



全国高等师范专科学校教材

原子物理学

周绍森 范成 编

华东师范大学出版社



全国高等师范专科学校教材

原子物理学

主 审：喀兴林

编 者：周绍森 范 成

华东师范大学出版社

原子物理学

周绍森 范 成 编

华东师范大学出版社出版发行

(上海中山北路3663号)

新华书店上海发行所经销 江苏省句容排印厂排版

江苏如皋印刷厂印刷

开本 850×1168 1/32 插页 1 印张 9.625 字数 240千字

1990年 3月第一版 1990年 3月第一次印刷

印数: 1—3,000本

ISBN7-5617-0476-3/N.022 定价: 2.54元

出版说明

党的十一届三中全会以来,师范专科教育有了很大的发展,但是,作为师专教学三大基本建设之一的师专教材建设,却始终没有得到很好的解决。长期以来,师范专科教材基本上是借用本科的教材,不但借用师范本科教材,而且还借用综合大学的本科教材,不适合师范专科的特点,影响了师范专科的教学质量。近几年来,有的地区和学校为了改变这种状况,也零星地编写了一些师专教材,可是,不成套,有的科甚至编写了几种,质量参差不齐。虽对师专无教材的局面有了部分改变,但终因没有一套全国统一的、高质量的教材而限制了师专办学效益的提高,也给师专的教学管理和评估工作带来了许多困难。

为了进一步发挥师专的办学效益,彻底改变师专没有适合自己特色的教材的局面,国家教委师范司在1987年制订了《二年制师范专科学校八个专业教学计划》;继之又约请了全国有教学经验的专家、教授编写了这八个专业的《教学大纲》;1988年7月在长春市东北师范大学又召开了全国二年制师专教材编写出版规划会议,会上研究制订了《1988~1990年二年制师专八个专业教材编写出版规划》。八个专业是:中文、历史、政治教育、数学、物理、化学、生物和地理。同时,还准备组织编写二年制音乐、美术、体育和英语专业教材。

在国家教委师范司的统一部署、各省市自治区教委的大力帮助和出版社的积极组织下,聘请了一些长期从事师专教学工作,具有丰富的教学实践经验和较高学术水平的教授或副教授担任各科主编。各位主编根据国家教委师范司拟定的《关于编写二年制师

专教材的指导思想和基本原则》及各科《教学大纲》的精神,组织编者收集资料,综合研究,争取编出一套具有师专自身特色的教材,以适应师专教育的迫切需要。

现在,在各方面的大力支持下,经过主编和各位编写人员的努力和辛勤劳动,这套教材将陆续面世。我们热忱地欢迎师专的广大师生使用它,并在使用过程中,多提宝贵意见,使之不断完善,不断提高,以保持与当代科学和师专教育实践的同步发展。

1989年1月

序

为了加强师范专科学校的教材建设,由国家教委主持,组织了师专有多年教学经验的教师,编写了一整套师专用的教材,本书就是其中的一种。

在师专学习阶段,原子物理学是一门很重要的课程。我们知道,物理学可以分成经典物理和近代物理两大部分。前者研究宏观物体的运动规律,后者则涉及微观世界的种种现象。在当今时代,后者的知识量绝不比前者少。但我们在学习的时候,经典物理有多门课程,而近代物理部分只有一两门课,原子物理学就是近代物理的一门主课。这样的课程安排是合理的,因为在中学物理课中经典物理占绝大部分。我们的日常生活、工程技术等总是同经典物理打交道。但是作为中学教师,不能不掌握一定数量的微观世界的知识,不能不知道近代物理的一些基本的现象、概念和规律。不然的话,我们就无法跟上当今世界科学技术的进步,甚至无法理解如半导体、激光和放射性同位素等日益深入人们生活领域的新事物,何况中学教材中已经收入了一定数量的微观世界的现象和规律。为了讲好这些内容,我们也应当有一个较坚实的知识基础。

