

现代物理基础丛书

68

# 粒子物理学导论

肖振军 吕才典 著



科学出版社

现代物理基础丛书 68

# 粒子物理学导论

肖振军 吕才典 著

国家自然科学基金项目(11235005)

江苏省物理一级学科建设项目

联合资助

科学出版社

北京

## 内 容 简 介

粒子物理是研究物质最深层结构的前沿学科。本书注重粒子物理基础知识的介绍,按照由浅入深的顺序对粒子物理发展史、基本相互作用、基本粒子的分类、高速粒子运动学、相互作用过程的运动学问题作了介绍。对于粒子物理的主要研究对象——轻子和强子,核力与同位旋,奇异粒子,对称性和各种守恒定律,夸克模型和强子结构以及电磁相互作用,深度非弹性散射与核子结构的部分子模型,量子色动力学,电弱相互作用的拉氏量和粒子谱,电弱规范对称性自发破缺的 Higgs 机制等分别进行了讨论。对于最新的理论研究成果和实验测量数据也作了介绍,例如, LHC 实验中的顶夸克物理和 Higgs 物理,重味物理与 CP 破坏的理论和实验研究进展。对 B 介子工厂、LHC 等重要的高能物理实验作了重点介绍。以北京正负电子对撞机实验(BEPCII+BESIII)和大亚湾中微子实验为例,对高能物理实验装置、实验数据的采集和分析流程作了较为系统的介绍。本书部分内容涉及量子场论计算。

本书可以作为理论物理、粒子物理与原子核物理及其他相关专业的研究生和高年级本科生粒子物理课程的教科书,也可以作为理论物理工作者和高能物理实验工作者的参考书。

### 图书在版编目(CIP)数据

粒子物理学导论/肖振军,吕才典著. —北京:科学出版社,2016.3  
(现代物理基础丛书;68)

ISBN 978-7-03-047551-0

I. ①粒… II. ①肖… ②吕… III. ①粒子物理学 IV. O572.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016) 第 044440 号

责任编辑:于盼盼 黄 海 曾佳佳 / 责任校对:张怡君  
责任印制:张 倩 / 封面设计:许 瑞

**科学出版社** 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

**新科印刷有限公司** 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2016年3月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2016年3月第一次印刷 印张:29 1/2 插页:6

字数:592 000

定价:98.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

## 《现代物理基础丛书》编委会

主 编 杨国桢

副主编 阎守胜 聂玉昕

编 委 (按姓氏笔画排序)

王 牧	王鼎盛	朱邦芬	刘寄星
邹振隆	宋菲君	张元仲	张守著
张海澜	张焕乔	张维岩	侯建国
侯晓远	夏建白	黄 涛	解思深

## 序

浩瀚的宇宙由微小的原子和其他物质粒子所组成，原子是由原子核和电子组成，原子核是由核子（质子和中子）组成，而核子则是由夸克和胶子组成。我们所认识的多彩的物质世界归根结底就是各种基本粒子存在和相互作用的世界。研究物质最小尺度最深层次的微观结构，研究基本粒子性质及其相互作用的前沿学科就是粒子物理学。

通过几十年实验和理论的探索，描述电弱相互作用和强相互作用基本规律的粒子物理标准模型已经建立并取得了前所未有的成功，这是在人类认识自然规律历史长河中的重大成就。当前对超越标准模型的新物理的探索更是方兴未艾。展现和介绍粒子物理学的基本知识和丰富内容，对于对自然科学有兴趣的读者特别是物理专业的读者显然是十分有益的。

该书的两位作者肖振军教授和吕才典研究员，都是在北京大学物理系学习并获得理学博士学位的，是我教过的学生中的佼佼者。我跟两位认识很久，合作发表过多篇论文，在科研工作中交流也很频繁。两位作者在粒子物理理论领域，特别是重味物理方向从事了多年的研究工作，分别独立或者合作完成了多项重要研究成果，成绩斐然，是国内该领域的优秀学者。肖振军和吕才典在  $B$  介子物理研究领域密切合作 20 多年，从 1995 年合作完成第一篇发表在 *Phys. Rev. D* 的学术论文，到先后合作主持两项国家自然科学基金重点项目，合作培养一批优秀研究生，堪称学术合作的楷模。

