

Instituto de Física
USP

Física V - Aula 14

Professora: Mazé Bechara

•

•

Convite

- Colóquio do IFUSP – Hoje – 4/4/2013
16h no A. de Moraes

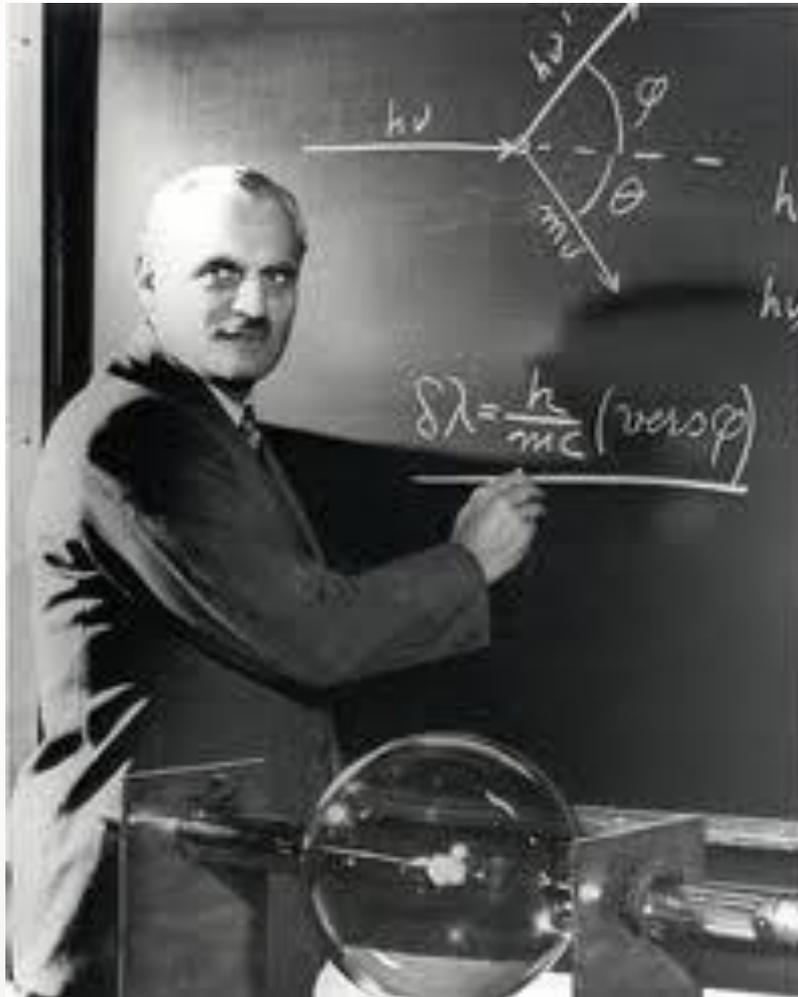
“Aspectos históricos da teoria cinética dos gases: do atomismo à equação de Boltzmann”

- Prof. Dr. Gilberto Medeiros Kremer,
- Departamento de Física, Universidade Federal do Paraná, Curitiba
- **Arrisque-se! Vá até lá conferir !**

Aula 14 - Efeito Compton ou o espalhamento dos Raios-X na interação com a matéria

1. O **Efeito ou espalhamento Compton** – o que é .
2. **As características dos espectros de radiação eletromagnética espalhada.**
3. **Determinação quantitativa da diferença de comprimentos de onda nos dois picos espalhados, em função do ângulo do espalhamento, segundo a idéia fotônica: natureza e cálculo do efeito Compton. O espalhamento Thomson segundo a visão ondulatória e a fotônica.**
4. **Aplicação**
5. **Condições** para ocorrer com feixe de raios-X **o espalhamento de fótons por elétrons “livres” e por elétron ligados na matéria: os espalhamentos Compton e Thomson respectivamente, e o efeito fotoelétrico** (absorção do fóton por um elétron ligado da matéria) e – **diferenciando os três fenômenos.**

Arthur H. Compton (1892 - 1962) – físico americano - Prêmio Nobel de Física de 1927



