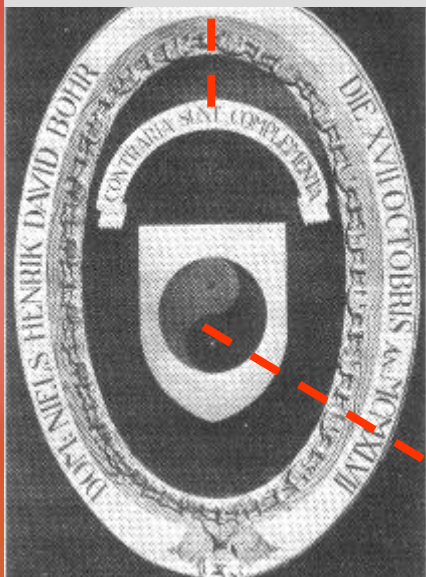


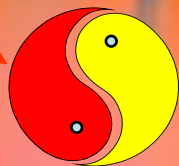
# 同学们好



“互斥即互补”



玻尔的族徽



一个人要是对量子物理学不曾感到震惊，他就根本没有理解它。

— 尼尔斯·玻尔

（丹麦. 1885—1962）

### 第五篇 量子现象和量子规律

#### 第十五章 场的量子性

普朗克能量子理论

爱因斯坦光量子理论

玻尔氢原子理论

激光原理

#### 第十六章 量子力学基本原理

德布罗意公式

不确定关系

物质波波函数 薛定谔方程

#### 第十七章 量子力学应用

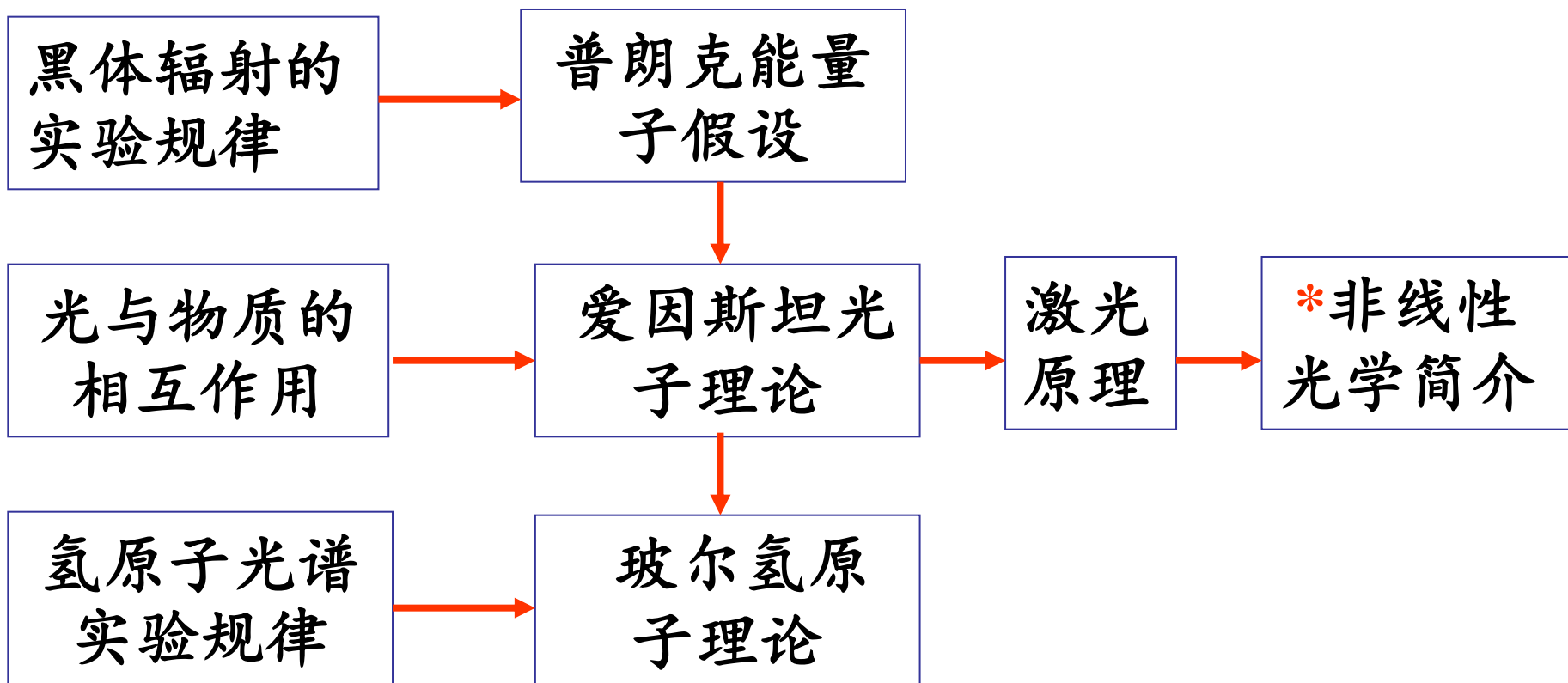
势阱和势垒

原子结构

固体能带理论

## 第十五章 场的量子性

### 结构框图



学时： 6

### 第一节 热辐射 普朗克能量量子假说

一、黑体辐射的实验规律

二、经典物理的困难

三、普朗克能量量子假说

### 一、黑体辐射的实验规律

#### 1.概念：

(1)热辐射:一切物体都以电磁波形式向外辐射能量，  
其功率和波长取决于物体的温度。

固体在温度升高时颜色的变化



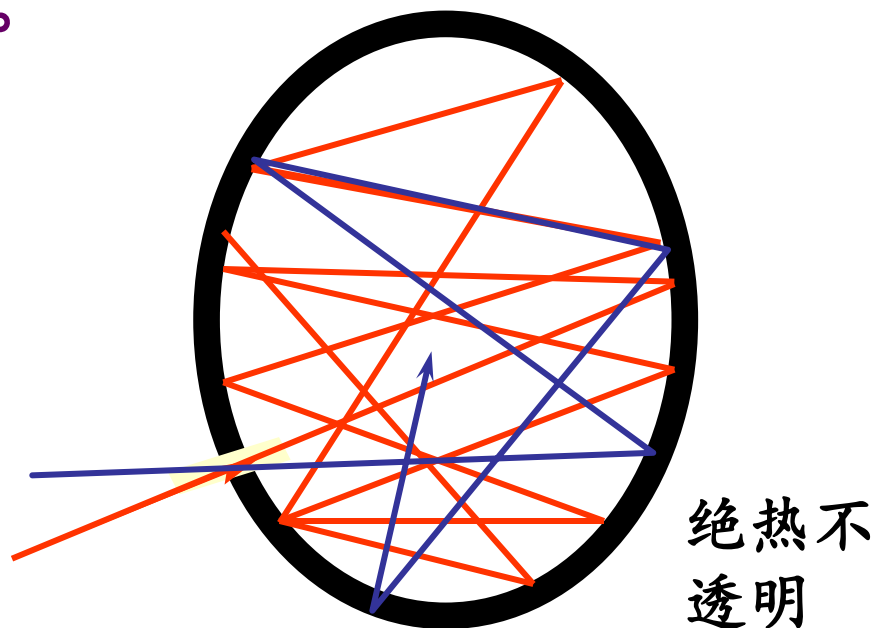
不同的原子辐射谱线的颜色（频率）成分不同。

(2) 平衡热辐射: 物体发射能量的同时, 又吸收周围其它物体的辐射能。当发射能量等于吸收能量时, 其温度不变, 外部电磁场能量也不变。


(3) 绝对黑体: 能全部吸收 (不反射) 任何波长的入射 (黑体) 辐射能的物体。

模型: 空腔小孔

注意: 黑体  $\neq$  黑色物体



**实验发现：**黑体的电磁辐射能力与吸收能力一致。且与材料无关，只与温度有关，为理想发射体。

黑体  完全吸收体  
理想发射体

(4) 单色辐射本领  $e_o(\lambda, T)$ : 单位时间内，从物体表面单位面积上发射的波长  $\lambda \rightarrow \lambda + d\lambda$  范围的辐射能与波长间隔  $d\lambda$  之比。

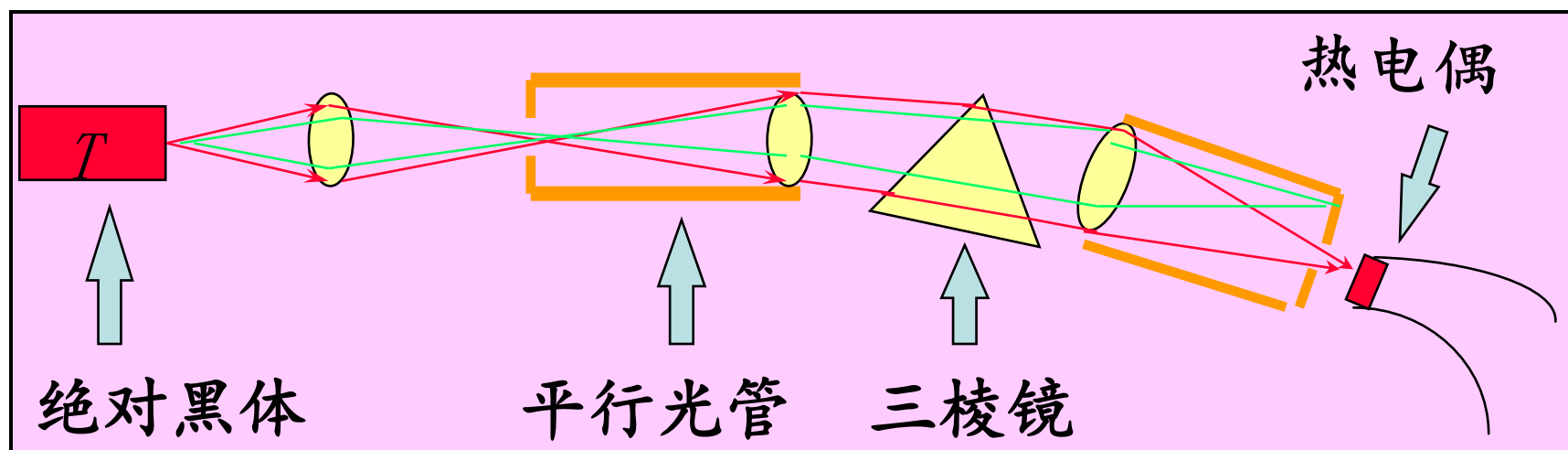
$$e_o(\lambda, T) = \frac{dE}{d\lambda}$$

