



Universidade Federal do ABC

**Prof. Dr. Reinaldo Luiz  
Cavasso Filho**

Centro de Ciências Naturais e  
Humanas

**Laboratório de Física III**  
***Antigo Lab. de Física Moderna***

Apresentação adaptada de 2011-Prof. José Antônio Souza

- **Formato**

4 Experimentos – 60% da nota final

Uma Prova – 40 % da nota final

**Conceito:**

A      $NF \geq 8.5$

B      $7.0 \leq NF < 8.5$

C      $5.5 \leq NF < 7.0$

D      $4.0 \leq NF < 5.5$

# **Experimentos**

**Efeito Fotoelétrico**

**Experimento de Milikan**

**Razão carga/massa do Elétron**

**Espectrometria**

**Difração de Raios X**

**Haverá 6 horas para realização de cada experimento (duas aulas)**

**Grupos de 4 a 5 estudantes.**

**Relatório - A ser entregue *impreterivelmente* na aula seguinte à realização do experimento.**

**(um relatório por grupo, seguindo diretriz de trabalho científico)**

**PDF para [rcavasso@gmail.com](mailto:rcavasso@gmail.com)**

Escreva o relatório com suas palavras,  
plágio = **F**

# Cronograma

Grupo/Semanas	02 e 09/03	16 e 23/03	06 e 13/04	20 e 27/04
<b>A</b>	<u>Millikan</u>	Fotoelétrico	Espectrometria	e/m
<b>B</b>	Fotoelétrico	Espectrometria	e/m	<u>Millikan</u>
<b>C</b>	Espectrometria	e/m	<u>Millikan</u>	Fotoelétrico
<b>D</b>	e/m	<u>Millikan</u>	Fotoelétrico	Espectrometria
<b>E</b>	<u>Millikan</u>	Fotoelétrico	Raio-X	e/m
<b>Prova 04/05/2018</b>				
<b>Substitutiva 11/05</b>	(com justificativa)			

# Eletromagnetismo

Tudo resolvido no final do século XIX

- Maxwell (1865)
  - Formulação elegante e concisa
  - Fundamentos da Eletricidade e Magnetismo
  - Matematisação sofisticada

Mecânica Clássica  
Mecânica Estatística  
Termodinâmica

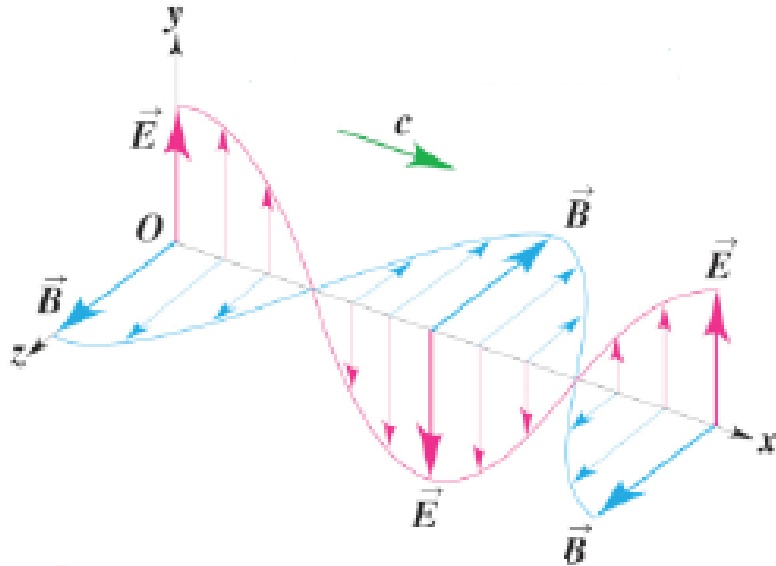
THE  
LONDON, EDINBURGH AND DUBLIN  
PHILOSOPHICAL MAGAZINE  
AND  
JOURNAL OF SCIENCE.  
—♦—  
[FOURTH SERIES.]  
—  
MARCH 1861.

A primeira contribuição  
de Maxwell: On  
Physical Lines of Force  
(1861)

XXV. *On Physical Lines of Force.* By J. C. MAXWELL, Professor of Natural Philosophy in King's College, London\*.

*Philosophical Transactions of the Royal Society of London* **155**, 459-512 (1865).

# ONDA ELETROMAGNÉTICA



Maxwell e Hertz (1887) mostram que a luz é uma onda eletromagnética: campos elétricos e magnéticos que oscilam em fase e se movimentam a uma velocidade equivalente à da luz

$$y(x,t) = A \cdot \text{sen}(\omega t - kx)$$

$$E(x,t) = E_{\text{max}} \cdot \text{sen}\left(2\pi\left(f \cdot t - \frac{x}{\lambda}\right)\right)$$

Propriedades comuns a todas as ondas eletromagnéticas:

- São transversais: E e B são perpendiculares entre si e à direção do movimento
- A razão entre os campos elétrico e magnético tem uma grandeza fixa dada por:

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

- A propagação da onda ocorre mesmo no vácuo

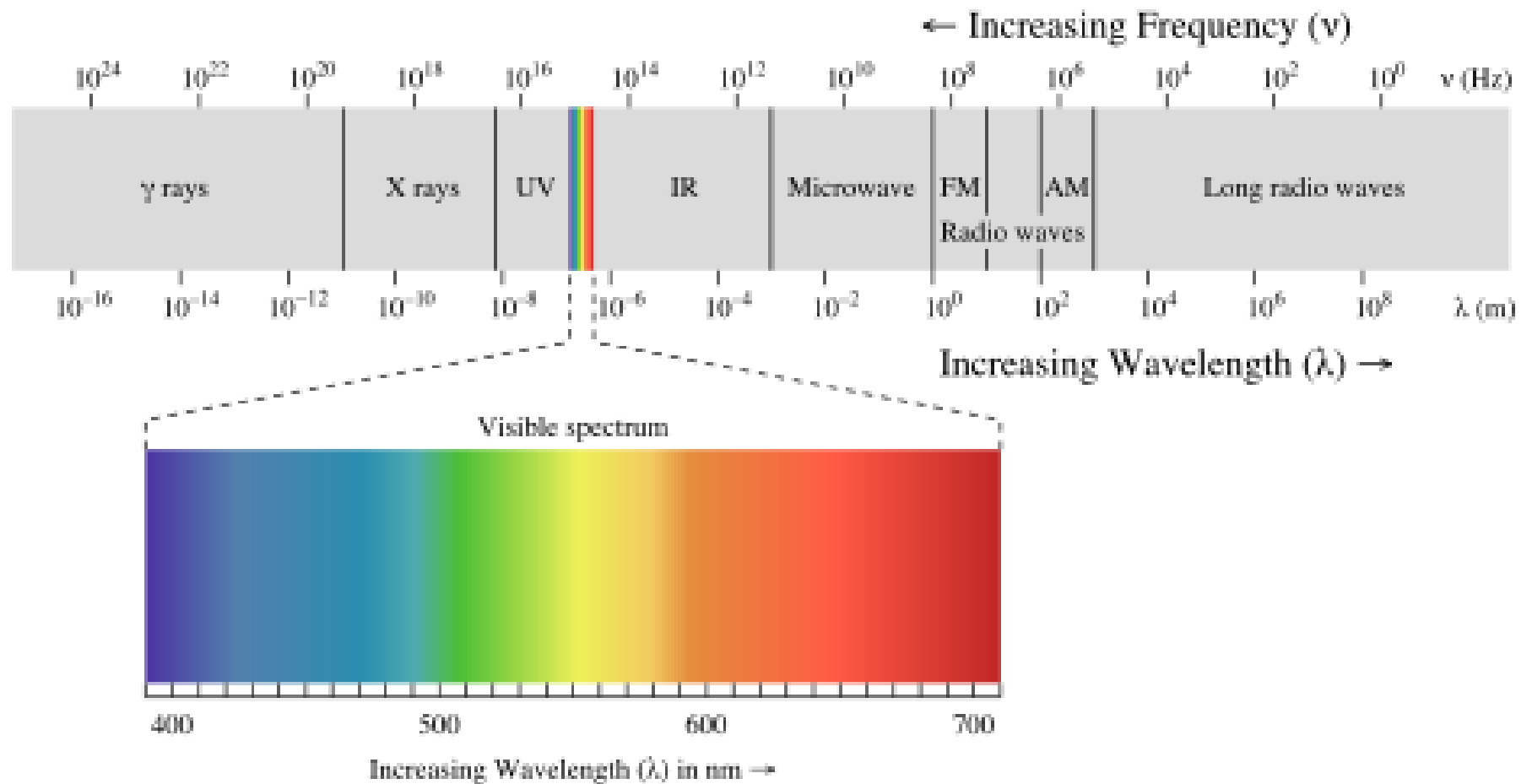
A onda se movimenta com velocidade fixa no vácuo dada por c ( $3 \cdot 10^8 \text{ m.s}^{-1}$ )