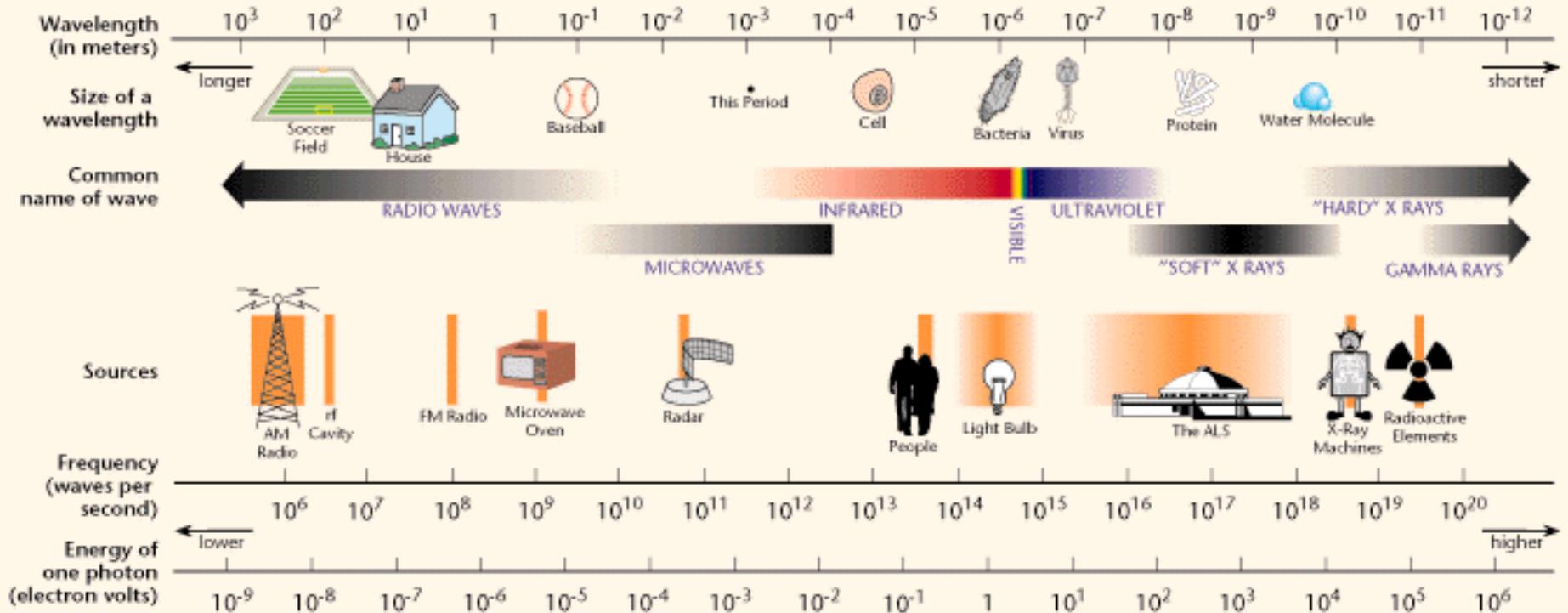
Compton teria sido, segundo alguns autores, o primeiro a chamar de fóton o quanta de luz, em 1926.

