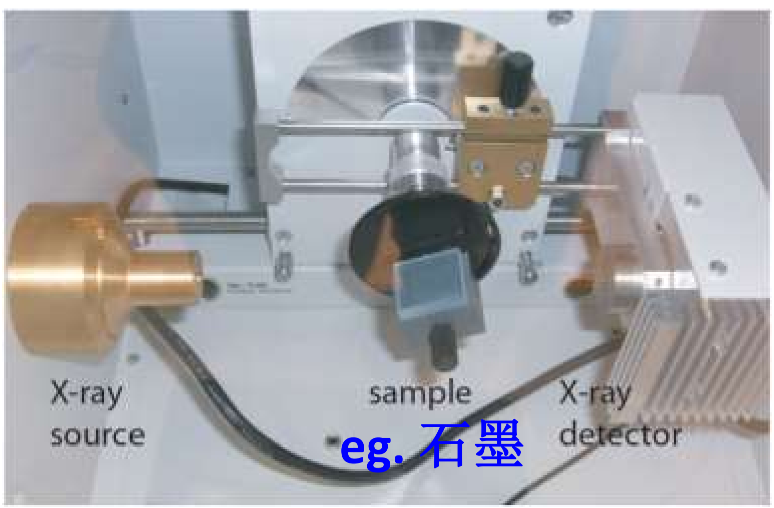
22.3 康普顿效应

如何证明
光子动量？

光电效应 ➡ $\varepsilon_{光子}=h\nu$ ➡ $p_{光子}=\dfrac{h}{\lambda}$

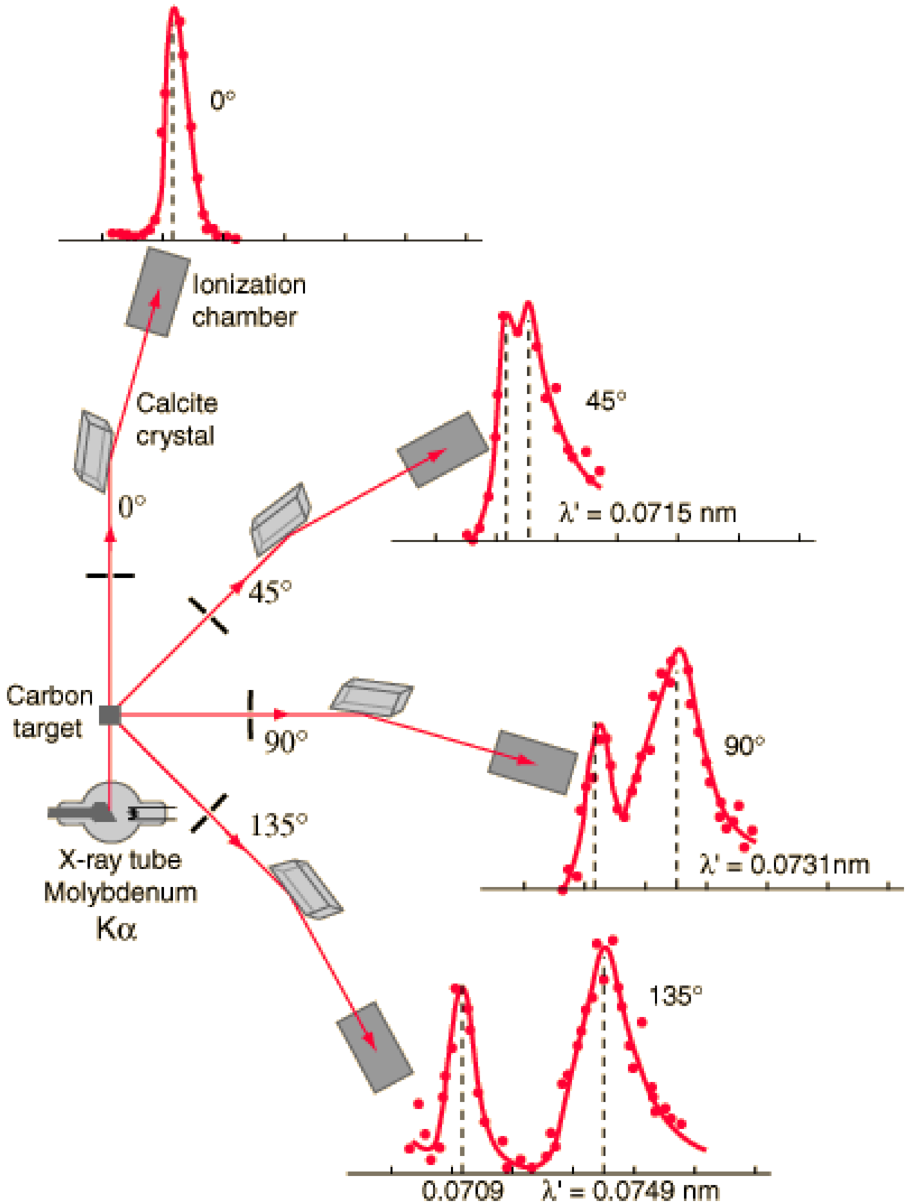
- 进行什么类型的实验？ 碰撞实验
- 选择怎样的光子？ 短波长(高频)光子
- 选择怎样的碰撞物质？ 轻原子的电子

