01 光的波粒二象性之光电效应

—— 光电效应实验装置

—— 一定频率的光照射阴极K

KA 之间加有电压

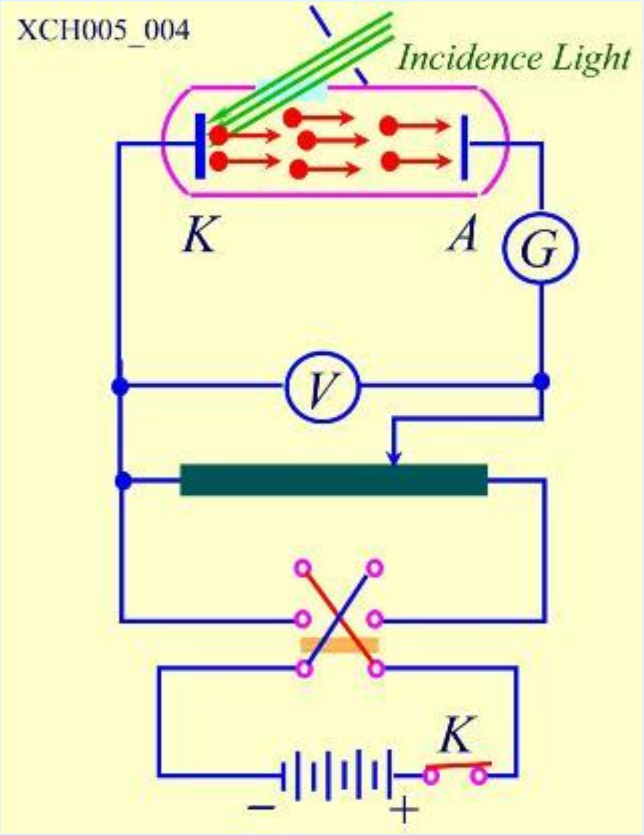
回路中有电流通过

—— 光照射阴极 K

将金属中的电子打出

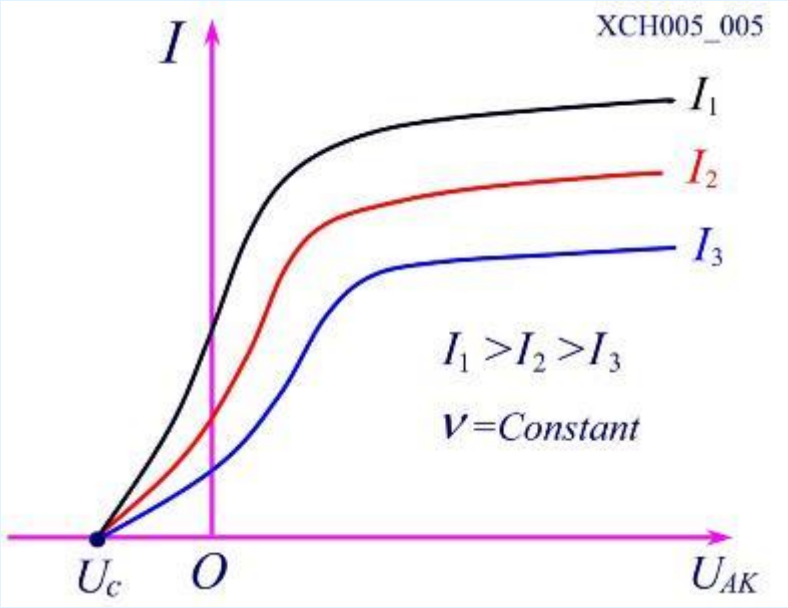
电子在电压的作用下

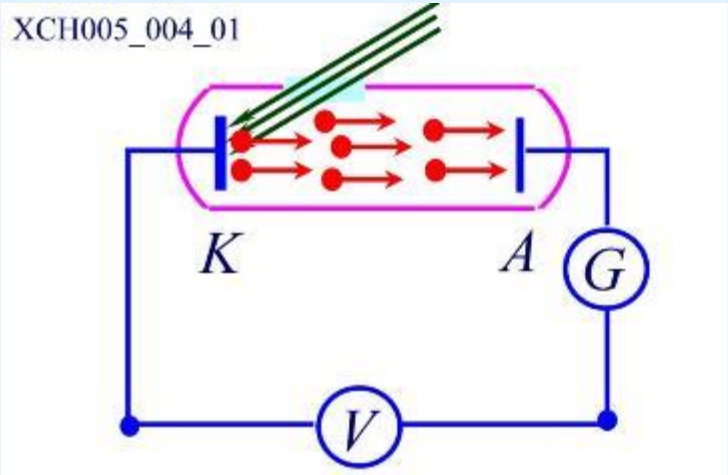
到达阳极 A



1）饱和电流

电压增加到一定值 —— 电流饱和



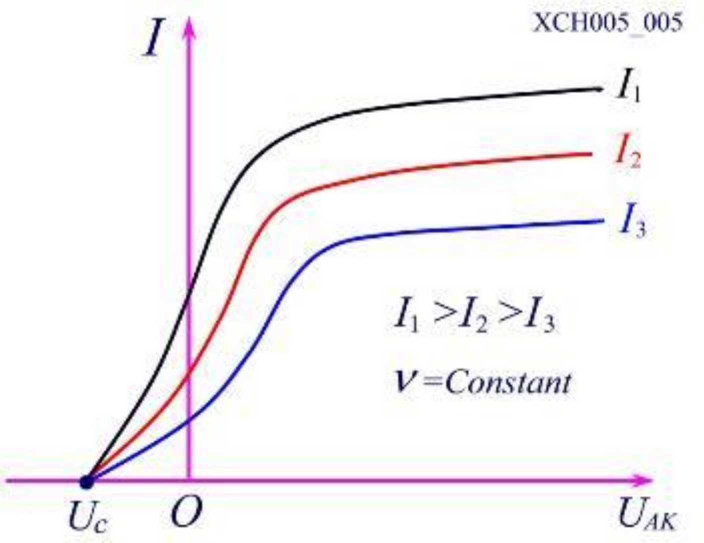


—— 单位时间阴极K逸出的光电子全被阳极A接收

—— 饱和电流与照射光强成正比

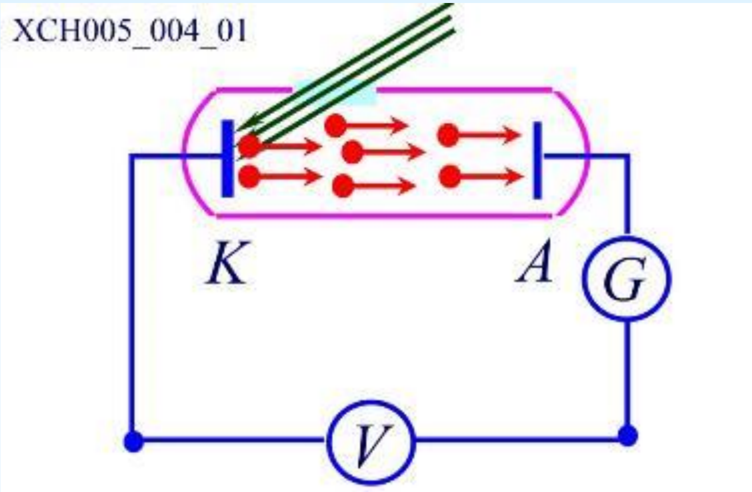
2）遏止电压 —— 光电流为零所施加的反向电压

遏止电压与照射光强无关



光电子的最大初动能

$$\frac{1}{2}mv_m^2 = eU_c$$



经典理论：

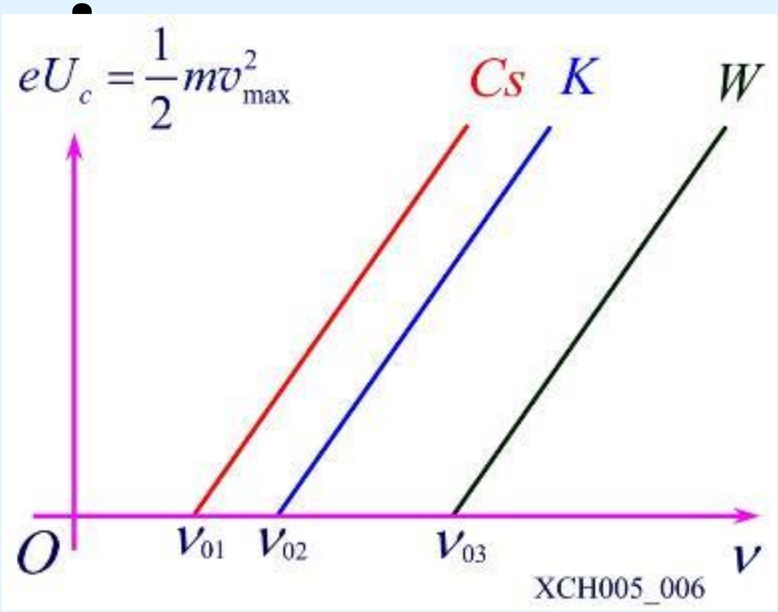
照射光越强、时间越长

电子获得动能越大

遏止电压和光强有关！

3） 截止频率(红限频率)

