面向21世纪课程教材

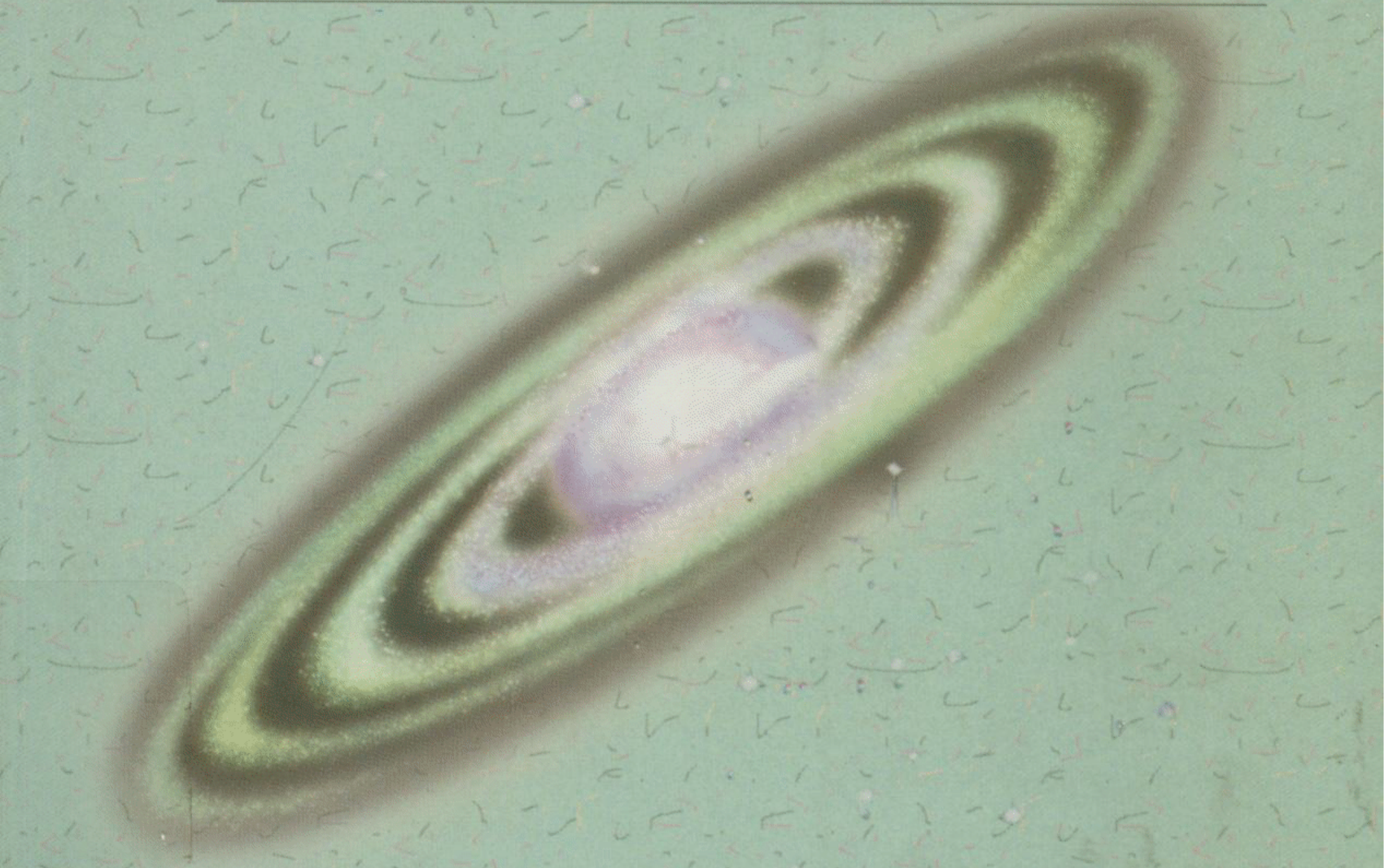
面向21世纪课程教材

基/础/物/理/教/程

YUAN ZI WU LI

原子物理

郑乐民 编



北京大学出版社

PEKING UNIVERSITY PRESS

需要全本请访问 www.ertongbook.com

面向21世纪课程教材

基础物理教程

原子物理

郑乐民 编

北京大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

原子物理/郑乐民编. —北京：北京大学出版社，2000
面向21世纪课程教材·基础物理教程
ISBN 7-301-04583-2

Ⅰ. 原… Ⅱ. 郑… Ⅲ. 原子物理-教材 Ⅳ. 056

中国版本图书馆CIP数据核字(2000)第65859号

书　　名：原子物理
著作责任者：郑乐民
责任编辑：李采华
标准书号：ISBN 7-301-04583-2/O·0471
出 版 者：北京大学出版社
地　　址：北京市海淀区中关村北京大学校内　100871
网　　址：http://cbs.pku.edu.cn/cbs.htm
电　　话：出版部 62752015　发行部 62754140　编辑室 62752021
电子信箱：zpup@pup.pku.edu.cn
排 版 者：北京因温特有限公司
印 刷 者：北京大学印刷厂印刷
发 行 者：北京大学出版社
经 销 者：新华书店
787×1092　18开本　14.375印张　250千字
2000年9月第一版　2000年9月第一次印刷
印　　数：0001—3000册
定　　价：21.00元

内 容 提 要

本书是《基础物理教程》丛书的第五卷，该教程丛书为教育部批准的面向21世纪课程教材.

