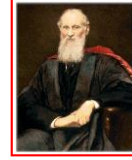


## Fins do Século XIX

Conferência na Royal Society em março de 1900

William Thomson  
Lord Kelvin (1824-1907)  
Físico inglês



“Atualmente pairam apenas **duas pequeninas nuvens cinzentas** sobre o céu cristalino da Física”

## Princípios de Mecânica Quântica

### Parte 2



São Carlos, 04 de abril de 2016

Entre as fontes luminosas mais comuns encontravam-se:

- sólidos aquecidos (p. ex. filamento de lâmpada)
- descargas elétricas em gases

Um corpo em qualquer temperatura emite energia – a **radiação térmica**

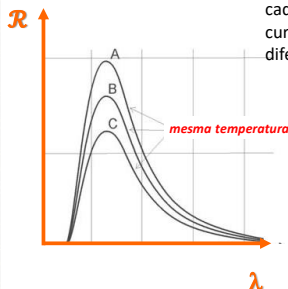
## Radiação do Corpo Negro



## Intensidade da radiação emitida e Comprimento de onda

três curvas  $\mathcal{R} \times \lambda$  para um diferentes materiais e **mesma temperatura**.

Para mesma temperatura, cada material apresenta uma curva de radiância espectral diferente.



Pode-se concluir que o material A é melhor emissor do que B, e este melhor do que C.

**experimental**

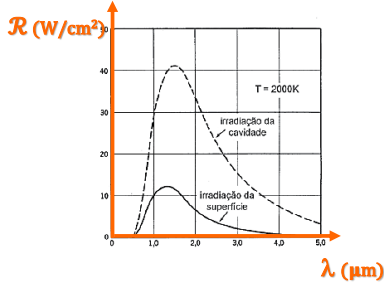
## Irradiador ideal

Estabeleceu-se um sólido ideal, um irradiador de cavidade, o corpo negro.

**As propriedades de emissão luminosa independem da natureza do material e variam de maneira simples com a temperatura.**

**O irradiador ideal: fatos importantes**

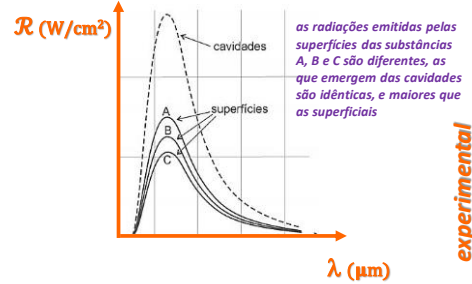
**1** A radiação proveniente da cavidade é mais intensa que a emitida pela superfície do material, qualquer que seja ele.



experimental

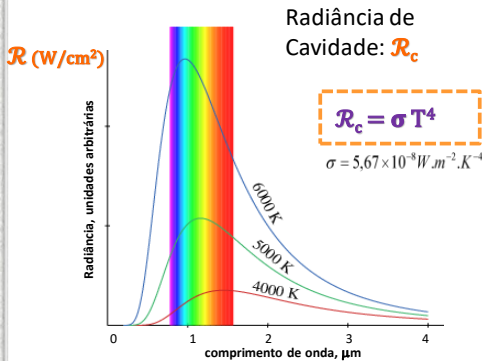
**O irradiador ideal: fatos importantes**

**2** Tanto a intensidade, como a distribuição da radiação que emerge da cavidade, não dependem do material; elas são função apenas da temperatura.



experimental

**Radiância espectral: lei de Stefan-Boltzmann**



**Radiância espectral: lei de Stefan-Boltzmann**

Radiância de um material:  $R$

Radiância de Cavidade:  $R_c$

$R = \epsilon \sigma T^4$

$R_c = \sigma T^4$

$\sigma = 5,67 \times 10^{-8} W.m^{-2}.K^{-4}$

emissividade  $\epsilon \rightarrow$  depende

- material
- temperatura

emissividade de uma superfície  $\epsilon$  varia entre zero e um  $0 \leq \epsilon \leq 1$

**Emissividade**

coeficientes { emissividade  $\epsilon$ , reflexão  $\rho$ , transmissão  $\tau$  }  $\rightarrow \epsilon + \rho + \tau = 1$

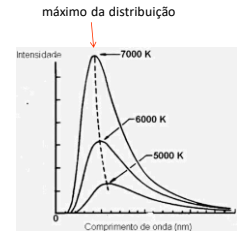
	$\epsilon$	$\rho$	$\tau$
corpo negro	1	0	0
corpo transparente	0	0	1
espelho perfeito	0	1	0
corpo cinzento	$\epsilon + \rho = 1$		
termografia (IV)	constante para T e $\lambda$ , $\epsilon < 1$		

**O espectro de corpo irradiante**



Wilhelm Wien (1896)

O comprimento de onda máximo de emissão é proporcional ao inverso da temperatura:  $\lambda \propto 1/T$

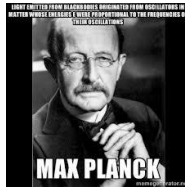


aumentando-se a temperatura T, o máximo da distribuição se desloca para comprimentos de onda menores

De acordo com a lei do deslocamento de Wien:

$\lambda_{máx} \cdot T = 2,898 \cdot 10^{-3} m \cdot K$

## A teoria de Planck

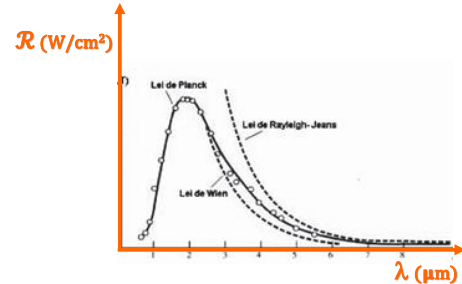


Max Planck  
(1858-1947)

Em dezembro de 1900, Planck apresentou à Sociedade Alemã de Física um estudo teórico sobre a emissão de radiação de um corpo negro, no qual deduz uma equação plenamente em acordo com os resultados experimentais.

## Radiação de corpo negro

Enquanto que a solução de Wien se ajustava bem aos pequenos comprimentos de onda, Raleigh e Jeans chegaram a uma solução que se ajustava aos grandes comprimentos de onda.



<http://www.galeriadafisica.com.br/le/20/fmc.pdf>

## Planck e sua constante

The Nobel Prize in Physics 1918

"In recognition of the services he rendered to the advancement of Physics by his discovery of energy quanta"

**$E = hf$**   
(energia do fóton)

**Constante de Planck**  
 $h = 6,63 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$   
 $h = 4,14 \times 10^{-15} \text{ eV}\cdot\text{s}$

Max Karl Ernst Ludwig Planck  
 Germany  
 Berlin University  
 Berlin, Germany  
 b. 1858  
 d. 1947

[http://nobelprize.org/nobel\\_prizes/physics/laureates/1918/index.htm](http://nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1918/index.htm)

## Radiação de corpo negro

### Teoria de Planck

Planck fez duas modificações na teoria clássica:

- Os osciladores (de origem eletromagnética) podem ter apenas certas energias discretas:

$$E_n = n h f$$

onde  $n$  é um número inteiro,  $f$  é a frequência, e  $h$  é chamada de constante de Planck:

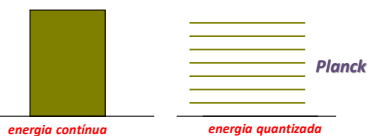
$$h = 6.6261 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$$

## A quantização de Planck

Planck fez a hipótese de que a **energia armazenada**, em cada modo de oscilação eletromagnética (de frequência  $f$ ), era **discreta** e da forma:

$$E_n = n h f \quad n = 0, 1, 2, \dots$$

Isso indicava que o movimento dos elétrons oscilantes nas paredes da cavidade deveria apresentar apenas valores discretos (**quantizados**), não contínuos, como se acreditava.



## Radiação de corpo negro

### Teoria de Planck

Planck fez duas modificações na teoria clássica:

- Os osciladores podem absorver ou emitir energia em múltiplos discretos de um quantum fundamental de energia dada por:

$$\Delta E = h f$$


### Radiação de corpo negro

**Teoria de Planck**

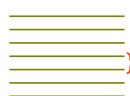
Planck fez duas modificações na teoria clássica:

- Os osciladores podem absorver ou emitir energia em múltiplos discretos de um quantum fundamental de energia dada por:

$$\Delta E = hf$$



energia contínua



energia quantizada

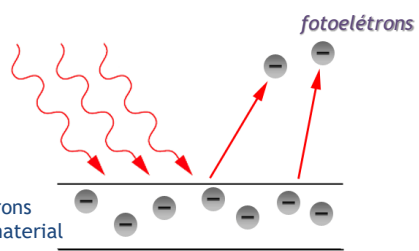
$\Delta E = hf$

### Efeito Fotoelétrico



### Efeito fotoelétrico

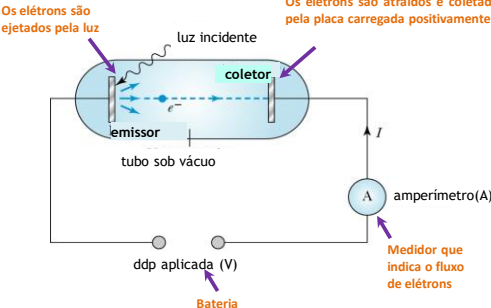
A luz arranca elétrons de diversas superfícies metálicas.



elétrons do material

fotoelétrons

### Experimento do Efeito Fotoelétrico



Os elétrons são ejetados pela luz

Os elétrons são atraídos e coletados pela placa carregada positivamente

emissor

coletor

tubo sob vácuo

ddp aplicada (V)

Bateria

amperímetro (A)

Medidor que indica o fluxo de elétrons

### A solução de Einstein

Pela conservação de energia

Energia antes (fóton) = Energia depois (elétron)

$$E = hf$$

$$hf = \phi + \frac{1}{2}mv_{max}^2$$

ou

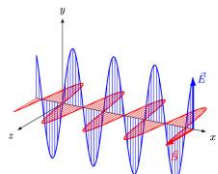
$$hf = \phi + K_{max}$$

onde  $\phi$  é a função trabalho do metal (energia potencial a ser superada antes do elétron poder escapar)

Aplica-se uma diferença de potencial  $V$  para que cesse a corrente - é o potencial de corte (potencial frenador)

$$V = -V_0$$

### Fótons



**Os fótons possuem momento**

**1916 Einstein:**  
fóton possui momento linear  $\vec{p}$

**fóton**  
não tem massa

$$E = hf$$

$$p = \frac{E}{c} = \frac{hf}{c}$$

(momento do fóton)

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

$$E = hf$$

**Os fótons possuem momento**

**1916 Einstein:**  
fóton possui momento linear  $\vec{p}$

**partícula**  
tem massa  $m$

$$K = \frac{1}{2}mv^2$$

$$\vec{p} = m\vec{v}$$

**fóton**  
não tem massa

$$E = hf$$

$$p = \frac{E}{c} = \frac{hf}{c}$$

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

$$p = \sqrt{2mK}$$

**Os fótons possuem momento**

**1916 Einstein:**  
fóton possui momento linear  $\vec{p}$

(momento do fóton  $p$ )

**fóton**  
não tem massa

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

Quando um fóton interage com a matéria há transferência de **energia** e de **momento**

$$E = hf$$

**Os fótons possuem momento**

**fóton**  $E = hf$   $p = \frac{h}{\lambda}$  não tem massa

Os postulados de Einstein sobre os quanta de luz e suas interações com a matéria:

1. A luz de frequência  $f$  consiste de quanta discretos, cada qual com energia  $E = hf$ .

Cada fóton viaja à velocidade da luz,  $c$ .

**Os fótons possuem momento**

**fóton**  $E = hf$   $p = \frac{h}{\lambda}$  não tem massa

Os postulados de Einstein sobre os quanta de luz e suas interações com a matéria:

2. Os quanta de luz são emitidos ou absorvidos integralmente.

Uma substância pode **emitir** 1, 2 ou 3 quanta, mas não 1,5 quantum.  
Analogamente, um elétron de um metal não pode **absorver** meio quantum, e sim, apenas **um número inteiro** deles.

**Os fótons possuem momento**

**fóton**  $E = hf$   $p = \frac{h}{\lambda}$  não tem massa

Os postulados de Einstein sobre os quanta de luz e suas interações com a matéria:

3. Um quantum de luz, quando absorvido pelo metal, transfere a totalidade de sua energia a um **único elétron**.

### Ondas Eletromagnéticas

perturbação

**cargas elétricas** → campo elétrico E

**cargas elétricas oscilando** → campo magnético  $B \perp E$

UFPA - Física  
096067 - A - FÍSICA PARA BIOTECNOLOGIA 2  
Ignez Casacelli  
31

### Propriedades das Ondas Eletromagnéticas

- (a)  $\vec{E}$  e  $\vec{B}$  perpendiculares à direção de propagação (transversal)
- (b)  $\vec{E}$  e  $\vec{B}$  perpendiculares entre si
- (c)  $\vec{E} \times \vec{B}$  sentido da propagação
- (d)  $\vec{E}$  e  $\vec{B}$  variam senoidalmente, mesma frequência e em fase

UFPA - Física  
096067 - A - FÍSICA PARA BIOTECNOLOGIA 2  
Ignez Casacelli  
32

### Ondas Eletromagnéticas

$$E = E_m \sin(kx - \omega t)$$

$$B = B_m \sin(kx - \omega t)$$

amplitudes

velocidade de uma onda  $v = \lambda f$        $\lambda = \frac{2\pi}{k}$        $\omega = 2\pi f$

$$v = \frac{2\pi}{k} \frac{\omega}{2\pi}$$

$$v = \frac{\omega}{k} \quad \boxed{c = \frac{\omega}{k}}$$

UFPA - Física  
096067 - A - FÍSICA PARA BIOTECNOLOGIA 2  
Ignez Casacelli  
33

### Ondas Eletromagnéticas

“Todas as ondas eletromagnéticas se propagam no vácuo com a mesma velocidade c.”

