

Efeito Fotoelétrico e Efeito Compton

Lucas Petersen Barbosa Lima

Palestra e relato de experimento
apresentados na disciplina de
Epistemologia da Física, 2008

(reprodução no site do professor autorizada pelo autor)

Tipos de Interação da Radiação Eletromagnética com a Matéria

Existem basicamente 3 tipos de interação da radiação eletromagnética com a matéria, que são os listados a seguir:

- Efeito Fotoelétrico
- Efeito Compton
- Produção de Pares (não objeto desta palestra)

Breve Histórico do Efeito Fotoelétrico

- 1886 – Heinrich Hertz durante as experiências para detecção das *ondas eletromagnéticas de Maxwell*, descobre que uma descarga elétrica entre 2 eletrodos ocorre mais facilmente quando se faz incidir sobre um deles luz ultravioleta
- 1888 - Wilhelm Hallwachs realizou algumas experiências baseado nas descobertas de Hertz, em especial o eletroscópio
- 1899 – J.J. Thomson verificou a emissão de elétrons

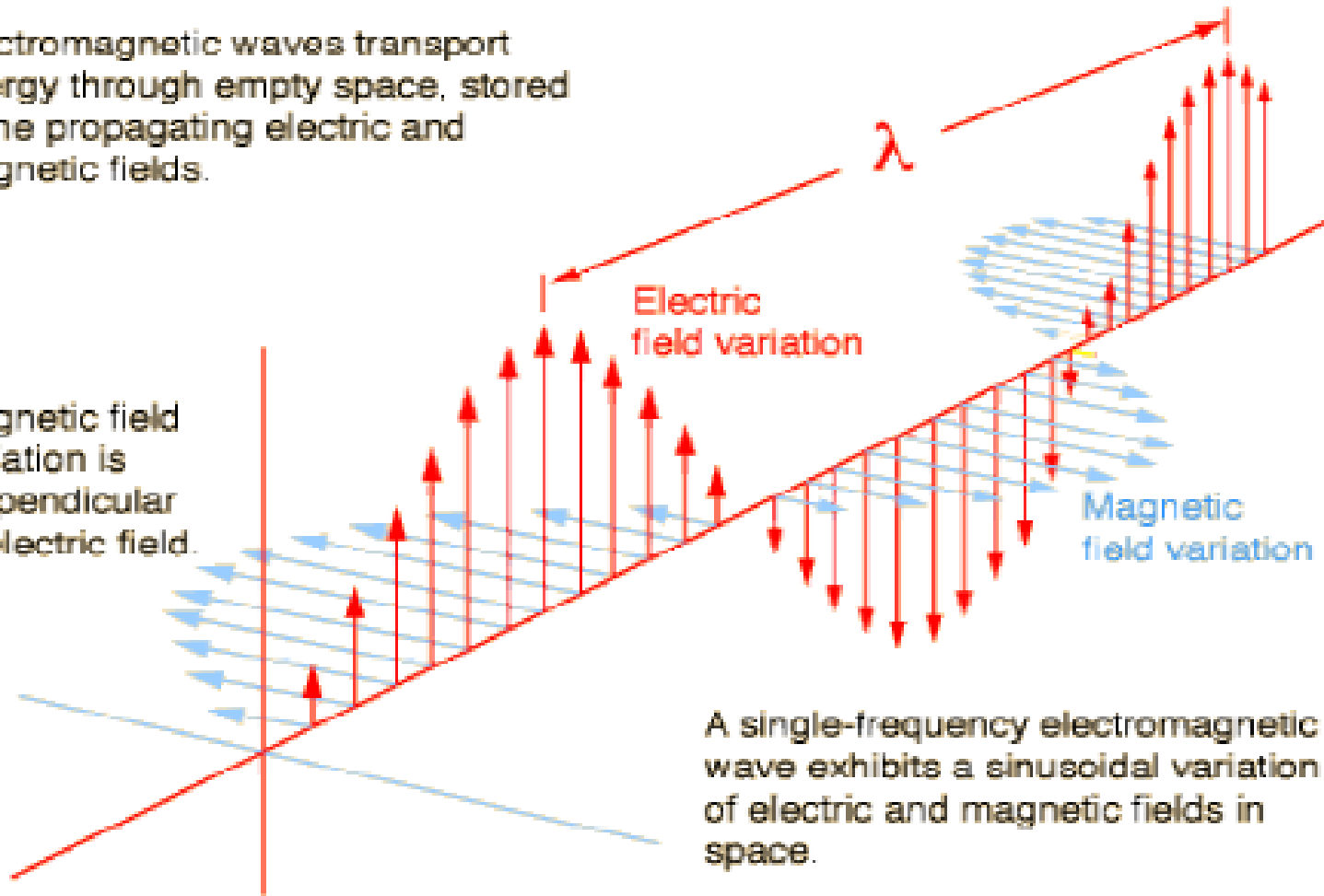
Breve Histórico do Efeito Fotoelétrico

- 1902 - Philip Lenard mostrou que a luz ultravioleta facilita a descarga ao fazer com que elétrons sejam emitidos da superfície do catodo, esta foi uma das primeiras medidas da **energia dos foto-elétrons**
- 1905 – Albert Einstein baseado na teoria da quantização de Planck e nos experimentos de Lenard, **propõe que a energia radiante está quantizada em pacotes concentrados de energia**, que depois iriam chamar-se de **fótons**
- 1915 - Robert Millikan verifica a teoria proposta por Einstein

Onda Eletromagnética

Electromagnetic waves transport energy through empty space, stored in the propagating electric and magnetic fields.

Magnetic field variation is perpendicular to electric field.

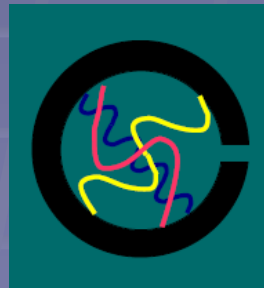
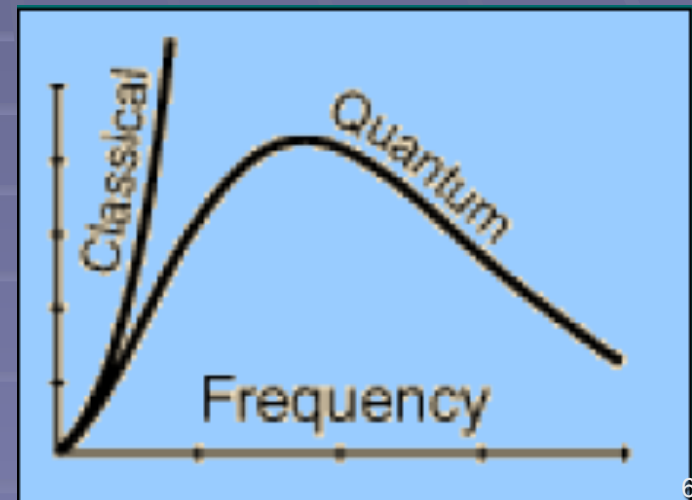
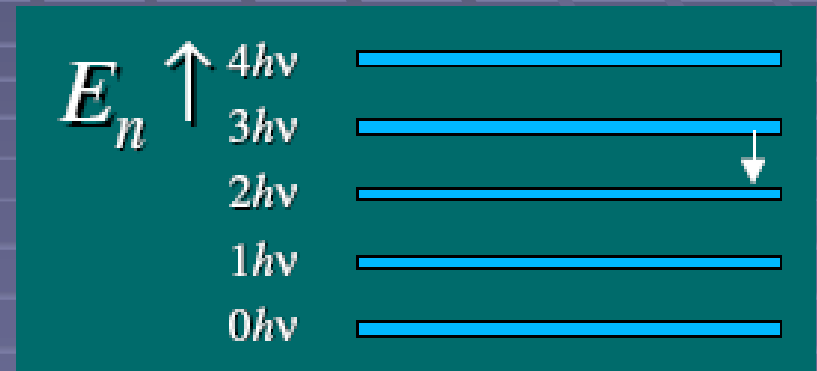


A single-frequency electromagnetic wave exhibits a sinusoidal variation of electric and magnetic fields in space.

