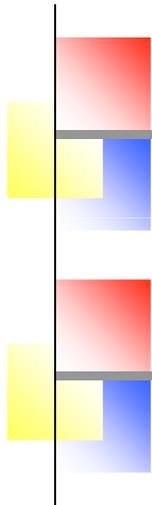




Universidade Federal Fluminense
Instituto de Física
Física IV

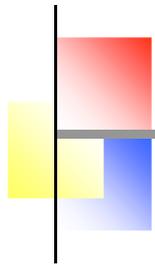


Funções de Onda e Incerteza

Daniel

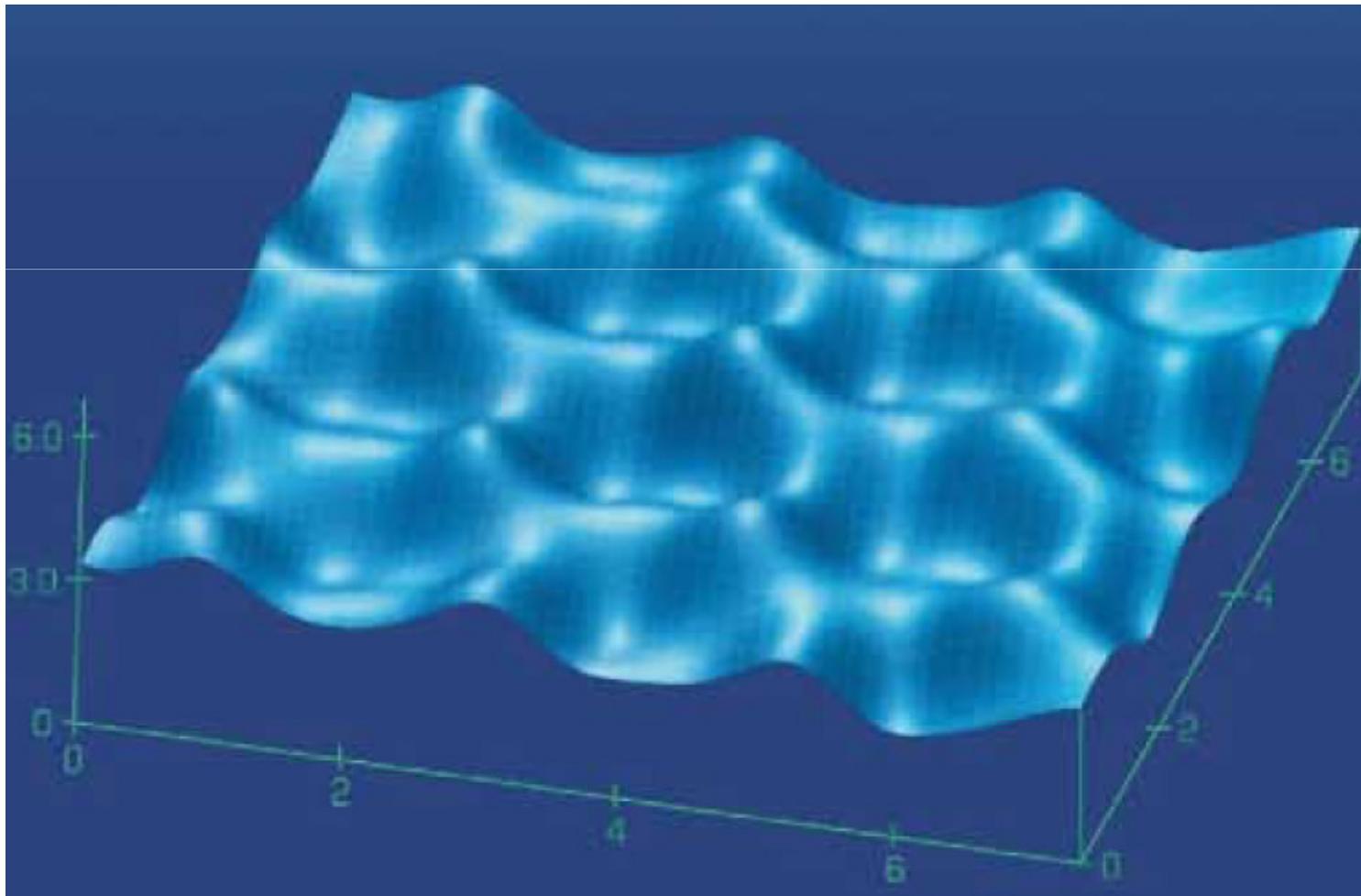
Niterói, 10 de Setembro de 2014

Do que se trata esta imagem?

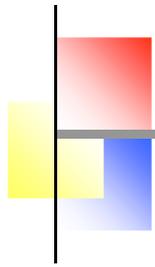


Mar?

Estrutura atômica?



Do que se trata esta imagem?



Estrutura do grafeno: uma “folha” de carbono com espessura atômica.

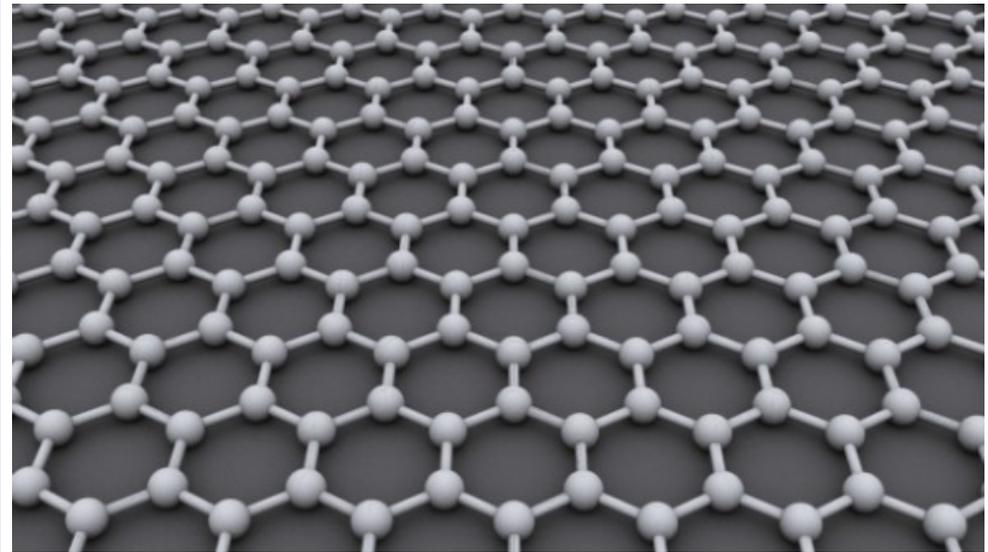
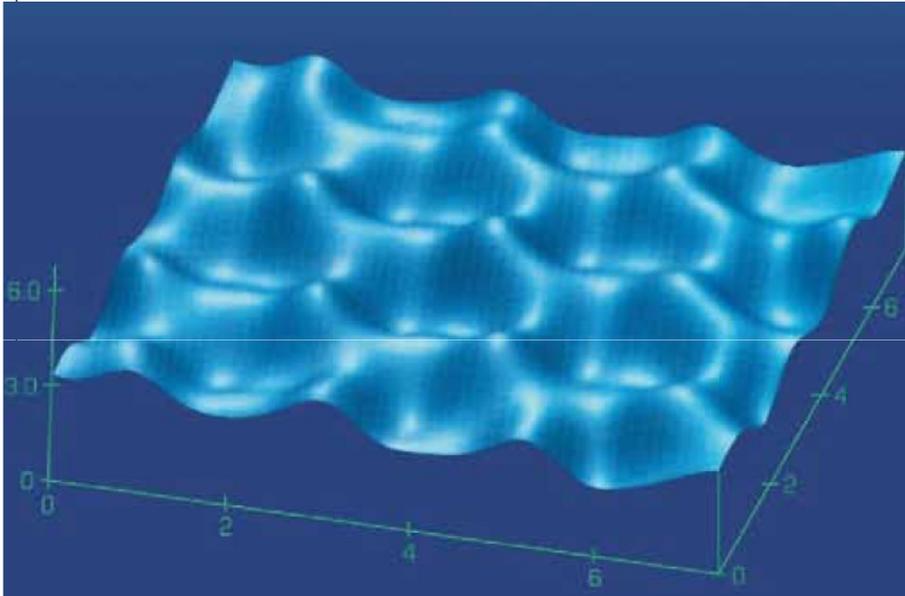


