

## 物质波理论的奠基者——L. V. 德布罗意

阎康年

(中国科学院自然科学史研究所)

今年8月15日是法国著名理论物理学家,物质波理论的创立者L. V. 德布罗意(Louis Victor de Broglie, 1892—)九十岁生日。本文概要介绍他的科学生涯和对现代物理学发展做出的贡献。

L. V. 德布罗意发展了爱因斯坦于1905年提出的光的波粒二象性概念,创造性地构思了物质波概念,成为波动力学的主要奠基人之一。他在从玻尔的原子理论转变到量子力学的过程中,起了关键性的作用。1929年他因“发现电子的波动性”而获诺贝尔物理学奖。他曾长期从事理论物理的教学和研究工作,对理论物理的后来发展和为其培养人才均做出一定的贡献。

L. V. 德布罗意于1892年8月15日生于法国下塞纳的迪埃普(Dieppe),他的祖先曾取得公爵爵位。祖父J. V. A. 德布罗意(1821—1901)是法国著名评论家、公共活动家和历史学家。父亲A. C. L. V. 德布罗意曾于1871年任法国驻英国大使,1873—1874任法国首相。他的哥哥M. 德布罗意(Maurice de Broglie, 1875—1960)按法国贵族世袭制度的规定,继承乃父的公爵爵位。M. 德布罗意是一位著名的X射线物理学家,曾任第二、三次索尔维(Solvay)国际物理会议的科学秘书,在1960年去世后,由L. V. 德布罗意承袭公爵称号。所以,他在1892—1960年间为“王子”(prince),在1960年后成为公爵。

L. V. 德布罗意的青少年时代在巴黎的索邦<sup>1)</sup>(Sorbonne)学习,曾在索邦即巴黎大学的文学院学习中世纪史,1910年得文学学士,后任该学院讲师。在学习期间受到他的哥哥研究X射线和彭加勒(H. Poincare, 1854—1912)著作的

深刻影响,转学自然科学,于1913年得科学学士学位。第一次世界大战期间,在军队服役六年。后来,集中研究物理并在他哥哥的实验室参加实验研究工作。1922—1924年间,逐渐形成他的物质波理论。1924年在巴黎大学考取科学博士学位,1928年任索邦的理论物理教授。1932—1962年间,任彭加勒学院的理论物理学教授。

L. V. 德布罗意是在近、现代科学交替和现代物理学发生深刻革命的时刻开始他的物理生涯的。1900年和1905年普朗克和爱因斯坦先后提出量子论和光量子说。1911—1913年形成卢瑟福-玻尔原子模型,这对解释原子现象来说是理论上的重大突破,并取得实验上的确认。但玻尔的电子定态轨道和跃迁概念,只是一种人为的假定,虽然索末菲(A. Sommerfeld, 1868—1951)予以发展,用椭圆电子轨道取代玻尔的圆轨道和用“分级能量理论”说明斯塔克效应,玻尔本人又于1918年提出了对应原理,在理论上有所进展,但仍难于计算非类氢元素(氢、氢离子以外的元素)原子的量子轨道和能级,特别是能级跃迁的辐射强度问题。L. V. 德布罗意正是在这时候做出关键性的贡献。

作为一个中世纪史学家,L. V. 德布罗意在学生时代阅读了彭加勒的著作《科学的生涯》和《科学与假设》等,对物理学和科学哲学产生浓厚兴趣,这对他走上科学道路起了重要作用。在听到朗之万做相对论讲演时,朗之万用相对论