A. H. Compton
1892 –1962



X射线被物质散射时，散射光中不仅有与入射光相同的波长成分，更有波长**大于**入射光波长的成分。

实验现象



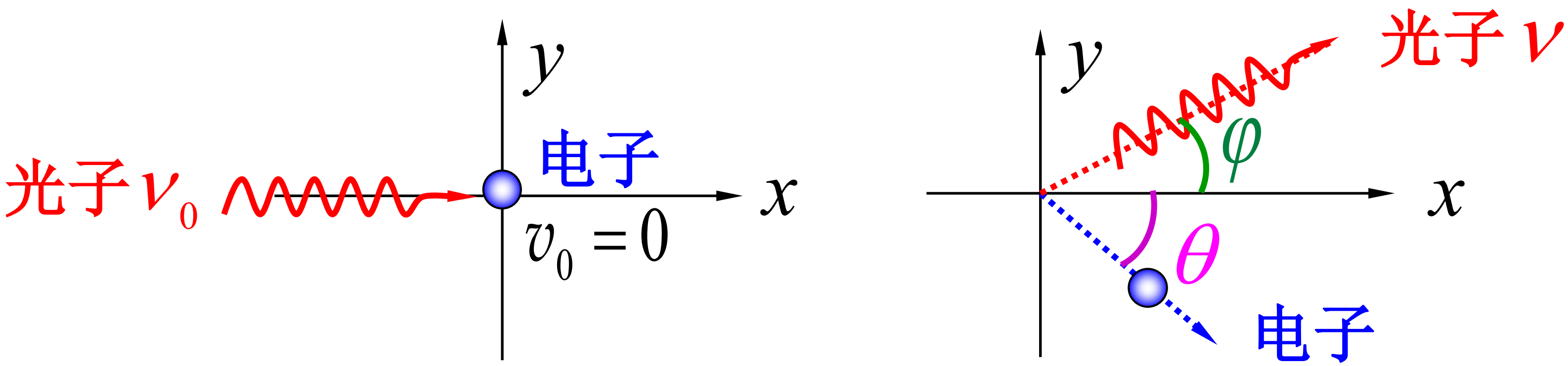
- 对于原子量较小的散射物质，康普顿散射较强，反之较弱。

- 波长的改变量 λ-λ_0 随散射角φ的增加而增加。（散射角φ：出射光与入射光的夹角）

- 对不同的原子量较小的散射物质，只要在同一个散射角下，波长的改变量 λ - λ_0 都相同。

量子解释：物理模型

高能光子与静止自由电子弹性碰撞



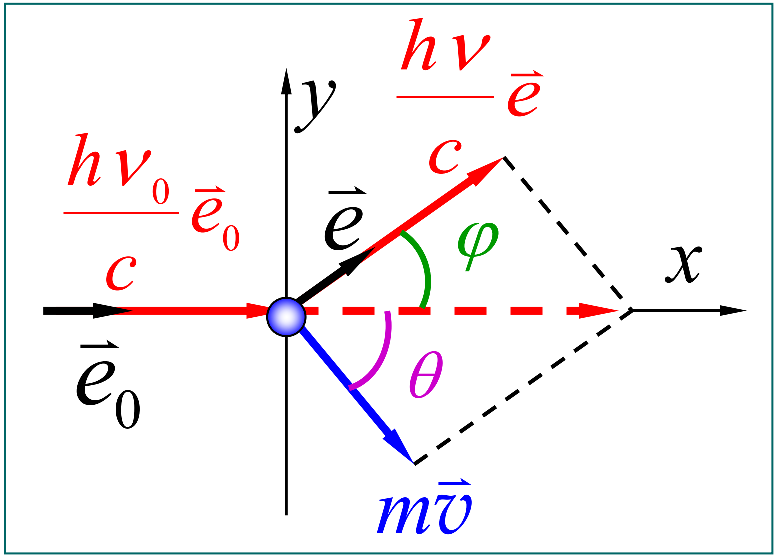
- 入射光子（X 射线或γ射线）动量(能量)大
- 固体表面电子束缚较弱，可视为近自由电子
- 电子热运动动能量小，可近似为静止电子
- 反冲电子速度很大，需用相对论力学来处理

理论分析

□能量守恒(标量关系)

$$h\nu_0 + m_0c^2 = h\nu + mc^2$$

□动量守恒(矢量关系)



x方向：$\dfrac{h\nu_0}{c} = \dfrac{h\nu}{c}\cos\varphi + mv\cos\theta$

y方向：$0 = \dfrac{h\nu}{c}\sin\varphi - mv\sin\theta$

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1-v^2/c^2}}$$

联立方程，消去v，θ

$$\frac{c}{\nu} - \frac{c}{\nu_0} = \frac{h}{m_0c}(1-\cos\varphi) \Rightarrow \lambda - \lambda_0 = \frac{h}{m_0c}(1-\cos\varphi)$$

