

Física IV

Cap 41 – Mecânica Quântica em 1D

ANDREA LATGE

2015



A EQUAÇÃO de SCHRÖDINGER

- ◆ Aprendemos que uma partícula material é caracterizada na física quântica por sua FUNÇÃO DE ONDA - $\psi(x)$
- ◆ Dada a função de onda – Probabilidade de encontrar a partícula numa determinada região do espaço.
- ◆ Como determinar a função de onda?????????
- ◆ PROPOSTA DE Schrödinger – EQUAÇÃO de onda



A EQUAÇÃO de SCHRÖDINGER



Erwin Schrödinger, físico austríaco, descobriu a equação em 1925

(Nobel 1933)

$$\frac{d^2\psi}{dx^2} = -\frac{2m}{\hbar^2} [E - U(x)] \psi(x)$$

- Nos diz qual tem de ser a função de onda de uma partícula de **energia E** bem-definida, submetida a uma energia potencial da forma **$U(x)$**

Equação-chave da Mecânica Quântica



A EQUAÇÃO de SCHRÖDINGER

Motivação: encontrar uma “equação de onda” para as funções de onda

Uma onda senoidal de comprimento de onda λ : $\psi(x) = \psi_0 \text{sen} \left(\frac{2\pi x}{\lambda} \right)$

satisfaz a eq. diferencial $\frac{d^2\psi}{dx^2} = -\frac{(2\pi)^2}{\lambda^2}\psi(x)$

Ideia 1: para concordar com a relação de de Broglie, precisamos

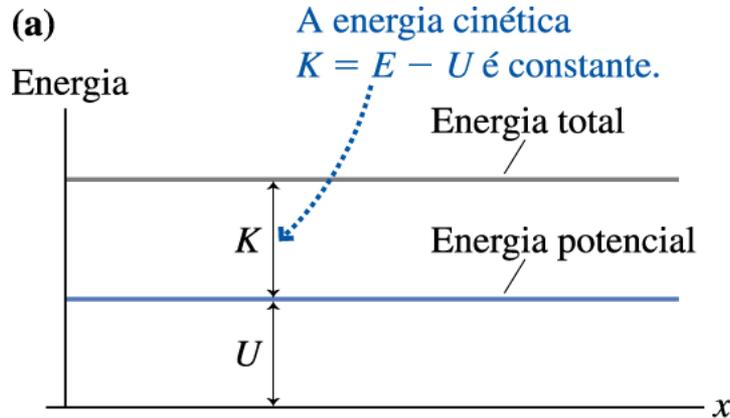
$$\frac{1}{\lambda^2} = \frac{p^2}{h^2} = \frac{2mK}{h^2} \quad \longrightarrow \quad \frac{d^2\psi}{dx^2} = -\frac{2mK}{\hbar^2}\psi(x)$$

Ideia 2: vamos assumir que essa relação continua valendo se a partícula está numa região com energia potencial $U(x) = E - K(x)$ dependente da posição

$$\frac{d^2\psi}{dx^2} = -\frac{2m}{\hbar^2} [E - U(x)] \psi(x)$$

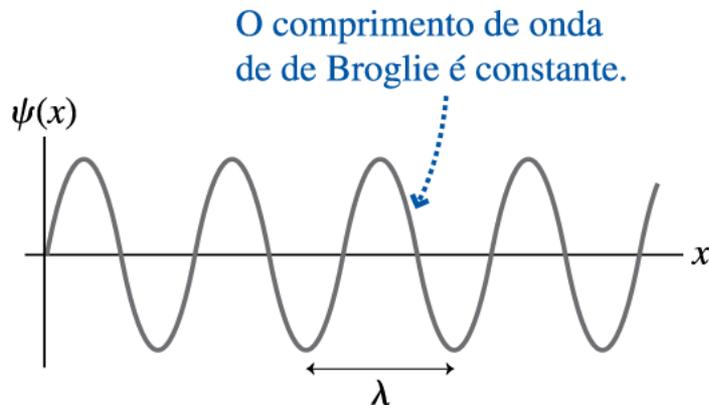


ENERGIA CINÉTICA E COMPRIMENTO DE ONDA



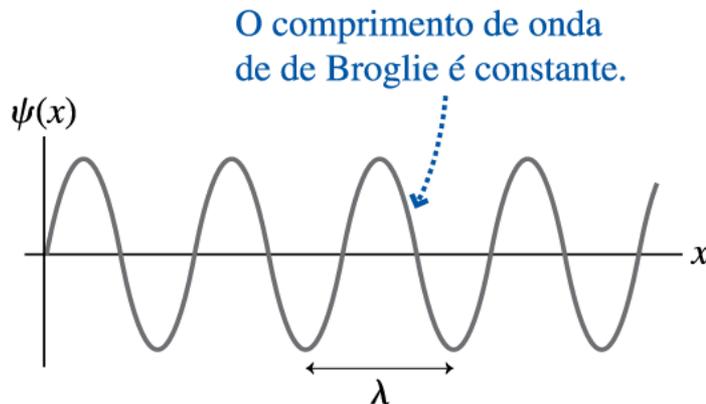
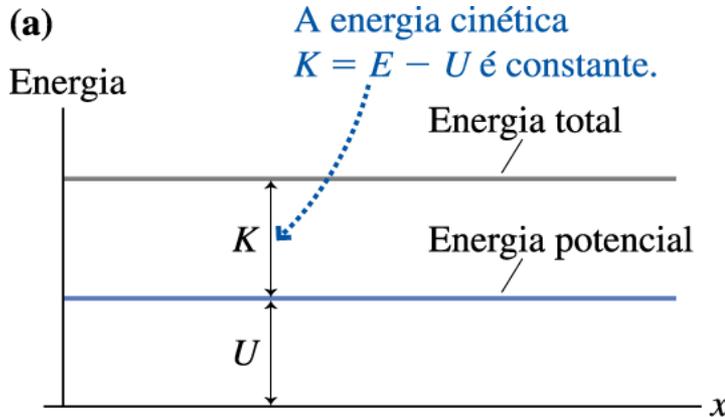
U constante

$$\frac{1}{\lambda^2} = \frac{p^2}{h^2} = \frac{2mK}{h^2}$$

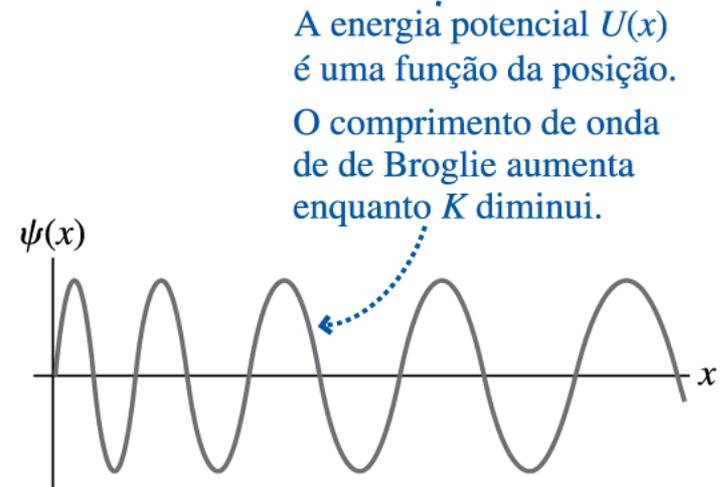
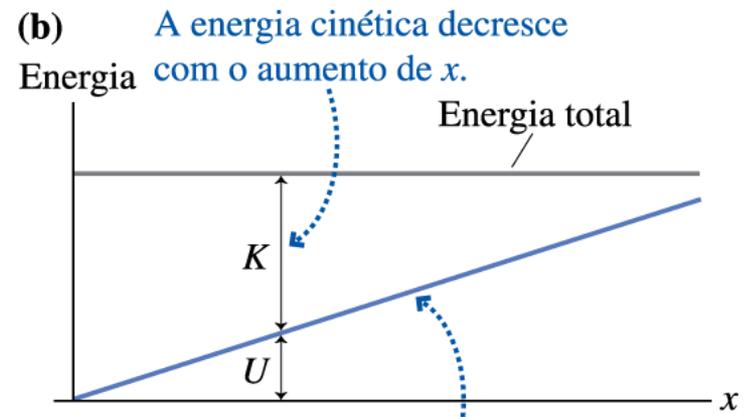


ENERGIA CINÉTICA E COMPRIMENTO DE ONDA

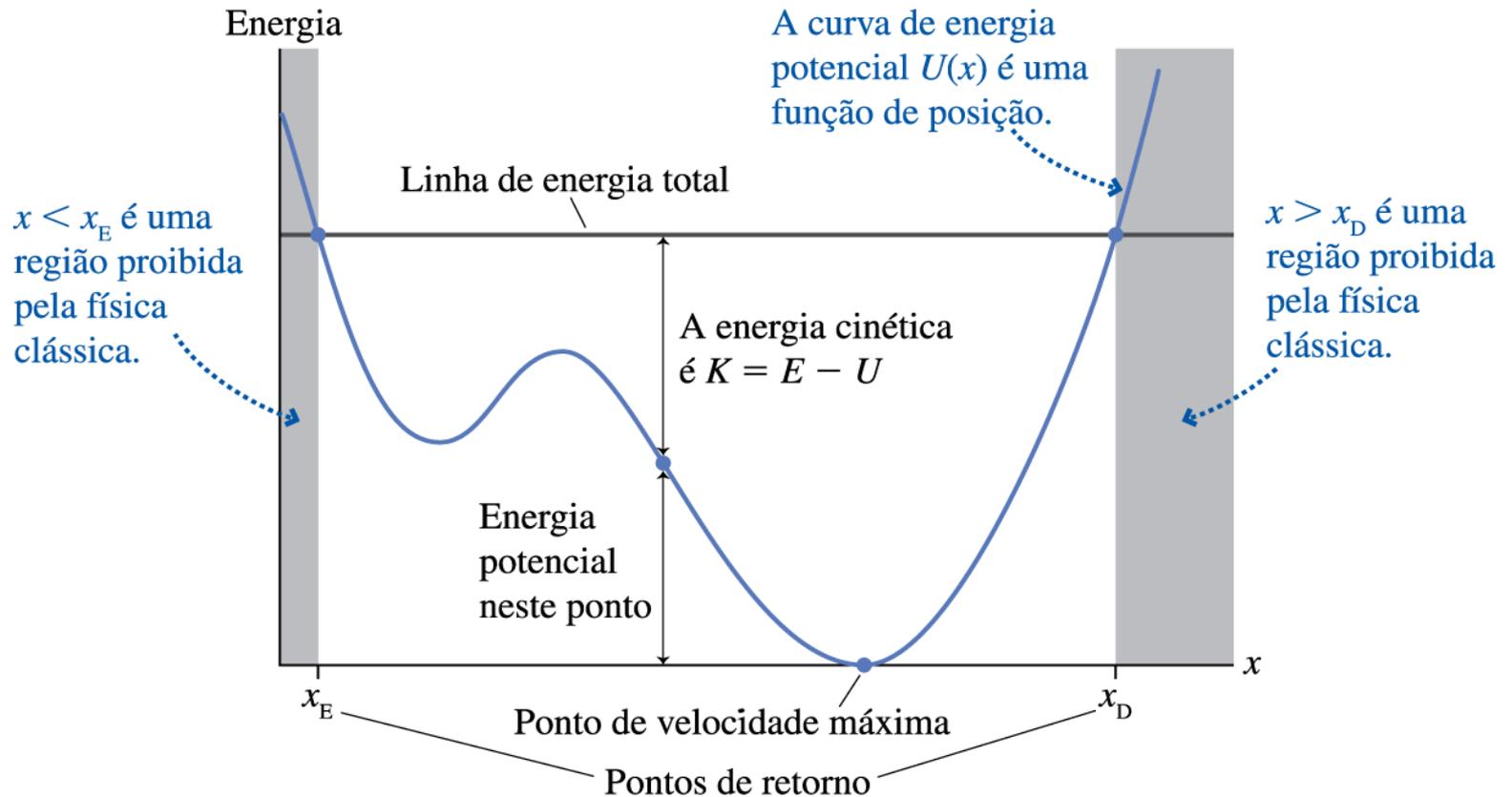
U constante



U dependente de x ($U_g = mgx$)



DIAGRAMAS DE ENERGIA POTENCIAL



Em física clássica: podemos também usar forças, via $F(x) = -dU(x) / dx$

Em MQ: Não falaremos mais em forças, já que partículas não têm posição bem-definida!



Resolvendo a Equação de Schrödinger

$$\frac{d^2\psi}{dx^2} = -\frac{2m}{\hbar^2} [E - U(x)] \psi(x)$$

- Equação diferencial linear de 2ª ordem
- Para cada valor de E há em princípio 2 soluções independentes $\psi_1(x)$ e $\psi_2(x)$;
Solução geral da forma

$$\psi(x) = A\psi_1(x) + B\psi_2(x)$$

- Para ser uma solução **física**, $\psi(x)$ deve satisfazer ainda **condições de contorno**:

1. É uma função contínua \longrightarrow $d\psi(x)/dx$ também contínua exceto em pontos x onde $U(x) \rightarrow \infty$

2. Normalizada: $\int_{-\infty}^{\infty} |\psi(x)|^2 dx = 1 \longrightarrow \psi(x) \rightarrow 0$ para $x \rightarrow \pm\infty$

Em geral **só haverá soluções físicas para certos valores discretos de E**

\longrightarrow QUANTIZAÇÃO DA ENERGIA



Resolvendo a Equação de Schrödinger

$$\frac{d^2\psi}{dx^2} = -\frac{2m}{\hbar^2} [E - U(x)] \psi(x)$$

Como proceder?

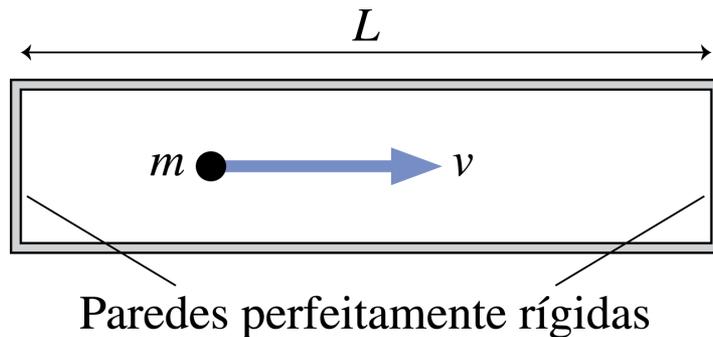
1. Proponha uma curva $U(x)$ que sirva de **modelo** para essa situação física.
2. Encontre a solução geral para a equação de Schrödinger
3. Imponha as condições de contorno apropriadas, e descubra para quais valores de E existe uma solução que as obedece. Esses serão os níveis de energia permitidos para o sistema! As funções de onda correspondentes são chamadas **estados estacionários**.
4. Estude as propriedades dos estados estacionários notando, por exemplo, onde há mais probabilidade de encontrar a partícula, como seu comprimento de onda se comporta, etc.

$$f = \Delta E / h = |E_f - E_i| / h$$



Exemplo: partícula em uma caixa rígida

Situação física
(idealizada)



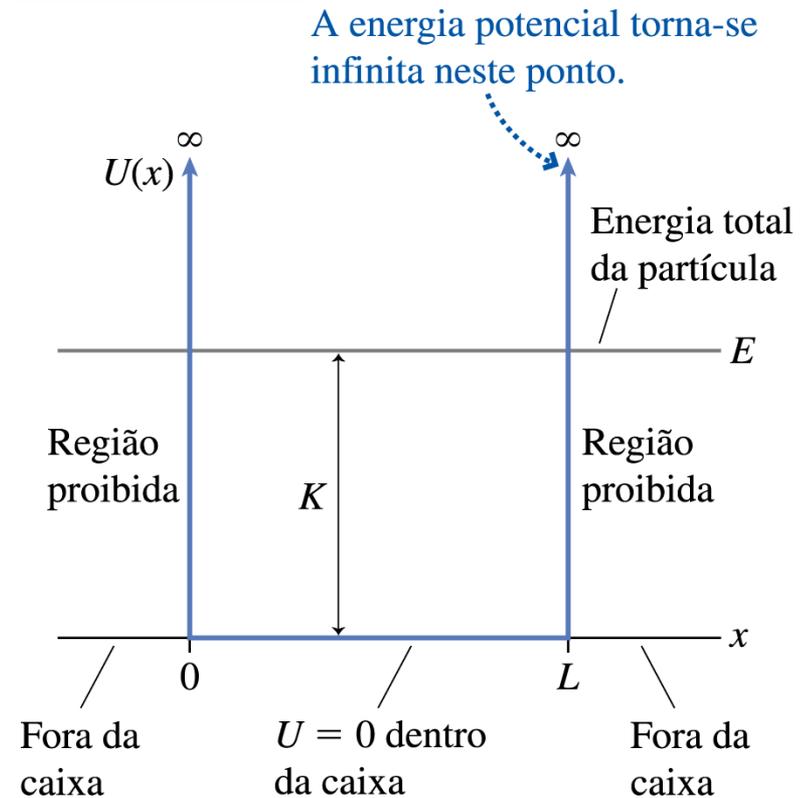
$$\psi(x) = 0 \quad \text{p/ } x \leq 0 \quad \text{e} \quad \text{p/ } x \geq L$$

$$\psi(x) = A \sin(kx) + B \cos(kx)$$

$$\Psi(0) = 0 \quad \text{e} \quad \Psi(L) = 0$$

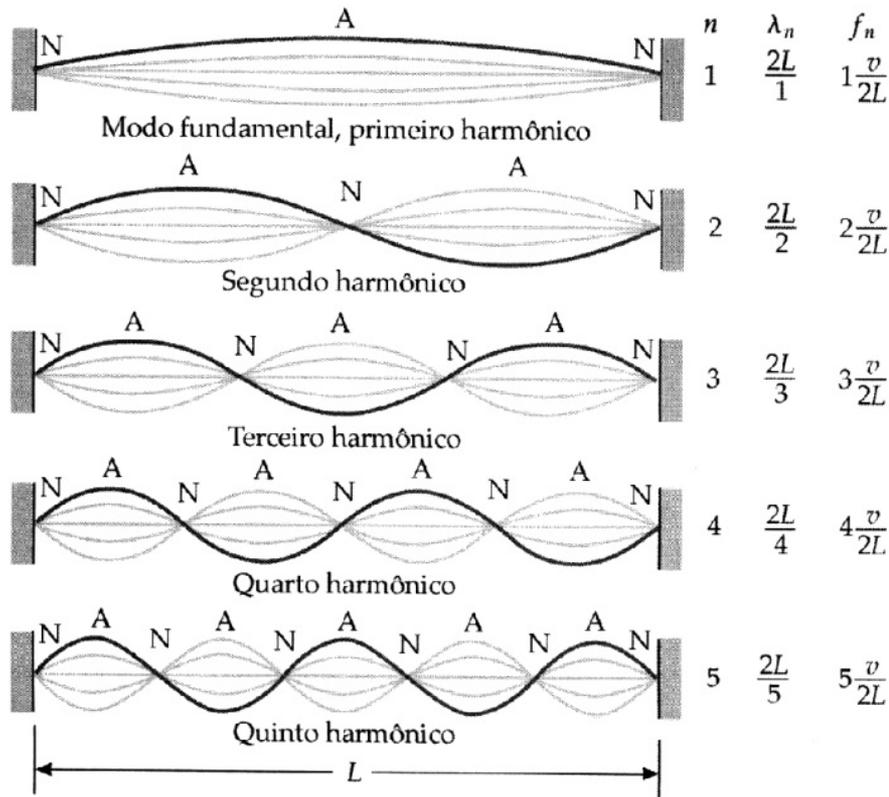
$$B=0 \quad \beta L = n\pi \quad \text{onde} \quad \beta^2 = 2mE/\hbar^2$$

Modelo

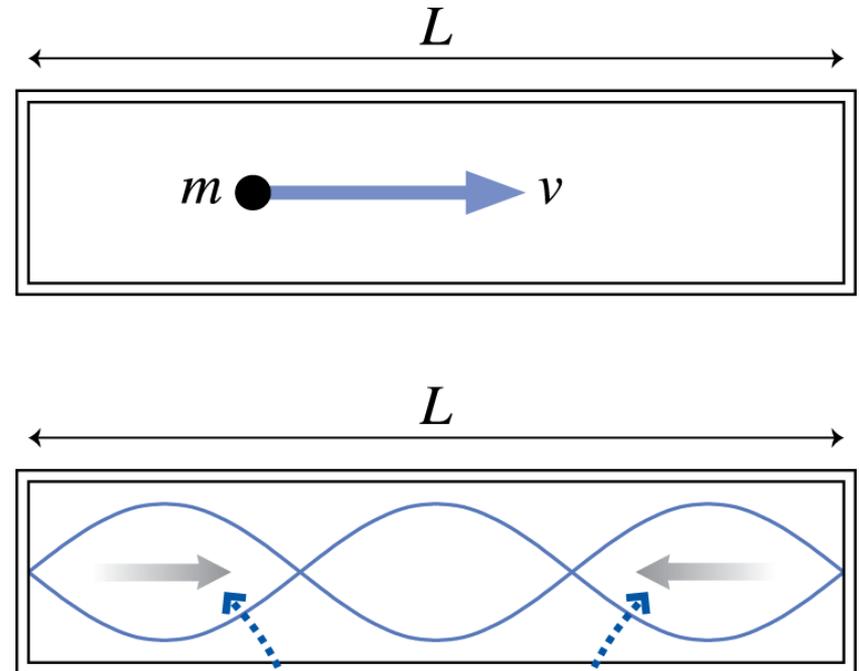


Exemplo: partícula em uma caixa rígida

Ressonância e onda estacionária:



Partícula em uma caixa



Ondas de matéria se deslocam em ambos os sentidos.

