

· 科学技术史 ·

## 量子力学的两个研究纲领\*

王 作 跃

拉卡托斯的科学研究纲领方法论认为,科学是靠不同的研究纲领竞争淘汰而发展的。这些研究纲领由指导性的“硬核”和保护性的“辅助假设”组成。<sup>[1]</sup>本文借用“科学研究纲领”概念,在近年科学史家研究的基础上,考察爱因斯坦和玻尔不同的量子纲领及其对薛定谔波动力学和海森伯矩阵力学创立的影响。

值得指出的是,早在拉卡托斯之前,爱因斯坦和玻尔就用过纲领(programme)来分析科学的发展,描述自己的科学目标和方法。爱因斯坦认为,从牛顿的“力学纲领”到麦克斯韦的“场论纲领”,科学的目的在于构造理论来完备地描述物理实在,物理学最终应统一在一个因果连续的时空场中。他认为自己的相对论构成这场论纲领的一步。<sup>[2]</sup>玻尔则更推崇“伽利略的纲领”,“即把物理现象的描述建立在可测定的量的基础上的纲领”。<sup>[3]</sup>他指出“科学的目的在于扩大并整理我们的经验。”<sup>[4]</sup>这两个不同的科学目标引出不同的量子纲领。爱因斯坦试图从因果,连续的时空场论出发改造经典力学,统一物理学并自然地解释量子现象;玻尔则认为量子标志了与经典物理“根本背离”只有放弃因果,直观时空描述,才能得到解释。下面先分别考察这两个纲领独立的发展,矩阵力学和波动力学的创立,然后讨论1926年春两理论等价性发现后的纲领性争论和相互作用。

### 一、爱因斯坦-薛定谔波场纲领

爱因斯坦从他科学生涯一开始就思考量子之谜,认其为“现代最深刻的物理学问题。”在作出狭义相对论的1905年,他提出光量子假设;在完成广义相对论后(1916)他又转向量子论,作出自发和受激辐射量子论,完成光的粒子性证明。但是这两个划时代的发现并没有形成一个系统的理论或持久的纲领。相反,这些研究更突出了波粒二象性和量子论与电磁场论的矛盾。1956年他把跃迁几率引入物理理论基础,这与他信奉的“因果性纲领”矛盾,最使他不安,被他列为他的理论的两个弱点之一(另一个是未能建立与波动理论的联系)。<sup>[5]</sup>

从二十年代初爱因斯坦开始形成他解决量子问题的研究纲领。经过多年探索,他认为以因果,时空连续概念为基础,以偏微分方程为数学工具的场论最有希望解释量子现象,这成为他的“硬核”。1922年底他向柏林普鲁士科学院作了一个题为“能用场论解决量子问题吗?”的报告,第一次公开阐明他的量子论研究纲领。从电磁场论和引力场论的成功出发,他提出一个“辅助假设”:用场方程为超定偏微分方程组的场论来描述物质结构和量子现

\* 本文为作者硕士论文改写而成,在此谨对许良英、赵中立、范岱年、何成钧、戈革等老师们的指导和帮助表示诚挚感谢。

象。具体讲，场方程组应得出静态，球对称的解以描述电子和质子。因为场方程组是超定的，方程数多于变量数，场的初始条件和物质粒子的运动就会受到限制，这样也许就能自然地导出量子条件或玻尔轨道。从此，他花了大量的心血在统一场论中寻找他“宠爱的”超定偏微分场论，来解决量子问题。在后来几乎所有论述和报告他统一场论的信件和文章中，他都要提到它与量子问题的关系。

1923—1924年，跟爱因斯坦好友朗之万在巴黎读博士的德布罗意提出“物质波理论”，为爱因斯坦的量子纲领提供了极大的希望。他从爱因斯坦的光的波粒二象性和相对论出发提出，物质粒子除有粒子性以外，也显示波动性，并以此解释玻尔原子稳态。这种用物质波对量子现象的解释，尽管不是从统一场论出发的，显然与爱因斯坦的总的连续场纲领一致。爱因斯坦在他的量子统计论中介绍德布罗意的思想，用它解释气体分子的互相干涉，并在一个脚注中指出德布罗意的论文“也对玻尔-索末菲量子规则作了很值得注意的几何解释。”由此德布罗意的物质波思想吸引了不少物理学家的注意。<sup>[64]</sup>

