



Universidade Federal do ABC

## **Prof. José Antonio Souza**

- Laboratório de Física Moderna

# Física Clássica

Tudo resolvido no final do século XIX

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

Eletrodinâmica Clássica  
Mecânica Clássica  
Mecânica Estatística  
Termodinâmica

THE  
LONDON, EDINBURGH AND DUBLIN  
PHILOSOPHICAL MAGAZINE  
AND  
JOURNAL OF SCIENCE.

[FOURTH SERIES.]

MARCH 1861.

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

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

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

# Mecânica Quântica

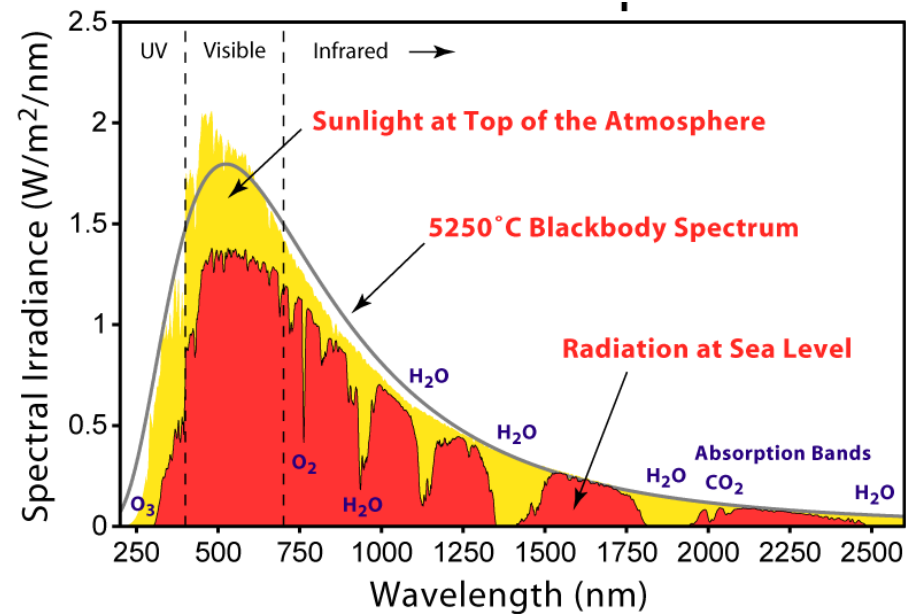
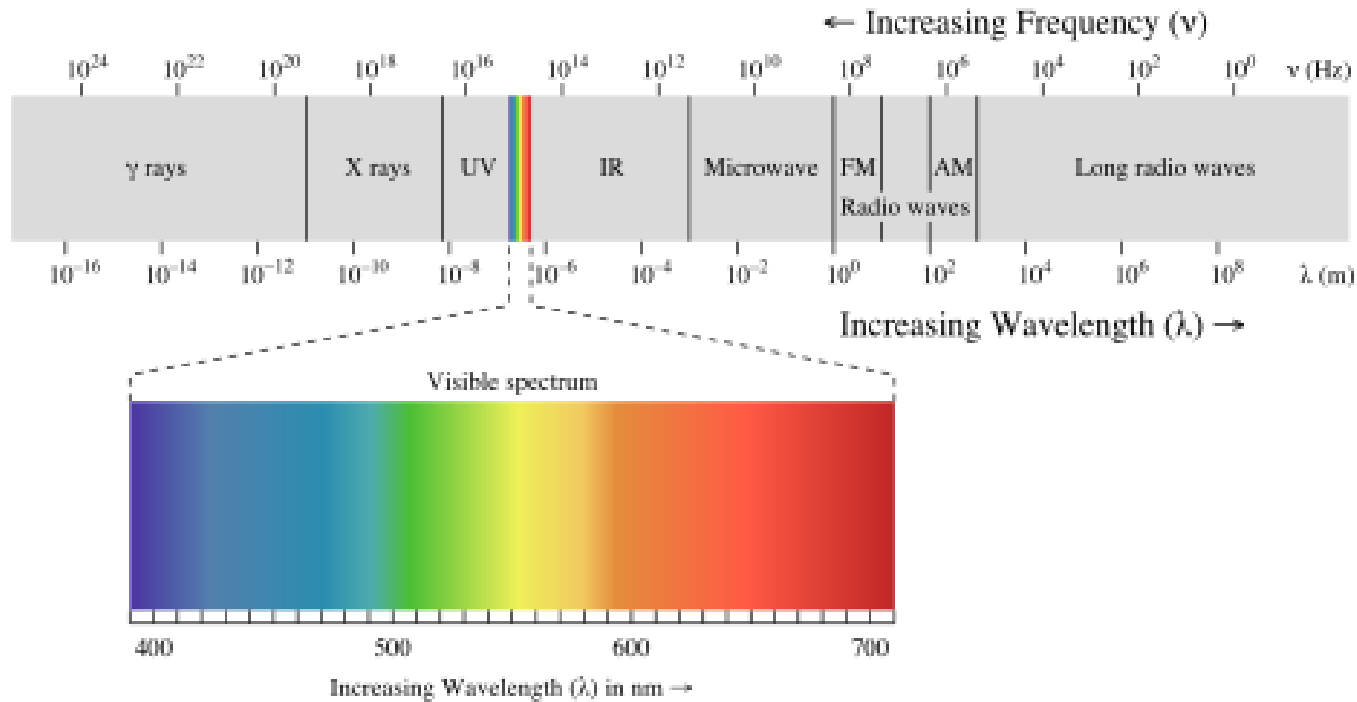
## Corpo negro: Espectro de corpo negro, catástrofe do ultravioleta, Leis de Rayleigh e Jeans, Hipótese de Planck

...numa reunião em 14/12/1900, Max Planck apresentou seu artigo “Sobre a teoria da lei de distribuição de energia do espectro normal”. Isso foi o início de uma revolução na física – a física quântica! Assim como a teoria da relatividade, a física quântica representa uma generalização da física clássica (velocidade da luz, constante universal). A relatividade estende as leis físicas para a região de grandes velocidades. A física quântica estende esse campo à regiões de pequenas dimensões (constante de Planck caracteriza a física quântica)...