(5) 总辐射本领  $E_0(T)$ : 单位时间内从物体表面单位面积上发射的各种波长的总辐射能。

$$E_0(T) = \int_0^{\infty} e_0(\lambda, T) d\lambda$$

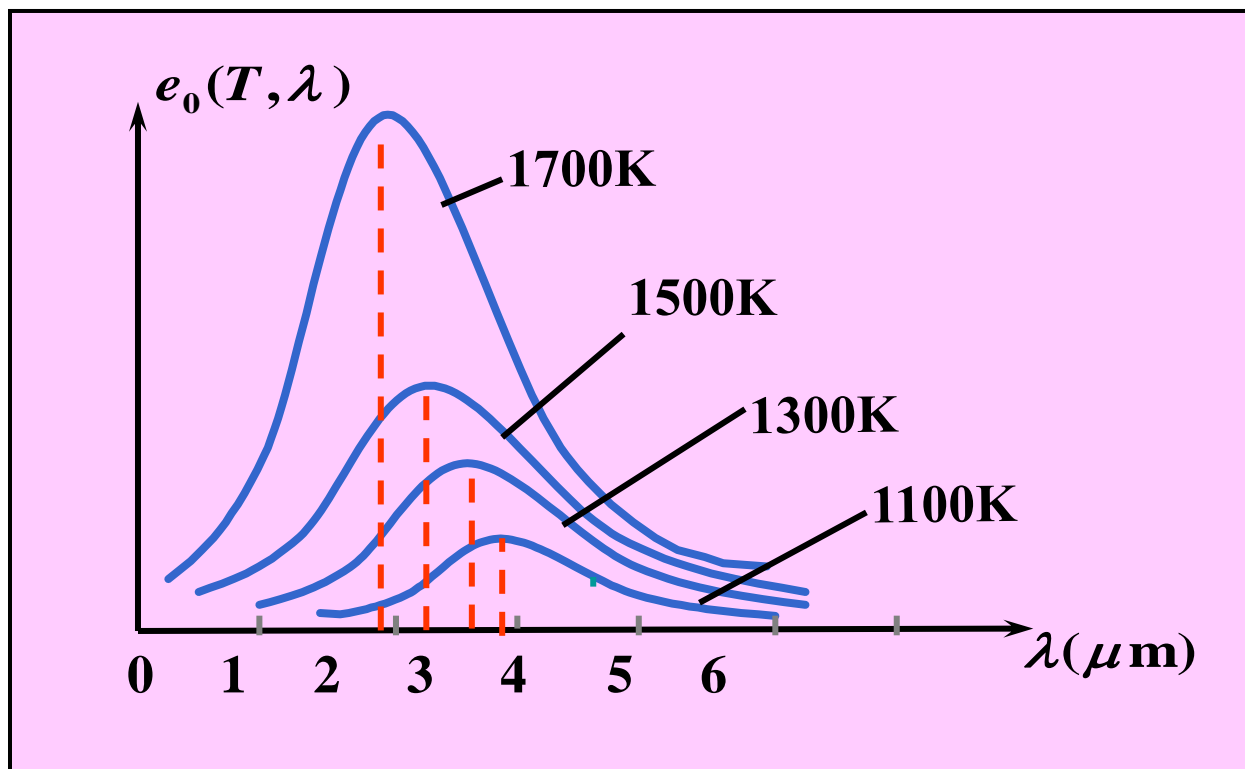
## 2. 黑体辐射实验

测定黑体单色辐射本领按波长分布的实验装置





### 实验曲线



总辐射本领, 即  $E_0(T) = \int_0^{\infty} e_0(\lambda, T) d\lambda$  为曲线下的面积。

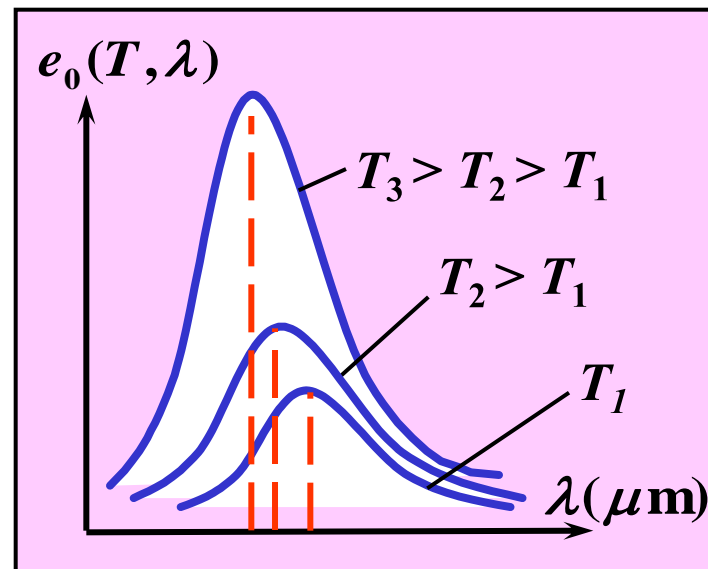
### 3. 黑体辐射实验定律

#### (1) 斯忒藩—波尔兹曼定律

$$E_0(T) = \sigma T^4$$

斯忒藩恒量:

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

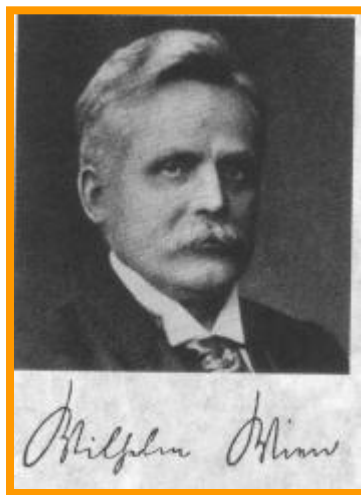


#### (2) 维恩位移定律

$$\lambda_m \cdot T = b$$

维恩常数:

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



维恩（德.1864—1928）获1911年诺贝尔物理奖

**[例题]** 由测量得到太阳辐射谱的峰值为490 nm，计算太阳表面温度、辐射功率。

**解：** 将太阳视为黑体，由维恩位移定律，得：

$$T = \frac{b}{\lambda_m} = \frac{2.897 \times 10^{-3}}{490 \times 10^{-9}} = 5.9 \times 10^3 (\text{K})$$

由斯忒藩—玻尔兹曼定律

$$E_0 = \sigma T^4 = 5.67 \times 10^{-8} \times (5.9 \times 10^3)^4 = 6.9 \times 10^7 (\text{W} \cdot \text{m}^{-2})$$

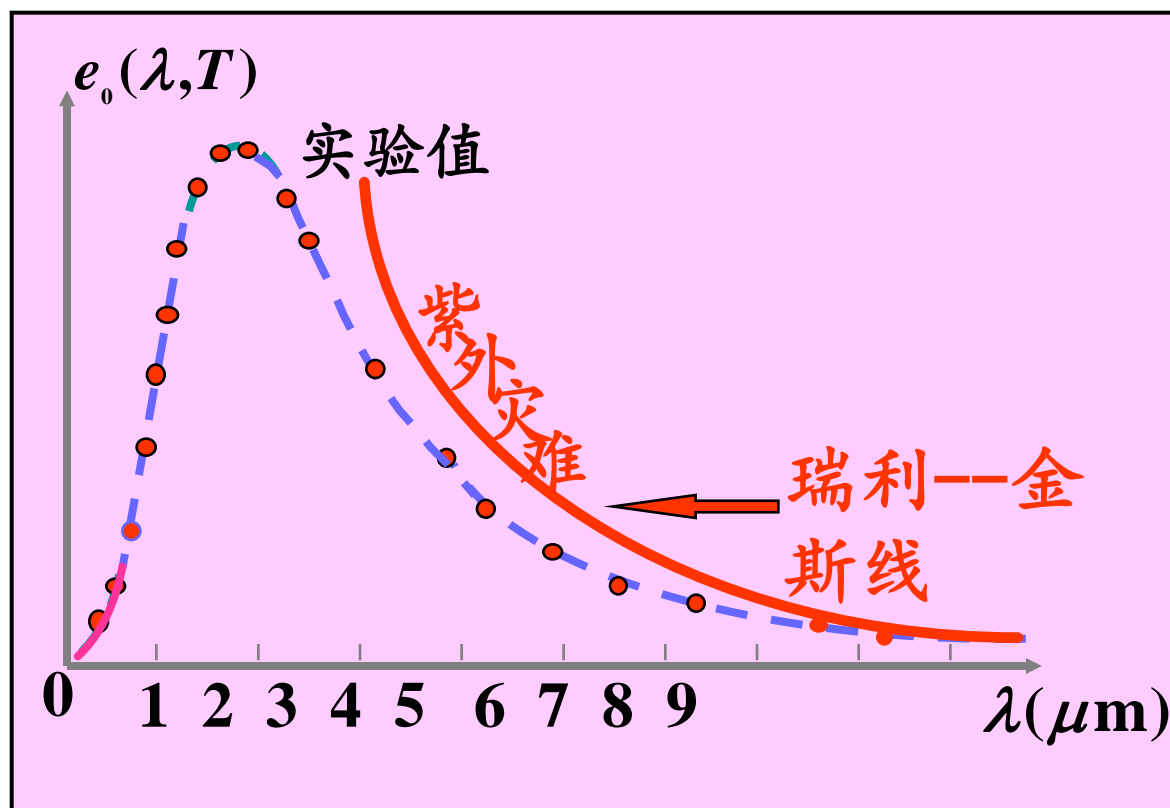
太阳半径： $R = 0.7 \times 10^9 \text{ m}$ . 总辐射功率：

$$P = E_0 \cdot 4\pi R^2 = 6.9 \times 10^7 \times 4\pi \times (0.7 \times 10^9)^2 = 4.2 \times 10^{26} (\text{W})$$