1) 索邦是巴黎大学所在地,过去曾为神学院,后来这里分布着巴黎大学的很多学院。法国学术界一般把索邦作为巴黎大学的代名词。

观点分析时间概念(朗之万是第一个详细处理“时钟悖论”的人)中,给 L. V. 德布罗意以深刻的启示。

他曾写道:“时钟频率的相对变化及波的频率的这个差异是基本的,大大吸引了我的注意,而且这个差异决定了我的整个研究方向”<sup>[1]</sup>。L. V. 德布罗意得到他的哥哥 M. 德布罗意的帮助及其实验室环境的熏陶, M. 德布罗意于 1904 年开始研究物理,并在巴黎建立自己的私人实验室,许多物理学家与他合作,主要进行 X 射线物理的实验研究,使 L. V. 德布罗意有机会接触这些实验和与物理学家们讨论并交流自己的看法。他在自传中写道:“我的哥哥把 X 射线看作波和粒子的组合,但他不是一个理论物理学家。在这个课题上,他没有清楚的概念”。又说“我曾长期同我的哥哥讨论他的光电效应和美丽的粒子光谱实验的解释。…同他进行有关 X 射线性质的长时间讨论,…使我产生将波的方面和粒子方面结合起来的想法”<sup>[2]</sup>。M. 德布罗意在 1913 年 10 月和 1921 年 4 月在布鲁塞尔举行的第二和第三次索尔维国际物理会议上任科学秘书时,曾将劳厄在两次会议上和 W. 布喇格在第二次会议上分别做的 X 射线晶体衍射和反射强度的专题报告,及卢瑟福在第三次会议上报告他的《原子结构》时提到莫斯莱的元素 X 光谱实验的文件,带回家整理,使 L. V. 德布罗意详细了解到会议的文件和讨论情况。对 X 射线的波动性和粒子性等问题以及当时的研究动向,有了深入的认识。此外,他把哈密顿将光学和力学类比建立起来的数学光学,看作自己的物质波思想的指导,并把法兰西学院教授布里渊(M. Brillouin)看作波动力学的“真正先驱者”。后者在 1919—1922 年间曾连续发表三篇论文:《关于传统的不连续传播的力学作用》、《传统的不连续作用和光谱线》及《一个年轻的大胆探索者的第三个最不同的结果》。L. V. 德布罗意得到他的复印本,认真学习,对形成自己的物质波概念和波动力学思想有明显的启发和推动作用。

L. V. 德布罗意受到上述各方面的启发,吸  
物理

取其有益的营养,着手用光量子假设处理黑体辐射问题。1922 年他在一篇关于黑体辐射的文章中,用光量子和热分子运动理论推导出维恩定律,又在光子气的假设下推导出普朗克定律,这些实际上是玻色统计的先驱性工作。此外,他又试图将光量子概念与干涉和衍射现象协调起来,以说明杨(T. Young)氏的光波动实验。认为这“对于一切干涉和衍射现象具有普遍性”。继而将这些结论推广到电子上,认为“通过小孔的电子流也将呈现衍射现象”。设想电子有衍射现象,就是预言电子具有波的性质,这对后来量子力学的产生有着重要的意义。关于“物质波”一词的来源, L. V. 德布罗意曾向雅摩(M. Jammer)说过:“他在一次会议上注意到一个现象,火光的以太幽灵来自点燃一枝香烟的引火器,正是引火器产生了光”<sup>[3]</sup>。因此,他将光波和物质联系起来,产生了这个名词。在他建立物质波理论时,约在 1923 年末采用了相波(phase wave)一词,这是斯托克斯(G. G. Stokes, 1819—1903)在 1849 年发表的一本关于流体力学的书中首先提出来的,其含义是导引能量的转移,所以后来又发展为导引波或领波(pilot wave)。他认为粒子在运行轨道的每一点上,都有相波在导引,并进而推广到曲线运动和力场的变速情况。在方法上, L. V. 德布罗意提出新动力学与旧动力学的关系应该是波动光学和几何光学的关系,因此,他把哈密顿处理经典力学与几何光学时所用的数学式类比法用于新动力学和波动理论的数学关系上。在 1923 年 9—10 月间不到一个月时间内,在这些设想基础上,写了三篇短文,发表在法国科学院的会议周报(Comptes Rendus)上,阐述他对粒子具有波粒二象性的思想<sup>[4]</sup>。9 月 10 日在《波和量子》一文中,提出“任何动体伴随以波,而且不可能将物体的运动和波的传播分开”。并把波粒二象性用于电子轨道运动,从玻尔和索末菲量子条件出发,得出电子轨道恰好是波长的整数倍,实际上提出相波的概念。9 月 24 日,在《光量子、衍射和干涉》一文中,提出“一束电子穿过小孔,可能产生衍射现象,这会成为在实验上验

证我们想法的方向”。在10月8日发表了《量子气体的运动理论和费玛原理》，从方法论上探讨费玛原理与建立波动力学的关系。这三篇文章可以看作波动力学奠基工作的真正开始。他在1924年在英国《哲学杂志》上发表《光量子的推测性理论》(Atentative Theory of Light Quanta)实际上是这三篇文章的综合。

