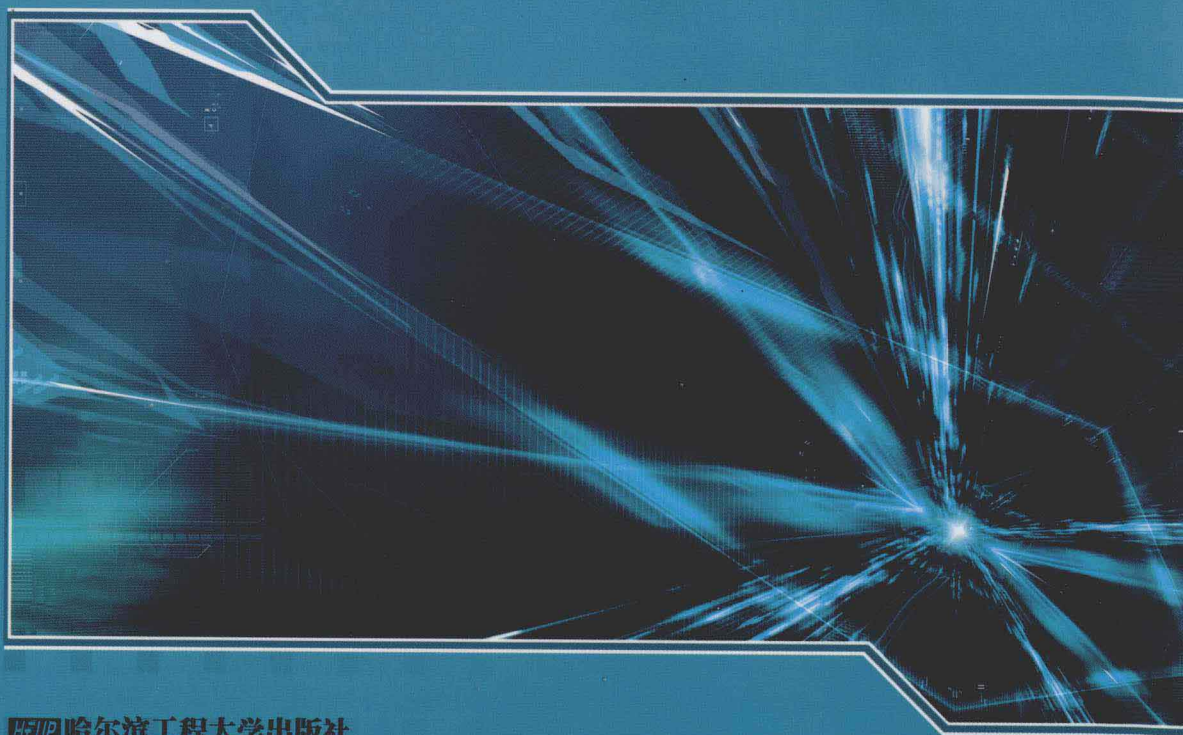




国防特色教材·核科学与技术

核能与核技术概论

——主编 魏义祥 贾宝山



HEUP 哈尔滨工程大学出版社
Harbin Engineering University Press

北京航空航天大学出版社
哈尔滨工业大学出版社

北京理工大学出版社
西北工业大学出版社



国防特色教材·核科学与技术

核能与核技术概论

主编 魏义祥 贾宝山

哈尔滨工程大学出版社

北京航空航天大学出版社 北京理工大学出版社
西北工业大学出版社 哈尔滨工业大学出版社

内容简介

本书对核工程与核技术专业的主要知识内容和应用领域进行了系统全面的介绍。全书除了将核物理基础及辐射防护内容作为公共基础外,重点对核能与核技术的基本原理和应用进行了全面分析,其中核能利用部分主要包括核裂变、核聚变、核燃料、核电厂、核动力、核武器;核技术应用部分主要包括加速器、核探测与核测量、放射医学与核医学、核地学、辐射成像、辐射加工、工业及农业应用等。丰富的内容便于读者对核科学技术的基本原理和应用有一个全面了解和较深入的认识。

本书内容力求系统全面,且深入浅出,有利于初学者对专业建立全面、准确、概括的认识,是大学本科低年级核工程与核技术类专业的专业概论课教材,同时也尽力为专业内外其他工程科技人员系统了解、学习核专业知识创造条件,可以作为专业培训教材或自学核专业的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

