

大学物理自学丛书

郭士望主编

原子物理

吴茂良 李继陶 编著

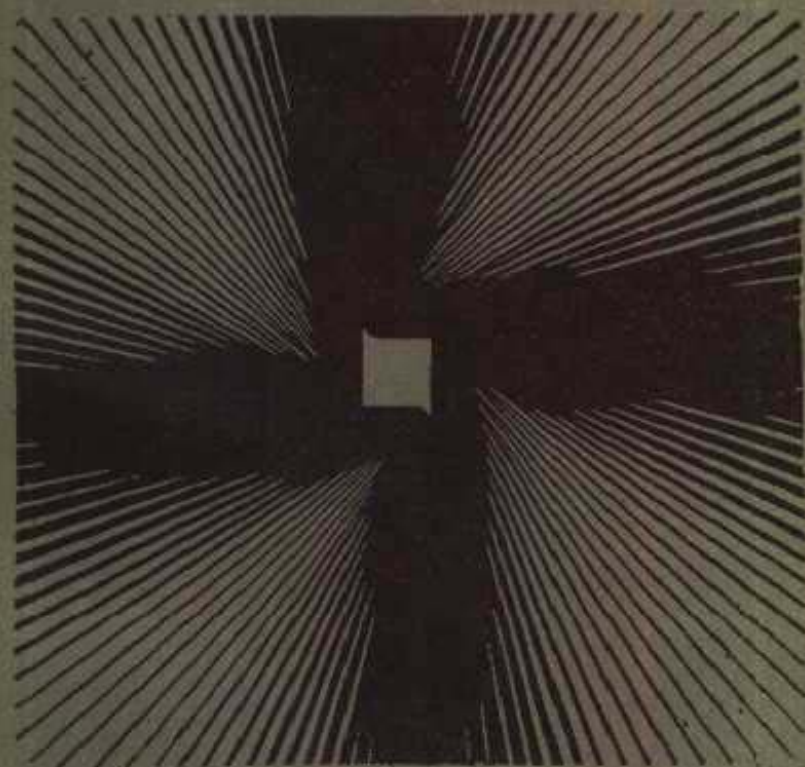
$$h\nu = E_2 - E_1$$



四川教育出版社

大学物理自学丛书

原子物理



四川教育出版社

一九八七年·成都

责任编辑:陈卫平

封面设计:何一兵

版面设计:王 凌

原子物理

四川教育出版社出版

(成都盐道街三号)

四川省新华书店发行

成都人北印刷厂印刷

本开787×1092毫米 1/32

印张15 字数315千

1987年3月第一版

1987年3月第一次印刷

印数: 1—1, 700册

书号: 7344·688

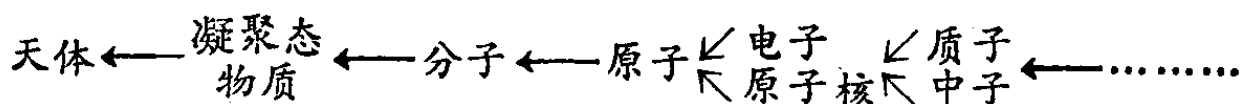
定价: 2.76元

SF147102

致 读 者

人类对物质世界的认识，经历了由粗浅到深入，由宏观到微观的一个逐步发展过程。十九世纪中后期，经典物理学已经很“完美”了，其中一个结论是：原子是组成物质的不可再分的最小微粒。“但是，在物理学晴朗天空的远处，还有两朵小小的令人不安的乌云”。这是1900年著名的英国物理学家开尔文在一篇展望二十世纪物理学的文章中的一句话。这两朵乌云，指的是当时物理学无法解释的两个实验，一个是黑体辐射实验，一个是迈克尔逊-莫雷实验。正是这两朵小小的乌云，不久就发展成为物理学中一场革命的风暴——以原子物理为开端的近代物理学诞生了。

事实上，近百年来才找到答案的许多问题，早在二千年前就开始提出来了。然而，十九世纪以来，科学发展是如此之快，以致容易忘记过去二千年来关于物质本性、物质结构的种种理论。现在我们知道，物质是由原子组成的，而原子则是物质结构层次中的一个层次：



原子物理是本世纪初期发展起来的物理学的一个分支学

科。1913年玻尔的氢原子量子论奠定了它的基础。原子物理的研究对象是：原子结构、性质、运动规律及其应用。原子物理的主要内容有：原子结构模型，核外电子分布规律，元素周期表；氢原子及碱金属光谱，原子光谱的规律性；原子的能级，原子激发和电离；电子自旋，原子磁矩；伦琴射线的产生和特性；能量、角动量及空间量子化；以及近年来迅速发展的原子碰撞过程和相互作用。