当时在瑞士苏黎世大学作物理教授的薛定谔也正研究量子气体统计，很快从爱因斯坦那里接受了德布罗意的物质波思想。他本来对波场就有偏好。1922年他曾发现玻尔原子中电子的一个引力场矢量具有与后来的德布罗意相波很相似的特征，尽管他当时并未意识到这一点。1924年他欢迎玻尔等以波解释辐射（BKS文，下面将详细讨论），并提出世界的稳定性要求“每个分立系统都与世界的所有其他部分联系起来”，隐含了波动世界观。这与爱因斯坦用物质波场干涉解释分子相互作用也很相近。现在薛定谔发现德布罗意的“天才的”论文与他1922年的想法，“在数学上是一样的，只不过……德布罗意在他的更广泛的理论框架中的考虑自然比我的单个陈述要具有大的多的价值。”<sup>[7]</sup>

几个月后，薛定谔发表“论爱因斯坦气体理论”，第一次运用德布罗意物质波并公开表示他的波动世界观：按照“德布罗意-爱因斯坦”物质波论，他认为粒子“只不过是构成世界基础的波动辐射的某种‘波峰’而已。”这里，他把德布罗意波粒共存的“导波”变为波动一元论。这更接近爱因斯坦以连续场为物质基元的思想。困难是，按照经典波动力学，用“波峰”或“波包”来取代粒子，波包会不断扩散开来，不能保持不变。薛定谔想，如果能对经典波动定律进行“量子理论修正”，使波包不扩散，未尝不能“找到一条从光量子两难中解放出来的道路。”

几个星期后，薛定谔在瑞士阿尔卑斯山度1925年圣诞时，作出了这个量子修正的波动力学，并导出了本世纪在科学文献中引用最多的非相对论薛定谔方程。他开始作出的是相对论的，得出略与实验不符的能级。失望之余，他发现方程的非相对论近似可以导出玻尔的巴尔末光谱公式，这一任何量子理论必过的第一关。后来他又发现用变分法可以导出同样的非相对论的波动方程，就发表了他的有名的“作为本征值问题的量子化”系列论文（共四篇）的第一篇（以下简称Q1）。<sup>[8]</sup>

在Q1中，薛定谔把通常的量子条件（如电子能级只能取普朗克常数的某个整数倍数）用一个变分条件代替：“我们寻求一个在整个构形空间中处处为实，单值，有限，二阶连续可微的 $\psi$ 函数，使得【哈密尔顿方程中的】平方式在整个构形空间上的积分为极值【即变分为零】”。这样量子整数性就会如振动弦的波节数一样“自然”出现。他相信他的新想法“非常深刻地抓住了量子规律的本质”。

在推导过程中，薛定谔没有引用物质波也没有把他的方程叫做波动方程，但他提到了德布罗意，并指出 $\psi$ 函数可作直观的“振动”解释，比电子轨道“更接近实在”。在一个月后

发表的Q2中，他又用哈密尔顿的波动和几何光学类比对经典力学修正得出了他的波动方程，更明确地把 $\psi$ 解释为波动。<sup>[9]</sup>

波动力学是按照爱因斯坦的纲领解决量子问题的一个巨大成就。首先在起源上，如薛定谔所指出，他的理论是受德布罗意理论和爱因斯坦的“简短却无限深刻的”的评论启发而作出的。在方法上，他使用的的确是爱因斯坦所主张的传统的时空连续描述和微分方程，并保持了因果性和守恒律。很多物理学家对他的直观图象和熟悉的方法表示欢迎，马上用来解决各种问题。普朗克和维恩等老一辈物理学家也为薛定谔理论的经典特征感到万分高兴，认为他终于解决了量子之谜。<sup>[10]</sup> 爱因斯坦在1926年春写信祝贺薛定谔，称赞他的思想“表现出了真正的天才，”确信他已取得了“决定性的进展”。他“同样确信”，先于薛定谔半年的“海森伯-玻恩的路线已经走向歧途。”<sup>[11]</sup> 显然，这是“纲领性的偏见”。下面简短地讨论矩阵力学在玻尔纲领指导下的发展，以及为什么爱因斯坦认为它走向了歧途。

## 二、玻尔-海森伯量子纲领

1913年玻尔“伟大三部曲”将量子条件引入卢瑟福有核原子，开创了量子论研究的主导潮流。此后他又用很多时间思考量子论的基础问题，想把他的各种假设“纳入一种逻辑自洽的形式中。”经过几年的艰苦探索，他借用爱因斯坦的几率概念，在埃伦菲斯特的绝热原理启发下，发展了他的对应原理，使得物理学家们能够摸索着比照经典力学来理解和计算原子中的量子过程。具体办法就是把经典电子轨道运动产生的电场强度作傅立叶级数展开，再写出量子论的电子跃迁几率和谱线强度。

