



国家出版基金项目
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION



现代原子核物理

实验核物理



孙汉城 杨春祥 编著

HEUP 哈尔滨工程大学出版社

2013 年度国家出版基金项目“现代原子核物理”

实验核物理

孙汉城 杨春祥 编著

HEUP 哈尔滨工程大学出版社

内 容 简 介

核物理是研究原子核的结构及其反应变化的运动规律的科学。实验核物理是从实验工作者的角度来学习、理解和研究核物理的基本技术、方法与知识的学科。书中绪论是高屋建瓴式的总结提纲,实验方法编介绍最基本的技术,更复杂的在物理问题中再叙述,核反应编介绍最基本的核反应,核谱学与核结构编是前沿的成果与展望。

本书特色是:通过学科发展历史与人物介绍,读者得到科学工作方法的启迪;既介绍实验结果与发现,又对理论的物理思想作了定性解释,避免复杂的数学推导;对于本学科的学术意义与应用作了兼顾。

本书可作为核物理与核能应用有关专业的研究生教材。由于注意收集了最新发展,对于有关科研、教学、工程技术人员也有一定参考价值。

图书在版编目(CIP)数据

实验核物理/孙汉城,杨春祥编著. —哈尔滨:
哈尔滨工程大学出版社,2013. 12
ISBN 978 - 7 - 5661 - 0719 - 0

I. ①实… II. ①孙…②杨… III. ①核物理学 - 实验 IV. ①O571.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 318035 号

出版发行 哈尔滨工程大学出版社
社 址 哈尔滨市南岗区东大直街 124 号
邮政编码 150001
发行电话 0451 - 82519328
传 真 0451 - 82519699
经 销 新华书店
印 刷 黑龙江省教育厅印刷厂
开 本 787mm × 1092mm 1/16
印 张 10.75
字 数 256 千字
版 次 2014 年 5 月第 1 版
印 次 2014 年 5 月第 1 次印刷
定 价 60.00 元
<http://press.hrbeu.edu.cn>
E-mail:heupress@hrbeu.edu.cn

序 言

原子核物理学(简称核物理学、核物理或核子物理)是20世纪新建立的一个物理学学科,是研究原子核的结构及其反应变化的运动规律的物理学分支。它主要有三大领域:研究各类次原子粒子与它们之间的关系、分类与分析原子核的结构,并带动相应的核子技术进展。原子核物理的研究内容包括核的基本性质、放射性、核辐射测量、核力、核衰变、核结构、核反应、中子物理、核裂变和聚变、亚核子物理和天体物理等。它研究原子核的结构和变化规律,射线束的产生、探测和分析技术,以及同核能、核技术应用有关的物理问题。

原子核物理内容丰富多彩,是物理学非常活跃的研究领域,一百多年来共有七十多位科学家因原子核物理领域的优异成绩而获得诺贝尔奖。并且原子核物理是一个国际上竞争十分激烈的科技领域,各国都投入大量人力、物力从事这方面的研究工作。它是一门既有深刻理论意义,又有重大实践意义的学科。

在原子核物理学产生、壮大和巩固的全过程中,通过核技术的应用,核物理与其他学科及生产、医疗、军事等领域建立了广泛的联系,取得了有力的支持。核物理基础研究又为核技术的应用不断开辟新的途径。人工制备的各种同位素的应用已遍及理工农医各部门。新的核技术,如核磁共振、穆斯堡尔谱学、晶体的沟道效应和阻塞效应,以及扰动角关联技术等都迅速得到应用。核技术的广泛应用已成为科学技术现代化的标志之一。

核物理的发展,不断地为核能装置的设计提供日益精确的数据,从而提高了核能利用的效率和经济指标,并为更大规模的核能利用准备了条件。截至2013年3月,全世界有30多个国家运行着435座核电机组,总净装机容量为374.1 GW,核能的发展必将为改善我国环境现状作出重要贡献。

“现代原子核物理”出版项目的内容包括激光核物理、工程核物理、核辐射监测与防护等理论与技术研究的诸多方面。该项目汇集和整理了我国现代原子核物理领域最新的一流水平的研究成果,是我国该领域的科学研究、技术开发的一个系统全面的出版项目。

值得称道的是,“现代原子核物理”项目汇集了国内核物理领域的多位知名学者、专家毕生从事核物理研究所积累的学术成果、经验和智慧,将有助于我国核物理领域的高水平人才培养,并进一步推动核物理有关课题研究水平的提高,促进我国核物理科学研究向更高层次发展。该项目的出版将有助于推动我国该领域整体实力的进一步提高,缩短我国与国外的差距,使我国现代原子核物理研究达到国际先进水平。

该系列丛书较之已出版过的同类书籍和教材,在内容组成、适用范围、写作特点上均有明显改进,内容突出创新和当今最新研究成果,学术水平高,实用性强,体系结构完整。“现代原子核物理”将是我国该领域的一个优秀出版工程项目,她的出版对我国现代原子核物理研究的发展有重要的价值。

