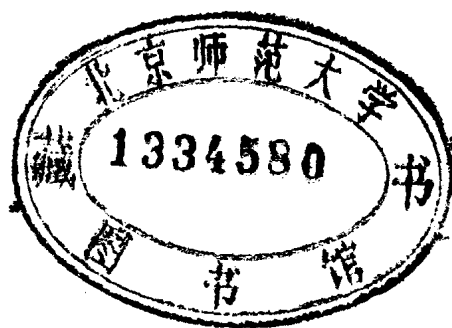


曼彻斯特物理学丛书

原子物理学

[英] J. C. WILLMOTT 著

李申生 译



高等教育出版社

内 容 提 要

本书根据英国 John Wiley & Sons Ltd. 出版的 J. C. Willmott 著《原子物理学》(Atomic physics) 一书 1975 年版译出。

本书为英国《曼彻斯特物理学丛书》(The Manchester Physics Series) 中的一卷。这套丛书由曼彻斯特大学理学院物理系 F. Mandl、R. J. Ellison、D. J. Sandiford 主编, 其余各卷为《物性学》、《光学》、《统计物理学》、《固体物理学》、《电磁学》、《电子学》, 我社陆续出版这套丛书的各卷, 以飨读者。

本书前三章介绍了建立量子力学的基础(包括物质和电荷的原子性; 原子的组成及经典物理学的失败; 普朗克常数、辐射和光子), 第四章以后的内容为电子和波、量子力学和薛定谔方程、有心力场中的角动量和电子自旋、氢原子和单电子离子的能级、元素周期表与泡利不相容原理、单电子光谱与双电子光谱、光谱线与选择定则、标识 X 射线谱。

本书可作为我国高等学校物理系原子物理学课程的教学参考书, 也可供有关人员参考。

曼彻斯特物理学丛书

原子物理学

[英] J. C. WILLMOTT 著

李申生 译

*

高等教育出版社出版

新华书店北京发行所发行

北京市顺义县印刷厂印装

*

开本 850×1168 1/32 印张 12.625 字数 300,000

1985 年 8 月第 1 版 1985 年 8 月第 1 次印刷

印数 00,001—6,900

书号 13010-0974 定价 3.20 元

JY11173/06

曼彻斯特物理学丛书主编序言

在制订大学物理学各门课程的大纲时，曼彻斯特大学物理系同人深感难以找到合适的教科书推荐给学生。其他大学的许多教师显然也有同感。大部分教科书的内容过多，学生没有时间加以消化；而且，按照这些书的编排方式，也极少有可能从中选取一些章节，借以定出一个自成体系、比重恰当的大纲。正是在这种情况下，产生了编写这套曼彻斯特物理学丛书的想法。

曼彻斯特物理学丛书各卷的材料比我们讲课时的内容大约增加了50%。为此，我们对丛书所应包括的课题作了精选。重点放在基础物理学方面，也包含一些深有启发、饶有趣味和富有价值的应用。考虑到各大学对具体课题的处理相差甚远，我们在组织材料时力求便于教师根据不同的分量、难度和不同的应用重点加以选择。为了这一目的，我们鼓励丛书各卷的作者使用教学流程图来表明各章之间的逻辑联系，并把某些节、段的课题打上星号。这些部分涉及较高深的内容，可供选读而不影响对各卷后继部分的理解。

因为计划把曼彻斯特物理学丛书作为一套体系完整的教材，所以丛书对所阐述的物理学各部分作了通盘安排。各卷深浅程度有所不同：《物性学》适用于第一学年，《固体物理学》适用于第三学年，其余各卷介乎二者之间，使用时可以有相当大的灵活性。《电磁学》、《光学》、《电子学》和《原子物理学》都是从一年级水平开始，逐步进展为适合二、三年级的课程。《统计物理学》则适用于第二、三学年。丛书各卷的编纂均自成体系，可以单独使用。

