

# Luz e matéria Parte 2

Fundamentos de física para gestão  
ambiental – 2016

Conteúdo - Halliday 8ª ed. Cap.38

# Fótons e ondas de matéria

- O fóton
- O efeito fotoelétrico
- Deslocamento Compton
- A luz como uma onda de probabilidade
- Elétrons e ondas de matéria
- A equação de Schrödinger
- Efeito Túnel
- Microscópio de Tunelamento

**A teoria ondulatória seria universalmente aceita se** ao final do séc. XIX novas experiências não tivessem mostrado algumas de suas falhas...

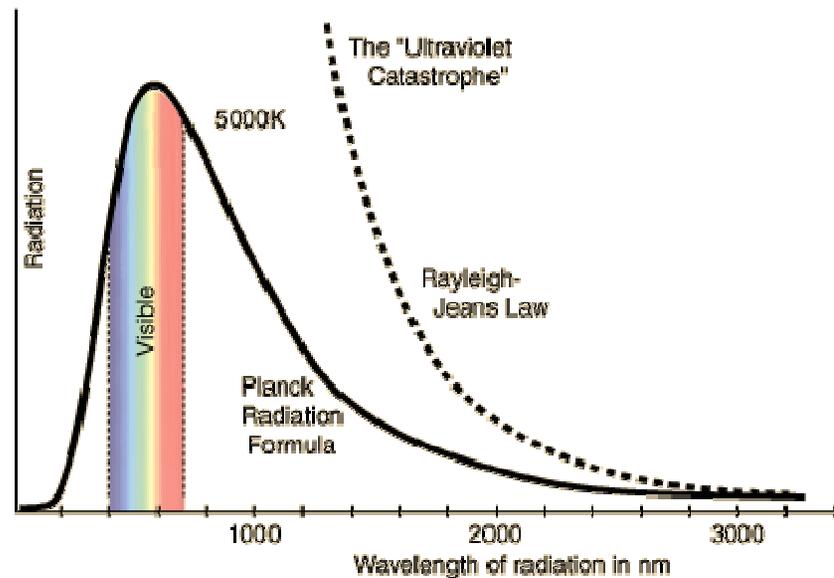
**- Radiação de corpo negro:**

Classicamente: partículas carregadas aceleradas próximas à superfície do corpo que emite ondas de calor

$$\lambda_{\text{peak}} T = 2.898 \times 10^{-3} \text{ m}\cdot\text{K}$$

$$\frac{P}{A} = e\sigma T^4$$

Problemas...



Em 1900, Planck propõe “pequenos osciladores” na superfície do corpo negro, relacionados às cargas de suas moléculas.

