放射物理与防护

肇庆医学高等专科学校
梁淼林

2020/7/18

第一章 物质的结构

学习目标：

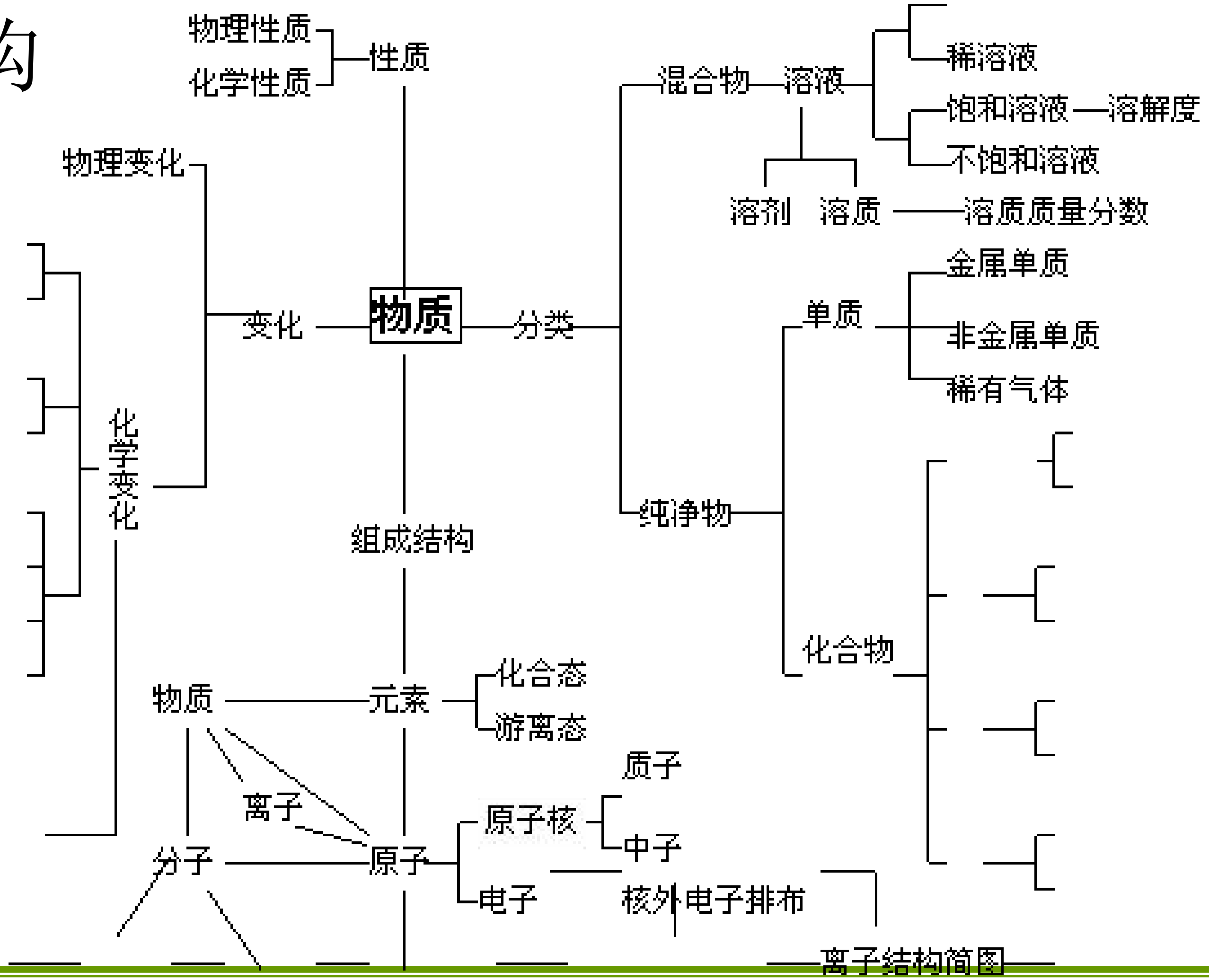
1、掌握卢瑟福的粒子散射实验的现象及重要意义；玻尔理论的基本假设；原子核结构

2、熟悉核外电子结构

3、了解核磁矩在外磁场中的进动；磁共振现象及核自旋弛豫；磁共振现象的医学应用

第一节 原子的结构

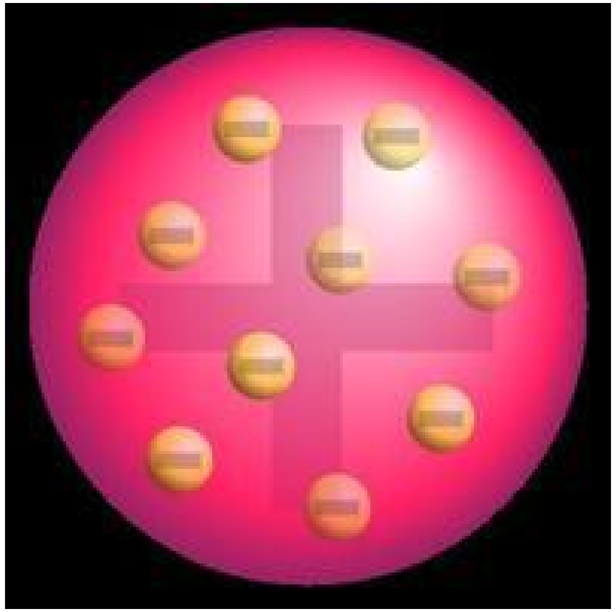
物质的结构



一、揭示原子结构的实验基础

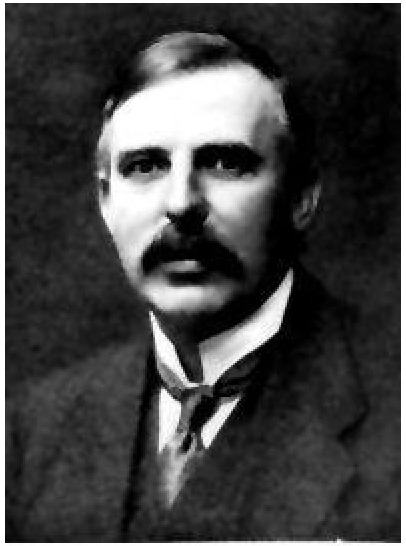
（一）α粒子的散射实验

1、汤姆生的原子结构模型



葡萄干布丁模型

2、卢瑟福的α粒子散射实验



卢瑟福，E.