实验表明：遏止电压与光的频率有关



$$U_c = K(\nu - \nu_0)$$

比例常数**K**与金属无关

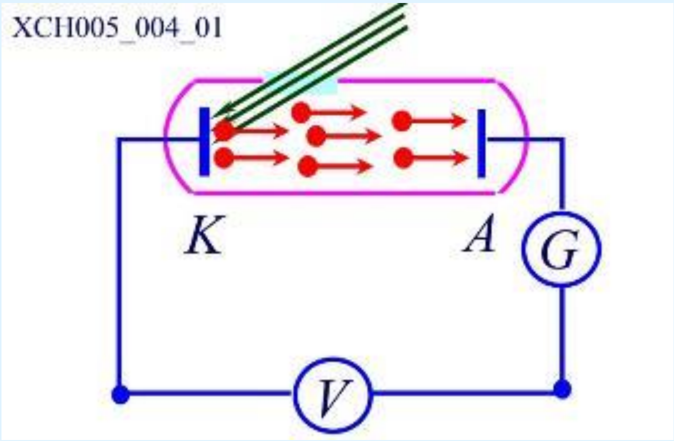
ν_0 —— 红限频率

红限波长 $\lambda_0 = \dfrac{c}{\nu_0}$

光电子的最大初动能 $\dfrac{1}{2}mv_m^2 = eK(\nu - \nu_0)$

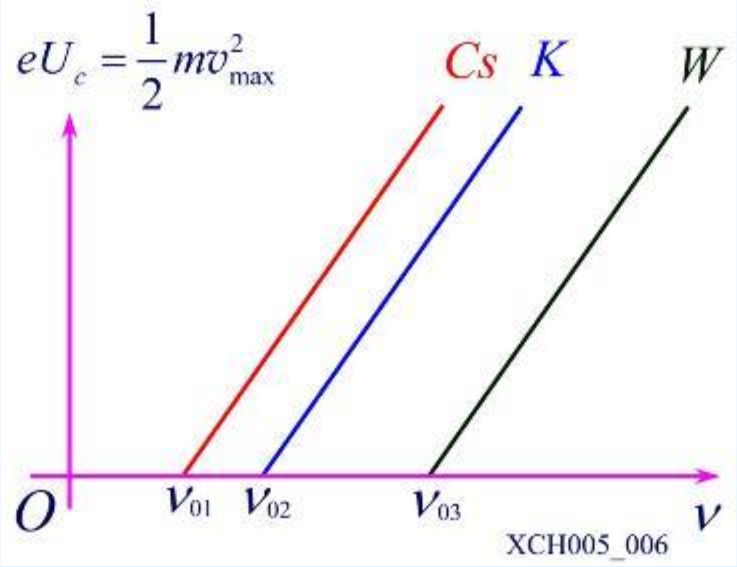
光电子的最大初动能

$$\frac{1}{2}mv_m^2 = eK(\nu - \nu_0)$$



$\nu < \nu_0$ **无论光多强**

时间多长 —— 无光电流



经典理论：

光的频率较低时

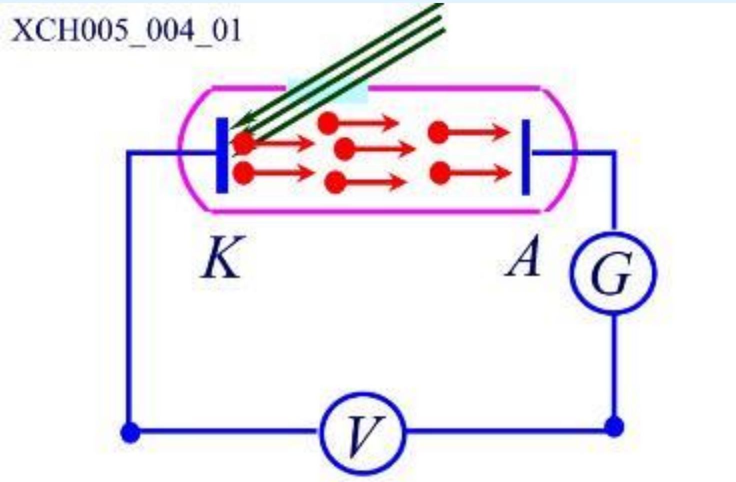
只要用足够强的光照射

电子可以获得足够的能量，从金属表面逸出

4）驰豫时间

光电子是即时发射，滞后时间不超过 $10^{-9}s$

—— 与照射光的强度无关



经典理论：

光照强度非常弱时

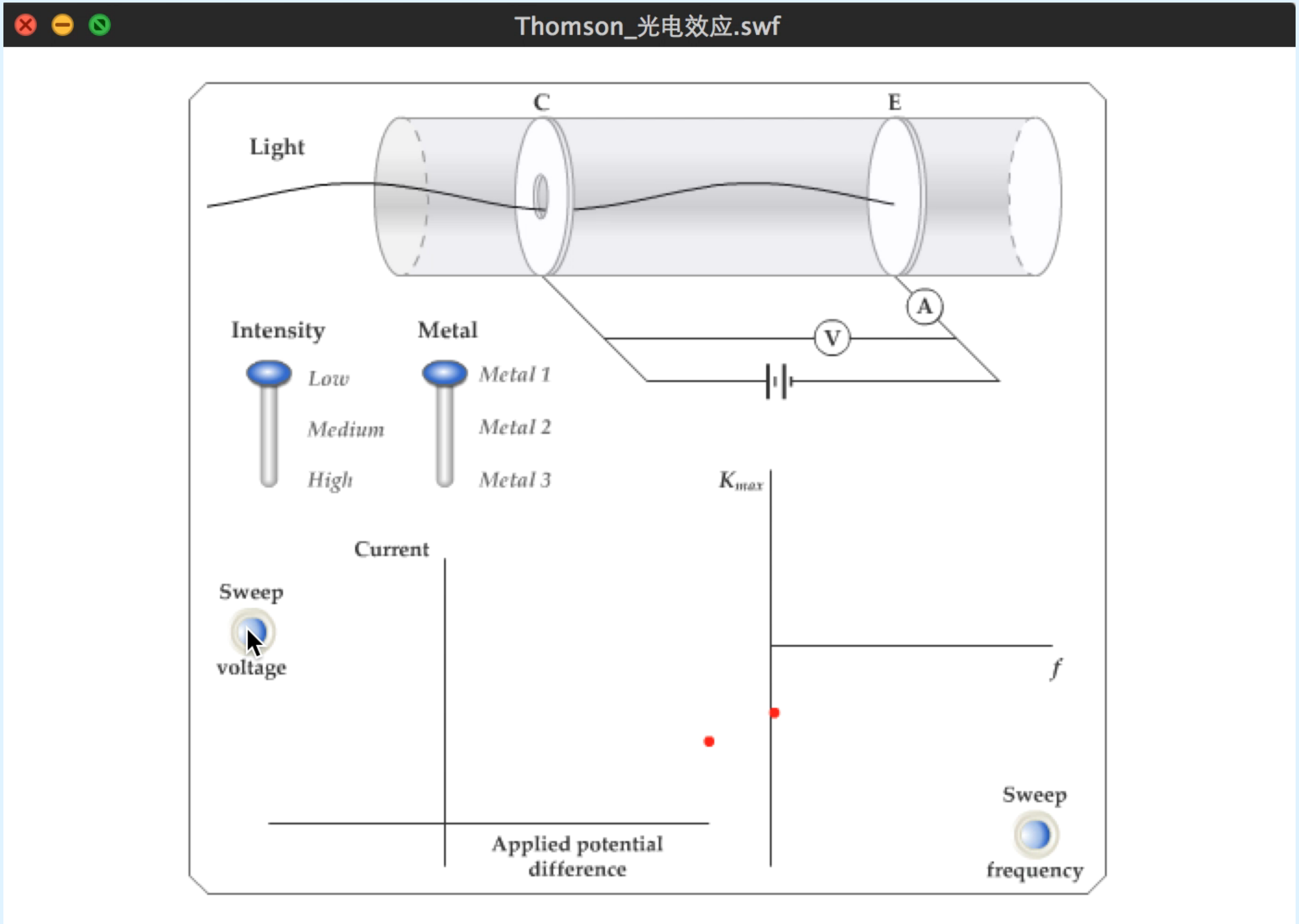
电子必须经过长时间

积累到足够的能量，从金属表面逸出

光电流的产生和光照时间有关！

—— 光电效应实验模拟演示 ✤ ——

—— 光电效应实验模拟演示 ✤ ——


Thomson_光电效应.swf
C
E
Light
A
V
Intensity
Low
Medium
High
Metal
Metal 1
Metal 2
Metal 3
K_{max}
f
Current
Sweep
voltage
Applied potential difference
Sweep
frequency

