

德布罗意与物质波理论

王较过

(陕西师范大学物理系 西安 710062)

路易斯-维克多·德布罗意(Louis-Victor de Broglie 1892—1987)是法国著名理论物理学家,物质波理论的创立者。德布罗意主要从事理论物理、尤其是关于量子问题的研究,他在该领域取得的重大研究成果为现代物理的发展做出了杰出的贡献。1924年11月,德布罗意在博士论文中阐述了著名的物质波理论,并指出电子的波动性。这一理论为建立波动力学奠定了坚实基础。由于这一划时代的研究成果,使他获得1929年的诺贝尔物理学奖,同时也使他成为第一个以学位论文获得诺贝尔奖金的学者。本文就德布罗意的科学生涯以及他关于物质波的理论作一探讨。

一、德布罗意的科学生涯

德布罗意1892年8月15日出生于法国塞纳河畔的蒂厄浦,是法国一贵族家庭的次子。德布罗意家族自17世纪以来在法国军队、政治、外交方面颇具盛名。祖父J.V.A德布罗意(1821—1901)是法国著名政治家和国务活动家,1871年当选为法国国民议会下院议员,同年担任法国驻英国大使,后来还担任过法国总理和外交部长等职务。

德布罗意从18岁开始在巴黎大学学习理论物理,但是因为打算沿其家族传统,以后从事外交活动,他也学习历史,并且于1909年获得历史学位。由于他哥哥(M.德布罗意)是一位实验物理学家,拥有设备精良的私人实验室,从事物理实验研究。因而德布罗意在学习历史的

同时,受到他哥哥的影响,参与一些物理研究工作。从他哥哥那里德布罗意了解到普朗克和爱因斯坦关于量子方面的工作,这些引起了他对物理学的极大兴趣。经过一番思想斗争之后,德布罗意终于放弃了已决定的研究法国历史的计划,选择了物理学的研究道路,并且希望通过物理学研究获得博士学位。

第一次世界大战期间,德布罗意在军队服役,被分配到无线电台工作,中断了他的理论物理研究。1919年,德布罗意重新回到他哥哥的实验室研究X射线,在这里,他不但获得了许多原子结构的知识,而且接触到X射线时而象波、时而象粒子的奇特性质。德布罗意曾经与其兄就X射线的性质进行了长时间的讨论,他对其兄及其同事们的实验工作发生了浓厚的兴趣。为了对这些现象做出理论解释,1920年,德布罗意重新开始研究理论物理,特别是关于量子问题,他的研究终于取得了可喜成果。1923年9月和10月,德布罗意发表了三篇关于物质波的论文,创立了物质波理论。之后,他投入博士论文的写作,1924年11月他以题为《量子理论的研究》的论文通过博士论文答辩,获得博士学位。在这篇论文中,包括了德布罗意近两年取得的一系列重要研究成果,全面论述了物质波理论及其应用。

德布罗意获得博士学位后,继续留在巴黎大学,他又发表了有关波动力学的有创造性的研究成果,同时担任教学任务。德布罗意在神

二象性。

人类对自然的认识由浅入深、由片面到全面、由现象到本质不断深化。对光本性的认识

也是沿着这个认识规律发展的。在认识发展中,物质生产水平、实验条件起了决定性的作用,同时促进人类认识水平的不断提高。

学院担任了两年义务讲座后,1928年被聘为新建立的巴黎大学亨利·彭加勒学院理论物理教授,他担任这一职务从事教学工作一直到1962年退休.1945年以后,他还担任法国原子能委员会顾问.1930年到1950年间,德布罗意的研究工作主要是波动力学的推广,他的研究取得了许多成果,发表了大量评论和论文.1951年以后的一段时间,德布罗意研究粒子和波之间的关系,目的是通过研究用经典的空间和时间概念对波动力学作出因果解释.此时重新研究他于1927年提出的引导波理论,但不久他就放弃这方面的工作,回到了以前的研究领域,探索微观现象产生的原因和决定论的科学哲学观点,用波动力学的观点探讨热力学和分子生物学.德布罗意一生的研究成果颇丰,他的著作就达25本之多.由于德布罗意的杰出贡献,他获得了很多的荣誉.1929年获法国科学院亨利·彭加勒奖章,同年又获诺贝尔物理学奖.1932年,获摩纳哥阿尔伯特一世奖,1952年联合国教科文组织授予他一级卡琳加奖,1956年获法国国家科学研究中心的金质奖章.德布罗意于1933年当选为法国科学院院士,1942年以后任数学科学常务秘书.他还是华沙大学、雅典大学等六所著名大学的荣誉博士,是欧、美、印度等18个科学院院士.