康普顿波长

$$\boxed{\lambda_C = \frac{h}{m_0c} = 2.43\times10^{-12}\,\mathrm{m} = 2.43\times10^{-3}\,\mathrm{nm}}$$

结果讨论

康普顿公式 $\Delta\lambda = \dfrac{h}{m_0 c}(1-\cos\varphi) = \lambda_C(1-\cos\varphi)$

- 波长改变量 $\Delta\lambda$ 与散射角φ有关， φ越大 $\Delta\lambda$ 也越大
- 波长改变量$\Delta\lambda$与入射光的波长无关(可见光？)
- $\Delta\lambda$与φ的关系与物质无关，是光子与近自由电子间的相互作用
- 各角度散射光中，始终存在波长不变的散射光成分

  因为光子与物质内层电子（or原子核）的作用

➢ **物理意义**

- 光子假设的正确性，狭义相对论力学的正确性
- 微观粒子也遵守能量守恒和动量守恒定律

例1

光电效应和康普顿效应都包含有电子与光子的相互作用过程。对此，在以下几种理解中，正确的是（　　）。

A. 两种效应中电子与光子组成的系统都服从动量守恒定律和能量守恒定律

B. 两种效应都是电子与光子的弹性碰撞过程

C. 两种效应都属于电子吸收光子的过程

D. 光电效应是金属电子吸收光子的过程，而康普顿效应则是光子和电子弹性碰撞的过程

光电效应全过程，电子受到金属晶格的束缚，电子-光子系统动量不守恒，是电子吸收光子的过程，选D。

例2

波长为 $\lambda_0 = 0.020$ nm 的 X 射线与自由电子发生碰撞，若从与入射光成90°角的方向观察散射线。求：(1)散射线的波长； (2)反冲电子的动能； (3)反冲电子的动量。

解： (1) $\Delta\lambda = \dfrac{h}{m_0 c}(1-\cos\varphi) = \dfrac{6.63\times10^{-34}}{9.1\times10^{-31}\times3\times10^{8}}(1-\cos 90^\circ)$

$$= 0.0024\,\mathbf{nm}$$

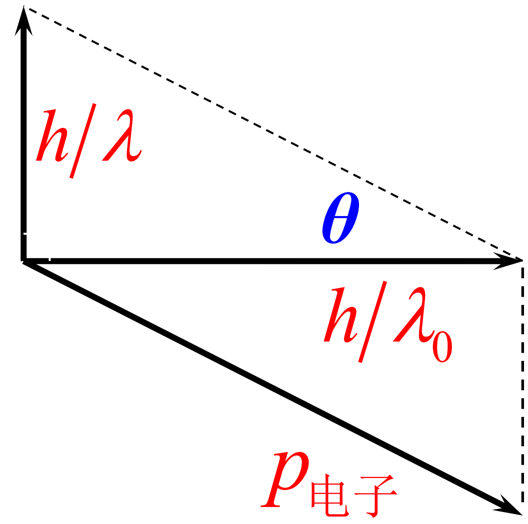
$$\lambda = \lambda_0 + \Delta\lambda = 0.0224\,\mathbf{nm}$$

(2) $E_k = h\nu_0 - h\nu = \dfrac{hc}{\lambda_0} - \dfrac{hc}{\lambda} = \dfrac{hc\Delta\lambda}{\lambda\lambda_0}$

$$= \frac{6.63\times10^{-34}\times3\times10^{8}\times0.024}{0.2\times10^{-10}\times0.22\times10^{-10}}\,\mathbf{J} = 1.08\times10^{-15}\,\mathbf{J}$$

$$(3)\ p_{电子} = \sqrt{\left(\frac{h}{\lambda_0}\right)^2 + \left(\frac{h}{\lambda}\right)^2}$$

$$= 4.5\times10^{-23}\,\mathbf{kg\cdot m\cdot s^{-1}}$$



$$方向: \tan\theta = \frac{h/\lambda}{h/\lambda_0} = \frac{\lambda_0}{\lambda}$$

$$\theta = \arctan\frac{0.20}{0.22} = 42.3°$$

例3

在康普顿效应中，入射光的波长为3×10^{-3} nm，反冲电子(静止质量m_0=9.11×10^{-31}kg)的速度为光速的60%，求散射光的波长和散射角。

解： 根据能量守恒

$$h\nu_0 + m_0c^2 = h\nu + mc^2$$

$$\frac{hc}{\lambda_0} + m_0c^2 = \frac{hc}{\lambda} + \frac{m_0}{\sqrt{1-v^2/c^2}}c^2$$

解得： $\lambda = 4.34\times 10^{-12}\,\mathbf{m}$

$$\Delta\lambda = \lambda - \lambda_0 = \frac{h}{m_0c}(1-\cos\varphi) \quad \Rightarrow \quad \varphi = 65.7^\circ$$

华南理工大学 South China University of Technology