

DOI:10.12405/j.issn.2097-1486.2025.04.004

未完成的量子革命：解释纷争为何仍在继续？

赵丹

山西大学 科学技术哲学研究中心, 山西 太原, 030006

摘要:发端于20世纪初的“量子革命”至今仍是一场“未完成的革命”,其核心解释纷争历百年而未决。文章回顾了从矩阵力学-波动力学之争、爱因斯坦-玻尔论战,到哥本哈根解释与玻姆力学、多世界解释之争论,再到哥本哈根学派与普林斯顿学派围绕测量问题展开的争论历程,进而梳理了当前物理学界解释版图的复杂局面,并剖析了争论背后关于世界图景的根本分歧。文章指出,量子革命不仅是理论与技术的革命,更是一场关于世界图景的理解与解释的革命。持续百年的解释之争,虽越来越难以达成共识,却在为物理学的持续进步提供不竭的思想动力。

关键词:量子力学;量子革命;哥本哈根解释;解释争论

中图分类号:N031

文献标志码:A

文章编号:2097-1486(2025)04-0353-10

The unfinished quantum revolution: why is the interpretation debate continuing?

ZHAO Dan

Research Center for Philosophy of Science and Technology, Shanxi University, Taiyuan 030006, China

Abstract: The quantum revolution initiated in the early 20th century still remains incomplete, with the persistent debates over its interpretation unresolved. This article examines the historical trajectory of these debates, encompassing the matrix mechanics-wave mechanics controversy, the seminal Einstein-Bohr debates, and the subsequent disputes concerning the measurement problem among interpretive schools such as the Copenhagen interpretation, Bohmian mechanics, and the many-worlds interpretation. Furthermore, it delineates the contemporary, complex topography of interpretations within physics and probes the profound divergences in the conception of reality that fuel these discussions. This article points out that the quantum revolution is not only a theoretical and technological revolution, but a transformative shift in the comprehension and interpretation of the world picture. Though there is no consensus over the century-long debates, it furnishes indispensable intellectual momentum for the continual advancement of physics.

Keywords: quantum mechanics; quantum revolution; Copenhagen interpretation; interpretation debate

0 引论

发端于20世纪初的量子革命,不仅颠覆了经典物理学的认知框架,构建起了一套描述微观世界的严密数学体系,也催生了现代信息技术的诸多突破,深刻塑造了当代社会的技术面貌。然而,这是一场未完成的革命——在量子理论持续应用于现实世界的同时,关于其本质含义的争论从未止息。直至今

日,随着“二次量子革命”的浪潮席卷而来,这些争论仍然活跃,悬而未决。据《自然》杂志于2025年开展的一项大规模调查显示^[1],物理学家对量子力学的理解仍存在显著分歧,争议焦点主要集中在以下几个方面:“何种量子力学解释更受支持”“波函数是否具有实在性”“量子与经典世界是否存在明确界限”,以及“测量过程是否依赖观察者”等。

在过去一百年间,量子力学的完善与发展始终

基金项目:教育部人文社科研究规划项目(22YJA720013);国家社科基金一般项目(24BZX075)

收稿日期:2025-11-04;**修回日期:**2025-12-03

伴随着激烈的解释争论。薛定谔(E. Schrödinger)与海森堡(W. Heisenberg)等就量子理论应是离散还是连续展开激烈交锋;爱因斯坦(A. Einstein)与玻尔(N. Bohr)等围绕量子力学的自治性与完备性进行长期论战;以罗森菲尔德(L. Rosenfeld)为代表的哥本哈根学派对玻姆(D. Bohm)、埃弗雷特(H. Everett III)和维格纳(E. Wigner)等人的异见提出尖锐批评;泽林格(A. Zeilinger)等人则尝试从信息角度重新解释量子力学。这些围绕量子理论及其解释的论争,不仅未曾阻碍量子力学的广泛应用,反而推动其在更大范围内得到验证、发展与实际应用,为量子信息、量子计算和量子测量等技术的革新奠定了坚实基础。反过来看,量子技术的革新与应用也为深化理论理解创造了新的契机,为澄清并解决解释层面的长期争议提供了可能。由此可见,量子理论的数学体系、实践应用与理论解释三者虽时有分离,但总体上相互依存,共同构成了量子革命不可或缺的三大支柱。

作为一场深刻的科学革命,量子革命不仅体现在理论建构与技术应用的层面,更是一场关乎理论理解与解释的认知革命。若缺少对理论内涵的深入把握和对量子图景的完整解释,这场革命便难以称得上完整。科学史家和科学哲学家在回顾 20 世纪初的量子革命时,大多聚焦于其理论层面的突破与哥本哈根解释蕴含的认知转变,却往往忽略了理论体系内部的不一致性,以及哥本哈根解释在构建整体世界图景方面的局限。正是这些理论含义与解释路径中存在的未竟之处,导致了过去百年来量子理论领域争论不休的局面。因此我们可以说,发端于 20 世纪初的量子革命并不彻底——量子革命,尚未完成。

文章试图梳理量子力学百年争论的思想脉络,将数学形式体系、实践问题解决能力与世界图景的解释视作一个相互关联的整体,进而探讨理论解释之争在科学认知与现实意义上的深刻价值。

1 矩阵力学与波动力学之争

在 1926 至 1927 年间,薛定谔提出波动力学并证明其与矩阵力学的数学等价性之后,物理学界围绕如何描述量子现象爆发了一场激烈的争论。争论的焦点在于:究竟应以非连续的跃迁过程,还是时空中的连续演化过程来刻画量子行为?是否有必要构建一种直观的物理图像?争论的一方是海森堡、玻恩(M. Born)和玻尔等,另一方则是薛定谔。尽管

