

第十三章 量子物理



回顾历史

两朵小乌云

- 迈克耳逊——莫雷实验
- 黑体辐射实验



狭义相对论

量子论

近代物理学的两块理论基石



第五次索尔维会议与会者合影(1927年)

发展线索和代表人物

普朗克(1858): 德国, 1900年提出量子概念(41岁) [1918](#)

爱因斯坦(1879): 美籍德国人; 1905年提出光量子假说(26岁) [1921](#)

卢瑟福(1871): 英国1911年提出原子核模型(40岁) [1908](#)

玻尔(1885): 丹麦, 1913年提出原子结构假说(28岁) [1922](#)

康普顿(1892): 美国1923年康普顿效应(31岁) [1927](#)



德布罗意(1892): 法国, 1924年提出物质波(31岁) [1829](#)

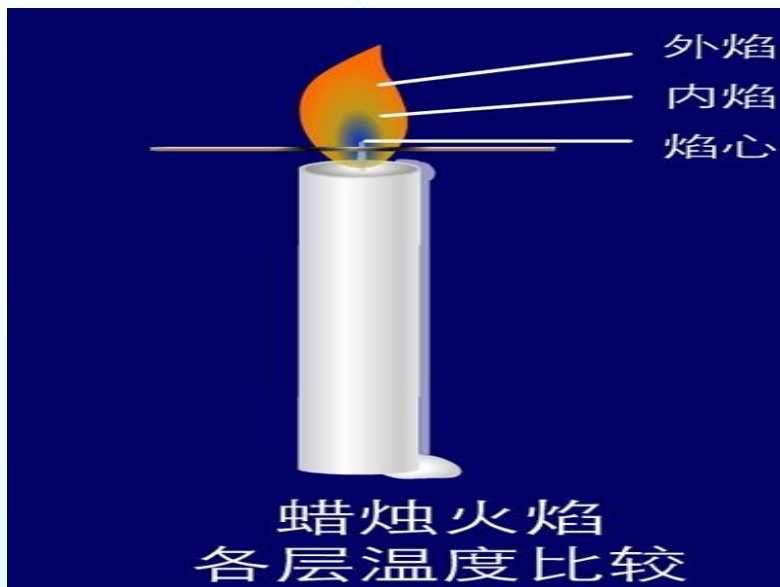
海森堡(1901): 德国, 1925年提出矩阵力学(24岁) [1932](#)

薛定谔(1887): 奥地利, 1926年提出波动方程(39岁) [1933](#)

波恩(1882): 德国, 1926年波函数的物理诠释(44岁) [1954](#)

泡利(1900): 瑞士籍奥地利, 1928年不相容原理(26岁) [1945](#)

狄拉克(1902): 英国, 1928年相对论量子力学(26岁) [1933](#)



问题： 辐射能量与什么因素有关呢？

一、热辐射现象

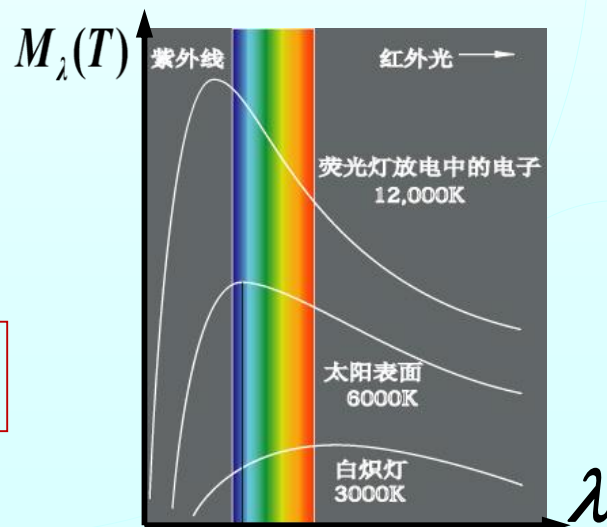
由于物体中的分子、原子受到激发而发射电磁波的现象称为**热辐射**。

固体或液体，在任何温度下都在发射各种波长的电磁波。

辐出度 $M(T)$ ：单位面积上发射的辐射总能量

$$M(T) = \int_0^{\infty} M_{\lambda}(T) d\lambda$$

温度越高，辐出度越大。



炎炎夏日穿什么凉快呢？



一个好的吸收体一定也是一个好的辐射体

能**全部吸收**任何波长的热辐射
而不反射和透射的一类物体

黑煤烟

约99%

能**全部吸收**任何波长的热辐射
而不反射和透射的一类物体

黑煤烟

约99%

黑体模型



① 斯特藩—玻尔兹曼定律

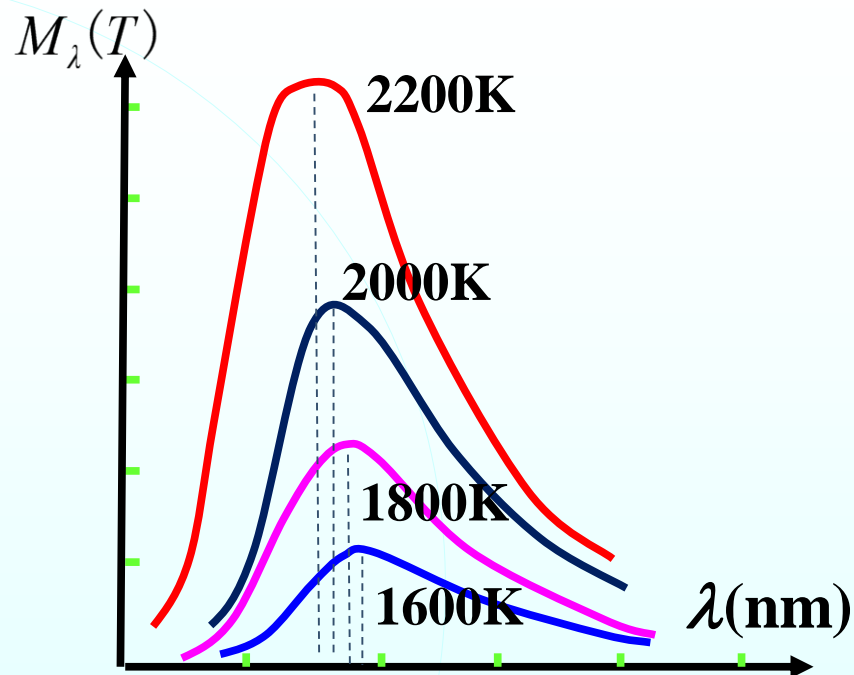
$$M(T) = \sigma T^4$$

$$\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$$

② 维恩位移定律

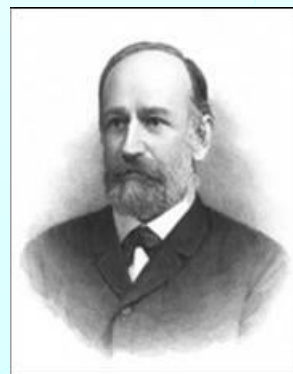
$$T\lambda_m = b$$

$$b = 2.897 \times 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{K}$$

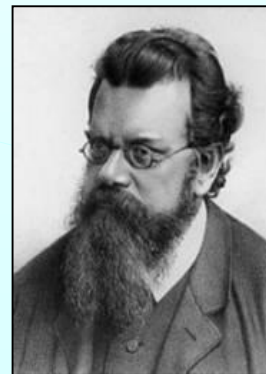


解释问题:

- ✓ 辐射能量与温度有关;
- ✓ 辐射按波长的分布主要取决于物体温度, 同一温度下的辐射能量光谱分布不均匀。



Josef Stefan
1835—1893



Ludwig Boltzmann
1844—1906

四、理论解释

1. 维恩公式 (1896年)

$$M_{\lambda}(T) = C_2 \lambda^{-5} e^{-\frac{C_3}{\lambda T}} \quad \text{在长波方面与实验数据不符}$$

