



20世纪初经典物理在微观领域的 三个问题上陷入困境：

- 黑体辐射问题，即 “紫外灾难”
- 光电效应 康普顿效应
- 原子的稳定性和大小

21.2 光电效应

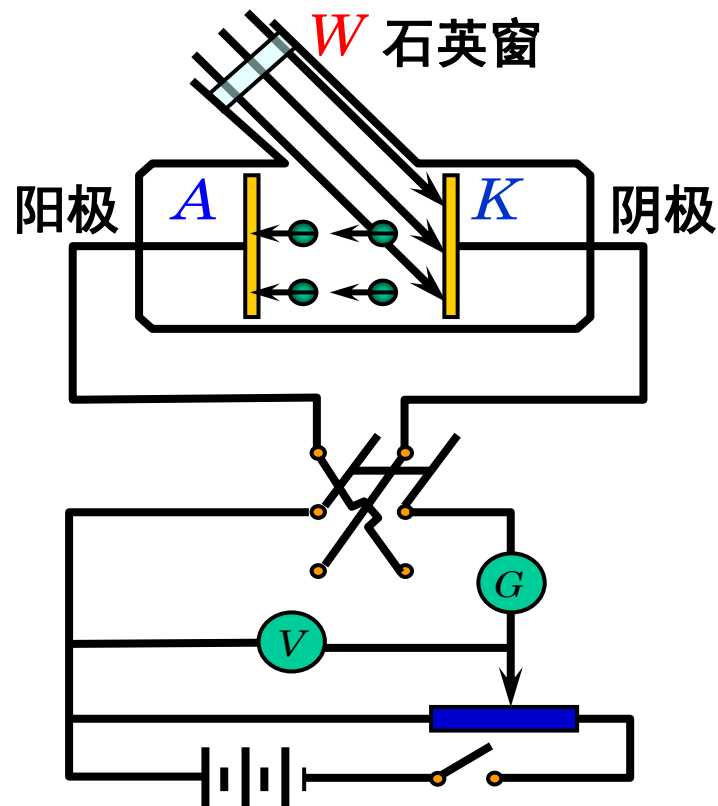
一、光电效应的实验规律

1887年**赫兹**首先发现

光电效应:光照到金属表面时,金属有电子逸出的现象。

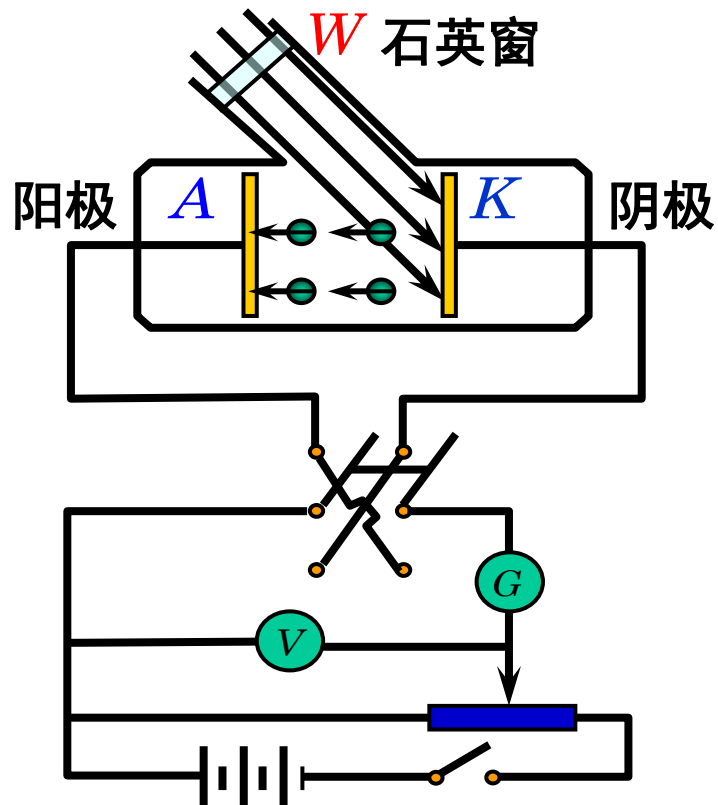
光电子 光电流

逸出功



实验步骤：

- (1) 入射光的频率、光强不变，改变**电势差**，测光电流 I 。
- (2) 改变**光强**在不同电势差下测 I 。
- (3) 改变**频率**，测 I 。

