

高等学校教材

# 现代化学原理

下 册

金若水 王韵华 芮承国 编

高等教育出版社

## 内容提要

本书为《现代化学原理》(下册),共有十章。前五章是在经典的物质结构和成键知识基础上着重介绍物质结构的现代知识和概念。后五章集中介绍元素化学知识,包括s区、p区和d区金属元素;非金属元素;碳和有机化学,重点介绍化学中比较典型的或在现代科学技术发展中具有重要作用的元素的基础知识。

### 图书在版编目(CIP)数据

现代化学原理. 下册/金若水,王韵华,芮承国编.  
北京:高等教育出版社,2003 6  
ISBN 7-04-011976-5

. 现... . 金... . 王... . 芮...  
. 化学-高等学校-教材 . O6

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 044886 号

---

出版发行 高等教育出版社  
社 址 北京市西城区德外大街 4 号  
邮政编码 100011  
总 机 010-82028899

购书热线 010-64054588  
免费咨询 800-810-0598  
网 址 <http://www.hep.edu.cn>  
<http://www.hep.com.cn>

经 销 新华书店北京发行所  
印 刷

开 本 787×1092 1/16  
印 张 27.25  
字 数 660 000

版 次 年 月第 1 版  
印 次 年 月第 次印刷  
定 价 43.70 元

---

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

策划编辑 岳延陆  
责任编辑 朱 仁  
封面设计 刘晓翔  
责任绘图 杜晓丹  
版式设计 胡志萍  
责任校对 朱惠芳  
责任印制

# 目 录

## 第五篇 结构和成键

第 17 章 原子核 .....	3	19-3 价键理论 .....	98
17-1 原子可再分 .....	3	19-4 价层电子对排斥(VSEPR)模型 .....	113
17-2 原子核的结构和稳定性 .....	11	19-5 离子键理论 .....	121
17-3 不稳定核的衰变 .....	16	19-6 晶体场理论 .....	130
17-4 放射性衰变的动力学 .....	21	小结 .....	141
17-5 核反应 .....	25	综合练习题 .....	142
17-6 化学元素的起源 .....	34	第 20 章 分子轨道 .....	146
小结 .....	38	20-1 分子轨道理论 .....	146
综合练习题 .....	38	20-2 同核双原子分子 .....	152
第 18 章 原子的电子结构 .....	41	20-3 异核双原子分子 .....	156
18-1 光的本性 .....	41	20-4 多原子分子 .....	159
18-2 氢光谱和玻尔原子 .....	47	20-5 分子光谱 .....	173
18-3 波粒子和波动方程 .....	52	20-6 配位场理论 .....	177
18-4 类氢原子 .....	56	小结 .....	179
18-5 多电子原子 .....	72	综合练习题 .....	180
18-6 原子电子结构的周期性和元素 周期表 .....	81	第 21 章 晶体结构和固体 .....	183
18-7 原子的周期性 .....	83	21-1 晶体外形的对称性 .....	184
小结 .....	89	21-2 晶体结构的有序性 .....	188
综合练习题 .....	90	21-3 X 射线结构分析 .....	194
第 19 章 化学键和分子结构 .....	92	21-4 晶体的类型 .....	199
19-1 元素的氧化态 .....	92	21-5 实际固体 .....	209
19-2 元素电负性和化学键的类型 .....	95	小结 .....	216
		综合练习题 .....	216

## 第六篇 元素化学

第 22 章 化学元素的地球资源和提取 .....	221	小结 .....	245
		综合练习题 .....	245
22-1 化学元素的地球分布和资源 .....	221	第 23 章 氢和 s 区金属 .....	248
22-2 单质提取的热力学原理 .....	231	23-1 氢 .....	248
22-3 金属的热冶炼 .....	234	23-2 碱金属 .....	259
22-4 金属的电冶炼 .....	241	23-3 碱土金属 .....	266

## 目 录

小结 .....	270	25-5 卤素 .....	356
综合练习题 .....	270	小结 .....	367
第 24 章 p 区和 d 区金属 .....	272	综合练习题 .....	368
24-1 p 区金属 .....	272	第 26 章 碳和有机物 .....	372
24-2 d 区金属 .....	281	26-1 碳及其性质 .....	372
小结 .....	300	26-2 碳的氧化物、含氧酸和含氧酸盐 .....	376
综合练习题 .....	301	26-3 碳氢化合物 .....	380
第 25 章 非金属 .....	306	26-4 官能团和有机物的分类 .....	391
25-1 硼 .....	306	26-5 合成高聚物 .....	402
25-2 硅 .....	313	26-6 天然聚合物 .....	411
25-3 氮和磷 .....	323	小结 .....	423
25-4 氧和硫 .....	343	综合练习题 .....	423
附录 核素的相对原子质量和核自旋 .....	426		

# 第五篇

## 结构和成键

本篇共五章,按物质的结构分为原子核、原子的电子结构、分子结构和晶体结构四个层次介绍。物质的化学变化和性质归根结底决定于物质的内部结构。本篇将在前面已讲过的物质结构与成键经典知识基础上,着重介绍物质结构的现代知识概念。