2 爱因斯坦光子理论

光子 —— 以光速运动的粒子束　　1个光子的能量 $E = h\nu$

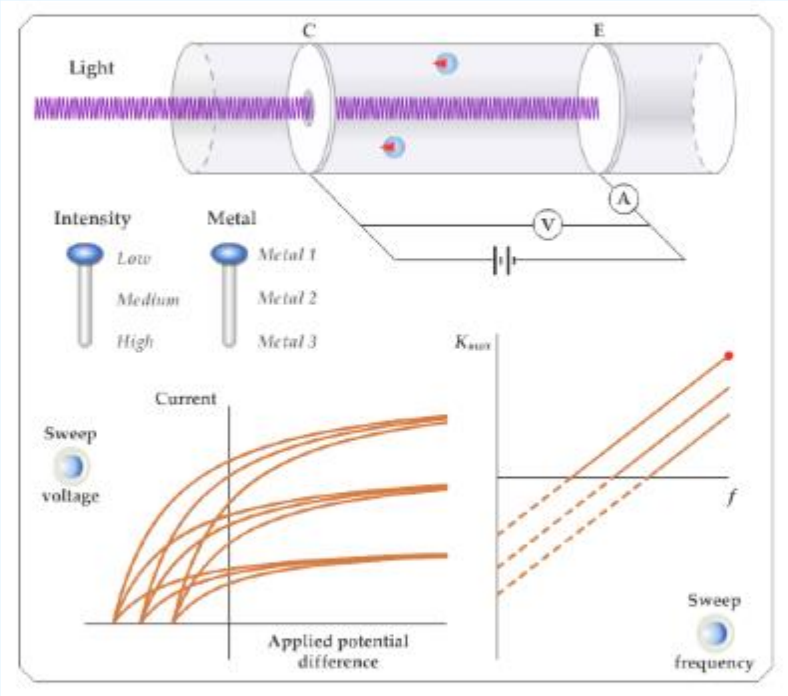
光子不能再被分割 —— 只能被整个吸收或产生

不同颜色的光__光子有不同能量

—— 电子吸收一个光子的能量

部分脱出金属表面所需能量__部分光电子的初动能

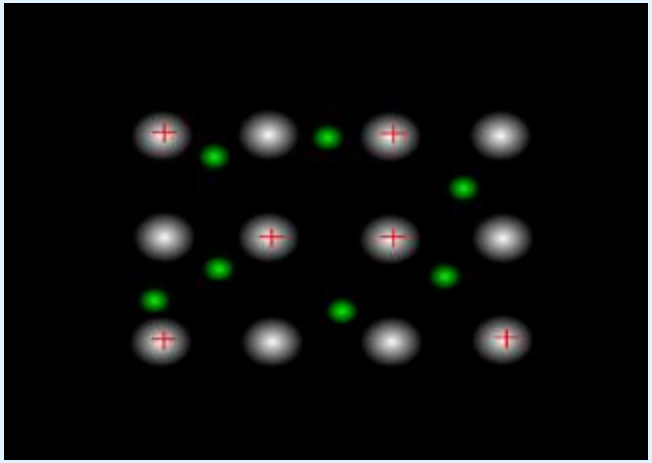
能量守恒　$h\nu = A + \frac{1}{2}mv_m^2$　—— 光电方程



$$h\nu = A + \frac{1}{2}mv_m^2$$ —— 光电方程

A —— 一个电子脱离金属表面克服正离子吸引力作的功

—— 金属的逸出功



$$\frac{1}{2}mv_m^2$$ —— 光电子最大初动能

爱因斯坦光电方程对光电效应的解释

$$h\nu = A + \frac{1}{2}mv_m^2 \longrightarrow h\nu = A + eU_c$$

$$U_c = \frac{h}{e}\left(\nu - \frac{A}{h}\right) \xrightarrow{\text{对比实验结果}} U_c = K(\nu - \nu_0)$$

$$\longrightarrow \begin{cases} K = \dfrac{h}{e} \\ \nu_0 = \dfrac{A}{h} \end{cases}$$

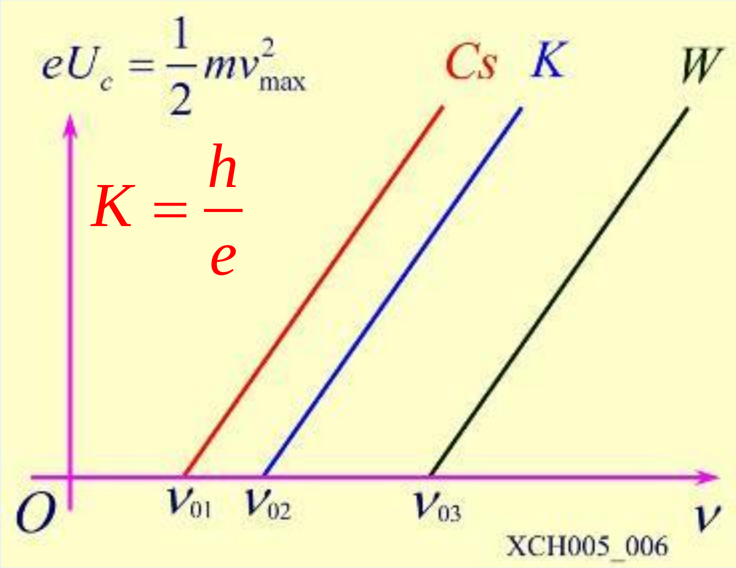
$A = h\nu_0$ —— 逸出功

—— 1916年密立根实验

得出不同金属的*K*是相同的

证实了 $h = Ke$

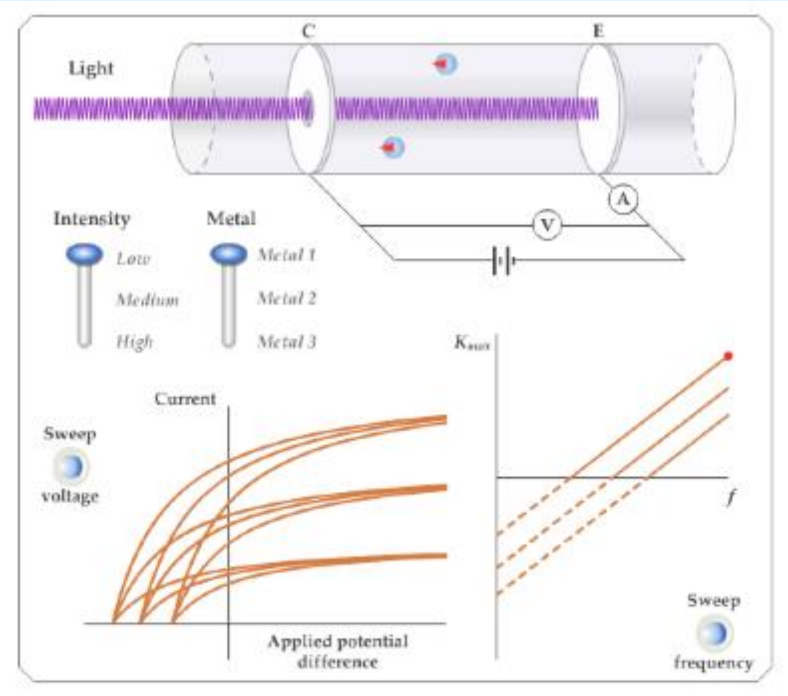
$h = 6.56 \times 10^{-34} J \cdot s$



金属	钨	锌	钙	钠	钾	铷	铯
红限频率 $/10^{14}Hz$	10.95	8.065	7.73	5.53	5.44	5.15	4.69
逸出功 A/eV	4.54	3.34	3.20	2.29	2.25	2.13	1.94