矩阵力学与波动力学在数学上被证明等价,但二者“对于经典力学的背离发生在截然相反的方向上”^[2],反映出对量子现象本质的两种根本不同的理解。

1925 年,海森堡、玻恩与约尔丹(P. Jordan)共同构建的矩阵力学体系,莫基于光谱频率与跃迁概率等可观察物理量,采用矩阵代数进行表述与计算。该体系不仅未曾尝试描绘原子内部的具体图像,更在哲学层面明确拒斥此类描述。而薛定谔于 1926 年创立的波动力学,则根植于清晰的物理图像——电子在原子内形成驻波。在“作为本征值问题的量子化”一文中,薛定谔虽明确表示赞成放弃“电子的位置”与“电子的轨迹”等传统概念,但也同时强调,若因此完全放弃在时空框架中描述原子内部过程,则“无异于完全投降”^[3],意味着物理学将丧失其研究的武器。这一哲学立场的宣示,清晰展现了薛定谔对海森堡等人放弃物理模型构建的实证主义倾向的明确反对。

薛定谔认为,波动力学所提供的可视化物理图景更易于理解,也更为物理学家所熟悉。在致友人的书信中,他评论道:“哥廷根学者的认知状态,大致相当于一个人已经能计算弦的振幅与相位,却尚未意识到它们可以组合成一个众所周知的直观图像”^[4]。薛定谔强调,在将量子力学拓展至散射问题等新的经验领域时——例如描述原子碰撞实验中电子被介质散射并在探测屏上被观测的过程——构建基于时空结构与几何关系的直观图像是非常必要的。如果在原子层面放弃直观描述,实验中从微观到宏观的物理转换将难以实现。薛定谔的质疑促使海森堡不得不认真对待直观性问题。尽管矩阵力学拒绝提供时空模型,但它仍需处理散射问题等实际经验,并解释宏观现象是如何从微观过程中产生的。在 1926 年 6 月完成的论文“多体问题与量子力学中的共振”中,海森堡做出了回应。他承认直观图像具有一定的启发性价值,但同时也指出,直观性应来源于理论的实用性,并警告过度追求理论的物理图像可能会威胁到数学体系的内在一致性。

波动力学采用的偏微分方程形式为物理学家所熟悉,其量子化条件可自然地导出,连续性预设也与经典物理学一脉相承,因此迅速赢得了广泛的认同。物理学家纷纷将其应用于实际问题的求解,这一趋势令海森堡深感不安。1926 年 6 月薛定谔在慕尼黑大学报告波动力学之后,海森堡当即指出该理论无法描述量子现象中的不连续性,例如无法合理解释

普朗克辐射定律。甚至在恩师索末菲(A. Sommerfeld)也已为波动力学所折服的情况下,海森堡不得不致信玻尔求助。同年9月,薛定谔受邀访问哥本哈根,与玻尔和海森堡就量子理论解释问题展开了深入讨论。海森堡后来回忆道,“难以准确表达那些讨论的激烈程度,也难以描述每个人信念的深度……两人为了新数学方案的特定解释而竭尽全力地争论着”^[5]。在争论中,薛定谔坚持一种在时空中连续的本体论图景,主张原子中的过程可用波动图像直观描述,连续的波动图景可消除原子物理中因不连续而引发的一切矛盾;而玻尔则认为,原子物理中的不连续性依然存在,经典物理学的概念在描述量子跃迁时已不再适用。

在与薛定谔的激烈争论之后,玻尔和海森堡更加坚信他们所探索的量子力学解释路径是正确的。次年,他们分别提出了影响深远的互补原理与不确定关系。与此同时,薛定谔的方法被玻恩应用于原子碰撞问题的处理中,但其原本实体意义的“波”被重新诠释为概率波——波函数的平方表示在某一时刻在某个位置找到电子的概率。这一转变意味着争论双方在某种程度上达成了“妥协”:玻尔主张,尽管波动图像和粒子图像在描述上相互排斥,但在原子过程的完整描述中必须互补结合;海森堡则尝试基于量子力学的形式体系及其具体解释,推导出普遍性的解释,他所提出的位置-动量不确定关系,也在一定程度上认可薛定谔关于时空描述必要性的观点。

波动力学与矩阵力学间的争论,发生在量子力学已具备两种明确的数学表述、却仍缺乏一个完整的、自洽的解释之际。当时,玻尔、海森堡、玻恩与薛定谔等人的观点仍处于不断摸索与形成之中。“在20世纪20年代中晚期,量子力学既不是一种单一且僵化的理论形式体系,参与其中的物理学家们也普遍认为,理论的解释与理论进一步的详细阐述是不可分割的”^{[6]174}。正是通过彼此之间的思想交锋,物理学家们才逐渐意识到自身理论中的不足,进而借助实际问题的求解检验理论的可靠性,推动理论的进一步发展与完善。可以说,这场争论对量子理论的澄清与量子现象的理解发挥了积极作用。

在这一阶段,理论在实际问题中的应用绝非简单的技术运用,而是“包括理论的阐述、可能的扩展甚至推翻,以及对其物理含义和内容的进一步澄清。应用过程从根本上具有建设性的作用,能够对概念框架进行修改或补充,或促使人们理解这种形式体

系的能力”^{[6]178}。例如,海森堡在1925年提出矩阵力学的论文中,就将其新的计算规则应用于色散问题与原子光谱;薛定谔的波动力学也以氢原子为例进行论述。最初提出的矩阵力学和波动力学均非成熟的理论体系,而是带有试探性质,其适用范围也较为有限。“1926年,(薛定谔)发表了总共256页的论文,系统论证了波动力学如何能够成功地解决一大批原子物理学问题”^[7]。将理论拓展至相对论情形、非周期性现象(如散射)、包含电子自旋的情形、多体问题以及与电动力学的结合等,本质上正是理解理论、进一步阐述理论的过程。

