

• 科学技术哲学 •

因果贝叶斯网络是否适用于量子力学?

Can Causal Bayesian Networks Be Applied to Quantum Mechanics?

苏无忌 /SU Wuji¹ 刘闯 /LIU Chuang²

(1. 上海师范大学哲学与法政学院, 上海, 200233; 2. 复旦大学哲学学院, 上海, 200433)
(1. College of Philosophy, Law & Political Science, Shanghai Normal University, Shanghai, 200233;
2. School of Philosophy, Fudan University, Shanghai, 200433)

摘要: 本文探讨因果贝叶斯网络在量子力学因果解释中的适用性, 聚焦于量子纠缠现象与因果原则的相容性问题。在因果贝叶斯网络的框架下解决量子纠缠问题需放弃因果定域性、受控变量外源性或时间顺序性等假设。量子纠缠的非定域性和无信号定理无法同时满足因果贝叶斯网络的核心原则——因果马尔可夫条件与忠实性原则。这两个原则中非忠实性可以被放弃。在诸多放弃特定假设的因果结构中, 逆向因果时最符合因果贝叶斯网络的结构。进一步分析逆向因果解释的可行性表明, 其虽与因果贝叶斯网络的非循环性要求相容, 但现有物理模型已超出传统因果图的描述能力。本文主张, 量子因果研究需发展超越经典因果贝叶斯网络的新工具, 以统一解释量子与经典现象的因果本质。

关键词: 因果贝叶斯网络 量子纠缠 逆向因果 非忠实性 EPR实验

Abstract: This article explores the applicability of causal Bayesian networks in the causal interpretation of quantum mechanics, with a focus on the compatibility of quantum entanglement with causal principles. To address the quantum entanglement problem within the framework of causal Bayesian networks, it is necessary to abandon assumptions such as causal locality, exogeneity of control variables, or temporal ordering. The non-locality of quantum entanglement and the no-signaling theorem cannot simultaneously satisfy the core principles of causal Bayesian networks—namely, the causal Markov condition and the faithfulness principle. Of these two principles, the faithfulness principle can be relinquished. Among the various causal structures that abandon specific assumptions, retrocausality emerges as the most compatible with the structure of causal Bayesian networks. Further analysis of the feasibility of retrocausal interpretations reveals that, while it aligns with the acyclicity requirement of causal Bayesian networks, existing physical models have already exceeded the descriptive capabilities of traditional causal graphs. The article contends that quantum causal research must develop new tools beyond classical causal Bayesian networks to provide a unified interpretation of the causal essence of both quantum and classical phenomena.

Key Words: Causal Bayesian Network; Quantum entanglement; Retrocausation; Non-Faithfulness; EPR Experiment

中图分类号: O212.8; O413.1 DOI: 10.15994/j.1000-0763.2026.05.004 CSTR: 32281.14.jdn.2026.05.004

基金项目: 国家社会科学基金重大项目“量子信息科技哲学及其逻辑基础研究”(项目编号: 22&ZD046)。

收稿日期: 2025年3月18日

作者简介: 苏无忌(1994-)男, 山西运城人, 上海师范大学师资博士后研究员, 研究方向为物理学哲学、因果建模。Email: wujisu@shnu.edu.cn

刘闯(1958-)男, 浙江松阳人, 复旦大学哲学学院特聘教授, 研究方向为科学哲学、物理学哲学。Email: chuangliu@fudan.edu.cn

因果贝叶斯网络 (Causal Bayesian Network) 是由思博瑞斯 (P. Spirtes)、格里莫 (C. Glymour)、沙奈斯 (R. Scheines)^[1] 以及珀尔 (J. Pearl)^[2] 等所创立的用概率相关性和有向无循环图分析因果概念的理论。这一理论可以从变量之间的统计关系推断其中的因果结构。近三十年来, 因果贝叶斯网络在社会学、计算机科学、人工智能、统计学、医学等领域掀起了一股因果推断和因果发现的风潮, 极大地推动了因果性概念在各个学术领域的发展。在哲学领域, 因果贝叶斯网络也广泛被运用于在因果的定义、因果性的本体论问题、心物因果的研究之中。因果贝叶斯网络已经成为如今探究因果关系最重要的方法。