该系列丛书的出版,必将对我国原子核物理领域的知识积累和传承、研究成果推广应用、我国现代原子核物理领域高层次人才培养、我国该领域整体研究能力提高与研究向更深与更高水平发展、缩短与国外差距、达到国际先进水平有重要的指导意义和促进作用。

我衷心地祝贺“原子核物理”项目成功立项出版。

潘自强

中国工程院院士
中核集团科技委主任
二〇一三年十月

前 言

原子核处在微观世界物质结构量子阶梯的中段。我们日常生活中接触的主要是原子与分子,其中分子是原子的集合体。更深入一层,就是原子核。在原子的中心,是一个极小的(10^{-12} cm 左右)而且重的(原子质量的绝大部分都在核中)原子核,周围是绕核旋转的电子。原子核又是有强相互作用的重子的集合体。组成普通原子核的重子是核子(带正电的质子与电中性的中子)。当其中一个或几个重子为比核子更重的超子时,这种核叫做超核。比重子更深的层次是粒子,重子是由三个夸克组成的,夸克等粒子是当代微观世界研究的最前沿。

原子核物理是研究原子核结构及其反应变化规律的学科,十分丰富多彩,又是研究粒子物理的基础。由于原子核极小而重,蕴含极大的能量,原子核物理又有极大的应用价值。

本书是作者 20 多年来在中核集团核工业研究生部讲授实验核物理课程讲义基础上改写的研究生教材。研究生教材应该既顾基础,又顾前沿。由于相当多的学生在大学没有学过核物理,本书不得不给学生补习一些基本知识,特别在本书的前半部分。在后半部分,则将学生带到学科的最前沿。

研究生教材不仅要教知识,而且要教科研工作方法。本书注意了学科发展历史,希望通过历史事件与历史人物的介绍来体会本门学科是如何发展起来的,使读者得到科研方法的启迪。

原子核物理是一门实验学科。本书既介绍实验技术与方法、实验结果与所发现的现象,又作了理论解释。当然,理论只限于定性的物理思想的描述。原子核物理是一门既有重大的学术意义,又有巨大的应用价值的学科,本书兼顾了这两个方面。应用有民用与军用两方面,本书也作了兼顾。本书既是研究生教材,对于有关领域的科研、教学和工程技术人员也有一定的参考价值。

本书在成稿的过程中,得到了许多老师与学生的帮助。特别是白希祥、周书华两位教授对书稿提出了宝贵意见。王雪杰、杨军两位先生在文字工作中给了许多帮助。作者深表感谢。同时,本书在撰写过程中,参考或引用了国内外一些专家学者的论著,在此表示衷心感谢。

由于作者水平有限,书中存在缺点和问题在所难免,欢迎读者指出,以便再版时更正。

编著者
2013 年 5 月

目 录

第0章 绪论	1
0.1 核物理简史	1
0.2 核在微观世界中的地位	4
0.3 传统核物理的理论框架	5
0.4 核物理对研究基本相互作用的贡献	5
0.5 核结构研究	7
0.6 核反应机制研究	9
0.7 核物理与核技术应用的物理基础	10
思考题	11
参考文献	12

第一编 实验方法

第1章 射线源技术	15
1.1 带电粒子源	15
1.2 X, γ 射线源	20
1.3 中子源	21
思考题	23
参考文献	23
第2章 探测技术	24
2.1 射线与物质的相互作用	24
2.2 探测器	32
思考题	35
参考文献	35

第二编 核反应

第3章 核反应的一般规律	39
3.1 核反应的分类	39
3.2 守恒定律	40
3.3 反应道(Channel)	40
3.4 费因曼图(Feynman Diagram)	41
3.5 各截面之间的关系	42

第4章 核子与轻离子引起的核反应	43
4.1 反应机制的实验判别	43
4.2 弹性散射	43
4.3 非弹性散射	49
4.4 转移反应	54
4.5 共振	60
4.6 重核裂变与轻核聚变(Fission and Fussion)	63
4.7 三体反应	68
4.8 极化	73
思考题	77
参考文献	77
第5章 重离子引起的核反应	78
5.1 特点	78
5.2 成就	78
第6章 中高能核反应	79
6.1 核子或轻离子引起的反应	79
6.2 中高能重离子碰撞	81
6.3 π 介子引起的核反应	82
6.4 电子引起的核反应	86
6.5 当代粒子观	87
思考题	89

第三编 核谱学与核结构

第7章 原子核的稳定性与核结构	95
7.1 概述	95
7.2 原子核的版图(疆界)	95
7.3 核素图(Nuclear Chart)中的一些规律性现象	96
7.4 原子核的质量和结合能(Nuclear Mass and Binding Energy)	96
7.5 远离稳定线核的核结构研究	100
7.6 超重岛的预言,超重元素的合成和鉴别	103
思考题	104
第8章 现代核谱学与核结构	105
8.1 现代核谱学的特征	105
8.2 现代核谱学实验技术的进步、设备更新及其成就	109
8.3 现代核谱学的成就	114
思考题	120