“Quantização” de Planck

Em 1900, Planck propõe para explicar a Radiação de Corpo Negro, que a energia da radiação seria quantizada, ou seja, poderia assumir somente alguns valores.

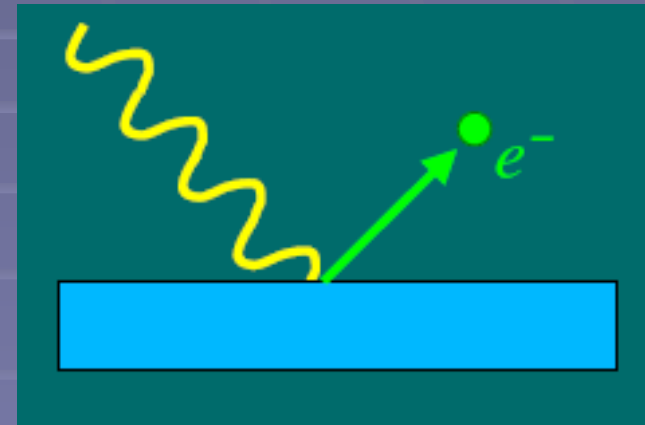
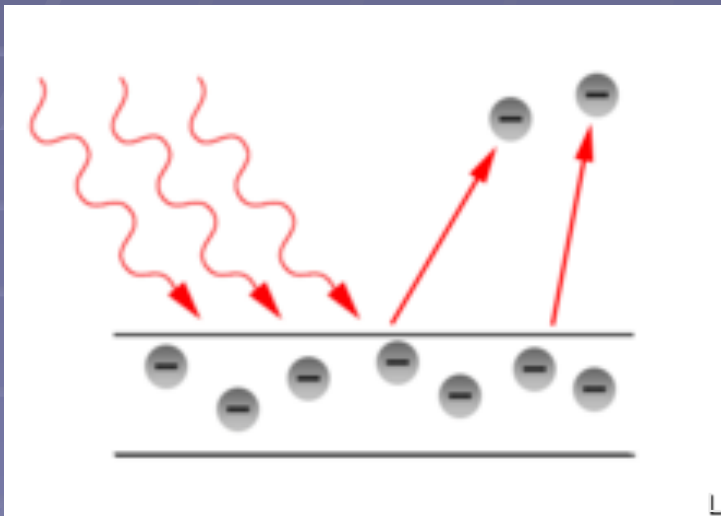
Contudo, a teoria de Planck foi aceita, pois explicava perfeitamente nos resultados experimentais, ao contrário da teoria de Rayleigh-Jeans (catástrofe do ultravioleta).



O que é o Efeito Fotoelétrico?

O *efeito fotoelétrico* é a emissão de elétrons por uma superfície quando exposta a uma radiação eletromagnética com uma certa frequência.

Logo, se incidirmos luz sobre uma superfície metálica, iremos ‘observar’ a emissão de elétrons ‘saindo’ da superfície.



Efeito Fotoelétrico – Proposto por Einstein

Einstein supôs que um tal pacote de energia está inicialmente localizado em um pequeno volume do espaço, e que permanece localizado à medida que se afasta da fonte com velocidade c . Ele propõe que a energia E do pacote, ou fóton, está relacionada com sua frequência ν pela equação:

$$E = h\nu$$

Propõe, também que no processo fotoelétrico um fóton é completamente absorvido por um elétron no fotocatodo.

Efeito Fotoelétrico - Teoria

Analisando o *efeito fotoelétrico* através do modelo proposto por Einstein (1905), temos que:

Energia do Fóton = Energia necessária para remover o elétron +
Energia cinética do elétron emitido

Ou seja:

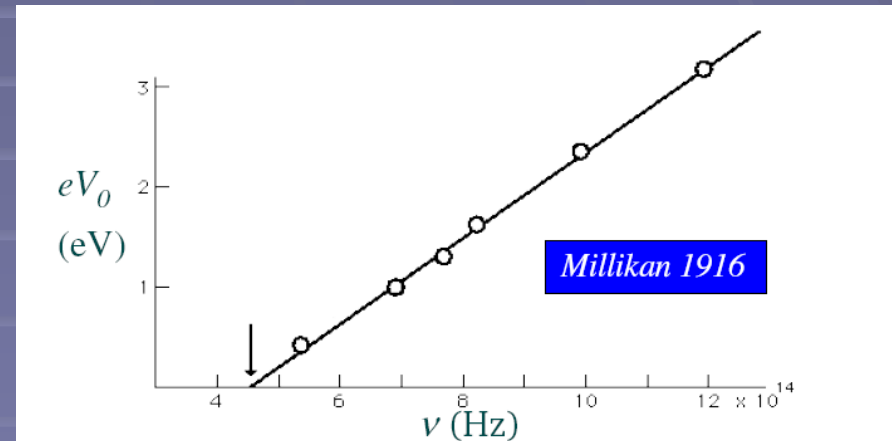
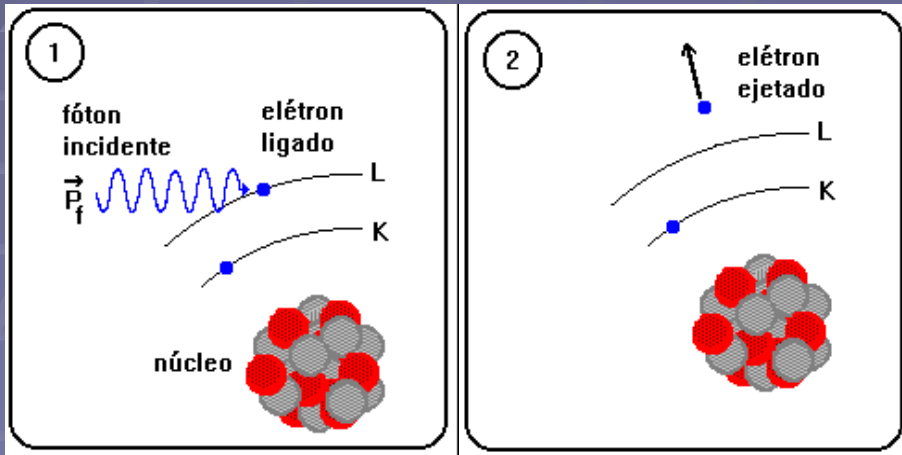
$$h\nu = \phi + E_c$$

Com isso, nota-se que se tivermos um fóton incidente com energia igual a energia necessária para remover o elétron da superfície do material, a energia cinética do elétron emitido será nula. Assim, esta energia do fóton, é chamada de *função trabalho* (ou *energia mínima para remover o elétron*). Então:

$$\phi = h\nu_0$$

Efeito Fotoelétrico - Teoria

Logo, se a frequência do fóton for menor que a frequência ν_0 , não é observado o efeito fotoelétrico. Sendo assim, a frequência ν_0 , é chamada de frequência de corte, (ou *limiar de corte ou, ainda, limiar do efeito fotoelétrico*).



