二.康普顿效应

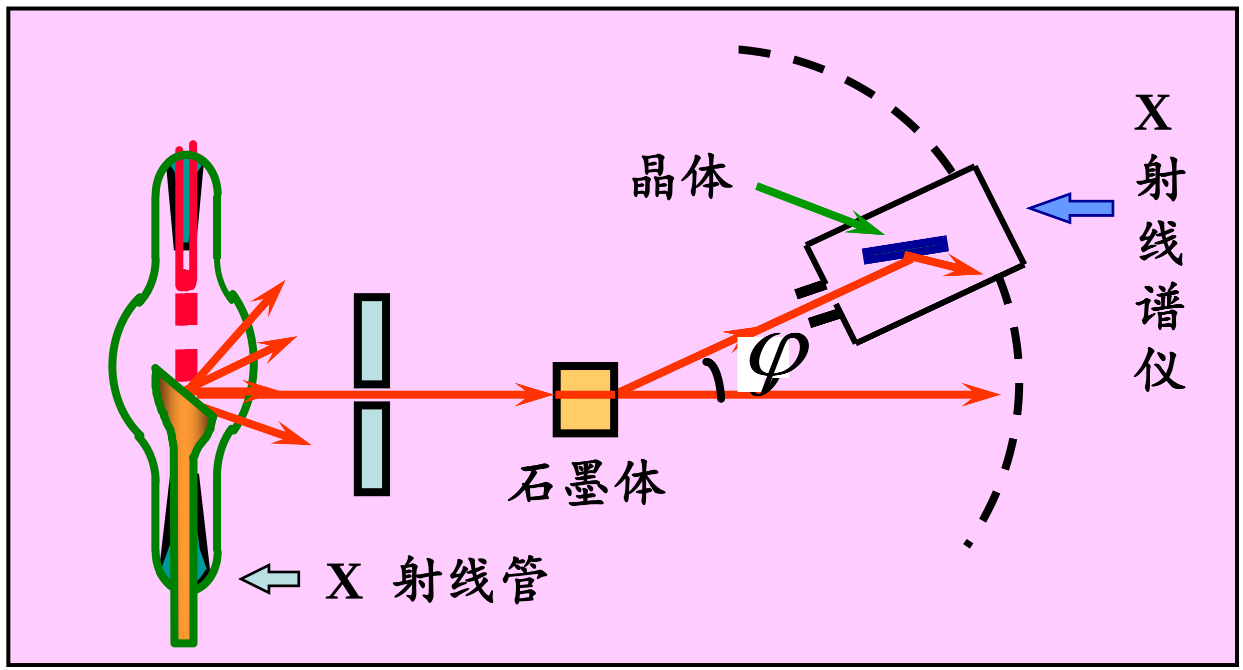
美国物理学家

1892-1962

获1927年诺贝尔物理奖

1.实验

实验装置示意图：X光被石墨散射



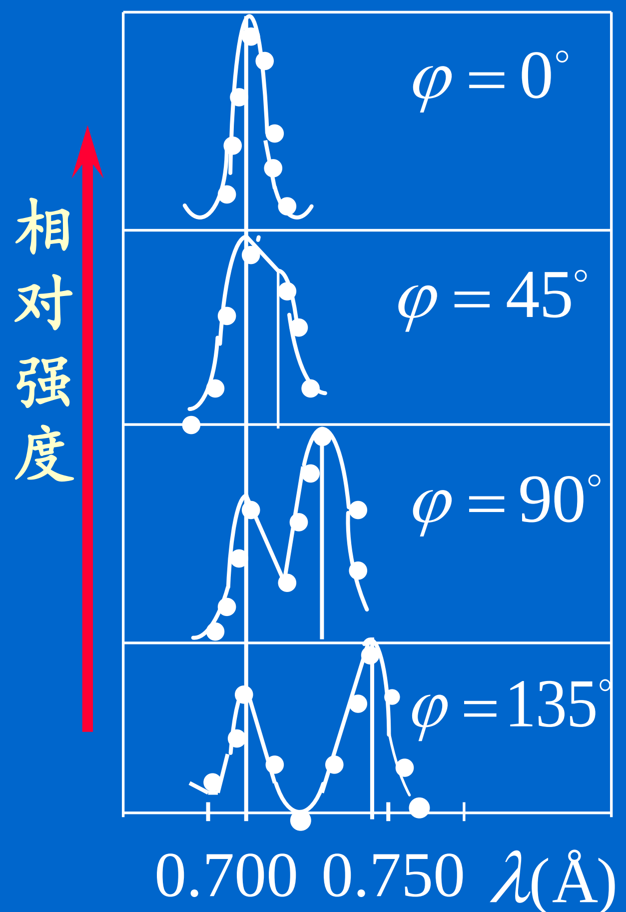
康普顿效应:散射过程中波长发生改变的现象。

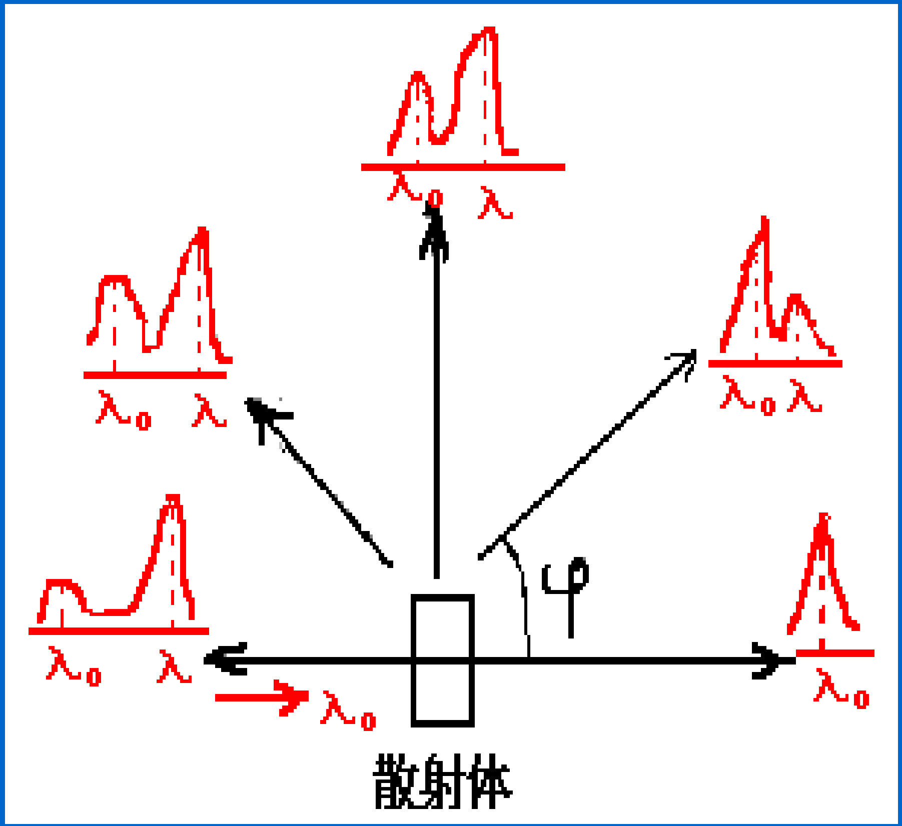
2.实验规律

(1)散射光中有 原波长λ_0成分，为瑞利散射；有 $\lambda > \lambda_0$ 成分，为康普顿散射。

(2)波长改变量$\Delta\lambda$只与散射方向φ有关，与λ_0和散射物质无关。

康普顿散射与散射角的关系:





$$\varphi\uparrow: \ \Delta\lambda\uparrow, \ I_{\lambda_0}\downarrow, I_{\lambda}\uparrow$$

