

## 第十五章 量子物理

### 15-2 光电效应、光的波粒二象性

重点:

- 1、光量子假说、光电效应方程;
- 2、光的波粒二象性

# 一、光电效应的实验规律

## 1、光电效应

光的照射下，金属及其化合物中的电子逸出金属表面的现象。

这些逸出的电子被称为：

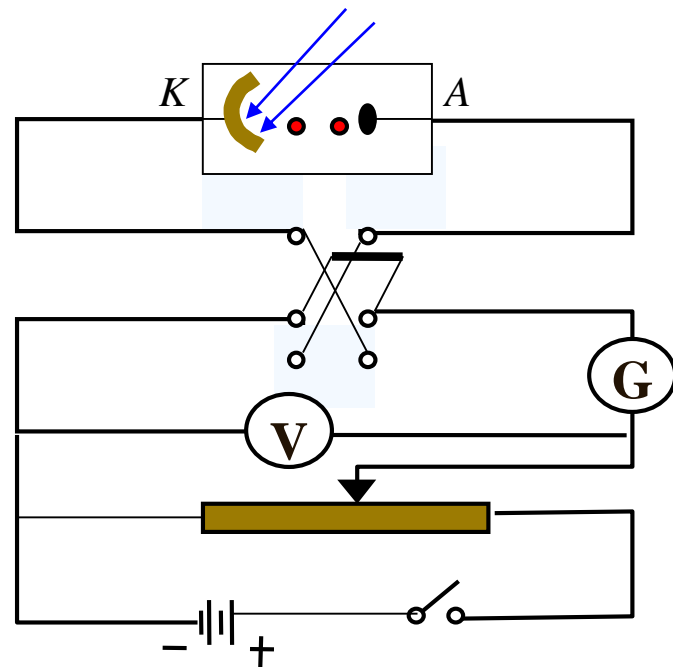
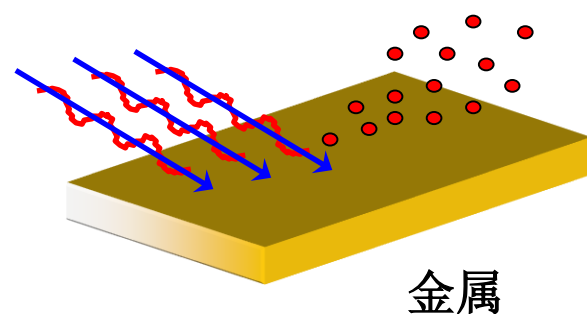
**光电子**

光电子运动形成的电流被称为：

**光电流**

## 2、实验装置

在一个真空管内，装有阴极  $K$  和阳极  $A$ ，当单色光通过石英窗口射到  $K$  上时，金属板便释放光电子。如果在  $K$ 、 $A$  两端加上电势差  $U$ ，则光电子飞向阳极，回路中形成光电流。



# 一、光电效应的实验规律

## 3、实验规律

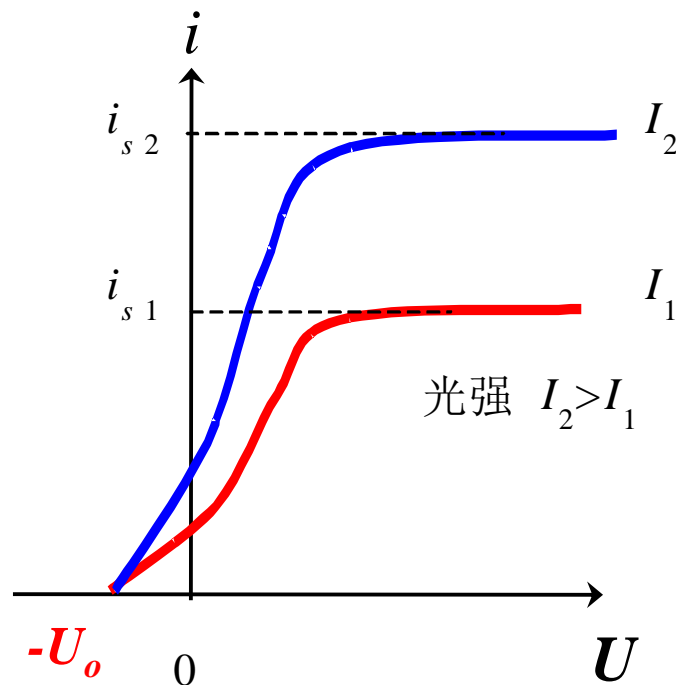
- 1) 在入射光频率不变时，  
饱和光电流强度  $i_s$  与入射光强  $I$  成正比；

