

面向

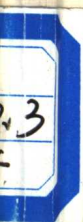
21

世纪物理学丛书

夸克与轻子物理 的运动学原理

刘涵 蔡勖 编著
华中师范大学出版社

MIANXIANG ERSHIYI SHIJI WULIXUE CONGSHU



面向 21 世纪物理学丛书

KUAKHEYUQINGZIWULIDEYUNDONGXUEYUANLI

夸克与轻子物理的运动学原理

刘 涵 蔡 勛 编著

华中师范大学出版社

1999 年·武汉

(鄂) 新登字 11 号

图书在版编目(CIP)数据

夸克与轻子物理的运动学原理/刘涵 蔡勛 编著.

—武汉:华中师范大学出版社,1999.12

(面向 21 世纪物理学丛书/张镇九主编)

ISBN 7-5622-2164-2/O·122

I. 夸… II. ①刘… ②蔡… III. ① 夸克—运动学分析(粒子物理) ② 轻子—运动学分析(粒子物理) IV. O572.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(1999)第 74798 号

面向 21 世纪物理学丛书

夸克与轻子物理的运动学原理

©刘 涵 蔡 勛 编著

华中师范大学出版社出版发行

(武昌桂子山 邮编:430079)

武汉正佳彩色输出中心照排

新华书店湖北发行所经销

文字六〇三印刷厂印刷

责任编辑:苏 睿

封面设计:罗明波

责任校对:刘 淳

督 印:方汉江

开本:850mm×1168mm 1/32

印张:8.125 字数:210 千字

版次:1999 年 12 月第 1 版

1999 年 12 月第 1 次印刷

印数:1—1 000

定价:22.00 元

本书如有印装质量问题,可向承印厂调换。

序 言

不论是在人生的道路上,还是在科学探索的过程中,有时候要回顾过去、审视现在并展望未来。物理学已有很长的发展历史,将来也必定还将有更大的发展。在这世纪相交之际,希望有这样的关于物理学的书:它能在整体上以较为一致的观点将迄今为止人们认为对物理学既是最重要、又是最基本的认识和问题作一个较为系统的概括;它是在科学上比较严格和比较可靠的科学专著;它在内容的选取上应力求简明,即不过于深邃和庞杂;它应是对物理学科内部的各分支学科、物理学的边沿学科以及与物理学相交叉的学科感兴趣的学者可作为学习和进一步开展研究的参考。本丛书正是为满足上述希望所作的尝试。

周光召

一九九七年九月七日

Preface

From time to time, we need to review the history, examine the present and the future perspectives. Physics has quite a long history, and is bound to have magnificent future. Standing at the turning point of the century, one will find such books on physics interesting and revealing: that the books should provide a systematic review of the mature understandings of the fundamental and important concerns in physics. The content of the book needs to be concise, without involving too much detailed derivatives and being encyclopedic. They should serve as useful reference books for the investigators engaged in branches of physics and relevant fields. The organizing of this series of books is an attempt with this goal in mind.

Zhou Guang Zhao

周光召

September 7, 1997

《面向 21 世纪物理学丛书》

顾问:周光召, Bergmann P G, 孙祖训

主编:张镇九

编委(以姓氏的拼音或英文字母为序):

白春礼(北京,中国科学院)

包 钢(美国,乔治亚大学)

Bergmann P G(美国,纽约大学)

蔡 勛(华中师范大学)

Gals'tov D(俄罗斯,莫斯科大学)

Kalnins E G(新西兰,威卡托大学)

林克椿(北京医科大学)

刘煜炎(中国科学院武汉物理和数学所)

Sabbata V(意大利,波罗尼亚大学)

桑建平(武汉大学)

孙祖训(中国原子能科学研究院)

王 琛(北京,中国科学院)

熊吟涛(武汉大学)

詹明生(中国科学院武汉物理和数学所)

张端明(华中理工大学)

张永德(中国科学技术大学)

张镇九(华中师范大学)