原子物理的发展深刻地影响着物理学的各个领域和化学，并且涉及到生物学、冶金学、矿物学、电子学等。由于原子物理研究的是物质微观结构，人们从中获得的是基本知识，而不仅是局部技术，因此原子物理在生产技术上的应用是开创性的。当代许多科学技术的理论基础是原子物理。比如金属、晶体、半导体、发光材料、磁性材料、激光等。

本书以大学普通物理学的原子物理教学大纲为依据。第一、二章，讨论原子光谱的实验规律，介绍 α 粒子散射实验、夫兰克-赫兹实验、史特恩-盖拉赫实验，逐步引导到玻尔的氢原子理论、原子的核模型、原子磁矩、空间量子化。第三章，从普朗克量子论出发，介绍量子力学及其对氢原子的描述。第四、五章，讨论碱金属光谱、电子自旋、原子的矢量模型、原子状态、电子壳层的建造，以及伦琴射线。第六章，讨论原子核的性质，核衰变，核反应，核结构，以及宇宙射线和基本粒子。为了突出重点，本书不包含分子光谱及分子结构的内容。

本书可供具备高中数学、物理基础知识的读者自学，也可作理工和师范大专院校的教学参考书，或大学生课外读本。每章正文之外，附有思考题，以便读者自学之后自我检查。书末附有习题，习题和思考题均有解答供读者参考。

自学本书的读者，请注意：1.对微观体系的描述不能用宏

规律，要想到量子化。2.实验现象的描述、分析、讨论和结论。3.物理概念、名辞术语的引入和含意，物理意义和数学表达形式。4.几个重要的物理常数。

本书编写过程中，参阅了褚圣麟的《原子物理学》、芮清泉的《原子物理学》、史斌星的《量子物理》、倪光炯、李洪芳的《近代物理》以及华东师范大学物理系普通物理教研组编的《普通物理学思考题题解》等书。我们对各位作者和负责编辑出版工作的同志谨致谢意。承蒙周骏官同志为本书绘制插图，深表感谢。

编者水平不高，错误难免，敬请读者指正。

序 言

《大学物理自学丛书》是根据全国自学考试普通物理教学大纲编写的，可作为参加高等教育普通物理自学考试的广大青年的学习参考书。它有无师自通的特点。有的分册曾作为川大的夜大学讲义使用过。

本丛书共八册，依次为：《力学》、《热学与分子物理（包括题解）》、《电磁学》、《光学（包括题解）》、《原子物理（包括题解）》、《微积分基础（包括习题及答案）》、《力学题解》、《电磁学题解》。凡具备高中文化程度的青年，只要认真阅读本丛书，并完成一定数量的作业，就能达到理科物理专业对普通物理的基本要求，获得通过普通物理单科考试的能力。

担任编写工作的同志，都是在川大主讲有关课程多年、富有教学经验的教师。

本丛书有以下几个特点：

第一，内容简练。本丛书突出基本概念、基本理论、基本技能，以学以致用为原则。其行文简明准确，深入浅出，从中学物理起步，将大学普通物理的主要部分讲得详细透彻；并注意介绍最新成就。凡属可讲可不讲的内容，一般不选入。

第二，自带工具。物理各分册的思考题、习题都有解答；所

需要的数学知识，都在《微积分基础》一书中讲到，读者无需它求。《微积分基础》例题多、实用性强，可收事半功倍的效果，因其是按数学系统编写的，先后次序不可能与物理的需要一致，故读者应根据各人的具体情况进行阅读。

第三，例题精解。为了培养读者的解题能力，本丛书所选例题较多，对求解某些典型问题的方法和步骤，作了原则性的概括，以便使读者有法可循。

第四，便于自学。本丛书全部采用国际单位制（SI制）。每分册中附有常用单位的国际符号与中文符号对照表，以便检索。在结构上，每章均按前言、正文、小结、思考题安排。前言中扼要指出学习该章的目的和要求，便于自学后进行总结和检查。

