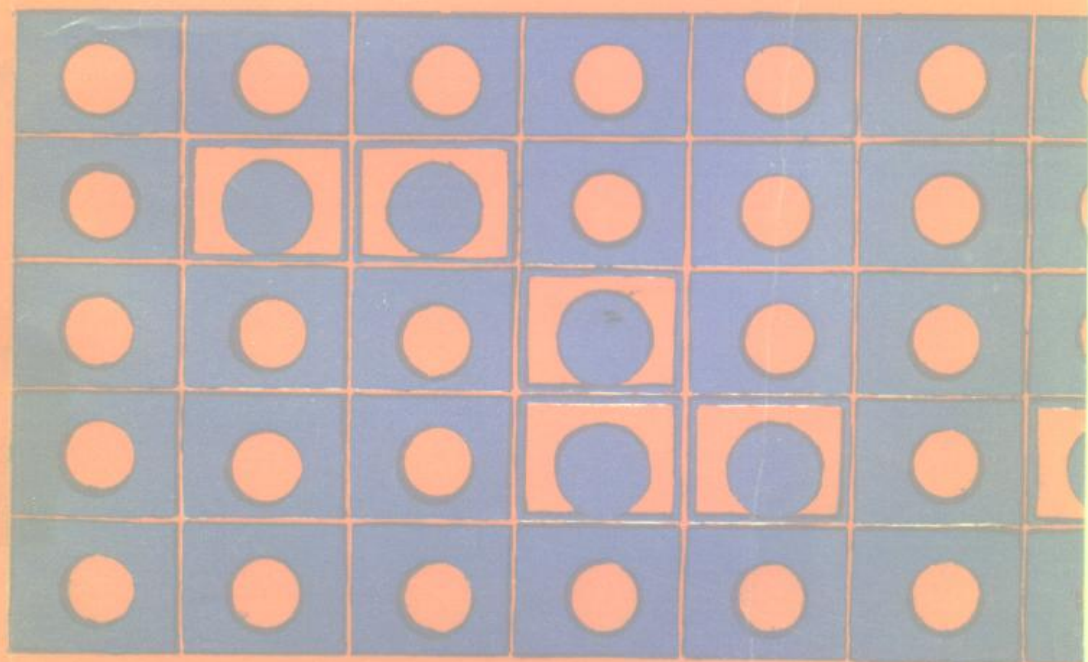


普通物理学教程之五

近代物理学

徐克尊 陈宏芳 周子舫 编

高等教育出版社



(京) 112 号

D1156/34 08

内 容 提 要

本书是中国科学技术大学汪克林教授主编的《普通物理学教程》的第五分册。

本书内容涉及近代物理学的原子分子物理、原子核物理、固体物理、粒子与原子相互作用和粒子物理几个主要方面。本书以实验事实为基础，同时引进了量子力学的基本内容，书中力图把近代物理学的内容建筑在量子力学的概念和方法的基础上，以使近代物理学的基本物理现象、概念和规律阐述得更加清楚和透彻。书中注意并简要地介绍了近代物理的一些最新研究进展，并试图把许多科技新成果有机地结合到有关章节中去，适当增添了一些应用的内容，使全书内容新颖并具有特色。书中还介绍了若干诺贝尔物理学奖获得者如汤姆孙、玻尔、德布罗意等的工作，适当加入了一些他们的思想方法和科学研究艺术的内容，以助学生创造性思维能力的培养。本书各章还附有习题，这对掌握概念有很大帮助。

本书可作为高等学校物理专业的教材或参考书，亦可供有关专业师生及科技工作者参考。

普通物理学教程之五

近代物理学

徐克尊 陈宏芳 周子舫 编

高等教育出版社出版

新华书店总店北京科技发行所发行

四川省金堂新华印刷厂印装

*

开本 850×1168 1/32 印张 20.875 字数 503 000

1993年4月第1版 1993年4月第1次印刷

印数 0 001—4 593

ISBN 7-04-003937-0/O·1148

定价 9.10 元

序

中国科学技术大学建校已逾30年。30年来在普通物理的教学中，从我们开始到现在的中年教学工作者们一直力图在教学中走出一条自己的路，这套书的产生基本上就是总结了这些年科大的普通物理教学中的经验和概括了科大普通物理的教学现状。

