

量子力学解释理论的建立及发展

佳木斯教育学院 厚宇德

作为现代物理学基础的量子力学,几乎一诞生就成了哥本哈根学派的特有领地。虽然量子力学在理论研究和实际应用上取得了巨大成功,但哥本哈根的解释理论一直受到爱因斯坦等物理权威的批评。今天,物理界这场旷日持久的论争已有了近乎明朗的结局。本文试回顾量子力学解释理论的建立过程及发展趋势。

一、量子起源

1900年,普朗克研究黑体辐射时第一次提出了能量量子化假设,这一年,是公认的量子论诞生年。1905年,爱因斯坦发展了普朗克的学说,提出了光量子理论,第一次将光看成是波动性与粒子性的统一体。从而,成功解释了赫兹的光电效应。

普朗克和爱因斯坦的这一部分工作在物理学史上有其重要地位,但使量子论产生深刻广泛影响的是玻尔。玻尔为解除卢瑟福有核模型的稳定性困难,1913年提出了新的原子理论,给出了定态和跃迁概念以及角动量量子化假设。玻尔理论相当出色地解释了氢原子光谱实验规律,成为量子力学形成前集其大成的量子理论。

二、德布罗意波

1924年,德布罗意把实物粒子和光子相类比,受爱因斯坦理论的启发,大胆提出了微观实物粒子也具有波动性的假设。实物粒子的这种波通常称物质波或德布罗意波。这一假设仅仅是个序幕。在它面前的问题之一就是,以前,人们从来不曾认为实物粒子与波能统一为一体,因为波总是在空间传播着的,而实物粒子则是凝聚的、定域的。为解决这一困难,德布罗意先后提出两种模型。其一是导波说:一个实物粒子仿佛坐在一个波上,随波而行。其二是波包说:粒子是波的一种紧凑结构——波包。在1927年的索尔威会议上,经分析讨论德布罗意的波粒统一模型遭到全体的一致否定。不过波包这一概念,在其后著作中还是经常被一些物理学家运用。在同一年,戴维逊和革末观察到了电子衍射,证明了电子具有波动性,说明了德布罗意物质波假说是正确的。

三、薛定谔的工作

玻尔的量子化条件是一条生硬的假设,不能令人信服,薛定谔还觉得玻尔的跃迁概念难以让人接受。他坚信,自然界能够以自然的明显的直观的方式加以理解。1925年他开始研究德布罗意的思想,给出了在微观世界中相当于宏观世界牛顿第二定律地位的薛定谔方程,创立了波动力学(与此同时,海森伯创立了矩阵力学,狄拉克将二者统一起来,统称量子力学)。与德布罗意一样,薛定谔认为粒子是一个波包。波函数 ψ 描写波包的运动状态, $|\psi|^2$ 代表微观粒子在空间的密度,因此 ψ 描写实在的波。他还用波的干涉衍射来取代玻尔的定态和跃迁。薛定谔的波动力学是成功的,但他对 ψ 的理解是错误的。按他的观点电子会很容易被分开。

四、玻恩的统计诠释

1926年,玻恩给出了薛定谔的波函数 ψ 的统计诠释。他认为,物质波并不象经典波代表什么实在的波动,只不过是粒子在空间的出现符合统计规律:我们不能肯定粒子某时刻一定在哪,我们只能给出这个粒子某时刻在某处出现的几率,因此物质波是几率波。玻恩说:“当薛定谔波动力学出现时,我立刻感到它需要一个非决定论的解释,并且猜到了 $|\psi|^2$ 是几率密度…”值得一提的是玻恩提出统计诠释后,曾说:“爱因斯坦的想法仍然是指导性的。他将光波振幅的平方看成是光子出现的几率密度…”

五、海森伯的测不准关系与测量理论

海森伯于1927年提出测不准关系。当时他对云室径迹显示电子是个粒子,而人们又说它具有波的性质,感到迷惑。进而他怀疑玻尔的氢原子

编者按:

今年8月15日是法国物理学家L. V. 德布罗意诞生百年纪念日。1924年他获巴黎大学博士学位,在博士论文中首次提出了“物质波”概念。E. 薛定谔在1926年发表有关波动学论文时认为:“这些考虑的灵感,主要归因于德布罗意先生的独创性的论文。”德布罗意于1929年获诺贝尔物理学奖。为此,本刊发表厚宇德、王德云文章,以资纪念。

中电子有轨道的观点是否合理。深入的研究使他发现微观粒子位置的不确定量 Δx 与动量不确定量 Δp 之间满足测不准关系： $\Delta x \Delta p \geq \hbar/2$ 。

根据测不准关系，如果一个粒子出现的地点被确切地确定，用波的图象来说即在这一位置存在一个缩拢到很小空间的波包。这样波包不稳定，会立刻分散开。这用粒子图象来说意味着不能赋予这粒子运动速度任何确定数值及方向，即粒子位置知道得越准，粒子速度（动量）越不确定，反之亦然。因此，哥本哈根学派认为测不准关系有助于理解玻恩的统计诠释及波粒二象性。

由测不准关系还可以推论出哥本哈根学派常谈的测量理论。海森伯认为，在经典情况下我们能用光子测量物体的准确位置，而光子对宏观物体的作用可以忽略不计。但在微观世界，光子与电子的相互作用是不可忽略的。因此用光波测定电子位置时，电子的动量变得不确定。一个纯粒子其位置和动量在某一时刻是唯一确定的。电子位置确定则动量不确定，即已显示非粒子性。而这又是测量所避免不了的。所以海森伯说：“不用深入到问题的细节我们就可以断定，观测行为在被观测事件上所引起的那部分原则上不可控制的干扰，是讨论原子现象时起决定作用的一个特征。”由此可以看出哥本哈根学派认为粒子具有波粒二象性其缘由不是粒子的自身特性，而是由于外加测量对粒子的干扰造成的。

六、玻尔的互补原理

1927年，玻尔提出互补原理，认为微观客体的互斥的粒子图象与波动图象其实是互补的，其中每一图象都只是部分地正确并有有限的应用范围，而要对微观客体进行全面描述，每一图象都是需要的。哥本哈根学派称此原理“已看到了自然界的秘密的内在机构”，“量子状态概念至此已获得澄清”。从此，互补原理成为该学派的基本哲学观点，号称哥本哈根精神。但是我们觉得，互补原理不过是在无计可施情况下对自然奥秘无可奈何的默认。充其量也只是对玻恩和海森伯工作的总结，并没给出什么更新的内容。现在基本公认测不准原理是互补原理的数学基础。互补原理确立后，哥本哈根量子论观点即宣告完成，因为再没有什么惊人的主张。从此，他们认为“原子物理学搞的是最基本的不可再分的过程或实体，不存在更小的微量可用来使观察不产生有影响的干扰”，所以，“测不准关系将永远坚持下去”，因此，“量子力学是一种完备的理论，它的基本数学或物理学的假设不容进一步修改”。这完全是固步自封。

七、爱因斯坦与量子理论

爱因斯坦自己不仅创立了光量子说，他还直接影响了德布罗意和玻恩。这二人的工作完全可以说是爱因斯坦思想的发展。但爱因斯坦一直是反对哥本哈根

学派的领袖。分歧在于，虽然爱因斯坦早在1901年就独立于吉布斯提出统计力学的一些基本原理，但在他看来，统计规律绝不是关于自然的最终理论。他称自己的光量子理论为一种权宜之计。他认为，终极理论应该对任何物理客体都存在因果性描述。而这恰恰是哥本哈根学派自称完备的理论所不具备的。波函数的统计诠释无法对一个电子的行为做出因果性预测。

