

DOI:10.12405/j.issn.2097-1486.2025.04.001

量子力学如何重塑我们对“实在”与“知识”的理解

成素梅

上海社会科学院 哲学研究所, 上海 200020

摘要:从哲学的视域来看,量子力学的百年发展可以划分为四个阶段,一是从量子力学的诞生到哥本哈根解释的确立,对决定论观点的颠覆;二是从EPR论证的发表到贝尔不等式的提出,对量子力学本性的深化理解;三是检验贝尔不等式的实验,逆转了物理学家理解“实在”与“知识”的哲学共识;最后是物理学家基于量子信息科学与技术的发展所提出的理解量子实在的信息进路,所论证的“实在与信息无法区分”有可能带来新的哲学范式。

关键词:量子百年;概率论的世界观;量子实在;量子信息

中图分类号:O413.1; N02

文献标志码:A

文章编号:2097-1486(2025)04-0327-07

How is quantum mechanics reshaping our understanding of “reality” and “knowledge”

CHENG Sumei

Institute of Philosophy, Shanghai Academy of Social Sciences, Shanghai 200020, China

Abstract: From a philosophical perspective, the century-long development of quantum mechanics can be divided into four stages. The first stage is from the birth of quantum mechanics to the establishment of the Copenhagen interpretation, which subverted deterministic views. The second stage is from the publication of the EPR argument to the proposal of Bell's inequality, which deepens the understanding of the nature of quantum mechanics. The third stage is the completion of experimental tests of Bell's inequality, which leads to a reversal in the philosophical consensus among physicists regarding “reality” and “knowledge”. Finally, based on advancements in quantum information science and technology, physicists have proposed an informational approach to understanding quantum reality, which argues that “reality and information are indistinguishable”, it is thus opening up new philosophical possibilities.

Keywords: quantum century; probabilistic worldview; quantum reality; quantum information

0 引言

联合国于2024年6月7日宣布,2025年为“国际量子科学与技术年”,并且设计发布了相互嵌套的三色彩环纪念标识,旨在倡导开展为期一年的全球性庆祝活动,来展示量子科技对人类文明以及人类理解自然界所产生的影响,同时这一举措也明确表明,深刻影响了物理学发展进程的量子科学技术已经得到人们的认可。当我们于2025年站在量子力学诞

生百年的历史节点来回望普朗克(Max Planck)在1900年提出的“量子”概念时,我们不得不心怀崇敬地感到,在经典物理的铜墙铁壁上凿开一道裂缝的“量子”概念的提出是多么的神奇而伟大,它既是人类踏入微观世界的风向标,也是引发多次哲学变革的导火索。如今,量子信息技术已经被应用于金融、交通、物流、制药、化工、汽车、航空、气象、食品加工等极其广泛的领域,成为许多国家在安全、军事、经济等方面处于优势地位和引领未来发展的战略焦点

基金项目:国家社会科学基金重大项目“当代量子诠释研究”(19ZDA038);“量子信息科技哲学及其逻辑基础研究”(22&ZD046)

收稿日期:2025-10-10;**修回日期:**2025-11-25

和布局前沿科技研发的重要领域。然而,具有如此光明前景的量子科技,过去百年的发展历程却与物理学家之间执着的哲学争论以及哲学追求密不可分。在全球纪念量子力学诞生百年之际,本文立足于哲学视域,来回眸量子力学百年发展节点的同时,揭示量子力学与哲学之间存在的相互促进与彼此互动的内在关系,以及这种互动对我们理解“实在”与“知识”的重塑。

