

高等学校试用教材

原子核物理

卢希庭 主编
胡济民 审校

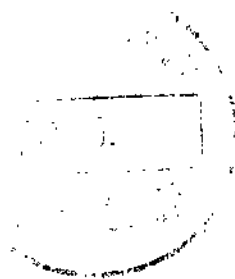
原子能出版社

51.02
211

原子核物理

卢希庭 主编

胡济民 审校



原子能出版社

1 9 8 1

1109292

内 容 简 介

本书全面、系统地阐述了原子核物理学这门学科的基本内容，并对粒子物理以及与核技术有关的一些内容作了简要的介绍。全书共分十三章，内容包括核的基本性质、放射性、核力、核衰变、核结构、核反应、中子物理、核裂变、核聚变和基本粒子等。书中着重叙述这些方面的基础知识和物理规律，同时适当介绍当前的一些进展情况。

为了便于读者自学，本书语言力求简明易懂，内容注意由浅入深，各章均有习题和答案。书中还附有较新、较详细的核素表。

本书可作为大学核物理专业原子核物理课程的教材，并可供其它有关专业的师生和从事原子能研究和应用的人员参考。

原 子 核 物 理

卢希庭 主编

胡济民 审校

原子能出版社出版

(北京 2108 信箱)

北京印刷厂印刷

(北京市西便门)

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

☆

开本 787×1092^{1/32}·印张 26·字数 625 千字

1981 年 1 月第一版·1981 年 1 月第一次印刷

印数 001—4700·统一书号: 15175·299

定价: 3.70 元

前 言

本书是在北京大学技术物理系原子核物理课程讲义的基础上修改、补充而成。全书共分十三章，计划课内学时数约 120。书中着重阐述原子核物理的基本知识和物理规律，并结合核物理的基本规律对若干较典型的核物理实验作了扼要的介绍。除核物理本身的内容外，还对粒子物理以及与核技术有关的内容，如宏观中子物理、核聚变、裂变链式反应等作了简要的介绍。本书内容的选择，重点放在基础知识上，同时适当反映当前的一些进展情况。

阅读本书需要具备普通物理、原子物理和量子力学等基础知识。使用本书作为原子核物理课程的教材时，最好安排在量子力学课程后面进行教学。如果这两门课程同时并进，为了便于教学，本书第四章的内容（除 § 4.3 节外）可以放到第七章或第九章以后学习。

本书可作为大学核物理专业原子核物理课程的教材，并可供其它有关专业的教师和学生以及从事原子能研究和应用的工作人员参考。

本书的第一、二、五、六、七、八、九章由卢希庭编写，第三、四、十一章由汪厚基编写，第十、十二、十三章由杨伯君编写。胡济民教授给本书写了绪论。

本书曾经审稿会审阅。参加审稿会的有北京原子能研究所苏宗涤、兰州近代物理研究所顾金南、兰州大学的朱钢和裘元勋、中国科技大学许咨宗、清华大学张玫、四川大学廖继志、北京师范大学李李桥、南京大学于祖荣和吉林大学胡佩瑶等同志，他们对本书提出了许多宝贵的意见。另外，宋行长和张启仁同志审阅了本书的第十三章，原子能研究所和高能物理所的一些同志审阅了本书的有关部分，他们都提出了宝贵的意见。编者谨向他们一并致谢。

由于编者学识所限，书中缺点和错误在所难免，敬请读者指正。

编 者
1980年3月于北京大学

目 录

前言	
绪论	1
第一章 原子核的基本性质	5
§ 1.1 原子核的电荷	5
§ 1.2 原子核的质量	5
§ 1.3 原子核的半径	8
§ 1.4 原子核的自旋	10
§ 1.5 原子核的磁矩	14
§ 1.6 原子核的电四极矩	16
§ 1.7 原子核的宇称	18
§ 1.8 原子核的统计性质	20
习题	21
第二章 放射性	22
§ 2.1 放射性的一般现象	22
§ 2.2 放射性衰变的基本规律	23
§ 2.3 递次衰变规律	26
§ 2.4 放射性平衡	28
§ 2.5 放射系	31
§ 2.6 人工放射性的生长	34
§ 2.7 放射性活度单位	37
习题	39
第三章 原子核的结合能和液滴模型	40
§ 3.1 原子核的结合能	40
§ 3.2 原子核稳定性的经验规律	46
§ 3.3 原子核的液滴模型	48
§ 3.4 原子核结合能的半经验公式	50
习题	55
第四章 核力	57
§ 4.1 氘核基态	57
§ 4.2 核子-核子散射	63
§ 4.3 核力的主要性质	70
§ 4.4 同位旋和核力的电荷无关性	70
§ 4.5 核力介子场理论简介	75
习题	77
第五章 α 衰变	78
§ 5.1 α 衰变的能量	78
§ 5.2 α 衰变的实验规律	83
§ 5.3 α 衰变的基本理论	86

