



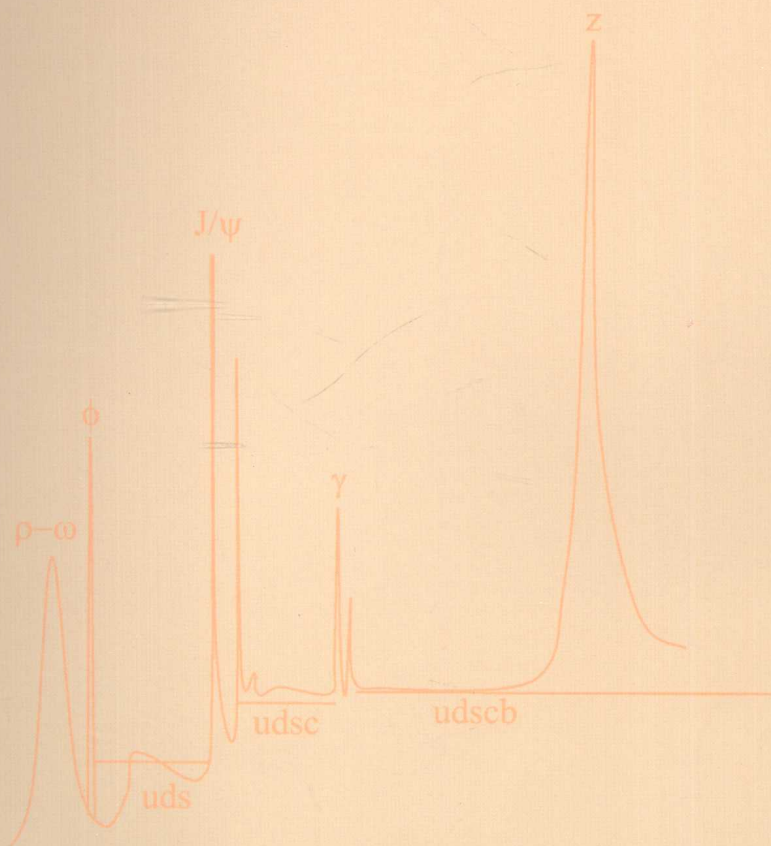
普通高等教育“十一五”国家级规划教材

中国科学技术大学精品教材

近代物理学

第2版

徐克尊 陈向军 陈宏芳 编著



中国科学技术大学出版社

中国科学技术大学精品教材

近代物理学

JINDAI WULIXUE

第2版

徐克尊 陈向军 陈宏芳 编著

中国科学技术大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

近代物理学/徐克尊,陈向军,陈宏芳编著.—2版.—合肥:中国科学技术大学出版社,2008.9

(中国科学技术大学精品教材)

“十一五”国家重点图书

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

ISBN 978-7-312-01883-1

I. 近… II. ①徐… ②陈… ③陈… III. 物理学 IV. O41

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 001541 号

中国科学技术大学出版社出版发行

安徽省合肥市金寨路 96 号,230026

网址 <http://press.ustc.edu.cn>

合肥学苑印务有限公司印刷

全国新华书店经销

开本:710×960 1/16 印张:28.25 插页:2 字数:538 千

1993 年 4 月第 1 版 2008 年 9 月第 2 版 2008 年 9 月第 1 次印刷

印数:1-3000 册

定价:48.00 元

总 序

2008年是中国科学技术大学建校五十周年。为了反映五十年来办学理念 and 特色,集中展示教材建设的成果,学校决定组织编写出版代表中国科学技术大学教学水平的精品教材系列。在各方的共同努力下,共组织选题281种,经过多轮、严格的评审,最后确定50种入选精品教材系列。

1958年学校成立之时,教员大部分都来自中国科学院的各个研究所。作为各个研究所的科研人员,他们到学校后保持了教学的同时又作研究的传统。同时,根据“全院办校,所系结合”的原则,科学院各个研究所在科研第一线工作的杰出科学家也参与学校的教学,为本科生授课,将最新的科研成果融入到教学中。五十年来,外界环境和内在条件都发生了很大变化,但学校以教学为主、教学与科研相结合的方针没有变。正因为坚持了科学与技术相结合、理论与实践相结合、教学与科研相结合的方针,并形成了优良的传统,才培养出了一批又一批高质量的人才。

