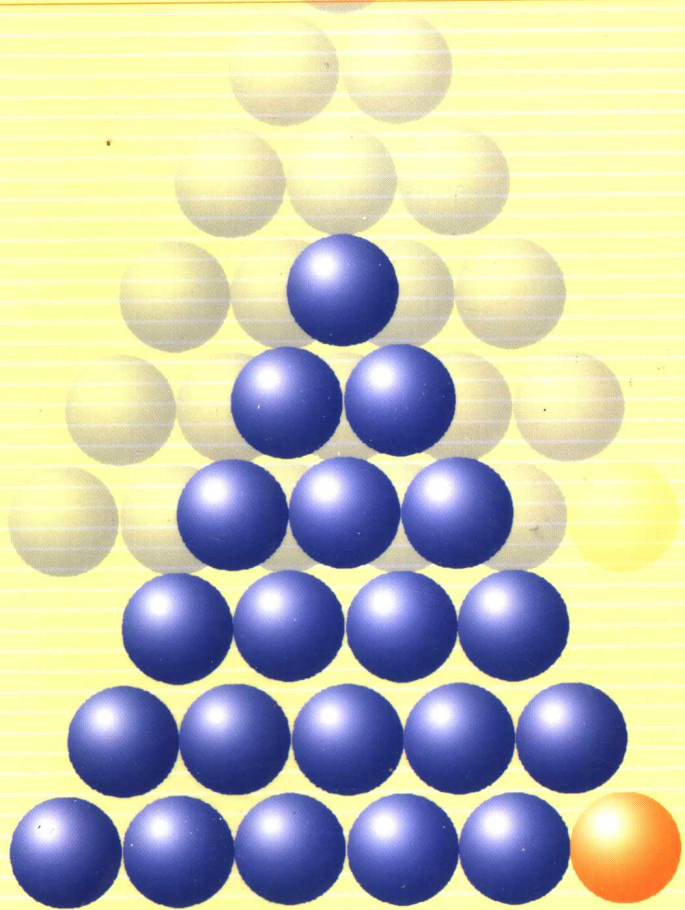


普通高等教育“九五”国家级重点教材

量子力学

第 二 版

邹 鹏 程



高等教育出版社

普通高等教育“九五”国家级重点教材

量子力学

第二版

邹鹏程

高等教育出版社

内容提要

本书是普通高等教育“九五”国家级重点教材,是在第一版的基础上修订而成的,是作者多年来教学经验的总结,反映了该学科的最新进展及作者在该领域的研究成果.全书内容丰富,结构严谨,层次分明,具有较高的理论水平,在内容、体系和处理方法等方面具有创新之处:在内容上,全书侧重讲述基本概念和基本方法,依据物理概念将量子力学所要处理的问题归为三类(定态、跃迁、散射问题),全书从量子力学的基本假设出发,采用演绎的方式进行讲述,并按照问题深入的程度,将全部内容分为三个层次(基本内容、进一步的理论、理论的发展和推广).全书阐述深入浅出、简明易懂,适合作为综合性大学、师范院校、工科院校物理类及有关专业的本科生、研究生的量子力学和高等量子力学的教材或参考书.

图书在版编目(CIP)数据

量子力学/邹鹏程. —2版. —北京:高等教育出版社, 2003.8
ISBN 7-04-011450-X

I. 量... II. 邹... III. 量子力学 IV. O413.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 023336 号

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 100011

总 机 010-82028899

购书热线 010-64054588

免费咨询 800-810-0598

网 址 <http://www.hep.edu.cn>

<http://www.hep.com.cn>

经 销 新华书店北京发行所

排 版 高等教育出版社照排中心

印 刷 河北新华印刷一厂

开 本 787×960 1/16

印 张 28.5

字 数 530 000

版 次 1989 年 11 月第 1 版

2003 年 8 月第 2 版

印 次 2003 年 8 月第 1 次印刷

定 价 32.50 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

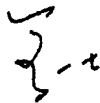
序

邹鹏程教授长期在我国高等学校从事量子力学的讲授和研究工作,对量子力学的理论有深入的理解,并有丰富的教学经验.该书是作者多年来教学经验的总结,并反映了他在这方面的研究成果.