在量子力学基础和量子信息的哲学理论中, 许多工作都试图建立量子过程的因果模型, 给量子现象以因果解释。在量子力学中, 处于纠缠态的类空间隔对象的统计相关性 (EPR/B 实验) 自从贝尔不等式被提出以来, 始终是物理学家和哲学家关注的焦点。时至今日, 仍然没有可以解释这一统计相关性且被广泛接受的因果模型。因果贝叶斯网络是否可以涉足这一领域也成为了物理哲学家们讨论的话题。最近十几年来, 因果贝叶斯网络的视角使量子因果获得了全新的发展。然而, 这一发展并不是解释清楚了量子过程的因果机制, 而是提出所有量子因果解释不得不解决的全新困难——量子纠缠的非忠实性 (non-faithfulness)。量子因果的谜团不仅未被解开, 反而增多了。

最近一段时间, 国内许多量子力学哲学的研究者纷纷将目光投向了逆向因果的解决方案。^{[3]-[5]} 逆向因果作为一种量子因果的解释, 其发展过程中也少不了结合因果贝叶斯网络的讨论。本文通过分析因果贝叶斯网络的原则与量子纠缠现象的相容性, 探究逆向因果和其他量子力学的因果解释是否与因果贝叶斯网络相容。

一、量子纠缠现象与因果贝叶斯网络

量子纠缠最早由爱因斯坦、波多尔斯基 (B. Podolsky) 和罗森 (N. Rosen) 在 1935 年的论文中提出, 称为 EPR 悖论。^[6] 他们认为量子力学的非定域性违反了经典的定域实在论 (local realism), 即事件只能通过局部相互作用产生因果效应。爱因斯坦将其称为“幽灵般的超距作用” (spooky action at a distance)。随后, 贝尔 (J. Bell) 在 1964 年提出了贝尔不等式和贝尔定理。贝尔定理表明, 任何与量子力学已经被实验证明的预测保持一致的隐变量理论必然不满足定域性。这意味着, 如果量子力学中有因果过程, 那么量子力学允许某些因果过程传递的速度超过光速, 而这与狭义相对论矛盾。贝尔的原意是用实验拒斥量子力学的超距作用, 而实验结果则表明量子纠缠是确实存在的现象。以一种 EPR/B 实验为例。假设存在一个粒子源能够产生处于纠缠量子态 Ψ 的粒子对 (如在自旋方向上处于纠缠的电子或者在偏振方向上处于纠缠的光子)。将两个纠缠粒子 α 和 β (如电子) 通过自由空间的方式传输到空间上相隔遥远的两个测量站点 A, B, 距离通常超过数千米 (如现代实验中可达数百公里), 确保测量事件满足类空间隔 (无光速信号传递的可能)。测量装置 A, B 可以测量接受到的粒子 α 和 β 在某一方向上的自旋。 α, β 测量得到的结果与纠缠量子态 Ψ 相关, 也与测量装置 A, B 采取的测量方向有关。举个例子, 如果纠缠量子态 Ψ 要求 α 和 β 在 z 轴方向上的自旋处于叠加态, 且总角动量为 0。如果 A, B 都测量 x 轴方向上的自旋, 则 α, β 的测量结果必为一个自旋向上, 另一个自旋向下。而如果 A 测量 x 轴方向, B 测量 y 轴方向, 则无论 α 的测量结果是什么, β 的结果总是 50% 可能自旋向上, 50% 可能自旋向下^①。

如果我们认为因果关系满足定域性, 因果

^①根据量子力学的标准解释, 如果 A 测量 x 轴方向的自旋, α 必然坍缩到 x 轴方向上, β 根据角动量守恒也坍缩到 x 轴方向。如果 B 测量的也是 x 轴, 那么测得就是 β 由 A 测量坍缩后的结果。如果 B 测量的是 y 轴方向, 那么 β 要重新坍缩到 y 轴方向, 而 x 轴的自旋的本征态是 y 轴方向自旋两个方向同振幅的叠加。

关系的传递速度不能超越光速,那么测量装置A测量 α 的结果应该与B的测量方式无关,因为B总是可以等到 β 到达B以后再决定测量方式,而此时包含B测量方式的信息并不能及时传递给A。同理 β 的结果应该与A无关。基于这一假设,贝尔提出如果EPR实验满足定域性, α, β 之间的相关关系应当满足贝尔不等式。而自1982年阿斯佩克特实验至2017年“墨子号”卫星实验的各种结果都突破了贝尔不等式的限制,证明了纠缠现象的存在。