肖振军在河南师范大学和南京师范大学，吕才典在中国科学院大学（中科院研究生院）讲授粒子物理学课程多年，在教学科研上颇有心得。这次他们把多年的教学科研工作总结在这本《粒子物理学导论》中。该书总结了粒子物理学发展的全貌，前八章包含了粒子物理学的基本内容，从粒子物理的基本概念讲起，由浅入深，介绍了粒子物理标准模型的基本概念、基本相互作用、对称性及其应用。在第 9 和第 10 两章，作者介绍了粒子物理学各个主要前沿方向的最新进展，包括标准模型理论的精确检验、顶夸克性质的理论计算和实验测量等，重点介绍了 2012 年 7 月发现的希格斯玻色子性质的 LHC 实验测量结果， $B$ 、 $D$  介子系统的混合与  $CP$  破坏唯象研究最新进展，以及两个  $B$  介子工厂实验和 LHCb 实验的最新结果。在第 11 章，作者以北京正负电子对撞机实验（BEPCH/BESIII）为切入点，介绍了粒子物理实验的基本方法和高能物理实验数据分析的流程，介绍了目前世界上主要的高能物理实验装置的基本情况，并对中国科学家提出的关于未来高能物理实验项



目的一些设想做了简要介绍。该书还在每一章提供了一些练习题和思考题，对于研究生准备粒子物理考试提供了帮助，是一本不可多得的粒子物理学入门教材。

长期以来，国内一直缺少一本全面介绍粒子物理学基础和标准模型全貌以及最新进展的研究生入门教科书。该书的完成填补了这个空白。肖振军和吕才典撰写的这本书既涵盖了粒子物理学经典的主要内容，又对粒子物理理论研究和实验测量的最新成果和进展做了全面、详细的介绍，相关实验数据更新到 2014 年底。看到两位学者不辞辛苦写作的这本 400 多页的《粒子物理学导论》，我既为他们的成绩感到欣慰，也为后来的更年轻的学子们感到高兴，欣然提笔作此序言。不论是在粒子物理理论研究领域还是实验研究领域，对于初次进入这些领域的研究生和年轻学者来说，这本书都可以引领他们熟悉粒子物理的基本理论框架，并帮助他们迅速进入自己感兴趣的前沿研究方向。

赵光达

2015 年 7 月 30 日于北大燕园

# 前 言

粒子物理学是一门发展迅速的基础学科，致力于研究比原子核更深层次的微观世界中物质的结构、性质和相互作用的规律。粒子物理研究以量子场论为依托，处理从几个 MeV 到 TeV 能区的极其广泛的物理现象。借助于极端高能的实验手段、高强度和高精度的实验装置，深入物质内部，探索物质的结构，寻找其最小组元及其相互作用规律；寻求物质、能量、时间、空间的深刻内涵。微观世界基本粒子的物理规律和宏观宇宙的起源、演化密切相关。

从 20 世纪 30 年代劳伦斯发明的直径只有 10cm、价值约 100 美元的第一个粒子回旋加速器，到今天在欧洲核子研究中心 (CERN) 运行的周长 27km 的高能质子-质子对撞机 (LHC) 和重量超过 1 万吨的探测器，其价格以 10 亿 ~100 亿美元计算。今天的粒子物理理论和实验研究是一门“大科学”：需要巨大的人力和财力资源的投入，需要广泛的国际合作。在欧洲核子研究中心，有来自全世界 80 多个国家和地区的大约 1 万名科学家和工程师在那里工作，他们代表着 500 多所大学和研究所。在北京正负电子对撞机实验中，虽然我们的存储环周长只有大约 240m，但却是这个能区最先进的实验设施。北京谱仪国际合作组的近 400 位物理学家和研究生参加了对  $\tau$ -粲物理实验探测器建造、运行、数据的采集和分析工作，他们来自世界 11 个国家的 53 所大学和研究所。

