

现代物理基础丛书

53

量子多体理论 与运动模式动力学

王顺金 著



科学出版社

《现代物理基础丛书》编委会

主 编 杨国桢

副主编 阎守胜 聂玉昕

编 委 (按姓氏笔画排序)

王 牧 王鼎盛 朱邦芬 刘寄星

邹振隆 宋菲君 张元仲 张守著

张海澜 张焕乔 张维岩 侯建国

侯晓远 夏建白 黄 涛 解思深

前 言

四川大学出版社于 2005 年出版了《高等量子论与量子多体理论》一书, 一年两次印刷达 4500 多册。该书在四川大学、兰州大学、中国科学院近代物理研究所、西南交通大学和台湾成功大学等五校所的研究生及年轻研究人员中讲授, 收到了良好的效果。清华大学、北京师范大学和中国科学院物理研究所等校所物理学方面研究生也把该书作为参考书。台湾一些书局订购了该书, 建议出版繁体字版本; 另有高校老师建议出版英文版。八年来, 这本书在研究生教育中发挥了作用。

鉴于上述情况, 四川大学物理科学与技术学院龚敏院长和科学出版社钱俊编辑商议, 建议作者修订该书, 在科学出版社出版。作者响应此建议并对该书进行了长达半年的修改扩充。由于内容增补较多, 结构变化很大, 该书更名为《量子多体理论与运动模式动力学》。

本书第一篇“简明量子多体理论”, 系统介绍量子多体问题研究中常用的高等量子论的基本理论和量子多体理论的基本理论方法, 包括量子力学的理论结构, 量子力学与经典力学的对应关系, 对称性理论和守恒定律, 量子多体理论中的平均场理论及其扩充和应用, 密度矩阵理论和格林函数理论等非微扰理论方法, 处理碰撞、散射和反应问题的理论方法, 相对论性量子力学, 量子力学的积分形式与路径积分, 量子力学中的几何相位, 量子力学问题的分类等, 其中包含了作者多年的研究成果和对量子论基本问题的特有看法。本书强调对物理概念和原理阐述的深刻性和数学表述的简洁性, 在内容和深度上适合于物理学博士研究生和高年级硕士研究生, 尽可能为物理学研究生阅读专业文献和从事物理学理论研究提供必要的高等量子论和量子多体理论基础, 力图在量子论学习和微观物理学研究之间架设一座桥梁。这一部分的内容兼顾理论物理、粒子物理与核物理、凝聚态物理和量子光学等专业研究生的需要, 也可供从事物理学研究的科技人员参考。

本书第二篇“量子运动模式动力学”, 系统介绍作者对量子世界和量子系统基本运动模式的观点和研究成果, 以及基于这一观点建立的三种量子运动模式动力学: 描述量子关联运动模式的关联动力学, 描述量子对称运动模式的代数动力学和描述量子系统与环境耦合运动模式的耦合动力学。其中, 第 13、14 章是基于作者及其合作者所发表的相关论文, 经修改和扩充而成, 并列出了比较全面的文献索引。感谢四川大学陶军博士对第 13 章电子文本转换提供的帮助。第 12、15 章是基于作者 2011 年 10 月在“第七届彭桓武理论物理论坛”上的报告, 感谢中国科学院理论物理研究所欧阳钟灿教授的邀请, 让作者有机会在这个全国著名的论坛上做报告;

还感谢中国科学院理论物理研究所周善贵教授对这两章生动而准确的表述所提供的帮助。第二篇的内容是本书所特有的,可供理论物理和量子多体理论专家、研究人员和年轻学者参考、研究、讨论和应用。

