

量子の世界で「ゆらぎ」の限界に迫る

—量子システムの精度と応答に関する新しい法則を発見—

概要

京都大学基礎物理学研究所 Vu Tan Van 准教授らの研究グループは、量子システムにおける精度・応答・エネルギーコストの関係について、新たな限界を理論的に導きました。これまで古典的なシステムでは、精度を高めるにはそれに見合うエネルギーコストが必要になる「熱力学的不確定性関係」が知られていましたが、本研究では、量子コヒーレンス^{注1)}などの量子特有の性質を考慮することで、量子系ではこの関係が修正されることを明らかにしました。さらに、観測のゆらぎに対する上限（逆不確定性関係）や、外部からの摂動に対する応答感度の上限（応答の不確定性関係）を新たに導き、量子システムに共通する基本的な制約を示しました。本研究は、量子熱力学^{注2)}の基礎を築くとともに、量子熱機関^{注3)}や量子計算^{注4)}など、量子技術の設計や性能評価にも新たな視点を提供するものです。今後、より複雑な量子システムへの理論的な拡張や、実験データとの検証を通じて、量子システム全般に通じる普遍的な原理の確立につながることを期待されます。

本研究成果は、2025年3月6日に米国の国際学術誌「*PRX Quantum*」にオンライン掲載され、International Year of Quantum Science and Technology (IYQ 2025) Collection に選ばれました。

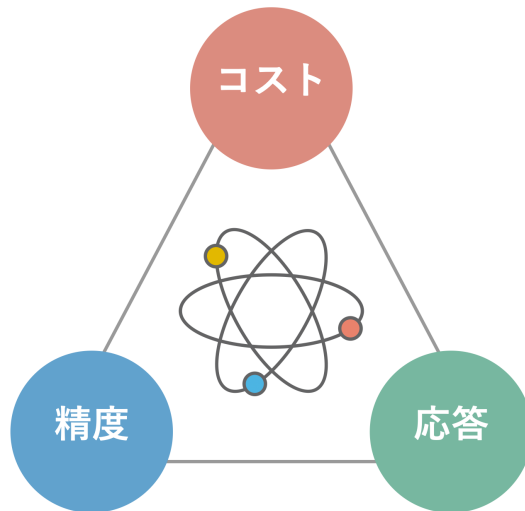


図 1：マルコフ型の開放量子系では、システムの時間的な変化に伴って得られる観測のゆらぎ（精度）や、外部からの刺激に対する応答のしやすさ（応答感度）が、エネルギー消費（熱力学的コスト）によって制約を受ける。

1. 背景

私たちの身の回りでは、目に見える自然現象から、スマートフォンなどの人工的なデバイスに至るまで、あらゆるものが周りの環境と熱やエネルギーをやり取りしています。このやり取りによって、ものの状態は常に変化し続け、特に小さなものほど、その変化は確率的、つまりサイコロを振るように次の状態が決まるようになります。例えば、水の中にあるとても小さな粒（コロイド粒子）は、水分子にぶつかりながらランダムに動きます。これはブラウン運動と呼ばれる現象です。このように、ミクロな世界では同じ実験をしても、毎回違う動きが観測されるのが当たり前です。では、こうした動きのばらつき（ゆらぎ）をどこまで小さくできるのか、また、そのためにはどれだけのエネルギーコストが必要なのか——この問いは、物理学においてとても重要なテーマとなっています。

こうした非平衡と呼ばれる状況を扱う非平衡熱力学という分野では、ここ10年ほどの間に熱力学的不確定性関係という新しい原理が発見されました。この原理は、観測量の高い精度（小さなゆらぎ）を実現するためには、それに見合うエネルギー（熱）が必要になることを意味しています。簡単に言えば、ゆらぎを小さく抑えるためには、その分多くのエネルギーを消費しなければならないという関係を示すものです。この考え方は、微小な機械や分子モーターの設計にも大きな影響を与えています。

ただし、これまでの研究のほとんどは古典的なシステム、つまり量子の性質を考慮しなくてもよい系を対象としたものでした。一方で、原子や電子など量子の世界では、ものの状態が重ね合わせになったり、量子コヒーレンスと呼ばれる特殊な性質を持つことが分かっています。この量子特有の性質によって、これまで古典系で成り立っていた原理が成り立たない可能性も指摘されていましたが、その具体的な条件や仕組みについては、十分に解明されていませんでした。

そこで今回の研究では、量子の世界におけるゆらぎとエネルギーコスト、そしてシステムの応答性（外からの刺激にどれだけ敏感に反応するか）の間にどのような制限があるのかを理論的に明らかにしました。これにより、これまで古典的なシステムで考えられていた熱力学的不確定性関係を、量子の世界でも成り立つ形に一般化することを目指しました。