Teoria Clássica das Ondas Eletromagnéticas (O.E.M.) e Efeito Fotoelétrico

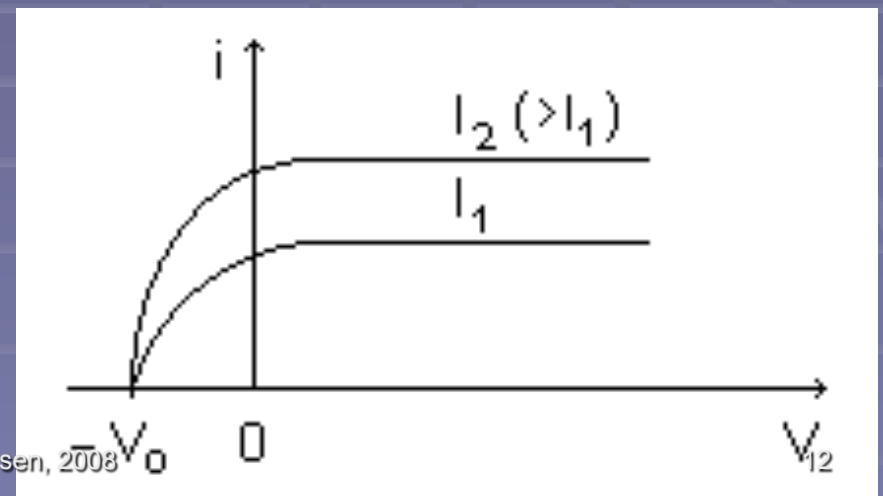
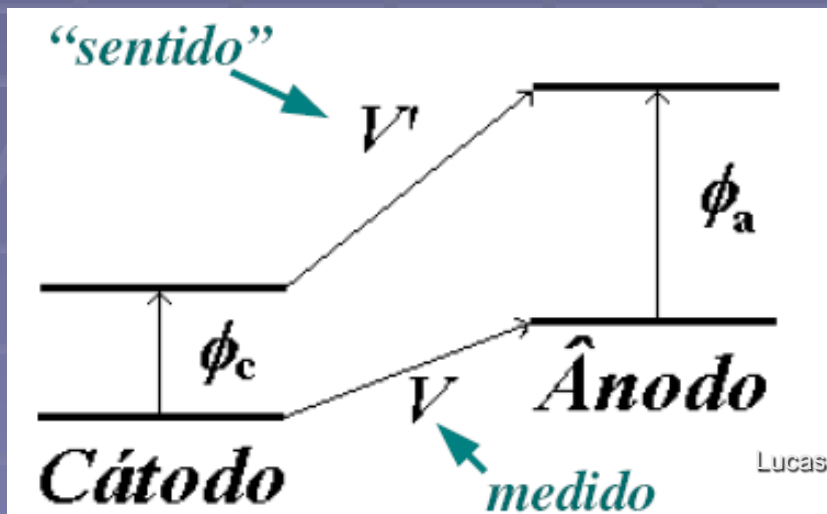
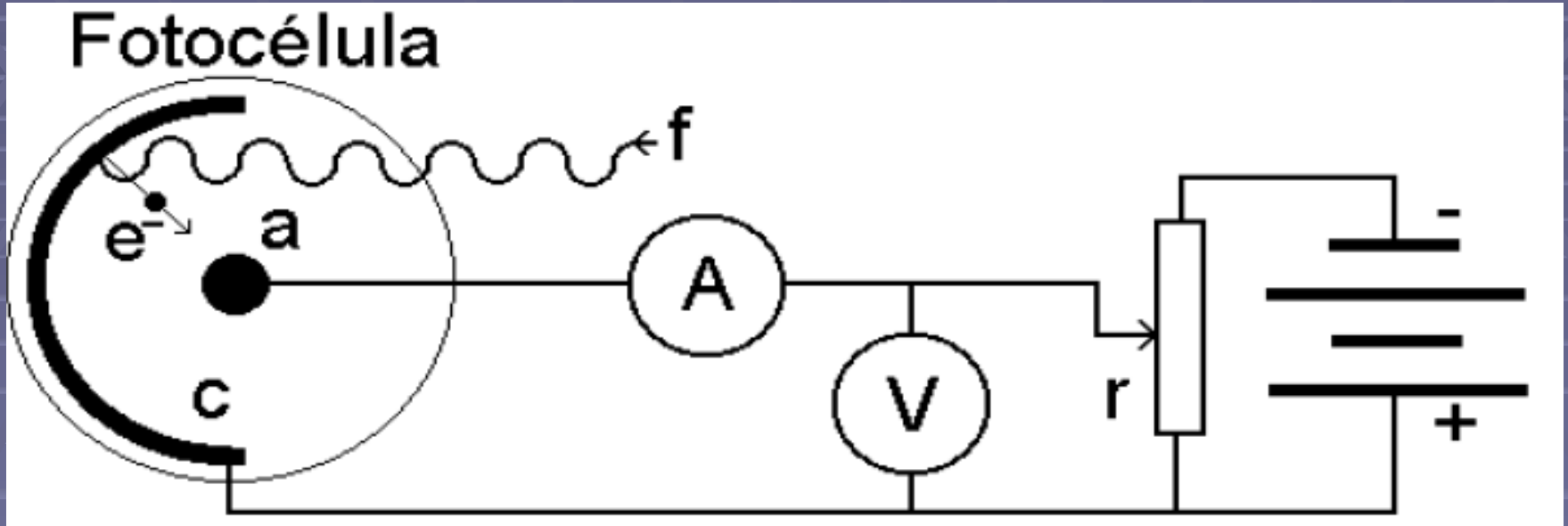
Teoria Clássica

- A energia cinética dos elétrons emitidos **depende** da Intensidade da O.E.M.
- **Haveria um intervalo de tempo** entre o instante que a luz incide sobre a superfície e o instante da ejeção do elétron.
- O efeito fotoelétrico **ocorre para qualquer frequência** desde que a intensidade da O.E.M fosse o bastante para dar a energia necessária à ejeção dos elétrons.

Efeito Fotoelétrico

- A energia cinética dos elétrons **não depende** da Intensidade.
- **Não há um intervalo de tempo mensurável** entre o instante que a luz incide sobre a superfície e o instante da ejeção do elétron.
- Para cada superfície existe um **limiar de frequência** característico, tal que **abaixo deste limiar o efeito fotoelétrico não ocorre**.

