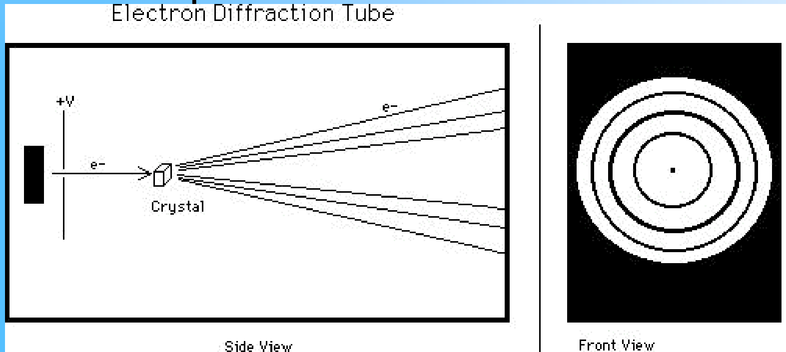


2. Ondas eletromagnéticas: oscilações de **E** e **B** que se propagam no vácuo a velocidade c=299 792 458 m/s ou em meios materiais;



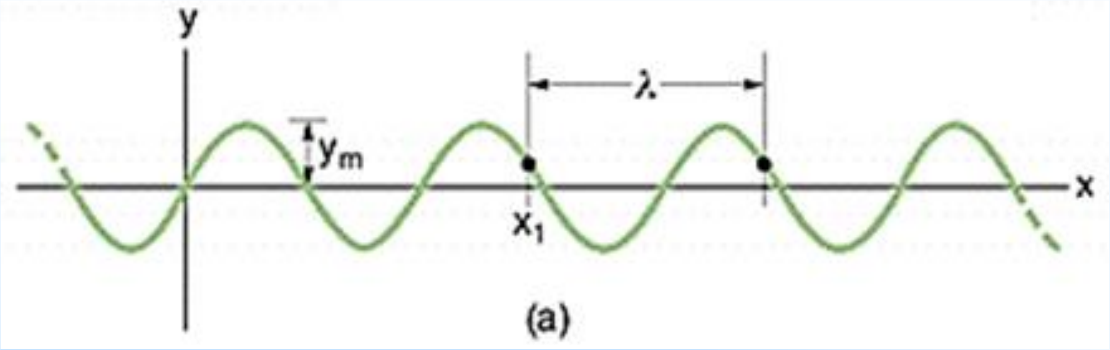


3. Ondas de matéria: partículas fundamentais (prótons, elétrons, etc) ou átomos e moléculas se comportando como ondas.



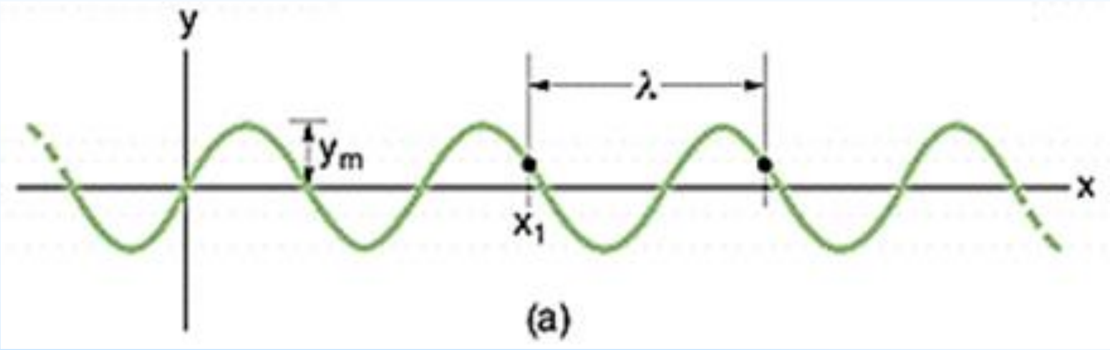
$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{6.63 \times 10^{-34} \mathrm{J \cdot s}}{mv}$$

Ondas Progressivas



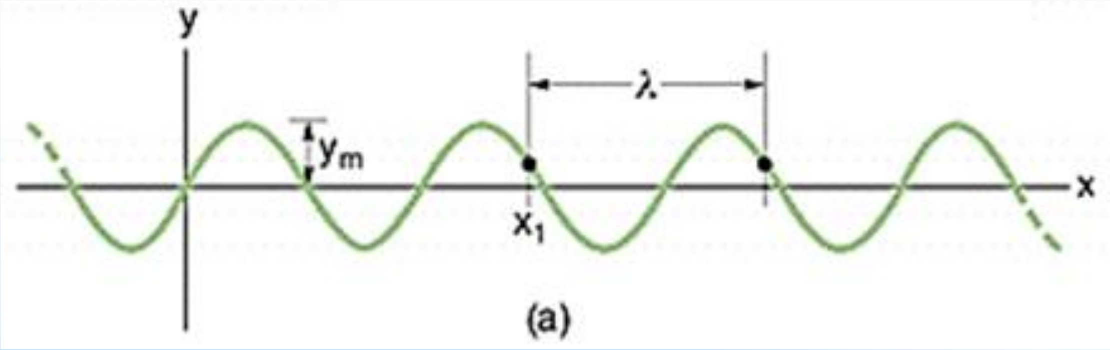
$\lambda =$ comprimento de onda

Ondas Progressivas



$\lambda =$ comprimento de onda, com dimensão $[\lambda] = L$

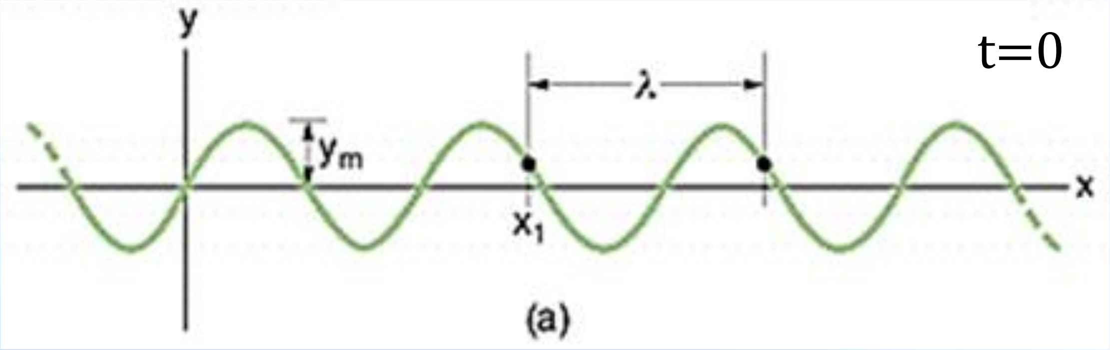
Ondas Progressivas



$\lambda =$ comprimento de onda, com dimensão $[\lambda] = L$

$y = f(x, t)$

Ondas Progressivas

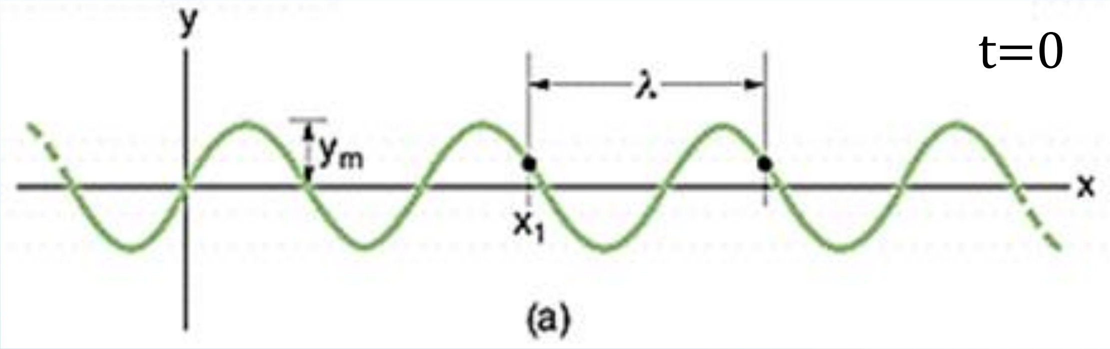


$\lambda =$ comprimento de onda, com dimensão $[\lambda] = L$

$y = f(x,t)$, que no instante t=0:

$y(x,0) = A \text{ sen } (kx)$

Ondas Progressivas

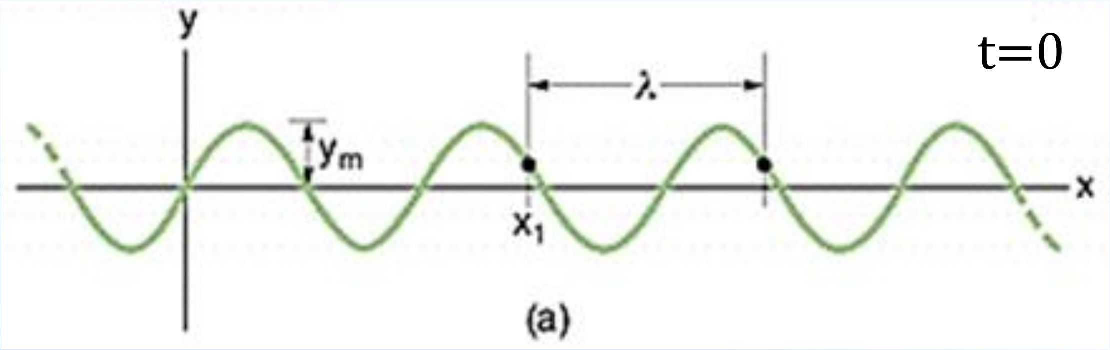


$\lambda =$ comprimento de onda, com dimensão $[\lambda] = L$

$y = f(x, t)$, que no instante t=0:

$y(x, 0) = A \text{ sen } (kx)$, onde $[k] = L^{-1}$

Ondas Progressivas



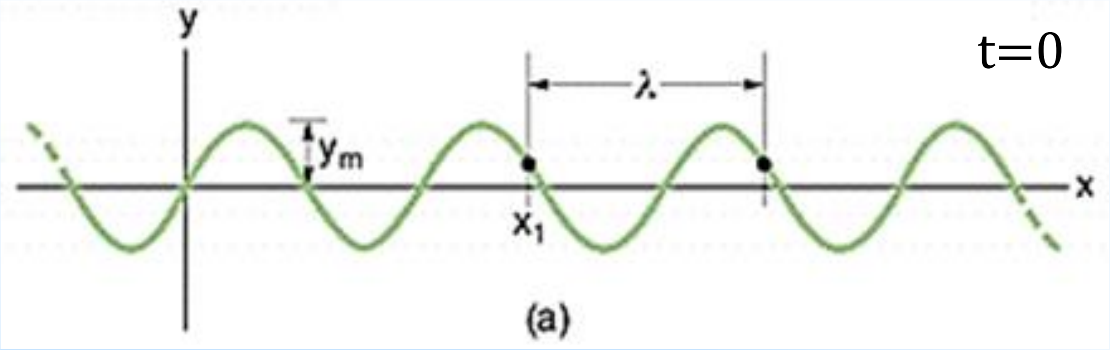
$\lambda =$ comprimento de onda, com dimensão $[\lambda] = L$

$y = f(x, t)$, que no instante t=0:

$y(x, 0) = A \text{ sen } (kx)$, onde $[k] = L^{-1}$

$y(x + \lambda, 0) = A \text{ sen } [k(x + \lambda)]$

Ondas Progressivas



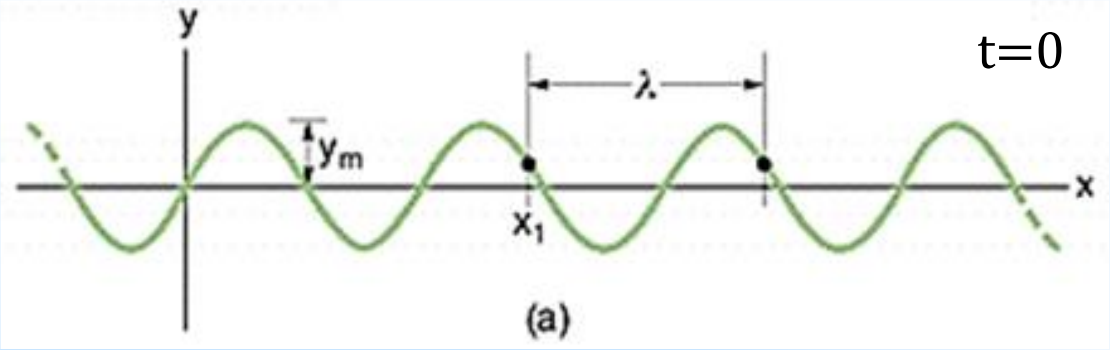
λ = comprimento de onda, com dimensão $[\lambda] = L$

$y = f(x, t)$, que no instante t=0:

$y(x, 0) = A$ sen (kx), onde $[k] = L^{-1}$

$y(x + \lambda, 0) = A$ sen $[k(x + \lambda)] = A$ sen (kx)

Ondas Progressivas



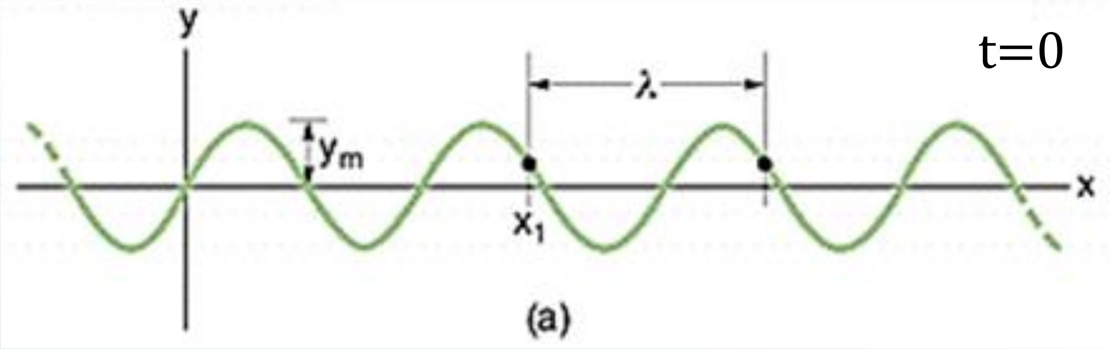
$\lambda =$ comprimento de onda, com dimensão $[\lambda] = L$

$y = f(x, t)$, que no instante t=0:

$y(x, 0) = A$ sen (kx), onde $[k] = L^{-1}$

$y(x + \lambda, 0) = A$ sen $[k(x + \lambda)] = A$ sen (kx) , então $k\lambda = 2\pi$

Ondas Progressivas



$\lambda =$ comprimento de onda, com dimensão $[\lambda] = L$

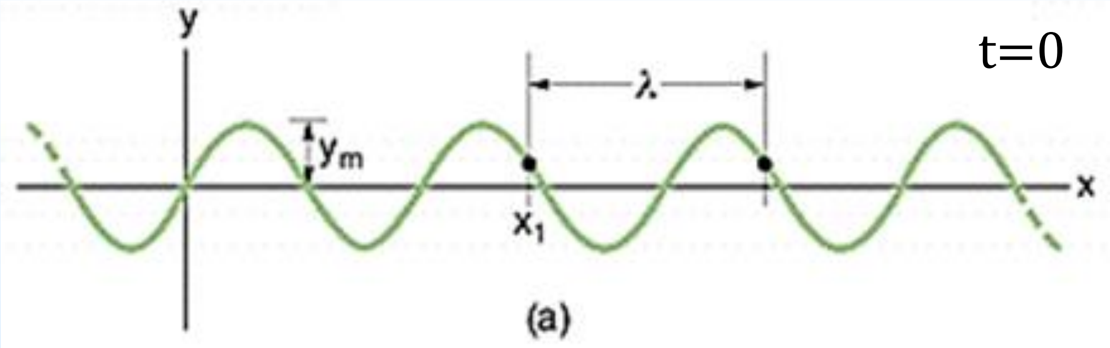
$y = f(x, t)$, que no instante t=0:

$y(x, 0) = A$ sen (kx), onde $[k] = L^{-1}$

$y(x + \lambda, 0) = A$ sen $[k(x + \lambda)] = A$ sen (kx) , então $k\lambda = 2\pi \Rightarrow$

Número de onda angular: $k \equiv \dfrac{2\pi}{\lambda}$

Ondas Progressivas



λ = comprimento de onda, com dimensão $[\lambda] = L$

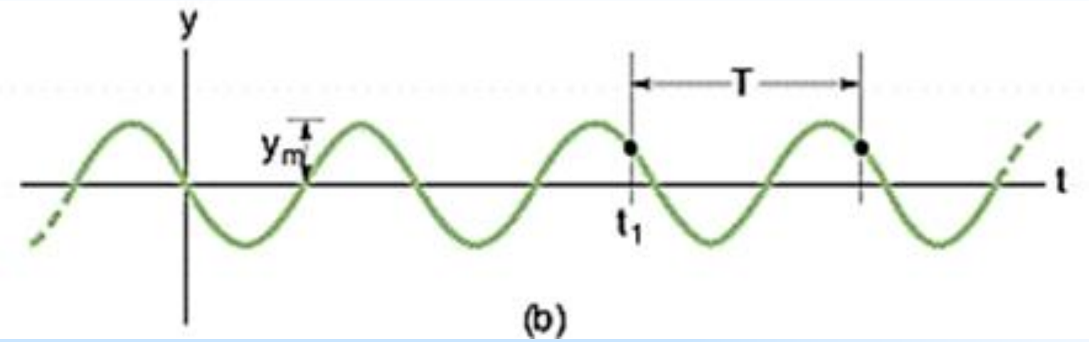
$y = f(x, t)$, que no instante t=0:

$y(x, 0) = A$ sen (kx), onde $[k] = L^{-1}$

$y(x + \lambda, 0) = A$ sen $[k(x + \lambda)] = A$ sen (kx) , então $k\lambda = 2\pi \Rightarrow$

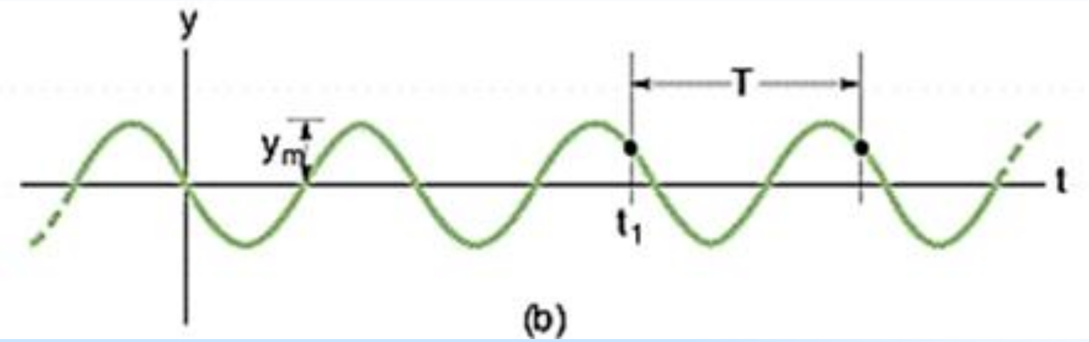
Número de onda angular: $\boxed{k \equiv \frac{2\pi}{\lambda}}$

