

728066

大学基础物理自学丛书

原子物理学

高顺福 屠传士 吴祖帽 编



大学基础物理自学丛书

原子物理学

高顺福 屠传士 吴祖媚 编

上海科学技术出版社

大学基础物理自学丛书

原子物理学

高顺福 屠传士 吴祖媚 编

上海科学技术出版社出版

(上海瑞金二路450号)

新华书店上海发行所发行 江苏溧水印刷厂印刷

开本 787×1092 1/32 印张 13.5 插页 1 字数 236,000

1934年1月第1版 1984年1月第1次印刷

印数 1--20,000

统一书号: 13119·1102 定价: (科四) 1.25 元

序 言

为了适应千百万未能进入高等院校的青年自学的需要,上海科学技术出版社在出版中学《数理化自学丛书》的基础上,又组织部分高等院校教师编写《大学基础数学自学丛书》、《大学基础物理自学丛书》和《大学基础化学自学丛书》。这是一件很有意义的工作。支持和鼓励广大在职青年坚持业余学习,让他们能够自学成才,是全社会的责任,也是我们高等学校教育工作者的义务,而为在职青年提供合适的自学读物,则是办好业余高等教育事业的一个组成部分。

《大学基础物理自学丛书》是由南京师范学院、安徽师范大学、扬州师范学院和江苏师范学院物理系的有关教师执笔编写的,其中力学(上、下册)由南师负责编写,热学由扬师负责编写,光学由皖师负责编写,电学(上、下册)和原子物理学由江师负责编写。全书共七册,可供具有高中文化程度、立志于自学大学物理的广大读者使用。本书亦可作为全日制高等院校、各类职工大学以及电视大学学生学习普通物理学的参考读物。

“自学丛书”与普通的教材相比,应该具有便于自学,无师自通的特点。本书在编写过程中,尽可能注意到这一特点。在内容的安排上抓住物理学中主要的必不可少的部分讲细讲透,不追求形式上的深而全;文字的叙述力求做到口语化、通俗化;新概念的引入尽量让读者在已有中学物理知识的基础上,通过具体的物理现象和有关实验逐步深化;对于物理公式的推导,在数学的严密性上不作过高的要求。只要读者在自

学本书的同时能自学《大学基础数学自学丛书》，在数学工具上不会发生大的困难。本书每章之首有提要，每章之末有小结，例题和习题按章节编排，每章末附复习题。本书例题较多，这是考虑到读者在自学本书的同时，不必再去翻阅其他参考书的例题。习题多是为了能让读者有选择的余地，并不要求读者对每道题都详细解答。本书附有习题和复习题答案，供读者解题时参考。

本书学习顺序原则上按照力、热、电、光、原子物理的顺序进行，但每种书又各自成系统，读者可按需要独立地选读其中任何一种，也不会有大的困难。

业精于勤，只要读者下定决心，持之以恒地刻苦攻读，相信大家是一定可以自学好大学物理的。

本书编审过程中得到南京师范学院、安徽师范大学、扬州师范学院和江苏师范学院物理系领导的支持以及这些学校许多教师的协助，在此一并致谢。

由于本书编写者水平所限以及出版时间的仓促，书中缺点和错误在所难免，希望读者多加指正。

朱正元

1981年4月于江苏师范学院

编 者 的 话

原子物理在物理系的全部课程中有它的特殊地位。它要阐明的是从经典物理到量子物理的发展过程。它对宏观物理的基本规律既不能违反；对微观客体的研究又必须从概念到方法上来一个飞跃。长期来，如何安排原子物理教材内容以及从怎样的起点开始，一直是物理工作者争议的问题。一种意见是着重物理图象和定性的半经典理论的处理；另一种意见要尽可能地用量子力学的方法来揭示微观世界的本质。因为学生的基础不尽相同，其它课程，如数理方法、统计物理开设的时间也在变化之中。这个问题一时还很难形成统一的意见。