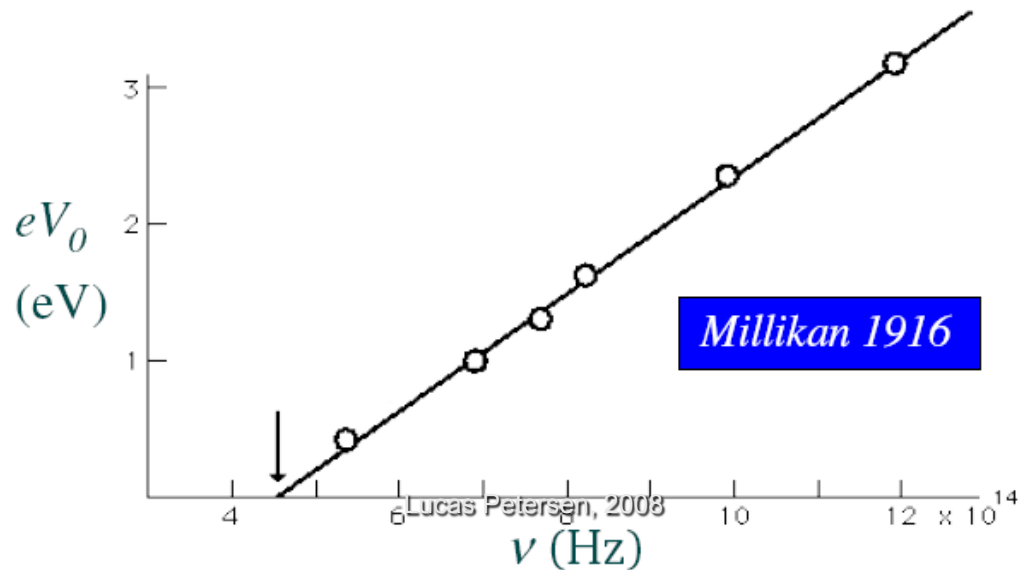
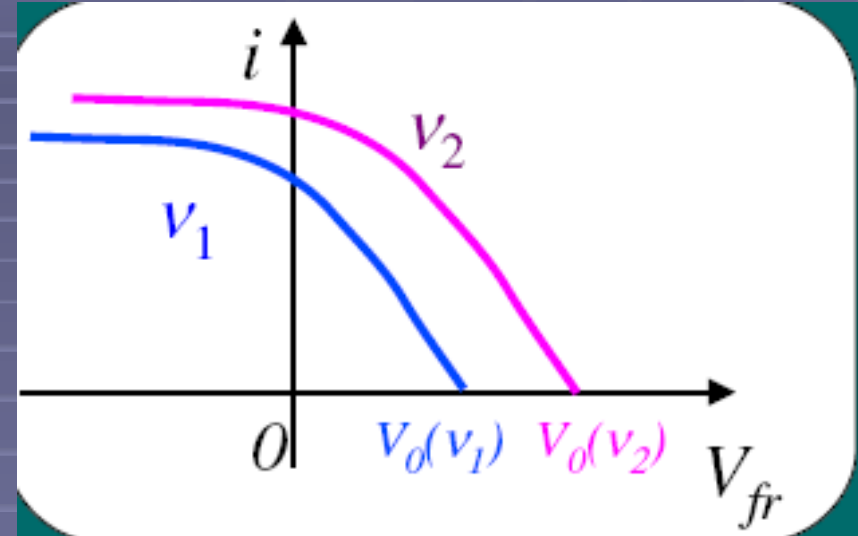
Experimento do Efeito Fotoelétrico



Resultados do Experimento de Millikan

$$eV_0(\nu) = E_c^{m\acute{a}x.} = h\nu - e\phi$$

$$V_0 = \frac{h\nu_0}{e} - \frac{w_0}{e}$$



Resultados do Experimento de Millikan

A inclinação da curva do gráfico do potencial limite no sódio obtido por Millikan deve ser h/e :

$$\frac{h}{e} = \frac{(2,20 - 0,65) \text{Volts}}{(10,0 \times 10^{14} - 6,0 \times 10^{14}) / s} = 3,9 \times 10^{-15} \text{V.s}$$

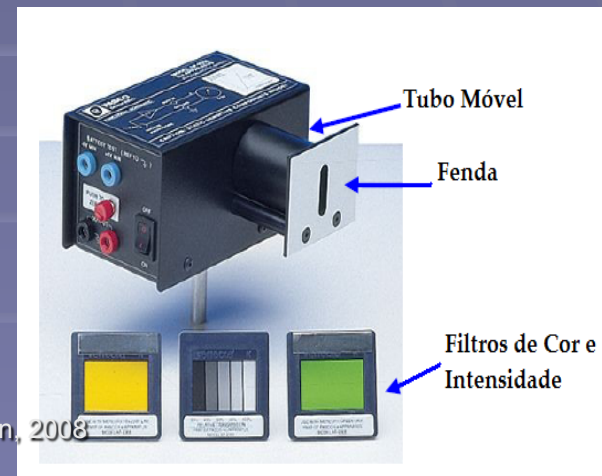
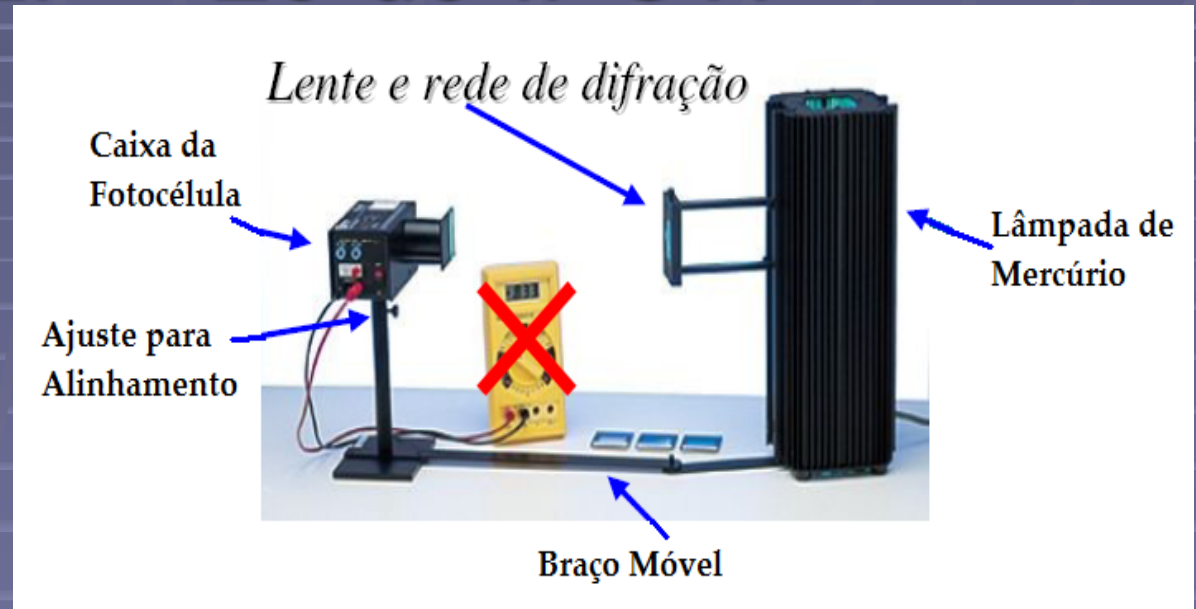
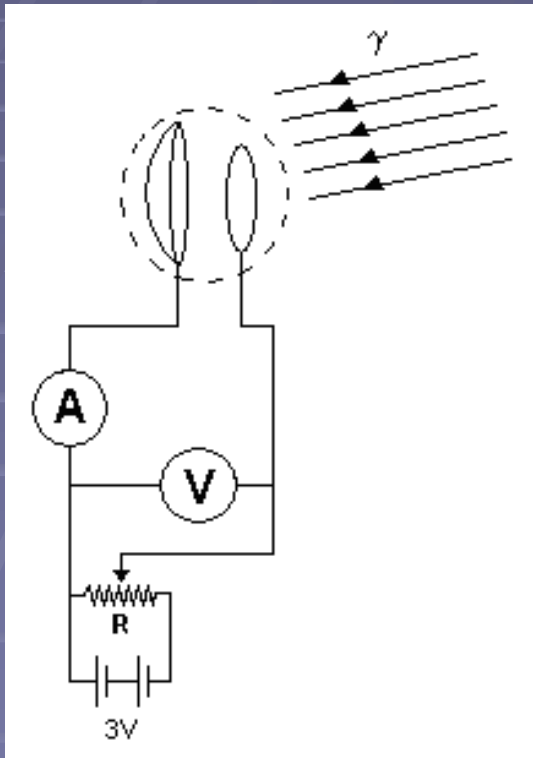
Assim, é possível determinar a constante de Planck (h):

$$h = (3,9 \times 10^{-15} \text{V.s})(1,6 \times 10^{-19} \text{C}) = 6,2 \times 10^{-34} \text{J.s}$$

Após uma análise de dados de outra superfície, Millikan obteve o seguinte valor para a constante de Planck:

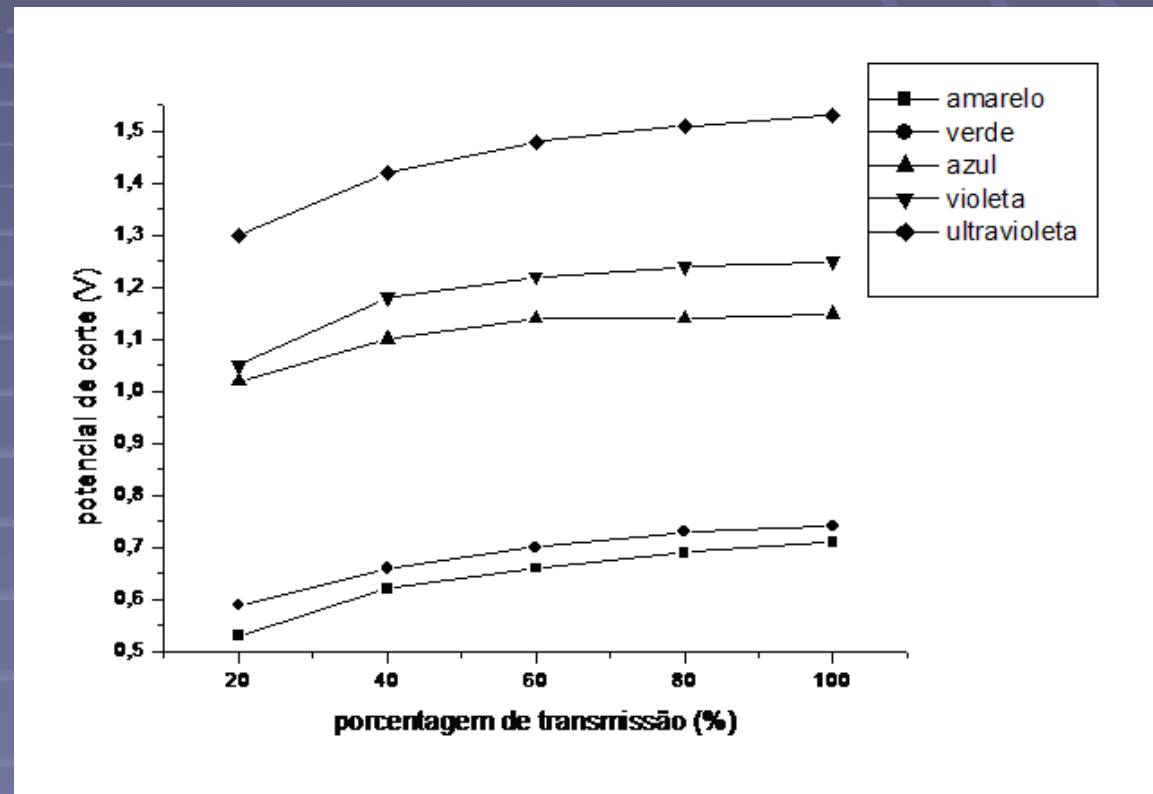
$$h = 6,57 \times 10^{-34} \text{J.s} \quad h_{\text{Atual}} = 6,6262 \times 10^{-34} \text{J.s}$$

Experimento Fotoelétrico realizado no LF – 25 do IFGW

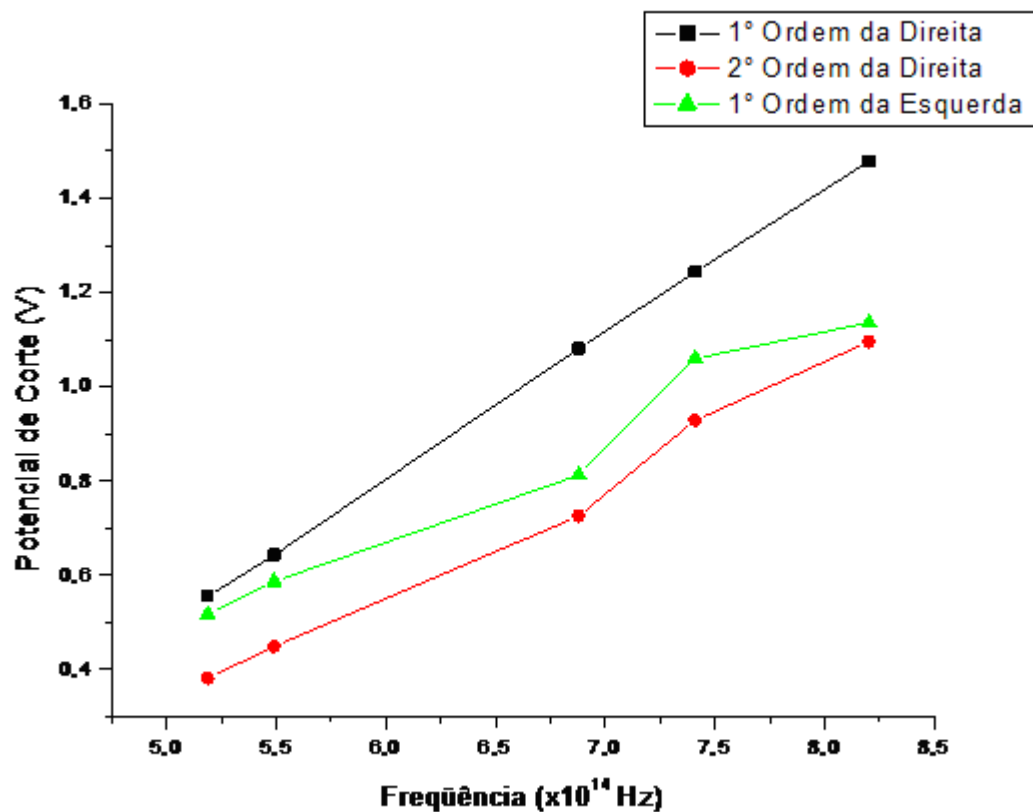


Experimento Fotoelétrico realizado no LF – 25 do IFGW

Côr	λ (Å)
Ultra-violeta	3654.83
Violeta	4046.56
Azul	4358.35
Verde	5460.74
Amarela	5789.69, 5769.60 (Dublete)

