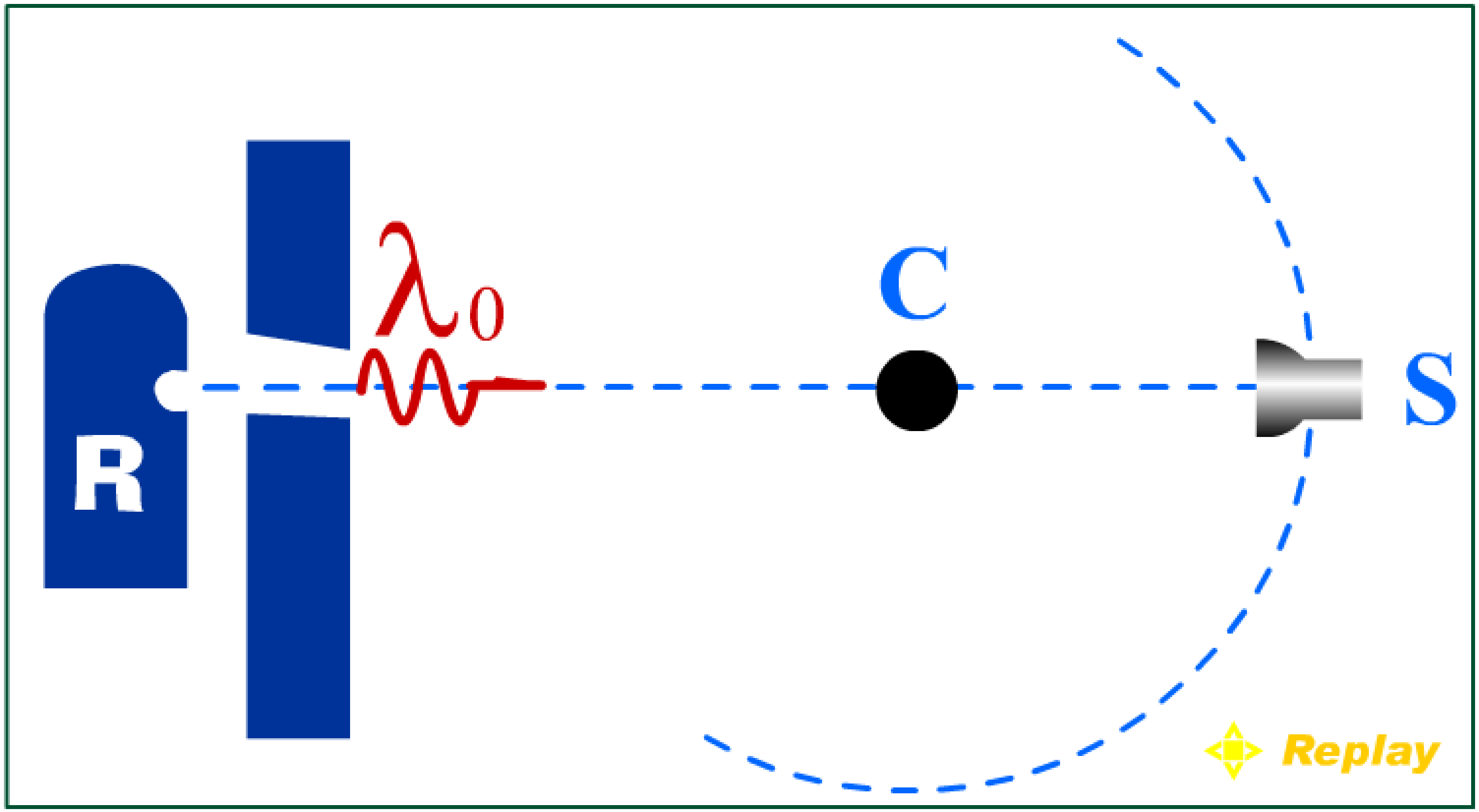
1920年，美国物理学家康普顿在观察X 射线被物质散射时，发现散射线中含有波长发生了变化的成分——散射束中除了有与入射波长 λ_0 相同的射线，还有波长 $\lambda > \lambda_0$ 的射线.