Ondas Progressivas



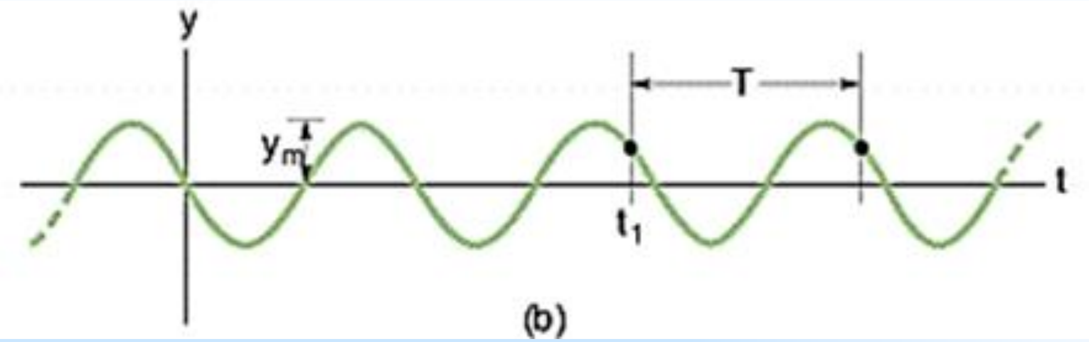
$T =$ período de oscilação

Ondas Progressivas



$T =$ período de oscilação, com dimensão $[T] = T$

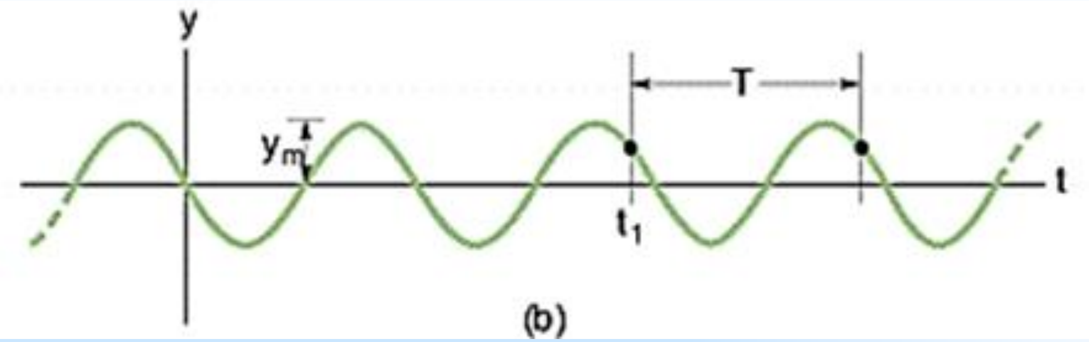
Ondas Progressivas



T = período de oscilação, com dimensão $[T] = T$

e a frequência $f = \frac{1}{T}$

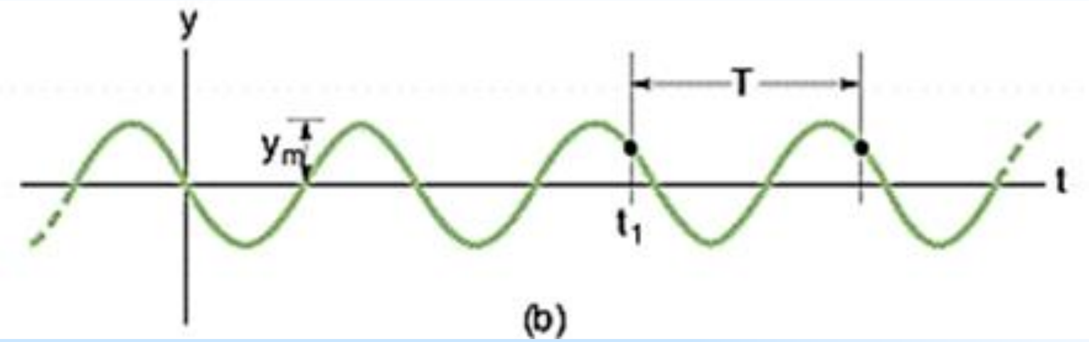
Ondas Progressivas



T = período de oscilação, com dimensão $[T] = T$

e a frequência $f = \frac{1}{T}$, com dimensão $[f] = T^{-1}$

Ondas Progressivas

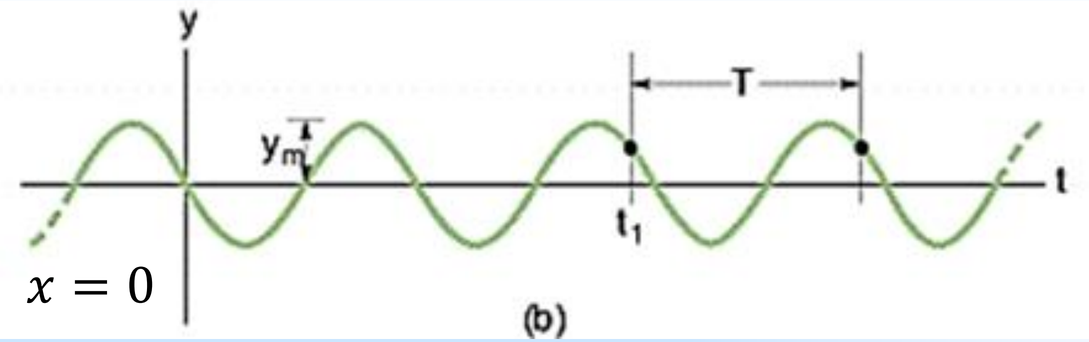


T = período de oscilação, com dimensão $[T] = T$

e a frequência $f = \frac{1}{T}$, com dimensão $[f] = T^{-1}$

$$y = f(x, t)$$

Ondas Progressivas

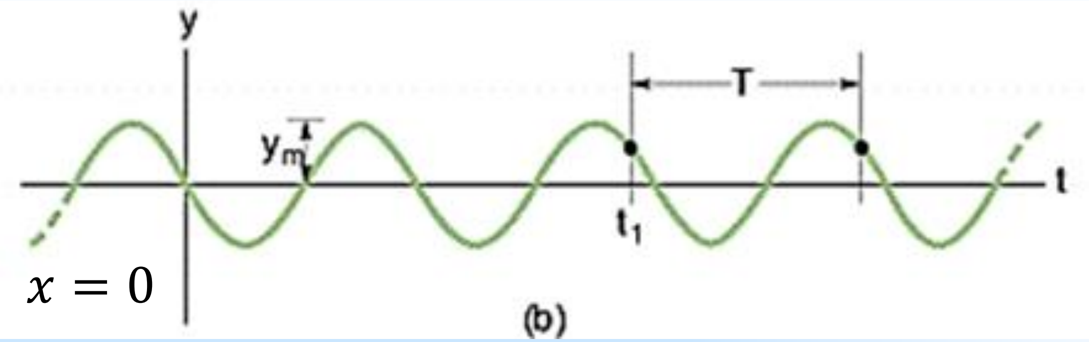


T = período de oscilação, com dimensão $[T] = T$
e a frequência $f = \frac{1}{T}$, com dimensão $[f] = T^{-1}$

$y = f(x,t)$, que em $x = 0$:

$y(0,t) = A\,\mathrm{sen}(-\omega t)$

Ondas Progressivas

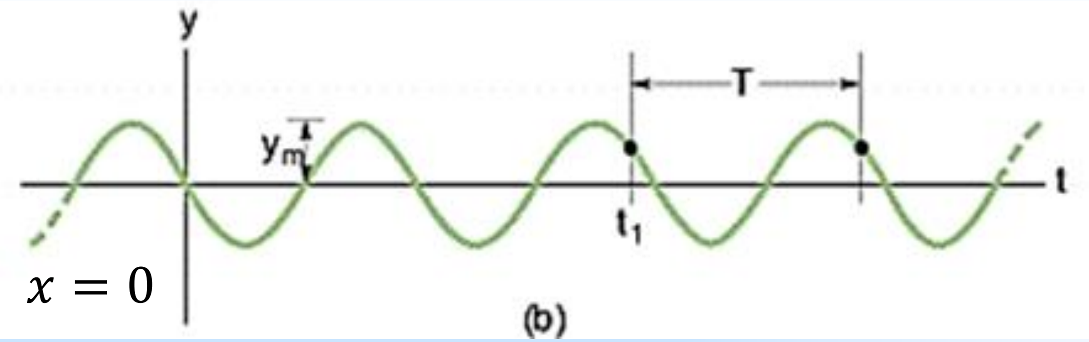


T = período de oscilação, com dimensão $[T] = T$
e a frequência $f = \frac{1}{T}$, com dimensão $[f] = T^{-1}$

$y = f(x, t)$, que em $x = 0$:

$y(0, t) = A\,\text{sen}(-\omega t)$, onde $[\omega] = T^{-1}$

Ondas Progressivas



T = período de oscilação, com dimensão $[T] = T$

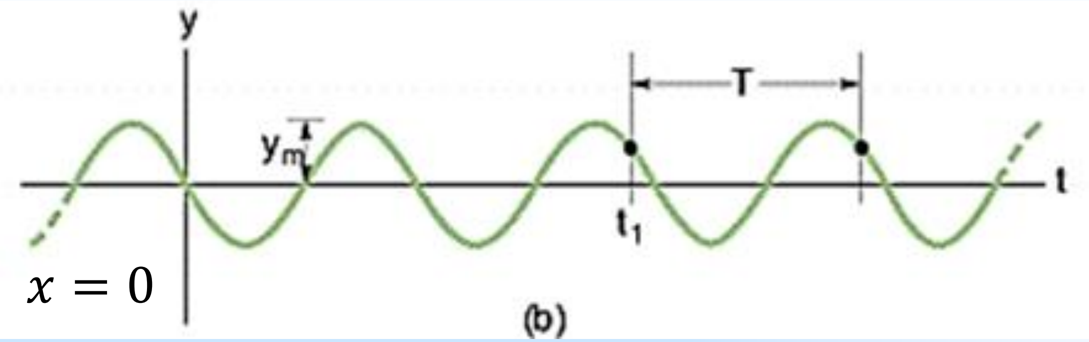
e a frequência $f = \frac{1}{T}$, com dimensão $[f] = T^{-1}$

$y = f(x,t)$, que em $x = 0$:

$y(0,t) = A\,\mathrm{sen}(-\omega t)$, onde $[\omega] = T^{-1}$

$y(0,t+T) = A\,\mathrm{sen}[-\omega(t+T)]$

Ondas Progressivas



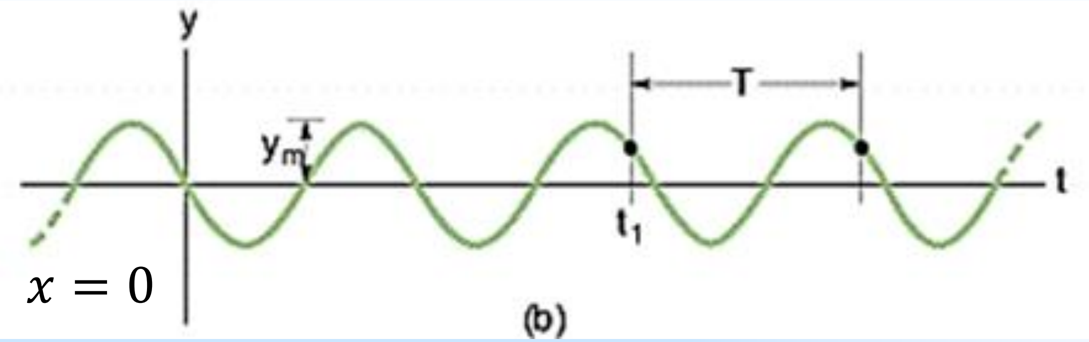
$T =$ período de oscilação, com dimensão $[T] = T$
e a frequência $f = \frac{1}{T}$, com dimensão $[f] = T^{-1}$

$y = f(x, t)$, que em $x = 0$:

$y(0, t) = A\,\text{sen}(-\omega t)$, onde $[\omega] = T^{-1}$

$y(0, t + T) = A\,\text{sen}[-\omega(t + T)] = A\,\text{sen}(-\omega t)$

Ondas Progressivas



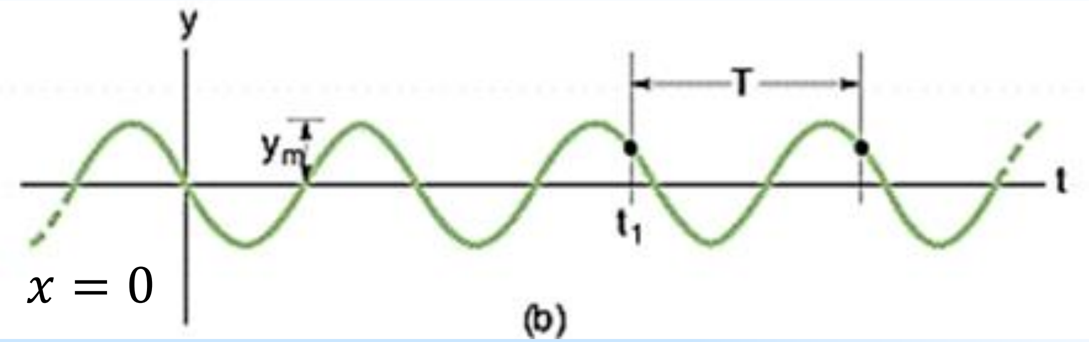
T = período de oscilação, com dimensão $[T] = T$
e a frequência $f = \frac{1}{T}$, com dimensão $[f] = T^{-1}$

$y = f(x,t)$, que em $x = 0$:

$y(0,t) = A\,\mathrm{sen}(-\omega t)$, onde $[\omega] = T^{-1}$

$y(0, t+T) = A\,\mathrm{sen}[-\omega(t+T)] = A\,\mathrm{sen}(-\omega t)$, então $\omega T = 2\pi$

Ondas Progressivas



T = período de oscilação, com dimensão $[T] = T$
e a frequência $f = \frac{1}{T}$, com dimensão $[f] = T^{-1}$

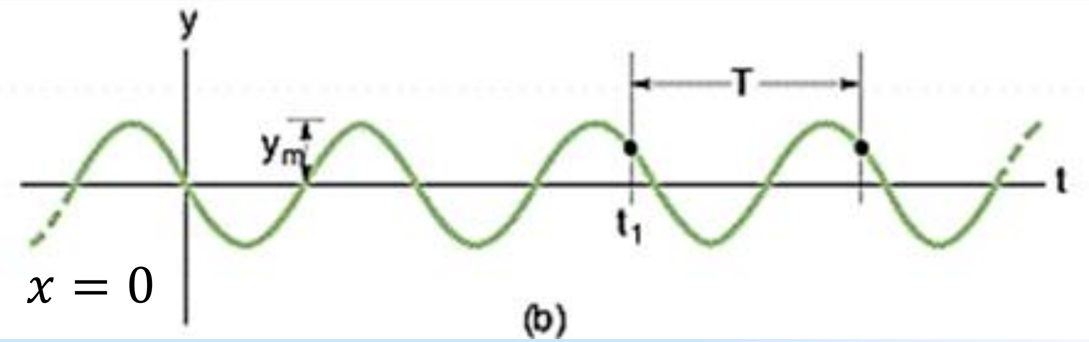
$y = f(x,t)$, que em $x = 0$:

$y(0,t) = A\,\mathrm{sen}(-\omega t)$, onde $[\omega] = T^{-1}$

$y(0,t+T) = A\,\mathrm{sen}[-\omega(t+T)] = A\,\mathrm{sen}(-\omega t)$, então $\omega T = 2\pi \Rightarrow$

Freqüência angular: $\omega \equiv \dfrac{2\pi}{T} = 2\pi f$

Ondas Progressivas



T = período de oscilação, com dimensão $[T] = T$
e a frequência $f = \frac{1}{T}$, com dimensão $[f] = T^{-1}$

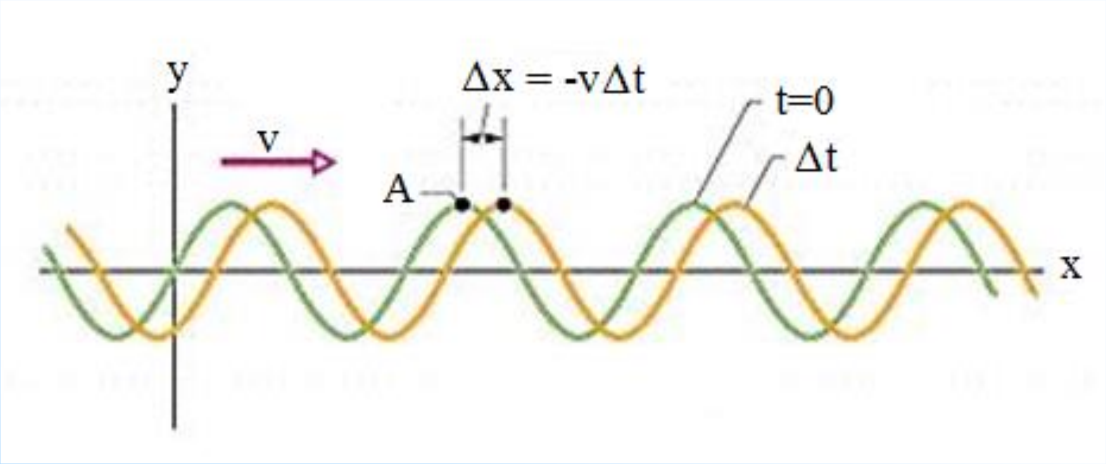
$y = f(x, t)$, que em $x = 0$:

$y(0, t) = A\,\mathrm{sen}(-\omega t)$, onde $[\omega] = T^{-1}$

$y(0, t + T) = A\,\mathrm{sen}[-\omega(t + T)] = A\,\mathrm{sen}(-\omega t)$, então $\omega T = 2\pi \Rightarrow$

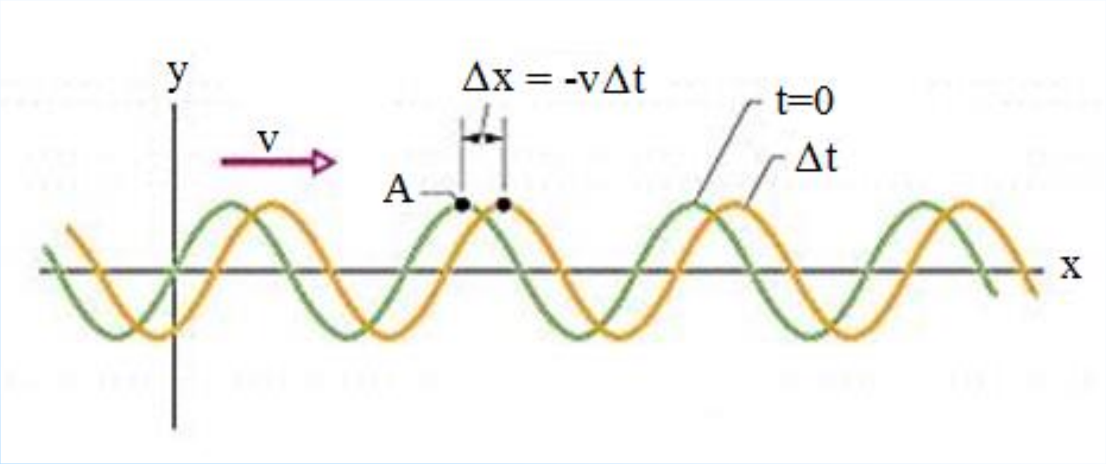
Freqüência angular: $\boxed{\omega \equiv \frac{2\pi}{T} = 2\pi f}$

