

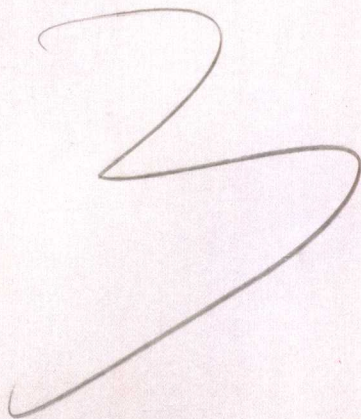
“十一五”国家重点图书出版规划项目

The Series of Advanced Physics of Peking University

北 京 大 学 物 理 学 丛 书

简明量子场论

王正行 编著



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

0413.3/11

2008

The Series of Advanced Physics of Peking University

北 京 大 学 物 理 学 丛 书

简明量子场论

王正行 编著



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

图书在版编目(CIP)数据

简明量子场论/王正行编著. —北京: 北京大学出版社, 2008. 4

(北京大学物理学丛书)

ISBN 978-7-301-13548-8

I. 简… II. 王… III. 量子场论 IV. O413.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 042055 号

书 名: 简明量子场论

著作责任者: 王正行 编著

责任编辑: 顾卫宇

标准书号: ISBN 978-7-301-13548-8/O · 0751

出版发行: 北京大学出版社

地 址: 北京市海淀区成府路 205 号 100871

网 址: <http://www.pup.cn> 电子信箱: zpup@pup.pku.edu.cn

电 话: 邮购部 62752015 发行部 62750672 编辑部 62752021 出版部 62754962

印 刷 者: 北京大学印刷厂

经 销 者: 新华书店

730 毫米×980 毫米 16 开本 19.25 印张 350 千字

2008 年 4 月第 1 版 2008 年 4 月第 1 次印刷

印 数: 0001—4000 册

定 价: 35.00 元

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究

举报电话:(010)62752024 电子信箱:fd@pup.pku.edu.cn

《北京大学物理学丛书》 第二届编委会名单

主 任：高崇寿

副 主 任：(按姓氏笔画排,下同)

	刘寄星	陈晓林	周月梅	夏建白
	聂玉昕	阎守胜	黄 涛	
编 委：	冯世平	田光善	孙昌璞	孙 琰
	朱 星	朱邦芬	宋菲君	肖 佐
	邹振隆	林宗涵	欧阳钟灿	俞允强
	胡 岗	闻海虎	顾卫宇	韩汝珊
	解思深			

前 言

物理学是自然科学的基础,是探讨物质结构和运动基本规律的前沿学科。几十年来,在生产技术发展的要求和推动下,人们对物理现象和物理学规律的探索研究不断取得新的突破。物理学的各分支学科有着突飞猛进的发展,丰富了人们对物质世界物理运动基本规律的认识和掌握,促进了许多和物理学紧密相关的交叉学科和技术学科的进步。物理学的发展是许多新兴学科、交叉学科和新技术学科产生、成长和发展的基础和前导。

为适应现代化建设的需要,为推动国内物理学的研究、提高物理教学水平,我们决定推出《北京大学物理学丛书》,请在物理学前沿进行科学研究和教学工作的著名物理学家和教授对现代物理学各分支领域的前沿发展做系统、全面的介绍,为广大物理学工作者和物理系的学生进一步开展物理学各分支领域的探索研究和学习,开展与物理学紧密相关的交叉学科和技术学科的研究和学习提供研究参考书、教学参考书和教材。

本丛书分两个层次。第一个层次是物理系本科生的基础课教材,这一教材系列,将几十年来几代教师,特别是在北京大学教师的教学实践和教学经验积累的基础上,力求深入浅出、删繁就简,以适于全国大多数院校的物理系使用。它既吸收以往经典的物理教材的精华,尽可能系统地、完整地、准确地讲解有关的物理学基本知识、基本概念、基本规律、基本方法;同时又注入科技发展的新观点和方法,介绍物理学的现代发展,使学生不仅能掌握物理学的基础知识,还能了解本学科的前沿课题和研究动向,提高学生的科学素质。第二个层次是研究生教材、研究生教学参考书和专题学术著作。这一系列将集中于一些发展迅速、已有开拓性进展、国际上活跃的学科方向和专题,介绍该学科方向的基本内容,力求充分反映该学科方向国内外