2012 年 7 月瑞士日内瓦的大型强子对撞机实验发现了标准模型的最后一个粒子——被称为“上帝粒子”的希格斯 (Higgs) 粒子，直接导致提出规范对称性自发破缺“Higgs 机制”的彼得·希格斯和弗朗索瓦·恩格勒获得 2013 年诺贝尔物理学奖。希格斯粒子的发现意味着粒子物理标准模型的粒子谱补齐了最后一块短板，但是却并不意味着粒子物理研究的终结，实际上却开启了粒子物理研究的新纪元。在标准模型理论框架下，希格斯粒子是目前所知所有基本粒子内禀质量的来源，但是却并没有给出不同粒子质量巨大差别的原因。而且希格斯粒子的存在意味着超出原来四种基本相互作用的第五和第六种相互作用 (汤川耦合和希格斯自相互作用) 的存在，急需进一步的粒子物理实验的验证。

一直以来，随着粒子物理学的高速发展，国内缺少一本反映粒子物理近期发展的适合初入门的学生学习的教科书。本书注重粒子物理基础知识的介绍，按照由浅入深的顺序对粒子物理发展史、基本相互作用、基本粒子的分类、高速粒子运动学——洛伦兹变换，相互作用过程的运动学问题作了介绍。对于粒子物理的主要研究对象——轻子和强子，核力与同位旋，奇异粒子，共振态粒子，对称性和各

种守恒定律, 夸克模型和强子结构以及电磁相互作用, 深度非弹性散射与核子结构的部分子模型, 电弱相互作用理论的拉氏量和粒子谱, 电弱规范对称性自发破缺的 Higgs(BEH) 机制等分别进行了讨论。

本书也注重学科前沿的发展情况介绍, 同时给出了各个研究方向的研究前沿进展情况, 并以一些反应过程为例, 给出一些计算和讨论的实用例子。在本书后半部分, 作者讨论在高能量前沿方向的标准模型精确检验, 介绍 LEP、Tevatron 对撞机实验的结果, 重点介绍在 LHC 强子对撞机实验上发现 Higgs 粒子, 对 Higgs 粒子性质的初步实验测量, 对顶夸克对产生和单产生过程的高精度实验研究等。在高精度前沿方向, 作者介绍美国和日本的  $B$  介子工厂实验和 LHCb 在高能对撞机实验上对含  $b$  介子系统的研究结果, 并对未来重味物理的发展和 Super- $B$  工厂 Belle-II 实验做简单讨论。

粒子物理包括粒子物理理论和实验探测两大组成部分。本书的主要内容包括粒子的结构、性质, 基本相互作用, 标准模型理论和检验等, 其中同时涉及高能物理实验、对撞机物理和探测器技术等。在本书的最后, 作者还对高能对撞机物理实验、实验数据采集和分析作部分基础性的介绍。主要介绍了北京正负电子对撞机和北京谱仪实验, 重点介绍探测器结构、数据采集与数据分析方法以及近期 BESIII 的主要实验测量结果。作者还对大亚湾中微子实验做了简要介绍, 对我国下一代高能对撞机实验的几个主要候选方案做了简单介绍。

本书由作者在南京师范大学和中国科学院大学(前中国科学院研究生院)讲授粒子物理学相关课程讲义的基础上编写而成。感谢两所学校的老师和同学对于本书使用过程中所提出的意见和建议以及授课过程中非常有益的讨论。在授课、课间讨论过程中, 很多研究生对本书所涉及的部分表达式的推导和验证做出了贡献。特别是中国科学院大学物理学院 2014 级的研究生们, 在本学期使用本书初稿的过程中, 发现了许多打印错误和解释不清楚之处, 为作者修改书稿提供了帮助, 作者在此表示感谢。感谢南京师范大学钟彬博士对本书粒子物理实验部分的贡献, 特别是撰写了第 11 章部分小节的初稿。