核能与核技术概论/魏义祥,贾宝山主编. —哈尔滨:哈尔滨工程大学出版社,2011.5

ISBN 978-7-5661-0124-2

I. ①核… II. ①魏…②贾… III. ①核能②核技术
IV. ①TL

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 091198 号

核能与核技术概论

主编 魏义祥 贾宝山

责任编辑 石岭

*

哈尔滨工程大学出版社出版发行

哈尔滨市南岗区东大直街 124 号 发行部电话:0451-82519328 传真:0451-82519699

<http://press.hrbeu.edu.cn> E-mail:heupress@hrbeu.edu.cn

哈尔滨市石桥印务有限公司印刷 各地新华书店经销

*

开本:787×960 1/16 印张:34.5 字数:749 千字

2011 年 7 月第 1 版 2011 年 7 月第 1 次印刷 印数:1500 册

ISBN 978-7-5661-0124-2 定价:70.00 元

《核能与核技术概论》编写组

主编 魏义祥 贾宝山

编者 (以姓氏笔画序)

王德忠	包成玉	邢宇翔	李 政	吴宏春
陈伯显	周四春	张大发	张化一	张志康
张建民	金永杰	林郁正	高 喆	贾宝山
桂立明	阎昌琪	曾 实	魏义祥	

前 言

20 世纪 50 年代党中央发出“向科学进军”的号召之后,核科学技术(原子能科学技术)就被人们视为一个“尖端而神秘”的新领域,人们常常把它与“两弹一艇”相联系。伴随着半个多世纪的发展和风雨,虽然人们对核科学与技术有了较多的了解,也对核能与核技术的应用有了切身的感受,但是不少人仍然感到了解不多,认识不深,即使是考入本专业的新生也常常存在不少误解。新世纪以来随着我国能源战略的调整和国民经济的发展,核能与核技术获得空前的重视和应用,不少人迫切希望了解这一学科,高等学校中也出现了兴办核工程与核技术专业的热潮,人们欢呼核科学技术的又一个春天到了。

目前我国还没有一部全面系统介绍核能与核技术应用的著作,这不利于学生准确、全面地认识本专业,也不方便有关科技人员了解、学习有关核知识。因此,教育部高等学校核工程与核技术专业教学指导委员会决定集中高校力量,编写一部《核能与核技术概论》,目的是使本专业低年级学生入学后对专业内容有一初步、概括的了解,建立正确的基本概念,破除核专业学习上的神秘感和恐惧感,培养专业学习的兴趣和信心,也为非本专业学生和关心本专业的人们提供一个了解核科学技术的途径。由于本书主要面对本科低年级学生,写作上希望强调概念,重视逻辑,争取做到循序渐进和深入浅出;在内容上希望突出重点,有所取舍,避免罗列公式和堆积数据。

核工程与核技术专业既具有理工结合的专业特点,又具有较多的专业应用方向。考虑到我国高校本专业的具体情况,为了满足不同专业方向的需要,本书简要介绍了核物理与辐射防护的基本概念和内容,重点按照核能与核技术的分类介绍了基本原理和主要应用。其中核能部分主要包括核电厂、核聚变、核燃料、核动力、核武器等;核技术部分主要包括辐射测量、粒子加速器、核地学、放射医学与核医学以及工、农业中的应用核技术等。希望读者对核科学技术的基本原理和应用领域有一个全面了解和深入的认识。

建议各高校核专业在本科低年级安排本课程,根据各自专业特点,在全面介绍主要内容基础上选择重点章节进行教学。教材在每章后列出了思考题供教学时参考。

本书较早列入编写计划,曾入选教育部普通高等教育“十五”国家级规划教材。本书较早列入编写计划,曾入选教育部普通高等教育“十五”国家级规划教材。本书较早列入编写计划,曾入选教育部普通高等教育“十五”国家级规划教材。

此为试读,需要完整PDF请访问: www.ertongbook.com

材,本次又入选国家国防科技工业局“十一五”国防特色规划教材,依据核科学与技术评审组审定的编写提纲编写。本书编者以清华大学工程物理系教授为主,联合了成都理工大学、哈尔滨工程大学、上海交通大学、西安交通大学、海军工程大学等高校十多位教授参加,每章节后分别列出了编者名单和所属学校。

