

高等学校教材

核测井物理基础

庞巨丰 主编



石油工业出版社
PETROLEUM INDUSTRY PRESS

P631.8
P-417

高等学校教材

核测井物理基础

庞巨丰 主 编
田亚娟 副主编

石油工业出版社

内 容 提 要

本书系统地阐述了核测井的物理基础,包括原子核的基本性质、放射性现象和核衰变规律、放射性原子核各种类型的衰变、地层岩石的天然(自然)放射性、地层岩石的 γ 光子特性、地层岩石的中子特性。

本书可作为石油高校、地矿高校和其他高校勘察技术与工程专业测井方向、测控技术及仪器、地球探测与信息技术等专业的教学用书。也可供测井、石油与天然气地质勘探、地球探测与信息、石油工程等专业的教师、研究生、工程技术人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

核测井物理基础/庞巨丰主编.

北京:石油工业出版社,2005.8

高等学校教材

ISBN 7-5021-5155-9

I. 核…

II. 庞…

III. 核测井-高等学校-教材

IV. P631.8

中国版本图书馆CIP数据核字(2005)第081919号

核测井物理基础

庞巨丰 编著

出版发行:石油工业出版社

(北京安定门外安华里2区1号 100011)

网 址: www.petropub.com.cn

总 机: (010) 64262233 发行部: (010) 64210392

经 销: 全国新华书店

印 刷: 石油工业出版社印刷厂

2005年8月第1版 2005年8月第1次印刷

787×1092毫米 开本: 1/16 印张: 10.25

字数: 256千字 印数: 1—2000册

定价: 18.00元

(如出现印装质量问题,我社发行部负责调换)

版权所有,翻印必究

前言

在当今的测井技术应用中，核测井技术发挥了其他测井方法不可替代的重要作用，显示了越来越大的优势。随着核成像测井技术的发展（含核磁共振成像测井），核测井技术更呈现出强大的生命力。尤其在生产测井和随钻测井中，核测井技术具有独到的作用。

核测井技术的发展，产生了能谱测井技术、时间谱测井技术和核层析成像测井技术。但无论核测井技术如何发展，核测井物理基础的学习都是必不可少的。

《核测井物理基础》是在西安石油大学校内讲义的基础上修改编写而成的，是高等学校（石油高等学校和地矿高等学校等）地球探测与信息技术学院（或系）测井专业、地球物理学院测井专业、资源工程学院测井专业或勘察技术与工程专业测井方向的重要课程；也是石油高校测控技术及仪器专业的重要课程，是在讲授测井专业课之前不可缺少的一门课。

本书从校内讲义到公开出版，还有一个插曲。

2004年9月1日，中国石油大学（华东）张锋老师电函咨询：“你们学校的测井专业所学的核物理基础用的是哪本教材？……我要是临时用校内讲义也来不及，不知你能否提出宝贵的建议？”作者回复：“我曾编过一本讲义，是《核地球物理基础》。”他再电函：“不知你们自编的教材《核地球物理基础》是否还有，因为我们这里基础理论课和测井专业课还是分开上的，另外现在来不及搞其他的教材，盼回复！”我马上到学校教材中心去找。由于校印的讲义，除学校使用，油田企业也常常购买，库存一本也没有了。我自己手头只有一本，无法提供给他。因此，我就萌发了在原讲义的基础上出一本书的愿望。通过石油工业出版社总编室主任鲜于德清的推荐，与教材出版中心主任杨静芬和编辑徐秀澎取得了联系。经过多次沟通，本书完成了出版审查，并定名为《核测井物理基础》。

《核测井物理基础》是高等学校有关专业的本科生和研究生的教材，同时，有不少内容与生产实际紧密结合。对高校有关专业教师、油田测井公司、测井研究院所（或中心）从事测井等有关专业的科技人员和工程技术人员，本书都是重要的参考书。

本书的出版承蒙西安石油勘探仪器总厂副厂长范士洪教授级高级工程师和原长庆油田测井公司经理杨玉征教授级高级工程师的推荐，在此表示最衷心的感谢！在教材编写过程中，得到李秦媛、李彤霞、譙毅、庞鲁蒙、陈亚凡、王莉等老师的帮助，在此一并致谢！

本书编写时间仓促，错误缺点在所难免，诚恳欢迎批评、赐教。

作者

2005年5月

目 录

绪论	(1)
第一章 原子核的基本性质	(3)
第一节 原子核的电荷、质量和半径	(3)
第二节 原子核的组成	(6)
第三节 原子核的结合能	(9)
第四节 原子核的自旋和磁矩	(13)
习题	(19)
第二章 放射性现象和核衰变规律	(21)
第一节 放射性现象	(21)
第二节 放射性原子核衰变的基本规律	(22)
第三节 放射性活度和辐射强度	(25)
第四节 两次连续衰变规律和放射性平衡	(27)
第五节 多次连续衰变规律和放射系	(32)
习题	(38)
第三章 放射性原子核的衰变类型	(40)
第一节 α 衰变	(40)
第二节 β 衰变	(43)
第三节 γ 跃迁 (γ 衰变)	(48)
第四节 核衰变的移位定则和衰变纲图	(51)
习题	(52)
第四章 地层岩石的天然 (自然) 放射性	(54)
第一节 天然放射性核素	(54)
第二节 天然放射性核素在地层岩石中的分布	(58)
第三节 自然 γ 能谱	(61)
习题	(64)
第五章 地层岩石的 γ 光子特性	(65)
第一节 γ 光子 (射线) 与地层相互作用	(65)
第二节 γ 光子在物质中的衰减	(72)
第三节 自然 γ 射线在地层中和沿井轴的通量分布	(78)
第四节 仪器源 γ 射线与地层相互作用	(88)
习题	(93)
第六章 地层岩石的中子特性	(94)
第一节 中子的分类和性质	(94)