1924年11月29日，L.V.德布罗意向巴黎大学的科学学院提交博士论文《量子理论的研究》(Recherches sur la Theorie des Quanta)，并进行答辩。考试委员会主席是佩兰(J.B.Perrin)，成员有朗之万等。论文的序言详细介绍了光学的历史及粒子说与波动说的论战经过，内容分七部分：相波、莫佩提(Maupertuis)和费玛原理、定态量子条件、二带电中心同时运动的量子化、光量子、X射线和 $\gamma$ 射线的散射及统计力学与量子。其基本思想是认为自然界由物质和辐射组成，它们分别由微粒(原子和电子)及以太波构成，后者则遵循麦克斯韦的电磁场方程。但对辐射来说，普朗克用量子论将粒子说和波动说予以综合。L.V.德布罗意认为辐射的这种二象性对解释已发现的事实既有成效，是否也能用于物质及其微粒呢？他从费玛和莫佩提对经典力学和光学现象的数学处理方法上，发现了用形式类比法的重要性。于是，得出粒子在运动过程中伴随着相波的假设，其波长等于普朗克常数与动量之比。由此假设出发，他建立了可以避免玻尔量子理论的上述缺点的理论。L.V.德布罗意认为卢瑟福-玻尔原子模型中的电子定态轨道，应当用物质波观点做如下的解释：这些轨道的长度中包含着整数个相波，换句话说，他用电子以整数波运动取代玻尔的电子定态轨道，而玻尔理论无法解释的不存在电子非定态轨道的原因问题，他却以波无法首尾相接做出合理的说明<sup>[9]</sup>。这样，L.V.德布罗意抛弃了“定态电子轨道”的说法，进行了观念上的变革。C.P.达尔文曾说这是“在科学史上一个真正重要的事件”。考试委员会虽然高度评价了他的创造性工作，但却对他的物质波的真实性的存在疑虑。当佩兰问道：“这些波

怎样用实验来证实呢？”L.V.德布罗意回答说：“用结晶对电子的衍射实验是可以做到的”<sup>[6]</sup>。这是他早已考虑过的实验方案，并曾向他哥哥的同事道维耶(Dauvillier)提出做这个实验，后者因忙于电视实验而搁置下来。道维耶后来在L.V.德布罗意六十岁生日的纪念册中写道：“为证明电子的这些性质的第一批实验是否定的，在这种实验中所用的阴极射线(电子束)太软，在高度真空中云母晶体把寄生电荷吸引了”，又说：“M.德布罗意、朗之万和佩兰都不争取在他们的实验中做这种实验，没有人相信它”<sup>[7]</sup>。

1924年4月，在第四次索尔维国际物理会议上，朗之万谈到L.V.德布罗意的工作，引起爱因斯坦的注意，并在12月向德布罗意索取论文复印本，还在给朗之万的信中指出，这是“揭开了巨大面罩的一角”。次年1月，爱因斯坦在柏林科学院的会议周报上发表论文，其中写道：“我将很仔细地探讨这个解释，因为我相信它包含了比类推更多的东西”<sup>[8]</sup>。他在3月发表爱因斯坦-玻色统计的论文时，指出L.V.德布罗意在“非常值得注意的文章中”，把一个粒子归结为一个波场，并认为他的工作不仅是爱因斯坦关于光的波粒二象性的简单类比，而且包含了玻尔和索末菲量子规则的非常卓越的几何解释。可见，爱因斯坦立即认识到L.V.德布罗意工作的重大意义，并对玻恩说：“您一定要读它，虽然看起来有点荒唐，但很可能是有道理的”<sup>[9]</sup>，玻恩在1925年7月15日给爱因斯坦的信中写道：“随后我读了路易·德布罗意的论文，并逐渐明白他们搞的是什么名堂。我现在相信，物质波理论可能是非常重要的”。他在1965年对此信加注说：“在爱因斯坦怂恿下，我们研究了德布罗意理论”<sup>[10]</sup>。L.V.德布罗意的工作既然引起象爱因斯坦、朗之万和玻恩这些大科学家的关注，也就必然在青年一代科学家之中产生深刻的影响。其中在苏黎世大学任教的奥地利物理学家薛定谔就是在爱因斯坦的影响下，于1925年11月初着手研究L.V.德布罗意的论文。他在几个月前给玻恩的信中还声称：“这

全都是瞎扯,大家就是不得不这样做”<sup>[9]</sup>. 而在此时,他意识到这个新设想的重要意义,决心从正研究的氢原子中的电子问题,“回到光波理论中去”,而“向物质波理论前进!”

