INSTITUTO DE FÍSICA

Universidade Federal Fluminense

Física IV

Cap. 39: Quantização (aula 7)

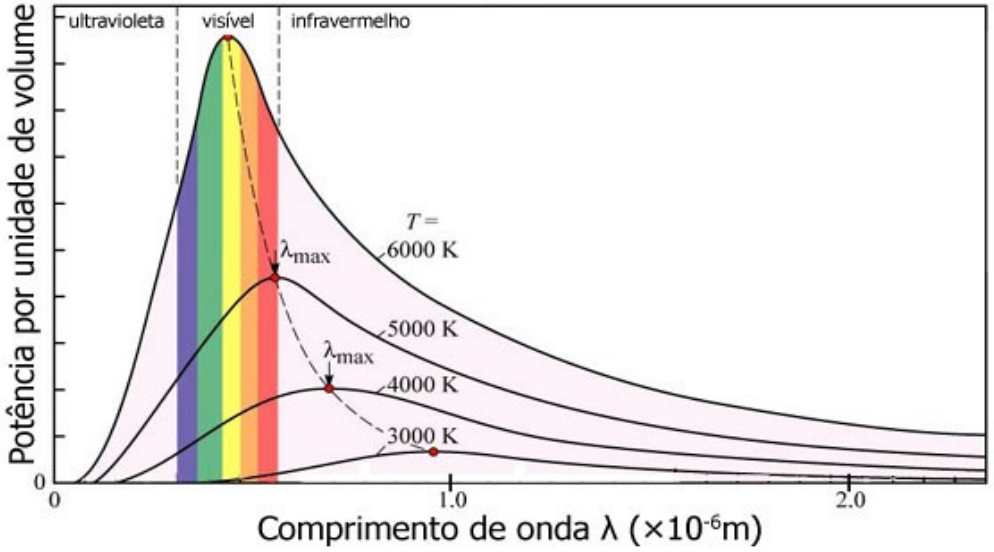
Prof. Carlos Eduardo (Cadu)

Niterói, Maio/2016

Radiação de corpo negro

Um objeto aquecido emite radiação térmica com um perfil que depende de sua temperatura:

Objetos a uma temperatura maior emitem com maior intensidade e apresentam um pico em comprimentos de onda mais curtos.



'Leis' empíricas

Lei de Stefan-Boltzmann

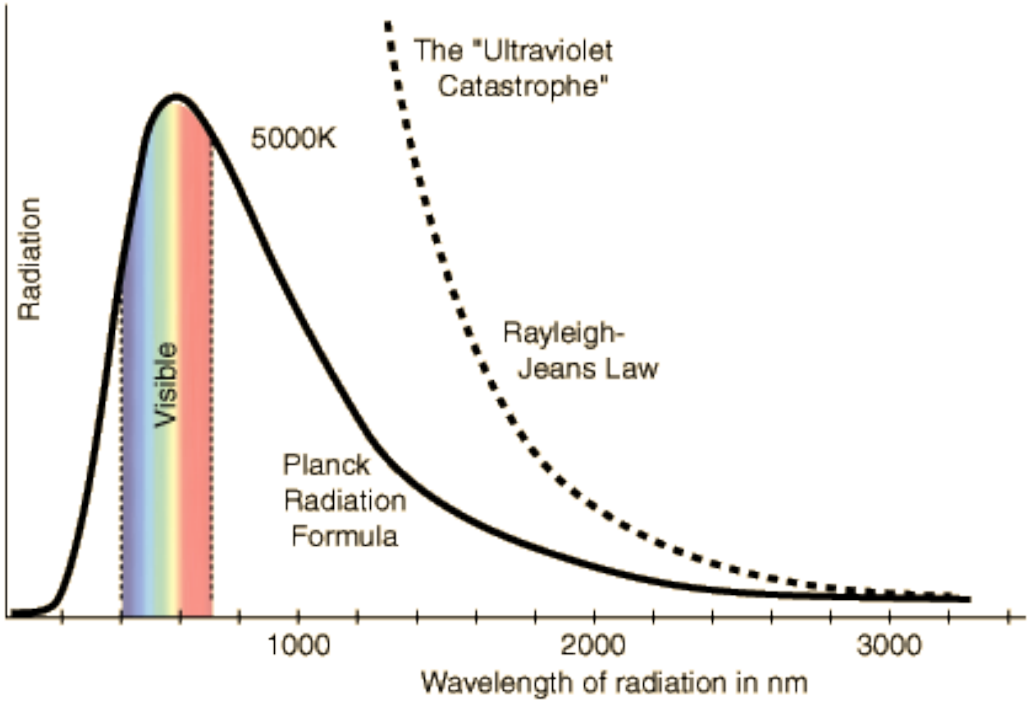
$I = \sigma . T^4$; $\sigma = 5.67 \times 10^{-8}\ Js^{-1}m^{-2}K^{-4}$

Lei de deslocamento de Wien

$\lambda_{max} = (2.90 \times 10^{-3}\ m.K) / T$

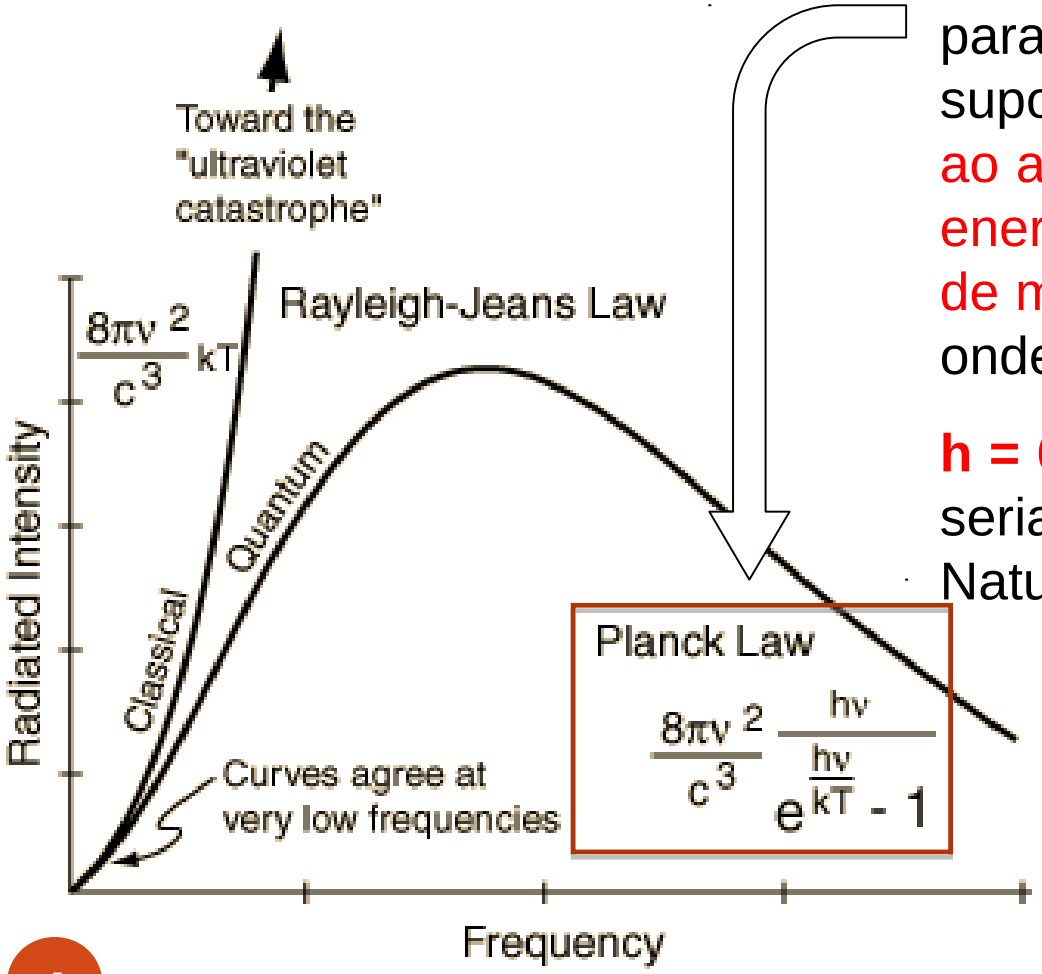
Radiação de corpo negro

“Catástrofe” do ultravioleta



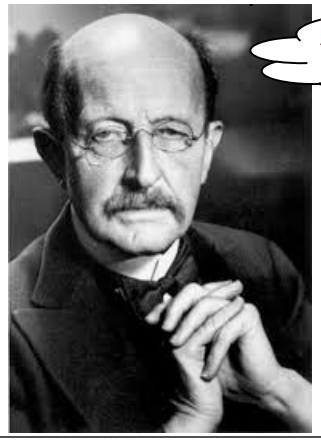
Problema: usando as leis conhecidas no fim do séc XIX para o eletromagnetismo e a termodinâmica, cientistas como Lord Rayleigh e James Jeans calcularam que a intensidade da emissão deveria **aumentar sem limite** quanto menor fosse λ ! Algo definitivamente não observado!!

Radiação de corpo negro



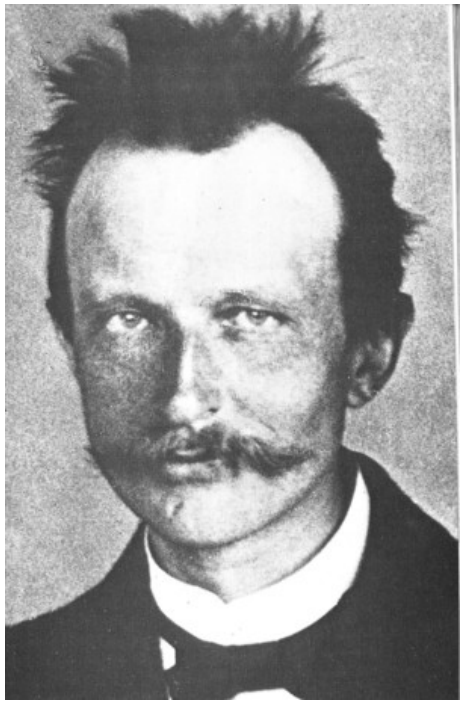
Solução (?): Em 1900, **Planck** obteve uma expressão matemática para a curva correta. partindo de uma suposição esquisita: assumir que, ao absorver ou emitir luz de freq. ν, a energia de um corpo só pode variar de múltiplos inteiros do valor $E = h\nu$, onde

$h = 6{,}63 \times 10^{-34}$ J.s = $4{,}14 \times 10^{-15}$ eV.s seria uma nova constante da Natureza

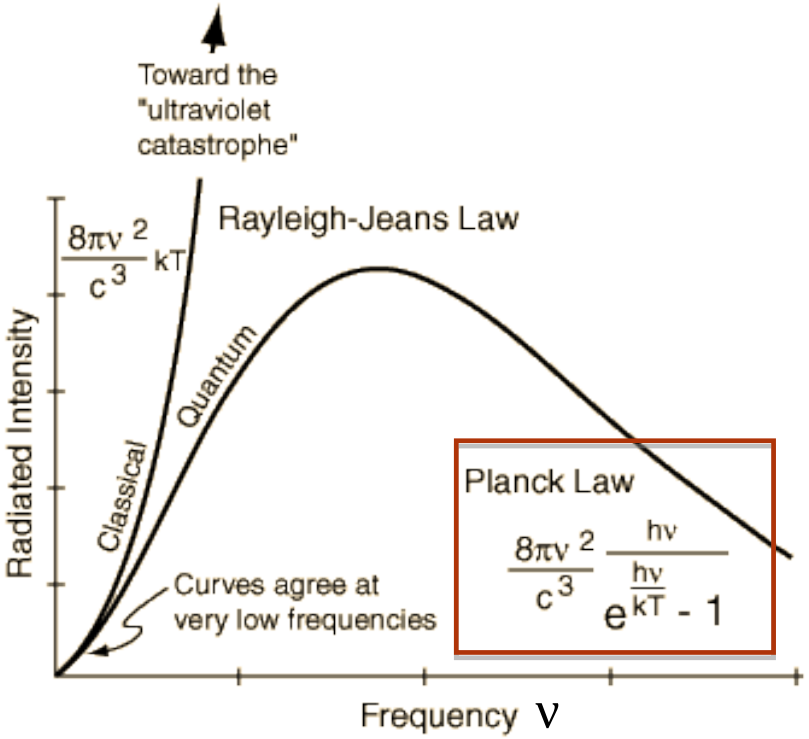


Mas de onde vem essa *quantização??*

Quantização



Max Planck em 1901
(saindo da cama)

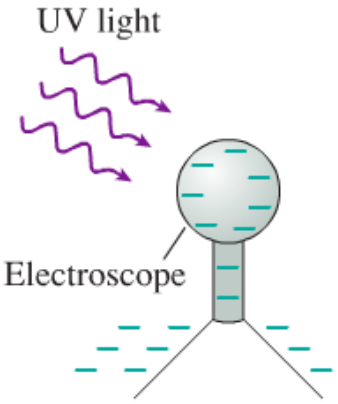


Constante de Planck

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

O efeito fotoelétrico

Descoberta (acidental, por H. Hertz, 1887): um eletroscópio carregado negativamente pode ser descarregado pela incidência de luz ultravioleta.