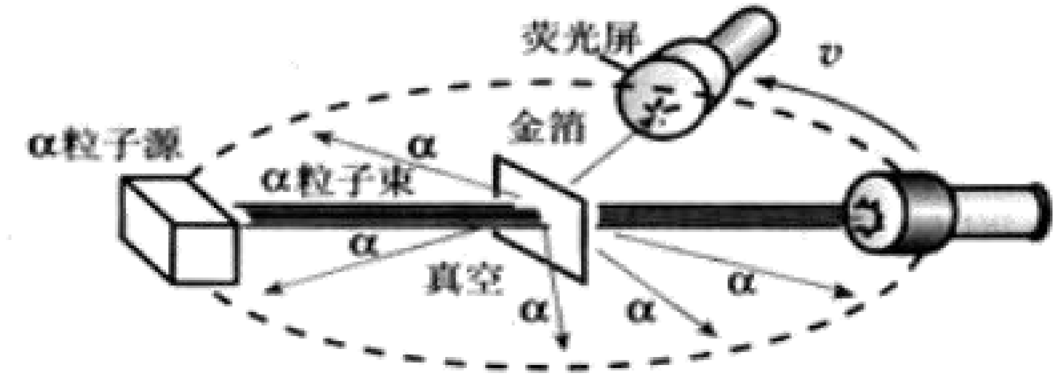
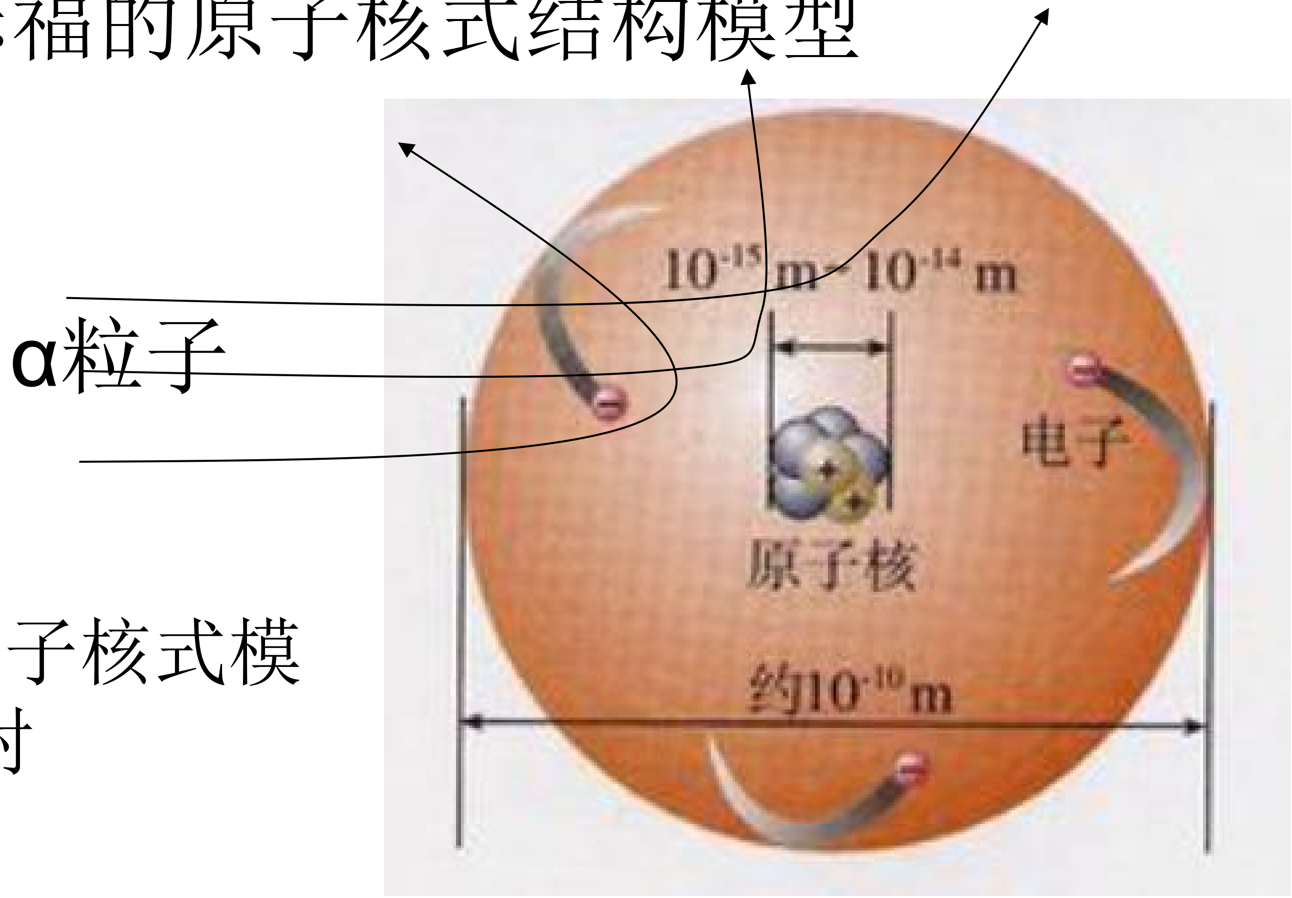


