

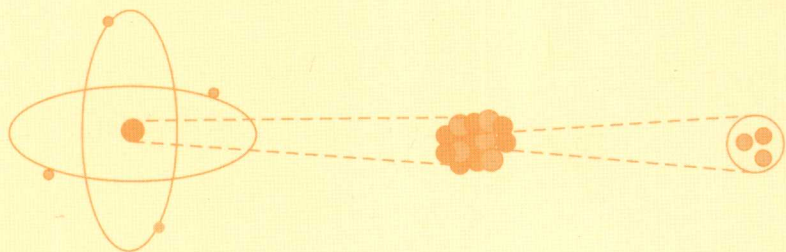


普通高等教育“十一五”国家级规划教材
“十一五”国家重点图书

中国科学技术大学 **精品** 教材

核与粒子物理导论

许咨宗 编著



中国科学技术大学出版社

05111

中国科学技术大学 **精品** 教材

核与粒子物理导论

HE YU LIZI WULI DAOLUN

许咨宗 编著



中国科学技术大学出版社

内 容 简 介

本书讲述近代物理学中的原子核物理和粒子物理的基础知识,内容包括研究核与粒子的基本实验方法(第1,2,4,12章),核与粒子的基本性质(第3章)、结构(第7,9章)、相互作用(第8,10章)以及不同相互作用过程遵循的守恒定律(第5,6章),并简要讨论了与宇宙学相关的一些核与粒子物理问题(第11章).本书侧重对基本物理定律、基本物理概念的介绍,为实验物理的学生提供简要的理论背景知识,为理论物理的学生提供简单的实验背景知识.

本书适合作为物理系近代物理专业本科生和研究生的教材,也可供相关研究人员参考.

图书在版编目(CIP)数据

核与粒子物理导论/许咨宗编著. —合肥:中国科学技术大学出版社,2009.8
(中国科学技术大学精品教材)

“十一五”国家重点图书

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

ISBN 978-7-312-02310-1

I.核… II.许… III.①核物理学—高等学校—教材 ②基本粒子—物理学—高等学校—教材 IV.O57

中国版本图书馆CIP数据核字(2009)第121151号

中国科学技术大学出版社出版发行

地址:安徽省合肥市金寨路96号,邮编:230026

网址:<http://press.ustc.edu.cn>

中国科学技术大学印刷厂印刷

全国新华书店经销

开本:710×960 1/16 印张:28.5 插页:2 字数:543千

2009年8月第1版 2009年8月第1次印刷

印数:1—3000册

定价:48.00元

总 序

2008年是中国科学技术大学建校五十周年。为了反映五十年来办学理念 and 特色,集中展示教材建设的成果,学校决定组织编写出版代表中国科学技术大学教学水平的精品教材系列。在各方的共同努力下,共组织选题281种,经过多轮、严格的评审,最后确定50种入选精品教材系列。

1958年学校成立之时,教员大部分都来自中国科学院的各个研究所。作为各个研究所的科研人员,他们到学校后保持了教学的同时又作研究的传统。同时,根据“全院办校,所系结合”的原则,科学院各个研究所在科研第一线工作的杰出科学家也参与学校的教学,为本科生授课,将最新的科研成果融入到教学中。五十年来,外界环境和内在条件都发生了很大变化,但学校以教学为主、教学与科研相结合的方针没有变。正因为坚持了科学与技术相结合、理论与实践相结合、教学与科研相结合的方针,并形成了优良的传统,才培养出了一批又一批高质量的人才。

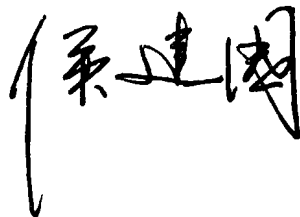
学校非常重视基础课和专业基础课教学的传统,也是她特别成功的原因之一。当今社会,科技发展突飞猛进、科技成果日新月异,没有扎实的基础知识,很难在科学技术研究中作出重大贡献。建校之初,华罗庚、吴有训、严济慈等老一辈科学家、教育家就身体力行,亲自为本科生讲授基础课。他们以渊博的学识、精湛的讲课艺术、高尚的师德,带出一批又一批杰出的年轻教员,培养了一届又一届优秀学生。这次入选校庆精品教材的绝大部分是本科生基础课或专业基础课的教材,其作者大多直接或间接受到过这些老一辈科学家、教育家的教诲和影响,因此在教材中也贯穿着这些先辈的教育教学理念与科学探索精神。