# 原 子 核

第四篇讲的是化学反应的宏观原理,现在要把注意力集中到物质的微观结构上来了。在讲反应机理时已经看到,分子的结构和成键对反应能否进行以及反应速率的快慢起着极其重要的作用。物质的化学行为归根结底是由它们的结构决定的。因此就有必要进一步谈一谈物质结构的问题。本章先从原子核谈起。

## 17-1 原子可再分

19世纪的化学家把原子看成是构建物质大厦的牢不可破的基石,尽管有种种迹象表明原子还有着更深层次的结构,但这些事实并没有引起他们的充分重视。1815年,英国化学家普劳特(W. Prout)注意到各种元素的相对原子质量几乎都是氢的相对原子质量的整数倍,从而指出:各种原子都是由氢原子构成的。但他的观点很快就被那时化学界的权威们否定了。直到19世纪末,电子和物质的放射性两项重大发现,才最终动摇了人们关于原子不可再分的和不可改变的信念。

### 电子的发现

18世纪末,意大利的伏打(A. Volta)用金属制成化学电池,英国的尼科尔森(W. Nicholson)和卡莱色尔(Carlisle)又在1800年用直流电把水分解为氢气和氧气。事实表明,物质的化学变化和电密切相关。法拉第在1833年提出的电解定律直接预示了电的原子性,可是连原子论也不相信的法拉第根本想不到会有电“原子”存在。直到1881年,德国物理学家亥姆霍兹(H. L. F. Helmholtz)指出:要是人们接受道尔顿的原子假说,也就不可避免地会从法拉第定律作出同样的结论,电,不论是正电还是负电,也分为基本部分,其行为就像电原子一样。英国的斯通尼(G. J. Stoney)持同样的观点,首先把在导线内流动的电的基本单元称为电子的就是斯通尼。可是电子的存在最终是通过阴极射线的深入研究才被人们确认的。

对阴极射线的认识起源于气体放电现象的研究。在自然界经常看到的闪电就是带电云层间

的空气被高压电击穿时的放电现象。气体的放电现象因电压和气体压强不同而有不同的特征。1853年,法国的马松(A. Masson)首次在玻璃管里做了气体低压放电的实验。1858年,德国的普吕克(J. Plucker)在研究气体的低压放电现象时发现了阴极射线。在一个两端封着电极的玻璃管两极施加高压电,然后用真空泵把管内的气体抽去,当管内的气压下降到100 Pa左右时,整个玻璃管充满了光亮的辉光;待气体的压强降低到10 Pa后,这种辉光逐渐被一个个的暗区隔开。若进一步抽去玻璃管内的残留气体,当压强降到0.1 Pa以下时,辉光完全消失,但电流计的指针显示,此时依然有电流在管内流过,而在阴极对面的玻璃壁上出现一个光亮的斑点,这些现象表明此时有某种射线从阴极发射出来,这种射线就叫阴极射线[图17-1(a)]。随后德国的希托夫(J. W. Hittorf)、英国的克鲁克斯(W. Crookes)等人深入研究了阴极射线的性质,发现阴极射线能推动叶轮转动,能使金属片灼热,能在电场和磁场中发生偏转[图17-1(b)];其行为像是带电的粒子流。

图 17-1 阴极射线

1897年,英国的汤姆逊(J. J. Thomson)通过测定射线的荷质比(又称比荷),最终证实阴极射线是带负电荷的电子流。

图17-2是测定带电粒子荷质比的实验装置。其中 $x$ 轴是阴极射线的行进方向,在垂直于 $x$ 轴的 $y$ 轴方向加一个电场,射线向阳极偏转说明它带负电。质量为 $m_e$ 、电荷为 $e$ 的带电粒子在电场中受到的作用力为

$$F_E = e E = m a_y$$

图 17-2 测量电子荷质比的阴极射线管

其中  $E$  为电场强度, 单位:  $V \cdot m^{-1}$  或  $N \cdot C^{-1}$ 。若电极的宽度为  $l$ , 带电粒子穿越电场所需的时间为  $t = l/v_x$ 。要是粒子离开电场时, 在  $y$  轴方向的位移距离为  $s$ , 便可以得知带电粒子在  $y$  轴方向的加速度为  $a_y = 2s/t^2 = eEl/m_e$ 。从而给出带电粒子的荷质比为

$$\frac{e}{m_e} = \frac{2s}{El^2} = \frac{2sv_x^2}{El^2}$$

为了确定  $v_x$ , 可以在既垂直于射线又垂直于电场的  $z$  轴方向加一个磁场, 在  $y$  轴方向给带电粒子一个相反的作用力:

$$F_H = e v_x B$$

(式中,  $B$  为磁感强度, 单位:  $N \cdot A^{-1} \cdot m^{-1}$ ;  $v_x$  为带电粒子在  $x$  轴方向的速度。通过调节磁感强度  $B$ , 使射线折回原途径, 此时电场和磁场对带电粒子的两种作用力彼此抵消, 即  $F_E = F_H$ ; 就可以得知带电粒子在  $x$  轴方向的运动速度为  $v_x = El/B$ 。给出带电粒子的荷质比与电场强度、磁感强度的关系:

$$\frac{e}{m_e} = \frac{2sE}{B^2 l}$$

如果从电场到玻璃屏的距离为  $R$ , 阴极射线在玻璃屏上的偏移距离为  $D$ 。考虑到带电粒子离开电场时在  $y$  轴方向的速度为  $v_y = a_y t = 2s/t = eEl/m_e v_x$ , 离开电场后在  $x$  和  $y$  轴方向所走过的距离分别为  $R - l/2$  和  $D - s$ 。因为  $(D - s)/(R - l/2) = v_y/v_x$ , 所以有:

$$D = \frac{v_y}{v_x} \left( R - \frac{l}{2} \right) + s = \frac{eEl}{m_e v_x^2} \left( R - \frac{l}{2} \right) + \frac{eB^2 l^2}{2m_e E} = \frac{eB^2 l}{m_e E} \left( R - \frac{l}{2} \right) + \frac{eB^2 l^2}{2m_e E} = \frac{eB^2 Rl}{m_e E}$$

$$\frac{e}{m_e} = \frac{DE}{B^2 Rl}$$

当电极的宽度  $l$ 、电极到玻璃屏的距离  $R$  为已知时, 合理地调节电场强度  $E$  和磁感强度  $B$ , 便可以通过测量阴极射线在玻璃屏上的偏移距离  $D$ , 计算带电粒子的荷质比。

汤姆逊发现从阴极发射的带电粒子的荷质比有确定数值, 由此断定这种带电粒子是负电荷的基本单元——电子。目前公认的电子的荷质比值为:  $e/m_e = 1.7588196 \times 10^{11} C \cdot kg^{-1}$ 。

电子的发现是 19 世纪末科学界的一个重大历史事件。

1906 年, 美国物理学家密立根 (R. A. Millikan) 用悬浮油滴法测定了电子的电荷, 进一步证实电荷有最小单位。

图 17-3 是实验装置的示意图。其中 A 是油滴喷入装置, B 是电容器, C 是用于调节两块电极片间电势差的可变高压电源, D 是使空气电离的电离源, E 是观察窗口, F 是显微镜。当喷入悬浮室的微细油滴落入电容器 B 的空间区域时, 与空气电离时产生的电子遭遇而带上电荷, 这些带电油滴在电容器内受到下列四种力的作用:

重力:  $F_1 = \frac{4}{3}\pi r^3 \tilde{N} g$  (其中  $r$  为油滴的半径,  $\tilde{N}$  为油滴的密度,  $g$  为重力加速度);

空气的浮力:  $F_2 = -\frac{4}{3}\pi r^3 \tilde{N}' g$  (其中  $\tilde{N}'$  为空气的密度);

空气的阻力:  $F_3 = -6\pi r \eta v$  (其中  $v$  是油滴的移动速度,  $\eta$  为空气的粘度);

电场对电子的静电作用力:  $F_4 = -QE$  (其中  $Q$  为油滴的

图 17-3 悬浮油滴法测电子电荷的实验装置示意图  
A—油滴喷射器; B—电容器; C—可变高压电源;  
D—放射源; E—观察窗; F—望远镜

电荷,  $E$  为电容器的电场强度)。

当这四种作用力彼此抵消而达平衡时, 油滴便作恒速运动。此时有:

$$F_1 + F_2 + F_3 + F_4 = \frac{4}{3}\pi r^3 (\tilde{N} - \tilde{N}')g - 6\pi r\eta v - QE = 0$$

$$Q = \frac{[4\pi r^3 (\tilde{N} - \tilde{N}')g] / 3 - 6\pi r\eta v}{E}$$

已知一定温度下空气的密度  $\tilde{N}$  和粘度  $\eta$ ; 油的密度亦可事先测定。用可变高压电源 C 调节电容器 B 两块极板的电势差, 待电场强度使油滴在极板间作恒速运动时。通过观察窗口 E 用显微望远镜 F 测量油滴的直径  $2r$  及其运动速度  $v$ ; 便可由上式计算油滴的电荷  $Q$ 。

密立根和他的学生通过大量测定, 发现所有油滴所带的电荷都是  $1.59 \times 10^{-19}$  C 或其整数倍, 并断定该值就是一个电子所带的电荷  $e$ 。电子电荷的现代精确测量值为  $e = 1.6021773 \times 10^{-19}$  C。

知道了电子的荷质比及其电荷, 也就知道了电子的质量  $m_e$  为:

$$m_e = \frac{e}{d/m_e} = \frac{1.6021773 \times 10^{-19}}{1.7588196 \times 10^{11}} = 9.109390 \times 10^{-31} \text{ kg}$$

氢原子的质量为  $m_H = 1.00794 \times 10^{-3} / 6.0221367 \times 10^{23} = 1.67373 \times 10^{-27}$  kg, 电子比氢原子约轻 1800 倍。