1 波函数的概率解释对决定论观念的颠覆

历史地看,我们今天所运用的量子力学形式体系由两条不同思路创立的矩阵力学和波动力学统一而来的。矩阵力学是海森堡(Werner Karl Heisenberg)、玻恩(Max Born)和约丹(Ernst Pascual Jordan)从量子化概念出发,通过分析原子发射或吸收辐射中的可观察的数学变量之间的关系,运用当时难以令人理解的矩阵代数方法,在超越玻尔(Niels Bohr)的旧量子论之基础上,于1925年共同创立的;波动力学是薛定谔(Erwin Schrödinger)从经典力学的哈密顿-雅可比方程出发,立足于德布罗意(Louis Victor de Broglie)的物质波假设,运用变分法,于1926年独自创立的。后来证明,这两种在形式上和内容上完全不同的理论,却具有数学上的等价性,于是,玻恩建议将两者统称为“量子力学”,并将波动力学的表述方式与量子跃迁的描述方式结合起来,提出了对波函数的概率解释,意指波函数的模的平方并不是代表实在的电荷密度,而是代表粒子的散射概率密度,也就是说,波函数“不回答一个粒子在某个瞬间在哪里这个问题而只回答一个存在于某个时间,某个地方的粒子的概率是什么这个问题……每一次观察都包含着对被观察事物的干扰和观察事物本身的微扰”^[1]。但问题在于,这种解释对经典物理学家视为金科玉律的决定论思想提出了尖锐的挑战。

在经典物理学中,作为实在的粒子是静态的,描述其运动变化的方程由物理量所构成,只要已知初始条件,就可以根据运动方程求解出这些物理量在未来任何时刻的数值,也就是说,系统未来的变化是由过去的初始条件唯一决定的。而玻恩对波函数的概率解释却否定了这种认知,比如,当电子与原子相撞时,量子力学无法提供相撞之后电子的确切位置。玻恩指出,“在这里,整个决定论就成了问题。从我们的量子力学的观点来看,在任何一个个别情形里,都没有一个量能够用来因果地确定碰撞的结果……我自己倾向于在原子世界里放弃决定论”^[2]。玻恩

甚至断言,“绝对必然性,绝对准确,最终真理等等观念都是应当从科学中排除出去的幽灵”“相信只有一种真理而且自己掌握着这个真理,这是世界上一切罪恶的根源”“客观性问题就是哲学默想的一个人工制品”^[1]。然而,这种将概率引入量子力学的思想并没有得到普朗克、爱因斯坦(Albert Einstein)、薛定谔等哲学保守派的支持,乃至玻恩在后来讨论“符号与实在”的关系问题时,把这种状况说成是他一直到1954年才因为自己的工作而获得诺贝尔物理学奖的主要原因所在^[1]。

在爱因斯坦看来,在量子理论建立之前,物理概念与符号所支持的决定论纲领,随着物理思想的发展,已经获得了毋庸置疑的地位。月亮总是在空间中占有确定的位置,与我们是否能感知到这个位置的存在无关。当物理学家提出他们对“外部世界”的描述时,其心里想到的正是这样的描述,而且这种纲领的有效性在每一种情况下都已经得到了实验的确证。而玻恩对波函数的概率解释和海森堡的不确定关系却使物理学家坚信,决定论纲领是一种错觉。这是爱因斯坦无论如何都无法接受的结论。于是,“上帝不掷骰子”成为爱因斯坦强烈反对量子力学哥本哈根解释的标志性口号。这种分歧使得物理学家对量子力学形式体系的理解成为当时的前沿热点。在1927年召开的第五届索尔维会议上,会议主席洛伦兹(Hendrik Antoon Lorentz)就曾有意识地将关于因果律、决定论和概率性等哲学话题引导为会议的关注点来讨论。埃伦费斯特(Paul Ehrenfest)在描述当时的情景时说,“难道就不能把决定论当作一种信仰,继续坚持下去?是否一定要把非决定论提升到原理的高度?”^[3]在这次讨论中,玻尔在全面接受波函数概率解释之基础上,提出互补性原理,来为海森堡的不确定关系奠基,爱因斯坦则敏锐地亮出思想实验进行强烈反驳。于是,爱因斯坦与玻尔围绕量子力学的自洽性的争论成为本次会议最大的亮点。然而,有意思的是,这次争论以玻尔获胜为终。当玻尔在三年之后的第六届索尔维会议上再次有说服力地回击了来自爱因斯坦思想实验的反驳时,量子力学的哥本哈根解释赢得了包括薛定谔、玻姆(David Joseph Bohm)在内的许多物理学家的认同,并占据了正统解释的地位,得到巩固和广泛地传播。

根据海森堡的不确定关系,我们无法同时精准地获得像位置和动量等共轭变量或成对属性的知识,并且,知识的这种限制是根本性的,是自然本身的内在特性,而不是测量工具不够好。玻尔把这种