作者感谢恩师赵光达先生和高崇寿先生的教诲和栽培。作者感谢戴元本、邝宇平、张宗焯、张肇西、黄涛、杜东生、李重生、薛晓舟、鲁公儒、黄朝商、童国梁、丁亦兵、曾谨言、李小源、李学潜等各位老师多年来在学术上的指导和帮助。在长期的科研工作中, 作者就粒子物理的许多问题和吴岳良、郑海扬、侯维恕、李湘楠、高原宁、张新民、王青、马伯强、郑汉青、乔从丰、邹冰松、罗民兴、任中洲、杨金民、马建平、廖益、刘纯、赵强、苑长征、金山、胡红波、朱世琳、朱守华、李海波、杨茂志、杨亚东、李作宏、张大新、陈莹、平加伦、郭立波、王建雄、贾宇、彭光雄、郑阳恒、黄明球、岳崇兴、王凯、陈绍龙、杨德山、沈月龙、徐庆君、金立刚、王琦、孙俊峰、曹俊杰、李营、王伟、王玉明、常钦等许多朋友和同事做过很多有益的讨



论, 在此一并表示衷心的感谢。

本书可以作为理论物理、粒子物理与原子核物理及其他相关专业的研究生和高年级本科生粒子物理课程的教科书, 也可以作为理论物理工作者和高能物理实验工作者的参考书。对于没有任何量子场论和群论基础的读者, 可以略去书中标有星号的章节。

粒子物理学探究领域和范围很广, 需要的数学和物理知识复杂, 限于作者水平和成书时间仓促, 书中难免存在疏漏和问题, 也必定有叙述或者打印错误, 引文也可能有疏漏之处, 请读者发电邮到两位作者的邮箱: xiaozhenjun@njnu.edu.cn, lucd@ihep.ac.cn, 指正这些问题, 以便及时更改。作者在此表示衷心的感谢。

本书的出版受到国家自然科学基金项目 (11235005) 和江苏省物理一级学科重点学科建设项目 (1343201042) 的联合资助。

肖振军 吕才典

2014 年 12 月于南京和北京

# 目 录

第 1 章 绪论	1
§1.1 粒子物理学的研究内容	1
§1.1.1 “基本”粒子谱	1
§1.1.2 粒子物理理论概要	4
§1.1.3 自然单位制	5
§1.2 高能物理实验手段	6
§1.2.1 现有高能加速器的种类	6
§1.2.2 世界上著名的加速器举例	8
§1.3 粒子的基本性质	10
§1.3.1 质量	10
§1.3.2 寿命与衰变宽度	11
§1.3.3 电荷	13
§1.3.4 自旋、极化、自旋统计关系	13
§1.3.5 螺旋度	14
§1.3.6 磁矩	15
§1.4 场、粒子与相互作用	16
§1.4.1 场和粒子	16
§1.4.2 基本相互作用	16
§1.5 粒子的分类	18
§1.5.1 稳定粒子和共振态	19
§1.5.2 轻子-夸克层次粒子的分类	20
练习题	21
第 2 章 高速粒子运动学	22
§2.1 洛伦兹变换	22
§2.1.1 洛伦兹变换	22
§2.1.2 洛伦兹变换的速度描写	26
§2.2 实验室坐标系和质心坐标系	29
§2.2.1 质心坐标系和反应有效能量	29
§2.2.2 反应 $Q$ 值和阈能	33
§2.2.3 微分截面在实验室系-质心系之间的变换关系	35

§2.3 相空间	37
§2.3.1 $n$ 体末态相空间	37
§2.3.2 不变相空间积分	38
§2.3.3 不变质量谱	40
§2.4 几个典型的运动学问题	42
§2.4.1 $n$ 个粒子反应的洛伦兹不变量	42
§2.4.2 $2 \rightarrow 2$ 反应中的 $s, t, u$ 不变量	42
§2.4.3 二体衰变运动学	43
§2.4.4 三体衰变运动学	45
§2.4.5 二体反应截面	49
练习题	50
<b>第 3 章 轻子和量子电动力学</b>	<b>52</b>
§3.1 轻子的基本性质	52
§3.1.1 $\beta$ 衰变与中微子的发现	53
§3.1.2 反 $\beta$ 衰变, 中微子相互作用	55
§3.1.3 中微子的螺旋度 (helicity) 与手征性 (chirality)	56
§3.1.4 电子和 $\mu$ 子的磁矩	58
§3.2 轻子数守恒和轻子普适性	58
§3.3 中微子质量问题	61
§3.4 中微子振荡	66
§3.4.1 振荡概率 $P_{\alpha\beta}$	66
§3.4.2 两个中微子间的振荡	68
§3.4.3 味本征态的运动方程*	70
§3.4.4 目前中微子实验的结果	72
§3.5 量子电动力学和轻子的散射过程	72
§3.5.1 阿贝尔定域规范对称性*	72
§3.5.2 量子电动力学的费恩曼规则	76
§3.5.3 轻子的电磁散射过程	78
§3.6 狄拉克方程与正电子	80
练习题	86
<b>第 4 章 强子与强子间相互作用</b>	<b>88</b>
§4.1 核力的汤川势和 $\pi$ 介子的理论预言	88
§4.2 核力与同位旋	92
§4.2.1 核力的电荷无关性和同位旋的引入	92
§4.2.2 两个核子体系的同位旋	94

