



德布罗意波

提出的前前后后

吴以义

1913年夏天,丹麦物理学家玻尔(Niels Bohr)发表了他关于原子模型的工作。在这一工作中,他引进了一种他称之为“定态”的概念。玻尔认为,电子绕原子核的运行轨道,并不是只要在力学上有可能就行了。除了力学的要求外,真实轨道还必须满足某些附加的要求,玻尔后来称之为量子条件。按玻尔的说法,电子是在一系列以核为圆心的同心圆轨道上运行的,这些同心圆轨道,可以用整数 $\tau = 1, 2, 3, \dots$ 来标记。

增加了与定态概念相联系的“量子条件”以后,汇同另外两条假定,玻尔成功地建立了氢原子模型,理论与实验的相对误差,不到6%,这是一个巨大的成功。

两个月以后,实验的进一步验证沓纷而至。第二年,直接验证定态存在的弗兰克-赫兹实验完成,玻尔模型从而完全确立。

于是工作进一步向两个方向发展。一是对玻尔模型作更精细的修正,索末菲(Sommerfeld)是这方面的代表;另一是对基础假定以进一步探求,其中最突出的,即是玻尔强加给自然的“量子条件”,这在经典物理看来太不可理解了,有人转向这一问题,希冀由此获得重大的突破。但是,很不幸,这一方向上的研究大多都以毫无结果而宣告失败,而可以提出来的结果,却是在与这一方向的研究毫无关系的另一些问题上产生出来的。

一、布里渊和他对原子模型的研究。 德布罗意的直接出发点。

法国物理学家布里渊(M. Brillouin)在法国物理学界是一位德高望重的老前辈。他开始研究玻尔模型时,产生了颇为奇怪的想法。他认为,既然弗兰克-赫兹实验已经证实了原子定态的存在,这种关于电子在原子中处于一种量子化的,即不连续的、特定的轨道上的说法,必须作为一个事实来接受。物理学家不过是为这种玻尔强加给自然的、奇奇怪怪地用整数标记的“定态”概念,找一个物理上的图景,或者说,找一个解释性的根据。

布里渊认为,玻尔模型中一系列整数标记的引进最引人注目,也最不自然,因此,由此下手该是合适的。

从经典力学的考虑出发,布里渊认为,整数只出现在与静驻波动有关的问题之中。因此,把定态注释为一种与干涉相关的驻波该是可取的。

但是在玻尔的理论中,有的只是原子核、电子,并没有可以形成波动的连续介质。是什么在波动呢?这就是问题。布里渊所能想象的

只有以太。他于是假定在原子核近傍有一层以太层,电子在其中运动。电子运动所引起的以太波在这层以太中相互干涉,相互消长,最后,如果电子运动是稳定的话,这种波必然以驻波形式静驻下来。在电子的玻尔轨道上,首尾相接地排列起来,玻尔用来标记定态的整数,正是这种排列在轨道圆周上的波的数目。因为干涉的缘故,这种波是静驻的,也就是说,波的数目只可能取整数。

布里渊所构造的图景,从经典力学的要求看来,是十分诱人的。可是进一步的计算显示出难以克服的困难。从1919年到1922年,布里渊在这个方向上努力了三年,可是最后仍未能建立起首尾一致的、有预言能力的理论。1922年,他在最后一篇关于原子模型的文章中说,在这方面他进行了两项主要的努力,但都未获成功,很可能要由“一位年轻的、敢想敢干的研究者”开创出第三条道路并在此道路上获取成功。

为了进一步探索,布里渊把自己关于原子模型的工作寄给了法国物理学家德布罗意,后者对这一问题表现了很大的兴趣,并且认为,“为了标志定态而诉诸整数的做法似乎指明了研究的方向。整数,事实上只有在必须诉诸波动的那些物理学分支,如弹性力学、声学 and 光学中出现。”

德布罗意在以后的研究工作中,多次提及布里渊的工作。1927年10月在第5次索尔维物理学讨论会上,德布罗意应邀作关于波动力学的报告。在报告中,他称布里渊是“波动力学的真正先驱”,对他表示了崇高的敬意。

但是,问题是,什么在波动呢?布里渊所假定的是一以太层,电子运行其间,从而引起以太层中的波动,或者说这是一种介质波。

二、光的波粒二象性:德布罗意假说的渊源

德布罗意仔细考察了布里渊的工作,发现困难在于引进介质波。而如果抛弃介质波的概念,又会怎么样呢?

