

令和 4 年 6 月 22 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2021

課題番号：18K03455

研究課題名(和文) 強相関トポロジカル量子相の微視的構築とその相構造の研究

研究課題名(英文) Microscopic construction of strongly-correlated topological phases and the study on their phase structures

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) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：近年関心を集めている「対称性に護られたトポロジカル相」、特に自発的に反転対称性が破れたカイラルな相が、二重井戸型の光学格子中の冷却原子フェルミ気体を用いて実現可能であることを解析的、数値的手法により示した。さらに、2次元正方格子上のSU(N)冷却原子気体で、少なくともN=10までは非可換なカイラルスピン液体が実現できることを数値的、解析的に示した。また、量子細線を適当な相互作用で結合することで2次元のトポロジカル相を構成する手法(coupled-wire construction)が、どのような機構でバルクの非自明な波動関数やトポロジカルなゲージ理論に導くかを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

対称性に護られたトポロジカル(SPT)相は近年数学的な分類学は大いに発展したが、現実的な物理系での実現可能性についてはそれほど理解が進んでこなかった。二重井戸光格子は実際に実現されてその理解が進んでおり、これを利用したSPT相についての理論結果は今後のSPT相の実現・検証の上で重要な役割を果たすと思われる。また、正方格子上のSU(N)モット絶縁体における非可換カイラルスピン液体の研究は、少数の例外を除けばこれまで比較的複雑で、非現実的な系でしか実現することがわかっていなかった物質相であり、比較的簡単な系でそれが普遍的に存在することは、今後の理論的理解、量子計算などへの応用上も重要である。

研究成果の概要(英文)：Symmetry-protected topological phases, especially those breaking reflection symmetry spontaneously, attract much attention recently in condensed-matter physics. We have shown, by means of analytical and numerical methods, that these can be realized with ultra-cold fermions trapped in a double-well optical lattice. Furthermore, through the cutting-edge numerical methods, we have established that the non-Abelian chiral spin liquids are realized in SU(N) cold-atom Mott insulators on a square lattice up to N=10.

Coupled-wire construction is a new appealing way of realizing two and three-dimensional topological phases by coupling quantum wires. We have clarified how non-trivial wave functions and topological gauge field theories in the bulk emerge in these coupled arrays of quantum wires.

研究分野：物性基礎論、量子磁性

キーワード：トポロジカル相 冷却原子気体 量子細線

1. 研究開始当初の背景

2016年度のノーベル物理学賞の対象となった二次元電子系における量子ホール状態や、量子磁性体における絶対零度での無秩序状態である「量子スピン液体」状態などのような物質相では、ランダウ流の局所的な秩序パラメータの代わりに、大域的に定義されるある種の位相幾何学的な量子数や、系の境界に局在した特有の創発的励起モードの有無などによって特徴付けられる「トポロジカル秩序」と呼ばれる新しいクラスの秩序がある。このようなトポロジカルな性質を持つ量子凝縮相は、素粒子物理、量子計算、物質科学などを巻き込んで学際的发展をみせている。最近では、何らかの対称性を課すことにより安定に存在することができる「対称性に護られたトポロジカル相 (SPT 相)」の発見、レーザーなどを用いた周期駆動系や、一見量子力学と無関係な地球上の海流などへの拡張など、その内容はますます豊かになりつつある。近年、相互作用のない(あるいは非常に弱い)電子系などでは、分類学、具体例ともにトポロジカル量子相の理解は非常に進んでいる一方、相互作用が本質的になる場合には、分類学の方面ではある一定の成果があるものの、その物理的理解、特に与えられたクラスのトポロジカル相がどのような系で、どのようなメカニズムで実現するかという極めて重要な問題が残されていた。そのようなトポロジカル相を(純理論的にせよ)実現する物理系を探索、提案する上で、大変クリーンで、制御性が高い冷却原子気体は重要な舞台を提供する。また、通常、背景にあるトポロジカル場の理論などを用いて抽象的に定式化されるトポロジカル相を、適当な量子細線を巧みに結合させることで実現させる「coupled-wire construction」もそのような目的からは興味深い。

