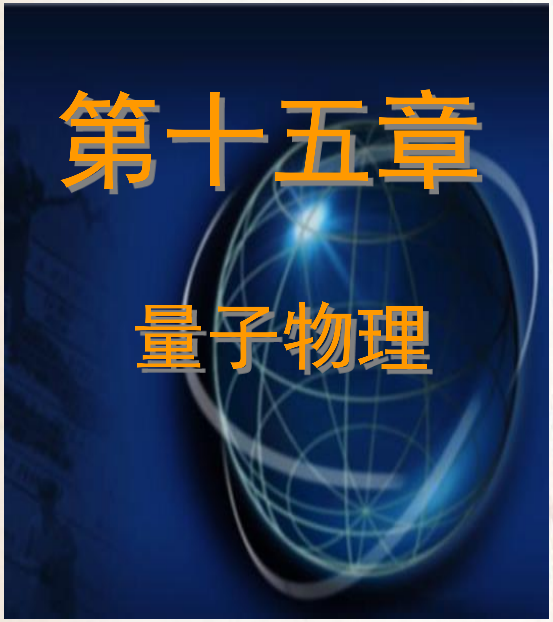
15-3 康普顿效应



第3节《康普顿效应 光的波粒二象性》

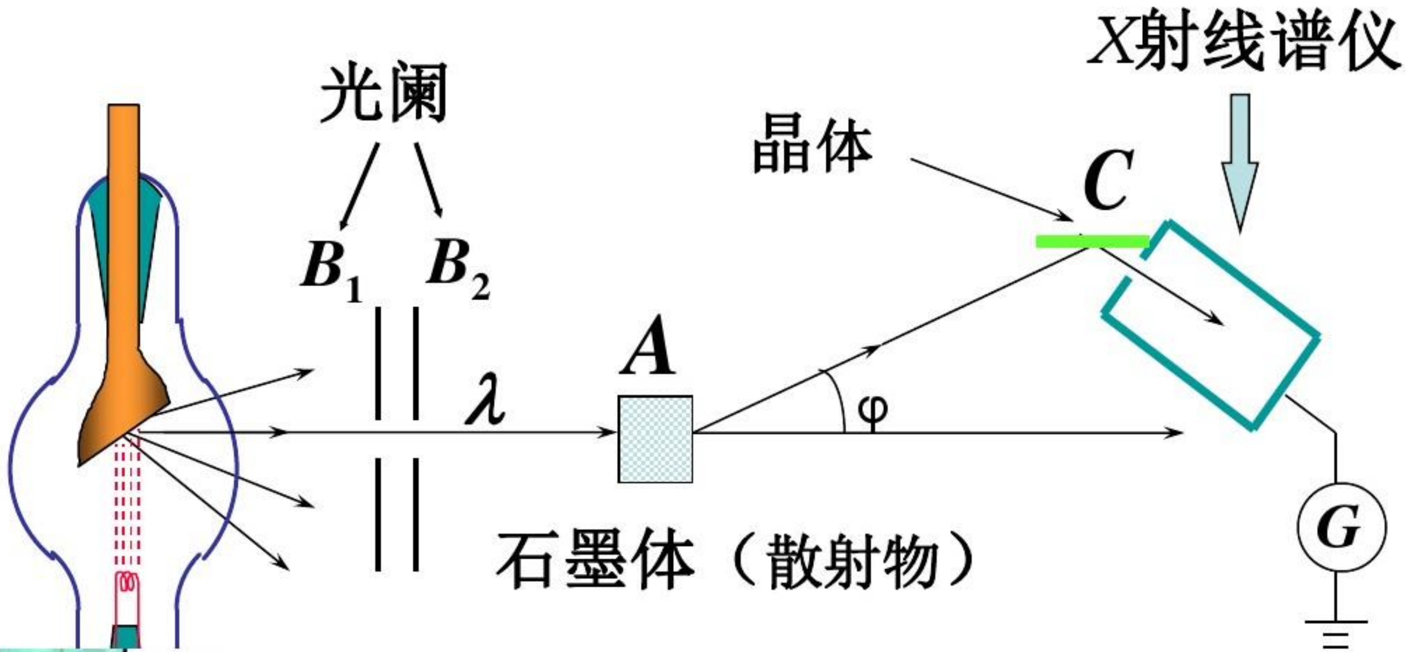
一、理解康普顿效应的实验规律，以及光子理论对这个效应的解释.

