

# 哥本哈根学派与量子力学

薛志宇

(伊盟电大物理系 内蒙古 017000)

量子力学是现代物理学的基础理论之一，是研究微观粒子的运动规律，是关于微观粒子波粒二象性的理论。量子力学诞生至今已有七十多年的历史，七十多年来，它不仅促进了物理学理论的发展，也促进了整个自然科学的发展。对量子力学的解释一直存在着争论，以爱因斯坦为首的薛定谔、德布罗意学派与以玻尔为首的海森堡、狄拉克、玻恩学派间的争论最为激烈，但这种争论并不影响量子力学在物理学乃至整个自然科学中的基础地位。当代物理学理论的深入发展愈来愈证明争论的必要性，然而我国关于量子力学的教科书几十年来只宣传哥本哈根学派的观点，我们觉得不够全面，特别当前一些实验支持了量子力学理论是不完备的观点，这就要求我们不仅要宣传量子力学的两派观点，而且应该继续对量子力学进行研究。本文简要介绍哥本哈根学派及量子力学的建立。

## 一、哥本哈根学派

哥本哈根学派的形成要从哥本哈根理论物理研究所说起。本世纪20年代量子论在物理学界引起极大的关注，很多有名望的物理学家都参与了这一理论的研究。围绕原子结构的研究展开激烈的讨论，在这方面首先取得突破性进展的是丹麦科学家玻尔。玻尔以《原子和分子的结构》为题在1913年先后发表了三篇论文，在物理学界引起极大的轰动，这三篇论文成为物理学历史上划时代的著作。在这些文章里，玻尔带着明确的方法论意识把量子假设应用于原子模型，对原子的光谱线作了解释，取得了成功。由于玻尔在理论物理学前沿出色的成就赢得了国际物理学界崇高声誉。当时玻尔在哥本哈根大学执教，为了更好地开展物理学理论研究，也为方便于别国科学家到哥本哈根进

行学术交流，于1921年在哥本哈根大学创立了理论物理研究所，玻尔担任所长。由于玻尔在国际物理学界的影响，在他的周围很快吸引了一批优秀青年科学家。据统计20年代到玻尔研究所工作一个月以上的学者有63人，来自17个国家，其中10人获得诺贝尔物理学奖，这些科学家中著名的有：玻尔、海森堡、玻恩、狄拉克、泡利等人。玻尔创立的哥本哈根大学理论物理研究所，主要目标是研究原子结构，后逐步转向研究原子核结构。1965年玻尔去世后人们为了纪念他，将哥本哈根大学理论物理研究所更名为玻尔研究所。20年代年轻的物理学家都希望到哥本哈根工作一段时间，目的是向玻尔讨教。为什么有那么多的科学家聚集在玻尔周围呢？主要有两个原因，其一，20年代玻尔在理论物理前沿的成就受到赞誉，许多物理学家折服于他的思想；其二，玻尔的为人是物理学界公认的，他人品高尚，喜欢与人讨论问题，善于引导年轻人正确思考问题，凡与他交流、讨论甚至激烈反对他的理论的人都能从中受益，他常以最友好的态度对待反对他理论的科学家。用玻尔自己的话说，他不怕在年轻人面前暴露缺点。一次海森堡听了玻尔的报告后提出了一些不同的意见，会后玻尔邀请他散步讨论这些问题，海森堡回忆说：“这次讨论对我今后的发展显然产生了决定性的影响”，他认为真正的科学生涯是从这次讨论开始的。用爱因斯坦的话说，作为一位科学思想家，玻尔所以有这么惊人的吸引力，在于他具有大胆和谨慎这两种品德的难得融合；很少有谁对隐秘的事物具有这样一种直觉的理解力，同时又兼有这样强有力的批判能力，他不但有关于细节的全部知识，而且还能始终坚定注视基本原理，他无疑是我们时代最伟大的发现者之一。20年代玻尔

