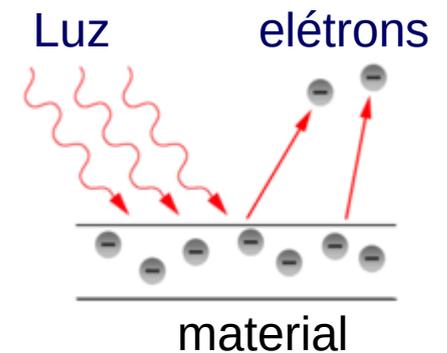


O efeito fotoelétrico

- No fim do século XIX uma série de resultados experimentais reacendeu uma discussão vigorosa sobre a natureza da luz.
- Tais experimentos não conseguiam ser explicados de maneira completa e satisfatória pela então aceita teoria clássica onde a luz era tida como sendo uma onda eletromagnética.
- Discutiremos a seguir uma desta experiências, conhecida como “Efeito Fotoelétrico”.

O efeito fotoelétrico

A figura ao lado ilustra pictoricamente o efeito fotoelétrico, que consiste na emissão de elétrons por um material, geralmente metálico, quando exposto a uma radiação eletromagnética (como a luz), de frequência suficientemente alta, como por exemplo radiação ultravioleta.



O ano de 1905 é considerado o "**annus mirabili**" da vida científica de Albert Einstein. Ao longo deste ano ele publicou cinco artigos, três dos quais revolucionaram a física. Entre estes encontra-se sua abordagem ao problema do efeito fotoelétrico que lhe rendeu o Prêmio Nobel de 1921.

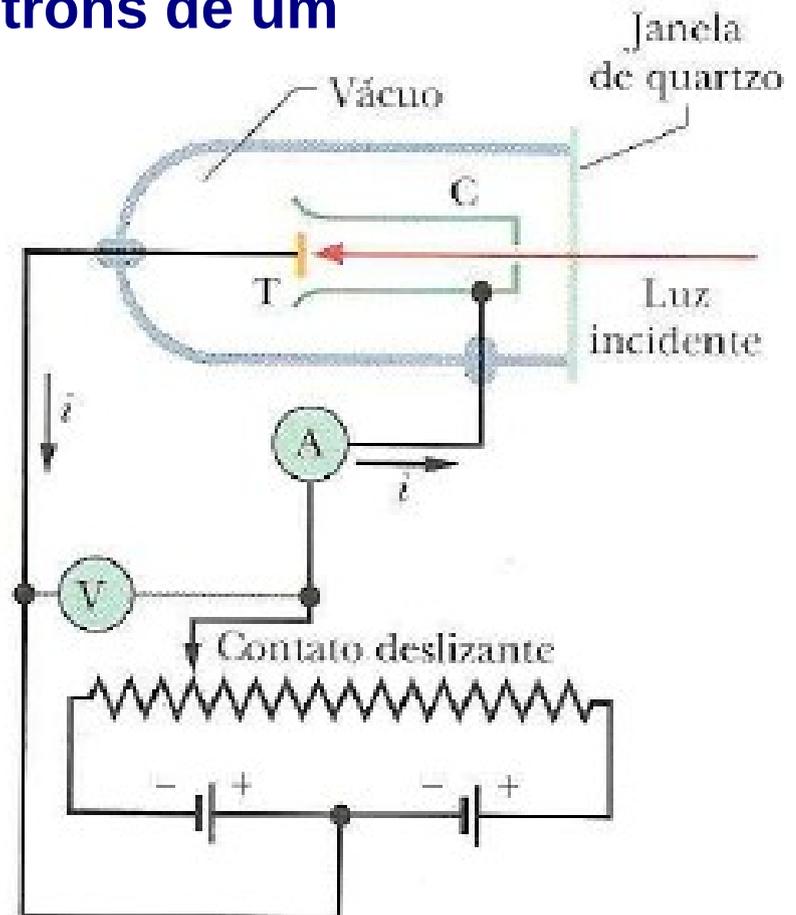
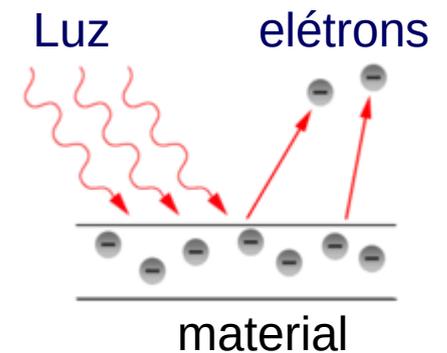
A descoberta do efeito fotoelétrico se deu por acaso, quando Heinrich Hertz, em **1887**, investigava a natureza eletromagnética da luz. Estudando a produção de descargas elétricas entre duas superfícies de metal em potenciais diferentes, ele observou que uma faísca proveniente de uma superfície gerava uma faísca secundária na outra.

