

原子物理学

原子物理学

主编 杨 羽 主审 殷传宗

参加编写人员(以姓氏笔划为序)

王继国 付康麟

刘学行 陈 时

西南师范大学出版社

1990·重庆

内 容 提 要

本书是参照1988年国家教委师范司颁布的二年制师范专科学校《原子物理学教学大纲》的要求编写的。全书分为十章：氢原子的玻尔理论、量子力学对氢原子的描述、碱金属原子、多电子原子、磁场中的原子、原子的壳层结构、原子核的性质和结构、不稳定核的衰变、核反应、粒子物理简介。每章均以一、两个实验为依据，阐述一个主要概念。全书先后阐述了量子化、波粒二象性、电子自旋、泡利原理、原子磁矩、原子壳层结构、结合能、衰变律、反应能等重要概念，揭示了原子、原子核内部的基本规律。

本书内容简明，突出实验，突出定性的理论。每章的重点内容有例题，章末附有启发性的结语和习题、思考题混编的练习，练习有提示和答案。

本书可作为师专和教育学院物理专业的教材，也可供电视师专、高师函授、中学教师参考。

原 子 物 理 学

杨 羽 主编

西南师范大学出版社出版

(重庆 北碚)

新华书店重庆发行所经销

重庆新华印刷厂 印刷

*

开本：787×1092 1/32 印张：11 插页：2 字数：238千

1990年5月 第一版

1990年5月 第一次印刷

印数：1—1:600

*

ISBN 7-5621-0270-8/O · 20

定价：2.25元

目 录

绪论.....(1)

为什么要学习原子物理学 怎样学习原子物理学

第一章 氢原子的玻尔理论.....(7)

§1-1 原子的核型结构.....(7)

原子的存在和电子的发现 α 粒子散射实验 卢瑟福散射理论及其实验验证

§1-2 氢原子光谱实验规律.....(20)

光谱 氢光谱的规律

§1-3 玻尔的氢原子理论.....(25)

行星模型的困难 普朗克—爱因斯坦量子论 玻尔假设

§1-4 氢光谱和类氢光谱的解释.....(35)

氢光谱的解释 类氢光谱的解释

§1-5 夫兰克—赫兹实验.....(47)

§1-6 玻尔理论的发展.....(50)

索末菲对玻尔理论的推广 空间量子化 玻尔理论的地位

结语：量子化.....(60)

练习.....(61)

第二章 量子力学对氢原子的描述.....(66)

