

Física Moderna I

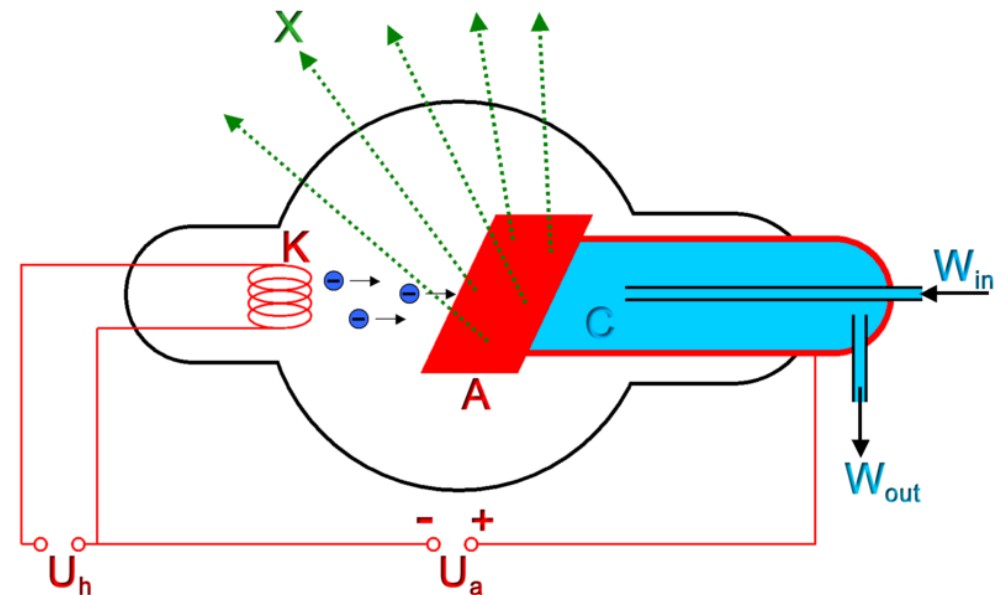
Aula 05

Marcelo G Munhoz
Edifício HEPIIC, sala 212, ramal 916940
munhoz@if.usp.br

Röntgen descobre os raios-X (1895)



- Röntgen trabalhava com tubos de raios catódicos
- Durante seus estudos ele observou algo bastante estranho...



Röntgen descobre os raios-X (1895)

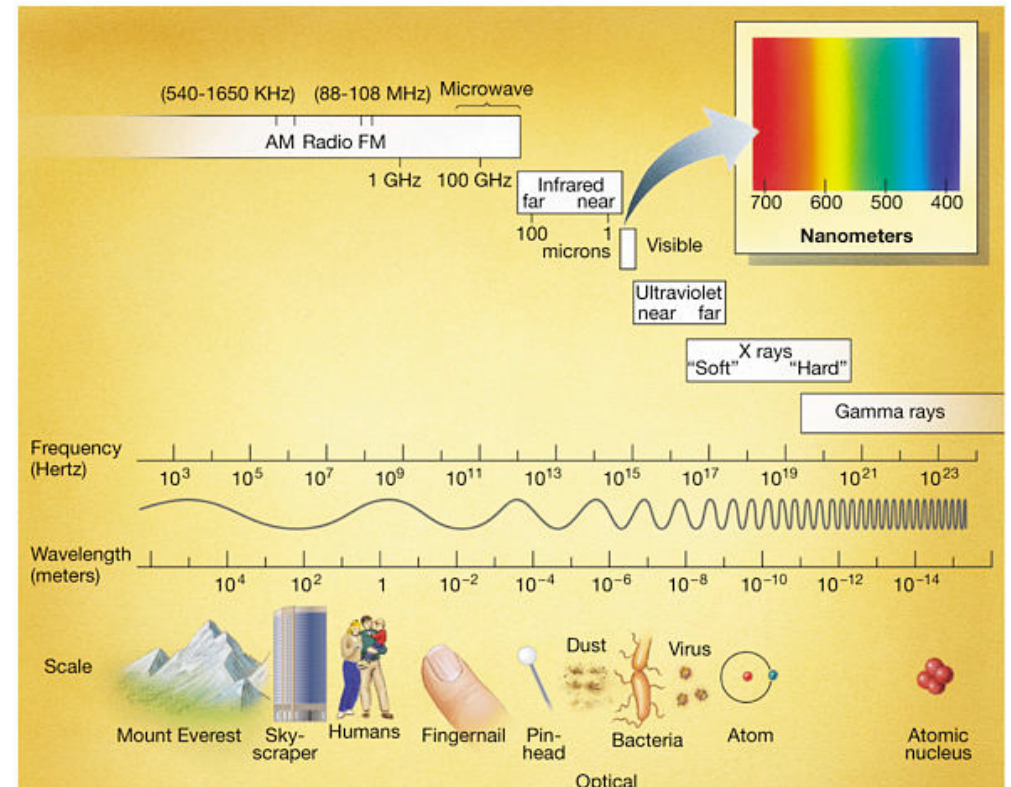


- Röntgen trabalhava com tubos de raios catódicos
- Durante seus estudos ele observou algo bastante estranho...



