

量子力学的な多粒子系に流れる熱流の原理限界を導出

量子力学的な多数の粒子からなる量子系へ流れる熱流の限界を、粒子数との関連から数学的に導出しました。その帰結として、粒子数が増えるにつれて熱流がどのように増大するかについての原理限界を解明し、将来実現されうる量子熱デバイスの性能限界を明らかにしました。

近年、微小な物体の量子力学的な性質を活用した量子技術の研究が進められています。その研究分野の一つである量子熱力学においては、量子性を用いた量子熱機関や量子バッテリーなどが、理論・実験両面から研究され、その可能性が議論されてきました。とりわけ、こういったデバイスの性能は、用いる量子系のサイズを大きくする時に、それを取り巻く環境系から量子系に流れる熱流（単位時間あたりに流れる熱）をどれくらい大きくできるかによって決定されます。しかし、そのような集団的な量子系に流れる熱流の原理限界については解明されていませんでした。

本研究では、量子系に流れる熱流の限界を求めるための新たな不等式を数学的に導出しました。これを用いて、量子系が多数の粒子から構成される場合、量子系へ流れる熱流が粒子数の3乗の関数以上に増大しないことを示しました。また、より現実的な条件設定の下で成り立つ不等式を導出し、その場合には熱流は粒子数の2乗の関数よりも速く向上しないことが分かりました。古くから知られる「超放射」というエネルギー放射の現象は、今回導出した原理限界を達成するという意味で、最も効率のよいエネルギー放射過程であることも明らかになりました。

先行研究では、さまざまな具体例において粒子数の1乗の関数を超える非線形な熱流の増大が示唆されてきたものの、あらゆる例に適用可能な原理限界を明らかにしたのは、本研究が初めてです。本研究結果は、量子デバイスの冷却機関等への応用も可能であると考えられます。

研究代表者

筑波大学数理物質系
都倉 康弘 教授

研究の背景

微小な物質に現れる量子力学的な性質を駆使した科学技術の実現は、現代物理学における重要な研究目標の一つです。しかし、そのような量子技術の実現に際して、用いる物理系の量子性は、しばしばそれを取り巻く環境系によって乱されてしまいます。このような現象は開放量子系^{注1)}という枠組みによって理論的に記述することができ、これによって量子系が晒されるノイズを理解することが重要な課題となります。また逆に、そのような開放量子系の特質を利点として用いることができれば、これを取り巻く環境系から流れる熱を仕事に変換する量子熱機関や、熱を充電エネルギーに変換する量子バッテリーなどの実現も可能となります。

このようなテーマは、量子熱力学という分野において、近年精力的に研究されています。例えば、量子系が多数の微小な量子力学的に振る舞う粒子（例えば、電子スピンや超伝導量子回路など）からなる場合、粒子数が増えるにつれて仕事率が非線形に増大するような量子熱機関ができることが知られています。しかし、いくつかの具体例ではこのような非線形な増大が示唆されているものの、あらゆる量子熱デバイス^{注2)}の性能を包括的に記述する理論は、これまで知られていませんでした。

研究内容と成果

本研究では、量子系に流れる熱流（単位時間あたりに流れる熱）を開放量子系の枠組みによって記述し、熱流の絶対値の上限を求める新たな不等式を導出しました。これを用いて、量子系と環境系との相互作用が示量性^{注3)}を持つ場合、量子系の粒子数を大きくした場合の熱流のスケーリング（比例的な増大）は、粒子数の3乗の関数を超えないことが分かりました。また実際に、粒子数の3乗の関数のスケーリングは、量子系と環境系の相互作用が全ての粒子の状態を一斉に基底状態から励起状態へ反転させるようなものである場合に実現可能であることも示しました。しかし、そのような相互作用は非常に理想的であり、理論的には重要ではあるものの、実際の実験系との関連性はそれほど明白ではありませんでした。

そこで、より現実的な、環境系との相互作用によって誘起される量子系のエネルギー変化が粒子数によらず一定である場合に成り立つ、さらに厳しい条件の下での不等式を導出しました。これによると、粒子数の2乗の関数を超える熱流のスケーリングは不可能であることが明らかになりました。

これらの結果は、理論の適用範囲を満たすすべての場合の熱流の原理限界を示しており、先行研究によって知られていたさまざまな具体例を包括的に説明します。例えば、70年ほどの歴史を持つ研究対象である超放射^{注4)}というエネルギー放出の現象は、粒子数の2乗の関数のスケーリングを持つ熱流が生じる具体例です。これは、今回導出した現実的な条件での原理限界を達成するという意味において、最も効率的なエネルギー放射であることも意味しています（参考図）。

今後の展開

量子技術の発展においては、例えば量子コンピュータの研究開発においてもそうであるように、量子系がそれを取り巻く環境系から受けるノイズをどのように制御するか、ということが重要な課題となります。本研究で得られた理論的知見を量子熱デバイス等の制御機関へ応用することで、こういった課題を解決できると考えられます。また、このような量子系に流れる熱流自体は、量子熱機関や量子バッテリーなどのデバイスの動作源となるものです。本研究グループは既に、粒子数の2乗の関数で仕事率が増大する量子熱機関の理論提案を行っており、本研究結果は、量子熱機関のさらなる可能性を示唆するものと言えます。