Espalhamento Compton

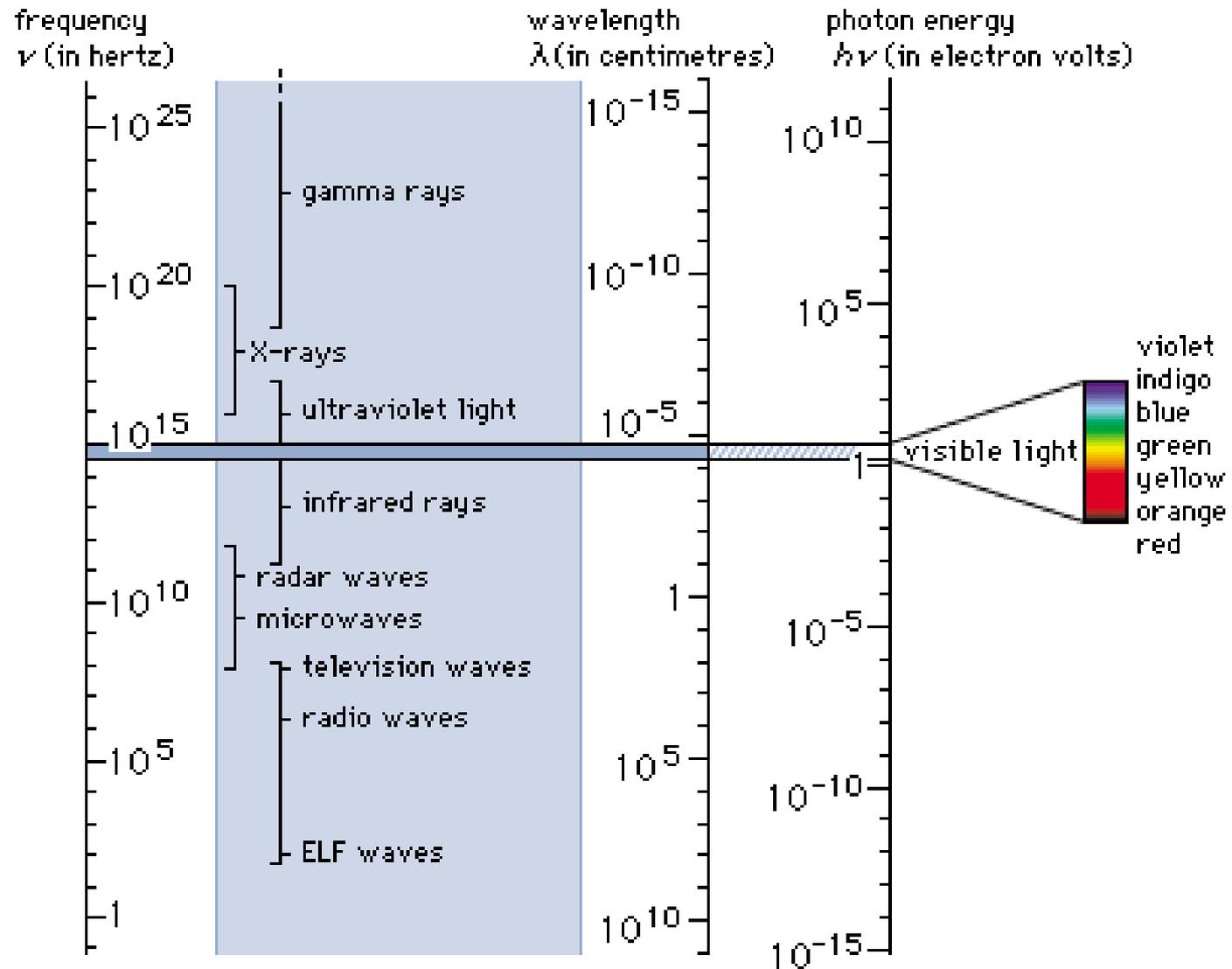
- **O que é:** espalhamento de feixe monocromático de **raios-X** ou **raios- γ** (radiação eletromagnética com **comprimentos de onda da ordem de 1 angstroms ou menores**, ou seja, **fótons com energias de keV ou MeV**) por materiais.
- **Significado de espalhamento:** depois de incidir (interagir) 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 de radiação com intensidades proeminentes: **um de mesmo comprimento de onda que o incidente (explicado no eletromagnetismo clássico)** e **outro com comprimento de onda “um pouquinho” maior que o comprimento de onda incidente - espalhamento Compton.**

Radiação eletromagnética e suas frequências no universo natural e cultural (nomes dependem da origem também)

