

平成 30 年 6 月 27 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K05211

研究課題名(和文) 強相関トポロジカル相における量子エンタングルメントと創発的自由度の研究

研究課題名(英文) Study on quantum entanglement and emergent degrees of freedom in strongly-correlated topological phases

研究代表者

戸塚 圭介 (Totsuka, Keisuke)

京都大学・基礎物理学研究所・准教授

研究者番号：80291079

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：フランスのグループとのここ数年の冷却SU(N)フェルミオン系に関する共同研究の成果をまとめたレビュー論文を執筆し、最終年度には2重井戸光格子を用いる現実的なセッティングで空間反転対称性を自発的に破る新たなSPT相を実現する方法を提案した。また太田氏等と、一次元のマヨラナ端状態を持つトポロジカル相における秩序変数、エンタングルメントなどのダイナミクスを調べた。結合ワイヤ構成法については、初めて正しくバルクの非自明な状態を表すChern-Simonsゲージ理論が創発されることを示した。さらに、2次元の任意の可換群の構造を持つトポロジカル状態を実現するレシピを発見した。

研究成果の概要(英文)：We have summarized the outcome of the Japanese-French collaboration on SU(N) cold fermion systems in these several years in a review article published in Annals of Physics. Also in July of 2016, the Japanese-French team organized a small project-oriented workshop on SU(N) magnetism and started many projects. In 2017, they proposed a realistic way of realizing a new type of symmetry-protected topological (SPT) phases that spontaneously break inversion symmetry in a double-well optical lattice. Together with Takumi Ohta, who is a former student, we investigated dynamical properties of order parameters and entanglement in fermionic SPT phases characterized by emergent Majorana edge modes. Concerning the coupled-wire construction (CWC) of 2,3D topological phases, Imamura and Totsuka succeeded in showing the Chern-Simons gauge theory is correctly reproduced in CWC. They also provided a recipe of constructing generic 2D Abelian topological phases using CWC.

研究分野：量子磁性、強相関電子系

キーワード：トポロジカル相 冷却原子気体 エンタングルメント SU(N)対称性 分数量子ホール効果

1. 研究開始当初の背景

2014年頃までにトポロジカル相、特に、特定の対称性によってそのトポロジカルな性質が護られる「symmetry-protected topological (SPT)相」の研究が、トポロジカル絶縁体・超伝導体のような弱相関係のみならず、相互作用が本質的に効いてくる強相関係においても飛躍的に進んだ。しかし、対称性から理論上可能なトポロジカル相を数え上げる「分類理論」の方面では大きな進展が見られ、そこで見出された相のあるものを実現する非常に技巧的なモデルの提案などもあるものの、実現可能なセッティングでのトポロジカル相の提案はあまりなかった。このため、提案されているトポロジカル相の実現、実験的検証のためにも、現実的なセッティングでの実現方法の理論的提案が待たれる状況であった。

2. 研究の目的

上のような状況を鑑み、本研究課題ではまず、従来のくりこみ群やオーダーパラメータに基づくアプローチと量子情報的アイデアに基づく手法を組み合わせた複合的アプローチで、光格子中のアルカリ土類金属元素などの強相関 SU(N)冷却原子系の相構造を解明することを目指した。もう一方で、非自明な2次元、3次元のトポロジカル状態やその非自明なエンタングルメントの構造を、より素性のはっきりしている一次元系を連結することにより、物理的なやり方で詳しく理解する方法論(結合ワイヤ構成法)を確立することも目指した。

3. 研究の方法

冷却原子の課題については、一次元量子系でスタンダードなボゾン化法などくりこみ群を組み合わせた方法、強結合展開に加え、密度行列くりこみ群(DMRG)などの数値手法、iTEBDのような量子情報論的な数値手法も活用した複合的アプローチを行った。結合ワイヤ構成法では、基本となるボゾン化法に加え、Chern-Simons ゲージ理論などに関する知見をフルに活用した。