### 物质的放射性

19 世纪末, 自然科学的另一重大发现是物质的放射性。

1896 年, 法国的贝克勒尔 (A. H. Becquerel) 在研究铀盐的磷光现象时意外地发现在阳光下晒过的铀酰硫酸复盐  $K_2UO_2(SO_4)_2 \cdot 2H_2O$  的晶体能使包在黑纸里的照相底片感光。说明铀盐在发射着某种能穿透纸张、玻璃和其他物质的射线。波兰化学家居里夫人 (M. S. Curie) 及其丈夫居里 (P. Curie) 认为铀射线是一种原子现象, 并称这种现象为物质的放射性; 居里夫妇发现钋也有放射性, 随后他们还发现了放射性比铀要强得多的新元素钋和镭。

A. H. Becquerel

M. S. Curie 和 P. Curie

1899 年, 英籍新西兰物理学家卢瑟福 (E. Rutherford) 在研究铀射线的性质时, 发现铀射线中有带正电荷的  $\alpha$  射线和带负电荷的  $\beta$  射线,  $\beta$  射线对铝箔的穿透能力比  $\alpha$  射线强; 测量射线的荷质比确定  $\alpha$  射线是带 2 个正电荷的氦离子,  $\beta$  射线是高速运动的电子流。1900 年, 法国的维拉

德(P. U. Villard)又在镭射线中发现了穿透能力更强的第三种射线 $\gamma$ 射线,这是一种不会在电场和磁场中发生偏转的电磁辐射。1900年,德国的多恩(F. E. Dorn)还证实镭在发射 $\alpha$ 射线的同时形成一种新的稀有气体——氡。1903年,卢瑟福和索迪(F. Soddy)指出放射性元素能通过发射 $\alpha$ 射线或 $\beta$ 射线转变为另一种放射性元素,并提出放射性元素的衰变理论,动摇了原子不可再分和不可改变的传统观念。

汤姆逊通过许多实验确定电子是原子的组成部分,并在1904年提出第一个原子模型。按这个模型,原子犹如图17-4所示的一个体积颇大的带正电球体,一定数量的电子均匀地分散在这个球体中与球内的正电相中和,因而整个原子呈电中性。汤姆逊原子很像是一个嵌着葡萄干的布丁。

图 17-4 汤姆逊原子模型

### 原子核

1909年,卢瑟福的同事盖革(H. Geiger)和马斯登(E. Marsden)在研究 $\alpha$ 粒子对金属箔片的穿透能力时,发现有少数 $\alpha$ 粒子以相当尖锐的角度折回。这一事实引起卢瑟福的重视,他认为盖革和马斯登的观察结果跟汤姆逊原子模型是抵触的。如果原子像一块松软的蛋糕,高速的 $\alpha$ 粒子理应全部穿过金属薄片。现在有少数 $\alpha$ 粒子折回,这一事实只能说明这些 $\alpha$ 粒子遇到了障碍物。以尖锐角度折回的 $\alpha$ 粒子很少,说明障碍物的体积很小;障碍物能把 $\alpha$ 粒子弹回,又说明其质量比 $\alpha$ 粒子大得多,而且这种障碍物可能也带正电荷。按这样的思路,卢瑟福在1911年提出核型原子模型。卢瑟福心目中,原子中心有一个很小的正电荷核心,称为原子核,原子的全部质量几乎都集中在原子核上,而数量和核电荷数相等的电子像行星绕太阳运行那样围绕着原子运行。卢瑟福原子好比一个小小的太阳系。

E. Rutherford

如果这种设想正确, $\alpha$ 粒子是受到正电荷高度集中的原子核的排斥而被散射,那么 $\alpha$ 粒子的偏转角就应当和核电荷大小有关。因为带正电荷 $2e$ 的 $\alpha$ 粒子和带正电荷 $Ze$ 的原子核之间的排斥势能为:

$$U = \frac{2Ze^2}{4\pi\epsilon_0 r}$$

其中 $r$ 为 $\alpha$ 粒子和原子核之间的距离。通过理论分析,一个质量为 $m$ 、运动速度为 $v$ 、以图17-5(a)所示的“瞄准距离” $d$ 向着原子核射去的 $\alpha$ 粒子受原子核排斥而发生的散射角 $\theta$ 为

$$\theta = 2 \tan^{-1} \frac{2Ze^2}{4\pi\epsilon_0 m v^2 d}$$

其中“瞄准距离” $d$ 是 $\alpha$ 粒子在被散射前的行进途径和原子核的垂直距离。这个公式表明:瞄准距离越小,散射角就越大。若 $\alpha$ 粒子对准原子核撞去,即瞄准距离为0,它就以 $180^\circ$ 的散射角折回。

在 $\alpha$ 粒子散射实验中,许多 $\alpha$ 粒子以不同的瞄准距离同时向着金属箔射去。按统计平均,若

图 17-5 金属叶片对 $\alpha$ 粒子的散射(a) 在不同瞄准距离上 $\alpha$ 粒子的散射角;(b) 在不同立体角发现 $\alpha$ 粒子的概率

