

0671-93
Y27027

本书第一版曾获得 1997 年度

国家级教学成果二等奖

原子核物理

(第二版)

杨福家 王炎森 陆福全 著

复旦大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

原子核物理/杨福家,王炎森,陆福全著. —2版. —上海:
复旦大学出版社,2002.2
ISBN 7-309-03114-8

I. 原… I. ①杨…②王…③陆… III. 核物理学
IV. O571

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 006919 号

出版发行 复旦大学出版社
上海市国权路 579 号 200433
86-21-65118853(发行部) 86-21-65642892(编辑部)
fupnet@fudanpress.com http://www.fudanpress.com

经销 新华书店上海发行所
印刷 复旦大学印刷厂
开本 850×1168 1/32
印张 13.625 插页 8
字数 378 千
版次 1993 年 12 月第一版
2002 年 2 月第二版 2002 年 2 月第一次印刷
印数 3 001—6 000
定价 22.00 元

如有印装质量问题,请向复旦大学出版社发行部调换。

版权所有 侵权必究

序 言

原子核物理,是笔者毕生从事的专业,撰写本书的目的是:力求用深入浅出的语言,向大学生提供一本教材。它既可用于物理专业,也可用于非物理专业。

本书可以作为拙作《原子物理学》^{〔1〕}的姊妹篇。因此,笔者愿在这里引申该书的一些基本观点:

作为一门大学课程,我们不仅要帮助同学积累一些知识,而且特别要提倡智能的培养。所谓智能,是指人们运用知识的才能;培养智能,主要是培养自学能力、思维能力、表达能力、研究能力和组织管理能力。如果只注重知识的积累,而不注意发展智能,那末,即使在头脑中有了一大堆公式、定理、概念,也不会灵活应用,不会独立地去积累更多的新知识,更不会有所创新。大学教学是否成功的标志之一,是看绝大多数同学是否经常在积极地思考,看他们在智能培养方面是否有明显的进步。

我们主张采取“既讲清楚,又不讲清楚”、“言犹未尽”的讲授方法。应该力求讲清一些基本概念,使大多数同学经过思考即可容易地掌握这些知识。对于已经学过的内容,我们提倡让同学自己去做“温故而知新”的工作;对于我们认为同学们经过思考可以掌握的内容,可以导出的公式,则留给同学们自己去做;有时我们留一些“伏笔”,过几章之后再作解答。对于一些较难的问题,我们鼓励在学习上感到比较轻松的同学通过思考和阅读一些文献后作出回答,并写出读书报告。书中还列有一些“世界难题”,让同学们在年轻的心灵中留下一些问题,准备在今后的岁月里去寻求答案。

〔1〕 杨福家,原子物理学(第二版),高等教育出版社,1990年。

成功的教学必须诱发问题；听了课，读了书，只感到“听得舒服，读来都懂”是不够的，真正的收获还应该反映在有没有产生新的问题。本世纪最伟大的物理学大师之一，尼耳斯·玻尔(Niels Bohr)曾告诫我们：

如果谁在第一次学习量子概念时，不觉得糊涂，那末他就一点也没有懂。

另一位物理大师韦斯科夫(V. F. Weisskopf)曾说过：

我们的知识好比是在无边无际的未知海洋中的一个小岛。这个岛屿变得愈大，它与未知海洋的接界也就扩展得愈广。

知识的增长必然孕育着新问题的产生。为此，我们特别鼓励同学经常地相互讨论，勇于提出问题，共同创造一个有浓厚学术气氛的学习环境。我国有一位教育家说过：“发明千千万，起点是一问”；量子力学的一位创始人也说过：“提出正确的问题，经常已解决问题的一大半了”，“科学扎根于讨论。”

*

*

*

笔者衷心感谢卢鹤绂教授，他是引导笔者入原子核物理之门的第一位导师；感谢曾担任过复旦大学领导的王零同志，他曾是复旦大学原子核科学系的第一位系主任，他在50、60年代与其他领导一起卓有远见地抓紧中青年教师的培养，为复旦以后的发展扎下坚实的基础；他们对笔者的慧识，使一颗嫩芽得到了肥沃的土壤。

感谢奥格·玻尔(Aage Bohr)和本·莫特逊(Ben Mottelson)两位原子核物理学大师，笔者从他们身上不仅学到了一些物理学知识，而且初步懂得了“哥本哈根精神”的真实涵义。