量子纠缠于狭义相对论看上去存在的矛盾点是超距作用似乎允许超光速地逆行时间传递信息,从而违反原因在前,结果在后的因果过程。但是量子力学中的无信号定理(No-Signaling Theorem)^[7]保证了量子纠缠无法传递任何信息。观察者无法通过选择对其子系统的测量方式来操控远端观察者的测量结果,从而实现信息的传递。仍以上述的EPR/B实验为例,如果A可以保证每次向它飞来的都是x轴自旋向上的粒子,那么它可以根据统计判断B是否在y轴方向测量。如果统计上所有粒子是自旋向上的则B没有在y轴方向测量,如果存在自旋向下的粒子则B有在y轴方向测量^①。然而,量子力学中不存在可以让A保证来的都是x轴自旋向上粒子的方法。任何如此做的企图都不可避免地提前测量,从而使粒子坍缩,解除两个粒子之间的纠缠关系。无信号定理确保量子力学中的非定域相关性不会导致超光速信息传递,从而与狭义相对论的因果性原则保持一致。无信号定理为量子隐形传态、超密编码等量子信息协议提供了理论基础,确保这些协议在信息传递中的安全性与有效性。

内格尔(P. Nager)提出,贝尔定理中的假设可以翻译为一系列因果假设,如此可以用因果贝叶斯网络来表示其因果结构。^[8]在此之前,先要了解因果贝叶斯网络的基本内容。因果贝叶斯网络用因果图来刻画因果结构。一张因果图是一张包含作为结点的变量以及连接结点

的有向箭头的有向无循环图(directed acyclic graph, DAG)。变量代表了所刻画的因果结构中可能发生事件,而有向箭头则代表了变量之间的直接因果关系。在因果图中,一个变量的直接原因是这个变量的亲(parent)变量,一个变量的直接结果是它的子(child)变量;通过一条因果路径成为一个变量原因的被称为这个变量的祖(ancestor)变量,通过一条因果路径成为一个变量结果的被称为这个变量的后(descendant)变量。在因果贝叶斯网络中,因果图中变量的相关和独立结构被用来解释和预测相应变量在统计中的相关和独立结构。其中发挥重要作用的是因果马尔可夫条件(Causal Markov Condition, CMC),它是指在因果图中,一个变量在以其全部亲变量为条件的条件概率下与除了它后变量以外的所有变量概率独立。

内格尔提出,贝尔定理等同于以下因果假设:^[9]

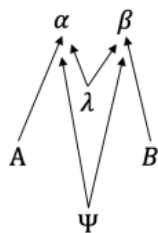
- 受控变量的外源性(Exogeneity of Controlled Variables, ECV):受到控制的变量(即测量方式A, B)被相互独立的干预所决定。
- 因果定域性(Causal Einstein Locality, CEL):类空间隔的事件之间没有直接的因果联系。
- 无回溯因果(No Backwards Causation, NBC):类时间隔的事件中结果不能先于原因发生。
- 因果马尔可夫条件(CMC):一个变量在以其全部亲变量为条件的条件概率下与除了它后变量以外的所有变量概率独立。
- 因果充分性(Causal Sufficiency, CS):集合 $\alpha, \beta, A, B, \Psi, \lambda$ (其中 λ 是决定 α, β 测量结果的隐变量,它无法被实验直接探测)包含了其中所有元素的共同原因。即这些变量所构成的因果图没有遗漏任何因果结构。

如果上述假设同时成立,则贝尔不等式得到满足。此外,在因果贝叶斯网络可以推导出唯一满足上述所有假设的EPR实验因果图结构,

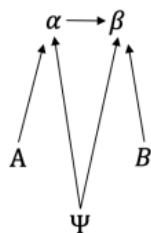
①A本应测量到x轴自旋向上的粒子,测量到自旋向下的唯一可能是,B有y轴方向测量,使得 α 先因为纠缠坍缩到y轴,再因为A的测量坍缩回x轴,从而翻转了原本的自旋。