局势说成是我们不能简单地把量子测量中存在的确定关系,归结为是由于缺乏对位置与动量值的认知所导致的,而应该看成量子系统本身所固有的特性。因为在量子测量中,如果不参照“实验设置”,用来描述对象微观态的术语(比如,电子的位置、电子的动量、系统的态函数)将是无意义的。玻尔把被测量对象的特性表现对测量设置的这种依赖性概括为量子测量中的整体性^[4]。这种观点不仅意味着,认识论上的确定性是有局限性的,而且还向启蒙时代以来关于客观性的理想提出了挑战,知识在本质上可能是情境化的、部分的和与视角相关的。玻尔的互补性原理被看成是量子假设的直接推论,不是先验地对经典概念的批判性分析的一种单纯的概念发现,而是缺乏要求同时使用某些经典概念的事实性条件的发现^[5]。玻尔本人甚至把他的这一发现与爱因斯坦对光速不变原理的发现相提并论。在狭义相对论中,光速不变原理说明物体的运动速度不能够超过光速来传播;在量子力学中,互补性原理要求在与物体运动的参照系相关的框架内,限制运用经典概念的范围。这种限制使得“实在”,在其最基本的层次上,不再是由静态的或固定不变的实体所构成,而是由动态的、依赖于测量设置的可能态所构成。这就对经典的形而上学实在论提出了挑战,支持了一种关系性或面向过程的本体论。

1932年,冯·诺伊曼(John von Neumann)在《量子力学的数学基础》一书中将量子态表示为复数无限维希尔伯特空间中的矢量,或者说,建立了量子态与希尔伯特空间矢量的对应关系,突破了经典力学有限维空间的限制,消除了矩阵力学与波动力学之间的分歧,并且明确提出,量子系统的概率性源于物理本质,而非观察者的无知,以此反驳爱因斯坦对量子力学的质疑,并证明了隐变量量子论的不可能性。冯·诺伊曼的著作不仅奠定了量子力学的数学基础,而且进一步巩固了量子力学哥本哈根解释的正统地位。然而,哥本哈根解释只是关于可观察量的解释,而不是关于可存在量的(beable)解释,因而它无法提供理解量子实在的本体论图像。对于在经典物理学土壤中成长起来的物理学家而言,他们只是把哥本哈根解释当作适用于教学与交流的权宜之计来接受,并没有从内心深处彻底地放弃为量子力学重新找回决定论基础的努力。见证这种努力的关键一步是爱因斯坦、波多尔斯基(Boris Podolsky)和罗森(Nathan Rosen)在1935年合作发表的《能认为量子力学对物理实在的描述是完备的吗?》(简称“EPR论证”)文章而迈出的。这

篇文章不仅使量子力学的本质特征显现出来,而且为1964年贝尔不等式或贝尔定理的提出奠定了基础。

2 固守经典实在论的努力深化了对量子力学本性的理解

在量子力学发展史上,“EPR论证”是一篇里程碑式的论文,不仅具有十分重要的理论价值,而且具有划时代的哲学意义。就理论价值而言,它促使薛定谔在进一步深化理解他的方程所遵守的态叠加原理的内在本质和澄清量子测量有别于经典测量的独特性之过程中,创造性地提出了成为当代量子信息技术基石的“量子纠缠”概念,还成为贝尔(John Stewart Bell)在1964年抓住隐变量理论的共同本质,提出了著名的贝尔定理或贝尔不等式,提供了思想实验的背景;就哲学意义而言,它基于经典实在论的理论前提对量子力学的完备性的质疑,第一次将物理学家固守经典实在论的执念与量子力学描述之间隐藏的深刻矛盾揭露出来。我把量子力学发展的这个时间段看成是物理学家尽力为量子力学铸牢其经典实在论根基所进行的持续探索,只不过,这种探索反而为物理学家深化理解量子力学的内在本性起到了推波助澜的作用。

