

第八章 光的量子性和激光

第三节 玻尔的原子模型

8.3 玻尔的原子模型

8.3.1 氢原子光谱中的谱线系

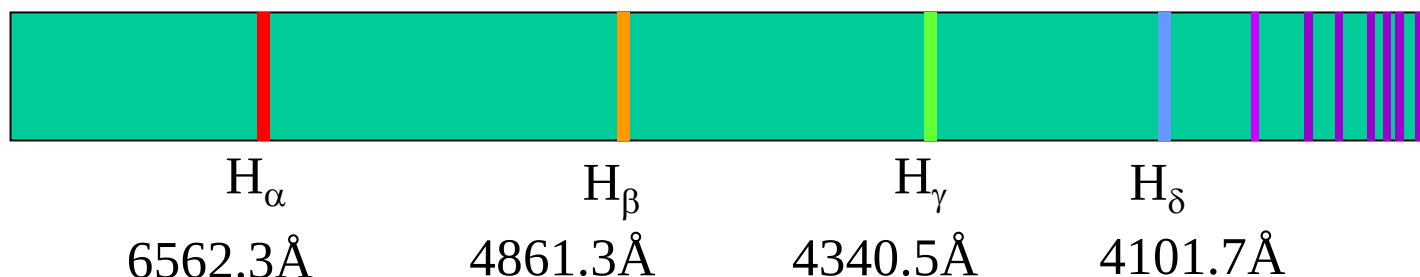
8.3.2 经典理论解释原子模型的困难

8.3.3 玻尔的氢原子模型

8.3 玻尔的原子模型

8.3.1 氢原子光谱中的谱线系

(利用光栅光谱仪观察低压氢气放电管发出的光得到如下谱线——线状分立的)



1885年巴耳末得到氢原子可见光谱线波长的经验公式：

巴耳末公式 $\lambda = B \frac{n^2}{n^2 - 4}$ $B = 3645.7 \text{ Å}$ $n = 3, 4, 5, 6, \dots$

将上式改写成

光谱公式 $\tilde{\nu} = \frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right)$ 波数 (单位长度内波的周期数)

其中 $R=4/B$ **里德伯常数** : $R=1.096776 \times 10^7 m^{-1}$

8.3 玻尔的原子模型

8.3.1 氢原子光谱中的谱线系

1889年里德伯提出了一个普遍公式：把上式中的 2^2 换成其他正整数 k^2 ，就可得氢原子其他线系，即

$$\tilde{\nu} = R\left(\frac{1}{k^2} - \frac{1}{n^2}\right) \quad n > k = 1, 2, 3, \dots; \quad n = k+1, k+2, k+3, \dots \quad (\text{广义巴尔末公式})$$

氢原子光谱其它谱的波数表示为：

赖曼系 $\tilde{\nu} = R\left(\frac{1}{1^2} - \frac{1}{n^2}\right) \quad n = 2, 3, 4, \dots \quad k=1 \text{在紫外区}$

帕邢系 $\tilde{\nu} = R\left(\frac{1}{3^2} - \frac{1}{n^2}\right) \quad n = 4, 5, 6, \dots \quad k=3 \text{在近红外区}$

布喇开系 $\tilde{\nu} = R\left(\frac{1}{4^2} - \frac{1}{n^2}\right) \quad n = 5, 6, 7, \dots \quad k=4 \text{在红外区}$

8.3 玻尔的原子模型

8.3.1 氢原子光谱中的谱线系

$$\tilde{\nu} = \frac{1}{\lambda} = R\left(\frac{1}{k^2} - \frac{1}{n^2}\right) = T(k) - T(n), \quad n > k = 1, 2, 3, \dots$$

$$T(k) = \frac{R}{k^2}, T(n) = \frac{R}{n^2} \quad \text{称为光谱项}$$

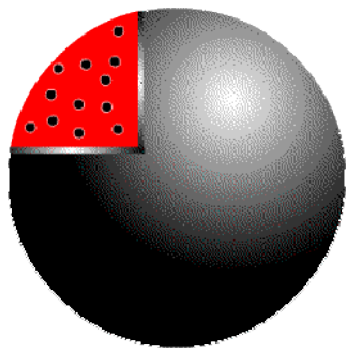
结论: 氢原子光谱规律如下：

- (1) 氢原子光谱是分立的线状光谱，各条谱线具有确定的波长；
- (2) 每一谱线的波数可用两个光谱项之差表示；
- (3) 前项保持定值，后项改变，就给出同一谱线系的各条谱线的波长。
- (4) 改变前项,就给出不同的谱线系。