本书的宗旨之一是促进对物理学基本问题感兴趣的读者对量子论基础的研究。为此,在量子论基本理论的阐述方面,包含了作者长期研究和思考得来的一些观点,如量子力学理论结构中关于“运动学和动力学”的观点,“量子力学对于经典力学的变革植根于运动学”的观点,真空的两种物理效应包括“宏观平稳真空的相对论尺钟效应和微观涨落真空的量子效应”的观点,把宏观物理时空看作“真空背景场的几何”的观点,把相对论效应看作“宏观平稳真空背景的尺钟效应及其共轭的运动学效应”的观点,真空量子涨落如何导致量子化的观点,量子论的本质在于它包含了真空量子涨落的、近似的白噪声属性(真空量子涨落的严格的普朗克尺度属性则表现为引力效应)的观点,以及经典力学与量子力学的联系和区别的观点等。在对量子世界的再认识和基本量子运动模式方面,有如下一些观点:“量子世界等于量子系统加真空背景”,“量子世界的基本要素包括微观粒子、相互作用和真空背景”,“量子系统的三种基本属性包括对称性、多体关联和系统-背景耦合,它们决定了量子系统的结构和性质,导致量子系统三种基本运动模式(关联运动模式、对称运动模式和耦合运动模式)”等。对这些问题阐述的观点,是作者个人的看法,构成了本书的特色之一。希望对这一问题的研究,能起到抛砖引玉的作用,引发年轻人对量子论基本问题的深入思考和研究,在物理学基本理论面临又一次变革的今天,这会是有益的。

本书得以顺利出版,四川大学物理科学与技术学院龚敏院长是热情的支持者和有力的推手,而科学出版社钱俊编辑则是整个出版工作的策划者和组织者,作者对他们表示深深的感谢,同时感谢教育部、四川大学及物理科学与技术学院出版基金的支持。

王顺金

2012年8月于西南交通大学九里堤校区

《高等量子论与量子多体理论》前言

2000年初,兰州大学物理科学与技术学院为了加强全院研究生基础理论课的教学工作,要我讲授全院研究生的必修课——高等量子力学。作为教师,我责无旁贷地接受了这项任务。要较好地完成这项任务,必须明确几个问题。

(1) 课程的目的与定位问题。它决定了教学大纲和教材的内容与深度,以及教学的目的与要求。高等量子力学是一门重点综合型大学物理学研究生的基础理论课程,在内容和深度上必须有较高的要求,要为物理学研究生阅读专业文献和从事物理学研究提供必要的量子力学理论基础,尽可能在量子论学习和微观物理学研究之间架设一座桥梁。此外,它还应包含当前科研工作中最有用的新成果。

(2) 研究生听众的组成问题。必修这门课程的80多名研究生来自理论物理、粒子物理与核物理、凝聚态物理与材料科学,以及量子光学等专业,其中学习实验物理学的研究生占多数(80%左右)。面对这一情况,为使各专业的学生都能从课程中受益,学到对他们有用的知识,本课程在内容上必须兼顾这些专业,而在教学和考试要求上又要有所区别。

(3) 与国内外教材的关系问题。目前,国内外有许多优秀的高等量子力学教材,但是前面两项要求决定了我必须花时间、花精力去编写一本教材,才能达成上面确定的目标。国内外优秀的高等量子力学教材是全世界高等教育的宝贵财富,教师对这些教材应当充分利用,同时又要使自己编写的教材能够与之互补,因为任何有生命力的书籍都应当是有特色、有个性的。基于上述认识,我花了半年多的时间写出了初稿,在兰州大学连续讲了三次,在西南交通大学讲了两次,2002年,我调往四川大学后,又在物理科学与技术学院讲了两次,常常出现每学期都要授课的忙碌景况。其间,我针对讲授过程中出现的问题对教材进行了修改和补充。

2003年,四川大学研究生院制定了研究生基础课教材建设规划。物理科学与技术学院和物理系的领导十分关心本学院研究生基础理论课的教学工作,多次敦促我在《高等量子论与量子多体理论》讲义的基础上,以正式出版物的形式在四川大学出版社出版。四川大学出版社的同志也十分热情,在他们的帮助下,这本书得以顺利出版。