尽管编写小组的同志在主观上作了很大努力，但限于业务水平和时间关系，缺点和错误在所难免，恳切欢迎读者批评指正，以便得到改进。

郭士堃

一九八五年于四川大学物理系

周期	IA	IIA	IIIA	IVB	VB	VIB	VIIIB	VIII	IB	IIB	IIIA	IVA	VA	VIA	VIIA	2	2E
1	1H 氢	1.0080														2He 氦	4.00260
2	3Li 锂	6.941	9.01218													10Ne 氖	20.179
3	11Na 钠	22.9898	24.304													18Ar 氩	39.948
4	19K 钾	39.0983	40.078													36Kr 氪	83.80
5	37Rb 铷	85.4678	87.62													54Xe 氙	131.29
6	55Cs 铯	132.9055	137.34													86Rn 氡	222.0175
7	87Fr 钫																

(A—主族 B—副族)															
19K 钾 39.102 元素符号 原子序数															
原子名称 元素名称 原子量															

57-71 镧系元素	57La 镧	138.9055	58Ce 铈	140.12	59Pr 镨	140.9077	60Nd 钕	144.24	61Pm 钷	145	62Sm 钐	150.4	63Eu 铕	151.96	64Gd 钆	157.25	65Tb 铽	158.9254	66Dy 镝	162.50	67Ho 铒	164.9303	68Er 铈	167.26	69Tm 铥	168.9342	70Yb 镱	173.04	71Lu 镥	174.92
89-103 锕系元素	89Ac 锕	227	90Th 钍	232.0377	91Pa 镤	231.03688	92U 铀	238.02891	93Np 镎	237.04817	94Pu 钷	244	95Am 镅	243	96Cm 锔	247	97Bk 锫	247	98Cf 锿	251	99Es 镄	254	100Fm 镆	257	101Md 镅	258	102No 镎	259	103Lw 铹	260

附注: 1. 表中所列原子数采用 1969 年国际原子量, 用碳单位的原子质量单位, 加括号的数字是寿命最长的放射性同位素的质量数。

2. 名称后注“^{*}”的是人造元素。

8. 周期数下面的符号表示在该周期元素的原子中价层电子所占有的壳层名称。

目 录

第一章 原子结构的初期理论与实验	(1)
§1.1 原子和电子.....	(1)
1.原子的质量和大小 2.电子的电荷与质量	
§1.2 原子的核式结构.....	(5)
1.原子的核式模型 2.卢瑟福散射公式	
§1.3 原子光谱的实验规律.....	(17)
1.光谱、光谱仪及光谱类别 2.氢原子光谱的实验规律	
3.光谱项、并合原则	
小结	(29)
思考题	(31)
第二章 氢原子	(32)
§2.1 玻尔的基本假设.....	(33)
§2.2 玻尔的氢原子理论.....	(38)
1.电子在原子核库仑场中的运动 2.氢原子中电子运动的轨道半径与能量 3.轨道、能级和光谱项 4.氢原子的结构与光谱 5.氢原子的连续光谱	
§2.3 夫兰克-赫兹实验	(56)
§2.4 类氢离子光谱.....	(63)
1.氢离子光谱 2.里德伯常数的变化	

§2.5 氢原子的椭圆轨道与相对论效应·····	(72)
1.索末菲量子条件 2.椭圆轨道的总能量与轨道特征	
3.相对论效应	
§2.6 角动量的空间量子化·····	(81)
1.原子的磁矩 2.角动量的空间量子化	
§2.7 史特恩-盖拉赫实验 ·····	(90)
小结·····	(95)
思考题·····	(100)
第三章 量子力学概要 ·····	(102)
§3.1 量子理论的起源·····	(103)
1.普朗克提出量子假说 2.爱因斯坦提出光子假说 3.玻尔提出原子定态跃迁理论 4.德布罗意提出物质波的假说 5.量子力学诞生了	
§3.2 量子力学的实验基础·····	(106)
1.光的波粒二象性 2.电子的波粒二象性	
§3.3 测不准原理·····	(115)
§3.4 波函数 ·····	(119)
1.什么是波函数 2.自由粒子的波函数 3.波函数的物理意义	
§3.5 薛定谔方程·····	(124)
1.薛定谔方程的一般形式 2.定态 3.一维问题 4.力学量算符	
§3.6 量子力学对氢原子的描述·····	(132)
1.薛定谔方程 2.波函数 3.能量和角动量 4.电子的几率分布	
小结·····	(151)
思考题·····	(154)
第四章 碱金属原子 (单价原子) ·····	(155)