在关于理论解释的争论上,海森堡与薛定谔都借助理论在实际问题中的应用来为自己辩护。但由于两种理论在不同具体问题上的有效性不同,薛定谔在两种理论等价性证明完成之前曾直言:“我显然希望,这两种理论进展间能不彼此抵触,而恰恰因为它们彼此出发点和方法的全然不同,它们能彼此补充,一方能在另一方失败的地方获得成功”^{[8]54}。后随着玻恩提出概率解释、玻尔阐述互补原理以及海森堡建立不确定关系,物理学家们将新生的量子理论应用于诸多遗留难题时,不断获得令人满意的结果。例如,针对玻尔在与薛定谔争论中所提出的威尔逊云室中电子径迹分立的问题,海森堡运用不确定关系给出了圆满的解释。至1927年科莫会议和索尔未会议相继召开,玻尔与海森堡的解释立场逐渐赢得了大多数物理学家的认同,这场关于量子力学解释的争论暂告一段落。

回顾量子力学创立初期波动力学与矩阵力学之间的争论,可以看出理论的数学表述、物理解释与实际应用三者之间具有深刻的关联性与整体性。首先,物理解释对数学体系的建立具有启发作用:薛定谔基于实体波图像构建波动力学方程便是一例,尽管该图像后来被修正,但它在理论创立过程中发挥了关键的引导作用。其次,理论应用对解释的发展具有建设性作用:在微观领域缺乏直观经验的情况下,理论在解决实际问题时充当了连接形式体系与经验的桥梁,对确立物理概念与原理的意义至关重要。最后,理论的解释在推动量子革命进程中不可或缺:薛定谔方程的提出固然是革命的开端,但若没有概率解释、互补原理等后续解释工作的完善,这场科学革命难以实现阶段性的成功。

上面所述仅是量子力学始创时期丰富争论的一个缩影。物理学家之间频繁的书信交流与观点交锋,直接推动了量子力学基本理论及其解释的完善

与发展,同时也为日后更为深入、激烈的争论埋下了伏笔。

2 爱因斯坦-玻尔争论

自1927年起,随着量子力学在原子与分子物理学中不断取得实证成功,绝大多数物理学家逐渐接受了玻尔与海森堡的解释立场,将量子力学视为一个完备且自洽的理论体系。在这一背景下,最具影响力的思想交锋发生在爱因斯坦与玻尔之间,两人围绕量子理论的一致性与完备性展开了持续数十年的争论,深刻揭示了双方在理解量子世界本质上的根本分歧。更为重要的是,这场原本属于哲学层面的争论在几十年后走进了物理实验室,借助实验技术的突破推动了二次量子革命的发生,为深入理解量子理论提供了全新的平台。

爱因斯坦与玻尔的论战可追溯至1920年代初期。在1927年召开的第五届索尔未会议上,争论进一步激化。爱因斯坦明确表达了对量子理论的不满。他设计了单缝衍射思想实验,试图论证量子力学无法描述单个物理过程。据会议文集记载,爱因斯坦指出:当在检测屏的某一点观测到电子时,“一个同一的基元过程在胶片的二个或者更多个地方起作用”^[8]。他认为,若将 $|\psi|^2$ 解释为粒子出现在某个地方的概率,则必然以超距作用为前提,违背了狭义相对论的基本原理,因此波函数只能描述大量电子的统计行为。玻尔在1949年撰写的回忆文章中补充了更多的争论细节,包括爱因斯坦提出的双缝实验版本。在他看来,爱因斯坦的核心关切在于“空间和时间中的因果描述在量子力学中被放弃的程度”^[9],并试图通过挑战不确定关系来揭示量子力学的内在矛盾。根据玻尔、海森堡与埃伦费斯特等人的回忆,玻尔当时运用互补性原理成功回应了爱因斯坦的质疑。

1930年第六届索尔未会议上,爱因斯坦再度发起挑战。他设计出光子箱思想实验,试图通过精确测量光子逸出时间与箱子重量变化来反驳能量-时间不确定关系。玻尔则以广义相对论的红移效应作为回应,指出在重力场中移动的时钟会产生计时偏差,这一偏差恰好与能量变化满足不确定关系。

在这两轮交锋之后,爱因斯坦“接受了玻尔的反论证……放弃了在内部不一贯性的基础上驳倒量子理论的任何希望”^[10],转而致力于证明量子力学的不完备性。然而,近些年来科学史研究提出了不

同解读。例如,布朗(H. Brown)、霍华德(D. Howard)、巴奇伽鲁皮(G. Bacciagaluppi)和华伦蒂尼(A. Valentini)等学者指出,玻尔并未完全理解爱因斯坦的深层关切——令爱因斯坦深感不安的实质是量子理论的非分离性,即“空间上分离的系统不能被独立处理”^[11]的特性。爱因斯坦认为,“不可分离性是量子物理学与经典物理学的区别所在;不确定性只是其一个表现形式”^[12]。正如埃伦费斯特在1931年访问爱因斯坦之后致信玻尔时所言,爱因斯坦是“出于完全不同的目的”^{[12]98-99},他试图构建一个理论场景,说明对一处系统的测量选择会使得实验者能够预言远处系统中两个不相容物理量中的一个。霍华德强调,只有从这一角度理解,才能将爱因斯坦自1909年至1935年EPR(Einstein-Podolsky-Rosen)论证期间对量子力学的质疑串联成一条连贯的线索。