### 二、经典物理遇到的困难

从经典物理理论出发推导 $e_o(\lambda, T)$ 函数表达式

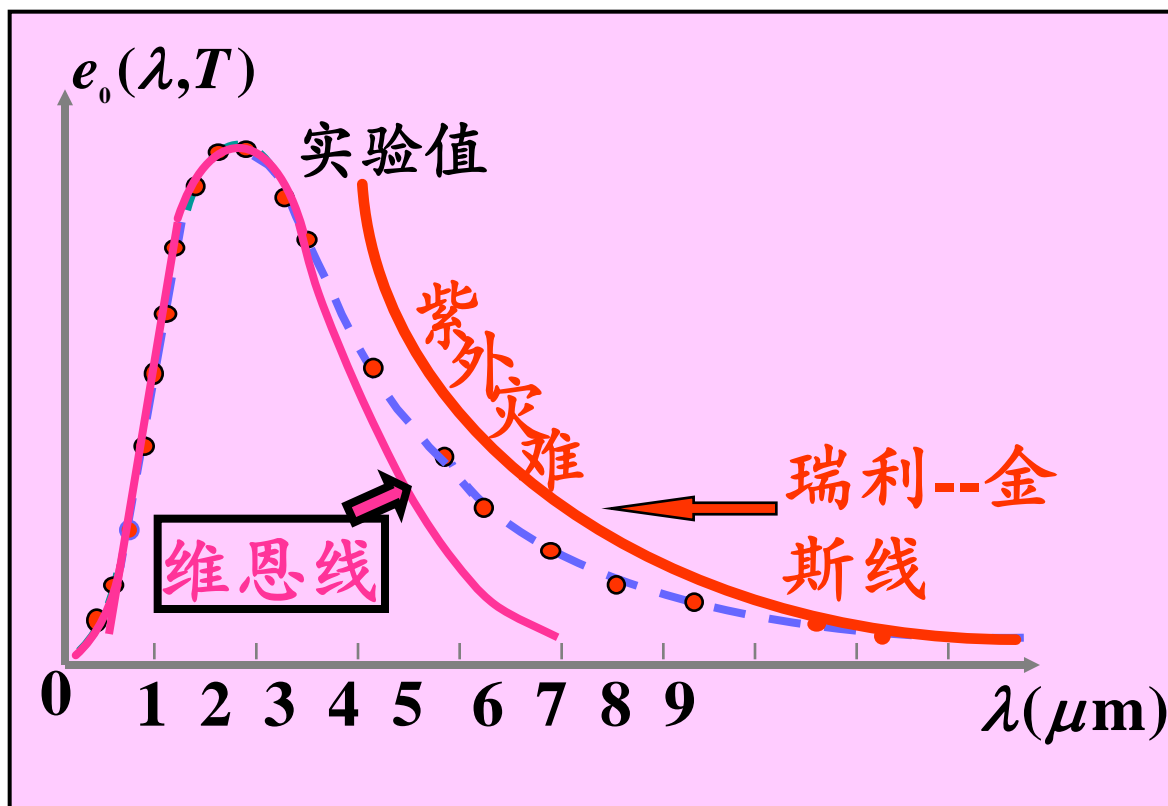
1. 瑞利——金斯公式  $e_o(\lambda, T) = CT\lambda^{-4}$



理论曲线与实验曲线在长波吻合，在短波相差很大——紫外灾难。

### 2. 维恩公式

$$e_o(\lambda, T) = C_1 \lambda^{-5} e^{-\frac{C_2}{\lambda T}}$$



理论曲线与实验曲线在短波接近，长波相差很大。

从经典理论出发推导  $e_o(\lambda, T)$  公式的努力均遭失败

### 三、普朗克能量量子假说

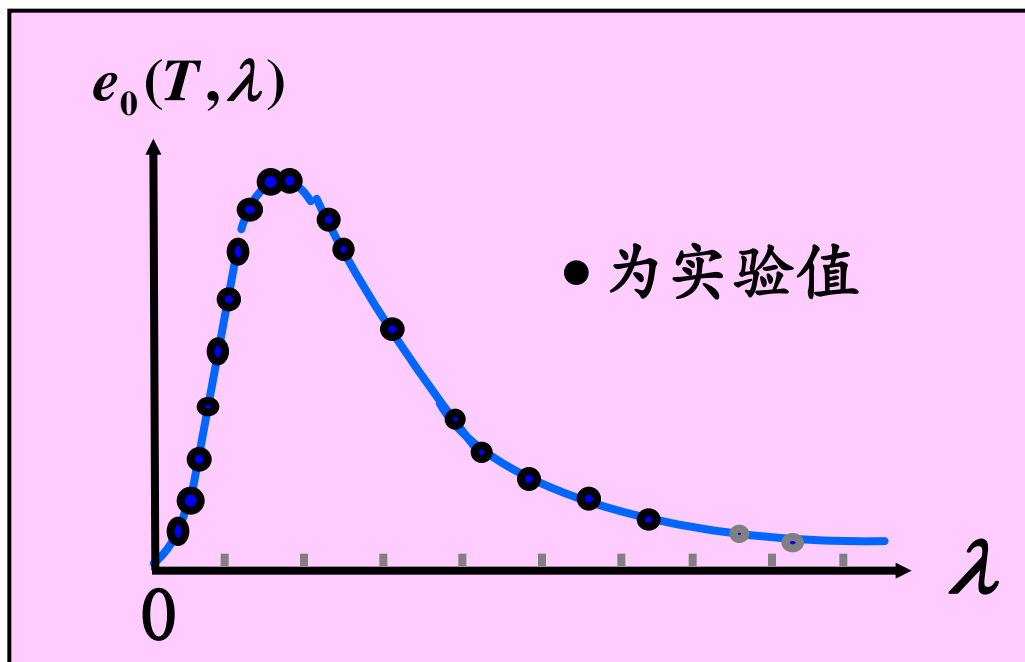
#### 1. 经验公式

在维恩公式和金斯公式之间用内插法得出与实验曲线相符的经验公式

$$e_0(\lambda, T) = 2\pi hc^2 \lambda^{-5} (e^{\frac{hc}{k\lambda T}} - 1)^{-1}$$



(德.1858-1947)



### 2. 能量量子假设（模型）

(1) 黑体是由大量包含各种固有频率  $\nu$  的谐振子组成的系统。

(2) 谐振子的能量只能取某个基本单元  $\varepsilon_0$  的整数倍,  $\varepsilon = \varepsilon_0, 2\varepsilon_0, 3\varepsilon_0, \dots$