$$\lambda \cdot f = c$$

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

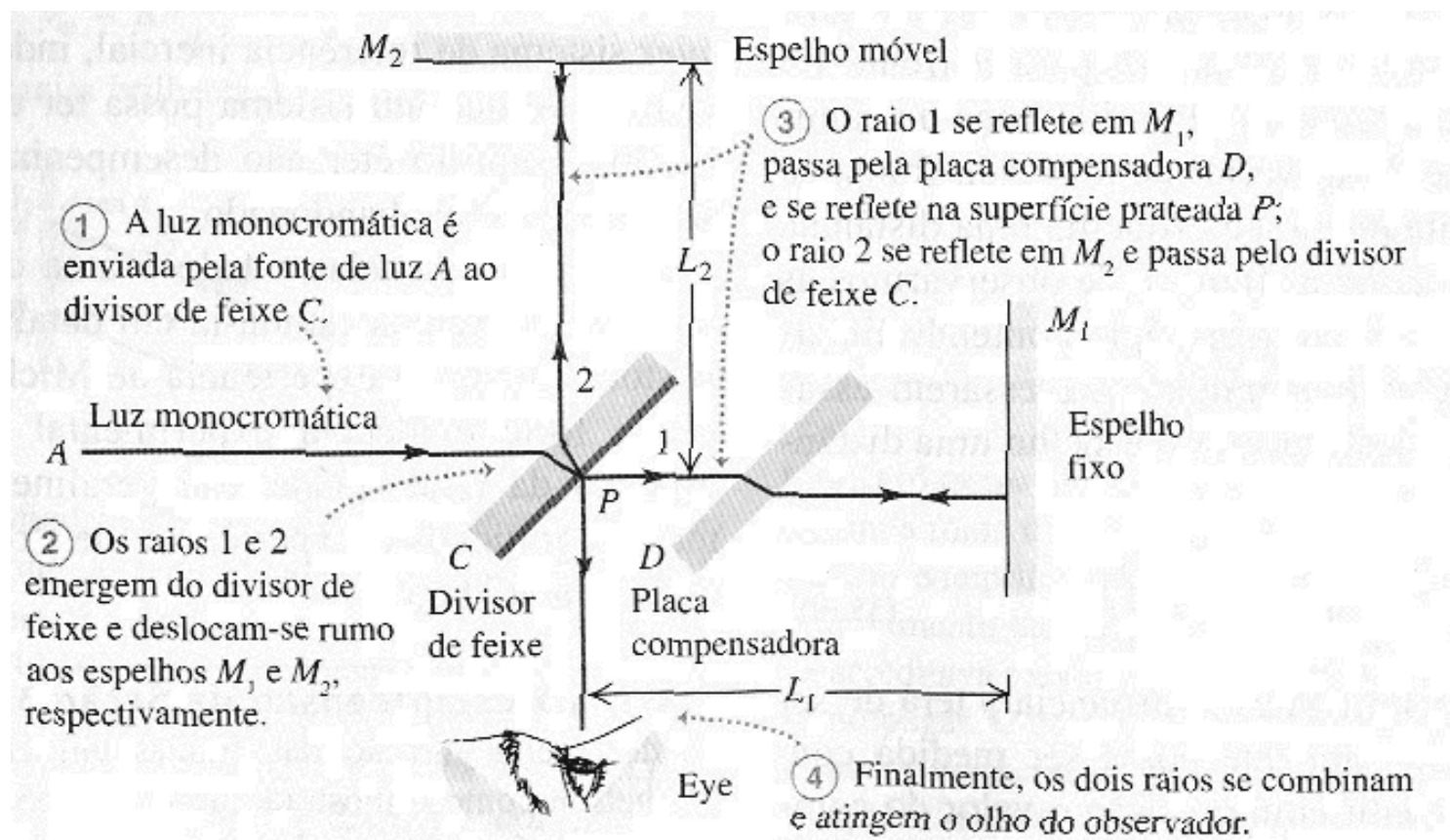
$$k = \frac{2\pi}{\lambda}$$

# Espectro eletromagnético



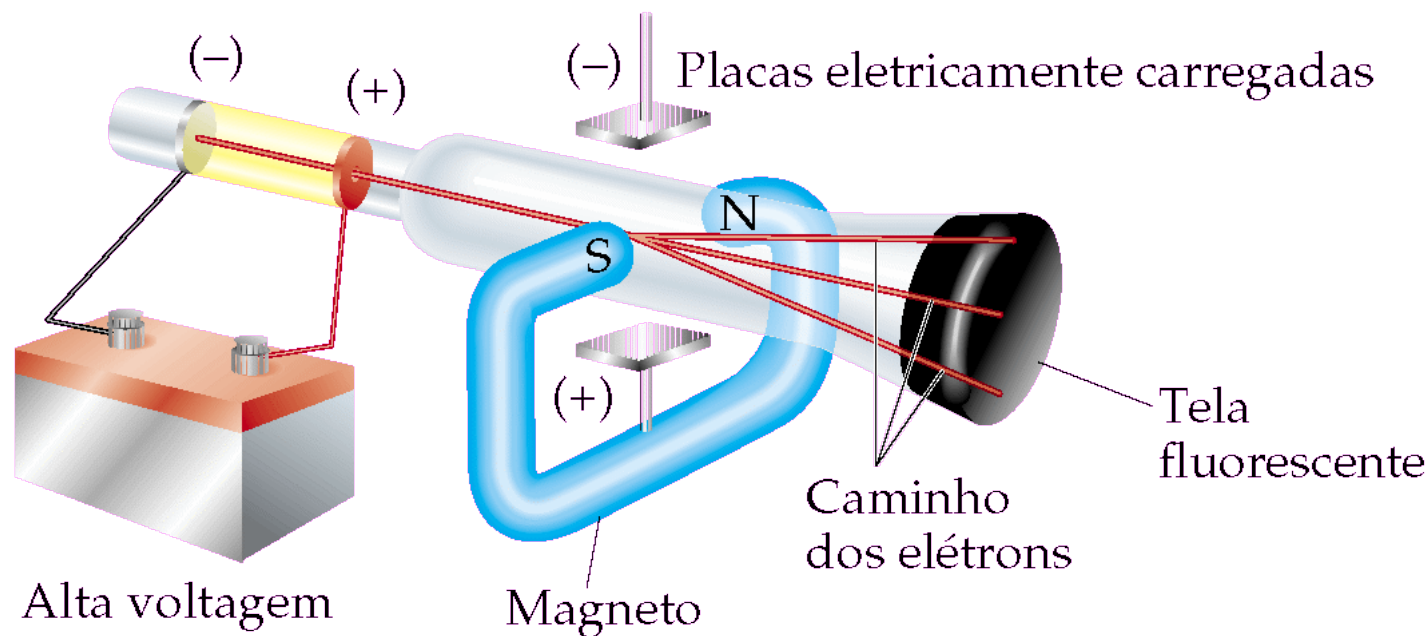


# INTERFERÔMETRO DE MICHELSON



# Raios catódicos e elétrons (Razão Carga/massa)

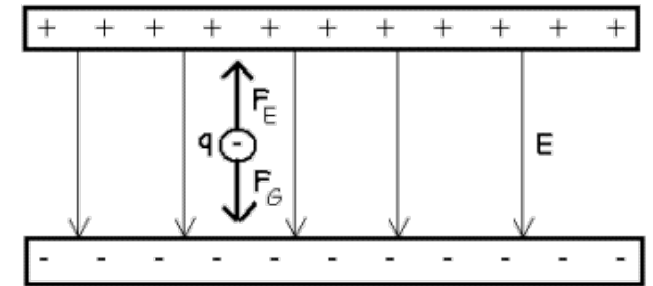
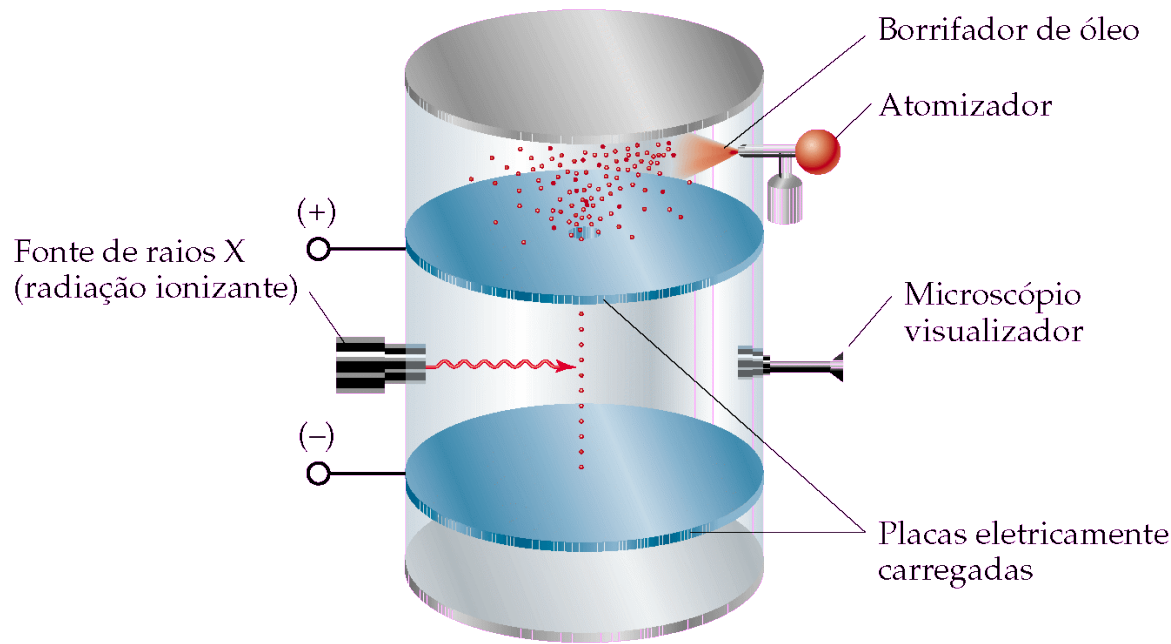
- A voltagem faz com que partículas negativas se desloquem do eletrodo negativo para o eletrodo positivo.
- A trajetória dos elétrons pode ser alterada pela presença de um campo magnético.
- Considere os raios catódicos saindo do eletrodo positivo através de um pequeno orifício.
- Se eles interagirem com um campo magnético perpendicular a um campo elétrico aplicado, os raios catódicos podem sofrer diferentes desvios.