第二节 原子核反应 (97)

第三节 中子源..... (103)

第四节 中子与地层的相互作用..... (109)

第五节 中子的慢化过程..... (113)

第六节 热中子在岩石中的扩散和被俘获..... (116)

第七节 中子通量的空间分布..... (122)

第八节 中子迁移理论和迁移方程..... (129)

习题..... (132)

附录..... (135)

附录 1 常用物理常数 (135)

附录 2 常用核素表 (137)

参考文献..... (155)

绪 论

随着人类对物质结构、运动规律和相互作用规律认识的深化,在认识的每一阶段,产生了相应的物理学。例如,对宏观物体运动规律的研究,产生了力学;对电磁规律的研究,产生了电磁学;对分子运动规律的研究,产生了分子物理学;对原子结构和运动规律的研究,产生了原子物理学;对原子核结构及运动规律的研究,产生了原子核物理学……

核物理学一方面从深度和广度两个方面按自身的规律向纵深发展,不断产生新的分支学科;另一方面,在它发展的过程中,不断向其他学科渗透,形成了许多边缘学科。对核辐射和放射性核素在地层中的运动及其与地层物质相互作用规律的研究,就产生了核测井物理学。

核测井物理学是应用原子核物理的理论、方法和核技术,去研究井下地层及介质性质的一门科学。它是核物理渗透到地球科学而形成的一门新兴的边缘学科,是利用核技术的方法去研究和分析岩石物性参数、地层元素与流体性质的一门学科。这门学科随着核物理学和核技术的发展而发展。

原子核物理学从形成学科至今大约 60 多年的历史。该学科的形成与发展大致可分为三个阶段:

(1) 探索阶段(1896—1930 年)。1896 年,法国的贝克勒尔(A. H. Becquerel)从照相底片感光现象中发现了天然放射性,不久确认这种过程中放射的是 α 、 β 和 γ 射线。从此,开创了人类深入认识物质微观结构的新纪元。1911 年,英国物理学家卢瑟福(E. Rutherford)用 α 粒子作炮弹轰击金属箔时,从产生大角度散射的实验中发现了原子核。1919 年,他在用 α 粒子轰击氮原子核的实验中又发现了质子。1920 年,卢瑟福提出了原子核中可能存在一种中性粒子的猜测。1928 年,盖革和米勒(Geiger—Müller)制成了探测粒子的计数器,为观测粒子提供了工具。这个时期,原子核物理的研究工作大部分属于自发探索活动,而且仅仅限于欧洲的几个国家。

(2) 形成阶段(1931—1945 年)。在这 15 年内,重大发现层出不穷,理论假说相继出现,工程技术粗现规模,初步形成了原子核物理的学科体系。

1932 年,英国物理学家恰德威克(J. Chadwick)用 α 粒子轰击铍发现了中子。接着德国的海森堡(W. Heisenberg)和原苏联的伊万宁柯(D. Ivanenke)立即提出了原子核由质子和中子组成的假说,这一模型思想奠定了原子核物理学的基础。同年,安德森(C. D. Anderson)从宇宙射线中发现了正电子。1934 年,依兰·居里—约里奥(I. Curie—Joliot)和弗勒德里克·约里奥—居里(F. Joliot—Curie)从 ${}_{13}^{27}\text{Al}(\alpha, n){}_{15}^{30}\text{P}$ 和 ${}_{5}^{10}\text{B}(\alpha, n){}_{7}^{13}\text{N}$ 反应中发现,生成核 ${}_{15}^{30}\text{P}$ 和 ${}_{7}^{13}\text{N}$ 都具有 β^+ 放射性,由此发现了用人工产生放射性的方法。1939 年,哈恩(O. Hahn)和斯特拉斯曼(F. Strassmann)发现了铀核裂变现象,开创了人类获取核能的新纪元。

原子核物理中的一些重要理论和模型也是在这一时期提出的。例如,1931 年,为了解释 β 衰变中“能量不守恒之谜”,泡利(W. Pauli)提出了中微子假说;1934 年,费米(E. Fermi)在中微子假说的基础上提出了 β 衰变理论,等等。

原子核物理的工程技术方面也初步形成规模。1931年,范德格拉夫(Van de Graaff)发明了静电加速器;1932年,劳伦斯(E. O. Lawrence)发明了回旋加速器,为人工加速粒子开辟了道路;1942年,在费米领导下,在美国芝加哥大学建立了第一座反应堆,为燃料生产、能源开发提供了设备;1944年,原苏联物理学家威克斯列尔(Veksler)提出了粒子加速的同步稳相原理,进而建立了同步稳相加速器,把加速粒子的技术提高到一个新的阶段。1945年,美国在奥本海默(J. R. Oppenheimer)等人领导下制成原子弹,同年7月15日在阿尔马戈多实验爆炸成功,为原子核的军事应用打开了通路。

