

● 山东教育出版社

原子物理学 与原子核物理学

· 652562

原子物理学与原子核物理学

李惠信 刘玉彬 孙庆元 编

山东教育出版社

一九八七年·济南

内 容 提 要

本书依据全国高等师范专科学校物理专业《原子物理学与原子核物理学教学大纲》编写，其内容包括原子物理学、原子核物理学、宇宙射线与基本粒子三部分，共计十三章。

本书系统阐述了原子物理学与原子核物理学的基本概念和基本理论，简明扼要地介绍了宇宙射线与基本粒子的基础知识。

本书可作为高等师范专科学校、教育学院和高等师范函授物理专业的试用教材，也可供中学物理教师教学和其他大专院校物理专业学生学习时参考。

原子物理学与原子核物理学

李惠信 刘玉彬 孙庆元编

山东教育出版社出版

(济南经九路胜利大街)

山东省新华书店发行 山东新华印刷厂印刷

*

787×1092毫米32开本 14.375印张 1插页 306千字

1987年10月第1版 1987年10月第1次印刷

印数 1—1,560

ISBN 7—5328—0092—X

G·51

书号 7275·658 定价 2.30 元

前 言

本书依据原教育部审订的高等师范专科学校用《原子物理学与原子核物理学教学大纲》，在编者的授课讲义的基础上整理改编而成。

为适应培养初中物理教师这一要求，本书突出了中学物理教学所需要的内容，简化了数学推导的过程，加强了基本概念和基本理论的叙述。对于本学科的最新成就和前沿课题也作了简要介绍。

全书授课70学时左右，以玻尔理论、矢量模型理论、原子壳层结构、核性质、核衰变和核反应为重点。打“*”号的可作为选讲或自学内容。书中选编了一定数量的例题，供课堂讲授和自学用。为了便于启发学生独立思考和巩固所学内容，在每章后附有思考题和练习题。全书采用国际单位制(SI)，物理量的名称和符号均采用国家标准总局颁发的GB1434—78的规定。

本书在编写过程中，山东省高等师范专科学校和部分教育学院的本学科教师对初稿提出了许多宝贵意见。山东师范大学俞雪珍副教授审订了全稿，孙景书、吴蕴崑、霍启英和庄步科等同志在山东省教育厅召开的审稿会上提出了许多宝贵的修改意见。编者特此表示感谢。

由于编者水平所限，书中不足之处，恳请读者批评指正。

编 者

1986年12月

目 录

绪论	(1)
§0.1 原子物理学与原子核物理学的发展	(1)
§0.2 原子物理学与原子核物理学的研究方法	(4)
§0.3 原子物理学与原子核物理学和其他学科的关系	(5)
第一章 原子结构的初期模型	(8)
§1.1 原子的质量和大小	(9)
§1.2 卢瑟福 α 粒子散射实验	(10)
§1.3 卢瑟福原子有核模型	(14)
思考题	(26)
练习题	(26)
第二章 玻尔理论及其发展	(28)
§2.1 氢原子光谱的实验规律	(28)
§2.2 经典物理学的困难 玻尔假设	(35)
§2.3 单电子原子的玻尔理论	(38)
§2.4 夫兰克-赫兹实验	(45)
§2.5 类氢离子光谱 原子核的运动	(51)
§2.6 索末菲对玻尔理论的发展	(58)
§2.7 碱金属原子的光谱	(65)
§2.8 价电子模型 碱金属原子的能级	(72)
§2.9 电子的轨道磁矩	(77)
§2.10 空间量子化 塞曼效应	(84)
§2.11 对应原理	(90)
思考题	(93)