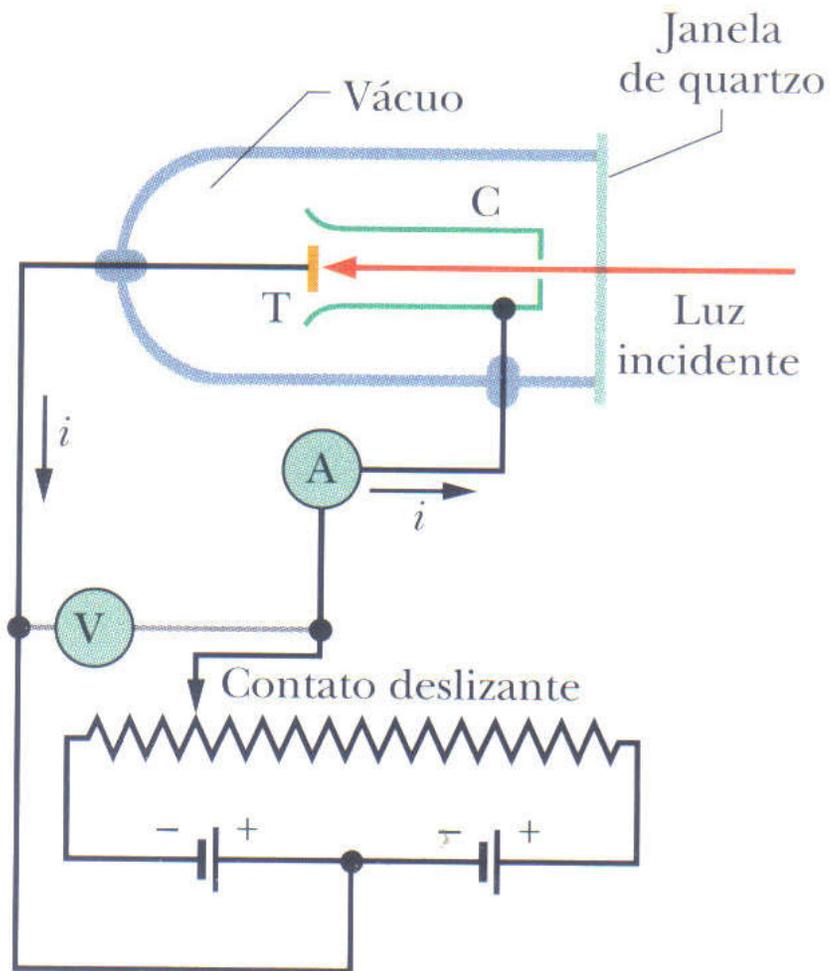
$$E = n h f$$

A energia destes “pequenos osciladores” é quantizada (admite somente certos valores discretos) e eles emitem e absorvem energia nestes valores discretos.

Tão inovadora era a ideia da quantização que até o Planck duvidava!!

**- Efeito fotoelétrico:**

Emissão de elétrons de superfícies metálicas por incidência luminosa.



$$K_{\max} = e V_{\text{corte}}$$

## Classicamente

1. Dependência da energia cinética dos elétrons com a intensidade luminosa: absorção contínua de energia pelos elétrons
2. Tempo entre a incidência da luz e ejeção de elétrons: se a luz for fraca, o material precisa absorver a energia por um tempo até que esta seja suficientemente acumulada para que haja a ejeção
3. Dependência da ejeção de elétrons com a frequência da luz: os elétrons deveriam ser ejetados a qualquer frequência, bastava que a intensidade fosse suficientemente alta para acumular energia
4. Dependência da energia cinética dos elétrons ejetados com a frequência da luz: não havia nenhuma...

## Problemas:

1. Elétrons emitidos imediatamente
2. Aumentar a intensidade luminosa não aumentava a energia cinética dos elétrons emitidos
3. Luz vermelha não causava ejeção nunca
4. Luz violeta fraca causava ejeção de poucos elétrons com energia cinética maior do que os com luz mais intensas mas de comprimentos de onda maiores (frequências menores)

Em 1905: Albert Einstein explica o fenômeno

Ele propôs que a teoria ondulatória era incompleta, e que a luz poderia ter características de partículas também. Demonstrou, matematicamente que um elétron liberado deveria receber uma certa quantidade de energia, que segundo ele seria proveniente de uma partícula radiante (“partícula de luz”), chamando essa energia de fóton ou quantum de energia. Então, quanto maior a frequência da onda (luz) maior seria a energia que ele poderia liberar.

a luz tem dupla natureza, corpuscular e ondulatória (**dualidade onda-partícula**)

se explicam todos os fenômenos ópticos, uns com a teoria ondulatória, outros com a corpuscular

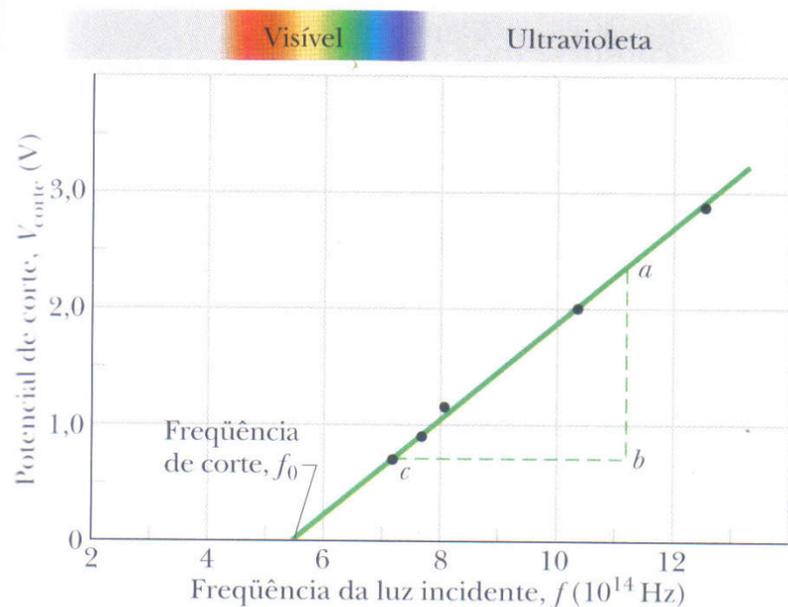
Se o comprimento de onda da luz for  $\lambda$ , seu quantum de energia  $\Delta E$  será definido como:

$$\Delta E = hc/\lambda$$

$h$  é a constante de Planck de valor  $6,626 \times 10^{-34}$  J.s Equação de Planck-Einstein