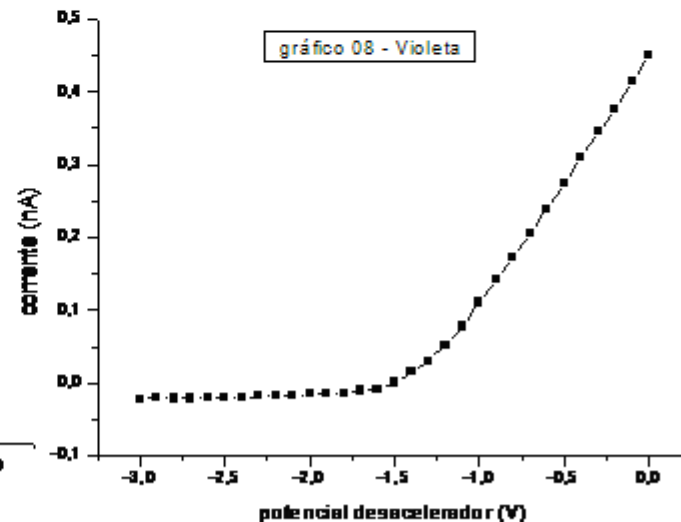
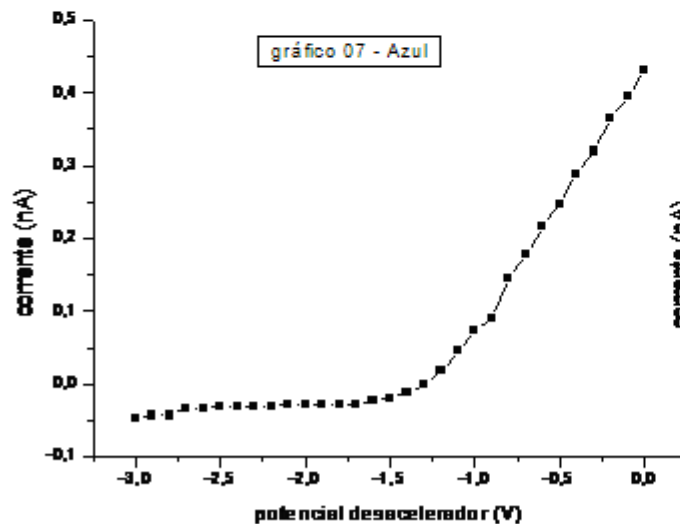
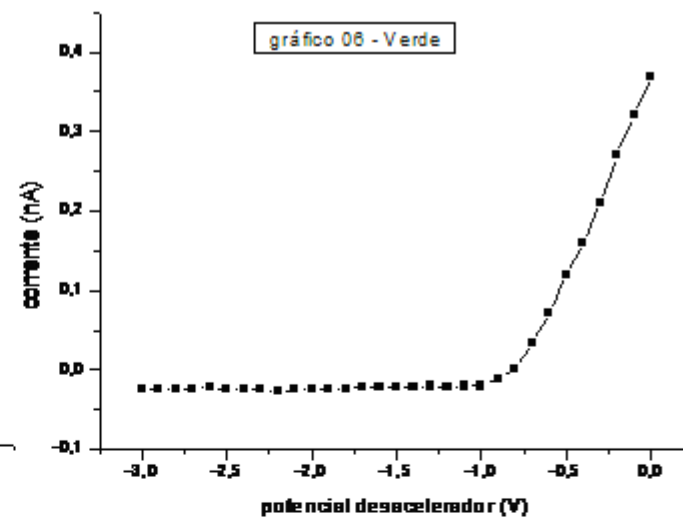
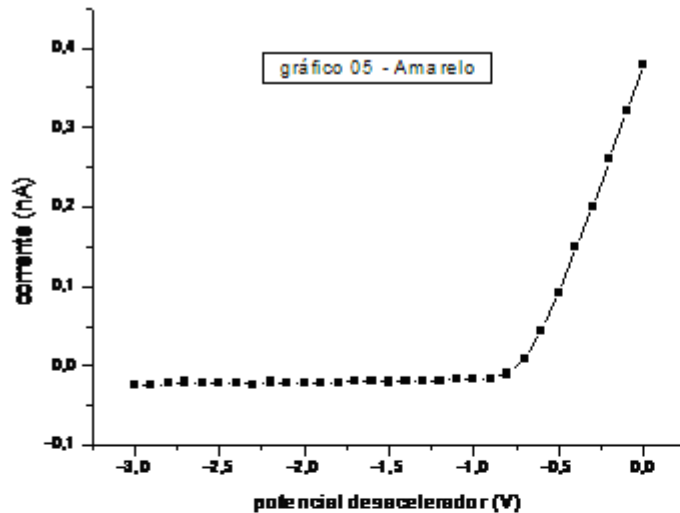


Experimento Fotoelétrico realizado no LF – 25 do IFGW

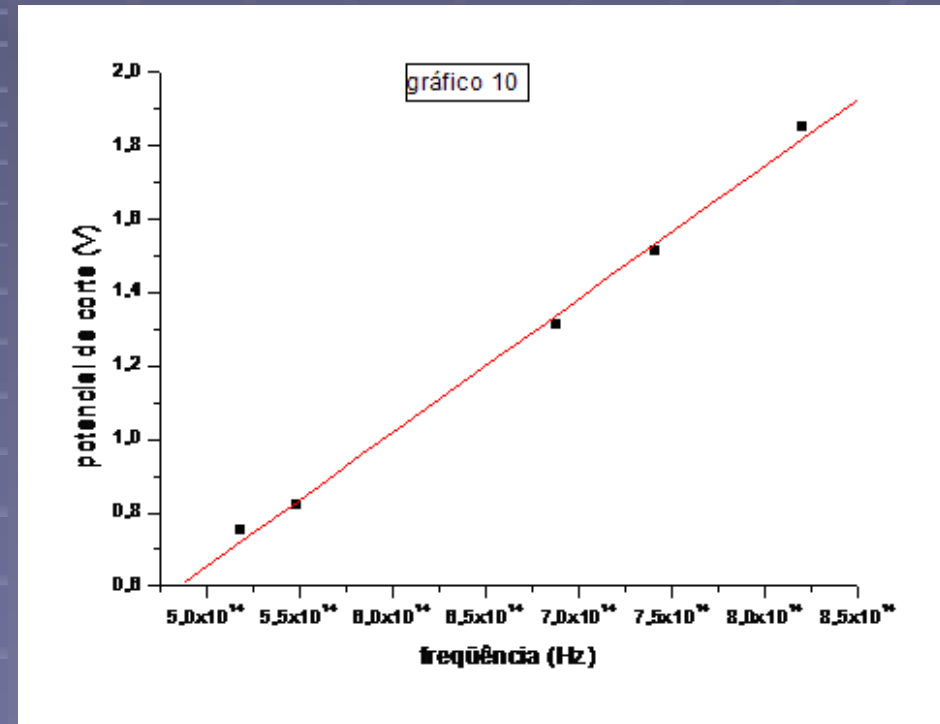
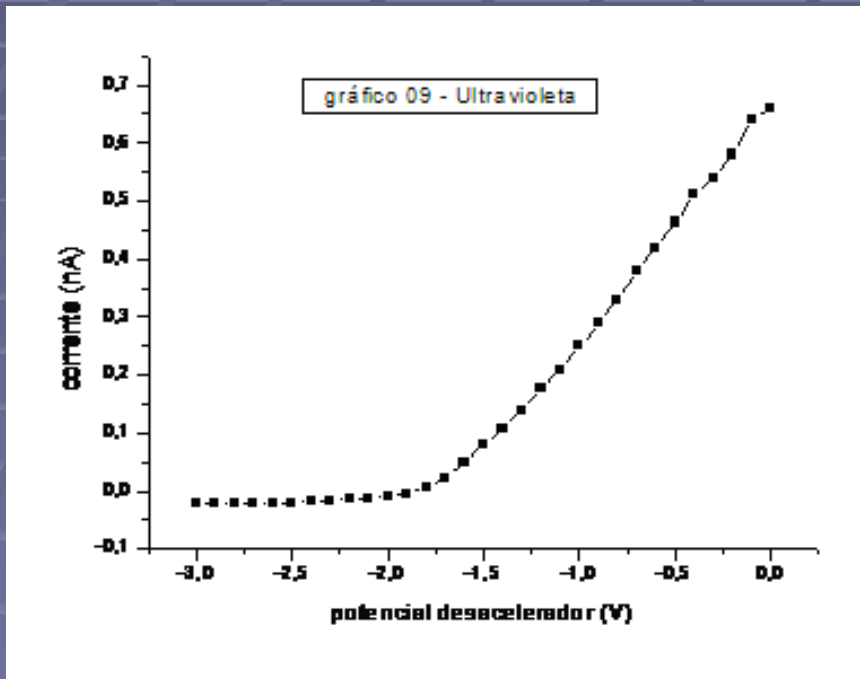


Valores Médios:
 $\phi = (0,83 \pm 0,23)V$
 $(h/e) = (2,53 \pm 0,57)E-15$ V.s

Experimento Fotoelétrico realizado no LF – 25 do IFGW



Experimento Fotoelétrico realizado no LF – 25 do IFGW



Valores Médios: $\phi = (1,16 \pm 0,08)V$
 $(h/e) = (3,64 \pm 0,12)E-15 V.s$

Conclusão do Experimento

A independência do valor do potencial de corte com a intensidade luminosa não foi verificada em nosso experimento, apesar de prevista pela teoria do efeito fotoelétrico. Isto se deve a significância da corrente de fuga presente, principalmente em intensidade mais baixas. Contudo, notamos que o potencial de corte é bastante dependente da frequência, como se esperava.

