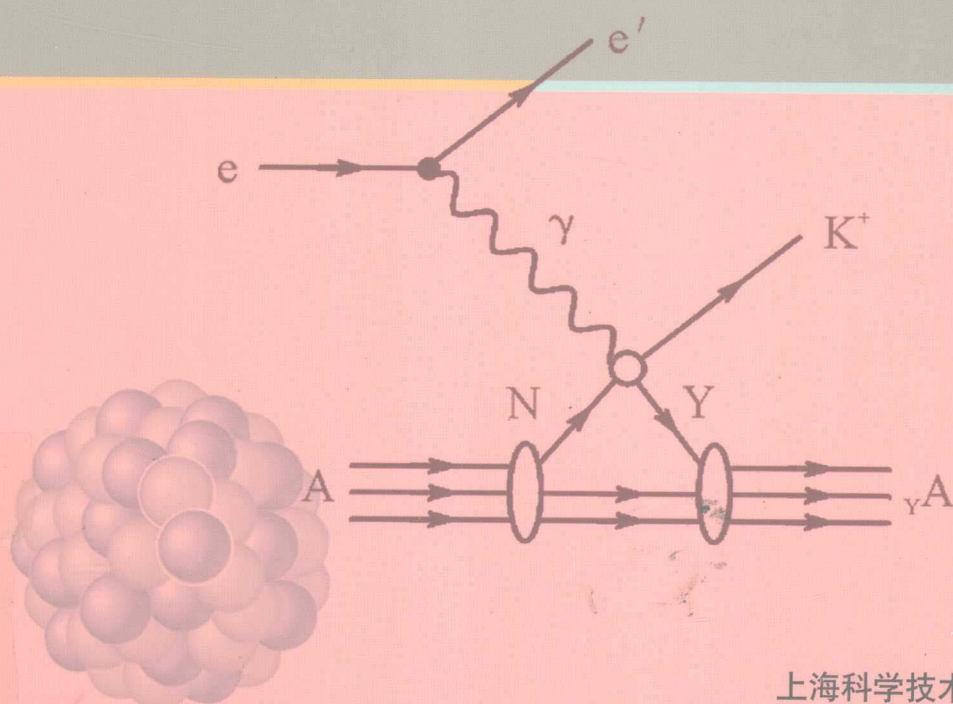




科学 专著：前沿研究

中高能核探针与 原子核结构

宁平治 姜焕清 厉光烈 叶云秀 段春贵 编著



上海科学技术出版社

中高能核探针 与原子核结构

宁平治 姜焕清 厉光烈 叶云秀 段春贵 编著

上海科学技术出版社

图书在版编目(CIP)数据

中高能核探针与原子核结构/宁平治等编著. —上海:
上海科学技术出版社, 2012. 11

(科学专著: 前沿研究)

ISBN 978—7—5478—1353—9

I. ①中... II. ①宁... III. ①核物理学②探针
IV. ①0571②TH83

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 127688 号

本书出版受“上海科技专著出版资金”资助

责任编辑 赵 伟

装帧设计 戚永昌

上海世纪出版股份有限公司 出版、发行
上 海 科 学 技 术 出 版 社

(上海钦州南路 71 号 邮政编码 200235)

新华书店上海发行所经销

苏州望电印刷有限公司印刷

开本 787×1092 1/16 印张 26 插页 4

字数 500 千字

2012 年 11 月第 1 版 2012 年 11 月第 1 次印刷

ISBN 978—7—5478—1353—9/O · 12

定价: 128.00 元

本书如有缺页、错装或损坏等严重质量问题,
请向工厂联系调换

国家科学技术学术著作出版基金资助出版

科学专著：前沿研究

各章撰稿人名单

■ 第 1, 5, 8, 9, 10, 11 章

宁平治,南开大学物理学院教授。

■ 第 2 章

叶云秀,中国科学技术大学近代物理系教授。

■ 第 3, 4 章

厉光烈,中国科学院高能物理研究所研究员。

■ 第 6, 7 章

姜焕清,中国科学院高能物理研究所研究员。

■ 第 12 章

段春贵,河北师范大学物理与信息工程学院教授。

进入 21 世纪以来,中国的科学技术发展进入到一个重要的跃升期。我们科学技术自主创新的源头,正是来自于科学向未知领域推进的新发现,来自于科学前沿探索的新成果。学术著作是研究成果的总结,它的价值也在于其原创性。