Ondas Progressivas



$$y = f(x - vt)$$

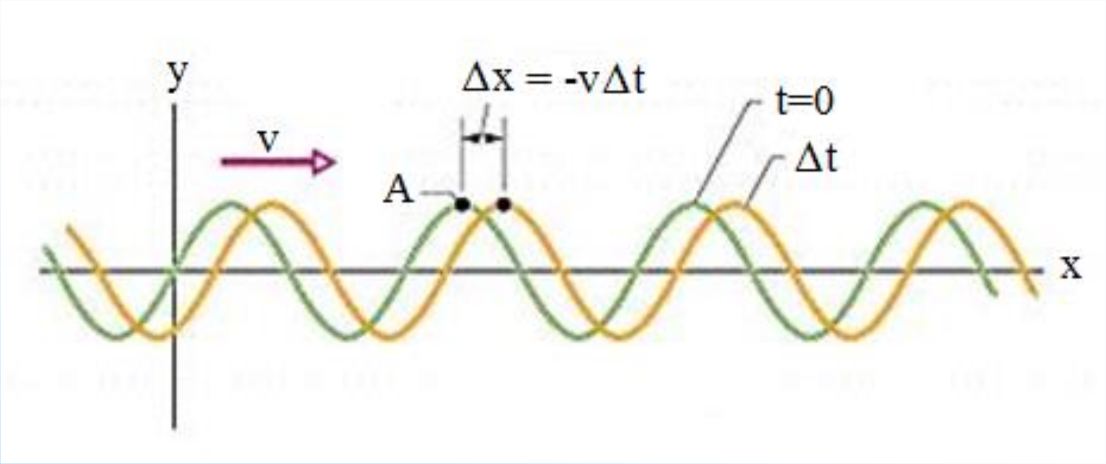
Ondas Progressivas



$$y = f(x - vt)$$

$$y = A\,\mathrm{sen}[k(x + \Delta x)] = A\,\mathrm{sen}[k(x - v\Delta t)]$$

Ondas Progressivas

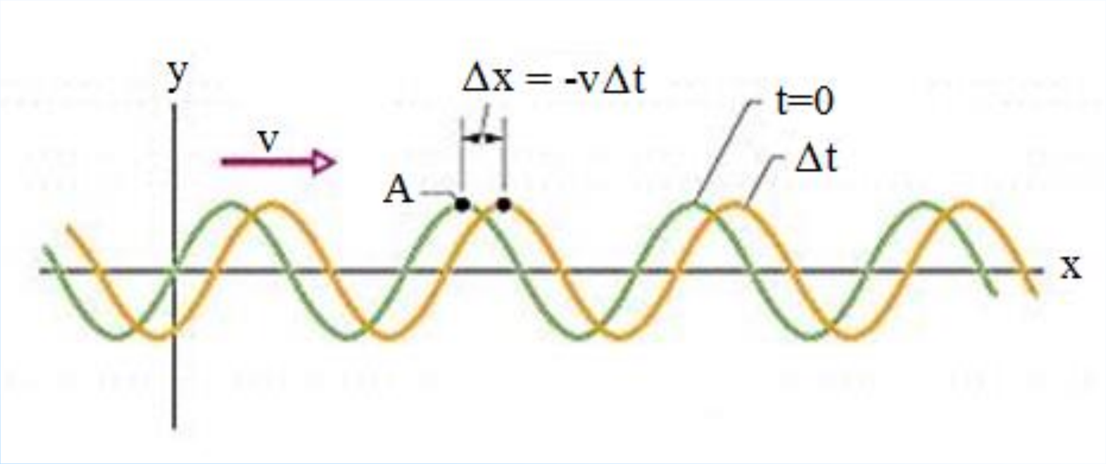


$$y = f(x - vt)$$

$$y = A\,\mathrm{sen}[k(x + \Delta x)] = A\,\mathrm{sen}[k(x - v\Delta t)]$$

Mas, $v = \dfrac{\Delta x}{\Delta t}$

Ondas Progressivas

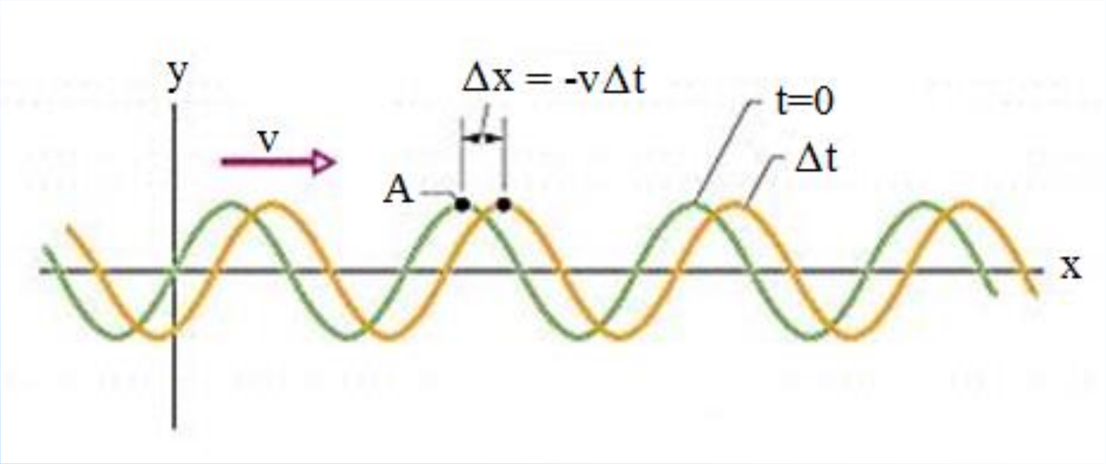


$$y = f(x - vt)$$

$$y = A\,\mathrm{sen}[k(x + \Delta x)] = A\,\mathrm{sen}[k(x - v\Delta t)]$$

Mas, $v = \dfrac{\Delta x}{\Delta t} = \dfrac{\lambda}{T}$

Ondas Progressivas

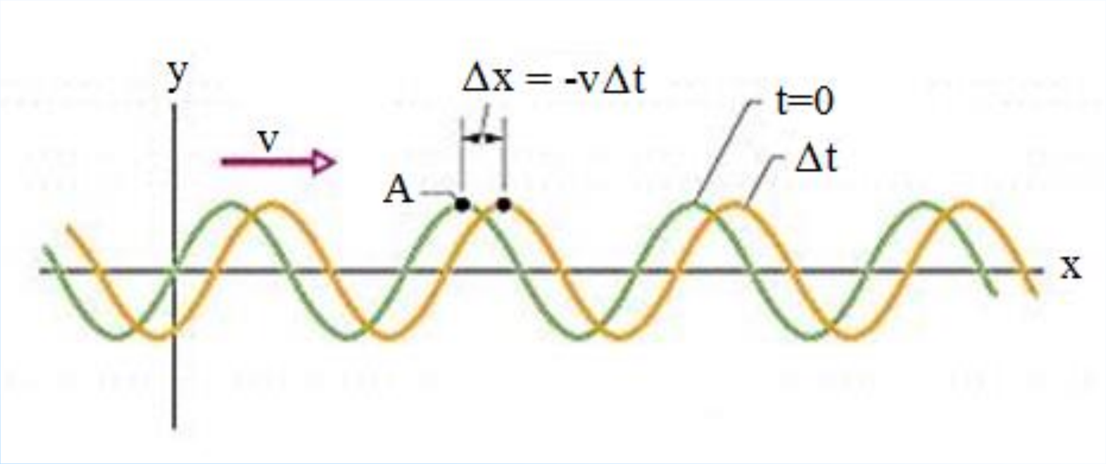


$$y = f(x - vt)$$

$$y = A\,\mathrm{sen}[k(x + \Delta x)] = A\,\mathrm{sen}[k(x - v\Delta t)]$$

Mas, $v = \dfrac{\Delta x}{\Delta t} = \dfrac{\lambda}{T} = \lambda f$

Ondas Progressivas

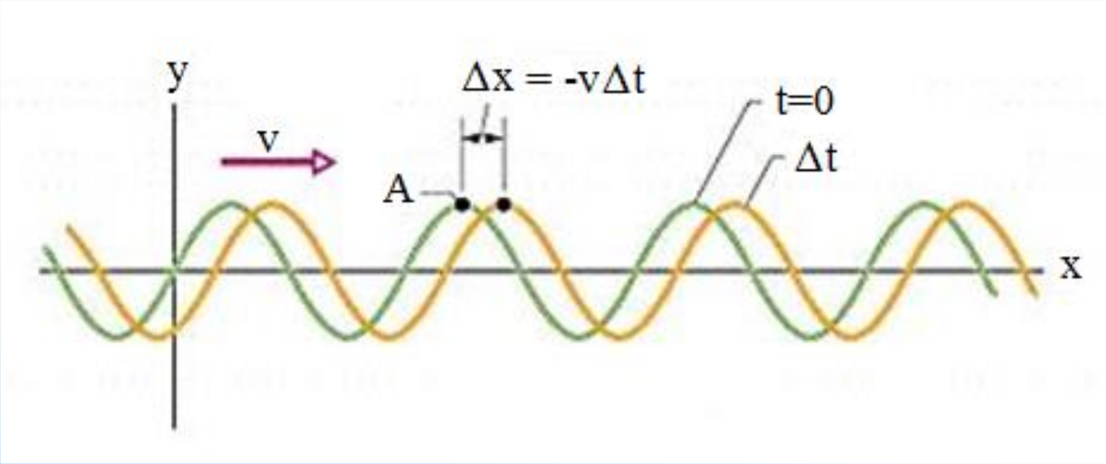


$$y = f(x - vt)$$

$$y = A\,\mathrm{sen}[k(x + \Delta x)] = A\,\mathrm{sen}[k(x - v\Delta t)]$$

$$\text{Mas, } v = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{\lambda}{T} = \lambda f = \frac{\lambda}{2\pi} 2\pi f$$

Ondas Progressivas

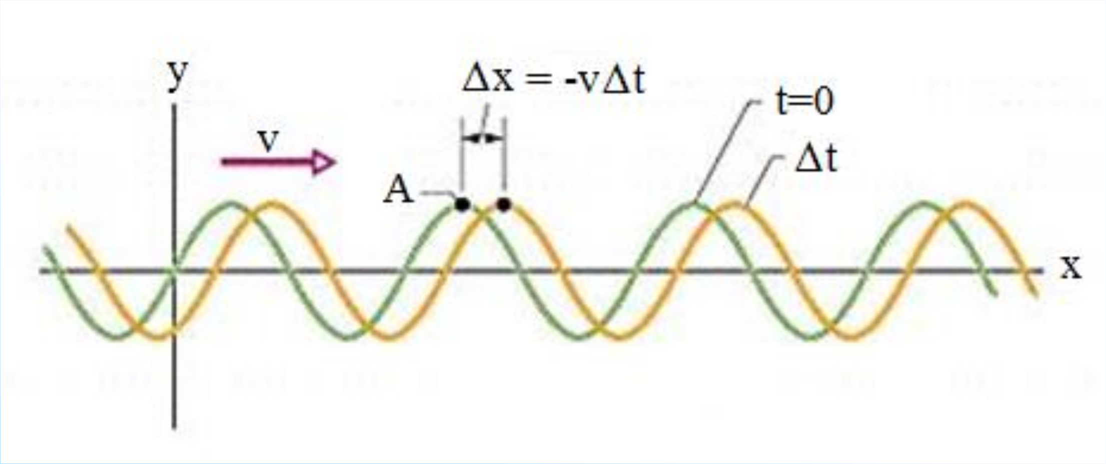


$$y = f(x - vt)$$

$$y = A\,\mathrm{sen}[k(x + \Delta x)] = A\,\mathrm{sen}[k(x - v\Delta t)]$$

Mas, $v = \dfrac{\Delta x}{\Delta t} = \dfrac{\lambda}{T} = \lambda f = \dfrac{\lambda}{2\pi} 2\pi f = \dfrac{\omega}{k}$

Ondas Progressivas

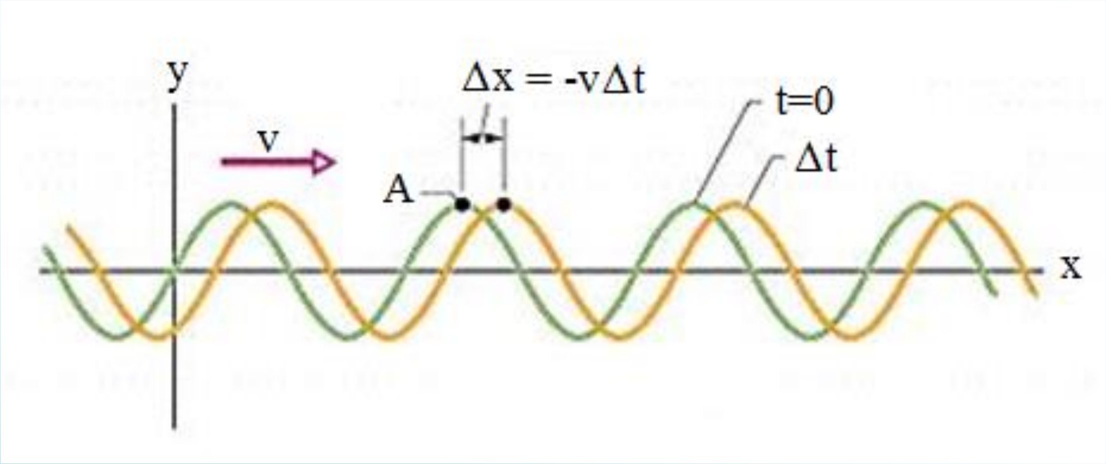


$$y = f(x - vt)$$

$$y = A\,\mathrm{sen}[k(x + \Delta x)] = A\,\mathrm{sen}[k(x - v\Delta t)]$$

Mas, $v = \dfrac{\Delta x}{\Delta t} = \dfrac{\lambda}{T} = \lambda f = \dfrac{\lambda}{2\pi} 2\pi f = \dfrac{\omega}{k} \Rightarrow v = \dfrac{\omega}{k}$

Ondas Progressivas



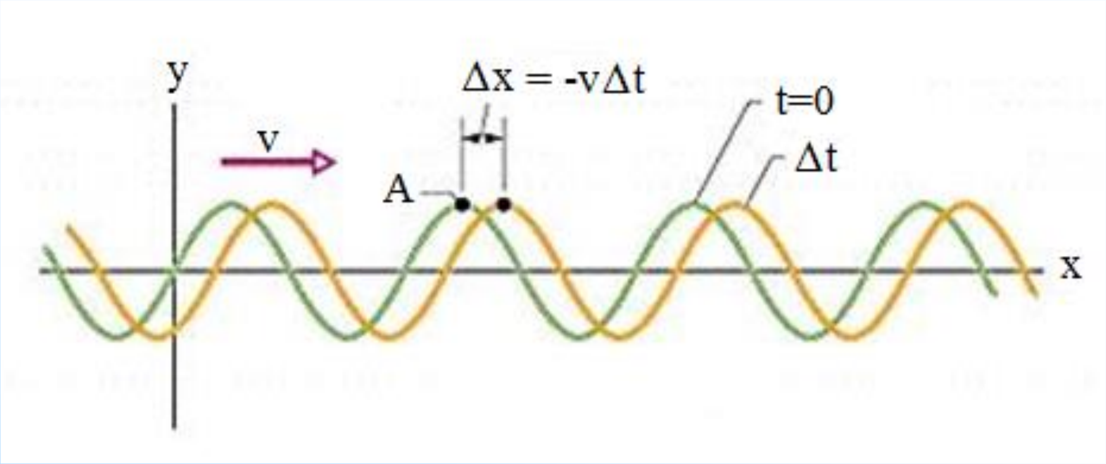
$$y = f(x - vt)$$

$$y = A\,\mathrm{sen}[k(x + \Delta x)] = A\,\mathrm{sen}[k(x - v\Delta t)]$$

Mas, $v = \dfrac{\Delta x}{\Delta t} = \dfrac{\lambda}{T} = \lambda f = \dfrac{\lambda}{2\pi} 2\pi f = \dfrac{\omega}{k} \Rightarrow \boxed{v = \dfrac{\omega}{k}}$,

onde v é a **velocidade de fase**.

Ondas Progressivas



$$y = f(x - vt)$$

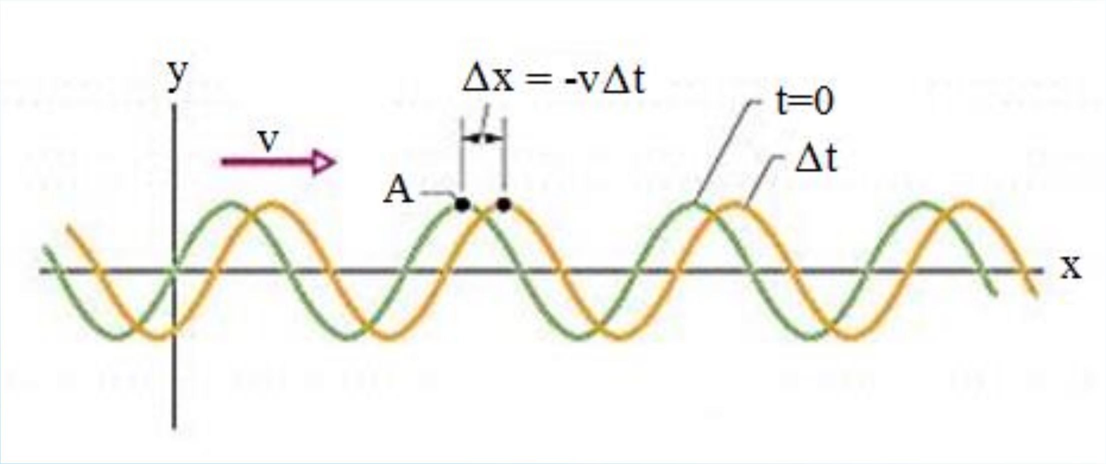
$$y = A\,\text{sen}[k(x + \Delta x)] = A\,\text{sen}[k(x - v\Delta t)]$$

Mas, $v = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{\lambda}{T} = \lambda f = \frac{\lambda}{2\pi} 2\pi f = \frac{\omega}{k} \Rightarrow \boxed{v = \frac{\omega}{k}}$,

onde v é a **velocidade de fase**.

$$y = A\,\text{sen}[k(x - vt)]$$

Ondas Progressivas



$y = f(x - vt)$

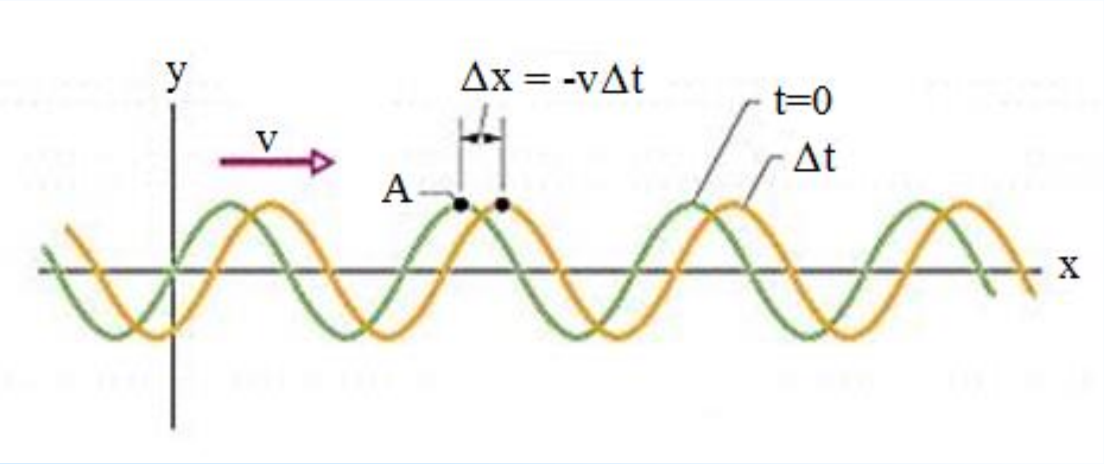
$y = A\,\mathrm{sen}[k(x + \Delta x)] = A\,\mathrm{sen}[k(x - v\Delta t)]$

Mas, $v = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{\lambda}{T} = \lambda f = \frac{\lambda}{2\pi} 2\pi f = \frac{\omega}{k} \Rightarrow \boxed{v = \frac{\omega}{k}}$,

onde v é a **velocidade de fase**.