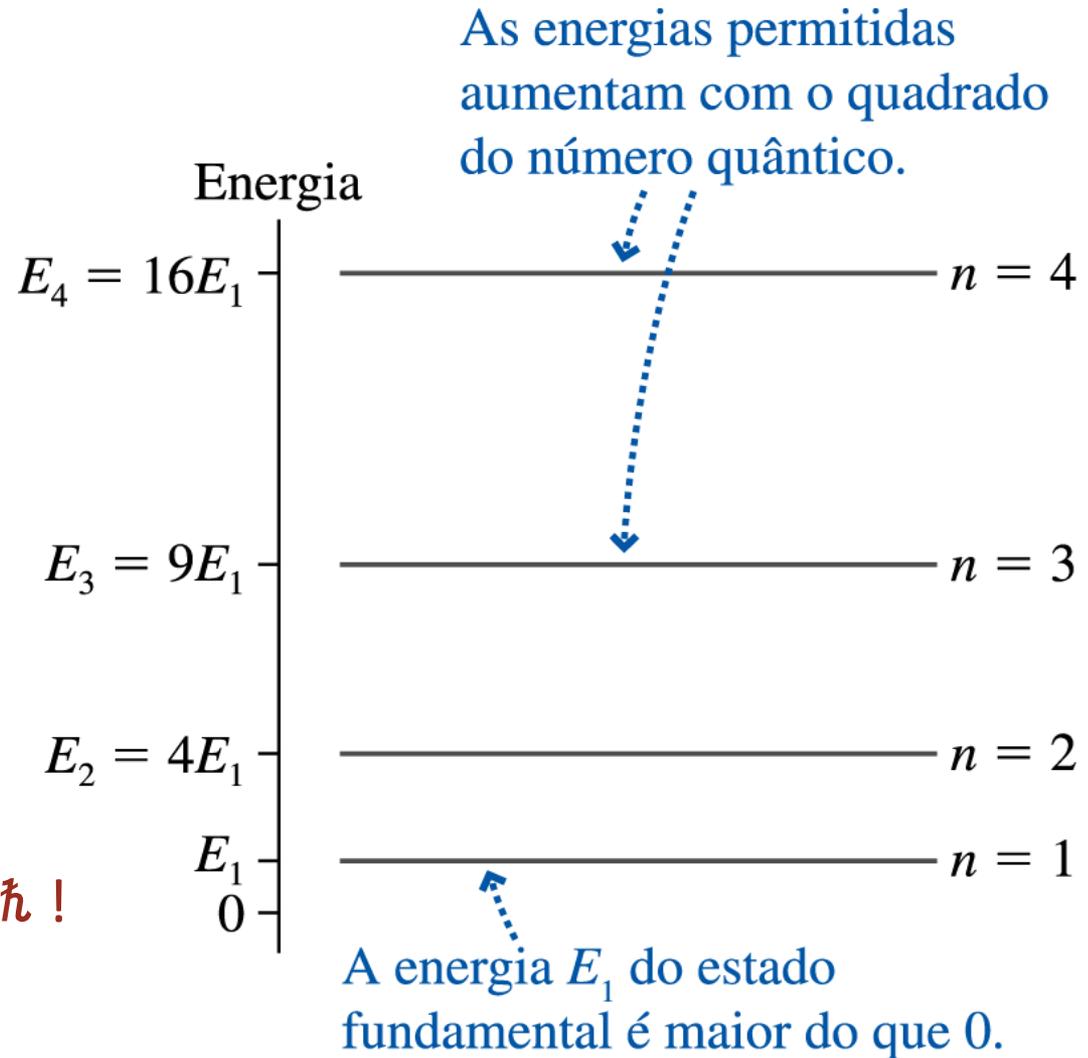
$$E_n = \frac{n^2 h^2}{8mL^2}$$



Níveis de energia para partícula em uma caixa rígida

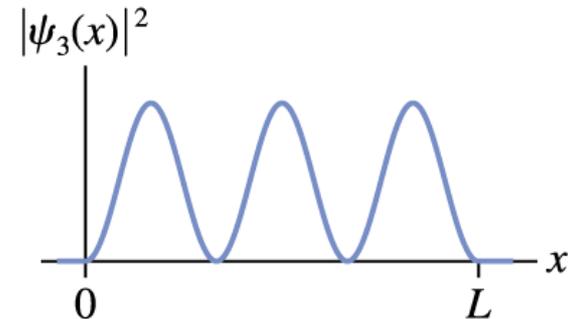
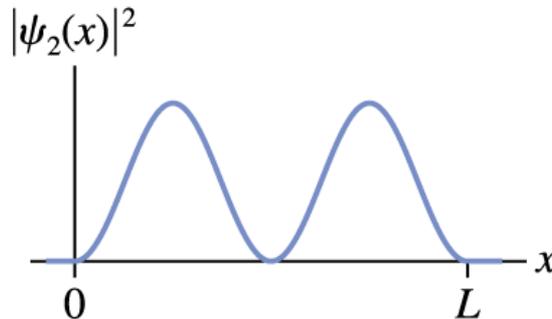
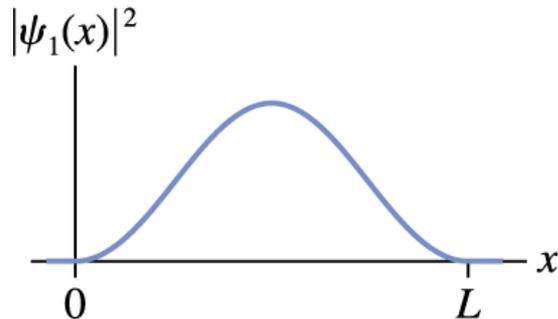
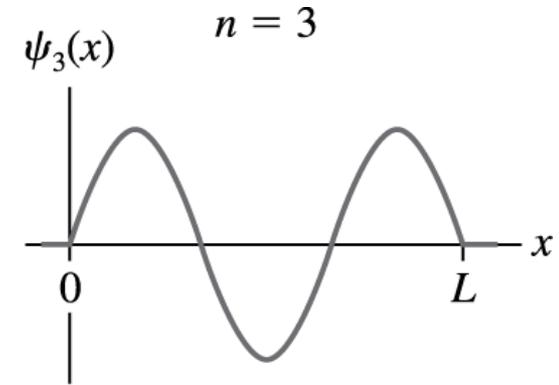
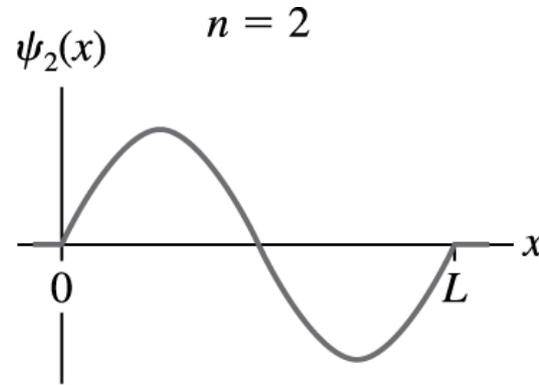
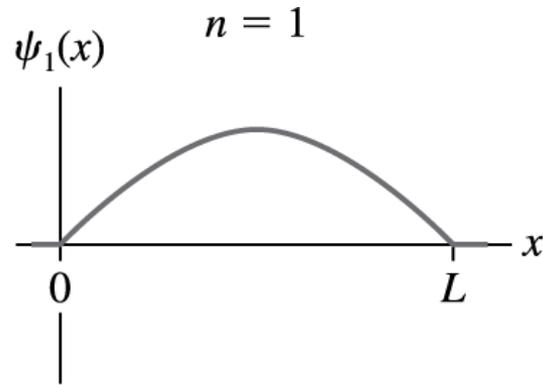
$$E_n = \frac{n^2 h^2}{8mL^2}$$

necessário para $\Delta x \Delta p \gtrsim \hbar$!



CAIXA RÍGIDA: FUNÇÕES de ONDA e P(x) p/ ESTADOS ESTACIONÁRIOS

$$\psi_n(x) = \sqrt{\frac{2}{L}} \operatorname{sen} \left(\frac{n\pi x}{L} \right)$$

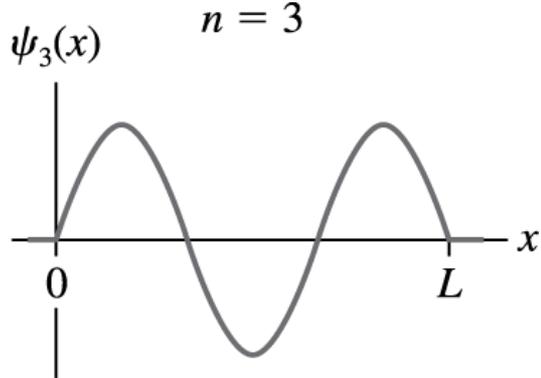
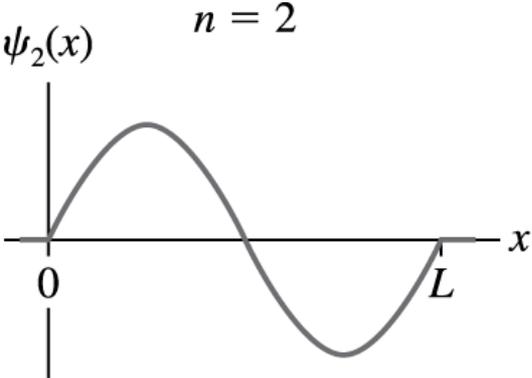
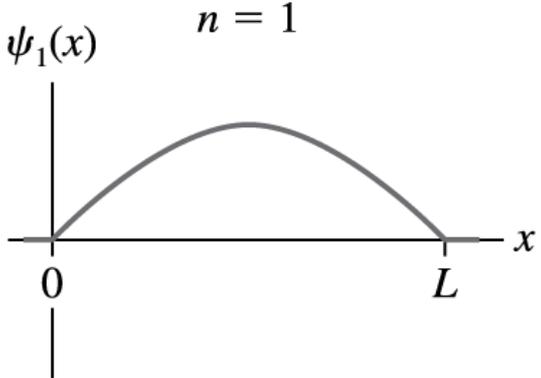


$$P_n(x) = |\psi_n(x)|^2 = \frac{2}{L} \operatorname{sen}^2 \left(\frac{n\pi x}{L} \right)$$

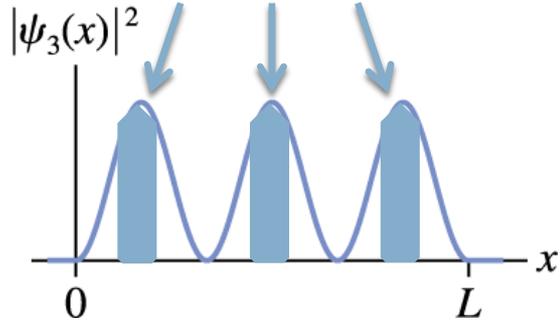
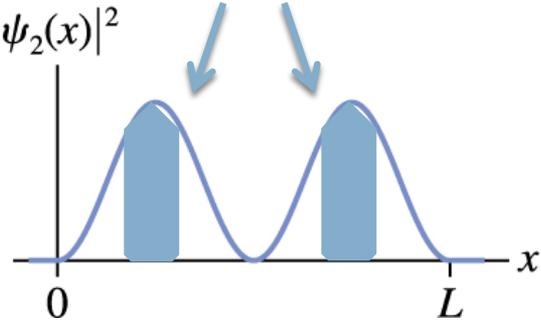
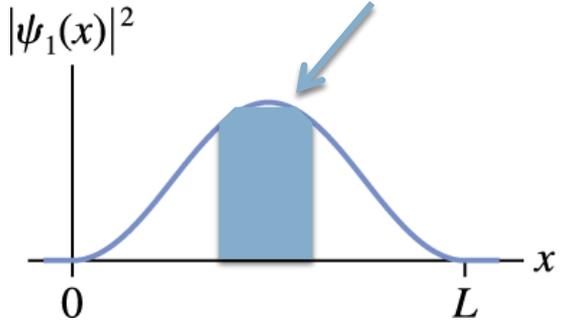


CAIXA RIGIDA: FUNÇÕES de ONDA e P(x) p/ ESTADOS ESTACIONÁRIOS

$$\psi_n(x) = \sqrt{\frac{2}{L}} \text{sen} \left(\frac{n\pi x}{L} \right)$$



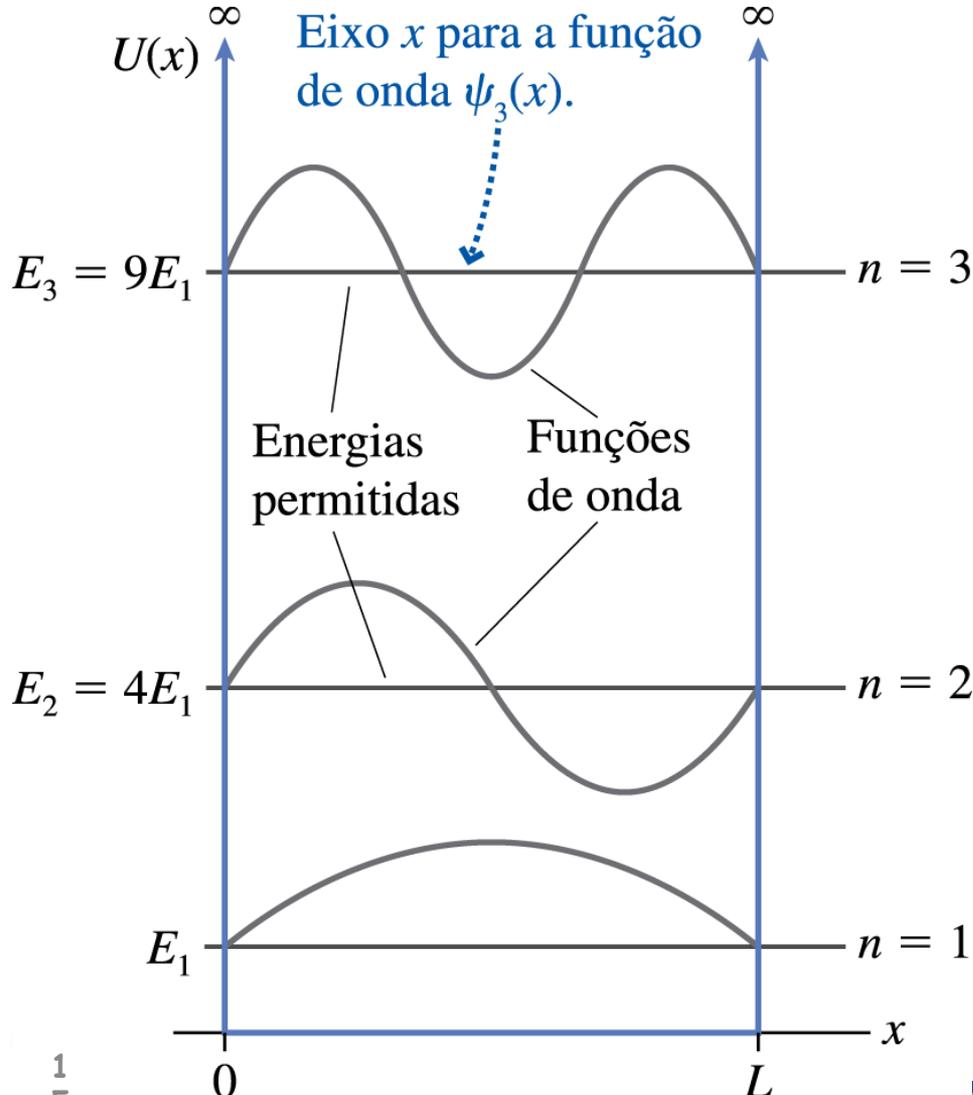
Regiões com maior probabilidade de encontrarmos a partícula



$$P_n(x) = |\psi_n(x)|^2 = \frac{2}{L} \text{sen}^2 \left(\frac{n\pi x}{L} \right)$$



FUNÇÕES de ONDA e Energias do poço ∞ : diagrama compacto

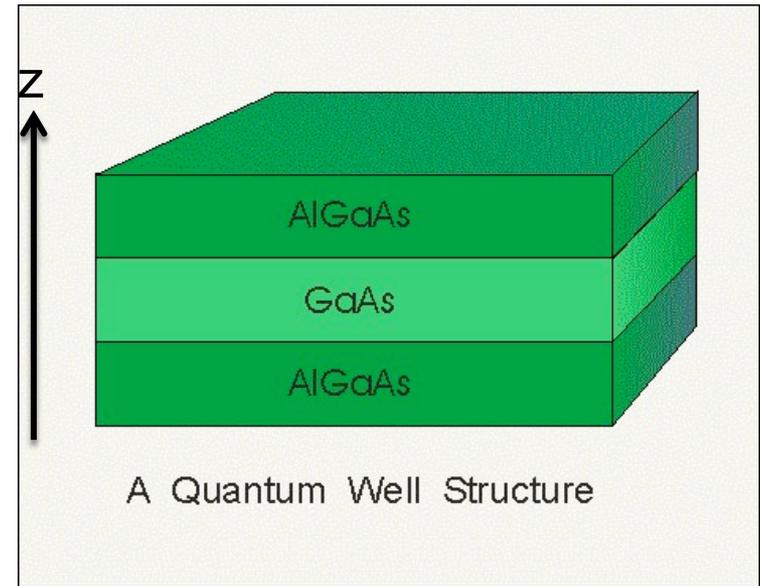
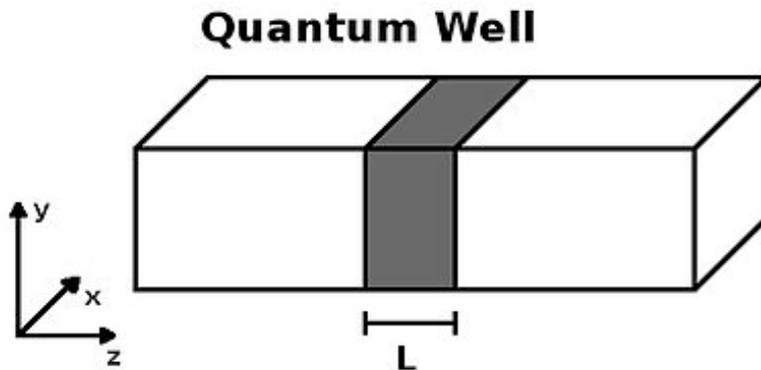


- ✓ **Mesmo eixo x** para níveis de energia e funções de onda.
- ✓ **Eixo y** tem dupla função:
 - para os níveis, representa valores de energia;
 - para as funções de onda: amplitude
- ✓ **Cada função de onda ψ_n** está representada como se o zero do 'seu' eixo y estiver na altura da energia E_n correspondente

Note que: $\psi_n(x)$ possui **$(n-1)$ nós** (zeros), excluídos os extremos, e **n antinodos** (máximos e mínimos)

Realização física (aprox.): poço quântico

Poço quântico: estrutura - “sandwich” de dois materiais diferentes (em geral ambos semicondutores), tais que elétrons necessitem de um grande energia para passar do material do meio para o das bordas



Exemplo: estimando o tamanho de um “poço quântico”

Exercício: um elétron está contido em um poço quântico 1D com um comprimento L desconhecido. Inicialmente, esperamos o dispositivo emitir espontaneamente toda a sua energia, e depois o iluminamos com radiação de diferentes frequências. Verificamos que os maiores comprimentos de onda que ele é capaz de absorver são $\lambda_a = 411\text{nm}$ e $\lambda_b = 1098\text{nm}$. Qual é o comprimento do poço?

$$E_n = \frac{n^2 h^2}{8mL^2}$$

$$h = 6,63 \times 10^{-34} \text{ N.m}$$

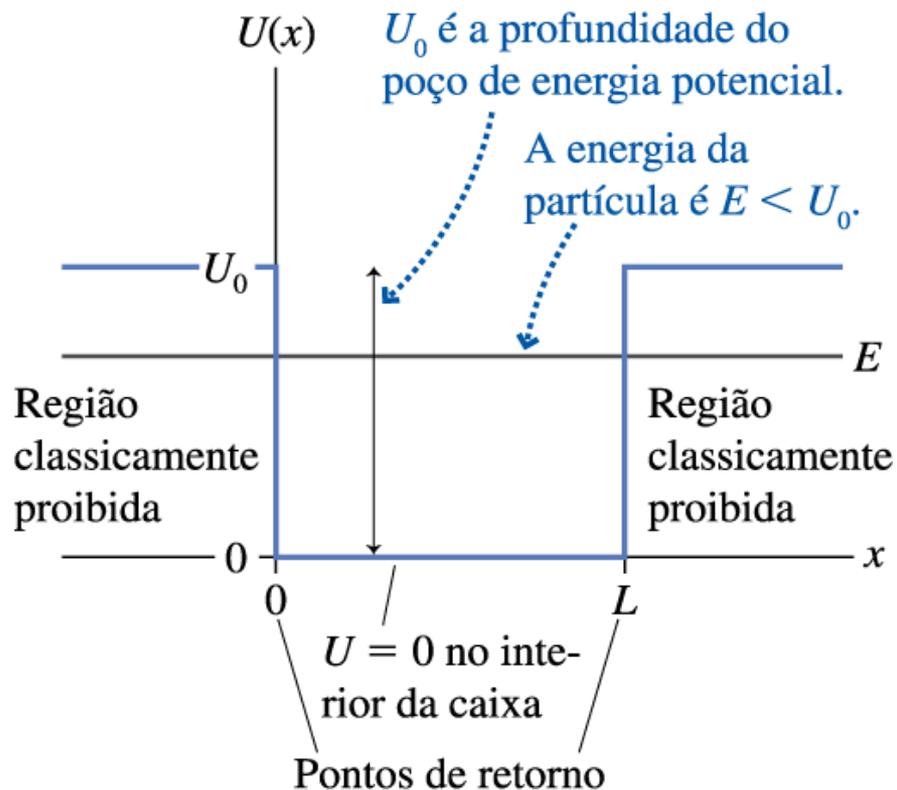
$$m_e = 9,11 \times 10^{-31} \text{ kg}$$

Resposta: $L \sim 1 \text{ nm!}$



POÇO DE POTENCIAL FINITO

(a) $U = 0$ no interior do poço



ex: bom modelo para um elétron num fio!

ar **fio** ar

$U_0 - E_1 \leftrightarrow$ 'função trabalho' !

