

中国科学技术大学  教材

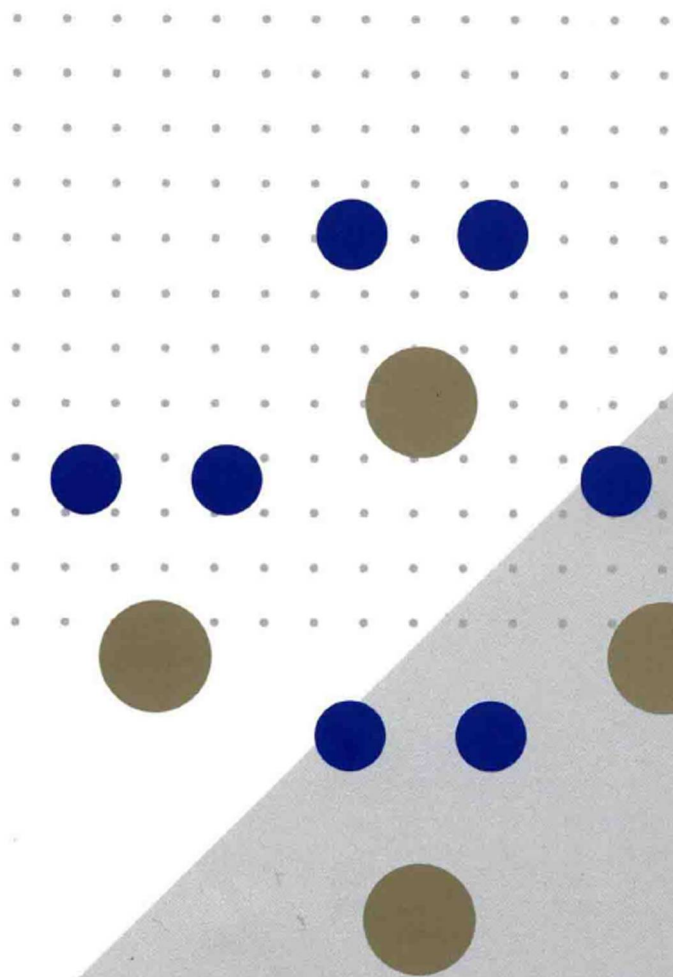
“十二五”国家重点图书出版规划项目

中国科学技术大学 交叉学科基础物理教程

主 编 侯建国 副主编 程福臻

原子物理学

朱林繁 彭新华 编著



中国科学技术大学出版社

中国科学技术大学交叉学科基础物理教程

主 编 侯建国 副主编 程福臻

- 力 学 ⊙ 刘 斌
- 热 学 ⊙ 朱晓东
- 电磁学 ⊙ 叶邦角
- 光 学 ⊙ 王 沛 鲁拥华
- 原子物理学 ⊙ 朱林繁 彭新华
- 理论力学导论 ⊙ 潘海俊
- 电动力学导论 ⊙ 李 弘
- 量子力学导论 ⊙ 潘必才
- 热力学与统计物理导论 ⊙ 袁业飞