$y = A\,\mathrm{sen}[k(x - vt)] = A\,\mathrm{sen}(kx - \omega t)$

Ondas Progressivas



$y = f(x - vt)$

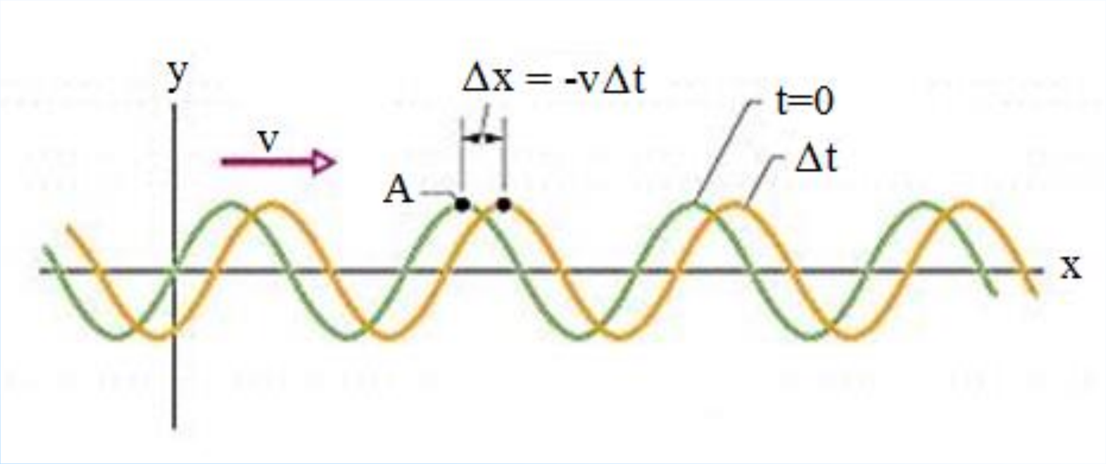
$y = A\,\mathrm{sen}[k(x + \Delta x)] = A\,\mathrm{sen}[k(x - v\Delta t)]$

Mas, $v = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{\lambda}{T} = \lambda f = \frac{\lambda}{2\pi} 2\pi f = \frac{\omega}{k} \Rightarrow \boxed{v = \frac{\omega}{k}}$,

onde v é a **velocidade de fase**.

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

Ondas Progressivas



$y = f(x - vt)$

$y = A\,\mathrm{sen}[k(x + \Delta x)] = A\,\mathrm{sen}[k(x - v\Delta t)]$

Mas, $v = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{\lambda}{T} = \lambda f = \frac{\lambda}{2\pi} 2\pi f = \frac{\omega}{k} \Rightarrow \boxed{v = \frac{\omega}{k}}$,

onde v é a **velocidade de fase**.

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

Dualidade onda-partícula

Dualidade onda-partícula

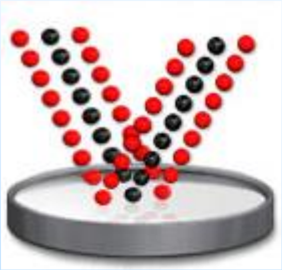
Isaac Newton (1642-1727)

Teoria corpuscular: Newton defendia que a luz era composta por uma "multidão de pequenos corpúsculos de vários tamanhos que pulavam dos corpos iluminados".

Dualidade onda-partícula

Isaac Newton (1642-1727)

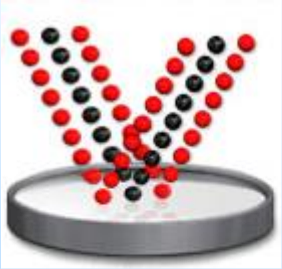
Teoria corpuscular: Newton defendia que a luz era composta por uma “multidão de pequenos corpúsculos de vários tamanhos que pulavam dos corpos iluminados”.

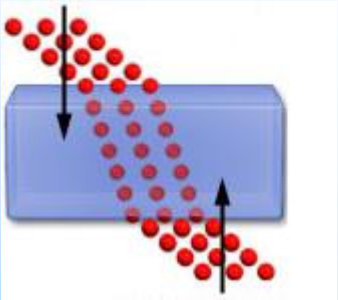


Dualidade onda-partícula

Isaac Newton (1642-1727)

Teoria corpuscular: Newton defendia que a luz era composta por uma "multidão de pequenos corpúsculos de vários tamanhos que pulavam dos corpos iluminados".

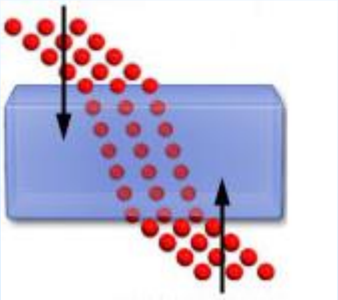




Dualidade onda-partícula

Isaac Newton (1642-1727)

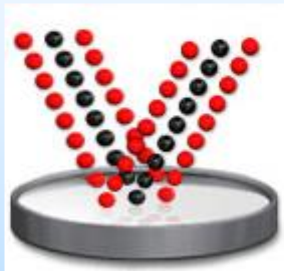
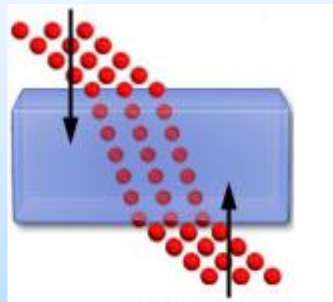
Teoria corpuscular: Newton defendia que a luz era composta por uma "multidão de pequenos corpúsculos de vários tamanhos que pulavam dos corpos iluminados".



Dualidade onda-partícula

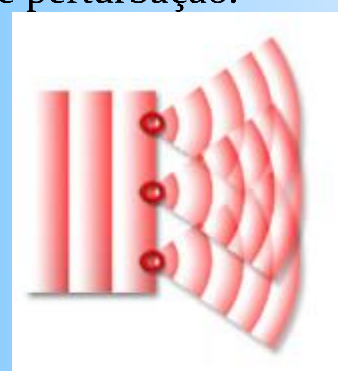
Isaac Newton (1642-1727)

Teoria corpuscular: Newton defendia que a luz era composta por uma "multidão de pequenos corpúsculos de vários tamanhos que pulavam dos corpos iluminados".


Christiaan Huygens (1629 - 1695)

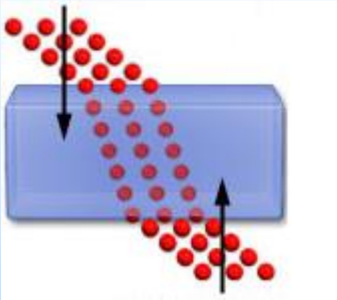
Teoria ondulatória: publicou *Traté de la lumière* de 1690, onde assumiu que o espaço era preenchido por um meio (éter) e que as perturbações do meio que constituíam a luz eram passadas para suas vizinhas que se tornam novas fontes de perturbação.



Dualidade onda-partícula

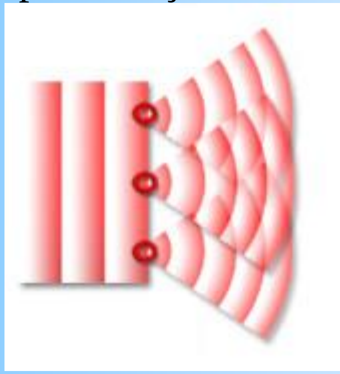
Isaac Newton (1642-1727)

Teoria corpuscular: Newton defendia que a luz era composta por uma "multidão de pequenos corpúsculos de vários tamanhos que pulavam dos corpos iluminados".



Christiaan Huygens (1629 - 1695)

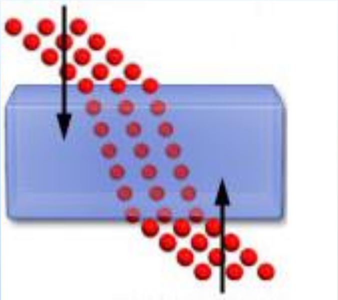
Teoria ondulatória: publicou *Traté de la lumière* de 1690, onde assumiu que o espaço era preenchido por um meio (éter) e que as perturbações do meio que constituíam a luz eram passadas para suas vizinhas que se tornam novas fontes de perturbação.



Dualidade onda-partícula

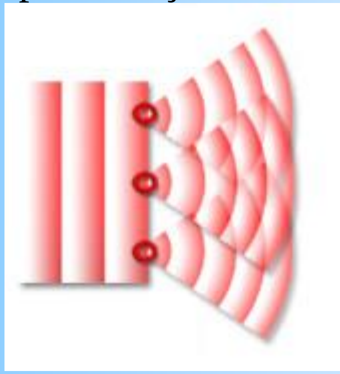
Isaac Newton (1642-1727)

Teoria corpuscular: Newton defendia que a luz era composta por uma "multidão de pequenos corpúsculos de vários tamanhos que pulavam dos corpos iluminados".



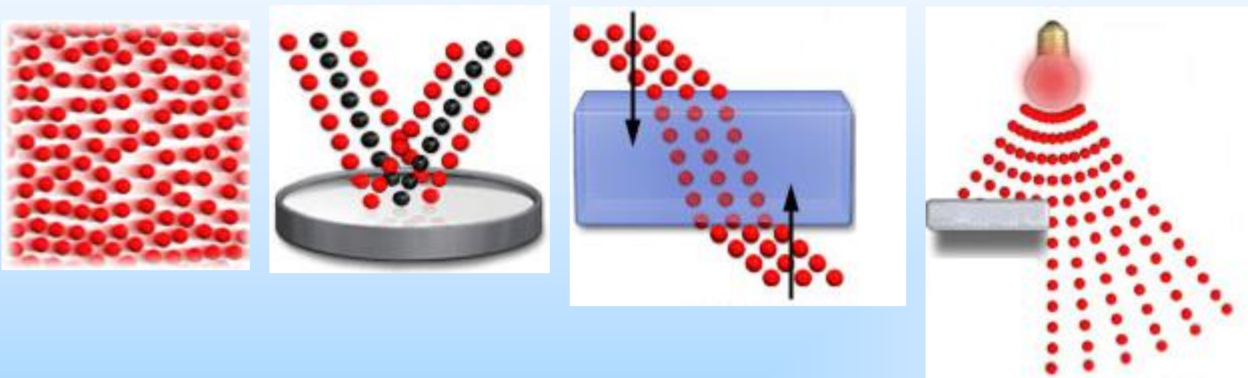
Christiaan Huygens (1629 - 1695)

Teoria ondulatória: publicou *Traté de la lumière* de 1690, onde assumiu que o espaço era preenchido por um meio (éter) e que as perturbações do meio que constituíam a luz eram passadas para suas vizinhas que se tornam novas fontes de perturbação.



Dualidade onda-partícula

Teoria corpuscular: Newton defendia que a luz era composta por uma “multidão de pequenos corpúsculos de vários tamanhos que pulavam dos corpos iluminados”.



Isaac Newton (1642-1727)

Christiaan Huygens (1629 - 1695)

Teoria ondulatória: publicou *Traté de la lumière* de 1690, onde assumiu que o espaço era preenchido por um meio (éter) e que as perturbações do meio que constituíam a luz eram passadas para suas vizinhas que se tornam novas fontes de perturbação.

Dualidade onda-partícula

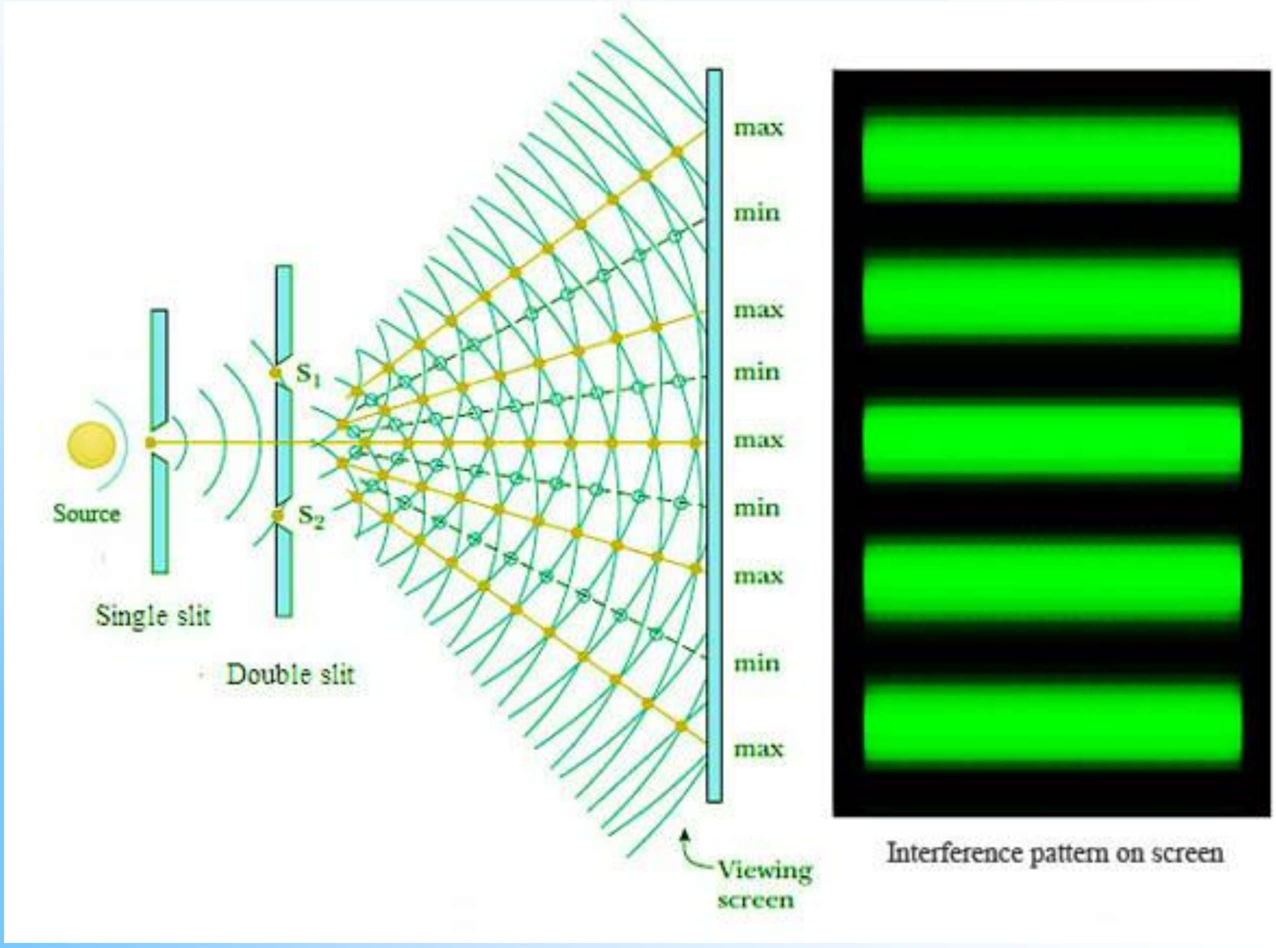
1801 o experimento da dupla fenda de Young:

Thomas Young(1773 - 1829)

Dualidade onda-partícula

1801 o experimento da dupla fenda de Young:

Thomas Young(1773 - 1829)



Dualidade onda-partícula

1801 o experimento da dupla fenda de Young:

Thomas Young(1773 - 1829)

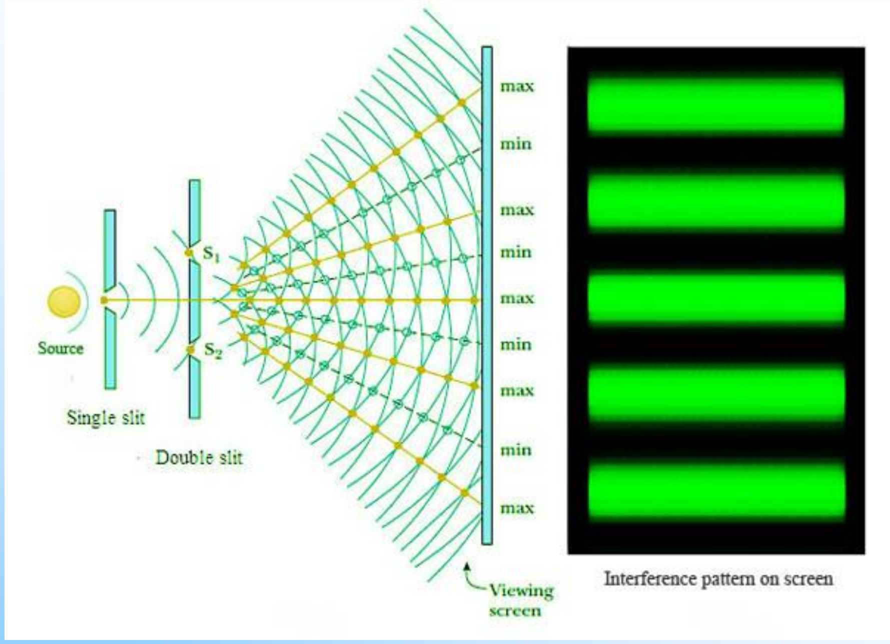
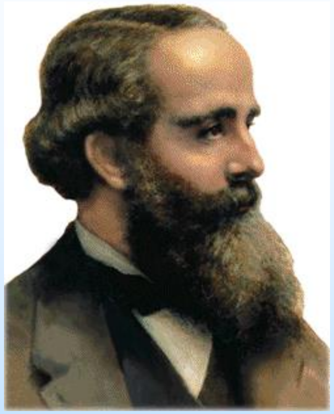


Imagem do Google Earth

Dualidade onda-partícula



James C. Maxwell
(1831 - 1879)

1864 Maxwell parte das 4 equações fundamentais do eletromagnetismo

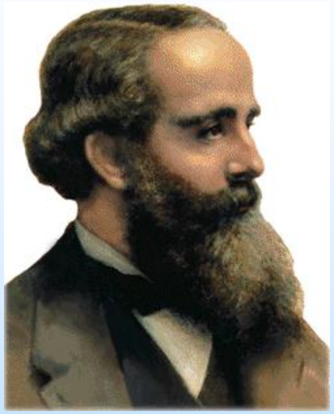
$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\varepsilon_0}$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu_0 \left(\vec{j} + \varepsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \right)$$

Dualidade onda-partícula



James C. Maxwell
(1831 - 1879)

1864 Maxwell parte das 4 equações fundamentais do eletromagnetismo e verifica que delas pode-se deduzir 2 equações de onda.

