

2 卢瑟福的原子有核模型

“原子”一词来自希腊文，含义是“不可分割的”。公元前四世纪，古希腊哲学家德谟克利特(Democritus)提出了这一概念，并把它当作物质的最小单元。

1807年，英国科学家约翰·道尔顿(John Dalton)提出原子论。他认为原子类似于刚性的小球，它们是物质世界的基本结构单元，是不可分割的。



John Dalton

假如由于某种大灾难，所有的科学知识都丢失了，只有一句话可传给下一代，那么怎样才能用最少的词汇来传达最多的信息呢？我相信这句话是原子的假设（或者说原子的事实，无论你愿意怎样称呼都行）：**所有的物体都是由原子构成的**——这些原子是一些小小的粒子，它们一直不停地运动着，当彼此略微离开时相互吸引，当彼此过于挤紧时又互相排斥。只要稍微想一下，你就会发现，在这一句话中包含了大量的有关这个世界的信息。

——费曼物理讲义第一卷1-2《物质是由原子构成的》

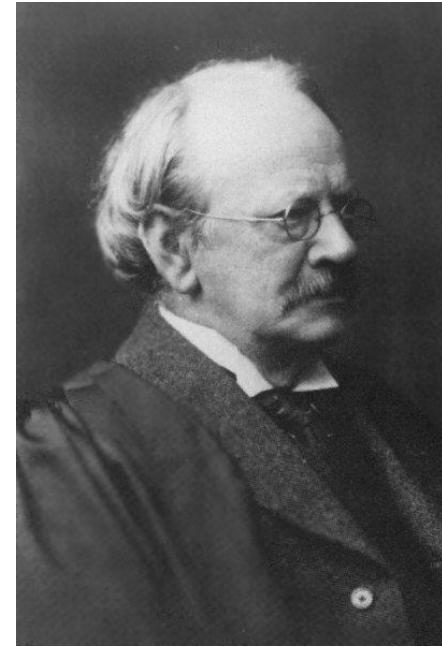
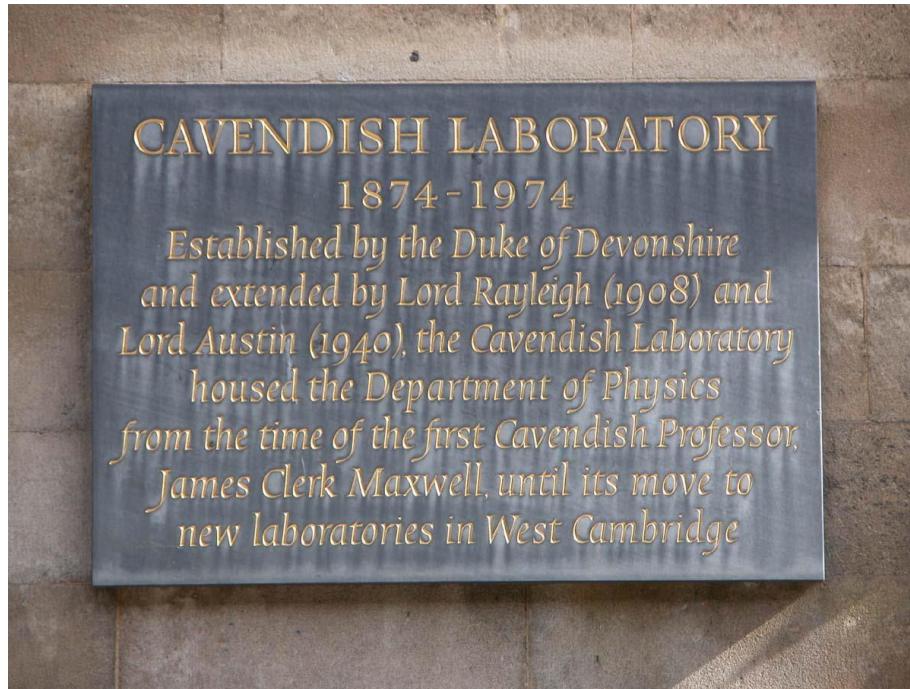
当化学家描述原子的排列时，物理学家从来不怎么相信化学家了解他在谈论的是什么。

——费曼物理讲义第一卷1-4《化学反应》



- 1869年，俄罗斯化学家门捷列夫在此基础上，发现了自然界的一个重大定律——元素周期律；
- 1895年，德国物理学家威廉·伦琴在试验莱纳德管和克鲁克斯管（阴极射线管）时偶然发现了X射线。伦琴于1901年获得第一届诺贝尔物理学奖；
- 1896年，法国物理学家贝克勒尔在研究某些含元素铀的荧光物质时发现元素的放射性，此后法国科学家皮埃尔·居里与波兰科学家玛丽·斯克沃多夫斯卡·居里致力于对这些能够产生射线的元素的研究，三人共同获得1903年度诺贝尔物理学奖。
- 1897年，英国物理学家J. J. 汤姆孙实验确认了电子的存在，测出电子的荷质比 e/m_e ，并因此被授予1906年诺贝尔物理奖。

电子是第一个被发现的微观粒子，电子的发现，对人类认识微观世界起了极为重要的作用，因为它是构成所以物质的基本成分。



约瑟夫·约翰·汤姆逊
Joseph John Thomson
1856-1940，英国物理学家，
电子的发现者。被誉为：
“最先打开通往基本粒子
物理学大门的伟人。”

- 1871年 - 1879年：詹姆斯·麦克斯韦
1879年 - 1884年：约翰·斯特拉特，第三代瑞利男爵
1884年 - 1919年：约瑟夫·汤姆孙
1919年 - 1937年：欧内斯特·卢瑟福
1938年 - 1953年：威廉·劳伦斯·布拉格
.....