金属箔的厚度为  $l$ , 单位体积内金属原子数为  $n$ , 单位时间内射在单位面积金属箔片上的  $\alpha$  粒子数为  $N$ 。那么如图 17-5(b) 所示, 在散射角  $\theta$  和离散射点距离为  $R$  的地方, 单位时间、单位面积内可能发现的  $\alpha$  粒子数  $dN/dA$  为

$$\frac{dN}{dA} = \frac{Nnl}{4R^2} \frac{2Ze^2}{4\pi\epsilon_0 m v^2}^2 \frac{1}{\sin^4(\theta/2)}$$

因为  $m$ 、 $v$ 、 $e$  为已知, 只要通过实验测定入射的  $\alpha$  粒子数  $N$  以及在  $(\theta, R)$  处发现的  $\alpha$  粒子数  $dN/dA$ , 便可以计算金属原子的核电荷  $Z$ 。1913 年, 盖革和马斯登通过金箔对  $\alpha$  粒子散射实验验证卢瑟福的有核原子散射模型, 实验结果和理论分析惊人地一致; 实验估计金原子核的半径小于  $10^{-12}$  cm, 核电荷约为  $+100e$ , 初步证实了原子核的存在。同一年, 荷兰的范登布洛克 (Van den Broek) 指出: 可能是原子的核电荷决定着元素在周期表中的排列顺序; 其结论马上被英国的摩斯莱 (H G I Moseley) 通过 X 射线光谱学的实验证实。从此原子的核电荷数被确认为是化学元素的原子序数。1920 年, 英国的查德维克 (J Chadwick) 用  $\alpha$  粒子散射实验精确地测定了铜、银、铂三种原子的核电荷, 结果是:  $Z_{Cu} = 29.3$ 、 $Z_{Ag} = 46.3$ 、 $Z_{Pt} = 77.4$ ; 在误差允许的范围内与这些元素的原子序数 29、47、78 相吻合。

### 质子和中子

后来进一步发现原子核还由质子和中子等亚原子粒子构成。

既然有带单位负电荷的电子, 是否也存在着带单位正电荷的粒子呢? 早在 1886 年, 英国的戈尔德斯坦 (E Goldstein) 在用阴极上开有小孔的阴极射线管做实验时发现, 阴极射线向着阳极发射的同时, 有另一种射线穿过阴极上的小孔向着相反的方向飞去。由于这种射线的飞行方向和阴极射线相反, 马上有人设想戈尔德斯坦发现的射线是某种带正电荷的粒子。1898 年, 德国物理学家威恩 (W. Wien) 首先研究了这种射线的性质, 发现其质量-电荷比要比电子大上千倍, 就推测有质量与氢原子接近的正电荷粒子存在。1907 年汤姆逊把这种射线称为阳射线, 并在 1910 年通过更精确的测量证实了威恩的推测。但是他立刻发现不同气体所发射的阳射线的质量不一样, 构成阳射线的粒子不可能是一切物质的共同成分。后来知道, 所谓阳射线其实是原子和分子在失去电子后所形成的带正电荷的气态离子流。直到 20 世纪初, 人们还无法回答是否真有带单位正电荷的亚原子粒子存在。

原子核发现后,按范登布洛克的观点,原子序数为 1 的氢核应当带有单位正电荷  $+1$ 。1914 年,卢瑟福接受了氢离子是带单位正电的粒子的观点。在此期间,索迪根据已经发现的放射性元素的行为于 1910 年提出同位素的概念;汤姆逊在 1912 年用电磁分离法发现了非放射性元素氦的同位素。1919 年,英国的阿斯顿(F. W. Aston)发明质谱仪。在用质谱仪测量了将近 200 种非放射性核素的相对原子质量后,阿斯顿提出整数定律,这条定律暗示各种核素的质量几乎都是氢原子质量的整数倍。同一年,卢瑟福研究了 $^{214}\text{Po}$ 发射的 $\alpha$ 粒子在氮气中的射程,意外地发现氮原子在受 $\alpha$ 粒子轰击时有新的粒子产生,并很快确证这种粒子就是带一个正电荷的氢原子核。用 $\alpha$ 粒子轰击许多原子的实验中,都有氢原子核产生,种种事实使卢瑟福确信氢原子核是原子核的组成部分,当原子受到 $\alpha$ 粒子轰击时,它就从原子核中分裂了出来。再联系到各种原子的质量几乎都是氢原子质量的整数倍的事实,带单位正电荷的氢原子核很可能就是决定原子质量的一种基本粒子。从 1920 年开始,卢瑟福就在发表的论文中把带单位正电荷的氢原子核改称为质子。所以人们认识质子有一个过程,很难说是谁在什么时候发现了质子,只能说第一个采用“质子”这个名词的是卢瑟福。