图 20-1 α粒子散射实验的示意图．荧光屏可以沿着图中虚线转动，用来统计向不同方向散射的粒子的数目．实验设备装在真空中．

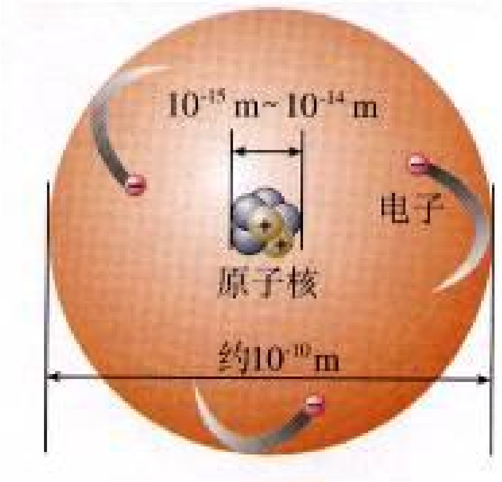
α粒子的散射实验装置

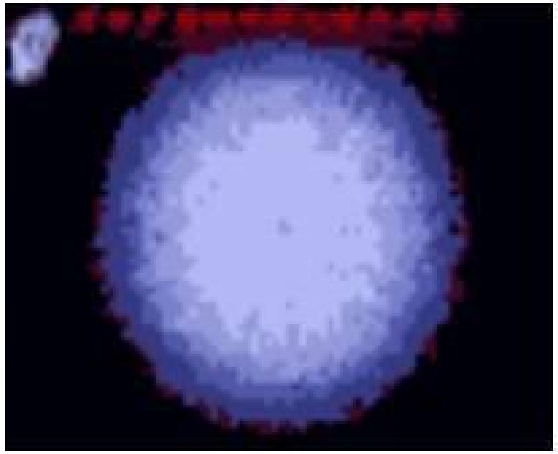
3、卢瑟福的原子核式结构模型



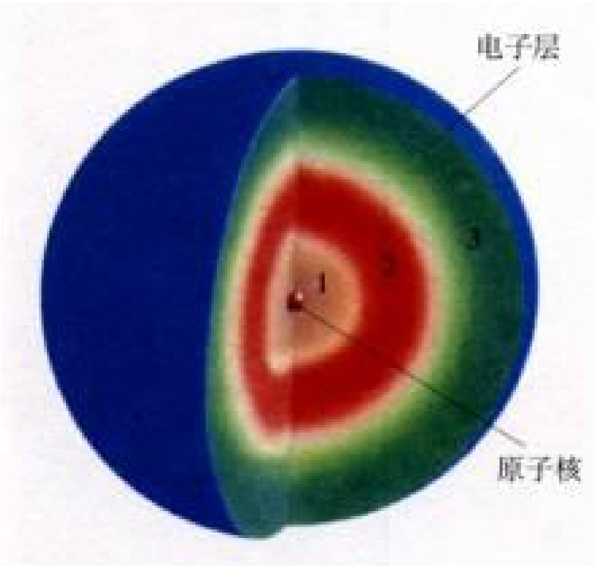
α粒子在原子核式模型中的散射

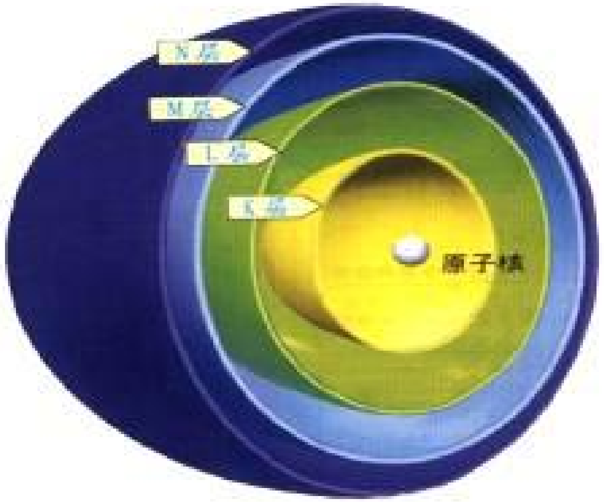
核式结构模型





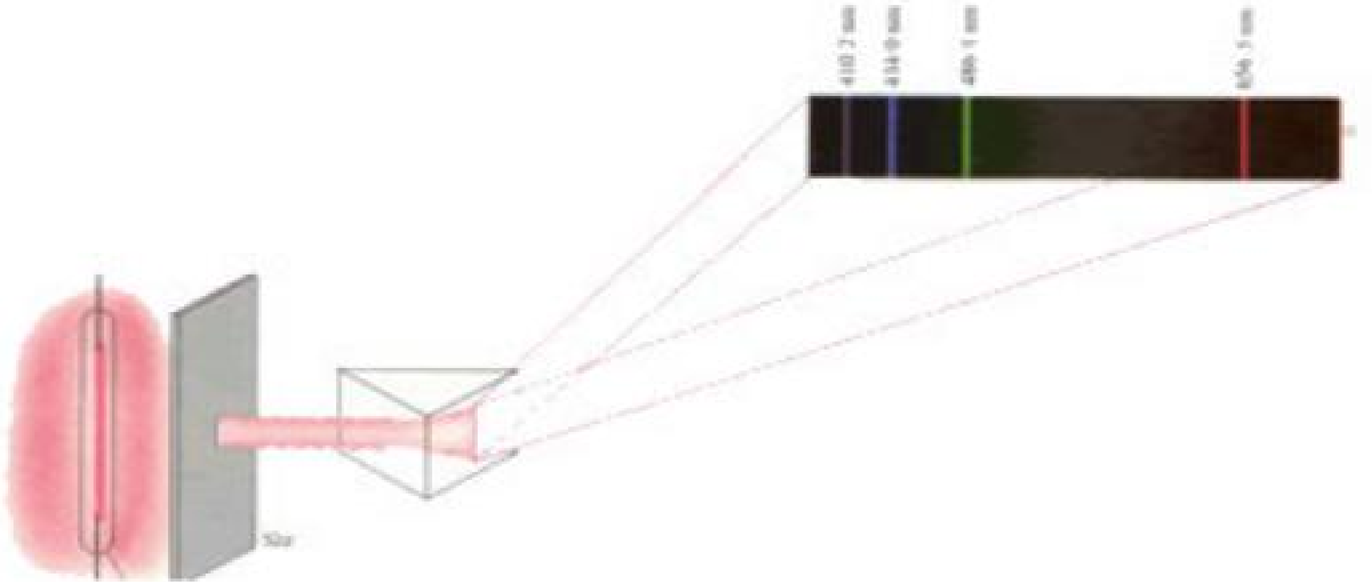
氢原子核外电子的运动



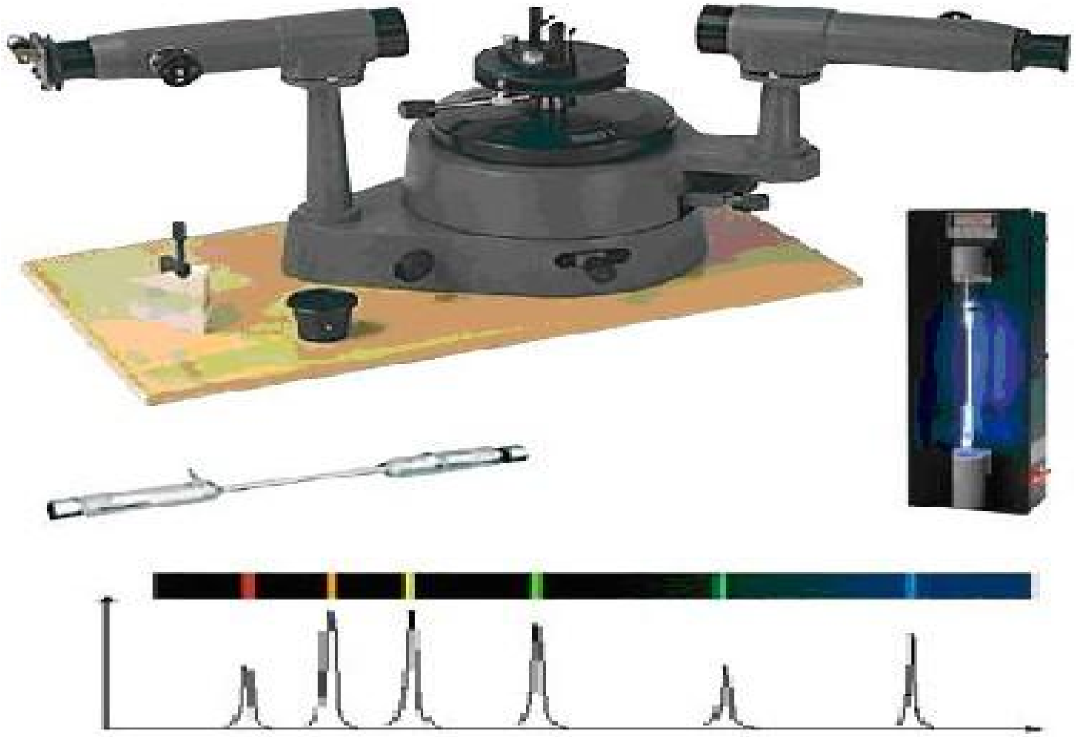


（二）氢原子光谱的实验规律

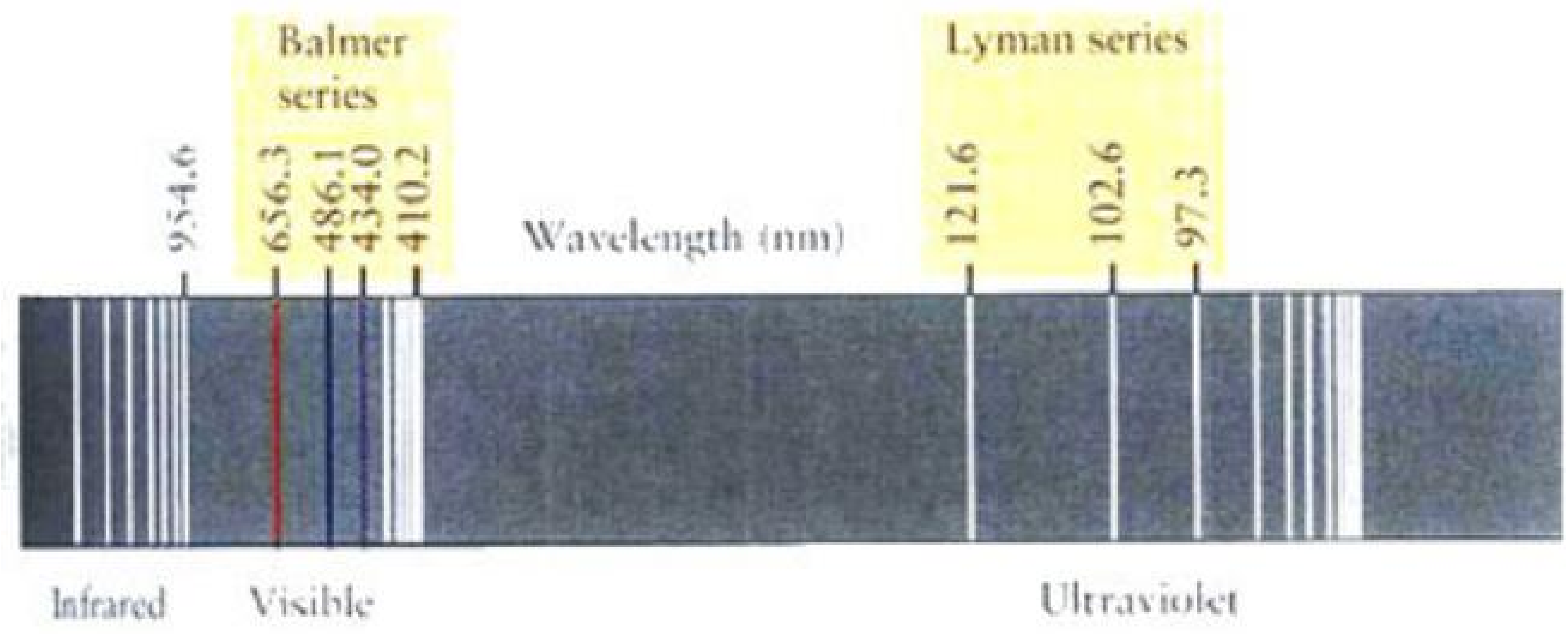
1、原子光谱 某种原子的气体通电后可以发光并产生固定不变的光谱



2、棱镜摄谱仪

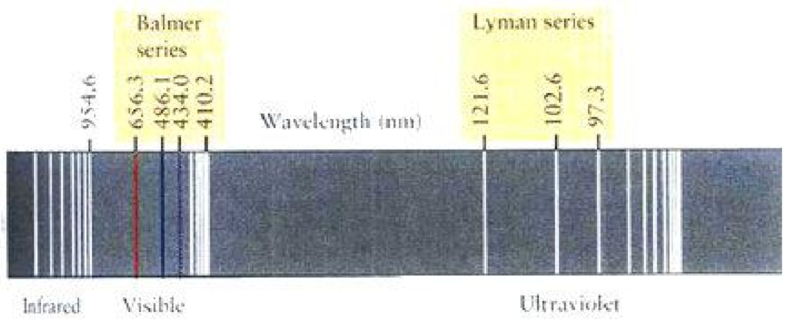


3、氢原子光谱



Balmer series
Lyman series
954.6
656.3
486.1
434.0
410.2
Wavelength (nm)
121.6
102.6
97.3
Infrared
Visible
Ultraviolet