研究所在量子力学方面的贡献是主要的,以玻尔为首的海森堡、狄拉克、玻恩等人建立了系统的量子力学理论,而且对量子力学的解释形成了比较一致的意见,他们认为波函数的几率解释是最后的解释,量子力学是一个非决定论的统计理论,统计规律是首要的,根本的.而以爱因斯坦为首的薛定谔、德布罗意、普朗克等人也对量子力学的建立作出了突出的贡献,这一学派也认为统计规律不同于经典的决定论或动力学规律,但统计规律只是我们对系统认识不完备才引起的一种临时办法,物理学的统计理论只不过是一种不充分的、不完善的理论.他们相信自然界中严格的因果性,他们认为同动力学规律相比,统计规律是次要的,暂时的.显然在量子力学的建立过程中两派的认识不尽一致,一有机会就展开激烈的争论,这种争论从20年代量子力学建立到50年代量子力学在各个领域获得了广泛应用一直没有停止过.人们把以哥本哈根大学理论物理研究所为中心,以玻尔为首,主要成员是海森堡、狄拉克、玻恩、泡利等人的这一学派称之为哥本哈根学派.由于当时物理学的实验较充分的支持了哥本哈根学派的观点,所以人们又称哥本哈根学派为正统派(或主流派),他们对量子力学的解释称为正统解释.

## 二、量子力学的建立

19世纪末和20世纪初物理学发展中重大突破之一是产生了量子论,在此基础上建立了量子力学.1900年,普朗克修正了维恩定律和瑞利-金斯定律之后,建立了一个在全波段都与实验结果一致的公式,为了解释他的公式,普朗克经过反复研究最终提出一个与经典物理学的连续性观念根本不同的假设,即物体在发射辐射和吸收辐射时,能量不是连续变化的,而是以一定数值的整数倍跳跃变化,即 $\mathcal{E} = h\nu$ ,能量不连续性的提出标志着量子论的诞生.这种不符合经典理论的新概念当时在科学界引起很大反响,多数科学家持反对态度,连普朗克本人也曾发生过动摇.对量子论的形成具有重大意义

的另一物理现象是光电效应.光电效应是19世纪80年代斯托列托夫、赫兹等科学家发现的.之后很多科学家对此进行研究,1902年勒纳德等人较全面的总结了光电效应研究的现象:①入射光的强度越大,打出的电子数就越多;②光辐射打出电子的速度与入射光频率成正比,与光的强度无关,增加入射光的强度不加大光电子的动能;③如果入射光的频率小于某一截止频率,无论入射光有多强,照射的时间有多长都不会发生光电效应.经典理论无法说明光电效应的实验事实.在物理学理论的变革中始终走在前沿的具有科学敏锐眼光的爱因斯坦从普朗克的能量量子化理论中看到了新理论的曙光,在深入研究能量量子化的基础上于1905年提出,不仅能量的辐射和吸收是不连续的,电磁波本身也是量子化的,并且指出照射到金属表面上的光,就是光量子流,频率为 $\gamma$ 的光,就是能量为 $h\nu$ 的光量子流.爱因斯坦的光量子理论不仅从理论上圆满解释了光电效应现象,而且发展了普朗克的量子论.19世纪原子物理学已建立起一套较完整的理论,卢瑟福的原子模型是科学家公认的原子结构理论,但电子绕核运转的模型和经典理论有矛盾,根据经典理论电子绕核运动是一种有加速度的运动,电子就要放出辐射,能量越来越小,最后电子会落在核上.那么如何解释原子的稳定性呢?在卢瑟福实验室访问的年轻学者玻尔对卢瑟福的原子模型进行了改造,提出了两条假设,①原子中的电子只能处在特定轨道上绕核运动,不同的轨道能量不同,电子在同轨道上运动既不吸收能量也不放射能量;②原子中的电子可以由一个定态轨道跃迁到另一定态轨道,当跃迁发生时,才会发射电磁辐射,其频率 $\gamma = (E_1 - E_2) / h$ .玻尔引入上述量子化条件后,解释了原子的稳定性和有关原子光谱的部分实验事实.但玻尔在引入量子化条件时又应用了经典轨道概念,在理论上是混乱的,还需要进一步改进.

