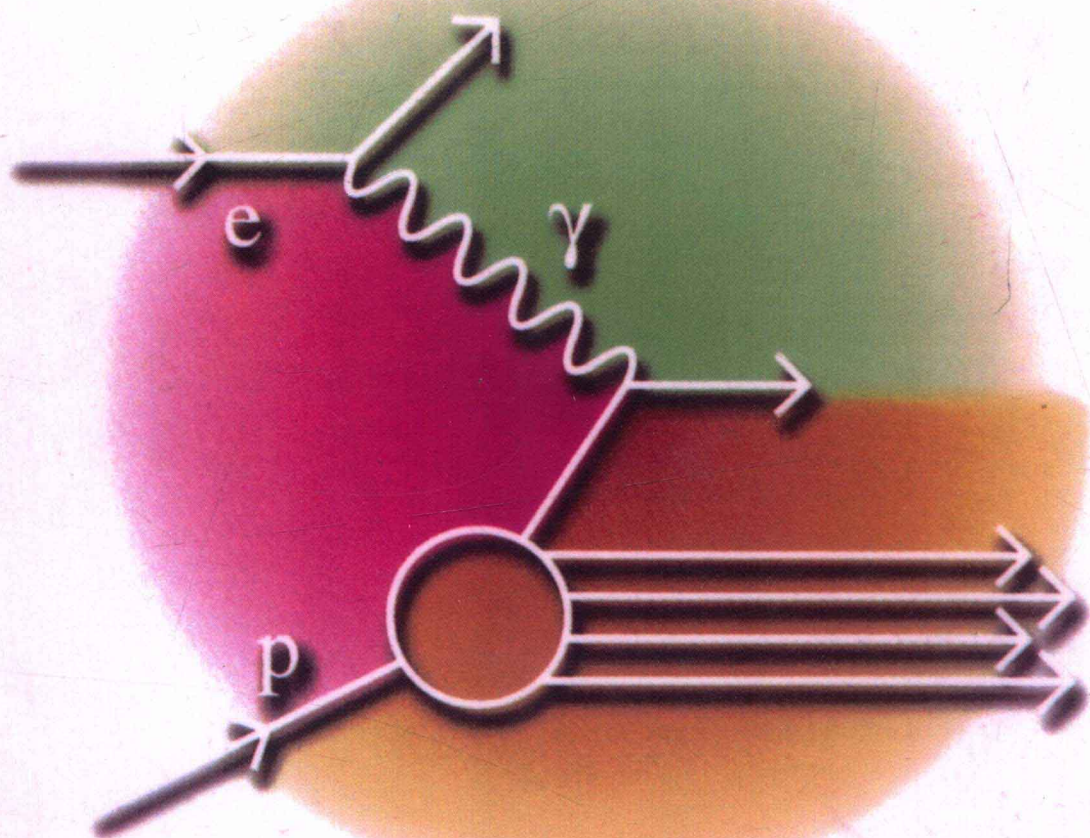


牛津大学研究生教材

量子场论现代导引

加来道雄 著



世界图书出版公司

www.wpcbj.com.cn

量子场论

现代导引

加来道雄

图书在版编目 (CIP) 数据

量子场论现代导引 = Quantum Field Theory: A Modern Introduction:
英文/(美) 加来道雄著. —影印本. —北京: 世界图书出版公司
北京公司, 2012. 3
ISBN 978 - 7 - 5100 - 4416 - 8

I. ①量… II. ①卡… III. ①量子场论—教材—英文 IV. ①O413. 3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 030280 号

Copyright © 1993 by Oxford University Press, Inc.

THIS BOOK IS BASED ON Quantum Field Theory: A Modern Introduction. This SPECIAL CHINESE VERSION is published by arrangement with Oxford University Press for sale/distribution in The Mainland (part) of the People's Republic of China (excluding the territories of Hong Kong SAR, Macau SAR and Taiwan Province) only and not for export therefrom.