参考図

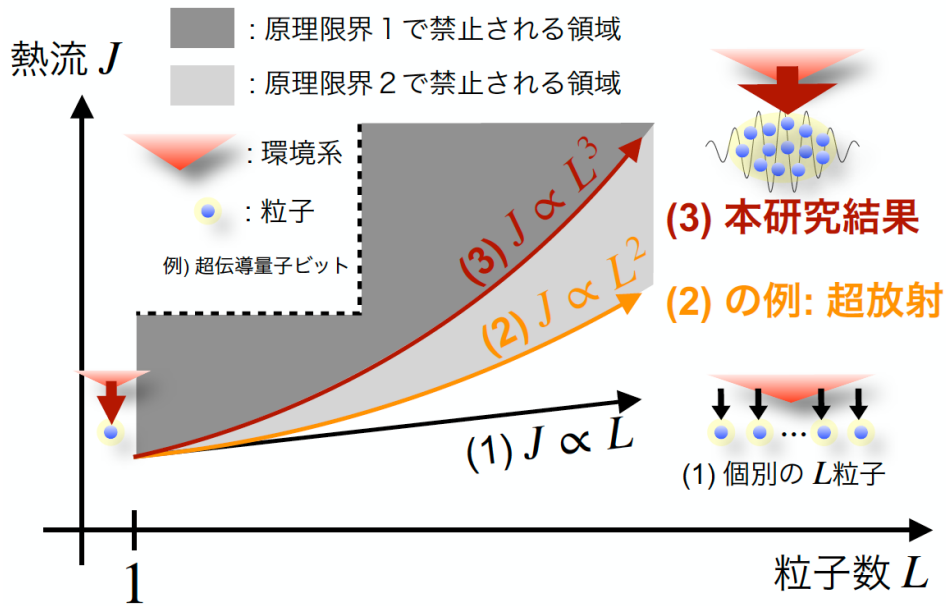


図 多数の粒子で構成された量子系に流れる熱流のスケーリング

(1) L 個の粒子が個別に環境系と相互作用する場合には、環境系から量子系に流れる熱流 J は、粒子が1つの場合に比べて L 倍となる（線形なスケーリング）。(2) 古くから知られる超放射においては、流れる熱流が L^2 倍になることが知られていた。(3) 本研究結果。環境系との理想的な相互作用条件を設定することで、 L^3 倍の熱流が流れる具体例を発見した。また、 L^3 より大きい（ $L^{3.1}$ 、 L^4 などの）スケーリングは実現不可能であることを数学的に証明した（原理限界1）。さらに、環境系との相互作用に（現実の物理系を想定した）追加の条件が課される場合には、さらに厳しく L^2 より大きいスケーリングが禁止されることを証明した（原理限界2）。超放射はこの追加の条件を満たし、かつ L^2 のスケーリングを達成するという意味で、原理的に最も効率の良いエネルギー放射過程である。

用語解説

注1) 開放量子系 (open quantum system)

量子系の性質を、それを取り巻く環境系の影響も考慮に入れて記述することができる枠組み。例えば、本研究でも扱っているように、環境系から量子系へ流れる熱流の計算などを可能にする。

注2) 量子熱デバイス (quantum thermodynamic device)

量子系に伴う熱の測定や制御などを主な目的とするデバイスのこと。量子熱機関や量子バッテリーがその具体例である。超伝導量子回路や核スピンなどを用いた実証実験も行われている。

注3) 示量性 (extensivity)

量子系と環境系の相互作用の強さが粒子数の増加につれ線形に増加するとき、「相互作用は示量性を持つ」という。

注4) 超放射 (superradiance)

量子力学的な2準位系（2つの独立した状態しかとらない系）の集まりが、環境系と協調的に相互作用するときに起こる現象。環境系に放射される単位時間あたりのエネルギーが、粒子数の2乗で増大する。1954年にR. Dickeによって理論的に提案され、その後さまざまな物理系で実験実証されている。

研究資金

本研究は、科研費基盤 B「小規模量子素子回路による情報処理過程の非平衡量子熱統計力学的研究(課題番号:20H01827)」、ムーンショット型研究開発事業研究開発プロジェクト「誤り耐性型量子コンピュータにおける理論・ソフトウェアの研究開発(課題番号:JPMJMS2061)」、JST さきがけ研究「完全秘匿性を実現する量子 IoT アーキテクチャの構築 (課題番号: JPMJPR1919)」の一環として実施されました。

掲載論文

【題名】 Universal Scaling Bounds on a Quantum Heat Current.

(量子熱流の普遍的なスケーリング限界)

【著者名】 S. Kamimura, K. Yoshida, Y. Tokura, and Y. Matsuzaki

【掲載誌】 *Physical Review Letters*

【掲載日】 2023 年 8 月 31 日

【DOI】 10.1103/PhysRevLett.131.090401

問合わせ先

【研究に関すること】

都倉 康弘 (とくら やすひろ)

筑波大学 数理物質系 教授

URL: <https://www.u.tsukuba.ac.jp/~tokura.yasuhiro.ft/>

【取材・報道に関すること】

筑波大学広報局

TEL: 029-853-2040

E-mail: kohositu@un.tsukuba.ac.jp