
Quando a Física Mudou de Rumo: A Caminho da Mecânica Quântica

André A. Lino

E-mail: andrelino@ufpi.edu.br

Departamento de Física-UFPI

Quem sou eu?

- Professor André A. Lino
- Coordenador das Olimpíadas de Física no Estado do Piauí: OBF e OBFEP
- Trabalho com cálculos de estrutura eletrônica de nanomateriais utilizando formalismo DFT
- Subcoordenador do Curso de Física.

Organização da apresentação:

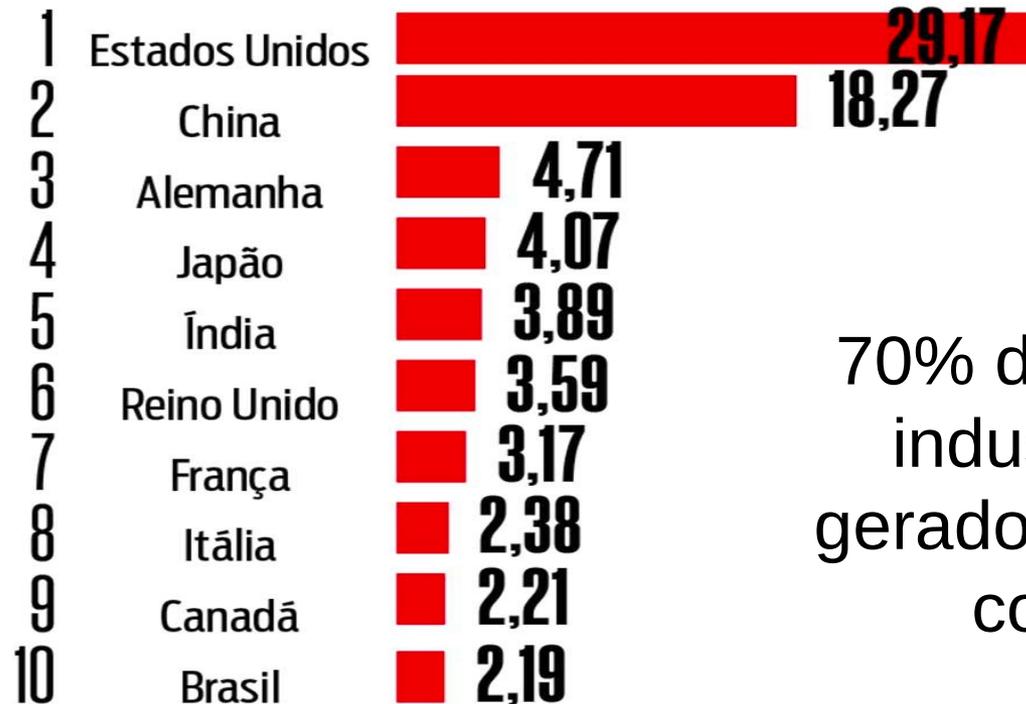
- Irei comentar justificativas para estudar física;
- Irei comentar até onde a Física Clássica dominou o conhecimento
- Irei comentar a época e onde podemos aplicar Teoria da Relatividade e a Mecânica Quântica
- Irei comentar sobre a nanotecnologia e nanociência;
- Irei comentar o por que estudar o átomo e como estudá-lo.
- Por último irei falar sobre o que faço além das aulas no Departamento de Física.

Riqueza das Nações em 2024

OS MAIS ENDINHEIRADOS

PIB

(Em US\$ trilhões)



Fonte: FMI

70% do PIB dos países industrializados são gerados na economia do conhecimento.

1. POSIÇÃO (NÚMERO DE PUBLICAÇÕES – CONTAGEM FRACIONÁRIA)



Science and Engineering Indicators 2020

Ciência, Tecnologia e Inovação

Ciência (do latim *scientia*)

= conhecimento



Tecnologia =
aplicação da ciência

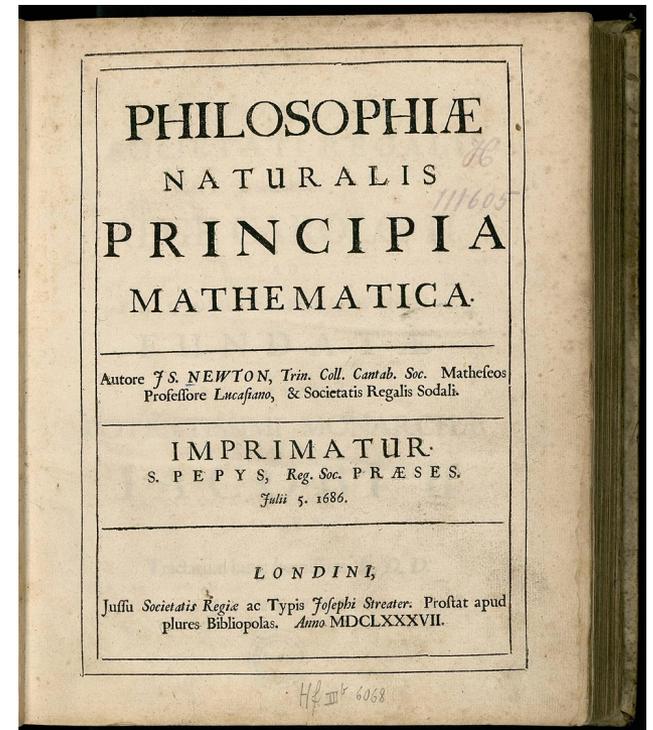
\$\$\$\$\$\$\$\$ \$

Quando a Física Mudou de Rumor?

Podemos dizer que a mecânica clássica e a Teoria Eletromagnética reinaram do século XVII até o começo do século XX.

Começo: século XVII → com Isaac Newton e a publicação: Principia Mathematica (1687), que formalizou as leis do movimento e a gravitação.

$$\vec{F} = \frac{d}{dt} \vec{p}$$



Domínio: séculos XVIII e XIX inteiros → praticamente toda a física era baseada em ideias clássicas: previsibilidade total, espaço e tempo absolutos, matéria contínua.

1. Mecânica Clássica (Newton, 1687):

- Movimento de corpos (de planetas a projéteis).
 - Forças, energia, momento linear e angular.
 - Gravitação universal.
 - Tudo era considerado contínuo e determinístico: se você soubesse as condições iniciais, poderia prever o futuro exatamente.
-

2. Óptica (séculos XVII–XIX)

- Estudo da luz como onda (principalmente depois de Huygens e depois Young com a experiência da dupla fenda).
- Reflexão, refração, dispersão.
- Maxwell mostrou que a luz é uma onda eletromagnética (1865).

3. Termodinâmica (séculos XVIII–XIX)

- Estudo do calor, energia e trabalho.
 - Primeira e segunda leis da termodinâmica.
 - Modelos clássicos como o gás ideal.
-

4. Eletromagnetismo (século XIX)

- Unificação da eletricidade e do magnetismo (Maxwell).
- Criação das equações de Maxwell (1860), que explicavam campos elétricos, magnéticos e ondas eletromagnéticas.

Até o final do século XIX, os físicos acreditavam que quase tudo já estava resolvido. Tanto que tem aquela frase famosa atribuída (erradamente) a Lord Kelvin dizendo que "não há mais nada a descobrir em física, só medições mais precisas" — justo antes da revolução quântica e relativística!

Só que surgiram problemas que a física clássica não conseguia explicar, tipo:

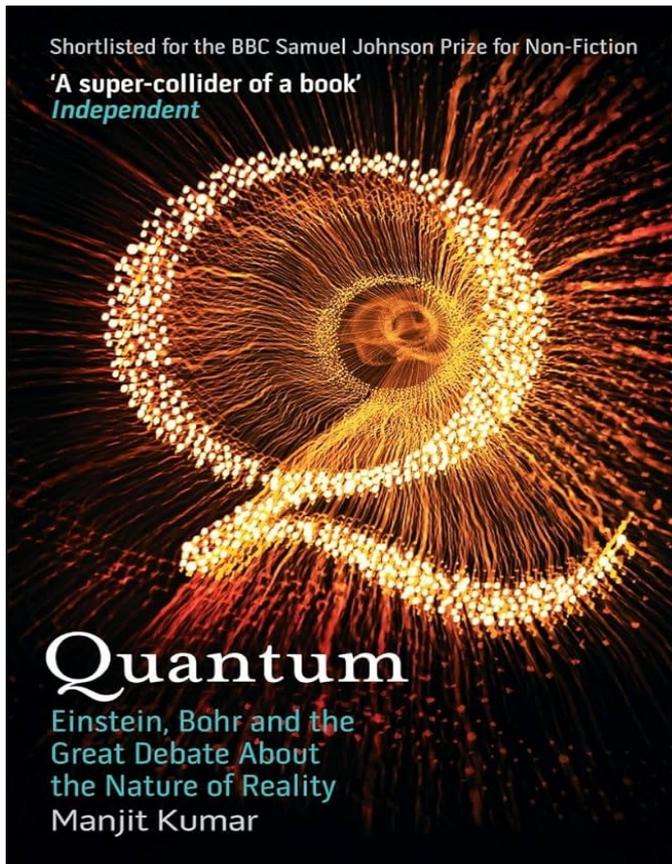
- Radiação do corpo negro.
- Efeito fotoelétrico.
- Linhas espectrais dos átomos (especialmente o hidrogênio).
- A mecânica clássica não conseguia explicar porque a velocidade da luz parecia a mesma para todos os observadores.

Esses "probleminhas" é que levaram à criação da Teoria da Relatividade e da mecânica quântica!

Livros Recomendados

"Os Quantos" (Manjit Kumar) – Sobre os debates entre Einstein e Bohr.

"A Elegância do Universo" (Brian Greene) – Explica a transição para a física moderna



Equações de Maxwell

A grande contribuição de Maxwell foi mostrar que a Ótica (estudo da luz visível) é um ramo do eletromagnetismo. As equações de Maxwell podem ser combinadas para se obter uma equação de onda para os campos \vec{E} e \vec{B} :

Equação independente
para o campo elétrico:

$$\mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} - \nabla^2 \vec{E} = 0$$

Equação independente
para o campo magnético:

$$\mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial t^2} - \nabla^2 \vec{B} = 0$$

Maxwell mostrou então, a partir das suas equações, que estas ondas eletromagnéticas se propagam no vácuo com uma velocidade igual a

Permeabilidade magnética do vácuo

Permissividade elétrica do vácuo

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} = \frac{1}{\sqrt{(4\pi \times 10^{-7} \text{ Tm/A}) \times (8,85 \times 10^{-12} \text{ F/m})}} = 299792458 \times 10^8 \text{ m/s}$$



Albert Einstein, até então somente um entusiasmado estudante de física, andava intrigado com uma discrepância entre as leis de Newton da mecânica e as leis de Maxwell do eletromagnetismo.

