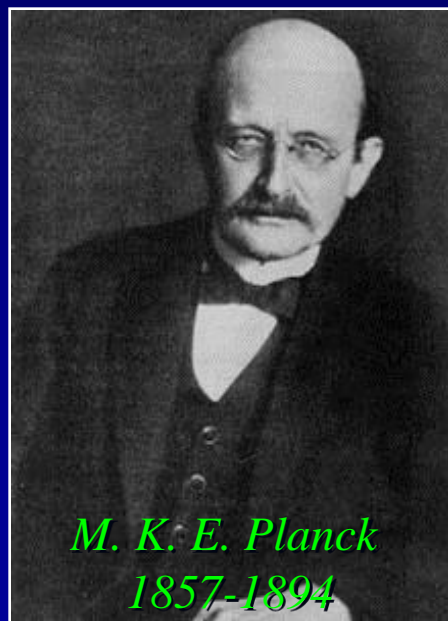


## § 15.2 光电效应 光的波粒二象性



## 背景

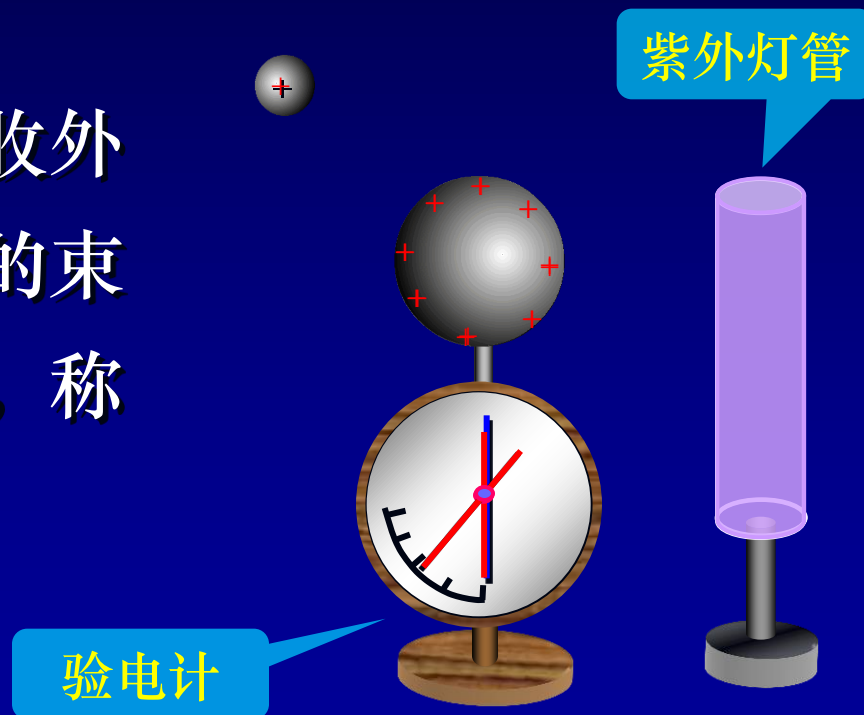
- ☺ 1887年赫兹发现了光电效应。
- ☺ 经典波动理论无法解释。
- ☺ 1900年普朗克提出关于能量辐射的量子化假设，1905年爱因斯坦提出光量子理论，并成功解释了光电效应，为此获得1921年诺贝尔物理学奖。



