

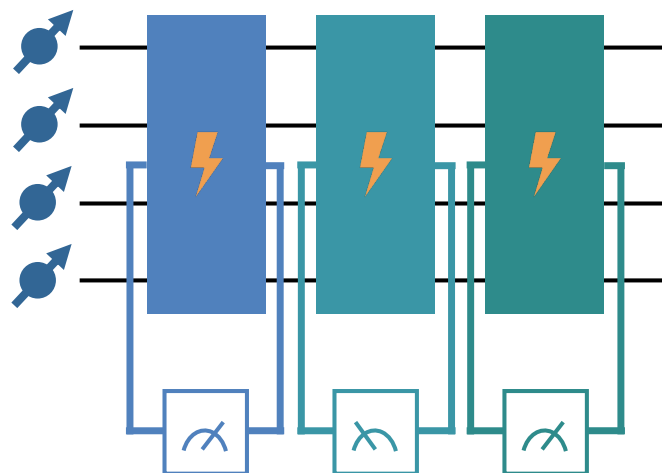
対称性の破れを伴うノイズを 量子演算から除去する新手法を提案

——演算過程の対称性を手がかりに、量子シミュレーションの精度を向上——

発表のポイント

- ◆ 量子計算機の演算過程を表す「量子チャネル」に潜むノイズを、その対称性に着目して効率的に検出・除去する新手法「対称性チャネル検証法」を提案した。
- ◆ 従来は量子状態という静的な情報にしか用いられてこなかった対称性に基づくノイズ除去手法が、量子チャネルという動的な操作にも適用できることを初めて示した。
- ◆ 本研究成果は、量子物理・量子化学をはじめとした量子シミュレーションの計算精度を著しく向上させるものと期待される。

演算ごとに、対称性を破るノイズを除去



対称性チェック

対称性チャネル検証法のイメージ図

概要

東京大学大学院工学系研究科の坪内 健人 大学院生、同大学大学院総合文化研究科の三橋 洋亮 東京大学特別研究員（研究当時、現・理化学研究所特別研究員）、高木 隆司 准教授、同大学素粒子物理国際研究センターの吉岡 信行 准教授らによる研究グループは、量子計算機の演算過程を表す「量子チャネル」（注 1）の対称性（注 2）を活用することで、ノイズを効率的に検出・除去する新しい手法「対称性チャネル検証法」を開発しました。これまで、対称性に基づくノイズ除去は主に量子状態（注 3）という静的な情報に対してのみ行われており、その適用範囲は限られていました。本研究では、この方法が量子チャネルという動的な演算にも適用可能であり、量子チャネルの対称性を壊すノイズを除去できることを示しました。その結果、量子計算機で取り除けるノイズの種類を大きく広げることに成功しました。本成果は、物性物理学や高エネルギー物理学、量子化学などの分野で重要となる、対称性を持つ量子系（注 4）

のシミュレーションを、完全な誤り耐性機能（注 5）を備えていない量子計算機でも実行するための有力な手法となることが期待されます。

発表内容

【研究背景】

物性物理学や高エネルギー物理学、量子化学をはじめとするさまざまな分野では、量子力学的な性質を持つ系を精密にシミュレーションすることが極めて重要です。特に、大規模な量子系の振る舞いを理解するためには、従来の計算機では限界があり、量子計算機の利用が有力な手段として期待されています。ところが、現行の量子計算機は、環境からの影響や制御の不完全さによってノイズが生じ、計算結果の信頼性が大きく損なわれてしまうという問題があります。そこで注目されているのが、対象とする量子系が持つ「対称性」を利用してノイズを検出・除去する手法です。対称性とは、物理系がある特定の操作を加えても変わらない性質を指します。計算が正しく実行されていれば対称性は保たれるため、対称性の破れが検出された場合はノイズが発生したと判断でき、その影響を取り除くことができます。しかし、これまで提案されてきた手法は、量子状態という静的な情報にしか適用できませんでした。そのため、計算全体で一貫して同じ対称性が保たれている必要があり、適用範囲や取り除けるノイズの種類が大きく制限されていました（図 1 左）。