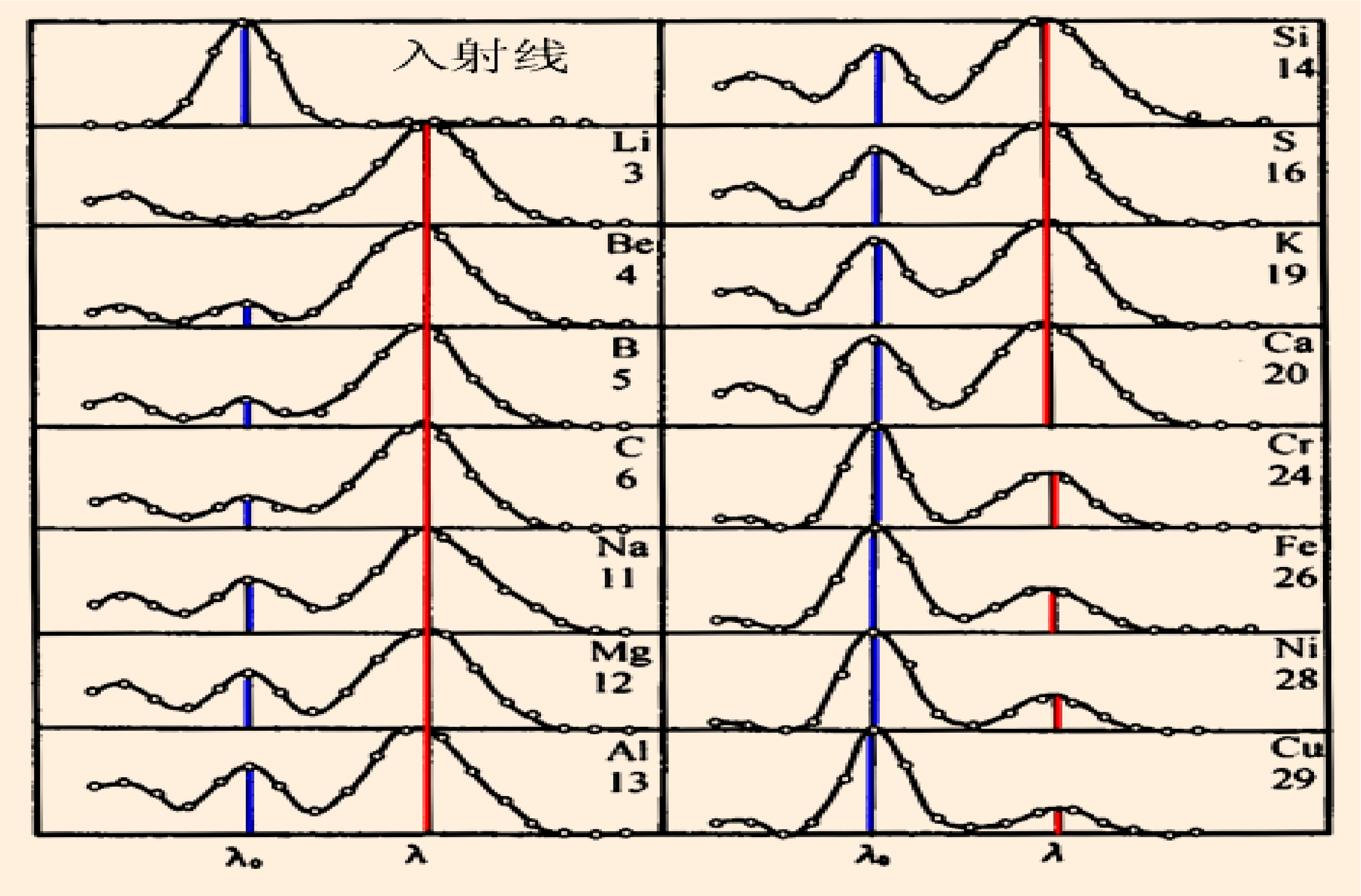
(3)原子量越小的物质，康普顿效应越显著。

同一散射角下 $I_{\lambda}/I_{\lambda_0}$ 随散射物质的变化：

吴有训

中国.

(1897—1977)