8.3 玻尔的原子模型

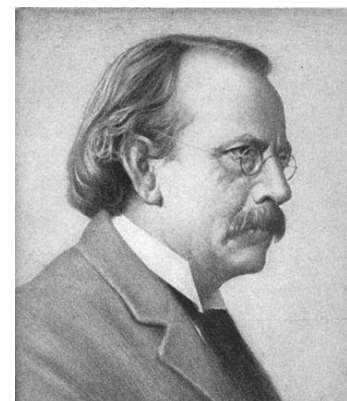
8.3.2 经典理论解释原子模型的困难

从汤姆逊模型到卢瑟福原子模型



汤姆逊模型

原子中带正电部分均匀分布在原子体内,电子镶嵌在其中,人们称之为"葡萄干布丁"或者"西瓜模型".



Joseph John Thomson

英国物理学家
(1856-1940)

1906年诺贝尔物理学奖

汤姆逊的博士生卢瑟福为了检验汤姆逊模型是否正确,于1909年设计了 α 粒子散射实验,并建议他的助手盖革(Geiger)和学生马斯顿(Marsden)实施。根据实验现象,他于1911年提出了原子的核式模型。

8.3 玻尔的原子模型

8.3.2 经典理论解释原子模型的困难

从汤姆逊模型到卢瑟福原子模型



α 粒子散射实验装置

放射源 R 发出一细束 α 粒子，直射到金属箔上。 α 粒子所受金属箔中原子的作用不同，将沿着不同的方向散射。荧光屏S及放大镜M可以沿着以F为中心的圆弧移动。对准某一方向，用放大镜M观察闪光，就能记录下单位时间内在这个方向散射的 α 粒子数。从而可以研究 α 粒子通过金属箔后按不同的散射角 θ 的分布情况。

实验现象

1. 被散射的 α 粒子大部分分布在小角度区域。
2. 用20层以上金箔实验时，少数（大约有 $1/8000$ ）的 α 粒子散射角 $\theta > 90^\circ$ 。
3. 有的甚至被弹回，偏转角几乎达到了 180° 。

8.3 玻尔的原子模型

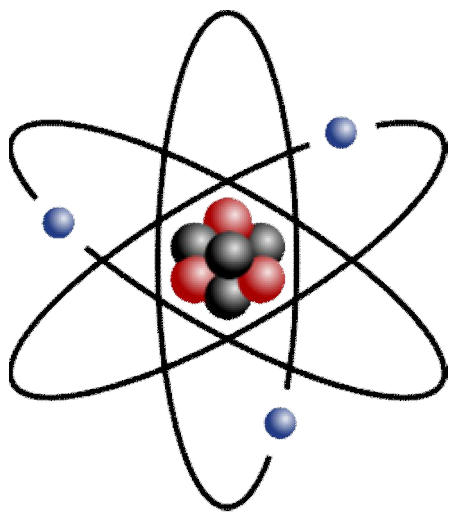
8.3.2 经典理论解释原子模型的困难

从汤姆逊模型到卢瑟福原子模型

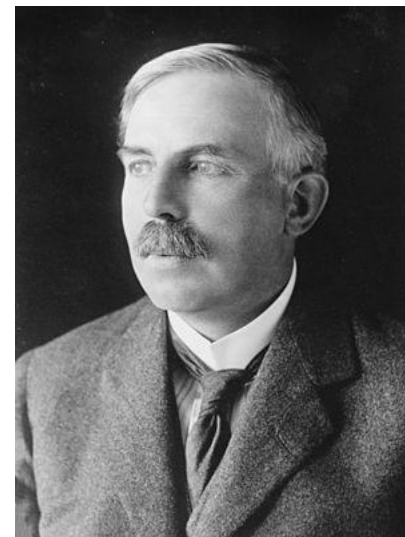
对 α 粒子散射实验的评价

“就像你用一枚15英寸的炮弹轰击一张薄纸被弹回并击中你一样不可思议。” ——卢瑟福

卢瑟福模型 (1912)