这一时期原子核物理发展的特点是,目标明确、队伍扩大、形成体系,其研究中心从欧洲转向美国,并向世界各国扩展。

(3) 发展阶段(1946年至今)。1946年以后,原子核物理学的学科体系基本形成,并向纵深发展。同时,又逐渐形成了一些分支学科,以及一些边缘学科。原子核物理本身沿着基础研究和应用研究两条途径迅速发展。基础研究主要是原子核结构的研究、核力学研究和不断寻找新的核素等。人们估计,自然界中可能存在6000多种核素,现在已发现的只不过2000余种。其中从自然界中发现的有300余种,用人工方法产生的有1700余种。

基础研究的同时,应用研究得到了相应的发展,目前已形成五大应用领域:①核武器研究,主要从事原子弹、氢弹、中子弹、 γ -激光弹、粒子束武器等各种新型武器的研究。②核燃料研究。③能源与动力研究,主要进行原子电池、核供热和核电站等的研究。④辐射防护研究。⑤核技术应用研究。核技术在工农业生产、人民生活 and 各个学科领域中得到了广泛应用。已经发展和应用的核技术有:射线照相、辐照改性、中子掺杂、辐照育种、X射线荧光分析、同位素应用、活化分析、核磁共振、射线治癌等等。

原子核物理学不但在本身学科主体上生长出许多分支学科,如中子物理学、反应堆物理学、加速器物理学、探测器与探测技术、粒子物理学……而且逐渐向相邻学科渗透,产生了各种类型的边缘学科,如核化学、核医学、放射生物学、放射地质学、放射性考古学、中微子天文学……核物理学向地球科学逐步渗透就产生了核测井物理学。

核测井物理学的内容十分丰富。石油勘探和开发中的核测井(也称放射性测井)始于20世纪30年代末期,由美国和原苏联首先采用自然伽马测井法评价地层和区别岩性。50年代,核测井得到了迅速的发展,相继出现了中子伽马测井和放射性同位素示踪测井等。60年代以后,自然伽马能谱测井得到了应用。随之,岩性密度测井及脉冲中子诱发伽马能谱测井等方法也相继开始进行现场试验,并且逐步投入使用。近年来,随着计算机技术的进步,能谱测井方法又得到了迅速的发展。今后若干年内,核测井的发展方向,是核成像测井。

核测井物理学是当前国际上十分活跃的一个学科。1987年创刊了《Nuclear Geophysics》杂志,由英国Pergamon Press Ltd. Oxford出版。创刊本身就意味着“核测井物理学”学科已形成。该杂志所发表的论文既有基础理论,也有实际应用的研究成果,反映国际上核测井物理学的最新科学技术水平。在国内,核测井领域近十多年来发展也十分迅速,已成为石油勘探开发中每井必测的项目。

本课程为地球探测与信息技术及仪器(测井和测井仪器)专业讲授基本的核测井物理知识。在教学中贯彻少而精的教学原则,从培养学生的独立能力出发,本着打好基础、精选内容、逐步更新、提高质量的思想。课程内容编排为:绪论;原子核的基本性质;放射性现象和核衰变规律;放射性原子核的衰变类型;地层岩石的天然(自然)放射性;地层岩石的 γ 光子特性;地层岩石的中子特性。

第一章 原子核的基本性质

19 世纪末，发现了 X 射线和放射现象，人类的认识开始深入到原子的内部。1911 年，卢瑟福 (E. Rutherford) 通过 α 粒子的散射实验，证明了原子内部有一个体积很小，几乎集中了原子全部质量的荷正电中心体。这个中心体就称为原子核。

各种核物理现象，如核衰变、核反应等，都与原子核的基本性质有着密切的关系。原子核的基本性质通常是指原子核作为整体时所具有的静态性质，即原子核的电荷、质量、半径、自旋、磁矩、电电极矩、宇称和统计性等。

第一节 原子核的电荷、质量和半径

一、原子核的电荷

原子核带的正电荷量 q 为：

$$q = +Ze \quad (1-1)$$

式中 Z ——核电荷数；

e ——基本电荷， $e = 1.602 \times 10^{-19} \text{C}$ (库仑)。

核电荷数 Z 相同的原子具有相同的化学性质，通常就把核电荷数 Z 相同的一类原子称为一种元素。元素的原子序数等于核电荷数 Z 。

核电荷数 Z 可以用特征 X 射线法、卢瑟福 α 散射法等测定。其中特征 X 射线法是一种间接测定核电荷数的方法，实验数据比较准确，因此，是广泛应用的一种方法。

莫塞莱 (H. G. J. Moseley) 于 1913 年，对各种原子发出的特征 X 射线的频率 ν 与它们的原子序数 Z 之间的关系进行了定量的研究，得到如下关系：

$$\sqrt{\nu} = aZ - b \quad (1-2)$$

这个关系式称为莫塞莱定律。式中 a 、 b 均为常数，在一定范围内与 Z 变化无关。对于不同系列的特征 X 射线，它们的 a 、 b 值是不同的。例如，对 κ_α 线系有： $a \approx 5.2 \times 10^7 \text{s}^{-1/2}$ ， $b \approx 1.5 \times 10^8 \text{s}^{-1/2}$ 。因此，只要测得元素的特征 X 射线的频率，即可定出其核电荷数 (原子序数)。莫塞莱曾经系统地测定了元素周期表中许多元素的核电荷数，指出从氢到铀共有 92 个元素，并确定了 43、61、85 和 87 号元素在周期表中的位置 (当时这 4 个元素还未被发现)，纠正了几对元素 (Co—Ni、Ar—K、Te—I) 在周期表中曾经被颠倒了顺序。