该书与传统的量子力学教材有较大的不同,具有明显的特色.该书结构严谨,层次分明,深入浅出,简明易懂,形成了一个具有科学性和易于接受的新的教学体系.在一般量子力学教材中,力学量算符通常是作为假设而引入的,本书吸收了力学量算子与系统的对称性具有内在联系的科学观点,将其巧妙地引入教材,不仅加深了对量子力学理论的理解,并且反映了量子力学基础理论在这一领域的重要发展.关于二次量子化的讲解也很有特色,思路明晰、直观,使繁、难的内容变得容易学习和掌握.

此外,该书在修订中还增加了“群论及其在量子力学中的应用”一节,书中一些用小字编排的内容,简明地介绍了量子力学的一些最新进展.作为新世纪的教材,这是十分必要的.

原书稿曾在1983年全国量子力学教材专项评选中中选,1989年由高等教育出版社出版,1992年获国家教委优秀教材一等奖,1997年定为国家级重点教材(修订).该书内容丰富而适当,具有较高的理论水平,同时又深入浅出、简明易懂,适合作为综合性大学物理系以及工科、师范院校等有关专业的本科生教材和研究生参考书.



2003年1月

我为什么要写量子力学

(代前言)

我想写本量子力学,还是20世纪60年代初的事.当时我同时讲授量子力学和电动力学,早在读书时期就有的一种感觉,这时就更加强烈了.这就是相比之下,总觉得量子力学在理论上不如其他几门力学(如理论力学、热力学、统计力学、电动力学)那样优美,于是便萌发了按照新的体系写本量子力学的想法.不久学校开始“四清”,随后是下乡“四清”,没完又开始了“文化大革命”.“文革”期间,课都不上,要书干什么,更何况是量子力学,一切只得作罢.

“文革”过后也没想就写,因为写书容易出书难.一位大学同窗曾幽默告诫:时人写书,多半是写“遗书”,当时情况确是如此.后来,由于偶然原因,还是写了起来.开始零星写些章、节,聊备学生参考.事有凑巧,1982年底,原国家教委通知将在全国举行量子力学教材专项评选,截稿日期是次年5月1日.于是决定一试,所以大部分内容都是这段时间赶写的.经过评选,侥幸得中,并于1989年由高等教育出版社出版.该次评选历时两年,据说是最认真、最公正也是最辛苦的一次,在此,谨向有关评委致以衷心的感谢.本次修订,完全保持了原稿的体系和风格.

下面继续谈谈萌发写书时的一些想法,并借此说明一下本书的特点.

和其他几门力学相比,学习量子力学,常感结构松散,内容零乱,即便是按公理体系写就的,大体也是如此.究其原因,觉得问题主要出在力学量上.

“力学量由厄米算符表示”历来被看作是量子力学的一条基本假设.虽说只是一条假设,但实际上,我们是到处都得假设.首先,我们得假设量子力学中有哪些力学量,此外,还必须为每个力学量假设一个对应的算符.这样一来,我们每讲一个力学量,实际上就得引入一堆假设,其结构自然难以严谨.在这样的框架下,甚至连系统的总动量何以等于各粒子动量之和?粒子的轨道角动量何以等于 $\mathbf{r} \times \mathbf{p}$,而不是 $-\mathbf{p} \times \mathbf{r}$?何谓自旋?粒子的总角动量何以等于其轨道角动量与自旋角动量之和?等等这样一些简单的问题,我们都不能加以证明,只能把它作为假设了事.最多我们只能说,根据“对应原理”,经典力学是这样,所以量子力学也该是这样.但是“对应原理”并不是量子力学的基本假设.由此可见,欲使量子力学的表述在逻辑上能与其他几门力学媲美,首先必须去掉关于力学量的假设.

另一方面,深究起来,力学量假设本身,也还存在一些问题.

