

高等学校教学参考书

原子核物理学

颜一鸣 主编

金星南 审校

高等学校教学参考书

原子核物理学

(初版)

颜一鸣	主编	金星南	审校
陈泽民			
尚仁成	编		
范国英			
张 玫			

原子能出版社

内 容 简 介

本书共分十三章,包括核子-核子相互作用、核结构、核衰变及核反应等内容。论述过程中突出物理图象,注意到实验结果的理论分析和概括,着重阐明理论模型提出的依据、物理思想、主要推论和实验检验。对重要公式做了推导。

本书可作为核物理和核技术专业研究生核物理课的主要参考书,亦可供有关核专业的科研人员、高校教师及高年级大学生参考。

高等学校教学参考书

原子核物理学

(初版)

颜一鸣 主编 金星南 审校

陈泽民 尚仁成 范国英 张 玫 编

原子能出版社出版

(北京2108信箱)

国防科工委印刷厂印刷

新华书店总店科技发行所发行·新华书店经售

☆

开本 $787 \times 1092^{1/16}$ ·印张40·字数998千字

1990年6月北京第一版·1990年6月北京第一次印刷

印数1—1000

ISBN7-5022-0240-4

TL·91(课) 定价: 7.75元

前 言

本书是根据1983年原核工业部教育司召集的“黄山教材会议”决定编写的，1984年6月在北京审定了书的编写提纲。在北京师范大学低能核物理研究所和清华大学现代应用物理系曾经向研究生讲授过本书的部分内容。

本书是作为核物理和核技术有关专业研究生核物理课的主要参考书编写的，目的在于使研究生在学完大学本科课程后进一步深入掌握核物理的基本知识、有关的基础理论，了解原子核物理的发展和现状，了解核物理的新进展，为学生日后在这一领域独立开展研究工作开阔眼界，打好基础。限于篇幅和课程要求，本书只阐述基础核物理（低能）而未涉及应用。讲述中力图突出物理图象，注意实验成果的理论分析和概括，着重阐明提出理论模型的依据、物理思想、主要推论、应用范围和实验检验。对重要的公式都作了推导。

本书共分十三章，包括核子-核子相互作用、核结构、核衰变和核反应等内容。第一章从实验和理论的结合出发阐述了核子-核子相互作用的基本性质，阐述范围大体上以后续章节的需要为度。第二章到第四章介绍了壳模型和集体模型以及它们之间的关联，从唯象角度阐述了有关理论模型及其发展，进行了较系统的推导，并着重和实验结果作比较。在介绍模型进展时适当引用了一些微观理论概念，如H-F自洽场、对关联、准粒子态等。第五章和第六章阐述了现代对 β 衰变的认识， γ 跃迁的基本理论，原子核的电磁特性和 β - γ 谱学在核结构研究中的作用，对各种模型的检验。第七章到第十一章阐明了核反应的基本概念，从碰撞理论的角度介绍了核反应的量子力学描述，重点阐述了S-矩阵理论，介绍了几种最重要的核反应机制模型：黑体模型、光学模型、直接反应模型、复合核反应和平衡前发射模型等，并试图反映出核反应模型理论的新进展，讨论如何用核反应进行核结构研究。第十二章介绍了若干比较特殊的重要核反应，如巨共振和极化反应等。第十三章较系统地介绍了二十余年来蓬勃发展的重离子核反应，这是当代核物理发展的前沿之一。

本书第一章至第四章（第三章第五节除外）、第七章至第十二章、附录A、B、C由北京师范大学颜一鸣编写，第五章由清华大学尚仁成编写，第六章和附录D、E、F由清华大学陈泽民编写，第十三章由北京师范大学范国英编写，第三章第五节由清华大学张玫编写。由原子能科学研究院金星南撰写绪论，原子能出版社刘元敏绘图，全书由颜一鸣主编。阅读本书的学生应修过量子力学和数理方法，最好学过高等量子力学。

1986年10月召开了《原子核物理学》一书的审稿会。会议由金星南主持，黄胜年、马中玉、卢希庭、丁肇忠、裘志洪和赵守林同志参加了审稿，他们对本稿作了逐章审阅，提出了许多宝贵的意见和建议，在此我们向这些同志致以衷心的感谢。