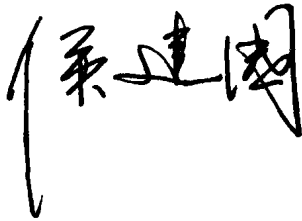
学校非常重视基础课和专业基础课教学的传统,也是她特别成功的原因之一。当今社会,科技发展突飞猛进、科技成果日新月异,没有扎实的基础知识,很难在科学技术研究中作出重大贡献。建校之初,华罗庚、吴有训、严济慈等老一辈科学家、教育家就身体力行,亲自为本科生讲授基础课。他们以渊博的学识、精湛的讲课艺术、高尚的师德,带出一批又一批杰出的年轻教员,培养了一届又一届优秀学生。这次入选校庆精品教材的绝大部分是本科生基础课或专业基础课的教材,其作者大多直接或间接受到过这些老一辈科学家、教育家的教诲和影响,因此在教材中也贯穿着这些先辈的教育教学理念与科学探索精神。

改革开放之初,学校最先选派青年骨干教师赴西方国家交流、学习,他们在带回先进科学技术的同时,也把西方先进的教育理念、教学方法、教学

内容等带回到中国科学技术大学,并以极大的热情进行教学实践,使“科学与技术相结合、理论与实践相结合、教学与科研相结合”的方针得到进一步深化,取得了非常好的效果,培养的学生得到全社会的认可。这些教学改革影响深远,直到今天仍然受到学生的欢迎,并辐射到其他高校。在入选的精品教材中,这种理念与尝试也都有充分的体现。

中国科学技术大学自建校以来就形成的又一传统是根据学生的特点,用创新的精神编写教材。五十年来,进入我校学习的都是基础扎实、学业优秀、求知欲强、勇于探索和追求的学生,针对他们的具体情况编写教材,才能更加有利于培养他们的创新精神。教师们坚持教学与科研的结合,根据自己的科研体会,借鉴目前国外相关专业有关课程的经验,注意理论与实际应用的结合,基础知识与最新发展的结合,课堂教学与课外实践的结合,精心组织材料、认真编写教材,使学生在掌握扎实的理论基础的同时,了解最新的研究方法,掌握实际应用的技术。

这次入选的 50 种精品教材,既是教学一线教师长期教学积累的成果,也是学校五十年教学传统的体现,反映了中国科学技术大学的教学理念、教学特色和教学改革成果。该系列精品教材的出版,既是向学校 50 周年校庆的献礼,也是对那些在学校发展历史中留下宝贵财富的老一代科学家、教育家的最好纪念。



2008 年 8 月

前 言

中国科学技术大学徐克尊、陈宏芳和周子舫教授主编的《近代物理学》已出版了15年,书中存在不少疏忽和不妥,在这15年间原子分子物理、原子核物理和粒子物理也有许多新的进展.本书是在这本书的基础上,根据作者在中国科学技术大学长期讲授“原子物理”课程和20多年进行原子分子物理和粒子物理研究工作的经验和积累,经重新改编而成.

通常,近代物理主要是指19世纪末和20世纪初开始形成的相对论和物质的微观结构理论——原子分子物理、原子核物理、粒子物理和固体物理.在目前的课程体系下,相对论一般已在“力学”课程中讲解,而固体物理在许多学校已被加强成为一门单独的课程,本书只包括原子物理、分子物理、原子核物理和粒子物理内容.

原子物理、分子物理、原子核物理和粒子物理的发展在一开始虽然有先后,但后来可以说是并行的,同时它们又是相互交错和相互促进的.它们展现给人们的是在看不见的微观物质世界中,各种粒子的结构和相互作用动力学的新现象和新理论.毫无疑问,从它们诞生之日起,就一直是处于科学研究的最前沿,这一点可以从绝大多数诺贝尔物理奖获得者都是由于他们在近代物理中的成就予以说明.