原子中的全部正电荷和极大部分质量都集中在原子中央，一个很小的体积内，称为原子核，原子中的电子在核的周围绕核运动。



Ernest Rutherford
(1871-1937)

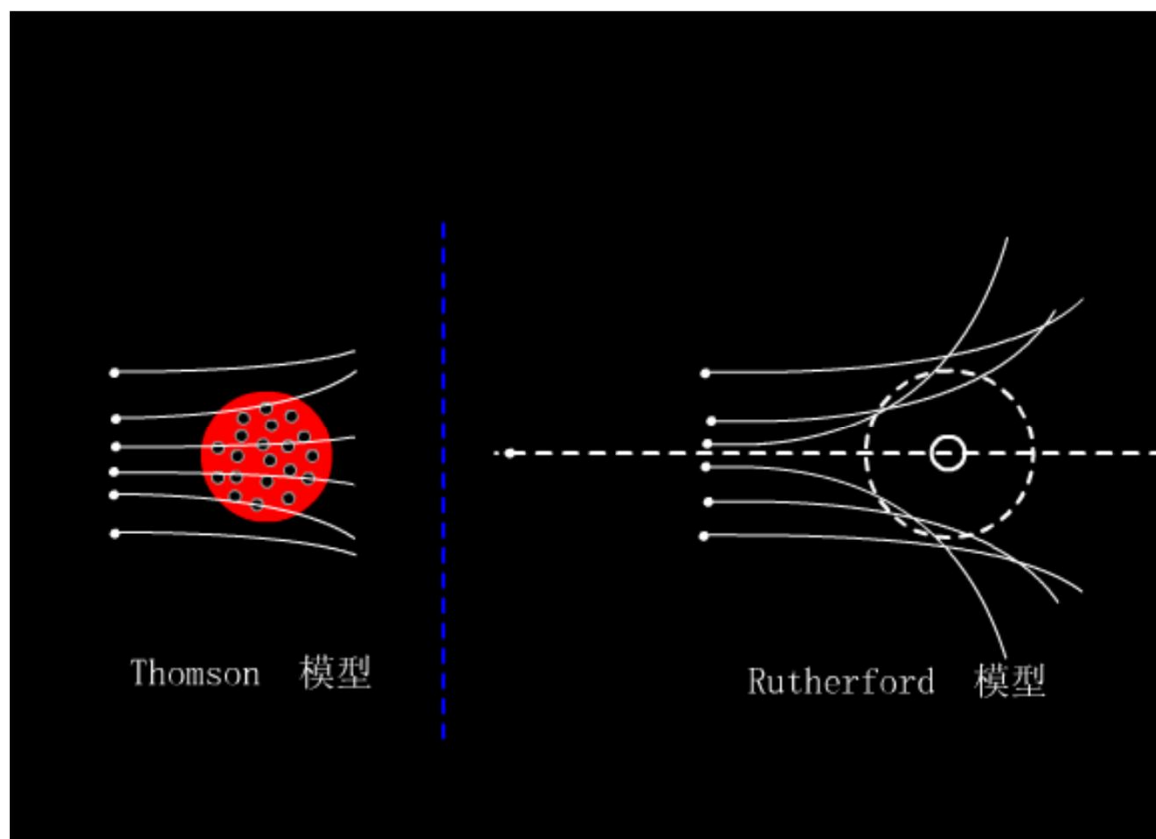
英国物理学家
1908 诺贝尔化学奖

8.3 玻尔的原子模型

8.3.2 经典理论解释原子模型的困难

从汤姆逊模型到卢瑟福原子模型

两模型区别：



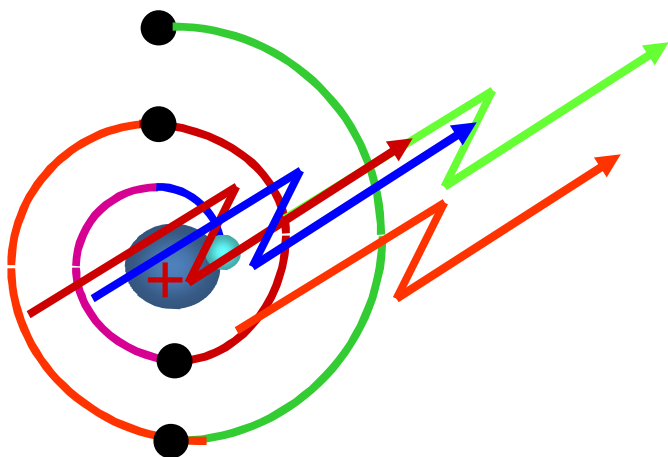
◆核式模型：正电荷集中在原子中心很小的区域，所以无限接近核时，作用力会变得的很大。

◆汤姆逊模型：在原子中心附近则不能提供很强的作用力。

8.3 玻尔的原子模型

8.3.2 经典理论解释原子模型的困难

经典理论的困难



按1911年卢瑟福提出的原子的行星模型——电子绕原子核 (10^{-12}m) 高速旋转。

对此经典物理势必得出如下结论：

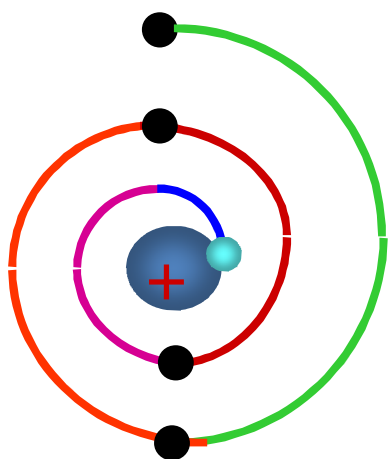
(1) 原子是“短命”的

电子绕核运动是加速运动必向外辐射能量，电子轨道半径越来越小，直到掉到原子核与正电荷中和，这个过程时间 $<10^{-10}$ 秒，因此不可能有稳定的原子存在。

8.3 玻尔的原子模型

8.3.2 经典理论解释原子模型的困难

经典理论的困难



(2) 不能解释为什么原子光谱是分立的线状光谱

电子作轨道运动，由于发射电磁波，能量逐渐减少，轨道半径逐渐变小，发射的电磁波的波长应连续变化的，原子光谱应为连续谱。