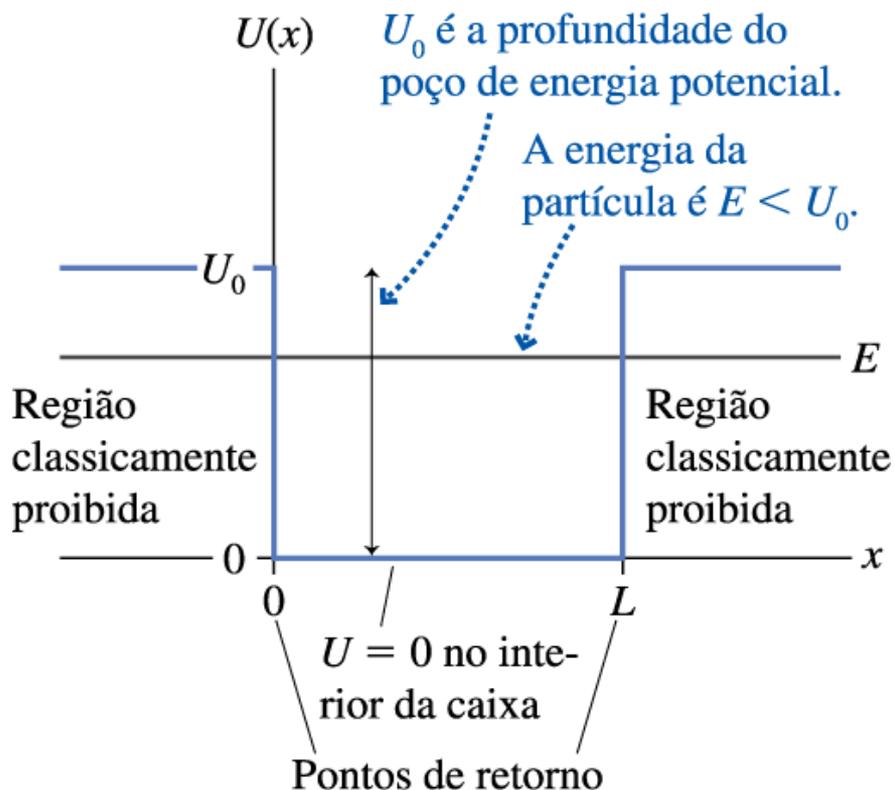
Pró: modelo mais realista que o poço infinito qdo a partícula tem energia que não é desprezível comparada à da 'barreira'

Contra: modelo mais difícil de resolver matematicamente.



POÇO DE POTENCIAL FINITO - dentro do poço

(a) $U = 0$ no interior do poço



$$\frac{d^2\psi}{dx^2} = -\frac{2m}{\hbar^2} [E - U(x)] \psi(x)$$

Solução geral no interior do poço: igual à do poço infinito!

$U(x) = 0$ dentro do poço

$$\psi(x) = A\cos(kx) + B\sin(kx)$$

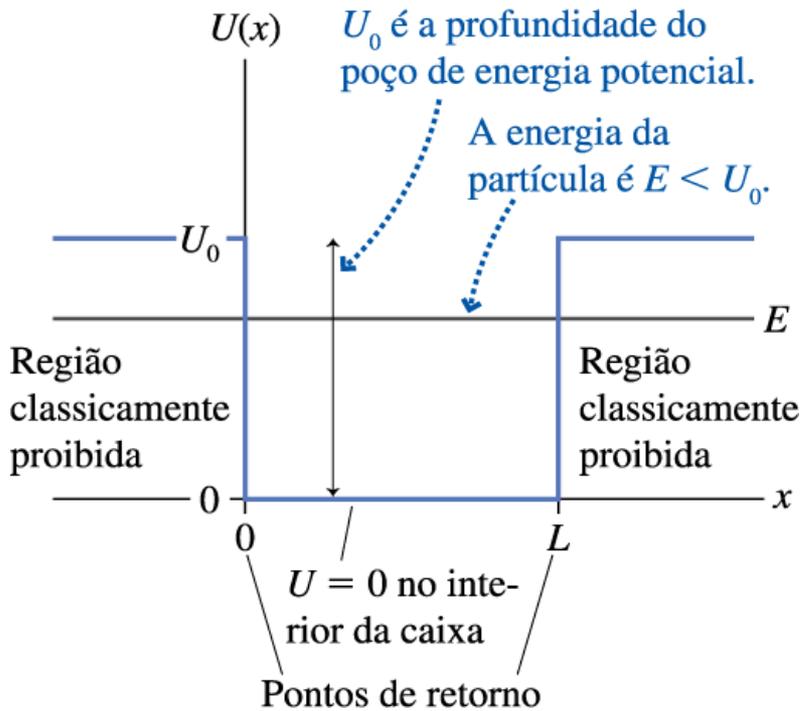
$$k = \frac{\sqrt{2mE}}{\hbar}$$

BUT... condições de contorno diferentes!



POÇO DE POTENCIAL FINITO – fora do poço

(a) $U = 0$ no interior do poço



Impondo a condição de contorno:

$$\psi(x) \rightarrow 0 \text{ para } x \rightarrow \pm\infty$$

$$\frac{d^2\psi}{dx^2} = -\frac{2m}{\hbar^2} [E - U(x)] \psi(x)$$

Solução geral no **exterior** do poço (região classicamente proibida):

$$\psi(x) = C \exp(x/\eta) + D \exp(-x/\eta)$$

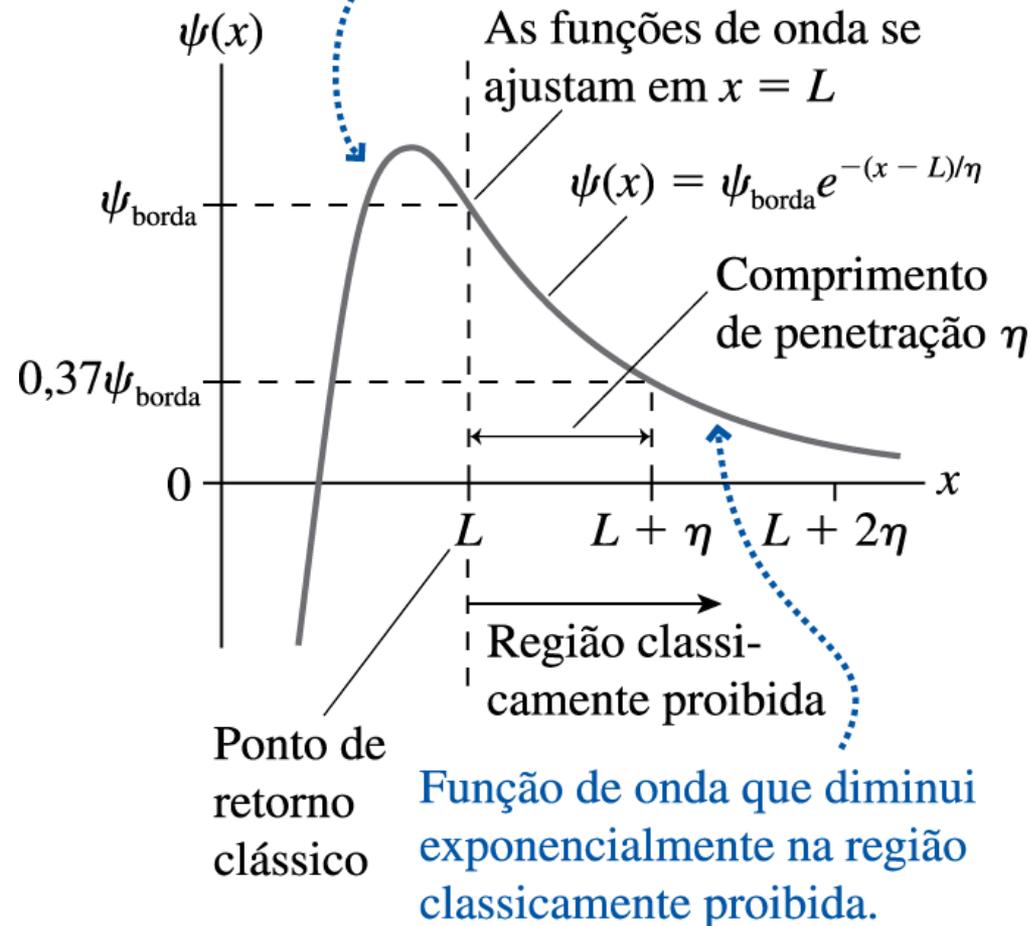
$$\eta = \frac{\hbar}{\sqrt{2m(U_0 - E)}}$$

$$\psi(x \geq L) = \psi(L) \exp\left[-\left(\frac{x-L}{\eta}\right)\right]$$
$$\psi(x \leq 0) = \psi(0) \exp\left[\frac{x}{\eta}\right]$$



Funções de Onda na região classicamente proibida

A função de onda é oscilatória dentro do poço de potencial



1) o comprimento de penetração η depende do inverso de $E - U_0$, ou seja, quanto menor for essa diferença, maior será a penetração na região classicamente proibida.

2) Da mesma forma, η depende do inverso da massa, ou seja quanto mais leve a partícula, maior será a penetração na região classicamente proibida.



POÇO DE POTENCIAL FINITO – fora do poço

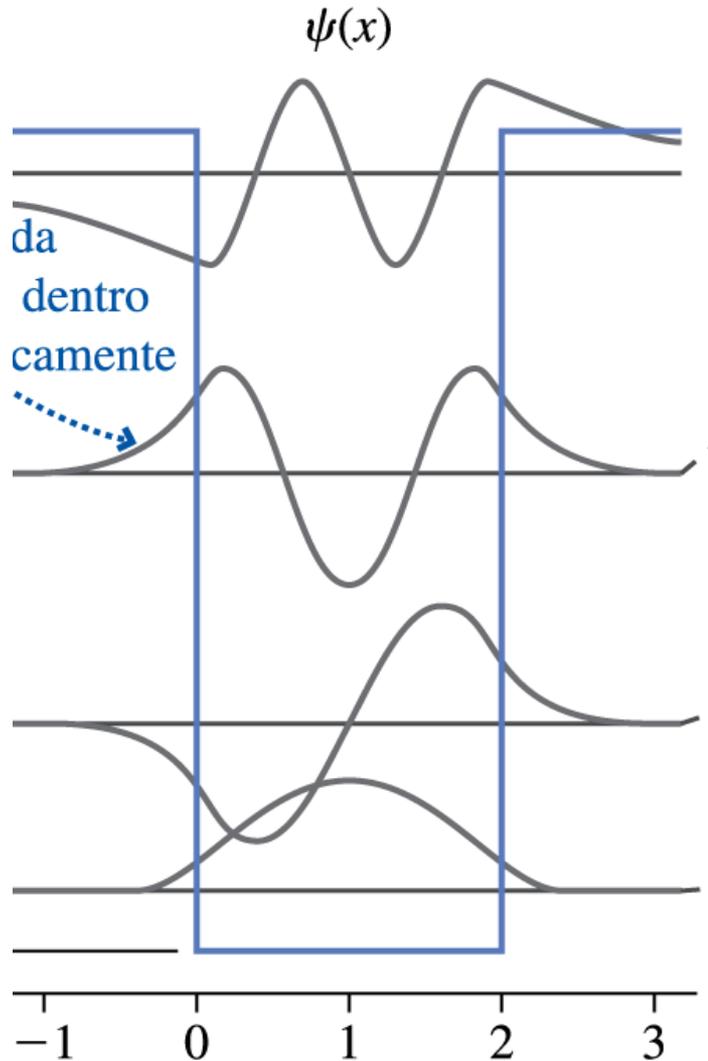
PENETRAÇÃO DA FUNÇÃO DE ONDA

$$\begin{aligned}\psi(x=L+\eta) &= \psi(x=L)\exp[-(L+\eta-L)/\eta] \\ &= \psi(x=L)\exp[-1] \\ &= 0.37\psi(x=L)\end{aligned}$$

η = Parâmetro mede o “quanto” a função de onda se estende além do limite clássico antes que a prob. se reduza a um valor muito próximo de zero.



Funções de onda do Poço de Potencial Finito

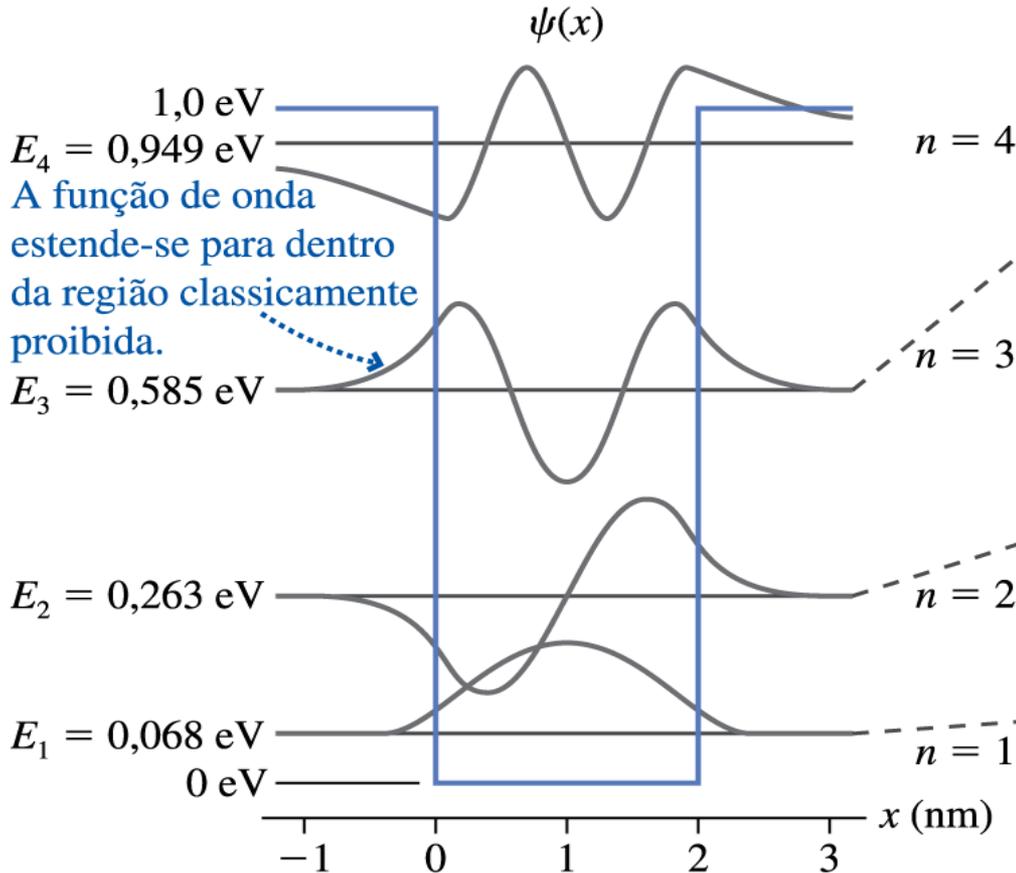


- ✓ A energia **é quantizada**.
- ✓ Existe apenas um **número finito** de estados ligados.
- ✓ Funções de onda são qualitativamente semelhantes àsquelas da partícula em uma caixa rígida.
- ✓ Diferença: elas se estendem para as regiões classicamente proibidas.
- ✓ Energia do nível **n do poço finito é sempre inferior à do nível n do poço infinito**

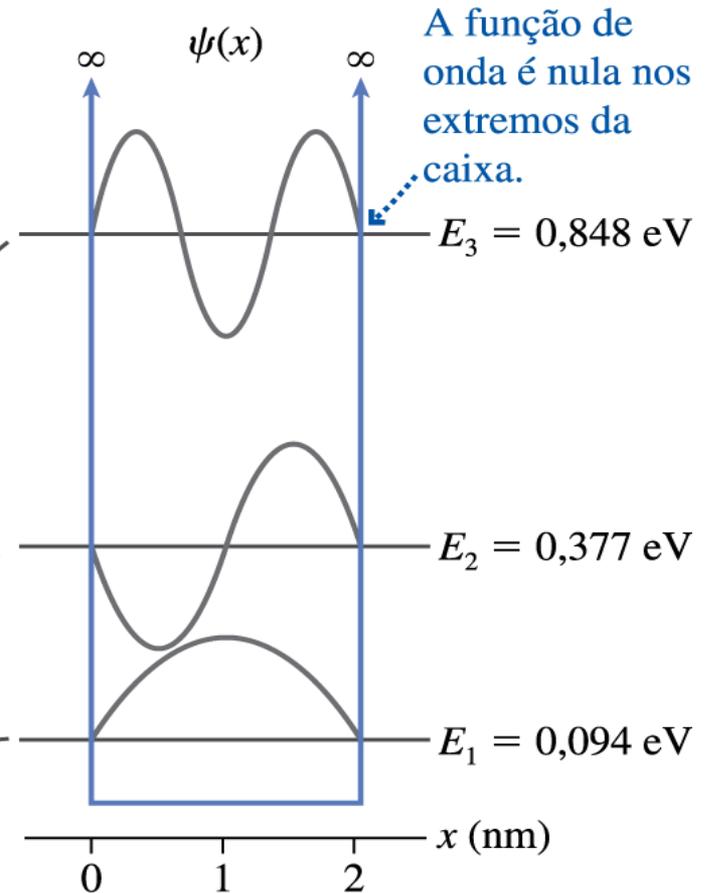


Comparando soluções dos poços de potencial Finito e Infinito de mesma largura

(a) Poço de potencial finito



(b) Partícula em uma caixa rígida



Para o mesmo **estado n** , poço finito tem oscilações mais “largas”

→ λ maior → p menor → K menor → E menor



Tunelamento quântico

Ex. 41.7 - Um elétron encontra-se confinado em uma região de largura 2,0 nm e com profundidade de potencial igual a 1,0 eV. Qual é o comprimento de onda de penetração na região classicamente proibida para um elétron nos estados $n = 1$ e $n = 4$?

$$n = 1 \quad U_0 - E_1 = 1.000\text{eV} - 0.068\text{eV} = 0.932 \text{ eV}$$

$$n = 4 \quad U_0 - E_4 = 1.000\text{eV} - 0.949\text{eV} = 0.051 \text{ eV}$$

$$\eta = \frac{\hbar}{\sqrt{2m(U_0 - E)}}$$

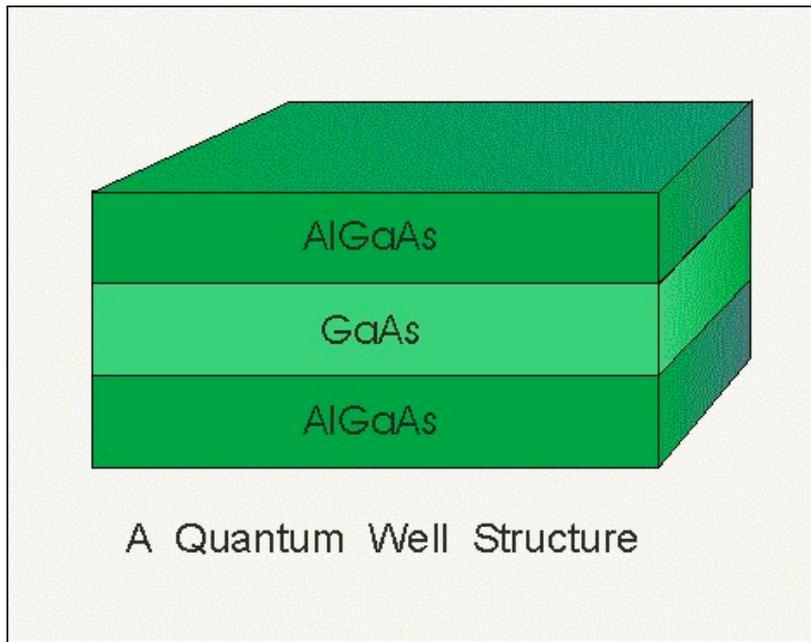
$$\eta = 0.20\text{nm} \quad p/ \quad n = 1$$

$$\eta = 0.86\text{nm} \quad p/ \quad n = 4 \text{ penetração muito maior - estado quase livre}$$

