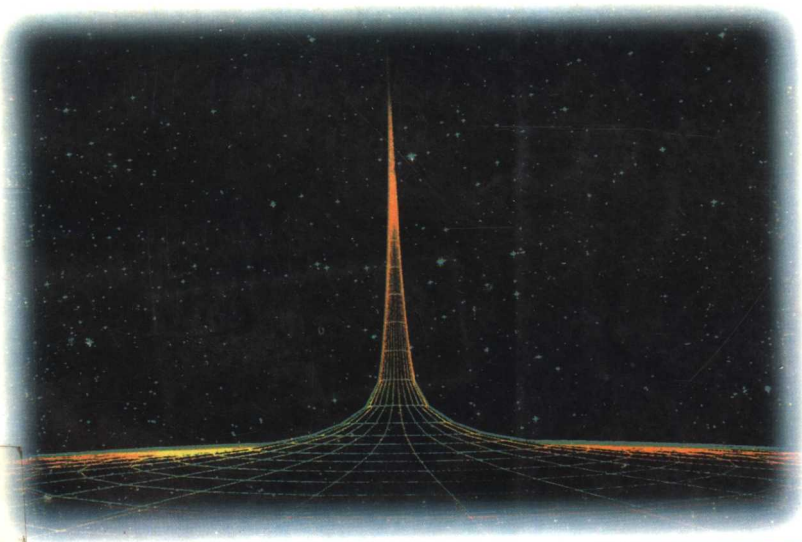


· 大学教材系列 ·

YUANZIWULIXUE

原子物理学

王德云 李增为 吴水清 编著



广西师范大学出版社

原子物理学

李增为 王德云 吴水清 编著

广西师范大学出版社出版发行 邮政编码:541001

(广西桂林市中华路 36 号)

广西师范大学出版社印刷厂印刷

*

开本:850×1168 1/32 印张:8.75 字数:219 千字

1996 年 7 月第一版 1996 年 7 月第一次印刷

印数:0001—1000 册

ISBN 7—5633—2256—6/O · 015

定价:12.00 元

内 容 简 介

本书以原子结构为中心,系统地论述了原子物理学的基本内容.从原子整体结构模型开始,先后阐述了原子物理学的理论基础——旧量子论的建立和发展,量子力学的基础知识;原子物理学研究的主要对象——氢原子、碱金属原子、多电子原子;原子作为整体在外磁场中的变化;用原子结构的观点解释元素周期表;X射线的基础知识等.

每章后面附有本章内容小结和习题,并附有一些专题概述,供学生阅读使用.

本书内容系统性强,整体结构合理,可作为师范院校、电大、函大等物理专业教材或参考书,亦可供有关科技人员和中学物理教师参考.

前 言

人们对于原子结构的认识,可以追溯到 19 世纪初期.但作为一门独立学科的原子物理学,却是从本世纪初逐步形成的.1913 年,丹麦物理学家尼·玻尔(N. Bohr)提出原子定态和量子态间的跃迁重要概念,建立了原子的量子论,这便是人们通常所认为的原子物理学的开端.

原子物理学的关键,是了解原子的结构及其性质,原子之间的相互作用,原子与电场和磁场的相互作用,并涉及到原子核物理、粒子物理方面的基础知识.

这本《原子物理学》是由三位作者(王德云、吴水清、李增为)在自己多年教学与创办物理杂志的实践基础上编写的.全书共分八章,内容有原子的模型,量子论的建立与玻尔理论,量子力学基础,碱金属原子,多电子原子,在外场中的原子,元素周期表与原子的壳层结构,X 射线等.

这本书取材适当,概念准确,具有一定的可读性,可作为高等师范院校的教材或教学参考书,特为推荐.

王德云

1996 年 3 月 16 日.

目 录

绪 论	(1)
第一章 原子模型的建立	(9)
§1 电子的发现及其性质	(9)
§2 汤姆逊原子模型与 α 粒子散射实验	(14)
§3 卢瑟福的原子有核模型	(18)
§4 卢瑟福原子模型的意义及其困难	(25)
本章内容小结	(27)
习题	(27)
第二章 量子论的建立与玻尔理论	(29)
§1 黑体辐射与普朗克假设	(29)
§2 光电效应与爱因斯坦假设	(39)
§3 康普顿散射	(44)
§4 氢原子光谱的实验规律	(51)
§5 玻尔理论的建立	(56)
§6 玻尔理论的应用	(59)
§7 玻尔理论的推广和发展	(68)
§8 玻尔理论的实验验证 —— 夫兰克-赫兹实验	(78)
§9 对应原理	(84)
附录 玻尔理论的地位和作用	(86)
本章内容小结	(89)
习题	(90)
第三章 量子力学基础	(93)
§1 实物粒子的波-粒二象性	(93)
§2 不确定关系	(98)
§3 波函数及其统计解释	(103)
§4 薛定谔方程	(108)