§4.1 碱金属原子光谱·····	(156)
§4.2 碱金属光谱规律的解释·····	(165)
1.价电子与原子实 2.轨道的贯穿与极化 3.碱金属原子光谱线系的形成	
§4.3 碱金属原子光谱的精细结构与电子自旋·····	(170)
1.碱金属光谱的精细结构 2.电子自旋 3.自旋-轨道相互作用能 4.角动量的合成 5.碱金属原子能级的分裂	
6.能级图与状态符号 7.单电子跃迁的选择定则	
小结·····	(193)
思考题·····	(195)
第五章 多价原子与原子的壳层结构·····	(197)
§5.1 角动量合成与 L-S 耦合·····	(198)
1.角动量合成的一般规律 2.L-S 耦合与原子状态	
§5.2 氢原子光谱·····	(205)
1.氢原子的状态与能级 2.氢原子光谱 3.碱土金属原子的光谱	
§5.3 塞曼效应·····	(215)
1.塞曼效应的实验观察 2.原子能级在磁场中的分裂	
3.塞曼效应的理论解释	
§5.4 原子的电子壳层结构·····	(224)
1.构造元素周期表的有关知识的归纳 2.核外电子分布的基本原则 3.元素的周期性 4.电子壳层的填充	
§5.5 X 射线光谱与内层电子跃迁·····	(247)
1.连续 X 射线光谱 2.X 射线的线状光谱 (标识光谱)	
3.俄歇效应	
小结·····	(257)
思考题·····	(263)
第六章 原子核·····	(265)

§6.1 原子核的基本性质·····	(266)
1.原子核的电荷和质量 2.原子核的大小和组成 3.原子核的结合能 4.原子核的自旋和磁矩 5.原子核的宇称	
§6.2 放射性及 α 衰变·····	(286)
1.放射性衰变规律 2.放射系及衰变能 3. α 衰变	
§6.3 β 衰变及 γ 跃迁·····	(307)
1. β 衰变 2. γ 跃迁 3.射线与物质相互作用	
§6.4 原子核反应·····	(327)
1.核反应中的守恒量 2.核反应能量 3.核反应截面 4.核反应机制 5.粒子加速器	
§6.5 核裂变和核聚变·····	(348)
1.核裂变 2.反应堆与原子弹 3.核聚变与氢弹	
§6.6 原子核结构模型·····	(369)
1.液滴模型 2.壳层模型	
§6.7 基本粒子·····	(380)
1.宇宙射线 2.基本粒子的性质和分类 3.粒子间的相互作用	
小结·····	(392)
思考题·····	(395)
思考题解答·····	(397)
习题·····	(415)
习题解答·····	(422)
附录 I 国际单位制(SI)·····	(454)
附录 II 基本常数及单位换算·····	(455)
附录 III 原子质量·····	(457)

第一章 原子结构的初期理论与实验

原子内部运动是物质基本运动形式之一。本章主要介绍一些对探索原子内部运动和结构起直接作用的基本实验及其理论分析。首先讨论 α 粒子的散射实验和卢瑟福 (E. Rutherford) 的原子核式模型。其次, 由于对原子结构的认识是和对原子光谱的研究分不开的, 我们将对原子光谱实验规律进行分析和总结, 为玻尔 (N. Bohr) 的原子结构理论打下基础。

本章要求读者重点掌握以下内容:

(1) 卢瑟福的原子核式模型及 α 粒子散射理论, 其中包括核的大小和电荷、散射角公式和卢瑟福公式;

(2) 氢原子光谱的实验规律, 其中包括氢原子光谱五个线系的名称和相应的公式, 广义巴耳末公式以及光谱项、并合原则、线系限和里德伯常数等重要概念。

§1.1 原子和电子

物质由分子组成, 而分子又由原子组成; 分子和原子都不能由肉眼直接看到。“原子”的本意是“不可分割的”,

但科学实验证明原子具有复杂的内部结构，而且也是可以分割的。化学的研究充分证明各种物体都是由元素构成的，原子是元素的最小单元，各种元素的原子，其结构与性质是不同的，例如碳元素的原子不同于铁元素的原子。但是各种原子的组成成分是相同的，都是电子、质子和中子等几种基本粒子。这几种基本粒子又怎样构成多种多样的，具有各种性质的原子呢？这是我们要逐渐说明的。本节先介绍原子和电子的一般情况，至于质子和中子，它们是原子核的组成部分，将留在本书的第六章中去介绍。

