

*Instituto de Física*  
*USP*

*Física V - Aula 14*

*Professora: Mazé Bechara*

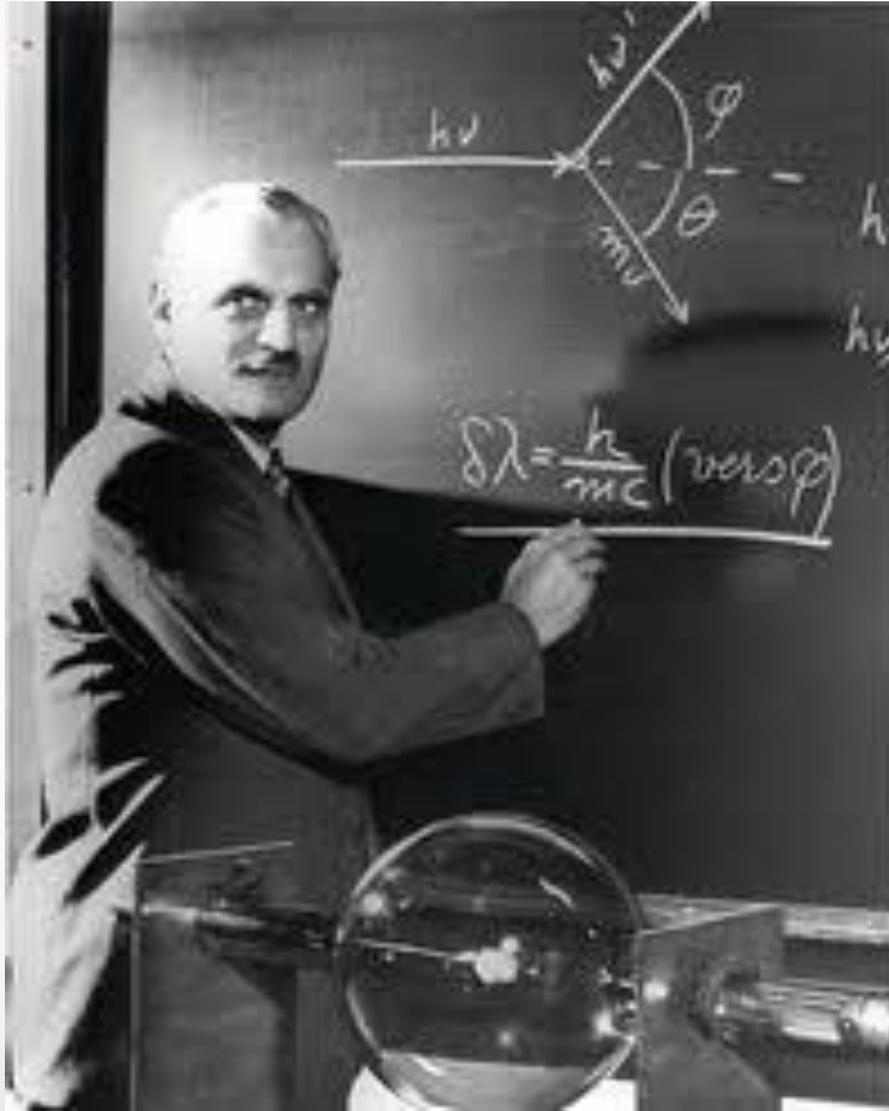
•

•

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

- 1. 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. Condições para ocorrer e diferenciações de três efeitos: Fotoelétrico, espalhamento Thomson e espalhamento Compton.**
- 5. Aplicação**