# 什么是光电效应？

▲原来带正电的锌球在紫外线照射下会失去其电荷。  
当光线照射在金属表面时，金属中有电子逸出，逸出的电子称为**光电子**。

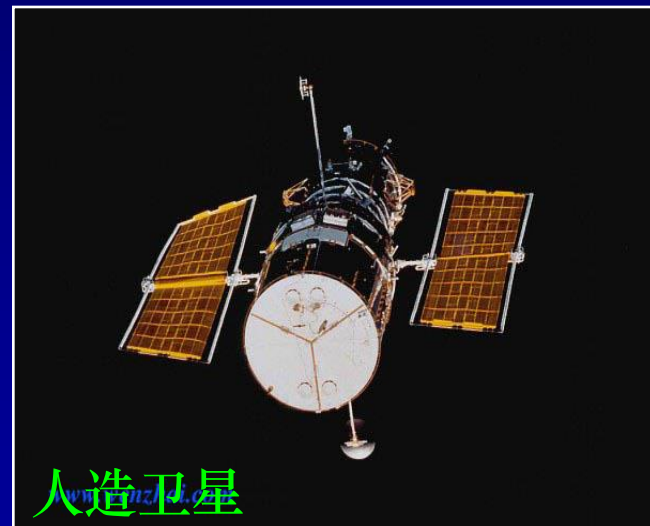
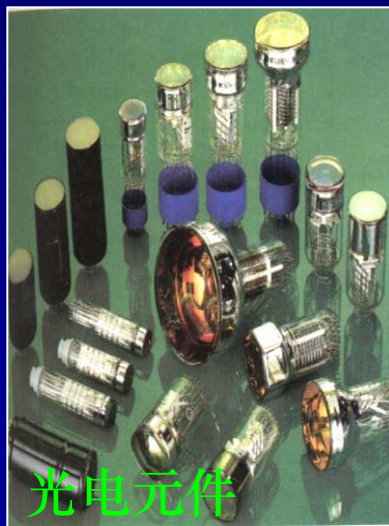
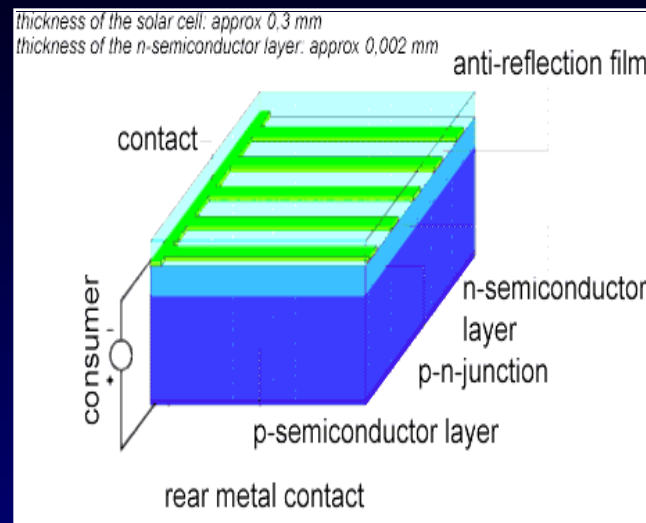
由于金属表面的电子吸收外界的光的能量，克服金属的束缚而逸出金属表面的现象，称为**外光电效应**。