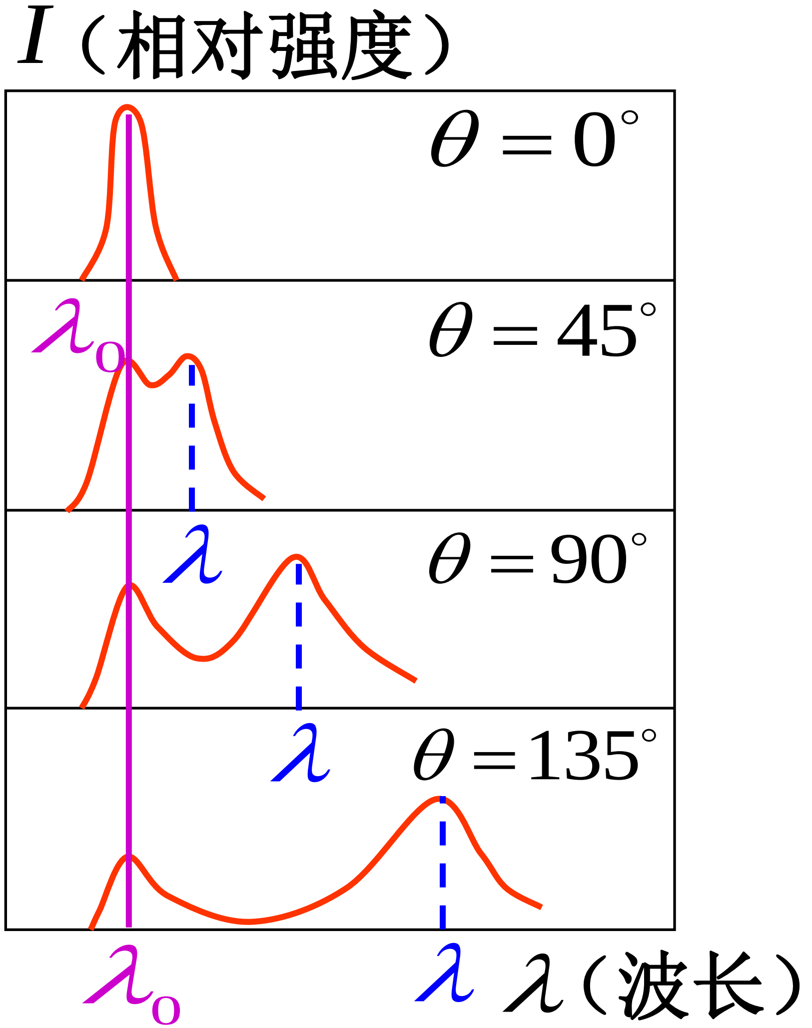
一 实验装置



二 实验结果

1 波长的偏移（$\Delta\lambda=\lambda-\lambda_0$）与散射角有关.

2 $\Delta\lambda$ 与散射物体无关.