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



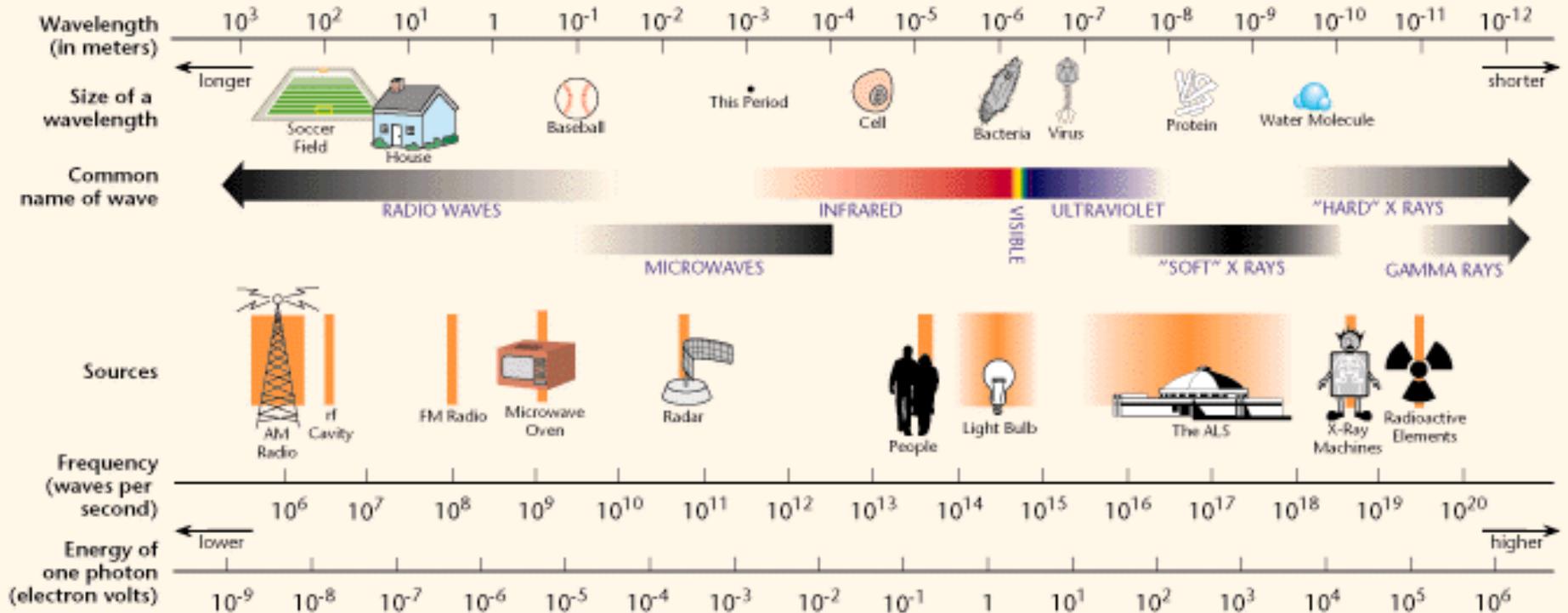
*Compton teria sido, segundo alguns autores, o primeiro a chamar de fóton o quanta de luz, em 1926.*

# *Espalhamento Compton*

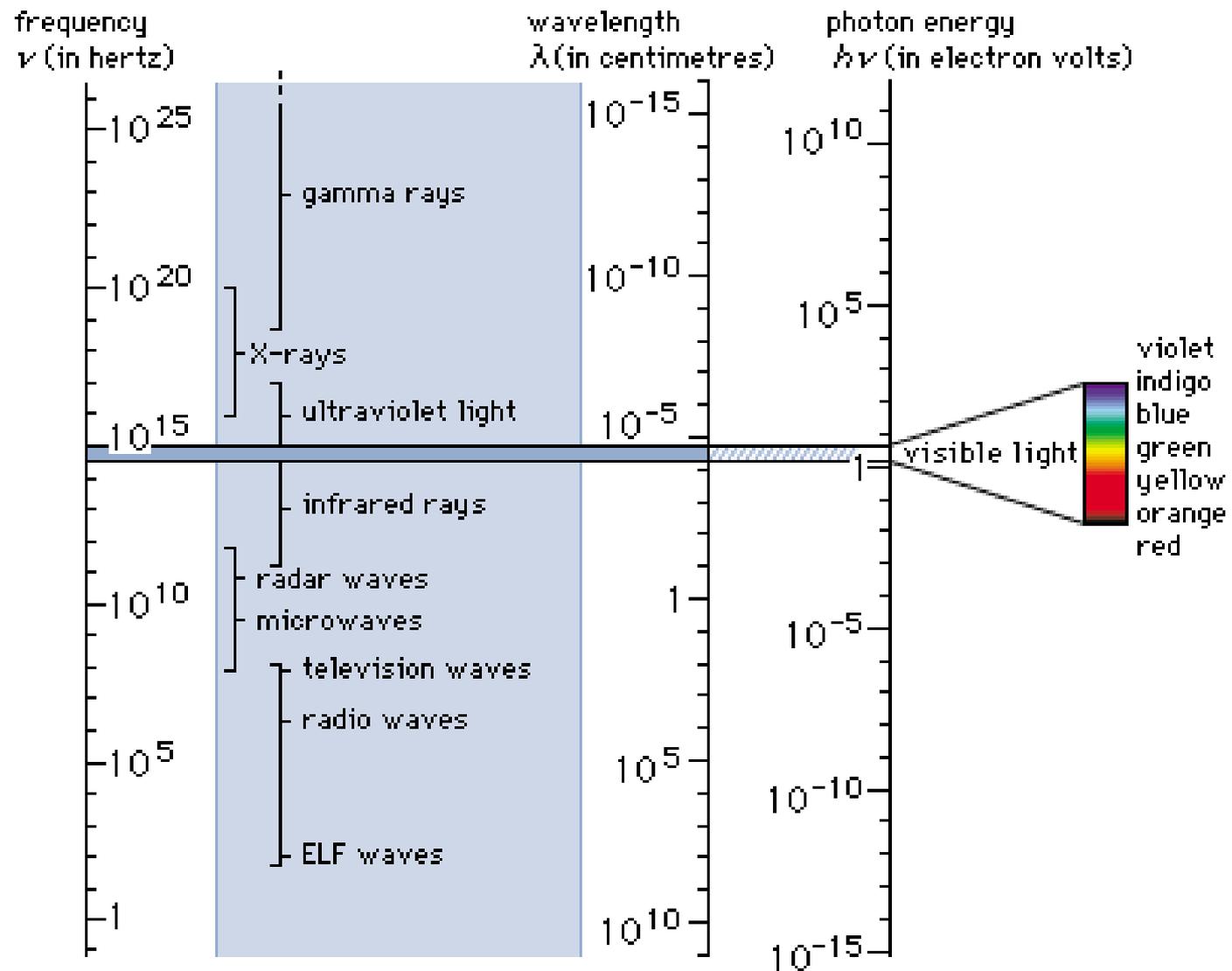
- **O que é:** espalhamento de feixe monocromático de **raios-X ou raios- $\gamma$**  por materiais.
- **Raios-X ou raios- $\gamma$ :** radiação eletromagnética com comprimentos de onda da ordem de **1 angstroms ou menores**, ou seja, **fótons com energias de keV ou MeV**.
- **Espalhamento:** depois 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 há **dois picos de radiação** - um de mesmo comprimento de onda que o incidente (espalhamento Thomsom) 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



