

现代物理 基础教程

(上册)

Fundamentals of Modern Physics

主编 霍裕平



高等教育出版社

现代物理 基础教程

(上册)

Fundamentals of Modern Physics

Xiandai Wuli Jichu Jiaocheng

主编 霍裕平

编者 (以章节先后为序)

范中和 张 林 曹义刚 金 涛
郭芳侠 李永放 王杰芳 杨德林
赵维娟 梁二军 贾 瑜 苏金瑞

高等教育出版社·北京

内容摘要

本书由中国科学院院士霍裕平主编。本书以现代物理的观点和现代技术发展对人才培养的要求出发,对物理类专业的传统基础物理课程结构和教学内容作了较大的改革。全书分为上下两册,上册包括以现代物理观点阐述的经典力学、热学、电磁学、电磁波及信息传输、狭义相对论等;下册包括量子物理、原子物理、原子核物理、光子物理、分子物理和固体物理等。本书凝炼和浓缩了上述学科的主要内容,试图使学生在有限的学时内比较全面地掌握现代基础物理学的概念与要义,了解各重要领域的基本过程与规律及其与当前迅速发展的高新技术的联系。

本书可作为高等院校物理类专业本科生的教材或参考书,也可供物理教师、科技工作者、研究生参考。

图书在版编目(CIP)数据

现代物理基础教程.上册 / 霍裕平主编. -- 北京 :
高等教育出版社, 2015. 10
ISBN 978-7-04-043743-0

I. ①现… II. ①霍… III. ①物理学-高等学校-教材 IV. ①O4

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第191791号

策划编辑 缪可可
插图绘制 杜晓丹

责任编辑 缪可可
责任校对 陈旭颖

封面设计 张志奇
责任印制 田 甜

版式设计 杜微言

出版发行 高等教育出版社
社 址 北京市西城区德外大街 4 号
邮政编码 100120
印 刷 北京嘉实印刷有限公司
开 本 787 mm × 1092 mm 1/16
印 张 26.25
字 数 640 千字
购书热线 010-58581118

咨询电话 400-810-0598
网 址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>
网上订购 <http://www.landraco.com>
<http://www.landraco.com.cn>
版 次 2015 年 10 月第 1 版
印 次 2015 年 10 月第 1 次印刷
定 价 45.90 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换
版权所有 侵权必究
物 料 号 43743-00

序言 ///

物理学是人类生产与社会发展的重要科学基础,是近代高新技术快速发展的直接科学支撑。能够比较全面地理解物理学的基本概念、基本理论、过程及规律,认识自然界各类重要物质的特性及可能的变化,是科学工作者和工程技术人员所必需的素质,对他们创新能力的提高至关重要,对物理类专业毕业生及物理教师,更是必要的专业和职业素质要求。按照子学科分类,物理学内容可归于经典物理学(主要指 19 世纪末以前建立和完善的宏观物理理论)和近代物理学(主要指 20 世纪初以后以相对论和量子论为基础发展起来的物理学理论)两大类。近代物理学已成为现代高新技术的重要科学基础,熟悉经典物理与近代物理在概念及规律上的联系对深入理解宏观运动规律至关重要。

总的说来,长时间以来我国基础物理教学内容比较陈旧、偏狭,缺少与当代高新技术的联系,从而影响了对未来大批科学和技术人才创新能力的培养。我们认为,对基础物理教育而言,当前的首要任务是改革基础物理教学内容,使得广大物理系(或接受物理教育)的学生能正确接受“现代物理学”的基本概念及基本规律。然而,教材是教学的载体,只有有了适合新时代要求的教材,先进的教学手段才能取得更有效的成果。

基于上述理念,我们编写这部现代物理基础教材的基本目标、原则及特色是:

1. 作为物理系的基础物理教材应该包括核心子学科的主要基础知识、基本规律,及有关物质的基本特性及变化行为。由于现代物理学涉及面很广,难以凝聚成篇幅较为有限的教材。近年来,国内外大多数物理教材改革偏重于一些重点课题的讲解。我们认为,这有可能会不利于学生对物理学基础的认识,不利于学生走出大学校门后在各种领域中灵活地应用各方面的物理知识。根据我们的认识及吸取一些同志的意见,本书选择了 11 个子学科,即经典力学、热学、电磁学、电磁波及信息传输、狭义相对论、量子物理、原子物理、原子核物理、光子物理、分子物理、固体物理。作为全书导引,还在前面增加了一章“物质结构”。由于考虑到距离大多数人关心的问题过于遥远,以及部分学者认为学科基础尚在论证发展中,我们没有考虑“基本粒子与量子场”“宇宙论”“广义相对论”三部分内容。“流体物理”应该也是基础物理中的一部分,但我们的确无能力将其作为完整学科加以凝聚。

2. 我国传统的物理系物理专业课程基本上可分为三个课程群,即基础物理课程群(普通物理类,两学年约 300 多学时),理论物理课程群(包括“四大力学”“数学物理方法”“计算物理”等)以及专业课程群。

理论物理课程群是可以一门课一门课近独立地讲授的。尽管对改革内容现已有很多争议,如数学物理方法是否应该包含“非线性数学”“泛函分析”等,但涉及范围比较小,个人或少数人合作还是可以开展改革的。

基础物理教材涉及范围很广,它与社会发展及高新技术联系非常密切,不能有原则性的偏差。因此,在当前急功近利的气氛较重的情况下,很难有对现代物理有一定水平的群体愿意全力