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} \approx 3,0 \times 10^8 \text{ m/s}$$

$\epsilon_0$	Permissividade do vácuo, também chamada de <u>constante elétrica</u> , uma constante universal	$\epsilon_0 \approx 8,85 \times 10^{-12} \text{ C}^2 \text{ N}^{-1} \text{ m}^{-2}$
$\mu_0$	Permeabilidade do vácuo, também chamada de <u>constante magnética</u> , uma constante universal	$\mu_0 \approx 1,26 \times 10^{-6} \text{ N/A}^2$

UFPA - Física  
096067 - A - FÍSICA PARA BIOTECNOLOGIA 2  
Ignez Casacelli  
34

### Ondas Eletromagnéticas

#### Amplitudes e módulos

$$\frac{E_m}{B_m} = c \quad (\text{razão entre amplitudes})$$

$$\frac{E}{B} = c \quad (\text{razão entre módulos})$$

UFPA - Física  
096067 - A - FÍSICA PARA BIOTECNOLOGIA 2  
Ignez Casacelli  
35

### Classificação

#### ONDAS ESFÉRICAS E ONDAS PLANAS

UFPA - Física  
096067 - A - FÍSICA PARA BIOTECNOLOGIA 2  
Ignez Casacelli  
36

UFPA Física 096067 - A - FÍSICA PARA BIOTECNOLOGIA 2 Ignaz Casacelli 37

ONDAS ESFÉRICAS E ONDAS PLANAS

### Classificação

UFPA Física 096067 - A - FÍSICA PARA BIOTECNOLOGIA 2 Ignaz Casacelli 38

ONDAS ESFÉRICAS E ONDAS PLANAS

### Classificação

UFPA Física 096067 - A - FÍSICA PARA BIOTECNOLOGIA 2 Ignaz Casacelli 39

ONDAS ESFÉRICAS E ONDAS PLANAS

### Classificação

$$I_1 = \frac{\mathcal{P}_{av}}{4\pi r_1^2}$$

$$I_2 = \frac{\mathcal{P}_{av}}{4\pi r_2^2}$$

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{r_2^2}{r_1^2}$$

UFPA Física 096067 - A - FÍSICA PARA BIOTECNOLOGIA 2 Ignaz Casacelli 40

### Radiação

- energia
- pressão
- transporte
- fluxo

UFPA Física 096067 - A - FÍSICA PARA BIOTECNOLOGIA 2 Ignaz Casacelli 41

### Transporte de energia e o Vetor de Poynting

John Henry Poynting (1852-1914)

$\vec{S}$  → Taxa de transporte de energia por unidade de área

Definição:

$$\vec{S} = \frac{1}{\mu_0} \vec{E} \times \vec{B}$$

UFPA Física 096067 - A - FÍSICA PARA BIOTECNOLOGIA 2 Ignaz Casacelli 42

### Transporte de energia e o Vetor de Poynting

$$\vec{S} = \frac{1}{\mu_0} \vec{E} \times \vec{B}$$

$\vec{S}$  → Taxa de transporte de energia por unidade de área

Taxa de transporte de energia → S depende da rapidez com a qual a energia é transportada por uma onda através de uma área unitária em um dado instante (Inst)

$$S = \left( \frac{\text{energia}}{\text{tempo}} \right)_{inst} \text{ unidade de área}$$

$$S = \left( \frac{\text{potência}}{\text{área}} \right)_{inst} \quad [S] = \frac{W}{m^2}$$

UFPA  
Física  
096067 - A - FÍSICA PARA BIOTECNOLOGIA 2  
Ignez Casacelli  
43

### Vetor de Poynting instantâneo S

$\vec{S}$  → Direção de propagação da onda e do transporte de energia no ponto.

$$\vec{S} = \frac{1}{\mu_0} \vec{E} \times \vec{B}$$

UFPA  
Física  
096067 - A - FÍSICA PARA BIOTECNOLOGIA 2  
Ignez Casacelli  
44

### Pressão de radiação

Ondas eletromagnéticas → Energia



UFPA  
Física  
096067 - A - FÍSICA PARA BIOTECNOLOGIA 2  
Ignez Casacelli  
45

### Vetor de Poynting instantâneo S

$\vec{S}$  → indica a direção de propagação da onda e do transporte de energia no ponto.  
→ indica um fluxo de energia

Módulo:

$$\vec{E} \perp \vec{B} \Rightarrow |\vec{E} \times \vec{B}| = EB \Rightarrow |\vec{S}| = S = \frac{1}{\mu_0} EB$$

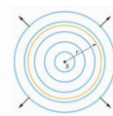
Como:  $\frac{E}{B} = c$

$$S = \frac{1}{c\mu_0} E^2 \quad \text{fluxo instantâneo de energia}$$

UFPA  
Física  
096067 - A - FÍSICA PARA BIOTECNOLOGIA 2  
Ignez Casacelli  
46

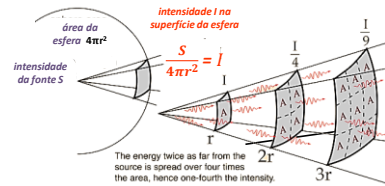
### Intensidade × distância

Uma fonte pontual S emite ondas eletromagnéticas uniformemente em todas as direções. As frentes de onda esféricas passam por uma esfera imaginária de centro em S e raio r.



esfera

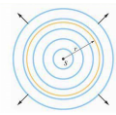
Fonte pontual = isotrópica



UFPA  
Física  
096067 - A - FÍSICA PARA BIOTECNOLOGIA 2  
Ignez Casacelli  
47

### Intensidade × distância

Uma fonte pontual S emite ondas eletromagnéticas uniformemente em todas as direções. As frentes de onda esféricas passam por uma esfera imaginária de centro em S e raio r.



$$\frac{S}{4\pi r^2} = I$$

$$I = \frac{pot}{area} = \frac{P_s}{4\pi r^2}$$

Fonte pontual = isotrópica

esfera

UFPA  
Física  
096067 - A - FÍSICA PARA BIOTECNOLOGIA 2  
Ignez Casacelli  
48

### Pressão de radiação

Ondas eletromagnéticas → Energia  
→ Momento linear  
pressão de radiação (muito pequena)

podemos exercer uma pressão sobre um objeto (a pressão de radiação) simplesmente iluminando o objeto



UFPA  
Física  
096067 - A - FÍSICA PARA BIOTECNOLOGIA 2  
Ignaz Casacelli  
49



Fonte de luz

### Pressão de radiação

podemos exercer uma pressão sobre um objeto (a pressão de radiação) simplesmente iluminando o objeto



Rino & Studart. Física na Escola, v.8, n. 1, 2007

UFPA  
Física  
096067 - A - FÍSICA PARA BIOTECNOLOGIA 2  
Ignaz Casacelli  
50

### Aplicação: Pressão de Radiação



<https://canaltech.com.br/entretenimento/10-tecnologias-da-jornada-nas-estrelas-que-se-tornaram-realidade/>

UFPA  
Física  
096067 - A - FÍSICA PARA BIOTECNOLOGIA 2  
Ignaz Casacelli  
51

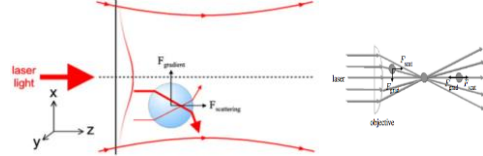
### Aplicação: Pressão de Radiação

### Pinças Ópticas "Optical Tweezers"

UFPA  
Física  
096067 - A - FÍSICA PARA BIOTECNOLOGIA 2  
Ignaz Casacelli  
52

### Pinças Ópticas "Optical Tweezers"

- O aprisionamento de partículas ou sistemas biológicos se dá principalmente pela incidente pressão dos fótons sobre esses sistemas.
- Envolve o equilíbrio entre dois tipos de forças ópticas: força de espalhamento e força de gradiente.



<http://www.stanford.edu/group/biacklab/Optical%20Tweezers%20Introduction.htm>

UFPA  
Física  
096067 - A - FÍSICA PARA BIOTECNOLOGIA 2  
Ignaz Casacelli  
53

### Pinças Ópticas "Optical Tweezers"

### APRISIONANDO A MATÉRIA COM A LUZ

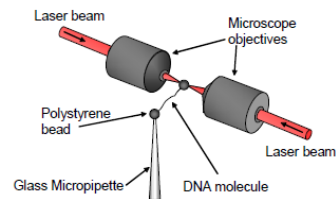
- Quanto maior a intensidade da luz, maior a força da armadilha.
- Se a armadilha não for forte o suficiente, o objeto irá escapar devido a movimentação térmica randômica (Movimento Browniano).

<http://www.stanford.edu/group/biacklab/Optical%20Tweezers%20Introduction.htm>

UFPA  
Física  
096067 - A - FÍSICA PARA BIOTECNOLOGIA 2  
Ignaz Casacelli  
54

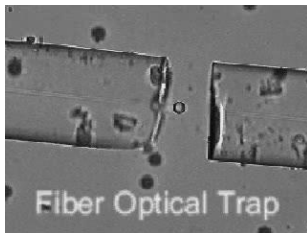
### Pinças Ópticas "Optical Tweezers"

O aprisionamento das partículas ou sistemas biológicos pode ser realizado utilizando-se duas pinças, uma contra a outra, sendo que o material de interesse situa-se entre essas pinças.



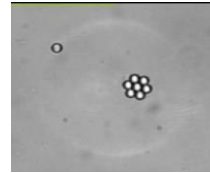
<http://www.stanford.edu/group/biacklab/Optical%20Tweezers%20Introduction.htm>

## Pinças Ópticas "Optical Tweezers"



<http://www2.i-med.ac.at/medphysik/tweezerpage.html#gallery>

## Pinças Ópticas "Optical Tweezers"



## Pressão de radiação e vela solar

Velas solares são um tipo de propulsão que utiliza pressão de radiação para gerar aceleração.

Elas são feitas de grandes espelhos membranosos de pouca massa que ganham momento linear ao refletirem fótons.

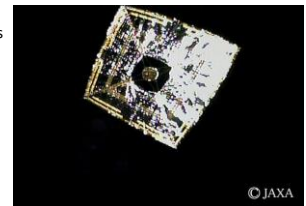
A pressão de radiação à distância da Terra ao Sol é de aproximadamente  $10^{-5}$  Pa.



Estudo da NASA de uma vela solar

## Pressão de radiação e vela solar

O conceito surgiu na década de 1920 e, devido a inúmeros desafios de engenharia, não foi explorado até anos recentes. A primeira nave espacial a voar usando vela solar foi a japonesa *Ikaros*, em 2010. O crescente interesse nessa tecnologia cria algumas possibilidades interessantes para o futuro das viagens espaciais.



*Ikaros*

<https://www.space.com/25800-ikaros-solar-sail.html>

## Pressão de radiação e vela solar

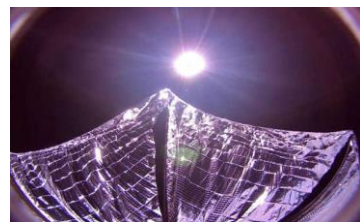
No dia 11 de junho de 2015, um novo tipo de nave espacial superou uma série de falhas e foi estendido com sucesso acima da Terra.

O satélite *LightSail* corrigiu as dificuldades em desenrolar suas velas solares, um sistema completamente diferente do propulsor tradicional, usado em foguetes, ou dos painéis solares.

<https://www.ecycle.com.br/component/content/article/373500-futuro-das-viagens-espaciais-teste-com-satelite-que-se-move-por-meio-da-luz-solar-e-bem-sucesso.html>

## Pressão de radiação e vela solar

A nave protótipo, construída pela *Planetary Society* dos Estados Unidos e financiada por doações públicas, está testando o mecanismo para desenrolar a vela. Outra missão que será lançada em 2016 irá testar o sistema de propulsão completo.



<https://www.ecycle.com.br/component/content/article/373500-futuro-das-viagens-espaciais-teste-com-satelite-que-se-move-por-meio-da-luz-solar-e-bem-sucesso.html>

**Pressão de radiação e vela solar**

Os veículos se movem por sua capacidade de acelerar: a chamada propulsão. Os veículos na terra aceleram ao interagir com o ambiente em torno deles, o carro acelera através da produção de uma força com o asfalto, o avião com o ar, etc. Mas, no espaço, existe o vácuo e então não há meio para interagir. Ai entram os propulsores de foguetes, que ejetam propulsão em uma direção, empurrando-os na direção oposta. Isso ocorre devido à **terceira lei do movimento de Newton**, que diz que toda vez que um objeto(A) exerce uma força sobre outro objeto(B), ele experimenta uma força igual e oposta .



<https://www.ecycle.com.br/component/content/article/37/3500-futuro-das-viagens-espaciais-teste-com-satelite-que-se-move-por-meio-da-luz-solar-e-bem-sucedido.html>

096067 - A - FÍSICA PARA BIOTECNOLOGIA 2  
Ignez Caracelli  
61

**Pressão de radiação e vela solar**

O propulsor em uma nave espacial é limitado e, uma vez esgotado, não há mais nenhuma aceleração possível. Por esse motivo, alguns lugares distantes no espaço são impossíveis de serem alcançados com foguetes convencionais. A vela solar contorna este problema ao não exigir qualquer massa propulsora. É como ter um foguete que pode se mover por um período de tempo indefinido.



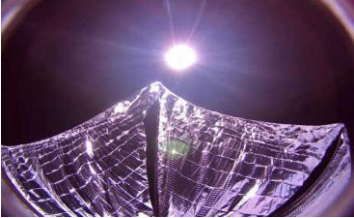
<https://www.ecycle.com.br/component/content/article/37/3500-futuro-das-viagens-espaciais-teste-com-satelite-que-se-move-por-meio-da-luz-solar-e-bem-sucedido.html>

096067 - A - FÍSICA PARA BIOTECNOLOGIA 2  
Ignez Caracelli  
62

**Pressão de radiação e vela solar**

Quais os principais desafios para essa tecnologia?

O principal desafio se deve ao fato da pressão de radiação solar ser muito pequena. Por isso, velas solares devem ser muito grandes para refletir quantidades significativas de luz, contudo também precisam ser leves para demandar menos força para movê-las.



<https://www.ecycle.com.br/component/content/article/37/3500-futuro-das-viagens-espaciais-teste-com-satelite-que-se-move-por-meio-da-luz-solar-e-bem-sucedido.html>

096067 - A - FÍSICA PARA BIOTECNOLOGIA 2  
Ignez Caracelli  
63

**Pressão de radiação e vela solar**

Quais os principais desafios para essa tecnologia?

E, para ser lançada com segurança, a vela deve ser dobrada e, em seguida, estendida na ausência de gravidade. Este mecanismo de extensão deve ser muito confiável, porque se ele falhar, toda a missão será desperdiçada. Por isso, estão sendo realizados esses treinos de lançamentos de *LightSail*.