## 内光电效应

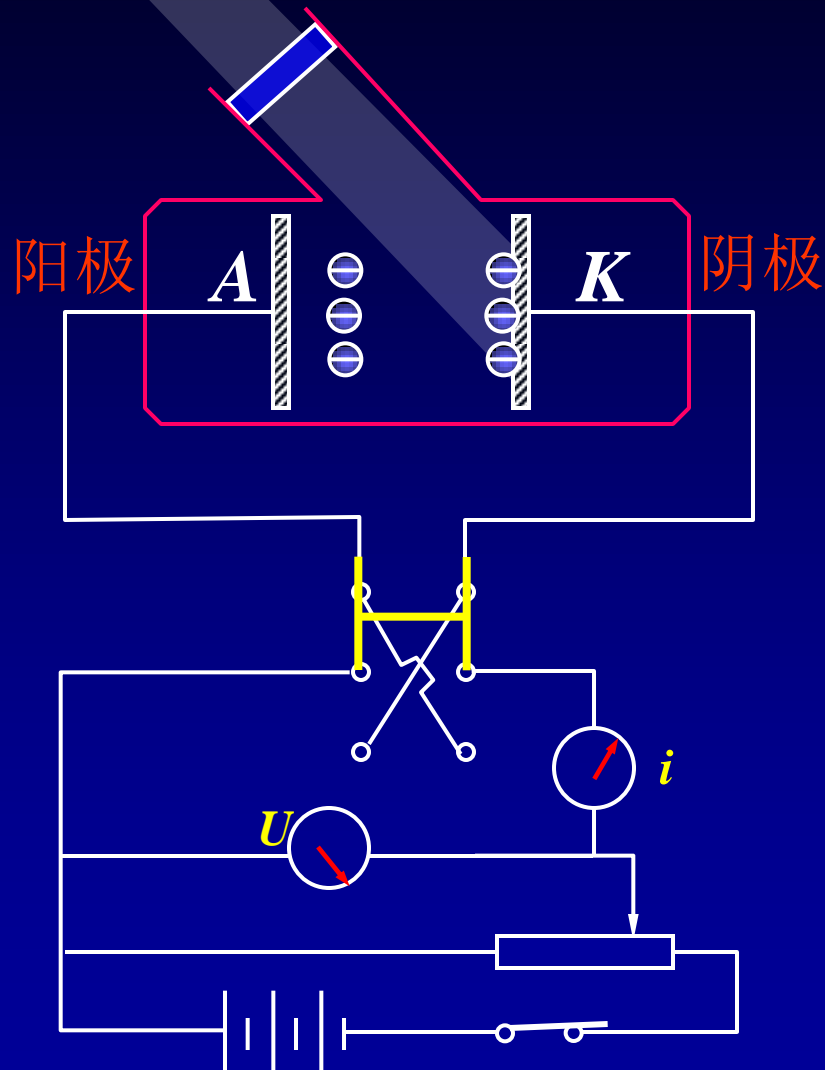
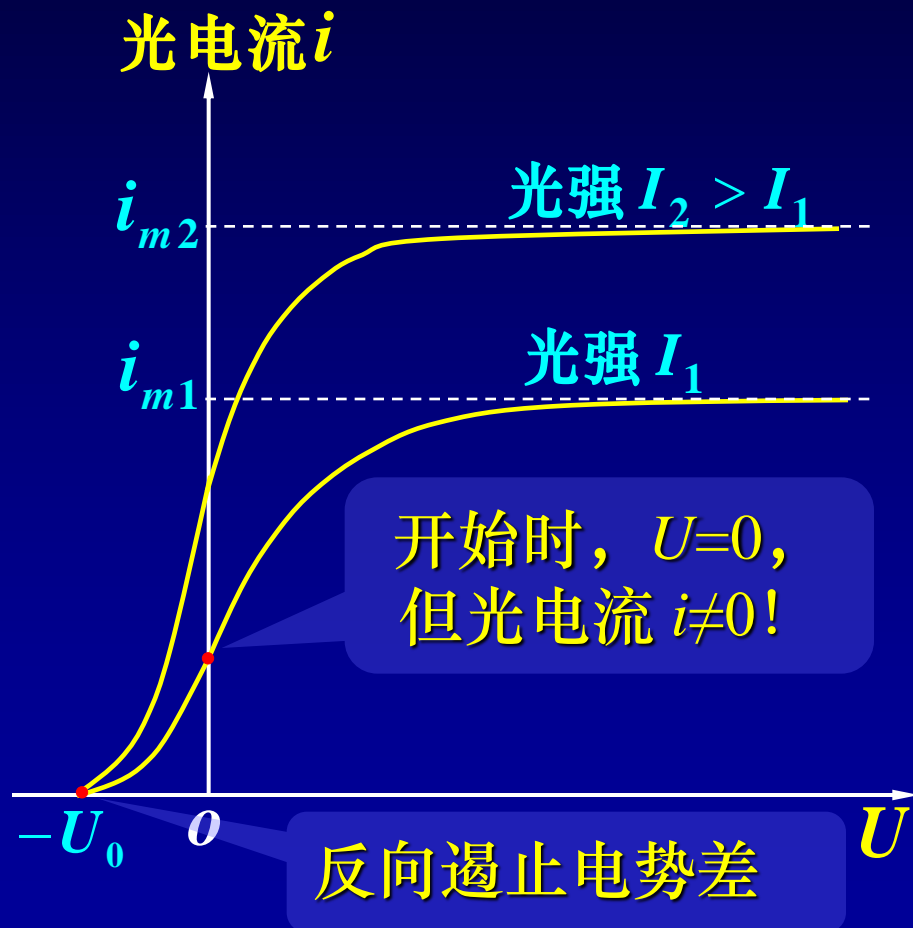
光的能量也可被导体或半导体内部的电子吸收，但仍留在其内部，使其导电性能增强的现象。