美国物理学家密立根(R. A. Millikan)，因电子电荷的测定被授予1923年诺贝尔物理奖。

1910年，美国物理学家密立根(R. A. Millikan)通过著名的“油滴实验”精确地测定了电子的电量。后来又经过几年反复测定，得出：

$$e = 1.59 \times 10^{-19} \text{ C}$$

现在的公认值为：

$$e = 1.60217733(49) \times 10^{-19} \text{ C}$$

根据电子的电量及荷质比 e/m_e ，可定出电子的质量为：

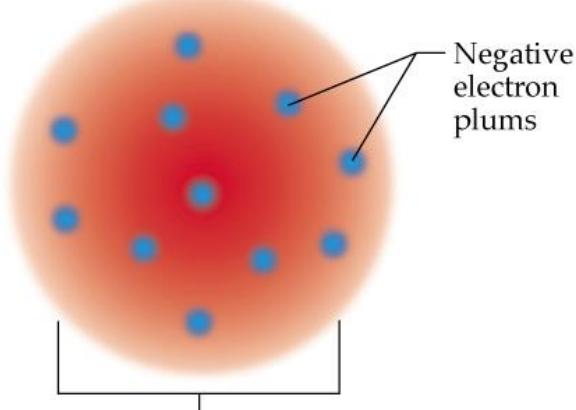
$$m_e = 9.1093897(54) \times 10^{-31} \text{ kg}$$

原子结构模型

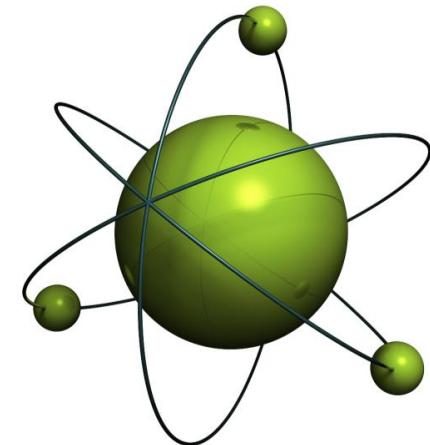


道尔顿的原子

Thompson plum pudding
model of the atom



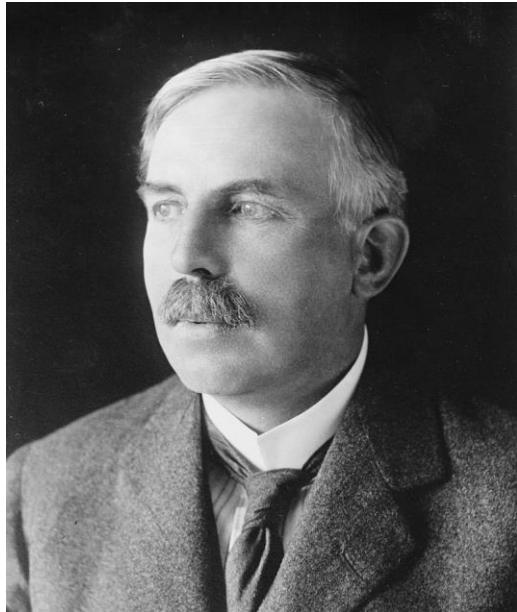
汤姆孙的原子



卢瑟福的原子

汤姆孙的原子模型（1898，布丁模型）

汤姆孙认为，原子中的正电荷和原子的质量均匀地分布在半径为 10^{-10} m 的球体范围内，电子浸于其中。然而，当他试图用他的模型去解释氢原子光谱时，他失败了。

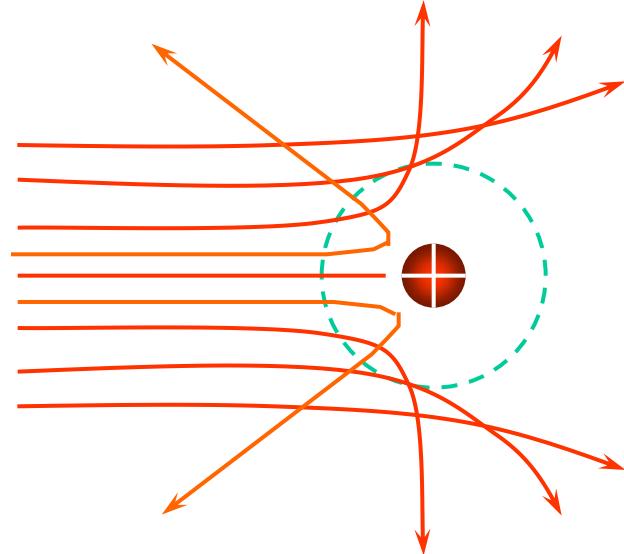
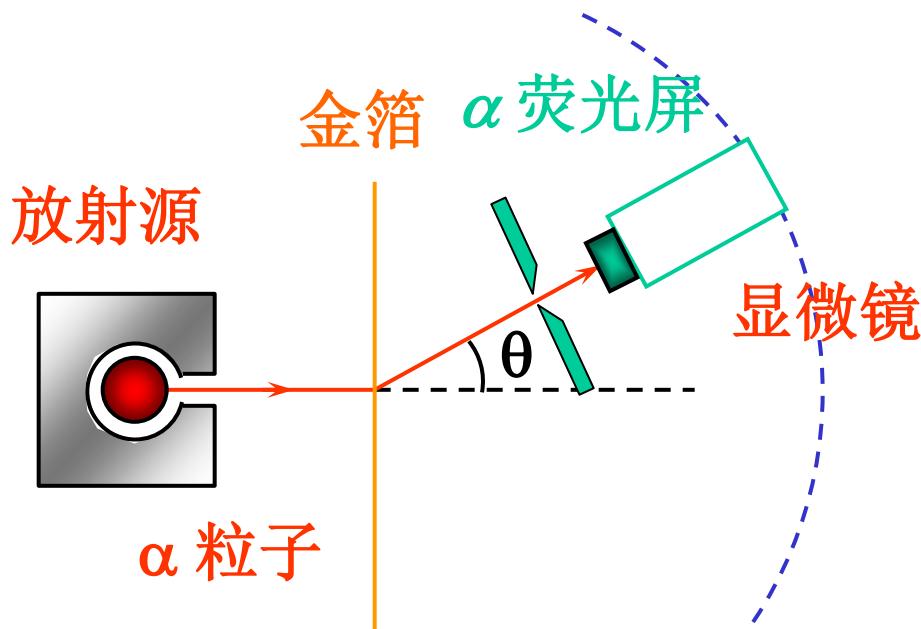