练习题	(94)
第三章 原子的矢量模型和角动量耦合理论	(98)
§3.1 史特恩-盖拉赫实验 电子自旋	(98)
§3.2 自旋-轨道相互作用	(106)
§3.3 原子光谱的精细结构	(114)
§3.4 双电子原子光谱 电子组态	(123)
§3.5 角动量耦合	(128)
§3.6 原子能级分布 多电子原子跃迁的选择定则	(137)
§3.7 多电子原子光谱的一般规律	(143)
§3.8 激光	(146)
思考题	(150)
练习题	(151)
第四章 原子壳层结构和X射线	(154)
§4.1 元素性质的周期性变化	(154)
§4.2 原子的电子壳层结构	(155)
§4.3 原子壳层结构和周期表	(164)
§4.4 X射线的产生及其光谱	(168)
§4.5 康普顿散射	(180)
思考题	(184)
练习题	(185)
第五章 量子力学基础	(187)
§5.1 物质二象性	(187)
§5.2 测不准关系	(190)
§5.3 波函数及其物理意义	(194)
*§5.4 定态薛定谔方程	(199)
*§5.5 定态问题的几个简例	(205)
*§5.6 基态氢原子	(220)
思考题	(225)

练习题.....	(226)
*第六章 分子结构与分子光谱.....	(229)
§6.1 分子键联和分子光谱的特点.....	(229)
§6.2 双原子分子能级与分子光谱.....	(235)
思考题.....	(246)
练习题.....	(246)
第七章 原子核的基本性质.....	(248)
§7.1 原子核的电荷和质量.....	(248)
§7.2 原子核的角动量和磁矩.....	(251)
§7.3 原子核的大小和形状.....	(256)
§7.4 原子核的成分与结合能.....	(259)
§7.5 核力.....	(267)
思考题.....	(270)
练习题.....	(271)
第八章 原子核的放射性衰变.....	(273)
§8.1 放射性衰变规律.....	(273)
§8.2 α 衰变.....	(284)
§8.3 β 衰变.....	(292)
§8.4 γ 衰变.....	(302)
思考题.....	(306)
练习题.....	(306)
第九章 探测器与加速器.....	(309)
§9.1 探测器.....	(309)
§9.2 加速器.....	(321)
思考题.....	(329)
练习题.....	(329)
第十章 原子核结构模型.....	(330)
§10.1 液滴模型.....	(330)

§10.2 壳层模型	(335)
思考题	(341)
练习题	(341)
第十一章 核反应	(342)
§11.1 核反应的实验情况	(342)
§11.2 核反应的守恒定律 反应能 阈能	(352)
§11.3 核反应截面	(359)
§11.4 核反应机制	(362)
§11.5 核反应与核能级	(367)
思考题	(370)
练习题	(371)
第十二章 原子核能及其利用	(374)
§12.1 重核的裂变	(374)
§12.2 轻核的聚变	(386)
§12.3 放射性同位素的应用简介	(393)
思考题	(400)
练习题	(400)
*第十三章 宇宙射线和基本粒子简介	(403)
§13.1 宇宙射线	(403)
§13.2 基本粒子	(411)
思考题	(434)
练习题	(434)
附录 1. 原子基态表	(437)
附录 2. 相对论的几个公式	(443)
附录 3. 核素表	(446)
附录 4. 常用物理常数	(451)
附录 5. 元素周期表	
主要参考书	

绪 论

原子和原子核是物质结构的微小单元。原子物理学，主要是研究原子的内部结构及其运动规律的科学；而原子核物理学(简称核物理学)，主要是研究原子核的性质、结构及其转变规律的科学。(一般说，它还包括对基本粒子的研究)就广义上讲，原子物理学与原子核物理学是研究物质微观结构的一门科学。

§0.1 原子物理学与原子核物理学的发展

在自然界中，各种各样的复杂现象都是由变化着的物质产生的。然而，这些物质并不仅仅是变化的，它们还具有一定的规律。因此，在这些多样性和规律性的背后，必然存在着把它们统一起来加以说明的基本原理。这种想法，自古以来就在人们的头脑中萌芽着。

