

2025年10月29日

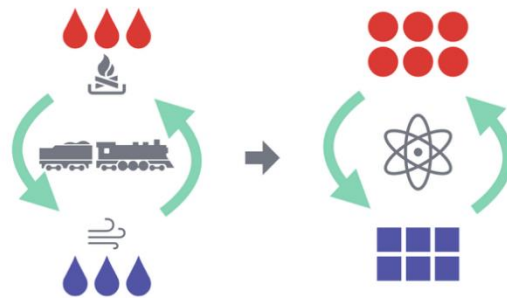
東京大学

科学技術振興機構 (JST)

量子情報の未解決問題「一般化量子 Stein の補題」を証明 ——量子リソースの最適な変換効率に関する普遍的法則を定式化——

発表のポイント

- ◆量子情報理論における大きな未解決問題だった「一般化量子 Stein の補題 (generalized quantum Stein's lemma)」の証明に成功しました。
- ◆物理学には、エネルギーをどれだけ効率良く変換できるかを定める「熱力学第二法則」があります。量子情報処理にもこれに似た法則があると考えられてきましたが、その定式化の鍵となる「一般化量子 Stein の補題」の既存の証明に誤りがあることが近年判明し、重要な未解決問題となっていました。
- ◆今回の成果によりこの問題が解決され、量子コンピュータでの計算や通信に使われるリソースをどれだけ効率良く変換できるかを定める、普遍的な法則が明らかになりました。これにより、量子情報処理の最適な性能を統一的に分析できる枠組みが整い、今後、量子コンピュータの計算や通信の解析やより良い設計、さらにはそれらの基礎となる理論の発展にも幅広く役立つと期待されます。



熱力学での変換 (左) の法則を元に、量子情報処理のリソースの変換 (右) の普遍的法則を定式化

概要

東京大学大学院情報理工学系研究科の山崎隼汰准教授は、香港中文大学 (深圳 (セン)) データサイエンス学院の林正人校長講座教授と共同で、量子情報理論における重要な未解決問題だった「一般化量子 Stein の補題」(Stein の補題と呼ばれる統計に関する補助的な定理を量子の世界に広げて一般化したもの) を証明し、量子リソースの最適な変換効率に関する普遍的な法則を定式化しました。これは、量子情報処理に役立つリソースの識別可能性や変換可能性を統一的に解析できる理論の枠組みを構築するものです。

「一般化量子 Stein の補題」とは、量子コンピュータでの情報処理で役立つ有用な量子状態と、そうでない量子状態を、どれだけ高い確率で見分けられるかの理論上の最高性能を示す補題です。もともとこの補題は2008年に提唱され、物理学の基礎である熱力学第二法則のような形で量子リソースの変換法則を定式化する上で鍵になると考えられていました。しかし近年の研究で、一般化量子 Stein の補題の既存の証明に誤りが発見され、定式化の可能性自体が不透明となり、重要な未解決問題となっていました。今回の研究では、この補題を厳密に証明し、

その「量子リソースを見分ける力」の理論を活用することで、様々な量子リソースの変換可能性を統一的に解析できる理論の枠組みを構築しました。

このように、本研究で構築した量子リソースの識別や変換に関する普遍的な理論の枠組みは、現在世界的に開発が進んでいる量子コンピュータでの量子情報処理において、量子リソース活用の最適性能や原理限界を定量的に分析し、より良い設計や新しい応用を解析する際の基盤になると予想されます。

発表内容

量子コンピュータは、量子力学の原理に基づいて情報処理を行うことで、従来のコンピュータでは実現が困難だった計算や通信を可能にできると予想されており、そのため現在世界的に量子コンピュータの実現に向けた開発が進んでいます。こうした優れた性能は、「量子もつれ状態」、「重ね合わせ状態」、「魔法状態」(注1)などに現れる量子力学特有の性質を、情報処理のリソースとして活用することによって実現できます。どの量子状態がリソースとして使えるのか、またどうすれば量子リソースを効率良く識別したり変換したりできるのかを明らかにすることは、量子情報理論の中心的な目標の一つです。