说明被光照射的电极上，  
单位时间内逸出的光电子数与  
入射光的强度成正比。

遏止(截止)电势差  $U_o$

光电子的最大初动能：

$$E_{k \max} = \frac{1}{2} m v_m^2 = e U_o$$



# 一、光电效应的实验规律

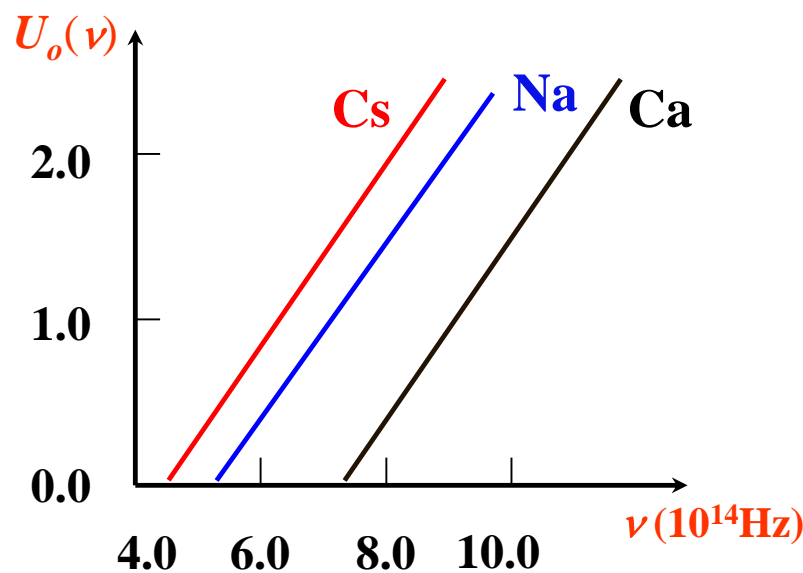
2) 光电子的最大初动能随入射光的频率线性增加，与光强无关；

$$U_o \propto \nu$$

$$E_{k\max} = \frac{1}{2} m v_m^2 = e U_o$$

$$E_{k\max} \propto U_o \propto \nu$$

$$E_{k\max} \propto \nu$$



3) 只有当入射光频率  $\nu$  大于一定的频率  $\nu_0$  时，  
 才会产生光电效应； $\nu_0$  称为截止频率或红限频率 Cut off Frequency  
 （对应的波长  $\lambda_0$  称为红限波长）

4) 瞬时性，光电效应是瞬时发生的，驰豫时间不超过  $10^{-9}\text{s}$

## 二、经典物理学所遇到的困难

按照光的经典电磁理论：

- 1、逸出光电子的初动能应随光强增大而增大，与频率无关；
- 2、不应存在截止频率；
- 3、电子积累能量需要一段时间，光电效应不可能瞬时发生。

## 三、爱因斯坦光电效应方程

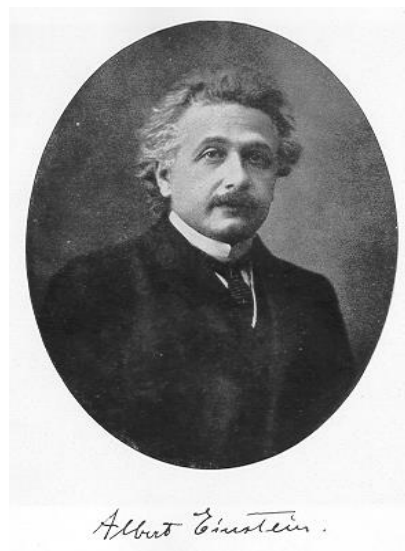
### 1、爱因斯坦光量子假说(1905)