为能统一地说明物质的多样性和规律性，人们曾提出过许多设想。早在战国时代，中国古代思想家就企图用日常生活中习见的“木、火、土、金、水”五种物质来说明世界万物的起源和多样性的统一。公元前6世纪，古希腊的泰拉斯认为，“水是万物之本。”后来，阿纳哈果拉斯则认为，“物质的变化是一些更小的、看不见的微粒相互组合和分开造成的。”公元前480—前370年，德莫克利特提出，“一切事物都是由一些原子构成的。”“原子”一词，在希腊文中是不可再分的意

思。以上这些设想都企图用少数几种物质，来统一地说明物质的多样性，但是，由于缺乏实验基础，在很长的时间内没有被人们接受。

正确的物质结构的原子论是在19世纪初诞生的。在罗蒙诺索夫从实验上证明了物质和运动的不变定律，并进一步发展了物质分子动力论后，1802年，道尔顿在说明化合物是由较简单的物质组合而成时，重新引用了原子的概念。1808年，他又发现了倍比定律。至此，原子学说才逐步建立起来。在克劳修斯、麦克斯韦和玻耳兹曼等人建立了气体分子运动论后，原子概念在物理学中得到了惊人的发展。1885年，巴尔末发现了氢原子光谱的规律性。1887年，赫兹发现了光电效应现象。1895年，伦琴发现了X射线。1897年，汤姆逊证明了原子中有电子存在。以上这些发现表明，原子也是可分的，电子是组成原子的不可缺少的一部分。

到了19世纪末，经典物理学已经发展得比较完善了。经典力学已成为一门非常精确的科学；经典电磁理论，已由麦克斯韦、法拉第等人加以概括，并把光学也统一到电磁理论中去；关于热现象的理论，也由焦耳、卡诺、玻耳兹曼和吉布斯等人从宏观和微观两个方面进行了总结。可以说经典物理学已取得了辉煌的成就。但是，经典物理学对于某些新的实验事实却无法解释。

为了克服经典物理学在解释黑体辐射问题上所遇到的困难，普朗克于1900年提出了能量子的假设。1905年，爱因斯坦为了说明光电效应现象的规律，明确地提出了光量子的概念。1911年，卢瑟福提出了原子的有核模型。这个模型虽能说明某些实验事实，但它却与经典物理学的理论发生了严重

的冲突。为了克服这个困难，玻尔于1913年提出了量子假设。由这个假设出发，可以说明当时已为实验所观察到的氢原子光谱的规律性。1914年，夫兰克和赫兹用实验证实了玻尔的定态的量子假设。1922年，玻尔又解释了元素性质的周期律。1924—1926年间，德布罗意、海森伯、薛定谔和玻恩等人创立了量子力学。1925年，泡利发表了不相容原理。同年，乌仑贝克和高德斯米特提出了电子具有自旋的概念。至此，描述微观粒子运动的理论已初具完善。

研究物质结构的另一个层次，是原子核的结构。1896年，贝克勒耳发现了铀的放射性现象。1902—1903年间，卢瑟福研究了天然放射线的成分，后于1919年首次实现了人工核转变，并发现了质子。1932年，查德威克发现了中子。随后，伊凡宁柯提出了原子核由质子和中子组成的学说。1934年，居里夫妇又发现了人工放射性现象。1939年，哈恩发现了重核的分裂。以上这些发现表明，原子核具有复杂的结构和变化。研究原子核的结构、性质和转变规律及其应用就成为原子核物理学的内容。

研究物质结构的第三个层次，是研究基本粒子的性质及其相互转变规律。对宇宙射线的探测以及高能加速器的建成给研究基本粒子提供了强有力的手段。近30年来，用高能质子束流照射核子（质子和中子的统称）时，发现了许多新的、短寿命的微观客体。由于它们都是在原子核的转变时出现的，所以人们认为它们是构成物质的基本单元，并称它们为基本粒子。近年来，西岛和盖尔曼等人发现，在基本粒子中，也具有一些规律性，但至今尚未找到满意的解释。这说明，人们对于物质结构的认识有待于发展到更深的—一个层