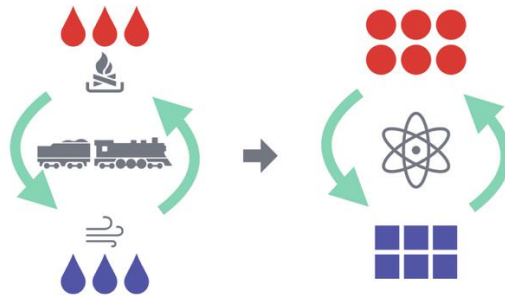
物理学には「熱力学第二法則」と呼ばれる法則があり、エネルギーの高い状態から別の状態に変換してエネルギーを有効活用したいとき、その効率や限界がエントロピー(注2)という指標の値で決まります。熱力学第二法則は「エントロピー増大の法則」とも呼ばれ、変換においてエントロピーは減少しないことを示します。エントロピーが増える変換はその逆方向の変換ができないため「非可逆な変換」、エントロピーが変化しない変換はその逆方向の変換が可能のため「可逆な変換」と呼ばれます。

同じように、量子の世界でも、量子もつれなどの量子リソースを変換する際に、その効率や限界を決める普遍的な法則が探求されてきました。量子リソースの間の変換が非可逆にしかできないのか、それとも熱力学第二法則のようにどのような量子リソースの間にも可逆な変換が存在するのか、その真偽は不明でした。

こうした法則が成り立つための鍵となるとされてきたのが、一般化量子 Stein の補題です。一般化量子 Stein の補題とは、量子情報処理に役立つリソース状態とそうでない非リソース状態をどれだけ高い確率で見分けられるかという仮説検定(注3)における最適性能を示す重要な補題です。従来の研究では、「もしこの補題が正しければ、熱力学第二法則と同じように、量子リソースの変換もリソースの量だけで可能かどうかが決められるため、可逆な変換が可能である」と考えられてきました。しかし、より近年の研究により、一般化量子 Stein の補題の既存の証明に誤りがあることが分かり、一般化量子 Stein の補題や熱力学に似た変換法則が成り立つ可能性自体が重大な未解決問題となっていました。

今回の研究では、既存の証明にはなかったピンチングや情報スペクトルといった手法を使い、一般化量子 Stein の補題を厳密に証明することに成功しました。さらに、この一般化量子 Stein の補題を活用して、量子状態や古典量子チャンネルに現れる様々な量子リソースの変換の最適効率を統一的に解析できる変換法則、いわば「量子情報理論における第二法則」が成立する理論的枠組みを確立しました。

この成果は、今後発展が見込まれる量子コンピュータによる量子計算や量子通信など多様な量子情報処理の性能や限界を定量的に解析できる普遍的な枠組みとして役立つことが期待されます。また「量子の世界で何が可能で何が不可能なのか」という根源的な問いにも新たな知見を与えるものです。



熱力学での状態変換（左）と量子情報処理のリソースの変換（右）

熱力学での状態変換（左）が可能かどうかは「熱力学第二法則」によって決まっています。この法則の大きな特徴は、状態変換の可能性がエントロピーという指標の値だけで決まる点です。エントロピーが減少しない変換は、必ずある種の操作で実現できます。この法則は、例えば蒸気機関で水を温めたり冷やしたりしてエネルギーを取り出すときに、その最適な効率を決めるなど、私たちのエネルギー利用の根本を支えています。今回の研究成果では、一般化量子 Stein の補題を証明して使うことで、量子情報処理で使われる量子リソースの変換（右）についても、熱力学と同じように「リソースの量」だけで変換の可能性や効率が決まり、「リソースの量」を保存する変換であれば可逆となるような理論的枠組みを作ることになりました。今後は、この理論を使って、量子情報処理の性能や限界をより深く理解したり、新しい量子技術の設計や解析に役立てたりできると期待されます。