**Realização de Experimento !!!**



# Experimento de Millikan



$$\|\vec{F}_e\| = \|\vec{F}_g\| \Leftrightarrow |q| \|\vec{E}\| = m \|\vec{g}\|$$

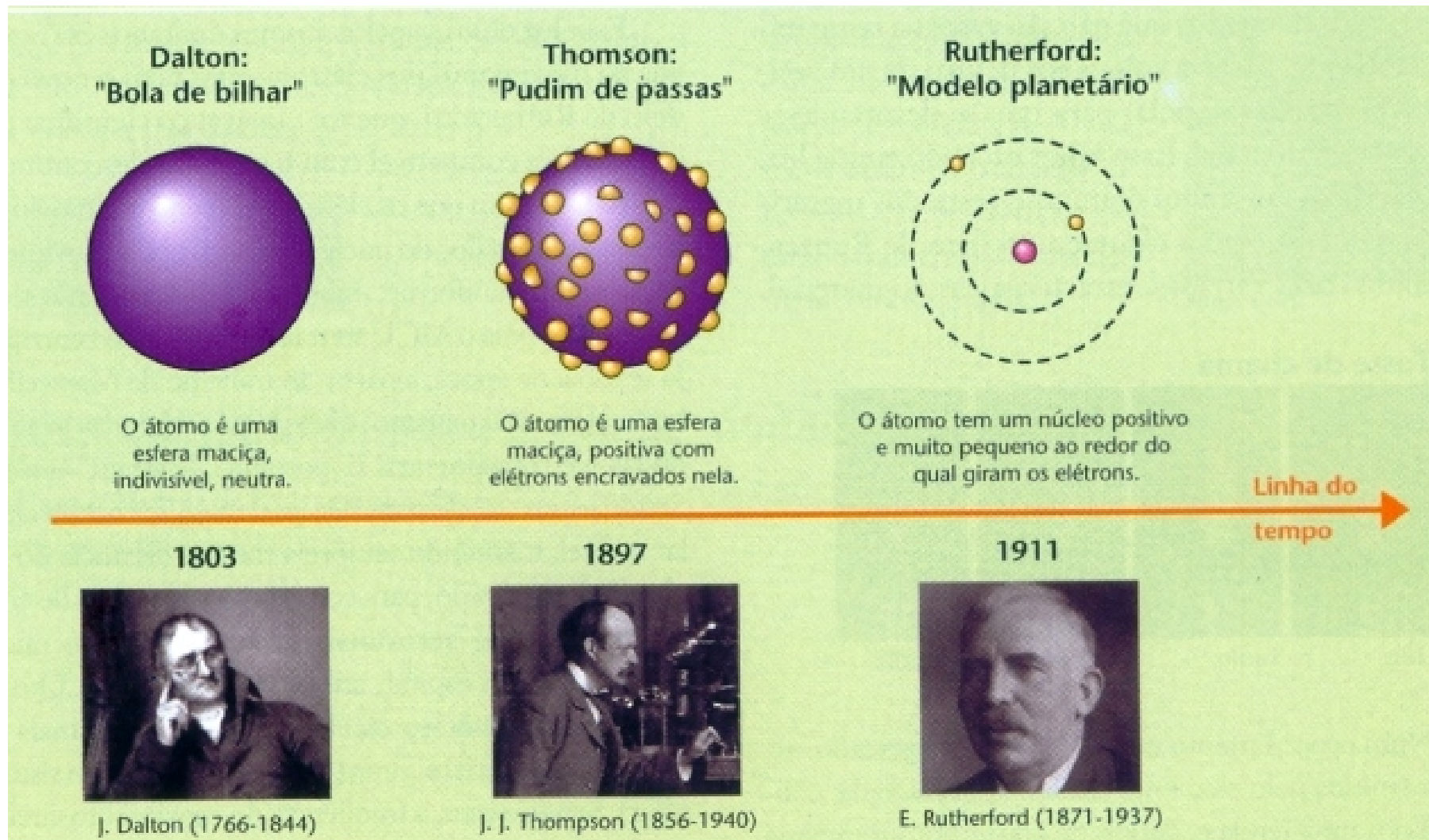
$$|q| = \frac{m \|\vec{g}\|}{\|\vec{E}\|} \quad |q| = \frac{\rho V \|\vec{g}\|}{\|\vec{E}\|} \Leftrightarrow |q| = \frac{4 \pi r^3 \rho \|\vec{g}\|}{3 \|\vec{E}\|}$$

$$|q| = \frac{4 \pi r^3 \rho \|\vec{g}\| d}{3 |\Delta V|}$$

- Utilizando este experimento, Millikan determinou que a carga no elétron é  $1,60 \times 10^{-19} \text{ C}$ .
- Conhecendo a proporção carga-massa,  $1,76 \times 10^8 \text{ C/g}$ , Millikan calculou a massa do elétron:  $9,10 \times 10^{-28} \text{ g}$ .
- Com números mais exatos, concluímos que a massa do elétron é  $9,10939 \times 10^{-28} \text{ g}$ .
- A carga é quantizada.