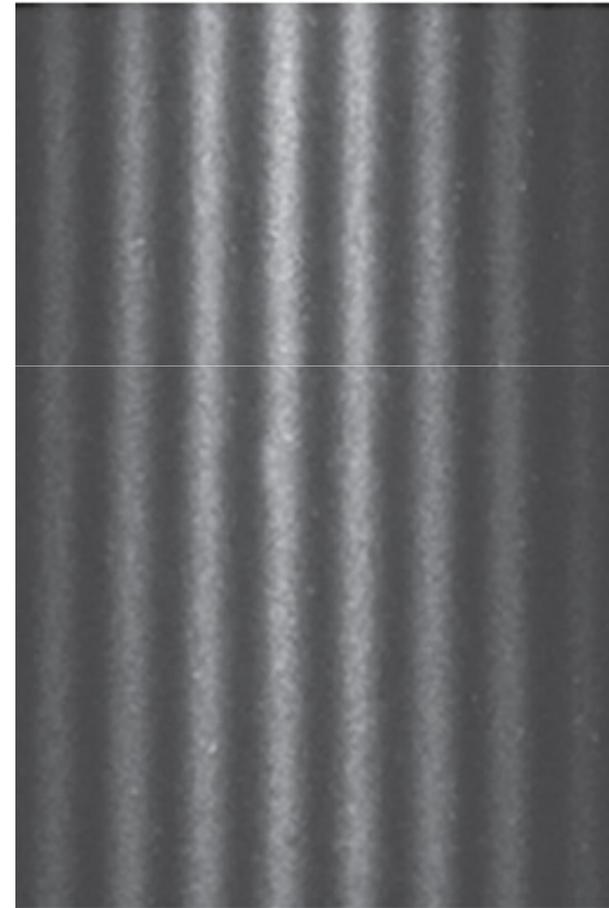
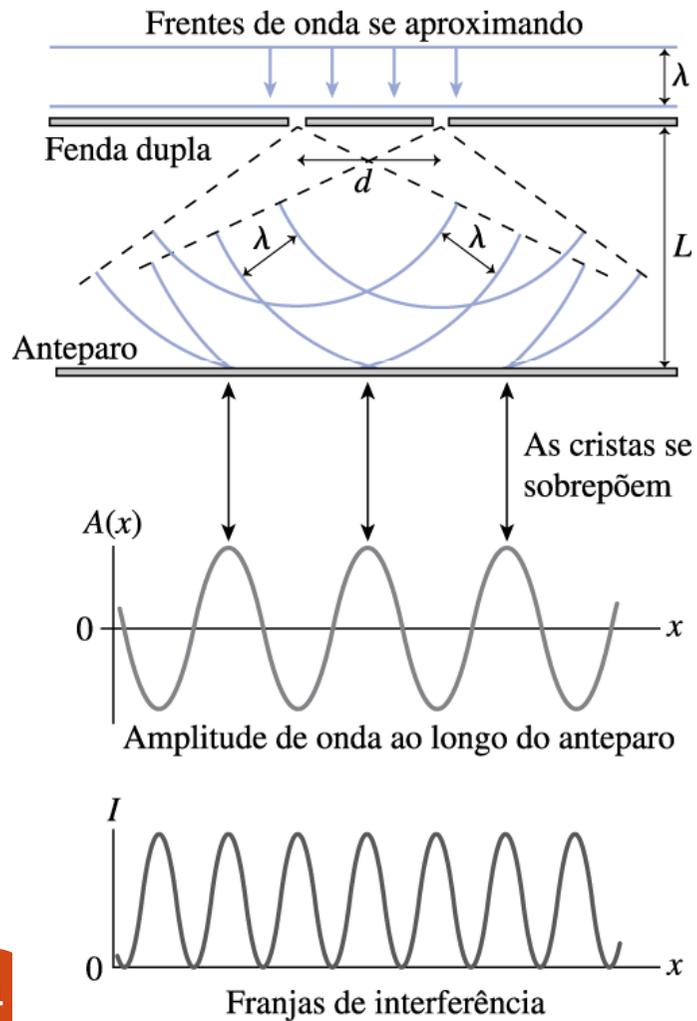
Imagem obtida com um microscópio de tunelamento: scanning tunneling microscope (STM); microscópio de tunelamento eletrônico

Desenho esquemático da disposição dos átomos de carbono.

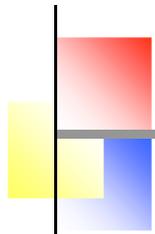
A invenção STM valeu ao alemão Gerd Binnig e ao suíço Heinrich Rohrer, o Prêmio Nobel de Física de 1986.

Interferência

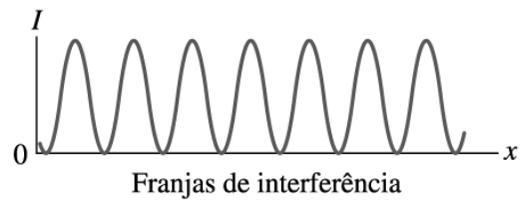
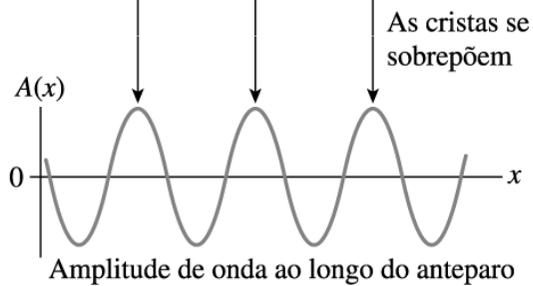
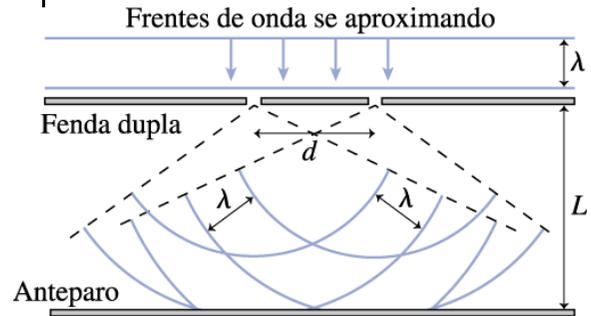
Interferência da fenda dupla



Interferência (perspectiva fótons)