発表者・研究者等情報

東京大学 大学院情報理工学系研究科 コンピュータ科学専攻

山崎 隼汰 准教授

〈研究当時：東京大学 大学院理学系研究科 物理学専攻 助教〉

香港中文大学（深圳） データサイエンス学院

林 正人 校長講座教授

兼：深圳国際量子研究院 首席科学家

兼：名古屋大学 大学院多元数理科学研究科 多元数理科学専攻 教授

論文情報

雑誌名：Nature Physics

題名：The generalized quantum Stein's lemma and the second law of quantum resource theories

著者名：Masahito Hayashi, Hayata Yamasaki*

DOI：10.1038/s41567-025-03047-9

研究助成

本研究は、科学技術振興機構(JST) 戦略的創造研究推進事業 さきがけ(課題番号:JPMJPR201A、JPMJPR23FC)、日本学術振興会(JSPS) 科研費(課題番号:JP23K19970)、文部科学省 光・量子飛躍フラッグシッププログラム(MEXT Q-LEAP)(課題番号:JPMXS0118069605、JPMXS0120351339)、National Natural Science Foundation of China(課題番号:62171212)、the General R&D Projects of 1+1+1 CUHK-CUHK(SZ)-GDST Joint Collaboration Fund(課題番号:GRDP2025-022)の支援により実施されました。

用語解説

(注1)「量子もつれ状態」、「重ね合わせ状態」、「魔法状態」

これらは、量子力学に特有の性質を持っている特別な量子状態で、量子情報処理の優位性を生み出すために欠かせないリソースです。例えば量子コンピュータによる計算で、こうした性質を使わずに量子計算を行うと、従来のコンピュータ(古典コンピュータ)で効率的に実行できるとごく限られた種類の計算しか実行できません。一方、量子コンピュータでこれらの量子力学特有の性質を適切に活用することで、従来のコンピュータよりもはるかに高速に計算を実行できる場合があります。

(注2) エントロピー

熱力学では、外界と熱のやりとりがない操作を断熱操作と呼びます。エントロピーは、ある状態変換が断熱操作で実現できるかどうかを決める重要な指標です。熱力学第二法則の大きな特徴は、「エントロピーが減少しない変換は、必ず何らかの断熱操作で実現できる」という点です。特に、エントロピーが変化しない変換は、その逆方向の変換も可能であるという可逆性があります。今回の研究では、量子リソースの変換についても、リソースの量だけで変換可能性が決まり、リソースの量が保存する変換であれば可逆になるという法則が普遍的に成り立つ理論的な枠組みを示しました。つまり、熱力学第二法則に相当する「量子情報処理における第二法則」が成り立つことを明らかにした点で、重要な意味があります。

(注3) 仮説検定

仮説検定は、情報処理の基礎となる「識別タスク」の一つです。たとえば「与えられた量子状態が量子情報処理に有用なリソース状態なのか、それとも非リソース状態なのか」を見分けたときに役立ちます。仮説検定では、二つの仮説(たとえば「リソース状態である」「非リソース状態である」)をそれぞれ「帰無仮説」と「対立仮説」と呼び、どちらが正しいかを識別します。帰無仮説が本当は正しいときに誤って棄却してしまう確率(第一種の誤り)をある決められた水準以下に抑えつつ、対立仮説が正しいときに誤って棄却してしまう確率(第二種の誤り)をできるだけ小さくすることが目標です。これまでの仮説検定の理論の多くでは、識別に用いるデータが毎回独立に、同じ確率分布から得られるという仮定で解析が行われてきました。しかし、一般化量子 Stein の補題の場合、非リソース状態についてこのような仮定が成り立たないため、解析が非常に難しくなるという問題がありました。今回の研究では、この問題を解決する新しい手法を導入することで、一般化量子 Stein の補題の証明に成功しました。

問合せ先

東京大学大学院情報理工学系研究科 広報室

Tel : 03-5841-4914 E-mail : ist-pr.t@gs.mail.u-tokyo.ac.jp

科学技術振興機構 広報課

Tel : 03-5214-8404 E-mail : jstkoho@jst.go.jp

(JST 事業に関する問合せ)

科学技術振興機構 戦略研究推進部 グリーンイノベーショングループ

安藤 裕輔 (あんどう ゆうすけ)

Tel : 03-3512-3526 E-mail : presto@jst.go.jp