本书得到牛津大学出版社的授权在中国大陆地区 (不包括香港, 澳门和台湾) 重印发行, 不得出口。

书 名: Quantum Field Theory: A Modern Introduction

作 者: Michio Kaku

中译名: 量子场论现代导引

责任编辑: 高蓉 刘慧

出版者: 世界图书出版公司北京公司

印刷者: 三河市国英印务有限公司

发 行: 世界图书出版公司北京公司 (北京朝内大街 137 号 100010)

联系电话: 010 - 64021602, 010 - 64015659

电子信箱: kjb@wpchj.com.cn

开 本: 16 开

印 张: 50.5

版 次: 2012 年 06 月

版权登记: 图字: 01 - 2011 - 6317

书 号: 978 - 7 - 5100 - 4416 - 8/O · 939

定 价: 129.00 元

This book is dedicated to my parents.

影印版前言

本书作为牛津大学出版社研究生教材系列丛书选定的量子场论教科书，于1993年面世。尽管距今已经有二十年，但该书经多次重印，至今仍然受到物理类相关学科的师生与研究人员的青睐，堪称一部优秀教材。现在我们将它推荐给读者，正是考虑到与类似书籍相比较，这本书对于学习量子场论课程所具有的独特价值。对于本书的详细介绍，包括内容的取舍及其特色、选材遵循的指导原则、与同类图书的比较以及使用的建议等，作者在序言中都有详细的说明，这里不打算赘述。我们只强调指出，该书几乎涵盖了二十世纪九十年代为止量子场论所涉及的所有的基本知识和应用领域。其中既有对作为量子场论基础知识的经典场论、量子力学、相对论和群论等的简要描述，也有对量子场论本身的各种量子化方法、费曼图和微扰论、重整化理论和重整化群的详细介绍；既包括了规范场论、QED、QCD、格点规范理论、电弱统一理论、标准模型、大统一、超对称、量子引力与超引力以及超弦理论等粒子物理相关的各个方面理论知识的详细阐述，也简要地讨论了在凝聚态物理中量子场论的典型应用知识。总而言之，其信息量之大，涵盖内容之广，在已经出版的同类书籍中确属少见。作者对这些内容有繁有简，花费了一番努力，做出了相当妥善的处理，非常便于学习使用。

本书的作者加来道雄（Michio Kaku）是一位日裔美国著名理论物理学家。1947年出生于美国加利福尼亚州圣何塞。依据百度百科的介绍，他的经历颇有一些传奇色彩。高中时期他在自家的车库中制作了一台功率为230万电子伏的电子感应加速器，能产生相当于地球磁场2万倍的磁场，目标是能制造出威力足以产生反物质的 γ 射线。这一作品被选作全国科学展的展览项目，并因此而成就了他的一个梦想，获得了哈佛大学的奖学金。上初中时老师在班上讲了一个故事，极其崇敬地提到物理学家爱因斯坦的名字，称他是整个人类历史上最伟大的学者，他的发现改变了整个世界和我们周围的一切。但是却很少有人能够理解他的思想。最后提到“爱因斯坦还没来得及完成一个最伟大的发现就撒手人寰”，“尚未完成的论文就放在自己的办公桌上”。这种结局引起了加来道雄极大的好奇心。从此，加来道雄开始学习关于爱因斯坦的一切。他花很多时间阅读和理解他能找到的相关著作，决定对这一秘密刨根问底。他在高中时期就看完了图书馆里所有关于“统一场论”的书籍。而为了实现这个目标，他立志成为一名理论物理学家。以其全部精力，秉承爱因斯坦的精神：探寻“包罗万物”的终极理论。在1972年获得博士学位之后的几十多年中，先后发表了170篇文章，涵盖主题为超弦理论、超引力、超对称和强子物理。1984年他和其他几名科学家相继提出了“超弦理论”，奠定了统一宇宙的四种基本作用：电磁相互作用、强相互作用、弱相互作用、引力的一种新的理论基础。在此期间他除了本书之外，还撰写了《弦、共形场论和M-理论》（Strings, Conformal Fields, and M-Theory. Springer, 1999.）以及

《超弦与 M - 理论导论》(Introduction to Superstrings and M - Theory. Springer, 1999.) 两部专著。与此同时,他还写了不少高级科普著作,其中《构想未来》、《超越爱因斯坦和超空间》、《平行宇宙》等,均被《纽约时报》和《华盛顿邮报》提名为当年的最佳科学读物之一。他的科普著作中很多都已相继译成中文,在我国有一定的影响力。有兴趣的读者不妨找来一读。

量子场论是我国物理类相关科目研究生的一门重要的必修基础理论课。本书内容丰富、叙述流畅、推导详尽、而且每章都配有许多习题,很适合选择部分内容作为教材。对于攻读粒子物理专业的研究生更是一部非常有用的参考书。

