

粒子、量子与波

〔苏〕Я.А.斯莫罗金斯基 著



· 科学出版社 ·

53.26
67

粒子、量子与波

[苏] Я. А. 斯莫罗金斯基 著

李 燊 译

黄高年 校



科学出版社

1983

1111195

DL 79/6/1

内 容 简 介

这本小册子向读者介绍了量子力学的现状和发展前景，著者用独到的形式叙述了量子概念发展道路上的重要阶段和认识量子概念时所遇到的困难。

本书可供专家、大专院校的教师、中学教师、大学生以及有中等文化程度的人阅读。

Я. А. Смородинский

ЧАСТИЦЫ, КВАНТЫ, ВОЛНЫ

粒子、量子与波

〔苏〕Я. А. 斯莫罗金斯基 著

李 焯 译

黄高年 校

科学出版社出版

北京朝阳门内大街137号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

1963年10月第 一 版 开本：787 × 1092 1/32

1963年10月第一次印刷 印张：2

印数：0091—7,500 字数：429,000

统一书号：13031·2398

本社书号：3276·13—3

定 价： 0.40元

7011111

致 读 者

这本小册子不是关于量子力学的系统叙述。要系统地叙述量子力学，这本书的篇幅是太小了（而写成一本厚书很难做到通俗）。如果可以谈模型的话（我们在这本小册子中要经常说到模型），那么这本小书就好比是在描写沿着城市的街道漫游。书中叙述各式各样问题的次序，大体上就像漫游时在路上遇到什么就谈什么，而没有按照历史规律或教科书章节的次序加以整理。各式各样问题的出现好像在一条美丽街道上矗立着的一幢幢房屋——它们可能属于不同的时代，但这并不妨碍它们协调地互相毗邻。著者在重游这条街道（它与著者记忆中的形象已经大不相同）时，感到非常愉快。读者也许会有同样愉快的感觉。如果没有这种愉快的感觉，则应当另找一个向导重游一次。量子力学是非常优美的，毫无疑问，这种美是每个人都能享受的。

显然，懂得中学的物理课程对阅读本书肯定会有所帮助，哪怕只是大体上了解光学中的衍射和干涉以及力学中的能量守恒和动量守恒，也是有益的。阅读本书时不要求读者具备高深的知识，只需要留心观察周围的事物。

目 录

致读者	i
引言	1
天体运动	2
在小距离内发生着什么	3
电子在原子内部为什么不辐射	5
关于量纲的概念	6
我们周围难以理解的事物	9
波与粒子	10
相干性	12
普朗克常数进入理论	15
如何捕捉量子	16
电子, 泡利原理	18
德布罗意波	19
电子衍射	21
声子	24
穆斯堡尔效应	25
粒子的散射	27
薛定谔方程	28
波函数	29
测不准原理	33
还有什么量子化的?	35
角动量矩投影的量子化	40
再谈角动量矩	41

谱线的宽度	42
光辐射定律	45
自发辐射和受激辐射	47
激光器	48
固体中的电子	49
超流动性	50
超导性	53
磁通量的量子化	54
约瑟夫逊效应	55
隐身术	56
自然界中的相似	57

引 言

自 1900 年 12 月 14 日有重要意义的那一天晚上，普朗克在他的报告中，第一次公开简明地叙述了量子假说以来，已快满 75 年了。这一天被认为是现代物理学的诞生之日。

尽管量子力学已有漫长的历史，但迄今它仍然保持着艰难学科的名声，与中学教科书中所讲述的物理学有很大差别。

当然，要学会运用量子力学的数学公式和方程式并不是一件轻而易举的事。例如，某一物理系统（譬如氧分子或诸如此类的系统）能级的计算就很难学会。

在其他一些学科中也同样会遇到这种困难。例如，现在人们大概不难理解行星的运动、牛顿定律和开普勒定律，但是，要计算行星实际轨道或卫星轨道却是非常复杂的，所需要的数学知识绝不比计算分子时所需要的少。然而，这并不妨碍我们去理解行星和卫星的运动规律。这就是说，问题完全不在于数学上的困难。也许，问题在于原子内部所发生的现象不能用肉眼看到——但现在人们已经习惯于考虑和理解其感觉范围以外的现象了。

原子的大小在这段不平凡的历史中毕竟还是起了重要的作用。当然，如果原子内部发生的现象与我们周围的事物相似的话，那么尺度的微小就不会是一种障碍。但是事实上，原子中及微观世界里的现象所遵循的规律，完全不同于物理学家在研究我们周围的宏观世界里的现象时所发现的规律。