本书编写后经中国原子能科学研究院陈叔平研究员和清华大学屈建石教授审阅,他们认真阅读了全书,提出了不少中肯的意见和建议,对全书的文字进行了仔细修改。本书成书过程中得到了教育部、国家国防科技工业局、清华大学等有关领导的大力支持,也得到了各有关高等学校的积极参与,限于篇幅还删节了已成文的部分章节内容,在此我们一并表示深深的感谢。限于编者的水平和经验,书中必定有不少错误和遗漏,敬请读者和同行指正。

编 者

2010年7月

目 录

第一部分 核物理基础

第 1 章 原子核物理的基本概念	3
1.1 原子核的基本性质	3
1.2 放射性衰变和衰变规律	11
1.3 原子核反应	19
1.4 核裂变和核聚变	24
思考练习题	33
参考文献	33

第二部分 核技术应用

第 2 章 核辐射探测与核信号测量	37
2.1 射线及其与物质相互作用	37
2.2 辐射探测的原理和主要的辐射探测器	46
2.3 核电子信号的处理与分析	53
思考练习题	72
参考文献	73
第 3 章 带电粒子加速器原理及应用	74
3.1 带电粒子加速器发展概况	74
3.2 带电粒子加速器原理	85
3.3 粒子加速器几个主要应用领域	109
思考练习题	120
参考文献	120
第 4 章 地质工作中的核勘查方法	122
4.1 核勘查方法概述	122
4.2 天然核方法在地质勘查中的应用	124
4.3 人工核方法在地质工作中的应用	138

4.4 核测井及其应用	155
思考练习题	164
参考文献	164
第5章 放射医学与核医学	166
5.1 放射诊断学	167
5.2 放射治疗学	184
5.3 核医学	200
思考练习题	217
参考文献	218
第6章 核技术的工农业应用	219
6.1 辐射成像	219
6.2 辐射型工业检测仪表	253
6.3 辐射加工与应用	267
6.4 核技术在农业中的应用	286
思考练习题	299
参考文献	300

第三部分 核能利用

第7章 核能利用的原理	303
7.1 核能的发现与发展历史	303
7.2 裂变反应堆的工作原理	310
7.3 核聚变装置的工作原理	320
思考练习题	328
参考文献	328
第8章 核能发电与核电厂	329
8.1 核电厂热力传输系统与类型	329
8.2 占统治地位的压水堆核电厂	334
8.3 其他重要类型核电厂	343
8.4 对各种先进堆型的探索	357
8.5 世界核电发展形势与中国核电发展战略	363
8.6 核电厂安全与事故对策	365

思考练习题	373
参考文献	373
第9章 可移动核动力	374
9.1 概述	374
9.2 舰船动力与核动力装置	376
9.3 民用核动力船	379
9.4 军用核动力舰船	383
9.5 舰船核动力发展	387
9.6 水下用小型核动力	393
9.7 空间核动力	400
思考练习题	409
参考文献	409
第10章 核武器	410
10.1 核武器概述	410
10.2 裂变核武器——原子弹	413
10.3 聚变核武器——氢弹	415
10.4 第三代代表性核武器——中子弹	417
10.5 放射性非核武器——贫铀弹	423
思考练习题	427
参考文献	427
第11章 聚变能的开发	428
11.1 等离子体物理简介	428
11.2 磁约束聚变	432
11.3 惯性约束聚变	441
11.4 其他途径的聚变	447
11.5 受控聚变研究进展和展望	450
思考练习题	454
参考文献	454
第12章 核燃料循环体系	455
12.1 核燃料循环体系	455
12.2 核资源及其利用	459

12.3 铀同位素分离	462
12.4 反应堆的燃料循环	481
12.5 乏燃料的后处理	485
12.6 高放长寿命核废物的嬗变处置	494
思考练习题	495
参考文献	496

第四部分 辐射防护

第13章 辐射防护与环境保护	501
13.1 人类生活环境中的辐射源及其水平	501
13.2 辐射对人体的生物效应	505
13.3 辐射防护和核安全基本原则	513
13.4 辐射防护标准及其安全评价	517
13.5 辐射防护的基本方法	527
13.6 辐射防护监测	532
思考练习题	538
参考文献	539