4、巴耳末公式



$$\lambda = B\frac{n^2}{n^2-4} \qquad n = 3,4,5,\cdots$$

式中，常数$B = 364.56$纳米(nm)

所表达的一组谱线称作巴耳末系

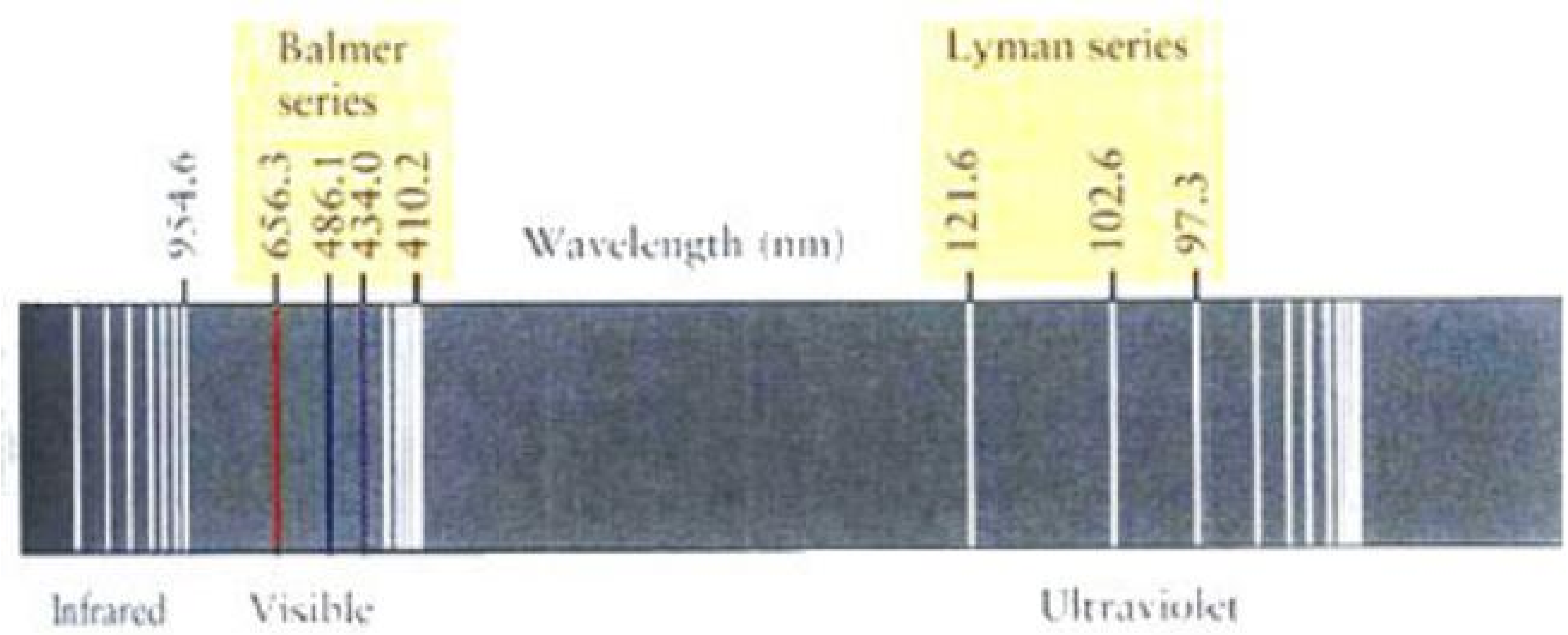
如果令 $\tilde{\nu}=\frac{1}{\lambda}$，$\tilde{\nu}$称波数，巴耳末公式为：

$$\tilde{\nu}=\frac{1}{\lambda}=\frac{1}{B}\frac{n^2-4}{n^2}=\frac{4}{B}\left(\frac{1}{2^2}-\frac{1}{n^2}\right) \qquad n=3,4,5,\cdots$$

或 $\tilde{\nu}=R_H\left(\frac{1}{2^2}-\frac{1}{n^2}\right) \qquad n=3,4,5,\cdots$

式中，常数 $R_H=\frac{4}{B}$，称里德伯常数。

$$R_H=1.0967758\times10^7 m^{-1}$$



由实验得出的经验公式，准确地描述了原子光谱的规律性，说明原子光谱反映了原子的内部结构的规律性

二、玻尔的原子模型

(一) 玻尔假说

1、光量子: $h\nu$

ν是光的频率,

$h = 6.626\times10^{-34}$焦耳·秒($j\cdot s$)为普朗克常数.

$$hc\tilde{\nu} = hcR_H\left(\frac{1}{k^2}-\frac{1}{n^2}\right)$$

c是光速，$c=\frac{\lambda}{T}=\lambda\nu, \frac{c}{\lambda}=\nu, c\tilde{\nu}=\nu$

$$hc\tilde{\nu} = hcR_H\left(\frac{1}{k^2} - \frac{1}{n^2}\right)$$

$$hc\frac{1}{\lambda} = \frac{hcR_H}{k^2} - \frac{hcR_H}{n^2}$$

物理意义

$$h\nu = \frac{hcR_H}{k^2} - \frac{hcR_H}{n^2} \qquad (1\text{-}2)$$

光的能量

原子辐射前后的能量之差

$$h\nu = E_2 - E_1 \qquad (1\text{-}3)$$

辐射前的能量

辐射后的能量（$E_1<E_2$）

如果原子的能量取负值，那么原子的能量

$$E = -\frac{hcR_H}{n^2} \qquad (1\text{-}4)$$

n是整数，上式表示原子能只能具有一系列的一定数值，是分隔的，不能连续变化——能量量子化。

2 电子在原子核外做圆周运动

$$\frac{mv^2}{r} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{Ze^2}{r^2} \qquad (1\text{-}5)$$

式中，m为电子的质量；v为为电子的速度

$$电子的动能: \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{Ze^2}{2r}$$

$$体系的势能: U = K - \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{Ze^2}{r}$$

体系的势能：$U = K - \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{Ze^2}{r}$

K是r=∞时的势能，可随意选定。

如果把r=∞时的势能定为零。
那么

$$U = -\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{Ze^2}{r}$$

原子的能量=动能+势能

由于近似认为原子核不动，所以原子核的动能为零

$$E=\frac{1}{2}mv^2+U=\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{Ze^2}{2r}-\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{Ze^2}{r}$$

$$=-\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{Ze^2}{2r} \qquad (1\text{-}6)$$