感谢希德教授，她给人以榜样的力量。她对中、青年学者总是投下鼓励、关怀、支持和慈祥的目光。

感谢中国科学院周光召院长，由于他的邀请，使笔者自1987年以来兼职于中国科学院原子核研究所，学到了很多实际知识。他给笔者提供了一个很有意义的舞台。

感谢朱光亚教授,他给了笔者一些少有的机会,增长了从书本中难以获得的知识。

笔者十分怀念已故物理大师钱三强教授,他在1958年参观、视察我们实验室的情景,以及在1963年笔者赴哥本哈根前夕的一席谈话,还历历在目,使人难忘。

陆福全教授和王炎森教授是本书的两位主要作者,一位在实验核物理方面,另一位在理论物理方面,辛勤耕耘了30多年,造诣颇深。我们都是“原子核物理专业”集体中成长,这个集体的科研、教学成果是本书的源泉。

笔者也感谢林瑶华同志为本书绘制插图付出了辛勤劳动。

恳请读者对本书提出批评和建议,以便再版时修正。

杨 福 家

1993年10月于复旦大学

目 录

绪 论	1
第一章 原子核的基本特性	6
§ 1.1 原子核的组成	6
原子的中心——原子核 中子的发现 核素图	
§ 1.2 原子核的大小(半径)	13
核半径定义 核电荷和核物质分布	
§ 1.3 原子核的结合能和半经验公式	16
原子核的结合能 液滴模型和质量(或结合能)半经验公式	
质量半经验公式的改进	
§ 1.4 原子核的自旋和统计性	27
核的自旋 核的统计性	
§ 1.5 原子核的磁矩	29
核子的磁矩 核的磁矩 核磁矩的测量——核磁共振法	
磁超精细相互作用引起核能级的分裂	
§ 1.6 原子核的电四极矩	36
核的电矩 电四极矩和核的形状	
电四极超精细相互作用引起核能级的分裂	
§ 1.7 原子核的宇称	40
空间反演与宇称 核的宇称	
结语	42
主要参考书目	43
附录 1A 核子夸克结构和 EMC 效应	44
习题	46
第二章 原子核结构	48

§ 2.1 核力	49
核力的主要性质 核力的介子理论 核力的夸克模型	
§ 2.2 费米气体模型	60
模型的基本思想 费米能级 对称能的表示式	
§ 2.3 原子核的壳层模型	64
壳层模型提出的背景 幻数存在得到支持 自旋-轨道耦合项	
§ 2.4 壳层模型的应用和改进	72
对核基态自旋和宇称的解释 对核低激发态自旋和宇称的解释	
对核的基态磁矩的预告 对核的基态电四极矩的预告	
壳层模型的进一步改进	
§ 2.5 原子核的集体模型	78
核的永久变形和描述 核的转动 核的振动	
结语	88
附录 2A 高自旋超变形核	88
习题	92
第三章 原子核衰变	94
§ 3.1 放射性衰变基本规律	96
指数衰变律 半衰期和平均寿命 放射性强度	
半衰期测量 级联衰变规律 同位素生产	
§ 3.2 α 衰变	107
α 衰变的能量条件 α 衰变的机制和半衰期	
α 衰变能与核能级图 α 衰变分支比和分衰变常数 附注	
§ 3.3 β 衰变	115
β 衰变的能量条件 β 衰变连续谱和中微子假说	
中微子存在的实验证明 跃迁分类和选择定则 附注	
§ 3.4 γ 衰变	126
一般性质 跃迁分类与跃迁几率的数量级估计 选择定则	
内转换电子 同质异能跃迁	
§ 3.5 穆斯堡尔效应	132

