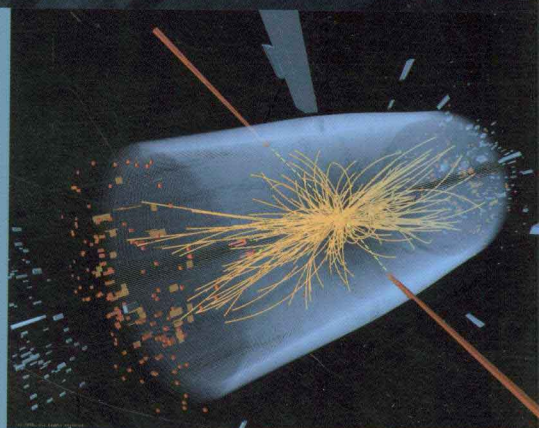




普通高等教育“十一五”国家级规划教材

量子力学

■ 刘觉平 主编



QUANTUM MECHANICS



高等教育出版社
HIGHER EDUCATION PRESS

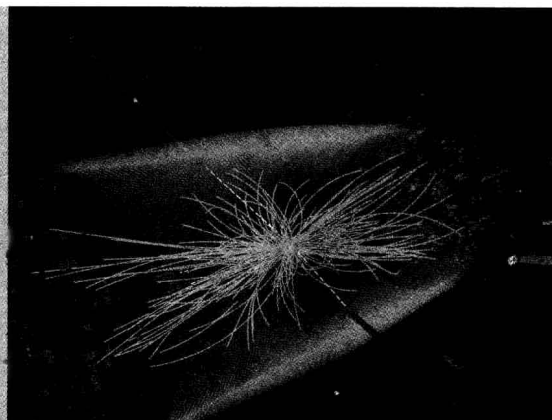


普通高等教育“十一五”国家级规划教材

量子力学

Liangzi Lixue

刘觉平 主编



QUANTUM MECHANICS



高等教育出版社·北京
HIGHER EDUCATION PRESS BEIJING

内容简介

本书系统地讲述了非相对论量子力学的理论体系(包括基本概念、原理与方法)及实际应用。本书内容包括: Hilbert 空间、表象变换、角动量理论、对称变换与可观察量、连续的 Galilean 变换与产生子之间的对易关系、Hamiltonian 与时间演化动力学、Dyson 级数、等时正则量子化的三种形式(即 Schrödinger 绘景、Heisenberg 绘景和 Dirac 绘景)、全同性、散射理论、量子跃迁和近似方法。此外,还对路径积分量子化方法、不可积相位、Aharonov-Bohm 效应、磁单极子、绝热定理、Berry 相位、量子系统、Bell 定理与 EPR 佯谬等,进行了分析与讨论。

本书可作为高等学校物理类专业的教材或教学参考书,也可供有关研究生、教师和科研工作者参考。

图书在版编目(CIP)数据

量子力学/刘觉平主编. —北京: 高等教育出版社,
2012. 8

ISBN 978-7-04-035457-7

I. ①量… II. ①刘… III. ①量子力学-高等学校-
教材 IV. ①O413.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 158409 号

策划编辑 高建
插图绘制 尹文军

责任编辑 张海雁
责任校对 金辉

封面设计 张志
责任印制 张福涛

版式设计 王艳红

出版发行 高等教育出版社
社 址 北京市西城区德外大街 4 号
邮政编码 100120
印 刷 人民教育出版社印刷厂
开 本 787×960 1/16
印 张 31.5
字 数 580 000
购书热线 010-58581118

电话 400-810-0598
网 址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>
网上订购 <http://www.landaco.com>
<http://www.landaco.com.cn>
版 次 2012 年 8 月第 1 版
印 次 2012 年 8 月第 1 次印刷
定 价 48.60 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换
版权所有 侵权必究
物 料 号 35457-00