据我所知，从事该书撰写的是一批长期活跃在教学第一线的中年教师，他们一方面教学，一方面进行科研，经过多次的教学实践和多方面的调研后写成了这一套书。在这套书中基本概念和基本方法的引入和阐述具有清晰的物理图像和清楚的物理思想。书中尽力把科学前沿的信息传递给同学，以新的观点整理材料并把科研的新成果充实到基础知识中去，注意培养学生的科研能力，并试图兼收并蓄国内外同种教材中的各家之长。总之，这是一套以探索精神撰写的，具有自己特色的普通物理教科书。

多年来在普通物理的教学中就存在如何更新教材使学生既能打好基础，增强能力的训练，又能培养他们的创造性和开拓精神的问题。这项工作难度颇大，不过我们要著书育人，要在教育事业上作一点有益的事，总应知难而进，锲而不舍，才能得到一步一步的进展。今天，这套书与读者见面了，我对科大30年来的普通物理教学取得的这一成果感到由衷的高兴，盼望今后更多的好教材层出不穷。

严济慈

前 言

本书是中国科学技术大学汪克林主编的《普通物理学教程》中的第五分册。它是根据作者在中国科学技术大学多次讲授的“原子物理”课程的讲稿，经修改和补充而成的。

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、原子核物理和粒子物理。相对论已在本教程之一《力学》分册中讲解，本书包括除相对论外近代物理的主要内容。

可以说原子物理、原子核物理和粒子物理的发展是并行的，同时它们又是相互交错、相互促进的。它们展现给人们的是，层出不穷、眼花缭乱的物质世界的新现象和新理论。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、能源等，已经越来越多地利用了近代物理的方法和技术。当今各个学科的相互交叉和相互渗透已经成为普遍的规律，要求一个理工科学生掌握涉及微观的原子、分子、固体、原子核和基本粒子各层次的基本知识，显然是合理的。当然，我们希望本书对其他学科的科学家和工程师也有参考价值。

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。书中

注意并简要地介绍了近代物理中最新的研究进展和已得到广泛应用的技术和手段。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。当然作为普通物理学，我们并不要求读者都能掌握量子力学中很多繁杂的理论计算。

由于本教材部分内容取材较深广，在教学中教师可根据实际情况取舍。其中原子物理、分子物理和原子核物理是基本内容，固体物理、粒子与原子相互作用和粒子物理是选修内容，打*号章节可作为进一步学习的参考资料。

本丛书主编汪克林教授审阅了本书全部初稿，中国科学技术大学方容川、谢建平、夏上达教授和郭常新副教授等分别对初稿的部分章节进行了审阅，还有一些同志也与我们讨论过一些问题或给予过帮助，陈慰祖同志为本书做过组织工作，作者为此表示衷心的感谢。本书稿交稿后中国科学技术大学北京研究生院汤拒非教授做了系统地审阅，最后北京大学高崇寿教授又进行了全面的审阅，提出很多中肯的修改意见，高等教育出版社奚静平先生审读了全书，提出许多宝贵意见，作者为此也表示衷心的感谢。对于书中还存在的缺点和不妥之处，敬请读者指正。

徐克尊

陈宏芳

周子舫

1990年7月28日

目 录

第一章 原子模型和单电子原子	1
§1.1 原子的经典性质和汤姆孙原子模型	1
一、原子的经典性质	1
二、光子的粒子特征	4
三、电子的发现	7
四、电子的电荷与大小	10
五、汤姆孙原子模型	13
§1.2 α 粒子散射实验和卢瑟福原子模型	14
一、 α 粒子散射实验	14
二、卢瑟福原子模型及散射公式	17
三、卢瑟福散射公式与实验的比较	21
四、截面	24
§1.3 氢原子光谱和玻尔原子模型	26
一、氢原子光谱和光谱项	27
二、玻尔原子模型	29
三、能级图	33
四、能级和原子光谱	36
§1.4 类氢离子光谱和原子的激发实验	39
一、类氢离子光谱	40
二、核质量的影响	41
三、激发电势的测量	43
§1.5 碱金属原子的光谱和能级	46
一、碱金属原子的光谱	46
二、索末菲原子模型	47