本书的撰写注意了以下几点:强调量子论的应用,强调教材与科研接轨,强调基本理论问题,强调量子论的最新进展。因为量子论的应用所涉及的问题绝大多数是量子多体问题,因此本书用很大篇幅(第3~6章)介绍量子多体理论的基本概念和基本理论方法,希望对读者阅读有关专业文献以及开展量子多体问题研究有所裨

益。在量子力学的基本理论的阐述方面,本书包含了作者长期研究和思考得来的一些观点,如量子力学理论结构中关于“运动学和动力学”的观点,“量子力学对于经典力学的变革植根于运动学”的观点,真空量子涨落如何导致量子化的观点,把物理时空看作“真空背景的几何”的观点,把相对论效应看作“平稳真空背景的尺钟效应及其共轭的运动学效应”的观点,以及经典力学与量子力学的联系和本质区别的观点等。对这些问题阐述的观点是作者个人的看法,希望对这些问题的研究能起到抛砖引玉的作用,引发年轻人对量子论基本问题的深入思考,这在物理学基本理论面临再一次变革的今天,将会是有益的。本书第 1,5,10,12 等章包含了作者的一些科研成果,第 9~11 章涉及量子力学新进展的一些方面,其中第 11 章只给读者建议了一个学习研究的提纲,并未展开讲述。

学习本书的读者,要求对大学物理系本科生的量子力学有比较全面扎实的基础,对群论特别是李群有一定的基础。具备上述条件的读者,学习本书不应有困难。对学理论物理的学生,还能从数学的准确度上掌握本书的基本内容。

本书力求对基本物理原理和基本理论方法的物理图像做尽可能清晰直观的讲述,强调对原理和概念从物理层面上去理解,对基本公式和基本方法从如何应用的角度去思考;对必要的数学推导,则尽可能简明扼要,重物理原理和概念的阐述,而不拘泥于数学细节。对学理论物理的学生,则要求从数学表述上去准确掌握定量的物理原理,对学实验物理的学生则建议他们注重物理原理的理解和应用,而不要求对数学公式细节的推导。

本书也凝聚了作者的亲人、同事和学生的心血和劳动。我的妻子郭开惠始终热情、耐心地支持我的教学、科研工作,她在繁忙的教学工作之余,帮助我打印和校对了许多章节;学生们对各章节提出了许多好的改进意见,帮助绘制图表,校对全书;四川大学研究生院、物理科学与技术学院和物理系的领导对本书的出版给予了热情的关心、帮助和支持;四川大学出版社则热情、细致地组织了出版工作。我在此对他们表示深切的感谢。

由于作者水平有限,书中的疏漏和不妥在所难免,请广大读者批评指正。

王顺金

2004 年 8 月于四川大学望江校区

《现代物理基础丛书》已出版书目

(按出版时间排序)