恰德威克 (J. Chadwick) 从 1920 年起，曾采用卢瑟福散射法对一些元素的核电荷数进

行了直接测定。实验表明，在允许误差范围内，测得的一种原子的核电荷数，等于这种原子所属的元素在元素周期表中的原子序数。表 1-1 列出了几个元素的测定结果。

二、原子核的质量

原子或原子核的质量是非常小的，一个¹²C 原子的质量为 $1.992678 \times 10^{-26} \text{ kg}$ ，较重的²³⁸U 原子的质量为 $3.9521 \times 10^{-25} \text{ kg}$ 。为方便起见，通常用一个特殊的单位来量度原子和原子核的质量。

表 1-1 卢瑟福散射法测定的核电荷数

元 素	原 子 序 数	实验测得的 Z 值
铜	29	29.30
银	47	46.30
铂	78	77.40

1960 年的国际物理学会议和 1961 年的化学会议分别通过决议，确定以一个¹²C 原子质量的 $\frac{1}{12}$ 作为原子质量单位，记为 u（u 是 unit 的缩写）。这个原子质量单位又称碳单位。

$$\begin{aligned} 1\text{u} &= {}^{12}\text{C 原子质量} \times \frac{1}{12} \\ &= 1.992678 \times 10^{-26} \times \frac{1}{12} \\ &= 1.660566 \times 10^{-27} \text{ kg} \end{aligned}$$

与碳单位相应的阿伏加德罗常数 N_A 为：

$$N_A = \frac{12}{m_c} = \frac{1\text{g}}{1\text{u}} = \frac{1}{1.660566 \times 10^{-27} \times 10^3} = 6.022045 \times 10^{23}$$

由此可见，阿伏加德罗常数 N_A 本质上是宏观质量单位“g”与微观质量单位“u”的比值。

必须指出，1961 年以前，国际上通用的原子质量单位是以一个¹⁶O 原子质量的 $\frac{1}{16}$ 作为原子质量单位，称为氧单位，记为 amu。与 amu 相应的阿伏加德罗常数 $N_A = 6.0236 \times 10^{23}$ 。氧单位比碳单位略小一些，两者之比为 1：1.000318。

在一般的核数据表中只标明原子质量。原子质量等于原子核的质量加上核外全部电子的质量，再减去与电子在原子中的结合能相当的质量。因此，原子核的质量可以表示为：

$$m_N = m - Zm_e + \sum_{i=1}^Z \frac{\epsilon_i}{c^2} \tag{1-3}$$

式中 m 、 m_N 和 m_e ——表示原子、原子核和电子的质量；

c ——光速， $c = 2.9979 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ；

ϵ_i ——第 i 个电子的结合能。

如果忽略电子的结合能，核质量近似为：

$$m_N \approx m - Zm_e \tag{1-4}$$

原子核的质量集中了原子质量的 99.975%。

测量原子质量的常用设备是质谱仪。其基本原理是：首先通过电离使所测原子变成离子，然后在电场中加速以获得动能，接着在磁场中偏转，由偏转的曲率半径求得离子的质量。设 U 为加速电极之间的电位差， q 为离子电荷，则质量为 m 的离子通过加速电极后以速度 v 运动的动能满足以下关系：

$$\frac{1}{2}mv^2 = qU \quad (1-5)$$

被加速的离子在磁感应强度 B 的作用下，将在垂直于磁场的平面以半径 R 作圆弧运动，最后通过狭缝到达接收电极。运动着的离子受到磁场的洛伦兹力为：

$$f = qvB \quad (1-6)$$

其向心加速度为 v^2/R ，于是得到：

$$f = qvB = \frac{mv^2}{R} \quad (1-7)$$

由式 (1-5) 和式 (1-7) 消去 v 解得：

$$m = \frac{qB^2R^2}{2U} \quad (1-8)$$

实际测量中 B 和 R 是已知量， q 也是已知的，只要改变电位差 U ，就可以测得不同离子的质量 m 。

当接收电极的离子电流 I 为某一极大值时，加速电位差 U 就是所测质量的峰值电压。实验测得的 $I-U$ 变化关系的典型曲线如图 1-1 所示。由式 (1-8)，从曲线峰值电压之比 U_1/U_2 ，就可求得质量之比 m_2/m_1 ，即：

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{m_2}{m_1} \quad (1-9)$$

因此，从已知质量的峰值电压可以得到待测离子的质量。在实际测量中，常是采用与已知质量的原子（如碳-12）作比较的方法，测出待测原子的质量。

以 u 为单位表示原子质量时，原子的质量都接近于整数。通常就把这个整数称为原子核质量数，并用符号 A 表示。前面提到的 ^{12}C 、 ^{238}U 中的 12、238 分别是这两种原子的核质量数。

三、原子核的半径

原子核作为一种客观实体存在，必须有一定的大小。这种微观客体的大小无法用宏观方法直接测量。

关于原子核的大小有两种理解：一种是核物质或核电荷的分布范围，另一种是核力的作用范围（核力是核子之间特有的作用力）。不过两者之间的差别不是很大。原子核很小，目前还无法直接观察。目前所有表示原子核大小的数据都是通过实验间接测得的。