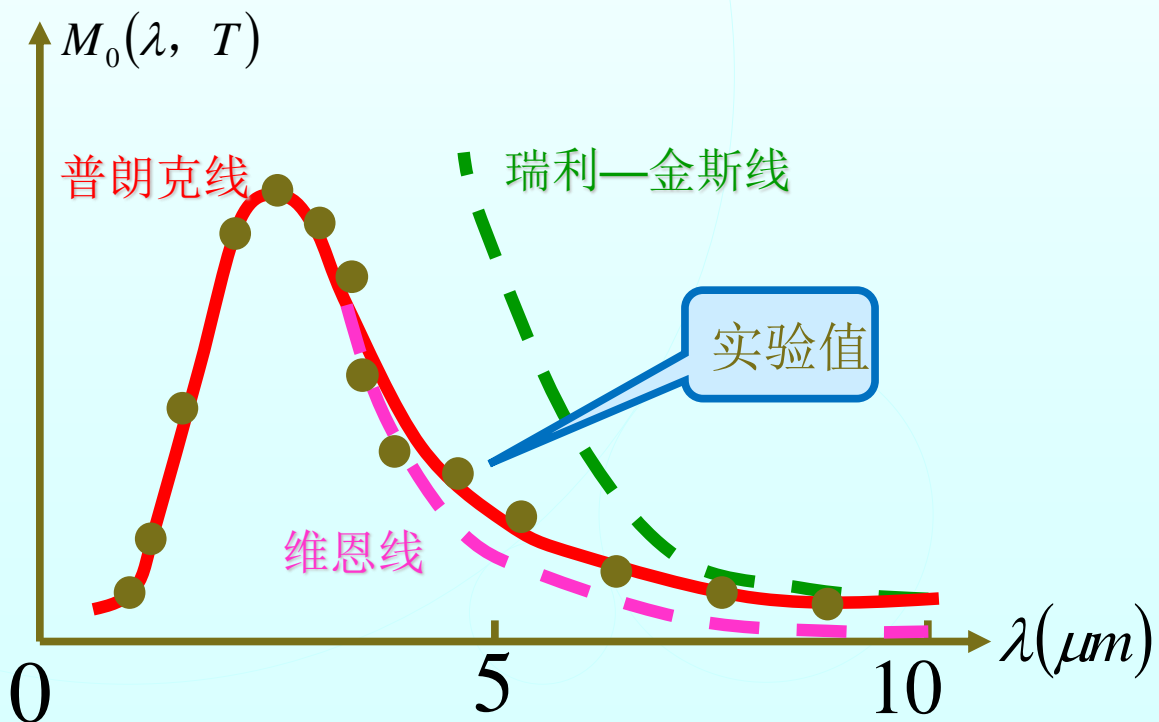
2. 瑞利—金斯公式 (1900年)

紫外灾难

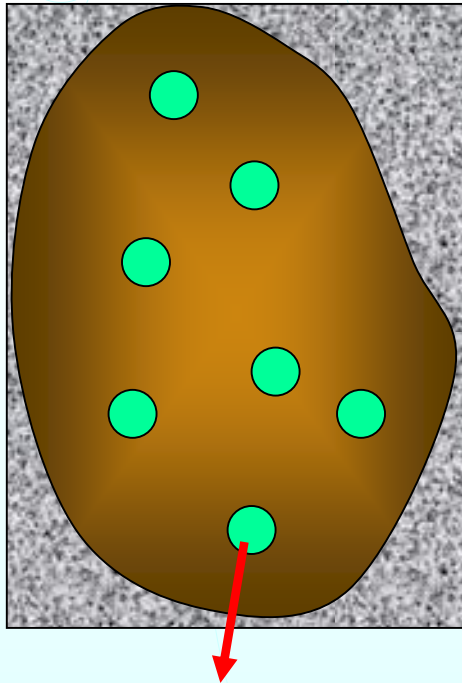
$$M_{\lambda}(T) = C_1 \lambda^{-4} T \quad \text{在短波区域明显与实验不符}$$

3. 普朗克公式:

$$M_{\lambda}(T) = 2\pi hc^2 \lambda^{-5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1}$$



4. 普朗克解释



谐振子

经典理论：振子辐射电磁波能量是连续的

普朗克：

谐振子所具有的能量不是任意的、连续的，而是某一最小能量 ε 的整数倍.

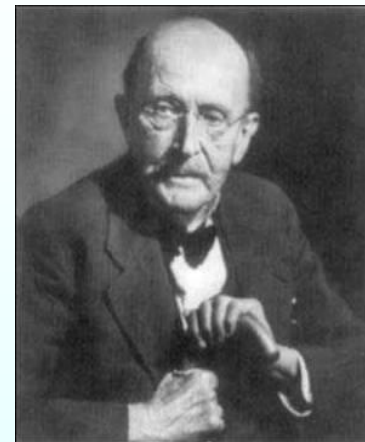
$$\varepsilon_n = nh\nu$$

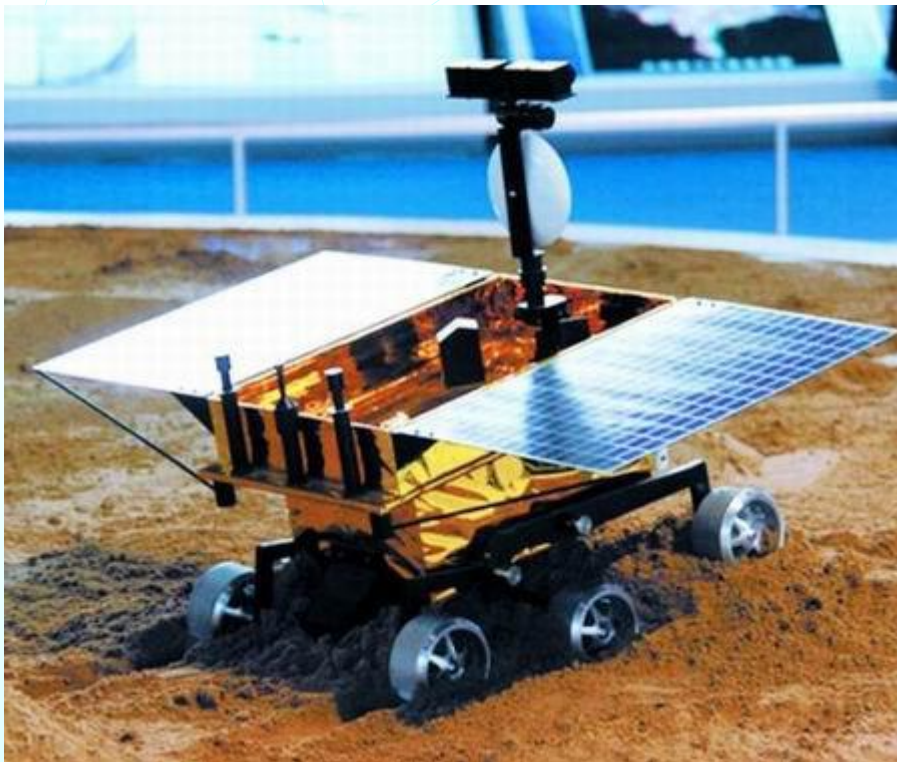
$$h = 6.63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$$

$$n = 1, 2, 3, \dots \text{ 量子数}$$

五、普朗克假设的意义

1. 普朗克假说圆满地解释了黑体辐射问题;
2. 首次提出微观粒子的能量是量子化的, 打破了经典物理学中能量连续的观念;
3. 事实上正是这一理论导致了量子力学的诞生, 普朗克也成为了量子力学的开山鼻祖, 1918年因此获得诺贝尔奖。