近代物理的发展大大推动了科学、技术、医疗和国民经济的迅猛发展.许多学科,例如:天文学、化学、生物学、材料科学等,已经进入了原子分子这个层次;许多部门,例如:农业、医学、地质、冶金、采矿、能源、国防等,已经越来越多地利用了近代物理的概念、方法和技术.当今各个学科的相互交叉和相互渗透已经成为普遍的趋势,相关的学科或专业的学生掌握涉及微观的原子、分子、原子核和基本粒子各层次的基本知识已经成为他们的需求.

在编写本书时,我们试图着重讲解基本的物理现象和实验事实,对物理概念力求解释清楚,避免繁杂的理论推导和计算.为了使近代物理的概念阐述得更清楚和

更正确,我们引进了量子力学的基础内容,把近代物理内容建筑在量子力学概念和方法的基础上,使学生能够在初步量子力学的框架下学习和理解原子物理、分子物理、原子核物理和粒子物理,为后续的量子力学课程树立正确的微观图像.当然作为普通物理学,我们并不要求读者在学习期间能掌握量子力学中很多繁杂的理论计算.书中注意介绍近代物理的发展,包括最近几十年的研究进展和已得到广泛应用的技术和手段,使学生能了解近代物理研究前沿,增加学生学习兴趣,培养学生的科研素质.

陈向军教授写第3、4和5章,陈宏芳教授写第9章,徐克尊教授写其余各章和附录并总串.由于本教材部分内容取材较深、较广,在教学中教师可根据实际情况取舍.其中前四章原子物理是基本内容,各学校可以根据自己的教学要求选修分子物理、原子核物理、粒子与原子相互作用和粒子物理的有关内容.

书中肯定还会存在缺点和不妥之处,敬请读者提出批评和建议,以便再版时改正.

徐克尊 陈向军 陈宏芳

2008年1月1日

目 次

总序	(i)
前言	(iii)
第 1 章 原子模型和单电子原子	(1)
1.1 原子的经典性质和汤姆生原子模型	(1)
1.1.1 原子的经典性质	(1)
1.1.2 光子的粒子特征	(3)
1.1.3 电子的发现	(6)
1.1.4 电子的电荷与大小	(8)
1.1.5 汤姆生原子模型	(11)
1.2 α 粒子散射实验和卢瑟福原子模型	(12)
1.2.1 α 粒子散射实验	(12)
1.2.2 卢瑟福原子模型及散射公式	(14)
1.2.3 卢瑟福散射公式与实验的比较	(17)
1.2.4 截面	(19)
1.3 氢原子光谱和玻尔原子模型	(21)
1.3.1 氢原子光谱和光谱项	(22)
1.3.2 玻尔原子模型	(23)
1.3.3 能级图	(26)
1.3.4 能级和原子光谱	(29)
1.4 类氢离子光谱和原子的激发实验	(32)
1.4.1 类氢离子光谱	(32)
1.4.2 原子核质量的影响	(33)
1.4.3 激发电势的测量	(35)

1.5 特殊的氢原子体系	(37)
1.5.1 里德伯态	(37)
1.5.2 奇特原子	(39)
1.5.3 粒子素和反氢原子	(43)
习题	(44)
第2章 量子力学初步	(47)
2.1 波粒二象性	(48)
2.1.1 单光子的粒子性	(48)
2.1.2 单光子的波动性	(49)
2.1.3 德布罗意波	(51)
2.1.4 电子的晶体衍射实验	(52)
2.1.5 单电子的波动性	(55)
2.2 不确定关系	(57)
2.2.1 位置和动量不确定关系	(57)
2.2.2 能量和时间不确定关系	(60)
2.3 波函数及其物理意义	(61)
2.3.1 波函数的引入	(61)
2.3.2 波函数的统计解释	(62)
2.3.3 对波函数的进一步讨论	(64)
2.4 薛定谔方程	(67)
2.4.1 薛定谔方程的建立	(67)
2.4.2 力学量算符、本征值和平均值	(70)
2.4.3 一维无限高方势阱	(73)
2.4.4 零点能	(75)
2.4.5 方势垒的穿透和隧道效应	(76)
2.4.6 电子显微镜和扫描隧道显微镜	(77)
2.5 氢原子的量子力学解	(79)
2.5.1 中心力场薛定谔方程	(79)
2.5.2 Φ 和 Θ 方程式的解和角动量	(80)