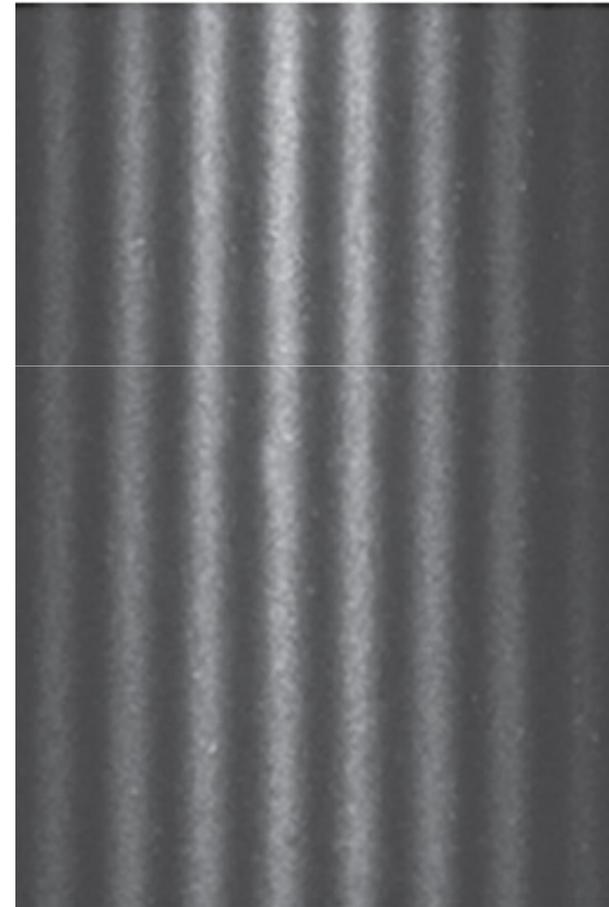


Interferência da fenda dupla

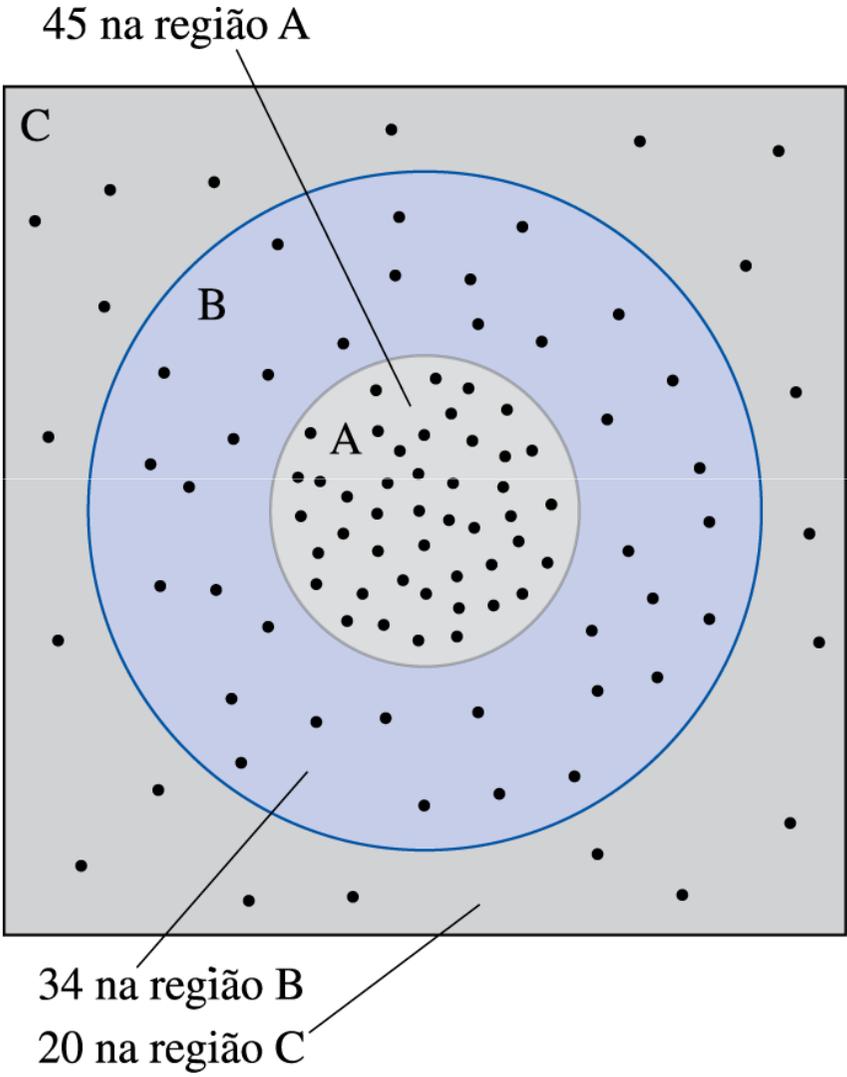
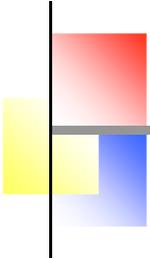


Posições de chegada dos fótons

➔ **Fótons**

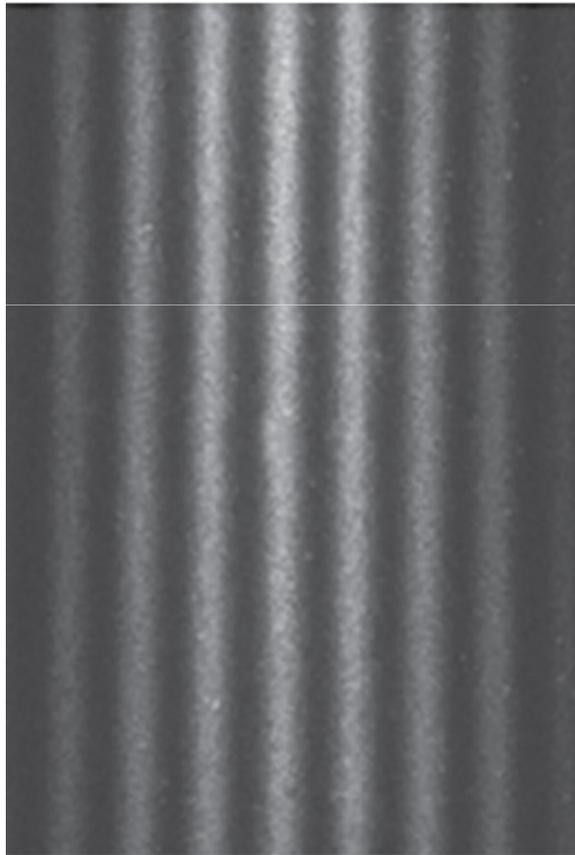


Probabilidade

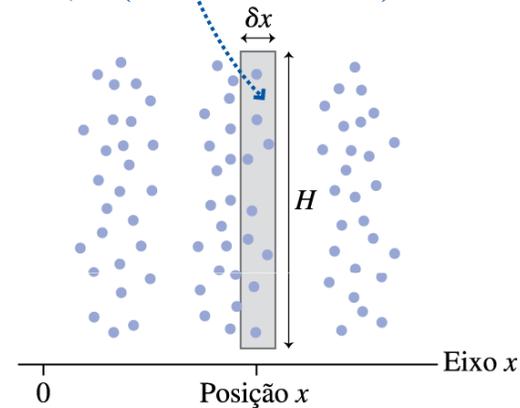


Interferência

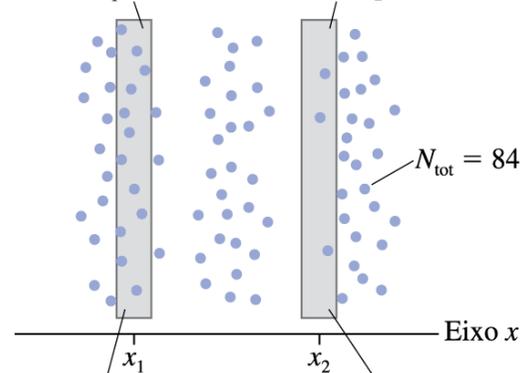
Uma análise sob o ponto de vista de fótons



- (a) O número de fótons nesta faixa estreita, quando ela está na posição x , é N (com δx centrado em x).



