

2024 年度年次報告書

量子・古典の異分野融合による共創型フロンティアの開拓

2023 年度採択研究代表者

山内 薫

東京大学 アト秒レーザー科学研究機構
特任教授

イオントラップ qudit-boson 型量子演算の実現

主たる共同研究者：

沖野 友哉（理化学研究所 最先端研究プラットフォーム連携 (TRIP) 事業本部 研究員）

立川 豊（DIC(株) R&D 統括本部 ）

2024 年度 研究成果の概要

(1) 山内グループの理論部門では、昨年に引き続き量子アルゴリズムの開発と量子シミュレーションを進め[1]、qubit を用いるよりも qudit を用いた方が効率的に量子シミュレーションを行うことができる量子系を探索した。「スピン量子数 S が $1/2$ より大きいスピン鎖」と「分子振動」を対象とした。「スピン量子数 S が $1/2$ より大きいスピン鎖」については、効率的な qubit エンコーディングを用いれば、qudit の場合と同等のパフォーマンスを持つことが示された[2]。「分子振動」については、予備的な量子シミュレーションの結果、qudit を用いたハミルトニアンがコンパクトな形を持つことを反映し、qudit を用いた場合の方が qubit を用いた場合よりも優れたパフォーマンスを持つことが示された。

また、イオンの局所振動モードを用いた連続量型エンコーディングにおいては、エンタングルメントがイオン間のクーロン相互作用によって生成されてしまうという問題、つまり、エンタングルメントのオンとオフを切り替えられないという問題を解決するために、位相シフトゲートを用いてクーロン相互作用を相殺し、実質的にオンとオフを切り替えられるエンタングルメント生成法を理論提案した[3]。この手法に基づくシミュレーションには、高精度な時間依存シュレーディンガー方程式ソルバーが必要となる他、GKP 状態などを用いる量子状態シミュレーションは計算コストが高いことから、計算の高効率化が必要となる。そこで、行列積状態(matrix product state: MPS)を用いた時間依存変分原理(time-dependent variational principle: TDVP) 法 (MPS-TDVP 法) を実装した。

(2) 沖野グループでは、山内グループの実験部門とともに、 $^{40}\text{Ca}^+$ を用いた qudit 系イオントラップ型量子コンピューター (qudit-TIQC) の開発を進めた。リニア Paul トラップと Ca オープンを設置した超高真空チェンバーを立ち上げ、423 nm と 375 nm のレーザー光を用いて Ca オープンから噴出した Ca 原子をイオン化した。リニア Paul トラップの DC 電極と RF 電極に適切な電圧を印加し、Ca イオンをトラップしたのち、397 nm レーザーを照射しドップラー冷却を実施した。蛍光信号は、qCMOS カメラを用いて蛍光画像として観測するとともに、PMT を用いて積分信号として取得可能とした。PMT の信号をシングルフォトンカウンターで計数し、単位時間あたりの蛍光数を計測可能とした。蛍光強度の RF 位相依存性を最小化することによって余剰マイクロモーション補正を行うなど、トラップ条件最適化の準備が整った。また、電源高調波ノイズの低減のため、自動電圧制御装置 (AVR) を導入し、qudit-TIQC に関わる全装置の電源を AVR から供給とした。

(3) 立川グループでは、昨年度に引き続き qudit を用いたイオントラップ型量子コンピューター (qudit-TIQC) の社内材料開発への適用課題についての調査および議論を行った。フォトン・アップコンバージョン材料の三重項-三重項消滅機構では、3 つ以上の励起状態が関与し、かつ複数の分子間での状態遷移が起こるため、その三重項-三重項消滅機構を qudit を利用した量子回路によって計算する方針とした。さらに、励起移動過程においてドナー分子からアクセプター分子への直接の励起エネルギー移動だけでなく、Bridge 分子を介した励起エネルギー移動を考慮すると、ドナー分子、アクセプター分子、Bridge 分子の 3 状態の励起子状態を扱う必要があるため、このドナー・Bridge・アクセプター系も qudit 適用に適したシステムであることが示された。また第四半期において昨年導入したものと同規模の量子計算検証用の計算機サーバーを購入し、稼働に必要なシステムのインストールを行い運用可能な状態とした。

【代表的な原著論文情報】

- [1] E. Lötstedt, T. Nishi, and K. Yamanouchi, “Simulation of time-dependent quantum dynamics using quantum computers,” *Adv. At. Mol. Opt. Phys.* **73**, 33-74 (2024).
- [2] E. Lötstedt and K. Yamanouchi, “Comparison of encoding schemes for quantum computing of $S > 1/2$ spin chains,” arXiv:2502.18838 (2025).
- [3] T. Nishi, K. Yamanouchi, R. Saito, and T. Mukaiyama, “Cancellation of phonon hopping in trapped ions by modulation of the trap potential,” *Phys. Rev. A* **111**, 022401 (2025).