本书主要含原子物理及分子物理部分.与传统内容相比，重点增加了与“辐射场与原子的共振相互作用”有关的内容.第一章介绍量子力学以前的原子物理学，增加了关于谱线的定量描述及对二能级间跃迁问题的讨论.第二章为量子力学初步.第三、四章分别介绍碱金属原子、复杂原子的结构和光谱.第五章讨论磁场中的原子，较深入地介绍了磁共振.第六章讨论辐射场与原子的共振相互作用，给出了经典理论(含量子力学修正)，阐明了共振吸收与色散过程.在此基础上，分析了量子放大与振荡(含激光原理)，以及共振辐射场对原子的机械力作用.第七章为分子结构与光谱.作为附篇，第八章给出了关于固体物理的一些知识.

除正文外，书中有内容较为广泛的附录，以及思考题和习题，读者从中可以更多地了解原子物理的最新发展，体会到综合运用基础物理知识、联系实际、思索问题和解决问题的乐趣.

本书可作为综合大学理工科的基础物理教材，也可以作为其他高等院校和中学物理教师的教学或自学参考读物.

《基础物理教程》总序

物理学是其他各自然学科和技术学科的基础，在过去几十年中物理学日益成为新技术的一个重要的支柱，因而《基础物理》已成为大学理、工、农、医各专业重要的基础课，而且各国的高等学校都为改进物理教学作了长期的探索. 新技术的飞速发展，要求学生较全面地掌握物理学的基本知识，并在思维方法方面得到锻炼，从而能适应他们一生在事业中将遇到的不断变化和发展的情况. 然而，要把近代物理学的成就和应用，组织成基础课的教学体系，并不单纯是材料的取舍和拼接，而是一个知识再加工的研究课题，需要经过长期持之以恒的研究和实践，才可能逐步有所改进. 课程改革是一个永无止境的难题.

在写这套书时，我们着重考虑了以下三个问题：

1. 按基本原理组织内容，适当调整某些素材的区划范围

对于教学改革的一个共识是如何精选内容，使教材不至过分庞杂. 经过考虑，我们认为宜以物理学的基本概念与基本规律为主题，并应联系现代的应用实例. 由于物理学的基本规律具有普遍性，所以在论述上和素材的选取上与传统的区划范围可以有所不同. 例如，在力学中可以涉及洛伦兹力；在分子运动论中可以讨论带电粒子的随机运动. 这样做有助于阐明基本规律的意义，并使线索更加明晰.

