

原子物理学



周尚文 编著

ATOMIC PHYSICS

兰州大学出版社

原子物理学

周尚文 编著

兰州大学出版社

(甘) 新登字第 08 号

原子物理学

周尚文 编著

兰州大学出版社出版

（甘肃）

兰州人民印刷厂印刷 甘肃省新华书店发行

开本: 787 × 1092 毫米 1 / 16 印张: 26

1995 年 12 月第 1 版 1995 年 12 月第 1 次印刷

字数: 620 千字 印数 1—1000 册

ISBN7-311-00812-3 / O · 107 定价: 26.00 元

前 言

本书是在兰州大学物理系本科原子物理课程讲义的基础上修改、补充而成。全书共分十二章，前八章讲原子物理，第九章讲分子结构，第十、十一章讲原子核物理，第十二章介绍粒子物理基本知识。本书着重阐述原子、分子、原子核和粒子物理的基本知识和基本规律。有选择地介绍了相应学科的一些新的发展和技述应用，以便强化对主要内容的理解，扩大知识面。

按现行教学大纲，物理专业原子物理课程是基础物理教学的一个组成部分，任务是讲授近代物理学的基础知识。计划内学时约 90。作为基础物理教程的最后一部分，本书内容的组织特点是，在学生已有的经典物理知识基础上，通过对微观运动的实验和观察结果的分析，建立和阐明量子物理的基本概念和基本规律。力求物理图象清晰，易学易懂并有利于自学。

本书在具体内容取舍上，以建立量子力学的观点为主，对旧量子论的介绍也是为了有助于对前者的掌握。在基础物理教学中这样作尚带有探索性，根据我们的教学实践，效果较满意。

为了便于教学，本书在章节安排、具体问题阐述、例题与习题配备等方面，注意了对学生理论联系实际、分析和解决问题能力的培养和训练。

本书可作高等院校物理专业原子物理课程的教材，也可供其它有关专业教师和学生以及需要了解有关近代物理基本知识但未学过量子力学的科技工作者参考。

在原讲义使用过程和成书过程中，我系许多同志和同学提出了不少宝贵建议和意见。全稿经西北师范大学余庚荪先生审阅并提出了宝贵意见。编者在此谨向他们表示衷心感谢。

由于编者学识有限，书中难免有错误和缺点，敬请读者批评指正。

编 者

1993 年 3 月于兰州大学

绪 论

以牛顿运动定律和万有引力定律为基础的经典力学,以经典力学为基础的经典统计力学,以麦克斯韦方程组和洛仑兹定律为基础的经典电磁理论,以及以经典电磁理论为基础的光学,统称为经典物理学。19世纪后期经典物理学达到了成熟阶段。

19世纪末,物理学家陆续发现了许多新物理现象,例如氢原子的巴尔末谱线系,黑体辐射能谱的精确测定等。经典物理对这些现象不能做进一步的解释,这正好暴露了它的局限性。

为了解释上述现象,一些与经典物理基础存在尖锐矛盾的概念和理论陆续提出。1900年普朗克(M. Planck)提出的能量量子概念认为,电磁辐射的能量应是一份一份量子化的,而不象经典理论要求的那样是连续的。量子论解决了当时黑体辐射能的“紫外灾难”。随后不久,爱因斯坦(A. Einstein)指出,电磁辐射能量的不连续性应是电磁辐射的“粒子”结构的反映,与实物粒子质量不连续性类似。这个观点后来被光电效应等实验所证实,确认了光具有波-粒二象性。

1905年爱因斯坦提出狭义相对论,革新了物理学的时空概念,建立相对论力学,揭露了质量和能量的内在联系,为研究物体高速运动提供了正确理论。

1913年玻尔(N. Bohr)提出的原子模型解释氢原子和类氢离子光谱的成功表明,原子系统的能量也具有不连续性,是量子化的。

1924年德布罗依(de Broglie)在光的波-粒二象性启示下提出实物粒子的波-粒二象性假说,不久也得到实验证实。

1925年薛定谔(E. Schrodinger)和海森伯(W. Heisenberg)提出量子力学的基本理论。量子力学和狭义相对论是近代物理的两大理论支柱。

近代物理的研究对象之一是微观世界。包括研究分子、原子、原子核和亚核粒子(如中子、质子)等微观粒子的内部结构、相互作用及运动规律等。近代物理通常分为原子物理、核物理和(亚核)粒子物理等。

本课程作为普通物理的近代物理部分,将通过对原子、原子核和粒子性质及内部结构有关实验事实的介绍和分析,阐明相应学科的基本概念和基本规律。本书的一至九章属原子物理内容,是课程的主要内容,除了讨论原子和分子内部结构外,同时担负着阐明微观运动基本概念和基本规律的任务。第十和十一两章介绍核物理的基本知识。第十二章是粒子物理简介。