玻尔强调，对应原理量子论代表了对经典物理的“根本背离”，没有任何概念上的逻辑联系，不需要“直观图象”；这种对量子根本性的强调，对直观图象的抛弃和傅立叶分解法的使用都成了海森伯后来建立矩阵力学的指导。

海森伯和泡利在1922年玻尔访哥廷根时第一次见到这位量子原子论的创立者。在一次演讲后，玻尔与海森伯讨论量子论的基础问题。他指出量子论不能用经典语言或模型“解释”或“描述”原子过程，只能发现观察结果之间的联系并以此为基础进一步探索。也许新实验会使量子论矛盾更加尖锐从而促使新概念的产生，使我们能把握这些“不可表述的原子过程。”玻尔从基本概念出发强调量子的革命性，对海森伯产生了“决定性的影响”，后者自称从此开启了“真正的科学生涯。”1924到1925年间，他几次访问玻尔的哥本哈根研究所，对玻尔的总的量子研究思想有了更透彻的理解。“跟哥廷根人，我学了数学”，他后来总结，“跟玻尔，我学了物理”。

1924年初，玻尔和克喇摩斯研究原子与辐射的相互作用，即色散现象。在他俩(Bohr和Kramers)与斯莱特(J. Slater)合作的有名的“论辐射的量子论”(“BKS文”)中，他们试图运用对应原理和原子的“虚振子”模型“给光学现象一个自洽的描述”。他们假设原子在与辐射作用时，其内部结构等同许多电子“虚振子”产生的辐射场，辐射频率对应于所能观察到的谱线频率。每个原子通过这些“虚”辐射场与其他原子“保持通讯”。一个原子中电子的跃迁取决于这个原子的初态和其他所有原子的态(而非跃迁)，其发生遵从几率规律。也就是说，一个跃迁不像爱因斯坦所假设的那样产生一个光子来因果地(一对一)引起另一个原子中的反方向跃迁。这样，从跃迁“这一量子论根本特征”出发，BKS提出“抛弃任何在远离原子中的跃迁之间建立因果联系，尤其是直接引用能量和动量守恒律的努力。”

能量被认为只是统计上守恒。<sup>[12]</sup>

BKS 文引起了爱因斯坦和玻尔关于量子论的辩论。爱因斯坦主要反对 BKS 放弃能量守恒和因果律的想法。在给玻恩的一封信中,他提到“玻尔关于辐射的意见是很有趣的。但是,我绝不愿意放弃严格的因果性,……固然,我要给量子以明确形式的尝试再三失败了,但是我绝不放弃希望。”他(和薛定谔)还从热力学出发指出 BKS 的错误。泡利也反对 BKS。他认为要解决量子困难,应该修改的是运动和力的概念,而不是能量。这些和其他物理上的证据使玻尔改变了能量不守恒的预言。不久,玻特(W. Bothe)等的实验果然证实原子基元过程中能守恒。<sup>[13]</sup>

尽管如此,BKS 一文在量子力学的发展上仍是一个重要的里程碑。除了对直观时空描述的抛弃(虚振子代替轨道电子)和几率的引入,还隐含了只用可观察量构造理论的思想,因为“虚振子”的频率不是不可观察的电子轨道转频,而是可观察到的“谱线频率”。这些概念的变化都没有因为实验结果而被否定。相反,玻尔认为,实验证实的光量子的存在使得物理“直观图象”描述变得更加不可能,进一步证明“力学定律的失效”。海森伯后来称 BKS 文为解决辐射悖论的“第一次认真尝试。”1924年底他与克喇摩斯一起以 BKS 理论为基础研究色散现象,应用并发展了对应原理。<sup>[14]</sup>

1925年春从哥本哈根回到哥廷根,海森伯用对应原理和“虚振子”模型计算氢原子的谱线强度这一玻尔量子论的最大难关,遇到了很大困难。他转向非谐振子,用同样方法处理,却取得很大成功。他以对应原理为指导,用可观察的辐射强度代替时空坐标,比照着经典力学中的运算规则,创造性地把旧的量子条件换成了新的量子运动学规则。这些规则很快就由玻恩和约尔丹总结成矩阵运算,再由他们三人和剑桥的狄拉克(独立地)发展成为第一个基础自洽的新量子力学。<sup>[15]</sup>

海森伯的量子力学实现了哥本哈根-哥廷根等地量子物理学家多年来在玻尔纲领指导下的奋斗目标。它建立在量子基础上,用差分方程表述,抛弃了经典时空图象描述,强调只有可观察量才能构造理论。玻尔指出,它“是对应原理所体现出的趋势的一个精确表述。”玻恩称它使“我们在所追求的纲领中前进了一大步。”泡利早就鼓励海森伯抛弃电子轨道,修正运动和力的概念。现在海森伯在这个方向取得成功,他高兴得手舞足蹈,直庆幸他的师弟“在哥本哈根跟玻尔学到了一点哲学思想”,不再那么局限于纯数学上的技术问题。不久泡利使用新理论攻克了氢原子谱问题,不仅使海森伯放了心,也使众多物理学家开始相信矩阵力学。<sup>[16]</sup>与自旋的发现结合在一起,矩阵力学很快就被应用到各种问题上并取得很大成功。