第 9 章 核结构模型	121
9.1 壳模型(球对称)	121
9.2 形变壳模型	130
9.3 对关联	140
9.4 推转壳模型(Cranking Shell Model)	143
9.5 相互作用玻色子模型简介	147
9.6 模型述评	148
思考题	148
第 10 章 极端条件下的核结构研究及展望	149
10.1 核结构研究现状	149
10.2 两种类型的放射性核束装置和实验设备的再次更新	149
10.3 极端条件下的核性质研究和展望	156
思考题	159
附录 元素周期表(从 1 ~ 118 号元素)	160

第0章 绪 论

0.1 核物理简史^[1-3]

19 世纪末的三大发现,为人类深入认识微观世界拉开了序幕。

1895 年,德国伦琴(W. K. Röntgen)发现 X 射线,为现代原子、分子物理,乃至固体物理、凝聚态物理的实验研究奠定了基础。伦琴荣获 1901 年诺贝尔物理奖。

1896 年,法国贝可勒尔(A. H. Becquerel)发现铀的放射性,人类由此获得了来自未知世界——“原子核”的信息。随后,法国居里夫妇(P. Curie 与 M. Curie)发现钍也有放射性,还从铀矿石中提炼出钋与镭两种放射性更强的新元素,核物理与放射化学学科开始萌芽。贝可勒尔、居里夫妇三人荣获 1903 年诺贝尔物理奖,居里夫人又于 1911 年获诺贝尔化学奖。

1897 年,英国汤姆生(J. J. Thomson)发现电子,这是人类发现的第一种基本粒子,孕育着半个世纪后诞生的粒子物理学。汤姆生荣获 1906 年诺贝尔物理奖。

1911 年,英国卢瑟福(E. Rutherford)发现了原子核,宣告核物理的诞生。卢瑟福用 α 粒子射击重金属薄膜,发现有相当多的 α 粒子作大角度反射,当时这一现象难以解释。为此,他选修了统计物理的课程,虚心听课,并参加考试。当时他已因发现放射性衰变的指数规律和证明 α 粒子(即氦核)、 β 粒子(即电子)而荣获 1908 年诺贝尔化学奖。卢瑟福用学到的知识定量地解释了自己的实验结果,否定了汤姆生的原子的葡萄干布丁模型(认为原子是由一些负电荷分布在一个带正电的球体中),提出了自己的原子的有核模型(原子由在中心的带正电的核与周围的电子组成,核很小,但很重,接近于原子的总质量)。卢瑟福不仅发现了原子核,而且他所用的实验方法——核-核碰撞法,也成了核反应实验研究的基本方法。

1919 年,卢瑟福发现质子,即氢原子核。

1932 年,英国查德威克(J. Chadwick)发现中子,他因此荣获 1935 年诺贝尔物理奖。早在 1930 年,德国波特(W. Bothe)用天然放射源的 α 射线轰击铍,发现产生了一种穿透力特别强的射线,他称之为“铍辐射”。可惜,他把它解释为高能量的 γ 射线。1932 年法国居里实验室约里奥-居里夫妇(J. F. Joliot Curie 与 I. Joliot Curie)用更强的放射源进一步做了这一实验,得到了相仿的结果。消息传到英国,给了卢瑟福的学生查德威克极大启发。卢瑟福早在 1920 年就曾设想过可能有一种与质子质量相仿的中性粒子。为了寻找这种粒子,查德威克已经花了十年苦功,未见踪影。波特和约里奥-居里的文章,使他想到用多种探测器来测量这种“铍辐射”的性能,特别是其动量与能量。最后,他肯定这不是 γ 射线,而是质量与质子相仿的中性粒子,他把它叫做中子。不久,德国海森伯(W. K. Heisenberg)提出了原子核由质子与中子组成的模型。核物理展开了新的一页。

1933 年,意大利费米(E. Fermi)发展了 1930 年奥地利泡利(W. Pauli)提出的中微子假说,提出除引力与电磁力以外的另一种新的相互作用——弱相互作用,建立了 β 衰变理论。

1935 年,日本汤川秀树提出核力的介子理论,对第四种相互作用——强相互作用,作出了初步解释,预言了介子的存在。介子发现后,他荣获 1949 年诺贝尔物理奖。

1936 年,丹麦尼·玻尔(N. Bohr)提出复合核模型,对平衡态的核反应机制作出了解释。

1938 年底,德国哈恩(O. Hahn)发现裂变,他因此荣获 1944 年诺贝尔化学奖。

中子发现以后,费米想到,中子不带电,应该容易打进带正电的原子核中引起核反应。他用中子轰击各种元素,发现了几十种新的放射性核素,而且他发现,速度低的热中子更容易引起核反应。因此,费米荣获 1938 年诺贝尔物理奖。他又想用中子轰击铀来产生新的元素——超铀元素。果然,他测到了一些新的放射性半衰期,他就认为是发现了超铀元素。当时找超铀元素是世界各大核科学实验室的一个热门课题。约里奥·居里夫妇也得到相仿结果。他们还用化学方法证明,所得“超铀元素”的化学性质与稀土元素镧相仿。他们感到困惑,但还不能跳出超铀元素的误区。德国柏林大学威廉皇家学院化学家哈恩与实验核物理权威迈特纳(L. Meitner)合作研究这个问题。后来,为逃避希特勒对犹太人的迫害,迈特纳离开德国。她在流亡瑞典时,接到哈恩关于实验的来信。哈恩在化学上确定中子打铀产生了稀土镧和钡,但物理上有可能吗?他写信请教迈特纳。迈特纳说,核物理出现了许多意外,应该有可能。她用玻尔的液滴模型思考,估算了重核的结合能,指出这是一个铀核分成了两个较轻的核。她起了个名字,叫做裂变。