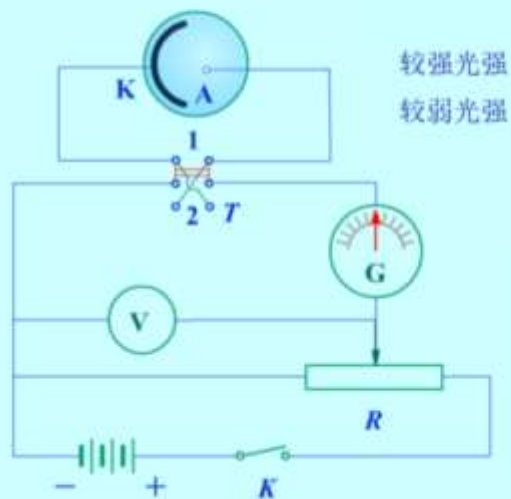


(1)入射光频率、强度一定，测电压与光电流关系

光电效应

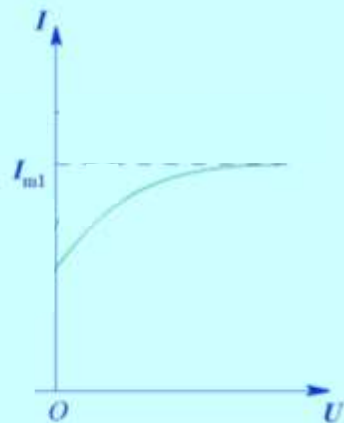
真空中光电实验简图

入射光:



提示:

换向开关T可变。滑动变阻器阻值可调，入射光可调。



电势差和光电流关系曲线



(1)入射光频率、强度一定，测电压与光电流关系

饱和光电流 I_m \Leftrightarrow 逸出的光电子数量

遏制电压 U_a \Leftrightarrow 光电子的最大初动能

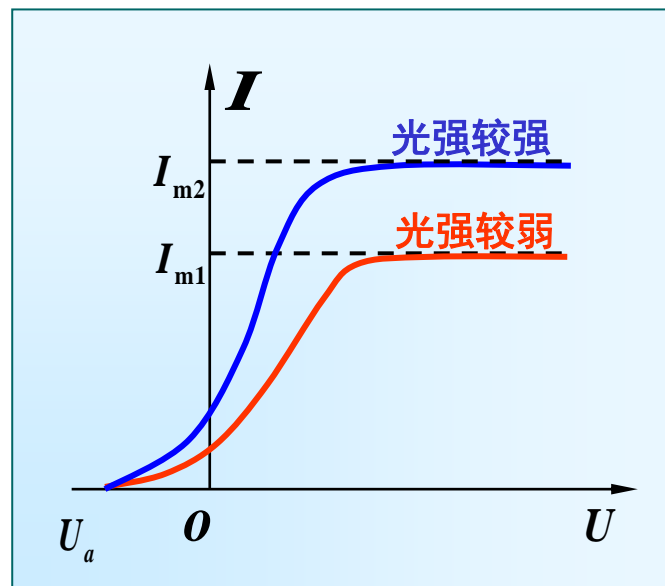
(2)改变光强，重复(1)