本书是《大学基础物理自学丛书》之一，因此必须考虑到广大读者自学的要求。量子力学虽然有一个严格的体系，但由于量子力学的方法的特点是从解边界条件的偏微分方程来得到本征值，否则就不能显示它的特征和优点，反而使初学者不得要领。但这些数学知识不是初学者所容易掌握的。即使数学基础较好的读者也会在方法上形式地掌握，而不能在旨意上深刻地理解。所以本书作者首先介绍十九世纪末叶一些新的物理现象——黑体辐射实验、光电效应实验等等，说明当时物理学家从经典物理的角度去理解这些新现象所遇到的困难，揭示必须按照实验的启示来发展理论和深化认识。这种历史叙述有助于解除读者长期以来学习经典物理时可能产生的机械观点并为学习更为抽象的微观理论打下基础。书中采

FA193/102

用半经典理论定性地讨论原子现象，并对其处理方法加以评述，指出这一理论仅为严格理论的一种粗糙的近似，其中错误的概念(例如电子轨道)应该扬弃，但其中有些经典物理结论(例如能量守恒、动量守恒、角动量守恒等)在微观领域中仍旧适用。在此基础上着重说明波粒二象性是微观物质的本性，并指出微观客体的态的正确标志，然后从这些正确的结果出发通过物理图象来进一步讲述原子物理和原子核物理。作者这样安排的意图是使叙述内容既容易为读者接受、又正确可靠，并使读者在学习这门课程之后能掌握一套虽然比较定性但简单易行的半定量的讨论问题的方法。我认为：这样做能使自学者节省时间和精力，较快地具备这门课程的知识，为进一步学习以此为基础的应用物理或理论物理打好基础。

作者希望我代他们向写作此书时给予协助的余行、姜士勇、荣钟麟等同志表示感谢。

周 孝 谦

1983 年元旦于苏州大学

绪 论

人类社会的生产活动，是一步一步地由低级向高级发展的，因此，人们的认识，不论是对于自然界方面，对于社会方面，也都是一步一步地由低级向高级发展的。物理学的发展当然也不例外。

在远古时代，人类在生产活动中，只能利用现成的材料或者依靠简单的冶炼得到的材料，经过粗糙的加工来制成的工具和用器。在生产中利用的动力，除了人力以外，也只是各种自然力（风力、水力、畜力等）。在这样的生产实践以及与当时的生产水平相适应的科学实验的基础上，人们只能初步地认识机械运动的规律。随着生产的不断发展，人类不仅需要不断创制或改进各种机械，而且还需要比较强大和容易传递的能源，这就促使人们进一步研究机械运动、热现象、电磁现象等的规律，同时制造和改进热机和电机。到了十九世纪中期，在生产实践和科学实验的基础上，人类对于物理现象的认识迅速地提高，总结出了系统的理论，这就是经典物理学。

经典物理的辉煌成就，对于人类社会生产的发展，起了巨大的推动作用。例如：一个大型火力发电站、水电站建成后所提供的能量，相当于成千上万个劳动力；在现代化的工厂里，正在不断生产出各种大型、精密的机器；现代化的交通和通讯工具，“缩短”了地球上不同地点之间的距离，所有这一切，都是与经典物理的高度发展分不开的。

但是，人类社会的生产的发展是无止境的，人类对于自然

界的认识也是无穷尽的。随着生产技术的提高,实验仪器的改进,物理学的研究对象更进一步地深入到物质内部,同时近代科学和生产的发展,也提出各种要求,例如制造出具有高强度、耐高温、耐高压、高度绝缘、低电阻等特殊性质的材料,寻找更强大的能源等等。要解决这些问题,必须深入地研究物质的微观结构,在这样的研究的过程中,人们逐渐发现,经典物理的规律并不完全适用于微观现象。通过反复的实践——认识——再实践——再认识,人类对于物理现象的认识向前跨进了一大步,建立了原子和原子核物理学。