§4.2.3	核子同位旋算符及波函数的矩阵表示*	95
§4.2.4	$\pi N$ 系统的同位旋	97
§4.3	同位旋对称性的应用	98
§4.3.1	同位旋守恒定律	98
§4.3.2	同位旋的破坏	101
§4.3.3	同位旋在弱衰变中的应用	102
§4.4	奇异粒子: $K$ 介子和超子	103
§4.4.1	奇异粒子的发现	103
§4.4.2	奇异粒子的性质	105
§4.4.3	重子数 $b$	107
§4.4.4	超荷 $Y$ , 盖尔曼-西岛关系	108
§4.4.5	奇异粒子的自旋和宇称	110
§4.5	共振态	110
§4.5.1	弹性散射的分波分析*	110
§4.5.2	共振态的产生和描写	112
§4.5.3	重子共振态	114
§4.5.4	介子共振态	115
	练习题	118
<b>第 5 章</b>	<b>对称性和守恒定律</b>	119
§5.1	守恒量的一般性质	119
§5.1.1	对称和破缺	119
§5.1.2	变换和对称的分类	120
§5.1.3	守恒量分类, 严格守恒和近似守恒	121
§5.2	Noether 定理	122
§5.2.1	经典物理中的 Noether 定理	122
§5.2.2	量子力学中的对称性	123
§5.2.3	复合对称性守恒量	124
§5.2.4	对称性和群	124
§5.3	连续时空对称性*	126
§5.3.1	空间平移不变性和动量守恒定律	126
§5.3.2	空间转动不变性和角动量守恒定律	127
§5.3.3	时间平移不变性和能量守恒定律	129
§5.4	空间反射变换和宇称守恒	129
§5.4.1	空间反射变换和宇称	129
§5.4.2	宇称守恒和宇称不守恒	131

§5.5 电荷共轭变换、 $G$ 变换和 $C$ 、 $G$ 宇称守恒	133
§5.5.1 纯中性态和 $C$ 宇称	135
§5.5.2 $C$ 变换不变和 $C$ 宇称守恒	137
§5.5.3 $G$ 变换和 $G$ 宇称	137
§5.5.4 $G$ 宇称守恒	139
§5.6 $CP$ 变换, $CP$ 守恒与破坏, $CPT$ 定理	141
§5.6.1 $CP$ 破坏	141
§5.6.2 $CP$ 破坏的来源	143
§5.6.3 时间反演和 $T$ 不变性	146
§5.6.4 $CPT$ 定理	149
§5.7 全同粒子交换变换	152
§5.7.1 全同粒子组成系统的选择规则	152
§5.7.2 正反费米子组成系统的对称性	153
§5.7.3 正反玻色子组成的系统	154
§5.8 么正群*	156
§5.8.1 $U(1)$ 规范不变性	157
§5.8.2 $SU(2)$ 群和同位旋	158
§5.8.3 $SU(3)$ 群	159
练习题	161
<b>第 6 章 强子结构、夸克模型</b>	<b>163</b>
§6.1 强子分类	163
§6.2 夸克模型和轻强子系统	169
§6.2.1 重子九重态	171
§6.2.2 夸克与颜色自由度	172
§6.2.3 重子八重态	175
§6.2.4 盖尔曼-大久保质量公式	177
§6.3 轻介子系统	179
§6.3.1 赝标量介子	179
§6.3.2 $1^-$ 矢量介子	183
§6.3.3 $\phi$ 介子衰变与“OZI”规则	184
§6.4 重夸克偶素: $J/\psi$ , $\Upsilon$ 介子	186
§6.4.1 粲夸克偶素: $J/\psi$ 的发现和基本性质	186
§6.4.2 Okubo-Zweig-Iizuka (OZI) 规则	189
§6.4.3 底夸克偶素: $\Upsilon$	190
§6.5 重味夸克物理	192