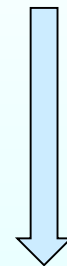




玉兔号月球车

“玉兔号”月球车超长服役7个月

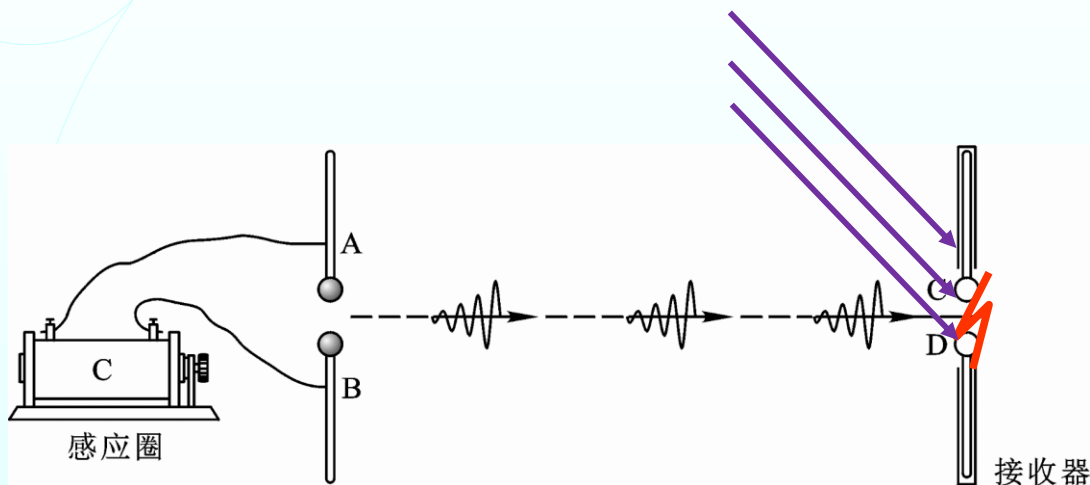
太阳能电池将
太阳能转化为电能



光电效应

一、光电效应的发现

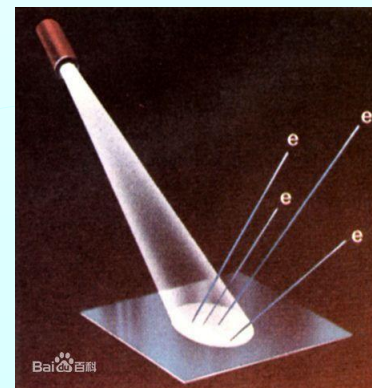
1887年赫兹(Hertz)首先发现负电极在紫外光的照射下更容易放电



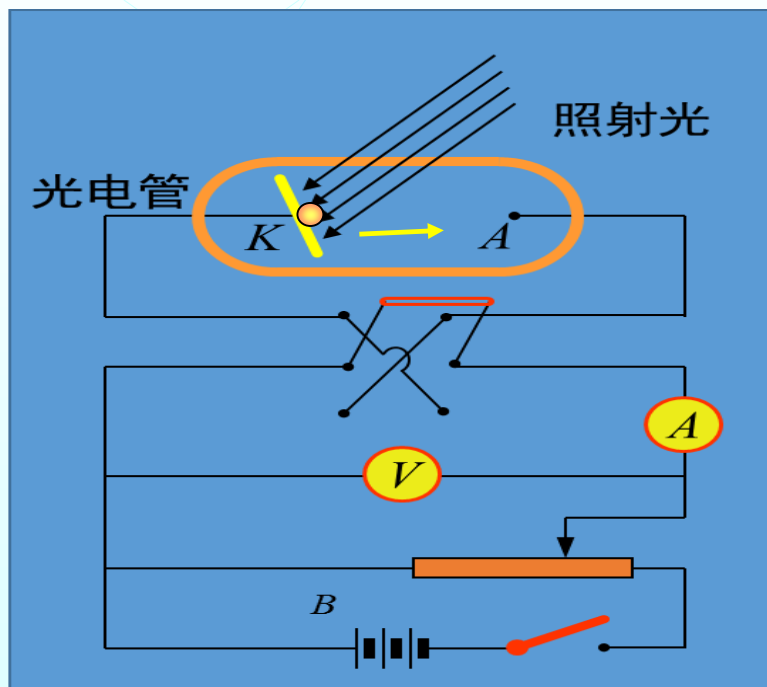
1899年, J.J.汤姆孙实验证明打出来电子流.

1900年勒纳德(P. Lenard)指出:

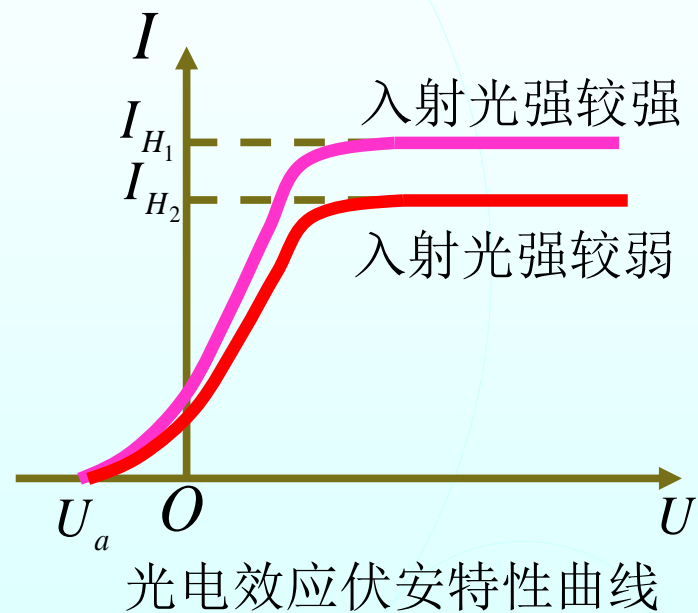
光电效应是金属中电子吸收入射光的能量, 从表面逸出的现象, 称为“光电效应”, 逸出的电子称为光电子。



1. 实验装置

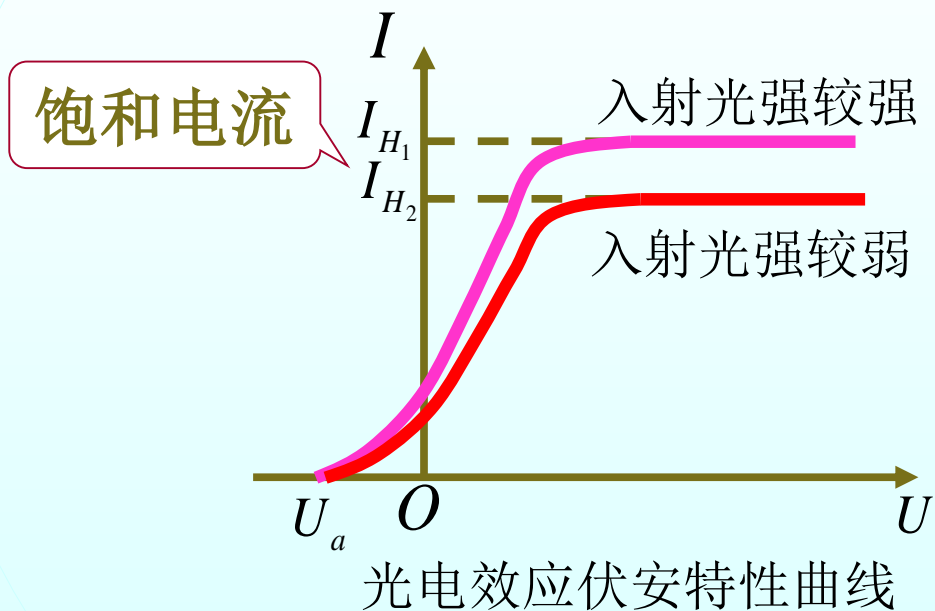


2. 实验曲线



3、实验规律

(1) **饱和电流**——在一定强度的单色光照射下,光电流随电势差的增加而增大,但当电势差增加到一定量值时,光电流达饱和值 I_H , 如果增加光的强度, 相应的 I_H 也增大。



规律1: 单位时间内, 金属表面逸出的电子数 N 与入射光强度 I 成正比。

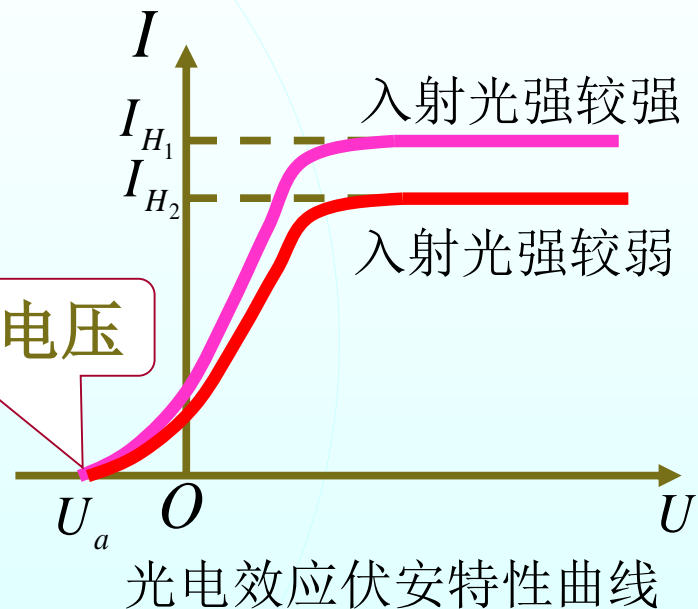
(2) 遏止电势差：光电子刚好不能到达A极时所加的反向电压的绝对值 U_a

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

实验表明：

遏止电势差与光强度无关

反向截止电压



规律2：光电子从金属表面逸出时具有一定的初动能，最大初动能与入射光强度 I 无关。

(3) 遏止频率 (又称红限)