内 容 简 介

回顾 20 世纪，造就现代科学和现代技术，改变人类自然观和认识论的，不能不归功于物理学最重大的成果：相对论与量子力学。伴随这两大理论的建立，得以迅速发展的最深刻、最激动人心的领域之一，是关于物质最深层次结构和基本相互作用的研究，即夸克与轻子物理。

以高能的实验手段，在理论上探索微观世界的统一图像和一般规律，基本出发点是相对论原理和量子力学原理。本书主要介绍夸克与轻子物理的运动学原理，探讨在缺省相互作用动力学条件下，运用守恒律和相空间去分析物理机制的最一般方法。

全书分为六章，第 1 章陈述粒子物理的标准模型，引入了轻子、夸克与强子，以及 Feynman 规则；第 2 章分别就单粒子、二粒子和多粒子情形介绍相空间分析；第 3 章讨论单体衰变过程，包括静止衰变的二粒子和三粒子末态，飞行衰变的二粒子和三粒子末态；第 4 章讨论两体散射过程，包括弹性和非弹性散射过程；第 5 章讨论多重产生过程，侧重分析了单举方法，分别叙述极限碎裂、标度无关、统计、流体和火球等一些唯象模型；第 6 章讨论深度非弹过程，介绍了核子结构函数和部分子模型。

本书适合从事粒子物理及相关领域研究和教学的工作人员、大学高年级学生和研究生参考。

Abstract

Recalling the 20th century, the great significant achievements in physics, which have created modern science and technology, and also have changed the human's understanding manner and outlook of the nature, are Relativistic Theory and Quantum Mechanics. Following the establishment of these great theories, one of the rapidly developed, very profound and most excited fields is the investigation on the deepest-level construction of matter and the fundamental interactions, i.e., physics on quarks and leptons.

The primary starting point for searching the universal picture and laws of microscopic world, both theoretically and experimentally through high-energy collision, is based on the relativistic and quantum principles. It is our hope that the present book would help the readers to get familiar with the kinematic principles on quarks and leptons, and the general methods to analyze the physical mechanism in terms of conservation laws, under the conditions of phase-space limitation and without considering detailed interaction dynamics.

The contents of the book are organized into six chapters. The standard model of particle physics is described in chapter 1, including an introduction of leptons, quarks, hadrons and Feynman rules. In chapter 2, the phase-space analyses on single-particle, two-particle and many-particle are studied. The subsequent four chapters discuss respectively the processes of single-particle decay, two-particle scattering, multi-particle production and deep-inelastic scattering.

This book is intended as a reference for researchers, lecturers and also graduate and senior students who are interested in this branch of physics and in related specialties.

前 言

20 世纪物理学中最激动人心、最深刻的进展，来自对物质世界基本组成的不断探索，它是从 1897 年 Thomson 发现电子开始的。电子是第一个被认证的基本粒子。

由于构成原子和原子核的基本粒子非常微小，人们无法直接观测或直接研究它们。一个世纪以来，为了观测这些粒子的径迹和它们的成分，为了研究物质的基本组元和支配这些组元的相互作用力，粒子物理学家们设计了越来越尖端的探测设备。与此同时，为了从更深层次探索物质结构，粒子物理学家们还在研制一代比一代能量更高的粒子加速器。人们了解到，电子和质子是普通物质的基本组元，十分稳定，容易受电场和磁场控制，因而它们能够被加速到很高的能量，并把它们作为探针去探索微观尺度的基本物质组元。目前，正负电子对撞的最高能量达到 200 GeV (欧洲核子研究中心 CERN 的 LEP)，质子反质子对撞的最高能量达到 2 TeV (美国 Fermi 国家实验室的 TEVATRON)，而正在建造中将于 2005 年运行的加速器中质子质子对撞的能量将高达 14 TeV (CERN 的 LHC)。因此，粒子物理又称为高能物理。