在德布罗意考察这些问题的时候,美国人康普顿(H. A. Compton)宣布,他在研究物质和辐射相互作用

用的时候,发现了某种非常有趣的效应。康普顿发现,一定波长的辐射在物体表面反射以后,波长会稍稍变长。通过深入地探讨,康普顿认为,这是由于辐射的粒子与物质粒子相互作用以后,能量损失的表现。利用粒子图景解释辐射,这是物理学中闻所未闻的。而且,粒子的能量损失,确实确实地是用波长变长来标志的。物理学于是面临这样一种令人困惑的局面,它被迫谈论一列波和粒子的碰撞,或者一个粒子的波长。

康普顿的研究几乎直接提示了波粒二象性,这种奇特的概念,最初是由爱因斯坦提出来的。

在本世纪最初几年中,爱因斯坦的工作很多都是从整个物理理论的结构出发考虑的。这是一种高屋建瓴的思维方式。1905年,爱因斯坦从普朗克关于能量量子化的工作中发现了理论上的不自洽性:普朗克同时应用了能量的连续和不连续两个假说。爱因斯坦注意到,关于连续的辐射和场的概念以及关于微粒结构的原子论概念,一直是物理学中两大分庭抗礼的理论支柱或基本出发点。对此的研究使得爱因斯坦在1908—09年间,提出了关于光是由波和粒子两个部分构成的观念。爱因斯坦设想,光的构成大略同于点电荷和静电场。这种“双重结构”的物理图景,几乎与德布罗意1923—24年间所想象的一样。

爱因斯坦援引了光电效应作为他的实验基础,并通过统计学对能量的涨落进行了计算,结果非常有趣:一项是关于波动的,另一项则不能用任何波动理论来解释,而涨落就由这么两项构成。爱因斯坦据此发挥了他的二象性理论,但是这个理论似乎未能引起很多人的注意。

然而,康普顿实验重新提出了这一问题。粒子呢还是波呢?看来物理学必须面对这个问题。在德布罗意最初考虑这一问题时,他也是这样提出问题的。爱因斯坦关于光的二象性的理论,对于德布罗意的假说说来,构成了一种背景,一种渊源。德布罗意并未直接援引爱因斯坦的工作,但是,考虑问题的方式,他所构想的图景,与爱因斯坦的工作,表现了明显的联系。德布罗意后来甚至说,他的工作只不过是对爱因斯坦的光二象性的一种“推广”。正是在这个意义上,爱因斯坦被称作为波动力学的“教父”。

三、德布罗意的早年科学工作。光的波粒二象性对他的影响

路易斯·维克多·德布罗意(Louis-Victor de Broglie),1892年8月15日生于法国塞纳河畔的蒂厄浦,他的家族以功勋著称于法国史。在1963年莫雷斯·德布罗意去世之前,路易斯用的就是这一贵族称号。

莫雷斯·德布罗意是路易斯的兄长,先服役于法国海军,研究舰-舰间的无线电通讯,后在朗之万(P. Langevin)的指导下,研究气体中带电的悬浮微粒,并

以此获得学位,1911年以工作人员身份考加了第一届索尔维物理学讨论会,会上结识了英国的W. H. 布拉格(Bragg),后者关于辐射的微粒本质的见解极大地影响了他。

与此同时,德国关于X-光的研究取得了长足的进展。劳厄(von Laue)发现了X-光在晶体中的干涉现象,无可辩驳地提示了X-光的波动性质。德布罗意后来回忆说,“X-光时而象波,时而象粒子的奇怪性质,给我以很深的印象,……(关于这种现象的)讨论,常使我陷入深深的沉思。”