φ一定，$\Delta\lambda$一定，轻元素散射的 $I_{\lambda}/I_{\lambda_0}$ 较大。

3.经典物理遇到的困难

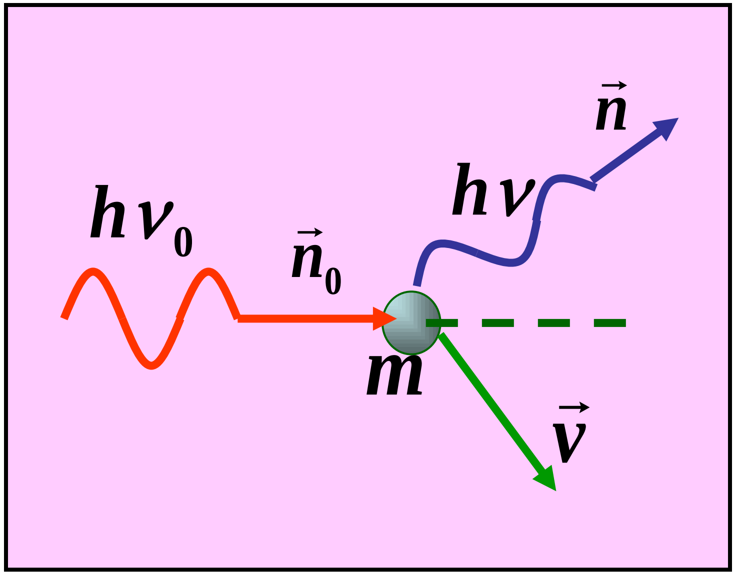
(1)无法解释散射光中有 $\lambda > \lambda_0$ 成分。

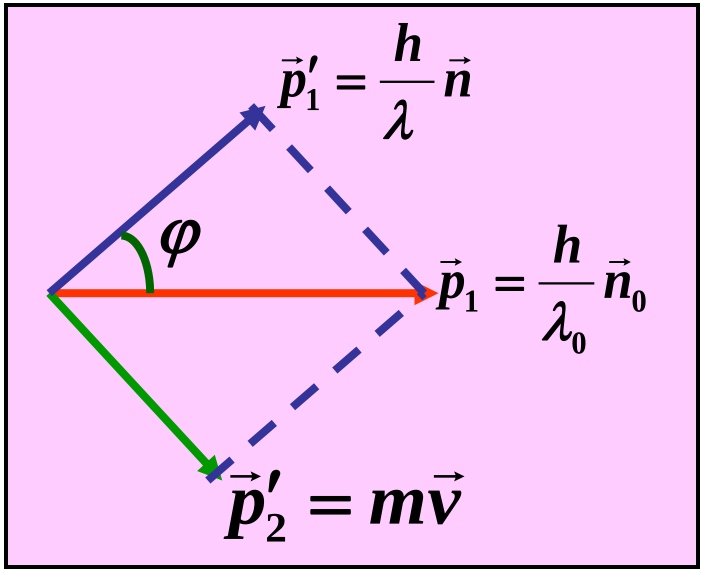
(2)无法解释在 $\varphi = 90^\circ$ 方向有散射光。

经典物理无法解释康普顿效应

4.用光子论解释康普顿效应

(1)入射光子与原子中外层电子发生弹性碰撞时，将一部分能量传给电子，散射光子的能量比入射光子低，频率减小，波长增加，产生波长为 $\lambda > \lambda_0$ 成份。





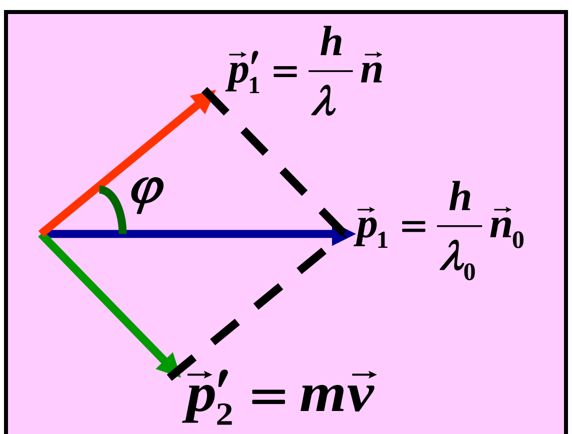
	撞 前	撞 后
光子	$E_1 = h\nu_0 = \frac{hc}{\lambda_0}$ $\vec{p}_1 = \frac{h}{\lambda_0}\vec{n}_0$	$E_1' = \frac{hc}{\lambda}$ $\vec{p}_1' = \frac{h}{\lambda}\vec{n}$
电子	$E_2 = m_0c^2$ $\vec{p}_2 = 0$	$E_2' = mc^2$ $\vec{p}_2' = m\vec{v}$

光子 $\xleftrightarrow{\text{弹性碰撞}}$ 静止自由电子 $\begin{cases}\text{能量守恒}\\ \text{动量守恒}\end{cases}$

由 能量守恒：$$\frac{hc}{\lambda_o}+m_oc^2=\frac{hc}{\lambda}+mc^2$$ ★

动量守恒：$$\frac{h}{\lambda_o}\vec{n}_o=\frac{h}{\lambda}\vec{n}+m\vec{v}$$

余弦定理：$$m^2v^2=(\frac{h}{\lambda_0})^2+(\frac{h}{\lambda})^2-2\frac{h^2}{\lambda\lambda_0}\cos\varphi$$ ★



质速关系：$$m=\frac{m_0}{\sqrt{1-(\frac{v}{c})^2}}$$ ★

求解得：$$\lambda-\lambda_0=\frac{h}{m_0c}(1-\cos\varphi)=\frac{2h}{m_0c}\sin^2\frac{\varphi}{2}$$

令 $$\lambda_c=\frac{h}{m_0c}=0.024\,\mathring{\mathrm{A}}$$ 电子的康普顿波长

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

(2) 入射光子与原子中内层电子发生弹性碰撞时，为光子与整个原子碰撞，而原子的质量远远大于光子，因此碰撞后原子能量几乎不变，光子的能量也几乎不变，光子频率不变，波长不变，仍有λ_0成份。

(3)原子序越小的物质，散射光中λ成分的光强越大。

理论结果与实验相符

- 证明了爱因斯坦光子理论的正确性
- 证明了能量守恒、动量守恒定律的普适性
- 证明相对论效应在宏观、微观均存在

例题

设$\lambda_0 = 0.1\,\mathring{A}$的光子与视为静止的自由电子发生弹性碰撞，

(1)在$\varphi = 90^\circ$方向观测到的散射光波长多少？

波长的相对改变为多少?