投入此项“吃力不讨好”的编写工作。为此,作为已“淡出江湖”的老人,我在此序言中要对参加本教材编写的郑州大学和陕西师范大学的12位中青年教师忘我的工作表示敬意。根据我们对现代物理学的认识,六年前开始编写本书时就已确定,除了包括以现代物理观点理解的力学、热学、电磁学、光学与信息传输等传统子学科章节外,还包括量子物理、原子物理、分子物理、原子核物理、光子物理及固体物理的要义。本书力图凝炼和浓缩上述学科的主要内容,使得大多数物理类专业本科生在老师的教导下,就能在当前教育制度允许的课时内(限制在300学时多一点)真正比较全面地掌握现代物理学的要义,真正有益于今后在各方面的工作。亦即,无论是经典物理还是近代物理,每章或每个子学科都只能“分配”到至多30多个学时,只是原传统基础物理篇幅的一半。

经过20世纪的迅速发展,“现代物理学”与传统“经典物理学”从内容到结构上都有极大的不同。相对于传统的教材,不仅增加了过半的微观物理的章节,而且诸如力学、热学、光学等学科也因引入了宏观物理量的微观含义而改造了相当部分的学科体系。我们看到,在本书中一些宏观物理量如果从微观基础概念出发去理解,就有可能大大消除原宏观定义的含混。比如,在第三章热学中,只要认识到均匀气体的“热力学状态”就是气体分子的“能量均分”平衡态,则热力学过程都是外界对气体做功或传热的结果。由热力学第一定律及气体物态方程就可直接、完整地讨论热力学过程及热力学循环,无需引入各种令人不易接受的热力学函数(如熵、焓等)。热力学第二定律只是“非平衡态热力学”的基础,只有在讨论输运过程中,才真正需要引入“熵”。本书中的热力学就成为比较容易理解和应用的学科。又如,相对传统学科内容变化最大的是电磁波及光学,也就是本书第五章电磁波与信息传输。近年来,通过电磁波的异地传输及处理信息过程变得越来越重要。如何描述分布在有限空间中不同点光源发射的电磁波及其在空间传播就成为光学中比较核心的问题。可以发现,基于平面波和傅里叶定律的经典光学(或几何光学)存在不少矛盾,应该在“球面波”基础上重新讨论如何将光源与光的传播结合;统一讨论几何光学与衍射的关系,分析光学器械的作用……构造“球面波与信息光学”。经过再三思考与试写,我们还是决定从本教程就开始初步按现代物理的基本要求改造光学及信息传输章节的内容。

综合其他方面较小的改动,在原经典物理内容的前五章中,也有约50%以上的内容根据现代物理学的观点作了较根本的或者可以称之为“创新”的改造。

3. 涉及近代物理学的后六章,每个子学科及章节的篇幅只能是可作为参考的专业基础教材的1/3左右。因此,需要编写者深入了解该子学科比较综合的内容,从而凝聚学科的基本知识、基本概念、相应物质的基本特性及变化过程、学科的基本规律以及与重要高新技术的联系,使得本科学生最终能真正理解教材内容并在今后能主动将这些内容与自己面临的有关工作联系起来。我们认为,在当前情况下,教师能深入理解相应子学科的核心认识是大多数学生能学好现代物理基础知识的关键。我们还要强调,近代物理学的整体性、各子学科的联系也较强。在编写每章子学科时,应该比较多地从现代物理整体来核定单章内容。例如,本书在分子物理学科的叙述中强调了物理学界长期忽视分子结构的形成及与各类物性的关系。实际上,在自然界中,微观有序结构自发形成是非常普遍的现象,自然界有非常多的重要物质,它们的特性、物态变化过程、物理现象等都与其分子结构密切联系。扩展一些,也许晶体物理、高分子物理、液体结构、生物物理等的进展也都与人类对这类“微观有序结构自发形成”理解的深化有关。在本书中,我们只在分

子物理一章中叙述了分子结构和化学键及杂化理论,并在固体物理中提及晶体结构与化学键的关系。我们希望,今后会有更多的物理学家和物理教师能重视分子结构及其与物性的关系,从物理学角度与化学家合作,填补分子物理中这一大块领地。

4. 根据现代物理的特点,以及当前社会上对现代物理的初步认识,现代物理基础教育应以教师讲授、学生理解和讨论为主,不宜过分强调“启发学生自主认识”,而是强调学生树立正确的物理概念和认识。我们不主张“通过习题来加深对物理的理解”,而是让学生了解现代物理与数学的接口处,在今后高年级课程或实际工作中有目的地深入到所需的数学领域。因此,我们才能在有限的篇幅内讲授现代物理的主要内容。我们认为,编写现代物理基础教材与科普作品的写作目标是完全不同的。学生通过学习要系统地了解基本物理现象、物理概念、物理规律,而不是对某些吸引人的现象或领域作出人们能接受的理解。近年来,国外同行曾出版过不少“改革”的物理教材,但主要都是围绕凝炼出的一些重要的现代物理概念或重大课题进行比较综合性地讲解。我们采取的是对现代物理比较全面的基础教育途径,以适应今后学生可能要应对的物理要求。对绝大多数学生来说,也许这样做更合适一些。

5. 为了使得学生对现代物理与社会发展及技术进步的联系有比较深刻的认识,强调现代基础物理学是当代高新技术主要的(有一些更是直接的)科学基础,这是本书的另一重要要求。为此,我们改写了光学及信息传输、分子结构、统计热力学,增加了激光、核能等内容。当然,这方面的实际内容太多,如何进一步概括和改进,更是我们及有志于现代物理教育改革的同事们今后的努力方向之一。