前沿最新进展和研究成果。学术专著首先着眼于物理学的各分支学科,然后再扩展到与物理学紧密相关的交叉学科。

愿这套丛书的出版既能使国内著名物理学家和教授有机会将他们的累累硕果奉献给广大读者,又能对物理的教学和科学研究起到促进和推动作用。

《北京大学物理学丛书》编辑委员会

1997年3月

自 序

“文革”结束后恢复招收研究生，胡济民先生找我给他新招的两位研究生柴发合与范希明讲量子场论。那是1979年初秋，我刚刚给王军涛他们班讲完电磁学。王竹溪先生知道了这事，让他新招的研究生（也就是我的师弟）郑小鹿也来听。地点安排在北大一教307，那是个可以坐一百多人的大教室，教务员说没有小教室了。记得第一堂课我夹着几本书和提纲就去了，心想只有几人，完全可以坐下来面对面轻松自由地讨论。到教室一看，我才被那场面惊得呆住。原来教室的课椅已经坐满，没有座位的人只好从旁边的教室去搬（那时的桌椅是活动的，还没有固定在地上）。到那时，我已经成为过了河的卒子，没有退路，只能硬着头皮走上讲台。看看下面，除了柴、范等几位，还有许多同事，甚至也有我的老师辈在座。除了本系本校，还有外校以及科学院和北京原子能研究院的，年纪多数与我相仿。当时拨乱反正，百废待兴，人称又一个科学的春天，大家对未来充满了热情的憧憬与希望。

我学量子场论始于听胡宁先生的课，当时胡先生的书还没有印出来，朱洪元先生的油印讲义全班只有一本在下面传。那时量子场论与原子核理论（杨立铭先生讲）都属于保密课程，笔记本是发下来的统一编号的保密本，课后又都交回保密室，个人没有留下文字的记录^①。记得课后与我同班的朱保如就开始译Schweber, Bethe和de Hoffman的*Mesons and Fields*。他毕业后去跟了张宗燧先生，不知最后译完了没有。那时重正化理论还没有获诺贝尔奖。听说王竹溪先生也做了很多重正化的演算，算草在少数熟人中传看。1965年重正化获奖后，紧跟着1967年Glashow, Weinberg和Salam的电弱统一模型确立，1973年又提出QCD，杨-Mills规范场成为场论的核心，量子场论经历了一场革命性的转变。这两大突破性进展及其所带来的革命性转变都发生在“文革”期间，我们一下子又落后了十多年，落到了断层的低端。面对教室里这一百多双渴望求知的眼睛，我只好临时抱佛脚，现学现卖。幸好那时李政道先生与黄克孙先生先后在北京科学会堂与高能物理研究所礼堂开大课，我从他们二位那里学来，转手就搬到我

^① 邓稼先先生那前后在核武器研究所讲授量子场论，也是保密的课程，他的讲稿解密后发表于《邓稼先文集》，安徽教育出版社，2003年。

的课堂上，真正做了搬运工。

胡济民先生叫我讲量子场论，大概是因为他看过我做研究生的毕业论文，那是关于超导体 Josephson 结理论基础的研究。在固体凝聚态和量子统计中大量运用量子场论方法，特别是超导电性理论。大家知道，量子场论的大腕 Bogoliubov 对超导电性理论做过漂亮出色的工作。他把电子的产生算符与消灭算符叠加，引进准粒子概念，就给出了 BCS 理论的结果。这真是神来之笔，令人倾倒。我后来离开这个领域，改做原子核理论，与粒子理论的关系就更直接和密切。不过，我始终没有机会做过纯粹的粒子理论。