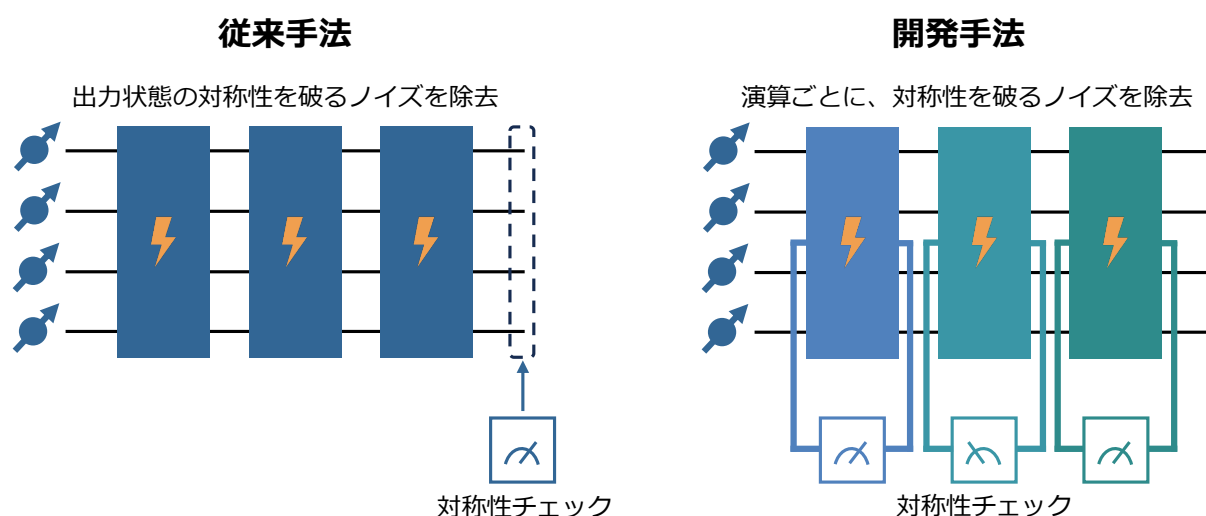


図 1：従来手法と、本研究で開発した新手法の比較

（図左）従来の手法では、計算の出力を表す量子状態だけに注目し、その状態が対称性を保っているかどうかを調べることでノイズを検出してきました。しかし、この方法は入力とその後の演算が同じ対称性を持つ場合にしか使えず、利用できる場面や取り除けるノイズの種類に大きな制約がありました。

（図右）一方、本研究で開発した対称性チャネル検証法では、量子チャネル（量子計算機における演算やゲートの過程）そのものが持つ対称性に着目し、演算ごとに対称性を壊すノイズを直接検出します。その結果、入力状態とチャネルの対称性が異なる場合や、チャネルごとに異なる対称性を持つ場合でもノイズを取り除くことができ、量子計算全体の信頼性を大きく高めることが可能になりました。

【研究内容】

本研究では、対称性を利用したノイズ除去が、量子演算や量子ゲートを含む動的な過程である「量子チャネル」にも適用できることを初めて示しました。特に、量子チャネルの対称性を

基準にして、それを壊すノイズを検出・除去する新しい方法「対称性チャネル検証法」を開発しました。この手法の大きな特徴は、量子状態そのものに依存せず、チャネルが持つ対称性だけを手がかりにノイズを取り除ける点にあります。これにより、従来の量子状態ベースの手法では扱えなかった、入力状態とチャネルの対称性が異なる場合や、チャネルごとに異なる対称性を持つ場合でもノイズ除去が可能となり（図1右）、計算の信頼性を大きく向上させることができます（図2）。さらに、この方法は、既存の量子アルゴリズムや回路にわずかな追加コストで組み込めるため、幅広い場面での応用が期待されます。また、近い将来に実現が見込まれる部分的に誤り耐性を備えた量子計算機に対しても有効であり、本手法が最適なノイズ除去法となることも示しました。