物理量的数量级 对物理现象做定性或半定量讨论时,常使用物理量值的数量级概念。当量度单位一定时,物理量值可用以10为底的指数形式表示,其指数部分就是该量值的数量级。例如,真空光速值为 $c = 299792500 \text{ ms}^{-1}$,可表示为 $c = 2.997925 \times 10^8 \text{ ms}^{-1}$,其中 10^8 ms^{-1} 就是 c 的数量级或 $c \sim 10^8 \text{ ms}^{-1}$ 。数量级是对物理量值的一种粗略表示或估计,数量级与精确值的差别可达好多倍。虽然如此,数量级在新现象的探索中仍不失为一种常用且非常有价值的概念。估计不同现象中同一物理量取值的数量级常会起到对现象的定性了解。但也应注意到数量级的粗略性。8500和1250的数量级可认为都是 10^3 ,这一点使初学者往往感到困惑。

微观世界的基本特征 原子、原子核和亚核粒子等

代表了当前人类在认识物质结构过程中已达到的依次深入的不同层次。这些层次间存在着质的差异，首先表现在各层次一些最基本特征量的数量级差异，例如它们的大小或尺度。

原子、原子核和质子大小的数量级分别为 10^{-10} 、 10^{-14} 和 10^{-16} m。图 0.1 是物理世界一些典型物体大小的数量级。物体的大小也说明了其组成成员间的距离范围。而物体成员间相互作用力的类型多少和强弱跟其间距有关。自然界物体间的相互作用力可归结为四种基本类型：万有引力，电磁力，核力(或强力)和弱力。宇宙天体间的相互作用主要是万有引力。人类日常涉及的宏观现象中的相互作用是万有引力和电磁力。微观现象中粒子间的万有引力与其它作用相比是非常小的，可忽略不计。原子或分子内的作用主要是电磁力。核内作用主要是强力，电磁力较弱，只起次要作用。当亚核粒子间距比核大小更小时，一般存在强力、电磁力和弱力。

随着粒子间主要相互作用类型的不同，粒子系统的能量也将有很大的不同。图 0.2 是各种微观物理现象涉及的粒子系统能量数量级的分布情况。在自然界和实验室中观察到的微观现象一般是错综复杂的，但根据现象涉及能量交换的数量级，就可大致辨认现象根源于原子内或原子核内，……。

作为图 0.2 所示能量级知识的应用，让我们看看物质结构的发展史。早期有关分子和原子的知识是从热学的分子运动论和化学研究中得到的，与这些现象有关的单个分子的能量很低，例如常温下分子热运动的平均能量为 $kT = 1.38 \times 10^{-23} (\text{J/K}) \times 300 (\text{K}) = 0.027 \text{ eV} \sim 10^{-2} \text{ eV}$ 。化学过程涉及的能量虽比分子热运动能高一些，但也只有 1 eV 的数量级，例如氯原子的电子亲和能为 3.8 eV 。使系统发生这样大小的能量改变正是当时的实验技术手段力所能及的。随着实验技术的发展，人们有可能给予原子更多的能量，改变其内部运动状态，甚至击破原子，这就是原子物理学形成的实验基础。自 20 世纪 30 年代以来，由于带电粒子加速器的出现和改进，人们掌握了能够深入到原子核内、核子内的实验手段，是核物理、粒子物理形成和发展所必需的。

[例] 估计 1kg 汽油燃烧所释放能量的数量级。

[解] 燃烧是一种化学现象，由图 0.2 知一个汽油分子燃烧释放能量的数量级为 1 eV 。

汽油虽由多种分子组成，这些分子的摩尔质量的数量级为 $100 \text{ g mol}^{-1} = 0.1 \text{ kg mol}^{-1}$ 。利用阿伏加德罗数 $N_0 = 6.022 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1} \sim 10^{23} \text{ mol}^{-1}$ 可得 1 kg 汽油包含的分子总个数的数量级为

$$N = \frac{1 \text{ kg}}{0.1 \text{ kg mol}^{-1}} \times 10^{23} \text{ mol}^{-1} \sim 10^{24} \text{ 分子}$$

