

因果推論を用いた量子物理学における因果律の考察

中塚 海渡(Kaito Nakatsuka)・木村 元(Gen Kimura)

大阪大学・芝浦工業大学

量子物理学の奇妙さを表す Bell 定理によって、量子物理学は我々の日常的な感覚である局所性もしくは実在性、あるいはその両方を否定するとされる(cf. Bell, 1964). しかし局所性と実在性, 正確には隠れた変数理論を認めるための提案は様々な形でされてきており, 例えば光速を超える速さでの通信, 測定文脈が完全に決定されている超決定論, 未来からの影響である逆向き因果律を認めるなどといった日常的な感覚からは外れるようなものがある(cf. Bell et al, 1985, Price, 1994). そこで本研究では, 前述した逆向き因果律を含めた因果律に着目する.

因果律は哲学において豊富に議論がなされてきており, その定義は規則説や反事実条件を用いた介入説など多様である. また一般に相関関係と因果関係は異なるものである. しかし前述の介入説を用いて因果律を定義し, 相関関係から因果グラフと呼ばれるグラフ上の確率変数間における因果関係を特定する統計的因果推論という手法が, 近年では機械学習や統計学の分野を中心に活発に研究されている(cf. Pearl, 2000). 一方, 量子物理学では, 過去の状態から未来の状態が一意に定まる古典物理学に対して, 過去の状態から未来の状態が確率的にしか予言できないという意味で因果律が破綻するといわれる. しかし原因から結果の向きを始め因果律について物理学理論上で厳密に定義されておらず, 哲学で議論されている因果律と必ずしも一致するわけではない.

そこで量子相関を統計的因果推論によって因果関係を特定し, 説明しようとする研究に着目する(cf. Wood & Spekkens, 2015). 通常, 統計的因果推論を用いる際には因果関係から相関関係に関する条件に加えて, 相関関係から因果関係に関する忠実性条件と呼ばれるより強い要請を必要とする. この条件によって因果グラフの構造のみから相関関係を特定, またその逆も可能となる. 忠実性条件が成り立たない場合について, 統計学の哲学ではしばしば問題となり, 相関関係を考える際に因果グラフの構造のみならず確率変数間の因果的影響度をも考慮しなければならないと理解される(cf. Pearl, 2000). これは量子相関に適用する際にも重要であり, 量子相関において因果推論を用いる際は忠実性条件が必ず成立しないことを要請しなければならない(cf. Wood & Spekkens, 2015).

量子相関における忠実性条件の破れが, これまでの Bell 定理の議論, 例えば超決定論や逆向き因果律の容認と因果グラフ上でどのような対応関係にあるのかを論じる. また位置などの確率分布が直前の状態のみに依存して, 刻一刻と確率的に変化する Markov 過程を量子物理学に適用した Barandes の理論では, 因果グラフ上の確率変数が Markov 的に変化していき量子物理学においても, 日常的な感覚と一致する因果関係の非対称性を主張する (cf. Barandes, 2024). しかし Markov 過程を量子物理学に適用した理論は, Barandes 以前に Nelson などによって異なる形で提唱されてきた(cf.

Nelson, 1966). そこで本発表では, Nelson などの理論を因果グラフから解釈しようとするとき因果関係にどのような性質が立ち現れてくるのか, 逆向き因果律や Barandes の理論との関係を絡めながら論じる.

参考文献

Bell, J. S. (1964). "On the Einstein Podolsky Rosen paradox," *Physics*, 1, 195-200.

Bell, J. S, Shimony, A, Horne, M & Clauser, J. (1985). "An exchange on Local Beables," *Dialectica*, 39, 85-96.

Barandes, J. A. (2024). "New Prospects for a Causally Local Formulaiton of Quantum theory" <https://arxiv.org/abs/2402.16935>, arXiv: 2402. 16935.

Nelson, E. (1966). "Derivation of the Schrödinger Equation from Newtonian Mechanics," *Phys. Rev*, 150, 1079-1085.

Pearl, J. (2000). *Causality: Models, Reasoning, and Inference*: Cambridge University Press.

Price, H. (1994). "A Neglected Route to Realism about Quantum Mechanics," *Mind*, 103, 303-336.

Wood, C. J & Spekkens, R. W. (2015). "The lesson of causal discovery algorithms for quantum correlations: causal explanations of Bell-inequality violations require fine-tuning," *New J. Phys*, 17, 033002.