次。

§0.2 原子物理学与原子核物理学的研究方法

原子物理学与原子核物理学是整个物理学的一个组成部分，因此它的研究方法仍然是观察、实验、假设和理论。

观察是就自然界中发生的现象加以考查和研究。有些现象，例如宇宙射线，只能在自然界中发生。对于这些现象的研究目前也只能用观察的方法。

发生在自然界中的现象，往往是错综复杂、相互联系和相互制约的。在这种情况下，必须用人工的方法将各种因素尽可能地分离开来，使现象在制备的条件下重复发生。观测和研究在制备条件下重复发生的现象就是实验。例如，研究原子对能量的吸收，必须用人工方法控制提供电子的能量。只有知道了电子的能量，才能确定原子吸收能量的情况。

有了足够丰富的观察和实验资料，经过分析、概括、判断和推理等一系列逻辑思维过程便可抽象出假设。例如，玻尔的量子假设就是在对原子光谱的实验观测基础上抽象出来的。但假设仅是以有限数量的观察和实验事实为基础抽象出来的，必须进一步用新的实验来检验其结果，或扬弃这个假设或进行一些修正，直到能足够正确地反映某些客观规律时，才能导致物理定律的建立。

多数物理定律是能用数学形式将某些现象和有关物理量之间的数量关系表达出来的，并能说明在哪些条件下将会有哪些现象发生。通过对不同的但有相互联系的现象进行研究，从一些已经建立起来的定律中经过推理和拓广得出更为

广泛的系统化知识，便形成物理理论。一套体系完整的理论往往可以从少数几条定律或基本原理出发，经过逻辑推理去说明一定范围内的各种现象。

从观察、实验到假设、理论，物理学的研究并没有完结。认识从实践始，经过实践得到了理性的认识，还必须回到实践中去。理论是从许多现象中概括和抽象出来的最本质的东西，所以一个能够正确反映客观实在的理论，不仅能解释已知的现象，而且能预言未知的现象，还能推断尚未发现的新规律。如果理论的推断结果得到新的实验验证，那么就可以使理论的内容更加丰富，否则就必须对理论所依据的假设进行修正或扬弃，而在新的实验基础上建立能反映该实验事实的新理论。

由上述可知，观察和实验是研究原子物理学与核物理学的方法的基础，只有在观察和实验的基础上，才能提出正确的假设，建立完善的理论。同时，理论还必须返回实践中去。一方面理论要经过实验的检验；另一方面，正确的理论对实践具有指导作用，理论再通过实践获得进一步的发展。所以研究原子物理学与核物理学的方法是理论和实践辩证统一的方法。

§0.3 原子物理学与原子核物理学和其他学科的关系

原子物理学与原子核物理学是以研究物质微观结构为主要对象的理论，所以，由此所得出的基本规律和原理，对于揭示所有微观粒子的本质是普遍适用的。

许多宏观的物理现象，只有从原子物理学的观点和理论出发，才能得到深刻而统一的认识。现在原子物理学的理论和

方法已渗透到各个学科和技术部门。例如，固体能带的形成，只有运用原子物理学的理论才能得到解释。元素化学键理论是建立在原子结构基础上的。固体发光、晶体结构和性质、金属内部的缺陷和位错等也需要原子物理学的知识。电介质和磁介质的特性也必须运用原子结构来说明。至于在天体物理学中常用的光谱分析方法，也是原子物理学的研究内容。近几年来，在生物物理学的研究中，也采用了原子物理学的理论和方法。

原子反应堆和加速器的建造，使放射性同位素得到更加广泛的应用。例如，在工业上可利用放射线来进行探伤；在农业上可利用放射线来育种；在生物学上可利用示踪原子研究生物对养料的吸收等等。现在，原子能的利用已成为一门专门的学科。