1947 年,英国鲍威尔(C. F. Powell)在宇宙线中发现了 π 介子——汤川预言的传递核力的粒子,他荣获 1950 年诺贝尔物理奖。

1949 年,美籍德国物理学家梅耶夫人(M. Goepper Mayer)与德国延森(J. H. D. Jensen)分别独立提出核结构的壳模型,他们荣获 1964 年诺贝尔物理奖。梅耶夫人原本是原子物理学家,精通原子的壳结构,后到美国芝加哥大学研究核物理的幻数问题。一次与费米讨论的过程中,费米提醒说,会不会核力的自旋-轨道耦合较强?由此,梅耶取得了突破。

1950 年,美国雷恩沃特(L. J. Rainwater)提出了核的形变理论。1951—1953 年,丹麦阿·玻尔(A. Bohr)与美裔丹麦物理学家莫特森(B. R. Mottelson)提出核的集体运动模型。他们三人荣获 1974 年诺贝尔物理奖。

后来,核物理向纵深发展。在此过程中,中国物理学家也作出了重要的贡献。

20 世纪 20 至 40 年代,核物理基础研究如日中天,我国一批莘莘学子赴欧美留学。他们的导师都是学术大师,很多是诺贝尔奖得主,研究工作都在学科前沿。他们都有着强烈的爱国、爱科学的情怀,抱着振兴中华的宏愿去“西天取经”。他们在国外工作时在学术上取得了出色成就,回国后又为科学在中国生根作出了历史性贡献。他们是我们中华民族的骄傲,是我们后辈的榜样,其中几位杰出的核物理大师简介如下。

吴有训与康普顿散射 1923 年,美国物理学家康普顿(A. H. Compton)在研究 γ 射线与 X 射线同物质相互作用时发现,其散射行为可以看成是作为粒子(光子)的 γ 射线与 X 射线同物质中电子的散射。当时康普顿只用一种物质做了实验。1921 年,吴有训毕业于南京高等师范学堂(南京大学前身),同年到美国作康普顿的研究生。在康普顿的指导下,吴有训对一系列物质做了实验,肯定了此规律的普遍性。美国另一实验室做不出同样结果,吴有训还去该实验室帮他们找原因,成功完成了实验。从此,康普顿效应得到公认,康普顿荣获 1927 年诺贝尔物理奖。有些国家将此效应称为康普顿-吴效应,吴有训自己不同意。他认为思想和实验方法都是老师的。而老师对这位学生也是十分满意的。几十年后,康普顿对杨振宁说,他始终不能区分他的两个得意门生:吴有训与阿尔瓦雷茨(L. W. Alvarez, 1968 年诺贝尔物理奖得主)的天分究竟谁高?后来何祚庥指出,在系统研究康普顿效应的过程中,吴有训发现的散射谱线的化学位移效应应该正名为吴有训效应。

吴有训回国后,在清华大学物理系树立了师生动手做实验的良好学风,后来他长期担

任大学与研究院的领导。他是中国原子能科学研究院的前身(中国科学院近代物理研究所)的第一任所长。后来他作为中国科学院副院长,为我国科学事业作出了卓越贡献。

赵忠尧与正电子 1925年赵忠尧毕业于东南大学(由南京高等师范学堂扩展而成),1927年到美国加州理工学院作密立根(R. A. Millikan, 1923年诺贝尔物理奖得主)的研究生,课题是较高能量的射线与物质的相互作用。赵忠尧发现了当 γ 射线能量较高时的反常吸收现象,以及伴生的发射0.5 MeV特殊 γ 辐射的现象。后来杨振宁与李炳安考证,前一现象全世界共三篇文章,赵忠尧的文章发表最早,而且最精确。后一现象只有赵一人发现。另外两家,一家没有测到,另一家测到在0.5与0.9 MeV处各有一个峰。后来才清楚,赵忠尧发现的这两个现象,实质上是电子对的生与死(产生与湮没),是正电子发现的前奏。可惜当时在美国的赵忠尧还不知道P. A. M. Dirac在英国提出的正电子的理论,对这些现象没有给出正确的解释。当时,曾有人将赵忠尧提名为诺贝尔奖候选人,但一方面因为大家都没有认识到这些发现的重大意义,另一方面因为有一位德国物理权威对赵的第二个发现提出怀疑。诺贝尔奖与赵忠尧擦肩而过。几十年后,李政道问起当年的诺贝尔奖评委主席,他说这是一个无法挽回的遗憾。