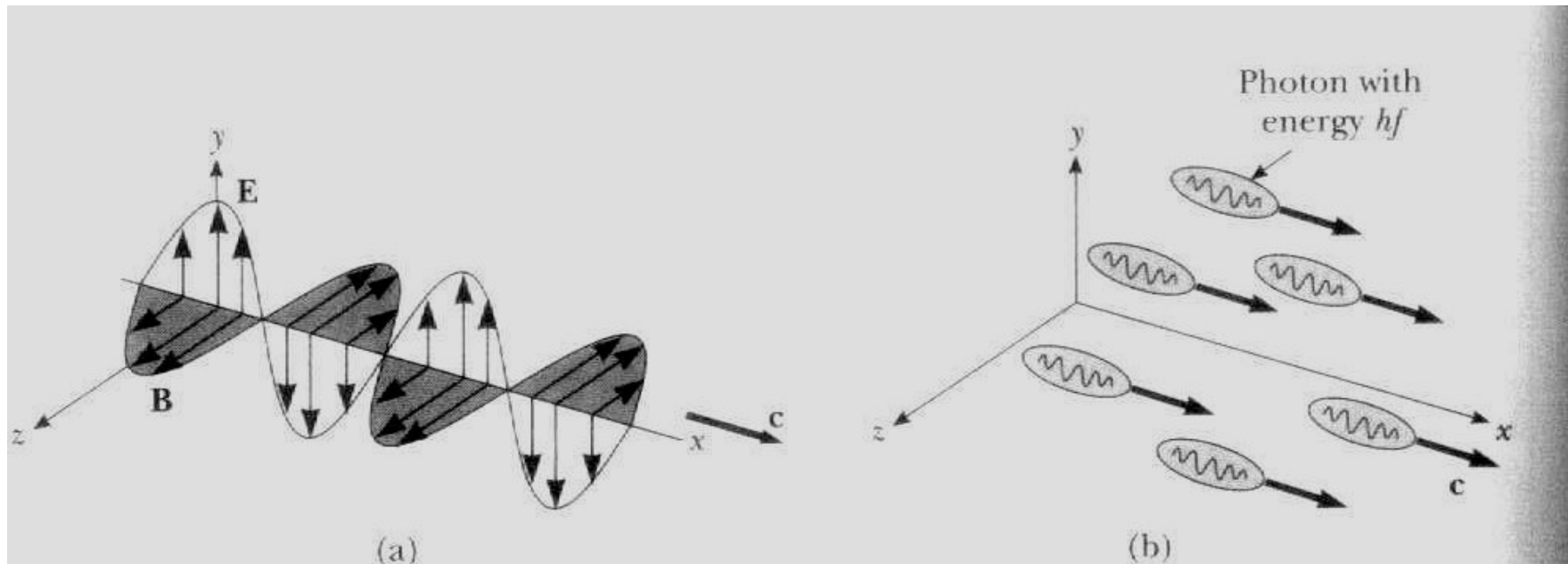
Afinal, o que são os raios-X?

- Após alguns anos de estudo, ficou claro que os raios-X eram ondas eletromagnéticas
- Ondas ?? Será ?!!!



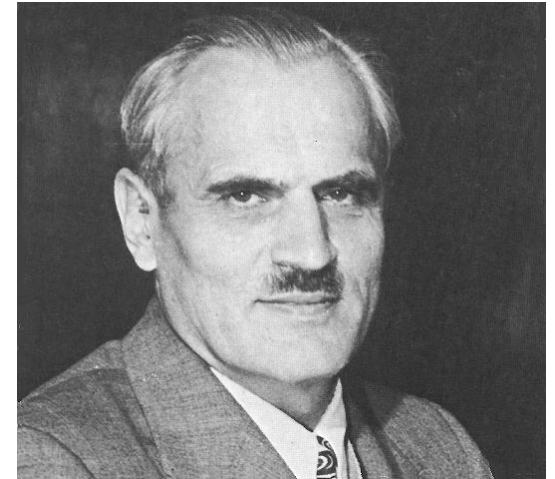
Dualidade onda-partícula da radiação eletromagnética

- A luz é uma onda eletromagnética e uma partícula (fóton) ao mesmo tempo!
- Ela se propaga como onda e interage como partícula...



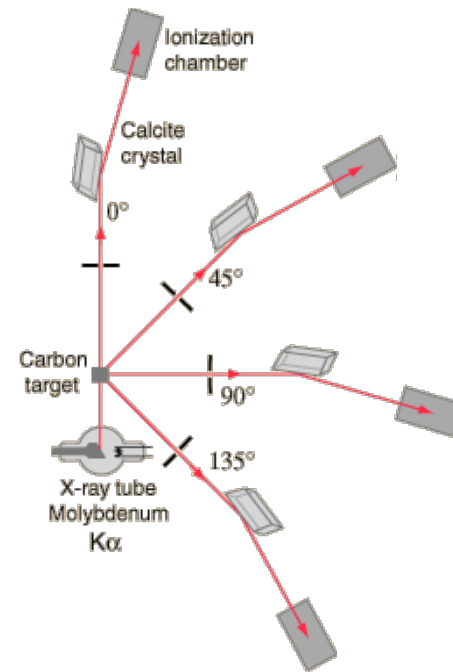
Raios-X também se comportam como partículas?

- Os estudos de Lenard e as explicações de Einstein se referiam apenas à luz visível?
- Será que podemos concluir que toda radiação eletromagnética se comporta da mesma forma, ora como onda ora como partícula?
- Arthur H. Compton, em 1922, tinha a resposta...
 - *A. H. Compton, Phys. Rev. 21, 483; 22, 409 (1923)*

