

# 令和3年度 未来研究ラボシステム 研究成果報告書

研究種目：個人研究

研究期間：令和3年10月～令和4年9月

研究課題名：SU(4)ハイゼンベルク模型の基底状態の解明

ラボ長

所属：物性物理工学

氏名：山田昌彦

## 研究成果：

当初の研究計画は、「二次元密度行列くりこみ群法(DMRG)のコードを実装し、それを用いてハニカム格子上のSU(4)ハイゼンベルク模型の基底状態を完全に解明する」というものであったが、当初の研究計画そのものはほぼ完全に達成し、複数の国内会議で発表した。現在投稿論文を準備中であり、近々国際雑誌に投稿予定である。

得られた研究成果は以下の通りである。 $\alpha$ -ZrCl<sub>3</sub>で実現することが期待されているハニカム格子上のSU(4)ハイゼンベルク模型についてDMRGの計算を行い、基底状態を精密に得ることに成功した。当初の計画に匹敵する400サイトのサイト数の数値計算を幅12サイトまで行い、また、ボンド次元が130万を超える二次元DMRGとしては世界記録レベルの計算に成功した。基底状態はほぼ厳密にギャップト量子スピン液体となることを確認し、そのトポロジカル相を特定するためのトポロジカル・エンタングルメント・エントロピーを観測できた。得られたトポロジカル・エンタングルメント・エントロピーはZ<sub>4</sub>スピン液体から予測される値とほぼ一致し、SU(4)ハイゼンベルク模型がZ<sub>4</sub>スピン液体を実現することを初めて明らかにした。これはアンダーソンの約50年前の予想に肯定的な解決を与える結果であり歴史的意義の大きいものであると考えている。

まだ半年という短い期間しかたっていないが、当初の予定以上に早く計画が進んだことで、いくつか予算の使い道を当初の予定から変更している。まず、当初の研究計画では阪大サイバーメディアセンターのスーパーコンピューターSQUIDのポイントを購入する予定であったが、これは不要となった。来年度より東京大学物性研のスーパーコンピューターに新しくGPU搭載ノードが追加されることになったためである。物性研のスパコンは無料で使うことができ、この発表によりSQUIDのポイント購入が不要となったことで、予算に余裕ができ自由にに使わせていただくことができた。

予算の使い道としては、研究室の計算機用にSSDを追加購入した他、研究のあらゆる場面で必要となるMathematica 13を新たに購入した。また、本研究は国際共同研究でもあり、共同研究者のミュンヘン工科大学Frank Pollmann教授、ウィグナー物理学研究センターKarlo Penc教授を訪ねるため、ドイツ・ミュンヘンを訪問した。ドイツ訪問は大変有意義であり、これによりすでに出ていた一連の結果を論文としてまとめる準備ができたと言える。

また、来年度5月に国際オンラインワークショップAsian-European workshop on “SU(N) physics in condensed matter and cold atoms”を開催予定であり、そのための準備も進めている。共同主催者のGeorge Jackeli博士、Karlo Penc教授、Frédéric Mila教授と緊密に連携を取り、厳しい国際情勢の中オンライン国際会議を成功させるために日々努力している。

結論としては、当初予定していた研究計画が前倒しで達成できたために、国際ワークショップ

をはじめとする、様々な方向性に未来ラボの対象を展開しており、全体として予定されていた以上の成果を上げられていると考えている。特に、今回未来ラボの支援で計画している国際ワークショップは、今後の未来ラボの個人研究のさらなる展開へとつなげるための情報収集にも役立つと思われ、来年度の予算の使途としても適切なものであると考えている。

キーワード：SU(4)、量子スピン液体、量子スピン軌道液体、密度行列くりこみ群

#### 研究経費（R3年度）の内訳

備品費	消耗品費	旅費	謝金	その他	合計
294,960 円	0 円	205,040 円	0 円	0 円	500,000 円

#### 共同研究者等

(1) 共同研究者（氏名・所属）

特になし

(2) 研究協力者（氏名・所属・学年（学生の場合））

特になし

#### 発表論文等（令和4年3月31日現在）

〔雑誌論文〕（査読なし）

1. Masahiko G. Yamada and Satoshi Fujimoto, “Thermodynamic signature of the SU(4) spin-orbital liquid and symmetry fractionalization from the Lieb-Schultz-Mattis theorem” arXiv:2111.14470 (2021).

〔著書〕 特になし

〔学会発表〕

1. 日本物理学会年次大会

山田昌彦、Karlo Penc、Frank Pollmann 「トポロジカル Z<sub>4</sub> スピン液体における分数化の証拠」  
オンライン開催（2022年3月）

2. オンライン CMT セミナー

山田昌彦 「ハニカム格子上のトポロジカル Z<sub>4</sub> スピン液体」 オンライン開催（2022年3月）

〔その他〕 特になし

#### 外部資金獲得状況・申請状況

日本学術振興会・科研費（若手研究）「SU(N)ハイゼンベルク模型の相図の解明」採択

#### 参考となるHP等

開催予定の国際ワークショップのHP

<https://mgyamada.github.io/sun2022/>