这套丛书虽是为英国大学生编写的，同样也适合美国大学一

年级以上的课程。在各卷的作者序言中,对于所要求的预备知识,都作了详细说明。

编纂这样一套丛书,必须对采用的单位制作出原则规定。经过尽可能广泛的协商,我们和作者及出版者共同决定,采用国际理论物理和应用物理协会多次建议和详尽解释的国际单位制(SI)。电学和磁学量都用国际单位制表出(其他单位制在电磁学卷中都有说明)。但是,我们并不认为诸如电子伏特这样的物理单位是不合法的。我们也不拘泥于某些细节,如 10 的因子(用 0.012 千克是否就比 12 克好?),缩写符号(尽管秒的缩写 s 和 sec 对于电子计算机来说并不等同,对于科学家来说却毫无区别)以及诸如此类的琐碎事项等等。

这套丛书的初稿曾在曼彻斯特大学试用过,并在其它大学的教师中广为流传,因而已经听到许多反映。我们非常感谢曼彻斯特和其他大学的广大师生,他们的批评、建议和有益的讨论有助于这套丛书的最后定稿,使它的撰述增色不少。我们要特别感谢各卷的作者,感谢他们的辛勤工作,感谢他们贡献了许多新概念,感谢他们耐心的讨论和经常接受我们的许多建议和要求。我们也向出版者 John Wiley and Sons 公司表示感谢,他们在各方面给予我们很大帮助,包括提供初稿的资金。

F. Mandl

R. J. Ellison

D. J. Sandiford

于曼彻斯特大学理学院物理系

作 者 序

几年以前，我们在曼彻斯特大学决定把我们的物理学讲稿或其中的一部分作为教科书试用。这项任务表明，对于某些课程来说，还缺少具有适当水平和适当篇幅的教科书。这些课程之一就是适合于英国大学二年级学生程度的原子物理学。本书就试图填补这项空白。

广泛地说，教授原子物理学和量子力学有两种可能的方法。第一种方法是把材料大体上按照历史发展的顺序排列起来；第二种方法则是把量子力学的定律作为假设提出来，就如同在经典力学中提出牛顿运动定律的假设一样，然后由此再对主题进行发展。利用后一种方法来讲授经典力学是可能的，因为大多数人基于日常经验对经典力学的概念都是比较熟悉的，即使他们并未正式表述过它们；例如说作用和反作用二者相等而相反就不会使大多数人感到意外。但是在日常经验中，却没有任何东西可以对量子力学的定律作出提示。从假说出发的好处，在于它可以使量子力学的结构形式比较清晰；但是作者的观点却认为，量子力学的假设对于初学者来说是过于离奇了，并且包含了如此多的陌生概念。因此，第一次最好还是从容地引导学生，说明经典物理学何以不能成立，尽可能做到每次只引进一个新概念。

所以，本书倾向于采用历史发展的方法。这种方法的危险，在于容易使得所有东西看来都是不可避免的，因而留下这样一种印象，即人们几乎可以推导出薛定谔方程。试图克服这个缺点的办法，主要依靠反复地声明，推导出量子力学是不可能的。而且，还可以利用一定数量的事后之见，推论出一些当时并不是显见之点；例如，没有普朗克常数，人们就不可能建立起一个标志原子现象尺

度的长度来；而经典物理学最终不可避免地要遭到失败，这种情况在当时肯定也不是普遍都意识到的。

本书企图形成一门课程的基础教材，该课程共有大约三十讲，每讲用五十分钟。不消说，在这段时间内讲完全部材料是不可能的，因此假定将作出某些选择，把有些课题留给学生自学。最初两章提供了有关物质的原子性的证据，由此建立起卢瑟福的原子模型。这方面的大部分内容是学生所熟悉的，因而可以略去。第三章讨论了普朗克常数在电磁现象中的普遍性。第四章从电子衍射开始，考虑了描述这个现象所需用的波函数的性质，并直接引出测不准原理，认为这一点之所以重要，就在于应让学生认识到，伴随着粒子运动的波动现象所引入的不确定性，与所取运动方程的精确形式无关。第五章是有关薛定谔方程的，而第六章则是有关角动量的。在此之后，所引入的新概念就只有第八章中的泡利不相容原理和第十章中的宇称了。