Postulados da Relatividade

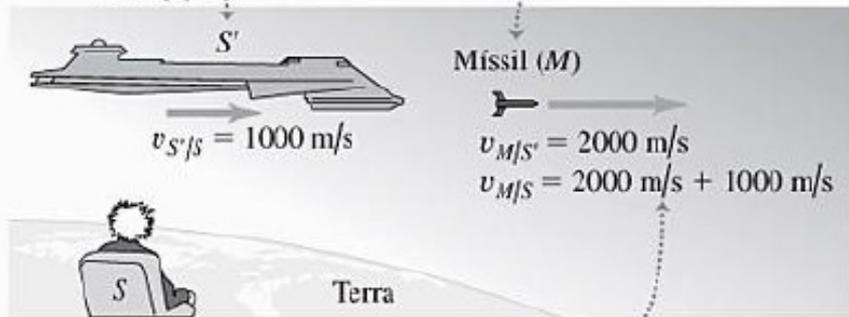
1) As leis Física devem ser as mesmas em qualquer sistema de referência inercial.

2) A velocidade da luz no vácuo deve ser sempre a mesma em qualquer sistema de referência inercial, e não depende da velocidade da fonte.

Velocidade limite : Velocidade da Luz no Vácuo Luz!!!!

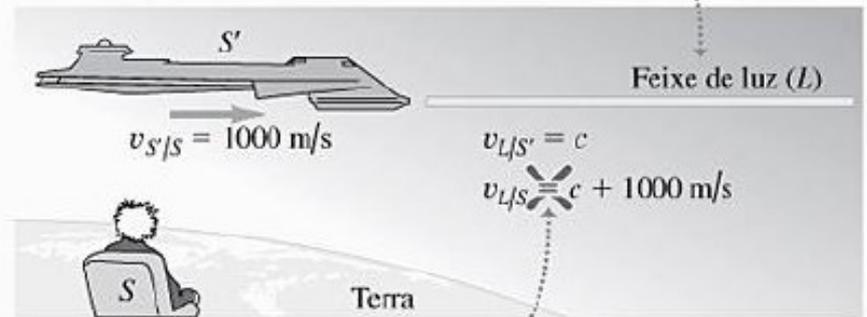
Figura 37.2 (a) A mecânica newtoniana faz previsões corretas sobre objetos relativamente lentos em movimento; (b) faz previsões incorretas sobre o comportamento da luz.

(a) Uma espaçonave (S') desloca-se com velocidade $v_{S'/S} = 1000 \text{ m/s}$ em relação a um observador na Terra (S). Um míssil (M) é disparado com velocidade $v_{M/S'} = 2000 \text{ m/s}$ em relação à espaçonave.



A MECÂNICA NEWTONIANA ACERTA: a mecânica newtoniana nos diz, acertadamente, que o míssil se move com uma velocidade escalar $v_{M/S} = 3000 \text{ m/s}$ em relação ao observador na Terra.

(b) Um feixe de luz (L) é emitido pela espaçonave com velocidade c .



A MECÂNICA NEWTONIANA ERRA: a mecânica newtoniana nos diz, incorretamente, que a luz se move a uma velocidade maior do que c em relação ao observador na Terra... o que contradiz o segundo postulado de Einstein.



1600–1700

- |
- ├ Física: Surgimento da Mecânica Clássica (Newton)
- ├ Economia/Sociedade: Revolução Científica, expansão marítima

1800–1900

- |
 - ├ Física: Consolidação da Física Clássica (Termodinâmica, Eletromagnetismo)
 - ├ Economia/Sociedade: Revolução Industrial (máquinas, fábricas, urbanização)
-

1900–1925

|

- ├ Física: Surgimento da Mecânica Quântica e Relatividade (Planck, Einstein)
- ├ Economia/Sociedade: Segunda Revolução Industrial, início das tensões globais

|

1914–1918

|

- ├ Evento: Primeira Guerra Mundial (impacto enorme na ciência e tecnologia)

|

1925–1950

|

- ├ Física: Consolidação da Física Moderna (Quântica completa, Relatividade Geral)
 - ├ Economia/Sociedade: Crise de 1929, Segunda Guerra Mundial, corrida tecnológica (radar, energia nuclear)
-

Revolução no conhecimento: Física Quântica

Virada do Século 20-Elétron, fóton e núcleo:
Átomo desvendado

- (1897-1899) J.J. Thomson “descoberta” do elétron
(1900) Max Planck quantização de osciladores
(1905-1914) Einstein, Millikan efeito fotoelétrico, fótons
(1911) Rutherford “descoberta” do núcleo
(1913-1926) Bohr, de Broglie teoria quântica do átomo

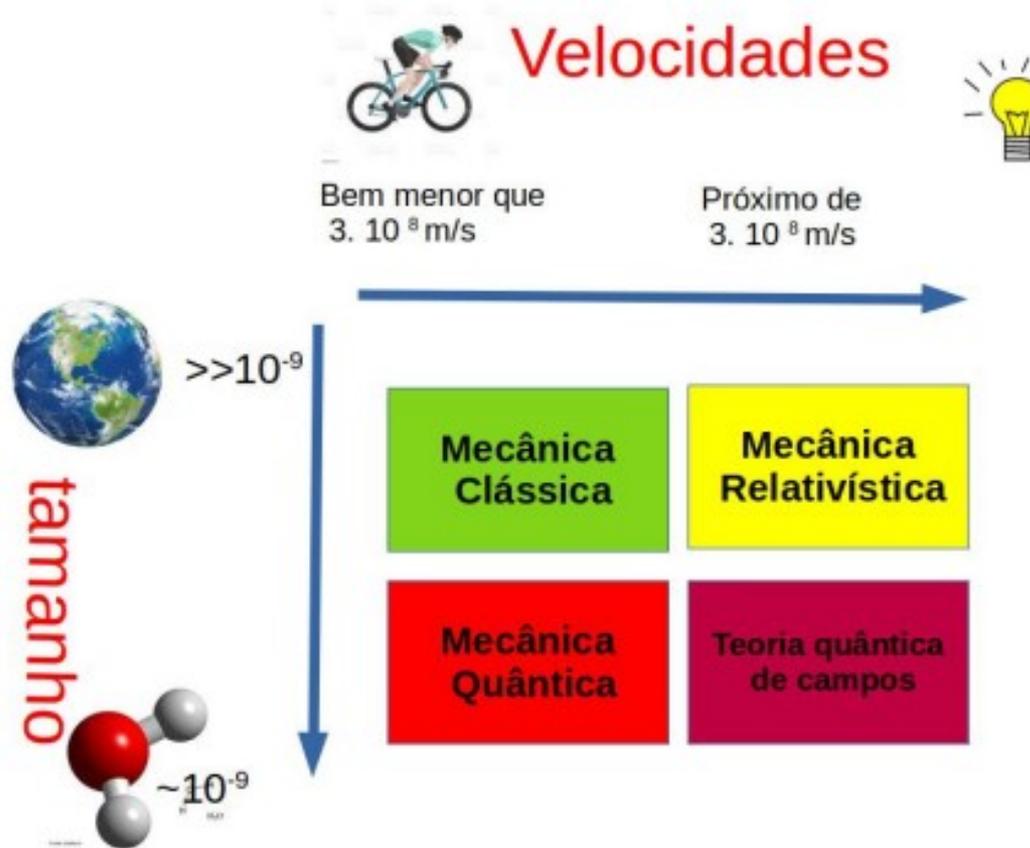
Heisenberg, Schroedinger

$$H\psi = i\hbar \frac{d\psi}{dt}$$

Todos receberam o prêmio Nobel



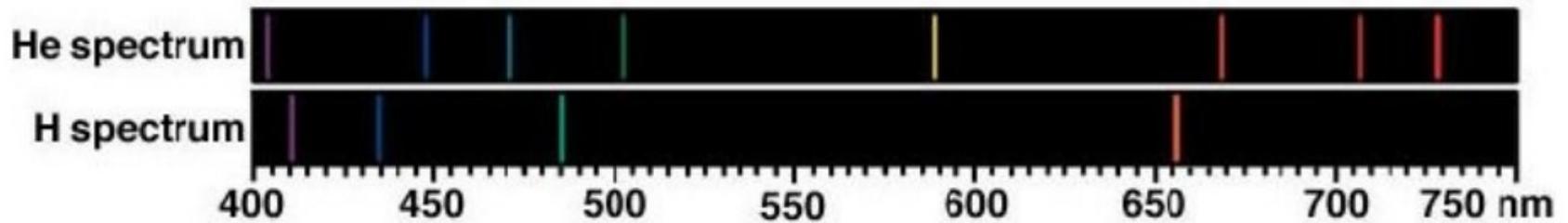
Para entender o átomo, em que área da física devemos estar?