前 言

量子力学与相对论的建立是 20 世纪物理学中最辉煌的成就。量子力学对于现代物理学和人类文明影响的深度和广度，是以往任何物理理论都不能比拟的。不仅物质的微观结构只有在量子力学的基础上才能得到解决，而且迄今为止的现代物理学的各个分支（例如凝聚态物理学、等离子体物理学、原子物理学、原子核物理学、粒子物理学、激光物理学、表面物理学、低温物理学、量子引力和宇宙论等）以及有关交叉学科（例如量子化学、量子生物学、材料学和量子金融等）都离不开量子力学。从 20 世纪 60 年代开始，一系列大尺度的宏观量子现象（例如 Bose-Einstein 凝聚、超导、超流和量子 Hall 效应等）的发现，进一步扩展了量子力学的研究领域。量子力学至今仍处于蓬勃的研究发展阶段。不仅量子信息理论、量子热力学等方面的各种新理念层出不穷，而且诸如量子计算机等与人类生活息息相关的尝试也方兴未艾。量子力学不仅是进一步学习、深造的基础，也是从事几乎所有物理研究的必备知识。因此，学习与掌握量子力学对于物理类专业的学生是至关重要的。本书的目的是为此提供一本合适的理论物理教材。

学习本书的前提是学生已掌握线性代数和原子物理学的基本内容，特别是从微观实验事实总结出来的唯象理论——Bohr 量子论。微观层次实验所揭示的最重要的结果是，量子力学物理状态构成了一个复空间——Hilbert 空间。通过原子物理学的学习，学生已在如何总结实验事实，提炼出物理概念，归纳成物理规律方面，受到了较为充分的训练。另一方面，近代物理发展证明：根据以往的实验基础，从物理世界的第一性原理（例如各种对称性、自洽性的要求）出发，提出预言，形成理论，再由实验进行检验，也是探索物理规律的重要方法。这便是理论物理学研究方法，这一方法在物理学的发展进程中起过并正在发挥极其重要的作用。在学生学完实验物理学即所谓大学物理后，进行后一种方法的训练，对于全面提高理工科学生分析问题、解决问题的能力，是十分必要的。而量子力学作为几乎所有理论物理的基石，本身应该自成一个逻辑尽可能严密的体系（这里的“尽可能”是出于以下三方面的考虑：其一，目前量子力学本身可能还没有成为逻辑完全严密的体系；其二，学生的接受水平可能对严密的陈述给出一定的限制；其三，着意给学生留出一定的探究空间），成为对学生进行这方面训练的最好场所。

值得指出的是：本书只涉及非相对论量子力学（相对论量子力学中必定会出现反粒子，因而会引起粒子的产生和湮没，从而应当作为量子场论的部分内容）。基于上述考虑，我们将支配非相对论物理规律的 Galilean 相对性原理提到中心地

位。如果实验告诉我们，量子物理的态空间是 Hilbert 空间；那么 Galilean 变换对称性以及量子理论中特有的全同粒子交换对称性等便必然对量子力学中的物理规律给出强有力的限制。本书考虑这些对称性在 Hilbert 空间的实现，从而引出相应的作用在 Hilbert 空间中的算符，导出可观察量之间的等时对易关系以及某些量子力学体系的 Hamiltonians。若将这些封闭的等时对易关系应用于一个无自旋的点粒子，则可证明存在一个普适常量，这就是 Planck 常量；对易关系中存在唯一的一个非零中心荷，它不可能用任何方法从理论体系中消去，这就是粒子的质量（这正好是非相对论力学的特点）。我们将这一非相对论量子力学体系，应用于自旋为 $1/2$ 的粒子，在外电磁场中自动导出 Pauli 方程；并由此推出了具有固有的内禀磁矩的点粒子与外磁场的相互作用量（与它在电动力学中的经典对应，恰好相差一个符号）。虽然，按照作者目前的认识，非相对论量子力学实际上是 Galilean 变换群在 Hilbert 空间中的 ray 表示（所谓 ray 表示，是指群变换所作用的矢量乘以一个非零常数后仍然表示同样的物理状态）；然而，学生并不需要预先具备群论基础。学生实际上是在学习物理的过程中同时学习和掌握有关数学知识的。本书将为学生提供群表示论的许多生动的量子力学实例，不仅有利于学生从基本概念上学习和掌握非相对论量子力学，而且有助于学生进一步在后续的学习中理解建立在群论基础上的整个理论物理体系。