饱和光电流 \propto 光强

光电子数量 \propto 光强

遏制电压与光强无关

最大初动能与光强无关



电势差与光电流关系曲线



(3)改变入射光的频率

对于某种金属材料，只有当入射光的频率大于某一频率时，电子才能从金属表面逸出，形成光电流。

若 $\nu < \nu_0$ ，无论光强多大，都没有光电子逸出。

金属	铯	钾	钠	锌	钨
截止频率 $\nu_0 / 10^{14} \text{ Hz}$	4.69	5.44	5.53	8.06	10.95

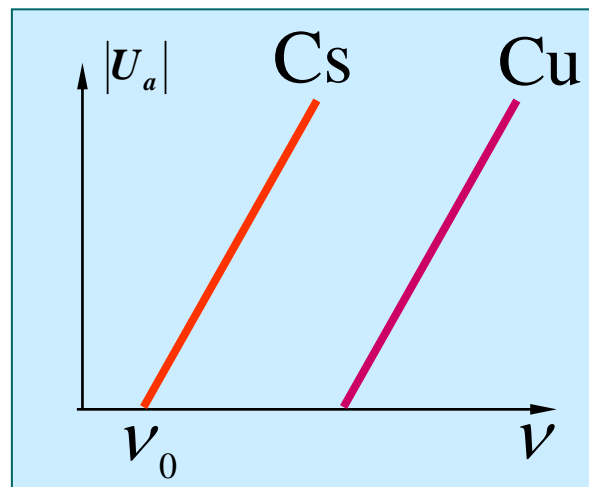
若 $\nu > \nu_0$, U_a 与入射光频率具有线性关系

$$|U_a| = K\nu - U_0$$

$$\therefore \frac{1}{2}mv_m^2 = e|U_a|$$

$$\frac{1}{2}mv_m^2 = eK\nu - eU_0 \geq 0$$

$$\nu \geq \frac{U_0}{K} \quad \nu_0 = \frac{U_0}{K} \quad \text{红限频率 (截止频率)}$$



(4) 弛豫时间

当 $\nu \geq \nu_0$ 时, 无论光强怎样微弱, 在照射的同时就产生了光电子, 弛豫时间最多不超过 10^{-9} s 。

经典理论

- 金属中电子吸收光能逸出，其**最大初动能**决定于光振动振幅，**即由光强决定**。
- 光强能量足够，光电效应对**各种频率的光都会发生**。
- 电子吸收光波能量只有到**一定量值**时，才会从金属中逸出。

实验结果

最大初动能与入射光强无关。

存在**截止频率**(红限)。

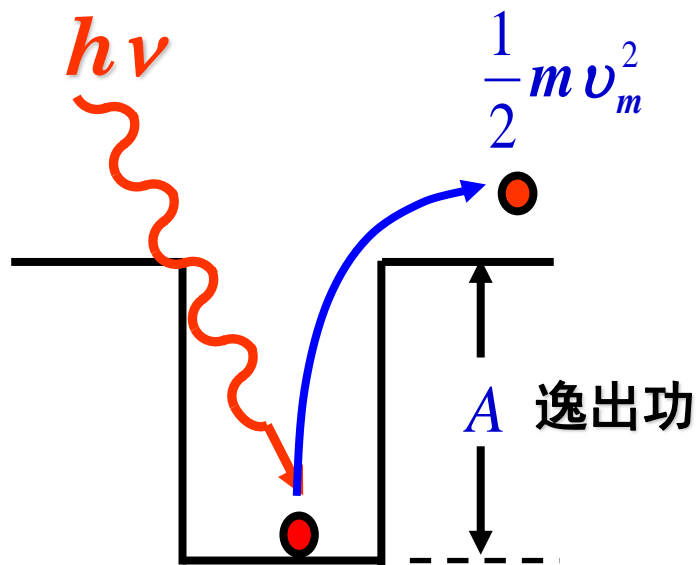
光电子是**即时发射**的。

《关于光的产生和转化的一个试探性的观点》（1905）

一束光就是一束在真空中以速度 c 运动着的粒子流，这种粒子称为光量子，简称光子。频率为 ν 的光的一个光子所具有的能为 $\varepsilon = h\nu$ ，它不能再分割，而只能整个的被吸收或产生出来。



爱因斯坦



光电效应方程 $h\nu = \frac{1}{2}mv_m^2 + A$

$$A = h\nu_0$$

光子理论

➤ 光强大，即**光子数**多，单位时间产生的光电子多，饱和光电流 I_m 越大。 $I_m \propto N h \nu$

➤ **光电效应方程** $\frac{1}{2} m v_m^2 = h \nu - A$
 $(\frac{1}{2} m v^2 \geq 0, \quad \nu \geq \frac{A}{h} = \nu_0)$

➤ 光子入射至金属表面，**一个光子的能量一次性被一个电子吸收**，无需时间积累。

实验结果

光电子数与光强成正比。
($\nu \geq \nu_0$ 时)

光电子的最大初动能与频率有关，存在截止频率。

瞬时性。

美国实验物理学家**密立根**从1904年起，历经10多年，直到1916年才完成了对光电效应的精确测量，从实验上证实了光电效应方程的正确性。





爱因斯坦因在数学物理方面的成就，尤其是发现了
光电效应的规律，获得了**1921年度诺贝尔物理学奖**。

光电效应的应用 光电倍增管

光信号→电信号



微光夜视仪



例:波长为 400nm的单色光照射在红限频率为 4.8×10^{14} Hz 的金属铯上, 求铯释放的光电子的最大初速度。(电子质量为 9.11×10^{-31} kg)