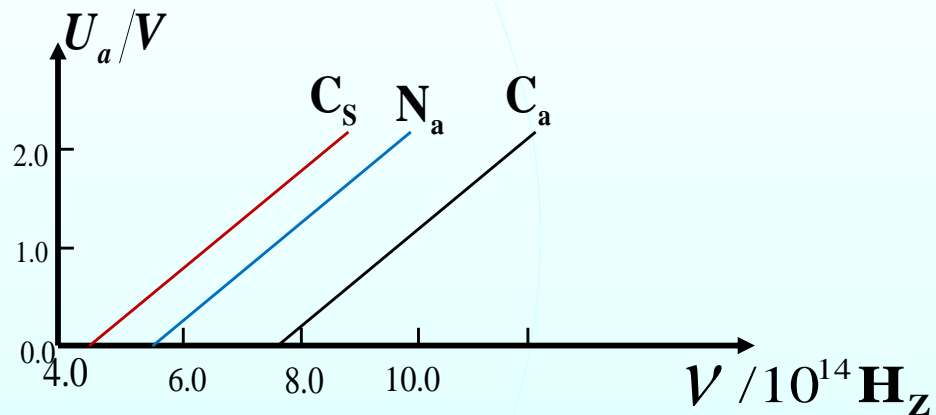
实验表明：遏止电势差 U_a 和入射光的频率之间具有线性关系，与入射光强度无关。