如图 1- (a) 所示。这一因果图恰好是在不考虑量子纠缠的情况下实验装置所具有的因果结构。

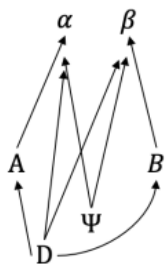
然而, 实验结果表明贝尔不等式不成立。这表明 ECV, CEL, NBC, CMC, CS 这五个假设中有一个或者多个不成立。应当放弃哪一个(些)假设, 放弃这一(些)假设之后能获得怎样的因果结构正是量子因果结构所关心的问题。



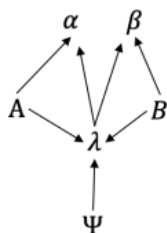
(a) 经典隐变量结构



(b) 超光速结构



(c) 超决定结构



(d) 逆向因果结构

图 1 EPR/B 实验的可能因果结构图

二、因果原则与量子纠缠的相容性

因果贝叶斯网络的提出者们普遍认为, 在量子纠缠中应该放弃 CMC。珀尔提出, 量子层面的因果关系与宏观因果不同, 有其自身的规则和直觉, 而量子因果以外因果关系应当遵循 CMC。^[10] 格里莫也认为所有因果关系满足马尔可夫条件并非逻辑必然为真, 可以接受不满足 CMC 的因果过程。^[11] 而共因原则 (principle of common cause) 的反对者, 如范·弗拉森 (B. van Fraassen)、^[12] 卡特莱特 (N. Cartwright)^[13] 等也认为并非所有的统计相关性可以由 CMC 解释。CMC 在因果贝叶斯网络中具有核心地位,

否认 CMC 则整个因果贝叶斯网络都无法工作。因此持有这种立场意味着承认因果贝叶斯网络不足以描述量子纠缠的因果过程。虽然这一立场在逻辑上是自洽的, 但是它削弱了因果贝叶斯网络的合理性: 如果 CMC 不是普遍为真的, 那么为什么我们可以在各种不同的宏观领域放心地使用因果贝叶斯网络作为因果推断和发现的工具?

如果认为 CMC 成立, 因果贝叶斯网络可以描述 EPR 实验, 那么看上去可行的做法是从 ECV, CEL, NBC, CS 这些假设中去掉一个, 再从余下的假设用因果发现算法推断符合实验结果的因果结构。然而, 这一思路并不完全可行。在因果发现算法中, 忠实性原则 (the principle of faithfulness) 是因果推断的主要原理, 它是 CMC 的逆命题: 如果变量 A 在以其全部亲变量为条件的条件概率下与变量 B 概率独立, 则不存在从 A 到 B 的因果路径。CMC 起到的作用是从因果图的结构得到变量的概率相关关系, 而忠实性原则起到的作用则相反, 是从变量的概率相关关系得到因果图的结构。伍德 (C. J. Wood) 和斯皮肯斯 (R. W. Spekkens) 提出, 任何同时满足 CMC 和忠实性条件的因果结构都无法满足 EPR/B 实验的实验结果。^[14] 其核心原因是, EPR 的实验结果同时有非定域相关关系和无信号 (no-signaling) 两种性质。如果在因果贝叶斯网络中 CMC 可以描述 EPR 的实验结果那么它必然违反忠实性原则^①。因此, 不能用因果发现算法判断 EPR 实验的因果结构。

忠实性原则并非不可违反的。在宏观因果过程中也有许多忠实性原则的反例。如果两个变量在非条件概率的情况下相互概率独立, 那么根据忠实性原则这两个变量之间不存在因果路径。然而以下情况都违反了这一判断:

- 路径抵消 (canceling path): 两个变量之间存在多条因果路径, 而这些路径产生的效果相互抵消。如避孕药既可以直接引发血栓, 又通过降低怀孕概率间接减少血栓风险。若两种

^①以图 1- (b) 为例, 如果这张图满足忠实性, 那么以 β 为条件的情况下, A 和 B 构成共同结果结构, 它们具有统计相关性。而这意味着以 β 为条件的情况下可以从 B 推断 A 的测量方式, 这违反无信号定理。

效应精确抵消,则统计上两者具有独立性,无法发现真实因果联系。

- 非传递性 (non-transitivity): 变量X是Y的原因, Y是Z的原因, 但是X可以和Z没有因果关系。例如一个人骑车摔倒伤到了右手, 他用左手打字写出了文章并发表。骑车摔倒是打字的原因(影响了具体方式), 打字是文章发表的原因。在因果图上存在从摔倒到文章发表的因果路径, 但是两者没有概率相关性。