从提出编写现代物理基础教材,明确教材的基本目标及要求,到开始组织十几位教师讨论编写,迄今已六年有余。历经数次逐章的审查和修改,印刷了一次试用教材,在两校组织两轮完整的教改试用,并多次征求了一些在科研与教学方面有经验人士的意见,我们认为教材初步达到了可以出版的程度。由于该书包含了相当多的新内容,加之作者们水平有限,书中肯定还存在不少可以(或者必须)修改的内容,希望在今后得到有志之士的批评指正。但是,我们可以负责任地说,在编写本书的整个过程中,我们追求前面所列的“目标”和“原则”的意愿是真诚的。

我是本书的主编。本书总的结构、每一章(子学科)的“主旨和要义”经过讨论,最终由我个人根据自己的认识来决策。具体内容分工各章节的同事负责起草,分工编写情况为:

范中和(第1章 物质结构)

张林、范中和(第2章 经典力学)

曹义刚、金涛(第3章 热学)

郭芳侠(第4章 电磁学)

李永放(第5章 电磁波及信息传输)

张林(第6章 狭义相对论)

王杰芳(第7章 量子物理)

杨德林(第8章 原子物理)

赵维娟(第9章 原子核物理)

梁二军(第10章 光的量子性及光与物质相互作用基础)

贾瑜(第11章 分子物理)

苏金瑞(第12章 固体物理)

除一些必要的统筹外,每个子学科基本保持原编著者的风格。对于初版的教材,我们认为也许这种方式更合适一些,也可保持今后执教的教师根据自己的认识有一定的自由度。

从某种意义上讲,本书的取材是与编写者对现代物理的认识分不开的,我们希望本书的出版能起到“抛砖引玉”的作用。今后一定会有不同认识的读者,展开负责任的讨论,甚至争论,从而可大大推进现代基础物理学的教育改革。

霍裕平

2015年6月

目录

第 1 章 物质结构	1	§ 2.6 刚体	101
§ 1.1 原子和分子	2	1 平动和转动	101
1 原子结构	2	2 刚体转动的描述	102
2 分子结构	9	3 刚体的角动量	105
§ 1.2 物质存在的形态	18	4 刚体的转动动能	109
1 气体	19	5 刚体的一般运动	112
2 固体	23	6 刚体的平衡	113
3 液体	28	7 进动	114
思考题	33	§ 2.7 自由度及相关分析	115
第 2 章 经典力学	35	1 相空间	115
§ 2.1 运动及其描述	36	2 自由度	117
1 空间和时间	37	3 自由度分析的意义	119
2 运动的描述	42	§ 2.8 流体	123
3 伽利略变换	46	1 流体运动的基本概念	123
§ 2.2 质点动力学	48	2 连续性方程	125
1 力	49	3 欧拉方程	127
2 质点动力学方程	52	4 实际流体	131
3 动量和冲量	59	5 物态方程	131
4 能量	60	6 初始条件和边界条件	132
5 机械振动	65	7 数值计算方法	133
§ 2.3 曲线运动	71	§ 2.9 流体中的声波	134
1 曲线运动	71	1 波动的基本概念	134
2 行星的运动	76	2 波动方程	137
§ 2.4 观测系中的牛顿第二定律	83	3 波动与振动的关系	140
1 有关绝对参考系的讨论	83	4 波的能量和能流	142
2 非惯性参考系	85	5 驻波	145
3 测量本征加速度	87	6 波源	148
§ 2.5 质点系	87	7 超声波和次声波	150
1 两体运动	88	8 多普勒效应	151
2 质点系的动量	92	思考题	153
3 质点系的能量	94	习题	155
4 碰撞	97	第 3 章 热学	160
5 质点系的角动量	99	§ 3.1 气体热力学	164
6 质点系对质心的角动量	100	1 气体的微观分子图像	164

2 气体分子自由度和碰撞	165	§ 4.2 真空中的静电场	228
3 均匀气体的热力学状态	166	1 电场	228
4 理想气体的热能与温度	169	2 电场强度	228
5 气体的宏观热力学参量	171	3 高斯定理 环路定理	231
6 理想气体的物态方程	172	4 电势	235
7 理想气体的热容	174	5 带电体在电场中受力及其运动	240
8 非理想气体的热能和物态方程	174	§ 4.3 静电场与物质的相互作用	241
9 气体热力学中能量传输过程	178	1 静电场与导体的相互作用	241
10 理想气体的热力学过程	180	2 静电场与电介质的相互作用	244
11 理想气体的卡诺循环	181	3 电容器及其电容	248
12 气体热机的基本原理	182	4 电场的能量	252
§ 3.2 气体的热力学非平衡过程	185	§ 4.4 电势的泊松方程 边界条件	253
1 局域平衡态,热力学第二定律的含义	186	1 泊松方程	253
2 分子分布函数	186	2 边界条件	254
3 均匀平衡态分布函数——麦克斯韦 速度分布	187	§ 4.5 恒定电流	255
4 局域平衡态分布函数——玻耳兹曼 分子数密度分布	191	1 恒定电流	256
5 分布函数随时间的演化	192	2 电源及其电动势	258
6 H 定理	193	3 欧姆定律及其微分形式	258
7 气体热力学状态的熵	194	4 稳恒电路分析	261
8 热力学第二定律	197	§ 4.6 恒定磁场及其性质	265
9 卡诺定理	199	1 磁现象	265
10 热力学函数	199	2 磁场的描述	266
11 输运过程	201	3 毕奥-萨伐尔定律	268
§ 3.3 热力学的基本原理	205	4 磁场的高斯定理	271
1 固体和液体的运动模式	205	5 磁场的安培环路定理	271
2 固体和液体热力学与气体热力学的 关系	209	§ 4.7 磁场对运动电荷及电流的作用	274
3 热平衡条件	213	1 磁场对运动电荷的作用	274
§ 3.4 相变	215	2 磁场对载流导线的作用	279
1 相变过程	215	§ 4.8 磁介质	281
2 多相共存	218	1 介质的磁化	281
3 蒸发与升华	219	2 有磁介质时的安培环路定理 高斯 定理	283
4 自然界中的水循环	220	3 铁磁质	284
思考题	222	§ 4.9 电磁感应	287
习题	223	1 电磁感应定律	288
第 4 章 电磁学	225	2 动生电动势	291
§ 4.1 库仑定律	226	3 感生电动势	293
1 电荷	226	4 自感和互感	295
2 库仑定律	226	5 磁场能量	297
		§ 4.10 交流电路	298
		1 交流电的概念	299