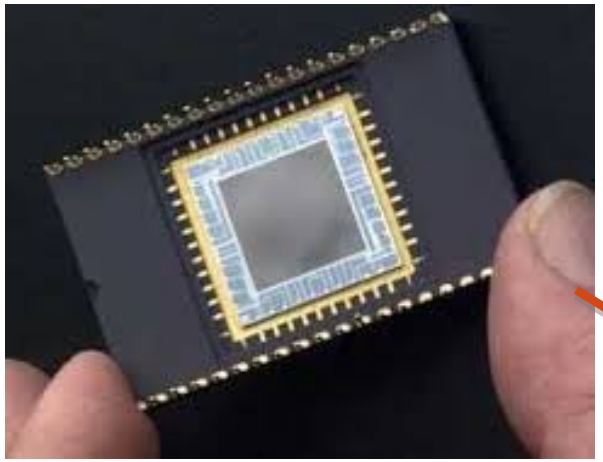


Em 1899 J.J.Thomson concluiu que as cargas elétricas que estavam sendo emitidas eram **elétrons**

Efeito fotoelétrico: emissão de elétrons por uma substância devido à incidência de luz na sua superfície.

Descendentes tecnológicos

sensor CCD

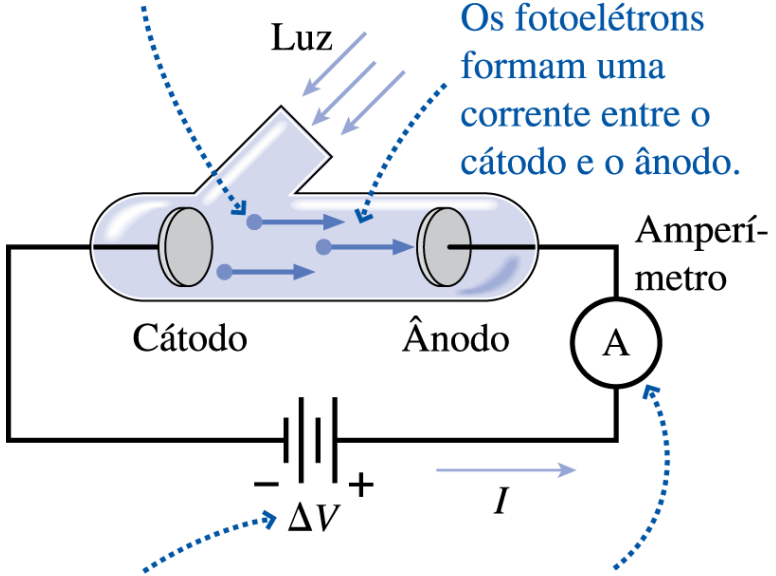


painéis solares fotovoltaicos

Experimento com tubo de raios catódicos

(P. Lenard, 1900)

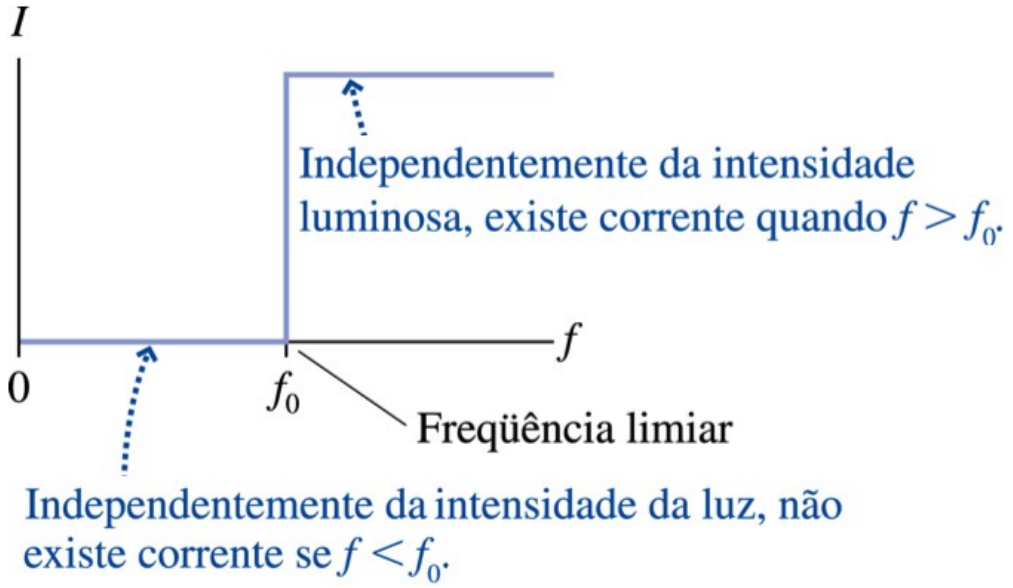
A luz ultravioleta faz o cátodo metálico emitir elétrons. Esse é o efeito fotoelétrico.



A diferença de potencial pode ser alterada ou invertida.

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

Observação crucial 1: só há corrente para luz com frequência **acima de uma frequência limiar f_0**



Atenção – a fig. acima (fig. 39.2) está errada na edição brasileira do livro-texto (aqui está corrigida) !

Experimento com tubo de raios catódicos

(P. Lenard, 1900)

P: Essa observação é incompatível com a descrição clássica da luz (onda eletromagnética)!!! Por que?

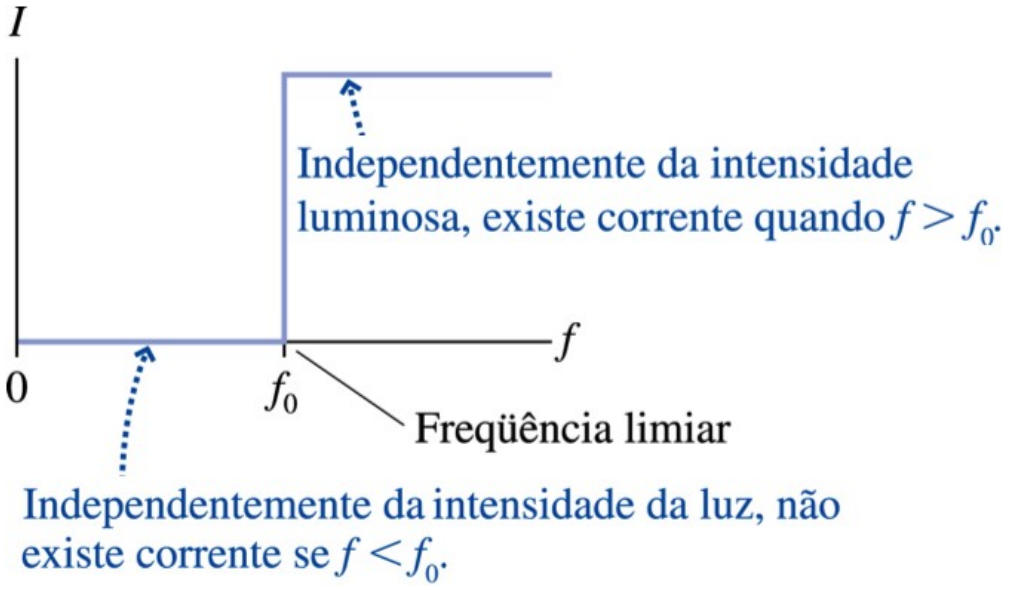
A) Uma onda EM clássica intensa deveria ejetar elétrons qualquer que fosse sua frequência.

B) Uma onda EM clássica deveria ser absorvida sem ejetar elétrons, qualquer que fosse sua frequência .

C) Uma onda EM clássica só deveria ejetar elétrons para frequências **abaixo** de um valor limiar f_0.

D) Uma onda EM clássica só deveria ejetar elétrons caso sua frequência e intensidade fossem **ambas** acima de um certo limiar.

Observação crucial 1: só há corrente para luz com frequência **acima de uma frequência limiar f_0**



Experimento com tubo de raios catódicos

(P. Lenard, 1900)

P: Essa observação é incompatível com a descrição clássica da luz (onda eletromagnética)!!! Por que?

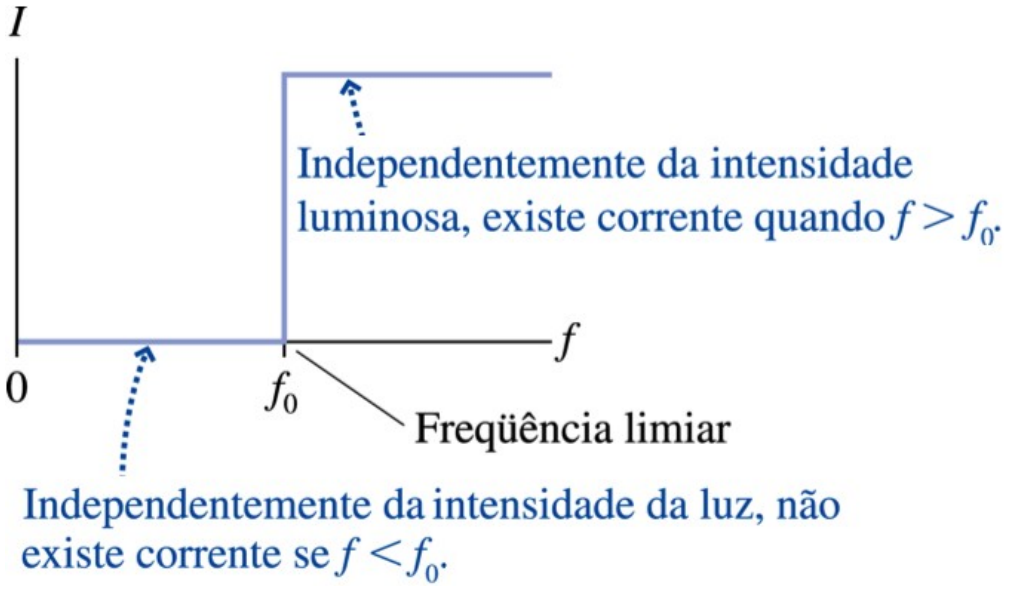
A) Uma onda EM clássica intensa deveria ejetar elétrons qualquer que fosse sua frequência.

B) Uma onda EM clássica deveria ser absorvida sem ejetar elétrons, qualquer que fosse sua frequência .

C) Uma onda EM clássica só deveria ejetar elétrons para frequências **abaixo** de um valor limiar f_0.

D) Uma onda EM clássica só deveria ejetar elétrons caso sua frequência e intensidade fossem **ambas** acima de um certo limiar.

Observação crucial 1: só há corrente para luz com frequência **acima de uma frequência limiar f_0**



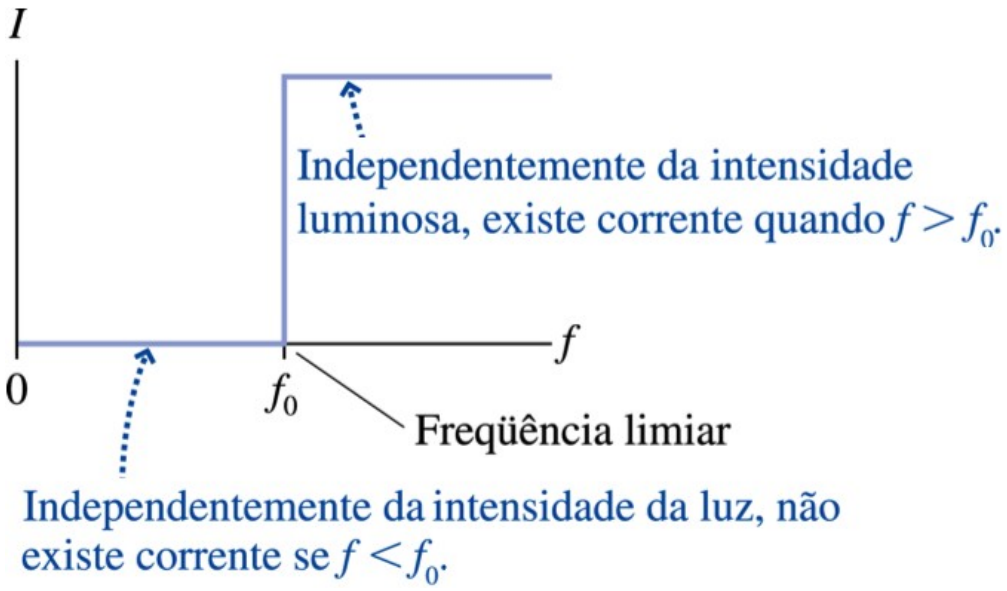
Experimento com tubo de raios catódicos

(P. Lenard, 1900)

P: Essa observação é incompatível com a descrição clássica da luz (onda eletromagnética)!!! Por que?

