

doi:10.13582/j.cnki.1672-7835.2025.03.006

对不确定原理内生性的量子模态解释

张友恒¹, 万小龙^{1,2}

(1.电子科技大学 马克思主义学院;2.电子科技大学 人文社科高等研究院,四川 成都 611731)

摘要:不确定原理作为量子力学及哥本哈根解释的基础理论,已经超越物理学范畴,成为多学科研究中的重要思想观点。然而,学术界常将不确定原理与测不准原理(关系)混用,忽略了两者在本体论与认识论层面上的根本差异。通过对海森堡原始研究的深入分析可知,不确定原理本质上是对量子本体属性的描述,揭示了不确定性作为量子物质的内在、内生特性。基于这一理解,可以引入函数的狭义相对论理论(STRF 理论),证明不确定性所导向的模态可能性与必然性实为命题逻辑的内生属性,从而从本体论维度阐明量子的逻辑基础。

关键词:不确定原理;本体论;模态逻辑;STRF 理论;量子逻辑

中图分类号:B81

文献标志码:A

文章编号:1672-7835(2025)03-0044-08

20 世纪初,量子物理学革命根本性地改变了科学界对物质世界的认知范式。在此之前,经典物理学凭借其确定性原则和精确的数学计算,已为宏观物质世界提供了令人满意的解释框架。然而,随着量子力学的兴起,物理学家开始深入探索微观世界的奥秘,发现物质的本质不再是经典物理学中那种确定性的存在,而是以波函数形式呈现的概率分布。这种与生俱来的不确定性及其衍生的概率解释,构成了量子物理学的核心特征,其理论基础正是海森堡提出的不确定原理。

然而,在学术讨论和跨学科应用中,不确定原理常被赋予超出其科学内涵的解释。对此,张江教授明确指出:量子力学的不确定原理是确定性的科学规律,其本质是对微观世界的精确描述,而非对宏观认识论的否定,其阐释不应走向神秘主义与不可知论^①;吴国林教授认为,不确定原理的中文译名存在误导,其德文原意更强调量子(微观)世界的内在不确定性(Unbestimmtheit),而非测量工具的局限^②。这些观点为我们正确理解不确定原理提供了重要启示。因此,在本文中,我们将把不确定性作为一个哲学的基本问题^③来看待,并对这种不确定原理提出一种本体论意义上的内生性模态解释,在方法上给出一种对“不确定性命题”的形式表述。这个思路一方面源于对模态逻辑内生性的理解,一方面源于对马克思辩证法的运用。本文的第一部分是对海森堡不确定原理本体论意义的简单概述;第二部分是基于模态逻辑的内生性理解对其进行处理;第三部分则是谈谈这种处理方式的意义和价值。

一、不确定原理的本体论解释

不确定原理通常被模糊地概括为几种“不可能性”陈述^④: I) 无法制备出位置和动量同时被精确局域化的量子态; II) 无法同时精确测量位置和动量; III) 无法在不干扰动量的情况下测量位置,反之亦

收稿日期:2024-12-26

基金项目:国家社会科学基金重大项目(22&ZD046)

作者简介:张友恒(1998—),男,湖北武汉人,博士生,主要从事科学哲学和逻辑哲学研究。

①张江:《不确定关系的确定性——阐释的边界讨论之二》,《学术月刊》2017 年第 6 期。

②吴国林,叶汉钧:《量子诠释学论纲——兼论公共阐释》,《学术研究》2018 年第 3 期。

③将不确定性原理参与物理哲学讨论可以追溯到高尔顿(Darwin Galton)于 1931 年在 *Science* 上发表的“The Uncertainty Principle”,但是聚焦于将其作为哲学问题来对待是兰茨伯格(Peter Landsberg)于 1947 年发表于 *Mind* 上的“The Uncertainty Principle as a Problem in Philosophy”。

④Busch P, Heinonen T, Lahti P. “Heisenberg’s Uncertainty Principle”, *Physics Reports*, 2007, 452(6): 155-176.

然。这些表述虽各有侧重,但均未能完整捕捉不确定原理的本质内涵。

1925 年,德国物理学家海森堡(Werner Heisenberg)创立矩阵力学理论时,发现了一个革命性的事实:位置(q)和动量(p)这两个表示物理量的矩阵不满足交换律,即 $pq \neq qp$ 。这意味着某些物理量之间的乘积顺序会根本性地影响计算结果,与经典物理学的预设相悖。随后,玻恩(Max Born)和约当(Pascual Jordan)对海森堡的发现进行了严格的数学形式化处理,建立了更为完整的矩阵力学体系,为量子力学奠定了坚实的数学基础。狄拉克(Paul Dirac)在其经典著作《量子力学原理》中,系统化地发展并推广了量子力学的数学形式体系。他创造性地引入了狄拉克符号(bra-ket 记号),为量子态和可观测量提供了极其简洁而强大的数学表示工具,极大地简化了量子力学的数学处理。在这些基础工作之后,海森堡于 1927 年发表了具有里程碑意义的论文,正式系统地阐述了不确定原理^①。这一原理在后来的文献中有时被称为“测不准原理(关系)”,这一称谓的变化恰恰反映了对该原理本质理解的微妙差异。

