

# Cap. 3 - Fótons – Propriedades Corpusculares da Radiação



Figure 38-1 Einstein in the early 1900s, at his desk at the patent office in Bern, Switzerland, where he was employed when he published his special theory of relativity.

Em 1905, Einstein propôs que a radiação eletromagnética era quantizada, e a quantidade elementar de energia luminosa é o que hoje chamamos de fóton.

$$E = h\nu$$

$$h = 6.63 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s} = 4.14 \times 10^{-15} \text{ eV}\cdot\text{s}$$

**Absorção de luz:** Aniquilação dos fótons!

**Emissão de luz:** Criação de fótons.

**Reflexão da luz:** Reflexão dos fótons.

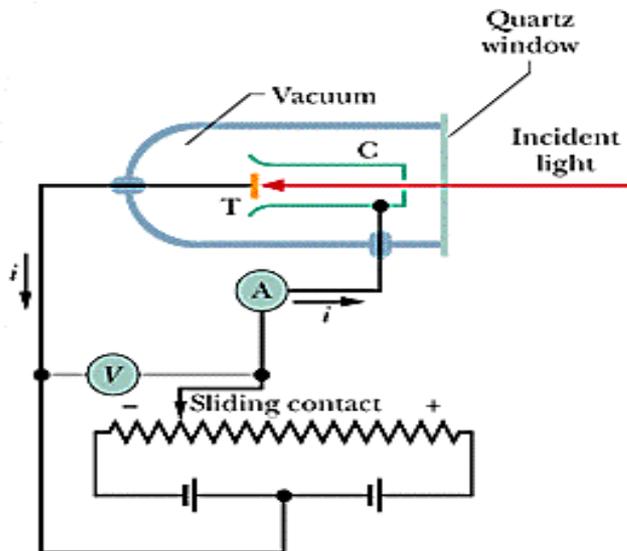
**$h$  é a Constante de Plank**

**Intensidade da Luz:** Número de fótons – Alta Intensidade luminosa – Teoria ondulatória clássica.

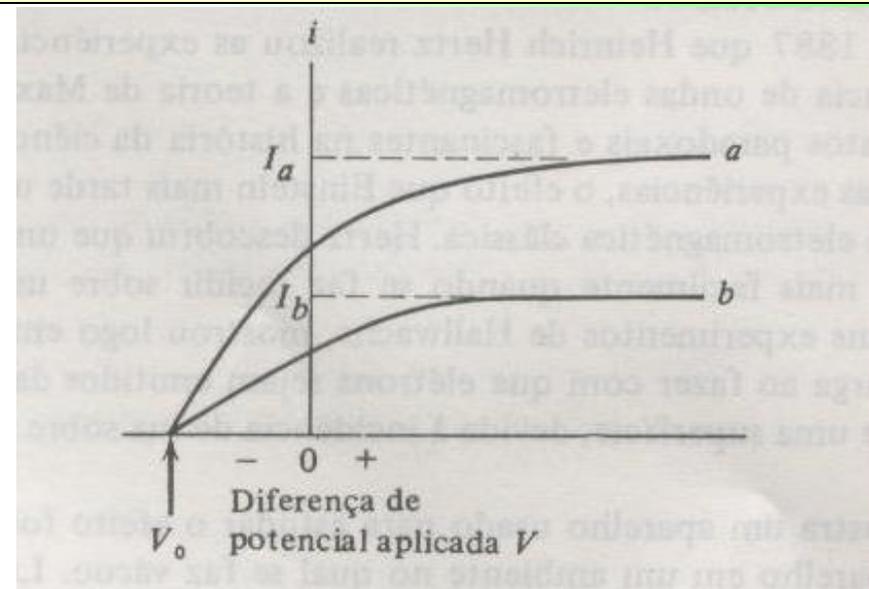
# O Efeito Fotoelétrico

Entre 1886 e 1887, Heinrich Hertz realizou experimentos que pela primeira vez confirmaram a existências de ondas eletromagnéticas e a teoria de Maxwell. Paradoxalmente, Hertz foi o primeiro a notar que uma descarga elétrica entre dois eletrodos ocorre mais facilmente quando se faz incidir sobre um deles luz ultravioleta. Essa foi uma das primeiras evidências do efeito fotoelétrico que Einstein, mais tarde, usou para contradizer outros aspectos da Teoria Eletromagnética Clássica.

Experimentos posteriores realizados por Lenard, Hallwachs and Millikan revelaram os detalhes do efeito fotoelétrico.



Para  $V$  negativo, a corrente fotoelétrica não cai imediatamente para zero, o que sugere que os fotoelétrons emitidos possuem energia cinética. E  $V_0$  não depende da intensidade da luz