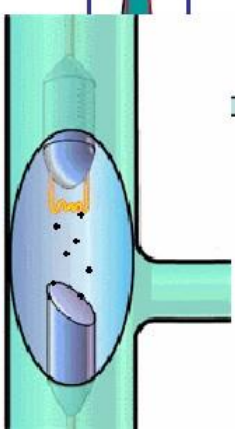
二、理解光的波粒二象性.

光的散射：光在介质中与物质微粒发生相互作用，因而传播方向发生改变的现象

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束波长 λ_0 相同的射线，还有波长 $\lambda > \lambda_0$ 的射线。波长的改变与散射角有关，而与入射波长和散射物质无关

15-3 康普顿效应



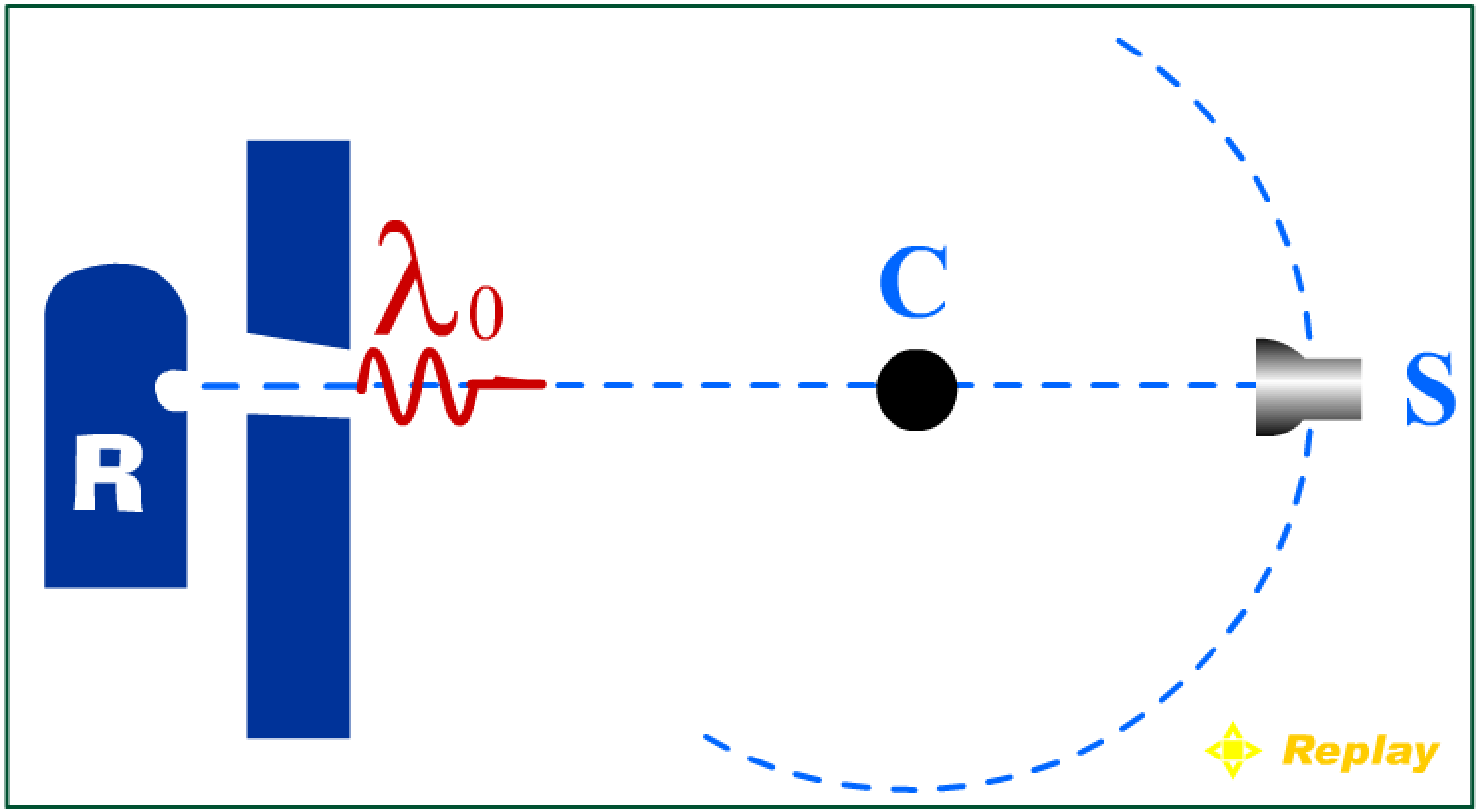


X 射线管

调节A对R的方位，可使不同方向的散射线进入光谱仪。