不确定原理,以其发现者海森堡命名,揭示了一个微观世界的基本事实:对于表现出波粒二象性的量子实体,无法同时精确确定其位置和动量(速度)。海森堡的研究表明,在量子力学框架中,位置和动量之间存在着一个基本关系: $pq - qp = h/(2\pi i)$ 。这一关系式表明,在量子力学中,位置坐标 q 和动量 p 不能同时被赋予确定的数值(其中 h 为普朗克常数, i 为虚数单位)。这种数学关系被称为“非对易关系”或“不可交换关系”,它构成了量子力学与经典力学的根本区别之一。该原理明确指出,当尝试同时测量量子实体的位置和动量(或速度)时,必然会产生不可消除的测量误差,使得位置测量误差与动量测量误差的乘积必然等于或大于一个与普朗克常数相关的固定值。通过海森堡 1927 年发表的开创性论文,量子力学所代表的科学革命本质逐渐清晰:它不仅要求我们放弃经典物理学根深蒂固的决定论世界观,还迫使我们抛弃对原子物理学的朴素实在论理解,从根本上重构我们对微观世界的认知方式^②。

海森堡的理论突破始于一种操作主义方法论的采用:将物理概念的可定义性归结为其可测量性,从而重新诠释了量子领域中的经典概念。这一方法论转向体现在他著名的伽马射线显微镜思想实验中,通过该实验他得出了不确定关系 $q_1 p_1 \approx h$, 这一关系描述的是对单个物理系统进行的单次测量所面临的基本限制^③。与此同时,通过狄拉克变换理论,他对不确定关系 $q_1 p_1 = h/2\pi$ 进行了严格的数学推导,得出了玻恩对薛定谔波函数的概率解释,从而将量子力学的概率性本质置于明确的数学框架之中。海森堡据此得出结论:“在经典理论中用来描述一个力学系统的所有概念,也可以精确地定义为原子过程。但是纯粹从实验来看,如果我们期望从实验中同时确定两个规范的共轭变量,那么为这种定义服务的实验带有内在的不确定性。”^④这一论断清晰地表明,不确定性并非源于测量技术的局限,而是量子世界的本体论属性,是微观实体的内在特性。因此,在量子力学理论框架中,有界系统的能量状态呈现量子化特征,我们只能通过概率分布来描述系统的未来演化。每个量子系统都可以用一个表示其能量状态的波函数来描述,而这些波函数并不直接对应于现实世界中的物理量,它们本质上是数学工具,用于计算物理量的期望值和概率分布^⑤。值得注意的是,薛定谔的波动力学和海森堡的矩阵力学,尽管形式迥异,但已被证明在数学上是完全等价的,它们提供了对同一物理现实的不同表象描述。

根据玻尔(Niels Bohr)提出的互补原理,量子系统的波动性和粒子性、直观表象和因果关系等都是互补的。这意味着在实验观测中,我们无法同时观察到量子对象的波动性和粒子性这两种属性。它们

①Heisenberg W. “The Actual Content of Quantum Theoretical Kinematics and Mechanics”, <https://ntrs.nasa.gov/citations/19840008978>. (此文为 NASA 档案英译版, 原版为德文, 较原文在细节上有所改动, 但是可读性略好)

②Born M. “Statistical Interpretation of Quantum Mechanics”, *Science*, 1955, 122(3172): 675-679.

③海森堡设 q_1 为已知 q 值的精度(q_1 近似 q 的平均误差), 或光的波长; p_1 为确定 p 值的精度, 或在这种情况下为康普顿效应中 p 的不连续变化, 从而根据康普顿效应的基本方程, 得出的此公式。详见 Heisenberg W. “Über den anschaulichen Inhalt der quantentheoretischen Kinematik und Mechanik”, *Zeitschrift für Physik*, 1927, 43(3): 172-198.

④Heisenberg W. “Über den anschaulichen Inhalt der quantentheoretischen Kinematik und Mechanik”, *Zeitschrift für Physik*, 1927, 43(3): 172-198.

⑤Aharonov Y, Anandan J, Vaidman L. “Meaning of the Wave Function”, *Physical Review A*, 1993, 47(6): 4616-4626.