核反冲对 γ 共振吸收的影响	穆斯堡尔效应的发现	应用举例	
结语	.....		139
附录 3A 几种罕见的衰变模式	.....		140
习题	.....		144
第四章 原子核反应	.....		147
§ 4.1 核反应概述	.....		148
几个著名的核反应	核反应分类	反应道和守恒定律	
§ 4.2 Q 方程及其应用	.....		150
反应能	Q 方程	Q 方程应用举例	
L 系和 C 系中出射角的转换			
§ 4.3 核反应截面和产额	.....		161
核反应截面	核反应产额	微分截面、分截面和总截面	
激发曲线和能谱	L 系和 C 系中微分截面的转换		
§ 4.4 细致平衡原理	.....		167
正、逆过程截面间关系	能量匹配	角度匹配	
§ 4.5 光学模型	.....		170
核反应过程的三阶段图像	光学模型的基本思想和复数势		
平均截面计算			
§ 4.6 复合核模型	.....		176
复合核模型的基本思想和实验验证	复合核衰变的基本特征		
复合核共振能级	能级宽度和寿命	单能级共振公式	
结语	.....		184
附录 4A 巨共振	.....		184
附录 4B 重离子核反应简介	.....		189
习题	.....		192
第五章 射线与物质相互作用	.....		194
§ 5.1 重带电粒子与物质的相互作用	.....		195
载能重带电粒子在物质中的能量损失	重带电粒子的射程		
§ 5.2 β 射线与物质的相互作用	.....		200

电子的能量损失 β 射程 电子的散射	
正电子与物质的相互作用	
§ 5.3 γ 射线与物质的相互作用	205
光电效应 康普顿效应 电子对效应 γ 射线的吸收	
§ 5.4 中子与物质的相互作用	216
中子核反应 核反冲 核裂变 中子活化	
结语	219
主要参考书目	219
习题	219
第六章 核辐射探测器	221
§ 6.1 气体探测器	223
核辐射引起气体的电离 电离室 正比计数管 G-M 计数管	
§ 6.2 闪烁探测器	230
闪烁体 光电倍增管 闪烁计数器	
§ 6.3 半导体探测器	239
金硅面垒半导体探测器 高纯锗半导体探测器	
§ 6.4 径迹探测器	244
原子核乳胶 威尔逊云室 气泡室 固体径迹探测器	
§ 6.5 中子探测器	248
气体中子探测器 闪烁中子探测器	
§ 6.6 新型低能粒子探测器——微通道板	249
§ 6.7 核辐射量度	252
辐射强度 能谱 辐射剂量	
结语	256
主要参考书目	256
习题	256
第七章 粒子加速器	258
§ 7.1 加速器中产生带电粒子的源	259
电子枪 离子源	

§ 7.2	高压倍加速器	261
§ 7.3	静电加速器	262
	范德格拉夫静电加速器 串列加速器	
§ 7.4	回旋加速器	265
§ 7.5	直线加速器	267
§ 7.6	同步加速器	269
§ 7.7	加速器质谱计	274
	结语	276
	主要参考书目	276
	习题	276
第八章	原子能的利用	278
§ 8.1	原子核的裂变	279
	裂变的发现 裂变机制 自发裂变(SF) 裂变能量及其利用	
§ 8.2	原子核的聚变	287
	轻核聚变 太阳能——引力约束聚变 氢弹——惯性约束聚变 可控聚变反应堆——磁约束 一种新型的干净核能源	
§ 8.3	核武器	296
	原子弹 氢弹 中子弹 核试验	
§ 8.4	核动力	303
	引言 秦山核电站	
	结语	313
	习题	313
第九章	核技术应用	315
§ 9.1	同位素示踪	316
§ 9.2	核成像技术	317
	γ 照相 中子照相 CT-计算机断层扫描	
§ 9.3	离子束分析	328
	背散射技术 质子 X 荧光分析 核反应分析	
§ 9.4	中子活化分析简介	346

§ 9.5 检测用核技术	348
核测井 同位素测厚	
§ 9.6 辐射工艺	350
食品保鲜 辐射消毒 辐射育种 辐照治疗	
新型高分子材料的获得和三废处理	
结语	353
主要参考书目	354
第十章 粒子物理浅说	355
§ 10.1 向着更深的层次	355
线度与能量 高能粒子源 高能物理特点 历史回顾	
§ 10.2 粒子家族	360
粒子谱 共振态	
§ 10.3 守恒律	369
重子数和轻子数 奇异数 宇称原理的失效 归纳:守恒律	
§ 10.4 标准模型与相互作用	382
弱电统一理论 夸克模型 相互作用 结语与展望	
习题答案	397
附 录	400
人名索引	400
名词索引	403
附 表	412
I 物理学常数	412
II 物质密度	415
III 10 的幂词头	416
IV 一些核素的性质	416
V 元素周期表	422