“EPR论证”是从实在性判据和完备性判据出发,通过考察测量纠缠粒子相关联的思想实验,来质疑量子力学的完备性。其中,实在性判据是指,要是对于一个体系没有任何干扰,我们能够确定地预测(即概率等于1)一个物理量的值,那么,对应于这一物理量,必定存在着一个物理实在的元素;完备性条件判据是指,只有当物理实在的每一个元素都必须在物理理论中有它的对应时,这个物理理论才是完备的。在这里,实在性判据是物理量成为物理实在的充分条件;完备性判据是一个物理理论是否完备应满足的必要条件。这两个判据确保物理实在的要素不是来自先验的哲学思考,而来自实验与测量结果。这两个判据的内容无疑是建立在经典实在论之基础上的。而量子力学则是在不断地挣脱经典物理学体系之束缚的过程中建立起来的,因此,今天看来,文章后半部分设想的关于两个粒子的量子描述的实验不可能与这两个事先设定的判据相吻合,是自然而然的。因为坚持经典实在论假设,自然会得出量子力学是不完备的结论,坚持认为量子力学是完备的观念,就需要放弃经典实在论的假设。现在,我们知道,放弃经典实在论并不等于量子力学会失去与实在世界相关的本体论预设,而是意味着我们需要重塑新的量子实在论。

EPR 论证发表不久就引起了薛定谔的高度关注。当时,薛定谔为了澄清量子测量与经典测量之间的差异,加深对量子力学特别是量子测量的深层次理解,连续写了两篇论文。在这两篇论文中,薛定谔首次杜撰了“量子纠缠”概念来概括“EPR 论证”所质疑的量子现象,并设计了著名的“薛定谔猫”实验来揭示运用经典测量观念来看待量子测量时所存在的悖谬之处。量子纠缠表明,曾经作用过的两个或多个粒子在分开之后,依然深深地关联在一起,其中,一个粒子状态的改变会同时影响到分离开来的另一个粒子的状态,无论它们相距多远。这是由薛定谔方程的性质决定的。这样,粒子之间的边界不再像经典粒子那样泾渭分明,而是存在着非定域性关联。这意味着,量子测量不再是被动地呈现“存在于那里”的实在,而是能够主动地生成实在,认知不再是纯客观的表征,而是参与,测量结果取决于被测量对象和测量设置之间的相互作用,这从根本上改变了观察者在科学中的地位:即,观察者不再是一个外在于对象的中立者或旁观者,而是实在展开的参与者。这种性质导致了哲学上的各种想象。

1948 年,爱因斯坦在“量子力学与实在”一文中依然执着地认为,量子理论“很可能成为以后一种理论的一部分,就像几何光学现在合并波动光学里面一样:相互关系仍然保持着,但其基础将被一个包罗得更广泛的基础所加深或代替”^[6]。1951 年,物理学家朗道(Lev Davidovich Landau)在根据哥本哈根解释的精神,出版了量子力学的教科书之后,开始对哥本哈根解释持有怀疑的态度。朗道认为,量子力学的玻尔解释中的互补原理是用语言的改进,来代替物理学中的建设性的探索,是对纯物理论据的严重曲解。这种做法不是主动地用物理学的手段和方法解决理论所遇到的困难,而是回避了所存在的问题^[7]。曾经是玻尔解释观点的热情支持者与传播者的玻姆,在出版了根据哥本哈根解释精神撰写的《量子理论》一书之后,出于对清晰的本体论图像的追求,于 1952 年发表了题为《用“隐变量”的思想方法提出量子力学的解释》的文章^[8]。这篇文章维护了包括空间、时间、决定论的因果性、物质的定域性等观念在内的经典概念结构,被认为是将量子力学纳入到经典概念框架内的一种具体努力,也是对德布罗意导波理论的一种复兴。玻姆把这种隐变量理论称之为“德布罗意-玻姆理论”。

玻姆在谈到他之所以提出一种可能的隐变量量子理论的动机时提出“首先应该记住,在这个理论提出之前,普遍存在这样一个印象:根本没有任何隐变

量概念(哪怕是抽象的、假设的和‘玄学的’隐变量的概念)能够与量子理论相容……因此,为了表明只是因为隐变量甚至不能被想象就抛弃它们这样一个做法是错误的,只要提出任何一个逻辑上相容的、用隐变量来说明量子力学的理论就够了,不论这种理论是多么抽象和‘玄学’”^[9]。这种为量子力学提供经典实在论根基的努力,以及对冯·诺伊曼关于隐变量不可能性的证明是否具有逻辑合理的审查,引起了当时在欧洲核子研究中心从事粒子物理和加速器设计工作的物理学家约翰·斯图尔特·贝尔的关注。