按照作者的观点，量子力学和所谓高等量子力学并没有严格的分界。就理论的基础性而言，前者更为重要，没有理由说它就因此而低了一等；后者一般着重于量子力学原理的更广泛、更重要的应用，或者增加相对论量子力学的内容，是前者的继续和扩展。根据这一观点，限于篇幅，在取材上，本书挑选了那些在作者看来最基本、最重要的内容，在统一的框架中，深入展开内部连贯一致的逻辑分析，以期有助于学生正确理解基本概念、基本规律，培养和增强解决问题的能力。此外，在讲述通常的等时正则量子化方法后，本书还介绍了在现代理论物理中起着重要作用的路径积分量子化方法；并对现代量子力学有趣的基本问题，如不可积相位、Aharonov-Bohm 效应、磁单极子、绝热定理、Berry 相位、量子系综、Bell 定理与 EPR 佯谬等，进行了一定的分析与讨论，以备教师在教学中适当进行取舍、选用，开拓学生的思维与视野。

作者自 2002 年起至今在武汉大学物理学院基础人才训练班讲授量子力学。本书是在历届课堂讲稿的基础上修改补充而成的。虽然前后历时十年之久，但仍觉时间仓促，加之水平有限，错误与疏漏之处在所难免，恳请读者指正。

刘觉平

2011 年 12 月 25 日于珞珈山麓

目 录

第 1 章 量子力学的基本概念	1
§1-1 物质的波粒二象性	1
1. 光的粒子性	1
2. 电子的波动性	4
3. 光子双缝干涉实验、不确定性关系和退相干原理	5
§1-2 Stern-Gerlach 实验	7
1. Stern-Gerlach 实验与 Uhlenbeck-Goudsmit 假设	7
2. 多级 Stern-Gerlach 实验	11
3. 复空间	13
§1-3 量子力学的态空间与可观察量	14
1. 右矢空间 (ket space) 及其表象	14
2. 左矢空间 (bra space) 与内积	16
3. 算符的运算	18
4. 算符的矩阵表示	20
5. 若干定理	21
6. 自旋 1/2 系统	23
§1-4 量子测量	25
1. 选择性测量	25
2. 期望值	26
§1-5 相容的可观测量	27
1. 可观测量的相容性 (compatibility) 与不相容性 (non-compatibility)	27
2. 相容的可观测量可具有相同的本征矢组	28
3. 简并与去简并	31
4. 相容的可观测量的测量	32
§1-6 互不相容的可观测量	32
1. 互不相容的可观测量的测量	32
2. 不确定性关系	33
3. 表象变换	35
4. 么正等价的可观测量	38
习题	39

第 2 章 位置算符、空间平移变换与动量算符	42
§2-1 连续谱与位置算符	42
1. 分立谱与连续谱	42
2. 位置算符	43
§2-2 空间平移变换与动量算符	44
1. Hilbert 空间中的无穷小平移变换	44
2. Hilbert 空间平移变换的产生子	47
3. 动量算符	47
§2-3 基本对易关系与 Dirac 量子化规则	49
1. 位置坐标与动量算符的对易关系	49
2. 位置-动量的不确定性关系	49
3. 有限平移变换	49
4. 基本正则对易关系 (Heisenberg 正则对易关系)	50
5. 动量表象	51
6. Dirac 量子化规则	52
§2-4 波函数	53
1. 位置表象中的波函数	53
2. 动量表象中的波函数	55
3. 位置表象与动量表象之间的关系	55
习题	59
第 3 章 空间转动变换和角动量算符	62
§3-1 空间转动与角动量算符	62
1. 三维 Euclidian 空间的转动及其产生子	62
2. Hilbert 空间中的转动与角动量算符	64
§3-2 自旋角动量算符	66
1. 自旋为 1/2 的自旋角动量分量算符的自旋投影算符表达式	66
2. Pauli 旋量	67
3. Pauli 旋量的转动	70
§3-3 自旋 1/2 系统的转动	73
1. 自旋 1/2 系统转动前后自旋角动量算符的期望值的变化	73
2. 自旋进动	75
3. 中子干涉	77
§3-4 Euler 转动	79
1. 普通的三维空间中刚体的任意转动	79
2. 二维自旋空间的 Euler 转动	81

