

华/中/师/范/大/学/出/版/金/丛/书

夸克与轻子物理 ——原理导引

KUAKE YU QINGZI WULI YUANLI DAOYIN

杨纯斌 蔡 勳 编著

华中师范大学出版社



华/中/师/范/大/学/出/版/基/金/丛/书

夸克与轻子物理 ——原理导引

KUAKE YU QINGZI WULI YUANLI DAOYIN

杨纯斌 蔡 勳 编著

华中师范大学出版社

夸克与轻子物理 ——原理导引

杨纯斌 蔡 勛 编著

教育部直属师范大学
华中师范大学出版社
2000年·武汉

(鄂)新登字 11 号

图书在版编目(CIP)数据

夸克与轻子物理——原理导引/杨纯斌,蔡勛编著.

—武汉:华中师范大学出版社,2000.3

ISBN 7-5622-2096-4/O·121

I. 夸…

II. ①杨… ②蔡…

III. ①夸克—基本知识 ②轻子—基本知识

IV. O572.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2000)第 00959 号

夸克与轻子物理——原理导引

①杨纯斌 蔡 勛 编著

华中师范大学出版社出版发行

(武昌桂山子 邮编:430079)

新华书店湖北发行所经销

通山县印刷厂印刷

责任编辑:胡祚蓉

封面设计:罗明波

责任校对:叶 誉

督 印:方汉江

开本:850mm×1168mm 1/32

印张:9

字数:225千字

版次:2000年3月第1版

2000年3月第1次印刷

印数:1—1000

定价:16.00元

本书如有印装质量问题,可向承印厂调换。

道生一，

一生二，

二生三，

三生万物。

《老子》第四十二章

内 容 提 要

本书以作者之一在华中师范大学粒子物理研究所授课时的讲义为基础,经修改、充实写成。根据研究和教学的需要,作者力求较系统地介绍夸克与轻子物理学(即现代粒子物理学)的基本概念,并在一定程度上反映该学科在理论原理和模型框架等方面公认的较成熟的近期发展。

全书在绪论之后,分为十章,内容有:夸克对称性,无自旋粒子的量子电动力学,自旋 $1/2$ 粒子的量子电动力学,强子结构与部分子模型,量子色动力学,弱相互作用的唯象理论,弱电唯象理论,规范对称与标准模型。

本书取材注重解决实际问题的能力,可供理论物理及有关专业的科学研究工作者参考,也可作为大专院校物理系研究生和高年级大学生的教学用书。

前 言

本书最早起稿于1986年给华中师范大学物理系四年级大学生讲授“高能物理”选修专业课时撰写的讲义。以后,在给理论物理专业90级和91级硕士研究生、1992年春季入学的博士研究生以及部分国内访问学者和进修教师讲授“粒子物理学”必修专业课时,又进行了整理和补充。书的主体部分完成于1995年秋季。这一课程的目的是要把学生带到世纪交替前物理学最活跃和最令人激动的前沿领域。由于这门学科的发展快,新的理论、新的实验和新的分支不断涌现,国内已出版的著作往往跟不上学科的发展,深感有必要编写一本相关的入门书。

如果从1932年正电子被发现时算起,粒子物理学作为一门独立的学科处于现代物理学的前沿已经60多年了。显然,要真正掌握它,并且切实做点物理工作,需要较深厚的数学和物理基础知识,譬如,群论、泛函分析、相对论性量子力学、规范场论等,而且也不是在短短几十个学时内所能讲完全、讲透彻的。不加夸张地说,不少章节都可以单独作为一门课程,花费一到两个学期来讲授。因此,本书着重对粒子物理学的基本实验规律、主要的物理概念和关键的理论发展,作出较为直观的粗线条式的讲述,避免其它专业书籍中会涉及的细致的理论分析和繁琐的数学推导。

粒子物理学的任务是探索物质的基本组元,研究支配这些组元性质的力。自20世纪60年代以来,一代又一代高能粒子加速器的更新和运行,获取了一批又一批崭新的实验结果,相应地,迅速形成了解释和预言这些结果的一种又一种灿烂的理论思想,使人类对于物质最基本的微观结构的认识经历了一场巨大的变革。30多年前被普遍认为基本的质子和中子,是由被称为夸克的更基

本的组元构成,它们中的5种已被确认,第6种夸克已得到实验的初步证实。电子依然是物质的基本组元,只是还存在有另外5种类似性质的粒子,它们被统称为轻子。物质是由夸克和轻子构成的,这就是我们目前已有的知识,也是我们把这本关于现代粒子物理学的书取名为《夸克与轻子物理——原理导引》的原因。