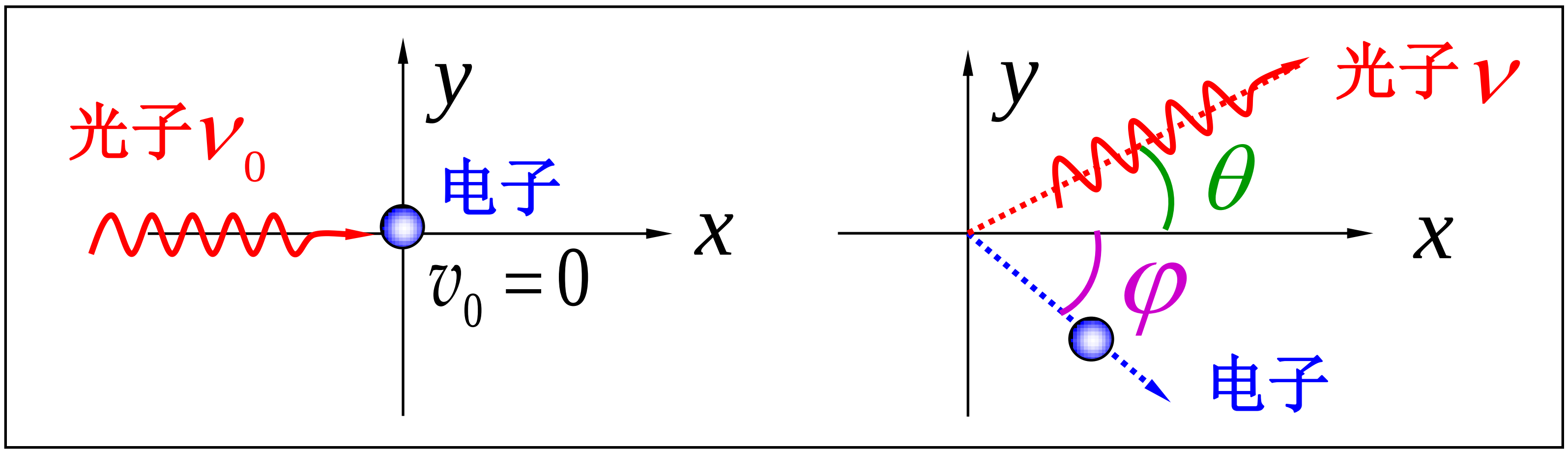
三 经典理论的困难

按经典电磁理论，带电粒子受到入射电磁波的作用而发生受迫振动，从而向各个方向辐射电磁波，散射束的频率应与入射束频率相同，带电粒子仅起能量传递的作用.

可见，经典理论无法解释波长变长的散射线.

四 量子解释

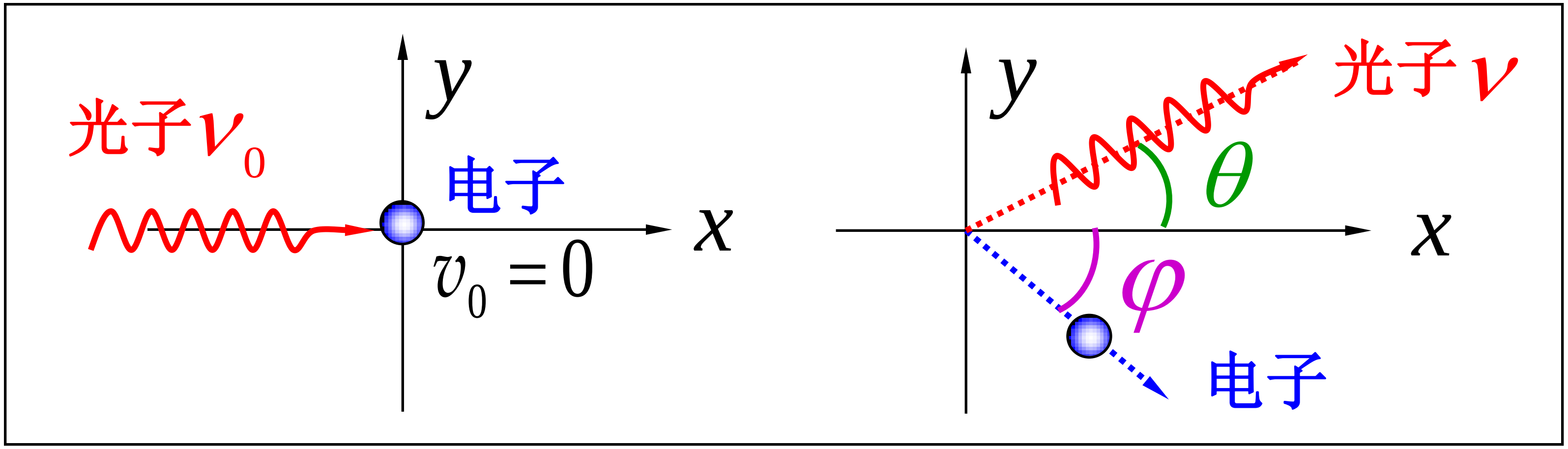
1 物理模型



- 入射光子（ X 射线或 γ 射线）能量大．

$E = h\nu$ 范围为：$10^4 \sim 10^5 \mathrm{eV}$

◆ 电子热运动能量 $\ll h\nu$ ，可近似为静止电子.