Mais detalhes sobre a evolução experimental em torno da descoberta do efeito fotoelétrico pode ser encontrada em <http://www.if.ufrgs.br/einstein/efeitofotoeletricodescoberta.html>

O efeito fotoelétrico

Devemos ressaltar que a emissão de raios catódicos (elétrons em 1897 Thomson) era induzida por aquecimento, e portanto, o fato de metais aquecidos ejetarem elétrons já era conhecido e completamente explicado pela física clássica. O que de fato é novo e intrigante é o fato da luz induzir a ejeção de elétrons de um alvo metálico.

Na figura ao lado há um orifício no anodo por onde a luz passa e incide sobre um alvo metálico (catodo). Estes eletrodos são polarizados com um potenciômetro formado por um reostato. Quando o contato deslizante fica mais à direita a diferença de potencial entre o catodo e anodo fica positiva e vice-versa: mais à esquerda negativa.

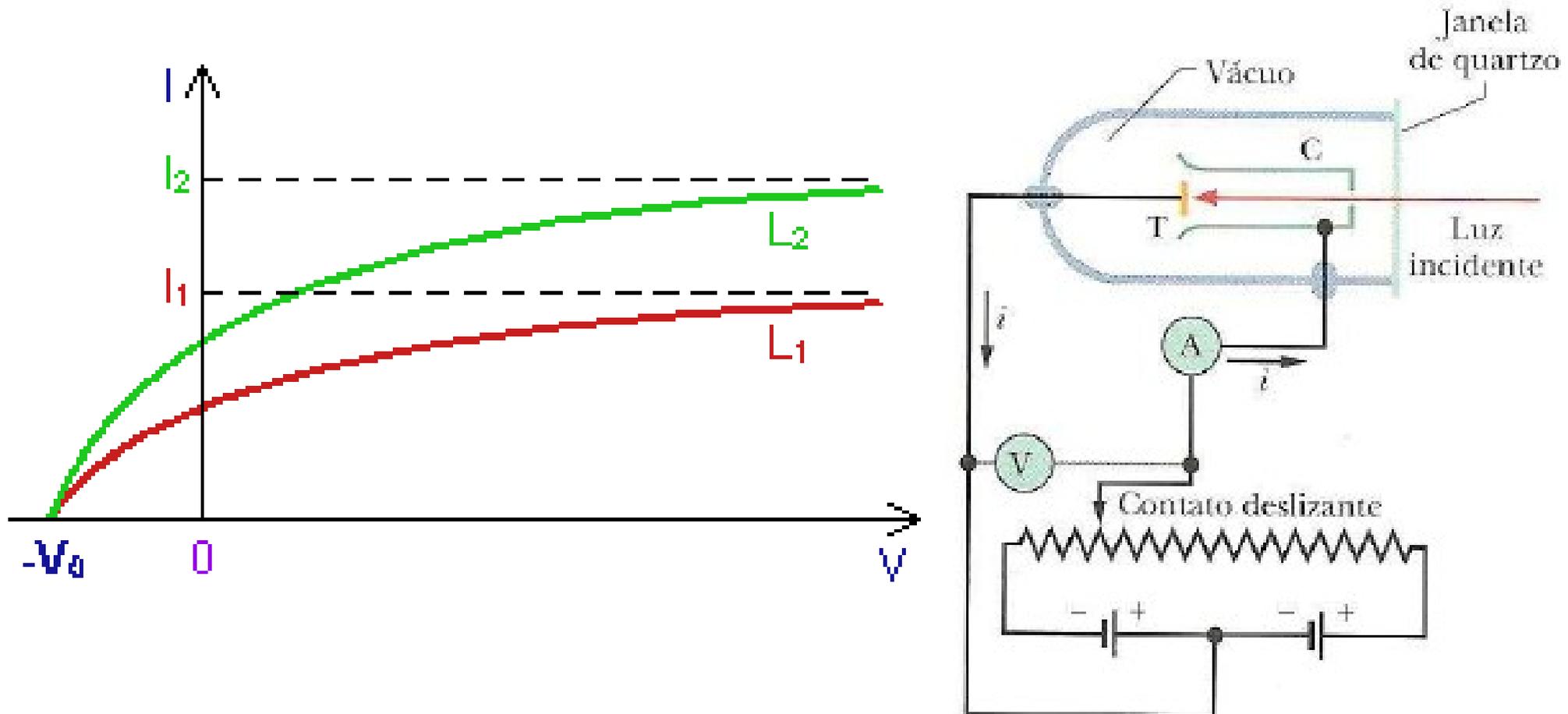


O efeito fotoelétrico

Resultados!!! - Resultado 1

A figura abaixo mostra um resultado típico para curva Tensão versus corrente obtida no experimento fotoelétrico para feixes luminosos incidentes de mesma frequência e intensidades diferentes $I_2 > I_1$.

Note que o potencial de corte independe da intensidade e vale V_0 para as duas intensidades!!!!. Isto é inexplicável classicamente.

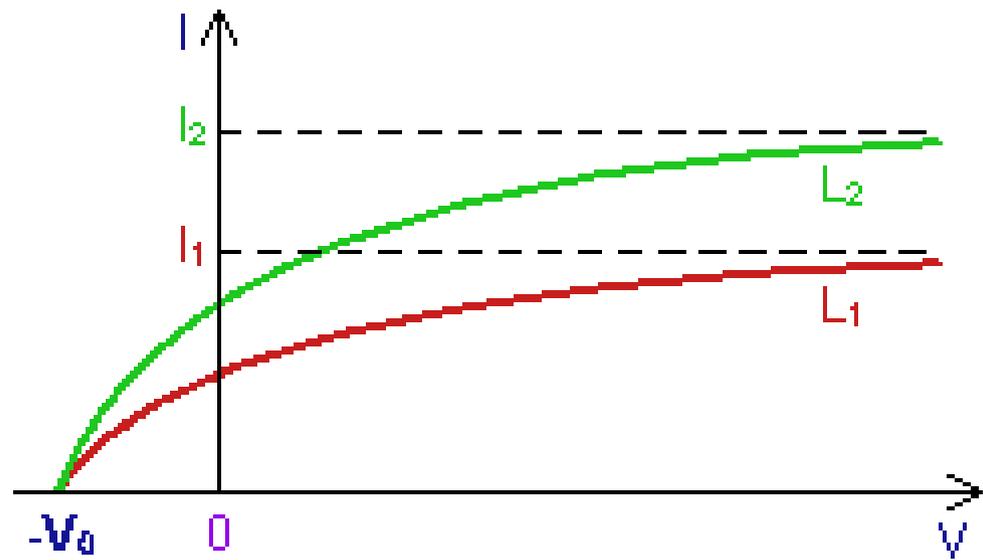


O efeito fotoelétrico

