

高等学校试用教材

原子物理学

褚圣麟 编

高等教育出版社

本书内容以说明原子结构为中心，从光谱学、电磁学、X射线等方面的实验事实和总结出的规律，汇总到原子结构的全貌。书中有“量子力学初步”一章，介绍阐述有关问题所需要的量子力学基本概念。全书在环绕中心目标述及有关实验事实和规律时，也就便提到目前有些重要应用方面，如激光原理、顺磁共振、X射线的衍射等。本书最后两章分别对原子核和基本粒子作了简要的介绍。各章均附有习题，全书采用国际单位制。

本书可作为高等学校物理专业的试用教材，也可供其他专业的有关教师、学生参考。

本书责任编辑：李松岩。

本书原由人民教育出版社出版。1983年3月9日，上级同意恢复“高等教育出版社”；本书今后改用高等教育出版社名义继续印行。

高等学校试用教材

原子物理学

褚圣麟 编

*

高等教育出版社出版
新华书店北京发行所发行
北京第二新华印刷厂印装

*

开本 787×1092 1/32 印张 13.375 字数 320,000

1979年6月第1版 1983年8月第6次印刷

印数 165,551—210,650册

书号 13010·0294 定价 0.97元

前 言

此书由编者授课的讲义整理而成。前八章以阐述原子结构为中心内容，书中以关于光谱、电磁现象、X射线等方面的实验事实和有关规律为依据，逐步揭示原子结构的情况。第九章简单论述了分子结构，通过这一章的介绍，希望能扩大读者对原子实际存在状况的了解。

第三章“量子力学初步”介绍这方面的基本概念，并以简例说明量子力学处理问题的方法。这样，在以后各章的论述中，可以引用这个理论的概念及其对一些具体问题的结论，使讨论更切合微观体系的规律。进一步学习量子力学需要有足够的有关原子和分子的知识。

最后两章扼要地介绍了原子核和基本粒子的知识。第十章内容大体是编者以前所编《原子核物理学导论》(高等教育出版社，1965年出版)一书内容的节要。第十一章搜集新近资料对基本粒子作了简略的介绍。为了不使这部分的篇幅过大，这两章没有包括实验方法的说明和数学推导，只用文字图表作介绍。增加这两章的用意是，此书如果用作教材，而“原子物理”课之后不拟另设“原子核物理”(包括一些基本粒子的知识)课程，这两章可以用作简略介绍这方面知识的参考资料，可供学生补充阅读之用。

此书用作教材时，可按照课程的要求，对内容加以选择。如果只要求一般理解的“原子物理”内容，而且学时较紧，可以用前九章或前八章的材料；或再斟酌精减去一些，例如第六和第八两章的内容可以选取一部分；第九章也可以不用。

承北京大学物理系曹昌祺教授阅读了本书第十一章的初稿并提出了宝贵意见。编者把此章初稿作了修改。特此对曹教授表示衷心的感谢。

北京大学物理系曾谨言同志提供了根据原子核中电荷分布半径的研究结论，他所建议对外斯塞格公式中库仑能一项进行修改的资料。编者已把这项修改写入书中。特此对曾同志表示谢忱。

许祖华等同志曾多次同编者一同担任原子物理学的教学工作，经常一同探讨有关教学上的问题。早年讲义的编写和修改，最后书稿的完成，都吸收了集体积累的教学经验。本书一至九章的习题是许祖华同志编写的，他还绘制了书中一些插图，对编写工作多方协助，特此致谢。

书稿曾经有关高等学校教师参加的审稿会议审查。在四川大学周仲璧同志主持下，承四川大学、复旦大学、中国科技大学、南京大学、南开大学、兰州大学、安徽大学、北京师范大学、北京师范学院、江苏师范学院、青海师范学院的各位教师审阅了书稿，进行了讨论，提出了宝贵的意见。编者参照这些意见，把书稿作了修改和补充，得以有所改进。特此对参加审稿会议的诸同志敬表谢意。