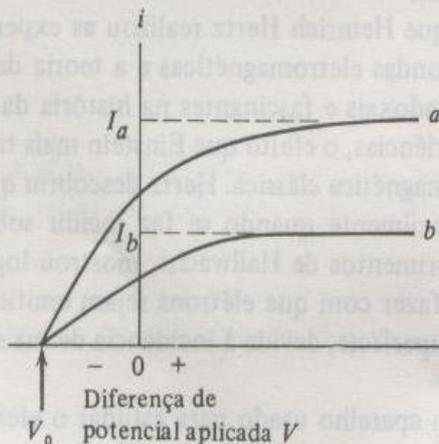
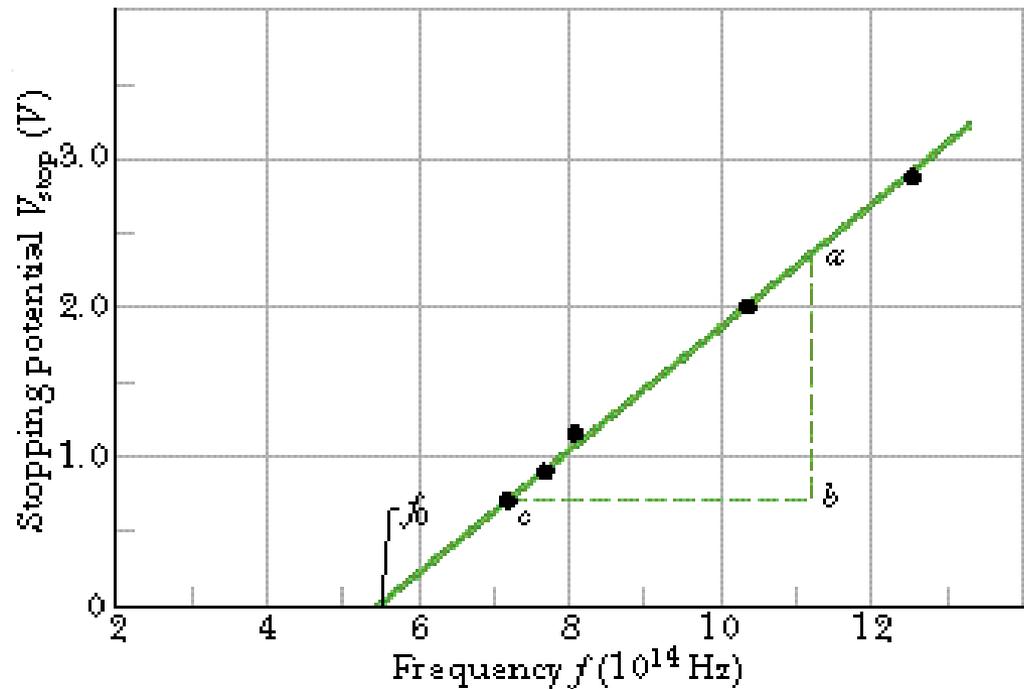
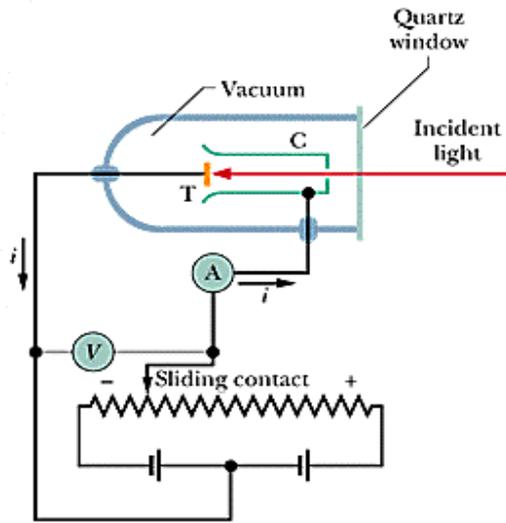
Para  $V$  positivo, a corrente fotoelétrica aumenta com  $V$  e atinge uma saturação quando todos os fotoelétrons emitidos são coletados.

# O Efeito Fotoelétrico

$V_0$  é conhecido como potencial limite ou de corte, e não depende da intensidade da luz. A partir de  $V_0$  podemos obter:

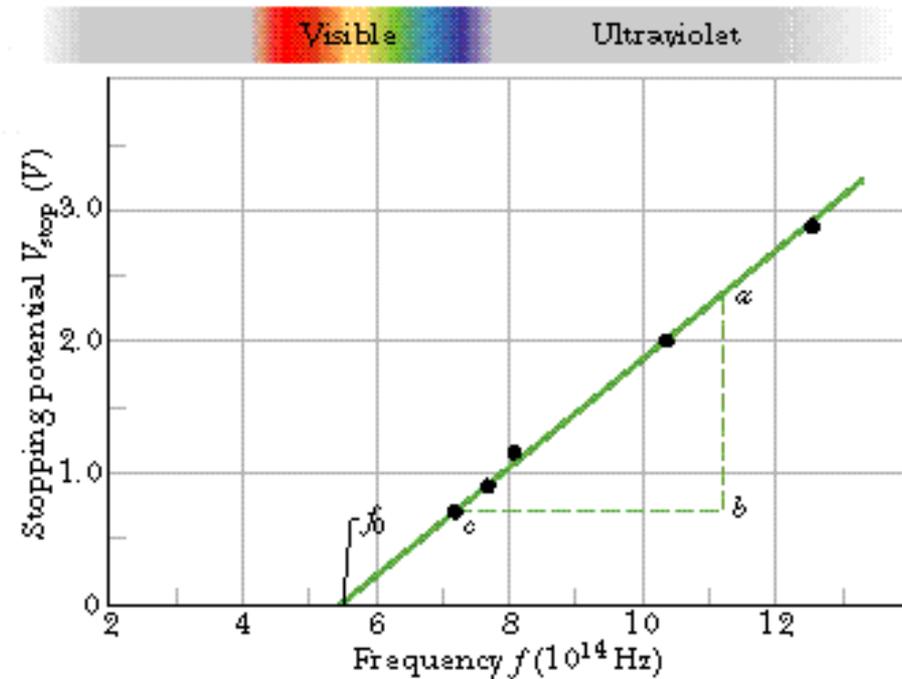
$$K_{\max} = eV_0$$

que é a energia cinética máxima do fotoelétrons emitidos, que independe da intensidade da luz.



Os experimentos de efeito fotoelétrico em função da frequência mostram que há um limiar de frequência ou frequência de corte abaixo do qual o efeito fotoelétrico deixa de ocorrer, independentemente da intensidade da luz.

# O Efeito Fotoelétrico



Millikan obteve estes dados para o Sódio em 1914, e este árduo trabalho sobre o efeito fotoelétrico lhe rendeu o Prêmio Nobel em 1923.

Note que a proposta do fóton do Einstein (1905) é anterior aos experimentos de Millikan,

# O Efeito Fotoelétrico X Teoria Ondulatória da Luz

1. A Teoria ondulatória requer que a amplitude do campo elétrico oscilante  $\mathbf{E}$  da onda luminosa cresça com o aumento da intensidade. Como a força aplicada ao um elétron é  $e\mathbf{E}$ , isto sugere que a energia cinética do elétron emitido deveria crescer com o aumento da intensidade da luz incidente, contrariando o experimento.

2. De acordo com A Teoria ondulatória, o efeito fotoelétrico deveria acontecer para qualquer frequência, desde que a luz incidente fosse intensa o suficiente para “arrancar” os elétrons. No entanto, para frequências menores que  $\nu_0$ , o efeito fotoelétrico não ocorre, qualquer que seja a intensidade da luz incidente.

3. Para a luz de baixa intensidade deveria existir um intervalo de tempo mensurável, entre o instante começa a incidir sobre a superfície e o instante da injeção do fotoelétron. Para uma placa de potássio colocada a 1 m da fonte de 1 W, pode-se estimar o tempo de 2 min para que o elétron adquira a energia necessária de 2,1 eV para ser ejetado.