德布罗意初攻历史,但他的兴趣始终在物理学方面。1921—22年间,他从事黑体辐射定律的理论基础研究,引向了关于辐射本质的讨论。将近十年关于波-粒关系的思考,以及正在进行的关于黑体辐射的工作,使得他对爱因斯坦的光二象性理论有一种特别深入的认识;而布里渊关于玻尔模型的工作,康普顿关于辐射的工作,都成为最终把德布罗意引向波动理论的直接原因。

四、德布罗意的波动假说以及提出过程的回顾

1923年9月10日,德布罗意论述他的波动观念的文章第一次出现在法国科学院会议通报上,标题是《波和粒子》。这篇文章不长,当时也没有能赢得很大的注意。

德布罗意的推理是从量子论公式 $E = h\nu$ 和相对论公式 $E = m_0c^2$ 开始的。既然同是一个容体的能量,德布罗意认为,应该是相等的,换言之应有 $h\nu = E = m_0c^2$,这儿 m_0 是“动点”的静质量。

$h\nu = m_0c^2$ 是令人耳目一新的,相对论和量子论竟然可以通过这么简单的方式联接起来。但是“动点”的物理意义,作者保持一种“有意的含糊”态度,回避说明这究竟是一个粒子呢还是一个波的峰。事实上,这一物理图景的问题,始终是最令人困惑的。

对 $m_0c^2 = h\nu$ 的进一步分析集中在频率 ν 上,德布罗意认为,在一个粒子理论里用频率定义粒子的能量,无论如何是不能令人满意的。但是,他并不认为应当力图在定义式中消除频率的表示,相反,他认为应当在理论图景中加入此种频率所对应的物理现象。他于是假定,对于任何动点,都有一个“内在的、简单的、周期性的现象,而频率正是这一现象的表征。”

德布罗意进一步用相对论考察了这一频率在不同的参照系中的表现。他发现有两种绝不相同的变化可能发生,一种对应于此频率的上升,一种对应于此频率的下降。德布罗意后来说,考察这种频率间的相对论性的变化,研究它们的差别,就决定了他以后的研究方向。

他又考察了时间间隔 $\Delta t = t - t_0$ 以后的时刻 t 时的情形。他发现先前赋予动点的波动现象也有两种不同的表现,而且,这两种不同的表现之间的联系与他

最初研究的一种上升，一种下降的频率之间的联系是一致的。这种一致性，德布罗意称之为“相的一致性”，使得他认为最初假定的波动现象是“真实的”。

他于是得出如下的结论：

“依其总能量与频率 ν 的辐射等价的光的原子是一种内在的、周期性现象的中心。”这就是物理学史上常被人提起的德布罗意关于物质具有波动本性的假设的第一次提出。

在这篇文章的后半部，德布罗意回到了他的出发点，即利用这种波动图景对于玻尔的工作作了一系列的重新解释，为玻尔模型提出了一种物理图景。二个星期后，9月24日，第二篇论述同一专题的文章以《光量子，干涉和衍射》刊登在法国科学院会议通报上；10月8日，又有一篇新的文章发表，这三篇文章，构成了德布罗意关于物质具有波动本质的假说的核心，以后诸多工作，是在这个基础上进一步发展的。

五、德布罗意假说的奇怪的历史遭过及其进一步发展

但是，这一组法文的短论文并没有被人注意到。只是到了朗之万方向爱因斯坦推荐，爱因斯坦进而给予肯定以后，科学界才知道有这么一个假说。爱因斯坦说，看看这个！似乎疯狂，但真正站得住脚呢！爱因斯坦把这一假说介绍给了薛定谔（E. Schrödinger）和玻恩（M. Born），这两位物理学家在两个不同的方面推进了这一假说，并因此分别获得了诺贝尔奖金。