康普顿实验装置示意图

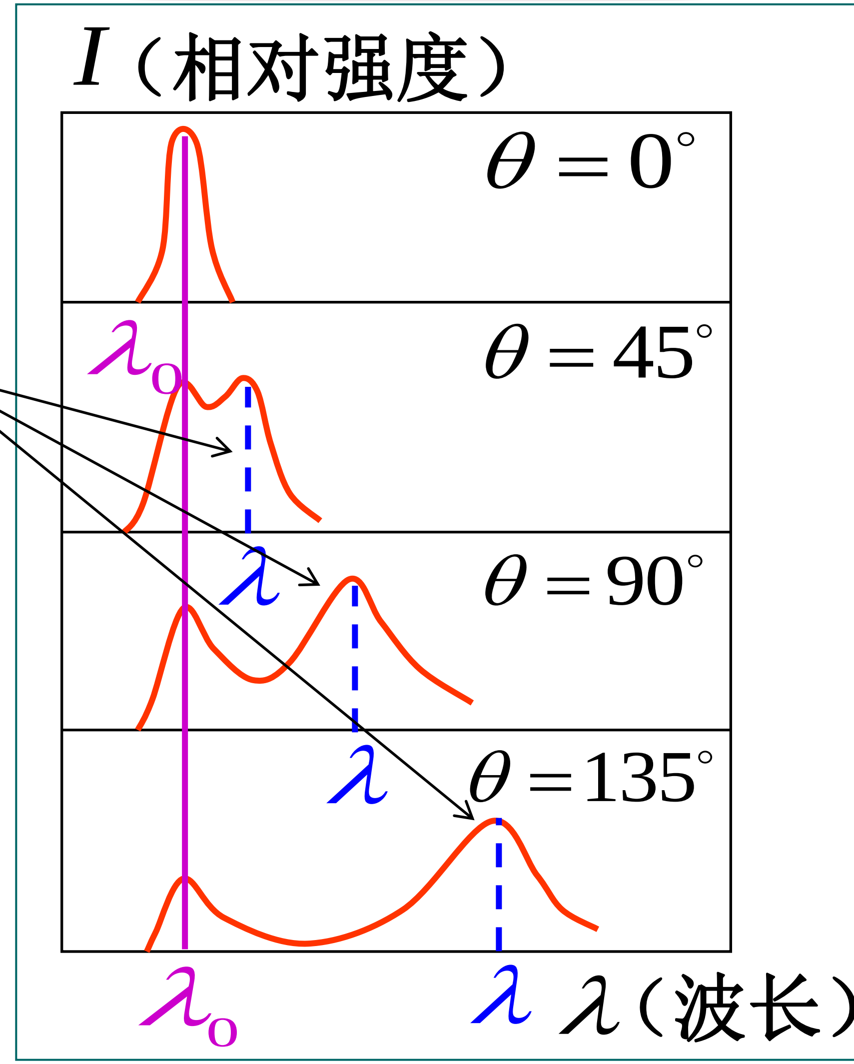
一　实验装置



二 实验结果

1 散射光除了和原来入射光一致的光外，还出现一种波长大于入射光的射线。

2 散射射线的波长中有两个峰值(λ_0， λ)，峰值的偏移与散射角有关，与散射物质无关



三 经典理论的困难

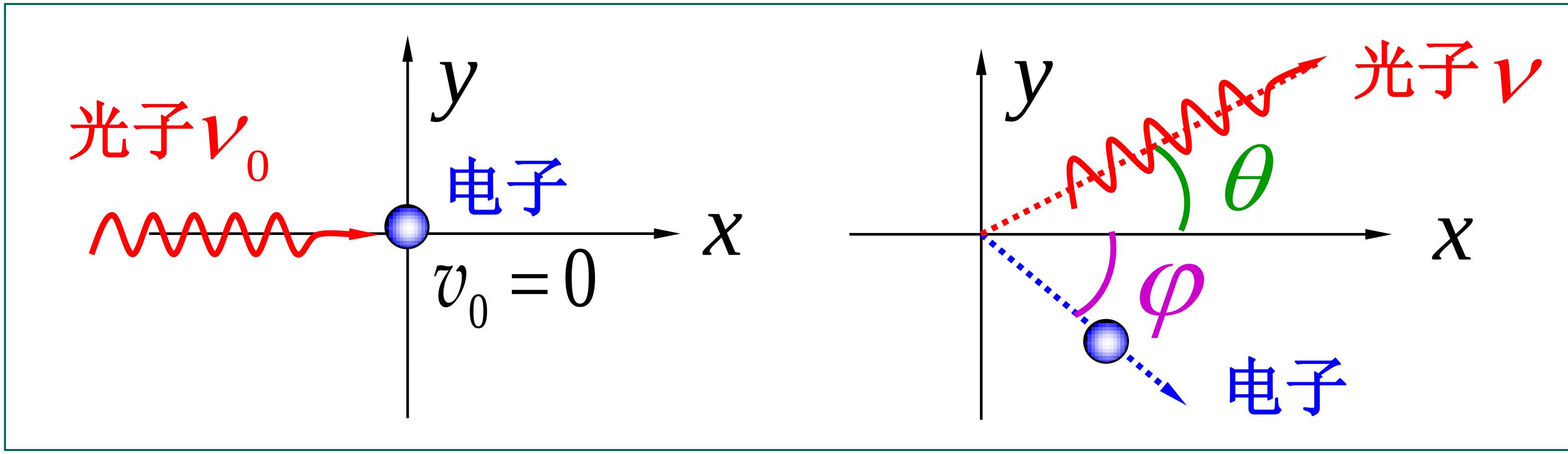
按经典电磁理论，带电粒子受到入射电磁波的作用而发生受迫振动，从而向各个方向辐射电磁波。

1、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.