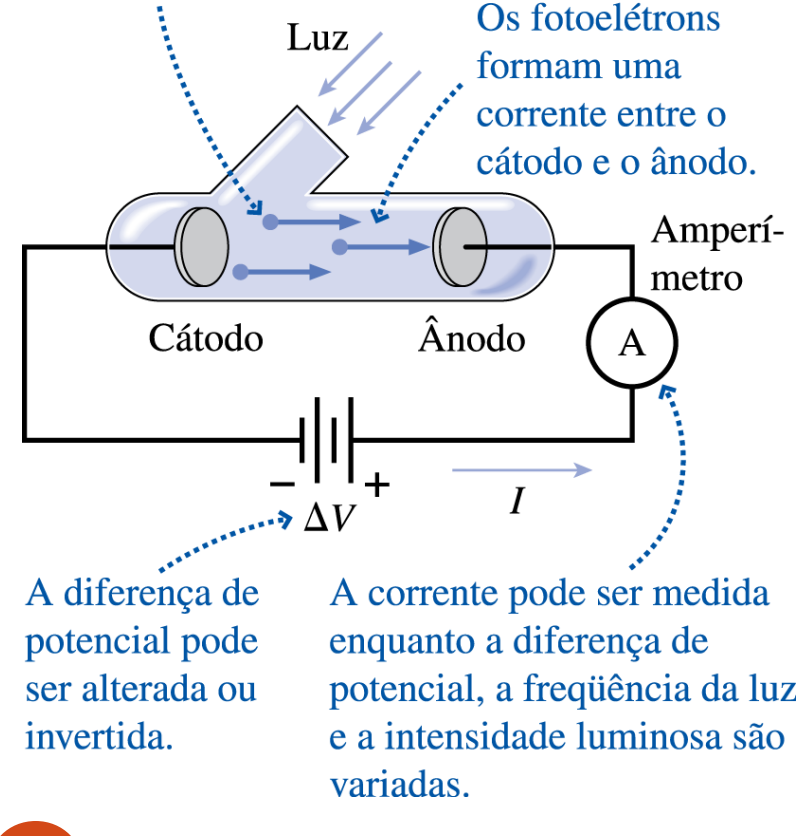
R:A. Uma onda clássica transmite mais energia quanto maior for sua intensidade. Assim, uma onda intensa deveria ser capaz de ejetar elétrons independente da sua frequência, e uma onda fraca não deveria ser capaz.

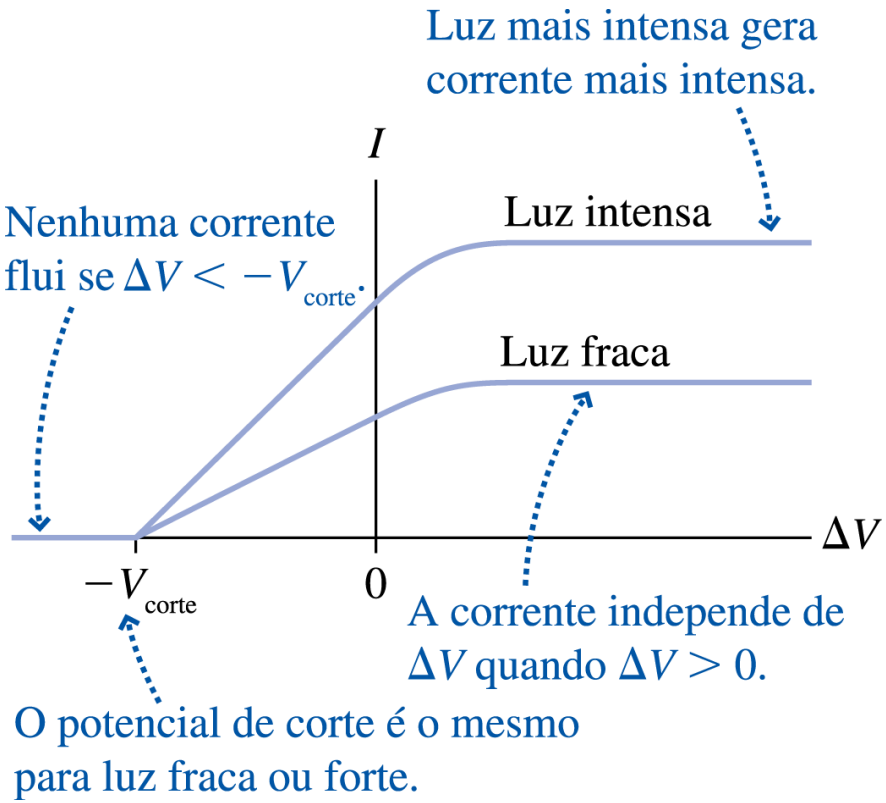
Observação crucial 1: só há corrente para luz com frequência **acima de uma frequência limiar f_0**



Aplicando uma ddp

Para luz de frequência $f > f_0$, se aplicarmos uma voltagem ΔV ao circuito a corrente depende tanto de ΔV como da intensidade da luz





Aplicando uma ddp

Para luz de frequência $f > f_0$, se aplicarmos uma voltagem ΔV ao circuito a corrente depende tanto de ΔV como da intensidade da luz

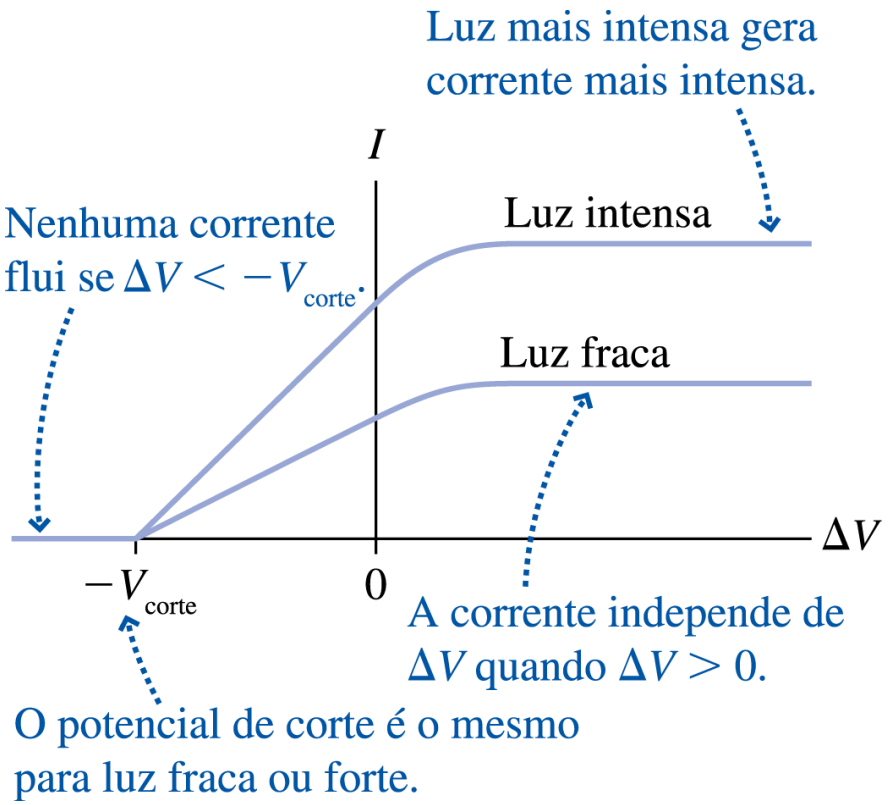
P: Por que essas curvas saturam (chegam a um patamar?)

A)Porque para voltagens grandes, não sobram no material mais elétrons para serem ejetados

B)Porque todo equipamento suporta um limite máximo de corrente

C)Porque para voltagens grandes, todos os elétrons ejetados do catodo chegam ao anodo

D)Porque para voltagens grandes, nenhum elétron ejetado do catodo chega ao anodo



Aplicando uma ddp

Para luz de frequência $f>f_0$, se aplicarmos uma voltagem ΔV ao circuito a corrente depende tanto de ΔV como da intensidade da luz

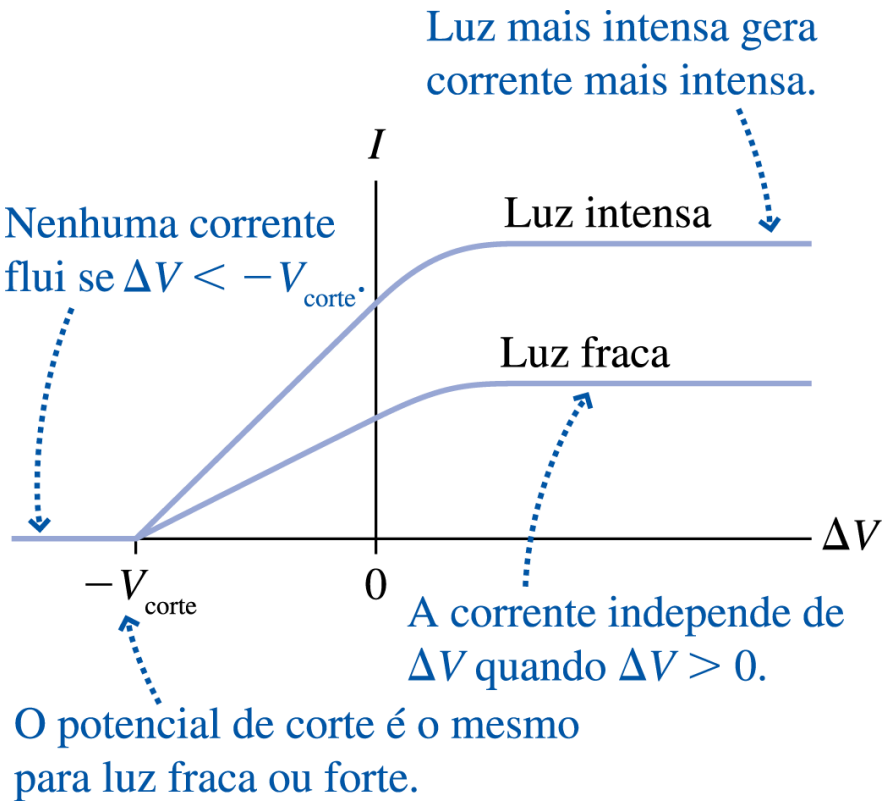
P: Por que essas curvas saturam (chegam a um patamar?)

A)Porque para voltagens grandes, não sobram no material mais elétrons para serem ejetados

B)Porque todo equipamento suporta um limite máximo de corrente

C)Porque para voltagens grandes, todos os elétrons ejetados do catodo chegam ao anodo

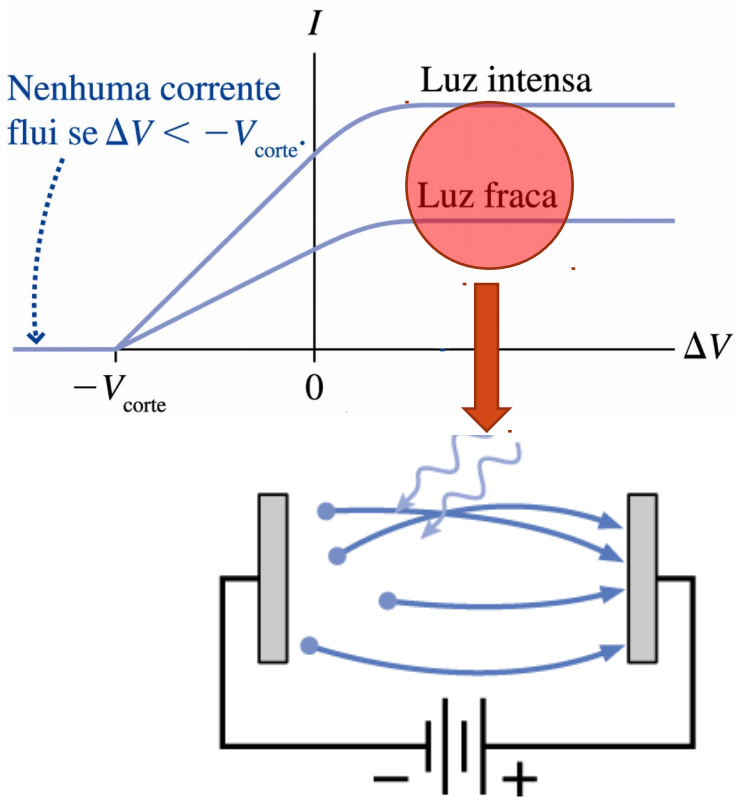
D)Porque para voltagens grandes, nenhum elétron ejetado do catodo chega ao anodo