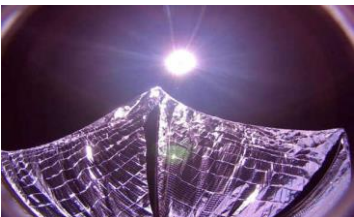
<https://www.ecycle.com.br/component/content/article/37/3500-futuro-das-viagens-espaciais-teste-com-satelite-que-se-move-por-meio-da-luz-solar-e-bem-sucedido.html>

096067 - A - FÍSICA PARA BIOTECNOLOGIA 2  
Ignez Caracelli  
64

**Pressão de radiação e vela solar**

Quais os principais desafios para essa tecnologia?

Superando o desafio de produzir velas grandes e leves, a aceleração que elas atingem continua a ser pequena: uma vela solar do tamanho de dois campos de tênis experimentaria uma força equivalente ao peso de 1 g na Terra. Se uma nave espacial tiver massa de 30 kg, sua aceleração será de apenas 0,0003 m/s<sup>2</sup>.



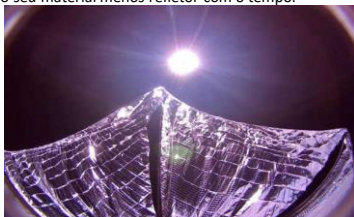
<https://www.ecycle.com.br/component/content/article/37/3500-futuro-das-viagens-espaciais-teste-com-satelite-que-se-move-por-meio-da-luz-solar-e-bem-sucedido.html>

096067 - A - FÍSICA PARA BIOTECNOLOGIA 2  
Ignez Caracelli  
65

**Pressão de radiação e vela solar**

Quais os principais desafios para essa tecnologia?

No entanto, apesar de ser uma velocidade lenta, ela pode ser contínua em direção à meta. O que significa que essas velas são adequadas para longas viagens interplanetárias. Na teoria, a vela pode acelerar para sempre, mas na prática existem algumas outras dificuldades. Radiação, impactos com micrometeoritos e saída de gás podem danificar a vela, tornando seu material menos refletor com o tempo.



<https://www.ecycle.com.br/component/content/article/37/3500-futuro-das-viagens-espaciais-teste-com-satelite-que-se-move-por-meio-da-luz-solar-e-bem-sucedido.html>

096067 - A - FÍSICA PARA BIOTECNOLOGIA 2  
Ignez Caracelli  
66

**Pressão de radiação e vela solar**

Quais os principais desafios para essa tecnologia?

A vantagem de projetos como o *LightSail*, é que eles podem trazer luz à viabilidade desse tipo de tecnologia. Criando assim, um maior interesse e entusiasmo neste modo de voos e a possibilidade de que haja um investimento substancial para o setor. Quem sabe assim, sejam desenvolvidas tecnologias necessárias para tornar a vela solar o principal sistema de propulsão de futuras naves espaciais.



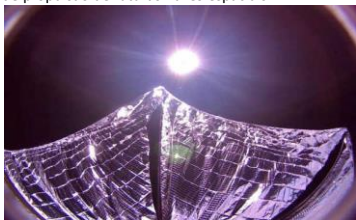
<https://www.encyte.com.br/component/content/article/337/3500-futuro-das-viagens-espaciais-teste-com-satelite-que-se-move-por-meio-da-luz-solar-e-bern-superdica.html>

096067 - A - FÍSICA PARA BIOTECNOLOGIA 2  
Ignez Casacelli  
67

**Pressão de radiação e vela solar**

Quais os principais desafios para essa tecnologia?

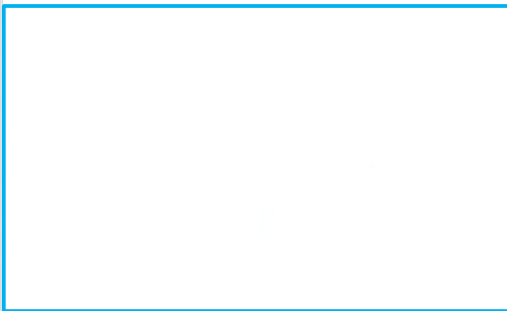
A vantagem de projetos como o *LightSail*, é que eles podem trazer luz à viabilidade desse tipo de tecnologia. Criando assim, um maior interesse e entusiasmo neste modo de voos e a possibilidade de que haja um investimento substancial para o setor. Quem sabe assim, sejam desenvolvidas tecnologias necessárias para tornar a vela solar o principal sistema de propulsão de futuras naves espaciais.



<https://www.encyte.com.br/component/content/article/337/3500-futuro-das-viagens-espaciais-teste-com-satelite-que-se-move-por-meio-da-luz-solar-e-bern-superdica.html>

096067 - A - FÍSICA PARA BIOTECNOLOGIA 2  
Ignez Casacelli  
68


**Pressão de radiação e vela solar**



<https://www.encyte.com.br/component/content/article/337/3500-futuro-das-viagens-espaciais-teste-com-satelite-que-se-move-por-meio-da-luz-solar-e-bern-superdica.html>

096067 - A - FÍSICA PARA BIOTECNOLOGIA 2  
Ignez Casacelli  
69

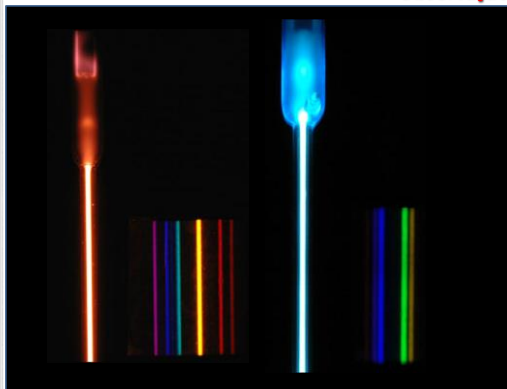
**Pressão de radiação e vela solar**



Espectro de raios

096067 - A - FÍSICA PARA BIOTECNOLOGIA 2  
Ignez Casacelli  
70

**Observação**



096067 - A - FÍSICA PARA BIOTECNOLOGIA 2  
Ignez Casacelli  
71

**Espectroscopia**

O instrumento utilizado na espectroscopia é chamado de espectroscópio



096067 - A - FÍSICA PARA BIOTECNOLOGIA 2  
Ignez Casacelli

### Espectroscópio (1859)

Gustav Kirchhoff  
físico alemão  
(1824-1887)

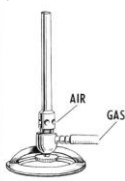


sugeriu que um elemento químico puro ao ser queimado emite uma radiação com cor bem característica (Teste da Chama)

Robert Bunsen  
químico alemão  
(1811-1899)



um queimador de gás metano ( $\text{CH}_4$ ) com controle da entrada de ar e cuja cor não interferia no experimento.



### Espectroscópio (1859)

Gustav Kirchhoff  
físico alemão  
(1824-1887)



sugeriu que um elemento químico puro ao ser queimado emite uma radiação com cor bem característica (Teste da Chama)

Robert Bunsen  
químico alemão  
(1811-1899)

um queimador de gás metano ( $\text{CH}_4$ ) com controle da entrada de ar e cuja cor não interferia no experimento.

### Kirchhoff e Bunsen

Por volta dos anos de 1860, Kirchhoff e Bunsen já haviam realizado um número suficientemente grande de análises espectrais.

### Kirchhoff e Bunsen

O conhecimento acumulado sobre as linhas espectrais já era suficiente a ponto de permitir que Kirchhoff formulasse três importantes enunciados sobre espectros que hoje são chamados de **leis de Kirchhoff**.

### Primeira lei de Kirchhoff

Um corpo **opaco e quente**, produz um **espectro contínuo**.

•o corpo opaco e quente pode ser um sólido, um líquido ou um gás altamente comprimido, e portanto denso.

•o espectro contínuo é um verdadeiro "arco-íris", um conjunto completo de cores sem qualquer linha espectral traçada sobre ele.



### Segunda lei de Kirchhoff

•um gás transparente, quente, produz um espectro onde uma série de linhas espectrais brilhantes estão traçadas contra o fundo escuro.

•a este espectro damos o nome de **espectro de linhas de emissão**.

•o número e as cores destas linhas depende de quais os elementos que estão presentes no gás



UFPA  
Física  
096067 - A - FÍSICA PARA BIOTECNOLOGIA 2  
Ignaz Cascaelli

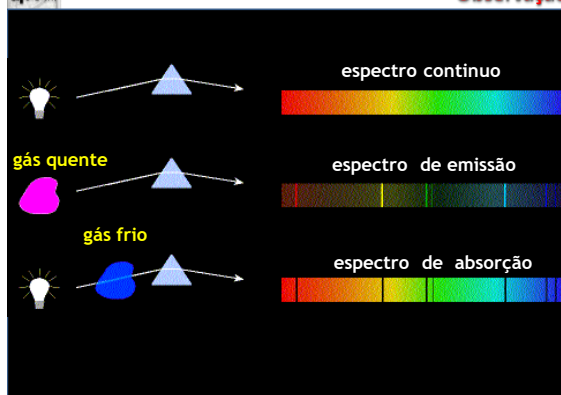
### Terceira lei de Kirchhoff

- se colocamos um gás transparente e frio na frente de uma fonte de espectro contínuo, o gás mais frio provoca o aparecimento de uma série de linhas escuras riscadas entre as cores do espectro contínuo.
- a este espectro damos o nome de **espectro de linhas de absorção**.
- as cores e o número das linhas de absorção depende dos elementos presentes no gás frio.



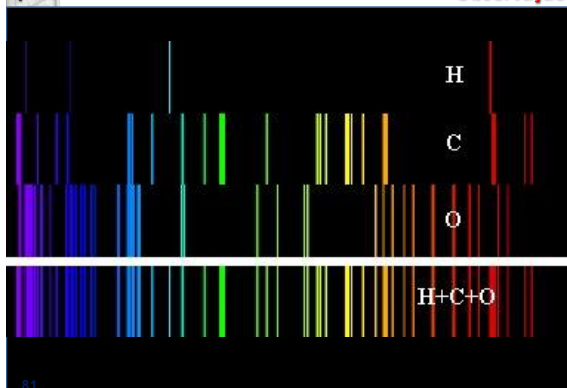
UFPA  
Física  
096067 - A - FÍSICA PARA BIOTECNOLOGIA 2  
Ignaz Cascaelli

### Observação



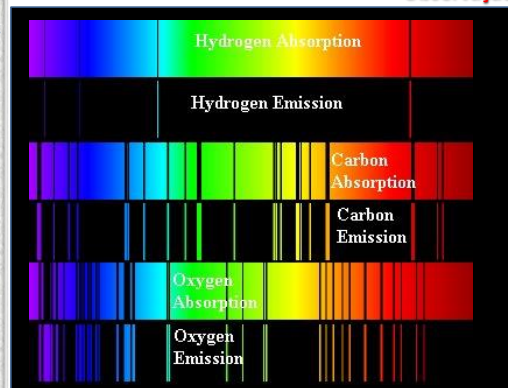
UFPA  
Física  
096067 - A - FÍSICA PARA BIOTECNOLOGIA 2  
Ignaz Cascaelli

### Observação



UFPA  
Física  
096067 - A - FÍSICA PARA BIOTECNOLOGIA 2  
Ignaz Cascaelli

### Observação



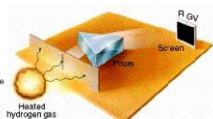
UFPA  
Física  
096067 - A - FÍSICA PARA BIOTECNOLOGIA 2  
Ignaz Cascaelli

### Espectro de raios

#### Espectros atômicos

O espectro emitido por um elemento químico não é contínuo

São como impressões digitais



Desde o século XVII, já se sabia que as **substâncias aquecidas** emitiam luz com **espectro discreto**.

UFPA  
Física  
096067 - A - FÍSICA PARA BIOTECNOLOGIA 2  
Ignaz Cascaelli

### Espectro atômicos

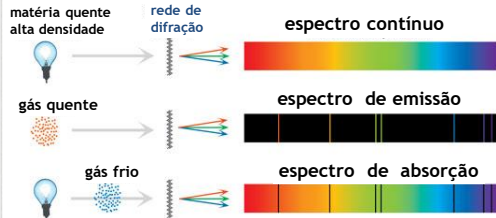
**Espectro:** conjunto de comprimentos de onda emitidos ou absorvidos pelo elemento.

**Espectro de emissão:** linhas coloridas obtidas pela dispersão da luz emitida pela amostra. Cada linha corresponde a um determinado comprimento de onda.

**Espectro de absorção:** linhas escuras obtidas ao transmitir luz branca através da amostra. As linhas escuras estão sempre nas mesmas posições das linhas claras emitidas pela mesma amostra. Assim, o espectro de absorção coincide com o espectro de emissão.

## Espectro de raios

Além do espectro de emissão temos também o espectro de absorção



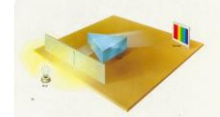
096067 - A - FÍSICA PARA BIOTECNOLOGIA 2  
Ignez Casacelli  
85

## Espectros atômicos e estrelas

As estrelas distantes que podem ser analisadas por meio da medida do espectro.

Em colaboração com seu colega químico Robert Bunsen, Kirchhoff transformou a Espectroscopia em uma poderosa ferramenta para a análise química de amostras diversas em laboratório.

O objetivo, nessa área, é identificar os elementos químicos presentes em uma determinada amostra.



096067 - A - FÍSICA PARA BIOTECNOLOGIA 2  
Ignez Casacelli  
86

## Espectros de emissão

→ Não havia explicação para o fato dele ser **descontínuo**, ou seja, a existência de frequências (cores) da luz emitida tão bem definidas.

→ Essa luz emitida pelos átomos excitados era associada ao movimento dos elétrons mas **nem o modelo de Rutherford** era compatível com o espectro descontínuo.

096067 - A - FÍSICA PARA BIOTECNOLOGIA 2  
Ignez Casacelli  
87

## Espectros de emissão

**Kirchhoff** demonstrou que os comprimentos de onda emitidos por uma substância coincidem com aqueles que esta mesma substância é capaz de absorver.

Seu método é baseado em uma propriedade muito importante: cada elemento químico tem seu espectro característico, que é o mesmo tanto para emissão como para a absorção de luz:

**o espectro funciona como uma "impressão digital" de cada elemento químico.**

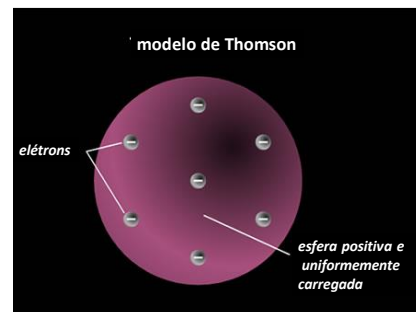
096067 - A - FÍSICA PARA BIOTECNOLOGIA 2  
Ignez Casacelli  
88

## Espectros Atômicos e modelos de átomo

**Dalton (1803-bola de bilhar):**  
o átomo é uma esfera maciça, indivisível e neutra.

096067 - A - FÍSICA PARA BIOTECNOLOGIA 2  
Ignez Casacelli  
89

## Átomos: Modelo de Thomson - 1897



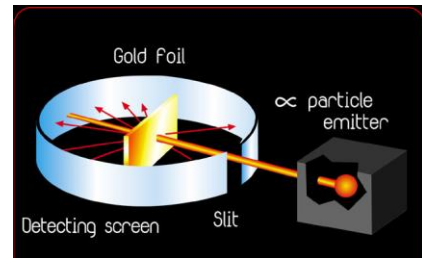
**Thomson (pudim de passas):** o átomo é uma esfera positiva com elétrons encravados nela.