爱因斯坦在普朗克能量子假设的基础上进一步提出了光子假设

1) 一束光是一束以光速 $c$ 运动的粒子流，  
这些粒子称为光量子（光子）Photon

2) 对于频率为 $\nu$ 的单色光  
每个光子的能量：

$$\varepsilon = h\nu$$



# 1、爱因斯坦光量子假说(1905)

1) 一束光是一束以光速 $c$ 运动的粒子流，  
这些粒子称为光量子（光子） Photon

2) 对于频率为 $\nu$ 的单色光  
每个光子的能量：

$$\varepsilon = h\nu$$

## 2、爱因斯坦光电效应方程

当频率为 $\nu$ 光照射金属时，一个电子整体只吸收一个光子

根据能量守恒：

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

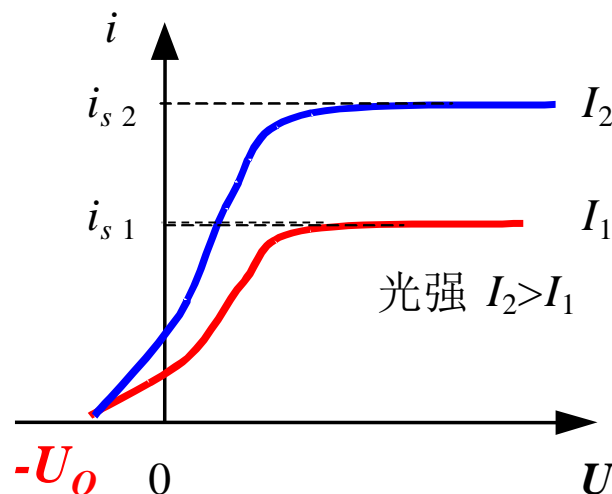
$W$  为该金属材料的逸出功 Work Gunction，与材料有关，  
电子用于克服金属表面势垒的束缚而做的功。



### 3、光子理论对光电效应的解释

#### 实验规律

- 1) 饱和光电流强度  $i_s$  与  
入射光强  $I$  成正比



#### 光子理论的解释

光的强度决定于单位时间内通过单位垂直面积的光子数  $N$

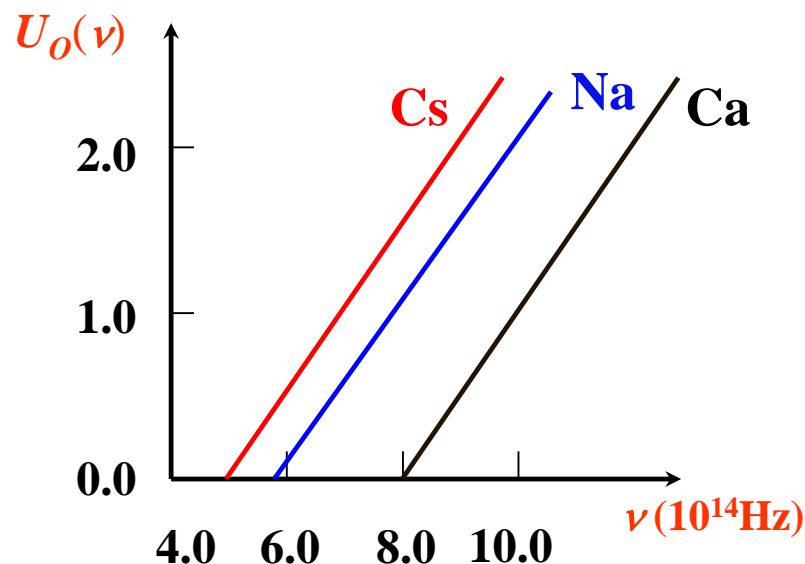
$$I = Nh\nu$$

当入射光的频率一定时，入射光越强则光子数  $N$  就越多，单位时间产生的光电子数就越多，饱和光电流就越大。

### 3、光子理论对光电效应的解释

#### 实验规律

- 2) 光电子的初动能随入射光的频率线性增加，而与入射光的强度无关。



#### 光子理论的解释

由  $\frac{1}{2}mv_m^2 = eU_o$  和  $h\nu = \frac{1}{2}mv_m^2 + W$

$$U_o = \frac{h}{e}\nu - \frac{W}{e} \quad \text{与实验比较有, 斜率: } K = \frac{h}{e}$$

$U_o$  与频率成线性关系，而与光的强度无关



### 3、光子理论对光电效应的解释

#### 实验规律

- 3) 只有当入射光频率  $\nu$  大于一定频率  $\nu_0$  时，才会产生光电效应。  $\nu_0$  称为截止频率或红限频率
- 4) 光电效应是瞬时发生的。 弛豫时间不超过  $10^{-9}\text{s}$