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\varepsilon_0}$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

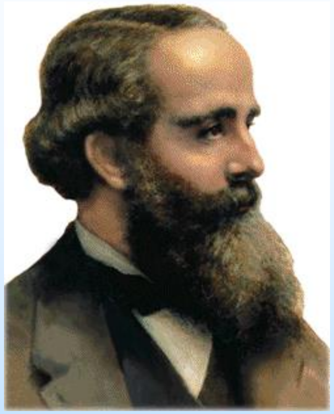
$$\vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu_0 \left(\vec{j} + \varepsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \right)$$

$$\Longrightarrow$$

$$\nabla^2 \vec{E} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2}$$

$$\nabla^2 \vec{B} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial t^2}$$

Dualidade onda-partícula



James C. Maxwell
(1831 - 1879)

1864 Maxwell parte das 4 equações fundamentais do eletromagnetismo e verifica que delas pode-se deduzir 2 equações de onda.

$$\vec{\nabla}\cdot\vec{E}=\frac{\rho}{\varepsilon_0}$$

$$\vec{\nabla}\cdot\vec{B}=0$$

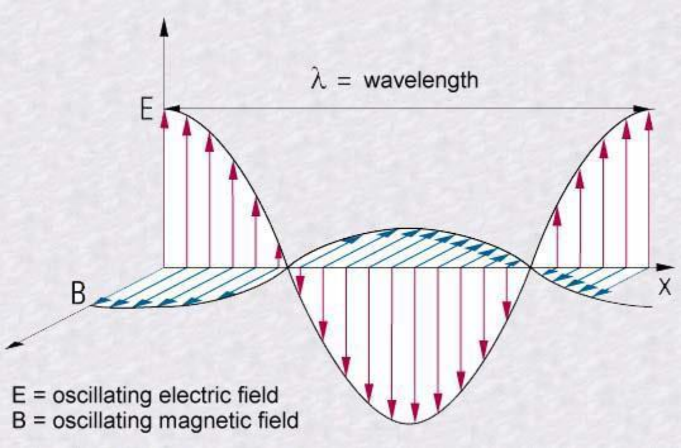
$$\vec{\nabla}\times\vec{E}=-\frac{\partial\vec{B}}{\partial t}$$

$$\vec{\nabla}\times\vec{B}=\mu_0\left(\vec{j}+\varepsilon_0\frac{\partial\vec{E}}{\partial t}\right)$$

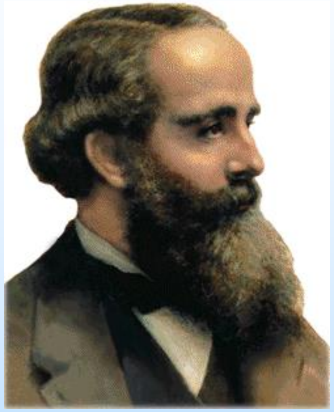
$$\Longrightarrow$$

$$\nabla^2\vec{E}=\frac{1}{c^2}\frac{\partial^2\vec{E}}{\partial t^2}$$

$$\nabla^2\vec{B}=\frac{1}{c^2}\frac{\partial^2\vec{B}}{\partial t^2}$$

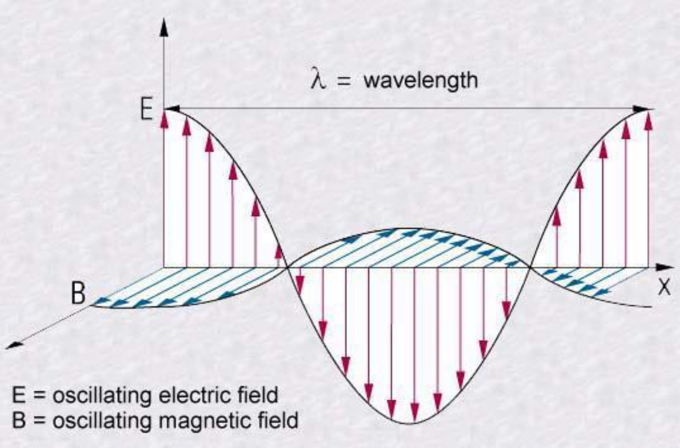


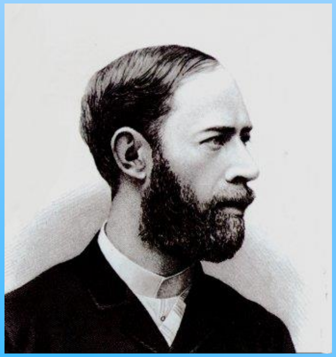
Dualidade onda-partícula



James C. Maxwell
(1831 - 1879)

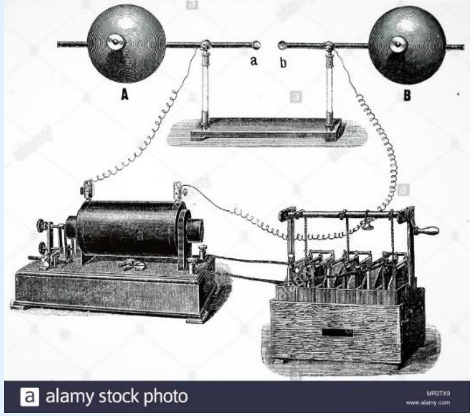
1864 Maxwell deduz as equações de ondas eletromagnéticas.



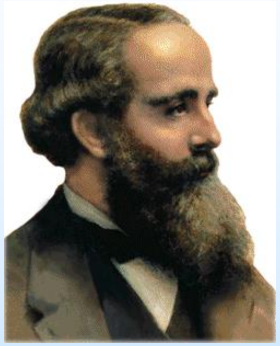


Heinrich R. Hertz
(1857 - 1894)

1887 Hertz demonstra a existência das ondas eletromagnéticas.



Dualidade onda-partícula

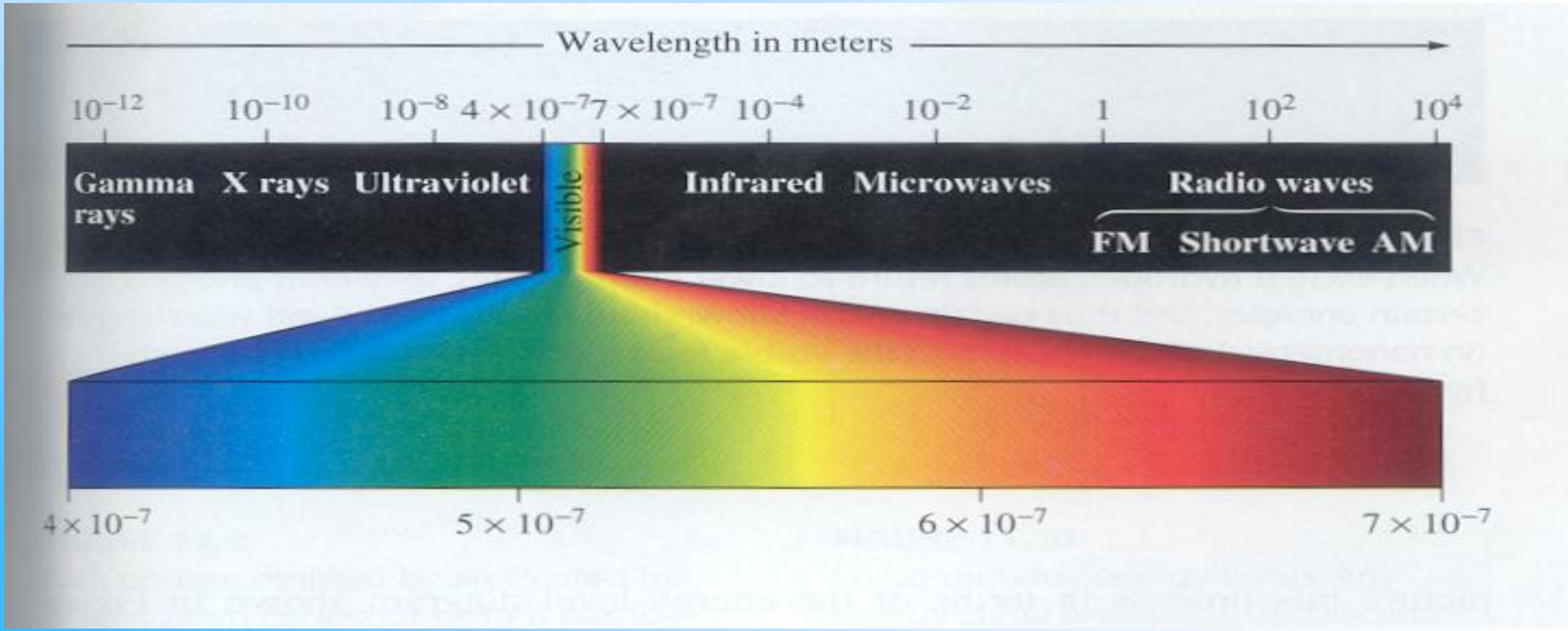


James C. Maxwell
(1831 - 1879)

1864 Maxwell deduz as equações de ondas eletromagnéticas.

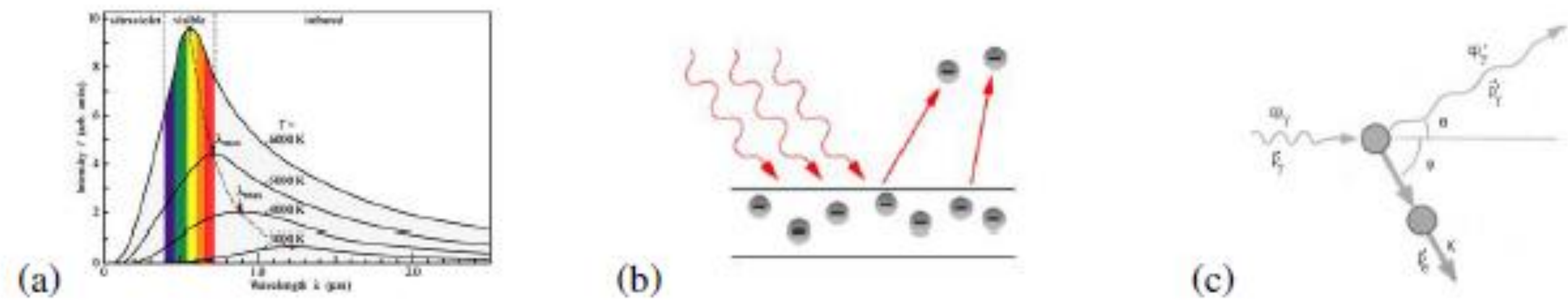
1887 Hertz demonstra a existência das ondas eletromagnéticas.

Heinrich R. Hertz
(1857 - 1894)



Dualidade onda-partícula

Na virada do século XX começam a surgir evidências do comportamento corpuscular da luz:



Radiação de corpo negro Efeito fotoelétrico Efeito Compton

Dualidade onda-partícula

Louis de Broglie
(1892 - 1987)

1924 Louis de Broglie propõe que o elétron se comporta como onda:

$$\lambda = {}^{h}/_{p}$$

Dualidade onda-partícula

Louis de Broglie
(1892 - 1987)

1924 Louis de Broglie propõe que o elétron se comporta como onda:

$$\boxed{\lambda = h/p} \; ,$$

onde *h* é a constante de Planck e $p=mv$ é o momento linear.

Dualidade onda-partícula

Louis de Broglie
(1892 - 1987)

1924 Louis de Broglie propõe que o elétron se comporta como onda:

$$\boxed{\lambda = {}^{h}/_{p}} \,,$$

onde h é a constante de Planck e $p=mv$ é o momento linear.

1929

Dualidade onda-partícula

Louis de Broglie
(1892 - 1987)

1924 Louis de Broglie propõe que o elétron se comporta como onda:

$$\boxed{\lambda = {}^{h}/_{p}},$$

onde *h* é a constante de Planck e *p=mv* é o momento linear.

1929

Ex.1) Calcule o comprimento de onda de de Broglie para:

Dualidade onda-partícula

Louis de Broglie
(1892 - 1987)

1924 Louis de Broglie propõe que o elétron se comporta como onda:

$$\boxed{\lambda = {}^{h}/_{p}} \,,$$

onde *h* é a constante de Planck e *p=mv* é o momento linear.

1929

Ex.1) Calcule o comprimento de onda de de Broglie para:

a) um elétron a 1/100 da velocidade da luz

Dualidade onda-partícula

Louis de Broglie
(1892 - 1987)

1924 Louis de Broglie propõe que o elétron se comporta como onda:

$$\boxed{\lambda = {}^{h}/_{p}}\ ,$$

onde *h* é a constante de Planck e $p=mv$ é o momento linear.

1929

Ex.1) Calcule o comprimento de onda de de Broglie para:

a) um elétron a 1/100 da velocidade da luz

$$\lambda = \frac{h}{mv}$$

Dualidade onda-partícula

Louis de Broglie
(1892 - 1987)

1924 Louis de Broglie propõe que o elétron se comporta como onda:

$$\boxed{\lambda = {}^{h}/_{p}}\ ,$$

onde *h* é a constante de Planck e *p=mv* é o momento linear.

1929

Ex.1) Calcule o comprimento de onda de de Broglie para:

a) um elétron a 1/100 da velocidade da luz

$$\lambda = \frac{h}{mv} \approx \frac{6{,}63 \cdot 10^{-34}}{9{,}1 \cdot 10^{-31} \cdot 10^{-2} \cdot 3 \cdot 10^{8}}$$

Dualidade onda-partícula

Louis de Broglie
(1892 - 1987)

1924 Louis de Broglie propõe que o elétron se comporta como onda:

$$\boxed{\lambda = {}^{h}/_{p}} \ ,$$

onde *h* é a constante de Planck e *p*=*mv* é o momento linear.

1929

Ex.1) Calcule o comprimento de onda de de Broglie para:

a) um elétron a 1/100 da velocidade da luz

$$\lambda = \frac{h}{mv} \approx \frac{6{,}63 \cdot 10^{-34}}{9{,}1 \cdot 10^{-31} \cdot 10^{-2} \cdot 3 \cdot 10^{8}} = 2{,}43 \cdot 10^{-10}\mathrm{m}$$

Dualidade onda-partícula

Louis de Broglie
(1892 - 1987)

1924 Louis de Broglie propõe que o elétron se comporta como onda:

$$\boxed{\lambda = {}^{h}/_{p}},$$

onde *h* é a constante de Planck e *p*=*mv* é o momento linear. **1929**

Ex.1) Calcule o comprimento de onda de de Broglie para:

a) um elétron a 1/100 da velocidade da luz

$$\lambda = \frac{h}{mv} \approx \frac{6{,}63 \cdot 10^{-34}}{9{,}1 \cdot 10^{-31} \cdot 10^{-2} \cdot 3 \cdot 10^{8}} = 2{,}43 \cdot 10^{-10}\mathrm{m} = 2{,}43\mathring{A}$$

Dualidade onda-partícula

Louis de Broglie
(1892 - 1987)

1924 Louis de Broglie propõe que o elétron se comporta como onda:

$$\boxed{\lambda = {}^{h}/_{p}},$$

onde *h* é a constante de Planck e *p=mv* é o momento linear.

1929

Ex.1) Calcule o comprimento de onda de de Broglie para:

a) um elétron a 1/100 da velocidade da luz

$$\lambda = \frac{h}{mv} \approx \frac{6{,}63 \cdot 10^{-34}}{9{,}1 \cdot 10^{-31} \cdot 10^{-2} \cdot 3 \cdot 10^{8}} = 2{,}43 \cdot 10^{-10}\mathrm{m} = 2{,}43\mathring{\mathrm{A}} \quad \sim \text{raio X}$$

Dualidade onda-partícula

Louis de Broglie
(1892 - 1987)

1924 Louis de Broglie propõe que o elétron se comporta como onda:

$$\boxed{\lambda = h/p},$$

onde *h* é a constante de Planck e *p*=*mv* é o momento linear.

1929

Ex.1) Calcule o comprimento de onda de de Broglie para:

a) um elétron a 1/100 da velocidade da luz

$$\lambda = \frac{h}{mv} \approx \frac{6{,}63 \cdot 10^{-34}}{9{,}1 \cdot 10^{-31} \cdot 10^{-2} \cdot 3 \cdot 10^{8}} = 2{,}43 \cdot 10^{-10}\mathrm{m} = 2{,}43\mathring{A} \quad \sim\text{raio X}$$

b) um prótron a 1/100 da velocidade da luz

Dualidade onda-partícula

Louis de Broglie
(1892 - 1987)

1924 Louis de Broglie propõe que o elétron se comporta como onda:

$$\boxed{\lambda = {}^{h}/_{p}}\,,$$

onde *h* é a constante de Planck e *p*=*mv* é o momento linear.

1929

Ex.1) Calcule o comprimento de onda de de Broglie para:

a) um elétron a 1/100 da velocidade da luz

$$\lambda = \frac{h}{mv} \approx \frac{6{,}63 \cdot 10^{-34}}{9{,}1 \cdot 10^{-31} \cdot 10^{-2} \cdot 3 \cdot 10^{8}} = 2{,}43 \cdot 10^{-10}\mathrm{m} = 2{,}43\overset{o}{\mathrm{A}} \quad \sim\text{raio X}$$

b) um prótron a 1/100 da velocidade da luz

$$\lambda = \frac{h}{mv}$$

Dualidade onda-partícula

Louis de Broglie
(1892 - 1987)

1924 Louis de Broglie propõe que o elétron se comporta como onda:

$$\boxed{\lambda = {}^{h}/_{p}}\ ,$$

onde *h* é a constante de Planck e *p=mv* é o momento linear.

1929

Ex.1) Calcule o comprimento de onda de de Broglie para:

a) um elétron a 1/100 da velocidade da luz

$$\lambda = \frac{h}{mv} \approx \frac{6{,}63 \cdot 10^{-34}}{9{,}1 \cdot 10^{-31} \cdot 10^{-2} \cdot 3 \cdot 10^{8}} = 2{,}43 \cdot 10^{-10}\mathrm{m} = 2{,}43\overset{\mathrm{o}}{\mathrm{A}} \quad \sim\text{raio X}$$

b) um prótron a 1/100 da velocidade da luz

$$\lambda = \frac{h}{mv} \approx \frac{6{,}63 \cdot 10^{-34}}{1{,}67 \cdot 10^{-27} \cdot 10^{-2} \cdot 3 \cdot 10^{8}}$$

Dualidade onda-partícula

Louis de Broglie
(1892 - 1987)

1924 Louis de Broglie propõe que o elétron se comporta como onda:

$$\boxed{\lambda = {}^{h}/_{p}},$$

onde *h* é a constante de Planck e *p*=*mv* é o momento linear.