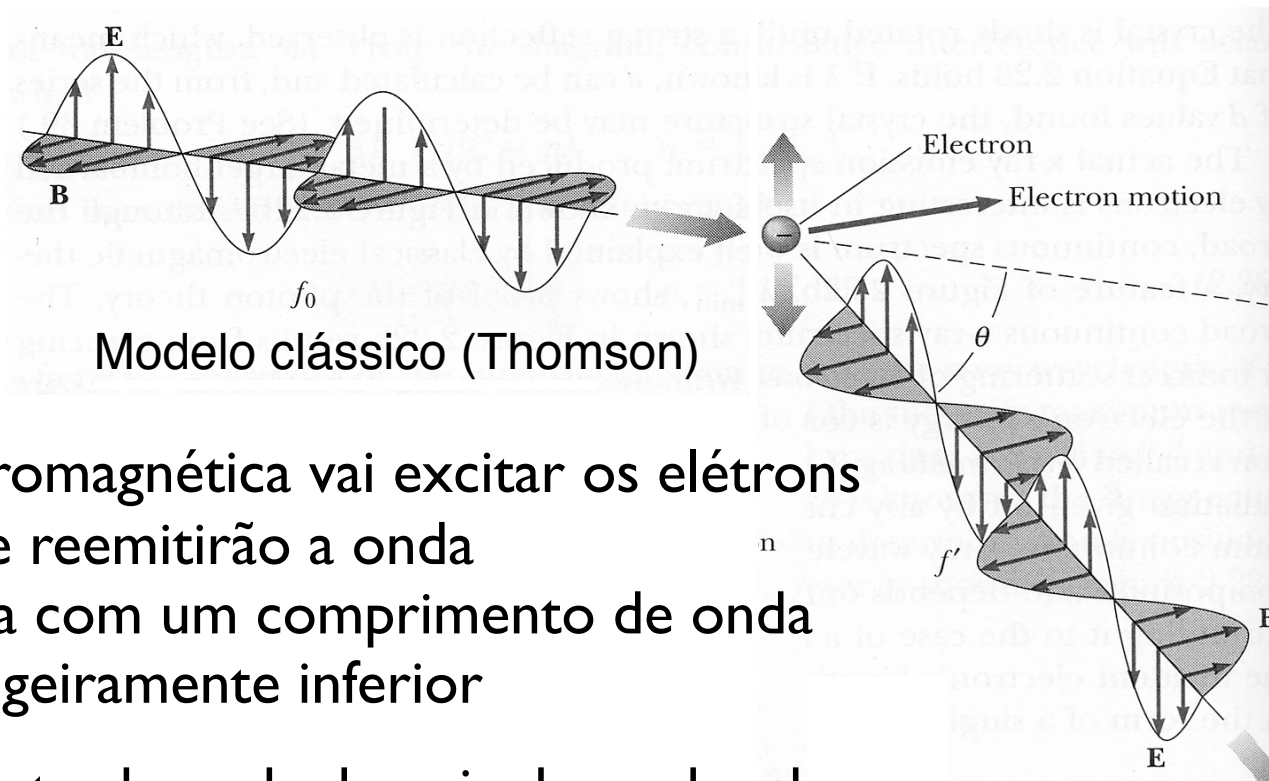


O experimento de Compton

- Compton fez incidir um feixe de raios-X com um comprimento de onda conhecido sobre uma amostra de carbono
- Usando um cristal, ele mediu o comprimento de onda dos raios-X espalhados em 3 ângulos diferentes
- O resultado foi surpreendente!



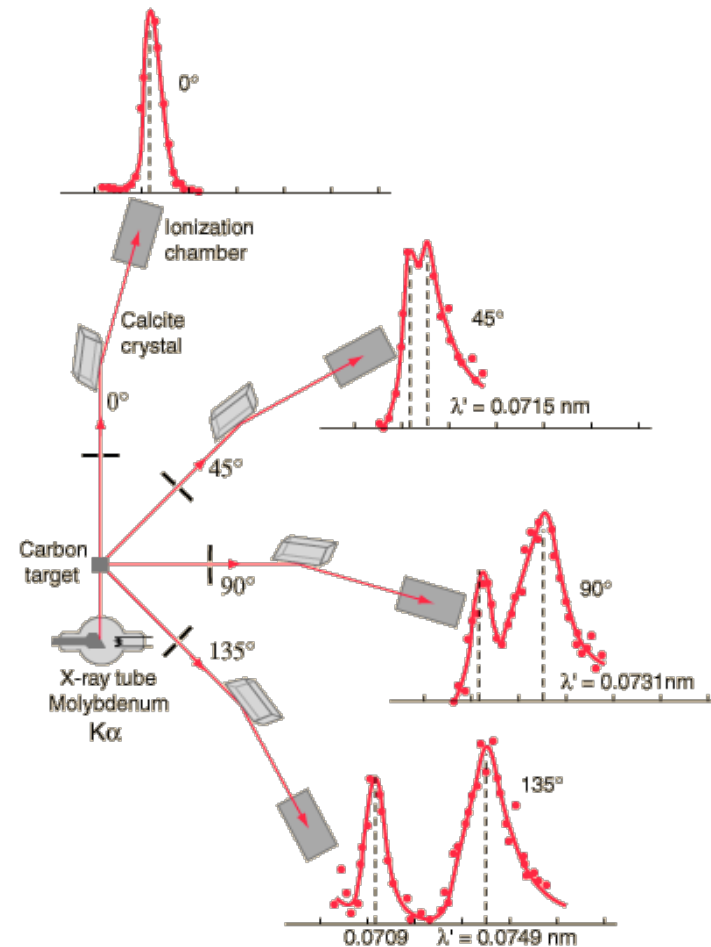
Expectativa “clássica” do experimento



- Uma onda eletromagnética vai excitar os elétrons do material que reemitirão a onda eletromagnética com um comprimento de onda ou frequência ligeiramente inferior
- Esse comprimento de onda deveria depender da intensidade da radiação incidente e do tempo de exposição

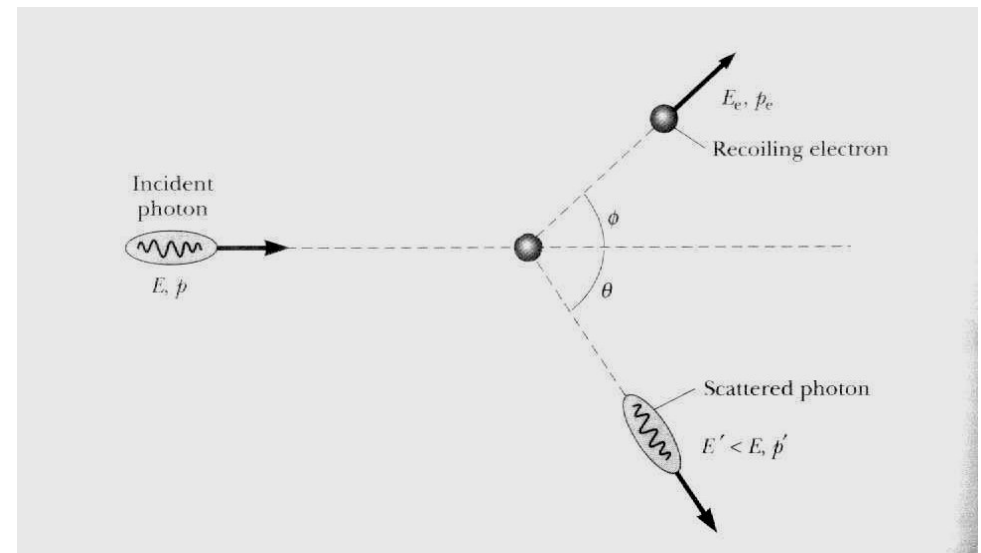
O experimento de Compton

- Compton observou que não só o comprimento de onda não dependia da intensidade da radiação incidente e do tempo de exposição, como dependia do ângulo de espalhamento!
- Além disso, o espectro de radiação apresentava dois picos!