2. 注重论述的科学性并加强思维能力训练

对于物理课程改革的另一个共识，就是应提高学生的理解能力和理论联系实际的能力. 这是又一个难题. 我们认为在过去的教材中，某些命题的论述欠深入；对实际应用的介绍未能着重于体现基本原理，而是较多地描述具体的技术过程；习题偏重于“代公式型”或“技巧型”. 这些急于求成的做法，往往使学生不自觉地养成注重记忆结论、但是忽视理解和思考的习惯. 在这套书中，我们力图使论述比较深入，体现物理学的思辨，用基本原理来概括各种可能的应用. 我们认为习题是课程教学的一个重要环节，习题能引导学生运用基本原理分析和解决实际问题. 这套书中除习题外，每一章还编入能引导学生深入思考的思考题.

习题和思考题数量较多，不可能要求学生全做. 有些习题涉及较深入的课题，可作为课堂讨论或课外研究的命题. 学生即使不做，只要看一遍

需要全本请访问 www.ertongbook.com

并略加思索，作为自我检查的“镜子”也是有益的.

3.《基础物理》是供学生反复阅读的书

物理课的教学环节，包括讲授、实验、自习、习题、复习考试等. 许多教学组织者，常希望教师能把学生“讲明白”，但往往是事与愿违. 困难在于任何课程和教材，都只能按“直线式”的顺序来安排内容. 但在一门课中介绍的概念或规律，又必须综合其他课程的内容才能理解. 真正的理解和消化有赖于学生的反复钻研. 我们不希望这套书，是一套学生在考试后可永不再翻阅的书. 因此，书中的材料可能比授课时的教学要求高一些，有些论点也比教学基本要求深入一些. 总之，对大学的主要课程，学生不能只学教师的讲稿内容，也不宜只看一本教材. 学生应通过对几本教材的比较，通过自己的研究，才能做到逐步消化和理解.

本书是参照理工科大学的教学基本要求编写的，但又不局限于此. 希望对学生的钻研和进取，有一定的引导作用. 为了便于使用，本书将有关内容分为若干层次. 打“*”号的章节可有选择地讲授或不讲；有些为扩展知识面的或常识性的材料则写在附录中.

《基础物理教程》包括《力学》、《电磁学》、《光学》、《热学》、《原子物理》五本书. 本书所需的数学知识是矢量代数、空间解析几何及简单的微积分运算，这些都是中学毕业生可以掌握的知识. 鉴于当前一些中学的教学受“应试教育”的影响，不少中学生未能系统地掌握应具备的知识，尤其缺乏思辨能力和通过自学进取的意识. 为弥补中学生数学知识的不足，作者还编写了《基础物理中的数学方法》，这本书可作为大学一年级学生的参考书.

《基础物理教程》是作者长期从事教学研究和实践的总结，也是一次教学改革的试验. 作者欢迎广大教师和读者提出自己的见解、指出本书的缺点和错误，以期进一步改进.

王 楚

序

本书是作为信息与电子科学类专业及应用物理专业基础物理课程的教材而编写的，包含原子物理学和分子物理学部分，亦可作为其他专业基础物理课中“原子物理”部分的教学参考书.

本书在内容更新方面，主要是增加了与“场与原子共振相互作用”有关的材料. 场与原子共振相互作用本是原子物理学不可分割的一部分，而近几十年来，原子物理学(及与其密切有关的学科)有了很大的发展，其中突出的，如量子放大与振荡(含激光)、磁共振、非线性光学等等，都充分反映了场与原子共振相互作用的丰富内容. 编者认为，这些内容，应该成为原子物理课程的有机组成部分，而不仅限于随手举例而已. 再者，原子物理学早已走出象牙之塔，日益掺入到各个学科以至技术部门中去，产生了巨大的影响. 其中，与信息及电子科学类专业密切有关的，有光通信、纳米电子学、计量技术、医学电子学等等. 电子器件向原子尺度方向发展，更是本世纪科技发展的方向之一. 传统的以原子结构为中心的课程内容，看来难以充分反映这种状况. 因此，本书在重视原子物理学作为近代物理的导引课程这一重要特点的同时，做了将场与原子共振相互作用问题“普通化”的努力. 编者认为，应用经典模型，并加上必要的量子力学修正，可以在普通物理框架内，较为系统地介绍有关问题. 某些较为深入的理论问题、物理现象或重大应用问题的原理，则放在附录中.