贝尔的工作虽然与量子力学的基本问题相差甚远,但出于爱好,他利用业余时间研究理论物理。他在读到玻姆关于隐变量量子理论的文章之后,决定重新剖析量子力学的基本问题。1964 年,贝尔基于对隐变量理论模型的详细考察,从冯·诺伊曼的工作和 EPR—玻姆思想实验出发,提出了一个被物理学家说成是“意义最深远的科学发现”^[10]的数学不等式,通常也被称之为“贝尔定理”。这个定理表明,任何定域隐变量理论的预言都会满足该不等式,而量子力学的预言将会违反该不等式。这样,贝尔的工作将爱因斯坦与玻尔之间的分歧转化为可以判定的数学形式,其伟大之处在于,不仅能够把所有的定域隐变量理论与量子力学在原则上区分开来,将一个形而上学的哲学争论转变成一个能够通过实验裁决的物理学问题,而且为开启全新量子科技时代奠定了基础。2022 年的诺贝尔物理学奖颁发给因“用纠缠光子进行的实验,证伪贝尔不等式,开创量子信息科学”的三位物理学家的事情,充分证明了贝尔工作的重要性。量子力学在这段时期的进展谱写了物理学家基于对经典实在论的固守来推动实验进展和深化理解量子力学本性的一个典型案例,从而内在揭示了,在关于微观世界本性的理解中,哲学与科学之间存在的相互促进关系,为把一直以来作为质疑量子力学把柄的量子纠缠和非定域性概念,最终上升为量子力学的本质特性,提供了实验框架。贝尔的文章也成为 20 世纪下半叶以来引用率最高的文章。

3 实验形而上学的诞生对哲学共识的根本性逆转

所谓“实验形而上学的诞生”是指,根据贝尔不等式提供的实验框架使得“量子世界究竟是定域性的?还是非定域性的?”这一形而上学问题第一次被转化为可以进行实验操作的实验问题。在贝尔不等式提出之前,关于量子力学解释的争论完全是“形而

上学”意义上的争论。哥本哈根解释认为,量子系统在测量之前没有确定的属性,量子力学并不是对微观对象变化过程的描述,而是提供获得某个测量结果的可能性有多大,强调“我们能够知道些什么”,而非“世界本身是什么样的”。爱因斯坦等人的经典实在论则坚信,“月亮在无人看时依然存在”,也就是说,物理对象拥有独立于测量的属性。玻尔和爱因斯坦之间争论的本质是世界观的不同,完全属于哲学层面的交锋,双方都拿不出决定性的实验证据来说服对方。在当时,这种局面既受制于实验条件的约束,也缺乏相应的实验方案,只能停留在思想实验和逻辑辩论层面,属于“形而上学”问题。贝尔工作的伟大贡献在于,他为这个形而上学问题找到了能够一决胜负的方法。这是量子力学发展史上从哲学质疑发展为探索实验方案的一个重大转折,为使得量子力学能够真正从一门关于“如何计算”的成功理论提升为一门关于“世界本质为何”的更深层次的科学理论,提供了现实机遇。

根据贝尔不等式来检验量子力学和隐变量理论何者正确的突破性实验是由2022年因此而获得诺贝尔物理学奖的法国物理学家阿兰·阿斯佩(Alain Aspect)在1982年完成的。实验结果最终以极高的置信度违反了贝尔不等式,彻底地否证了定域隐变量理论的存在性,支持了量子力学的预言。之后的实验进一步重复验证和强化了这一结果。针对这样的实验结果,贝尔指出,“依我看,首先,人们必定说,这些结果是所预料到的。因为它们与量子力学预示相一致。量子力学毕竟是科学的一个极有成就的科学分支,很难相信它可能是错误的。尽管如此,人们还是认为,我也认为值得做这种非常具体的实验。这种实验把量子力学最奇特的一个特征分离了出来。原先,我们只是信赖于旁证。量子力学从来没有错过。但现在我们知道了,即使在这些非常苛刻的条件下,它也不会错”^[11]。贝尔还强调说,他在1964年底在《物理学评论》杂志所发表的提出贝尔不等式的文章——《关于爱因斯坦波多尔斯基罗森悖论》(On the Einstein Podolsky Rosen Paradox)——所假设是定域性,不是决定论,决定论是一种推断,不是一种假设,因为他的论文是从定域性到决定论的隐变量开始的。因此,实验结果对贝尔不等式的违反,是对定域性的直接否定和决定论的间接否定,反过来,则是揭示了非定域性是量子力学的本质特征,或者说,非定域的结构是试图准确地重新提出量子力学预言的任何一个理论所具有的特征。