中国科学院大学 丁亦兵

前 言

在 20 世纪 60 年代，出现了很多量子场论的经典教科书。由于量子电动力学（QED）唯象实验的成功，量子场论变成了一个严格的物理知识体系，如同非相对论量子力学那样得以确立。

在 20 世纪 70 年代和 80 年代，由于规范理论的日益成熟，标准的一个学年量子场论课程很快过时，出现了很多关于规范理论各个方面的高等专著。因此，一个学年的量子场论课程通常被分拆了，采用一本量子电动力学教材作为第一学期的基础，而在涉及规范理论各个方面的几本专著中选择一本作为第二学期教材。

现在，由于标准模型的成功，强化和扩充标准的一个学年量子场论课程十分必要。很显然，我们需要一本适合 20 世纪 90 年代的教材，一本在内容上连贯一致并以标准模型为基础的教材，就像早期的那些以量子电动力学为基础的教材一样。由于标准模型迅速地像量子电动力学那样确立起来，因此对于一本以标准模型为重点的教科书有着迫切的需要。

因而，我们把本书分成三个部分，它可以用于两个或三个学期课程：

第一部分：量子场和重整化

第二部分：规范理论和标准模型

第三部分：非微扰方法和统一

本书第一部分总结了量子电动力学的进展。以微扰论和重整化理论为基础，它提供了第一学期量子场论课程的基本内容。（然而，本部分内容也可以作为非相对论量子力学课程的相对论部分的延续，在三个学期的量子力学课程的最后一个学期使用。因为微扰论和费曼图现已渗透到量子物理学的各个分支，所以通过这种方式，非高能物理专业的学生？会发现第一部分特别有用。）

在第二部分中，标准模型是重点。它可用做第二个学期量子场论课程的基本内容。该部分对于路径积分方法和标准模型的唯一理论给予了特别的关注，这一章尤其适合那些想要了解高能物理的学生，而标准模型的应用知识对于学习高能物理是必不可少的。希望学生在欣赏铺天盖地的旨在证明标准模型正确性的大量实验证据的同时，学完这一部分。

因为超出标准模型所必需的实验正在急剧地变得昂贵和耗费时间，而且我们也意识到物理学的发展到下一个十年可能会变得越来越理论化，因此我们觉得应该尝试探索使我们超出标准模型的各种理论。

因此，本书第三部分适合那些想追求更前沿内容的学生，它可以用两种方式使用。教师可将第三部分的一些章节的内容在传统的两学期量子场论课程的最后阶段讲解；或者可以作为第三学期的量子场论课程的基础。我们提供了各种各样的论题，从而使教师可以从中挑选最热门和有趣的章节。在写作本部分时，我们给使用这些材料的教师留下了尽可

能多的取舍余地。

我们在本书中所采取的不同于其它书籍的方法主要表现在以下几个方面：

首先，我们尝试尽可能地以连贯一致的方式将大量信息合并和精简到一本书中，从量子电动力学开始，讲到标准模型，并以超对称结束。

第二，我们强调群论的作用，将量子场论的很多特性视为洛伦兹群、庞加莱群和内部对称群的副产品。从这个角度看，量子场论的很多相当任意的和看似人为的约定被视为群论的结果。群论，特别是在第三部分，在认识统一方面起到了关键作用。

第三，我们给出了重整化理论的三种不同的证明。大部分书，即使它们完整地处理重整化理论，都只会给出一种证明。然而，因为重整化理论在现代研究中的重要性，认真的学生可能会发现只有一种重整化证明是不够用的。当从一种完全不同的方法阐述重整化理论时，学生可能对于处理研究缺乏任何准备。因此，我们给出了重整化理论的三种不同的证明，从而可以让学生至少精通两种不同的方法。在第7章，我们介绍了 Dyson/Ward 的最初的证明。第二部分中，我们还给出了基于 BPHZ 方法和重整化群的两种不同的证明。

第四，我们应该告诫读者，非微扰夸克禁闭或者超对称的实验证明是绝对不存在的。然而，因为当前大量的理论高能物理研究集中在第三部分所涵盖的内容之中，这一部分将给学生提供一个高能物理中主流趋势的简短概述。而且，我们的态度是把非微扰场论和超对称看作是有用的理论“实验室”，在其中检验我们关于量子场论的想法。我们觉得第三部分的这些技巧，如果把它们视为探究场论局限性的丰富而多产的实验室的话，认真的学生将会从中获益良多。