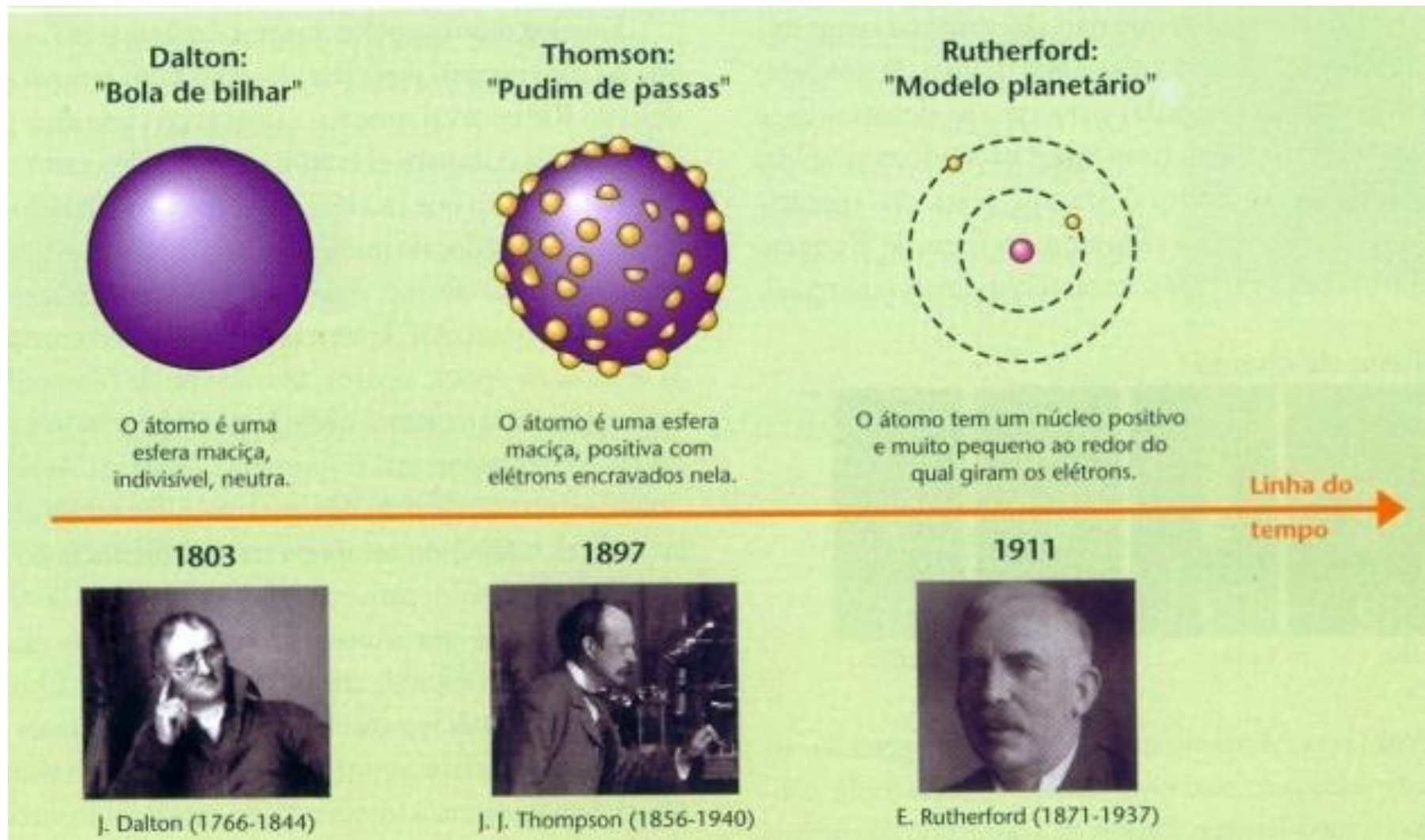
# O corpo negro e a história da Física

- Alguns dos principais intervenientes: Joseph Stephan, Ludwig Boltzmann, Wilhelm Wein, Lord Rayleigh, James Jeans, Max Planck
- Fatos que a Física Clássica não podia explicar
  - O espectro do corpo negro
  - Os espectros atômicos de linhas
  - A estabilidade do átomo

# Espectro eletromagnético



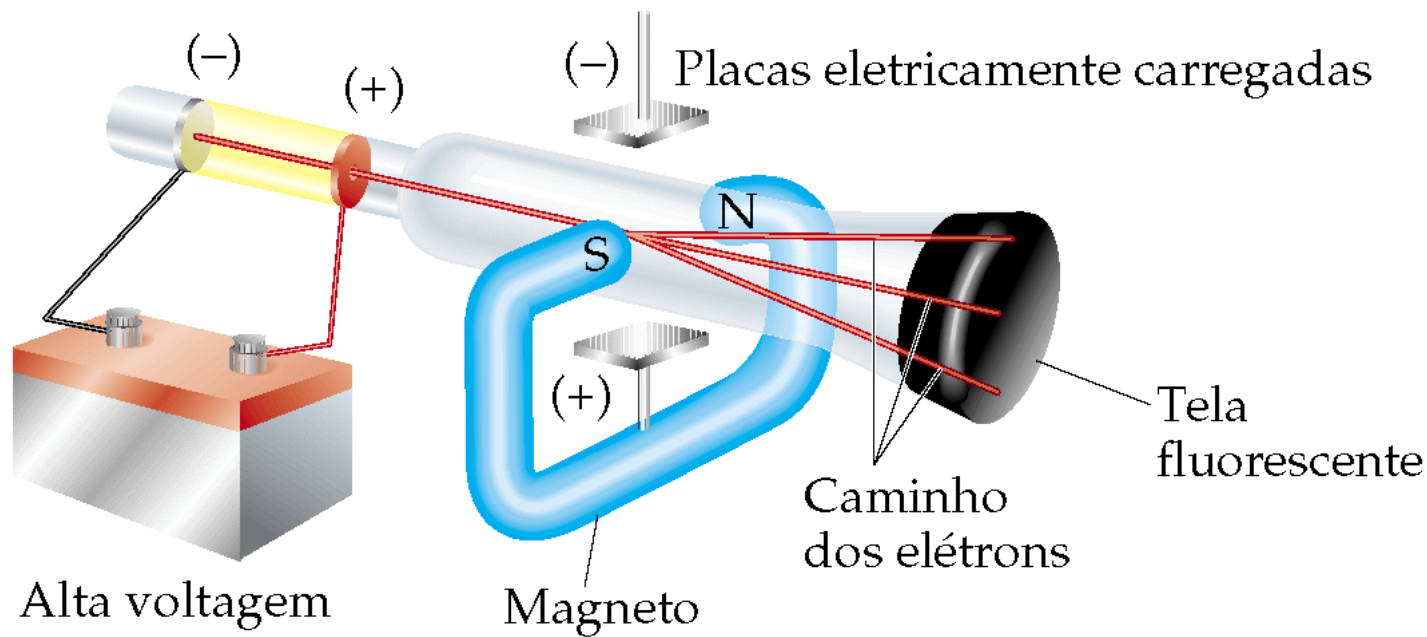
# Das “bolas de bilhar” de Dalton ao modelo nucleado de Rutherford



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

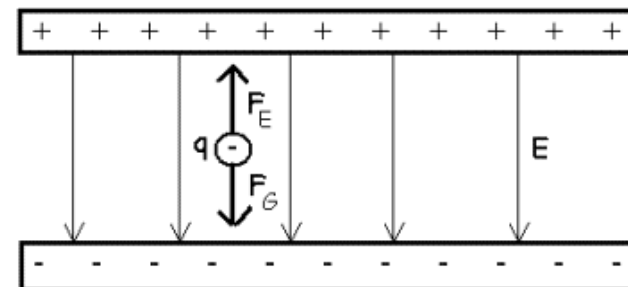
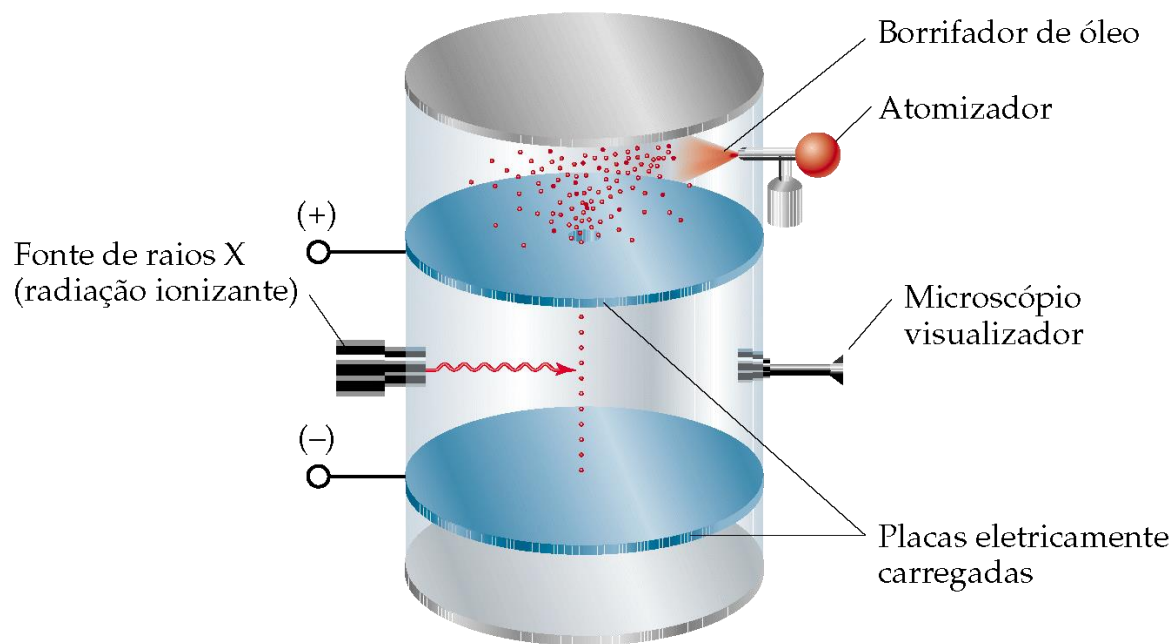
# Raios catódicos e elétrons (Razão Carga/massa)