Os valores encontrados para h/e foram de $(2,53 \pm 0,57)E-15$ V.s para a 1ª montagem e $(3,64 \pm 0,12)E-15$ V.s para a 2ª. Esses valores trazem uma boa confirmação da teoria, já que ambos possuem a mesma ordem de grandeza do valor teórico, que é de $(4,134)E-15$ V.s

Conclusão do Experimento

Para o valor de ϕ obtivemos valores razoáveis para função trabalho de um metal, mas não podemos comparar com algum valor tabelado, já que esse valor varia muito com as condições experimentais particulares.

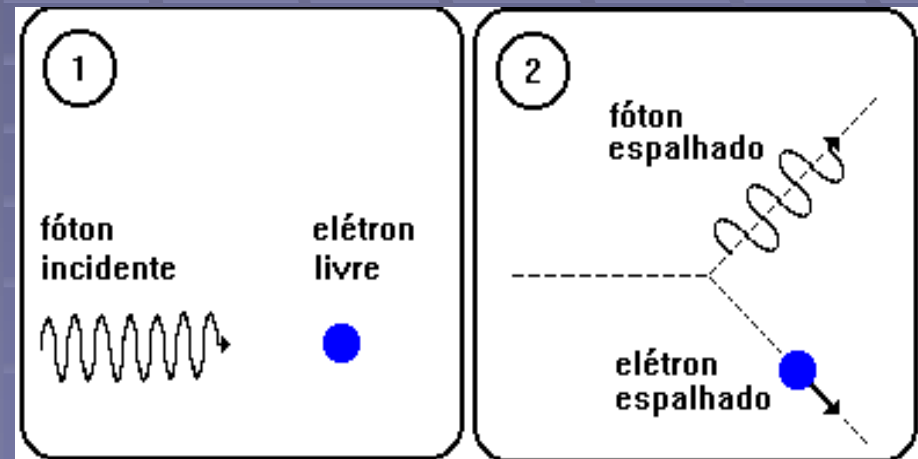
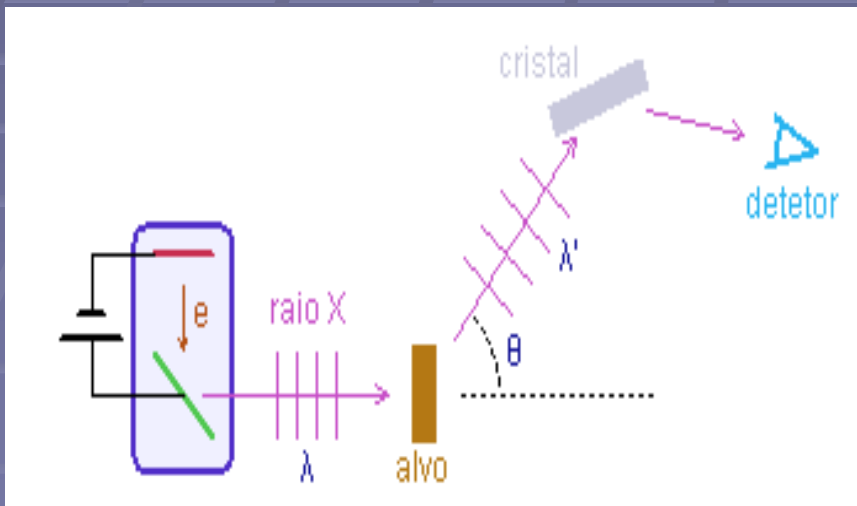
Não foi possível fazer um estudo sobre a diferença de tempo de a chegada da luz na superfície do catodo e a ejeção de fotoelétrons, mas sabe-se que não existe retardo entre o instante em que a radiação eletromagnética atinge a superfície da placa e o instante em que aparecem os elétrons arrancados. Deixamos como uma proposta de trabalho para uma próxima oportunidade.

Assim, os três aspectos principais do efeito fotoelétrico que não podem ser explicados em termos da teoria ondulatória da luz seriam estudados:

- Independência da energia máxima dos fotoelétrons com a intensidade da luz.
- Presença de um limiar de frequência.
- Inexistência de retardamento entre incidência da luz e emissão de elétrons.

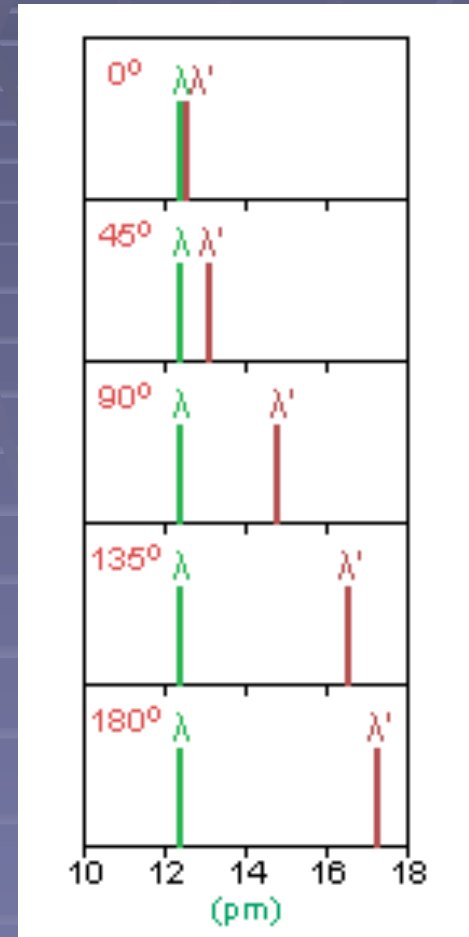
Efeito Compton

Em meados de 1920, A. H. Compton realizava experiências de espalhamento com *raios-X monocromático* em vários materiais. Ele observou que após o espalhamento, a energia do *raios-X* tinham mudado, e sempre diminuía.



Efeito Compton

Assim, Compton fez incidir um feixe de raios-X com comprimento de onda λ , sobre um alvo de grafite. Mediu-se a intensidade dos raios-X espalhados como função de seu comprimento de onda para vários ângulos de espalhamento.



Efeito Compton - Teoria

Do ponto de vista da teoria eletromagnética clássica, não é possível explicar a redução na energia do *raios-X*.

