

德布罗意的生平和贡献

——纪念德布罗意诞生一百周年

金尚年

(复旦大学物理系,上海 200433)

L. 德布罗意是 20 世纪 20 年代为量子力学的创建作出杰出贡献的物理大师之一。他创导了粒子具有波性的学术思想,从而导至波动力学的建立。他是迄今因学位论文而获得诺贝尔奖金的唯一的一位物理学家。在 50 年代,他重举批判量子力学哥本哈根学派旗帜,再次提出双重解理论,创导了非线性量子力学。

对物理学来说,本世纪 20 年代是最令人激动的年代。在这十年中,物理学家继相对论之后建立了量子力学,完成了近代物理学革命。量子力学是由许多不同哲学倾向、不同科学经验的科学家在短短几年中建立和完善的,其进展之快,参与人数之多,以及对其结论的物理诠释分歧之大,是迄今物理学史上所没有的。在这一群对量子力学的建立和完善作出杰出贡献的物理学家之中,仅诺贝尔物理奖获得者就有爱因斯坦、玻尔、德布罗意、海森伯、薛定谔、狄拉克、玻恩和泡利。今年是德布罗意诞生一百周年,我们谨以此文表示对他的崇敬和纪念。

一、一反贵族世家传统 献身探索量子奥秘

路易·德布罗意 (Louis Victor de Broglie), 1892 年 8 月 15 日诞生于法国塞纳河畔迪埃普的一个世袭贵族家庭。L. 德布罗意的祖先 F. M. 德布罗意于 1742 年因功受封,被国王路易十四拜为公爵; 1759 年,他的儿子 V. F. 德布罗意又被罗马帝国封为德国亲王。虽然公爵头衔只能由族长世袭,但是亲王头衔却可由全家男丁共享。因此 L. 德布罗意从小就是一位德国亲王; 1960 年他的哥哥莫利斯·德布罗意逝世后,他同时又是法国公爵。在法

国历史上,德布罗意家族一直显赫于政界、军界。近二百年中至少为国家提供了一位总理、一位国会领袖、多位部长和驻外大使,为法兰西军队提供了三位上将和多位高级军官。但是到了 20 世纪莫利斯·德布罗意和路易·德布罗意这一代,兄弟俩却一反家族传统,转而立意为科学事业献身,并且取得了杰出成就,受到世人更为广泛的尊敬。

L. 德布罗意在巴黎詹森公学毕业后进入巴黎大学攻读历史, 1909 年获得历史学学位。这时有两个因素促使他的兴趣转向了物理学。其一,他读了当时法国最著名的物理学家、数学家和科学思想家彭加勒著的《科学的价值》和《科学与假设》等几本书,使他对自然科学有了新的认识;其二,1911 年被称为物理学首脑会议的第一届索耳维会议在布鲁塞尔召开,他的哥哥 M. 德布罗意以工作人员的身份参加了这个会议,得到了会议的全部文件。这次会议的主题是辐射和量子论。L. 德布罗意怀着极大的兴趣阅读了这些文件,这使他最终下决心要贡献出自己的全部力量“去弄清楚普朗克引入的量子概念”。1913 年, L. 德布罗意获得了科学硕士学位。正当他准备对“神秘的量子”进行深入研究时,第一次世界大战爆发了。他虽贵为亲王,应征入伍亦不例外。在军队期间, L. 德布罗意大部分时间参与了在埃菲尔铁塔上架设

和管理无线电台的工作，这使他一直保持和物理学有所接触。大战结束后，他立即退伍重入大学，拜著名物理学家朗之万为师攻读理论物理博士学位。朗之万也是他哥哥 M. 德布罗意的导师。

