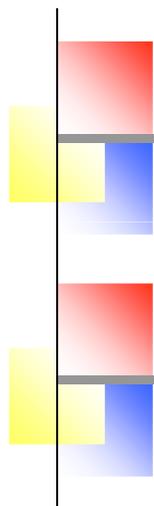




**Universidade Federal Fluminense**  
**Instituto de Física**  
**Física IV**



**Quantização**

**Daniel**

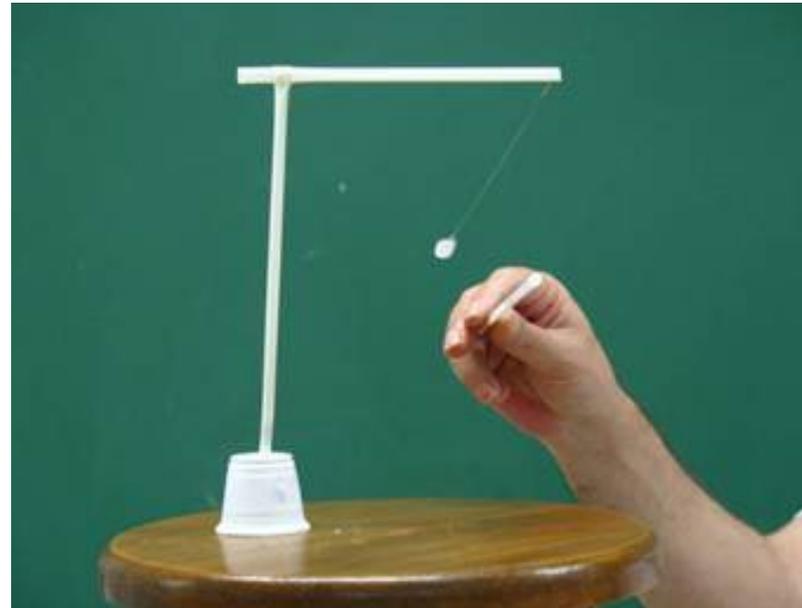
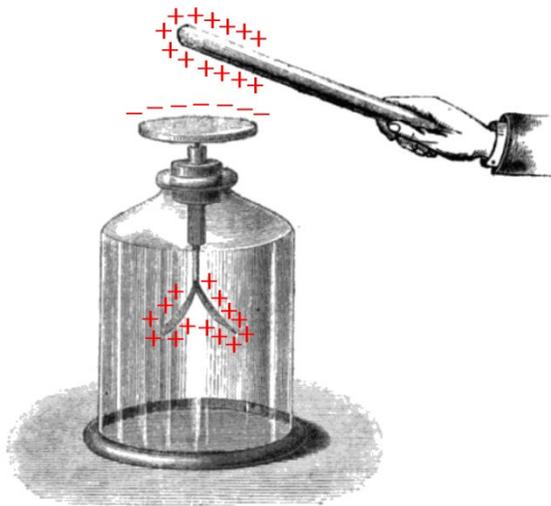
Niterói, 27 de Agosto de 2014

# O efeito fotoelétrico

Em 1886, Heinrich Hertz demonstrou que ondas eletromagnéticas poderiam ser geradas artificialmente.

Acidentalmente: um eletroscópio negativamente carregado podia ser descarregado por incidência de luz ultravioleta.

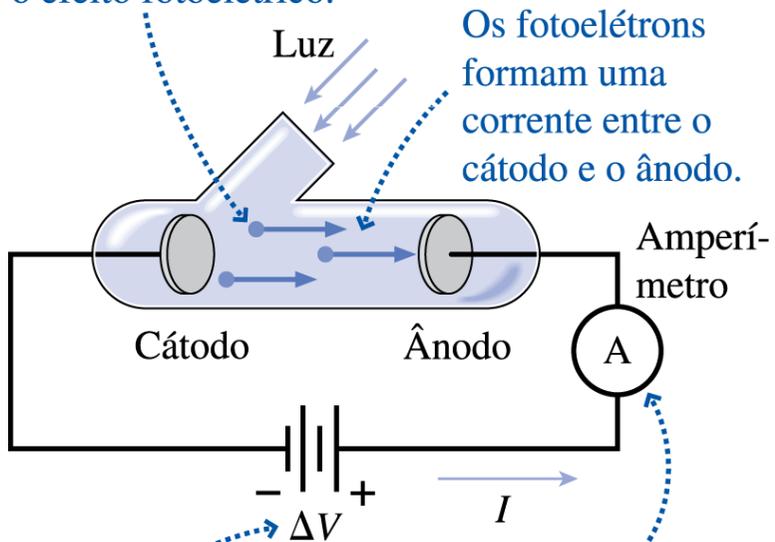
Em 1899 Thomson concluiu que as cargas elétricas que estavam sendo emitidas eram elétrons:



# Efeito Fotoelétrico

**Efeito fotoelétrico: emissão de elétrons por uma substância devido a incidência de luz em uma superfície.**

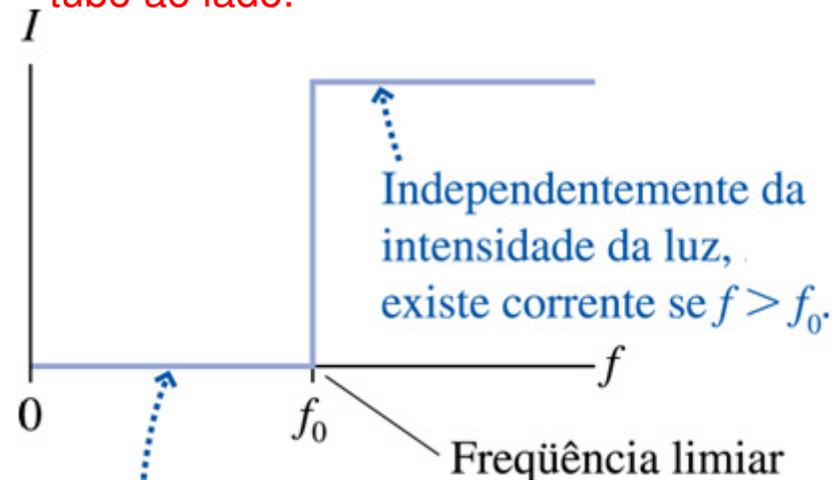
A luz ultravioleta faz o cátodo metálico emitir elétrons. Esse é o efeito fotoelétrico.



A diferença de potencial pode ser alterada ou invertida.

A corrente pode ser medida enquanto a diferença de potencial, a frequência da luz e a intensidade luminosa são variadas.

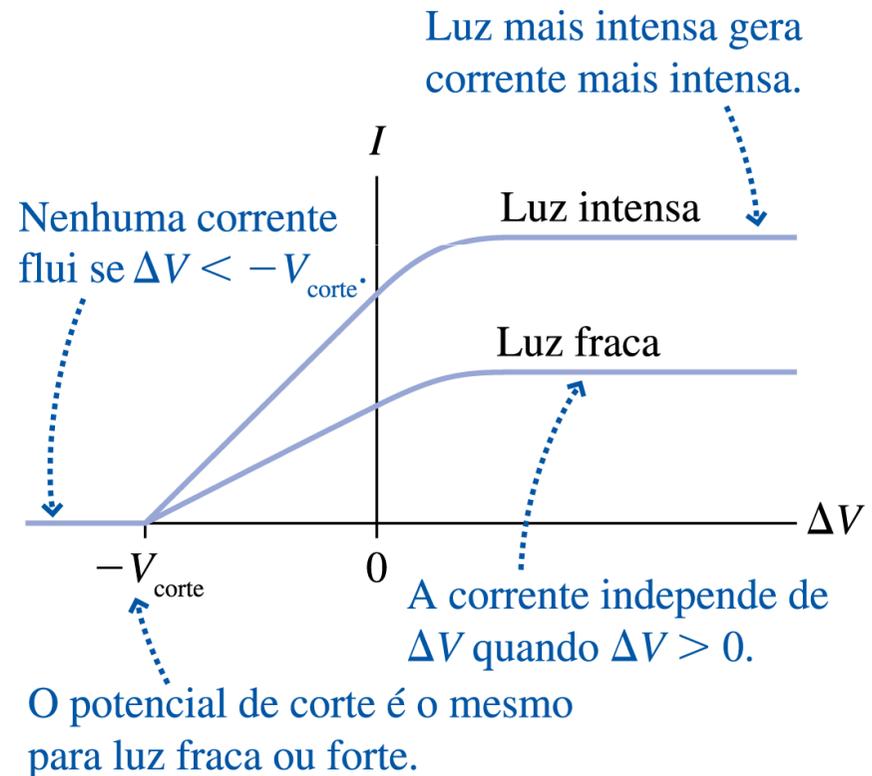
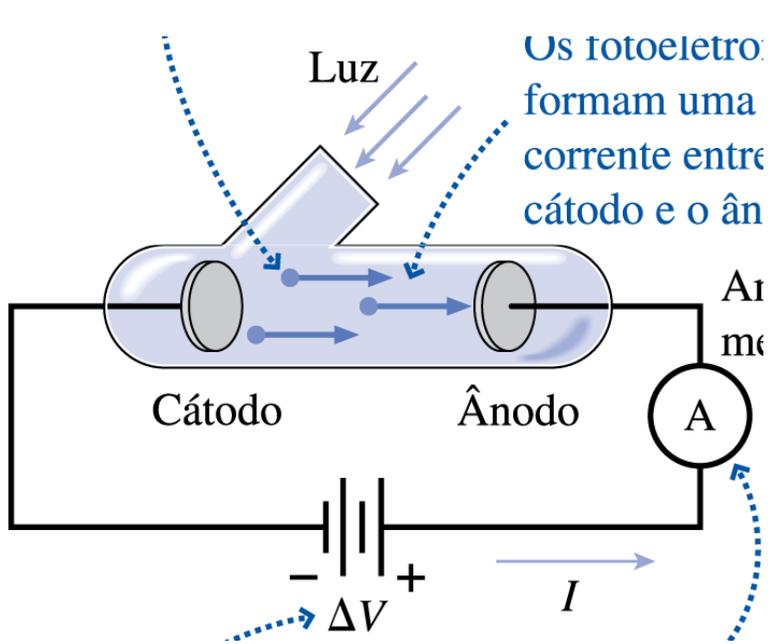
O experimento ao lado foi concebido por um estudante de Hertz (1900) Phillip Lenard. Já se tinha bombas de vácuo capaz de diminuir significativamente a pressão no tubo ao lado.