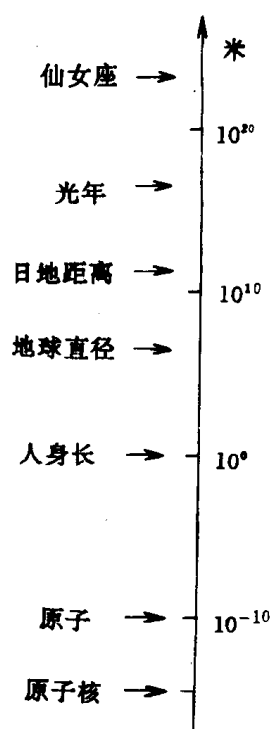


图 0.1

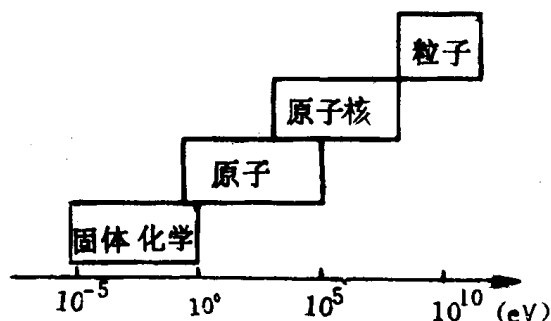


图 0.2

最后得 1 kg 汽油燃烧释放能的数量级为

$$E \sim 10^{24} \times 1 \text{ eV} = 10^{24} \text{ eV} = 10^2 \text{ kJ}.$$

习 题

0.1 在合理基础上, 估计下列各量

- (1) 在温度 $T=3\text{K}$ 时热辐射光子的平均波长,
- (2) 太阳的发光度(瓦),
- (3) 海平面空气中 N_2 分子的平均速率,
- (4) 红光光子能量的 eV 值,
- (5) 海平面大气中 N_2 分子间的平均距离,
- (6) 电解水产生 1kg H_2 气时电流所供应的最小能量,
- (7) 电子由静止通过 100 V 的电位差加速后的速度,
- (8) 10 百万吨(10^6 吨)级氢弹爆炸时的质能转换。

目 录

绪论

第一章 原子的基本状况	(1)
§ 1.1 导言	(1)
§ 1.2 阿伏加德罗定律	(1)
§ 1.3 原子的质量	(2)
§ 1.4 原子的大小	(3)
§ 1.5 电子	(4)
§ 1.6 原子结构模型	(7)
§ 1.7 卢瑟福 α 粒子散射理论	(9)
§ 1.8 卢瑟福理论与实验	(13)
§ 1.9 原子核的大小	(15)
§ 1.10 *截面的概念	(16)
习题	(17)
第二章 氢原子 旧量子论	(18)
§ 2.1 光谱学与原子结构	(18)
§ 2.2 氢原子光谱的实验规律	(20)
§ 2.3 玻尔原子理论的基本假设	(22)
§ 2.4 氢原子的玻尔理论	(24)
§ 2.5 有限核质量效应	(29)
§ 2.6 类氢系统	(30)
§ 2.7 夫兰克-赫芝实验 原子能级的电测量	(34)
§ 2.8 原子电子的椭圆轨道 索末菲理论	(36)
§ 2.9 空间量子化	(41)
§ 2.10 史特恩-盖拉赫实验	(43)
§ 2.11 激发态原子	(46)
§ 2.12 原子按能态的布居 激光器	(52)
习题	(54)
第三章 物质的波-粒二象性 量子力学简介	(57)
§ 3.1 物质的波-粒二象性 德布罗依假设	(57)
§ 3.2 戴维逊-革末实验	(60)
§ 3.3 海森伯测不准关系	(62)
§ 3.4 波函数及其统计意义	(68)
§ 3.5 薛定谔方程	(74)
§ 3.6 粒子在稳恒势场中的运动 定态薛定谔方程	(78)

§ 3.7	态迭加原理 自发跃迁过程	(83)
§ 3.8	氢原子的量子力学理论	(87)
习题		(92)
第四章	碱金属原子 电子自旋	(95)
§ 4.1	碱金属原子光谱	(95)
§ 4.2	价电子运动	(97)
§ 4.3	独立电子模型 电子态	(101)
§ 4.4	碱金属原子光谱的精细结构	(102)
§ 4.5	电子自旋	(104)
§ 4.6	电子自旋的观测	(106)
§ 4.7	原子电子的自旋-轨道耦合 量子角动量合成法则	(109)
§ 4.8	单(价)电子原子的总角动量	(112)
§ 4.9	碱金属原子能级的精细结构 单(价)电子原子系统辐射跃迁的 选择定则	(113)
§ 4.10	光子自旋	(120)
§ 4.11	氢原子能级的精细结构 兰姆能级移位	(124)
习题		(130)
第五章	多电子原子 泡利不相容原理	(132)
§ 5.1	氦及第二族元素的光谱和能级	(132)
§ 5.2	多电子原子的独立电子理论 电子组态	(133)
§ 5.3	氦原子能级初探 单电子激发态	(136)
§ 5.4	多电子原子的矢量模型	(138)
§ 5.5	L-S 耦合 *j-j 耦合	(138)
§ 5.6	氦原子能级和光谱	(147)
§ 5.7	同类粒子的全同性	(149)
§ 5.8	泡利不相容原理	(157)
§ 5.9	同科电子组态的谱项	(161)
§ 5.10	多电子原子的能级结构 洪德法则	(166)
习题		(169)
第六章	原子基态的电子结构 X 射线谱	(171)
§ 6.1	元素性质的周期律	(171)
§ 6.2	原子电子状态的壳层分类	(174)
§ 6.3	原子基态的电子壳层排布 元素周期表	(174)
§ 6.4	原子基态能级	(180)
§ 6.5	X 射线及其产生	(186)
§ 6.6	X 射线发射谱	(187)
§ 6.7	X 射线吸收谱	(189)
§ 6.8	莫塞莱定律	(191)
§ 6.9	X 射线与原子电子壳层结构	(192)