$$U_a = K\nu - U_0$$

K : 与金属材料无关

U_0 : 与金属材料有关

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



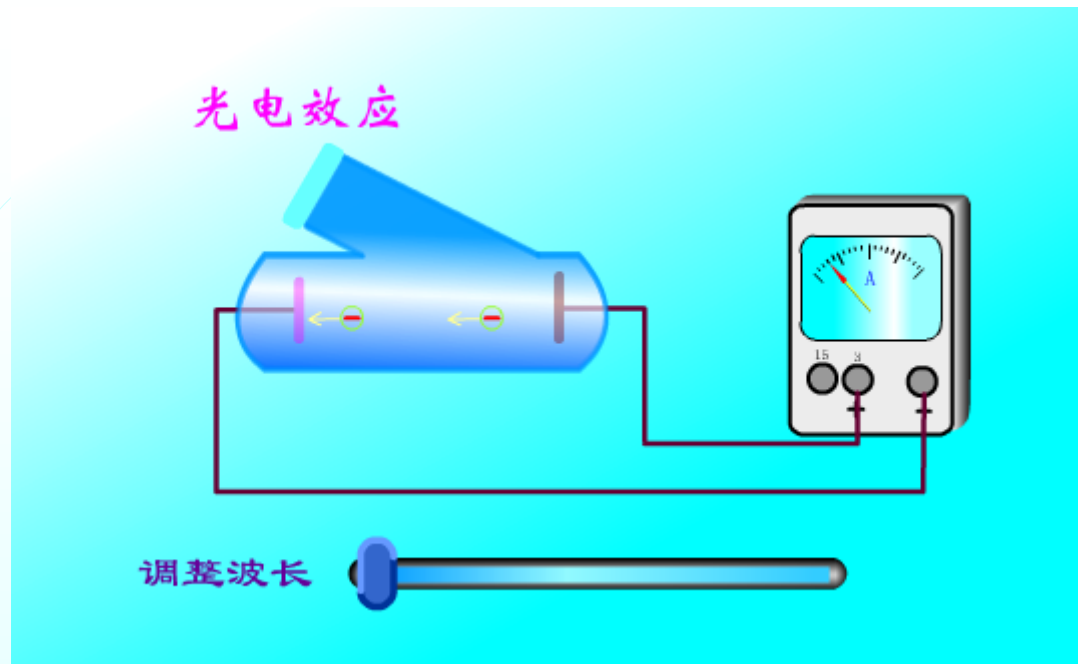
遏止电势差与频率的关系

$$\nu \geq \frac{U_0}{K}$$

$$\nu_0 = \frac{U_0}{K}$$

遏止频率

$$\nu_0 = \frac{U_0}{K}$$

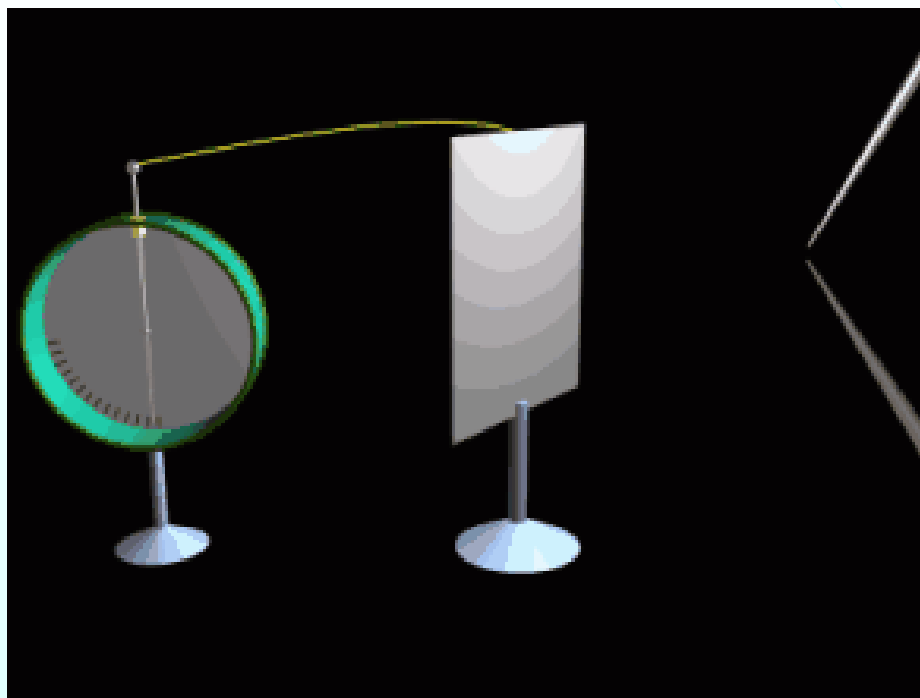


当入射频率 $\nu \geq \nu_0$ 时，任何光强均产生光电效应
 $\nu < \nu_0$ 时，光强再大也无光电效应

一般 $\nu_0 > 4.0 \times 10^{14} \text{ Hz}$ ，且与材料有关。

规律3：光电子最大初动能随入射光频率线性增加，每一种金属光电效应都存在一个红限频率。

(4) 弛豫时间



规律4：光电效应具有瞬时性, 光电子发射的延迟时间 $\Delta t < 10^{-9}$ s, 与光强 I 无关。

光的波动说的缺陷

- ❑ 按照光的波动说, 光电子的初动能取决于入射光强, 和光的频率无关;
- ❑ 无法解释红限的存在;
- ❑ 无法解释光电效应的产生几乎无须时间的积累。

三、爱因斯坦光子理论

1. 光子假说

光在空间传播时，也具有粒子性，想象一束光是一束以 c 运动的粒子流，这些粒子称为光量子，也称光子，它的能量与电磁波的频率 ν 有关，大小为：

$$\varepsilon = h\nu$$

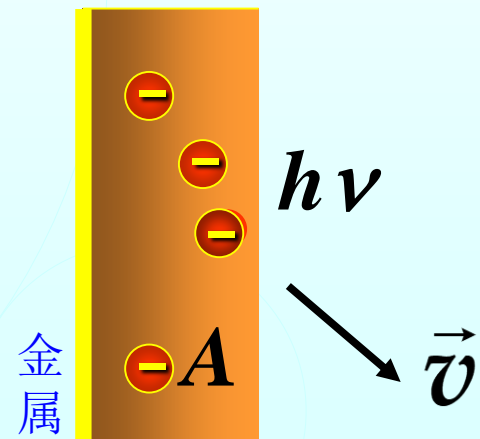
2. 爱因斯坦光电效应方程

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

光电效应方程

最大初动能

逸出功



3. 解释光电效应

(1) 饱和光电流与光强成正比

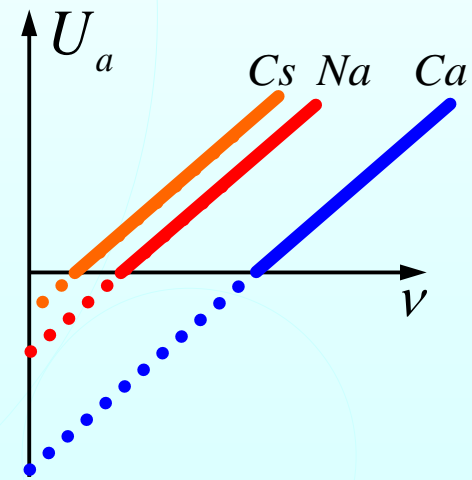
光强: $I = Nh\nu$

$$\Rightarrow I \uparrow \rightarrow N \uparrow \quad I_H \uparrow = Ne$$

(2) 光电子的遏止电势差与光的频率成正比, 与光强无关.

$$\left. \begin{aligned} h\nu &= \frac{1}{2}mv_m^2 + A \\ eU_a &= \frac{1}{2}mv_m^2 \end{aligned} \right\} \Rightarrow eU_a = h\nu - A$$

$$\Rightarrow \left. \begin{aligned} U_a &= \frac{h}{e}\nu - \frac{A}{e} \\ U_a &= K\nu - U_0 \end{aligned} \right\} \Rightarrow \begin{aligned} \text{截距: } U_0 &= \frac{A}{e} \\ \text{斜率: } K &= \frac{h}{e} \end{aligned}$$



(3) 红限频率的存在

$$\frac{1}{2}mv_m^2 = h\nu - A \quad \geq 0 \quad \Rightarrow \quad h\nu \geq A$$

$$\Rightarrow \quad \nu_0 = \frac{A}{h}$$

材料不同， A 不同，因而 ν_0 与材料有关

(4) 吸收光子是一次性的，无需能量累积过程。

✓ 证明能量量子假设的正确性

1914—1916年，密立根光电效应实验

1923年，康普顿效应

4、光电效应的应用

- 光电管



- 光电倍增管



光信号 → 电信号

- 红外变像管

红外辐射图像 → 可见光图像

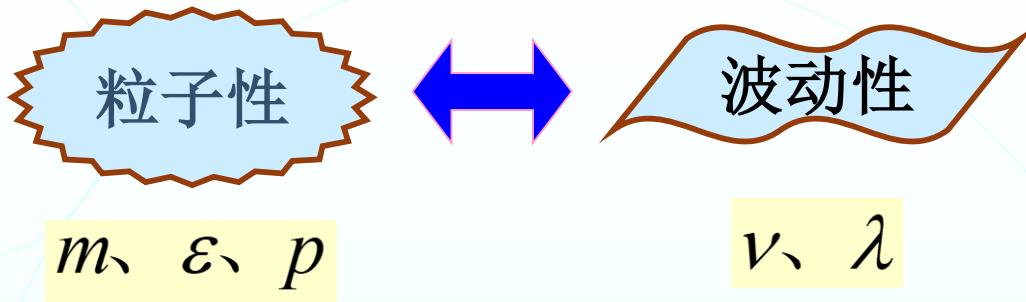


- 像增强器

微弱光学图像 → 高亮度可见光学图像



四、光的波粒二象性



光具有波粒二象性

光子能量: $\varepsilon = h\nu$

光子动量: $p = \frac{\varepsilon}{c} = \frac{h\nu}{c} \Rightarrow p = \frac{h}{\lambda}$

光子质量: $m = \frac{\varepsilon}{c^2} = \frac{h\nu}{c^2} \quad m_o = 0$

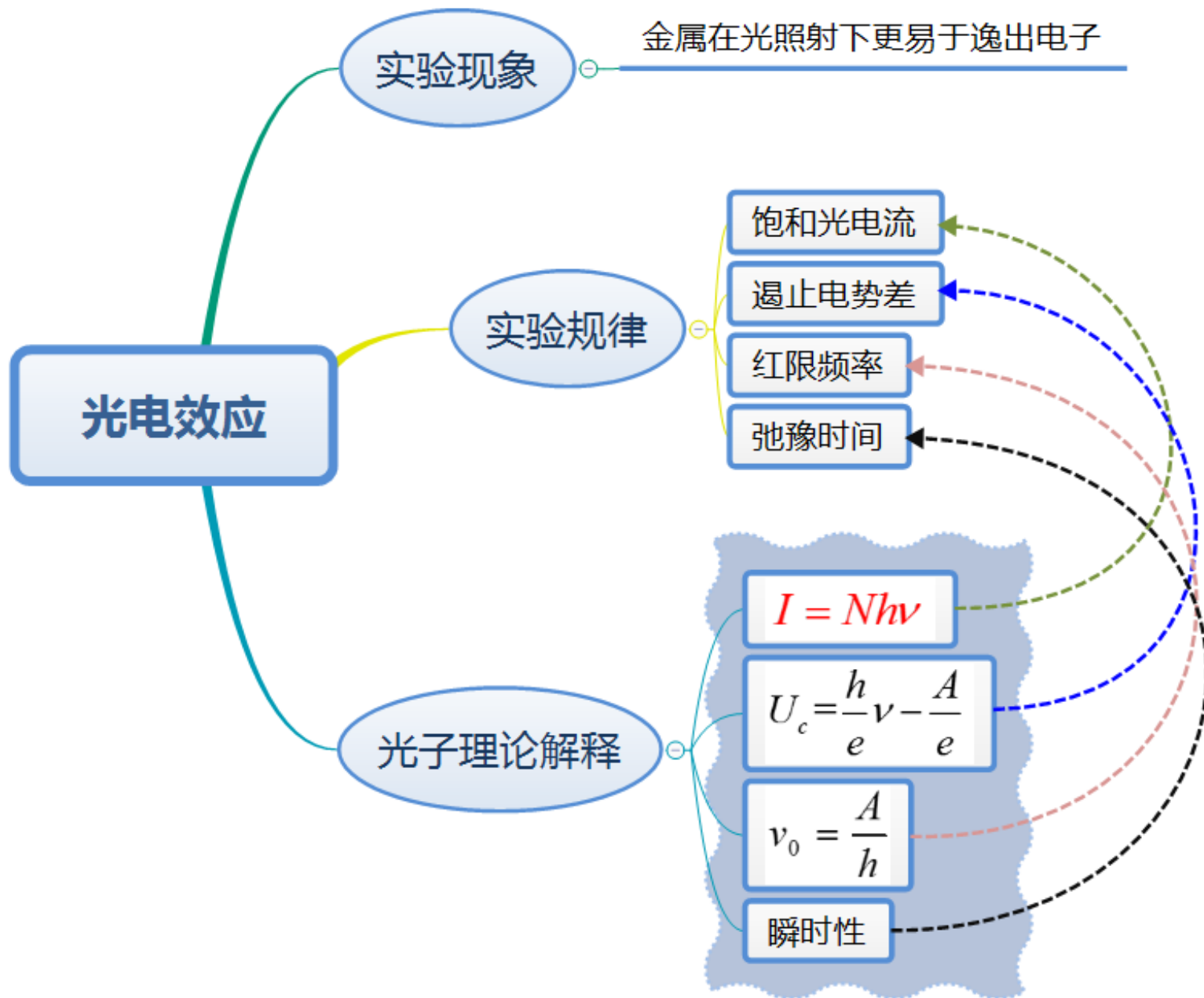
例：钾的光电效应红限为 $\lambda_0 = 6.2 \times 10^{-7} \text{m}$ ，求（1）电子的逸出功；（2）在 $\lambda = 3.0 \times 10^{-7} \text{m}$ 的紫外线照射下，遏止电势差为多少？（3）电子的初速度为多少？