§2-1 微观粒子的波粒二象性.....	(66)
----------------------	------

波粒二象性 不确定关系 波函数及其统计解释

§2-2 薛定谔方程	(79)
------------------	------

薛定谔方程 一维无限深势阱

§2-3 量子力学对氢原子的描述	(88)
------------------------	------

氢原子的波函数 角动量量子化 能级的简并

核外电子的几率分布

结语: 量子化的再认识	(103)
-------------------	-------

练习	(104)
----------	-------

第三章 碱金属原子	(106)
-----------------	-------

§3-1 碱金属原子的光谱和能级	(106)
------------------------	-------

碱金属原子光谱的实验规律 碱金属原子的能级

原子实的极化与价电子的轨道贯穿

§3-2 光谱的精细结构和电子自旋	(117)
-------------------------	-------

碱金属原子光谱的精细结构 电子自旋 自旋-轨道相互作用

结语: 电子状态的描述	(129)
-------------------	-------

练习	(130)
----------	-------

第四章 多电子原子	(133)
-----------------	-------

§4-1 耦合矢量模型	(133)
-------------------	-------

电子间的相互作用 L-S耦合 原子态符号与洪特定则

§4-2 氢原子的光谱和能级	(143)
----------------------	-------

氢原子能级与泡利原理 多电子原子辐射跃迁选

择定则	(153)
§4-3 激光的产生	(153)
结语: 原子状态的描述	(156)
练习	(158)
第五章 磁场中的原子	(160)
§5-1 原子的有效磁矩	(160)
§5-2 塞曼效应	(164)
原子能级在磁场中的分裂 塞曼效应	(164)
§5-3 史特恩-盖拉赫实验	(173)
原子在非均匀磁场中受的力 史特恩-盖拉赫实验	(173)
结语: 研究原子结构的几类实验手段	(178)
练习	(179)
第六章 原子的壳层结构	(182)
§6-1 原子的壳层结构	(182)
元素的周期性 原子的电子壳层结构 原子基态的确定	(182)
§6-2 X射线	(197)
X射线谱 韧致辐射 标识辐射 X射线的应用	(197)
结语: 从有核模型到壳层结构	(202)
练习	(203)
第七章 原子核的性质和结构	(205)
§7-1 原子核的基本性质	(205)

核的电荷、质量、大小和组成	核的自旋、磁矩	
和电四极矩	核的合能	
§7-2	核力	(218)
核力的存在	基本性质	核力的介子理论简介
§7-3	核结构模型	(223)
液滴模型和结合能半经验公式	壳层模型	集体模型
结语：对原子核静态性质的测量		(232)
练习		(233)
第八章	不稳定核的衰变	(235)
§8-1	放射性衰变的基本规律	(235)
稳定核的分布	衰变规律	放射性活度
则与放射系		
§8-2	α 衰变	(244)
α 衰变条件和 α 衰变能	α 能谱与核的能级	α 粒子的动能的实验测定
§8-3	β 衰变	(250)
β 衰变的类型	β 衰变的条件	β 能谱与中微子假设
β 衰变机制和 β 衰变能		
§8-4	γ 衰变	(256)
一般性质	内转换电子	穆斯堡尔效应
§8-5	放射性同位素的应用和防护	(260)
放射性同位素的应用	放射性防护	
结语：不稳定核向稳定核的过渡		(264)
练习		(265)

第九章 核反应	(268)
§9-1 核反应	(268)
核反应的守恒定律 反应能和阈能 核反应的分类	
核反应的机制	
§9-2 重核的裂变	(281)
裂变的发现 裂变机制 链式反应 裂变能的利用	
§9-3 轻核的聚变	(287)
聚变能和聚变条件 非控制热核反应 受控热核	
反应	
§9-4 探测器和加速器	(292)
探测器 加速器和对撞机	
结语: 能量关系及其计算	(300)
练习	(302)
第十章 粒子物理简介	(305)
§10-1 粒子的相互作用和粒子分类	(305)
粒子概述 相互作用 粒子分类 共振态粒子	
§10-2 对称性和守恒律	(316)
粒子物理中新的守恒量 对称性和守恒律	
§10-3 夸克(层子)模型	(327)
结语: 展望	(332)
练习	(333)
附表	(335)
I 物理常数	(335)
II 大事年表	(337)
III 元素周期表	(339)

绪 论

一、为什么要学习原子物理学

1. 原子物理学的研究对象是基本的

物理学是研究物质运动的最一般规律和物质的基本结构的科学。人们在认识各种物质时，总是首先研究日常生活中经常接触到的宏观物质，由此产生宏观的物理学，如力学、热学、电磁学、光学等。随着科学技术和生产的发展，人们的认识不断地扩大和深化，一方面向着宇宙的深处发展，去研究太阳、银河系等遥远的庞然大物，建立了天体物理学、宇宙学等宇观的物理学；另一方面则朝着微观世界发展，去研究分子和原子、原子核、粒子三个递深的物质微观结构层次，形成微观的物理学。

原子物理学主要是研究原子的结构和性质，就广义来说，是研究物质微观结构的一门科学。它具有内容的基本性。只有深入研究物质的微观结构，才能更好地揭示许多宏观、宇观的现象与规律的本质，从而使人们对物质世界有更深入的比较统一的认识。

2. 原子物理学的发展，包含了丰富的物理思想和物理方法

物质结构的思想，发端于古代原始的原子学说。“原子”一词来自希腊文，意思是“不可分割的”。公元前4世纪，古希腊物理学家德漠克利特提出这一概念，并把它当作物质的最

小单元。但古代的原子学说只是一种臆测，没有实验的依据。差不多同时代的物理学家亚里士多德等人反对这种物质的原子学说，认为物质是连续的，可以无限地分割下去，这种观点统治了整个中世纪。随着实验技术的发展，越来越多的实验事实表明物质的原子学说是正确的。