096067 - A - FÍSICA PARA BIOTECNOLOGIA 2  
Ignez Casacelli  
90

## Fatos

- descoberta do elétron (1897)
- quantização da carga do elétron (1910)

## Átomos: modelo de Rutherford - 1911

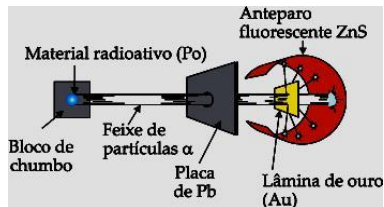


Rutherford (modelo planetário):  
o átomo tem um núcleo positivo e muito pequeno  
ao redor do qual giram os elétrons.

- descoberta do núcleo atômico

## Átomos: modelo de Rutherford

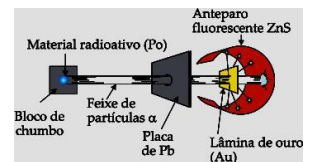
Em 1911, Ernest Rutherford, estudando a trajetória de partículas  $\alpha$  (partículas positivas) emitidas pelo elemento radioativo polônio, bombardeou uma fina lâmina de ouro.



## Átomos: modelo de Rutherford

Rutherford observou que:

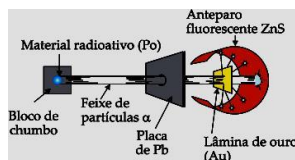
- a maioria das partículas atravessavam a lâmina de ouro sem sofrer desvio em sua trajetória → logo, há uma grande região de vazio, que passou a se chamar eletrosfera



## Átomos: modelo de Rutherford

Rutherford observou que:

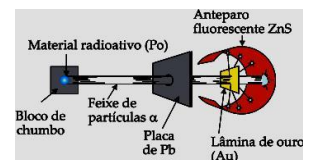
- algumas partículas sofriam desvio em sua trajetória  
→ haveria uma repulsão das cargas positivas (partículas  $\alpha$ ) com uma região pequena também positiva (núcleo).



## Átomos: modelo de Rutherford

Rutherford observou que:

- um número muito pequeno de partículas batiam na lâmina e voltavam  
→ portanto, a região central é pequena e densa, sendo composta portanto, por prótons

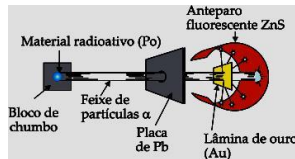




### Átomos: modelo de Rutherford

Diante das observações, **Rutherford** concluiu que a lâmina de ouro seria constituída por:

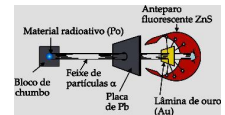
*átomos são formados por um núcleo muito pequeno carregado positivamente (no centro do átomo) e muito denso, rodeado por uma região comparativamente grande onde estariam os elétrons.*



### Átomos: modelo de Rutherford

Nesse contexto, surge ainda a ideia de que os elétrons estariam em movimentos circulares ao redor do núcleo, uma vez que se estivesse parados, acabariam por se chocar com o núcleo, positivo.

O pesquisador acreditava que o átomo seria de 10000 a 100000 vezes maior que seu núcleo.



### Átomos: modelo de Rutherford

#### Inconsistência:

Um elétron girando em torno do núcleo está submetido a uma aceleração centrípeta e em função disso há emissão de radiação, o que faria o elétron perder energia até colidir com o núcleo!

Propostas de solução?

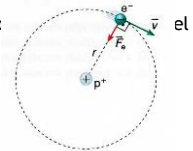
### O modelo de Bohr aplicado ao átomo de hidrogênio

#### 1º postulado

*O elétron pode existir sem irradiar em qualquer estado de um conjunto de estados estacionários com energia bem determinada.* (Bohr não diz como encontrar estes estados estacionários).

O elétron descreve órbitas circulares em torno do núcleo, formado por um único

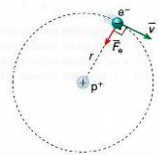
A força eletrostática é a força  $F_e$  por esse movimento.



### O modelo de Bohr aplicado ao átomo de hidrogênio

Apenas algumas órbitas estáveis, denominadas **estados estacionários**, são permitidas ao elétron.

Nelas o átomo não irradia energia.



### O modelo de Bohr aplicado ao átomo de hidrogênio

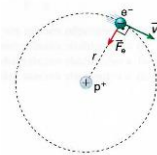
#### 2º postulado

A passagem de um elétron de um estado para outro é possível mediante **absorção** ou **liberação** de energia:

$$E' - E = hf$$

$$\Delta E = hf$$

*condição de frequência de Bohr*



## O modelo de Bohr aplicado ao átomo de hidrogênio

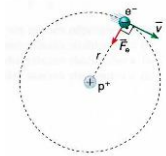
Os postulados juntam duas ideias:

- hipótese do fóton e quantização de energia (Planck)
- conservação de energia (Einstein)

$$\Delta E = hf$$

condição de frequência de Bohr

Estas propostas são semi-clássicas



## O modelo de Bohr aplicado ao átomo de hidrogênio

Lei de Coulomb

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_p q_e}{r^2}$$

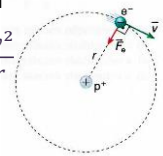
$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r^2}$$

elétron na órbita

$$F = m a$$

$$F = m \frac{v^2}{r}$$

$$\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r^2} = m \frac{v^2}{r}$$



## O modelo de Bohr aplicado ao átomo de hidrogênio

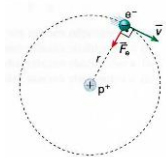
energia cinética:  $K = \frac{1}{2} m v^2$

$$\frac{1}{8\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r} = \frac{1}{2} m v^2$$

$$K = \frac{1}{8\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r}$$

$$\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r} = m v^2$$

$$\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r^2} = m \frac{v^2}{r}$$



## O modelo de Bohr aplicado ao átomo de hidrogênio

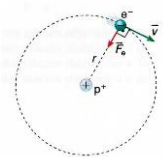
energia potencial:  $U = (-e)V$

$$U = (-e) \frac{e}{4\pi\epsilon_0} \frac{1}{r}$$

$$U = -\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0} \frac{1}{r}$$

$$U = (-e) \frac{q}{4\pi\epsilon_0} \frac{1}{r}$$

$$V = \frac{q}{4\pi\epsilon_0} \frac{1}{r}$$



## O modelo de Bohr aplicado ao átomo de hidrogênio

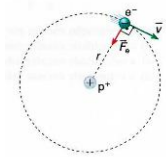
energia total:  $E = K + U$

$$K = \frac{1}{8\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r}$$

$$U = -\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0} \frac{1}{r}$$

$$E = \frac{1}{8\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r} - \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0} \frac{1}{r}$$

$$E = -\frac{e^2}{8\pi\epsilon_0} \frac{1}{r}$$



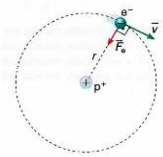
## O modelo de Bohr aplicado ao átomo de hidrogênio

$$\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r^2} = m \frac{v^2}{r}$$

$$\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{mr} = v^2$$

$$v = \sqrt{\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{mr}}$$

velocidade



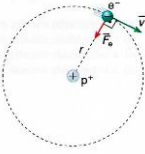
**O modelo de Bohr aplicado ao átomo de hidrogênio**

$$v = \sqrt{\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{mr}}$$

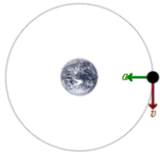
$$\omega = 2\pi f = \frac{v}{r}$$

frequência:  $f = \frac{v}{2\pi r}$

$$f = \sqrt{\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{mr}} \left( \frac{1}{2\pi r} \right)$$

$$f = \sqrt{\frac{e^2}{16\pi r^3 \pi^3 \epsilon_0}} \text{ frequência}$$


**O modelo de Bohr aplicado ao átomo de hidrogênio**

$$v = \sqrt{\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{mr}}$$


**momento:**  $p = mv$

↓

**momento angular:**  $L = mvr = pr$

↓

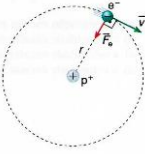
**Raio da órbita** → **energia**

**O modelo de Bohr aplicado ao átomo de hidrogênio**

$$v = \sqrt{\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{mr}}$$

**momento:**  $p = mv$

$$p = m \sqrt{\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{mr}}$$

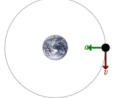
$$p = \sqrt{\frac{m}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r}}$$


**O modelo de Bohr aplicado ao átomo de hidrogênio**

**momento:**  $p = mv$        $p = \sqrt{\frac{m}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r}}$

**momento angular:**  $L = mvr = pr$

momento angular é a quantidade de movimento associado a um objeto que executa um movimento de rotação em torno de um ponto fixo

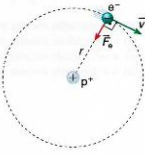


**O modelo de Bohr aplicado ao átomo de hidrogênio**

**momento:**  $p = mv$        $p = \sqrt{\frac{m}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r}}$

**momento angular:**  $L = mvr = pr$

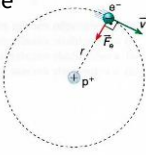
$$L = pr = \sqrt{\frac{m}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r}} r$$

$$L = \sqrt{\frac{m}{4\pi\epsilon_0} \frac{r^2 e^2}{r}}$$


**O modelo de Bohr aplicado ao átomo de hidrogênio**

**momento angular:**  $L = \sqrt{\frac{me^2 r}{4\pi\epsilon_0}}$

As órbitas permitidas ao elétron são aquelas em que o momento angular orbital é um múltiplo inteiro de  $h/2\pi$



**O modelo de Bohr  
aplicado ao átomo de hidrogênio**

Assim:  $L = mvr = n \frac{h}{2\pi}$  ( $n=1,2,3,\dots$ )

Raios das órbitas permitidas:

$$L = \sqrt{\frac{me^2 r}{4\pi\epsilon_0}} = n \frac{h}{2\pi} \rightarrow \frac{me^2 r}{4\pi\epsilon_0} = n^2 \frac{h^2}{4\pi^2}$$

$$r = n^2 \frac{\epsilon_0 h^2}{\pi m e^2}$$

**O modelo de Bohr  
aplicado ao átomo de hidrogênio**

Raios das órbitas permitidas:

$$r_n = n^2 \frac{\epsilon_0 h^2}{\pi m e^2}$$

$$r_n = n^2 r_B$$

$r_B$  : raio de Bohr (corresponde ao estado fundamental).

$$r_B = \frac{\epsilon_0 h^2}{\pi m e^2}$$

**O modelo de Bohr  
aplicado ao átomo de hidrogênio**

Raios das órbitas permitidas:

$$r_n = n^2 \frac{\epsilon_0 h^2}{\pi m e^2}$$

Energia:

$$E = -\frac{e^2}{8\pi\epsilon_0} \frac{1}{r}$$

$$E_n = -\frac{me^4}{8h^2\epsilon_0^2} \frac{1}{n^2}$$

$$E_n = -\frac{13,6}{n^2} \text{ (eV)} \quad (n=1,2,3,\dots)$$

**O modelo de Bohr  
aplicado ao átomo de hidrogênio**

Raio de Bohr:

$$r_B = \frac{\epsilon_0 h^2}{\pi m e^2}$$

$$r_B = \frac{\epsilon_0 h^2}{\pi m e^2} = 5,3 \times 10^{-11} \text{ m}$$

**O modelo de Bohr  
aplicado ao átomo de hidrogênio**

$$E_n = -\frac{13,6}{n^2} \text{ (eV)} \quad (n = 1,2,3,\dots)$$

$$r_n = n^2 r_B \quad n \rightarrow \text{número quântico}$$

$n = 1$  estado fundamental  
(mais baixa energia)

$$E_1 = -13,6 \text{ (eV)}$$

$$r_1 = r_B = 5,3 \times 10^{-11} \text{ m}$$

**O modelo de Bohr  
aplicado ao átomo de hidrogênio**

$$E_n = -\frac{13,6}{n^2} \text{ (eV)} \quad (n = 1,2,3,\dots)$$

$$r_n = n^2 r_B \quad \text{raios das órbitas permitidas}$$

$n = 1$  estado fundamental  
(mais baixa energia)

$$r_1 = r_B$$

UFPA  
Física  
096067 - A - FÍSICA PARA BIOTECNOLOGIA 2  
Igneaz Caracelli  
121

### O modelo de Bohr aplicado ao átomo de hidrogênio

$$E_n = -\frac{13,6}{n^2} \text{ (eV)} \quad (n = 1, 2, 3, \dots)$$

$$r_n = n^2 r_B \quad \text{raios das órbitas permitidas}$$

$n > 1$  estados excitados

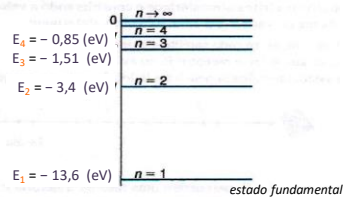
$$E_1 = -13,6 \text{ (eV)} < E_2 < E_3 < \dots < E_n$$

UFPA  
Física  
096067 - A - FÍSICA PARA BIOTECNOLOGIA 2  
Igneaz Caracelli  
122

### Energia do elétron no n-ésimo estado estacionário

$$E_n = -\frac{13,6}{n^2}$$

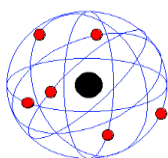
Níveis de energia de um elétron num átomo de hidrogênio.