§ 6.10 X 射线能级的分裂和精细结构	(195)
§ 6.11 俄歇效应	(199)
§ 6.12 光电子谱技术	(200)
习题	(201)
第七章 磁场中的原子	(203)
§ 7.1 原子的磁矩	(203)
§ 7.2 外磁场对原子的作用	(206)
§ 7.3 顺磁共振	(209)
§ 7.4 塞曼效应 帕邢-巴克效应	(212)
§ 7.5 双共振和光泵运	(216)
习题	(220)
第八章 原子能级的超精细结构	(223)
§ 8.1 原子光谱线的超精细结构	(223)
§ 8.2 原子核的自旋和磁矩 原子总角动量	(224)
§ 8.3 超精细结构相互作用	(227)
§ 8.4 超精细能级举例	(229)
§ 8.5 外磁场中超精细能级的分裂	(232)
§ 8.6 核自旋的测量 核磁共振	(234)
§ 8.7 原子核的电四极矩	(236)
习题	(238)
第九章 分子结构和分子光谱	(239)
§ 9.1 分子结合力	(239)
§ 9.2 分子内部运动	(243)
§ 9.3 双原子分子的转动 分子转动光谱	(246)
§ 9.4 双原子分子的振动 分子振动-转动光谱	(250)
§ 9.5 双原子分子的电子能态	(255)
§ 9.6 双原子分子的电子-振动-转动光谱	(258)
§ 9.7 拉曼效应	(262)
习题	(265)
第十章 原子核的基本性质	(267)
§ 10.1 导言	(267)
§ 10.2 原子核的组成成分	(267)
§ 10.3 原子核内电荷和质量分布 核大小	(269)
§ 10.4 原子核的质量亏损和结合能	(271)
§ 10.5 核力	(273)
§ 10.6 核模型	(276)
习题	(287)
第十一章 核过程	(288)
§ 11.1 核过程简介	(288)

§ 11.2	核衰变	(289)
§ 11.3	α 衰变	(291)
§ 11.4	β 衰变	(295)
§ 11.5	γ 衰变 穆斯堡尔效应	(301)
§ 11.6	核反应	(304)
§ 11.7	反应能	(306)
§ 11.8	反应截面	(311)
§ 11.9	核反应机制 核共振和复合核模型	(312)
§ 11.10	核裂变 核能利用	(316)
§ 11.11	核聚变	(318)
	习题	(320)
第十二章	粒子物理	(322)
§ 12.1	粒子物理简介	(322)
§ 12.2	轻子 弱相互作用	(324)
§ 12.3	粒子过程与基本相互作用	(332)
§ 12.4	传递作用场的中间粒子	(335)
§ 12.5	π 介子	(339)
§ 12.6	强子同位旋	(344)
§ 12.7	K 介子	(348)
§ 12.8	重子	(355)
§ 12.9	重子数守恒定律	(359)
§ 12.10	奇异粒子 奇异数守恒定律	(360)
§ 12.11	粒子与反粒子 电荷共轭不变性	(364)
§ 12.12	共振粒子	(366)
§ 12.13	强子的夸克模型	(372)
§ 12.14	夸克色别	(381)
§ 12.15	标准模型	(385)
	习题	(388)
附录		
表 1 部分核数据表		
表 2 部分粒子数据表		
表 3 常用物理常数表		

第一章 原子的基本状况

本章主要讨论两方面的问题。一是原子性质的早期知识，二是原子有核模型。前者是后者的事实依据，后者是进一步探讨原子内部运动的起点。

§ 1.1 导 言

自然界的任何物体都由原子构成的思想起源很早。但开始仅是一种猜想。到 19 世纪，分子运动论和化学领域的大量事实表明，分子或原子是组成物体的基石。分子运动论研究对象是热现象。热现象是分子热运动和分子间的作用力这两种对立因素相互消长的种种表现，所涉及的主要是分子或原子的整体运动。化学现象是分子分解成原子，或原子组合成分子的过程，涉及到原子最外层电子(价电子)的重新分布。在这些现象中，原子或原子的主体部分表现为一个比较稳定或坚固的系统，好象是一个不可分割的坚硬颗粒，这就是原子概念的形成过程。

