

理論物理学

第四册 原子物理学基础

И. В. 苏什金 著

人民教育出版社

3

7

3020



理 論 物 理 学

第四册 原子物理学基础

И. В. 苏什金著

北京师范大学物理系翻譯組譯

人民教育出版社

本书系根据苏联专家苏什金(И. В. Сушкин)于1956-1957年在北京师范大学物理系理论物理进修班讲课时所用的讲义译出。

本书共分四册出版,顺序是一、热力学;二、统计物理学;三、电动力学;四、原子物理学基础(即量子力学)。

本书可作高等师范学校物理系的理论物理参考书,也可供综合大学物理系参考。

第四册原子物理学基础由北京师范大学物理系翻译组金鐸、梁維丽两同志译出,由喀兴林同志校订和整理。

理 論 物 理 学

第四册 原子物理学基础

И. В. 苏什金著

北京师范大学物理系翻译组译

人民教育出版社出版

高等学校教学用书编辑组
北京宣武门内大街27号

(北京市书刊出版业营业许可照出字第2号)

外文印刷厂印装 新华书店发行

统一书号 13010·861 开本 850×1168 1/32 印张 11 1/16

字数 272,000 印数 0001~8,000 定价 (6) 1.10

1960年11月第1版 1960年11月北京第1次印刷

第四册目录

引言	1
----	---

第一章 量子力学的实验基础

§ 1. 原子和电子	3
§ 2. 原子的能级	8
§ 3. 原子的行星模型和玻尔理论	11
§ 4. 电子衍射	20
§ 5. 光的量子本性	24
§ 6. 微观粒子的运动	33

第二章 原子粒子波动性质的一些最简单推论

§ 7. 波函数和测不准关系	37
§ 8. 波云的运动	52
§ 9. 薛定谔方程的一些性质及其推论	60
§ 10. 势阱中的粒子	63
§ 11. 势垒和势垒	75
§ 12. 平均值	89

第三章 最简单的量子力学问题

§ 13. 量子力学的公理	93
§ 14. 量子力学的数学工具	104
§ 15. 一维谐振子	135
§ 16. 类氢原子	151
§ 17. 动量矩算子和类氢原子状态的分类	168
§ 18. 原子和电子的磁性, 自旋	178
§ 19. 选择规则	185
§ 20. 较复杂原子的光谱	190
§ 21. 门捷列夫元素周期系	193
§ 22. 在磁场中的原子	198
§ 23. 相同粒子系统	204

第四章 量子化的场的概念

§ 24. 电磁场	221
§ 25. 二次量子化	241
§ 26. 起流动性	255

§ 27. 电子場.....	272
§ 28. 超导体的最简单的模型.....	284

第五章 原子核物理的若干問題

§ 29. 原子核的性质.....	291
§ 30. 原子核的液滴模型.....	298
§ 31. α 蜕变.....	307
§ 32. 原子核的裂变.....	316
§ 33. 核反应.....	3 3
§ 34. 原子能.....	334
§ 35. β 蜕变.....	347
§ 36. 氘核和核力.....	353
§ 37. 原子核的周期系統.....	364

引 言

我們的原子物理学課程包括有量子力学，量子力学在原子中的应用——即狹义的原子物理学，以及原子核物理学。这三部分中，每一部分所包括的都非常广泛，因此只有在类似我們这样的初步課程的範圍內才能把它們放在一起研究。

量子力学是原子範圍內的現象和物体运动的物理理論。它研究微觀世界的現象和規律，这些現象和規律与通常宏觀世界中的現象和規律有着本质的不同。通常，对大量原子粒子（Атомные частицы）适用的宏觀規律对于一个原子粒子行为的描叙并不适用。許多慣常的物理概念不能搬到量子力学中来，在量子力学中，这些概念或者不存在，或者需要大大地修改。因此，由于必須修正慣常的概念，所以了解微觀的量子規律就要碰到很大的困难。領會与慣常并不相同的量子規律，唯一可靠和簡單的方法是：研究实验事实，承认不能用量子概念以前的观点来解釋的現象，而定出新的規律。在这种情况下，对于新的实验事实，完全不能抱有某种成見，即使是很小的成見也不能有。通常，一切根据經典基础来解釋新的实验事实的企图，最后都遭到失敗并被現代物理学的发展所抛弃。

