

Física IV

Capítulo 39: Quantização

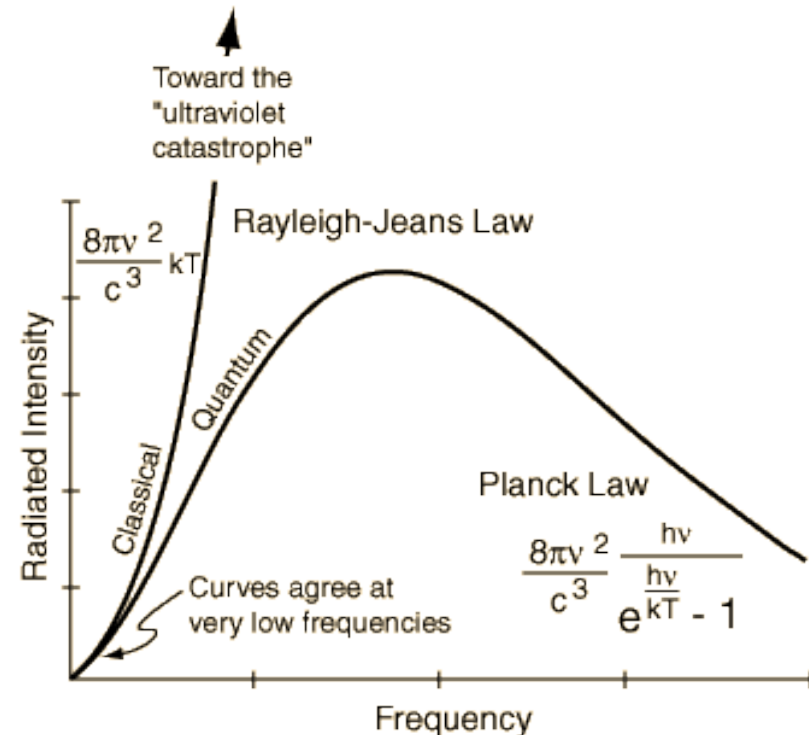
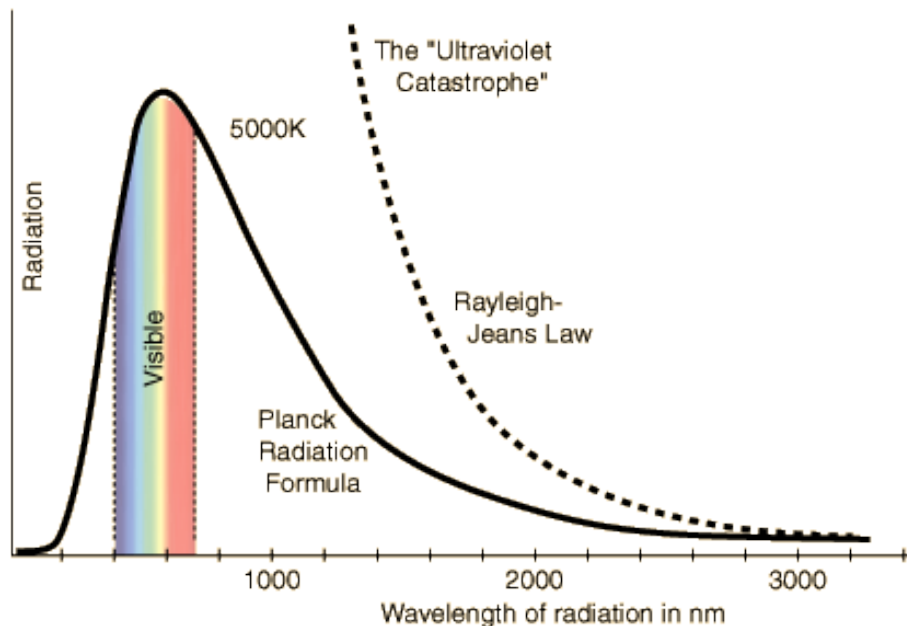
Prof. Andrea Latgé