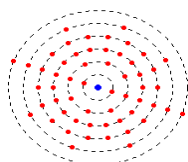
$$E_1 < E_2 < E_3 < \dots < E_n$$

UFPA  
Física  
096067 - A - FÍSICA PARA BIOTECNOLOGIA 2  
Igneaz Caracelli

### Níveis de energia



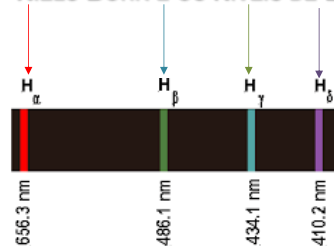
Modelo atômico de Rutherford



Modelo atômico de Bohr

UFPA  
Física  
096067 - A - FÍSICA PARA BIOTECNOLOGIA 2  
Igneaz Caracelli

### NIELS BOHR E OS NÍVEIS DE ENERGIA



Espectro do hidrogênio. As raias coloridas correspondem à emissão de energia na forma de fótons, liberados nos saltos dos elétrons.

UFPA  
Física  
096067 - A - FÍSICA PARA BIOTECNOLOGIA 2  
Igneaz Caracelli

### NIELS BOHR E OS NÍVEIS DE ENERGIA

Determinou-se, então, o número quântico principal que corresponde ao raio de uma órbita genérica de um átomo. A cada órbita associa-se uma energia:

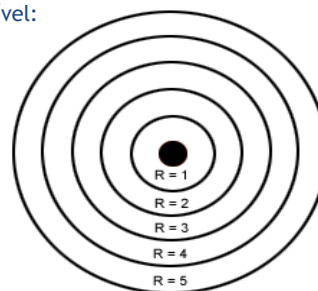
$$E_n = \frac{1}{n^2} \cdot E_1$$

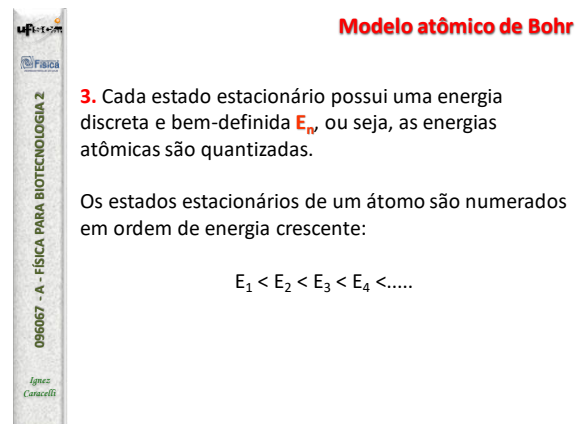
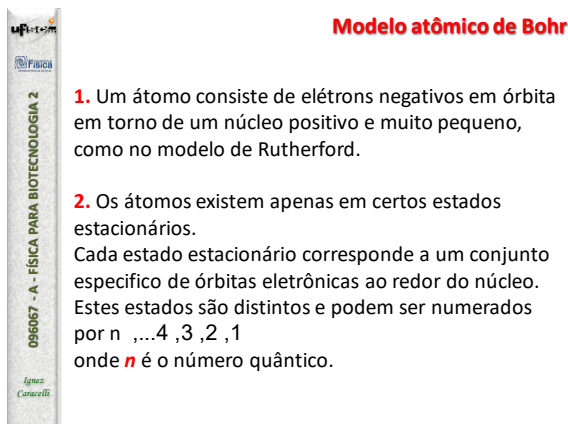
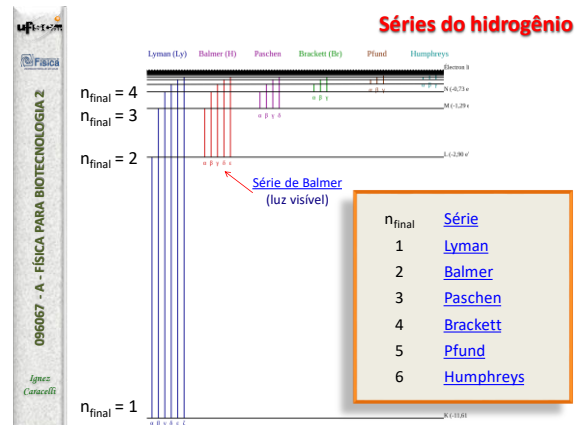
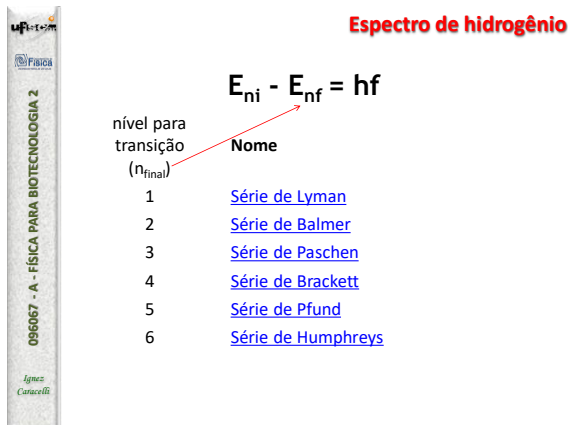
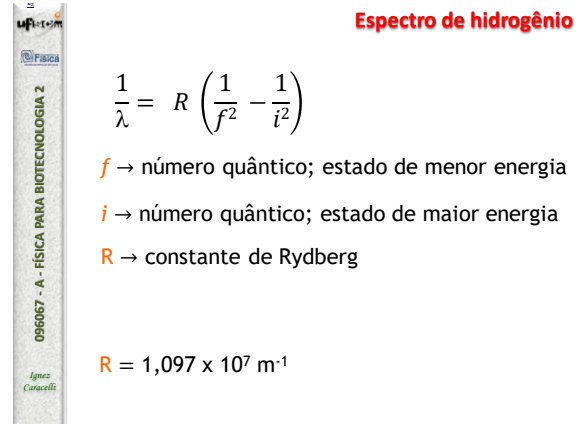
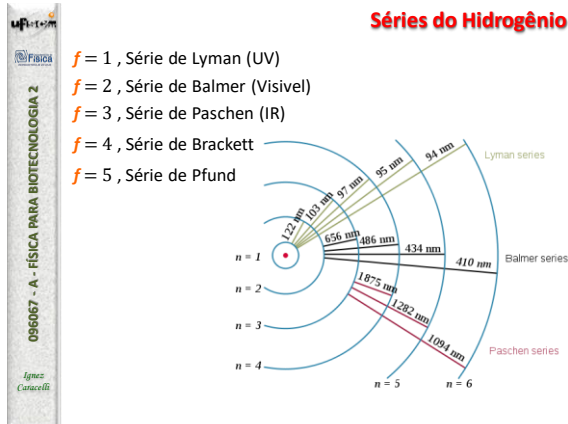
estado estacionário fundamental.

UFPA  
Física  
096067 - A - FÍSICA PARA BIOTECNOLOGIA 2  
Igneaz Caracelli

### NIELS BOHR E OS NÍVEIS DE ENERGIA

Cada órbita ganha um número "n", quanto maior este número, maior a energia do nível:





### Modelo atômico de Bohr

4. O estado de energia mais baixo do átomo, de energia  $E_1$ , é estável e pode existir indefinidamente. Ele é denominado *estado fundamental* do átomo.

Outros estados estacionários com energias  $E_2, E_3, E_4, \dots$  são denominados *estados excitados* do átomo.

### Modelo atômico de Bohr

5. Um átomo pode "saltar" de um estado estacionário para outro por emissão ou absorção de um fóton de frequência

$$f_{\text{fóton}} = \frac{\Delta E}{h}$$

onde  $h$  é a constante de Planck e

$$\Delta E = |E_f - E_i|$$

$E_i$  → a energia do estado inicial

$E_f$  → a energia do estado final

### Modelo atômico de Bohr

5. Um átomo pode "saltar" de um estado estacionário para outro por emissão ou absorção de um fóton de frequência

$$f_{\text{fóton}} = \frac{\Delta E}{h}$$

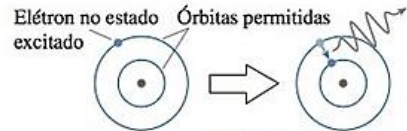
onde  $h$  é a constante de Planck e

$$\Delta E = |E_f - E_i|$$

Este salto é chamado de transição ou, às vezes, de salto quântico.

### Modelo atômico de Bohr

(a) Emissão e absorção de luz



O elétron salta para um estado estacionário de energia mais baixo e emite um fóton.

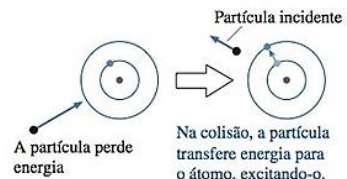
### Modelo atômico de Bohr



### Modelo atômico de Bohr

6. Um átomo pode mudar de um estado de menor energia para um de maior energia pela absorção de uma energia em uma colisão inelástica com um elétron ou com outro átomo. O processo é denominado excitação colisional.

(b) Excitação colisional



## Modelo atômico de Bohr

### 7. Átomos tendem ao estado fundamental.

Em um estado excitado e deixado por sua conta, um átomo saltará para estados de energias cada vez mais baixos, até atingir o estado fundamental.

## Modelo atômico de Bohr

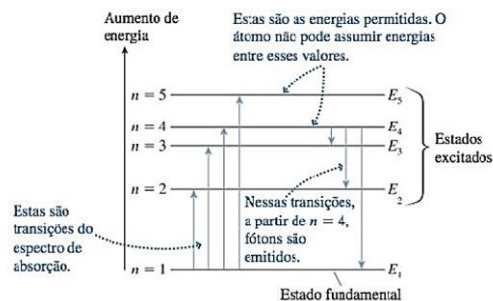
Cada elemento da tabela periódica possui um espectro próprio.

As energias dos estados estacionários são as energias dos elétrons em órbita.

Elementos diferentes, com diferentes números de elétrons, possuem órbitas estáveis distintas e, conseqüentemente, distintos estados estacionários.

Estados com diferentes energias emitem ou absorvem fótons de comprimentos de onda diferentes.

## Diagramas de níveis de energia



## Espectro de hidrogênio

$$\frac{1}{\lambda} = R \left( \frac{1}{f^2} - \frac{1}{i^2} \right)$$

$f \rightarrow$  número quântico; estado de menor energia

$i \rightarrow$  número quântico; estado de maior energia

$R \rightarrow$  constante de Rydberg

$$R_{\infty} = \frac{m_e e^4}{8\epsilon_0^2 h^3 c} = 1.097\,373\,156\,8539(55) \times 10^7 \text{ m}^{-1},$$

$$R = 1,097 \times 10^7 \text{ m}^{-1}$$

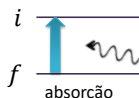
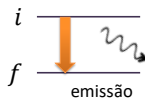
## Espectro de hidrogênio

se o átomo sofre uma transição entre dois níveis de energia causada pela emissão ou absorção de um fóton de luz, o comprimento de onda da luz é dado por:

$$\frac{1}{\lambda} = R \left( \frac{1}{f^2} - \frac{1}{i^2} \right)$$

$f \rightarrow$  número quântico; estado de menor energia

$i \rightarrow$  número quântico; estado de maior energia



## NIELS BOHR E OS NÍVEIS DE ENERGIA

O modelo de Bohr apresentou problemas, só funcionava bem para átomos de hidrogênio.

Então, o físico alemão Arnold Sommerfeld realizou trabalhos que generalizaram a teoria, incluindo órbitas elípticas.

A partir de 1926, com os trabalhos de Erwin Schrödinger, a ideia de órbitas seria substituída pela interpretação probabilística para os níveis de energia do átomo.





Vídeo para assistir

### O experimento da fenda dupla: ondas, matéria e partículas



<http://www.youtube.com/watch?v=u7VctogNgU4>

português

<http://www.youtube.com/watch?v=FRhojLLdrsY>

inglês com legenda



Vídeo para assistir

### El gato de Schrödinger: español



[http://www.youtube.com/watch?v=JC9A\\_E5kgZY](http://www.youtube.com/watch?v=JC9A_E5kgZY)

español

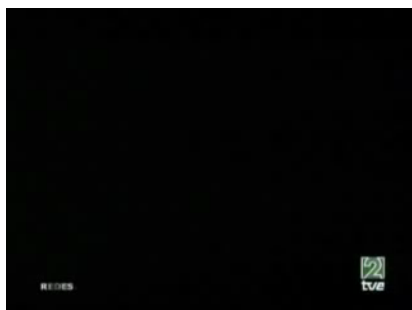
[http://es.thebigbangtheory.wikia.com/wiki/Gato\\_de\\_Schr%C3%B6dinger](http://es.thebigbangtheory.wikia.com/wiki/Gato_de_Schr%C3%B6dinger)

texto



### El gato de Schrödinger: español

Vídeo para assistir



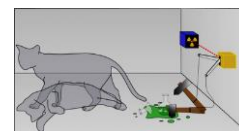
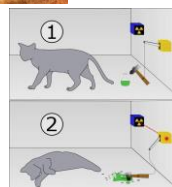
[https://youtu.be/JC9A\\_E5kgZY?t=66](https://youtu.be/JC9A_E5kgZY?t=66)

español



Vídeo para assistir

### El gato de Schrödinger: español



[http://www.youtube.com/watch?v=JC9A\\_E5kgZY](http://www.youtube.com/watch?v=JC9A_E5kgZY)

español

[http://es.thebigbangtheory.wikia.com/wiki/Gato\\_de\\_Schr%C3%B6dinger](http://es.thebigbangtheory.wikia.com/wiki/Gato_de_Schr%C3%B6dinger)

texto



Vídeo para assistir

### O gato de Schrödinger por Sheldon



<https://www.youtube.com/watch?v=SiiQbwRPVig>



Vídeo para assistir

### O gato de Schrödinger por Sheldon



<https://www.youtube.com/watch?v=SiiQbwRPVig>

UFPA - Física

096067 - A - FÍSICA PARA BIOTECNOLOGIA 2

151

Ignês Canacelli

**Efeito Compton**

X-ray photon, electron, scattered electron, scattered X-ray photon

© 2007 Encyclopædia Britannica, Inc.

UFPA - Física

096067 - A - FÍSICA PARA BIOTECNOLOGIA 2

Ignês Canacelli

**O efeito fotoelétrico**

fóton incidente, matéria, e

UFPA - Física

096067 - A - FÍSICA PARA BIOTECNOLOGIA 2

Ignês Canacelli

**O experimento de Compton**

A experiência de Compton consistiu na incidência de fótons de frequência na faixa de Raios X com comprimento  $\lambda_0$ , em um alvo de grafite:

Carbon target, X-ray tube Molybdenum  $K\alpha$ , Calcite crystal, Ionization chamber, Scattering from outer carbon electrons, Scattering from inner carbon electrons produces very little wavelength shift because they are tightly bound and the entire atom recoils.