2. 研究の目的

このような状況を踏まえ、本研究では強い相関を持つ量子多体系におけるトポロジカル状態を、現実的な系で実現する可能性を探り、その性質、および相構造を調べることにより、将来的な強相関トポロジカル相の系統的実現とその実験的検証の理論的基礎を作ることを目指す。具体的には、(i) アルカリ土類様原子気体特有の $SU(N)$ 対称性を持つ一次元、二次元のフェルミ粒子系、スピン系におけるトポロジカル相を調べること、(ii) 二次元、三次元のトポロジカル相を、量子細線を結合させてゆくことで構築する「coupled-wire construction」の物理、特に波動関数やトポロジカルなゲージ理論などのバルクの非自明な性質がどのように形成されるのかを「物理的に」理解すること、の2つの大きなテーマについて研究を行った。

3. 研究の方法

$SU(N)$ 対称性を持つフェルミオン系、スピン系の研究においては、共形場理論、強結合展開、 $1/N$ 展開などを用いた解析的アプローチ以外に、密度行列くりこみ群、 $SU(N)$ の群論的性質をフルに利用した数値対角化、トポロジカル相に関する情報に数値的にアクセスすることを可能にするテンソルネットワーク法などを組み合わせた大規模数値計算も用いた。また、coupled-wire construction の研究では、いわゆるボゾン化、朝永-ラッティンジャー流体の方法と、boson-vortex duality のような双対変換、Chern-Simons ゲージ理論の正準構造の解析を組み合わせたアプローチを用いた。

4. 研究成果

まず、二重井戸光格子中の一次元 $SU(N)$ 冷却フェルミ原子系の相構造について研究を行った。このような格子構造は、2つ以上の波長のレーザー光を巧みに組み合わせることで実現でき、実際に実験的にも作成に成功している。このような光格子中に、基底状態 1S_0 にあるアルカリ土類様フェルミ原子気体を導入すると、二重井戸の2つの「谷」に対応した2つの軌道自由度を持つ $SU(N)$ フェルミオン系を実現できる。通常の電子スピン由来の $SU(2)$ 対称性のある場合でも、2軌道系は豊かな物理を含んでいることが知られており、その $SU(N)$ への拡張はさまざまな新奇な状態の出現が期待される。我々は、この系に対して強結合展開、場の理論的アプローチ、密度行列くりこみ群による数値的アプローチの両面から解析を行い、 $N=2, 3, 4$ の場合について詳細な相図を決定した。特に、研究代表者を含むチームによるこれまでの研究で既に実現が示されていた SPT 相に加えて、 $N=3$ の場合には、分類学的にはその存在が予言されていたものの現実的な系ではその存在が知られていなかった「反転対称性を自発的に破る SPT 相 (カイラル SPT 相)」が、実験上も十分実現可能なパラメータ領域で実現することが初めて明らかにされた [Phys. Rev. B 99, 054414 (2019)]。また、この系と密接に関係する $SU(N)$ スピンモデルも調べ、単一のモデル内で複数の SPT 相を有するような豊かな相構造が得られることも示した [Phys. Rev. B, 101, 195121 (2020)]。