三、原子实的极化和轨道贯穿效应	49
四、碱金属原子的能级	52
§1.6 特殊的氢原子体系	54
一、里德伯原子	54
二、奇特原子	56
三、粒子素	62
习题	63
第二章 量子力学初步	66
§2.1 波粒二象性	67
一、单光子的粒子性	67
二、单光子的波动性	69
三、德布罗意波	71
四、电子的晶体衍射实验	72
五、单电子的波动性	77
§2.2 不确定关系	79
一、位置和动量不确定关系	79
二、能量和时间不确定关系	83
§2.3 波函数及其物理意义	84
一、波函数的引入	84
二、波函数的统计解释	86
三、对波函数的进一步讨论	88
§2.4 薛定谔方程	90
一、薛定谔方程的建立	91
二、力学量算符、本征值和平均值	95
三、一维无限高方势阱	98
四、零点能	102
五、方势垒和隧道效应	102
六、电子显微镜和扫描隧道显微镜	105
§2.5 氢原子的量子力学解	107

一、中心力场薛定谔方程	107
二、 Φ 和 Θ 方程式的解和角动量	108
三、 R 方程式的解和能量	111
四、发现电子的概率的空间分布	114
§2.6 对应原理和普朗克常数	116
一、对应原理	117
二、作用量判据	118
三、精确度的极限	120
习题	121
第三章 原子磁矩和电子自旋	125
§3.1 轨道磁矩和斯特恩-盖拉赫实验	125
一、轨道磁矩	125
二、外磁场对磁矩的作用	127
三、斯特恩-盖拉赫实验	130
§3.2 电子自旋和原子磁矩	133
一、碱金属原子光谱的精细结构	133
二、电子自旋	135
三、自旋-轨道相互作用	139
四、总角动量	141
五、原子磁矩	143
§3.3 氢原子能级的精细结构	146
一、精细结构	146
*二、兰姆移动	152
三、超精细结构	154
§3.4 外场中的原子	156
一、塞曼效应	156
二、电子顺磁共振	163
*三、斯塔克效应	165
习题	169

第四章 氦原子和多电子原子	173
§4.1 氦原子的能级	173
一、氦原子的光谱和能级	173
二、氦原子能级的简单讨论	175
§4.2 泡利不相容原理和交换效应	179
一、波函数的交换对称性	179
二、泡利不相容原理	181
三、交换效应与氦原子	183
§4.3 多电子原子的原子态和能级	187
一、多电子原子的电子组态	187
二、LS 耦合	191
三、 jj 耦合	200
四、选择定则	203
§4.4 电子的壳层结构和原子基态	205
一、原子中电子的壳层结构	205
二、原子基态	218
§4.5 原子的内层能级和 X 射线	219
一、X 射线的发现和衍射现象	219
二、X 射线管及其发射谱	223
三、俄歇电子和荧光产额	229
四、同步辐射	235
习题	235
第五章 分子结构和分子光谱	238
§5.1 分子的形成	238
一、离子键	239
二、共价键	241
§5.2 分子能级和分子光谱	246
§5.3 双原子分子光谱	249

一、转动光谱	249
二、振动光谱	254
三、振动转动光谱带	256
四、分子的电子态	259
五、电子振动光谱带系	263
六、电子振动转动光谱带系	266
§5.4 喇曼散射	270
*§5.5 核自旋对双原子分子能级布居和光谱的影响	279
§5.6 多原子分子光谱	286
一、多原子分子的转动	286
二、多原子分子的振动	291
三、多原子分子的电子态	294
四、多原子分子的能级和光谱特性	294
习题	295
第六章 固体的结构和性质	299
§6.1 晶体结构	300
一、晶体的晶格结构	300
二、晶格的周期性	305
三、晶系和布喇菲格子	307
§6.2 晶体的结合	310
一、晶体结合的四种基本形式	310
二、结合力的普遍性质和结合能	315
三、离子晶体的库仑能和马德隆(Madelung)常数	318
§6.3 晶格振动和固体的热学性质	320
一、简正振动和晶格热容量的量子理论	321
二、晶体的非简谐振动和热膨胀	328
§6.4 固体中的电子状态	330
一、金属中的自由电子气	330