爱因斯坦提出光量子理论之后,特别是康普顿、吴有训的X散射实验的成功,科学家普遍

认识到光子具有波粒二象性。德布罗意深入地研究了量子论,于1922年在一篇关于黑体辐射的论文中用光量子假设和热力学分子运动论推导出维恩辐射定律,在光子气的假设下,得出了普朗克定律。1923年9月10日,德布罗意发表了关于量子力学研究的第一篇论文《波和粒子》,在文中从与粒子能量相联系的频率 $\gamma$ 出发,作了一个大胆的设想,认为一般的物质也具有波粒二象性的性质,从而提出物质波概念。物质波概念提出后,他又用物质波理论导出了波尔量子化条件。同年9月24日,德布罗意发表了关于量子力学研究的第二篇论文《光量子,衍射和干涉》,在文中指出用实验验证粒子波动的可能性,他预言:一束电子穿过非常小的孔可能产生衍射现象,此预言在1927年由戴维逊和汤姆逊电子衍射实验的成功而证实。同年10月发表了第三篇论文《量子,气体动力学理论与费马原理》,在文中给出光学和经典力学类比的结论。1924年11月,发表了第四篇论文《量子理论的研究》,即德布罗意的博士论文,在文内除论述了前三篇文章中涉及的主要内容外,还得出波长与动量的关系,德布罗意认为一个动量为 $P$ ,能量为 $E$ 的自由运动的电子,相当于一个波长为 $\lambda = h / P$ ,频率 $\gamma = E / h$ ,并沿粒子运动方向传播的平面波, $\lambda = h / P$ 与 $E / h\nu$ 合称爱因斯坦-德布罗意关系。物质波理论圆满地解释了波尔量子化条件,同时使科学家们进一步认识到波粒二象性不仅是微观粒子具有的性质,而且是物质世界具有的普遍特性。物质波理论是建立量子力学的基础,更确切地说是波动力学诞生的开始。可以说由于德布罗意的物质波理论才触发了量子力学的建立。当时德布罗意的导师郎之万看到他的博士论文后拿不定主意,就将一份寄给爱因斯坦,爱因斯坦认为论文非常有价值,在给郎之万的回信中说:“德布罗意揭开了巨大面罩的一角”。在向其他科学家介绍物质波理论的同时,爱因斯坦运用物质波理论研究单原子理想气体,并与玻尔合作提出玻色-爱因斯坦统计方法。

在爱因斯坦向科学家们积极宣传德布罗意

的观点的同时,薛定谔开始研究物质波理论,他在接触物质波理论的初期是持反对态度,就在爱因斯坦向他宣传这个理论时,他都感到不可思议。而在与爱因斯坦多次通信讨论这个理论的基础上,并深入研究了德布罗意的论文之后他才接受了这个理论,同时指出德布罗意的工作“没有从普遍性上加以说明”。为了寻求普遍规律,薛定谔于1926年1月、2月、5月、6月先后写了四篇论文,总题目是《作为本征值问题的量子化》。他的第一篇论文是与时间无关的薛定谔方程;第二篇是含时间的薛定谔方程;第三篇是与时间无关的薛定谔微扰理论,在这篇论文中首次提出“波动力学”的概念;第四篇是含时间的薛定谔微扰理论。薛定谔在这四篇论文中找到了物质波运动的普遍规律,建立了波动力学。他在完成波动力学的创建过程中,接受了玻尔对应原理的思想,他认为量子力学与物理光学相类似,因此也必然存在一个物质波的波动方程与光的波动方程相类似,于是他就仿照波动方程的具体形式得出薛定谔方程。薛定谔方程是波动力学的基本方程,方程中的未知函数 $\psi(x, y, z, t)$ 称为波函数。当时薛定谔并不明确波函数 $\psi(x, y, z, t)$ 的物理意义,把它解释为实在的波动,而粒子是波的密集,即波包,由于波包会随时间无限扩展,所以薛定谔的解释与粒子稳定性这一事实不相符合。那么波函数应当怎样解释?在薛定谔第四篇论文发表不久,玻恩于1926年6月,在一篇题为《散射过程中的量子力学》一文中首次提出波函数的统计解释。玻恩以粒子碰撞的实验事实为基础,把描述电子与爱因斯坦描述光子的方式相类比,认为波函数 $\psi(x, y, z, t)$ 是电子随时间和位置坐标变化的几率函数,电子的几率与波函数模的平方成正比。玻恩的解释物理意义明确,并与量子力学的其他部分统一;玻恩的解释首先在哥本哈根学派内部得到了统一,成为哥本哈根学派的正统解释,随后这一解释很快被多数科学家接受,但爱因斯坦、薛定谔等人持反对态度。

