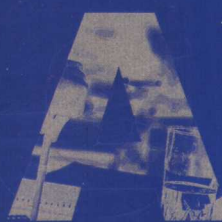


研究生系列教材



ADVANCED QUANTUM
THEORY AND QUANTUM
MANY-BODY THEORY

与量子多体理论
高等量子论

● 王顺金 著



四川大学出版社

四川大学研究生教材建设基金重点资助项目

0413
9

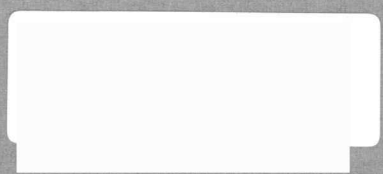


ADVANCED QUANTUM
THEORY AND QUANTUM
MANY-BODY THEORY

高等量子论
与量子多体理论



● 王顺金 著



四川大学出版社

SB/31/09

责任编辑:王 锋
责任校对:李桂兰
封面设计:丁 丁
责任印制:李 平

图书在版编目(CIP)数据

高等量子论与量子多体理论 / 王顺金著. — 成都: 四川大学出版社, 2004.12
(研究生系列教材)
ISBN 7-5614-3004-3

I. 高... II. 王... III. 量子论-研究生-教材
IV. O413

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 138124 号

书名 高等量子论与量子多体理论

作者 王顺金
出版 四川大学出版社
地址 成都市一环路南一段 24 号 (610065)
发行 四川大学出版社
印刷 郫县犀浦印刷厂
开本 787mm×960mm 1/16
印张 19.5
字数 335 千字
版次 2005 年 1 月第 1 版
印次 2005 年 1 月第 1 次印刷
定价 35.00 元

版权所有◆侵权必究

- ◆读者邮购本书, 请与本社发行科联系。电话: 85408408/85401670/85408023 邮政编码: 610065
- ◆本社图书如有印装质量问题, 请寄回出版社调换。
- ◆网址: www.scupress.com.cn

序

“年年岁岁花相似，岁岁年年人不同。”在世纪之交，经过高教体制改革，又一次强强合并后的新四川大学已成为我国西部地区规模最大、学科门类最齐全的新型综合性研究型大学。校训“海纳百川，有容乃大；严谨勤奋，求是创新”已成为川大人求知治学的座右铭。

作为新世纪的献礼，我校研究生教材建设基金资助的又一批研究生优秀教材相继正式出版了，在此我表示热烈的祝贺。

众所周知，21世纪是知识经济的世纪，国际竞争空前激烈。竞争的焦点是科学技术，竞争的核心是创新型人才，竞争的关键是国民教育。对于四川大学这样的国家重点大学而言，必须注意大力发展研究生教育，扩大规模，注重质量，强调创新。

校长、教师、教材是办学的三大要素，而教材是教学改革与师生智慧的重要结晶。正是基于这种思考，我校建设以学科建设为龙头，作为一项重要的措施就是加强研究生的教材建设。我们通过各种渠道，筹集了专项基金，用以资助研究生优秀教材的编写和出版。我们在1999年首次资助的是有博士学位授权点的学科专业中涉及面大、使用面宽的研究生学位平台课程的优秀教材。而今，我们扩大了教材基金资助的范围，无论文、理、工、管、医，只要是经过专家评审后认定的优秀教材，都可被列为资助对象。特别是社会需求量大的应用学科、新兴学科、交叉学科及保护学科的优秀教材，更是优先资助出版。

我们推出的研究生教材的基本特点是：符合该学科教学大纲的基本要求，有较强的理论性和系统性。这些教材既反映了该学科发展的新知识、新动向、新成就，也反映了我校教师在该门学科教学与科研中的新成果与新经验。

前人说得对，古今之成大事业、大学问者，都必须经过三种境界：“昨夜西风凋碧树，独上高楼，望尽天涯路。”此第一境界也。“衣带渐宽终不悔，为伊消得人憔悴。”此第二境界也。“众里寻他千百度，蓦然回首，那人却在，灯火阑珊处。”此第三境界也。研究生优秀教材的建设应该算作一种“大事业”。