The Course of Interdisciplinary
Fundamental Physics of USTC

Atomic Physics

定价：86.00元

ISBN 978-7-312-03717-7



上架建议：物理学

中国科学技术大学 精品教材

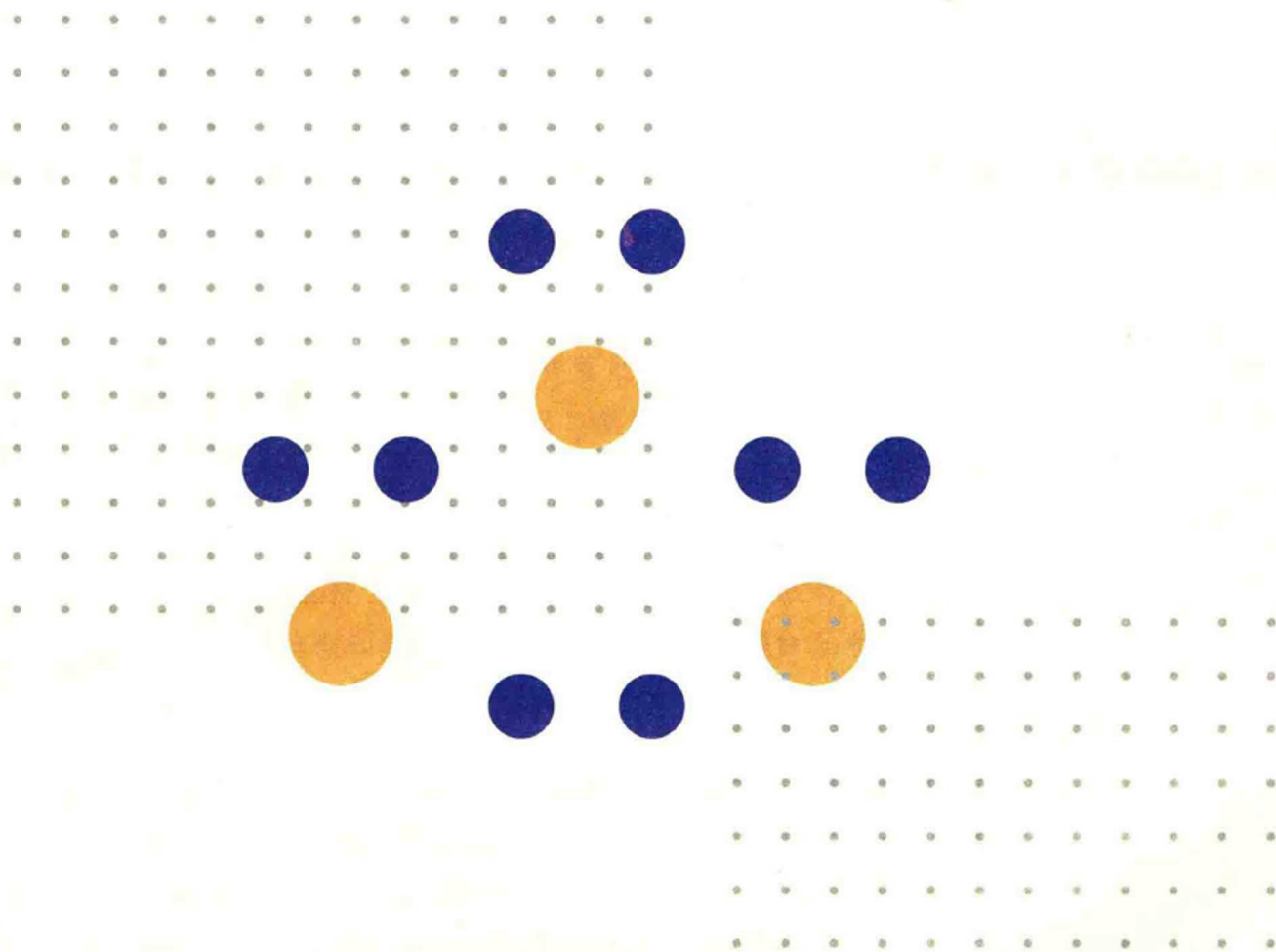
“十二五”国家重点图书出版规划项目

中国科学技术大学 交叉学科基础物理教程

主 编 侯建国 副主编 程福臻

原子物理学

朱林繁 彭新华 编著



中国科学技术大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

原子物理学/朱林繁,彭新华编著. —合肥:中国科学技术大学出版社,2017.1

(中国科学技术大学交叉学科基础物理教程)

中国科学技术大学精品教材

“十二五”国家重点图书出版规划项目

ISBN 978-7-312-03717-7

I. 原… II. ①朱…②彭… 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(2016)第 269663 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

<http://press.ustc.edu.cn>

合肥市宏基印刷有限公司印刷

全国新华书店经销

开本:880 mm×1230 mm 1/16 印张:27 字数:617 千

2017 年 1 月第 1 版 2017 年 1 月第 1 次印刷

定价:86.00 元



序 ■

物理学从 17 世纪牛顿创立经典力学开始兴起,最初被称为自然哲学,探索的是物质世界普遍而基本的规律,是自然科学的一门基础学科。19 世纪末 20 世纪初,麦克斯韦创立电磁理论,爱因斯坦创立相对论,普朗克、玻尔、海森堡等人创立量子力学,物理学取得了一系列重大进展,在推动其他自然学科发展的同时,也极大地提升了人类利用自然的能力。今天,物理学作为自然科学的基础学科之一,仍然在众多科学与工程领域的突破中、在交叉学科的前沿研究中发挥着重要的作用。