由于编者的学识所限，错误不妥之处在所难免，尚祈读者指正。

编者

1989年10月于北京

目 录

绪 论	1
第一章 原子核的基本性质.....	4
第一节 原子核的基本知识.....	4
一、原子核的组成和大小.....	4
二、原子核的质量和结合能.....	6
第二节 原子核的能态及其特征量.....	8
一、原子核的能态和原子核谱学.....	8
二、自旋和统计.....	10
三、原子核的磁矩.....	13
四、原子核的电四极矩.....	15
第三节 空间和时间的对称性.....	17
一、空间反映、宇称.....	17
二、时间反演.....	19
第四节 同位旋对称性.....	20
一、核力的电荷对称性和电荷无关性.....	20
二、同位旋.....	20
三、原子核的同位旋.....	22
四、原子核理论中的同位旋不变性问题.....	22
第五节 核子-核子相互作用.....	24
一、核子-核子相互作用的若干实验结果及其分析.....	24
二、介子交换势.....	39
三、普遍唯象核子-核子相互作用势.....	41
参考文献	45
第二章 壳模型.....	46
第一节 核模型的作用.....	46
第二节 壳模型的实验依据.....	47
一、幻核的实验依据.....	48
二、单粒子壳模型的物理构想.....	49
第三节 单粒子壳模型.....	50
一、核势阱.....	50
二、单粒子能级.....	51
三、自旋-轨道耦合.....	53
四、壳层间距.....	57
五、通用的单粒子核势阱.....	58
六、单粒子壳模型的某些应用.....	59
第四节 独立粒子壳模型.....	62
一、组态和组态混合.....	63
二、大容量壳模型计算.....	68

三、Hartree-Fock 自洽场.....	72
第五节 准粒子模型 和对关联.....	73
一、原子核中的对关联现象.....	73
二、核的超流模型.....	75
三、超流模型的若干应用.....	80
参考文献.....	86
第三章 集体模型.....	87
第一节 引言.....	87
第二节 液滴的振动.....	90
第三节 球形核的表面振动.....	94
一、表面振动的描述.....	94
二、偶偶核的振动谱.....	97
三、均方形变因子.....	98
第四节 变形核的普遍理论和偶偶核的能谱.....	100
一、变形核的普遍理论.....	100
二、变形偶偶核的能谱、振动-转动相互作用.....	103
三、非轴对称核的能谱.....	109
第五节 相互作用玻色子模型 (IBM)	113
一、模型的建立和基本假设.....	113
二、IBM的哈密顿量.....	115
三、动力学对称性及三种极限.....	115
四、模型的发展.....	125
参考文献.....	125
第四章 变形壳模型.....	127
第一节 综合模型概念.....	127
第二节 弱耦合模型.....	128
第三节 强耦合模型.....	130
一、强耦合模型的一般描述.....	130
二、变形壳层结构.....	132
三、奇变形核的能谱.....	142
四、柯里奥利力.....	144
第四节 原子核的高自旋态.....	148
一、高自旋态的特点.....	148
二、回弯现象.....	150
三、高自旋态的回弯和晕转带的机制研究、推转模型.....	153
第五节 综合模型中的若干物理量.....	158
一、核磁矩.....	159
二、电四极矩.....	160
三、转动惯量.....	164
参考文献.....	168
第五章 原子核的电磁相互作用与 γ 跃迁.....	170

第一节 引言	170
一、跃迁几率与末态能级密度的一般讨论	170
二、关于原子核与电磁场相互作用的一般讨论	172
第二节 电磁场的平面波解	175
第三节 电磁场的球面波解	179
第四节 电磁场的量子化	183
第五节 原子核的 γ 跃迁几率	185
第六节 原子核 γ 跃迁的选择定则	190
一、自旋和宇称的选择定则	190
二、同位旋的选择定则	192
第七节 γ 跃迁与核结构	195
一、单粒子模型的电磁跃迁及Weisskopf估计	196
二、表面振动模型中的电磁跃迁	203
三、集体转动与电磁跃迁	206
四、关于核芯激发模型及其参数化方法	209
第八节 γ 跃迁中的角分布与角关联	212
一、辐射场的多极展开	212
二、 γ 辐射的角分布	214
三、级联 γ 跃迁中的角关联	217
四、混合跃迁的角关联	221
五、粒子- γ 角关联	225
第九节 内转换和内电子对产生	230
参考文献	236
第六章 β 衰变和弱相互作用	237
第一节 引言	237
一、 β 衰变的类型	237
二、自然界的相互作用	237
三、研究 β 衰变的意义	238
第二节 β 衰变的相互作用形式	239
一、流-流相互作用	239
二、跃迁弱流的形式及可能的哈密顿量	242
三、弱哈密顿量的普遍形式	243
第三节 β 跃迁的分类和选择定则	246
第四节 容许跃迁	251
一、跃迁几率和 β 谱形	252
二、电子-中微子角关联	256
三、 $fT_{1/2}$ 值及耦合常数	259
第五节 极化原子核的 β 衰变和电子、中微子的极化	262
一、极化 ^{60}Co 实验	264
二、二分量中微子理论	246
三、中微子的极化	267