二、物质波理论的形成

德布罗意开始研究物理学时,恰逢现代物理学发生深刻革命的时期.1900年,普朗克研究黑体辐射时假定谐振子取分立的能量,提出量子的概念,由此出发,他推导出能够描述黑体辐射规律的普朗克黑体辐射公式.但是,人们并没有认识能量子的重要性,只把能量子看作仅仅是在支配物质和辐射相互作用过程中是合适的,频率为 ν 的物质振子仅仅以 $h\nu$ 的倍数发射或吸收能量.直到1905年,量子概念才发生了重要发展.1905年,爱因斯坦发表了题为《关于光的产生和转化的一个启发性观点》的论文,文中通过对黑体辐射的研究和论证,得到并提出了光量子的概念,并用它成功地解释了光电效应.这一工作的意义之一在于,光量子的

概念是在分析和研究黑体辐射基础上得到的,表明量子概念具有比较普遍的意义.爱因斯坦认为:密度小的单色辐射,从其热现象方面的行为看,仿佛是由一些独立的能量所组成.本世纪初,人们通过对X射线的研究认识到,X射线具有时而象波、时而象粒子的奇特性质.1913年,玻尔提出原子中的电子运动的量子化条件,原子中的电子只有可能进行某些运动,成功地解释了氢原子光谱.玻尔的量子化条件没有理论基础,是人为规定的.1919—1922年,法国物理学家布里渊提出了一个解释玻尔量子化条件的理论.布里渊把电子和波作为一个整体进行研究,设想在原子核周围存在着一层以太,电子在其中运动掀起波,这些波相互干涉在原子核周围形成驻波.这些研究成果,尤其是布里渊的理论对德布罗意提出物质波思想产生巨大影响.

德布罗意重新开始研究理论物理,物理学面临着的主要困难是:对于光需要有微粒说和波动说两种理论;确定原子中电子的稳定运动涉及到整数,这些都是当时人们无法理解的事实.德布罗意首先考察光量子理论和玻尔的量子化条件.确定光微粒能量的表达式是 $W = h\nu$,这个公式中包含着频率 ν ,而纯粹的粒子理论不包含频率的因素;确定原子中电子的稳定运动涉及到整数,而物理学中涉及到整数的只是干涉现象和本征振动现象.这些结果使德布罗意想到,对于光需要同时引进粒子的概念和周期的概念;对于电子不能简单地用微粒来描述电子本身,还必须赋予它们周期的概念.于是,德布罗意形成了指导他进行研究的全部概念:在所有情况下,都必须假设微粒伴随着波而存在,他的首要目的就是建立微粒的运动和缔合波的传播之间的对应关系.

1923年夏末,德布罗意已开始形成他的相波(后来他称为相位波)概念,9月10日,他发表了关于物质波理论的第一篇论文——《波和量子》,文中提出的思想可以被看作是波动力学理论的开端.两个星期后,德布罗意又发表了《光量子、衍射和干涉》的论文,明确提出相干波的

概念。文中明确指出：要描述一个动点的运动，观察者必须将这一运动与一个非物质的、在同一方向上传播的正弦波联系起来。在观察者看来，这一波的频率等于上述动点的总能量除以普朗克常量 h 。同年 10 月 8 日，德布罗意发表关于物质波理论的第三篇论文《量子、气体运动理论以及费马原理》。文中阐述了波与粒子的对应关系，他假定与任何粒子相联系的相波，在空间任何点与粒子同相位。相波的频率与速度由粒子的能量和速度所决定。

