



量子物理学

牛顿力学、热学、电磁学和波动学，统称**经典物理学**。经典物理学研究的基本上是**宏观**领域的物理现象。

相对论指出了经典物理学的第一个局限性：不适用**高速运动**领域。

量子物理学指出了经典物理学的第二个局限性：不适用于电子、原子、分子等**微观**领域。



相对论和量子物理学统称近代物理学。

从经典物理学到近代物理学，不仅仅是尺度上的问题，而是一次物理观念的革命，是人们认识物质世界的一次飞跃。

量子物理学研究的对象是微观粒子(如电子、原子、分子等)，而微观粒子往往有意想不到的性质。

这其中最主要和最普遍的是微观粒子的量子性和波动性。



第 16 章

早期量子论

- 光电效应及爱因斯坦的光子理论
- 玻尔氢原子理论
- 康普顿效应
- 激光和激光器原理



* §16.1 量子论的提出

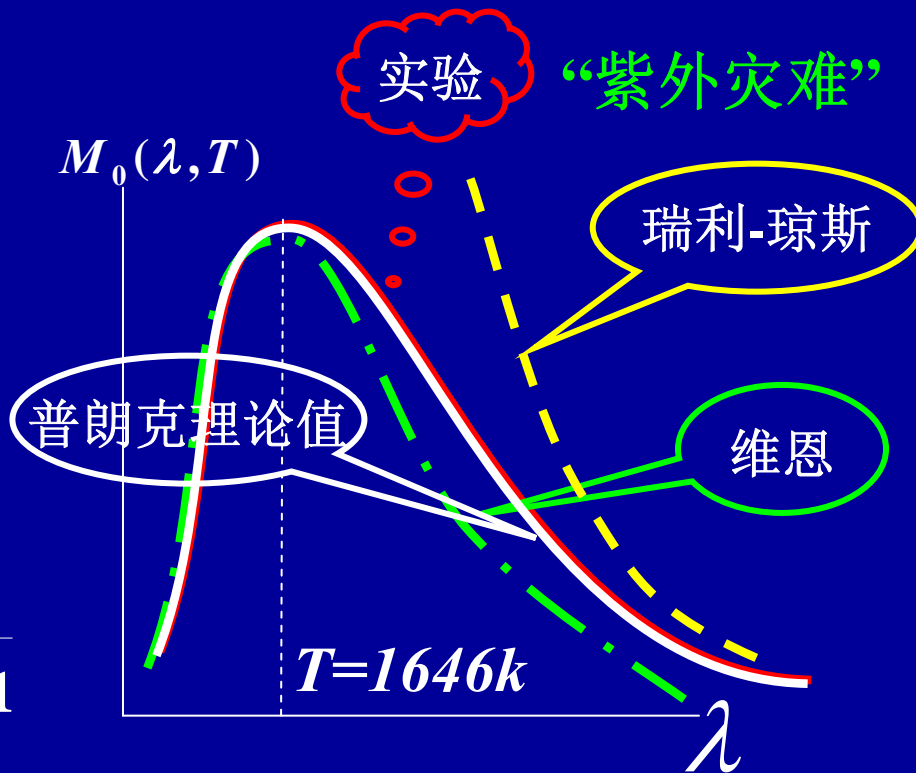
一. 黑体辐射

二. 普朗克能量量子假说(1918年诺贝尔物理奖)

辐射或吸收是以能量
为 $h\nu$ 的颗粒形式进行的

能量为 $h\nu$ 的颗粒——
能量子

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





§ 16.2 爱因斯坦的光子理论

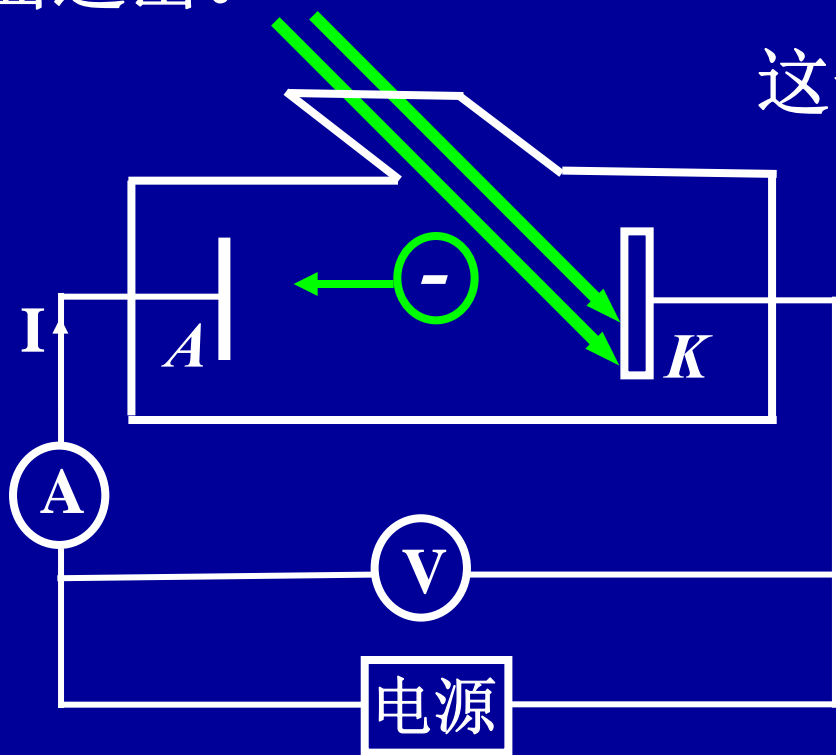
一. 光电效应的实验定律

当光照射在阴极 K (金属)时, 就有电子从阴极从表面逸出。

这一现象称作光电效应现象。

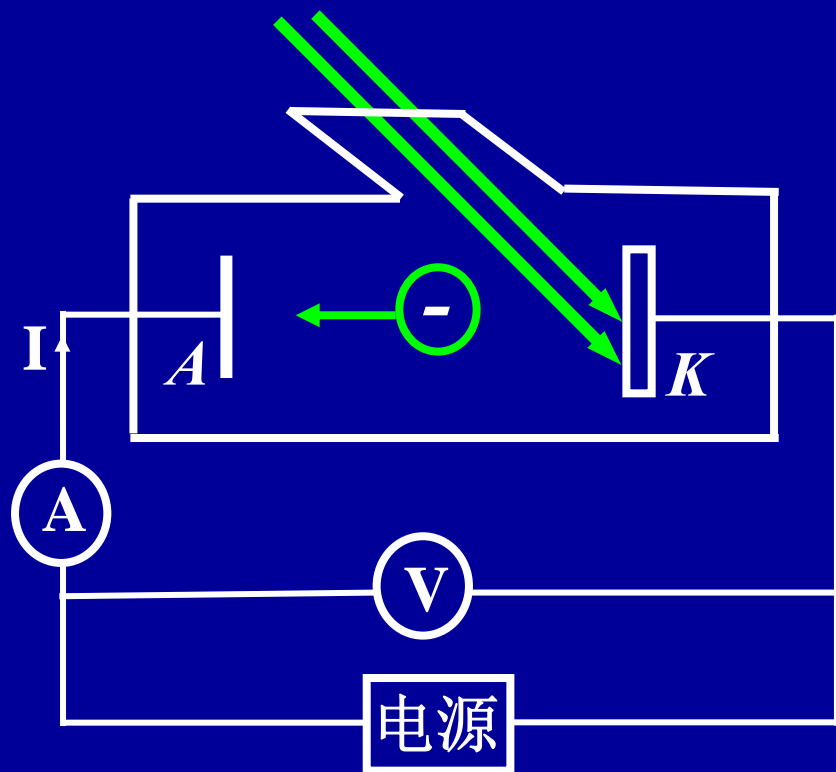
这种电子叫光电子。

在电场的作用下, 光电子由 K 奔向阳极 A , 形成光电流。





当加速电压增加到一定值时，**光电流达到一饱和值** I_s 。不加电压，还是有光电流，说明**光电子有初速度**。加反向电压，光电流减小。



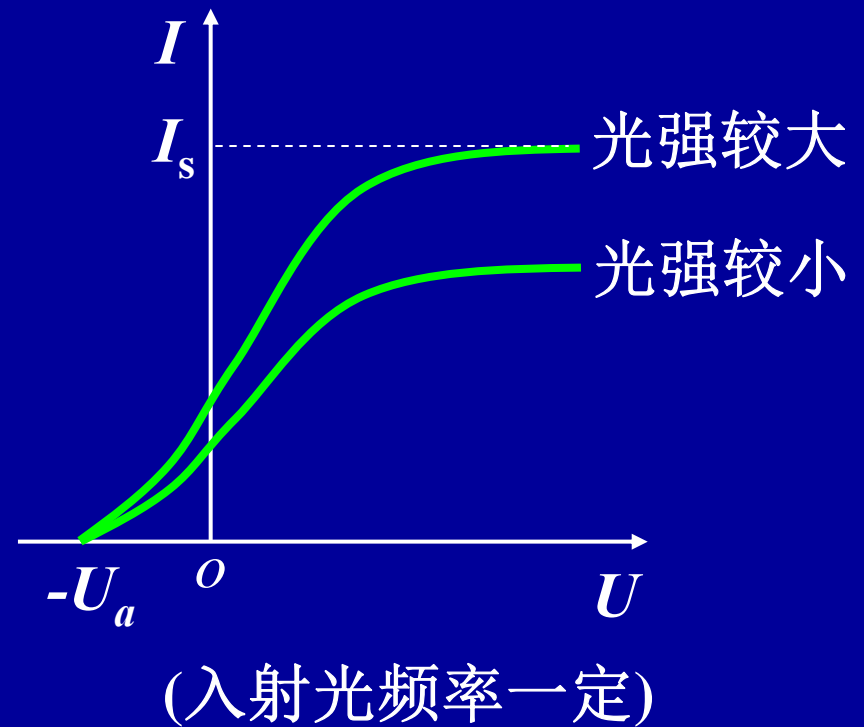
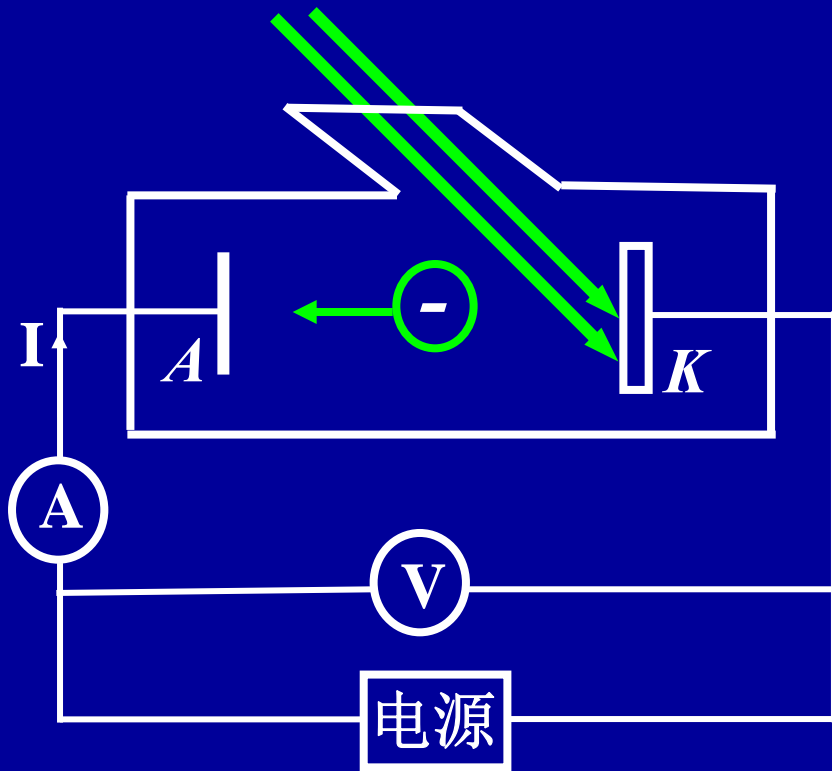
当反向电压达到某一值时，光电子全部不能达到阳极，没有光电流。