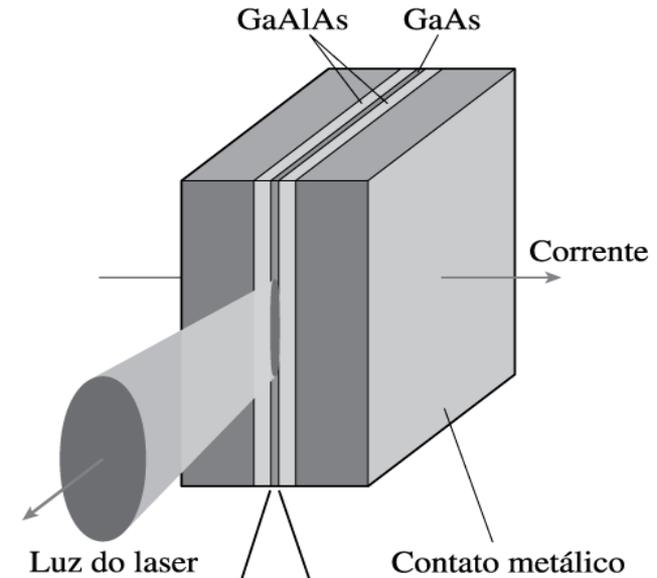


POÇO DE POTENCIAL FINITO - APLICAÇÕES

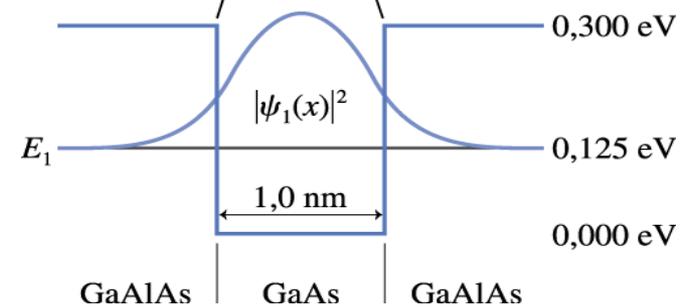
Física de materiais: modelo um pouco melhor para um poço quântico



(a) Laser de poço quântico

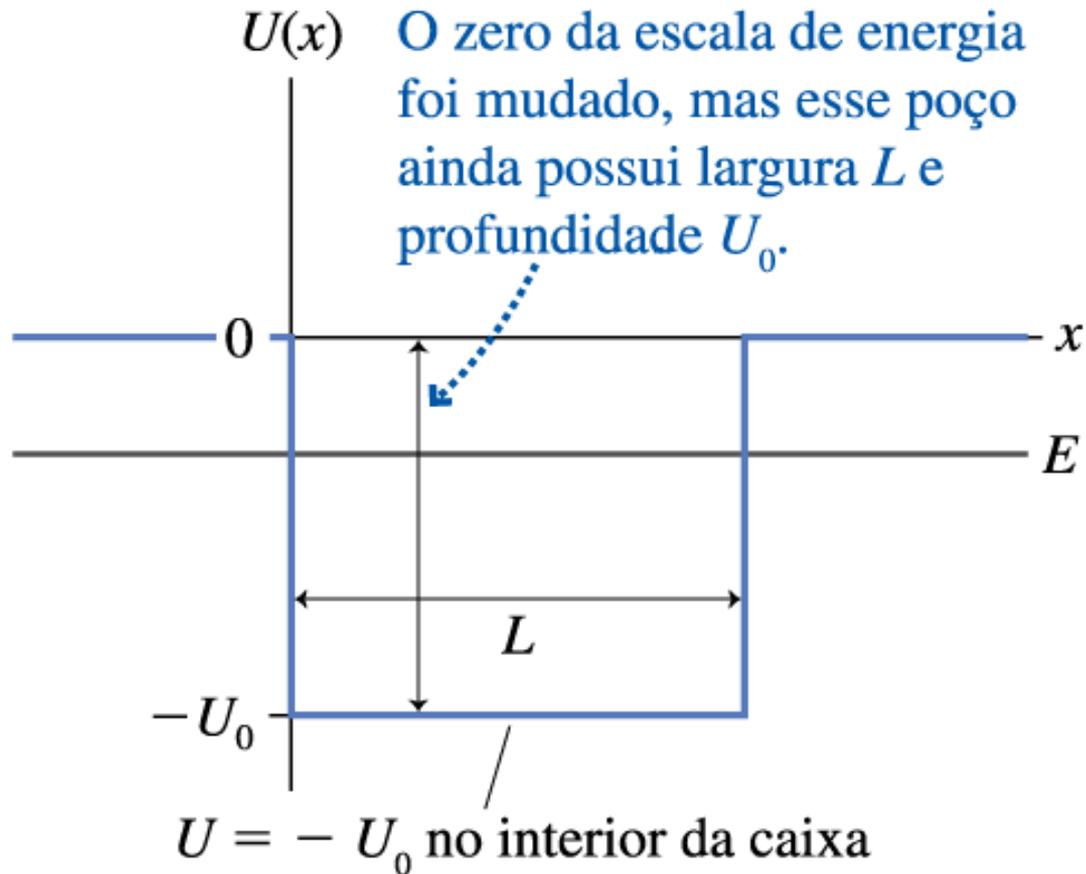


(b)



POÇO DE POTENCIAL FINITO – DESCRIÇÃO ALTERNATIVA

(b) $U = 0$ no exterior do poço



POÇO DE POTENCIAL FINITO – APLICAÇÕES

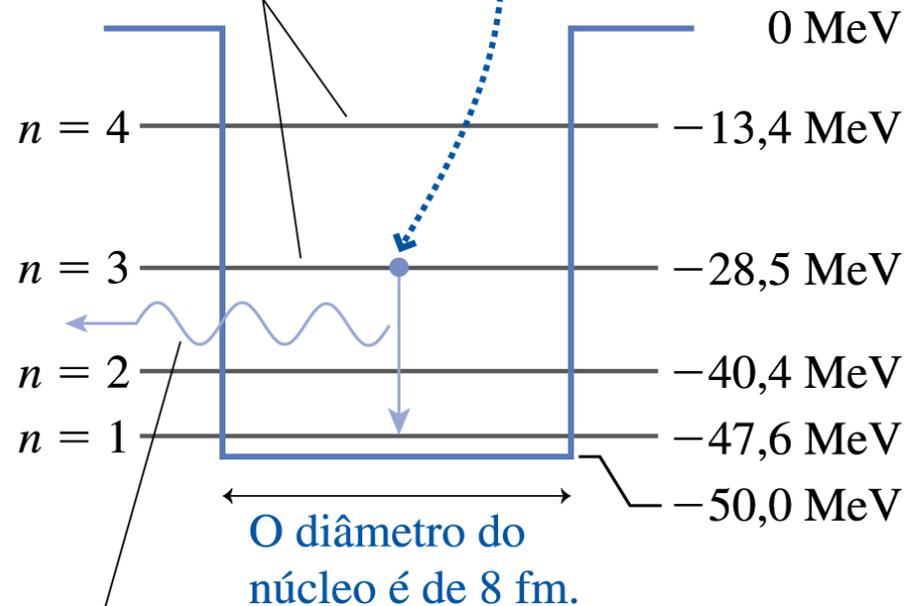
Física Nuclear – modelo simples para potencial sentido pelo nêutron num núcleo

Forças entre os núcleons (prótons e neutrons) – forças nucleares atrativas e fortes

Devido ao **pequeno tamanho do núcleo**, (representado aqui pela largura do poço), as energias das transições nucleares são **$\sim 10^6$ maiores que as das transições eletrônicas!**

Um decaimento radioativo deixou o nêutron em um estado excitado $n = 3$. O nêutron salta para o estado fundamental $n = 1$, emitindo um fóton de raio gama.

Níveis de energia para um nêutron em um núcleo

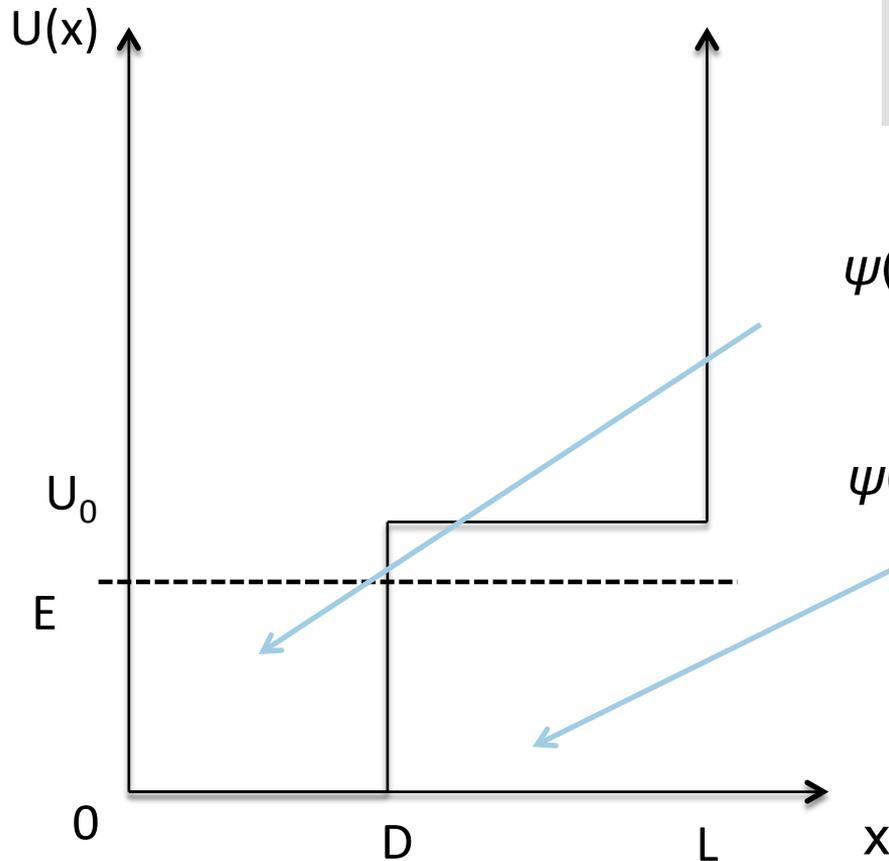


Emissão de raio gama



POÇO DE POTENCIAL GERAL: ANÁLISE QUALITATIVA DAS FUNÇÕES DE ONDA DE ESTADOS LIGADOS

Exemplo: poço infinito com “degrau”



se $E < U_0$, a eq. de Schrödinger tem a seguinte solução geral:

p/ $0 \leq x \leq D$:

$$\psi(x) = A\cos(kx) + B\sin(kx), \quad k = \frac{\sqrt{2mE}}{\hbar}$$

p/ $D \leq x \leq L$:

$$\psi(x) = C\exp(x/\eta) + D\exp(-x/\eta),$$

$$\eta = \frac{\hbar}{\sqrt{2m(U_0 - E)}}$$

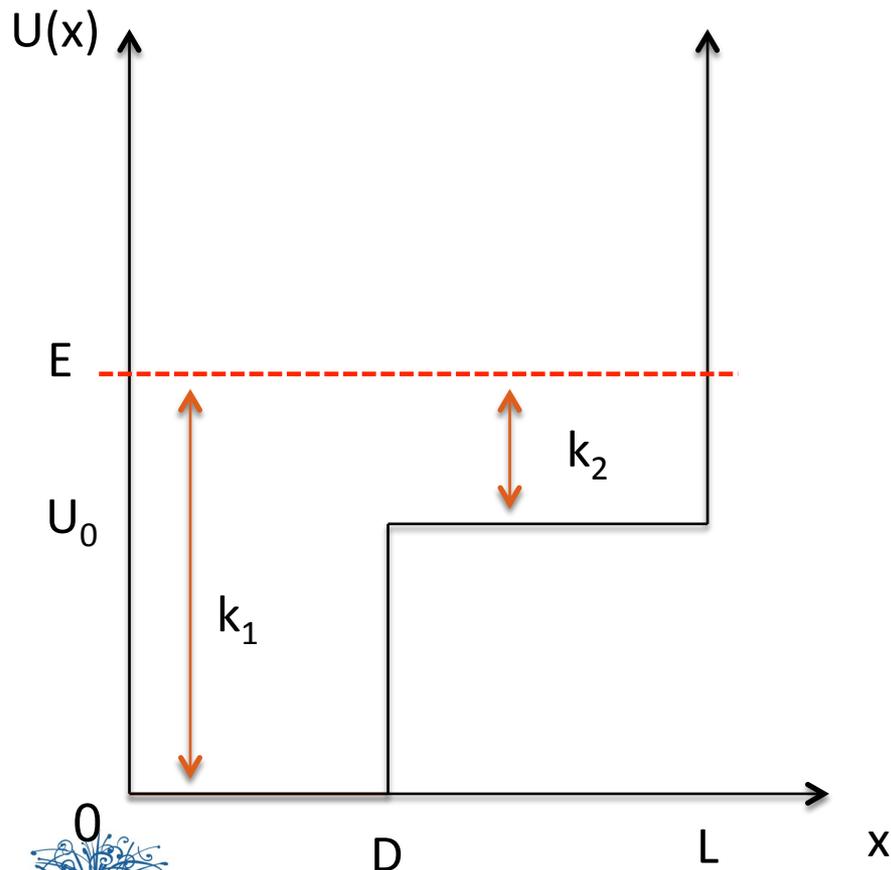
condições de contorno: $\psi(0) = \psi(L) = 0$

e tb ψ e ψ' contínuos em $x = D$



POÇO DE POTENCIAL GERAL: ANÁLISE QUALITATIVA DAS FUNÇÕES DE ONDA DE ESTADOS LIGADOS

Exemplo: poço infinito com “degrau”



se $E > U_0$, a solução geral da eq. de Schrödinger tem a forma

$$\psi(x) = A\cos(kx) + B\sin(kx),$$

com

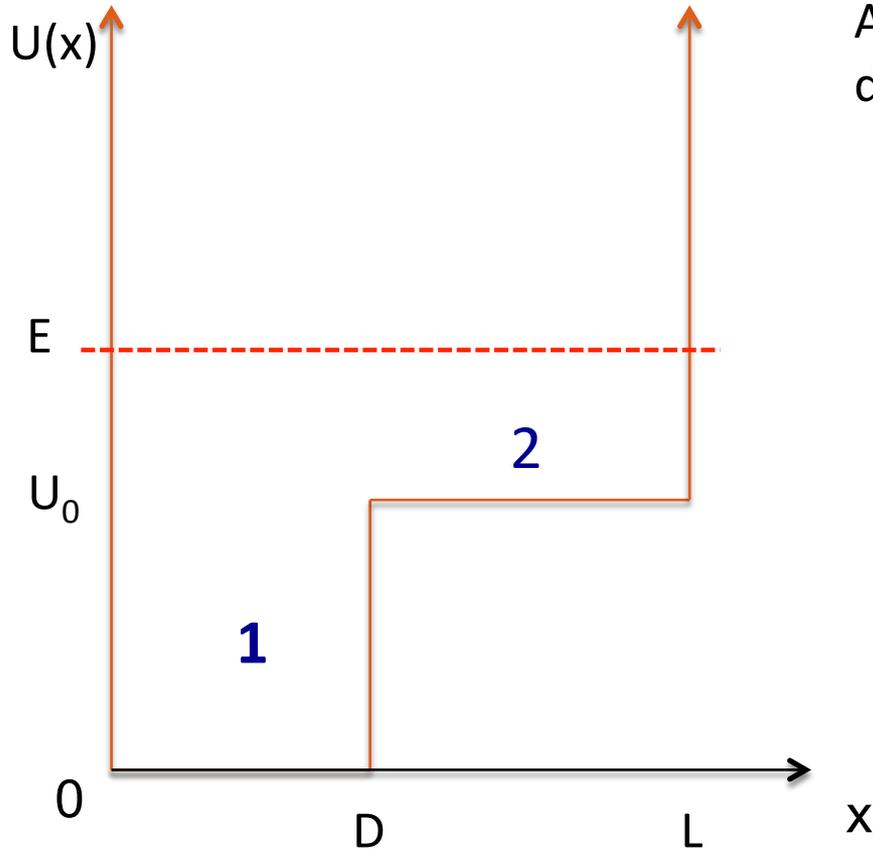
$$\left\{ \begin{array}{l} k_1 = \frac{\sqrt{2mE}}{\hbar}, \text{ para } 0 \leq x \leq D \\ k_2 = \frac{\sqrt{2m(E - U_0)}}{\hbar}, \text{ para } D \leq x \leq L \end{array} \right.$$

O número de onda é *menor* (i.e., o comprimento de onda é *maior*) no lado onde a energia cinética $K(x) = E - U(x)$ é menor



POÇO DE POTENCIAL GERAL: ANÁLISE QUALITATIVA DAS FUNÇÕES DE ONDA DE ESTADOS LIGADOS

Exemplo: poço infinito com 'degrau'



A *amplitude* das oscilações também é diferente nas duas regiões. Reescrevendo

$$\psi(x) = C \cos(kx + \varphi)$$



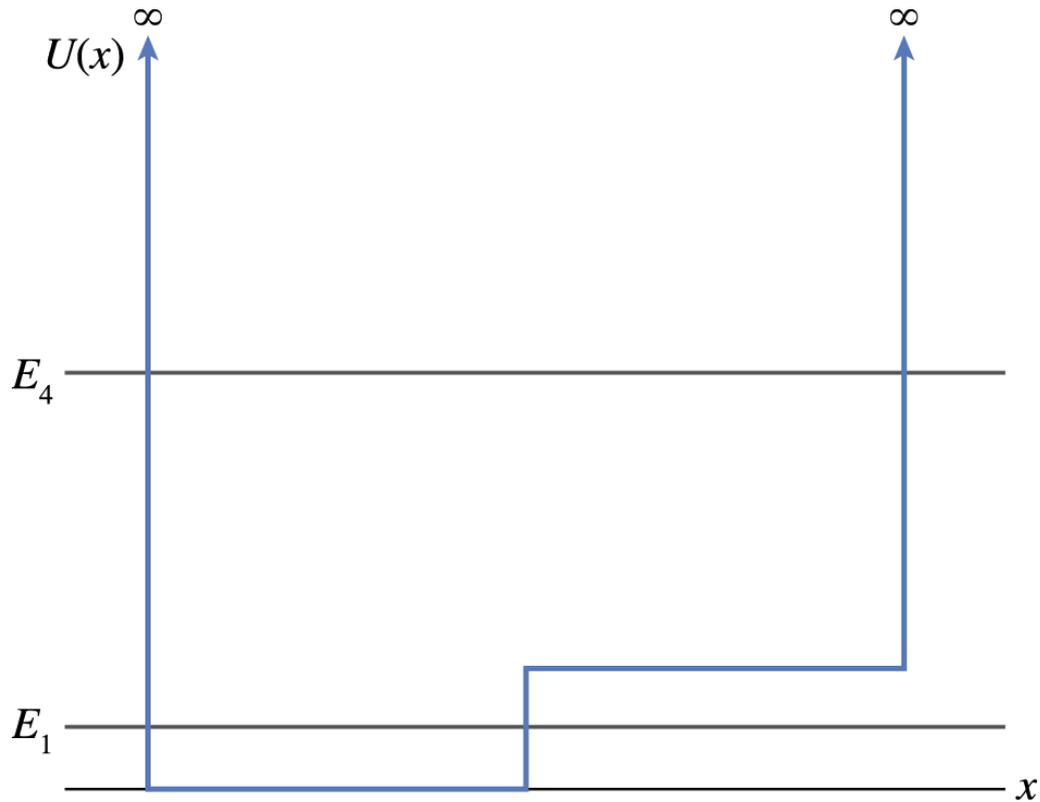
$$\psi^2(x) + (\psi'(x))^2 / k^2 = C^2$$

Essa expressão vale dos 2 lados do "degrau". Mas como ψ e ψ' são contínuos em $x = D$, e $1/k_1 < 1/k_2$, segue que

