

Instituto de Física USP

Física Moderna I Aula 10

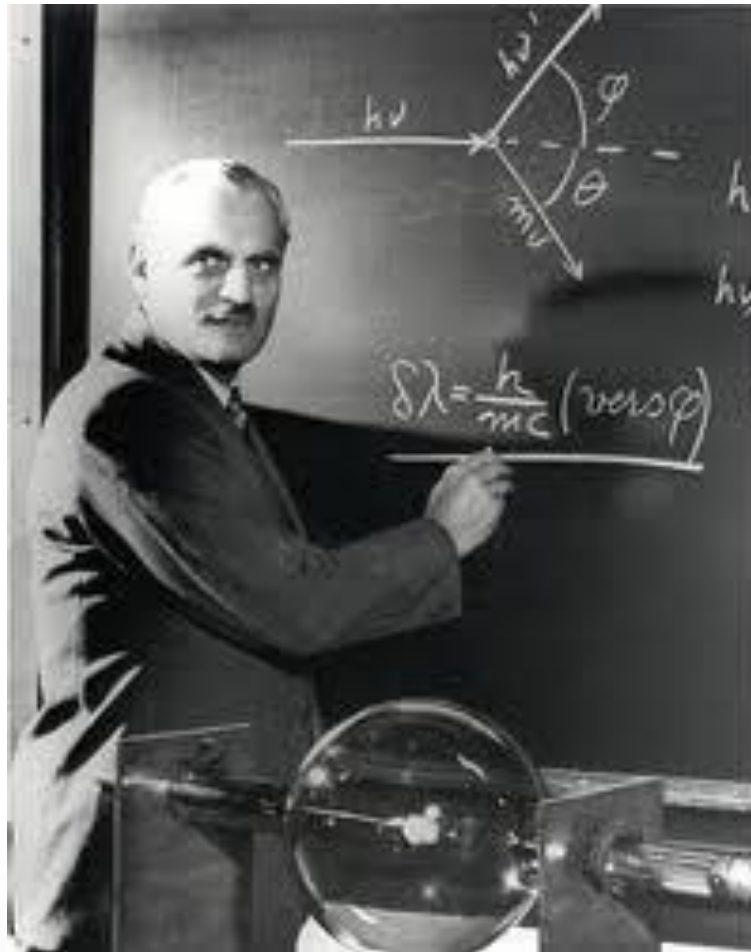
Professora: Mazé Bechara

Aula 10 - Efeito Compton ou o espalhamento dos Raios-X na interação com a matéria

1. O Efeito Compton – o que é .
2. As características dos espectros espalhados a partir da idéia fotônica da radiação eletromagnética.
3. Determinação quantitativa da diferença de comprimentos de onda em função do ângulo do espalhamento. Condições para ocorrer absorção do fóton pelo elétron da matéria (efeito fotoelétrico) ou espalhamento do fóton pelo elétron da matéria.
4. Aplicação do efeito Compton.
5. Aplicação: a difração – impressão digital de ondas, e a visão fotônica.

Arthur H. Compton (1892,1962) – físico americano

Prêmio Nobel de Física em 1927



Compton teria sido, segundo alguns autores, o primeiro a chamar de fóton o quanta de luz, em 1926.