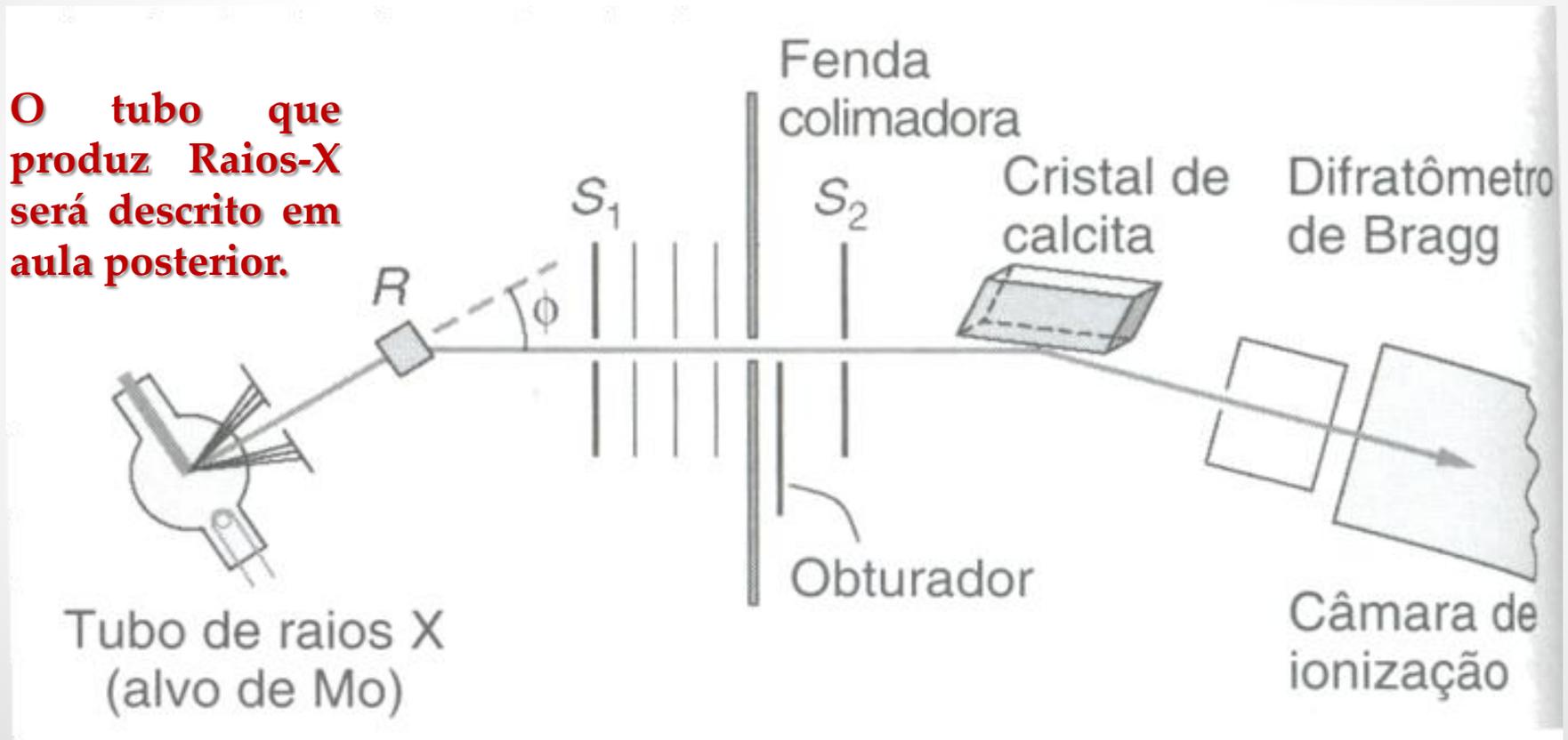
# Radiação eletromagnética: nomeados conforme frequência e origem