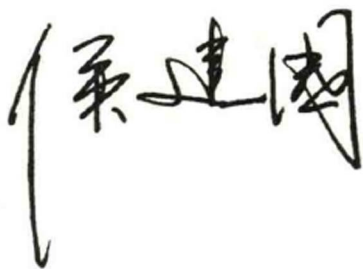
大学的物理课程不仅仅是物理知识的学习与掌握,更是提升学生科学素养的一种基础训练,有助于培养学生的逻辑思维和分析与解决问题的能力,而且这种思维和能力的训练,对学生一生的影响也是潜移默化的。中国科学技术大学始终坚持“基础宽厚实,专业精新活”的教育传统和培养特色,一直以来都把物理和数学作为最重要的通识课程。非物理专业的本科生在一二年级也要学习基础物理课程,注重在这种数理训练过程中培养学生的逻辑思维、批判意识与科学精神,这也是我校通识教育的主要内容。

结合我校的教育教学改革实践,我们组织编写了这套“中国科学技术大学交叉学科基础物理教程”丛书,将其定位为非物理专业的本科生物理教学用书,力求基本理论严谨、语言生动浅显,使老师好教、学生好

学。丛书的特点有:从学生见到的问题入手,引导出科学的思维和实验,再获得基本的规律,重在启发学生的兴趣;注意各块知识的纵向贯通和各门课程的横向联系,避免重复和遗漏,同时与前沿研究相结合,显示学科的发展和开放性;注重培养学生提出新问题、建立模型、解决问题、作合理近似的能力;尽量作好数学与物理的配合,物理上必需的数学内容而数学书上难以安排的部分,则在物理书中予以考虑安排等。

这套丛书的编者队伍汇集了中国科学技术大学一批老、中、青骨干教师,其中既有经验丰富的国家级教学名师,也有年富力强的教学骨干,还有活跃在教学一线的青年教师,他们把自己对物理教学的热爱、感悟和心得都融入教材的字里行间。这套丛书从2010年9月立项启动,其间经过编委会多次研讨、广泛征求意见和反复修改完善。在丛书陆续出版之际,我谨向所有参与教材研讨和编写的同志,向所有关心和支持教材编写工作的朋友表示衷心的感谢。

教材是学校实践教育理念、达到教学培养目标的基础,好的教材是保证教学质量的第一环节。我们衷心地希望,这套倾注了编者们的汗水和心血的教材,能得到广大师生的喜爱,并让更多的学生受益。



2014年1月于中国科学技术大学



前 言

我们所处的世界是五彩缤纷、纷繁复杂的,而我们人类的寿命和认知能力是有限的。因此,从纷繁复杂的表象中提取最核心的要素和规律,并使之代代传承和积累,是我们人类适应严酷的自然环境、合理改造它并使之适宜人类居住和生存的主要方法和手段。物理学就是这样一门学科,它旨在揭示物质的最基本结构及物质运动的最一般规律。这也就是说,物理学研究的是这个世界的最基本构成要素以及这些要素演化为这个世界所遵循的最一般的规律。从学习和研究的角度来说,就是既要知其然,更要知其所以然。

近代物理的开端始于 19 世纪末,其标志是 X 射线(1895)、放射性(1896)和电子(1897)的发现。随后的几十年,是物理学发展的黄金时期。在此期间,诞生了 20 世纪最重大的发现:相对论和量子力学。相对论和量子力学反过来又极大地促进了物理学各分支学科的发展,例如:原子物理、分子物理、固体物理、原子核物理和粒子物理等。这些分支物理学科中的每一门都涉及物质结构的一个层次,其共同点在于它们都建立在量子力学的基础上,互相之间有一定的内在联系,因此我们把它们的基本内容都包含在本教材中。

原子物理学是研究原子的基本结构及其运动一般规律的学科。原子的尺度在 10^{-10} m 的量级,涉及的作用力是电磁力。原子物理学的内容主要包括原子的空间结构、原子的能级结构和原子的动力学参数,使用的实验方法主要为谱学方法,包括光谱、电子能谱和离子能谱。虽然