- 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



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

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

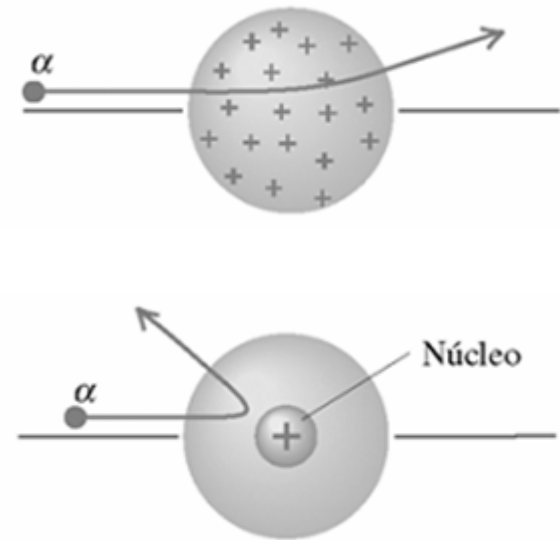
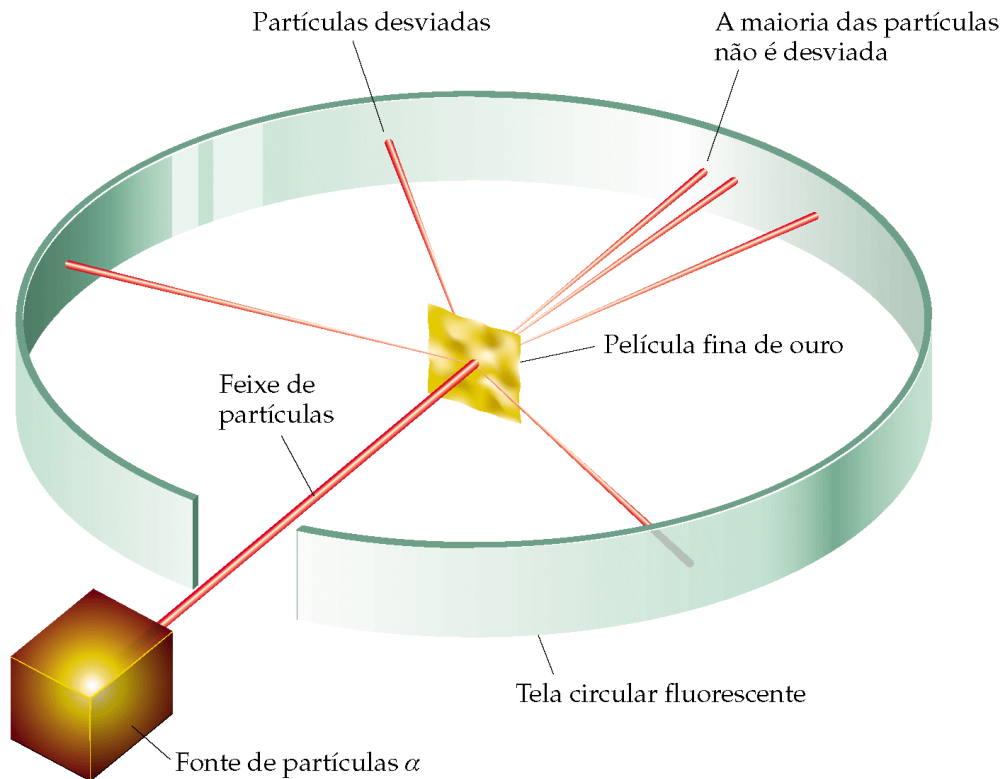
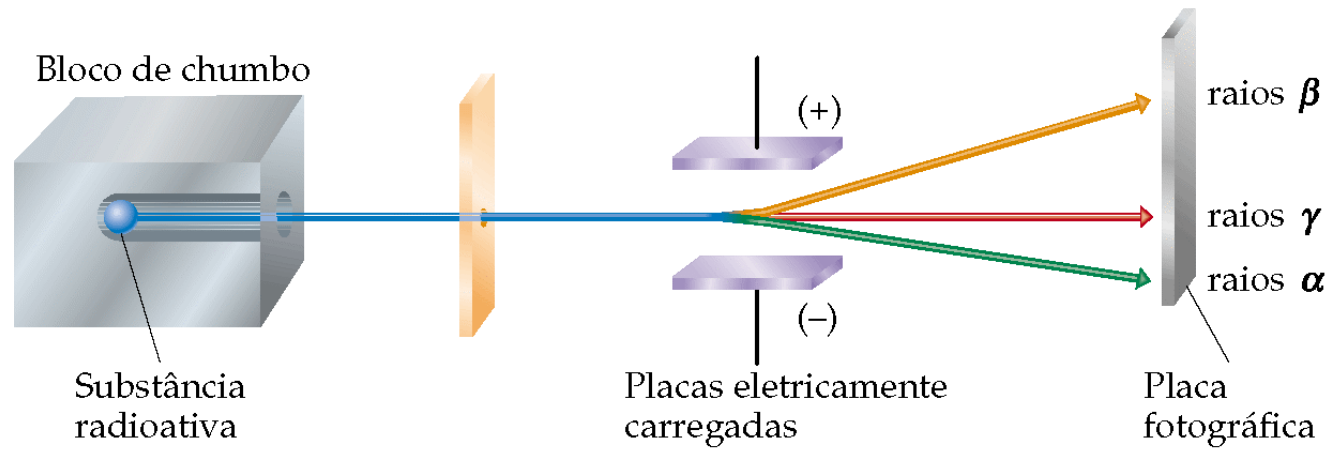
$$|q| = \frac{4 \pi r^3 \rho \|\vec{g}\| d}{3 |\Delta V|}$$

- 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 !!!



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

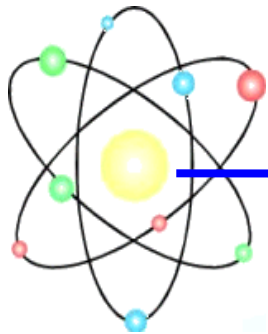


# A descoberta do Núcleo

- Espalhamento de partículas alpha
  - Thomson: espera-se ângulos muito pequenos de espalhamento. Em seu modelo as partículas alpha seriam espalhadas por elétrons.
  - Observou-se algumas partículas alpha com espalhamento para trás
  - Nas palavras de Rutherford: *[esse resultado] foi tão incrível como se você disparasse uma bala de canhão de 15 polegadas sobre uma folha de papel e ela voltasse e atingisse você.*

Átomo

Núcleo



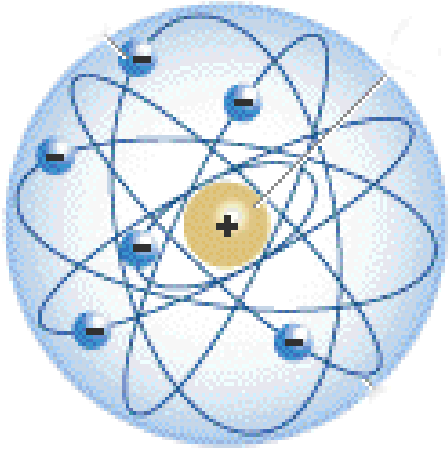
Prótons  
Nêutrons

- Um núcleo central com carga  $Ze$ .
- O núcleo atômico teria um raio da ordem de  $10^4$  vezes menor do que o raio atômico.