(2)反冲电子的动能为多少？ (3)动量为多少？

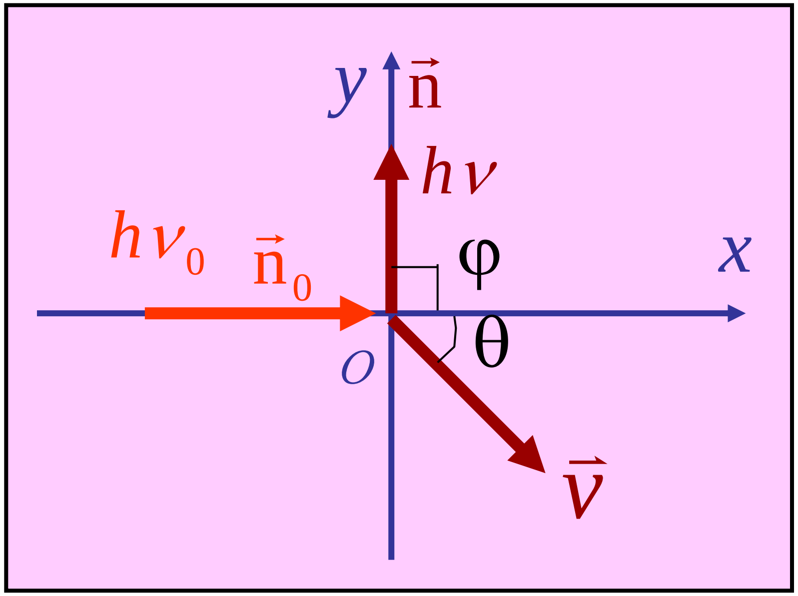
解:(1) 在$\varphi = 90^\circ$方向观测到的散射光波长有：

$$\lambda_o = 0.1\,\mathring{A}$$

$$\lambda = \lambda_0 + \Delta\lambda = \lambda_0 + 2\lambda_c \sin^2\frac{\varphi}{2} = 0.124(\mathring{A})$$

波长的相对改变: $\dfrac{\Delta\lambda}{\lambda_0} = 24\%$

(2)



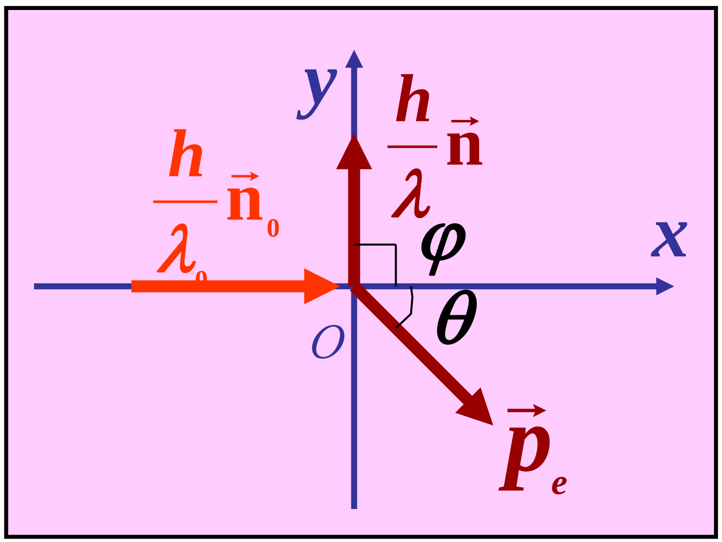
$$\because \frac{hc}{\lambda_o} + m_0 c^2 = \frac{hc}{\lambda} + m_0 c^2 + E_k$$

$$\therefore E_k = \frac{hc}{\lambda_o} - \frac{hc}{\lambda} = \frac{hc\Delta\lambda}{\lambda\lambda_o} = 3.8\times10^{-15}(\mathrm{J})$$

$$= 2.4\times10^{4}\,\mathrm{eV}$$

(3)作图：

设入射光动量 $p=\dfrac{h}{\lambda_o}$，散射光动量 $p^{'}=\dfrac{h}{\lambda}$，碰撞前电子动量p_e=0, 碰撞后电子动量x轴方向：$P_e\cos\theta$, y轴方向:- $P_e\sin\theta$



由动量守恒定律：

$$\begin{cases}\dfrac{h}{\lambda_o}=p_e\cos\theta\\[2ex] 0=\dfrac{h}{\lambda}-p_e\sin\theta\end{cases}$$

解得反冲电子动量：

$$\begin{cases}p_e=8.5\times10^{-23}\ (\mathrm{kg\ ms^{-1}})\\ \theta=38^o44'\end{cases}$$

表16.2.2 光与物质二种相互作用比较

	光电效应	康普顿效应
光子	$h\nu \geq A$	$h\nu \geq 10^5 \mathrm{eV}$
光子	可见光、紫外线	软 X 射线
物质粒子	束缚电子	自由电子、弱束缚电子
物理过程	完全非弹性碰撞； 光子被吸收，电子逸出。	弹性碰撞； 光子被散射，电子反冲