例如,关于 φ 和 $L_\varphi = -i\hbar \frac{\partial}{\partial \varphi}$ 的问题. φ 和 L_φ 都是可观测的力学量,但是,如果我们要求波函数单值,那么 φ 就不是一个合法的算符;如果放弃单值性要求, L_φ 又不是厄米的. 其结果是,虽然 $[\varphi, L_\varphi] = i\hbar$, 和 x, p_x 有相同的对易式,但它并不满足通常的测不准关系: $\Delta\varphi \cdot \Delta L_\varphi \geq \hbar$. 因此,要将“力学量由厄米算符表示”作为一个普遍的假设,看来可能有些问题.

除此之外,还有测量问题.“测量的可能值为算符的本征值”也是量子力学关于力学量的假设内容之一. 但众所周知,根据 Dirac 方程,电子的速度算符 $\hat{\mathbf{r}} = c\boldsymbol{\alpha}$, α_i 的本征值为 ± 1 , 因此,根据以上假设,我们在任何时候测量电子在任何方向的速度,其结果只能是正、负光速,这显然与实际不符. 此外,也还存在其他一些不是本征值的测量操作. 因此,要将“测量的可能值为算符的本征值”作为一个普遍假设,看来也有一些问题. 既然如此,与其将“测量的可能值为算符的本征值”当作一个基本假设,还不如将它看作是谱分解类测量过程的一个具体结果,以避免逻辑上的漏洞.

既然存在问题,那么,表述量子力学是否可以不要力学量的假设呢?

回忆学习经典力学的过程,也许能够得到启示. 经典力学的基础是牛顿的三条定律,其中没有关于力学量的假设. 在中学里,动量 $= m\mathbf{v}$ 、动能 $= \frac{1}{2} m \mathbf{v}^2$ 、角动量 $= \mathbf{r} \times \mathbf{p}$ 等等,实际上都是作为一种经验即假设而引入的,到了理论力学,情况就不同了,一切仅从牛顿定律出发,动量、动能、角动量等等,都是作为运动方程的积分来定义的,并最终与守恒定律相联系.

量子力学能否也这样做? 经过分析,证明是可行的.

和经典力学一样,在量子力学中,虽然可以定义各种各样的力学量,但除坐标外,真正具有物理意义的力学量,实际上都与守恒定律有关,而守恒定律的存在则是系统具有对称性的结果. 所以,重要的一步,首先是要在量子力学的框架下,直接建立对称性与守恒定律的联系. 为此,作者构造了一个简单的定理 (§6.1 基本定理),它直接给出了两者的关系,其作用类似于场论中的 Noether 定理,但它更简单,更直观,并可直接用于量子力学和离散变换. 有了这一定理,“力学量由算符表示”便可以不再作为假设,力学量算符的作出也不再需要通过经典类比.

在新的框架中,力学量是从运动方程出发,根据对称性,由守恒定律加以定义. 它自然导致力学量由算符表示. 而且,这样一来,除坐标外,对于任何系统,所有力学量的算符,都可用统一的观点,根据原始的定义,从数学上严格做出,力学量之间的所有关系皆可得到严格的证明,其中不再需要引用经典力学的结果.

本书基本上就是按照这一思路写成的.

本书与其他几门力学类似,采取公理式体系讲述,其主要特点如下:

一、在逻辑上,本书采用演绎的方式进行讲述,全部结果皆从以下基本假设导出.

基本假设: 1) 粒子的状态由波函数描写;

2) 波函数的绝对值的平方代表粒子出现的概率;

3) 波函数的运动满足薛定谔方程;

4) 对于全同粒子,有全同性原理.

二、在内容上,本书根据物理概念而不是数学方法,将量子力学所要处理的实际问题归为三类,即

1) **定态问题:** 求解系统可能的稳定状态,计算其能级和波函数.

2) **跃迁问题:** 计算系统由给定的初态过渡到指定末态的概率;

3) **散射问题:** 讨论粒子间的碰撞,属于连续谱.

方法上则可作为定态问题也可作为跃迁问题处理.

三、在系统上,本书按照问题深入的程度,将全部内容分为三个层次,即三部分.

第一部分: “量子力学的基本原理”,共四章.