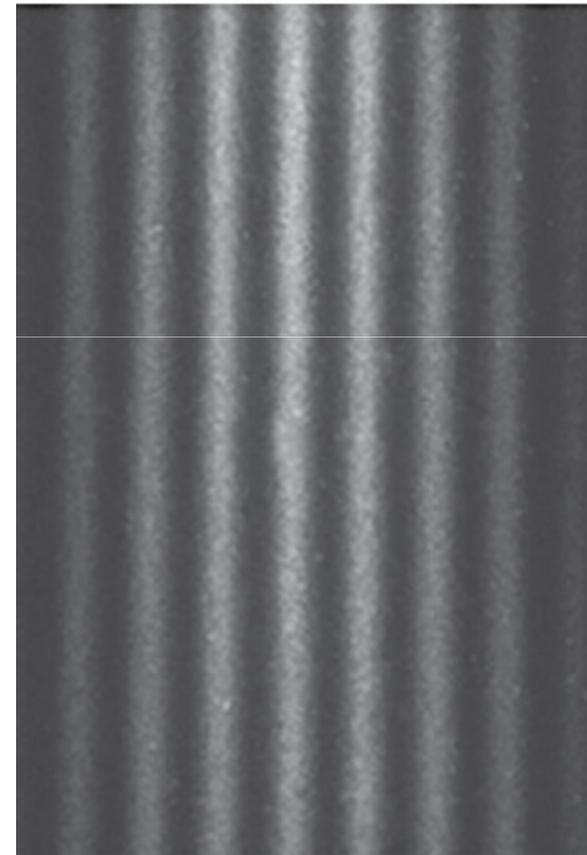
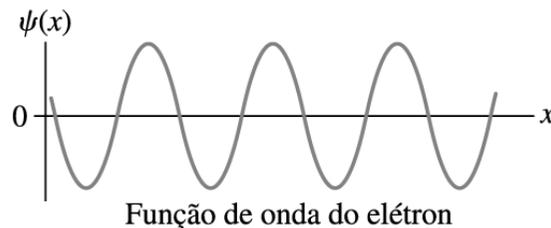
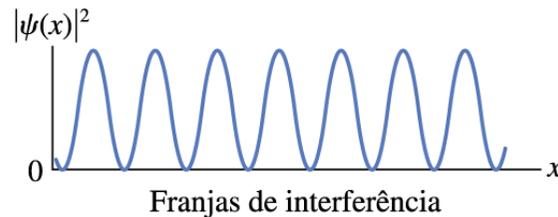
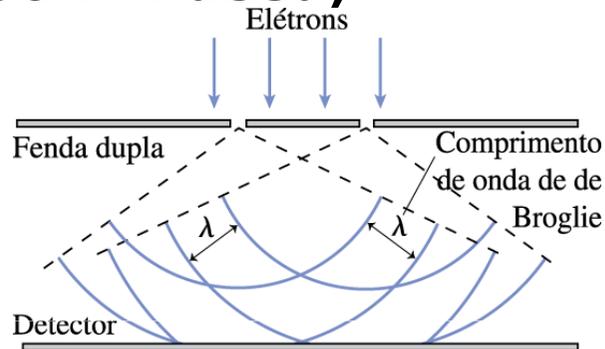
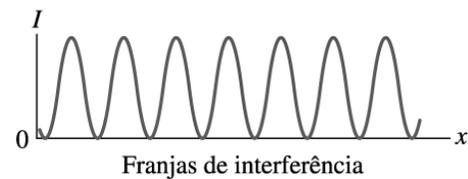
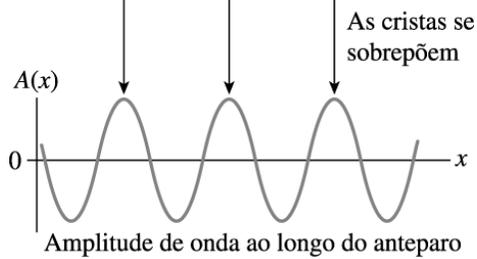
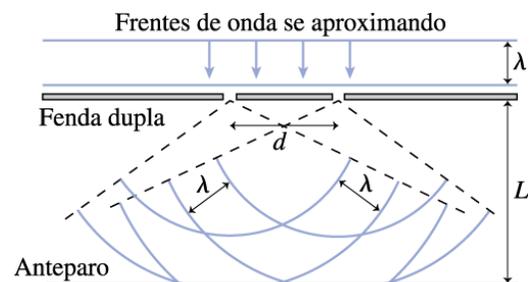
- (b) N (com δx centrado em x_1) = 12 N (com δx centrado em x_2) = 3



Prob (com δx centrado em x_1) $\approx 12/84$	Prob (com δx centrado em x_2) $\approx 3/84$
$= 4/28$	$= 1/28$

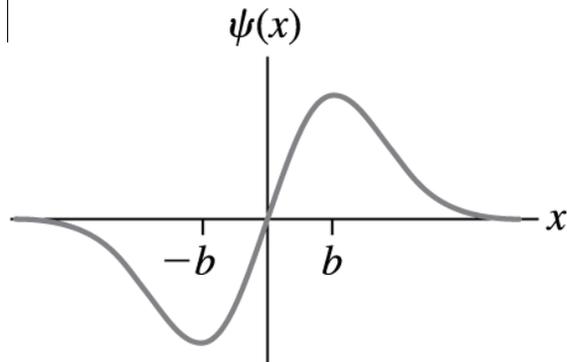
Interferência

Uma análise sob o ponto de vista de elétrons (partículas com massa)



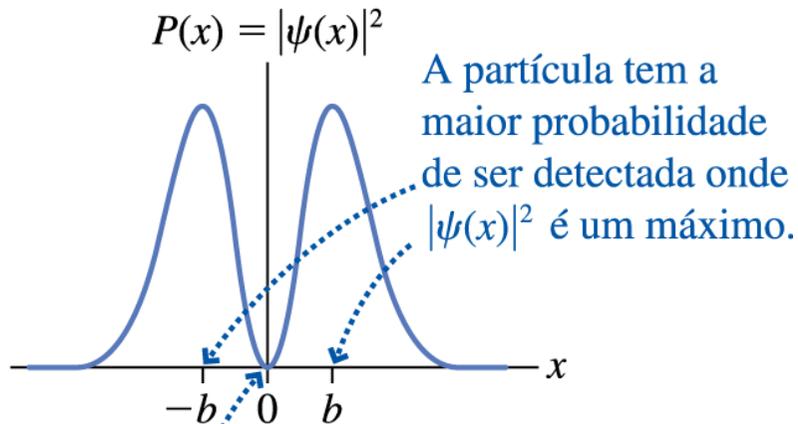
Função de onda de um elétron

(a) Função de onda



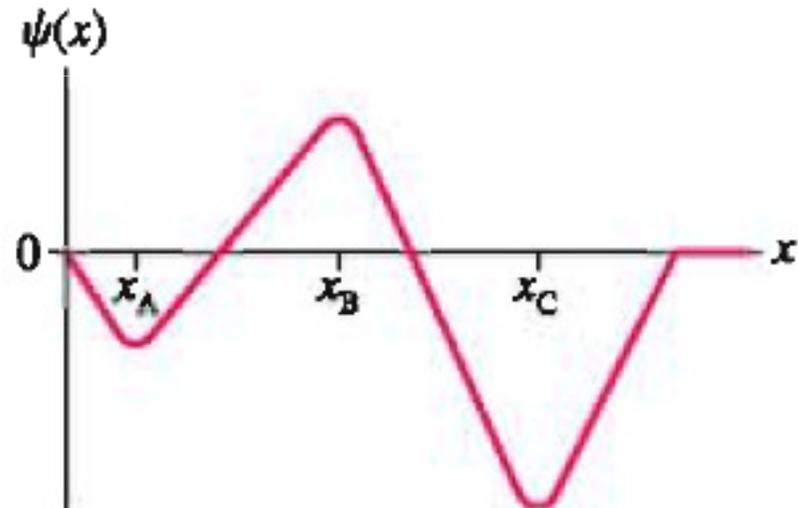
Esta é a função de onda de um nêutron. Em que valor de x há maior probabilidade de encontrarmos o nêutron?