$c$  é a velocidade da luz no ar ou no vácuo de valor constante  $3 \times 10^8$  m/s.

$$hf = K_{\text{máx}} + \Phi \quad (\text{equação do efeito fotoelétrico})$$

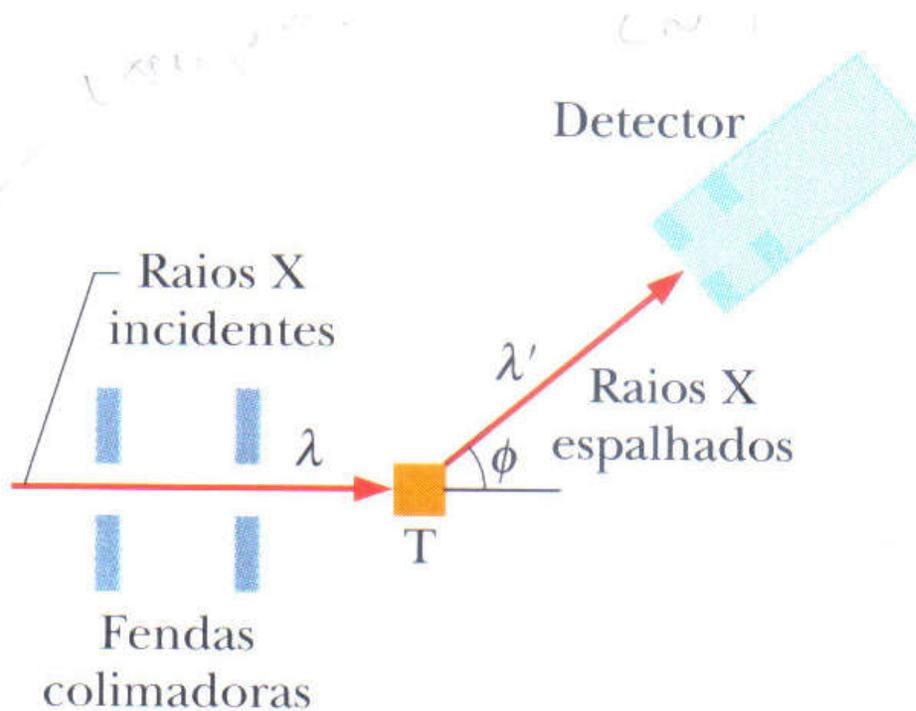


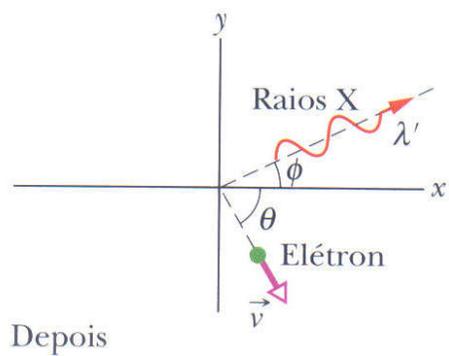
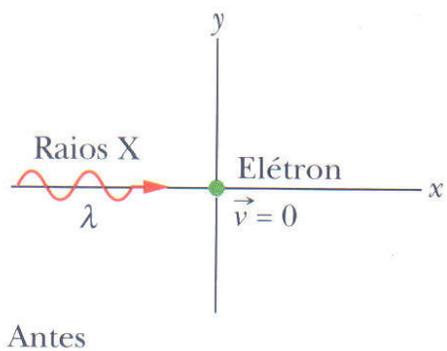
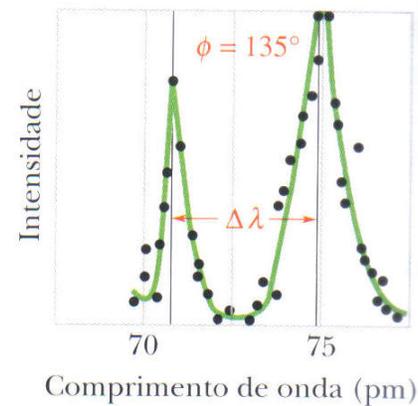
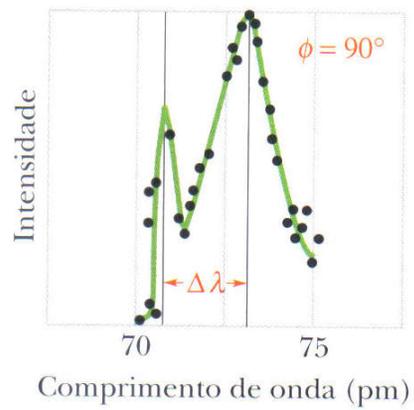
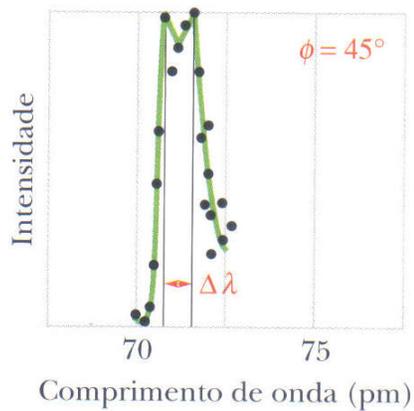
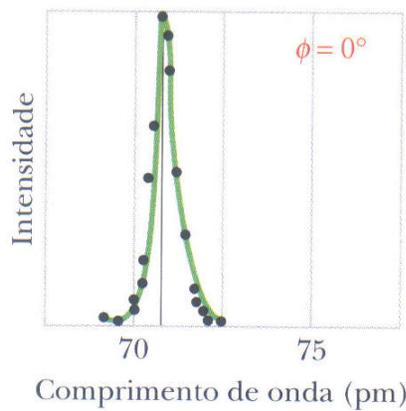
CONSERVAÇÃO DE ENERGIA