改革开放之初,学校最先选派青年骨干教师赴西方国家交流、学习,他

们在带回先进科学技术的同时,也把西方先进的教育理念、教学方法、教学内容等带回到中国科学技术大学,并以极大的热情进行教学实践,使“科学与技术相结合、理论与实践相结合、教学与科研相结合”的方针得到进一步深化,取得了非常好的效果,培养的学生得到全社会的认可。这些教学改革影响深远,直到今天仍然受到学生的欢迎,并辐射到其他高校。在入选的精品教材中,这种理念与尝试也都有充分的体现。

中国科学技术大学自建校以来就形成的又一传统是根据学生的特点,用创新的精神编写教材。五十年来,进入我校学习的都是基础扎实、学业优秀、求知欲强、勇于探索和追求的学生,针对他们的具体情况编写教材,才能更加有利于培养他们的创新精神。教师们坚持教学与科研的结合,根据自己的科研体会,借鉴目前国外相关专业有关课程的经验,注意理论与实际应用的结合,基础知识与最新发展的结合,课堂教学与课外实践的结合,精心组织材料、认真编写教材,使学生在掌握扎实的理论基础的同时,了解最新的研究方法,掌握实际应用的技术。

这次入选的 50 种精品教材,既是教学一线教师长期教学积累的成果,也是学校五十年教学传统的体现,反映了中国科学技术大学的教学理念、教学特色和教学改革成果。该系列精品教材的出版,既是向学校五十周年校庆的献礼,也是对那些在学校发展历史中留下宝贵财富的老一代科学家、教育家的最好纪念。



2008年8月

序

在过去和将来,核与粒子“小宇宙实验室”都是人们研究自然界基本相互作用及其统一的一个理想的实验室,人类认识自然的很多突破和飞跃是在其中发生的.例如,从汤姆逊原子模型到科学的玻尔原子模型的飞跃;从“物质是由不可分割的原子构成”到今天的“物质是由‘夸克’组成”的观念的突破;从电弱分离到电弱统一的飞跃;弱作用宇称不守恒引发的人们对物理学基本对称性的新的认识等等.

核与粒子“小宇宙实验室”不仅是孕育新思想、新观念的“苗圃”,同时也是发明新技术新方法的“温床”.核与粒子物理发展的理论、方法和技术不断渗透和传播到自然科学和社会科学的许多方面.核与粒子物理学的发展需要材料科学和技术、计算机科学和技术、电子通信科学和技术等各个门类的科学技术发展的支撑,同时也推动相关科学技术的发展,为相关学科的发展提供重要的支持.如质谱技术、磁共振技术和正电子湮灭技术(凝聚态物理中的正电子谱学、医学中的 PET 技术)等已成为其他学科的一种重要研究手段.

随着人们对自然认识的深化,很多基本问题,例如宇宙起源、演化和暗物质等,需要核与粒子物理领域的研究人员和宇宙学、天体物理领域的研究人员的通力协作来攻克.社会发展中基本问题,例如,能源问题和国家安全问题等,也需要不同领域内的专家和核与粒子物理领域的专家合作.因此核与粒子物理涉及的一些基本概念、基本规律和对一些基本过程和现象的理解,不仅是从事核与粒子物理本学科研究和应用的人们的入门知识,也是从事相关学科研究和应用的人们需要具备的基本知识.

