

德布罗意和狄拉克

沈 惠 川

(中国科学技术大学基础物理中心)

德布罗意同狄拉克之间的关系，甚至比他和薛定谔之间的关系还来得密切：德布罗意和他的二哥莫里斯·德布罗意由于研究 X 射线的吸收、散射及其光谱的缘故，很早就同英国曼彻斯特大学的卢瑟福及其在剑桥大学三一学院的乘龙快婿福勒有学术联系。德布罗意 1923 年 10 月 13 日发表于英国《自然》杂志第 112 卷 2815 期 540 页题为“波和量子”的论文，就是由福勒推荐的。德布罗意和福勒后来还经常进行学术互访。而从小就精通法语的狄拉克，正是福勒的高足。

在 1927 年 10 月召开的布鲁塞尔第五届 Solvay 物理学会议上，由于狄拉克赞同由玻恩、玻尔、泡利和海森伯所倡导的“正统量子力学”纯概率诠释，使得德布罗意同他之间的关系一度趋于冷淡。德布罗意和狄拉克都是性格内向孤高、温文尔雅的物理学家，因而这一度的冷淡并未造成激烈的文字攻讦。况且，由于在第五届 Solvay 会议上宣讲“波导理论”所造成的失策，德布罗意正处在身不由己的尴尬境地：他本人不得不在课堂和学术会议上言不由衷地“承认”正统诠释的“正确性”。

使得德布罗意和狄拉克的思想重新接近的直接原因是后者在 1928 年所提出的“相对论性量子力学”，亦即“Dirac 方程”。德布罗意十分欣赏 Dirac 方程。首先，与量子力学的 Heisenberg 形式不同，Dirac 方程是一组波动方程；它在形式上与德布罗意的“相波理论”或“波导

我们不知道爱因斯坦在多大程度上认为应当这样做，但我们不禁感受到对知识界的我们的整个制度化生活的有损自尊的压力。当我们为物理学和物理学家在当今世界中的成就而感到自豪时，我们不应忘记，正是这种成就及其实

理论”并无矛盾（尽管在解释上是不同的）。其次，这组方程是相对论协变的。德布罗意是一个十分倚重相对论的人，Dirac 方程的出现使他仿佛遇到了知己。

Dirac 方程的建立过程体现了狄拉克思想同德布罗意思想的巧妙融合。狄拉克后来回忆道，他之所以要发明“Dirac 方程”，就是为了要解决“相对论性的 de Broglie 关系”同“非相对论性的 Schrödinger 方程”之间的矛盾。他说过：“我非常欣赏德布罗意工作成果的美！”言语之间，流露出他对德布罗意的钦佩之情。

德布罗意利用 Dirac 方程进行了多种研究。1927 年至 1952 年是德布罗意一生中困惑违心，生活上和精神上都不太顺心的时期；在这期间，德布罗意研究的主要课题是光子波动力学。他提出了一种所谓“聚合方法”，即一种将自旋数大于 1/2 的粒子全部分解为自旋 1/2 粒子的组合的方法。德布罗意发现用这种聚合方法能够很好地解释光的中性理论。1934 年，德布罗意在“正统”诠释下建立了复合粒子的波动方程和一整套数学变换；利用这些变换，德布罗意证明了由两个“Dirac 方程”聚合而成的“de Broglie 方程”可分解为两类：一类与自旋为 0 的粒子有关，这在当时还未被实验所证实；另一类是含有附加电磁势的“简化 Maxwell 方程”。后来，德布罗意又将这一方法推广到任意自旋粒子。德布罗意为此奋斗了十年，他的研究成果已在 1948 年委托其助手和学生托内拉特夫人向第八届 Solvay 物理学会议作了报告。海森伯后来写道：“根据 1936 年德布罗意的思想，光量子一定是复合实体；作为一个重大原理它所带来的难题与物质波发现所引起的疑问同等重要。”德布罗意在这一课题上奉献了 20 篇论文和 6 本书。在德布罗意所有的 153 篇学术论

现的方式是受到爱因斯坦批评的，我们不要忘记去问这是为什么：也许这会告诉我们有关我们自己和社会有价值的东西。

译自“Physics today”（1965 年 1 月）

文和 33 种专著中,有 5 篇论文 2 种专著的标题中嵌有狄拉克的姓氏或“自旋 $1/2$ 粒子”的字样,而在标题中提到的其他科学家,最多的是玻尔也只有 2 篇。