- | | | |
|--------------------------|-------------|---------|
| 1. 现代声学理论基础 | 马大猷 著 | 2004.03 |
| 2. 物理学家用微分几何(第二版) | 侯伯元, 侯伯宇 著 | 2004.08 |
| 3. 数学物理方程及其近似方法 | 程建春 编著 | 2004.08 |
| 4. 计算物理学 | 马文淦 编著 | 2005.05 |
| 5. 相互作用的规范理论(第二版) | 戴元本 著 | 2005.07 |
| 6. 理论力学 | 张建树, 等 编著 | 2005.08 |
| 7. 微分几何入门与广义相对论(上册·第二版) | 梁灿彬, 周彬 著 | 2006.01 |
| 8. 物理学中的群论(第二版) | 马中骐 著 | 2006.02 |
| 9. 辐射和光场的量子统计 | 曹昌祺 著 | 2006.03 |
| 10. 实验物理中的概率和统计(第二版) | 朱永生 著 | 2006.04 |
| 11. 声学理论与工程应用 | 朱海潮, 等 编著 | 2006.05 |
| 12. 高等原子分子物理学(第二版) | 徐克尊 著 | 2006.08 |
| 13. 大气声学(第二版) | 杨训仁, 陈宇 著 | 2007.06 |
| 14. 输运理论(第二版) | 黄祖洽 著 | 2008.01 |
| 15. 量子统计力学(第二版) | 张先蔚 编著 | 2008.02 |
| 16. 凝聚态物理的格林函数理论 | 王怀玉 著 | 2008.05 |
| 17. 激光光散射谱学 | 张明生 著 | 2008.05 |
| 18. 量子非阿贝尔规范场论 | 曹昌祺 著 | 2008.07 |
| 19. 狭义相对论(第二版) | 刘 辽, 等 编著 | 2008.07 |
| 20. 经典黑洞与量子黑洞 | 王永久 著 | 2008.08 |
| 21. 路径积分与量子物理导引 | 侯伯元, 等 著 | 2008.09 |
| 22. 量子光学导论 | 谭维翰 著 | 2009.01 |
| 23. 全息干涉计量——原理和方法 | 熊秉衡, 李俊昌 编著 | 2009.01 |
| 24. 实验数据多元统计分析 | 朱永生 编著 | 2009.02 |
| 25. 微分几何入门与广义相对论(中册·第二版) | 梁灿彬, 周彬 著 | 2009.03 |
| 26. 中子引发轻核反应的统计理论 | 张竞上 著 | 2009.03 |
| 27. 工程电磁理论 | 张善杰 著 | 2009.08 |
| 28. 微分几何入门与广义相对论(下册·第二版) | 梁灿彬, 周彬 著 | 2009.08 |
| 29. 经典电动力学 | 曹昌祺 著 | 2009.08 |

- | | | |
|----------------------------------|------------------------------------|---------|
| 30. 经典宇宙和量子宇宙 | 王永久 著 | 2010.04 |
| 31. 高等结构动力学(第二版) | 李东旭 著 | 2010.09 |
| 32. 粉末衍射法测定晶体结构(第二版·上、下册) | 梁敬魁 编著 | 2011.03 |
| 33. 量子计算与量子信息原理
——第一卷: 基本概念 | Giuliano Benenti 等 著
王文阁, 李保文 译 | 2011.03 |
| 34. 近代晶体学(第二版) | 张克从 著 | 2011.05 |
| 35. 引力理论(上、下册) | 王永久 著 | 2011.06 |
| 36. 低温等离子体
——等离子体的产生、工艺、问题及前景 | B. M. 弗尔曼, И. M. 扎什京 编著
邱励俭 译 | 2011.06 |
| 37. 量子物理新进展 | 梁九卿, 韦联福 著 | 2011.08 |
| 38. 电磁波理论 | 葛德彪, 魏兵 著 | 2011.08 |
| 39. 激光光谱学
——第1卷: 基础理论 | W. 戴姆特瑞德 著
姬扬 译 | 2012.02 |
| 40. 激光光谱学
——第2卷: 实验技术 | W. 戴姆特瑞德 著
姬扬 译 | 2012.03 |
| 41. 量子光学导论(第二版) | 谭维翰 著 | 2012.05 |
| 42. 中子衍射技术及其应用 | 姜传海, 杨传铮 编著 | 2012.06 |
| 43. 凝聚态、电磁学和引力中的多值场论 | H. 克莱纳特 著
姜颖 译 | 2012.06 |
| 44. 反常统计动力学导论 | 包景东 著 | 2012.06 |
| 45. 实验数据分析(上册) | 朱永生 著 | 2012.06 |
| 46. 实验数据分析(下册) | 朱永生 著 | 2012.06 |
| 47. 有机固体物理 | 解士杰, 等 著 | 2012.09 |
| 48. 磁性物理 | 金汉民 著 | 2013.01 |
| 49. 自旋电子学 | 翟宏如, 等 编著 | 2013.01 |
| 50. 同步辐射光源及其应用(上册) | 麦振洪, 等 著 | 2013.03 |
| 51. 同步辐射光源及其应用(下册) | 麦振洪, 等 著 | 2013.03 |
| 52. 高等量子力学 | 汪克林 著 | 2013.03 |
| 53. 量子多体理论与运动模式动力学 | 王顺金 著 | 2013.03 |
| 54. 薄膜生长(第二版) | 吴自勤, 等 著 | 2013.03 |
| 55. 物理学中的数学物理方法 | 王怀玉 著 | 2013.03 |