Aplicando uma ddp

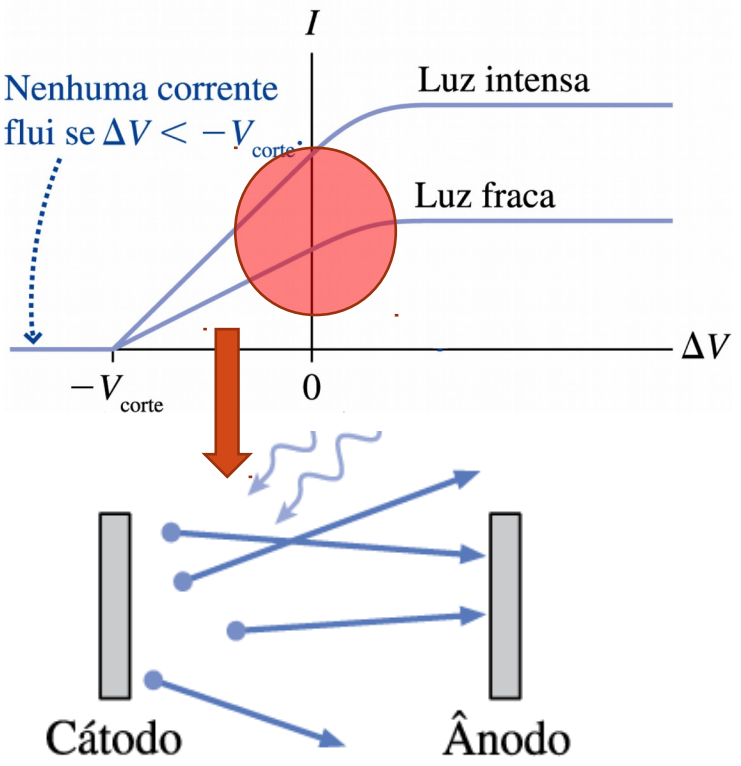
Variando a diferença de potencial ΔV da fonte

a) $\Delta V > 0$



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

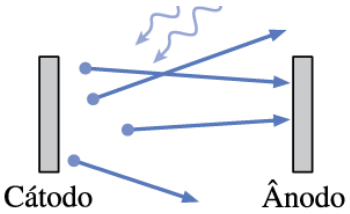
b) $\Delta V = 0$



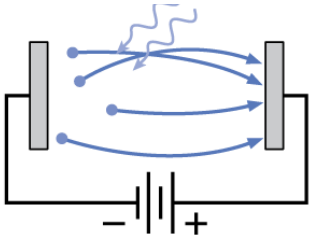
$\Delta V = 0$: os fotoelétrons deixam o cátodo em todas as direções. Poucos deles chegam ao ânodo.

Aplicando uma ddp

Variando a diferença de potencial ΔV da fonte

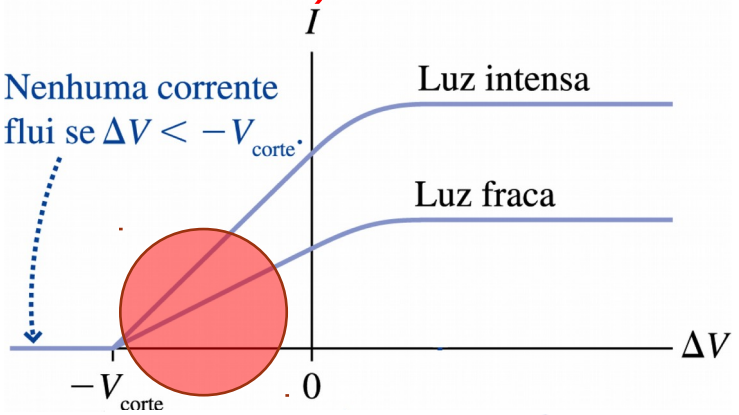


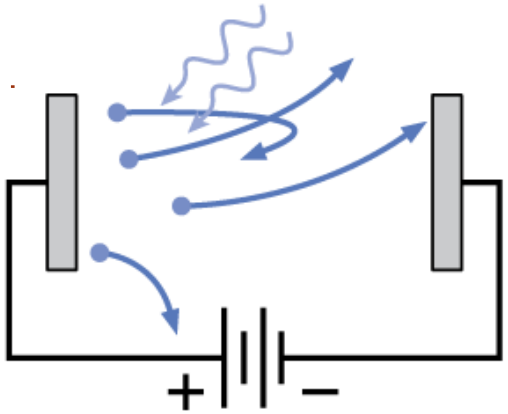
$\Delta V = 0$: os fotoelétrons deixam o cátodo em todas as direções. Poucos deles chegam ao ânodo.



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

c) $\Delta V < 0$

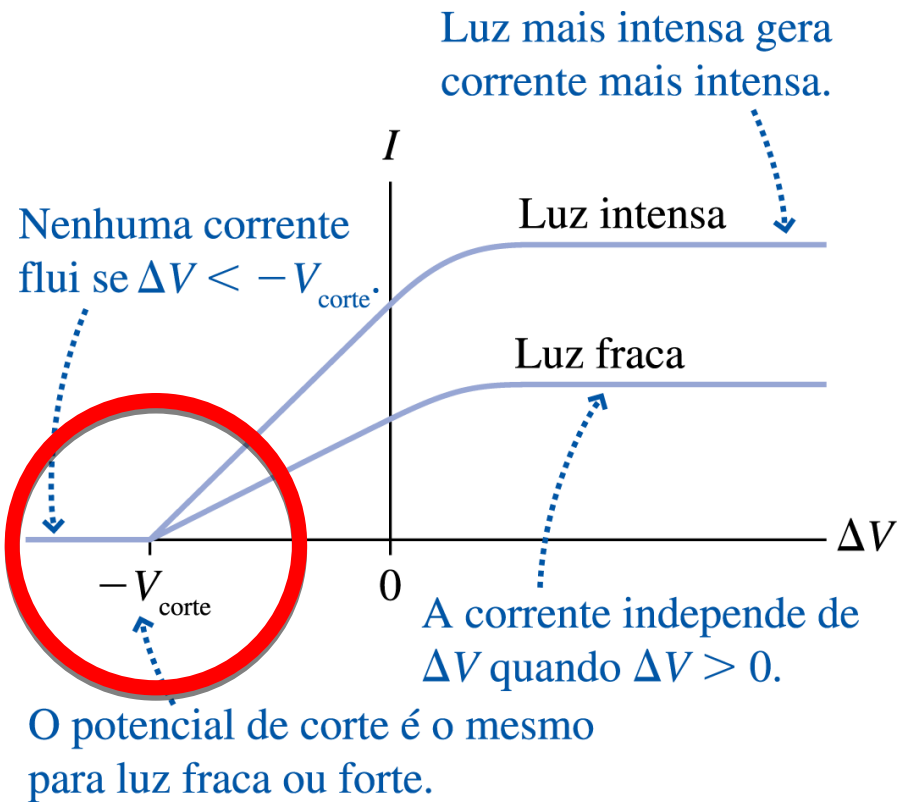




$\Delta V < 0$: um ânodo negativo repele os elétrons. Apenas os mais rápidos conseguem chegar ao ânodo.

O potencial de corte

Observação crucial 2: A corrente some quando ΔV passa de um certo limiar negativo $-V_{corte}$, o qual **não depende da intensidade da luz**



Considerações Energéticas

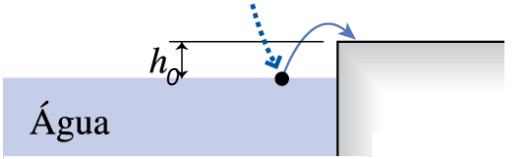
1. Quando a luz incide sobre o cátodo, os elétrons absorvem energia. Vamos chamar a energia absorvida por um elétron de $E_{eletron}$

2. Para um elétron ser arrancado do cátodo, ele precisa receber energia suficiente para superar a 'barreira' de energia que o mantém preso, a qual tem um certo valor E_0

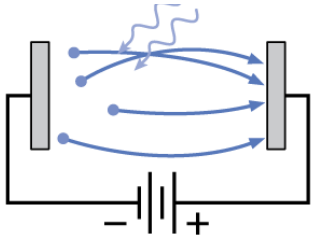
Esse valor é chamado **'função-trabalho'**, e **depende do material.**

Analogia

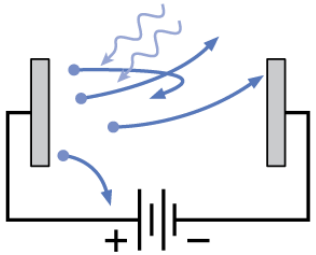
A energia *mínima* necessária para remover uma gota de água da piscina é mgh_0.



3. Após ser arrancado, o elétron passa a ser acelerado pelo campo elétrico produzido pelos eletrodos. Esse campo pode fornecer ou retirar energia do elétron, dependendo do sinal da ddp



$\Delta V > 0$



$\Delta V < 0$

P: Assumindo que o elétron consegue alcançar o anodo, qual a sua energia cinética ao chegar lá?

A) $K_f = E_{eletron} + E_0 + e\,\Delta V$

B) $K_f = E_{eletron} + E_0 - e\,\Delta V$

C) $K_f = E_{eletron} - E_0 + e\,\Delta V$

D) $K_f = E_{eletron} - E_0 - e\,\Delta V$

Considerações Energéticas

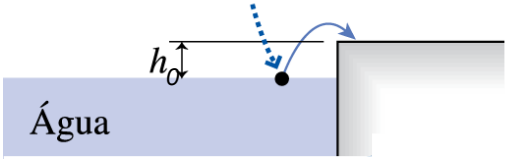
1. Quando a luz incide sobre o cátodo, os elétrons absorvem energia. Vamos chamar a energia absorvida por um elétron de $E_{eletron}$

2. Para um elétron ser arrancado do cátodo, ele precisa receber energia suficiente para superar a 'barreira' de energia que o mantém preso, a qual tem um certo valor E_0

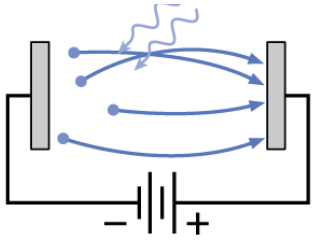
Esse valor é chamado **'função-trabalho'**, e **depende do material.**

Analogia

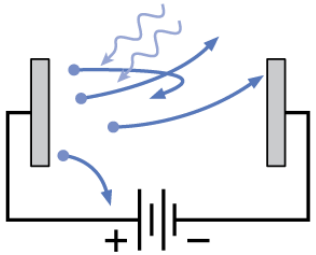
A energia *mínima* necessária para remover uma gota de água da piscina é mgh_0.



3. Após ser arrancado, o elétron passa a ser acelerado pelo campo elétrico produzido pelos eletrodos. Esse campo pode fornecer ou retirar energia do elétron, dependendo do sinal da ddp



$\Delta V > 0$



$\Delta V < 0$

P: Assumindo que o elétron consegue alcançar o anodo, qual a sua energia cinética ao chegar lá?

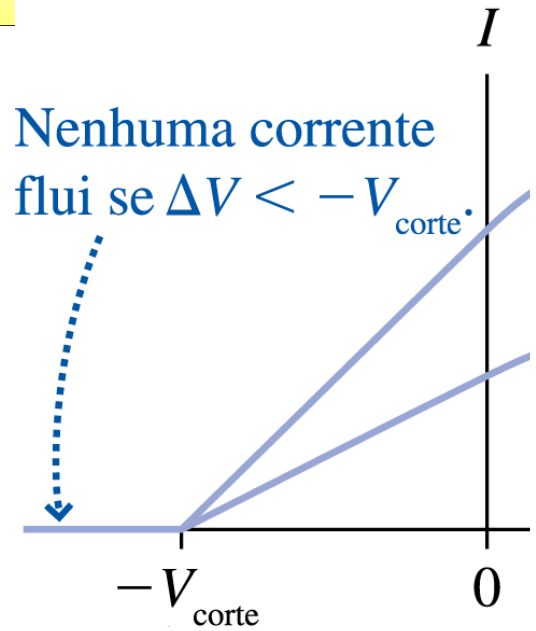
A) $K_f = E_{eletron} + E_0 + e\,\Delta V$

B) $K_f = E_{eletron} + E_0 - e\,\Delta V$

C) $K_f = E_{eletron} - E_0 + e\,\Delta V$

D) $K_f = E_{eletron} - E_0 - e\,\Delta V$

Considerações Energéticas



$K_f = E_{eletron} - E_0 + e\,\Delta V$

P:A energia "eV_{corte}" representa:

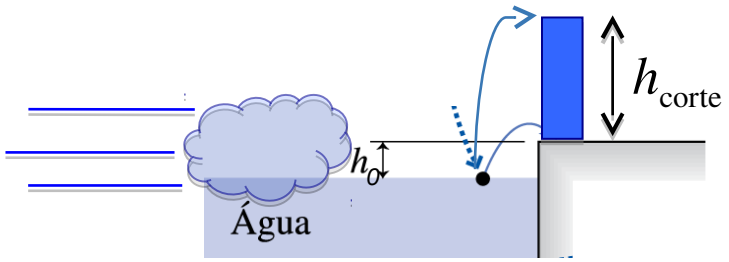
A) A menor energia possível para um elétron imediatamente após ser ejetado do catodo

B) A menor energia que precisa ser fornecida para ejetar um elétron do catodo

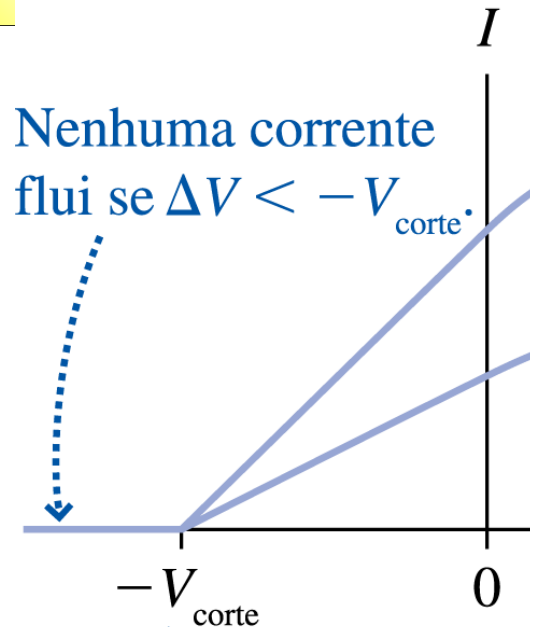
C) A maior energia possível para um elétron imediatamente após ser ejetado do catodo

D) A maior energia que precisa ser fornecida para ejetar um elétron do catodo

ANALOGIA: Se gotas recebem energia E do vento, há uma "altura de corte" máxima h_{corte} além da borda, da qual elas não passam.