# Modelo Atômico de Rutherford (1911)

## Modelo Atômico Planetário



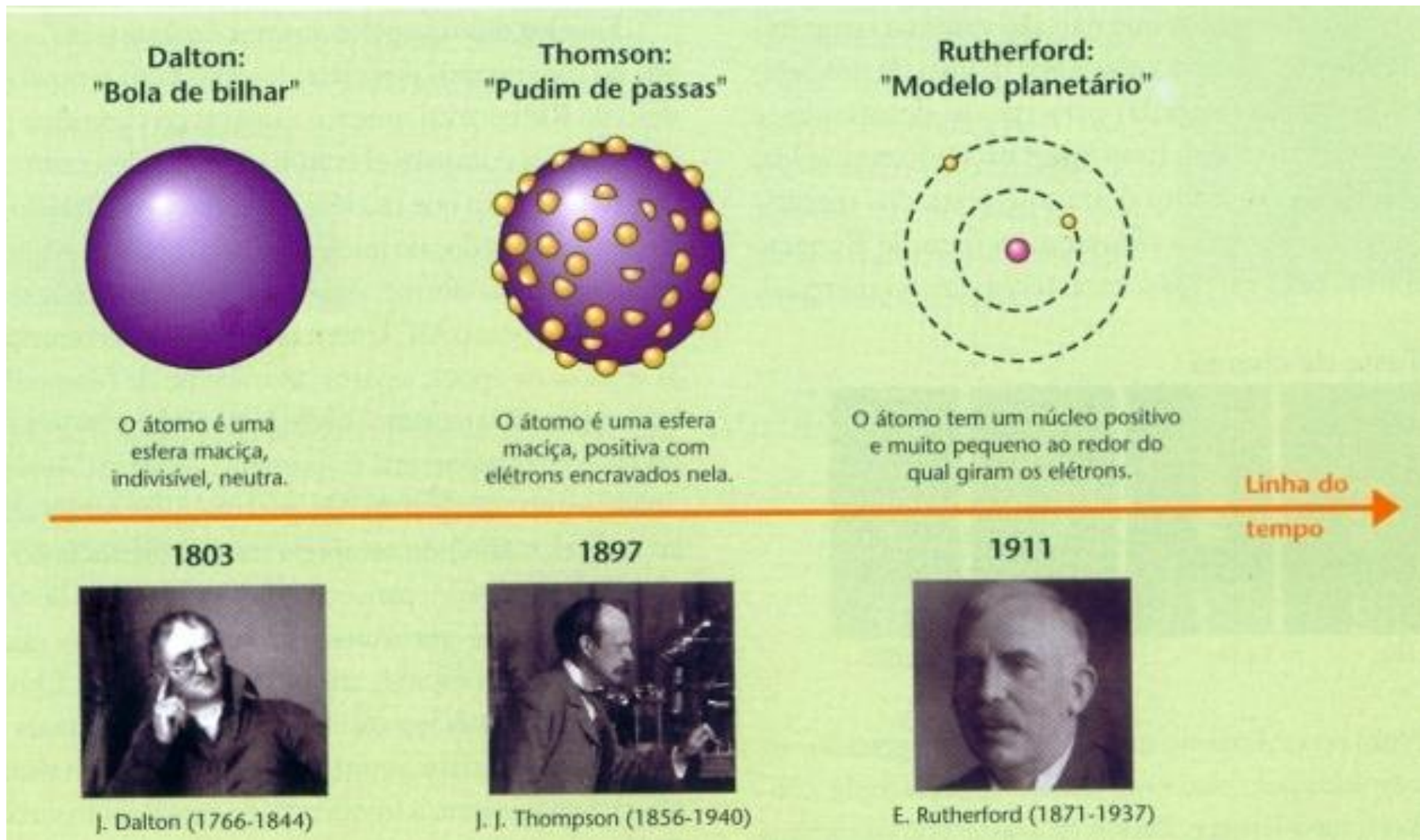
O átomo seria esférico com raio de aproximadamente  $10^{-8}$  cm  
O núcleo no centro com raio  $10^{-12}$  cm (10.000 vezes menor)  
Os elétrons estariam orbitando o núcleo

### - Falhas do modelo de Rutherford



Eletromagnetismo: toda carga acelerada irradia liberando energia!

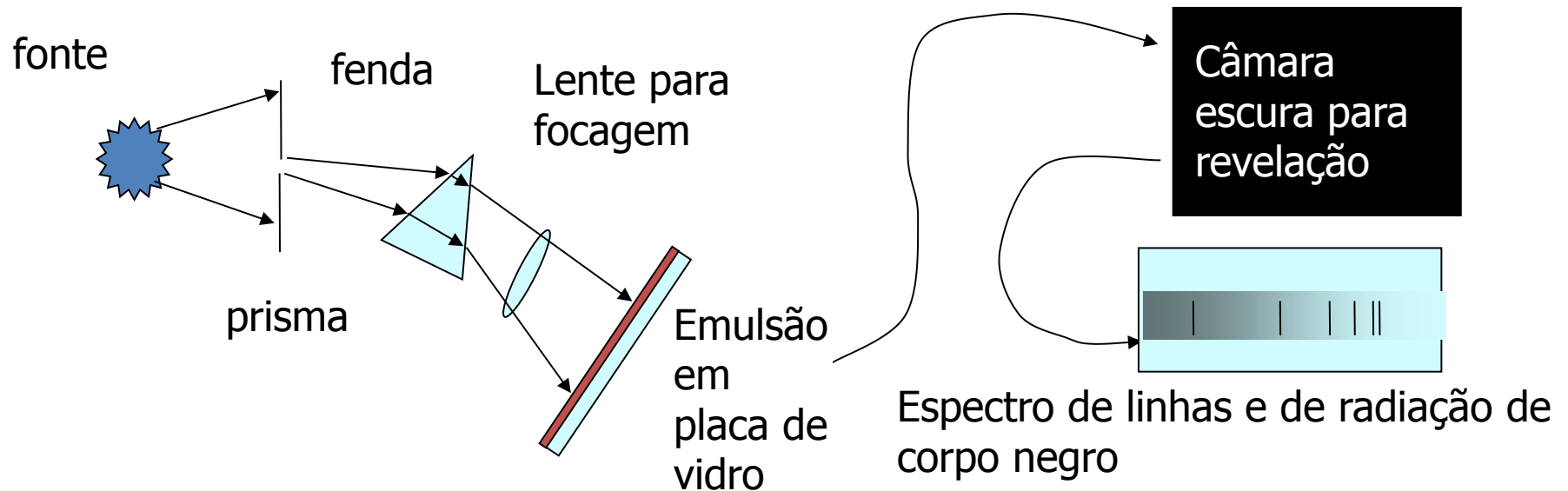
# Das “bolas de bilhar” de Dalton ao modelo nucleado de Rutherford



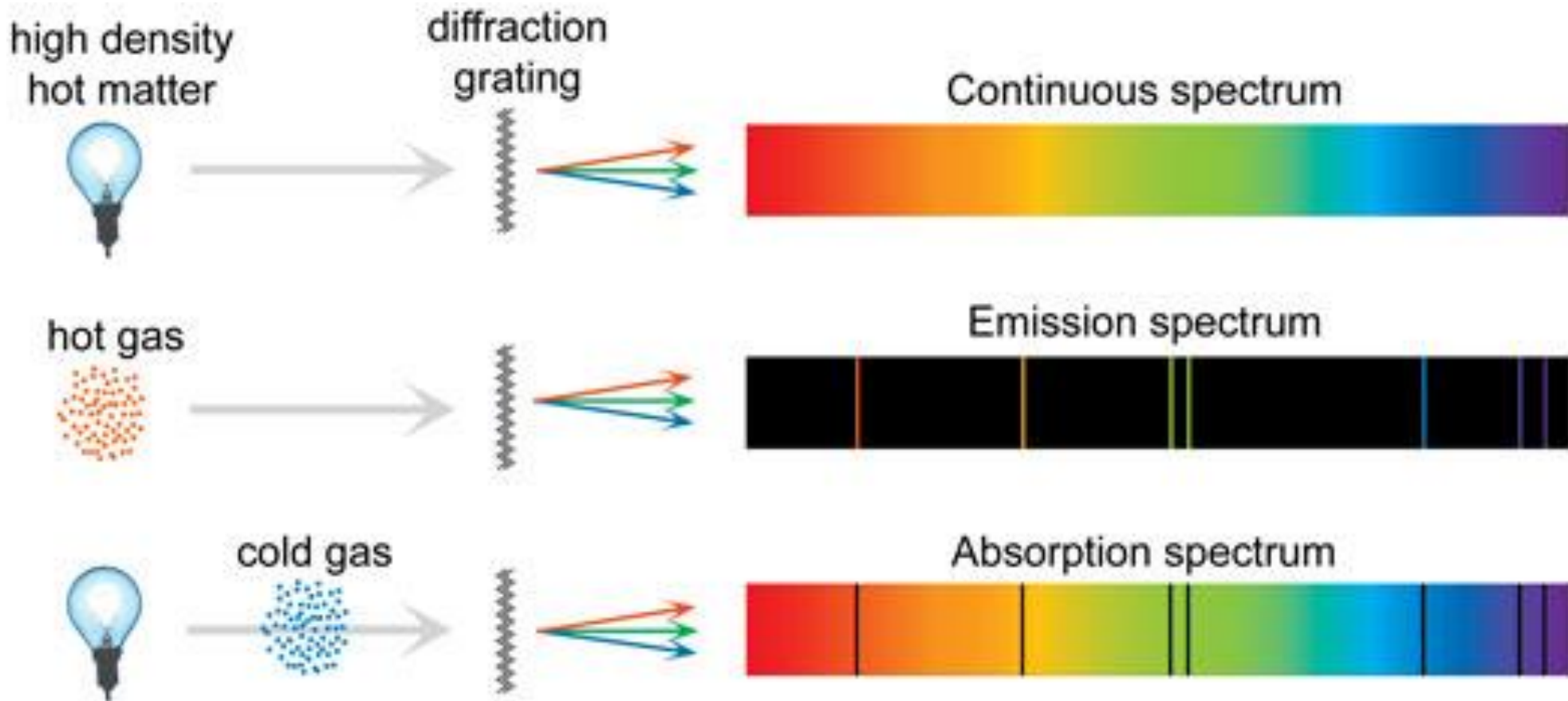
Henri Becquerel (1896) - Descoberta das partículas alfa  
Proposição de experimentos – testar o modelo!