目 录

前言

《高等量子论与量子多体理论》前言

第一篇 简明量子多体理论

第 1 章 量子力学的理论结构	3
1.1 量子动力学理论的结构	3
1.1.1 运动学与动力学	3
1.1.2 观测理论	5
1.1.3 自由度: 运动学自由度与动力学自由度	6
1.1.4 表象理论	7
1.2 量子力学几种形式及其与经典力学几种形式的对应	10
1.2.1 Heisenberg-Dirac 形式与 Poisson-Hamilton 形式的对应	10
1.2.2 Schroedinger 形式与 Hamilton-Jacobi 形式的对应	11
1.2.3 Feynman 形式与 Lagrangian 形式的对应	11
1.2.4 Nelson 的随机形式与 Newton 力学 Langevin 形式的对应	12
1.3 量子力学的主要应用	13
1.4 量子力学的近期发展	14
参考文献	15
第 2 章 对称性理论与守恒定律	17
2.1 物理系统的对称性与守恒定律	17
2.1.1 对称性	17
2.1.2 对称性的分类	17
2.1.3 对称性的表述	18
2.1.4 对称性的后果	18
2.1.5 简并子空间的量子态按对称群不可约表示分类	20
2.2 空间各向同性和系统的转动对称性——角动量守恒 —— 角动量理论 精要	22
2.2.1 空间各向同性与系统的转动不变性	22
2.2.2 转动群的不可约表示, 两个角动量的耦合与 C-G 系数	23

2.2.3	转动群元 $\hat{R}(\Omega)$ 的矩阵表示: D -函数	26
2.2.4	不可约张量算符, Wigner-Eckart 定理与选择定则	27
2.3	时空平移对称性和反射对称性	28
2.3.1	时间平移不变性与能量守恒	28
2.3.2	空间平移不变性与动量守恒	29
2.3.3	空间反射不变性与宇称守恒	30
2.3.4	时间反演不变性	32
2.4	全同粒子系统的置换对称性与统计性守恒	34
2.4.1	全同粒子	34
2.4.2	置换对称性	35
2.4.3	置换群	37
2.4.4	分数统计	38
2.5	量子系统 Hamilton 量的动力学对称性	38
2.5.1	动力学对称性的定义	39
2.5.2	具有动力学对称性的系统的性质	40
2.5.3	例子	40
2.6	对称性与群论	50
2.6.1	对称性用对称群描述	50
2.6.2	连续的对称变换导致李群 —— 连续可微群	50
2.6.3	不连续的对称变换导致离散群	51
2.6.4	空间群	51
2.7	量子系统的对称性和量子对称运动模式	51
	参考文献	51
第 3 章	量子多体理论 (I): 平均场理论	53
3.1	量子力学多体问题	53
3.1.1	量子多体系统与量子多体问题	53
3.1.2	量子多体理论: 微观理论和等效理论	53
3.1.3	微扰理论和非微扰理论	54
3.2	平均场理论: 最简单的非微扰理论和处理多体问题的出发点	54
3.2.1	平均场理论的基本思想	54
3.2.2	平均场近似: 时间有关的 Hartree-Fock 理论 (TDHF) 与 Hartree-Fock 理论 (HF)	55
3.2.3	玻色子系统的平均场理论	60
3.2.4	平均场理论的意义	61
3.3	原子的平均场理论: 原子的壳层结构	61