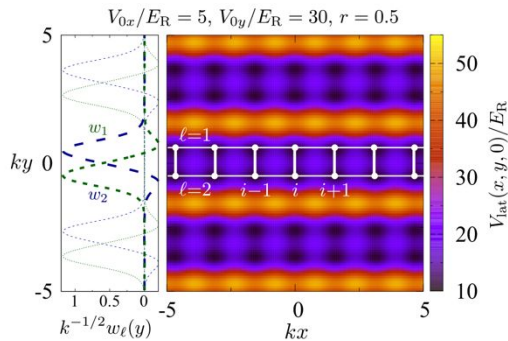


図1 二重井戸光格子。

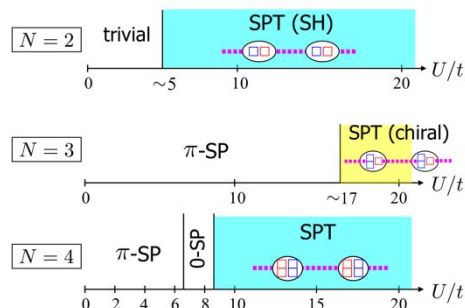


図2 二重井戸中の SU(N)フェルミ原子気体の相図。黄色がカイラル SPT 相。

次に、冷却 SU(N)フェルミ気体の Mott 絶縁相で実現する、SU(M)スピン系におけるトポロジカル相、具体的には系の境界に分数量子ホール効果に類似の「一方通行の」ギャップレス励起が現れる「カイラル量子スピン液体」の研究を行った。テンソルネットワーク法などを用いて得られる、エンタングルメントスペクトルや境界に出現するギャップレス励起の構造を、共形場理論から予言されるスペクトル構造と子細に比較することにより、 $N=2$ から 10 までで正方形格子の多体交換相互作用を持つ SU(M)スピンモデルの基底状態が、実際に可換な分数統計粒子を持つカイラル量子スピン液体であることを示した [Phys.Rev.B, 104, 235104 (2021)]。

Coupled-wire construction に関しては、2019 年春に基礎物理学研究所に滞在中であったストックホルム大の Hans Hansson 氏と共同で、量子細線系の有効作用と量子ホール系の複合ボゾン平均場理論の有効作用の類似性を利用して、実際にバルクに量子ホール系と同様の波動関数が現れることを示した。更にこの類似性を追求することにより、バルクにトポロジカルなゲージ理論である Chern-Simons ゲージ理論が出現することも示した [Phys.Rev.B 100, 125148 (2019)]。通常、このようなトポロジカルゲージ理論は流体力学的な考察とホール伝導度などの応答関数の情報を組み合わせて現象論的にその存在が理解されるものであり、やや人為的ではあるものの、現象論的考察に頼らず、量子細線系という微視的な物理模型から出発してこのようなトポロジカルな有効理論が創発されることを実際に示したことは大変興味深い。また、この構成法を逆に辿ることにより、トポロジカルゲージ理論を用いて定式化されている「一般的な」可換なトポロジカル状態を、量子細線系にどのような相互作用を入れれば実現できるかに関するレシピも構成した。次に、量子細線の理論とゲージ理論の間の双対性と、ゲージ理論の正準構造を組み合わせると、実は複合ボゾン平均場理論を経由することなしに、直接 2 次元、3 次元のバルクのトポロジカルゲージ理論を導くことができることも示した(投稿準備中)。この方法は、磁束貼り付けに基づく複合ボゾン平均場理論が使えない 3 次元のトポロジカル相においても適用可能であり、より一般的なアプローチであると言える。