§ 5.4 质子衰变及有关问题	91
习题	92
第六章 β 衰变	94
§ 6.1 β 能谱的特点	94
§ 6.2 中微子	96
§ 6.3 β 衰变的三种类型及其衰变能	101
§ 6.4 衰变纲图	103
§ 6.5 β 衰变的基本理论	104
§ 6.6 跃迁分类和选择定则	107
§ 6.7 居里描绘	110
§ 6.8 衰变常数和比较半衰期	113
§ 6.9 轨道电子俘获	117
§ 6.10 宇称不守恒问题	119
§ 6.11 β 衰变中粒子的螺旋性	123
习题	127
第七章 γ 跃迁	129
§ 7.1 γ 辐射的多极性	129
§ 7.2 γ 跃迁几率	132
§ 7.3 选择定则	134
§ 7.4 内转换	136
§ 7.5 同质异能态	139
§ 7.6 级联 γ 辐射的角关联	141
§ 7.7 穆斯鲍尔效应	145
§ 7.8 实验研究核衰变能级图	148
习题	152
第八章 核结构模型	154
§ 8.1 幻数存在的实验根据	154
§ 8.2 原子核的壳模型	156
§ 8.3 壳模型的应用	165
§ 8.4 集体模型的概念	172
§ 8.5 转动能级和振动能级	175
§ 8.6 形变核的基态性质	181
§ 8.7 集体运动与跃迁几率	186
§ 8.8 高自旋态中的回弯现象	189
习题	191
第九章 原子核反应	192
§ 9.1 核反应的概况	192
§ 9.2 反应能	195
§ 9.3 实验室坐标系和质心坐标系	199
§ 9.4 核反应截面	203
§ 9.5 核反应产额	207
§ 9.6 核反应截面的一般特征和细致平衡原理	211

§ 9.7	反应截面的分波分析	215
§ 9.8	核反应的三阶段描述和核反应机制	219
§ 9.9	光学模型	200
§ 9.10	复合核理论	225
§ 9.11	核反应的共振	227
§ 9.12	连续区理论	233
§ 9.13	复合核的衰变——蒸发模型	237
§ 9.14	直接反应	240
§ 9.15	光核反应	244
§ 9.16	中子核反应	247
§ 9.17	p 和 α 引起的核反应	253
§ 9.18	重离子核反应	259
	习题	270
第十章 中子物理		272
§ 10.1	中子的基本性质	272
§ 10.2	中子源	276
§ 10.3	中子和物质的相互作用	280
§ 10.4	中子的慢化	282
§ 10.5	中子的扩散	287
§ 10.6	中子的衍射	291
	习题	295
第十一章 原子核的裂变		296
§ 11.1	原子核裂变的发现	296
§ 11.2	自发裂变与诱发裂变	297
§ 11.3	裂变后现象	301
§ 11.4	裂变的液滴模型理论	312
§ 11.5	壳校正	317
§ 11.6	链式反应与裂变反应堆	323
	习题	328
第十二章 原子核的聚变		329
§ 12.1	轻原子核的聚变反应	329
§ 12.2	实现受控热核反应的基本条件	334
§ 12.3	受控热核聚变的磁约束装置	338
§ 12.4	惯性约束	346
	习题	349
第十三章 基本粒子和高能核物理		351
§ 13.1	宇宙射线	351
§ 13.2	基本粒子的性质	355
§ 13.3	奇异粒子和奇异数	362
§ 13.4	共振态	367
§ 13.5	强子的结构模型	372
§ 13.6	基本粒子的相互作用	380

§ 13.7 奇异原子和奇特核.....	385
§ 13.8 中高能粒子和核的相互作用.....	390
习题.....	392
参考书籍.....	399
习题答案.....	400
附录一 电子结合能.....	404
附录二 常用物理常数.....	407

绪 论

十九世纪末，物质结构的研究开始进入微观领域，在几十年内，人们在这方面取得了重大的进展：物理学中建立了研究物质微观结构的三个分支学科，即原子物理、原子核物理和粒子物理；发现了微观世界的运动规律，创造了量子力学和量子场论；原子能的释放，为人类社会提供了一种新能源，推动社会进入原子能时代。在所有这些发展中，原子核物理的研究起了关键作用。核物理是一个国际上竞争十分剧烈的科技领域，各国都投入大量人力物力从事这方面的研究工作。核物理基础研究的重大成就，核能和核科学技术的广泛应用已成为科技现代化的主要标志之一。