路易·德布罗意是爱因斯坦光量子假设的坚定追随者。他的哥哥莫利斯有一个装备精良的私人物理实验室，主要从事 X 光的研究。L. 德布罗意在这个实验室里通过光电效应等实验，对辐射的量子性质有深刻印象；同时通过 X 光衍射实验，对辐射的波动性质也了解得非常清楚。但是，他深感受因斯坦的光量子理论并没有使牛顿和惠更斯时代就已尖锐化的光的粒子说和波动说的争论得到根本解决，只不过使光的粒子说又重新抬头罢了。因此他把自己探索量子奥秘的宏愿集中到想给爱因斯坦的光量子假设再披上一件波动的外衣，使光量子也能解释它遭到失败的干涉、衍射等只能用光的波动说才能解释的现象。1922 年，他在这方面跨出了第一步，在《物理学杂志》上发表了一篇用光量子假设推导普朗克黑体辐射公式的文章。在这以前，包括爱因斯坦在内的许多物理学家，都曾试图通过光量子理论来导出普朗克公式。但是最后大家都发现，单由光量子假设只能得到维恩公式，要得到普朗克公式还必需另有独立的假设。L. 德布罗意在这篇文章^[1]中假设平衡温度下的黑体辐射，可以看作是能量为 $h\nu$ 的光原子所组成的气体，但它不同于理想气体，这些光原子还可以形成能量为 $2h\nu, 3h\nu \cdots nh\nu \cdots$ 的“光分子”。由单个光原子组成的气体得到的是维恩公式，而考虑了各种可能的多原子“光分子”后，所得到的即是普朗克公式。现在我们知道，光子相互间的这种关联性，正是光子具有波动性的结果。

L. 德布罗意真正创造性的工作——提出电子具有波动性的假设，是在 1923—1924 年之间完成的。1962 年，他在他的博士论文再版前言中对当时的情况是这样说的：“在 1923 年期间，经过一段长时间的独自沉思以后，我突然有了这样一个思想，爱因斯坦在 1905 年所作的发

物理

现应该可以推广到所有的物质粒子，明显地可以推广到电子。”在这一思想的启迪下，1923 年 9—10 月间他在《法国科学院报道》上接连发表了三篇题为《波和量子》、《光量子、衍射和干涉》及《量子、气体运动理论及费马原理》的短文，提出了现在被称为德布罗意波的雏形。接着他又用英文写了一篇较为详细的综合文章《光量子试论》，于 1924 年 2 月发表在英国《哲学杂志》上。这以后他就撰写题为《量子理论研究》的博士论文。根据德布罗意回忆：“1923 年我写了博士论文，需要申请学位。我打印了三份，送了一份给朗之万，让他决定是否可以作为博士论文接受。朗之万也许对我的新思想有点吃惊，拿不定主意，要我再提供一份由他送给爱因斯坦，请爱因斯坦评定。爱因斯坦认为这篇论文很有价值，这促使朗之万决定接受我的论文。”^[2]1924 年 11 月 25 日，德布罗意的博士论文通过答辩，由此，他步入了物理学大师行列，奠定了以后获得诺贝尔物理奖的基础。

二、拓波粒二象奇思 开波动力学先声

L. 德布罗意在他的博士论文^[3]中认为

$$E = h\nu_0, \quad E = m_0c^2.$$

这两个都是爱因斯坦创立的关系式，不论对光还是实物粒子，都普遍成立。别人虽也承认这两个式子，但前者只对光而言，后者只对实物粒子而言。德布罗意作了上述假定，实际上认为光量子的静止质量不为零，而像电子等一类实物粒子则具有频率为 ν_0 的周期过程。根据相对论的思想，由上述关系式给出的物质周期过程的频率

$$\nu_0 = \frac{m_0c^2}{h}$$

是在和物质相对静止的参考系中的频率。现在设物体以速度 $v = \beta c$ 运动，则在静止参考系中有

$$E = mc^2 = \frac{m_0c^2}{\sqrt{1 - \beta^2}}, \quad E = h\nu,$$

从而得

$$\nu = \frac{m_0 c^2}{h} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}}$$