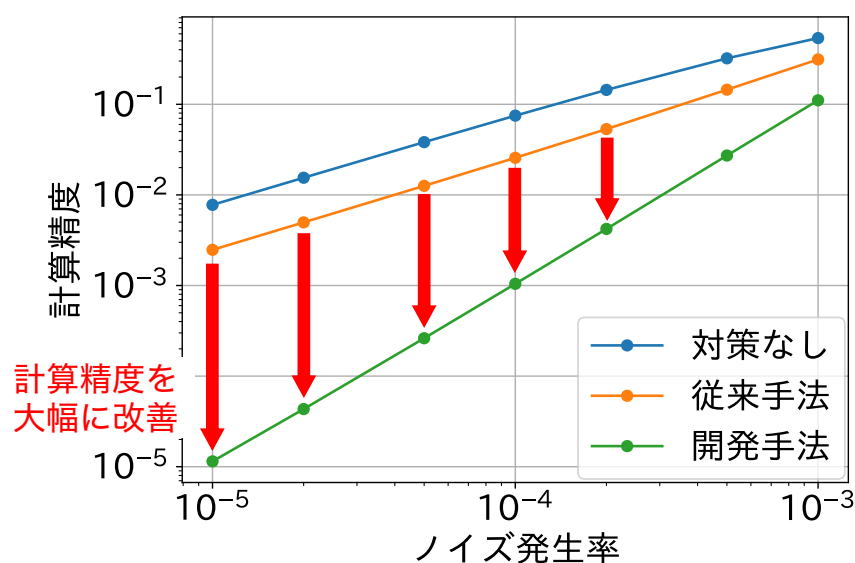


図2：従来手法と開発手法による計算精度の比較

青のプロット（対策なし）は、ノイズを検出しない場合、ノイズが増えるにつれて計算精度が大きく悪化していく様子を示しています。オレンジのプロット（既存手法：量子状態に基づく検証）では、ある程度のノイズは抑制できますが、改善の幅は限定的です。一方、緑のプロット（開発手法：対称性チャネル検証法）では、同じ条件下で計算精度が桁違いに改善されていることがわかります。特に、ノイズ発生率が低くなるほど、より大きな効果を発揮する点が特徴です。この結果は、対称性を用いて量子チャネルごとにノイズを検出・除去することが、計算全体の信頼性を大きく高めることを具体的に示しています。

【研究の意義、今後の展望】

本研究で開発した対称性チャネル検証法は、量子計算機に避けられないノイズを効率的に取り除き、計算の信頼性を高める新しい方法です。特に、物性物理学や高エネルギー物理学、量子化学の分野で扱う多くの物質は対称性を持っています。そのため、本手法を利用することで、完全な誤り耐性を備えていない近未来の量子計算機においても、高精度な量子シミュレーションを実行できることが期待されます。

発表者・研究者等情報

東京大学

大学院工学系研究科

坪内 健人 博士課程

大学院総合文化研究科

三橋 洋亮 研究当時：東京大学特別研究員（日本学術振興会特別研究員 PD）

現：理化学研究所 量子コンピュータ研究センター 特別研究員

高木 隆司 准教授

素粒子物理国際研究センター

吉岡 信行 准教授

論文情報

雑誌名：PRX Quantum

題 名：Symmetric channel verification for purifying noisy quantum channels

著者名：Kento Tsubouchi*, Yosuke Mitsuhashi, Ryuji Takagi, and Nobuyuki Yoshioka

DOI：10.1103/jcd6-lft3

URL：<https://doi.org/10.1103/jcd6-lft3>

研究助成

本研究は、JST B00ST(課題番号：JPMJBS2418)、JSPS 科研費(課題番号：JP23KJ0421、JP23K19028、JP24K16975、JP24H00943)、JST CREST(課題番号：JPMJCR23I3)、東京大学統合物質・情報国際卓越大学院（MERIT-WINGS）、IBM Quantum の支援により実施されました。

用語解説

（注 1）量子チャネル

量子計算機における量子演算の過程や量子ゲートの働きを表す概念。量子状態に対してどのような処理が行われるかを記述する。

（注 2）対称性

結晶における並進対称性や球体における回転対称性など、系がある特定の操作のもとで不変に保たれる性質のこと。例えば、正方形を 90 度回転させても形が変わらないように、物質の中には変換を行っても保たれる特徴がある。量子状態の対称性とは、ある操作を加えてもその状態が変化しないことを指す。量子チャネルの対称性とは、ある操作とチャネルの順序を入れ替えても全体の結果が変化しないことを指す。

（注 3）量子状態

量子計算機内での情報のあり方を表す概念。量子計算の入力や途中経過、出力の状態を記述するために用いられる。

（注 4）量子系

量子力学の法則に従って振る舞う物理的な対象の総称。電子や原子、分子といったミクロな粒子だけでなく、それらが集まってできる物質も含まれる。

（注 5）誤り耐性機能

量子計算機でノイズや誤りが生じて、その影響を検知・修正し、正しく計算を進めるための仕組み。将来の大規模な量子計算機の実現に不可欠とされる。

問合せ先

＜研究内容について＞

東京大学素粒子物理国際研究センター

准教授 吉岡 信行（よしおか のぶゆき）

東京大学大学院工学系研究科

博士課程 坪内 健人（つぼうち けんと）

※ご連絡の際は、吉岡准教授のメールアドレスを Cc に入れてください。

＜機関窓口＞

東京大学大学院工学系研究科 広報室