各种实验研究表明，原子核是接近球形的，于是人们通常用“半径”来近似描述原子核

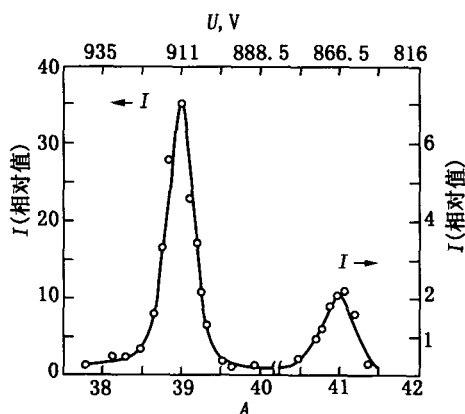


图 1-1 钾的质量谱

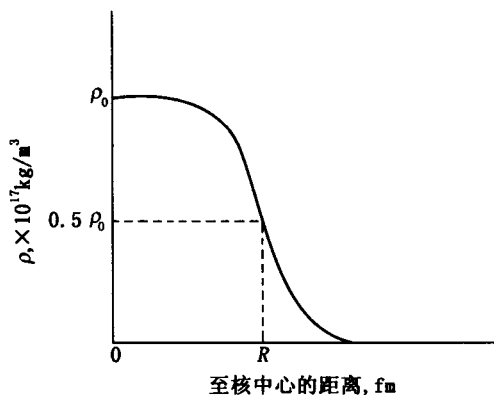


图 1-2 原子核的质量密度分布

的大小。由实验得知，在原子核内物质密度不是处处相等的。图 1-2 是通过测量核内电荷分布得到的核内质量分布的大致情况。在核的中间部分密度基本上是一个常数 ρ_0 ，在核的表层，密度由 ρ_0 逐步下降到 0。所谓“核半径”，就是指由核中心至密度降为 ρ_0 的 $\frac{1}{2}$ 处的距离。

各种实验方法的测量结果表明，原子核的半径约为 $10^{-15} \sim 10^{-14} \text{ m}$ ，并与质量数 A 有如下近似关系：

$$R \approx r_0 A^{1/3} \quad (1-10)$$

r_0 是常数，用不同的方法测量核半径时，所得到的 r_0 值略有差异。测量核力作用范围得到的 $r_0 \approx (1.3 \sim 1.5) \times 10^{-15} \text{ m}$ ；测量电荷密度分布范围得到的 $r_0 \approx (1.1 \sim 1.3) \times 10^{-15} \text{ m}$ 。因此，通常取 $r_0 \approx (1.1 \sim 1.5) \times 10^{-15} \text{ m}$ 。而且原子核半径常用费米 (fm) 做单位， $1 \text{ fm} = 10^{-15} \text{ m}$ 。

若设原子核的体积为 V ，质量为 m_N ，则原子核内核物质的平均密度为：

$$\rho = \frac{m_N}{V} = \frac{m_N}{\frac{4}{3}\pi R^3} = \frac{3}{4} \frac{m_N}{\pi r_0^3 A} \quad (1-11)$$

将 $A/m_N = N_A$ (阿伏加德罗常数) 代入式 (1-11)，即得：

$$\rho \approx 10^{14} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3} \approx 10^{17} \text{ kg/m}^3$$

由此可见，原子核内核物质的平均密度是非常高的。

第二节 原子核的组成

一、质子和中子

^1H 原子仅有一个壳层电子，可以用气体放电法剥离，得到 ^1H 原子核。通常称 ^1H 原子核为质子，用符号 P 表示。1919 年，卢瑟福用 α 粒子轰击 ^{14}N 核，获得 ^{17}O 和质子 P 。此后，有人用 α 粒子轰击另外一些原子核，同样得到质子。这说明原子核内含有质子。

人们对一系列原子核的质量进行了研究，发现所有原子核的质量几乎都为质子质量的整数倍。于是人们设想，原子核是由 A 个质子组成的。但是除 ^1H 原子核的质量数 A 与电荷数 Z 相等外，其余所有原子核的 A 均大于 Z 。显然，纯粹由质子组成原子核的猜测是不能成立的。那么除质子外，原子核内还可能含有什么粒子呢？

1920 年，卢瑟福根据当时已知的实验事实推测，核内应当存在一种与质子质量大体相等，不带电荷的粒子。1932 年，恰德威克用钋 (Po) 发射的 α 粒子轰击铍箔，发现飞出了

一种新的粒子。这种粒子不带电荷，质量与质子差不多，在物质中穿透能力很强。人们把这种粒子取名为中子，并用符号 n 表示。

中子发现后，伊凡宁柯 (Д. Д. Иваненко) 和海森堡 (W. Heisenberg) 随即提出原子核由质子和中子组成的假说。按照这种假说，原子核内质子数目等于原子核的电荷数 Z ，核内的中子数则为：

$$N = A - Z$$

原子核的这种假说可以解释许多实验事实。

质子和中子统称为核子。原子核的质量数等于组成该原子核的核子数。

二、核素和核素图

通常把具有相同质子数 Z 、中子数 N 的一类原子核称为一种核素。核素用统一的符号表示： A_ZX_N 。其中 X 为元素符号，符号左上角 A 为核质量数，左下角 Z 为核电荷数，右下角 N 为中子数。在实际工作中往往写成 AX ，如 ${}^{238}_{92}\text{U}_{146}$ 往往写成 ${}^{238}_{92}\text{U}$ 。而更经常的表示方法是只写出元素符号和质量数，即写成 AX ，如 ${}^{238}_{92}\text{U}$ 常写成 ${}^{238}\text{U}$ 。天然铀就有 ${}^{238}\text{U}$ (99.275%)、 ${}^{235}\text{U}$ (0.720%) 和 ${}^{234}\text{U}$ (0.0054%) 三种核素。核素可以分为稳定性核素和不稳定性核素（即放射性核素）。迄今实验上发现的核素共有 2000 多种，其中稳定性核素只有 270 种。