著书立说,乃是科学研究工作不可缺少的一个组成部分。著书立说,既是丰富人类知识宝库的需要,也是探索未知领域、开拓人类知识新疆界的需要。特别是在科学各门类的那些基本问题上,一部优秀的学术专著常常成为本学科或相关学科取得突破性进展的基石。

一个国家,一个地区,学术著作出版的水平是这个国家、这个地区科学研究水平的重要标志。科学研究具有系统性和长远性,继承性和连续性等特点,科学发现的取得需要好奇心和想象力,也需要有长期的、系统的研究成果的积累。因此,学术著作的出版也需要有长远的安排和持续的积累,来不得半点的虚浮,更不能急功近利。

学术著作的出版,既是为了总结、积累,更是为了交流、传播。交流传播了,总结积累的效果和作用才能发挥出来。为了在中国传播科学而于 1915 年创办的《科学》杂志,在其自身发展的历程中,一直也在尽力促进中国学者的学术著作的出版。

几十年来,《科学》的编者和出版者,在不同的时期先后推出过好几套中国学者的科学专著。在 20 世纪三四十年代,出版有《科学丛书》;自 20 世纪 90 年代以来,又陆续推出《科学专著丛书》、《科学前沿丛书》、《科学前沿进展》等,形成了一个以刊物名字样科学为标识的学术专著系列。自 1995 年起,截至 2010 年“十一五”结束,在科学标识下,已出版了 25 部专著,其中有不少佳作,受到了科学界和出版界的欢迎和好评。

为了继续促进中国学者对前沿工作做有创见的系统总结,“十二五”期间,《科学》的编者和出版者决定对科学系列学术著作做新的延伸,将科学

专著学术丛书扩展为三个系列品种,即《**科学** 专著:前沿研究》、《**科学** 专著:生命科学研究》、《**科学** 专著:大科学工程》,继续为中国学者著书立说尽一份力。

随着中国科学研究向世界前列的挺进,我们相信,在**科学**系列的学术专著之中,一定会有更多中国学者推陈出新、标新立异的佳作问世,也一定会有传世的名著问世!

周光召

(《科学》杂志编委会主编)

2011年5月

原子核物理学是一门不断发展的学科。自 1911 年卢瑟福发现原子核至今的百年发展历程中,人们对于原子核的认识由浅入深、由表及里、由唯象到微观地逐步深入。建立在核子-介子自由度基础上的传统核物理,可以说是根深叶茂、成就辉煌,并在继续发展。对原子核物理的了解以及研究原子核的技术和方法已经在许多领域得到了广泛的应用。

随着高能物理研究的进展,人们对物质结构有了更深入的认识。特别是对于强相互作用的深入了解,使人们开始重新认识原子核这个强相互作用的多体系统。将已知的原子核物理学现象与夸克、胶子及相应的理论相联系是摆在核物理学家面前具有挑战性的任务。由于加速器技术和探测器技术上的进步,人们有可能利用更高能量、更多种类的粒子束流来探测原子核的运动规律。到了 20 世纪 70 年代,核物理研究的重要前沿之一就是利用高能物理的最新成果,进一步研究原子核内除核子以外的新自由度,用来探测原子核结构的探针也从传统的较低能量的电子及核子扩充到高能电子、高能核子以及可以得到的各类介子和轻子,这就形成了中高能核物理的前沿领域。

国际上,一批旨在产生中高能核探针的大科学装置相继建成,用这些中高能核探针研究原子核结构和性质,以及认识核子的结构和性质,近四十年来取得了长足的进展和丰硕的成果。把这些进展和成果有选择地、较系统地介绍给关注中高能核物理发展的读者是本书目的。

本书结合我们多年来在中高能核物理方面所做的研究工作,分别对国际上利用高能电子、高能光子、中微子、中高能核子、 π 介子以及 K 介子等探针认识原子核方面取得的重要进展做了系统评述,对于相关领域的基本理论工具和分析方法做了介绍,对于相关领域的未来发展做了展望。

鉴于本书大部分内容的前沿性和引导性,各章节尽量给出了相关基本文献和最新参考文献,以方便读者掌握课题线索,从而充分利用当今丰富而便捷的网络资源。由于本书内容涉及面较广,在成书过程中对内容进行了必要的选择和删繁就简,如删去了重离子探针的内容而只限于讨论单粒子