#### 光子理论的解释

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

- 3) 若能发生光电效应必要求

$$\frac{1}{2}mv_m^2 \geq 0$$

$$\Rightarrow h\nu - W \geq 0 \quad \Rightarrow \quad \nu \geq \frac{W}{h} = \nu_0$$

$$\nu_0 = \frac{W}{h}$$

为红限频率

- 4) 一个光子是整体而被电子吸收，不需要时间积累，因此光电效应的弛豫时间很短。

## 四、光的波粒二象性

### 1、光子的能量、质量与动量

爱因斯坦把光束视为粒子流，那么“光”就不仅具有能量，而且还应该有质量、动量！关于这些问题，爱因斯坦在1905年的第三篇论文即狭义相对论中全盘推出了。

光子静止质量： $m_0 = 0$

光子的能量：

$$\varepsilon = h\nu$$

$$\varepsilon = mc^2$$

$$m = \frac{h\nu}{c^2}$$

光子的动量：

$$p = mc = \frac{h\nu}{c^2} c = \frac{h\nu}{c}$$

$$p = \frac{h}{\lambda}$$

$$\vec{p} = \frac{h}{\lambda} \vec{e}_n$$

## 四、光的波粒二象性

### 2、光的“波粒二象性”

$$\varepsilon = h\nu$$

$$p = \frac{h}{\lambda}$$

波长、频率是描写波动性的物理量，  
而质量、动量、能量是描写粒子性的物理量。  
所以爱因斯坦对“光”同时赋予了波动性和粒子性。

光的波动性和粒子性是通过普朗克常数联系在一起的。

- 1) 在有些情况(干涉、衍射、偏振等)下，光显示出波动性；  
光在传播过程中显著地表现出它的波动性。
- 2) 在另一些情况下(热辐射、光电效应等)，显示出粒子性；  
在与物质相互作用时，更多的表现为粒子性。

光具有“波粒二象性”

爱因斯坦获1921年诺贝尔物理奖。

## 例 5

关于光子的性质，有以下说法，其中正确的是：

(1) 不论真空中或介质中的速度都是 $c$ ；



(2) 它的静止质量为零；



(3) 它的动量为： $p = \frac{h\nu}{c}$ ；



(4) 它的总能量就是它的动能；

(5) 它有动量和能量，但没有质量。

**例 6:** 以  $\lambda_1 = 550 \text{ nm}$  的光照射某金属表面，测得遏止电压为  $U_{01} = 0.19 \text{ V}$ 。现以  $\lambda_2 = 190 \text{ nm}$  的光照射该表面，求：1) 此时的遏止电压  $U_{02}$ ； 2) 该金属的逸出功  $W$ ； 3) 该金属的红限频率  $\nu_0$ 。

**解：1)** 由爱因斯坦光电效应方程：

$$h\nu = \frac{1}{2}mv_m^2 + W, \quad \frac{1}{2}mv_m^2 = eU_0, \quad h\nu = h\frac{c}{\lambda} = eU_0 + W,$$

对于  $\lambda_1 = 550 \text{ nm}$  的光，有：  $h\frac{c}{\lambda_1} = eU_{01} + W,$

对于  $\lambda_2 = 190 \text{ nm}$  的光，有：  $h\frac{c}{\lambda_2} = eU_{02} + W,$

$$U_{02} = U_{01} + \frac{1}{e} \left( h\frac{c}{\lambda_2} - h\frac{c}{\lambda_1} \right) \Rightarrow U_{02} = 4.47 \text{ V}$$