1952 年由于玻姆在《物理评论》上发表了两篇题为“关于量子理论隐变量诠释的建议”的文章以及其它更根本的原因,德布罗意重新回到了他 1927 年“双重解理论”的立场。就在这一时期,由于量子电动力学中出现了以施温格,朝永振一郎和费因曼为首创者的所谓“重整化理论”,狄拉克也开始关心起量子力学的发展前途来了。尽管狄拉克的出发点同德布罗意的出发点完全不同,尽管狄拉克处理问题的方式也同德布罗意处理问题的方式不同,但是他们对物理实在的看法却基本相同或大体相仿,只不过德布罗意的视线瞄准将来而狄拉克的注意力集中在当前而已。这种基本相同或大体相仿的看法使得他们两人的立场进一步接近。甚至可以说,德布罗意和狄拉克之间在量子力学基础问题上的距离,在某种程度上比德布罗意同玻姆之间在同一问题上的距离还来得近。

一、德布罗意和狄拉克的共同立场

德布罗意和狄拉克的共同立场,简言之就是他们都对爱因斯坦相对论持完全肯定的态度。这种肯定,不仅仅是修辞上的欣赏和赞扬,而是在自己的工作中贯彻始终。在德布罗意的工作中经常应用相对论:德布罗意在其博士论文中所得到的“相位和谐定律”和在正统量子力学教科书中所一再提到的“de Broglie 关系”,就是他根据相对论原理导出的。德布罗意基金会主席洛切克说:“相对论是德布罗意理论的基本框架,因为他的相位和谐定律正是基于相对论不变……没有相对论,德布罗意无从理解波动力学,这也是他致力于 Dirac 方程而很少顾及 Schrödinger 方程的原因(他的光子理论的出发点就是 Dirac 方程);他的几乎所有工作都是基于相对论的。”1987 年 3 月 19 日清晨,德布罗意在巴黎近郊的塞纳河谷医院溘然长逝;第二天《费加罗报》就以通栏标题“法兰西的爱因斯坦”来褒扬他的一生。对德布罗意的这一立

场,狄拉克感慨最深。狄拉克说过:“在所有的人当中,最早想到粒子应一般地与波相缔合的是德布罗意。爱因斯坦在光子和光波之间的关系中已经建立了这一缔合,这在 1905 年他就这么做了。而德布罗意则将它推广到各种粒子。德布罗意完全是从数学美出发作这种推广的。这种数学美是人们通过建立相对论形式的方程而得到的。”“德布罗意建立了一个用 ψ 描述的波所遵循的方程。这个波动方程表明,如果有一些平面波在确定的方向上传播、并且具有确定的频率,那么这些波便对应于一个具有确定动量和能量的粒子。这个对应是相对论性的对应,并且是数学上一个精确的对应。”狄拉克还盛赞“de Broglie 关系”:“是一个很美妙的理论,因为这种联系是相对论的。”狄拉克同时承认他本人也有这种嗜好:“一旦看到了一些用非相对论形式表示的物理学,人们就能把它修改成适合特殊相对论的。这很像一种游戏。一有机会我就沉溺于此。”他认为:“相对论之所以得到如此普遍的承认,其主要理由就在于它的数学美。”当然,狄拉克对数学美的偏爱有点过头:相对论之所以得到普遍承认,不仅仅是由于其形式上的数学美,而更重要的是它具有本质上的物理美和哲学美。但是狄拉克对相对论能有这样的见解,在同类数学物理学家中已经是佼佼者了。德布罗意和狄拉克在量子力学的推理过程中应用相对论用得如此出神入化,以至于有人说:如果有朝一日能够确定相对论原理在建立正确的量子力学理论中的主导地位的话,那么德布罗意和狄拉克两人就是众多量子理论家中的绝代双雄。

与他们对爱因斯坦相对论完全肯定的态度有关,是他们在局域性问题上的相同认识。局域性问题同相对论密切相关:只有彻底相对论性的粒子,才是局域的;而非局域的理论,都是非相对论的。一部量子力学发展史,从某种程度上说来,实质上就是追求将量子力学同相对论相协调的历史。狄拉克认识到,“de Broglie 关系”是相对论性的,而 Schrödinger 方程反倒是非相对论的,由此他提出了以“Dirac 方程”