在科学上面是没有平坦的大路可走的,只有那在崎岖小路的攀登上不畏劳苦的人,有希望到达光辉的顶点。

——马克思

我的人生哲学是工作;我要揭示大自然的奥妙,为人类造福。

——爱迪生

绪 论

物理学是研究物质运动的最一般规律和物质基本结构的科学。原子核物理作为物理学的一个分支,主要研究物质结构的一个层次;这个层次介于原子和粒子物理两层次之间,称之为原子核。原子核物理学是本世纪初开始形成的一门学科,它随着近代物理学的发展,随着社会对核技术应用的需要而发展起来的。自诞生以来,原子核物理一直是前沿学科之一。

自 1911 年卢瑟福(E. Rutherford)提出原子的核式模型以来,原子就被分成两部分处理:一是处于原子中心的原子核,一是绕核运动的电子。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,或许是分得最开的两个层次。物质的性质可以主要归因于原子,或主要归因于原子核,但几乎不同时归于两者。元素的化学、物理性质和光谱特性,基本上只与核外电子有关,而放射现象则归因于原

子核。与原子物理有关的现象在自然界相当普遍,在日常生活中到处可见。相比之下,原子核现象在自然界中相当少见。不过从本世纪40年代中期开始,一直到现在,“原子核”逐渐成为越来越多的人知道的名词了。下面让我们对原子核物理的发展史作一概括的回顾。

1896年,贝克勒尔(H. Becquerel)发现了铀放射现象。这是人类第一次在实验室里观察到原子核现象。1897年,居里夫妇(P. & M. Curie)发现放射性元素钋和镭。1899年发现 α 、 β 射线,1900年发现 γ 射线。1903年,卢瑟福证实了 α 射线是带正电荷的氦原子核, β 射线是电子。1911年进而提出原子的核式模型。1919年卢瑟福首次实现人工核反应,用 α 粒子从氮核打出质子。

1932年,查德维克(J. Chadwick)发现中子。此后,海森伯(W. Heisenberg)立即提出原子核由质子和中子组成。1934年,约里奥·居里夫妇(F. & I. Joliot-Curie)发现人工放射性,这是人工制备放射元素的开始。

1939年,哈恩(O. Hahn)和史特拉斯曼(F. Strassmann)在用中子轰击重元素铀的实验中发现有中间质量的元素产生;接着,梅特纳(L. Meitner)和弗里希(O. Frisch)提出用铀原子核分裂成两半的产物解释哈恩-史特拉斯曼的实验结果,从而导致重核裂变的发现。同年,尼·玻尔(N. Bohr)和惠勒(J. A. Wheeler)提出了重原子核裂变的液滴模型理论。

1942年,在费米(E. Fermi)领导下,利用铀核裂变释放中子及能量的性质,发明热中子链式反应堆,可算是大规模利用原子能的开始。1945年在奥本海默(J. R. Oppenheimer)领导下,美国洛斯·阿拉莫斯(Los Alamos)实验室制成快中子链式反应爆炸装置——原子弹;1kg铀(^{235}U)在日本广岛上空分裂,导致近10万人死亡,10万人受伤。1952年,在泰勒(E. Teller)领导下,实现轻元素的热核爆炸,试爆氢弹成功。

1949年,迈耶尔(M. G. Mayer)和简森(J. H. D. Jensen)提出了著名的核的壳层模型,对核内核子运动作了唯象的描述。1952年,奥格·

玻尔(A. Bohr)和莫特逊(B. Mottelson)提出核的集体模型,对核的集体运动作了唯象的描述。这是两个著名的核结构模型。

1954年,苏联建成第一个原子能发电站。1958年,我国建成第一座重水型原子反应堆;在1964年成功试爆第一颗原子弹,1967年试爆氢弹成功;1991年12月我国第一座自行设计制造的核电站——秦山核电站发电成功。

原子核物理学,是研究物质结构的一个层次的基本学科,与其它层次的研究一样,都要回答:这一层次是由什么组成的,这些组成物是怎样运动的,它们又是怎样相互作用的。原子核物理学是一门实验性很强的学科,它遵循着实验—理论—实验的发展原则,本书在叙述中也努力按照这个原则。另外,原子核物理学也是一门应用性很强的学科,它不仅和其它学科(如化学、生物、材料、冶金、地质等)一起产生了不少边缘学科,而且核技术应用也已深入到工、农、医、能源等国民经济的许多领域中,影响到人们生活的许多方面。鉴于这门学科的这些特点,我们在本教材中着重介绍四部分内容:介绍核物理的基本知识(第1—4章);介绍核物理的实验技术,包括实验工具和测量手段(第5—7章);介绍原子能利用和核技术应用(第8、9章);在最后一章(第10章)中,根据这门课程的传统习惯,介绍粒子物理内容,它的研究对象比原子核更深一个层次。当前人们也把原子核和粒子物理学统称为亚原子物理学。通过本教材希望给予读者对原子核物理的基本内容,包括实验技术和应用有一个全面的了解;同时,我们在本教材中,向读者介绍本学科的一些研究前沿的新的发展和动态,以及介绍我国科学家在原子核物理研究领域中所作出的贡献和成就。