能量出现负值是由于把r=∞时的势能定为零的结果

当r越大 $\longrightarrow$ E越大（绝对值越小）

半径大的轨道代表大能量

由（1-6）式得：

$$r = -\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{Ze^2}{2E}$$

把（1-4）式代入得：

$$r = -\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{n^2 Ze^2}{2hcR_H} \quad (1\text{-}7)$$

$$E = -\frac{hcR_H}{n^2}$$

与能量联系的电子轨道也是分隔的，它的半径有一定的数值，不能连续变化——轨道量子化。

3 玻尔两个基本假定：

第一，在原子内部存在一系列的能量状态E_1，E_2，E_3，…，当原子处在任一稳定能态时，电子绕原子核做圆周运动，虽有向心加速度，却不向外辐射能量。而且，只有当电子的角动量 p_φ等于$\hbar$的整数倍的哪些轨道才是可能的，即

$$p_\varphi = mvr = n\hbar$$

玻尔的量子化条件

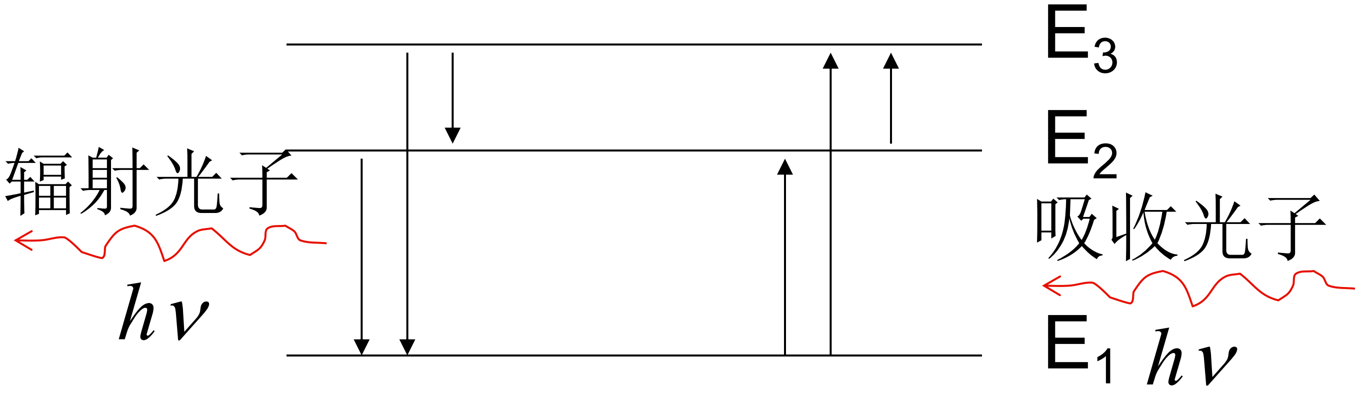
式中，n=1，2，3，…为量子数；

$$\hbar = \frac{h}{2\pi} = 1.055\times10^{-34}\, j\cdot s$$ 普朗克常数

第二，当原子从能量状态E_n跃迁到能量状态E_k时，它将发射（或吸收）一个单色的光子，其频率由下式决定

玻尔的频率条件

$$\nu = \frac{E_n - E_k}{h} \quad （1\text{-}9）$$



（二）氢原子的玻尔理论、原子能级

由（1-8）式与（1-5）式消去速度v，得电子运动的轨道半径

$$\begin{cases} \dfrac{mv^2}{r} = \dfrac{1}{4\pi\varepsilon_0}\dfrac{Ze^2}{r^2} \\ p_\varphi = mvr = n\hbar \end{cases} \Rightarrow \quad r_n = 4\pi\varepsilon_0 \frac{n^2\hbar^2}{mZe^2} \qquad （1\text{-}10）$$

对于Z=1的氢原子，

当n=1时， $r_1 = 4\pi\varepsilon_0 \dfrac{\hbar^2}{me^2}$ 称为第一轨道半径，

通常用a_1表示

对于Z=1的氢原子，

当n=2时，$r_2 = 4\pi\varepsilon_0 \dfrac{2^2\hbar^2}{me^2} = 4\times 4\pi\varepsilon_0 \dfrac{\hbar^2}{me^2} = 4a_1$

称为第二轨道半径。

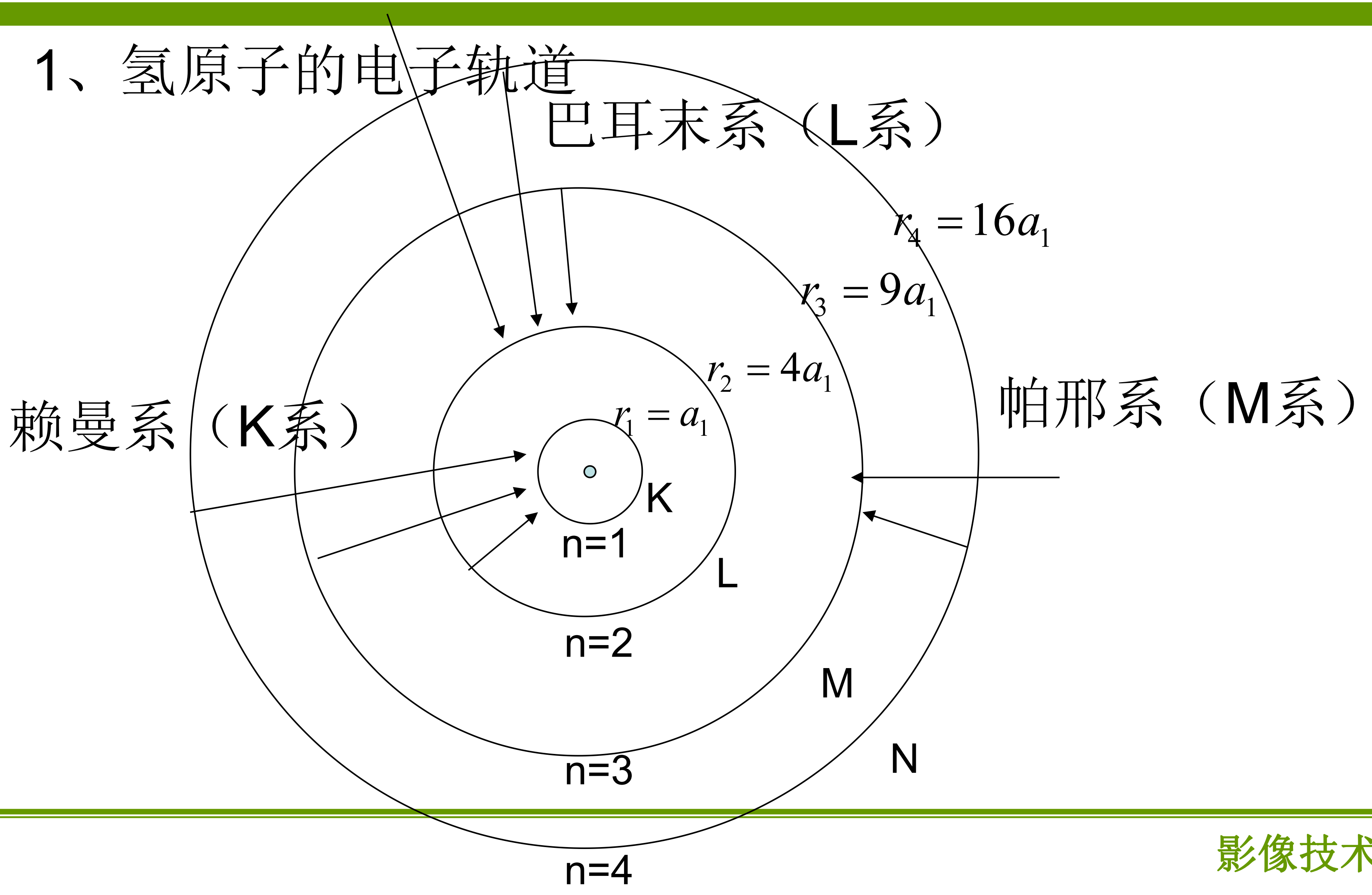
当n=3时，$r_3 = 9a_1$ 称为第三轨道半径。

当n=4时，$r_4 = 16a_1$ 称为第四轨道半径。

$\vdots$

当n时，$r_n = n^2 a_1$ 称为第n轨道半径。

1、氢原子的电子轨道



2、氢原子的能级

$$\begin{cases} E = -\dfrac{1}{4\pi\varepsilon_0}\dfrac{Ze^2}{2r} & \text{(1-6)} \\ r_n = 4\pi\varepsilon_0 \dfrac{n^2\hbar^2}{mZe^2} & \text{(1-10)} \end{cases}$$

将(1-10)式代入(1-6)式得

$$E_n = -\frac{1}{(4\pi\varepsilon_0)^2}\frac{m(Ze^2)^2}{2n^2\hbar^2}, n = 1,2,3,\cdots \quad （1\text{-}11）$$

$$E_n = -\frac{1}{(4\pi\varepsilon_0)^2}\frac{m(Ze^2)^2}{2n^2\hbar^2}, n = 1,2,3,\cdots \qquad （1-11）$$

