

2023 年度年次報告書

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

本多 正純

理化学研究所 数理創造プログラム

上級研究員

初期宇宙解明に向けた量子アルゴリズム開発基盤の創成

研究成果の概要

2023 年度は本研究領域に関連するプロジェクトについて、1 本の原著論文および 2 本の国際会議プロシーディングスを発表し、2 件の集中講義・11 件の招待講演・2 件の一般公演・1 件のアウトリーチ活動を行った。

論文¹⁾では、トーリックコードをフラクトン的な意味で一般化した格子模型に対して、低エネルギーで対応する場の量子論を提案した。これはトーリックコードと BF 理論と呼ばれる位相的場の理論の間の関係を、エニオンの運動の仕方が制限されるように拡張したものである。この拡張では、格子模型に対応する場の量子論はもはや完全に位相的な場の理論ではなく、**foliated BF 理論**と呼ばれる部分的に位相的な場の理論のクラスに対応することが明らかになった。フラクトンに関連する格子模型は基底状態の縮重度が大きなものが多く、この研究成果は今後新たな誤り訂正符号の開発に役立つ可能性があると考えられる。この方向性の研究は当初の研究計画にあったものではないが、さきがけ研究課題を始めてから領域会議などにより量子情報についての知見が広がったおかげで疑問に思ったことをきっかけに始めたものである。

プロシーディングス²⁾は、1次元量子電磁気学におけるエネルギースペクトルの量子計算法に関して、国際会議 **Lattice 2023** で行った発表に基づいたものである。この理論ではトポロジカル項が大きいとき、素粒子論分野において通常用いられるモンテカルロ法による解析が符号問題により困難になることが知られている。そこで我々は、基底状態に対して適切な周波数を持った周期的な摂動を加えて、他の状態への転移を見ることで、古典シミュレータにより励起エネルギーの値を見積もる数値シミュレーションを行った。

プロシーディングス³⁾は、3次元 **SU(2)** ヤン・ミルズ理論の相構造の数値解析に関して、国際会議 **Lattice 2023** で行った発表に基づいたものである。具体的にはモンテカルロ法による数値的な結果と理論的な議論により、非閉じ込めと空間反転対称性の自発的破れが共存した相の存在を示唆する結果を得た。このような現象を直接検証するには符号問題を回避する手法が必要となるため、今後3次元ゲージ理論を量子計算機に乗せる有効な手法を探索していく。

【代表的な原著論文情報】

- 1) H. Ebisu, M. Honda and T. Nakanishi, "Foliated field theories and multipole symmetries," *Phys. Rev. B* 109, no.16, 165112 (2024) [doi:10.1103/PhysRevB.109.165112]
- 2) D. Ghim and M. Honda, "Digital Quantum Simulation for Spectroscopy of Schwinger Model," *PoS LATTICE2023*, 213 (2024) [doi:10.22323/1.453.0213]
- 3) M. Hirasawa, K. Hatakeyama, M. Honda, A. Matsumoto, J. Nishimura and A. Yosprakob, "Determination of the CP restoration temperature at $\theta=\pi$ in 4D SU(2) Yang-Mills theory through simulations at imaginary θ ," *PoS LATTICE2023*, 193 (2024) [doi:10.22323/1.453.0193]