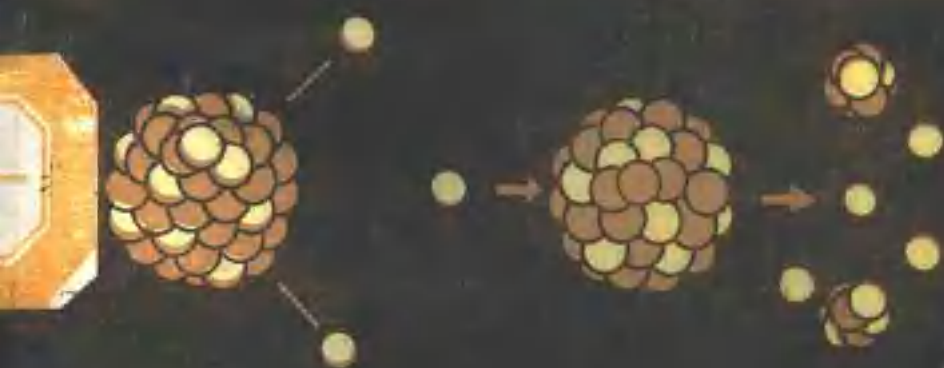


892311



原子核及其特性



王震遐 田家祺 著

原子能出版社

原子核及其特性

王震遐·田家祺 著

原子能出版社

内 容 简 介

本书以丰富有趣的史实和通俗生动的语言介绍了从原子深入到原子核研究的发展过程。全书从发现放射性现象讲起,对 α , β , γ 三种射线、原子核结构、原子核反应、中子与原子核裂变,以及高能核物理的最新进展等内容都作了深入浅出的描述。本书适合一般科技人员阅读,对具有中等文化水平的读者也是一本有益的读物。

核技术丛书

原子核及其特性

王震遐 田家祺 著

原子能出版社出版

(北京2108信箱)

原子能出版社印刷厂印刷

新华书店总店科技发行所发行·新华书店经售

☆

开本 $787 \times 1092^{1/32}$ ·印张6.25·字数135千字

1988年10月北京第一版·1988年10月北京第一次印刷

印数1—800

ISBN 7-5022-0107-6

TL·44 定价: 1.95元

序

1896年，天然放射性的发现拉开了揭示原子内部奥秘的序幕。继这以后，经过世界各国许许多多科学工作者数十年的辛勤探索和研究，取得了辉煌的成果：发现了不少新的放射性元素；实现了人工核反应，人工合成了放射性同位素；中子、质子和正电子的发现，丰富了人们对原子核的认识；从三十年代起，各种类型加速器的建成，为核物理研究提供了一种强有力的新工具，同时，用加速器生产了很多新的放射性同位素；1939年，发现了核裂变，接着，1942年，建成了世界上第一座核反应堆，它标志着人类进入了原子能时代。核反应堆提供了一种强大的中子源，为中子的研究和应用，以及放射性同位素的大量生产创造了条件。这样，放射性同位素、放射源，放射性标记化合物、放射性药物和同位素仪表等的研制和供应，逐步走上了商品化的道路，为核科学技术在各个领域中的应用打下了良好的基础。

核反应堆技术的进步和成熟，导致五十年代中核电站的出现，开创了核科学技术应用的另一崭新的领域。核能发电突出的特点是单位重量燃料的发电量十分高，一座100万千瓦的核电站每年仅消耗约一吨铀-235，而烧煤电站则需270万吨标准煤。目前核电的成本不比火电贵，对环境的污染也少；包括反应堆在内的核发电设备现已十分成熟，达到了商品化水平。今天，核能发电已占世界电站总装机容量的十分之一，可以肯定，今后仍将不断增长。

加速器的发展，使它超出了原先专供核物理研究的范

围，已开始向着应用领域迈进。加速器能生产纯度高、半衰期短、发射正电子的无载体放射性同位素，加速器产生的各种粒子束流比放射性同位素放射出的射线的强度高很多。它为核科学技术的应用提供了一种新工具，开辟了新领域。

核技术丛书包括十几个专题，基本上反映了核技术及其在各个领域中的应用概貌。编写本丛书的目的，在于使读者对核技术的特点及其应用能获得较清晰而又正确的了解，消除对放射性和射线的恐惧，普及核技术应用知识，推动核技术的应用，为我国四个现代化建设做出应有的贡献。