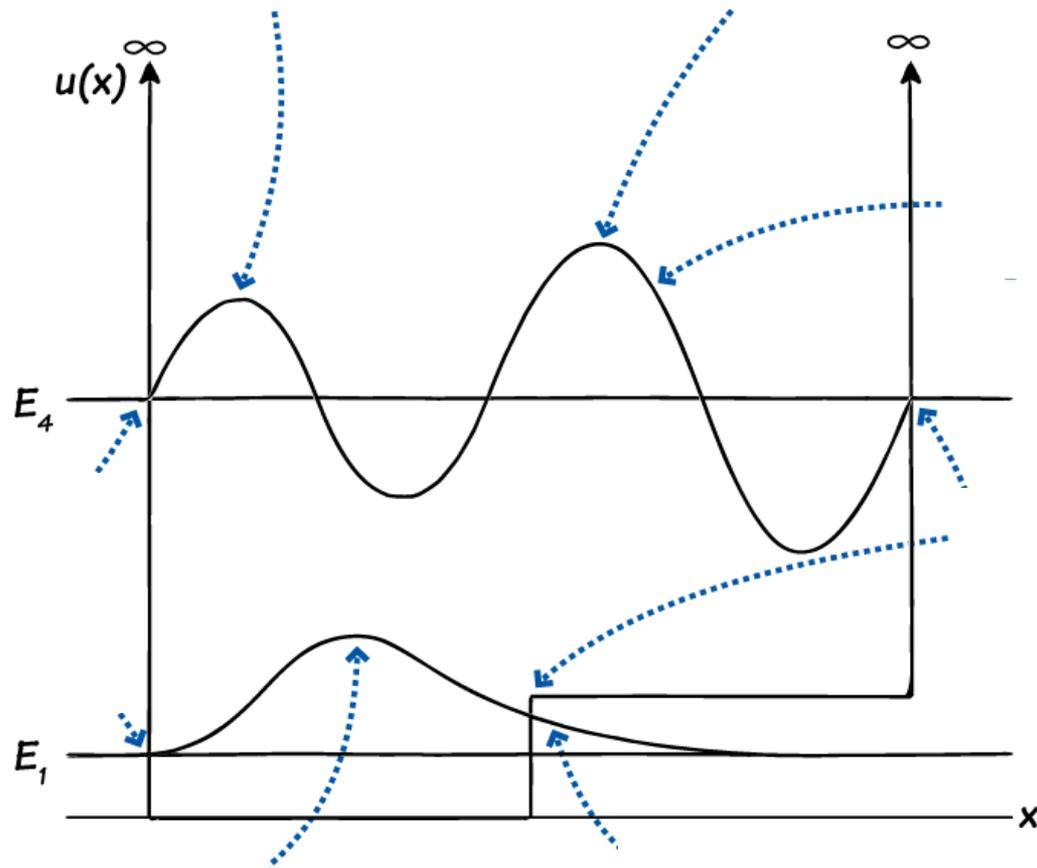
$$\text{Amplitudes: } C_1 < C_2$$



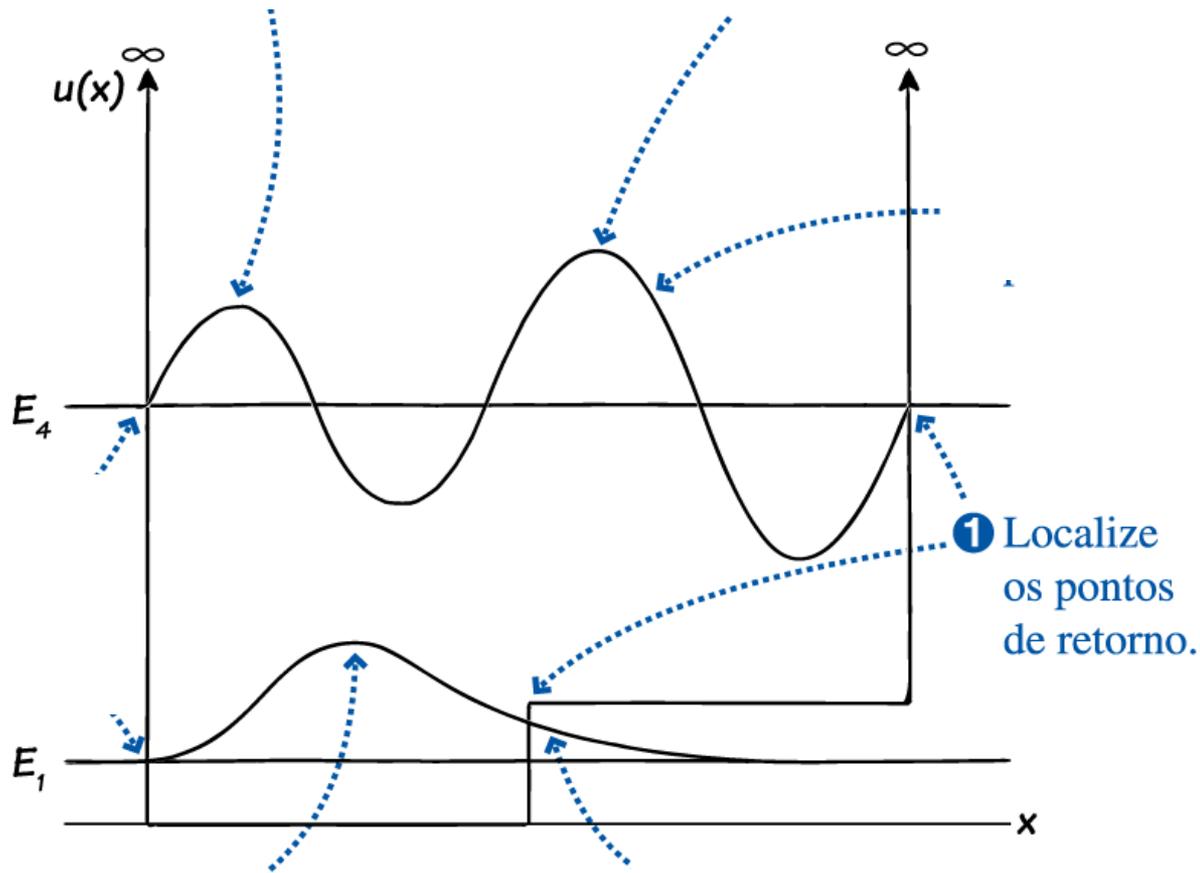
POÇO DE POTENCIAL GERAL: ANÁLISE QUALITATIVA DAS FUNÇÕES DE ONDA DE ESTADOS LIGADOS



POÇO DE POTENCIAL GERAL: ANÁLISE QUALITATIVA DAS FUNÇÕES DE ONDA DE ESTADOS LIGADOS



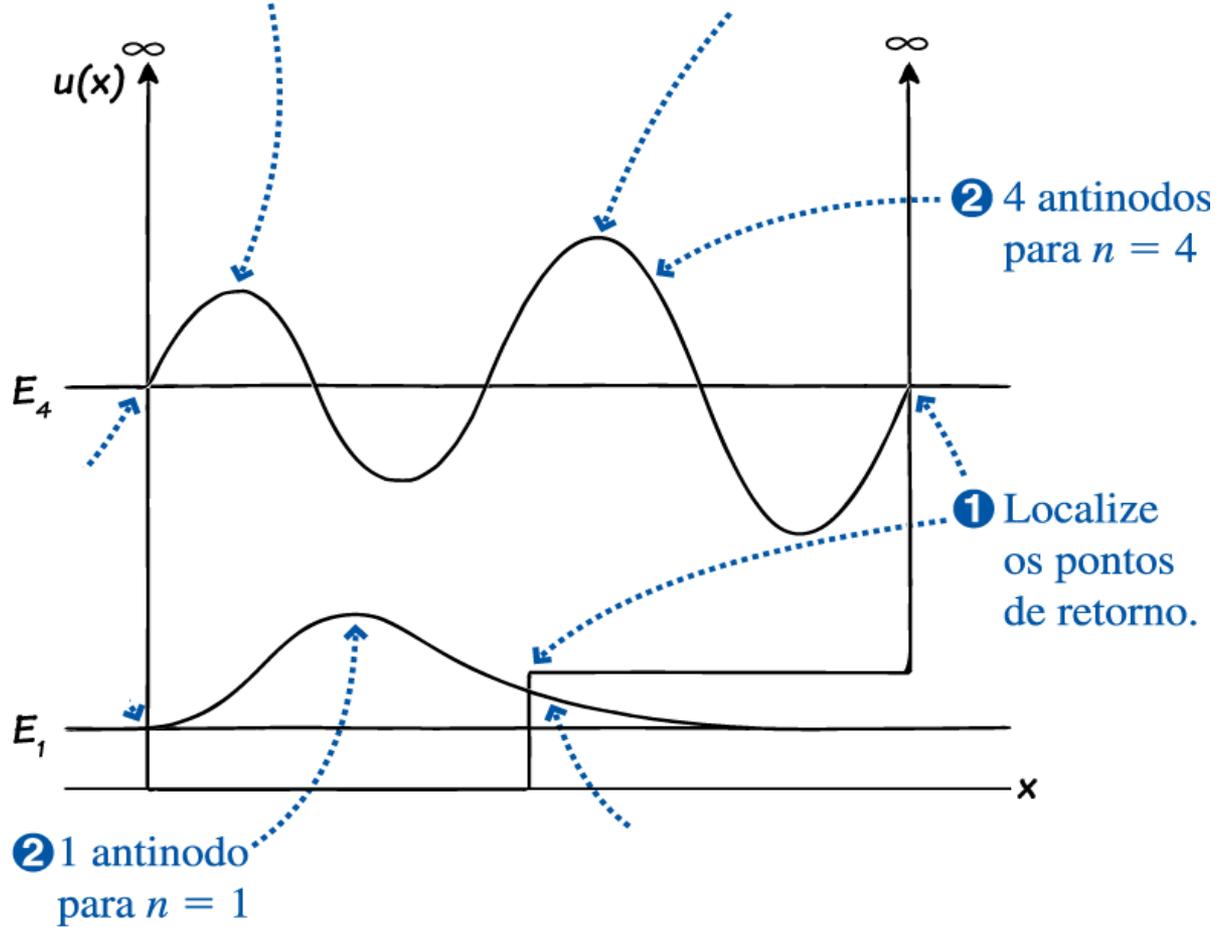
POÇO DE POTENCIAL GERAL: ANÁLISE QUALITATIVA DAS FUNÇÕES DE ONDA DE ESTADOS LIGADOS



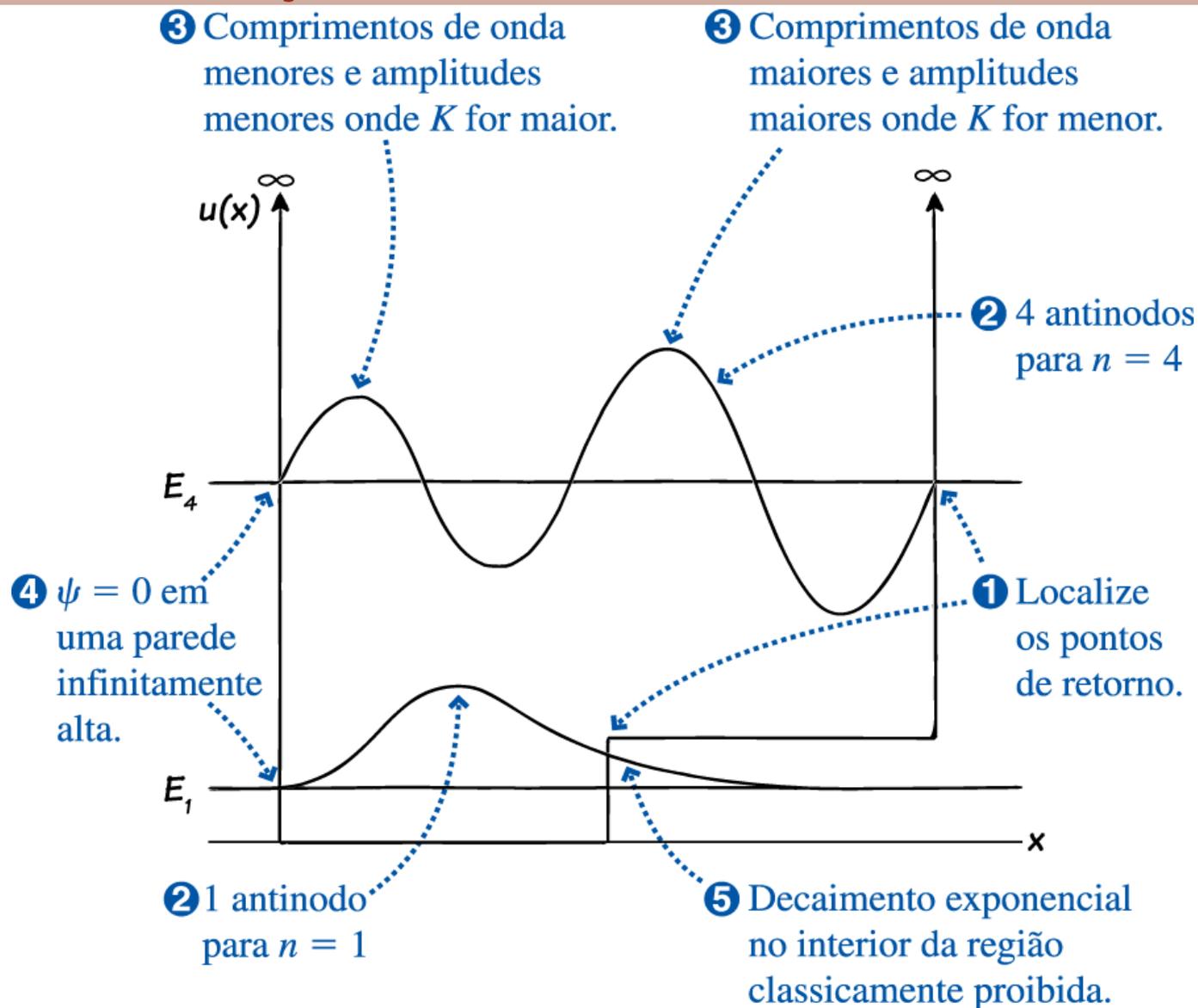
POÇO DE POTENCIAL GERAL: ANÁLISE QUALITATIVA DAS FUNÇÕES DE ONDA DE ESTADOS LIGADOS

③ Comprimentos de onda menores e amplitudes menores onde K for maior.

③ Comprimentos de onda maiores e amplitudes maiores onde K for menor.

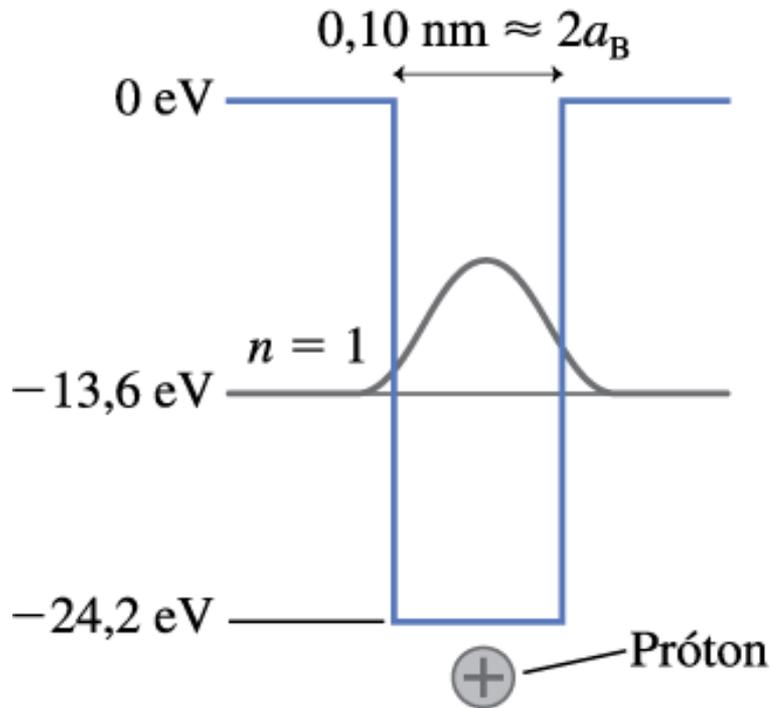


POÇO DE POTENCIAL GERAL: ANÁLISE QUALITATIVA DAS FUNÇÕES DE ONDA DE ESTADOS LIGADOS

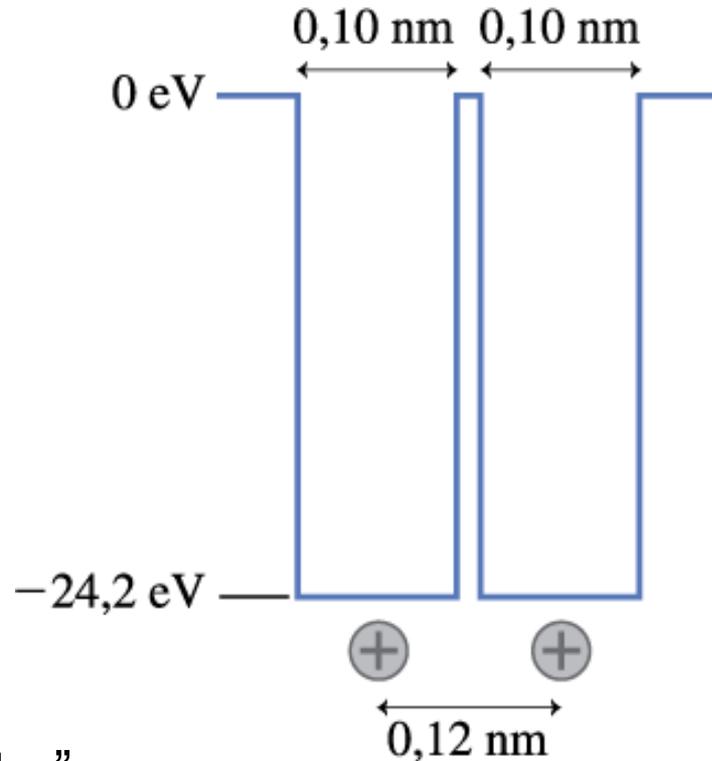


LIGAÇÃO QUÍMICA COVALENTE

(a) Modelo unidimensional simples de um átomo de hidrogênio



(b) Modelo da molécula de H_2^+ considerada como um elétron ligado a dois prótons separados por $0,12 \text{ nm}$

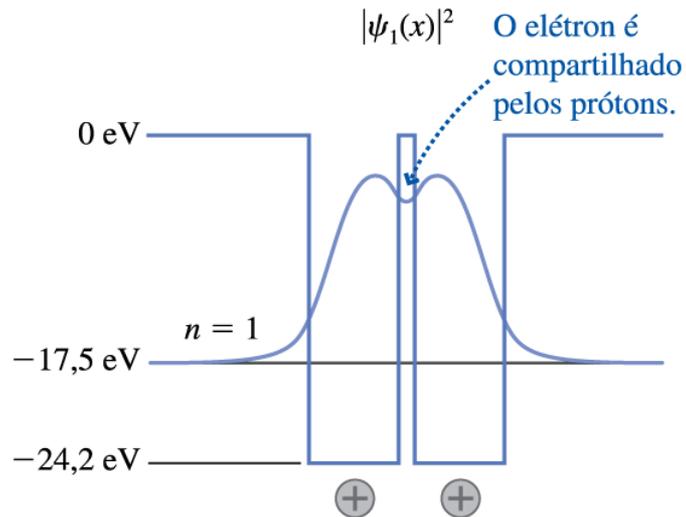
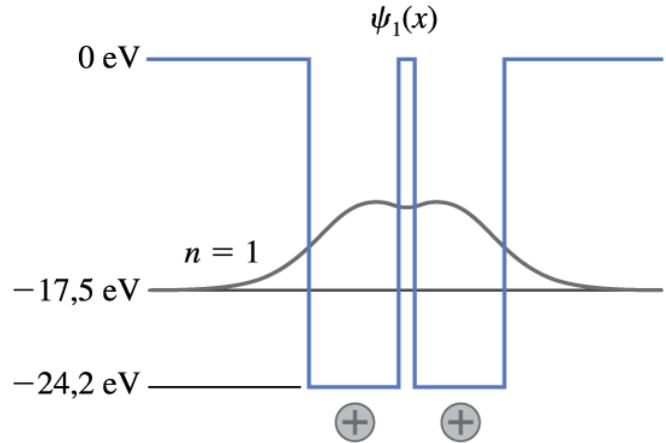


vide applet “Estados Quânticos Ligados”