3.3.1	原子中电子的运动, 类氢原子和电子-电子 Coulomb 相互作用修正	61
3.3.2	原子的平均场理论	62
3.3.3	原子平均场理论的改进, 能量密度泛函理论	63
3.4	原子核的平均场理论: 原子核的壳层结构	64
3.4.1	原子核中核子的独立粒子运动与幻数的存在	64
3.4.2	原子核的平均场理论: TDHT 和 HF 近似	64
3.4.3	原子核平均场理论的唯一形式——壳层模型	66
3.4.4	原子核的相对论性平均场理论	66
3.5	晶体的平均场理论: 固体的能带结构	67
3.5.1	固体的量子力学多体问题	67
3.5.2	电子运动与原子核运动的分离: Born-Oppenheimer 绝热近似	68
3.5.3	巡游电子运动方程的平均场近似: 能带结构	69
3.5.4	固体平均场理论的改进	72
3.6	平均场理论的改进: 密度泛函理论与局域密度近似	72
3.6.1	量子多体系统基态的性质: 能量最低、能量泛函对波函数变分极小	72
3.6.2	Hohenberg-Kohn 定理	73
3.6.3	Kohn-Sham 方程	74
3.6.4	$E_{xc}[\rho]$ 的局域密度近似	75
3.6.5	Car-Parrinello 的从头算分子动力学	76
3.6.6	时间有关的 Kohn-Sham 方程	77
3.7	散射与反应问题的平均场理论: 光学模型	78
3.7.1	原子碰撞和原子核碰撞问题	78
3.7.2	光学模型	78
	参考文献	79
第 4 章	量子多体理论 (II): 剩余相互作用与二次量子化表象	80
4.1	多粒子系统量子态用单粒子态描述	80
4.1.1	多粒子系统中的单粒子状态: 剩余相互作用与单粒子态量子跃迁	80
4.1.2	单粒子量子态跃迁与单粒子量子态产生、消灭算符	81
4.2	二次量子化表象	82
4.2.1	二次量子化表象的基本精神	82
4.2.2	Bose 系统	82
4.2.3	费米子系统	87
4.2.4	量子多体系统二次量子化表象的场论形式	89
4.3	原子核和原子的组态混合模型	92
4.4	固体物理中的几个模型	94

4.4.1	固体的磁性与 Heisenberg 模型	94
4.4.2	电子窄带关联与 Hubbard 模型: 金属 - 绝缘相变	97
4.4.3	杂质磁性与 Anderson 模型	98
4.4.4	金属的超导电性与 Bardeen-Cooper-Schrieffer 模型	98
	参考文献	101
第 5 章	量子多体理论 (III)-超越平均场近似的非微扰理论: 密度矩阵理论和 Green 函数理论	102
5.1	纯态与混合态、多体系统的关联等级描述	102
5.1.1	纯态与混合态	102
5.1.2	多体系统的关联等级理论	102
5.2	密度矩阵理论: 多体关联密度矩阵动力学	103
5.2.1	密度矩阵与 von Neumann 方程	103
5.2.2	约化密度矩阵与多体关联密度矩阵动力学	105
5.2.3	两类不同自由度的约化密度矩阵	110
5.3	Green 函数理论: 多体关联 Green 函数动力学	111
5.3.1	一个粒子系统的 Green 函数	111
5.3.2	多粒子系统的 Green 函数	114
5.3.3	Green 函数的运动方程: 多体关联 Green 动力学	117
5.3.4	多体系统基态的单粒子 Green 函数的 Lehmann 谱分解	118
5.3.5	多体关联 Green 函数动力学的二次量子化表象形式	120
5.4	量子统计力学初步	121
5.4.1	非平衡态统计力学	121
5.4.2	平衡态统计力学	123
	参考文献	127
第 6 章	碰撞、散射和反应的量子多体理论: 光学模型、直接反应和散射矩阵	129
6.1	碰撞、散射和反应问题	129
6.1.1	结合态本征值问题与非结合态碰撞问题: 结构问题与碰撞问题	129
6.1.2	势场散射与光学模型	129
6.1.3	反应过程及其特点	130
6.1.4	处理碰撞问题的任务	131
6.2	直接反应和 Lippmann-Schwinger 方程	131
6.2.1	碰撞问题的描述: 反应道-内部运动与相对运动的联合描述	131
6.2.2	Lippmann-Schwinger 方程	132
6.2.3	跃迁振幅	134