# Efeito Fotoelétrico

## Variando a diferença de potencial da fonte

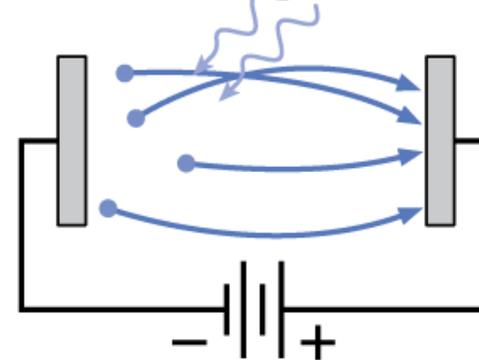
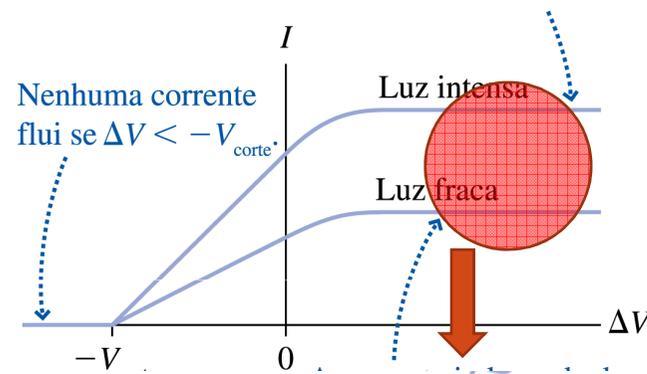
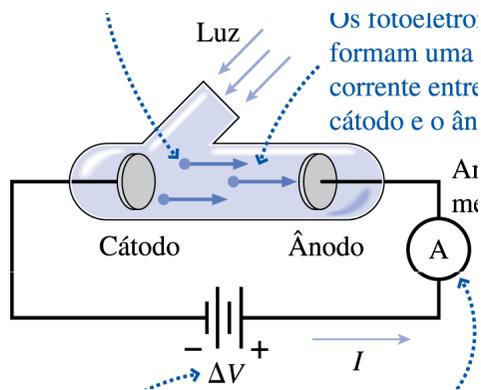
A física clássica não explica as observações deste experimento simples.



# Efeito Fotoelétrico

## Variando a diferença de potencial da fonte

Potencial positivo.

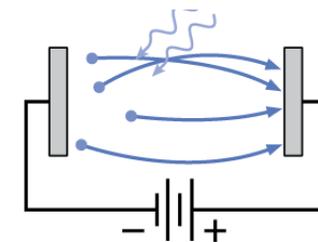
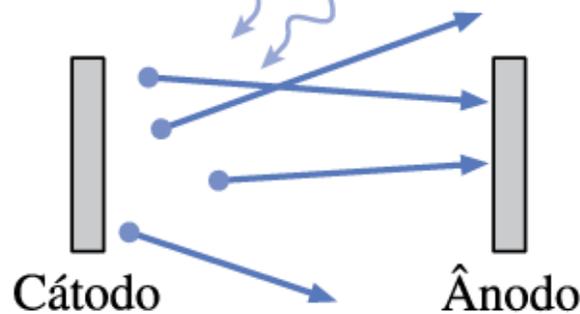
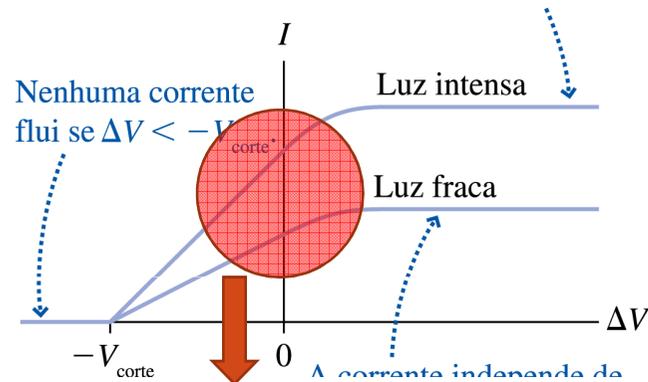
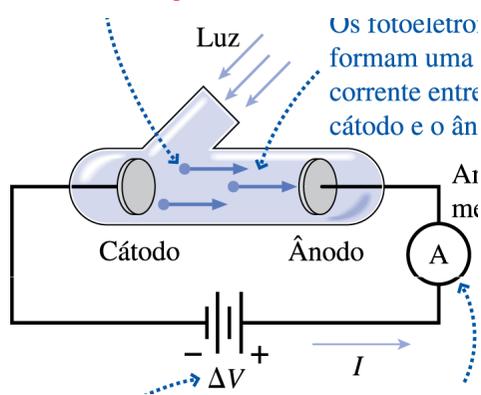


$\Delta V > 0$ : um ânodo positivo atrai todos os fotoelétrons para si.

# Efeito Fotoelétrico

## Variando a diferença de potencial da fonte

Diferença de Potencial = 0

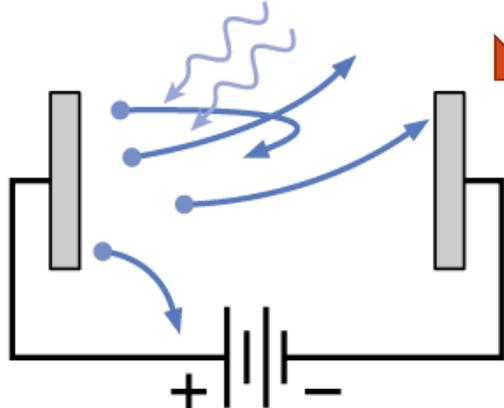
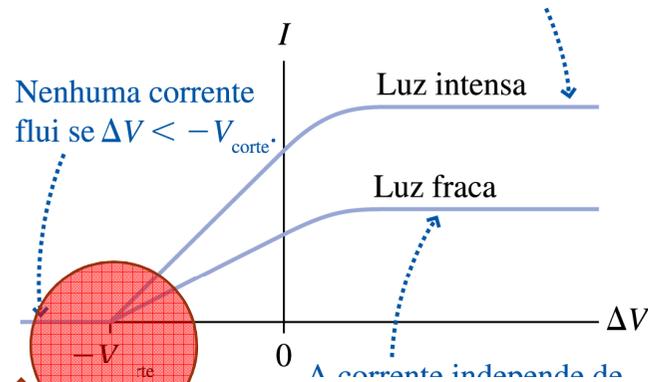
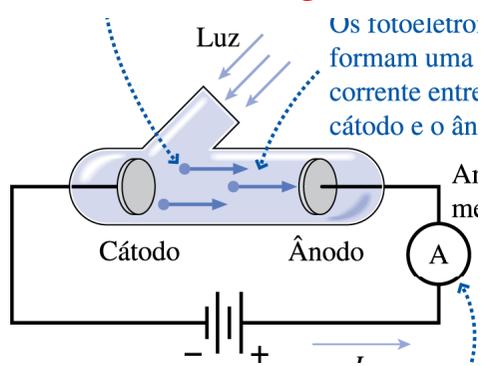


$\Delta V = 0$ : os fotoelétrons deixam o cátodo em todas as direções. Poucos deles chegam ao ânodo.

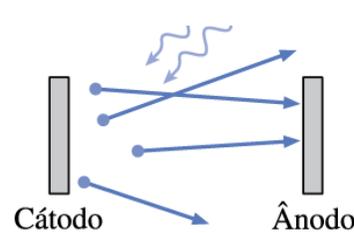
# Efeito Fotoelétrico

## Variando a diferença de potencial da fonte

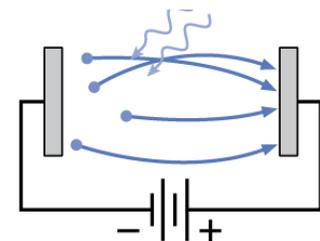
### Potencial Negativo



$\Delta V < 0$  : um ânodo negativo repele os elétrons. Apenas os mais rápidos conseguem chegar ao ânodo.