第一部分

核物理基础

第1章 原子核物理的基本概念

19世纪末,在1895,1896和1897年相继发现了X射线、放射性和电子,这三大发现揭开了近代物理的序幕,物质结构的研究开始进入微观领域。其中,1896年法国科学家贝可勒尔(Becquerel A H)发现天然放射性现象,这是人类第一次观察到核变化,通常人们把这一重大发现看成是核科学的开端。到20世纪50年代逐步形成了研究物质结构的三个分支学科,即原子物理、原子核物理和粒子物理。三者有独立的研究领域和对象,但又有紧密的关联。对我们的研究对象而言,我们将重点论述原子核物理这一领域。

1.1 原子核的基本性质

世界万物是由原子、分子构成的,每一种原子对应一种化学元素。例如,氢原子对应氢元素,氧原子对应氧元素。到目前为止,包括人工制造的不稳定元素,人们已经知道了一百多种元素了。

1911年卢瑟福(Rutherford R C)根据 α 粒子的散射实验提出了原子的核式模型假设,即原子是由原子核和核外电子所组成。从此以后,原子就被分成两部分来处理:核外电子的运动构成了原子物理学的主要内容,而原子核则成了另一门学科——原子核物理学的主要研究对象。原子和原子核是物质结构的两个层次,但也是互相关联又完全不同的两个层次。

电子是由英国科学家汤姆逊(Thomson J J)于1897年发现的,也是人类发现的第一个微观粒子。电子带负电荷,电子电荷的值为

$$e = 1.602\,176\,46 \times 10^{-19} \text{ C}$$

并且电子的电荷是量子化的,即任何电荷只能是 e 的整数倍。电子的质量为

$$m_e = 9.109\,381\,88 \times 10^{-31} \text{ kg}$$

原子在一般情况下呈电中性,原子核带正电荷,原子的正电荷全部集中于原子核上。

原子的大小是由核外运动的电子所占的空间范围来表征的,可以设想为电子在以原子核为中心、距核非常远的若干轨道上运行。原子的大小即半径约为 10^{-8} cm 的量级,以铝原子为例,其半径约为 $1.6 \times 10^{-8} \text{ cm}$,其密度 $\rho = 2.7 \text{ g/cm}^3$ 。

原子核的质量远远超过核外电子的总质量,因此原子的质量中心和原子核的质量中心非常接近。原子核的线度只有几十飞米($1 \text{ fm} = 10^{-15} \text{ m} = 10^{-13} \text{ cm}$),而密度高达 $10^8 \text{ t} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。原子核的性质必然对原子的性质产生一定的影响,例如原子光谱的精细结构。原子核的许多特性正是通过对原子或分子现象的观察来确定的。但也有许多性质仅仅取决于原子或原子核,例如物质的许多化学及物理性质,光谱特性基本上只与核外电子有关,而放射现象则主要归因于原子核。

下面将讨论原子核的一般性质,即原子核作为整体所具有的静态性质。本章着重讨论原子核的组成、电荷、质量、半径、稳定性等性质,对原子核自旋、磁矩、宇称和统计性质等较深入的问题不在此处展开讨论。如在今后的工作中遇到这些问题,可参考其他的核物理书籍。

1.1.1 原子核的组成及其稳定性

1896年贝可勒尔发现了铀的放射现象,这是人类第一次在实验室里观察到原子核现象。他发现用黑纸包得很好的铀盐仍可以使照相底片感光,实验结果说明铀盐可以放射出能透过黑纸的射线。随后,1897年居里夫妇(Curie P & M)发现放射性元素钋和镭。1903年,卢瑟福证实了铀盐放出的 α 射线就是氦核, β 射线就是较早发现的电子。1911年根据 α 粒子在金箔上发生大角度散射的实验事实,卢瑟福提出了原子的核式模型。

1. 原子核的组成及其表示

在发现中子之前,当时人们知道的“基本”粒子只有两种:电子和质子。因此,把原子核假定为由质子和电子组成的想法就非常自然,但从其一开始就遇到了不可克服的困难。

1932年查德威克(Chadwick J)发现中子,海森堡(Heisenberg W)立刻提出原子核由质子和中子组成的假设,而且被一系列的实验事实所证实。

中子和质子的质量相差甚微,它们的质量分别为

$$m_n = 1.008\,664\,92\,u$$

$$m_p = 1.007\,276\,46\,u$$

这里, u 为原子质量单位,1960年国际上规定把 ^{12}C 原子质量的 $1/12$ 定义为原子质量单位,即

$$1\,u = 1.660\,538\,73 \times 10^{-27}\,\text{kg} = 1.660\,538\,73 \times 10^{-24}\,\text{g} = 931.494\,013\,\text{MeV} \cdot c^{-2} \quad (1.1.1)$$