注意： 光电效应不考虑相对论效应，康普顿效应要考虑。

三、电子偶效应（自学：了解）

四、光的波粒二象性

光子具有波动性和粒子性。

光子的波粒二象性:光在某些条件下行为像经典的“波动”，在另一些条件下的行为又像经典的粒子。

光子的波动性和粒子性的联系：

1.光子的波动性和粒子性是光子本性在不同条件下表现出来的两个侧面。

2:公式

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$$

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

$$m = \frac{E}{c^2} = \frac{h}{c\lambda}$$

将描述光子粒子性的E、p、m与描述光子波动性的ν，λ定量地联系了起来。

3:光波为概率波，其强度分布描述了光子到达空间各点的概率。

$$\left.\begin{matrix} I \propto A^2 \\ I \propto N \end{matrix}\right\} N \propto A^2$$

振幅越大，I越大表示光子数越多，光子到达该处概率越大——概率波。

第三节 氢原子光谱 玻尔理论

一、氢原子光谱

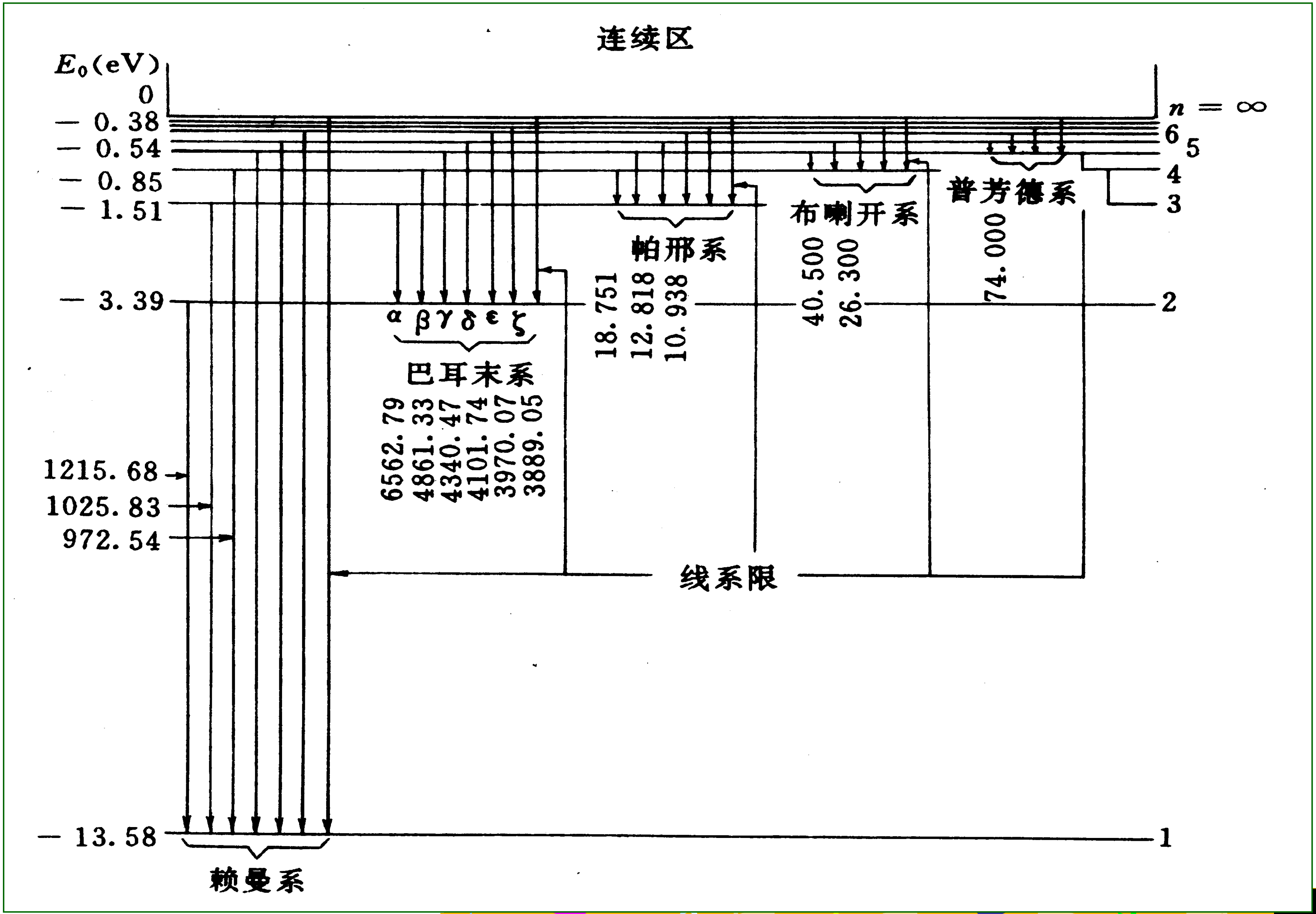
二、玻尔理论

一、氢原子光谱

1.氢光谱实验

一系列分立的线状光谱

6562.8 红
4861.3 蓝
4340.5
4101.7
紫


连续区
E_0(eV)
0
-0.38
-0.54
-0.85
-1.51
-3.39
-13.58
$n=\infty$
6
5
4
3
2
1
α β γ δ ε ζ
巴耳末系
6562.79
4861.33
4340.47
4101.74
3970.07
3889.05
帕邢系
18.751
12.818
10.938
布喇开系
40.500
26.300
普芳德系
74.000
1215.68
1025.83
972.54
线系限
赖曼系