爱因斯坦最初对矩阵力学持怀疑观望态度。1925年9月海森伯论文刚发表,他写信给埃伦菲斯特说“海森伯下了一个大量子蛋”。1925年底,他与玻尔同赴莱登庆祝洛伦兹获博士学位五十周年,在埃伦菲斯特家里曾深谈量子论和自旋理论,可惜未留下详细记载。几天后,在给贝索的一封信中爱因斯坦称矩阵力学“真是魔术一般的计算”,“极其巧妙,极其复杂,足以保护它不致为人们查出谬误。”1926年3月他给玻恩夫人写道:“海森伯-玻恩的思想把我们都给震住了,并在所有搞理论的人中产生了深刻的影响。”玻恩和海森伯当时读到这封信都很高兴。但同时,爱因斯坦已经开始怀疑新理论的正确性,如他在给埃伦菲斯特的另一封信所表露:“我越来越倾向于认为,[矩阵力学的]思想是错的,尽管我很佩服它”。<sup>[17]</sup>

薛定谔波动力学一出现,爱因斯坦就更加断定矩阵力学已“走向歧途。”时空描述是一个主要纲领性分歧。在4月28日与海森伯的谈话中他对可观察原理表示不满,并指出矩阵力

学对物理过程没有给出一种描述，连续与不连续性的矛盾仍未解决。薛定谔也认为海森伯等抛弃时空描述在哲学上无异于“彻底的投降”，因为在他看来，离开时空框架我们就无法进行思考，更提不上理解原子结构。海森伯理论之缺乏直观性（及其超越对数方法）使他“感到失望”。对这些批评，海森伯引用玻尔的教导指出传统的时空过程确实不再能描述微观过程。他希望理论的发展能克服抛弃时空描述所带来的困难。

1925年底朗佐斯 (C. Lanczos) 的“论量子力学的一种场论表述”几乎达到了这个目标。作为爱因斯坦一生的敬仰者和后来的助手，朗佐斯试图从场论纲领出发把矩阵力学用积分方程表述成时空直观连续形式。其理论在实质上极近于且早于薛定谔的波动力学。海森伯和泡利读过朗佐斯的论文却都误解了他的能量公式，低估了它的意义。泡利本来在相对论中就“反对任何人的连续区理论”，现在对朗佐斯的场论修正更觉得“没多大用”。薛定谔认出朗佐斯与自己在纲领上的一致，称他的连续解释“极有价值。”可惜他也误解了朗佐斯的能量公式：否则，矩阵力学的图象和过渡困难可能由此得到解决，它和波动力学的联系也可能更早发现。

### 三、等价性的发现和纲领性的争论

1926年春，矩阵力学和波动力学的创立给物理学家提供了两种量子力学，不仅数学形式不同，物理图象更相异。薛定谔曾分析过二者“在出发点和概念上的巨大差异”。他称它们与经典力学的背离发生在“正好相反的方向”。一个用分立数值（矩阵）代替经典连续变量建成“一真正不连续理论”，另一个“从经典质点力学走向连续理论”。他希望两个新理论不会互相冲突而能“互相补充”。但鉴于两个理论在方法上“如此之根本不同”，他说“我还没能找到任何联系”。

然而，几个星期后，他和泡利，埃卡特 (C. Eckart) 等却几乎同时，独立地发现了矩阵力学和波动力学之间的联系，证明了它们的数学等价性。他们的步骤大同小异，皆把动量用算符表示，把任何物理量写成算符，从数学上可证明它们既符合波动方程也符合矩阵运算。等价性的发现使两个纲领开始互相作用，大大地促进了量子力学的发展，也更进一步深化了关于量子力学的物理基础和哲学思想上的纲领性争论。

科学哲学家汉森 (N. Hanson) 和拉卡托斯曾指出，这数学等价性证明并未建立物理等价性，当年物理学家们“忽视”或“没弄清楚这一点。”<sup>[18]</sup>从历史来看，这论断的前一半是对的，后一半却是错的。物理学家当年并未混淆数学与物理等价性。