同样是理论物理学的基本理论，量子场论与量子力学的情况却并不相同。量子力学在短短几年之中基本上就已经成熟与臻于完成，所以 Dirac 的《量子力学原理》可以用了七八十年依然弥久不衰成为经典。其它几本量子力学初创时期的著名教科书，如 Sommerfeld, Kramers, Fock 等的著作，今天拿来依然可读，只是缺少现代的例子而已。而量子场论虽然只比量子力学年轻两岁，但若把几本早期的名著拿来读，就会有恍如隔世的沧桑，有如看古董做历史的感觉。究其原因在于，量子场论在 20 世纪 60 年代发生了一场 Veltman 在其诺贝尔演讲中称之为“扭转心灵的转变”，而且至今仍在成长演化之中，尚未完成与定型。

在 20 世纪 50 年代之前流行并被视为经典的 Wentzel 的 *Quantum Theory of Fields*，现在早已鲜为人知。50~60 年代风行的 Heitler 的 *The Quantum Theory of Radiation*，Jauch 与 Rohrlich 的 *The Theory of Photons and Electrons*，以及 Schweber, Bethe 与 de Hoffman 的 *Mesons and Fields*，到 60 年代就被 Bjorken 与 Drell 的两本书 *Relativistic Quantum Mechanics* 和 *Relativistic Quantum Fields* 所取代。80 年代开始流行 Itzykson 和 Zuber 的 *Quantum Field Theory*，它属于在发生了“扭转心灵的转变”之后不久写成的那一代教材。而当今的时尚，则是 Weinberg, Ryder, 徐一鸿 (A. Zee)，和 Peskin 与 Schroeder 了。在这个信息爆炸的时代，知识更新迅速，理论进展加快，一部成功的教材，在市场上流行的生存期也就是一二十年。

这种变迁的核心，主要是理论体系的表述与讲法。在 Wentzel 和 Heitler 的时代，使用的是 Pauli 的度规 1234，公式中还保留 c 与 \hbar 。从 Bjorken 与 Drell 开始，度规就换成 Dirac 的 0123，而 c 与 \hbar 则更早就不见了^①。这只是在形式上。在理论原理和内容的表述与讲法上，虽然 Feynman 的路径积分和 Schwinger 的泛函方法早在 40~50 年代之交就已经提出，但是 Bjorken-Drell 仍然与 Wentzel

^① 值得指出，邓稼先的《量子场论》手稿中用的已经是 0123，那大约是在 1958~1960 年。见《邓稼先文集》，安徽教育出版社，2003 年，219 页。

一样，是正则量子化。路径积分和泛函方法在 Itzykson 和 Zuber 的书中已经有系统的叙述，不过直到 Weinberg 和 Peskin-Schroeder，主线还是正则量子化，只是路径积分与泛函分析所占分量越来越大。而 Ryder 和徐一鸿等人则已经把中心和主线都换成了路径积分和泛函分析。将来如何发展还难以逆料，现在只能说，路径积分与泛函分析已经是量子场论中不可或缺的重要部分了。

记得 1961 年周光召先生就为我们班开过“量子场论中的泛函分析”这门课，这是在当时还没有写入任何一本书中的内容。那时他刚从杜布纳回来，既年轻又潇洒。在实际上，物理教学的发展总是要比物理学本身的发展落后一个相位，而尽量跟上发展和缩小这个相差，则是每位教师努力追求的目标，是物理教学改革的主要方向和任务。特别是对于像量子场论这样本身还在发展与演化的理论，教学就如同流水中的小舟，不跟着前进就是后退与落伍。时尚与潮流是文化的一部分，而文化则是一种隐形但不可抗拒的力量，它在无形之中引导和支配着物理教学发展的方向与潮流。

经过 20 世纪 60~70 年代的大发展，量子场论已经不仅仅是一门深奥的学问，而更像是一种精湛的技艺。每一套精细纤巧而且专门的演算技巧，都可以写成篇幅浩瀚的专门著作。现在量子场论的教科书也是林林总总，信手数来就有数十种。书也越写越厚，往往使初学者望而却步。而在另一方面，有兴趣和需要学量子场论的人也越来越多。在这种情况下，我相信一本跟随潮流而又十分简约的简明量子场论在读者中仍然是有市场的。