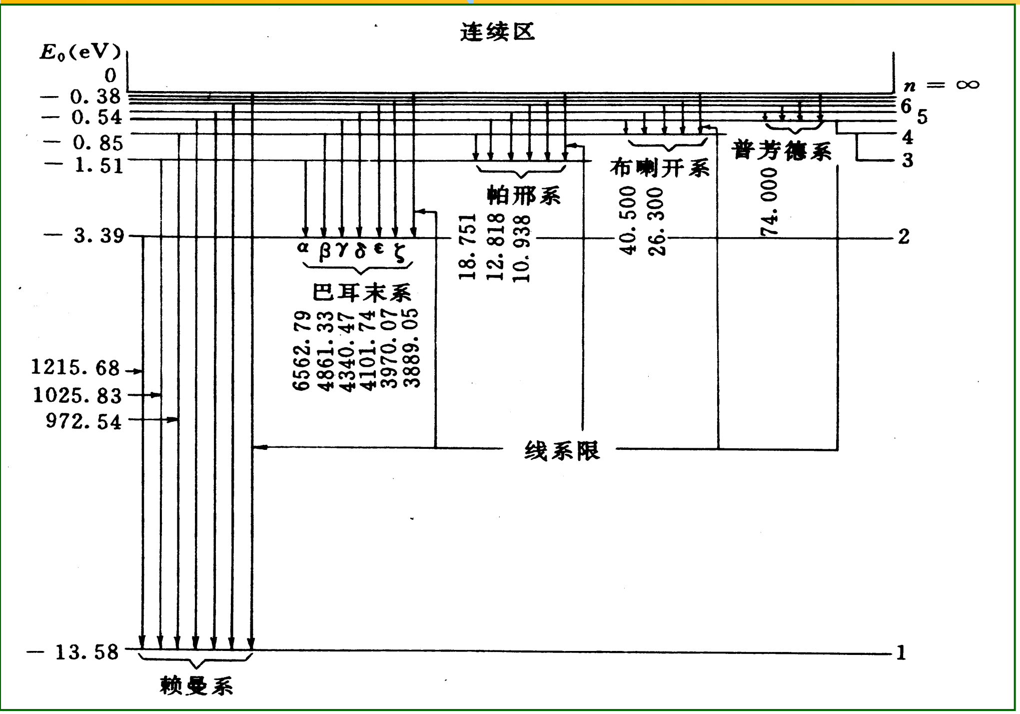
2.氢原子光谱实验规律

里德伯公式:—— 氢原子光谱的普遍公式

波数 $$\tilde{\nu}=\frac{1}{\lambda}=R_H\left(\frac{1}{m^2}-\frac{1}{n^2}\right)$$

里德伯常数 $R_H = 1.0967758 \times 10^7\ \mathrm{m}^{-1}$

$$\begin{cases} m=1,2,3,\ldots \\ n=m+1, m+2, m+3,\ldots \end{cases}$$



波数 $\tilde{\nu} = \dfrac{1}{\lambda} = R_H\left(\dfrac{1}{m^2} - \dfrac{1}{n^2}\right)$

$m = 1 \quad n = 2, 3, 4 \cdots$

赖曼系：紫外区

$m = 2 \quad n = 3, 4, 5 \cdots$

巴尔末系：可见光区

$m = 3 \quad n = 4, 5, 6 \cdots$ 帕邢系：红外区

$m = 4 \quad n = 5, 6, 7 \cdots$ 布喇开系：远红外区

$m = 5 \quad n = 6, 7, 8 \cdots$ 普方德系：远红外区

• • •• • •

m取不同的值，对应于不同的线系。m一定时，n取不同的值，对应于相同线系中不同的谱线。

$$\text{波数}\ \tilde{\nu}=\frac{1}{\lambda}=R_H\left(\frac{1}{m^2}-\frac{1}{n^2}\right)$$