本书内容的选取和组织,着眼于研究工作中提出的主流课题,而不拘泥于形式上的理论系统。绪论分为五节,概括地介绍夸克与轻子、色量子数和电磁、强、弱三种相互作用。第一章给出夸克对称性;第五章介绍强子结构与部分子模型。第二、三、四章,第六、七章和第八章分别讲述电磁相互作用理论、强相互作用理论和弱相互作用理论。第九章和第十章分别讨论弱电唯象理论和标准模型。背景材料中参考了 Halzen F 和 Martin A D 合著的《Quarks and Leptons》一书。在有限的讲授时间里,尽可能让学生了解该学科的多个方向和新发展,从长远来看,应该是大有裨益的。我们不当在学生刚开始学习粒子物理时,就把他们限制在一个我们自己所熟悉的窄小的选题上。也需要指出,如果学生只满足于课堂上讲授的那些知识,自己不再花时间钻研,他们将不可能在任何一个选题上学会做研究工作。希望本书能够给初学者作入门的向导。为此,我们给本书加了一个副书名“原理导引”。我的合作者杨纯斌在本书的撰写中起了重要作用。限于作者的水平,偏颇疏漏之处自当不少,祈望指正。

感谢李家荣教授审阅全书和提出宝贵意见。许多同志(钱琬燕,喻连枝,王晓荣,余燕凌,胡宗荣等)为本书的付印做了大量的工作,作者在此向她们一并致谢。

蔡 勛

1999年10月于武昌桂子山

目 录

绪论	1
§ 0.1 夸克与轻子	1
§ 0.2 色量子数	4
§ 0.3 电磁相互作用	9
§ 0.4 强相互作用	10
§ 0.5 弱相互作用	15
第一章 夸克对称性	19
§ 1.1 同位旋和 $SU(2)$ 对称性	19
§ 1.2 奇异性和 $SU(3)$ 对称性	22
§ 1.3 宇称、电荷共轭和分立对称性	25
§ 1.4 介子	26
§ 1.5 重子	29
§ 1.6 重夸克	34
§ 1.7 色因子	41
第二章 无自旋粒子的量子电动力学	45
§ 2.1 反粒子	45
§ 2.2 非相对论性微扰理论与 Feynman 规则	48
§ 2.3 无自旋的“电子- μ 子”散射	53
§ 2.4 截面和衰变率	56

§ 2.5	无自旋的“电子-电子”和“电子-正电子”散射	60
§ 2.6	交叉对称性	61
§ 2.7	传播子	64
第三章	自旋 $\frac{1}{2}$ 粒子的量子电动力学 (I)	67
§ 3.1	Møller 散射 $e^-e^- \rightarrow e^-e^-$	67
§ 3.2	$e^-\mu^+ \rightarrow e^-\mu^+$ 过程和 $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$ 过程	70
§ 3.3	螺旋度	73
§ 3.4	光子	79
§ 3.5	Compton 散射与 $e^+e^- \rightarrow \gamma\gamma$ 过程	85
§ 3.6	Green 函数方法, Feynman 规则	88
第四章	自旋 $\frac{1}{2}$ 粒子的量子电动力学 (II)	94
§ 4.1	电子的 Rutherford 散射	94
§ 4.2	Lamb 移动	99
§ 4.3	反常磁矩	101
§ 4.4	重整化技术	103
§ 4.5	荷屏蔽与跑动耦合常数	108
第五章	强子结构与部分子模型	113
§ 5.1	电子-质子弹性散射和强子的形状因子	113
§ 5.2	电子-质子深度非弹性散射	119
§ 5.3	Bjorken 标度性	125
§ 5.4	部分子	128
§ 5.5	夸克与胶子	133

第六章 量子色动力学 (I)	140
§ 6.1 虚光子-部分子过程	140
§ 6.2 胶子辐射	144
§ 6.3 Altarelli-Parisi 方程	148
§ 6.4 部分子的几率密度函数	152
§ 6.5 Weizsäcker-Williams 公式	155
第七章 量子色动力学 (II)	158
§ 7.1 $e^+e^- \rightarrow q\bar{q}$ 过程	158
§ 7.2 碎裂函数及其标度性	161
§ 7.3 $e^-e^+ \rightarrow q\bar{q}g$ 过程	165
§ 7.4 $e^-e^+ \rightarrow$ 强子的 QCD 修正	173
§ 7.5 微扰 QCD	175
§ 7.6 Drell-Yan 过程	177
第八章 弱相互作用的唯象理论	180
§ 8.1 宇称破坏与弱流	180
§ 8.2 μ 衰变和 π 衰变	187
§ 8.3 具有带电流贡献的中微子-电子散射	192
§ 8.4 中微子-夸克散射	194
§ 8.5 弱中性流	198
§ 8.6 Cabibbo 角和弱混合角	200
§ 8.7 CP 破坏	207
第九章 弱电唯象理论	212
§ 9.1 超荷	212
§ 9.2 流-流的有效相互作用	217