这就是说, $E = h\nu$ 这个公式, 在不同参考系中, 其周期过程的频率是不一样的。上式中的 ν 是静止参考系中的频率, 而前式中的 ν_0 是跟随物体一起运动的参考系中的频率。但是根据相对论的时钟变慢效应, 当跟随时钟一起运动的参考系中有一频率为 ν_0 的周期过程, 则在静止参考系(有相对速度 βc)中, 其频率变为 $\nu_1 = \nu_0 \sqrt{1 - \beta^2}$ 。将前式中的 ν_0 值代入之, 得

$$\nu_1 = \frac{m_0 c^2}{h} \sqrt{1 - \beta^2}$$

比较 ν 和 ν_1 两个表示式, 可知在 $\beta \neq 0$ 时 ν 和 ν_1 不可能相同。但是从上面引入 ν 和 ν_1 的思路来看, 这两个频率似乎应该相同, 都是静止参考系中看到的运动物质周期过程的频率。德布罗意在博士论文中写道: “这里遇到了一个困难, 使我长期困惑不解, 在证明了如下定理(我们将称此为位相一致定理)之后, 我才排除这一困难:

与运动物体相联系, 其相对于静止观察者的频率等于 $\nu_1 = \frac{m_0 c^2}{h} \sqrt{1 - \beta^2}$ 的周期性变化的现象, 在静止的观察者看来, 总是与如下一种波同位相, 这个波的频率为 $\nu = \frac{m_0 c^2}{h} \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}}$, 其传播方向与以速度为 $\nu = \beta c$

运动的物体的运动方向相同, 速度为

$$V = \frac{c}{\beta}。”$$

位相一致定理的意思是说: 从量子论的观点看, 一个以速度 $\nu = \beta c$ 运动着的粒子, 总伴随着一个频率为 ν 的波, 这个波具有性质: 1. 相速度为 $V = \frac{c}{\beta}$; 2. 传播方向和粒子运动方向相同; 3. 它的位相和相对论观点的周期过程 ν_1 的位相永远相同; 4. 它的群速度即为粒子运动的速度。这几点的证明都很简单, 这里不再赘述。

德布罗意称这个他所引入的伴随物体运动由位相来定义的量子波为相波, 现在大家都称它为德布罗意波。德布罗意在提出了他的相波后, 接着说: “借助于受量子概念有力的推动提出的一个假设, 这些结果建立了运动物体的运动和波的传播之间的联系, 使我隐约地看到了将这两个关于光的本质的对立的理论统一起来的可能性。”德布罗意波究竟是一个怎样的波? 是像电磁场那样真实的波, 还是想象的波? 相波是否有能量? 静止物体是否有相波? ……这些问题德布罗意都没有明确回答。他在博士论文结尾处有这样几句话: “我特意将相波和周期现象说得比较含糊, 就像光量子定义一样, 可以说只是一种解释。因此, 最好将这一理论看成是物理内容尚未说清楚的一种表达方式, 而不能看成是最后定论的学说。”

德布罗意的博士论文共分七章。上述相波理论就是其第一章的基本内容。余下各章均为相波的具体应用, 最后一章的标题是统计力学和量子理论。当时爱因斯坦正在研究理想气体的量子理论, 他在收到德布罗意的博士论文前, 刚完成一篇标志玻色-爱因斯坦统计诞生的论文《单原子理想气体的量子理论》。在这篇论文的结尾处爱因斯坦提请读者注意, 他这篇论文存在一个他自己还不能解释的悖论。文章发表后不久他收到朗之万送来的德布罗意的博士论文, 看出他自己论文中的悖论可用德布罗意的理论来解释。于是他立即又写了续篇《单原子理想气体的量子理论 II》。文中明确提出: “一个物质粒子系可以怎样同一个波场相对应, 德布罗意先生已在一篇很值得注意的论文中指出了。”并且“相信这里所讲的不只是单纯的类比。”它“给我在第一篇论文的结尾中所指出的悖论带来了光明。”^[4]以爱因斯坦当时的名望, 在他接连发表的两篇论文中作了这样的评述, 实际上等于给德布罗意的理论打上了批准的印迹。