除第一章介绍量子力学的基本假设外,其余三章都是具体求解运动方程(包括精确解和近似计算),详细讨论以上三类问题的解答.这一部分的特点是直接求解方程,所有结果都从求解方程直接得出,本质上不涉及力学量的问题.

第二部分: “对称与守恒,力学量理论”,共六章.

同样是解决前述三类问题,但与第一部分不同,它的特点是不具体求解方程,而是通过对称与守恒及力学量的讨论,揭示运动过程中的一些普遍规律,从而达到对于微观运动过程的更加深入的认识.

对于定态,力学量理论给出能级或态的分类方法;对于跃迁,则可给出选择定则和相关过程的概率比.

其中,第五章“线性算符及表示理论”属于数学准备,主要介绍有关线性算符的知识和推广量子力学的表述方法;第六章是关于对称、守恒及力学量的一般讨论,其中,“群论及其在量子力学中的应用”一节,仅供有兴趣的读者参考;第七章具体讨论时、空均匀性与能量、动量守恒;第八章讨论空间各向同性与角动量守恒;第九章讨论时、空反演及宇称守恒;第十章是力学量理论应用举例,主要是一些直接求解方程不易解决的典型问题.

第三部分: “全同粒子系及相对论波动方程”,共三章.

这一部分是量子力学的发展与推广.首先,它将单粒子的量子力学推广到全同粒子系;二次量子化则进一步将量子力学推广到粒子数可变的情形,使其能够处理粒子的产生、湮没和相互转化的问题;相对论波动方程使量子力学能够描写

高速粒子的运动。

四、在讲法上,本书也做了一些新的尝试.除力学量外,主要有二次量子化等问题.

五、本书着重基本概念和基本方法的讲述,应用的安排主要围绕说明基本概念和基本方法.

书中插有一定数量的思考题,目的在于加深有关概念的理解和纠正一般容易发生的错误.

一些需要知道但又比较简单的问题,为了行文紧凑,常作为练习加以叙述,证明则留给学生自己去做,以培养学生独立工作的能力.

每章末尾附有一定数量的习题,供学生选作,其中大部分是为了配合书中内容临时编就的.通过这些习题,可以加深有关内容的理解和方法的掌握.

六、为了突出重点,在本书中,次要章节标有“*”号,每节之中的次要内容则以小字编排.这些内容仅供有兴趣的读者参考,略去它们不会影响内容的连贯性.

本书第五章属于数学准备,为了逻辑上的完整和行文的连贯,内容较为烦琐,课堂上不必逐一讲述,主要是掌握有关的结论和方法.详细推证仅供对数学有兴趣的读者参考.

七、本书可作为综合大学、师范院校、工科院校物理类或有关专业的本科生、研究生的量子力学和高等量子力学的教材或参考书.

本书全讲约需 100 学时左右.

本书第一部分是量子力学的基础,讲授约需 40 学时.学完这一部分,即已掌握量子力学的基本思想和基本方法以及初等量子力学的主要内容.

对于非物理专业,可主要学习第一部分,然后根据情况,选学 § 5.6: 矩阵表示、§ 8.2 iii): 角动量算符的对易关系、§ 8.3 iii): J^2 、 J_z 的本征值和本征函数、§ 8.4: 角动量算符的矩阵、§ 8.5: 角动量相加法则、第十一章: 全同粒子系. 这样,基本上包括了初等量子力学的全部内容. 总共约需 60 学时左右.

对于物理专业,在学完第一部分之后,可加学第五章: 线性算符及表示理论、第六章: 对称与守恒,力学量理论、第八章: 空间各向同性和角动量守恒、第十一章: 全同粒子系. 总共约需 70 学时左右. 如果时间允许,亦可选讲第七章、第九章、第十章、第十一章的部分内容.

若作为理论物理专业或研究生的高等量子力学教材,第一部分可略去不讲,留给学生自行浏览,主要学习第二部分和第三部分. 若有必要,除第四章的有关内容外,还可再加强一些形式散射理论的内容.