1896年，贝可勒尔(Becquerel)发现天然放射性现象，这是人们第一次观察到的核变化现象。通常人们就把这一重大发现看成是核物理学的开端。此后的三、四十年可以看成是核物理发展的初期阶段，人们主要从事放射性的衰变规律、射线性质的研究，并且利用射线来研究原子核。

在这一时期，人们为了探测各种射线、鉴别其种类并测定其能量，初步建立了一系列探测方法和测量仪器。其中有些基本设备，如计数器、电离室等，至今还在沿用，大多数原理和方法，逐步得到发展，并且获得新的应用。应该指出，探测射线并测定其性质，一直是核物理研究和核技术应用的中心环节。

放射性衰变的研究，确立了衰变规律的统计性。它是微观世界物质运动的一个重要特点，它与经典力学和电磁学规律有显著的区别。此外，还发现了经过 α 和 β 射线衰变，一种元素会变成另一种元素，从而突破了那种认为元素是不可改变的观点。

放射性元素发射的高能射线，特别是 α 射线，在当时为研究和探索原子核提供了一种前所未有的武器。首先认识到并利用这种特点的是卡文迪许实验室的卢瑟福等人。他们在1919年用 α 射线轰击各种原子，观测 α 射线所发生的偏折，从而确立了原子的核结构，并提出了原子结构的行星模型。这一成就为原子结构和原子核的研究奠定了基础(在此以前，连原子核这个名词也不存在)，把原子结构的研究引上了正确的轨道。此后不久，人们便初步弄清了原子的壳结构和电子在原子中的运动规律，同时建立和发展了描述微观世界物质运动基本规律的量子力学。

1919年，在同一实验室中，人们又发现，用 α 粒子轰击氮核能放出质子(氢原子的原子核)，这是首次用人工实现的核蜕变(核反应)。这一发现很快受到许多核物理学家的重视。用射线轰击原子核来引起核反应的方法逐渐成为研究原子核的主要手段。在初期的核反应研究中，最主要的成果是1932年中子的发现和1934年人工放射性核素的合成。这揭示了原子核是中子和质子组成的。中子的发现为核结构的研究提供了最重要的前提。中子不带电荷，不受核电荷的排斥，容易进入原子核而引起核反应。因此，新发现的中子以及放射性中子源的制备为研究原子核提供了一种很有效的手段。

即使在核物理发展的最初阶段，人们就注意到这门新学科的可能应用，并且很快就发现了放射性射线对某些疾病的治疗作用。这是它当时就受到社会重视的重要原因。最早研

究放射性和核物理的专门机构，是巴黎的镭学研究所，它既从事核物理基础研究，又从事放射性医学研究。直到今天，核医学仍然是核技术应用的一个重要领域。

应该看到，核物理的发展是与整个科技发展紧密相连的。毫无疑问，核物理是在全部物理学的理论和技术基础上发展起来的，不但在当时已经比较完整的经典力学和电磁学对核物理的发展不可缺少，而且物理学的其它分支，如气体分子运动论，光学等，以及物理的各种实验技术，都是研究核物理所需要的。要着重指出的是，对原子核的研究，化学工作始终是和物理工作相互配合进行的。如果没有艰巨的化学分离分析工作，要进行放射性的研究是不可设想的。就在放射性发现后两年，居里夫妇从成吨的铀矿石中分离出几毫克的镭，在那时镭是化学性质完全未知的新元素。这种化学分离工作，即使在现代的实验室中也很繁重，何况在当时的条件下呢！因此，这项工作不能不认为是一项惊人的成就。居里夫人的工作为化学开辟了一门新的分支学科——放射化学。她所创建的方法，为后来的放射化学研究打下了很好的基础。后来，放射化学和核物理始终是研究原子核的两门姐妹学科。随着对原子核的研究工作日益发展，放射化学中又分出了核化学，它侧重于原子核的基础研究。我们今天所获得的有关放射性和原子核的性质的知识，有不少是放射化学和核化学的研究成果。

在二十世纪四十年代前后，核物理进入了一个大发展的阶段。1939年，哈恩(Hahn)和斯特拉斯曼(Strassmann)发现了核裂变现象。1942年，费米(Fermi)建立第一个链式反应堆。我们把这两项重大突破看成是核物理进入大发展阶段的主要标志，因为这是人类掌握核能源的开端。众所周知，核能是发展潜力很大的一种能源。要有效地利用核能源，需要解决一系列复杂的科学技术问题。在这种形势下，核物理研究进入了一个大发展的阶段，成为国际上竞争十分剧烈的科技领域。