Abril/2015



RADIAÇÃO DE CORPO NEGRO

“Catástrofe” do ultravioleta



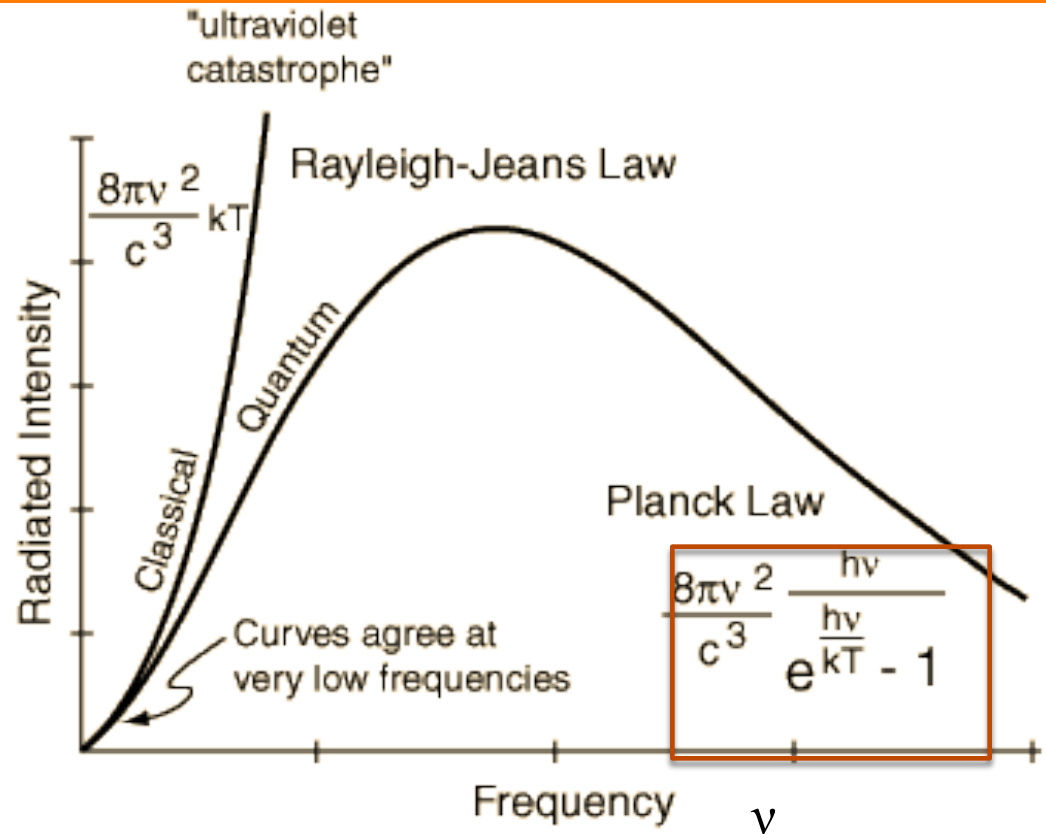
1900 - Max Planck descobre que pode derivar uma fórmula para a curva experimental, evitando a ‘catástrofe’. Para isso porém, precisava fazer uma hipótese estranha: que as paredes de um corpo negro absorvem e emitem radiação em ‘pacotes’ discretos ou **quantizados**, de tamanho $E = hf$, onde f é a frequência da radiação e $h = 6,63 \times 10^{-34} \text{ J.s}$
 $= 4,14 \times 10^{-15} \text{ eV.s}$ - uma nova constante da Natureza



QUANTIZAÇÃO



Max Planck



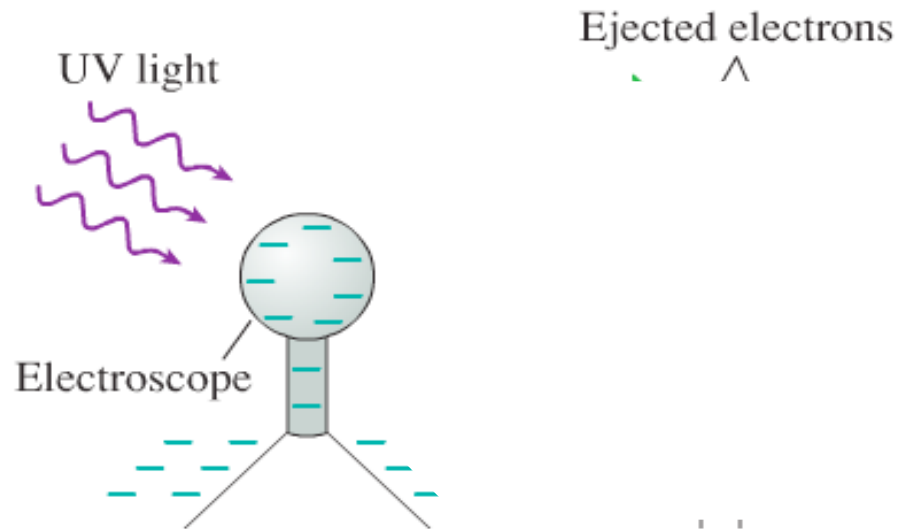
Constante de Planck

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



O EFEITO FOTOELÉTRICO

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



J.J.Thomson – 1899: 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.

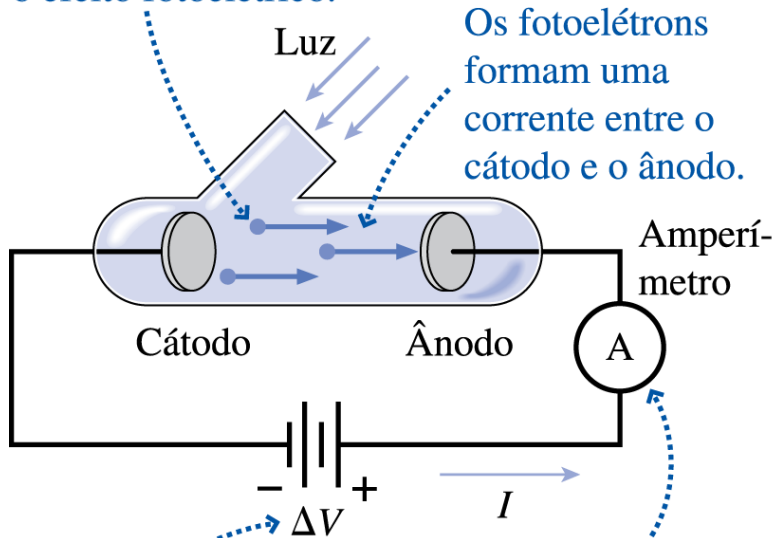


O EFEITO FOTOELÉTRICO

Experimento usando tubo de raios catódicos (P. Lenard, 1900)

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

Os fotoelétrons formam uma corrente entre o cátodo e o ânodo.