从17世纪到19世纪，由化学家和物理学家的共同努力，确立了科学的原子学说。17世纪气体分子运动论开始萌芽。19世纪初，化学家道尔顿在定比定律和倍比定律的基础上，提出了他的原子学说，化合物组成的规律得到简单而明了的理解。进一步支持道尔顿原子学说的论据，是物理学家克劳修斯、麦克斯韦和玻耳兹曼在19世纪创立的完整的气体分子运动论。布朗运动是它的重要实验证据。这个理论可以解释气体的许多性质，并可粗略地估计阿伏加德罗常数，使得原子的质量和大小得以初步确定。不过，当时人们都认为任何一种元素的原子是不可再分割的。进一步地认识原子，原子物理学的真正发展，是从19世纪末期开始的。

19世纪末，物理学已经建立了完美的经典理论体系：力学、热力学、电动力学，成功地解决了当时提出的若干重大课题，绝大多数物理学家都认为基本问题都研究清楚了。著名的英国物理学家开尔文说：“在已经基本建成的科学大厦中，后辈物理学家只要做一些零碎的修补工作就行了。”但他也意识到还存在一些困难，于是他接着说：“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。”这两朵乌云，是指当时物理学无法解释的两个实验，即迈克尔逊—莫雷实验和热辐射实验。正是这两朵小小的乌云，和经典物理在其它方面（如物质结构方面）的困难，使得物理学的基本理

论发生了变革，一系列新的物理思想出现了，与这些物理思想相适应的新方法也出现了，建立了近代物理学的两大支柱：相对论和量子理论，物理学的面貌焕然一新。

量子理论是描述微观世界物质运动规律的基本理论，一般把它分为旧量子论和现代量子理论——量子力学两个发展阶段。原子物理学在研究物质结构方面的发展，和光量子理论的发展，导致了量子理论从旧量子论到量子力学的转变。而量子力学建立以后，原子物理学才有了正确的坚实的理论基础。因此，我们可以把原子物理学的发展，相应地分为旧量子论和量子力学两个时期。

旧量子论时期的原子物理学，其主要理论是玻尔理论。这一时期的一些重要发展是：1885年巴耳末发现氢光谱的经验规律。1897年汤姆逊证明电子的存在。1901年，普朗克在热辐射研究中提出量子论。1911年，卢瑟福证实了原子的核型结构。在这些进展的基础上，1913年玻尔发表了他的原子结构理论，成功地解释了氢光谱。但玻尔理论有着严重的缺陷，以后索末菲等人按照经典理论修正和扩展玻尔理论，都不能对原子现象提供非常满意的解释，暗示经典理论必须由全新的理论来代替。1924年，德布罗意溶合了光量子理论和玻尔理论的正确方面，提出物质波假说。1926年，海森堡、薛定谔分别建立了量子力学的矩阵理论和波动理论。1927年，玻恩提出统计解释。1928年，狄拉克完成相对论性的量子力学。一个完整的量子力学体系建立起来了。以量子力学作为理论基础，原子物理学得到全面深入的发展。

3. 原子物理学影响到物理学的全部领域，影响到其它基础学科和应用学科

原子是由原子核和核外电子构成的，对它的研究，基本分为核外和核两个部分，分别称为原子物理和原子核物理。

原子物理是解决分子物理问题的基础。在实际研究中，它们总是联系在一起，统称为原子与分子物理。原子与分子物理是研究原子与分子的结构，运动规律以及相互作用的科学。主要研究内容有：(1)原子与分子的电子结构；(2)原子与分子光谱；(3)原子与分子的碰撞过程和相互作用。要揭示许多宏观现象和规律的本质，非从微观结构考虑不可。因此，原子与分子物理学是一门很重要的学科，它影响到物理学的全部领域，影响到其他基础学科和应用学科。它的发展对物理学和其他基础学科和应用学科的研究和发展，起着很大的推动作用。例如：空间物理、量子化学、分子生物学、激光技术及新材料的设计等都要用到原子与分子物理的基本理论知识和基本数据，并不断向原子与分子物理提出新的问题，要求进行新的理论探讨，建立新的理论计算方法和实验方法。