# Cap. 2 - Fótons – Propriedades Corpusculares da Radiação



Figure 38-1 Einstein in the early 1900s, at his desk at the patent office in Bern, Switzerland, where he was employed when he published his special theory of relativity.

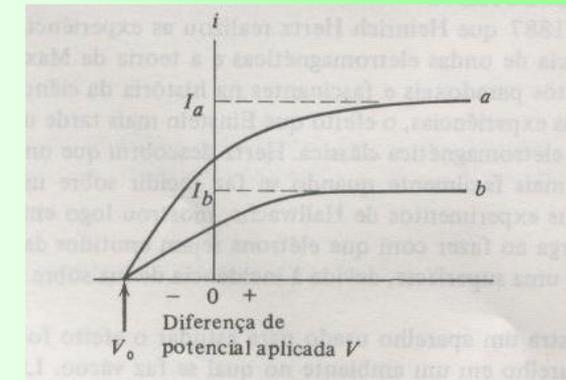
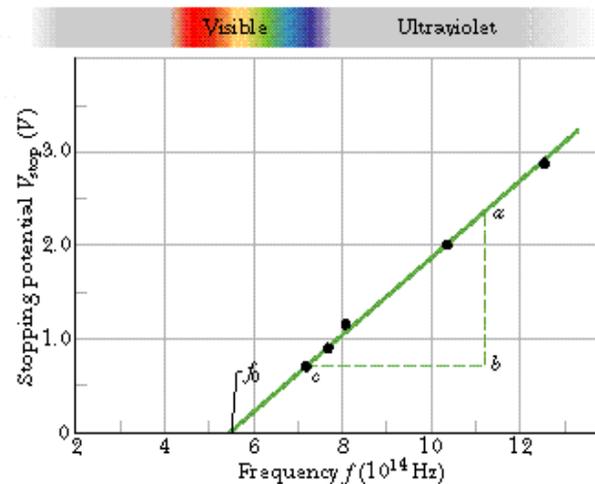
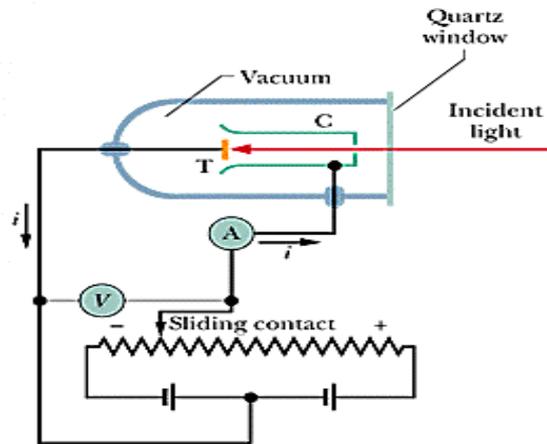
No quadro, nós discutimos em detalhes a hipótese de Einstein.

$$E = h\nu$$

$$h = 6.63 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s} = 4.14 \times 10^{-15} \text{ eV}\cdot\text{s}.$$

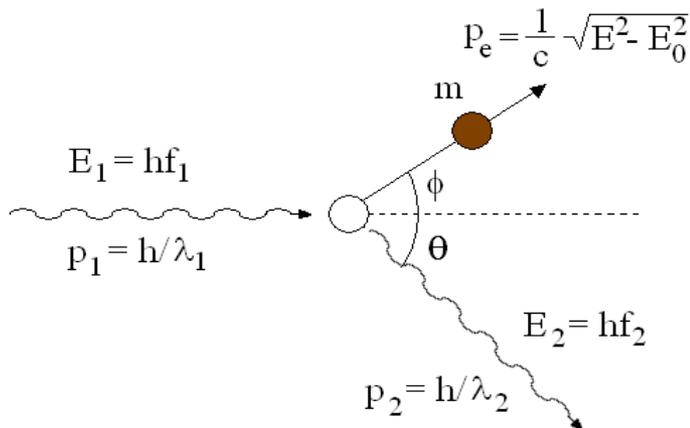
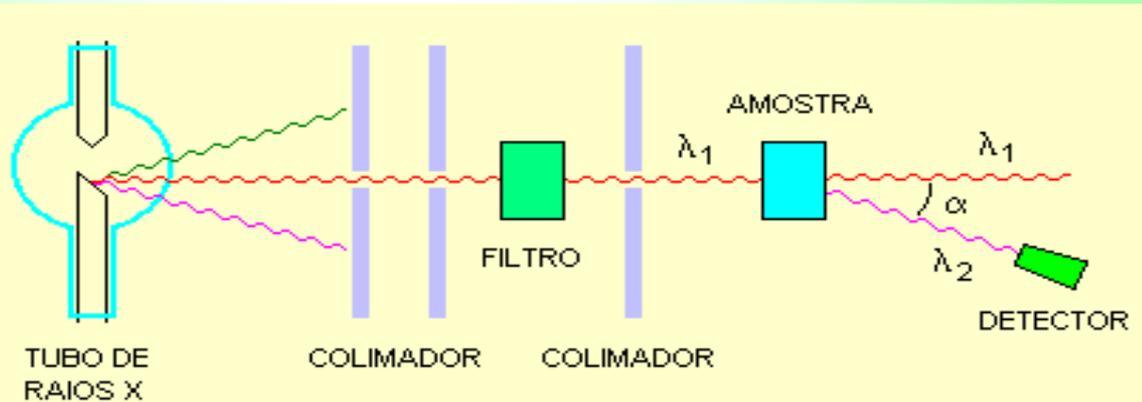
**$h$  é a Constante de Plank**

$$K_{\text{max}} = h\nu - W_0$$



# O Efeito Compton

A natureza corpuscular (ou quântica da luz) introduzida por Einstein em 1905, permanecia controversa, mesmo após a experiência de Millikan. Essa idéia foi ganhando mais aceitação com o acúmulo de evidências experimentais, como a descoberta do efeito Compton em 1923.



O efeito Compton é a variação do comprimento de onda da radiação eletromagnética dispersada por elétrons livres.

Estudando-se a dispersão dos raios x pela amostra observa-se que a radiação espalhada consiste de radiação com o comprimento de onda original e de radiação com comprimento de onda maior que o original, que a diferença entre esses dois comprimentos de onda é tanto maior quanto maior é o ângulo de espalhamento  $\alpha$  e que tal diferença é independente da substância que constitui a amostra.