欧内斯特·卢瑟福（Ernest Rutherford，1871-1937），英国物理学家，被称为“原子核之父”。因为“对元素蜕变以及放射化学的研究”，荣获1908年诺贝尔化学奖。

卢瑟福1899年开始加入了对元素的放射性研究的行列中。1899年他发现了元素“钍”，1902年他在实验中确认，一种原子可以蜕变成为另一种原子，否定了道尔顿的“原子说”。1911年，他根据他的粒子散射实验，提出了**卢瑟福原子结构模型**，极大地推动了对原子结构的认识，为后来的量子力学深入讨论原子结构奠定了基础。

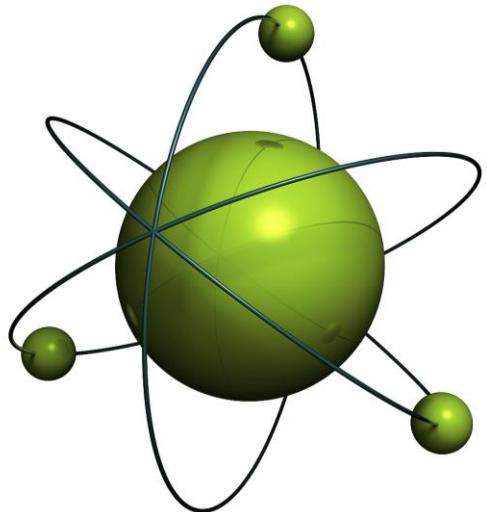


1909年—— α 粒子散射实验



卢瑟福散射实验使用 α 粒子（一种带正电的粒子）来探测原子的结构。假如汤姆孙的假设是正确的，那么由于正电荷完全散开，而不是集中于一个原子核，那么通过原子的 α 粒子移动方向应该只会有小角度偏差。然而，他们得到的实验结果非常诡异，虽然绝大部分粒子经金箔散射后，散射角很小 ($2^\circ \sim 3^\circ$)，但大约每8000个 α 粒子，就有一个粒子的移动方向会有很大角度的偏差，甚至超过90度。

卢瑟福的原子结构模型：



从散射实验的结果，卢瑟福断定，大多数的质量和正电荷，都应该集中于一个很小的区域（原子核）；电子则包围在区域的外面。当 α 粒子移动到非常接近原子核时，它会被很强烈的排斥，以大角度反弹。原子核的小尺寸解释了为什么只有少数的 α 粒子被这样排斥。

1911年，卢瑟福根据实验结果提出了原子的“核式结构模型”(也被称为“卢瑟福行星模型”)：有一个带正电的中心体，即原子核，所带正电的数值是原子序数乘单位正电荷。原子核的半径在 10^{-15} 到 10^{-14} 米之间。原子核外边散布着带负电的电子，但原子质量的绝大部分是原子核的质量。

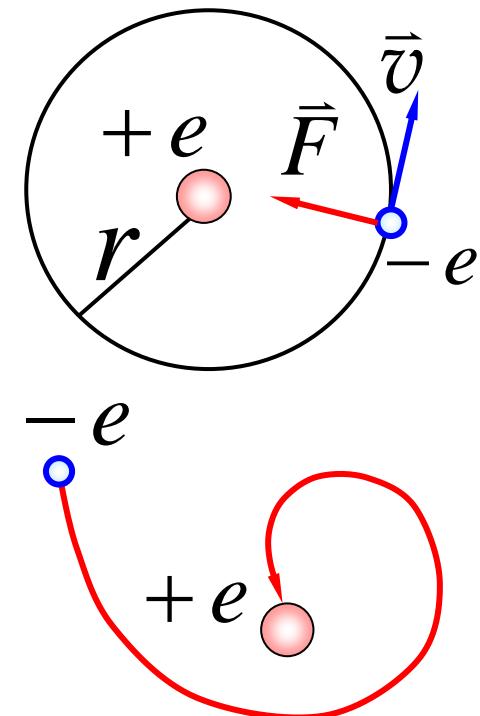


二 氢原子的玻尔理论

1 经典有核模型的困难

根据经典电磁理论，电子绕核作匀速圆周运动，作加速运动的电子将不断向外辐射电磁波。

- ◆ 原子不断向外辐射能量，能量逐渐减小，电子旋转的频率也逐渐改变，发射光谱应是连续谱；
- ◆ 由于原子总能量减小，电子将逐渐的接近原子核而后相遇，原子不稳定。