# Deslocamento Compton

Os fótons possuem momento

$$p = \frac{hf}{c} = \frac{h}{\lambda} \quad (\text{momento do fóton}).$$





Relacionado com a transferência de momento dos fótons

$$hf = hf' + K$$

$$K = mc^2(\gamma - 1)$$

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - (v/c)^2}}$$

$$hf = hf' + mc^2(\gamma - 1)$$

Conservação da energia

$$f = c/\lambda \text{ e } f' = c/\lambda'$$

$$\frac{h}{\lambda} = \frac{h}{\lambda'} + mc(\gamma - 1).$$

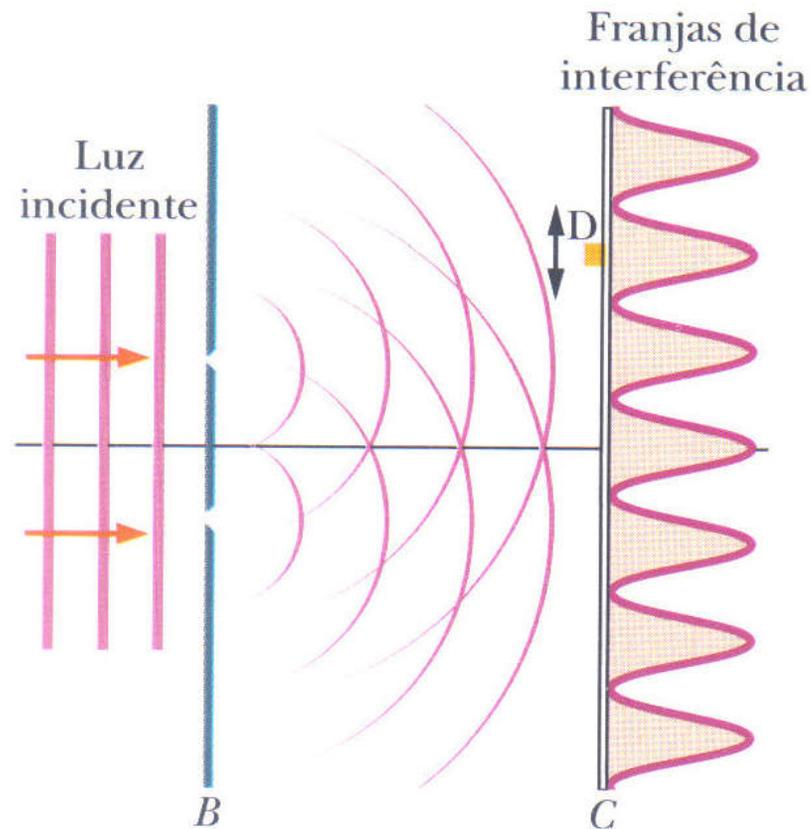
$$\frac{h}{\lambda} = \frac{h}{\lambda'} \cos \phi + \gamma m v \cos \theta \quad (\text{eixo } x)$$

$$0 = \frac{h}{\lambda'} \sin \phi - \gamma m v \sin \theta \quad (\text{eixo } y).$$