在等价性发现之前，薛定谔就认为他的波动物理图象比海森伯的无图象要优越。他承认矩阵力学能解决谱线强度，而波动力学（在玻恩几率解释之前）仍无能为力。但是，与矩阵力学的无图象相比，他觉得波动力学具有“物理指导思想”方面的优势，即有一个明确的波动图象，通过“波包”构造能“建立宏观和微观力学过程之间的桥梁”。

在等价性论文中，他特别论证了数学与物理等价性的区别并进一步阐述了他的波动连续图象的优越性。他指出，如果遵循马赫的思维经济原则和可观察原则，“数学等价性和物理等价性就几乎完全一样了，”矩阵力学也会因抛弃不可观察的时空直观图象而“具有某种优势。”但是薛定谔认为实验物理经常是以“极其直观的形式”提出问题的，如原子碰撞，电子散射等。对这些问题，矩阵力学由于缺乏直观图象很难处理。从这个角度出发，薛定谔觉得他的波动力学在物理上应用更广泛，可以完成微观和宏观之间的过渡。<sup>[19]</sup>

作为一个例子，他从等价性证明所建立的与矩阵力学的联系出发，提出波函数的“电磁解释”，把波函数解释为电场在空间的分布，来处理原子与电场的相互作用。他希望这样就能“把发射光的强度和极化在麦克斯韦-洛仑兹理论基础上得到理解”，而不用“跳跃量子”。

爱因斯坦对薛定谔的探索给以鼓励。他在1926年8月21日给索末菲的信中提到“在这些对量子规则作深刻阐明的新尝试中，我最满意的是薛定谔的表述方式。但愿那里所引进的波场是能够从  $n$ - 维空间移植到3维或4维坐标空间的！”埃卡特从朗佐斯理论出发作出等价性证明后也认为“波动力学比矩阵力学更基本，而且更有希望……提供一个最终的物理解释。”

海森伯和泡利则尖锐批评薛定谔的电磁解释。泡利讽刺薛定谔对连续性的坚持为“苏黎世地方迷信”，声称要对他的“连续性磨房”泼冷水，因为泡利深信“量子现象是不能只用连续场物理的概念就能掌握”。海森伯尤其不喜欢薛定谔对波动力学直观性的宣扬。他写信给泡利说他“越对薛定谔理论的物理部分仔细思考，就越讨厌他”。海森伯承认矩阵力学不能用传统的时空描述。但他正确地指出薛定谔的图象也不完备。他认为薛定谔理论的主要用处是计算矩阵元。<sup>[20]</sup>

玻恩对波动力学的态度要缓和的多。在等价性发现之后，他用波动力学解决了碰撞这个矩阵力学难办的非周期运动。在这研究中他提出了波函数的几率解释，今天仍为几乎所有物理学家接受。玻恩认为，只要把原子对电子的散射看成粒子碰撞过程（而非薛定谔想的电磁波作用），电子波函数的某一展开系数就决定电子被散射到那个方向上的几率。<sup>[21]</sup>这解释很快就由泡利作了推广，并由狄拉克、约尔丹、冯·诺意曼等发展成一个自洽的公理化表述，最终完成了矩阵力学和波动力学理论的统一。当然，这时波函数的解释已不是薛定谔的电磁连续解释而是玻恩的几率解释。

玻恩的几率解释重开了几年前爱因斯坦和玻尔等关于因果性的争论。既然波函数或其他量都不能因果地决定单个碰撞的结果，玻恩认为应该“在原子世界中抛弃决定论”。他称自己是从爱因斯坦有过的光量子“鬼场”想法和BKS文得到启发的。然而当他写信给爱因斯坦感谢他的启发时，爱因斯坦却给他“一个沉重打击”：“我无论如何深信上帝不是在掷骰子”。几个月后，爱因斯坦甚至撰文试图例证薛定谔的波动力学可以“不用任何统计解释。”薛定谔则从未接受玻恩的几率解释，尽管他自己在二十年代初也曾信奉过统计自然观。到了五十年代，当爱因斯坦已接受玻恩解释为自洽（但不完备）的量子力学必要部分时，薛定谔还在与玻恩争论几率解释。

玻尔，尽管不同意薛定谔和爱因斯坦的因果和连续纲领，却从多年的量子思考中意识到波粒二象性的根本性，所以对波动力学不仅不像海森伯那样反感，而且马上意识到它的价值。薛定谔Q1一发表，玻尔就称他对稳定能值的确定为一个“美妙的办法。”从泡利那里他还早就获知等价性关系，可能在1926年春就开始考虑量子力学的波粒互补性。<sup>[22]</sup>