量子力学的非定域性对经典世界观提出了挑战,否定了定域实在论,支持了玻尔的整体论和关系论,表明宇宙不是一个由相互独立的部件简单组装而成的机器,而是系统的各个部分之间存在着内在的、不可分割的关系,支持了复杂性科学所支持的“整体大于部分之和”的观点。这显然向根深蒂固的还原论思想提出了挑战。还原论认为,通过理解系统最基本的组成部分就能理解整个系统,但量子纠缠表明,即使你理解了每个部分的所有信息,你仍然无法描述整个系统,因为关联信息是独立存在的,整体无法还原为部分。关系论则表明,微观实在的属性并非其固定的内在固有,而是只能在测量域境中来确定。不确定性是微观世界的固有特征,并非因为认知者的无知,这支持了本体论上的非决定论或随机性的观点,进一步打击了决定论的观念,并致使物理学家的哲学共识彻底地发生了根本性的转变。

这些检验贝尔不等式的实验的独特之处在于,其一,研究对象发生了变化:实验目标不再是关于具体的物理现象,而是关于世界基本结构的哲学假设;其二,哲学方法论革命:首创了用精密的物理实验来裁决深层性哲学问题的方法论;其三,实验结果具有震撼性的哲学意义:将在经典物理学土壤中成长起来的“定域实在论”,从一个合理而优雅的哲学共识逼入绝境,不再成为关于量子世界的可行选项,物理学家不得不认真而严肃地把“非定域性”接受为是量子世界的一个基本特征。这标志着人类认识世界的一个全新篇章的开启:我们不再仅仅通过思辨来猜想世界的本质,而是可以设计实验,让自然本身来告诉我们答案。形而上学问题从此有了踏入实验室的入口。哲学家和物理学家开始真正接受量子世界的随机性,并基于这种随机性重新探索和构建新的量子实在观。

4 量子力学的信息解释对“实在”与“信息”关系的重塑

自1994年肖尔算法提出以来,量子力学的“怪异”特性——量子纠缠——从用来质疑量子力学完备性的哲学难题转变为开发量子信息技术的强大资源,出现了产学研互动发展的新态势。典型特征是,其一,研究范式的转换:物理学家不再热衷于争论量子力学是否正确,而是主动探索如何利用量子世界的特性,比如,态叠加原理、量子纠缠、量子不可克隆等来创造新型技术,表现出从理解和验证量子理论转向操控和利用量子资源;其二,学科融合:量子力学与信息科学(计算、通信、密码学)深度融合,产生

了量子信息科学这一新的交叉学科;其三,技术驱动:涌现出以量子计算、量子通信和量子精密测量为支柱的量子信息技术,这些技术被称之为“第二次量子革命”;其四,双向促进:新技术的出现反过来又深化了物理学家对量子基础问题的理解;其五,全球化与产业化:量子技术成为大国竞争的高科技前沿,并开始走出实验室,表现出产业化的趋势,成为主要国家战略选择和商业投资的重点。

量子信息科学与技术的前沿发展与量子力学基础研究的深度交织,催生新的视角和新的问题,激发物理学家用量子信息概念来重新表述量子力学概念体系的热情。因为量子信息科学家相信,量子信息与物理实在相联系,他们提议把量子力学看成是表征与操纵信息的理论,而不是关于非经典的波或粒子的理论,这就使“量子信息”成为理解量子力学的新概念,形成了理解量子实在的信息进路,进而在某种程度上复兴了量子力学的哥本哈根解释,使玻尔的观念重新受到重视,并将量子力学的解释从本体论层面转向认识论层面,将哲学讨论的核心论题从思考“量子世界是怎样的”逐渐转向思考“我们如何通过量子信息来认知量子世界”。