提出同位素概念后,索迪又提出了放射性元素衰变的“位移规则”。按这条规则,放射性元素的原子发射一个 $\alpha$ 粒子,产生的是原子序数大 1 的新元素,即其原子的核电荷增加一个单位正电荷;放射性元素的原子发射一个 $\beta$ 粒子,产生的是原子序数小 2 的新元素,即其原子的核电荷减少二个单位正电荷。若一种放射性元素的原子在发射一个 $\alpha$ 粒子后,再发射二个 $\beta$ 粒子,形成的新元素就是原来那种元素的同位素,其原子的核电荷保持不变。在质子被确认以后,卢瑟福起初认为各种原子的原子核都是由质子和电子构成的,因为只要假定 $\alpha$ 粒子(即氦核)由 4 个质子和 2 个电子构成,便能合理地解释位移规则。后来他觉得这种观念不恰当,因为由一个质子和一个电子构成的氢原子很容易电离,但要使一个非放射性核失去一个电子却非常困难。于是,卢瑟福就推测在原子核内一定还存在着某种质子和电子的紧密结合体但不同于氢原子的东西,可以称为中子。

卢瑟福的学生曾设计了多种寻找中子的实验,但都没有找到。到 20 世纪 30 年代,卢瑟福的推测最终被实验证实。1930 年,德国的玻蒂(W. W. G. F. Bothe)和贝克(H. Becker)注意到用 $\alpha$ 粒子轰击铍原子时,产生一种能穿透 20 cm 厚铅板的中性射线,他们误认为这是一种高能 $\gamma$ 射线。但是英国的查德维克(J. Chadwick)怀疑这种看法,他认为玻蒂和贝克观察到的射线应当由某种电中性的粒子构成。1932 年,查德维克通过大量理论计算和实验测量,证明这种射线是不带电的粒子流,并通过测量和它碰撞的质子的运动速度,计算出中性粒子的质量是质子的 1.0067 倍,从而断言这种电中性的粒子就是人们找了很久的中子。如果中子是由质子和电子构成的,氢原子就有可能变成中子。但是要实现这种转变非常困难,所以查德维克认为中子和质子一样是构成原子核的一种基本粒子。

这就是说,原子核是由中子和质子两种基本粒子构成的,原子核的质子-中子模型从此确立。

其实,除电荷外,质子和中子有极大的相似性,它们的质量近乎相等,二者都能在原子核中找到。后来的物理学家普遍把中子和质子看成是同一种基本粒子的两个版本,把它们统称为核子。

### 其他基本粒子

实际上,原子核内还有一个相当复杂的世界,发现中子只是了解原子核的起点。

1932年,美国的安德森(C D Anderson)发现在宇宙射线中有性质和电子完全相似的、带单位正电荷粒子的存在,把它称为正电子。不久居里夫妇就观察到被 $\alpha$ 粒子轰击过的硼靶和铝靶会连续不断地发射正电子。说明正电子也是原子核的组成部分。

为了揭示原子核内的核子间结合力的本质,1934年日本的汤川秀树认为:在核子之间交换着某种质量比电子大150倍的介子。几年后安德森就在宇宙射线中观察到介子。而且发现介子不至一种:其中有 $m = 206 m_e$ 的 $\pi$ 介子和 $m = 273 m_e$ 的 $\rho$ 介子等等,对核子间结合力起作用的是 $\rho$ 介子。

构成原子的所有比原子小的粒子都称为基本粒子。表17-1所列的是与本章有关的部分重要基本粒子的物理性质。

表 17-1 若干重要的基本粒子

名称	符号	质量 u	自旋
电子	$e^-, -\frac{1}{2}\hat{A}$	0 000 548 579 90	$\frac{1}{2}$
正电子	$e^+, +\frac{1}{2}\hat{A}$	0 000 548 579 90	$\frac{1}{2}$
质子	${}^1_1p$	1 007 276 47	$\frac{1}{2}$
中子	${}^1_0n$	1 008 664 90	$\frac{1}{2}$

### 练习题

- 有一个带电粒子垂直地穿过互相垂直的均匀电场和磁场运动。当电场强度  $E = 2.0 \times 10^3 \text{ V} \cdot \text{m}^{-1}$ , 磁场的磁感强度  $B = 5.0 \times 10^{-3} \text{ T}$  时, 带电粒子作直线运动而不发生任何偏转。计算该带电粒子的速度。注: 磁感强度的国际单位为特斯拉(符号 T):  $1 \text{ T} = 1 \text{ N} \cdot \text{A}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ 。
- 一阴极射线管中, 电极宽度为 1.500 cm, 电极到玻璃屏的距离为 30.00 cm。当电场强度  $E = 1.204 \text{ N} \cdot \text{C}^{-1}$  时, 测得阴极射线在玻璃屏上的偏移距离为 1.400 cm。当磁场的磁感强度调节到  $B = 4.615 \times 10^{-4} \text{ T}$  时, 阴极射线返回原途径。计算电子的荷质比。
- 氢原子由一个电子和一个质子构成。质子的质量是电子质量的 1836 倍, 计算质子的荷质比。
- 在电解硝酸银水溶液时, 将 0.500 A 的恒定电流通过电解池 30.0 min, 在阴极析出金属银 1.01 g, 计算  $\text{Ag}^+$  离子的荷质比。
- 密立根实验中, 测得一个直径为  $3.28 \times 10^{-4} \text{ cm}$  的油滴在电场强度为  $E = 9.35 \times 10^4 \text{ N} \cdot \text{C}^{-1}$  时保持平衡。若油滴的密度为  $\rho = 0.851 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ , 且空气的浮力和阻力可以忽略不计, 计算该油滴所带的电量。重力加速度为  $980.7 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-2}$ 。
- ${}^{239}_{94}\text{Pu}$  是一种核燃料。确定构成  ${}^{239}_{94}\text{Pu}$  的原子核的中子数和质子数, 以及该原子的核外电子数。