每一章的后面都选用了一些习题。其中从简单的数学问题开始，使学生熟悉原子物理学中所涉及的物理量的数量级，直到远远超出本书范围的问题，试图让学习较好的学生能够得到提高和扩展。

我们曾经试图避免用“…原来是”这样的词句来处理一些比较困难的材料，而宁可试着给出一个似乎合理的物理解释。这样做并不总是可能的，但是物理学的引人入胜处之一就在于，有许多简单的情况往往需要最高级和最透彻的分析。希望本书能使读者对所讨论的问题感到一点兴趣，并激励他们进一步钻研水平更高的教科书。

J. C. Willmott

1974年4月于英国 曼彻斯特

目 录

第一章 物质和电荷的原子性	1
1.1 引言.....	1
1.2 分子运动论.....	3
1.3 原子的大小.....	5
1.4 电荷的原子性——电解.....	7
1.5 气体放电.....	8
1.6 “阴极射线”的性质.....	9
1.7 阴极射线的本性——电子流.....	14
*1.8 电子荷质比的精确测量.....	15
1.9 密立根实验和电荷的量子化.....	18
习 题.....	23
第二章 原子的组成以及经典物理学的失败	24
2.1 引言.....	24
2.2 原子是中性的推论.....	24
2.3 原子和 X 射线 每个原子所含的电子数.....	25
2.4 原子模型和 α 粒子散射.....	29
2.5 α 粒子.....	30
2.6 根据汤姆孙模型对于 α 粒子散射的解释.....	32
2.7 卢瑟福的原子模型.....	37
2.8 卢瑟福公式与实验结果的比较.....	46
2.9 前向散射.....	49
2.10 截面的概念.....	50
2.11 原子核的大小.....	52
2.12 卢瑟福模型的重新陈述及评论.....	54
2.13 缺少的常数.....	55
习 题.....	56
第三章 普朗克常数 辐射和光子	58

带有 * 号的节可略去, 因为它们对理解本书的以后部分并不是必需的。

3.1	引言	58
3.2	黑体辐射	58
3.3	原子的大小	61
3.4	光电效应	63
3.5	根据经典观点解释光电效应的困难	69
*3.6	在光强极弱情况下的时间延迟	71
3.7	根据光子观点解释光电效应的困难	73
3.8	康普顿效应	73
3.9	光子的源	76
3.10	辐射——是波还是粒子?	81
	习 题	89
第四章	电子和波	90
4.1	作为粒子的电子	90
4.2	电子和波	91
4.3	电子和X射线衍射	92
4.4	电子和其它粒子的波长	97
4.5	电子——是波还是粒子?	98
4.6	几率波及其叠加	101
4.7	匀速运动的粒子的表示	103
4.8	频率和速度	105
4.9	自由空间中粒子的微分方程以及波函数的复数本性	107
4.10	测不准原理——波动图象的推论	111
*4.11	测不准原理的进一步讨论	114
4.12	能量和时间之间的测不准关系	119
4.13	能量-时间测不准关系的进一步讨论	120
*4.14	测不准原理的一个解析实例	123
	习 题	126
第五章	量子力学和薛定谔方程	127
5.1	引言	127
5.2	薛定谔方程	129
*5.3	某些似是而非的争论	130
5.4	与时间无关的薛定谔方程	131

*5.5	建立与时间无关的薛定谔方程的另一种方法	134
5.6	边界条件以及与时间无关的薛定谔方程的解	135
5.7	本征值和本征函数	141
5.8	H的本征函数的正交性和完全性	143
*5.9	H的属于不同本征值的本征函数的正交性	145
5.10	算符、期待值和本征值	148
5.11	小 结	154
	习 题	155
第六章	有心力场中的角动量和电子自旋	157
6.1	引言	157
6.2	行星运动的经典特征	158
6.3	带电粒子的磁矩与其角动量之间的关系	160
6.4	原子磁矩的测定	163
6.5	角动量在量子力学中的表示	166
6.6	角动量 z 分量的本征值	170
6.7	角动量的大小以及其它分量	171
*6.8	不可能确知角动量的所有三个分量的证明	173
6.9	对具有确定角动量的态的惯用描述	174
6.10	角动量与斯特恩-革拉赫实验的结果	175
6.11	内禀角动量以及角动量的半整数值	179
6.12	电子自旋	182
*6.13	电子自旋的分析	184
*6.14	利用经过改进的斯特恩-革拉赫装置进行 实验的可行性	194
*6.15	电子磁矩的精确测量	197
	习 题	203
第七章	氢原子和单电子离子的能级	205
7.1	引言	205
7.2	所论问题的经典的哈密顿函数和量子力学的哈密顿算符	206
7.3	基态解	212
7.4	基态波函数的归一化以及解的其它特性	217
7.5	氢原子的其它球面对称态	222