这是什么意思呢？难道还有另外的规律？我们可以用天

文学作为一个很好的史例。

天 体 运 动

很早以前人们就已经发现，地面上的自由物体都进行直线运动——如石头向下降落，火焰向上升起。古代的人们曾经认为，所有其他形式的非直线运动均应有其原因。但是，天体沿着圆周运动，就好像拴在一个旋转着的球面上。天体的这种运动方式同地面上的经验是不一致的。从本质上讲，天体与地面上的物体极不相同，所以人们可以习惯地认为这些理想物体是沿理想轨道运动的，它们的运动受理想球面系统控制。不管怎样说，这种概念已牢固地在人们的脑海中扎了根，使得许多世纪以来，虽然很少有人认真对待开普勒的发现，也不令人奇怪。

然而，行星沿椭圆轨道的运动以及牛顿的万有引力定律，都已逐渐为人们所理解。现在令人奇怪的倒是，中学生们竟是如此容易地接受了关于大地是一个大球体以及行星沿椭圆运动的概念。

也许，量子力学的不通俗性只是时间问题。再经过一、二代人，波函数的概念也会变得像坐标和速度的概念那样简单吗？

有些人还幻想将来有朝一日，量子力学会这样变化：所有“不理解”的事物将消声匿迹，物理学又回到经典的状态。真的会有这样的事吗？这个问题很难回答。但是，到现在为止，科学发展的全部经验都表明，在科学史中从来没有发生过倒退。也可以想像，量子力学将来会愈来愈发展，愈来愈深入人们的生活。随着岁月的流逝，会有愈来愈多的人习惯它。而在科学发展中，“习惯”几乎总是会被人们所理解并接受。

然而，量子力学毕竟还是具有非常重要的特性，关于这种特性应该多少讲几句。

我们再回到宇宙的构造上来。古代的人们完全满足于这样的想像：地球由三条鲸鱼驼着而这些鲸鱼立在乌龟的背上，乌龟则漂浮在大洋中。大洋是怎么回事呢？当时并不理解，但谁也没有为它操心。海洋无垠的概念并不曾使人感到害怕。宇宙无限的概念现在对许多人来说已经十分自然。相反，关于空间弯曲以及宇宙有限模型的概念（无论是否由实验证实），却使人感到非常难以理解，甚至荒谬。

人们非常容易接受相似概念。自然界的现象只按大小变化似乎是很自然的。在古老的传说中，常常出现矮子和巨人，飞毛腿和贪吃的人。这些戏剧中的人物和正常人完全一样，只是在某些方面夸大（或缩小）了几倍。关于古里维尔历险记的故事并没有引起原则性的异议。相反，如果有人分辩说，人（人的全部线性尺寸）是不能简单地放大许多倍的，那么这种议论反而会被认为是离奇的。

如果违反相似性，就会出现新的规律。而这个事实是人们的思想所难以接受的。也许，量子力学概念的困难性也要同违反相似性相联系起来吗？不管怎样，就让我们从这里开始来讲述量子力学吧！

在小距离内发生着什么

十九世纪，希腊人关于自然界中一切物质都是由原子组成的这种古老思想又重新抬头。如果说在十八世纪人们以为组成物质的最小粒子是单子（没有赋予单子任何确定的特性），那么，到了十九世纪以后，原子假说已成为一种实用的假说，这种假说使得许多物理现象自然地得到了解释。

但是，这种假说本身也有缺陷。如果根据这种假说认为一切物质(缺少经验的观察者认为物质是连续媒质)事实上都是由原子组成的，那么就会产生这样的问题：原子是由什么组成的呢？

有人认为原子结构与太阳系类似，这种解释是非常简单和自然的。重而小的核位于中心，电子(好像太阳系中的行星)绕核旋转。像古人不谈论“海洋的边缘在哪里”这种问题一样，起初人们也没有询问关于“质子和电子内部有什么”这样的问题。

原子的行星系统模型符合相似原理，并且很容易纳入通常的概念范围。但是，这种模型中却包含着一个对于经典物理学的全部概念来说都是致命的缺点。从经典物理学的观点来看，绕核旋转的电子应当辐射电磁波，并且不断地损失能量，最后落到原子核上。

这时应当指出，我们不是按事件的历史顺序进行叙述的。原子的行星模型是1912年在卢瑟福实验室里诞生的，当时尼·玻尔在那里。尼·玻尔对这个模型研究了很多年，他愈来愈不满意开普勒式的经典模型。为了建立一种新的模型，他不得不引入一些新的假设。在年岁大一些的物理学家们看来，他的这些假设是荒谬的¹⁾；即使尼·玻尔自己也不能完全理解他自己所建立的理论。