四、 β 粒子的极化	269
第六节 极化中子的衰变和 β 衰变中的时间反演不变性	272
一、时间反演不变性及其对耦合常数的要求	272
二、CPT 定理	273
三、极化中子的 β 衰变	274
四、 β 衰变相互作用小结	277
第七节 禁戒跃迁	278
一、源的速度效应与推迟效应	278
二、禁戒跃迁的谱形	279
三、关于赝标量相互作用	281
第八节 原子核矩阵元	282
一、镜像核衰变的矩阵元	282
二、变形核的 β 跃迁	286
参考文献	288
第七章 核反应的基本概念	290
第一节 运动学和守恒定律	290
一、核反应概念	290
二、能量守恒	291
三、动量守恒	291
四、质心坐标系和实验室坐标系	292
第二节 截面及其测量	296
一、核反应截面	296
二、激发曲线	298
三、截面的实验测量	298
第三节 核反应机制	301
一、复合核过程和直接反应	303
二、复合核共振	305
三、反应时间	306
四、能谱	307
五、分支比	308
六、角分布的特征	308
参考文献	309
第八章 核反应的量子力学描述	311
第一节 波函数和截面	311
一、波函数的形式	311
二、微分截面	314
第二节 薛定谔方程	314
一、薛定谔方程的耦合方程形式	315
二、势散射薛定谔方程的积分方程形式	316
三、玻恩近似和扭曲波玻恩近似	317
四、普遍的碰撞积分方程	318
第三节 分波分析	319

一、分波的意义	319
二、分波展开	320
三、入射波和出射波	321
四、截面的分波表达式	322
第四节 S 矩阵理论	322
一、S 矩阵的定义	322
二、S 矩阵的基本性质	323
三、S 矩阵和截面的关系	326
第五节 S 矩阵理论的若干应用	327
一、弹性散射和非弹性过程截面的关系	327
二、势散射的相移分析	329
三、总截面和光学原理	330
四、库仑作用效应	331
第六节 有自旋粒子的碰撞	333
一、自旋和道自旋	333
二、有自旋时的碰撞道	335
三、散射波函数和散射矩阵	335
四、核反应中的角分布	336
五、截面和逆反应	337
第七节 散射的经典和半经典描述	339
一、粒子的经典弹性碰撞	339
二、半经典近似	342
三、冲量近似	344
参考文献	346
第九章 黑体模型和光学模型	347
第一节 黑体模型	347
一、分波和强吸收	347
二、衍射和强吸收散射	350
三、非弹性散射的强吸收	353
第二节 光学模型	356
一、引言	356
二、中子截面中的宽共振	357
三、光学模型截面的计算	360
四、光学势阱参数	367
五、实验测量结果的光学模型分析及光学模型的应用	373
六、光学模型的进展	378
参考文献	381
第十章 直接反应	382
第一节 直接反应的半经典描述	382
第二节 微扰理论和玻恩近似	383
一、平面波玻恩近似	383
二、扭曲波玻恩近似	385