解： $A = h\nu_0 = \frac{hc}{\lambda} = \frac{6.63 \times 10^{-34} \times 3 \times 10^8}{6.2 \times 10^{-7}} = 3.21 \times 10^{-19} \text{J}$

$$h\nu = \frac{1}{2}mv^2 + A \qquad \frac{1}{2}mv_m^2 = eU_a$$

$$U_a = \frac{h\nu - A}{e} = \frac{hc}{e\lambda} - \frac{A}{e} = 2.14 \text{V}$$

$$v = \sqrt{\frac{2eU_a}{m}} = \sqrt{\frac{2 \times 1.6 \times 10^{-19} \times 2.14}{9.1 \times 10^{-31}}} = 8.67 \times 10^5 \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$$



当光照射到尺度远小于其波长的物体上，
光就会向各个方向散开，这种现象称为**光的散射**。

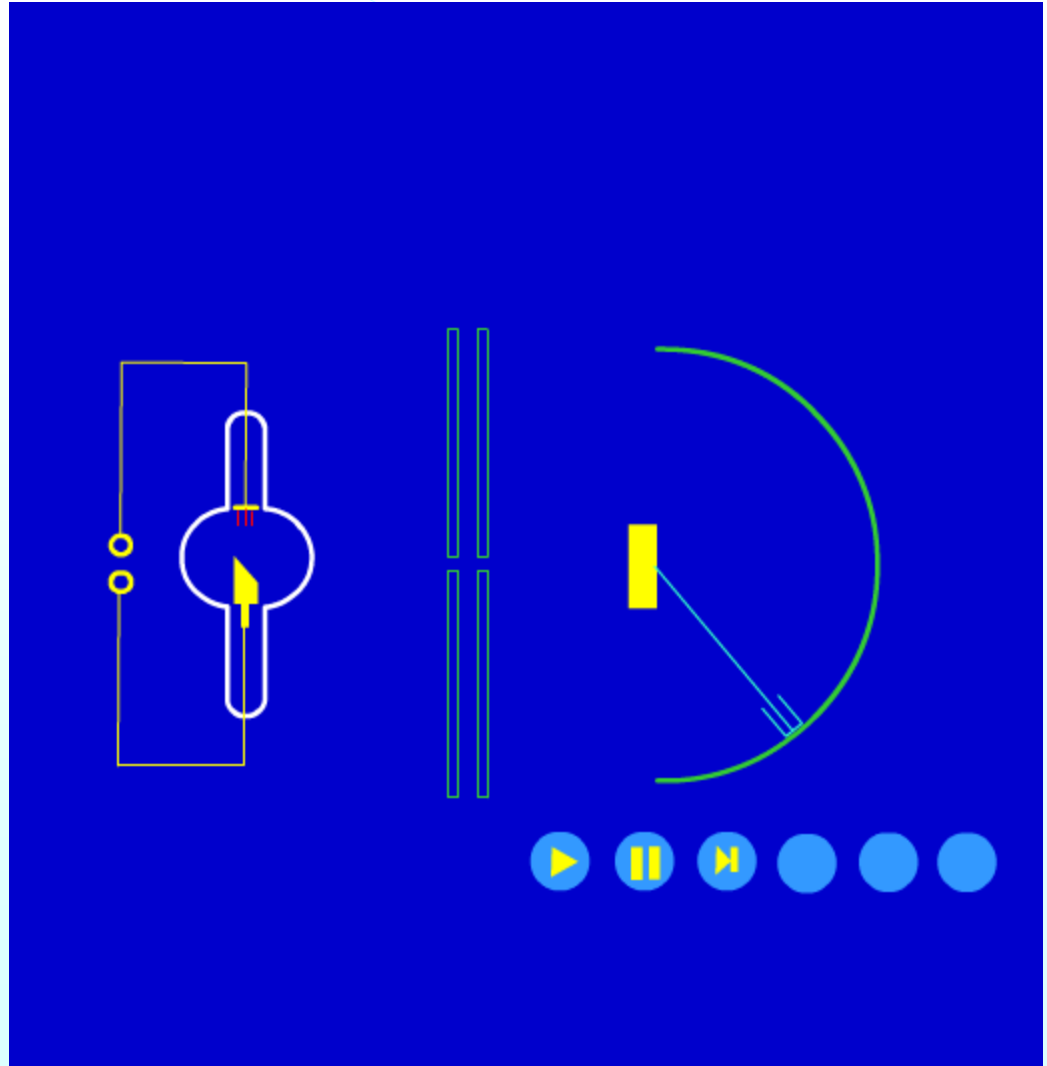