- 掩盖 (masking): 如果一个结果有多个原因, 那么其中单个原因的概率相关性在非条件概率中可能被掩盖。例如, 两个人完全随机地猜拳, 其中一个人获胜的概率是1/3。如果他打算出石头, 因为另一个人出手是完全随机的, 他的获胜概率仍然是1/3。出手的选择并不改变获胜的概率, 但是两人的胜负和他们选择之间具有因果关系。

这些违反忠实性原则的情况都依赖于因果结构中参数的细致调节 (fine-tuning)。在路径抵消中, 每条因果路径产生效果的总和需要严格地相互抵消; 在非传递性中, 中间变量必须恰好可以分解为两个变量的乘积; 在掩盖中, 每个原因变量的概率分布必须恰好是均分。如果这些参数没有被严格满足, 即使因果图的结构一致, 所得到的概率分布也不会违反忠实性原则。因为非忠实的概率独立关系对于参数的变化极端敏感, 珀尔称这种独立关系缺乏稳定性 (stability), 任何对因果参数的轻微扰动都会破坏独立关系, 使忠实性原则成立。([10], p.48) 这已经与量子力学构成了紧张。在宏观的非忠实因果中存在着大量的稳定性被破坏的实例, 例如在避孕药和血栓的例子中, 更换身体条件不同的受试人群可以使非忠实性失效。而在量子力学中从来没有过违反无信号约束的情况。

内格尔指出, 在因果贝叶斯网络的视角下, EPR/B实验所要需解决的问题在传统的非定域性的物理问题之外还有因果结构的问题。一种能解释EPR/B实验的物理机制不仅要能够解释纠缠的两个粒子如何具有概率相关性, 还需要解释这一机制如何构成了非忠实的因果结构,

以及这种因果结构如何具有稳定性。

在已有的解释量子纠缠的非忠实性的工作中, 内格尔提出EPR/B的物理机制中存在着内部路径抵消 (internal canceling path) 的因果结构, 通过变量取值层面的相互抵消达到微调。因为该机制是在变量内部的, 所以它对于外在的干扰而言具有稳定性。艾格 (M. Egg) 和爱思菲尔德 (M. Esfeld) 则从玻姆力学出发, 认为量子力学的细致调节是量子平衡假说 (quantum equilibrium hypothesis) 的结果。只要量子平衡假说在独立的基础上是合理的, 我们就可以解释为什么在特定的因果情形中存在非忠实的独立性。^[15] 以上这些工作证明了构建非忠实的EPR/B实验的因果结构的可行性。然而, 这些工作都建立在量子力学中特定的假设或诠释之上。任何其他与之假设不同的解答仍然需要自行解决非忠实性的问题。

三、量子纠缠的可能因果结构

根据放弃的假设不同, 支持CMC的EPR/B实验的因果解释可以主要分为以下三类: 超光速因果 (superluminal causation), 超决定 (superdeterminism), 逆向因果 (retrocausation)。其中, 逆向因果是与因果贝叶斯网络最为融贯的一种解释。

超光速因果是放弃因果定域性(CEL)假设, 其允许类空间隔的事件之间具有因果关系。图1-(b)是超光速结构中的一种。根据狭义相对论, 这种因果关系原因和结果之间并没有确定时间顺序。在一些参考系看来原因发生在结果之前, 在另一些参考系看来, 结果发生在原因之前。这种解释最大的优势在于可以直接以因果的方式解读量子力学对纠缠态的描述, 即一侧粒子的坍塌“引起”了另一侧粒子的坍塌。这一解释可以依靠的物理基础是玻姆力学^[16]及其他相似的理论。这一理论认为一个粒子的速度不仅由它自己, 而是所有与之纠缠的粒子的位置所确定, 并否认相对论性的时空结构。比高伊 (T. Bigaj) 采用反事实和干预的因果分析方法, 探讨量子纠缠的非定域相关性是否可以归因于某

种因果机制。^[17]其结果显示,非定域因果过程涉及循环因果性,例如测量结果之间的双向因果关系。对于因果贝叶斯网络而言,非循环性是其重要基础。将超光速因果融入因果贝叶斯网络存在着困难。