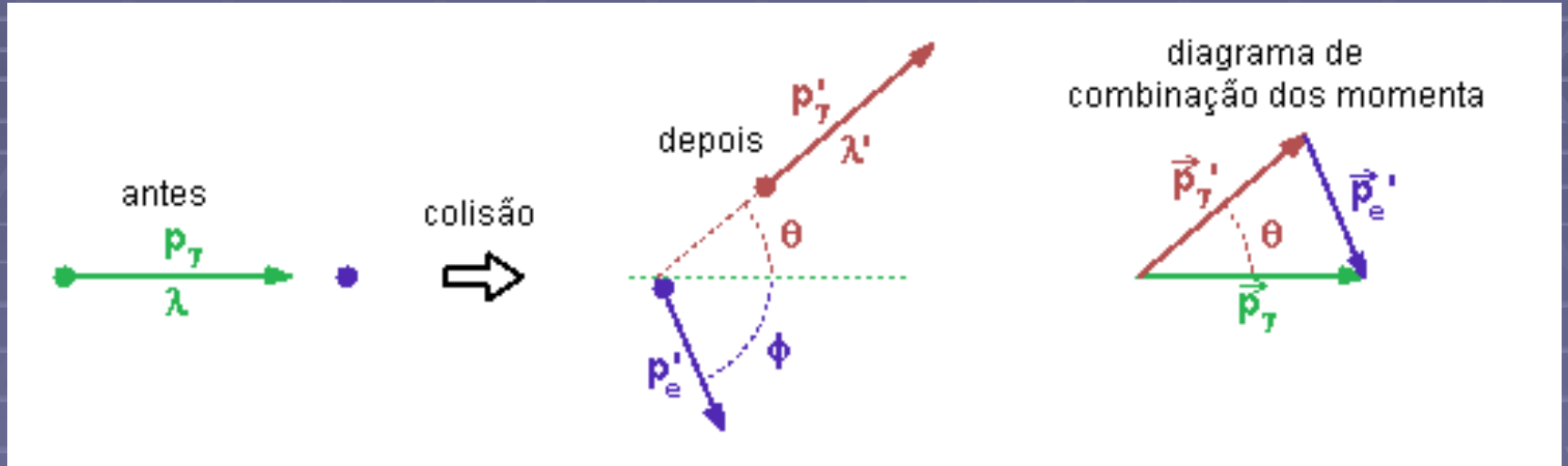
Entretanto, considerando que a radiação incidente seja formada por um *feixe de fótons*, temos que considerar somente a energia do fóton ($E=hf$), e por conservação de momento, a energia depois do espalhamento será $E' = hf' < E$, concordando com os resultados dos experimentos de Compton.

Efeito Compton - Teoria

Logo, Compton assumiu algumas hipóteses para desenvolver sua teoria:

- O espalhamento pode ser interpretado como uma *colisão entre um fóton de raio X e um elétron* do material do alvo;
- Como a energia do fóton de raio X é muito maior que as energias cinéticas e potenciais de um elétron na matéria, podemos desprezar estas energias e considerar *o elétron como livre e inicialmente em repouso*;
- *A energia e o momento linear são conservados* na colisão;
- Como a energia inicial do fóton não é muito menor que a energia de massa do elétron, precisamos utilizar a *cinemática Relativística*;

Efeito Compton - Teoria



$$\Delta\lambda = \lambda_1 - \lambda_0 = \lambda_c (1 - \cos \theta)$$

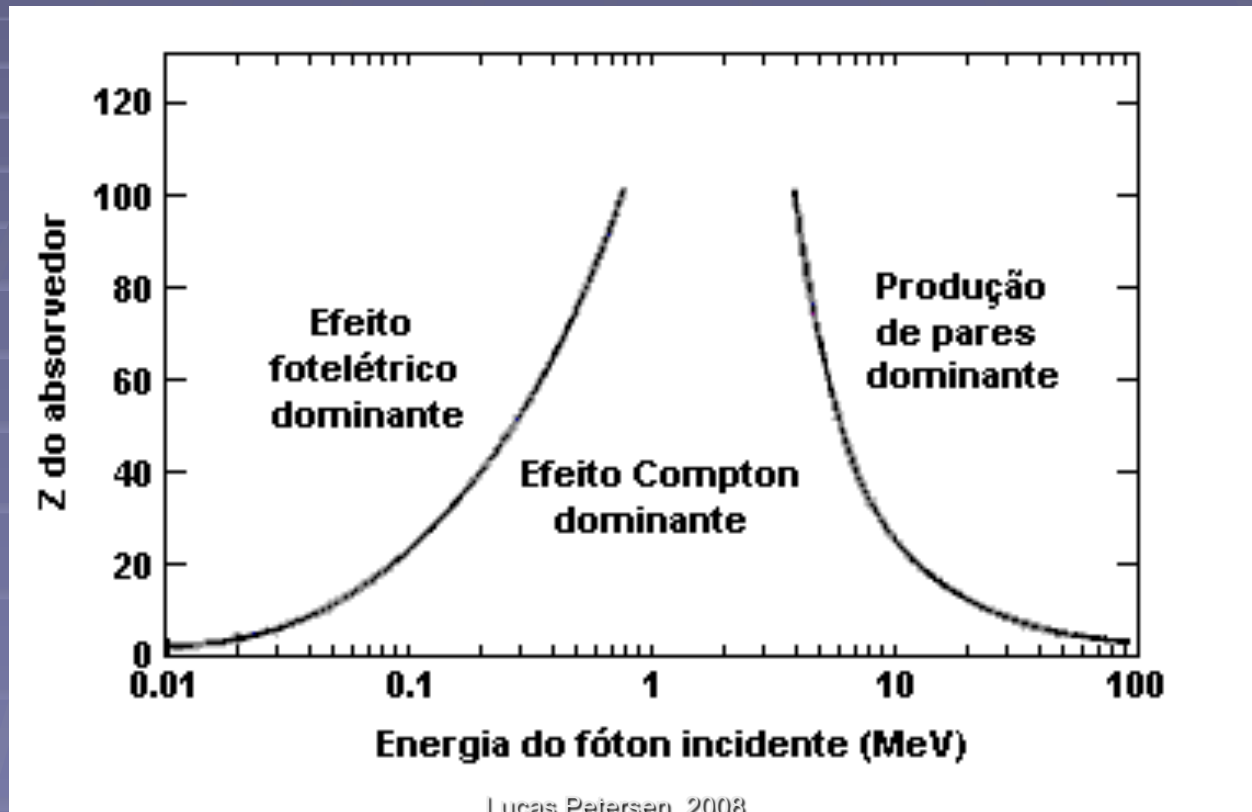
$$\lambda_c = \frac{h}{m_0 c} = 2,43 \times 10^{-12} m = 0,0243 \text{ \AA}$$

Efeito Compton

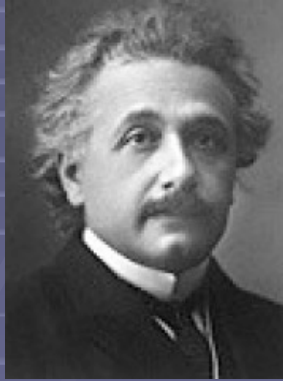
Animação:

http://www.if.ufrgs.br/~betz/iq_XX_A/efCompt/pEfComptonText.htm

Probabilidade de Ocorrência dos efeitos fotoelétrico, compton e produção de pares



Prêmio Nobel



Albert Einstein - Prêmio Nobel de Física em 1921, “pelos serviços para a Física Teórica, e especialmente para a sua descoberta da lei do *efeito fotoelétrico*.”



Robert Andrews Millikan – Prêmio Nobel de Física em 1923, “pelo seu trabalho sobre a *carga elementar* e sobre o *efeito fotoelétrico*.”

Arthur Holly Compton – Prêmio Nobel em 1927 dividido com Charles Thomson Rees Wilson, “pela descoberta do *Efeito Compton* de diminuição da energia de um fóton de raio X quando ele interage com a matéria.”

Referências

1. EINSBERG, R.; RESNICK, R., Física Quântica; Átomos, moléculas, sólidos, núcleos e partículas. Cap 1 e 2; Editora Campus, 1979.
2. Melissinos, A. C.; “Experiments in Modern Physics”; págs 18 a 27 - Academic Press, Inc., 1966.
3. Instruction Manual and Experiment Guide for the PASCO scientific Model AP-9368 and AP – 9369; “h/e Apparatus and h/e Apparatus Accessory Kit” -1989 PASCO scientific.

Muito Obrigado!

Qualquer dúvida:

tang.bard@gmail.com