**例 6:** 以  $\lambda_1 = 550 \text{ nm}$  的光照射某金属表面，测得遏止电压为  $U_{01} = 0.19 \text{ V}$ 。现以  $\lambda_2 = 190 \text{ nm}$  的光照射该表面，求：1) 此时的遏止电压  $U_{02}$ ； 2) 该金属的逸出功  $W$ ； 3) 该金属的红限频率  $\nu_0$ 。

解：

$$2) \quad h \frac{c}{\lambda_1} = eU_{01} + W,$$

$$\Rightarrow W = h \frac{c}{\lambda_1} - eU_{01} = 2.07 \text{ eV}$$

$$3) \quad \nu_0 = \frac{W}{h} \Rightarrow \nu_0 = 5.0 \times 10^{14} \text{ Hz}$$

**例 7：**从金属铝中逸出一个电子至少需要 **4.2 eV** 的能量，  
现以波长为 **200 nm** 的光照射到铝的表面上，

**求：** 1) 逸出光电子的最大初动能为多少？  
2) 遏止电势差为多少？  
3) 铝的截止波长为多少？

**解：** 1) 由题可知：  $W = 4.2 \text{ eV}$ ,  $\lambda = 200 \text{ nm}$

根据爱因斯坦光电效应方程：

$$h\nu = E_{k\max} + W, \Rightarrow E_{k\max} = h\frac{c}{\lambda} - W, \Rightarrow E_{k\max} = 2.0 \text{ eV}$$

$$2) \text{ 由 } E_{k\max} = eU_0, \Rightarrow U_0 = \frac{E_{k\max}}{e} = 2.0 \text{ V}$$

$$3) \text{ 由 } W = h\nu_0 = h\frac{c}{\lambda_0}, \Rightarrow \lambda_0 = \frac{hc}{W} = 296 \text{ nm}$$



**例 8:** 波长为 **250 nm**、强度为  **$2 \text{ W/m}^2$**  的紫光照射到钾的表面上，  
钾的逸出功为  **$2.21 \text{ eV}$** ，

- 求:** 1) 逸出光电子的最大初动能为多少？  
2) 每秒从钾表面**单位面积**所发射的**最大电子数**为多少？

**解:** 1) 根据爱因斯坦光电效应方程:

$$h\nu = E_{k\max} + W, \Rightarrow E_{k\max} = h\frac{c}{\lambda} - W, \Rightarrow E_{k\max} = 2.76 \text{ eV}$$

2) 每个光子的能量:  $h\nu = h\frac{c}{\lambda} = 4.97 \text{ eV} = 7.95 \times 10^{-19} \text{ J}$

光强  $I$ :  $I = Nh\nu$

每个光子最多只能释放一个电子，

每秒从钾表面单位面积所发射的**最大电子数**为  $N$ :

$$N = \frac{I}{h\nu} = \frac{2}{7.95 \times 10^{-19}} = 2.52 \times 10^{18} \text{ s}^{-1} \text{ m}^{-2}$$

**例 9:** 如图所示, **K** 是一细金属丝电极, **A** 是以 **K** 为轴、半径为  $R$  的圆筒形电极, 其内部有沿轴向的均匀磁场, 磁感应强度为  $B$ , 在 **A**、**K** 之间接有一个灵敏检流计 **G**, 当波长为  $\lambda$  的单色光照射到 **K** 上时, **G** 可以检测到光电流, 如果逐渐加大磁感应强度  $B$ , 当  $B=B_0$  时, 光电流恰好为零, 电子的质量为  $m$ , 电量为  $e$ , 求: 金属丝 **K** 的逸出功。

解:  $F_m = e v_m B = m a_n = m \frac{v_m^2}{R'}$

回旋半径  $R' = \frac{m v_m}{e B}$ ,

当  $B=B_0$  时,  $R' = \frac{R}{2}$ , 光电流恰好为 0,

当  $B>B_0$  时,  $R' < \frac{R}{2}$ , 光电子被限制于磁场内

$$\frac{R}{2} = \frac{m v_m}{e B_0}, \quad v_m = \frac{e B_0 R}{2 m}$$

$$h \nu = \frac{1}{2} m v_m^2 + W, \Rightarrow W = \frac{h c}{\lambda} - \frac{e^2 B_0^2 R^2}{8 m}$$