Weinberg 的书是三卷本大部头，Peskin 与 Schroeder 的书是八百多页，Siegel 的电子版也有近八百页。这都是大匠们的宏幅巨著，我不敢攀比。Dirac 写广义相对论只用几十页，更是高手神笔，令人高山仰止。我为自己设定的目标，是控制在三百页左右。所以我把本书的重点放在量子场论的基本原理、理论和概念，不打算深入许多数学推演与具体理论的细节。我的目标是针对具有狭义相对论和非相对论量子力学基础的读者，为他们提供一个进入研究工作所必需又尽量简约的量子场论基础，使他们能够花费尽量少的时间与精力，就可以克服在了解量子场论时所遇到的主要障碍，并能进一步深入到他们所感兴趣的专门领域。所以本书起名《简明量子场论》，英文 *Elementary Quantum Field Theory*。

按照这个目标，我的做法是尽快直接进入具体物理和问题的讨论，对要用到的基本原理采取渗透式的讲法，结合具体问题现用现讲，而不是先集中单独和抽象地讲原理，再具体运用到不同的物理和问题。因为设定读者只有非相对论量子力学和相应的数学基础，所以在讲旋量场的同时讲 Dirac 方程，在讲路径

积分时讲一点泛函分析和 Grassmann 代数的 ABC, 在讲维数正规化时补充 Γ 函数和 Feynman 积分的知识. 同样, Feynman 规则和 γ 矩阵的运算也不是一次讲完, 而是用多少讲多少, 现用现讲. 这种讲法在局部的逻辑性与系统性方面会显得不够完美, 但却突出了具体的物理和问题. 这是鱼与熊掌的选择, 见仁见智就因人而异了.

此外, 因为本书定位为简明量子场论, 只阐述量子场论的物理与基本理论, 不涉及更深层的基础和数学结构, 所以除非必须, 我尽量避免使用专门的数学. 比如群论, 这对于粒子物理是必需的数学手段, 而对于一本简明的量子场论却可以避开不用. 所以本书没有使用群论, 只是在个别地方用了群论的术语. 这就可以为没有学过群论的读者提供一个了解和学习量子场论的选择, 而不必陷入过多数学的困扰. 当然, 本书更没有必要进入微分几何的圣殿, 那完全是学了一遍量子场论以后的下一步选择了.

本书包括引言、标量场、矢量场、旋量场、路径积分、散射振幅与 Feynman 图、QED、重正化、杨-Mills 规范场和 QCD、Glashow-Weinberg-Salam 模型、结语等部分. 在用自由场的正则量子理论建立场的粒子图像之后, 就进入路径积分和泛函方法的讨论, 在此基础上引进 Feynman 图给出 Feynman 规则. 然后着重讨论 QED (量子电动力学), 给出一些基本 QED 过程低阶微扰的计算, 和旋量 QED 的单圈重正化, 并给出 QED 可重正性的证明. 在讨论了 Abel 规范理论的 QED 之后, 接着又进一步讨论非 Abel 规范理论的 QCD (量子色动力学), 具体讨论了强相互作用的渐近自由问题. 在扼要介绍唯象处理弱作用过程的普适 Fermi 相互作用和计算 μ 子衰变率之后, 讨论了统一处理电磁与弱相互作用的 Glashow-Weinberg-Salam 模型, 特别是使规范粒子获得质量的自发对称破缺和 Higgs 机制, 以及使 Fermi 子获得质量的机制. QED、重正化、杨-Mills 规范场和 QCD、Glashow-Weinberg-Salam 模型这四部分是本书的重点, 篇幅占全书一半以上. 不使用群论的理论和概念, 不要求读者学过高等量子力学. 对于不想投入过多时间的读者, 或对于学时不多只准备讲授一个学期的课程, 我相信这是一个恰当而值得考虑和推荐的安排和选择.

鉴于量子场论具有尚未完成与定型这一特点, 许多定义和符号在不同作者的书中不尽相同, 往往有正负号和虚单位 i 以及 2π 之类常数的差别, 这无疑为读者凭空增添了不必要的麻烦与困扰. 不过百花齐放百家争鸣, 这是历来如此, 将来也绝不可能完全统一, 我们只能接受和适应这个现实. 而量子场论又涉及大量繁杂冗长的计算, 一不小心就会出错, 一步错就常常是全盘输. 所以学量子场论不能只靠做题. 学量子场论最好的方法, 是跟着老师或书本一步一步做计

算, 并且不要受老师或书本的约束, 要选择适合自己的定义和符号, 检验和判断每一步运算的正误, 归纳和设计自己的逻辑和体系. 这样在学完之后, 你就有了适合你自己的量子场论. 这无论对你将来的工作还是进一步的学习都有莫大好处, 远远胜过你去做许多习题. 事实上, 这是学习理论物理的一般方法, 尤其是对于学习新的正在发展的理论. 当然本书还是提供了一套与正文紧密配合的在传统意义上的练习题, 以适合不同读者的需要.