中国科学技术大学近代物理系许咨宗教授为讲授原子核与粒子物理学课程和写作教材,进行了二十多年的辛勤劳动.本书是经过 27 届本科教学实践和教育改

革试验而完成的高质量著作。相信列入“普通高等教育‘十一五’国家级规划教材”和“中国科学技术大学精品教材”而出版的《核与粒子物理导论》会是一本获取该领域基本知识的好参考书。

唐孝威

2008年10月10日

前 言

原子核与粒子物理学是探索物质结构的前沿科学,是近代物理学的重要组成部分.《核与粒子物理导论》是经过中国科学技术大学近代物理系 27 届本科教学实践和教育改革试验所形成的教材.自 1982 年(77 级本科)起,从讲稿的多次修改到讲义的 5 次修订和重印,作为近代物理系本科生专业基础课教材.近十年来,同时兼为硕士研究生学位课教材.本书的特点是:

一、《核与粒子物理导论》侧重于该学科所涉及的基本物理定律、基本物理概念的描述.书中避免繁琐的数学推导,对重要的理论公式只介绍其隐含的物理图像和重要物理量的含义,使读者可以正确运用该理论公式来理解实验现象和实验规律;对重要的物理实验避免繁琐的实验技术细节叙述,只介绍其实验的物理动机和设计思想及如何从实验引出重要的物理结论.本教材适合作为近代物理的基础教材,为实验物理的学生提供简要的理论背景知识,为理论物理的学生提供简单的实验背景知识.各自获得的背景知识有利于双方今后研究工作中的沟通和理解.

二、基于核与粒子物理的实验技术和方法大体相同或相近,它们涉及的作用力(强、弱和电)类型相同,理论上处理的方法有很多相似之处.因此《核与粒子物理导论》把核与粒子作为亚原子的一个层次来讨论,把它们有机组合在一起,可以有利于知识的连贯性、统一性,避免不必要的重复.

三、《核与粒子物理导论》重点突出核与粒子物理的基本物理规律的描述,同时注意介绍该学科近十几年的实验和理论的发展.讲稿在多年教学过程中随着该学科研究工作的发展而不断地更新,包括上世纪末、本世纪初的一些重要实验的介绍和新实验数据的引用,使学生和读者对当前该学科的热点、发展方向有大致了解,为他们参与该学科的学术交流作铺垫,有益于他们参与相关学科领域的研究.

《核与粒子物理导论》全书分 12 章.1~6 章介绍核与粒子物理的共同部分——

基本实验方法及核与粒子相互作用过程应该服从的守恒定律. 后面 6 章分别介绍粒子的结构和粒子相互作用(7,8 两章),核素的核子结构和核素的相互作用(9,10 两章),第 11 章是天体物理学中的核与粒子物理,第 12 章介绍相对论粒子碰撞运动学. 把 12 章进行不同的组合,可以作为不同的需要的教学班级的教材或者参考书. 例如 1~6,加上 9,10 和 11 章可作为原子核物理导论教材;1~8 外加 11 和 12 章可作为粒子物理导论的教材;第 1 和第 2 章可以独立作为高能物理或者核物理实验的培训班的教材. 每章附有一些习题. 书后有部分习题解答.

本教材的形成和出版要感谢近三十年参与本课程教学的老师. 特别是中科院院士唐孝威教授,他非常关心本课程的教学,对课程的安排和内容提出宝贵建议,并多次登上本课程的讲台为本科生做专题讲座,讲课内容也无形中融入本教材;范扬眉老师,她曾多次主讲《导论》中的核物理部分并编写过部分的讲义,对整个教学体系和教材的形成做出贡献;伍健老师在后期参加部分教学工作,并为本书的第 11 章提供了部分材料. 还要感谢修本门课的历届本科生和研究生,他们的提问和质疑是本教材改进、提高和精练的动力. 部分研究生为本书的很多图片的制作做出贡献. 在此对所有帮助本书出版的同事、朋友们表示衷心的感谢.

由于本人水平所限本书存在的不足之处在所难免,希望读者批评指正.

作者
2008 年 9 月 2 日

目 次

| | |
|------------------------------|---------|
| 总序 | (i) |
| 序 | (iii) |
| 前言 | (v) |
| 绪论 | (1) |
| 0.1 探索物质微观结构的前沿科学 | (1) |
| 0.2 核及粒子物理研究的对象及内容 | (4) |
| 0.3 核及粒子物理学研究对象的基本特征 | (4) |
| 0.4 自然单位制 | (6) |
| 习题 | (10) |
| 第 1 章 粒子束的获得 | (11) |
| 1.1 放射源 | (11) |
| 1.2 反应堆 | (19) |
| 1.3 粒子加速器 | (21) |
| 1.4 宇宙线 | (29) |
| 参考文献 | (34) |
| 习题 | (35) |
| 第 2 章 粒子束与物质相互作用和粒子的探测 | (37) |
| 2.1 粒子与物质相互作用 | (37) |
| 2.2 粒子探测器 | (49) |
| 2.3 粒子谱仪系统 | (60) |
| 参考文献 | (71) |
| 习题 | (72) |
| 第 3 章 核及粒子的基本特性 | (74) |
| 3.1 核及粒子的质量 | (74) |
| 3.2 粒子自旋 | (81) |
| 3.3 核与粒子的电磁矩 | (87) |