原子的能级结构与原子中电子的空间分布(原子的空间结构)紧密相关,但从历史发展脉络上讲,又是泾渭分明的两个层次。原子的空间结构主要指的是各种原子模型,在历史上这是原子物理最早研究的内容。从汤姆孙的西瓜模型到卢瑟福的行星模型,直至量子力学给出了最终的原子空间结构图像。原子的能级结构是原子可能存在的能量状态,它是原子的内在基本特性之一,可由量子力学给出很好的描述,其外在表现就是原子吸收或发射的光谱。原子光谱是原子的指纹,由原子的谱线可以指认原子的种类,由其强度可推测元素的丰度,这也是原子物理用于物质结构分析的物理基础。因此,原子物理的核心内容之一就是给出原子能级结构的规律,当然这是以量子力学为基础的。作为一本本科生教材,本书给出单电子系统和双电子系统的能级结构规律;至于多电子体系,只涉及原子的壳层结构和原子的基态。原子的动力学参数在现实生活中有非常重要的应用,本书只给出了相关的基本概念及部分应用。

分子物理比原子物理要复杂得多,其核心是分子的能级结构规律。虽然分子中的主要相互作用仍是电磁力,但与原子中的单中心问题不同,分子是多中心问题,既有电子的运动,又有原子核的振动和转动,且三者是耦合在一起的。处理分子问题的基础是玻恩-奥本海默近似,其核心是把电子的运动与原子核的运动分开处理。涉及电子运动的能级属于电子态,涉及原子核运动的为振动态和转动态。本书只阐述双原子分子的能级结构规律,包括双原子分子的电子态、振动态和转动态的能级结构规律。

固体是由大量原子或分子形成的宏观系统,原子分子之间的结合方式、空间结构以及电子分布等方面的不同导致了固体中各形各色的宏观性质。然而固体又是一个比分子复杂得多的多粒子体系,因此除了像分子一样引入玻恩-奥本海默近似外,固体物理学中还采用了各种其他近似方法,进而构建出简单的模型,并在实验的基础上不断地改进它。另一方面,固体物理学还起了联系基础理论物理与应用学科之间桥梁的重要作用,对固体的进一步利用和开发不断推动着人类社会的进步,例如半导体和激光技术的产生和发展。当今的凝聚态物理学是固体物理学的进一步拓展,是物理学中最庞大、最重要的分支,包含的内容极其广泛与丰富。本书只介绍晶体(即内部原子结合成有规则排列的固体)的基本理论,利用简单的模型来解释一些基本现象、规律以及应用,包括晶体结合与结构、固体电子论(金属自由电子气理论和能带论)及半导体。



原子核的尺度为 10^{-14} m, 比原子小了 4 个数量级。与原子物理中电磁力起支配作用不同, 原子核内起主导作用的是强相互作用力, 电磁力也起重要作用。除此之外, 不像原子, 原子核中没有对称中心, 这进一步增加了理论描述原子核的复杂性, 因此关于原子核的理论大多是唯象理论。了解原子核的结构和一般特性, 掌握放射性衰变的基本规律, 对核裂变和核聚变、核能的和平利用有一个概括性的认识, 是原子核物理的基本要求。了解了相关规律, 就不会人云亦云, 谈核色变。只有真正掌握了相关知识, 才能做到“谣言止于智者”, 才不会闹“日本福岛核电站发生核泄漏, 民众买碘盐防核”的笑话。

粒子物理是物质结构的更深层次。在过去看来, 这些粒子比原子核更小, 是基本粒子。但是随着研究的深入, 揭示出这些粒子中的很多还有更基本的结构, 这就是夸克模型。因此, 了解这些粒子间的相互作用, 把它们进行分类, 并了解相应的对称性和守恒律, 进而了解到目前为止最精确的标准模型, 是粒子物理的基本内容。

原子物理学并不是美丽的海市蜃楼, 虚无缥缈而不可触摸。原子物理的知识已经渗透到了各个领域和我们的日常生活中, 已经并还在促进着其他学科的发展, 改变并美化着我们的生活。