是分离的,由观测者通过实验设置选择观察哪一种属性。按照不确定原理,由于观测仪器与量子系统之间不可避免的相互作用,我们无法以任意精度预测系统的未来状态。然而,正是由于在描述中引入了“观测”行为和“观测者”主体,不确定原理在某些语境下被误解为纯粹的“测不准原理”。这种误解的产生有其历史原因。一方面,在1926年海森堡与爱因斯坦的著名对话中,爱因斯坦尖锐地质疑道:“你假设原子内部存在电子,却拒绝考虑它们的轨道,即使我们可以在云室中观察到电子轨迹。我很想听听你为何做出这样奇怪的假设?”^①另一方面,在与薛定谔波动力学的理论竞争中,海森堡迫切需要为其形式化的矩阵力学提供直观理解和可视化解释。这些因素共同促使他在那篇具有革命性意义的论文中引入了包含观测行为和观测者的思想实验,这种表述方式可以理解为海森堡量子力学在对经典物理学革命过程中的一种策略性妥协。它一方面增强了新理论的可接受性,另一方面却导致理论在理解和传播过程中,产生了从本体论向认识论的不当转向,特别是在所谓的“量子社会科学”和某些经济学研究中尤为明显^②。

澄清这一误区,可以从波普尔(Karl Popper)的科学哲学视角获得启示。波普尔指出:“理论不是一幅图画,它不需要通过视觉图像的方式来理解——如果我们理解了一个理论所要解决的问题,以及它比竞争对手更好或更差地解决问题的方式,我们就理解了这个理论。”^③他进一步强调,“可观测的”一词暗示了某种实际上并不存在的东西,在量子力学的理论表述中,“可观测的”这一概念与“真实的”并无本质区别,只是表达方式的不同^④。同样值得注意的是,当海森堡回应爱因斯坦对量子力学的质疑时,他明确指出矩阵力学的数学形式是对原子内部过程的直接描述,确定的是原子的定态或从一种状态到另一种状态的跃迁概率的数学规律^⑤。基于以上分析,我们有充分理由认为,不确定原理本质上是海森堡对量子力学物理本体的描述,而非一种认识论立场。

认识论上的不确定性源于观测主体对客观事实的认知不足,即无法全面把握对象的整体属性。与此截然不同,本体论层面由概率引起的随机不确定性是由量子对象本身的内在随机性或模糊性所决定的,即使在掌握了所有相关知识的情况下也无法消除。尽管量子力学研究必然涉及认知过程,但对量子现象的观测和描述不能简单地归结为认识论问题,而应回溯到更基本的本体论层面。在下一部分,我们将对量子的本体论问题进行进一步探讨,展现这种“不确定性”是量子自身的完全属性。

二、不确定的模态内生性理解

让我们回到不确定原理的核心表述。海森堡在1927年的开创性论文中首次给出了不确定原理的数学表达式: $\Delta p \Delta q \approx h$ 。随着研究的深入,他在1930年芝加哥大学的系列讲座中对这一原理进行了更为精确和详尽的阐释,并将数学表达式修正为更为严格的不等式形式: $\Delta p \Delta q \geq h$ ^⑥。这一修正不仅提高了表达的精确性,也更清晰地揭示了不确定性作为量子世界基本属性的本质特征。

在量子力学的发展历程中,符号 Δ 与其他研究者在教科书和论文中使用的符号 σ 、 δ 在本质上是等价的,它们均表示某种准确度(Genauigkeit)或误差(Fehler)。值得注意的是,肯纳德(Earle Kennard)提

①Heisenberg W. *Physics and Beyond: Encounters and Conversations*. New York: Harper & Row Publishers, 1971, p.62. 海森堡“Über den anschaulichen Inhalt der quantentheoretischen Kinematik und Mechanik”一文是在1927年发表,结合他1971年出版的著作“Physics and Beyond”中的回忆录,可以发现海森堡长期与爱因斯坦有书信来往以及见面讨论。因此说海森堡会考虑爱因斯坦这位巨擘的提问或者说是意见,是有理由的。

②关于量子社会科学的评论,可参见Waldner D. “Schrödinger’s Cat and the Dog that Didn’t Bark: Why Quantum Mechanics is (probably) Irrelevant to the Social Sciences”, *Critical Review*, 2017, 29(2): 199–233. 关于对经济学的批判,可参见赵晓磊、赵磊:《“不确定性原理”何以被误读?——对经济学“只谈概率,不谈因果”的溯源批判》,《四川师范大学学报(社会科学版)》2020年第5期。

③Popper K. “Quantum Mechanics without ‘The Observer’”, Bunge M (eds.), *Quantum Theory and Reality*. Berlin, Heidelberg, New York: Springer Berlin Heidelberg, 1967, p.14.

④Popper K. “Quantum Mechanics without ‘The Observer’”, Bunge M (eds.), *Quantum Theory and Reality*. Berlin, Heidelberg, New York: Springer Berlin Heidelberg, 1967, pp.41–42.

⑤Heisenberg W. *Physics and Beyond: Encounters and Conversations*. New York: Harper & Row Publishers, 1971, p.66.

⑥Heisenberg W. *Physics and Beyond: Encounters and Conversations*. New York: Harper & Row Publishers, 1971, p.66.