$n\to\infty$, 对应该谱线系的最短波长，为线系限。

$n=m+1$, 对应该谱线系的最长波长。

里兹并合规则：波数 $\tilde{\nu}=T(m)-T(n)$

二、玻尔理论

1.基本假设

(1)原子只能够处于定态。

定态：原子体系只能处于的一系列具有不连续能量的稳定状态。在这些状态下，电子绕核运动但不辐射能量。

(2)定态与一系列分立轨道相对应，电子在这些轨道上绕核运动，轨道角动量为：

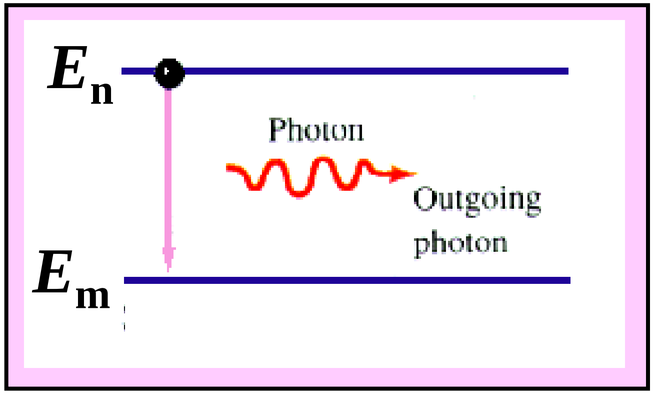
$$L = rmv = n\frac{h}{2\pi} = n\hbar$$ —— 轨道角动量量子化条件

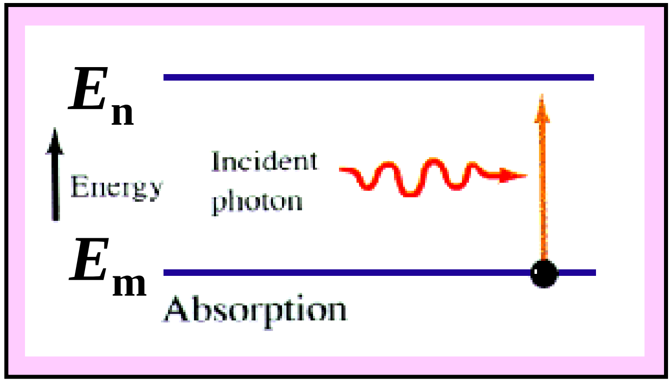
其中：n＝1, 2, 3……量子数

(3)原子体系在两个定态之间发生跃迁时，发射或吸收光子，其频率由两定态的能量差决定.

$$h\nu_{nm} = E_n - E_m$$

—— 频率条件





2.重要结论

氢原子核外电子的轨道半径为：$r_n = \dfrac{n^2 \varepsilon_0 h^2}{\pi m e^2}$

氢原子核外电子的轨道速率为：$v_n = \dfrac{e^2}{2\varepsilon_0 h n}$

氢原子系统的能量为：$E_n = -\dfrac{m e^4}{8\varepsilon_0^2 h^2 n^2}$

其中：n=1，2，3,……

基态 激发态

氢原子系统是量子化的

基态(n=1): $r_1 \approx 0.53\,\mathring{A}$ —— 玻尔半径

$$v_1 \approx 2.18\times10^6\ \mathrm{m\ s^{-1}}$$

$E_1 \approx -13.6\,\mathrm{eV}$ —— 氢原子基态能量

$$\therefore r_n = n^2 r_1$$

$$E_n = \frac{1}{n^2}E_1 (n = 1,2,3,\ldots\ldots)$$ —— 氢原子处于量子数为n的能级的能量

能级：原子体系只能处于的一系列具有不连续能量的稳定状态（定态）

频率条件：$h\nu = \frac{E_1}{n^2} - \frac{E_1}{m^2}$

例：求巴耳末线系次长波长。

跃迁后：$m=2$；跃迁前：$n=4$。

由里德伯公式得：

$$\lambda_{42}=\frac{1}{R_H\left(\frac{1}{m^2}-\frac{1}{n^2}\right)}=\frac{1}{1.097\times10^7\times\left(\frac{1}{2^2}-\frac{1}{4^2}\right)}=4.86\times10^{-7}(\mathrm{m})$$

相等！

由频率条件得：

$$\lambda_{42}=\frac{hc}{E_4-E_2}=\frac{6.63\times10^{-34}\times3\times10^8}{-13.6\times1.6\times10^{-19}\times\left(\frac{1}{4^2}-\frac{1}{2^2}\right)}\approx4.86\times10^{-7}(\mathrm{m})$$

计算光谱线波长时：若题上给了R_H，用里德伯公式计算，若题上给了h，用频率条件计算。

练习：氢原子基态的电离能是<u>13.6</u>eV，电离能为0.544eV的激发态氢原子，其电子处于 $n=$<u>5</u>的轨道上运动。

解：电离能 $W=E_{\infty}-E_n=0-E_n=-E_n$

对于基态：$E_1=-13.6\text{eV}$

$$W=-E_1=-(-13.6)=13.6\text{eV}$$

当 W=0.544eV时：

$$0.544=-E_n=-\frac{E_1}{n^2}=\frac{13.6}{n^2}$$

得：$n=5$

作业

1. No.7;
2. 自学本章各例题并完成书上的习题(对照书后的参考答案自己订正);
3. 自学：夫兰克-赫兹实验。

第十一周星期三交作业