我们如此地组织各个章节，使其能以多种不同方式适应不同的需求。例如，在第一部分中，在第3章至第6章给出了正则量子化方法的核心。这些章节对于构建量子场论和费曼图的一种坚实基础十分必要。尽管路径积分方法现在已被证明对于规范理论更为灵活多变，通过阅读这些章节，学生将会对量子场的严谨性有一个更好地理解。然而，已经了解群论和重整化基本知识，或者不想深入钻研错综复杂的量子场论的学生可以跳过第2章和第7章。

在第二部分中，关键内容被包含在第8章至第11章。在这几章中，我们阐述了理解标准模型的必要知识，即路径积分、规范理论、自发对称破缺和唯象学，它们构成了该部分的核心，不能被忽略。而第12章至第14章的内容应该只适合那些希望能够更详细地展现量子场论精妙之处（BRST，反常，重整化群等）的学生阅读

在第三部分中，读者有着根据个人兴趣选择研读什么内容的极大自由。我们撰写这一部分的目的是为了对量子场论的不同方法给予最大的灵活性。对于那些想了解夸克禁闭和非微扰方法的读者，第15至17章是必不可少的；想研读大统一理论的学生应该学习第18章；然而，希望了解在过去十年中最令人兴奋的理论进展的学生应该阅读第19至21章。

由于文献中见到的符号和约定的范围广泛，并经常混淆，我们尝试，至少在最前面的几章，与在 Bjorken 和 Drell, Itzykson 和 Zuber, 郑大培 (Cheng) 和李灵峰 (Li) 的书中出现的那些符号和约定保持一致。我采用的度规是 $g_{\mu\nu} = (+, -, -, -)$ 。

本书还包括了311个习题，分列在每章之后。我们认为求解这些习题对于理解内容是必不可少的。学生们经常抱怨说他们理解了内容但是不能解答习题。我们觉得这个说法是矛盾的。如果你不能做出习题，那么你还是没能真正完全理解内容。

在本书的写作过程中，我们力求避免两个极端。我们尝试避免给出重整化理论的过于冗长的论述和费曼图的晦涩复杂的介绍。它让人想起了作为一个中世纪时期的学徒，他们看重的是掌握高度专业化的、神秘的技术和技巧，而不是得到那个领域的一个全面的了解。

另一个极端是浅显介绍理论物理，在其中删除了许多重要的概念，因为它们被认为对于学生来讲太难了。那时，学生对该领域只能有一个肤浅的认识，由此带来的是迷惑而不是理解。尽管学生可能倾向于一个量子场论的较为容易的介绍，但最终受害的还是学生。当面对科学研究时，这些学生将会完全束手无策。甚至高能物理预印本的题目学生都不懂。

通过采取这种折中的方法，我们希望给学生提供一个当前许多研究领域的坚实基础，而不用铺天盖地的事实压跨学生。如果我们能够避免了这些极端的话，我们认为本书就是成功的。

加来道雄 (Michio Kaku)

纽约

1992年7月

Acknowledgments

I would especially like to thank J. D. Bjorken, who has made countless productive and useful suggestions in every chapter of this book. This book has greatly benefited from his careful reading and critical comments, which have significantly strengthened the presentation in a number of important places.

I would like to thank Dr. Bunji Sakita and Dr. Joseph Birman for their constant support during the writing of this book. I would like to thank A. Das, S. Samuel, H. Chang, D. Karabali, R. Ray, and C. Lee, for reading various chapters of the book and making valuable comments and numerous corrections that have greatly enhanced this book.

I would also like to thank my editor Jeffrey Robbins, who has skillfully guided the passage of the three books that I have written for him. I would also like to thank the National Science Foundation and CUNY-FRAP for partial support.