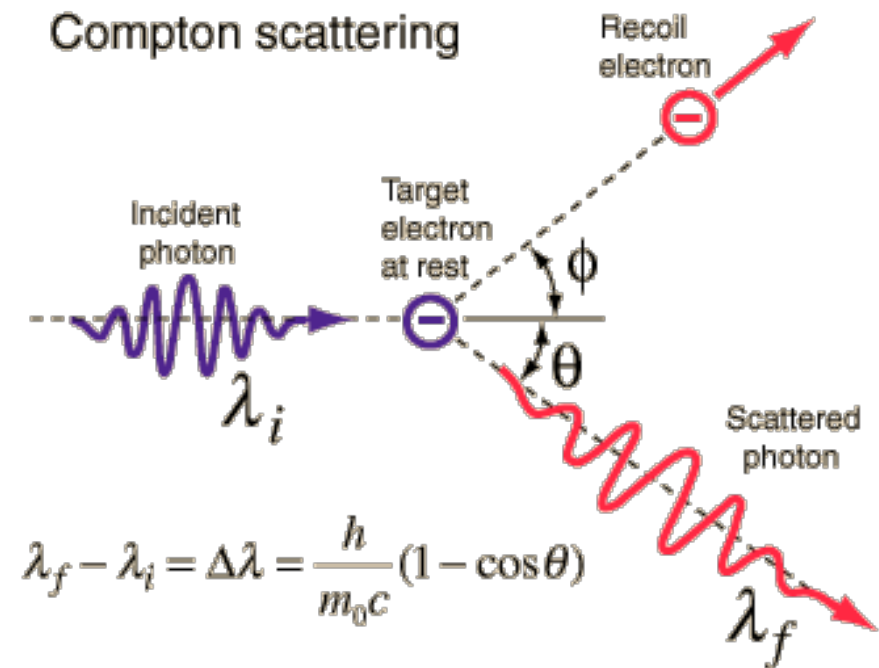
Como explicar essas observações?

- Utilizando a idéia de que os raios-X se comportam como partículas
- Supondo que uma “partícula” de radiação, com comprimento de onda λ_0 , energia E_0 e momento p_0 incide sobre um elétron de massa m_e
- Esse elétron sofre um recuo, sendo emitido em um ângulo φ , com energia E_e e momento p_e
- A partícula de radiação, por sua vez, é emitida no ângulo θ , com energia E' e comprimento de onda λ'



Espalhamento Compton

- Usando apenas a idéia da dualidade onda-partícula da radiação eletromagnética e os princípios de conservação de energia e momento, podemos reproduzir os resultados obtidos por Compton

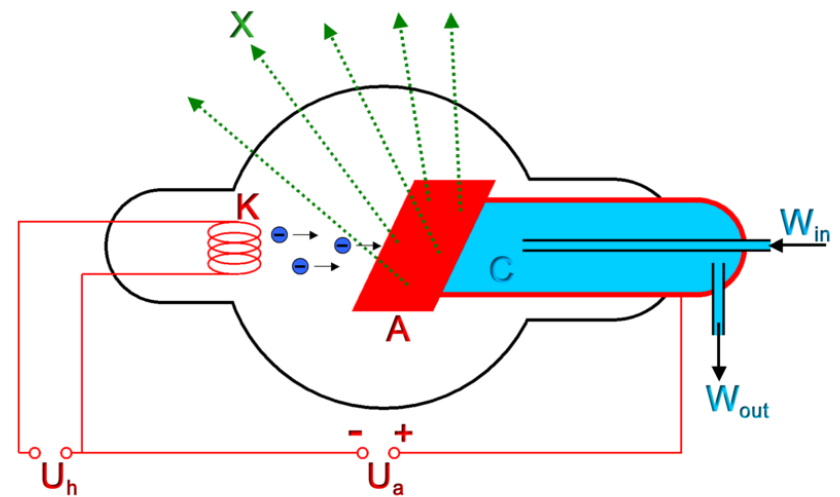


A natureza dual da radiação eletromagnética

- Compton escreveu em seu artigo:
 - *“A presente teoria depende essencialmente da suposição de que cada elétron que participa do processo espalha um quantum completo (fóton). Isto envolve também a hipótese de que os quanta de radiação vêm de direções definidas e são espalhados em direções definidas. O apoio experimental da teoria indica de forma bastante convincente que um quantum de radiação carrega consigo tanto momento como energia”*

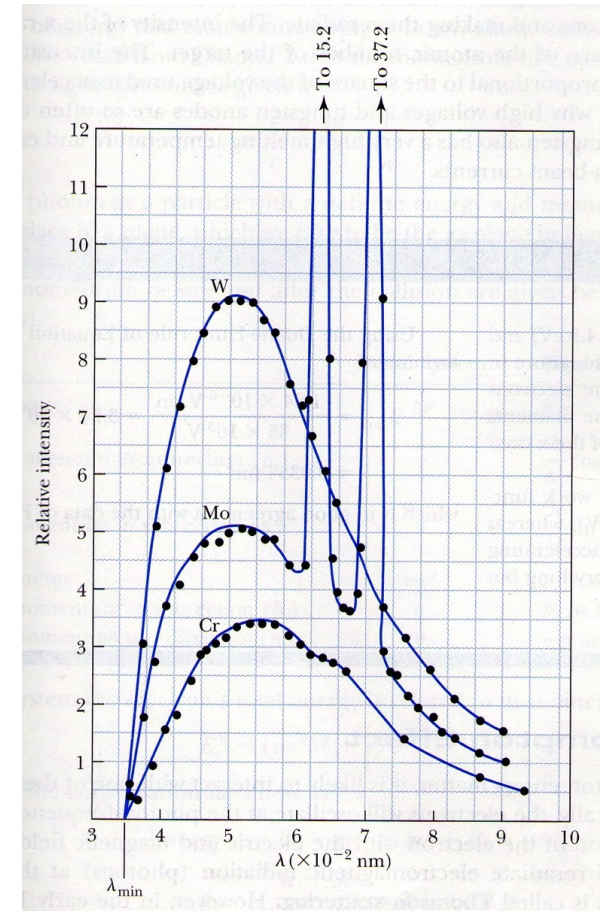
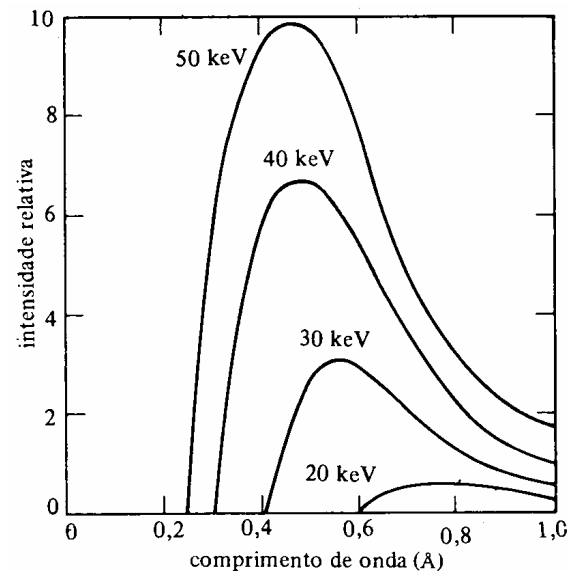
Como são produzidos os raios-X?