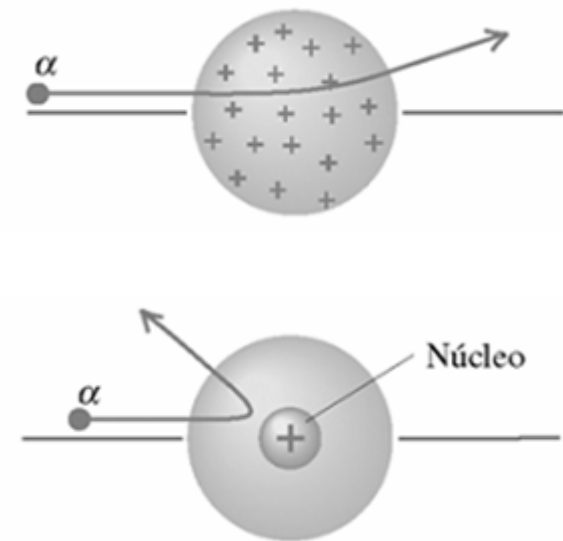
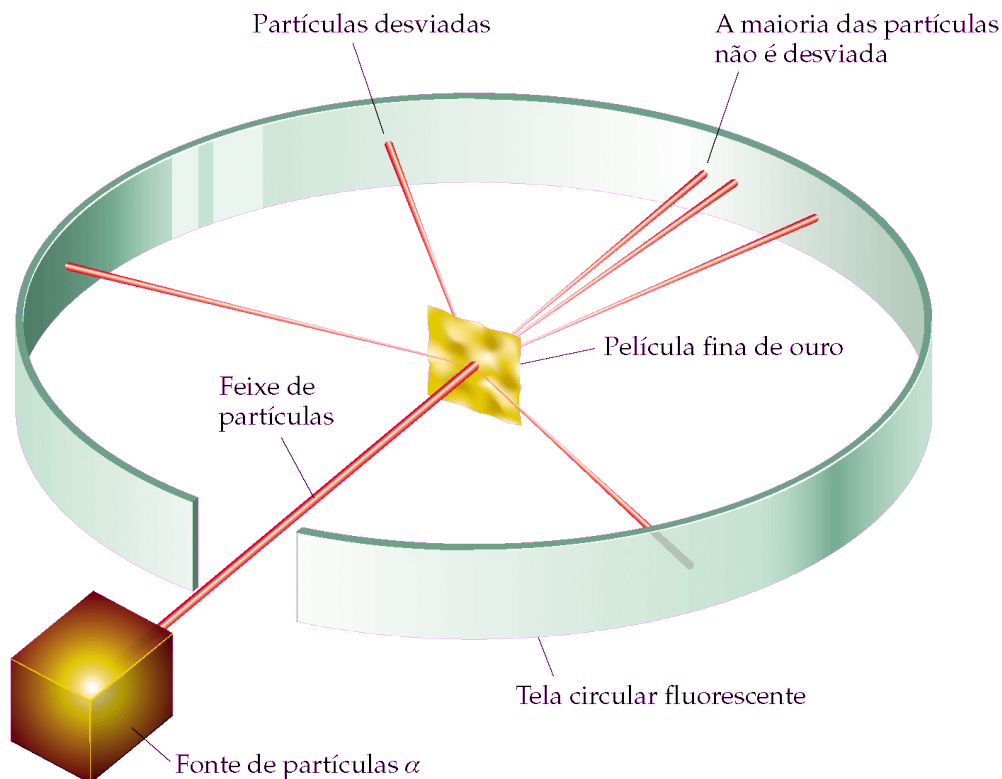
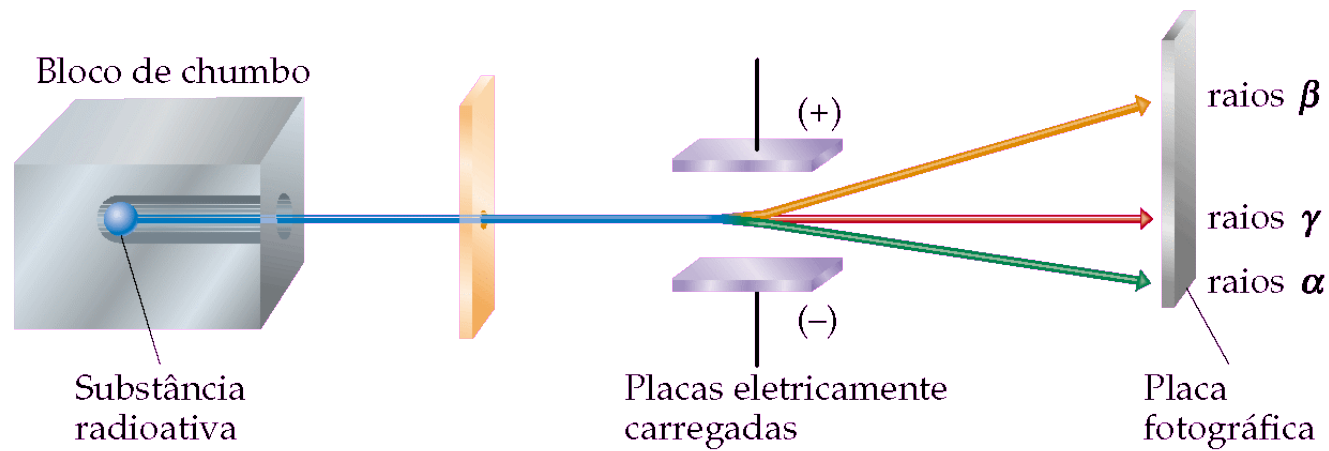
## Realização de Experimento !!!

# Das “bolas de bilhar” de Dalton ao modelo nucleado de Rutherford



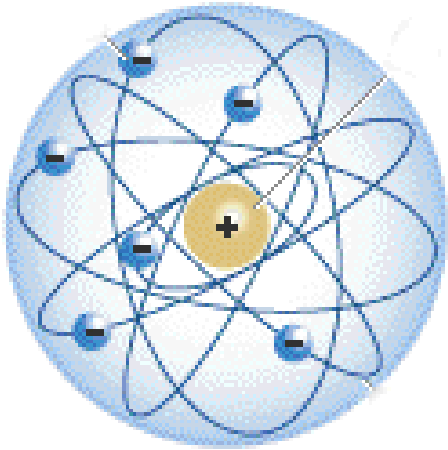
Henri Becquerel (1896) - Descoberta das partículas alfa  
Proposição de experimentos – testar o modelo!

# Experimento de Rutherford (1911): Espalhamento de partículas $\alpha$



# Modelo Atômico de Rutherford (1911)

## Modelo Atômico Planetário



O átomo seria esférico com raio de aproximadamente  $10^{-8}$  cm  
O núcleo no centro com raio  $10^{-12}$  cm (10.000 vezes menor)  
Os elétrons estariam orbitando o núcleo

### - Falhas do modelo de Rutherford

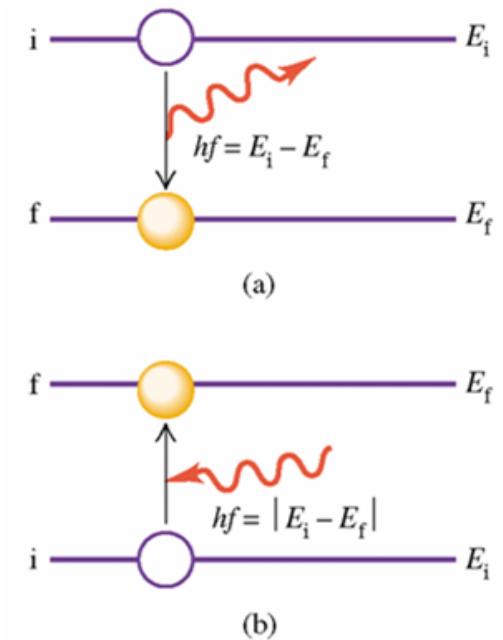
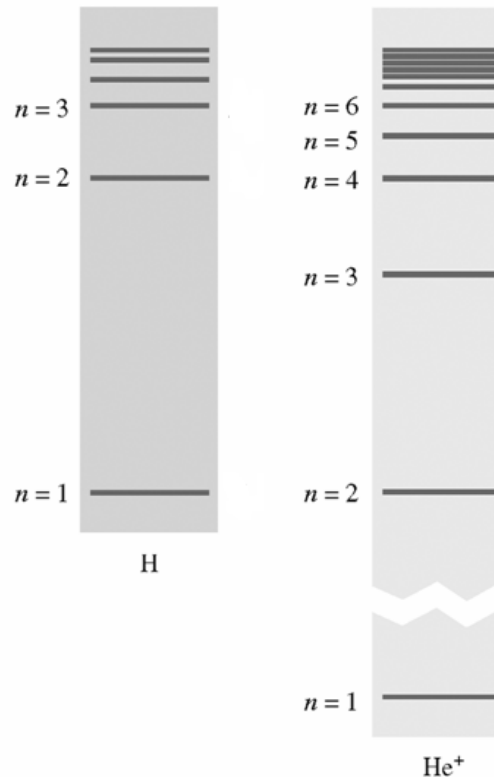
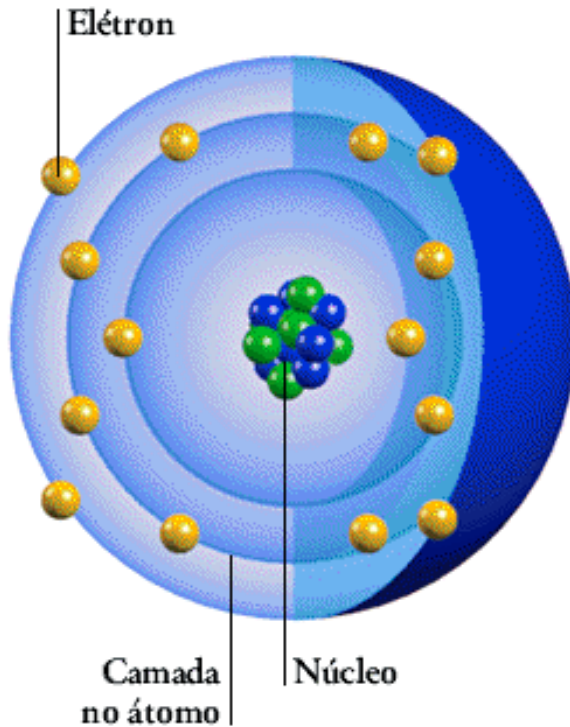


Eletromagnetismo: toda carga acelerada irradia liberando energia!

# Modelo Atômico de Bohr

## Postulados de Bohr

- A teoria clássica da radiação não vale para sistemas de dimensões atômicas.
- Os elétrons estariam confinados em órbitas estáveis, não radiantes, chamadas estados estacionários.
- Quando um elétron se transfere de um estado estacionário para outro ele emite ou absorve uma quantidade de energia (fóton).