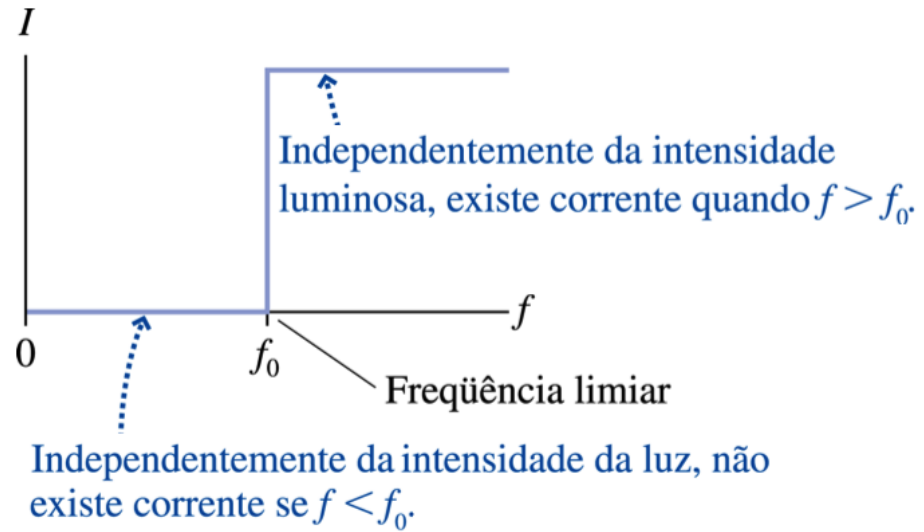


A diferença de potencial pode ser alterada ou invertida.

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

RESULTADO EXPERIMENTAL 1:

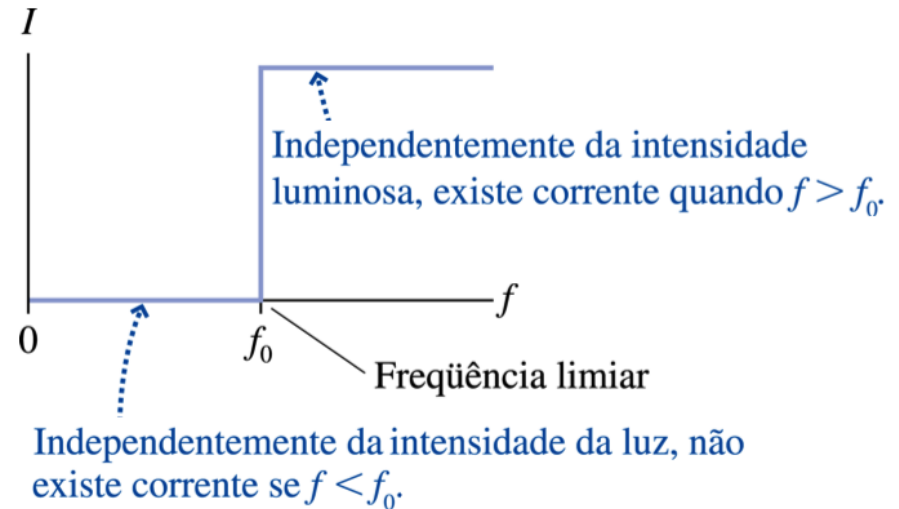
- ✓ apenas corrente para luz com frequência acima de uma frequência limiar f_0



O EFEITO FOTOELÉTRICO

Pergunta:

Esta observação é incompatível com a descrição clássica da luz (OEM)!!!
Por que?



1. Uma onda EM clássica intensa deveria ejetar elétrons qualquer que fosse sua frequência.
2. Uma onda EM clássica deveria ser absorvida sem ejetar elétrons, qualquer que fosse sua frequência .
3. Uma onda EM clássica só deveria ejetar elétrons para frequências **abaixo** de um valor limiar f_0 .
4. Uma onda EM clássica só deveria ejetar elétrons caso sua frequência **e** intensidade ambas fossem acima de um certo limiar.



O EFEITO FOTOELÉTRICO

Pergunta:

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

Resposta (1)

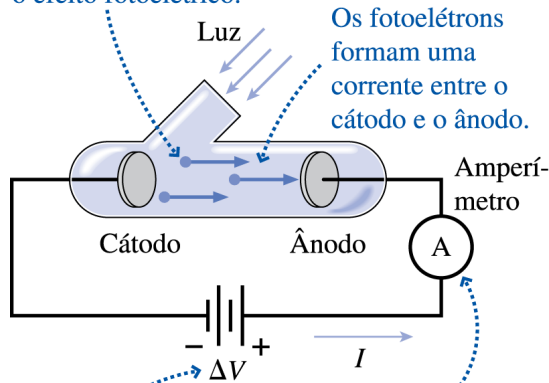
Uma onda clássica transmite mais energia quanto maior for sua intensidade.