1929

Ex.1) Calcule o comprimento de onda de de Broglie para:

a) um elétron a 1/100 da velocidade da luz

$$\lambda = \frac{h}{mv} \approx \frac{6{,}63 \cdot 10^{-34}}{9{,}1 \cdot 10^{-31} \cdot 10^{-2} \cdot 3 \cdot 10^{8}} = 2{,}43 \cdot 10^{-10}\text{m} = 2{,}43\mathring{\text{A}} \quad \sim\text{raio X}$$

b) um prótron a 1/100 da velocidade da luz

$$\lambda = \frac{h}{mv} \approx \frac{6{,}63 \cdot 10^{-34}}{1{,}67 \cdot 10^{-27} \cdot 10^{-2} \cdot 3 \cdot 10^{8}} = 1{,}32 \cdot 10^{-13}\text{m}$$

Dualidade onda-partícula

Louis de Broglie
(1892 - 1987)

1924 Louis de Broglie propõe que o elétron se comporta como onda:

$$\boxed{\lambda = {}^{h}/_{p}} \, ,$$

onde h é a constante de Planck e $p=mv$ é o momento linear.  **1929**

Ex.1) Calcule o comprimento de onda de de Broglie para:

a) um elétron a 1/100 da velocidade da luz

$$\lambda = \frac{h}{mv} \approx \frac{6{,}63 \cdot 10^{-34}}{9{,}1 \cdot 10^{-31} \cdot 10^{-2} \cdot 3 \cdot 10^{8}} = 2{,}43 \cdot 10^{-10}\text{m} = 2{,}43\text{Å} \quad \sim\text{raio X}$$

b) um prótron a 1/100 da velocidade da luz

$$\lambda = \frac{h}{mv} \approx \frac{6{,}63 \cdot 10^{-34}}{1{,}67 \cdot 10^{-27} \cdot 10^{-2} \cdot 3 \cdot 10^{8}} = 1{,}32 \cdot 10^{-13}\text{m} = 132 \text{ fm}$$

Dualidade onda-partícula

Louis de Broglie
(1892 - 1987)

1924 Louis de Broglie propõe que o elétron se comporta como onda:

$$\boxed{\lambda = {}^{h}/_{p}} \; ,$$

onde h é a constante de Planck e $p{=}mv$ é o momento linear.

1929

Ex.1) Calcule o comprimento de onda de de Broglie para:

a) um elétron a 1/100 da velocidade da luz

$$\lambda = \frac{h}{mv} \approx \frac{6{,}63 \cdot 10^{-34}}{9{,}1 \cdot 10^{-31} \cdot 10^{-2} \cdot 3 \cdot 10^{8}} = 2{,}43 \cdot 10^{-10}\mathrm{m} = 2{,}43\overset{o}{\mathrm{A}} \quad \sim\text{raio X}$$

b) um prótron a 1/100 da velocidade da luz

$$\lambda = \frac{h}{mv} \approx \frac{6{,}63 \cdot 10^{-34}}{1{,}67 \cdot 10^{-27} \cdot 10^{-2} \cdot 3 \cdot 10^{8}} = 1{,}32 \cdot 10^{-13}\mathrm{m} = 132 \ \mathrm{fm} \quad \sim\text{raio } \gamma$$

Dualidade onda-partícula

Louis de Broglie
(1892 - 1987)

1924 Louis de Broglie propõe que o elétron se comporta como onda:

$$\boxed{\lambda = {}^{h}/_{p}},$$

onde *h* é a constante de Planck e *p*=*mv* é o momento linear.

1929

Ex.1) Calcule o comprimento de onda de de Broglie para:

a) um elétron a 1/100 da velocidade da luz

$$\lambda = \frac{h}{mv} \approx \frac{6{,}63 \cdot 10^{-34}}{9{,}1 \cdot 10^{-31} \cdot 10^{-2} \cdot 3 \cdot 10^{8}} = 2{,}43 \cdot 10^{-10}\mathrm{m} = 2{,}43\mathring{\mathrm{A}} \quad \sim\text{raio X}$$

b) um prótron a 1/100 da velocidade da luz

$$\lambda = \frac{h}{mv} \approx \frac{6{,}63 \cdot 10^{-34}}{1{,}67 \cdot 10^{-27} \cdot 10^{-2} \cdot 3 \cdot 10^{8}} = 1{,}32 \cdot 10^{-13}\mathrm{m} = 132\ \mathrm{fm} \quad \sim\text{raio } \gamma$$

c) uma bola de gude de 5 g viajando a 1 m/s

Dualidade onda-partícula

Louis de Broglie
(1892 - 1987)

1924 Louis de Broglie propõe que o elétron se comporta como onda:

$$\boxed{\lambda = {}^{h}/_{p}} \, ,$$

onde h é a constante de Planck e $p=mv$ é o momento linear.

1929

Ex.1) Calcule o comprimento de onda de de Broglie para:

a) um elétron a 1/100 da velocidade da luz

$$\lambda = \frac{h}{mv} \approx \frac{6{,}63 \cdot 10^{-34}}{9{,}1 \cdot 10^{-31} \cdot 10^{-2} \cdot 3 \cdot 10^{8}} = 2{,}43 \cdot 10^{-10}\text{m} = 2{,}43\mathring{\text{A}} \quad \sim\text{raio X}$$

b) um prótron a 1/100 da velocidade da luz

$$\lambda = \frac{h}{mv} \approx \frac{6{,}63 \cdot 10^{-34}}{1{,}67 \cdot 10^{-27} \cdot 10^{-2} \cdot 3 \cdot 10^{8}} = 1{,}32 \cdot 10^{-13}\text{m} = 132 \text{ fm} \quad \sim\text{raio } \gamma$$

c) uma bola de gude de 5 g viajando a 1 m/s

$$\lambda = \frac{h}{mv}$$

Dualidade onda-partícula

Louis de Broglie
(1892 - 1987)

1924 Louis de Broglie propõe que o elétron se comporta como onda:

$$\boxed{\lambda = {}^{h}/_{p}}\ ,$$

onde *h* é a constante de Planck e *p*=*mv* é o momento linear.

1929

Ex.1) Calcule o comprimento de onda de de Broglie para:

a) um elétron a 1/100 da velocidade da luz

$$\lambda = \frac{h}{mv} \approx \frac{6{,}63 \cdot 10^{-34}}{9{,}1 \cdot 10^{-31} \cdot 10^{-2} \cdot 3 \cdot 10^{8}} = 2{,}43 \cdot 10^{-10}\mathrm{m} = 2{,}43\mathring{\mathrm{A}} \quad \sim\text{raio X}$$

b) um prótron a 1/100 da velocidade da luz

$$\lambda = \frac{h}{mv} \approx \frac{6{,}63 \cdot 10^{-34}}{1{,}67 \cdot 10^{-27} \cdot 10^{-2} \cdot 3 \cdot 10^{8}} = 1{,}32 \cdot 10^{-13}\mathrm{m} = 132\ \mathrm{fm} \quad \sim\text{raio } \gamma$$

c) uma bola de gude de 5 g viajando a 1 m/s

$$\lambda = \frac{h}{mv} \approx \frac{6{,}63 \cdot 10^{-34}}{5 \cdot 10^{-3} \cdot 1}$$

Dualidade onda-partícula

Louis de Broglie
(1892 - 1987)

1924 Louis de Broglie propõe que o elétron se comporta como onda:

$$\boxed{\lambda = {}^{h}/_{p}},$$

onde *h* é a constante de Planck e *p*=*mv* é o momento linear.

1929

Ex.1) Calcule o comprimento de onda de de Broglie para:

a) um elétron a 1/100 da velocidade da luz

$$\lambda = \frac{h}{mv} \approx \frac{6{,}63 \cdot 10^{-34}}{9{,}1 \cdot 10^{-31} \cdot 10^{-2} \cdot 3 \cdot 10^{8}} = 2{,}43 \cdot 10^{-10}\mathrm{m} = 2{,}43\mathring{\mathrm{A}} \quad \sim\text{raio X}$$

b) um prótron a 1/100 da velocidade da luz

$$\lambda = \frac{h}{mv} \approx \frac{6{,}63 \cdot 10^{-34}}{1{,}67 \cdot 10^{-27} \cdot 10^{-2} \cdot 3 \cdot 10^{8}} = 1{,}32 \cdot 10^{-13}\mathrm{m} = 132\ \mathrm{fm} \quad \sim\text{raio } \gamma$$

c) uma bola de gude de 5 g viajando a 1 m/s

$$\lambda = \frac{h}{mv} \approx \frac{6{,}63 \cdot 10^{-34}}{5 \cdot 10^{-3} \cdot 1} = 1{,}33 \cdot 10^{-31}\mathrm{m}$$

Dualidade onda-partícula

Louis de Broglie
(1892 - 1987)

1924 Louis de Broglie propõe que o elétron se comporta como onda:

$$\boxed{\lambda = {}^{h}/_{p}} \; ,$$

onde *h* é a constante de Planck e *p*=*mv* é o momento linear.

1929

Ex.1) Calcule o comprimento de onda de de Broglie para:

a) um elétron a 1/100 da velocidade da luz

$$\lambda = \frac{h}{mv} \approx \frac{6{,}63 \cdot 10^{-34}}{9{,}1 \cdot 10^{-31} \cdot 10^{-2} \cdot 3 \cdot 10^{8}} = 2{,}43 \cdot 10^{-10}\text{m} = 2{,}43\text{Å} \quad \sim\text{raio X}$$

b) um prótron a 1/100 da velocidade da luz

$$\lambda = \frac{h}{mv} \approx \frac{6{,}63 \cdot 10^{-34}}{1{,}67 \cdot 10^{-27} \cdot 10^{-2} \cdot 3 \cdot 10^{8}} = 1{,}32 \cdot 10^{-13}\text{m} = 132 \text{ fm} \quad \sim\text{raio } \gamma$$

c) uma bola de gude de 5 g viajando a 1 m/*s*

$$\lambda = \frac{h}{mv} \approx \frac{6{,}63 \cdot 10^{-34}}{5 \cdot 10^{-3} \cdot 1} = 1{,}33 \cdot 10^{-31}\text{m} \quad \text{muito pequeno para ser detectado}$$

Dualidade onda-partícula

Dualidade onda-partícula

Interpretação para o 3° postulado de Bohr:

$$L = n\hbar$$

Dualidade onda-partícula

Interpretação para o 3° postulado de Bohr:

$$L = n\hbar \Rightarrow nh = 2\pi L$$

Dualidade onda-partícula

Interpretação para o 3° postulado de Bohr:

$$L = n\hbar \Rightarrow nh = 2\pi L = 2\pi rp$$

Dualidade onda-partícula

Interpretação para o 3° postulado de Bohr:

$L = n\hbar \Rightarrow nh = 2\pi L = 2\pi rp$,

onde substituimos o momento angular de uma órbita circular: $L = rp$.

Dualidade onda-partícula

Interpretação para o 3° postulado de Bohr:

$L = n\hbar \Rightarrow nh = 2\pi L = 2\pi rp$,
onde substituimos o momento angular de uma órbita circular: $L = rp$.

Então : $2\pi rp = nh$

Dualidade onda-partícula

Interpretação para o 3° postulado de Bohr:

$L = n\hbar \Rightarrow nh = 2\pi L = 2\pi rp$,
onde substituimos o momento angular de uma órbita circular: $L = rp$.

Então : $2\pi rp = nh \Rightarrow 2\pi r = \dfrac{nh}{p}$

Dualidade onda-partícula

Interpretação para o 3° postulado de Bohr:

$L = n\hbar \Rightarrow nh = 2\pi L = 2\pi rp$,
onde substituimos o momento angular de uma órbita circular: $L = rp$.

Então : $2\pi rp = nh \Rightarrow 2\pi r = \dfrac{nh}{p}$

que, usando a relação de de Broglie: $\lambda = \dfrac{h}{p}$

Dualidade onda-partícula

Interpretação para o 3° postulado de Bohr:

$L = n\hbar \Rightarrow nh = 2\pi L = 2\pi rp$,
onde substituimos o momento angular de uma órbita circular: $L = rp$.

Então : $2\pi rp = nh \Rightarrow 2\pi r = \dfrac{nh}{p}$

que, usando a relação de de Broglie: $\lambda = \dfrac{h}{p}$, vem:

$$2\pi r = n\lambda$$

Dualidade onda-partícula

Interpretação para o 3° postulado de Bohr:

$L = n\hbar \Rightarrow nh = 2\pi L = 2\pi rp$,
onde substituimos o momento angular de uma órbita circular: $L = rp$.

Então : $2\pi rp = nh \Rightarrow 2\pi r = \dfrac{nh}{p}$

que, usando a relação de de Broglie: $\lambda = \dfrac{h}{p}$, vem:

$$\boxed{2\pi r = n\lambda}$$

que significa que a circunferência da órbita deve ser tal que contenha números inteiros do comprimento de onda das ondas estacionárias:

Dualidade onda-partícula

Interpretação para o 3° postulado de Bohr:

$L = n\hbar \Rightarrow nh = 2\pi l = 2\pi rp$,

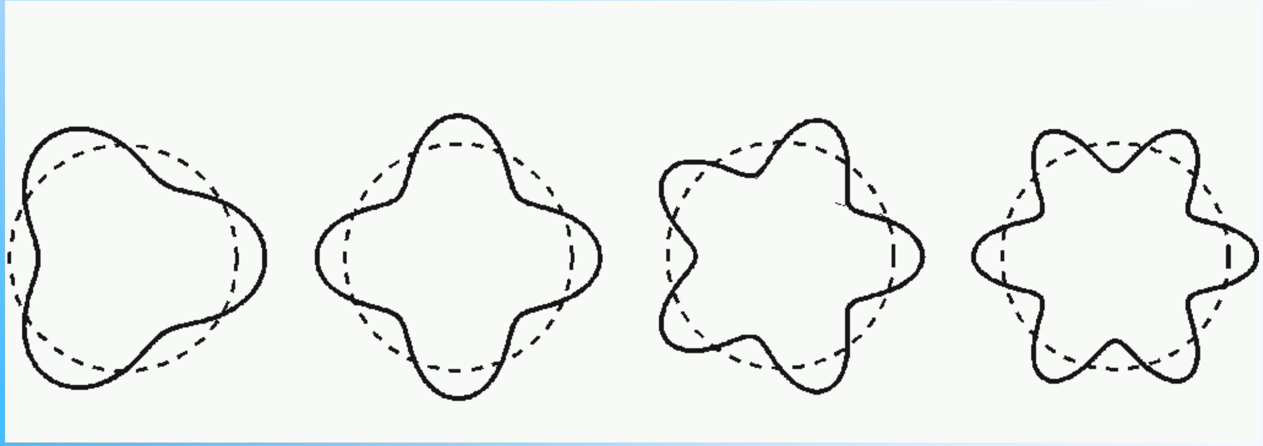
onde substituimos o momento angular de uma órbita circular: $L = rp$.

Então : $2\pi rp = nh \Rightarrow 2\pi r = \dfrac{nh}{p}$

que, usando a relação de de Broglie: $\lambda = \dfrac{h}{p}$, vem:

$$\boxed{2\pi r = n\lambda}$$

que significa que a circunferência da órbita deve ser tal que contenha números inteiros do comprimento de onda das ondas estacionárias:



Ondas estacionárias em um círculo para $n = 3,4,5,6$

Verificação experimental da dualidade onda-partícula

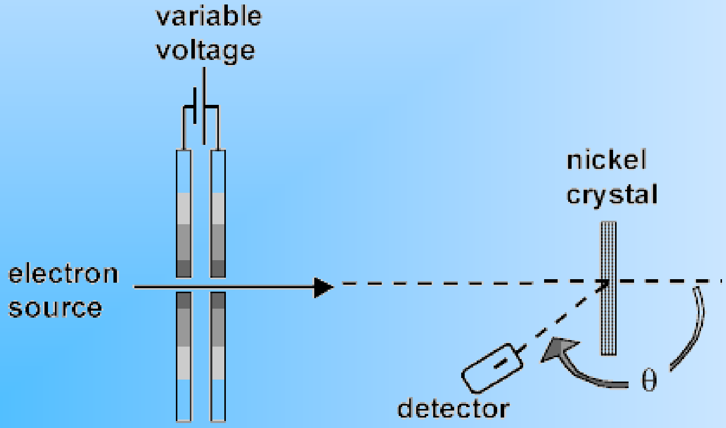
C. Davisson (1881 - 1958)
L. H. Germer (1896 - 1971)

1927 Davisson e Germer observam a interferência de elétrons.

Verificação experimental da dualidade onda-partícula

1927 Davisson e Germer observam a interferência de elétrons.

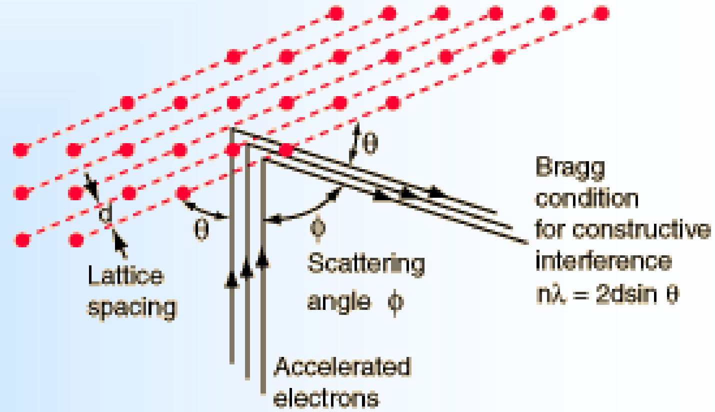
C. Davisson (1881 - 1958)
L. H. Germer (1896 - 1971)

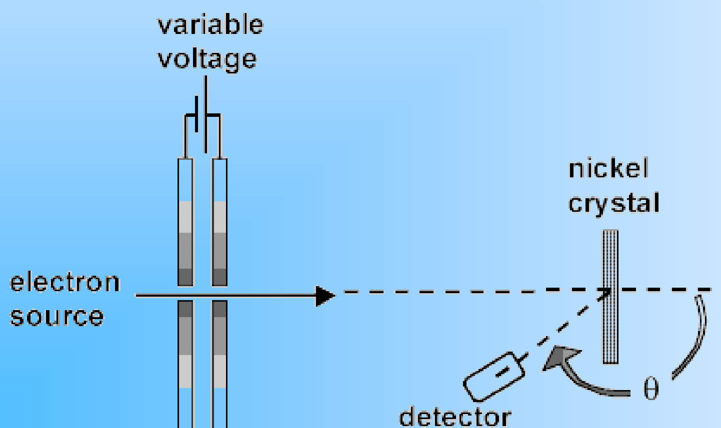


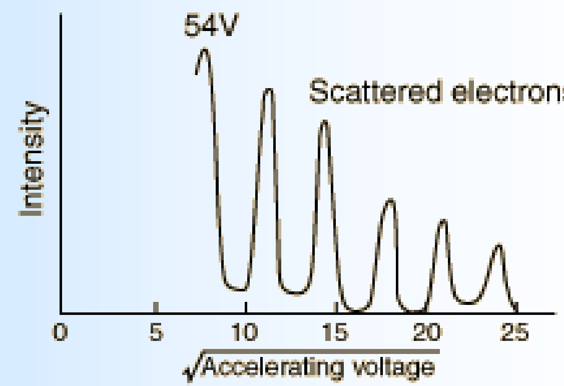
Verificação experimental da dualidade onda-partícula