若以原子核的中子数 N 为纵坐标、质子数 Z 为横坐标对核素作图（如图 1-3 所示），这种图称为核素图。在图中仅画出 β 稳定性核素，每一个圆点都表示一种稳定的原子核。通过 β 稳定性核素区域中心的曲线称为 β 稳定线。直线（虚线）则表示 $N = Z$ 的点。从图中可见，在轻核中，除氢原子核外，当 $A < 40$ ($Z < 20$) 时，稳定的原子核几乎都在 $N = Z$ 的直线上，即 β 稳定线几乎与 $N = Z$ 直线重合，或非常靠近，核素的 $N/Z \approx 1$ 。这表明中子数和质子数相等的轻核是最稳

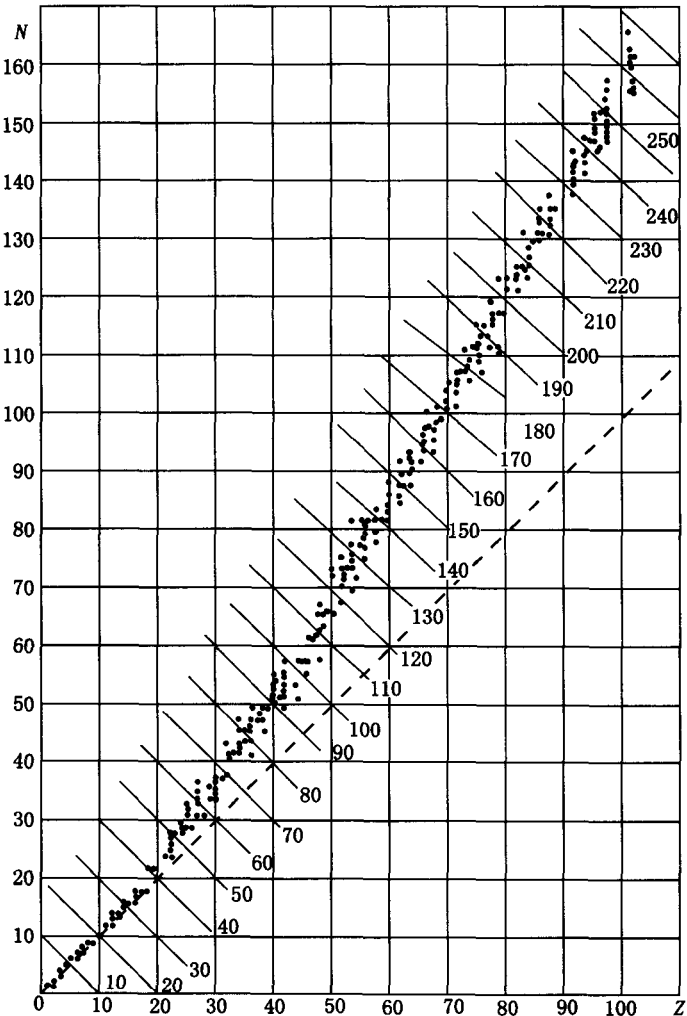


图 1-3 β 稳定性的核在 $Z-N$ 平面上的标绘

定的。同时，轻核的核电荷数 Z 与核质量数 A 之比 $Z/A \approx 0.5$ 。当 $A > 40$ ($Z > 20$) 时，稳定核素中的中子数大于质子数，且随 A (或 Z) 的增加，中质比 N/Z 也相应增大，而荷质比 Z/A 减小，且 $Z/A < 0.5$ 。例如自然界中存在的最重的稳定核 $^{208}_{82}\text{Pb}$ ，它的中质比 $N/Z = 1.54$ ，荷质比 $Z/A = 0.394$ 。这一现象可以这样来理解：在轻核中，由于质子少，库仑排斥力不大，可以近似认为完全是核力在起作用，这时 $N = Z$ 的原子核最稳定。在原子核中，中子和质子有一起出现的趋势，多一个中子也就要求多一个质子。但当质量数增加时，质子增多，库仑排斥力很快增大，库仑排斥的增加要比核力增加快得多，使原子核的稳定性降低。为了保持核的稳定性，要求在质量数增加的同时，中子数目比质子数目增加得多一些。中子多了，就可以通过它们和质子的核力作用而抵消质子的库仑斥力。同时，能有较多的中子填在质子之间把质子隔开，从而起到减弱库仑力的作用。这就使得在原子核质量数增加时，核的中质比随之增加，而荷质比随之下降。

β 稳定线可用下面经验公式表示：

$$Z = \frac{A}{1.98 + 0.0155A^{2/3}} \quad (1-12)$$

β 稳定线上的大多数核素对 β 衰变是稳定的，但并不一定是稳定性核素。当 $Z > 83$ 时，均为放射性核素，这时，在 β 稳定线上的核素是 α 衰变的核素。

稳定核素中 Z 、 N 两者均为偶数的最多，一个为奇数另一个为偶数的次之，两者均为奇数的只有 ^1_1H 、 ^6_3Li 、 $^{10}_5\text{B}$ 、 $^{14}_7\text{N}$ 和 $^{180}_{81}\text{Ta}$ 五种。