张守群

目 录

第一章 走向原子核深处

一、大宇宙和小原子核	1
二、什么东西构成了核	2
三、在原子核内质子是回吗?	4
四、原子核的自旋和宇称	5
五、原子核的电荷和磁矩	7
六、量一量原子核	9
七、原子核的稳定性	10
八、核力	14

第二章 放射性的发现及其规律性

一、放射性的发现	16
二、 α 、 β 和 γ 射线	18
三、天然存在的放射性元素	21
四、放射性衰变规律	28

第三章 α 射线

一、 α 射线和它的射程	33
二、 α 射线能量与半衰期的关系	35
三、 α 射线能量的测量	35

第四章 β 射线

一、原来是电子	40
二、 β 射线的能量	41
三、 β 能谱的危机与泡利假说	47
四、奇妙的中微子	50
五、 β^+ 衰变与 K 俘获	54
六、一个守恒定律的否定	56

第五章 γ 射线

一、 γ 射线的起源	60
-------------------------	----

二、 γ 射线能量的测量	60
三、 γ 射线的方向角关联	64
四、一种名不副实的现象——内转换	67
五、 γ 射线的无反冲发射与吸收——穆斯堡尔效应	69
六、怎样看衰变纲图	72
七、内壳电子谱的应用	73

第六章 为原子核画像

一、把原子核比作液滴	77
二、原子核的 α 粒子模型	80
三、原子核的壳层模型	82
四、集体运动模型	88

第七章 原子核反应

一、从炼金术到原子核反应	92
二、原子核反应基本知识	97
三、了解核反应的手段	106
四、原子核反应的机制	123
五、重离子反应	128
六、原子核反应的用途	131

第八章 中子与原子核裂变

一、“铀辐射”之谜	140
二、查德威克发现了中子	141
三、中子的特性	142
四、产生中子的方法——中子源	145
五、记录中子的工具——中子探测器	150
六、中子打碎原子核	153

第九章 高能核物理简介

一、宇宙射线	171
二、基本粒子	179
三、高能粒子与原子核	189

第一章 走向原子核深处

一、大宇宙和小原子核

宇宙是这样巨大，原子核又是这样微小，这个包罗万象变化无穷的自然界，从远古到现在一直对人类有着巨大的吸引力。

经过天文学家的精心观测，人们已经推算出宇宙的半径大约有 10^{26} 米，这样远的距离就连速度最快的光也要走 100 亿年。地球距太阳是 1.5×10^{11} 米；地球的半径为 6.4×10^6 米（参见图 1.1）；而原子核的半径大约才只有 10^{-13} 厘米，宇宙中大和小的差别竟如此巨大！

有人估计，宇宙中质子和中子的总数约有 10^{80} 个；太阳中的质子和中子总数是 1×10^{57} 个；地球中则是 4×10^{51} 个。假使把宇宙中的全部质子和中子做成和太阳一样大小的恒星，大约可以做 10^{23} 个。然而最重的原子核中的质子和中

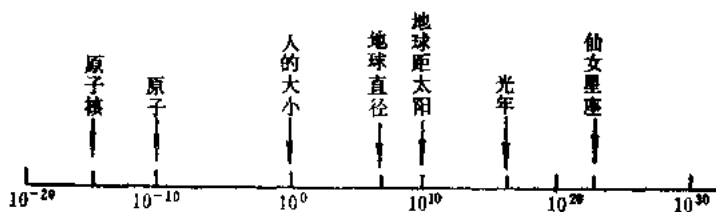


图1.1 宇宙中大小的比较

子数才只有几百个，可见，宇宙中的多和少的悬殊又是如此惊人！

现在我们再来看一看生物和无生物的一些有趣情况。

人是较为复杂的肌体，它大约由 10^{16} 个细胞组成。细胞是一个基本的生理学单位，它含有大约 10^{12} — 10^{14} 个原子。每个生物细胞中，至少含有一个DNA（脱氧核糖核酸）或它的近亲RNA（核糖核酸）的长分子链；在细胞的DNA链中保存着构成一个完整的人、鸟等等所必需的全部化学指令或遗传信息。一个DNA分子可能由 10^8 至 10^{10} 个原子组成，其中原子的精确排列对不同的生物个体可能不同，而在种与种之间这种排列肯定是不同的。在我们地球上已被定名的生物种类有 10^6 种以上。