2 交流电路分析	303	3 电磁波的应用与发展	352
思考题	305	§ 5.6 几何光学	355
习题	307	1 几何光学近似的物理基础	355
第 5 章 电磁波及信息传输	313	2 几何光学中的基本概念	356
§ 5.1 麦克斯韦方程组	314	3 球面介质成像的傍轴条件	356
1 矢量运算与微分	314	4 平面反射镜和球面反射镜成像	357
2 涡旋电场和位移电流	315	5 薄透镜成像	358
3 麦克斯韦方程组	318	6 光学成像中的像差与色差	360
4 电磁场的边界条件	319	7 人眼结构与成像原理	362
5 电磁波源与传播	320	8 光的偏振	363
§ 5.2 电磁波的传播	321	§ 5.7 半球面波的相干叠加 图形	
1 均匀介质中的电磁波波方程	321	传播与处理	369
2 平面电磁波	322	1 光学系统中的光源及半球面波	370
3 电磁波的叠加原理	325	2 多个相干点光源的干涉	371
4 群速度	326	3 图像传输及光学系统	377
5 傅里叶分析概述	327	思考题	382
6 电磁波的频谱分布	329	习题	383
§ 5.3 球面电磁波	331	第 6 章 狭义相对论	385
1 球面电磁波	331	§ 6.1 洛伦兹变换	386
2 相干球面电磁波的信息传送	334	1 相对论的产生	386
3 电磁波图像传输	336	2 洛伦兹变换关系	389
§ 5.4 电磁波的反射与折射	340	§ 6.2 相对论的质能公式	394
1 电磁波在介质界面上的反射与折射	341	1 相对论动量和能量	394
2 介质的折射率	344	2 相对论质能公式	396
§ 5.5 不同频段电磁波的产生和传播	346	思考题	399
1 无线电波的几种传播方式	346	习题	400
2 电磁波的产生	348	习题答案	401

第 1 章 物质结构

▶ 人们生活在五彩缤纷的物质世界里,构成这个世界的物质是多种多样的,比如我们的周围的空气、水、花草、树木、宝石、金属……这些物体都是比较大、能直接观测到的,被称为宏观物体.描述宏观物体运动规律的理论称为经典物理学.尺度在 10^{-10} m 以下的微小物体(比如原子、电子等)被称为微观物体.描述微观物体运动规律的理论称为量子物理学.

自然界的物质千姿百态.在一定条件下,自然界的物质处在相对稳定的状态,按照传统的观点,人们将日常生活中所接触的宏观物质分为三种状态:固态、液态和气态.由于组成物体的原子或分子相互作用力的约束,当原子或分子只能围绕各自的平衡位置作微小振动时,表现为固态;当分子或原子运动得比较剧烈,使其没有固定的平衡位置,但还不致分散远离时,表现为液态;如果分子或原子失去了固定的平衡位置,而且能在空间作自由运动,能够互相分散远离时,就表现为气态.在一定条件下,物体的三种状态是可以相互转化的.

目前,在元素周期表上列出的元素中,只有 92 种是天然存在于自然界的.尽管在我们周围存在着不计其数的物质,而且具有各种不同的形态与特性,巨大的或微小的,坚硬的或柔软的,有形的或无形的,有生命的或无生命的……但它们都是由这 92 种不同元素的原子组成的.自然界存在着的一切宏观物体可以由一种元素的原子组成,也可以由多种元素的原子组成.不同物质性质各异,鲜花绿叶中有能治疗疾病的良药,也有可危及生命的毒草;同样都是由碳原子构成的石墨和金刚石,石墨很柔软,它是制作铅笔芯的原料,而金刚石却很坚硬,能切割玻璃.为什么会如此呢?这需从组成物质的原子和由原子构成的分子说起.

§ 1.1 原子和分子

原子是物质结构的一个层次,是参与化学反应的最小粒子.分子是物质保持其化学性质的最小单位.

费曼曾经说过:“假如在一次大灾难中所有的科学知识都丢失了,只剩下一句话留给下一代,怎样才能用最短的语句包含最多的信息呢?我相信这句话是原子假设,即一切物体都是由原子组成的,这些原子是一些很小的粒子,它们始终不停地运动着,当彼此略微离开时相互吸引,当彼此过于靠近时又相互排斥.”为什么呢?自然界种类繁多、形态各异的万物的共性在哪里?这些需要在微观层次中去寻找.

1 原子结构

1.1 认识原子

自然界形形色色的物质是由什么构成的呢?这个自然科学中最根本的问题,在古代就引起了人们的注意.公元前4世纪,古希腊哲学家德谟克里特提出了一个朴素的概念——“原子”,原子(atom)一词来源于希腊文($\alpha\tau\omicron\mu\omicron\varsigma$),意思是“不可分割”的.德谟克里特认为,千千万万种物质都是由最微小、最坚硬、不可入、也不可再分的“原子”构成,他还认为,不同数目、不同形状的原子以不同的形式排列并连接起来就构成了宇宙间的万物.然而,这只是一种创造性的大胆想象和猜测,没有任何实验和事实依据.尽管当时生产技术和科学水平很低下,人们对物质结构的探索仅仅停留在直观和推测上,缺乏科学的证明.然而作为人类探索物质结构的最初阶段,这些见解和猜测一直影响着后人.