由于本书内容偏多，在进行教学时，可以有所选择. 作为最基本的要求，可以选第一至第四章的主要内容进行教学. 其次，可增加第五、七两章中若干内容. 有关场与原子共振相互作用的材料，虽散见于各章. 但集中反映在第六章中，建议学习之. 编者以为，不论教师是否系统地讲授，学生能认真地读一遍也是有益的.

大学生需要生动活泼地学习，本书为此提供了一些条件. 书中的思考题，内容较为广泛，涉及新的原子物理实验方法，以及多种应用的可能性. 编者建议，教师不必拘泥于讲授的内容，而可主动向学生介绍正文、思考题、附录中一些感兴趣的问题，而学生更不妨主动地去翻阅. 有些思考题可能不好问答，存疑亦可. 读者可能会发现，这有利于了解新动态、思考新问题，有助于开动脑筋，增加兴趣，而不致于把原子物理看成是一大堆难

以记忆的公式的堆积.

此外,作为附篇,本书列入了"固体物理学的一些知识"一章,含固体结构、晶格振动、固体能带结构、半导体等节,其目的在于使后续课中不设置固体物理学或固体电子学课的时候,在此可以得到一些初步的理论知识.

本教材不含原子核物理及粒子物理部分.如有教学需要,请选用其他教材.

本教材曾先后多次在北京大学电子信息科学与技术专业及微电子学专业试用,经过几次修改.其间,编者曾请教过多位专家教授,并得到了他们的宝贵的意见,特在此致谢.他们是:王国文、叶佩弦、叶朝辉、许祖华、宋增福、李守中、李师群、尚仁成、高政祥、曾谨言、韩汝琦等诸位教授.本丛书主编王楚教授审阅了全稿,并提出了重要的意见.张量博士对全书文字作了修饰,并整理了全部习题,亦在此致谢.

郑乐民

2000.5

目 录

第一章 量子力学以前的原子物理学 …… (1)

§1.1 玻尔理论以前的原子物理学 …… (1)

1.1.1 原子结构的模型 …… (1)

1.1.2 原子光谱的一些经验规律 …… (3)

1.1.3 普朗克的量子假设 …… (4)

§1.2 玻尔理论 …… (6)

1.2.1 玻尔理论要点 …… (6)

1.2.2 氢原子能级及光谱 …… (8)

1.2.3 氢公式的其他应用 …… (10)

§1.3 弗兰克-赫兹实验 …… (11)

§1.4 玻尔理论的推广和意义 …… (13)

1.4.1 玻尔理论的推广 …… (13)

1.4.2 玻尔理论的意义 …… (14)

§1.5 关于光谱产生的机制 …… (15)

1.5.1 谱线的表征 …… (16)

1.5.2 产生谱线的过程——经典理论 …… (18)

1.5.3 产生光谱的过程——爱因斯坦理论 …… (20)

1.5.4 二能级间光的吸收与发射 …… (23)

*1.5.5 碰撞与弛豫 …… (25)

附录A 关于黑体辐射 …… (27)

附录B 关于爱因斯坦系数 …… (28)

思考题 …… (29)

习 题 …… (30)

第二章 量子力学初步 …… (32)

§2.1 物质的二象性、概率波与量子态 …… (32)

2.1.1 德布罗意波假设 …… (32)

2.1.2 德布罗意波的实验验证及物理诠释 …… (34)

2.1.3 不确定性原理 …… (35)

2.1.4 波函数与量子态 …… (37)