原子核式结构的缺陷：

- 无法解释原子的稳定性；
- 无法解释原子光谱的不连续性。

为了解决上述的困难，1913年丹麦物理学家玻尔在卢瑟福的核型结构的基础上，把量子化概念应用到原子系统，提出三个基本假设。



Niels Bohr

丹麦物理学家(1885-1962)

1922年诺贝尔物理学奖

8.3 玻尔的原子模型

8.3.3 玻尔的氢原子模型

玻尔把量子化的概念用到原子系统，提出了三条基本假设：

(1) 稳定态假设

稳定态对应的能量 $E_1, E_2, E_3 \dots$ 是不连续的，处在这些状态的原子不辐射电磁波。

(2) 跃迁假设

原子从一定态向另一一定态跃迁时，就要发射（或吸收）一个频率为 ν 的光子

$$|E_n - E_k| = h\nu \quad \text{跃迁频率条件}$$

(3) 轨道角动量量子化假设

$$L = n \frac{h}{2\pi} \quad \text{玻尔轨道量子化条件}$$

即：电子作圆周运动时，其角动量 L 必须等于 $\frac{h}{2\pi}$ 的整数倍。 n 为正整数，称为量子数。

8.3 玻尔的原子模型

8.3.3 玻尔的氢原子模型

(1) 电子轨道半径的量子化

$$\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r_n^2} = m \frac{v^2}{r_n} \quad (\text{动力学方程})$$