波动力学的创建人薛定谔当时正在做与爱因斯坦相同的工作。爱因斯坦接连发表的这两篇论文引起了极大的兴趣。但是, 他开始时

对玻色-爱因斯坦统计的思想很不理解,认为计算有错误,于是写信给爱因斯坦。爱因斯坦向薛定谔推荐了德布罗意的论文。薛定谔“怀着极大的兴趣拜读了德布罗意的独创性论文,并且终于掌握了它。”1925年12月15日,薛定谔发表了波动力学建立前的最后一篇关于气体统计力学的论文,题目是《论爱因斯坦的气体理论》。文章一开头薛定谔就指出,如果不考虑德布罗意-爱因斯坦的运动粒子的波动理论,解决问题的其他途径是没有的。在这篇文章中,薛定谔没有更多的采用玻色的方法,而是充分运用了德布罗意理论。这表明此时薛定谔不仅已经掌握了德布罗意的思想,而且已经将它用来研究自由粒子系的运动。很自然地,进一步的研究就是将这一理论用于最简单的束缚态粒子——氢原子中的电子。这就是一个半月后他发表的创建波动力学的第一篇论文《量子化是本征值问题》^[5]。接着他又接连发表了同一题目的另外三篇论文,从而建立起了完整的波动力学的理论体系。薛定谔在他的论文中明确承认,他关于原子问题的考虑是爱因斯坦-德布罗意考虑的一种推广。1926年4月23日,薛定谔在给爱因斯坦的信中对此说得更坦率:“没有你的关于简并气体的第二篇论文引起我对德布罗意思想的重要性的认识,这一切(指波动力学的建立)在现在或其他任何时候都不会开始。”^[6]

波动力学的建立并且迅速得到物理学家的承认,不仅使薛定谔,同时也使德布罗意的名声大噪,并且德布罗意还先于薛定谔因发现电子的波动性获得了1929年的诺贝尔物理学奖。在德布罗意的博士论文答辩时,会议主席佩兰曾问他,电子的波动性可用什么方法检验?他回答说,电子通过晶格时可能会出现干涉和衍射图样。这一点在他1923年9月24日发表的短文中也曾有所提及。1925年,美国实验物理学家C. J. 戴维孙在研究镍对电子的散射时,因实验事故使靶污染、氧化。他经过长时间加热清理镍靶后再重做实验,发现电子被散射后出现类似光干涉、衍射的图样。这是因为长时的热处理使镍靶由原来的由微小晶体所组成变成

物理

了大块晶体的缘故。戴维孙这时还不知道德布罗意的电子波理论,因此他对观察到的新现象没有引起重视。1926年夏,戴维孙到英国访问,获悉了德布罗意的理论,他立刻想到一年前自己所观察到的意外现象,可能就是德布罗意波。返美后他立即和革末一起重做实验,1927年发表实验结果,完全证实了德布罗意的理论。几乎同时,英国剑桥的G. P. 汤姆孙在观察电子束通过薄金箔时也观察到圆环条纹。尽管这一实验不是为验证德布罗意理论而做的,但是他的发现为德布罗意的电子波理论提供了又一坚实的基础,使物理学家对德布罗意的理论彻底信服了。就这样,下一轮的诺贝尔物理学奖的桂冠便落到了L. 德布罗意的头上。因学位论文而获得诺贝尔奖金,德布罗意是迄今唯一的一个。

三、重举批判哥本哈根学派旗帜 开创非线性量子力学的研究

在量子力学建立以后,德布罗意对物理学的发展所作的贡献,最重要的是50年代他重新开展对哥本哈根学派的批判和开创非线性量子力学的研究。

事情得从20年代关于量子力学诠释的争论说起。1925—1926年,海森伯和薛定谔相继创建了两种不同形式的量子力学并且证明了两者是统一的以后,作为波动力学奠基人之一的德布罗意,当时既没有赞同以玻尔-海森伯为首的哥本哈根学派对量子力学所作的解释,也没有对薛定谔的量子力学解释表示认可。1924年,德布罗意在提出他的相波理论时,虽然对相波的物理实在究竟是什么是含糊不清的,但他心目中一直认为波和粒子都是物理实在。他所追求的是要用一种统一的理论来同时描述这两种物理实在;并且认为:作为实物的电子和作为场的光量子在本质上是一样的,只要把较为简单的光的波和粒子的双重性质真正弄清楚了,譬如说可用光量子理论成功地解释光的干涉、衍射等现象,那么电子的量子理论即可自然而得。德布罗意把这种能同时描述粒子和波动