这一反向电压称为**遏止电压**， U_a 表示。

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



1. 当入射光频率一定时，饱和电流 I_s 和光强成正比。



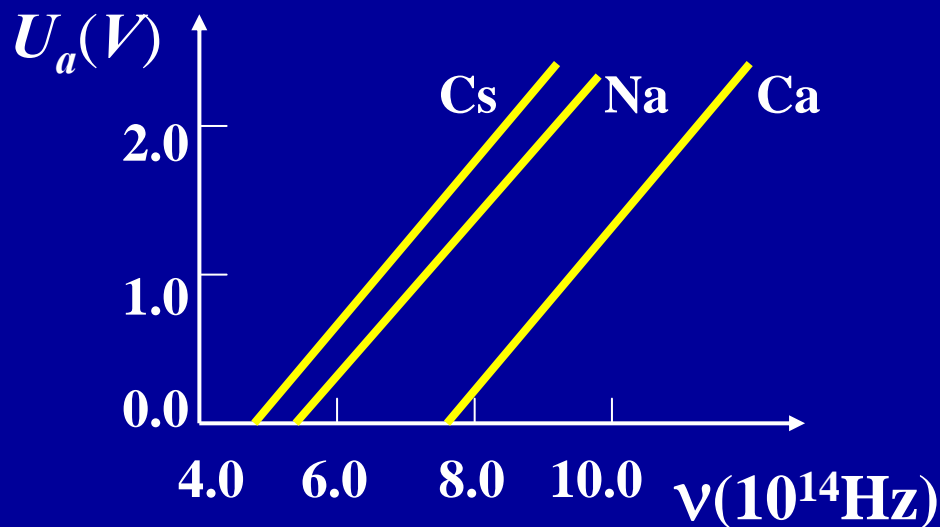
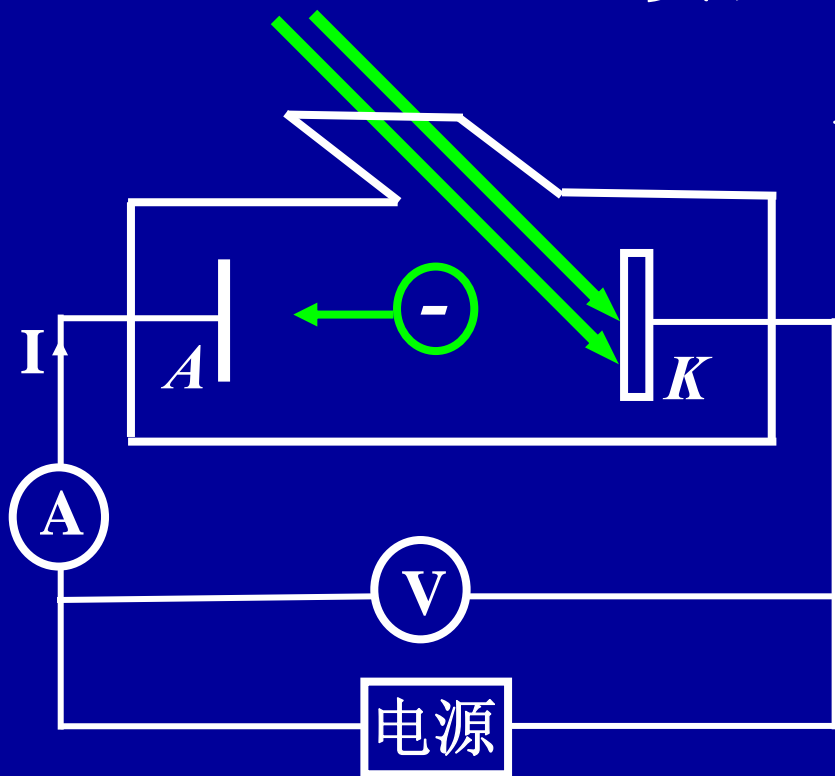


$$\frac{1}{2}mv^2 = eU_a$$

2. 光电子的初动能随入射光的频率线性增加，与入射光的强度无关。

实验： $U_a = K\nu - U_o$ (与入射光强无关)

$$\frac{1}{2}mv^2 = e(K\nu - U_o)$$

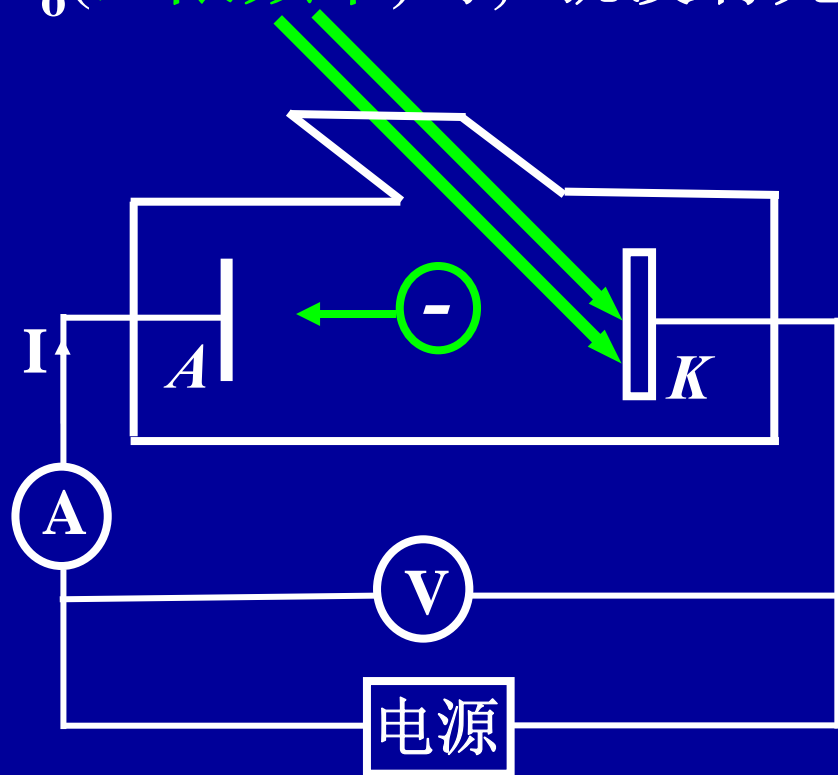




3. 存在红限

$$\frac{1}{2}mv^2 = eK\left(\nu - \frac{U_o}{K}\right) = eK(\nu - \nu_o) > 0$$

对一给定的金属，当入射光的频率小于某一频率 ν_o (红限频率) 时，就没有光电子逸出(即没有光电流)。



不同物质具有不同的红限频率。

4. 立即发射，驰豫时间不超过 10^{-9}s 。



● 波动说的解释

以上实验结果是光的经典波动图像无法解释的。

按照光的波动说，金属在光的照射下，其中的电子受到电磁波中电场作用而作**受迫振动**，吸收光波的能量，从而逸出金属表面。

由这种受迫振动的理论，**光强愈大，受迫振动的振幅愈大，发射出的光电子的初动能就应愈大。**

但实验结果是：**光电子的初动能与入射光强无关**，而与入射光的频率成线性关系。



同时，只要入射光强足够大(入射能量足够多)，金属中的电子就能从光波中吸收足够的能量并积累到一定量值而逸出金属表面，**根本不应存在红限频率**。

但实验指出，当**入射光的频率小于某一频率 ν_0** 时，无论入射光强如何，都没有光电子从金属中逸出(即没有光电效应)。按照波动理论，能量的积累是需要一定时间的，**光电子不会立即发射**。

理论计算表明，在功率为 $1mW$ 的入射光照射下，逸出功为 $1eV$ 的金属，从光开始照射到释放出电子，大约要等待 $16min$ ，这同**光电效应瞬时响应**的实验结果完全不符合。



二. 爱因斯坦光子说(1921年诺贝尔物理奖)

1. 爱因斯坦光子假设

A. 光在空间中传播时，也具有粒子性。

一束光就是以光速 c 运动的粒子流，这种粒子称为光子。

B. 不同频率的光，其光子的能量不同。

频率为 ν 的光的光子能量为 $E = h\nu$

按此假说，一束光有 n 个光子，则该束光的光强

$$I_{\text{光强}} = nh\nu c$$



按照光子假说:

a. 光经过单缝衍射后，在光屏上的光强分布曲线就可以理解为光子的堆积曲线。

在中央明条纹内，光子堆积的数目多。

b. 光与物质间进行的能量交换是以光子能量($h\nu$)为交换单位。



2. 爱因斯坦光电效应方程

当光和金属相互作用时，金属中的束缚电子吸收一个光子的能量后，一部分用于从金属表面逸出时所需要的逸出功，其余部分能量成为光电子的初动能：

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

逸出功

$$A = h\nu_0 = \frac{hc}{\lambda_0}$$

称为爱因斯坦光子方程。

此过程遵守能量守恒。



三. 光子理论解释光电效应

1. 按光子理论，要产生光电效应，需有光电子逸出，

$$\frac{1}{2}mv^2 \geq 0 \quad h\nu \geq A \quad \nu \geq \frac{A}{h}$$

$$\nu_{\min} = \frac{A}{h} = \nu_0$$

当入射光的频率 $\nu \geq \nu_0$ 时，方能产生光电效应。



注意:

A. $\nu_0 = \frac{A}{h} \rightarrow A = h\nu_0$ 是一个常用的式子。

B. $\lambda_0 = \frac{c}{\nu_0}$ 称为光电效应的红限波长。

当入射光波长 $\lambda \leq \lambda_0$ 时，才能发生光电效应。

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



2. 当光子的能量 $h\nu \geq A$ 时，金属中的束缚电子一次性吸收一个光子能量，无需能量积累时间。

因此，光电效应应该是**瞬时效应**。

3. 由光子方程 $\frac{1}{2}m\nu^2 = h\nu - A$

→ $\frac{1}{2}m\nu^2$ 与 ν 成**线性**关系。

$\frac{1}{2}m\nu^2$ 与光子数 N 无关， $\frac{1}{2}m\nu^2$ 与入射光强度无关。



4. 在满足红限频率的条件下，光强大，光子数多。因而吸收光子能量成为光电子的数目多，饱和电流大。

因此，饱和光电流和入射光强成正比。

小结:

光子理论完全成功地解释了光电效应的实验规律。

光电效应证明了光子假设的正确性。



四. 光的波粒二象性

光具有干涉，衍射现象，说明光是一种波。

光电效应又显示光具有粒子性。

因此，光具有波粒二象性，光既是粒子又是波。

在光的传播过程中，主要表现出波动性；当光和其他物质作用时，主要表现为粒子性。

描写光的波动性质的物理量是： λ 和 ν

描写光的粒子性质的物理量是：

能量 E 质量 m 动量 p



光的二象性之间的联系:

光子的能量 $E = h\nu = hc/\lambda$

光子的质量 动质量: $m = \frac{E}{c^2} = \frac{h\nu}{c^2} = \frac{h}{\lambda c}$

静质量: $m_0 = 0$

光子动量

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

$$m_o = m \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

(光子速度 $v = c$)

$$E = mc^2$$



光电效应的常用公式小结:

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

逸出功:

$$A = h\nu_0 = \frac{hc}{\lambda_0}$$

$$\begin{aligned}\frac{1}{2}m\nu^2 &= eU_a = h\nu - A = h\nu - h\nu_0 \\ &= h\frac{c}{\lambda} - h\frac{c}{\lambda_0}\end{aligned}$$