在这一阶段中，粒子加速和射线探测技术得到很大的发展，为核物理的基础研究和核技术的广泛应用提供了必要的技术前提。在三十年代初，当加速器首次出现在核物理实验室时，人们仅能将质子加速到七十万电子伏^①，而到七十年代，人们就己能把质子加速到四十亿电子伏了。目前，常用的加速器业已工业生产。成千台加速器在研究所、大学、工厂和医院中运转，为核物理研究和核技术的应用提供各式各样的束流。四十年代以来，粒子探测技术也有了很大的发展。尤其是半导体探测器的引用，大大提高了测定粒子能量的分辨率。核电子学和计算技术的飞速发展，从根本上改善了实验数据获取和处理的能力。所有这一切，扩展了我们所观测的核现象的范围，提高了观测的精度，从而促进了核物理基础研究，扩大了核技术的应用范围。

通过大量的科学实验活动，人们对原子核的基本结构和变化规律有了更深入的认识。概括起来说，我们对于稳定的核素或寿命较长的放射性核素的基态和较低的激发态的性质，已经积累了较系统的实验数据，并且通过理论分析，建立了各种模型，对核子在核内的运动和核反应机制有了较系统的理解。介绍这些成果，并在理论上和实验上对它们进行初步的分析，指出今后可能的发展方向，是本书的主要内容。

迄今为止，人们通过核反应已经人工合成了15种原子序数大于92的超铀元素和上千

^① 专为核物理研究而设计的加速器，在本世纪二十年代后期就已开始原理的探讨，静电加速器(Van de Graaff)、回旋加速器(Lawrence)、直线加速器(Wideroe)的雏形在三十年初均已建立。首先用于核反应实验的是Cockcroft及Walton的高压倍加器。

种新的放射性核素。这种研究工作进一步表明了元素仅仅是在一定条件下相对稳定的物质结构单位，并不是永恒不变的。人们把核物理和天文学结合起来，确认了核过程是在天体演化中起关键作用的过程，并且初步了解了在天体演化过程中各种原子核的形成和演变的规律。这就表明，在自然界中，各种元素都有一个发展变化的过程，都处于永恒的变化和发展之中。

通过高能和超高能射线束与原子核的相互作用，人们发现了上百种短寿命的粒子，即重子、介子、轻子和各种共振态粒子。庞大的粒子家族的发现把人们对物质世界的研究推进到一个新的阶段，建立了一门新的学科——粒子物理学。在当前，这是物质结构研究的前沿。这一发展，又一次证明了物质不可穷尽性这一辩证唯物主义的光辉论断。

过去，我们只知道物质之间有电磁和引力相互作用，通过对原子核的深入研究，才发现了物质之间还有两种短程的相互作用，即强相互作用和弱相互作用。研究这四种相互作用的规律和它们之间可能的联系，探索可能存在的新的相互作用，已成为粒子物理学的一个重要课题。

核物理的发展，不断地为核能装置的设计提供日益精确的核数据，从而提高了核能利用的效率和经济指标，并为未来的更大规模的核能利用准备条件。目前，世界上已运行的发电反应堆达 221 座，总装机容量达到 120 吉瓦。核发电量约占总发电量的 8%，预计到公元 2000 年，可达 45%。人工制备的各种同位素的应用，遍及理工农医各部门。新的核技术，如核磁共振、穆斯鲍尔效应、晶体阻塞效应、扰动角关联等都迅速得到广泛应用。科学工作者在绝大多数的研究用反应堆和加速器上进行着核技术应用的研究工作。各种射线束已成为人们常用的最灵敏的探针、精密的分析手段、独特的加工工具、特效的诊断和治疗的方法。应该认为，核技术的普遍应用是科学技术现代化的重要标志之一。

在过去的一、二十年内，由于粒子物理逐渐成为一门独立的学科，核物理已不再是物质结构研究的最前沿了，它已转入向纵深发展的新阶段。在此期间，三方面的技术进展对核物理研究产生了深刻的影响。首先，七十年代电子计算机的使用，对核物理实验技术产生深刻的影响。过去，要对一个核过程同时测定几个参量已经比较困难，而现在，微处理机和在线数据获取与处理系统的应用，可以根据需要，让成百个探测设备协同动作，同时记录和成百个参量。这就大大扩展了我们的观测能力，从而可以对较复杂的核现象，如重离子核反应，进行全面的观测和研究。其次，目前重离子加速技术的发展水平，已达到能够有效地加速从氢到铀的所有元素的离子，其能量从每个核子几个兆电子伏到几千兆电子伏。这就大大扩充了人们变革原子核的手段，从而可以全面开展重离子核物理的研究。第三，随着高能物理的发展，人们已能建造强束流的中高能加速器。这类加速器不仅能提供直接加速的离子流，还可以提供如 π 介子， K 介子等次级粒子束。这些高能粒子流从另一方面扩充了我们研究原子核的手段，使高能核物理成为富有生气的研究方向。充分地利用和发展这些新技术，将为核物理开拓新的研究领域，为核技术开辟新的应用途径，也有可能发现新的核能源。人们将合成和研究许多新的核素，甚至合成理论上预言的质量数在 300 左右的超重核；可以研究处于各种异常状态的核，如高自旋态的核，大形变的核，密度异常的核以及各种奇特核。