高能粒子最显著的特征是相对论性。对相对论性粒子的碰撞和碰撞产物的分析是最重要的工作，粒子物理学家正以此为基础来探索确定微观物质世界的统一原理和基本的物理定律。

在过去的 100 年中，人类对物质基本性质的认识经历了一场巨大的革命。现在已经知道，构成物质的基本砖块是两类粒子——夸克与轻子，它们都是服从 Fermi-Dirac 统计的自旋为 $1/2$ 的粒子。构成原子核的核子(质子和中子)并不是基本的，它们又由被称为上(u)和下(d)两种味道的夸克组成。目前的实验已证

实,共有六种不同味道的夸克。跟质子、中子和其它强子不同,构成原子的核外电子经受住了实验的考验,它依然是物质的基本组元。在现有的实验和理论条件下,电子是没有结构和不可分割的。此外还存在5种类似电子的粒子,统称为轻子。

夸克和轻子之间的重要差别在于,夸克被一种称为强相互作用的基本力禁闭在强子内,而轻子不参与强相互作用。还有三种基本力对夸克和轻子都起作用,那就是带电粒子参与的电磁相互作用力、引起某些放射性衰变的弱相互作用力及引力。在粒子物理学中,对于强力、弱力和电磁力性质的认识已取得了重大进展,并建立起了一种标准模型,我们可以用称为规范场的理论来描写。传递这三种相互作用的媒介粒子分别为胶子、 W 、 Z 和光子,它们都是服从Bose-Einstein统计的自旋为1的粒子。由于粒子之间的引力相对来说十分微弱,因此在粒子物理学中一般不作讨论。

有两个重要的物理量用于描述相对论性粒子的状态:能量 E 和三维动量 $\mathbf{p}$,它们一起构成了Minkowski空间中的四维动量。由于大多数粒子都是不稳定的,因此粒子相互作用过程的研究也包含粒子的衰变过程在内。测量参与相互作用过程的粒子的动量特性是实验上研究各种相互作用过程的基础。通过研究相互作用过程末态粒子的动量分布,对实验数据进行分析,已成为验证相互作用动力学理论模型的基本方法。

由于实验数据中包含了末态粒子能量、动量和出射角等信息,所以对实验数据的运动学分析具有重要意义。粒子的质量、自旋、电荷以及其它的内部量子数需要用特定方法测量,在分析粒子的运动学特性时,可认为这些物理量已知。运动学原理研究的主要是相互作用粒子的能量和动量状态,这种状态的描述不包含高能粒子碰撞过程的动力学,不涉及相互作用的具体机制。运动学方法的基本原则是运用守恒律对相互作用的性质作出可靠的预言,这些守恒律包括能量、动量、角动量和其它内部量子数的

守恒律。除了守恒律外，运动学方法还运用了量子力学和量子场论的一般假设和结论，特别是狭义相对论的一个最重要的结论——相互作用过程的描述必须是相对论不变的，即物理定律不依赖于所选择的惯性参照系。

运动学方法也建立在统计物理假设的基础之上。在能量和动量守恒的前提下，根据“物理过程的几率正比于末态粒子的相空间体积元”这一假设，可对次级粒子的动量分布作出预言。由于这样作出的预言忽略了相互作用动力学，因此，一般来说和实验结果并不完全一致，然而在缺少动力学信息的情况下，它能给出有关末态粒子动量分布的可靠的初步推测，在很多情况下能卓有成效地促进研究新粒子和相互作用过程的实验发展。

运动学方法包含了最一般的夸克与轻子相互作用过程的唯象信息，掌握这些运动学方法要求读者熟悉狭义相对论和量子力学的基本原理，也要求读者对夸克与轻子的性质有初步的了解。在一本书里我们难以对所有的运动学方法都作出详尽的叙述，本书将把注意力放在既简明，而又在有关粒子物理的研究领域中必须考察的运动学问题上。

本书是应《面向 21 世纪物理学丛书》编委会之约而编写的。编写过程中遵照了丛书的宗旨，即“将迄今为止人们认为对物理学既是最重要，又是最基本的认识和问题作一个较为系统的概括”，“在科学上，比较严格和比较可靠”，“在内容的选取上，力求简明，不过于深邃和庞杂”。希望它对在粒子物理学及其相关领域工作的研究和教学人员、大学高年级学生和研究生以及对该领域感兴趣的其他读者能够有所帮助。