例2-1 真空中一孤立金属球的红限波长

$\lambda_0=6500\text{\AA}$ ，入射光波长 $\lambda=4000\text{\AA}$ ，试求：

(1) 发射出的光电子的初速度；

解： (1) $h\nu = \frac{1}{2}mv^2 + A$

$$\frac{1}{2}mv^2 = \frac{hc}{\lambda} - \frac{hc}{\lambda_0}$$

$$v = 6.5 \times 10^5 (m/s)$$

$$c = \nu\lambda$$

$$m = 9.11 \times 10^{-31}$$

$$h = 6.63 \times 10^{-34}$$



(2) 若金属球半径 $R=30\text{cm}$ ，该球最多能放出多少个光电子？

解：金属球发出光电子后，电势就会升高，升高到遏止电压 U_a 时就不再发射光电子了。

$$\frac{1}{2}mv^2 = eU_a \quad \therefore U_a = 1.19 \text{ (V)}$$

$$U_a = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 R} = \frac{Ne}{4\pi\epsilon_0 R}$$

$$N = \frac{4\pi\epsilon_0 RU_a}{e} = 2.48 \times 10^8 \text{ 个}$$



例2-3 波长为 λ 的光投射到一金属表面，发射出的光电子在匀强磁场 B 中作半径 R 的圆运动。求：(1) 入射光子的能量、质量和动量；(2) 此金属的逸出功及遏止电势差。

解：(1) $E = h\nu = hc/\lambda$, $m = \frac{E}{c^2} = h/\lambda c$, $p = mc = h/\lambda$

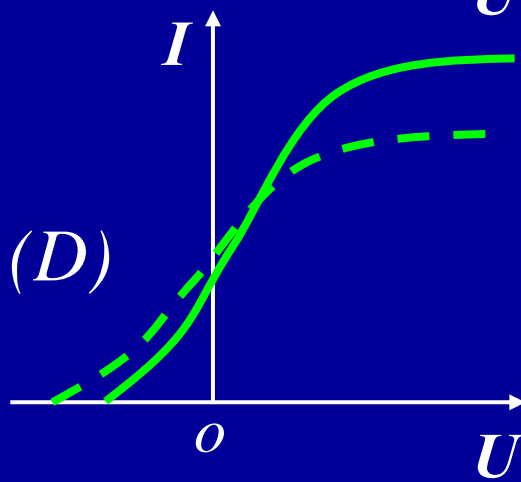
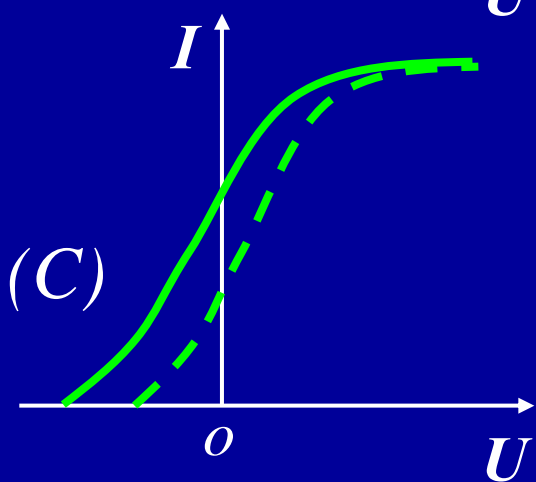
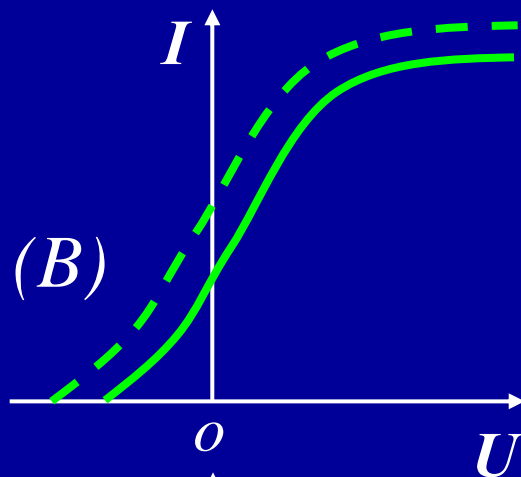
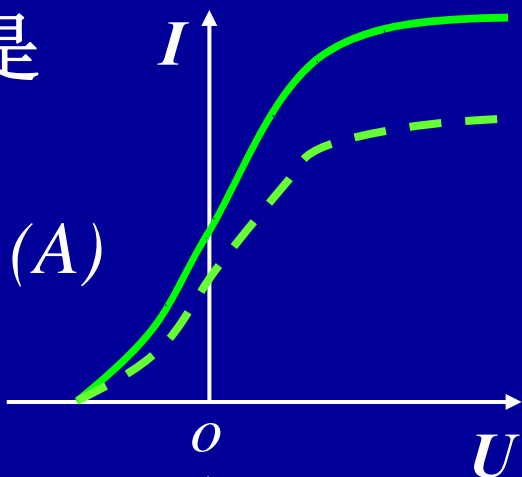
$$(2) \frac{hc}{\lambda} = \frac{1}{2}mv^2 + A \quad \because R = \frac{mv}{eB} \quad \therefore v = \frac{ReB}{m}$$

$$A = \frac{hc}{\lambda} - \frac{R^2 e^2 B^2}{2m}$$

$$\text{由 } \frac{1}{2}mv^2 = eU_a \text{ 得 } U_a = \frac{R^2 e B^2}{2m}$$



例2-4 一定频率的单色光照射到某金属表面，测出光电流曲线如实线所示；然后光强度不变、增大照射光的频率，测出光电流曲线如虚线所示。满足题意的图是



(D)



原因说明:

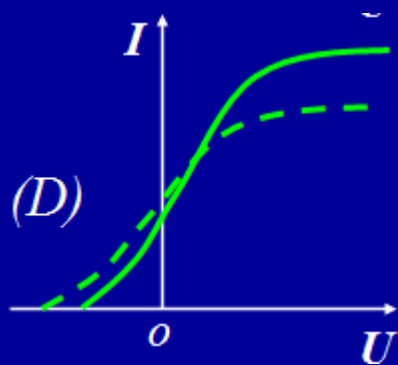
因增大照射光的频率，光电子的动能增大；
光电子的动能增大，遏止电压的数值增大。

$I_{\text{光强}} = nh\nu c$ 光强 $I_{\text{光强}}$ 不变， ν 增大，

光子数 n 减少。

光电子数减少，饱和光电流减小。

$$I_{\text{电流}} = nesV$$





例2-5 光的能流密度 $S=30(W/m^2)$, (1)求单位时间内投射到物体表面单位面积上的总动量; (2)若物体表面的反射率为1, 求物体表面受的光压。

解: 单位时间内投射到物体表面单位面积上的光子数为

$$N = \frac{S}{h\nu}$$

于是单位时间内投射该物体表面单位面积上的总动量为

$$\sum p = N \frac{h}{\lambda} = \frac{S}{c} = 1.0 \times 10^{-7} (kg.m.s^{-1})$$

由动量定理: $\overline{F}\Delta t = \Delta p = 2\Sigma p$, 于是光压为

$$P = 2\sum p = \frac{2S}{c} = 2.0 \times 10^{-7} (pa)$$



例2-6 图为光电效应实验曲线。(1)求证对不同材料的金属，AB段的斜率相同；(2)由图上数据求出普朗克恒量 h 。

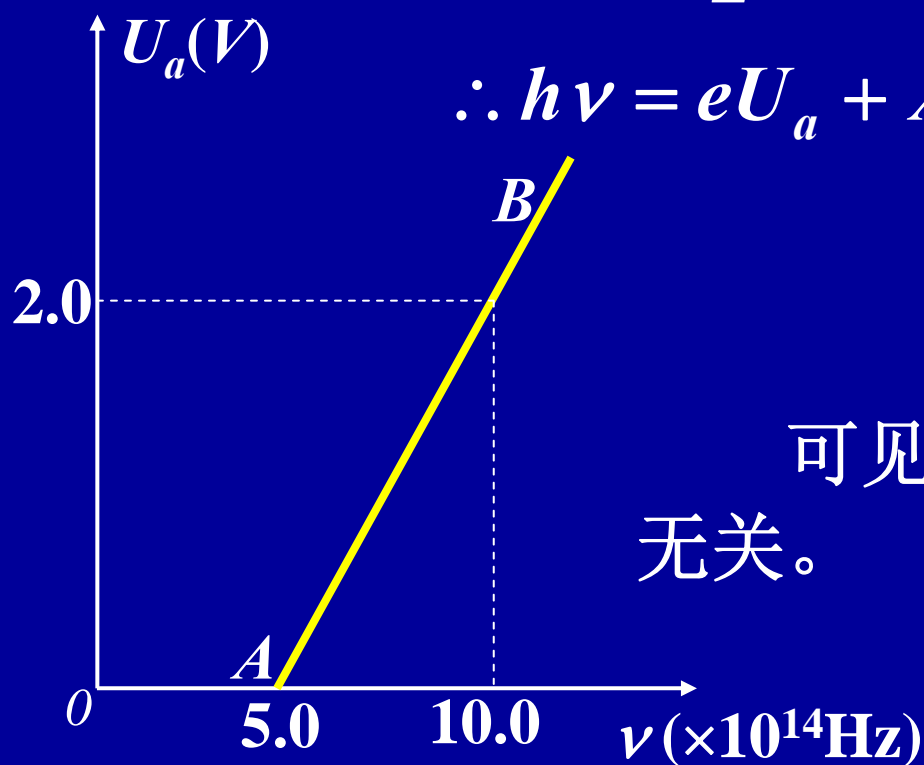
解： (1) $\because h\nu = \frac{1}{2}mv^2 + A, \quad \leftarrow \frac{1}{2}mv^2 = eU_a$

$\therefore h\nu = eU_a + A \quad \xrightarrow{\text{求导}} \quad h = e \frac{dU_a}{d\nu}$

$$\frac{dU_a}{d\nu} = \frac{h}{e}$$

可见，AB段的斜率与材料种类无关。

$$h = e \frac{dU_a}{d\nu} = 6.4 \times 10^{-34} \text{J}\cdot\text{s}$$

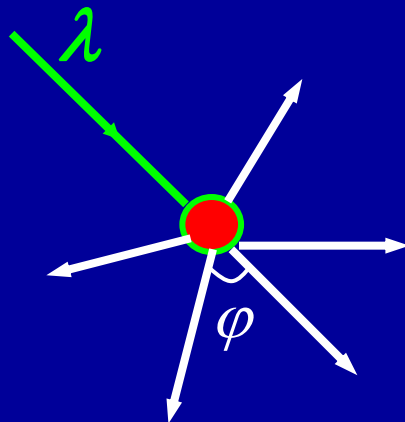




§ 16.4 康普顿散射 (1927年诺贝尔物理奖)