1931年赵忠尧回国后,先后任职于清华大学、西南联合大学与中央研究院。1946至1950年在美国作核物理研究并为回国建静电加速器作部件准备工作。赵忠尧回国后先后参与创建了中国原子能科学研究院与高能物理研究所,主持创建了中国科学技术大学核物理系,为核物理的科研与教育在中国生根作出了卓越贡献。

王淦昌与中微子 1929年清华大学物理系第一届毕业生王淦昌赴德留学,师从迈特纳做 β 衰变研究。他的博士论文是测定 β 能谱的高能区谱形是否是锐截止型,以此判断泡利于1930年提出的中微子假设是不是正确。他的实验结果支持中微子的存在。博士论文通过了,但王淦昌还不满意,他回国后一直念念不忘,想找到更好的方法。1941年浙江大学迁到后方遵义,环境略为安定,他写出一篇创造性的短文,提出了用电子俘获来判断有无中微子的实验方案。这是末态只有两个粒子的二体问题,不像一般 β 衰变是三体问题那样不确定。文章先送到国内的物理学报,编辑部将稿件退回,因当时一年只出一期,王淦昌只好将文稿送美国的《物理评论》,文章很快发表。1942年,阿伦(J. S. Allen)用此方案做的实验结果发表。王淦昌从此闻名海内外。

1950年后,王淦昌参与创建中国原子能科学研究院,主持开拓了我国宇宙线研究,在杜布纳联合原子核研究所发现了新粒子——反 Σ^- 超子。回国后他又为核武器研究作出了重大贡献,并提出了用激光作惯性约束核聚变的新方向。

吴大猷与超铀元素 1929年吴大猷毕业于南开大学物理系,1931年赴美国密歇根大学留学。1933年他发表了《重原子f态的两个最低点的特征值及其量子亏损》与《最重元素的低能态》两篇文章。前文解决了有两个不对称最小位势量子力学问题的理论计算方法问题;后文对铀原子与铀离子5f低能态做了具体计算,预言了超铀元素也像稀土元素那样有一个系列存在,他预言了其中14种新元素。1951年诺贝尔化学奖得主西博格(G. T. Seaborg)后来告诉吴大猷,吴的论文使他明确了发现新元素的方向。

吴大猷1934年回国,先后在北京大学、四川大学、西南联合大学物理系任教。1939年为庆祝北京大学成立40周年而创作的《多原子分子的振动光谱及其结构》一书,后在美国翻译出版,吴成为国际知名学者。1946年吴大猷带李政道与朱光亚赴美。吴先后在美国、瑞士和加拿大从事物理研究与教学。1978年他从美国退休回台湾,1983年任“中央研究

院”院长,为台湾的科学研究作出了重要贡献。1992 年他在北京参加了中国当代物理学家联谊会,为两岸学术交流作出了开创性的贡献。

钱三强、何泽慧与三分裂、四分裂 1936 年钱三强、何泽慧从清华大学物理系毕业。1937 年钱三强赴法国居里实验室师从约里奥·居里夫妇研究核物理。1936 年何泽慧赴德国柏林高等工业学校技术物理系留学,她获得博士学位后转而研究核物理,师从波特(1954 年诺贝尔物理奖得主)。1945 年她发现正电子与电子的弹性碰撞这一稀有现象。1947 年钱三强主持发现了三分裂现象,何泽慧是主要合作者之一,并观察到更稀有的四分裂。当时,英国同行认为第三个粒子不是裂变时产生的,而是一个裂变碎片作 α 衰变的产物。钱三强等测量了第三个粒子的出射角分布,大多是从 80 多度方向出射,与它在同时产生的两个轻重略有不同的裂变碎片的库仑场中受斥力的方向一致。他们还发现,第三个粒子不仅是 α 粒子,还有更重与更轻的核。三分裂得到了世界公认,成为裂变物理研究的一个分支。

1948 年,钱、何回国。钱三强参与了中国科学院的组织工作,为核科学在中国生根,为核工业发展作出了杰出贡献。何泽慧为我国核辐射探测技术、中子物理、宇宙线与高能天体物理研究奠定了坚实的基础。

张文裕与 μ 原子 1931 年张文裕毕业于燕京大学物理系,1935 年赴英留学,在剑桥大学卡文迪许实验室师从卢瑟福作核物理研究。1938 年他获博士学位后回国,在西南联合大学任教。1943 年赴美,在普林斯顿从事核物理与宇宙线研究。他参与发明了火花计数器,证实 μ 子不参加强相互作用,发现了被誉为“张原子”的 μ 原子。1956 年回国后,主持中国原子能科学研究所的宇宙线研究。1972 年中国科学院高能物理所成立,张文裕任所长,为我国高能物理研究作出了奠基性的贡献。