探针等;又如某些章节删去了公式推导而直接给出结果,但大多注明了出处。

本书内容共分为 12 章,前 4 章主要介绍电磁探针,包括电子探针和光子探针。第 5 章至第 8 章主要介绍强子探针,包括中高能核子探针、 π 介子探针和 K 介子探针,第 9、10 章两章介绍各种中高能探针应用于奇异性产生和重味产生。第 11、12 章扼要介绍了核物理中的中微子探针。

本书是南开大学宁平治教授发起,与中国科学院高能物理研究所姜焕清研究员和厉光烈研究员共同策划的。在撰写过程中,邀请中国科技大学叶云秀教授和河北师范大学段春贵教授分别撰写了第 2 章和第 12 章。

本书的出版得到“国家科学技术学术著作出版基金”和“上海市学术著作出版基金”的资助,在撰写和出版过程中,得到了许多同仁的支持和帮助。李磊和罗延安教授对部分章节给予了具体的帮助,彭光雄教授为本书的最后出版做了大量的沟通和协调工作,作者在此一并表示感谢。上海科学技术出版社的编辑和有关人员为本书的出版付出了辛勤的劳动,作者深表感谢。

本书可作为原子核物理、强子物理及相关领域研究人员、研究生及大专院校核物理教师的参考书;内容精简后亦可作为主攻中高能核物理与强子物理方向研究生教材。

本书涉及中高能核物理的各个专门领域,而且是蓬勃发展、与日俱新的领域。由于经验不足,本书肯定有许多不妥和错误之处,恳请读者提出宝贵意见。

宁平治 姜焕清 厉光烈

2010/12/21 于北京

第 1 章 电磁探针引论	1
§ 1.1 电子探针	1
1.1.1 从低能电子探针谈起	2
1.1.2 电子探针:从低能到高能	3
1.1.3 电子探针:核子的电磁形状因子	3
1.1.4 电子探针:准弹性散射	4
1.1.5 电子探针:三个共振区	8
1.1.6 电子探针:深度非弹性散射	9
1.1.7 电子探针:EMC 效应	15
1.1.8 极化电子探针	16
1.1.9 极化电子探针:不对称性	17
1.1.10 核内核子的电磁形状因子	18
§ 1.2 光子探针	19
1.2.1 光子探针简史	19
1.2.2 光核反应中的核介质效应	20
§ 1.3 研究现状	21
1.3.1 关于电子探针与核子形状因子问题	21
1.3.2 关于 eA 的准弹性散射过程	21
§ 1.4 电磁探针展望	21
参考文献	23
第 2 章 高能电子探针与核子结构的实验研究	28
§ 2.1 概述	28
§ 2.2 核子的电磁形状因子	30
2.2.1 绝对截面法测质子弹性散射形状因子和核子的大小	31
2.2.2 质子的电磁形状因子的实验测量	32
2.2.3 中子的电磁形状因子的实验测量	36
2.2.4 核的纵向响应函数和库仑求和规则	37
§ 2.3 核子的奇异性电磁形状因子	38
2.3.1 核子的奇异性形状因子和中性弱矢量形状因子	39
2.3.2 中性弱矢量形状因子与宇称破坏不对称性	40
2.3.3 奇异性形状因子的实验测量	40
§ 2.4 核子自旋平均的结构函数	44
2.4.1 深度非弹性散射中核子自旋平均的结构函数	44
2.4.2 核子结构函数的实验测量	45
2.4.3 广义部分子分布和深度虚康普顿散射	48
§ 2.5 核子极化结构函数	51
2.5.1 深度非弹性散射中核子的纵向极化结构函数的实验研究	52

