

革新的な量子情報処理技術基盤の創出  
2021 年度採択研究代表者

2022 年度  
年次報告書

桑原 知剛

理化学研究所 開拓研究本部  
白眉チームリーダー

量子多体理論を用いた量子計算機の高速度アルゴリズムの開発

## 研究成果の概要

今年度はボソン系の Lieb-Robinson 限界を解決することに注力した。この問題は 15 年以上にわたる未解決問題であり、さきがけ研究員就任にあたって大きな目標の一つであった。今年度はこの問題に終止符を打ち、論文にまとめることができた。この結果により、Quantum Information Processing の国際会議における口頭発表にもアクセプトされた。

多体物理学の基本原理は因果関係であり、光円錐の外側への情報伝播を厳密に禁止している。しかし、非相対論的な系では、このような光円錐が精密に定義できるかどうかはしばしば不明瞭である。1972 年の Lieb と Robinson の有名な研究によって、情報量は有効光円錐で制限され、いわゆる “Lieb-Robinson 限界” で特徴づけられることが明らかになった。過去 50 年の中で、Lieb-Robinson 限界は様々な量子シミュレーションアルゴリズムの精度誤差や、低温(あるいは絶対零度)状態での量子もつれの数学的構造にアクセスする上で重要な概念として理解されてきた。しかし、Lieb と Robinson による初期の研究とそれに続く一般化は 2 つの条件、すなわち、i) 相互作用の短距離性と ii) 局所エネルギーが有限である系に限定されていた。これらの条件が崩れることは、現実的な実験系(例:冷原子系)をはじめとして数多くの物理系で存在するが、このような場合の情報伝播の速度限界は極めて非自明である。特に、後者の条件(ii)の破れは、長年にわたる先行研究にもかかわらず、いまだほとんど解明されていないというのが現状であった。相互作用のノルムが局所的に上界を持たない場合、Lieb-Robinson 限界を証明するための多くの解析ツールが破綻してしまう。これらのことは、これらの系における Lieb-Robinson 限界の普遍的な構造を理解する上での大きな障害となっていた。

本研究の成果は 2 点に要約される。第一の主要な成果として、相互作用するボソン系の最適な光円錐を特定し、精度保証付きでダイナミクスをシミュレートするためのゲート複雑性を解明したことである。第二に、従来の予想に反して、我々の結果は情報伝播に関するボソンとフェルミオンの間の顕著な違いを解明した。より具体的には、ボソン系特有の現象として情報伝播の加速が起こることを実証した。このような加速は簡単なプロトコルで実験的に観測することができると期待している。

### 【代表的な原著論文情報】

- 1) T. Kuwahara, K. Saito, “Exponential clustering of bipartite quantum entanglement at arbitrary temperatures,” *Physical Review X* 12 (2), 021022 (2022)
- 2) T. Kuwahara, T. Van Vu, K. Saito, “Optimal light cone and digital quantum simulation of interacting bosons,” arXiv preprint arXiv:2206.14736, presented in 26th Conference on Quantum Information Processing (QIP2023)