| | |
|---------------------------|-------|
| 参考文献 | (95) |
| 习题 | (96) |
| 第4章 核与粒子的非点结构 | (97) |
| 4.1 相互作用的量子场论的描述 | (97) |
| 4.2 粒子的分类 | (101) |
| 4.3 弹性散射——探测核与粒子“荷”的分布 | (104) |
| 4.4 轻子是类点粒子 | (119) |
| 参考文献 | (126) |
| 习题 | (127) |
| 第5章 守恒定律及其应用 | (128) |
| 5.1 对称性与守恒定律 | (128) |
| 5.2 $n-p$ 对称性和同位旋守恒 | (135) |
| 5.3 规范变换不变性——相加性量子数守恒 | (144) |
| 参考文献 | (150) |
| 习题 | (151) |
| 第6章 分立变换对称性和相乘性量子数 | (153) |
| 6.1 全同粒子交换对称性 | (154) |
| 6.2 空间反射变换及空间宇称 | (156) |
| 6.3 电荷共轭变换及 C 宇称 | (168) |
| 6.4 时间反演变换对称性和 CPT 定理 | (175) |
| 6.5 中性 K 介子衰变和 CP 破缺 | (180) |
| 参考文献 | (186) |
| 习题 | (186) |
| 第7章 强子结构的夸克模型 | (188) |
| 7.1 强子态的产生 | (188) |
| 7.2 强子谱和强子结构的夸克模型 | (193) |
| 7.3 重子的味 $SU(3)$ 多重态 | (198) |
| 7.4 介子的 $SU(3)$ 多重态 | (203) |
| 7.5 强子的质量和强子的磁矩 | (207) |
| 7.6 重味夸克的发现和重夸克偶素 | (214) |
| 7.7 含有重味夸克的强子 | (218) |
| 参考文献 | (224) |
| 习题 | (225) |
| 第8章 粒子及其相互作用 | (227) |

| | |
|--|-------|
| 8.1 带有电磁作用荷的粒子的相互作用——量子电动力学(QED) | (228) |
| 8.2 强作用动力学理论——量子色动力学(QCD) | (238) |
| 8.3 弱相互作用 | (252) |
| 8.4 弱中性流和电弱统一 | (264) |
| 参考文献 | (277) |
| 习题 | (277) |
| 第 9 章 核素的核子结构 | (279) |
| 9.1 唯象核子-核子作用力 | (280) |
| 9.2 核素核子结构的唯象模型 | (290) |
| 9.3 核素的集体运动 | (307) |
| 参考文献 | (317) |
| 习题 | (317) |
| 第 10 章 核素的相互作用 | (319) |
| 10.1 核素的衰变 | (319) |
| 10.2 不同核物质态的制备和它们的特性 | (339) |
| 参考文献 | (359) |
| 习题 | (361) |
| 第 11 章 宇宙学中的核与粒子物理 | (362) |
| 11.1 Big Bang 宇宙标准模型和粒子物理 | (362) |
| 11.2 天体形成、演化过程中的核与粒子物理 | (377) |
| 参考文献 | (388) |
| 习题 | (388) |
| 第 12 章 相对论粒子碰撞运动学 | (389) |
| 12.1 洛仑兹(Lorentz)变换 | (389) |
| 12.2 相对论粒子碰撞运动学 | (393) |
| 12.3 典型过程的运动学 | (399) |
| 习题 | (406) |
| 附录 A 常用物理数据表 | (407) |
| 附录 B 核素的性质 | (415) |
| 附录 C 一些重子、介子的衰变特性 | (426) |
| 附录 D C-G 系数、球谐函数和 d-函数表 | (429) |
| 附录 E 射线与物质相互作用 | (430) |
| 附录 F 习题解答 | (433) |