$\Delta V = 0$  : os fotoelétrons deixam o cátodo em todas as direções. Poucos deles chegam ao ânodo.

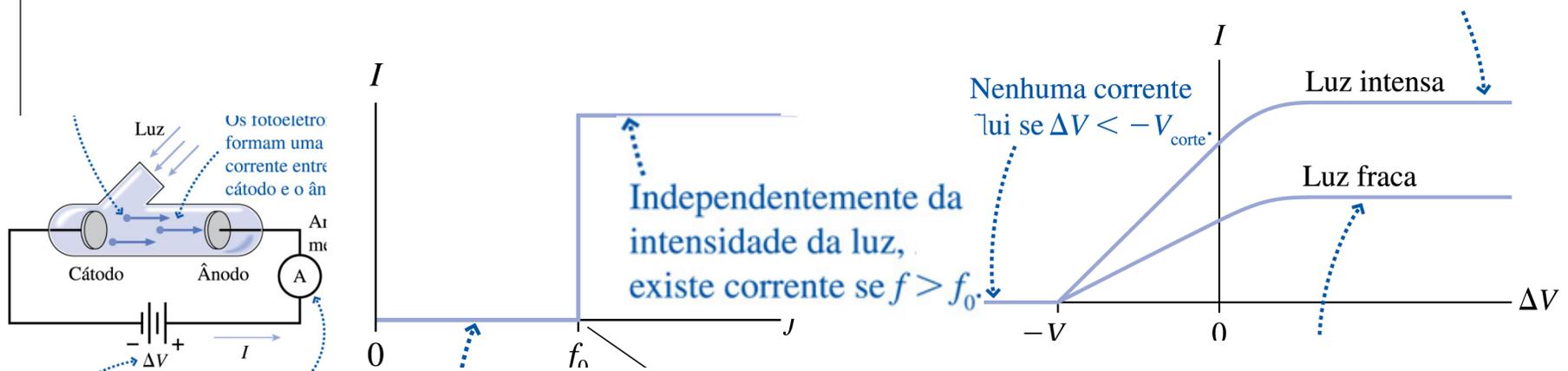


2

# Efeito Fotoelétrico

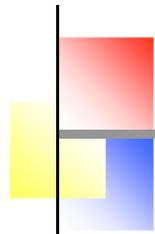
## Principais conclusões de Lenard

- 1) A corrente  $I$  é diretamente proporcional à intensidade de luz.
- 2) A corrente  $I$  surge imediatamente quando a luz incide.
- 3) Fotoelétrons são emitidos apenas se a freq. da luz for maior que  $f_0$ .
- 4) O valor de  $f_0$  depende do material que constitui o cátodo.
- 5)  $\Delta V$  positivo a corrente é constante.  $\Delta V$  negativo, a corrente descrece até 0 A no potencial de corte ( $V_{\text{corte}}$ ).
- 6) O  $V_{\text{corte}}$  independe da Intensidade da luz. A corrente depende da intensidade.



$$K_{\text{max}} = E_{\text{elétron}} - E_0 \quad - \quad K_f = K_i + e \Delta V \quad - \quad E_{\text{elétron}} \cong I \Delta t A \text{ (clássico)}$$

# Efeito Fotoelétrico



## Como explicar classicamente

- 1)
- 2) A corrente  $I$  surge imediatamente quando a luz incide.
- 3)
- 4)
- 5)
- 6) O  $V_{\text{corte}}$  independe da Intensidade da luz. A corrente depende da intensidade.

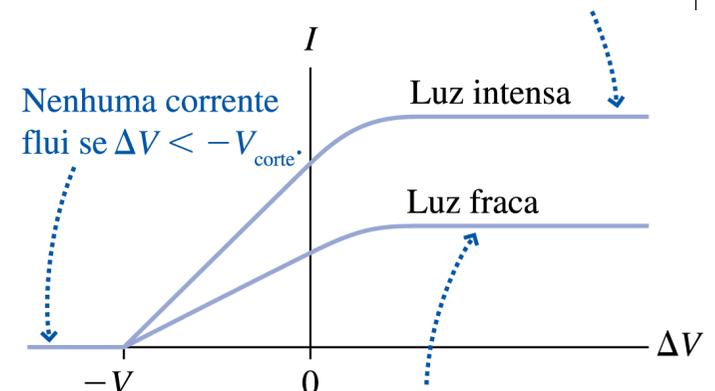
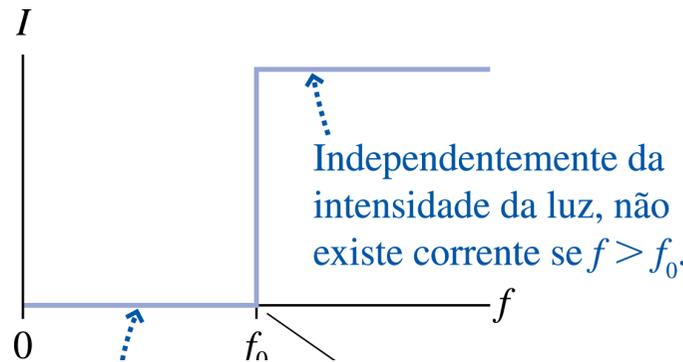
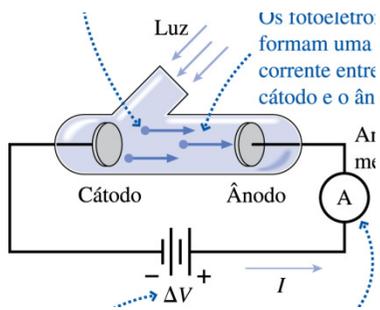
## Postulados de Einstein

- 1) A luz de frequência  $f$  consiste em quanta discretos,  $E = hf$ . Com o  $v$  do fóton igual a velocidade da luz.
- 2) Os quanta de luz são emitidos ou absorvidos integralmente. Podem emitir 1, 2 e 3 quanta, mas não 1,5 quantum.
- 3) Um quanta da luz, quando absorvido pelo metal, transfere a totalidade de sua energia a um único elétron.

# Efeito Fotoelétrico

## Implicações dos Postulados de Einstein

- 1) A luz de frequência  $f$  consiste em quanta discretos,  $E = hf$ . Com o  $v$  do fóton igual a velocidade da luz.
- 2) Uma iluminação mais intensa transfere maior quantidade de quanta e portanto, mais elétrons são ejetados: Corrente aumenta com Intens.
- 3) O potencial de corte não depende da Intensidade da luz.
- 4) O quantum de luz é absorvido instantaneamente, não há atraso.

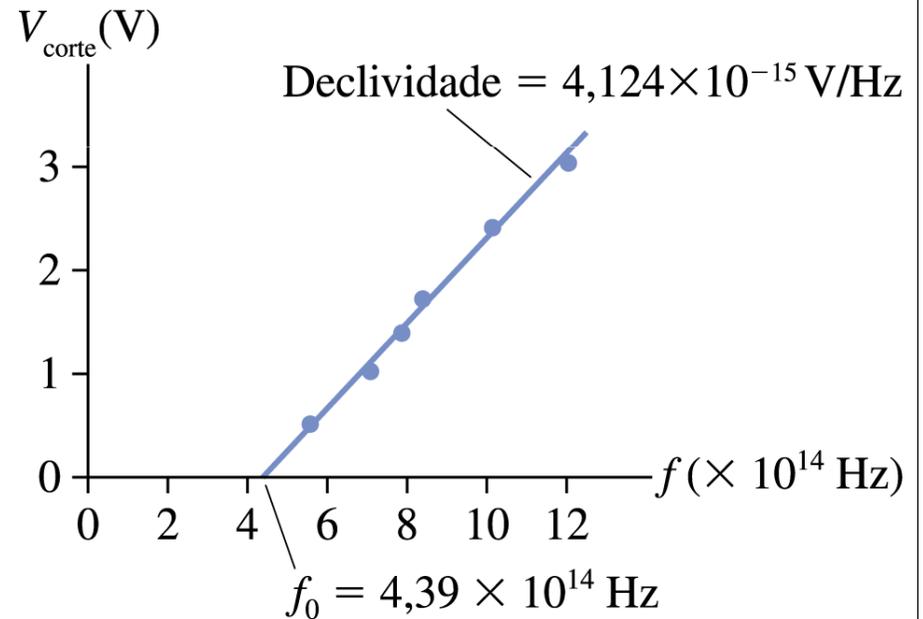
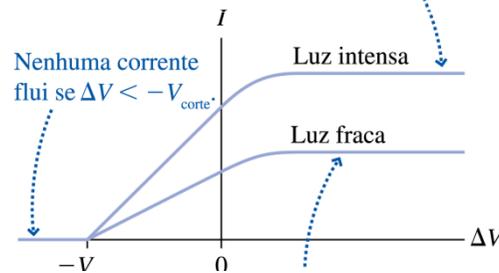
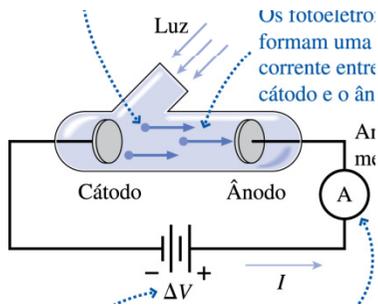


$$K_{\text{max}} = hf - E_0 \quad - \quad V_{\text{corte}} = (hf - E_0)/e \quad - \quad E_{\text{elétron}} = hf \text{ (quântico)}$$

# Efeito Fotoelétrico

## Implicações dos Postulados de Einstein

Alguns dos dados de Millikan para um cátodo de césio:



$$V_{\text{corte}} = (f - f_0)h/e$$

# Ondas de Matéria

1924, Louis-Victor de Broglie – estudante francês de doutorado.