1935年,爱因斯坦、波多尔斯基(B. Podolsky)和罗森(N. Rosen)共同发表“量子力学所描述的物理实在是完备的吗?”一文,基于实在性判据和完备性判据论证量子力学的不完备性。实在性判据是指:在对系统没有任何干扰的情况下,能够确定地预言一个物理量的值,那么存在对应于该物理量的一个物理实在要素。完备性判据明确物理理论是完备的,意味着所有的物理实在要素都在物理理论中有对应。通过分析量子纠缠粒子对之间存在的关联,他们指出,在测量粒子1的位置或动量时虽未干扰粒子2,却能够确定地推断出粒子2的位置或动量值。然而,位置与动量不对易,不能同时是实在的,由此证明波函数的量子力学描述是不完备的。

爱因斯坦与玻尔的争论显然围绕量子力学的解释展开,其思想实验在当时与量子力学的数学体系及实际应用并无直接关联。然而,随着1951年玻姆以自旋重新表述EPR论证,1964年贝尔(J. Bell)进一步分析EPR论证中隐含的定域性假设并给出区分隐变量理论与量子力学的实验判据,以及量子光学等相关领域实验技术的持续进步,至20世纪70年代,这些思想实验逐步转化为真实的物理实验。从1972年克劳瑟(J. Clauser)等人的实验开始,到1982年阿斯佩克特(A. Aspect)实验的突破性工作,十年间共有八个团队进行了十一场贝尔定理检验实验。尽管实验结果不尽一致,但大多数支持量子力学的预测。此后,纠缠及其所揭示的量子非定域性逐渐被确认为一种真实的物理效应。随着物理学家对单个量子系统隔离、控制和观察的能力越来越强,量子密码术、量子信息传输和量子计算等

新兴领域应运而生,构成了量子信息科学的重要支柱。

在这一从思想实验到物理实验的转变过程中,出发点是对量子力学的解释与基础问题的深层探索,关键推动力来自量子技术实践与器件物理学的发展,而最终受益的是包括基础理论与应用技术在内的整个物理学领域。贝尔、克劳瑟与希莫尼(A. Shimony)等人的贡献,源于他们对玻姆隐变量理论的兴趣与对哥本哈根解释的质疑。他们所挑战的并非量子力学的数学体系或其应用成效,而是其解释体系。克劳瑟与阿斯佩克特实验的成功,离不开量子光学技术的多项突破:他们选用原子级联辐射产生的纠缠光子对作为实验对象,采用可调谐染料激光器制备光子,测量光子的偏振状态,应用高效偏振器与灵敏的光电探测器,并设计在光子飞行过程中快速切换偏振器方向等。这些实验技术既依赖于器件物理学的发展,又反过来推动器件的迭代更新。“器件物理学与基础物理学以及量子力学基础研究一同发展,而且器件研究导致了基础物理学问题的产生,而后者又激发了新的器件的出现”^[13]。

3 测量问题上的争论

爱因斯坦-玻尔论战后,在玻尔与哥本哈根学派的广泛影响下,至20世纪50年代,哥本哈根解释已成为量子力学领域不容置疑的正统观点,学界普遍认为量子理论不存在基础性问题。

然而,尽管在哲学层面被视为量子革命代表,哥本哈根解释本身并非毫无争议。玻尔对经典测量仪器的模糊援引,未能对测量过程提供令人满意的说明;而冯·诺伊曼(von Neumann)对测量过程的量子力学处理,也为不同解读留下了空间。诸如波函数坍缩在物理实在层面究竟意味着什么、为何需要区分测量时与未测量时的不同描述、究竟是什么引发了波函数坍缩等一系列根本问题,持续引发着新一轮的量子力学基础争论。

3.1 普林斯顿学派与哥本哈根学派的争论

1932年,冯·诺伊曼以希尔伯特空间为基础,对量子力学进行了系统公理化。该体系明确区分了量子系统的两种演化方式:一是由薛定谔方程描述的连续演化,二是在测量瞬间发生的波函数坍缩。这一公理化框架因其数学清晰性与经验有效性被广泛接受,被称为是量子力学的正统解释。冯·诺伊曼将测量仪器本身也纳入量子力学的描述范围,从而在测量过程中必须引入外部的观察者以引起波函数坍

缩。值得注意的是,他提出“心理-物理平行主义(psycho-physical parallelism)”概念,并将其与玻尔的互补描述相联系,刻意淡化了与哥本哈根解释之间的差异。

1961年,深谙量子力学基础与冯·诺伊曼理论的维格纳,在论文“关于身心问题的评论”中沿着正统解释的路径得出了一个引人深思的结论:“当物理理论的领域被扩展到包括微观现象时,通过量子力学的创立,意识的概念再次出现在舞台上:如果不考虑意识,就不可能以一种完全一致的方式表述量子力学定律”^[14]。他明确指出,仅靠引入测量仪器无法解释为何叠加态会坍缩为单一的测量结果,而必须有意识的观察者的参与。尽管承认这一认识论结论令人不安,但维格纳认为这是心理学研究的过程,物理学家无需为此困扰。在1963年发表的“测量问题”一文中,维格纳明确了他所谓的正统解释来自海森堡、冯·诺伊曼、伦敦(F. London)和鲍尔(E. Bauer),并详细分析了正统解释关于测量的表述,得出“使系统处于指针位置确定的状态之一的测量不能用量子力学的线性定律来描述”^[15],这一论断为“量子测量问题”的明确提出做出了“深远的认识论结论”。