优秀教材的作者们对于研究生教育改革的执著追求，令人钦佩；他们的无私奉献精神，值得赞扬；他们所取得的教学科研成果应该积极推广，使其产生应有的社会效益，为百年名校增添光彩。我殷切希望在陆续出版的研究生教材中能出现“传诸后世”的佳作，更希望我校有更多教授、名家动手撰写研究生教材，分门别类，出版系列的研究生教材丛书，为建设国内一流、国际知名的新四川大学做出更大的贡献。

中国科学院院士
四川大学副校长
四川大学研究生院院长

刘应明 教授

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中国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，本书得以顺利出版。

本书在撰写过程中注意了以下几点：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、4、5、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。对学习理论物理的学生，应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，强调对原理和概念要从物理层面上去理解，对基本公式和基本方法要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。对学习理论物理的学生，则要求从数学表述上去准确掌握定量的物理原理，对学习实验物理的学生则建议他们注重对物理原理的理解和应用，而不要求对数学公式细节的推导。

本书也凝聚了笔者的亲人、同事与学生的心血和劳动。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，书中的错误和不妥在所难免，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

目 录

第 1 章 量子力学的理论结构	1
1.1 量子力学的理论结构	1
1.1.1 运动学与动力学	1
1.1.2 观测理论	3
1.1.3 自由度	4
1.1.4 表象理论	4
1.2 量子力学的几种形式及其与经典力学的对应	7
1.2.1 Heisenberg - Dirac 形式与 Poisson - Hamilton 形式的对应	7
1.2.2 Schrödinger 形式与 Hamilton - Jacobi 形式的对应	8
1.2.3 Feynman 形式与 Lagrangian 形式的对应	9
1.2.4 Nelson 的随机形式与牛顿力学形式的对应	10
1.3 量子力学的主要应用	11
1.4 量子力学的近期发展	12
第 2 章 对称性理论与守恒定律	14
2.1 物理系统的对称性与守恒律	14
2.1.1 对称性	14
2.1.2 对称性的分类	14
2.1.3 对称性的表述	15
2.1.4 对称性的后果	16
2.1.5 简并子空间的量子态按对称群不可约表示分类	17

2.2	空间各向同性和系统的转动对称性	
	——角动量守恒及角动量理论精要	19
2.2.1	空间各向同性与系统的转动不变性	19
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	20
2.2.3	转动群元 $\hat{R}(\Omega)$ 的矩阵表示—— D -函数	23
2.2.4	不可约张量算符, Wigner-Eckart 定理与选择定则	24
2.3	时空平移对称性和反射对称性	25
2.3.1	时间平移不变性与能量守恒	25
2.3.2	空间平移不变性与动量守恒	27
2.3.3	空间反射不变性与宇称守恒	28
2.3.4	时间反演不变性	30
2.4	全同粒子系统的置换对称性与统计性守恒	32
2.4.1	全同粒子	32
2.4.2	置换对称性	32
2.4.3	置换群	35
2.4.4	分数统计	36
2.5	量子系统 \hat{H} 的动力学对称性	37
2.5.1	动力学对称性的定义	37
2.5.2	具有动力学对称性的系统的性质	38
2.5.3	例子	38
2.6	对称性与群论	49
2.6.1	对称性导致对称群	49
2.6.2	连续的对称变换导致李群——连续可微群	49
2.6.3	不连续的对称变换导致离散群	49
2.6.4	晶体的平移群是一般空间平移变换群的离散子群, 而晶体的点群是 $O(3)$ 群的离散子群	49