# 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



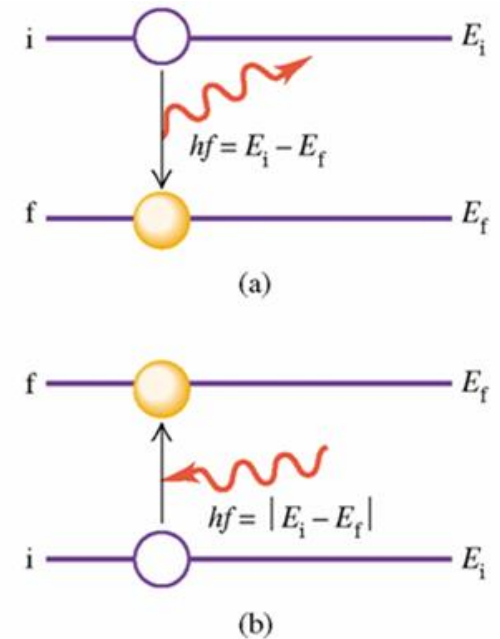
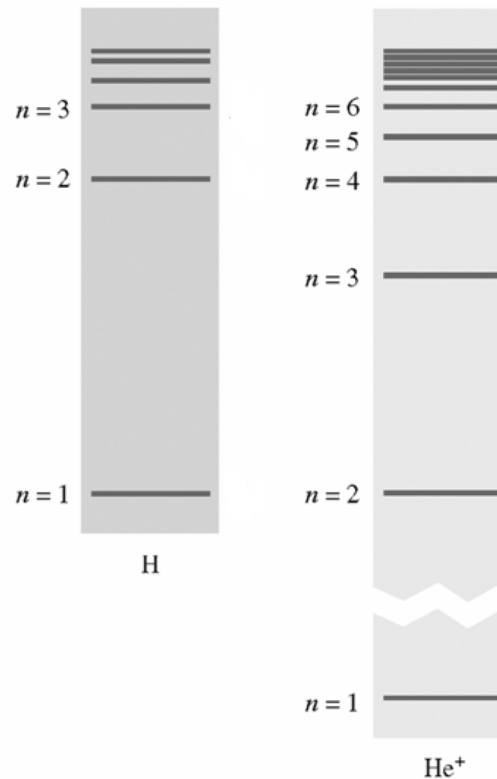
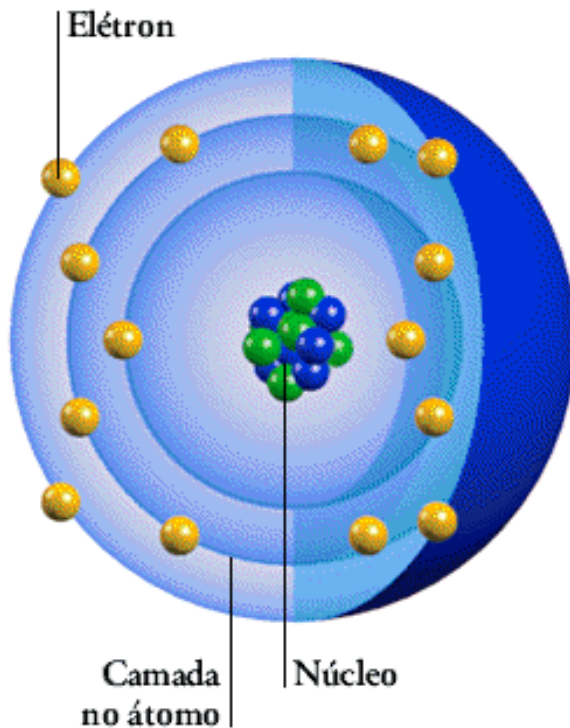
# Espectros de emissão e o espectro de absorção



# Modelo Atômico de Bohr

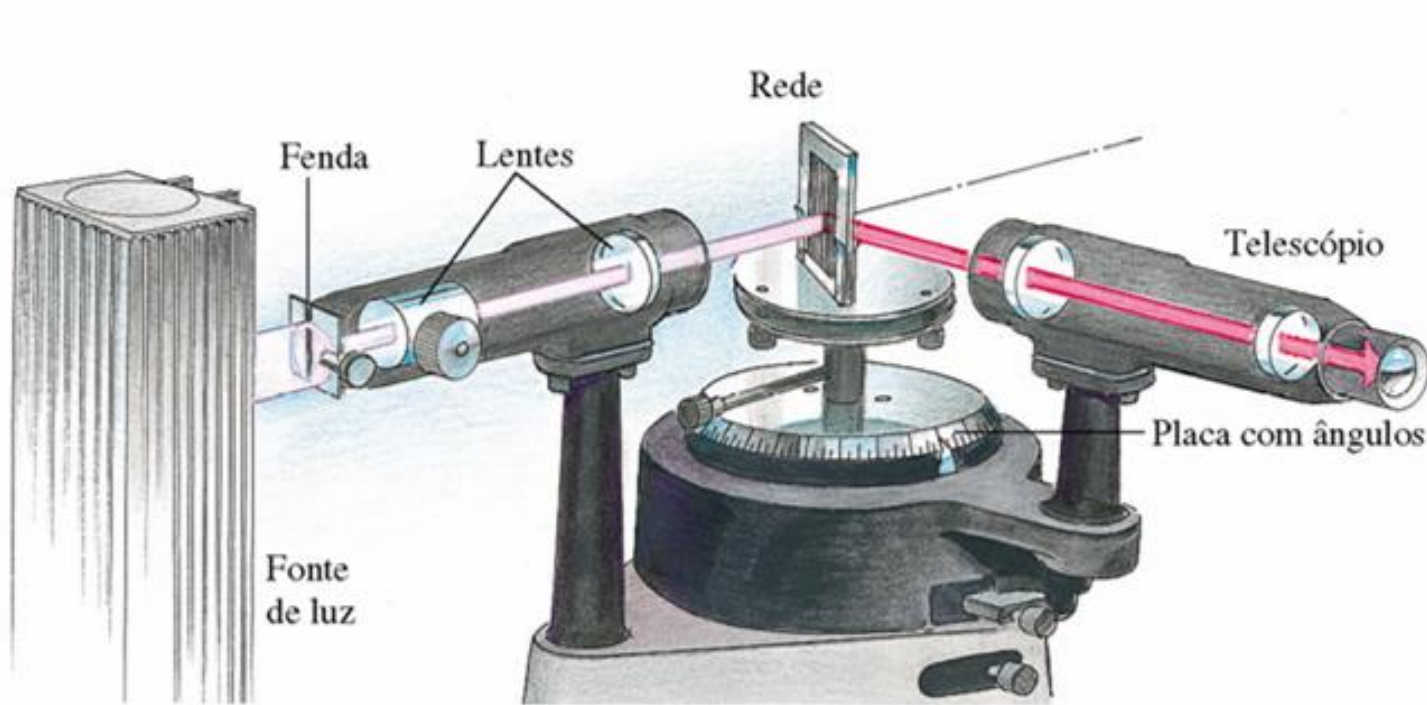
## Postulados de Bohr

- 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  $E_f - E_i$ .