编写原子物理学教材是很不容易的。这是因为,第一,原子物理的内容很多,头绪纷繁,每一内容都要提到而又难于作深入的探讨;第二,在微观世界中有很多新的概念,这些新概念与经典物理的概念和日常生活的经验不同,有的甚至格格不入,为使学生逐步接受并掌握这些重要概念,需要在教材编写上下一番大的力气;第三,人们认识微观世界的历史是复杂而曲折的,编写教材既不能脱离历史的认识过程,又不能拘泥于真实历史的顺序。本书作者具

有丰富的教学经验，他们在组织安排、内容取舍和文字讲解等方面，对上述三个难点作了较好的处理，取得了较大的成功。

不难看出，在编写本书的时候，作者体现了以下三个特点：第一，加强对微观世界中重要概念、基本规律和基础理论的分析论述，尽量避免复杂的数学计算，着重于指出微观领域中各个层次的内部结构、相互作用和运动规律；第二，加强对学生的科学思维能力的培养，在分析微观领域的实验现象与现有理论的矛盾的基础上，提出新的物理模型和新的物理概念，然后又回到实验中去验证，如此反复从而上升到新的理论；第三，坚持面向中学物理教学，加强基本理论与实际应用之间的联系，对中学教材中涉及的内容特别加强讲述。

有一些同学在学过原子物理之后，认为：“原子物理没有什么内容，全是些介绍性的东西。”实际上，有这样看法的同学并没有学好这门课程。我们都习惯于经典物理的学习，在那里有很多定理和公式，这些定理和公式都是经过一系列的数学运算，推导或证明出来的。而每个定理或公式，又能用来做很多复杂的习题。如果把这称为“内容”的话，原子物理中这样的“内容”确实不多。但是，原子物理学是本世纪初物理思想大变革大丰收时期的一个缩影，其中包含着丰富的物理内容。许多重要规律、重要概念的发现和建立的过程，当做故事听听固然容易，但要真正学会，使之成为自己的知识，使自己的头脑更善于分析和解决问题，那就不是轻而易举的事情了。我希望同学们认真学习原子物理学，不要按学力学或电学那种模式来学习，要在学习过程中逐步掌握原子物理学本身的特点，针对这一特点来学，一定会大有收获。

喀兴林

1989年元月于北京

绪 论

原子物理学是研究原子内部结构及其运动规律的科学。

原子概念的提出已有二千余年的历史。人们对原子的存在及其内部结构与运动规律的认识,经历了一个由宏观到微观、长期不断的探索过程,直至本世纪初才开始形成为近代物理学中的一门学科。

古代思想家很早就提出了物质结构的设想。公元前4世纪古希腊的德谟克利特就提出了“原子”的概念,并把它当成“不可分割”的物质最小单元。与此差不多同时的亚里斯多德等人却认为物质是连续的,可以无限地分割下去。在我国,战国时期(公元前475~221年)的墨翟也提出了物质的微粒结构观点,《墨经》中曾记载:“端,体之无序最前者也”。意即说,“端”是组成“体”的不可分割(“无序”)的最基本的东西(“最前者”)。同时期的公孙龙却提出了物质无限可分的观点,他认为:“一尺之棰,日取其半,万世不竭。”

16世纪之后,随着实验技术的发展,伽利略、笛卡尔、波义耳、牛顿等科学家都支持物质的原子观。1808年道尔顿阐明定比定律与倍比定律,开辟了原子学说的门径。由于化学家们的努力探索,建立了不同物质的统一基础——原子论。其基本思想是物质有不同层次的结构,原子是最基本的物质单元,宇宙间千变万化的各种不同物质都是由不同元素的原子搭配组合而成的。

原子物理学的阔步前进是从19世纪末期开始的。当时,在物理和化学上已经有种种迹象显示原子有更深的层次。1869年门捷列夫提出了元素周期表,1885年巴尔末发现了氢光谱线系的规律。

特别是1895年伦琴发现了X射线,1896年贝克勒耳发现了放射性,1897年汤姆逊证明了电子的存在,这三大发现揭开了近代物理的序幕。1900年普朗克提出了能量子说,1911年卢瑟福证实了原子的核式结构,1913年玻尔发表了原子的量子理论,这使原子物理学得以迅速发展。1925年诞生了研究微观粒子的崭新理论——量子力学,大大地促进了原子物理学和整个物理学以及其它学科的进一步发展。目前对微观世界的研究,已从原子、原子核这两个层次,深入到更基本的粒子层次,以及比粒子更深入的层次。