6.2.4	直接反应过程的跃迁振幅	134
6.3	光学模型和势场散射	136
6.3.1	光学模型	136
6.3.2	微观光学势与唯象光学势	138
6.3.3	粒子在光学势场中的散射与吸收	143
6.4	散射矩阵	154
6.4.1	量子力学处理问题的三种绘景	154
6.4.2	相互作用绘景中状态随时间的演化和时间演化算符	156
6.4.3	时间演化的算符的微扰论展开与散射矩阵	157
	参考文献	161
第 7 章	相对论性量子力学	162
7.1	微观粒子的相对论性动力学	162
7.1.1	非相对论性量子力学的特点	162
7.1.2	相对论性量子力学的特点	163
7.2	Klein-Gordon 方程	164
7.2.1	Schroedinger 方程的建立	164
7.2.2	相对论性量子力学方程——Klein-Gordon 的建立	165
7.3	自由粒子的 Dirac 方程	166
7.3.1	线性化	166
7.3.2	α_i, β 的表示	167
7.3.3	Lorentz 协变性	169
7.3.4	从角动量守恒导出 Dirac 粒子的内禀自旋为 $1/2$	171
7.3.5	中微子的运动方程	171
7.3.6	Dirac 方程的自由平面波解	173
7.4	电磁场中的 Dirac 方程	176
7.4.1	电磁场中电子的 Dirac 方程	176
7.4.2	非相对论极限与电子磁矩	177
7.4.3	中心力场下的非相对论极限: 自旋轨道耦合力	178
7.4.4	中心力场中电子运动的守恒量	182
7.4.5	$(\hat{K}, \vec{j}^2, j_z)$ 的共同本征态	184
7.4.6	径向方程	185
7.4.7	氢原子光谱的精细结构	187
7.4.8	电子与电磁场相互作用系统的 Lagrange	189
7.5	量子场论初步: 量子电动力学、量子强子动力学与 Walecka 模型	190
7.5.1	量子电动力学初步	190

7.5.2 量子强子动力学初步	192
参考文献	194
第 8 章 量子力学的积分形式与路径积分	195
8.1 量子力学的路径积分形式	195
8.1.1 从 Schroedinger 微分形式到 Feynman 路径积分形式	195
8.1.2 从 Feynman 形式到 Schroedinger 形式	200
8.1.3 相空间的路径积分形式	203
8.1.4 Feynman 的路径积分形式的意义	204
8.2 量子场论的路径积分方法	205
8.3 统计物理中的路径积分	206
参考文献	206
第 9 章 量子力学中的几何相位	207
9.1 引言	207
9.2 AB 效应、AS 效应与磁通量子化	207
9.2.1 AB 效应	207
9.2.2 AS 效应	209
9.2.3 磁通量子化	210
9.3 Berry 相位	211
9.3.1 含时 Hamilton 量的瞬时本征值问题	212
9.3.2 含时量子系统的时间演化	212
9.3.3 绝热近似	213
9.3.4 绝热 Berry 相位	214
9.3.5 自旋为 1/2 的粒子在转动磁场中的运动	215
9.3.6 非绝热 Berry 相位	216
9.3.7 非绝热非周期性几何相位——Pancharatnam 几何相位	217
9.3.8 几何相位的量子经典对应——Hannay 角	217
9.4 物理空间的几何效应与规范场	218
9.4.1 物理空间	218
9.4.2 诱导规范场	218
9.4.3 Hilbert 空间的参数空间的弯曲及其几何效应的描述	218
9.4.4 经验与教训	218
参考文献	218
第 10 章 量子力学前沿问题	220
10.1 量子 Hall 效应	220
10.2 Bose-Einstein 凝聚	220

