

令和 8 年 2 月 20 日

量子コンピュータを用いた高精度原子核構造計算の実現 － 核物理シミュレーションの新たな時代へ －

宇都宮大学 データサイエンス経営学部 吉田 聡太准教授（理化学研究所（理研） 仁科加速器科学研究センター 核子多体論研究室 上級研究員）、東京大学工学系研究科原子力国際専攻 佐藤 健准教授、同大学大学院生 緒方 拓巳さん、理研仁科加速器科学センター 核子多体論研究室 木村 真明室長らの共同研究グループは、理研に設置されている Quantinuum 社製イオントラップ型量子コンピュータ「黎明」を用いて、酸素・カルシウム・ニッケル同位体の高精度な基底状態推定を実現しました。本研究の成果は、2026 年 2 月 6 日に American Physical Society が発行するオープンアクセスの物理学総合誌である Physical Review Research 誌に掲載されました。

■ 研究の背景と意義

原子核の構造と反応の理解は、物質の起源や宇宙の進化を解明する上で不可欠です。その一方で、量子多体系のシミュレーションは、粒子や自由度の数が増えるにつれて計算量が爆発的に増大し、古典計算機では扱いきれない問題を数多く抱えています。とくに、核子間に働く核力が複雑で強い相互作用であることから、原子核物理学における多体系問題は計算困難な課題として知られています。近年、量子コンピュータが量子多体系のシミュレーションに対する有望なアプローチとして注目を集めており、物性物理や量子化学が対象とするスピン系や電子系に対する量子シミュレーションの研究は盛んに報告されている一方で、原子核物理学への応用例は限定的でした。

本研究では、理研和光キャンパスに設置されたイオントラップ方式の量子コンピュータ「黎明」を用いて、酸素・カルシウム・ニッケル同位体の高精度な基底状態推定を実現しました。イオントラップ方式の高いゲート精度に加え、系の特性を考慮した量子回路の設計と誤り低減法を組み合わせることで、上記の幅広い同位体にわたり基底状態エネルギーにして 0.1%オーダーでの高精度な基底状態エネルギー推定を達成しています。

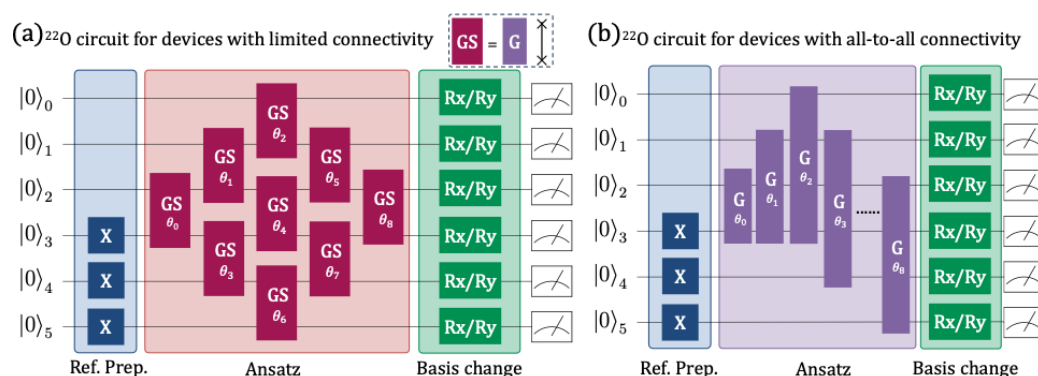


図 1. ^{22}O 同位体の基底状態推定に用いた状態作成回路の模式図

(a) 近接量子ビット間の演算に限定した回路 (b) 全結合量子ビットを仮定した回路

図1は、偶数核子からなる原子核を少ない量子ゲートで効率的に表現するための ansatz(状態作成回路)の概略図です。本研究では、(b)の全結合型の量子ビットに対する演算を可能とするイオントラップ型量子コンピュータを用いていますが、ハミルトニアン各项の期待値をエラー低減しつつ効率的に測定するために、最近接結合型の量子ビットに対する演算を基本とする(a)の ansatz を用いて実機での測定を行っています。