L.V. 德布罗意的物质波概念固然是一个创造性的贡献,但它的主要作用还是表现在通过波动力学奠定量子力学的基础上,而这却是由薛定谔完成的. 薛定谔从 L.V. 德布罗意的导引波出发,把玻尔的定态轨道用整数波长的“振动系”描述. 他把波函数  $\psi$  与原子核周围可能存在的德布罗意波相对应,建立起他的波动方程. 它可描述氢和比氢更复杂的原子中电子的运动,而且可处理谱线的强度问题. 薛定谔于 1926 年 2 月在《物理学年鉴(Annalender Physik)》上发表论文《作为本征值问题的量子论》. 薛定谔创立量子力学,使 L.V. 德布罗意的贡献也就著称于世了.

L.V. 德布罗意在回答佩兰提问时所说的物质波可用电子衍射实验证明的话,确是深思熟虑之谈. 他根据自己提出的波长  $\lambda = h/mv$  公式,计算了几千电子伏加速电压的电子束的波长为  $10^{-8}$  厘米左右,即与 X 射线的波长属于同数量级,这个判决性实验是在 1927 年进行的. 1927 年 1 月 6 日,美国贝尔电报电话实验室的戴维森(C. J. Davison)和杰默(L.H.Germer)在用电子轰击镍时,镍片因加热时间过长,镍变成单晶结构. 其晶格的原子间距与电子的波长属同数量级,也很适合做 X 射线实验. 当电子束射到其上时,出现明暗交替的干涉环现象,可由干涉带求出电子的波长. 当反射的最大强度方向与观测方向一致时,计算的电子波长为 1.65 埃,与 L.V. 德布罗意的计算结果几乎完全符合. 同年 5 月,英国的 G.P. 汤姆孙在研究生莱德(A. Reid)的帮助下,在阿伯丁做了一系列阴极射线被金属箔衍射的实验,雄辩地证明电子产生衍射现象而具有波动性. 这两个实验令人信服地证明了 L.V. 德布罗意预言电子具有波动性,以及预言电子波长取决于普朗克常数和动量的关系式. 后来,德国的斯特恩(O. Stern)又用实验证明原子和分子也产生衍射现象而具有波动

性. 大量实验说明,物质波或波粒二象性是物质存在的普遍形式. 戴维森和 G.P. 汤姆孙“由于他们在实验上发现了电子辐射晶体时产生干涉现象”,而于 1937 年共同获得诺贝尔物理学奖.

在量子力学建立以后,1927 年 5 月 L.V. 德布罗意在《物理杂志(Journal de Physique)》上发表《以双重解理论的形式表现的波和粒子共存的模式》的文章. 在 1927 年 10 月举行的第五次索尔维国际物理会议上,他做了《量子新力学》的报告,回顾了薛定谔的波动力学工作和玻恩对  $\psi$  函数做的几率诠释解,强调波动说和粒子说的结合是成功的. 最后他提问说:“人们知道能量可以呈点状集中,而同时假设有  $\psi$  波存在的理论也很成功. 这二者怎样才能调和起来?”<sup>[10]</sup>他进而提出目前波动学的首要问题是粒子与波之间应该有什么关系? 为此,他提出导引波理论,这个理论是建立在“双重解理论”公式的基础上,但不要双重解理论中的奇异解. 他的导引波理论在会议上未得到多少支持,他自己也怀疑是否能把  $\psi$  波想象为一个确实存在的物理场. 不久,他放弃了自己的这个看法,而依附了玻尔的互补诠释,因为这个诠释得到绝大多数与会者的支持.

在后来的 15 年左右时间内, L.V. 德布罗意又重新研究了她的双重解理论,并进一步加以发展,主要是以下三个方面:

(1) 他认为波动是一个物理过程,波动力学所研究的是波在时空中传递的过程. 粒子是能量的高度集中,稳定地处在波动之中,按波动力学的规律运动. 他认为薛定谔方程中的  $\psi$  波等于归一化常数  $c$  乘真实的  $\nu$  波,是一种虚波(fictitious wave).  $|\psi|^2$  表示单位体积中出现粒子的可能性.

(2) 如果粒子不受同它接触的并对它施加影响的亚量子介质(Subquantum medium)的持续扰动,则粒子的运动将由“导引定律(Guiding Law)”决定. 导引定律是粒子在它的波中以携带其波的相位方式的运动规律”<sup>[11]</sup>.

(3) 粒子是以高能同“亚量子介质”持续接

触,并被一种布朗运动所激发. 它在其波动中不停地跳动,这对其物理量的统计意义是一个很好的证明.