§ 9.3 弱电干涉效应	223
第十章 规范对称性与标准模型	229
§ 10.1 局域规范不变性	229
§ 10.2 对称性自发破缺与 Higgs 机制	235
§ 10.3 规范 Bose 子和 Fermi 子的质量	242
§ 10.4 标准模型	250
§ 10.5 大统一及其它	253
附录	260
A 1 自然单位制	260
A 2 群论简介	261
A 3 非相对论性量子力学	264
A 4 Lorentz 协变性与 4-矢量符号	265
A 5 Klein-Gordon 方程	266
A 6.1 Dirac 方程	268
A 6.2 螺旋度	269
A 6.3 反粒子解	272
A 6.4 双线性协变关系、求迹定理	274
A 6.5 零质量 Fermi 子(两分量中微子)	276
参考文献	278

绪 论

§ 0.1 夸克与轻子

世界是怎样构成的?

我国古代思想家老子提出:“道生一,一生二,二生三,三生万物”.这里的“道”是老子用以说明宇宙本原的概念,“一”指原始未分的混沌状态,“二”指阴阳,阴阳相激荡,产生和气,是为“三”.“道”经过演化而构成万物世界.后来,西方古代思想家 Anaximenes 具体地给出一种原始的物质结构理论:物质由空气、火、水和土四种元素构成.

现在,人们已熟悉 Mendeleev 的科学答案:元素周期表,包括有 100 多种化学元素.老子的思想比 Anaximenes 的模型在理性上明显地优越,因为简单.但是,老子的思想太抽象. Anaximenes 的模型,采用的物质“砖块”数目少,可惜,它是错误的! Mendeleev 的答案是正确的,但作为一种“最终的”答案又太复杂了.实验上发现的元素数目的急剧增加,周期表排列的明显规律性,强烈地表明物质还具有更下一层次的结构.我们现在已经知道, Mendeleev 周期表中的各种元素都由夸克与轻子组成.

关于“世界怎样构成”的问题,作为 20 世纪最重要的科学成就,已可以用表 0.1 来回答.表 0.1 的答案与 Anaximenes 模型一样具有理性上的简单性,又与 Mendeleev 方案一样在定量上与实验事实符合.这个答案是一步一步由涉及原子物理、核物理和粒子物理许多领域的一系列实验中提炼得来的.这些实验从 20 世纪初就开始了,而直到近 30 年内,最重要的一系列发现才直接把我们

引向夸克、轻子和规范 Bose 子的世界。

质子 p 和中子 n (统称为核子) 被一种强相互作用 (或核力) 束缚在一起形成了核。核又通过电磁力把电子束缚起来, 形成各种化学元素的原子。通过弱相互作用造成核的放射性衰变, 中子转变为质子, 伴随一个电子和一个中微子产生。然而世界并不只有中子和质子, 它们是被称为重子并参与强相互作用的 Fermi 态粒子谱中最轻的粒子。根据最近的记录, 重子的数目已多达上百种。此外, 还发现有相当多数目的参与强相互作用的 Bose 态粒子——介子, π 介子是最轻的一种。Fermi 子和 Bose 子分别是自旋 $J = n(\hbar/2)$ 的、系数 n 为奇数和偶数的粒子态。所有参与强相互作用的粒子 (重子和介子) 统称为强子。强子由夸克组成。电子和中微子不参与强相互作用, 因此不是强子, 称为轻子。中微子只参与弱相互作用。夸克和电子还参与电磁相互作用。 π 介子、中子、质子不是物质结构的谜底, 它们和由它们组成的核和原子, 只是由夸克和电子组成的束缚态的一些表现形式。

表 0.1 作为物质砖块的基本粒子和它们的某些量子数

	名称	自旋	重子数 B	轻子数 L	电荷 Q
夸克	u (上夸克)	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{3}$	0	$+\frac{2}{3}$
	d (下夸克)	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{3}$	0	$-\frac{1}{3}$
轻子	e (电子)	$\frac{1}{2}$	0	1	-1
	ν (中微子)	$\frac{1}{2}$	0	1	0
规范 Bose 子	γ (光子)	1	0	0	0
	$W^{\pm}, Z$ (弱 Bose 子)	1	0	0	$\pm 1, 0$
	$g_i, i=1, \dots, 8$ (胶子)	1	0	0	0

(自旋单位为 $\hbar$, 电荷单位的定义规定电子电荷为 -1。表中没有列出夸克与轻子的反粒子。)

我们现在需要一种理论框架以便对上述图像作定量的计算. 这种理论应当既是量子化的, 又是相对论不变的. 20 世纪 30 年代初出现的一种描写电子和光子电磁相互作用的理论能满足这些要求, 这就是量子电动力学. 描写其它类型相互作用的相对论性量子场论, 也以量子电动力学为模式. 这些理论与所谓的“规范理论”有关. 量子电动力学是规范理论的一个简单例子. 人们相信, 夸克和轻子之间电磁相互作用、弱相互作用和强相互作用都可以由规范理论统一描写, 那就是弱电统一模型和量子色动力学.