第三节 多步过程和强耦合	404
参考文献	412
第十一章 复合核反应	413
第一节 复合核	413
第二节 核反应的共振现象	414
一、共振现象的产生	415
二、单能级共振公式 (B-W 公式)	419
三、中子截面的共振	425
四、共振参数的统计分布	428
第三节 复合核的连续区描述	431
一、有效截面按共振能级的统计平均	431
二、复合核的形成和衰变	433
三、H-F理论的改进	437
四、复合核衰变的蒸发模型	441
第四节 低能区的光学模型和强度函数	447
第五节 $\mathcal{R}$ 矩阵理论	450
一、 $\mathcal{R}$ 矩阵理论	450
二、 $\mathcal{R}$ 矩阵理论的应用	455
第六节 涨落现象	461
第七节 中间结构和平衡前反应	467
一、核反应中的中间结构和门槛态	467
二、激子模型	469
三、原子核反应的多步理论	472
参考文献	475
第十二章 若干其它核反应	477
第一节 原子核大小和核物质分布	477
一、库仑散射和卢瑟福公式	477
二、原子核的电荷分布	480
三、原子核物质密度分布	486
第二节 同位旋相似态	488
一、同位旋多重态	488
二、电荷交换反应中的同位旋相似态	489
三、Lane 方程	490
四、相似态共振	493
五、相似态共振的精细结构	498
第三节 巨多极共振	501
一、巨多极共振的实验现象	501
二、巨共振的核反应机制	512
三、巨共振的衰变	516
第四节 核反应中的极化	519
一、极化现象	519

二、极化的量子力学描述	522
三、极化和若干相互作用	530
参考文献	538
第十三章 重离子核反应	541
第一节 概述	541
一、碰撞参量和重离子核反应的分类	542
二、重离子相互作用势	543
三、反应总截面	546
第二节 库仑激发	547
一、一般概述	547
二、激发截面	549
三、多重激发	550
四、在库仑场中的形变和敲碎	552
第三节 弹性散射	553
一、散射截面的振荡结构和重离子反应的强吸收及强库仑相互作用的特性	553
二、中间结构与准分子态	558
三、背散射现象和弹性转移反应	559
第四节 转移反应	562
一、转移反应的截面和角分布	563
二、Q窗效应	565
第五节 深度非弹性散射	568
一、实验情况	569
二、经典描述	573
三、动能耗散与各物理量的弛豫	575
四、经典的摩擦模型	577
五、唯象的输运理论	580
六、含时间的 Hartree-Fock 理论 (TDHF)	584
第六节 全熔合反应	585
一、全熔合截面	586
二、全熔合的限制	590
三、超重元素	594
四、复合核的退激发	595
参考文献	598
附录	599
附录A C-G系数和 Racah 系数	600
附录B 刚体转动和转动矩阵	606
附录C 张量算符	610
附录D 狄喇克方程	613
附录E 核素性质表	622
附录F 常用物理常数	630

绪 论

人们对原子核的研究已经有了90多年的历史。1896年贝可勒尔发现天然放射性现象。1911年卢瑟福根据 α 粒子与原子大角度散射的事实,证明在原子的中心存在原子核,又于1919年在 α 粒子轰击氮引起的人工蜕变中发现质子。1932年Chadwick论证了原子核中中子的存在。这些卓越的成就奠定了原子核物理学的基础。

30年代是原子核物理学的大发展时期。Cockcroft与Walton的高压倍加器,Vander Graaff的静电加速器,Lawrence与Livingston的回旋加速器先后建成;各种探测器在这个时期有新的改进,改进了原子核物理学的实验研究手段。人们开始大规模地有系统地做原子核反应的研究工作,积累了大量的实验数据。

费密等用中子照射各种原子核,开始人工合成放射性核素;Hahn与Strassmann等人发现铀原子核的裂变(1938年),费密建立了第一个原子反应堆(1942年),开拓了核能利用与核技术的各种应用前景。

为了研究,掌握当时所观察到的大量实验事实,尼·玻尔于1936年提出原子核的复合核模型,以说明所观察到的核反应现象,1939年又用原子核的液滴模型来解释原子核的裂变。这些成就使人们认识到原子核的结构与原子结构迥然不同。原子是由结构疏松的原子核与电子组成,原子核内核子的结合是十分紧密的。30年代初Elssasser与海森堡等人提出的原子核内壳的概念几乎被遗忘了。1948年M. Mayer根据大量实验事实,论证原子核内核子是成壳的,她加进了核子作用力的自旋-轨道耦合,改进了原来的原子核壳层模型,解释了大量的实验数据,充实了原子核壳模型理论。与此同时A. Bohr发展了以原子核的振动和转动两种运动形式相结合的原子核的集体模型,成功地解释了另一部分壳模型所不能解释的实验结果。实际上原子核的运动是十分复杂的,有很多实验结果不是仅用壳模型或集体模型可以解释的。在原子核内核子的单粒子运动经常与原子核的集体运动耦合起来,产生一些特殊的性质,于是又提出了原子核的综合模型。根据这些模型可以有效地描述原子核结构在低激发状态下的规律。A. Bohr是将原子核的集体运动中的振动模式与转动模式分别描述的。Arima与Iachello在1975年用群论方法统一描写这两种运动模式,提出了相互作用玻色子模型。用这种模型成功地给出原子核的低激发态性质。