2、无法解释波长改变与散射角的关系。

四　经典理论无法解释，只能用 量子解释

1　物理模型

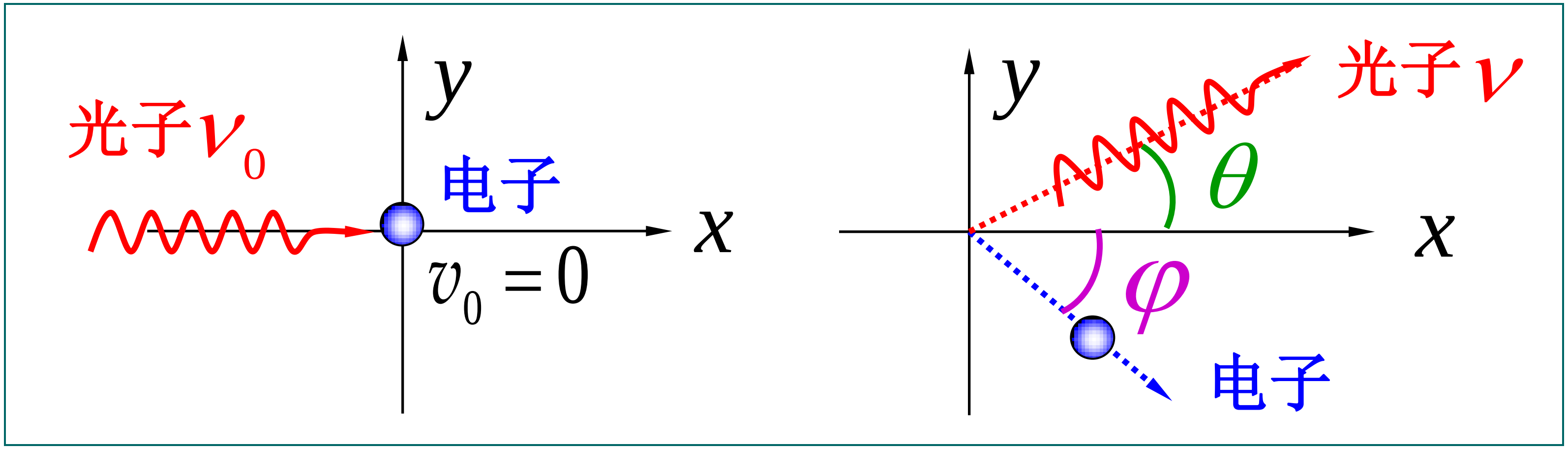


◆ 入射光子（ X 射线或 γ 射线）能量大．

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

15-3　康普顿效应

- 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) 光子与粒子散射碰撞中交换的能量与碰撞角度有关，因此波长改变与散射角有关