Desta forma, uma onda intensa deveria ser capaz de ejetar elétrons independente da sua frequência, e uma onda fraca não deveria ser capaz.



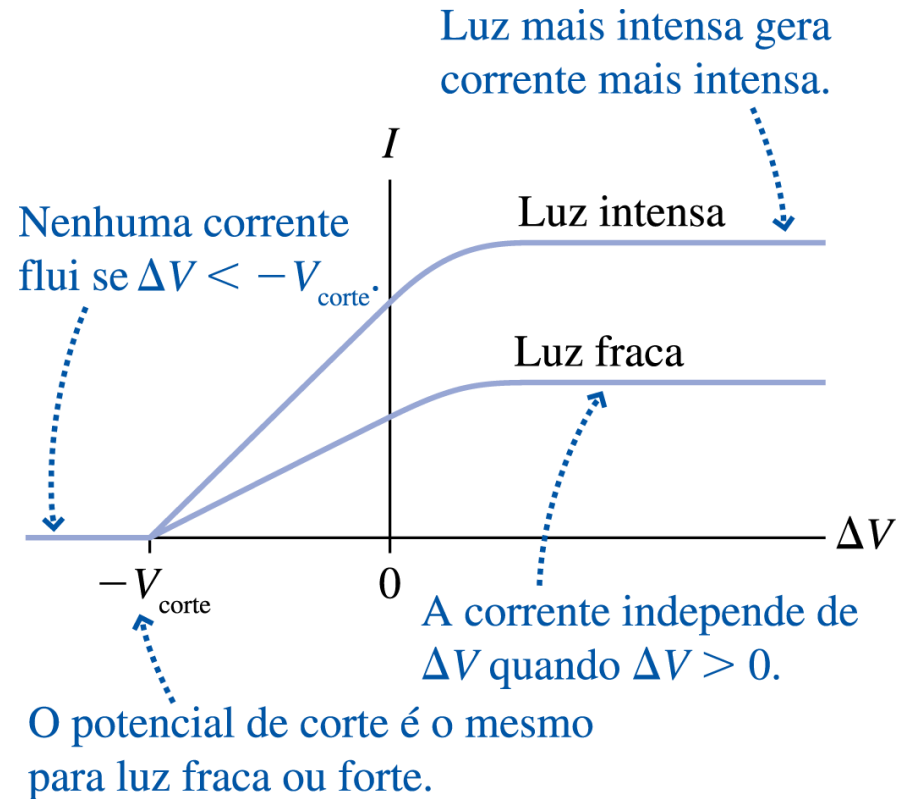
O EFEITO FOTOELÉTRICO

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.

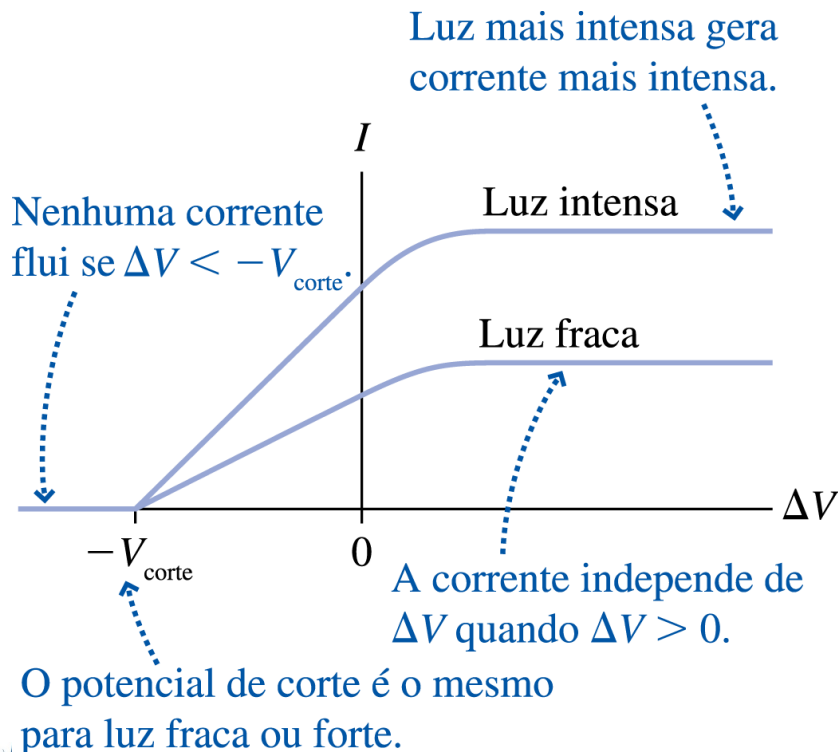


Resultado experimental 2: para luz de uma dada frequência f , se aplicarmos uma voltagem ΔV ao circuito, a corrente depende tanto de ΔV como da intensidade da luz



O EFEITO FOTOELÉTRICO

Resultado experimental 3: para luz de uma dada frequência f , se aplicarmos uma voltagem ΔV ao circuito, a corrente desaparece, para qq intensidade, quando ΔV passa de um certo limiar negativo $-V_{\text{corte}}$