基于原子物理发展起来的实验方法提供了大量的物质结构的分析测试手段, 而这些手段往往在其他领域引起了革命性的变化。这中间最著名的例子恐怕就是近代物理学对生命科学的影响了。DNA 双螺旋结构的发现, 开创了分子生物学的新时代, 使得遗传的研究深入到了分子层次。而在 DNA 双螺旋结构的发现过程中, 基于原子物理发展起来的 X 射线晶体衍射技术起了核心作用。也正是实验上漂亮的 DNA 衍射图片, 促成克里克和沃森提出了 DNA 的双螺旋结构。对 DNA 双螺旋结构的提出做出杰出贡献的四位科学家中就有三位是从事 X 射线晶体衍射的物理学家, 他们是富兰克林、威尔金斯、克里克。在生命科学领域中应用的典型例子还有基于 X 射线吸收规律发展起来的 X 光胸透医学成像和 CT、基于核磁共振发展起来的核磁共振成像、基于分子光谱的单分子显微成像等等。类似的分析测试手段还有很多, 它们在物理的其他分支学科、材料科学、化学、地球科学、生物、医学、环境科学等领域都有极其广泛的应用, 也跟我们的日常生活息息相关。因此, 了解和掌握这些分析测试手段的基本原理, 无疑对于相关学科的读者是非常有帮助的, 这也是本课程的基本目的之一。

原子物理知识的掌握和应用,当然是本教材的主要目的。但是,原子物理的发展留给人们的绝不仅仅只有相关知识,其非常重要的一个方面是教会我们如何去思考、去探索未知的世界,也即科学研究的方法。中国古语说得好:“授人以鱼,不如授人以渔。”掌握了科学研究的方法,就拥有了探索未知世界的利器。原子物理恰好是体现科学研究方法的典型案例,不用过多地去雕琢,仅仅适当遵循历史的发展脉络,就可体现出“假说→实验验证→新问题→新理论或新假说→新的实验验证”的基本科学研究方法。而在这一不断循环的、螺旋式上升的认识过程中,近代物理学史上的大物理学家如汤姆孙、卢瑟福、玻尔、德布罗意……也为我们留下了巨大的思想财富。追寻伟人们分析问题、解决问题的思路,无疑是一段非常美妙的旅程,也会潜移默化地影响我们的思维方法。

本教材的内容较为丰富,任课老师可以根据授课的对象,选择性地讲授相关章节。例如,针对化学系,可以略去以后还会学到的分子物理和固体物理的内容;作为补充,讲授一些以后很难有机会接触到的原子核物理的基本概念和图像,无论是作为常识还是提高科学素养都是十分有益的。而对于核技术专业,则可以略去原子核和粒子物理的部分,讲授一些分子光谱和固体物理的知识。另外,为了增加教材的可读性,在正文中我们省略了一些复杂的推导。但是,为了保证教材的完整性,这些推导放入了相应章节的附录中,略过这些附录并不影响本教材的学习和使用。还有,带*的章节比较难,可根据授课对象及学时选讲或者不讲。

在本教材的撰写过程中,得到了程福臻教授的大力帮助,与他的多次探讨,使作者受益匪浅。作者特别感谢徐克尊教授和周先意教授多年的支持与帮助。徐克尊教授和清华大学尤力教授还仔细审阅了书稿,并提出了许多中肯的意见和建议。另外,实验室的很多研究生及上过编者课程的一些本科生,包括刘亚伟、徐卫青、康旭、彭裔耕、崔江煜、潘建、梅小寻、赵小利、缪鹏等人帮助作者录入了部分初稿并绘制了部分图表,在此作者表示深深的感谢。