原子核物理与粒子物理的联系比较紧密。核物理从本世纪40年代起已经成为一门重要的应用科学。核物理的研究，基本上是在理论和应用两个方面。一方面是研究核的结构、核力的性质，以及核反应等基本问题，为进一步利用自然规律开辟道路；另一方面是研究有关核能产生与应用的理论和技术问题，为解决能源问题开辟广泛的途径。核物理是当前物理学发展的主流之一，而核物理的基本问题又是和粒子物理交织在一起的。对粒子的研究，是物质结构与运动的最基本问题。

二、怎样学习原子物理学

1. 原子物理学是一门微观科学

原子物理学是研究微观世界的近代科学，与我们过去所学的经典物理有着一些较大的差异。经典物理学中的规律是从宏观现象中总结出来的，经典规律不一定都适用于微观体系。微观体系有它自己的规律，不能要求都按宏观规律来描述。我们的日常经验和过去所学的经典物理所形成的一些概念和方法，在我们初次接触微观物理时，可能会束缚我们的思想。例如，经典物理中所有的物理现象都有一个满意的直观的图象，而原子现象是不能期待有这样的图象的，不能要求对它的描述都很直观。物理科学的主要目的并不是提供图象，而是用公式去表述那些支配现象的规律，并利用这些规律去发现新的现象。这就要求我们在思想上尽量地摆脱经典观念的束缚，学会通过微观规律所显示的宏观现象而逐步地了解它们。

2. 原子物理学是一门发展中的科学

原子物理学研究的是微观物体，不能直接观察，只能由它在实验中的宏观表现，推知它的结构和运动情况。因此由实验到理论之间常需要推理和抽象，又回到实验中加以检验，在这种多次反复、逐步发展的过程中，认识往往是不完备的，不能期望原子物理学在发展过程中提出的理论一定十分完整周密。例如，原子物理的初期理论，既包含着经典物理的思想和方法，同时又包含着量子论的思想和方法，形成一种特殊的称为半经典半量子的旧量子理论。这种理论能够在简单的和初级的情况下描述原子的一些现象，但对于稍为复杂的原子系统则受到限制。这就要求我们注意正确看待经典理论和半经典理论，对原子物理的研究，特别是在方法上，不可能完全摆脱经典的框架。实验证明，经典规律在原子物理学

中并非完全否定。

3. 原子物理学是一门实验科学

原子物理学的上述特点，表明实验在原子物理学中占有特别重要的地位。对于原子的描述，我们要利用一些经典的简化模型对某些量子现象作一些类比，以帮助理解。但最终我们要从实践的观点出发，准确地领会实验现象，明白实验如何必然地导致一些不能为经典物理学所容纳的结论。实验中根本没有似是而非的或任何神秘的东西，实验反映的是事物本来的面目，我们要按照事物的本来面目来认识事物，找出对被观察现象的简单的前后一致的描述。善于从丰富的实验现象中建立新概念，放弃旧的不适用于微观客体的观念，在这一过程中，努力训练自己的抽象能力和概括能力。这样，我们就不会感到量子现象比经典物理的现象（例如万有引力）更神秘了。实际上，一切物理过程的基本道理总是朴素明白、自然而然、实实在在的。经典物理如此，量子物理也如此。以后我们还会看到，经典力学规律，实际上不过是量子力学规律在一定条件下的近似。可以说，量子理论不过是经典理论的自然的深入的发展。

第一章 氢原子的玻尔理论

氢原子的玻尔理论是关于原子结构的第一个成功的理论。我们在这一章里，首先阐述玻尔理论建立的基础；然后着重讨论玻尔关于原子结构的定态、定态的跃迁和由对应原理导出的角动量量子化三个著名假设，建立玻尔模型，并讨论玻尔理论的两个实验验证；最后简单介绍索末菲对玻尔理论的推广，说明玻尔理论的地位。