2.5.3 R 方程的解和能量	(83)
2.5.4 电子的空间概率分布	(86)
2.6 对应原理和普朗克常数	(92)
2.6.1 对应原理	(92)
2.6.2 作用量判据	(94)
2.6.3 精确度的极限	(94)
习题	(95)
第 3 章 电子自旋和原子能级的精细结构	(98)
3.1 原子的轨道磁矩和斯特恩 - 盖拉赫实验	(98)
3.1.1 原子的轨道磁矩	(98)
3.1.2 外磁场对磁矩的作用	(100)
3.1.3 斯特恩 - 盖拉赫实验	(101)
3.2 电子自旋和自旋-轨道相互作用	(103)
3.2.1 电子自旋	(103)
3.2.2 自旋-轨道相互作用	(105)
3.2.3 总角动量	(107)
3.2.4 角动量相加法则	(108)
3.3 氢原子能级的精细结构	(110)
3.3.1 氢原子能级结构的精细修正	(110)
3.3.2 氢原子光谱的精细结构	(115)
3.3.3 兰姆移位和电子的反常磁矩	(116)
3.3.4 超精细结构	(118)
3.4 碱金属原子的能级和光谱	(121)
3.4.1 碱金属原子的能级及量子数亏损	(121)
3.4.2 碱金属原子的光谱	(122)
3.4.3 碱金属原子光谱的精细结构	(124)
3.5 外场中的原子	(125)
3.5.1 外磁场中的原子:塞曼效应	(125)
3.5.2 电子顺磁共振	(133)

3.5.3 外电场中的原子:斯塔克效应	(135)
习题	(137)
第4章 多电子原子的能级和光谱	(139)
4.1 氢原子的光谱和能级	(139)
4.2 泡利不相容原理和交换效应	(141)
4.2.1 全同性原理和波函数的交换对称性	(141)
4.2.2 泡利不相容原理	(143)
4.2.3 两个电子的自旋波函数	(144)
4.2.4 氢原子与交换效应	(145)
4.3 多电子原子的电子组态和壳层结构	(149)
4.3.1 多电子原子的中心力场近似和电子组态	(149)
4.3.2 原子的壳层结构和元素周期表	(151)
4.3.3 电子组态能级的简并度	(159)
4.4 多电子原子的原子态和能级	(160)
4.4.1 $L-S$ 耦合	(161)
4.4.2 $j-j$ 耦合	(167)
4.4.3 洪特定则和原子基态	(170)
4.4.4 外磁场中的多电子原子能级分裂	(171)
4.4.5 选择定则和多电子原子的光谱	(171)
4.5 原子的内层能级和特征 X 射线	(173)
4.5.1 X 射线发射谱	(174)
4.5.2 俄歇电子能谱和荧光产额	(178)
4.5.3 同步辐射	(179)
习题	(181)
第5章 分子结构和分子光谱	(183)
5.1 分子能级结构和光谱概述	(183)
5.2 分子的化学键	(186)
5.2.1 离子键	(186)
5.2.2 共价键	(188)

5.3 双原子分子的能级和光谱	(192)
5.3.1 波恩-奥本海默近似	(192)
5.3.2 双原子分子的转动能级和转动光谱	(194)
5.3.3 双原子分子的振动能级和振动光谱	(198)
5.3.4 双原子分子电子结构	(202)
5.3.5 双原子分子的电子振动转动光谱	(207)
5.4 拉曼散射	(212)
习题	(218)
第 6 章 粒子与原子和分子的相互作用	(219)
6.1 光子的吸收和散射	(220)
6.1.1 光电效应	(220)
6.1.2 汤姆生散射和康普顿散射	(222)
6.1.3 瑞利散射和共振散射	(227)
6.1.4 吸收定律和 X 射线吸收精细结构	(229)
6.2 正电子及有关效应	(232)
6.2.1 正电子和反粒子	(232)
6.2.2 电子对效应	(235)
6.2.3 电子偶素	(236)
6.2.4 正电子湮灭	(237)
6.3 带电粒子的弹性和非弹性散射	(240)
6.3.1 卢瑟福散射和莫特散射	(241)
6.3.2 非弹性散射	(245)
6.3.3 多次散射	(249)
6.4 带电粒子的电离损失和射程	(250)
6.4.1 电离损失	(250)
6.4.2 径迹和射程	(254)
6.4.3 某些应用技术	(255)
6.5 热碰撞激发和退激发	(259)
6.5.1 热激发和布居	(259)