彭新华教授撰写了本教材的第6章,其他章节由朱林繁教授完成,全书最后由朱林繁教授统稿。

受限于作者的水平,书中难免会有错误或不当之处,敬请读者指正。

朱林繁 彭新华

2016年9月

目 录

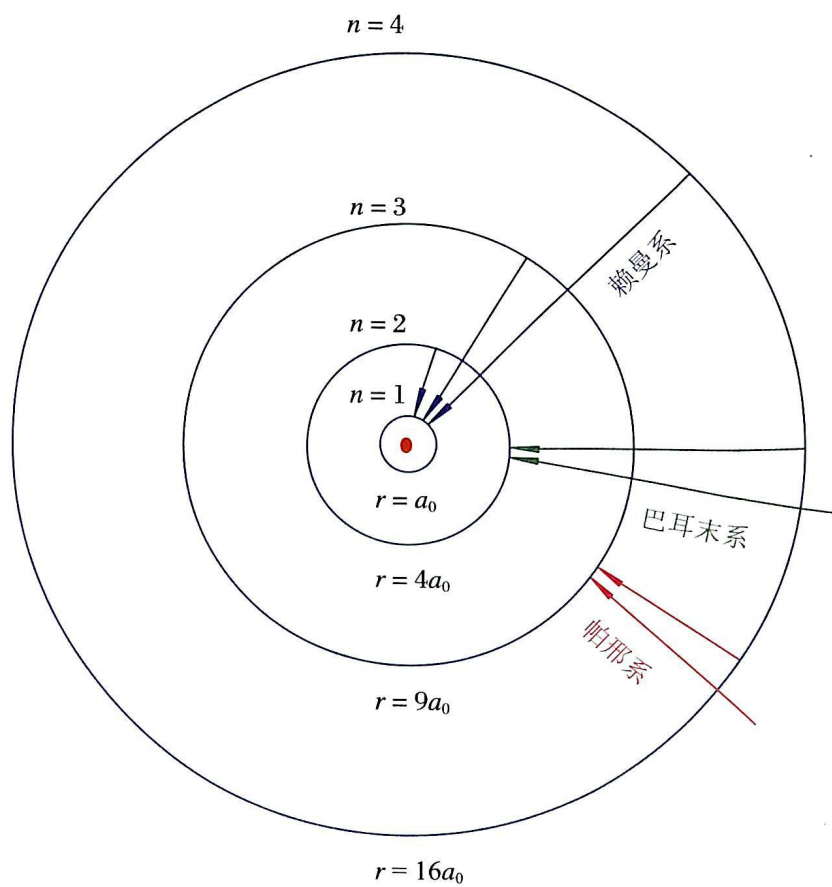
序	(i)
前言	(iii)
第 1 章 原子模型初探	(1)
1.1 原子论及原子的一般特性	(2)
1.2 电子的发现和汤姆孙的原子模型	(4)
1.3 α 粒子散射实验和卢瑟福原子模型	(7)
1.4 玻尔原子模型	(16)
1.5 类氢原子体系	(27)
1.6 弗兰克-赫兹实验	(35)
附录 1-1 卢瑟福散射公式	(39)
第 2 章 量子力学基础	(43)
2.1 光的波粒二象性	(44)
2.2 实物粒子的波粒二象性	(58)
2.3 波函数和薛定谔方程	(63)
2.4 不确定关系	(69)
2.5 算符	(72)
2.6 势阱	(75)
2.7 氢原子的薛定谔方程解	(79)
2.8 量子数的物理解释	(88)
2.9 中心势近似	(92)
2.10 选择定则	(96)
附录 2-1 瑞利-金斯公式的推导	(98)

附录 2-2 普朗克公式的推导	(99)
附录 2-3 轨道角动量量子数 l 的选择定则	(100)
附录 2-4 磁量子数 m 的选择定则	(101)
第 3 章 原子的能级结构和光谱	(103)
3.1 电子自旋	(104)
3.2 泡利不相容原理	(110)
3.3 原子的壳层结构和元素周期表	(119)
3.4 自旋-轨道相互作用	(128)
3.5 单电子原子的能级结构和光谱	(135)
3.6 LS 耦合和 jj 耦合	(146)
3.7 双电子原子的能级结构和光谱	(161)
3.8 X 射线和原子的内壳层能级	(166)
附录 3-1 氢原子的精细结构	(177)
附录 3-2 多电子的 LS 耦合	(181)
第 4 章 外场中的原子	(185)
4.1 塞曼效应	(186)
* 4.2 磁共振技术	(195)
* 4.3 原子频标	(209)
4.4 斯塔克效应	(214)
附录 4-1 塞曼效应的偏振特性	(218)
第 5 章 双原子分子的能级结构和光谱	(221)
5.1 分子的形成和化学键	(222)
5.2 双原子分子的能级	(227)
5.3 双原子分子的光谱	(235)
5.4 拉曼散射	(248)
* 5.5 双原子分子的电子态	(253)
第 6 章 固体物理概述	(267)
6.1 固体的分类与结合	(268)
6.2 晶体结构学基础	(275)
6.3 金属自由电子气模型	(291)
6.4 能带理论基础	(303)
6.5 半导体	(323)