光电元器件的设计就是基于此原理。

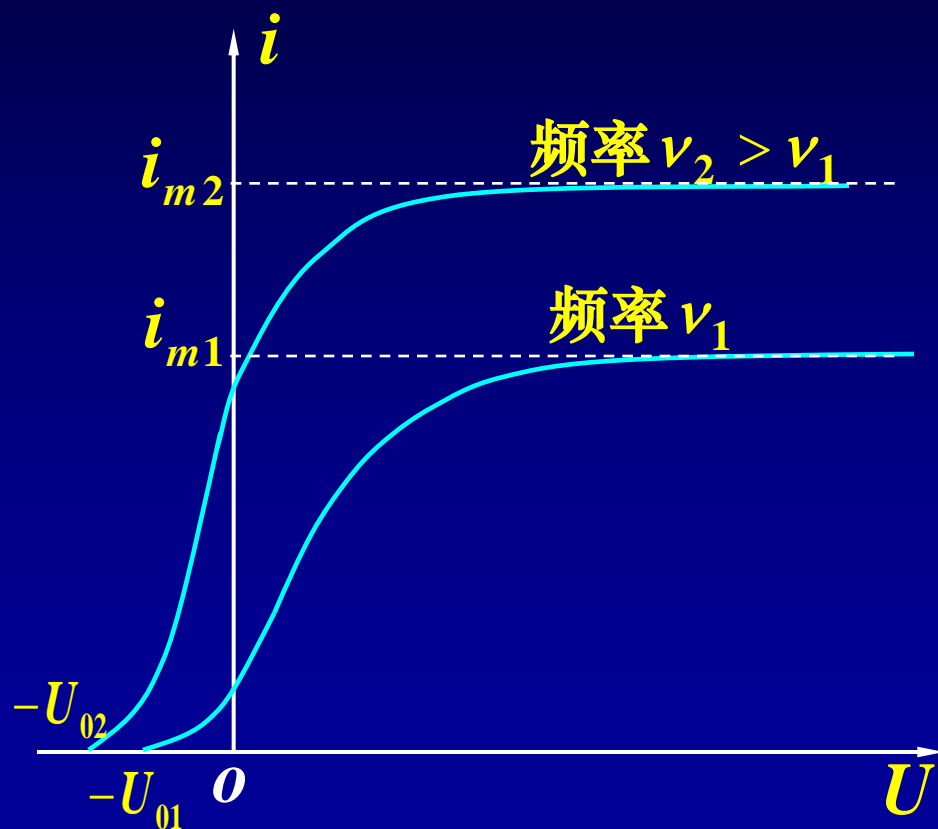


# 一、光电效应的实验

保持光的频率 $\nu$ 不变：

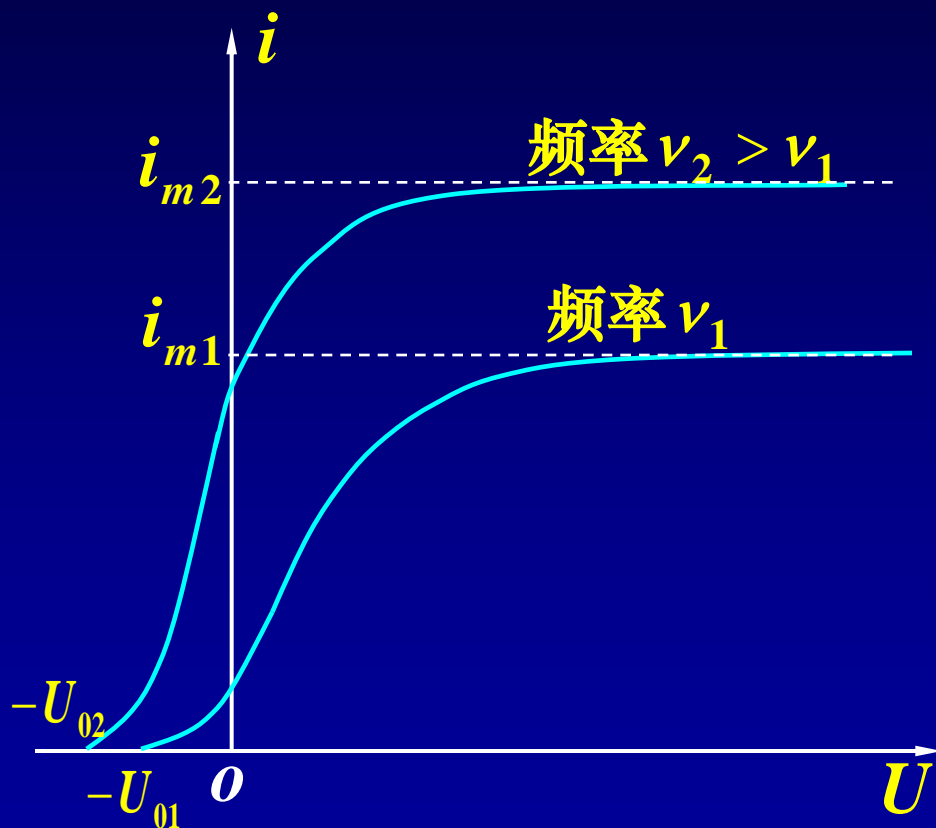


保持光强  $I$  不变：



1. 光强和频率一定时， $i$  随着  $U$  的增加而增加至一饱和值  $i_m$ 。
  2. 当  $\nu$  一定时， $i_m \propto I$ 。
  3. 光强一定时， $i_m$  随着  $\nu$  的增加而增加。
  4. 当  $\nu < \nu_0$  时，无论光强多大， $i = 0$ 。
- $\nu_0$  称为截止频率。

5. 当  $\nu > \nu_0$  时，光电子初动能  $E_{k0} \propto \nu$ ；反向遏止电势差  $U_0 \propto \nu$  与光强无关。