各章内容简述如下:

第一章,介绍原子核的基本性质,即回答原子核的组成以及核的主要静态性质,这是以后各章的基础。

第二章,叙述核子间相互作用力——核力的基本性质以及描述核内核子运动和核整体运动的两个著名的核模型:壳层模型和集体模型。

第三章,介绍原子核的衰变,即原子核的放射现象及其规律,这是只与核有关的现象。放射性衰变不仅对核性质及核结构研究提供重要信息,而且在实际中有重要应用。

第四章,内容为原子核反应,包括核反应运动学和核反应动力学。由于核反应涉及到各种核与核,核与粒子间相互作用,且能量范围大,因此相比核衰变,能提供更多信息,应用更普遍。

第五章,介绍原子核所发出的射线和物质的相互作用。射线和物质的相互作用是进行原子核物理实验的必要基础知识。本章内容不仅是射线探测的基础,也是核技术应用的基础。

第六章,谈原子核辐射的探测问题,既讲述各种核辐射探测器的基本工作原理和性质,又简单介绍核辐射量度中几个基本物理量。

第七章,内容为粒子加速器。要了解原子核就要变革原子核。通过加速器使粒子获得能量,然后轰击原子核产生核反应,这是研究原子核的最主要方法之一。另外,加速器也是核技术应用的重要工具。

第八章,叙述原子能利用。这一章主要从能源角度来讨论裂变和聚变的产生和利用,内容包括核武器(原子弹、氢弹和中子弹)、核电站和受控聚变反应。

第九章,介绍核技术应用。由于核技术在国民经济各个领域中的应用面非常广泛,本章仅就一些重要领域,并且具有典型性的一些问题进行介绍,重点讨论核成像技术和核分析技术,对工业检测和辐射工艺也将作一简单介绍。

第十章,为粒子物理。本章将介绍粒子物理的特点,粒子家族和相互作用,以及相互作用中所遵循的守恒律,包括弱相互作用中宇称不守恒的讨论。另外对夸克(层子)模型也将作简单介绍。

最后需要指出,如果把1932年发现中子作为原子核物理的开始,至今六十年已过去了,可是,我们今天对原子核的了解,还远没有达到六十年前对原子的了解程度。当前在原子核物理方面有许多前沿课题需要人们去探索和研究,大片的处女地需要人们去开垦。

本书可作为高等院校物理专业以及其它与核物理、核技术有关专业的学生的教材,也可作为其他专业学生或有关科技人员的参考书。

使用本教材约需 50 学时。由于全书内容大致可分为四个部分,各部分内容基本独立,所以教学时,也可按实际情况选取。

一个能思想的人,才是一个力量无边的人

——巴尔扎克

凡现象所表现的,没有不在本质内的。凡在本质内没有的,也就不会表现于外。

——黑格尔

第一章 原子核的基本特性

与原子物理有关的现象在自然界相当普遍,在我们的日常生活中到处可见。相比之下,原子核的现象就较罕见了。不过,从本世纪40年代中期开始,一直到现在,“原子核”也几乎成了家喻户晓的名词。

为了了解原子核,人们首先是测定了它作为整体所具有的静态特性,也就是说,首先从外部来观察原子核所具有的“外貌”,以得到一个基态核的图像。这些静态基本特性包括核的组成、质量、大小、自旋和统计性、宇称以及核矩——磁矩和电四极矩。当然,这些性质的来源是和核的内部结构及其运动变化密切相关。本章的介绍,不仅使我们对原子核基本特性有一个概括的了解,而且是后面章节对原子核深入了解的必要基础。

§ 1.1 原子核的组成

1. 原子的中心——原子核

在近代物理发展中,1911年卢瑟福(E. Rutherford)发现原子核,