物理学的进一步发展表明，原子并不是不可分割的，是可以变形或击破的，具有复杂的内部结构和运动。

原子物理是研究原子的结构、原子内部运动的规律，以及这些现象对自然界和人类影响的科学。原子物理研究的主要对象是单个原子。

原子是由原子核和电子组成的中性系统。原子序数 Z (电荷数)反映了原子核内质子的数目或原子中电子的数目。质量数 A 反映了原子核内质子和中子的总数。 A 和 Z 一定的原子叫核素原子，它具有确定的物理性质。物理学中所研究的原子就是指核素原子。化学中研究的元素原子实际是几种同位素(具有相同 Z 和不同 A 的核素)原子的混合体，它们有不同的物理性质，在物理学中应分别研究。

§ 1.2 阿伏加德罗定律

原子量 19 世纪初，在研究总结化学变化规律的基础上，已能对个数相同的两群不同原子的质量进行相对比较测量。形成原子量概念。

1961 年国际协议规定，把碳元素的一种同位素 ^{12}C 的单个原子质量的 $1/12$ 作为量度原子质量的相对单位。由此就可确定各种核素单个原子的相对质量，例如： ^1H 为 1.007825， ^{12}C 为 12.0000， ^{16}O 为 15.99491。这表明单个 ^1H 原子的质量是单个 ^{12}C 原子质量的 $1/12$ 的 1.007825 倍，……。按此所得核素原子的相对质量叫该核素的原子量。化学中常用的元素原子量是天然元素中所含各种同位素原子量按丰度的平均值，可看作核素原子量的近似值。

阿伏加德罗(A. Avogadro)定律(1811 年) 以 10^{-3}kg (或 g)作质量单位时，若由相同原子组成的核素系统的质量值正好等于该核素的原子量值，那么，就定义此系统所包含物质的量为 1 摩尔(mol)。例如，12.000000g 的 ^{12}C 为 1mol 的 ^{12}C ，1.007825g 的 ^1H 为 1mol 的 ^1H 。

阿伏伽德罗定律：一摩尔的任何核素物质所包含的原子个数相同，都等于恒量 N_A 。

N_A 叫阿伏伽德罗数, 其值需由实验测定。公认值为

$$N_A = 6.0220943(63) \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}. \quad (1 \cdot 2 \cdot 1)$$

一般地说, 物质系统的组成基本单元可以是原子, 也可以是分子、离子、电子或这些粒子的某种特定组合等。摩尔作为量度物质多少的通用单位, 一般的定义为: 一摩尔的任何物质系统所包含基本组元的个数等于 12.000000 g 的 ^{12}C 所包含原子个数。因此阿伏伽德罗定律可一般地表述为: 一摩尔任何物质所包含基本组元的个数为 N_A 。

阿伏伽德罗常数 N_A 的测定 1908 年 Perrin 通过对布朗运动的研究, 第一次测定了 N_A 值。后来又用不同的方法对 N_A 进行了测定。一种较精确的方法是 X 射线衍射法。

当 X 射线束在单晶上衍射时(图 1.1a), 衍射光强的极大值满足布拉格公式

$$2d\sin\theta = n\lambda, \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (1 \cdot 2 \cdot 2)$$

其中 d 为晶面间距, θ 为掠射角, λ 为 X 射线波长。

利用已知波长的 X 射线可确定 d 并求出 N_A 。现以 NaCl 晶体为例, 其晶体结构如图 1.1(b), 设晶体中一个 Na^+ 或 Cl^- 离子占据的体积为 d^3 , 一摩尔 NaCl 中共有 $2N_A$ 个 Na^+ 和 Cl^- 。因此 NaCl 晶体的摩尔体积为 $2N_A d^3$ 。另一方面, 测量 NaCl 晶体的密度 ρ 及摩尔质量 A_r (分子量) 也可得 NaCl 的摩尔体积为 A_r / ρ , 于是有