第 7 章 原子核物理概论	(345)
7.1 原子核的基本性质	(346)
7.2 核力和壳层模型	(351)
7.3 原子核衰变	(355)
7.4 原子核的结合能、核反应和核能	(361)
7.5 辐射剂量防护简述	(372)
第 8 章 粒子物理简介	(375)
8.1 粒子间的相互作用	(376)
8.2 粒子的基本性质和分类	(378)
8.3 强子的夸克模型	(382)
8.4 守恒律	(385)
8.5 标准模型简介	(389)
习题	(391)
部分习题参考答案	(401)
参考文献	(407)
附录 I 元素周期表	(409)
附录 II 基本的物理和化学常数	(410)
名词索引	(412)

第 1 章 原子模型初探



1.1 原子论及原子的一般特性

1.1.1 原子论的发展简史

古代人类了解世界的手段是极其有限的,基本上是基于对自然现象的观察和思考。所以放在当时的历史背景看,追问世界本源的先贤都是智者,而其对世界本源的描述也只能是在对自然现象观察和思考基础上的、想当然的假设。由于缺乏科学的基础,人们提出了各种各样的假说,当时的历史条件也无法对这些假说进行检验。因此,这些假说是主观的、缺乏实验验证基础的,属于哲学思辨的范畴。尽管如此,在人类自然科学知识基本处于空白的古代,这些假说还是为人类提供了认识世界的切入点。

在我国西周(公元前 1046—前 771)初期,就已经有了关于世界本源的认识和思考,这就是五行说,其记载见于《尚书·洪范》。五行说认为万物都是由金、木、水、火、土五种基本元素组成的,其相生相克主宰着世界的运行。从探索世界的基本构成要素及其运行规律的视角来看,五行说的目的与物理学的研究目标是一致的,虽然用现在的眼光看五行说并不科学,但是想想五行说提出的年代是三千年前,我们就应该为祖先的智慧而自豪。在中国古代,类似的思想还有很多。例如,老子(约公元前 571—前 471)在道德经中说“道生一,一生二,二生三,三生万物。万物负阴而抱阳,冲气以为和”。墨翟(约公元前 468—前 376)提出“端,体之无序而最前者也”;“端,无间也”。子思(公元前 483—前 402)说过“语小,天下莫能破焉”。惠施(公元前 390—前 317)认为“至小无内,谓之小一”。这里,老子的“道”、墨子的“端”、子思的“语小”、惠施的“至小”都是指构成世界的最基本单元,而且这一单元不可再分割,与现在关于原子的定义,有较大的相似之处。当然,也有人持相反的、认为物质可以无限分割的观点,例如公孙龙(公元前 320—前 250)就留下了“一尺之捶,日取其半,万世不竭”的千古名言。

差不多同时代的古希腊也提出了类似的观点。“原子(atom)”一词,就来源于希腊文,是不可分割的意思,首先由德谟克利特(约公元前 460—前 370)提出。德谟克利特认为:一切物质都是由分立的原子组成的,原子这种微粒是不可再分的,这就是原始的“原子论”。与德谟克利特所持观点相反,亚里士多德(约公元前 384—前 322)认为物质是连续的,是可以无限分割的。



进入19世纪,随着人类实验手段的进步,积累了大量的关于化学反应的实验资料,对化学反应的规律性有了深刻的认识。1806年,法国的普鲁斯脱提出了定组成定律,也叫定比定律:一种化合物,不论它是如何制备的,其组成的元素间都有一定的质量比。1807年,英国的道尔顿提出了倍比定律:在化学反应中,每种化合物都有一定不变的组成,各化合物中元素的量都成一定的整数比。在倍比定律的基础上,道尔顿于1808年提出了原子论,其要点是: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和性质,不同元素原子的性质和质量各不相同,且原子在一切化学变化中不可再分。由于道尔顿的原子论是建立在实验基础上的,已经是科学而不是哲学思辨了。在道尔顿提出原子论以后,随着时间的推移,不断有新的实验证据证实它的科学性,在它的基础上也提出了许多重要的理论规律。例如,1808年盖·吕萨克提出的简比定律、1811年提出的阿伏伽德罗定律、1826年布朗运动实验的解释、1833年法拉第提出的电解定律、1869年门捷列夫的元素周期表等等。到了19世纪末,道尔顿的原子论已经深入人心,成为公认的科学常识了。