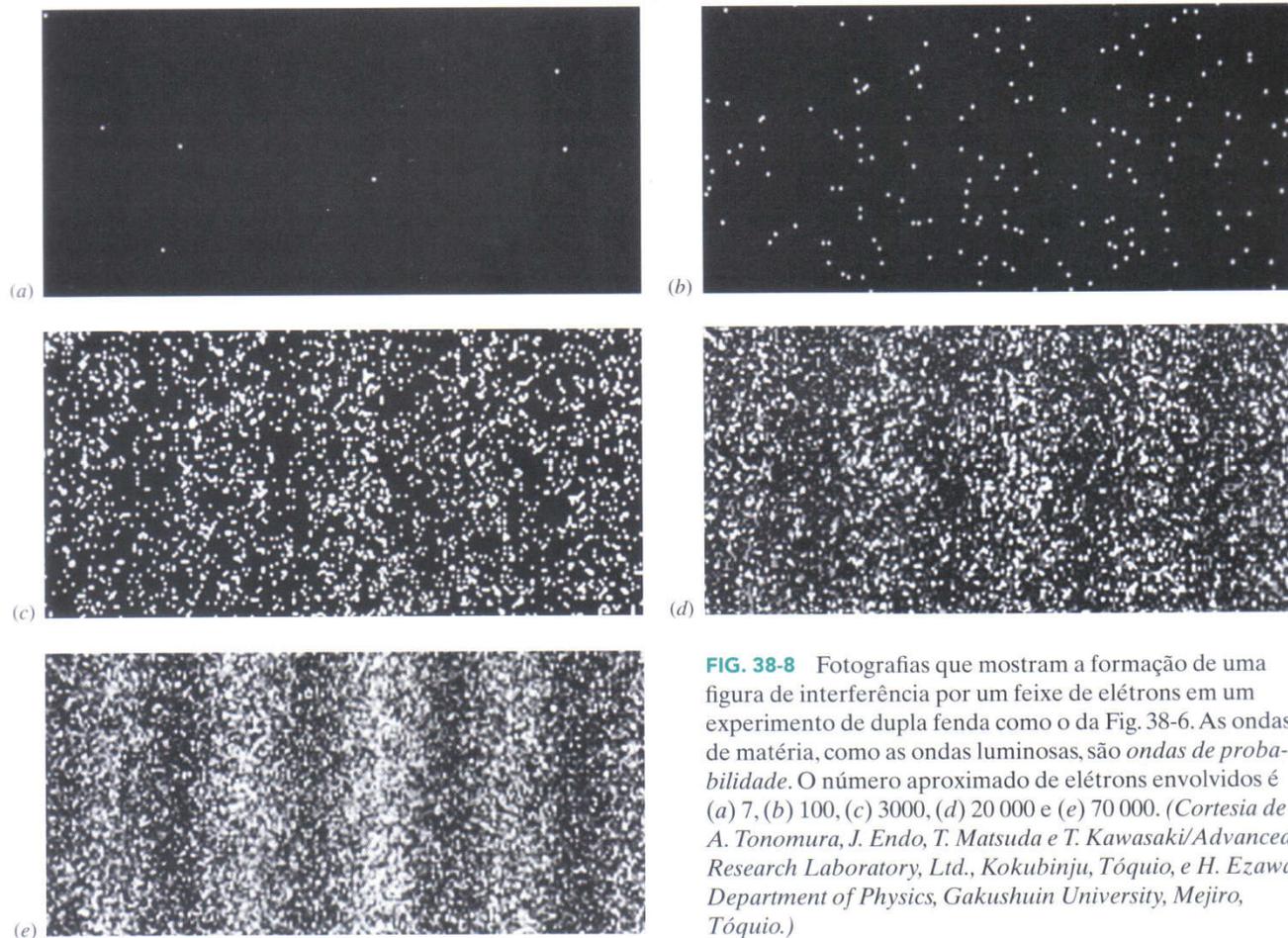
$$\Delta\lambda = \frac{h}{mc} (1 - \cos \phi) \quad (\text{deslocamento de Compton}).$$

# A luz como uma onda de probabilidade

A probabilidade (por unidade de tempo) de que um fóton seja detectado em um pequeno volume com o centro em um dado ponto de uma onda luminosa é proporcional ao quadrado da amplitude do campo elétrico associado à onda no mesmo ponto.