(b) Densidade de probabilidade

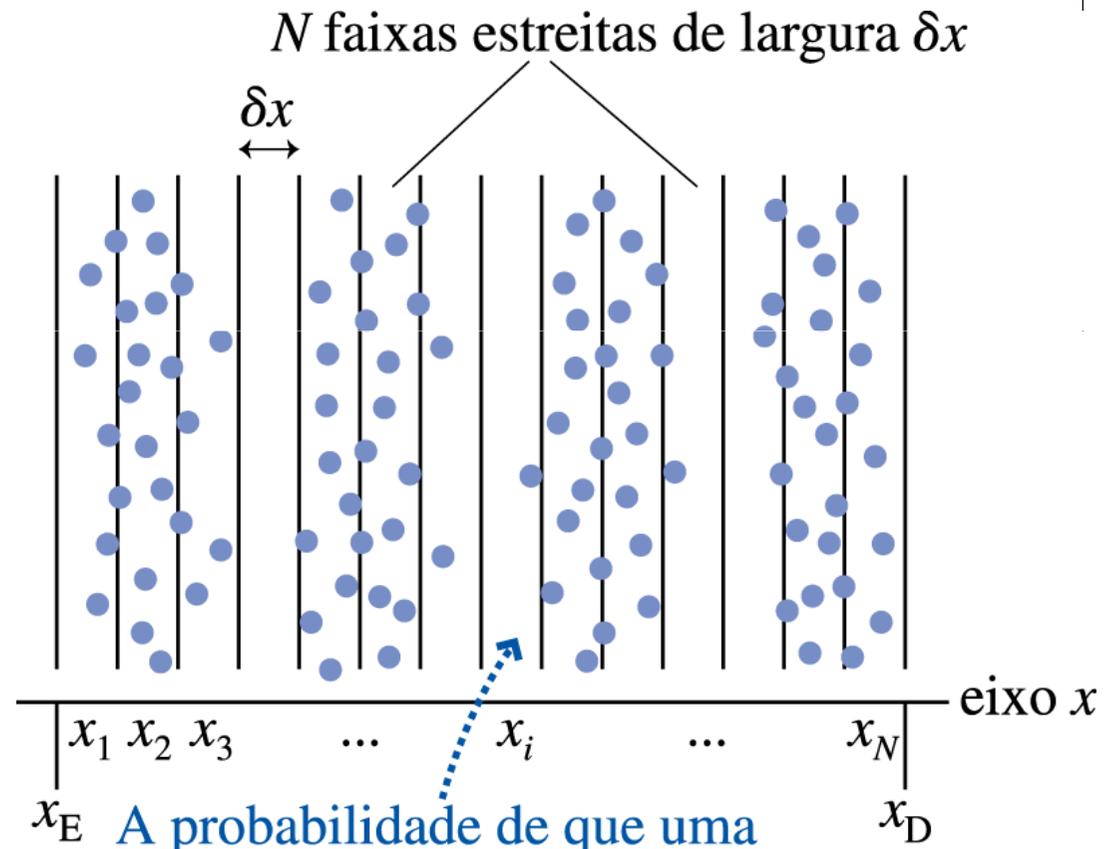
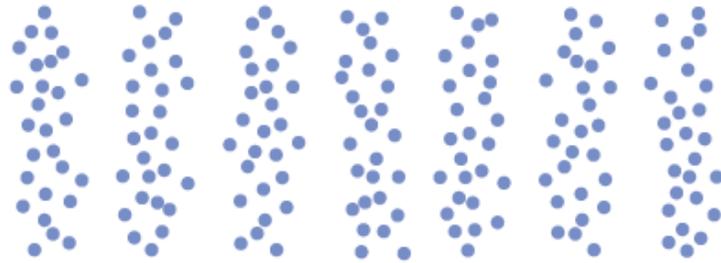
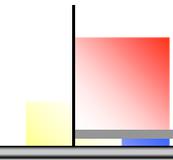


A partícula tem a maior probabilidade de ser detectada onde $|\psi(x)|^2$ é um máximo.

A partícula tem probabilidade nula de ser detectada onde $|\psi(x)|^2 = 0$.

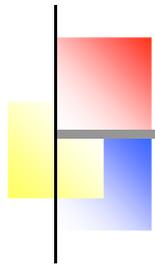


Normalização



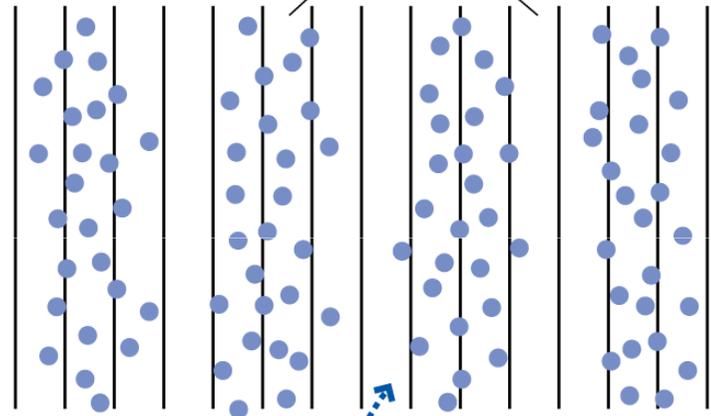
A probabilidade de que uma partícula incida na faixa i é
 $\text{Prob}(\text{com } \delta x \text{ centrado em } x_i) = P(x_i) \delta x.$

Normalização



N faixas estreitas de largura δx

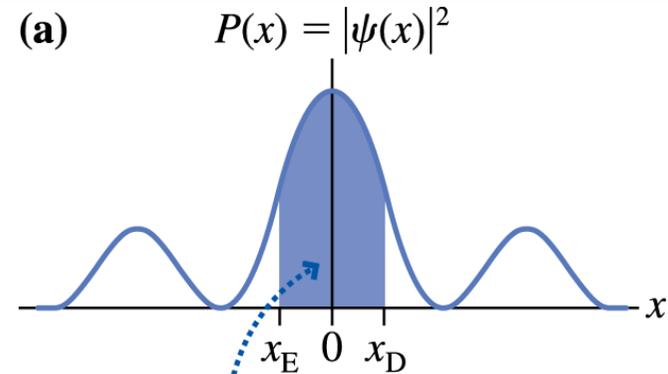
δx



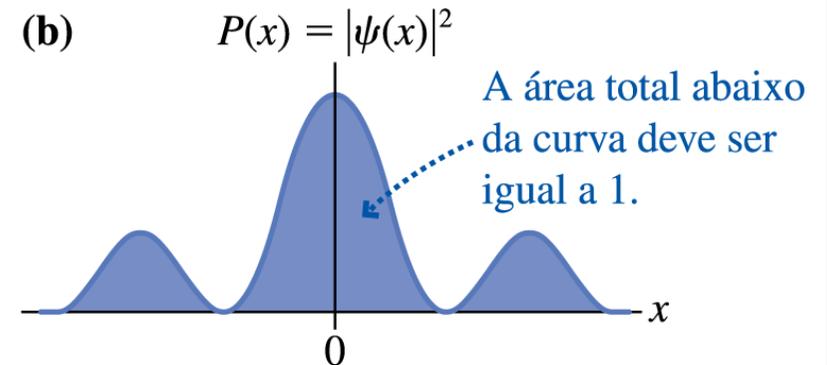
eixo x

x_1 x_2 x_3 ... x_i ... x_N
 x_E x_D

A probabilidade de que uma partícula incida na faixa i é
 $\text{Prob}(\text{com } \delta x \text{ centrado em } x_i) = P(x_i) \delta x.$



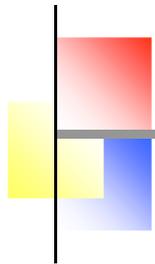
A área abaixo da curva entre x_E e x_D é a probabilidade de encontrar a partícula entre x_E e x_D .