在核反应方面,除了尼·玻尔的复合核反应机制以外,在50年代初发现了原子核的直接反应机制。这种反应机制最初是在氘的削裂反应中认识到的,后来发现它也存在于原子核的弹性散射、非弹性散射、转移反应、敲出反应中,是一种较普遍的反应机制。

根据对核反应数据的系统研究,Weisskopf等人建立了光学模型。利用核反应机制与光学模型,人们已成功地分析了大量核数据,由此更深一步了解了原子核的运动规律。

上面所讲的直接反应机制与复合核反应机制是两种极端的情况。直接反应机制描述入射粒子与原子核碰撞之后、经历很短时间的、直接从始态到末态的一种反应过程。复合核反应机制所描述的过程,则是入射粒子被原子核俘获之后,经过相当长的时间(与粒子渡越原子核的时间相比)到达某一平衡状态再发射粒子或 γ 射线的过程。在这两种反应机制之间存在着

中间状态下的反应机制，例如门槛态的衰变，平衡前反应等等。

核结构与核反应存在着紧密的联系，通过核反应可以获得核结构的知识，由核结构的知识可以预言核反应的趋势。例如由核内核子对关联的存在，可以预言某些原子核，双核子转移的反应截面应有显著的增强；又如由于原子核的集体振动在核反应中能显现出来，所以在核反应的激发曲线上能观察到很宽的共振峰（巨共振）等。

50年代后期，加速器向两个方向发展。一个方向的发展是提高加速粒子的能量。30年代的加速器，只能将质子加速到MeV量级，而现在已提高到1000GeV量级。另一个方向的发展是提高加速粒子的质量，50年代以前的加速器都是加速p、d、t、 α 等质量较轻的粒子，而现在已能对从较轻的质子起直到较重的铀离子的各类离子进行加速。加速器在这两个方面的发展促进了原子核物理领域内的中高能核物理与重离子物理研究的开展。

除了加速器的进展以外，又建成了极化离子源，改进了探测技术，使用了半导体探测器等新型探测器；近20年来在核物理实验中广泛使用了电子计算机，建立了各种数据测量、获取和处理系统。这些都把原子核物理的研究推进到一个新的阶段。

高能粒子具有较短的德布罗意波，所以它是原子核的良好探针，能够对原子核的性质给出较精确的信息。高能粒子的另一特点是当它与另一粒子碰撞时，能产生新粒子，能形成新的原子核，如 Λ 超核、 Σ 超核等；当它与核内核子碰撞时，也能使核子激发，以致可使人们研究核子激发态在核内的行为，甚至可以研究组成核子的夸克对原子核性质的影响等。

重离子物理有很多独具的特点，如通过重离子反应可以产生高自旋态的原子核，高自旋态原子核的特性与普通核有着很大的差别；深度非弹性碰撞是重离子碰撞下所特有的现象，可供研究核子在核物质中输运的一些特性；重离子的熔合反应是获得新核素的有效手段；超高能重离子碰撞可成为提供研究原子核内新自由度的一个好的场所。

以上所举的一系列事实，说明原子核物理学是一门内容十分丰富，并且新现象还在继续不断发现的一门生气蓬勃的学科。

核物理的发展对于其它基础学科的发展也有巨大的影响。众所周知，粒子物理学直接诞生于高能宇宙射线和在高能加速器上关于粒子束与原子核相互作用的研究，现在已成为认识物质结构的前沿学科。天体演化是自然科学中人类对客观世界认识的另一基本课题。几十年来，通过对核反应和核衰变的研究，以及人工合成各种核素，人们逐步了解到核过程是天体演化的基础过程，由此产生了天文学的新的分支——核天文学。核技术的应用对近30年原子分子物理的新发展有重要的促进作用。同样，其它物理学科，如固体物理、光学、原子物理等以及化学、工程技术、电子学的发展也促进了原子核物理的发展。