LIGAÇÃO QUÍMICA COVALENTE

(a) Orbital ligante

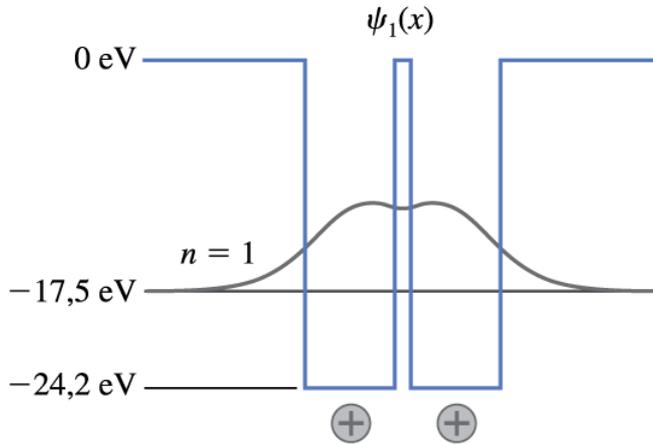


Energia **diminui** com a distância entre os núcleos

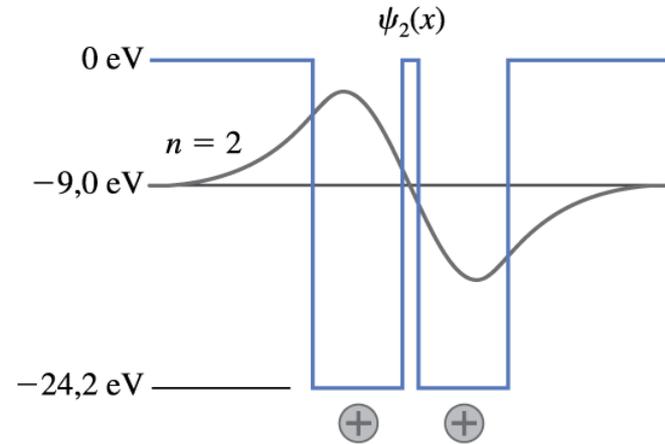


LIGAÇÃO QUÍMICA COVALENTE

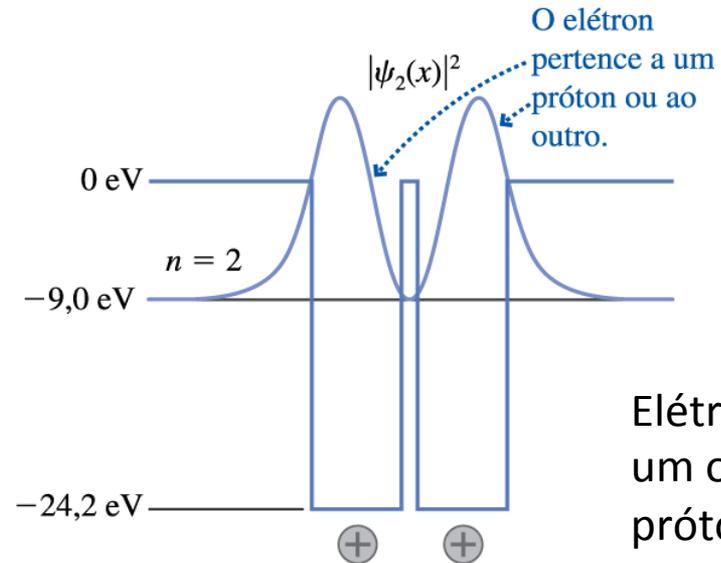
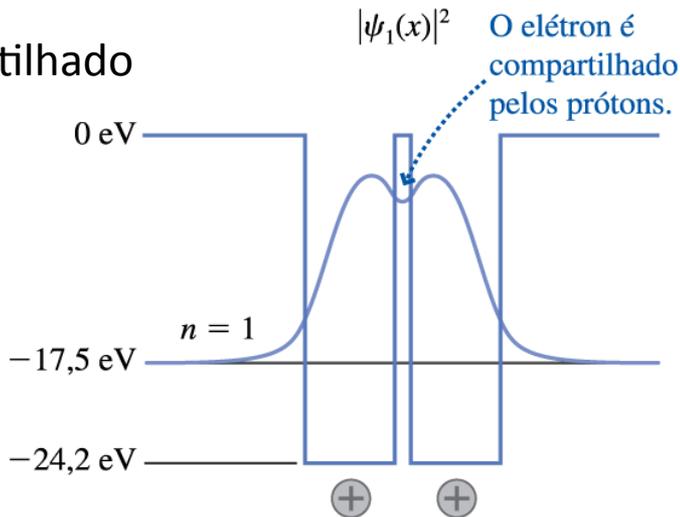
(a) Orbital ligante



(b) Orbital antiligante



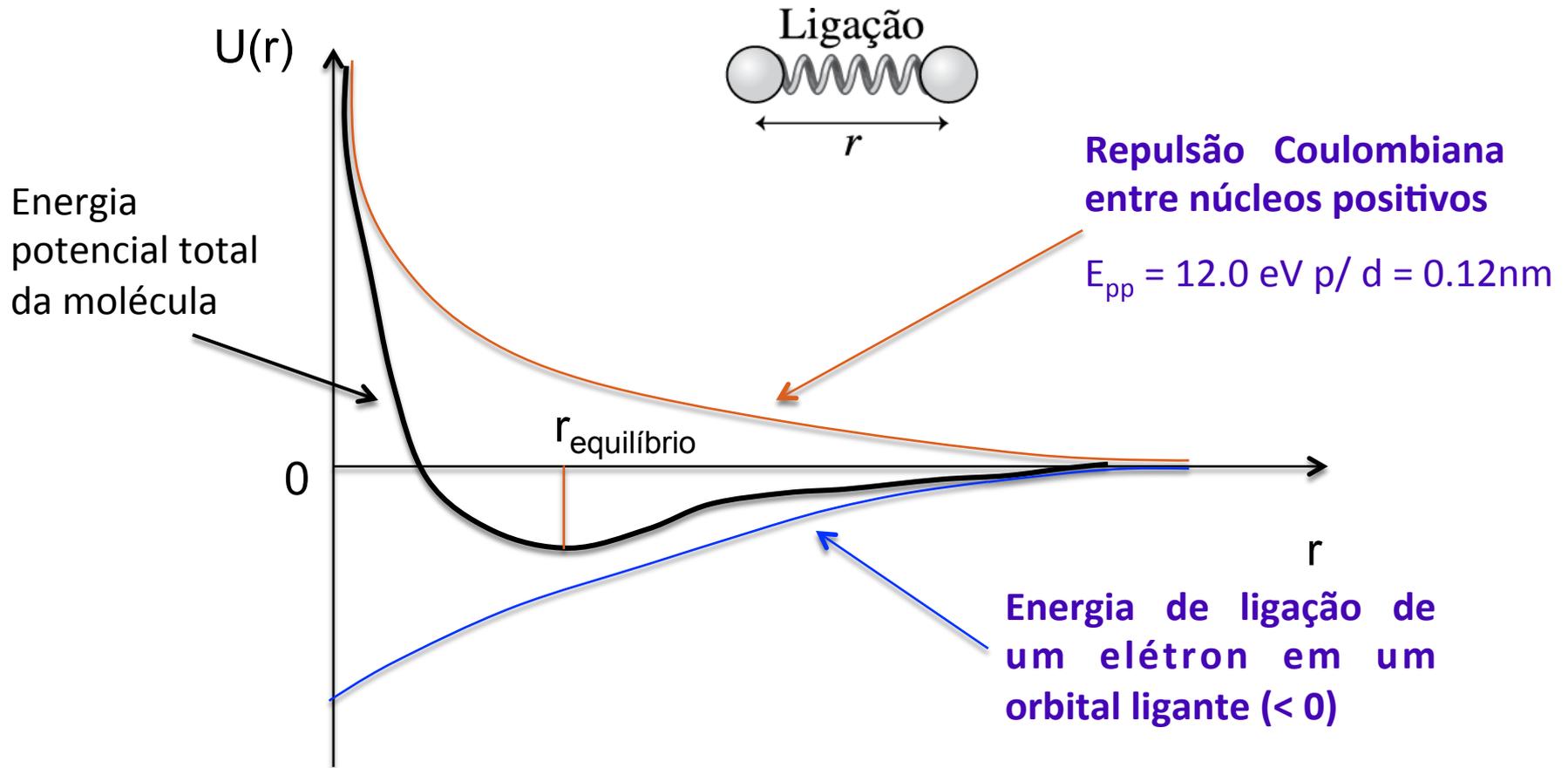
Elétron compartilhado



Elétron em um ou outro próton



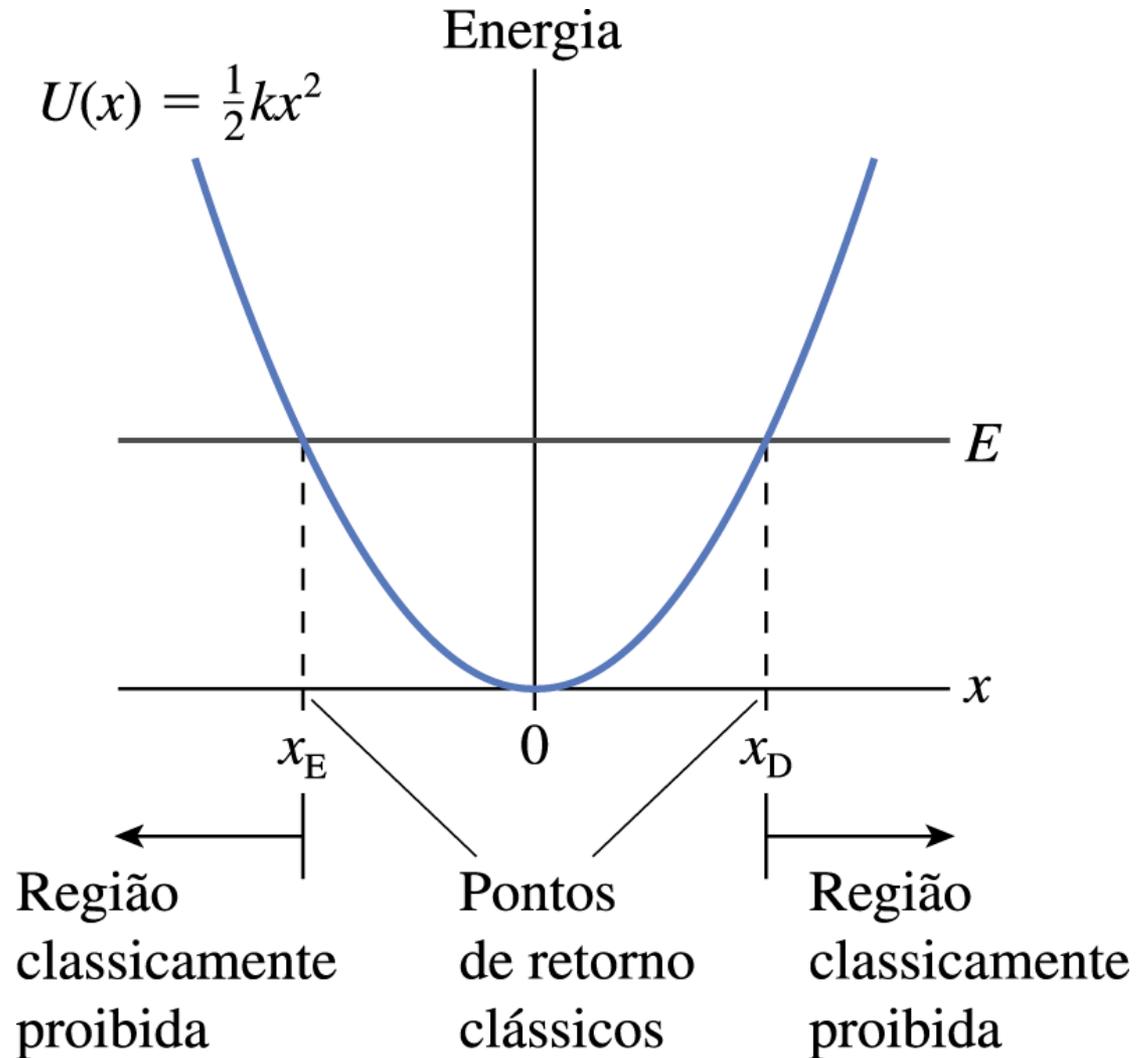
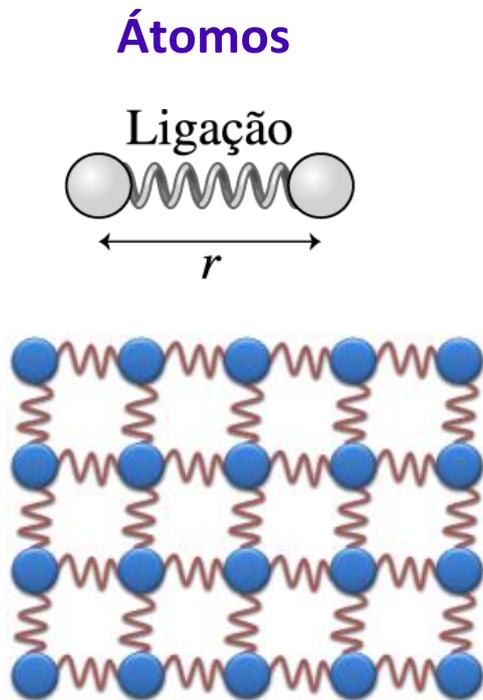
LIGAÇÃO QUÍMICA COVALENTE



Tipicamente: $r_{\text{equilíbrio}} \sim 10^{-1} \text{ nm a } 1 \text{ nm}$ (dimensões atômicas)

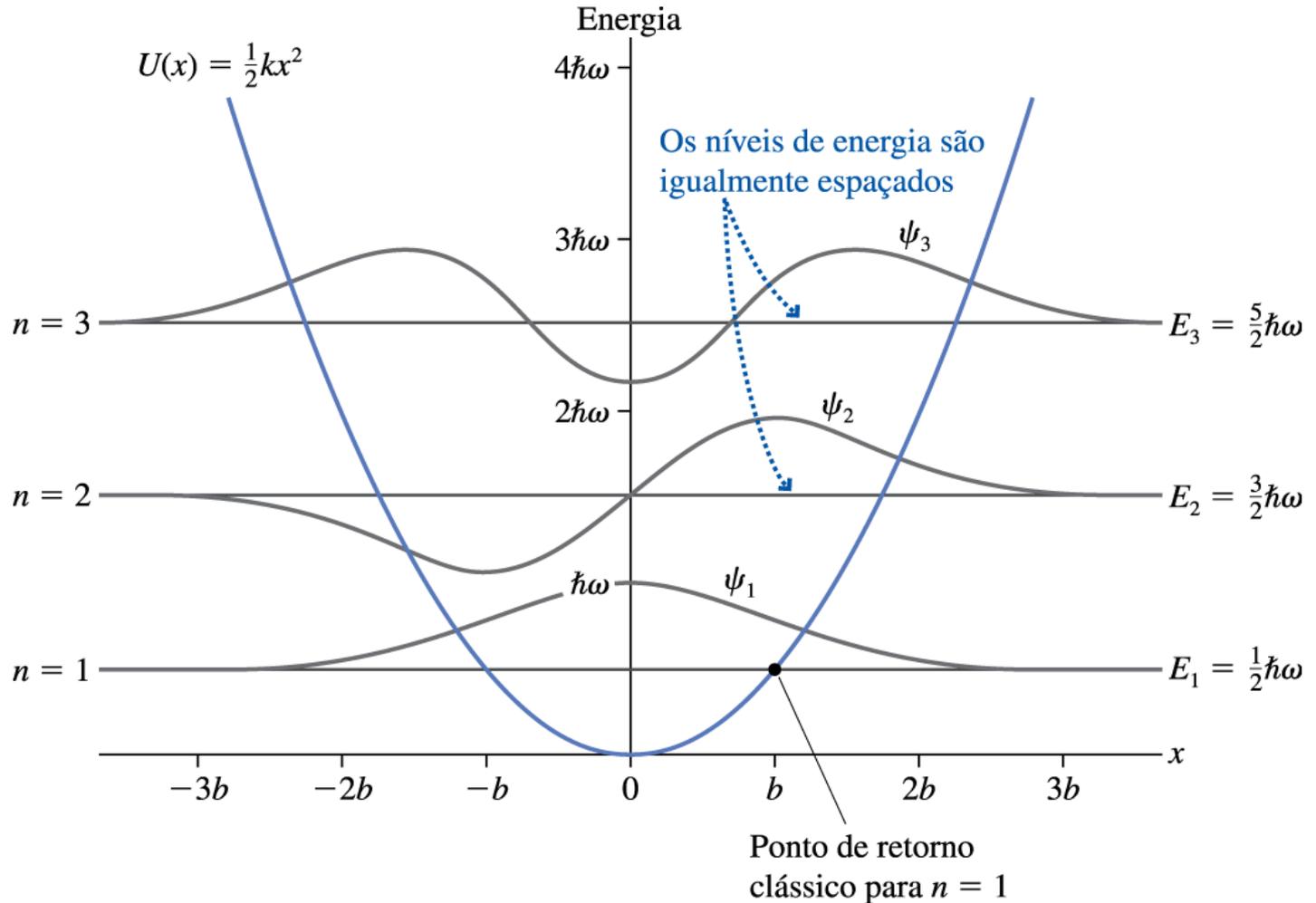


OSCILADOR HARMÔNICO CLÁSSICO



OSCILADOR HARMÔNICO

Partícula
clássica
oscila com
 $\omega = \sqrt{k/m}$



OSCILADOR HARMÔNICO CLÁSSICO

Equação de Schrödinger

$$\frac{d^2\psi}{dx^2} = -\frac{2m}{\hbar^2} \left[E - \frac{1}{2}kx^2 \right] \psi(x)$$

Primeiras soluções

$$\psi_1(x) = A_1 e^{-x^2/2b^2}$$

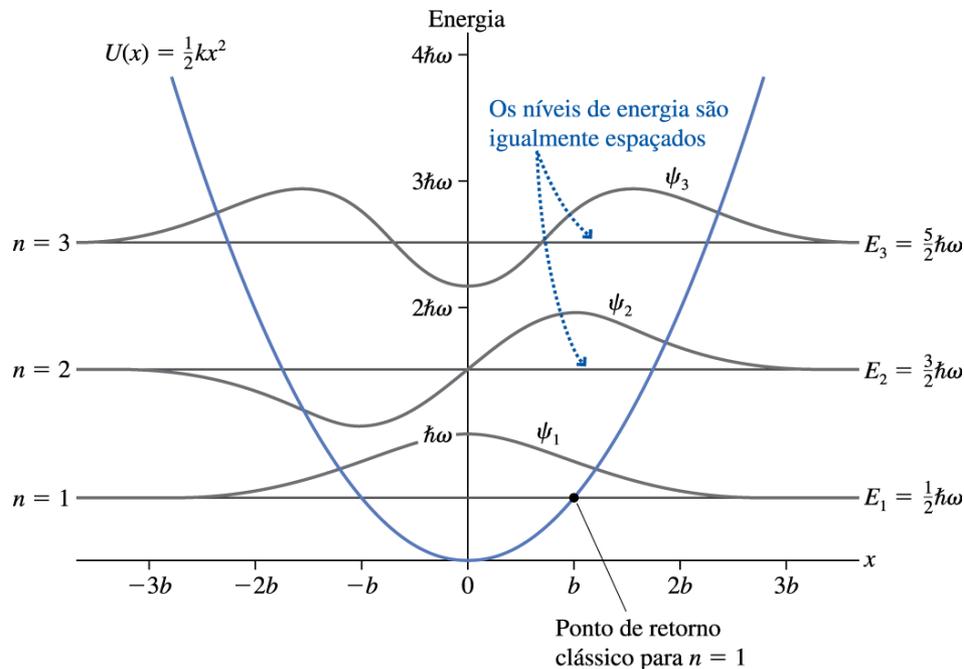
$$\psi_2(x) = A_2 \frac{x}{b} e^{-x^2/2b^2} \quad b = \sqrt{\frac{\hbar}{m\omega}}$$

$$\psi_3(x) = A_3 \left(1 - \frac{2x^2}{b^2} \right) e^{-x^2/2b^2}$$

Energias: $E_n = (n - \frac{1}{2}) \hbar\omega$

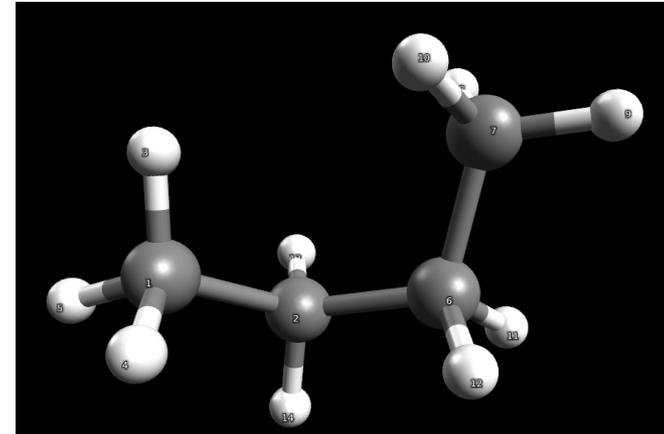
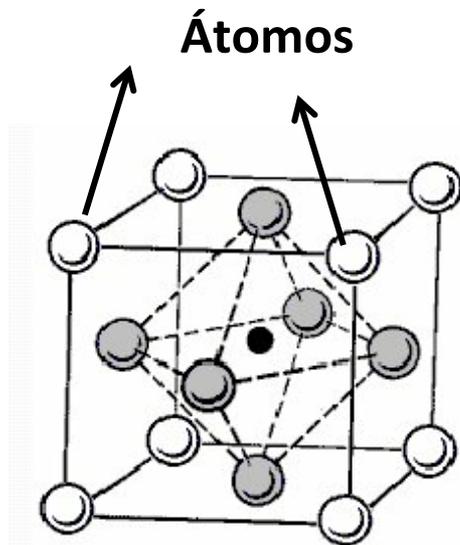
Espaçamento uniforme:

$$E_{n+1} - E_n = \hbar\omega$$

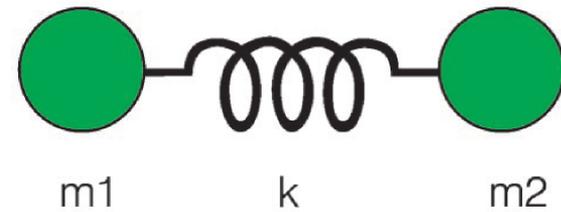


OSCILADOR HARMÔNICO

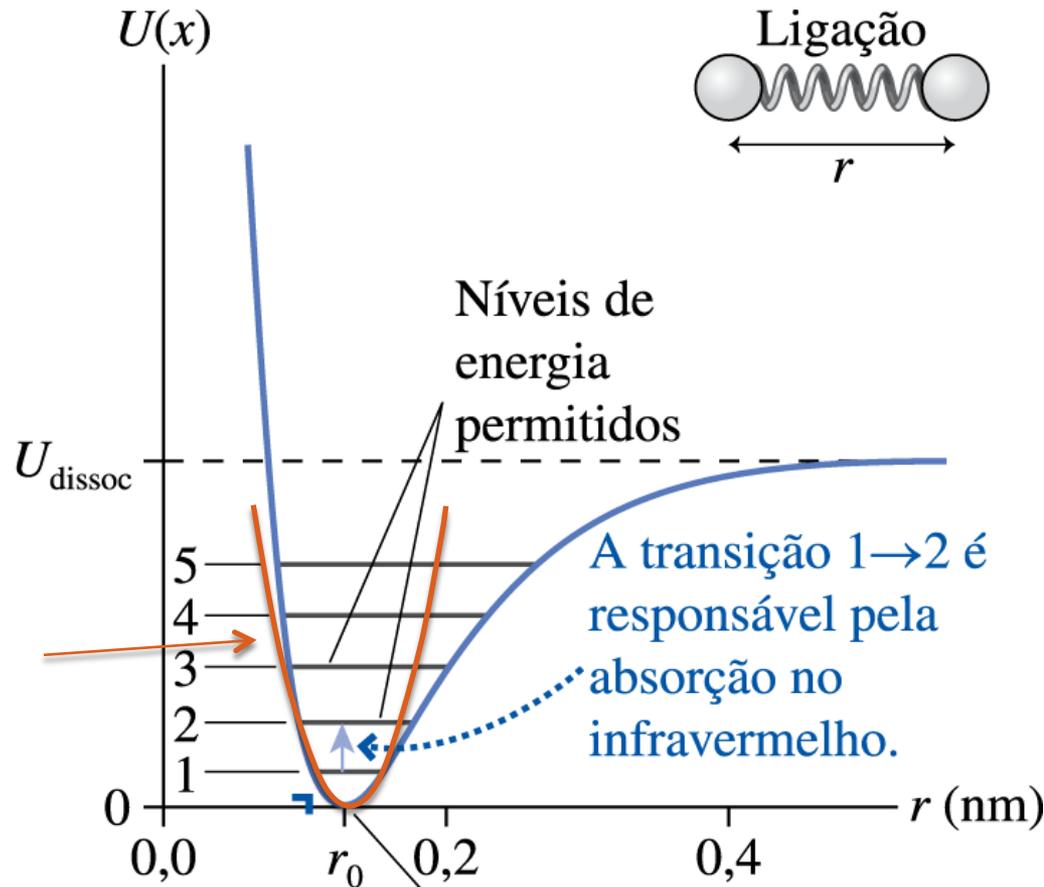
Classicamente



Átomos



Aplicação : vibrações moleculares



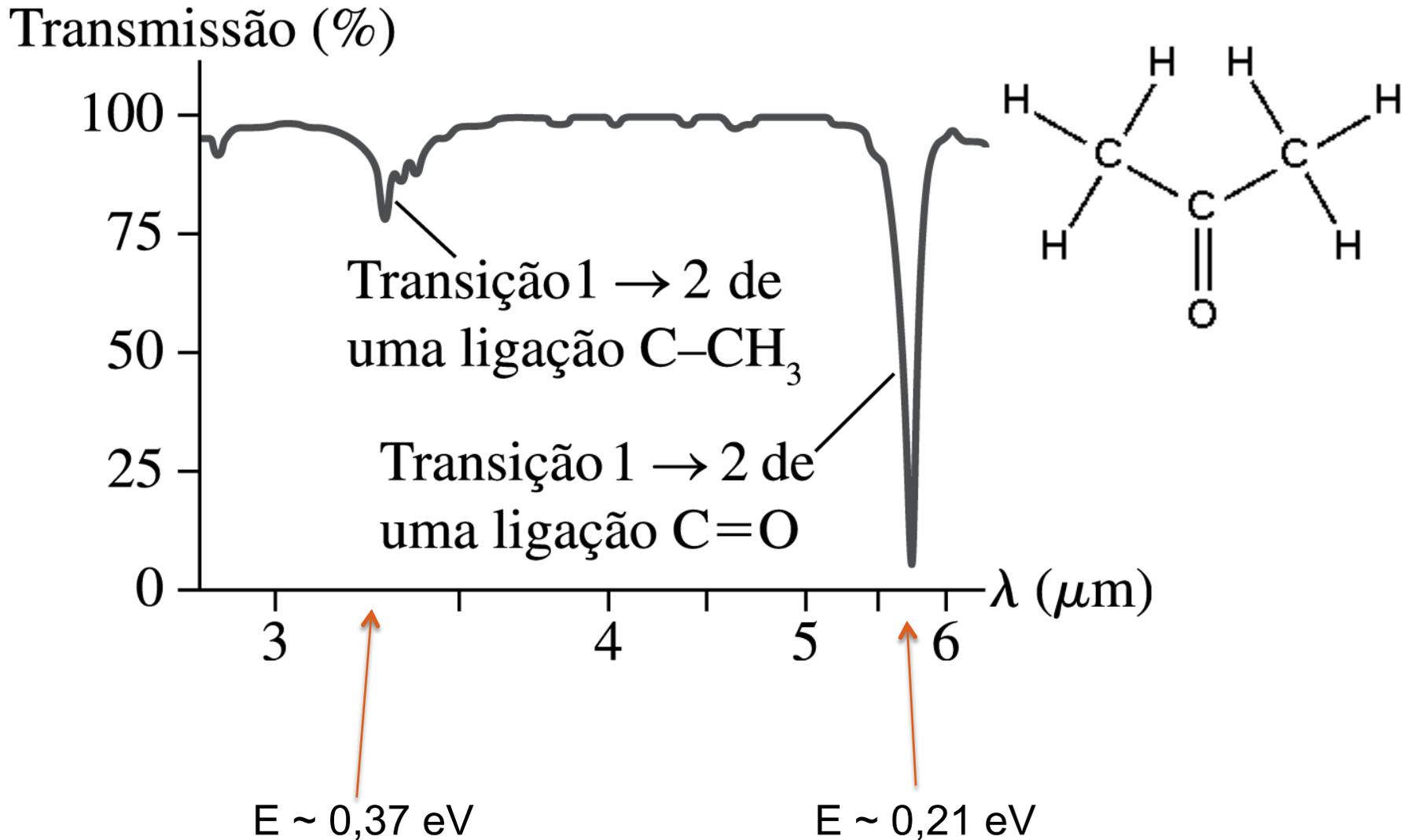
Parábola aproximada, próximo ao mínimo

A transição 1→2 é responsável pela absorção no infravermelho.

A parte mais funda do poço de potencial é quase uma parabólica. Separação de equilíbrio



EXEMPLO: absorção por acetona [$(\text{CH}_3)_2\text{CO}$]



BARREIRA DE ENERGIA: PARTÍCULA CLÁSSICA

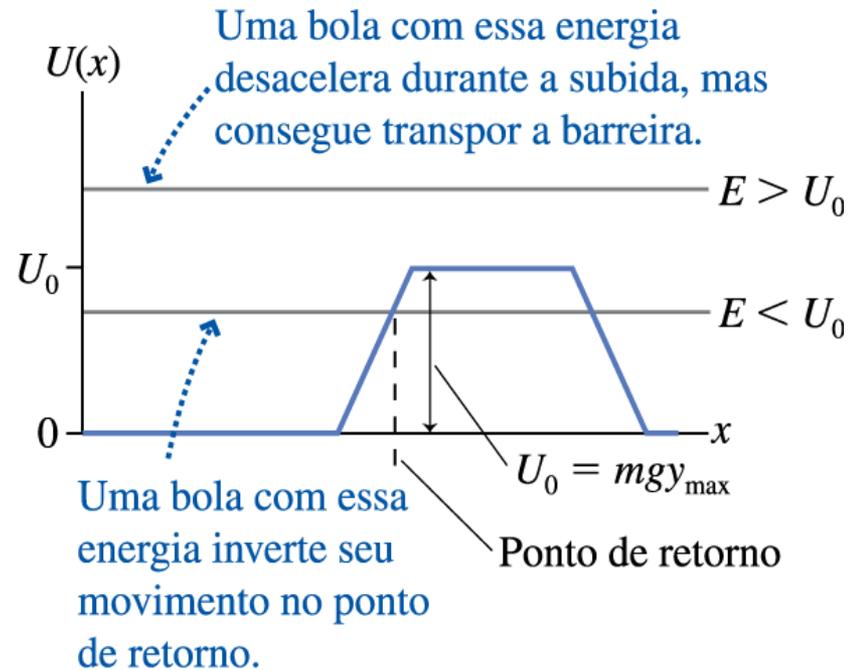
(a) BARREIRA FÍSICA



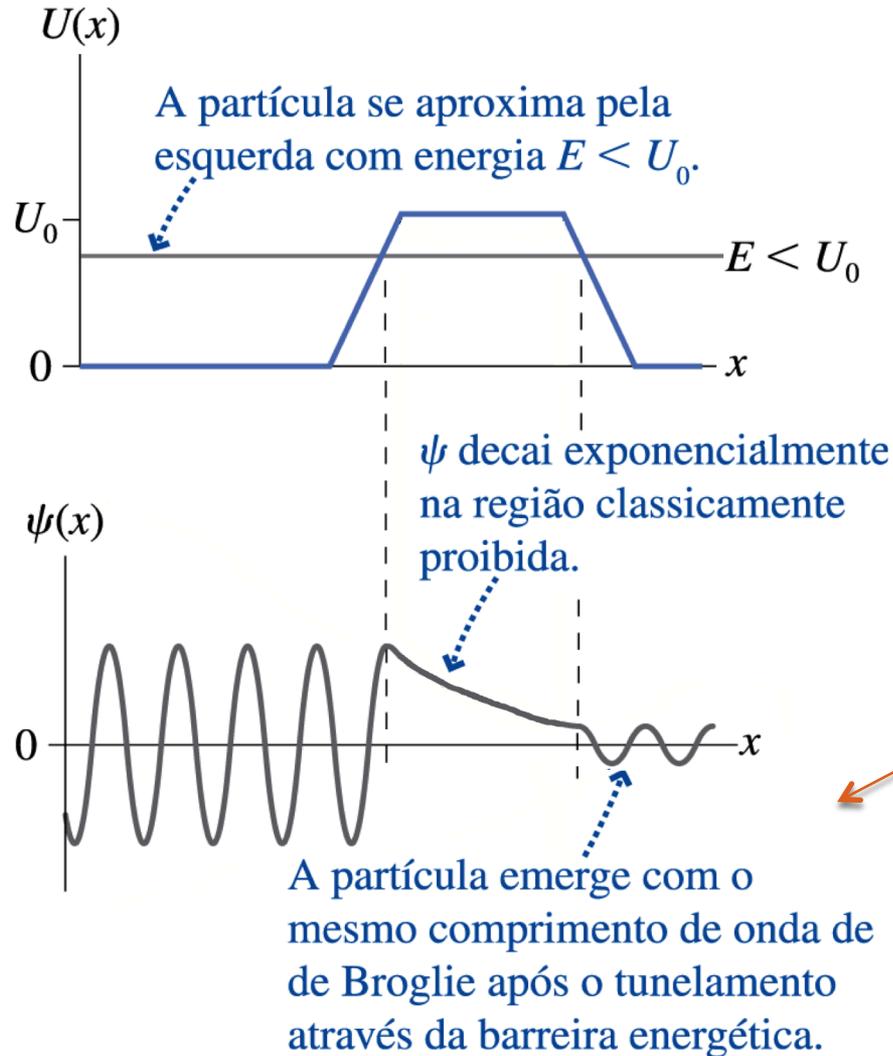
A bola possui energia cinética K

BARREIRA ENERGÉTICA

(b)



BARREIRA DE ENERGIA: PARTÍCULA QUÂNTICA



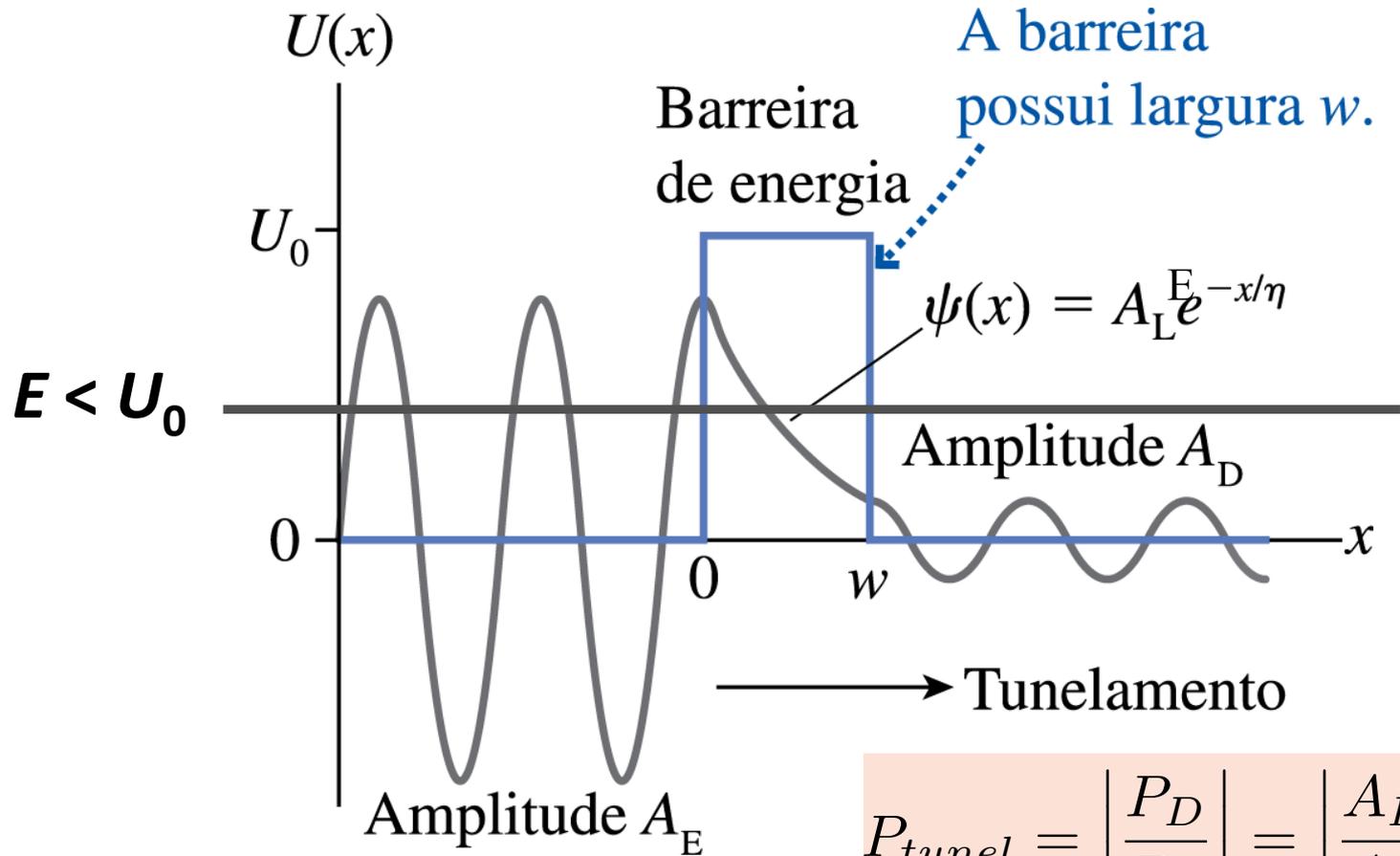
Partícula tem probabilidade de aparecer do outro lado da barreira!

**Tunelamento
quantomecânico**

obs: fig. incorreta no livro (limites da região class. proibida estão na posição errada)



TUNELAMENTO: dependência com largura e altura da barreira



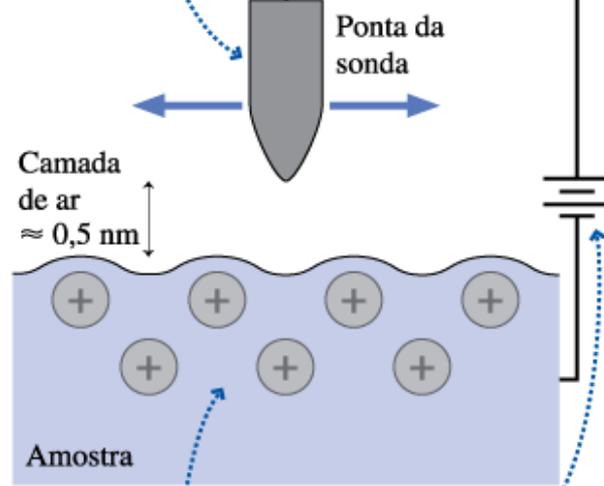
$$P_{tunnel} = \left| \frac{P_D}{P_E} \right| = \left| \frac{A_D}{A_E} \right|^2 = e^{-2w/\eta}$$



STM – Scanning tunneling microscope

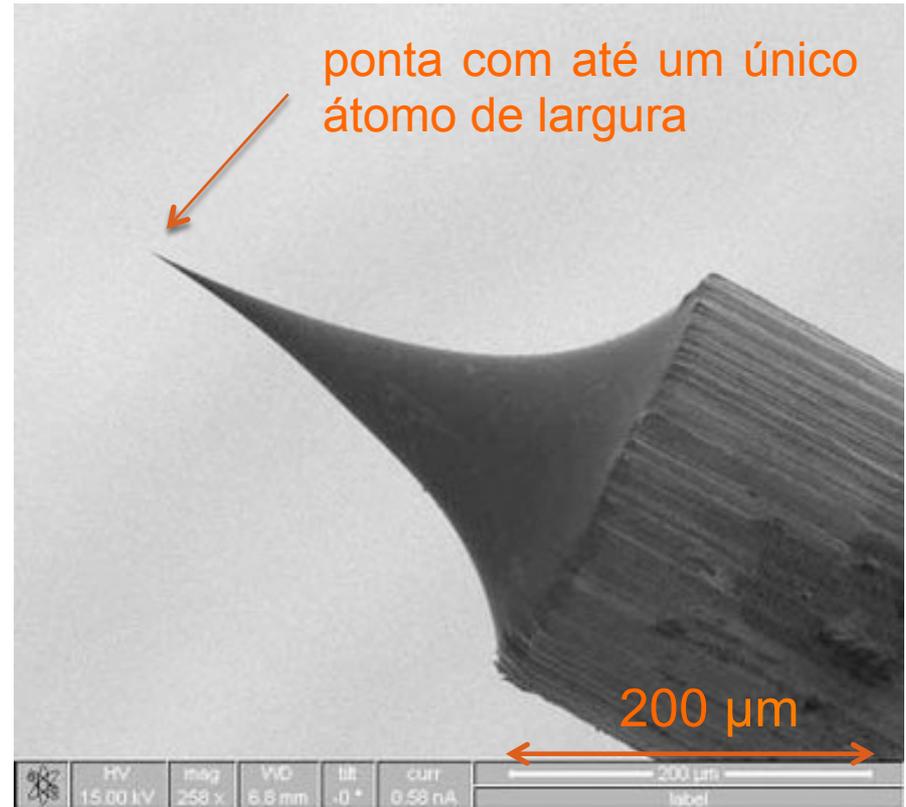
4. Uma imagem mostra a corrente em função da posição da ponta da sonda, revelando o perfil da superfície.

3. A corrente é monitorada à medida que a sonda é movimentada para a frente e para trás, varrendo toda a amostra.



1. A amostra pode ser considerada como um conjunto de caroços iônicos positivos imersos em um "mar" de elétrons.

2. Uma pequena voltagem positiva faz os elétrons tunelarem através da fina camada de ar entre a ponta da sonda e a amostra.



STM – Scanning tunneling microscope

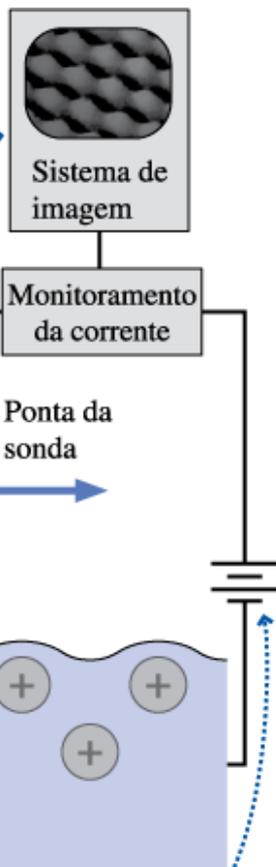
4. Uma imagem mostra a corrente em função da posição da ponta da sonda, revelando o perfil da superfície.