书中一定还有缺点和不妥之处，恳请读者提出宝贵意见和批评。

诸 圣 麟

1979年1月于北京大学

目 录

前言	1
绪论	1
第一章 原子的基本状况	6
1.1 原子的质量和大小	6
1.2 原子的核式结构	8
1.3 同位素	19
习题	20
第二章 原子的能级和辐射	22
2.1 光谱——研究原子结构的重要途径之一	22
2.2 氢原子的光谱和原子光谱的一般情况	24
2.3 玻尔的氢原子理论和关于原子的普遍规律	26
2.4 类氢离子的光谱	36
2.5 夫兰克-赫兹实验与原子能级	42
2.6 量子化通则	48
2.7 电子的椭圆轨道和氢原子能量的相对论效应	50
2.8 史特恩-盖拉赫实验与原子空间取向的量子化	55
2.9 原子的激发和辐射 激光原理	62
2.10 对应原理和玻尔理论的地位	71
习题	76
第三章 量子力学初步	78
3.1 物质的二象性	78
3.2 测不准原理	82
3.3 波函数及其物理意义	86
3.4 薛定谔波动方程	89
3.5 量子力学问题的几个简例	93
3.6 量子力学对氢原子的描述	103
习题	113

第四章 碱金属原子和电子自旋	115
4.1 碱金属原子的光谱	115
4.2 原子实的极化和轨道的贯穿	120
4.3 碱金属原子光谱的精细结构	124
4.4 电子自旋同轨道运动的相互作用	126
4.5 单电子辐射跃迁的选择定则	134
4.6 氢原子光谱的精细结构与*蓝姆移动	135
习题	143
第五章 多电子原子	145
5.1 氦及周期系第二族元素的光谱和能级	145
5.2 具有两个价电子的原子态	149
5.3 泡利原理与*同科电子	159
5.4 复杂原子光谱的一般规律	161
5.5 辐射跃迁的通用选择定则	164
5.6 原子的激发和辐射跃迁的一个实例——氦氖激光器	165
习题	168
第六章 在磁场中的原子	170
6.1 原子的磁矩	170
6.2 外磁场对原子的作用	174
6.3 史特恩-盖拉赫实验的结果	178
6.4 顺磁共振	180
6.5 塞曼效应	184
6.6 抗磁性、顺磁性和铁磁性	191
习题	197
第七章 原子的壳层结构	199
7.1 元素性质的周期性变化	199
7.2 原子的电子壳层结构	202
7.3 原子基态的电子组态	205
习题	218
第八章 X射线	219
8.1 X射线的产生及其波长和强度的测量	219

8.2	X射线的发射谱	224
8.3	同X射线有关的原子能级	229
8.4	X射线的吸收	233
8.5	康普顿效应	238
8.6	X射线在晶体中的衍射	242
	习题	248
第九章	分子结构和分子光谱	250
9.1	分子的键联	250
9.2	分子光谱和分子能级	256
9.3	双原子分子的电子态	260
9.4	双原子分子的振动光谱	263
9.5	双原子分子光谱的转动结构和分子常数的测定	267
9.6	组合散射(拉曼效应)	275
9.7	多原子分子简述	279
	习题	284
第十章	原子核	285
10.1	原子核的基本性质	285
10.2	原子核的放射衰变	295
10.3	射线同实物的相互作用和放射性的应用	312
10.4	核力	323
10.5	原子核结构模型	326
10.6	原子核反应	341
10.7	原子核裂变和原子能	352
10.8	原子核的聚变和原子能利用的展望	359
	习题	369
第十一章	基本粒子	370
11.1	基本粒子和粒子的相互作用	370
11.2	粒子的观测	373
11.3	守恒定律和对称原理	383
11.4	共振态	389
11.5	强子分类和层子模型	394

11.6 关于电磁相互作用·····	400
11.7 弱相互作用·····	404
习题·····	409
常用物理常数 ·····	411
参考书籍 ·····	411
外国人名表 ·····	413
索引 ·····	415

绪 论

原子是物质结构的微小单元。原子物理学，按现在一般的了解，主要研究原子的结构与性质及有关问题。就广义说，这是关于物质微观结构的一门科学。

1. 原子物理学的发展

古代哲学家对物质的结构就有许多设想。有人认为物质是由简单的、不可分割的基本单元所谓“原子”构成的。这是原始的原子学说。但建立在科学基础上的原子学说是到了近二百年内才发展的。十七世纪气体分子运动论的萌芽可以说是现代原子学说的发轫。牛顿在 1666 年发现光谱，后来这方面大量资料的积累成为探索原子结构的重要依据。但原子物理学的重要的发展是在十九世纪。1808 年道耳顿阐明化学上的定比定律与倍比定律，开辟了原子学说的门径。分子运动论在十九世纪有很多发展。1827 年布朗运动的发现是分子运动的有力证据。1833 年法拉第电解律的提出显示了电的基本单元的存在。光谱的观察在十九世纪也有很多进展。但原子物理学的阔步前进还在十九世纪的末期。