解: 由爱因斯坦光电效应方程

$$\begin{aligned}\frac{1}{2}mv_m^2 &= h\nu - A \\ &= h\frac{c}{\lambda} - h\nu_0\end{aligned}$$

$$v_m = 6.50 \times 10^5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad c$$

光电效应中动能为经典表示



“能量子” $\varepsilon = h \nu$

$$E^2 = c^2 p^2 + m_0^2 c^4$$



“光量子” 能量: $\varepsilon = h \nu$

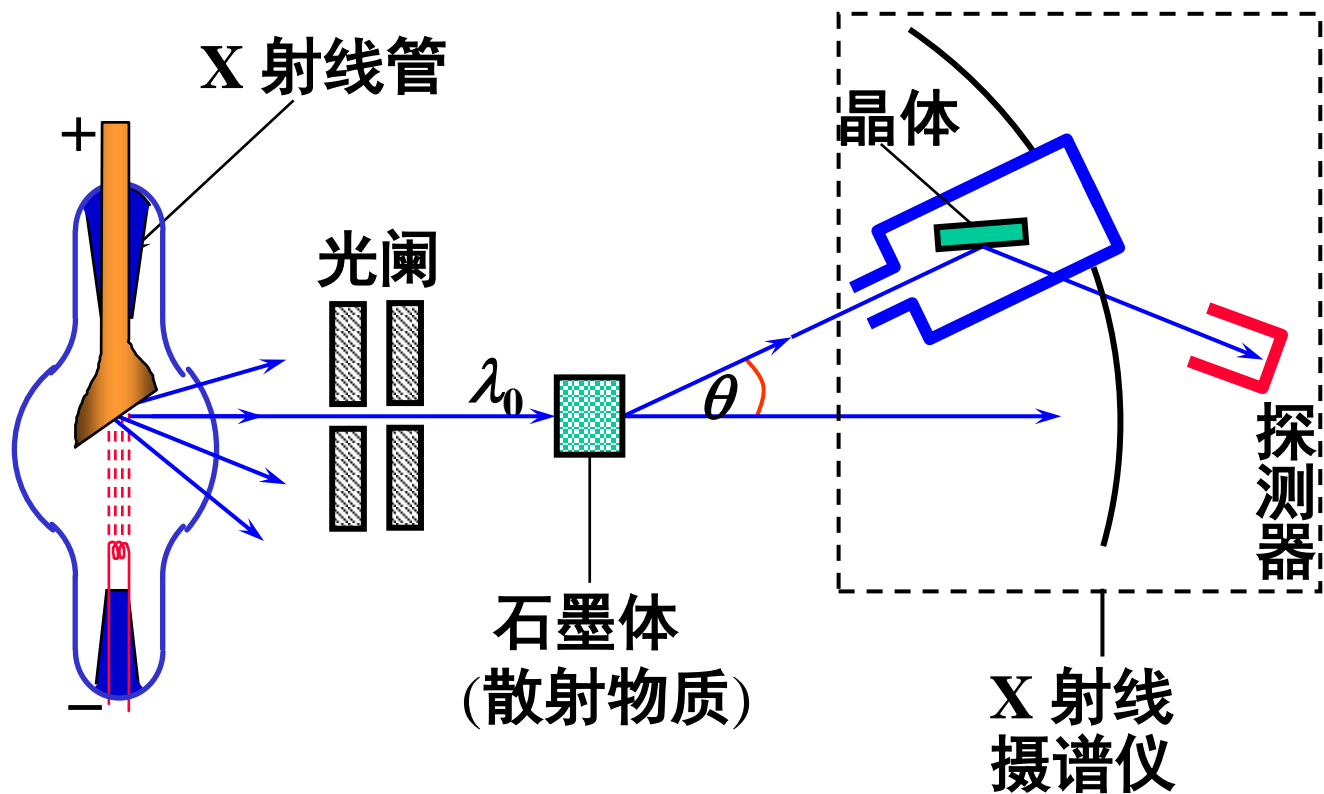
“光量子” 动量: $p = \frac{\varepsilon}{c} = \frac{h}{\lambda}$