彭恒武与 HHP 理论 1935 年彭恒武毕业于清华大学物理系。1937 年,他赴英留学,师从量子物理大师玻恩(M. Born, 1954 年诺贝尔物理奖得主)。当时,玻恩的书库对彭恒武全部开放,彭打下了极好的数学基础。他得到哲学博士学位后,又转到海特勒(W. Heitler)门下,获得科学博士学位。在研究介子的起源过程中,建立了扬名天下的 HHP 理论。HHP 是三位作者的姓的第一字母——哈密顿(Hamilton)、海特勒(Heitler)、彭(Peng)。彭恒武自己说,该工作物理思想主要是海特勒的,他的贡献主要是数学上的。

1948 年,彭恒武回国后先后在云南大学、清华大学物理系教书。1950 年后,他协助钱三强建立中国原子能科学研究所。1961 年后,他主持九院的理论工作,对核武器研究作出了重大贡献。1972 年,他回到中国科学院,任高能物理研究所副所长。1978 年,他领导创建了中国科学院理论物理研究所。

0.2 核在微观世界中的地位

世界有宏观与微观之分,纳米材料介于两者之间。微观世界有若干个层次。分子和原子是一个大层次,其中分子是原子的集合体。核和强子是一个大层次,其中核是强子的集合体,如图 0-1 所示。

A. Bohr 有一句名言:核处在量子阶梯的中段。核的地位决定了核物理既有前沿的基础研究,又有广泛的应用价值。

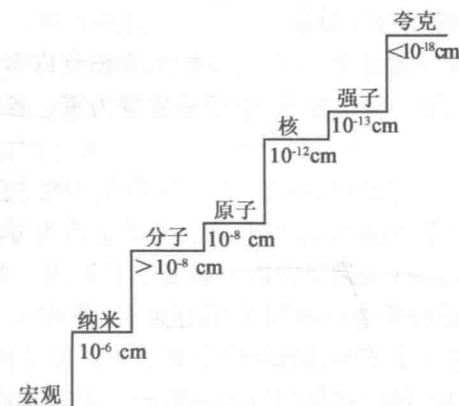


图 0-1 物质结构量子阶梯示意图

0.3 传统核物理的理论框架

传统的(或称经典的)核物理理论从三个基本假定出发:①原子核是由统称核子的质子与中子组成的;②原子核运动规律遵循非相对论量子力学;③核力是二体力,即 $V = \sum_{i \neq j} V_{ij}$,其中 V_{ij} 是第 i 核子与第 j 核子的相互作用势。不符合此规律的三体力等多体力可忽略不计。

从这些假定出发,原则上可以建立一个完整的核理论体系,但是实际上有两大基本困难:一是核力问题,核力远比原子物理中的电磁相互作用复杂,至今没有弄清楚;二是多体问题,除了质子与氦核以外,其余原子核都是由多个核子组成的,多体问题难以求严格解。像固体物理那样的多体问题还好解决,因为体的数目很多,统计性很好。核的多体数目不多,特别是轻核,更难解决。

因此,实际的核理论还只能是近似的理论。长远的目标是,弄清核力的本质,发展解多体问题的方法,这是一条发展“微观理论”的路线。经过几十年的努力,这条路线也取得了明显进展,但由于核力的微观理论还处在定性阶段,核结构的微观理论还只能采用唯象的核力,可以说还只是一种“半微观理论”。

迄今为止,能解决实际问题的核理论还是唯象理论。假设一种近似的物理模型,与实验数据比较,定出若干个参数,从而得到关于某些核现象的定量描述。如何从微观理论推算出这些参数值,也是微观理论的一大目标。核物理发展到今天,已经开始冲击前述的三个基本假定。可以肯定的是,这几个假定只是在一级近似的意义上才是正确的。

毫无疑问,上述经典的核理论在许多问题上是不够好的近似,它们还将继续长期发展并取得辉煌成就。但是,更深入的核理论将建立在核子是有结构的当代粒子物理理论的基础之上,这一发展趋势也是必然的。

当前,随着粒子物理的量子色动力学(QCD)的发展,核物理的“核色动力学(NCD)”正在兴起。^[4]

0.4 核物理对研究基本相互作用的贡献

核是研究基本相互作用的天然实验室。现在已知有四种基本相互作用:引力相互作用、电磁相互作用、强相互作用与弱相互作用。历史上,强作用与弱作用都是从核物理研究

中发现的,至今也仍是核物理的研究对象。

中微子是弱作用的主要参加者之一,但其特性至今仍有许多谜题未能解开。粒子物理的标准模型——QCD + 电弱统一模型要求:中微子质量为零。若能确知中微子质量不等于零,标准模型即需作修正。

用氚 β 衰变测定中微子质量是可行的方法。20 世纪八九十年代,全世界几个实验室用氚 β 谱测定中微子质量的工作都未能得出中微子质量是否为零的结论。由于仪器精度以及氚原子、分子效应的限制,最佳结果是中微子质量小于 2 eV。而且有一个问题,氚 β 谱得到的直接结果是中微子质量的平方。各家结果都是:此值在零左右分布,峰值都小于零。有人解释为中微子是超光速粒子。何祚麻仔细分析了中国原子能科学研究院的实验数据,考查了各家文章,得出结论:问题出在理论近似不精确。中微子质量平方是作为一个参数,由理论谱与实验数据拟合得出的,可是理论谱对氚原子或分子的复杂的激发能级做了近似。这样,理论谱就有了扭曲,使得中微子质量平方这个参数有了系统误差。