作 者

1999 年 5 月于武汉桂子山

符号约定

一、自然单位制

以 $[M]$, $[L]$, $[T]$ 分别表示质量、长度和时间的量纲, 真空中的光速 c 和 Plank 常数(除以 2π) $\hbar$ 的量纲分别为

$$[c] = [L][T]^{-1},$$
$$[\hbar] = [M][L]^2[T]^{-1}.$$

以电子电荷的绝对值 e 表示电荷的单位, 精细结构常数的定义为

$$\alpha = e^2 (\hbar c)^{-1} = 1/137.$$

本书采用自然单位制, 选取 $\hbar = c = 1$, 只有一种单位留下, 较方便的是使用 MeV 或 GeV ($1 \text{ GeV} = 10^3 \text{ MeV} = 10^9 \text{ eV}$)。

在自然单位制中, 有

$$[L] = [T], \quad [M] = [L]^{-1}, \quad [e^2] = [1].$$

下面的两个转换式子很有用:

$$\hbar c = 197.3 \text{ MeV} \cdot \text{fm},$$
$$(\hbar c)^2 = 0.3894 (\text{GeV})^2 \cdot \text{mb}.$$

作粗略估计时, 可近似取

$$1 \text{ fm} \approx 5 (\text{GeV})^{-1}, \quad 1 (\text{GeV})^{-2} \approx 0.4 \text{ mb},$$
$$1 (\text{GeV})^{-1} \approx 6.6 \times 10^{-25} \text{ s}.$$

二、相对论惯例

Minkowski 空间的度规张量定义为

$$g_{\mu\nu} = g^{\mu\nu} = \begin{pmatrix} +1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{pmatrix}.$$

采用逆变四维矢量, 时空坐标 $x^\mu (\mu=0, 1, 2, 3)$ 标记为

$$x^\mu = (t, \mathbf{x}) = (t, x, y, z).$$

质量为 m 的四维动量标记为

$$p^\mu = (E, \mathbf{p}) = (E, p_x, p_y, p_z),$$

式中, $E = (\mathbf{p}^2 + m^2)^{1/2}$.

两个四维矢量 A 和 B 的标积定义为

$$A \cdot B = A_\mu B^\mu = g_{\mu\nu} A^\mu B^\nu = A^0 B^0 - \mathbf{A} \cdot \mathbf{B}.$$

目 录

前 言	1
符号约定	1
1 标准模型	1
1.1 发展中的粒子物理	1
1.2 轻子、夸克与强子	3
1.2.1 轻子家族	3
1.2.2 夸克家族	4
1.2.3 强子	5
1.3 Feynman 规则	7
1.3.1 Feynman 图	7
1.3.2 外线和内线的 Feynman 规则	8
1.3.3 顶点的 Feynman 规则	10
1.3.4 Lorentz 不变的跃迁振幅	12
1.4 散射与衰变	13
1.4.1 相互作用过程中的守恒定律	13
1.4.2 相空间	14
1.4.3 衰变率与散射截面	16
2 相空间分析	21
2.1 单粒子分布的 Lorentz 变换	21
2.1.1 分布的变量变换	21
2.1.2 单粒子一维分布的 Lorentz 变换	22
2.1.3 单粒子二维分布的 Lorentz 变换	24
2.2 两粒子的相空间	25