- Como um feixe de elétrons incidindo em um material produz raios-X?



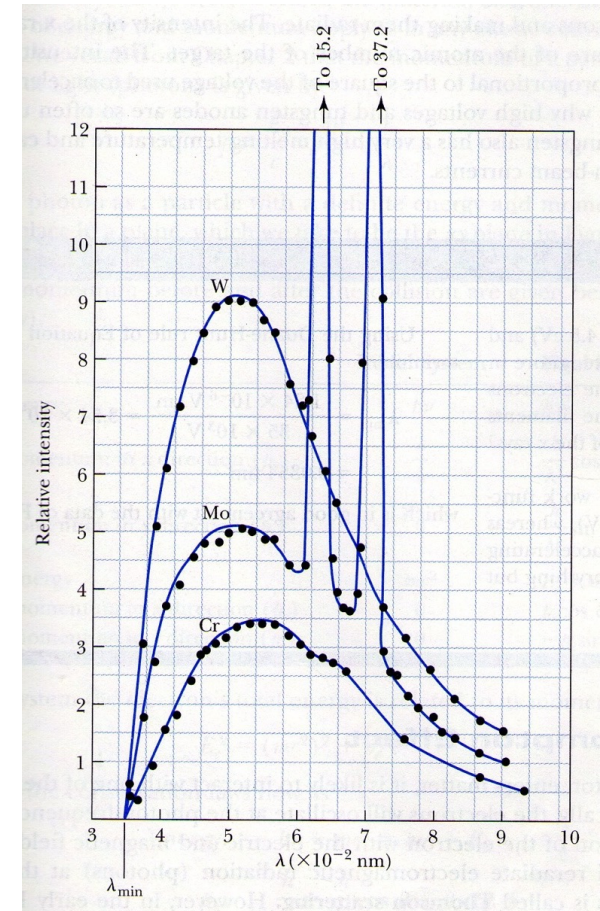
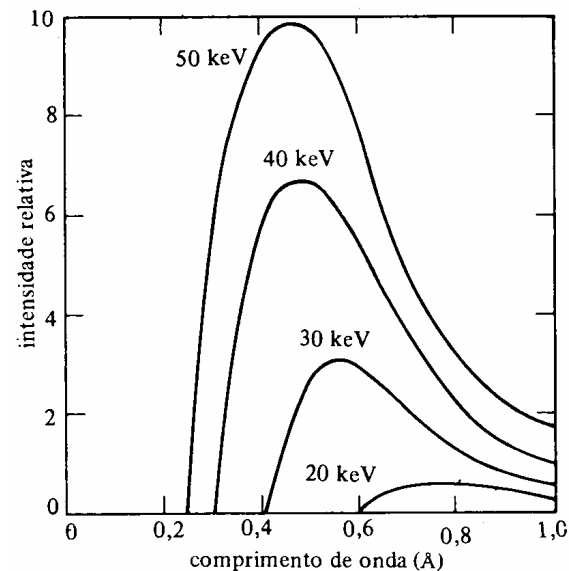
Como são produzidos os raios-X?

- Como um feixe de elétrons incidindo em um material produz raios-X?
- Quais as características dos raios-X produzidos?



Como são produzidos os raios-X?

- Segundo a física clássica uma carga em aceleração emite um espectro contínuo de radiação eletromagnética
- Porém, ela não pode explicar a razão de existir um valor mínimo de comprimento de onda nesse espectro



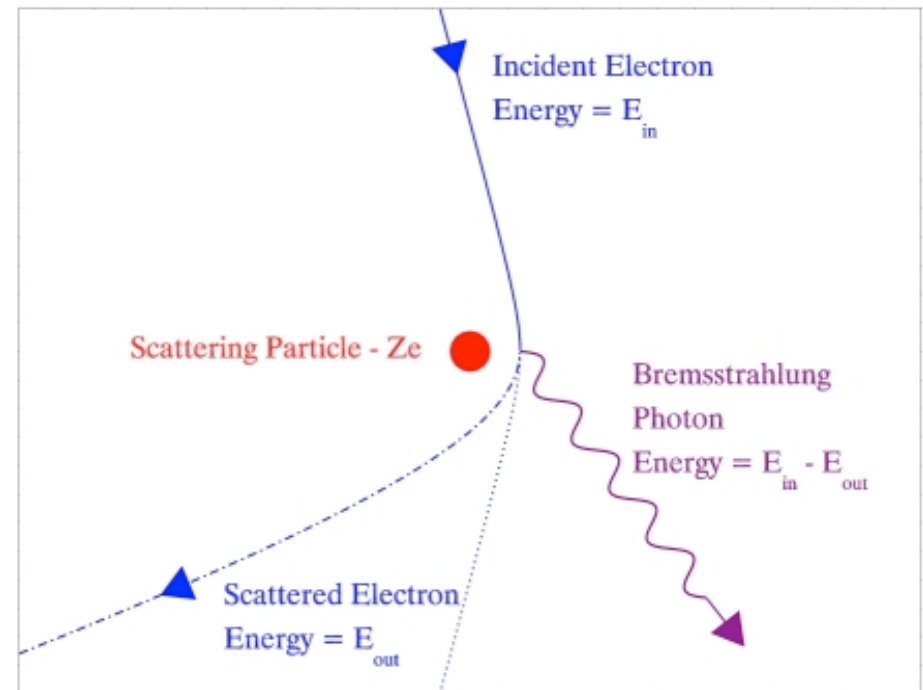
Produção de raios-X

- Por outro lado, se tratarmos os raios-X como partículas, podemos explicar esse efeito
- Seja um elétron de energia cinética E_i incidindo sobre o átomo de um material
- O elétron interage com o núcleo do átomo e transfere parte de sua energia para ele, ficando com uma energia final E_f
- Como o núcleo é muito pesado, podemos desprezar o recuo sofrido por ele