此式表示氢原子能量的数值是分隔的。电子在不连续的轨道上运动，原子所具有的能量也不连续的，这种不连续的能量状态，称为原子的**能级（energy level）**

由公式可知：轨道半径与n^2成正比，而能量E的绝对值与n^2成反比。

讨论：　当$n \to \infty$时，　　$r \to \infty$，而$E \to 0$；

$$E_n = -\frac{1}{(4\pi\varepsilon_0)^2}\frac{m(Ze^2)^2}{2n^2\hbar^2}, n = 1,2,3,\cdots \qquad （1-11）$$

讨论：$m_e = 9.109390\times10^{-31}kg, Z = 1, 1eV = 1.602\times10^{-19}J$

$e = 1.602177\times10^{-19}C, \varepsilon_0 = 8.854188\times10^{-12}F\cdot m^{-1},$

$\hbar = 1.0546\times10^{-34}J\cdot s,$原子质量$u = 1.660540\times10^{-27}kg$

当n=1时，

$$E_1 = -\frac{1}{(4\times3.14\times8.854\times10^{-12})^2}\frac{9.109\times10^{-31}\left[(1\times1.602\times10^{-19})^2\right]^2}{2\times1^2\times(1.055\times10^{-34})^2}$$

$$= -2.178\times10^{-18} = -2178\times10^{-21}J = -\frac{2178\times10^{-21}}{1.602\times10^{-19}} \approx -13.6eV$$

当n=2时，

$$E_2 = -\frac{1}{(4\times3.14\times8.854\times10^{-12})^2}\frac{9.109\times10^{-31}\left[(1\times1.602\times10^{-19})^2\right]^2}{2\times2^2\times(1.055\times10^{-34})^2}$$

$$= -\frac{1}{2^2}\times2178\times10^{-21}J = -544.5J \approx -\frac{1}{2^2}\times13.6eV = -3.40eV$$

当n=3时，

$$E_3 = -\frac{1}{3^2}\times2178\times10^{-21}J = -242J \approx -\frac{1}{3^2}\times13.6eV = -1.54eV$$

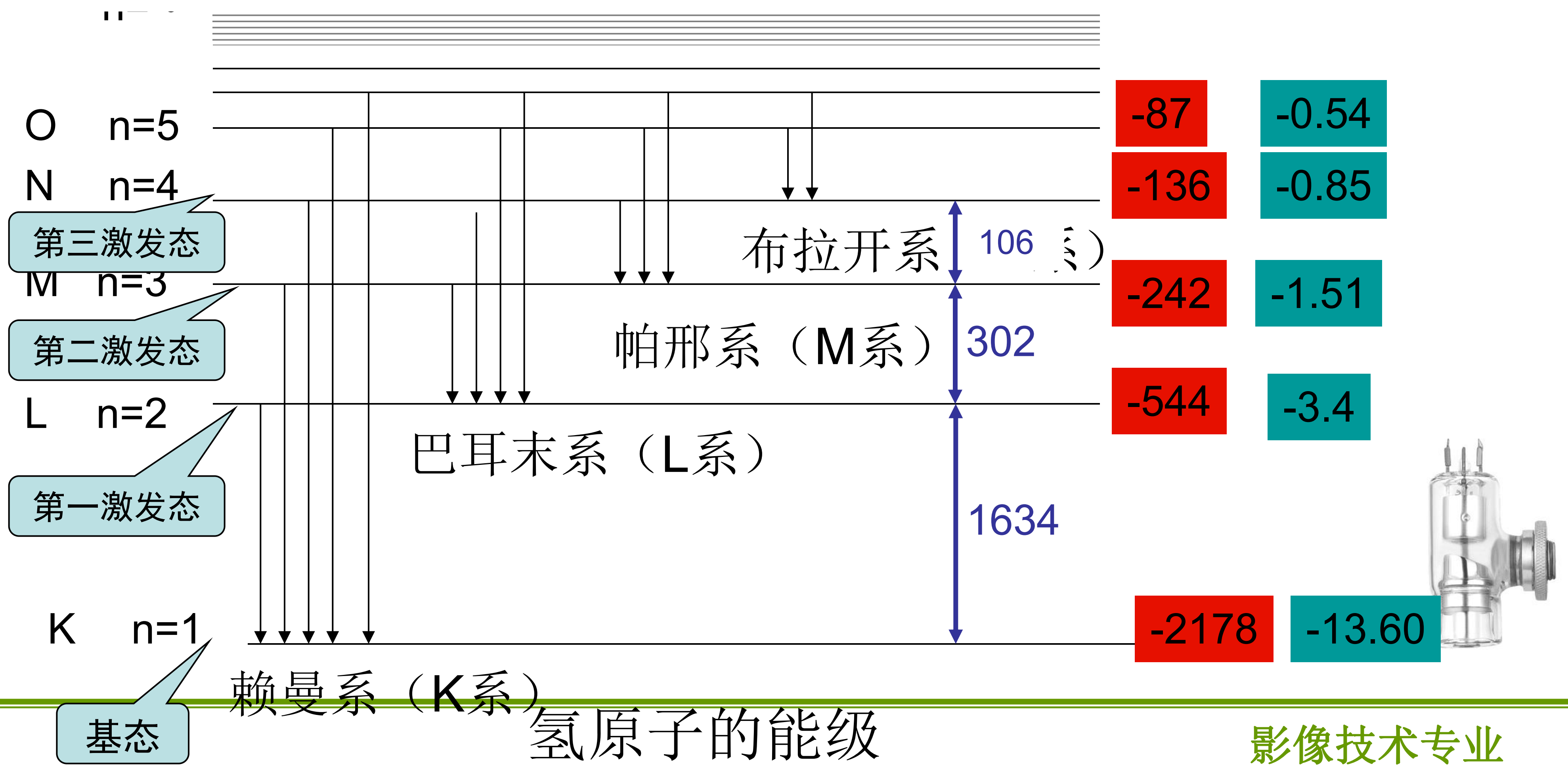
$$\vdots$$

当n时， $$E_n = -\frac{E_1}{n^2} = -\frac{1}{n^2}\times2178\times10^{-21}J = -\frac{13.6}{n^2}eV$$

$$r_n = n^2 a_1$$

$$E_n = -\frac{E_1}{n^2} = -\frac{1}{n^2} \times 2178 \times 10^{-21} J = -\frac{13.6}{n^2} eV$$

邻近轨道的间距随n的增加而增加，而邻近的能级的间隔随n的增加而渐减，趋向于零。



氢原子的能级

$$\begin{cases} E_n = -\dfrac{1}{(4\pi\varepsilon_0)^2}\dfrac{m(Ze^2)^2}{2n^2\hbar^2}, n = 1,2,3,\cdots & \text{（1-11）} \\ \tilde{\nu} = \dfrac{E_n - E_k}{hc} & \text{（1-9）} \end{cases}$$

将(1-11)代入(1-9)式求出波数公式:

$$\tilde{\nu} = \frac{E_n - E_k}{hc} = \frac{2\pi^2 m(Ze^2)^2}{(4\pi\varepsilon_0)^2 h^3 c}\left(\frac{1}{k^2} - \frac{1}{n^2}\right) \qquad (1\text{-}12)$$

里德伯常数:

$$R_H = \frac{2\pi^2 m(Ze^2)^2}{(4\pi\varepsilon_0)^2 h^3 c} = 1.097373\times 10^7 m^{-1}$$