概括说来，核物理的发展历史表明，它是一门内容异常丰富，在理论上和应用上都十分重要的学科。七十多年的研究工作，取得极为丰硕的成就。但是，没有探索过的领域更

为宽广，已经探索过的领域也还有很多方面缺乏精确的实验资料，更没有建立起一套系统的完整的理论。至于在核能利用和核技术的应用方面，则有着更大量的核物理工作要做。核物理是一门生气勃勃的、发展中的学科。

第一章 原子核的基本性质

原子核的基本性质通常是指原子核作为整体所具有的静态性质。它包括原子核的电荷、质量、半径、自旋、磁矩、电四极矩、宇称和统计性质等。这些性质和原子核结构及其变化有密切关系。本章的讨论，不仅使我们对原子核的静态性质有个概括了解，而且为讨论以后各章准备必要的知识。

§ 1.1 原子核的电荷

1911年，卢瑟福(E. Rutherford)做了如下实验：用一束 α 粒子去轰击金属薄膜，发现有大角度的 α 粒子散射。分析实验结果得出：原子中存在一个带正电的核心，叫做原子核。它的大小是 10^{-12} 厘米(cm)的数量级，只有原子大小的万分之一，但其质量却占整个原子质量的99.9%以上。从此建立了有核心的原子模型。由于原子是电中性的，因而原子核带的电量必定等于核外电子的总电量，但两者符号相反。任何原子的核外电子数就是该原子的原子序数 Z ，因此原子序数为 Z 的原子核的电量是 Ze ，此处 e 是基本电荷，即一个电子电量的绝对值。当用 e 作电荷单位时，原子核的电荷是 Z ，所以 Z 也叫做核的电荷数。

不同的原子核由不同数目的中子和质子所组成。中子和质子统称为核子，它们的质量差不多相等，但中子不带电，质子带正电，其电量为 e 。因此，电荷数为 Z 的原子核含有 Z 个质子。可见，原子序数 Z 同时表示了核外电子数、核内质子数以及核的电荷数。

测量原子核电荷的方法有多种。比较精确的方法是在1913年由莫塞莱(H. G. J. Moseley)提出的。他发现元素所放出的特征X射线的频率 ν 与原子序数 Z 之间有下列关系：

$$\sqrt{\nu} = AZ - B \quad (1.1-1)$$

式中 A 、 B 是常数，对于一定范围内的元素，它们不随 Z 改变。因此，只要测量元素的特征X射线频率 ν ，利用(1.1-1)式即可定出原子序数 Z 。例如，根据由元素钇($_{39}\text{Y}$)到银($_{47}\text{Ag}$)的 K_{α} 线的频率，可定出 $A \approx 5.2 \times 10^7 \text{秒}(\text{s})^{-1/2}$ ， $B \approx 1.5 \times 10^8 \text{s}^{-1/2}$ 。历史上，曾测量当时未知元素铽(Tc)的 K_{α} 线 $\nu_{\alpha} = 4.4 \times 10^{18} \text{s}^{-1}$ ，由(1.1-1)式求得Tc的 $Z = 43$ 。除Tc以外，元素钷($_{61}\text{Pm}$)、砷($_{85}\text{At}$)和铈($_{87}\text{Fr}$)都是利用莫塞莱方法发现的。

除 $Z = 43, 61, 93$ 的元素是人工制造的以外，从 $Z = 1$ 到94的元素，自然界中均存在。以后用人工方法还获得了从 $Z = 95$ 到107的元素。六十年代末，理论上预测有可能在 $Z = 114$ 附近存在一批超重元素，它们形成所谓“稳定岛”。最近十年来人们一直试图用人工合成法，或在自然界中发现这些元素。

§1.2 原子核的质量

原子核的质量是原子质量与核外电子质量之差(当忽略核外电子的结合能时)。由于核

的质量不便于直接测量，通常都是通过测定原子质量(确切地说是离子质量)来推知核的质量的。其实，一般不必推算核的质量，只需利用原子质量，因为对于核的变化过程，变化前后的电子数目不变，电子质量可以自动相消。