二、固体的能带理论	335
三、电子在晶体中的速度和有效质量	340
四、导体、绝缘体和半导体	342
§6.5 半导体	347
一、半导体的导电机制	347
二、电子和空穴的统计分布	352
三、 $p-n$ 结	357
*四、半导体超晶格	358
*五、经典和量子霍尔效应	361
§6.6 固体的磁性	364
一、介质的磁化	364
二、抗磁性	365
三、顺磁性	367
四、铁磁性	370
五、反铁磁性和亚铁磁性	374
§6.7 超导电性	377
一、超导体的基本电磁学性质	377
二、超导电性的宏观和微观理论	381
*三、高温超导材料研究的进展	385
§6.8 固体中的光吸收	386
一、基本吸收	388
二、激子吸收	389
三、自由载流子吸收	391
四、晶格吸收	392
五、杂质吸收	392
习题	394
第七章 粒子和原子的相互作用	398
§7.1 光子的吸收和散射	398
一、光电效应	399

二、汤姆孙散射和康普顿散射	403
三、瑞利散射	408
四、吸收定律	412
*五、近阈和扩展X射线吸收精细结构	415
§7.2 正电子及有关效应	417
一、正电子和反粒子	417
二、电子对效应	420
*三、电子偶素	422
*四、正电子湮灭	424
*§7.3 带电粒子碰撞	428
一、卢瑟福散射和莫特散射	430
二、非弹性散射	436
三、多次散射	439
*§7.4 带电粒子的电离损失	440
一、电离损失	440
二、径迹和射程	445
三、某些应用技术	447
§7.5 碰撞激发和退激发	452
一、热激发	452
二、无辐射碰撞退激发	454
§7.6 能级宽度和跃迁	457
一、跃迁概率和寿命	457
二、能级宽度	461
三、谱线增宽	465
*四、选择定则和禁戒跃迁	469
习题	473
第八章 原子核的基本性质和结构	476
§8.1 原子核的一般性质	478

一、质子和中子组成核	476
二、原子核的质量和核素	478
三、原子核的大小和密度	481
§8.2 原子核的量子性质	482
一、自旋、磁矩和电四极矩	482
二、核磁共振	486
三、宇称和统计性	489
§8.3 原子核的稳定性和结合能	490
一、核素图和 β 稳定线	490
二、结合能	493
三、液滴模型和半经验公式	496
§8.4 核力	499
一、核力性质	499
*二、核力的介子场论	504
§8.5 核结构模型	507
一、壳层模型	507
二、集体模型	511
习题	515
第九章 核衰变和核反应	518
§9.1 放射性衰变的基本规律	518
一、指数衰变规律和活度	519
*二、级联衰变	522
*三、核素生产	525
§9.2 α 衰变	526
一、 α 衰变条件和衰变能	526
二、衰变纲图	528
*三、 α 衰变理论	530
*四、质子和其它类 α 放射性	533

§9.3 β 衰变	534
一、 β 衰变类型和衰变能	534
二、 β 射线能谱和中微子	538
*三、跃变分类和选择定则	540
§9.4 γ 跃迁	542
一、 γ 射线多极性和选择定则	542
二、内转换和同质异能态	545
*三、穆斯堡尔效应	546
*四、 γ - γ 角关联	550
§9.5 核反应	552
一、概况	552
二、反应能和阈能	555
*三、反应截面	559
§9.6 裂变和聚变	561
一、自发裂变和诱发裂变	561
二、链式反应和反应堆	562
三、轻核聚变	564
*四、太阳能	569
习题	571
第十章 粒子物理	575
§10.1 粒子的基本性质和分类	576
一、粒子的基本性质	576
二、相互作用	578
三、粒子的分类	586
§10.2 守恒定律	590
一、重子数	590
二、轻子数	592
三、奇异数	593
四、同位旋	595

五、宇称	597
*六、电荷共轭和 CPT 定律	601
§10.3 强子的夸克模型	605
一、夸克假设	606
二、重子和介子的夸克构成	610
*三、夸克的“色”和夸克间的相互作用	613
§10.4 夸克和轻子	618
一、夸克和轻子	618
二、相互作用的统一	619
习题	621
习题答案	623
附录 I 基本的物理常数	633
附录 II 原子单位制	635
附录 III 原子 K、L 壳层的电子结合能和 X 射线能量	636
附录 IV 诺贝尔物理奖获得者	642
人名索引	649

第一章 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构成，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、碱金属原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孙原子模型

一、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)，各化合物中元素的量都成一定的整数比(称为倍比定律)。在上述实验基础上，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。因而使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

$$N_A = 6.0221367(36) \times 10^{23} \text{mol}^{-1}$$

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.

$$1u = 1.6605402(10) \times 10^{-27} \text{kg}$$

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