直到1926年，才出现了海森伯的量子力学和与它等效的薛定谔的波动力学，从而使新的原子模型获得了坚实的基础。

我们将按照重大事件的逻辑次序(逻辑次序常与历史次序大不一样)来叙述这门科学的现状。

1) 但是，应当指出，与玻尔模型有关的概念不知道为什么并没有像相对论那样遇到强大的阻力。也许是量子力学走运：它没有马上引起人们的广泛注意，它在初期发展比较平稳。

电子在原子内部为什么不辐射

我们回到电子上来。氢原子中电子轨道的半径（它决定氢原子的大小）约为 10^{-8} 厘米。电子在这个轨道上的速度达到 10^8 厘米/秒。在这种运动中，向心加速度非常之大，按照电动力学的规律，电子的辐射应当非常强，因而原子实际上一刹那就应当消失。在关于行星运动的问题中完全没有发生这种事情。行星的加速度非常微小，这是由于重力互作用比电磁互作用微弱得多。因此，行星重力波的辐射弱到这种程度，以致在行星生存的整个时间内都可以忽略不计。所以经典的天体力学，尽管对重力波一无所知，但在计算行星轨道时并没有产生任何错误。

原子中的情况则完全不一样。要想使力学的要求和电动力学的要求在原子中并存，无论如何是不可能的¹⁾。也许应当指出，相对论正是在认清了力学与电动力学之间不能相互迁就的时候诞生的。

原子还具有一种经典力学中无法理解的特性。由对频谱的研究得知，原子内的电子不能以任意轨道旋转。例如，在氢原子中，轨道半径（更确切点说是到原子核的平均距离，或者说是椭圆长半轴的长度）相互之间的比值为整数的平方。最深的轨道，即最靠近原子核的轨道的尺寸为 0.5×10^{-8} 厘米 $= a_1$ 。其余各轨道的尺寸按公式 $a_n = n^2 a_1$ （其中 $n = 1, 2, 3, \dots$ ）计算。在行星系统中根本没有这种现象，虽然有时也有人提出过一些计算行星之间距离的公式（例如，约100年前

1) 根据电动力学的规律可以估算出，电子在每次旋转中消耗在辐射上的能量（在氢原子中）约是自己总能量的 $(1/137)^4$ 。 $\alpha = 1/137$ 这个数我们以后还要遇到。

博德提出的公式)，但这些公式都相当复杂，并且不很准确。无论如何，现在任何人已不再怀疑行星可以在任意距离上运动（人造卫星可以看作是这方面的实验证据），行星的分布也可能有规律，但这只能与行星系统的进化有关。

其他一切原子也都有类似的性质。可能存在的轨道形成所谓能谱（因为每一个轨道都可以用电子的能量来表征）。原子中电子的能量只能是能谱中的一个值。例如，氢原子中最低能级的能量等于 13.5 电子伏（即 $13.5 \times 1.6 \times 10^{-12} = 2.16 \times 10^{-11}$ 尔格）。这就是说，为了在正常情况下使氢原子电离，必须给它施加 13.5 伏的电位差。下一个能级的能量等于 $13.5 : 2^2 = 3.4$ 电子伏¹⁾。在这些能级之间电子不可能存在。

这样，原子向我们提出了两个问题：为什么当电子处于许可轨道上的时候不辐射？为什么存在一系列许可轨道？

关于量纲的概念

经典物理学未能回答这两个问题中的任何一个。不但如此，我们可以断定，经典物理学永远也不可能给出这些问题的答案。根据量纲的概念可以作出这个结论。

为了弄明白怎样才能作出如此果敢的论断，我们先假定有人已用一种巧妙的理论（但必须是经典的理论）成功地找到了氢原子处于基态时半径 a_1 的计算公式。这个公式中想必包含一个系数（例如，这个系数中可能包含 π ）以及表征氢原子特性的物理量，例如电子和质子的电荷 e 以及它们的质量 m 和 M 。不难看出，由这三个量不可能组成任何具有长度量纲的量。如果再加上电子的速度 v ，那么，就可以用 e^2/mv^2