Produção de raios-X

- Se postularmos que a diferença de energia do elétron é usada para criar um fóton de radiação, temos:

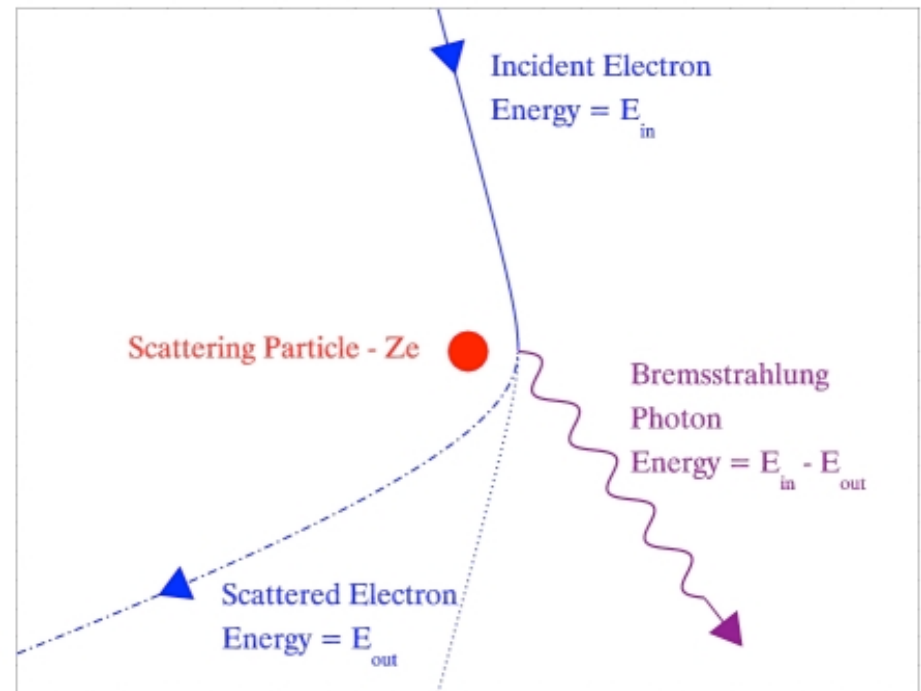
$$E_i - E_f = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$$



Produção de raios-X

- No caso do nosso aparato experimental: $E_i = eV$
- Portanto, se o elétron perder toda sua energia, ou seja, $E_f = 0$, tem-se:

$$E_i - 0 = eV = \frac{hc}{\lambda_{min}} \Rightarrow \lambda_{min} = \frac{hc}{eV}$$

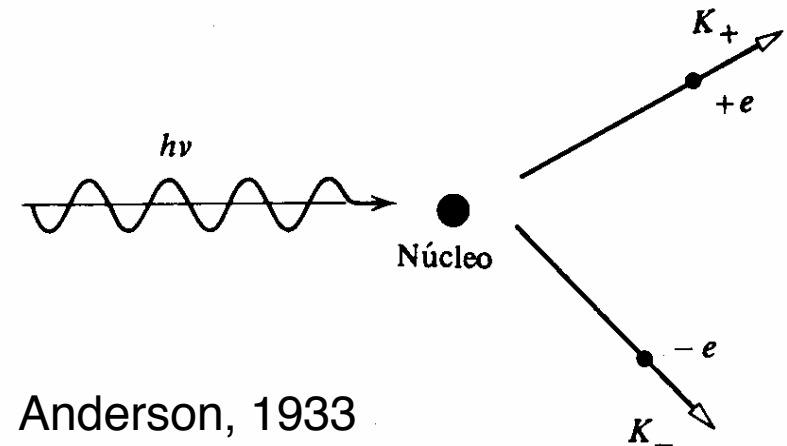


Bremsstrahlung e o efeito fotoelétrico

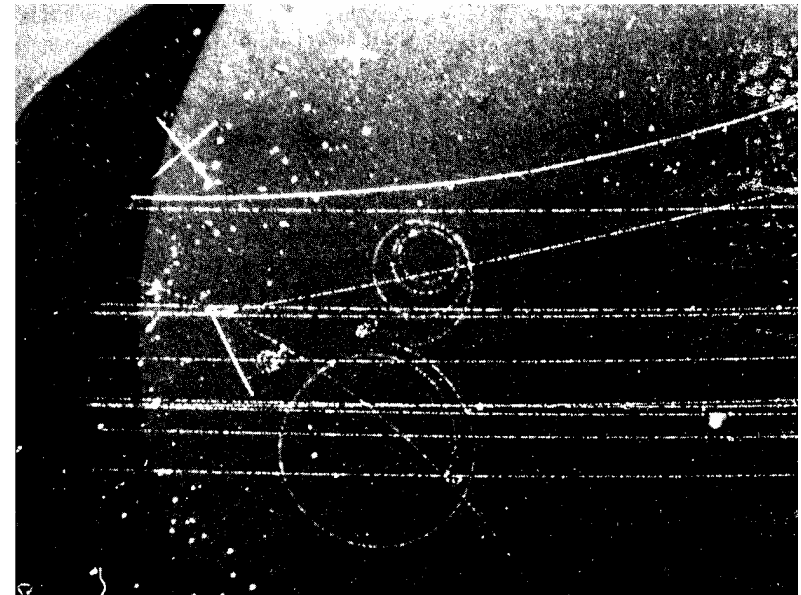
- Produção de raios-X: elétrons acelerados produzem fótons. Esse efeito é chamado de *Bremsstrahlung*
- Efeito Fotoelétrico: fótons “arrancam” elétrons do material
- Será que é possível fótons produzirem realmente elétrons, da mesma maneira que elétrons produzem fótons?