无生物也表现出多种形式。质子、中子和电子结合成一百多种不同的化学元素和近20000种同位素，这些元素又以各种不同的比例组成 10^6 种以上的化合物。再加上具有各种物理化学性质的液体、固体和气体等等，确实是种类繁多了。

原子核内又是怎样的呢？别看它的范围只有 10^{-13} 厘米那么一丁点儿，但其结构之巧妙，变化之纷繁，俨然又是一个令人眼花缭乱的天地。

二、什么东西构成原子核

早在1896年，戈尔茨坦（E. Goldstein）首先在放电管中发现了失去电子的氢原子核，后来卢瑟福把它叫质子。最初人们发现各种原子核的质量都很接近于质子质量的整数倍，因此曾认为原子核是由质子组成的。但是除了氢核以外，所有原子核的质量数 A 都大于它的质子数 Z 。 A 代表原子

核中的核子总数， Z 代表原子核中的质子总数。这样看来，既然 A 比 Z 大，那就表示原子核中还有别的什么核子存在。后来查德威克发现这是一种质量和质子差不多大小的粒子，定名为中子。

中子被发现后，有人立即提出原子核是由质子和中子组成的理论。不久这种理论就被人们所接受。

要了解原子核的结构，首先要知道这种核所包含的质子和中子数目。核内的质子数 Z 叫做原子序数。中子数是用 N 表示的，因此核内的总核子数 A 就可以写成

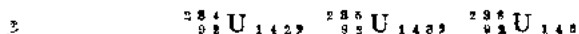
$$A = Z + N$$

由此人们就把元素按质子数分类，例如， $Z = 82$ 的铅称 82 号元素， $Z = 92$ 的铀称 92 号元素等等。

现在让我们来讲一讲同位素的含义。

大家知道，元素周期表是按原子序数 Z 给原子核编号的，例如 92 号元素指的是质子数 $Z = 92$ 的铀原子核。但是同样是铀原子核其中包含的中子数却是可以不同的。比如有的包含 142 个中子，有的则包含 143 个或 146 个中子。因此人们把这种在周期表上处于同一位置，也就是说具有相同数目的质子数而中子数不同的原子核称做同位素。

为了区别各种不同的同位素，人们在化学元素符号的左下角标上原子序数 Z ，左上角标上原子总核子数 A ，右下角标上中子数 N ，即用 A_ZX_N 来表示不同的同位素。例如铀的三种同位素的符号可以写成



同位素中所包含的各种原子核，一般称之为核素，各种核素的天然含量的百分比有一个专门的名称，叫同位素丰度。例如，天然存在的铀有上述三种，其同位素的丰度分

别为0.0055%，0.714%和99.27%。

三、在原子核内质量守恒吗？

质量守恒是物理学中的基本定律之一。但是从表面看来，在原子核内这个定律似乎出现了疑问。因为当一些自由核子聚集形成某一原子核时，这个原子核的总质量却不等于各个核子的质量之和，而是略小些。人们把这种质量的减少称之为质量亏损。

产生这种质量亏损的原因，可以根据爱因斯坦的质量 M 和能量 E 的关系来解释。这种关系可以写成

$$M = E/c^2 \text{ 或 } E = Mc^2 \quad (1-1)$$

式中 E 以焦耳为单位， M 以千克为单位， c 是光速。这个公式说明，如果一个系统的质量有变化，相应地也要产生能量的变化。由此可见，质量的减少意味着一定能量的释放。自由状态的单个核子结合为原子核时，质量减少了 ΔM ，就要释放出大小为 ΔE 的能量，它们之间的数量关系是

$$\Delta E = c^2 \Delta M = 931 \Delta M \text{ (兆电子伏)} \quad (1-2)$$

这是自由核子结合成原子核时所放出的能量，因而叫做原子核的结合能 E_b 。反之，如果要把原子核打碎，起码也要给它这样大的能量。

我们用最简单的氘(^2_1H)原子核来说明原子核的结合能。氘核是由一个中子和一个质子组成的。原来，自由质子的质量为1.007825原子质量单位。自由中子的质量为1.008665原子质量单位。氘核的质量要比中子和质子的质量之和小0.00239原子质量单位。这就是氘原子核的质量亏损。

* 兆电子伏为能量单位，符号为MeV。

由上式可以算出氦原子核的结合能

$$E_b = \Delta E = 931 \times \Delta M = 931 \times 0.00239 \approx 2.2 \text{ MeV}$$