↓  
能量量子

(3) 能量量子能量  $\varepsilon_0 = h\nu$

(4) 黑体只能按能量量子  $\varepsilon_0$  的整数倍一份一份地吸收或收发能量。

### 3. 意义

- (1) 导出与实验曲线相吻合的经验公式，解决了黑体辐射的困难。
- (2) 普朗克恒量 $h$ 已经成为物理学中最基本、最重要的常数之一。
- (3) 引入能量量子化的概念，是量子物理开端，为爱因斯坦光子理论和玻尔氢原子理论奠定基础。



## 第二节 爱因斯坦光子理论

一、光电效应

二、康普顿效应

三、电子偶效应

四、光的波粒二象性

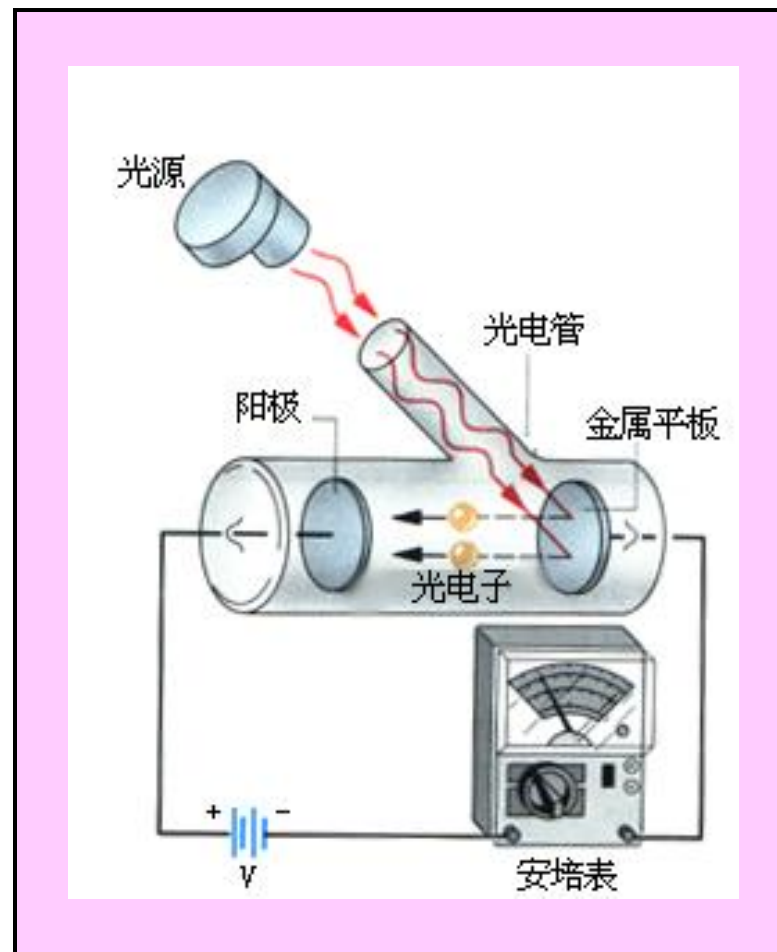
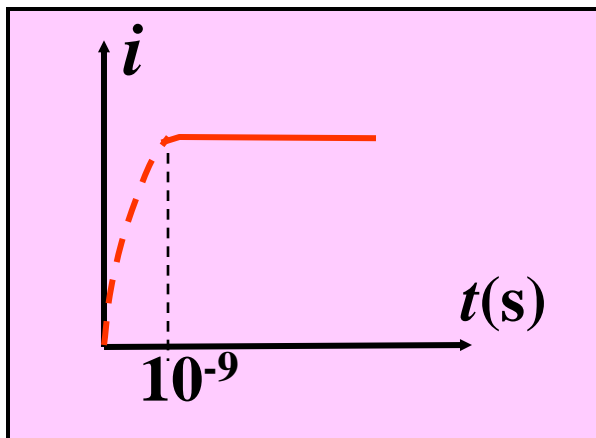
### 一、光电效应 (1887年赫兹发现)