# Espectrometria

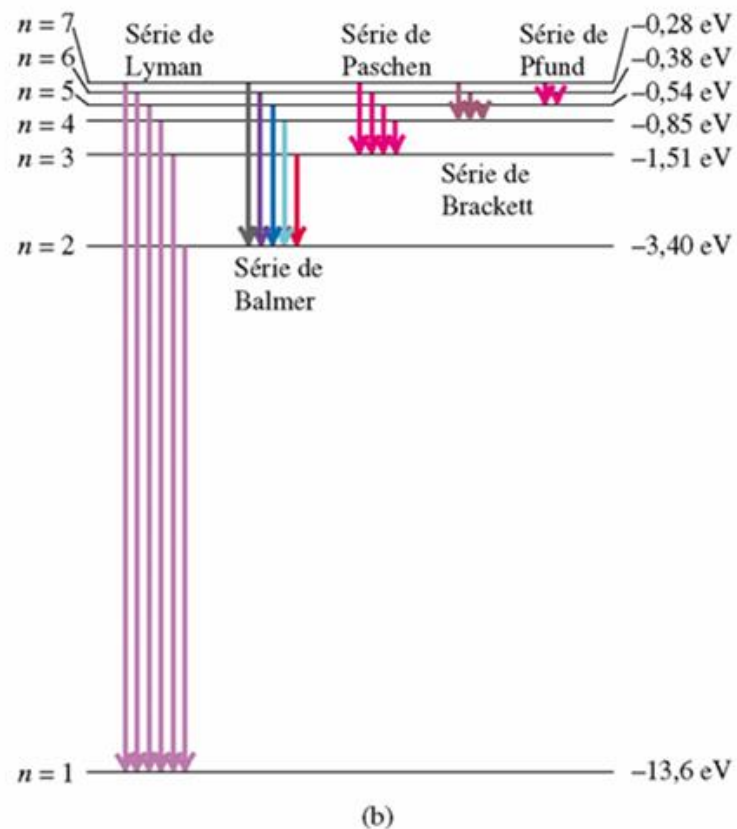
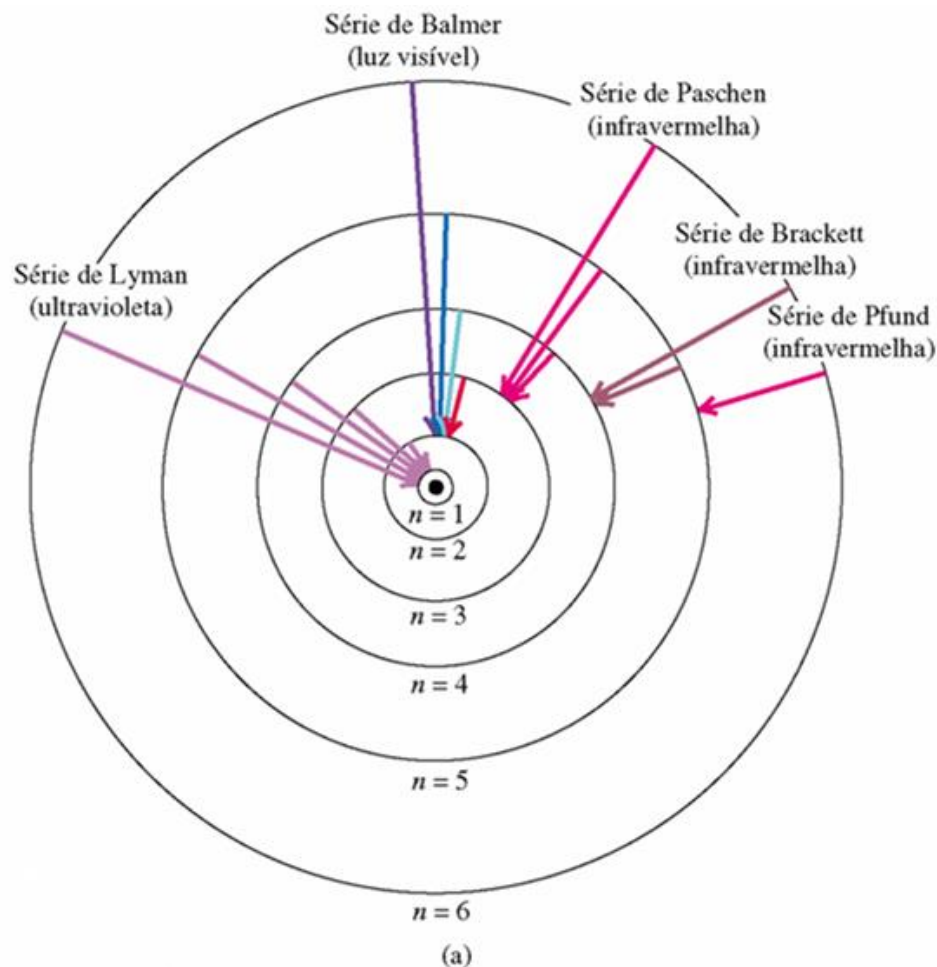


Um espectrômetro usando uma rede de difração. As lentes entre a fonte e a rede produzem um feixe de raios paralelos que incide sobre a rede. Esse feixe, ao incidir perpendicularmente ao plano da rede, sofre difração produzindo espectros de várias ordens, cujas direções são determinadas pela Equação (38.13). 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.