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

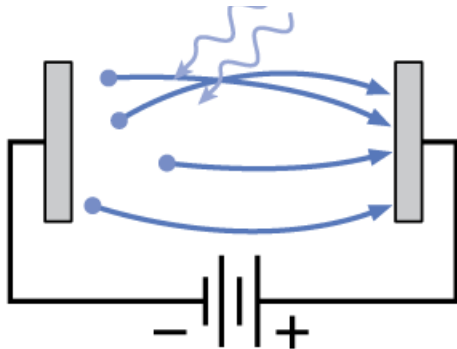
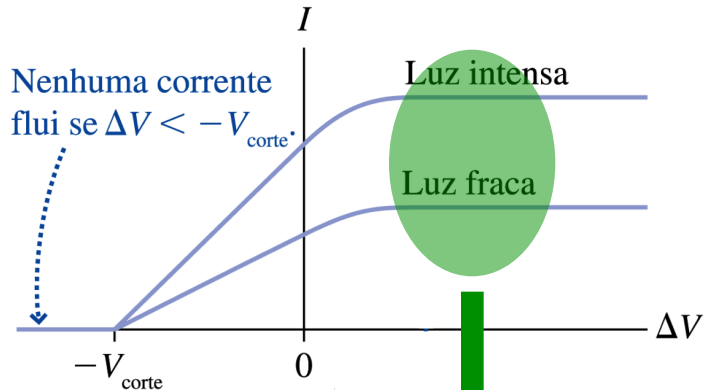
- A) Porque para voltagens grandes, não sobram no material mais elétrons para serem ejetados
- B) Porque todo equipamento suporta um limite máximo de corrente
- C) Porque para voltagens grandes, todos os elétrons ejetados do catodo chegam ao anodo
- D) Porque para voltagens grandes, nenhum elétron ejetado do catodo chega ao anodo



O EFEITO FOTOELÉTRICO

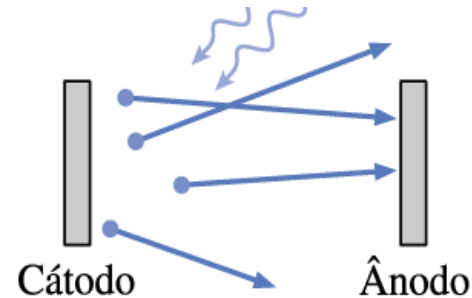
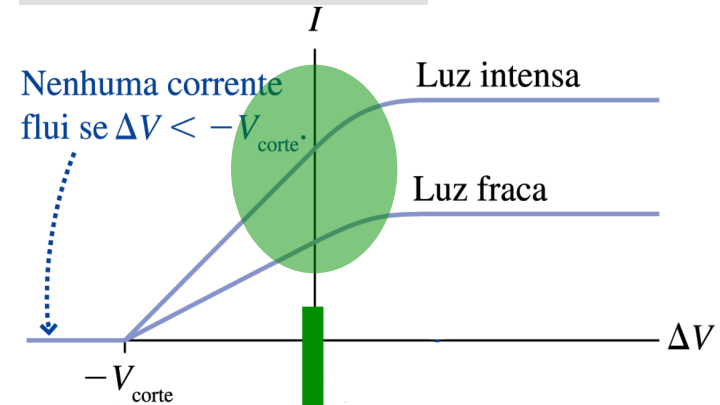
Variando a diferença de potencial ΔV da fonte

(a) $\Delta V > 0$



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

b) $\Delta V = 0$



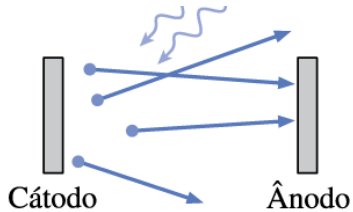
$\Delta V = 0$: os fotoelétrons deixam o cátodo em todas as direções. Poucos deles chegam ao ânodo.



O EFEITO FOTOELÉTRICO

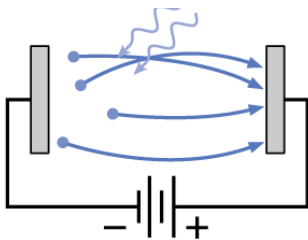
Variando a diferença de potencial ΔV da fonte