Resultados!!! - Resultado 1

O potencial de corte é negativo e representa o valor da polarização contrária capaz de frear os elétrons mais energéticos que são emitidos pela placa iluminada, tornando assim a corrente registrada no amperímetro nula.

Note que o potencial de corte independe da intensidade e vale V_0 para as duas intensidades.



Este resultado causou uma certa estranheza. Este potencial deveria mesmo independe da intensidade?

Segundo a interpretação clássica vigente à época, a luz teria natureza ondulatória e seria formada por oscilações dos campos elétrico e magnético, com a intensidade (potência por unidade de área) bem estabelecida e ligada ao vetor de Poynting. Intensidade maior implicaria em maiores campos acelerantes!!! Estranho muito estranho!!!! Há algo de novo nisso!

Questões- Sobre o efeito fotoelétrico

Os resultado das experiências sobre o efeito fotoelétrico mostrou a existência de um potencial de corte.

a- O valor deste potencial de corte dependia do tipo de material do eletrodo?

A resposta é não **Ele afeta apenas os elétrons foto-emitidos que são indistinguíveis.**

Segundo a interpretação ondulatória para luz, a relação entre potência e amplitude do campo elétrico **é proporcional ao quadrado do módulo do campo elétrico.**

b- Então a interpretação clássica é incapaz de explicar a existência de um potencial de corte?