$$2N_A d^3 = \frac{A_r}{\rho},$$

由此得阿伏伽德罗数 N_A 为

$$N_A = \frac{A_r}{2\rho d^3}. \quad (1 \cdot 2 \cdot 3)$$

N_A 的测量结果见式(1 · 2 · 1)。

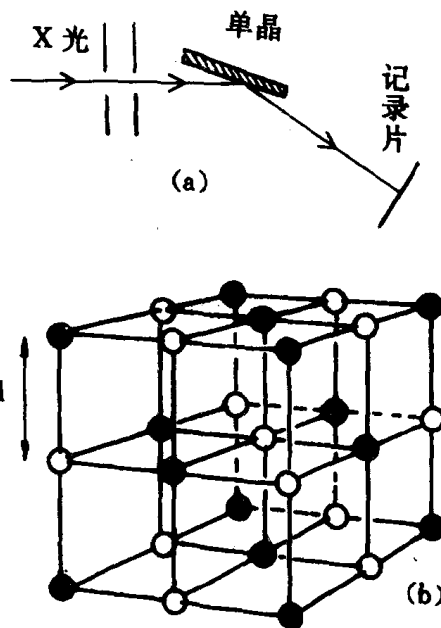


图 1.1

§ 1.3 原子的质量

原子质量是指单个原子的质量, 是原子的一个重要基本量。

利用阿伏伽德罗定律和 N_A 值, 可以从宏观的核素原子量求得原子的质量。设核素的原子量为 A_r 它的每个原子的质量 m 应为

$$m = \frac{A_r}{N_A}. \quad (1 \cdot 3 \cdot 1)$$

原子质量单位 可以把 ^{12}C 原子质量的 $1/12$ 看做类似于克(g)或千克(kg)的一种较小的新质量单位,叫做原子质量单位,并用 u 表示。 u 和 kg 的换算关系式为

$$1u = \frac{1}{12} \cdot \frac{12 \times 10^{-3} \text{ kg mol}^{-1}}{N_A \text{ mol}^{-1}} = 1.6605655(86) \times 10^{-27} \text{ kg.} \quad (1 \cdot 3 \cdot 2)$$

按 u 的定义,核素原子量就可看成用 u 为单位的该核素原子的质量。例如氧的原子量为16,一个氧原子的质量为 $m=16u$ 。要知道 m 的 kg 值,可利用关系式(1·3·2)按一般的单位换算即可。

质谱仪 质谱仪是用物理方法把质量不同的原子分离开来,并精确测定其质量的装置。质谱仪的结构原理在电磁学中曾经提及。1910年汤姆逊(J. J. Thomson)建造了第一台质谱仪。后来阿斯顿(F. W. Aston)进一步作了重要改进。阿斯顿质谱仪的构造如图1.2,原子在离子源 o 中被电离,离子受20—50 kV的电压 V 加速并通过一些狭缝成

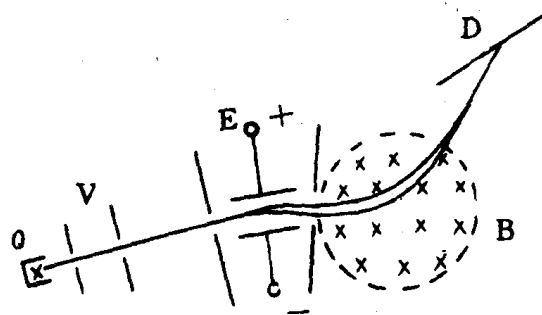


图 1.2

准直束,利用适当电场 E 和磁场 B 的作用,使束中速度不同而荷质比(e/m)相同的离子聚集在记录片 D 上形成一条质量谱线。整个装置处于真空容器内。测定离子质谱线在记录片上的位置,能够以很高的精确度确定核素离子的相对质量。

质谱仪还可用来确定已知质量离子的电离级次。质谱仪分离的纯核素离子束在其它科技领域也得到了应用。在原子质量研究中质谱仪的广泛使用,促成了采用 ^{12}C 为原子量的相对标准。因为真空系统中总是存在一些真空泵油挥发的碳氢化合物的分子,在记录底片上会自动出现 ^{12}C 的质谱线,成为非常方便的比较标准。

[例 1.1] 估算氧原子的质量

[解] 取氧的原子量为 $A_r \approx 16$,按式(1·3·1)有

$$m = \frac{A_r}{N_A} \approx \frac{16 \text{ g mol}^{-1}}{6.02 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}} = 2.7 \times 10^{-23} \text{ g.}$$

§ 1.4 原子的大小

在讨论原子的大小或半径时,首先遇到的一个问题是关于原子半径的确切含意。对两个同样的理想刚性球来说,它们的半径是确定的,通过它们互相靠近(碰撞)的实验,测量球心间最小距离可得球半径。但原子作为核和电子通过一定相互作用联系在一起的粒子系统,绝对刚性假设是不符合事实的。两个原子在碰撞过程相互靠近的最小距离与原子内部结构和入射动能有关。这就是说,原子的半径大小跟测量的具体实验条件有关。对分子、原子核等也存在类似情况。