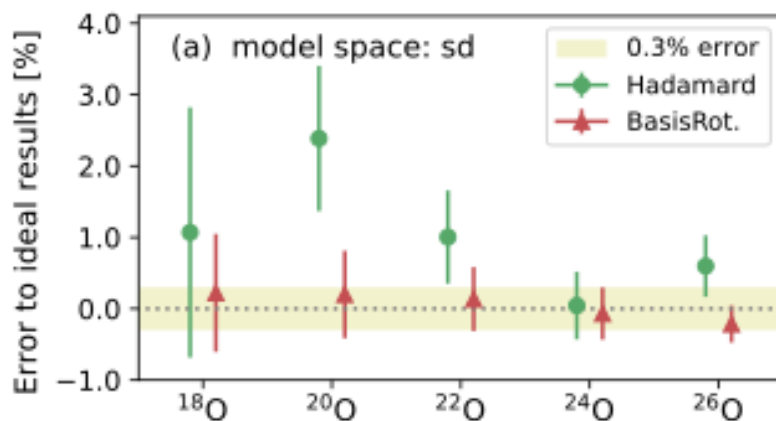


図2. 酸素同位体に対する「黎明」による測定結果

上の図2には、実際に「黎明」を用いて得られた、酸素同位体の基底状態エネルギー推定の結果を示しています。縦軸は、ノイズのない理想的な結果に対する誤差を表しています。今回対象としたハミルトニアンは1体項・2体項からなり、エネルギーを推定するためには、それらの各項の期待値を複数の量子回路を用意して測定する必要があります。今回は、異なる2つの方法を採用して「黎明」で測定を行いました。一つは、追加で必要な量子回路の数が最小となるものの、1体項のみにエラー低減が適用可能な方法で、図の緑色で示されています。もう一方が、余剰で必要な量子計算機のリソースは多くなるものの、1体項だけでなく2体項についてもエラー低減が可能な方法で、図中、赤の三角で示されています。後者の結果に注目すると、いずれの同位体においても、0.1%程度の高精度な計算を達成していることがわかります。現状のNISQと呼ばれる量子コンピュータを用いて、これだけの高精度で核子系の量子計算を達成した例は初めてです。

この成果は、量子コンピュータが原子核の理論計算における新たな計算基盤となり得ることを示す重要な一歩であり、量子計算と基礎物理学の融合を加速させるものです。

■ 補足説明

- ・ **同位体:** 同じ元素でありながら、中性子数が異なる原子核のこと。例えば、酸素には8個の陽子を持つ同位体が複数存在し、中性子数が8個の ^{16}O 、中性子数が10個の ^{18}O 、中性子数が14個の ^{22}O などがある。
- ・ **基底状態:** 量子力学における系のエネルギーが最も低い状態。原子核の基底状態は、その安定性や反応性を理解する上で重要な情報を提供する。
- ・ **ハミルトニアン:** 量子系の性質を記述する演算子であり、系のエネルギーや時間発展を決定する。
- ・ **NISQ:** Noisy Intermediate-Scale Quantum の略。現在の量子コンピュータは、量子ビット数

やゲートの精度に制限があり、これらの制約下で動作する量子コンピュータを指す。

- ・ **イオントラップ型量子コンピュータ**: 電磁場を用いてイオン(荷電粒子)を閉じ込めて保持し、量子ビットとして利用する方式の量子コンピュータ。高精度な量子ゲート操作が可能であるという利点がある。
- ・ **黎明**: 理化学研究所和光キャンパスに設置された、Quantinuum 社のイオントラップ型量子コンピュータ。

注) 2025 年 2 月 12 日お知らせ「量子コンピュータ『黎明』が理化学研究所で本格稼働、量子ハイブリッド高性能コンピューティング新時代を切り拓く」

https://www.riken.jp/pr/news/2025/20250212_1/

- ・ **エラー低減**: 現状の NISQ では量子ゲートの精度に限りがあるため、量子計算機で計算して得た結果から、誤差(エラー)を低減する方法の適用が不可欠となる。
- ・ **1 体項・2 体項**: ハミルトニアンを構成する項のうち、1 体項は単一の粒子に作用する項、2 体項は 2 つの粒子の相互作用を表す項を指す。

■ 研究支援

本研究は、科学研究費助成事業 (JP22K14030、JP25H01511、JP25K01688)、JST 戦略的創造研究推進事業 さきがけ (JPMJPR25F8)、JST ERATO (JPMJER2304)、JST COI-NEXT(JPMJPF2221)、文部科学省量子科学技術研究開発推進事業 Q-LEAP (JPMXS0118067246) によって一部支援されました。また、本研究は、NEDO (国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構) の「ポスト 5G 情報通信システム基盤強化研究開発事業 (JPNP20017)」の委託事業「計算可能領域の開拓のための量子・スパコン連携プラットフォームの研究開発 (研究代表者: 佐藤三久)」、および理研 TRIP イニシアティブ (ユースケース元素変換) の一環として行われています。

■ 原論文情報

Sota Yoshida, Takeshi Sato, Takumi Ogata, Masaaki Kimura: "Bridging quantum computing and nuclear structure: Atomic nuclei on a trapped-ion quantum computer" Phys. Rev. Research 8, 013134 (2026) <https://doi.org/10.1103/td9s-z7my>

[PRESS RELEASE]



■ 本件に関するお問い合わせ先

(研究内容について)

国立大学法人 宇都宮大学 データサイエンス経営学部 准教授

国立研究開発法人理化学研究所 仁科加速器科学研究センター 上級研究員

吉田 聡太

E-mail: syoshida@cc.utsunomiya-u.ac.jp

(報道対応)

国立大学法人 宇都宮大学 広報・渉外係

TEL:028-649-5201

E-mail: kkouhou@a.utsunomiya-u.ac.jp

理化学研究所 広報部 報道担当

Tel: 050-3495-0247

Email: ex-press@ml.riken.jp