纲领性争论在等价性和几率解释后变得更加激烈。1926年夏天，薛定谔在慕尼黑演讲他的连续解释。海森伯正好在场，就提出质疑，说连续解释恐怕连普朗克的辐射公式都解释不了。结果，他受到维恩的“训斥”。在这场不愉快后，海森伯写信给泡利评论薛定谔“人品如此之好，可我发现他的物理学又是如此之怪；当人们听他演讲时，好像又回到了26年前。薛定谔想把所有量子论的东西：如光电效应，弗兰克碰撞，斯特恩-盖拉赫效应等通通抛掷一边。这样要搞出一个理论也太容易了。然而这[理论]根本不符合事实”。听了海森伯的汇

报，玻尔在9月份邀请薛定谔到哥本哈根他家里，三人一起讨论量子力学的物理和哲学问题。

在这场重要的，异常激烈的争论中，薛定谔仍然坚持以连续的波动解释消除不可理解的量子跃迁。玻尔则认为二十五年的量子论研究表明，我们不可能去除不连续现象。如果我们不能给量子跃迁一个直观描述的话，也许它在本质上就是不可直观描述的。争论到最后，薛定谔累得病倒了，由玻尔夫人亲切照顾，却仍被玻尔“紧追不放”。多年后海森伯还感叹当年双方在“根深蒂固的一些信念”上寸土不让的“激情”。

从哥本哈根回到苏黎世，薛定谔给玻尔写了一封优美真诚的感谢信。他承认玻尔的众多论据对他产生了很大“心理影响”，但还是不愿抛弃直观图象。“即使一百个尝试失败了”，他认为，“人们也不应该放弃希望，[而应]通过对时空事件的本质进行逻辑自洽的概念表述（我没说是通过经典图象）来达到这一目标”。对此，玻尔报以善意的微笑：“我不用强调[你也知道]我是以多大的兴趣关注着你对你那更光明的希望的追求。如果你不能在凡俗的空间和时间中杀尽这些鬼[指量子跃迁]的话，那么也许将来可以到五维世界里达成一个和解”。<sup>[23]</sup>

与薛定谔的讨论，使玻尔和海森伯更肯定自己是“走在正确的道路上”。经过几个月的紧张讨论和思考（包括与泡利和狄拉克的书信通讯），海森伯和玻尔在1927年分别提出了测不准和互补原理，为量子力学提供了一个直观理解。海森伯从粒子观念出发，发现粒子的位置和动量不确定度之积为普朗克常数。他认为这不确定性是纯粹由量子所体现的不连续性引起的，不愿承认薛定谔的连续观有任何价值。玻尔（和狄拉克）看出他推论中的一个错误。玻尔指出，只有考虑到波粒二象性，测不准关系才能成立。海森伯勉强接受了玻尔的建议，在校注中承认连续和不连续二象性引起测不准关系。

玻尔在1927年4月13日给爱因斯坦的一封信（转寄海森伯的测不准文）中最早阐述了自己的互补性思想。他指出经典物理语言和我们的实验观察都具局限性（要么波，要么粒，不能描述或同时看到波粒）。这事实使我们可以量子力学中，既处理物质的波动性又处理其粒子性而不自相矛盾，因为“问题的不同侧面不会同时出现”。用测不准关系他证明光的粒子性（能量守恒）和波动性就有这种互补和互斥的关系。<sup>[24]</sup>

至此，海森伯和薛定谔的量子论，从1926年春等价性证明开始相互影响，经玻恩几率解释，测不准关系，终于在玻尔的互补原理中得到融合。玻尔纲领成了量子论的物理和哲学基础。爱因斯坦和薛定谔，从几率解释之后，逐渐意识到量子力学已不再是沿着他们所设想的方向发展。但爱因斯坦终生也没有停止从场论来解释量子的努力。用拉卡托斯的术语，薛定谔的波动力学和他的超定场论在一定意义上都是他的“辅助假设”，它们的失败并未改变他对统一场论这一纲领“硬核”的追求。在1927年的索耳末会议上，爱因斯坦第一次公开表示与玻尔在量子力学解释上的分歧。此后这场物理学家的讨论扩展到别的学术领域，演化成戈革教授所说的“世界大战”。<sup>[25]</sup>

## 四、结 论

量子力学史是极其复杂、迷人的，本文“管窥”挂一漏万，但从以上讨论似乎可以肯定，在二十年代确实存在着分别以玻尔和爱因斯坦为代表的两个量子研究纲领。其分歧集中在量子解释的因果性、连续性和时空直观描述可能性上。爱因斯坦觉得只有符合这些属性的