德布罗意的这三篇论文是物质波理论奠基工作的开端。继这三篇论文之后，德布罗意着手撰写他的博士论文《量子理论的研究》。1924 年 11 月，德布罗意通过论文答辩，获博士学位。他的博士论文包括了近两年研究的一些成果，比较系统地论述了物质波理论，得到物质波的一些重要结果。德布罗意认为，任何运动着的物体都伴随着一种波动，而且不可能将物体的运动和波的传播分开，这种波称为相位波。存在相位波是物体的能量和动量同时满足量子条件和相对论关系的必然结果。德布罗意考虑静止质量为 m_0 、相对于静止观察者的速度为 $v = \beta c (\beta < 1)$ 的粒子，他假设粒子是周期性内在现象的活动中心，它的频率 $\nu_0 = m_0 c^2 / h$ ， h 是普朗克常数， $m_0 c^2$ 是粒子的内在能量。以狭义相对论原理和严格的量子关系式为基础，L. 德布罗意通过严格论证得到：相位波的波长是， $\lambda = h / p$ ， h 是普朗克常数， $p = m_0 v / \sqrt{1 - \beta^2}$ 是相对论动量，这就是著名的德布罗意波长与动量的关系。此外，德布罗意把相位波的相速度 ($u = \lambda \nu$) 和群速度 (能量传递的速度) 联系起来，证明了波的群速度等于粒子速度，确定了群速度与粒子速度的等同性。他的这些研究成果形成了比较完整的物质波理论。

三、物质波理论的实验验证

德布罗意撰写论文时，他的哥哥 (M. 德布罗意) 建议他的论文应包括实验部分，可是他没有采纳这个建议。他的物质波理论是在没有得到任何已知事实支持的情况下提出来的，这就使得答辩委员会对物质波的真实性的存在疑虑，

答辩委员会主席佩兰就提出了物质波如何用实验来证实的问题。对佩兰的提问，德布罗意回答：用晶体对电子的衍射实验验证物质波的存在是可能的。他的这个思想是早已形成的，他曾在 1923 年 9 月 24 日《光量子、衍射和干涉》一文中指出：从很小的孔穿过的电子束，可能产生衍射现象，这也许会成为在实验上验证物质具有波粒二象性的方法。他还曾向他哥哥的同事道维里叶提出做电子的衍射实验，后者因忙于电视实验而将其搁置。

物理学的发展需要理论和实验的两只脚向前迈进，现在理论这只脚已经先向前迈进了一步，这就给实验提出了研究课题。物质波理论提出后，如何从实验上证实物质波存在就成了人们关注的一个热点。

按照德布罗意理论，经过几千伏加速电压的电子束，其波长数量级为 10^{-10} 米，这与 X 射线的波长是同一个数量级，因而可以用晶体对电子的衍射实验验证物质波。德布罗意的理论一传到美国，就在纽约开始了显示电子衍射的实验。尽管这个实验开始并不是为验证波动理论而做的，但是到了 1926 年，这项工作的目的已经转变为验证物质波理论。1927 年初，戴维森和革末通过实验发现，在镍晶体对电子的衍射实验中，有 19 个事例可以用来验证波长和动量之间的关系，而且每次都在测量精确度范围内证明了德布罗意公式 $\lambda = h / p$ 的正确性。戴维森实验所用电子束的电子能量很低，仅有 50—600 电子伏特。同年 G.P. 汤姆逊用较高能量的电子做了晶体对电子束衍射的实验，他让电子能量为 1000—8000 电子伏特的电子束垂直射入赛璐珞、金、铂或铝等薄膜上，观测产生的衍射图样。实验观测和由德布罗意理论得到的结果非常一致，这充分证明了电子具有波动性，再一次用无可辩驳的事实向人们展示了德布罗意理论是正确的。以后，人们通过实验又观察到原子、分子……等微观粒子都具有波动性。实验证明了物质具有波粒二象性，不仅使人们认识到德布罗意的物质波理论是正确的，而且为物质波理论奠定了坚实基础。