7.6	氢原子和类氢离子的非球面对称态——p 态	227
7.7	角动量较高的态	236
7.8	用量子数描述态	237
7.9	氢原子中的电子自旋	239
	习 题	239
第八章	元素周期表与泡利不相容原理	241
8.1	引言	241
8.2	对于含有若干个电子的原子的描述	241
8.3	元素的性质与泡利不相容原理	245
8.4	泡利不相容原理对于原子描述的影响	253
8.5	根据原子的壳层模型建立的元素周期表	256
8.6	全同粒子的不可分辨性与波函数的对称性	266
8.7	对称性守恒	275
8.8	交换对称性与泡利不相容原理	276
	习 题	278
第九章	单电子光谱与双电子光谱	279
9.1	引言	279
9.2	闭合壳层的角动量与电荷分布	280
9.3	初级微扰理论	282
*9.4	第一级微扰理论结果的正规推导	284
*9.5	微扰理论计算的两个例子	286
9.5.1	核电荷的增大	286
9.5.2	核的有限大小的影响	288
9.6	碱金属原子的能级	290
*9.7	量子数亏损	295
9.8	钠的 3p 态的结构	297
9.9	角动量的相加	301
9.10	自旋-轨道相互作用	306
9.11	氦原子简介	312
9.12	氦原子的基态	313
*9.13	(9.46a)式中的积分计算	317
9.14	氦原子的激发态与反对称性的影响	320

9.15	对称性与总自旋之间的联系	328
9.16	氮的激发态的描述	329
9.17	小结	332
	习 题	332
第十章	光谱线与选择定则	334
10.1	引言	334
10.2	氢与碱金属原子的选择定则	335
10.3	原子态的性质以及对于电磁辐射的分析	335
10.4	电偶极辐射的选择定则(1)	339
10.5	电偶极跃迁几率以及宇称的概念	340
10.6	宇称	343
10.7	具有与不具有确定宇称的波函数的例子	345
10.8	电偶极辐射的选择定则(2)	346
	习 题	350
第十一章	标识 X 射线谱	351
11.1	引言	351
11.2	莫塞莱实验	353
11.3	X 射线能级和选择定则	356
	习 题	359
附录 A	傅里叶级数和傅里叶变换	361
附录 B	物理常数的数值	367
附录 C	习题解答	369
附录 D	阅读书目	382
	索引	384

1

第一章 物质和电荷的原子性

1.1 引言

在十九世纪, 已经积累了大量的证据支持物质是由原子组成的概念。我们在下面列举一些化学定律, 它们在原子假说的基础上可以得到简单的解释:

(1) **定比定律:** 当化学元素在适当的条件下化合成特定的化合物时, 参与化合的元素重量之比总是相同的。

(2) **倍比定律:** 如果甲、乙两种元素相互化合而生成几种化合物, 则在这些化合物中, 与一定重量的甲元素相化合的乙元素各重量间成简单的整数比。

基于原子假说, 这些定律可以解释如下: 一定量的某种已知化学元素是由该元素的大量原子所组成的, 每个原子都具有相同的

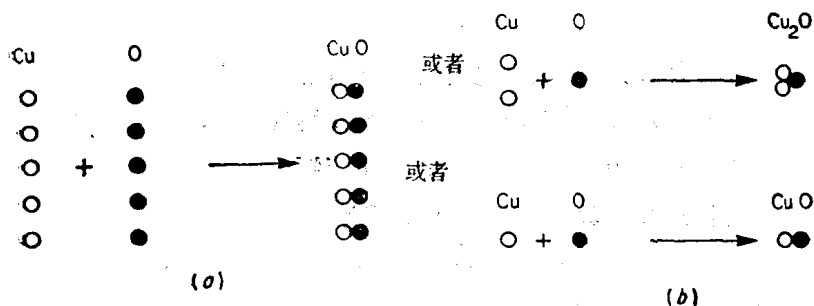


图 1.1 (a) 基于原子假说的定比定律.
(b) 基于原子假说的倍比定律.