18世纪末叶以后,工业的发展促进了包括化学在内的自然科学的发展,在积累了大量化学知识的基础上,英国化学家道尔顿于1803年提出了原子论.他在分析某些化合物的组成时发现,元素的量只能以某一最小量的整数倍变化,于是把某元素参加化学变化的最小单元称为该元素的原子.他认为,一切物质都是由极小微粒的原子组成的,原子是不可见和不可分割的,它们既不能创造也不能消灭,在化学变化中原子保持其本性不变;同一元素的原子,其形状、质量和各种性质都相同,而不同元素的原子的大小、质量和单位体积内的数目各不相同;当两种元素化合时,甲元素的每一个原子总是和乙元素的一个或几个(整数)原子结合在一起的.道尔顿的原子论是最先在科学事实基础上建立的理论.

那么,原子是什么模样,我们是否可以观察到呢?由于原子很小,我们凭肉眼是看不见的,但是可以借助仪器观察到它.假设让你观察一块平整干净的纯铁板,无论怎样非常贴近地、仔细地、认真地观察,也只能看见光滑的连续的铁板.即使利用最好的光学显微镜(最大放大倍率约为2 000)进行观察,仍然只能看见光滑的连续的铁板.如果改用放大倍率为数十万倍的电子显微镜进行观察,所看见的铁板表面就不再是光滑连续的了,而能够观察到类似于从远处观看到的体育场上挤满的人群一样的景象.如果想进一步了解这挤满的是什么及它们的真实面目,可以用扫描隧穿显微镜(STM)进行观察,这时能够清楚地观察到各个原子在物质表面的排列状态.图1-1-1是通过扫描隧穿显微镜观察到的硅表面原子排列的照片.现在,人们不仅可以将STM当成“眼睛”

来观察材料表面原子的细微结构,而且可以将 STM 的探针当成“手”来操纵摆弄单个原子,用它的探针尖吸住一个孤立原子,然后把该原子放到另一个位置.图 1-1-2 的照片是 IBM 公司的科学家于 1993 年在 4 K 的温度下,用扫描隧穿显微镜的针尖把 48 个铁原子一个一个地栽到了一块精制的铜表面上,围成一个圆圈,圈内就形成了一个势阱,人们称为“量子围栏”.

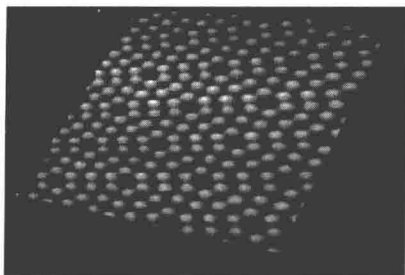


图 1-1-1 硅表面的 STM 照片

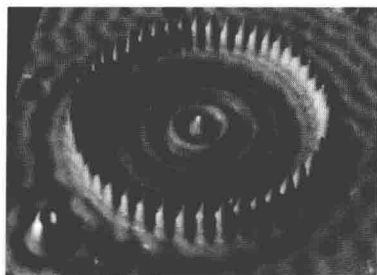


图 1-1-2 “量子围栏”

原子有多大呢?为了能让同学们对原子的大小有一个粗略的印象,我们可以想象,如果把一个苹果放大到地球那样大,苹果中的一个原子差不多就有原来的苹果那么大了.氢原子是所有原子中最小的,它在元素周期表中排在第一位.如果将 1 亿个氢原子一个挨一个地排成一串,其长度也只有 1 cm(厘米).若将原子视为圆球形,其直径只有 10^{-10} m 数量级. 10^{-10} m 称为埃($\text{\AA}$, $1 \text{ \AA} = 1 \times 10^{-10} \text{ m}$).

1.2 原子的内部结构

原子有没有内部结构呢?在道尔顿提出原子论以后的一百多年时间里,人们一直把原子当成不可再分的、没有结构的质点来看待.但是从 19 世纪末以后,这种观点受到了一系列科学发现的巨大冲击.1897 年,汤姆孙在研究气体放电管阴极射线实验时发现了电子,通过进一步更精确的实验证实:电子是构成原子的一部分.电子是一种比原子更小、存在于原子中并带有负电荷的粒子.实验测得一个电子所带的电荷量为 $-1.602\ 176\ 487 \times 10^{-19} \text{ C}$ (库仑).常用符号“e”表示电子.电子的发现揭示了原子也是有复杂内部结构的.1898 年,居里夫妇发现了具有放射性的元素,研究指出,这些放射性元素的原子内部不断地有物质粒子自发地抛射出来,在其周围形成了射线.电子和元素放射性的发现表明了一个不容否定的客观事实:在原子的内部还存在着更小的粒子,从而打破了“原子不可分割”的神话,这是人类对原子结构认识的又一重大突破.