在量子力学的信息解释中,诺贝尔物理学奖获得者安东·蔡林格(Anton Zeilinger)以量子随机性和量子纠缠为前提所阐述的量子力学的信息解释比较有代表性。蔡林格认为,从贝尔不等式的提出到所完成的一系列实验已经推翻了定域实在论的哲学观点。这不仅表明,我们过去所青睐的认知世界的经典实在论方式是行不通的,而且更重要的是表明,量子世界由一种全新的随机性所支配,这不是量子力学不完备的表现,反而是量子世界的一个基本特征和最吸引人的结果,是20世纪最伟大的发现^[12]。于是,他以这个伟大发现为前提,论证了我们无法在“实在”与关于实在的“知识”之间,或者说,在“实在”与“信息”之间,作出区分的观点。在蔡林格看来,在量子领域内,把“实在”与“信息”区分开来,就像在牛顿力学诞生之前,把地面上的定律与天体运动定律区分开来一样,是人为的想象。他论证说,在量子领域内,“如果我们不使用我们所掌握的关于实在的信息,我们就无法谈及实在。这也许表明,实在和信息是一枚硬币的两面,它们在更深意义上是无法区分的。如果真是这样,那么,在给定情况下所能说出来的东西一定以某种方式定义了或至少严格限制了所能存在的东西”^[13]。蔡林格甚至把量子领域内“实在”与“信息”这种不可区分性,与狭义相对论中“空

间”与“时间”的不可分,相媲美。

因为在量子领域内,我们总是根据我们所拥有的信息来谈及实在。我们一旦通过测量获得新知识,就改变了知识的呈现。波函数和所测量到的属性恰好是对不同信息的不同表征。所以,蔡林格论点中的信息不是关于实在的信息,而是我们唯一的实在^[14]。也就是说,量子实在是从获得测量信息的过程中产生出来的,而不再是作为一种静态的实体存在于那里。这种观点直接颠覆了关于“存在”和“所知”相区分的经典二元论,深刻地揭示了将物体的物理属性(比如,体积、质量等)完全归因于物体本身(或者说,与物体的本体不可分离)的经典观念的局限性。在量子领域内,不仅被测量对象的行为表现会随着测量设置的改变而改变,而且观察者、测量设置和被测量对象之间的相互作用,将物理量从实在的固有属性重新概念化为一种关系属性。这样,量子实在与其属性并非必然绑定。这种观点得到了“量子柴郡猫”实验的支持。这个实验表明,微观粒子的物理属性(比如,电子的电荷和自旋,光的偏振等)可以与其本体相分离。这不仅揭示出量子实在及其属性的灵活多变关系,体现了实在生成于互动的核心思想,而且加深了物理学家对“量子实在”的深层次认识^[15]。这种把实在看成是由可获取的信息来确定的观点表明,我们在重塑量子力学的解释时,也在重塑我们的世界观与认识论,进而推动人类从“物质宇宙”走向“信息宇宙”的认知跃迁。

5 结语

总而言之,量子力学经过百年的发展,迫使我们不得不承认,回归经典实在论并不是唯一的前进方式,而是需要面对一种新哲学的可能性:关于实在的知识,不再像经典实在论所认为那样,是实在属性的直接呈现,而是测量后获得的共生信息。在量子领域内,观察不是被动的,“实在”在被观察之前也不是完全确定的,观察者所观察的并不是自然本身,而是自然在观察者质询方法下所显露出来的样子,观察行为本身与被观察现象深深地交织在一起。

参考文献:

- [1] M·玻恩. 我的一生和我的观点[M]. 李宝恒, 译. 北京: 商务印书馆, 1979: 52.
- [2] M·玻恩. 碰撞的量子力学[M]. 原文节选. 王大兴, 译. 科学名著赏析物理卷. 太原: 山西科技出版社, 2006: 251.