1987A 超新星爆发给了测定中微子质量一次新的机会。日本小柴昌俊 (M. Koshiba) 与我国唐孝威在离开欧洲回国时,商量合作一个重大项目,在低本底的地下实验室建一个大型装置,由几千吨纯水和一千多只光电倍增管组成,探测质子衰变。唐孝威回国后找到了合适的山洞,但项目没有批准。小柴昌俊只好独自进行研究。他好不容易在日本找到了一个旧的矿井,建好了一个装置,质子衰变尚未找到,却测到了 1987A 超新星爆发送来的 11 个中微子信号^[5]。信号太少,还得出确切的中微子质量,小柴昌俊因开创了中微子天文学而荣获 2002 年诺贝尔物理学奖。

中微子有质量,可能会发生中微子振荡 (ν_e, ν_μ, ν_τ 相互变换),这是太阳中微子丢失之谜的一个合理解释。近几年来,中微子振荡已有几个实验证据得到公认,包括最近王贻芳等在大亚湾地下实验室发现的 ν_e 与 ν_τ 的振荡。^[6]

有一些核,发射一个电子的 β 衰变受能量守恒律限制,是不可能的,但同时发射两个 β 射线的双 β 衰变却在能量上是可能的(因为核内有对关联)。同时发射两个中微子的双 β 衰变已发现,但还有一种可能的衰变模式—— 0ν 双 β 衰变(不发射中微子)尚未发现。如果发现这种现象,即打破了轻子数守恒定律。

李政道、杨振宁发现的弱作用中宇称不守恒是吴健雄首先由 β 衰变实验证实的。学术界正在研究时间反演对称性的破坏。中子电偶极矩的测量已达 $10^{-24} \text{ e} \cdot \text{cm}$ 的水平,排除了时间反演对称性破坏(如果有的话)来源于电磁相互作用的可能性。更精确的实验将能判断时间反演对称性是否破坏,并弄清它的来源是弱作用或是“超弱作用”。

核力是一种强相互作用,用位势近似时,如图 0-2 所示,大体可分为以下三区:

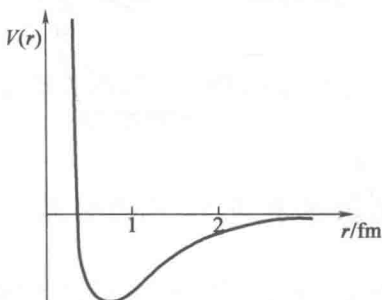


图 0-2 核力示意图

- (1) 远程区($r \geq 1.7 \text{ fm}$), 单 π 交换;
- (2) 中程区($0.45 \text{ fm} \leq r \leq 1.7 \text{ fm}$), 主要是双 π 交换或重介子 ρ, ω 介子交换;
- (3) 短程区($r \leq 0.45 \text{ fm}$), 排斥芯, 不清楚。

这个核力图像是多年前的。近来, 人们开始尝试从粒子是由夸克组成的观点来重建核力理论, 这是今后核力研究的主要方向。

核力的实验研究已经证明, 以前认为正确的核力的电荷无关性(中子-中子, 中子-质子, 质子-质子间的核力都相等)并不严格成立, 约差 2%。而核力的电荷对称性(中子-中子与质子-质子间的核力相等)目前的实验结果还是成立的, 将面临更精确的实验检验。三体力也正在进行实验研究。

核不仅是中子-质子的集合体, 还可以是强子的集合体, 例如超核(核内的一个或两个中子被 Λ^0, Σ^0 等超子代替)。

研究超核可以研究中子、质子与超子之间的相互作用。双超核还可研究超子与超子之间的相互作用。

图 0-3 给出了超核中 Λ^0 的结合能。中子-质子核内核子结合能达 8 MeV 即饱和, 而超核中 Λ^0 的结合能到 14 MeV, 尚未饱和。

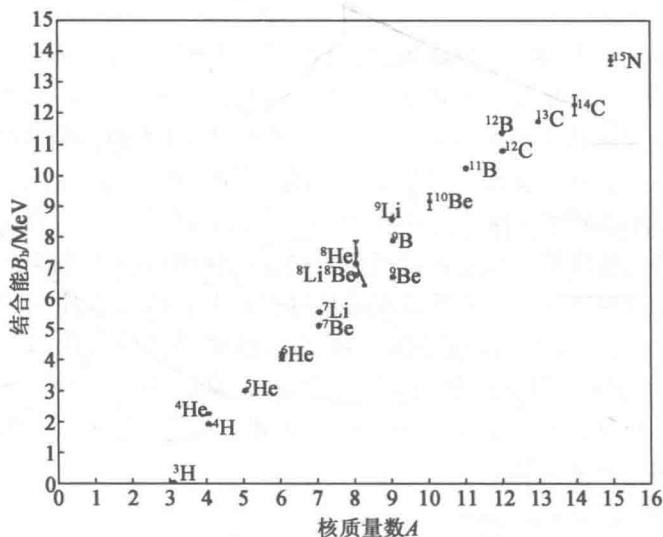


图 0-3 超核中 Λ^0 的结合能示意图

0.5 核结构研究^[7]