$$L = mvr_n = n \frac{h}{2\pi}$$

$$\longrightarrow r_n = n^2 \frac{h^2 \epsilon_0}{\pi m e^2}$$

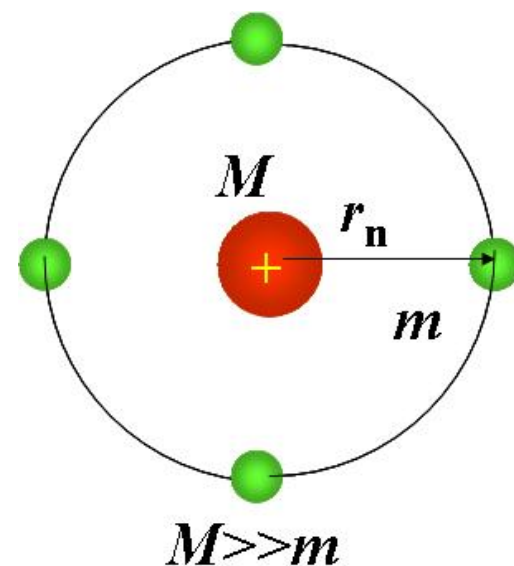
$$n=1, 2, 3, 4, \dots$$

结论：电子轨道是量子化的。

① $n=1$ 的轨道 r_1 称为玻尔半径。

$$r_1 = 1^2 \frac{(6.63 \times 10^{-34})^2 \times 8.85 \times 10^{-12}}{3.14 \times 9.1 \times 10^{-31} (1.6 \times 10^{-19})^2} \approx 0.53 \text{ \AA}$$

② 量子数为 n 的轨道半径为 $r_n = n^2 r_1 \approx 0.53 n^2 \text{ \AA}$



8.3 玻尔的原子模型

8.3.3 玻尔的氢原子模型

(2) 能量量子化和原子能级

$$\because E_n = \frac{1}{2}mv_n^2 - \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r_n} \quad \text{又} \because m\frac{v_n^2}{r_n} = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r_n^2}$$

$$\therefore E_n = \frac{e^2}{8\pi\epsilon_0 r_n} - \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r_n} = -\frac{e^2}{8\pi\epsilon_0 r_n}$$

$$\text{而} : r_n = n^2 \left(\frac{\epsilon_0 h^2}{\pi m e^2} \right) \Rightarrow E_n = -\frac{1}{n^2} \left(\frac{m e^4}{8 \epsilon_0^2 h^2} \right) \quad (n = 1, 2, 3, \dots)$$

结论：能量是量子化的。

这些分立的能量值 $E_1 E_2 E_3 \dots$ 被称为能级。

8.3 玻尔的原子模型

8.3.3 玻尔的氢原子模型

(2) 能量量子化和原子能级

- $n=1$ 为氢原子的最低能级，称为**基态能级**；
- $n>1$ 的各定态称为**受激态（或激发态）**；
- 当 $n\rightarrow\infty$ 时， $E_\infty=0$ 称为**电离态**。