6. 当  $\nu > \nu_0$  时，光电效应是瞬时的，时间  $< 10^{-9}\text{s}$ 。



## 二、经典波动理论的缺憾

无法解释：

1. 光电子初态动能只与光频率 $\nu$ 成正比，而与入射光强无关。
2. 截止频率。
3. 光电效应的瞬时性。



### 三、光量子(光子)假设 爱因斯坦方程

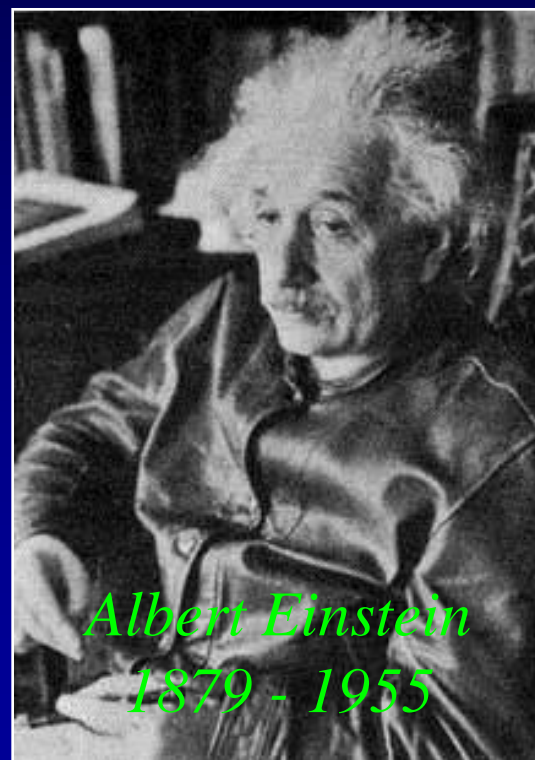
1. 频率为  $\nu$  的光是由大量能量为  $\varepsilon = h\nu$  光子组成的粒子流，这些光子的真空光速皆为  $c$ 。

$h = 6.63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$  (普朗克常数)