Considerações Energéticas



$K_f = E_{eletron} - E_0 + e\,\Delta V$

P:A energia "eV_{corte}" representa:

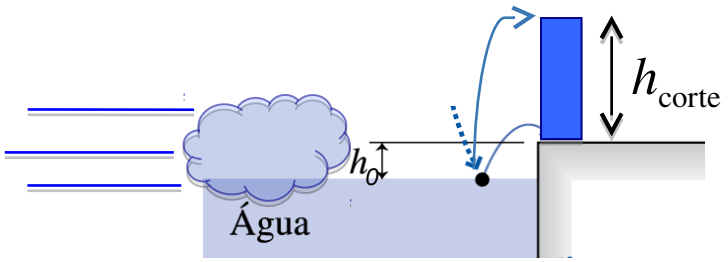
A) A menor energia possível para um elétron imediatamente após ser ejetado do catodo

B) A menor energia que precisa ser fornecida para ejetar um elétron do catodo

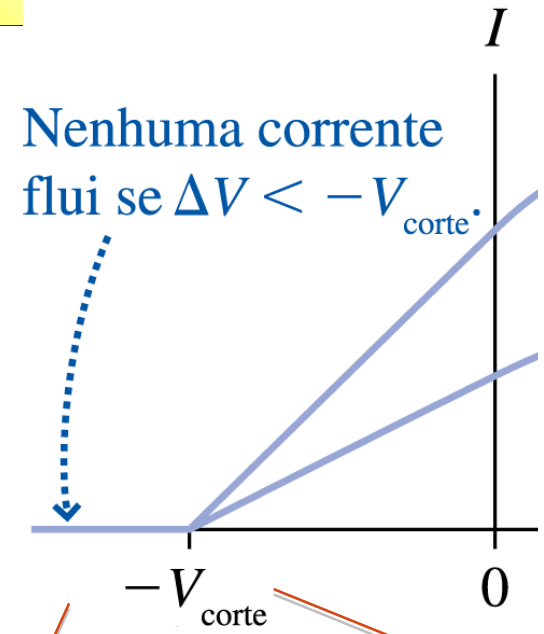
C) A maior energia possível para um elétron imediatamente após ser ejetado do catodo

D) A maior energia que precisa ser fornecida para ejetar um elétron do catodo

ANALOGIA: Se gotas recebem energia E do vento, há uma "altura de corte" máxima h_{corte} além da borda, da qual elas não passam.
A energia mgh_{corte} corresponde à maior energia possível que resta para uma gota após ter escapado da borda.



Considerações Energéticas



0 $K_f = E_{eletron} - E_0 + e\,\Delta V$

P: A energia eV_{corte} representa:

A) A menor energia possível para um elétron imediatamente após ser ejetado do catodo

B) A menor energia que precisa ser fornecida para ejetar um elétron do catodo

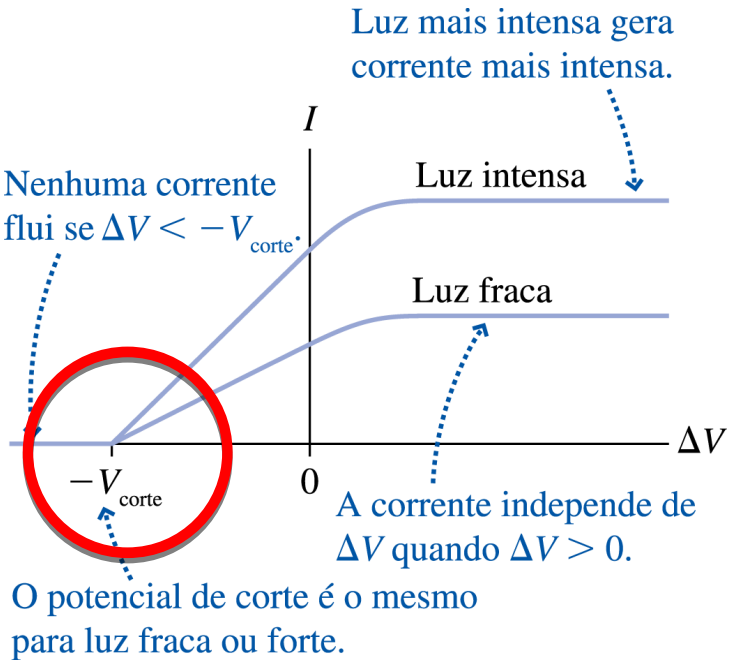
C) A maior energia possível para um elétron imediatamente após ser ejetado do catodo

D) A maior energia que precisa ser fornecida para ejetar um elétron do catodo

$$V_{corte} = (E_{eletron} - E_0)/e$$

Considerações Energéticas

$$V_{corte} = (E_{eletron} - E_0)/e$$



Porém: a previsão da Física Clássica para ondas eletromagnéticas é:

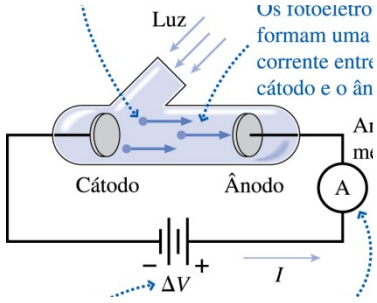
$$E_{elétron} \cong I\Delta tA \text{ (clássico)}$$

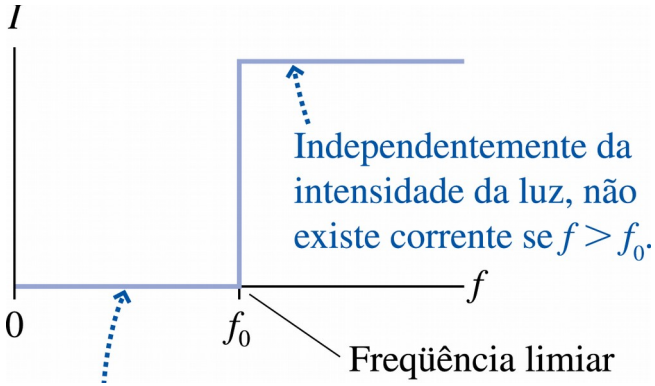
Portanto V_{corte} dependeria da intensidade da luz *!* (??)

Efeito Fotoelétrico

Resumo das observações

1) Fotoelétrons são emitidos apenas se a freq. da luz for maior que f_0.



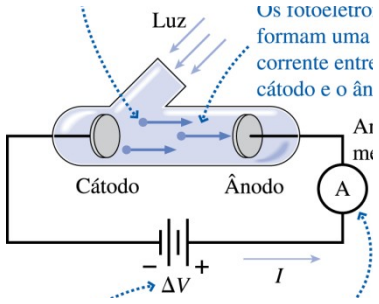


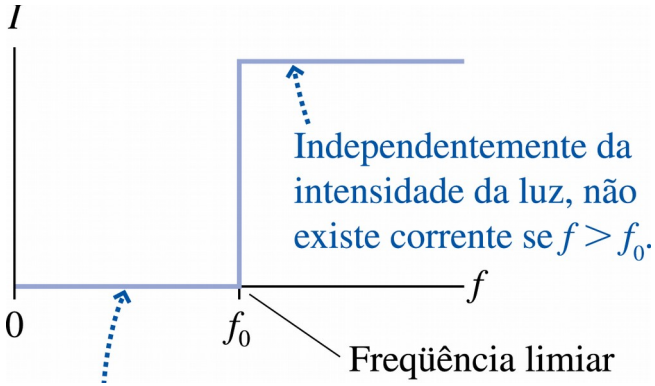
Efeito Fotoelétrico

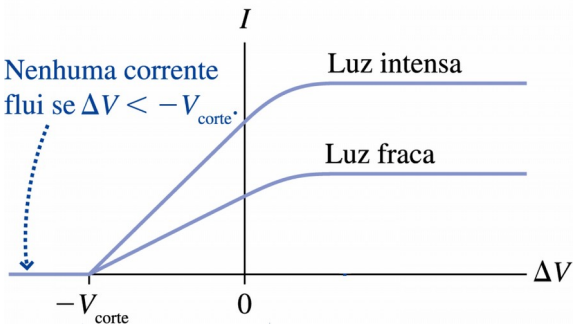
Resumo das observações

1) Fotoelétrons são emitidos apenas se a freq. da luz for maior que f_0.

2) Para $f > f_0$ e ΔV fixo, a corrente I é diretamente proporcional à intensidade da luz







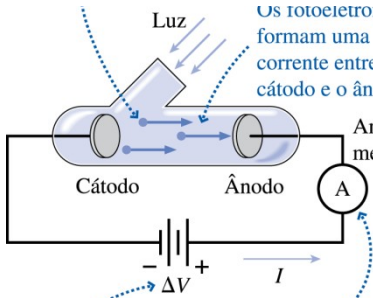
Efeito Fotoelétrico

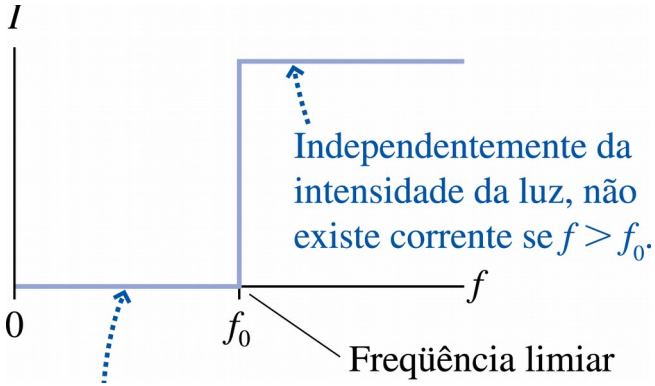
Resumo das observações

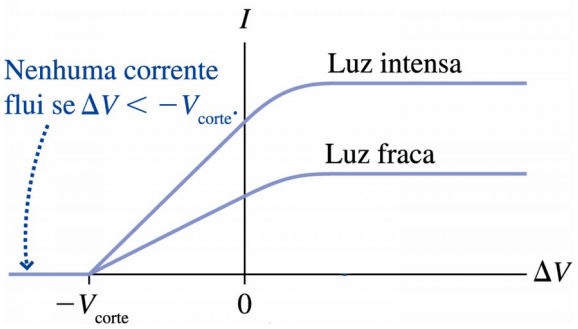
1) Fotoelétrons são emitidos apenas se a freq. da luz for maior que f_0.

2) Para $f > f_0$ e ΔV fixo, a corrente I é diretamente proporcional à intensidade da luz

3) Com ΔV positivo e alto a corrente é constante. Reduzindo ΔV, a corrente decresce até 0 A no potencial de corte $\Delta V = -V_{corte} < 0$.







Efeito Fotoelétrico

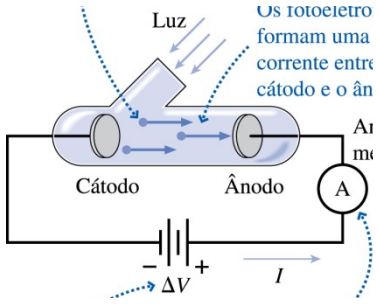
Resumo das observações

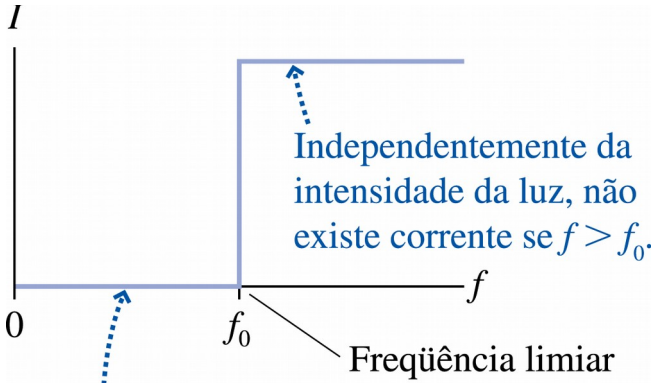
1) Fotoelétrons são emitidos apenas se a freq. da luz for maior que f_0.