—— 1个电子一次吸收1个光子获得能量逸出金属表面

不需要时间的积累



—— 光强非常弱__个别电子

吸收光子产生光电效应

—— 光子能量 $E < h\nu_0 = A$

—— 无论照射光多强

照射时间多长__不产生光电子

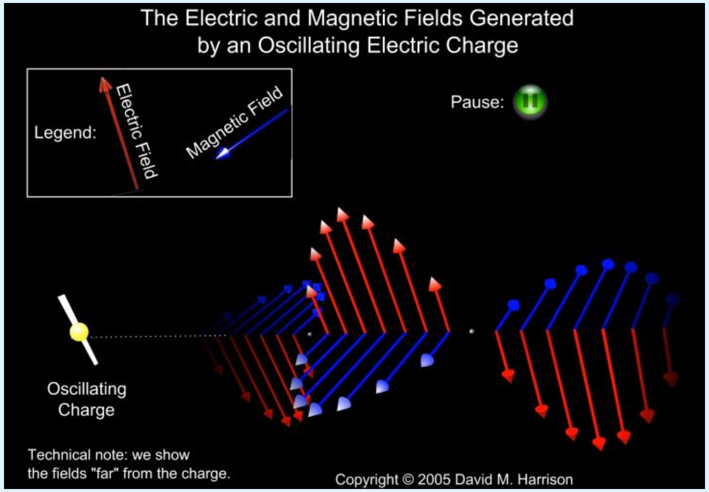
3 光的波粒二象性

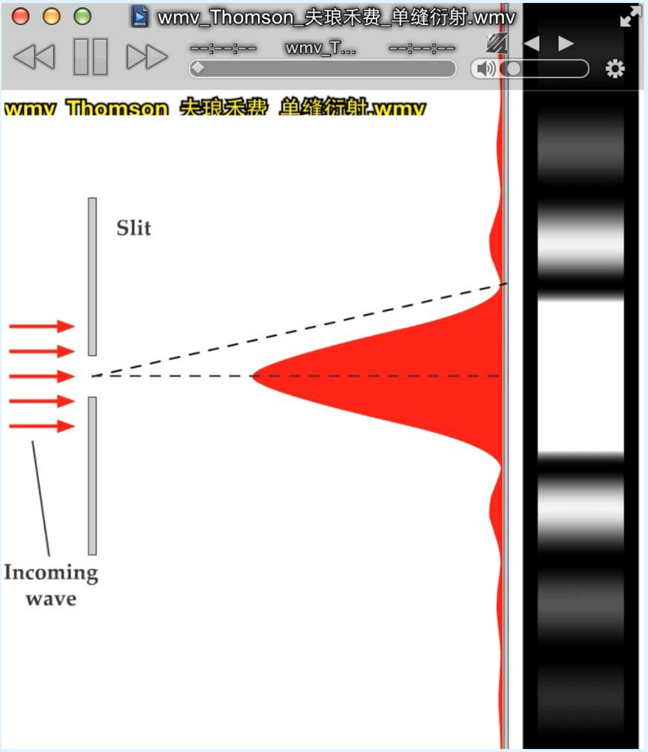
光的直线传播

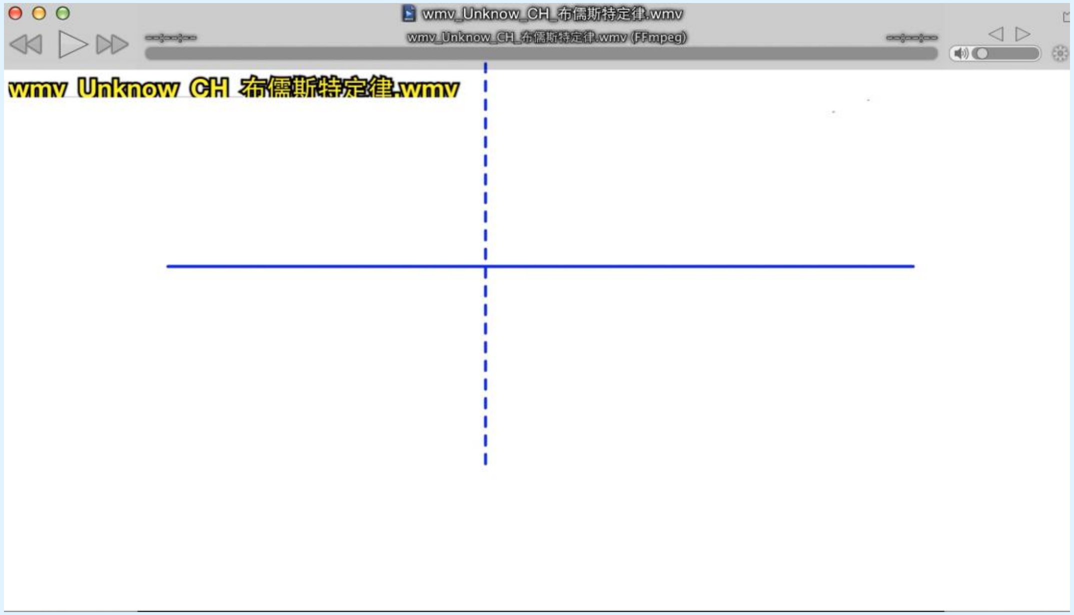
介质面上的反射和折射

光的干涉和衍射

—— 表现出光的波动性

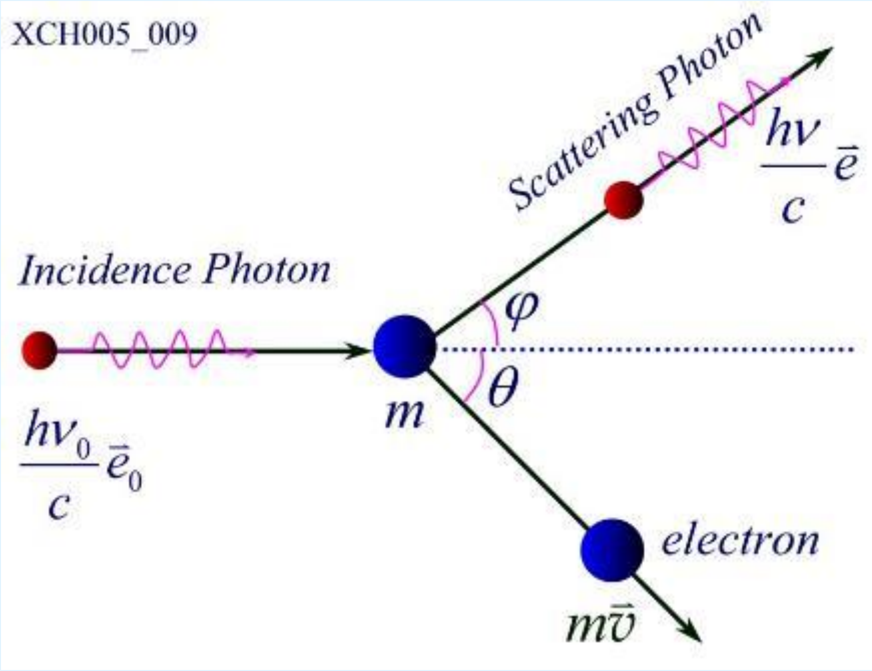






光与物质相互作用

—— 表现出光的粒子性



爱因斯坦相对论 —— 光的波动性和粒子性联系起来

—— 光的波动性和粒子性 ——

光子的能量 $E = h\nu \xrightarrow{\text{质能关系}} E = m_\varphi c^2$

光子的质量 $\boxed{m_\varphi} = \dfrac{h\nu}{c^2} = \boxed{\dfrac{h}{\lambda}}\dfrac{1}{c}$

光子的动量 $\boxed{p} = m_\varphi c = \boxed{\dfrac{h}{\lambda}}$

质量 —— 粒子特征量

波长 —— 波动特征量

质量 $m_\varphi = \dfrac{m_{\varphi 0}}{\sqrt{1 - v^2 / c^2}} \xrightarrow{v = c} \boxed{m_{\varphi 0} = 0}$

m_φ —— 有限值

作业：W11 黑体辐射 光电效应

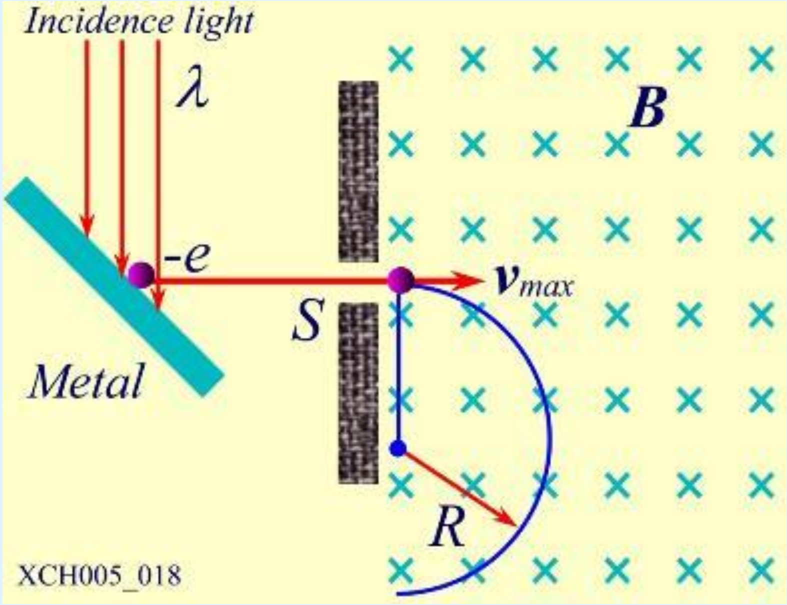
- **例题01 波长为λ的单色光照射某金属表面上发生光电效应，发射光电子(电量绝对值e，质量m)经狭缝S后垂直进入磁感应强度为*B*的均匀磁场**

现已测出电子在磁场中作圆周运动的最大半径为R

求：

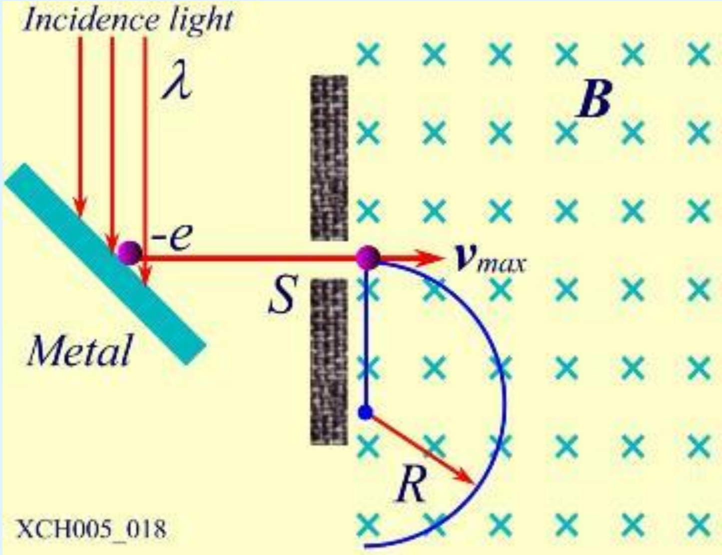
1) 金属的逸出功

2) 遏止电势差



☛ 光电子在均匀磁场中做圆周运动 $m\frac{v_m^2}{R}=ev_mB$

最大出射速度 $v_m=\frac{eBR}{m}$



光电方程 $h\nu=A+\frac{1}{2}mv_m^2$

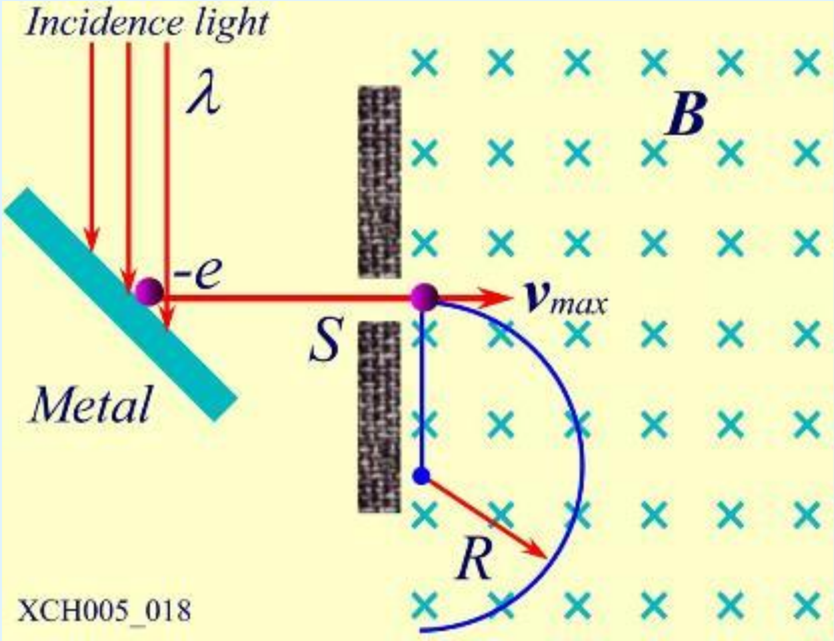
金属逸出功 $A=\frac{hc}{\lambda}-\frac{1}{2}\frac{(eBR)^2}{m}$