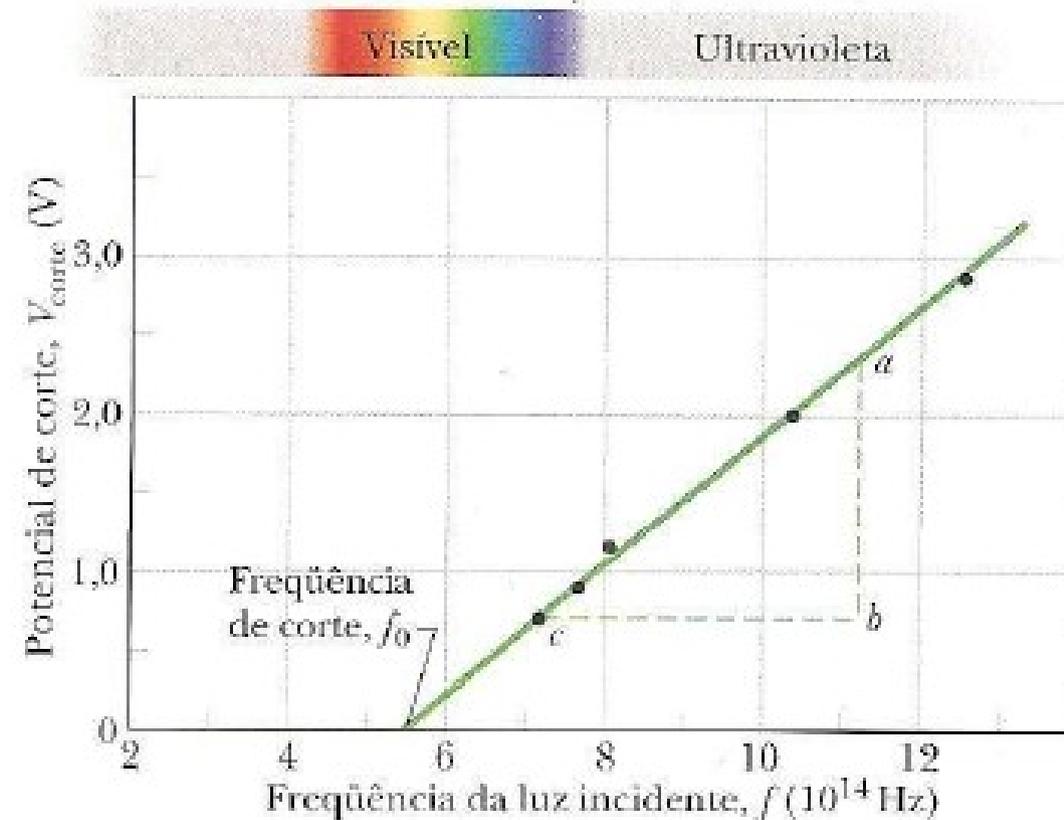
R. Na verdade ele é capaz!!!!!! A incapacidade dela reside no fato deste potencial de corte independer da potência da luz incidente. Feixe luminoso mais potente criaria fotoelétrons mais energéticos e portanto mais difíceis de parar. Isto não acontece na prática!

Outras questões-

c- O efeito fotoelétrico acontece para qualquer frequência (cor) da luz incidente?