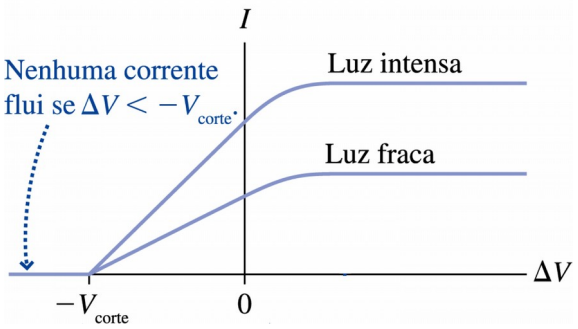
2) Para $f > f_0$ e ΔV fixo, a corrente I é diretamente proporcional à intensidade da luz

3) Com ΔV positivo e alto a corrente é constante. Reduzindo ΔV, a corrente decresce até 0 A no potencial de corte $\Delta V = -V_{corte} < 0$.

4) Para uma dada frequência f, o valor de V_{corte} independe da intensidade da luz.







Efeito Fotoelétrico

Resumo das observações

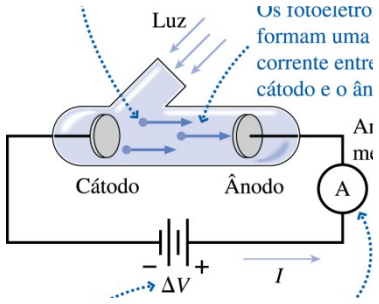
1) Fotoelétrons são emitidos apenas se a freq. da luz for maior que f_0.

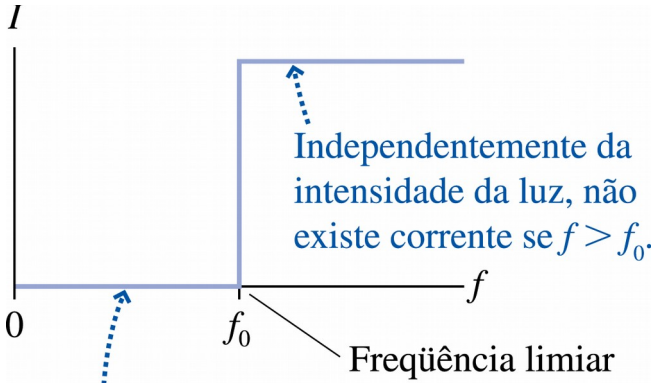
2) Para $f > f_0$ e ΔV fixo, a corrente I é diretamente proporcional à intensidade da luz

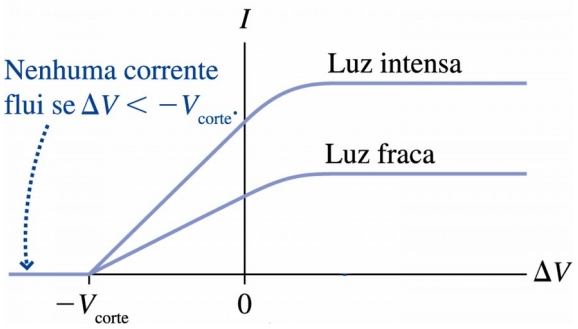
3) Com ΔV positivo e alto a corrente é constante. Reduzindo ΔV, a corrente decresce até 0 A no potencial de corte $\Delta V = -V_{corte} < 0$.

4) Para uma dada frequência f, o valor de V_{corte} independe da intensidade da luz.

- Para $f > f_0$ a corrente I surge *imediatamente* quando a luz incide, por mais fraca que seja.







Efeito Fotoelétrico

Resumo das observações

1) Fotoelétrons são emitidos apenas se a freq. da luz for maior que f_0.

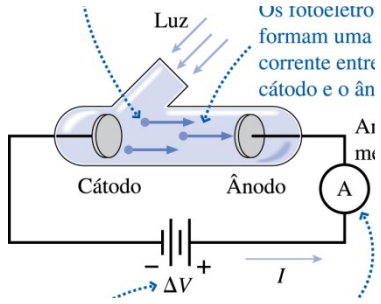
2) Para $f > f_0$ e ΔV fixo, a corrente I é diretamente proporcional à intensidade da luz

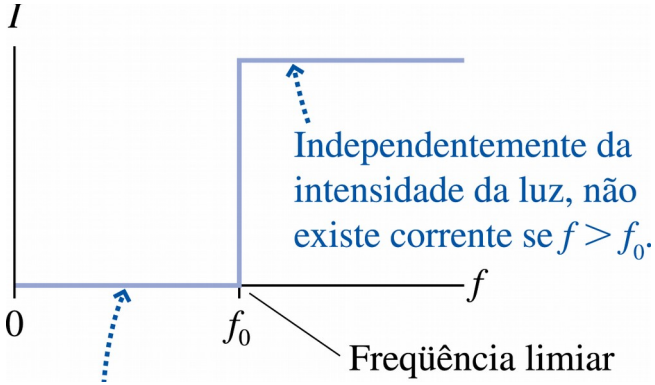
3) Com ΔV positivo e alto a corrente é constante. Reduzindo ΔV, a corrente decresce até 0 A no potencial de corte $\Delta V = -V_{corte} < 0$.

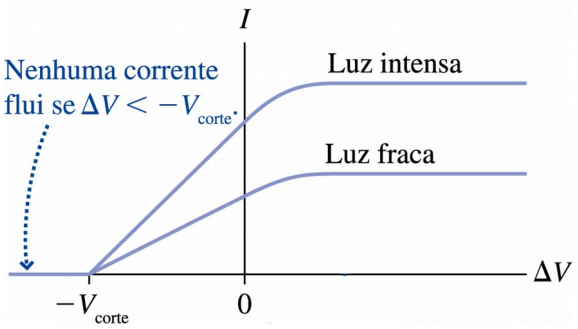
4) Para uma dada frequência f, o valor de V_{corte} independe da intensidade da luz.

1) Para $f > f_0$ a corrente I surge *imediatamente* quando a luz incide, por mais fraca que seja.

2) O valor de f_0 depende do material que constitui o cátodo.







Postulados de Einstein

Em 1905 (mesmo ano da Teoria da Relatividade), Einstein propôs um modelo simples capaz de explicar todas as características do Efeito Fotoelétrico. Por esse feito, recebeu o Prêmio Nobel de 1921.

O modelo de Einstein consiste de 3 postulados:

1) A luz de frequência *f* consiste em unidades ou 'quanta' discretas, ***"Fótons"***, cada uma das quais carrega energia ***E = hf***, e se propaga com velocidade *c.*

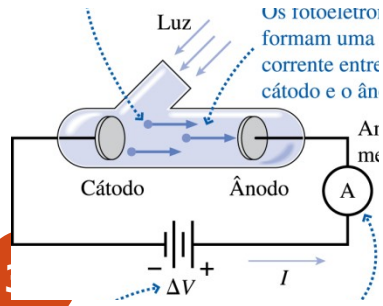
2) Os quanta de luz são emitidos ou absorvidos integralmente. Podem ser emitidos 1, 2, 3, ... quanta, mas não 1/2 quantum.

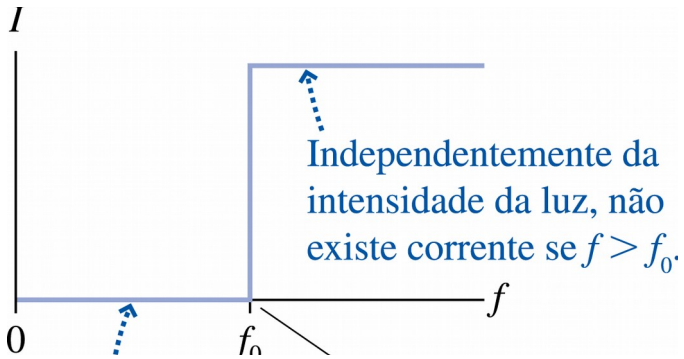
3) Um quantum da luz, quando absorvido pelo metal, transfere a *totalidade* de sua energia a um único elétron.

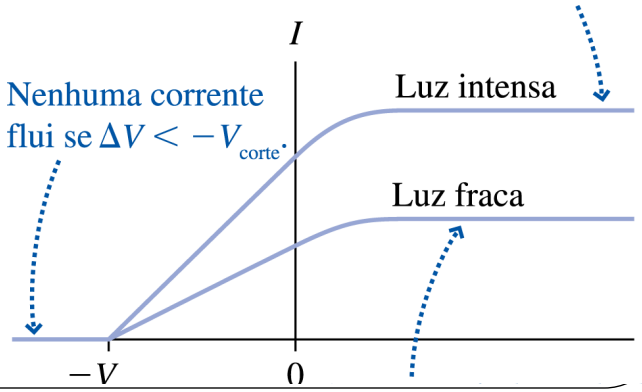
Implicações dos postulados de Einstein

$E_{elétron} = hf$ (quântico) $\qquad V_{corte} = (hf - E_0)/e$

1. Deve haver sim uma frequência de corte, dada por $\mathbf{f_0 = E_0 / h}$
2. O potencial de corte não depende da intensidade da luz, mas da sua frequência!
3. Uma iluminação mais intensa transfere maior quantidade de quanta e portanto, mais elétrons são ejetados: Corrente aumenta com Intensidade!
4. O quantum de luz é absorvido instantaneamente, não há atraso.

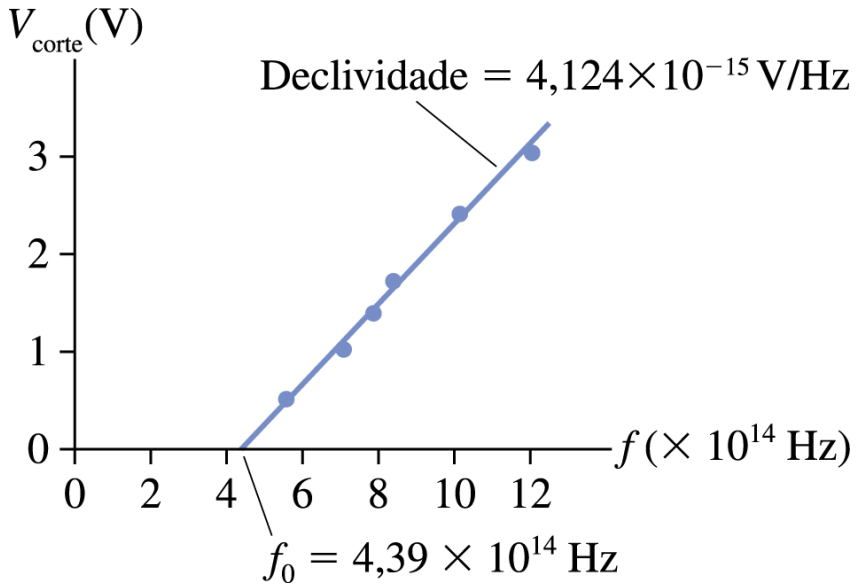






Teste experimental (R. Millikan, 1916)

Dados experimentais para um cátodo de césio



Confirma a previsão de Einstein:

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

Como conhecia ***e* = 1,602 x 10^{-19}C**, Millikan obteve o valor da constante de Planck

***h* ~ 6,61 x 10^{-34} J.s**

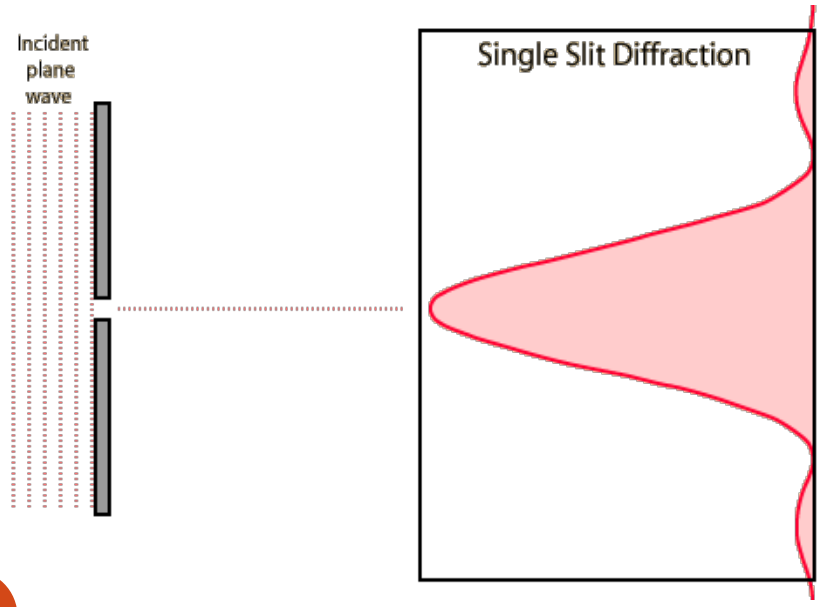
Valor concorda com o estimado de forma independente pelas medições da radiação térmica de corpos negros

Aula 9

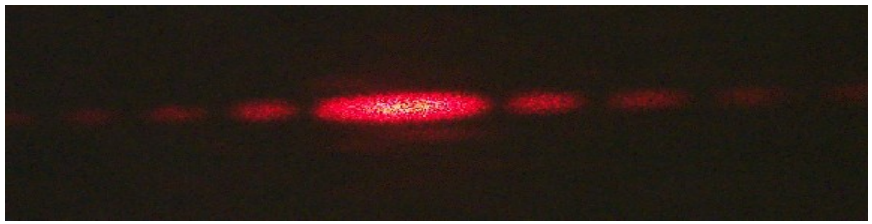
Luz: onda ou partícula?