Já que a luz apresentava comportamento de partícula, poderia haver uma simetria e partículas poderiam ter comportamento ondulatório.

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

Exercício 1: Qual o  $\lambda$  de de Broglie de uma pessoa caminhando com  $v = 5 \text{ m/s}$  e  $m = 80 \text{ kg}$ ?

R:  $1,6 \times 10^{-36} \text{ m}$

Ex. 39.5: Qual é o comprimento de onda de de Broglie de um elétron com  $1,0 \text{ eV}$ ?

R:  $1,2 \times 10^{-9} \text{ m} = 1,2 \text{ nm}$

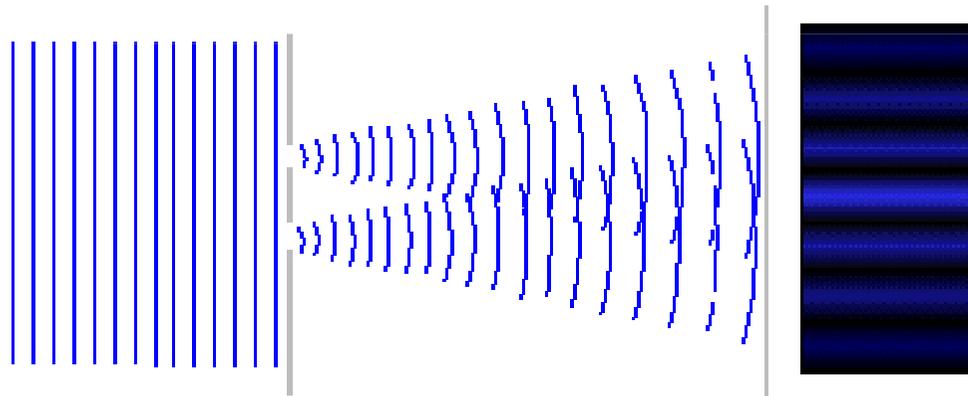


# Ondas de Matéria

1924, Louis-Victor de Broglie – estudante francês de doutorado.

Difração e interferência – fenômeno ondulatório (observado quando a ondas atravessam fendas -  $\lambda \sim d$ )

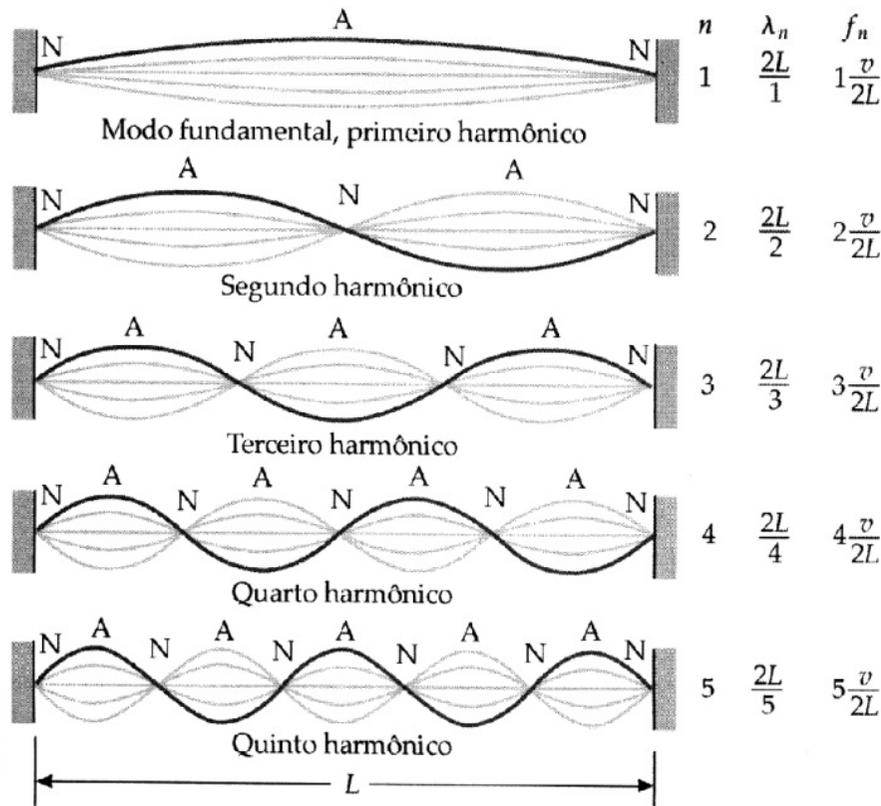
Vídeo



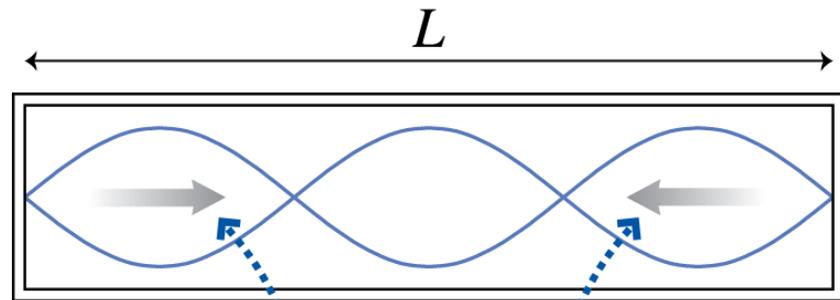
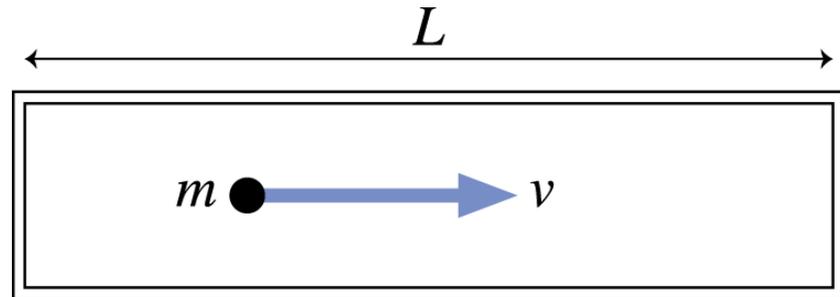
# Quantização da energia

## Partícula em uma caixa

Ressonância e onda estacionária:



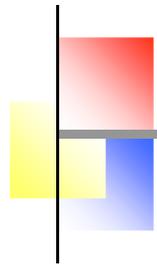
Vídeo



Ondas de matéria se deslocam em ambos os sentidos.

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

# Quantização da energia



Ex. 39.7 – Qual é a quantidade fundamental de energia para uma gotícula de óleo usado por Millikan com  $1,0 \mu\text{m}$  de diâmetro, quando confinada em uma caixa de comprimento  $10 \mu\text{m}$ ? A densidade do óleo é de  $900 \text{ kg/m}^3$

R:  $E_1 = 1,2 \times 10^{-42} \text{ J} = 7,3 \times 10^{-24} \text{ eV}$ .

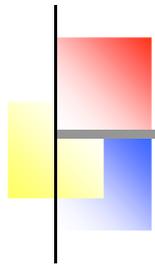
Energia muito pequena para conseguirmos perceber que sua energia é quantizada.

Ex. 39.8 – Quais são as três primeiras energias permitidas para um elétron confinado em uma caixa unidimensional de  $0,1 \text{ nm}$  de comprimento, o tamanho aproximado de um átomo?

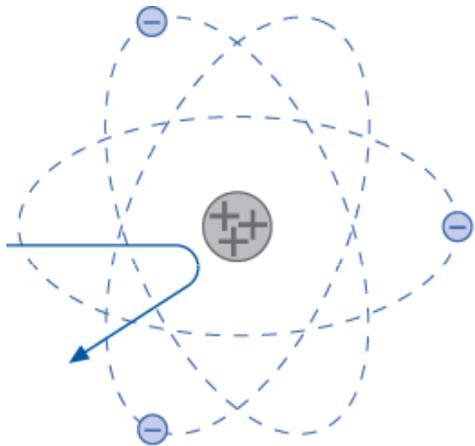
R:  $E_1 = 38 \text{ eV}$        $E_2 = 4E_1 = 152 \text{ eV}$        $E_3 = 9E_1 = 342 \text{ eV}$

O confinamento de um partícula conduz diretamente à quantização de sua energia.

# Modelo atômico de Bohr



Niels Bohr foi trabalhar com Rutherford na Inglaterra após 1911.



Modelo atômico de Rutherford



Dificuldades de explicar:

- 1) Como este átomo poderia ser estável (partículas aceleradas irradiam)
- 2) Espectro de emissão discreto

Espectro de emissão do hidrogênio.