一. 散射

向一定方向传播的光线通过不均匀物质后，向各个方向传播的现象，称为**散射**。



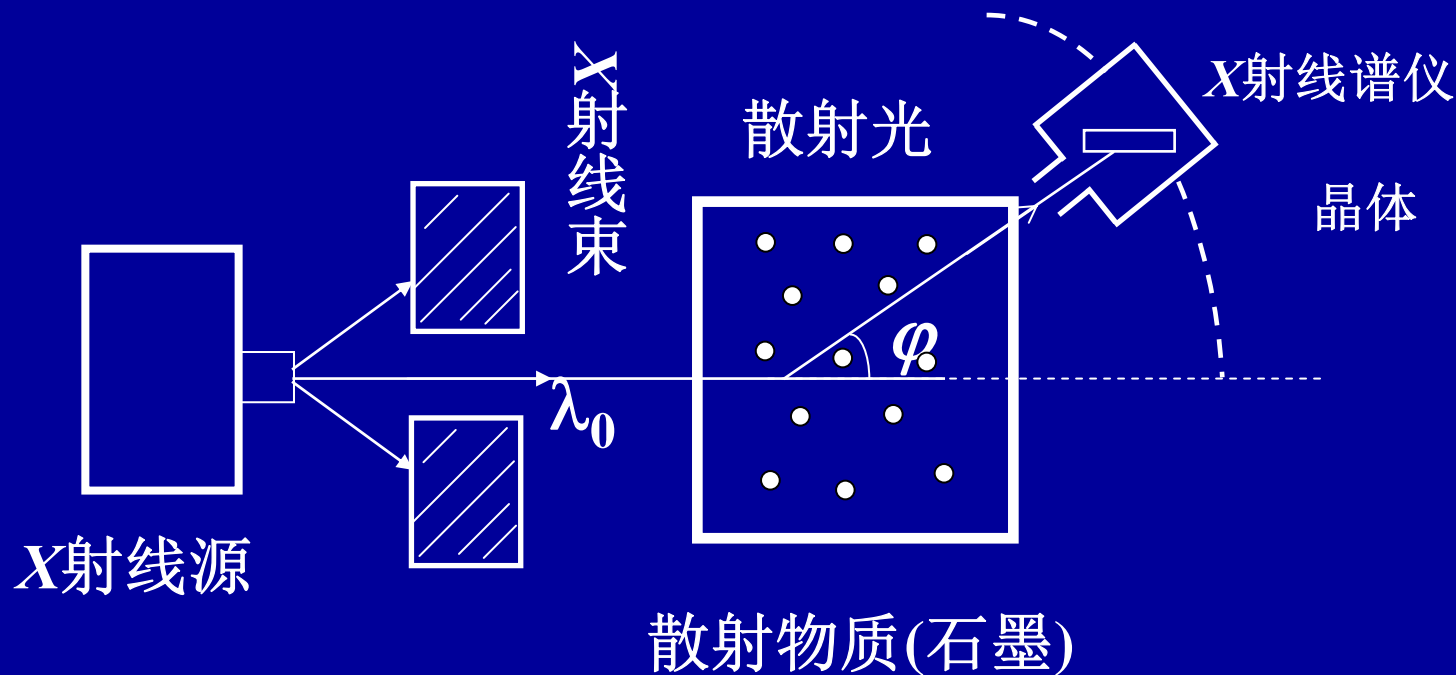
按照波动的“**受迫振动**”理论，向各个方向散射的光的频率和波长都与入射光相同；而散射光的强度与波长成反比。

这个结论对一般波长是正确的。



二. 康普顿散射

1923年康普顿及其学生吴有训研究了X射线通过物质时向各个方向散射的现象。



发现：在散射的X射线中，除了原波长的散射线外，还有波长较长的散射。改变波长的散射称为康普顿散射。



波长极短的X射线被轻元素(如石墨)散射后:

1. 散射X射线中, 正常散射($\lambda=\lambda_0$); 有康氏散射($\lambda>\lambda_0$)。

2. 波长增加量 $\Delta\lambda=\lambda-\lambda_0$ 与散射角 ϕ 有关, 散射光的波长 λ 随散射角 ϕ 的增大而增大;

$\Delta\lambda=\lambda-\lambda_0$ 与散射物质无关。

3. 康氏散射的强度与散射物质有关, 原子量较小的物质, 康氏散射较显著。



经典散射理论的困难

经典散射理论：X射线是一种电磁波，它引起物质中的电子做**受迫振动**，每个受迫振动的电子辐射电磁波，形成散射的X射线。

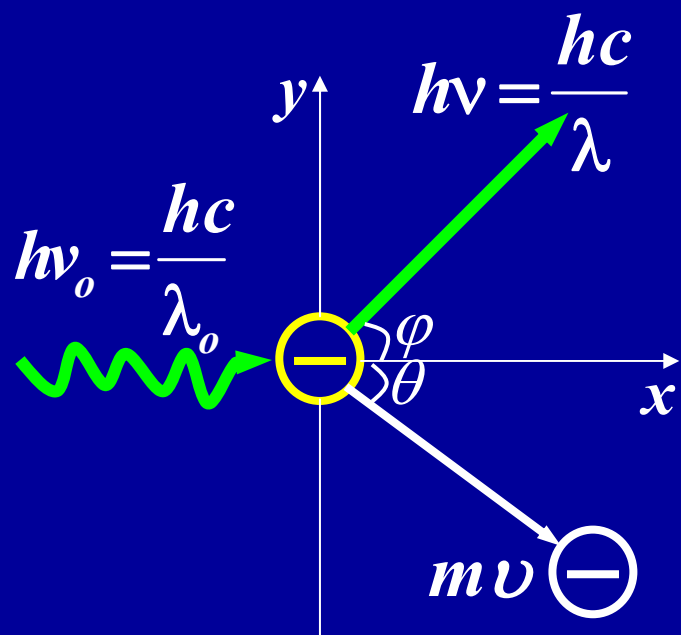
按照这种散射理论，能够解释**波长不变的正常散射**。因电子的受迫振动的频率和入射的X射线频率相等，电子受迫振动辐射的电磁波(散射的X射线)的频率与入射的X射线的频率相同。

对**波长变长的康氏散射**，按此理论不能解释。



三. 用光子概念分析康普顿散射

入射X射线高能、高速光子与静止的自由电子作弹性碰撞。



入射X光子和电子碰撞后成为散射光子。

自由电子获得入射X光子的一部分能量成为反冲电子。

散射X光子的能量较入射X光子能量小。

$$(h\nu)_{\text{散射}} < (h\nu_0)_{\text{入射}}$$

$$\nu_{\text{散射}} < \nu_{\text{入}} \quad \lambda_{\text{散射}} > \lambda_0$$



用光子理论解释正常散射

入射X射线光子除了和散射物质中的自由电子弹性碰撞外，还会与散射物质中的**束缚电子发生弹性碰撞**。由于束缚电子被原子紧密束缚，因此**入射的光子与束缚电子的碰撞等效于与整个原子碰撞**。

由于原子的质量很大，**X射线光子的能量不会显著地改变**。

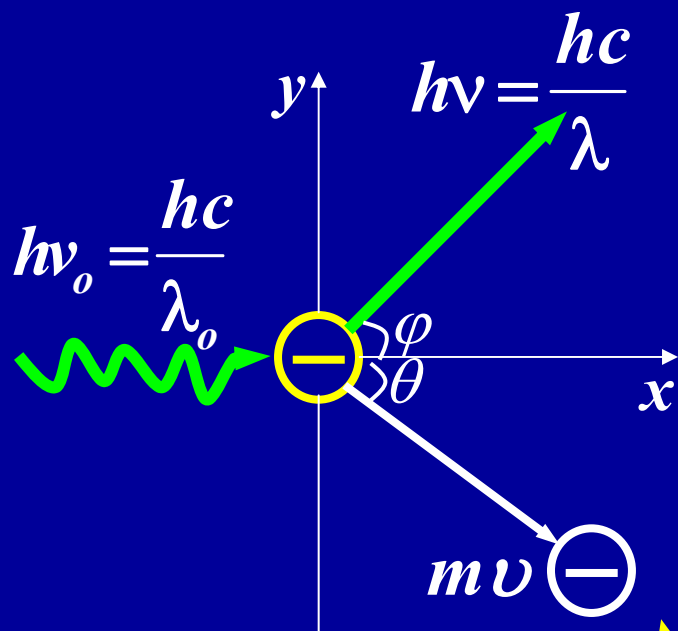
频率不变，波长不变。

这就是波长不变的正常散射。



四. 康普顿散射公式

高能光子与静止的自由电子作弹性碰撞。



能量守恒:

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

动量守恒:

$$x: \frac{h}{\lambda_0} = \frac{h}{\lambda} \cos \varphi + mv \cos \theta$$

$$y: 0 = \frac{h}{\lambda} \sin \varphi - mv \sin \theta$$

$$\lambda - \lambda_0 = \frac{2h}{m_0c} \sin^2 \frac{\varphi}{2}$$

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \quad c = v\lambda$$



$$\lambda - \lambda_0 = \frac{2h}{m_0 c} \sin^2 \frac{\varphi}{2}$$

可见，波长的改变 $\lambda - \lambda_0$ (散射波长 λ) 随散射角 φ 的增大而增大，与散射物质无关，这与实验完全符合。

康普顿波长：

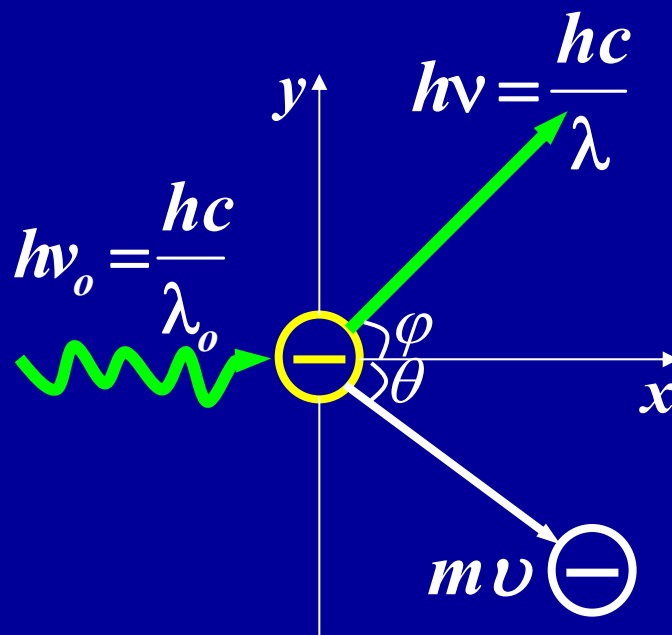
$$\lambda_c = \frac{h}{m_0 c} = 0.024 \text{ \AA}$$

散射波长的最小值和最大值分别是：

$$\text{当 } \varphi = 0, \quad \lambda_{\min} = \lambda_0;$$

$$\text{当 } \varphi = 180^\circ, \quad \lambda_{\max} = \lambda_0 + 2\lambda_c$$

最大的波长偏移为2倍康普顿波长。





五.康普顿散射的意义

康氏效应证实了：

1. 光子假设的正确性、狭义相对论力学的正确性；
2. 光确实具有波粒二象性；
3. 微观粒子也遵守能量守恒和动量守恒定律。



问题1:

为什么用可见光观察不到康普顿散射？

可见光 $\lambda_0=10^{-7}m$, 康氏波长偏移 $\Delta\lambda$ 的数量级为 $10^{-12}m$.