原子和原子核物理学是近代关于物质微观结构的学科。它们主要从理论和实验两个方面来研究原子和原子核的性质与结构、原子和原子核内部物理现象的规律性以及其实际应用等方面的问题。

原子和原子核物理是固体、半导体、超导体、激光和磁性材料等学科的基础,至于X射线和同位素在工农业生产和医学上的应用以及原子能发电、原子能舰艇等则是原子和原子核物理的直接应用。随着工农业生产和科学技术的进一步发展,原子和原子核物理的应用必将愈来愈广泛,因而学好原子和原子核物理对于培养又红又专的建设人材,为实现四个现代化作出贡献是有重要意义的。另外,学习原子和原子核物理对于批判唯心论和形而上学,更好地领会唯物论和辩证法也是有帮助的。

要学好原子和原子核物理,必须掌握正确的学习方法。因为原子和原子核物理的研究对象是微观客体,所以学习这门课程的方法与经典力学、经典电磁学有些不同。在学习过程中,我们将会遇到一些与经典物理截然不同的新概念,这时,我们应充分认识自己原有经验和知识(它们都是在日常生活

中,在研究宏观物体运动规律中得到的)的局限性,而接受这些在微观客体领域中为实践所证实的相对真理。当然,由于知识发展的继承性,我们在原子和原子核物理中也将用到许多经典物理中的术语,但是它们的涵义并不一定和经典物理中完全相同,这希望初学者注意。另外,在研究微观客体运动状态时,我们还将涉及一些较为复杂的数学计算,这些数学计算当然最好弄懂,但更重要的是要搞清楚物理实质。有些数学计算或较难理解的内容,我们加了“*”号,读者在初次阅读时可以略去不读。

目 录

序 言

编者的话

绪 论1

第一章 原子物理的实验基础1

§ 1.1 黑体辐射和普朗克的量子假设1

§ 1.2 光的量子理论9

§ 1.3 原子光谱的规律性、光谱项、并合规则18

第一章小结25

复习题一26

第二章 玻尔-索末菲原子模型28

§ 2.1 α 粒子散射实验和原子的核模型28

§ 2.2 α 粒子散射的数学计算*36

§ 2.3 玻尔的原子模型和氢原子光谱42

§ 2.4 能级存在的实验证明55

§ 2.5 椭圆轨道理论58

§ 2.6 玻尔理论的局限性66

§ 2.7 碱金属元素光谱规律性的初步研究69

§ 2.8 原子磁矩和空间量子化80

§ 2.9 正常塞曼效应87

第二章小结91

复习题二94

第三章 原子的矢量模型97

§ 3.1 电子自旋 史特恩-盖拉赫实验97

§ 3.2 原子的矢量模型102

§ 3.3 碱金属光谱的精细结构108

§ 3.4 氢光谱理论	114
§ 3.5 非常塞曼效应	118
第三章小结	124
复习题三	127
第四章 原子的壳层结构和元素周期律	129
§ 4.1 周期表的物理依据	130
§ 4.2 原子基态光谱项的确定	136
§ 4.3 元素周期表	138
表 4-5 化学元素周期表	插页
表 4-6 元素的电子层结构	143
第四章小结	145
复习题四	146
第五章 X 射线	147
§ 5.1 X 射线的产生	147
§ 5.2 X 射线的连续光谱	149
§ 5.3 X 射线的标识光谱	151
§ 5.4 X 射线的波长的测量	155
§ 5.5 X 射线的应用	159
第五章小结	163
复习题五	164
第六章 量子力学基础	166
§ 6.1 德布罗意假设和实验验证	166
§ 6.2 德布罗意波的统计解释	169
§ 6.3 测不准关系	173
§ 6.4 薛定谔方程	178
§ 6.5 自由粒子、平面转动子的薛定谔方程的解	180
§ 6.6 转动子的薛定谔方程的解*	183
§ 6.7 一维无限深势阱的解	191
§ 6.8 氢原子问题的量子力学处理	193
§ 6.9 谐振子	200

