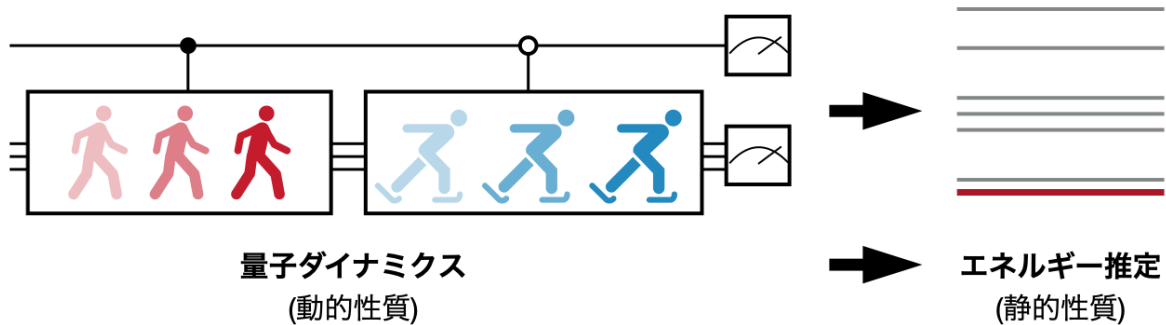


国立大学法人東京大学

動から静に変換する量子アルゴリズムを実証 ——IBM 量子プロセッサによる世界最大級のシミュレーション——

発表のポイント

- ◆超伝導量子コンピュータを用いた世界最大級の量子多体シミュレーションに成功した。
- ◆誤り耐性機能を持たない量子コンピュータでも有用性の示されている、量子ダイナミクスのための量子回路が、エネルギー推定にも活用できることを示した。
- ◆完全な誤り耐性機能が実現されるまでの期間でも、大規模な量子シミュレーションへの道を開くものと期待される。



量子ダイナミクスからエネルギーを計算する量子アルゴリズムのイメージ図

量子状態の動的な性質を干渉させることで、固有エネルギーという静的な性質を抽出している。

概要

東京大学素粒子物理国際研究センターの吉岡信行准教授（研究当時：東京大学大学院工学系研究科 助教）と IBM の研究チームは、最新の量子プロセッサである IBM Heron プロセッサを搭載した超伝導量子コンピュータを用いて、最大 56 量子ビットからなる量子多体系（注 1）のシミュレーションに成功しました。古典計算アルゴリズムの代表格の一つである「Krylov 部分空間法」は、量子物理学をはじめとして、計算科学分野で広範に用いられる強力な手法ですが、メモリ・計算量爆発が避けられないという問題を抱えています。本研究では、部分空間を量子コンピュータ上で実現する「Krylov 量子対角化 (KQD) 法」により、世界最大級のサイズで固有エネルギーのシミュレーションが可能となることを示しました。本成果は、誤り耐性のない量子デバイス上で大規模な量子多体系のシミュレーションを可能にする新たな手法として、量子計算科学の発展に貢献することが期待されます。

発表内容

【研究背景】

量子多体系のエネルギーの推定は、物性物理学、量子化学、高エネルギー物理学などの分野で重要な課題です。誤り耐性機能（注 2）を持たない量子コンピュータを用いた研究では、従来、変分量子アルゴリズム（注 3）が主に用いられてきましたが、得られる値の理論保証がなく、計算の実行回数が膨大になるため、大規模系への適用が困難でした。一方で、もし量子位

相推定法（注 4）を用いることができれば、高精度な結果が得られますが、長大な量子回路の実行が求められることから、誤り耐性のある量子コンピュータが必要となってしまいます。したがって、現在の量子コンピュータや、初期段階の誤り耐性量子コンピュータでも実行可能で、かつ高精度なエネルギー推定を可能にする新しい量子アルゴリズムが求められています。