2. 若单位时间内通过单位面积的光子数为  $N$ ，则光强

$$I = N \cdot h\nu$$

$\nu$ 一定时， $I$ 大，则  $N$ 大。



## 爱因斯坦方程

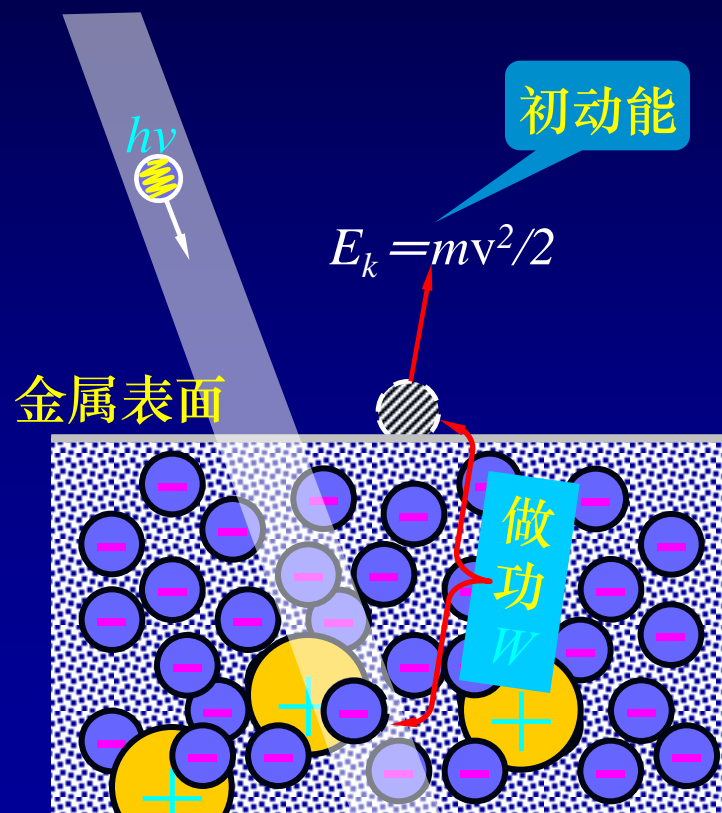
电子逸出时必须克服内部正离子对其吸引力做功，就大量电子而言，该值的统计平均值记作 $W$ ，称为电子的逸出功。

光子与电子是一对一相互作用且一次性完全被电子吸收！

由能量守恒得：

$$h\nu = \frac{1}{2}mv^2 + W$$

(爱因斯坦方程)



要使光电子能逃逸出金属表面，则必须使：

$$E_k = \frac{1}{2} m v^2 \geq 0 \quad \text{即：} \frac{1}{2} m v^2 = h \nu - W \geq 0$$

$$\nu \geq \frac{W}{h} \quad \text{令 } \nu_0 = \frac{W}{h} \text{ (称为截止频率，亦称红限)}$$

即：要使光电子能逃逸出金属表面，则必须使入射光的频率必须大于或等于截止频率，即  $\nu \geq \nu_0$ 。

很自然地解释了截止频率的实验现象！

$$\text{必须掌握：} \nu_0 = \frac{W}{h} \quad \text{及} \quad W = h \nu_0$$

**例** 铂的逸出功为6.3eV，求铂的截止频率 $\nu_0$ 。

**解：**  $\nu_0 = \frac{W}{h}$      **1eV = 1.6 × 10<sup>-19</sup> J**

$$\nu_0 = \frac{6.3 \times 1.6 \times 10^{-19}}{6.63 \times 10^{-34}} = 9.6 \times 10^{14} \text{ Hz}$$

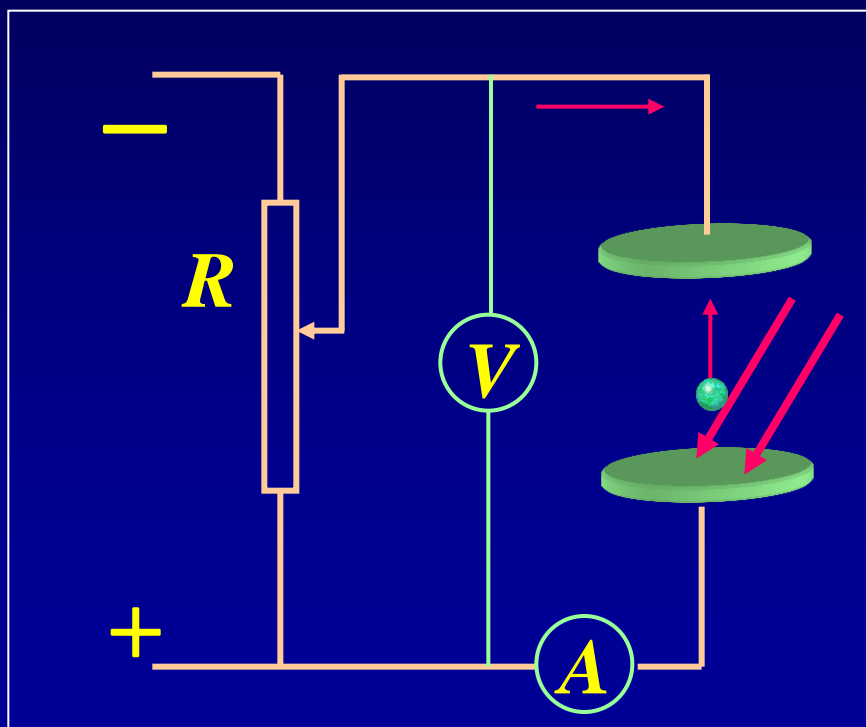
**例** 钾的截止频率 $\nu_0 = 4.62 \times 10^{14} \text{ Hz}$ ，以波长 $\lambda = 435.8 \text{ nm}$ 的光照射，求钾放出光电子的初速度。