1913年——玻尔的氢原子理论

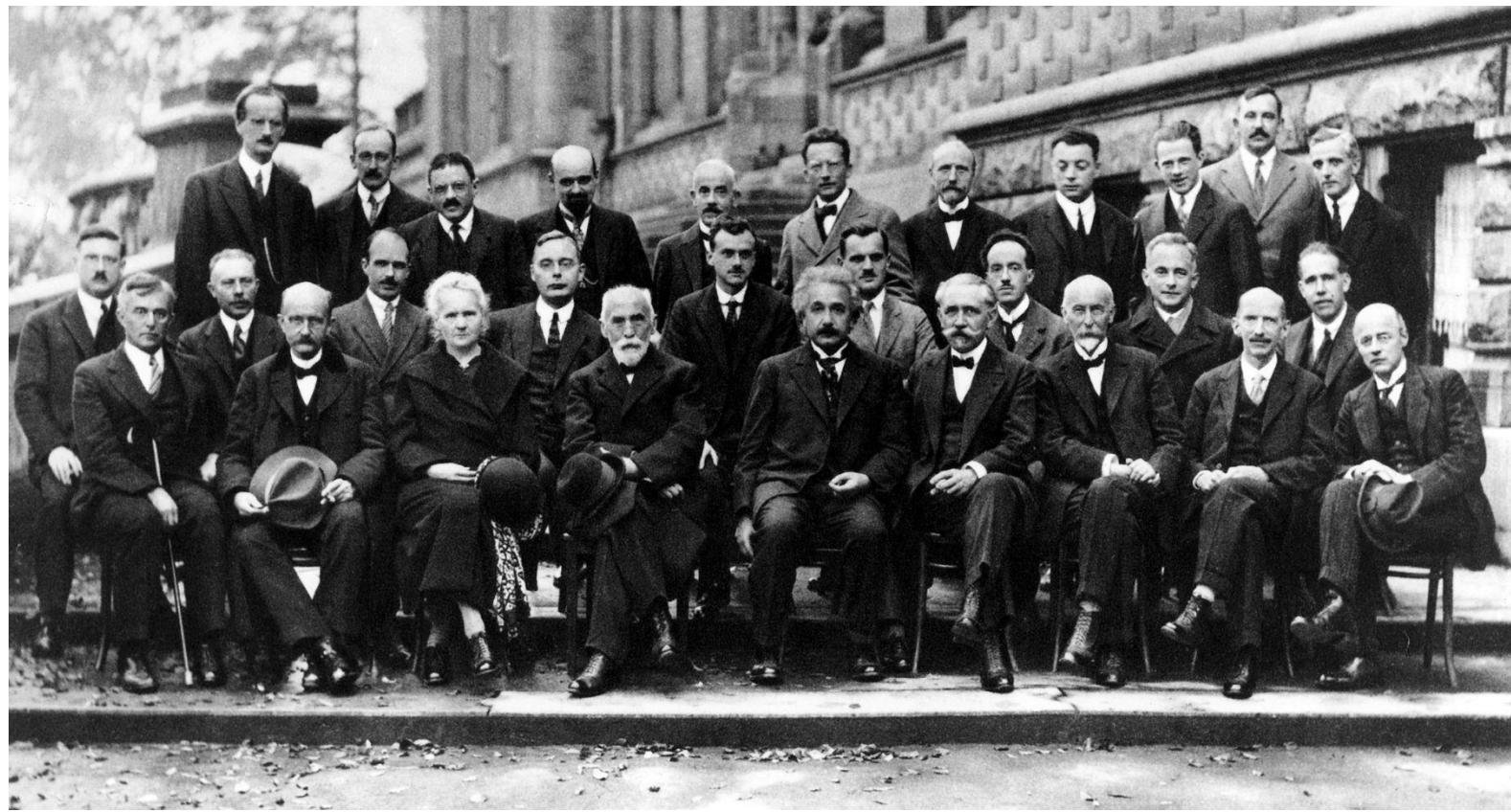
1911年，玻尔成为了剑桥大学卡文迪许实验室的一名博士后，跟随当时的实验室主任汤姆逊进行研究。他在那一年的年底结识了当时正在曼彻斯特大学工作的卢瑟福，并于次年从剑桥转到了卢瑟福的实验室继续研究。在1912年8月他回到丹麦的哥本哈根大学担任讲师。他于1913年在《哲学杂志》上连续发表了三篇论文，在这三篇论文中玻尔将马克斯·普朗克所提出的量子理论运用于卢瑟福所提出的模型，构建了具有突破性的玻尔模型。

玻尔非常喜欢足球，他曾经代表哥本哈根的学院足球俱乐部（Akademisk Boldklub）比赛，司职守门员。



尼尔斯·玻尔（Niels Bohr, 1885—1962），丹麦著名理论物理学家，现代物理学的创始人之一。1922年因“对原子结构以及从原子发射出的辐射的研究”而荣获诺贝尔物理学奖。

可能最著名的一次索尔维会议是1927年10月召开的第五次索尔维会议。此次会议主题为“电子和光子”，世界上最主要的物理学家聚在一起讨论新近表述的量子理论。会议上最出众的角色是**爱因斯坦**和**尼尔斯·玻尔**。前者以“上帝不会掷骰子”的观点反对海森堡的不确定性原理，而玻尔反驳道，“爱因斯坦，不要告诉上帝怎么做”——这一争论被称为玻尔-爱因斯坦论战。参加会议的二十九人中有十七人获得或后来获得诺贝尔奖。玛丽·居里是照片中唯一一位女性。