量子力学的最大特征是原子性，也就是微觀粒子的不可分性，和同种类微觀粒子的全同性。原子性表示有相同的和不变的性质存在。原子性的概念和“量子化”概念很相近，量子化概念所表示的是能够跳跃地变化或限在某一个範圍內变化的性质存在。就經典物理的結果來說，微觀系統的許多特性的量值和变化的分立性是新的性质。与此同时，在量子力学中也存在連續性。一切微觀

粒子都按波的定律运动,而波就是連續性的范例。因此,量子力学是分立性和連續性的辯証綜合。很好地了解辯証唯物主义,就可以很容易地了解量子力学。

第一章 量子力学的实验基础

§ 1. 原子和电子

假如避开古希腊哲学家的原子性不谈，原子性最先在化学中出现。罗蒙诺索夫是第一批原子论者之一，他发现了一系列的化学基本定律，并根据原子性概念来解释它们，而拉瓦锡和道尔顿在相当晚之后才重复罗蒙诺索夫的一系列发现。

在化学实验的基础上建立起物质守恒定律和元素守恒定律。任何化学反应都不能改变元素的量，只发生元素在化合物中的重新分配。

成分不变定律(定比定律)确定：每一种化合物都是由对该化合物来说一定的一些元素所组成，这些元素之间有一定的重量比。成分不变定律只对化合物是正确的，而对混合物就不正确了。

几种元素以精确的、一定的比例化合在一起，然而，一般说来，由某两种元素可以获得多种不同的化合物，这些化合物的性质以及元素之间的成分比都不相同。如果一种元素在不同的化合物中和等量的某一种其他元素化合，则在各化合物中所含的这种元素的量成简单的整数比。这件事很值得注意；它构成倍比定律的内容。假如在元素 A 和 B 之间可以进行几种的化学组合的话（它们的量为 a 和 b ），则在不同的化合物中 A 和 B 的数量比可写成 $2ab$, $1a\ 1b$, $2a\ 3b$, $a\ 2b$, $2a\ 5b$, $a\ 3b$ 等等，也就是说元素 B 的量与一价元素 A 的量之比为 $1, 2, 3, 4, 5, 6$ 。

许多化学定律并不曾以某一个理论联系在一起。罗蒙诺索夫，然后是道尔顿，根据物质的原子构造的概念，给出这些定律的解释。一切元素都由各种不同种类的，但全同的和不可破坏的原

子所組成。原子彼此联合在一起形成分子，分子的成分对一定的化学物质來說是不变的。这就解釋了物质守恒定律和成分不变定律。原子可以組成包含有不同个数原子的分子，这就解釋了倍比定律。最熟悉的例子为氧化氮。 N_2O , NO , N_2O_3 , NO_2 , N_2O_5 。根据分子的已知的成分，以及构成这一物质的元素的重量比(这是可以測出的)，很容易求得元素的相对重量。把氧原子重量定为 16 个单位，以这种单位来表示原子的重量就是原子量。

用上面規定的单位，分子的重量等于組成这个分子的原子底原子量之和，这就是分子量。其重量的克数等于分子量那么多的物质称为一个克分子。

很容易指出，某两种物质的分子底重量比等于它們的克分子量之比。由此得出結論，在任何物质的一克分子中包含有一定数量的分子；这样的分子数为 $N = 6.02 \times 10^{23}$ (阿佛加德罗数)。

知道阿佛加德罗数后就能确定原子大小底数量級。事实上，例如认为：每一个鉄原子占有立方体积，并且这些立方体是密密的放置着，我們来求每个原子占有的体积

$$V = \frac{A}{Nd} \quad A = 56, d = 8 \text{ 克/厘米}^3, V^{1/3} \cong 2.3 \times 10^{-8} \text{ 厘米.}$$