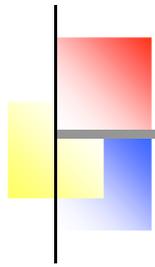
656,5 nm

486,3 nm

434,2 nm

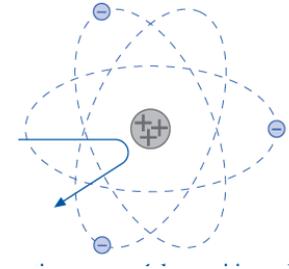
410,3 nm

# Modelo atômico de Bohr

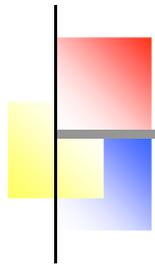


Modelo atômico de Bohr:

- 1) Um átomo consiste de elétrons negativos em órbita em torno de um núcleo positivo e muito pequeno – Rutherford.

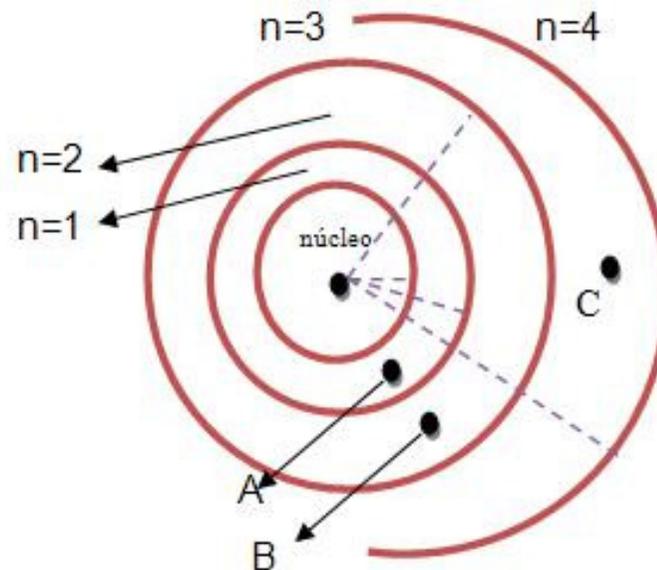
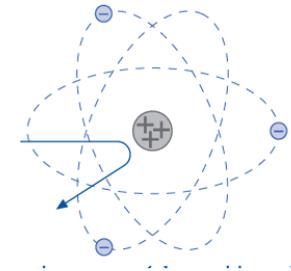


# Modelo atômico de Bohr

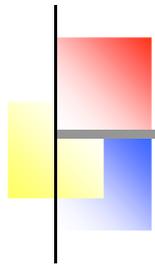


## Modelo atômico de Bohr:

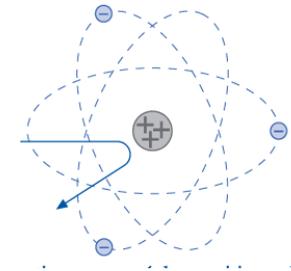
- 1) Um átomo consiste de elétrons negativos em órbita em torno de um núcleo positivo e muito pequeno – Rutherford.
- 2) Os átomos existem apenas em certos estados estacionários. Cada estado estacionário corresponde a um conjunto específico de órbitas eletrônicas ao redor do núcleo.  $n = 1, 2, 3, 4 \dots$  (número quântico).



# Modelo atômico de Bohr

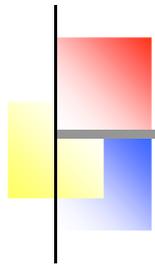


## Modelo atômico de Bohr:

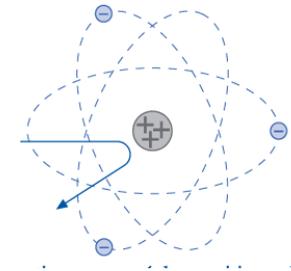


- 1) Um átomo consiste de elétrons negativos em órbita em torno de um núcleo positivo e muito pequeno – Rutherford.
- 2) Os átomos existem apenas em certos estados estacionários. Cada estado estacionário corresponde a um conjunto específico de órbitas eletrônicas ao redor do número.  $n = 1, 2, 3, 4 \dots$  (número quântico).
- 3) Cada estado estacionário possui uma energia discreta e bem definida  $E_m$ , ou seja, as energias são quantizadas.  $E_1, E_2, E_3, \dots$

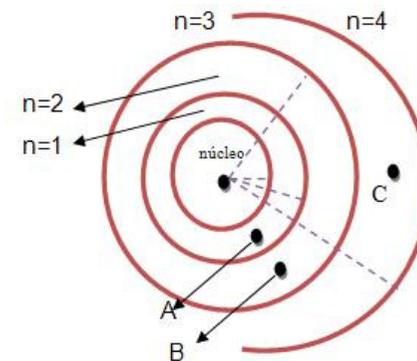
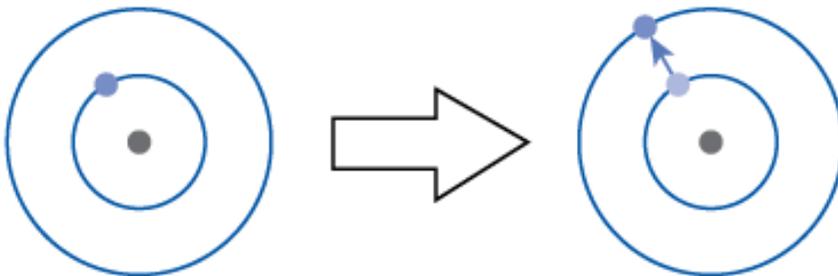
# Modelo atômico de Bohr



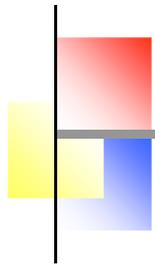
## Modelo atômico de Bohr:



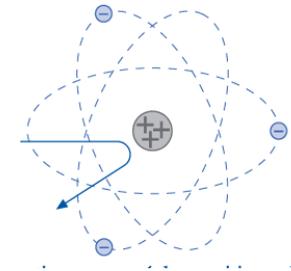
- 1) Um átomo consiste de elétrons negativos em órbita em torno de um núcleo positivo e muito pequeno – Rutherford.
- 2) Os átomos existem apenas em certos estados estacionários. Cada estado estacionário corresponde a um conjunto específico de órbitas eletrônicas ao redor do número.  $n = 1, 2, 3, 4 \dots$  (número quântico).
- 3) Cada estado estacionário possui uma energia discreta e bem definida  $E_m$ , ou seja, as energias são quantizadas.  $E_1, E_2, E_3, \dots$
- 4) O estado  $E_1$ , é denominado **ESTADO FUNDAMENTAL** os estados  $E_2, E_3, E_4, \dots$  são os estados **EXCITADOS**.



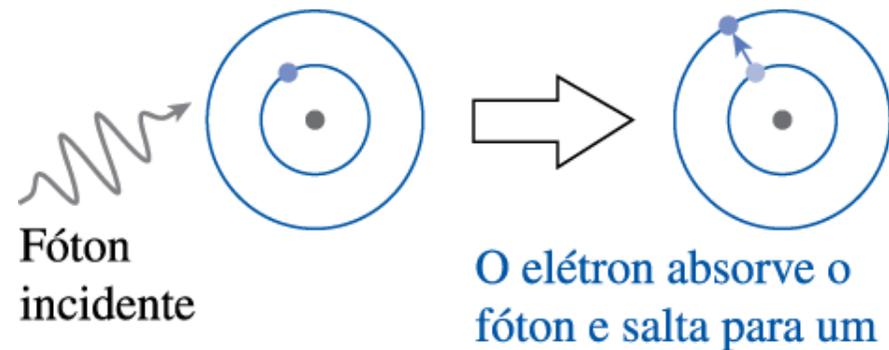
# Modelo atômico de Bohr



## Modelo atômico de Bohr:



- 1) Um átomo consiste de elétrons negativos em órbita em torno de um núcleo positivo e muito pequeno – Rutherford.
- 2) Os átomos existem apenas em certos estados estacionários. Cada estado estacionário corresponde a um conjunto específico de órbitas eletrônicas ao redor do número.  $n = 1, 2, 3, 4 \dots$  (número quântico).
- 3) Cada estado estacionário possui uma energia discreta e bem definida  $E_m$ , ou seja, as energias são quantizadas.  $E_1, E_2, E_3, \dots$
- 4) O estado  $E_1$ , é denominado ESTADO FUNDAMENTAL os estados  $E_2, E_3, E_4, \dots$  são os estados EXCITADOS.
- 5) Um átomo pode “saltar” de um estado estacionário para outro. Transição: sai do estado inicial para um estado final.