绪 论

0.1 探索物质微观结构的前沿科学

0.1.1 探索“无限”

20 世纪物理学沿着两条主航线拓宽人类对自然的认识. 第一条航线是利用各种望远镜(从 1609 年 Galileo 发明的第一台天文望远镜到今天的各种先进的太空望远镜观测系统)向大宇宙的广度搜索. 第二条航线是利用各种显微设备(从 1683 年 Anton van Leeuwenhoek 发明的第一台显微镜到现代的 STM 以及强有力的粒子显微系统——大型加速器和各种大型的粒子谱仪), 向小宇宙——原子及亚原子的深度探索.

1. 大宇宙(Cosmos)

宇宙有多大? 宇宙无限大, 在目前可及的宇宙尺度约为 10^{26} m. 现已知, 宇宙中约有 10^{11} 个星系. 其中我们所在的星系——银河系的尺度约为 5×10^{17} m. 约有 10^{11} 个星体. 与银河系近邻的星系——仙女座(Andromeda) 与我们相距为 2×10^{22} m.

2. 亚原子(Micro Cosmos)

这里指的是原子以下的层次: 原子核和粒子. 人类对微宇宙的探索是与各种显微装置的发明和应用分不开的, 下表列出其联系.

| 显微装置 | 探索对象 | 对象尺度(m) |
|-------|--------------|-----------|
| 光学显微镜 | 细菌(Bacteria) | 10^{-5} |
| 电子显微镜 | 病毒(Viruses) | 10^{-7} |

(续表)

| 显微装置 | 探索对象 | 对象尺度(m) |
|-------------|--------|--------------------------|
| 现代电子显微镜 | 分子结构 | 10^{-9} |
| STM-扫描隧道显微镜 | 单原子 | 10^{-10} |
| 加速器粒子显微探针 | 核与粒子结构 | $10^{-14} \sim 10^{-17}$ |

0.1.2 探索物质微观结构的前沿科学

1. 古哲学和“原子”(纪元前)

Democritus 是纪元前有代表性的哲学家. 他的哲理是: 所有物质都是由“看不见的而且是不能分割的粒子”(称为“Atoms”)组成的. “Atom”. 希腊文意思为“Uncuttable”. 原子有不同的类型(Form)、形状(Shape)、重量(Weight). 原子在空间运动的不同形态构成不同的物质. 这是古希腊哲学家对古神学的挑战. 人类首次提出“世界是由什么构成的”这样一个重大科学课题. 这一人类思想上的革命, 导致了自然科学的诞生. 古希腊哲学成为了纪元前探索物质微观结构的前沿学科.

2. 科学的原子分子学说的创立

18, 19 世纪, 随着生产力的发展和科学实验的深入, 人们用各种科学仪器来研究物质的生成和转化. 发现了物质的基本组分“Element”. 著名的化学家 John Dalton (1766~1844) 1803 年提出: 每种不同的 Element(元素)有自己的原子, 原子被认为是“Hard and indestructible rather like billiard ball”. “Atoms clustered together into what the Italian Amadeo Avogadro later called molecules”. 原子结团成为分子, 人们可以数出一定重量(每克原子, 每克分子)的物质所含的原子或分子数目($N_A = 6.023 \times 10^{23} \cdot \text{mole}^{-1}$), 从而能精确地称量原子的重量. 人们对构成复杂的物质世界的元素的物理和化学性质进行了研究, 希望找到众多的元素(当时有几十种元素被发现)遵循的规律. 1869 年, 俄国科学家 D. I. Mendeleev 按元素原子的原子序数排序, 建立了元素周期表. 它的出现标志着科学的原子论的形成. 我们可以说, 物性学、物理化学是 18 世纪探索物质微观结构的前沿科学.

0.1.3 亚原子物理的曙光,物理学的一个新纪元

1. 一批有重大科学意义的实验和发现

- 1895年 W. K. Rontgen 发现了 X 射线.
- 1896年 H. Becquerel, M. Curie 发现放射性.
- 1895年 J. J. Thomson 确认了第一个亚原子粒子——电子.
- 光电效应的实验研究及黑体辐射和光谱的研究.
- 1911年 Rutherford 的 α 粒子散射,有核原子.