类似的計算給出原子大小(連同它所占的空間)的数量級为几个埃(Å)。

电子是原子的一个組成部分，它是在 19 世紀末发现的。起初将电量的最小单位(即电的原子)称为电子。电的原子的发现是由理論导致的，这发现源于法拉第电解定律和物质的原子性质。在电解时，为了分解出一个克分子的一价物质，总是必須消耗同样的电量(約 96.500 庫倫)。因此，分到一个原子的电量为

$$e = 4.8 \times 10^{-10} \text{ 静电单位}$$

电子的电荷曾用各种办法进一步測量过，因此，現在认为这电荷被

确定得非常精确。

进一步发现有一种小的、但完全一定的质量与基本的负电荷联系在一起。于是开始把小的带负电的粒子称为电子。阴极射线是电子流，阴极射线研究可以确定电子的基本性质。在放电管中，当电子通过 V 伏特的电势差后，电子得到的动能为 $\frac{mv^2}{2} = \frac{\text{电子伏特}}{300}$ 尔格。由于电子所带的电量很小，所以用尔格表示能量值就有些不方便，在原子物理中人们取电子伏特作为能量单位，电子伏特就是电子通过 1 伏特的电势差后所获得的能量。一个电子伏特的量值为

$$1 \text{ 电子伏特} = \frac{4.8 \times 10^{10}}{300} = 1.6 \times 10^{-12} \text{ 尔格}.$$

以不特别强的电场加速电子，在相对论改正还不需要考虑时，电子所得的速度为

$$v = \sqrt{\frac{e}{m} \frac{V}{150}}. \quad (1.1)$$

大约在 V 不到 10^4 伏特以内，这公式是正确的； V 再大时就必须考虑质量随速度的变化。

然而根据(1.1)计算速度时需要知道电子质量，由于电子质量很小，不可能直接测量。但是，可以精确的确定 $\frac{e}{m}$ 之比，而根据已知的 e 求出 m 。克希涅尔(Кирхнер)的双电容器法可以认为是确定荷质比的最精确方法。电子束以一定速度由电子枪飞过两个电容器而落到荧光屏上(图 1)。电容器

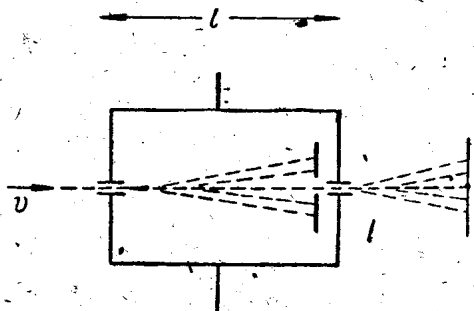


图 1

由一个频率为 ν 的振荡器来通以交流电流。电容器的交变电场使电子的轨道上下弯曲而形成分散的电子束。在第二个电容器前放置一个隔板，这隔板只让当第一个电容板间的场强等于零的瞬间飞过第一个电容器的那些电子通过。改变用来加速电子的电势差，使电子的速度为 v ，在这速度下，电子在振荡器半个振动周期内、或在 $\frac{T}{2}$ 的整数倍的时间内通过两电容器之间的距离 l 。在这个适当的速度下，在荧光板上可以看到一个不移动的斑点。观察时只需测量在荧光板上产生一个斑点时的加速场强，不必测量偏转。由(1.1)和关系式

$$\frac{l}{v} = n \frac{T}{2}, \quad T = \frac{1}{\nu}.$$

我們求到

$$\frac{e}{m} = \frac{v^2}{n^2 V}.$$

测量得出 $\frac{e}{m} = 5.27 \times 10^{17}$ 静电单位/克，由此得 $m = 9.1 \times 10^{-28}$ 克。知道电子质量就可以与原子质量比较而得出以下结论：电子仅仅是原子的一部分。因为，最轻的氢原子质量为

$$m_H = \frac{1}{6 \times 10^{23}} = 1.6 \times 10^{-25} \text{ 克}.$$

氢原子质量大于电子质量，且是电子质量的 1800 多倍。

門捷列夫在建立元素周期系时，曾以原子质量作为基本的性质。根据道尔顿的见解，认为同一种元素的原子质量相同。但是，放射性元素族的研究发现了有些元素具有不同质量的原子，有相同的化学性质，即处在周期表中相同位置的原子，称为同位素。我們要指出，由普劳特(Пройт 1815 年)的假设就已经得出同位素的存在。因此必须认为，原子量是具有不同质量而在化学上相同的原子的混合物的平均重量。这一假设仅在 20 世纪初才在新的基础上复活。在放射性元素族中发现了同位素，只有在提出根据原