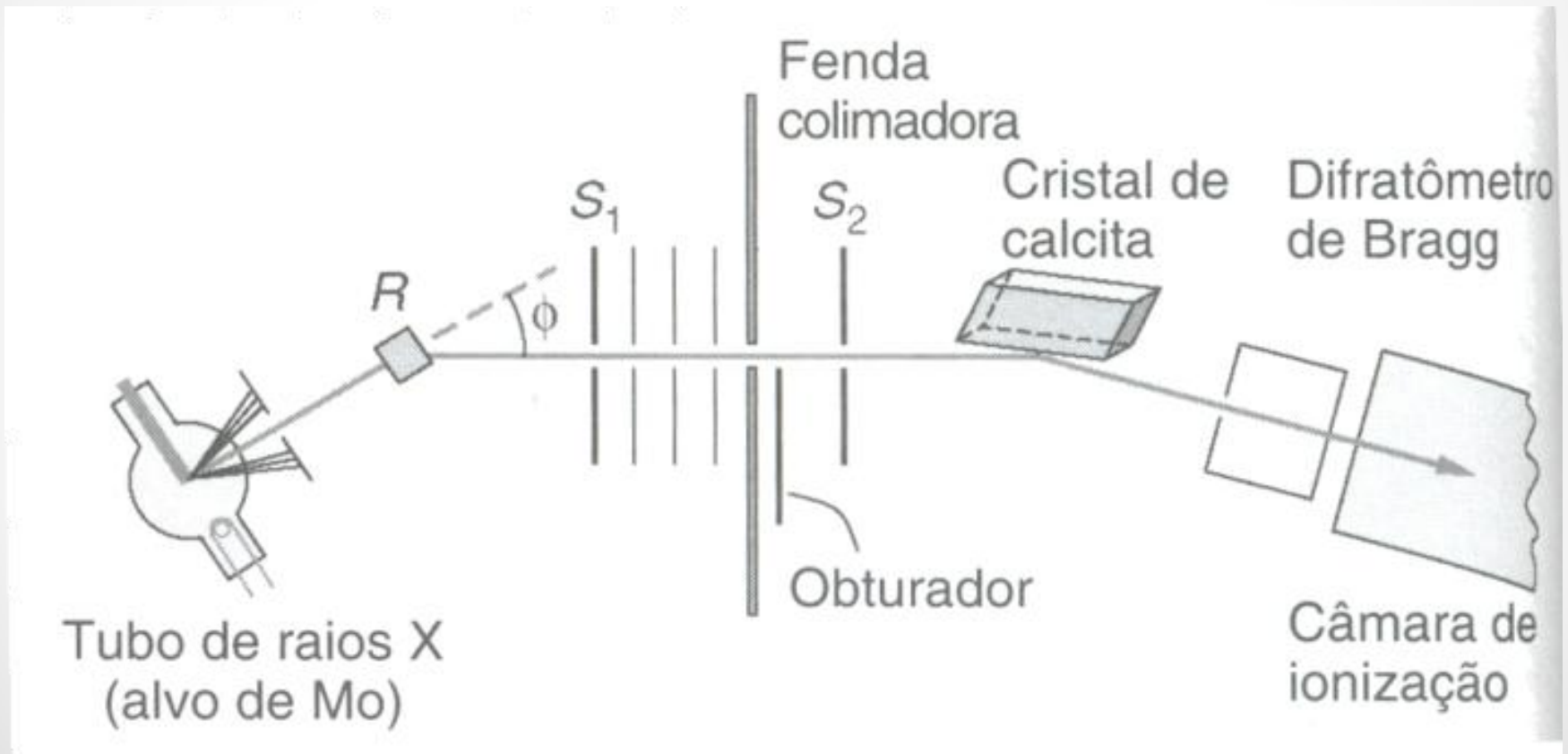
Espalhamento Compton

- **O que é:** espalhamento de um feixe de **raios-X** ou **raios- γ** (radiação eletromagnética com comprimentos de onda da ordem de 1 angstroms ou menores) por materiais.
- **Significado de espalhamento:** depois de incidir (interagir) com um material é observada radiação eletromagnética em diversas direções em relação à direção incidente.
- **Característica da radiação espalhada:** em qualquer ângulo de espalhamento (ângulo diferente de zero com a direção do feixe incidente) há dois picos com intensidades proeminentes: um se mesmo comprimento de onda que o incidente e de outro com comprimento de onda “um pouquinho” maior que o comprimento de onda incidente.

Radiação eletromagnética: seus comprimentos de onda comparados às dimensões do universo natural e cultural