原子的内部构造是什么样呢?探讨并确定原子内部的结构就成为当时科学研究的一个重要前沿.科学家们认为,既然电子存在于原子的内部,电子是构成原子的一部分,而原子都是电中性的粒子,那么,在原子的内部必须还有一种带正电荷的粒子与电子共存,并且,正电荷数必然和电子数相等.为了探求原子内部的结构,1911 年,卢瑟福及其助手们进行了如图 1-1-3 所示的实验,当 α 粒子束射向金箔时,大部分粒子都能直线通过金箔,只有极少数(八千分之一至一

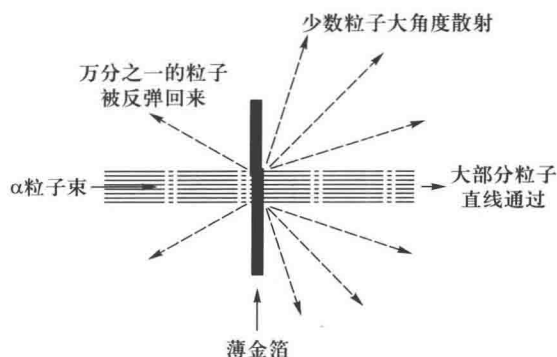


图 1-1-3 卢瑟福 α 粒子散射实验

万分之一)的粒子好像遇到了什么严重的阻碍似的被反弹了回来.卢瑟福分析这一实验现象后指出:每个 α 粒子的质量大约是电子质量的7 000倍,它以接近光速的速度运动,如果 α 粒子接近电子,虽然电子能吸引和它所带电荷相反的 α 粒子,但由于和电子相比, α 粒子的质量太大了,电子没有能力把它吸引过去,因此 α 粒子会将电子撞到一边而自己不受影响的呈直线穿过.考虑到构成射线束的 α 粒子是带正电荷的粒子(实际上 α 粒子是去掉两个电子的氦原子核),把 α 射线弹射回来的一定是构成金箔的金原子内存在带正电荷的部分.由于只有很少粒子被反弹回来,表明原子中带有正电荷的部分并不是均匀地分布在原子之中,它只是集中在原子内一个很小的区域. α 粒子只有与原子内的很小体积的正电部分进行头对头的碰撞才会发生反折,而大部分 α 粒子会直接穿过原子正电部分以外的虚空区域.另外,当高速的 α 粒子撞向原子内带正电的很小体积时,小体积岿然不动,却把 α 粒子弹射了回去,这就表明,这个带正电的小体积具有相当大的质量.

在 α 粒子散射实验的基础上,卢瑟福提出了原子核式结构模型,他指出在原子的中心有一个体积很小但却几乎集中了原子全部质量的带正电荷的“硬芯”,它就是原子核,外面有带负电荷的电子在核外空间里绕着原子核运动,就像行星围绕太阳运动一样.他认为电子在原子核周围从内层向外层的一个一个的“轨道”上运动,最外层轨道的大小就是原子的大小.图1-1-4所示为原子的结构模型,我们可以将这里的“轨道”理解为电子在核外有相对独立的状态.至此人们认识到,原子是由体积更小的原子核和核外一个或多个电子组成的,电子带负电荷,原子核带正电荷.每一个电子带有一个基本单位的负电荷 $-e$,原子核所带的正电荷为 Ze ,其中 Z 是原子序数,它决定原子在元素周期表中的位置.一般情况下,原子核所带的正电荷和核外电子所带的负电荷量值相等而符号相反,因此,原子本身呈电中性,这是正常的原子.如果原子缺少电子或有多余的电子,因而带有电荷,则将这种原子称为离子,缺少电子而带正电荷的称为正离子,有多余电子而带负电荷的称为负离子.

电子和原子核依靠库仑引力结合成原子.原子核外的电子只能处在一些离散的(或称量子化的)轨道上,每一个轨道都对应原子的一个稳定的能量状态(称为能级).我们可以形象地将原子的能级或原子中的电子态理解为一系列的台阶.每个台阶间隔代表的能量是不相同的,上边的台阶比低层的台阶密得多.图1-1-5是氢原子的能级台阶及跃迁.电子从台阶1(原子的基态)跃迁

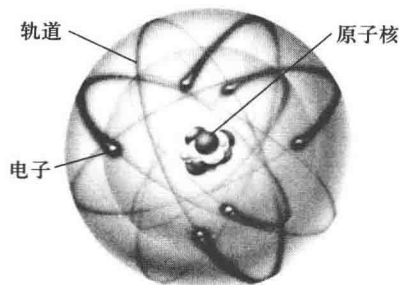


图 1-1-4 原子结构模型

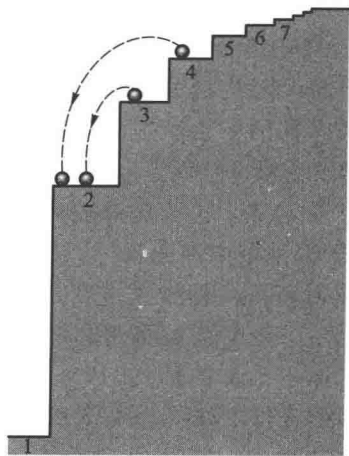


图 1-1-5 氢原子的能级台阶及跃迁

到台阶 2 需要吸收恰好 $h\nu$ 的能量,如果电子从台阶 2 落回到台阶 1 也需要放出同样多($h\nu$)的能量.电子在不同能级之间跃迁时,吸收或放出光子的能量与能级之间的能量差相等.

电子在原子核外的空间以接近光速的速度运动,其运动规律是比较复杂的.电子在运动中,既有一定的速度和质量,表现出粒子的性质;又有一定的波长和频率,表现出波动的性质.这种特殊性使我们不能同时测定某一时刻电子在原子中的位置和速度,只能指出电子在核外某处出现概率的大小.人们一般所说的原子中电子的“轨道”实际上是反映电子在核外运动出现概率比较大的区域.这里的“概率”描述的不是个别电子的某次运动,而是电子的许许多多多次运动的统计结果.