6.5.2	无辐射碰撞退激发	(261)
6.6	跃迁和能级宽度	(263)
6.6.1	跃迁速率和寿命	(264)
6.6.2	能级宽度	(266)
6.6.3	谱线增宽	(270)
6.6.4	选择定则和跃迁类型	(272)
	习题	(276)
第7章	原子核的基本性质和结构	(279)
7.1	原子核的一般性质	(279)
7.1.1	质子和中子组成核	(279)
7.1.2	原子核的质量和核素	(281)
7.1.3	原子核的大小和密度	(283)
7.2	原子核的量子性质	(284)
7.2.1	自旋、磁矩和电四极矩	(284)
7.2.2	核磁共振	(287)
7.2.3	宇称和统计性	(289)
7.3	原子核的稳定性和结合能	(290)
7.3.1	核素图和 β 稳定线	(290)
7.3.2	结合能	(293)
7.3.3	液滴模型和半经验公式	(295)
7.4	核力	(297)
7.4.1	核力性质	(297)
7.4.2	核力的介子场论	(301)
7.5	核结构模型	(303)
7.5.1	壳层模型	(303)
7.5.2	集体模型	(306)
	习题	(310)
第8章	核衰变和核反应	(312)
8.1	放射性衰变的基本规律	(312)

8.1.1	指数衰变规律和活度	(313)
8.1.2	级联衰变	(315)
8.1.3	核素生产	(317)
8.2	α 衰变	(318)
8.2.1	α 衰变条件和衰变能	(318)
8.2.2	衰变纲图	(319)
8.2.3	α 衰变概率和寿命	(320)
8.2.4	质子和其他类 α 放射性	(323)
8.3	β 衰变	(324)
8.3.1	β 衰变类型和衰变能	(324)
8.3.2	β 射线能谱和中微子	(326)
8.3.3	跃迁分类和选择定则	(329)
8.4	γ 跃迁	(330)
8.4.1	γ 射线多极性和选择定则	(330)
8.4.2	内转换和同质异能态	(332)
8.4.3	穆斯堡尔效应	(333)
8.5	核反应	(336)
8.5.1	核反应分类	(336)
8.5.2	守恒定律和反应截面	(339)
8.5.3	反应能和阈能	(340)
8.6	裂变和聚变	(343)
8.6.1	自发裂变和诱发裂变	(343)
8.6.2	链式反应、原子弹和反应堆	(345)
8.6.3	轻核聚变	(347)
8.6.4	太阳能和氢弹	(351)
	习题	(352)
第 9 章	粒子物理	(356)
9.1	粒子的基本性质和分类	(357)
9.1.1	粒子的基本性质	(357)

9.1.2 粒子的分类	(359)
9.2 强子的夸克模型	(370)
9.2.1 夸克的引入	(370)
9.2.2 重子和介子的夸克组成	(372)
9.2.3 夸克的基本性质	(375)
9.3 守恒定律与对称性	(380)
9.3.1 相加性量子数	(381)
9.3.2 相乘性量子数	(383)
9.4 粒子物理的标准模型及其他物理模型	(388)
9.4.1 粒子物理的标准模型简述	(388)
9.4.2 其他物理理论模型	(399)
习题	(401)
附录 I 基本的物理和化学常数	(404)
附录 II 原子单位制	(406)
附录 III 诺贝尔物理奖获得者及其主要工作	(407)
习题答案	(416)
主要参考书目	(423)
名词索引	(424)
人名索引	(436)

第1章 原子模型和单电子原子

原子是物质结构的一个层次.本章主要讨论原子的一般性质以及原子的结构模型,并着重讨论用能级和量子数描述的原子能量不连续状态以及它们的实验证实.作为简单的例子,本章还将讨论不考虑自旋轨道耦合作用等精细和超精细结构效应的单电子氢原子、类氢离子以及其他的特殊氢原子体系.