# Elétrons e ondas de matéria



$$\lambda = h/p$$

**FIG. 38-8** Fotografias que mostram a formação de uma figura de interferência por um feixe de elétrons em um experimento de dupla fenda como o da Fig. 38-6. As ondas de matéria, como as ondas luminosas, são *ondas de probabilidade*. O número aproximado de elétrons envolvidos é (a) 7, (b) 100, (c) 3000, (d) 20 000 e (e) 70 000. (Cortesia de A. Tonomura, J. Endo, T. Matsuda e T. Kawasaki/Advanced Research Laboratory, Ltd., Kokubinju, Tóquio, e H. Ezawa, Department of Physics, Gakushuin University, Mejiro, Tóquio.)

# A equação de Schrödinger

$$\Psi(x, y, z, t) = \psi(x, y, z) e^{-i\omega t}$$

As ondas de matéria, além de serem associadas a **E** e **B** (transporte de energia e momento), transporta massa e, as vezes, carga

➤ A probabilidade (por unidade de tempo) de que uma partícula seja detectada em um pequeno volume com centro em um dado ponto é proporcional ao valor de  $|\psi|^2$  nesse ponto.

# Princípio da incerteza de Heisenberg

$\vec{p}$  com precisão absoluta



$$\Delta x \cdot \Delta p_x \geq \hbar$$

$$\Delta y \cdot \Delta p_y \geq \hbar$$

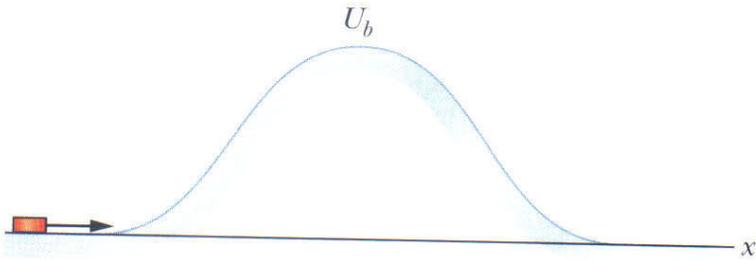
$$\Delta z \cdot \Delta p_z \geq \hbar$$

$$\Delta p_x = \Delta p_y = \Delta p_z = 0$$



$$\Delta x \rightarrow \infty, \Delta y \rightarrow \infty, \Delta z \rightarrow \infty$$

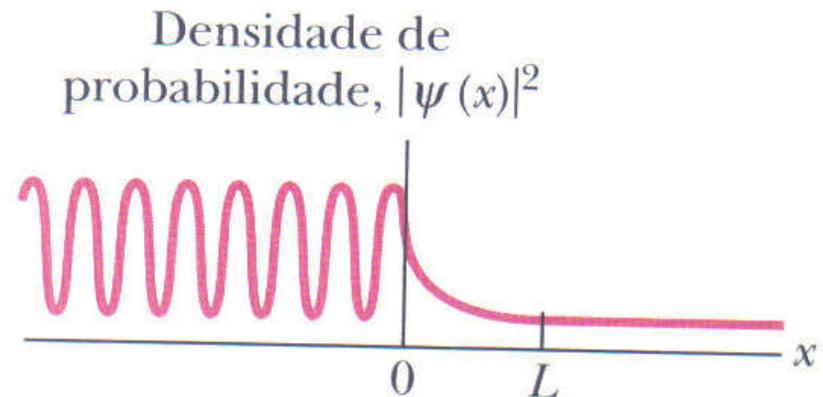
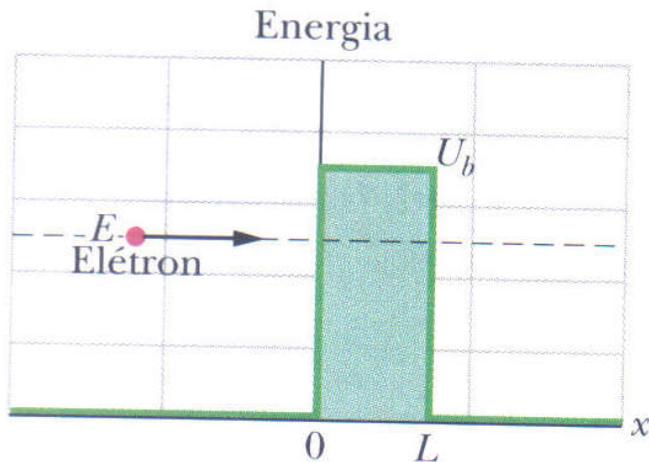
# Efeito Túnel