$\lambda' = 0.0731 \text{ nm}$

UFPA - Física

096067 - A - FÍSICA PARA BIOTECNOLOGIA 2

Ignês Canacelli

**O experimento de Compton**

1923:

Arthur Compton (esq.) com seu assistente, 1936

Raios X incidentes,  $\lambda$ , Fendas colimadoras, T,  $\lambda'$ ,  $\phi$ , detector, Raios X espalhados

UFPA - Física

096067 - A - FÍSICA PARA BIOTECNOLOGIA 2

Ignês Canacelli

**Compton**

146913 The Nobel Prize in Physics

Nobelprize.org

The Official Web Site of the Nobel Prize

The Nobel Prize in Physics 1927  
Arthur H. Compton, C.T.R. Wilson

Arthur Holly Compton, Charles Thomson Rees Wilson

The Nobel Prize in Physics 1927 was divided equally between Arthur Holly Compton "for his discovery of the effect named after him" and Charles Thomson Rees Wilson "for his method of making the paths of electrically charged particles visible by condensation of vapour".

[http://www.nobelprize.org/nobel\\_prizes/physics/laureates/1927/index.html](http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1927/index.html)

UFPA - Física

096067 - A - FÍSICA PARA BIOTECNOLOGIA 2

Ignês Canacelli


**Efeito Compton**

fóton incidente, matéria

o que se esperava (classicamente)?

fóton incidente  $\lambda$ , fóton desviado  $\lambda$

**Efeito Compton**


fóton incidente  $\lambda$   matéria (elétron)

*o que aconteceu (quântica)?*

fóton incidente  $\lambda$   $\rightarrow$  fóton desviado  $\lambda' \neq \lambda$   
 $\lambda' > \lambda$

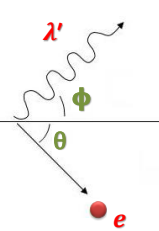
UFPA - Física 096067 - A - FÍSICA PARA BIOTECNOLOGIA 2 Ignez Casacelli

**Efeito Compton**

fóton incidente  $\lambda$   matéria (elétron)


*o que aconteceu (quântica)?*

fóton desviado  $\lambda' \neq \lambda$   
 $\lambda' > \lambda$   
 $E' < E$

$\theta$  

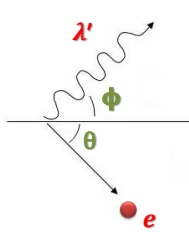
UFPA - Física 096067 - A - FÍSICA PARA BIOTECNOLOGIA 2 Ignez Casacelli

**Efeito Compton**

fóton incidente  $\lambda$   matéria (elétron)



*o que aconteceu (quântica)?*


fóton desviado  $\lambda' \neq \lambda$   
 $\lambda' > \lambda$   
 $E' < E$


$\theta$  


UFPA - Física 096067 - A - FÍSICA PARA BIOTECNOLOGIA 2 Ignez Casacelli

**Efeito Compton**

fóton incidente  fóton espalhado 

elétron antes da colisão   $\theta$

elétron após a colisão   $P_e$

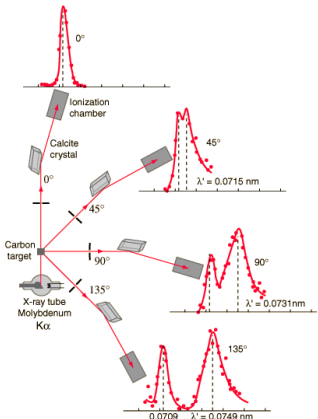
$x$   $y$  

UFPA - Física 096067 - A - FÍSICA PARA BIOTECNOLOGIA 2 Ignez Casacelli

**Efeito Compton**

**Dependência com o ângulo  $\phi$**

segundo pico com  $\lambda' > \lambda$

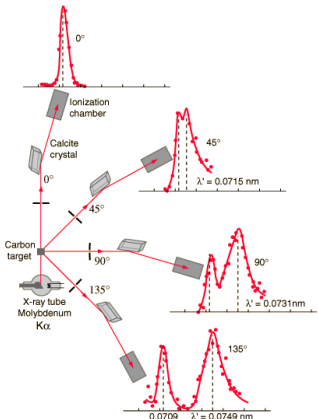


UFPA - Física 096067 - A - FÍSICA PARA BIOTECNOLOGIA 2 Ignez Casacelli

**Efeito Compton**

feixe incidente 1 único  $\lambda$

feixe espalhado vários  $\lambda$  com 2 picos de intensidade  
 1 pico  $\rightarrow \lambda$  incidente  
 2 pico  $\rightarrow \lambda' > \lambda$



UFPA - Física 096067 - A - FÍSICA PARA BIOTECNOLOGIA 2 Ignez Casacelli

**Conservação de energia**

Energia do fóton incidente =  
Energia fóton espalhado +  $K_{\text{elétron}}$

ANTES DEPOIS

096067 - A - FÍSICA PARA BIOTECNOLOGIA 2  
Ignez Casacelli

**Conservação de energia**

Energia do fóton incidente = Energia fóton espalhado +  $K_{\text{elétron}}$

$$hf = hf' + mc^2(\gamma - 1) \Rightarrow \frac{h}{\lambda} = \frac{h}{\lambda'} + mc(\gamma - 1)$$

onde:  $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - (v/c)^2}}$   
(fator de Lorentz)

**Conservação de momento:**

(eixo x)

$$\frac{h}{\lambda} = \frac{h}{\lambda'} \cos \phi + \gamma m v \cos \theta$$

(eixo y)

$$0 = \frac{h}{\lambda'} \sin \phi - \gamma m v \sin \theta$$

onde:  $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - (v/c)^2}}$   
(fator de Lorentz)

096067 - A - FÍSICA PARA BIOTECNOLOGIA 2  
Ignez Casacelli

**Comprimento de onda de Compton**

Deslocamento de Compton:

$$\Delta\lambda = \frac{h}{mc} (1 - \cos \phi)$$

Comprimento de onda de Compton

$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda$$

096067 - A - FÍSICA PARA BIOTECNOLOGIA 2  
Ignez Casacelli

**Comprimento de onda de Compton**

Deslocamento de Compton:

$$\Delta\lambda = \frac{h}{mc} (1 - \cos \phi)$$

Comprimento de onda de Compton

$$\Delta\lambda = \lambda_c (1 - \cos \theta)$$

$$\lambda_c = \frac{h}{m_e c} = \frac{6,6260693 \times 10^{-34} \text{ Js}}{9,1093826 \times 10^{-31} \text{ kg} \times 3 \times 10^8 \text{ m/s}} = 2,42 \times 10^{-12} \text{ m} = 0,0242 \text{ \AA}$$

096067 - A - FÍSICA PARA BIOTECNOLOGIA 2  
Ignez Casacelli

**Efeito Compton**

A expressão do **deslocamento Compton**, explica os dados experimentais:

- ✓ O **primeiro máximo** está associado aos **elétrons** que estão **fortemente ligados** aos átomos do alvo e que também participam do processo de colisão.

096067 - A - FÍSICA PARA BIOTECNOLOGIA 2  
Ignez Casacelli

**Efeito Compton**

A expressão do **deslocamento Compton**, explica os dados experimentais:

- ✓ O **primeiro máximo** está associado aos **elétrons** que estão **fortemente ligados** aos átomos do alvo e que também participam do processo de colisão.
- ✓ O **segundo máximo** deve-se aos fótons que são espalhados pelos **elétrons "livres"**, que são liberados na colisão, então, esses fótons têm seus comprimentos de onda modificados.

096067 - A - FÍSICA PARA BIOTECNOLOGIA 2  
Ignez Casacelli

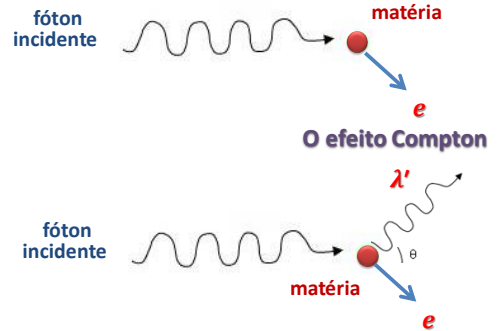
UFPA  
Física  
096067 - A - FÍSICA PARA BIOTECNOLOGIA 2  
Ignez Canacelli

### Efeito Compton

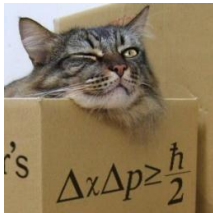
O **espalhamento Compton** (1923) permitiu **confirmar a natureza corpuscular** da radiação eletromagnética.

UFPA  
Física  
096067 - A - FÍSICA PARA BIOTECNOLOGIA 2  
Ignez Canacelli

### O efeito fotoelétrico



UFPA  
Física  
096067 - A - FÍSICA PARA BIOTECNOLOGIA 2  
Ignez Canacelli  
171

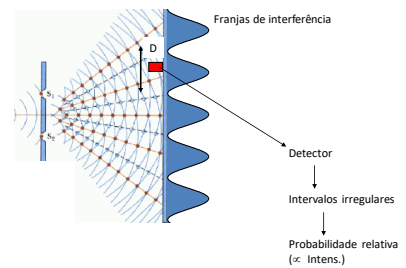


Ondas  
Função de Ondas  
Ondas de probabilidade

UFPA  
Física  
096067 - A - FÍSICA PARA BIOTECNOLOGIA 2  
Ignez Canacelli

### A luz como uma onda de probabilidade

Thomas Young, 1801



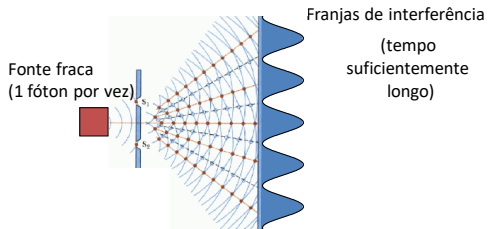
Luz = onda de probabilidade

UFPA  
Física  
096067 - A - FÍSICA PARA BIOTECNOLOGIA 2  
Ignez Canacelli

### A versão para fótons isolados

G. I. Taylor, 1909

O Fóton passa por qual fenda?

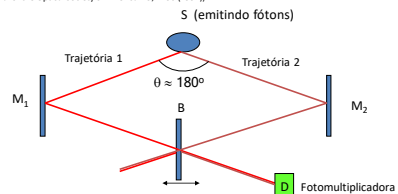


Onda de probabilidade → "franjas de probabilidade"

UFPA  
Física  
096067 - A - FÍSICA PARA BIOTECNOLOGIA 2  
Ignez Canacelli

### A nova versão para fótons isolados

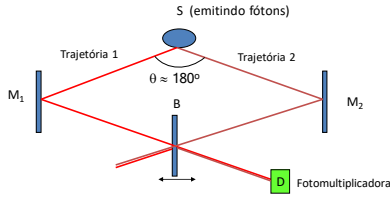
Ming Lai e Jean-Claude Diels (Univ. Novo Mexico), 1992  
(Journal of the Optical Society of America B 9, 2290 (1992))



um único fóton é emitido pela fonte S  
um único fóton : percorre 2 trajetórias distintas  
se recombina no espelho semitransparente B  
é detectado em D

### A nova versão para fótons isolados

Ming Lai e Jean-Claude Diels (Univ. Novo Mexico), 1992  
(Journal of the Optical Society of America B 9, 2290 (1992))



o fóton emitido é uma onda de probabilidade → se propaga em todas as direções  
no experimento: colhe amostras desta onda em 2 direções e combina no detector D

### Resultados: Luz

Três versões do experimento da fenda dupla mostram que:

#### Geração

- A luz é gerada na forma de fótons

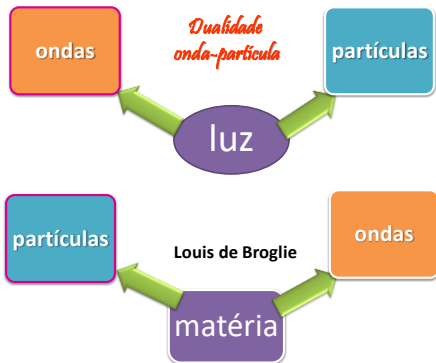
#### Deteccção

- A luz é detectada na forma de fótons

#### Propagação

- A luz se propaga na forma de *onda de probabilidade*

### Luz e Matéria



### Elétrons e ondas de matéria

Ondas de matéria:

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

(comprimento de onda de de Broglie)



Louis de Broglie, 1924

### Elétrons e ondas de matéria

Ondas de matéria:

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

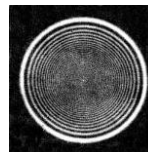
(comprimento de onda de de Broglie)

feixe de luz → onda

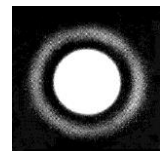
transfere *energia* e *momento* à matéria por meio de *fótons*

### Ondas de matéria

Ondas de matéria:  
(prótons, nêutrons, iodo (1994))



Rayos X em alumínio



elétrons contra uma folha de alumínio

### Equação de Schrödinger



### Equação horária

$$S = S_0 + v_0 t + \frac{1}{2} a t^2$$

descreve o movimento de um corpo

### Onda EM

$$E = Em \text{ sen } (kx - \omega t)$$

descreve o campo elétrico associado à onda em certo ponto do espaço e em um dado instante

a OEM transporta energia e momento

### Função de onda

Uma **onda de matéria** é descrita por uma função de onda  $\Psi(x, y, z, t)$ .

$$\Psi(x, y, z, t) = \underbrace{\psi(x, y, z)}_{\text{coordenadas espaciais}} \underbrace{e^{-i\omega t}}_{\text{coordenada temporal}}$$



Erwin Schrödinger

a onda de matéria transporta energia, momento, massa e às vezes carga.

### Função de onda

Uma **onda de matéria** é descrita por uma função de onda  $\psi(x, y, z, t)$

$$\Psi(x, y, z, t) = \underbrace{\psi(x, y, z)}_{\text{coordenadas espaciais}} \underbrace{e^{-i\omega t}}_{\text{coordenada temporal}}$$

$i \rightarrow$  número complexo

$\omega \rightarrow$  frequência angular da onda de matéria =  $2\pi f$

$f \rightarrow$  frequência da onda de matéria

### Função de onda $\Psi$

$$\Psi(x, y, z, t) = \underbrace{\psi(x, y, z)}_{\text{coordenadas espaciais}} \underbrace{e^{-i\omega t}}_{\text{coordenada temporal}}$$

- são ondas de probabilidade similar às OEM
- supor que as ondas de matéria chegam a um detector
- a probabilidade de que o detector indique a presença de uma partícula em um intervalo de tempo especificado é proporcional a  $|\psi|^2$ , onde  $|\psi|$  é o valor absoluto da função de onda na posição do detector.