超决定论否认了受控变量的外源性(ECV)或因果充分性(CS)的假设^①。根据超决定论,在实验之前的其他事件是实验测量方式或者实验结果的共同原因。更加极端的观点是假设宇宙的初始条件决定了所有测量选择和结果,以此来解释量子纠缠的统计相关性。^[18]图1-(c)是超决定论结构中的一种,其中超决定原因D决定测量的选择和测量。最初提出超决定解释的是物理学家布兰斯(C. Brans)。^[19]超决定论的优势在于不需要任何违反因果直觉的假设和机制,与因果贝叶斯网络的基本原则也不会发生冲突。然而,从因果贝叶斯网络的方法论来说,超决定相当于滥用共因原则,对任何相关性都假设一个隐藏的共同原因。这样的假设在因果发现中本就不被优先考虑。物理学家蔡林格(A. Zeilinger)对超决定论的评论表示了类似的担忧。他认为实验者具有自由控制实验的能力是科学的基础假设,承认超决定论会导致可证伪性和科学的价值被摧毁。^[20]因此从因果贝叶斯网络的角度,超决定论也不是一个好的因果解释。

任何存在结果先于原因发生的假设都可以称为回溯因果。如果一个因果假设只违反无回溯因果(NBC)而不违反因果定域性(CEL),那么这一假设就有可能与因果贝叶斯网络相容。^[21]因果贝叶斯网络要求因果图是不循环的。如果因果关系中原因一定发生在结果之前,那么非循环性的要求一定可以得到满足。但存在回溯因果并不一定意味着因果图会发生循环。如图1-(d)所示,隐变量 λ 所处于时空位置在时间上早于测量A, B发生。这张图满足因果的一切条件。而基于因果贝叶斯网络的因果概念理论,如干预主义(interventionism)^[22]也并不对原因和结果的时间先后顺序有所要求。

在这个意义上逆向因果是因果贝叶斯网络最为相容的解释。

采取逆向因果的优势在于,它可以很好地与狭义相对论相容。只要原因事件和结果事件之间是类时间隔的,那么逆向因果就和正向因果一样具有洛伦兹不变性。在所有参考系中逆向因果的结果都发生在原因之前。逆向因果的另一个优势是物理定律的时间反演对称性似乎支持逆向因果的存在。普莱斯(H. Price)曾基于这一思路论证只要量子态具有实在性,实验的输入输出是离散的事件,任何符合量子理论经验结论的基础解释就必须包含逆因果性。^[23]另一项研究基于作用量对偶原理(the Action Duality Principle),通过不同量子实验的同构来论证逆向因果的可能性。^[22]在物理上,物理学家构建出多个包含逆向因果机制的量子力学模型,包括交易解释(Transactional Interpretation)、^[24]双状态向量构形(Two-State Vector Formalism)、^[25]因果对称玻姆模型(Causally Symmetric Bohm Model)^[26]等。

逆向因果遇到的主要问题在于它在本体论上是否是可能的。传统分析哲学认为逆向因果不能与我们的日常所熟悉的正向因果相融贯。其中最为著名的当属布莱克(M. Black)的阻挠论证(Bilkling argument),^[27]如果结果先于原因发生,那么我们可以在观察到结果后阻挠原因发生,如此会造成逻辑矛盾。布莱克论证,如果存在逆向因果,任何行动者能对其中的原因和结果的任何信念都会造成矛盾。在量子力学的框架下,达米特(M. Dummett)的分析是回应阻挠论证的有力工具。他在对阻挠论证的分析中指出,阻挠论证具有隐藏前提,行动者对结果事件是认识可及(epistemic access)的。^[28]如果行动者不能知道结果事件的任何信息,那么阻挠论证就不再成立。普莱斯指出,量子力学的结构必然让任何行动者不可能获得隐变量的信息。^[29]因此,以隐变量为结果的逆向因果不会受到阻挠论证的困扰。