重量,而这个重量是该元素所特有的(图 1.1). 当两种元素化合成一个化合物时,二者的原子以简单的整数比组成化合物的分子.

因此,如果用铜和氧化合成化合物氧化铜时,我们发现 63.5g 的铜总是与 16g 的氧化合. 我们还可以进一步用 63.5g 的铜与 8g 的氧化合成氧化亚铜.

原子假说是这样解释上述情况的: 铜和氧的原子量之比为 63.5:16, 故氧化铜的分子式为 CuO , 而氧化亚铜的分子式为 Cu_2O .

应用这个简单的假说,就有可能对于整个简单的无机化学中所观察到的化合物重量给予定量的解释.

已经发现,当物质处于气态时,参与化学反应的元素不仅其重量,而且其体积也都遵循简单的定律.

(3) 盖-吕萨克定律: 在每一种生成或分解的气体中,组分和化合物气体的体积彼此之间具有简单的整数比.

事实上,这个定律只有当气体非常近似地遵循理想气体定律时才能应用.

考虑到盖-吕萨克定律以及前述两个定律,就导致这样的结论: 气体的体积与其中所含的粒子数目有关. 由此我们得到

(4) 阿伏伽德罗定律: 在相同的温度和压强条件下,相同体积的不同气体含有相等数目的分子.

下面将会看到,该定律包含有这样的意思,即在给定的温度和压强下,1 摩尔气体(不论是何种气体)总是占有特定的体积. 在标准温度和压强(0°C 和 760mmHg)下,该体积为 22.4 升.

1 摩尔的分子数称作阿伏伽德罗数,其值为

$$N_0 = 6.023 \times 10^{23}.$$

阿伏伽德罗数可以通过多种方法进行测量,其中最精确的方法基于利用 X 射线衍射对原子间距的测量. 所有这些方法自然

都基于原子假说所作的假设,而不同方法所得结果的一致性,对该假说提供了有力的支持.

1.2 分子运动论

麦克斯韦和玻耳兹曼发展起来的气体分子运动论所取得的巨大成就,给原子假说提供了进一步的支持.对原子假说的最引人注目的支持,也许来自对布朗运动的观察.

分子运动论把气体的压力解释为由于气体分子对器壁撞击的结果.如果把一个小物体悬挂在气体中,它也会受到气体分子的撞击,并且由于分子的数目有限,在任何时刻都不会出现完全的平衡,结果物体就会经历无规运动.首先观察到这个现象的是植物学家布朗.

作为一个例子,我们可以考虑一个悬镜,例如电流计的悬镜.因为镜子的两半不会受到数目完全相等的分子的撞击,所以它会经历扭转运动.分子运动论不仅指出这个现象一定会发生,并且还能断言关于这个效应的量值.根据能量均分定理[参阅 F. Mandl, Statistical Physics (Manchester Physics Series), Wiley, London, 1971.有中译本,范印哲译,《统计物理学》(曼彻斯特物理学丛书),人民教育出版社,1981年],在总能量表达式中以二次式出现的每一项,都具有平均能量 $\frac{1}{2}kT$,其中 T 为绝对温度, k 称为玻耳兹曼常数,其值为 R/N_0 ;这里 R 为气体常数, N_0 为阿伏伽德罗数,即1摩尔中的分子数.

把这个结果应用到电流计的悬镜上去,能量的表达式中就会包含 $\frac{1}{2}c\theta^2$ 项,其中 θ 为悬镜的偏转角,而 c 为扭转常数.因此得到

$$\frac{1}{2}c\overline{\theta^2} = \frac{1}{2}kT, \quad (1.1)$$

或

$$\overline{\theta^2} = \frac{kT}{c}, \quad (1.2)$$

其中 $\overline{\theta^2}$ 为均方偏转.