场论才能满意地解释量子现象。他的场论纲领影响了德布罗意、朗佐斯、薛定谔和波动力学的创立。玻尔则认为要解释量子非得改革经典物理学的上述特征不可。他的量子纲领主导了量子论的研究，从1913原子论，到对应原理，到 BKS 论文，指导了大批物理学家，包括玻恩、泡利、海森伯、狄拉克等的研究，直至矩阵力学的建立。量子力学物理和哲学基础的最终阐述是两个新量子论在等价性发现后在玻尔纲领主导下相互作用的结果。

玻尔曾在回顾自己与爱因斯坦多年来关于量子论的物理和哲学的讨论时，引用一个“有关两种真理的古老说法”：世界上有两种真理，一种是简单真理，其反面即为谬误；另一种是“深奥真理”，其反面还是“深奥真理”。爱因斯坦和玻尔的量子纲领可能就包含了这样的“深奥真理”。<sup>[26]</sup>它们很难按照拉卡托斯那样划分成“进步”、“退步”。二者都是对“经典力学”的“背离”。玻尔背离的是“经典”部分（抛弃因果时空描述）；爱因斯坦背离的是“力学”部分（用场取代粒子和力）。一个遵从伽里略可观察纲领成功地找到了量子基础上的新力学，但仍未找到量子论与引力的联系；另一个继承麦克斯韦的场论纲领通过波动力学对量子力学的创立起了重大作用，但总的来说在解决量子问题上仍未成功，未能用因果连续的时空场论自然地解释量子统一物理学的基础。从这种“深奥真理”的对立中找出“秩序性”，在今天仍像在玻尔和爱因斯坦的时代一样是物理学家的努力方向。

## 注 释

〔圆括号内第一数字为文献编号；罗马数字为卷数；以后为页数〕

- [1] 拉卡托斯举量子力学为例，指出薛定谔和海森伯的量子理论属于“不同的、互相对立的研究纲领”，尽管它们“在数学上（和观察上）等价”。可惜拉卡托斯早逝，未能对量子力学史进行更深入分析。另外，他承认他的理论是从波普的“形而上学研究纲领”发展而来的。（1，77，95）
- [2] （2，I，122，222—229，295，388，514）。波普曾认为“法拉第，麦克斯韦，爱因斯坦，德布洛意，和薛定谔把世界看成连续场的纲领”是“形而上学研究纲领”“最近和最伟大的”例子。（1，95）
- [3] （3，3）
- [4] （4，97）
- [5] （2，II，350）；（5，410—412）；（4，40）
- [6] （7，244—252）
- [7] （9，192）。该传记第一次对薛定谔生平尤其私生活作详尽描写。 *Isis* 68（1977），606—609； *Am. J. Phys.* 47（1979），644—648。
- [8] （10，V，404—90）；（9，191—207）； *Stud. Hist. Phil. Sci.* 19（1979），311—340； *Centaurus* 1982—1983，154—197。
- [9] （11，13—40）
- [10] （13，3）；（10，V，17—36）
- [11] （13，23—24）；（9，209）
- [12] （8，V，1—96，101—118，204—206，尤其 102，107）；BKS 文收在（15，159—176）；（2，1，193）
- [13] （8，V，23—38，75—80）
- [14] （15，223—252）
- [15] （15，19—59，261—385）； *HSPS*，v. 8，162；（18，A1，329—342）；（10，II）
- [16] （15，57—58，387—415）
- [17] （20，88）；（10，637）
- [18] （21，119—120）；（1，77）
- [19] （12，III，162）
- [20] （22，I，328，357，366）
- [21] *Z. f. Phys.* 37（1926），863—67；（23，257）
- [22] （8，VI，9）；（23，260）
- [23] （8，VI，9—15）

- [24] (8, VI, 21—24)  
 [25] (14, 269)  
 [26] (4, 73)

### 参 考 文 献

[按引用顺序, NY-New York, U. P. -University Press]