核物理是一门基础物理学科，但它的发展一开始就和核技术的应用紧密相联。1938年核裂变现象被发现之后，它在军事上的应用——原子弹的研制方面具有头等重要的意义，成为世界各大国激烈竞争的领域。核武器的发展和竞争给予二次世界大战后国际社会的政治生活以深刻的影响。近30余年，核能和核技术在国民经济各个领域的应用和进展非常迅速，几乎渗透到所有部门，以致核技术的应用已成为国民经济现代化水平的重要标志之一。重核的裂变与轻核的聚变是核能的主要来源。核能在能源中的地位堪与煤、石油并列。重核的裂变已为人类所掌握，现在正在努力试图控制和掌握轻核的聚变，已经取得了不小的进展。各种辐射源和辐射技术在工农业各部门得到了广泛的应用，例如辐射加工、辐射食品保藏、辐射育种、离子束材料改性等等。形成了一批和核科学有关的边缘学科，如核医学，核工程，核地

球物理探矿等。核分析技术，如核磁共振、穆斯鲍尔效应、中子与带电离子活化分析、离子背散射、射线诱发的X射线分析、正电子湮灭等在材料科学、环境科学、生命科学、地球科学、考古学、法医学中得到越来越广泛的应用。

总之，核物理学无论在基础科学研究，或是社会文化建设与经济建设中都起着重要作用，是核技术发展的基础。

提供给读者的这本《原子核物理学》是作为核物理和核技术专业以及其它有关的核科学、工程技术各学科的研究生学习、阅读的参考书而编写的。所编内容包括原子核物理学的基本原理及近年来的一些新成就，包括原子核的基本性质，核子-核子相互作用，原子核结构，核衰变及核反应。本书偏重于低能核物理实验内容，收集了较丰富的实验结果，并从理论上阐明这些实验事实。由于本书篇幅的限制，对重离子物理仅作简略的介绍，对中、高能核物理则未曾涉及。

这本书的出版如果能对专门从事研究低能核物理的人员，以及从事核科学、工程技术人员获得原子核物理的基本知识有所裨益，编写者将感到欣慰，因为这也是编写本书的一个目的。

第一章 原子核的基本性质

第一节 原子核的基本知识

一、原子核的组成和大小

原子核的发现可以追溯到本世纪初。1906—1912年间卢瑟福及其助手根据金属对 α 粒子散射的实验结果提出了原子核的行星模型。这就是著名的卢瑟福散射实验（具体描述见第十二章第一节）。他所使用的方法至今仍是核分析技术的一个重要手段。这个实验的分析表明原子中有一个核心——原子核。原子核带正电并且集中了几乎全部（ $>99.95\%$ ）的原子质量。原子几乎是透明的，核半径大致为 10^{-14} — 10^{-15}m ，而外围的原子电子壳层的特征长度则为 $\approx 10^{-10}\text{m}$ 。要将两个电子从氢原子中分离出来只需 79eV 的能量，而要将氢原子核打散，则需 28MeV 的能量，即原子核结合能比原子结合能高约100万倍。这使得我们在研究原子现象时，可以将原子核视为质点；而在研究原子核结构和反应时，几乎可以忽略原子的电子壳层的影响。只有在一些特定的超精细结构现象中才能觉察到外围电子影响的存在。

任一原子核有它的特征物理量来标志，它们是：

- 1) 原子核的质量数 A 和原子序数 Z ；
- 2) 表征原子核大小的核半径 R 和原子核对球状的偏离 $\delta R/R$ ；
- 3) 原子核结合能 E_B ，自旋 I 和宇称 π ；
- 4) 表征原子核电磁特性的量：均方电荷分布半径 $\langle R^2 \rangle$ ，核磁矩 μ ，电四极矩 Q_2 等；
- 5) 原子核的统计；
- 6) 原子核的同位旋。

这些量也称为原子核的静态特征量。本章将分别对上述原子核的特征物理量作简单的介绍。

原子核带正电。各种原子核所带的电荷都是氢原子核电荷的整数倍，等于 Ze 。 e 的绝对值为电子电荷的值。 Z 称为原子序数，它决定原子在元素周期表中的位置。所有原子核的质量都接近氢原子核质量的整数倍，但有显著的差异。这个整数称为原子核的质量数，我们用 A 来表示。具有特定质量数、原子序数和核能态，而且其平均寿命长得足以被观测的一类原子称为核素。 Z 相同而 A 值不同的核素称为同位素， A 相同而 Z 值不同的称为同质异位素。

最轻的原子核是氢原子核，又称为质子。1919年卢瑟福用 α 粒子轰击氮原子核时得到了质子^[1]，从而证明了质子在其它原子核中的存在。可以设想原子核的组成成分中有质子。