2. 新的观念和新的理论的诞生

● 量子革命(Quantum Revolution)

1900年,Max Planck 认为辐射和吸收的能量交换是不连续的,而是以“量子” $h\nu$ 为单位, h 是 Planck 常数.

1905年,Albert Einstein 认为光的行为如同一簇称为“Photon”的粒子流,正确揭示了光电效应的物理过程.

● 20 世纪初量子力学的建立

实验发现的大量新现象为一批年轻有为、富有创新精神的物理学家提供了机遇.他们提出了新观念、创立了新理论.有代表性的是:L. de Broglie(1892~1987)提出物质(粒子)的波动性.一束能动量为 E 、 P 的粒子流,其行为就像一列波长为 $\lambda = h/P$ 、频率为 $\nu = E/h$ 的波(1924);W. K. Heisenberg(1901~1976)建立了矩阵力学和不确定性原理(1921);P. A. M. Dirac(1902~1984)建立了相对论量子力学(1928);W. E. Pauli(1900~1958)提出了 Pauli 不相容原理(1925);E. Schrödinger(1887~1961)建立了波动力学(1925).

除 Schrödinger 和 de Broglie 外,其他几位物理学家建立上述理论时都只有二十几岁.量子力学在亚原子世界取代了牛顿力学.

● 相对论时空观的建立

1905年 Albert Einstein(1879~1955)发表了三篇具有里程碑意义的科学论文:光电效应——光的粒子性;对 Brown 运动的物理解释;狭义相对论.1921年他因对光电效应做出物理解释和光子新观念的引入而获 Nobel 物理奖.实际上他建立的相对论时空观在物理学上的影响更为深远.相对论时空观对大宇宙和亚原子的“小宇宙”的探索都具有十分重要的意义.

原子物理,原子核物理和粒子物理分别是 20 世纪各个时期探索物质结构的前沿科学.

- 剥离原子的电子或者改变原子的状态, 需要提供 $1 \sim 10^3$ eV 的能量.
 - 剥离核的一个核子或者改变核素的状态, 要提供 $10^5 \sim 10^7$ eV 的能量.
- eV 和 J 的换算关系是

$$1 \text{ eV} = 1.602 \times 10^{-19} \text{ J}$$

- 粒子的产生需要高能粒子碰撞, 如下表所示:

| 过 程 | 所需最小能量 |
|--------------------------------|---------------------------------|
| $e^+ + e^- \rightarrow J/\psi$ | $3.1 \times 10^9 \text{ eV}$ |
| $e^+ + e^- \rightarrow Z^0$ | $9.1 \times 10^{10} \text{ eV}$ |

0.3.2 亚原子世界涉及相互作用种类多, 是研究各种相互作用力的一个理想的场所

亚原子世界涉及自然界中的四种基本相互作用, 它们是: 电磁相互作用、弱相互作用、强相互作用和引力相互作用. 其中引力相互作用在亚原子世界可以忽略.

0.3.3 量子场论是描述粒子及其相互作用的基本理论

正如前面所述, 粒子的尺度小, 其行为必须用量子力学来描述; 粒子能量高, 其速度往往和光速相近, 其运动方式服从相对论规律. 粒子可以产生和湮灭, 在相互作用过程中粒子数量是变化的. 描述系统的自由度可以在相当大的范围内变化. 量子场论是描述微观、高速、多自由度系统的一个最好的理论. 量子场论中的粒子及其相互作用的图像是:

- 粒子本身是一种场, 场可以具有无穷多的自由度. 粒子的产生实质是相应的场由其基态变成激发态. 对应的场所处的激发态不同, 其相应的粒子数目和运动状态就不同. 粒子的湮灭, 表明该粒子的场从激发态回到基态.

- 一般来说, 场用复量描写, 互为复共轭的两种场的激发态对应它们的粒子和反粒子.

- 场论中的“真空”是充满相互重叠的各种粒子的场和相互作用的复共轭场, 它们都处于场的基态.

- 粒子的相互作用表现为场与场之间的相互作用.

例如: μ 子的衰变