在第五届、第六届索尔威会议上，爱因斯坦都宣布实验结果冲击测不准关系，但都被玻尔及时驳倒。之后，爱因斯坦的思想转向量子力学描述的完备性问题上来。物理学史上给人的印象仿佛爱因斯坦最后的反击方向的选择是节节败退的结果。其实爱因斯坦的几次发难，思想是前后一致的。他说：“我对统计性量子理论的反感，不是针对它的定量的内容，而是针对人们现在认为这样处理物理学基础在本质上已是最后方式的这种信仰”。1935年，他和波多尔斯基及罗森提出“EPR悖论”，论证了在对体系I的测量不干扰体系II的情况下，不能同时确切测量的两个量，能同时具有确定的值，因此，他们认为量子力学是不完备的，粒子的本性并非不确定的。爱因斯坦还论证了量子力学存在如下悖论：两个相互作用后在空间分离开来已不再互相影响的量子系统，对其中一个的测量将会影响到另一个的状态。他敏锐地指出，这是由于某些尚未发现的因素即“隐变量”引起的。否则“要么量子力学是不完备的，要么存在超距作用”。当时物理界已抛弃了超距作用，但玻尔仍辩解没有理由认为空间上分隔的两客体间没有联系。这种反驳是苍白无力的。

1965年贝尔改进了EPR悖论，论证了任何局域性隐变量理论都不能给出量子力学的全部统计性预言。1979年斯塔普把贝尔的发现进一步表述为广义贝尔定理：没有任何局域性理论能重复给出量子力学的全部统计性预言内容。说明当前的量子力学本质上是非局域性的，而允许超距作用存在。这一结果恰恰是爱因斯坦分析到的但认为是不可能的结果之一。我们相信这也出乎玻尔的预料，否则他不会在论争中那样自信。无论如何，争论本身毕竟推动了科学的发展。量子力学非局域性的发现，为深入揭示量子现象的本质提供了一条途径；对超距作用的研究有可能弄清测量仪器对微观客体的作用机制。这样，测不准关系也有机会受到真正的检验。但是这方面的进展几乎没有，倒是反对哥本哈根学派的玻姆的理论，对此有包容有发展。

八、玻姆的理论

玻姆是在爱因斯坦的直接激励下，从事量子力学隐变量理论研究的。量子力学的隐变量理论可作如下定义：一个量子力学系统的态 ψ 是不完备的，即系统需要由 ψ 以及隐变量 ξ 共同确定。亦即关于 (ψ, ξ) 的完整知识可以使人们精确地预言任何单次测量的结

方守贤：“积极支持《现代物理知识》这一通俗刊物，促进青年人热爱科学、热爱物理有很大作用”。

丁大钊：“信息量大，雅俗共赏。不同层次的人阅读后均有所得益。”

果；而且，对 δ 值取平均将得到通常量子态 ψ 。开始玻姆把粒子的坐标与速度视为隐变量。其实关于粒子的变量无所谓隐不隐可言，因此他后期已不再使用隐变量这个名称了。

1932年冯·诺伊曼首次对隐变量的可能性作出了否定性数学论证。而玻姆一方面坚持爱因斯坦关于量子力学对物理实在描述不完备的观点，另一方面，又采纳玻尔关于量子现象整体性相关的观点（即允许超距作用存在），使得他能避开冯·诺伊曼论证的制约。

他将波函数写成指数形式： $\psi = R e^{-\frac{iS}{\hbar}}$ ，代入薛定谔方程后可以得出量子力学的哈密顿——雅可比方程：

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \frac{(\nabla S)^2}{2m} + V + Q = 0$$

其中 $Q = -\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\nabla^2 R}{R}$ 称量子势。

玻姆根据哈——雅方程认为：在量子力学领域，微观粒子具有本体论意义。即理论中的粒子应视为实实在在的连续运动的粒子，它具有动量 $p = \nabla S$ ，不仅受经典势 V 的作用，还受量子势 Q 的作用。而按量子力学本质上电子既不是粒子也不是波。我们不能一步一步跟踪原子中电子的路径，否则我们会发现电子是波还是粒子。