双重性质的力学称为新波动力学，而把经典牛顿力学和相对论力学称为“旧力学”或“几何力学”；薛定谔的波动力学则是他所追求的新波动力学一般原理的一种例证。1927年，他把自己的想法在一篇题为《新波动力学原理》^[1]的论文中公开发表了。他强调指出：新波动力学的一般原理就是熟知的经典力学的哈密顿-雅可比方程和光学中的费马原理相结合后的推广。接着他又发表了《物质及其辐射的波动力学和原子结构》一文，对自己的观点作了进一步发展和补充。1927年春，他综合上述两篇文章的观点，正式提出了称之为“双重解”的量子力学理论。根据这个理论，波动方程容许有两种不同的解，一种是正常解

$$u_{\text{正}} = a(xyz) \exp\{i\omega[t - \varphi(xyz)]\},$$

它是一个具有统计意义的连续函数；另一种是奇异解

$$u_{\text{奇}} = f(xyzt) \exp\{i\omega[t - \varphi(xyz)]\}.$$

两个解中的位相函数 $\varphi(xyz)$ 是相同的，但奇异解中的振幅 $f(xyzt)$ 具有沿着垂直于等相面 $\varphi = \text{常数}$ 的曲线 n 而运动的“可动奇点”，这些奇点代表粒子的运动。

由于量子力学建立后物理学家对其诠释众说纷纭，因此1927年10月在布鲁塞尔召开的第五届索耳维会议上，这个问题成了会议的中心议题。德布罗意应邀在会上第一个发言，他报告了他的新波动力学理论，期望能像他的博士论文一样得到大家的赏识。但是结果却大出意料，竟以彻底失败而告终。泡利在他报告后提出了激烈的批评，指出按照他的理论连普朗克公式都得不到，弄得他毫无招架之力，不能自圆其说。最后，德布罗意不得不在会上表示放弃自己的双重解理论而皈依哥本哈根学派的诠释。但实际上，他的内心深处并没有真正放弃自己的主张。

德布罗意在第五届索耳维会议上遭到严重挫折后，他对量子理论的研究进入长期沉思阶段。他曾先后在巴黎大学和彭加勒研究院任教，1932年成为教授，同年担任彭加勒研究院院长，1933年被选为法国科学院院士，1942年起担任

该院终身秘书，1945年被任命为法国原子能高等委员会委员。此外，他还先后受聘为国外六所著名大学的名誉教授和18个国家的科学院成员。在这期间，他一方面根据正统观点向年轻一代讲授量子力学；另一方面则对哥本哈根学派的理论基础进行了彻底的分析。分析的结果使他越来越坚信：现行量子力学的理论基础是不可靠的，总有一天会有一种新的量子理论来取代现行的量子力学。

在沉思了25年之后，1952年德布罗意终于又重新举起了批判哥本哈根学派的旗帜。其背景除了上述内因外，还有一个重要的外因。这一年追随爱因斯坦路线的玻姆发表了一篇题为《用隐变量理论解释量子理论的一种设想》的论文。量子力学的隐变量理论，在30年代爱因斯坦、冯·诺依曼、G. 赫尔曼等人从不同角度都曾研究过。倾向性的意见是：线性隐变量理论大概不可能存在。其后，由于第二次世界大战，大家都无暇顾及这种纯理论性的探索，因此就被人遗忘了。现在玻姆提出了一个具体的隐变量理论，引起了许多物理学家的兴趣。德布罗意发现，玻姆的工作某种程度上是他1927年工作的翻版，因此他感到重新提出自己理论的时机已经成熟，于是就接连发表了几篇批判哥本哈根学派及重述自己双重解理论的文章。1956年，德布罗意出版了《非线性波动力学》一书，这本书是他阐明自己量子力学观点的最系统和最全面的著作。