由规范理论的一般性框架给出的模型与新的实验现象结合, 已经成为不断取得重大研究进展的基础. 奇异粒子的实验发现就是典型的例子. 对于反应 $\pi^+ + p \rightarrow K^+ + \Sigma^+$ 的实验观察发现奇异粒子在非奇异强子的强相互作用中成对产生, 它们不能被纳入由 u 和 d 夸克组成的框架内. 这清晰地暗示了一种新夸克的存在, 称为奇异夸克(s). 新的奇异夸克不仅带电, 还有与 u 和 d 夸克不同的其它量子数. 实验上测量的奇异粒子的质量, $K(u\bar{s})$ 比 $\pi(u\bar{d})$ 重, $\Sigma(uus)$ 比 $p(uud)$ 重, 暗示 s 夸克比 u 和 d 重. 现在已经知道, 还有更重的 c 夸克、 b 夸克和 t 夸克. 轻子除了电子外, 也有更重的 μ 子, 它除了质量比电子约大 200 倍外, 其它所有方面都像电子. 现在我们知道还有一种轻子叫 τ 子, 因此表 0.1 应当扩展为表 0.2.

表 0.2 已经知道的夸克和轻子

	第一代	第二代	第三代
夸克	u (上夸克)	c (粲夸克)	t (顶夸克)
	d (下夸克)	s (奇异夸克)	b (底夸克)
轻子	e (电子)	μ (μ 子)	τ (τ 子)
	ν_e (e 中微子)	ν_μ (μ 中微子)	ν_τ (τ 中微子)

原子核、原子和分子, 即我们周围的世界是由表 0.2 的第一列组成的, 称为第一代. 第二列、第三列中粒子的所有性质都与第一

列相似,差别在于质量,分别称为第二代和第三代.为什么世界这样分代,是迄今未能回答的重大物理问题之一.

随着新一代粒子加速器的建造,研究目标进入更高的能量区域.使用这些加速器和十分尖端的探测器,人们正在探索前人还没有揭示过的物质微观世界更深层次的结构.本书希望把读者引向这样一个领域.

§0.2 色量子数

核子的自旋为 $\frac{1}{2}$, π 介子的自旋为 0. 它们由自旋 $\frac{1}{2}$ 的夸克构成,遵从角动量加法规则,分为重子(3 个夸克构成的 Fermi 态)和介子(夸克-反夸克构成的 Bose 态). 在表 0.1 中,电荷 Q 、重子数 B 和轻子数 L 是相当简单的标记,它们都是守恒的相加性量子数. 例如,质子是 uud 束缚态,利用表中 u 和 d 夸克的量子数,质子的重子数 $B = \frac{1}{3} + \frac{1}{3} + \frac{1}{3} = 1$,轻子数 $L = 0$,电荷 $Q = \frac{2}{3} + \frac{2}{3} - \frac{1}{3} = 1$.

历史上由 $p = uud$ 和 $n = udd$, 推测 $\Delta^{++} = uuu$, 但遇到了困难. uuu 组态虽然正确地符合了实验上发现的双电荷、自旋 $3/2$ 的 Δ^{++} 重子,但是由三个全同的自旋 $1/2$ 基态 u 夸克构成的组态是 Fermi 统计禁止的. 此外,这种朴素的夸克模型还有一种麻烦, qqq , $\bar{q}\bar{q}\bar{q}$ 和 $q\bar{q}$ 态可以分别表现实验观察的重子、反重子和介子,然而,诸如 qq , $\bar{q}\bar{q}$, $\dots$, 或单个夸克本身,以及其它所有可能组合的态又是什么呢? 例如,实验上并没有观察到电荷为 $4/3$ 的 uu 粒子. 为了解决这两个难题,我们给夸克(不给轻子)赋予了一种新的性质,即一个新的量子数,这就是“色”量子数. 夸克分别具有三种原始的色:红、绿、蓝,分别记为 R, G, B . “色”这个名词的使用,只是借用了一种类似性质,即所有真实的颜色都由三原色组成. 将 Δ 态的波函数写为 $u_R u_G u_B$, 就克服了 Fermi 统计的困难,三个 u