式中, c 为真空中的光速。

中子为中性粒子,质子为带有单位正电荷的粒子。在提出原子核由中子和质子组成之后,任何一个原子核都可用符号 ${}_Z^AX_N$ 来表示。右下标 N 表示核内中子数,左下标 Z 表示质子数或称电荷数,左上标 $A(A = N + Z)$ 为核内的核子数,又称质量数。元素符号 X 与质子数 Z 具有唯一确定的关系,例如, ${}^4_2\text{He}$, ${}^{16}_8\text{O}$, ${}^{238}_{92}\text{U}$,等等。实际上,简写 AX ,已足以代表一个特定的核素,左下标 Z 往往省略。 Z 在原子核中为质子数,在原子中则为原子序数。只要元素符号 X 相同,不同质量数的元素在周期表中的位置上相同,就具有基本相同的化学性质。例如, ${}^{235}\text{U}$ 和 ${}^{238}\text{U}$ 都是铀元素,两者只相差三个中子,它们的化学性质及一般物理性质几乎完全相同;但是,它们是两个完全不同的核素,它们的核性质完全不同。

我们先介绍表示原子核的一些常用术语。

(1) 核素(nuclide)

核素是指在其核内具有一定数目的中子和质子以及特定能态的一种原子核或原子。例

如, $^{208}_{86}\text{Tl}$, $^{208}_{82}\text{Pb}$ 是独立的两种核素, 它们有相同的质量数, 而原子核内含有不同的质子数; $^{90}_{38}\text{Sr}$, $^{91}_{39}\text{Y}$ 是原子核内含有不同的质子数和相同的中子数的独立的两种核素; $^{60\text{m}}\text{Co}$ 和 ^{60}Co 也应该看成独立的两种核素, 它们的原子核内含有相同的质子数和中子数, 但所处的能态是不同的。

(2) 同位素 (isotopes) 和同位素丰度

我们把具有相同质子数, 但质量数 (即核子数) 不同的核所对应的原子称为某元素的同位素。同位是指该同位素的各种原子在元素周期表中处于同一个位置, 它们具有基本相同的化学性质。例如, 氢同位素有三种核素: ^1H , ^2H , ^3H , 分别取名为氕、氘、氚。某些元素, 例如锰、铍、氟、铝等在天然条件下, 只存在一种核素, 称为单一核素而不能说它们只有一种同位素。某元素中各同位素天然含量的原子数百分比称为同位素丰度。例如天然存在的氧的同位素有三种核素: ^{16}O , ^{17}O , ^{18}O , 它们的同位素丰度分别为 99.756%, 0.039% 和 0.205%。

(3) 同质异能素 (isomers)

半衰期较长的激发态原子核称为基态原子核的同质异能素或同核异能素, 它们的 A 和 Z 均相同, 只是能量状态不同, 一般在元素符号的左上角质量数 A 后加上字母 m 表示。这种核素的原子核一般处于较高能态, 例如 $^{87\text{m}}_{38}\text{Sr}$ 称为 $^{87}_{38}\text{Sr}$ 的同质异能素, 其半衰期为 2.81 小时。同质异能素所处的能态, 又称同质异能态, 它与一般的激发态在本质上并无区别, 只是半衰期即寿命较长而已, 上面所说的 $^{60\text{m}}\text{Co}$ 就是 ^{60}Co 的同质异能素。

2. 原子核的稳定性及核素图

根据原子核的稳定性, 可以把核素分为稳定的核素和不稳定的放射性核素。原子核的稳定性与核内质子数和中子数之间的比例存在着密切的关系。

正如在化学和原子物理学中把元素按原子序数 Z 排成元素周期表一样, 我们可以把核素排在一张核素图上。核素图与元素周期表的不同之处在于, 除了电荷数 (即核内质子数) Z 外, 还必须考虑中子数 N 。