O efeito fotoelétrico parece indicar que a luz é composta de ***partículas***. Porém, quando falamos em frequência, comprimento de onda, estamos falando nas propriedades de uma ***onda***. De fato, a luz apresenta propriedades típicas de ondas, como a ***difração*** e a ***interferência***.

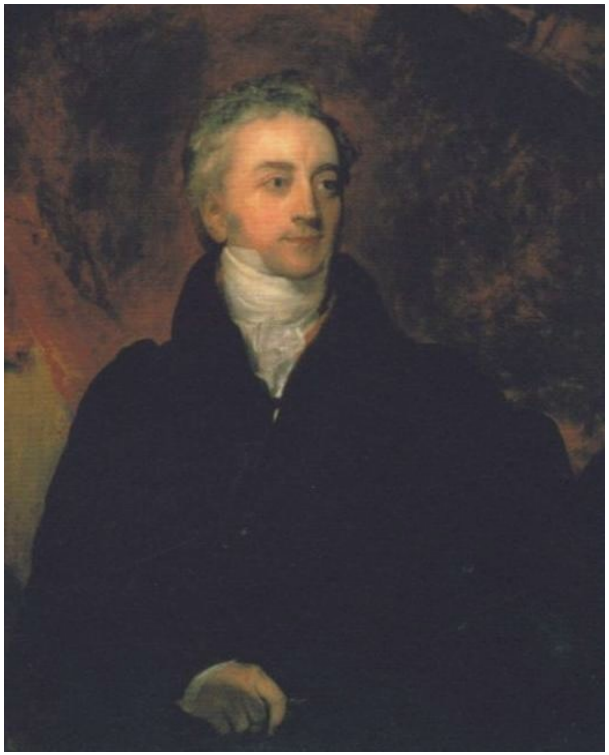
Difração por uma Fenda simples:



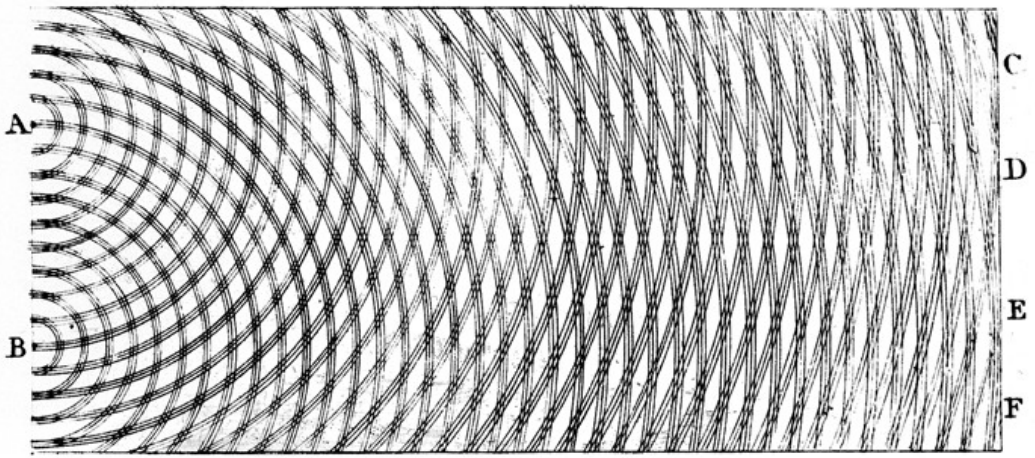
Equivalente: Difração por um fio de cabelo:



Interferência com duas fendas

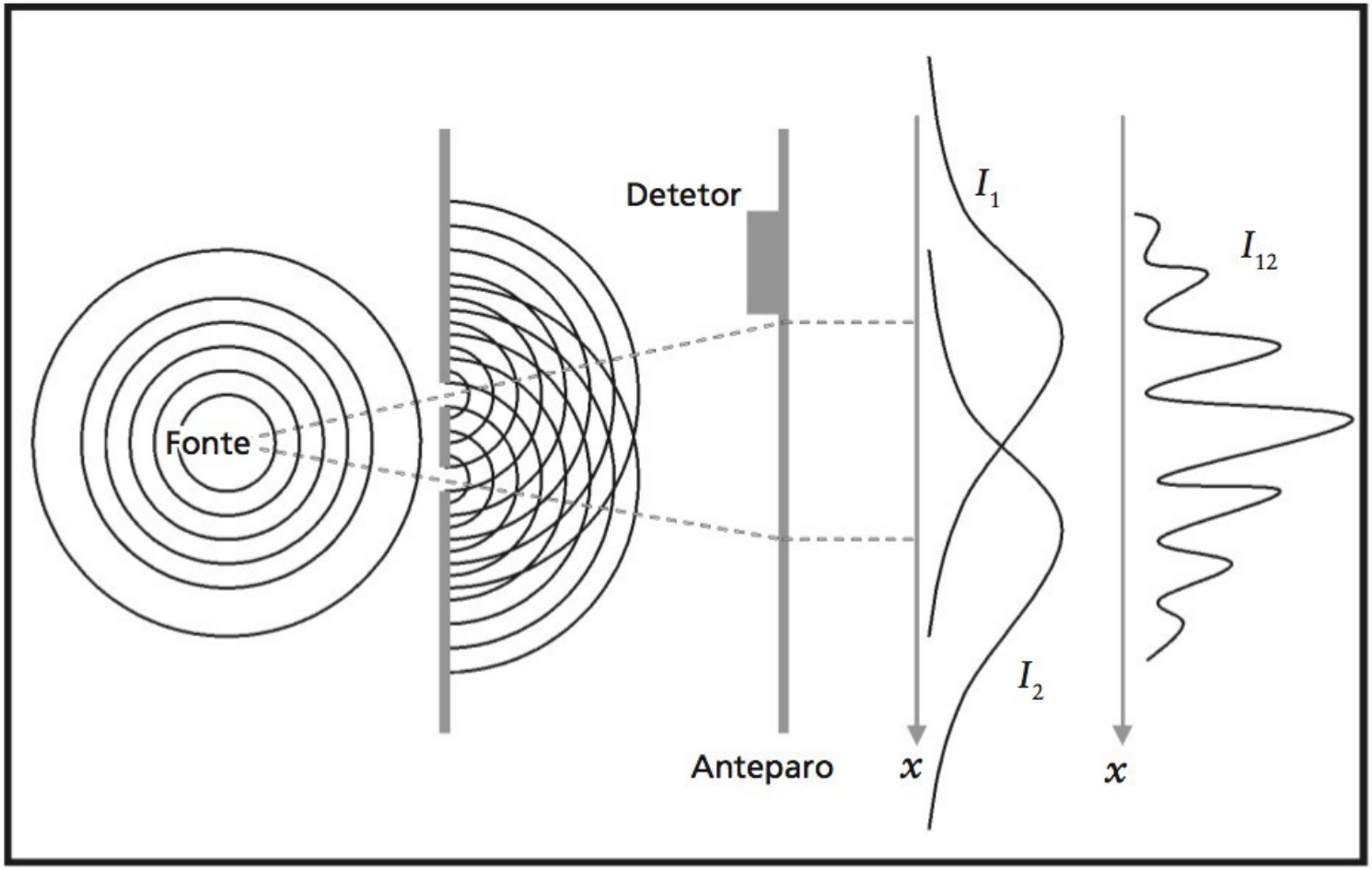


Em 1801, Thomas Young descobriu que uma onda (seja de água, de luz, ou qualquer outra) produz um padrão de interferência característico ao passar por duas frestas

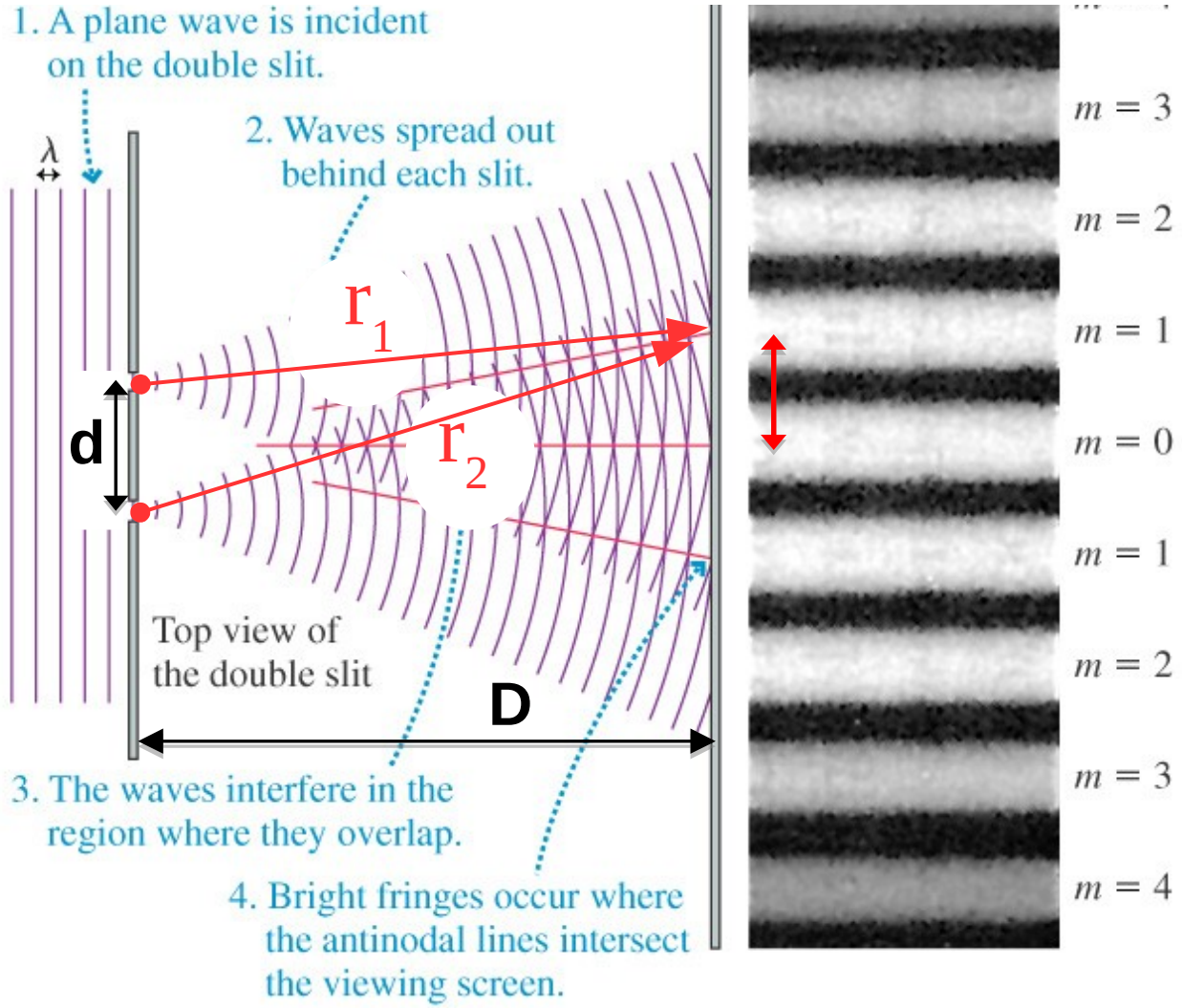


Interferência com duas fendas

Dupla fenda com ondas clássicas



Interferência com duas fendas



Interferência construtiva

$$|r_1 - r_2| = m\lambda$$

Interferência destrutiva

$$|r_1 - r_2| = (m+½)\lambda$$

Interferência com duas fendas

P: o que será que acontece quando fazemos essa mesma experiência com luz de muito baixa intensidade?

A) O padrão de interferência aparece imediatamente em todo o anteparo de uma vez, de uma forma facilmente distinguível (alto constraste entre áreas claras e escuras).

B) O padrão de interferência vai aparecendo de forma lenta mas uniforme, em todo o anteparo de uma vez. Inicialmente é difícil de distinguir (baixo contraste entre áreas claras e escuras), mas vai ficando cada vez mais distinto.

C) O padrão de interferência vai aparecendo de forma lenta mas granular, i.e, alguns pontos aparecem antes de outros. Inicialmente é difícil de distinguir, mas vai ficando cada vez mais distinto.

D) Não aparece um padrão de interferência

Interferência com duas fendas

Link p/ vídeo: http://bit.ly/1mhBtTU

Interferência com duas fendas

P: o que será que acontece quando fazemos a experiência de interferência de dupla fenda com elétrons?

A) O padrão de interferência aparece imediatamente em todo o anteparo de uma vez, de uma forma facilmente distinguível (alto constraste entre áreas claras e escuras).