A área total abaixo da curva deve ser igual a 1.

Em todo intervalo de x : $-\infty$ até $+\infty$

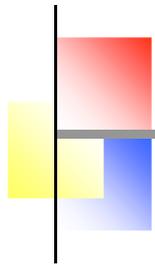
Exercício de normalização



40.2 - A figura abaixo mostra a função de onda de um partícula confinada em uma região delimitado por $x = 0$ e $x = L = 1,0$ nm. Fora dessa região, a função de onda é nula.

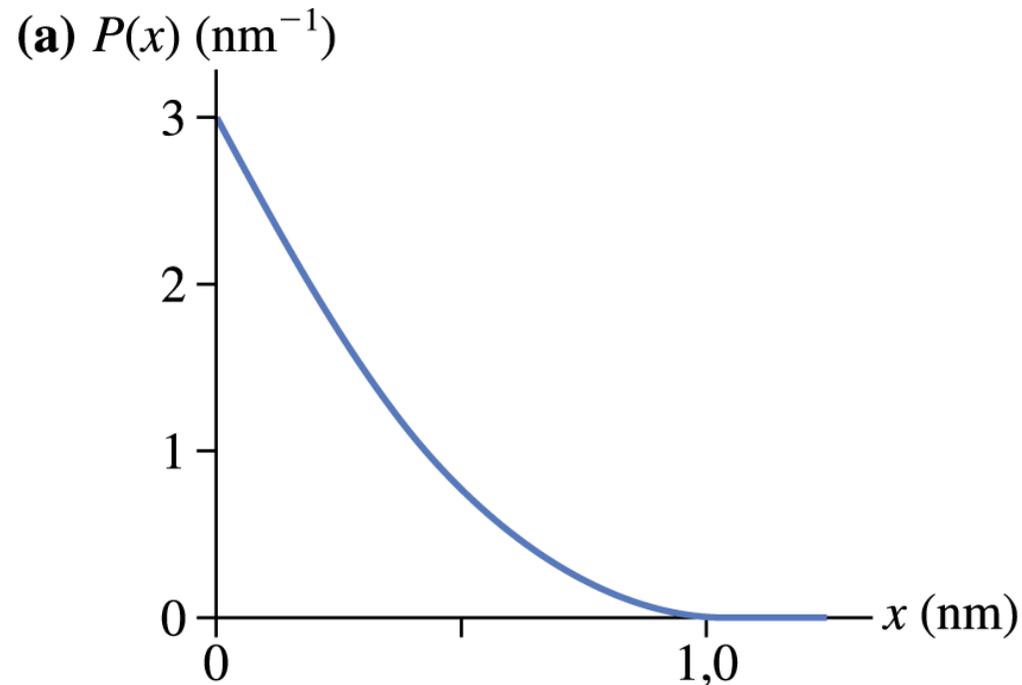
- Determine o valor de c .
- Desenhe o gráfico da densidade de probabilidade $P(x)$.
- Trace uma figura com pontos que indique onde as primeiras 40 ou 50 partículas podem se encontradas.
- Calcule a probabilidade de encontrar a partícula em uma região com largura $\delta x = 0,01$ nm centrada nas posições $x_1 = 0,05$ nm, $x_2 = 0,5$ nm e $x_3 = 0,95$ nm.

Normalização

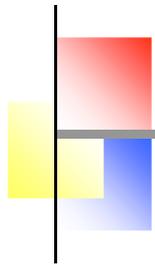


A figura abaixo mostra a função de onda de um partícula confinada em uma região delimitado por $x = 0$ e $x = L = 1,0$ nm. Fora dessa região, a função de onda é nula.

- Determine o valor de c .
- Desenhe o gráfico da densidade de probabilidade $P(x)$.

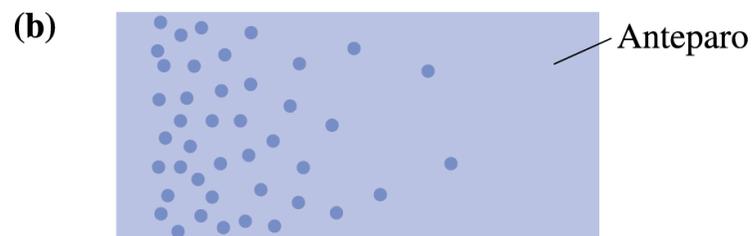
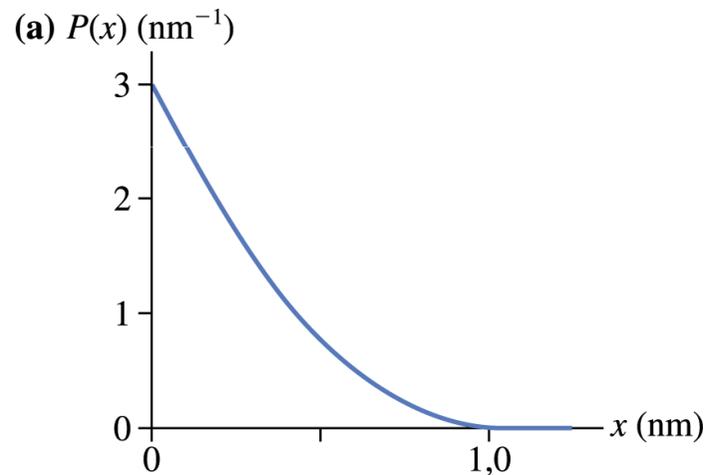


Normalização

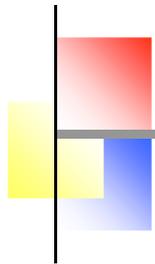


A figura abaixo mostra a função de onda de um partícula confinada em uma região delimitado por $x = 0$ e $x = L = 1,0$ nm. Fora dessa região, a função de onda é nula.

c) Trace uma figura com pontos que indique onde as primeiras 40 ou 50 partículas podem se encontradas.



Exercício de normalização



40.3 – Uma determinada partícula é descrita pela função de onda

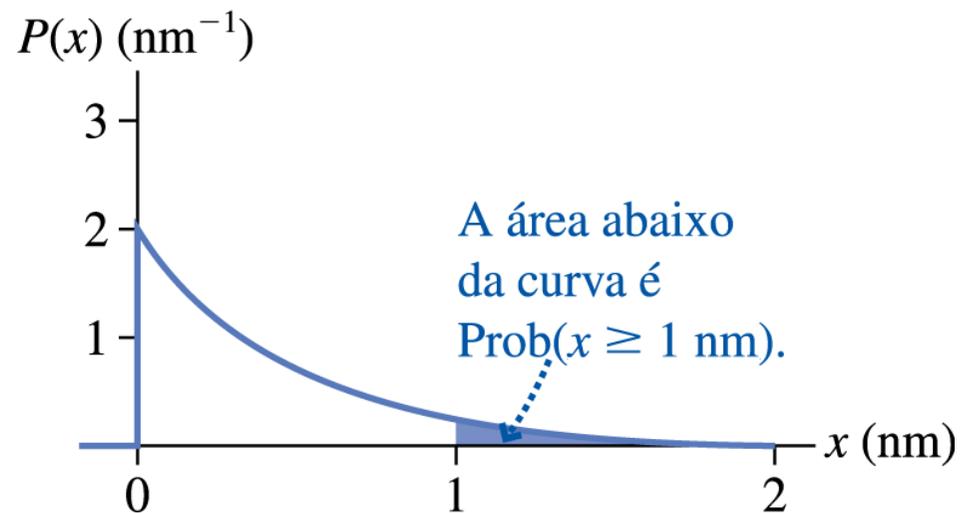
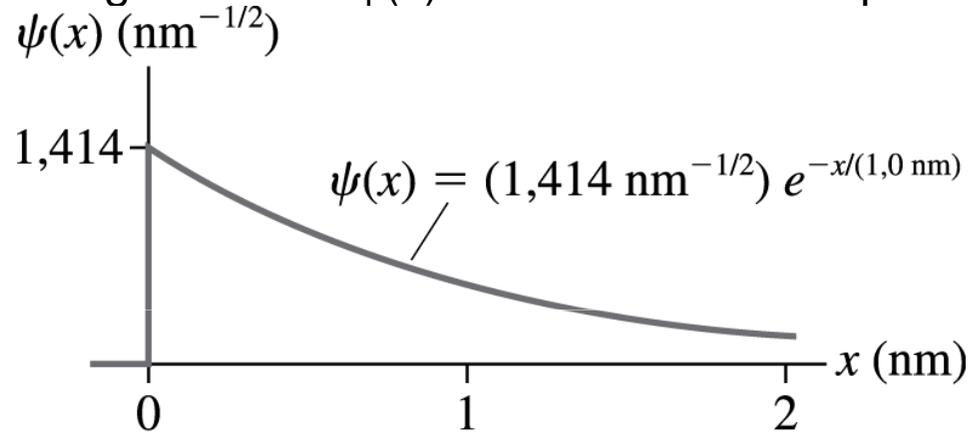
$$\psi(x) = \begin{cases} 0 & x < 0 \\ ce^{-x/L} & x \geq 0 \end{cases} \quad \text{onde } L = 1 \text{ nm.}$$