#### 1. 实验

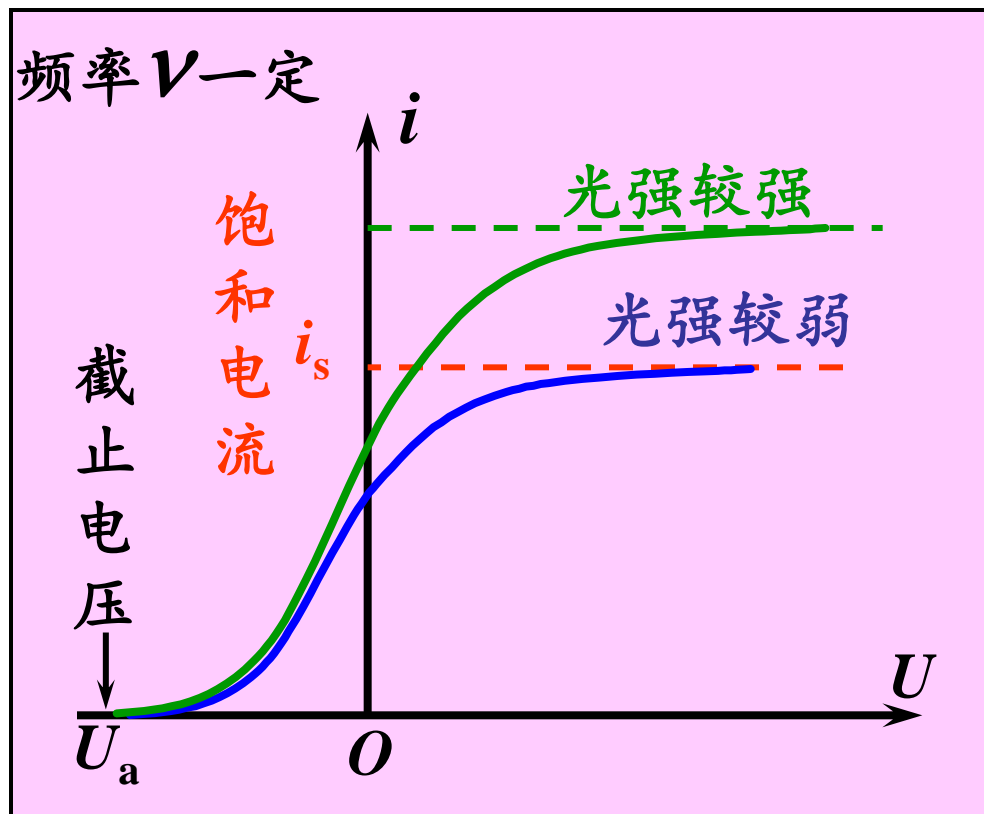
光电效应：物质吸收光的能量后释放电子的现象。

#### 2. 实验规律

(1) 光电效应是瞬时发生的。



(2) 入射光频率一定，饱和光电流与入射光强成正比。

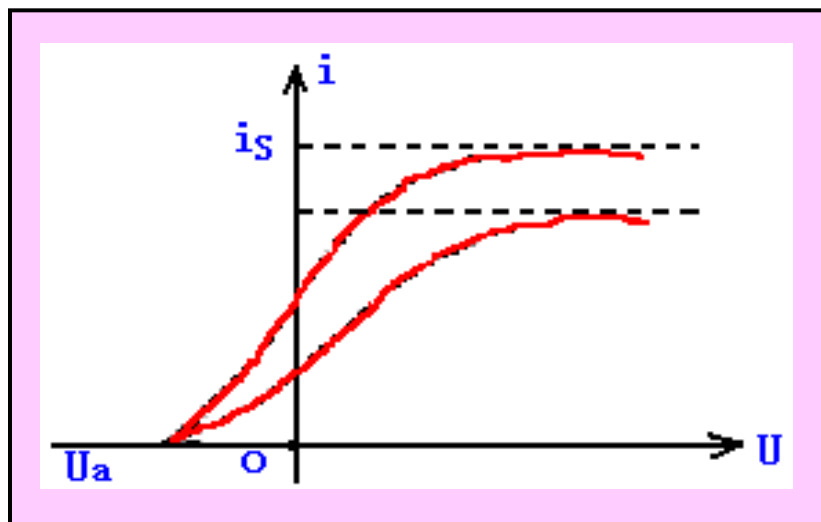


截止电压的存在说明光电子逸出时具有初动能，且：

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

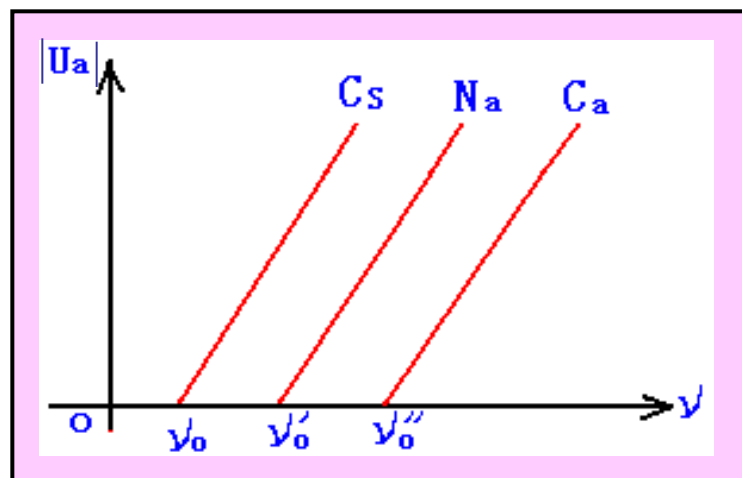
(3) 光电子初动能与光强无关，和入射光频率呈线性关系。

频率  $\nu$  一定

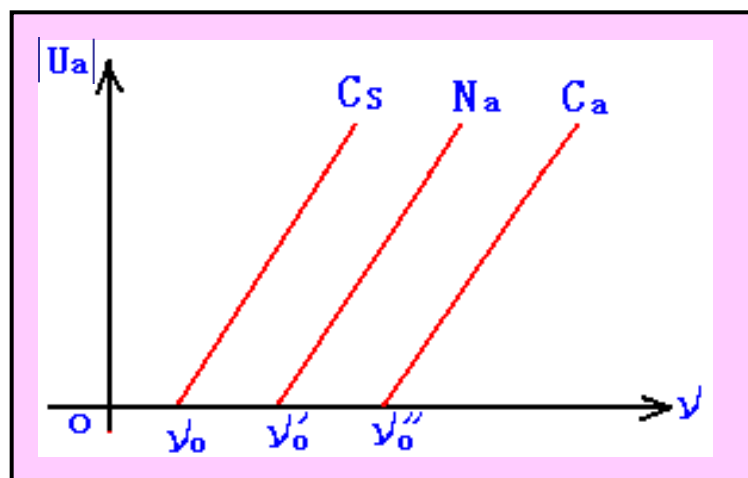


$$\frac{1}{2}mv_m^2 = e|U_a|$$

实验指出截止电压和入射光频率有线性关系：



(4) 对于任何金属，存在一个红限频率  $\nu_0$



只有  $\nu > \nu_0$ ，  
才有光电效应发生。

### 3. 经典电磁波理论遇到的困难

(1) 无法解释光电子的初动能应决定于入射光的频率。

(2) 无法解释红限的存在。

(3) 无法解释光电效应的瞬时性。

### ▲ 4. 爱因斯坦光子理论

爱因斯坦假设光也是一种粒子流，频率为 $\nu$ 的光波的每一个粒子对应的能量为 $E=h\nu$ 。每份能量便称为一个光量子，通常称为**光子**。

**爱因斯坦光子理论要点：**

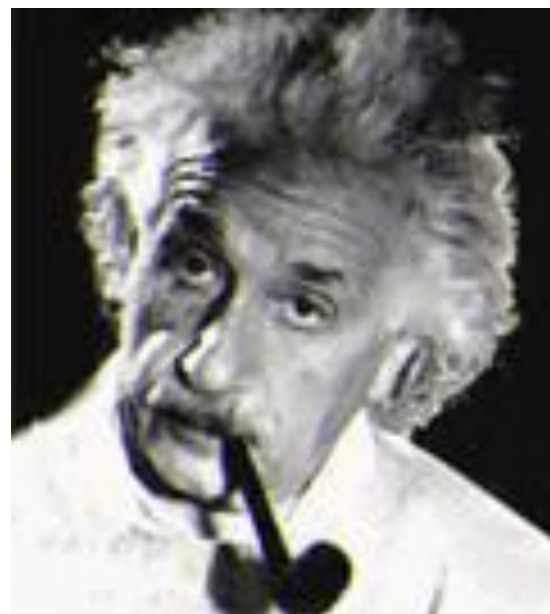
(1) 光是以光速 $c$ 运动的光子流

(2) 每个光子能量  $E = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$

$$\text{动量 } p = mc = \frac{E}{c} = \frac{h}{\lambda}$$

(3) 光强即光的能流密度  $I = N h\nu$

$N$ : 单位时间通过垂直于  $\vec{c}$  单位面积的光子个数



### 5. 光电效应方程

由能量守恒：

入射光子能量 = 逸出功 + 光电子最大初动能

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

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

$$A = h\nu_0$$

红限频率



**注意：**对单光子光电效应，一个电子只能吸收一个光子的能量逸出。

爱因斯坦因为光电效应理论荣获1921年诺贝尔物理奖，  
密立根由于用实验验证该理论荣获1923年诺贝尔物理奖。

### 6. 爱因斯坦光子理论对光电效应的解释

- (1). 电子只要吸收一个光子就可以从金属表面逸出，所以无须时间的累积过程。
- (2). 光强大，光子数多，释放的光电子也多，所以饱和光电流也大。
- (3). 从方程可以看出光电子初动能和照射光的频率成线性关系。