# O Efeito Compton

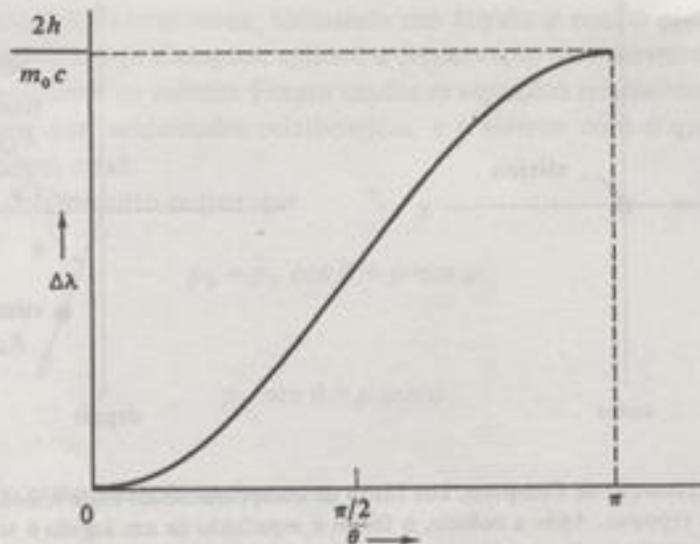
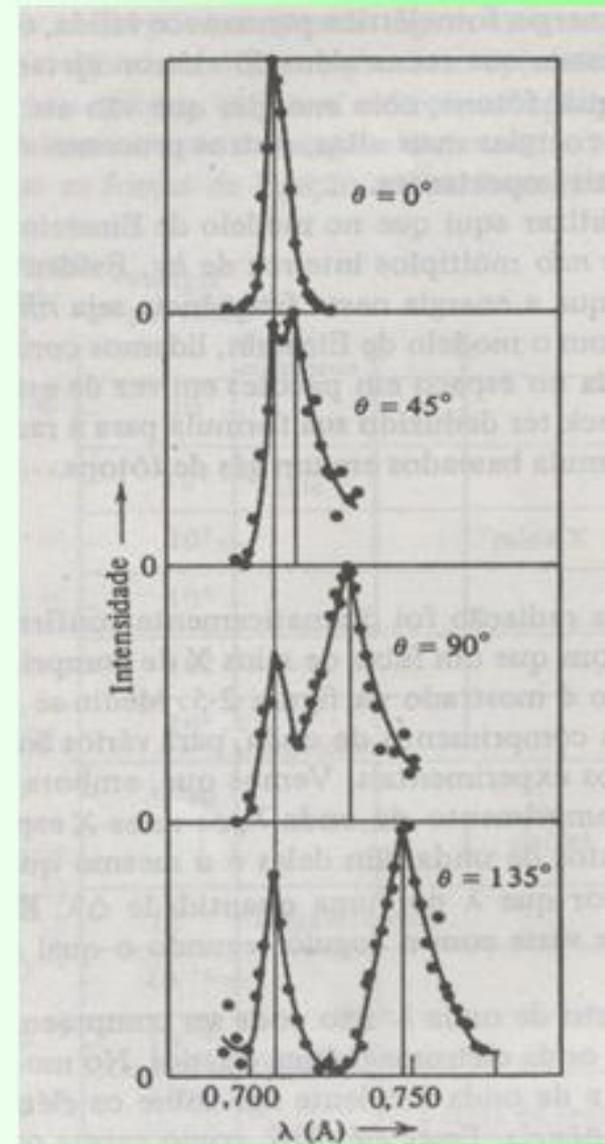
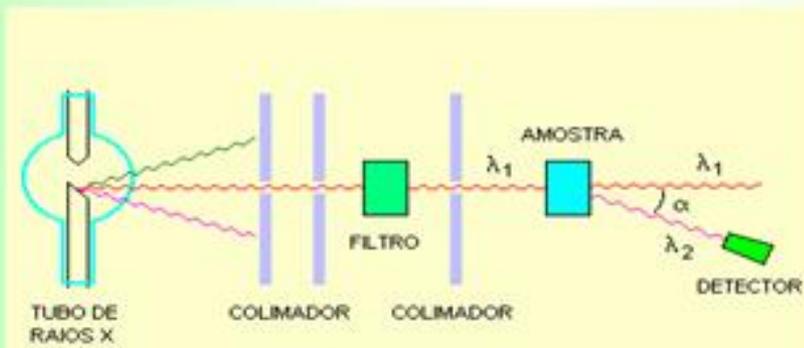
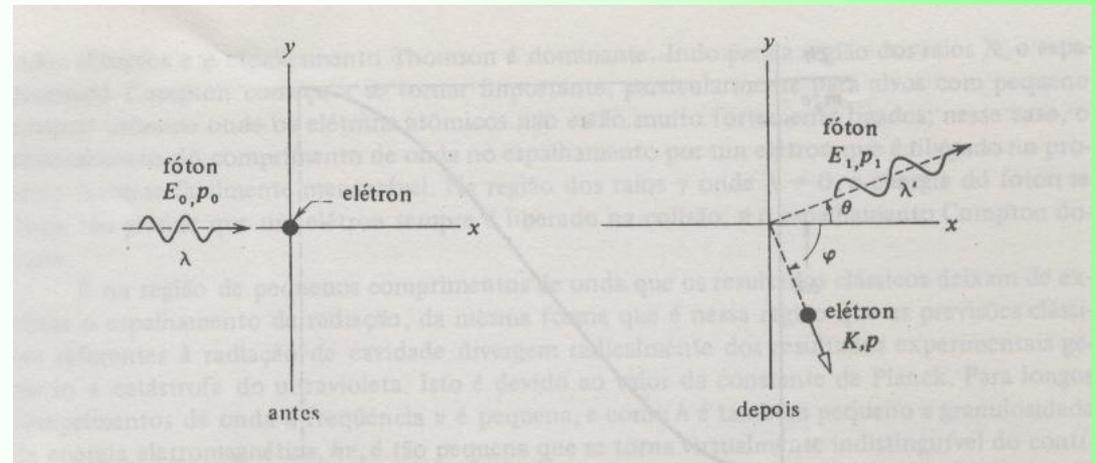
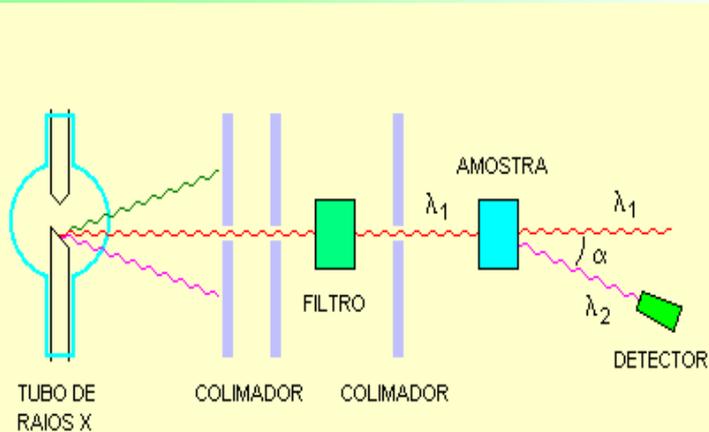