0.5.1. 核的组成

1932 年就确立了核是由中子与质子组成的。现在看来, 这一认识还只是一级近似, 即以最简单的氦核基态为例, 它还可能有的概率处在由 Δ^{++} 与 Δ^- 组成的状态。当两个核子靠近时, 可以互相激发, 核子成了 Δ 粒子。按照氦核是由中子与质子组成的观点, 可以精确计算出 $\text{H} + n_{\text{th}} \rightarrow \text{D} + \gamma$ 的截面(其中 n_{th} 是热中子), 为 $303 \pm 4 \text{ mb}$, 而实验值是 $332 \pm 2 \text{ mb}$, 明显不符。当考虑中子与质子间交换 π 介子而形成的介子流修正后, 理论值可以修正 7%, 与实验值还差 3%。这要用氦核中有 Δ 自由度才能解释。

核内的 π 介子不但存在于核力的交换之中,而且当核物质的密度超过某一临界值以后,核物质会发生相变,有大量的在核内自由运动的 π 介子产生,叫做“ π 凝聚”。对于所需的临界密度,有的理论预计比平常核密度高几倍,有的预计与平常核密度差不多,尚待实验证实。

当代对物质结构的基本认识是:宇宙中有两大类基本粒子。一类是传递相互作用的玻色子(自旋为整数),它们是传递电磁相互作用的光子,传递强相互作用的胶子,传递弱相互作用的中间玻色子,传递引力相互作用的引力子(引力子尚未实验发现);另一类是组成各种物体的基元,即各种基本的费米子(自旋为半整数),其又分夸克与轻子两类。轻子的特点是不参加强相互作用。三个夸克组成中子、质子、超子等重子;夸克一反夸克对组成介子。有没有由 4 个、5 个或 6 个夸克组成的多夸克态目前正在研究中。

在极高能的重离子碰撞中,可能形成夸克—胶子等离子体,打破核子(强子)这一层次。在实验室中模拟宇宙大爆炸初期的状态,这是当前核物理与粒子物理共同关注的一个大方向。

0.5.2. 新核素

由中子—质子组成的核素的种类是有限的,因为质子与质子之间有库仑排斥,要靠较多的中子的核力吸引才能将核子维持在一起,而核力又是短程力,不能像化学中的高分子那样“无限”扩展。

理论上估计核素有 7 000 ~ 8 000 种,现已发现近 3 000 种。地球上天然存在的元素最重的只到 92 号元素铀,现在人造元素已发现到 118 号元素。

远离 β 稳定线的新核素不断发现。1991 年以来,我国学者在国内加速器上发现了 27 种新核素。中国原子能科学研究院周书华等发现了 ^{90}Ru , 中国科学院上海原子核所石双惠等发现了 ^{202}Pt , 中国科学院兰州近代物理所袁双贵等发现了 ^{185}Hf 与 ^{237}Th , 是我国在本领域本土实验室做出的第一批成果。后来大量新核素是近代物理所用其重离子加速器发现的。

超核研究也有明显进展。 Λ 超核研究已从过去的基态研究发展到激发态研究,还测到了它们放出的 γ 射线,并开始研究超核谱学。 Σ 超核也已开始发现,如 $\Sigma^9\text{Be}$, $\Sigma^{12}\text{C}$ 等。还发现了含有两个超子的双超核,这是核物理的新领域,如图 0-4 所示。单超核才发现了不到 40 种,双超核才发现了 3 种,还有广阔的研究天地。图 0-4 中还预列出将来可能会发现的有 C 量子数的超核的坐标轴。

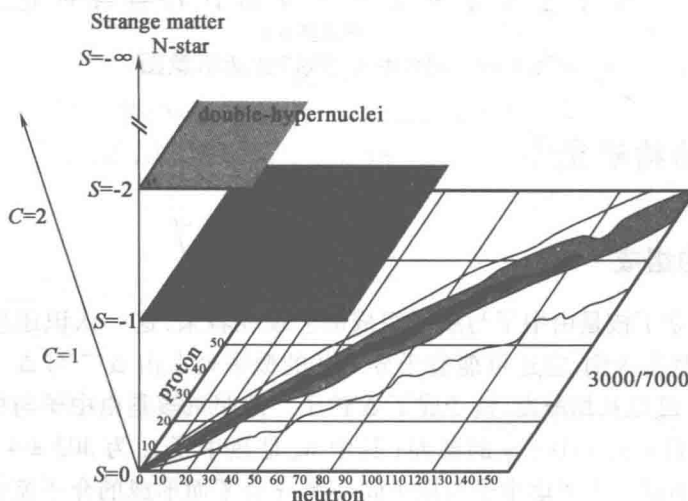


图 0-4 包括超核的核素图