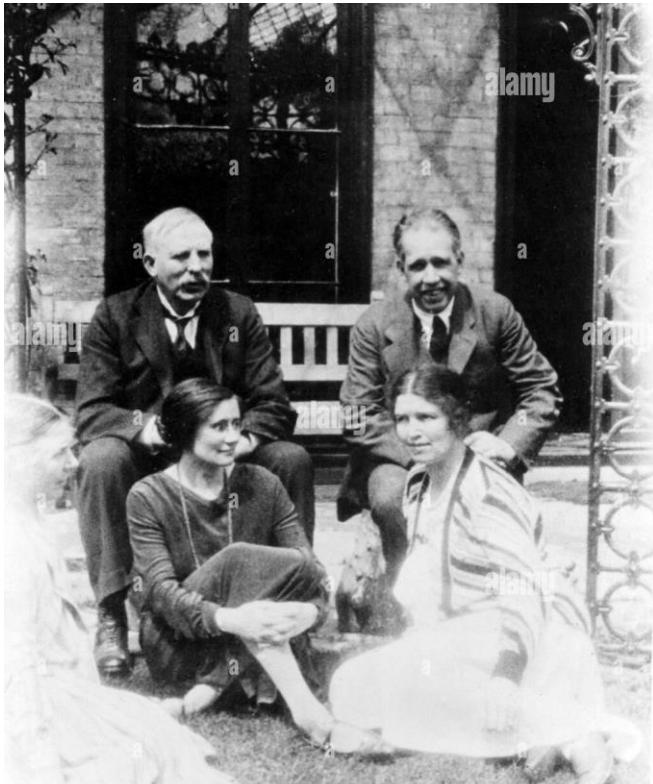
SOLVAY CONFERENCE 1927

A. PICARD	E. HENRIOT	P. EHRENFEST	Ed. HERSEN	Th. DE DONDER	E. SCHRÖDINGER	E. VERSCHAFFELT	W. PAULI	W. HEISENBERG	R.H. FOWLER	L. BRILLOUIN
-----------	------------	--------------	------------	---------------	----------------	-----------------	----------	---------------	-------------	--------------

P. DEBYE	M. KNUDSEN	W.L. BRAGG	H.A. KRAMERS	P.J.M. DIRAC	A.H. COMPTON	L. de BROGLIE	M. BORN	N. BOHR
I. LANGMUR	M. PLANCK	Mme CURIE	H.A. LORENTZ	A. EINSTEIN	P. LANGEVIN	C.H.E. GUYE	C.T.R. WILSON	O.W. RICHARDSON

Absents : Sir W.H. BRAGG, H. DESLANDRES et E. VAN AUBEL





Before and after 1927



2 玻尔的氢原子理论

1913年玻尔在卢瑟福的原子结构模型的基础上，将量子化概念应用于原子系统，提出三条假设：

(1) 定态假设

电子在原子中可以在一些特定的圆轨道上运动而不辐射电磁波，这时，原子处于稳定状态，简称定态。

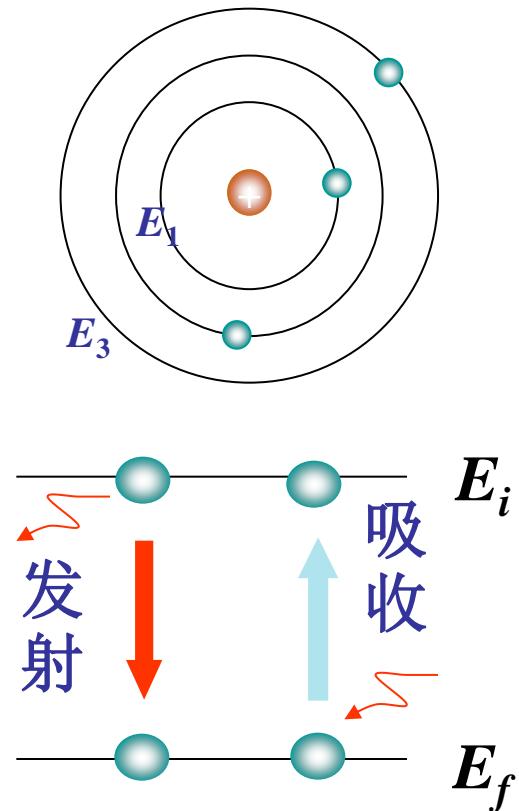
与定态相应的能量分别为 $E_1, E_2 \dots$,

$$E_1 < E_2 < E_3$$

(2) 频率条件（跃迁条件）

原子能量的任何变化，包括发射或吸收电磁辐射，都只能以在两个定态之间的方式进行。

$$h\nu = E_i - E_f$$



(3) 量子化条件

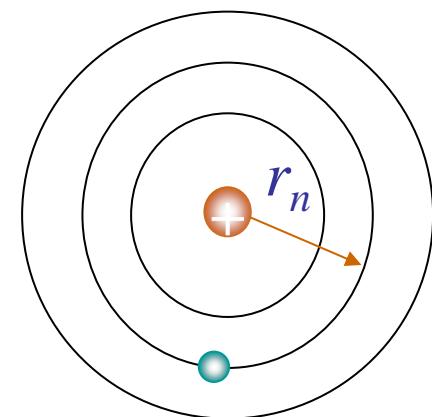
定态与电子绕核运动的一系列分立圆周轨道相对应，电子轨道角动量只能是 $(\hbar/2\pi)$ 的整数倍，即

$$L = mvr = n \frac{\hbar}{2\pi} \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad \text{主量子数}$$