- Determine o valor de c .
- Desenhe os gráficos de $\psi(x)$ e da densidade de probabilidade $P(x)$.
- Calcule a probabilidade de encontrar um partícula na região $x \geq 1 \text{ nm}$

Exercício de normalização

40.3 – Uma determinada partícula é descrita pela função de onda

b) Desenhe os gráficos de $\psi(x)$ e da densidade de probabilidade $P(x)$.



Princípio da incerteza de Heisenberg

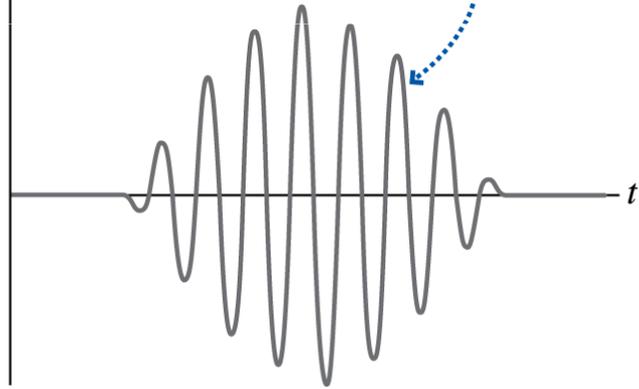
$$\Delta x \Delta p_x \geq h/2$$

Princípio da incerteza

Um pacote de onda pode representar tanto uma partícula material (função de onda ψ) quanto um fóton (campo eletromagnético E).

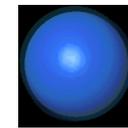
ψ ou E

O pacote de onda oscila, o que é uma característica das ondas.

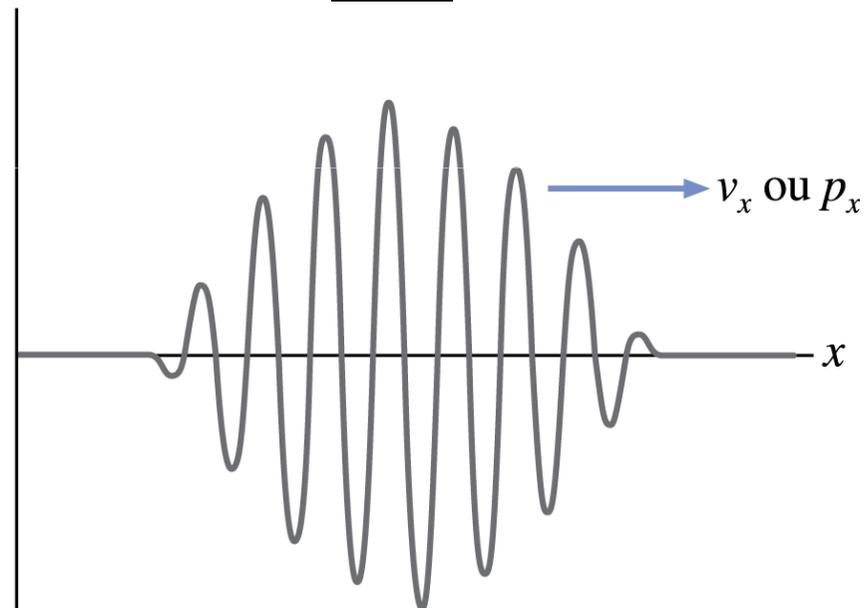


Duração do pacote de onda Δt

O pacote de onda é localizado, o que é uma característica das partículas.



$\psi(x)$



Pacote de ondas de largura Δx

Princípio da incerteza de Heisenberg

Incerteza de uma partícula de poeira:

Ex. 40.5 - Uma partícula de poeira com $1,0 \mu\text{m}$ de diâmetro ($m = 10^{-15} \text{ kg}$) está confinada em uma caixa de $10 \mu\text{m}$ de comprimento. Podemos afirmar, com certeza, que a partícula encontra-se em repouso? Em caso negativo, em que faixa de valores é mais provável que meçamos a velocidade da partícula?

Considerando a incerteza na posição como a largura da caixa: $\Delta x = L \text{ m}$, a incerteza na velocidade (momento) $\Delta v_x = 3 \times 10^{-14} \text{ m/s}$.

Para percorrer 1 mm levaria 2000 anos. Ainda assim, não podemos ter certeza se a partícula está “realmente” em repouso.

Princípio da incerteza de Heisenberg

A incerteza de um elétron

Ex. 40.6 – Que faixa de velocidades pode ter um elétron confinado em uma região de 0,1 nm de comprimento, o tamanho aproximado de um átomo?

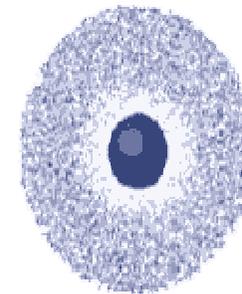
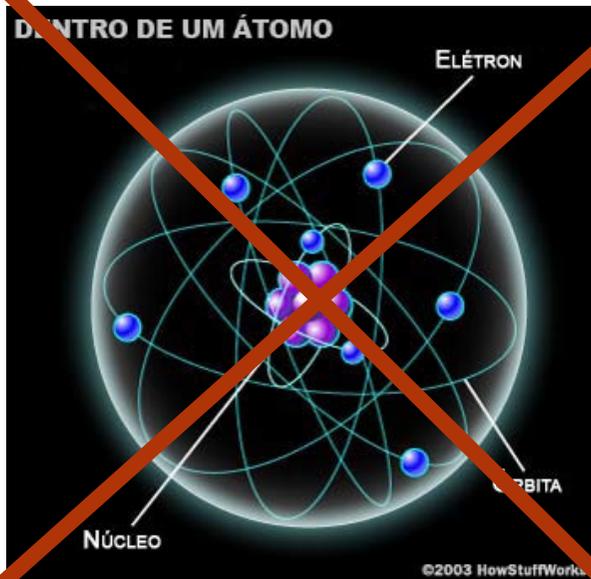
Considerando a incerteza na posição como: $\Delta x = 0,1 \text{ nm}$, a incerteza na velocidade (momento) $\Delta v_x = 4 \times 10^6 \text{ m/s}$, ou seja, tudo que podemos dizer é que a velocidade do elétron está na faixa de valores $- 2 \times 10^6 \text{ m/s}$ e $2 \times 10^6 \text{ m/s}$. É impossível conhecer a velocidade desse elétron com maior precisão do que isso.