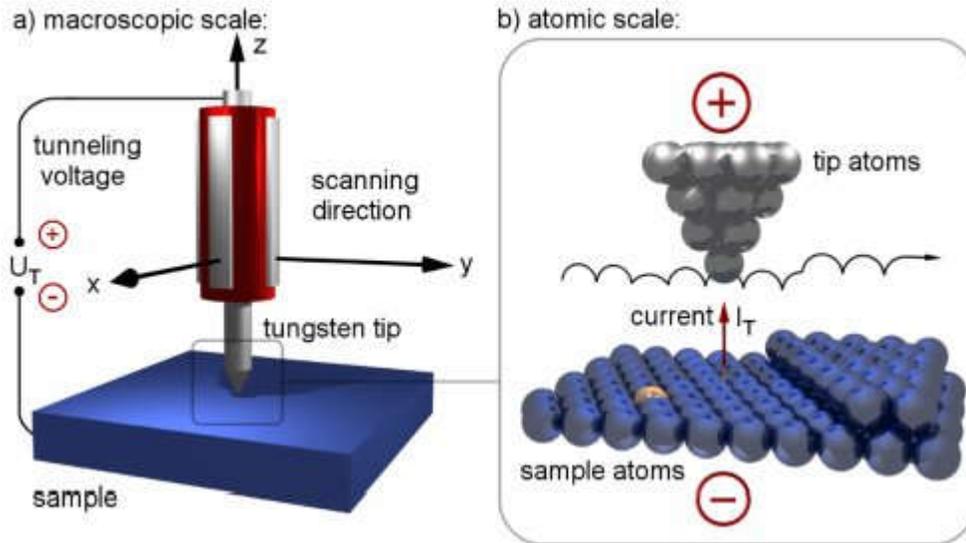
**FIG. 38-13** Um tremó desliza no gelo sem atrito em direção a uma colina. A energia potencial gravitacional do tremó no alto da colina será  $U_b$ .

← clássico

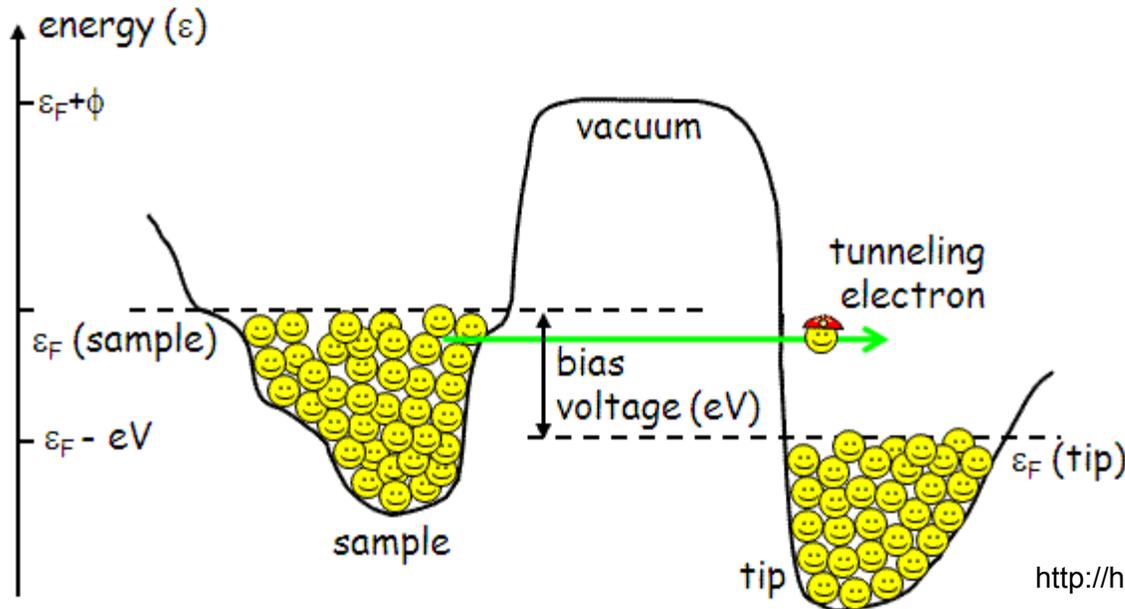
quântico



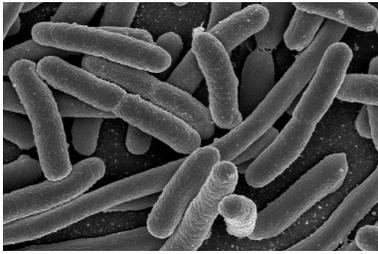
# Microscópio de Tunelamento



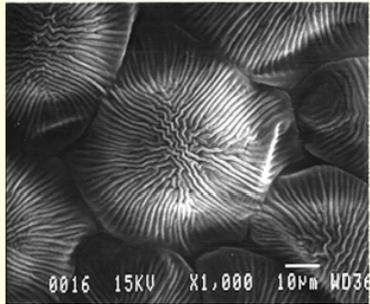
<http://www.ieap.uni-kiel.de/surface/ag-kipp/stm/stm.htm>