三、核素的分类

根据核素的 Z 和 A 的大小进行分类。

(1) 同位素：质子数相同、而中子数不同的核素称为同位素。如 ^1_1H 、 ^2_1H 和 ^3_1H 是氢的同位素； $^{234}_{92}\text{U}$ 、 $^{235}_{92}\text{U}$ 和 $^{238}_{92}\text{U}$ 是铀的同位素。同位素在元素周期表中占同一位置。一般来说，它们的化学性质相同，但核性质不同。同位素中不同核素间物理性质的差别较大，特别在轻同位素中更突出。如氚水 ($^3\text{H}_2\text{O}$) 和重水 ($^2\text{H}_2\text{O}$) 的沸点比普通水高。

自然界有许多元素不只含一种核素。如天然铀由 ^{234}U 、 ^{235}U 、 ^{238}U 三种核素组成。对于天然存在的元素，一种核素在它所属的天然元素中所占的原子百分数称为该核素的天然丰度。如 ^{238}U 核素的天然丰度为 99.27%，就是说在天然铀原子中有 99.27% 的 ^{238}U 原子。

(2) 同中子素：中子数相同、而质子数不同的核素称为同中子素。如 $^{30}_{14}\text{Si}_{16}$ 和 $^{32}_{16}\text{S}_{16}$ 就是同中子素。

(3) 同量异位素：原子核的质量数相同而电荷数 (质子数) 不同的核素称为同量异位素。如 $^{40}_{19}\text{K}$ 和 $^{40}_{20}\text{Ca}$ 即是同量异位素。

(4) 同质异能素：原子核可以处于不同的能量状态。能量最小的状态称为原子核的基态，能量较大的称为原子核的激发态。处于激发态的核，寿命一般很短。但是，在某些情况下激发态的寿命比较长，这些能态称之为亚稳态。原子核的质量数和质子数均相同 (当然中子数也相同)、而能量状态不同的核素称为同质异能素。表示同质异能素的方法是在质量数后加一个 m ，以标志原子核处在能量比较高的状态。如 $^{99m}_{44}\text{Mo}$ 为 $^{99}_{44}\text{Mo}$ 的同质异能素。

第三节 原子核的结合能

一、核物理中的能量单位

核物理中的能量单位一般用电子伏特 eV 表示。1 eV 就是一个电子在真空中通过电位差为 1V (伏特) 的电场所获得的能量。它与其他能量单位的关系是:

$$\begin{aligned} 1\text{eV} &= 1.6022 \times 10^{-19} \text{C} \times 1\text{V} \\ &= 1.6022 \times 10^{-19} \text{J} (\text{焦耳}) \end{aligned}$$

除 eV 以外, 还用 keV (千电子伏特)、MeV (兆电子伏特)、GeV (十亿电子伏特) 表示。

$$\begin{aligned} 1\text{keV} &= 10^3 \text{eV} \\ 1\text{MeV} &= 10^3 \text{keV} = 10^6 \text{eV} \\ 1\text{GeV} &= 10^3 \text{MeV} = 10^6 \text{keV} = 10^9 \text{eV} \end{aligned}$$

二、质量和能量的相互关系

根据相对论原理, 质量和能量的相互关系为:

$$E = mc^2 \quad (1-13)$$

这就是著名的爱因斯坦 (A. Einstein) 质能关系式。式中 E 为物质的总能量; c 为光在真空中的传播速度; m 为运动物质的质量, 称运动质量。

1902 年, 考夫曼 (W. Kaufmann) 通过实验证明, 爱因斯坦相对论给出的, 以速度 v 运动的粒子, 其质量的大小是随它的运动速度变化的, 即:

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1-\beta^2}} \quad (\beta = \frac{v}{c}) \quad (1-14)$$

式中, m_0 为粒子静止时 ($v=0$) 的质量, 称为粒子的静止质量。从式 (1-14) 可见, 当粒子的速度 v 增大时, 它的质量 m 也随之增大; 真空中的光速 c 是粒子运动速度的极限。

粒子静止时具有的能量为静质量能 (也称静止能量)。根据质能关系式, 1 g 物质的静质量能为:

$$\begin{aligned} E &= 0.001\text{kg} \times (2.9979 \times 10^8 \text{m} \cdot \text{s}^{-1})^2 \\ &= 8.9874 \times 10^{13} \text{J} \approx 9 \times 10^{13} \text{J} \end{aligned}$$

1u 物质相应的静质量能为:

$$\begin{aligned} E &= \frac{1.6606 \times 10^{-27} \text{kg} \times (2.9979 \times 10^8 \text{m} \cdot \text{s}^{-1})^2}{1.6022 \times 10^{-13} \text{J}} \\ &= 931.5 \text{MeV} \end{aligned}$$

几种粒子的静止质量和静止能量（静质量能）如表 1-2 所示。

表 1-2 几种粒子的静止质量和静止能量

粒子名称	符 号	静止质量, u	静止能量, MeV
电子	e	0.0005486	0.5110
质子	p	1.0072765	938.2797
中子	n	1.0086650	939.5731