2.5.2 深度非弹性散射中核子的横向极化结构函数的实验研究	62
参考文献	65
第3章 带电轻子探针与原子核结构——EMC效应	69
§3.1 带电轻子-核子深度非弹性散射与核内核子结构函数	69
3.1.1 带电轻子-核子深度非弹性散射	69
3.1.2 原子核内束缚核子的结构函数	71
§3.2 EMC效应的实验现象	72
3.2.1 EMC效应的实验发现	72
3.2.2 Rochester-SLAC-MIT组的实验验证	73
3.2.3 EMC效应的后续实验研究	73
§3.3 EMC效应的理论解释	74
3.3.1 早期的理论模型	74
3.3.2 核束缚能效应	77
3.3.3 组分夸克模型和双重 x 重新标度模型	81
3.3.4 部分子演化模型	82
参考文献	83
第4章 光子探针与原子核结构	85
§4.1 核阴影效应	85
4.1.1 核阴影效应的实验现象	85
4.1.2 核阴影效应的理论解释	87
4.1.3 EMC效应与核阴影和反阴影效应的统一描述	91
§4.2 核德雷尔-颜过程	94
4.2.1 德雷尔-颜过程与核德雷尔-颜过程	94
4.2.2 核德雷尔-颜过程的实验研究	98
4.2.3 核德雷尔-颜过程的理论研究	99
§4.3 J/Ψ 光生反应	101
4.3.1 J/Ψ 光生反应的实验现象	101
4.3.2 J/Ψ 光生反应的理论解释	103
参考文献	103
第5章 核子探针与核力	105
§5.1 核力理论研究简史	105
5.1.1 关于介子交换模型	105
5.1.2 关于夸克模型	106
5.1.3 关于介子交换模型的新发展	107
5.1.4 关于高精度现实NN势模型	107
§5.2 核子探针与NN散射实验	108
§5.3 由核子探针检验核力的介子交换模型	111
5.3.1 CD-Bonn势简介	111
5.3.2 由核子探针确定Bonn模型参数	113
5.3.3 核力的其他介子理论模型	115

§ 5.4 由核子探针检验 Argonne v18 势	115
5.4.1 Argonne v18 势简介	115
5.4.2 由核子探针检验 Argonne v18 势	116
§ 5.5 由核子探针检验手征 NN 势	118
5.5.1 引述: 两个简单例子	118
5.5.2 有效场论与手征微扰论简介	119
5.5.3 引述: 有效拉格朗日量概要	119
5.5.4 核子探针检验结果	121
§ 5.6 极化核子探针	123
5.6.1 自旋观测量简介	123
5.6.2 极化 NN 散射实验	124
5.6.3 极化 NN 散射新数据	126
§ 5.7 中高能核子探针与短程核力	130
5.7.1 中高能区的特殊性	130
5.7.2 相对论介子交换模型要点	131
5.7.3 中高能 NN 散射实验	131
5.7.4 中高能核子探针检验结果	133
§ 5.8 问题与展望	135
参考文献	135
 第 6 章 中高能质子与原子核的相互作用	141
§ 6.1 引言	141
§ 6.2 NN 相互作用的简单回顾	143
6.2.1 NN 弹性散射	143
6.2.2 NN 非弹性反应	144
6.2.3 NN 碰撞中的 K、 η 、 ω 和 ϕ 介子产生	147
§ 6.3 中高能 pA 散射的理论处理	149
6.3.1 pA 散射的非相对论唯象光学模型描述	149
6.3.2 沃森多重散射理论及光学势	150
6.3.3 格劳伯多重散射理论	154
6.3.4 微观和半微观核子-核光学势	159
6.3.5 pA 散射的相对论描述	160
§ 6.4 中高能 pA 碰撞中的 π 介子产生	161
6.4.1 π 介子产生的实验	161
6.4.2 π 介子产生与核内的核子共振态	163
6.4.3 双重子态和多夸克态	165
§ 6.5 pA 碰撞中的 η 介子产生与 η A 束缚态	166
6.5.1 pA 碰撞中 η 介子产生与核内的 $N^*(1535)$ 共振态	166
6.5.2 η 介子产生与 η A 束缚态	167
§ 6.6 pA 碰撞中阈能附近 K 介子产生与超核	168
6.6.1 $p+A \rightarrow K^+ + X$ 反应	168
6.6.2 pA 碰撞中 Λ 超核的产生	170
§ 6.7 中高能 pA 碰撞引起的其他反应	171