虽然按照历史的发展和线索来经验地叙述物理是最直接和自然的选择, 但历史往往不合逻辑. 而正如 Einstein 所说, 经验不是相信的依据. 只有理论的逻辑和演绎才能产生信心和力量. 作为理论物理, 本书选择逻辑的叙述而割舍了经验的累积, 只在少数地方做了历史的铺垫. 不过, 对于中国的读者, 我们前辈在量子场论发展的历史长河中参与和走过的足迹却是值得关注的. 我没有全面和具体的了解, 只能就我个人所知, 零星点滴地提到一些, 以附注的形式提供给读者. 这里提到的有马仕俊、张宗燧、彭桓武、胡宁和杨立铭几位先生. 他们的工作, 分别在 Wentzel, Heitler, Jauch 和 Rohrlich 的名著中被提到和受到了好评. 当然, 贡献最大的是杨振宁先生和李政道先生, 杨-Mills 这个名字会被恒久地写入物理学中, 宇称不守恒的发现则最终导致电弱统一模型的建立, 这都已经写入了量子场论的正文.

在去年 12 月 8 日北大为胡宁先生逝世十周年暨铜像落成仪式举行的纪念会上, 马伯强教授问我最早在国内讲授量子场论的是谁, 我告诉他很可能是马仕俊先生. 马仕俊先生 1935 年从北大物理系毕业, 1937 年获中英庚款到剑桥跟 Heitler 做介子场论, 1941 年获博士学位后回国, 任教于昆明西南联大, 为本科生讲“普通物理”、“力学”和“微子论”(即气体分子运动论), 为研究生讲“理论物理”和“原子核、场论”, 杨振宁先生和李政道先生都曾是他的学生. 杨振宁先生于 1943 年春听过他的场论, 课讲授得既清晰明白, 又很有系统和深度. 从“原子核、场论”这个名称来看, 这门课会讲授核力的介子场论, 那时 Yukawa (汤川秀树) 的理论刚刚提出不久, 这是当时量子场论发展的前沿和热点. 1946 年马仕俊先生到普林斯顿高级研究院, 那正是 Heisenberg 的 S 矩阵理论在物理学中产生强烈冲击的时候, 他在那里发现了 S 矩阵著名的多余零点. 他 1947 年到都柏林高级研究院, 1949 年在那里指出 Fermi 处理量子电动力学方法的困难, 这导致一年后 Gupta-Bleuler 方法的产生^①. 在那个年代的中国理论物理学家中, 马仕俊先生是才华横溢成绩卓著的一位. 1962 年初, 在他创造力的鼎盛时期,

^① 参阅 T.D. Lee and C.N. Yang, Obituary for Dr. Shih-Tsun Ma, in Chen Ning Yang, *Selected Papers, 1945-1980, with commentary*, Freeman, 1983, p.324.