§ 5 一维无限深势阱	(113)
§ 6 量子力学对氢原子的描述	(116)
附录	(127)
本章内容小结	(130)
习题	(133)
第四章 碱金属原子	(136)
§ 1 碱金属原子光谱的一般结构	(136)
§ 2 电子的自旋	(144)
§ 3 碱金属原子光谱的精细结构	(153)
§ 4 碱金属原子的状态符号	(160)
§ 5 氢原子光谱的精细结构	(162)
本章内容小结	(167)
习题	(170)
第五章 多电子原子	(173)
§ 1 氢及碱土金属原子的光谱和能级	(173)
§ 2 两个电子的耦合	(177)
§ 3 复杂原子光谱和能级的一般规律	(187)
§ 4 泡利原理·同科电子	(192)
附录 激光原理简介	(196)
本章内容小结	(206)
习题	(207)
第六章 在外磁场中的原子	(209)
§ 1 原子的磁矩	(209)
§ 2 外磁场对原子的作用	(211)
§ 3 塞曼效应	(215)
附录	(225)
1. 顺磁共振	
2. 核磁共振	
3. 斯塔克效应	
本章内容小结	(230)

习题	(231)
第七章 元素周期表与原子的壳层结构	(233)
§1 元素性质的周期性变化	(233)
§2 原子的壳层结构	(235)
§3 原子中电子壳层的建造与元素周期表	(246)
本章内容小结	(248)
习题	(249)
第八章 X 射线	(250)
§1 X 射线的产生及其性质	(250)
§2 X 射线产生的机制	(253)
§3 X 射线的吸收	(263)
本章内容小结	(266)
习题	(267)
附录 (1)物理常数	(269)
(2)元素周期表	(270)
主要参考书	(271)
后记	(272)

绪 论

1. 原子物理学研究的内容

物理学是研究物质运动的最一般规律和物质基本结构的科学。原子物理学,作为物理学的一个分支,主要研究物质结构的一个层次,这个层次,介于分子和原子核两个层次之间,称之为原子。虽然原子概念的提出已有两千余年的历史,但是我们所讲授的原子物理学是在本世纪初开始形成的一门学科,并随着近代物理学的发展而发展起来的。

原子物理学主要研究原子的结构、性质等有关方面的问题,并涉及到原子核物理,粒子物理方面的基础知识。通过这门课程的学习,建立起比较完整的原子“物理图像”。

2. 原子物理学的建立和发展

为了学好这门课程,先对它的建立和发展情况做些介绍,帮助大家了解一些原子物理学发展的历史及推动原子物理学发展的典型事件和具有代表性的实验是有益的。

原子物理学的发展可划分几个时期:

(1)古代

古代哲学家对物质结构的认识有过许多美好的设想,经过了漫长的岁月。这个历史时期具有代表性的是古希腊的留基伯(Leucippus)和他的学生德谟克利特(Democritus),称为古原子论的奠基者,他们认为物质是由简单的不可分割的基本单元——原子组成。这虽属机械唯物论,但这朴素的思想确是原子论的萌芽。现今世界上通用的原子(Atom)一词是沿用古希腊的 nous(原意是不可

分割),在古印度将原子称为 anu(译为“微”,意为“微小”).在我国,战国时期的墨家称为“端”,《墨经》中曾记载:“端:体之无序最前者也.”意思是说:“端”是组成物质的不可分割的最原始的东西.名家称为“小一”,那时称惠恩的人就曾说过:“其小无内,谓之小一.”意思是说,“小一”这东西不再有内,也就无法再分割了,即为最原始的微粒.严复翻译的《穆勒名学》一书中,首次把原子(Atom)一词介绍到我国,当时他把 Atom 译为莫破,把 Atom Theory 译为莫破质点论.

但是,差不多同时代的亚里士多德(Aristotle)等人却反对这种物质的原子观.他们认为,物质是连续的,可以无限制地分割下去.在我国,以战国时期的公孙龙为代表的也是主张物质无限可分的,他的名言:“一尺之棰,日取其半,万世不竭.”近几百年的物理学,一直在考验这句话的正确性.公孙龙在 2000 多年前的臆想,正在不断地得到现代科学的支持.

(2)近代

建立在科学基础上的原子学说大约是在二三百年的事情,这一时期又可划分成:

①前期(17~18 世纪)

这一时期的主要代表性的发现有:

1666 年牛顿光谱的发现以及后来许多关于这方面资料的累积成为探索原子结构的重要依据.