## 17-2 原子核的结构和稳定性

原子核体积很小,按 $\alpha$ 粒子散射实验的估计原子核的半径不超过  $10^{-12}$  cm。根据库仑定律可以作 $\alpha$ 粒子和原子核互相排斥的势能曲线(图 17-6),其中  $r$  是 $\alpha$ 粒子离原子核中心的距离,  $R$  是原子核的半径。 $\alpha$ 粒子从远处向原子核靠近时,它们的排斥势能一开始随势能曲线上升。但当 $\alpha$ 粒子和原子核的距离小于原子核的半径  $R$  时,核力开始起作用,库仑定律失效,体系的势能大幅度下降。质量大于铜的原子对 $\alpha$ 粒子的散射实验中,没有观察到对卢瑟福散射公式的偏离,因为 $\alpha$ 粒子的能量还不足以使它们接近这些原子的表面。实验表明, $\alpha$ 粒子和铜原子中心的最小距离是  $1.2 \times 10^{-12}$  cm,和金原子中心的最小距离是  $3.2 \times 10^{-12}$  cm。但是轻原子对 $\alpha$ 粒子的散射就会偏离库仑定律。如铝对 $\alpha$ 粒子的散射实验中,当距离接近  $8 \times 10^{-13}$  cm 时, $\alpha$ 粒子和核的作用就不再服从库仑定律。由此可以对原子核的半径作出大体的估计。

图 17-6 原子核和 $\alpha$ 粒子作用的势能曲线其中  $a$  是库仑势能

高能质子的散射、快速中子的吸收和散射等实验手段都可以用于测定原子核的半径。

### 液滴模型

中子散射的研究表明原子核的半径和原子的质量数有关。质量数在 50 左右的原子核,半径约为  $6 \times 10^{-13}$  cm;质量数在 200 左右的原子核,半径约为  $1 \times 10^{-12}$  cm。核半径  $R$  和质量数  $A$  的经验关系近似地为:

$$R = R_0 A^{1/3}$$

式中,  $R_0 = 1.33 \times 10^{-13}$  cm。这一经验关系意味着原子核的体积  $V$  和它的质量数  $A$  成正比:

$$V \propto R^3 \propto A$$

即原子核的体积直接正比于质子数和中子数的总和。若中子和质子都有确定的体积,上面的经验关系就表明原子核是质子和中子均匀地堆积在一起的产物,结果原子核的总体积等于质子的体积和中子的体积的总和。按这样的事实,丹麦物理学家玻尔(N. Bohr)在 1936 年提出原子核结构的液滴模型,认为原子核好像是一种不可压缩的、表面张力很大的特种液体凝成的液滴。

### 核质量和核稳定性

核质量是原子核的一项重要性质。按质子-中子模型,一定数量的质子和中子结合构成了一种特定的核,含这种原子核和电子的原子就形成一种特定的核素。

按理一种核素的质量应等于构成它的全部质子、中子和电子的质量的总和。但实际并非如此。例如由 7 个质子、7 个中子和 7 个电子构成的核素 $^{14}_7\text{N}$ 的原子质量应当是:

$$m({}_{7}^{14}\text{N}) = 7 \times (1.00727647 + 1.00866490 + 0.00054857990) = 14.11542965 \text{ u}$$

但 ${}_{7}^{14}\text{N}$ 原子的静止质量的实验测量值为 $14.00307400 \text{ u}$ 。二者相差：

$$\Delta m({}_{7}^{14}\text{N}) = 14.11542964 - 14.00307400 = 0.11235565 \text{ u}$$

之所以会有这样的差异,是因为质子和中子在形成原子核的过程中要释放巨大的结合能。

按爱因斯坦关系:  $E = mc^2$  (其中  $c$  为光速), 1 个原子质量单位 ( $1 \text{ u} = 1.660540 \times 10^{-27} \text{ kg}$ ) 的能量当量为:

$$E = 1.660540 \times 10^{-27} \times (2.99792458 \times 10^8)^2 = 1.492419 \times 10^{-10} \text{ J}$$

若采用百万电子伏特 (MeV,  $1 \text{ MeV} = 1 \times 10^6 \times 1.6021773 \times 10^{-19} = 1.6021773 \times 10^{-13} \text{ J}$ ) 为单位, 则为:

$$E = 1.492419 \times 10^{-10} / 1.6021773 \times 10^{-13} = 931.494 \text{ MeV}$$