4. 研究成果

フランスのグループと共同で、冷却 SU(N)フェルミオン系において実現される絶対零度相、特に近年注目を集めている「対称性に護られたトポロジカル相」についての研究を行った。特に、SU(N)以外に、粒子の内部自由度、軌道自由度などの付加的な対称性がある場合の SU(N)冷却フェルミオン系の性質について、場の理論、強結合展開などの解析的手法に加えて、DMRG、iTEBDなどの数値的手法を組み合わせて詳細に調べ、基底状態の相図を完成させた。その結果、パラメータ空間の広い領域にわたって対称性に護られたトポロジカル相が実現しており、十分な冷却温度が得られればトポロジカル相が実現される可能性が十分にあることを示した(Bois et

al., 2015)。これらの一連の冷却 SU(N)フェルミオン系に関する共同研究の成果をまとめたレビュー論文を執筆した(Capponi et al., 2016)。さらに、2016年夏には、このチームが主体となって京大基研において、本科研費補助金も一部投入して、国内外の SU(N)系の理論・実験の第一線研究者を10数名集めた2週間の小規模なワークショップを開催し、新たな共同研究プロジェクトを発足させた。また2017年には、従来冷却原子では実現する方法が知られていなかった空間反転対称性を自発的に破る SPT 相についても、2重井戸型の光格子を用いた現実的なセッティングで実現する方法を提案した(査読中)。

磁場中で実現するさまざまなトポロジカル相については、一次元の SPT 相に関するものと、二次元の真性トポロジカル相に関するものの2つの問題について取り組んだ。一次元の SPT 相については、以前田中秋広氏と共同で開発した方法を拡張することで、磁場中の一次元の SPT 相についても幾何学的位相の効果を取り込んだ理論が構成できること、また、スピン量子数と磁化の値の差の偶奇に応じて SPT 相の性質を示すプラトー状態とそうでないプラトー状態の2つが可能であることを示した(Takayoshi et al., 2015)。二次元の磁場中真性トポロジカル相の可能性は、以前の田中秋広氏との共同研究の中で場の理論に基づいた議論により指摘されていたが、今回、微視的模型に関する強結合展開、量子モンテカルロ計算を行った。その結果、カゴメ格子上の拡張されたスピン-1/2 反強磁性体の磁化 1/6 の所に現れるプラトーで、トポロジカル縮退など予想される性質を持つトポロジカルな Z_2 スピン液体状態が実現しうることを示した(Plat et al., 2015)。また、SPT 相における量子ダイナミクスについては、当時大学院生であった太田氏等と共同で、マヨラナ端状態を持つフェルミオン SPT 相の秩序変数、エンタングルメントのダイナミクスについて調べ、相互作用の時間変化により励起された(Bogoliubov)準粒子がエンタングルメント構造などに大きく影響することを見出した(Ohta et al., 2015, 2016)。

2006年にKitaevにより提案された蜂の巣格子上の異方的スピン 1/2 模型(Kitaev 模型)は、分数化した励起(マヨラナフェルミオン)を持つスピン液体状態を厳密に実現できるユニークな模型であるが、4d、5d 遷移金属化合物で実験的な候補物質がいろいろ提案されていることもあり関心を集めている。似たような軌道の空間配置に起因する異方的スピン模型は三角格子系でも理論的、実験的に見つかっているが、これらについて2次元 DMRG を用いた大規模数値計算により基底状態相図を完成させた(Shinjo et al., 2016)。結合ワイヤ構成法は、理論的によくわかっている一次元のギャップを持たない模型を適

当な鎖間相互作用で結合することにより、非自明な 2 次元、3 次元のトポロジカル相を実現する処方箋である。この分野のこれまでの研究は基本的に境界に現れる端状態にのみ注目して、系の内部にバルクの非自明な状態が正しく発現しているかは調べられていなかった。今回、大学院生の今村氏と共同で、強結合極限での残留自由度を子細に調べることにより、実際に結合ワイヤ構成法において分数量子ホール状態などの有効理論として知られている Chern-Simons ゲージ理論が創発されることを示した。またその方法を拡張し、2 次元の任意の可換なトポロジカル状態を、結合ワイヤ構成法で実現するレシピを発見した（投稿準備中）。

5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕(計 8 件)

T. Ohta, S. Tanaka, I. Danshita, and K. Totsuka, “Phase Diagram and Sweep Dynamics of a One-Dimensional Generalized Cluster Model”, Journal of Physical Society of Japan, 査読有、84 巻、2015、063001-1-4, <http://dx.doi.org/10.7566/JPSJ.84.063001>