图 1.2 表明了所得到的结果. 图中的这些涨落有力地支持了原子假说.

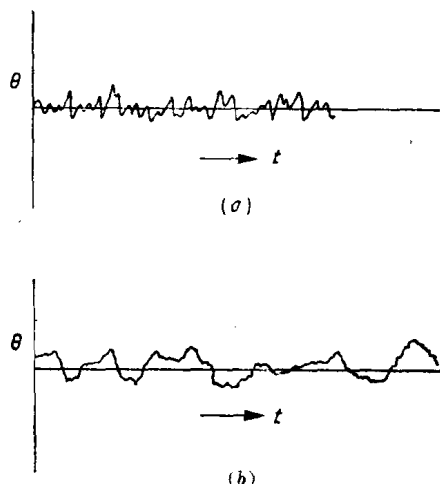


图 1.2 电流计悬镜的角位置由于其布朗运动所引起的涨落.

(a) 轻度阻尼的电流计和(b)阻尼较大的电流计. 在两种情况中均方涨落都相同.

事实上, 阿伏伽德罗数的最早的一个值, 是根据涨落的量度而算出的. 最初的实验, 是由佩林(Perrin)于 1909 年做的, 当时他正在研究悬浮的藤黄树脂粒子的无规运动^①.

① 在本章的讲授过程中, 将讲解各种直接测定重要物理量的方法的细节. 应当指出, 测定这些物理量的最精确值是一件复杂的工作. 其中包括对于许多实验资料的不同片段进行细致的统计分析. 要得到由真正所需量组合而成的某些量的真正精确的结果, 通常倒是非常容易的. 作者殷切地希望读者阅读下列两篇论文:

(1) Jesse Du Mond and E. R. Cohen, “当前关于物理学和化学中基本常数的知识”前二十页, *Rev. Mod. Phys.*, **37**(1965), 537.

(2) B. N. Taylor, W. H. Parker and D. N. Langenberg, 超导体中利用宏观的量子相位相干方法对 e/h 的测定, *Rev. Mod. Phys.*, **41**(1969), 375.

1.3 原子的大小

各种实验都指出,阿伏伽德罗数的值为 $N_0 = 6 \times 10^{23}$ 。如果我们假定在固体元素(例如金属)中的原子堆积在一起,以致相邻的原子都互相接触,就可以估计出原子的半径来。

设每个原子的半径为 r cm, 则 1 cm 的长度内将含有 $1/2r$ 个原子, 而 1 cm^3 的体积内将含有 $1/8r^3$ 个原子。一摩尔的物质就大约含有 6×10^{23} 个原子。如果物质的密度为 ρ , 则一摩尔原子将占有体积 $A/\rho \text{ cm}^3$, 其中 A 为物质的原子量。所以 1 cm^3 的体积大约含有 $6 \times 10^{23} \rho/A$ 个原子, 由此可得

$$r = \frac{1}{2} \left(\frac{A}{6 \times 10^{23} \rho} \right)^{1/3}$$

根据上式对几种固体元素进行计算的结果列在下表中:

元 素	原 子 量	$\rho(\text{g/cm}^3)$	$r(\text{cm})$
锂	7	0.7	1.3×10^{-8}
铝	27	2.7	1.3×10^{-8}
铜	63	8.9	1.14×10^{-8}
硫(正交晶系)	32	2.07	1.48×10^{-8}
铅	207	11.34	1.55×10^{-8}

注: 上列半径通常以埃($\text{\AA}$)为单位, $1 \text{\AA} = 10^{-8} \text{ cm}$ 。

因此,我们从上述计算中看到,所有物质的原子大小都只有几埃。由其它方法,例如分子运动论的方法,也可以得到类似的结果。

这样,由许多迹象汇总在一起得出这样一个观点,即认为元素是由原子组成的,而这些原子的半径都约为 10^{-8} cm 。

在以上叙述中,我们很谨慎,并没有定义所说的原子半径是什么意思。我们通常对一般采用的术语只有一种直觉的理解,而这