整个20世纪60年代后半期,关于测量问题的技术性争论持续激烈进行。长期担任玻尔助手的罗森菲尔德对维格纳的观点表示出强烈不满,批评他未能将玻尔的互补性纳入正统解释,并且还在坍缩中引入意识这一主观要素。罗森菲尔德在1965年撰文指出,是物理学理论的公理化处理带来了混乱,企图通过将玻尔的论证翻译成形式化语言的过程会产生认识上的困难,会为偏离玻尔常识性结论的猜测留下余地。他进一步称“这些误解直到最近(1962年)才被达内尔(A. Daneri)、洛林格(A. Loinger)和普罗斯佩里(G. M. Prosperi)对量子力学中测量过程进行得非常彻底和优雅的讨论完全消除”^[16]²²³。达内尔等三人提出的模型与玻尔思想完全一致,他们在用量子力学处理完系统与测量仪器间的相互作用后,对仪器进行了经典统计物理处理,实现了既简单又能定量处理的方案。1966年,达内尔等三人在后续论文中仅以脚注形式提及“维格纳、希莫尼、莫道尔(P. A. Moldauer)、柳濑(M. Yanase)和姚赫(J. Jauch)对这一主题做出新的实质性贡献”^[17]。这一轻慢的态度激怒了维格纳,他尤其担心这些攻击性的言论会损害年轻学者的学术生涯。尽管与姚赫在测量问题上立场不完全一致,维格纳仍致信希望他与柳濑共同回应达内尔等人的批评。1967年,姚赫、

维格纳和柳濂以专业而礼貌的态度回应了达内尔等人的论文,承认了对方对测量理论的有益贡献。1970年在意大利瓦雷纳暑期学校上,维格纳与普罗斯佩里通过非正式讨论达成共识,认为量子测量过程仍需进一步研究。这场争论至此告一段落。

作为1963年诺贝尔奖得主的维格纳,凭借其在量子力学领域的权威地位与重要贡献,对动摇哥本哈根解释的垄断地位起到了关键作用。“事实上,由于维格纳和罗森菲尔德之间的争论,以及跨越大西洋的一些论文的互相指责,哥本哈根的垄断被打破了。物理学家开始把哥本哈根学派和普林斯顿学派称为量子力学正统的两种变体”^{[13]141-142}。作为维格纳的学生,希莫尼后来在贝尔定理的实验验证中也做出了重要贡献。

3.2 哥本哈根解释与玻姆解释

事实上,在维格纳提出其观点之前,便已存在与哥本哈根解释不同的量子力学解释。然而,这些观点在当时被看作是形而上学思辨,未引起主流物理学界的充分重视。

早在1927年10月召开的第五届索尔未会议上,德布罗意(de Broglie)就曾提出“导波理论”,试图在微观领域恢复因果性描述。他认为波函数不仅具有概率波属性,同时也决定着粒子在空间中的具体运动轨迹。然而,这一理论遭到了泡利(W. Pauli)的严厉批评,导致德布罗意很快放弃了该方向。这一事件以及冯·诺伊曼在《量子力学的数学基础》中对隐变量理论的不可能性证明,“使得直至五十年代初期,学界普遍认为德布罗意的因果性理论已经被断然否定了”^{[10]154}。

1951年,任职于普林斯顿大学的玻姆在撰写《量子理论》一书时,深入研究了玻尔的互补性原理,却发现自己难以完全认同。这促使他转而提出自己的隐变量解释。在该解释中,隐藏的变量决定了单个系统的精确行为,但在测量中这些信息被平均化,从而与正统解释给出相同的实验预测。在1952年发表的奠基性论文中,玻姆明确指出:“仅靠这种解释的可能性,就证明我们没有必要放弃在量子水平的精度上对单个系统做准确、合理和客观的描述”^[18]。玻姆的隐变量理论不仅揭示出冯·诺伊曼关于隐变量理论不可能性证明的缺陷,也打破了哥本哈根解释的唯一性。值得注意的是,此时德布罗意已与助手维吉尔(J. P. Vigiér)重新发展了其“双重解”理论,双方随后建立合作,使法国的庞加莱研究所成为隐变量理论研究的重要阵地。

然而,玻姆的理论遭到了主流物理学界的强烈批评甚至敌意。泡利提醒玻姆注意德布罗意早年的类似工作,并从物理和认识论角度提出双重质疑:一方面认为该理论对可观测现象缺乏直接或间接影响,无法验证;另一方面指出其对位置和动量这对正则共轭变量引入了人为的不对称性,使得理论带有“人工形而上学”特征。罗森菲尔德的批评则更具哲学色彩。作为互补原理的坚定捍卫者,他认为互补性必然要求放弃决定论,因而指责玻姆的理论是一种形而上学的倒退。“决定论未能逃脱这种命运(成为进步的阻碍),那些仍坚持决定论、对互补性的证据视而不见的物理学家,无论他们愿不愿意,都把科学家的理性态度换成了形而上学家的态度”^{[19]84}。在马克思主义者罗森菲尔德看来,形而上学意味着孤立、割裂、僵化与呆板。

罗森菲尔德不但自己质疑玻姆的解释,还动员其他物理学家共同抵制。派斯(A. Pais)、科恩(R. Cohen)、福克(V. Fock)等物理学家积极地响应了这一呼吁。作为苏联国内支持互补原理的最具影响力的学者,福克抱怨“玻姆-维格纳病”过于泛滥。“六位最为杰出的科学家对他(玻姆)发起了攻击,这对于如此年轻的人来说是一种极大的荣幸”^{[19]85-86}。不过,也有如马里奥·居里(M. Curie)等物理学家并不支持罗森菲尔德的批评立场。

