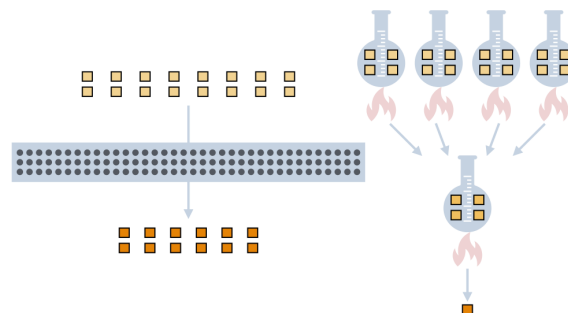


東京大学
科学技術振興機構（JST）

量子コンピュータ実現の大きな壁「コスト増大」を回避 ——魔法状態蒸留のコストを一定以下に抑える新手法を開発——

発表のポイント

- ◆ 有用な量子コンピュータを実現するためには、ノイズの影響を取り除くことが不可欠で、特に「魔法状態」と呼ばれる量子状態のノイズを減らす「魔法状態蒸留」という処理が中心的に使われます。本研究では、魔法状態蒸留でノイズをどれだけ減らしても、そのためのコストを一定の定数以下に抑えることが可能であることを初めて明らかにしました。
- ◆ 従来の方では、ノイズを減らそうとすればするほど、際限なくコストが増大してしまうという問題がありました。この問題を回避するために、高いノイズ除去能力とコスト効率を両立できる新しい量子エラー訂正符号を作り、コストの増加を防ぎながらノイズを除去できる方法を開発しました。
- ◆ 今回の成果は、こうしたコスト増加を防ぐ設計ができることを初めて示したものであり、今後の量子コンピュータ開発に新しい可能性や方向性をもたらすことが期待されます。



本研究で開発した新手法（左）と従来手法（右）による魔法状態蒸留

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らの研究グループは、マサチューセッツ工科大学のアダム・ウィルズ大学院生、フォックスコンの謝明修博士と共同で、有用な量子コンピュータの実現に欠かせない「魔法状態」のノイズを効率よく取り除く新しい方法を開発しました。この方法では、ノイズを取り除く「魔法状態蒸留（注1）」というプロセスのコストを一定の定数以下に抑えながら、必要に応じてノイズをいくらでも小さくすることができます。

魔法状態蒸留のコストは、大規模な量子コンピュータの開発における大きな障壁のひとつでした。これまでの魔法状態蒸留の方法では、ノイズをより減らそうとするほど、必要となるコストが際限なく増えてしまうという問題がありました。今回の研究では、高いノイズ除去能力とコスト効率の両方を実現できる新しい魔法状態蒸留の仕組みを作り、どれだけノイズを減らしてもコストの増加を防ぐことができることを初めて明らかにしました。

量子コンピュータで有用な計算を行うには、ノイズの影響を抑えて正確に計算を実行する仕組みが不可欠です。本研究の成果は、これまでの量子コンピュータ開発で大きな壁だった魔法状態蒸留のコストの増大を回避する新しい設計指針を示したものであり、今後の量子コンピュータの実現に向けた研究開発において、従来の限界を超える省コストでスケーラブルな設計への道を切り開くものです。

発表内容

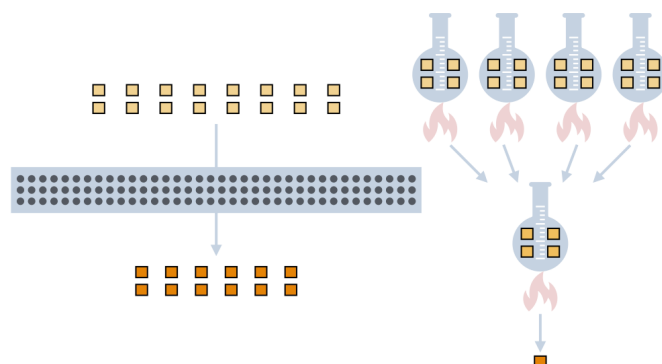
量子コンピュータが実現されると、素因数分解・量子力学の数値シミュレーション・量子計算を活用した機械学習など、従来のコンピュータで高速に解くのが難しかった計算問題を速く解けるようになる場合があると予想されています。そのため量子コンピュータの実現に向けて現在世界中で研究開発が進められています。従来のコンピュータは 0 と 1 のどちらかを表す「ビット」を単位として計算を進めるのに対し、量子コンピュータは量子力学の原理で動作する「量子ビット（注2）」を使用します。しかし、量子ビットはわずかなノイズの影響を受けやすく、エラーが生じやすいという性質があります。そのため、実際に役立つ量子計算を正しく行うためには、ノイズの影響を抑えながら計算を進める「誤り耐性量子計算」の仕組みが欠かせません。

誤り耐性量子計算では、1 つの量子ビットの情報を、たくさんの物理的な量子ビットに分散して表す「量子エラー訂正符号（注3）」という仕組みが使われます。量子エラー訂正符号を使うことで、もし一部の量子ビットにエラーが生じて、残りの量子ビットから元の情報を正しく復元できるようになります。量子計算で使われる演算の中には、この量子エラー訂正符号の上で簡単に実行できるものもあれば、特別な準備が必要なものもあります。特に、簡単に実行できない種類の演算は、「魔法状態」と呼ばれる特別な量子状態を使うことで実現されます。量子計算を行うためには、ノイズの少ない高精度な魔法状態を用意する必要があり、そのためにあたかもアルコール濃度の低い酒を蒸留してアルコール濃度の高い酒とするように、「魔法状態蒸留」という処理でノイズを減らした魔法状態を作り出し、それを使って計算を進めます。