表示的相对论量子力学。在相对论量子力学中，粒子运动速度（即波的群速度）不会超光速，并且自动地解决了粒子的自旋问题，因此看上去它要比薛定谔理论来得精致。然而，狄拉克理论同薛定谔理论一样，其描写粒子运动的“Hamilton-Jacobi 方程”同样是非相对论的；换言之，狄拉克理论的“相对论性”还不够彻底。这种非相对论性导致了理论上的非局域性。其次，由于薛定谔理论和狄拉克理论都是线性的，因而它们用于处理多体问题的总能量表达式也是非相对论的。这就表明了以上两种量子理论所能达到的相对论性要求都是有限的，只不过程度上有所不同而已。对于理论中所出现的这种非局域性，狄拉克并不回避讳言，也不像玻姆那样转而去支持非局域量子力学。他说：“的确，我感到有一些量以非局域的方式变换，是与相对论的精神相抵触的。”“我们应当承认，将量子理论与相对论协调起来的问题还没有解决。物理学家目前所使用的一些概念是不充分的。”他尤其对“重整化理论”违背相对论协变性感到忿懑。狄拉克的这一态度与他无保留地肯定相对论的立场完全一致。德布罗意在局域性问题上的态度是众所周知的。德布罗意的愿望之一就是想要亲手解决量子力学的局域性问题。他的双重解理论就是这一坚定态度的集中体现。德布罗意学派认为局域性问题是下列三个问题的综合：(1) 粒子的运动速度不能超光速；(2) 粒子必须具有永久的保形性；(3) 粒子之间不可能全域相关。德布罗意和狄拉克在局域性问题上的立场同爱因斯坦完全一致。局域性原理正是爱因斯坦在 EPR 论文中首次提出来的。

德布罗意和狄拉克都主张物理学基本规律应当是因果性的和决定论的。德布罗意自不必说：他的许多论著都以醒目的“因果诠释”作为标题；在《量子论是非决定论的吗？》一文中，他说过：“在伟大天才们的经典时期，从拉普拉斯到庞加莱，总是宣传着自然现象的决定论……将概率引进科学理论中来，那是我们无知的结果。”狄拉克，作为工科学生出身的数学物理学家，他也说过：“因果性对于没有受到干扰的系

统仍是适用的……为描述未受干扰系统而建立起来的方程，就是表述某一时刻的条件与另一时刻的条件之间的因果关系的微分方程。”他还说过：“如果你对物理学基本定律中存在非决定论感到不安，那决不是你一个人有这种感觉；很多人都是如此。我也是这样。”“我个人仍然持有这样的成见，不主张在基本物理学中有非决定论。”“很可能过些时候我们可以得到一种改进了的量子力学，它将回到决定论，从而证明爱因斯坦的观点。”爱因斯坦和德布罗意赞成局域非线性量子力学，这种局域非线性量子力学并不要求牺牲决定论和因果性。相反，正统量子力学代表人物或以玻姆为代表的“波导理论”学派主张非局域的线性量子力学，这种非局域的线性量子力学则必将导致非决定论，而且除了玻姆的说法之外又都是非因果性的。当然，狄拉克对因果性和决定论的追求，还仅仅停留在认识上，他没有像德布罗意那样已付诸行动。

据德布罗意的学生博勒加尔回忆，德布罗意早在 1940 年就已认识到现有的量子力学形式体系不可能同(广义)相对论相协调。德布罗意从不涉足近二、三十年变得时髦起来的所谓“量子宇宙论”，因为他觉得这种时髦理论的基础十分脆弱。许多量子宇宙论的论文作者，简单地将量子力学中的能量-动量张量移入广义相对论场方程，或者反过来将广义相对论中的度规张量代进类似于 Klein-Gordon 方程的所谓“Wheeler-de Witt 方程”，就说是完成了量子宇宙论(或至多说，高维组态空间可以“紧致”化为物理空间)。对这种处理方法，德布罗意不屑一顾；因为他明白组态空间不同于物理空间，非局域不同于局域，线性不同于非线性；他尤其无法容忍量子力学“多世界诠释”中的宇宙观及其哲学倾向。德布罗意的这一立场得到了狄拉克的赞同。他说：“目前已有了一种明显的方式将标准的电磁理论方程应用于 Riemann 空间，以便它们能够适合爱因斯坦引力理论。但是所得到的理论是否真正能应用于自然界？人们对此还有怀疑。”尽管狄拉克在这句话中言及的仅仅是电动力学同广义相对论的协调，但他反对这