§6.5.1	$b$ 夸克与 $B$ 物理	193
§6.5.2	顶夸克与顶夸克物理	195
§6.6	强子的命名规则	197
§6.6.1	中性没有味道的介子 ( $S = C = B = T = 0$ )	197
§6.6.2	带味道的 $S, C, B \neq 0$ 的介子	198
§6.6.3	重子的命名规则	199
§6.6.4	静态 $SU(6)$ 模型	201
	练习题	202
第 7 章	量子色动力学与核子结构函数	204
§7.1	量子色动力学理论	204
§7.1.1	强相互作用的拉氏量	204
§7.1.2	渐近自由与夸克禁闭	206
§7.2	电磁形状因子	212
§7.3	电子-质子深度非弹性散射 (DIS)	215
§7.3.1	$ep$ 散射的无标度性*	216
§7.4	核子结构的部分子模型	220
§7.4.1	简单部分子模型	221
§7.4.2	虚光子吸收的总截面*	223
§7.4.3	夸克分布函数	224
§7.5	HERA 电子-质子对撞机与深度非弹性散射	225
§7.5.1	中性流过程: $\gamma$ 交换*	226
§7.5.2	部分子模型: $e + q \rightarrow e + X$	228
§7.5.3	深度非弹性散射微分截面公式*	231
	练习题	234
第 8 章	电弱统一理论	236
§8.1	电弱相互作用理论发展简史	236
§8.2	GIM 机制和 CKM 矩阵	242
§8.2.1	夸克混合	242
§8.2.2	GIM 机制	243
§8.2.3	CKM 夸克混合矩阵	244
§8.3	电弱统一理论的群结构、拉氏量与粒子谱	246
§8.3.1	Yang-Mills 场: 非阿贝尔定域规范对称性*	248
§8.3.2	规范对称性一般情况*	251
§8.4	对称性的自发破缺	253
§8.5	Brout-Englert-Higgs 机制	262

§8.6	$\sigma(e^+e^- \rightarrow f^+f^-)$ 的计算*	267
§8.6.1	$e^+e^- \rightarrow f^+f^-$ : 有极化情况	268
§8.6.2	$e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$ : 光子传播子贡献	270
§8.6.3	$e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$ : $\gamma$ 和 $Z^0$ 贡献	272
§8.6.4	$e^+e^- \rightarrow q\bar{q}$ (hadrons)	274
	练习题	277
<b>第 9 章</b>	<b>标准模型精确检验、顶夸克物理与 Higgs 物理</b>	279
§9.1	标准模型精确检验	280
§9.1.1	荷电流与中性流	280
§9.1.2	标准模型电弱参数的精确测量	282
§9.2	规范玻色子多点耦合的实验检验	286
§9.3	顶夸克物理	289
§9.4	LHC 实验与 Higgs 物理	296
§9.4.1	Higgs 玻色子的主要产生过程	298
§9.4.2	Higgs 玻色子的衰变和 Higgs 玻色子与其他粒子的耦合测量	300
§9.4.3	新物理模型中的 Higgs 玻色子	309
	练习题	312
<b>第 10 章</b>	<b>重味物理和 <math>CP</math> 破坏</b>	314
§10.1	$K$ 介子系统: 发现 $CP$ 破坏 50 年	316
§10.2	$B$ 介子系统的混合与 $CP$ 破坏	323
§10.2.1	$B_{(s)}$ 介子混合: $\Delta M_q$ 和 $\Delta\Gamma_q$	323
§10.2.2	间接 $CP$ 破坏 $a_{SL}^q$	326
§10.2.3	第二、三类 $CP$ 破坏: $A_{CP}^{\text{decay}}$ 和 $A_{CP}^{\text{mix}}$	330
§10.3	$B_{(s)}$ 介子典型衰变过程	332
§10.3.1	低能有效哈密顿量方法	332
§10.3.2	$B_{s,d}^0 \rightarrow \mu^+\mu^-$ 纯轻子衰变过程	333
§10.3.3	半轻子衰变过程	337
§10.3.4	强子衰变过程	339
§10.4	CKM 矩阵与幺正三角形相角抽取	340
§10.4.1	相角 $\beta$	343
§10.4.2	相角 $\alpha$	346
§10.4.3	相角 $\gamma$	348
§10.4.4	相位 $\phi_s$	353
§10.5	未来的重味物理研究	358
	练习题	364