康普顿散射后的波长为

$$\lambda = \lambda_o + \Delta\lambda \cong \lambda_o$$

可见光观察不到康普顿散射，**X射线**可以。



问题2: 光电效应和康普顿散射都是光子和电子的作用过程。 **它们有什么不同?**

共同点: 二者都是光子和电子相互作用的结果。

区别:

① 光电效应是光子和**金属中的束缚电子**相互作用。电子全部吸收一个光子的能量而逸出表面。此过程遵守**能量守恒**。

② 康氏效应是光子和**金属中的自由电子弹性碰撞**的结果。自由电子部分吸收光子的能量成为反冲电子和散射光子。此过程遵守**动量守恒和能量守恒**。



③ 光电效应和康氏效应没有严格的限制，二者同时存在，光电效应有弱的康氏效应，反之亦然。

轻金属，原子对电子的束缚较弱，自由电子多，康氏效应显著。

重金属，原子对电子的束缚较强，束缚电子多，光电效应显著。



例4-1 用波长 $\lambda_0=0.014\text{\AA}$ 的X射线作康普顿散射实验，反冲电子的最大动能是多少？

解： 根据能量守恒，反冲电子的动能为

$$E_k = \frac{hc}{\lambda_0} - \frac{hc}{\lambda}$$

有极值的条件是一阶导数为零，由此得 $\lambda \rightarrow \infty$ ，最大动能是：

$$E_k = \frac{hc}{\lambda_0} \quad \times$$

事实上 λ 的最大值只为 $\lambda_{max}=\lambda_0+2\lambda_c$ ，由此得反冲电子的最大动能为

$$E_k = \frac{hc}{\lambda_0} - \frac{hc}{\lambda_0 + 2\lambda_c} = 1.1 \times 10^{-13} \text{ J}$$



例4-2 康普顿散射中，入射波长 $\lambda_0=0.1\text{\AA}$ 。在与入射方向成 90° 角的方向上，散射波长为多大？反冲电子的动能和动量如何？

解：将 $\varphi=90^\circ$ 代入：

$$\Delta\lambda = \lambda - \lambda_0 = \frac{2h}{m_0c} \sin^2 \frac{\varphi}{2}$$

散射波长为： $\lambda = \lambda_0 + \Delta\lambda = 0.1 + 0.024 = 0.124\text{\AA}$

反冲电子的动能：

$$E_k = \frac{hc}{\lambda_0} - \frac{hc}{\lambda} = 3.8 \times 10^{-15} \text{ J}$$



由动量守恒:

$$x: \frac{h}{\lambda_o} = \frac{h}{\lambda} \cos \varphi + m v \cos \theta$$

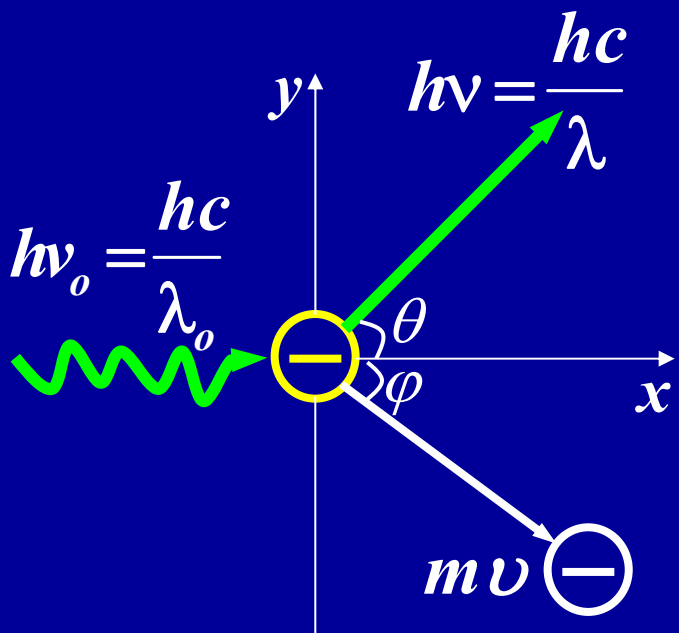
$$y: 0 = \frac{h}{\lambda} \sin \varphi - m v \sin \theta$$

将 $\varphi = 90^\circ$ 代入得

$$\frac{h}{\lambda_o} = p \cos \theta, \quad \frac{h}{\lambda} = p \sin \theta$$

$$\therefore p = h \sqrt{\frac{1}{\lambda_o^2} + \frac{1}{\lambda^2}} = 8.5 \times 10^{-23} \text{ (SI)}$$

$$\theta = \cos^{-1}\left(\frac{h}{\lambda_o p}\right) = 38^\circ 44'$$





例4-3 X射线($\lambda_0 = 0.03\text{\AA}$)投射到石墨上, 测得反冲电子速度 $v = 0.6c$, 求: (1)电子因散射而获得的能量是静能的几倍? (2)散射光子的波长 $\lambda = ?$ 散射角 $\varphi = ?$

解: (1) 电子因散射而获得的能量:

$$E_k = mc^2 - m_0c^2 = m_0c^2 \left(\frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} - 1 \right) = 0.25m_0c^2$$

$$(2) \text{ 又 } E_k = 0.25m_0c^2 = \frac{hc}{\lambda_0} - \frac{hc}{\lambda}, \quad \therefore \lambda = 0.0434\text{\AA}$$

$$\text{由 } \lambda - \lambda_0 = \frac{2h}{m_0c} \sin^2 \frac{\varphi}{2} \quad \text{得: } \varphi = 63.4^\circ$$



例4-4 康普顿散射中，入射光子能量为 0.5MeV 。若反冲电子能量为 0.1MeV ，求散射光子波长的改变量 $\Delta\lambda$ 与入射光子波长 λ_0 之比。

解： $\because E_o = \frac{hc}{\lambda_o} \quad \therefore \lambda_o = \frac{hc}{E_o}$

$$E_k = E_o - \frac{hc}{\lambda} \quad \Rightarrow \quad \lambda = \frac{hc}{E_o - E_k}$$

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_o} = \frac{\lambda - \lambda_o}{\lambda_o} = \frac{E_k}{E_o - E_k} = \frac{0.1}{0.5 - 0.1} = 0.25$$

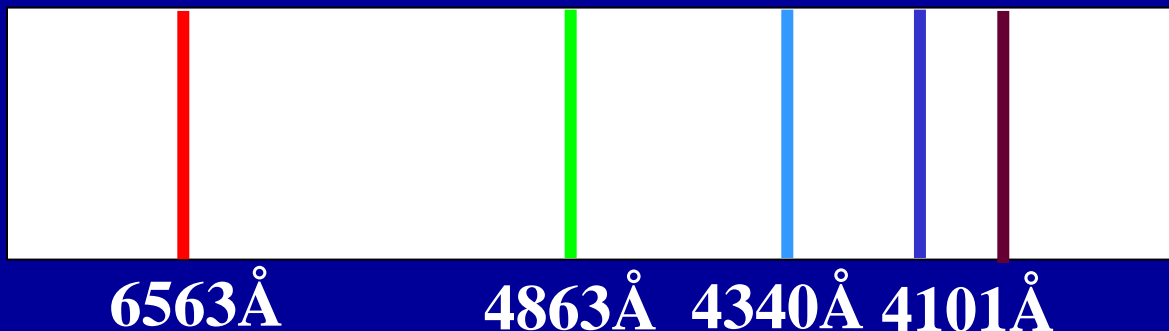


§ 16-3 氢原子光谱 玻尔理论

不同原子的辐射光谱完全不同，因此研究原子光谱的规律是探索原子内部结构的重要方法。

一. 氢原子光谱的实验规律

1. 氢原子光谱是由一些分立的细亮线组成，即是分立的线光谱。





2. 谱线的波数(波长)由下式确定:

$$\bar{\nu} = \frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{k^2} - \frac{1}{n^2} \right)$$

$k=1, n=2,3,\dots$ 赖曼系(紫外区);
 $k=2, n=3,4,\dots$ 巴耳末系(可见光区);
 $k=3, n=4,5,\dots$ 帕邢系(红外区);

.....

($R=1.097 \times 10^7 m^{-1}$ —里德伯恒量)

3. 里兹并合原理

任何原子谱线的波数均由下式确定:

$$\bar{\nu} = T(k) - T(n)$$

$T(k)$ 、 $T(n)$, 称为光谱项。



二. 卢瑟福原子核型结构及困难

1911年，卢瑟福通过 α 粒子散射实验证明：

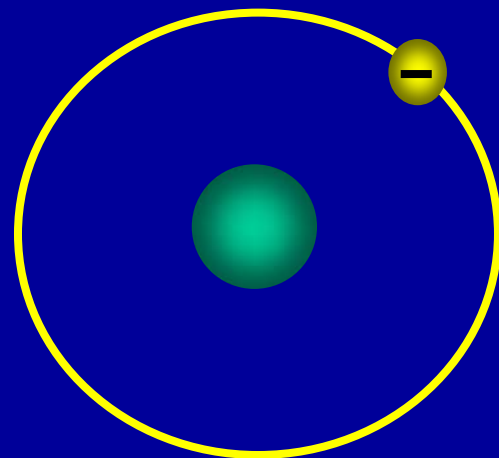
原子是由带正电的核和在核外作轨道运动的电子组成。

原子的核型结构

卢瑟福原子模型的困难：

不能解释原子的稳定性问题；

不能解释原子为什么会发出分立线状光谱。





因为据经典电磁理论，绕核作变速运动的电子必将不断地向外辐射电磁能量。

这就产生了两个后果：

一是由于原子系统的能量连续不断地减少，频率也将连续的改变，原子应发出连续的光谱。

这与原子线状光谱的实验事实不符。

二是电子能量的不断减少，它将沿螺线逐渐接近原子核，最终落在核上，这意味着原子的毁灭。

但事实上原子系统是稳定的。



1913年，玻尔在卢瑟福的核型结构的基础上，把量子概念应用于原子系统，提出三条基本假设作为他氢原子理论的基础，使氢光谱规律获得很好的解释。

三. 玻尔氢原子假设

(1) 定态假设

原子系统只能处于一系列不连续的能量状态(能级 E_1, E_2, \dots)；电子虽然在相应的轨道上绕核作圆周运动，但不辐射能量。

这些状态称为原子系统的稳定态(简称定态)。



(2) 轨道角动量量子化假设

电子绕核作圆周运动，但其轨道角动量 L 决定于下述条件：

$$L = m v r = n \hbar \quad \text{量子数 } n=1,2,\dots \quad \hbar = \frac{h}{2\pi}$$

(3) 量子跃迁假设

原子从 E_n 跃迁到 E_k 发出(或吸收)光的频率：

$$\nu = \frac{E_n - E_k}{h}$$

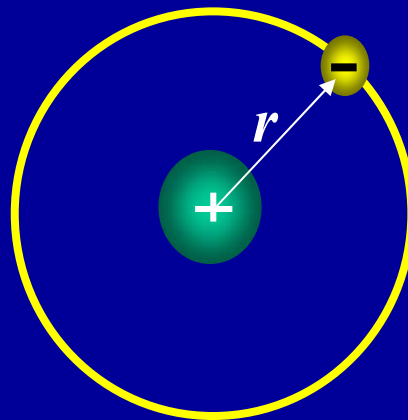


四. 玻尔的氢原子理论

三条基本假设+经典理论(牛顿定律)

$$\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r^2} = m \frac{v^2}{r}$$

$$L = m v r = n \hbar$$



得轨道半径:

$$r_n = n^2 a_o \quad n=1,2,\dots$$

玻尔半径:
$$a_o = \frac{\epsilon_o h^2}{\pi m e^2} = 5.29 \times 10^{-11} m$$



氢原子系统的动能:

$$E_k = \frac{1}{2} m v^2 = \frac{e^2}{8\pi\epsilon_0 r_n}$$

$$\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r^2} = m \frac{v^2}{r}$$

氢原子系统的势能:

$$E_p = -\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r_n}$$

$$r_n = n^2 a_o$$

氢原子系统的能量:

$$a_o = \frac{\epsilon_o h^2}{\pi m e^2}$$

$$E = E_k + E_p = -\frac{e^2}{8\pi\epsilon_0 r_n}$$

即
$$E_n = -\frac{1}{n^2} \left(\frac{m e^4}{8 \epsilon_o^2 h^2} \right) \quad n=1,2,\dots$$



氢原子系统的能量为

$$E_n = -\frac{13.6\text{eV}}{n^2} \quad n=1,2,\dots$$

$$r_n = n^2 a_o$$

(1) 能量是量子化的负值。

$n=1$, 基态, $E_1=-13.6\text{eV}$, $r_1=a_o$;

$n=2$, 第1激发态, $E_2=-3.4\text{eV}$, $r_2=4a_o$;

$n=3$, 第2激发态, $E_3=-1.51\text{eV}$, $r_2=9a_o$;

$n=4$, 第3激发态, $E_4=-0.85\text{eV}$, $r_2=16a_o$;

.....