出的不确定原理的现代表述形式为: $\Delta p \Delta q \geq \hbar/2$ (其中 $\hbar$ 为约化普朗克常数), 即 $\Delta p \Delta q \geq \hbar/4\pi$ 。“肯纳德的理论则指的是粒子的集合, 其中动量和位置在它们各自的平均值上显示出一种扩展——它根本不涉及测量。”^① 在一些研究中, 肯纳德给出的公式被视为“第二个”不确定原理, 但是肯纳德在他的论文中写道: “这就是海森堡的广义不确定性关系。它为每一对标准变量的不确定性测度的乘积设置了一个下限。”^② 为了进一步解释符号 Δ , 在吉纳苏 (Vasudeva Jijnasu) 的研究中, 曾从科学史的视角整理了从 20 世纪直至这个世纪对不确定原理表述的四种方案, 它们分别是: Δ 、 σ 、 $\varepsilon - \eta$ 、 $\varepsilon - \varepsilon$, 并把前两者归于本体论解释, 后两者归于认识论解释^③。他认为随着 20 世纪 80 年代以来对 Δ 研究工作的承认, $\varepsilon - \eta$ 和 $\varepsilon - \varepsilon$ 的客观性已经曝光——它们依赖于 Δ 所表示的本体的不确定性。他谈道: “海森堡将扰动的不确定性归因于变化的不连续性, 这将我们带回到内在不连续性上, 从而回到 Δ ; 玻尔在此基础上又补充了一点, 即 (按照互补原理) 必须承认物体系统的波相 (从而再次承认 Δ)。”^④

至此, 问题的本质开始变得清晰: 由于“物质”本体在地蕴含着不连续性和不确定性, 不确定原理从根本上动摇了经典物理学中严格因果律的基础。尽管海森堡与休谟采取了不同的路径——一个从本体论出发, 一个从认识论出发, 但新康德主义者仍试图继续在这一领域开展工作^⑤。在海森堡的回忆录中, 他特别提到了与赫尔曼^⑥ (Grete Hermann) 的争论, 赫尔曼在与海森堡会面时首先提出的问题就是: “量子力学怎么可能试图稀释因果律, 同时又希望保持为科学的一个分支呢?”^⑦ 正是基于这种对因果律的质疑, 爱因斯坦在著名的 EPR 论文中首次提出了隐变量的概念, 旨在论证量子力学的实在性和局域性。然而, 随着贝尔不等式的实验验证, 局域隐变量解释已经被有力地“证伪”, 这迫使我们重新思考爱因斯坦著名的质疑: “上帝会掷骰子吗?”

必须指出的是, 无论是隐变量理论还是贝尔 (John Bell) 的理论都面临着典型的迪昂—奎因问题^⑧。我们必须承认, 量子力学的理论体系包含着诸多假设。根据迪昂—奎因理论, 我们能够确认局域性隐变量理论存在问题, 贝尔不等式为排除局域性隐变量设定了明确界限, 但对于在支持局域性隐变量理论的推理过程和证据中哪一环节出现了问题, 贝尔不等式并未给出明确指示。就此而言, 我们认为“隐变量理论的思路应该得到重新重视, 但不是在标准数学形式体系上再增加新的变量, 而是标准数学形式体系本身就隐含着新变量”^⑨。

在直觉层面, 在经典命题逻辑框架内, 我们无法确定地判断“上帝掷骰子”这一命题的真假, 其判断高度依赖于个体所接受的理论背景。若认为量子力学超越了逻辑推理的范畴, 显然是不合理的, 因为我们同样可以提出与赫尔曼相似的质疑: 量子力学如何能够一方面摆脱科学逻辑推理的基本框架, 另一方面又声称自身仍属于科学领域? 然而, 我们也必须承认, 不确定原理确实对传统逻辑推理方式产生了深远影响。在经典逻辑中, 通常假设所有事实都可以被完全确定并精确认知, 而量子力学则从根本上挑战了这一预设, 促使我们重新思考如何在不确定性条件下构建合理的逻辑推理体系。

① Atkinson D, Peijnenburg J. “Putting the Cart Before the Horse: Ernest Nagel and the Uncertainty Principle”, Neuber M, Tuboly T (eds.), *Ernest Nagel: Philosophy of Science and the Fight for Clarity*. Cham: Springer International Publishing, 2022, p.135.

② Kennard E. “Zur quantenmechanik einfacher bewegungstypen”, *Zeitschrift für Physik*, 1927, 44(4): 326–352.

③ $\varepsilon - \eta$ 表示的是观测的不确定的误差—扰动 (或不准确—扰动); $\varepsilon - \varepsilon$ 的逻辑推广是位置和动量联合可测性的有限性, 指的是涉及两个测量的误差—误差不确定性。

④ Jijnasu V. “The Uncertainty Principle—A Simplified Review of the Four Versions”, *Studies in History and Philosophy of Science Part B: Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, 2016, 55: 62–71. 此文的主要贡献是整理了从 1925—2016 年内对不确定原理的表述更新, 并做出哲学分析。

⑤ 在这一点上新康德主义者已有过许多争论和批判, 本文不再赘述。有兴趣的读者可以从哥本哈根学派的著作中找到他们的回应, 这些研究不仅是有关物理的, 更是对分析量子力学的哲学十分有价值的文本。

⑥ 赫尔曼是一位杰出的哲学家、数学家、新康德主义者, 她的著作《自然哲学中的量子力学基础》被誉为“新量子力学最早和最好的哲学处理之一”。

⑦ Heisenberg W. *Physics and Beyond: Encounters and Conversations*. New York: Harper & Row Publishers, 1971, p.118.

