

令和元年6月3日現在

機関番号：82401

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2017～2018

課題番号：17H07362

研究課題名（和文）カゴメ反強磁性体の量子スピン液体に対する有効理論の微視的な構築

研究課題名（英文）Microscopic formulation of the effective theory for quantum spin liquids in kagome antiferromagnets

研究代表者

藤 陽平（Fuji, Yohei）

国立研究開発法人理化学研究所・開拓研究本部・基礎科学特別研究員

研究者番号：50802732

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 800,000円

研究成果の概要（和文）：物質中における電子やスピンの互いに強く相互作用することで実現する新奇な物質相の一つであるトポロジカル相では、興味深いことに分数励起という特殊な統計性を持つ励起が出現する。本研究では、そのようなトポロジカル相の例である、カゴメ反強磁性体における量子スピン液体状態や、分数量子Hall状態、3次元のゲージ理論などに注目し、相互作用を制御するための場の理論的な解析手法を用いて、それらのトポロジカル相を実現するモデルを1次元量子細線の接合系から構成した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

相互作用する量子多体系におけるトポロジカル相に現れる分数励起は、量子コンピュータなど次世代のデバイスへの応用が期待されている。ところが、量子多体系における相互作用を制御可能な形で取り扱うことは物性物理学における難題であり、そのための一般的枠組みは知られていない。本研究の結果は、トポロジカル相を実現するための微視的な相互作用のメカニズムを理解するための手掛かりとなり、将来的なトポロジカル相の実験的実現やデバイスの設計に役立つと期待される。

研究成果の概要（英文）：In materials, electrons or spins strongly interacting with each other can form exotic phases of matter called topological phases, in which interesting excitations known as fractional excitations with nontrivial statistics appear. In this study, we focused on several examples of the topological phases, such as quantum spin liquids in Kagome antiferromagnets, fractional quantum Hall states, and three-dimensional gauge theory, and constructed models realizing them from coupled one-dimensional quantum wires, with the help of quantum field theory technique which allows us to control the interaction.

研究分野：物性理論

キーワード：トポロジカル相 分数量子Hall状態 量子スピン液体 量子細線

1. 研究開始当初の背景

物質中における電子やスピンの集団的性質から生じる新奇な物質相であるトポロジカル相は、純粋に自然科学的な興味に留まらず、量子コンピュータや次世代のデバイスへの応用の観点からも、これまで実験と理論の両面から精力的に研究がなされてきた。特に、相互作用のない電子系におけるトポロジカル絶縁体・超伝導体に対しては、バンド理論の枠組みからの理解が非常に進んでおり、第一原理計算などと組み合わせることで実験結果を再現するような理論を構築することが可能になりつつある。

一方で、相互作用のある電子系やスピン系においては、分数量子 Hall 状態や量子スピン液体状態に代表されるように、分数励起あるいはエニオン励起と呼ばれる非自明な素励起を持ったトポロジカル相が実現可能であり、相互作用のない電子系では見られない、より多彩な物性を示す。このようなトポロジカル相を特徴付け、分類する抽象的な数学的枠組みは様々な形で提案されている。一方で、自由電子系におけるバンド理論のように、相互作用する量子系を記述する微視的な物理的理論とトポロジカル相を記述する数学的理論を結びつける一般的枠組みを構築することは困難な課題である。

2. 研究の目的

上記のような背景のもと、本研究では、バンド理論の枠組みに当てはまらない、相互作用のある量子多体系におけるトポロジカル相に対して、微視的な模型から出発し、トポロジカル相に特徴的な物理的性質を記述する有効理論を導出すること、およびそのための枠組みを構築することを目標とする。とりわけ、平均場近似や、特殊な模型に対してのみ適用できる厳密解を超えて、制御可能な近似の範囲内で、多くのクラスの模型に適用できる枠組みを構築したい。また、与えられた微視的な模型を解析するための手段としてだけでなく、狙ったトポロジカル相に対して模型を微視的にデザインできるような方法を提案したい。