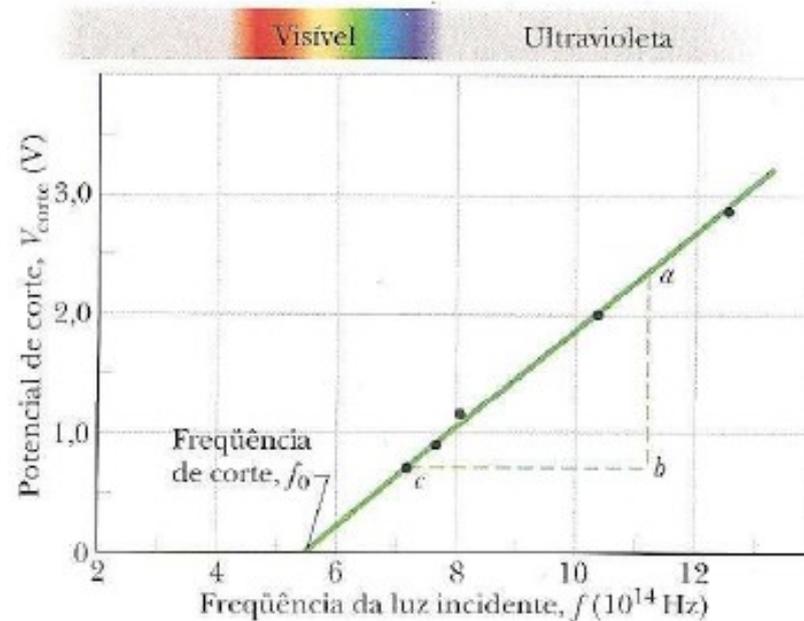
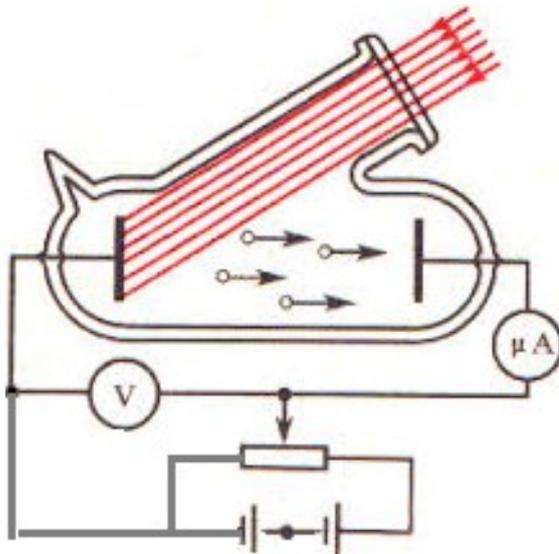
Um resultado da experiência sobre o efeito fotoelétrico obtido por A. Millikan revelou a existência de uma “frequência de corte”. O que seria esta “frequência de corte? É uma frequência limite, abaixo da qual não há ejeção de elétrons, não importando qual seja a potência do feixe de luz incidente. Tal frequência depende da natureza do material alvo sobre o qual incide o feixe.

O efeito fotoelétrico



O efeito fotoelétrico

A esquerda vemos um esquema da montagem para realizar o experimento do sobre o efeito fotoelétrico. O feixe luminoso representado em vermelho incide sobre um alvo fazendo com que elétrons sejam arrancados do mesmo. Vê-se também um circuito de polarização dos eletrodos interno a um tubo de vidro onde se fez vácuo.



A figura da direita mostra o resultado da experiência de Millikan para a variação do potencial de corte em função da frequência do feixe de luz incidente sobre um alvo de sódio. O ponto da curva obtida, e extrapolada como uma reta, que cruza o eixo das frequências onde o potencial de corte é zero é chamado frequência de corte.

O efeito fotoelétrico

Uma interpretação clássica para o efeito fotoelétrico seria o de que a luz é uma onda eletromagnética tem um campo elétrico associado e este promoveria uma agitação (térmica) dos elétrons, que depois de atingida uma determinada amplitude, seriam ejetados. O que nesta explicação está em desacordo com o resultado experimental de Millikan? A resposta é: **“quase nada está em desacordo, tirando dois detalhes não previstos: Existência de frequência de corte e potencial de corte, ambos independentes da potência do feixe de luz incidente”**.

Para explicar o efeito fotoelétrico verificado observado por pela primeira vez por A. E. Becquerel em 1839 e confirmado por Heinrich Hertz em 1887, Einstein propôs, em 1905, que a luz fosse constituída por partículas que ele denominou de fótons. Qual é a expressão para energia que cada um destes fótons carregava?

Segundo Einstein, um *quantum* de luz de frequência f tem uma energia dada

$$\text{por } E = hf \quad (\text{energia do fóton}),$$

onde h é a chamada **constante de Planck**, que tem o valor

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

Um pouco de matéria!!!

O efeito fotoelétrico

Segundo a interpretação corpuscular da luz dada por Einstein para explicar o efeito fotoelétrico, uma maior intensidade do feixe incidente estaria ligado a um maior número de fótons no feixe incidente. Cada um deles transportaria um quantum de energia com valor igual a hf . Estas partículas viajariam à velocidade da luz e ao colidir com os elétrons no alvo entregariam esta energia ao elétrons, uma parte desta energia sendo convertida em energia cinética e outra parte usada para desligar o elétron do material do alvo.