1) 电子的能量与它到原子核的平均距离成反比。

表示长度。这时，表示半径的公式可以写成：

$$a_1 = Ae^2/mV^2$$

式中， A 是一常数。但是，这个公式给出的是电子的速度和它距原子核的平均距离之间的关系¹⁾。而 a_1 和 V 各自都可以取任意数值，所以这个公式不适用。如果不放弃经典力学，我们不可能得到另外的公式。如果离开经典力学，就可以采用其他的量，例如从相对论中借用（在提出原子模型前夕，相对论已经为人们所熟知）。在相对论中，基本常数光速 c 起作用。若在公式中用 c 代替 v ，我们将得到所需形式的公式

$$a_1 = A \frac{e^2}{mc^2},$$

但是，这个公式对我们并不适用。例如，若我们利用这个公式估算氢原子中电子的能量，在数量级上它等于 e^2/a_1 ，即约等于 mc^2 ，这是大得惊人的能量（约0.5兆电子伏）。

从普遍性的观点看，这个公式也不好。我们求解的问题不是相对论性的。电子的速度比光速小得多，所以用光速来确定氢原子的尺寸是荒唐的。一般说来，不应当马上就求助于相对论——相对论在以后将会对我们有用。

于是，我们只好转向由普朗克发现的作用量子了。普朗克的伟大公式

$$E = h\omega$$

使辐射频率与量子能量发生联系²⁾。普朗克常数($h = 1.057 \times 10^{-27}$ 尔格·秒)建立了自然界中的新标度——能量标度。这是第一次从纯理论概念出发创立新的基本常数（这个常数

1) 由这个公式可知， $mv^2 = A \frac{e^2}{a_1}$ ，即动能与位能成正比。这是一个正确的公式，由经典力学可以得到 $A = -1$ 。

2) 以前曾写为 $E = h\nu$ ，其中 ν 是角频率。因为在物理学中目前常使用回旋频率 $\omega = 2\pi\nu$ ，所以，为了保持普朗克公式的形式，就引入 $\hbar = h/2\pi$ 。

建立起经典力学中所没有的东西——现象的本征标度)。从此以后,物理学家们不再满足于相似原理——本征标度不同的现象应当遵从不同的规律。

很有意思的是,在创立普朗克常数的前夕,就已经知道了光速以及电子的荷质比(后者不很准确)这些基本常数,但是,还没有人理解这些常数与自然标度之间的关系。

普朗克常数马上提供了一种可能性来写出新的原子半径的表示式(舍弃常数 A)

$$a_1 = \frac{\hbar^2}{me^2}$$

或

$$a_1 = \frac{e^2}{mc^2} \left(\frac{\hbar c}{e^2} \right)^2$$

在上式中,我们引入了光速 c (虽然刚才已经说明,引入光速 c 是没有意义的)。当然,实际上 c 并不包含在这个公式中(c 可以约掉!)。如果注意到

$$\frac{\hbar c}{e^2} = 1/\alpha = 137.03,$$

就是前面提到过的那个常数(通常用它的倒数 α 表示)就可以明白,把光速 c 引入原子半径的公式是有益的。我们看到, a_1 大约是前面被舍弃的所谓“相对论半径”的 $137^2 = 2 \times 10^4$

倍。还应当指出 $\frac{e^2}{mc^2} = 2.8 \times 10^{-13}$ 厘米,由此得出 $a_1 = 0.5 \times 10^{-8}$ 厘米,这与我们预期的数值一致。

这样看来,普朗克常数不仅是能量的标度,而且在确定原子大小时,也是长度的标度。当然,这还不是由推导得出的结论。还必须证明,由某种理论也可以得出这样的结论。这件工作由量子力学完成了。

现在我们应该指出,新的基本常数也给世界的相似性增

添了一些限制.当现象参加者的尺寸变得只有原子那样大时,这些物理现象就不再与宏观世界的现象相类似.在我们日常的宏观实践中,我们从来没有感觉到普朗克常数——它对我们的感觉来说是太微小了.这正是量子力学使我们感到难以理解的原因所在.

相对论也曾使我们感到难以理解,这是因为很难想像光的传播也需要一些时间.只要习惯了这一点,则相对论中所有其他现象就都不难理解了.由此得出结论,应当习惯于普朗克常数!

我们周围难以理解的事物

不应当认为,只是在解释像原子结构这类问题时才需要量子力学.在我们周围发生的许多现象,都需要有量子力学的概念才能理解它们.现在我们甚至感到奇怪,为什么我们以前没有注意到经典力学对许多最简单的事物都解释不了这一事实呢?例如,在十九世纪初,人们曾认为物体是连续不断的.至于物体是如何构成的这个问题,完全没有引起人们的注意,就象古人从来不为海洋为什么是无边无际而操心一样.但是,在原子理论出现以后,对固体结构问题就再也不能不操心了.甚至一些很著名的物理学家也感觉到存在着分子这一事实本身引起了无法克服的矛盾,所以很久很久不敢承认分子的存在.