能量为负值表示原子中的电子处于束缚态。



(2) **电离能**(使基态氢原子中的电子远离核所需作的功)为

$$E_{\text{电离}} = 13.6\text{eV}, \text{ 与实验很好符合。}$$

(3) 当原子从能态 E_n 跃迁到 E_k 时, 发射光子的频率为

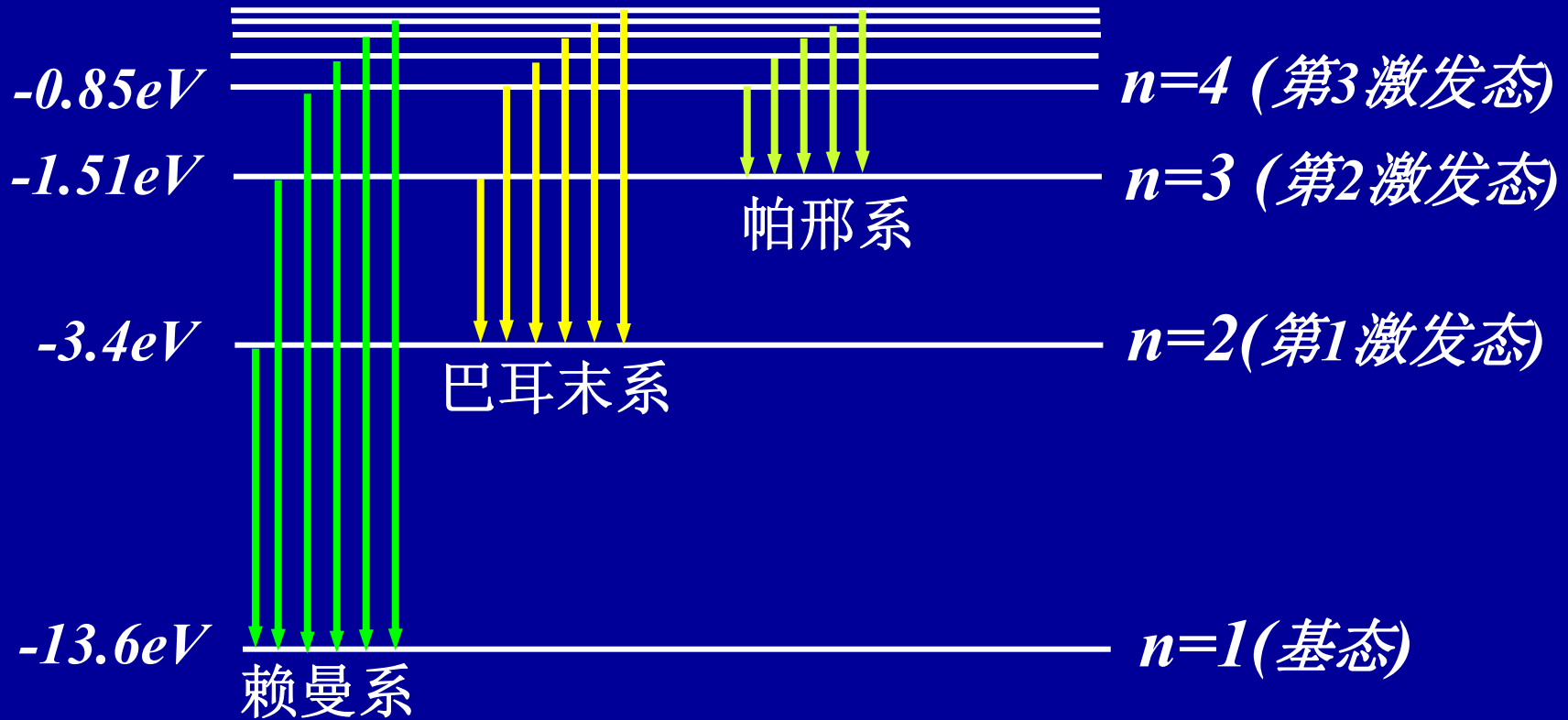
$$\nu = \frac{E_n - E_k}{h} = \frac{me^4}{8\epsilon_0^2 h^3} \left(\frac{1}{k^2} - \frac{1}{n^2} \right) = Rc \left(\frac{1}{k^2} - \frac{1}{n^2} \right)$$

$$\bar{\nu} = \frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{k^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad E_n = -\frac{1}{n^2} \left(\frac{me^4}{8\epsilon_0^2 h^2} \right)$$

$$R = \frac{me^4}{8\epsilon_0^2 h^3 c} = 1.097 \times 10^7 \text{m}^{-1} \text{ (里德伯恒量)}$$



$$E_n = -\frac{13.6\text{eV}}{n^2} \quad n=1,2,\dots$$



$$\nu = \frac{c}{\lambda} = \frac{E_n - E_k}{h} \quad \bar{\nu} = \frac{1}{\lambda} = R\left(\frac{1}{k^2} - \frac{1}{n^2}\right)$$



五. 玻尔理论的成就与缺陷

成功：玻尔理论成功地解释了氢原子和类氢离子的光谱规律。定态、能级、电子跃迁等概念是普遍成立的。

不足：无法解释氢原子光谱的精细结构(如强度、能带、选择定则)。更无法解释其它原子的光谱规律。玻尔理论实际上是经典理论与量子理论的大杂烩。

但玻尔理论给人们指明了一个方向，只有用完整的量子理论才能正确地描述原子世界的规律，获1922年诺贝尔物理学奖。



例3-1 可见光能否使基态氢原子受到激发？要使基态氢原子发出可见光，至少应供给多少能量？

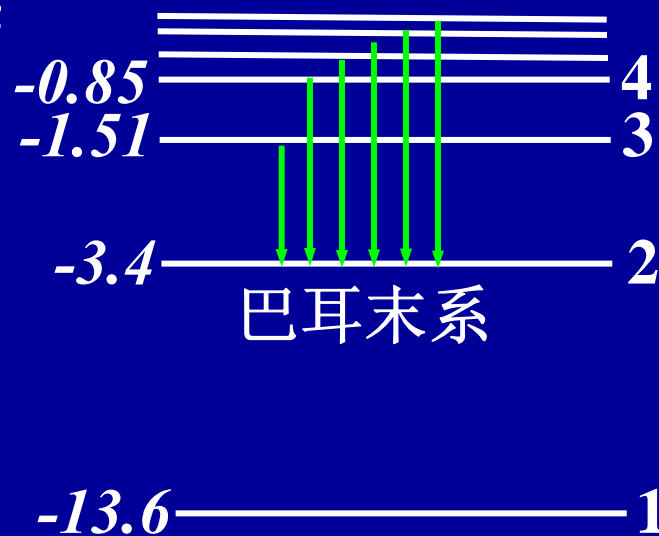
解：激发—使处于基态的氢原子跃迁到激发态。

可见光光子的能量(取 $\lambda = 4000\text{\AA}$):

$$E = \frac{hc}{\lambda} = 3.1\text{eV}$$

最低激发能量为 (13.6-

3.4)eV=10.2 eV> 3.1eV可见光不能使基态氢原子受到激发。



要使基态氢原子发出可见光，至少应供给的能量为 $13.6-1.51=12.09\text{ eV}$

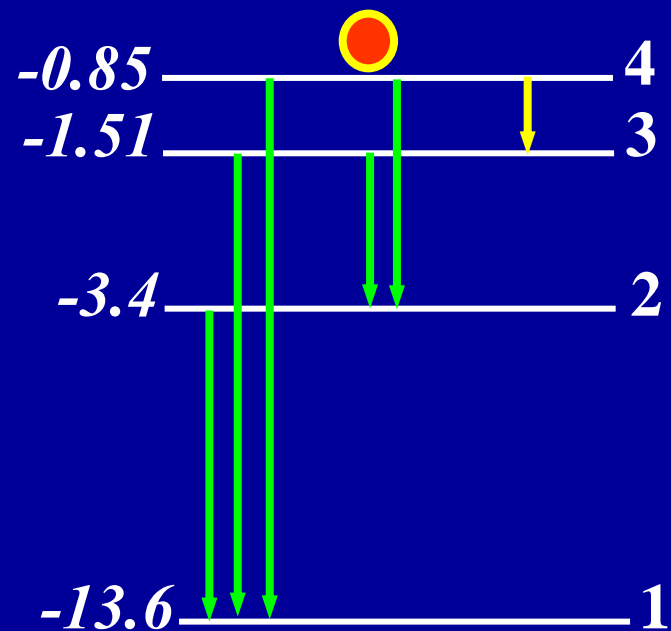


例3-2 大量氢原子处于第3激发态，跃迁过程中能发出几条谱线？各属于哪个线系？

解：实验证明，基态是稳定的。

处于激发态上的原子寿命极短，约为 $10^{-8} \sim 10^{-10} \text{s}$ 。因此处于激发态上的原子都自发的倾向于向低能态跃迁。

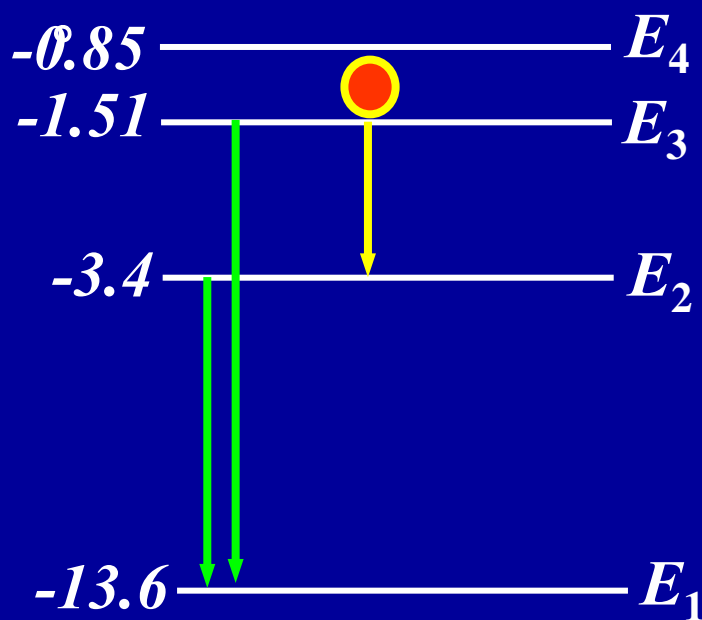
$n=4$ 赖曼系： 3条；
 巴耳末系： 2条；
 帕邢系： 1条。





例3-3 用动能为 12.2eV 的电子轰击基态氢原子，求可能发出光子能量和光波波长。

解： 设电子能把它的动能尽量多的交给基态氢原子，那么，基态氢原子能跃迁到的最高能级 E_3 是



计算波长有两种方法：

$$\bar{\nu} = \frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{k^2} - \frac{1}{n^2} \right)$$

$$\nu = \frac{c}{\lambda} = \frac{E_n - E_k}{h}$$

$$E_n = -\frac{13.6\text{eV}}{n^2}$$



$$\bar{\nu} = \frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{k^2} - \frac{1}{n^2} \right)$$

$$R = 1.097 \times 10^7 \text{ m}^{-1}$$

$E_2 \rightarrow E_1$: 发射光子 $E = 10.2 \text{ eV}$

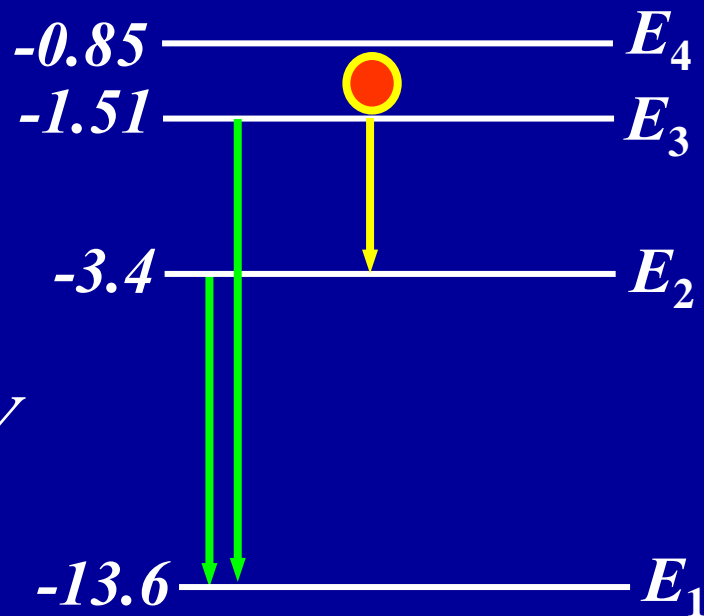
$$k=1, n=2, \lambda = 1215 \text{ \AA}$$