FIGURA 2-8. O resultado de Compton  $\Delta\lambda = (h/m_0 c)(1 - \cos \theta)$ .

# O Efeito Compton



Da conservação do momento linear na direção x:

$$p_0 = p_1 \cos \theta + p \cos \varphi$$

Da conservação do momento linear na direção y:

$$p_1 \sin \theta = p \sin \varphi$$

Da conservação da energia:

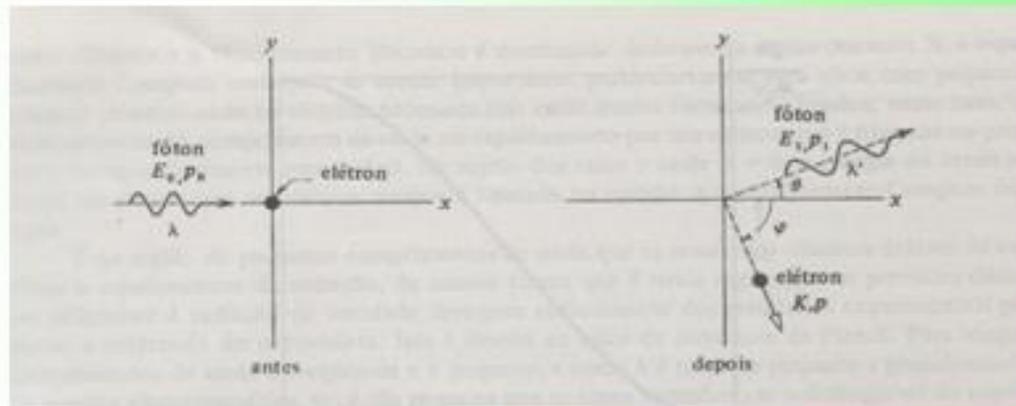
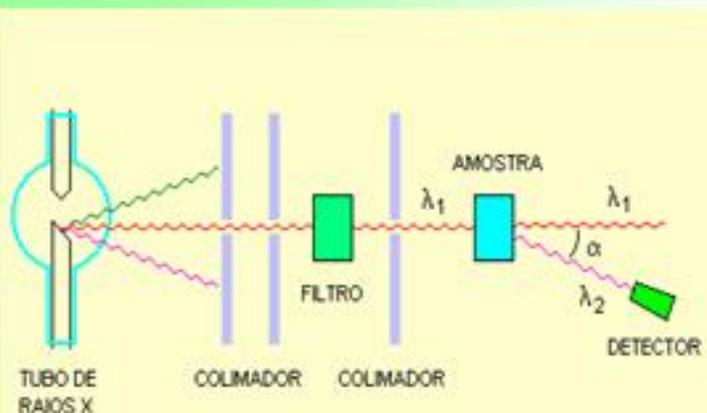
$$E_0 + m_0 c^2 = K_{el} + m_0 c^2 + E_1$$

Resolvendo sistemas de três equações:

$$\Delta \lambda = \lambda_1 - \lambda_0 = \frac{h}{m_0 c} (1 - \cos \theta)$$

onde  $\lambda_C = h/m_0 c = 0,0243 \text{ \AA}$  é o chamado comprimento de onda de Compton e  $\Delta \lambda$  é o deslocamento Compton.

# O Efeito Compton

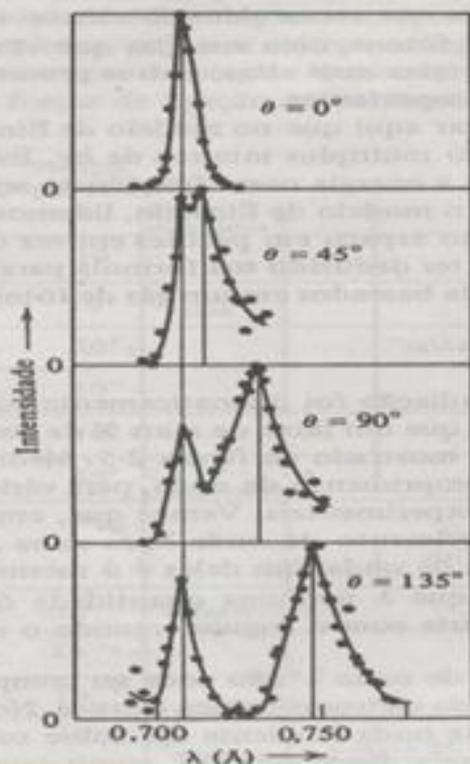


$$\Delta \lambda = \lambda_1 - \lambda_0 = \frac{h}{m_0 c} (1 - \cos \theta)$$

O pico em  $\lambda_0$  pode ser entendido lembrando que os elétrons de caroço, mais fortemente ligados do átomo de carbono, não são ejetados pelo raio-x. Nesse caso o átomo de carbono recua como um todo. Nesse caso:

$$\Delta \lambda \sim \frac{h}{M_{\text{átomo}} c} = 10^{-4} \lambda_C \text{ que é desprezível.}$$

O espalhamento da luz em  $\lambda_0$  é o espalhamento "clássico" conhecido como espalhamento Thomson.