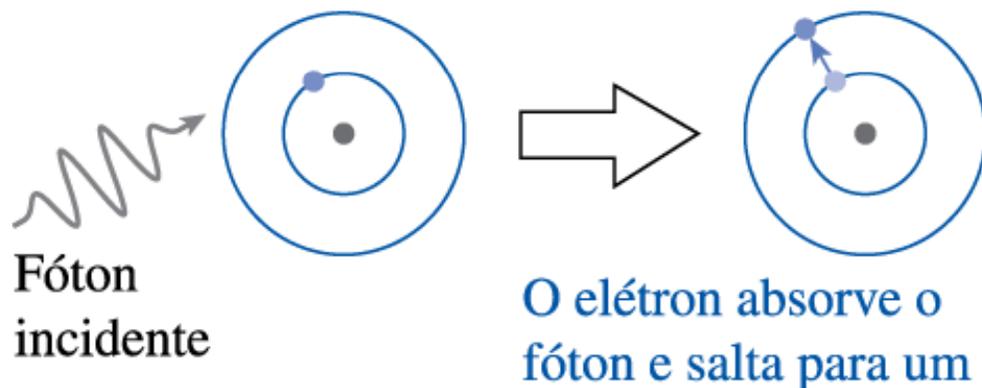


$$f_{\text{fóton}} = \frac{\Delta E_{\text{átomo}}}{h}$$

# Modelo atômico de Bohr

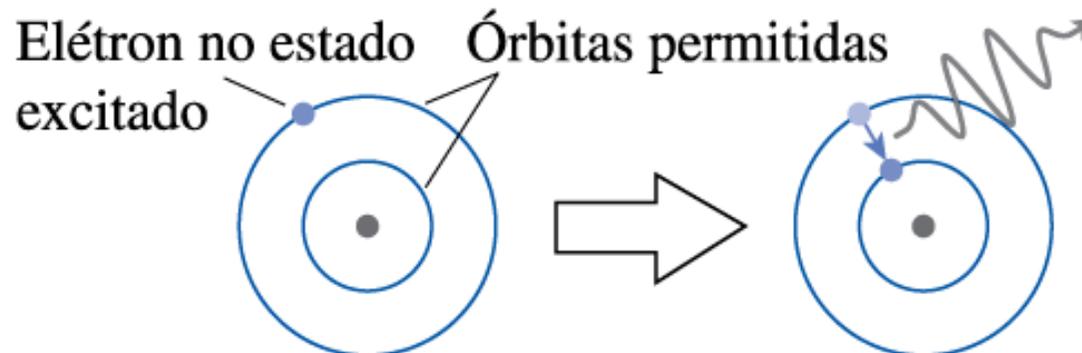
## Modelo atômico de Bohr:

- 5) Um átomo pode “saltar” de um estado estacionário para outro. Transição: saí do estado inicial para um estado final.
- 6) Absorção: saí do estado de menor energia para maior.  
Emissão: saí do estado de maior energia para menor.



$$f_{\text{fóton}} = \frac{\Delta E_{\text{átomo}}}{h}$$

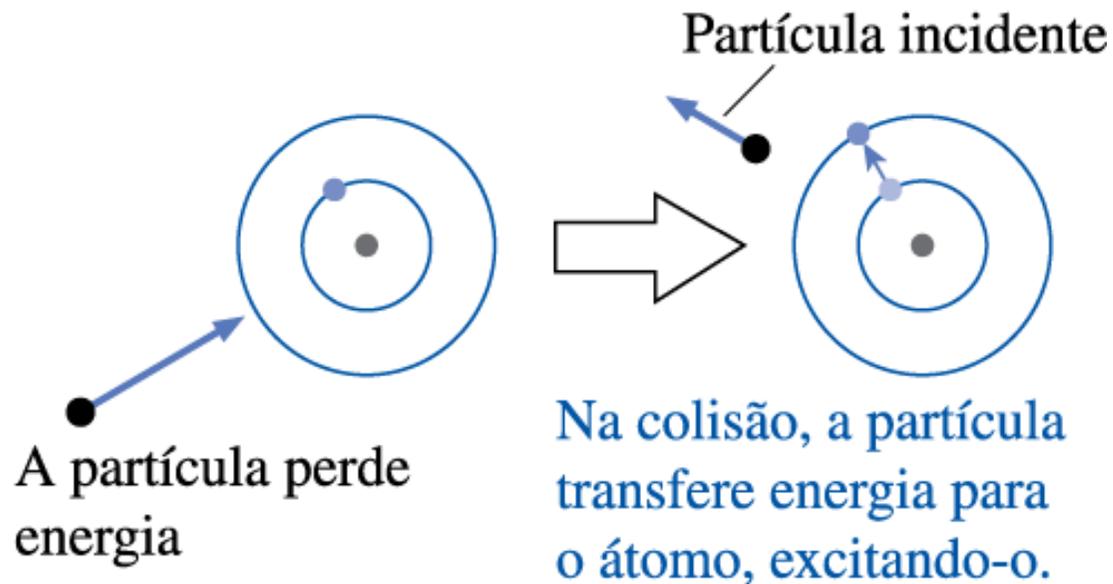
$$\Delta E_{\text{átomo}} = E_{\text{final}} - E_{\text{inicial}}$$



# Modelo atômico de Bohr

## Modelo atômico de Bohr:

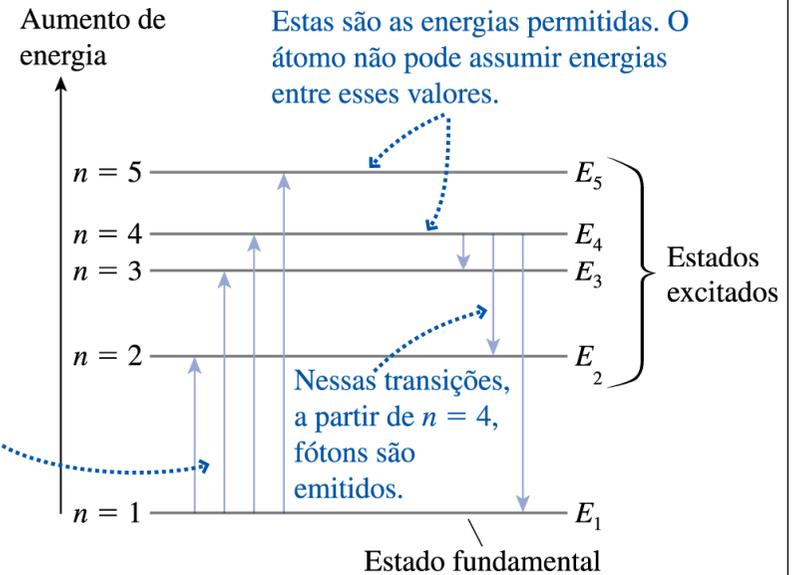
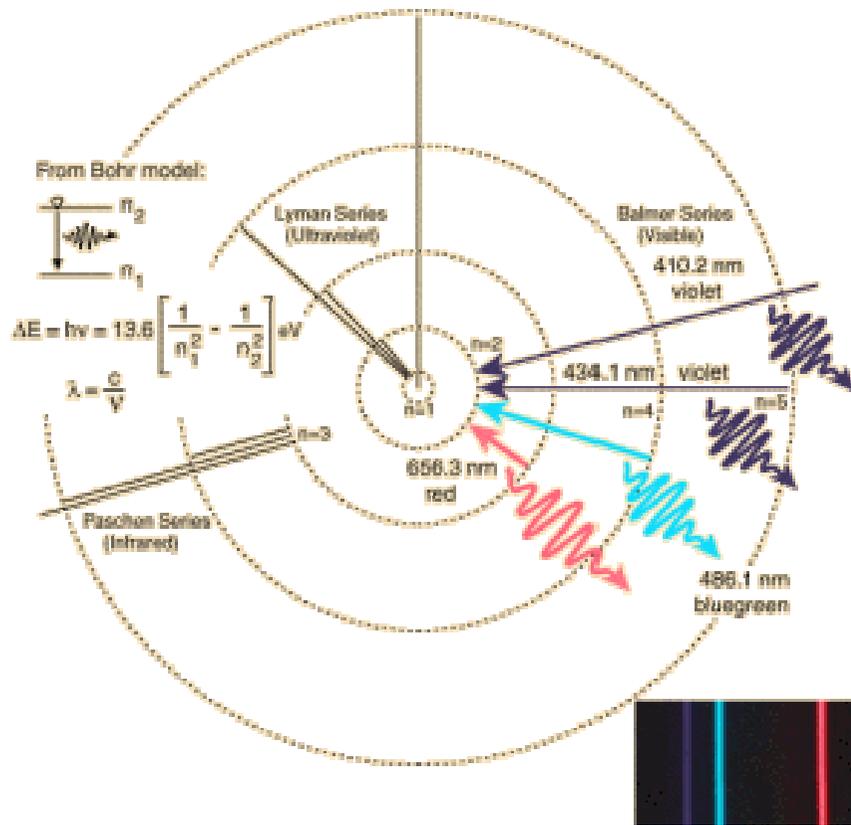
7) Excitação por colisão: colisão, por exemplo, de um elétron com o átomo.



$$\Delta E_{\text{átomo}} = E_{\text{final}} - E_{\text{inicial}}$$

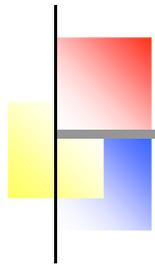
# Modelo atômico de Bohr

Espectro do átomo e diagrama de níveis de energia.