§3-5 角动量问题的一般解	83
1. 角动量阶梯算符	83
2. J^2 和 J_z 的本征矢 (即 (J^2, J_z) 表象)	84
3. 角动量算符的矩阵元	86
4. 转动算符 $\mathcal{D}(R)$ 的矩阵元	88
§3-6 轨道角动量	90
1. 角动量算符对易关系的另一种实现 (轨道角动量)	90
2. 轨道转动算符坐标态矢的作用	90
3. 轨道角动量算符在 x 表象中的表达式	91
4. 球谐函数	95
5. 球谐函数作为转动矩阵的矩阵元	98
习题	99
第 4 章 量子动力学	102
§4-1 量子体系的时间演化	102
1. 时间演化算符	102
2. Hamiltonian 作为时间平移变换的产生子	103
3. Schrödinger 方程	105
§4-2 量子力学三大绘景	105
1. Schrödinger 绘景 (或称为波动力学)	105
2. 时间演化算符的表达式	106
3. Heisenberg 绘景 (或称为矩阵力学)	107
4. 相互作用绘景 (Dirac 绘景)	109
5. Dyson 级数	111
6. 基矢与跃迁振幅	113
7. 能量本征矢 (Schrödinger 绘景) 与量子力学问题的基本解法	114
§4-3 能量-时间不确定性关系	116
1. Fourier 带宽定理	116
2. 关联振幅、幸存概率和能量-时间不确定性关系	117
3. Mandelstam-Tamm 不等式和时间-能量不确定性关系	120
4. 与态的半衰期和完全消亡时间有关的不等式	121
§4-4 Schrödinger 波动方程	123
1. 含时 Schrödinger 波动方程	123
2. 定态 Schrödinger 波动方程	124
3. 与波函数有关的物理解释	124
4. 束缚态边界条件	127

5. Virial 定理	128
6. Hellmann-Feynman 定理	129
§4-5 简谐振子	129
1. 能量本征矢和能量本征值	129
2. Fock 空间 (或粒子数表象)	131
3. 位置表象中的能量本征函数 (波函数)	132
4. 粒子数表象中可观测量的矩阵元	133
5. 简谐振子系统中的位置-动量的不确定性关系	134
6. 简谐振子的时间演化 (Heisenberg 绘景)	135
习题	136
第 5 章 关于角动量的进一步讨论	140
§5-1 两个角动量算符的合成	140
1. 复合系统 (composite system)	140
2. 总角动量算符	142
3. 可对易的角动量算符的完备集合 (两类基矢)	143
§5-2 Clebsch-Gordan 系数	145
1. Clebsch-Gordan 系数的定义及其性质	145
2. Clebsch-Gordan 系数的递推关系	149
3. Clebsch-Gordan 级数	150
§5-3 角动量的 Schwinger 振子模型	152
1. 无耦合简谐振子	152
2. 由两类简谐振子的产生和湮没算符构造角动量算符	153
3. 构造角动量算符 J^2 和 J_z 的共同本征态	154
4. 约化转动矩阵元的 Wigner 公式	155
§5-4 张量算符	157
1. 矢量算符	157
2. Cartesian 张量与球张量	159
3. 球张量算符	160
4. 两个球张量算符的乘积	162
5. 张量算符的矩阵元 (Wigner-Eckart 定理)	164
6. 投影定理 (Wigner-Eckart 定理的应用)	166
习题	168
第 6 章 Galilean 变换与非相对论量子力学	170
§6-1 态矢与可观测量的对称变换	170
1. 对称变换	170