第六章小结	203
复习题六	205
第七章 原子核的某些基本性质	207
§ 7.1 原子核的电荷和质量	208
§ 7.2 原子核的组成、原子核的角动量及核磁矩	212
§ 7.3 原子核的大小、形状及电四极矩	221
§ 7.4 质量亏损和结合能	226
§ 7.5 核力的基本性质	230
§ 7.6 几种原子核结构模型	235
第七章小结	252
复习题七	254
第八章 放射性核素及其应用	256
§ 8.1 原子核的放射性衰变	256
§ 8.2 放射性衰变规律	259
§ 8.3 位移定则、放射系	268
§ 8.4 α 、 β 、 γ 衰变	276
§ 8.5 放射性探测	291
§ 8.6 放射性核素的应用	302
§ 8.7 辐射剂量,放射性防护	303
第八章小结	307
复习题八	309
第九章 核反应	312
§ 9.1 核反应	312
§ 9.2 核反应中的守恒定律 反应能	315
§ 9.3 加速器	323
§ 9.4 人工加速粒子所产生的核反应	332
§ 9.5 反应截面,核反应机制	334
§ 9.6 裂变反应	339
§ 9.7 链式反应和反应堆	346
§ 9.8 轻核的聚变、热核反应	351

§ 9.9 核武器的防御	357
第九章小结	359
复习题九	361
第十章 宇宙线和基本粒子	365
§ 10.1 宇宙线的成份	365
§ 10.2 宇宙线的来源及研究宇宙线的意义	368
§ 10.3 基本粒子的特性	369
§ 10.4 相互作用的分类和基本粒子的分类	372
§ 10.5 对称和守恒定律	375
§ 10.6 强子的结构模型——层子模型	384
第十章小结	389
复习题十	390
附录 I 一些物理常数	392
附录 II 中性原子质量、半衰期、核子平均结合能	393
附录 III 习题答案	409

第一章

原子物理的实验基础

十九世纪末到二十世纪初, 物理学的研究领域从宏观世界逐步深入到微观世界, 许多新的实验结果用经典理论已不能得到解释, 在此基础上诞生了普朗克 (M. Planck 1858~1947 年)、玻尔 (N. Bohr 1885~1962 年) 的量子理论, 我们的叙述就从经典物理的失效开始。作为例子, 我们简单地讨论黑体辐射、光电效应、康普顿 (A. Compton 1892~1962 年) 效应和原子光谱的规律性, 其中除原子光谱的规律性外, 我们都给出光的量子理论的解释。

§ 1.1 黑体辐射和普朗克的量子假设

经典物理的基本概念和基本假设, 是以人们日常生活和生产的经验为基础的。在日常生活和生产中我们都很熟悉, 描写物体的运动性质的各个物理量, 都是可以连续地变化的。例如, 在物体自由下落的过程中, 它的速度 (因而它的动量、动能), 坐标 (因而它的势能) 等将连续地发生变化; 行星绕太阳旋转的过程中, 它的角度坐标, 角速度, 矢径长度, 径向动量 (因而它的角动量、势能、动能) 等也是可以连续地改变的。人们对于这样的概念是如此地习以为常, 以致往往不自觉地忽略它的实践基础, 误以为这是对于任何客体都适合的。