本书的第一章将介绍原子的核式结构模型,同时阐明这种模型与经典物理的矛盾。第二至四章,我们从氢原子、碱金属原子到多电子原子,逐步介绍核外电子的结构、运动规律及其互相作用。其中第二章介绍玻尔等人为克服经典困难,创造性地把量子概念引入原子领域,建立的早期量子理论;第三章中引入了“电子自旋”这一重要概念,深化了人们对核外电子运动形式的认识;第四章应用轨道与自旋的相互作用来研究多电子原子体系,并用泡利原理等规律来建造核外电子的壳层结构,从而给元素周期表以现代观点的解释。在这三章中我们既能看到早期量子理论的成功,又能看到因为它没有脱离经典物理的旧框架而带来的局限性。第五章我们对量子力学进行简要介绍,并描绘出应用它来分析氢原子时所得到的崭新物理图象。从第六章至第八章,我们将进入比原子更深的层次——原子核。其中第六章介绍核的性质、组成及内部的相互作用;第七章介绍核内自发的一种运动形式——核衰变;第八章介绍人工引起的核反应。本书最后的第九章,介绍比原子核更深的层次——“粒子”。由于粒子物理还是处于研究阶段的年轻科学,我们只能对粒子的分类及其相互作用、守恒定律作简要的介绍,并提出比粒子更深一个层次的夸克(层子)模型。

原子物理学的发展,使人们对物质结构的认识大大深化,物理学中许多宏观现象和规律的本质得到了清晰的解释。原子物理学

影响了物理学的全部领域,同时,原子物理学还和化学、生物科学、结晶学、矿物学、冶金学、天文学等学科紧密相关。原子物理学的知识在现代工业、农业、医药、国防等方面有着广泛的应用,在当今世界进入以信息技术、微电子技术、生物技术、新材料和新能源技术等为主体的新技术革命的时候,原子物理学的地位和作用就更加突出了。

原子物理学的发展过程是人们由宏观世界进入微观世界的过程,也是人们的思想观念和思维方法不断变革的过程。学习和研究原子物理学,将有助于我们掌握和运用唯物辩证的科学思维方法,培养科学研究工作能力和尊重实践、勇于探索、敢于创新、坚韧不拔的科学精神。

原子物理学是一门正在发展中的学科,微观世界中还有许许多多的“谜”等待着人们去揭开。由原子到原子核,再到“粒子”和比“粒子”更深层次的科学进军,正在影响和改变着我们的整个世界!

目 录

绪论	1
第一章 原子的核式结构	1
§1.1 原子的质量和大小	1
§1.2 卢瑟福核式结构模型	4
小结	15
问题与习题一	16
第二章 氢原子的玻尔理论	18
§2.1 光谱的一般知识	18
§2.2 氢原子光谱的实验规律	19
§2.3 玻尔的氢原子理论	24
§2.4 玻尔理论对光谱的解释	32
§2.5 玻尔理论又一实验验证：夫兰克-赫兹实验	40
§2.6 索末菲对玻尔理论的推广	44
§2.7 原子的空间量子化	52
§2.8 玻尔理论的历史地位	56
小结	59
问题与习题二	61
第三章 碱金属原子	63
§3.1 碱金属原子光谱的实验规律	63
§3.2 原子实极化和轨道贯穿	67
§3.3 斯特恩-盖拉赫实验与电子自旋	72
§3.4 碱金属原子光谱精细结构	77
小结	84
问题与习题三	86
第四章 多电子原子	88
§4.1 氦原子光谱和能级	88
§4.2 角动量耦合和对氦光谱的解释	89