种简单搓合的意思是十分清楚的。狄拉克 1937 年所提出的、不成功的“大数假说”，实际上就是反对这种简单搓合的另一种尝试。

由于这些原因，德布罗意和狄拉克都认为目前的量子力学不是其最终形式。狄拉克说过：“我强烈地感到今天物理学所达到的阶段远非最终阶段；它只是我们的自然进化图景中的一个阶段。我们应当预期这一进化还要继续下去。”“我认为也许结果最终会证明爱因斯坦是正确的，因为不应将量子力学的目前形式视为其最终形式。”而德布罗意的态度则更进一步：他自 1927 年开始就在追求一种改进了的新量子力学；双重解理论就是他提出来的一种解决方案；当他年老体衰、无法胜任的时候，他还要求青年物理学家和有经验的数学家们能够完成他的未竟事业。

德布罗意和狄拉克的共同立场，尤其是他们对相对论的完全肯定态度，使得他们同爱因斯坦的关系十分亲密。德布罗意不但将爱因斯坦视作自己的兄长，而且视作自己的导师。德布罗意曾多次撰文纪念爱因斯坦的华诞或冥诞；他们之间曾就许多问题进行过信件交流。狄拉克尽管与爱因斯坦通信不多，但据狄拉克夫人说，狄拉克唯一一次流泪，就是因为爱因斯坦的辞世。

二、德布罗意和狄拉克之间的差别

尽管德布罗意和狄拉克在对待量子力学基础理论的问题上有着共同立场，但由于两人的出身背景、兴趣爱好和所受教育的不同，因而他们两人之间的差别也是明显的。

首先，在对待相对论，对待局域性，对待因果性决定论这些问题方面，德布罗意的态度坚决，而且付诸实施。甚至是 Dirac 方程，包括“非线性 Dirac 方程”（即 Heisenberg 的“宇宙方程”），德布罗意也要对其非局域性进行评论。德布罗意的这种不妥协立场以及由此带来的对法国物理学事业发展的影响，被“正统量子力学”学派斥之为“是一件坏事”，但对真正研究量子力学基础问题的科学家来说却是一件天大的好事。而狄拉克，则往往仅仅停留在认识上；也

可能他认识到这些问题已为时太晚，以致于来不及进行深入的研究。他说过：“非局域性是我们目前所能做到的最好办法。”“但是，我们必须承认，非决定论是我们目前的知识状态下所能达到的最好办法。”“我不得不接受这种非决定论，那是因为在目前我们还没有任何比这更好的东西。”从“基本粒子不基本”的观点来看，从阿斯派克特等人的实验结果以及对夸克禁闭问题的分析来看，目前还无法判断德布罗意的立场百分之百地正确，因而狄拉克以上这些说法是可以理解的，他的意见很正常。

其次，在对待对称性问题方面，德布罗意和狄拉克之间有不同的看法。狄拉克认为，一个物理系统的所有可能表象之间有着一定的对称性。在《量子力学原理》一书中，狄拉克认为表象间的等价性即是量子力学的根据之所在，并且是其优美之处。当然，从纯数学角度来看，这是毫无疑问的；但是，从物理学的观点来看却并非如此。这是德布罗意不赞成正统说法的一个基本点。早在 1952 年他就这么说过：“实际上，在所有能够实际测量的物理量中，位置单独作为一方，所有其他可能的变量的集合作为另一方，其间存在着很强的非对称性。一般说来，位置是任何物理学系统中唯一可以加以观测而无需制备的物理量。”对时间的对称性，德布罗意也有类似的观点；他认为由于时间只有一个方向，因而所谓“均匀时间”或“可逆性”都是为了推理或计算的需要而虚构的。德布罗意认为，对其他物理量的测量，最终都归结为位置和时间的测量。

因而，第三，可以看出，德布罗意重视的是物理学，而狄拉克则比较侧重数学；德布罗意重视的是直觉，而狄拉克则比较侧重理性。德布罗意私下曾承认自己的数学功底不深，他常常为自己没有及时发现 Schrödinger 方程（更不用说 Dirac 方程）而遗憾，也经常为无法继续深入研究双重解理论而感慨。在数学方面，狄拉克的优势是明显的。对“Dirac 方程”和“Dirac 算符”的称道几十年来不绝于耳。但是，狄拉克在物理思想方面不如德布罗意深刻，也是有目共