THE ELECTROMAGNETIC SPECTRUM



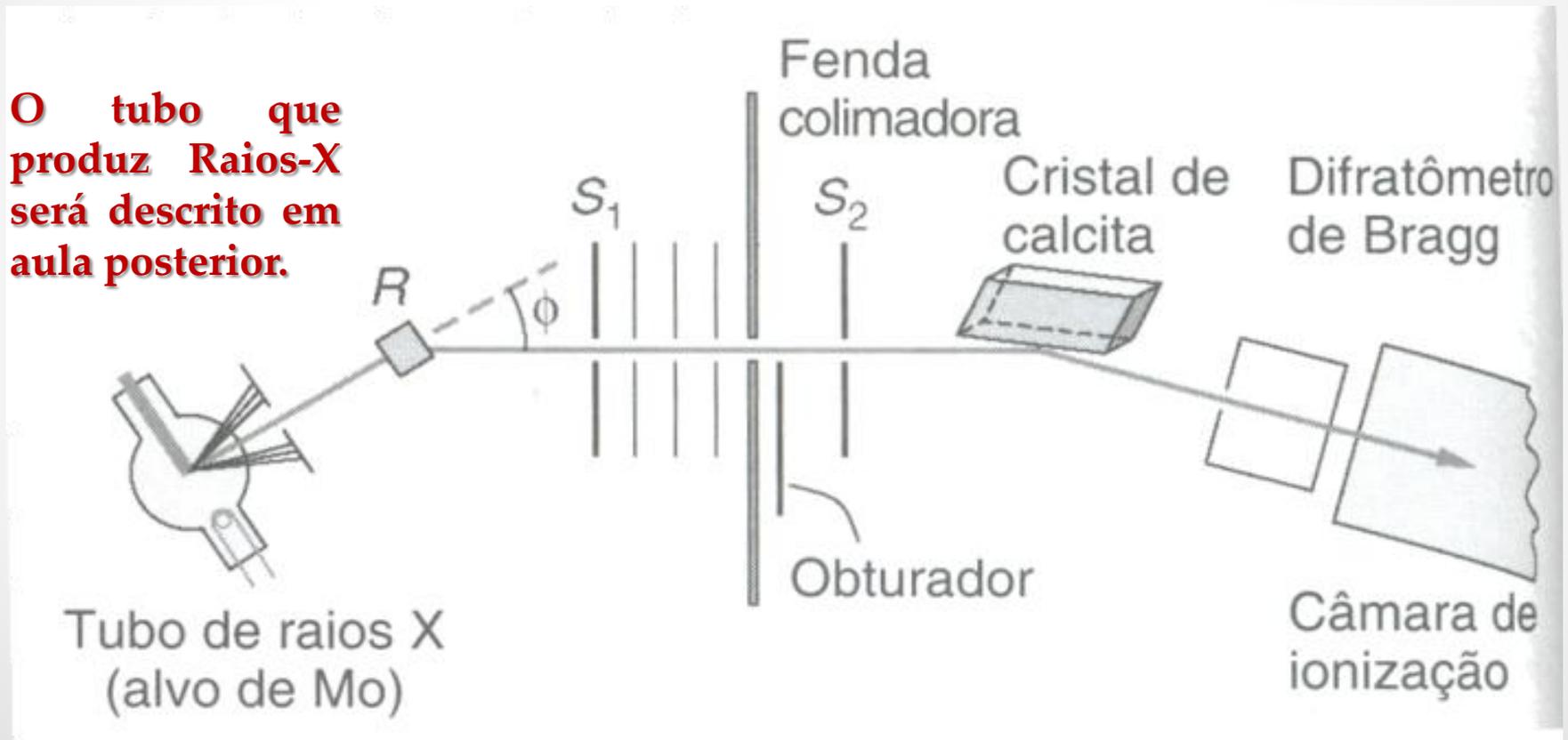
Radiação eletromagnética: nomeados conforme frequência e origem



© 2006 Encyclopædia Britannica, Inc.