6.7.1	pA 碰撞中其他介子产生	171
6.7.2	pA 碰撞引起的散裂反应与散裂中子源	172
§ 6.8	问题与展望	173
	参考文献	175
第 7 章	π 介子与原子核的相互作用	178
§ 7.1	引述: π 介子探针与 π 核相互作用	178
§ 7.2	π N 二体相互作用	179
7.2.1	π N 散射的同位旋分析	179
7.2.2	π N 散射振幅的分波展开与相移分析	181
7.2.3	π N 相互作用的基本理论	183
§ 7.3	π N 散射与重子共振	185
7.3.1	共振态与相移	185
7.3.2	布莱特-维格纳共振	186
7.3.3	共振态与散射振幅的解析行为: 阿根图	186
7.3.4	$\pi\pi$ 散射与新的介子共振态	188
§ 7.4	π 介子与原子核的散射	191
7.4.1	π A 一级光学势	191
7.4.2	高阶修正	193
7.4.3	π 介子与原子核散射的研究现状	194
§ 7.5	π A 电荷交换反应	197
7.5.1	π A 单电荷交换反应	197
7.5.2	π A 双电荷交换(DCX)反应的实验研究	198
7.5.3	关于双电荷交换机制的讨论	201
7.5.4	DCX 反应的理论处理方法	202
§ 7.6	π 介子在原子核上的吸收	206
7.6.1	π 吸收机制的讨论	206
7.6.2	π 吸收后核子发射的多重散射处理	207
7.6.3	π 介子在原子核上的辐射吸收	208
§ 7.7	π 介子在原子核上引起的介子产生	209
7.7.1	(π^+, K^+) 协同产生反应与超核	209
7.7.2	(π, η) 反应	209
7.7.3	$(\pi, 2\pi)$ 反应与核内的 σ 介子	211
§ 7.8	核物质中 π 介子性质的变化	213
7.8.1	π 介子在核物质中的自能	213
7.8.2	π 介子在核内性质的讨论	214
§ 7.9	展望	216
7.9.1	π 介子在未来强作用物理中的地位	216
7.9.2	π N 散射与 $\pi\pi$ 散射和核物理	217
7.9.3	双重子的寻找	218
7.9.4	原子核内的 Δ 和 π	219
7.9.5	π 介子在极化靶上的反应	219
7.9.6	π A 单电荷与双电荷交换	219

7.9.7 高能和核物质密度的 π 动力学研究	220
参考文献	220
第 8 章 K 介子探针与超核物理	223
§8.1 引述	223
8.1.1 K 介子探针的简单性质	223
8.1.2 带电 K 介子的产生和衰变	224
8.1.3 中性 K 介子的衰变	225
§8.2 KN 二体相互作用	226
8.2.1 引述	226
8.2.2 KN 系统的同位旋	228
8.2.3 K^+N 散射实验的主要特征	229
8.2.4 K^+N 散射的分波分析	230
8.2.5 K^+N 散射的理论模型	230
§8.3 K^-N 二体相互作用	240
8.3.1 引述	240
8.3.2 K^-N 相互作用理论	241
8.3.3 K^-N 散射研究的发展	243
8.3.4 K^-N 二体反应过程	244
§8.4 K^+A 散射	245
8.4.1 K^+A 散射实验结果	245
8.4.2 K^+A 散射的理论分析	246
8.4.3 K^+A 散射的光学模型	246
§8.5 K^+A 散射的核介质效应	248
8.5.1 K^+A 散射的常规核介质效应	248
8.5.2 K^+A 散射的次常规核介质效应	249
8.5.3 K^+A 散射的非常规核介质效应	251
8.5.4 K^+A 散射: 研究进展与问题	254
§8.6 K^-A 散射	257
8.6.1 K^-A 弹性散射	257
8.6.2 K^-A 光学势与 K^-A 散射	259
8.6.3 K^-A 势深度的进一步研究	260
8.6.4 K^-A 势深度的动量相关性	261
8.6.5 K^-A 光学势动量相关性的 RMF 分析	262
8.6.6 K 介子的平均自由程	264
§8.7 K 介子探针的其他相关问题	265
8.7.1 中性 K 介子散射	265
8.7.2 重子产生	267
8.7.3 奇异性交换反应	267
8.7.4 超核产生	268
8.7.5 扭曲波冲量近似	270
8.7.6 超核结构研究进展	272
8.7.7 Λ 超核衰变	275