让我们进入原子内部去看一看.原子的中心是原子核,原子核的体积比原子小得多.比较精密的实验测出原子核的大小(直径)约为几个飞米(fm)的量级, $1\text{ fm} = 10^{-15}\text{ m}$.现在,我们将原子核的大小和整个原子作一个比较.尽管较轻的原子可能有较短的半径,而较重原子的半径较长,但原子半径的平均值大约是 $2 \times 10^{-10}\text{ m}$.为了方便比较,我们可以用 $5 \times 10^{-15}\text{ m}$ 作为一个原子核半径的平均值.那么,整个原子的半径是原子核半径的 4 万倍.这意味着如果把原子核放大成一个桔子的大小,那么原子的直径差不多就有 3 公里那么大.这样的比较使我们清楚地看出原子核周围是一个很“空旷”的结构.尽管轨道电子的确占据着原子核周围的区域,但电子本身是那么小,它们只能占据极其微小的空间.原子中电子的质量是微不足道的,原子质量的 99.945% ~ 99.975% 集中在原子核这样小的体积里,在原子核中物质的密度可以达到 $10^{17}\text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$,即使把珠穆朗玛峰的体积压缩到 1 m^3 ,它的密度仍然达不到这样大的数值.

原子核虽然很小,但其内部仍有着极为复杂的结构.卢瑟福通过 α 粒子散射实验发现了质子,并预言了中子的存在.1932 年,查德威克在实验中发现了不带电的中子,并测出中子的质量与质子质量比较接近.通常用符号“p”表示质子,用符号“n”表示中子.质子和中子都是组成原子核的粒子,所以统称为“核子”,核子通过核力紧紧地束缚在一起构成原子核.核子中每个质子带有一个基本单位的正电荷,中子呈电中性.由于质子带有正电荷,而原子是呈电中性的,所以,一个原子核中质子数目的多少也就决定了原子核所带正电荷的多少,同时也决定了核外电子数目的多少.例如,氢原子核外有 1 个电子,氦原子核外有 2 个电子,铀原子核外有 92 个电子.到此,人们构造出了微小的原子世界的一个物理图像:一个小小的原子核位于原子的中心,周围被电子的云团包围着.

质子、中子和电子都是构成原子的粒子,都比原子小,因此它们也被称为亚原子粒子.到目前为止,电子是所有粒子中最轻的,电子的质量为 $9.109\ 382\ 15 \times 10^{-31}\text{ kg}$ (千克).质子的质量是电子质量的 1 836 倍,为 $1.672\ 621\ 637 \times 10^{-27}\text{ kg}$,自由中子的质量是电子质量的 1 839 倍,为 $1.674\ 927\ 211 \times 10^{-27}\text{ kg}$.可见,质子、中子和电子的质量都是很小的.在自然科学中,人们常取由 6 个质子和 6 个中子构成的碳原子核的原子质量的十二分之一作为微观粒子的质量单位,这个单位称为原子质量单位,以符号 u 表示.原子质量单位 u 和千克(kg)之间的关系是 $1\text{ u} = 1.660\ 538\ 78 \times 10^{-27}\text{ kg}$.以原子质量单位表示质子、中子和电子的质量时,质子是 $1.007\ 276\ 466\ 77\text{ u}$,中子是 $1.008\ 664\ 915\ 97\text{ u}$,电子是 $5.485\ 799\ 094\ 3 \times 10^{-4}\text{ u}$.由此可见,电子的质量比质子和中子的质量小得多.

既然原子核是由质子和中子构成的,似乎原子核的质量应该等于核内所有质子与中子的质量之和.但是,实验发现,原子核的质量总是小于组成它的质子和中子的质量总和.将质子和中子结合成原子核后质量减少的现象称为原子核的质量亏损,它是核能利用的基础.

在已经发现的原子中,有一些元素的原子核具有相同的质子数而中子数不相等,虽然它们含有的核子总数不一样,却具有同样的原子序数,它们在元素周期表中占据着同样的位置,因此,将它们称为同位素.最简单元素的同位素是氢,它有三种同位素:氕(${}^1\text{H}$)、氘(${}^2\text{H}$ 或D)和氚(${}^3\text{H}$ 或T).氢同位素的结构如图1-1-6所示.氕核中含有1个质子和0个中子,常称为氢;氘核内含有1个质子和1个中子,常称为重氢;而氚核内含有1个质子和2个中子,常称为超重氢.

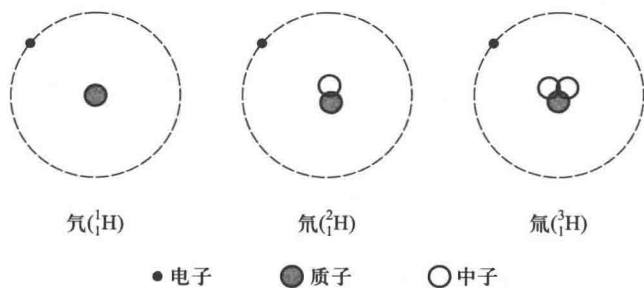


图 1-1-6 氢的同位素

原子核中,质子和中子的总数目差不多决定了原子的质量,常称为质量数(用 A 表示).质子数决定了原子的化学性质,称为原子数(常用 Z 记之).原子核的质量越大(含有更多的质子数),同位素就越多.例如,锡的原子核中有50个质子,具有10个稳定的同位素,质量数从 $A=112$ (62个中子)到 $A=124$ (74个中子).核中的中子可以帮助核把具有排斥作用的质子粘在一块.有的同位素是天然存在的,有的是人工制造的;有的具有放射性,有的没有放射性.例如,碳的三种同位素中,质子数都是6,而中子数分别是6个、7个和8个;碳12(记为 ${}^{12}\text{C}$)和碳13(记为 ${}^{13}\text{C}$)是稳定型的,碳14(记为 ${}^{14}\text{C}$)具有放射性.放射性同位素的原子核很不稳定,会不间断地、自发地放射出看不见但穿透力很强的射线.这种现象称为原子核的放射性衰变.