绝对黑体的辐射能量密度按波长分布规律的各种经典解释的失败, 迫使人们不得不重新审查这一概念的正确性, 结果

引起了物理思想上的一次重大变革。人们开始认识到,与宏观世界不同,在微观世界内,物理量的数值不一定能够连续变化,这个特点就是微观世界的量子性。

下面我们就来介绍热辐射现象的规律以及普朗克量子假设的成就。

众所周知,任何物体,在任何温度下,都在不断地以电磁波的形式向外辐射能量,这种现象,称为热辐射。在向外辐射能量的同时,任何物体也都在不断地吸收与反射落在它上面的辐射能。现在设想有几个物体被放在一个具有完全反射壁的密闭容器中,假设容器内部是绝对真空(这里指没有任何“实物”粒子),则空腔里的物体只能通过辐射(而不能通过热传导和对流)来相互交换能量。实验证明,经过较长时间后,必定能够达到这样一种稳定状态,即每一物体在任意时间间隔内所发出的辐射能恰好等于它所吸收的辐射能。在这种情形下,我们就说,物体的热辐射过程达到了平衡。由于此时物体的状态可以用一个确定的温度来描述,因此,平衡热辐射也可叫作温度辐射。下面我们只讨论平衡热辐射。

首先我们来定义热辐射理论中的几个基本概念。

1. 辐射本领 设在单位时间内,由辐射体表面面积元 ds 上发出的波长在 λ 到 $\lambda+d\lambda$ 之间的辐射能为 dE_λ ,当 ds 、 $d\lambda$ 都很小时,我们可以认为 dE_λ 与 ds 、 $d\lambda$ 都成正比,即

$$dE_\lambda = \gamma(\lambda, T) d\lambda ds, \quad (1-1)$$

比例系数 $\gamma(\lambda, T)$ 是波长 λ 和辐射体温度 T 的函数。如果面积元 ds 一定,波长间隔 $d\lambda$ 相同,当辐射体温度不同,或者在不同波长 λ 附近,辐射能 dE_λ 一般是不同的。 $\gamma(\lambda, T)$ 称为物体在温度 T 时发出波长为 λ 的辐射能的辐射本领。

例如,温度为1000K的某物体,在1秒钟内,由其表面5

平方厘米面积上发出波长在 1599~1601 埃范围内的辐射能为 2 尔格, 则该物体温度为 1000K 时, 在波长 1600 埃附近的辐射本领为:

$$\begin{aligned}\gamma(\lambda, T) &= dE_{\lambda}/d\lambda ds \\ &= 2 \times 10^{-7} \text{ 焦耳} / 5 \times 10^{-4} \text{ 米}^2 \times 2 \text{ 埃} \times 1 \text{ 秒} \\ &= 2 \times 10^{-4} \text{ 焦耳} / \text{秒} \cdot \text{米}^2 \cdot \text{埃}.\end{aligned}$$

2. 吸收本领 若射在物体表面面积元 ds 上的、波长在 λ 到 $\lambda+d\lambda$ 之间的辐射能为 dE_{λ} , 其中一部分能量 $d'E_{\lambda}$ 被物体所吸收, 则二者之比

$$d'E_{\lambda}/dE_{\lambda} \equiv a(\lambda, T). \quad (1-2)$$

称为物体在温度 T 时, 对于波长为 λ 的辐射的吸收本领. 由定义显然可知:

$$a(\lambda, T) \leq 1.$$

3. 绝对黑体 在任何温度 T 下, 对任何波长 λ 的辐射的吸收本领均为 1 的物体, 称为绝对黑体, 简称黑体. 对于黑体

$$a_0(\lambda, T) \equiv 1.$$

黑体是一种理想的物体, 在自然界并不存在, 但用人工方法可以制造出与黑体十分接近的物体, 这就是空腔黑体, 如图 1-1 所示. 因为空腔的小孔很小, 射入空腔的辐射, 经器壁多次的部分吸收和部分反射以后, 再射出空腔的部分所占的比例就极小了(为了使重新射出空腔的辐射变得更小, 有时在空腔的内壁上涂以吸收本领很强的烟黑等物质), 因此空腔可看成绝对黑体.

基尔霍夫(G. Kirchhoff 1824~1887 年)通过理论分析指出, 对于相同的温度 T 和波长 λ , 不同物体(我们用下标 1, 2, ... 区别)的辐射本领和吸收本领之间, 具有下述关系