1.1.2 原子的经典性质

物质是由原子组成的,那么单个原子的基本性质是什么?它有多大?质量是多少?这都是需要回答的问题。在19世纪末,根据当时的科学知识,已经可以估算出单个原子的质量和大小了。

由于固体很难压缩,可以认为它是由一个个原子密堆积形成的。假设原子是球形,作为一种简单的近似,可以认为原子占据立方体的顶点形成固体,也即邻近原子的球心构成立方体。已知原子的质量数为 A ,其密度为 ρ ,则单个原子的半径为

$$r = \frac{1}{2} \left(\frac{A}{\rho N_A} \right)^{1/3} \quad (1.1.1)$$

这里 $N_A = 6.022140857(74) \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$,为阿伏伽德罗常数,括号中数字为误差。根据当时已知的实验数据,人们估算出Fe、Au、Ag、Cu的半径分别为 $1.56 \text{ \AA}$ 、 $1.74 \text{ \AA}$ 、 $1.65 \text{ \AA}$ 、 $1.45 \text{ \AA}$ ($1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ m}$)。由此可以看出,所有原子的半径都在 10^{-10} m 的数量级。

类似地,可估算每种元素单个原子的质量:

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

现在,原子的质量是以原子量 u 为单位的, $1 u = 1.660539040(20) \times 10^{-27} \text{ kg}$ 。根据元素种类的不同,原子的质量分布范围为 $1 \sim 300 u$ 。

1.2 电子的发现和汤姆孙的原子模型



图 1.2.1 汤姆孙(J. J. Thomson, 1856—1940), 英国

19 世纪的另一重大科学成就是麦克斯韦方程组的建立,电学发展至鼎盛时期。一些科学家出于兴趣开始研究稀薄气体的导电问题。也正是在这一过程中,1858 年德国物理学家普吕克尔发现,正对放电管阴极的管壁发出了绿色的荧光,显然该荧光是由来自于阴极的未知射线引起的,后来人们把从阴极发出的这种射线称为阴极射线。但是,阴极射线是什么,它带不带电,是电磁波还是粒子,人们并不清楚。1879 年克鲁克斯改进了放电装置,发明了阴极射线管,也叫克鲁克斯管,为阴极射线的研究提供了强有力的工具,也因此掀起了研究阴极射线的热潮。也正是在用克鲁克斯管研究阴极射线的过程中,1895 年伦琴发现了 X 射线,1897 年汤姆孙(图 1.2.1)发现了电子,从而揭开了近代物理的序幕。

汤姆孙认为,阴极射线是带电粒子束。为了揭示该粒子的特性,汤姆孙用克鲁克斯管对阴极射线做了详细的研究,其所用装置示意图见图 1.2.2,相应的几何尺寸也在图中给出。克鲁克斯管为一真空玻璃管,其中 C 为阴极, A 为阳极, B 为准直孔。从阴极发出的阴极射线经准直孔后,得到很细的一束。当后面的偏转板 D、E 不加电压时,阴极射线会直线前进,达到荧光屏的中间位置,在此处观测到荧光。当偏转板加上如图所示电压时,阴极射线会偏向下,证明它带负电。假设阴极射线所带电荷量为 q , 质量为 m , 则其在荧光屏上偏离中心的距离 y 为

$$\begin{aligned}
 y &= y_1 + y_2 \\
 &= \frac{1}{2} a t_1^2 + a t_1 t_2 \\
 &= \frac{1}{2} \frac{qV}{md} \left(\frac{l}{v} \right)^2 + \frac{qV}{md} \frac{l}{v} \frac{L - l/2}{v} \\
 &= \frac{qVlL}{mdv^2}
 \end{aligned} \tag{1.2.1}$$

这里 y_1 和 y_2 分别为阴极射线粒子在偏转板中的偏转距离和偏转板右端自由漂移区的偏转距离, V 和 d 分别为偏转板所加电压及偏转板之间的距离, l 和 L 分别为偏转板的长度和偏转板中心与荧光屏的间距, 如图 1.2.2(b) 所示。 $a = qV/(md)$ 为加速度, t_1 和 t_2 为阴极射线粒子在偏转板和自由漂移区的运动