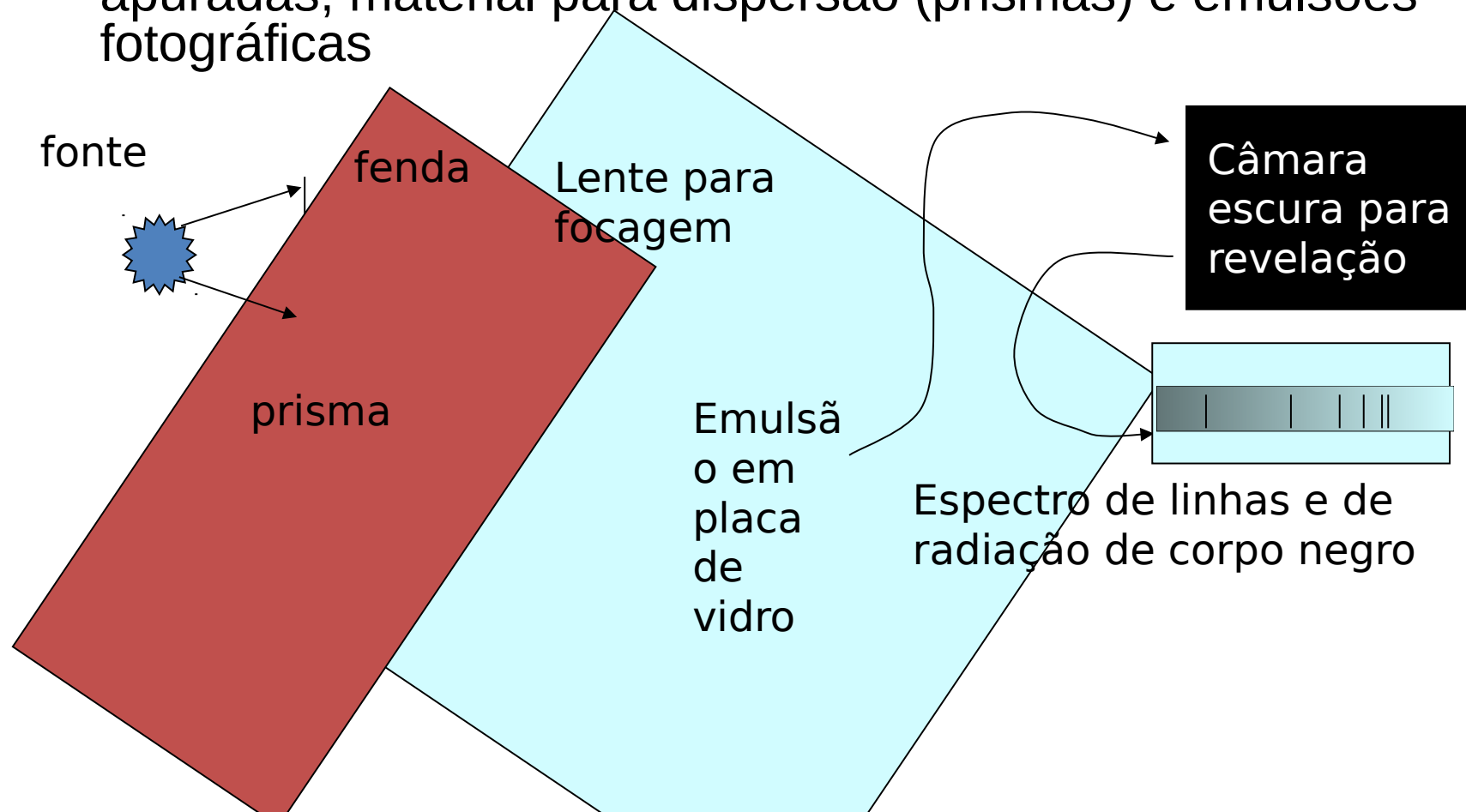


(a) A energia do átomo cai de um nível inicial  $i$  até um nível final  $f$  emitindo um fóton com energia igual a  $E_i - E_f$ . (b) A energia do átomo se eleva de um nível inicial  $i$  até um nível final  $f$ , absorvendo um fóton com energia igual a  $E_f - E_i$ .



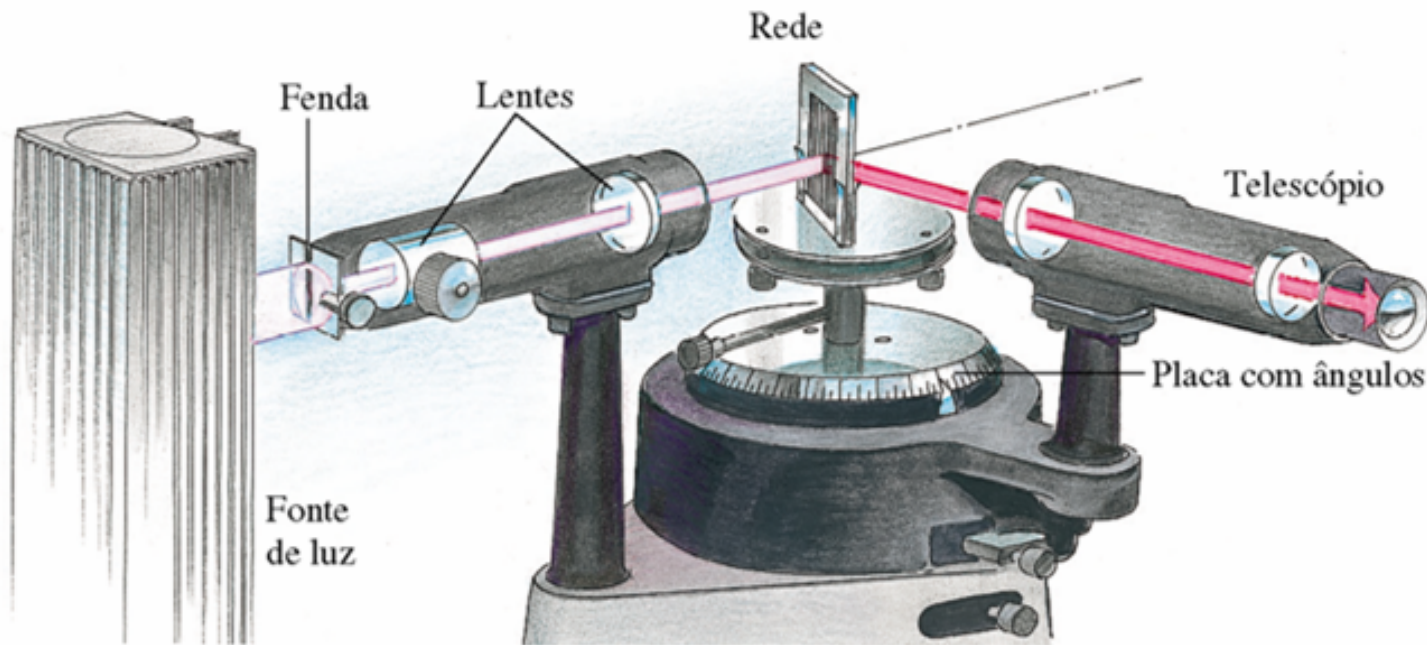
# Avanços na Espectroscopia

- Estudo da emissão ou absorção de luz pelos vários materiais (gases, líquidos, sólidos)
- No séc. XIX as técnicas foram sendo cada vez mais apuradas; material para dispersão (prismas) e emulsões fotográficas