但是原子核不能仅由质子组成。已知许多同位素的 A 值差别相当大。例如，氢有三种同位素：氕、氘和氚，它们的质量比为1:2:3。人们根据放射性射线中有 β 射线（即电子组成的射线），曾经设想原子核可能由质子和电子组成，原子核中有 A 个质子和 $(A-Z)$ 个电

子。但是这个假说产生了一系列原则性的困难，例如 ${}^4\text{N}$ 核是服从玻色统计的，而如果 ${}^4\text{N}$ 由质子与电子组成，即由21个服从费密统计的粒子组成，则 ${}^4\text{N}$ 应服从费密统计，所以原子核不可能由质子和电子组成。关于原子核的组成成分的问题在1932年得到了解决。在这一年中由居里夫妇发现^[2]，并由Chadwick论证了中子的存在^[3]。尔后，有人又对中子的性质作了研究。研究表明中子的质量与质子的大致相等（前者稍重），它不带电荷，自旋为1/2。有关中子特性的研究至今仍然是核物理和粒子物理的重要课题。紧接着中子的发现，德国的海森堡和苏联的Иваненко分别提出了原子核由质子和中子组成的假说^[4,5]。这个假说解决了质子-电子假说不能解决的困难，且为以后的大量实验所证实。现在大家都知道，一个质量数为 A 的原子核由 Z 个质子和 $N=A-Z$ 个中子组成。中子和质子有很多特性彼此类似，又是组成原子核的两种基本粒子，它们统称为核子。

在知道了原子核的组成以后，很自然要去了解核的大小和形状。用不同的方法可以测定原子核的电荷和质量分布。人们经常利用强相互作用的效应来了解原子核的大小和形状，这可以通过 π 介子、核子、 α 粒子等和原子核发生作用来测量核内核物质的分布。也可以利用带电粒子（如电子、 μ 子等）和原子核的电磁相互作用来研究原子核内的电荷分布等。我们将在第十二章第一节中介绍原子核大小的测量问题，这里只说明，大量的实验结果表明，核内核物质密度大体为常数，而在表面层很快地降为零。在球形核中，核物质的径向分布通常可以用费密分布来描述：

$$\rho(r) = \rho_0 \{1 + \exp[(r-R)/a]\}^{-1} \quad (1.1-1)$$

图1.1给出了费密分布的示意图。可以看出核物质密度在中心部分几乎是均匀的， a 是表示模糊边界宽度的特征量。将 R 定义为由核心至核物质密度降为 $0.5\rho_0$ 处之距离，则 R 大致为

$$R = R_0 A^{1/3} \quad (1.1-2)$$

对于原子核中的质子分布（即核的电荷分布）， $R_0 \approx 1.1 \times 10^{-15} \text{m} = 1.1 \text{fm}$ 。 π^- 和 π^+ 介子对原子核的散射以及 (t, d) 型直接反应的研究结果表明中子分布半径略大于质子分布半径。(1.1-2)式表明原子核体积 $\propto A$ ，即核密度为常数，和核素无关。

实验表明，大部分原子核的形状并不是球形的，很多原子核是椭球形的。偏离球形、有稳定形变的核称为变形核。对于椭球形核，其半径与它和椭球形的对称轴之间的夹角有关。例如在一级近似下，可用下面的公式描述：

$$R(\vartheta) = R_0 \{1 + \beta_2 Y_{20}(\vartheta, \varphi)\} \quad (1.1-3)$$

式中 R_0 为由式(1.1-2)决定的同样大小的球形核之半径； β_2 称为四极形变因子。核物质的分布仍可由(1.1-1)式描述，只是式中的 R 由 $R(\vartheta)$ 代替。设变形核的长短轴之差为 δR ，则

$$\beta_2 = \frac{4}{3} \sqrt{\frac{\pi}{5}} \frac{\delta R}{R} \approx 1.06 \frac{\delta R}{R} \quad (1.1-4)$$