Falhas da Mecânica Clássica

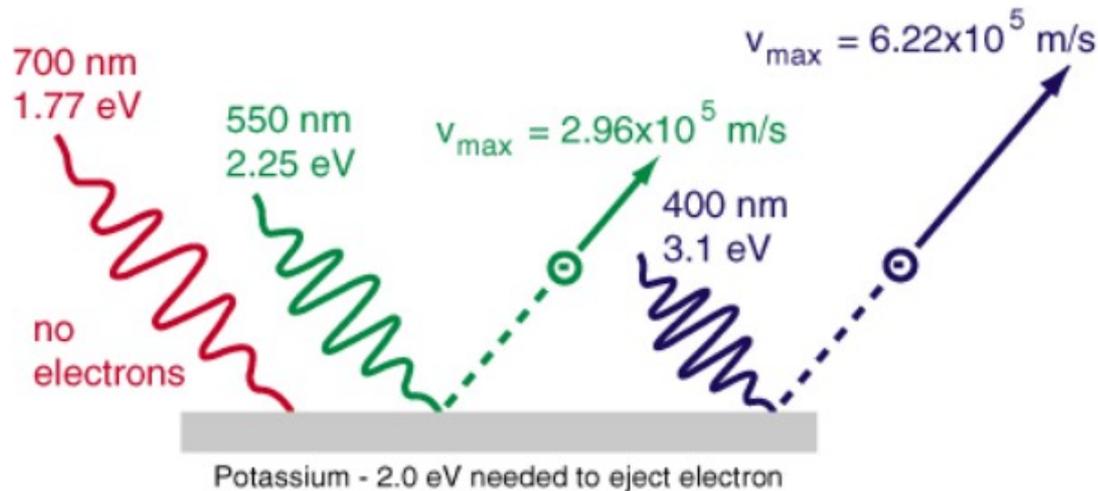
1. Explicar linhas espectroscópicas

- Espectro atômico: linhas espectrais discretas (called “lines”)



- A luz emitida por um gás excitado consiste em comprimentos de onda discretos, não bandas contínuas.

2. Efeito fotoelétrico

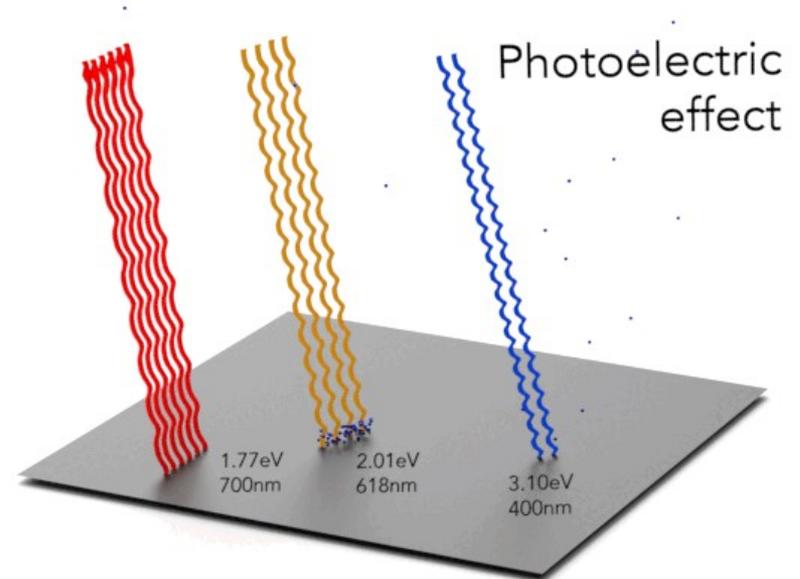
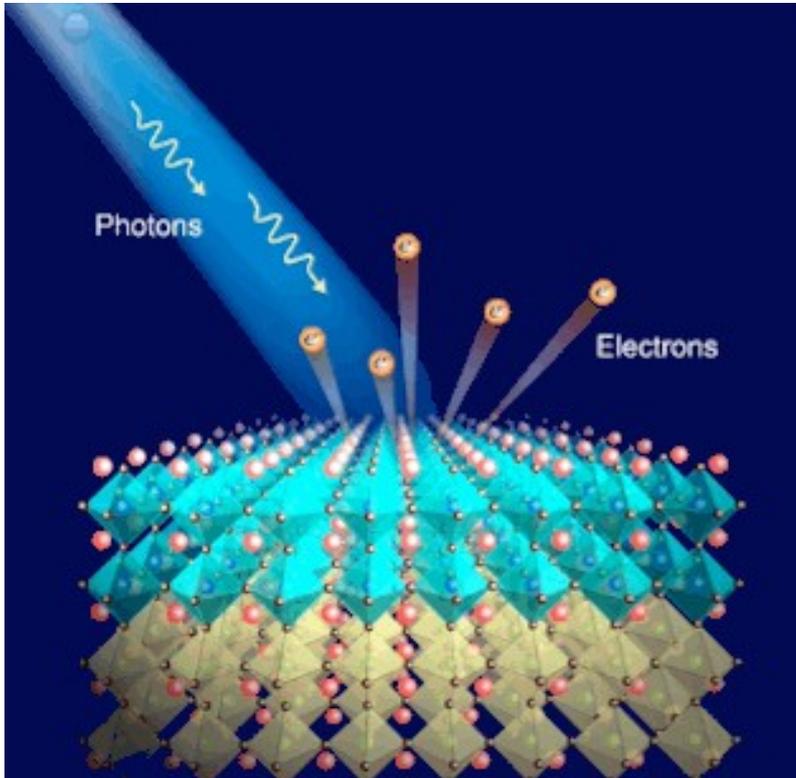


Photoelectric effect

- A luz pode ejetar elétrons de um metal, mas somente se a frequência está acima de um valor específico. Classicamente, a energia é proporcional a amplitude.

$$E=hf$$

Equação do efeito fotoelétrico:



$$hf = \Phi + K_{max}$$

Lampadas com gases diferentes



Para trabalhar com átomos precisamos entender o átomo.

O que é um fóton?

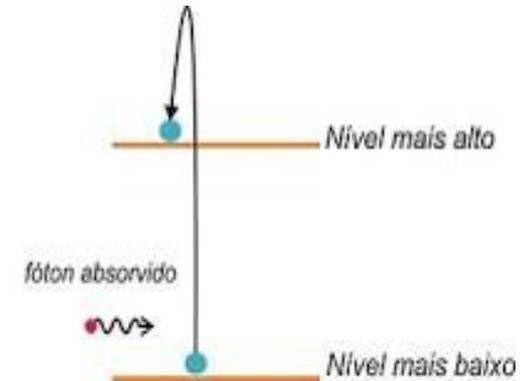
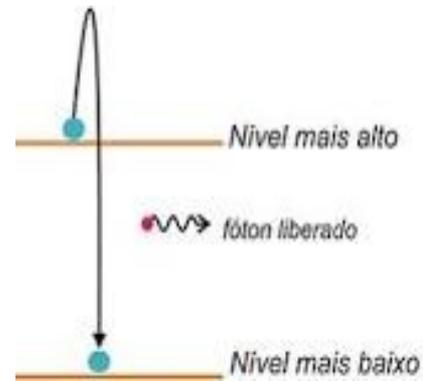
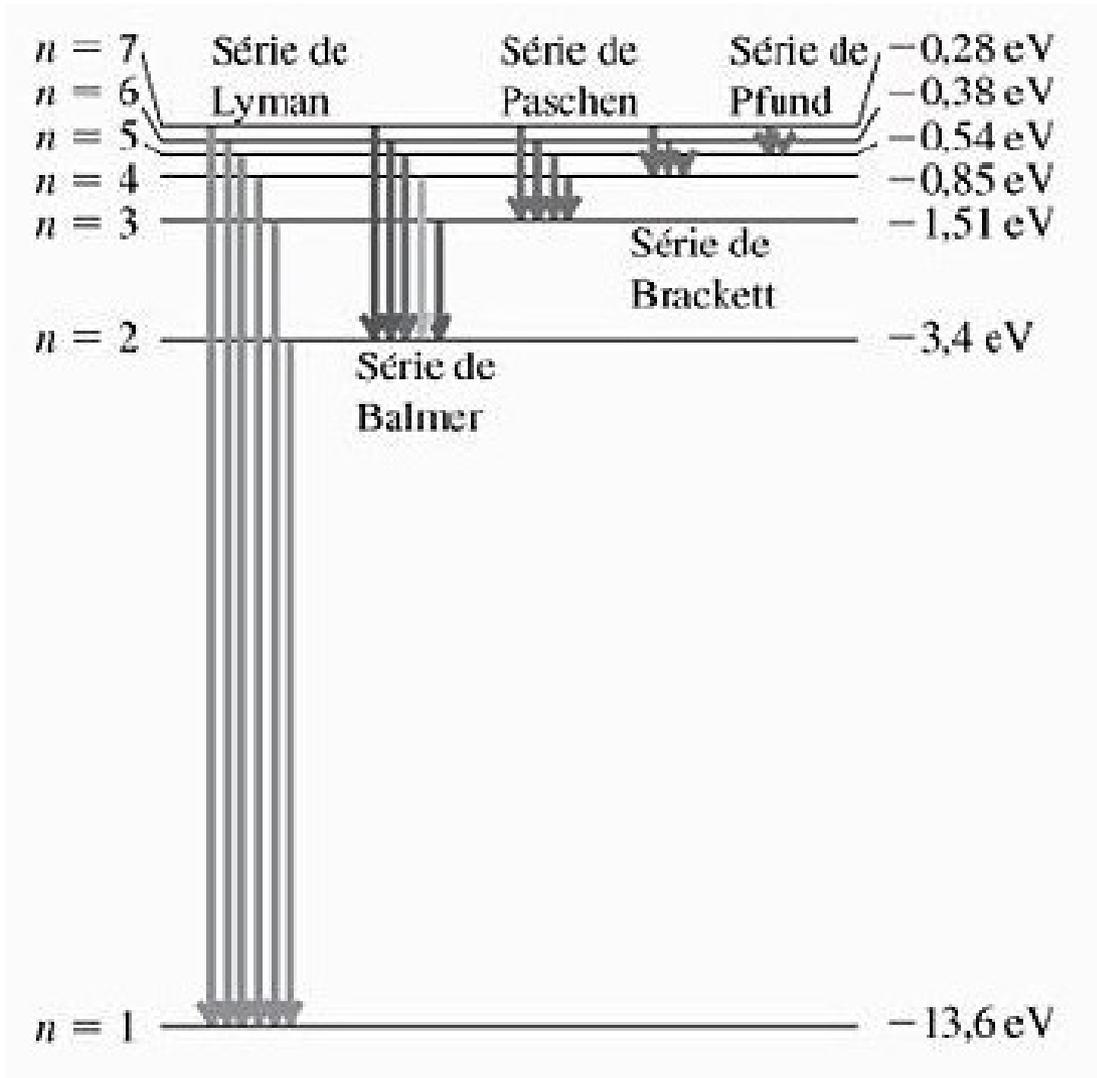
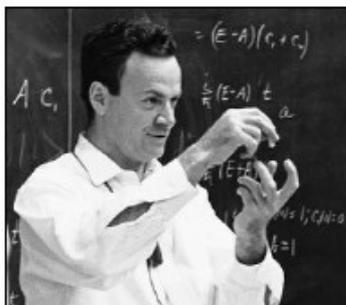