第 3 章 多体理论 (I): 平均场理论	51
3.1 量子力学多体问题	51
3.1.1 量子多体系统与量子多体问题	51
3.1.2 量子多体理论: 微观理论和等效理论	51
3.1.3 微扰理论和非微扰理论	52
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	52
3.2.1 平均场理论的基本思想	52
3.2.2 平均场近似: 时间有关的 Hartree - Fock 理论 (TDHF) 与 Hartree - Fock 理论 (HF)	53
3.2.3 玻色子系统的平均场理论	59
3.2.4 平均场理论的意义	59
3.3 原子的平均场理论: 原子的壳层结构	60
3.3.1 原子中电子的运动, 类氢原子和电子 - 电子之间库仑相互作用修正	60
3.3.2 原子的平均场理论	61
3.3.3 原子平均场理论的改进, 能量密度泛函方法	62
3.4 原子核的平均场理论: 原子核的壳层结构	63
3.4.1 原子核中核子的独立粒子运动与幻数的存在	63
3.4.2 原子核的平均场理论: TDHT 和 HF 近似	63
3.4.3 原子核平均场理论的唯一象形式——壳层模型	65
3.4.4 原子核的相对论性平均场理论	65
3.5 晶体的平均场理论: 固体的能带结构	66
3.5.1 固体的量子力学多体问题	66
3.5.2 电子运动与原子核运动的分离: Born - Oppenheimer 近似	67
3.5.3 巡游电子运动方程的平均场近似: 能带结构	68
3.5.4 固体平均场理论的改进	71
3.6 平均场理论的改进: 密度泛函理论与局域密度近似	71
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 $E_{xx}[\rho]$ 的局域密度近似	75
3.6.5 Car-Parrinello 的从头算分子动力学 (Ab Initio Molecular Dynamics) (CP-AIMD)	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
第 4 章 多体理论 (II): 剩余相互作用与二次量子化表象	81
4.1 多粒子系统量子态的单粒子态描述	81
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	81
4.1.2 单粒子量子态跃迁与单粒子量子态产生、消灭算符	82
4.2 二次量子化表象	83
4.2.1 二次量子化表象的基本精神	83
4.2.2 玻色系统	83
4.2.3 费米子系统	89
4.2.4 量子多体系统二次量子化表象的场论形式	91
4.3 原子核的组态混合模型	94
4.4 固体物理中的几个模型	95
4.4.1 固体的磁性与 Heisenberg 模型	95
4.4.2 电子窄带关联与 Hubbard 模型: 金属-绝缘相变	98
4.4.3 杂质磁性与 Anderson 模型	100
4.4.4 金属的超导电性与 Bardeen-Cooper-Schrieffer (BCS) 模型	100

第 5 章 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	104
5.1 纯态与混合态、多体系统的关联等级描述	104
5.1.1 纯态与混合态	104
5.1.2 多体系统的关联等级理论	104
5.2 密度矩阵理论: 多体关联密度矩阵动力学	105
5.2.1 密度矩阵与冯·诺意曼方程.....	105
5.2.2 约化密度矩阵及其运动方程	107
5.2.3 多体关联密度矩阵动力学	108
5.2.4 二体关联密度矩阵动力学及其应用	109
5.2.5 两类不同自由度的约化密度矩阵	112
5.3 Green 函数理论: 多体关联 Green 函数动力学	113
5.3.1 一个粒子系统的 Green 函数	114
5.3.2 多粒子系统的 Green 函数	117
5.3.3 Green 函数的运动方程: 多体关联 Green 动力学	120
5.3.4 基态单粒子 Green 函数的 Lehmann 谱分解	122
5.3.5 多体系统的 Green 函数, 二次量子化表象形式	123
5.4 量子统计力学初步	125
5.4.1 非平衡态统计力学	125
5.4.2 平衡态统计力学	127
第 6 章 碰撞、散射和反应问题: 光学模型与 S-矩阵	133
6.1 碰撞、散射和反应问题	133
6.1.1 结合态问题与非结合态碰撞问题: 结构问题与碰撞问题	133
6.1.2 势场散射与光学模型	133
6.1.3 反应过程及其特点	135
6.1.4 处理碰撞问题的任务	135
6.2 Lippmann-Schwinger 方程	135
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	135
6.2.2 Lippmann-Schwinger 方程	136
6.2.3 跃迁振幅	138
6.2.4 反应过程的跃迁振幅	139
6.3 光学模型和势场散射	141
6.3.1 光学模型	141
6.3.2 微观光学势与唯象光学势	143
6.3.3 粒子在光学势场中的散射与吸收	149
6.4 S-矩阵	161
6.4.1 量子力学处理问题的三种绘景	161
6.4.2 相互作用表象中状态随时间的演化	163
第 7 章 相对论性量子力学	171
7.1 微观粒子的相对论性动力学	171
7.1.1 非相对论性量子力学的特点	171
7.1.2 相对论性量子力学的特点	172
7.2 Klein-Gordon 方程	173
7.2.1 薛定格方程的建立	173
7.2.2 相对论性量子力学方程 Klein-Gordon 的建立	173
7.3 自由粒子的 Dirac 方程	175
7.3.1 线性化	175
7.3.2 α_i, β 的表示	176
7.3.3 罗仑兹协变性	177
7.3.4 从角动量守恒导出 Dirac 粒子内禀自旋为 1/2	179
7.3.5 中微子的运动方程	180
7.3.6 Dirac 方程的自由平面波解	181
7.4 电磁场中电子的 Dirac 方程	185
7.4.1 电磁场中电子的 Dirac 方程	185
7.4.2 非相对论极限与电子磁矩	186
7.4.3 中心力场下的非相对论极限：自旋轨道耦合力	187