## Função de onda $\Psi$

$|\Psi|$  → é o valor absoluto da função de onda na posição do detector

$\Psi$  → é um número complexo

$|\Psi|^2$  → é sempre uma grandeza real e positiva

$|\Psi|^2$  → é chamado de densidade de probabilidade

## Significado da Função de onda $\Psi$

$|\Psi|$  → tem caráter de amplitude de probabilidade

$|\Psi|^2$  → 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.

## A densidade de probabilidade $\Psi^2$

$|\Psi|$  → amplitude de probabilidade

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

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

$\Psi^*$  → complexo conjugado de  $\Psi$

$$\Psi^2 = \Psi \cdot \Psi^*$$

$$\Psi^2 = \psi(x, y, z) e^{-i\omega t} \cdot \psi(x, y, z) e^{+i\omega t}$$

## Equações para ondas

As **ondas sonoras** e as **ondas em cordas** obedecem às **equações da mecânica newtoniana**.

As **ondas luminosas** obedecem às **equações de Maxwell**.

As **ondas de matéria** obedecem à **equação de Schrödinger**, proposta em 1926 pelo físico austríaco Erwin Schrödinger.



Erwin Schrödinger

1926

## A equação de Schrödinger

Função de onda:

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

### O que significa a função de onda?

O significado da função de onda tem a ver com o fato de que as ondas de matéria, como as ondas luminosas, são ondas de probabilidade.

Supor que uma onda de matéria chega a uma região do espaço que contém um detector de pequenas dimensões. A probabilidade de que o detector indique a presença de uma partícula em um intervalo de tempo especificado é proporcional a  $|\Psi|^2$ , onde  $|\Psi|$  é o valor absoluto da função de onda na posição do detector.



Erwin Schrödinger

1926

## A equação de Schrödinger

Função de onda:

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

Embora  $\Psi$  seja em geral uma grandeza complexa,  $|\Psi|^2$  é sempre uma grandeza real e positiva. Assim, é  $|\Psi|^2$ , a chamada **densidade de probabilidade**, que possui significado físico, e não  $\Psi$ .

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



Erwin Schrödinger



1926 **A equação de Schrödinger**


Função de onda:  

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

Equação de **Schrödinger**

$$\frac{d^2\psi}{dx^2} + \frac{8\pi^2m}{h^2}[E - U(x)]\psi = 0$$

(eq. de Schrödinger 1D)




Erwin Schrödinger

1926 **A equação de Schrödinger**

**Como calcular a função de onda?**

As ondas sonoras e as ondas em cordas obedecem às equações da mecânica newtoniana.




Erwin Schrödinger

1926 **A equação de Schrödinger**

**Como calcular a função de onda?**

As ondas luminosas obedecem às equações de Maxwell.




Erwin Schrödinger

1926 **A equação de Schrödinger**

**Como calcular a função de onda?**

As ondas de matéria obedecem à equação de Schrödinger, proposta em 1926 pelo físico austríaco Erwin Schrödinger.



Erwin Schrödinger


1926 **A equação de Schrödinger**

**Como calcular a função de onda?**

Muitas das situações envolvem o movimento de uma partícula ao longo do eixo  $x$  em uma região na qual a força a que a partícula está sujeita faz com que a partícula possua uma energia potencial  $U(x)$ . Neste caso especial, a equação de Schrödinger pode ser escrita como

$$\frac{d^2\psi}{dx^2} + \frac{8\pi^2m}{h^2}[E - U(x)]\psi = 0$$

(eq. de Schrödinger 1D)




Erwin Schrödinger

onde  $E$  é a energia mecânica total (soma da energia potencial  $U$  e da energia cinética) da partícula.

1926 **A equação de Schrödinger**

**Como calcular a função de onda?**

Se  $U(x) = 0$ , a equação descreve uma **partícula livre**, ou seja, uma partícula que não está sujeita a nenhuma força. 

$$\frac{d^2\psi}{dx^2} + \frac{8\pi^2m}{h^2}[E - U(x)]\psi = 0$$

(eq. de Schrödinger 1D)

**partícula livre**  $\Rightarrow U(x) = 0$

$$\frac{d^2\psi}{dx^2} + \frac{8\pi^2m}{h^2}[K + U(x) - U(x)]\psi = 0$$

$$\frac{d^2\psi}{dx^2} + \frac{8\pi^2m}{h^2}[K]\psi = 0$$

1926 **A equação de Schrödinger**

Como calcular a função de onda?

partícula livre  $\Rightarrow U(x) = 0$

$$\frac{d^2 \psi}{dx^2} + \frac{8 \pi^2 m}{h^2} [K] \psi = 0$$

$$\frac{d^2 \psi}{dx^2} + \frac{4 \pi^2}{h^2} (p^2) \psi = 0$$

$$\frac{d^2 \psi}{dx^2} + \left(2\pi \frac{p}{h}\right)^2 \psi = 0$$

$$\frac{d^2 \psi}{dx^2} + \left(2\pi \frac{1}{\lambda}\right)^2 \psi = 0$$

$K = \frac{1}{2} m v^2$

$p^2 = 2mK$

(momento do fóton)

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

1926 **A equação de Schrödinger**

Como calcular a função de onda?

partícula livre  $\Rightarrow U(x) = 0$

supor que partícula se desloca no sentido dos  $x > 0$

$$\frac{d^2 \psi}{dx^2} + \left(2\pi \frac{1}{\lambda}\right)^2 \psi = 0$$

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

$\frac{d^2 \psi}{dx^2} + k^2 \psi = 0$

**equação de Schrödinger, partícula livre**

$$\psi(x) = A e^{ikx} + B e^{-ikx}$$

**Solução geral**

1926 **A equação de Schrödinger**

Como calcular a função de onda?

$$\psi(x) = A e^{ikx} + B e^{-ikx}$$

**Solução geral**  
A, B constantes arbitrárias

$$|\psi|^2 = |\psi_0 e^{ikx}|^2 = (\psi_0^2) |e^{ikx}|^2$$

$$\Psi(x, t) = \psi(x) e^{-i\omega t} = (A e^{ikx} + B e^{-ikx}) e^{-i\omega t}$$

$$= A e^{i(kx - \omega t)} + B e^{-i(kx + \omega t)}$$

supor que partícula se desloca no sentido dos  $x > 0$

1926 **A equação de Schrödinger**

Como calcular a função de onda?

$$\psi(x) = A e^{ikx} + B e^{-ikx}$$

**Solução geral**  
A, B constantes arbitrárias

$$|\psi|^2 = |\psi_0 e^{ikx}|^2 = (\psi_0^2) |e^{ikx}|^2$$

$$|e^{ikx}|^2 = (e^{ikx})(e^{ikx})^* = e^{ikx} e^{-ikx} = e^{ikx - ikx} = e^0 = 1$$

conjugado                      conjugado

$$|\psi|^2 = (\psi_0^2)(1)^2 = \psi_0^2$$

**constante**

1926 **A equação de Schrödinger**

Como calcular a função de onda?

**equação de Schrödinger, partícula livre**

$$\psi(x) = A e^{ikx} + B e^{-ikx}$$

**Solução geral**

$$\psi(x) = \psi_0 e^{ikx}$$

$$|\psi|^2 = (\psi_0^2)(1)^2 = \psi_0^2$$

Densidade de probabilidade,  $|\psi(x)|^2$

1926 **A equação de Schrödinger**

**equação de Schrödinger, partícula livre**

$$\psi(x) = A e^{ikx} + B e^{-ikx}$$

**Solução geral**

Densidade de probabilidade,  $|\psi(x)|^2$

Gráfico da densidade de probabilidade  $|\psi|^2$  para uma partícula livre que se desloca no sentido positivo do eixo x.

Como  $|\psi|^2$  tem o mesmo valor para qualquer valor de x, a particular pode ser detectada com a mesma probabilidade em qualquer ponto da trajetória.

### O princípio de incerteza de Heisenberg

Werner Heisenberg, 1927:  
Impossibilidade de medir simultaneamente a posição e o momento de uma partícula com precisão ilimitada



$$\begin{aligned} \Delta x \Delta p_x &\geq \hbar \\ \Delta y \Delta p_y &\geq \hbar \\ \Delta z \Delta p_z &\geq \hbar \end{aligned}$$

Indeterminações na posição

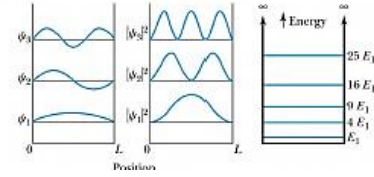
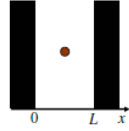
Indeterminações no momento

onde  $\hbar = \frac{h}{2\pi}$

### Poço de Potencial quadrado infinito

O exemplo mais simples é aquele de uma partícula confinada numa caixa com paredes rígidas, onde a partícula não pode penetrar. Este potencial chamado de poço quadrado infinito é dado por:

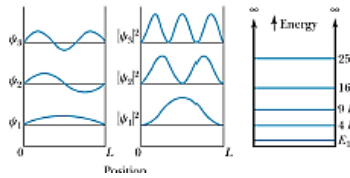
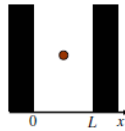
$$V(x) = \begin{cases} \infty & x < 0, x > L \\ 0 & 0 < x < L \end{cases}$$



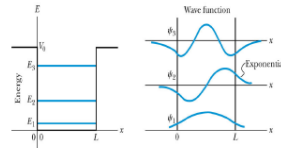
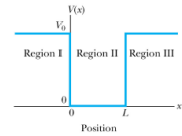
### Poço de Potencial quadrado infinito

$$E_1 = \frac{\pi^2 \hbar^2}{2mL^2}$$

$$E_n = n^2 \frac{\pi^2 \hbar^2}{2mL^2} \quad (n = 1, 2, 3, \dots)$$

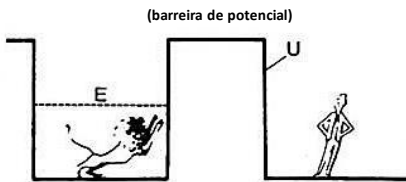


### Poço de Potencial quadrado finito



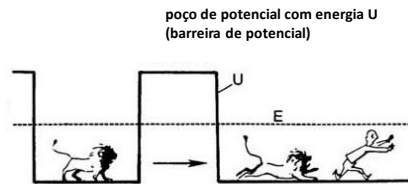
### Barreira de Potencial

Na física clássica:



### Barreira de Potencial

Na física quântica:

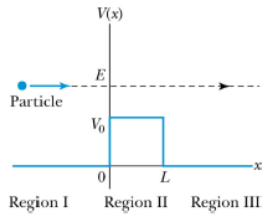


<http://books.google.com.br/books?id=3Q08jRmtrK&q=tunnel+effect#v=snippet&q=tunnel%20effect&f=false>

<http://books.google.com.br/books?id=3Q08jRmtrK&q=tunnel+effect#v=snippet&q=tunnel%20effect&f=false>

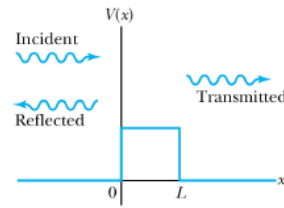
UFPA  
Física  
096067 - A - FÍSICA PARA BIOTECNOLOGIA 2  
Ignaz Casacelli  
211

**Barreira de Potencial**



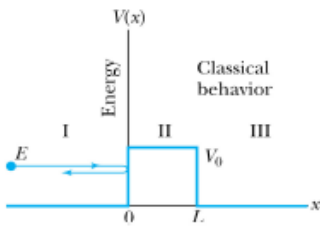
UFPA  
Física  
096067 - A - FÍSICA PARA BIOTECNOLOGIA 2  
Ignaz Casacelli  
212

**Barreira de Potencial**



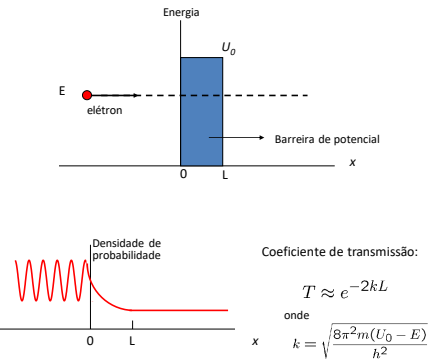
UFPA  
Física  
096067 - A - FÍSICA PARA BIOTECNOLOGIA 2  
Ignaz Casacelli  
213

**Barreira de Potencial**



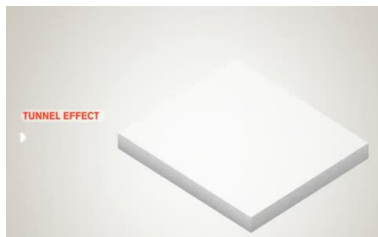
UFPA  
Física  
096067 - A - FÍSICA PARA BIOTECNOLOGIA 2  
Ignaz Casacelli  
214

**O efeito túnel**



UFPA  
Física  
096067 - A - FÍSICA PARA BIOTECNOLOGIA 2  
Ignaz Casacelli  
215

**Efeito Túnel**



<https://www.youtube.com/watch?v=K64Tv2mKSh4>

UFPA  
Física  
096067 - A - FÍSICA PARA BIOTECNOLOGIA 2  
Ignaz Casacelli  
216

**O efeito túnel: Prêmio Nobel**

**The Nobel Prize in Physics 1973**


"for their experimental discoveries regarding tunneling phenomena in semiconductors and superconductors, respectively"

"for his theoretical predictions of the properties of a supercurrent through a tunnel barrier, in particular those phenomena which are generally known as the Josephson effects"

Leo Esaki      Ivar Giaever      Brian David Josephson


## Aplicação do efeito túnel: Prêmio Nobel

Physics


 The Nobel Prize in Physics 1986

"for his fundamental work in electron optics, and for the design of the first electron microscope"


"for their design of the scanning tunneling microscope"



**Ernst Ruska**  
1/2 of the prize  
Federal Republic of Germany



**Gerd Binnig**  
1/4 of the prize  
Federal Republic of Germany



**Heinrich Rohrer**  
1/4 of the prize  
Switzerland

## Microscópios

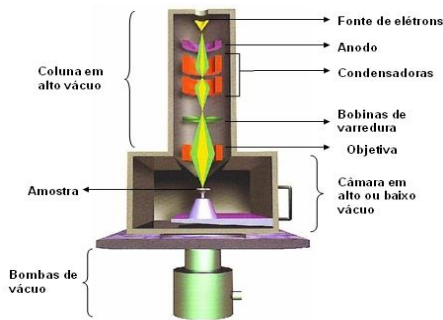
### ópticos

- ondas luminosas
- ondas condensadas através de lentes de vidro.
- aumento útil de cerca de 1.000 x

### eletrônicos

- feixe de elétrons
- ondas condensadas por lentes eletrônicas
- aumento útil de cerca de 200.000 a 400.000 x
- poder de resolução 100 x maior que os ópticos

## Microscópio eletrônico



## Microscópios de varredura

Um *Scanning Probe Microscope* é uma família de microscópios onde uma **sonda** varre a superfície da amostra, registrando ponto a ponto algum tipo de interação.