薛定谔最初的反应是“垃圾”，并把论文退了回去。由于朗之万、爱因斯坦的极力推荐，才重新研究这一课题。他认为，德布罗意既然假定了波的存在，就必须进一步处理波的运动，这就需要—个方程。利用密封壳体里的经典波动的类比，薛定谔得出了一个满足德布罗意要求的方程，这就是大名鼎鼎的薛定谔方程。我们知道，在量子力学中，这一方程一直以能量的本征值方程而显得特别重要。

薛定谔还认为，只肯定波的存在还不够，还必须回答“波是什么”这么一个根本的问题。他认为，波就是波，就是真实的、实在的、在三维物理空间中展开的波。正是薛定谔，而不是德布罗意，第一次在科学文献中使用了“物质波”这一术语，而这个词，德布罗意一直到现在都是避免使用的。在德布罗意看来，这波多少是“假想的”或“虚构的”，所以他宁可用“相波”这一术语来指称他这么多年来一直不断地谈论的那个波。

玻恩从另一个角度，得出了对波概念的完全不同的解释。他在关于散射的研究中，通过和经典散射公式的比较，发现描写德布罗意波的那个函数常常是处于和经典理论中的散射截面相同的地位。而散射截面，如所周知，带有明显的统计意义。玻恩于是把德布罗意波注释为一种几率的分布，或者就叫做几率波。这一注释立即引起了几乎所有“老一辈”物理学家的反

对，但经过近三十年的考验，最终还是被最大多数的物理学家所接受。

在波动假说的进一步发展上，出现了戏剧性的转折。那些不相信波动的人，如薛定谔，后来成了比德布罗意更彻底的波动论者；而开始并不太反对的人，如玻恩，后来却拿了另一套注释来代换了德布罗意的原意。而德布罗意本人，在按原来思路推进屡遭挫折以后，宣布放弃了努力而接受玻恩的学说。

六、实验验证，诺贝尔奖

然而现在，让我们仍回到德布罗意的最初考察。1924年11月29日，德布罗意进行物理学博士学位论文答辩，论文的题目是《量子理论的研究》，这篇论文的主要思想用了他的1923年的那三篇“科学院会议通报”论文。文章的独创性，逻辑上的自洽性和作者综观全局的能力给了考试委员会很好的印象，但是要他们相信真的存在一种“波”似乎是困难的。考试委员会的主任委员贝兰（J. Perrin）问道：关于这波的实验验证可能性如何呢？德布罗意当即回答说：在电子通过一个口径相当小的孔时可能会出现衍射现象，这正是我们期待的实验证明的方向。

其实，德布罗意当时不知道，他的理论所期待的实验验证早已在大西洋彼岸完成，美国西部电气公司戴维逊（C. J. Davisson）正对着他在镍单晶上电子的反射流所显示的奇怪分布而困惑不解呢！把他所遇见的不可解释的分布曲线寄给了玻恩，玻恩几乎立即领悟出，这是对德布罗意理论的证实。

稍后，另一名英国物理学家汤姆逊（G. P. Thomson），利用电子的衍射再次验证了德布罗意所预言的现象。至此，德布罗意波的存在似已无疑义，而戴维逊和汤姆逊亦因此而获得了诺贝尔奖。

物质具有波动本性，这件事实在不好理解。1929年12月11日在德布罗意被授予诺贝尔奖的仪式上，诺贝尔物理奖委员会主席奥西恩（Oseen）想起了一位瑞典诗人的诗句，“我生是一波”，他接着说，要是诗人说“我是一波”，那就道出了“人类迄今为止对物质本性的最深刻的认识。”

但是，无论如何，在物理上把电子确定为一种波要比在诗歌中把人生咏叹为一种波要复杂得多，这方面的探索一直贯穿着以后将近五十年的物理学的发展。从布里渊的介质波到德布罗意的相波，到薛定谔的物质波，到玻恩的几率波，波的概念不断地在发展，在变化。这种概念的发展，反映了人类认识原子客体的重大进步，而德布罗意关于波的假说，则是这一重大进步的第一步。科学的本质是探索的，而这种探索过程中的无数个第一步，都集中地表现了对真理的永恒的追求和执着的向往。