Diagrama dos níveis de energia do hidrogênio

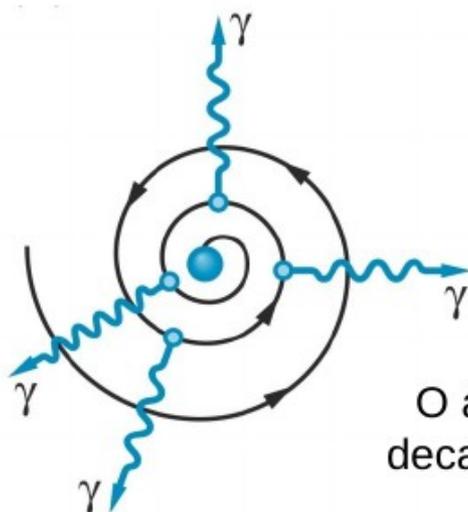


3. Estabilidade do átomo



- **Todas as coisas são feitas de átomos, e seu comportamento não é explicado corretamente pela mecânica newtoniana.**

- **A Física clássica não explica a estabilidade do átomo!**



$$F \propto \frac{e^2}{R^2} = m \frac{v^2}{R}$$

$v \approx 10^6 \text{ m/s}$ - Movimento não relativístico

$$K + U \propto - \frac{e^2}{2R}$$

$$I \propto \frac{2e^2 a^2}{3c^3} = \frac{2e^2 v^4}{3c^3 R^2}$$

- Potência carga acelerada

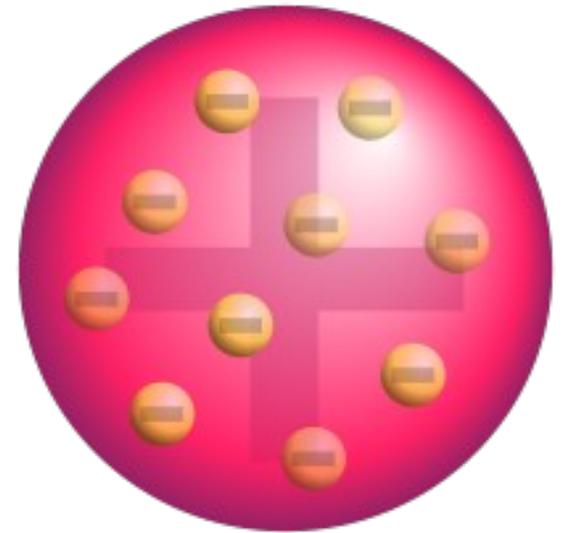
O átomo "clássico" decairia rapidamente!

$$\tau = \frac{K + U}{I} \propto \frac{e^2}{R} \cdot \frac{c^3 R^2}{e^2 v^4} = \frac{R}{v} \cdot \left(\frac{c}{v} \right)^3 \approx 10^{-10} \text{ s} \quad !!!$$

O núcleo do átomo

Thomson

Vejam os fatos ocorridos até cerca de 1910. Em 1897, J. J. Thomson descobriu o elétron e mediu a razão entre sua carga e sua massa (e/m); em torno de 1909, Millikan completou suas primeiras medidas da carga do elétron $-e$. Essas e outras experiências mostraram que quase toda a massa de um átomo deve ser associada à sua carga *positiva* e não aos elétrons. Já se sabia também que o tamanho de um átomo era da ordem de 10^{-10} m e que todos os átomos, exceto o hidrogênio, têm mais do que um elétron.



Estudo do átomo feito por Rutherford (1910-1911)

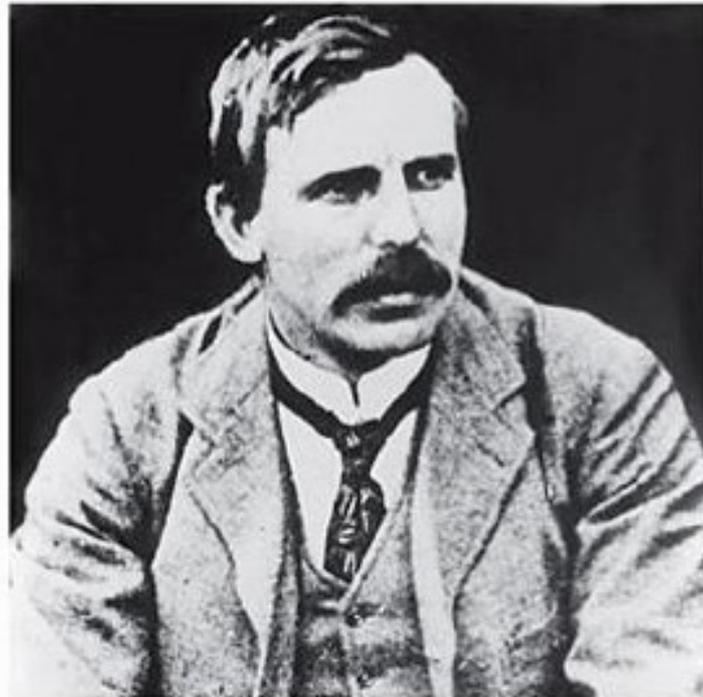


Figura 38.14 Nascido na Nova Zelândia, Ernest Rutherford (1871-1937) desenvolveu suas atividades profissionais na Inglaterra e no Canadá. Antes de realizar as experiências que verificaram a existência dos núcleos dos átomos, ele ganhou em 1908 (juntamente com Frederick Soddy) o prêmio Nobel de Química por ter mostrado a radioatividade na desintegração dos átomos.

Experiência de espalhamento de Rutherford.

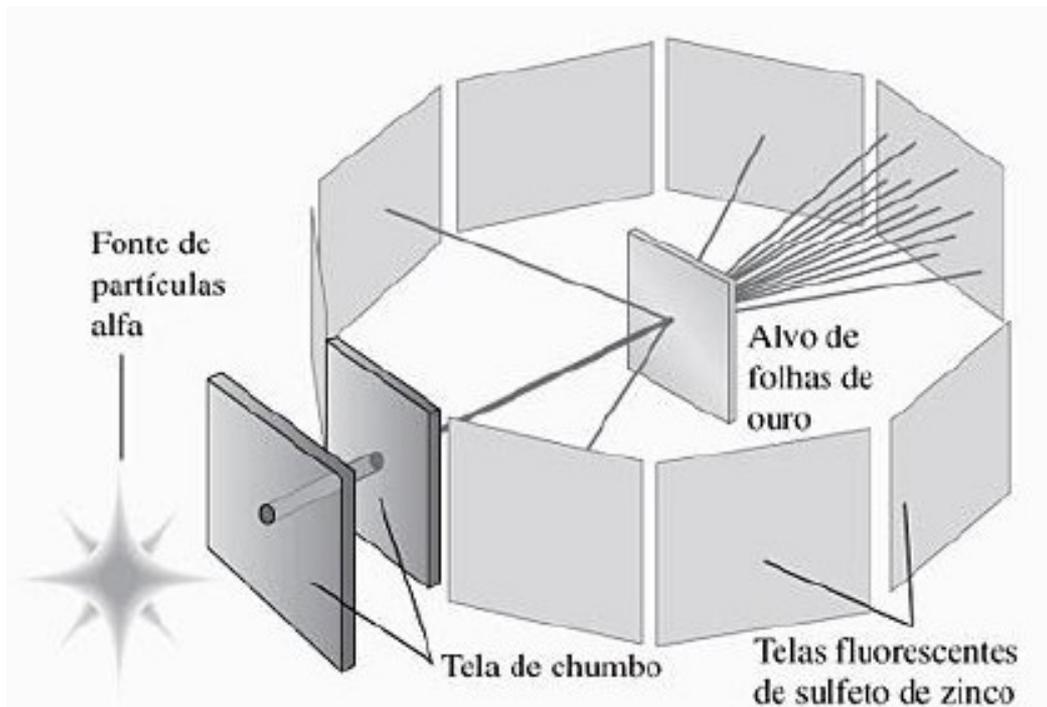
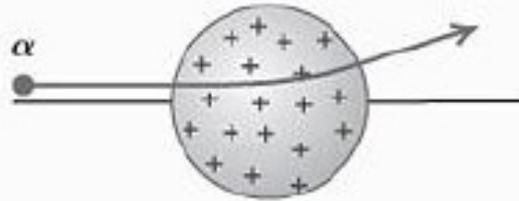


Figura 38.15 O espalhamento de partículas alfa produzido por uma fina folha metálica. A fonte das partículas alfa é um elemento radioativo tal como o rádio. As duas telas de chumbo com pequenos orifícios formam um feixe fino de partículas alfa que são espalhadas pela folha de ouro. As direções das partículas alfa desviadas são determinadas pelas cintilações ocorridas nas telas fluorescentes.

“Foi o acontecimento mais incrível que ocorreu em toda a minha vida. Foi tão inacreditável quanto se você atirasse uma bala de canhão em uma folha de papel e a bala ricocheteasse e o atingisse.”

Comparação entre os modelos dos átomos.

(a) Modelo de Thomson do átomo: uma partícula alfa sofreria um desvio muito pequeno.



(b) Modelo de Rutherford do átomo: uma partícula alfa pode sofrer um desvio com um ângulo muito grande pela ação do núcleo denso e positivamente carregado (o desenho não está em escala).