【研究内容】

本研究では、Krylov 量子対角化（KQD）アルゴリズムを IBM Quantum の Heron プロセッサで実行し、実装の容易さと理論保証を両立できることを示しました（図 1）。具体的には、時間発展を行う量子回路を干渉させることで、最大 56 量子ビットからなる、2 次元格子上的量子多体系の固有エネルギーを計算できることを示しました（図 2）。この手法は、パラメータの最適化を必要とせず、予め設計された回路の実行と、古典的な後処理のみでエネルギー推定が可能で、かつ実行する回路の種類を増やすことで、系統的に精度を改善できます。これにより、扱うことのできる問題のヒルベルト空間次元を 100 倍以上に拡張できることが示されました。

本研究では、計算のターゲットである模型が従う対称性を活用することで、量子回路の大幅な簡素化が可能になることを活用し、回路の深さを抑えています。また、ハードウェアノイズの影響を軽減するために、最先端の量子誤り抑制技術を駆使し、実験の精度向上を実現しました。

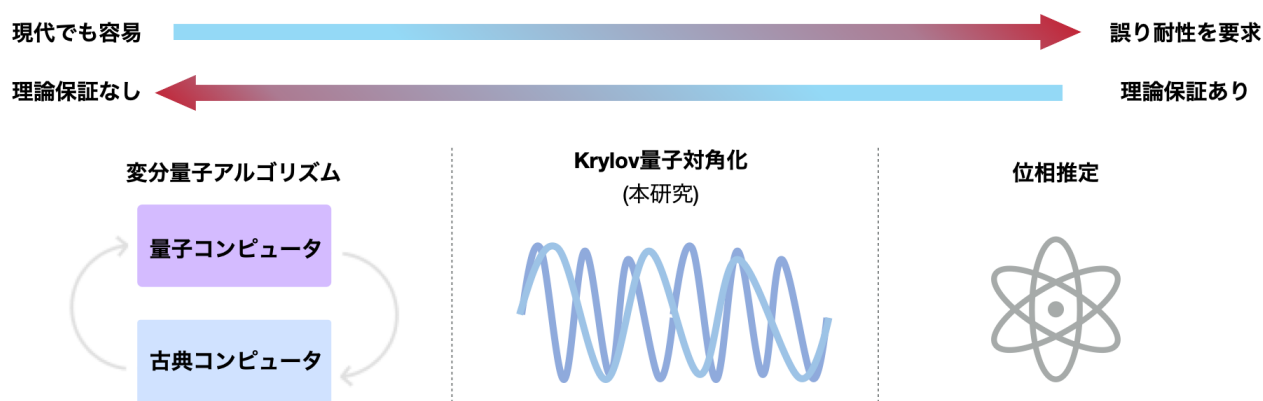


図 1：エネルギー推定を行う量子アルゴリズムの比較。

本研究で実装した Krylov 量子対角化は、実装の容易さと理論保証を兼ね備えている。

【研究の意義、今後の展望】

本研究は、誤り耐性のない現行の量子コンピュータ上で、大規模な量子多体系の固有エネルギーを高精度に推定する手法を新たに実証した点で、意義深いものです。KQD アルゴリズムは、パラメータ最適化を必要としないため、今後の量子計算科学における有力な手法となることが期待されます。また、物性物理学だけでなく、量子化学や高エネルギー物理を含めた多くの分野において、より大規模な系のシミュレーションへの応用が見込まれます。