他在澳大利亚悉尼黯然辞世，人生的路途走得艰难而悲怆。在关洪教授的《胡宁传》和本书作者的《严谨与简洁之美——王竹溪一生的物理追求》这两本书中，都有提到他的地方。

本书是在我授课讲稿的基础上进一步整理和发展而成。主要参考的书籍，除了在上面提到的和在本书正文中引用的以外，还有裘忠平的《现代量子场论导引》(华中师范大学出版社，1992年)，曹昌祺的《量子规范场论》(高等教育出版社，1990年)，徐建军的 *Quantum Field Theory* (《量子场论》)(复旦大学出版社，2004年)，戴元本的《相互作用的规范理论(第二版)》(科学出版社，2005年)，赵光达的《量子场论讲义》(电子版，2005年)，李重生的《电弱相互作用理论(基础部分)》(讲义，2000年)，以及国外一些大学量子场论讲义的电子版，还有 Gordon Kane 的 *Modern Elementary Particle Physics* (Addison-Wesley, 1993)。本书是阐述性的而不是研究性的，所以只在个别地方注出了原始文献。同样，本书是阐述性而不是评述性的，所以尽量避免评述性的写法，只在个别地方不作推理与解释就直接写出了结论。实际上，本书的数学推演都力求做到能让读者一步一步跟随下来，不作过分的省略与跳跃。按我的学习经验，任何高深的理论，具体到每一步细节都不难。困难大都来自基础准备不足或推演的省略与跳跃。

感谢高崇寿教授对书稿的审阅与推荐，特别是他建议我把动量空间场算符的定义从欧洲 Itzykson-Zuber 和 Ryder 的形式换成美国 Bjorken-Drell 和 Weinberg 的形式。还要感谢马伯强教授的仔细审阅和宝贵意见。也还要感谢北京大学出版社的支持与帮助。本书是作者用 $\text{CT}_{\text{E}}\text{X}$ (中文 $\text{L}^{\text{A}}\text{T}_{\text{E}}\text{X}$) 软件写成和排版的，在排版过程中得到责任编辑顾卫宇女士专业和细心的指导与帮助，得到吴崇试教授传授有关使用 $\text{CT}_{\text{E}}\text{X}$ 的一些方法和诀窍，并参考和使用了 CTAN 和 $\text{CT}_{\text{E}}\text{X}$ 网站提供的有关资料 and 软件，作者在此一并表示衷心的感谢。书中的错误或不妥之处，还望识者不吝指正，以便将来有机会时得以更正。

2008 年仲春作者于北京大学物理学院

一些符号和定义

$$\sigma^1 = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}, \quad \sigma^2 = \begin{pmatrix} 0 & -i \\ i & 0 \end{pmatrix}, \quad \sigma^3 = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix},$$

$$(g_{\mu\nu}) = (g^{\mu\nu}) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{pmatrix},$$

$$\begin{aligned} ab &= a \cdot b = a_\mu b^\mu = a^\mu b_\mu = g^{\mu\nu} a_\mu b_\nu = g_{\mu\nu} a^\nu b^\mu \\ &= a^0 b^0 - a^1 b^1 - a^2 b^2 - a^3 b^3 = a^0 b^0 - \mathbf{a} \cdot \mathbf{b}, \end{aligned}$$

$$\partial_\mu = \frac{\partial}{\partial x^\mu} = (\partial_0, \nabla),$$

$$\partial^\mu = \frac{\partial}{\partial x_\mu} = (\partial_0, -\nabla),$$

$$\square = \partial^2 = \partial_\mu \partial^\mu = \partial_0^2 - \nabla^2,$$

$$\bar{\psi} = \psi^\dagger \gamma^0,$$

$$\not{\partial} = \gamma^\mu \partial_\mu,$$

$$\not{D} = D^\mu \gamma_\mu,$$

$$\not{a} = \gamma^\mu a_\mu,$$

$$\underline{Q} = \gamma^0 Q^\dagger \gamma^0,$$

$$[A, B] = AB - BA,$$

$$\{A, B\} = AB + BA,$$

$$A \overleftrightarrow{\partial}_\mu B = A(\overrightarrow{\partial} - \overleftarrow{\partial})_\mu B = A \frac{\partial B}{\partial x^\mu} - \frac{\partial A}{\partial x^\mu} B.$$

目 录

1 引 言	1
1.1 量子场论的性质与特点	1
1.2 相对论协变性	3
1.3 Lagrange 作用量原理	7
1.4 公式的简化	10
2 标量场	13
2.1 实标量场及其量子化	13
2.2 实标量场的粒子性	16
2.3 复标量场及其量子化	21
2.4 规范变换及粒子的荷	23
3 矢量场	28
3.1 Maxwell 场及其规范条件	28
3.2 场的角动量	30
3.3 Maxwell 场的正则量子化	34
3.4 重矢量场	43
4 旋量场	47
4.1 Weyl 方程	47
4.2 Dirac 方程	51
4.3 Dirac 方程的变换性质	58
4.4 旋量场的 Jordan-Wigner 量子化	62

