

# 德布罗意及其导航波理论

陈关荣

香港城市大学电机工程系, 中国香港 999077

**摘要** 介绍了物理学家路易·德布罗意(Louis de Broglie, 1892—1987)的生平和科学贡献, 特别是他的导航波理论的前世今生。

**关键词** 德布罗意; 物理学; 导航波理论

## 1 导航波理论的诞生

路易·德布罗意(Louis Victor Pierre Raymond duc de Broglie), 出生在法国北部迪耶普(Dieppe)的一个外交和政治世家(图1)。他14岁那年, 时为家族第五代公爵的父亲维克多(Victor, 5th duc de



图1 路易·德布罗意(1892—1987)

Broglie)去世。母亲保琳(Pauline d'Armaillé)和世袭第六代公爵的哥哥摩里斯(Maurice, 6th duc de Broglie)把他送去了巴黎最好的贵族中学 Lycée Janson de Sailly 读书。德布罗意在中学时期, 他的法文、历史、物理、哲学成绩全都名列前茅。1909年中学毕业后, 他进入了法国一流的索邦大学(Sorbonne Université), 该校著名的校友包括居里夫妇(Pierre and Marie Curie)。

可能由于德布罗意对各个学科都擅长的缘故, 在大学里读书的德布罗意并不清楚自己应该主修什么科目。他最初选择了历史, 后来又转去学法律。1911年, 他的物理学者哥哥摩里斯把他带去参加在比利时布鲁塞尔召开的第一届索尔维(Solvay)国际会议, 在那里他见到了爱因斯坦、居里夫人和亨利·庞加莱(Jules Henri Poincaré), 对物理学产生了极大兴趣, 回校后转读理论物理。1913年, 他带着文学和科学两个学士学位文凭从索邦大学毕业。

收稿日期: 2019-02-14; 修回日期: 2019-05-31

基金项目: 香港 GRF Grant CityU(12000317)

作者简介: 陈关荣, 教授, 研究方向为复杂网络和非线性动力系统, 电子信箱: eegchen@cityu.edu.hk

引用格式: 陈关荣. 德布罗意及其导航波理论[J]. 科技导报, 2019, 37(22): 149-152; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2019.22.016

翌年,第一次世界大战爆发。德布罗意到了陆军服役,开始在一个军事要塞当工兵,后来转到在巴黎艾菲尔铁塔下的无线电部门当通讯兵。1918年,第一次世界大战结束,德布罗意随之退役。他返回索邦大学,继续学习和研究理论物理,师从保罗·朗之万(Paul Langevin)。那时,他的哥哥摩里斯正在研究X-射线光谱和光电效应,常常把他带到自己的实验室里工作。后来,兄弟两人共同发表了光学方面的论文。

1924年,32岁的德布罗意完成了博士论文《量子理论研究》,次年全文发表在《物理年刊》<sup>[1]</sup>。在他的博士论文里,德布罗意基于爱因斯坦对于光波特别是光波的“波粒二象性”研究,提出了电子的波动性新理论,把爱因斯坦的理论从光推广到物质,即物质微粒的波粒二象性。

导师朗之万对德布罗意新理论的正确性没有太大的把握,于是把德布罗意的论文寄给了爱因斯坦征求意见。爱因斯坦兴奋地写了封简短的回信,称赞道:“他掀起了巨大帷幕的一角!”爱因斯坦将论文推荐到了柏林科学院,于是这一新理论很快便广泛传播于物理学界。受这篇论文的启发,1926年埃尔温·薛定谔(Erwin Schrödinger)写下了今天熟知的薛定谔方程。1927年克林顿·戴维森(Clinton Davisson)与雷斯特·革末(Lester Germer)的著名电子实验,以及1928年乔治·汤姆逊(George Thomson)的另一个实验,都验证了德布罗意的电子波理论。

1926—1927年,从不同角度出发,马克斯·玻恩(Max Born)对薛定谔方程做出了概率论解释,另外沃纳·海森堡(Werner Heisenberg)提出“不确定性原理”,说明无法同时精确地测量到粒子的动量和位置。

1927年,第五次索尔维国际会议再次在布鲁塞尔召开,主题是“电子和光子”,讨论新兴的量子理论(图2)。这是一次最为人知的学术会议,在两个不同学派之间发生了著名的玻尔—爱因斯坦论战。居里夫人是唯一的女性科学家,29位与会者中有17人获诺贝尔奖。

丹麦物理学家尼尔斯·玻尔(Niels Bohr)提出



图2 第五次索尔维会议合影(德布罗意位于第二排右三)

了量子力学标准的“哥本哈根诠释”,宣称在量子尺度上被观测到之前一切都是“不真实”的。他认为粒子的位置并不是确定的,而是随机的,由概率波函数决定;在测量到的一瞬间,波函数坍塌成一个点,粒子飞跃到这一点上,此刻它的位置才成为“现实”。