§1-1 原子的核型结构

一、原子的存在和电子的发现

1. 原子的存在

十九世纪，气体分子运动论，化学中定比定律、倍比定律等，在原子假说的基础上得到了解释。说明物质的组成是不连续的，不论气态、液态和固态的物质，都是大量颗粒性的最小单位——分子或原子的集合。原子的存在，表现在它有一定的质量和一定的大小。

各种不同元素的原子的质量是不同的。用化学的方法，可以确定各种元素原子的相对原子质量——原子量 A 。但事实上，一种元素常有几种原子，它们的质量不同，而化学性质相同，即在元素周期表中的位置相同，称为同位素。同位素的原子量，可以用物理的方法即质谱仪来测定。化学方法测

定的原子量，实际是一种元素的几种不同同位素原子量加权的平均值。元素周期表中所列的元素的原子量，就是平均值。不指明是某同位素的原子量，而说某元素的原子量，一般指平均值。1961年以前国际上通用的原子量，取同位素 ^{16}O 的原子量的 $1/16$ 作为单位，称为原子量的氧单位。目前的国际标准，是原子量的碳单位，它是同位素 ^{12}C 的原子量的 $1/12$ 。某元素的原子量，是该原子的质量与同位素 ^{12}C 原子质量的 $1/12$ 的比。可见原子量是相对质量，是没有量纲的。例如氢的原子量是1.00797，碳12.01115，氧15.9994，铜63.546。通常把原子量最接近的整数称为质量数，仍用 A 表示，例如氢原子的质量数 $A=1$ ，氧原子的质量数 $A=16$ ，铜的质量数 $A=63$ 等。

由于一摩尔原子的质量(摩尔质量) $\mu = A \times 10^{-3}$ 千克/摩尔，而一摩尔原子含有的原子数目是阿伏伽德罗常数(见书末附表I物理常数)

$$N_A = 6.022045 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$$

因此，知道了原子量 A ，可以求出一个原子质量的绝对值

$$M_A = \frac{\mu}{N_A} = \frac{A \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{mol}^{-1}}{6.022 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}} = A \cdot 1.661 \times 10^{-27} \text{ kg} \quad (1-1-1)$$

由此式算得氢原子的质量

$$M_H = 1.67367 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

其他原子质量可同样算出，最大的原子质量是这个数值的200多倍。而

原子的大小可以用不同的方法估计。一种简单的方法是：假设晶体中的原子是互相接触的并整齐排列的球体，晶体的

密度为 ρ ，则一摩尔质量 μ 的原子的总体积为 μ/ρ ，而一摩尔原子具有 N_A 个原子，一个原子占有体积 $\frac{4}{3}\pi r^3$ ，则有

$$\frac{4}{3}\pi r^3 \cdot N_A = \frac{\mu}{\rho} = \frac{A \times 10^{-3}(\text{kg} \cdot \text{mol}^{-1})}{\rho(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})}$$

由此得到原子的半径

$$r = \sqrt[3]{\frac{3 A \times 10^{-3}}{4 \pi \rho N_A}} (\text{m}) \quad (1-1-2)$$

由于是估算，式中的原子量 A 可取质量数。依此可算得不同原子的半径如表1-1-1

表1-1-1

元 素	质量数	$\rho(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	$r(\text{\AA})$
锂	7	0.7×10^3	1.6
铝	27	2.7×10^3	1.6
铜	63	8.9×10^3	1.4
硫	32	2.07×10^3	1.8
铅	207	11.34×10^3	1.9

表中原子半径的单位 $1 \text{\AA} (\text{埃}) = 10^{-10} \text{m}$ ，是原子领域中常用的长度单位。

从上表中可以看出，不同原子的半径几乎都差不多。利用现代的场离子显微镜，我们能够直接观察到原子。由各种方法的估算，或者直接观察，都可以判断原子的线度为1埃的数量级。

2. 电子的发现

人们对原子结构的最初认识，是从了解它具有电的结构