S. Takayoshi, K. Totsuka, and A. Tanaka, “Symmetry-protected topological order in magnetization plateau states of quantum spin chains”, Physical Review B, 査読有、87 巻、2015、045107, <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevB.87.045107>

X. Plat, F. Alet, S. Capponi, and K. Totsuka, “Magnetization plateaus of an easy-axis kagome antiferromagnet with extended interactions”, Physical Review B, 査読有、92 巻、2015、174402, <http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevB.92.174402>

M. Matsuda, S.E. Dissanayake, D.L. Abernathy, K. Totsuka, A.A. Belik, “Magnetic excitations in an S=1/2 diamond-shaped tetramer compound $\text{Cu}_2\text{PO}_4\text{OH}$ ”, Physical Review B, 査読有、92 巻、2015、184428, <http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevB.92.184428>

T. Ohta, S. Tanaka, I. Danshita, and K. Totsuka, “Topological and dynamical properties of a generalized cluster model in one dimension”, Physical Review B, 査読有、93 巻、2016、165423-1-15, <http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevB.93.165423>

S. Capponi, P. Lecheminant, and K. Totsuka, “Phases of one-dimensional $\text{SU}(M)$ cold atomic Fermi gases -- from molecular Luttinger liquids to topological phases”, 査読有、367 巻、2016、50-95, <http://dx.doi.org/10.1016/j.aop.2016.01.011>

T. Ohta and K. Totsuka, “Topological Quantum Phase Transitions in a Majorana Chain with Spatial Modulation”, Journal of Physical Society of Japan, 査読有、85 巻、2016、074003, <http://dx.doi.org/10.7566/JPSJ.85.074003>

K. Shinjo, S. Sota, S. Yunoki, K. Totsuka, and T. Tohyama, “Density-Matrix Renormalization Group Study of Kitaev-Heisenberg Model on a Triangular Lattice”, Journal of Physical Society of Japan, 査読有、85 巻、2016、114710, <http://dx.doi.org/10.7566/JPSJ.85.114710>

〔学会発表〕(計 6 件)

戸塚圭介, “ $\text{SU}(N)$ 冷却原子を用いたトポロジカル相の実現”, 量子制御技術の発展により拓かれる量子情報の新時代, 2015 年 7 月 16 日, 京都, 日本

Keisuke Totsuka, “Topological phases of quantum magnets at high field”, Entanglement in strongly correlated systems, 2016 年 2 月 23 日, Benasque, Spain

Keisuke Totsuka, “Topological phases of $\text{SU}(N)$ cold fermion systems--entanglement, order parameters, and group cohomology”, Physics of bulk-edge correspondence and its universality, 2016 年 9 月 26 日, 京都, 日本 (招待講演)

Keisuke Totsuka, “Symmetry-protected topological phases -- basic concepts and realization”, International School on Topological Science and Topological Matters, 2016 年 2 月 13, 15 日, 京都, 日本 (招待講演)

戸塚圭介, “Lieb-Schultz-Mattis approach to $\text{SU}(M)$ -symmetric Mott insulators”, 日本物理学会第 72 回年次大会, 3 月 19 日, 大阪, 日本

Keisuke Totsuka, “ $\text{SU}(M)$ cold fermions in a double-well optical potential”, Topological properties in quantum magnets, 2017 年 9 月 1 日, Budapest, Hungary (招待

講演)

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

取得状況(計0件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

戸塚 圭介 (TOTSUKA, Keisuke)
京都大学・基礎物理学研究所・准教授
研究者番号： 80291079

(2) 研究分担者

(3) 連携研究者

(4) 研究協力者

F. Alet, Toulouse University, France
V. Bois, Cergy-Pontoise University,
France

Sylvain Capponi, Toulouse University,
France

段下一平 (DANSHITA, Ippei), 京都大学基
礎物理学研究所 (現 近畿大)

P. Fromholz, Cergy-Pontoise University,
France

今村征央 (IMAMURA, Yukihiisa), 京都大学
基礎物理学研究所

Philippe Lecheminant, Cergy-Pontoise
University, France

X. Plat, Toulouse University (現 理研)

高吉慎太郎 (TAKAYOSHI, Shintaro), 物質
材料研究機構 (現 Geneva 大学)

田中秋広 (TANAKA, Akihiro), 物質材料研
究機構

田中宗 (TANAKA, Shu), 京都大学基礎物理
学研究所 (現 早稲田大)