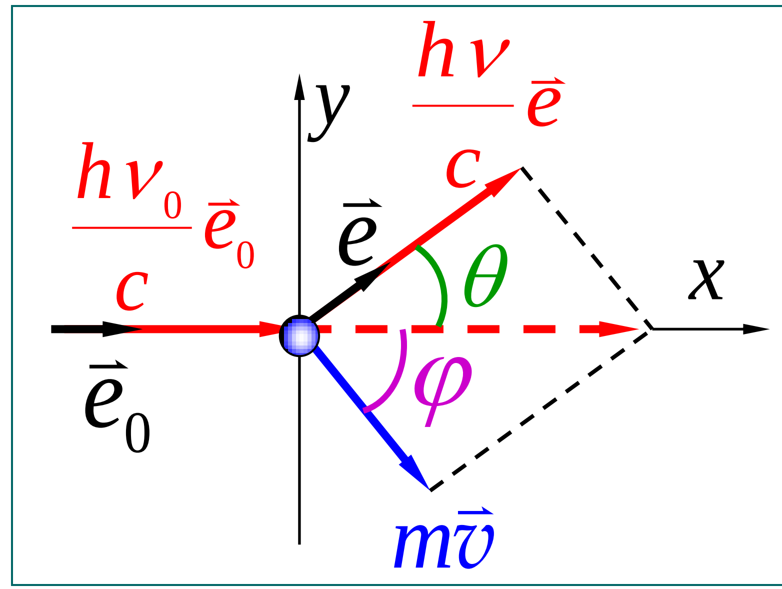
3 定量计算

能量守恒

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

动量守恒

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



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

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

$$m^2 c^4 (1 - \frac{v^2}{c^2}) = m_0^2 c^4 - 2h^2 \nu_0 \nu (1 - \cos\theta) + 2m_0 c^2 h(\nu_0 - \nu)$$

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

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

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

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

- **康普顿公式**

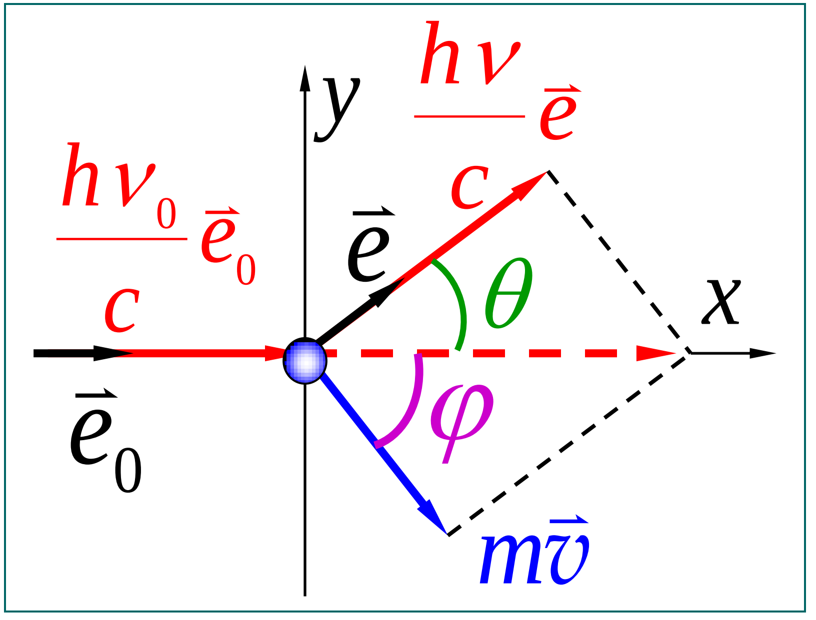
$$\boxed{\Delta\lambda = \frac{h}{m_0 c}(1-\cos\theta) = \lambda_C(1-\cos\theta)}$$

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

- 有力地支持了光量子假设的正确性，狭义相对论力学的正确性，首次在实验上证实了光子的动量.
- 微观粒子的相互作用也遵守能量守恒和动量守恒定律，康普顿获得1927年诺贝尔物理学奖.

吴有训对研究康普顿效应的贡献

1923年,参加了发现康普顿效应的研究工作.

1925—1926年，吴有训用银的X射线(λ_0 =5.62nm)为入射线，以15种轻重不同的元素为散射物质，在同一散射角($\varphi = 120^0$)测量各种波长的散射光强度，作了大量 X 射线散射实验。

对证实康普顿效应作出了重要贡献。

吴有训
(1897-1977)

例1 波长 $\lambda_0 = 1.00 \times 10^{-10}$ 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） $\Delta\lambda = \lambda_{\mathrm{C}}(1-\cos\theta) = \lambda_{\mathrm{C}}(1-\cos 90^{\circ}) = \lambda_{\mathrm{C}}$

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

（2） 反冲电子的动能

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

（3） 光子损失的能量＝反冲电子的动能