3 氢原子轨道半径和能量的计算

(1) 轨道半径

$$\left. \begin{array}{l} \text{经典力学: } \frac{e^2}{4\pi \epsilon_0 r_n^2} = m \frac{v_n^2}{r_n} \\ \text{量子化条件: } mv_n r_n = n \frac{\hbar}{2\pi} \end{array} \right\}$$



$$r_n = \frac{\epsilon_0 h^2}{\pi m e^2} n^2 = r_1 n^2 \quad (n = 1, 2, 3, \dots)$$

$$r_n = \frac{\epsilon_0 h^2}{\pi m e^2} n^2 = r_1 n^2 \quad (n=1,2,3,\dots)$$

$n=1$: 玻尔半径 $r_1 = \frac{\epsilon_0 h^2}{\pi m e^2} = 5.29 \times 10^{-11}$ m

(2) 能量

$$v_n = \frac{e^2}{2\epsilon_0 hn} = \frac{\alpha c}{n} \quad (n=1,2,3,\dots) \quad \alpha = \frac{e^2}{2\epsilon_0 hc} \approx \frac{1}{137}$$

第 n 轨道电子总能量:

$$E_n = (E_k + E_p)_n = \frac{1}{2} m v_n^2 - \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r_n}$$

$$E_n = -\frac{me^4}{8\epsilon_0^2 h^2} \cdot \frac{1}{n^2} = \frac{E_1}{n^2}$$

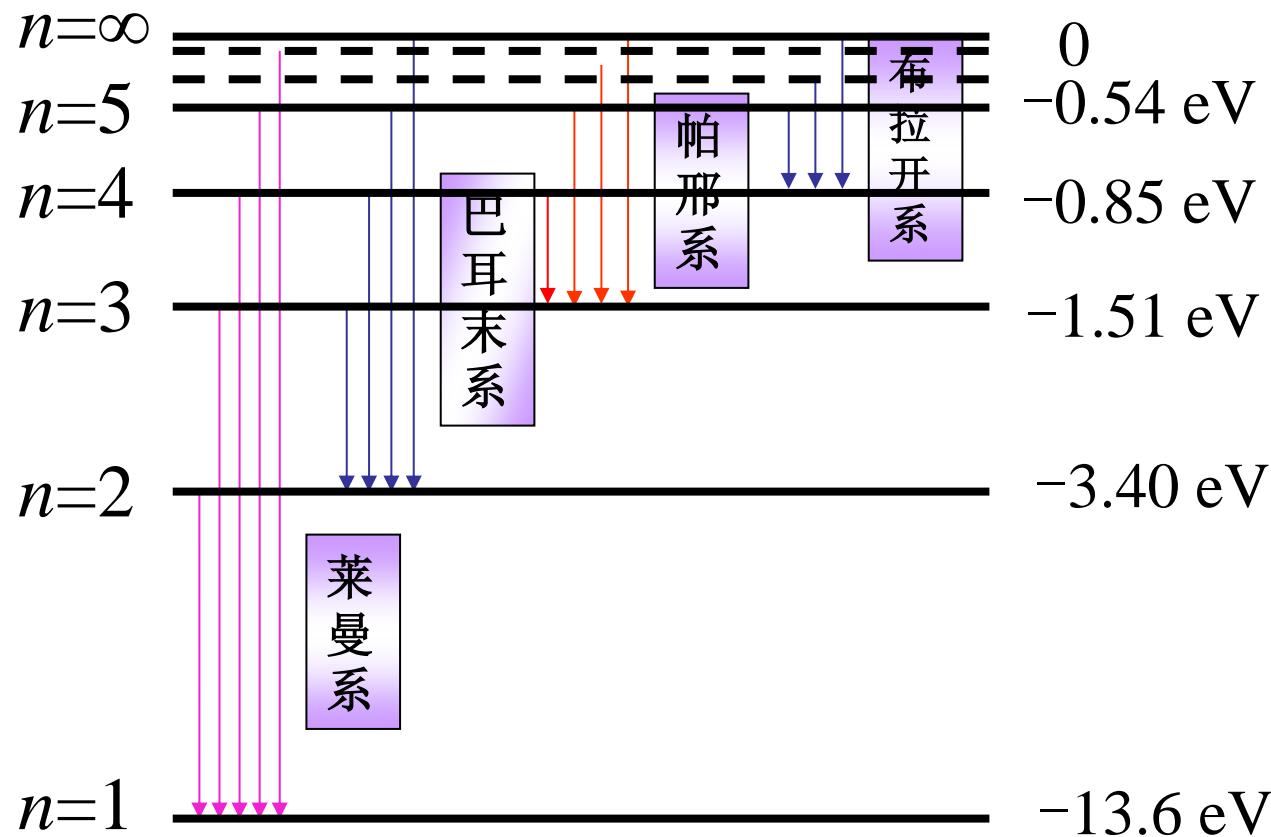
基态能量 ($n = 1$)

$$E_1 = -\frac{me^4}{8\varepsilon_0^2 h^2} = -13.6 \text{ eV} \text{ (电离能)}$$

激发态能量 ($n > 1$)