最大出射速度 $v_m = \dfrac{eBR}{m}$

遏止电压 $eU_c = \dfrac{1}{2} m v_{\max}^2$

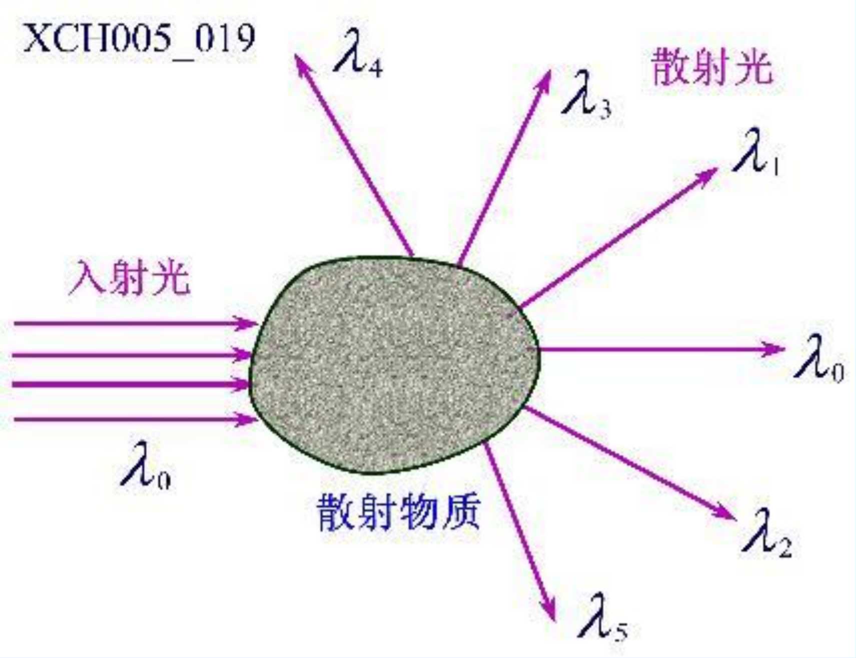
$$= \frac{1}{2}\frac{(eBR)^2}{m}$$

$$U_c = \frac{e}{2m}(BR)^2$$



03 康普顿效应

1 康普顿效应实验



—— *X*光照射物质

出射*X*光中

除波长与入射波长相同外

还有波长较长的成份

—— **1923年康普顿发现**

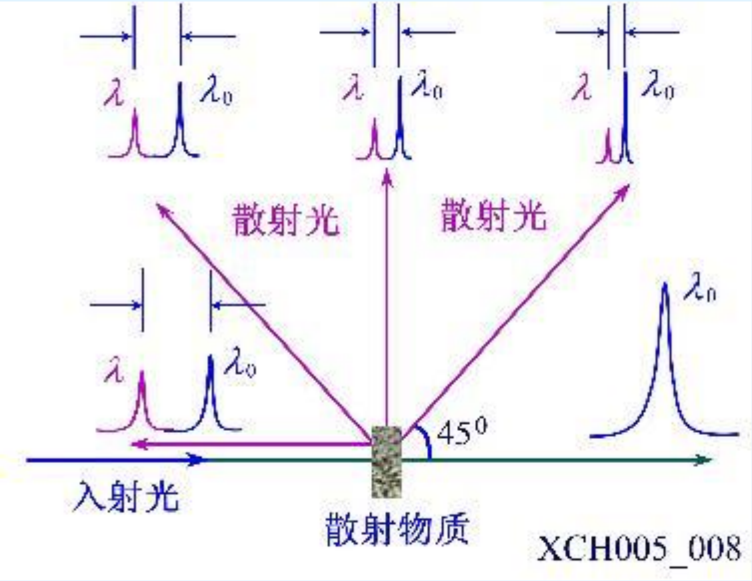
—— **1927年获诺贝尔物理学奖**

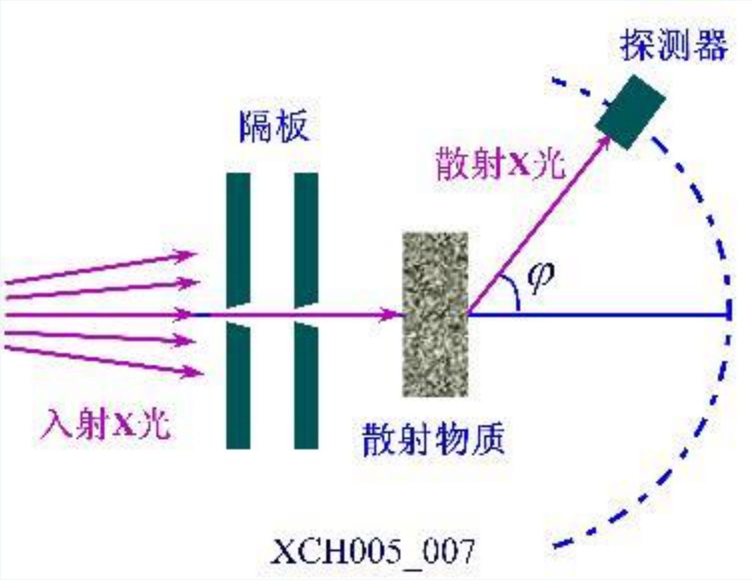
散射实验装置

—— 吴有训1926年

对不同物质的康普顿散射

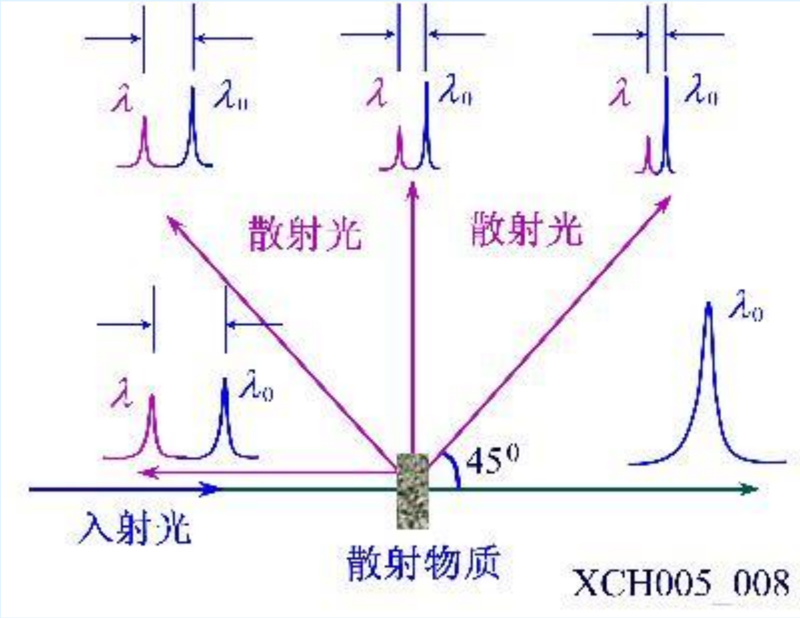
进行了研究





1) 同一种散射物质，康普顿散射改变量 $\Delta\lambda = \lambda - \lambda_0$

$\varphi\uparrow \longrightarrow \Delta\lambda\uparrow$ —— 波长位移



- **波长位移与散射物质无关**

2) 谱线强度

原子越大：原波长谱线强度越大

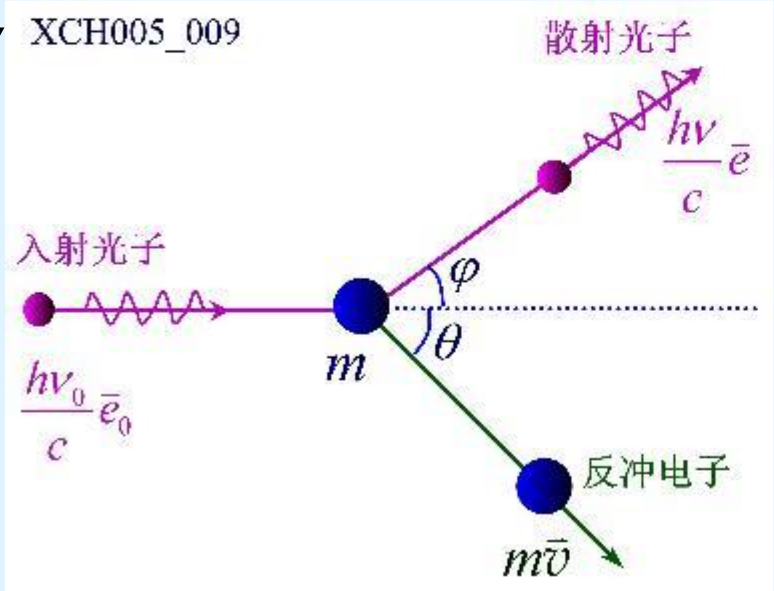
新波长谱线强度越小

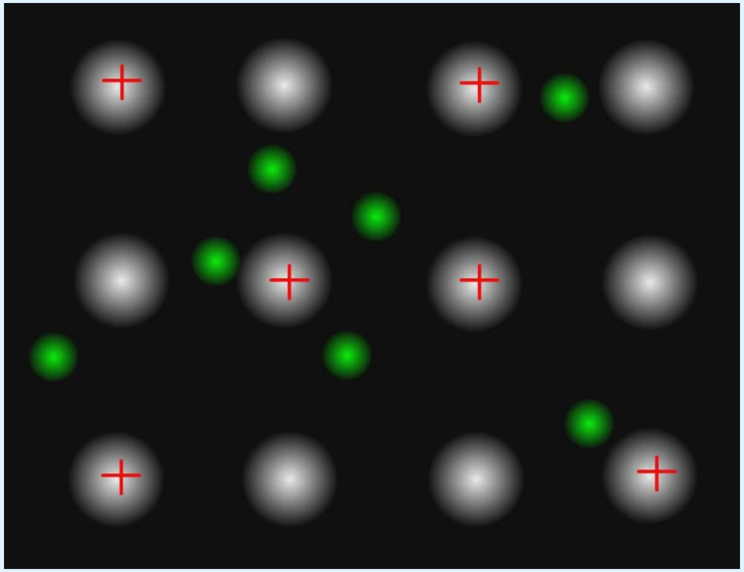
康普顿散射
- **波长位移和物质无关**
- **谱线强度和物质以及散射角有关**

2 康普顿效应理论

*X*光子能量约 $10^4 \sim 10^5\ eV$

公有化电子结合能 $10 \sim 10^2\ eV$





可将公有化电子

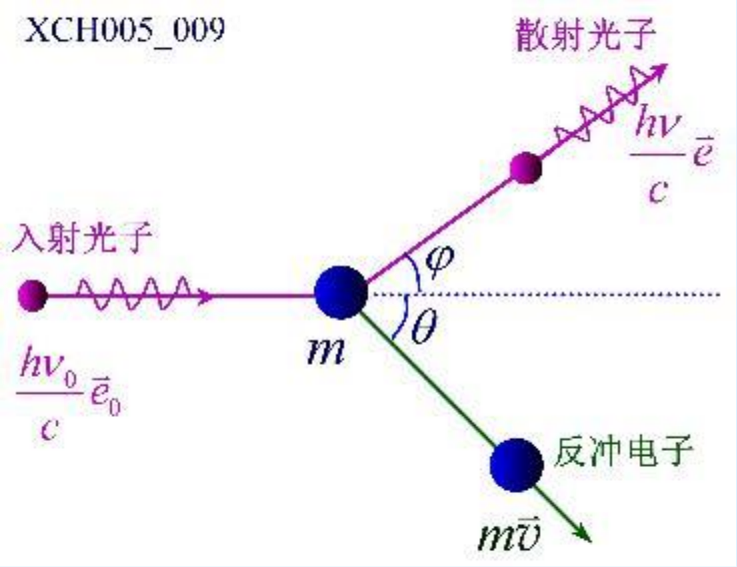
看作是静止的自由电子

康普顿散射 —— 光子和电子发生弹性碰撞

光子和电子作用前

光子的能量和动量

$$\begin{cases} E_{\varphi 0} = h\nu_0 \\ \vec{p}_{\varphi 0} = \dfrac{h\nu_0}{c}\vec{e}_0 \end{cases}$$



电子的能量和动量

$$\begin{cases} E_{e0} = m_0 c^2 \\ \vec{p}_{e0} = 0 \end{cases}$$

光子和电子作用后

散射光子

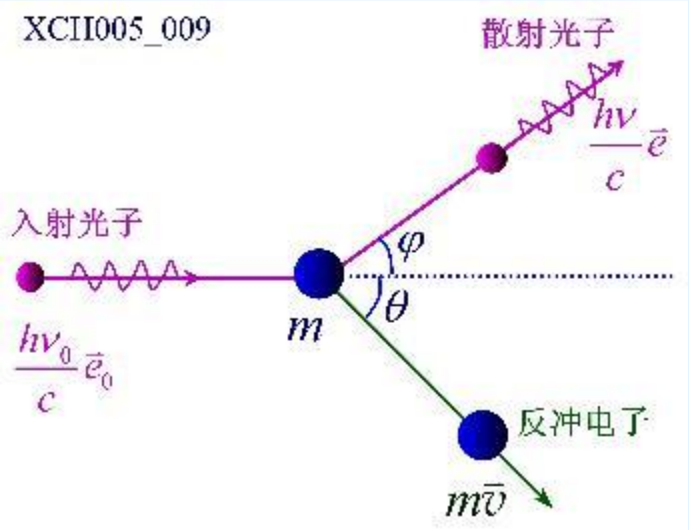
$$\begin{cases} E_{\varphi} = h\nu \\ \vec{p}_{\varphi} = \dfrac{h\nu}{c}\vec{e} \end{cases}$$

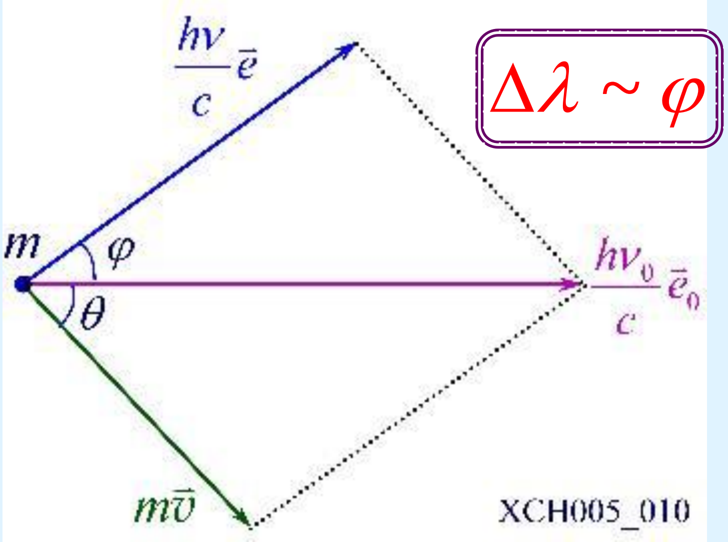
反冲电子

$$\begin{cases} E_e = mc^2 \\ \vec{p}_e = m\vec{v} \end{cases}$$

作用前后光子和电子的能量和动量守恒

$$
\begin{cases}
\boxed{h\nu_0 + m_0c^2 = h\nu + mc^2} \\[2ex]