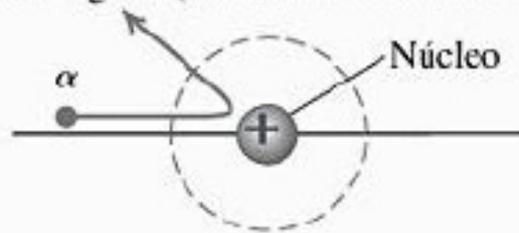


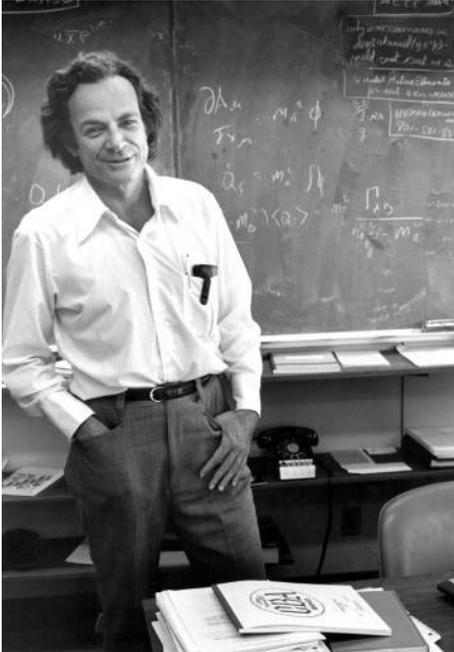
Figura 38.16 (a) O modelo de Thomson do átomo foi contestado pelas experiências de espalhamento de Rutherford. (b) Para explicar seus resultados experimentais, Rutherford desenvolveu um modelo nuclear do átomo.

Experimento de Rutherford

Mostra que:

- O átomo possui um núcleo muito pequeno, de densidade muito grande.
- Diâmetro menor que 10^{-14} m.
- Portanto, o núcleo ocupa um volume cerca de 10^{-12} do volume total do átomo.
- Contém toda a carga positiva do átomo.
- Possui pelo menos 99,95% da massa total do átomo.

Richard Feynman (1918 - 1988)



Richard Philips Feynman foi um físico teórico norte-americano do século XX, foi um dos pioneiros da eletrodinâmica quântica e ficou conhecido pelos seus trabalhos no ramo da formulação integral da mecânica quântica.

Em 1959 Feynman fez uma palestra com o título: “Há muito espaço lá embaixo”

Revista Brasileira de Ensino de Física, vol. 40, nº 4, e4210 (2018)

www.scielo.br/rbef

DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/1806-9126-RBEF-2017-0375>

Seção Especial - Celebrando os 100 anos de nascimento de Richard P. Feynman



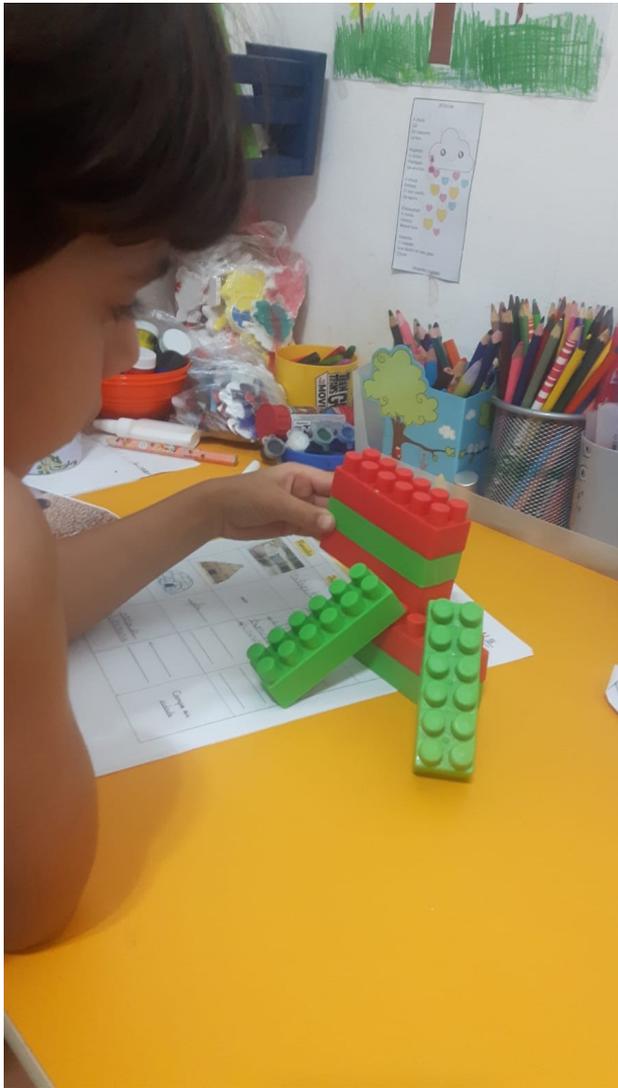
Licença Creative Commons

Há mais história lá embaixo - um convite para rever uma palestra

There is plenty of history at the bottom – an invitation to revisit a talk

Peter A. Schulz*¹

¹Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Ciências Aplicadas, 13484-350 Limeira, SP, Brasil.



Perguntas:

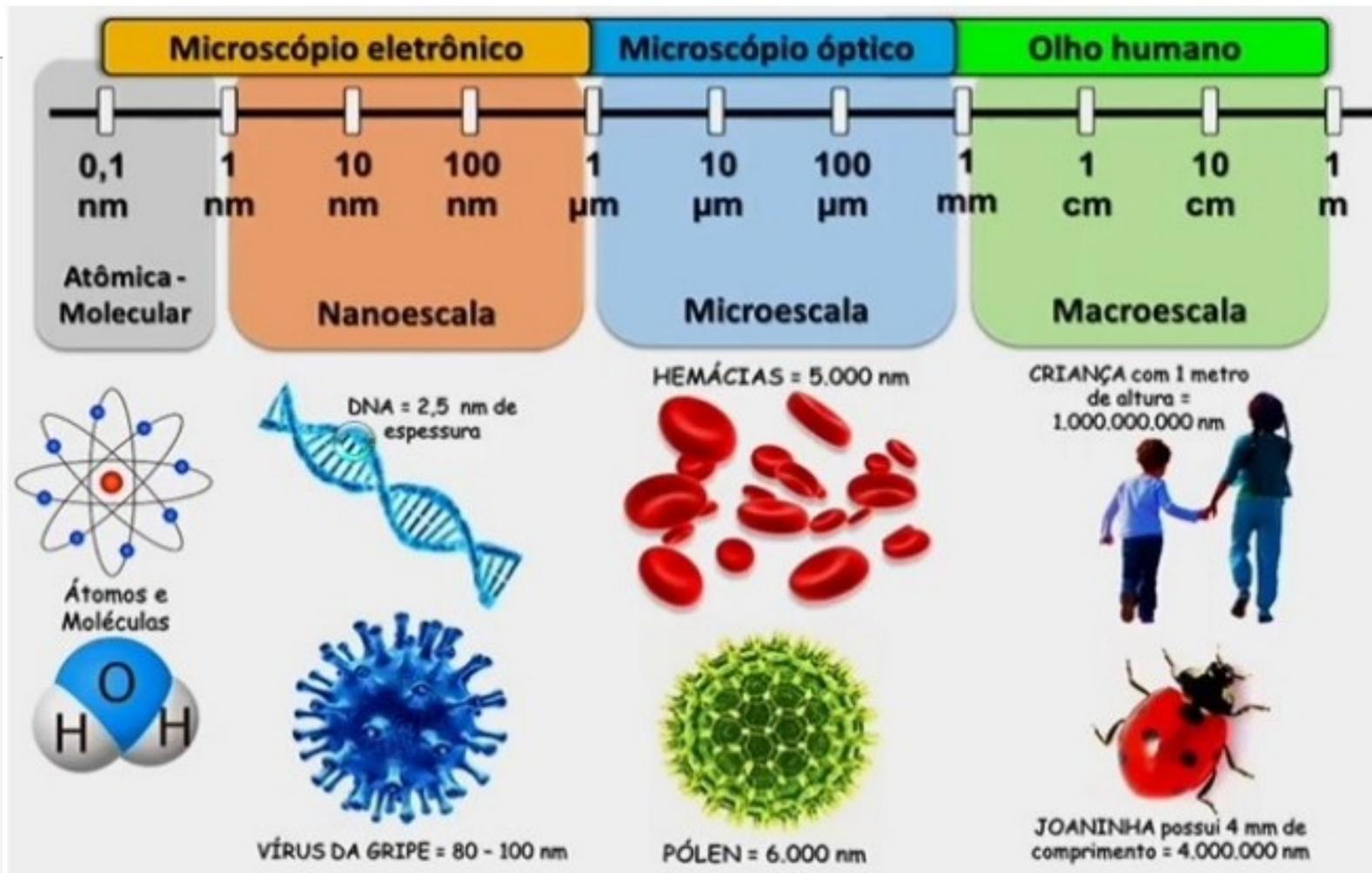
- Por que não podemos manipular átomo por átomo?
- Por que não podemos escrever todo o conhecimento humano na cabeça de um alfinete?
- Por que não podemos construir máquinas para fazer essas coisas?

Manipulação de duas camadas de grafeno.

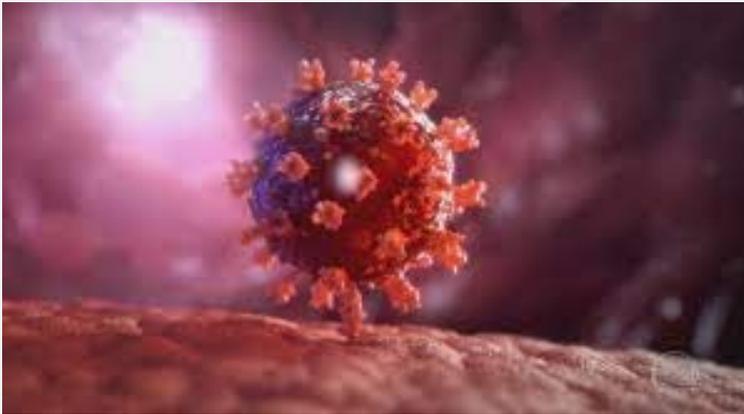


Volume 590 Issue 7846,
18 February 2021

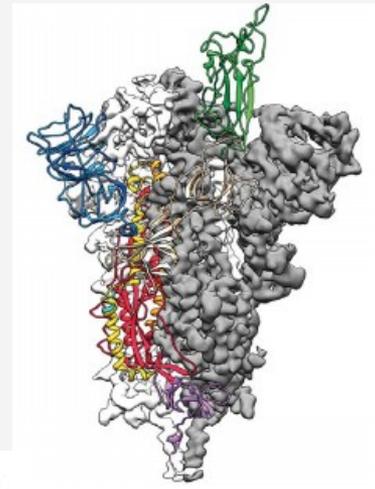
O que o nanômetro? O que é a nanotecnologia?