A potência é dada pela taxa temporal com que a energia flui da lâmpada. Se cada fóton carrega uma *quantum* de energia, a quantidade total de energia será igual ao número de fótons (N) multiplicado pela energia de cada um deles, sendo dada por:

Exemplo: Uma lâmpada de vapor de sódio é colocada no centro de uma casca esférica que absorve toda a energia que chega até ela. A lâmpada tem uma potência de 100 W; suponha que toda a luz é emitida com um comprimento de onda de 590 nm. Quantos fótons são emitidos por segundo?

O efeito fotoelétrico

Solução!

$$P = \frac{dE}{dt} = \frac{d(N hf)}{dt} = \frac{d(N hc/\lambda)}{dt} = hc/\lambda \frac{dN}{dt}$$

$$\frac{dN}{dt} = P \frac{\lambda}{hc}$$

$$\frac{dN}{dt} = 100 \text{ W} \cdot \frac{590 \times 10^{-9} \text{ m}}{6,63 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s} \cdot 3 \times 10^8 \text{ m/s}} = 2,97 \times 10^{20} \text{ fótons /s}$$

Houston We have a problem!!!!

Como pode uma partícula se deslocar a velocidade da luz?

Segundo a Teoria da Relatividade do próprio Einstein, não seria necessário gastar uma energia infinita pra isso acontecer? Colocar uma partícula à velocidade da luz!!!!

O efeito fotoelétrico

De fato trata-se de uma partícula relativística já que tem velocidade c . Portanto sua energia total é dada por:

$$E = \gamma mc^2 \quad \text{ou} \quad E = mc^2 + K$$

O fator de Lorentz neste caso é infinito !!!!! E agora????

O fóton por este lado teria energia infinita !!! Como resolver isso?

Um pouco de matéria!!!

Einstein interpretou o efeito fotoelétrico como sendo causado pela ejeção de elétrons do alvo devido a colisão deles com partículas de luz as quais ele denominou de fótons, dando portanto a luz uma natureza corpuscular. Cada fóton leva um quantum de energia hf (constante de Planck vezes a frequência do luz incidente) . Quando toda a energia do fóton incidente é transferida para o elétron alvo, uma parte vira energia cinética do elétron (neste caso a energia máxima K_{max}) e a outra parte consumida para vencer a ligação que o elétron tem com o material do alvo, desligando-o do mesmo. A equação fotoelétrica de Einstein condensa estas informações na forma:

$$hf = K_{max} + \Phi$$

O efeito fotoelétrico

Na equação fotoelétrica de Einstein

$$hf = K_{max} + \Phi$$

existe uma grandeza Φ conhecida como função trabalho. Ela representa **o gasto de energia para liberar o elétron do alvo**. Esta grandeza **não** depende da frequência da luz incidente, contudo **depende da natureza do material**. A unidade de grandeza usada para quantificar esta grandeza é geralmente é o eV

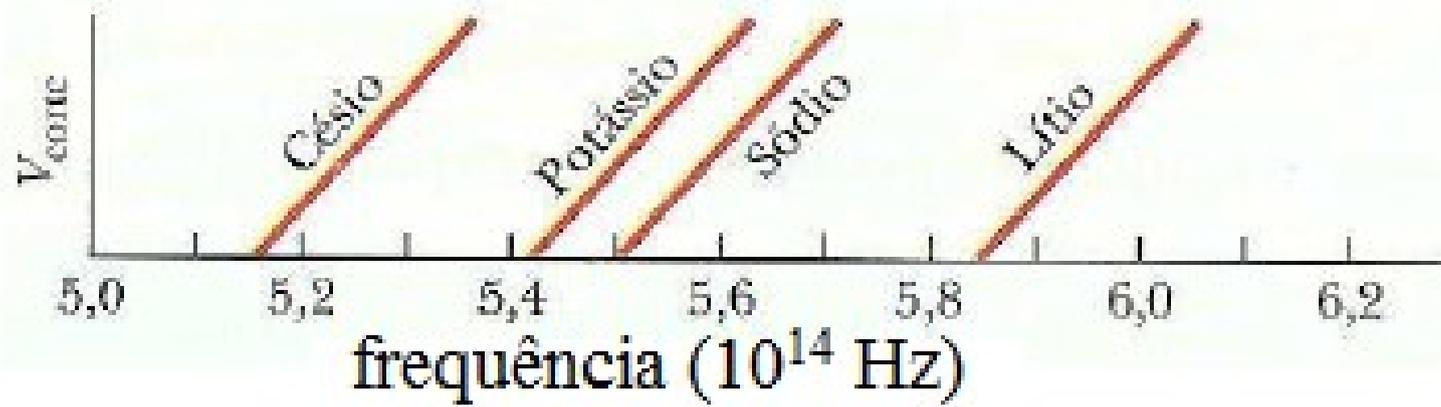
A interpretação corpuscular dada por Einstein para efeito fotoelétrico supera a incapacidade da física clássica de explicar o resultado experimental?