物理学发展到十九世纪八十年代，积累了大量事实，归纳出好多原理和定律，建立了完整的三大理论体系，那就是力学、热力学和电动力学。当时的物理学家以为物理学的重要定律全发现了，理论完备了，此后的进展只能是关于次要问题的补充罢了。可是事实不是这样，当时社会生产的发展促使科学迅速的发展，物理学又展开了新的一页。

在十九世纪最后三十年，技术有很大的进展，工业发达起来，电力的应用逐渐推广，冶金工业有了发展，内燃机和蒸汽轮机被采

用，交通运输也方便了。生产的发展一方面提出了新的科学问题，同时也为科学工作提供了更好的条件。这样，在这时期和以后，物理学得到了迅速的发展。光谱资料在十九世纪最后二十年中有很大积累，1885年巴耳末发现氢光谱线系的规律，1887年赫兹发现光电效应，1895年伦琴发现X射线，1896年贝克勒耳发现放射性，1897年汤姆逊证明电子的存在，1900年，普朗克把多人关于黑体辐射的研究结果进一步研究以后，提出了量子论，1911年卢瑟福证实了原子的核式结构。在这基础上，1913年有玻尔理论的发表，此后几年中，原子物理学发展得很快。到了1925年，一个关于微观体系的新理论——量子力学——建立了起来。这个理论对物理学的进一步发展起了巨大作用。

2. 原子物理学的地位与作用

原子物理学研究物质的微观结构，这是更深入更基本的物理问题。要揭示好多宏观现象与规律的本质，非从微观结构考虑不可。例如物体为什么有导体、半导体和绝缘体之别；导热率高的物体导电率也高，显然二者有联系，其内在联系又是怎样的呢；物体发光又是怎么回事呢。这里所举的以及其他很多事实是早就知道的，但只是在原子物理学发展以后，才得到了更清楚的理解。原子物理学不但对许多已知的宏观现象作了解释，而且发展了新的知识，从而使人们对物质世界有了更深入的而且比较统一的认识。原子物理学的发展不只涉及物理学的某些部门，而是影响到物理学的全部领域。

原子物理学与其他学科也有关系。原子结构的知识是化学与物理学共同的贡献。上文说到原子物理学在物理学中的作用，它在化学中也有重要作用；在说明元素的性质、化学键、分子结构等问题时都要以原子结构为根据。现代天文学中的天体物理学大部分是通过天体所发光谱来进行分析研究的，而光谱的理论是原子

物理学中的重要内容。晶体的结构和性质的研究需要原子结构的知识；这样，原子物理学又与那些与结晶学有密切关系的矿物学、冶金学等也有关系。生物科学中引用原子物理学中的原理与技术的地方日益增加。其他科学部门，不论是基础科学或应用科学，与原子物理学也有多方面的联系。至于数学与物理学相互协作的关系更不用说了。

原子物理学在生产上所起的作用是具有基本性的，影响面也是广的；这不只是局部技术问题。原子物理学研究的是物质微观结构，这是基本知识，把它用在生产上，影响必然是深而广的。现在举一些具体例子。各种电子器件都要用电子源，而电子的发射与发射物质的微观结构有关，所以研究发射电子的材料需要原子物理学的知识。广大范围的建设材料的性质的研究，如各种金属、磁性材料、半导体等也需要原子物理学的知识。还有发光材料的研究，光谱分析方法在冶金技术上的应用，X射线在材料检验上的应用，光电管在自动控制上的应用等等，都与原子物理学有关。至于原子能和放射性的应用，即使其所依据的原子核物理学不作为原子物理学的一部分，但关于这方面所用的测量方法以及设备的材料等问题上也要用到原子物理的知识。总之，原子物理学与现代生产有广泛而密切的联系。

3. 学习上应注意的几点

原子物理学是研究微观体系的物理过程的，这里有一些概念与原理是以前的学习中没有的。为了能很好地接受初次遇到的概念，正确地理解这门学科中的一些原理，减少不必要的困难，我们特别提出下列应注意的几点：

(1) 实践是检验真理的标准。物理学各部门的发展往往经过这样的步骤：先在自然界中、生产过程中或科学实验中观察到一些事实。为了要了解这些事实，就把观察到的现象进行分析，参考已

有的科学知识，提出一个粗糙的假定。如果这个假定能够简单地说明观察到的事实，或甚至与进一步的实验符合，就可以从这个假定出发推究比较深入的理论。从这样发展的理论又可以推测其他情况下的实验结果，于是再进行实验。实验的结果可能证实理论的正确性，理论就可以被肯定。如果实验的结果与理论不符，就要考虑放弃或修改理论或重做实验。物理学就是这样在实践与理论相互推动下向前发展的。科学的发展总是从生产实践或科学实验到理论，再把理论用于生产或实验的反复过程。实践是检验真理的标准。实验是科学的实践。物理学中的理论是否正确，决定于实践——生产实践或科学实验——的考验。理论必须合乎逻辑，但理论的建立不单靠严密的形式逻辑。