由 7 个质子、7 个中子和 7 个电子的质量与 ${}_{7}^{14}\text{N}$ 原子的质量差可以算出这些粒子在形成一个 ${}_{7}^{14}\text{N}$ 原子时所释放的结合能  $E_b$  为:

$$E_b = 0.11235565 \times 931.494 = 104.659 \text{ MeV}$$

为考察原子核的相对稳定性, 常采用核素的核子平均结合能, 即结合能  $E$  和核子数  $A$  的比值  $E = E_b / A$  作为衡量原子核稳定性的指标。例如 ${}_{7}^{14}\text{N}$  的  $E_b / A$  值为:

$$E_b / A = 104.496 / 14 = 7.46 \text{ MeV}$$

各种核素的  $E_b / A$  值都可以按类似的方法计算。核子的平均结合能愈大, 相应的原子核就愈稳定。若以各稳定核素的  $E_b / A$  值对它们的质量数作图, 得到一条图 17-7 所示的曲线。由图可见: 从 ${}_{1}^{2}\text{H}$  到 ${}_{2}^{4}\text{He}$ ,  $E_b / A$  陡然上升,  ${}_{3}^{7}\text{Li}$  的  $E_b / A$  值有所下降,  ${}_{4}^{9}\text{Be}$  又回升, 后面各核素的核子平均结合能在约 8 MeV 左右波动。质量数为 60 左右的核素, 核子的平均结合能达最大值 8.8 MeV, 这些核素最稳定。过了极大值, 随质量数进一步增加, 各种原子核的核子平均结合能平缓地下降。

图 17-7 稳定核的核子平均结合能随质量数的变化趋势

从图 17-7 看, 质量数大于 20 的原子核,  $E_b / A$  值近乎是一个常数:  $E_b / A \approx$  常数。所以这些原子核的结合能几乎与它们的质量数  $A$  成正比:

$$E_b = \text{常数} \times A$$

这种关系意味着核力是一种只在邻近的 2 个核子之间起作用的短程力。如果核力是远程力, 每个核子都要和  $A-1$  个其他核子起作用, 原子核的结合能就应当和  $A(A-1)$  成正比。这种关系还表明核力的大小和电荷的关系不大。

1935 年, 德国的冯·韦茨萨克 (C E von Weizsacker) 根据液滴模型提出计算原子核结合能的半经验公式。他认为, 原子核的生成能应包括以下几项:

第一项是由核力作用的吸引能。若核力是作用于一对核子之间短程力, 对于一个由核子紧密堆积形成的原子核, 这种吸引能正比于核子数  $A$ , 比例常数的经验值为  $14.1 \text{ MeV}$ 。

第二项是质子间的库仑排斥能。库仑排斥能正比于质子数的平方  $Z^2$ , 反比于原子核的半径  $R$ 。因为原子核的体积和  $A$  成正比, 其半径就和  $A^{1/3}$  成正比。所以核内质子间的库仑排斥能和  $Z^2/A^{1/3}$  成比例, 比例常数的经验值为  $0.585 \text{ MeV}$ 。

处在原子核表面和处在内部的核子在结合能上有差异, 处于核表面的核子外面没有其他核子和它们作用, 它们的结合能应当比内部核子的结合能小。因而要扣除由于这种表面效应而损耗的能量。这种能量应正比于核的表面积  $R^2$ , 即正比于  $A^{2/3}$ , 比例常数的经验值为  $13.1 \text{ MeV}$ 。

上面三项加在一起, 给出原子核结合能的半经验公式为:

$$E_b = 14.1 A - 0.585 \frac{Z^2}{A^{1/3}} - 13.1 A^{2/3}$$

尽管这个半经验公式没有涉及核力的本性, 也没有考虑到核自旋等其他细致因素的影响, 但还是对各种核的稳定性的总体变化趋势作出了合理的说明。

### 稳定核

已知知道的 2000 多种核素中, 表 17-2 所列的 284 种是稳定核素。以稳定核的质子数对核子数作图, 可以给出图 17-8 所示的图形。按这种图形, 全部稳定核都分布在  $Z=N$  线的下侧。除少数轻核的质子数和中子数相等外, 大多数稳定重核的中子数都大于质子数。核内质子偏多, 就会因为质子间的电性排斥而不稳定。

除  ${}^1_1\text{H}$  以外的 283 种稳定核中, 质子数和中子数都是偶数的占了极大多数, 而质子数和中子数都是奇数的没有几个:

	$N$ 奇数	$N$ 偶数
$Z$ 奇数	9	53
$Z$ 偶数	56	165

这一事实表明: 在各种稳定核中质子或中子都趋向于成对分布。

表 17-2 稳定核素

元 素	稳定核素的质量数 $A$	元 素	稳定核素的质量数 $A$	元 素	稳定核素的质量数 $A$
${}_1\text{H}$	1, 2	${}_4\text{Be}$	9	${}_7\text{N}$	14, 15
${}_2\text{He}$	3, 4	${}_5\text{B}$	10, 11	${}_8\text{O}$	16, 17, 18
${}_3\text{Li}$	6, 7	${}_6\text{C}$	12, 13	${}_9\text{F}$	19