$$\frac{1}{2} m v_m^2 = h \nu - A$$

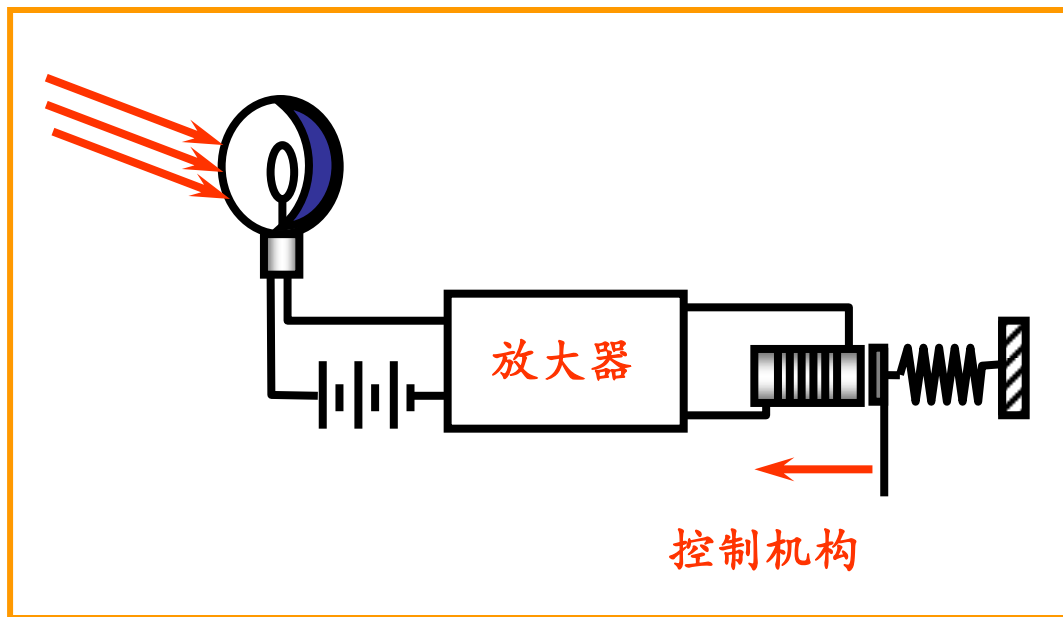
- (4). 从光电效应方程中，当初动能为零时，可得到红限频率： $\nu_0 = A/h$