子在磁场和电场中运动的偏离来测量原子质量的方法之后，对同位素的探求才算成功。1910年汤姆逊第一次用这方法测量了原子的质量。他所用的方法还很不完善。一般说来，完善的方法在设计思想方面是相当简单，然而要实现这方法在技术方面却很复杂。

现代质谱仪测量的质量，当然不是原子的，而是离子的，即阳极射线的质量。在设计思想方面最简单的仪器是这样的：一个阳极射线的源，一个速度过滤器和一个分析机构。速度过滤器是互相垂直的电场和磁场，电场和磁场对阳极射线的作用方向不同。磁力为

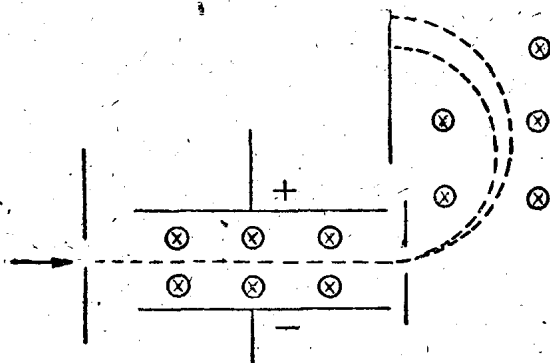


图 2

$$f_{\text{磁}} = evH,$$

而电力为

$$f_{\text{电}} = eE,$$

粒子速度不同，这两个力也不同。只有 $f_{\text{磁}} = f_{\text{电}}$ 的粒子才能通过速度过滤器(图2)，其余的都被挡住了。因此过滤器让速度为 $v = \frac{E}{H}$ 的粒子通过而与其质量多少无关。离子从过滤器出来后就进入均匀的磁场中，在这磁场中离子沿半径为

$$R = \frac{m}{e} \frac{v}{H},$$

的圆运动。半径依赖于质量的关系是线性的，这就大大简化了确

定质量的手續; 质量为

$$m = CR,$$

这里的 C 是仪器常量。可以由測量的結果得到以下的結論: 92 种元素共有达 300 种稳定的同位素; 全部的同位素, 包括放射性的、不稳定的同位素在內則更多(达 500 种); 大多数原子的原子质量都接近于整数(假如以氧的单位来測量); 化学的原子量是天然同位素的机械混合物的平均重量; 在門捷列夫周期表中, 原子序数为偶数的原子的同位素数較多, 如

Sn^{50} ——14 种, Sb^{51} ——4 种, Te^{52} ——11 种, I^{53} ——6 种,

Xe^{54} ——12 种, Cs^{55} ——3 种, Ba^{56} ——11 种等等;

輕元素的同位素的原子量之間的差別最大, 例如氫的同位素 H^1 , H^2 , H^3 的质量之間的差別非常大, 而同位素 U^{235} 和 U^{238} 的质量差別便不大; 因此分离氫元素的同位素就簡單得多。現在能够大量地获得重水 H_2^2O , 其量可以吨計。重氫在物理中起很大的作用, 很显然, 重水对一切生物來說具有重要意义, 虽然, 在自然界中遇到的是非常小量的重水和普通水的混合物。

§ 2. 原子的能級

原子可以分立地改变自己的态, 它們的能量不能取任意的值。这种从經典的观点来看不可理解的事实具有一系列实验的証明, 我們只談其中的两个: 原子光譜; 弗兰克和赫茲的实验。