Produção de pares

- Sim, de fato esse fenômeno é observado
- Porém, esse processo precisa respeitar as diversas leis de conservação da natureza
- Fótons produzem um par elétron-pósitron (conservação de carga) a partir da sua interação com o núcleo atômico (conservação de momento e energia)

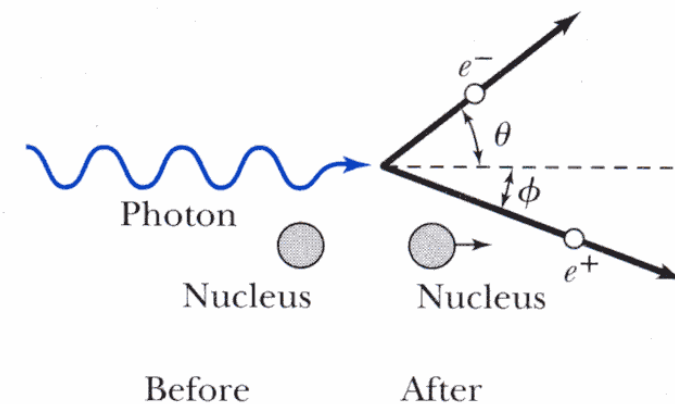
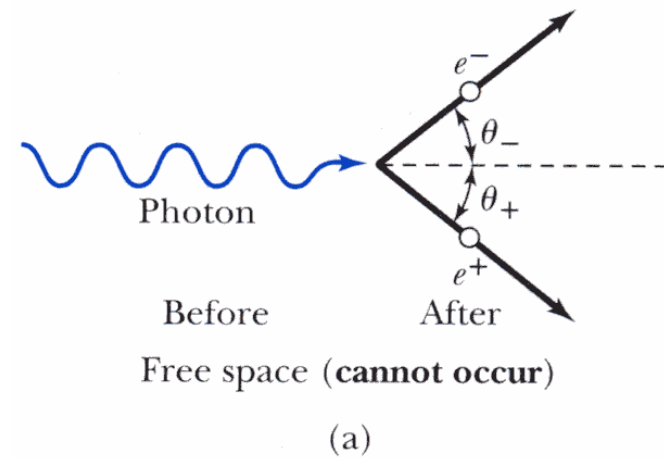


Anderson, 1933



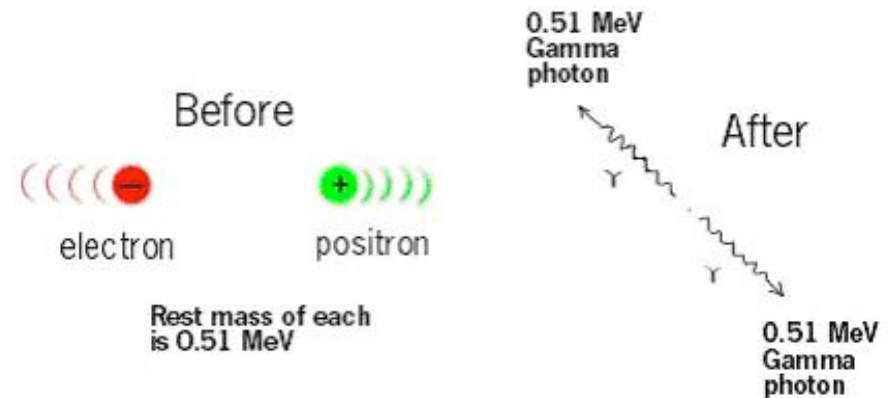
Produção de pares

- A única maneira desse processo conservar momento e energia é se o núcleo atômico estiver presente e absorver parte da energia e momento do fóton



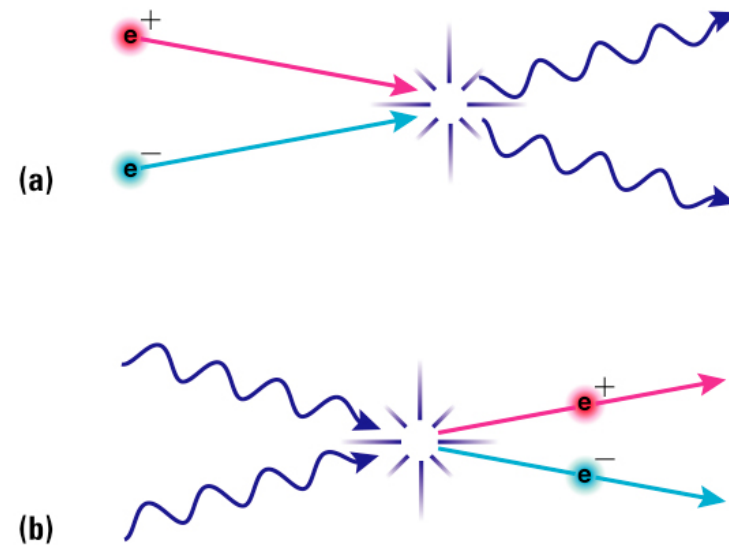
Aniquilação de pares

- O processo inverso também pode ocorrer: um elétron e um pósitron podem se aniquilar produzindo fótons



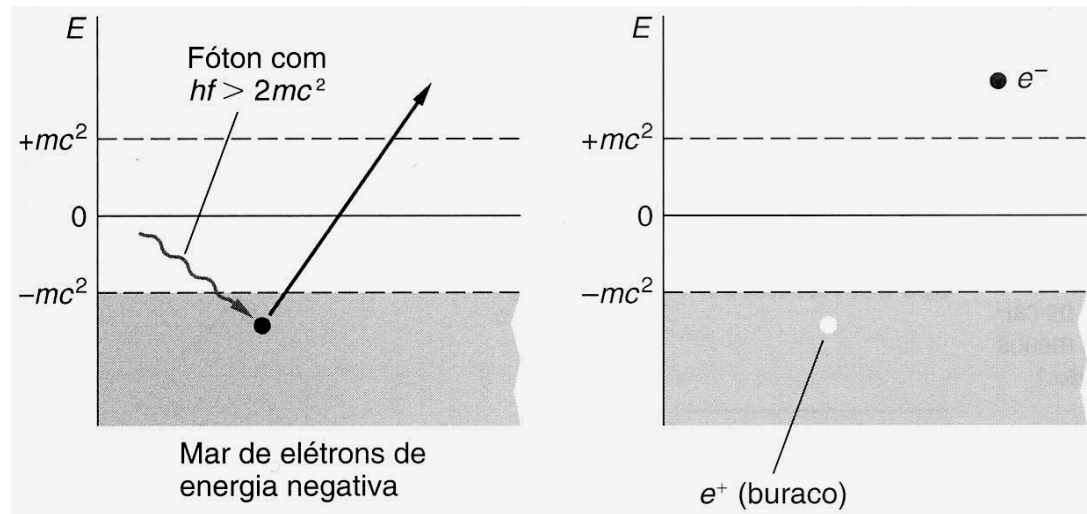
Produção e aniquilação de pares

- Podemos enxergar a produção e aniquilação de pares como sendo as duas “faces” do mesmo processo