最后,我要感谢物理系前系主任周仲璧先生和郭士堃教授,他们在 1983 年的全国量子力学教材评选中,对该书做了热情的推荐:

我要感谢王珮教授,他在原书的编写过程中,给了我热情的支持和帮助;

我要感谢陶必友教授,他在 1984 年帮助我审阅了讲义全稿,提出了许多宝贵的意见;

我要感谢李能先生,他在该书的出版过程中,曾给了我许多帮助;

我还要感谢许多关心和帮助过我的老师和同事;

最后,我要特别感谢段一士先生和马中骢教授.

段先生一贯热心对青年的培养,热情帮助青年成长,我在学生时代,他就给了我特别的关怀和鼓励.1984 年暑假,正值全国实验物理会议在兰州大学召开,段先生每天除了主持会议外,还有繁重的组织和接待工作,但他仍在百忙中抽出时间,冒着酷暑,每天和我详细讨论书中的各种问题,并主动为该书写下了毫无保留的赞赏评语,热情地向四川出版社推荐出版(当时全国评选尚未揭晓),给了我极大的鼓励和帮助,这次修订,又热情地为本书作序,令我永志不忘.

马中骢教授 1984 年曾帮助我审阅了讲义全稿,提出过许多宝贵意见.这次修订中他又认真地审阅了全书,提出了许多宝贵的意见和建议,给了我很大的帮助.

由于水平所限,错误在所难免,敬请读者不吝赐教.

邹鹏程

2003 年 1 月于成都

目 录

绪 论	1
§ 0.1 经典物理学的困难及量子力学的产生	1
i) 黑体辐射与能量子假说	1
ii) 光电效应及康普顿散射	3
iii) 原子结构方面的困难	4
§ 0.2 德布罗意假设	6
§ 0.3 波包的动量和能量 不确定关系	9
附录:傅里叶变换	13
习题	14

第一部分 量子力学的基本原理

第一章 基本假设	17
§ 1.1 态的描写及其意义	17
i) 波粒二象性	17
ii) 统计解释	17
iii) 归一化	19
iv) 坐标平均值与坐标算符	20
v) 复杂体系的描写	21
vi) 补充	22
§ 1.2 正交分解与概率振幅	23
i) 叠加原理	23
ii) 线性空间	24
iii) 内积与正交分解	26
iv) 态的测量与概率振幅	28
v) 动量平均值与动量算符	31
vi) 补充	32
§ 1.3 薛定谔方程	33
i) 薛定谔方程	33
ii) 薛定谔方程的特点	37
iii) 概率流密度与粒子数守恒	40
* § 1.4 量子力学与经典力学的关系 对应原理	43
i) 从薛定谔方程到牛顿方程	43

ii) 从薛定谔方程到哈密顿方程	46
iii) 力学量的算符表示	48
iv) 量子化方法	49
* v) 宏观近似条件	50
习题	53
第二章 定态问题	55
§ 2.1 薛定谔方程的稳定解 定态	55
i) 分离变量法 定态	55
ii) 定态解的正交性与完备性	57
iii) 初值问题	58
iv) 波函数的标准条件	58
§ 2.2 隧道效应	60
§ 2.3 一维方势阱中的运动	64
§ 2.4 散射时的共振	67
§ 2.5 简谐振子	70
§ 2.6 氢原子和类氢离子	73
i) 两体问题的化简	74
ii) 球坐标中分离变量	76
iii) 径向方程	79
iv) 讨论	83
v) 球谐多项式	84
§ 2.7 定态微扰理论	85
i) 各级近似方程	85
ii) 无简并时的微扰公式	86
iii) 简并微扰方法	92
§ 2.8 变分法	96
习题	99
第三章 跃迁问题	102
§ 3.1 跃迁概率公式	103
i) 跃迁振幅方程	103
ii) 一级跃迁公式	104
iii) 跃迁过程中的能量守恒	105
iv) 末态求和与初态平均	106
v) 二级跃迁的意义	106
§ 3.2 周期微扰下跃迁公式的化简	107
i) 跃迁公式的化简	107
ii) 几点说明	109

iii) δ 函数的消去	110
§ 3.3 电偶极跃迁	112
i) 跃迁公式	112
ii) 选择定则	114
§ 3.4 自发跃迁	116
i) 爱因斯坦辐射理论	116
ii) A_{nm} 、 B_{nm} 的计算	118
iii) 谱线强度	119
iv) 激光器原理	119
习题	121
第四章 散射问题	123
§ 4.1 散射的一般概念	123
§ 4.2 定态处理——玻恩近似	125
i) 散射截面与球面波振幅的关系	125
ii) 微扰解与玻恩公式	127
* iii) 高阶近似与符号公式	132
§ 4.3 定态处理——分波法	133
i) 散射截面与相移的关系	133
ii) 相移的意义及近似条件	136
iii) 光学定理	138
* iv) 散射矩阵	138
§ 4.4 跃迁方法	140
习题	142

第二部分 对称与守恒 力学量理论

第五章 线性算符及表示理论	146
§ 5.1 线性空间与线性算符	146
i) 态的表示	146
ii) 线性算符	147
iii) 对易关系的计算	150
iv) 算符函数	151
§ 5.2 内积及共轭运算	152
i) 内积	152
ii) 态的共轭	154
iii) 算符的共轭	155
§ 5.3 厄米算符及其性质	157
i) 厄米算符及幺正算符	157

ii) 本征方程	158
iii) 厄米算符的性质	159
iv) 连续谱的情形	165
v) 箱归一化	166
§ 5.4 力学量的测量	168
§ 5.5 算符具有共同本征态的条件 同时测量与不确定关系	171
i) 算符具有完备共同本征态的条件	172
ii) 不确定关系	174
iii) 同时测量	176
iv) 用不确定关系估计系统基态能量	176
§ 5.6 矩阵表示	177
i) 态和内积的矩阵表示	177
ii) 算符的矩阵表示	181
iii) 矩阵形式下本征方程的求解	184
* iv) 连续谱的情形 积分算子	186
v) 密度矩阵	188
§ 5.7 表象变换	189
i) 波函数及算符的变换	189
ii) S 矩阵的幺正性	190
* iii) 算符的对角化	191
* iv) 幺正算符	192
* § 5.8 与运动有关的表象	193
i) 态空间随时间变化的幺正算符	193
ii) 与运动有关的表象	195
习题	200
第六章 对称与守恒 力学量	202
§ 6.1 对称与守恒 基本定理	202
§ 6.2 算符守恒的条件及不守恒时随时间的变化	208
i) 算符守恒的条件	208
ii) 对称与简并	208
iii) 算符随时间的变化	210
§ 6.3 守恒算符的性质	212
* § 6.4 群论及其在量子力学中的应用	215
i) 群的基本概念	215
ii) 群的表示	221
iii) 群论在量子力学中的应用	230
习题	237

第七章 时、空均匀性与能量、动量守恒	239
§ 7.1 空间均匀性与动量守恒	239
i) 空间均匀性	239
ii) 平移算符	239
§ 7.2 空间平移时态及算符的变化	244
i) 平移时态的变化	244
ii) 平移时算符的变化	246
* iii) 无穷小平移时算符的变化	248
§ 7.3 与空间平移有关的选择定则	249
§ 7.4 时间均匀性与能量守恒	251
§ 7.5 与时间平移有关的选择定则	253
i) 平移时态的变化	253
ii) 平移时算符的变化	254
iii) 与时间平移有关的选择定则	255
习题	256
第八章 空间各向同性与角动量守恒	257
§ 8.1 绕固定轴的转动 角动量算符 J_z	257
§ 8.2 绕任意轴的转动 角动量矢量算符 J	262
i) 空间的无穷小转动	262
ii) 转动的无穷小算符 角动量矢量 J	263
iii) 角动量算符的对易关系	265
§ 8.3 任意转动下态的变化	267
i) J^2 算符与转动不变子空间	267
ii) 球对称系统的能级结构	268
iii) J^2 、 J_z 的本征值和本征函数	269
§ 8.4 角动量算符的矩阵	271
i) 角动量算符的矩阵	271
ii) 电子的自旋算符	274
iii) 转动时态的变化 转动矩阵	276
§ 8.5 角动量相加法则	277
i) 总角动量算符的本征值	277
ii) 总角动量的本征态 C-G 系数	280
iii) 耦合系统的能量	284
§ 8.6 与转动有关的选择定则	286
i) 转动时算符的变化 不可约张量算符	286
ii) 维格纳-艾卡定理	287
iii) 朗德公式	291