原子光譜是最簡單的, 对于不同的原子來說, 有不少是彼此很相似的。研究原子光譜可以作出关于原子性质的重要結論。对于原子光譜來說, 綫状是它的特点。許多譜綫构成綫系, 每个綫系中譜綫与譜綫之間的距离, 随着波长的縮短而减小。氫具有最簡單的光譜。在它的可見部分中, 可以找到巴耳末系的譜綫, 这些譜綫的頻率由下式来决定:

$$\nu = R \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right),$$

式中 n 是大于 2 的任意整数。在巴耳末系中，已經可以观察到 40 条綫。当 n 的值很大时，綫与綫之間的距离减小，頻率趋近于 $\nu = \frac{R}{4}$ 。有趣的是：上述的公式是于 1885 年求得的，当时只知道巴耳末系的五条綫。从該公式精确地算出了以后发现的其他綫的頻率。其后，又发现了氢光譜綫的其他綫系，它們可以用下列一个公式来写出：

$$\nu = R \left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right), \quad (2.1)$$

m 和 n 都是整数，并且，

$$n > m.$$

当 m 的值不同时，得到了不同綫系的公式，当 $m=1$ 时为賴曼系， $n=3$ 为帕邢系， $n=4$ 为布喇开系， $n=5$ 为逢德系。发现了这些綫系以后，紧跟着建立了并合原理，該原理是說：将光譜綫系的公式或頻率相加或相减，可以得到新的光譜綫系的公式或頻率。如果把(2.1)式写成下列形式

$$\nu = T(m) - T(n),$$

式中

$$T(n) = \frac{R}{n^2},$$

則很容易看出：量值 $T(2)$ 和 $T(3)$ 等等，都包括在不同綫系的表示式中，它們的結合給出了各种頻率的綫。与实验很好的符合并且形式相当简单的公式(2.1)說明：这里并不是偶然的符合，应当存在有原子輻射的規律。如果采用輻射能量子 $h\nu$ 的表示式，則闡明这种規律是很简单的。把(2.1)式乘上普朗克常数得

$$h\nu = hT(m) - hT(n) = \mathcal{E}_m - \mathcal{E}_n. \quad (2.2)$$

因为氢原子輻射的那些頻率总是相同的，所以氢原子仅可以輻射一些完全一定的能量 $h\nu$ 。因此，原子的态是以完全一定的形式来

改变,而使得两个态的能量差等于放出的量子的能量。从另一方面看,这意味着:原子可以处在具有一定能量 $\mathcal{E}_n = \mathcal{E}_0 - hT(n)$ 的一些态中。负号的出现是由于:当辐射时,原子的能量减少,因而 $\mathcal{E}_n < \mathcal{E}_0$; $\mathcal{E}_0$ 为原子的最大能量,该能量的值目前还不知道,并且也不是重要的。

我们现在研究氢原子光谱,它的特性指出原子的能态及其中能量变化过程的分立性。从其他原子光谱的较复杂的规律,也可以得到同样的结论。经典物理是把光的辐射及其频率与原子的一个一定的态联系起来。而实验证实了:每一个放出的光子是与原子的两个不同的态相对应的,每一个态都具有固定的能量。根据这些结论,很容易解释并合原理的存在——即原子可以从任意初态过渡到任意终态,结果,出现了为这两个态的能量差所决定的频率。

经典物理不能解释原子有分立的态存在,但是,我们根据研究光谱所得到的理论,它的结论的正确性是可以实验直接证明的。弗兰克和赫兹的实验(图3)就证明了这一点。它的基本思想在于:向汞 Hg 的原子发射已知能量的电子,当碰撞时,电子可以给原子一部分能量,同时,激发了原子。当电子损失能量时,电子的速度减小,电流就减小。电流的减小意味着有电子与原子的非弹性碰撞存在。电流与加速势差的关系有如图4所示的形式。

仅从加速势差为 $V = 4.9$ 伏特开始,电子的能量才可能传给原子。当 $V = 9.8$ 伏特; 14.7 伏特等时为最大,其原因可以解释为:电子在到达阳极以前的道路上,发生了几次碰撞,几乎消耗了所有的能量。对实验方法稍作一些改变也可以确定其他激发态的能量。当 $V \geq 4.9$ 伏特时出现的汞原子激发态,可由充满仪器内的汞蒸汽的发光而看出。辐射出来的光量子的能量 $h\nu$ 确切地等于被场以 4.9 伏特所加速的电子的能量。