虽然从因果贝叶斯网络的角度,选择逆向

①违反一个还是两个取决于违反的是参数独立性还是结果独立性。

因果是一种可行的进路,但是逆向因果的物理模型却会超出因果贝叶斯网络的描述能力。在因果贝叶斯网络中,一个因果模型所有变量的联合概率分布等于其中每一个变量以其亲变量为条件的条件概率的乘积。这一性质被称为马尔可夫条件的因式分解式(the factorization of Causal Markov Condition)。它在数学上与马尔可夫条件等价。如果一个模型的联合概率分布无法被因式分解,那么这个模型就不满足CMC条件,无法被因果贝叶斯网络的DAG所描述。伊文斯(P. Evans)就以此论证存在超越因果贝叶斯网络能力的逆向因果模型。^[30]伊文斯所考察的是沃顿(K. Wharton)的一次齐备拉格朗日模型(All-at-Once Lagrangian Models)。^[31]这一框架基于哈密顿原理和双时间边界条件,量子系统的动力学由初始和终态共同约束,隐含逆因果影响。它对EPR/B实验的因果解释是测量A、B的设置影响过去状态隐变量 λ ,从而使测量结果 α 、 β 具有相关性。对于非忠实性,这一模型把它解释为路径积分中的振幅相消的结果。仅从因果描述而言,图1-(d)描述了这一模型的因果结构。另一方面,这一模型在物理上可以根据费曼路径积分描述所有变量的联合概率分布。伊文斯证明,根据物理原则得到的联合概率分布不能被马尔可夫条件所因式分解。这说明沃顿的模型超越了因果贝叶斯网络描述因果结构的能力。伊文斯认为这是由于当前因果贝叶斯网络所具有的局限性导致的。处于量子纠缠的粒子不满足因果贝叶斯网络所要求的变量之间的独立可固定性(Independent fixability),而观察者的时空视角限制了其可知可控变量的选择。因果贝叶斯网络的传统框架难以容纳量子逆因果性,需发展更灵活表示方法,或接受非因果依赖的核心地位。

四、结语:呼唤新工具

通过用因果贝叶斯网络分析EPR/B实验可以看出,这一在其他领域大显神通的工具并没有能很好地解释实验现象所呈现出的相关性。即使放弃了一些合乎直觉的因果假设,因果贝

叶斯网络也很难构建出因果结构。这一结果对于因果贝叶斯网络而言构成了两难:要么它需要承认自然中存在量子现象的和非量子现象的两种截然不同的因果本质,要么它需要承认不加分辨地在任何非量子领域使用因果推断并没有好的辩护。

一种摆脱两难的解决方案是,当前的因果贝叶斯网络是一个更为普遍的因果理论的特殊情况。这一普遍的因果理论可以表示量子纠缠的因果结构,并且可以在非量子情形下退化为因果贝叶斯网络。这一方案已经成为了新近的研究方向,在这一方面的研究有共因原则的量子力学扩展^[32]和循环因果的量子结构^[33]等。

[参考文献]

- [1] Spirtes, P., Glymour, C. N., Scheines, R. *Causation, Prediction, and Search* [M]. 2nd ed. New York: MIT Press, 2000.
- [2] Pearl, J. *Causality: Models, Reasoning, and Inference* [M]. 2nd ed. New York: Cambridge University Press, 2009.
- [3] 江怡、李然. 对逆向因果和时间反演对称性的哲学分析 [J]. 探索与争鸣, 2024, (8): 142-153; 179-180.
- [4] 栗钰杰、高山. 量子非定域性的逆向因果解释 [J]. 自然辩证法通讯, 2024, 46 (8): 10-16.
- [5] 孙圣. 量子力学的逆向因果争论及其辨析 [J]. 科学技术哲学研究, 2024, 41 (3): 41-47.
- [6] Einstein, A., Podolsky, B., Rosen, N. 'Can Quantum-mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete?' [J]. *Physical Review*, 1935, 47(10): 777-780.
- [7] Hall, M. J. W. 'Imprecise Measurements and Non-locality in Quantum Mechanics' [J]. *Physics Letters A*, 1987, 125(2/3): 89-91.
- [8] Näger, P. M. 'The Causal Problem of Entanglement' [J]. *Synthese*, 2016, 193(4): 1127-1155.
- [9] Näger, P. M. 'Causal Graphs for EPR Experiments' [EB/OL]. <http://philsci-archive.pitt.edu/9915/>. 2024-05-20.
- [10] Pearl, J. *Causality* [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2000, 68.
- [11] Glymour, C. 'Markov Properties and Quantum Experiments' [A], Demopoulos, W., Pitowsky, I. (Eds.) *Physical Theory and Its Interpretation: Essays in Honor of Jeffrey Bub* [C], Dordrecht: Springer, 2006, 117-125.
- [12] Van Fraassen, B. 'The Charybdis of Realism: Epistemological Implications of Bell's Inequality' [J].

