

# 測定における因果性・統計性：ドレスト光子を例として

岡村 和弥 (名大情報)

**要約** これまでの量子測定理論は測定前の被測定系と測定系間の独立性が前提となっていた。近接場光学・ドレスト光子を対象とした測定に対してはこの前提が成り立たない。ドレスト光子に対する測定理論を定式化するにあたり著者はまだ明確な回答を持ち合わせていないが、因果性をこの文脈での重要概念と考えている。ドレスト光子を対象とした測定での因果性と統計的記述を深めることにより今後進展させたい。

量子系に対する測定の特徴・特殊性を話として、Heisenberg 以来の伝統的な枠組みの中で「測定は対象の状態を乱す」などと言われてきた。Heisenberg が思考実験で提示した  $\gamma$  線顕微鏡の例では、有限の時間だけ相互作用で  $\gamma$  線により被測定系である粒子の位置と運動量が変化することが知られている。そして当時の時代的制約があるなか、Heisenberg は「不確定性原理」と呼ばれる誤差と擾乱の間のトレードオフを示した。不確定性原理の数理的側面については von Neumann の教科書 [1] がとてもわかりやすい。これまで量子測定理論で想定されてきた研究対象は、上の例のように測定前は独立な被測定系と測定系（測定装置のマイクロ端）を有限の時間相互作用させ測定系の物理量の変化をメーターに用いる場合である [1, 2]。有限自由度系の延長上で量子場でも測定理論を展開できるが、量子場の測定理論での有界時空領域における局所測定は相対論的な状況を含む形に従来の量子測定理論の定式化を拡張したものである [3]。測定前の被測定系と測定系間の独立性はこれまでの量子測定理論における基本的前提であると言える。

近接場光学・ドレスト光子 [4] を対象とした測定はその現象のあり方から、系によっては遠方の放射光に頼った測定だけでは不十分で、測定装置と被測定系が近接した事実上その 2 つが区別不可能な状況での測定を取り扱わなければならない。これは先の独立性が成り立たない場合にあたり、これまでの測定理論での前提を放棄する形になる。近接場光学およびその周辺分野と量子測定理論のどちらもまだまだ発展中であり、これらがこれまではっきりとした形で相互に影響を及ぼさなかったために基本的前提、言い換えれば暗黙の了解となっていたとも言える。

では、測定前の被測定系と測定系間の独立性が成り立たない場合に被測定系の物理量をどのようにして測っていると言えるのだろうか？その答えを残念ながらまだ明確に持ち合わせていない。けれども、著者がドレスト光子に対する測定理論を展開するに重要だと考える概念があり、それが因果性である。因果性とは、原因と結果の関係性（およびそれがあるか否か）についての概念である。因果性を測定の文脈で理論的に吟味するというのはある意味では当たり前であり一方でとても難しいことである。なぜなら、測定装置のメーターは被測定系の物理系と相互作用した結果を反映すべきであり、またそのようになっていることが確かめられて然るべきであるというのが当然だと思う理由である。一方で、(何を因果の対象とするのかという問題はあるが) 物理で標準的に扱う相関関数などを単純にチェックするだけでは因果を確認できないというのが難しい理由である。ドレスト光子（という仮定）なしに説明不能な現象の存在自体が実は因果的な説明であるのだが、因果性に関わる研究は自然と学際的な文脈を呼び寄せることになる。というのも因果性は学問・分野を問わずその扱いが難しい対象だからである。ドレスト光子という対象だけで

なく物理理論を扱うための因果性の哲学を（実験を例とした実際の場面への）実践と学際的観点から見直すのも将来像を描く上で今後必要となるかもしれない。

量子系の議論は統計性を前提にしているということを最後に付け加えたい。具体的には物理的状況・実験設定に対応した（量子）状態により系の統計的振る舞いを記述する。もちろん統計性は因果性を記述するための不可欠な要素である。統計学は、その重要性が近年ますます認識され需要も伸びているが、状態概念および因果性が生かされる場面を通じて自然科学の中で哲学的にも実学的にも新しく発展することを期待したい。

謝辞 この研究は（社）ドレスト光子研究起点の支援を受けています。

## 参考文献

- [1] J. von Neumann, *Mathematische Grundlagen der Quantenmechanik*, (Springer, Berlin, 1932); *Mathematical Foundations of Quantum Mechanics*, (Princeton UP, Princeton, 1955).
- [2] M. Ozawa, Uncertainty relations for noise and disturbance in generalized quantum measurements, *Ann. Phys. (N.Y.)* **331**, 350–416 (2004).
- [3] K. Okamura and M. Ozawa, Measurement theory in local quantum physics, *J. Math. Phys.* **57**, 015209 (2016), doi: 10.1063/1.4935407..
- [4] 大津 元一, 『ドレスト光子』, (朝倉書店, 2013) .