$$E_n = E_1 / n^2$$

氢原子能级跃迁与光谱图



4 玻尔理论对氢原子光谱的解释

$$E_n = -\frac{me^4}{8\varepsilon_0^2 h^2} \cdot \frac{1}{n^2}$$

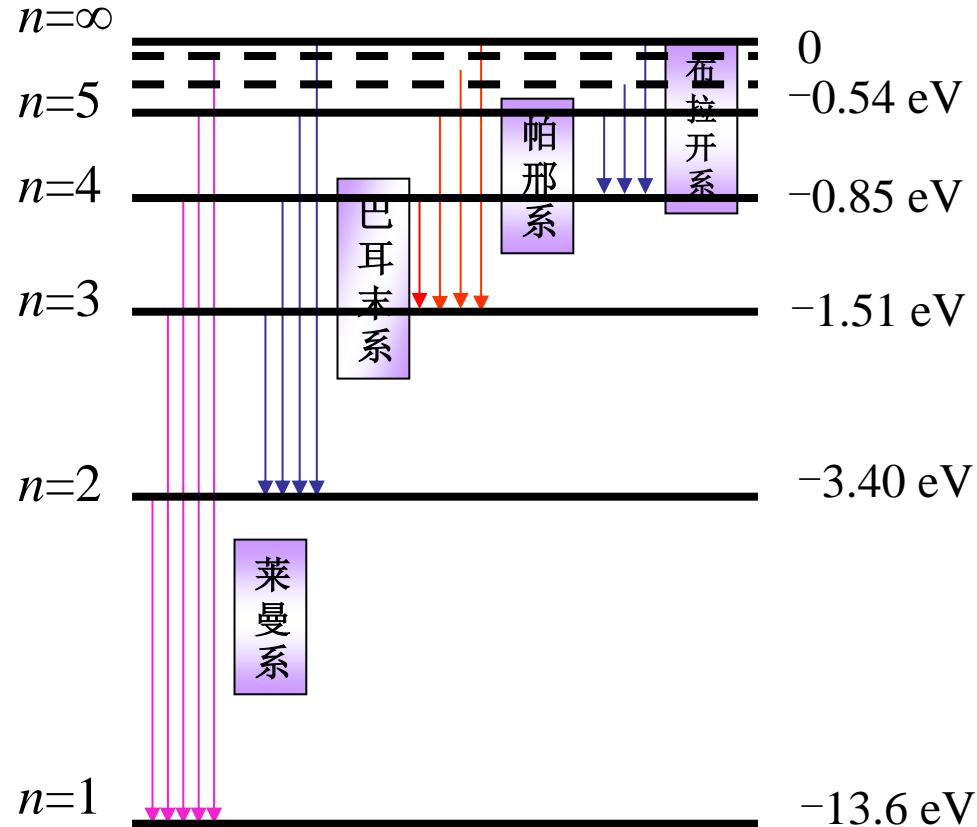
$$h\nu = E_i - E_f$$

波数

$$\sigma = \frac{1}{\lambda} = \frac{\nu}{c}$$

$$= \frac{me^4}{8\varepsilon_0^2 h^3 c} \left(\frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2} \right), \quad n_i > n_f$$

$$\frac{me^4}{8\varepsilon_0^2 h^3 c} = 1.097 \times 10^7 \text{ m}^{-1} \approx R \text{ (里德伯常数)}$$



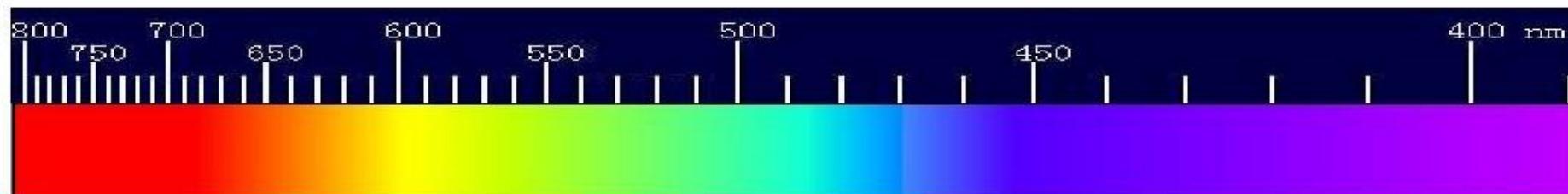
三 氢原子玻尔理论的意义和困难

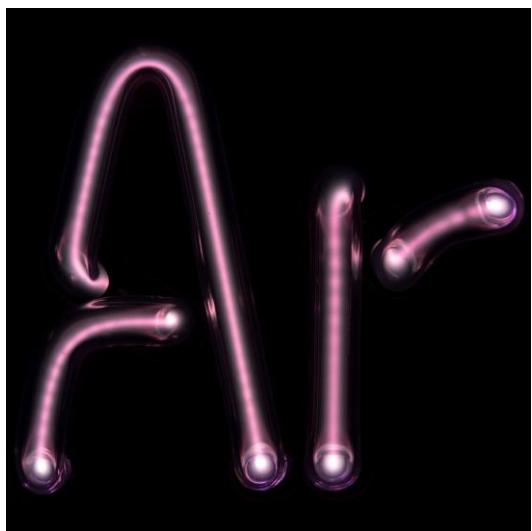
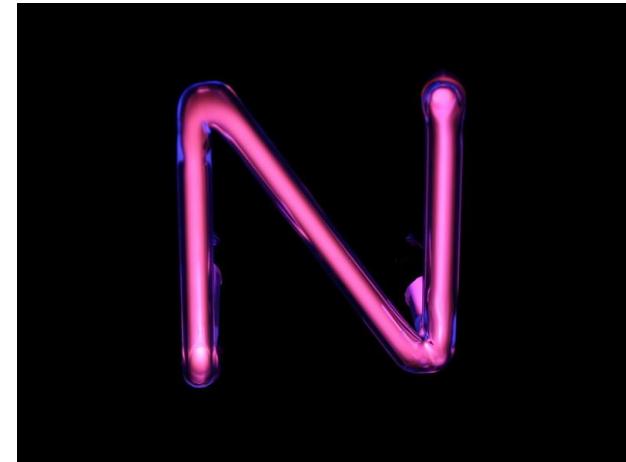
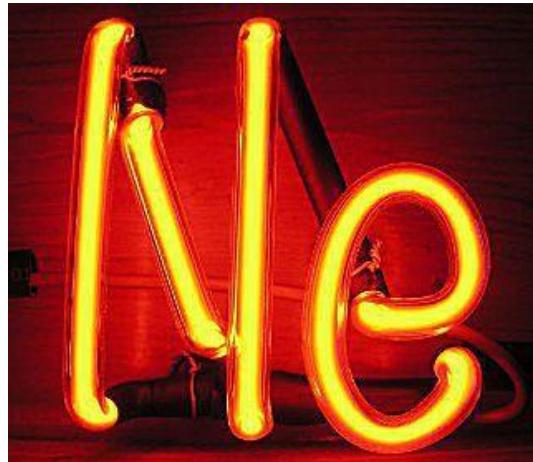
1 意义

