



现代物理学丛书

量子力学 卷II

(第三版)

曾谨言 著

科学出版社

0413.1
230
(2)

56

现代物理学丛书

0413.1

量子力学

230

卷 II

(2)

(第三版)

曾谨言 著

科学出版社

2001

内 容 简 介

与本书第二版相比,第三版做了较大幅度的修订。特别是卷Ⅰ适量地介绍了近年来量子力学(基本理论及相关实验工作)的新的进展及在有关前沿领域中的应用。卷Ⅰ主要包括:量子态的描述、量子力学与经典力学的关系、路径积分、量子力学中的相位、二次量子化、角动量理论、量子体系的对称性、氢原子与谐振子的动力学对称性、时间反演、散射理论、相对论量子力学、辐射场的量子化及其与物质的相互作用。书中附有适当数量的习题和思考题。为便于读者学习本书,书后附有:分析力学简要回顾以及群与群表示理论简介。

本书卷Ⅰ适合作为理科大学物理类专业研究生的主要参考书,也是物理学工作者的一本有用的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

量子力学 卷Ⅰ/曾谨言著.-3版.-北京:科学出版社,2000

(现代物理学丛书/周光召主编)

ISBN 7-03-008188-9

I. 量… II. 曾… III. 量子力学 N.O413.1

中国版本图书馆CIP数据核字(1999)第73901号

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

源海印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

1993年3月第一版 开本:850×1168 1/32

1997年3月第二版 印张:23 7/8

2000年7月第三版 字数:623 000

2001年3月第五次印刷 印数:8 801-13 800

定价:48.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈杨中〉)

第三版序言

今年,我们迎来了量子论诞生一百周年.量子力学的建立,也已历七十余载.量子力学与相对论的提出,是20世纪物理学两个划时代的成就.可以毫不夸张地说,没有量子力学与相对论的建立,就没有人类的现代物质文明.

“原子水平上的物质结构及其属性”这个古老而基本的课题,只有在量子力学理论上才原则上得以解决.可以说没有哪一门现代物理学的分支及相关的边缘学科能离开量子力学这个基础.例如,固态物理学,原子与分子结构和激光物理,原子核结构与核能利用(核电技术和原子弹),粒子物理学,量子化学和量子生物学,材料科学,表面物理,低温物理,介观物理,天体物理,量子信息科学等,实在难以胜数.

然而在量子力学建立的早期年代,很少人意识到这个基本理论的广阔应用前景.当时,很少人能认识到,有朝一日量子力学会提供发展原子弹和核电技术所必需的理论基础.同样,也很少人想到基于量子力学而发展起来的固态物理学,不仅基本搞清了“为什么有绝缘体、导体、半导体之分?”“在什么情况下会出现超导现象?”“为什么有顺磁体、反磁体和铁磁体之分?”等,这些最基本的问题,还引发了通讯技术和计算机技术的重大变革,而这些进展对现代物质文明有决定性的影响.

但事情到此并没有完结.尽管量子力学基本理论体系已在20世纪20年代建立起来,尽管正统的量子力学理论在说明各种实验现象和在极广泛领域中的应用已取得令人惊叹的成就,但围绕量子力学基本概念和原理的理解及物理图象,一直存在激烈的争论.我们兴奋地注意到,近年来量子力学在实验和理论方面又取得令人瞩目的新进展.在国际上一些权威性学术刊物(如 *Nature*, *Sci-*

ence, Phys. Rev. Lett. 等)上不断出现一系列报道. 一方面,关于量子力学基本概念和原理的争论,已从思辩性讨论转向实证性研究[包括 EPR 佯谬, Bell 不等式, 量子力学中的非定域性的实验检验, Schrödinger 猫态在介观尺度上的实现, 纠缠态概念与路径 (which way) 实验, 作为描述系统的波函数的实验测量, 等], 这些成果将有助于人们重新理解量子力学的基本概念和原理, 以及量子力学和经典力学的关系. 另一方面, 一系列新的宏观量子效应不断被发现, 例如, 继激光超导和超流现象、Josephson 效应等之后, 近年来发现的量子 Hall 效应, 高温超导现象, Bose-Einstein 凝聚等. 相关的应用技术也正在迅速开展. 估计在 21 世纪初, 量子力学的实用性会更加明显, 一批新的交叉学科将应运而生, 例如, 量子态工程, 量子信息科学等.

所有这些新的进展给人们两个印象: 一是量子力学基本概念和原理的深刻内涵及其广阔的应用前景, 还远未被人们发掘出来, 在我们面前还有一个很大的必然王国. 量子力学的进一步发展, 也许会对 21 世纪人类的物质文明有更深远的影响. 另一方面, 人们看到, 量子力学理论所给出的预言, 已被无数实验证明是正确的. 当然, 人们对量子力学基本概念和原理的理解还会不断深化, 但可以相信, 至少在人们现今对物质存在形式的概念下, 量子力学的理论体系无疑是正确的.

为适应量子力学近年来的这些新进展, 本书第三版(特别是卷 II)做了较大幅度的修改. 卷 I 适合于作为本科生学习量子力学的进一步深入的参考书, 卷 II 则可作为研究生高等量子力学课的主要参考书. 青年物理学工作者在学完本书后, 可以比较顺利地进入与量子力学有关的各前沿领域的研究工作.

本书是根据作者在北京大学从事量子力学教学和研究 40 年经验写成的. 作为一个教师, 我愿对同行教师和同学们讲讲自己的对教学的一些看法.

* * *

教师的职责是从事教学. 教师教学生, 教什么? 如何教? 学生

要学,学什么?如何更有效地学?我认为一个好的高校教师,不应只满足于传授知识,而应着重培养学生如何思考问题、提出问题和解决问题。

这里涉及到科学上的继承和创新的关系。中国有句古话:“继往开来”,说得极好,很符合辩证法。我的理解,“继往”只是一种手段,而目的只能是“开来”。诚然,为了有效地进行探索性工作,必须扎扎实实继承前人留下的有用的知识遗产。但如就此止步,科学和人类的进步自何而来?有了这点认识,我们的教学思想境界就会高得多,就别有一番天地,就把一个人的认识活动汇进不断发展的人类认识活动的长河中去了。

基于这点认识,教师就会自觉地去贯彻启发式的教学方式。学生学一门课,学的是前人从实践中总结出来的间接知识。一个好的教师,应当引导学生设身处地去思考,是否自己也能根据一定的实验现象,通过分析和推理去得出前人已认识到的规律?自然科学中任何一个新的概念和原理,总是在旧概念和原理与新的实验现象的矛盾中诞生的。讲课虽不必要完全按照历史的发展线索讲,但有必要充分展开这种矛盾,让学生自己去思考,自己去设想一个解决矛盾的方案。在此过程中,即使错了,也不要紧,学生可以由此得到极为宝贵的独立工作能力的锻炼。如果设想出来的方案与历史上解决此矛盾的途径不一样,那就更好。科学史上殊途同归的事例是屡见不鲜的。对这样的学生,就应格外鼓励。他们比能够原封不动重述书本的学生要强百倍。

学生有了这点认识,就不会在书本和现有理论面前顶礼膜拜(“尽信书不如无书”),而是把它们看成在发展中的东西。一切理论都必须放在实践的审判台前来自明其真理性。我们提倡,对待前人的知识遗产,既不可轻率否定,也不可盲目相信。这样,学生就敢于在通过思考之后对现有理论或老师所讲的东西提出怀疑。这对于培养有创造性的人才是至关重要的,也是应提倡的学风和师生关系(所谓“道之所存,师之所存也”,亦即“吾爱吾师,吾尤爱真理”。)还应该教学中提倡讨论的风气。Heisenberg 说过:“科学植根于

讨论之中。”

要真正贯彻启发式教学，教师有必要进行教学与科学研究。而教学研究既有教学法的研究，但更实质性的是教学内容研究。

从教学法来讲，教师讲述一个新概念和新原理时，应力求符合初学者的认识过程。真理总是朴素的。我相信，一切理论，不管它多困难和多抽象，总有办法深入浅出地讲清楚。做不到这一点，常常是由于教师自己对问题的理解太肤浅。此外，讲述新概念，如能与学生学过的知识或熟悉的东西联系起来讲，进行类比，则学习的难度往往会大为减轻，而且学生对新东西的理解也会更深刻。

在教学内容上，至少对于像量子力学这样的现代物理课程来讲，我认为还有很多问题并未搞得很清楚，很值得深入研究，决不可人云亦云。吴大先生在他的《量子力学》(甲部)的序言中批评不少教材“辗转抄袭”，这并非夸张之词。(例如国内广泛流传的布洛欣采夫的《量子力学原理》书中提到：基于波函数的统计诠释，从流密度的连续性即可导出波函数微商的连续性。但这种论证是错误的。)教师如能以研究的态度来进行教学，通过“潜移默化”，学生也就会把这种精神和学风带到他们尔后的工作中去，这就播下了宝贵的有希望的种子，到时候就会开出更美丽的花朵，并结出更丰硕的果实(“青出于蓝而胜于蓝，冰生于水而寒于水”^①)。

高校教师，除教学之外，还很有必要在某些前沿领域进行科学研究。一个完全没有科研实践经验的人，对于什么是认识论，往往只会流于纸上谈兵。对于人们怎样从不知到知，怎样从杂乱纷纭的现象中找出它们的内在联系，则一片茫然。有科学实验经验的教师，在讲述一个规律或原理时，一般会注意剖析人们怎样从不了解到了解它的过程，而不是把它看成一堆死板的知识去灌输给学生。我自己有过多次这样的体会，即当讲述一个问题时，如果自己在该问题有关领域做过一定深度的工作，讲起来就“很有精神”，“左右逢源”，并能做到“深入浅出”，“言简意赅”。反之，就只能拘谨地重

① 见荀子·劝学篇，“青，取之于蓝，而青于蓝；冰，水为之，而寒于水”。

述别人的话,不敢逾越雷池一步。

高校教师从事科学研究还有两个有利条件:一是有可能触及学科发展中某些根本性的问题,这对于只搞科研而不从事教学的人,往往难以注意到它们。另一有利条件是能广泛接触很多年轻学生(本科生和研究生),他们是一支重要的新生力量,受传统思想的束缚较少。教师在教他们的过程中,往往会得到很多启发。历史上有不少科学家,在大学生或研究生阶段,就已对一些科学问题作出了重要贡献。例如,R. P. Feynman 的量子力学路径积分理论,就是他在研究生阶段完成的。有鉴于此,我在教学中,对改革考试制度做过如下的尝试:即在适当的时机,向同学们提出一些目前人们还不很清楚,而学生已有基础可以进行探讨的问题,如哪一位同学能给出一个解决的方案,就予以免试,给予最优秀的成绩。出乎意料,有一些竟被少数聪明而勤奋的学生相当满意地解决了。有人也许会说,这样的问题不太好找。但我的经验表明,只要这门学科还在发展,这样的问题就比比皆是,但它们只对勤于思考的人敞开大门。当然,这样的问题并不一定都非常重要,但对于培养创新人才却是非常有效的。

最后谈谈教材建设。也许有人认为,像量子力学这样一门学科,世界上已有不少名著,没有必要再写一本教材。但我认为只要科学发展不停顿,教材就应不断更新。量子力学虽然比较成熟,但并不古老。学科的发展和教材的建设还远没有达到尽头。我们充分尊重世界名著,但也不必被它们完全捆住了手脚,何况这些名著也不尽适合我国的教学实际情况。回想 50 年代,国内各高校开设量子力学课的经验还很不足。当时北大有一些学生批评“量子力学不讲量”,“量子力学是从天上掉下来的”。这些批评虽嫌偏激,但也反映教学中存在不少问题。我从研究生毕业后走上讲台开始,就下了决心要改变这种状况。在长期教学实践和科学研究的基础上,写成了《量子力学》(上、下册,1981,科学出版社)。90 年代初,又改写成两卷本。在撰写时,我结合教学实际,对基本概念和原理的讲述,做了一些新的尝试。实践证明,收到了较好的效果。出版之后,我先后

收到一千多封读者热情的来信,给予了肯定,认为对提高我国的量子力学教学水平以及培养我国(包括台、港、澳地区及世界各地华裔)一代年轻物理学工作者做出了积极的贡献.该书先后十几次重印,仍不能满足读者要求.

岁月如流,40年转瞬即逝.我们的祖国正欣欣向荣.但应该看到,我国的教育事业,与先进国家相比,还有较大差距.我们中华民族曾经有过光辉的历史,对人类的科学和文化做出过很多重大贡献.但近几百年来,我们落后了.一个国家,如果教育长期落后,就不可能强大繁荣,一个民族如不重视教育,就无法自立于世界民族之林.在此新世纪来临之际,我们必须不失时机奋起直追.这可能需要几代人的努力,作为一个教师,我寄希望于年代一代.“十年树木,百年树人”.深信我们祖国群星灿烂、人才辈出的光辉前量,定会加速到来.

作者于北京大学

2000年1月

第一版(1981年)序言(摘录)

量子力学是在人类的生产实践和科学实验深入到微观物质世界领域的情况下,在20世纪初到20年代中期建立起来的.人们从实践中发现,在原子领域中,粒子的运动行为与日常生活经验中粒子的运动行为有质的差异在这里我们碰到一种新的自然现象——量子现象,它们的特征要用一个普适量——Planck 常量 h 来表征.经典物理学在这里碰到了无法克服的矛盾,量子力学的概念与规律就是在解决这些矛盾的过程中逐步揭示出来的.

但是,不能认为量子力学规律与宏观物质世界无关.事实上,量子力学的规律不仅支配着微观世界,而且也支配着宏观世界,可以说全部物理学都是量子力物理学的.已被长期实践证明的描述宏观自然现象的经典力学规律,实质上不过是量子力学规律的一个近似.一般说来,在经典物理学中不直接涉及物质的微观组成问题,因而量子效应并不显著,所以经典力学是一个很好的近似.例如,行星绕太阳的运动,与氢原子中电子绕原子核的运动相似,都受量子力学规律支配,但对于前者,量子效应是微不足道的(角动量 $mvR \gg h$, m 是行星质量, v 是速度, R 是轨道半径),因此,经典力学规律被证实是相当正确的.

但有一些宏观现象,量子效应也直接而明显地表现出来,例如,极低温下(v 很小)的超导现象与超流现象;又例如,白矮星及中子星等高密度(R 很小)的星体以及常温、常压、常密度情况下质量 m 很小的粒子系(例如,金属中的电子气),量子效应都很显著,不能忽视.因此,经典力学与量子力学适用范围的分界线,应当根据量子效应重要与否来划分.

量子力学规律的发现,是人们对于自然界认识的深化.量子力学,特别是非相对论量子力学的基本规律与某些基本概念,从它们

建立到现在的 50 多年中,经历了无数实践的考验,是我们认识和改造自然界所不可或缺的工具.由于量子力学所涉及的规律极为普遍,它已深入到物理学的各个领域,以及化学和生物学的某些领域.现在,可以说,要在物理学的任何领域进行认真的工作,没有量子力学是不可思议的.事实上,量子力学已成为现代物理学的不可或缺的理论基础.

当然,与任何一门自然科学一样,量子力学也只是在不断发展中的相对真理.从量子力学建立以来,对它的某些基本概念以及对其基本规律的一些看法,始终存在着不同见解的争论.这需要通过进一步的科学实践以及揭示新的矛盾来逐步加以解决.

第二版(1990年)序言(摘录)

10年前,作者所著《量子力学》(上、下册,科学出版社,1981)的内容是针对当时国内量子力学教学实际情况而选定的.该书出版以来,受到广大读者欢迎,多次重印,仍不能满足要求.作者先后收到读者近千封热情洋溢的来信,给予了肯定和较高的评价,认为对提高我国量子力学教学水平起了积极的作用.1988年初国家教委颁发了建国以来首届国家级高校优秀教材奖,该书是获奖的六本物理书之一.

10年以来,我国量子力学教学水平有了明显提高.各高校普遍招收了研究生.作为物理及有关专业研究生的基础理论课,普遍设置了高等量子力学课.为适应这种情况,本书将分两卷出版.卷I作为本科生教材或参考书,而卷II则作为研究生的教学参考书.

在撰写本书时,作者参照了国外近年来出版的一些新教材的优点,更多地反映了量子力学在有关科研前沿领域中的应用,同时还选用了同行和作者近年来所做的某些教学研究成果.

关于量子力学发展史的介绍,过去国内教材很少直接引证原始文献,有些史实的讲述与历史有出入.本书根据国外一些可靠的量子力学史籍和原始文献,做了一些重要订正.例如,关于 Planck 黑体辐射公式提出的历史背景,Bohr 的对应原理等.

基本概念和原理的讲述,历来是一个大难点.过去学生批评“量子力学课不讲理”,“量子力学是从天上掉下来的”.根据作者多年从事教学和科研工作的经验,在《量子力学》(1981)中,曾经对基本概念和原理的讲述做了一些新的尝试,例如,从波动-粒子两重性的分析来引进函数的统计诠释以及说明为什么必须引进算符来刻画力学量,关于量子态概念与态叠加原理,表象理论等.作者着重引导读者去分析问题和解决问题,以增进读者的学习兴趣.这方

面得到了很多同行和读者的肯定.在撰写本书时,作者又做了进一步改进,并纠正了一些流行的不恰当的说法.