1. 原子的质量和大小 化学元素中最轻的原子是氢原子，一个氢原子的质量是 1.673×10^{-27} 千克，一个碳原子的质量是 1.994×10^{-26} 千克，其它元素中最大的一个原子质量也不过是氢原子的两百多倍。任何一个元素其原子质量都是很小的，用千克或克做原子质量的单位很不方便。因此在化学和物理中常用相对质量单位，称为**原子质量单位**。人们规定自然界中含量最丰富的一种碳同位素的质量为12.000个原子质量单位。通常用符号 u 来表示，其大小为

$$1u = 1.661 \times 10^{-27} \text{ 千克} \quad (1.1-1)$$

其它原子的质量同原子质量单位 u 相比较而定出其相对值，称为**原子量**。于是氢的原子量是 1.008，碳的原子量是12.011，氧是 15.999，铜是 63.546。只要知道了原子量，任何一个原子的绝对质量也就可以求得。

在采用原子质量单位时，我们可以取最接近原子质量的整数来近似地表示原子的质量，这个整数就叫做原子的**质量数**。氢的原子量是 1.008，它的质量数就是 1；碳原子的质量数是12，氧是16，铜是64。

质子和中子的质量也可用原子质量单位来表示:

$$\begin{aligned} 1 \text{ 个质子的质量} &= \frac{1.673 \times 10^{-27} \text{ 千克}}{1.661 \times 10^{-27} \text{ 千克}} \\ &= 1.007 \approx 1; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} 1 \text{ 个中子的质量} &= \frac{1.675 \times 10^{-27} \text{ 千克}}{1.661 \times 10^{-27} \text{ 千克}} \\ &= 1.008 \approx 1. \end{aligned}$$

所以质子和中子的质量数都是1, 原子核的质量数是整数。

原子的大小可以用各种方法求得。例如我们可以用气体分子运动论来作一些估计。由气体分子平均自由程的理论公式

$$\bar{\lambda} = \frac{1}{4\sqrt{2}n\pi r^2} \quad (1.1-2)$$

可以算出原子的半径 r , 式中 $\bar{\lambda}$ 表示分子的平均自由程, n 是单位体积内的分子数。若我们选定原子气体分子, 由实验测得 $\bar{\lambda}$ 和 n , 则可由(1.1-2)式算出原子的半径 r 来, 其数量级为 10^{-10} 米。用其它方法求得的原子半径, 其数量级都是与此一致的。

2. 电子的电荷与质量 在19世纪末期, 人们发现了电子, 并且证明它是原子中的一个重要组成部分, 这是人们认识原子结构的开端。在对电现象的研究中, 英国科学家法拉第 (M. Faraday) 首先认识到电荷的不连续性。1863年他宣布了著名的法拉第电解定律。根据这个定律, 当有96486.70库的电量通过一价离子溶液时, 便有一摩尔的一价离子的

物质被电解出来，并且与物质种类无关。这就意味着，任何元素一摩尔的一价离子带有相同的电量，与离子的性质无关，这个电量叫**法拉第常数**，通常用 F 来表示，即

$$F = 96486.70 \text{ 库/摩}.$$

实验还发现，若在电解液中电解出来的是二价离子，当通过 96486.70 库的电量时，只能电解出 $\frac{1}{2}$ 摩的物质。如果是三价离子，就只能电解出 $\frac{1}{3}$ 摩的物质。因此可以认为：二价离子所带的电量是一价离子的 2 倍，三价离子所带的电量是一价离子的 3 倍。再根据阿伏加德罗定律知道，任何一摩物质内均含有 $N_0 = 6.022 \times 10^{23}$ 个原子，我们如果假定这些电量都是均匀地分布在这 N_0 个原子上的，因此一个离子所带的最小电荷相当于一个一价离子所带的电量，用符号 e 来表示，它等于

$$e = \frac{F}{N_0} = \frac{96486.70}{6.022 \times 10^{23}} = 1.602 \times 10^{-19} \text{ (库)}, \quad (1.1-3)$$

这就是电子的电荷。这个电量是电荷的最小单元，称为**基本电荷**。任何物体所带电量都是它的整数倍。电子电荷的直接测定直到 1911 年才由美国科学家密立根 (R. A. Millikan) 完成，他准确地测定了电子电荷的电量，并且直接证明了电荷的不连续性和基本电荷的存在。

带电粒子的电量和质量是它的两个最基本的属性，1897 年汤姆孙 (J. J. Thomson) 在研究阴极射线性质时测定了电子的电荷与其质量的比值 (e/m)，称为**荷质比**。根据最近测得的数值，荷质比为