目 录

第一部分 量子场和重整化

第 1 章	为什么需要量子场论?	3
1.1	历史回顾	3
1.2	强相互作用	6
1.3	弱相互作用	8
1.4	引力相互作用	9
1.5	规范革命	11
1.6	统一	14
1.7	作用量原理	16
1.8	从一次量子化到二次量子化	21
1.9	Noether 定理	23
1.10	习题	30
第 2 章	对称性和群论	33
2.1	群论基础	33
2.2	$SO(2)$	35
2.3	$SO(2)$ 和 $U(1)$ 的表示	39
2.4	$SO(3)$ 和 $SU(2)$ 的表示	42
2.5	$SO(N)$ 的表示	45
2.6	旋量	48
2.7	洛伦兹群	49
2.8	庞加莱群的表示	53
2.9	主群和超对称性	56
2.10	习题	58
第 3 章	自旋为 0 和 1/2 的场	61
3.1	量子化方案	61
3.2	Klein - Gordon 标量场	63
3.3	带电标量场	69
3.4	传播子理论	72

3.5	狄拉克旋量场	77
3.6	旋量场的量子化	86
3.7	Weyl 中微子	93
3.8	习题	95
第 4 章	量子电动力学	99
4.1	麦克斯韦方程	99
4.2	相对论量子力学	102
4.3	麦克斯韦场的量子化	106
4.4	Gupta - Bleuler 量子化	112
4.5	C, P 和 T 不变性	115
4.5.1	宇称	116
4.5.2	电荷共轭	117
4.5.3	时间反演	119
4.6	CPT 定理	120
4.7	习题	123
第 5 章	费曼规则和 LSZ 约化	127
5.1	截面	127
5.2	传播子理论和卢瑟福散射	134
5.3	LSZ 约化公式	141
5.4	狄拉克旋量的约化	145
5.5	时间演化算符	147
5.6	威克定理	151
5.7	费曼规则	156
5.8	习题	159
第 6 章	散射过程和 S 矩阵	163
6.1	康普顿效应	163
6.2	对湮灭	170
6.3	穆勒散射	173
6.4	Bhabha 散射	176
6.5	韧致辐射	177
6.6	辐射修正	184
6.7	反常磁矩	189
6.8	红外发散	194
6.9	兰姆位移	196
6.10	色散关系	199
6.11	习题	204

第 7 章 QED 的重整化	209
7.1 重整化方案	209
7.2 重整化类型	212
7.2.1 不可重整理论	213
7.2.2 可重整理论	215
7.2.3 超可重整理论	216
7.2.4 有限理论	217
7.3 ϕ^4 理论中的重整化概述	218
7.4 QED 中的重整化概述	227
7.5 正规化类型	235
7.6 Ward - Takahashi 恒等式	243
7.7 交缠发散	247
7.8 QED 的重整化	250
7.8.1 步骤一	250
7.8.2 步骤二	251
7.8.3 步骤三	252
7.8.4 步骤四	254
7.9 习题	256

第二部分 规范理论和标准模型

第 8 章 路径积分	261
8.1 量子力学公理	261
8.1.1 公理一	262
8.1.2 公理二	262
8.2 导出薛定谔方程	272
8.3 从一次量子化到二次量子化	273
8.4 连通图的生成元	279
8.5 圈图展开	284
8.6 对 Grassmann 变量的积分	285
8.7 Schwinger - Dyson 方程	288
8.8 习题	291
第 9 章 规范理论	295
9.1 局域对称性	295
9.2 Faddeev - Popov 规范固定	298
9.3 规范理论的费曼规则	304
9.4 库仑规范	307
9.5 Gribov 不定性	311

9.6	库仑规范和朗道规范的等价性	314
9.7	习题	318
第 10 章	温伯格—萨拉姆模型	321
10.1	自然界中破缺的对称性	321
10.2	希格斯机制	326
10.3	弱相互作用	333
10.4	温伯格—萨拉姆模型	335
10.5	轻子衰变	338
10.6	R_ξ 规范	342
10.7	't Hooft 规范	345
10.8	Coleman - Weinberg 机制	348
10.9	习题	357
第 11 章	标准模型	363
11.1	夸克模型	363
11.2	QCD	374
11.2.1	自旋统计问题	375
11.2.2	对湮灭	376
11.2.3	喷注	376
11.2.4	奇特态的缺失	377
11.2.5	介子衰变	378
11.2.6	渐近自由	378
11.2.7	禁闭	378
11.2.8	手征对称性	379
11.2.9	无反常	380
11.3	喷注	380
11.4	流代数	384
11.5	PCAC 和 Adler - Weisberger 关系	389
11.5.1	CVC	390
11.5.2	PCAC	391
11.5.3	Adler - Weisberger 关系	393
11.6	混合角和衰变过程	396
11.6.1	纯轻子衰变	397
11.6.2	半轻子衰变	397
11.6.3	非轻子衰变	398
11.7	GIM 机制和 Kobayashi - Maskawa 矩阵	399
11.8	习题	403