2.1.5 态叠加原理 …… (38)
§2.2 薛定谔方程 …… (39)
2.2.1 薛定谔方程的引进 …… (39)
2.2.2 一维无限高势垒(无限深势阱)中的粒子 …… (41)
2.2.3 势垒贯穿 …… (43)
2.2.4 简谐振子 …… (45)
§2.3 量子力学中的一些理论和方法 …… (46)
2.3.1 平均值及算符的引进 …… (46)
2.3.2 本征值和本征函数 …… (48)
2.3.3 角动量 …… (49)
2.3.4 全同粒子 …… (50)
§2.4 用薛定谔方程解氢原子问题 …… (52)
2.4.1 氢原子的能量本征值与本征函数 …… (52)
2.4.2 电子概率分布 …… (54)
2.4.3 宇称 …… (56)
2.4.4 氢原子能级的简并与跃迁 …… (57)
*§2.5 氢原子问题的补充 …… (57)
2.5.1 氢原子的精细结构与狄拉克理论 …… (58)
2.5.2 关于电偶极跃迁及其选择定则 …… (59)
附录C 氢的兰姆移位和超精细结构 …… (62)
思考题 …… (64)
习　题 …… (65)

第三章 碱金属原子结构及光谱 …… (67)

§3.1 碱金属原子光谱与能级 …… (67)
3.1.1 碱金属光谱的经验规律 …… (67)
3.1.2 轨道模型 …… (69)
§3.2 自旋轨道相互作用 …… (71)
3.2.1 电子轨道运动的磁矩 …… (71)
3.2.2 电子自旋与磁矩 …… (72)
3.2.3 自旋轨道相互作用 …… (73)
§3.3 碱金属原子能级和谱线的精细结构 …… (74)
3.3.1 原子的总角动量 …… (74)
3.3.2 自旋轨道相互作用能 …… (75)
3.3.3 精细结构分裂 …… (76)
*3.3.4 谱线强度问题 …… (78)

§3.4 碱金属原子能级的超精细结构和同位素移位 …… (79)
3.4.1 超精细结构 …… (79)
3.4.2 同位素移位 …… (82)
思考题 …… (83)
习 题 …… (84)

第四章 复杂原子的能级结构和光谱 …… (86)

§4.1 原子的壳层结构 …… (86)
4.1.1 有心力场近似 …… (86)
4.1.2 泡利原理与壳层结构 …… (87)
4.1.3 价电子能级结构的确定 …… (88)
§4.2 两个价电子的原子结构和光谱 …… (89)
4.2.1 1s*nl* 组态 *LS* 耦合的能级 …… (89)
4.2.2 氦原子能级 …… (91)
4.2.3 两个价电子 *jj* 耦合的能级 …… (93)
4.2.4 钙原子能级 …… (94)
§4.3 复杂原子能级结构的一般规律 …… (95)
§4.4 原子的电离能级和X射线谱 …… (98)
4.4.1 原子的X射线能级 …… (98)
4.4.2 原子的X射线吸收谱 …… (99)
4.4.3 原子的X射线发射谱 …… (100)
*§4.5 原子的光电子能谱和俄歇电子能谱 …… (102)
附录D 等效电子组成的 *LS* 耦合能态 …… (104)
附录E 关于X射线的若干知识 …… (105)
思考题 …… (111)
习 题 …… (111)

第五章 磁场中的原子 …… (113)

§5.1 原子的磁性 …… (113)
5.1.1 原子的磁矩 …… (113)
5.1.2 磁场中的原子磁矩 …… (115)
5.1.3 原子蒸气的宏观磁性 …… (117)
§5.2 原子光谱的塞曼效应 …… (119)
5.2.1 正常塞曼效应 …… (119)
5.2.2 反常塞曼效应 …… (121)
5.2.3 强磁场的作用 …… (121)

需要全本请访问 www.ertongbook.com

5.2.4 有超精细结构时的塞曼能级分裂 …… (123)
§5.3 磁共振 …… (124)
5.3.1 选择定则和偏振 …… (124)
5.3.2 施特恩-盖拉赫实验 …… (125)
5.3.3 原子(分子)束磁共振 …… (126)
5.3.4 核磁共振 …… (127)
*5.3.5 光磁双共振 …… (130)
附录F 关于原子在外场中的行为 …… (131)
附录G 原子(分子)频率标准 …… (134)
附录H 关于核磁共振 …… (137)
思考题 …… (140)
习 题 …… (142)

第六章 辐射场与原子的共振相互作用 …… (144)