我们到处都遇到经典物理学所不能解释的现象:沿导体流动的电子;到处发生的化学反应;给地球提供能量的太阳,更不用说无线电接收机和电视机中许多装置的工作情况.为了解释所有这些现象都需要普朗克常数 h . 可以把一切物理公式分为两类:一类公式(经典公式)中不包含 h , 另一类公式(量子学公式)中包含 h . 包含 h 的公式表明,这种现象不能用经典理论描述,公式中不存在 h 时则表明,量子效应在

这种场合很微弱，经典物理学可以单独正确地描述该现象¹⁾。

波 与 粒 子

我们已经说过，十九世纪初的自然科学家们曾认为液体和固体都是连续媒质。在原子理论出现以后，需要创立新的学科——统计物理学(或者像当时所说的物质的动力学理论)，以便至少在原则上使连续媒质的运动与原子的运动联系起来。就在这时候产生了一种猜想，即一切自然现象归根结底都是物质粒子——原子的运动。但是，这种理论似乎无论如何也不适用于光学现象。光学的发展史是很奇特的：牛顿认为，光是一种粒子流。这种假说曾解释了光通过光学仪器时的现象。在发现衍射和干涉现象以前，粒子说曾被认为是一种完好的理论²⁾。但是衍射和干涉现象表明，光不是粒子而是波。在十九世纪初期，菲涅耳建立了光的理论，他认为光是某种弹性媒质——以太的振动。菲涅耳的理论也可以很好地解释光通过透镜和棱镜时的一切现象。于是出现了非常奇怪的事实：同一个物理现象用两种似乎完全不相容的理论都可以解释。从那时起很长一段时间，物理学家们必须在光的波动说和粒子说之间选择一种。

很长时间以来，波和粒子这两种概念不仅不相容，而且甚至是对立的。常常把它们比喻成逻辑对“或—或”。但谁也没有想到，在二十世纪，两种理论竟会魔术般地融合在一起。

如果稍微仔细地观察一下波和粒子的特性，就可以从波(或粒子)中看出粒子(或波)的特性的萌芽。

1) 为了简单起见，我们把相对论列入经典物理学的范畴。相对论效应可以从公式中的光速符号 c 看出。

2) 牛顿的理论不能解释颜色，但人们对这一点没有给予注意。利用力学来解释颜色曾是非常诱人的，这使人们很容易忽略牛顿理论中的不协调性。

光波在每一点（在均匀媒质中）都是直线传播的。从探照灯射出的光线和水龙带嘴子射出来的水（当它不弯曲和不散开的时候）非常相似。在初等教科书中讲过，光的折射现象既可用波动说来描述，也可用粒子说来描述。只是应当假定，波在媒质中以比真空中的光速小的速度 c/n （ n 是折射系数）传播，而粒子则以比真空中的光速 c 更大的速度 nc 飞行。

另一方面，波也能在由粒子组成的气体中传播，只是这些波是由许许多多粒子组成的。不过，气体中的波并不是气体本身。当波在水面传播时，沿途各处的波都是由该处的粒子形成的——波传播速度和压力，而水的粒子却几乎不移动位置。沿金属弦线传播的波本身并不携带金属：弦的每一小段都振动，但并不发生沿弦的位移。所以，也必须为光的传播想象出一种特殊的媒质——以太。但是，一百年以来，谁也不知道以太是由什么组成的，是如何组成的。

最后，不得不抛弃关于以太的概念（至少是它的初始形态）。现在大家都知道（或者说大家都习惯了）光波是自己存在的，不需要什么媒质（与海洋中的波不一样）。就像在电学理论（电动力学）中的电磁场是自己存在而不需要任何媒质一样。

这是一件非常重要的事实，是现代理论的基石之一。虽然麦克斯韦也考虑过以太，但是他考虑以太只是出于习惯（或者说只是为了“自我安慰”）；在麦克斯韦方程中，任何地方也没有出现以太。甚至在考虑以太的性质时，还曾尽力使以太的性质不致影响理论结果¹⁾。

1) 说到这里使我不得不想起 J·凯罗的一则笑话（不知道是谁把它译成俄文的，我只是从 A. B. 米格达那里听来的）：

我打定了这样的主意，
把胡须染成各种颜色，
再用大扇子把它遮掩，
为的是使人们不注意。