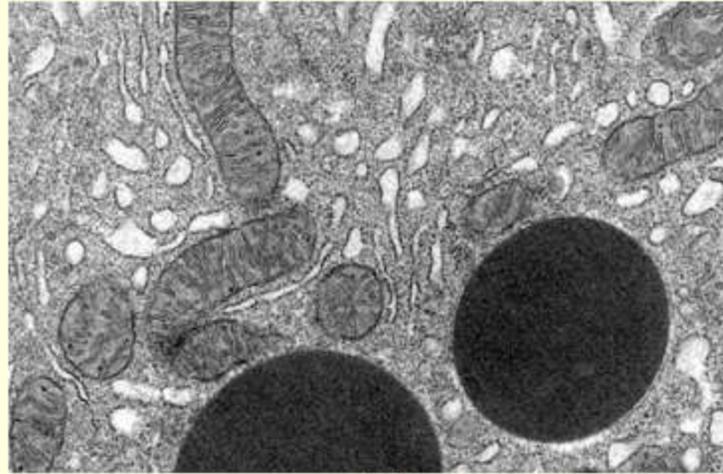
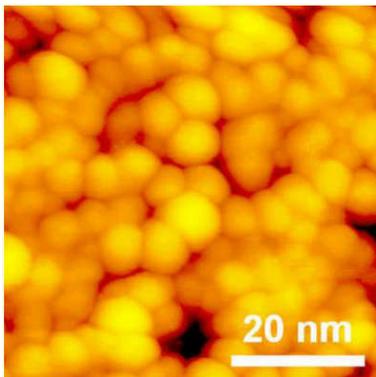
<http://hoffman.physics.harvard.edu/research/STMintro.php>



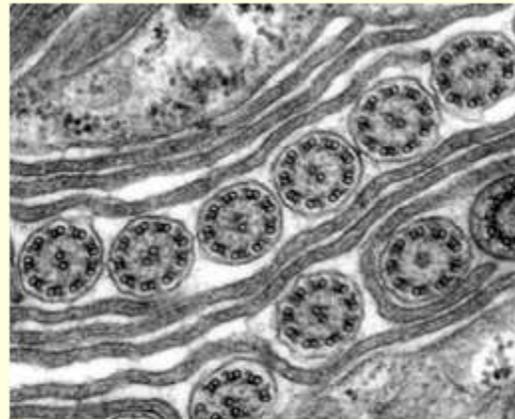
SEM image of *E. coli* cells. Image credit: [Biodefense Image Library](#)



– 100,000X magnification

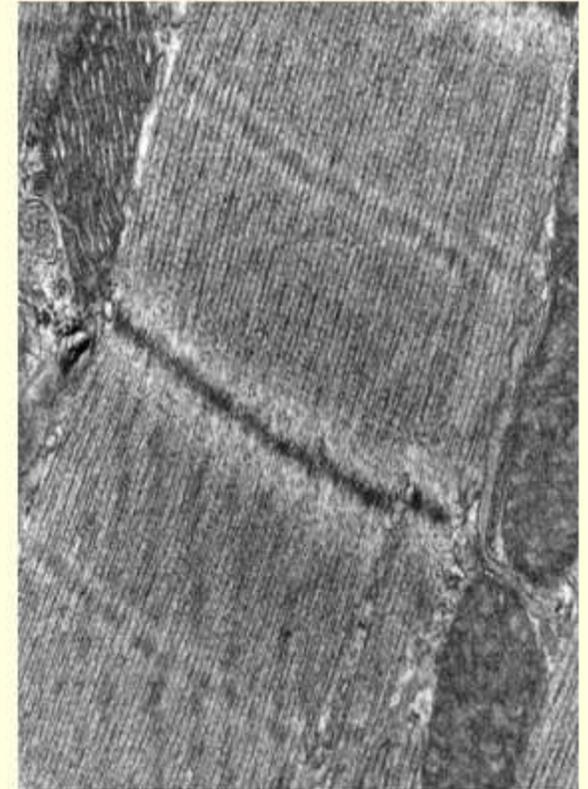


Mitochondria



Microtubules

# TEM



Cardiac muscle