1.1 原子的经典性质和汤姆生原子模型

1.1.1 原子的经典性质

18世纪末、19世纪初人们发现,在化学反应中每种化合物都有一定不变的组成(称为定比定律),不同化合物中同种元素的量都成一定的整数比(称为倍比定律).在实验基础上,1803年道尔顿(J. Dalton)提出了宏观物质是由少数几种原子组成的,同种元素的原子都具有相同的质量,不同元素的原子具有不同的质量的论点,因而过去在哲学上有关原子论的争论,第一次从假说走上科学,有了实验支持.

在原子论基础上,人们可以不必知道原子的结构和组成情况,用经典的方法即可知道原子的下述一般特性.

(1) 阿伏伽德罗常数 N_A

1811年阿伏伽德罗(A. Avogadro)在研究气体化学反应问题时发现,在同样的温度和压强条件下,同体积的任何气体含有的分子数目相同.在有了原子量、分子量和摩尔质量的概念之后,人们可以把阿伏伽德罗定律推广为更一般的表示方式:1摩尔物质,不论它是什么种类的物质,都含有相同数目的微粒,这个数称为阿

伏伽德罗常数 N_A . 因此, 1 摩尔元素物质(其质量单位是克, 质量的数值等于该种元素的原子量), 不论它是哪种元素, 都含有 N_A 个相同数目的原子. 同样, 1 摩尔化合物分子(其质量单位为克, 质量的数值等于该种分子的分子量), 不论它是哪种化合物, 均含有 N_A 个相同数目的分子. 摩尔的符号为 mol. 实验给出

$$N_A = 6.022\ 141\ 99(47) \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$$

其中括号内两位数字为最后两位数字的误差.

(2) 原子的质量

已知某元素的原子量为 A , 由于 1 摩尔该元素的质量为 A 克, 含有 N_A 个原子, 因此, 该元素一个原子的质量 M 即为

$$M = \frac{A}{N_A} \quad (1.1.1)$$

各种元素的原子量现已精确地测定出来了, 列在元素周期表上或核素表上. 元素周期表或核素表上的原子量, 是以 1960 年国际物理和化学会议决定的以 ^{12}C 的原子量为 12 个原子质量单位 u 来确定的.

$$1 u = 1.660\ 538\ 73(13) \times 10^{-27} \text{ kg}$$

可见原子的质量是多么小. 这一点是不足为怪的. 从原子量与一个原子质量的关系 $A = N_A M$, 以及法拉第常数 F 与电子电荷 e 的关系 $F = N_A e$ 和气体普适常数 R 与玻耳兹曼常数 k 的关系 $R = N_A k$ 可以看到, N_A 起到了联系宏观量与微观量之间关系的桥梁作用, N_A 数字之大, 正好说明微观世界的微小.

(3) 原子数密度 N

原子数密度 N 定义为: 单位体积内原子数. 设某元素物质的密度为 ρ , ρ 即为单位体积该物质具有的质量, 由于 N_A/A 为 1 克该物质含有的原子数, 因此

$$N = \frac{\rho N_A}{A} \quad (1.1.2)$$

(4) 原子半径 R

每个原子平均占有的空间体积为

$$V'_A = \frac{1}{N} = \frac{A}{\rho N_A} \quad (1.1.3)$$

对于固体物质, 每个原子互相紧密堆集, 如果原子是立方体, 则原子之间没有空隙, 原子本身的体积即为上述空间体积 V'_A . 实际上把原子认为是球形更合理, 在这种情况下, 为减少球与球之间的空隙, 可在不同排和不同层之间原子错开 60° 的情况下得到原子最紧密堆集, 因此, 每个原子平均占有的空间体积为

$$V'_A = (2R)(\sqrt{3}R)(\sqrt{3}R) = 6R^3 \quad (1.1.4)$$