⑧ 陈晓平:《迪昂—蒯因问题及其解答》,《重庆理工大学学报(社会科学版)》2010 年第 1 期。

⑨ 万小龙, 兰智高, 陈明益:《一元算符逻辑理论四探——毕克霍夫-冯·诺依曼量子逻辑存疑》,《科学技术哲学研究》2013 年第 1 期。

本文解释的出发点是量子理论中本体论与逻辑推理的关系问题。我们认为,函数的狭义相对论(The Special Theory of Relativity of Function, STRF)或许能为量子理论的逻辑解释提供新的视角。我们的理解基于对全同粒子和非局域性隐变量的分析,方法论上以模态逻辑为基础,旨在从量子的逻辑基础出发,为相关研究提供一种可行的思路,该思路通过簇语义刻画命题在不同背景下的依存关系,从而为模态逻辑提供内生性解释。

定义 1: 不确定触及可能和必然。

在逻辑和概率论中,“不确定”意味着我们缺乏足够信息来确定一个事件是否会发生,而“可能”则表示该事件有一定概率发生——虽然我们无法完全确定它会发生,但至少它不是不可能的。通过对不确定性进行量化,我们可以达到对可能性的把握^①。在此,我们引入模态算符 $\Box$ 和 $\Diamond$ (Box 和 Diamond, 分别表示必然和可能) 及其相互定义关系,从而得出:

$$Uncertainty = \neg \neg \Diamond q \leftrightarrow \Diamond q \triangleq \neg \Box \neg q$$

定义 2: 真值函数可以与非真值函数等价转换。

考虑“粒子在位置 q ”和“粒子的动量为 p ”这样一对可表述粒子状态的真值函数式命题 $q \wedge p$, 当测定到位置 q^n , 动量可以为 $p^1, p^2, \dots, p^{n+1}$ 的不确定状态。在量子力学中,粒子可以处于“位置 q^1 到 q^{n+1} ”和“动量为 p^1 到 p^{n+1} ”这样的叠加态。在仅考虑测定到单一位置 q^n 的情况下,粒子的状态可能处于 $q^n \wedge p^1, q^n \wedge p^2, \dots, q^n \wedge p^{n+1}$ 这种“不确定”状态。对于测定的位置 q^n 而言, $q^n \wedge p^{(1,2,\dots,n+1)}$ 与之构成一种非真值函数(Non-truth-valued function)关系,即当仅有一个变元取值确定时,合取式的取值仍然不确定^②。

不确定关系告诉我们,我们无法完全确知量子本体的状态,它包含多种可能性。但这并不意味着在逻辑上无法表述它;事实上,上述模态算符($\Diamond q$)正具有这种表述能力。从物理学普适性(Universality)原则出发,我们应当能够表述这种不确定性而不破坏逻辑推理的一致性。鉴于所有真值函数都可以通过 $\neg, \wedge$ 表达,可以使用与之等价的、带上标的非真值函数式来表达这种模态关系:

$$(1) \neg A = hA$$

$$(2) A \wedge A_1 = H^{A_1} A$$

先只考虑一种情况: $q^n \wedge p^1$, 可表示为 $H^{p^1} q^n$, 从而等价为模态逻辑命题。当我们对 $H^{p^1} q^n$ 赋值时可以发现,我们并非是对变元 q^n 赋值,而是在 $H^{p^1} q^n$ 的背景下对 q^n 赋值。当然,如果在表示多个变元时,此非真值函数式不可避免地繁琐起来,因此还需进一步处理。

定义 3: 模态算子 $\Box$ 的内生性中存在可隐藏的簇语义

传统模态逻辑将必然算子 $\Box$ 视为外加于经典命题逻辑(CP)的符号,而 STRF 理论证明, $\Box$ 实际上是经典逻辑内部自然涌现的辅助符号簇^③。这一涌现过程遵循以下逻辑:

(1) 经典命题(如 q)的真值函数表达式可严格等价转换为非真值函数簇。例如: q 的真值函数形式可转换为簇 $\{H^{q^1} q, H^{q^2} q, \dots\}$ 这样的非真值函数式,其中每个 $H^{q^i} q$ 表示 q 在特定背景(如上标 q^i)下的非真值函数式。这种转换隐藏了低层次的复杂性(如上标差异),但保持了逻辑一致性和推理有效性。