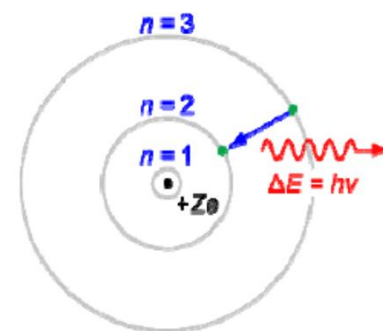
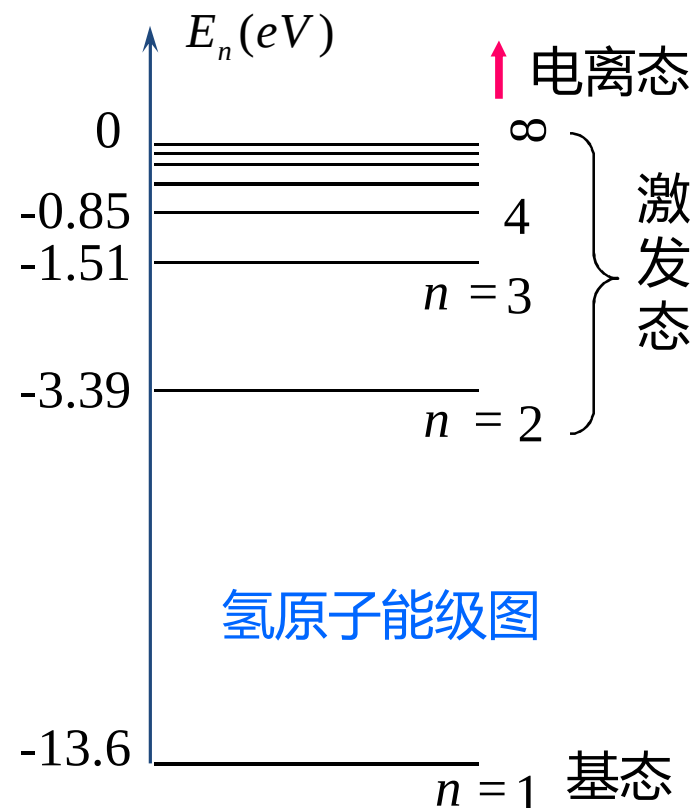
基态能量($n=1$): $E_1 = -13.6 \text{ eV}$

激发态能量 ($n > 1$):