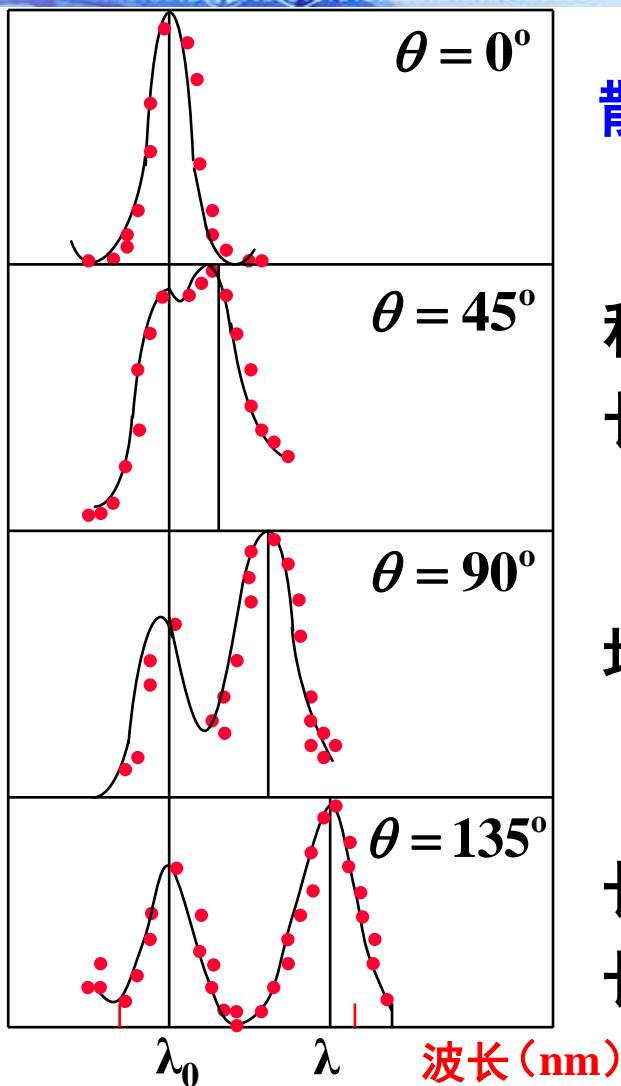
光的量子理论

21.3 康普顿效应

一、康普顿效应实验 (1923年)



相对强度



散射曲线的三个特点:

1. 除原波长 λ_0 外, 出现了移向长波方面的新的散射波长 λ 。
2. 新波长 λ 随散射角 θ 的增大而增大。
3. 当散射角增大时, 原波长的谱线强度降低, 而新波长的谱线强度升高。

Second Series

May, 1923

Vol. 21, No. 5

THE
PHYSICAL REVIEW

X射线被轻元素散射的量子理论

A QUANTUM THEORY OF THE SCATTERING OF X-RAYS
BY LIGHT ELEMENTS

BY ARTHUR H. COMPTON

ABSTRACT

A quantum theory of the scattering of X-rays and γ -rays by light elements. —The hypothesis is suggested that when an X-ray quantum is scattered it spends all of its energy and momentum upon some particular electron. This electron in turn scatters the ray in some definite direction. The change in momentum of the X-ray quantum due to the change in its direction of propagation results in a recoil of the scattering electron. The energy in the scattered quantum is thus less than the energy in the primary quantum by the kinetic energy of recoil of the scattering electron. The corresponding *increase in the*



A.H. Compton
康普顿
(1892-1962)