- Synthese*, 1982, 52(1): 25–38.
- [13] Cartwright, N. 'What is Wrong with Bayes Nets?'[J]. *The Monist*, 2001, 84(2): 242–264.
- [14] Wood, C. J., Spekkens, R. W. 'The Lesson of Causal Discovery Algorithms for Quantum Correlations: Causal Explanations of Bell-inequality Violations Require Fine-tuning'[J]. *New Journal of Physics*, 2015, 17(3): 033002.
- [15] Egg, M., Esfeld, M. 'Non-local Common Cause Explanations for EPR'[J]. *European Journal for Philosophy of Science*, 2014, 4(2): 181–196.
- [16] Bohm, D. 'A Suggested Interpretation of the Quantum Theory in Terms of "Hidden Variables" I'[J]. *Physical Review*, 1952, 85(2): 166–179.
- [17] Bigaj, T. 'On Quantum Entanglement, Counterfactuals, Causality and Dispositions'[J]. *Synthese*, 2020, 197(10): 4161–4185.
- [18] Davies, P. C. W., Brown, J. R. *The Ghost in the Atom: A Discussion of the Mysteries of Quantum Physics*[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1986, 45–46.
- [19] Brans, C. H. 'Bell's Theorem Does Not Eliminate Fully Causal Hidden Variables'[J]. *International Journal of Theoretical Physics*, 1988, 27(2): 219–226.
- [20] Zeilinger, A. 'Experiment and the Foundations of Quantum Physics'[J]. *Reviews of Modern Physics*, 1999, 71(2): S288–S297.
- [21] Evans, P. W., Price, H., Wharton, K. B. 'New Slant on the EPR-Bell Experiment'[J]. *The British Journal for the Philosophy of Science*, 2013, 64(2): 297–324.
- [22] Woodward, J. *Making Things Happen: A Theory of Causal Explanation*[M]. New York: Oxford University Press, 2003.
- [23] Price, H. 'Does Time-symmetry Imply Retrocausality? How the Quantum World Says "Maybe"?'[J]. *Studies in History and Philosophy of Science Part B: Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, 2012, 43(2): 75–83.
- [24] Cramer, J. G. 'Generalized Absorber Theory and the Einstein-Podolsky-Rosen Paradox'[J]. *Physical Review D*, 1980, 22(2): 362–376.
- [25] Aharonov, Y., Bergmann, P. G., Lebowitz, J. L. 'Time Symmetry in the Quantum Process of Measurement'[J]. *Physical Review*, 1964, 134(6B): B1410–B1416.
- [26] Sutherland, R. I. 'Bell's Theorem and Backwards-in-time Causality'[J]. *International Journal of Theoretical Physics*, 1983, 22(4): 377–384.
- [27] Black, M. 'Why Cannot an Effect Precede Its Cause'[J]. *Analysis*, 1956, 16: 49–58.
- [28] Dummett, M. 'Bringing About the Past'[J]. *The Philosophical Review*, 1964, 73(3): 338.
- [29] Price, H. *Time's Arrow and Archimedes' Point*[M]. Oxford: Oxford University Press, 1996, 174.
- [30] Evans, P. W. 'Quantum Causal Models, Faithfulness, and Retrocausality'[J]. *The British Journal for the Philosophy of Science*, 2018, 69(3): 745–774.
- [31] Wharton, K. B. 'A Novel Interpretation of the Klein-Gordon Equation'[J]. *Foundations of Physics*, 2010, 40(3): 313–332.
- [32] Lorenz, R. 'Quantum Causal Models: The Merits of the Spirit of Reichenbach's Principle for Understanding Quantum Causal Structure'[J]. *Synthese*, 2022, 200(5): 424.
- [33] Barrett, J., Lorenz, R., Oreshkov, O. 'Cyclic Quantum Causal Models'[J]. *Nature Communications*, 2021, 12(1): 885.

[责任编辑 王巍 谭笑]