这样, 核素图就必须是 N 和 Z 的两维图。图 1.1.1 是核素图 (部分), 以 N 为横坐标、 Z 为纵坐标 (也可以反过来表示), 然后让每一核素对号入座。图 1.1.1 中, 每一格代表一个特定的核素。带有斜线条和加黑的核素为稳定核素, 格中百分数为该核素的丰度。白底的核素为不稳定的放射性核素, 格中 α , β^- , β^+ 表示该核素的衰变方式, 箭头指向为衰变后的子核, 时间表示半衰期的长短。

在现代的核素图上, 既包括了天然存在的 332 个核素 (其中 280 多个是稳定核素), 也包括了自 1934 年以来人工制造的 1 600 多个放射性核素, 一共约 2 000 个核素。

为了从核素图中得到更多的有关核稳定性的认识, 有人绘制了 β 稳定核素分布图, 如图 1.1.2 所示, 图中横坐标为质子数 Z , 纵坐标为中子数 N 。在图 1.1.2 中, 在同一垂直线上 (即 Z 相同) 的所有核素是同位素; 在同一水平线上 (即 N 相同) 的所有核素是同中子异荷素; 在 N 和 Z 轴上截距相等的直线上 (即 A 相等) 的所有核素称为同量异位素。

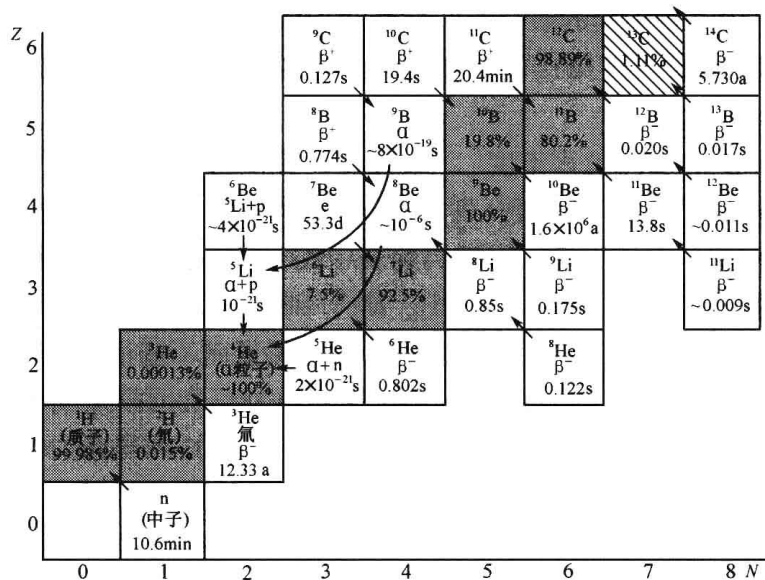
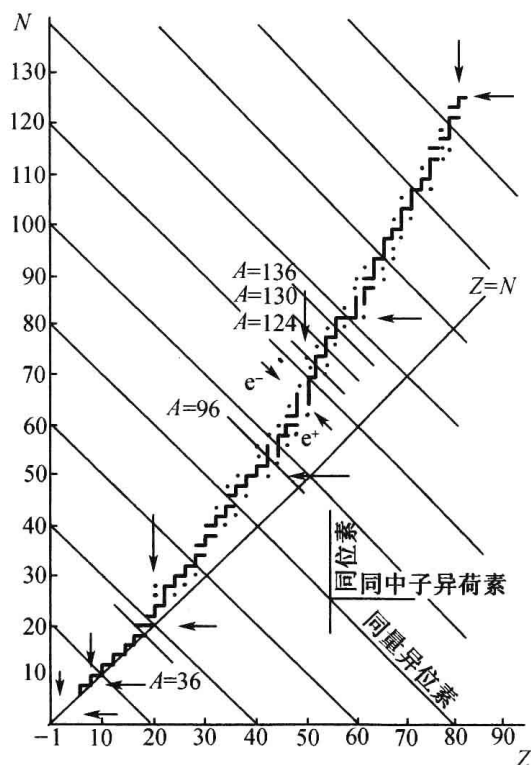


图 1.1.1 核素图(部分)