钼 $K\alpha$ 线被轻元素散射时的波长

THE WAVE-LENGTH OF MOLYBDENUM $K\alpha$ RAYS WHEN SCATTERED BY LIGHT ELEMENTS

BY ARTHUR H. COMPTON AND Y. H. WOO

RYERSON PHYSICAL LABORATORY, UNIVERSITY OF CHICAGO

Communicated, May 6, 1924

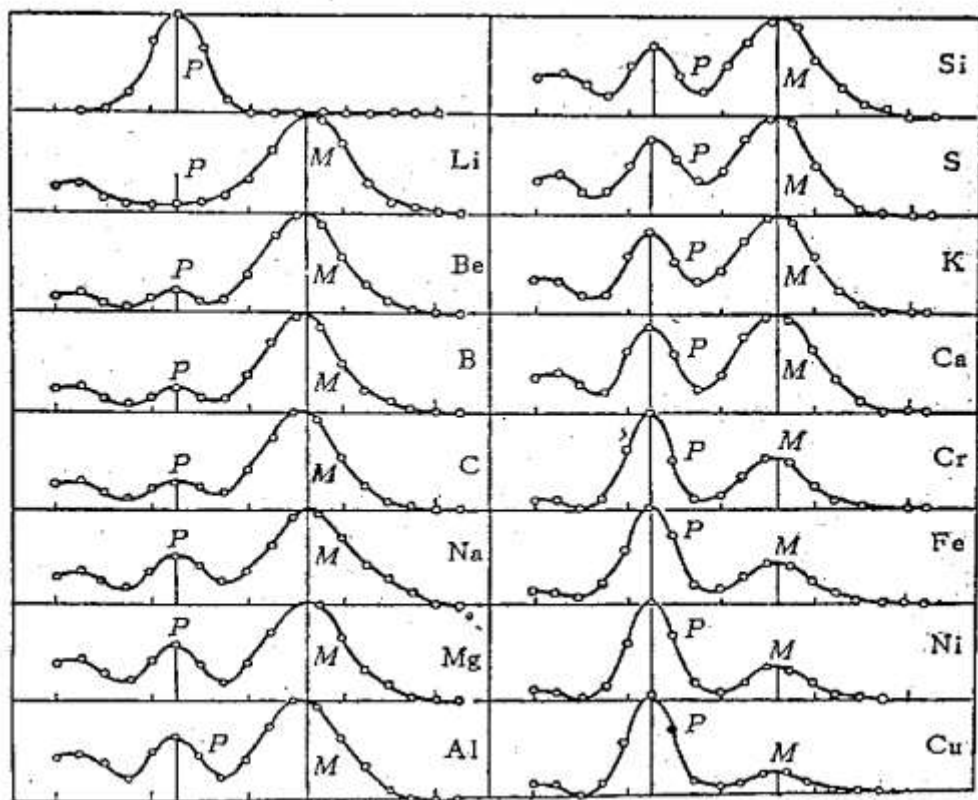
A paper by Clark, Stifler and Duane in the April number of these PROCEEDINGS describes measurements of the wave-length of the X-rays from a molybdenum target after they have been scattered by certain substances of low atomic number. The conclusion drawn from these experiments is that no secondary radiation occurs whose wave-length is increased by the amount $0.024 (1 - \cos \theta)$ A. U. predicted by the quantum theory of scattering. They find, on the other hand, evidence for modified secondary radiation whose minimum wave-length is $\lambda\lambda_k/(\lambda_k - \lambda)$, where λ is the wave-length of the incident rays and λ_k is the critical K absorption wave-length of the radiating element. The experiments described in the present paper were undertaken to examine this question in greater detail.