爱因斯坦以“上帝不会掷骰子”的观点反对玻尔,以及他所依赖的海森堡“不确定性原理”。而玻尔则反驳道:“爱因斯坦先生,请不要告诉上帝怎么做。”在这场论战中,德布罗意自然站在爱因斯坦一边。他还提出了一种“导航波”(pilot-wave)理论,即每一粒子都具有确定性的空间位置或轨迹,由导航波函数描述。可是,支持玻尔的沃尔夫冈·泡利(Wolfgang Pauli)在会议中指出,导航波理论无法解释非弹性散射,从而无法说明导航波背后的物理本质。这次会议结束时,玻尔学派以他们的革命性理论占了上风。此后,德布罗意的导航波理论也渐渐地被物理学界遗忘。

1929年的诺贝尔物理学奖颁发给了博士毕业不到5年的德布罗意,表彰他“发现了电子的波动性”(for his discovery of the wave nature of electrons)。颁奖委员会的颂词中说:“在这么年轻的时候,你就陷入到物理学中最深刻问题的争论中。在没有任何证据支持的情况下,你有勇气断言,物质不仅具有微粒性质,而且还具有波动性质。后来的实验证实了你的观点是正确的。”

德布罗意从1928年开始在索邦大学教授理论物理学,其后在亨利·庞加莱研究院(Institut Henri Poincaré)工作,1932年后在巴黎大学(Université de Paris)任理论物理教授直至1962年70岁退休。

据不完全统计,他一生发表了150篇学术论文和25本书。

学术荣誉方面,1933年德布罗意当选为法国科学院(Académie des Sciences)院士。1942年他成为科学院的常务秘书,负责分配行政工作任务、报告科学院年度成绩、撰写逝世院士挽词等,任职至1975年。1944年,他荣膺法兰西学术院(Académie Française)首席院士。法兰西学术院是1635年创立的法国历史最悠久和名气最大的学术权威机构。一生中他先后被欧洲、美国和印度等18个国家科学院遴选为外籍院士。德布罗意获得过许多重要奖项,特别是1929年法国科学院首次颁发的亨利·庞加莱奖、1938年德国物理学会的马克斯·普朗克(Max Planck)奖、1952年联合国教育科学及文化组织的卡林加奖(Kalinga Prize)、1956年法国国家科学研究中心的金质奖章,1961年法国荣誉军团大十字勋章(Légion d'honneur)等。他还先后被华沙、布加勒斯特、雅典、洛山、魁北和布鲁塞尔等大学授予荣誉博士学位。

学术活动方面,1945年德布罗意兼任法国原子能委员会高级顾问,又在亨利·庞加莱研究院建立了工程力学中心。他的长期努力还促成了著名的国际量子分子科学院(IAQMS)的创立并成为首批核心成员。1950年,在德布罗意波动力学因果论的基础上,大卫·玻姆(David Bohm)引入了量子势等概念从而建立了著名的德布罗意-玻姆理论,是目前唯一能给予物质波以实在状态描述以及为某些量子力学预言做出合理解释的理论。德布罗意-玻姆理论还为经典混沌(classical chaos)理论和量子混沌(quantum chaos)理论的统一提供了基本框架(量子力学中的德布罗意-玻姆相空间)。

1960年,德布罗意的哥哥摩里斯去世,他成为了第七代布罗意公爵(7th, duc de Broglie)。德布罗意终身未婚,不曾有过私人汽车,一辈子住平民小屋,深居简出,喜欢过平俗简朴的生活。他为人彬彬有礼,从来不发脾气,是一位典型的绅士学者。也许正因为这样,他健康长寿,于1987年3月19日以95岁高龄在巴黎市郊的Louveciennes离世。

## 2 导航波理论的复活

历史从来不肯轻易退出舞台。1927年第五次索尔维国际会议上德布罗意提出的导航波理论虽然渐被遗忘,可还不是僵尸。

2005年,由巴黎狄德罗大学的流体物理学家伊夫·库代(Yves Couder)指导的团队偶然做了一个“弹跳油滴”(bouncing-droplet)实验,发现了一个可能颠覆玻尔量子力学理论的现象:当微小油滴跌落到振动的油层表面时,它会上下弹跳,并能够穿越障碍,很好地诠释了一些扑朔迷离的量子现象。他们发现弹跳的油滴在围绕油面中心转动时,只沿某些“量子化”的轨道运动,有时还会弹跳到另一个量子轨道上,这与电子在原子核中的运动十分相似。库代意识到,这验证了德布罗意主张的导航波理论!随后,库代和伊曼纽尔·福特(Emmanuel Fort)合作,进行了更精确的“双缝实验”(double-slit experiment)。很多物理学家对这类实验非常看好。理查德·费曼(Richard Feynman)说,双缝实验“蕴含了量子力学的所有精华,隐藏着量子力学的终极规律”。库代和福特在记录了75个弹跳油滴通过双缝的轨迹之后,宣称在油滴的落点处观察到了类似于干涉的条纹,而这看来只能是来源于导航波<sup>[2]</sup>。