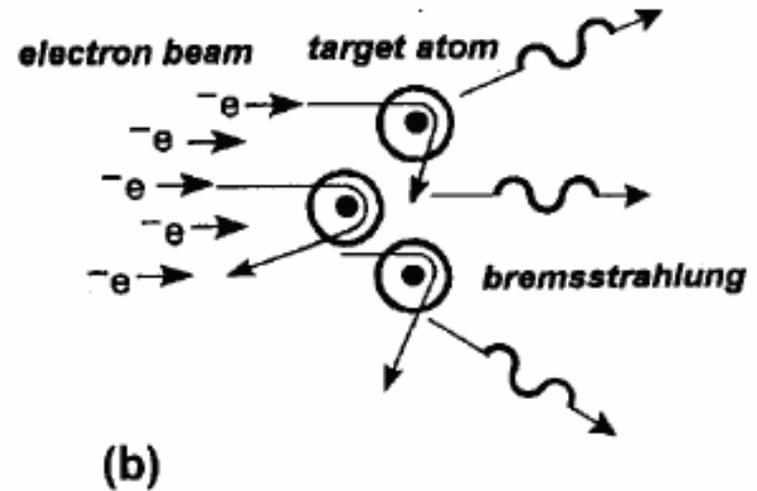
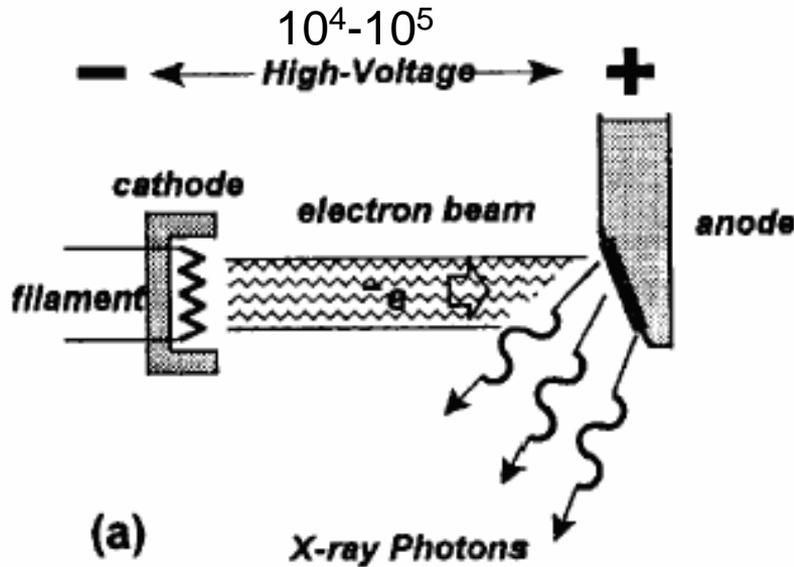


# Fótons e a produção de raios-x

## Produção de raios X por Efeito Bremsstrahlung

“radiação de frenagem”

Raios-X foram descobertos por Röntgen em 1895.



$$h\nu = K_i - K_f$$

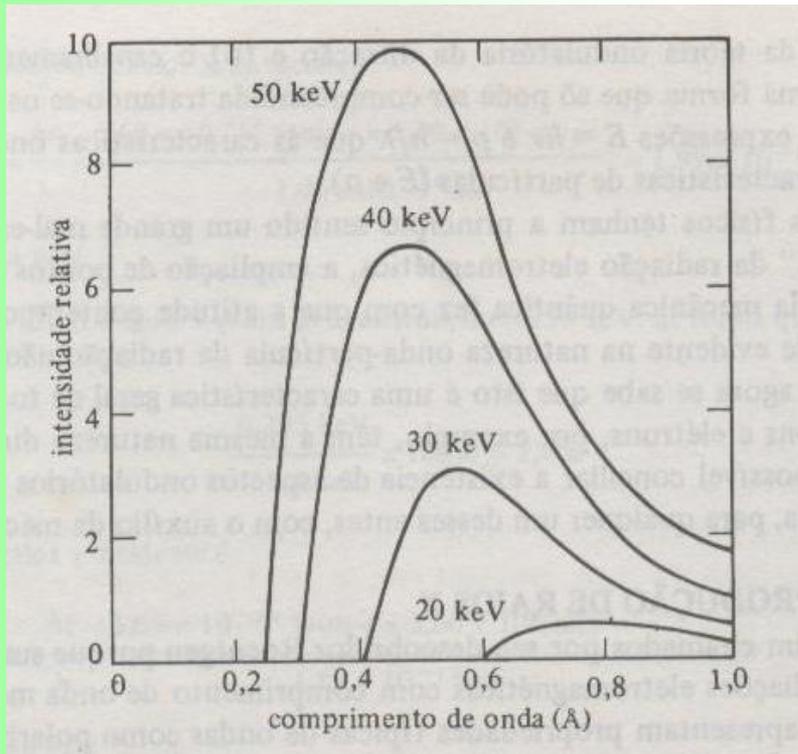
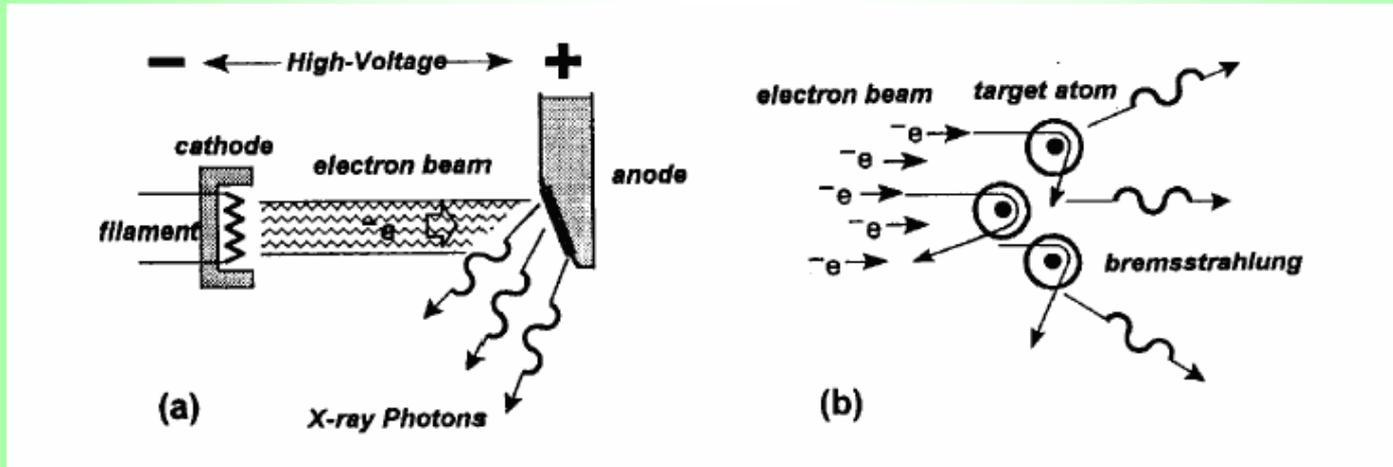
$$h\nu \in [0, K_i]$$