2. Wigner 定理	171
3. 产生子与单参数么正连续变换	173
附录: Wigner 定理的证明	174
§6-2 态矢与可观测量的 Galilean 变换	180
1. 普通的牛顿时空中的 Galilean 变换	180
2. Hilbert 空间中的 Galilean 变换	181
3. Galilean 变换对波函数的作用	182
§6-3 Galilean 变换的产生子	183
1. Galilean 变换的 10 个产生子	183
2. Galilean 变换的产生子之间的一般对易关系	183
§6-4 产生子之间的对易关系	184
§6-5 中心荷	188
1. 可用自治条件确定的中心荷	188
2. 可通过重定态矢相位消去的中心荷	189
3. 不可能消去的物理中心荷	192
§6-6 确定动力学变量	193
1. 粒子位置算符和速度算符	193
2. 一个没有内部自由度的标量粒子的对称变换产生子的具体形式	197
3. 一个有自旋的自由粒子的对称变换产生子的具体形式	200
4. 一个处于外场中的标量粒子的对称变换产生子的具体形式	201
5. 一个没有内部自由度的标量粒子的位置算符 Q 和动量算符 P 的不可约性	203
§6-7 自旋 1/2 粒子的非相对论波函数	204
1. Schrödinger 算符的开方	204
2. 非相对论自由粒子的两分量旋量方程	206
§6-8 经典电磁场中的非相对论 1/2 旋量粒子 (Pauli 方程)	207
1. 最小耦合原则和局域规范不变性	207
2. Pauli 方程	209
§6-9 自旋-轨道耦合	210
1. 自旋为 1/2 的带电粒子的 Hamiltonian	210
2. 自旋-轨道耦合的唯象理论	212
3. 电子自旋角动量的运动方程	213
4. Thomas 自旋进动提供的附加贡献	213
习题	215
第 7 章 量子力学中的不连续对称性	217
§7-1 对称性与守恒律	217

1. 经典力学中的对称性	217
2. 量子力学中的对称性	218
3. 对称性与简并	219
4. 反么正算符	219
§7-2 空间反演与宇称算符	221
1. 空间反演变换及其性质	221
2. 态矢和波函数的空间反演	224
§7-3 时间反演	226
1. 时间反演算符及其性质	226
2. 态矢和波函数的时间反演	232
3. 自旋 $1/2$ 体系的时间反演	234
4. 时间反演下的 Hermitian 算符的期望值	237
5. 与电磁场的相互作用	238
习题	239
第 8 章 全同性	242
§8-1 交换对称性	242
1. 全同粒子	242
2. 交换简并	242
3. 交换算符及其性质	243
4. 全同多粒子体系	246
§8-2 玻色子和费米子	246
1. 确定全同多粒子体系状态的困难及避开困难的办法	246
2. Pauli 不相容原理与 Bose-Einstein 凝聚	248
3. 全同粒子体系的态矢	248
4. 两电子体系	249
§8-3 置换对称性与 Yong 图	252
1. $SU(2)$ 群表示和 Yong 图	252
2. $SU(3)$ 群表示和 Yong 图	255
3. 两粒子体系的自旋态的置换对称性	256
§8-4 冷固体中的电子	258
1. Sommerfeld 自由电子气模型	258
2. Bloch 定理与能带结构	260
习题	263
第 9 章 近似方法	265
§9-1 定态非简并微扰论	265

1. 完全 Hamiltonian 的本征值问题	265
2. 二能级系统	265
3. 定态非简并微扰展开	267
4. 波函数的归一化	270
5. 平方 Stark 效应	272
§9-2 定态简并微扰论	275
1. 简并情形中的困难与避开困难的方法	275
2. 一级能移和简并子 Hilbert 空间中 V 的对角化	276
3. 扰动后态矢的一级修正	277
4. 二级能移	278
5. 线性 Stark 效应 (均匀电场中原子能级移动称为 Stark 效应)	279
§9-3 精细结构	281
1. 表象选择	281
2. 两分量自旋角函数	281
3. 能级移动 (它们形成了能级的精细结构)	285
§9-4 Zeeman 效应	286
1. 弱磁场极限下 Zeeman 效应 (即反常 Zeeman 效应)	286
2. 强磁场极限下的 Zeeman 效应	288
3. p 电子的能级移动与外磁场强度的关系	290
§9-5 半经典近似 (WKB 近似)	290
1. 定态 Schrödinger 方程的解	290
2. Kramer 连接公式	293
3. 束缚态	297
4. 势垒贯穿	299
§9-6 变分法	302
1. 基态能必须满足的条件	302
2. Ritz 变分法	302
3. Schrödinger 变分原理	303
4. 线性变分法	304
5. 变分法的精度	305
6. 变分法的应用	305
§9-7 氦原子	307
1. 微扰计算	307
2. 变分法计算	309
3. 激发态 (全同性的量子效应)	310