关于气体分子论的萌芽及 18 世纪中叶罗蒙诺索夫早期分子运动论的建立.

②中期(18 世纪末到 19 世纪中期)

这是原子物理学发展的重要时期

1806 年法国普鲁斯脱(J. L. Proust)发现化合物分子的定组成定律.

1807 年英国道尔顿(J. Dalton)发现倍比定律,并提出原子论,

从而开辟了原子学说的门径。

1808年,法国盖·吕萨克(J. L. Gay-Lussac)发现气体化合时,各气体的体积成简比的定律,并由之认为元素气体在相等体积中的重量应正比于它的原子量。

1811年,意大利阿伏伽德罗(A. Avogadro)提出假说:相同体积的气体在同温同压下含有相同数目的分子。

1826年,英国布朗(R. Brown)观察到液体中的悬浮微粒作无规则的起伏运动,即所谓“布朗运动”,这是分子运动的有力证据。

1833年,英国法拉第(M. Faraday)提出电解定律,揭示了电的基本单元的存在。

1869年,俄国门捷列夫(Д. И. Менделеев)提出元素周期律。

③后期(19世纪末期到20世纪初)

这是原子物理学阔步前进的时期

经典物理学大约经过近300年的发展,到19世纪末已经建立较完整的理论体系,这就是以牛顿三定律和万有引力定律为基础的经典力学;以麦克斯韦方程组和洛仑兹公式所表述的电磁场理论;对于热现象有以热力学三大定律为基础的宏观理论;又有用统计物理学所描述的微观理论。至此,不少物理学家,其中包括一些很有名望的物理学家认为物理学理论的骨架已经完成,今后的工作只不过是扩大这些理论的应用范围和提高实验的精度,从而做些修补细节的工作罢了。

比如,早在19世纪上半叶,人们就发现天王星的运动与万有引力定律、能量守恒定律、角动量守恒定律有矛盾。1846年科学家勒威耶(Leverrier)和阿丹姆斯(Adams)各自提出,如果天王星外面某轨道上有一颗质量一定的行星存在,就能解释这种矛盾,并预言了这颗行星将在下一年的某月某日在某处出现。果然,第二年在他们预言的时间、位置观察到一颗新行星,后来命名为海王星。这件事看成是牛顿力学的巨大成功,被誉为“不必向天空看一眼,就

发现了这颗新行星”，“是在勒威耶笔尖下看到的，完全凭计算就确定了远在当时所知的太阳系之外的一个星体的位置和大小”。同样又发现了冥王星。1899年除夕之夜，欧洲著名科学家聚餐会上，大会主席开尔文发表的新年贺词中说：“19世纪已将物理大厦主部建成，今后物理学家的任务就是修饰、完美这所大厦了。”但是，也就在这篇贺词中他又指出：“在物理学的天边，还有两朵小小的，令人不安的乌云。”一朵是热辐射的“紫外灾难”。指1900年英国物理学家瑞利(L. Rayleigh)和金斯(J. H. Jeans)推导出黑体辐射能量密度公式：

$$\rho(\nu) = \frac{8\pi}{c^3} K T \nu^4$$

因为 $\rho(\nu)$ 与 ν^4 成正比，则在紫外部分将会发射出无限大的能量，这就是所谓的“紫外灾难”。这公式的推出是依据经典电磁理论和统计物理，因此，这个灾难实际上也就是经典物理学的灾难；另一朵乌云是迈克尔逊-莫雷(Michelson-Morley)实验，否定以太的存在，确定光速不变性。

正是这两朵小小的乌云不断扩大，酿成物理学的一场伟大革命风暴，最终导致了量子理论和相对论的建立，开创了近代物理的新纪元。

这一时期原子物理学发展的重要标志有：

1885年，丹麦的巴耳末(Balmer)发现了氢原子光谱的规律。

1895年、1896年和1897年相继发现了X射线、放射性和电子。这三大发现揭开了近代物理的序幕。

1900年、1905年提出能量子和光量子的概念。

1911年，卢瑟福(E. Rutherford)原子有核模型的提出，1913年玻尔(N. Bohr)理论的建立，使原子物理学开始了新的篇章。

这时期的量子理论仍以经典理论为基础，故称为旧量子论。

(3)现代(20世纪20年代至今)