总之，人类对物质结构的认识每前进一步，便揭开了物质现象的一个新世界，从而导致一场重大的技术革命。例如，在19世纪末，人们统一了电力和磁力，导致了电磁技术和无线电技术的大发展；20世纪40年代，对原子核结构的认识，导致了原子核能的应用。不难想象基本粒子理论的发展和突破，必将导致一场重大的技术革命。

由此可见，原子物理学与原子核物理学和力学、电学、光学一样，是一门基础学科，是物理专业学生的必修课程之一。

由于原子物理学与原子核物理学的研究对象是物质世界，它揭示的是物质存在的真实性和物质运动规律的客观性，这就使它和哲学有着密切的关系。辩证唯物主义的世界观承认世界的物质性和物质运动的客观规律性，并断言客观世界及其运动规律是可以为人们所认识的。原子物理学与原

子核物理学的发展越来越深刻地证明了这些论断的正确性。例如，原子结构和原子核衰变，一方面说明各种原子是相互联系的，另一方面也说明了一切物质都是在不停地运动和变化的。可以说，原子物理学与原子核物理学的许多发现，都给辩证唯物主义哲学提供了科学根据。

第一章 原子结构的初期模型

原子物理学是一门实验科学。在对原子现象进行实验观测的基础上，物理学家通过对实验观测进行理论分析和概括，或者为了解释某些原子现象，往往提出一个原子模型。这已成为原子物理学研究过程中极通常、极重要的方法。另外，从物理学基本原理出发的严格理论计算，往往也是在原子模型基础上选择合适的计算方法来完成的。由此可见，原子模型在实验现象和严格的物理理论之间起着承上启下的作用，它是人们认识原子结构的重要环节。

然而，物理模型的建立绝不是一劳永逸的。新的实验事实往往不只是证实、丰富了原有的模型，有时还会和原有的模型发生矛盾和冲突。其结果，或揭露了原有模型的缺陷，从而推翻旧模型；或暴露了原有模型的局限性、片面性，从而给旧模型规定一个适用范围。整个原子物理学发展史表明，原子模型永远处于不断演变、不断更新之中。

在本章，我们将从分析原子中所包含的正负电荷入手，建立起能说明原子中正负电荷分布的原子结构模型。为了考查这个模型是否合理，再进一步分析 α 粒子散射实验。通过对实验结果的分析，确认原子结构的有核模型。在这个模型的基础上，建立 α 粒子的散射理论。最后，将理论结果和实验结果加以比较，进一步验证这个模型和理论的正确性。

§1.1 原子的质量和大小

一、原子的质量

原子的质量和宏观物体的质量相比是很小的。在物理学和化学中，量度原子的质量通常不使用公斤，而用原子质量单位做单位。1961年，国际计量大会规定：用碳(C)在自然界中丰度最大的一种同位素原子质量的 $1/12$ 作为原子质量单位，称为原子质量碳单位。用字母 u 表示，即

$$1u = 1.66055 \times 10^{-27} \text{ 千克.}$$

现在已经知道，各种原子的质量是不同的。物理学和化学中经常采用原子的相对质量，即原子质量 M_A 与碳单位的比值，并称为原子量，用字母 A 表示：

$$A = \frac{M_A}{u}. \quad (1-1)$$

显然，原子量是无量纲的。例如，氢的原子量是 1.0079，氧的原子量是 15.9949，金的原子量是 196.9665 等等。原子量可用化学方法进行测定。

根据已知的原子量，由式 (1-1) 可求出原子的绝对质量

$$M_A = A \cdot u = 1.66055 \times 10^{-27} A \text{ (千克)}. \quad (1-2)$$

如果 1 摩尔原子的质量是 A (克)，那么由阿伏伽德罗常数 N_A 还可以把原子的绝对质量表示为

$$M_A = \frac{A}{N_A} \text{ (克)}. \quad (1-3)$$

其中阿伏伽德罗常数 $N_A = 6.02217 \times 10^{23} \text{ (摩尔)}^{-1}$ 。此时， A 表示 1 摩尔原子质量的克数，称为 1 摩尔原子质量。