3.3 哥本哈根解释与埃弗雷特解释

1957年,普林斯顿大学的博士生埃弗雷特提出了另一种不同于哥本哈根解释的量子力学解释。他尖锐地指出,正统解释“建立在外部观察的概念之上。观察到各种可能结果的概率完全由过程1(波函数坍缩)所规定……然而,对于一个不受外部观察的系统来说,过程1是不可能的”^[20]。在他所构建的相对态解释中,薛定谔方程被视作普遍成立,波函数是基本的物理实体,任何子系统的态都不是独立的,而是与系统其余部分的态相关联。在测量相互作用之后,“观察者的态分支成许多不同的。每个分支表示测量的不同结果和对象系统态的相应本征态。任何给定的观测序列之后,所有分支同时存在于叠加态中”^{[20]459}。我们所观察到的单一测量结果,其实只是叠加态中某一分支内的相对态;而被观察对象、测量仪器乃至观察者自身构成的整个系统,始终处于所有分支叠加的未坍缩态。

埃弗雷特这一革命性的构想,最初得到了导师惠勒(J. Wheeler)的鼓励与支持。作为玻尔长期以来的学生、朋友、合作者与互补原理的支持者——惠

勒曾赞誉互补原理为“当代最具革命性的哲学观念”^{[10]131}——他却以惊人的学术包容性接纳了埃弗雷特的新解释。他不仅协助埃弗雷特完善理论表述、推动其论文在《现代物理评论》上发表,还竭力促成该解释获得哥本哈根学派的认可,包括支持埃弗雷特亲赴哥本哈根当面征求玻尔的意见。然而,在哥本哈根学派看来,埃弗雷特对波函数的解释既含混不清又缺乏合理性,其赋予波函数真实的物理内涵是错误的。他们认为,埃弗雷特未能真正理解测量过程的本质,尤其是忽略了宏观测量的不可逆性,同时错误地将概率排除在理论框架之外,并对观察者的概念存在根本性误解。玻尔本人认为埃弗雷特的解释不过是数学技巧,罗森菲尔德则在一封私人信件中写道:“至于埃弗雷特,我和玻尔都无法容忍他。12年前,他来哥本哈根拜访我们是为了推销他那些无望的错误想法,它是惠勒极不明智地怂恿他发展起来的。他笨得无法形容,连量子力学中最简单的东西都搞不懂”^{[13]114-115}。埃弗雷特后来回忆这段哥本哈根之行时,坦言“那简直是一场地狱,从一开始就注定了要失败”^{[13]114}。

面对如此强大的反对声浪,埃弗雷特不得不在惠勒的督促下大幅删减论文内容、弱化表述,并特别强调其解释只适用于量子引力等有限情形。这段经历对他造成了深远的打击,最终促使他在获得博士学位后不久便毅然离开了学术圈。

3.4 解释的纷争

20世纪70年代以后,量子力学的解释版图开始呈现多元化发展。1970年代,布伦廷(L. Ballentine)等人在爱因斯坦“波函数描述系统”观点的基础上,明确提出了统计解释(the statistical interpretation);哲学家范·弗拉森(van Fraassen)则构建了模态解释(the modal interpretation);与此同时,埃弗雷特的解释经德威特(B. Dewitt)的推广,以多世界解释之名逐步发展开来。20世纪80年代,克拉莫(J. Cramer)提出了具有逆因果特征的交易解释(the transactional interpretation);格里菲斯(Robert Griffiths)基于多世界解释框架发展出一致历史(the consistent histories)解释;阿尔伯特(D. Albert)和洛尔(B. Loewer)等人发展出了多心灵解释;GRW(Ghirardi、Rimini与Weber)则共同提出了动力学的坍缩理论。20世纪90年代,由泽(H. D. Zeh)提出的退相干理论在经历近二十年沉寂后重获关注;盖尔曼(M. Gell-Mann)与哈特(J. Hartle)在此基础上构建了退相干历史解释(the decoherent histories interpreta-

tion);1996年罗韦利(C. Rovelli)提出了强调关系性特征的关系论量子力学(relational quantum mechanics)。21世纪以来,福克斯(C. Fuchs)等提出了量子贝叶斯主义(quantum Bayesianism),泽林格等提出了信息解释,希利(R. Healey)给出了实用主义(pragmatist)的解释。

各种新的解释层出不穷,关于量子世界的理解也各式各样。面对如此纷繁的量子力学解释,物理学家们的态度也日趋分化。一个世纪前的物理学界,可以清晰地描绘出以玻尔、海森堡、玻恩、泡利等哥本哈根学派为一方、以爱因斯坦、薛定谔、德布罗意为反对一方的阵营分布。而当前的物理学界,已难以简单归类。物理学家们不得不采用投票统计的方式,为量子力学的解释纷争描绘轮廓。

早在1997年,泰格马克(M. Tegmark)在“量子理论的基本问题”会议上对48位物理学家进行的调查显示(允许多选),在明确表态的票数中,哥本哈根解释仍居首位,多世界解释紧随其后(见表1)。泰格马克当时评论道:“与哥本哈根解释占统治地位的过去相比,观点发生了相当惊人的转变”^[21]。2011年在“量子物理学与实在的本质”会议上的新一轮调查(33位参与者,含27位物理学家)中(见表2),哥本哈根解释依然保持领先,而信息理论解释则异军突起,展现出强劲的发展势头。2025年6月,《自然》杂志面向万余名物理学家的调查(回收1101份有效回复)更是揭示了学界深层的不确定性(见图1):仅有24%的受访者对所选解释抱有充分信心,多数人只是勉强接受或视其为权宜之计。

表1 1997年的投票结果^[21]

Table 1 Voting result in 1997^[21]