$$\lambda \in \left[ \frac{hc}{K_i}, \infty \right]$$

$$K_i = eV$$

$$\lambda_{\min} = \frac{hc}{eV}$$

# Fótons e a produção de raios-x



$$h\nu = K_i - K_f$$

$$K_i = eV$$

$$\lambda_{\min} = \frac{hc}{eV}$$

# CAMPINAS SYNCHROTRON NATIONAL LABORATORY EXAFS-XANES-XDR (structural and magnetic)

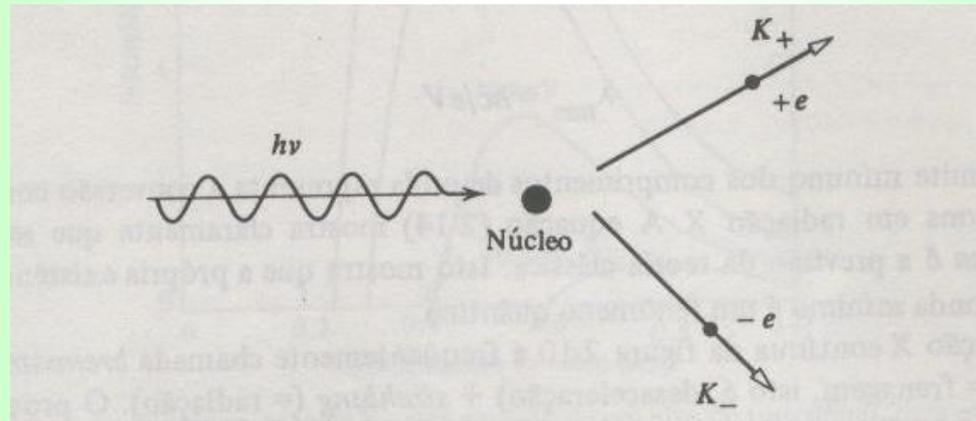


**~  $10^{11}$  fótons/s @ 200 mA @  $E = 8\text{keV}$  ( $\lambda \sim 1.5 \text{ \AA}$ );  $D \sim 30 \text{ m}$**

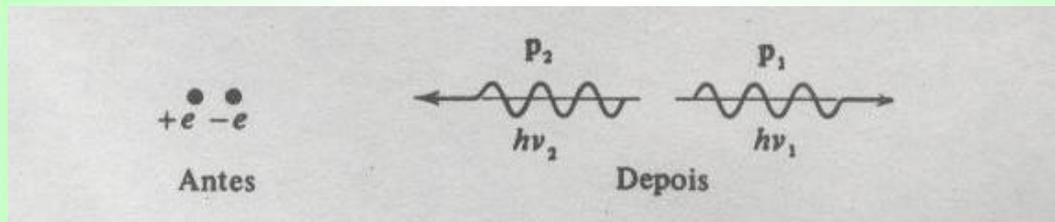
**Raios-x com alta intensidade, alto grau de polarização, grande direcionalidade e coerência.**

# Fótons e a produção e aniquilação de pares

Quando fótons de altíssimas energias são incidentes sobre a matéria, um outro tipo de processo passa a ser possível: A criação de pares elétron-pósitron. O pósitron é uma partícula com a mesma massa do elétron, mas com o sinal contrário de sua carga e de seu momento magnético.



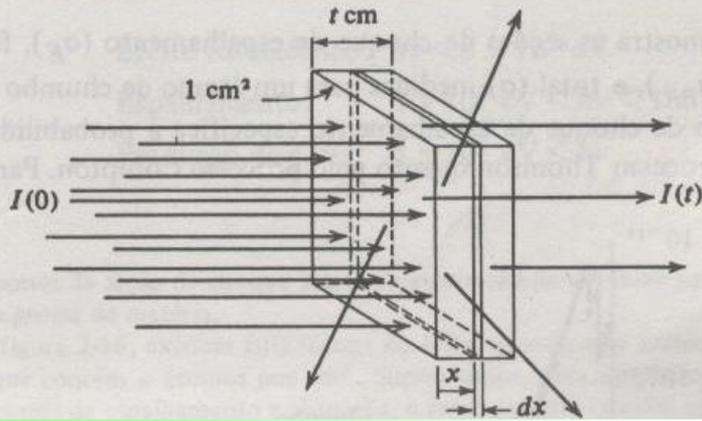
De maneira inversa, um par elétron-pósitron pode se aniquilar e gerar ondas eletromagnéticas



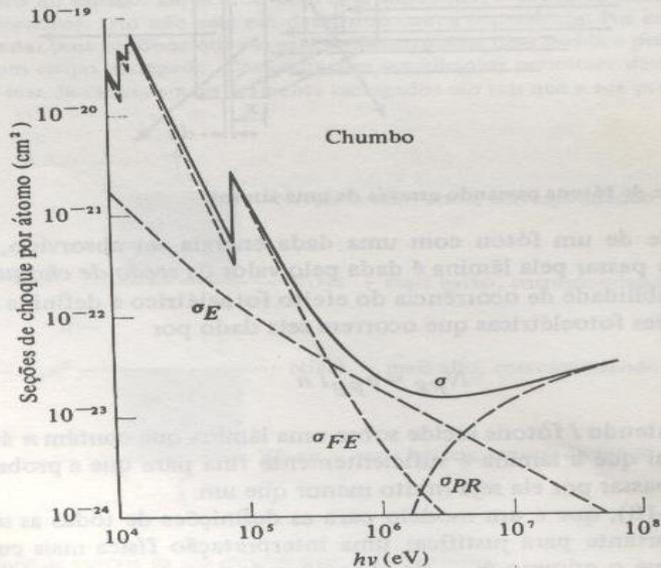
Vamos ao quadro descrever estes processos em detalhe.