© 2006 Encyclopædia Britannica, Inc.

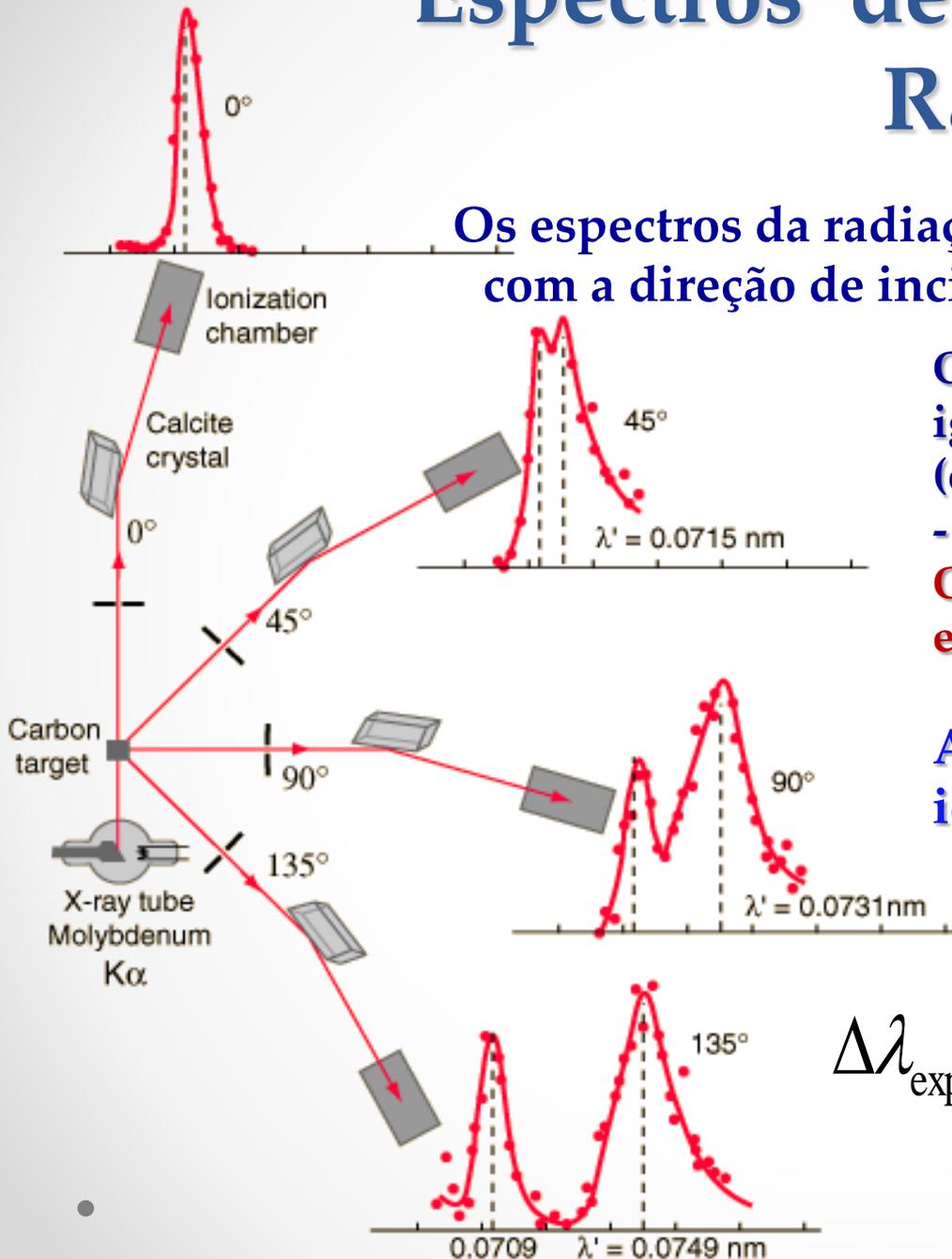
# Efeito Compton – o equipamento para produzir os espectros do espalhamento