2. 研究手法・成果

今回の研究では、マルコフ型の開放量子系^{注5)}と呼ばれるシステムを対象にしました。これは、量子システムが外部の環境と絶えずエネルギーや情報をやり取りしながら、時間的に変化していく様子を記述する理論的な枠組みです。特に、本研究では、環境との相互作用によってエネルギーが瞬間的に出入りする量子ジャンプという現象に注目しました。これは、量子システムがある状態から別の状態へ飛び飛びに移る過程で、量子特有の特徴です。この量子ジャンプがどのくらい頻繁に起こるのかや、ジャンプによって生じるエントロピー生成を手がかりに、ゆらぎや応答との関係を、量子推定理論という手法を用いて理論的に導きました。

その結果、以下の3つの新しい法則を発見しました。

- (1) **量子熱力学的不確定性関係**：観測量の相対ゆらぎとエントロピー生成^{注6)}の間に成り立つ、新しいトレードオフ関係式を導きました。この数式には量子コヒーレンスの寄与が明示的に含まれています。これにより、古典系では必ず成り立つとされてきた熱力学的不確定性関係が、量子コヒーレンスによって破れる場合があることを理論的に示しました。
- (2) **量子逆不確定性関係**：観測量の相対ゆらぎには、どれだけ大きくなり得るかという上限が存在することを示す、新しい法則を導出しました。この上限は、観測量の瞬間的なゆらぎと、システムの対称化されたスペクトルギャップによって決まることが分かりました。この関係は、量子システムにおけるゆらぎの根本

的な限界を示すものであり、量子系の安定性を理解するための重要な成果です。

- (3) 量子応答の不確定性関係：外部からシステムに小さな摂動を加えたときに、システムがどれくらい敏感に反応するかについても、新しい制限を導出しました。特に、この応答感度には量子ジャンプの活性度が重要な役割を果たし、応答感度の上限はジャンプ活性によって決まることを明らかにしました。

さらに、これらの理論的な原理を、量子熱機関とスピン輸送モデル^{注7)}を使った数値シミュレーションによって正しく成り立つことを確認しました。

3. 波及効果、今後の予定

本研究は、量子の世界における「ゆらぎ・エネルギーコスト・応答」の関係について、理論的な枠組みを提示したものです。古典のゆらぎ熱力学で知られている法則が、量子系ではどのように修正されるのかを考察したことで、量子版の非平衡熱力学を考えるうえでのひとつの足がかりになると考えています。また、本研究で得られた知見が、量子熱機関や量子計算など、量子技術のさらなる発展に貢献できれば幸いです。今後は、より複雑な量子システムへの拡張や、実験データとの比較・検証を進めることで、量子システム全般に適用できる普遍的な法則の解明につながればと考えています。

4. 研究プロジェクトについて

本研究は下記の助成金と研究機関による支援を受けて行われました。

- (1) JSPS 科研費「Exploring universal relations in nonequilibrium systems using optimal transport theory」
JP23K13032 (研究代表者：Vu Tan Van)
- (2) 京都大学基礎物理学研究所 重力量子情報研究センター

<用語解説>

注1) 量子コヒーレンス：量子特有の現象で、量子状態が複数の状態を重ね合わせたまま存在する性質。

注2) 量子熱力学：量子力学の法則に従う微小なシステムにおけるエネルギーや熱のやり取りを扱う理論。

注3) 量子熱機関：量子システムを使って熱エネルギーを仕事に変換する装置や仕組みのこと。

注4) 量子計算：量子力学の原理を利用して情報を処理する新しい計算方法。

注5) マルコフ型の開放量子系：量子システムが外部の環境と絶えずエネルギーや情報をやり取りしながら変化していく系。現在の状態が未来の状態を決めるが、過去の影響は残らないという性質がある。

注6) エントロピー生成：システムの中で不可逆的な変化によって生じる乱雑さの増加を表す量。

注7) スピン輸送モデル：量子スピンの、空間的にどのように移動したり伝わったりするかを調べるモデル。

<研究者のコメント>

「量子システムにおけるゆらぎや応答に対する新たな基本的限界を示すことができました。特に、量子コヒーレンスとエネルギーコストがどのように精度向上に関わるのか、また応答とコストの間にどのような定量的な関係があるのかを明らかにできたことを嬉しく思います。まだ検討すべき課題は多く残されていますが、非平衡量子系における普遍的な法則を探るための一つのステップになれば幸いです。」(Vu Tan Van)

<論文タイトルと著者>

タイトル：Fundamental bounds on precision and response for quantum trajectory observables (量子軌跡上の観測量に対する精度と応答の基本的限界)

著者：Tan Van Vu

掲載誌：*PRX Quantum* (*PRX Quantum* **6**, 010343 (2025)) DOI : 10.1103/PRXQuantum.6.010343