矩阵力学是海森堡建立的,他是哥本哈根

学派的主要成员,与玻尔一起工作过,对玻尔非常尊重,但他并不因此完全赞同玻尔的理论,他赞赏玻尔主张“实验结果要用与之对应的原理来解释”,对玻尔的轨道量子化理论有所怀疑,认为它不严格,而且用了位置和速度的经典概念,他赞同“分析性和严格性”的要求,认为一开始就应该有严格的形式,他接受了爱因斯坦的思想,一个完善的理论,必须依可观测量为依据.把物理量建立在可观测的基础上.他认为原子物理中所谓的轨道上运动的电子的位置和速度是不可观测的一种虚构,而可观测的是原子发射出谱线的频率和强度,这就是海森堡建立矩阵力学的主导思想.1925年7月,海森堡完成题为《关于运动学和动力学关系的量子论诠释》的论文,第一次给出了微观粒子运动规律的矩阵力学.在海森堡矩阵力学的基础上,玻恩、约尔丹合作写出了《量子力学I》,随后海森堡又与玻恩、约尔丹合作发表了长篇论文《量子力学II》,比较系统地阐明了矩阵力学的原理和方法.1927年3月,海森堡在《量子论的运动学与动力学的直觉内容》论文中,提出量子力学的另一基本原理测不准关系,玻尔在同年9月以“量子公设和原子论的最近发展”为题的讲演中首次阐述了互补原理.至此量子力学的理论框架就全部建立起来了.然而在量子力学的深入发展和外延方面作出突出贡献的是狄拉克,他在深入研究海森堡思想和矩阵力学的基础上,于1925年11月发表了《量子力学的基本方程》,在该论文中他抓住了量子力学量不可对易性的关键一点,把海森堡的不可对易的乘法规则纳入哈密顿理论体系,使海森堡的矩阵力学成为严密的理论.1926年12月提出变换理论,从矩阵力学导出了薛定谔方程.1927年发表了《量子代数学》的论文,使量子力学成为既与经典力学不同,又相互衔接的完整的理论体系.同时他通过把量子化过程应用于电磁场波函数本身,建立了完备的辐射理论;他从量子力学出发,推导出爱因斯坦辐射理论,开创了量子电动力学和量子场论.1928年他又将量子论与相对论结合起来,建立了有关电子理论的著

名的狄拉克方程.1930年他对量子力学的研究作了全面的总结,写成了《量子力学原理》这本集大成的世界名著,至此量子力学的系统理论才算建立起来.

量子力学、波动力学、矩阵力学概念首先分别由玻恩、薛定谔、海森堡提出,多数文献又把波动力学和矩阵力学统称量子力学.波动力学和矩阵力学是从两个不同方面研究共同的问题,其效果是相等的.但这两种理论创立初期互不了解,因此双方互相对立,有时非常激烈,但薛定谔还是研究了海森堡的论文,并于1926年4月,发表了《关于海森堡-玻恩-约尔丹的量子力学与我的波动力学之间的关系》一文,证明了波动力学与矩阵力学是等价的.但对量子力学的诠释问题两派所持观点互不相让.从30年代到50年代由于实验支持了正统派的解释,这个期间多数科学家接受了哥本哈根学派的观点.但近年来,由于氢原子相干态的理论实验的研究结果对哥本哈根学派对量子力学的解释提出了挑战,愈来愈多的科学家认为量子力学是不完备的理论.随着科学理论的实验技术的深入发展,说明量子力学不完备的理论可能还会出现,但我认为这并不影响量子力学的基础地位.由于量子力学的创立才出现了量子统计物理学、量子电动力学、量子场论、量子化学、量子生物学等新的学科;也由于有了量子力学才产生了半导体、激光等新技术;当前自然科学的理论及高新技术的发展无不以量子力学为基础.因此我们说量子力学不仅是自然科学的基础理论之一,也是整个现代科学技术的基础理论之一.