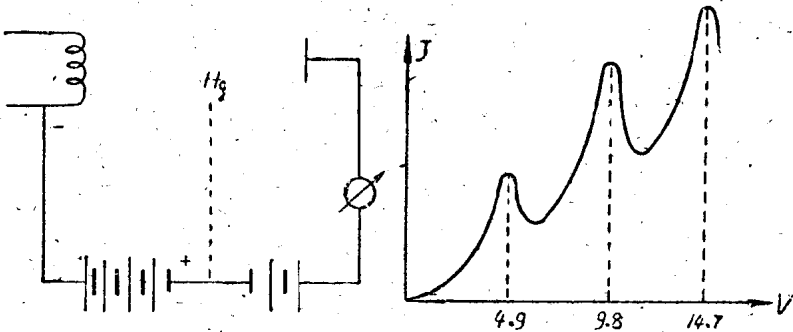


图 3

图 4

§ 3. 原子的行星模型和玻尔理論

目前，我們对原子的知識知道得不多，所知道的是：在原子中包括有带負电的电子，但是，整体來說，原子是中性的，因此，在原子中应当还有正电荷。原子中电子的数目应当等于基本正电荷的数目。然而，在不同的原子中，电子和正电荷的数目还是不知道的。除此之外，电荷在原子內部的分布也还是不知道的，也就是說，还不知道原子的結構。原子的态的分立性是已知的，但它的原因还不清楚。所有这些問題都已經几乎完全在經典概念的基础上得到了实验上和理論上的解决。1911年卢瑟福的著名实验闡明了原子的結構。

卢瑟福实验在于以放射性物品所发射的快速 α 粒子来“試探”原子。 α 粒子流指向被研究物质的薄片，而用閃爍法确定偏斜了不同角度的 α 粒子的数目。当时，根据 α 粒子在电磁場中偏斜的实验和析譜的研究，已經知道了 α 粒子的性质。卢瑟福的测量指出：絕大多數的 α 粒子通过被研究的箔时，其飞行方向仅遭到很小的偏斜。其中很小的一部分，大約 10^{-4} ，偏斜的角度大于 90° 。 α 粒子的偏斜是由它与原子的带电部分的相互作用所引起的。然而，

其质量约为 α 粒子的质量 $\frac{1}{7000}$ 的电子, 不可能对 α 粒子有影响。除此之外, 大部分几乎没有偏斜的、前进的 α 粒子则是下述的一个观念的证据: 这一观念即是在原子中存在有很大的空的空間, 而物质仅占有原子体积的一小部分。因为电子的质量很小, 所以原子的基本质量应当与占有体积非常小的正电荷有关。卢瑟福假设: 原子的结构类似于太阳系——原子的行星模型。必须谈到: 这种观念不是新的, 列宁于 1908 年在“唯物主义与經驗批判主义”一书中就曾写过原子如同行星系的话。

卢瑟福根据自己的假设, 很成功地发展了对于原子的 α 粒子散射的理论, 并且以实验证实了它。这一理论是从下列的假设出发: 正电荷 Ze 集中在处于原子中心的原子核里。原子核的质量几乎是原子的总质量(减去 Z 个电子的很小质量)。掠过核前进的 α 粒子带有电荷 $+2e$, 它与原子核按库仑定律相互作用。

两个相互作用的质点是对它们惯性中心运动的。为了不研究两个粒子的运动, 我们研究一个折合质量为

$$\mu = \frac{Mm}{M+m}$$

的粒子底相对运动, 上式中 M 和 m 分别为原子核的质量和 α 粒子的质量。解决求 α 粒子在核场中的轨道这一问题, 采用极坐标是较方便的。在原子核场中的速度 $\vec{v}$ 可分解为径向分量和横向分量, 即 $\vec{v} = \dot{r}\vec{e}_r + r\dot{\varphi}\vec{e}_\varphi$ 。因为没有任何的外力, 所以无论发生什么样的运动, 系统(即两个粒子, 核和 α 粒子)的动量矩和能量应当守恒(围绕核的电子, 由于电子的质量很小, 故不加以考虑):

$$M = \mu r^2 \dot{\varphi} = \text{const},$$

$$\frac{\mu}{2}(\dot{r}^2 + r^2\dot{\varphi}^2) + \frac{2Ze^2}{r} = \mathcal{E} = \text{const}.$$

我们认为:

$$r = r(\varphi),$$