The apparatus used was identical in general design with that employed



吴有训1897-1977

吴有训的康普顿效应散射实验曲线



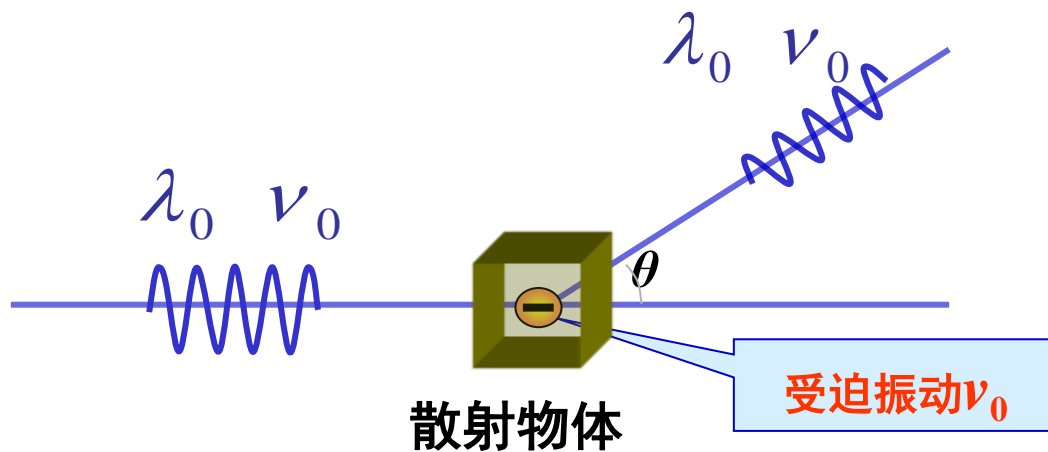
吴有训1897-1977

曲线表明：1、 $\Delta\lambda$ 与散射物质无关，仅与散射角有关。

2、轻元素 $I_\lambda > I_{\lambda_0}$ ，重元素 $I_\lambda < I_{\lambda_0}$ 。

二、康普顿效应的理论解释

1、经典电磁理论的解释



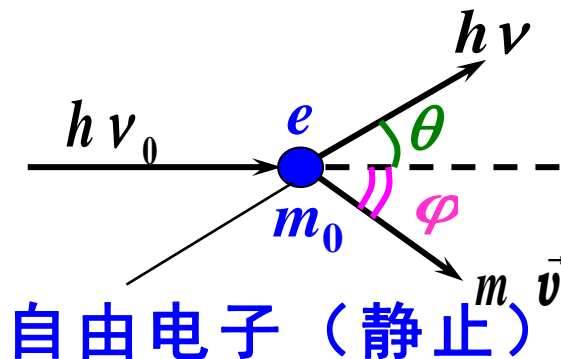
无法解释波长改变和散射角的关系

2. 康普顿用光子理论做了成功的解释

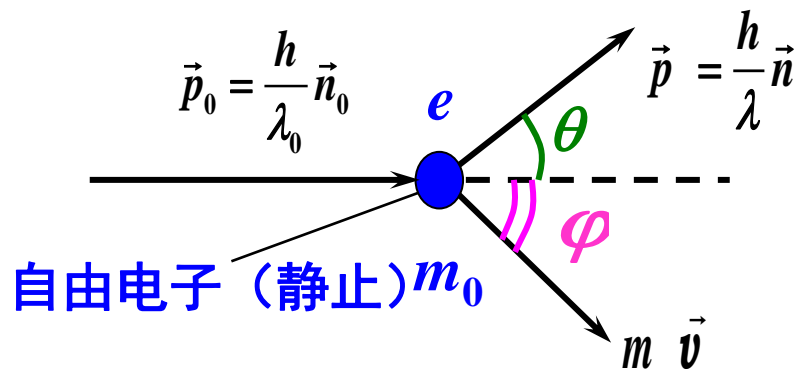
X射线光子与“自由电子”完全弹性碰撞

(波长 1nm 的X射线，其光子能量 $\varepsilon \sim 10^4\text{eV}$ ，

外层电子束缚能，室温下 $E \sim 10^{-2}\text{eV}$)



碰撞过程中能量与动量守恒



$$\left\{ \begin{array}{ll} \text{能量守恒} & h\nu_0 + m_0 c^2 = h\nu + m c^2 \\ \text{动量守恒} & \frac{h}{\lambda_0} \vec{n}_0 = \frac{h}{\lambda} \vec{n} + m \vec{v} \\ \text{反冲电子质量} & m = m_0 / \sqrt{1 - v^2 / c^2} \quad \lambda = \frac{c}{\nu} \end{array} \right.$$

$$\Delta \lambda = \lambda - \lambda_0 = \frac{h}{m_0 c} (1 - \cos \theta) = \frac{2h}{m_0 c} \sin^2 \frac{\theta}{2}$$

讨论：

1、为什么康普顿散射中还有原波长 λ_0 呢？

光子还可与石墨中被原子核束缚得很紧的电子发生碰撞。

2、为什么康普顿效应中的电子不能像光电效应那样吸收光子而是散射光子？

$$\left. \begin{aligned} h\nu_0 + m_0c^2 &= mc^2 \\ \frac{h\nu_0}{c} \vec{n}_0 &= m\vec{v}\vec{n}_0 \\ m &= m_0 / \sqrt{1 - v^2/c^2} \end{aligned} \right\} 1 - \frac{v}{c} = \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \rightarrow v = c$$

违反相对论！

在康普顿效应中能量是相对论中表达式

光电效应 VS 康普顿效应

物理现象	康普顿效应	光电效应
相同点	都涉及光子与电子的相互作用，都须用光量子理论解释	
入射光子能量 vs电子束缚能	X射线或γ射线 ~ MeV $h\nu \gg A(\sim \text{eV})$	可见光或紫外线 ~ eV $h\nu \sim A(\sim \text{eV})$
作用机制	外层电子可视为自由电子，光子与电子发生完全弹性碰撞，光子被自由电子吸收一部分能量，波长变长。	电子吸收光子的全部能量并逸出金属表面，从而具有初动能。
守恒量	光子-电子系统满足 能量守恒、动量守恒	满足 能量守恒

例题：比较用X光 ($\lambda_1 = 0.05\text{nm}$) 和紫光 ($\lambda_2 = 400\text{nm}$) 入射, $\theta = \pi$ 时康普顿散射的情况。

(电子的静止质量为 $9.11 \times 10^{-31}\text{kg}$)