Copyright © Addison Wesley

Interpretação de Paul Dirac

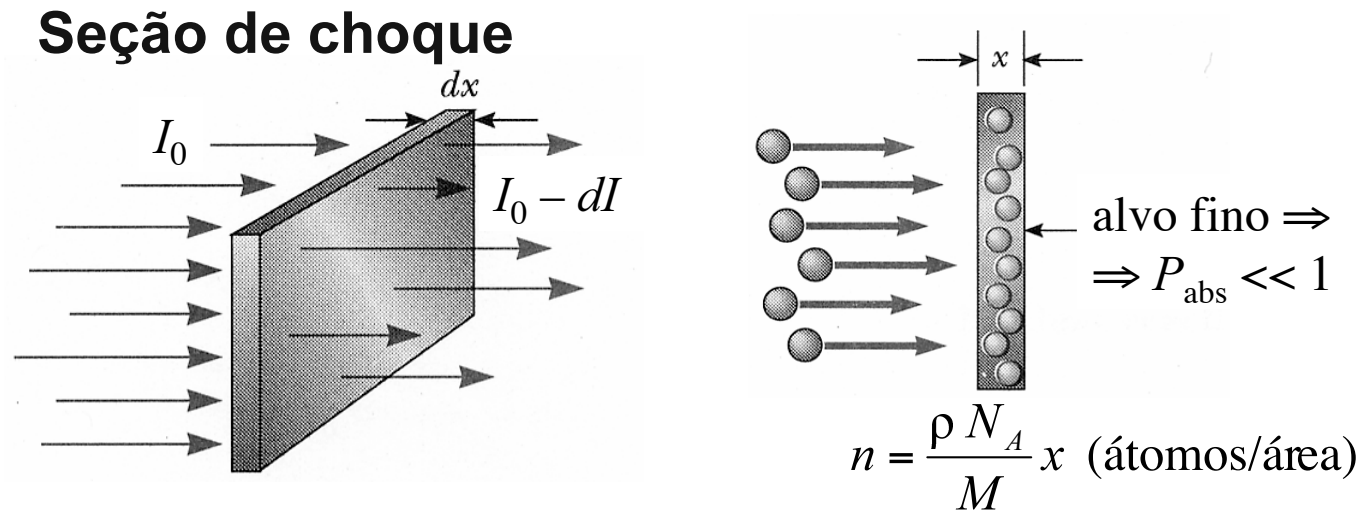


- Existe um “mar de elétrons” que pode ser “excitado” e criar um elétron deixando um “buraco” que é o pósitron

Seção de choque de absorção de fótons na matéria

- Ao incidir um feixe de fótons sobre algum material, existe uma probabilidade que alguns fótons interajam com os átomos desse material
- A seção de choque define a probabilidade de um fóton interagir com o material através de algum processo (fotoelétrico, produção de pares, espalhamento Thomson ou espalhamento Compton)

Seção de choque de absorção de fótons na matéria

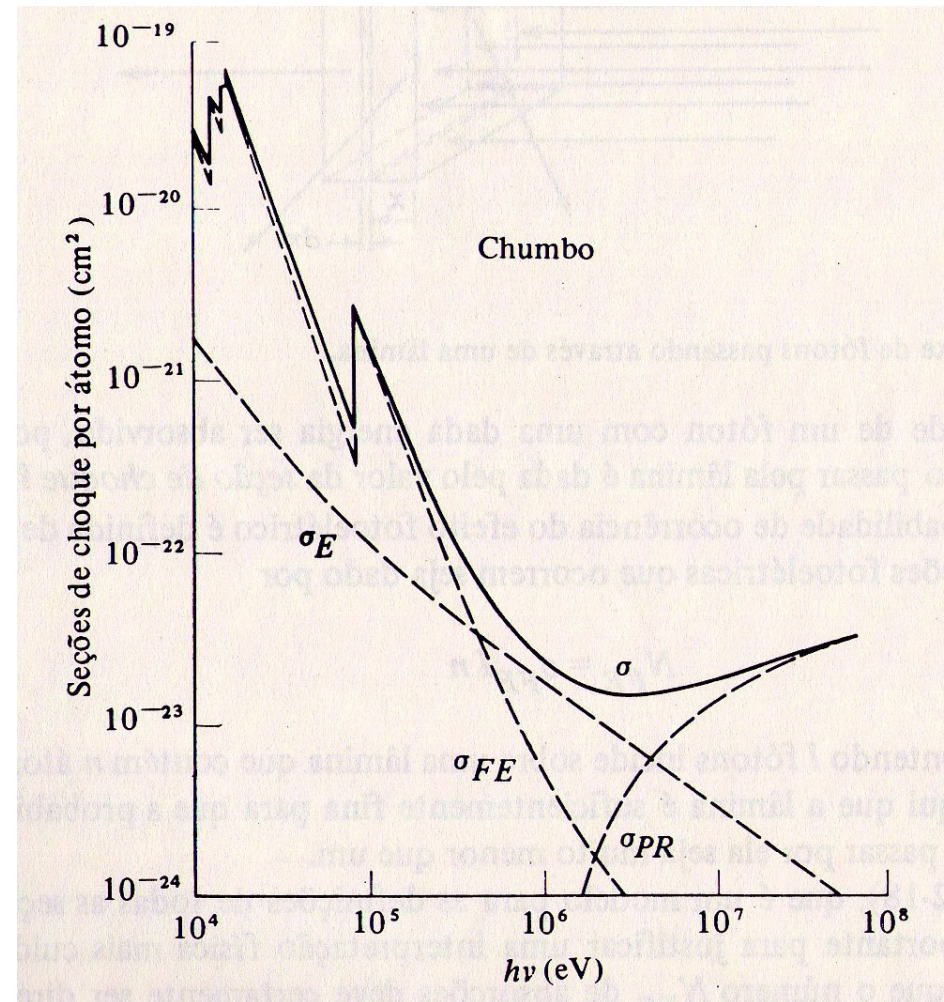


$$dI \propto I_0 \cdot n \Rightarrow dI = \sigma \cdot I_0 \cdot n$$

- A seção de choque tem dimensão de área !

Seção de choque de absorção de fótons na matéria

- Pode-se medir qual é a seção de choque em função da energia dos fótons para cada processo ocorrer



Dualidade onda-partícula da radiação eletromagnética

- Portanto, diversos fenômenos mostram que a radiação eletromagnética de fato apresenta esse caráter dual