量子势的存在乃是经典理论与量子理论之间差别的主要源由。由量子势的定义式可知它与关联的粒子的波函数的强度无关，仅依赖于波函数的形式。因此，及使这个波由于在大距离上传播而扩散开来 ($R^2 \rightarrow 0$)，量子势也可能有很强的效应（即 $\Delta R/R$ 并不必然趋于零）。玻姆的研究表明：只要承认及使在没有经典场的“空”的空间粒子仍受到一个不随距离的增加而衰减的量子势的作用，就能解释波粒二象性（这就是玻姆波粒统一解释的新观点）。这一观念称量子力学的 AB 效应，最初由阿哈拉洛夫和玻姆二人于 1959 年提出。最近，新村彰等人第一次成功地观测到了 AB 效应。这无疑是对玻姆理论的最有力支持。

玻姆还完成了不同于哥本哈根学派的测量理论，在新测量理论中，客观的微观实在既独立于测量仪器，又独立于人的意识，使得对于一次具体的跃迁何时发生的问题能够进行预测。

显然，玻姆的工作具有重大意义，只要人们对量子势的物理图象有更深刻的认识，量子势被证为真实的，则为爱因斯坦与玻尔的争论画下句号的时期就来到了。但超距作用对相对论的冲击以及量子势对量子力学的冲击使我们有必要重新考察它们的适用局限等。

学部委员评《现代物理知识》

冼鼎昌：“这是一份很好的现代物理高级科普刊物，将最前沿的当代物理发展介绍给读者，深入浅出，科学性 & 可读性均相当好，是一份难得的刊物。”

王淦昌：“本刊是一种很好的较高层次的物理普及知识刊物。”

郭仲衡：“本刊物信息量大，反映本学科最新动态及时，经常有许多很生动的文章，对培养年青一代起良好作用，是一份普及现代物理的优秀刊物。”

谢家麟：“本刊对宣传、普及近代物理知识，推动我国科技现代化有很重要的作用。”

《中国物理快报》简介

《中国物理快报》是中国物理学会主办的高级英文学术月刊，其宗旨是迅速向国内外传播我国物理学界在理论和实验物理方面的最新成果，并介绍与物理学有关的交叉学科和应用方面的新成就。

《中国物理快报》是物理学会主办的七种学术刊物中唯一的快报型刊物。它的文章篇幅简短，出版周期短，特别强调所反映的研究工作的创新性。在目前科学迅速发展，信息量大量增加的时代，这种类型的刊物普遍受到重视。

《中国物理快报》的英文名称叫作 Chinese Physics Letters。它由设在中科院物理研究所内的编辑部编辑、排版，并在国内自办发行。除封面外内容完全相同的国外版则由美国纽约的阿莱顿公司出版、发行。

《中国物理快报》自 1984 年创刊以来，已成为我国物理学的核心期刊之一。它所发表的文章有较高的学术水平，能较全面地反映我国物理学的最新成就。它的论文发表周期平均六个月左右。对于具有突破性的成果，经过一定的审查程序，允许以更快的速度发表。例如，我国科学家一项关于 X 射线激光的研究工作，从投稿算起，仅用了一个半月，就在 1991 年 12 月份的 8 卷 12 期上发表了。

《中国物理快报》的学术地位已为国际上最权威的检索系统所确认。1989 年，美国的《科学引文索引》(SCI) 将选用我国期刊的数量降为 9 种，而创刊不久的《中国物理快报》系当年新增的。英国的《科学文摘》(SA) 确定了摘录频率最高的核心刊物 750 种，我国入选 8 种，其中之一便是《中国物理快报》。在美国的《化学文摘》(CA) 所引用的刊物中，《中国物理快报》居第 763 位，在入选的国内刊物中居第 19 位。

我国科学要走向世界，必须伴以科学期刊同时走向世界。热切地希望有志于此目的物理学家和广大读者爱护、关心、支持《中国物理快报》。(李力伟)