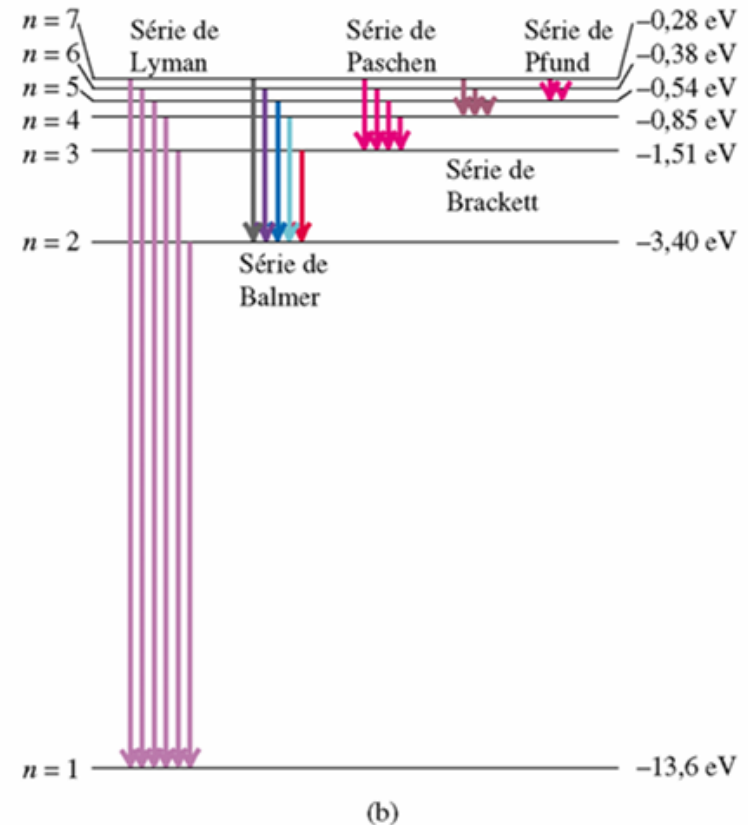
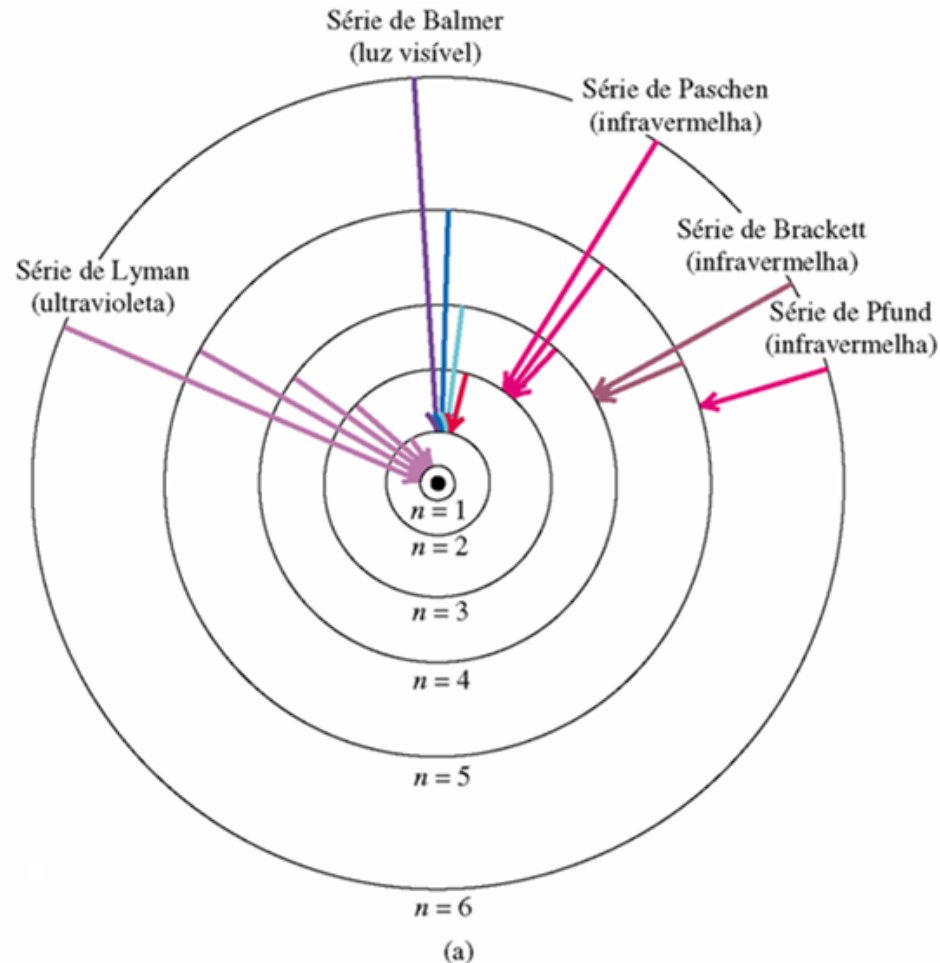
# Espectrometria



Um espectrômetro usando uma rede de difração. As lentes entre a fonte e a rede produzem um feixe de raios paralelos que incide sobre a rede. Esse feixe, ao incidir perpendicularmente ao plano da rede, sofre difração produzindo espectros de várias ordens, cujas direções são determinadas pela Equação (38.13). O feixe difratado é observado através de um telescópio cuja ocular possui linhas de referência para medir com precisão o ângulo  $\theta$ .

## Realização de Experimento !!!

# Experiência de Frank-Hertz: Linhas espectrais, evidências a favor da existência de “subníveis”



(a) Órbitas “permitidas” para um elétron no modelo de Bohr do átomo de hidrogênio (não em escala). As transições responsáveis por algumas das linhas das diversas séries são indicadas por setas. (b) Diagrama dos níveis de energia, mostrando algumas transições correspondentes a essas diferentes séries.

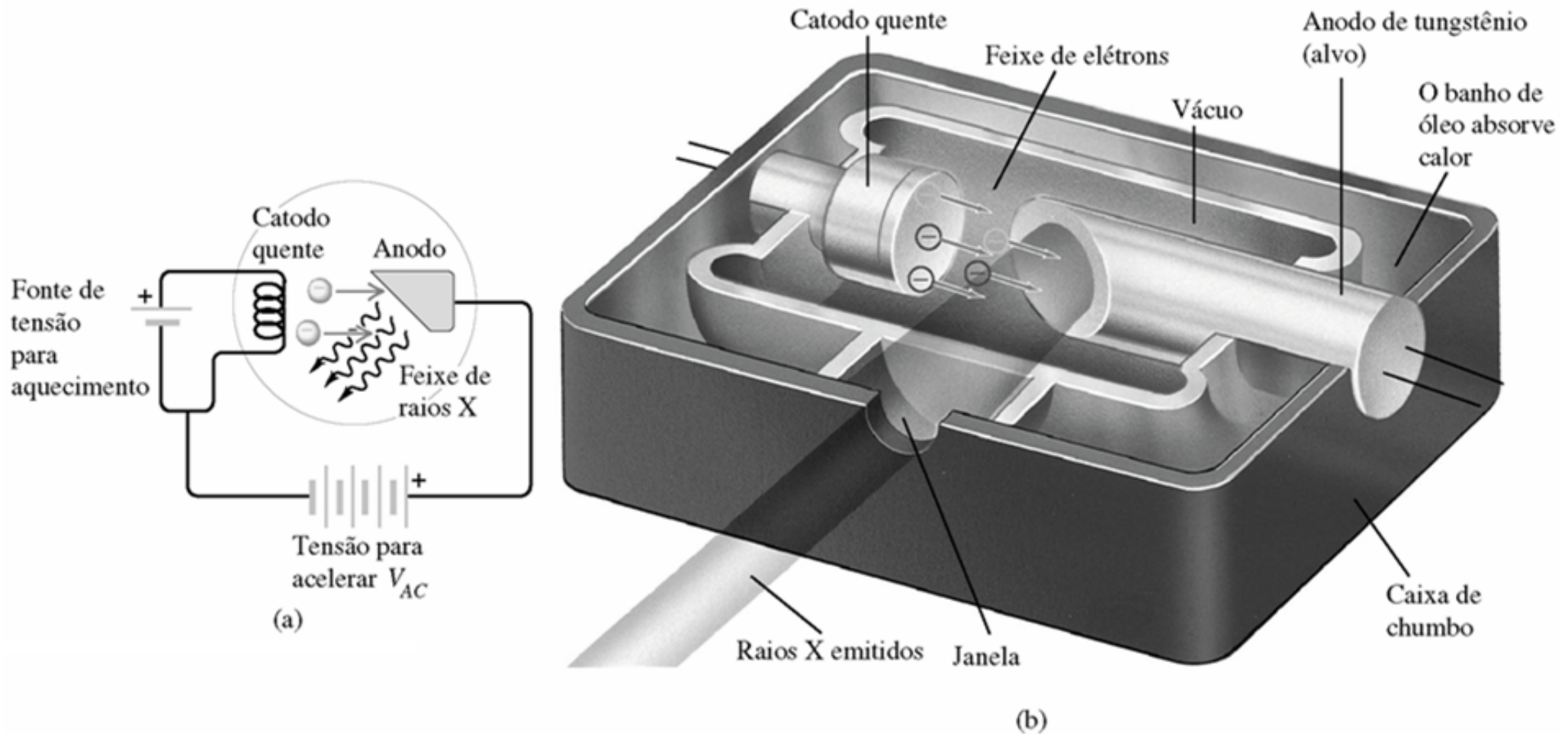
# Raios-X

## Descoberta dos raios-X



Primeira radiografia tirada por  
Röntgen (1895)