德布罗意为什么把他重新提出来的双重解理论称为非线性量子力学呢？这是因为不管是德布罗意自己还是玻姆，以及量子力学刚建立时颇为有名的马德隆的流体力学解释，在把薛定谔方程中的波函数分解为虚部和实部后，所得到的量子力学方程都是非线性方程。虽然非线性方程的求解比线性方程要难得多，但是在物理上的回旋余地也可相应增加。德布罗意认为改善现行量子力学理论基础的出路很可能要走非线性化的道路，因此明确提出了非线性量子力学的研究问题，号召富有创造性的年轻物理学家和数学家把这一领域的研究工作深入扩

展下去。

由于德布罗意是量子力学的创建人之一，并且曾公开表示过皈依哥本哈根学派，因此他重新举起批判哥本哈根学派旗帜，对物理学界有不小影响。从那时以来，在物理杂志上持非正统观点的量子力学的文章时有所见。这里特别值得一提的是量子力学的另一位创建人狄拉克晚年对现行量子力学所持的观点。1975年，狄拉克应邀访问澳大利亚，在新威尔大学作了题为《量子力学的发展》的讲演。狄拉克说：“不应该认为量子力学的现在形式是最后形式。关于现在的量子力学，存在一些很大的困难……它是到现在为止人们能够给出的最好理论，然而不应当认为它能永远地存在下去。”“关于现在的量子力学基础是正确的说法，我是不能接受的。”^[8]狄拉克是公认的哥本哈根学派的成员，他在70年代公开发表这样的观点，是否和德布罗意重举批判哥本哈根学派旗帜有一定关系呢？

L. 德布罗意于1987年3月19日病逝于巴黎附近的家中，享年95岁。他是本世纪20年代为量子力学创建作出杰出贡献的物理大师中最后逝世和最长寿的一位。虽然德布罗意的双重解理论迄今尚未取得完全成功，但是他作为反对哥本哈根学派的顽强战士，开创非线性量子力学的研究，将启迪人们将量子奥秘探索到底！

- [1] L. de Broglie, *Le Journal de Physique le Radium*, 3(1922), 422.
- [2] A. Pais, *Rev. Mod. Phys.*, 151-4(1979), 866.
- [3] L. de Broglie, Ph. D. Thesis, *Ann. de Phys.*, 3-10 (1925), 22-128.
- [4] 范岱年等编译，爱因斯坦文集第二卷，商务印书馆(1979)，420.
- [5] E. Schrödinger, *Collected Paper on Wave Mechanics*, Blackie & son, London, (1928), 9.
- [6] Prizibram (ed.), *Brief Zur Wallen Mechanik—Schrödinger, Planck, Einstein, Lorentz, Springer Vienna*, (1964), 20.
- [7] L. de Broglie, *Le Journal de Physique le Radium*, 7 (1926), 1.
- [8] 狄拉克著，张宜宗、郭应焕译，物理学的方向，科学出版社，(1981)，20.

新当选的中国科学院学部委员介绍(II)

新当选的学部委员苏定强



苏定强——中国科学院南京天文仪器研制中心研究员，1936年6月出生于江苏省武进县，1959年他毕业于南京大学天文系并留校任物理

教，1962年应聘在中国科学院南京天文仪器厂(1990年易名为中国科学院南京天文仪器研制中心)进行研究和设计工作，1978年被聘为副总工程师，1986年被聘为研究员，1991年11月当选为中国科学院数学物理学部委员。他主要从事天文光学方面的科学研究和光学天文仪器的设计工作，并取得多项重要成果。在大望远镜光学系统的研究设计方面，他首先提出在大望远镜光学系统中，折轴系统和卡氏系统公用同一块副镜的设计思想，并提出了加有中继镜的折轴系统设计方案，明显提高了准直精度和象质(已被应用于欧洲南方天文台的世界上最大望远镜的设计中)；提出了新的主焦点系统和新的 Nasmyth 系统、阵列缩焦器和阵列象场改正器等一系列重要的新思想和新的设计方案；负