根据这三个方面, L. V. 德布罗意得出与粒子持续接触和由“亚量子介质”组成粒子的一种隐恒温器 (hidden thermostat) 设想. 他认为如果这个设想能够得到发展, 将对量子物理的未来产生很大影响. 他相信波动力学若以这个原理为基础, 才能说明目前量子力学中应用的形式论 (formalism), 而隐藏在形式论背后的物理实在终会被人们发现, 并得到新的和更加合理的解释.

1951年以后, L. V. 德布罗意的研究工作主要是探索微观现象产生的原因和决定论的科学哲学观点, 并从波动力学的观点出发, 探讨热力学和分子生物学问题.

L. V. 德布罗意在 1924 年以后, 获得法国和国际上的很高荣誉. 除获得诺贝尔物理学奖外, 还被授予彭加勒奖章. 1933 年当选为法国科学院的院士, 1942 年成为法国科学院的常务秘书. 1944 年当选为法兰西学院的院士. 1952 年被联合国经济及社会理事会授予卡林加 (Kalinga) 奖金. 1953 年和 1958 年先后当选为英国皇家学会的会员和美国艺术与科学科学院的院士.

L. V. 德布罗意的著作至今共达二十种以上, 其中主要有《波和粒子 (Ondes et Corpuscules)》(1930), 《新物理学和量子 (La Physique nouvelle et les Quanta)》(1937), 《物质和光 (Matière et Lumière)》(1937), 《连续和不连续

(Continu et Discontinu)》(1941), 《现代物理学和量子 (La Physique moderne et les Quanta)》(1941), 《关于核理论的波动力学 (De la Mécanique Ondulatoire à la Théorie du Noyau)》(1943), 《光波和粒子 (Optique Ondulatoire et Corpusculaire)》(1950), 《知识和发现 (Savants et Découvertes)》(1951), 《物理学的展望 (英译本, New Perspectives in Physics)》(1962), 《波动力学的流行解释: 批判性的研究 (英译本, Current Interpretation of Wave Mechanics: A Critical Study)》(1944), 《孤粒子热力学 (La Thermodynamique de la Particule isolée)》(1964) 和《科学的确定性和不确定性 (Certitudes et Incertitudes de la Science)》(1966) 等书. 编辑了《波动力学和分子生物学 (Wave Mechanics and Molecular Biophysics)》(1966).

## 参 考 文 献

- [1] M. Jammer, *The Conceptual Development of Quantum Mechanics*, McGraw-Hill Book Company, New York, (1966), p. 240.
  - [2] *ibid.*, p. 239.
  - [3] *ibid.*, p. 240.
  - [4] *ibid.*, p. 242—243.
  - [5] G. Gamow, *Biography of Physics*. Harper & Row, New York and Evanston, (1961), p. 251—252.
  - [6] See ref. [1], p. 247.
  - [7] 周世勋, *大学物理* 1(1982), 9.
  - [8] See ref. [1], p. 249.
  - [9] A. Hermann, *Die Jahrhundertwissenschaft*, Stuttgart, (1977), 83.
  - [10] 赵中立、许良英等编译, 《纪念爱因斯坦文集》, 上海科技出版社, (1979), 357.
  - [11] *Modern Scientists and Engineers*, McGraw-Hill, Book Comp., Vol. I, (1980), 143.
  - [12] M. I. De Vries and A. Mastenbroek, *J. Mater. Sci.*, 12(1977), 1700.
  - [13] E. M. Schulson, *Proceeding of 4th Annual SEM Symposium*, IIT Research Institute, Chicago, Illinois, (1971), p489.
  - [14] S. K. Bhamu, *Metallography*, 6(1973), 429.
  - [15] S. M. Daoidson, G. R. Booker, R. Stickler, *Proc. of 25 th Anniversary of EMAG*, Inst. of Phys. London, (1971), 298.
- ~~~~~
- (上接第 757 页)
- [5] J. P. Spencer and C. J. Humphreys, *Phil. Mag.* A, 42, (1980), 433.
  - [6] E. M. Schulson and C. G. Van Essen, *J. Sci. Instrum.*, 2(1969), 247.
  - [7] C. G. Van Essen, E. M. Schulson, R. H. Donaghay, *Nature*, 225(1970), 847.
  - [8] E. M. Schulson, *Rev. Sci. Instrument*, 44(1973), 348.
  - [9] 蓝芬兰、廖乾初, *金属学报*, 16(1980), 104.
  - [10] 廖乾初、蓝芬兰, *金属学报*, 17(1981), 565.
  - [11] M. Pitaval, G. Fontaine, P. Durupt, *Proc. 7th Inter. Congress and Electron Microscopy*, Grenoble, 2(1970), 185.