习题	292
第九章 时、空反演及 K^0 介子的衰变	295
§ 9.1 空间反演及宇称守恒	295
i) 镜像与反演	295
ii) 宇称算符	298
iii) 与反演有关的选择定则	300
iv) 宇称守恒及其破坏	302
§ 9.2 CP 对称与中性 K 介子的衰变	303
i) CP 对称与 K^0 介子的哈密顿量	304
ii) 运动方程及其解	305
iii) 讨论	306
* § 9.3 时间反演	308
i) 一般概念	308
ii) 时间反演算符	310
习题	311
第十章 算符理论应用举例	313
§ 10.1 周期场中的运动	313
§ 10.2 简谐振子的算符解法	318
§ 10.3 带电粒子在电磁场中的运动	323
i) 带电粒子的哈密顿量	323
ii) 概率守恒	324
iii) 均匀磁场中的运动 轨道磁矩与抗磁性	324
* iv) 规范不变性	326
v) 泡利方程	327
§ 10.4 施特恩-格拉赫实验及磁共振	329
i) 施特恩-格拉赫实验	329
ii) 磁共振实验	331
§ 10.5 氢原子及碱金属的能级	335
§ 10.6 原子光谱的精细结构	339
i) 轨道-自旋耦合 碱金属光谱的精细结构	339
ii) 相对论修正 氢光谱的精细结构	343
§ 10.7 原子光谱的超精细结构	345
§ 10.8 外磁场中谱线的分裂	349
i) 强磁场	350
ii) 弱磁场	351
iii) 一般情况	352
§ 10.9 外电场中谱线的分裂	355

i) 弱电场中氢原子的一级斯塔克效应	355
ii) 一般情况	356
iii) 碱金属的斯塔克效应	359
习题	361
 第三部分 全同粒子系及相对论波动方程	
第十一章 全同粒子系	363
§ 11.1 交换对称与全同性原理	363
i) 一般概念	363
ii) 两电子系统的波函数	368
§ 11.2 全同粒子的散射	370
i) 零自旋粒子的散射	370
ii) 非零自旋粒子的散射	371
§ 11.3 氦原子与氢分子	372
i) 氦原子	372
ii) 氢分子	379
习题	382
第十二章 二次量子化	383
§ 12.1 玻色系统的二次量子化	383
i) 粒子数表象	383
ii) 产生算符和湮没算符	384
iii) 用产生算符和湮没算符表示力学量	386
iv) 对易关系	388
v) 玻色系统与简谐振子的关系	390
§ 12.2 费米系统的二次量子化	391
i) 产生算符与湮没算符	391
ii) 用产生算符和湮没算符表示力学量	394
iii) 对易关系	395
§ 12.3 二次量子化与场量子化的关系	397
§ 12.4 应用举例	400
i) 带电粒子与电磁场的相互作用	400
ii) 一级近似 自发跃迁	401
iii) 高阶近似 费曼图	404
习题	405
第十三章 相对论波动方程	407
§ 13.1 克莱因-戈登方程	407
i) 克莱因-戈登方程	407

ii) 电荷守恒	408
iii) 非相对论近似	409
§ 13.2 自由粒子的狄拉克方程	409
i) 狄拉克方程	410
ii) 概率守恒	411
iii) 自旋角动量	411
§ 13.3 自由粒子狄拉克方程的解	412
§ 13.4 电磁场中的狄拉克方程	415
i) 自旋磁矩	415
ii) 轨道自旋耦合	418
§ 13.5 库仑场中狄拉克方程的精确解	419
i) 球坐标中分离变量	420
ii) 库仑场中径向方程的精确解	423
§ 13.6 狄拉克方程的对称性	427
i) 狄拉克方程的惯用形式	427
ii) 空间反演	427
iii) 时间反演	429
iv) 电荷共轭	430
v) 洛伦兹变换及电子自旋	431
习题	435
物理常量表	436