这个结果已经用实验做了验证，证明是正确的。

为了对原子核结合能的大小有一个具体的概念，我们可以把结合能同汽油燃烧时所产生的热能（化学能）做比较。一公斤汽油所包含的化学能大约只有一公斤氦结合能的 1×10^7 分之一。也就是说，一公斤氦核的结合能，相当于一万吨汽油燃烧所放出的化学能。可见原子核的结合能（通常称为核能）实在太得惊人！

四、原子核的自旋和宇称

1. 自旋

差不多每个人在儿童时代都兴致勃勃地玩过陀螺，它能够围绕自己的轴线迅速旋转而长时间不致倾倒。这种旋转运动在物理学上常用一个叫做转矩的量来描述。所有一切转动着的物体，都具有它自己的转矩。

原子核也在不停地旋转，显然也应有它自己的转矩。但是不能认为它是一个转动着的微小刚体陀螺。我们平常所见到的陀螺，其转矩由于摩擦而逐渐减小，直到最后停止转动。但原子核的转矩却是永恒不变的。人们使用一个称为自旋的物理量来描述原子核旋转的特性。自旋单位用 $\hbar/2\pi$ 表示，记为 $\hbar$ ，其中 h 为普朗克常数。

2. 宇称

当人们照镜子时都会发现，人的左手在镜子中的影像是右手，而右手在镜子中的影像是左手。眼睛、耳朵也同样如此。物和像的关系成为左右互变的关系。如果像中的情形是现实中可以实现的现象，那么我们就把这种关系称为镜像对

称性或左右对称性。

天空中自左向右飞行的鸟，在镜中是向左飞行，这种运动实际上是存在着的。这说明力学现象是左右对称的。

当通以电流 I 的直导线，放到通电流 i 的矩形线圈旁边时，直导线就受到指向镜面的推力，如图 1.2 所示。但是镜中的像却变得不同了，此时矩形线圈中的电流方向变得相反，然而直导线中电流的方向却是不变的。这样一来，它受到的推力方向就指向镜外。不管是物还是像，这些情况都符合电磁规律，可见电磁现象是左右对称的。

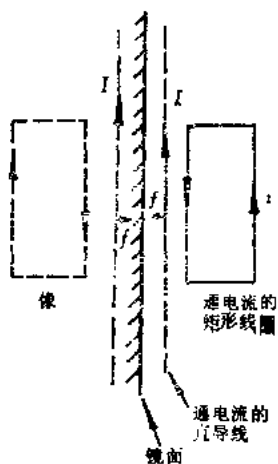


图1.2 电磁现象的对称性

这样，凡是现实世界上任何一种运动（或物理过程），只要它在镜像中的运动也是现实世界存在的，我们就说这种运动（或物理过程）是宇称守恒的。

在微观世界中，粒子（这里就是核子）是用波函数*来描述的。如果在空间镜像中，波函数不改变符号，例如，本来波函数的符号为正，则称粒子体系具有偶宇称，相反，如果波函数变号，则称它具有奇宇称。对应于偶和奇，宇称只取两种数值，即 $+1$ （偶宇称）和 -1 （奇宇称）。实际应用时，为了简单起见，只用 $+$ 和 $-$ 来表示。

处在任何状态的原子核，都有特定的自旋和宇称，这是原子核的重要特性之一。

五、原子核的电荷和磁性

大家知道，原子是电中性的。同时也知道原子是由原子核和核外电子所组成。那么这里就产生一个很有意思的问题：原子核内一定存在着和外围电子数目相等的带正电荷的粒子，否则原子怎么能成为中性的呢？经过科学家们的努力，得出了这样的结论：这些带正电荷的粒子就是质子，核内的质子数（也称核电荷数）与核外电子数目相同，并且等于这种元素在门捷列夫周期表中所在位置的原子序数 Z 。例如，氢的原子序数为 1 ，那么它的核电荷数也是 1 ；铁的原子序数为 26 ，它的核电荷数同样是 26 。

到目前为止，人们已发现了共计 109 种元素，在周期表中从 1 号一直排到 109 号。其中 43 ， 61 以及大于 94 的元素都是用人工方法制造的，叫人造同位素。它们在自然界已经不存在了。 Z 等于 85 ， 87 ， 93 和 94 的元素，开始也是用人工方

* 在微观世界中，为了描述核子在一定时刻 t 在某一空间位置 (x, y, z) 出现的几率，人们用一个函数 $\psi(x, y, z)$ 来表示， $\psi(x, y, z)$ 称做波函数，有兴趣的读者可参考专门书籍。