C. Davisson (1881 - 1958)
L. H. Germer (1896 - 1971)

1927 Davisson e Germer observam a interferência de elétrons.



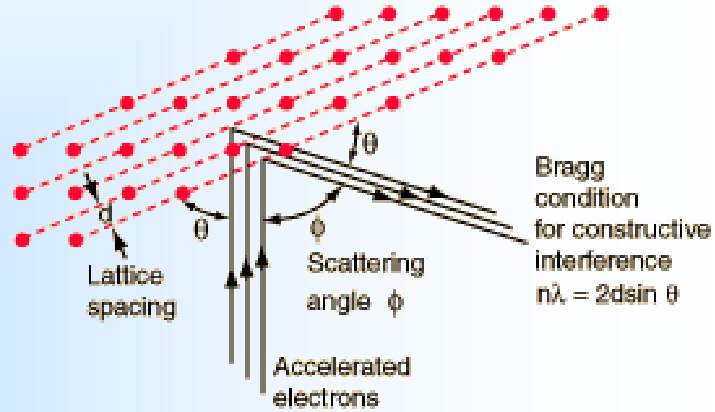


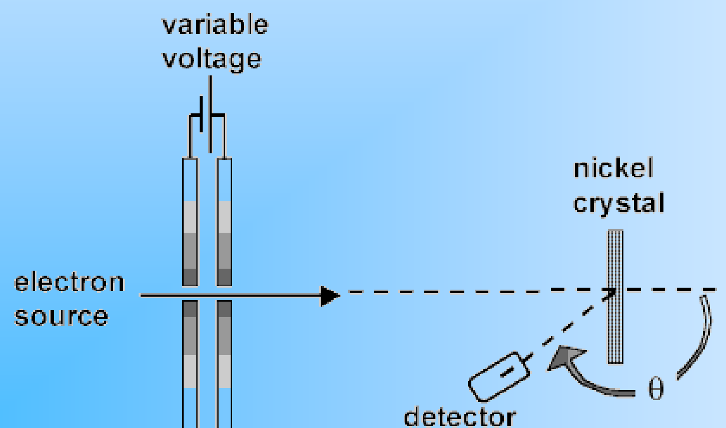


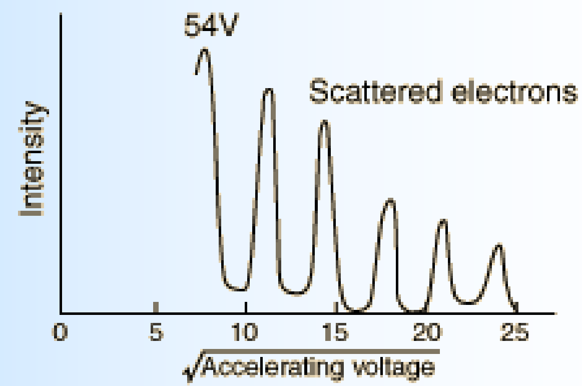
Verificação experimental da dualidade onda-partícula

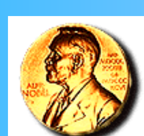
C. Davisson (1881 - 1958)
L. H. Germer (1896 - 1971)

1927 Davisson e Germer observam a interferência de elétrons.









1937 Davisson & Thomson

Verificação experimental da dualidade onda-partícula

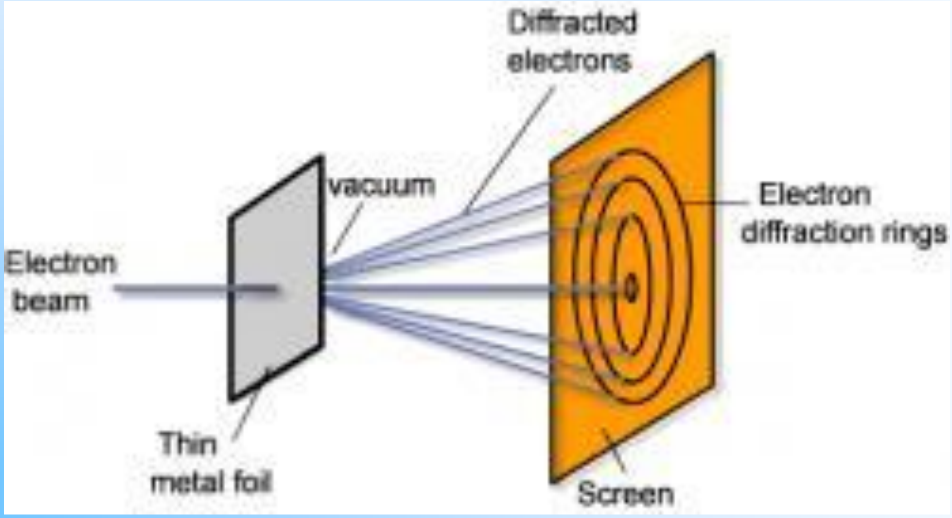
1927 G.P. Thomson observa a difração de elétrons.

G. P. Thomson
(1892 - 1975)

Verificação experimental da dualidade onda-partícula

1927 G.P. Thomson observa a difração de elétrons.

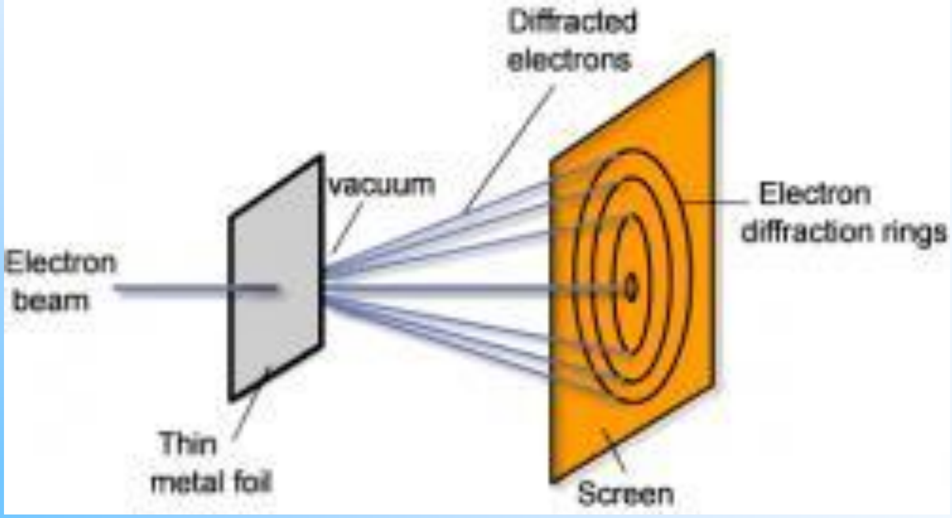
G. P. Thomson
(1892 - 1975)



Verificação experimental da dualidade onda-partícula

1927 G.P. Thomson observa a difração de elétrons.

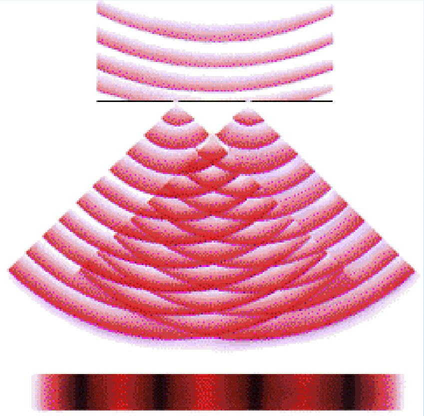
G. P. Thomson
(1892 - 1975)

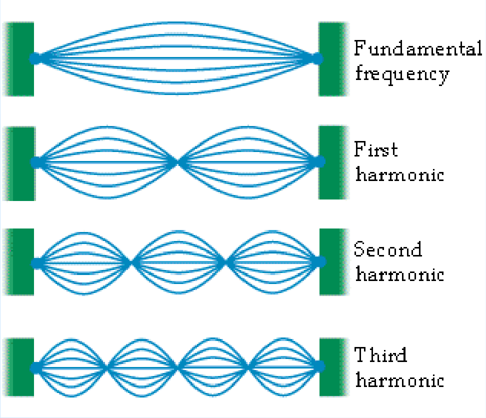


1937 Davisson & Thomson

Princípio de Superposição

Duas ou mais ondas que passam pela mesma região se superpõem

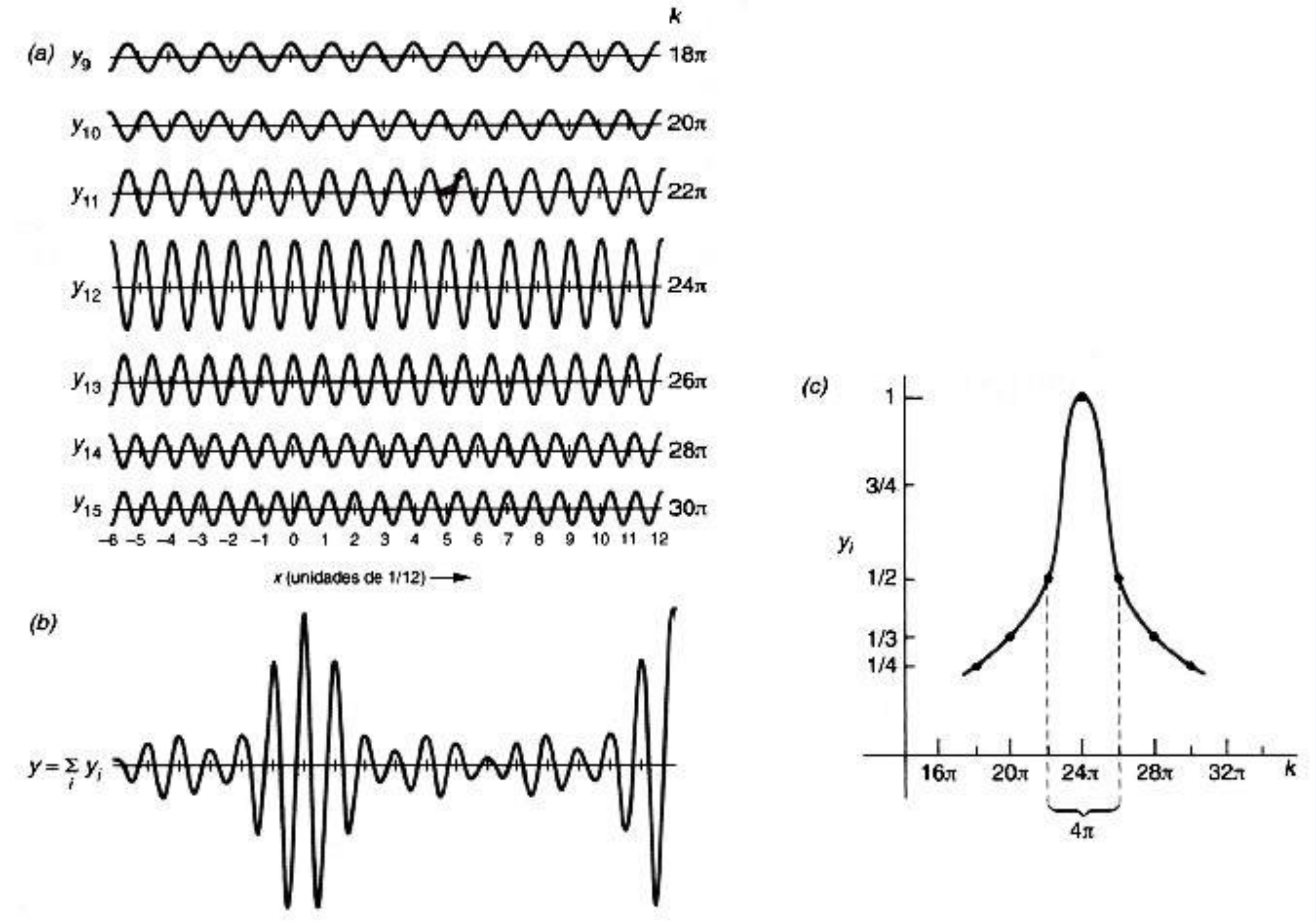




$$\boxed{y'(x,t) = y_1(x,t) + y_2(x,t)}$$

➢ ondas superpostas se somam algebricamente para produzirem uma onda resultante.

Pacotes de ondas



Princípio de indeterminação clássico: $\boxed{\Delta k \Delta x \approx 1}$

Princípio da indeterminação

Werner Heisenberg
(1901 - 1976)

1927 Heisenberg formula o princípio da incerteza.

$$\Delta p \cdot \Delta x \geq \frac{\hbar}{2}$$

$$\Delta E \cdot \Delta t \geq \frac{\hbar}{2}$$

Princípio da indeterminação

Werner Heisenberg
(1901 - 1976)

1927 Heisenberg formula o princípio da incerteza.

$$\Delta p \cdot \Delta x \geq \frac{\hbar}{2}$$

$$\Delta E \cdot \Delta t \geq \frac{\hbar}{2}$$

1932

Princípio da indeterminação

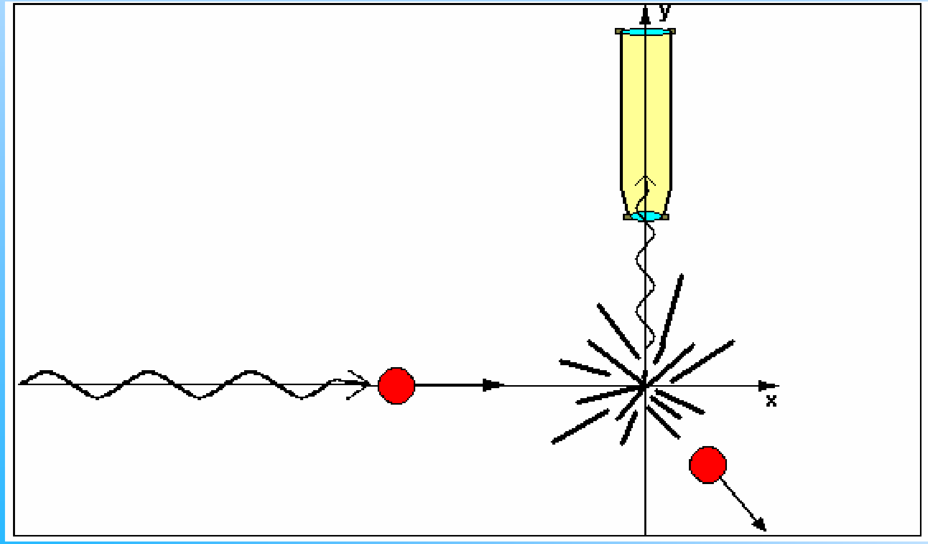
Werner Heisenberg
(1901 - 1976)

1927 Heisenberg formula o princípio da incerteza.

$$\Delta p \cdot \Delta x \geq \frac{\hbar}{2}$$

$$\Delta E \cdot \Delta t \geq \frac{\hbar}{2}$$

1932

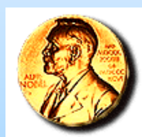


Princípio da indeterminação

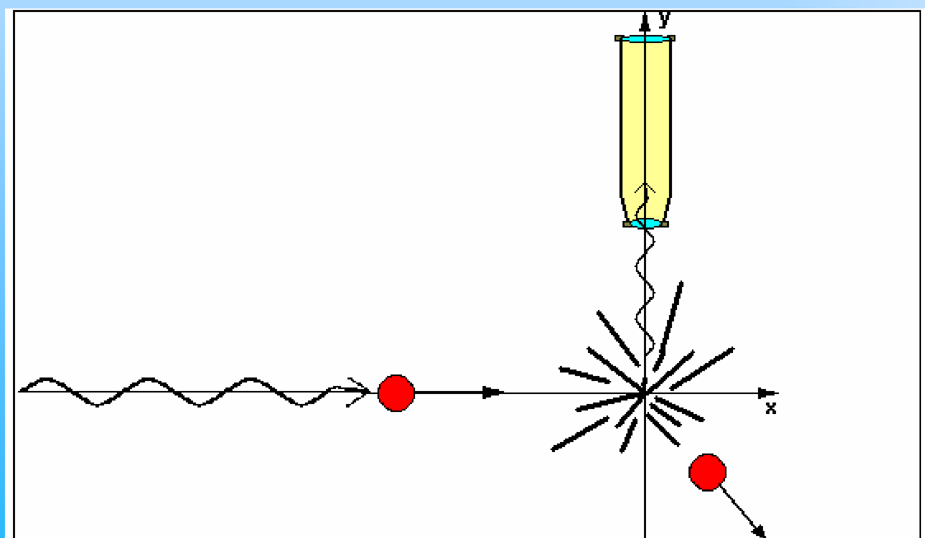
Werner Heisenberg
(1901 - 1976)

1927 Heisenberg formula o princípio da incerteza.

$$\Delta p \cdot \Delta x \geq \frac{\hbar}{2} \qquad \Delta E \cdot \Delta t \geq \frac{\hbar}{2}$$



1932



melhor precisão da posição:
$\Delta x \sim \lambda$

Princípio da indeterminação

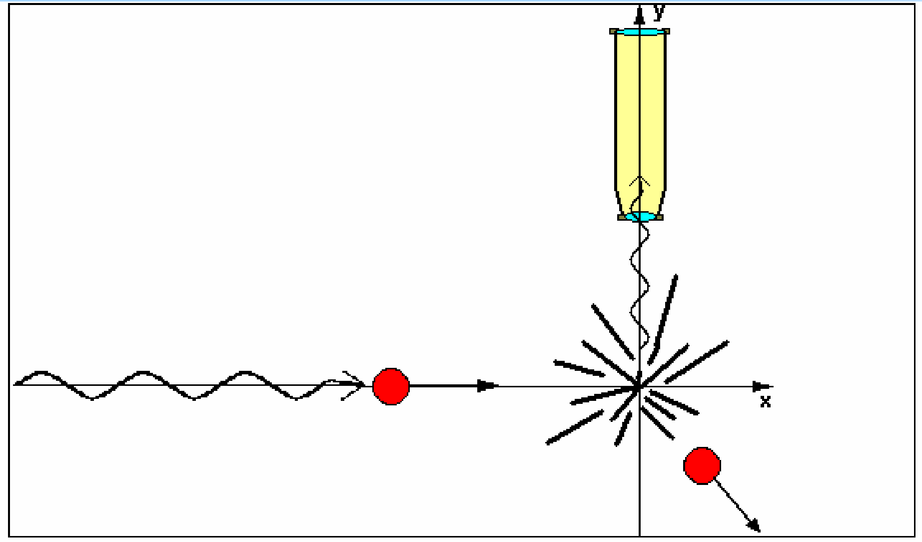
Werner Heisenberg
(1901 - 1976)

1927 Heisenberg formula o princípio da incerteza.

$$\Delta p \cdot \Delta x \geq \frac{\hbar}{2}$$

$$\Delta E \cdot \Delta t \geq \frac{\hbar}{2}$$

1932



melhor precisão da posição:
$\Delta x \sim \lambda$

o fóton fornece ao elétron o recuo (momento):
$\Delta p \sim \frac{h}{\lambda}$

Princípio da indeterminação

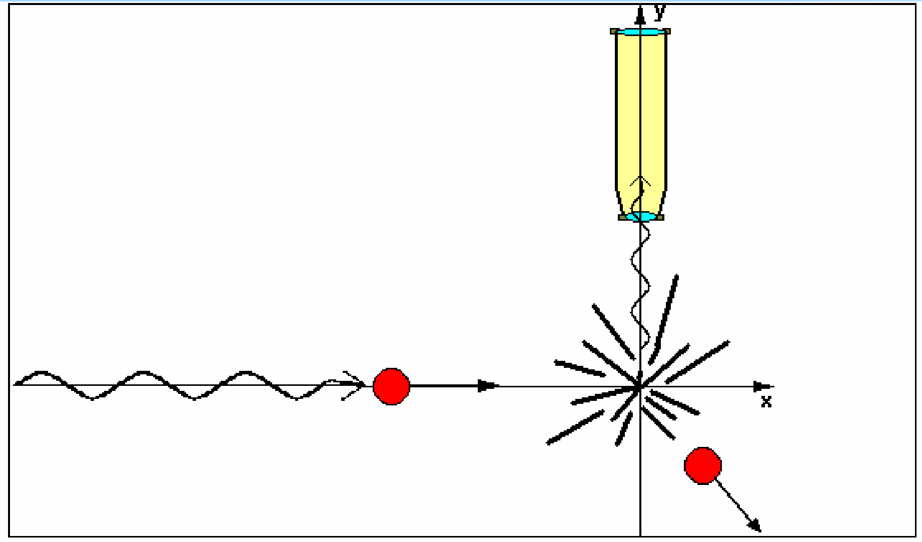
1927 Heisenberg formula o princípio da incerteza.