$$E_n = \frac{E_1}{n^2} = -\frac{13.6}{n^2} \text{ eV} \quad n=1, 2, 3, \dots$$

氢原子处于电离态时能量: $E_\infty = 0$

氢原子从基态($n=1$) 跃迁到激发态($n>1$)时所需的能量被称为**激发能**。

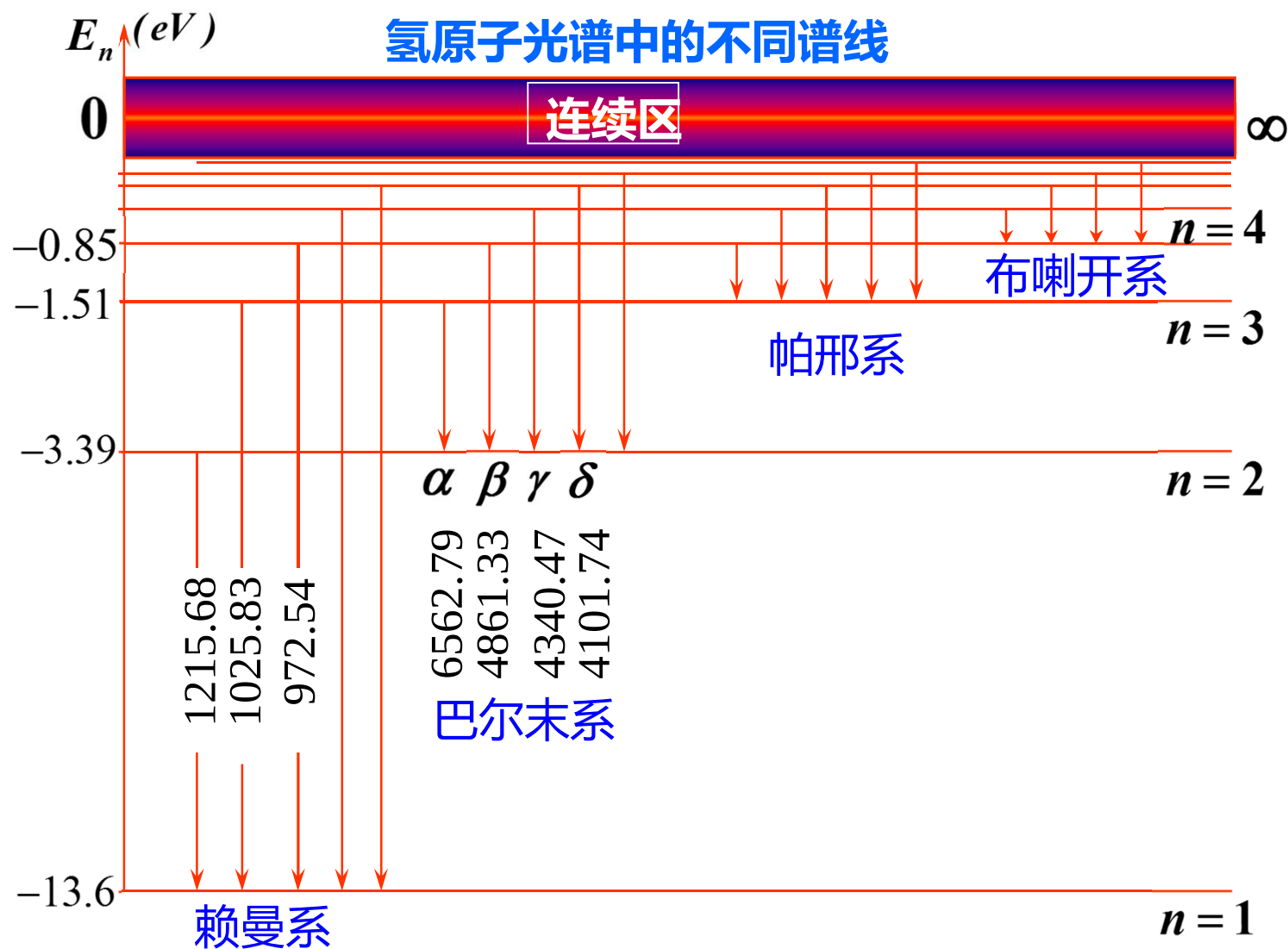


8.3 玻尔的原子模型

8.3.3 玻尔的氢原子模型

(2)

能量量子化和原子能级



8.3 玻尔的原子模型

8.3.3 玻尔的氢原子模型

由玻尔理论讨论 “里德伯常数 R ”

频率条件：
$$\nu_{nk} = \frac{E_n - E_k}{h}$$

氢原子的能级公式：
$$E_n = -\frac{1}{n^2} \left(\frac{me^4}{8\varepsilon_0^2 h^2} \right) \quad (n = 1, 2, 3, \dots)$$

得到：
$$\tilde{\nu}_{nk} = \frac{1}{\lambda} = \frac{me^4}{8\varepsilon_0^2 h^3 c} \left(\frac{1}{k^2} - \frac{1}{n^2} \right)$$

与
$$\tilde{\nu}_{nk} = \frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{k^2} - \frac{1}{n^2} \right)$$
 式比较得到：

$$R_{\text{理}} = 1.097373 \times 10^7 \text{ m}^{-1}$$

$$R_{\text{实验}} = 1.096776 \times 10^7 \text{ m}^{-1}$$

 实验值和理论值符合得很好！

8.3 玻尔的原子模型

8.3.3 玻尔的氢原子模型

玻尔理论的成功与局限

成功：解释了氢原子光谱，之后有人推广到类氢离子（ $H_e^+ \cdot L_i^{+2} \cdot B_e^{+3}$ ，只有一个电子绕核转动的离子）也获得成功。他的定态跃迁的思想至今仍是正确的。并且它是导致新理论的跳板。玻尔因该理论于1922年获诺贝尔物理学奖。

局限：只能求出氢原子及类氢原子光谱的频率，对谱线的强度、宽度、偏振等一系列问题都无法处理，对于多电子系统的原子光谱也无法解释清楚。

原因：它是半经典半量子理论的产物。

(1) 把电子看作是一经典粒子，推导中应用了牛顿定律，使用了轨道的概念，所以玻尔理论不是彻底的量子论。

(2) 角动量量子化的假设以及电子在稳定轨道上运动时不辐射电磁波是十分生硬的。

本节重点

- (1) 玻尔的氢原子模型（理解）
- (2) 能级的概念（理解）

作业

p301-1