\dfrac{h\nu_0}{c}\vec{e}_0 = \dfrac{h\nu}{c}\vec{e} + m\vec{v}
\end{cases}
$$





$$\boxed{\Delta\lambda \sim \varphi}$$

$+$

动量守恒

$$
\begin{cases}
\dfrac{h\nu_0}{c} = \dfrac{h\nu}{c}\cos\varphi + mv\cos\theta \\[2ex]
\dfrac{h\nu}{c}\sin\varphi = mv\sin\theta
\end{cases}
$$

$+$ 电子能量和动量的关系

$$\boxed{m^2c^4 = m^2v^2c^2 + m_0^2c^4}$$

动量守恒 $$\begin{cases} \dfrac{h\nu_0}{c} = \dfrac{h\nu}{c}\cos\varphi + mv\cos\theta \\ \dfrac{h\nu}{c}\sin\varphi = mv\sin\theta \end{cases}$$

两式消去 θ

$$m^2v^2c^2 = h^2(\nu_0^2 + \nu^2 - 2\nu_0\nu\cos\varphi)$$

能量和动量的关系 $$m^2c^4 = m^2v^2c^2 + m_0^2c^4$$

$$m^2c^4 - m_0^2c^4 = h^2[(\nu_0 - \nu)^2 + 4\nu_0\nu\sin^2\frac{\varphi}{2})]$$

$$\underline{\underline{m^2c^4 - m_0^2c^4}} = h^2[(\nu_0-\nu)^2 + 4\nu_0\nu\sin^2\frac{\varphi}{2})]$$

能量守恒 $$h\nu + mc^2 = h\nu_0 + m_0c^2$$

$$mc^2 = h(\nu_0-\nu) + m_0c^2$$ —— 两边平方

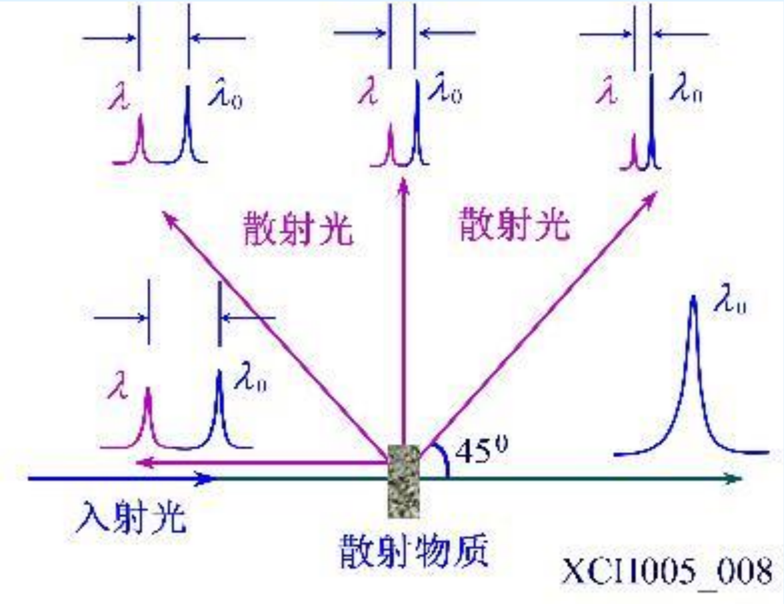
$$\longrightarrow \underline{\underline{m^2c^4 - m_0^2c^4}} = h^2(\nu_0-\nu)^2 + 2h(\nu_0-\nu)m_0c^2$$

$$2h(\nu_0-\nu)m_0c^2 = 4\nu_0\nu h^2\sin^2\frac{\varphi}{2}$$

$$\longrightarrow \frac{1}{\nu} - \frac{1}{\nu_0} = 2\frac{h}{m_0c^2}\sin^2\frac{\varphi}{2}$$

$$\begin{cases} \lambda_0 = \dfrac{c}{\nu_0} \\ \lambda = \dfrac{c}{\nu} \end{cases}$$

$$\lambda - \lambda_0 = \frac{2h}{m_0 c}\sin^2\frac{\varphi}{2}$$



$$\lambda_c = \frac{h}{m_0 c} = 0.00243\, nm$$

$\varphi = 90^0$ 方向上波长改变量 —— 康普顿波长

波长位移

$$\Delta\lambda = \lambda - \lambda_0 = 2\lambda_c \sin^2\frac{\varphi}{2}$$ —— **康普顿散射公式**