解释	投票人数	占比
哥本哈根解释	13	27%
多世界解释	8	16.7%
玻姆解释	4	0.83%
一致历史解释	4	0.83%
动力学坍缩理论(GRW/DRM)	1	0.02%
上述都不选/不确定	18	37.5%

尽管这些投票调查在形式上并不严谨——例如允许重复投票或弃权,且受限于参会人员的构成,其结果未必完全客观、结论也未必绝对可靠——但它们清晰地揭示出量子力学解释领域的根本现状:多种解释并存,而物理学家的立场存在深刻分歧。从三次调查结果来看,哥本哈根解释依然占据主流。这表明相

表 2 2011 年的投票结果^[22]

Table 2 Voting result in 2011^[22]

解释	投票人数	占比
哥本哈根解释	14	42%
多世界解释	6	18%
信息理论解释	8	24%
GRW 理论	3	9%
量子贝叶斯主义	2	6%
关系解释	2	6%
其他	4	12%
没有喜欢的解释	4	12%

当一部分物理学家满足于理论的计算与预测能力，并不深究其背后的物理图像与世界图景，也未能对玻尔的互补性思想等核心哲学进行批判性反思。

随着 20 世纪 90 年代量子信息科学的兴起，以信息或认知为核心的解释路径逐渐形成。该阵营的代表人物如泽林格认为，量子态并非客观实体，而是存在于认知范畴的信息。类似的还有量子贝叶斯主义与关系论量子力学，它们都强调量子态不应该被孤立地看待，而应该与观察者、测量过程以及该过程中知识态的变化联系起来。“这些重建或重新解释量子理论的尝试，也意味着对玻尔解释的恢复，不过现在它已摆脱了之前的主观主义色彩，并且不再期望成为适用于几乎所有经验领域的新的哲学圣杯”^[23]。在这类认识论的解释中，超光速影响不再构成困扰，因为纠缠并不涉及信息的真实传递，而只是观察者自身知识的更新。然而，此类解释也面临自身的难题，例如必须解释：为何作为信息的量子态能在双缝干涉实验中表现出无可置疑的物理效应。

另一方面，仍有众多物理学家执着于探寻量子世界的真实图景与波函数的实在性含义——多世界解释、玻姆/德布罗意导波理论以及动力学坍缩理论的支持者便属此列。然而，这些实在论解释之间往往也存在着非常大的分歧：多世界解释坚持波函数永不坍缩、薛定谔方程普遍有效，而坍缩理论认为坍缩才是基本过程；导波理论和多世界解释的支持者常互相指责对方的理论定义模糊不清；导波理论本身是决定论的，而交易解释等逆因果理论甚至走向了超决定论……更令人惊讶的是，《自然》的调查显示，即便选择了同一种解释的物理学家，在“量子态是否实在”“量子与经典之间是否存在明确的界限”“量子非定域性是否意味着超光速”等问题上仍莫衷一是。局面之复杂，可谓一个“乱”字难以尽述。

解释之争，根源在于量子力学的数学形式体系与其物理解释的分离，这也导致争议难以通过实验裁决。正因如此，《自然》调查中“四分之三的受访者认为量子理论未来将被更完整的理论取代”^[1]，物理学家寄希望于两条路径：一是通过量子力学与广义相对论的结合带来根本性洞察；二是借助量子信息技术的突破性进展揭示理论的深层含义。前者旨在拓展量子理论的应用疆域，后者仰仗技术手段的革新，二者都期待以此推动基础理论的变革。但无论通过何种途径，量子力学解释纷争的最终判决都必须回归理论实践——唯有如此，“波函数”“纠缠”“非定域性”等核心概念才能获得明确的意义。

4 小结

量子力学的百年发展史，亦是一部跨越世纪的

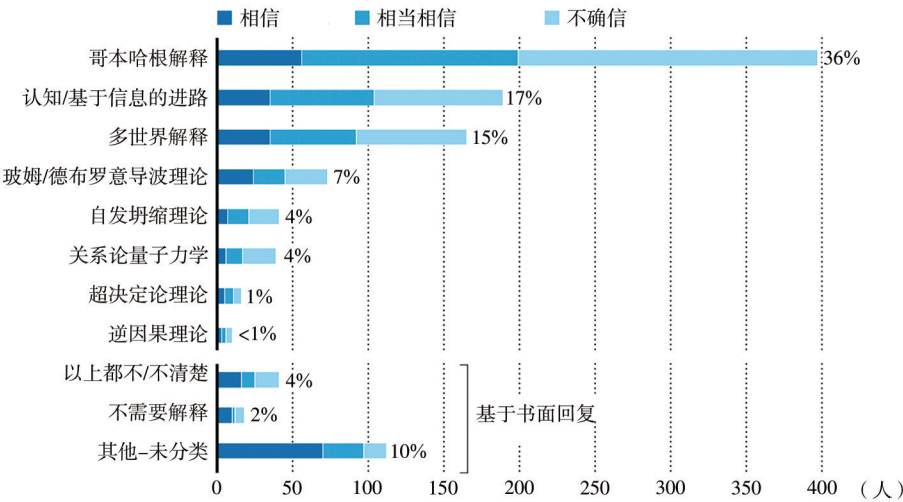


图 1 2025 年的投票结果^[1]

Figure 1 Voting result in 2025^[1]

解释之争。二十世纪二三十年代理论创立初期的争论,被普遍视为必要且富有建设性;而从二十世纪五十年代至七十年代,相关讨论则多被视为形而上学而遭到冷遇;直到二十世纪八十年代以后,基础问题的价值被重新发掘,越来越多的物理学家主动投身于这场关乎量子本质的思辨之中。然而,这场持续百年的争论,非但未能驱散早期笼罩在量子现象之上的迷雾,反而引入了更多令人困惑的新概念:多重平行世界、时间逆向因果、宇宙波函数、作为主观信念的量子态……我们或可说:量子革命在解释层面的革命远未完成。前路漫漫,量子革命的终章依然书写艰难。

但若换一个视角,这种持续的分支与争鸣或许正是科学的活力所在。正如爱因斯坦与玻尔之间的哲学交锋,最终催生了量子信息革命的萌芽。尽管争论未必能达成共识,也无法提供统一的解释图景,但它不断深化着我们对于理论的理解,拓展其深度与广度,更持续激发出想象力与创造力——这正是百年量子争论所揭示的深刻现实意义。

争论仍在继续,而我们亦在争论中不断进步!