Dimensões do Coronavírus



Ordem de 120nm

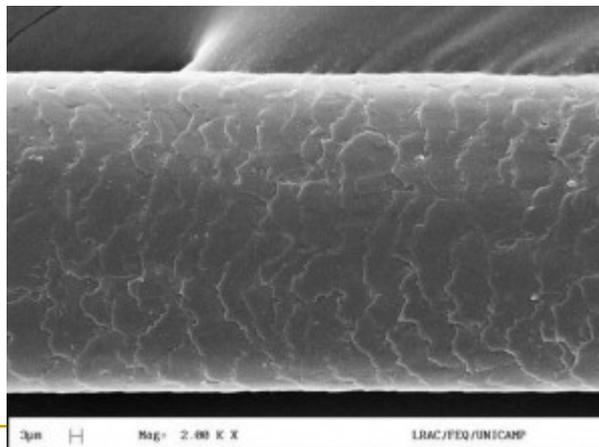


Definições:

Nanotecnologia é como a manipulação de estruturas atômicas e moleculares, em escala industrial, que estão presentes em uma escala que corresponde a um bilionésimo de metro (10^{-9}m), denominada nano.

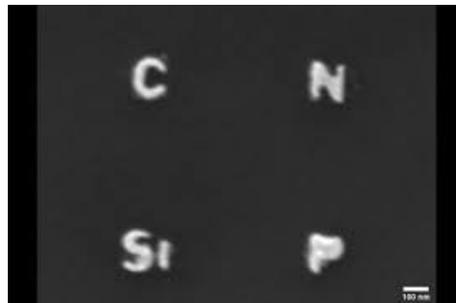
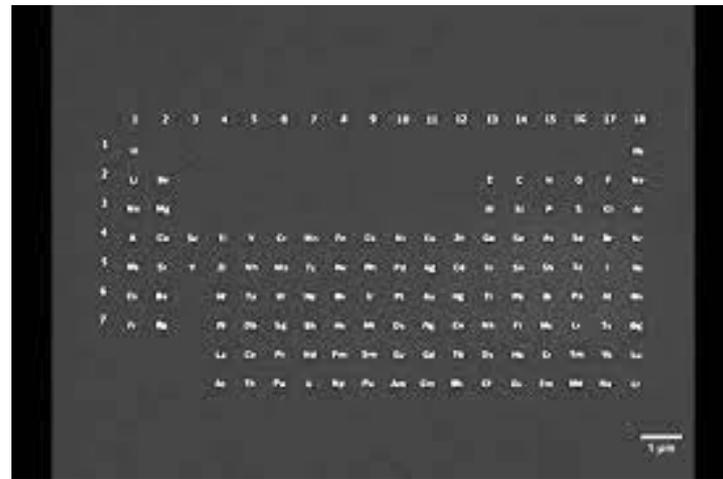
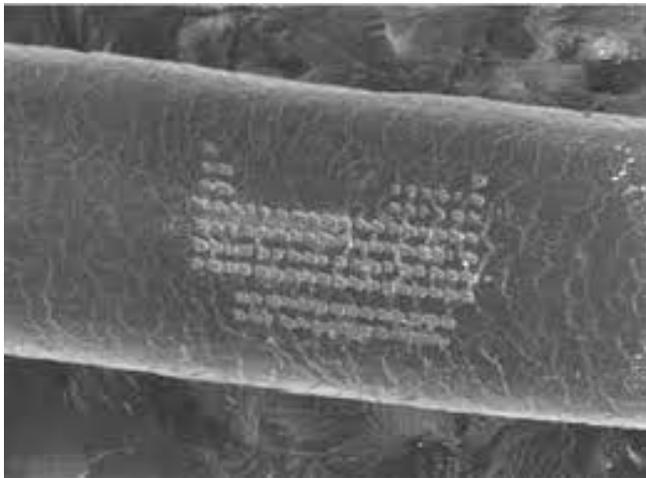
Nanociência é ciência que estuda as propriedades e potencialidades de materiais na escala nano.

Unha humana cresce em
torno de 1nm por segundo e
a barba de um homem 5nm
por segundo



Diâmetro de um
fio de cabelo
50000 nm

Em 2010, a Universidade de Nottingham recebeu o Recorde Mundial do Guinness por criar a menor tabela periódica do mundo. Carinhosamente gravado em um dos cabelos do próprio químico Martyn Poliakoff, media apenas 90 μm por 46 μm .

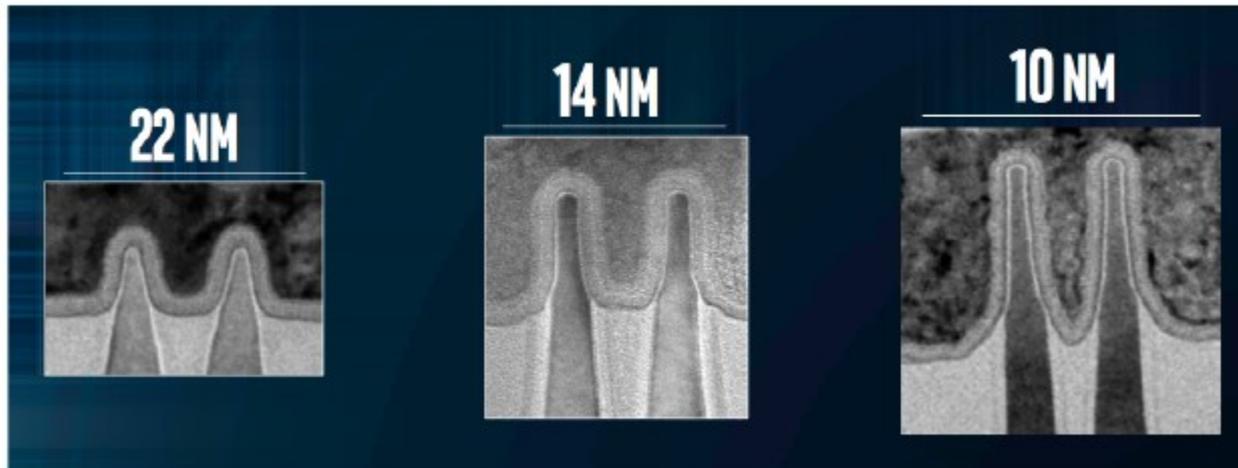


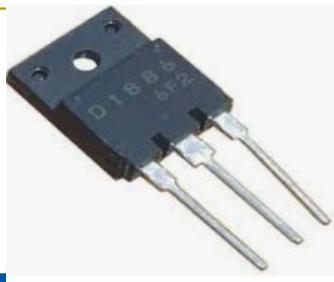
<https://youtu.be/cQU2IAsQak8?t=74>

30 Mar 2017 | 16:00 GMT

Intel Now Packs 100 Million Transistors in Each Square Millimeter

This week, Intel revealed more about its 10 nm technology, which it says leads the industry by years





intel.