法制造的，后来发现，在自然界，有些元素还有极微量存在。

磁性好像与电流有着不解之缘。大家知道，当存在环形电流时，同时产生磁矩，其方向遵守右手螺旋定则。原子核内既然有电荷在运动，当然也就有磁矩。实验已证明原子核确实有磁矩存在，并测得质子的磁矩为

$$M_p = 2.7896 \frac{e\hbar}{2m_p} = 2.7896\mu_N$$

中子的磁矩为

$$M_n = 1.9103 \frac{e\hbar}{2m_n} = -1.9103\mu_N$$

式中 μ_N 称为核磁子， μ_B 称为玻尔磁子 $\left(= -\frac{e\hbar}{2m_e c} \right)$ 。

原子核的磁矩是核内各个核子磁矩的合成结果。

原子核磁矩的测量方法有很多种，比较重要的是核磁共振法。其基本原理是将测量样品放到利用高频电流所产生的交变磁场 B 中，使其频率 ν 满足

$$h\nu = 2\mu_N B \quad (1-3)$$

即

$$\nu = \frac{2\mu_N B}{h} \quad (1-4)$$

由此可见，根据频率 ν 和磁场 B 就可以算出 μ_N 了。

目前在生物、化学、固体等物质结构的研究中，核磁共振法有着广泛的应用。

六、量一量原子核

原子的质量包括原子核的质量和核外电子的质量以及它们的结合能。电子的这种结合能是极微小的，所以常常略去。利用一般方法测出的都是原子的质量，但是我们可以根据原子的总质量计算出原子核的质量来。

原子核的质量单位是这样规定的，把碳-12原子的质量单位定为12个单位，这叫原子质量单位，用amu或u表示。据计算

$$1 \text{ 原子质量单位} = 1.660566 \times 10^{-27} \text{ 千克}$$

其他原子的质量，都可以同这个单位相比较而得到。

我们可以看出，用这个单位所表示的各种核素的质量，很接近一个整数（参见表1.1）。这个整数就是核素的质量数A。

表1.1 几种同位素的原子质量

同 位 素	原子质量 (amu)	同 位 素	原子质量 (amu)
${}^1_1\text{H}$	1.007825	${}^{16}_8\text{O}$	15.994915
${}^2_1\text{H}$	2.014102	${}^{17}_8\text{O}$	16.999133
${}^3_1\text{H}$	3.016050	${}^{23}_{11}\text{Na}$	22.989773
${}^{12}_6\text{C}$	12.000000	${}^{119}_{50}\text{Sn}$	118.906291
${}^{13}_6\text{C}$	13.003354	${}^{238}_{92}\text{U}$	238.02891

现在我们再来看看原子核到底有多大。

早在卢瑟福所做的 α 粒子散射实验中，就证明原子的中

心有一个核，并估计它的半径小于 10^{-12} 厘米。通过实验证明各种原子核的半径 R 与原子质量数 A 近似有下列关系：

$$R = R_0 A^{1/3} \quad (1-5)$$

R_0 为比例系数，实验测得 $R_0 \sim 1.2 \times 10^{-15}$ 米 = 1.2 费米*。

原子核的体积虽小，但密度却大得惊人。如果把原子质量 M 近似地视为原子核的质量，同时假设原子核是一个小圆

球，那么它的体积 V 就等于 $\frac{4}{3}\pi R^3$ ，其平均密度 ρ 应为

$$\rho = \frac{M}{V} = \frac{3}{4\pi R_0^3 N_A} \quad (1-6)$$

式中 N_A 为阿伏加德罗常数。

对不同的原子核， R_0 是常数。可见各种原子核的密度大致都是相同的。进一步计算一下，就可以得到原子核的平均密度

$$\rho \approx 10^{17} \text{ 千克/米}^3$$

即使把珠穆朗玛峰的体积压缩到1立方米，它的密度仍然达不到这样大的数值。可见原子核的密度之大，可谓无与伦比了。

七、原子核的稳定性

原子核是由质子和中子组成的，那么原子核内的质子数和中子数是否是任意的呢？为什么有的核是稳定的，而有的核却是不断地衰变的呢？下面就来回答这些问题。

* 在原子核物理中，规定1费米= 10^{-15} 米，记为fm；费米这个单位是为纪念出生在意大利的美籍物理学家费米而命名的。