这是新量子论诞生和发展时期。

1924年德布罗意(de. Broglie)提出物质波的概念,将光的二象性推广到一般实物粒子。

1925年,微观体系的新理论——量子力学的建立。

1932年,中子的发现,表明原子核有结构,这以后核物理的研究和应用得到迅速发展。

1950年,基本粒子的研究和发展成绩卓著。

我国物理学工作者对这一科学领域的研究做出了积极的贡献,现仅举几个典型例子说明。

1920年,叶企孙和他的合作者测定出普朗克常数 h 的数值, $h = 6.556 \pm 0.009 \times 10^{-27}$ 尔格·秒,这个数值在物理学界沿用了16年之久。

1925~1926年,吴有训通过实验观测到X射线散射中波长改变的现象。

1947年,钱三强和何泽慧夫妇发现核裂变时,极少数的情况下,分裂成三块和四块的情况,称为三分裂和四分裂。

1959年,王淦昌发现了 Σ^- 超子。

1966年,我国高能物理工作者提出了强子结构的层子模型,为研究物质微观结构更深的层次探索新路。

3. 原子物理学的地位和作用

(1)原子物理学揭示了宏观物理现象和规律的本质

一些宏观现象和规律要得以深入解释,就得从微观结构去考虑,而微观结构的研究便是原子物理学的课题。比如,物体为什么能发光?常温下为什么一般物体不能发光?元素的物理、化学性质为什么呈现出周期性?物体划分为导体、半导体、绝缘体的原因是什么?

另外,通过对物质结构的研究,不但能解释许多已经发现的事实,尚能发展新的知识,如对光谱精细结构的解释,提出了电子自

旋问题.

(2)原子物理学是近代物理学的开端

20 世纪初建立和发展起来的近代物理学,其中量子理论和相对论是两大支柱,而原子物理学是量子理论的重要组成部分,也是近代物理学最早建立和比较完善的一门学科.

另外,原子物理学的发展,不只涉及物理学的某些学科,如光谱学等,而且影响整个物理学各个领域.

随着科学实验水平的提高,生产技术的发展,原子物理学研究的内容更加深入,分工也更加细腻,因而后来又划分出原子核物理学,粒子物理学.同时研究的理论体系也更加完整,其中包括《量子力学》、《量子场论》,以及近几十年才发展起来的《规范场理论》、《量子色动力学》等,这是近代物理学的前沿.

(3)原子物理学与其他学科有着密切的关系

化学研究的内容与原子物理学的关系越来越密切,不论无机化学,还是分析化学,现在已演变出量子化学.

天体物理学对天体的研究重要手段之一,就是对天体所发光谱的分析,而光谱分析是原子物理学的重要内容.

矿物学、冶金学是与结晶学科有密切关系的,而结晶学涉及到对晶体结构的研究,这又是原子物理学的内容.

数学与物理学的关系更加密切,像自旋概念的提出,正电子的预言均依赖于数学.《群论》起初纯属数学抽象,用途不知.后来研究晶体发现与“群”有关,19 世纪末先后写成三本书,直到 1931 年用于《量子力学》,1941 年用于光谱的研究.近代物理的许多学科离不开《群论》,它已经作为理论物理的一门重要基础课程.

(4)原子物理学在生产上所起的作用是基本的,影响面很广.

电子器件中的电子源,X 射线在材料检验和医学上的应用,发光材料的研究,光电管在自控中的应用,反应堆的运行,核武器的研究和使用的……都与原子物理学有着密切的关系.

4. 学习原子物理学应注意的几个问题

每一门学科,都有一套理论和相应的概念,都有其自身的特点,要学好这门课程,掌握这些特点是很重要的。

(1) 掌握原子物理学研究问题的一般方法

原子物理学同物理学其他学科一样,也是以实验为基础的,首先根据自然界、生产过程和科学实验中的事实、现象提出假说(假设)或模型,用其若能说明所观察到的现象,便可上升为理论,否则便被抛弃。再用这些理论指导实践,进一步检验理论的正确性。循环往复,建立起更加完整的体系。整个原子物理学的发展过程正是如此。

正如马克思所言:“只要自然科学在思维着,它的发展形式就是假说。”

(2) 注意每一个理论都有它的适用范围

经典物理学的规律是由宏观现象总结出来的;而原子物理学研究的对象是微观粒子,它有自己的运动规律和特点,完全用经典的那一套理论、办法来处理是不适合的,甚至是行不通的,也就是经典规律不一定都适用于微观体系,这一点在今后的学习中要注意体会。

当然,不适用不等于错,恰恰体现了理论的相对性,如同牛顿力学有它自己的适用范围一样。

对于经典物理学的一些概念和方法已经接触很多,并且已经形成很深的观念。在学习新内容时,要注意突破传统观念的束缚。明显的区别是:宏观客体及其物理现象都是可以摸得着、看得见的,直观性强;而微观客体是摸不着、看不见的,生活中没有直接的经验,因此,就不可能像宏观物体那样有一幅清楚的图像。但这不等于不可知,可通过它们所显示出来的宏观现象而逐步了解它们,认识它们。因为宏观现象是它们内部结构、性质、特征的外在表现。通过对这些外在现象的研究来探讨内部结构恰是原子物理学的基础。

本方法.