# Fótons e sua interação com a matéria: secção de choque

Nós descrevemos quatro processos pela qual os fótons podem interagir com os átomos de uma lâmina de matéria: fotoelétrico, produção de pares, espalhamento Thomson e Compton.



A probabilidade de cada um desses processos ocorra é expressa em termos de uma grandeza chamada secção de choque ( $\sigma$ ) que tem unidade de área e depende da frequência do fóton e do tipo de átomo da lâmina de matéria.



Para o chumbo:

Efeito Fotoelétrico:  $W_0 < h\nu < 5 \times 10^5$  eV

Espalhamento:  $5 \times 10^5 < h\nu < 5 \times 10^6$  eV

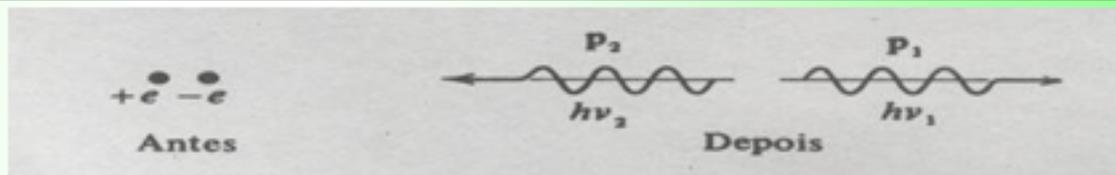
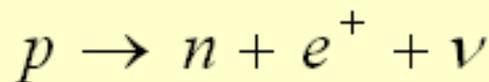
Produção de pares:  $5 \times 10^6 < h\nu$

Iremos discutir com maiores detalhes a secção de choque no quadro.

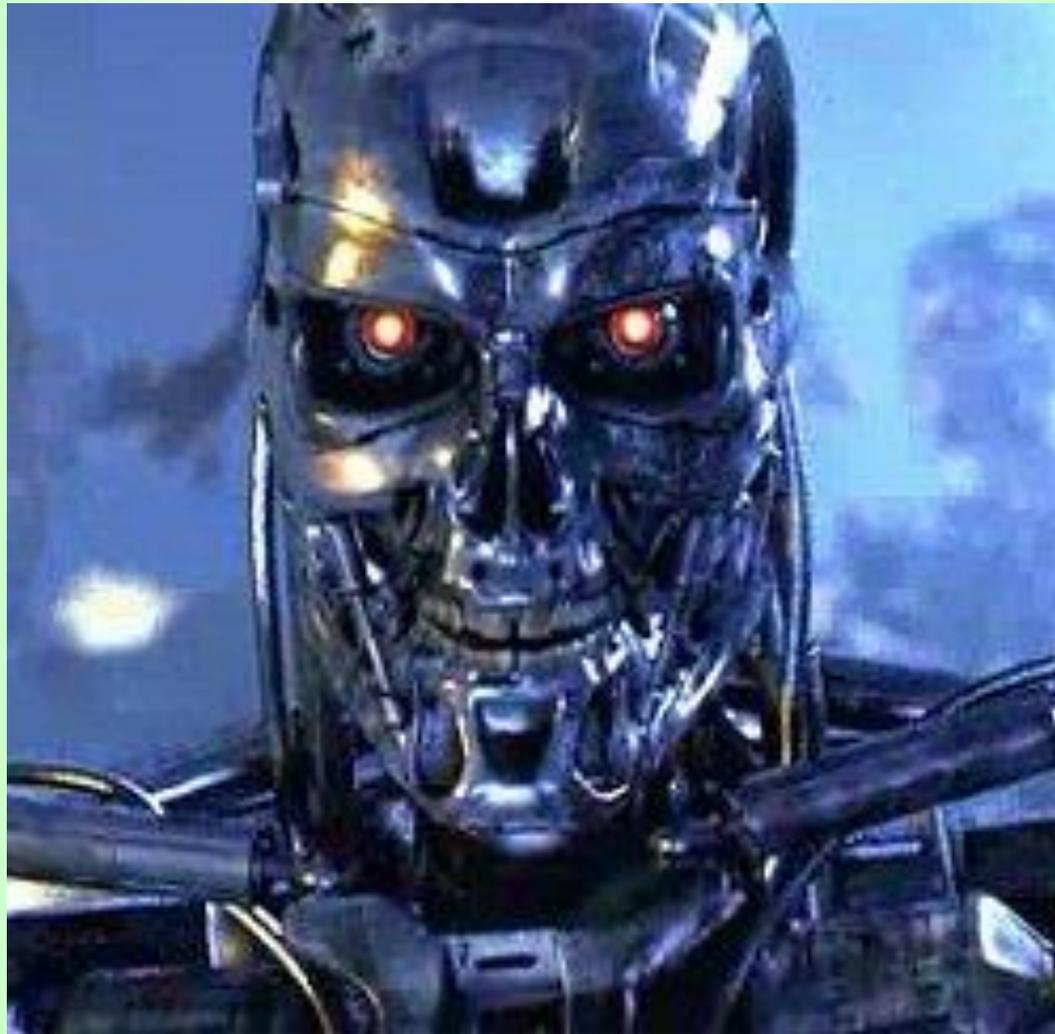
## Tomografia por emissão de pósitrons – (PET-scan)

O PET-scan é uma técnica de imagens de estruturas e funções corporais, usadas para diagnósticos médicos, que se baseia do fenômeno de aniquilação de pares elétron-pósitron.

Na corrente sanguínea do paciente é injetada um sustância a ser metabolizada em algum órgão de interesse e que contém elementos radioativos previamente incorporados (ex:  $^{11}\text{C}$ ,  $^{13}\text{N}$ ,  $^{15}\text{O}$ ,  $^{18}\text{F}$ ). Esses núcleos decaem com uma meia vida de alguns minutos através de uma decaimento  $\beta$ -positivo emitindo um pósitron.



Assim, 2 fótons são emitidos em linha reta com sentidos contrários e detectados em coincidência. Sua direção no espaço define uma reta que passa pelo ponto de aniquilação. Um grande número ( $10^4$ ) destes eventos gera uma grande quantidade dessas retas cuja intersecção pode identificar com boa precisão a região de absorção de “traçador” molecular. Esta técnica é capaz de trazer informações tanto anatômica quanto metabólicas sobre o órgão em questão.



I' ll be back!