$$\Delta p \cdot \Delta x \geq \frac{\hbar}{2}$$

$$\Delta E \cdot \Delta t \geq \frac{\hbar}{2}$$

Werner Heisenberg
(1901 - 1976)

1932

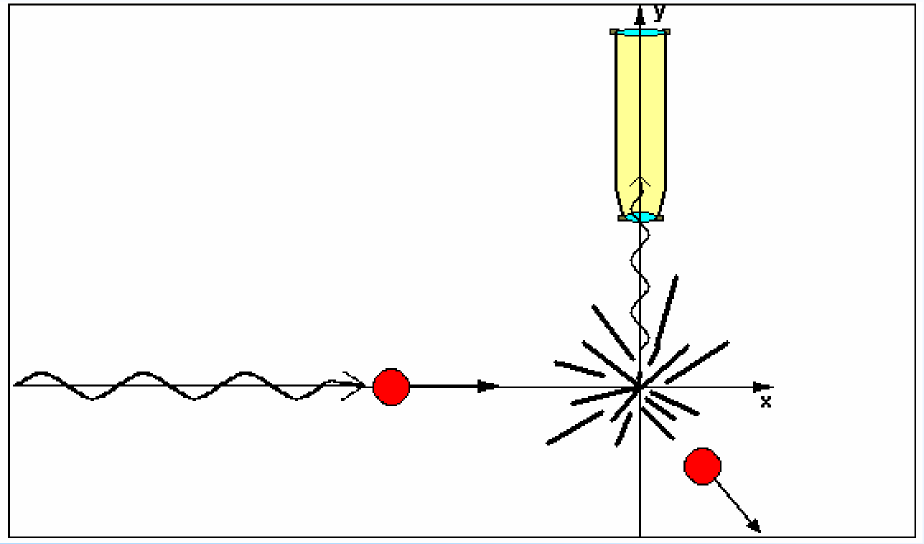


melhor precisão da posição:
$\Delta x \sim \lambda$

o fóton fornece ao elétron o recuo (momento):
$\Delta p \sim \dfrac{h}{\lambda}$

tal que:
$\Delta p \cdot \Delta x \sim h$

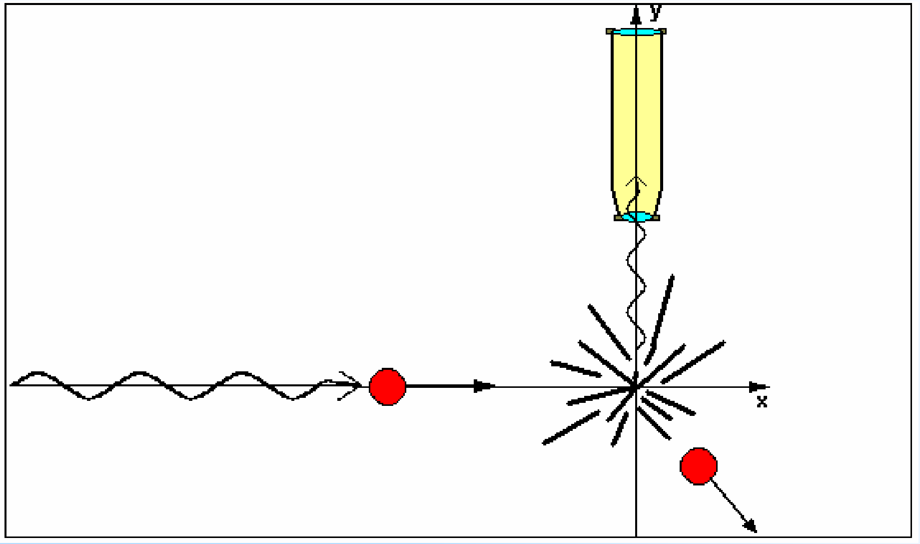
Princípio da indeterminação



De de Broglie:

$$\lambda = \frac{h}{p}$$

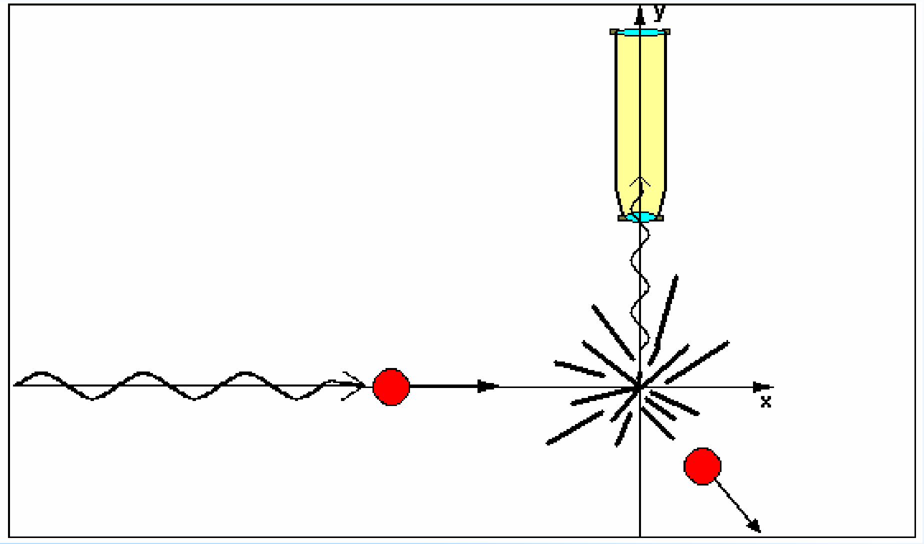
Princípio da indeterminação



De de Broglie:

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{2\pi}{k}$$

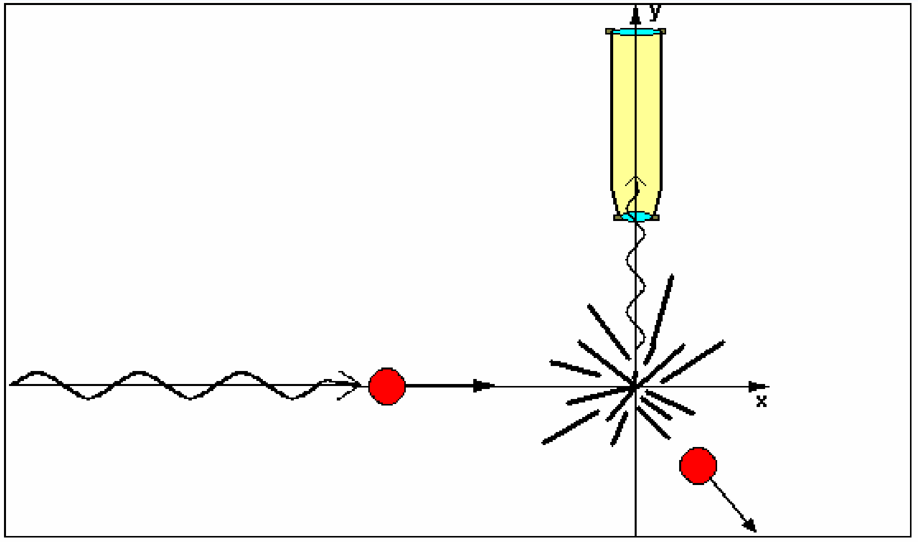
Princípio da indeterminação



De de Broglie:

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{2\pi}{k} \Longrightarrow k = \frac{2\pi}{h} p$$

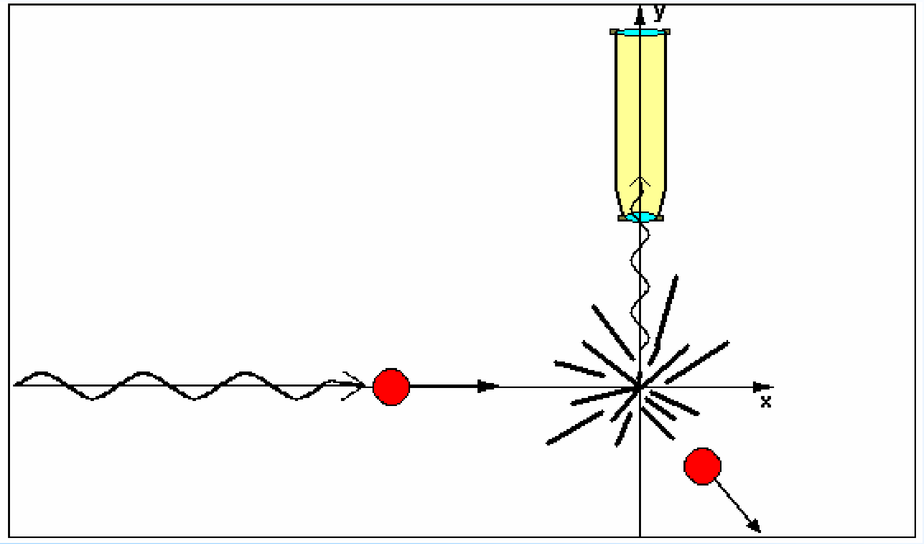
Princípio da indeterminação



De de Broglie:

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{2\pi}{k} \Longrightarrow k = \frac{2\pi}{h} p \Longrightarrow \Delta k = \frac{2\pi}{h} \Delta p$$

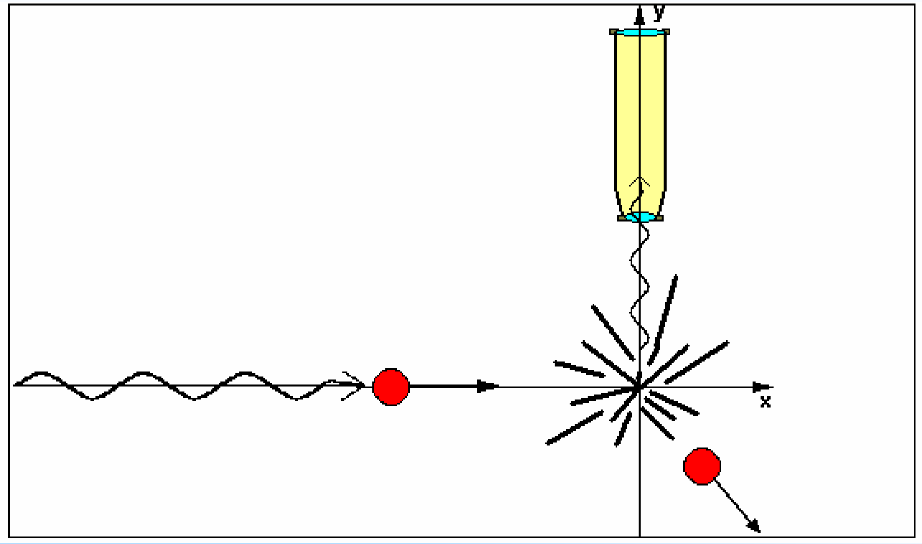
Princípio da indeterminação



De de Broglie:

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{2\pi}{k} \Longrightarrow k = \frac{2\pi}{h} p \Longrightarrow \Delta k = \frac{2\pi}{h} \Delta p = \Delta p/\hbar$$

Princípio da indeterminação

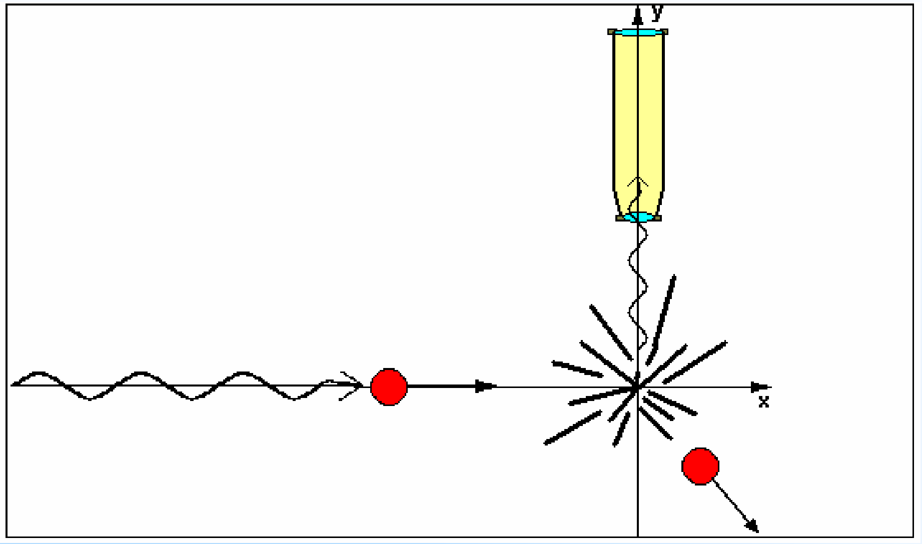


De de Broglie:

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{2\pi}{k} \Longrightarrow k = \frac{2\pi}{h} p \Longrightarrow \Delta k = \frac{2\pi}{h} \Delta p = \Delta p/\hbar$$

Como $\Delta k \Delta x = 1$

Princípio da indeterminação

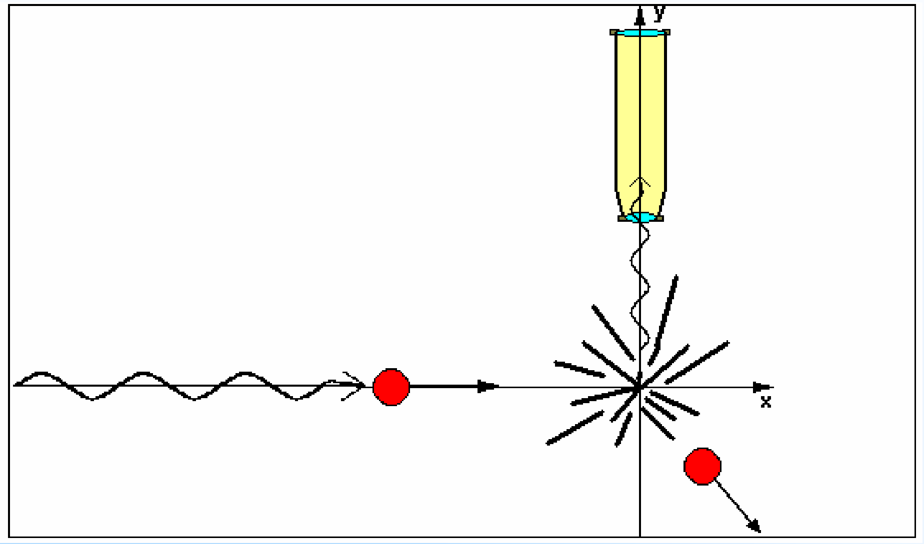


De de Broglie:

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{2\pi}{k} \Longrightarrow k = \frac{2\pi}{h} p \Longrightarrow \Delta k = \frac{2\pi}{h} \Delta p = \Delta p/\hbar$$

Como $\Delta k \Delta x = 1 \Rightarrow (\Delta p/\hbar)\Delta x = 1$

Princípio da indeterminação

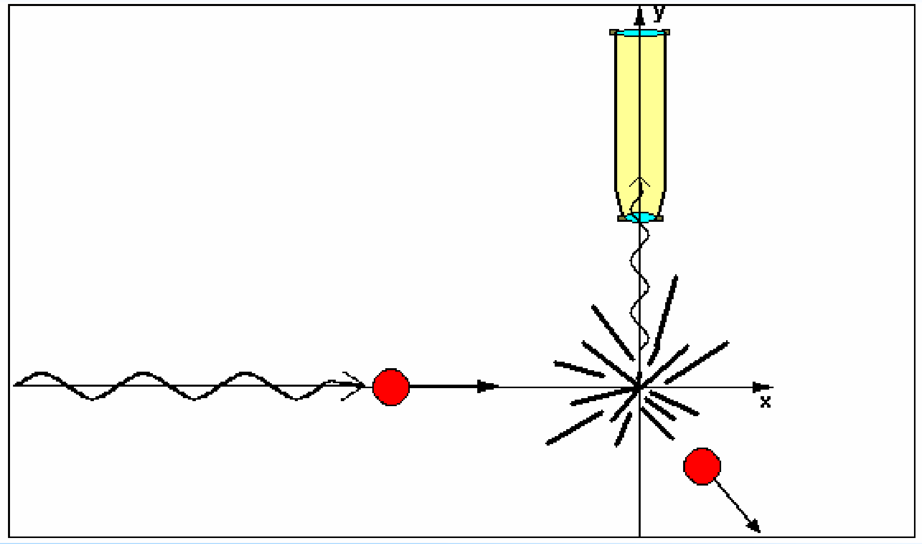


De de Broglie:

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{2\pi}{k} \Longrightarrow k = \frac{2\pi}{h} p \Longrightarrow \Delta k = \frac{2\pi}{h} \Delta p = \Delta p/\hbar$$

Como $\Delta k \Delta x = 1 \Rightarrow (\Delta p/\hbar)\Delta x = 1 \Rightarrow \Delta p \Delta x = \dfrac{h}{2\pi}$

Princípio da indeterminação

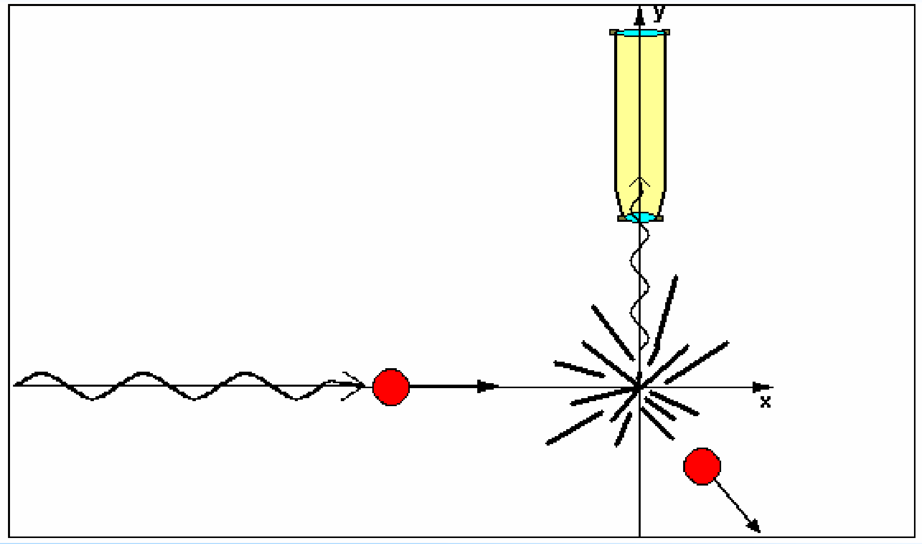


De de Broglie:

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{2\pi}{k} \Longrightarrow k = \frac{2\pi}{h} p \Longrightarrow \Delta k = \frac{2\pi}{h} \Delta p = \Delta p / \hbar$$

Como $\Delta k \Delta x = 1 \Rightarrow (\Delta p/\hbar)\Delta x = 1 \Rightarrow \Delta p \Delta x = \dfrac{h}{2\pi} \Rightarrow \Delta p \Delta x \approx \hbar$

Princípio da indeterminação



De de Broglie:

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{2\pi}{k} \Longrightarrow k = \frac{2\pi}{h} p \Longrightarrow \Delta k = \frac{2\pi}{h} \Delta p = \Delta p / \hbar$$

Como $\Delta k \Delta x = 1 \Rightarrow (\Delta p/\hbar)\Delta x = 1 \Rightarrow \Delta p \Delta x = \dfrac{h}{2\pi} \Rightarrow \boxed{\Delta p \Delta x \approx \hbar}$