(3)注意知识的连贯性和阶段性

这一方面的知识与那一方面的知识;这一学科与那一学科之间存在着一定的内在联系.学习原子物理学要用到力学、电磁学、数理方法等方面的知识,这些大家已经学过,有关的结论、公式直接应用;但也用到一些尚未学到的知识,这里面涉及到电动力学、量子力学等,有关的结论你先承认下来,以后再学.

(4)加强基本知识的理解和掌握

原子物理学就知识本身来说系统性是比较强的,讨论问题的方法也很明确.但知识内容比较零散,概念多、公式多、常数多,也给学习带来一定的困难.

另外,这门课程用到比较复杂的数学知识不多,开始学习容易忽视,到四、五、六章又会感到“乱”.为避免这种情况出现,一开始就要抓住其特点,扎实学习,打好基础.在学习注意采用“比较”的方法,便于理解、记忆,又防止混淆.

第一章 原子模型的建立

§ 1 电子的发现及其性质

1. 电子的发现过程

(1)1833年,法拉第(M. Faraday)提出电解定律,基本内容是:

①在电解中析出物的量与通过的电量成正比,而与电压、电极面积及液体的导电性质无关.

②由相同的电量析出的不同电解产物有固定的当量关系.

依此推得:一摩尔任何原子的单价离子带有相同的电量,这个电量就是法拉第常数

$$F=9.648456 \times 10^4 \text{ 库仑/摩尔}$$

而1摩尔原子数为 $N_A=6.022045 \times 10^{23} \text{ 摩尔}^{-1}$

(是1811年由A. Avogadro提出的). 于是就不难会提出电荷存在最小单元问题. 认为电应当由一种基本电荷,或者叫做“电的原子”所构成.

(2)1874年爱尔兰物理学家斯通尼(G. J. Stoney)依据法拉第常数 F 与阿伏伽德罗常数 N_A 之比,即表为 $e=F/N_A$. 明确提出原子所带的电荷为一基本电荷的整数倍. 并于1881年提出用 electro 来命名这个电荷的最小单位,译为“电子”,意为电荷的量子.

(3)1838至1896年间,通过阴极射线的研究,总结出:

①在没有外磁场的影响下,射线是直线前进的. 若在射线前进

的方向上放一障碍物,便会产生清晰的影子.

②加入外磁场或电场时,射线会发生偏转,依偏转情况知道射线是由一些带负电的物质微粒组成的.

19 世纪中期对气体放电现象的研究是热潮.在当时设备已经相当完善,只是真空度不够.1855 年德国吹玻璃工人盖斯勒(Geissler)利用托里拆利真空原理制造了水银真空泵,从而可以获得比较高的真空,为阴极射线的研究提供了良好的条件.

(4)真正从实验上确认电子存在,是在 1897 年由汤姆逊(J. J. Thomson)作出的.

汤姆逊设计了几个实验对阴极射线的性质进行具体测定,并于 1897 年 4 月 30 日将阴极射线的荷质比 e/m 测量结果,在英国皇家学院的星期五晚上以《阴极射线》为题做了报告.荷质比的测定就认为是发现了电子.因为荷质比是反应粒子重要性质的基本参量之一.

2. 电子基本性质的测定.

(1)荷质比 e/m 的测定

装置如图 1·1 所示:

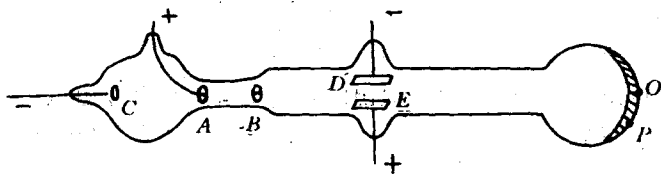


图 1·1 汤姆逊在 1897 年使用的放电管示意图

阴极射线从阴极 C 发出后,通过狭缝 A, B 成一狭窄的射线束再穿过两片平行的金属板 D, E 之间的空间,最后到达右端带有标尺的荧光屏上. D 和 E 之间可以加电场,放电管周围又可以加磁场.加电场 E 后,射线由 O 点偏到 P 点,由此可知阴极射线带有负电.再加上一个方向与纸面垂直向外的磁场 B ,使射线从 P 点回到