1.3 壳层结构模型

通过上面的讨论使我们对原子核有了一定了解,原子是由原子核和核外电子构成的,大家知道,在所有的原子中,除了氢原子只含有一个电子外,其他原子所含电子的数目从几个、几十个直到上百个.例如,氧原子核外有8个电子,钙原子核外有20个电子,铅原子核外有82个电子.那么,原子中这么多电子在核外是如何分布的呢?

原子中的每一个电子不仅受到原子核的作用,而且各个电子之间也有相互作用,与宏观物体的机械运动不同,电子在原子核外的一定空间里以接近光速的速度运动,没有确定的轨迹和运动方向,也无法准确地知道它在某一时刻所处的位置和速度.电子在核外的运动服从量子力学的规律.

人们在长期科学实验和量子力学理论基础上总结出了“原子的壳层结构”模型,即可以用原子内的电子按一定的壳层排列反映原子结构的内在规律性.人们按照离原子核距离的远近将核外电子运动的不同区域分成不同的电子层,用主量子数 $n=1,2,3,4,5,6,\dots$ 表示从内到外的各个电子层. n 值越小表示电子离核越近, n 值越大表示电子离核越远.常把 $n=1$ 的壳层称为第一壳层,也称 K 壳层, $n=2,3,4,5,6,\dots$ 各壳层分别称为第二、第三、第四、第五、第六……

壳层,或称 L、M、N、O、P……壳层.处于同一壳层的电子又有不同的运动状态,用角量子数 l 表示之,对于给定的 n 值,角量子数 l 的取值可以有 $l=0,1,2,3,\dots,(n-1)$,一共有 n 个.根据 l 的不同取值又可以把每一个壳层分为若干个次壳层,通常把 $l=0,1,2,3,\dots$ 的电子分别称为 s、p、d、f……电子.

需要指出的是,“电子壳层”的提法只是为了方便形象而已,并非核外电子真的就在一个一个大小的壳层上运动.“壳层”只不过是电子经常出现的一个区域.

原子中的电子是如何填充到各个壳层上的呢?显然不会是杂乱无章的,否则这么多运动的电子就要互相“撞车”.1925年,泡利在实验研究的基础上总结出这样的规律:在一个原子中无论含有多少个电子,都不会找到任何两个运动状态完全相同的电子.将此称为泡利原理.根据这一原理,在量子数为 n 的壳层上所能容纳的最多电子数为 $2n^2$.

每一壳层最多能容纳的电子数为 $2n^2$,它们按照什么顺序填充到原子壳层上去的?是从最里面的壳层开始向外填充呢,还是从外层向里层填充?人们研究发现,原子中高速运动的电子之所以不掉进原子核里,是因为原子中的电子具有能量,而且电子的能量是不连续的(亦即“量子化”的),在多电子的原子中,各个电子的能量是不同的.不同壳层上的电子中,最内层的电子在核外运动的空间范围最小,而且其能量一般也最低.越靠近最内层的各层(n 值小)电子在核外运动的空间范围越小,其能量也越低;反之, n 值越大的外层电子在核外运动的空间范围越大,能量也越高.量子数 n 对电子的能量起重要作用,对于多电子原子,其能量除了与 n 有关外,还与其他因素有关.电子在原子核外的壳层上一层一层地填充,原子处于正常状态时,每个电子趋向于占有最低的能量状态,当原子中电子的能量最小时,整个原子的能量最低,这时原子处于最稳定的状态.就好像石块处在山谷时重力势能最小、最稳定一样.由于原子稳定的能量状态主要取决于主量子数 n ,所以,最靠近原子核的壳层最容易被电子占据,原子中的所有电子总是从能量最低的最内壳层开始向外排列.在一般情况下,电子首先填充 $n=1$ 的壳层,填满该壳层后,再填充 $n=2$ 的壳层,然后再依次填充 $n=3,4,5,6,\dots$ 的各壳层.也就是说,对于多电子原子,首先在 $n=1$ 的壳层上填充 2 个电子,然后在 $n=2$ 的壳层上填充 8 个电子,再往 $n=3$ 的壳层上填充 18 个电子,继而在 $n=4$ 的壳层上填充 32 个电子……电子在各个壳层上填充,我们可以形象地将其想象成洋葱一样,一层套在另一层的外边.

最简单的原子是氢原子,其核外只有 1 个电子.氢原子位于元素周期表中第一周期的第一个原子,也是第一族元素中第一个.图 1-1-7 直观地画出了氢原子的壳层结构.比氢原子复杂一点的是氦原子,它是元素周期表中第一周期的第 2 个原子,氦原子内有 2 个电子,其壳层结构如图 1-1-8 所示.

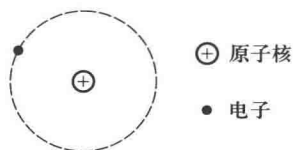


图 1-1-7 氢原子壳层结构

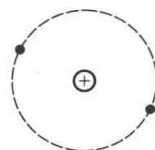


图 1-1-8 氦原子壳层结构

对于核外电子数更多的原子,依据上述各壳层上电子的填充规律,我们可以画出化学元素周期表中任意一个周期或任意一族元素原子的壳层结构图.