$E_3 \rightarrow E_1$: 发射光子 $E = 12.09 \text{ eV}$

$$k=1, n=3, \lambda = 1026 \text{ \AA}$$

$E_3 \rightarrow E_2$: 发射光子 $E = 1.89 \text{ eV}$

$$k=2, n=3, \lambda = 6563 \text{ \AA}$$





玻尔理论虽然圆满解释了氢原子及类氢原子的光谱，但对谱线的强度无法计算；对其它原子更无能为力。

从理论上讲，只不过是经典理论的基础上加上了一些量子条件，它远不是真正的量子论。

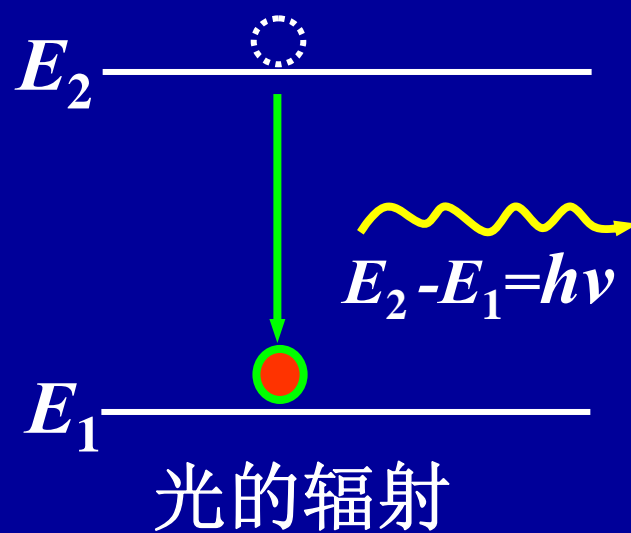
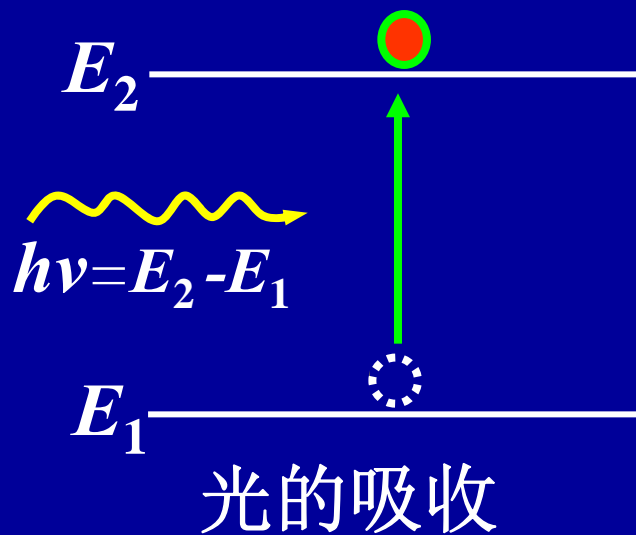
真正的量子论我们将在第17章中介绍。



§ 16.5 激光原理

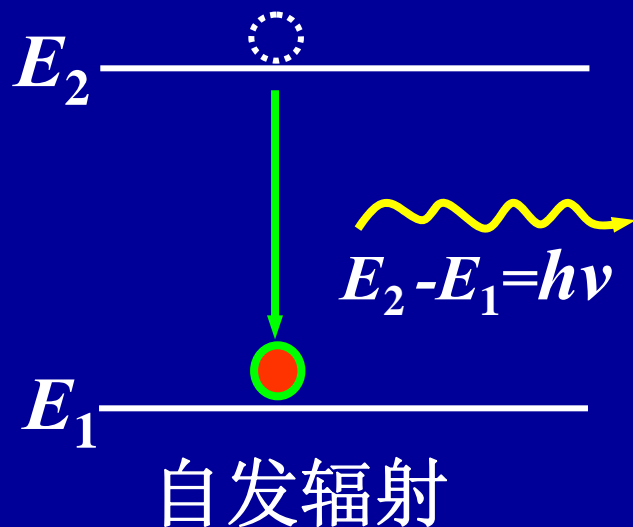
本节仅就激光形成的基本原理和它的特性及其应用作一扼要的介绍。

一. 光的吸收和辐射



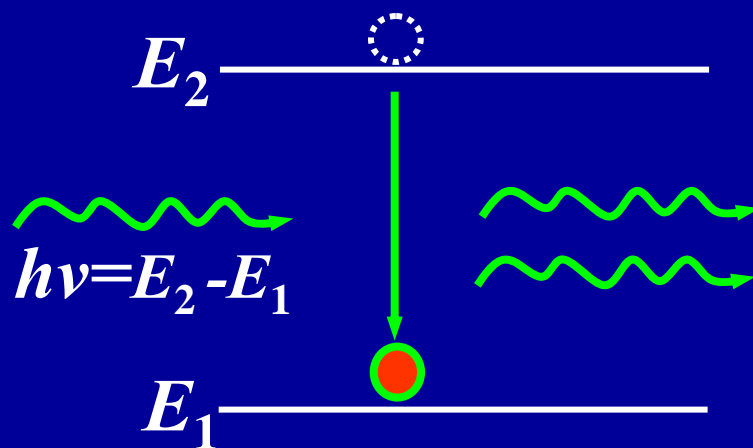


二. 自发辐射和受激辐射



处于激发态的原子，在没有外界作用的情况下，**自发地**从激发态返回基态，从而辐射出光子。这种辐射称为**自发辐射**。

特点：自发辐射出的**光子特性**(频率、相位、偏振状态、传播方向)**均不同**，所以自发辐射的光是不相干的。普通光源发光就属于自发辐射。



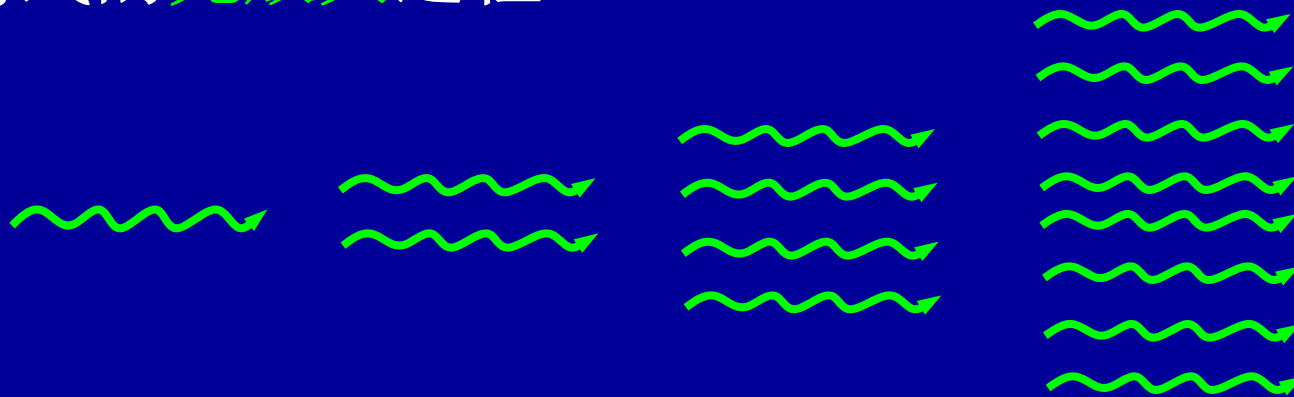
受激辐射

处于激发态的原子，在自发辐射前受到能量 $h\nu = E_2 - E_1$ 的外来光子的刺激，从高能态 E_2 跃迁到低能态 E_1 ，同时辐射出一个与外来光子状态相同的光子。这种辐射称为受激辐射。

特点：受激辐射辐射发出的光子特性(频率、相位、偏振状态以及传播方向)完全相同。



一个光子的输入，由于受激辐射而得到两个完全相同的光子，这两个又可变为四个这就形成了雪崩式的**光放大**过程。



由于受激辐射出的大量光子特性相同，即光子简并度大，所以受激辐射发出的光相干性好，亮度极高，从而出现光源的质的飞跃。

因此，**受激辐射是形成激光的基础。**



三. 粒子数反转

有了受激辐射，是否就能得到激光输出呢？

否！光通过工作物质时，不仅有受激辐射形成的光放大，还有光的吸收。

根据玻耳兹曼分布律，通常温度下，处于低能态的原子数总是多于高能态的原子数(正常分布)。光通过这种煤质时，吸收光子的原子多，辐射光子的原子少，因此总的效果是光强减弱。