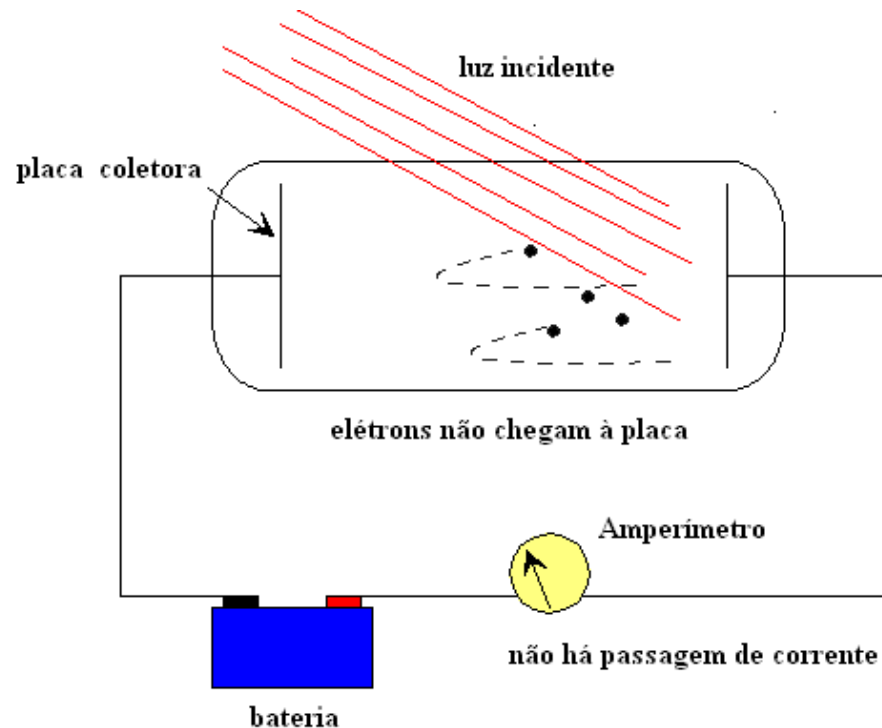
# Tubo de Raios-X



(a) Dispositivo para produzir raios X, semelhante ao usado por Röntgen. Elétrons emitidos do catodo quente por emissão termoiônica são acelerados no sentido do anodo; ao colidirem com ele, ocorre a emissão de raios X. (b) Seção reta de um aparelho de raios X. O anodo é resfriado por um líquido para evitar superaquecimento.

# Efeito fotoelétrico: observações experimentais

- Os elétrons são emitidos com uma velocidade inicial elevada.



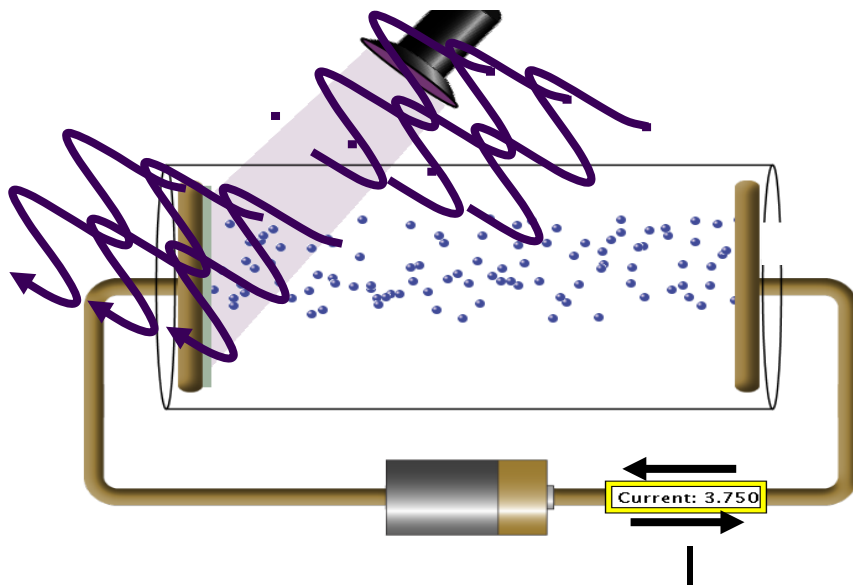
- Isso pode ser confirmado invertendo o potencial aplicado  $V_{AC}$ .
- Podemos determinar a energia cinética máxima dos elétrons emitidos ajustando o potencial do anodo em relação ao catodo, de modo que seu valor negativo  $V_0$  seja suficiente para anular a corrente.
- Existe uma ddp (potencial de frenamento =  $V_0$ ) para a qual nenhum elétron atinge o ânodo

# Efeito fotoelétrico: explicando as observações experimentais

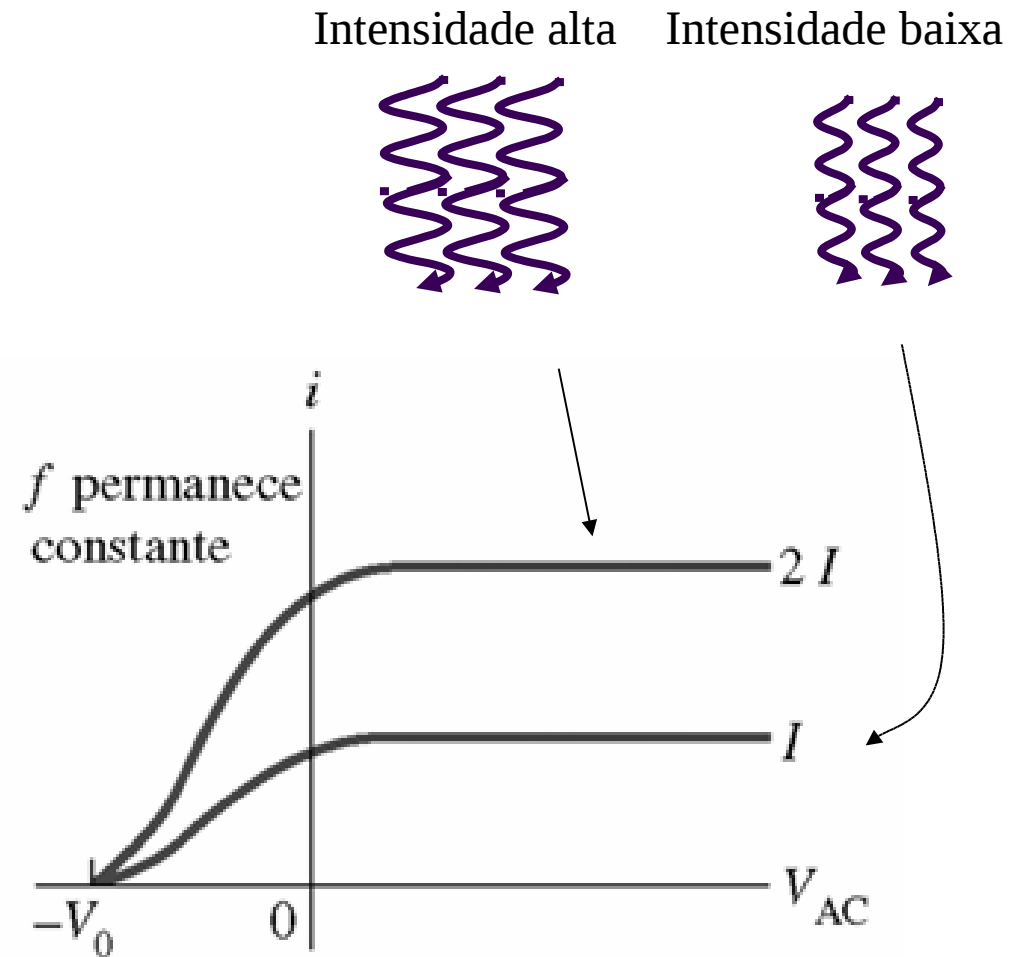
- Aumentar a intensidade  $\neq$  aumentar energia

amplitude

frequência



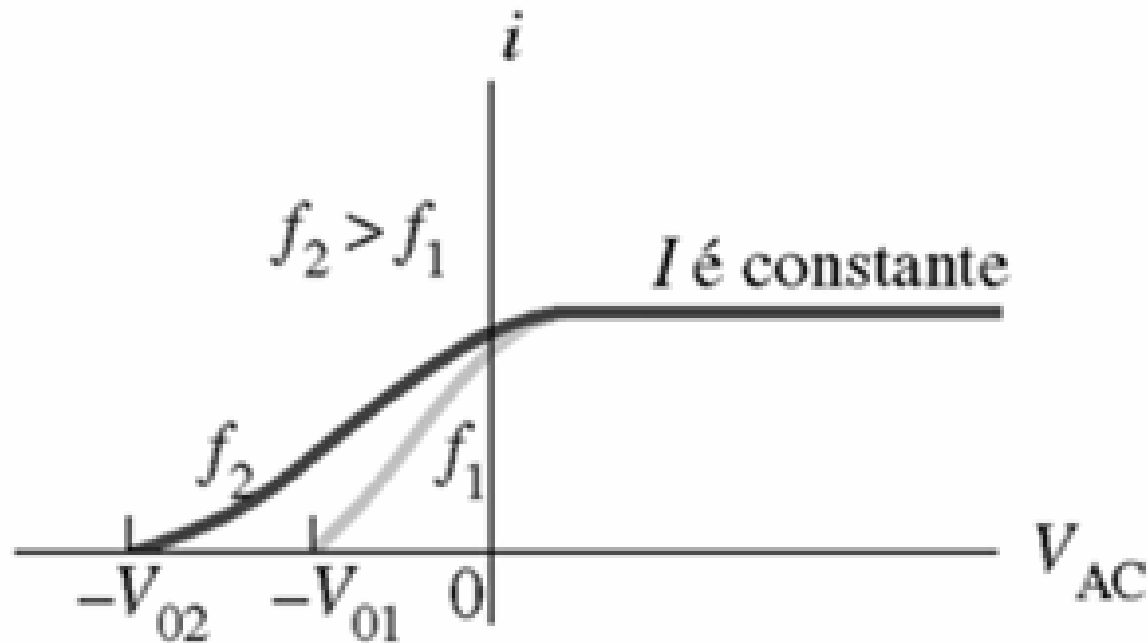
Corrente fotoelétrica  $i$  em função do potencial  $V_{AC}$  do anodo em relação ao catodo para uma frequência da luz constante. O potencial de frenamento (de corte) independe da intensidade da luz  $I$ , contudo a corrente fotoelétrica é diretamente proporcional à intensidade.