参考文献	280
第 9 章 中高能探针在原子核上的奇异性产生	289
§ 9.1 引述-奇异性产生	289
§ 9.2 奇异性产生的基本过程	290
9.2.1 研究概况	290
9.2.2 pp 碰撞中的奇异性产生	291
9.2.3 πN 碰撞中的奇异性产生	296
9.2.4 K 介子与核子(Kp)碰撞中的奇异性产生	297
§ 9.3 电磁探针与奇异性产生	299
9.3.1 引述	299
9.3.2 基本过程理论分析	300
9.3.3 奇异粒子的光产生	303
9.3.4 奇异粒子的电产生	304
§ 9.4 核物质中的奇异性产生	305
9.4.1 质子与核(pA)碰撞中的奇异性产生	306
9.4.2 介子与核(πA 及 KA)碰撞中的奇异性产生	307
9.4.3 超核光产生与电产生	307
§ 9.5 问题与展望	310
参考文献	311
第 10 章 中高能探针在核子与核上的重味产生	317
§ 10.1 引述	317
10.1.1 关于重夸克的特点	317
10.1.2 关于重味强子	318
10.1.3 重夸克偶素	318
10.1.4 关于重夸克系统的有效理论	319
§ 10.2 基本的重味产生过程	319
10.2.1 重味产生引述	319
10.2.2 重味产生基本过程动力学特征	320
§ 10.3 高能核子-核子(pp)碰撞与重味产生	322
§ 10.4 RHIC 实验中的重味衰变道	323
§ 10.5 可能的重味超核	326
参考文献	327
第 11 章 中微子探针引论	329
§ 11.1 一般讨论	329
11.1.1 关于中微子探针	329
11.1.2 中微子性质简介	330
11.1.3 中微子源	332
11.1.4 中微子味振荡与中微子质量	332
§ 11.2 中微子振荡物理	333
11.2.1 概述	333

11.2.2	振荡长度	333
11.2.3	三味混合矩阵	335
11.2.4	三味混合矩阵的欧拉转动参数化	336
11.2.5	实验数据现状	337
§ 11.3	弱作用理论和中微子探针	337
11.3.1	弱相互作用的费米理论	338
11.3.2	弱作用的中间玻色子理论	340
11.3.3	衰变宽度和散射截面	341
11.3.4	电弱统一理论	342
11.3.5	弱作用理论小结	343
§ 11.4	中微子探针与夸克模型	343
11.4.1	夸克模型	343
11.4.2	中子 β 衰变的夸克模型	344
11.4.3	轻子-夸克对称性	344
11.4.4	夸克混合	345
11.4.5	CKM 矩阵	345
11.4.6	中微子-夸克散射(荷电流过程)	346
11.4.7	中微子-夸克散射(中性流过程)	347
§ 11.5	中微子-核散射研究意义	347
§ 11.6	中微子-电子散射	348
11.6.1	中性流高能 μ 中微子弹弹性散射	348
11.6.2	低能中微子-电子散射	349
§ 11.7	中微子探针与核子	349
11.7.1	概述	349
11.7.2	荷电流过程与中性流过程	350
11.7.3	νN 散射截面理论结果的一般趋势	351
11.7.4	低能中性流 νN 散射	352
11.7.5	导致 π 产生的荷电流(CC) νN 准弹性散射	353
11.7.6	中微子探针与核子弹弹性散射形状因子	354
11.7.7	中微子探针与核子的轴矢形状因子	354
11.7.8	中微子探针与核子内的夸克	355
11.7.9	中高能中微子-核子非弹性散射	356
§ 11.8	中微子探针与原子核	357
11.8.1	研究概述	357
11.8.2	低能中微子-原子核散射理论框架 ($E_\nu \ll \text{GeV}$)	357
11.8.3	低能中微子-原子核散射截面	357
11.8.4	中高能中微子-原子核散射 ($1 \text{ GeV} \leq E_\nu \leq 10 \text{ GeV}$)	358
11.8.5	中微子深度非弹性散射	359
11.8.6	小结	359
	参考文献	361
第 12 章	中微子-原子核深度非弹性散射	365
§ 12.1	中微子(反中微子)-核子深度非弹性散射与核子结构函数	365

§ 12.2 中微子探针与核子结构函数的核效应	371
12.2.1 实验研究	371
12.2.2 核子结构函数的核效应	373
§ 12.3 中微子深度非弹性散射与核阴影效应	374
§ 12.4 粲强子产物与奇异海夸克分布	377
12.4.1 双 μ 子产生微分截面	377
12.4.2 核内奇异海夸克分布的实验研究	379
§ 12.5 问题与展望	381
参考文献	381
 索引	 383
后记	394