Conforme o tipo de interação, a microscopia toma um nome específico

## Microscópios de varredura

Os dois modos básicos do SPM são:

- Microscopia de Tunelamento  
(STM – *Scanning Tunneling Microscopy*)
- Microscopia de Força Atômica  
(AFM - *Atomic Force Microscopy*)

## Microscópios de varredura

Atualmente existe uma infinidade de modos de operação:

- *Magnetic Force Microscopy* (MFM),
- *Electric Force Microscopy* (EFM),
- *Scanning Thermal Microscopy* (SthM)
- *Scanning Capacitance Microscopy* (SCM)
- *Conductive Atomic Force Microscopy* (CAFM)

Todas estas modalidades de microscopia podem ser realizadas em pressão ambiente.

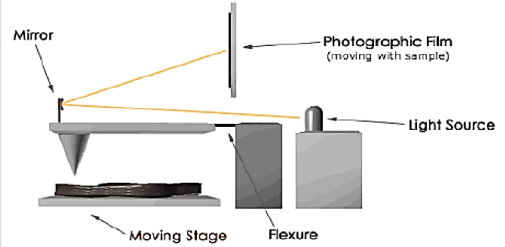
### Profilômetro

- Sistema semelhante ao do fonógrafo

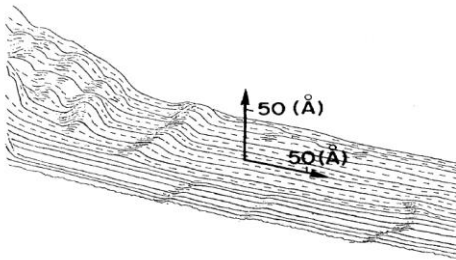


### Profilômetro

- Medir pequenas variações na superfície
  - Pouca variação fora do eixo da medida
- Obter perfil da superfície
- Obter rugosidade

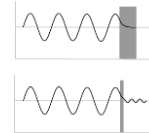


### Microscópio de Tunelamento



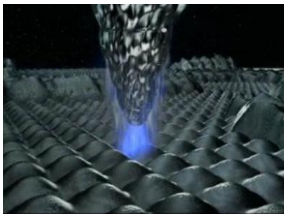
### Tunelamento

- **Física clássica:** o elétron não pode estar do outro lado da barreira pois não tem energia suficiente pra atravessá-la
- **Mecânica quântica:** o elétron pode estar do outro lado da barreira → probabilidade de tunelamento é exponencial com o tamanho da barreira.



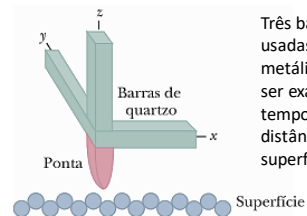
### Funcionamento

- Aplicação direta do efeito de tunelamento
- Separação entre a sonda e amostra → Barreira de potencial



*Esta técnica fica restrita a amostras condutoras e semicondutoras.*

### Funcionamento

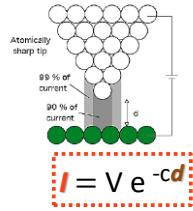
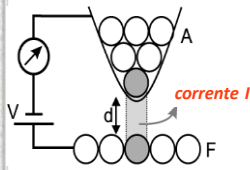


Três barras de quartzo são usadas para fazer uma ponta metálica varrer a superfície a ser examinada e ao mesmo tempo manter constante a distância entre a ponta e a superfície.

A ponta se move para cima e para baixo para acompanhar o relevo da superfície e o registro do movimento é usado para gerar as informações necessárias para que em um computador seja criada uma imagem da superfície.

UFPA  
Física  
096067 - A - FÍSICA PARA BIOTECNOLOGIA 2  
Ignez Casarelli  
229

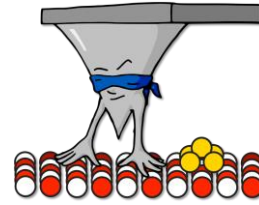
**Funcionamento**



- Microscópio mede a **corrente de tunelamento I** líquida entre a amostra e a sonda
- **I** → Corrente de tunelamento → Exponencial com a distância  $\sim \text{Å}$  → enorme exatidão
- **V** → tensão aplicada entre a sonda e a amostra
- **c** → constante; **d** → separação entre a amostra e a sonda

UFPA  
Física  
096067 - A - FÍSICA PARA BIOTECNOLOGIA 2  
Ignez Casarelli  
230

**Funcionamento**



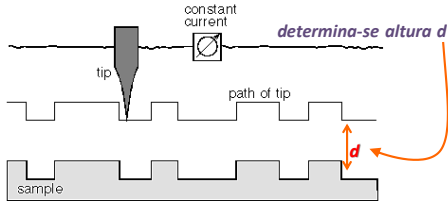
- Pode-se, então, “ver” a topografia da amostra

UFPA  
Física  
096067 - A - FÍSICA PARA BIOTECNOLOGIA 2  
Ignez Casarelli  
231

**Funcionamento**

Há dois modos básicos de operação:

1. **Corrente constante**: sonda varre a amostra no plano  $xy$ , mantendo  $z$  constante.



Modo de corrente constante

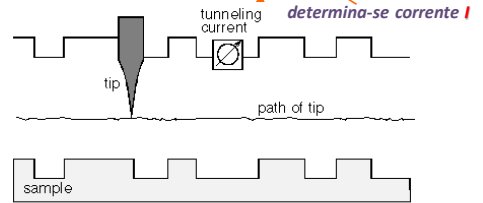
$$I = V e^{-cd}$$

UFPA  
Física  
096067 - A - FÍSICA PARA BIOTECNOLOGIA 2  
Ignez Casarelli  
232

**Funcionamento**

Há dois modos básicos de operação:

2. **Altura constante**: A distância relativa entre a amostra e a sonda não muda



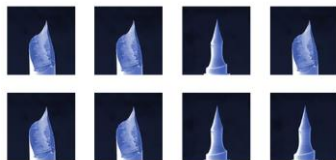
Modo de altura constante

$$I = V e^{-cd}$$

UFPA  
Física  
096067 - A - FÍSICA PARA BIOTECNOLOGIA 2  
Ignez Casarelli  
233

**Componentes**

- Sondas – Tips
  - Tungstênio, Platina, Iridio
  - Diâmetro 0.25 mm

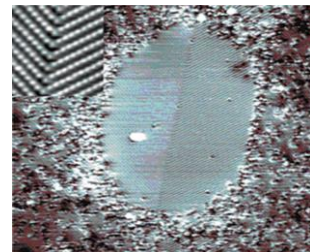


Fonte: <http://www.brukeratmprobes.com/c-107-scanning-tunneling-microscopy-stm.aspx>

UFPA  
Física  
096067 - A - FÍSICA PARA BIOTECNOLOGIA 2  
Ignez Casarelli  
234

**Aplicações**

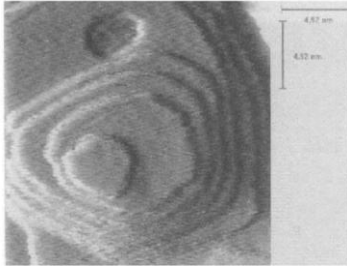
- Imagem de superfície com resolução atômica
  - Nanoestrutura de GaAs
    - Encontro de dois nanocristalitos fundidos perfeitamente



[https://www.scribd.com/document/428422817/panoramic\\_imaging\\_of\\_the\\_atomic\\_scale\\_via\\_a\\_network\\_of\\_scanning\\_tunneling\\_microscopy\\_codes.html#Ozicoo](https://www.scribd.com/document/428422817/panoramic_imaging_of_the_atomic_scale_via_a_network_of_scanning_tunneling_microscopy_codes.html#Ozicoo)

## Aplicações

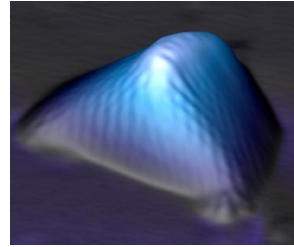
- Imagens de topografia
  - Superfície de Au
    - Degraus com diferença de um átomo



Fonte: <http://uploaddeimagens.com.br/imagem/index6Souro.png>

## Aplicações

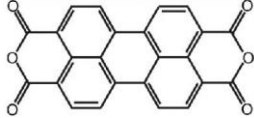
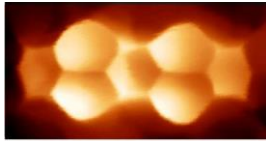
- Imagens de topografia em 3D
  - Nanobolha piramidal de grafeno
    - Formação de pseudocampo magnético de até 400T



Fonte: <http://newscenter.lbl.gov/news-releases/2010/07/29/graphene-under-strain/>

## Aplicações

- Visualização de estruturas moleculares
  - PTCDA
    - perylene-3,4,9,10-tetracarboxylic-3,4,9,10-dianhydride



Fonte: <http://www.geekosystem.com/tag/scanning-tunneling-hydrogen-microscopy/>

## Aplicações

- Visualização de estruturas moleculares



- Molecular Man
  - 28 moléculas de CO
  - 45 Å dos pés à cabeça
  - Substrato de platina

Fonte: <http://www.pnas.org/content/94/24/12749/F5.expansion>

## Manipulando átomos

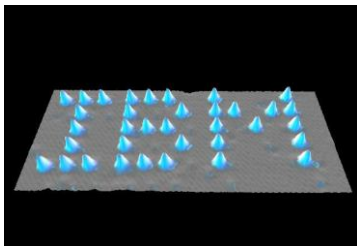


Imagem feita com átomos de xenônio sobre placa de níquel

## ondas

**ondas mecânicas** → equações da mecânica newtoniana.

**ondas luminosas** → equações de Maxwell

**ondas de matéria** → equação de Schrödinger

**ondas gravitacionais** → teoria da relatividade geral





### ondas gravitacionais

As **ondas gravitacionais** são ondulações na curvatura do espaço-tempo que se propagam como ondas, viajando para o exterior a partir da fonte.

Previstas em 1916 por Einstein com base em sua teoria da relatividade geral, e detectadas em 2015.

As ondas gravitacionais transportam energia na forma de **radiação gravitacional**.

Ignaz  
Canevelli

241



### ondas gravitacionais

Segundo a teoria de Einstein, todos os corpos em movimento emitem essas ondas que, como uma pedrinha que afeta a água quando toca nela, produz perturbações no espaço.

Essas ondas gravitacionais são basicamente **feixes de energia** que distorcem o tecido do espaço-tempo, o conjunto de quatro dimensões formado por tempo e espaço tridimensional.

E Einstein previu que o Universo estava inundado por essas ondas. Esse efeito, no entanto, é muito fraco, e apenas grandes massas, movendo-se sob fortes acelerações, podem produzir essas ondulações em um grau razoável.

Ignaz  
Canevelli

242



### ondas gravitacionais

Assim, quanto maior essa massa, maior é o movimento e maiores são as ondas.

Nessa categoria entram explosões de estrelas gigantes, a colisão de estrelas mortas super-densas e a junção de buraco negros.

Todos esses eventos devem radiar energia gravitacional na velocidade da luz.

Ignaz  
Canevelli

243



### ondas gravitacionais

Os grupos brasileiros são liderados pelo físico Odlyio Aguiar, do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (Inpe), em São José dos Campos, e pelo físico italiano Riccardo Sturani, do Instituto de Física Teórica da Universidade Estadual Paulista (Unesp).

<http://revistapesquisa.fapesp.br/2016/02/12/experimento-detecta-ondas-gravitacionais/>

Ignaz  
Canevelli

244



### ondas gravitacionais

Os pesquisadores trabalhavam há anos para detectar as minúsculas distorções causadas quando as ondas gravitacionais passam pela Terra.

Os detectores nos Estados Unidos - localizados no **Ligo** - e na Itália (conhecido como Virgo) são ambos formados por dois túneis idênticos em forma de L, de 4 km de comprimento. Os norte-americanos, usados para a descoberta, estão separados por 3 mil km.

**Ligo** Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory

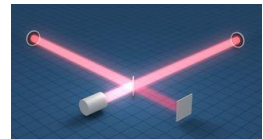
Ignaz  
Canevelli

245



### ondas gravitacionais

Nele, um feixe de laser é gerado e dividido em dois - uma metade é disparada em um túnel, e a outra entra pela segunda passagem.



Espelhos ao final dos dois túneis rebatem os feixes para lá e para cá muitas vezes, antes que se recombinem. Se uma onda passa pelo túnel, ela vai distorcer levemente seu entorno, mudando a longitude dos túneis em uma quantidade diminuta (apenas uma fração da largura de um átomo).

Ignaz  
Canevelli

246

**Ondas gravitacionais: interferômetro**



<https://www.ligo.caltech.edu/video/ligo20160211v6>

UFPA  
Física  
096067 - A - FÍSICA PARA BIOTECNOLOGIA 2  
Igneza Caravalli  
247

**ondas gravitacionais: colisão de buracos negros**

As ondas registradas agora pelo **Ligo** foram geradas pelo movimento acelerado de dois buracos negros, um com massa 36 vezes maior que a do Sol e outro com 29 vezes a massa solar.

Em cerca de 0,45 segundo, o par de buracos negros espiralou um em direção do outro e colidiu. Da fusão dos buracos negros, surgiu um com massa muito mais elevada (62 vezes a do Sol).

A energia das ondas gravitacionais emitidas durante a colisão ultrapassou em 50 vezes a potência de todas as estrelas do Universo combinadas.

<http://revistapesquisa.fapesp.br/2016/02/12/experimento-detecta-ondas-gravitacionais/>

UFPA  
Física  
096067 - A - FÍSICA PARA BIOTECNOLOGIA 2  
Igneza Caravalli  
248

**Ondas gravitacionais: 2 buracos negros**



<https://youtu.be/1agm33IEAuo?t=45>

<https://www.ligo.caltech.edu/video/ligo20160211v10>

UFPA  
Física  
096067 - A - FÍSICA PARA BIOTECNOLOGIA 2  
Igneza Caravalli  
249