参考文献:

- [1] GIBNEY E. Physicists Disagree Wildly on What Quantum Mechanics Says About [J]. *Nature*, 2025, 643: 1175-1179. DOI:10.1038/D41586-025-02342-y.
- [2] SCHRODINGER E. An undulatory theory of the mechanics of atoms and molecules [J]. *Physical review*, 1926, 28(6): 1049.
- [3] 薛定谔. 作为本征值问题的量子化[M]. 薛定谔讲演录. 范岱年, 胡新和, 译. 北京: 北京大学出版社, 2007: 51.
- [4] JAHNERT M. LEHNER C. The Early Debates about The Interpretations of Quantum Mechanics[M]. Freire O Jr. *The Oxford Handbook of the History of Quantum Interpretations*. Oxford: Oxford University Press, 2022: 140.
- [5] HEISENBERG W. Physics and Beyond: Encounters and Conversation[M]. Pomerans A J trans. New York: Haper & Row Publishers. 1971: 73.
- [6] JOAS C. Foundations and Application: The Creative Tension in the Early Development of Quantum Mechanics[M]. Freire O Jr. *The Oxford Handbook of the History of Quantum Interpretations*. Oxford: Oxford University Press, 2022: 174.
- [7] 曼吉特·库马尔. 量子理论: 爱因斯坦与玻尔关于世界本质的伟大论战[M]. 包新周, 伍义生, 余谨, 译. 重庆: 重庆出版集团, 2012: 169.
- [8] 爱因斯坦. 对于量子理论的意见(1927年10月下旬)[M]. 爱因斯坦文集(第一卷). 许良英, 范岱年, 编译. 北京: 商务印书馆, 1976: 232.
- [9] 玻尔. 就原子物理学中的认识论问题和爱因斯坦进行的商榷[M]. 尼耳斯·玻尔集(第七卷). 卡耳卡尔, 编. 戈革, 译. 北京: 科学出版社, 1998: 297.
- [10] 马克斯·雅默. 量子力学的哲学[M]. 北京: 商务印书馆, 2014: 188.
- [11] BACCIAGALUPPI G, VALENTINI A. Quantum Theory at the Crossroads-Reconsidering the 1927 Solvay Conference [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2009: 246.
- [12] HOWARD D. The prehistory of EPR, 1909—1935: Einstein's early worries about the quantum mechanics of composite systems[M]. Miller A. *Sixty-two Years of Uncertainty*. New York: Plenum Press, 1990: 97.
- [13] FREIRE O Jr. The Quantum Dissidents: Rebuilding the Foundations of Quantum Mechanics(1950—1990)[M]. New York: Springer, 2015: 237.
- [14] WIGNER E P. Remarks on the mind-body question[M]. Wheeler J, Zurek W H. *Quantum Theory and Measurement*. Princeton: Princeton University Press, 1983: 168-181.
- [15] WIGNER E P. The Problem of Measurement [J]. *American Journal of Physics*, 1963, 31(6): 12.
- [16] ROSENFELD L. The Measuring Process in Quantum Mechanics[J]. *Progress of Theoretical Physics Supplement*, 1965, E65: 222-231.
- [17] DANERI A. LOINGER A. PROSPERI G. M. Further Remarks on the Relations Between Statistical Mechanics and Quantum Theory of Measurement[J]. *Nuovo Cimento*, 1966: 120.
- [18] BOHM D. A Suggested Interpretation of the Quantum Theory in Terms of "Hidden" Variables I[J]. *Physical Review*, 1952, 85(2): 166.
- [19] FREIRE O J. David Bohm: A Life Dedicated to Understanding of the Quantum World[M]. Berlin: Springer, 2019.
- [20] EVERETT III H. "Relative state" formulation of quantum mechanics[J], *Reviews of Modern Physics*, 1957, 29(3): 455.
- [21] TEGMARK M. The interpretation of quantum mechanics: Many worlds or many words?[J]. *Progress of Physics*, 1998, 46(6-8): 855-862.
- [22] SCHLOSSHAUER M, KOFLER J, ZEILINGER A. A snapshot of foundational attitudes toward quantum mechanics [J]. *Studies in History and Philosophy of*

- Science Part B: Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, 2013, 44 (3): 222-230. DOI: 10.1016/j.shpsb.2013.04.004.
- [23] FREIRE O J. Making Sense of the Century-Old Scientific Controversy over the Quanta [M]. Freire O Jr. *The Oxford Handbook of the History of Quantum Interpretations*. Oxford: Oxford University Press, 2022: 841.



赵丹,女,副教授。目前主要从事物理学史、物理学哲学和科学哲学研究工作,主持完成国家和省部级项目近十项,包括国家社科基金项目、教育部人文社科研究项目等,在《哲学研究》《自然辩证法通讯》《科学技术哲学研究》等期刊发表论文近20篇。E-mail:chyuzhao@sxu.edu.cn

(责任编辑:彭 鹏)