10.3	Josephson 效应	221
10.4	van der Waals 力与 Casimir 效应	221
10.5	Bell 定理与实验验证	221
10.6	量子态纠缠与退相干	221
10.7	拓扑量子力学	222
10.8	量子信息与量子通信	222
10.9	量子编码与量子计算	222
	参考文献	222
第 11 章	量子力学问题的分类	224
11.1	按照系统的动力学性质的分类	224
11.2	按照认识论路线的分类	225
11.3	按照系统的量子运动方程的可积性和运动的规则性的分类	226
11.4	按照系统的非线性度的分类	227
11.5	按照系统的 Hamilton 量的时间依赖性的分类	227
11.6	按照系统的来源的分类	227
11.7	按照系统与环境的关系的分类	228
11.8	按照量子运动模式的分类	228
第二篇 量子运动模式动力学		
第 12 章	量子世界与量子运动模式	233
12.1	量子世界的基本要素	233
12.2	量子系统的基本属性和运动模式	234
12.3	量子运动模式的动力学	235
	参考文献	237
第 13 章	量子关联运动模式和关联动力学	238
13.1	引言	238
13.2	原子核的基本运动形态与多体关联运动模式	239
13.2.1	原子核结构与核反应中的关联运动模式	240
13.2.2	原子核多体关联理论的发展过程	242
13.3	量子多体理论中的关联动力学	243
13.3.1	多体关联密度矩阵动力学	245
13.3.2	多体关联 Green 函数动力学	250
13.4	量子场论中的关联动力学	257
13.4.1	非规范场的关联动力学	258

13.4.2	SU(N) 规范理论的约束关联动力学	262
13.4.3	QED 的约束关联动力学	268
13.5	多体关联动力学的应用	268
13.5.1	原子核多体关联动力学成为重离子核反应 Giessen 模型的微观理论基础	269
13.5.2	强子物质输运方程解释了高能核-核碰撞中 π 介子产生的双温能谱和 π 介子发射的偏向性	274
13.5.3	二体关联动力学解释了热原子核巨共振衰变宽度的温度无关性	275
13.5.4	二体关联动力学解释了原子核小振幅运动衰变宽度和重离子碰撞中质量扩散	280
13.5.5	二体关联动力学对重离子碰撞中碎裂现象的描述	281
13.5.6	在凝聚态物理和介观物理方面的应用	281
13.5.7	关联动力学在其他方面的应用	281
13.6	结论和展望	282
13.6.1	原子核和量子多体关联动力学的特征	282
13.6.2	展望	283
13.7	致谢	285
	参考文献	285
第 14 章	量子对称运动模式和代数动力学	290
14.1	人造量子系统与非自治量子系统	290
14.1.1	人造量子系统	290
14.1.2	非自治系统	291
14.1.3	代数动力学的起因	292
14.2	量子对称运动模式与代数动力学	293
14.2.1	动力学的诸要素	293
14.2.2	代数动力学及其内涵	294
14.3	代数动力学的应用: 人造量子系统的理论研究	301
14.3.1	可积系统与规则运动	301
14.3.2	不可积系统与量子无规运动	322
14.3.3	量子统计力学系统的耗散与退相干问题	328
14.3.4	量子信息系统的研究	334
14.4	讨论与展望	340
14.4.1	人造量子系统问题	340
14.4.2	代数动力学方法与其他相关方法的比较	341
14.4.3	展望	342

14.5	非线性微分方程的代数动力学算法	342
14.6	致谢	343
	参考文献	343
第 15 章	系统-环境耦合运动模式与耦合动力学	349
15.1	系统-环境耦合问题的重要性	349
15.2	量子系统-环境耦合动力学的一般形式	350
15.3	量子系统-环境耦合动力学的两个具体例子	355
15.3.1	二能级原子 (系统) 与单模辐射场 (环境) 耦合	355
15.3.2	耦合的双模腔光场系统: 动力学代数结构	359
15.4	量子系统-环境耦合动力学需要深入研究的问题	361
	参考文献	363
附录	一般参考书和习题的建议	364
附录一	一般参考书目	364
附录二	关于第一篇简明量子多体理论的习题的建议	365