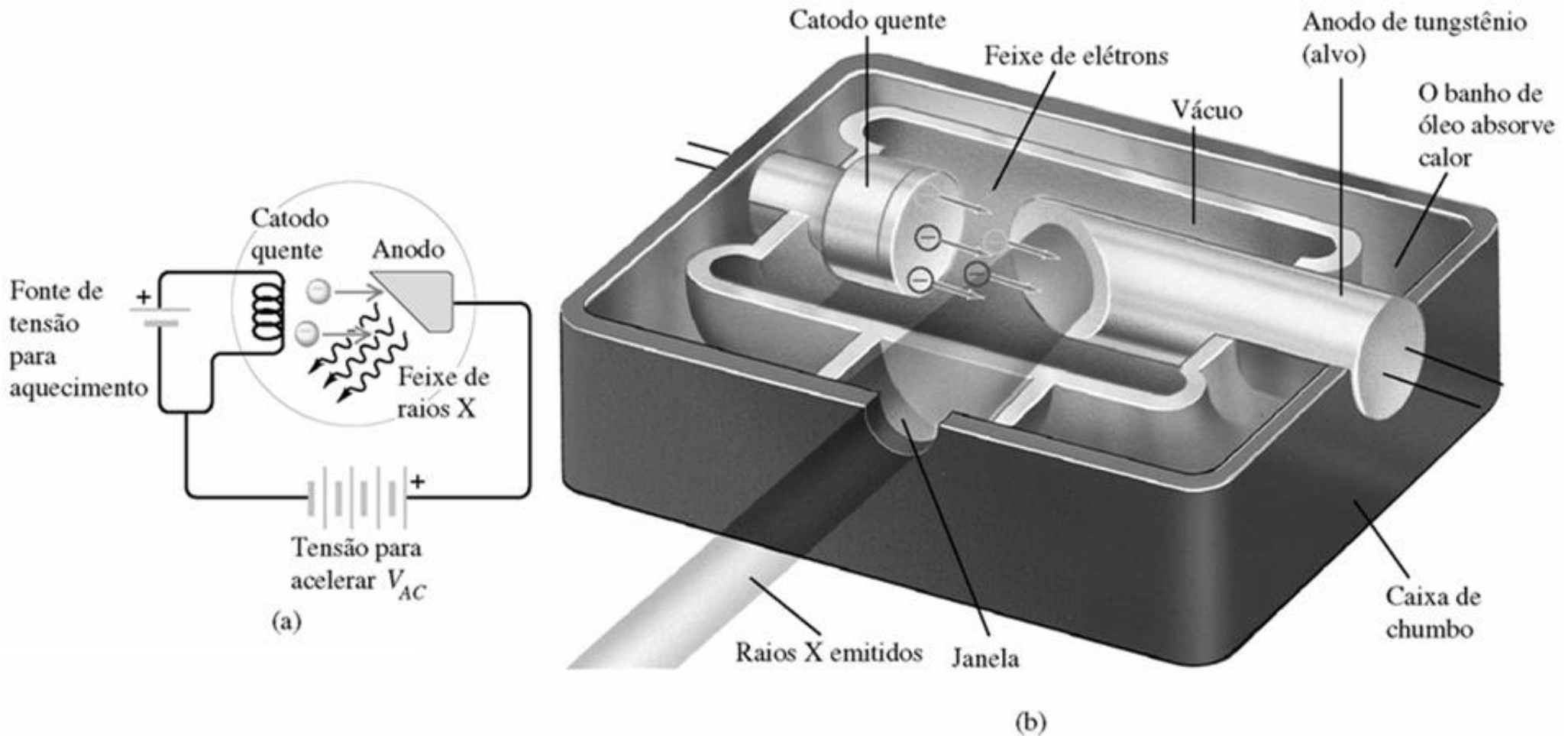
# Raios-X

Descoberta dos raios-X



Primeira radiografia tirada por  
Röntgen (1895)

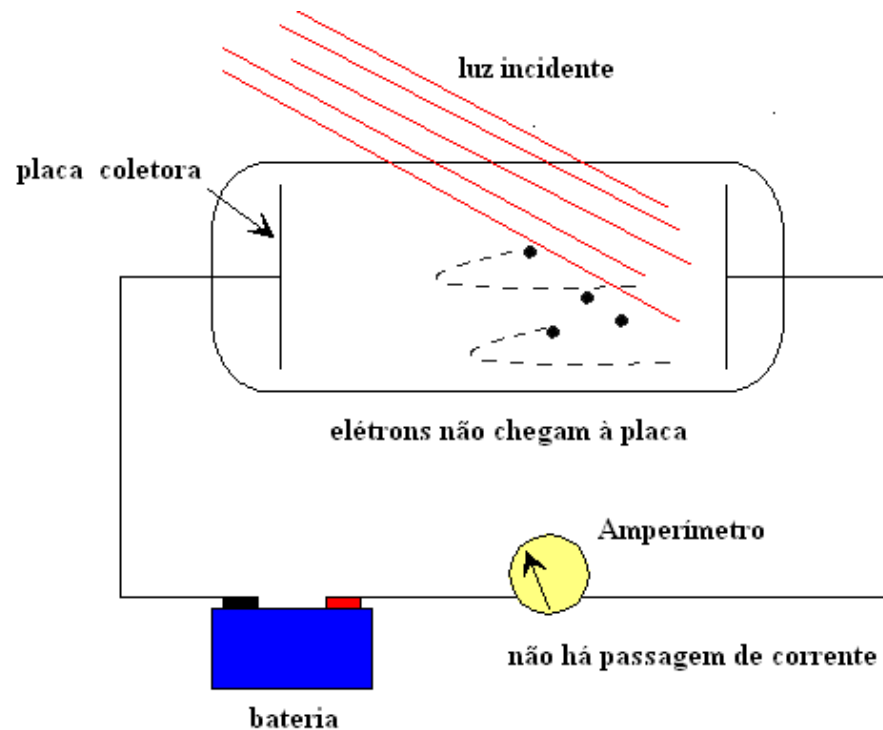
# Tubo de Raios-X



(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.



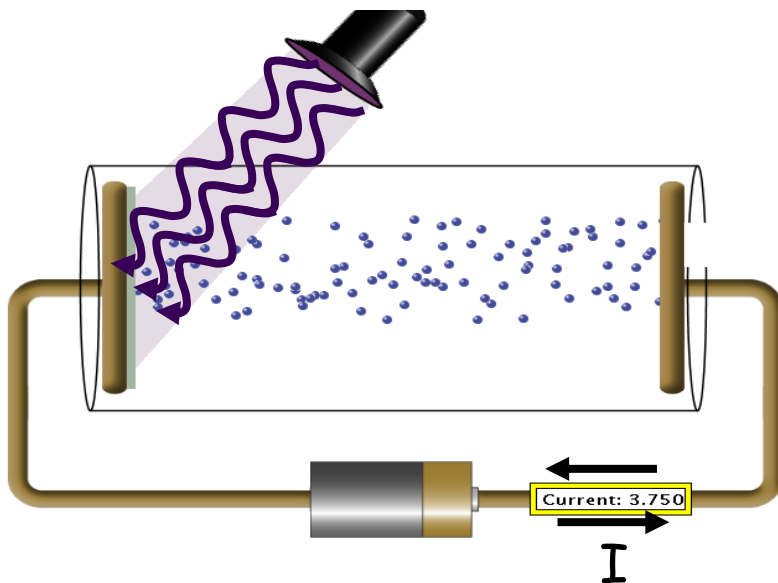
- Isso pode ser confirmado invertendo o potencial aplicado  $V_{AC}$ .
- Podemos determinar a energia cinética máxima dos elétrons emitidos ajustando o potencial do anodo em relação ao catodo, de modo que seu valor negativo  $V_0$  seja suficiente para anular a corrente.
- Existe uma ddp (potencial de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