习题	313
第 10 章 散射理论	317
§10-1 Lippmann-Schwinger 方程	317
1. 与时间无关的弹性散射	317
2. Green 函数	317
3. 动量表象与位置表象中的 Lippmann-Schwinger 方程	318
4. 大距离性状与散射振幅	321
5. 散射截面	322
§10-2 Born 近似	323
1. 跃迁算符	323
2. Born 级数	324
3. 第一阶 Born 近似	325
4. 光学定理	327
§10-3 Eikonal 近似 (半经典近似)	329
1. Eikonal 近似下的高能粒子的波函数	329
2. Eikonal 近似下的散射振幅	331
3. 光学定理	332
§10-4 自由粒子态 (平面波与球面波)	332
1. 自由粒子态的两种表示	332
2. 表象变换矩阵元 $\langle p E, l, m \rangle$	333
3. 平面波 $ p\rangle$ 作为自由球面波的叠加	335
4. $ E, l, m\rangle$ 在位置表象中的波函数	335
5. 衰变产物的角分布	336
§10-5 分波展开	337
1. 球对称势场中的跃迁算符	337
2. 球对称势场中的散射振幅	337
3. 球对称势场中的分波散射振幅	338
4. 对于径向波函数的积分方程	339
§10-6 散射算符的么正性与散射相移	340
1. 散射算符的么正性	340
2. 分波散射相移	341
3. 分波散射截面	341
4. 验证光学定理	342
5. Argand 图	342
6. Eikonal 近似中的相移	343

§10-7 确定散射相移的方法	345
1. 利用径向波函数在分界面上的连续性	345
2. 利用径向波函数的对数微商在分界面上的连续性	347
3. 利用散射相移的积分方程	347
§10-8 硬球散射	349
1. 散射相移	349
2. S 波散射	350
3. 低能散射极限	350
4. 高能散射极限	352
§10-9 散射中的对称性	355
1. 全同粒子散射	355
2. 幺正的对称操作对跃迁算符或散射振幅的作用	358
3. 反幺正的对称操作对跃迁算符或散射振幅的作用	359
习题	360
第 11 章 量子跃迁	364
§11-1 跃迁振幅和跃迁概率	364
1. 跃迁振幅和跃迁概率的概念	364
2. 含时微扰论	365
§11-2 跃迁率与 Fermi 黄金规则	365
1. 常微扰	365
2. 谐和微扰	369
§11-3 光的吸收和受激辐射	371
1. 外电磁场中的原子	371
2. 光的吸收过程的跃迁率	373
3. 光的吸收截面	373
4. 电偶极 (E1) 近似	374
5. 选择定则	375
6. Thomas-Reiche-Kuhn 求和规则	376
§11-4 衰变宽度	376
1. 瞬时近似	376
2. 浸渐近似	377
3. 在浸渐近似下导出 Fermi 黄金规则	378
4. 衰变	378
5. 能极移动	380
6. Breit-Wigner 共振态公式	381