(2) 必然命题 $\Box q$ 并非独立存在,而是经典命题 q 通过等价转换后隐藏上标的簇的普遍形式表示。例如: $\Box q \triangleq \{H^{q^1} q, H^{q^2} q, H^{q^3} q, \dots\}$, 表示“ q 在所有可能背景中为真”。这种隐藏上标的操作,使得 $\Box q$ 形式上表现为单一的必然命题,实则内蕴了多背景下的真值分布。

(3) 簇语义的形式化与一元性:簇语义通过以下方式实现模态逻辑的一元语义,避免传统二元语义(如可能世界语义)的冗余:例如,给定任意命题 A , 其必然性赋值为: $V(\Box A) = 1$, iff. $\forall A' (A \wedge A' \rightarrow$

①Hansson S. “Can Uncertainty be Quantified?” *Perspectives on Science*, 2022, 30(2): 210–236.

②万小龙,陈明益,冉奎:《真值函数与非真值函数的等值变换——一元算符逻辑理论五探》,《山东科技大学学报(社会科学版)》2012年第6期。

③万小龙:《必然性的内生涌现对量子哲学与科学哲学的意义》,《自然辩证法研究》2025年第1期。

$V(A') = 1$), 其中, ARA' 表示 A' 属于 A 的等价簇(如 $A' = H^{A'}A$)。它与标准语义(克里普克语义)的对比, 克里普克语义需引入冗余的“世界”参数: $V(\Box A, w) = 1, \text{ iff, } \forall w'(wRw' \rightarrow V(A, w') = 1)$, 其中 w 实际不参与运算, 仅为满足二元性而设。而簇语义通过 ARA' 直接表达命题与背景的依赖关系, 无需额外参数, 实现语义一元性。在同一个公理中, 必然算子 $\Box$ 通过隐藏的上标动态表示不同必然性。例如, 在 K 公理中: $\Box(A \rightarrow B) \rightarrow (\Box A \rightarrow \Box B)$, 其完整簇语义形式为: $H^{(A \rightarrow B)'}(A \rightarrow B) \rightarrow (H^{A'}A \rightarrow H^{B'}B)$ 。值得注意的是, 簇的上标仅由簇定理和所链接的子公式共同决定, 在进行逻辑推理时可以暂时隐藏这些繁复的上标, 而不影响推理的一致性和有效性。因此隐藏上标后, 簇语义形式上与经典 K 公理一致。并且, $H^{A'}$ 表征命题 A 在特定背景 A' 下的语义依存, 其簇集 $H^{A'}$ 等价于 $\Box A$ 的完整语义解释, $\Box A$ 是在形式上隐藏了簇的内容。那么对模态算子 $\Box$ 的簇理解, 首先达成了它的本体论简约性, 其次是消除克里普克语义中“可能世界”的形而上学负担, 将模态实在性还原为命题间的内在语义关系, 并且通过 ARA' 依存关系取代 wRw' 的可及关系, 建立更直接的语义对应。

通过上述分析可以看出, 模态命题逻辑可以通过簇语义的理解从经典命题逻辑中获得内生性的解释, 而无需将模态算符视为外加于经典逻辑的独立符号。我们可以得出一个重要结论: 量子不确定性所蕴含的模态可能性特征实际上是内生于量子本体论结构之中的。这一认识与吉纳苏从科学史角度对量子理论发展的研究结论形成了相互印证。因此, 在协调不确定原理、量子理论与经典物理解释之间的关系时, 我们建议采取以下认识论路径: 与其试图通过引入新的假设性理论来弥合现有理论间的差异, 不如从根本上重新审视微观世界在本体论层面表现出的独特性质。这种研究路径既避免了传统解释中“世界参数”带来的语义冗余问题, 又为量子理论与经典物理的深层统一提供了逻辑基础。STRF 理论所揭示的模态算子内生性表明, 量子现象表现出的“反常”特性, 实质上反映的是我们对逻辑基础认知的局限性, 而非物理理论本身的缺陷。

三、基于簇语义的量子逻辑方法论意蕴

以上内容是从不确定性的本体论谈到逻辑上对这种内在不确定性的处理, 这种处理同样不涉及“观察”和“测量”, 其目的是能从思维的“狡计”中隐藏的不确定性反映物质本身存在的不确定性。我们希望这能作为一种有效方法来审视由量子力学革命所影响的自然科学和社会科学研究, 从而摒弃部分不合理的形而上学观点。因此, 以下将简单谈谈这种处理方法的合理价值。