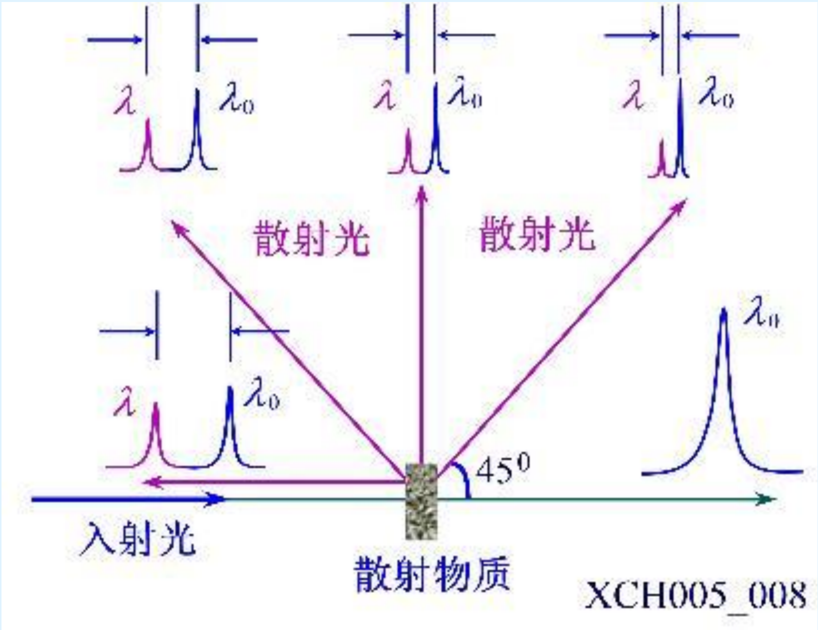
3 康普顿效应的实验结果解释 $\Delta\lambda = \dfrac{2h}{m_0 c}\sin^2\dfrac{\varphi}{2}$

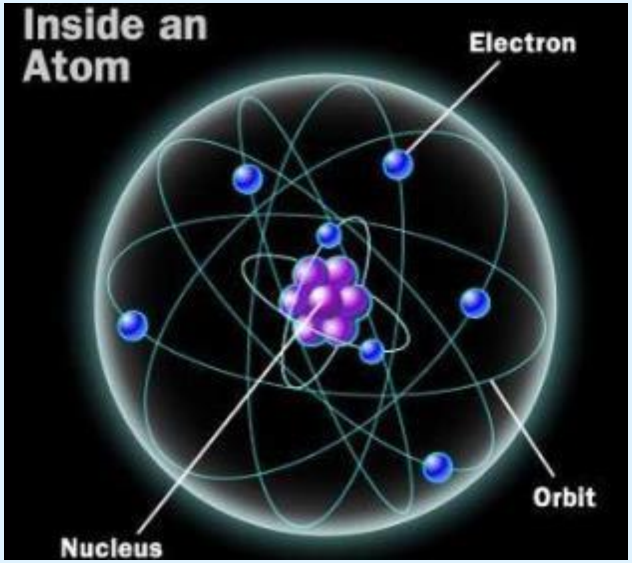
X光子入射物质

1) 没有发生作用　(波长无位移)

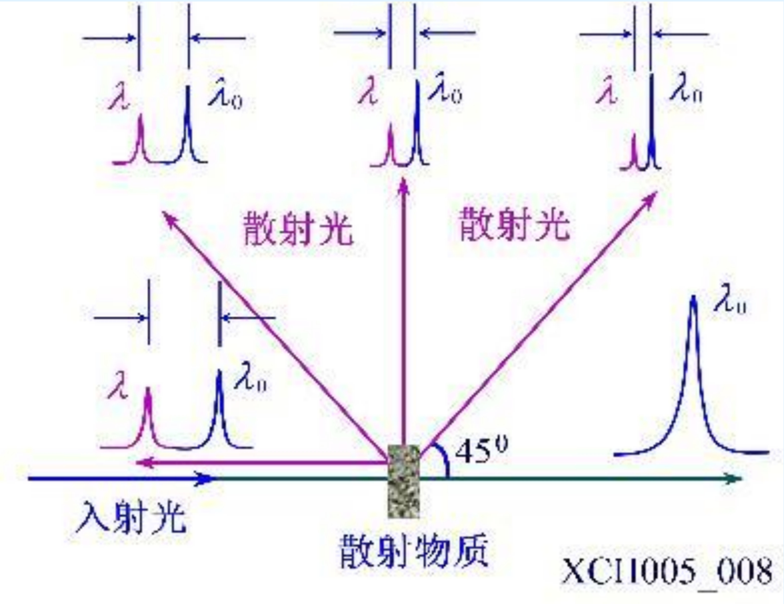
2) 和外层电子作用(波长有位移)

3) 和内层电子作用(波长位移很小)