§11-5 光电效应	382
1. 光电效应中光的吸收截面	382
2. 箱归一化	382
3. 末态的态密度与吸收微分截面	383
4. 跃迁矩阵元	385
习题	385
第 12 章 散射理论的进一步讨论	388
§12-1 与时间有关的散射理论体系	388
§12-2 基于含时微扰论的散射理论	390
1. 从含时微扰论导出 Fermi 黄金规则	390
2. 从含时微扰论计算散射截面	390
§12-3 电子-原子非弹性散射	391
1. 弹性散射与非弹性散射	391
2. 电子-原子散射微分截面	392
3. 原子 Coulomb 势的矩阵元	393
4. 原子的跃迁形状因子	394
5. 用跃迁形状因子表示电子-原子散射微分截面	394
6. 荷电粒子穿越物质每单位长度的能量损失	395
§12-4 核形状因子	396
§12-5 低能散射和束缚态	397
1. 球对称势	397
2. 阈值性状	398
3. 有限深球对称势阱或势垒	399
4. Ramsauer-Townsend 效应 (1923 年)	400
5. 零能散射与束缚态	401
6. 分波散射振幅的极点与束缚态	403
§12-6 共振散射	405
1. 束缚态和共振态	405
2. Breit-Wigner 共振态公式	407
§12-7 Coulomb 散射	407
1. 非全同粒子的 Coulomb 散射	407
2. 全同玻色子的 Coulomb 散射	412
3. 全同费米子的 Coulomb 散射	412
习题	413

第 13 章 路径积分量子化与不可积相位	417
§13-1 路径积分量子化	417
1. Feynman 基本假设	417
2. 半经典展开	418
3. 泛函积分测度	418
4. 归一化常数	419
5. 一维非相对论粒子的 Feynman 路径积分量子化	419
6. 与等时正则量子化比较	420
7. 一维非相对论自由粒子的 Feynman 传播子	422
8. 导出 Schrödinger 方程	423
§13-2 不可积相位与 Aharonov-Bohm 效应	423
1. 圆柱壳盒中的带电粒子	423
2. 不可积相位	424
3. Aharonov-Bohm 效应	425
§13-3 磁单极子	427
1. 磁单极子的磁场	427
2. 磁单极子的矢势	427
3. 自洽条件与规范变换	428
4. 带电粒子的波函数	428
5. Dirac 电荷量子化条件	429
§13-4 浸渐定理	429
1. 浸渐定理的内容	429
2. 含时 Schrödinger 方程解的一般形式	430
3. 浸渐定理的证明	431
4. 自洽性检验	432
§13-5 Berry 相位	432
1. Berry 几何相位的定义	432
2. Berry 相位的规范对称性	433
3. Berry 相位赋值公式	434
4. 在外磁场中的自旋 1/2 粒子的 Berry 相位	435
习题	436
第 14 章 量子系综	439
§14-1 密度算符	439
1. 极化粒子束和非极化粒子束	439
2. 密度算符的定义	440

3. 密度算符的性质	440
4. 系综的时间演化	441
§14-2 连续谱表象中的系综	442
1. 可观察量在连续谱表象中的系综平均值	442
2. 密度矩阵 ρ 的一些重要性质	442
3. 热平衡系综的密度矩阵	443
4. 关于顺磁化率 χ 的 Brillouin 公式	445
§14-3 粒子束的极化	446
1. 极化算符	446
2. 散射粒子束的极化	449
3. 微分散射截面	450
§14-4 自旋为 $1/2$ 的粒子被无自旋靶的散射	451
习题	455
第 15 章 Bell 定理及其推论	457
§15-1 EPR 佯谬	457
§15-2 自旋关联	457
§15-3 Bell 不等式	460
1. Bell 不等式的推导	460
2. Bell 定理 (与量子力学比较)	461
3. 关于 Bell 定理的更严格的证明 (即基于更少假设的证明)	461
§15-4 极化关联	463
1. 双光子极化关联	463
2. 正电子偶素衰变	464
3. 激发态原子的 $j=0 \rightarrow 1 \rightarrow 0$ 级联辐射	465
4. 实验检验	466
§15-5 不用概率表示的 Bell 定理	468
1. Kochen-Specker 定理	469
2. Bell 定理的另一证明	470
§15-6 关于 Bell 定理含义的初步讨论	471
习题	473
附录 基本物理常量表	475
参考文献	477
索引	481