Mesma frequência!!!  
Intensidade diferente!!!

## Efeito fotoelétrico: observações experimentais

Para frequências menores do que  $\nu_0$  o efeito fotoelétrico não ocorre



Mesma Intensidade!!!  
Diferentes frequências!!!



# Efeito fotoelétrico: considerações de Einstein (Nobel 1921)

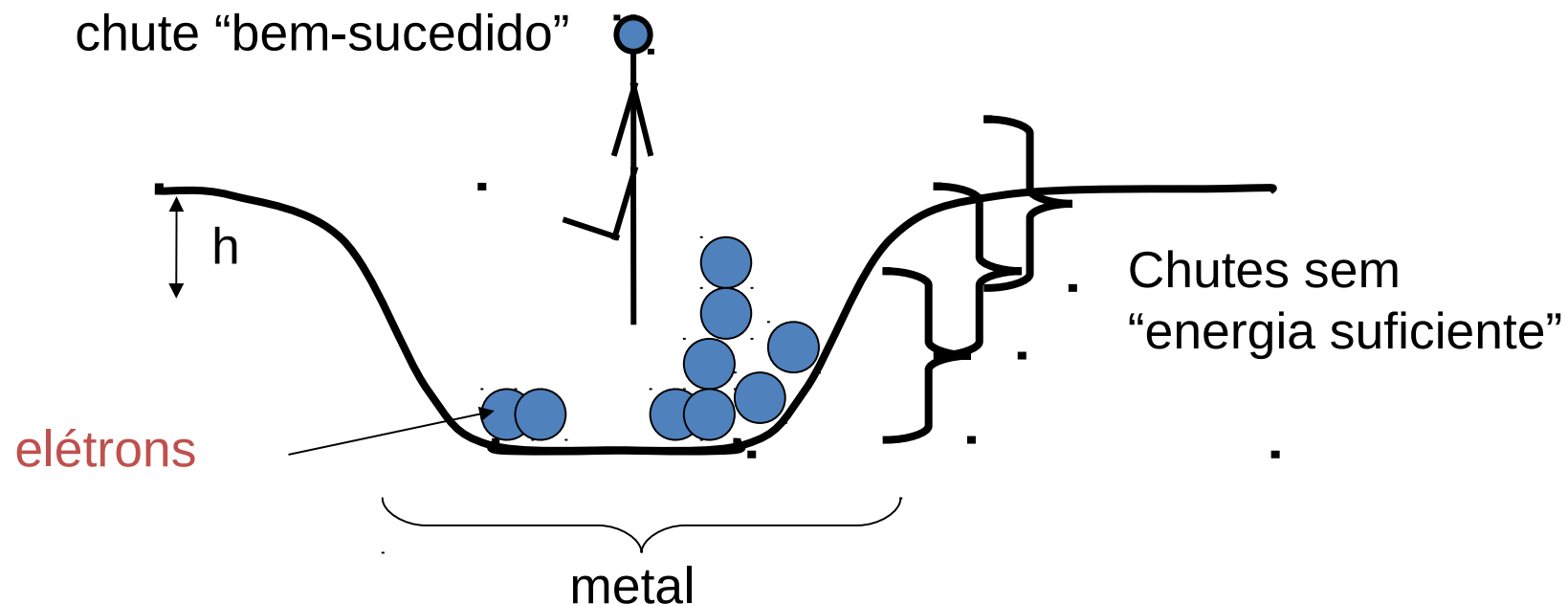
Utilizou a idéia do corpo negro de Planck!

Analogia: bola em um buraco

Quanto mais forte o chute, maior a probabilidade da bola sair

O chute deve ter uma energia mínima para que a bola saia!

$$\text{Energia Cinética da Bola} = \text{Energia do chute} - mgh$$





## Efeito fotoelétrico: considerações de Einstein (Nobel 1921)

### •Equação de Einstein

The diagram shows the equation  $\left(\frac{1}{2}mv^2\right)_{\max} = eV_0 = hv - \phi$  with arrows pointing to each term from descriptive text. An arrow points from 'Energia cinética do elétron' to  $\left(\frac{1}{2}mv^2\right)_{\max}$ . Another arrow points from 'Potencial de frenamento' to  $eV_0$ . A third arrow points from '“chute”' to  $h\nu$ . A fourth arrow points from 'Φ = função trabalho (energia necessária para “arrancar” o elétron) característica do material' to  $\phi$ .

Potencial de frenamento

$$\left(\frac{1}{2}mv^2\right)_{\max} = eV_0 = h\nu - \phi$$

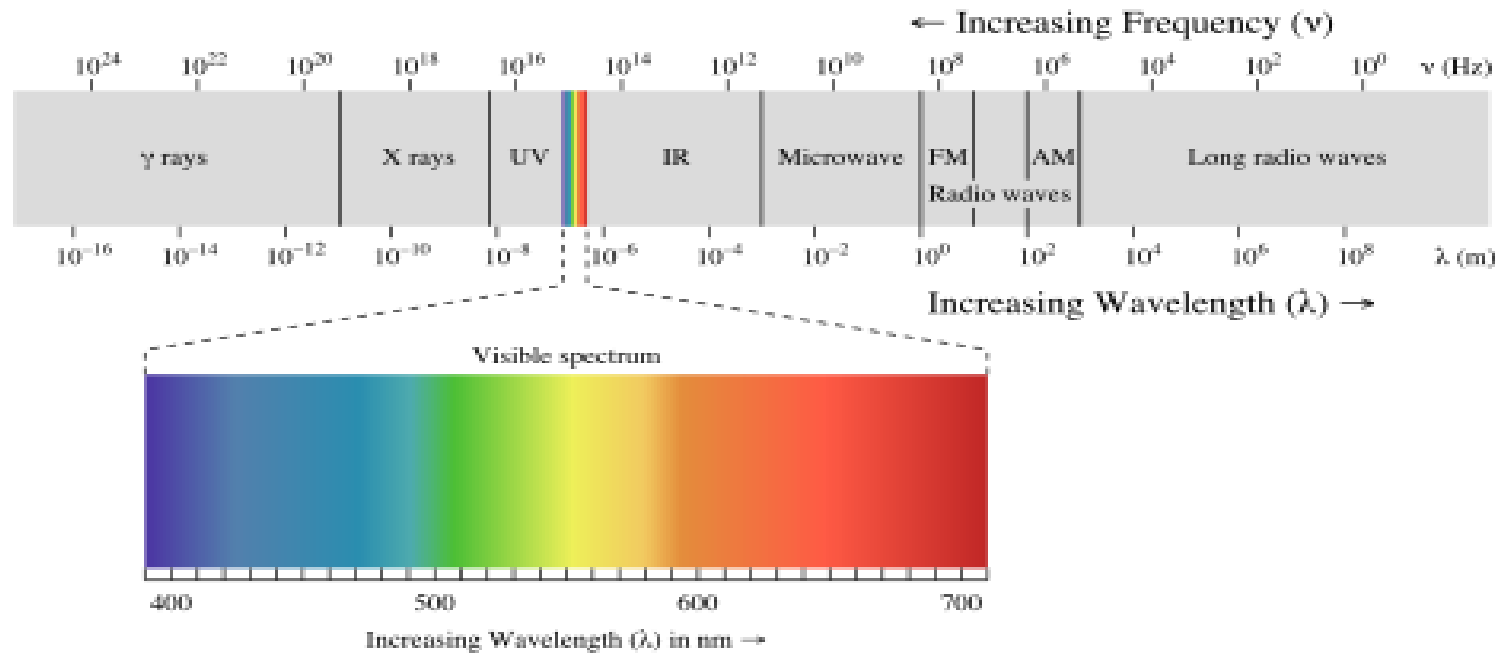
“chute”

Φ = função trabalho (energia necessária para “arrancar” o elétron) característica do material

Energia cinética do elétron

Realização de Experimento !!!

# Natureza da Luz



- Onda eletromagnética
- Dualidade onda-partícula

$$E = h\nu$$

$$p = \frac{E}{c} = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda}$$

# Referências bibliográficas

- Sears e Zemansky, Física IV (person)
- Física Moderna, Caruso e Oguri, cap 8.2 e 10.3.3
- What is Quantum Mechanics? a physics adventure, Transnational college of LEX, cap 1.6 e 1.7
- How Things Works, L.A. Bloomfield, cap 19.1