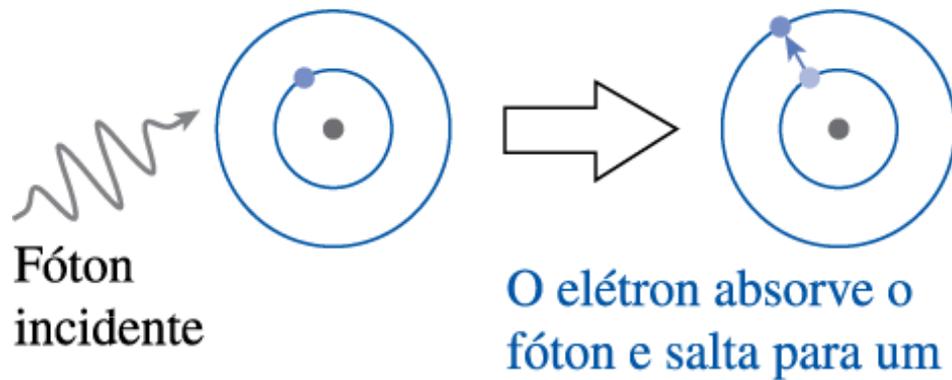


$$\Delta E_{\text{átomo}} = E_{\text{final}} - E_{\text{inicial}}$$

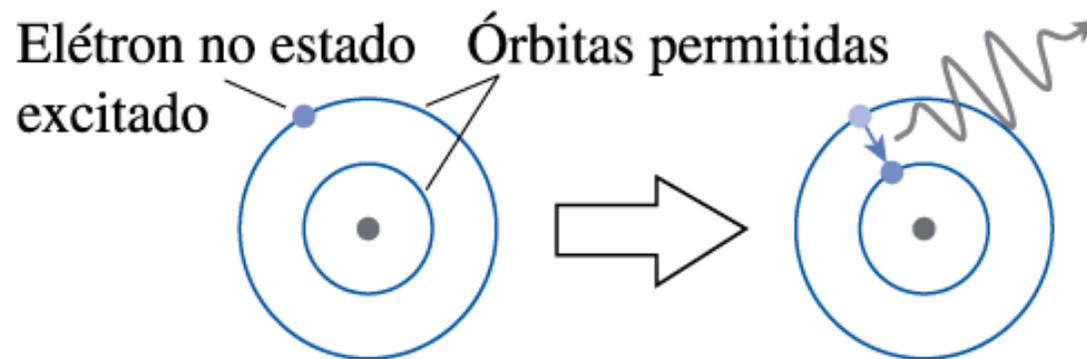
# Aplicação



Laser - Light amplification by Stimulated Emission of Radiation .



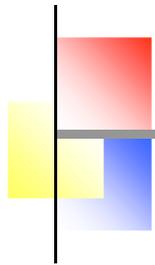
**excitação**



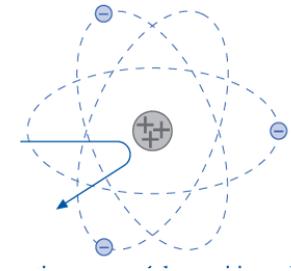
**Emissão estimulada**

**excitação**

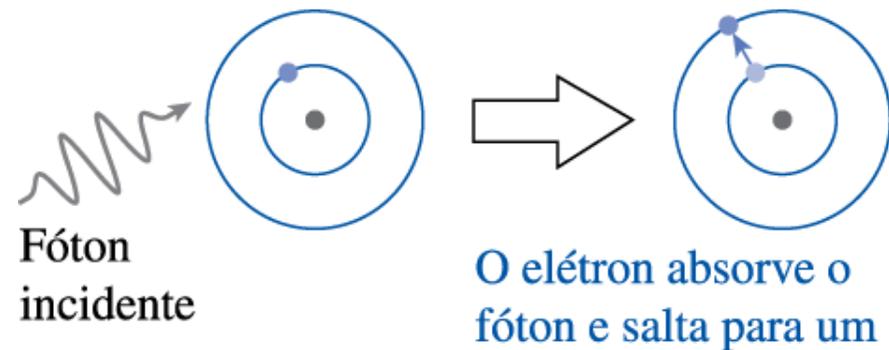
# Modelo atômico de Bohr



## Modelo atômico de Bohr:

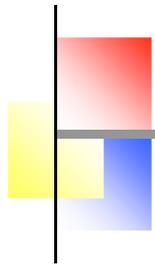


- 1) Um átomo consiste de elétrons negativos em órbita em torno de um núcleo positivo e muito pequeno – Rutherford.
- 2) Os átomos existem apenas em certos estados estacionários. Cada estado estacionário corresponde a um conjunto específico de órbitas eletrônicas ao redor do número.  $n = 1, 2, 3, 4 \dots$  (número quântico).
- 3) Cada estado estacionário possui uma energia discreta e bem definida  $E_m$ , ou seja, as energias são quantizadas.  $E_1, E_2, E_3, \dots$
- 4) O estado  $E_1$ , é denominado **ESTADO FUNDAMENTAL** os estados  $E_2, E_3, E_4, \dots$  são os estados **EXCITADOS**.
- 5) Um átomo pode “saltar” de um estado estacionário para outro. Transição: sai do estado inicial para um estado final.



$$f_{\text{fóton}} = \frac{\Delta E_{\text{átomo}}}{h}$$

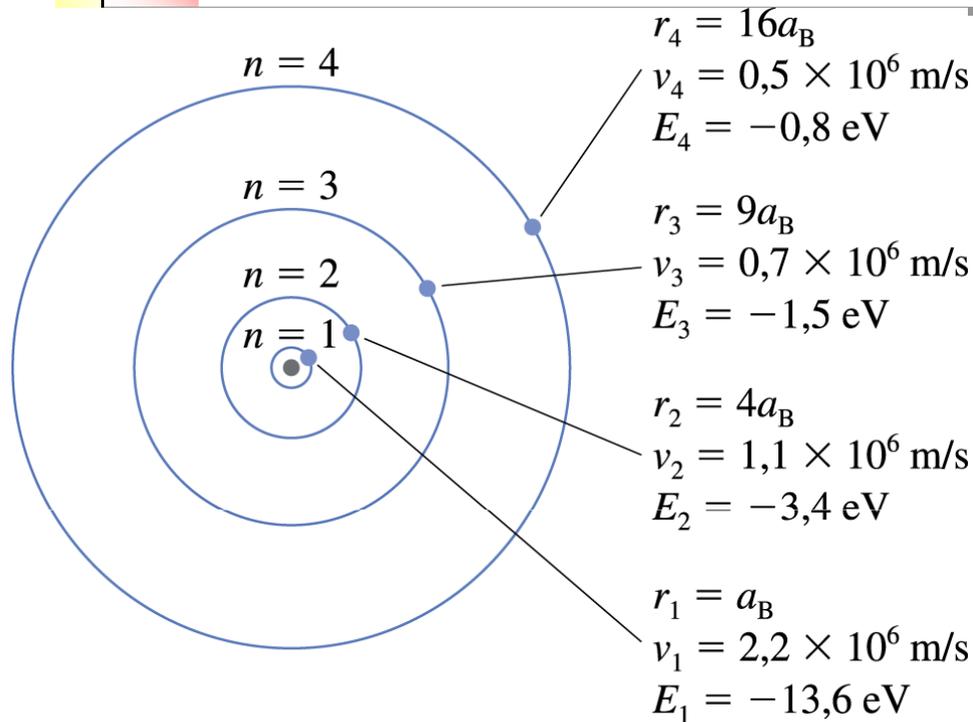
# Modelo atômico de Bohr



## Implicações do Modelo atômico de Bohr:

- 1) A matéria é estável: Não existe estado de energia mais baixo do que o fundamental
- 2) Os átomos emitem e absorvem um espectro discreto.
- 3) Os espectros de emissão podem ser produzidos por colisões
- 4) Os comprimentos de onda de absorção forma um subconjunto dos comprimentos de onda do espectro de absorção.
- 5) Cada elemento da tabela periódica possui um espectro próprio.