§6.1 经典理论 …… (144)
6.1.1 原子的自发发射 …… (144)
6.1.2 原子的受迫振动 …… (146)
6.1.3 吸收与色散 …… (148)
6.1.4 量子力学的修正和补充 …… (149)
6.1.5 关于磁共振 …… (150)
§6.2 线形与线宽 …… (150)
6.2.1 均匀增宽 …… (151)
6.2.2 非均匀增宽——多普勒增宽 …… (152)
§6.3 原子的微波激射 …… (155)
6.3.1 微波激射器 …… (155)
6.3.2 谐振腔与量子振荡 …… (156)
§6.4 激光 …… (159)
6.4.1 激光的产生 …… (159)
6.4.2 激光的一些性质 …… (160)
6.4.3 以原子为激活介质的激光器 …… (161)
*§6.5 共振场对原子的机械力作用 …… (164)
附录I 关于核磁共振的经典理论 …… (167)
附录J 消多普勒谱 …… (172)
思考题 …… (175)
习 题 …… (176)

第七章 分子结构与光谱 …… (178)

§7.1 分子的形成 …… (178)

7.1.1 玻恩-奥本海默近似 …… (178)

7.1.2 氢分子离子 H_2^+、电子能态、振动势能和分子的形成 …… (179)

7.1.3 氢分子、双电子共价键 …… (180)

7.1.4 离子键 …… (181)

§7.2 分子的能级与光谱 …… (182)

7.2.1 二原子分子的转动能级与纯转动谱 …… (182)

7.2.2 二原子分子的振动和振转谱 …… (184)

7.2.3 多原子分子的振动谱 …… (186)

7.2.4 分子的电子能态与电子带系光谱 …… (187)

§7.3 拉曼散射和非线性光学效应 …… (189)

7.3.1 拉曼散射与分子的拉曼光谱 …… (189)

7.3.2 非线性光谱 …… (191)

思考题 …… (193)

习 题 …… (194)

第八章 附篇——固体物理的一些知识 …… (196)

§8.1 固体结构 …… (196)

8.1.1 晶体与非晶体 …… (196)

8.1.2 晶体的结合 …… (197)

§8.2 晶格振动 …… (199)

8.2.1 一维单原子链 …… (199)

8.2.2 一维双原子链 …… (200)

8.2.3 三维晶格的振动、声子 …… (201)

§8.3 晶体的能带结构 …… (201)

8.3.1 晶体的能带结构 …… (202)

8.3.2 导体与非导体 …… (203)

8.3.3 金属中的电子 …… (204)

§8.4 半导体 …… (207)

8.4.1 本征半导体与掺杂半导体 …… (207)

8.4.2 pn 结 …… (209)

8.4.3 半导体的光-电子学效应 …… (210)

附表一 原子的电子组态、基态及电离能 …… (212)

附表二　基本常数 …… (215)
附表三　能量值转换因子 …… (215)

第一章 量子力学以前的原子物理学

§1.1 玻尔理论以前的原子物理学

1.1.1 原子结构的模型

"原子"作为物质组成基本单元的概念,在古代仅是一种假说.到了19世纪,人们对原子已有了相当的了解.由气体动理论可知,1 mol 原子物质含有的原子数是阿伏伽德罗数 N_A.因此,由相对原子质量就可以求出每个原子的质量.最轻的原子——氢原子的质量约为 1.67×10^{-27} kg.原子的大小也可以从气体动理论估计出来,其半径是 0.1 nm 量级.1869年,门捷列夫(Mendeleev)发现元素周期律,它系统地总结了元素的物理、化学性质,对于人们认识原子有极其重要的意义.

以上所说,都属于原子的外部特性.更深一个层次的问题是,它为什么会有这样一些性质?原子的内部结构是怎样的?

在19世纪中,从溶液导电(电解)和气体放电现象中,人们得知原子可以带有正或负电荷而形成离子.对于"电"的本质的认识的追求,延续了相当长的时间.到了19世纪末、20世纪初,两个著名的实验确认了电子的存在,由实验结果得知电子的一些基本性质.第一个是1897年汤姆孙(J. J. Thomson)阴极射线实验.他指出,阴极射线就是电子流,实验测量出了电子的荷质比 e/m.第二个是1910年的密立根(R. A. Millikan)油滴实验.由实验求得电子电荷的值 $e\approx1.6\times10^{-19}$ C,再由 e/m 之值求得电子质量 $m\approx9.11\times10^{-31}$ kg.