3. 研究の方法

そのためのステップの1つとして、本研究では主として、相互作用する量子系におけるトポロジカル相の候補と期待されている、カゴメ格子上の反強磁性体における基底状態の量子スピン液体状態に注目して、その有効理論を微視的な模型から出発して導出することを試みる。特に、格子上で記述される微視的な模型を制御可能な近似のもとで取り扱うために、1次元量子系の低エネルギー・長波長の物理的性質を定量的に記述できる場の量子論的手法であるボゾン化法や共形場理論による解析方法を主として用いる。このような場の理論によって記述された有効理論が、微視的な模型の自由度とどのように対応するかを明らかにし、さらに期待されるトポロジカル相の性質を再現できることを確かめる。

4. 研究成果

本研究は計画当初、カゴメ反強磁性体における量子スピン液体状態を主な対象とする予定であったが、以下で詳しく説明するように、並行して行っていた分数量子 Hall 状態と3次元のトポロジカル相に対する研究について大きな進展があった。

(1) カゴメ格子上の反強磁性体における量子スピン液体状態の有効理論

カゴメ格子とは図1左のように三角形が頂点を共有して作られる2次元の格子であり、格子点上に置かれた量子力学的なスピン間に、スピンを反並行に揃える反強磁性的な相互作用が働くと、スピンは安定な磁気秩序状態を取ることができない。このような反強磁性体では、絶対零度における基底状態で量子スピン液体状態が実現すると期待され、そこではトポロジカルに非自明な励起が現れると考えられている。

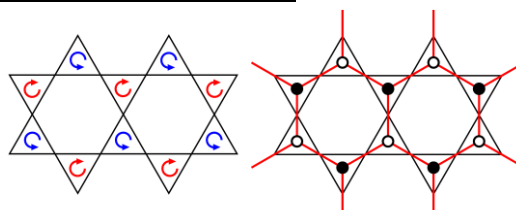


図1:カゴメ格子(左)と対応する蜂の巣格子(右)

本研究では、実際の物質で実現するような空間等方的なスピン間の相互作用は理論的な取り扱いが難しいので、まずは Ising 極限と呼ばれる大きな一軸異方性のある状況から出発した。Ising 極限において、格子点上の大きさ $1/2$ のスピンは三角形上でスピンの合計が $1/2$ である状態を取ろうとする。この合計スピン $1/2$ を蜂の巣格子上の格子点を占有するボーズ粒子とみなすと(図1右)、ボーズ粒子の粒子数について局所的な保存則が成立し、その保存則を満たすようにゲージ場を導入することで、カゴメ反強磁性体を蜂の巣格子上のゲージ理論で書き直すことができる。

ボーズ粒子のダイナミクスは摂動論的に取り入れることができ、具体的にはカゴメ格子上の三角形における3個のスピンによる3体相互作用を考えた。対応するボーズ粒子のゲージ理論は、ゲージ場の揺らぎを無視する近似では、1次元の場の理論の手法であるボゾン化法を用いて解析することができる。その結果、3体相互作用が時間反転対称性を保つような場合、カゴメ反強磁性体の基底状態は線形エネルギー分散を持つ Dirac フェルミオンの素励起と、創発的なゲージ場から生じるやはり線形分散の光子的な素励起を持つギャップレス量子スピン液体であることを発見し、その有効理論を得た。ここまでの進捗は学会発表⑥で報告した。さらに

進んで量子スピン液体状態の安定性を示すためには、結晶対称性の下での素励起の振る舞いを調べる必要があるが、トポロジカル相に典型的な素励起の非局所的な性質のために、その解析は当初想定していたよりも難航している。これらの問題を解決することが残された課題である。

(2) 2次元電子ガスにおける分数量子 Hall 状態の量子細線による構成

量子スピン液体の研究と並行して、磁場中で相互作用する2次元電子系において発現するトポロジカル相である分数量子 Hall 状態に関する研究を行った。このような分数量子 Hall 状態は電子密度と磁束量子密度の比であるフィリングによって特徴付けられ、分数統計性に従うエニオンと呼ばれる素励起を持ち、素励起における電荷が分数化されることによって分数に量子化された Hall 伝導度を示すことが実験的にも知られている。