誤り耐性量子計算の実現を難しくしている主な障壁のひとつが、魔法状態蒸留にかかるコストの大きさです。魔法状態蒸留では、ノイズを含んだ魔法状態を多数使って、ノイズの少ない魔法状態を準備します。このとき、ノイズの少ない魔法状態を 1 つ得るあたりに必要なノイズのある魔法状態の数が「コスト」となります。従来の魔法状態蒸留の方法では、たとえばノイズの大きさを $1/10 \rightarrow 1/1,000 \rightarrow 1/1,000,000 \rightarrow \dots$ と減らしていこうとすると、そのためのコストも $1 \rightarrow 15 \rightarrow 225 \rightarrow \dots$ と増えてしまい、最終的には計算全体のコストも大きくなるという問題がありました。今回の研究では、「代数幾何符号」と呼ばれる符号理論の手法を応用し、魔法状態蒸留を効率よく行うための新しい量子エラー訂正符号を設計しました。この符号は、魔法状態蒸留において高いエラー訂正能力とコスト効率の両方を実現し、さらにエラー訂正の処理も高速に行えるという特徴があります。従来の手法では、符号の性能が不足していたため、ノイズを減らすために蒸留を何度も繰り返す必要があり、そのたびにコストがどんどん増えてしまうという問題がありました。今回の手法では、新しい符号を使うことで、たった一度の蒸留で十分にノイズを除去できるようになりました。この仕組みにより、どれだけノイズを減らしてもコストが一定の定数以下に抑えられる「定数オーバーヘッド」の魔法状態蒸留が可能なことを、初めて明らかにしました。

本研究の成果は、今までの魔法状態蒸留では避けられなかったコストの増大を回避できる新しい可能性を切り開いたものです。これにより、従来の限界を超える高効率な誤り耐性量子計算のための理論的な基盤と設計指針を提供します。ただし、今回得られた理論的な成果を実際

の量子コンピュータ開発に活かすためには、実際の物理デバイスの特徴や制約に合わせてこの手法をさらに最適化していく必要があります。今後は、本研究で提案した新しい手順を設計指針として、理論と実験の両方から実装・実現に向けた研究が進んでいくことが期待されます。



本研究で開発した新手法（左）と従来手法（右）による魔法状態蒸留の違い

本研究の方法（左）では、高いノイズ除去能力とコスト効率を両立する仕組みを開発したことで、ノイズのある魔法状態（黄色）を一度にまとめてノイズの少ない魔法状態（橙色）に蒸留でき、コストの増加を防ぐことができます。これに対して従来の方法（右）は、ノイズを減らすために蒸留を何度も繰り返す必要があり、そのたびにコストがどんどん増えてしまうという問題がありました。

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〉

マサチューセッツ工科大学 (Massachusetts Institute of Technology)

アダム・ウィルズ (Adam Wills) 博士課程

フォックスコン (Foxconn)

謝明修 (Min-Hsiu Hsieh) 博士

論文情報

雑誌名：Nature Physics

題 名：Constant-Overhead Magic State Distillation

著者名：Adam Wills*, Min-Hsiu Hsieh, Hayata Yamasaki

DOI：10.1038/s41567-025-03026-0

URL：<https://www.nature.com/articles/s41567-025-03026-0>

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）の支援により実施されました。

用語解説

（注 1）魔法状態蒸留

量子エラー訂正符号を用いた量子計算では、ほとんどの基本演算は簡単に実行できますが、より複雑な演算を可能にするためには、あらかじめ魔法状態という特殊な量子状態にある量子ビットを準備して利用する必要があります。この魔法状態は、簡単な量子操作だけでは実現できない種類の計算を可能にする鍵となるもので、計算の自由度や表現力を飛躍的に高める役割を果たします。このため、ノイズの少ない魔法状態の準備は、実用的な量子コンピュータの実現に不可欠な技術となっています。こうしたノイズの少ない魔法状態を準備するプロセスを、アルコール以外の不純物が多く含まれる酒から不純物の少ない酒を蒸留するプロセスになぞらえて、魔法状態蒸留と呼びます。

（注 2）量子ビット

量子コンピュータを構成する基本要素です。通常の計算機ではビットは 0 か 1 のどちらかを表しますが、量子コンピュータの基本単位となる量子ビットは、0 と 1 の「重ね合わせ状態」を取ることができます。この重ね合わせ状態は量子力学特有の状態で、量子コンピュータは物質の重ね合わせ状態を活用して高速な計算を実現しています。一方、この重ね合わせ状態はノイズの影響を受けやすく、計算の途中で量子ビットにはどうしてもエラーが発生してしまいます。

（注 3）量子エラー訂正符号

量子ビットの情報を、より多数の量子ビットに載せることで、エラーの影響から情報を守る方法です。エラー訂正符号は、もともと量子ではない普通のビットについて考案された手法です。例えば 1 ビットの値「0」を 3 ビットの「000」に符号化し、値「1」を「111」に符号化すると、冗長性のおかげで、3 ビット中の 1 個のビットにエラーが起きても訂正が可能になります。この量子版が量子エラー訂正符号です。量子ビットの場合、普通のビットよりもエラーの起こり方が多様になるので、訂正にはより多くの追加ビットが必要になります。例えば量子ビット 1 個の情報を、7 個の量子ビットがスクラムを組んだような状態に載せ替えることで、7 個のうち 1 個の量子ビットにエラーが起きても訂正が可能になり、ノイズの影響を減らすことができます。