玻尔理论在解释氢原子光谱的实验规律方面是成功的。玻尔假定真实反映了氢原子的内部情况

实验值: $R_H = 1.0967758\times 10^7 m^{-1}$

三 原子核外的电子结构

学习目标：

1、掌握原子核外的电子结构

2、熟悉描述核外电子运动的四个量子数

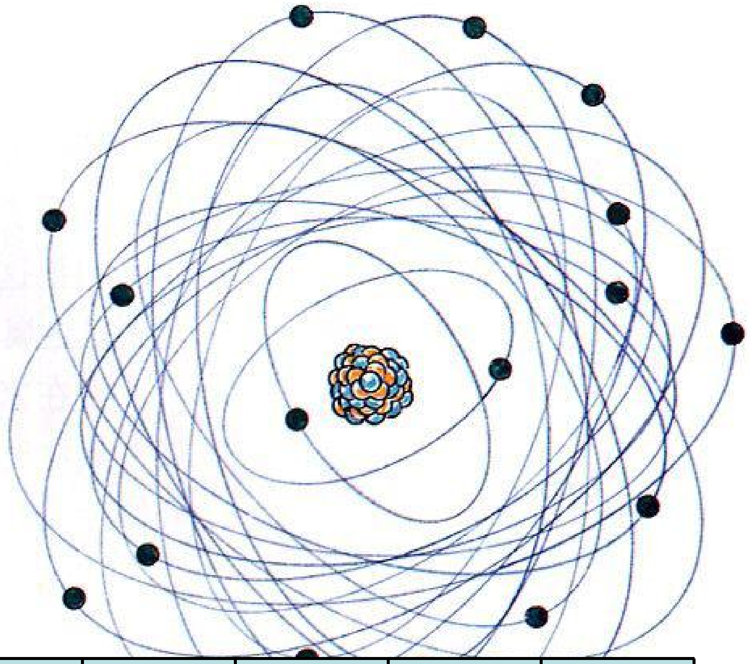
3、了解原子能级和结合能的概念

三 原子核外的电子结构

(一) 空间量子化

1. 主量子数n

原子核外的电子云是分层排布的，电子壳层可由主量子数表示



主量子数n	1	2	3	4	5	6	7	…
电子壳层	K	L	M	N	O	P	Q	…

原子能级低
电子距核近

原子能级高
电子距核远

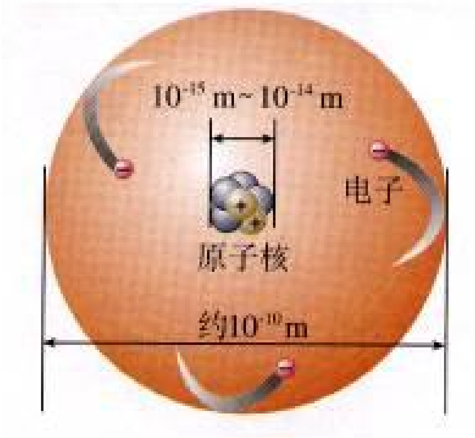
2. 角量子数l

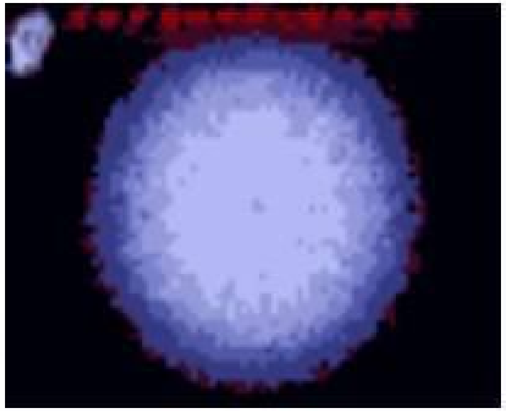
根据在同一电子壳层中的电子所具有的能量及运动形式不同，又分成若干电子亚层，由角量子数l确定

当n确定后，l可取0，1，2，3， …，(n-1)，有n个不同的值

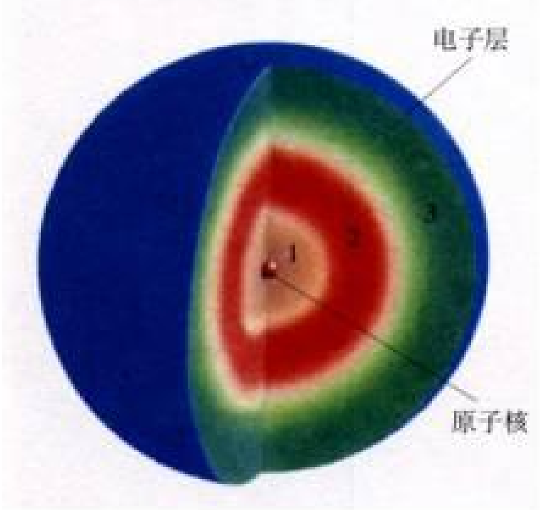
角量子数l	0	1	2	3	4	5	…	n-1
电子亚层	s	p	d	f	g	h	…	

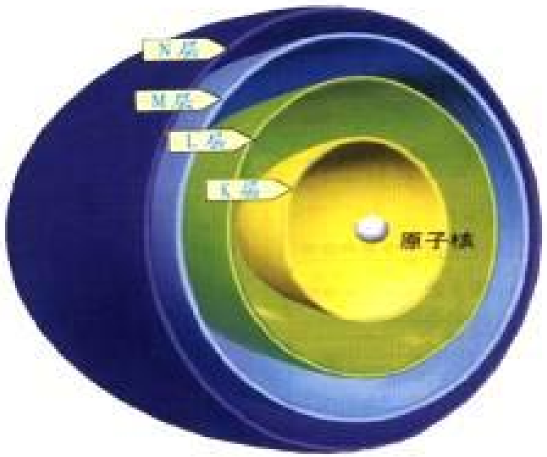
电子壳层（主量子数n）和电子亚层（角量了数l）决定了原子所具有的能量，即原子能级





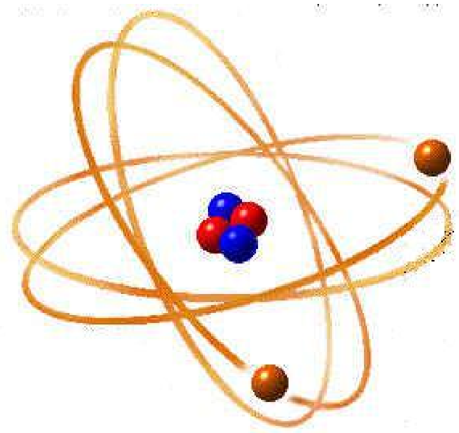
氢原子核外电子的运动





3. 磁量子数m_l

电子轨道平面的空间有一定的取向，在角量子数l确定后，其量子轨道平面可有（2l+1）个不同的取向，这些轨道的量子数用m_l表示



$$m_l = 0, \pm 1, \pm 2, \cdots, \pm l$$

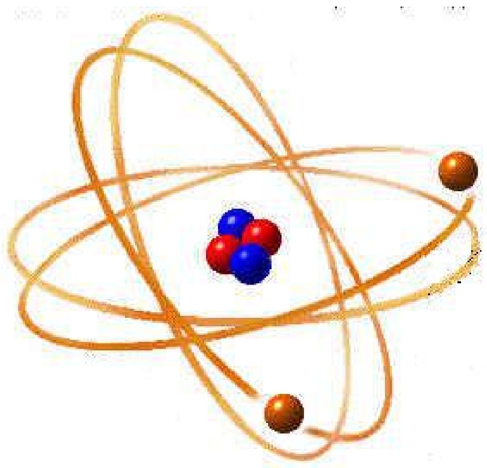
4. 自旋量子数m_s

电子绕原子核运动除公转外还有自转，称为电子自旋。有两个不同的取向或说有两种自旋状态，其自旋方向相反。由向上箭头“↑”和向下箭头“↓”表示

电子的自旋状态由自旋量子数决定 $m_s = \pm \frac{1}{2}$

绕原子核运动的电子用四个量子数(n,l,m_l,m_s)来描述它们所处的状态

$$\begin{cases} \text{主量子数}: n = 1,2,3,\cdots \\ \text{角量子数}: l = 0,1,2,3,\cdots,(n-1) \\ \text{磁量子数}: m_l = 0,\pm 1,\pm 2,\cdots,\pm l \\ \text{自旋量子数}: m_s = \pm \dfrac{1}{2} \end{cases}$$