第 12 章	Ward 恒等式, BRST 和反常	407
12.1	Ward - Takahashi 恒等式	407
12.2	Slavnov - Taylor 恒等式	411
12.3	BRST 量子化	412
12.4	反常	414
12.5	非阿贝尔反常	419
12.6	QCD 和介子衰变到伽玛射线	420
12.7	Fujikawa 方法	424
12.8	习题	429
第 13 章	规范理论的 BPHZ 重整化	431
13.1	规范理论中的对应项	431
13.2	规范理论的维数正规化	436
13.3	BPHZ 重整化	441
13.4	森林图与骨架图	447
13.5	量子场论是否真的存在?	451
13.6	习题	456
第 14 章	QCD 和重整化群	459
14.1	深度非弹性散射	459
14.2	部分子模型	463
14.3	中微子求和规则	467
14.4	光锥中的乘积展开	470
14.5	重整化群	476
14.6	渐近自由	483
14.7	Callan - Symanzik 关系	485
14.8	最小减除	488
14.9	标度破坏	491
14.10	重整化群证明	494
14.10.1	步骤一	496
14.10.2	步骤二	497
14.10.3	步骤三	497
14.11	习题	499

第三部分 非微扰方法和统一

第 15 章	格点规范理论	505
15.1	威尔逊格点	505
15.2	格点上的标量和费米子	508

15.3	禁闭	512
15.4	强耦合近似	514
15.5	蒙特卡罗模拟	517
15.6	哈密顿量公式	521
15.7	重整化群	523
15.8	习题	524

第 16 章	孤子, 磁单极子和瞬子	529
16.1	孤子	529
16.1.1	例一: φ^4	531
16.1.2	例二: Sine - Gordon 方程	533
16.1.3	例三: 非线性 O(3) 模型	536
16.2	磁单极子解	539
16.3	特霍夫特—波利亚科夫磁单极	543
16.4	WKB, 隧穿和瞬子	545
16.5	杨—米尔斯瞬子	554
16.6	θ 真空和强 CP 问题	559
16.7	习题	566

第 17 章	相变和临界现象	571
17.1	临界指数	571
17.2	Ising 模型	575
17.2.1	XYZ 海森堡模型	580
17.2.2	IRF 和顶点模型	580
17.3	Yang - Baxter 关系	581
17.4	平均场近似	584
17.5	标度和重整化群	588
17.5.1	步骤一	593
17.5.2	步骤二	596
17.5.3	步骤三	596
17.5.4	步骤四	597
17.6	ε 展开	597
17.7	习题	605

第 18 章	大统一理论	609
18.1	统一和跑动耦合常数	609
18.2	SU(5)	611
18.3	反常相消	612
18.4	费米子表示	613

18.5	$SU(5)$ 自发破缺	619
18.6	层次问题	622
18.7	$SO(10)$	622
18.8	超出 GUT	627
18.8.1	人工色	627
18.8.2	前子或亚夸克	627
18.8.3	超对称和超弦	628
18.9	习题	628
第 19 章	量子引力	633
19.1	等效原理	633
19.2	广义协变作用量	638
19.3	广义相对论中的标架和旋量	640
19.4	GUTs 和宇宙学	642
19.5	暴胀	647
19.6	宇宙学常数问题	649
19.7	卡鲁扎—克莱因理论	650
19.8	推广到杨—米尔斯理论	652
19.9	量子化引力	657
19.10	量子引力中的抵消项	658
19.11	习题	660
第 20 章	超对称和超引力	663
20.1	超对称	663
20.2	超对称作用量	665
20.3	超空间	669
20.4	超对称费曼规则	680
20.5	非重整化定理	682
20.6	有限场论	684
20.7	超群	688
20.8	超引力	692
20.9	习题	696
第 21 章	超弦	699
21.1	为什么需要弦?	699
21.2	点对弦	701
21.3	量子化弦	705
21.3.1	Gupta – Bleuler 量子化	705
21.3.2	光锥规范	709