当粒子以速度 v 运动时，若考虑到相对论效应，其动能 E_k 为：

$$E_k = E - m_0 c^2 = mc^2 - m_0 c^2 = m_0 c^2 \left(\frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}} - 1 \right) \quad (1-15)$$

当 $v \ll c$ ，即 $\beta \ll 1$ 时，可将 $1/\sqrt{1-\beta^2}$ 按级数展开，忽略高次项，得：

$$E_k \approx m_0 c^2 \left(1 + \frac{1}{2} \beta^2 - 1 \right) = \frac{1}{2} m_0 v^2$$

此结果与经典力学的动能公式一致。

若考虑相对论效应，粒子运动时的动量为：

$$p = mv = \frac{m_0 \beta c}{\sqrt{1-\beta^2}} \quad (1-16)$$

又

$$\begin{aligned} E^2 &= (mc^2)^2 = \frac{m_0^2 c^4}{1-\beta^2} = \frac{m_0^2 c^4 + m_0^2 \beta^2 c^4 - m_0^2 \beta^2 c^4}{1-\beta^2} \\ &= \frac{m_0^2 c^4 (1-\beta^2) + m_0^2 \beta^2 c^4}{1-\beta^2} = m_0^2 c^4 + p^2 c^2 \end{aligned}$$

故得到总能量、静止质量和动量三者的关系式：

$$E^2 = m_0^2 c^4 + p^2 c^2 \quad (1-17)$$

或

$$E = \sqrt{m_0^2 c^4 + p^2 c^2} \quad (1-18)$$

又因为

$$E = E_k + m_0 c^2 \quad (1-19)$$

将式 (1-19) 代入式 (1-17) 得：

$$E_k (2m_0 c^2 + E_k) = p^2 c^2 \quad (1-20)$$

这就是相对论力学中的动能和动量关系式。当动能 E_k 与静止能量 $m_0 c^2$ 相比可以忽略时，式 (1-20) 简化为：

$$E_k = \frac{p^2}{2m_0} \quad (1-21)$$

对于光子，它的静止质量为零，即 $m_0 = 0$ ，则有：

$$E_k = E = pc \quad (1-22)$$

即光子的总能量就是它的动能。

在原子和原子核体系中当粒子的动能 $E_k \ll m_0 c^2$ 时，可以应用经典力学的公式计算动能，否则就应用式 (1-15) 计算动能。

为方便起见，在以后各章讲到原子、原子核或粒子的质量时，如不作特殊说明， m 一般表示静止质量。

三、质量亏损

研究发现，原子核的质量总是小于组成它的所有核子的质量之和。如 ${}^2\text{H}$ 核由一个质子和一个中子组成，组成它的一个质子和一个中子的质量和 $m_p + m_n$ ， ${}^2\text{H}$ 核的质量为 m_N (${}^2\text{H}$)，两者之差为：

$$\Delta m = m_p + m_n - m_N({}^2\text{H})$$

在具体计算中可以用原子质量代替核质量，则：

$$\begin{aligned}\Delta m &= m({}^1\text{H}) + m_n - m({}^2\text{H}) \\ &= 1.007825 + 1.008665 - 2.014102 \\ &= 0.002388\text{u}\end{aligned}$$

${}_{92}^{238}\text{U}$ 核由 92 个质子和 146 个中子组成，则：

$$\begin{aligned}\Delta m &= 92m({}^1\text{H}) + 146m_n - m({}^{238}\text{U}) \\ &= 92 \times 1.007825 + 146 \times 1.008665 - 238.050819 \\ &= 1.93417\text{u}\end{aligned}$$

组成原子核的 Z 个质子和 $(A - Z)$ 个中子的质量和与该原子核质量之差称为该原子核的质量亏损。所有原子核都有正的质量亏损，即：

$$\Delta m(Z, A) = Zm({}^1\text{H}) + (A - Z)m_n - m(Z, A) > 0 \quad (1-23)$$

式中 $m({}^1\text{H})$ —— ${}^1\text{H}$ 的原子质量；

$m(Z, A)$ —— 电荷数为 Z 、质量数为 A 的原子的质量。

必须指出，在原子核质量亏损的计算中，采用的是原子质量 $m({}^1\text{H})$ 和 $m(Z, A)$ 。之所以能这样做，是因为在计算 Δm 时， Z 个 ${}^1\text{H}$ 原子中的电子质量正好被 ${}^Z_Z\text{X}$ 原子中 Z 个电子的质量所抵消。当然严格说，这样做仍然是一种近似，因为在多电子原子中 Z 个电子的结合能，不等于 Z 个 ${}^1\text{H}$ 原子中电子的结合能之和。不过这个差别很小。

除了质量亏损外，有时还用到“质量过剩”的概念。所谓核素的“质量过剩”，是指 $(m - A)$ ，单位为 u 。此外 m 和 A 分别为核素的原子质量和质量数。与“质量过剩”对应的能量是：

$$\Delta(Z, A) = [m(Z, A) - A]c^2 \quad (1-24)$$

在有些核数据表中，往往不是列出核素的原子质量 $m(Z, A)$ ，而是列出 $\Delta(Z, A)$ (表 1-3)。这样，用质量差计算能量变化时，就省去了单位之间的换算。利用 $\Delta(Z, A)$ 值求原子质量也很简单。 $\Delta(Z, A)$ 的单位一般用 MeV ，所以核素的原子质量为：