——电子轨道的大小、形状，轨道平面在空间的取向和电子的自旋方向

(二) 电子的壳层结构

1、泡利不相容原理

多电子的原子，在同一原子中，不能有两个或两个以上的电子具有完全相同的量子数（n,l,m_l,m_s）,也就是说一个量子态最多只能容纳一外电子

2、电子壳层

原子有多少个电子，就有多少个量子态被占据。原子系统的量子态分为许多层，每层都有许多量子态，可容纳许多电子，所以称为电子壳层

3、主量子数为n的壳层，可容纳的最多电子数：

$$N_n = \sum_{l=0}^{n-1} 2(2l+1) = 2n^2 \qquad \text{（1-13）}$$

n,　第n主壳层

l=0，第s亚层
l=1，第p亚层
⋮
l=n-1，亚层

2(2l+1)个量子态
容纳2(2l+1)个电子

⋮

n=3,第三主壳层(M壳层)

l=0，第s亚层1个轨道2个电子
l=1，第p亚层3个轨道6个电子
l=2，第d亚层5个轨道10个电子

18个量子态，
容纳18个电子

n=2,第二主壳层(L壳层)

l=0，第s亚层1个轨道2个电子
l=1，第p亚层3个轨道6个电子

8个量子态，
容纳8个电子

n=1,第一主壳层(K壳层)

l=0，第s亚层

2个量子态，
容纳2个电子

讨论：原子中的某一电子的量子态

主量子数n	壳层	角量子数l	亚层	电子所处状态
3	M	2	d	3d
4	N	0	s	4s

主量子数n	1	2	3	4	5	6	7	
主壳层	K	L	M	N	O	P	Q	
角量子数l	0	1	2	3	4	5	6	
亚层	s	p	d	f	g	h		

(三) 原子核外壳层电子的结合能

1、把移走原子中某壳层轨道电子所需要的最小能量，称为该壳层电子在原子中的**结合能**

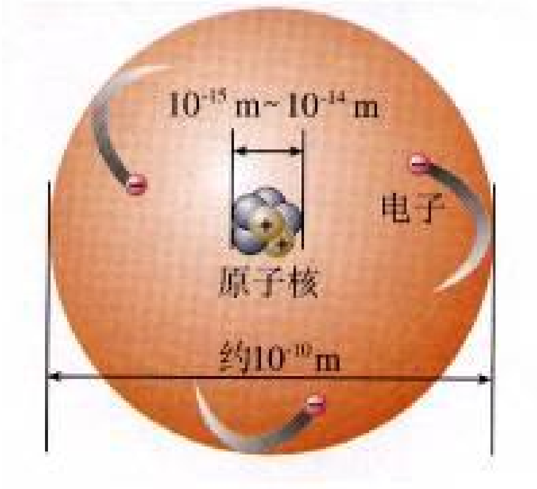
2、**原子能级**是指电子与核结合成原子时，能量的减少值

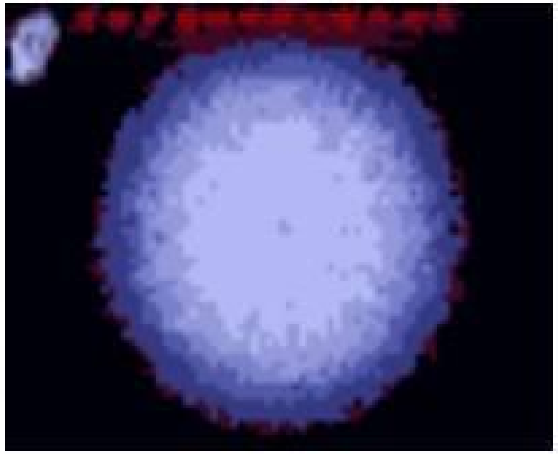
而**结合能**则表示将电子从原子中移走所需最小能量

3、原子能级是结合能的负值，它们的绝对值相等而符号相反

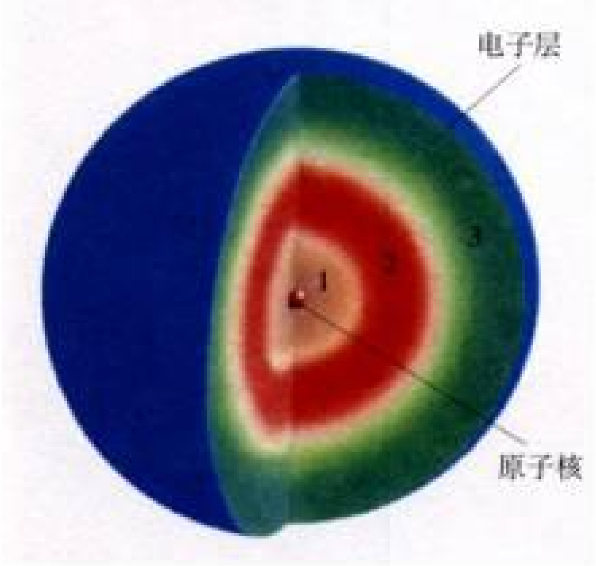
结合能最大的K电子 → 其能级最低

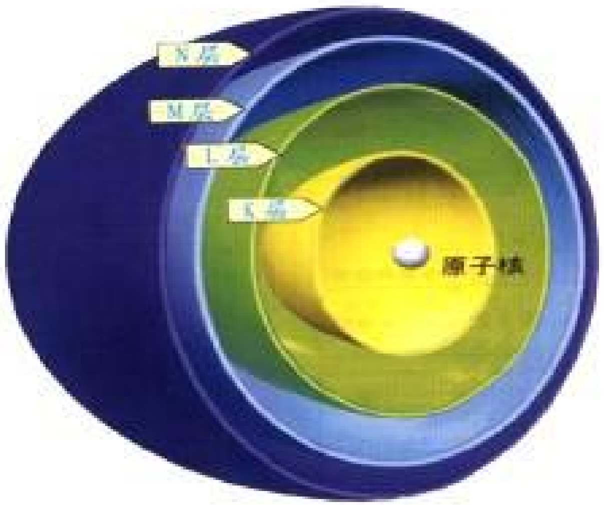
结合能较小的外层电子 → 其能级则较高



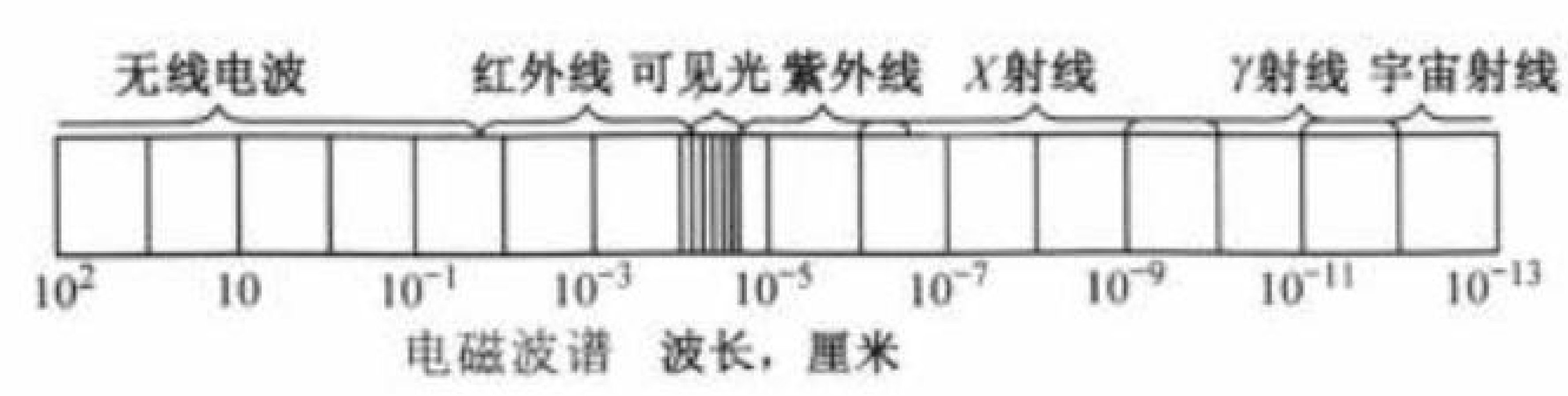


氢原子核外电子的运动





核式结构模型


无线电波
红外线 可见光 紫外线
X射线
γ射线 宇宙射线
10^2
10
10^{-1}
10^{-3}
10^{-5}
10^{-7}
10^{-9}
10^{-11}
10^{-13}
电磁波谱 波长，厘米