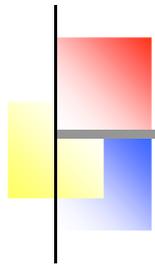
# Níveis atômicos do Hidrogênio



**TABELA 39.2** Raios, velocidades e energias dos primeiros cinco estados do átomo de hidrogênio de Bohr

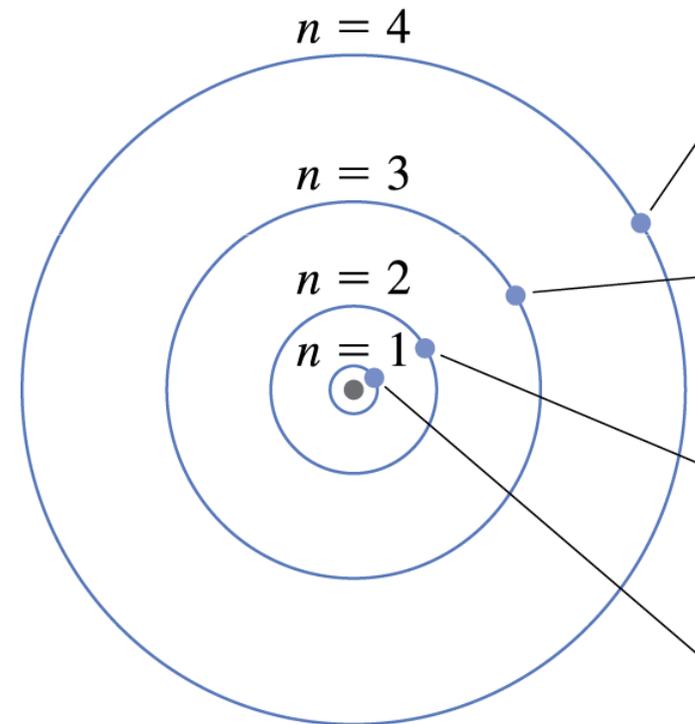
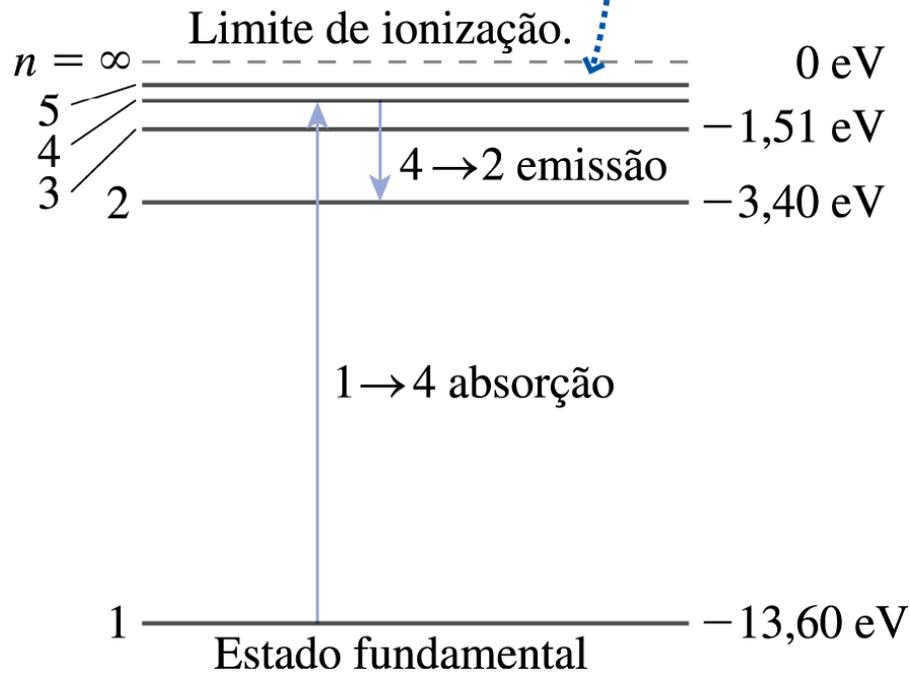
$n$	$r_n(\text{nm})$	$v_n(\text{m/s})$	$E_n(\text{eV})$
1	0,053	$2,19 \times 10^6$	-13,60
2	0,212	$1,09 \times 10^6$	-3,40
3	0,476	$0,73 \times 10^6$	-1,51
4	0,846	$0,55 \times 10^6$	-0,85
5	1,322	$0,44 \times 10^6$	-0,54

# Níveis atômicos do Hidrogênio

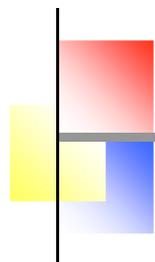


Energia de ionização = -13,6 eV

Muitos níveis de energia amontoados.

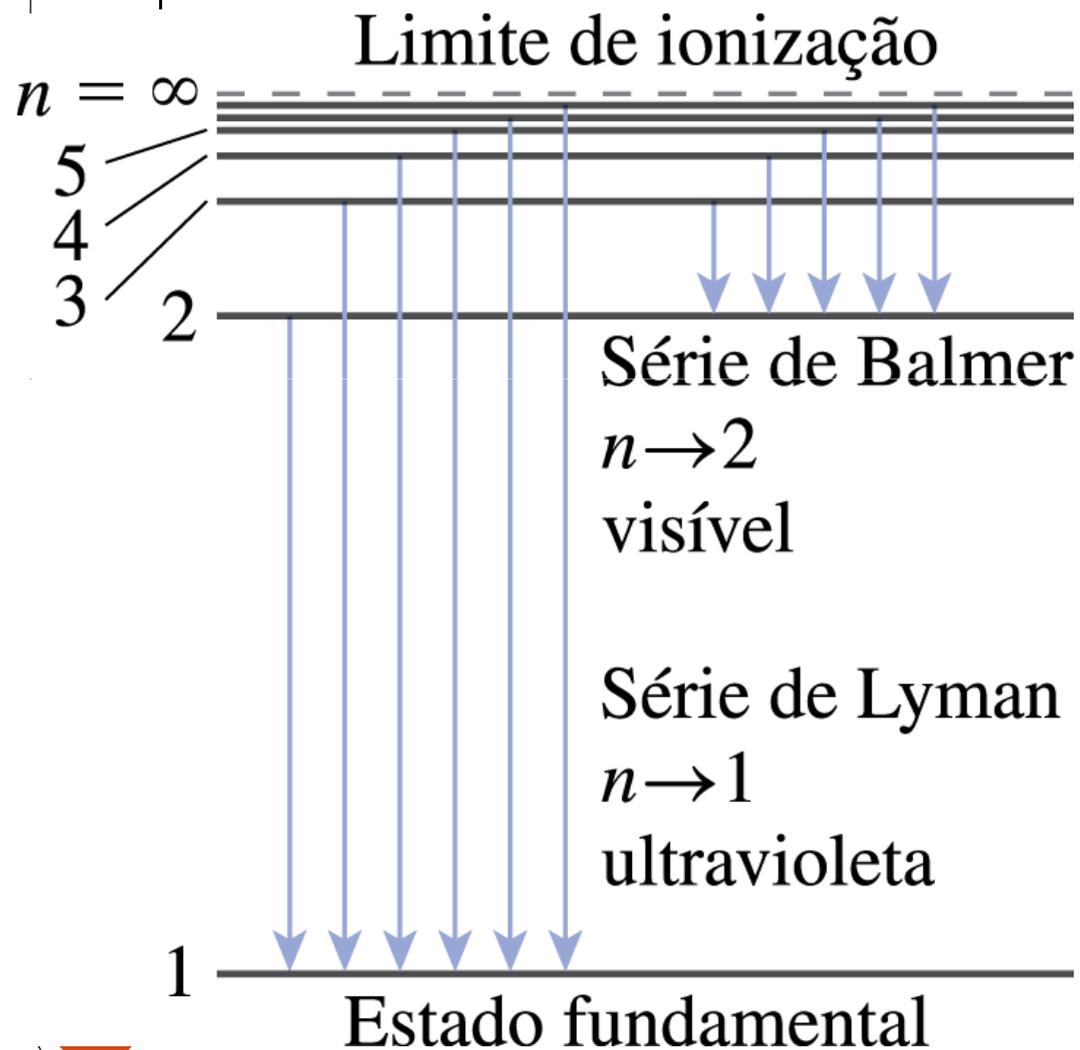


# Espectro do Hidrogênio



Série de Balmer e de Lyman

As linhas espectrais se estendem até o limite da série, de 364,7 nm.



Espectro de emissão do hidrogênio.

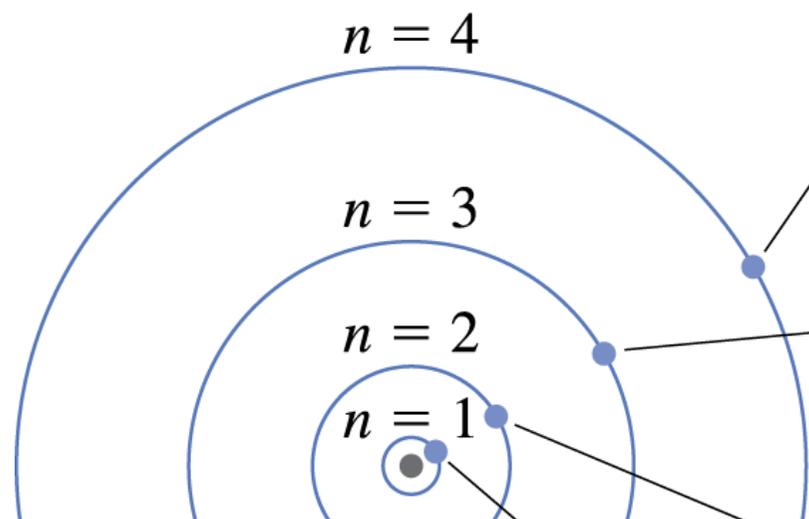


656,5 nm

486,3 nm

434,2 nm

410,3 nm



# Íons hidrogenóides

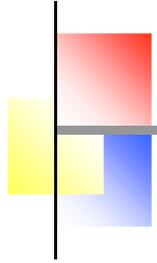
Observar que os átomos estão ionizados de forma a termos um único elétron.

**TABELA 39.3** Comparação entre íons hidrogenóides com  $Z = 1, 2, \text{ e } 3$

Íon	Diâmetro $2r_1$	Energia de ionização $ E_1 $	Comprimento de onda para $3 \rightarrow 2$
H ( $Z = 1$ )	0,106 nm	13,6 eV	656 nm
He <sup>+</sup> ( $Z = 2$ )	0,053 nm	54,4 eV	164 nm
Li <sup>++</sup> ( $Z = 3$ )	0,035 nm	125,1 eV	73 nm

# Tipos de Magnetismo

---



## Diamagnetismo

M x Campo Magnético