Na interpretação corpuscular dada por Einstein, um aumento da intensidade está ligado a um aumento na taxa temporal com que os fótons fluem, não aumentando a energia de cada um deles individualmente, e desta forma, tanto o valor do potencial de corte e da frequência de corte independentes da intensidade ficam justificados!!!!

O efeito fotoelétrico



TESTE 2 A figura mostra vários gráficos como o da Fig. 38-2 obtidos com alvos de césio, potássio, sódio e lítio. As retas são paralelas. (a) Coloque os alvos na ordem dos valores da função trabalho, começando pelo maior. (b) Coloque os gráficos na ordem dos valores de h , começando pelo maior.



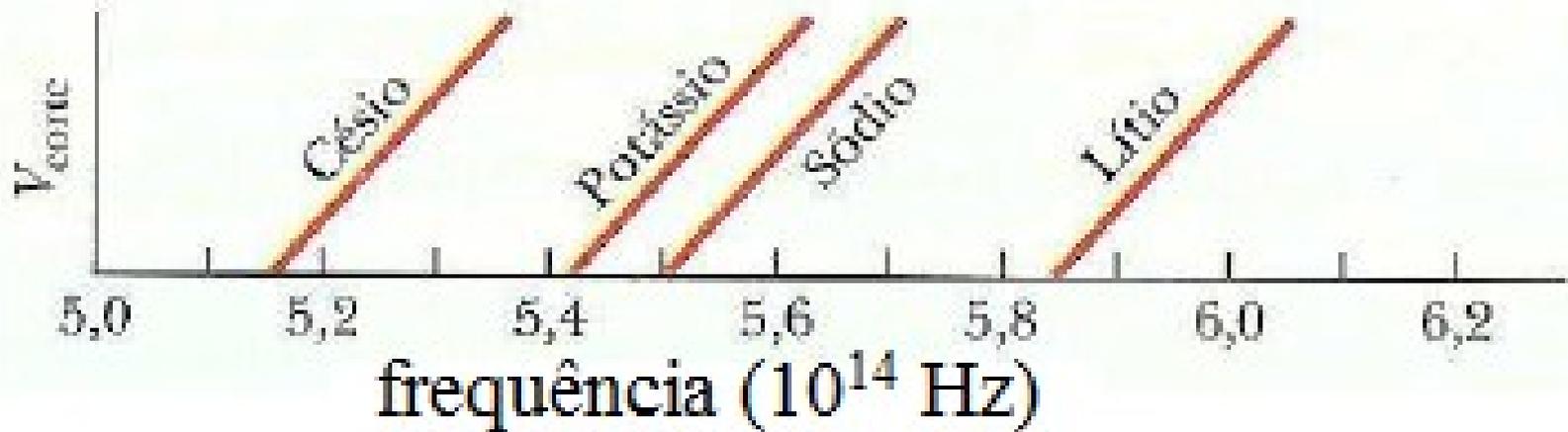
Segundo Einstein

$$hf = K_{\text{max}} + \Phi$$

$$E = hf_0 \Rightarrow V_{\text{corte}} = 0 \Rightarrow K_{\text{max}} = 0 \cdots \Phi = hf_0$$

O efeito fotoelétrico

Questão: Determine o valor da função trabalho Φ do sódio a partir da figura.