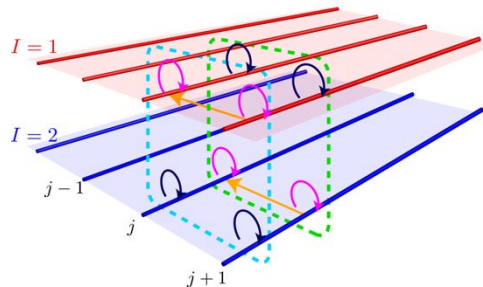


図3 一般の可換なトポロジカル状態の量子細線による構成法。

最後に、上で挙げた 2 つの大きなテーマとは少し離れるが、強相関ボゾン系におけるトポロジカル相の(実験系での)実現可能性に関する研究を実験グループと共同で行った。2次元スピンギャップ物質である $\text{Sr}_2\text{Cu}_2(\text{BO}_3)_2$ は、スピン間相互作用が強くフラストレーションがあるにも拘わらず、厳密な基底状態がわかり励起状態の構造もよく理解されているという点で、ボゾン系のトポロジカル相における相互作用効果を実験的に調べる上で理想的な系である。近年、この系の磁気励起であるトリプロンを相互作用のない自由ボーズ気体として取り扱うことで、系の磁気励起の波数空間での非自明なトポロジカル構造に起因する熱ホール効果を示す可能性が理論的に指摘された。これを受けて、低温での非常に注意深い実験を行った結果、実験の精度の範囲内で熱ホール効果がないことがわかったが、相互作用のない自由ボーズ気体の枠内で想定される原因をひとつひとつ理論的に検討することで、この不一致がトリプロン間の強い相互作用に起因するものであることがわかった [Phys.Rev.B 105, 024415 (2022)]。この結果は、必然的に強い相互作用が存在する(さもなければ、基底状態はボーズ凝縮を起こす)ボーズ粒子系に対して、相互作用のない(あるいは非常に弱い)フェルミ系のトポロジカル相で得られた知見を素朴に拡張するには細心の注意が必要であることを示唆している。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 7件/うち国際共著 5件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Ji-Yao Chen, Jheng-Wei Li, Pierre Nataf, Sylvain Capponi, Matthieu Mambrini, Keisuke Totsuka, Hong-Hao Tu, Andreas Weichselbaum, Jan von Delft, and Didier Poilblanc	4. 巻 104
2. 論文標題 Abelian SU(N) ₁ chiral spin liquids on the square lattice	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 235104-1,33
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevB.104.235104	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 S. Suetsugu, T. Yokoi, K. Totsuka, T. Ono, I. Tanaka, S. Kasahara, Y. Kasahara, Z. Chengchao, H. Kageyama, and Y. Matsuda	4. 巻 105
2. 論文標題 Intrinsic suppression of the topological thermal Hall effect in an exactly solvable quantum magnet	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 024415-1,11
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevB.105.024415	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Y. Avishai, K. Totsuka, and N. Nagaosa	4. 巻 88
2. 論文標題 Non-Abelian Aharonov-Casher Phase Factor in Mesoscopic Systems	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 J. Phys. Soc. Jpn.	6. 最初と最後の頁 084705-1,17
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.7566/JPSJ.88.084705	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Y. Imamura, K. Totsuka, and T.H. Hansson	4. 巻 100
2. 論文標題 From coupled-wire construction of quantum Hall states to wave functions and hydrodynamic	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Phys. Rev. B	6. 最初と最後の頁 125148-1, 15
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevB.100.125148	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 S. Capponi, P. Fromholz, P. Lecheminant, and K. Totsuka	4. 巻 101
2. 論文標題 Symmetry-protected topological phases in a two-leg SU(N) spin ladder with unequal spins	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Phys. Rev. B	6. 最初と最後の頁 5100
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.101.195121	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 K. Totsuka	4. 巻 17
2. 論文標題 New Surprises from ``Bamboo Baskets''	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 JPSJ News Comments	6. 最初と最後の頁 3
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJNC.17.03	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 P. Fromholz, S. Capponi, P. Lecheminant, D. Papoular, and K. Totsuka	4. 巻 99
2. 論文標題 Haldane phases with ultracold fermionic atoms in double-well optical lattices	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 054414-1,6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.99.054414	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計6件 (うち招待講演 6件 / うち国際学会 6件)

1. 発表者名 Keisuke Totsuka
2. 発表標題 Designing topological gauge theories with quantum wires
3. 学会等名 Entanglement in strongly correlated systems (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 K. Totsuka
2. 発表標題 Symmetry-protected topological phases with ultra-cold SU(N) fermions
3. 学会等名 The Fourth Kyoto-Beijing-Tokyo Workshop on Ultracold Atomic Gases (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 K. Totsuka
2. 発表標題 Exploring 1D Symmetry-protected topological phases with ultra-cold SU(N) fermion gases
3. 学会等名 3rd Asia-Pacific workshop on Quantum Magnetism (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 K. Totsuka
2. 発表標題 Emergent gauge theories from a coupled array of wires
3. 学会等名 TOPMAT 2018 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 K. Totsuka
2. 発表標題 Symmetry-protected topological phases with broken parity in cold fermions in a double-well optical lattice
3. 学会等名 Quantum Magnetism: Frustration, Low-dimensionality, Topology (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 K. Totsuka
2. 発表標題 Hunt for symmetry-protected topological phases in SU(N) ultra-cold fermions in double-well optical lattices
3. 学会等名 BEC2018X (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関			
フランス	Toulouse大学	Max-Planck institute	Munchen大	他3機関
スウェーデン	Stckholm大学			
イスラエル	Ben Grion大学			
フランス	Cergy-Pontoise university	Toulouse university		