2.3	三粒子系统中一对粒子的有效质量分布·····	27
2.4	n 粒子系统中 k 个粒子的有效质量分布·····	30
3	单体衰变过程·····	35
3.1	静止衰变的二粒子末态·····	35
3.1.1	静止衰变二粒子末态的能量与动量大小·····	35
3.1.2	静止衰变二粒子末态的角分布·····	36
3.2	飞行衰变的二粒子末态·····	38
3.2.1	飞行衰变二粒子末态的能量分布·····	38
3.2.2	飞行衰变中末态粒子的角分布·····	40
3.2.3	飞行衰变末态二粒子张角的分布·····	46
3.2.4	衰变末态粒子的横动量分布·····	48
3.3	二粒子末态衰变的几个实例·····	50
3.3.1	末态包含中微子的衰变·····	50
3.3.2	中性介子的双光子衰变·····	53
3.3.3	大质量的不稳定粒子的衰变·····	54
3.4	静止衰变的三粒子末态·····	55
3.4.1	静止衰变三粒子末态中一对粒子的质心系·····	55
3.4.2	静止衰变三粒子末态的分布·····	58
3.5	飞行衰变的三粒子末态·····	64
3.5.1	单粒子的动量分布·····	64
3.5.2	横动量分布分析法·····	67
3.6	三光子末态的衰变锥·····	69
3.6.1	飞行衰变的三光子末态·····	69
3.6.2	衰变锥中的角分布·····	73
4	两体散射过程·····	77
4.1	弹性和准弹性散射过程的运动学变量·····	77
4.1.1	Mandelstam 不变量·····	77
4.1.2	质心系中末态粒子张角的运动学限制·····	79
4.1.3	实验室系中的运动学限制·····	80

4.2 弹性和准弹性过程的微分截面	85
4.2.1 关于不变量 t 和 u 的微分截面	85
4.2.2 临阈行为和 v^{-1} 定律	87
4.2.3 实验室系中关于出射动能的微分截面	89
4.3 几个应用实例	90
4.3.1 $\nu_\mu + n \rightarrow \mu^- + \Lambda_c^+$	90
4.3.2 $e^+ + e^- \rightarrow \tau^+ + \tau^-$	93
4.3.3 部分子 $2 \rightarrow 2$ 基本过程的一些公式	97
5 多重产生过程	105
5.1 研究多重产生的非遍举方法	105
5.1.1 单举过程	106
5.1.2 双举过程	108
5.2 单举过程的运动学变量	109
5.2.1 相对论不变的运动学变量	109
5.2.2 实验室系和质心系中的运动学变量	111
5.2.3 光锥变量	112
5.2.4 标度无关变量	112
5.2.5 快度变量与赝快度变量	114
5.2.6 纵向运动学变量之间的关系	117
5.3 极限碎裂假设和标度无关性假设	120
5.3.1 邹祖德-杨振宁-阎爱德极限碎裂假设	120
5.3.2 Feynman 标度无关性假设	123
5.4 单举的产生重粒子的衰变过程	125
5.4.1 二粒子末态的衰变	125
5.4.2 三粒子末态的衰变	131
5.5 多重产生过程的唯象模型研究	136
5.5.1 统计模型	136
5.5.2 流体动力学模型	143
5.5.3 热力学模型与火球模型	150

5.5.4 多重数分布、起伏与关联	154
6 深度非弹过程	174
6.1 轻子-核子过程的运动学	174
6.1.1 几种轻子-核子过程	174
6.1.2 一些运动学变量之间的关系	176
6.1.3 运动学极限	178
6.2 轻子-核子的深度非弹过程	180
6.2.1 深度非弹区域	180
6.2.2 准弹性散射	181
6.3 轻子-核子深度非弹过程中的标度无关性	184
6.3.1 核子的结构函数	184
6.3.2 部分子假设	185
6.3.3 部分子的自旋与电荷	189
6.4 Breit 坐标系与轻子-部分子碰撞	192
6.4.1 Breit 坐标系	192
6.4.2 部分子吸收虚光子(或 $W^\pm$, Z Bose 子)的运动学	193
6.4.3 中微子过程中的重夸克产生	194
6.5 强子-核子碰撞中轻子对和中间 Bose 子产生	196
6.5.1 $q\bar{q} \rightarrow l^+ l^-$	196
6.5.2 $W^\pm$ 和 Z^0 Bose 子的产生	200
6.5.3 夸克-部分子的横向运动	202
附录 Lorentz 变换	207
A.1 四维时空的 Lorentz 变换	207
A.1.1 Lorentz 因子	207
A.1.2 快度	208
A.1.3 赝球坐标	209
A.2 四维动量的 Lorentz 变换	211
A.2.1 四维速度	211
A.2.2 四维动量	212