### 7. 光电效应在近代技术中的应用

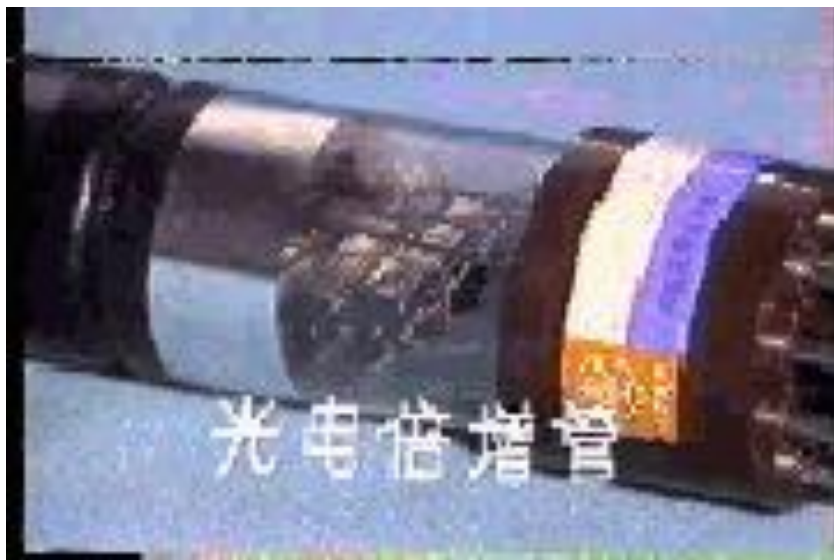
(1) 光电管：将光信号转换成电信号

(2) 光控继电器

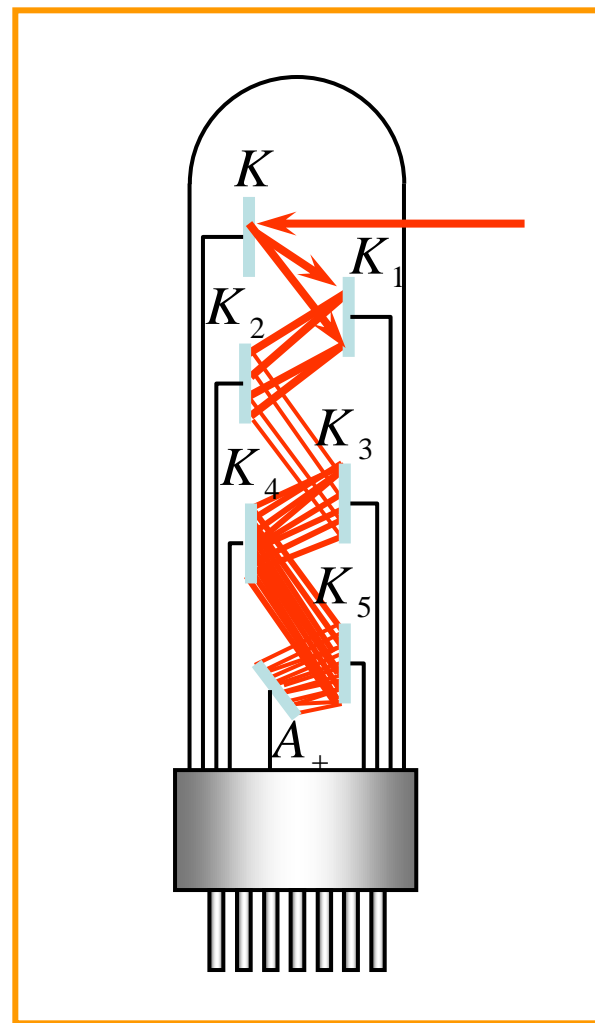


可以用于自动控制，自动计数、自动报警、自动跟踪等。

### (3) 光电倍增管

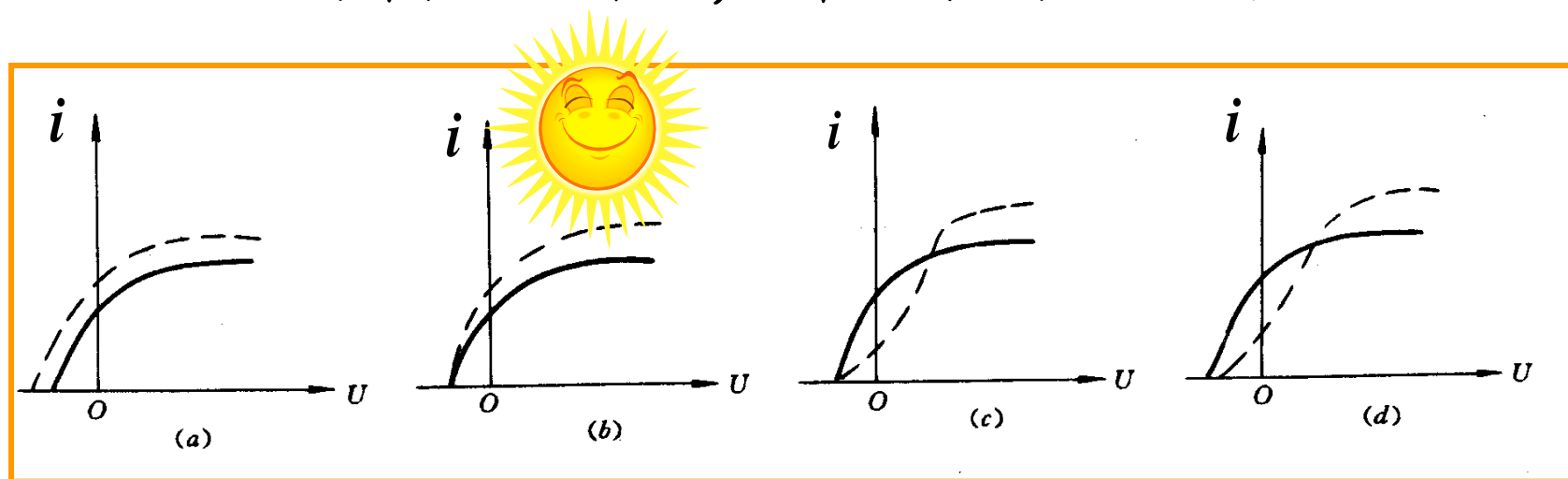


可对微弱光线进行放大，可使光电流放大 $10^5 \sim 10^8$ 倍，灵敏度高，用在工程、天文、科研、军事等方面。



一系列次阴极被轰击出多个次级电子

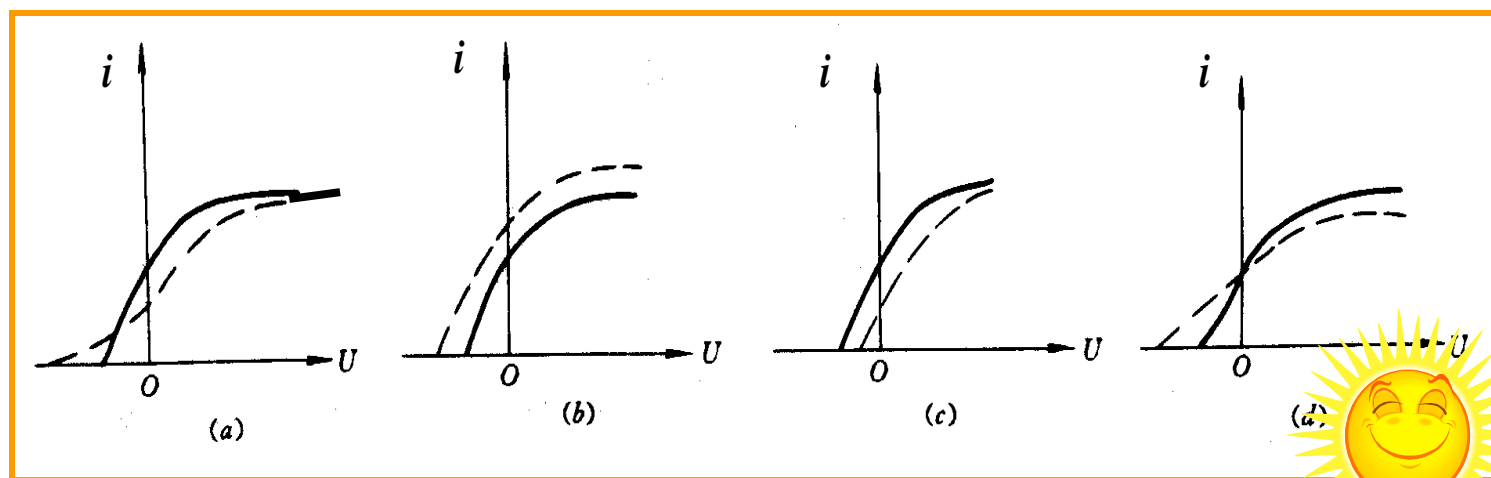
**练习1.P<sub>152</sub> 15.1(2)** 以一定频率的单色光照射在某种金属上，测出其光电流曲线如图中实线所示。然后保持光的**频率不变，增大照射光强度**，测出其光电流曲线如图中虚线所示，哪一个图是正确的？



$I = Nh\nu$ : 频率不变时, 对于确定的  $U$ ,  $I \uparrow, N \uparrow, i \uparrow$ 。

$$h\nu = A + \frac{1}{2}mv_m^2 = A + e|U_a|; \nu, A \text{ 不变}, |U_a| \text{ 不变。}$$

**练习2.P<sub>152</sub> 15.1(3)** 以一定频率的单色光照射在某种金属上，测出其光电流曲线如图中实线所示。然后在**光强不变的情况下，增大照射光的频率**，测出其光电流曲线如图中虚线所示，**不计转换效率与频率的关系**，下列哪一个图是正确的？



**光强**  $I = Nh\nu$  不变,  $\nu \uparrow, N \downarrow, i_m \downarrow$

$$h\nu = A + \frac{1}{2}mv_m^2 = A + e|U_a|, \quad \nu \uparrow, A \text{ 不变}, |U_a| \uparrow$$

### 例题 P<sub>153</sub> 15.5

波长为4000Å的单色光照射在逸出功为2.0 eV 的金属材料上,光射到金属单位面积上的功率为  $3.0 \times 10^{-9} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ , 求:

- (1).单位时间内、单位面积金属上发射的光电子数。
- (2).光电子的最大初动能。

**解:** (1).对于单光子光电效应, 忽略吸收效率问题, 金属发射的光电子数等于在同一时间内射到金属表面的光子数:

$$N = \frac{w}{h\nu} = \frac{w\lambda}{hc} = \frac{3 \times 10^{-9} \times 4000 \times 10^{-10}}{6.63 \times 10^{-34} \times 3 \times 10^8} = 6.03 \times 10^9$$

(2). 由爱因斯坦光电效应方程：

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

光电子的最大初动能为：

$$\begin{aligned} E_{km} &= \frac{1}{2}mv_m^2 = h\nu - A = \frac{hc}{\lambda} - A \\ &= \frac{6.63 \times 10^{-34} \times 3 \times 10^8}{4000 \times 10^{-10}} - 2.0 \times 1.6 \times 10^{-19} \\ &= 1.77 \times 10^{-19} \text{ (J)} \end{aligned}$$