$$\Delta V = 0$$



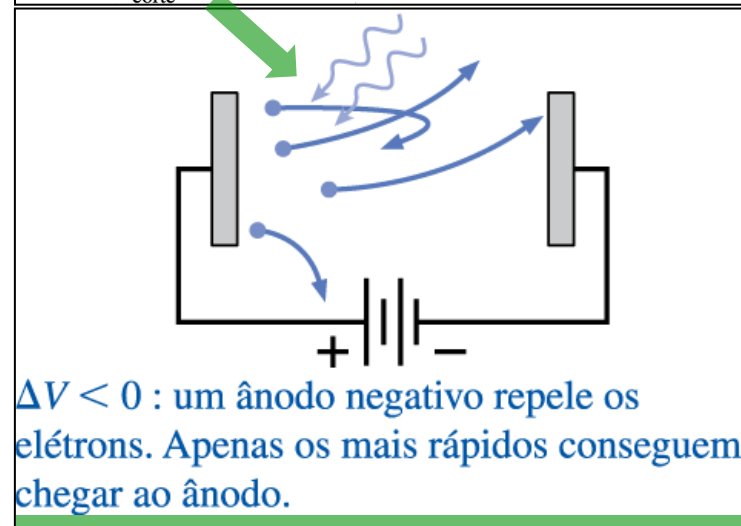
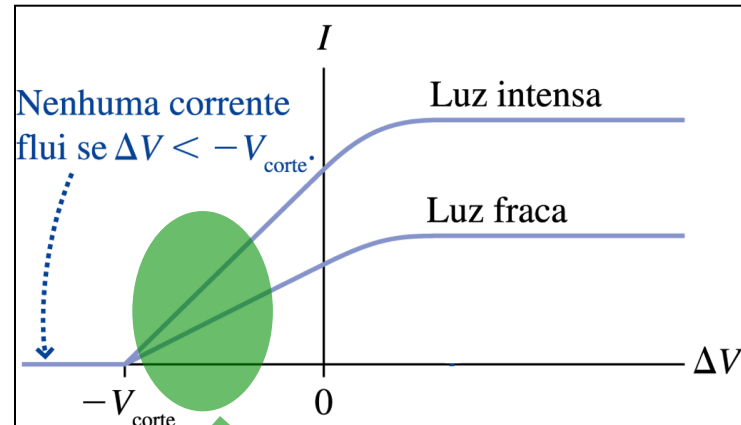
$\Delta V = 0$: os fotoelétrons deixam o cátodo em todas as direções. Poucos deles chegam ao ânodo.

$$\Delta V > 0$$



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

$$(a) \Delta V < 0$$



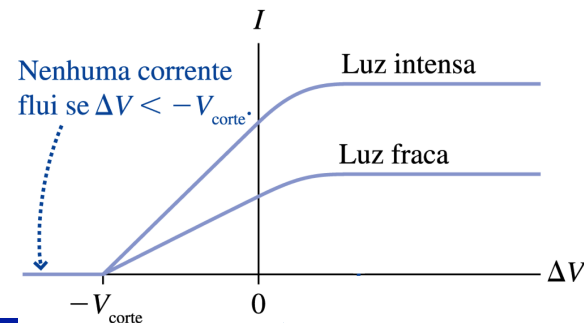
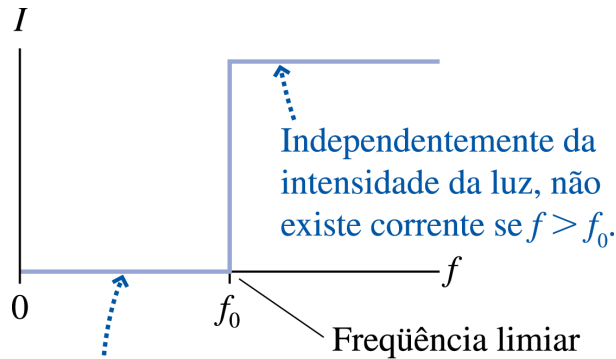
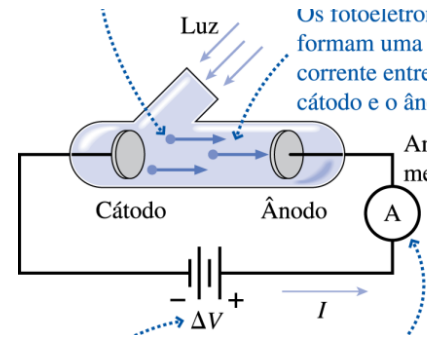
$\Delta V < 0$: um ânodo negativo repele os elétrons. Apenas os mais rápidos conseguem chegar ao ânodo.



O 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) Para $f > f_0$ a corrente I surge *imediatamente* quando a luz incide, por mais fraca que seja.
- 4) O valor de f_0 **depende do material** que constitui o cátodo.
- 5) Com $\Delta V > 0$ e alto a corrente é constante. **Reduzindo ΔV** , a corrente decresce até **0 A** no potencial de corte $\Delta V = -V_{\text{corte}} < 0$.
- 6) Para uma dada frequência f , o valor de V_{corte} **independe da intensidade da luz**.