由于一个克原子的任何元素包含有 6.022045×10^{23} 个原子[此即阿伏伽德罗 (Avogadro) 常数 N_A]，因而一个原子的质量是很微小的，通常不是以克(g)或千克(kg)做单位，而是采用原子质量单位，记作 u(是 unit 的缩写)。一个原子质量单位定义如下：

$$1 \text{ u} = {}^{12}\text{C} \text{ 原子质量的 } \frac{1}{12}$$

这种原子质量单位叫做碳单位，是 1960 年物理学国际会议通过采用的。需要指出，在这以前，采用的是氧单位，记作 amu(是 atomic mass unit 的缩写)。1amu 定义为 ${}^{16}\text{O}$ 原子质量的 $\frac{1}{16}$ 。碳单位和氧单位的换算关系如下：

$$1 \text{ u} = 1.000318 \text{ amu}$$

根据定义，原子质量单位与 g 或 kg 单位间的关系有

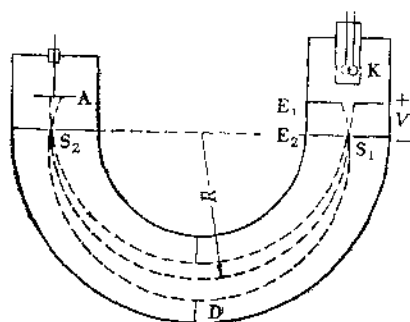
$$1 \text{ u} = \frac{12}{N_A} \cdot \frac{1}{12} = \frac{1}{6.022045 \times 10^{23}} = 1.6605655 \times 10^{-24} (\text{g}) = 1.6605655 \times 10^{-27} (\text{kg})$$

由此可见，阿伏伽德罗常数 N_A 本质上是宏观质量单位“g”与微观质量单位“u”的比值。如果采用氧单位，则 N_A 是“g”与“amu”的比值。由于“amu”与“u”略有差异，因而氧单位的 N_A 与碳单位 N_A 也稍有不同。

显然，在碳单位中，一个 ${}^{12}\text{C}$ 原子的质量为 12.000000 u；在氧单位中，一个 ${}^{16}\text{O}$ 原子的质量为 16.000000 amu。这是区分两种单位制的明显标志①。

测量原子质量常用的仪器是质谱仪。它的基本原理如下：首先让原子电离，然后在电场中加速以获得一定动能，接着在磁场中偏转，由偏转的曲率半径的大小可求得离子的质量。

图 1-1 是早期所用的一种质谱仪的原理图。D 为一扁平的真空盒，它放在一磁铁间隙内。磁铁产生的均匀磁场，其磁场强度 \mathbf{H} ②垂直于真空盒平面。真空盒内主要有离子源 K、加速电极 E_1 、 E_2 和接收电极 A。由离子源产生的被测离子，通过加速电极的狭缝 S_1 后，获得动能 qV ， q 是离子的电荷， V 是加速电极 E_1 和 E_2 之间的电势差。于是，质量为 M 的离子通过加速电极后所具有的速度 v 满足下列关系：



$$\frac{1}{2} M v^2 = qV \quad (1.2-1)$$

被加速的离子在磁场 \mathbf{H} 的作用下，将在垂直磁场的平面内以半径 R 作圆弧运动，最后通过狭缝 S_2 到达接收电极。于是有

图 1-1 质谱仪原理图

① 有些文献书籍中，碳单位的符号也用 amu，不用 u。因此，为了判别是碳单位还是氧单位必须根据 ${}^{12}\text{C}$ 或 ${}^{16}\text{O}$ 的原子质量的数值来确定。

② 用 CGSM 单位制表示时，在真空中，磁场强度 \mathbf{H} 的大小等于磁感应强度 \mathbf{B} 的大小。因此，习惯上往往称真空中的磁感应强度 \mathbf{B} 为磁场强度，并用 \mathbf{H} 来表示。本书中提到的磁场强度 \mathbf{H} 实际上是指磁感应强度 \mathbf{B} 。

$$\frac{qvH}{c} = \frac{Mv^2}{R} \quad (1.2-2)$$

式中 c 是光在真空中的速度。

由(1.2-1)和(1.2-2)两式消去 v 可得

$$\frac{q}{M} = \frac{2Vc^2}{H^2R^2} \quad (1.2-3)$$

或

$$M = \frac{qH^2R^2}{2Vc^2} \quad (1.2-4)$$

因此, 实验测得 q 、 H 、 R 和 V 的数值后, 即可由(1.2-4)式求出离子的质量 M 。实际仪器中, H 和 R 都已固定, q 也已知, 于是只要改变加速电势差 V , 就可测得不同的离子质量 M 。例如, 设离子的电量为一个电子电荷的数值, $H=3580$ 高斯(Gs), $R=5$ cm, 实验测得 $V=672$ 伏(V)时, 离子电流有一极大值, 则由(1.2-4)式可以算出所测离子质量

$$M = \frac{4.8 \times 10^{-10} \times (3.58 \times 10^3)^2 \times 5^2}{2 \times 672 \times (1/300) \times (3 \times 10^{10})^2} = 3.82 \times 10^{-23} \text{ (g)}$$