- [1] I. Lakatos, *The Methodology of Scientific Research Programmes* (NY: Cambridge U. P., 1978).  
 [2] 许良英等编译, 《爱因斯坦文集》, 三卷, 商务印书馆, 1976—1979 第1版。  
 [3] N. 玻尔: 《原子物理学和人类知识论文续编》, 郁韬译, 商务印书馆, 1978年第1版。  
 [4] N. 玻尔: 《原子物理学和人类知识》, 郁韬译, 商务印书馆, 1964年第1版。  
 [5] Pais, "Subtle is the Lord...": *The Science and Life of Albert Einstein* (NY: Oxford U. P., 1982).  
 [6] 赵中立、许良英编, 《纪念爱因斯坦译文集》, 上海科学技术出版社, 1979年第1版。  
 [7] M. Jammer, *Conceptual Development of Quantum Mechanics* (NY: American Institute of Physics, 2nd ed., 1989).  
 [8] E. Rudinger (ed.), *Niels Bohr Collected Works* (NY: North-Holland, 9 vol, 1972—1989).  
 [9] W. Moore, *Schrödinger: Life and Thought* (NY: Cambridge U. P., 1989).  
 [10] J. Mehra and H. Rechenberg, *The Historical Development of Quantum Theory* (NY: Springer-Verlag, 5 vol., 1984—1987).  
 [11] E. Schrödinger, *Collected Papers on Wave Mechanics* (London: Blackie, 1928).  
 [12] *Erwin Schrödinger Collected Papers* (Vienna: Austrian Academy of Sciences, 4 vol., 1984).  
 [13] K. Przibram (ed.), *Letters on Quantum Mechanics* (NY: Philosophical Library, tr. by M. Klein, 1967).  
 [14] 戈革: 《尼耳斯·玻尔——他的生平、学术和思想》, 上海人民出版社, 1985年第1版。  
 [15] B. L. Ver Waerden(ed), *Sources of Quantum Mechanics*(NY: Dover, 1967).  
 [16] 《诺贝尔获得者演讲集》, 宋玉升等译, 科学出版社, 1984第1版。  
 [17] W. Heisenberg, *Physics and Beyond* (NY: Harper & Row, 1971).  
 [18] W. Blum, H. -P. Durr, and H. Rechenberg (eds.) *Werner Heisenberg Collected Works* (NY: Springer-Verlag, series A-C, 1985).  
 [19] W. Pauli (ed.), *Niels Bohr and the Development of Physics* (NY: Oxford U. P., 1955).  
 [20] Max Born (ed.), *The Born-Einstein Letters* (London: Macmillan, 1971).  
 [21] N. R. Hanson, *The Concept of the Positron* (NY: Cambridge U. P., 1963).  
 [22] A. Hermann, K. V. Meyenn and V. F. Weisskopf (eds.), *Wolfgang Pauli: Scientific Correspondence with Bohr, Einstein, Heisenberg; et al* vol. 1, 1919—1929 (NY: Springer-Verlag, 1979).  
 [23] A. Pais, *Inward Bound* (NY: Oxford U. P., 1986).  
 [24] E. Schrödinger, *Science and the Human Temperament* (NY: Cambridge U. P., 1967).

[作者简介]: 王作跃, 男, 1963年6月19日生。1982年河南师范大学(新乡)物理系毕业, 1985年中国科技大学研究生院毕业, 获科学史理学硕士。现为美国加州大学圣巴巴拉分校科学史博士候选人。通信地址: Z. Wang, History Department, U. C. Santa Barbara, CA 93106, USA. 电话: (805)685—9283.

(本文责任编辑 王克迪)

## Abstracts

### The Concepts of Time in Ancient China

This paper analyses ancient Chinese's knowledge of the nature and definition of the concept of time, discusses the relevant entries in Technological Volumes of Mozi, proposes a different opinion to some current explanations, and holds that the knowledge of relation between time-space and motion in ancient China was just within the classic physics. The author also points out that, in ancient China, there were two concepts about finite and infinite time, and each of them had its own internal basis, which have been discussed from a new angle by this paper. With combining the ancients' metrology of time, this paper analyses their investigations on the essence of time, explains the scientific significance of such investigations.

### Two Research Programmes of Quantum Mechanics

Albert Einstein and Niels Bohr pursued two rival research programs to solve the "quantum riddle" that led to the creations of Erwin Schrödinger's wave mechanics and Werner Heisenberg's matrix mechanics. In the end, quantum mechanics, with the adoption of Max Born's probability interpretation and Heisenberg's uncertainty principle, clearly came to represent more the Bohr program. Nevertheless, the Einstein program made important contributions to the clarification of its physical and philosophical foundations, as evidenced in Bohr's complementarity idea, not to say that its goal of unifying physics (including quantum physics) by a field theory is as valid as ever. Contrary to Lakatos' methodology of scientific research programs, neither Bohr's nor Einstein's was a "degenerating" program.

### Hu Mingfu's Life and Road of Saving Nation by Science

Hu Mingfu was a pioneer of Chinese modern science undertaking, one of the chief founders of the Science Society of China, and the first Doctor in Chinese modern mathematicians. His short life covered the major periods of founding of modern science undertaking in China. Because he had devoted to the cause of scientific education, not achieved greater success in studies of science and died so early, his life and contribution to the Chinese modern science undertaking has been ignored. According to relevant materials, this paper gives a review for his career.

本期执行主编 范岱年

本期终审编辑 李醒民 李伯聪

本期发稿编辑 刘新彦

本期责任校对 刘新彦 李淑英 刘玉兰