§ 13-3 康普顿效应

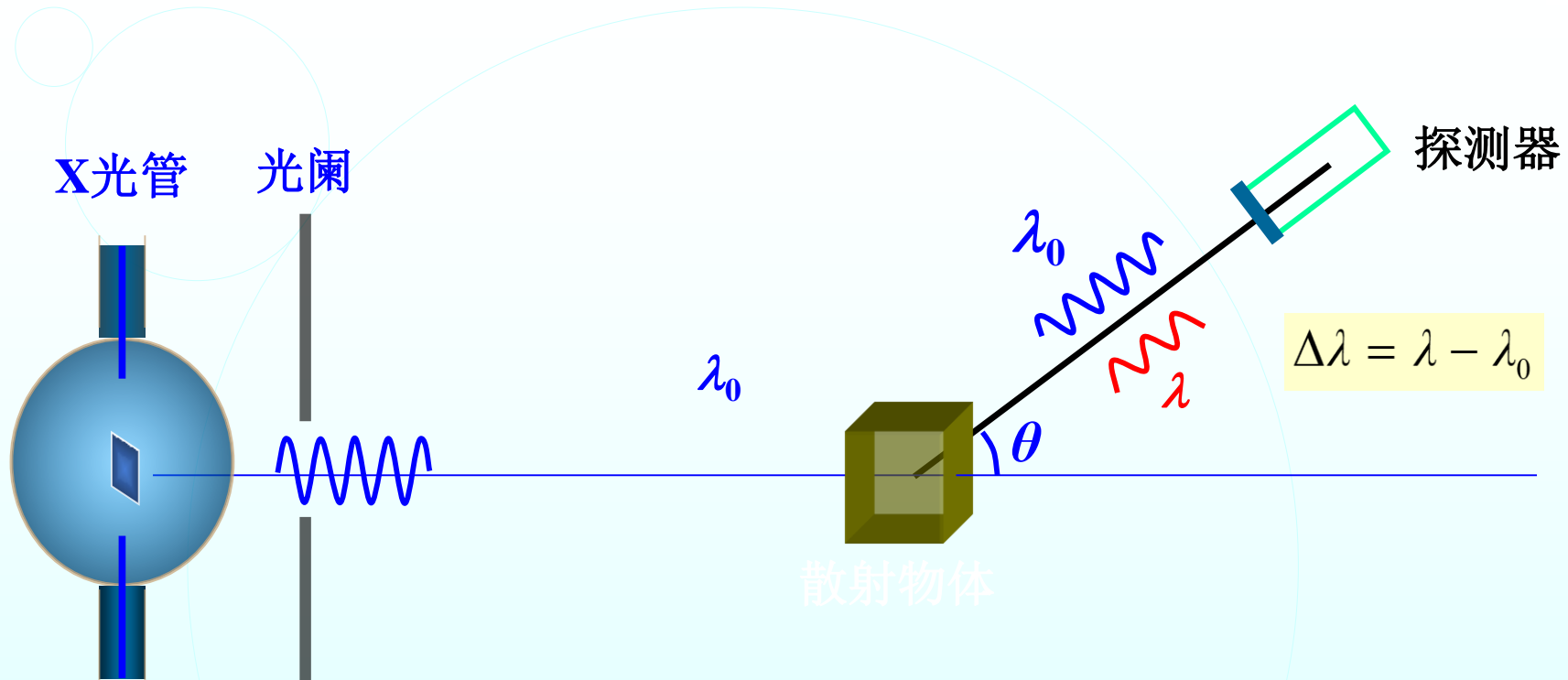


Arthur H. Compton
1892-1962

The Nobel Prize in Physics
1927

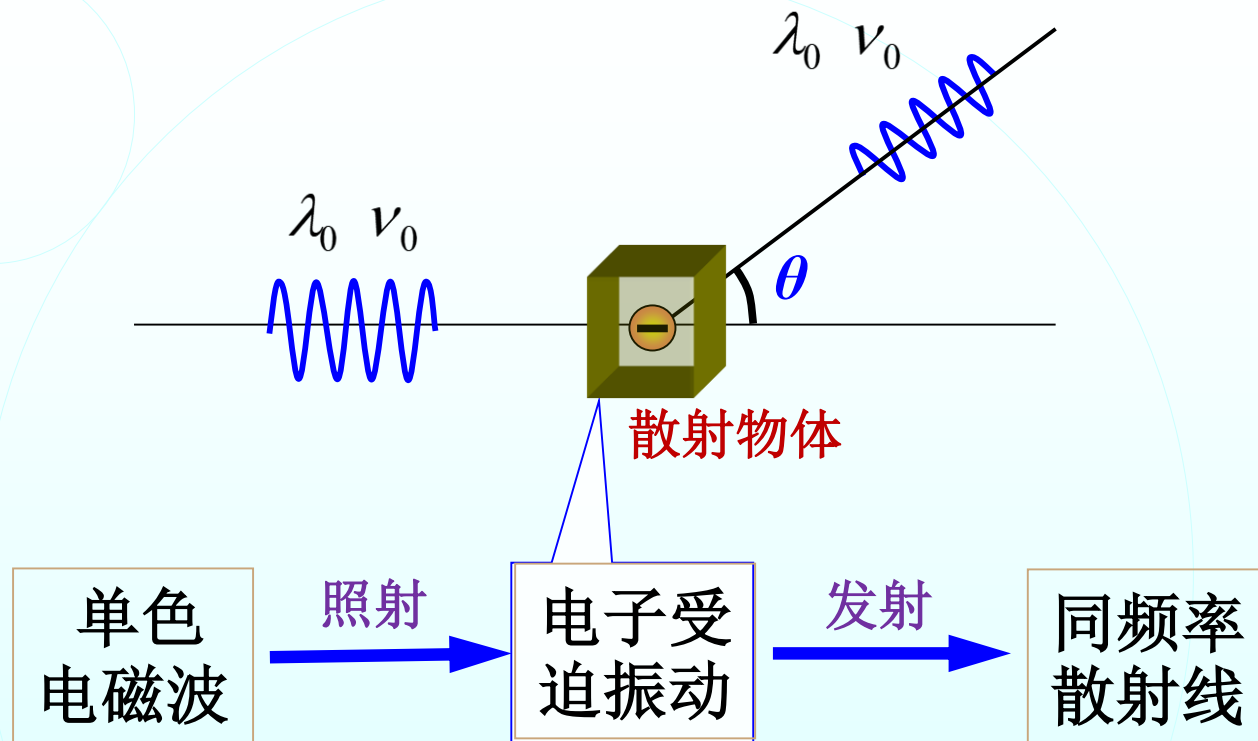


一、康普顿效应



散射光谱中除有波长 λ_0 的射线(瑞利散射)外,
还有 $\lambda > \lambda_0$ 的射线(康普顿散射).

1、经典物理的解释



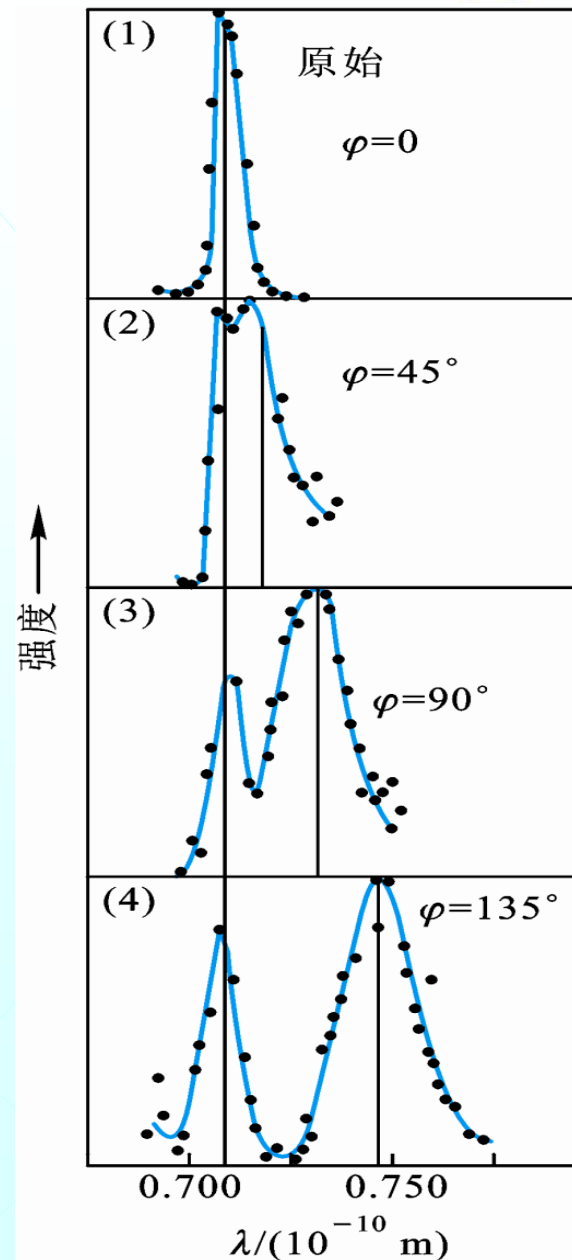
经典理论只能说明波长不变的散射，不能说明康普顿散射。

2、实验结果

(1) 同一散射物质，不同散射角

$\Delta\lambda$ 改变, I 改变

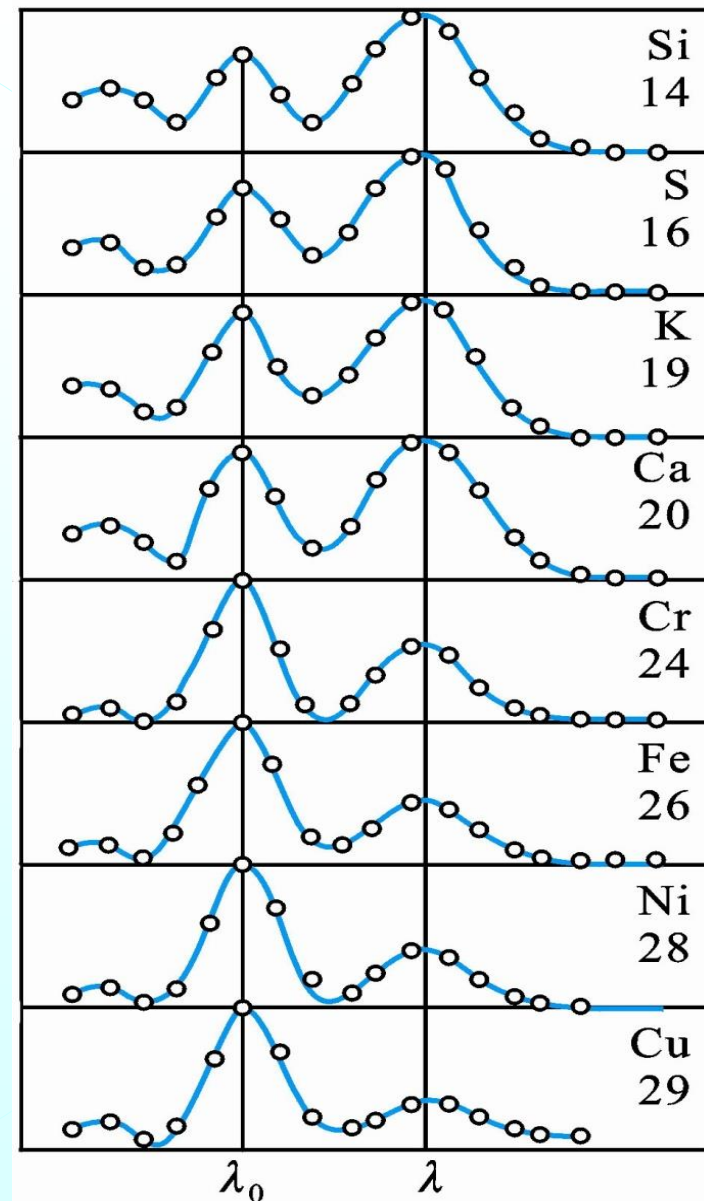
- 散射光除原波长 λ_0 外，还出现了波长大于 λ_0 的新的散射波长 λ ；
- 波长差 $\Delta\lambda$ 随散射角 θ 的增大而增大；
- 随散射角 θ 的增加，原谱线 λ_0 的强度降低，新谱线 λ 的强度增加。