◆ 固体表面电子束缚较弱，视为近自由电子.

◆ 电子反冲速度很大，用相对论力学处理.

2 定性分析

(1) 入射光子与散射物质中束缚微弱的电子弹性碰撞时，一部分能量传给电子，散射光子能量减少，频率下降、波长变大.

(2) 光子与原子中束缚很紧的电子发生碰撞，近似与整个原子发生弹性碰撞时，能量不会显著减小，所以散射束中出现与入射光波长相同的射线.

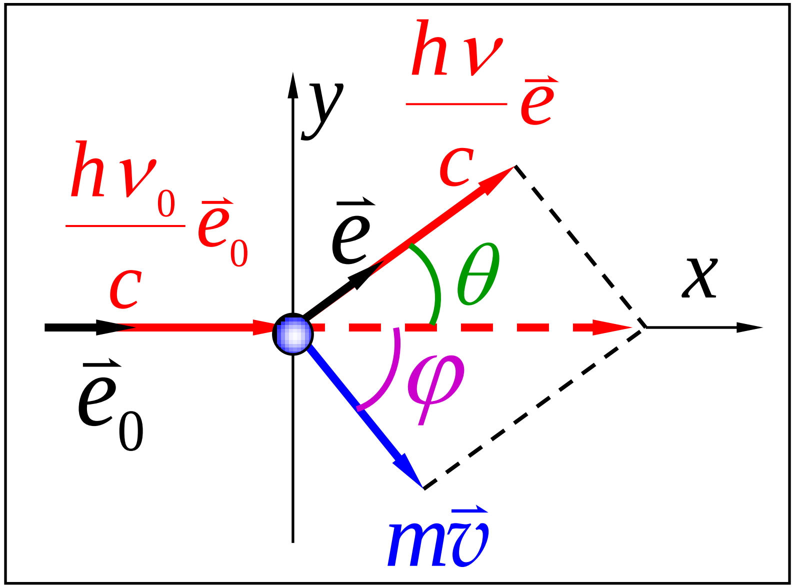
3 定量计算

能量守恒

$$h\nu_0 + m_0c^2 = h\nu + mc^2 \qquad (1)$$

动量守恒

$$\frac{h\nu_0}{c}\vec{e}_0 = \frac{h\nu}{c}\vec{e} + m\vec{v} \qquad (2)$$



$$m^2v^2 = \frac{h^2\nu_0^2}{c^2} + \frac{h^2\nu^2}{c^2} - 2\frac{h^2\nu_0\nu}{c^2}\cos\theta \qquad (3)$$

$$m^2 v^2 = \frac{h^2 \nu_0^2}{c^2} + \frac{h^2 \nu^2}{c^2} - 2\frac{h^2 \nu_0 \nu}{c^2}\cos\theta$$

式（1）平方得 $m^2 c^4 (1 - \frac{v^2}{c^2}) =$

$$m_0^2 c^4 - 2h^2 \nu_0 \nu (1 - \cos\theta) + 2 m_0 c^2 h(\nu_0 - \nu)$$

$$m = m_0 (1 - v^2 / c^2)^{-1/2}$$

$$\frac{c}{\nu} - \frac{c}{\nu_0} = \frac{h}{m_0 c}(1 - \cos\theta) = \lambda - \lambda_0 = \Delta\lambda$$

$$\Delta\lambda = \frac{h}{m_0 c}(1-\cos\theta) = \frac{2h}{m_0 c}\sin^2\frac{\theta}{2}$$