3. A corrente é monitorada à medida que a sonda é movimentada para a frente e para trás, varrendo toda a amostra.

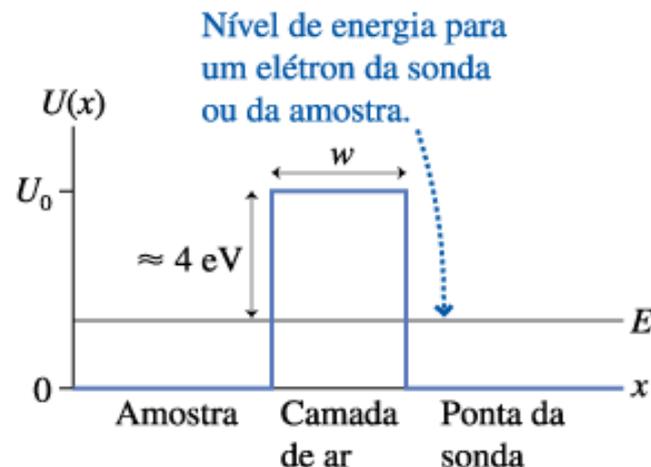
Camada de ar $\approx 0,5 \text{ nm}$

1. A amostra pode ser considerada como um conjunto de caroços iônicos positivos imersos em um “mar” de elétrons.

2. Uma pequena voltagem positiva faz os elétrons tunelarem através da fina camada de ar entre a ponta da sonda e a amostra.



(b)



Como $P_{tunnel} \sim e^{-2w/\eta}$, uma pequena mudança em w se reflete em uma grande mudança na corrente de tunelamento.

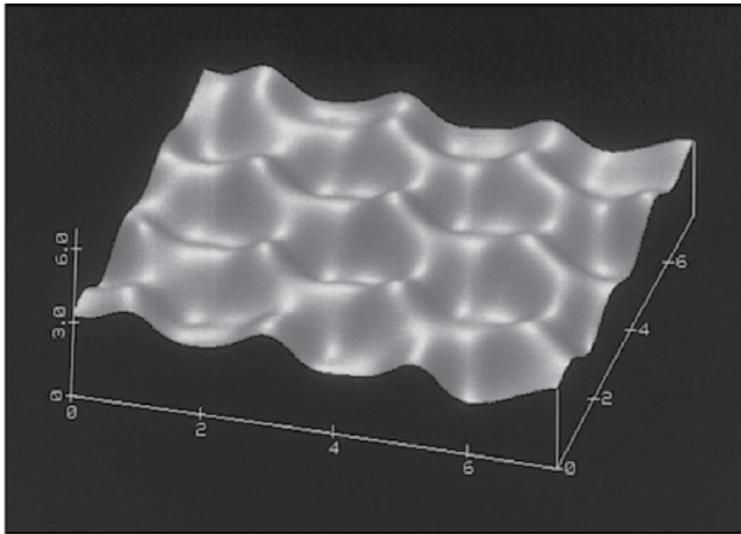
Exercício: no exemplo acima, em quantas vezes P_{tunnel} aumenta quando a ponta da sonda passa sobre um átomo de espessura $\sim 0,1 \text{ nm}$ (reduzindo w de $0,5 \text{ nm}$ para $0,4 \text{ nm}$)?

R: cerca de $e^2 \sim 7,3$ vezes

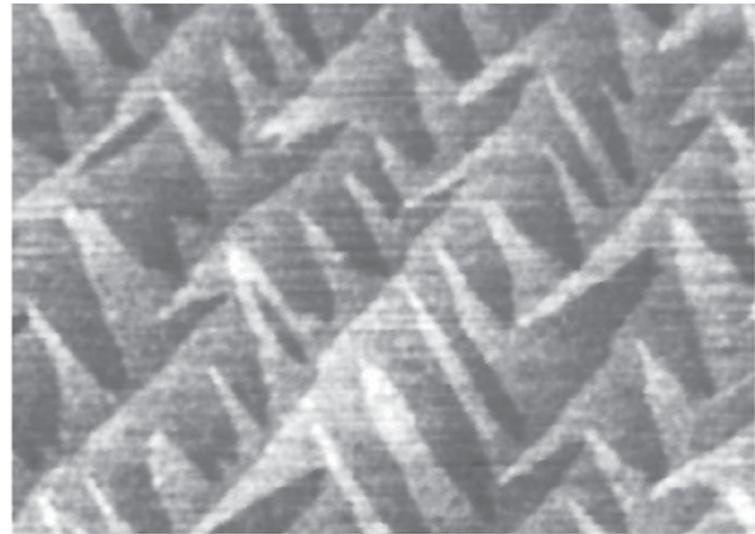


STM – *Scanning tunneling microscope*

Microscópio de tunelamento



Átomos de carbono na superfície do grafite



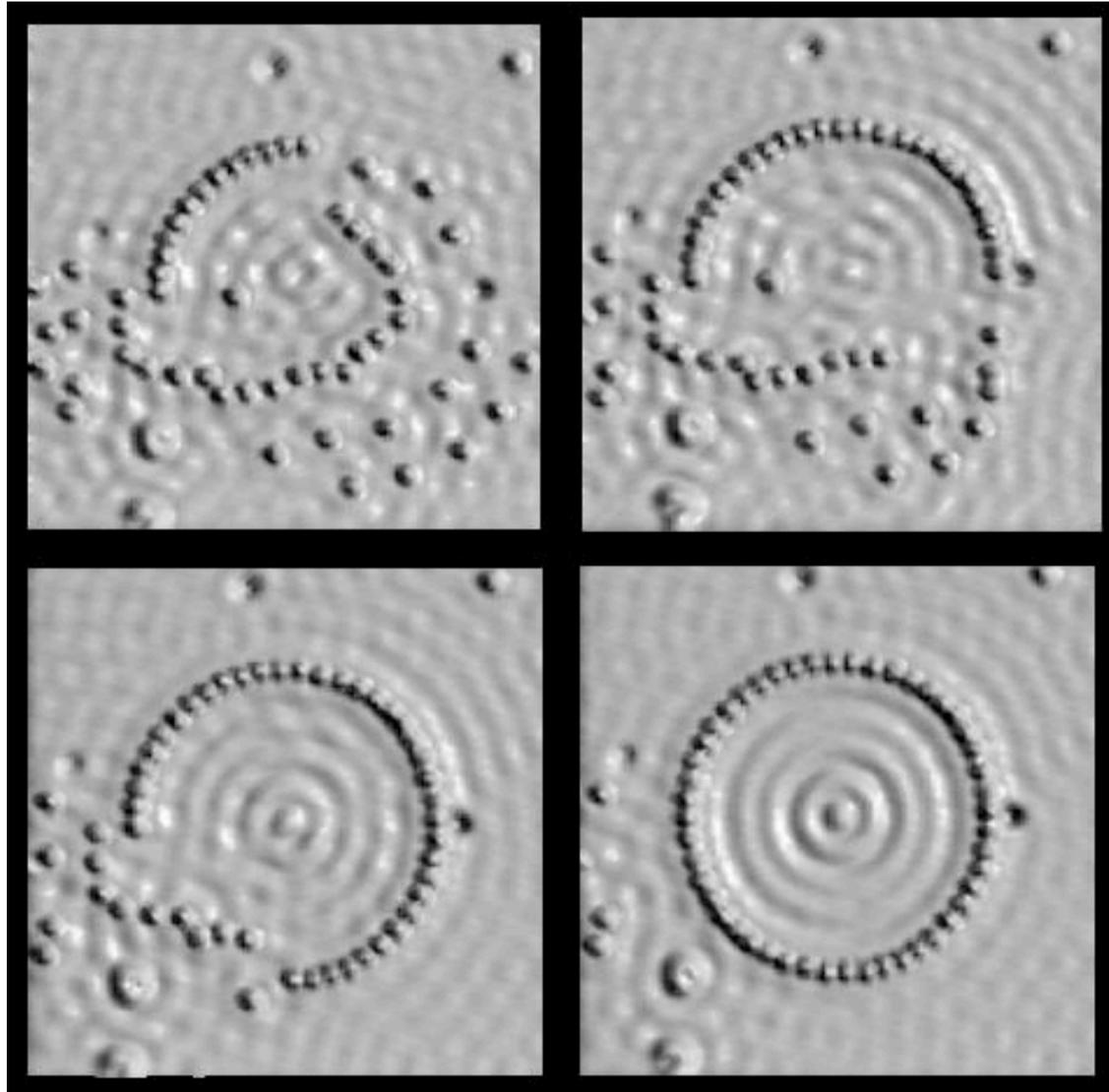
A superfície do silício



STM – *Scanning tunneling microscope*

Microscópio de tunelamento

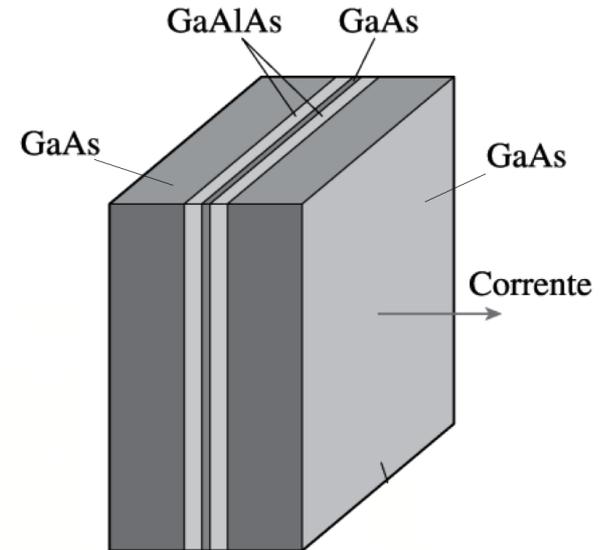
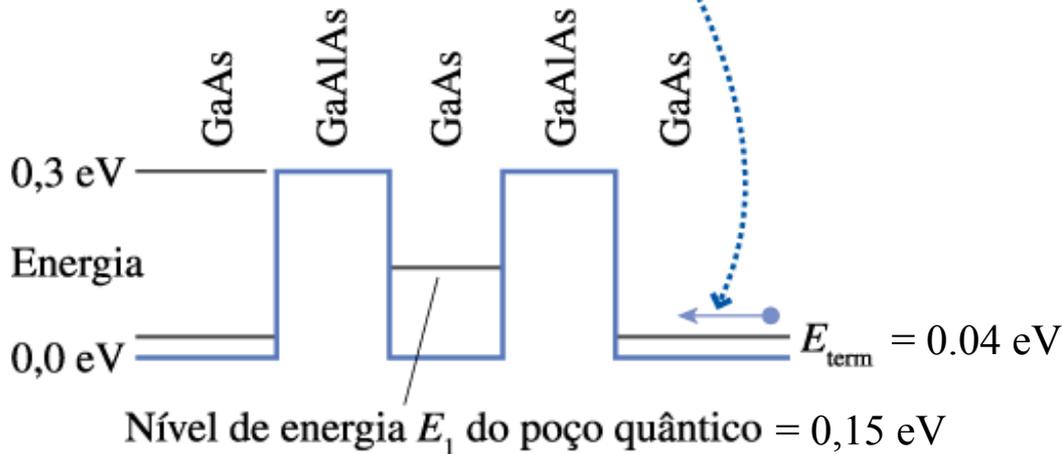
- ✓ A ponta do STM também pode ser usada para mover átomos “soltos” na superfície. Vemos aqui a montagem de um círculo formado por átomos de ferro em uma superfície de Cu.
- ✓ Essa estrutura é chamada de **“curral quântico”**, pois os elétrons na superfície do Cu ficam presos no seu interior como animais em um curral.
- ✓ Observe a onda estacionária circular formada por esses elétrons! (A corrente de tunelamento é maior nas regiões com mais probabilidade de encontrar um elétron).



DIODO TÚNEL RESSONANTE

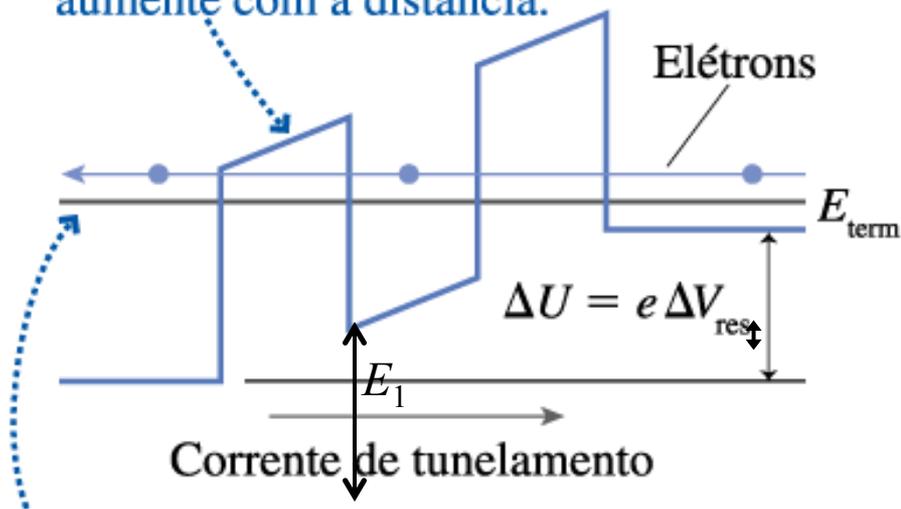
(a)

Elétrons aproximam-se pelo exterior com energia térmica $E_{term} \sim 3/2 k_B T = 0.04 \text{ eV}$ a $T = 300\text{K}$



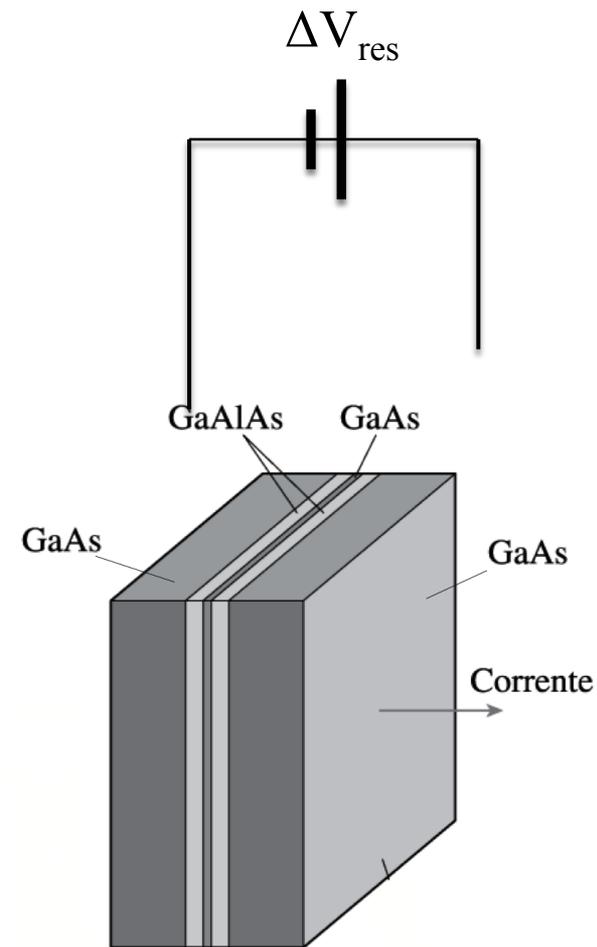
DIODO TÚNEL RESSONANTE

(b) Uma diferença de potencial faz com que a energia potencial aumente com a distância.



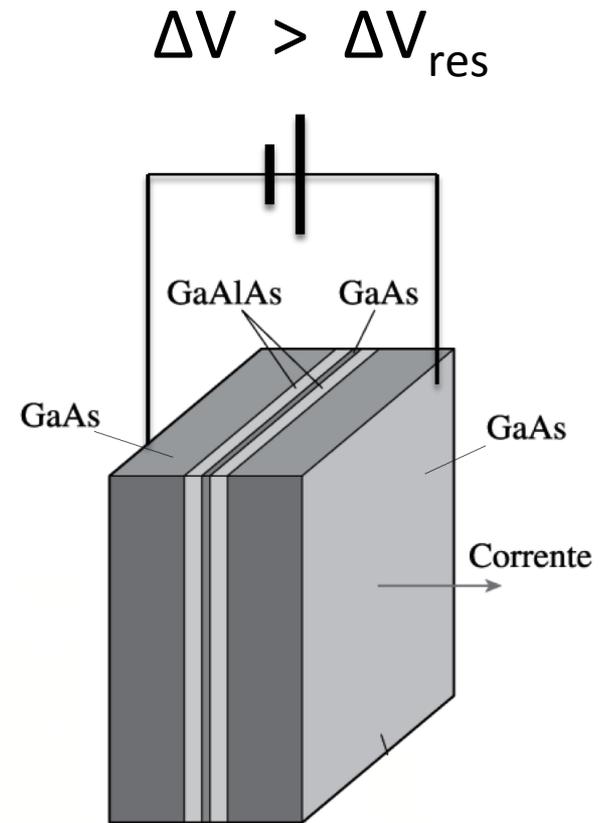
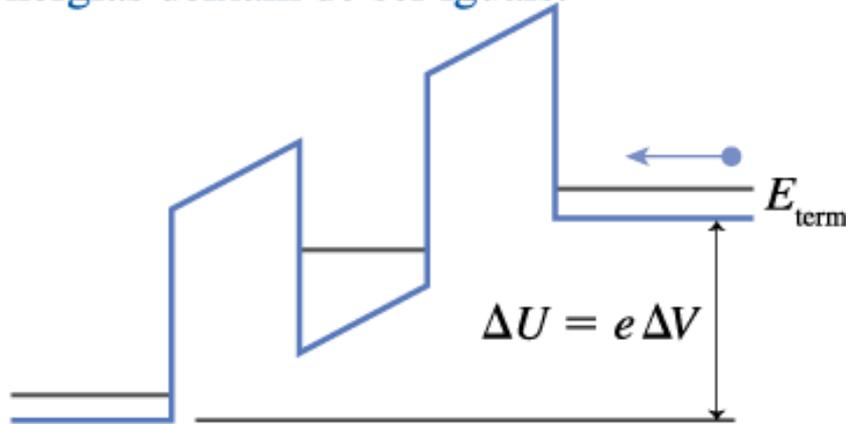
A energia do poço quântico se iguala à energia do elétron, o que permite que os elétrons tunelem.

Quando $\Delta U = E_1 - E_{term}$, a energia do nível no interior do poço quântico se iguala à energia dos elétrons incidentes, o que permite que eles tunelem – isto é um efeito de **ressonância**

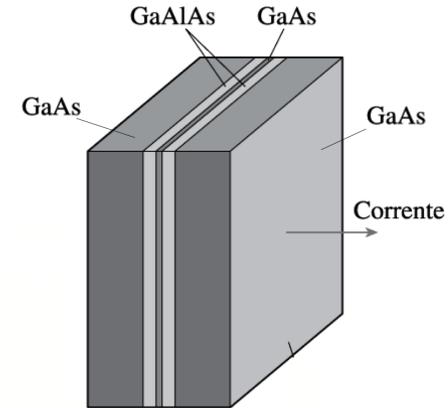
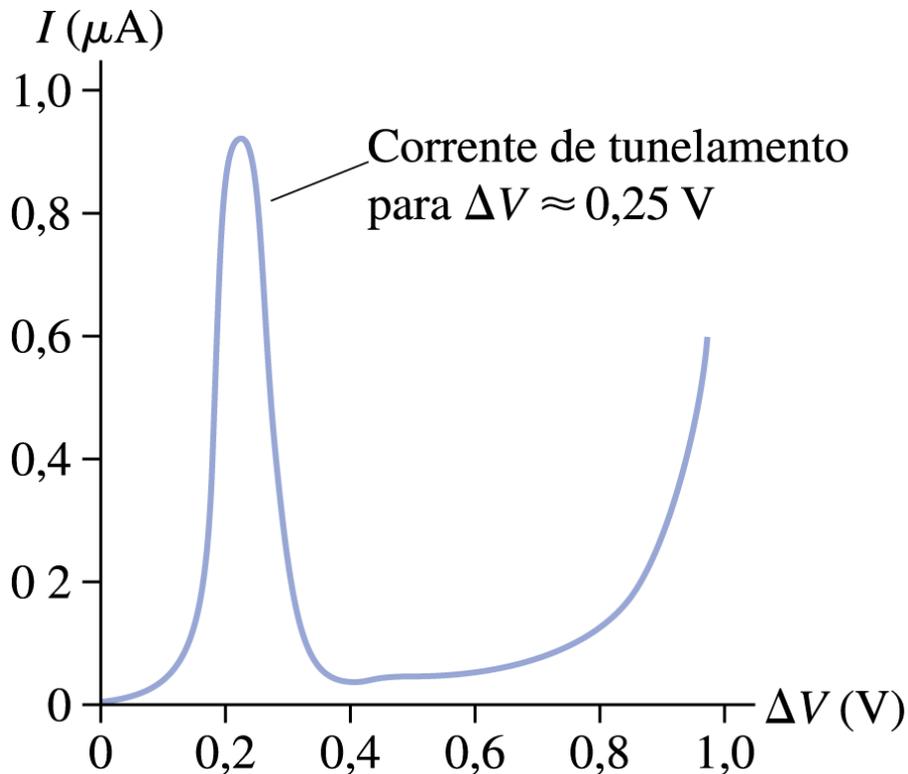


DIODO TÚNEL RESSONANTE

(c) O tunelamento pára quando as energias deixam de ser iguais.



DIODO TÚNEL RESSONANTE



Dados experimentais de uma estrutura com uma camada de 4nm de GaAs entre duas barreiras de 10 nm de GaAlAs

Há uma faixa estreita de voltagens próximas a 0,25V onde a corrente aumenta em 10 vezes.

Aplicação: Circuitos digitais de computadores