7.4.4	中心力场中电子运动的守恒量	191
7.4.5	(\hat{K}, j^2, j_z) 的共同本征态	193
7.4.6	径向方程	194
7.4.7	氢原子光谱的精细结构	197
7.4.8	电子与电磁场相互作用系统的拉格朗日	199
7.5	量子场论初步: 量子电动力学 (QED)、量子强子动力学 (QHD) 与 Walecka 模型	200
7.5.1	量子电动力学 (QED) 初步	200
7.5.2	量子强子动力学 (Quantum Hadron Dynamics, QHD)	202
第 8 章	量子力学的积分形式与路径积分	206
8.1	量子力学的路径积分形式	206
8.1.1	从薛定格微分形式到费曼的路径积分形式	206
8.1.2	从费曼形式到薛定格形式	211
8.1.3	相空间的路径积分形式	215
8.1.4	费曼的路径积分形式的意义	216
8.2	量子场论的路径积分方法	217
8.3	统计物理中的路径积分	218
第 9 章	量子力学的几何相位	220
9.1	引言	220
9.2	AB 效应、AS 效应与磁通量子化	221
9.2.1	AB 效应	221
9.2.2	AS 效应	222
9.2.3	磁通量子化	224
9.3	Berry 相位	225
9.3.1	含时哈密顿量的瞬时本征值问题	225
9.3.2	含时量子系统的时间演化	226
9.3.3	绝热近似	227

9.3.4	绝热 Berry 相位	228
9.3.5	一个例子: 自旋为 $1/2$ 的粒子在转动磁场中的运动	229
9.3.6	非绝热 Berry 相位	231
9.3.7	非绝热非周期性几何相位——Pancharatnam 几何相位	231
9.3.8	几何相位的量子经典对应——Hannay 角	232
9.4	物理空间的几何效应与规范场	232
9.4.1	物理空间	232
9.4.2	诱导规范场	232
9.4.3	Hilbert 空间的参数空间的弯曲及其几何效应的描述	233
9.4.4	经验与教训	233
第 10 章	非自治系统量子力学	235
10.1	人造量子系统与非自治量子系统	235
10.1.1	人造量子系统与量子光学系统	235
10.1.2	非自治量子系统	236
10.1.3	代数动力学	237
10.2	代数动力学	238
10.2.1	动力学的诸要素	238
10.2.2	代数动力学及其内涵	240
10.3	人造量子系统与量子光学系统的理论研究: 代数动力学的应用	247
10.3.1	可积系统与规则运动	247
10.3.2	不可积系统与量子无规运动	263
10.4	讨论与展望	277
10.4.1	人造量子系统问题	277
10.4.2	代数动力学方法与其他相关方法的比较	278
10.4.3	展 望	279

第 11 章 量子力学前沿问题	282
11.1 量子 Hall 效应	282
11.2 Bose - Einstein 凝聚 (BEC)	283
11.3 Josephson 效应	283
11.4 Van der Waals 力与 Casimir 效应	283
11.5 Bell 定理与实验	283
11.6 量子态纠缠与退相干	284
11.7 拓扑量子力学	284
11.8 量子信息与量子通讯	284
11.9 量子编码与量子计算	284
第 12 章 结语: 量子力学问题	286
12.1 按照系统的动力学性质进行分类	286
12.2 按照理论认识路线进行分类	287
12.3 按照系统的量子运动方程的可积性进行分类	288
12.4 按照系统的非线性度进行分类	289
12.5 按照系统的哈密顿量的时间依赖性进行分类	289
12.6 按照系统的来源进行分类	290
12.7 按照系统与环境的关​​系进行分类	290
附 录	292
一、一般参考书目	292
二、关于各专业研究生学习重点的建议	294
三、关于《高等量子论与量子多体理论》习题的建议	294