- **康普顿波长** $\lambda_C = \dfrac{h}{m_0 c} = 2.43\times10^{-12}\ \mathrm{m}$

- **康普顿公式**

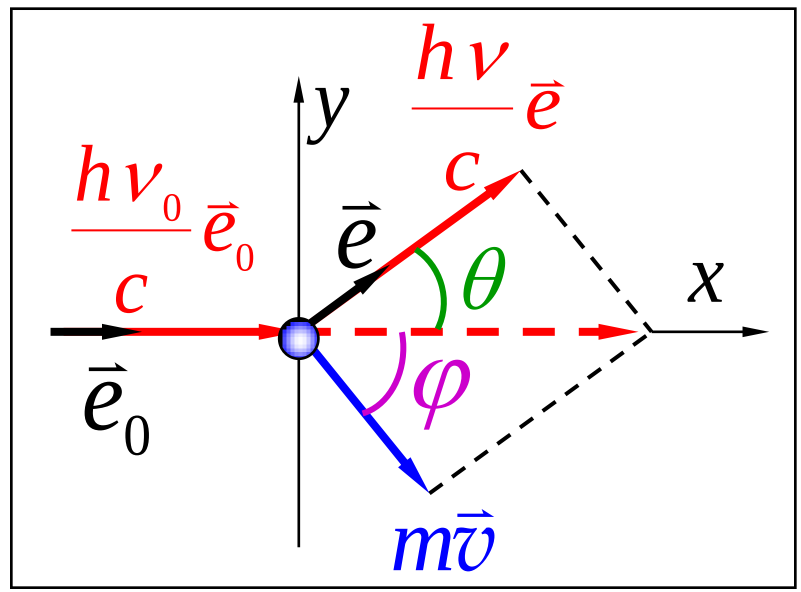
$$\boxed{\Delta\lambda = \frac{h}{m_0 c}(1-\cos\theta) = \lambda_C(1-\cos\theta)}$$

4　结论

◆ 散射光波长的改变量 $\Delta\lambda$ 仅与 θ 有关.

$$\theta = 0, \Delta\lambda = 0$$

$$\theta = \pi, \quad (\Delta\lambda)_{\max} = 2\lambda_C$$



◆ 散射光子能量减小

$$\lambda > \lambda_0, \nu < \nu_0$$

5 讨论

◆ 光具有波粒二象性

一般而言，光在传递过程中，波动性较为显著；光与物质相互作用时，粒子性比较显著.

◆ 若 $\lambda_0 >> \lambda_C$ 则 $\lambda \approx \lambda_0$，可见光观察不到康普顿效应.

◆ $\Delta\lambda$ 与 θ 的关系与物质无关， 是光子与近自由电子间的相互作用.

◆ 散射中 $\Delta\lambda = 0$ 的散射光是因光子与紧束缚电子的作用. 原子量大的物质，其电子束缚较强，因而康普顿效应不明显.

6　物理意义

- 光子假设的正确性，狭义相对论力学的正确性 .
- 微观粒子的相互作用也遵守**能量守恒**和**动量守恒**定律.

例1 波长 $\lambda_0 = 1.00 \times 10^{-10}\ \mathrm{m}$ 的 X 射线与静止的自由电子作弹性碰撞，在与入射角成 90° 角的方向上观察，**问：**

（1） 散射波长的改变量 $\Delta\lambda$ 为多少？

（2） 反冲电子得到多少动能？

（3） 在碰撞中，光子的能量损失了多少？

解

（1） $\Delta\lambda = \lambda_C(1-\cos\theta) = \lambda_C(1-\cos 90^\circ) = \lambda_C$

$$= 2.43 \times 10^{-12}\,\mathrm{m}$$

（2） 反冲电子的动能

$$E_\mathrm{k} = mc^2 - m_0c^2 = \frac{hc}{\lambda_0} - \frac{hc}{\lambda} = \frac{hc}{\lambda_0}(1-\frac{\lambda_0}{\lambda}) = 295\,\mathrm{eV}$$

（3） 光子损失的能量＝反冲电子的动能