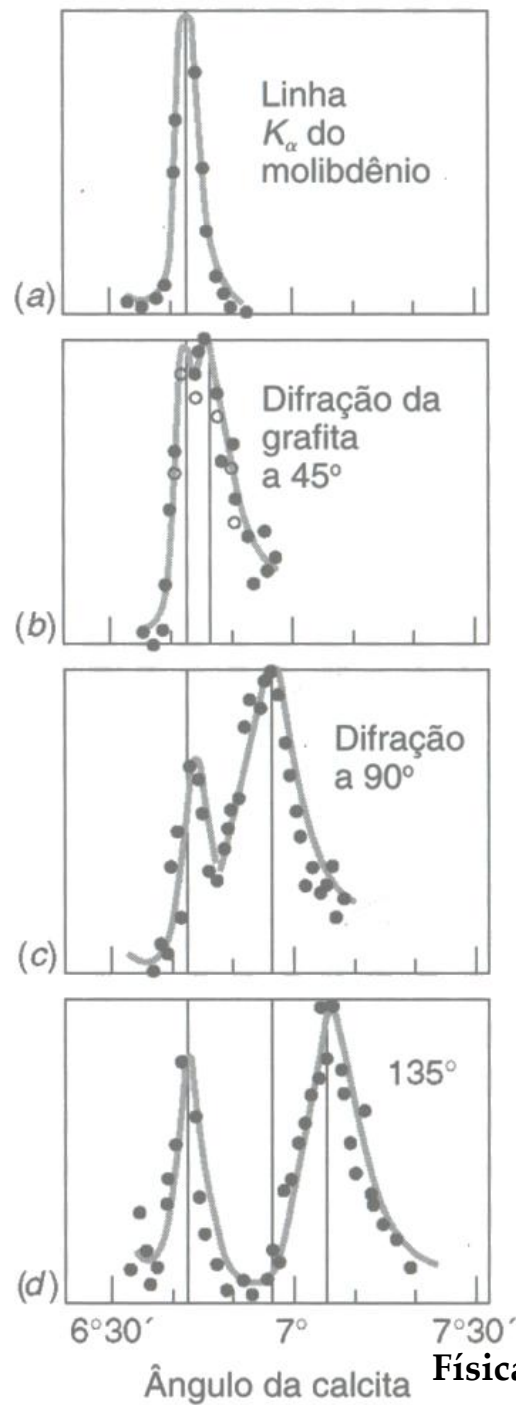


Efeito Compton – o espalhamento dos raios-X



Efeito Compton

Os espectros da radiação espalhada a 45° , 90° e 135° com a direção de incidência



O feixe transmitido - 0°

Relação observada

$$\Delta\lambda_{\text{exp}} = \lambda' - \lambda_{\text{inc}} = \lambda_c (1 - \cos\theta)$$

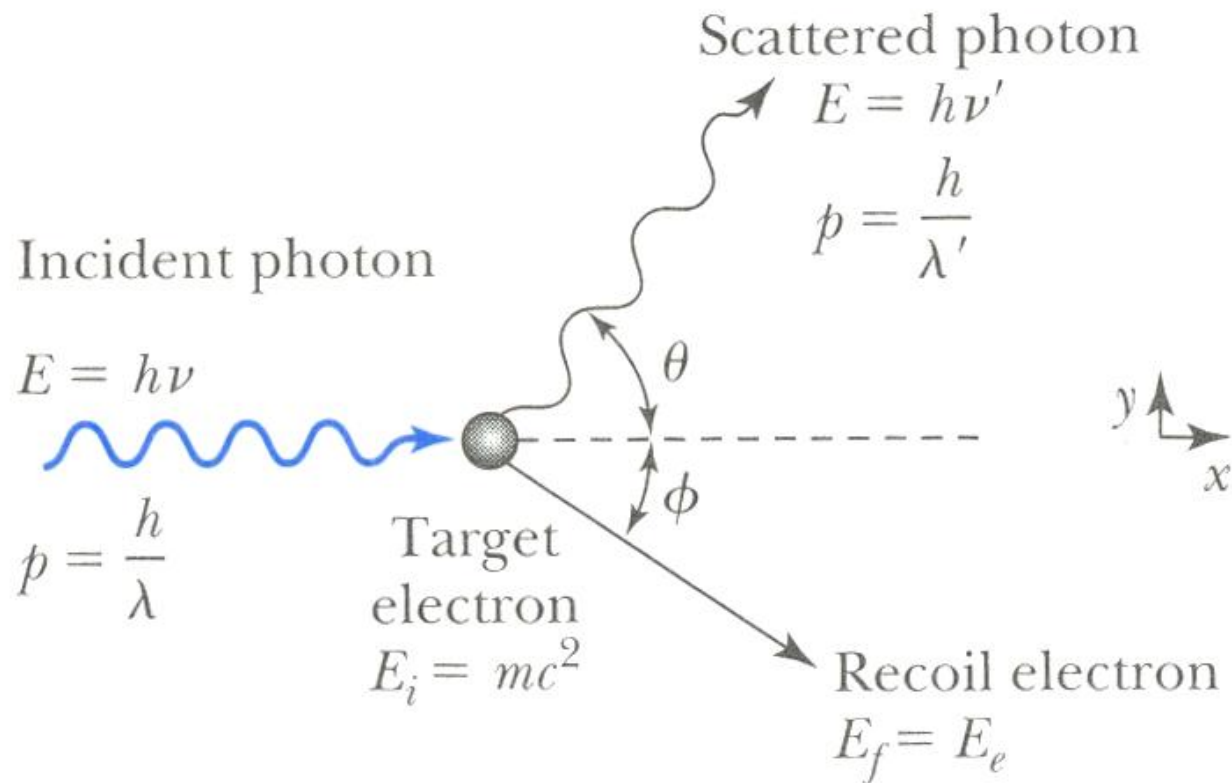
A (meia) explicação da visão ondulatória