- [3] 曼吉特·库玛尔. 量子传: 究竟什么才是现实[M]. 王乔琦, 译. 北京: 中信出版集团, 2022: 302.
- [4] 成素梅. 在宏观与微观之间: 量子测量的解释语境与实在论[M]. 广州: 中山大学出版社, 2006: 57-58.
- [5] HOOKER C A. The Nature of Quantum Mechanical Reality: Einstein Versus Bohr[M]. Paradigms and Paradoxes: The Philosophical Challenge of Quantum Domain. Pittsburgh: University of Pittsburgh Press, 1972: 137.
- [6] 许良英, 范岱年. 爱因斯坦论文集第一卷[M]. 北京: 商务印书馆, 1976: 446.
- [7] 秦克诚. 量子力学哲学[M]. 北京: 商务印书馆, 1989: 534.
- [8] BOHM D. A suggested interpretation of the Quantum theory in terms of 'hidden variable', I and II [J]. *Physics Review*, 1952, 85(2): 166-193.
- [9] 秦克诚, 洪定国. 现代物理学中的因果性与机遇[M]. 北京: 商务印书馆, 1965: 215.
- [10] STAPP H P. Are superluminal connections necessary? [J]. *Nuovo Cimento*, 1977, 40(1): 191-205.
- [11] WHITAKER A. Einstein, Bohr and The Quantum Dilemma[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1996: 42.
- [12] 成素梅. 理解量子实在的信息论进路[J]. 自然辩证法研究, 2025, 41(1): 3-10. DOI: 10.19484/j.cnki.1000-8934.2025.01.001.
- [13] ZEILINGER A. The message of the quantum[J]. *Nature*, 2005, 438(7069): 743. DOI: 10.1038/438743a.
- [14] BILBAN T. Realism and Antirealism in Informational Foundation of Quantum Theory[J]. *Quanta*, 2024, 3(1): 32-34. DOI: 10.12743/quanta.v3i1.24.
- [15] 中国科学院量子信息与量子科技创新研究院. 中国科大首次实验揭示“量子柴郡猫”的量子特性[EB/OL]. (2020-06-24) [2025-10-07]. <http://www.quantum-cas.ac.cn/2020/0624/c20525a432620/page.htm>.



成素梅,理学学士,哲学博士,上海社会科学院哲学研究所二级研究员/教授,《哲学分析》杂志主编,主要研究方向为科学实在论、量子力学哲学、人工智能哲学、科技伦理、休闲哲学等,发表各类学术论文200余篇,出版个人学术著作8部,合著3部,出版各类译著12部,主编学术著作15部,主编科学技术哲学方面的学术类丛书8套。2016年9月到2024年12担任哲学所副所长,2022年9月到2024年12月临时主持哲学所工作。

国务院政府特殊津贴专家,教育部新世纪优秀人才支持计划入选者,上海市领军人才,获得上海社会科学院首届社科名家工程“仲礼学者”称号,获得上海市先进工作者和上海市三八红旗手荣誉称号,曾赴牛津大学哲学系、剑桥大学科学史与科学哲学系、李约瑟研究所、斯坦福大学哲学系、南加州大学哲学系、京都大学人文科学研究所、哥本哈根大学玻尔文献馆、美国汉廷顿图书馆进行学术访问与合作研究,近期出版的学术著作有《改变观念:量子纠缠引发的哲学革命》(个人)、《科学时代的哲学探索》(个人)、《科创未来的哲学思考》(集体)等。曾担任国际“逻辑学、方法论和科学技术哲学协会”(CLMPST)理事(2019—2023)、中国自然辩证法研究会常务理事、上海市自然辩证法学会理事长以及上海市思维科学学会副会长等。目前担任国际科学理事会中国委员会(ISC-CHINA)荣誉委员、中国自然辩证法研究会物理学哲学学会副主任、上海市哲学学会副会长。

个人学术专著《在宏观与微观之间:量子测量的解释语境与实在论》获上海市第九届哲学社会科学优秀成果一等奖,《改变观念:量子纠缠引发的哲学革命》获上海市第十六届哲学社会科学优秀成果一等奖,《理论与实在:一种语境论的视角》获上海市第十届哲学社会科学优秀成果三等奖;学术论文“技能性知识与体知合一的认识论”(载《哲学研究》2011年第6期)获上海市第十一届哲学社会科学优秀成果三等奖;译著《科学哲学指南》获全国第六届(2006年度)引进版社会类优秀图书奖;主编的《简明量子科技》丛书(共6册)获2024年上海市优秀科普图书;合作主编的《信息文明的哲学研究》丛书(共5册)获得上海市第十六届哲学社会科学优秀成果一等奖;所指导的硕士研究生两次获得上海市研究生优秀成果(学位论文)奖。