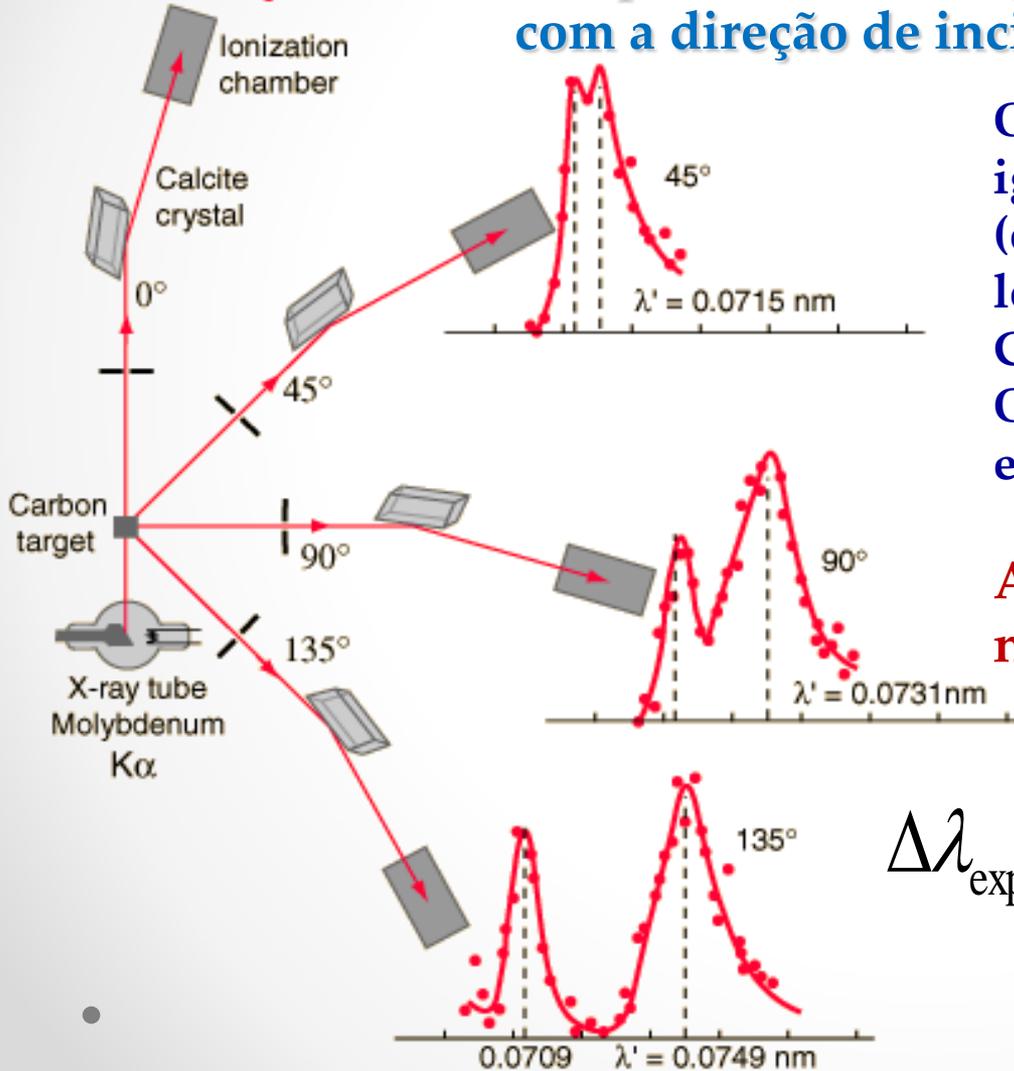
Efeito Compton – o equipamento para produzir os espectros do espalhamento

O tubo que produz Raios-X será descrito em aula posterior.



Espectros de espalhamento de Raios-X

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



O comprimento de onda menor é igual ao do feixe incidente (espalhamento Thomson ou Rayleigh - tem explicação na Física Clássica).

O comprimento de onda maior é o do espalhamento Compton.

Ambos os picos têm explicação na idéia fotônica da REM.