- A onda ao incidir em cargas da matéria, promove as oscilações das cargas com a frequência do campo elétrico da onda, e como consequência, as cargas (re)emitem ondas na mesma frequência que a onda, em diferentes direções. Pela teoria de Maxwell, uma carga que oscila em uma direção pode emitir onda em qualquer direção perpendicular à direção de oscilação, com diferentes probabilidades para cada ângulo específico. Este tipo de espalhamento previsto pelo eletromagnetismo clássico é também conhecido como **espalhamento Thomson**.

Compton no artigo “Uma Teoria Quântica para o Espalhamento de Raios X por Elementos”

- “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 quanto energia”.

Representação do espalhamento: fóton e elétron



Compton scattering of a photon by an electron essentially at rest.

Relações relativísticas

$$\varepsilon = \sqrt{p^2 c^2 + m_o^2 c^4} = T + m_o c^2$$

Equação válido para massas de repouso nula (fótons) e não nulas (partículas materiais).

$$\varepsilon = mc^2 = \frac{m_o}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} c^2$$

Equação válida só para partículas materiais: $m_o \neq 0$ e $v < c$

Fótons – partículas com energia (ε) e momento linear (p).

*Relações entre as grandezas corpusculares (ε, p) e as
ondulatórias (ν, λ)*

$$\varepsilon = h \nu = \frac{hc}{\lambda} = pc$$

$$E = \sqrt{p^2 c^2 + m_0^2 c^4} = pc \quad \text{Fótons: } m_0 = 0$$

Resultado do espalhamento: um fóton com um elétron “livre” (energia de ligação desprezível frente à do fóton incidente)
(demonstração em aula para elétron relativístico)

$$\lambda_{\text{comp}} - \lambda_{\text{inc}} = \frac{h}{m_{oe}c} (1 - \cos \theta) = 0,0243 \text{ \AA} (1 - \cos \theta)$$

$$\lambda_c = \frac{h}{m_{oe}c} = 0,0243 \text{ \AA}$$

Resultado do espalhamento de um fóton com um elétron ligado

Na interação com elétron ligado ou núcleo, a massa m_0 envolvida no processo é pelo menos 2000 vezes menor (massa do núcleo mais leve: o do hidrogênio) que a massa de repouso do elétron “livre”, ou seja, o comprimento de onda compton é pelo menos 2000 vezes menor. Essa diferença no valor do comprimento de onda não é possível de se observar experimentalmente:

$$\lambda' - \lambda_{inc} = \frac{h}{m_0 c} (1 - \cos \theta) \leq 0,000012 \text{ \AA} (1 - \cos \theta)$$

Efeito Compton - Aplicação 01

Um feixe de Raios-X de comprimento de onda de $0,500\text{\AA}$ incide sobre uma folha de ouro.