原子半径的实验测定方法很多,现举几例。

碰撞截面的测定。分子物理关于输运过程的讨论表明，通过对粘滞系数 η 等的测定，可得分子或原子的有效碰撞截面和半径。

范德瓦耳斯气体方程的体积修正量 b 的测定。对范氏方程 $(p+a/V^2) \cdot (V-b) = RT$ 中体积修正量 b 的测定，也可得气体分子或原子半径。

X 射线衍射测定晶格常数。假定晶体中原子是相互靠拢的，测定晶格常数 d 就是对原子大小的量度。

表 1.1 是用多种方法对不同原子半径的测定值。结果表明，不论原子轻重如何，它们的大小在通常情况下都是差不多的。任何原子的半径数量级都为 10^{-10}m 或 $1\text{\AA}$ 。原子结构的理论必须考虑这个事实！

表 1.1 (单位 $\text{\AA}$)

原 子	由 η	由 d	由 b
Ne	1.18	1.60	1.2
Ar	1.44	1.90	1.48
Kr	1.58	1.97	1.58
Xe	1.75	2.20	1.72

§ 1.5 电 子

对原子内部结构的探讨虽开始得很早，但系统地研究则是 19 世纪末的事情，电子的发现为研究原子组成提供了可能性。在这个基础上，各种关于原子结构的模型、理论相继提出，有关实验相继完成，促进了原子物理学的形成和发展。因此需先对电子的发现及其基本性质加以介绍。

汤姆逊(J. J. Thomson)阴极射线实验 电子的发现和荷质比测定 汤姆逊通过阴极射线实验发现了电子(1887 年)。实验装置见图 1.3，真空容器内的阳极 A 与阴极 K 之间加有数千伏的电压，器内残存气体的离子经电场加速后轰击阴极，使阴极发出一种射线，当时叫阴极射线。此射线通过阳极 A 和另一金属片 A' 中央的小孔后形成细束。如果没有容器中部的装置，射线束将沿直线前进，射到另一端的荧光屏 S 的中央 O ，形成一个光点。反之，如果将容器中部的电容器两个极板 C 、 D 充电，在 C 、 D 间形成竖直方向的电场，通过观察荧光屏上光点向上或向下的移动，将会发现电场能使射线束偏转，偏转方向表明射线束带负电。另外，在图中虚线圆圈的区域内，还可在管外用载流线圈产生方向垂直纸面的磁场。如果只有磁场，也可观察到射线束发生向上或向下的偏转。磁场中的偏转方向也表明射线束带负电。如同时加上电场和磁场，调节二者的方向和强度，可使它们产生的偏转互相抵消，设此时电场和磁场分别为 E 和 B 。若进一步假定阴极射线是由电荷为 $-e$ ，质量为 m 的粒子组成的，偏转互相抵消时有

$$v = \frac{E}{B}, \quad (1 \cdot 5 \cdot 1)$$

利用式(1·5·1)可测量粒子速度 v 。

测量电场或磁场单独产生的偏转幅度，就可得到组成射线粒子的电荷质量比（荷质比） e/m 。汤姆逊是将电场去掉，让粒子束在磁场内作圆周运动，其半径应为

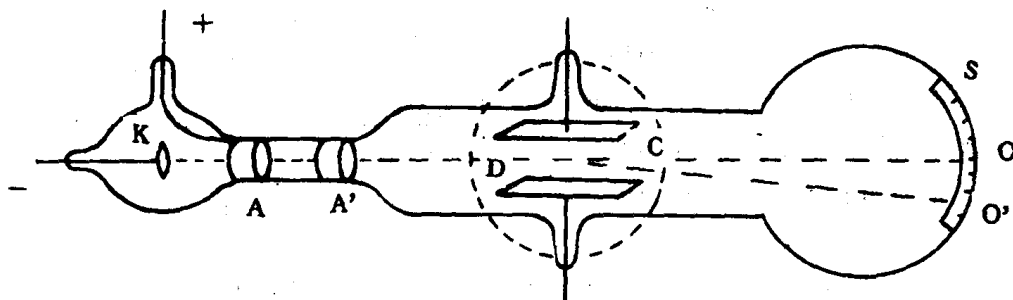


图 1.3

$$R = \frac{mv}{eB} \quad (1.5.2)$$

由式(1.5.1和2)可得粒子的荷质比为

$$\frac{e}{m} = \frac{E}{RB^2}, \quad (1.5.3)$$

其中半径 R 的值是通过测量屏上光点移动距离 OO' 和仪器的一些几何参量确定的(详细几何计算从略), O' 是只有磁场时屏上光点位置。

汤姆逊将各种气体分别注入器内, 并用不同材料的阴极重复这一实验, 在实验的精确范围内总是测得相同的 e/m 值, 表明用不同气体离子轰击不同材料阴极所发射出的阴极射线都是由同样的负电粒子组成。当时称这些粒子为“微粒”, 并称它们所带的电荷为“电子”(电荷的量子), 现在把微粒本身叫电子。这些情况也表明电子可能是所有阴极材料中原子的共同组成成员, 这就形成了进一步研究原子结构的开端。