4.5	微观因果性原理	68
5	路径积分	73
5.1	数学准备	74
5.2	路径积分量子力学	80
5.3	标量场的路径积分	89
5.4	标量场自由 Green 函数	92
5.5	旋量场的路径积分	97
6	散射振幅与 Feynman 图	100
6.1	相互作用标量场	100
6.2	相互作用标量场的 Green 函数	103
6.3	S 矩阵及其性质	107
6.4	S 矩阵的计算公式	110
6.5	π - N 散射振幅	115
6.6	散射截面	123
	附录 一些 γ 矩阵公式和求迹公式	127
7	QED	128
7.1	旋量 QED 的 Feynman 规则	128
7.2	Compton 散射	132
7.3	另外几个简单的 QED 过程	140
7.4	等效外场近似	148
7.5	标量 QED 和 π - γ 散射	155
8	重正化	159
8.1	发散困难	161
8.2	正规化	165
8.3	QED 的单圈重正化	173

8.4	电子反常磁矩	178
8.5	Ward-Takahashi 恒等式	184
8.6	QED 的可重正性	191
9	杨-Mills 规范场和 QCD	199
9.1	杨-Mills 规范场	201
9.2	杨-Mills 场的路径积分	206
9.3	QCD Feynman 规则	213
9.4	BRST 对称性与 Slavnov-Taylor 恒等式	217
9.5	QCD 单圈重正化	221
9.6	重正化群方程与 QCD 渐近自由	227
	附录 规范场的微分形式	234
10	Glashow-Weinberg-Salam 模型	237
10.1	弱作用的唯象理论	237
10.2	自发对称破缺与 Goldstone 定理	244
10.3	Higgs 机制	248
10.4	弱同位旋与 Weinberg 转动	253
10.5	Higgs 场与粒子谱	260
10.6	含夸克的模型	264
11	结 语	271
	练习题	273
	索 引	285

太古洪炉铁未销，铸来虹岭插层霄。
群峰众壑争朝拜，绛阙玄都迥寂寥。
呼吸直能通帝谓，洁清无自着尘嚣。
凌虚便有飘然想，只觉青冥不算高。
——王锡山
《题铁峰庵》

1 引 言

1.1 量子场论的性质与特点

量子场论是粒子物理的基本理论 物理学的不同层次，有如下关系^①：

实验 \longleftrightarrow 唯象理论 \longleftrightarrow 基本理论 \longleftrightarrow 数学

在上述关系中，前两部分是实验物理，中间两部分是理论物理，后两部分则是数学物理。唯象理论是实验物理与理论物理的相交部分，它反映了我们对物理世界初步的理解和认识；而基本理论则是理论物理与数学的相交部分，它反映了我们对物理世界深入的理解和认识。

物理世界的最深层次，是由电子、中微子、夸克、核子、介子、光子、胶子、中间玻色子……等等各种各样不同性质不同层次的粒子组成的粒子世界。关于各种粒子的性质、特点、运动和变化，以及它们之间的相互关系、作用与转化，就是粒子世界的现象学。我们通过对粒子现象的综合、归纳、比较和分析，形成了对粒子世界理性的了解和认识，这就是粒子物理学。而粒子物理学的基本理论，则是量子场论。作为粒子物理的基本理论，量子场论是我们当今对粒子世界最深层次的了解和认识。粒子物理还在探索发展之中，所以量子场论是一门还在发展中的理论。

量子场论是粒子体系的动力学模型 粒子物理是在时空中的物理，时空坐标 (t, x, y, z) 是描述粒子运动的基本参数。粒子运动的主要特征，是它们在时空中的产生和消灭。描述粒子在时空中产生和消灭的量，是在时空中分布的场。这种场描述的微观粒子具有量子性，所以它是一种量子场。粒子之间存在相互作用，所以在相应的场之间存在耦合。每种粒子都有各自的性质与特点，这表现为各种场的具体对称与变换性质。

^① 杨振宁，《杨振宁文集》，张奠宙编，上海师范大学出版社，1998年，841页。