(2) 科学是逐步地不断地发展的 原子物理学研究的对象是原子、分子等微观物体，不能直接观察。微观物体的结构和运动情况要从反映这些情况的宏观现象中去推究。所以更需要实验和理论多次反复的过程。在逐步发展的过程中，认识往往是不完备的，只是近似的，但是逐步深化的，逐步走向完善的。因此就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。科学是逐步发展的，而且是不断发展的。

(3) 对微观体系不能要求都按宏观规律来描述 经典物理学中的规律是从宏观现象中总结出来的，前面已提到经典规律不一定都能适用于微观体系；微观体系自有一套规律。在日常生活中我们认识到的是宏观现象，以前所学的也主要是宏观物理学，因此经典物理学的概念和方法在我们脑中坚信不疑。现在一旦接触微观物理，我们的思想方法有时还受经典物理学的束缚。我们应当突破这个束缚。例如，微观体系不能直接观察，在我们生活中从无直接经验，因此对每一微观体系的描述，不可能都象对宏观物体一样，也具有直观性；对好些微观体系的情况，不能要求想象出一

幅清楚的图象。直观性是建立在生活经验上的，而这种经验局限于宏观现象，因此就不能要求对每一微观体系的描述都很直观。但这不是说微观体系就不可以了解了，我们通过它们所显示的宏观现象而逐步了解它们。

必须说明，原子物理学中并未完全否定经典规律，不少经典规律仍在微观物理中 useful。至于何者可用，何处可用，或不可用，还是决定于实践的检验。

第一章 原子的基本状况

科学的发展证实了原子的存在，人们已获得很多关于原子的知识。现在已经证明原子不是如同古代人所想象那样简单而不可分割的，它有复杂的内部结构和运动，而且是可以击破的。化学已经阐明各种物体是由元素构成的，原子是元素的最小单元。各种元素的原子的结构与性质是有差异的，这就是说，有不同类型的原子，例如碳和铁都是元素，它们的最小单元就是碳原子和铁原子，这两种原子有各自的结构和特性，它们都可以被击破，但击破后分出来的粒子不再具有碳或铁的特性，已经不是碳或铁了。各种原子的成分是相同的，只是几种基本粒子。这几种基本粒子怎样构成多种多样的、具有各种元素特性的原子，这是将要逐步说明的。本章先介绍原子的一般情况。

1.1 原子的质量和大小

各种原子的质量不同。在化学和物理学中常用它们质量的相对值。现在把碳在自然界中最丰富的一种同位素(见 1.3 节)的质量定为 12.000 个单位作为原子量的标准，其他原子的质量同碳 12 比较，定出质量值，称为原子量。于是氢的原子量是 1.0079，碳 12.011，氧 15.999，铜 63.54。原子量可用化学方法测定。

知道了原子量，可以求出原子质量的绝对值。按阿伏伽德罗定律，一摩尔原子的物质中，不论哪种元素，含有同一数量的原子。这个数称为阿伏伽德罗常数。如果以 A 代表原子量， N_0 代表阿伏伽德罗常数， M_A 代表一个原子的质量绝对值，那么

$$M_A = \frac{A}{N_0}. \quad (1)$$

式中原子量 A 代表一摩尔原子的以克为单位的质量数。只要 N_0 知道, M_A 就可以算出。测定 N_0 的方法有好几种, 现在只举一种。

从电解可以测得法拉第常数

$$F = 96486.70 \text{ 库仑/摩尔.}$$

F 表示一摩尔带单个电量的离子所带的总电量。如果原子的原子价为 n , 则显然

$$\begin{aligned} N_0 &= \text{一摩尔的原子数} \\ &= \frac{\text{分解一摩尔原子的物质所需的电量}}{\text{一个离子所带的电量}} \\ &= \frac{nF}{ne} = \frac{F}{e}, \end{aligned} \quad (2)$$

如果电子电量 e 精密测得, N_0 可求出。目前认为最精密的 N_0 值是

$$N_0 = 6.022169 \times 10^{23} \text{ (摩尔)}^{-1}. \quad (3)$$

由(1)式可算得氢原子的质量

$$M_H = 1.67367 \times 10^{-24} \text{ 克.} \quad (4)$$

其他原子质量的绝对值同样可算出, 最大的原子质量是这个数值的二百几十倍。

原子的大小可以从下述几个方法加以估计:

(1) 在晶体中原子是按一定的规律排列的。从晶体的密度和一个原子的质量, 可以求出单位体积中的原子数。假设晶体中的原子是互相接触的球体, 并已知其排列情况, 就可以算出每个原子的大小。即使不知排列情况, 也可以求得原子大小的数量级。上述单位体积中的原子数的倒数就差不多是每个原子的体积, 其立方根的数值表示原子线性大小的数量级。

(2) 从气体分子运动论也可以估计原子的大小。关于气体分子的平均自由路程, 有下列一个理论公式:

$$\lambda = \frac{1}{4\sqrt{2} N \pi r^2}, \quad (5)$$

式中 λ 是分子平均自由路程, N 是单位体积中分子数, r 是分子的半径(假定为球形)。如果 λ 和 N 由实验求得, r 可以由上式算出。简单分子的半径的数量级与组成这分子的原子的半径数量级相同。对单原子的分子, r 亦就是原子的半径。

(3) 从范德瓦尔斯方程也可以测定原子的大小。在方程

$$\left(P + \frac{a}{V^2}\right)(V - b) = RT$$

中, b 值按理论应等于分子所占体积的四倍。由实验定出 b , 就可以算出分子的半径, 其数量级和原子半径相同。

从不同方法求一种原子的半径, 所得数值是有些出入的, 但数量级是相同的, 都是 10^{-10} 米。各种原子的半径是不同的, 但都具有刚才所说的数量级。

1.2 原子的核式结构

在二十世纪初, 从实验事实已经知道电子是一切原子的组成部分。但物质通常是中性的, 足见原子中还有带正电的部分。又从电子的荷质比(e/m)的测量, 知道电子的质量比整个原子的质量要小得多, 当时已经知道一个电子的质量差不多是氢原子质量的二千分之一。这些实验结果和当时的经典理论是考虑原子结构模型的基础。

J. J. 汤姆逊(J. J. Thomson)最早提出了一个原子结构模型。他根据上述资料, 设想原子的带正电部分是一个原子那么大的、具有弹性的、冻胶状的球, 正电荷均匀分布着, 在这球内或球上, 有负电子嵌着。这些电子能在它们的平衡位置上作简谐振动。观察到的原子所发光谱的各种频率认为就相当于这些振动的频率。汤姆逊的原子模型好象能够把当时知道的实验结果和理论考虑都归纳进去。

但勒纳特(Lenard)从1903年起直到多年后所做电子在金属膜上的散射实验显示了汤姆逊模型的困难。他发现较高速度的电子很容易穿透原子，后者不象是具有 10^{-10} 米那样半径的实体球。 α 粒子散射的实验则否定了汤姆逊模型，建立了核式模型。

1. α 粒子的散射实验

α 粒子是放射性物体中发射出来的快速粒子，它具有氢原子那样的质量，是电子质量的7300倍，它带两个单位的正电荷。后来证明它就是氢原子核。卢瑟福(E. Rutherford)的一同工作者盖革(H. Geiger)和马斯顿(E. Marsden)继续卢瑟福开始进行的 α 粒子散射实验，在1909年观察到一个重要现象，就是 α 粒子受铂的薄膜散射时，绝大多数如以前所观察到的，平均只有2—3度的偏转，但有1/8000的 α 粒子偏转大于 90° ，其中有接近 180° 的。

他们所用仪器的布置大致如图1.1所示。 R 为被一铅块包围的 α 粒子源，发射的 α 粒子经一细的通道后，形成一束射线，打在

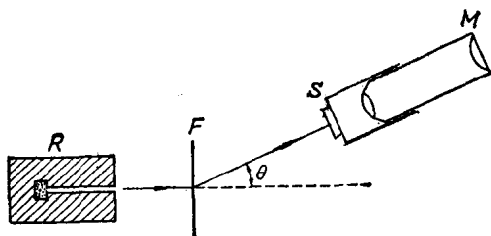


图 1.1 观测 α 粒子散射的仪器装置示意图

铂的薄膜 F 上。有一放大镜 M ，带着一片荧光屏 S ，可以转到不同的方向对散射的 α 粒子进行观察。荧光屏是玻璃片上涂荧光物硫化锌制成的，用时，把有硫化锌一面向着散射物 F 。当被散射的 α 粒子打在荧光屏上，就会发生微弱的闪光。通过放大镜观察闪光就可记下某一时间内在某一方向散射的 α 粒子数。从 α 粒子源到荧光屏这段路程是在真空中的。