睹的。

同样,第四,也可以看出,德布罗意强调的是将来,而狄拉克则比较注重现实。德布罗意家族的祖训“为了将来”(现已作为德布罗意基金会的铭牌),就是德布罗意工作特征的最好写照:他的许多工作都是高瞻远瞩的,相比之下,狄拉克所说的“目前所能达到的最好结果”,就显得有点只顾眼前了。当然,在说到狄拉克的这一工作特征时,人们不应忘记他对目前流行的量子力学的不满。

第五,德布罗意对非线性问题非常重视,相形之下,狄拉克对非线性问题就很少涉及。洛切克曾引用德布罗意的话说:“线性是一种特征,而非线性就是没有特征。”换言之,线性是有条件的,非线性才是无条件的。德布罗意“双重解理论”中有一个关于“波的方程就是非线性的。早在1953年,德布罗意及其学生就开始研究具有类孤波解的非线性波动方程。他的学生们将这种孤立波称为“驼峰解”。德布罗意的这一思想同爱因斯坦是合拍的。爱因斯坦认为“所有逻辑简单的物理学方程必然是非线性的”,还说过:“由于物理学的基本方程都是非线性的,因而所有的数学物理方程都必须从头研究。”反观狄拉克,他对非线性问题就似乎没有说过什么话;他的许多理论工作都是建立在线性空间、线性数学的基础之上的。量子力学发展史上唯一一个与狄拉克的姓氏有关的所谓“非线性Dirac方程”(即“宇宙方程”)不是由狄拉克本人而是由海森伯提出来的。德布罗意在1958年曾撰文研究过这一非线性方程同双重解理论的关系。

第六,在对哥本哈根学派的态度上,德布罗意和狄拉克两人也有不同的表现。1927年10月的Solvay会议上,德布罗意过招时由于不慎作了关于“波导理论”的报告而遭惨败;哥本哈根学派大获全胜。会议之后,德布罗意沉默了三年,并不得不违心地在课堂上和会议上为他人

作嫁。尽管心有不甘,但表面上不得不随大流,直到1952年他才公开回到原先的立场。狄拉克则不同:他早年可以说是哥本哈根学派营垒中的一员大将,50年代以后由于在“重整化”问题上的思考,才使他背离原先的阵营。使他背离哥本哈根学派的直接原因,是他不愿抛弃相对论。在因相对论和流行的量子力学尖锐冲突无法两兼令人不得不表明立场的十字路口,狄拉克最终选择了相对论。这就同德布罗意殊途同归,并且同德布罗意产生了共同语言。当然由于历史的原因,狄拉克的许多工作仍带有典型的哥本哈根学派色彩。

最后,需要说明的是,德布罗意和狄拉克对哲学、对文学的看法也有许多不同。德布罗意是一位思想家:他无论写科学论文,无论写科学史料,都带有一定的哲理。尽管他不是一位职业哲学家,但他文中像“因果性”、“决定论”这样的字眼随处可见。据博勒加尔说,德布罗意又是一位热心的人文学者:他对文学、绘画和诗作十分精通。而狄拉克则相反:他对人文学科从来就没有好感。他曾说过:“我本人的思路实际上是把重点放在能用方程形式表达出来的思想上,而玻尔的许多思想都带有更加普遍的特征并与数学相去甚远。”“我感到哲学家所说的一切都是相当不确定的。”“我并不认为哲学对物理学的进展会有任何贡献。我并不是一下子就有这种看法的。只是在经过许多思考,并且研究了哲学家的议论后才得出这种看法的。”当然,从狄拉克后期关于“因果性”、“决定论”的言论中可以看出,他对哲学也并不是完全陌生的:他只不过讨厌“纯粹”的哲学而已。狄拉克对诗作的看法更为奇特。有一个出名的故事讲到他曾对奥本海默说:“我听说你写诗就像你研究物理学那样出色。你是用什么法子将这两者结合起来的?要知道,在科学上大家都尽力使人们将过去不明白的事物弄清楚,而在诗里,事情却恰恰相反!”