第一, 这是坚持辩证唯物主义的合理表述。在经典物理学中, 测量被认为是一个相对简单的、不干扰系统的过程。系统在被测量时已经处于某个确定的状态, 测量只是揭示了这个状态的本质。如果仅是站在朴素唯物论的角度, 当然可以这么理解。但是唯物辩证法不仅仅在于相对静止, 它是包含着绝对运动的统一, 那么确定性和不确定性也应该能在某种形式上对立统一。在量子力学中, 测量不可避免地干扰系统, 叠加态在测量之前没有一个确定的状态。只有在进行测量时, 系统才会坍缩到一个确定的状态。如果过分强调测量的确定(静止), 不可避免地会忽视掉量子世界的本质。世界视角(Word Perspectives)丛书主编露丝(Ruth Anshen)在海森堡的著作前言中表示:“量子力学告诉我们似乎生存在一个动态过程和结构的世界里。因此, 我们需要一种潜在性的算法, 而不是一种概率的算法。我们需要一种联结两极的辩证法, 在这种辩证法中的统一性和多样性被重新定义为同一本质的同时和必然的两极。”^①如果我们可以赞同以辩证法的视角来看待量子力学的科学发展, 就可以得出不确定性和确定性应同时存在于本体和认识的测量行为中。本文一再强调海森堡的不确定原理不涉观测并不是否定观测的作用, 而是表明: 即便在相同的实验条件下重复同样的测量, 量子力学中的测量结果也不是确定的, 是随机分布在可能结果中的, 这种概率性源于量子态本体的统计性质。并且在量子力学史中, 可以发现许多假设可以存在于完美的测量思想实验中从而形成理论, 在这些理论基础上又能通过实验发展成新的理论。因此, 我们需要知道的不仅仅是“这个结论错了”这种结论, 也需要知道这个结论为什么错了的

^①Heisenberg W. *Physics and Beyond: Encounters and Conversations*. New York: Harper & Row Publishers, 1971, p. X.

原因,那些支撑的理论计算和观测结果到底是在哪里出现了偏差,它对在此基础上建立的(被认为是正确的)理论有何种影响,对理论体系整体有哪些影响。这也是从辩证法的角度看待量子力学的单个理论、假设和科学整体理论体系关系的应有之义。

第二,这呈现了“经典语言”和“非经典语言”之间关系的相互性。量子力学中量子理论的哥本哈根诠释始于一个悖论,物理学中的任何实验,无论是涉及日常生活现象还是涉及原子事件,都要用经典物理学的术语来描述。经典物理学的概念构成了我们用来描述实验安排和陈述结果的语言,我们不能也不应该用任何其他概念来代替这些概念。在使用经典概念时,必须记住它们的适用范围有限,但是我们不能也不应该试图改进它们。在玻尔和费利克斯(Felix Bloch)的争论中,玻尔认为量子力学被迫使用经典物理学的语言,仅仅是因为我们没有其他语言来表达结果,但费利克斯提出:“一旦我们对量子理论有了更深入的了解,我们就能抛弃经典概念,用一种新的语言,比我们今天更准确地描述原子现象吗?”^①科学的一个基本前提是,我们谈论测量时所用的语言与谈论日常经验时所用的语言具有基本相同的结构。虽然这种语言是一种带有不充分的交流和模糊性的定位手段,但它仍然是所有科学的前提。海森堡曾表示:“实证主义者强调语言准确性的重要性……但在科学上,我们最多只能尝试接近这个理想,但永远无法真正实现它……理论物理学家用来描述自然界的数学公式,应当具有这种程度的逻辑纯洁性和严谨性。但是,当我们试图将这些公式应用于自然界时,整个问题就会以不同的形式重新出现。因为如果我们想对自然说点什么——科学还试图做些什么呢?我们必须从数学语言过渡到日常语言。”^②在我们看来,STRF理论对量子的逻辑解释同样也秉承这个信念,如果非要使用一种我们称之为与经典逻辑不同的非经典逻辑来表述量子的逻辑基础,同样也可以提出像费利克斯那样的问题:一旦我们对量子逻辑有了更深入的理解,是否能够抛弃经典逻辑,并用一种新的、更精确的逻辑体系来描述量子现象?但是我们也能得到像海森堡式的回答:尽管对量子现象可以提出逻辑体系来解释,但整个科学实践的交流和测量过程依然依赖于经典逻辑的语言框架。这就是为什么即使对量子现象提出了如此多非经典逻辑形式的表示和解释,但STRF理论仍要保留和回到经典逻辑语言形式解释的原因。正如魏茨泽克(Carl Weizsäcker)所说,“自然比人类早,但人类比自然科学更早”,这句话的第一部分以其完全客观的理想来证明经典物理学,第二部分告诉我们为什么我们无法摆脱量子理论的悖论,即使用经典概念的必要性^③。