所以被测原子的质量数

$$A = \frac{M}{1.66 \times 10^{-24}} = \frac{3.82 \times 10^{-23}}{1.66 \times 10^{-24}} = 23$$

实验测得的接收电极的离子电流 I 随加速电势差 V 的变化关系的典型曲线如图 1-2 所示。由(1.2-4)式可知, 根据曲线峰值电压之比 $V_1:V_2$, 可求得质量之比 $M_2:M_1$ 。因此, 如果利用已知质量的峰值电压, 可以得出待测离子的质量。

实际测量中常利用高分辨的质谱仪对一些质量双线的测量结果作为标准质量谱。质量双线是两个荷质比 $\frac{q_1}{M_1}$ 和 $\frac{q_2}{M_2}$ 很接近的离子在质谱仪上所产生的谱线。由于它们的荷质比很接近, 在测量它们的质量差时, 系统误差可以抵消, 因而这种测量的精度比绝对测量要高得多。标准的双线有以下一些: $(^1\text{H}_2)^+ - (^2\text{D})^+$ 、 $(^2\text{D}_3)^+ - (^{12}\text{C})^{++}$ 、 $(^{12}\text{C}^1\text{H}_4)^+ - (^{16}\text{O})^+$, 设它们的质量差分别为 a, b, c , 则有

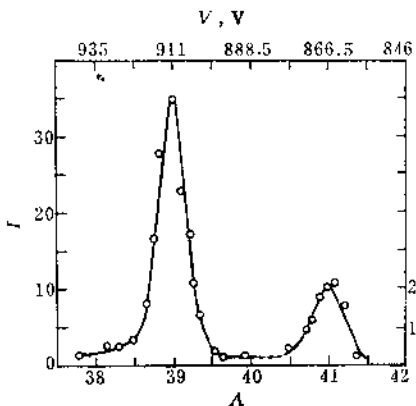


图 1-2 钾的质量谱
[引自 A.J. Dempster, *Phys. Rev.*, 20, 631 (1922).]

$$\begin{cases} 2M(^1\text{H}) - M(^2\text{D}) = a \\ 3M(^2\text{D}) - \frac{1}{2}M(^{12}\text{C}) = b \\ M(^{12}\text{C}) + 4M(^1\text{H}) - M(^{16}\text{O}) = c \end{cases} \quad (1.2-5)$$

其中 $M(X)$ 表示原子 X 的质量。当质量的单位用 u 表示时, 则从(1.2-5)式可解得如下结果:

$$\begin{cases} M(^1\text{H}) = 1 + \frac{1}{6}(3a + b) \\ M(^2\text{D}) = 2 + \frac{1}{3}b \\ M(^{16}\text{O}) = 16 + \frac{2}{3}(3a + b) - c \end{cases} \quad (1.2-6)$$

这样， ^1H 、 ^2D 和 ^{16}O 的质量就可以通过质量差 a, b, c 的测量精确地得到。

表 1-1 列出了一些原子质量的测量值。由表可见，原子质量都接近于一个整数，此整数叫做原子核的质量数 A 。例如， ^4He 、 ^{12}C 、 ^{16}O 、 ^{235}U 的质量数分别是 4、12、16、235。由于质子和中子的质量都十分接近于 1，而原子核是由质子和中子组成的，因而核的质量数 A 也就是核内质子数 Z 和中子数 N 之和，即质量数等于核子数。

表 1-1 一些原子的质量①

原子名称	原子质量 (u)	原子名称	原子质量 (u)
^1H	1.007825	^7Li	7.016005
^2H	2.014102	^{12}C	12.000000
^3H	3.016050	^{16}O	15.994915
^4He	4.002603	^{235}U	235.043924
^6Li	6.015123	^{238}U	238.050786