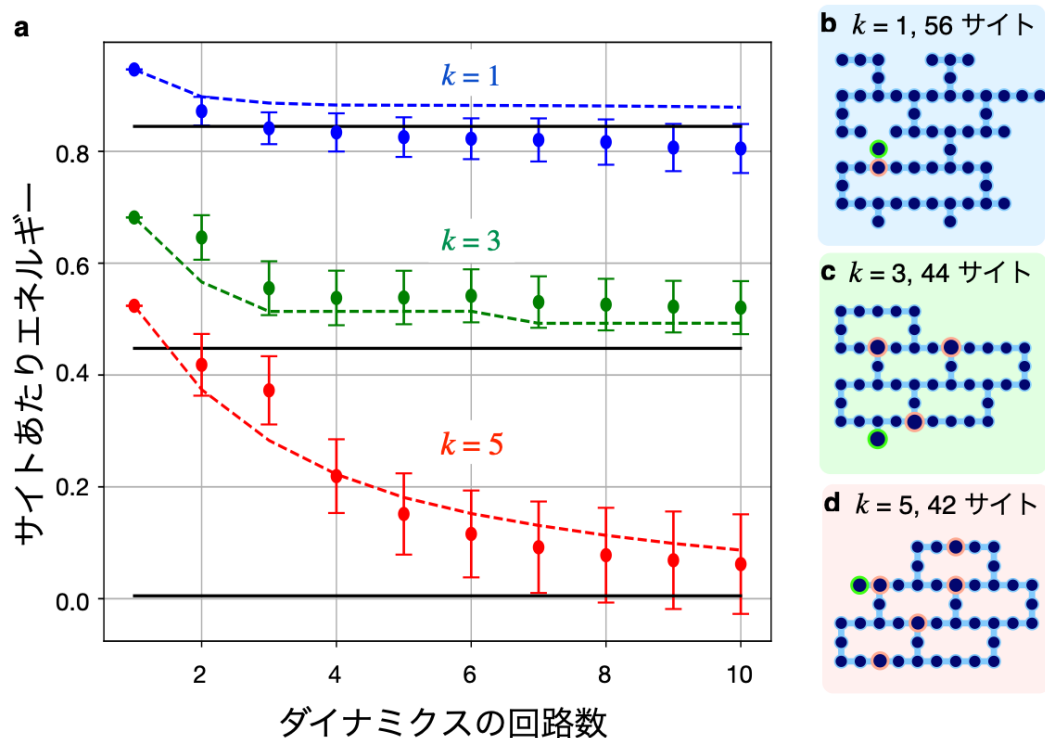


図 2 : Krylov 量子部分空間法によるエネルギーの推定結果。

パネル b, c, d に示された量子多体模型における粒子数対称性を活用し、全体で $k=1, 3, 5$ 個の粒子が存在する時の最低固有エネルギーが計算された。

○関連情報：

IBM Blog: Welcome to the Quantum Advantage Era (以下リンクにて公開予定)

<http://ibm.com/quantum/blog/quantum-advantage-era>

発表者・研究者等情報

東京大学 素粒子物理国際研究センター

吉岡 信行 准教授

研究当時：東京大学大学院工学系研究科 助教

IBM Quantum

Mirko Amico 博士

Will Kirby 博士

Antonio Mezzacapo 博士

論文情報

雑誌名 : Nature Communications

題 名 : Krylov Diagonalization of large many-body Hamiltonian on a quantum processor

著者名 : Nobuyuki Yoshioka*, Mirko Amico*, William Kirby*, Petar Jurcevic, Arkopal Dutt, Bryce Fuller, Shelly Garion, Holger Haas, Ikko Hamamura, Alexander Ivrii, Ritajit Majumdar, Zlatko Minev, Mario Motta, Bibek Pokharel, Pedro Rivero, Kunal Sharma, Christopher J. Wood, Ali Javadi-Abhari, Antonio Mezzacapo

DOI: 10.1038/s41467-025-59716-z

URL: <https://www.nature.com/articles/s41467-025-59716-z> (日本時間 6 月 24 日 18 時 (英国夏時間 : 24 日午前 10 時) 公開)

研究助成

本研究は、IBM-UTokyo ラボの支援により実施されました。

用語解説

(注 1) 量子多体系

量子力学の原理に従って運動する多くの粒子が相互作用するような対象のこと。

(注 2) 誤り耐性機能

計算中に発生した誤りを取り除く機能のこと。誤り耐性機能を持つ量子計算のことを、「誤り耐性量子計算」と呼ぶ。

(注 3) 変分量子アルゴリズム

量子回路の出力が所望の目的に沿うように、ゲート操作に付随するパラメータを更新するようなアルゴリズムのこと。

(注 4) 量子位相推定法

量子回路を実行した状態と実行しない状態を重ね合わせて干渉させることで、印加される量子位相を読み取るアルゴリズムのこと。

問合せ先

(研究内容については発表者にお問合せください)

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)

Tel : 03-3815-8384 E-mail : nyoshioka@g.ecc.u-tokyo.ac.jp

東京大学 産学協創部

E-mail : kyoso-info.adm@gs.mail.u-tokyo.ac.jp