由此可以推断,原子中包含有电子成分.由于电子的质量仅是原子质量的 $10^{-3}\sim10^{-5}$,且带负电荷,所以中性原子中存在着质量占原子的极大部分、且带有等量正电荷的成分.中性原子如失去电子,即成正离子;如获得额外电子,即成负离子.

现在,核心问题就是,带正电荷的成分究竟是什么?两种成分是如何组成原子的?

汤姆孙曾提出过一个模型.他设想带正电荷部分是一个原子那样大的球体,正电荷均匀分布于球体中,而电子则嵌在其中.这个模型为后来

的实验事实所否定.

1911 年,卢瑟福(E. Rutherford)提出了原子结构的核式模型. 通过对 α 粒子被原子散射的实验结果的分析,他认为,一个原子序数为 Z 的原子,它的带正电荷 Ze 的部分,集中于半径小于 10^{-14} m 的原子核内. 原子核的质量占原子质量的绝大部分,而其半径仅为原子半径的 10^{-4} 量级. Z 个电子则分布于核外,以库仑力与核相联系,并绕核运动,如同行星绕太阳转动似的. 用这个模型来计算 α 粒子被原子散射的结果,理论与实验完全一致.

下面我们定性地分析一下两种模型中 α 粒子被原子散射后运动方向改变的情况. α 粒子是带两个 e 电量的正电荷的氦原子核,当它与原子碰撞时,原子中的电子,由于质量仅为 α 粒子的 1/8000左右,对 α 粒子的运动方向的影响可以忽略不计. 原子中带正电部分的作用,对两种模型是很不相同的. 图 1.1(a)是汤姆孙模型,正电荷分布在半径约 10^{-10} m 的球体内,设此半径为 R;(b)是卢瑟福模型,正电荷分布在半径约 10^{-14} m 的核内. 两者质量完全相同. 当 α 粒子接近原子时,如距原子中心的距离 $r \geqslant R$,则它受到的原子中正电荷的斥力,对两种模型而言是相同的. 但当 $r < R$ 时,情况完全不同. 在(a)中,α 粒子受力随 r 的减小而线性地趋于零,原子很容易穿越这种原子. 总起来讲,α 粒子被原子散射而偏转的角度总是非常小的. 在(b)中则不然,α 粒子受力随 r 的减小,按二次方反比规律急剧增大. α 粒子的偏转角可能很大;而当"对头"碰撞时,α 粒子可能折回(偏转 180°),这在(a)中根本不可能出现. 理论计算表明,α 粒子偏转角在 $\theta, \theta+\mathrm{d}\theta$ 范围内的概率正比于 $\mathrm{ctg}^4(\theta/2)$,实验结果与此相符. 在实验中,曾观察到粒子折回($\theta \approx 180°$)的概率达 10^{-4} 量级. 简言之,核式模型得到了实验的有力支持.

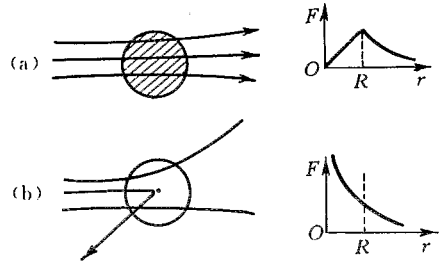


图 1.1　两种模型中 α 粒子受力比较

但是,从经典理论看,原子的核式模型有内在的不可克服的矛盾. 由电学得知,具有加速度的带电粒子将发射电磁波. 电子绕原子核转动时,由于发射电磁波而不断损失能量,转动的轨道半径越来越小,最后将落入核内,从而使正负电荷中和,原子崩溃. 理论估算表明,这个时间极短,仅约 10^{-9} s 量级. 这就是说,根本不可能出现稳定的原子,而这与众所周知

需要全本请访问 www.ertongbook.com