(2) 不同元素，相同散射角

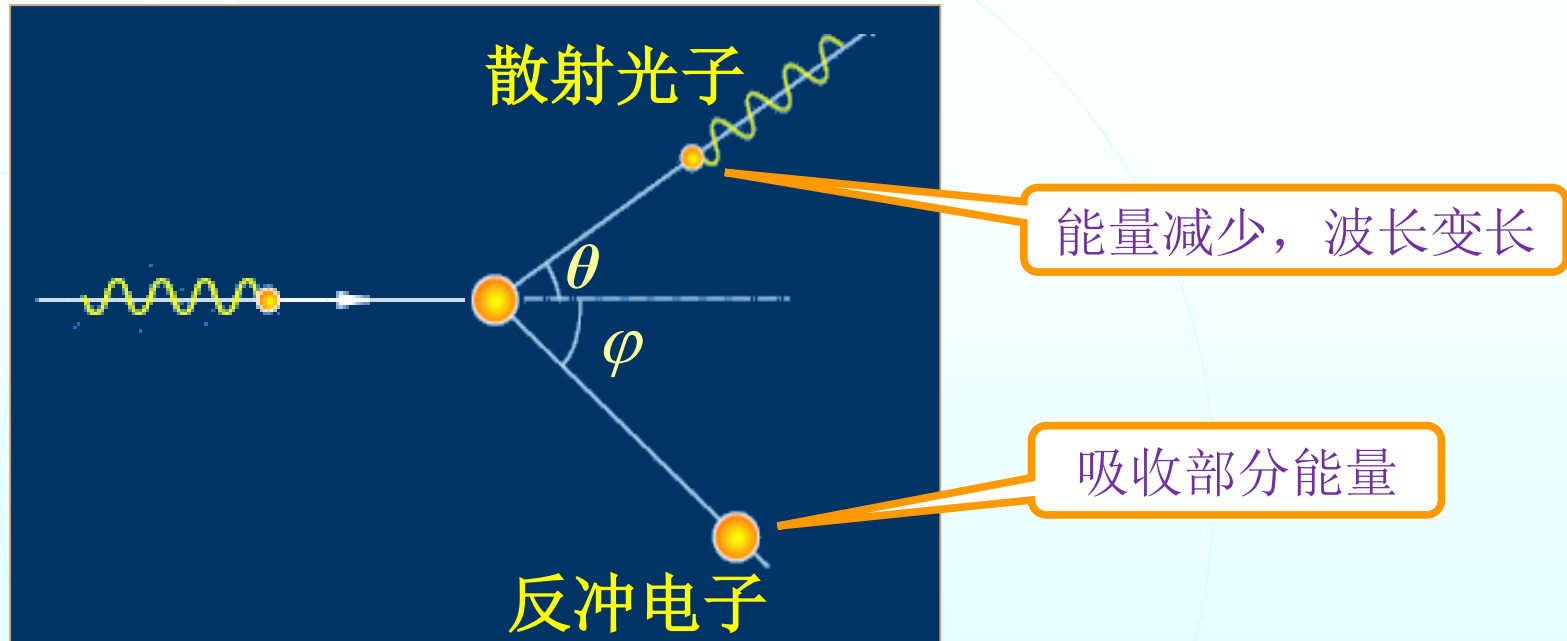
$\Delta\lambda$ 不变, I 改变

- θ 相同时，对不同的散射物质， $\Delta\lambda$ 都相同，与散射物质无关！
- 在原子序数小的物质中，康普顿散射较强。



二、康普顿效应的定性解释

1、光子和散射物中的一个自由电子（束缚很弱的电子）发生碰撞



2、光子和散射物中的束缚很紧的电子发生碰撞

散射光频率 = 入射光频率 波长不变

3、原子量小的轻原子中的电子一般束缚较弱

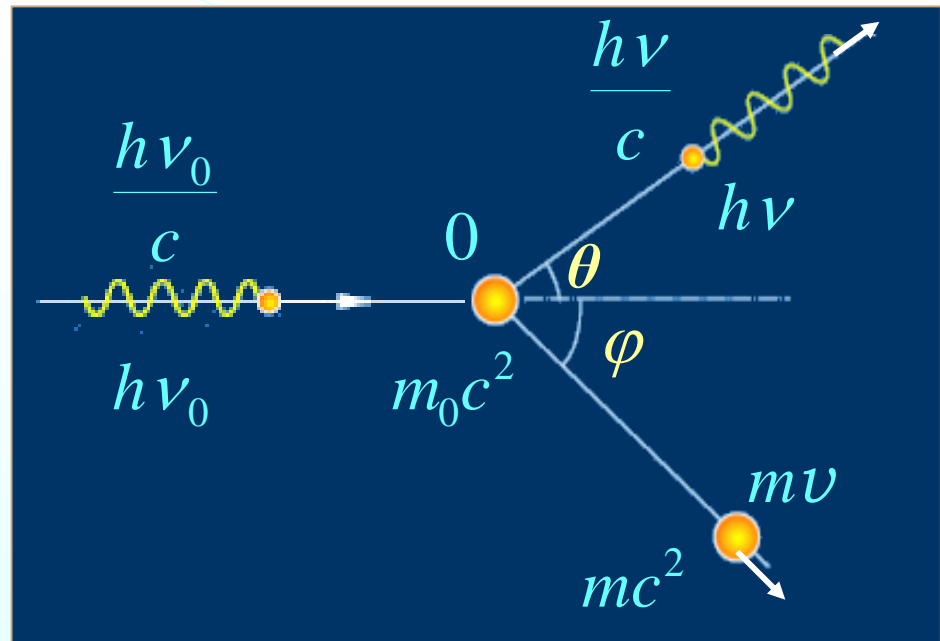
原子量大的重原子中的电子一般束缚较强

三、康普顿效应的定量解释

能量、动量守恒

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

$$\begin{cases} \frac{h\nu_0}{c} = \frac{h\nu}{c} \cos \theta + mv \cos \varphi \\ \frac{h\nu}{c} \sin \theta = mv \sin \varphi \end{cases}$$



波长改变量

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

康普顿波长

$$\lambda_c = \frac{h}{m_0c} = \frac{6.63 \times 10^{-34}}{9.11 \times 10^{-31} \times 3 \times 10^8} = 0.00243 (nm) = 2.43 \times 10^{-12} (m)$$

讨论:

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

(1) $\theta \uparrow$, $\Delta\lambda \uparrow$, 与散射物质无关.

$\theta = 0$ 时, $\Delta\lambda = 0$, λ_0 不变;

$\theta = \pi$ 时, $\Delta\lambda$ 最大, 与实验相符.

(2) 波长的改变量 $\Delta\lambda$ 与入射光的波长无关

(3) 经典: $\lambda = 10\text{cm}$ (微波), $\Delta\lambda/\lambda \approx 2.43 \times 10^{-11}m$

—— 观察不到康普顿效应

量子: $\lambda = 10^{-10}m$ (X射线), $\Delta\lambda/\lambda \approx 2.43 \times 10^{-2}m$

—— 能观察到康普顿效应

1、支持了“光量子”概念，进一步证实了光子理论。

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。

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

3、证实了在微观领域同样严格遵守动量守恒和能量守恒。