由图 1.1.2 可以发现,稳定核素几乎全落在一条光滑曲线上或紧靠曲线的两侧,我们把这条曲线称为 β 稳定曲线。由图 1.1.2 可见,对于轻核,稳定曲线与直线 $N = Z$ 相重合;当 N, Z 增大到一定数值之后,稳定线逐渐向 $N > Z$ 的方向偏离。在 Z 小于 20 时核素的 N 与 Z 之比约为 1, Z 为中等数值时 N 与 Z 之比约为 1.4, Z 等于 90 左右时 N 与 Z 之比约为 1.6。相对于稳定曲线而言,中子数偏多或偏少的核素都是不稳定的。位于稳定线上方的核素为丰中子核素,易发生 β^- 衰变;位于稳定线下方的核素为缺中子核素,易发生 β^+ 衰变。

由于库仑力是长程相互作用力,它能作用于核内的所有质子,正比于 $A(A-1)$;而核力是短程力,只作用于相邻的核子,正比于 A 。随着 Z 的增加, A 也增加,库仑相互作用的影响增长得比核力快,要使原子核保持稳定,必须靠中子数的较大增长来减弱库仑力的排斥作用,因此随着 $Z(A)$ 的增长,稳定核素的中子

图 1.1.2 β 稳定核素分布图

数比质子数越来越多,越来越大地偏离 $Z=A$ 直线,稳定核素不复存在,当 Z 大到一定程度时,连长寿命放射性核素也不复存在,这样核素在目前的已知核素区慢慢就终止了。

在 1966 年左右,理论预测在远离 β 稳定曲线的 $Z=114$ 附近,存在一个超重稳定元素“岛”。近十年来,由于重离子加速器的大量建造,重离子核反应得以广泛实现,为实现和验证这一理论提供了有效的工具。

原子核的稳定性还与核内质子和中子数的奇偶性有关,自然界存在的稳定核素共 270 多种,若包括半衰期 10^9 年以上的核素则为 284 种,其中偶偶(e-e)核 166 种;偶奇(e-o)核 56 种;奇偶(o-e)核 53 种;奇奇(o-o)核 9 种。

根据核内质子数和中子数的奇偶性可以看出:偶偶核是最稳定的,稳定核最多;其次是奇偶核和偶奇核;而奇奇核最不稳定,稳定核素最少。

事实表明,当原子核的中子数或质子数为 2,8,20,28,50,82 和中子数为 126 时,原子核特别稳定,我们把上述数目称为“幻数”。

1.1.2 原子核的大小

一个原子的线度约为 10^{-8} m,根据卢瑟福用 α 粒子轰击原子的实验得知原子核的线度远小于原子的线度。若想象原子核近似于球形,则就有原子核半径的概念。由于原子核的半径很小,需要通过各种间接的方法进行测量。由于所用方法的不同,测出的原子核半径的意义也不相同,产生了核力半径和电荷分布半径之分。但无论如何,用各种方法得出的结果是相近的。

在历史上,最早研究原子核大小的是卢瑟福和查德威克。他们用质子或 α 粒子去轰击各种原子核,根据这一方法,发现原子核半径遵从如下规律:

$$R = r_0 A^{1/3}, \quad r_0 = 1.20 \text{ fm} \quad (1.1.2)$$

其后出现了许多其他更精确的测量方法,如用中子衍射截面测量原子核的大小(核力半径),用高能电子散射测量原子核的大小及电荷形状因子(电荷分布半径),等等。并依据所采用的方法,分别给出电荷半径或核力半径。

总结以上的实验结果,原子核半径 R 与 $A^{1/3}$ 成正比,而其比例常数 r_0 的最新数据为

$$R = (1.20 \pm 0.30) A^{1/3} \text{ fm (电荷半径)} \quad (1.1.3)$$

$$R = (1.40 \pm 0.10) A^{1/3} \text{ fm (核力半径)} \quad (1.1.4)$$

这时原子核的密度——单位体积内的核子数为

$$\rho_N = \frac{A}{V} = \frac{A}{\frac{4}{3}\pi R^3} = \frac{3}{4\pi r_0^3} \quad (1.1.5)$$

从(1.1.5)式可见, ρ_N 为一常数。表明只要核子结合成原子核,其密度都是相同的,这就形成核物质的概念。将 $r_0 = 1.20 \text{ fm}$ 代入,可得

$$\rho_N = 2.84 \times 10^8 \text{ t/cm}^3$$