Percebam que é uma incerteza de $\sim 100 \%$ na velocidade e na posição

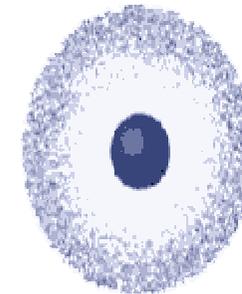
Princípio da incerteza de Heisenberg

Orbitais

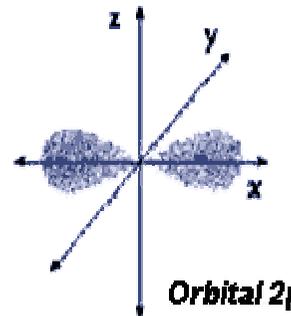
Orbitais atômicos, lugar com probabilidade de encontrar os elétrons



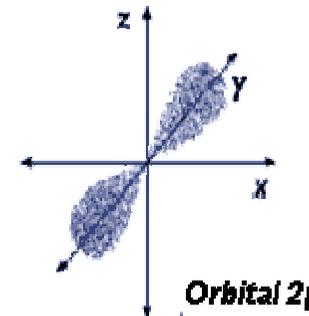
Orbital 1s



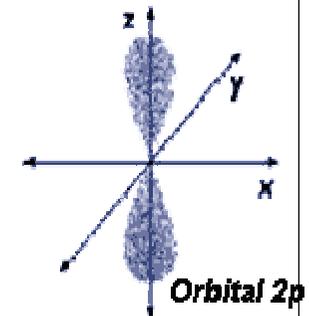
Orbital 2s



Orbital 2p



Orbital 2p

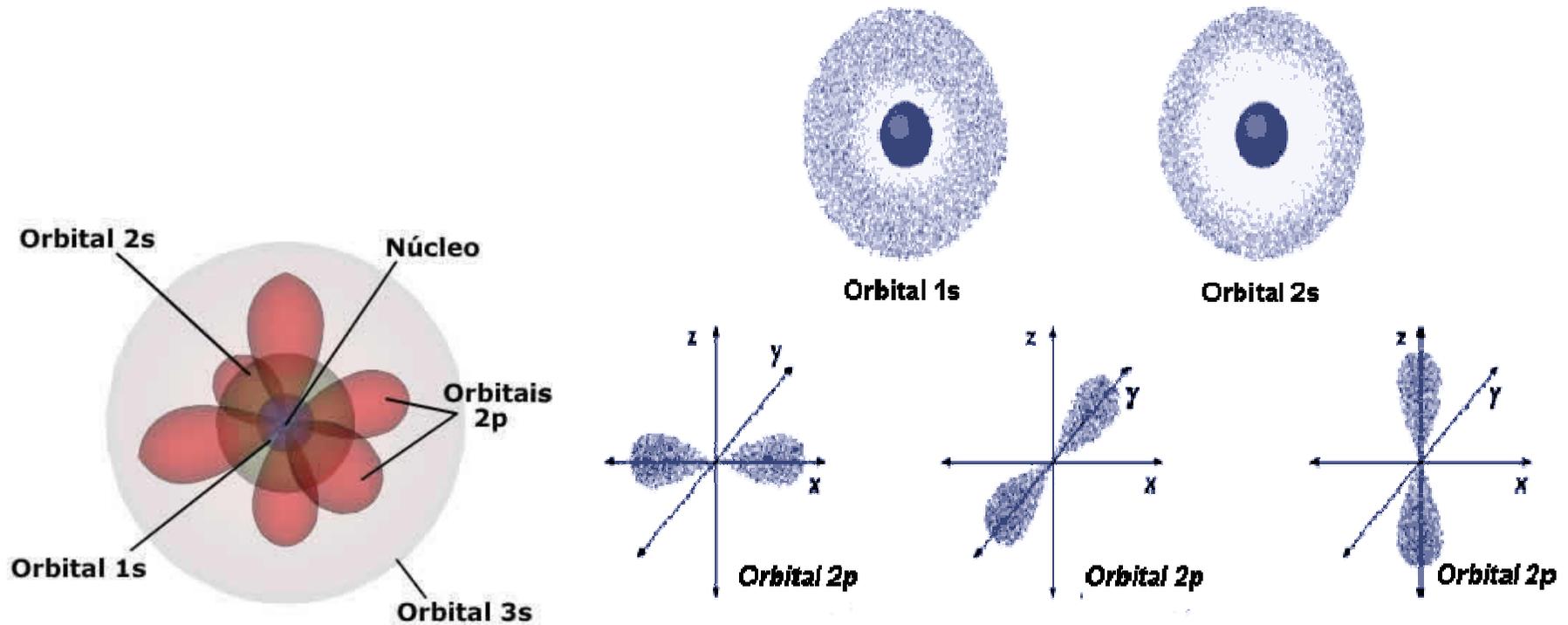


Orbital 2p

Princípio da incerteza de Heisenberg

Orbitais

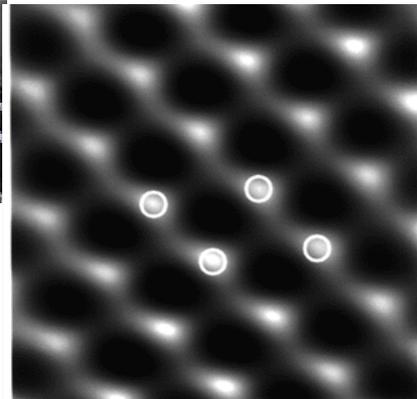
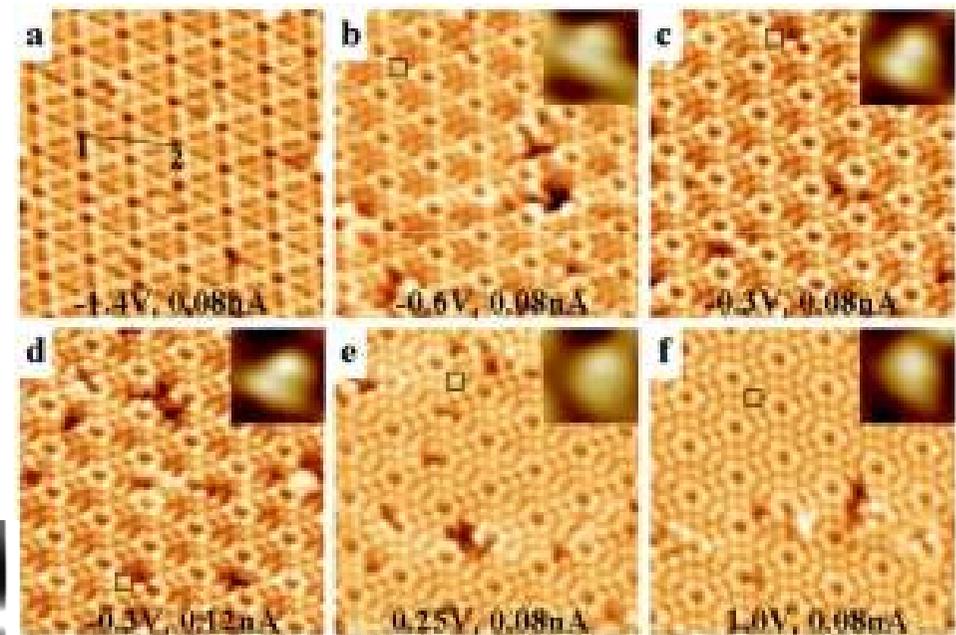
Orbitais atômicos, lugar com probabilidade de encontrar os elétrons



Como “ver” átomos?

Microscópio eletrônico de transmissão (MET)

Microscópio eletrônico de Varredura (MEV)



0 0.5 1nm

Como “ver” átomos?

Microscópio força atômica