**解：**  $\varepsilon = E_{k0} + W$       $h\nu = \frac{1}{2}mv^2 + h\nu_0$

$$v = \sqrt{\frac{2h}{m_e} \left( \frac{c}{\lambda} - \nu_0 \right)} = 5.72 \times 10^5 (m/s)$$

## 对 $E_{k0} \propto \nu$ , $U_0 \propto \nu$ 的解释

如果电极之间加上反向电压，当光电子的动能不足以克服电场力而到达阳极 A 时，光电流降为零，此时 A、K 间的电压称作**遏止电势差**。

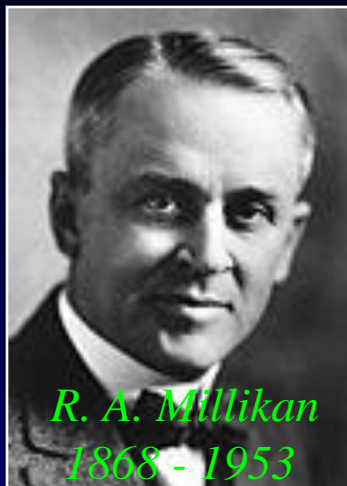


$$eU_0 = \frac{1}{2}mv^2$$

$$eU_0 = h\nu - W$$

$$\therefore E_{k0} \propto \nu, U_0 \propto \nu$$

可知初动能及反向遏止电压与  $\nu$  成正比，而与光强无关。



## 光子理论的有力证据

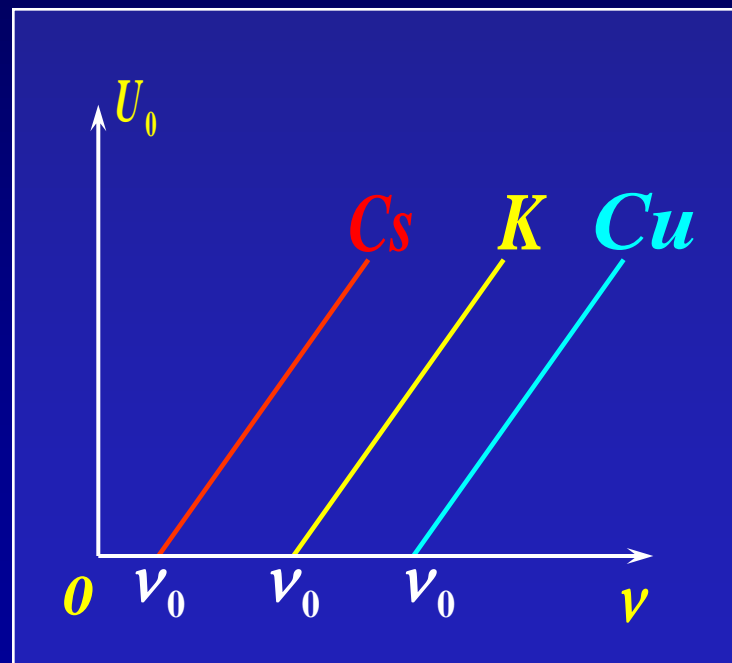
密立根在实验中测得  $U_0$  与  $\nu$  的关系曲线如下图所示，与理论符合较好。

光子理论: 
$$\begin{cases} eU_o = \frac{1}{2}m v^2 = h\nu - W \\ U_o = \frac{h}{e}\nu - \frac{W}{e} \end{cases}$$

$h$  的实验值:  $h = ek$

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

(理论值:  $h \approx 6.63 \times 10^{-34} J \cdot s$ )