PERFORMANCE PER WATT

TIME

Strained Silicon



Intel 90nm



Enhanced Strain

Intel 65nm



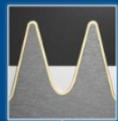
Hi-K Metal Gate

Intel 45nm



Enhanced HKMG

Intel 32nm



First FinFET

Intel 22nm



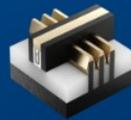
Enhanced FinFET

Intel 14nm



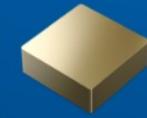
COAG

Intel 10nm



Enhanced FinFET

Intel 10nm SuperFIN



Super MIM Capacitor

Transistor optimization for performance

Metal stack enhancements

Intel 7

EUV Litho



Intel 4

Denser design libraries

Increased transistor drive current

Reduced via resistance

Increased use of EUV

Intel 3



RibbonFET + PowerVia



Intel 20A

Ribbon innovation increased performance

Continued metal linewidth reduction

Intel 18A

Intel NEXT

Angstrom era

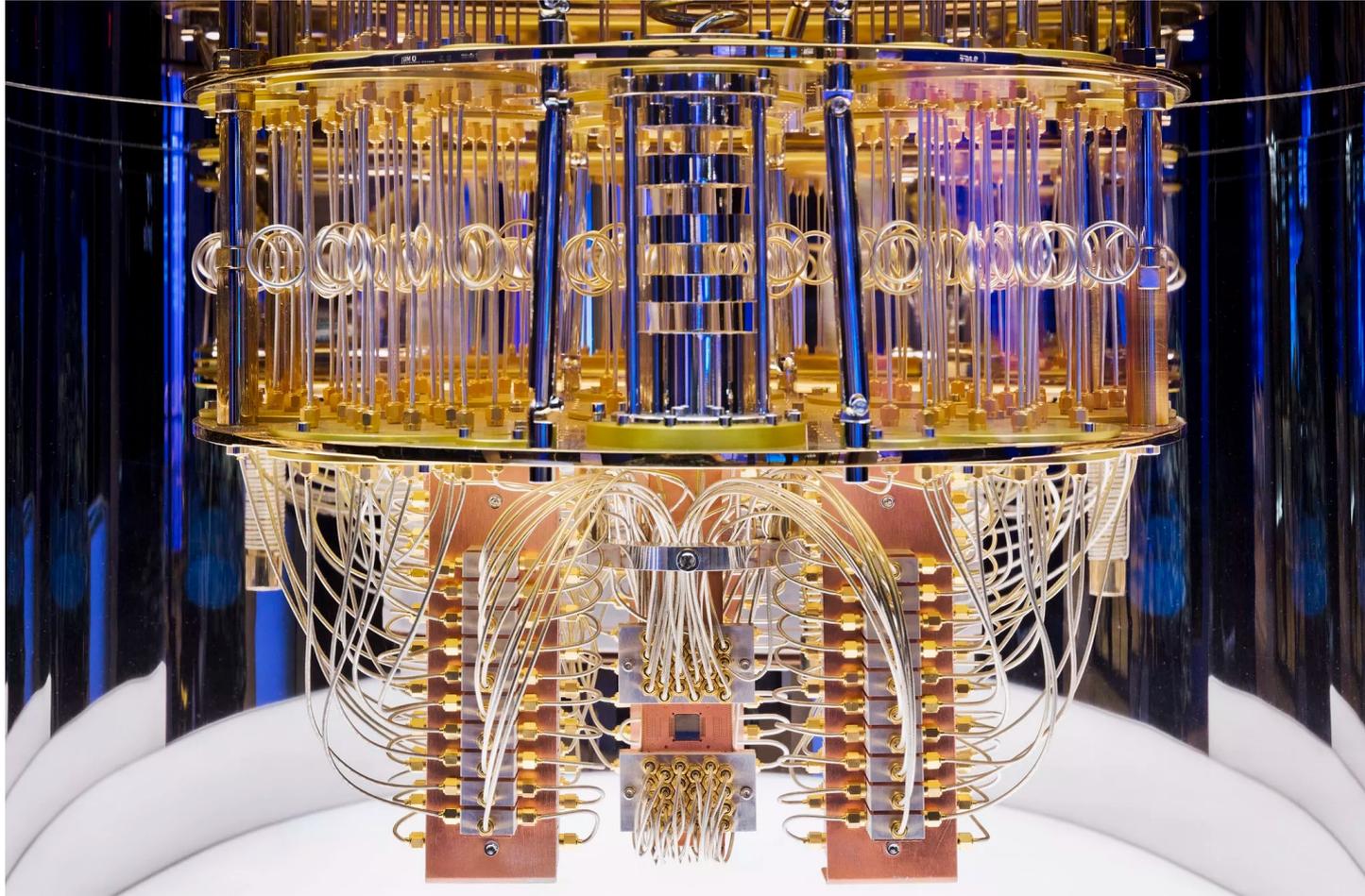
Intel's roadmap until 2025

A brief overview



In the above roadmap, Intel has completed its transition to Intel 7, Intel 4, and Intel 3, with Intel 20A, and 18A coming in the next few years. For reference, Intel 7 is what the company names its 10nm process, and Intel 4 is what it names its 7nm process. Where the names come from (even though one could argue that they're misleading) is that Intel 7 has a very similar transistor density to TSMC's 7nm, despite Intel 7 being built on a 10nm process. The same goes for Intel 4, with WikiChip actually coming to the conclusion that Intel 4 is very likely to be slightly denser than TSMC's 5nm N5 process.

Computador Quântico: IBM



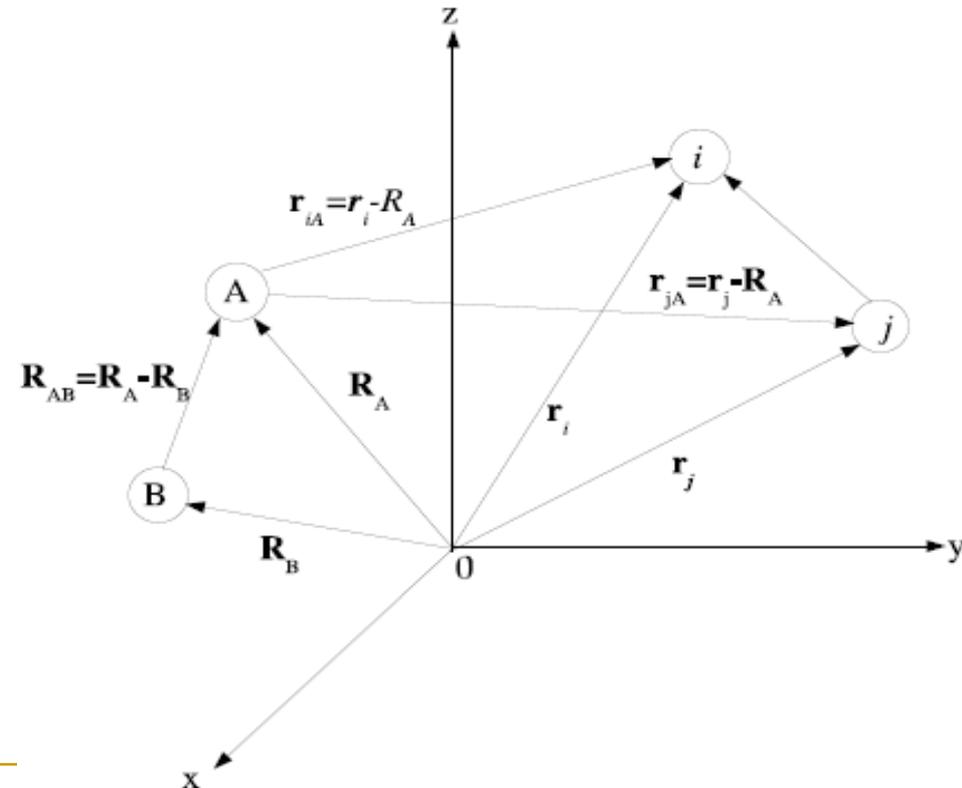
Metodologia

Qual metodologia devemos usar?

Devemos procurar a resposta dentro dos fundamentos da mecânica quântica.

Qual a hamiltoniana que descreve o meu sistema?

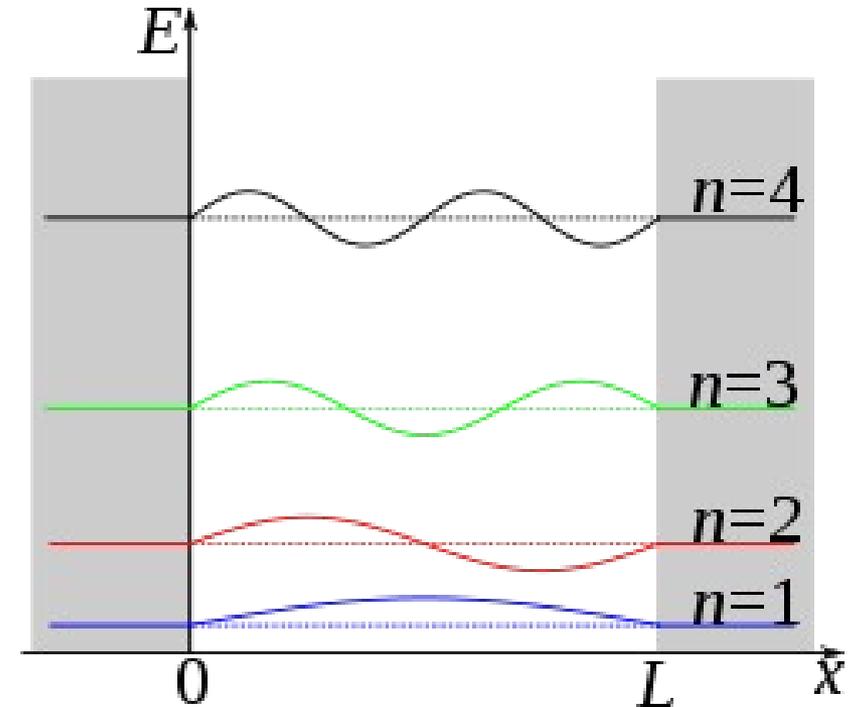
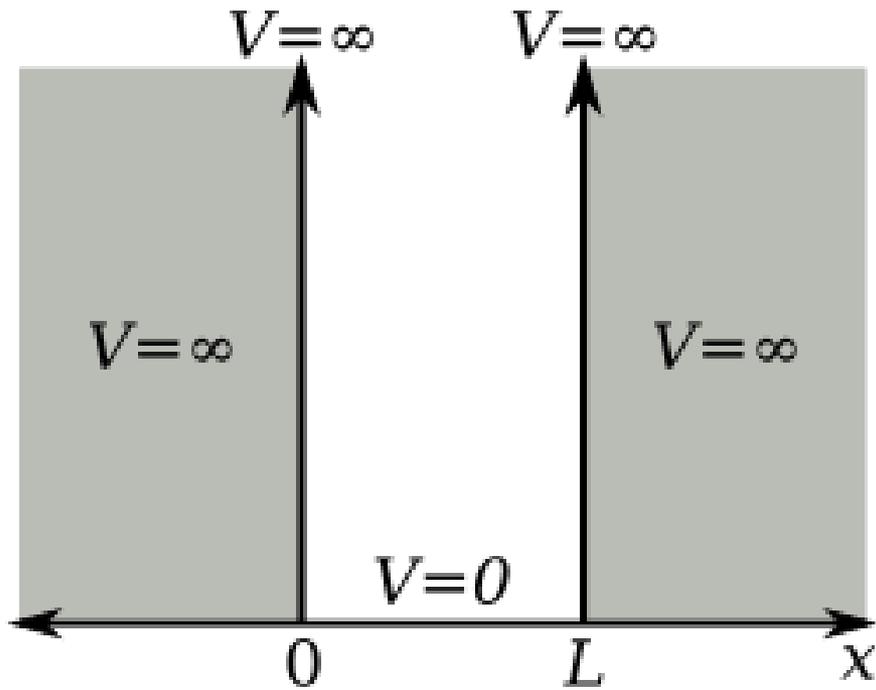
$$H = \sum_{i=1}^N \frac{1}{2} \nabla_i^2 - \sum_{A=1}^M \frac{1}{2M_A} \nabla_A^2 + \sum_{i=1}^N \sum_{j>i}^N \frac{1}{|\vec{r}_i - \vec{r}_j|} - \sum_{i=1}^N \sum_{A=1}^M \frac{Z_A}{|\vec{r}_i - \vec{R}_A|} + \sum_{A=1}^M \sum_{B>A}^M \frac{Z_A Z_B}{|\vec{R}_A - \vec{R}_B|}$$



Devemos resolver a equação de Schroedinger!

$$H\Psi = E\Psi$$

Bandas de Energia



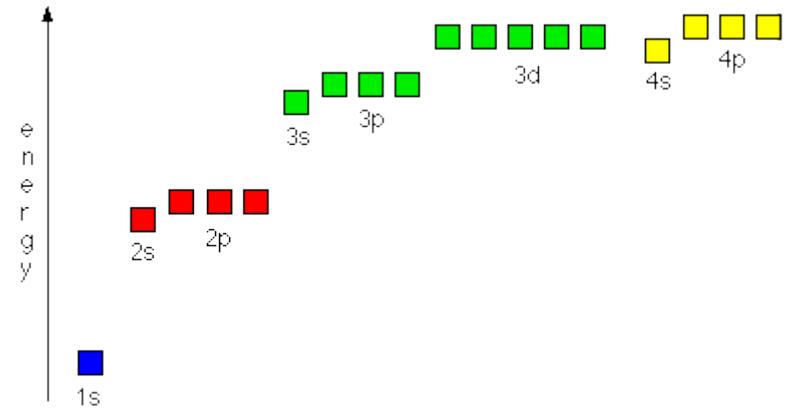
$$-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{d^2\psi}{dx^2} + V(x)\psi = E\psi$$

$$\psi_{II} = A \sin\left(\frac{n\pi}{L}x\right), \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