O EFEITO FOTOELÉTRICO

Considerações energéticas

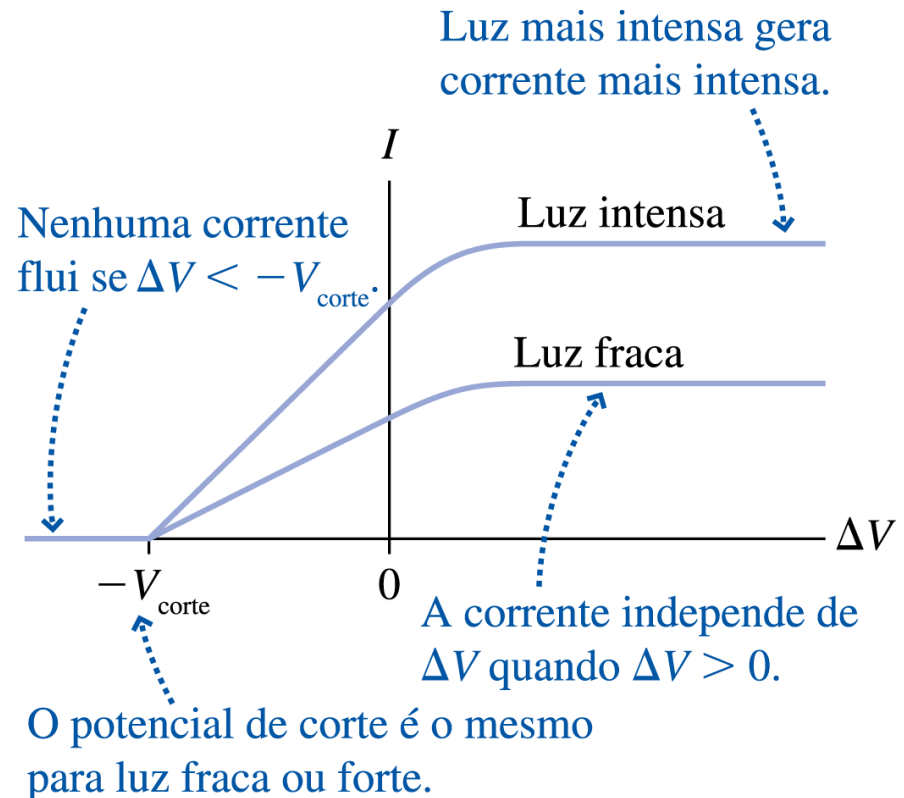
P: A energia eV_{corte} representa:

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

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

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

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



O EFEITO FOTOELÉTRICO

VISÃO CLÁSSICA - Considerações energéticas

- ✓ Elétron absorve uma energia $E_{\text{elétron}}$ da luz:

$$E_{\text{elétron}} \cong I \Delta t A \quad (\text{clássico})$$

- ✓ Elétron precisa superar uma barreira de energia E_0 para escapar do material.

$$K_{\text{max}} = E_{\text{elétron}} - E_0$$

- ✓ Após sair, ele é acelerado pelo potencial externo, ganhando ou perdendo energia cinética:

$$K_f = K_i + e \Delta V \rightarrow V_{\text{corte}} = (E_{\text{elétron}} - E_0)/e = K_{\text{max}}/e$$

REPARE que nesse caso V_{corte} dependeria da intensidade I ???



POSTULADOS DE EINSTEIN

1905 - Einstein propõe um modelo simples capaz de explicar todas as características do Efeito Fotoelétrico.
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 com energia $E=hf$. Cada foton viaja com a velocidade da luz- c .

2. Os quanta de luz são emitidos ou absorvidos integralmente. Podem ser emitidos 1, 2, 3, ... quanta, mas não 1,5 quantum.

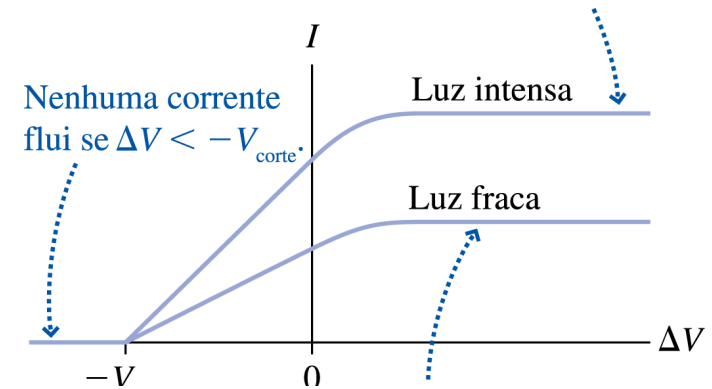
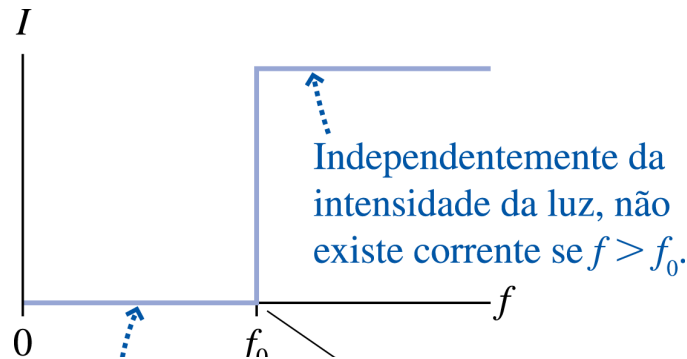
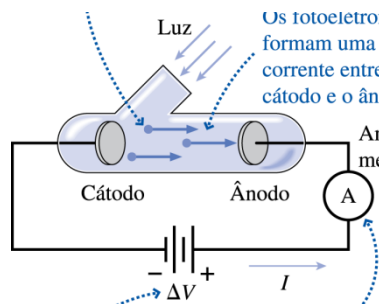
3) Um quantum da luz, quando absorvido pelo metal, transfere a *totalidade* de sua energia a um único elétron.