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**

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

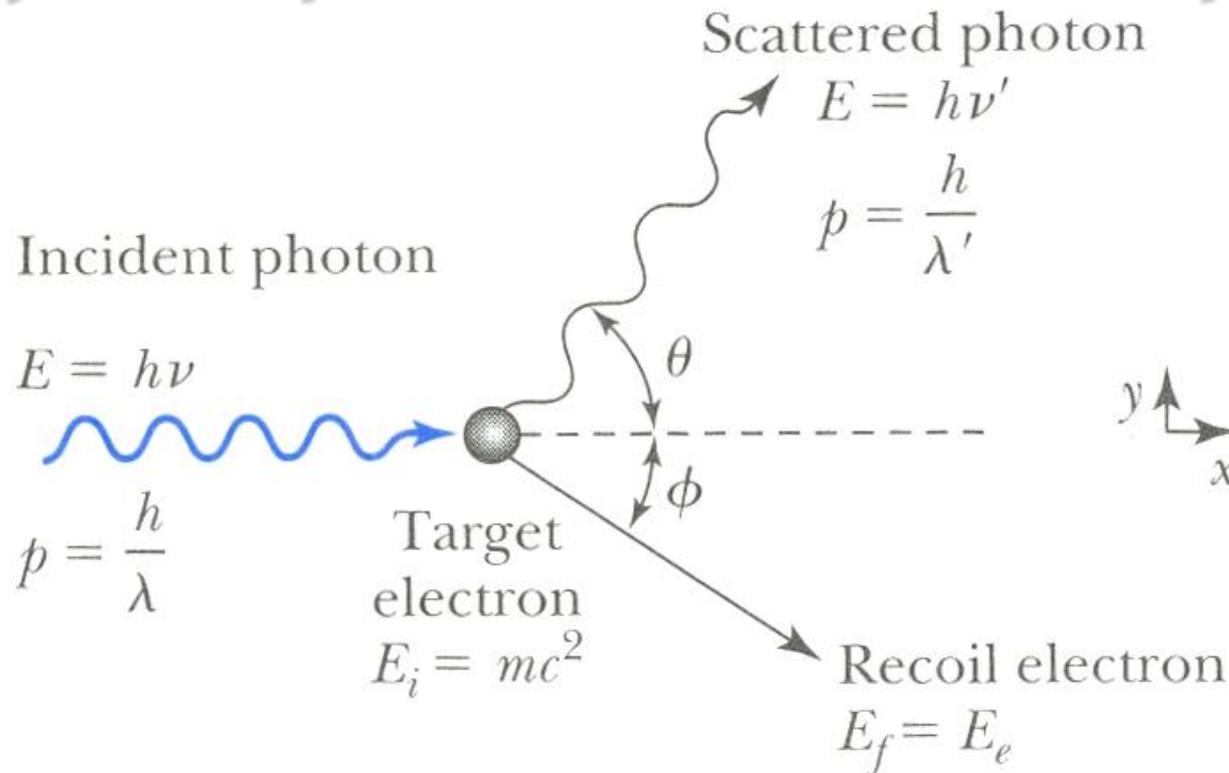
# *A (meia) explicação da visão ondulatória*

- 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 com maior intensidade perpendicularmente à direção de oscilação, e dependem do ângulo específico e frequência de 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).

# 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 ( $\varepsilon$ ) e momento linear ( $p$ ). Relações entre as grandezas corpusculares ( $\varepsilon, p$ ) e as ondulatórias ( $\nu, \lambda$ )

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

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

**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)**

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

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

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  $m_o$  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.**

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

- **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.**

# *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?**
3. **Há efeito Compton com luz?**
4. **Há efeito fotoelétrico com Raios-X?**

# *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*