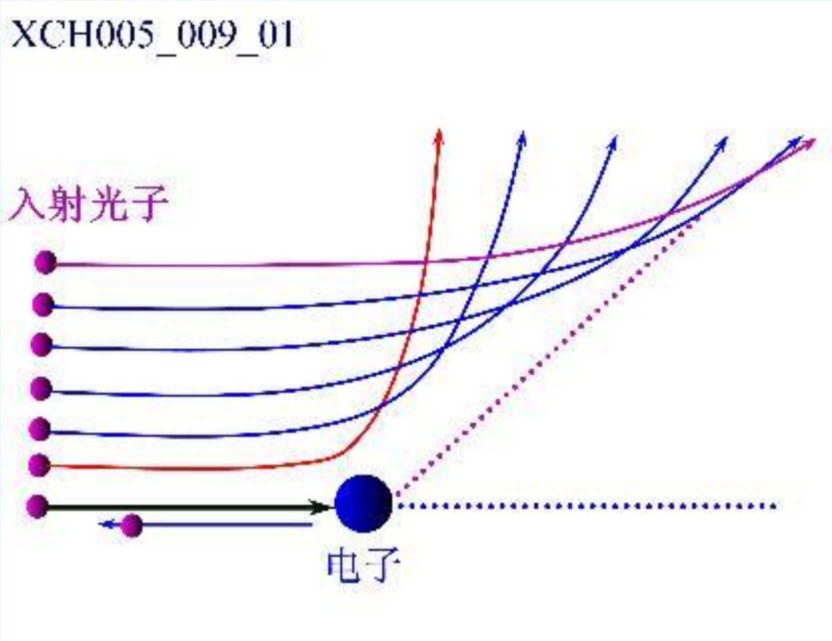




$$\Delta\lambda = 2\lambda_c \sin^2\frac{\varphi}{2}$$



$$\lambda_c = \frac{h}{m_0 c}$$ —— 康普顿波长



1) 波长位移量和物质无关

散射角越大，

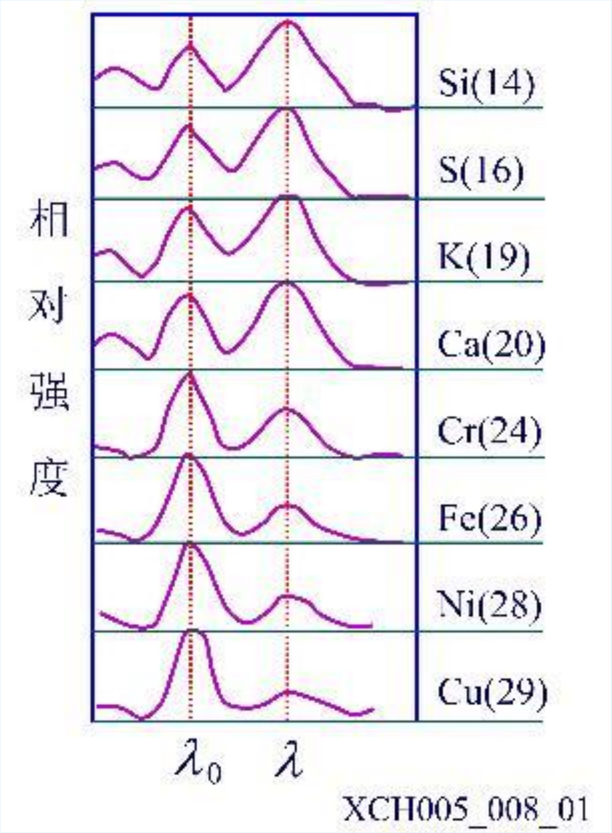
光子损失的能量越多，

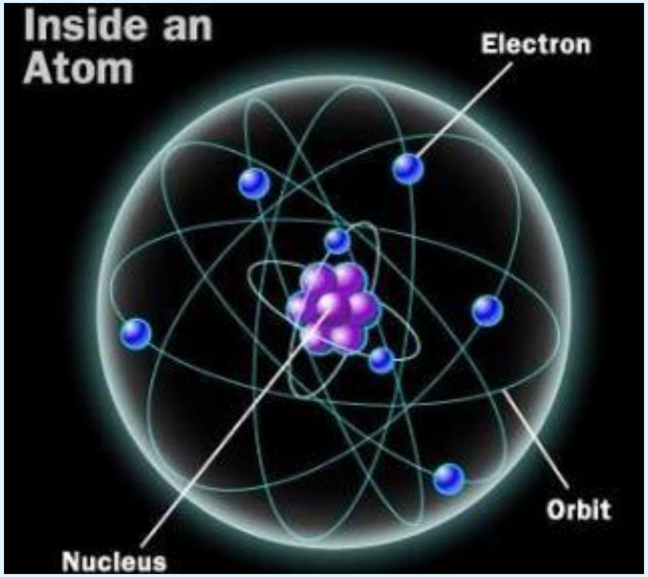
波长位移越大！

2) 散射原子越大

原波长谱线的强度越大

新波长谱线的强度越小





原子序数越大内层电子越多

光子和内层电子碰撞几率越大

光子的能量改变很小

原波长谱线的强度大

✌ 波长 $\lambda_0 = 0.02\ nm$的X射线与自由电子碰撞

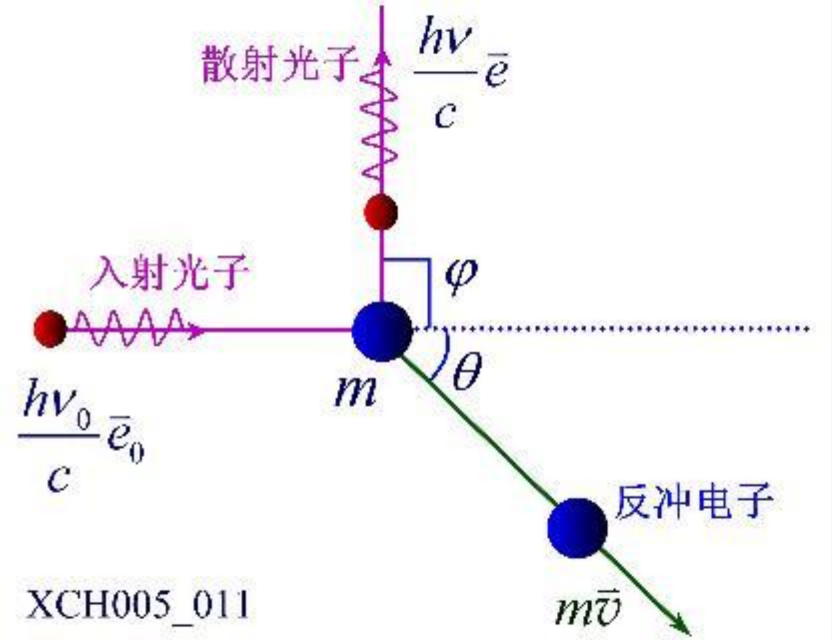
如果从与入射线 $\varphi = 90^0$ 的方向观察散射线。

求:

1) 散射线的波长;

2) 反冲电子的动能;

3) 反冲电子的动量

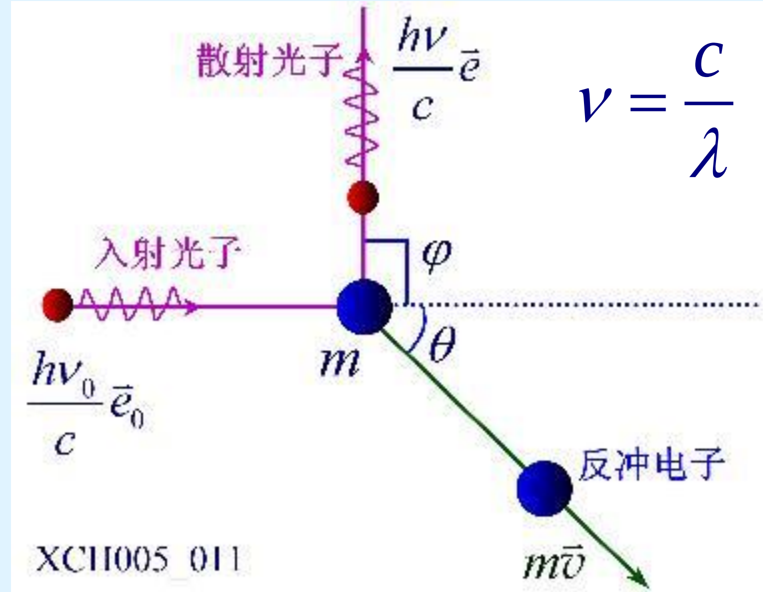


1) 散射线的波长

$$\varphi = 90^0 \text{ 方向上}$$

$$\lambda - \lambda_0 = 2\lambda_c \sin^2\frac{\varphi}{2} = \lambda_c$$

$$\lambda = \lambda_0 + \lambda_c$$



$$\xrightarrow[\lambda_c = 0.00243\,nm]{\lambda_0 = 0.02\,nm} \boxed{\lambda = 0.02243\,nm}$$

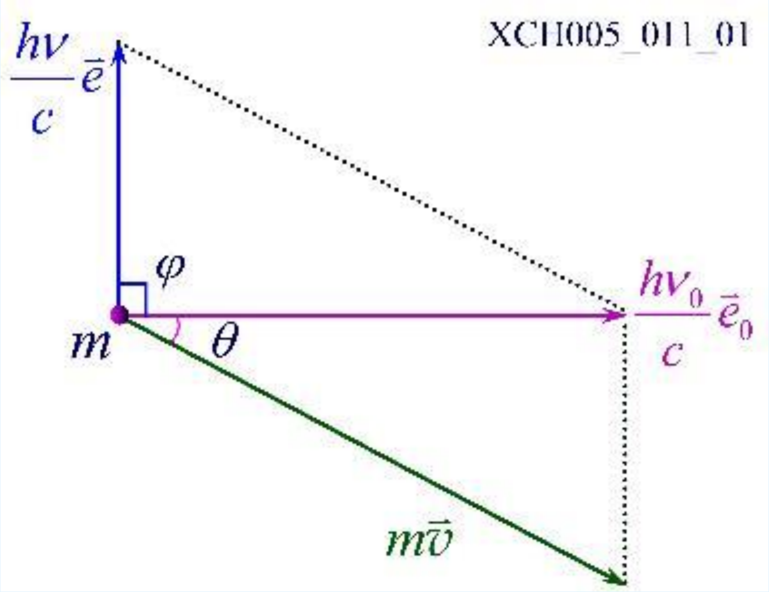
2) 反冲电子的动能

$$E_k = mc^2 - m_0c^2 = h\nu_0 - h\nu$$

$$E_k = hc\left(\frac{1}{\lambda_0} - \frac{1}{\lambda}\right) \xrightarrow[\lambda = 0.02243\,nm]{\lambda_0 = 0.02\,nm} \boxed{E_k = 6.8\times10^3\,eV}$$

3) 反冲电子的动量

$$\vec{p}_e = \frac{h\nu_0}{c}\vec{e}_0 - \frac{h\nu}{c}\vec{e}$$



$$p_e = \sqrt{\left(\frac{h\nu_0}{c}\right)^2 + \left(\frac{h\nu}{c}\right)^2 - 2\frac{h^2\nu_0\nu}{c^2}\cos\varphi}$$

$$= h\sqrt{\left(\frac{1}{\lambda_0^2} + \frac{1}{\lambda^2}\right)}$$

$$\boxed{= 4.5\times10^{-23}\,kg\cdot m/s}$$

$$\left.\begin{array}{l} p_\varphi = \dfrac{h}{\lambda} = \dfrac{h}{0.02243\,nm} \\ p_{\varphi 0} = \dfrac{h}{\lambda_0} = \dfrac{h}{0.02\,nm} \end{array}\right\} \longrightarrow \tan\theta = \frac{p_\varphi}{p_{\varphi 0}} = \frac{\lambda_0}{\lambda} \qquad \boxed{\theta = 42^0 18'}$$

✌ 一个静止的电子和一能量为 $h\nu_0$ 的光子碰撞后它获得的最大能量是多少？

☛ **电子获得的能量** $\Delta E = mc^2 - m_0c^2 = h\nu_0 - h\nu$

波长位移 $\lambda - \lambda_0 = \dfrac{2h}{m_0c}\sin^2\dfrac{\varphi}{2}$ $\quad \dfrac{c}{\nu} - \dfrac{c}{\nu_0} = \dfrac{2h}{m_0c}\sin^2\dfrac{\varphi}{2}$

$\varphi = 180^0$ 时，光子波长改变最大，即光子能量改变最大

$$\frac{1}{h\nu} - \frac{1}{h\nu_0} = \frac{2}{m_0c^2} \longrightarrow h\nu = \frac{1}{\dfrac{2}{m_0c^2} + \dfrac{1}{h\nu_0}}$$

$$\boxed{\Delta E = \frac{2h^2\nu_0^{\ 2}}{m_0c^2 + 2h\nu_0}}$$