- (1) 正确地指出原子能级的存在(原子能量量子化).
- (2) 正确地指出定态和角动量量子化的概念.
- (3) 正确地解释了氢原子及类氢离子光谱规律.

2 不足之处

- (1) 无法解释比氢原子更复杂的原子.
- (2) 微观粒子的运动视为有确定的轨道.
- (3) 对谱线的强度、宽度、偏振等一系列问题无法处理.
- (4) 半经典半量子理论，既把微观粒子看成是遵守经典力学的质点，同时，又赋予它们量子化的特征.





例12: 计算氢原子基态电子的轨道角动量、线速度。

解: 基态 $n = 1$

$$L_1 = n \frac{h}{2\pi} = \frac{6.6 \times 10^{-34}}{2\pi} = 1.055 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$$

$$v_1 = \frac{L_1}{mr_1} = \frac{1.055 \times 10^{-34}}{9.11 \times 10^{-31} \times 0.529 \times 10^{-10}} = 2.19 \times 10^6 \text{ m/s}$$

例13: 用 12.6 eV 的电子轰击基态原子，这些原子所能达到的最高能态？

解: 如果氢原子吸收电子全部能量，它所具有能量

$$E = E_1 + 12.6 = -13.6 + 12.6 = -1.0 \text{ eV}$$

轨道能量 $E_n = \frac{E_1}{n^2} = \frac{-13.6}{n^2} = -1.0 \text{ eV}$

$$n = \sqrt{13.6} = 3.69 \quad \text{取} \quad n = 3$$

例14: 计算氢原子光谱中莱曼系的最短和最长的波长，并指出是否为可见光，能使处于基态的氢原子电离的最大波长是多少？

解： 氢原子光波波数为： $\sigma = \frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right)$

$m=1$ 时为莱曼系光谱，即

$$\sigma = \frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{1^2} - \frac{1}{n^2} \right), \quad n = 2, 3, \dots$$

$n=\infty$ 时对应最短波长； $n=2$ 时对应最长波长。

另由频率条件 $h\nu = \frac{hc}{\lambda} = E_n - E_1, \quad n = 2, 3, \dots$

式中 $E_1 = -13.6 eV, \quad E_n = \frac{E_1}{n^2}$

$$h\nu = \frac{hc}{\lambda} = E_n - E_1, \quad n = 2, 3, \dots \quad E_1 = -13.6 \text{ eV}, \quad E_n = \frac{E_1}{n^2},$$

1) $n \rightarrow \infty, E_n = 0$, 发出最短波长:

$$\lambda_{\min} = -\frac{hc}{E_1} = \frac{6.63 \times 10^{-34} \times 3 \times 10^8}{13.6 \times 1.6 \times 10^{-19}} = 9.141 \times 10^{-8} \text{ (m)}$$

即 $\lambda_{\min} = 914.1 \text{ \AA}$, 不可见光。

2) $n=2, E_n = E_1 / 2^2$, 发出最长波长:

$$\lambda_{\max} = -\frac{4hc}{3E_1} = \frac{4 \times 6.63 \times 10^{-34} \times 3 \times 10^8}{3 \times 13.6 \times 1.6 \times 10^{-19}} = 1.219 \times 10^{-7} \text{ (m)}$$

即 $\lambda_{\max} = 1219 \text{ \AA}$, 不可见光。

使处于基态的氢原子电离的最大波长为 $\lambda = 9.141 \times 10^{-8} \text{ m.}$

例15： 已知氢原子的电离能为 13.60 eV。设氢原子处在某一定态，从该定态移去一个电子所需要的能量是 0.85 eV。通常把电子从基态跃迁到其它定态（激发态）所需要的能量称为激发能，试问从上述定态向激发能为 10.20eV 的另一定态跃迁时，所产生的谱线的波长是多少？

解：由频率条件 $E_n - E_m = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$ ， 据题意 $E_n = -0.85eV$

$$E_m = (E_m - E_1) + E_1 = 10.20 - 13.6 = -3.40(eV)$$

故由 E_n 跃迁到 E_m 发出的谱线波长为

$$\lambda = \frac{hc}{E_n - E_m} = \frac{6.63 \times 10^{-34} \times 3.0 \times 10^8}{(3.4 - 0.85) \times 1.6 \times 10^{-19}} \\ = 4.875 \times 10^{-7}(m)$$

由 $E_m = \frac{E_1}{m^2}$, $\therefore m = \sqrt{E_1/E_m} = \sqrt{13.6/3.4} = 2$

谱线属巴尔末系。