(Resposta) Energia limiar implica $K = \text{zero}$

$$hf_0 = 0 + \Phi = \Phi,$$

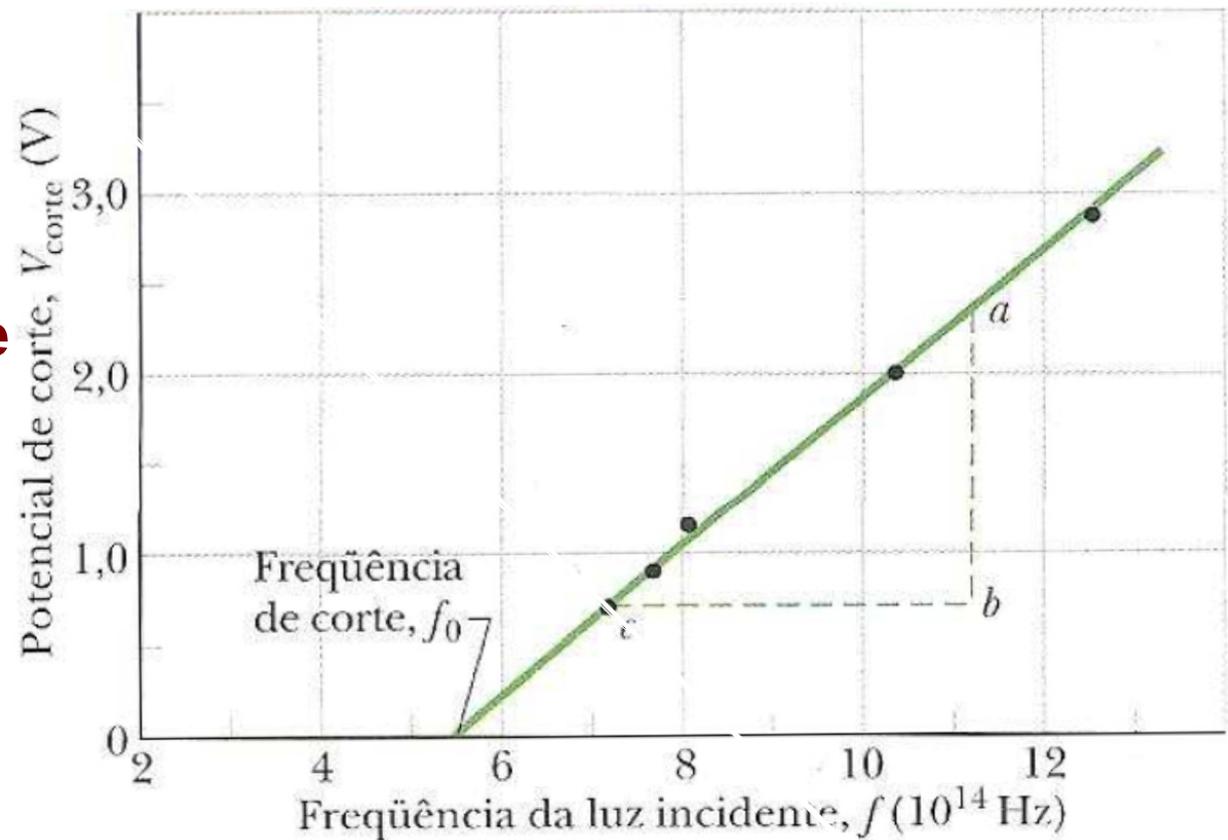
$$\begin{aligned}\Phi &= hf_0 = (6,63 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s})(5,5 \times 10^{14} \text{ Hz}) \\ &= 3,6 \times 10^{-19} \text{ J} = 2,3 \text{ eV}.\end{aligned}$$

O efeito fotoelétrico

Exercício:
Obtenha o valor da constante de Planck, a partir do gráfico que exhibe o resultado de Millikan,

$$hf = K_{max} + \Phi$$

$$hf = eV_{corte} + e\Phi$$



$$\frac{h}{e} = \frac{ab}{bc} = \frac{2,35 \text{ V} - 0,72 \text{ V}}{(11,2 \times 10^{14} - 7,2 \times 10^{14}) \text{ Hz}} = 4,1 \times 10^{-15} \text{ V} \cdot \text{s}.$$

Multiplicando esse resultado pela carga elementar e , obtemos:

$$h = (4,1 \times 10^{-15} \text{ V} \cdot \text{s})(1,6 \times 10^{-19} \text{ C}) = 6,6 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s},$$