要获得真正的光放大，就要求辐射光子的原子多，吸收光子的原子少，这就必须使处于高能态上的原子数 N_2 多于低能态原子数 N_1 ，这种分布称为粒子数反转分布。



实现**粒子数反转**是产生激光的必要条件。

实现粒子数反转的两个条件是：

第一，外界向工作物质输入**能量**，把尽可能多的原子从低能级激发到高能级，这一过程称为**激励**(也称为抽运或泵浦)。

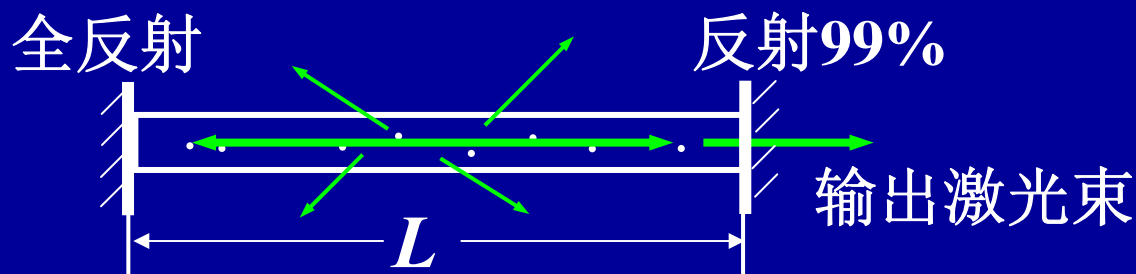
第二，工作物质要有(能发生粒子数反转的)适当的能级结构。



四. 光学谐振腔

光学谐振腔的作用有：

1. 产生和维持光放大；



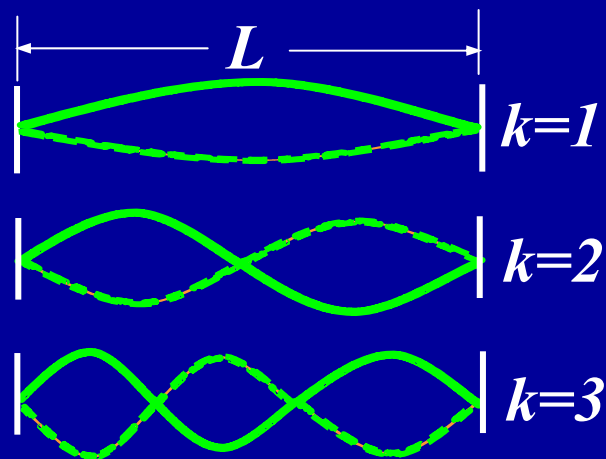
光学谐振腔

2. 改善方向性；

3. 提高单色性。

$$L = k \frac{\lambda_n}{2} \quad k = 1, 2, \dots$$

$$\nu = k \frac{c}{2nL}$$

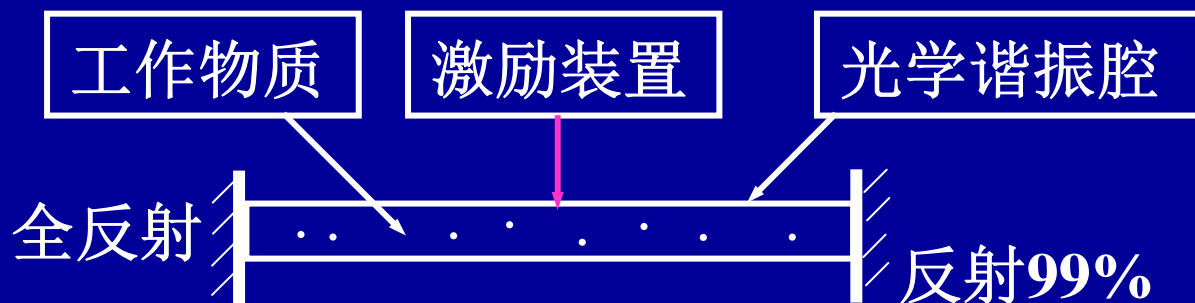




五. 激光器的组成

一个激光器由三个基本部分组成：

激光工作物质、激励(能源)装置和光学谐振腔。



激光器的组成



六. 激光器的类型

按照工作物质来分，可分为
气体激光器、半导体激光器、固体激光器和
液体激光器等。

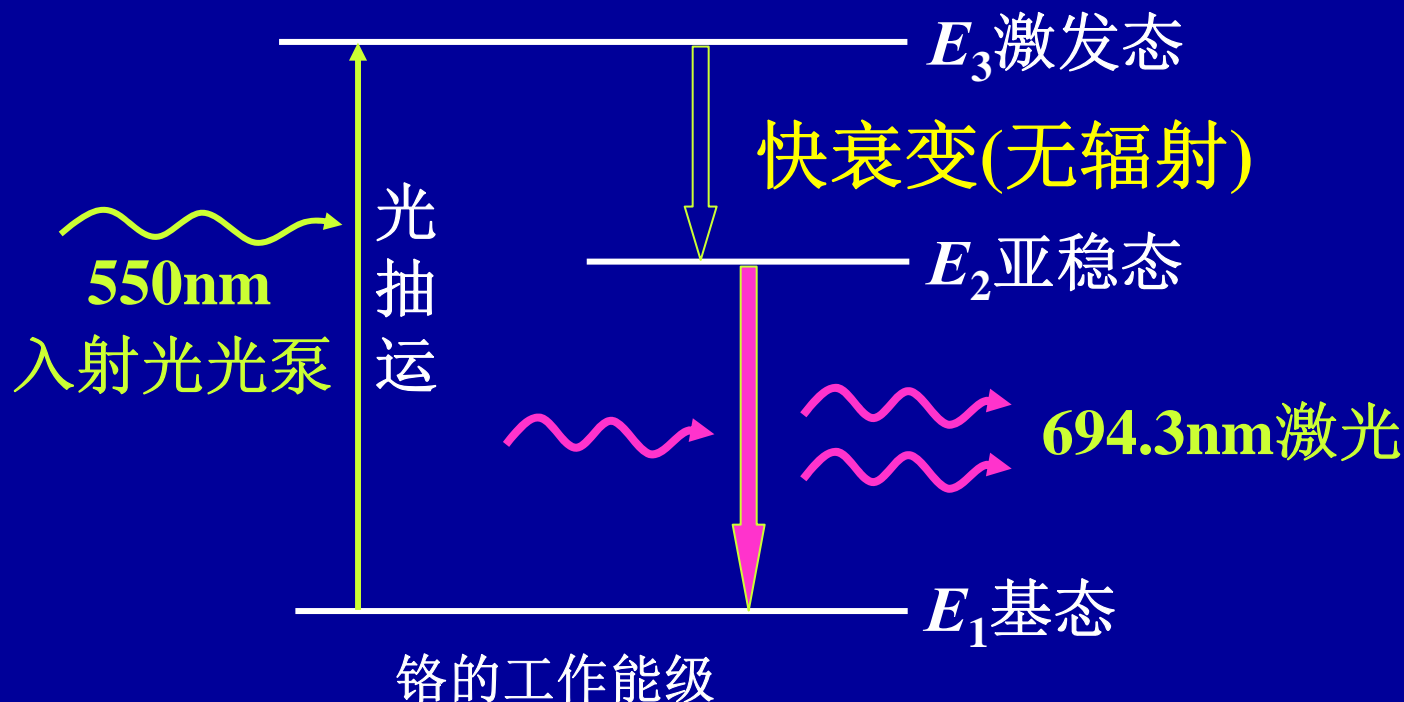
按照激光输出方式来分，又可分为
连续输出激光器和脉冲输出激光器。



1. 红宝石激光器

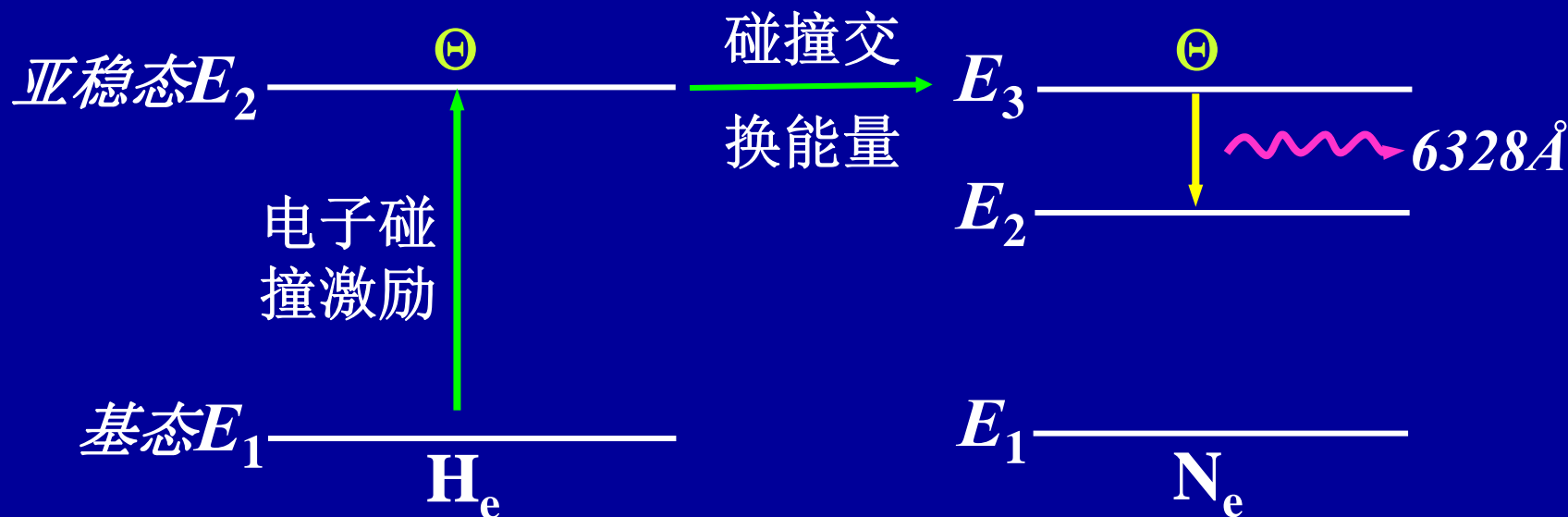
红宝石是一根掺有0.035%铬离子(Cr^{3+})的 Al_2O_3 晶体棒。

这是一个典型的三能级系统的激光器。





2. H_e-N_e 激光器

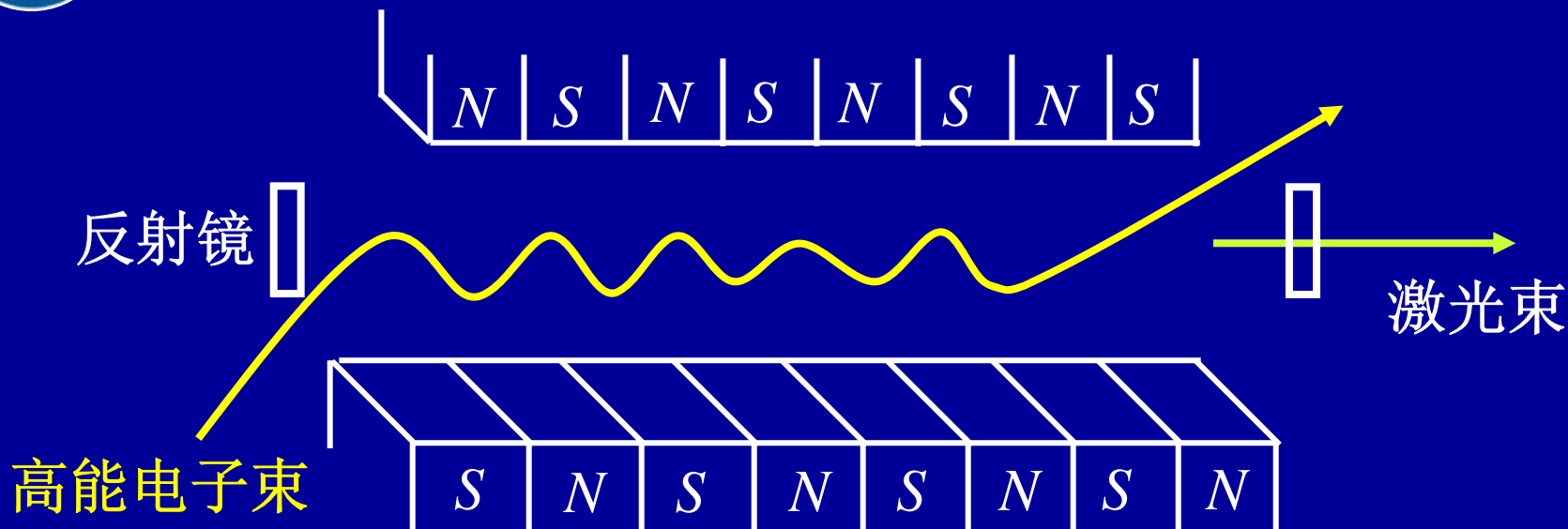


以上激光器，其发光过程都是束缚电子发生受激辐射发出激光。其缺点：

一是发出光的波长由原子能级确定，因而无法调节。二是受介质耐热性的限制，难于提高输出功率。



3. 自由电子激光



加速电子发射的电磁波沿轴向传播,并在两反射镜间发生谐振。

前进中的电子与它所发射的光子产生受激康普顿散射而形成极强的相干光,这就是 **自由电子激光**。

特点: 波长可调, 高功率。



七. 激光的特性及应用

1. 方向性好

激光方向性好的特性，可用于定位、导向、测距等。

2. 单色性好

激光单色性好的特性，可用于精密测量、激光通讯、等离子体测试等。



3. 能量集中(亮度高)

激光器的脉冲输出功率可达 10^{13}W 。

激光使能量高度集中的特性，可用于打孔、焊接、切割，制造激光武器等。在医学上，可用激光作为手术刀。

4. 相干性好

由于激光的单色性好，因而它的时间相干性极好。可用于快速、精密的无损检测，用作激光全息照相的光源。



1. 产生激光的必要条件是 _____

2. 产生粒子数反转的条件:

1) 选取适当的工作物质(三能级系统或四能级系统)这些物质存在着能够发生粒子数反转的能级结构.

2) 外界激励(也称抽运或泵浦)尽可能多的原子从低能级激发到高能级.

3. 世界上第一台激光器是 _____

激光的主要特性是: 方向性好, 单色性好, 因而相干性好, 光强大 (亮度高).

4. 激光器中光学谐振腔的作用是

1) 产生维持光的振荡, 使光得到加强

2) 使激光有很好的方向性 3) 使激光单色性好