解：波长改变量相同 $\Delta\lambda = \frac{2h}{m_0c} \sin^2 \frac{\theta}{2} = 0.0048\text{nm}$

对 X 光 $\frac{\Delta\lambda}{\lambda_1} = \frac{0.0048}{0.05} = 9.6\%$

对紫光 $\frac{\Delta\lambda}{\lambda_2} = \frac{0.0048}{400} = 0.0012\%$

\therefore 入射光能量较低 ($\lambda \gg \lambda_c$) 时, 康普顿效应不显著,
将主要观察到光电效应 ($\nu > \nu_0$)。

例题： 在一个康普顿实验中，入射的X射线光子能量为0.51MeV，X射线与一个静止的自由电子碰撞后，电子获得了0.15 MeV的**动能**。求散射光子的波长。（电子的静止质量为 $9.11 \times 10^{-31}\text{kg}$ ）

解 光子与自由电子弹性碰撞过程中能量守恒

$$h\nu_0 + m_0c^2 = h\nu + \textcolor{red}{mc}^2 = h\nu + (m_0c^2 + E_k)$$

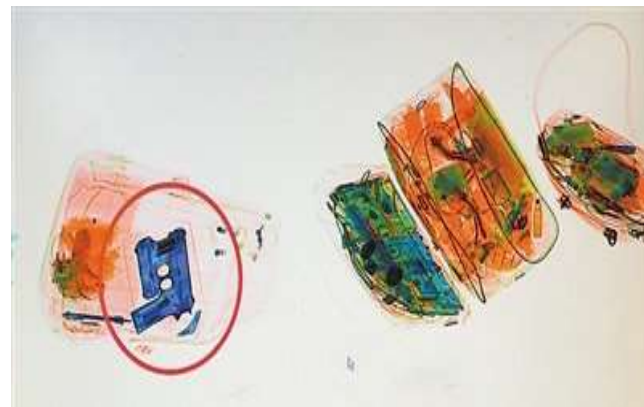
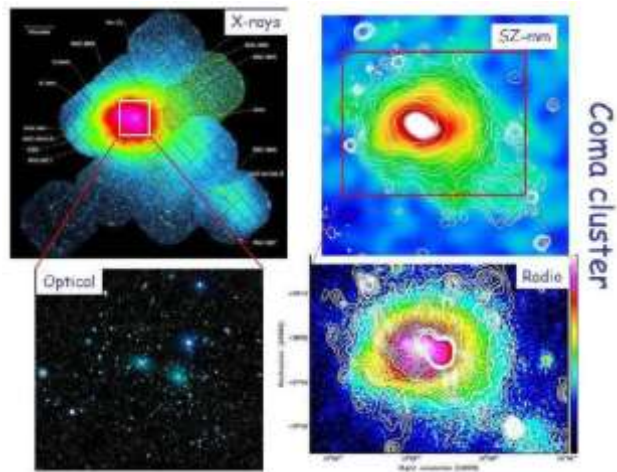
$$h\nu = h\nu_0 - E_k = 0.51 - 0.15 = 0.36 \text{ MeV}$$

$$= 5.76 \times 10^{-14} \text{ J}$$

散射光子的波长

$$\lambda = \frac{c}{\nu} = 3.45 \times 10^{-12} \text{ m}$$

康普顿散射线成像



三、康普顿散射实验的意义

1、支持了“光量子”概念，进一步证实了

$$\varepsilon = h\nu$$

2、首次实验证实了爱因斯坦提出的“光量子具有动量”的假设

$$p = \varepsilon/c = h\nu/c = h/\lambda$$

3、证实了在微观领域的单个碰撞事件中，
动量和能量守恒定律仍然是成立的。

康普顿获得1927年诺贝尔物理学奖。

四、光的波粒二象性

$$\begin{array}{ll} \text{波动性特征:} & \nu \quad \lambda \\ \text{粒子性特征:} & m \quad \varepsilon \quad p \end{array} \quad \left\{ \begin{array}{l} \varepsilon = h\nu \\ p = \frac{h}{\lambda} \\ m = \frac{h\nu}{c^2} \end{array} \right.$$

波动性：突出表现在传播过程中（干涉、衍射）

粒子性：突出表现在与物质相互作用中
(光电效应、康普顿效应)

光作为电磁波是弥散在空间而连续的
光作为粒子在空间中是集中而分立的

} 统一于**概率波**



作业:

P211: 一.3, 二.3,5 三.3