汤姆逊的原始装置后来经过许多改进, 测量精确度不断提高。但此类装置中电子速度远小于真空光速 c , 因此, 测得的电子荷质比叫静荷质比。其公认值为

$$\frac{e}{m_0} = 1.7588047(49) \times 10^{11} \text{ Ckg}^{-1}. \quad (1.5.4)$$

1901 年考夫曼(S. G. Kaufmann)对 β 射线荷质比的测定发现, 构成 β 射线电子的 e/m 值与速度大小有关, 可表示为

$$\frac{e}{m} = \left(\frac{e}{m_0} \right) \left(1 - \frac{v^2}{c^2} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (1.5.5)$$

v 为 β 电子的速度。因 β 电子速度可达光速的 90% 左右, 所以, e/m 可小到静止值的 1/2 左右。

电子的发现奠定了研究原子、分子和聚集态等结构的基础。电子又是最早发现的亚核粒子, 对电子性质和运动规律的深入研究是粒子物理的组成部分。

电子电荷 测定电子电荷的较好方法是密立根(Millikan)油滴实验。实验装置示意如图 1.4 所示, P_1 和 P_2 是水平放置的平行板电容器, 上极板 P_1 的中央开有小孔。喷雾器 A

喷出小油滴通过小孔进入电容器。油滴在形成过程已带电，必要时还可用 X 光照射等方法使油滴电量改变。当 P_1 和 P_2 间加有一定电压时，进入电容器的油滴受到电场力、重力、空气浮力和粘滞阻力的作用。由于空气粘滞阻力与油滴速度成正比，因此油滴最后将变成匀速运动，其速度值可用显微镜 M 观察通过已知距离所需的时间确定。

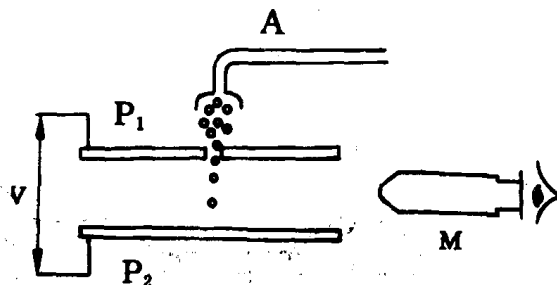


图 1.4

当电容器不加电压时，观察一个选定油滴的运动。设油的密度为 ρ ，油滴半径为 r ，空气密度为 ρ_0 和粘滞系数为 η ，油滴匀速下落的速度为 v_g 。利用粘滞阻力的斯托克斯定律有

$$\frac{4}{3}\pi r^3(\rho - \rho_0)g = 6\pi r\eta v_g, \quad (1.5.6)$$

式中除油滴半径 r 外，其余量是已知或可以测量的，用此式可确定 r 。

如电容器加适当电压，使上述油滴向上运动，测定其上升达到匀速后的速度 v_e 。设油滴所带的电量为 q ，同理有

$$qE - \frac{4}{3}\pi r^3(\rho - \rho_0)g = 6\pi r\eta v_e. \quad (1.5.7)$$

由上二式可得

$$q = \frac{k(v_g + v_e)}{E}, \quad (1.5.8)$$

其中 k 为

$$k = 18\pi \left[\frac{\eta^3 v_g}{2(\rho - \rho_0)g} \right]^{\frac{1}{2}}. \quad (1.5.9)$$

密立根对不同油滴带电量 q 的大量观察表明， q 总是基本电量 e 的整数倍，即 $q = ne$ ， e 是油滴可能的最小电量。这说明电荷的存在具有量子化的性质，即物体所带电量都只能是 e 的整数倍。电量 e 就是一个电子所带的电量，公认值为

$$e = 1.6021892(46) \times 10^{-19} \text{C}. \quad (1.5.10)$$

电子质量 知道了 e/m_0 和 e 就可算出电子的(静)质量为

$$m_0 = 9.109534(47) \times 10^{-31} \text{kg} = \frac{0.511034(14) \text{MeV}}{c^2}. \quad (1.5.11)$$

与原子相比电子静质量是非常小的，最轻的氢原子质量也是电子质量的 1837 倍。

按相对论，任何物体的质量 m 与速度 v 满足关系

$$m = \frac{m_0}{\left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)^{\frac{1}{2}}}, \quad (1.5.12)$$

m_0 为物体静质量， c 为真空光速。另一方面，任何带电体的电量与带电体的速度无关，