于是,德布罗意的导航波理论复活了,让德布罗意的追随者们兴奋了10年的光景。在这段时间里,两个派别的物理学家都开展了一系列的相关实验。麻省理工学院(MIT)流体动力学家约翰·布什(John Bush)的团队、丹麦技术大学(Technical University of Denmark)托马斯·玻尔(Tomas Bohr)和安诺斯·安诺生(Anders Andersen)的团队,以及内布拉斯加大学(University of Nebraska)量子物理学家赫尔曼·贝特兰(Herman Batelaan)的团队都做出了一些相当完美的实验,但都没有观察到库代他们所说的干涉条纹。其中,约翰·布什和他的研究小组旨在阐明弹跳油滴的细微导航波动力学,并试图对其类似量子的行为做出合理的解释。他们获得在垂直振动流体浴上反弹油滴的理论结果,建立了其

运动的积分微分方程,观察到油滴弹跳状态通过超临界分叉之后几乎是直线地穿过双缝,并没有看到条纹出现。有趣的是,他们看到油滴运动状态从不稳定到稳定的改变,验证了油滴在复杂几何形状中行走时的混沌动力学行为<sup>[3]</sup>。赫尔曼·贝特兰团队则测量了来自光栅的电子衍射,并且记录了双缝衍射图形,证明了具有弹跳油滴的宏观波粒对偶性,还试图对个别事件以确定的方式来描述其量子力学原理<sup>[4]</sup>。托马斯·玻尔和安诺斯·安诺生的研究团队在2015年发表了最好的综合性实验报告,以十分有说服力的结果表明:库代和他的团队的实验中存在关键性错误,其原因归咎于实验过程中不该忽略的噪音、使用不正确的方法和不够充分的统计数据<sup>[5]</sup>。

有趣的是,发表这个报告推翻德布罗意理论的主要人物——丹麦技术大学的托马斯·玻尔——正是尼尔斯·玻尔的孙子(图3、图4)。

“我当时特别想知道,到底能不能得到一个确定性的量子力学理论。”考虑到自己在玻尔家族中的位置,托马斯强调说:“也许是怀着一种责任感,我觉得自己有义务见证最终结果。”

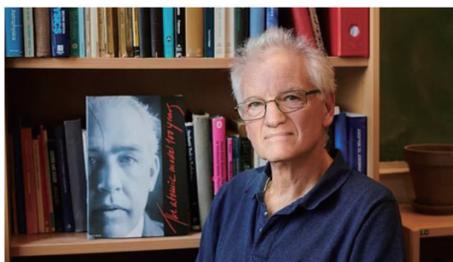


图3 托马斯·玻尔与他的祖父尼尔斯·玻尔照片的合照  
(图片来源:Quanta Magazine)

## de Broglie and his pilot-wave theory

CHEN Guanrong

Department of Electrical Engineering, City University of Hong Kong, Hong Kong 999077, China

**Abstract** This paper gives a profile of the physicist Louis de Broglie (1892—1987) with regard to his academic life and scientific contributions, especially the past and the present developments of his pilot-wave theory.

**Keywords** de Broglie; physics; pilot-wave theory ●



图4 玻尔祖孙三代(图片来源:尼尔斯·玻尔档案馆)

当然,德布罗意的追随者们并没有放弃——今天他们仍在路上。

### 参考文献(References)

- [1] de Broglie L. Recherches sur la Théorie des Quanta, Masson[J]. Annales de Physique, 1925(10): 22-128.
- [2] Wolchover N. Famous experiment dooms alternative to quantum weirdness[J/OL]. (2018-11-11)[2019-02-11]. <https://www.quantamagazine.org/famous-experiment-dooms-pilot-wave-alternative-to-quantum-weirdness-20181011/>.
- [3] Oza A U, Rosales R R, Bush J W M. A trajectory equation for walking droplets: Hydrodynamic pilot-wave theory [J]. Journal of Fluid Mechanics, 2013, 737(12): 552-570.
- [4] Batelaan H. Double slit electron diffraction[C]//Emergent Quantum Mechanics, Vienna: Conference Series, 2015: 012007.
- [5] Bohr T, Andersen A P, Lautrup B. Bouncing droplets, pilot-waves, and quantum mechanics[M]. Berlin: Springer, 2016: 335-349.



(责任编辑 傅雪)