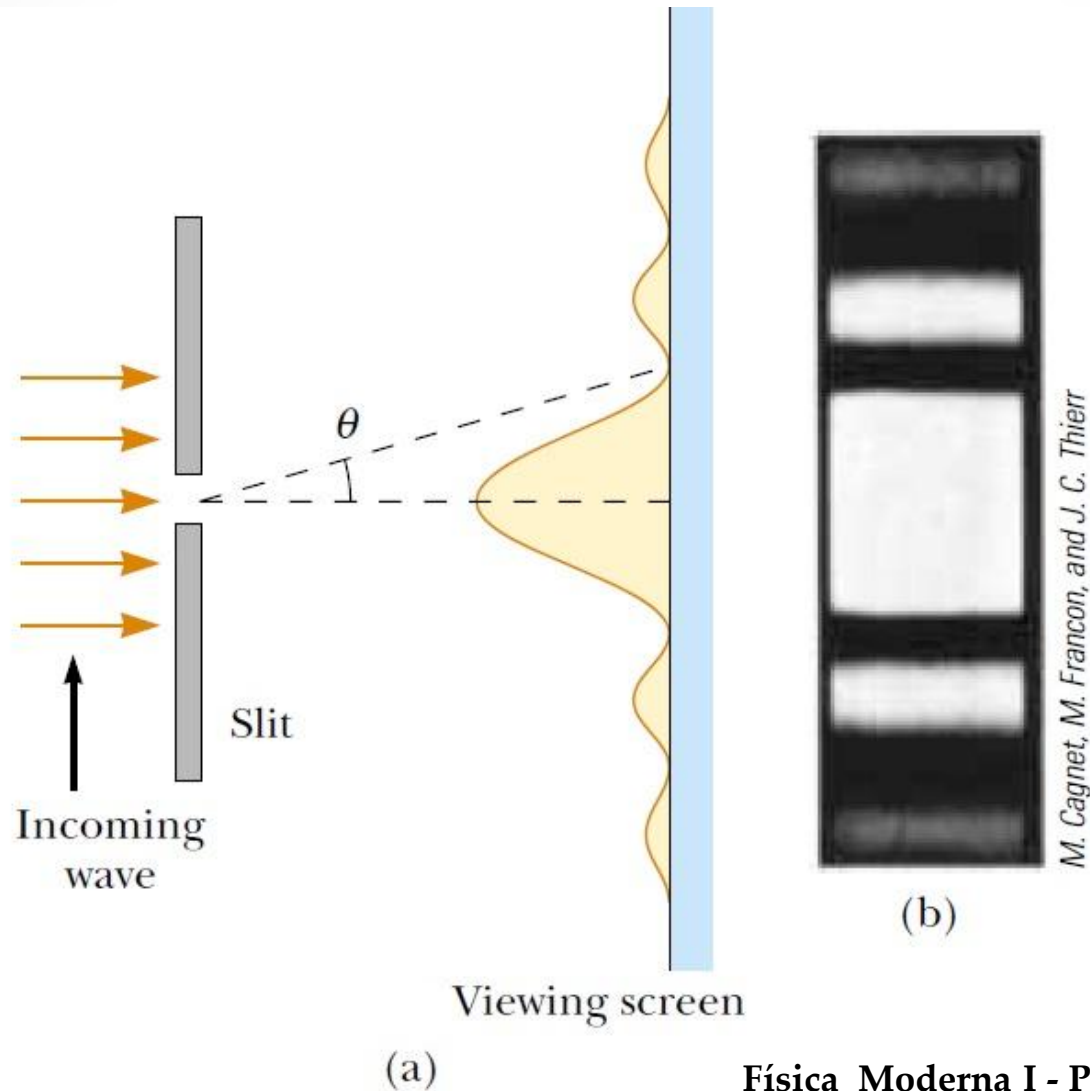
- a) Determine a energia dos fótons do feixe.
- b) Determine o valor máximo e o valor mínimo, em angstroms, do comprimento de onda dos fótons espalhados. Explícite os ângulos de espalhamento nos quais há feixe espalhado com o valor máximo e com o valor mínimo do comprimento de onda. Justifique.
- c) Determine a energia cinética máxima dos elétrons arrancados do material no efeito Compton, e os ângulos nos quais os fótons que os arrancaram foram espalhados. Justifique.
- d) Determine a porcentagem de energia e de momento linear de um fóton que foi transferida no espalhamento para os casos do item (b). Diga “quem” recebe a energia e o momento linear do fóton espalhado com o maior comprimento de onda e com o menor comprimento de onda.
- e) Qual a relação entre as intensidades dos feixes espalhados em todos os ângulos, nos diversos comprimentos de onda com a intensidade do feixe incidente? Justifique.
- f) O feixe incidente pode produzir corrente fotoelétrica no ouro? Em que condições? Justifique. *Sugestão – compare a sua resposta ao item (d) com o que ocorre no caso do efeito fotoelétrico.*

Difração – onda e partículas

Aplicação 3.

- a) A luz monocromática de um feixe que passa por **uma fenda de largura da ordem do comprimento de seu onda** faz um padrão de claros e escuros conhecido como **padrão de difração**. Desenhe o padrão de difração de uma fenda em um anteparo bem distante da fenda. (Este caso tem-se a figura chamada de ***difração de Fraunhofer***.) **Justifique.**
- b) Como seria a figura formada considerando a proposta de visão fotônica de Einstein? **Justifique.**

Difração de Fraunhofer: anteparo longe da fenda



A imagem no anteparo longe, após um feixe de luz monocromática de baixíssima intensidade atravessar uma fenda (centro dos retângulos) - compatível com o caráter dual tempo de exposição crescente de a a d