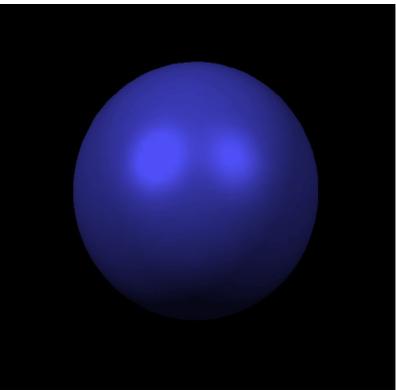
$$E = n^2 \frac{h^2}{8mL}$$

Átomos de 1 elétron

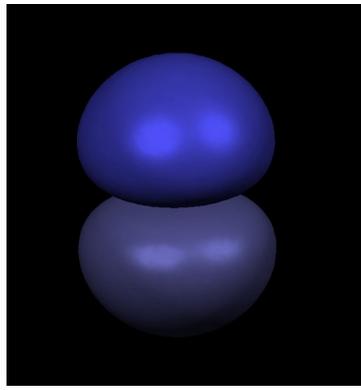
Energias:



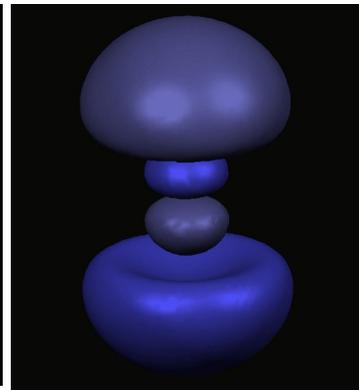
Distribuições de probabilidade:



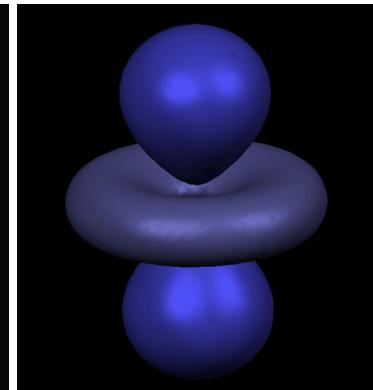
$N=2, l=0$



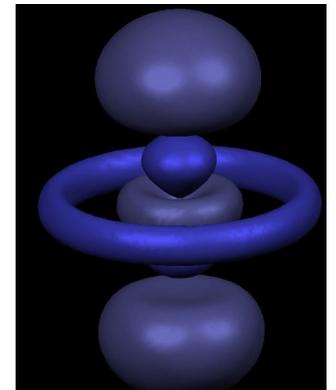
$N=2, l=1, m=0$



$N=3, l=1, m=0$

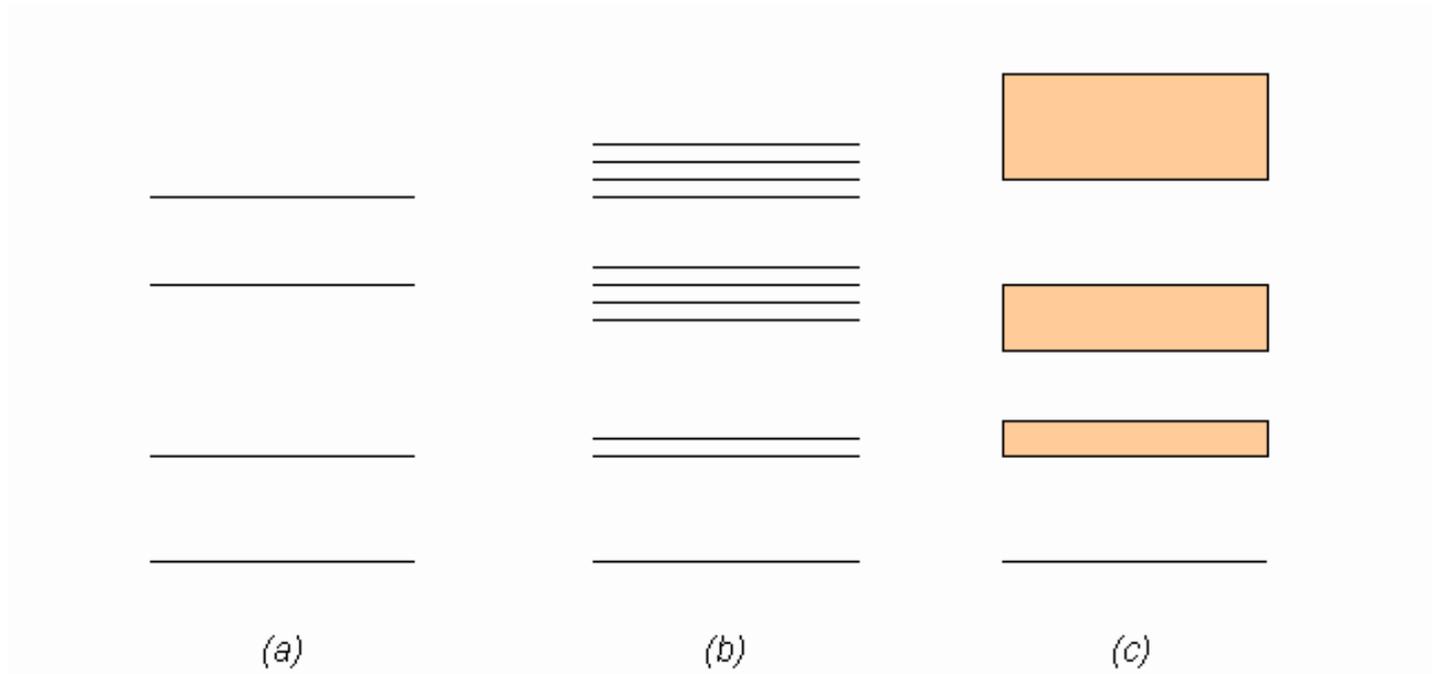


$N=3, l=1, m=0$



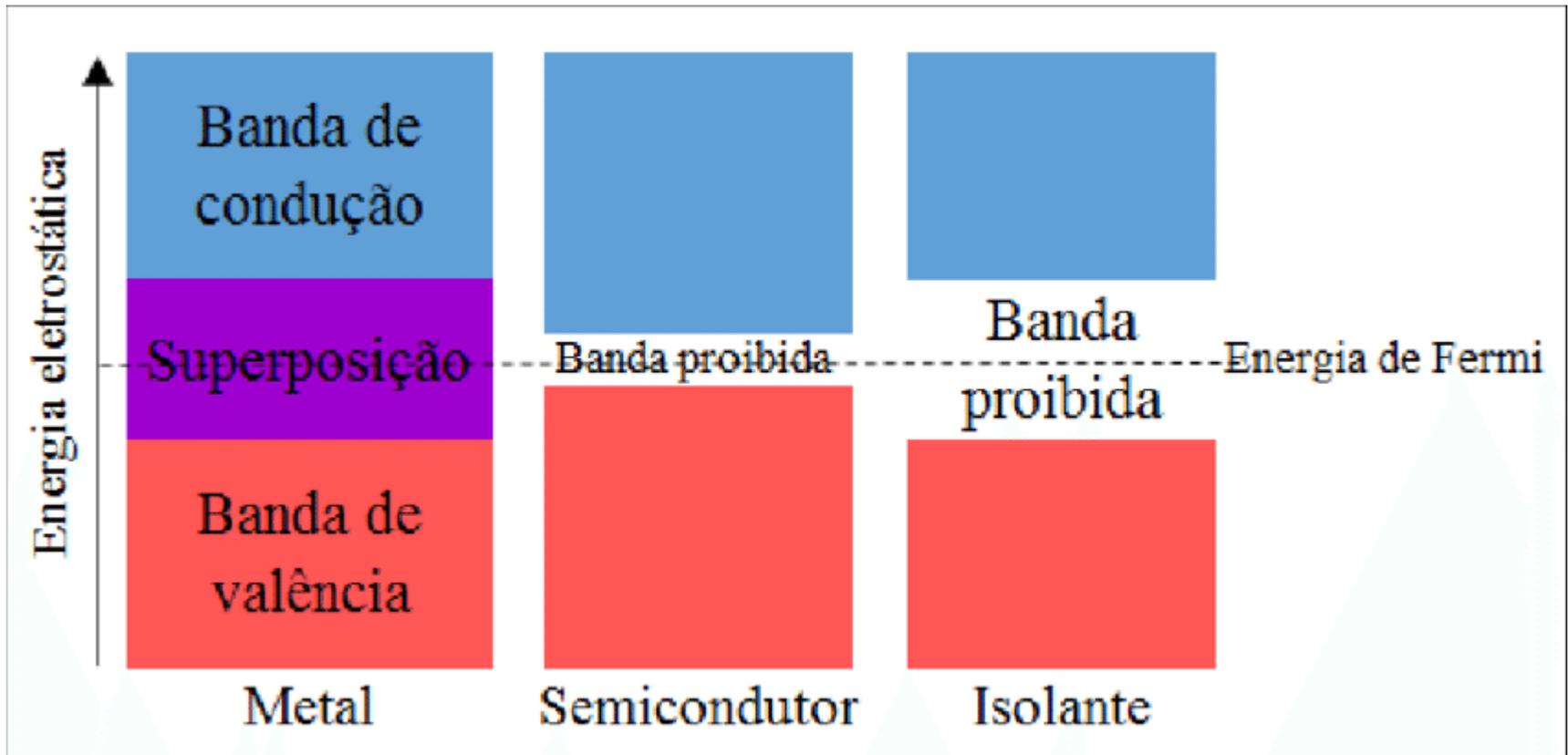
$N=4, l=2, m=0$

Bandas em um Sólido



Formação de bandas num sólido. (a) átomo isolado. (b) sistema de alguns átomos.
(c) um mol de átomos.

O que devemos entender ?
Metais, Semicondutores e Isolantes



Obrigado!!!