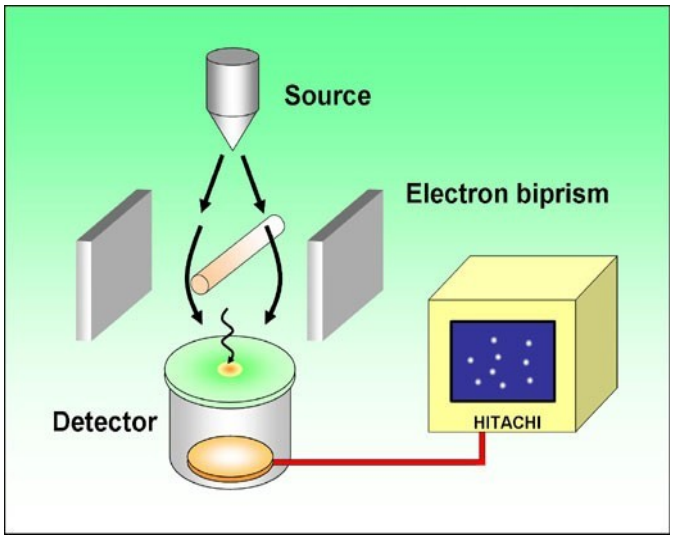
B) O padrão de interferência vai aparecendo de forma lenta mas contínua, em todo o anteparo de uma vez. Inicialmente é difícil de distinguir (baixo contraste entre áreas claras e escuras), mas vai ficando cada vez mais distinto.

C) O padrão de interferência vai aparecendo de forma lenta mas granular. Inicialmente é difícil de distinguir, mas vai ficando cada vez mais distinto.

D) Não aparece um padrão de interferência

Dupla fenda com elétrons (1989)

Tonomura et al (Hitachi)

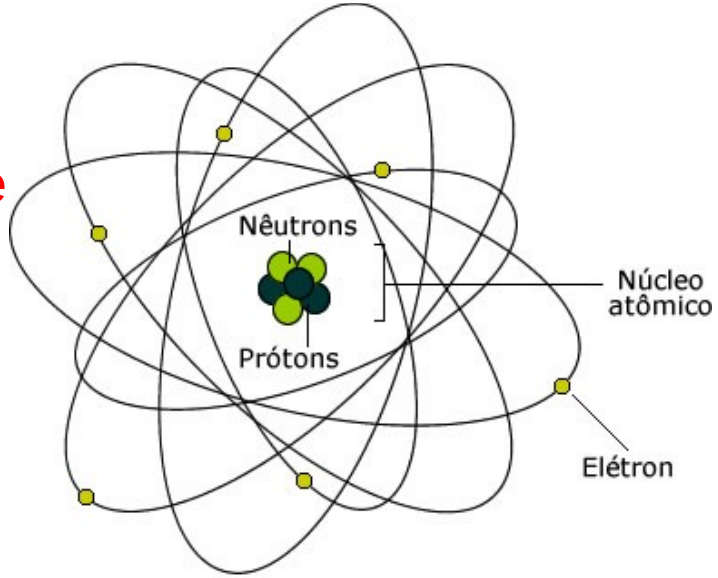


Link p/ vídeo: http://bit.ly/1g1mZnE

Modelo atômico de Bohr (1913)

Niels Bohr (1885-1961)– físico dinamarquês, trabalhou com Rutherford

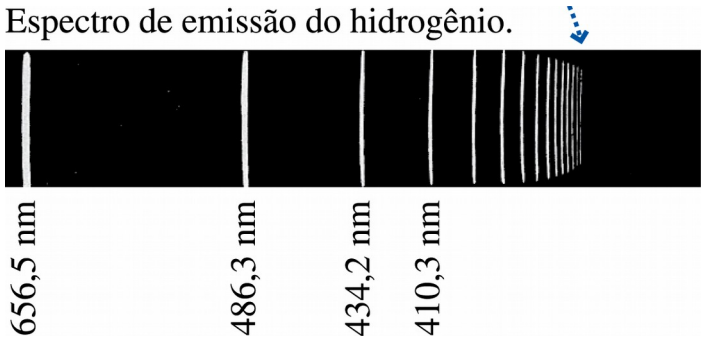
Modelo atômico de Rutherford



Lembrando: havia dificuldades para explicar:

1) Como um átomo assim poderia ser estável (partículas aceleradas irradiam)

2) Espectros discretos de emissão / absorção



Modelo atômico de Bohr (1913)

Observações empíricas e suas explicações segundo o Modelo atômico de Bohr:

1) A matéria é estável pois não existe estado de energia mais baixo do que o fundamental

2) Os átomos emitem e absorvem um espectro discreto de luz pois só fótons com energias correspondendo às diferenças entre estados estacionários podem ser emitidos e absorvidos

3) Os espectros de emissão também podem ser observados quando um feixe de elétrons atravessa gás num tubo de raios catódicos pois os elétrons colidem com os átomos do gás, os quais são excitados para estados de maior energia e em seguida sofrem decaimento espontâneo.

4) As frequências tipicamente presentes nos espectros de absorção formam um subconjunto das que aparecem nos espectros de emissão correspondentes. Como os átomos tendem a estar no estado fundamental (devido aos decaimentos espontâneos), apenas linhas de absorção a partir deste estado serão tipicamente observadas na Natureza

5) Cada elemento da tabela periódica possui um espectro próprio.

Não explicado !!

O que determina os estados estacionários de cada elemento?

Exemplo: espectro do Hidrogênio

Fórmula de Rydberg

$$\lambda = \frac{91,8 \times 10^{-9} m}{\left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2}\right)}$$

$$E = \frac{hc}{\lambda}$$

$$= 13,6\ eV \left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2}\right)$$

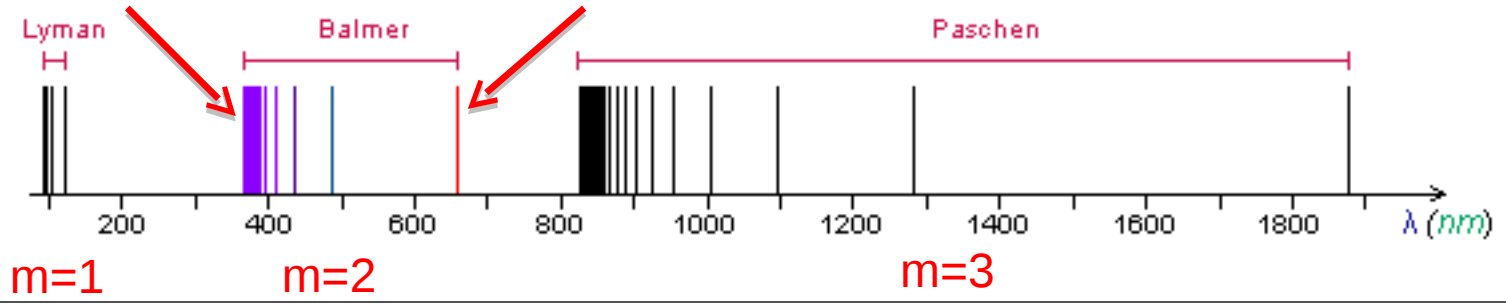
As linhas nos extremos direito e esquerdo do espectro de Balmer correspondem respectivamente a quais pares de valores de *m* e *n*?

A) 2 e ∞ (esq.) e 2 e 1 (dir.)

B) 2 e ∞ (esq.) e 2 e 3 (dir.)

C) 2 e 1 (esq.) e 2 e ∞ (dir.)

D) 2 e 3 (esq.) e 2 e ∞ (dir.)



Exemplo: espectro do Hidrogênio

Fórmula de Rydberg

$$\lambda = \frac{91,8 \times 10^{-9} m}{\left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2}\right)}$$

$$E = \frac{hc}{\lambda}$$

$$= 13,6\ eV \left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2}\right)$$

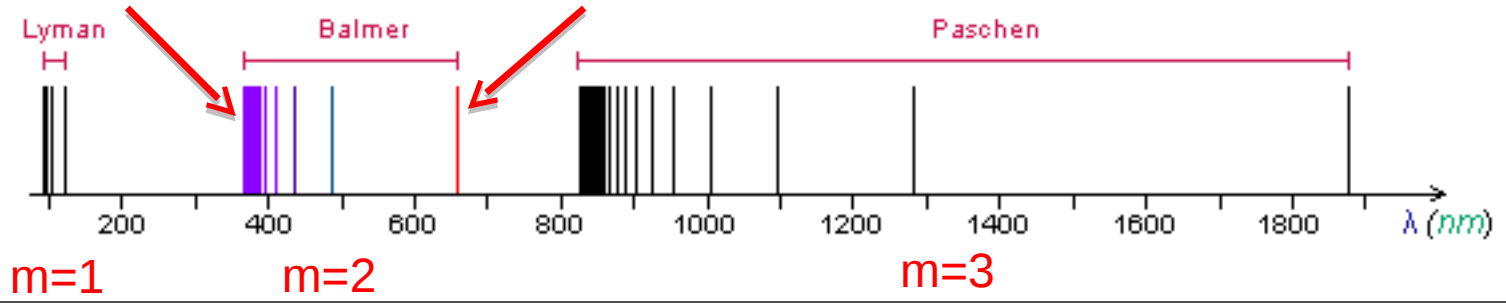
As linhas nos extremos direito e esquerdo do espectro de Balmer correspondem respectivamente a quais pares de valores de *m* e *n*?

A) 2 e ∞ (esq.) e 2 e 1 (dir.)

B) 2 e ∞ (esq.) e 2 e 3 (dir.)

C) 2 e 1 (esq.) e 2 e ∞ (dir.)

D) 2 e 3 (esq.) e 2 e ∞ (dir.)



Exemplo: espectro do Hidrogênio

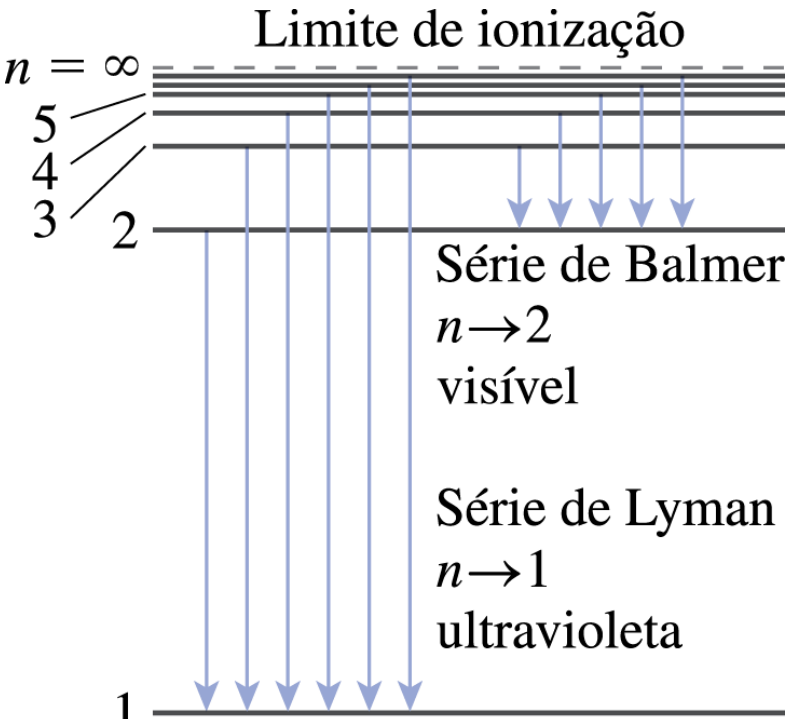
Fórmula de Rydberg

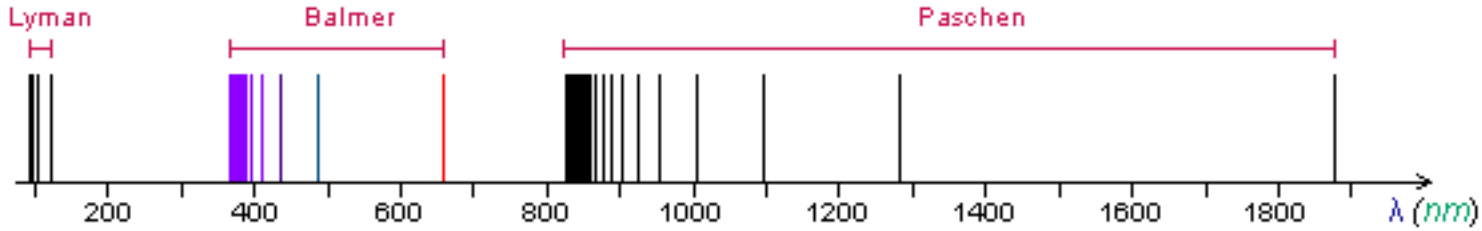
$$\lambda = \frac{91,8 \times 10^{-9} m}{\left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2}\right)}$$

$$E = \frac{hc}{\lambda}$$

$$= 13,6\ eV \left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2}\right)$$

Interpretação





m=1 m=2 m=3