① 引自 A. H. Wabstra, et al., *Nuclear Data Table*, **A9**, 265 (1971)。

具有相同质子数 Z 和中子数 N 的一类原子核，称为一种核素，有时也把具有相同原子序数 Z 和质量数 A 的一类原子，称为一种核素。核素用下列符号表示： ^A_ZX 。其中 X 是元素符号， A 是质量数， Z 是质子数（或叫电荷数）， N 是中子数。例如， ^7_3Li 是元素锂的一种核素，它的质量数是 7，质子数是 3，中子数是 4。在实际工作中，往往只写出元素符号和质量数，省写了质子数和中子数。这是因为有了元素符号，也就知道了质子数；知道了质量数 A 和质子数 Z ，也就知道了中子数 $N = A - Z$ 。

质子数相同，中子数不同的核素称为同位素。例如 ^1_1H 、 ^2_1H 、 ^3_1H 是氢的三种同位素， $^{235}_{92}\text{U}$ 和 $^{238}_{92}\text{U}$ 是铀的两种同位素。以前在习惯上，往往用同位素的术语来代替核素使用。

中子数相同，质子数不同的核素称为同中子素，例如 ^3_1H 和 ^3_2He 。

质量数相同，质子数不同的核素称为同量异位素。例如 $^{40}_{18}\text{Ar}$ 、 $^{40}_{19}\text{K}$ 、 $^{40}_{20}\text{Ca}$ 。

质量数和质子数均相同（当然中子数也相等），而能量状态不同的核素称为同质异能素。表示同质异能素的方法是在质量数后面加写 m ，它表示这种核素的能量状态比较高。例如 ^{60m}Co 是 ^{60}Co 的同质异能素，前者的能量状态比后者高。

§ 1.3 原子核的半径

实验表明，原子核是接近于球形的。因此，通常用核半径来表示原子核的大小。核半径用宏观尺度来衡量是很小的量，为 $10^{-12} - 10^{-10}$ cm 数量级，无法直接测量，而是通过

原子核与其它粒子相互作用间接测得它的大小。根据这种相互作用的不同，核半径一般有两种定义。

1. 核力作用半径

由 α 粒子散射实验发现：在 α 粒子能量足够高的情况下，它与原子核的作用不仅有库仑斥力作用，当距离接近时，还有很强的吸力作用，这种作用力叫做核力。核力有一作用半径，在半径之外，核力为零。这种半径叫做核半径，这样定义的核半径是核力作用半径。

实验上，通过中子、质子或其它原子核与核的作用所测得的核半径就是核力作用半径。实验表明：核半径与质量数 A 有关。它们之间的关系可近似地表示作下面的经验公式：

$$R \approx r_0 A^{\frac{1}{3}} \quad (1.3-1)$$

式中 $r_0 = (1.4-1.5) \times 10^{-13} \text{cm} = (1.4-1.5)$ 费米(F)。F是核物理中常用的长度单位 \AA ， $1\text{F} = 10^{-13} \text{cm} = 10^{-15} \text{米(m)}$ 。

2. 电荷分布半径

核内电荷分布半径就是质子分布的半径。测量电荷分布半径比较准确的方法是利用高能电子在原子核上的散射。电子与原子核的作用实际上就是电子与质子的作用。为了准确地测量质子分布半径，电子的波长必须小于核半径，因此电子的能量必须足够高。事实上，电子的波长 λ 与电子的动能 E_k 之间有以下关系：

$$\lambda = \frac{hc}{[E_k(E_k + 2E_0)]^{1/2}} \quad (1.3-2)$$

式中 E_0 是电子的静止能量。当 $E_k \gg E_0$ 时，(1.3-2)式成为

$$\lambda = \frac{hc}{E_k} \quad (1.3-3)$$

可见电子的动能越高，波长越短。

高能电子在核上散射的角分布是核内电荷分布的函数，而且电子能量越大，角分布曲线对电荷分布越敏感。用这种方法测得的核半径是

$$R \approx 1.1 \times A^{\frac{1}{3}} \text{F} \quad (1.3-4)$$

利用高能电子在核上的散射，不仅可以测得核内电荷分布范围，而且可以获知电荷分布状况。图1-3表示核内电荷分布的大致情况。纵坐标 ρ 表示电荷密度，横坐标 r 表示离原子核中心的距离。由图可见，在原子核中央部分电荷密度是一常数，在边界附近逐渐下降。密度从90%下降到10%所对应的厚度，称为边界厚度 t 。实验表明，对各种核都具有相同的 t 值：

$$t = (2.4 \pm 0.3) \text{F}$$

图1-3中的曲线可用下式表示：

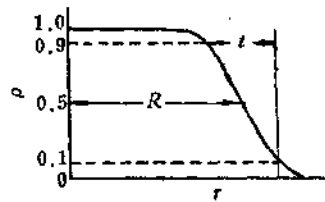


图 1-3 核内电荷分布状况

① 在有些文献和书籍中，长度单位“费米”用符号“f”或“fm”表示。