迄今对于这种变形核已经作了很多的研究工作（详见第三、四章）。

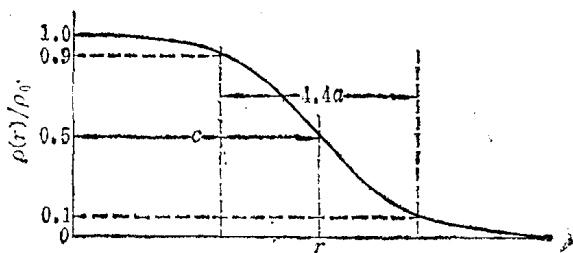


图1.1 核内核物质的费密分布示意图

二、原子核的质量和结合能

原子核质量占原子总质量的 99.95% 以上。原则上讲, 由原子质量表中的原子质量减去其所有的电子质量 (电子在原子中的结合能可以忽略) 即得到原子核的质量。但实际上人们都通用原子质量而不用原子核质量。这是因为人们研究原子核物理问题时常常研究核的变化过程。变化前后电子的数目不变, 从而电子的总质量在变化前后也不变, 因之原子质量的变化即相当原子核质量的变化。只在某些特殊场合, 如正电子发射, 轨道电子俘获等过程中才需要考虑电子质量。

通常使用质谱仪测量原子质量。最早设计使用质谱仪的是 Aston^[6]。几十年来, 质谱仪的设计原理、工艺部件、数据处理能力各方面不断得到改进。目前, 测量灵敏度可达 10^{-15}g , 精度达 $0.1\mu\text{u}$ 。现在人们用宇宙飞船从月球、火星等其它星体上取回的样品可用质谱仪作精密分析。

精密的原子质量测定对人们了解核力、核结构起了重要的作用。目前, 不仅对所有稳定同位素的质量都作了精确的测定, 而且还测量了大量的用加速器产生的短寿命核素的质量。

对于原子核质量的测定表明, 原子核的质量并不等于组成它的核子质量的总和, 而是小于后者。它表明作用在核子之间的是吸引力, 而且这力是很强的相互作用力, 即核力。它能使核内有很多带正电的质子的原子核保持稳定。组成原子核的各个核子的质量与原子核质量之差, 称为质量亏损, 我们用 B 表示。根据爱因斯坦质量与能量关系公式所得到的与此质量亏损相应的能量称为原子核的结合能, 我们用 E_B 表示。 B 与 E_B 之间存在下列关系:

$$B = \frac{E_B}{c^2} \quad (1.1-5)$$

设原子的质量为 M_A , 则

$$E_B = \{ [ZM_H + (A-Z)m_n] - M_A \} c^2 \quad (1.1-6)$$

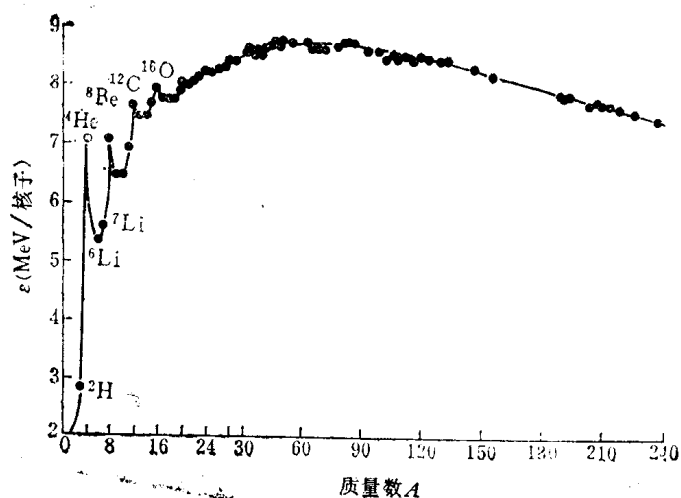


图1.2 原子核的比结合能曲线

其中 M_H 为氢原子质量, m_n 为中子质量。

根据原子核的质量可以判断核的稳定性, 只有原子核的质量小于它散裂后形成之核的质量和时, 它才能保持稳定。

$\epsilon = E_B/A$ 为平均分配到每一个核子上的结合能, 称为比结合能。比结合能随质量数 A 的变化如图 1.2 所示。从图中可以看到, 很轻的核 ($A < 16$) 的比结合能较小, 但随 A 的增加而涨落, 对 ${}^4\text{He}$ 、 ${}^8\text{Be}$ 、 ${}^{12}\text{C}$ 、 ${}^{16}\text{O}$ 四个核, ϵ 值很大, 然后比结合能单调地增加, 直到 $A \approx 50$, $\epsilon \approx 8.7\text{MeV}$ 。当 A 进一步增加时, 比结合能又逐渐减小。比结合能越大, 原子核越稳定。