Relação observada

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

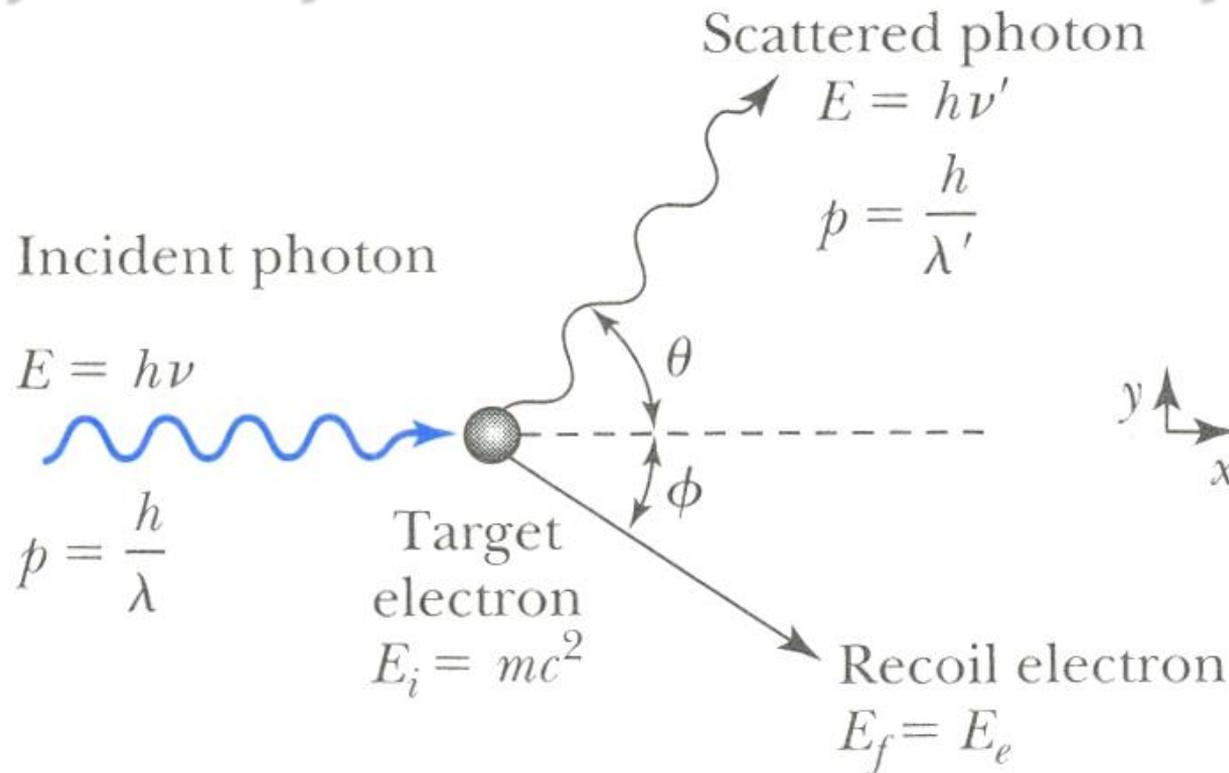
A (meia) explicação da visão ondulatória

- **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 e frequência de oscilação, com a mesma frequência da oscilação. Este tipo de espalhamento previsto pelo eletromagnetismo clássico é também conhecido como **espalhamento Thomson (ou Rayleigh).****

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 de fóton por elétron livre e parado



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

- O elétron “livre” da matéria é emitido ficando efetivamente livre, e forma a corrente Compton (microampère ou menor).

Dúvidas

1. Qual a diferença entre efeito fotoelétrico e efeito Compton?

2. Os elétrons do “efeito Compton” saem do material com energia relativística ou não relativística?

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)

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

$$E = \sqrt{p^2 c^2 + m_0^2 c^4} = pc$$

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. Na página da disciplina a demonstração para elétron não relativístico)

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

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

Observe que cada partícula tem seu comprimento de onda Compton

Espalhamento de um fóton com um elétron ligado ou por um núcleo

- Na **interação de um fóton com um elétron ligado ao núcleo ou com o próprio núcleo.**
- A massa m_0 é pelo menos 2000 vezes menor (massa do núcleo mais leve: hidrogênio) que a massa de repouso do elétron. O **comprimento de onda Compton é pelo menos 2000 vezes menor.**

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

- **Essa diferença no valor do comprimento de onda não é possível de se observar experimentalmente.**
- Neste caso a energia transferida do fóton ao elétron ligado ou núcleo não consegue arrancar o elétron ou núcleo do material.
- **Esta é a explicação fotônica para o espalhamento com o comprimento de onda idêntico ao do feixe incidente.**

Efeito Compton - Aplicação

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 e a mínima 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). Explique "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) Há 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.

Efeito Compton - *processos* *“equivalentes”* segundo a *QED*