# Efeito fotoelétrico: explicando as observações experimentais

- Aumentar a intensidade  $\neq$  aumentar energia

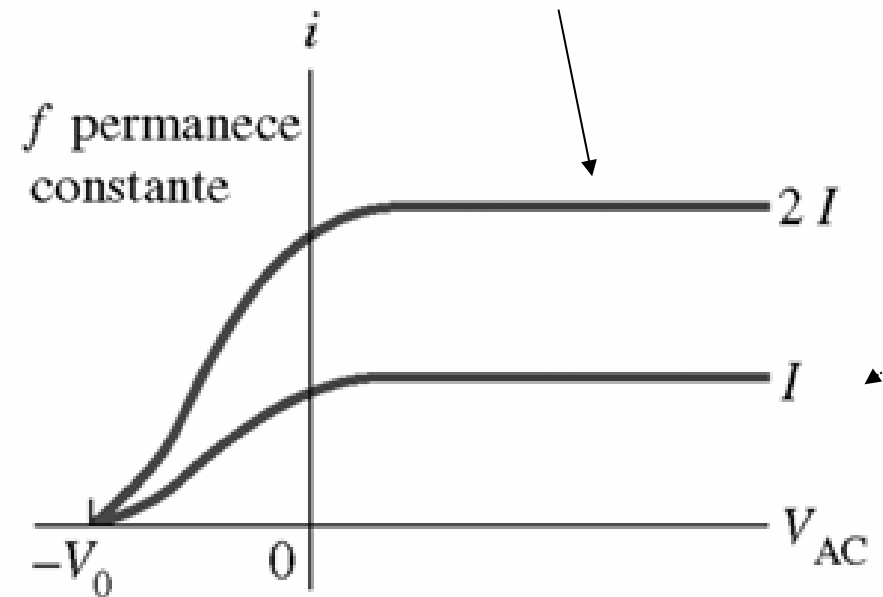
amplitude

freqüência



Intensidade alta

Intensidade baixa

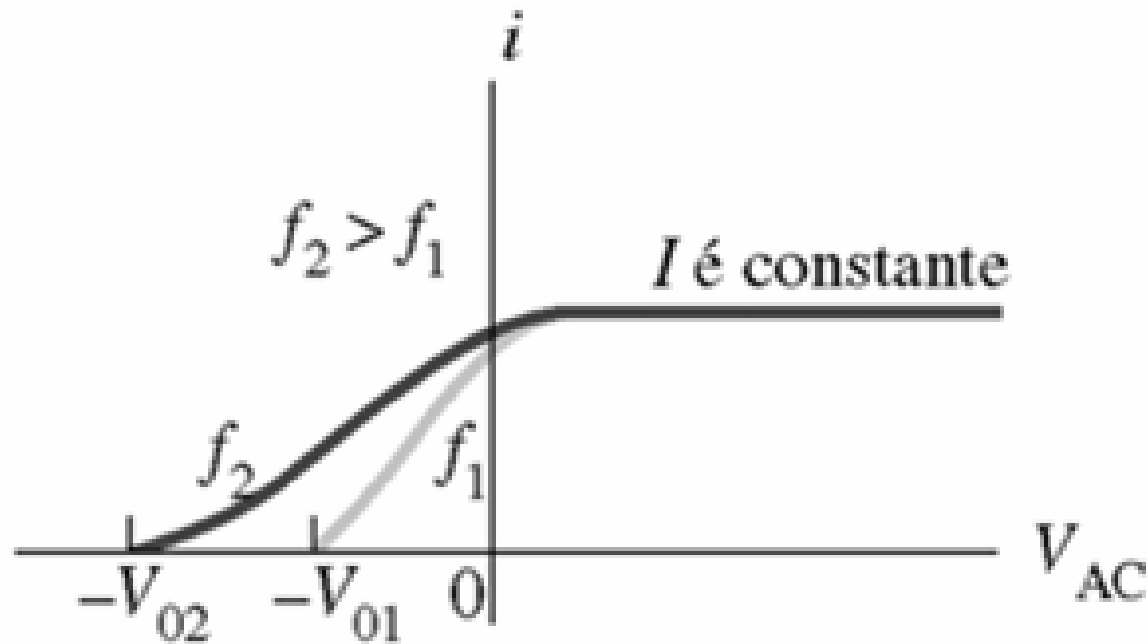


Corrente fotoelétrica  $i$  em função do potencial  $V_{AC}$  do anodo em relação ao catodo para uma frequência da luz constante. O potencial de frenamento (de corte) independe da intensidade da luz  $I$ , contudo a corrente fotoelétrica é diretamente proporcional à intensidade.

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)

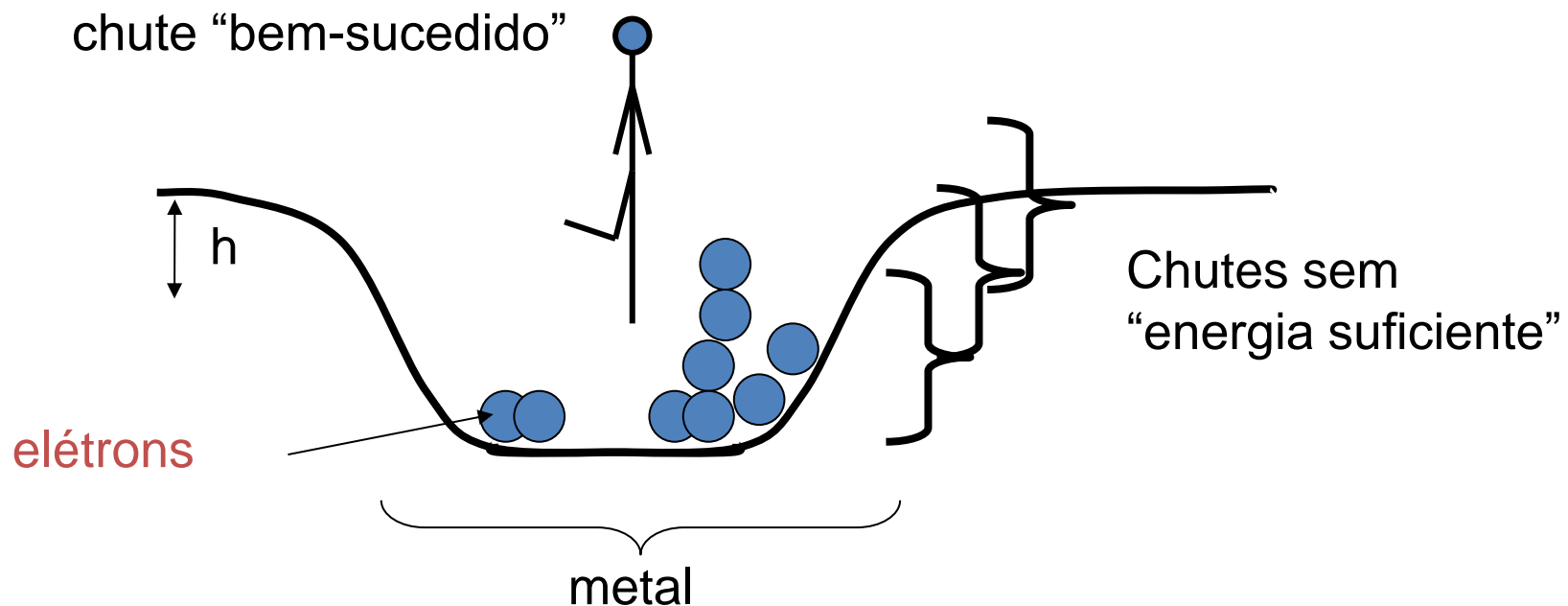
Utilizou a idéia do corpo negro de Planck!

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

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

Potencial de frenamento

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

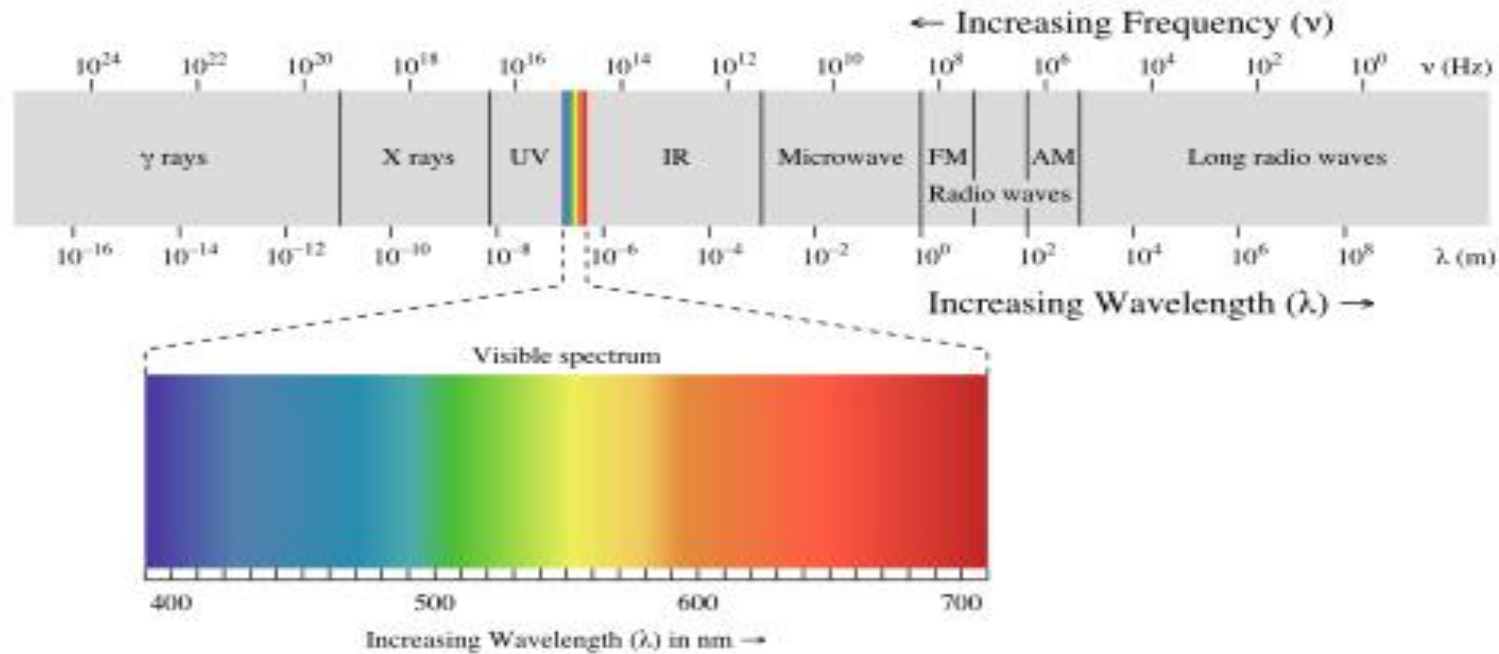
“chute”

Energia cinética  
do elétron

**Realização de Experimento !!!**



# Natureza da Luz



- Onda eletromagnética
- Dualidade onda-partícula

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

# Estrutura da Matéria