O EFEITO FOTOELÉTRICO

Implicações dos Postulados de Einstein

- 1) Uma iluminação mais intensa transfere maior quantidade de quanta e portanto, mais elétrons são ejetados: Corrente aumenta com Intensidade!
- 2) O potencial de corte não depende da Intensidade da luz.
- 3) O quantum de luz é absorvido instantaneamente, não há atraso.



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



O EFEITO FOTOELÉTRICO- MILLIKAN

Alguns dados experimentais para um cátodo de césio

R. Millikan – 1916

Confirma a previsão de Einstein:

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

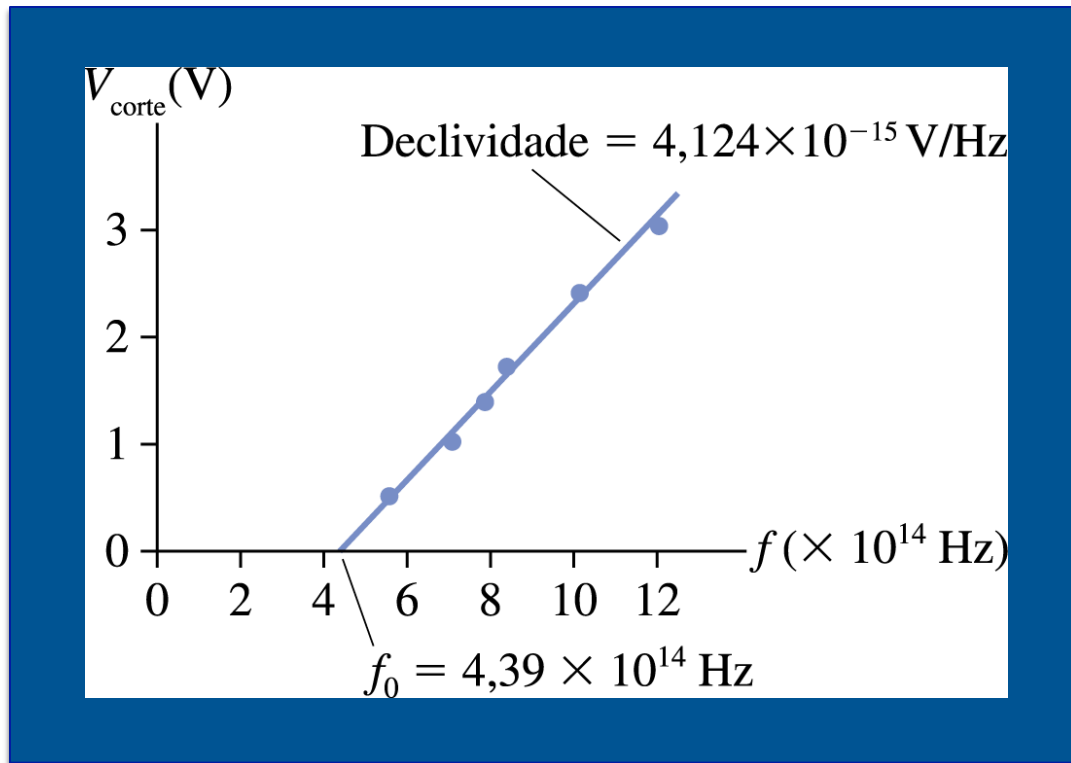
Conhecidos

$$e = 1,602 \times 10^{-19} \text{C},$$

Millikan obteve o valor da constante de Planck

$$h \sim 6,61 \times 10^{-34} \text{ J.s}$$

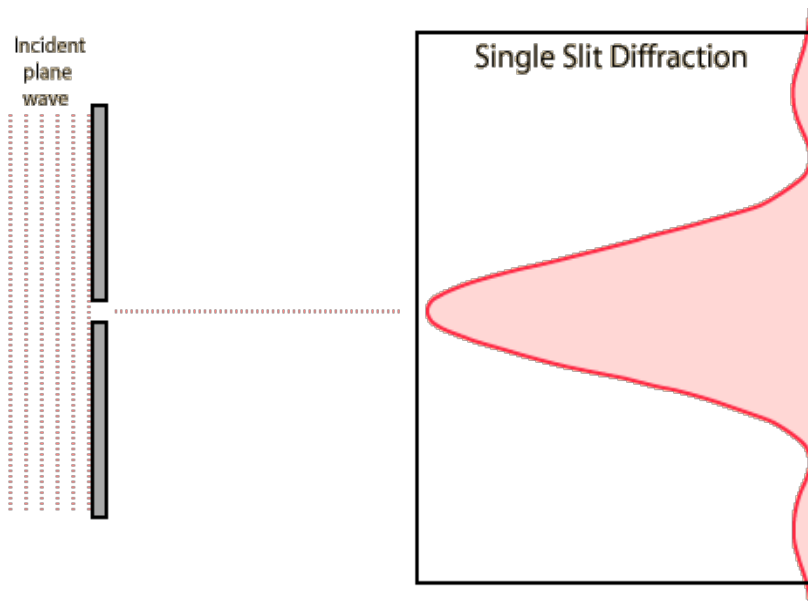
✓ Valor concorda com o estimado de forma independente pelas medições da radiação térmica de corpos negros



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:

