

# 原子物理学

Atomic Physics

第2版

崔宏滨 编著

$$|\Psi_{431}(r, \theta, \varphi)|^2 = |R_{43}(r)\Theta(\theta)\Phi_1(\varphi)|^2$$

$$R_{43}(r) = \frac{1}{96\sqrt{35}} \left(\frac{Z}{a_1}\right)^{\frac{3}{2}} \left(\frac{Zr}{2a_1}\right)^3 e^{-\frac{Zr}{4a_1}}$$

$$Y_{31}(\theta, \varphi) = \sqrt{\frac{21}{64\pi}} \sin \theta (5 \cos^2 \theta - 1) e^{i\varphi}$$

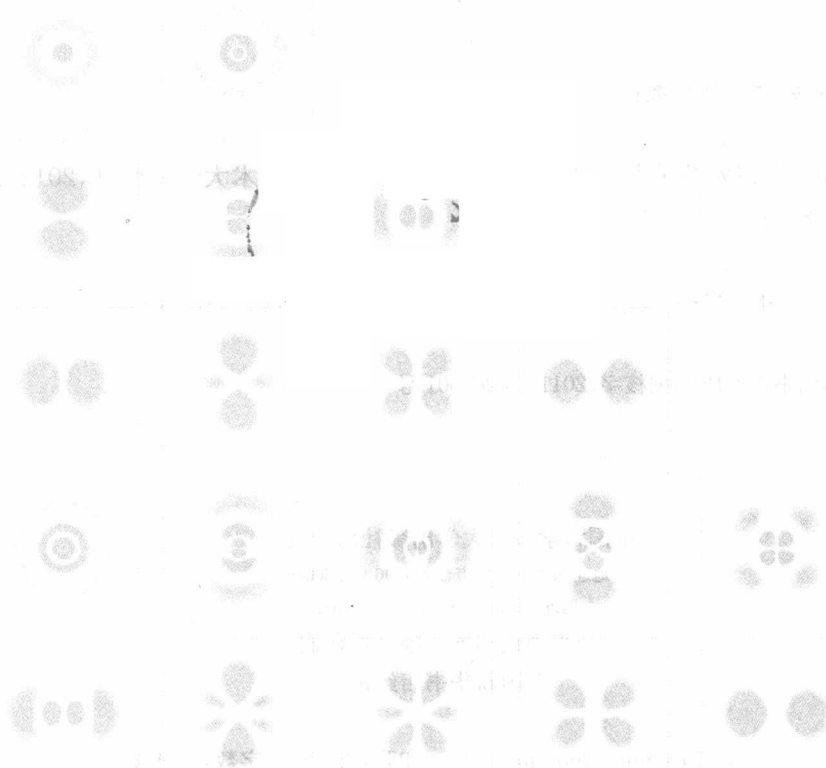
中国科学技术大学出版社

# 原子物理学

ATOMIC PHYSICS

第 2 版

崔宏滨 编著



中国科学技术大学出版社

## 内 容 简 介

本书讲述大学普通物理的“原子物理学”部分,内容包括原子的结构,原子的量子模型,量子力学的初步介绍,原子、分子的光谱和能级以及原子核的基本知识.书中详细描述了有关原子物理的重要实验,提供了大量的实验数据,利用量子力学的基本概念,通过对实验结果的分析,向读者尽可能详尽地介绍了原子、分子的结构、能级、跃迁、光谱以及原子核的组成、放射性、核反应等方面的知识以及原子物理学在各个方面的应用.对于处理和研究原子结构、能级、光谱的方法和技巧,做了仔细的说明和论证.书中附有大量图片和实验数据,便于读者参考核对.

本书适合作为大学物理类以及其他理工类本科生的教材,也适合作为其他专业读者的参考书.

## 图书在版编目(CIP)数据

原子物理学/崔宏滨编著.—2版.—合肥:中国科学技术大学出版社,2012.1  
ISBN 978-7-312-02932-5

I. 原… II. 崔… III. 原子物理学—高等学校—教材 IV. O562

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 265501 号

中国科学技术大学出版社出版发行

地址 安徽省合肥市金寨路 96 号,230026

网址 <http://press.ustc.edu.cn>

合肥现代印务有限公司印刷

全国新华书店经销

开本: 710 mm×960 mm 1/16 印张: 29.75 字数: 564 千  
2009 年 5 月第 1 版 2012 年 1 月第 2 版 2012 年 1 月第 2 次印刷  
印数: 3001—6000 册  
定价: 49.80 元

## 第 2 版序

### ——兼论原子物理学的学习方法

本书自两年前出版以来,作者收到了许多读者的意见和建议,其中既有针对某些细节的疑问和讨论,也有针对书中错误的指正和不足的补充,当然更多的是鼓励和期望.据作者统计,这两年中,本书曾用作中国科学技术大学 8 个教学班的教材,也被至少另外 4 所高校选作教材.

由于前次所印 3000 册很快告罄,根据读者的要求和出版社的建议,作者在原书的基础上,补充和更新了部分内容,并做了较大篇幅的修订,以期更好地满足教学的要求.

#### 对于本次修订的说明

第一,更正了书中的一些讹误,特别是正文中的插图、公式,习题的数据和参考答案.

第二,补充了大量原子光谱和能级的实验数据,并引用了一些基本物理常数的最新测量值,删除了原书中不必要的附录.

第三,增加了一些介绍原子物理领域中新进展、新应用的内容,特别是对一些实验设备 and 研究手段做了更详细的描述.

第四,更多地介绍了原子物理学和量子力学发展过程中的重要事件和代表人物.

第五,对原书中的某些内容做了次序上的调整.

第六,将许多实际问题作为例题进行讲解.

#### 原子物理学的特点

本书出版之后,许多读者希望能够介绍一下原子物理学的学习方法;作者在讲授这门课的过程中,也常有学生表示原子物理学内容复杂、头绪繁多、核心知识难

以把握、遇到问题不知如何处理,等等.其实,作者当年在科大初学这门课的时候,也有许多疑惑和不解,也遇到了很大的困难.正是这些疑惑和困难的化解,使作者逐步认识了原子物理学的本来面目,也渐渐悟出了学习这门课程的方法.

毫无疑问,原子物理学是最重要的物理基础课程之一,也是较难讲授和学习的一门课程.说这门课程难学,是与读者之前学过的力学、热学、电磁学等课程相比而言的.例如,力学的起点是牛顿定律,整个力学的理论体系都是建立在牛顿定律的基础之上的;电磁学的基础是库仑定律、安培定律和电磁感应定律,这三大定律构成了电磁理论的框架.力学、热学、电磁学的特点是,从最基本的实验定律出发,运用数学逻辑,就能够推导出相关结论,并解决具体的问题,因而体系严谨、条理清晰、易于把握.而原子物理学则明显不同.

首先,尽管量子力学是处理原子问题的一般方法,但是在学习原子物理的过程中,读者仅仅是了解了量子理论的基本知识,而且,由于数学知识的限制,许多问题并不能用量子力学严格求解.

其次,学习原子物理,总是要反复经历一个先简单、后复杂,先粗浅、后深入的过程.例如,第一过程,用简单直观的玻尔模型处理氢原子和类氢离子的问题;第二过程,引入电子的自旋,用量子理论处理单电子原子的问题;第三过程,利用球对称平均势场近似,根据角动量的耦合处理多电子原子的问题,等等.

更重要的是,原子物理中似乎缺少像牛顿定律那样一以贯之、无所不能的利器,很多结论不是从理论上推导得来的,而是根据实验总结出来的,而且针对不同类型的原子,所要考虑的因素和采用的手段往往差异较大.

原子理论体系的上述特点,对于熟悉力学、热学、电磁学学习方法的初学者来说,一时难以适应,所以会感到困难.

其实,物理学始终是一门实验科学,物理学的一切结论都来自于实验,一切结论都要经过实验的检验.力学、热学、电磁学中的各种定律、定理和原理其实都是从物理实验中总结出来的,每一门学科都是将许多零散的实验和孤立的结论归纳起来逐渐形成一个完整的理论体系.相对于已成经典的力学、热学、电磁学而言,正在不断发展和完善之中的原子物理学更能体现这一特征.绝大多数人的物理知识并不是从实验中得到,而是在课堂上学到的.学习物理的过程,往往是先学习和熟悉基本的定律、定理和原理,如牛顿定律、库仑定律、高斯定理、能量守恒原理,等等,然后再依据这些定律、定理和原理,来解释各种物理现象、并用数学方法解决各类物理问题.这就是通常所谓的演绎方法,当然这也是最有效的学习已有知识的方法.然而,学习原子物理,更重要的是必须掌握归纳的方法,并充分意识到这一方法在物理学中的重要性.

但是,仅仅有实验还不能成为物理学,正如牛顿所言:物理学是自然哲学的数学原理.因而,将实验的结果用数学的逻辑加以表述,并建立由此及彼的关联,才能构成一个完整的理论体系.相对于力学、热学、电磁学,原子物理学中涉及的数学知识要复杂得多,通常要求解微分方程.但是,物理学又不完全等同于数学,这些复杂的数学问题往往可以根据实际情况,采用适当的近似方法得到有意义的结论.

数学应用的对象必须具有足够简单而形象的特征,这就需要将研究对象最本质的特征抽象出来并以此构建出物理模型.实际上,卢瑟福的原子、普朗克的谐振子、爱因斯坦的光量子、玻尔的定态轨道、乌伦贝克-古德斯密特的电子自旋,都是微观粒子结构和运动的物理模型.这些物理模型都是根据实验结果构建的,只有根据这样的模型才能解释相关实验的结果,也只有建立了这样的模型,才能够推演出进一步的结论.

所以,物理实验、物理模型、数学逻辑是构成原子物理学理论体系的要素.当然,其他的物理学分支也是由这些要素构成的理论体系.

还有非常重要的一点是,许多理论体系都离不开一些基本的假设,这些基本假设在数学中被称做公理,在物理学中则被称做原理.例如,平面几何中的一个公理是:一个平面内,一条直线与另两条直线相交,若在直线同侧的两内角之和小于 $180^\circ$ ,则这两条直线经过无限延长后在这一侧一定相交.这一结论尽管在平面几何的体系中无法证明,但却被公认是正确的,而这一公理,就是一个基本的假设,就是整个平面几何体系的基础.物理学中的能量守恒原理其实也是一个基本的假设,也是构成物理学理论体系的基础.原理与定理、定律不同,凡是被称做定理的,都是从理论上推导出来的,如高斯定理、冲量定理等;凡是被称做定律的,都是可以直接被具体的实验验证的,例如牛顿第二定律可以通过测量加速度与力、质量的关系加以验证,库仑定律可以通过测量力与电荷、距离的关系加以验证.原理由于是对一类普遍事实的总结和概括,所以不可能从实验上一一验证,例如光学中的费马原理、光的可逆性原理,相对论中的光速不变及真空中光速最高原理,原子物理中的泡利原理,等等.只要没有出现与这些假设相悖的实验结果,这些假设就可以成为被普遍接受的原理,从而作为构建一个理论体系的基础.

## 原子物理的学习方法

作为物理学的一个分支,原子物理学与力学、热学、电磁学等其他学科并无本质区别,所遵循的方法和原理都是相同的.如果说有特点的话,那就是关于原子的理论是近百年来才发展起来的,并在不断的完善之中.因而,在学习这门课的过程

中,就不能单单依赖我们所熟悉的演绎方法.

第一,要掌握并熟悉根据实验结果归纳出基本结论的方法.

原子的核式结构,是卢瑟福在汤姆孙发现电子的基础上,根据 $\alpha$ 粒子散射的实验结果所总结出的原子模型.光子的概念,是综合了黑体辐射实验、光电效应实验、康普顿散射实验而建立的;原子中电子的定态轨道,是玻尔根据原子光谱数据和光子概念所构建的电子运动模型;物质的波粒二象性,也是由大量的光的粒子性和电子的波动性实验结果而总结出来的一般性的结论.因而,充分了解每一个重要的物理实验以及该实验所反映的物理思想,并从中总结出物理规律,是学好原子物理学的基础.

第二,要运用量子的方法处理原子的问题.

原子是微观体系,处理微观体系问题的理论是量子力学.一方面,量子力学的观点和结论与读者所熟悉的经典物理有所不同,因而要时刻变换思维的角度.另一方面,量子力学本身就是在原子研究的基础上建立和发展起来的,所以不可能先学过量子力学再学习原子物理.这就要求将在原子物理学中总结出的量子力学的思想用来处理原子的问题.实际上,原子物理只是宏大的量子理论体系中的一个小分支,不可能也不必非得完整学过量子力学再来学习原子物理,用量子力学的某些结论处理原子问题已经足够了.

第三,要正确理解原子体系中的物理概念和物理模型.

原子是看不见摸不着的,因而原子的结构、原子中电子运动的模式等都是根据实验结果推断出来的,随着更精确、更深入的实验研究的进行,对原子的认识也在不断更新,新的结论能更准确地体现原子内部结构和运动的规律.例如正电荷与电子分离的核式结构模型仅仅能解释原子对入射粒子的散射,而不能说明核外电子是如何运动的.玻尔模型中,电子仅仅有轨道角动量,能够解释当时已有的氢光谱的规律,但却不能说明后来测量到的精细光谱.只有在引入了电子的自旋后,才能更准确地描述电子的运动并对精细光谱作出解释.然而,仅仅这样还不够,因为更精确的实验测量到了原子的超精细光谱,这就需要进一步引入原子核的自旋以及核与电子的相互作用.但是,也不能将原子核看做一个仅仅有自旋的实体,核还有具体而复杂的结构,并可形成一系列的能级,这说明,对原子的全面认识是基于一系列物理实验的,每一个新的物理实验,都会对原子的图像进行补充和更新,赋予其更丰富的内涵.

另外,原子物理中认为电子绕核运动,因而具有轨道角动量,又因为电子具有一定的空间尺度,所以同时也有自旋角动量.轨道角动量、自旋角动量都是具体的物理量,按照物理学的原则,物理量应当是可以从实验上测量的.但是,由于实验技

术的限制,直至今日也根本无法测量这些角动量.那么这些角动量是否真的有物理意义呢?实际上,引入角动量,是为了解释原子的光谱和能级.而解释能级和光谱,也只能依据已有的物理知识.根据电磁理论,原子的能量包括库仑势能,这一点用电子在核的库仑场中的运动能够解释;至于精细结构能级,只能认为是磁势能,这一点可以用电子轨道运动产生的磁场与自旋运动产生的磁矩之间的相互作用来解释;还有相对论效应,等等.可见,如果不引入角动量,则无法解释磁矩的成因.而电子的磁矩,包括轨道磁矩和自旋磁矩,确实能够从实验上测量到,而且这些磁矩都具有量子化的特征,当然可以由此推断角动量也是量子化的.所以,量子化的角动量,就是核外电子最重要的物理量,也是分析原子能级的基础.

还有一个例子就是电子的波函数.电子具有波粒二象性,在原子物理中,主要还是将其作为粒子来研究的,因为电子所具有的电荷、质量、动量、角动量、磁矩等都是粒子的特征.但是,由于牛顿力学不能用于微观体系中的粒子,所以将电子作为波进行处理,用光学中描述波动的数学表达式来描述电子,这就是电子的波函数.通过求解波函数,就能够了解电子的运动规律.因而,波函数其实就是描述粒子运动特征一种手段.

第四,根据实际情况适当地应用数学知识.

物理学的发展离不开数学,物理问题的解决也要用到数学.原子物理中大量的问题需要求解微分方程,然而,多数情况下并不能得到微分方程严格的解析解,但这并不影响物理问题的解决.事实上,物理上的严格与数学上的严格是不同的,不顾具体的条件一味追求数学上的严格既无必要也无意义.

在用数学方法处理物理问题时,许多情况下只有数值解而没有一般性的解析解,更多的情况是根据具体的条件忽略次要因素、作出必要的近似才能有解的,例如有限深势阱和有限高势垒的问题,以及氢原子精细结构能级的计算,等等.根据实际而作出必要的近似,可以方便地进行计算,而这些计算结果能够与实验结果很好地符合,因而已经足够了.在很多情况下,还要根据估算的结果判断结论的合理性,例如,原子核能放出 $\beta$ 射线,但并不能据此判断核中有电子存在,这是因为 $\beta$ 射线的能量与由不确定关系所估算出的核中电子的能量相去太远.也正是因为如此,要求读者在学习原子物理的过程中熟悉原子半径、光谱线能量、电子磁矩等一些物理量的数值,从而具有良好的物理直觉.也正是基于这种考虑,本书中引用了大量的实验数据,以备查询和参考.

物理学所追求的,永远都是实验上的精确,而不单单是数学上的精确.

以上是作者在学习和讲授原子物理过程中的体会和心得,写出来与读者分享并希望对读者有所裨益.任何一位教师都不能通晓所有的知识,而仅仅是物理学殿

## 第2版序

堂中的一名解说人;任何一本教材都不可能反映一个学科的全貌和最新进展,而仅仅是通向物理学殿堂的一块铺路石。

热爱原子物理的读者,应该更广泛地与同行讨论,更多地涉猎文献。

能使青年学子有点滴心得,是作者编写本书的最大期冀。

崔宏滨

2011年10月21日

于中国科学技术大学

## 第 1 版序

如果将 1895 年伦琴发现 X 射线作为近代物理学开始的标志,那么人类对原子的研究也不过一百多年的历史.但是,在这短短的一百多年中,物理学家不仅揭开了原子和其他许多“基本”粒子的神秘面纱,而且成功地将原子研究的成果服务于人类的各项活动,并对社会的生产方式、人们的日常生活以及世界的结构和秩序产生了巨大的影响.正像牛顿力学的建立直接引发了始于英国的工业革命一样,以原子物理学及直接建立在原子物理基础之上的量子力学为核心的近代物理学(另一个同样重要的核心是相对论)也给人类社会带来了一场深刻的革命,这场革命贯穿整个 20 世纪,具有象征意义的事件就是核能的开发,激光的出现,微电子、光电元器件的大规模应用以及对宇宙起源的科学探索.

物理学是一门实验科学,原子物理学尤其如此,因为这门学科的研究对象是微观世界,而微观世界的规律往往是与生活在宏观时空中的人们的日常经验相左的.所以,如果离开严密精确的实验,原子物理学就失去了存在和发展的基础.正是基于这一认识,本书始终以实验事实以及对实验分析所得到的结论为出发点,力求为读者提供一份翔实可靠而又合乎物理学逻辑的教学参考资料.

本书第 1 章介绍了汤姆孙发现电子的实验以及卢瑟福确立原子结构模型的  $\alpha$  粒子散射实验.第 2 章中,首先分析了光谱学实验的结果以及这些结果与经典物理学理论体系的矛盾.正是为了解决这些经典物理学的困难,玻尔建立了量子化的原子模型.本章还通过多个实验说明了玻尔模型在许多方面所获得的巨大成功.第 3 章开始介绍量子力学的基础知识,通过对多个实验事实的仔细描述和分析,向读者展示了光的粒子性和电子(包括分子)的波动性,引入了德布罗意物质波的思想,并特别强调了“波粒二象性是量子力学的基础”这一重要观点.从波粒二象性出发,自然地得到了不确定关系、态叠加原理以及波函数的统计解释等这些量子力学中最基本的原则,随后介绍了薛定谔方程和不同表象下的力学量算符,并利用该方程计算了几个一维情况下微观体系的波函数和本征值,特别对单个电子在有心力场(库仑势)中的波函数以及电子角动量的本征值做了详细的分析与合理的解释,为之后利用这些理论研究原子的状态做了充分的准备.第 4 章至第 7 章是本书的核心部分,分别介绍了单电子原子、多电子原子、磁场中的原子以及分子的能级和光谱,其

中充分地利用了第3章中已经介绍过的量子力学的知识,结合对各种原子光谱的实验研究结果,通过对电子角动量和磁矩的讨论,逐步引入了分析各种不同类型、不同外界条件下(主要是外磁场)原子状态的方法,以及建立在泡利原理基础上的原子壳层模型和元素的周期律,并对简单分子的能级和光谱做了讨论.第8章介绍了原子核的基本知识,由于对原子核以及基本粒子的研究还在不断地深入和发展,所以本章注重向读者展示核物理的实验研究结果.

分析原子和分子以及原子核的状态,离不开量子力学,因而本书以大量的篇幅和充分的资料介绍了量子力学的基本知识.但是,原子物理学不同于量子力学,前者主要以简单有效的方法处理原子的问题,注重实验事实及其合理的解释,而后者则是力求在原子物理实验的基础上建立完整而严谨的逻辑体系,利用数学工具进行理论分析.编者希望本书能为读者日后学习量子力学打好坚实的基础.

相对于其他经典的物理学分支,原子物理学年轻而充满活力,建立和发展了原子物理学科学家们的事迹,宛如就发生在昨天,读者若对这些事迹知之甚少,则是一大遗憾,所以本书用了不少篇幅介绍了他们所做的工作.

作为一本教材,本书的多数读者是第一次学习原子物理学的本科生,所以,提供严格而准确的资料、导出正确而合理的结论从而使初学者开卷有益,是编者的良好初衷.为了避免以讹传讹的弊病,编者对书中涉及的每一个实验、每一个结论,都查阅了许多参考资料,特别是查阅了大量的当年实验研究和理论分析的原始文献;对于用英语之外的其他文字发表的文献,则尽量阅读对这些文献的英文评论和介绍;对于参考资料中不一致的地方,则尽量分析对比,选择合理的结论.书中许多实验装置图示、实验结果图表,都取自当时的科研论文,并注明了出处,方便读者查阅.这样做的目的,不仅仅是为了资料的严谨,也是希望能为读者养成正确的科研工作态度和方法尽一份责任.

由于阅读了大量的文献,再加上多年在中国科学技术大学的教学经验,书中一些地方采用了编者独创的方法,例如第1章中库仑散射公式的推导、第5章中等效电子原子态的分析方法等,希望对读者有所启发.

面对蓬勃发展、日新月异的原子物理学,编者难窥全豹.本书篇幅有限,虽然尽力,不免疏漏.错误不足之处,恳请读者指出,以期有机会加以改正.

崔宏滨

2008年10月10日

于中国科学技术大学

# 目 录

|                    |         |
|--------------------|---------|
| 第2版序               | ( i )   |
| 第1版序               | ( vii ) |
| 0 绪论               | ( 1 )   |
| 0.1 物质的原子观         | ( 1 )   |
| 0.1.1 古代关于物质结构的观点  | ( 1 )   |
| 0.1.2 近代原子观的建立     | ( 3 )   |
| 0.1.3 原子的质量和体积的估算  | ( 4 )   |
| 0.2 原子是物质结构的一个层次   | ( 6 )   |
| 0.3 原子物理学研究方法      | ( 7 )   |
| 0.4 原子是微观体系        | ( 7 )   |
| 0.5 原子是一种物理模型      | ( 8 )   |
| 1 原子的核式结构——卢瑟福模型   | ( 9 )   |
| 1.1 原子时代的序曲        | ( 9 )   |
| 1.2 原子的结构          | ( 10 )  |
| 1.2.1 电子的发现        | ( 10 )  |
| 1.2.2 汤姆孙的原子模型     | ( 16 )  |
| 1.3 卢瑟福原子模型        | ( 20 )  |
| 1.3.1 卢瑟福的原子核式结构模型 | ( 20 )  |
| 1.3.2 卢瑟福散射公式      | ( 21 )  |
| 习题                 | ( 34 )  |
| 2 氢原子的光谱与能级——玻尔模型  | ( 36 )  |
| 2.1 氢原子的光谱         | ( 36 )  |
| 2.1.1 光谱           | ( 36 )  |
| 2.1.2 氢原子的光谱       | ( 38 )  |

## 目 录

|                               |        |
|-------------------------------|--------|
| 2.2 玻尔的氢原子模型 .....            | ( 42 ) |
| 2.2.1 经典理论解释氢原子光谱的困难 .....    | ( 42 ) |
| 2.2.2 玻尔的氢原子模型 .....          | ( 43 ) |
| 2.2.3 氢的里德伯常数实验值与理论值的偏差 ..... | ( 49 ) |
| 2.2.4 氢原子的连续谱 .....           | ( 50 ) |
| 2.3 类氢离子的光谱 .....             | ( 51 ) |
| 2.3.1 类氢离子与皮克林线系 .....        | ( 51 ) |
| 2.3.2 氦的发现 .....              | ( 53 ) |
| 2.4 弗兰克-赫兹实验 .....            | ( 54 ) |
| 2.4.1 基本思想 .....              | ( 54 ) |
| 2.4.2 弗兰克-赫兹实验装置与实验结果 .....   | ( 55 ) |
| 2.4.3 改进的弗兰克-赫兹实验装置 .....     | ( 56 ) |
| 2.4.4 阴极射线激发光源 .....          | ( 58 ) |
| 2.5 玻尔理论的推广 .....             | ( 59 ) |
| 2.5.1 量子化通则 .....             | ( 59 ) |
| 2.5.2 椭圆轨道 .....              | ( 60 ) |
| 2.5.3 系统的能量 .....             | ( 64 ) |
| 2.5.4 玻尔理论的相对论修正 .....        | ( 65 ) |
| 2.6 施特恩-格拉赫实验与空间量子化 .....     | ( 68 ) |
| 2.6.1 电子轨道运动的磁矩 .....         | ( 68 ) |
| 2.6.2 外磁场对原子的作用 .....         | ( 69 ) |
| 2.6.3 施特恩-格拉赫实验 .....         | ( 70 ) |
| 2.6.4 轨道取向的量子化 .....          | ( 73 ) |
| 习题 .....                      | ( 74 ) |
| 3 量子力学引论——微观体系的基本理论 .....     | ( 77 ) |
| 3.1 量子论的实验依据 .....            | ( 79 ) |
| 3.1.1 黑体辐射 .....              | ( 79 ) |
| 3.1.2 光量子假说 .....             | ( 86 ) |
| 3.1.3 粒子的波动性 .....            | ( 92 ) |
| 3.2 物质的波粒二象性 .....            | ( 98 ) |

|                               |        |
|-------------------------------|--------|
| 3.2.1 物质的波动性与粒子性 .....        | ( 98 ) |
| 3.2.2 量子态——波粒二象性的必然结果 .....   | (100)  |
| 3.3 不确定关系 .....               | (102)  |
| 3.3.1 几个典型的例子 .....           | (102)  |
| 3.3.2 不确定关系的严格表述 .....        | (104)  |
| 3.4 波函数与薛定谔方程 .....           | (109)  |
| 3.4.1 波粒二象性的数学描述 .....        | (110)  |
| 3.4.2 电子的双缝干涉实验 .....         | (110)  |
| 3.4.3 波函数的统计解释 .....          | (114)  |
| 3.4.4 薛定谔方程 .....             | (115)  |
| 3.4.5 力学量的算符 .....            | (118)  |
| 3.4.6 表象与力学量的平均值 .....        | (119)  |
| 3.4.7 本征函数与本征值 .....          | (122)  |
| 3.5 态叠加原理 .....               | (123)  |
| 3.5.1 对双缝干涉实验的另一个思考 .....     | (123)  |
| 3.5.2 光的偏振性实验 .....           | (125)  |
| 3.5.3 量子态的叠加 .....            | (126)  |
| 3.6 定态薛定谔方程问题 .....           | (129)  |
| 3.6.1 一维简谐振子 .....            | (129)  |
| 3.6.2 一维无限深势阱 .....           | (131)  |
| 3.6.3 有限深方势阱 .....            | (134)  |
| 3.6.4 方势垒 .....               | (136)  |
| 3.6.5 扫描隧道显微镜与原子力显微镜 .....    | (141)  |
| 3.7 单电子原子的波函数 .....           | (145)  |
| 3.7.1 哈密顿方程及其本征函数的解 .....     | (145)  |
| 3.7.2 解的物理意义 .....            | (149)  |
| 3.7.3 能量和角动量 .....            | (160)  |
| 3.7.4 波函数的宇称 .....            | (162)  |
| 习题 .....                      | (163)  |
| 4 单电子原子的能级和光谱——电子的角动量模型 ..... | (167)  |

## 目 录

|                                |              |
|--------------------------------|--------------|
| 4.1 单电子原子的光谱 .....             | (167)        |
| 4.1.1 单电子原子 .....              | (167)        |
| 4.1.2 碱金属原子的光谱与能级 .....        | (169)        |
| 4.1.3 碱金属原子光谱与能级的精细结构 .....    | (173)        |
| 4.2 电子的角动量与电子的自旋 .....         | (174)        |
| 4.2.1 电子轨道运动的角动量与原子的磁矩 .....   | (174)        |
| 4.2.2 自旋的引入 .....              | (175)        |
| 4.3 自旋-轨道相互作用 .....            | (177)        |
| 4.3.1 电子轨道运动的磁场 .....          | (177)        |
| 4.3.2 电子的总角动量 .....            | (179)        |
| 4.3.3 自旋-轨道相互作用对能级的影响 .....    | (181)        |
| 4.3.4 原子态的符号表示 .....           | (184)        |
| 4.4 单电子跃迁的选择定则 .....           | (186)        |
| 4.5 氢原子光谱的精细结构 .....           | (187)        |
| 4.5.1 对玻尔能级的相对论和量子力学修正 .....   | (187)        |
| 4.5.2 兰姆移位 .....               | (194)        |
| 4.6 原子的超精细结构能级 .....           | (197)        |
| 4.6.1 原子核的角动量与磁矩 .....         | (197)        |
| 4.6.2 核磁矩与电子磁场的相互作用 .....      | (198)        |
| 4.6.3 原子能级的超精细结构分裂 .....       | (199)        |
| 4.7 斯塔克效应 .....                | (200)        |
| 4.7.1 外电场对原子能级和光谱的影响 .....     | (200)        |
| 4.6.2 斯塔克效应的物理机制 .....         | (201)        |
| 习题 .....                       | (202)        |
| <b>5 多电子原子——电子间的相互作用 .....</b> | <b>(205)</b> |
| 5.1 氦原子的光谱与能级 .....            | (205)        |
| 5.1.1 氦原子 .....                | (205)        |
| 5.1.2 价电子间的相互作用 .....          | (207)        |
| 5.2 两个价电子的耦合 .....             | (211)        |
| 5.2.1 中心力场近似下的角动量 .....        | (211)        |

|                         |              |
|-------------------------|--------------|
| 5.2.2 价电子角动量的耦合 .....   | (213)        |
| 5.3 泡利不相容原理 .....       | (231)        |
| 5.3.1 全同粒子与交换对称性 .....  | (231)        |
| 5.3.2 泡利原理 .....        | (232)        |
| 5.3.3 两电子体系中电子的自旋 ..... | (233)        |
| 5.3.4 原子可能的状态 .....     | (235)        |
| 5.4 等效电子构成的原子态 .....    | (237)        |
| 5.5 复杂原子的能级和光谱 .....    | (243)        |
| 5.5.1 实验观察到的一般规律 .....  | (243)        |
| 5.5.2 多个价电子形成的原子态 ..... | (244)        |
| 5.5.3 辐射跃迁的选择定则 .....   | (249)        |
| 5.6 原子的壳层结构 .....       | (253)        |
| 5.6.1 元素的周期律 .....      | (253)        |
| 5.6.2 核外电子的壳层 .....     | (256)        |
| 5.6.3 基态原子的电子组态 .....   | (257)        |
| 5.6.4 原子的基态 .....       | (264)        |
| 5.7 激光增益介质中的能级 .....    | (268)        |
| 5.7.1 氩离子激光 .....       | (269)        |
| 5.7.2 氦氖激光 .....        | (272)        |
| 5.7.3 氦镉激光 .....        | (273)        |
| 5.8 X射线 .....           | (276)        |
| 5.8.1 X射线的产生及其性质 .....  | (276)        |
| 5.8.2 X射线的连续谱 .....     | (280)        |
| 5.8.3 X射线的标识谱 .....     | (280)        |
| 5.7.4 X射线的吸收 .....      | (289)        |
| 5.8.5 X射线医学成像 .....     | (292)        |
| 习题 .....                | (293)        |
| <b>6 磁场中的原子 .....</b>   | <b>(297)</b> |
| 6.1 原子的磁矩 .....         | (297)        |
| 6.1.1 原子的有效总磁矩 .....    | (297)        |

## 目 录

|                            |              |
|----------------------------|--------------|
| 6.1.2 朗德 $g$ 因子 .....      | (299)        |
| 6.2 外磁场中的原子 .....          | (302)        |
| 6.2.1 外磁场对原子的作用 .....      | (302)        |
| 6.2.2 外磁场中原子能级的分裂 .....    | (303)        |
| 6.2.3 对施特恩-格拉赫实验的解释 .....  | (304)        |
| 6.2.4 顺磁共振 .....           | (304)        |
| 6.2.5 核磁共振 .....           | (307)        |
| 6.2.6 分子束磁共振实验 .....       | (309)        |
| 6.3 塞曼效应 .....             | (310)        |
| 6.3.1 现象 .....             | (310)        |
| 6.3.2 解释 .....             | (312)        |
| 6.3.3 兰姆移位的实验测量 .....      | (316)        |
| 6.4 帕邢-巴克效应 .....          | (318)        |
| 6.4.1 强磁场中的原子 .....        | (318)        |
| 6.4.2 强磁场中能级的分裂与辐射跃迁 ..... | (319)        |
| 习题 .....                   | (320)        |
| <b>7 分子的结构和光谱 .....</b>    | <b>(323)</b> |
| 7.1 原子间的键联与分子的形成 .....     | (323)        |
| 7.1.1 原子的电离能与亲和势 .....     | (323)        |
| 7.1.2 离子键 .....            | (327)        |
| 7.1.3 共价键 .....            | (330)        |
| 7.1.4 金属键 .....            | (333)        |
| 7.1.5 范德瓦耳斯键 .....         | (334)        |
| 7.2 分子的能级与光谱概述 .....       | (334)        |
| 7.3 双原子分子的电子态 .....        | (335)        |
| 7.4 双原子分子的振动光谱 .....       | (338)        |
| 7.4.1 双原子分子的振动能级 .....     | (338)        |
| 7.4.2 双原子分子的振动光谱 .....     | (340)        |
| 7.5 双原子分子的转动光谱 .....       | (342)        |
| 7.5.1 双原子分子的转动能级 .....     | (342)        |