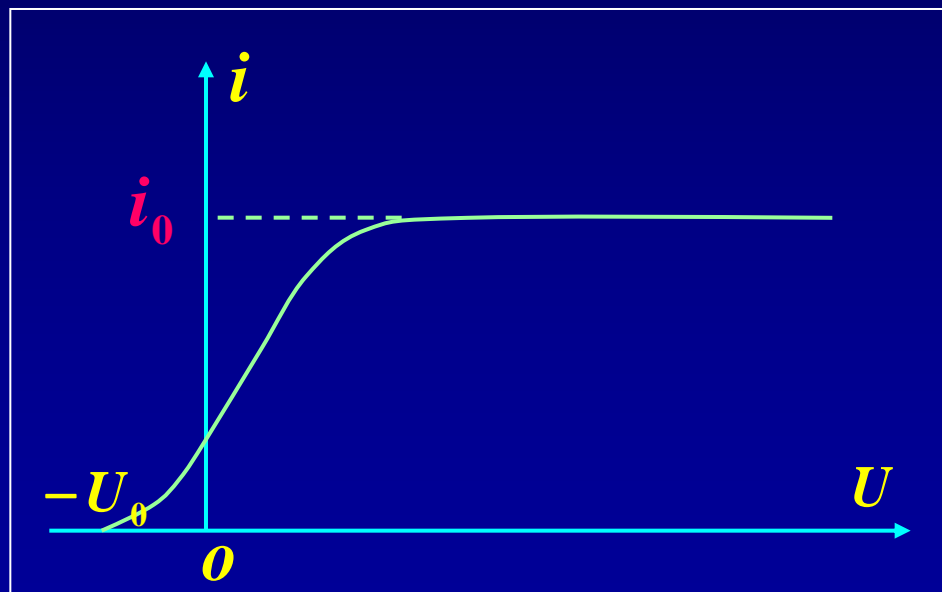


## 光电流正比于光强的解释

$$I = N \cdot h\nu \longrightarrow N \propto I$$

光电流随正向电压的增大而增大，但是当电压增达到一定值，单位时间内光电子数不在增加，光电流达到饱和。

增大入射光强，光束中的光子数增加，单位时间内光电子数增加，光电流增大。



## 光电效应瞬时性的解释

电子吸收光子时间很短，只要光子频率大于截止频率，电子就能立即逸出金属表面，无需积累能量的时间，与光强无关。



牛顿将光当作微小的弹性粒子，惠更斯等人根据波的干涉、衍射等特性，推翻了牛顿的观点，麦克斯韦最终建立了光的电磁波理论。爱因斯坦有将光解释为具有分立的能量、动量的光子 ……

光究竟是什么？



## 四、光的波粒二象性

光是电磁波，具有干涉、衍射等波动性：

$$\nu = \frac{c}{\lambda} \quad c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}$$

同时光又具有粒子性，其能量、动量为量子化的分立值：

$$E = h\nu \quad p = \frac{h}{\lambda} \quad \left( p = mc = \frac{E}{c} = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda} \right)$$

光的既具有波动性，又具有粒子性，即波粒二象性。

粒子和波都是人们为了研究物体的运动规律而建立起来的理想化模型。光在某些场合下表现出波动性，而在另外一些场合下又表现出粒子性。

光子也可能还可能存在内部结构。

**例** 求波长为20 nm 紫外线光子的能量、动量及质量。

**解：** 光子能量  $\varepsilon = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$       代入数值

$$\varepsilon = \frac{6.63 \times 10^{-34} \times 3 \times 10^8}{20 \times 10^{-9}} = 9.95 \times 10^{-19} \text{ J}$$

$$\text{光子动量 } P = \frac{h}{\lambda} = \frac{6.63 \times 10^{-34}}{20 \times 10^{-9}} = 3.3 \times 10^{-26} \text{ kgm/s}$$

$$\text{光子质量 } m = \frac{\varepsilon}{c^2} = \frac{9.95 \times 10^{-19}}{(3 \times 10^8)^2} = 1.11 \times 10^{-35} \text{ kg}$$

归纳:

$$h\nu = \frac{1}{2}m\mathbf{v}^2 + W$$

$$E_k = \frac{1}{2}m\mathbf{v}^2 = eU_0$$

$$W = h\nu_0$$

$$h(\nu - \nu_0) = \frac{1}{2}m\mathbf{v}^2$$

$$h\nu = eU_0 + W$$