• §4.3 塞曼效应	95
§4.4 泡利原理	103
§4.5 元素周期表	107
• §4.6 激光原理	115
• §4.7 X射线	118
小结	123
问题与习题四	126
第五章 量子力学初步	128
§5.1 微观粒子的波粒二象性	128
§5.2 测不准关系	132
§5.3 波函数及其统计解释	136
§5.4 薛定谔方程	142
§5.5 氢原子的量子力学处理	153
§5.6 量子力学对氢原子运动状态的描绘	158
小结	166
问题与习题五	168
第六章 原子核的性质和结构	171
§6.1 原子核的质量和大小	171
§6.2 原子核电荷及其分布	174
§6.3 原子核的自旋和磁矩	176
§6.4 原子核的组成和结合能	180
§6.5 核力的基本性质	186
§6.6 原子核结构模型	189
小结	196
问题与习题六	198
第七章 原子核衰变	199
§7.1 放射性衰变规律	199
§7.2 α 衰变	206
§7.3 β 衰变	210
§7.4 γ 衰变	215

§7.5 放射系	217
§7.6 射线的探测方法	218
§7.7 放射性的应用与防护	221
小结	227
问题与习题七	229
第八章 原子核反应	231
§8.1 核反应的一般规律	231
§8.2 原子核裂变	238
§8.3 原子核聚变	242
§8.4 原子能的利用	246
§8.5 加速器	252
小结	259
问题与习题八	260
第九章 粒子物理学简介	262
§9.1 宇宙线和新粒子的不断发现	263
§9.2 粒子间的相互作用和粒子的分类	268
§9.3 守恒定律	274
§9.4 夸克(层子)模型	280
小结	287
问题与习题九	288
后记	289
附录	290

第一章 原子的核式结构

人们对于物质结构的认识,是经过了漫长时间的探索,不断地深化的。直到1897年汤姆逊(J.J. Thomson)发现电子后,人们才认识到原子并不是构成物质的最小微粒,从而开始对原子内部结构的探索。本章在介绍原子的基本状况后,着重介绍对揭示原子内部结构起着重要作用的 α 粒子散射实验,以及在此实验基础上卢瑟福(E. Rutherford)提出的原子核式结构理论。

§1.1 原子的质量和大小

一、原子的质量

各种元素的原子具有不同的质量,原子质量的量度有取其相对值与绝对值两种方法。

在化学和物理学中常采用“原子量 A ”来表示不同原子的质量。1961年国际原子量委员会规定,以自然界含量最丰富的一种碳同位素 $^{12}_6\text{C}$ 的质量的 $1/12$ 定为原子质量单位,符号为 u ,即碳($^{12}_6\text{C}$)原子质量等于 $12.0000u$ 。将其它原子的质量与 $^{12}_6\text{C}$ 相比较就可定出该原子质量的相对值。这个值就称为该原子的原子量。如氢(^1_1H)原子量为 1.0079 ,质量为 $1.0079u$;氦原子(^4_2He)的原子量为 4.0026 ,原子质量为 $4.0026u$ 。

原子的绝对质量是用千克或克为单位来表示原子质量,记作 M_A ,也就是以保存在巴黎国际计量局的铂铱公斤国际原器的质量为单位来度量的原子质量值。

根据阿伏伽德罗定律,一摩尔原子的任何物质中都具有相同

的原子数,这个数称为阿伏伽德罗常数,记作 N_A ,经精细测量得①

$$N_A = 6.02214 \times 10^{23} \text{ 摩尔}^{-1}。 \quad (1.1.1)$$

按照 1961 年国际原子量委员会的规定,1摩尔某元素的质量在数值上等于该元素的原子量 A (以克·摩尔 $^{-1}$ 为单位)。因此,如该元素单个原子的绝对质量为 M_A ,则

$$M_A = A/N_A \quad (1.1.2)$$

由(1.1.2)式很容易算出单个 ^{12}C 原子的质量为

$$M_C = 12.0000/N_A \text{ 克}。$$

因为每个碳(^{12}C)原子质量为 12.0000u,故u和克的换算关系为 $12.0000\text{u} = 12.0000/N_A \text{ 克}$,即

$$1\text{u} = \frac{1}{N_A} \text{ 克}, \quad (1.1.3)$$

以 N_A 的数值代入可得:

$$1\text{u} = 1.66054 \times 10^{-24} \text{ 克}。$$

从上面可以看到 N_A 是一个重要的普适常数,利用它把宏观质量单位(克)和微观质量单位(u)联系起来了。也就是说 N_A 起着宏观与微观之间的桥梁作用。

二、原子的大小

在目前的测量手段下,对原子的大小还不能直接测量,而要通过间接方法测量。

原子并没有明显的边界,利用下述方法我们可以估计原子的大小。

在固体和液体中,各原子几乎相互接近,特别是在晶体中,原子按一定规律整齐排列成点阵,这就为估计原子的大小提供了方

① 本书中各种基本常数数据均取自 1986 年国际科技数据委员会〔CODATA〕公布的基本常数国际推荐值。

便。

假定原子是球形的,每个原子的半径为 r ,且元素的原子按一定规律紧密排列,以致相邻的原子都相互接触。若其原子量为 A ,则 A 克原子具有 N_A 个原子。设该原子质量密度为 ρ (克/厘米³),则 A 克原子总体积为:

$$V = \frac{A}{\rho}, \quad (1.1.4)$$

而一个原子半径为 r 的原子,体积为 $\frac{4}{3}\pi r^3$,

故:
$$\frac{4}{3}\pi r^3 N_A = \frac{A}{\rho}.$$

由此可得估算原子半径的公式

$$r = \left(\frac{3}{4\pi} \cdot \frac{A}{\rho N_A} \right)^{\frac{1}{3}}. \quad (1.1.5)$$

根据(1.1.5)式可计算出不同原子的半径大约都在 10^{-10} 米数量级。表1.1.1列出一些原子的半径,表中1埃($\text{\AA}$)= 10^{-10} 米,为原子物理中常用的长度单位。

表 1.1.1

元 素	质量数 A	质量密度 ρ (克/厘米 ³)	原子半径 r (埃)
Li	7	0.7	1.6
Al	27	2.7	1.6
Cu	63	8.9	1.4
S	32	2.07	1.8
Pb	207	11.34	1.9

从范德瓦尔斯(Van, der, waals)方程也可以估算原子的大

小。在方程 $(p + \frac{a}{V^2})(V - b) = RT$ 中, p 为气体的压强, 系数 a 的量值决定于气体普适常数, T 为绝对温度, V 为体积, b 值按理论应等于1摩尔气体分子总体积的四倍。由实验测定一组 p 、 V 、 T 值后, 可确定 b 值, 由此算出分子的半径, 其数量级和原子半径相同。

计算原子的大小还可以采用其它的方法。用不同的方法得到的数值会有些差别, 但它们的数量级相同。

§1.2 卢瑟福核式结构模型

1897年, 英国物理学家汤姆逊在研究阴极射线时, 发现各种不同材料做成的阴极所发射的阴极射线具有同样的性质, 它们都是一种带负电的粒子流。汤姆逊进一步测定了这种粒子的电荷和质量的比值(荷质比), 并把这种粒子命名为“电子”。显然, 汤姆逊的发现揭示了电子应是原子的组成部分。

因为原子是呈中性的, 既然原子中包含有带负电荷的电子, 那么原子中也一定会有带有等量正电荷的物质。1903年汤姆逊首先提出了一种原子模型。他设想原子是一个半径约为 10^{-8} 厘米的弹性的冻胶状的小球, 原子中的正电荷均匀分布在整个球内, 而带负电荷的电子则镶嵌在这个球体中, 正、负电荷的量值相等, 以保持单个原子的电中性。原子中的电子则在它们平衡位置上作简谐振动。人们观察到原子所发光谱的各种频率, 可认为相当于这些电子振动的频率。汤姆逊原子模型可以使当时的一些实验结果得到一定的解释, 但是, 这个模型所预言的原子光谱与实验观测的数据完全不符, 特别是 α 粒子散射实验否定了汤姆逊的原子模型。

一、 α 粒子散射实验

α 粒子散射实验是历史上一个著名的实验, 它导致了原子核的发现。