第三,再谈一谈量子的逻辑问题。在经典逻辑中,语言的不同层次之间存在对应关系。以“量子自旋向上”和“量子确实自旋向上”这两个陈述为例,虽然它们在逻辑上属于不同的层次,但在经典逻辑框架下,这些陈述是完全等价的。这意味着它们要么同真、要么同假,不可能出现一个为真而另一个为假的情况。然而,在量子互补的逻辑模式中,这种关系变得更为复杂,因为量子逻辑允许存在经典逻辑中不存在的不确定状态。具体表现为:当“量子确实自旋向上”这个陈述为假时,并不必然意味着“量子自旋向上”这个陈述也为假。换句话说,如果我们无法确认量子确实自旋向上,这并不意味着量子一定自旋向下——量子可能处于一种无法明确判定其自旋方向的状态。因此,这两个层次的语言在表述的正确性方面是完全等价的,但在表述的不正确性方面却不是。玻尔引入量子论解释的互补性概念鼓励物理学家使用一种“模糊”的语言,而不是一种明确的语言,以一种符合不确定原理的模糊方式使用经典概念,交替地应用不同的经典概念,这些概念如果同时使用会导致矛盾^④。这就是STRF中的簇理解的含义,矛盾的命题在经典逻辑中会违背矛盾律,但是在簇理解中存在着这种互补性的概念,公式簇为真,是指这组公式中的每个公式各自为真。我们知道用自然的物理和哲学语言来描述一个不适用于自然语言的逻辑方案是自相矛盾的,然而正如魏茨泽克所指出:人们可以区分不同层次的语言,这样就有可能

①Heisenberg W. *Physics and Beyond: Encounters and Conversations*. New York: Harper & Row Publishers, 1971, p.130.

②Heisenberg W. *Physics and Beyond: Encounters and Conversations*. New York: Harper & Row Publishers, 1971, p.135.

③Heisenberg W. *Physics and Philosophy*. New York: Harper & Brothers Publishers, 1958, p.56.

④Heisenberg W. *Physics and Philosophy*. New York: Harper & Brothers Publishers, 1958, p.179.

在不同的层次上有不同的逻辑模式,但是最后我们必须回到自然语言,从而回到经典的逻辑模式^①。魏茨泽克认为在自然界中存在一个“状态”,在这个状态下陈述是正确的,与互补语句相对应的“状态”被他称为“共存状态”。“共存”这个词描述了不确定的情况,但它不是“不同的状态”,因为每个状态在某种程度上也包含其他“共存状态”,他认为“状态”的概念是量子本体论的第一个定义。这就是为什么人们想要谈论原子、粒子本身,就必须要么使用数学方案作为自然语言的唯一补充,要么必须将数学方案与一种语言结合起来,这种语言利用了一种修改过的逻辑或根本没有明确定义的逻辑^②。海森堡曾评述冯·诺依曼和魏茨泽克的研究工作:“量子论的数学方案可以被解释为经典逻辑的扩展或修改。”^③因此,从方法论的角度,STRF 理论有理由被视为是在前人基础上的一次创新尝试。

结语

综上所述,本文的目的不是消除存在于本体论和逻辑中内生的不确定性,而是提出一种基于模态逻辑的理解处理这种不确定性的推理方式。本文想要表达的是:虽然量子存在不确定性,但是在形式上并不是无法理解的,通过正确的表示方法我们能寻找到不确定中的确定,如此一来模态的多种可能也在形式中找到了必然。模态的多样性也仍然存在,但并非是飘忽不定的,而是在给定具体形式时被隐藏了,通过正确的理解和表示,我们也能发现必然中存在的可能。通过簇理解,模态的二元语义等价于经典的一元语义,从而消解二元语义的冗余,在句法上能正确的表达,并能以此出发解释和解决一些难题。本文还想表达的是,物理世界的量子化只是量子世界与经典物理世界所存在的直觉和逻辑相冲突的特征之一,它还包括其他要素:如波粒二象性、纠缠、不确定原理和自旋——所有的这些都有其自身反直觉的方面。而在科学史上,它们也从质疑走向接受,并且最终共同构成了科学对自然界的充分描述。

A Quantum Modal Interpretation of the Endogeneity of the Uncertainty Principle

ZHANG Youheng¹ & WAN Xiaolong^{1,2}

(1. School of Marxism Studies, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China;

2. Advanced Institute of Humanities and Social Sciences, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China)

Abstract: The uncertainty principle, as the foundational theory of quantum mechanics and the Copenhagen interpretation, is also applied as a conceptual viewpoint in various disciplines. In some studies, the uncertainty principle is referred to as the indeterminacy principle (relation), and the two are often confused. However, uncertainty and indeterminacy actually address different levels of issues, i.e. ontology and epistemology. In Heisenberg's research, this principle primarily describes the essence of quantum ontology, where uncertainty is an intrinsic and inherent property of quantum matter. Under this understanding, STRF theory effectively demonstrates that modality possibilities and necessities guided by uncertainty are intrinsic properties of propositional logic, thus explaining the logical foundation of quantum theory in an ontological sense.

Key words: uncertainty principle; ontology; modal logic; STRF theory; quantum logic

(责任校对 葛丽萍)

①Heisenberg W. *Physics and Philosophy*. New York: Harper & Brothers Publishers, 1958, p.182.

②Heisenberg W. *Physics and Philosophy*. New York: Harper & Brothers Publishers, 1958, p.185-186.

③Heisenberg W. *Physics and Philosophy*. New York: Harper & Brothers Publishers, 1958, p.181.