第 11 章 高能物理实验简介 .....	366
§11.1 加速器物理实验 .....	366
§11.1.1 粒子加速器 .....	369
§11.1.2 粒子探测器 .....	371
§11.1.3 粒子物理实验数据分析 .....	374
§11.2 非加速器物理实验 .....	376
§11.3 中国的加速器粒子物理实验 .....	380
§11.3.1 北京正负电子对撞机 .....	381
§11.3.2 北京谱仪 .....	383
§11.4 BESIII 国际合作组部分成果简介 .....	396
§11.4.1 轻强子 .....	396
§11.4.2 $X$ 、 $Y$ 、 $Z$ 强子谱 .....	399
§11.4.3 $D$ 介子的混合与衰变 .....	404
§11.5 中国未来高能物理实验展望 .....	408
练习题 .....	412
附录 A 狄拉克方程与狄拉克矩阵 .....	413
附录 B 费恩曼规则与 $SU(3)_c$ 规范群 .....	426
附录 C 部分重粒子典型衰变宽度表达式 .....	432
附录 D 电磁学关系式和物理常数表 .....	436
参考文献 .....	438
彩图	

# 第1章 绪 论

## 物质是由什么组成的？

人们在研究自然界普遍规律时有一个很自然的问题就是物质组成的最小单位是什么？在我国古代典籍《庄子·天下篇》中，庄子提出“一尺之棰，日取其半，万世不竭。”也就是说一尺之棰，今天取其一半，明天取其一半的一半，后天再取其一半的一半的一半，如是“日取其半”，总有一半留下，所以“万世不竭”。一尺之棰是一个有限的物体，但它却可以无限地分割下去。这是辩证的思想，认为物质组成应该没有最小的极限。实际上夏朝时的中国人（公元前 2000 年）相信物质是由金、木、水、火、土（五行）组成。西方哲学家（古希腊的 Empedocles）在公元前 430 年认为物质是由水、火、土和空气组成的。同时代的 Democritus 认为万物是由大小不同、质量不同、有不可入性的原子组成，原子是“不可再分”的意思。战国时代宋国的哲学家惠施也有此观点（至小无内，谓之小一）。真正带有近代性质的原子论，是道尔顿（John Dalton, 1766~1844）在 19 世纪初提出来的。19 世纪，自然科学创立，物理、化学等相继诞生。各种物质都是由分子组成的，不同分子的性质是物质的物理和化学性质的基础。分子又是由原子组成的，门捷列夫的元素周期表给出了物质组成的最新答案：物质世界是由约 110 种元素组成。

20 世纪是物理学飞速发展的世纪，也可以说是一个物理学的世纪。这个世纪的前 30 年是原子物理学的时代，与化学的研究并存。当然，通过大学的量子力学和原子物理课程，大家已经知道了这些原子（元素）是由原子核和电子组成，原子核则是由质子和中子组成的。20 世纪的 30~40 年代是核物理学大发展的时期。在这之后，粒子物理学蓬勃发展起来。

粒子物理学的研究对象就是物质的基本结构和基本相互作用<sup>[1]</sup>。粒子物理学认为质子和中子是由夸克组成的。那么到底有多少种夸克，或者说有多少种基本粒子呢？这些夸克又是如何组成质子、中子、介子的呢？它们是通过什么样的相互作用联系起来的？这就是这门课程要告诉大家的。

## §1.1 粒子物理学的研究内容

### §1.1.1 “基本”粒子谱

粒子物理学的发展历史从某种程度上也可以说是各种基本粒子的发现史，按照顺序有：