过去国内量子力学课的讲法往往给读者造成一个印象,认为力学量本征值问题似乎总是在一定边条件下去解微分方程,这有历史的原因.但据作者所知,实际科研工作中更多地是用代数方法求解力学量的本征值.有一些本征值问题可以用代数方法给出极漂亮的解法.例如,角动量的 Dirac 理论和 Schwinger 表象.为弥补这方面的不足,本书增设力学量本征值问题的代数解法一章.

还有一些问题,在有关科研领域中经常碰到,但在过去教材中讨论得很少,例如,低维体系,定态微扰论与量子跃迁的关系,共振态与束缚态的关系,散射振幅的极点与束缚定态能级的关系, Hellmann-Feynman 定理,自然单位等,本书用了适当篇幅予以介绍.散射理论一章做了大幅度修改.对于散射的经典描述和量子力学描述的比较,守恒量分析在散射理论中的重要性, Born 近似的适用条件等,都做了较详细的讨论.

为了有助于读者更深入理解有关概念和原理,书中安排了适量的思考题和练习题.为增进读者运用量子力学处理具体问题的能力,在每章之末选进了大量习题供读者选用,并附有答案和提示.这些习题中有相当部分选自近年来国外研究生资格考试题.采用本书的读者,可同时选用《量子力学习题精选与剖析》(钱伯初,曾谨言,科学出版社)作为主要参考书.

应该强调,教材是给学生学习用的.教师讲课时应根据不同情况(学生水平,专业需要等)选讲本书的一部分($<2/3$),其余部分最好留给学生自由阅读,这有利于不同程度和兴趣的学生发展其聪明才智.教师应该明确,教学的目的主要是培养学生分析问题和解决问题的能力,而不应局限于传授具体的知识.

目 录

第 1 章 量子态的描述	(1)
1.1 量子力学基本原理的回顾	(1)
1.1.1 波动-粒子两象性,波函数的统计诠释	(1)
1.1.2 力学量用算符描述,本征值与本征态,Heisenberg 不确 定度关系	(4)
1.1.3 量子态叠加原理,表象与表象变换	(7)
1.1.4 量子态随时间的演化,Schrödinger 方程,定态	(12)
1.1.5 对 Bohr 互补性原理的理解	(15)
1.2 密度矩阵	(16)
1.2.1 密度算符与密度矩阵	(17)
1.2.2 混合态的密度矩阵	(24)
1.2.3 复合体系的子体系,约化密度矩阵	(30)
1.2.4 波函数统计诠释的进一步理解	(32)
1.3 纠缠态	(35)
1.3.1 自旋为 1/2 的二粒子的自旋纠缠态,Bell 基	(35)
1.3.2 光子偏振态与双光子纠缠态	(40)
1.3.3 EPR(Einstein-Podolsky-Rosen)佯谬	(43)
1.3.4 Bell 不等式与实验检验,定域性与隐变量	(49)
1.3.5 Schrödinger 猫态及其在介观尺度上的实现	(53)
1.3.6 双缝干涉与“判断路径”(which way)实验	(55)
1.3.7 纠缠态在量子信息论中的应用	(60)
附录 量子不可克隆定理	(63)
1.4 量子态的测量,Wigner 函数	(65)
第 2 章 量子力学与经典力学的关系	(73)
2.1 对应原理	(73)
附录	(80)
2.2 Poisson 括号与正则量子化	(84)

附录 正则量子化程序中的问题	(87)
2.3 Schrödinger 波动力学与经典力学的关系	(96)
2.3.1 Schrödinger 波动方程与 Jacobi-Hamilton 方程的关系	(96)
2.3.2 Schrödinger 波动方程提出的历史简述	(98)
2.3.3 Bohm 的量子势观点	(101)
2.3.4 力学与光学的相似性	(103)
2.4 WKB 准经典近似	(105)
2.4.1 WKB 准经典近似波函数	(105)
2.4.2 势阱中粒子的准经典束缚态, Bohr-Sommerfeld 量子化 条件	(108)
2.4.3 势垒隧穿	(111)
数学附注 WKB 波函数的连接公式	(114)
2.4.4 中心力场中粒子的准经典近似	(120)
2.5 谐振子的相干态	(127)
2.5.1 Schrödinger 的谐振子相干态	(127)
2.5.2 湮没算符的本征态	(131)
2.5.3 谐振子相干态与 Schrödinger 猫态的 Wigner 函数	(134)
2.5.4 相干态的一般性质	(137)
2.5.5 谐振子的压缩相干态	(143)
附录 一些常用的代数式	(146)
2.6 Rydberg 波包, 波形的演化与恢复	(151)
附录 二维各向同性谐振子的相干态, 能量和角动量结构	(158)
第 3 章 路径积分	(170)
3.1 传播子	(171)
3.2 路径积分的基本思想	(176)
3.3 路径积分的计算方法	(180)
3.4 Feynman 路径积分理论与 Schrödinger 波动方程 等价	(184)
3.4.1 从 Feynman 路径积分到 Schrödinger 波动方程	(184)

3.4.2	Feynman 路径积分提出的历史简介	(186)
3.4.3	量子理论发展历史的反思	(189)
3.5	位形空间和相空间的路径积分	(192)
3.5.1	位形空间中的路径积分	(193)
3.5.2	相空间中的路径积分	(195)
附录	规范不变性	(197)
第 4 章	量子力学中的相位	(206)
4.1	AB(Aharonov-Bohm)效应	(207)
4.1.1	磁 AB 效应	(208)
4.1.2	电 AB 效应	(209)
附录	“标量 AB 效应”	(209)
4.2	重力相移	(211)
4.2.1	COW(Covella-Overhauser-Werner)实验与重力相移	(211)
4.2.2	弱等价原理,量子力学与广义相对论的矛盾	(213)
4.3	量子力学中的相位不定性	(215)
4.3.1	常数相位不定性	(215)
4.3.2	Lewis-Riesenfeld 含时不变量,本征态的含时相位不定性	(217)
4.4	Berry 相	(221)
4.4.1	Berry 绝热相	(221)
4.4.2	AA(Aharonov-Anandan)相	(228)
4.4.3	量子态的自然联络	(238)
4.4.4	Berry 相,AA 相与 Lewis 相的关系	(240)
第 5 章	二次量子化	(243)
5.1	全同粒子系的量子态的描述	(243)
5.1.1	粒子数表象	(243)
5.1.2	产生算符与湮没算符,全同 Bose 子体系的量子态的描述	(245)
5.1.3	全同 Fermi 子体系的量子态的描述	(248)
5.2	Bose 子体系的单体和二体算符的表示式	(251)
5.2.1	单体算符	(252)

5.2.2	二体算符	(254)
5.3	Fermi 子体系的单体和二体算符的表示式	(262)
5.3.1	单体算符	(264)
5.3.2	二体算符	(266)
5.4	坐标表象与二次量子化	(269)
5.4.1	坐标表象	(269)
5.4.2	无相互作用 Fermi 气体	(272)
5.4.3	无相互作用无自旋粒子多体系	(277)
5.5	Hartree-Fock 自洽场, 独立粒子模型	(279)
附录 1.	正规乘积	(287)
2.	缩并	(288)
3.	Wick 定理	(288)
5.6	对关联, BCS 波函数, 准粒子	(289)
第 6 章	角动量理论(续)	(304)
6.1	量子体系的有限转动	(304)
6.1.1	量子态的转动, 转动算符	(304)
6.1.2	角动量本征态的转动, D 函数	(305)
6.1.3	D 函数与球谐函数的关系	(311)
6.1.4	D 函数的积分公式	(313)
6.2	陀螺的转动	(315)
6.2.1	陀螺的 Hamilton 量	(315)
6.2.2	对称陀螺的转动谱的代数解法	(318)
6.2.3	对称陀螺转动谱的分析解法	(321)
6.2.4	非轴对称陀螺的转动谱	(325)
6.3	不可约张量, Wigner-Eckart 定理	(328)
6.3.1	不可约张量算符	(328)
6.3.2	Wigner-Eckart 定理	(331)
6.4	多个角动量的耦合	(337)
6.4.1	3 个角动量的耦合, Racah 系数, $6j$ 符号	(337)
6.4.2	4 个角动量的耦合, $9j$ 符号	(347)
6.5	张量积, 矩阵元	(353)
6.5.1	张量积	(353)