このような分数量子 Hall 状態を1次元の量子細線の接合系とみなすことで、1次元の場の理論である共形場理論を用いた微視的な記述が得られることは以前から指摘されていた。一方で、分数量子 Hall 状態は伝統的に、電子に磁束量子を束縛して得られる複合粒子によって現象論的に理解されてきた。例えば、典型的な分数量子 Hall 状態である Laughlin 状態は、複合フェルミオンが Landau 準位と呼ばれる自由粒子の軌道を占有して作る整数量子 Hall 状態、あるいは複合ボゾンが巨視的に位相を揃えてボーズ凝縮を起こした状態と解釈できる。

我々は、このような分数量子 Hall 状態に対する量子細線を用いた微視的な模型が、現象論的な複合粒子の描像を自然に内包していることを発見した。また、既に広く知られている複合粒子の描像を用いることで、階層状態と呼ばれる様々なフィリングへ一般化された分数量子 Hall 状態に対応した量子細線の模型を系統的に構成できることを示した。また、特殊なフィリングでは複合フェルミオンが有効的に磁場を感じなくなり、複合フェルミオンの金属状態である複合 Fermi 液体や超伝導状態である Pfaffian 状態が可能になる。これらの状態に対しても、量子細線の模型が系統的に構成できることを示し、それらの階層状態などへの一般化を議論した。これらの量子細線の模型は、人工磁場中に置かれた光格子上的冷却原子気体などの微視的な模型に応用できる可能性がある。以上の結果は、雑誌論文②、学会発表③④⑤で報告されている。

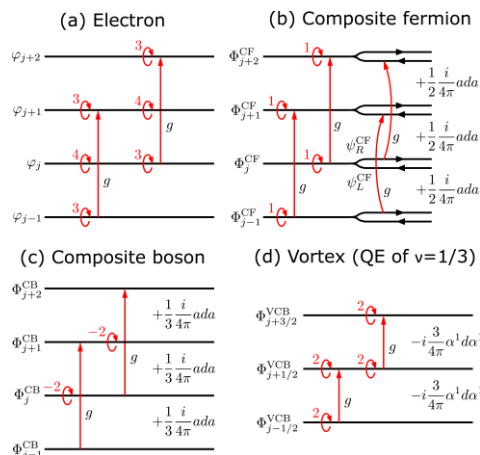


図2：現象論との対応から得られた Laughlin 状態に対する量子細線の模型の模式図。(a)元の電子、(b)複合フェルミオン、(c)複合ボゾン、(d)複合ボゾンの渦励起による記述。

(3) 3次元量子多体系におけるトポロジカル相の量子細線による構成

量子スピン液体や分数量子 Hall 状態は、空間2次元の相互作用する量子系において実現するトポロジカル相であるが、3次元においても相互作用する量子系に特有のトポロジカル相が存在する。2次元では、分数励起あるいはエニオン励起は粒子的な振舞いをする点状の励起のみが許されたのに対し、3次元では点状の励起の他にループ状の励起も分数励起として許される。しかし、このような非自明な分数励起を持つトポロジカル相を実現する3次元の模型を微視的に構成する方法は、トポロジカルな場の理論を出発点にして厳密に解ける模型を構成する方法以外にほとんど知られておらず、しかも厳密に解ける模型の多くは非常に複雑な相互作用を持つため、現実の実験と対応させることは難しい。

我々は、粒子とループ状の分数励起を持つ3次元のトポロジカル相に対して、2次元と同様の量子細線を用いた微視的な模型を構成できることを示した。この構成の背景にある基本的なアイデアは、3次元トポロジカル相のレイヤー構成と呼ばれる方法であり、2次元のトポロジカル相を3次元的に積み上げた後に、レイヤー間でエニオン励起の束縛状態を作ってエニオン凝縮を起こすことで3次元のトポロジカル相を得るというものである。このレイヤー構成は概念的には便利であるが、実際にこの構成法を微視的な模型に対して実装する手続きは与えられていなかった。

我々は、それぞれ共形場理論で記述される量子細線の模型において、量子細線間の相互作用を共形 embedding と呼ばれる数学的手続きによって適切に選ぶことにより、純粋に3次元的なトポロジカル相をレイヤー構成と同様の論理で構成できることを指摘した(図3)。具体的にこの方法を用いて、フェルミオンの統計性を持つ点状の分数励起とループ状の分数励起を持

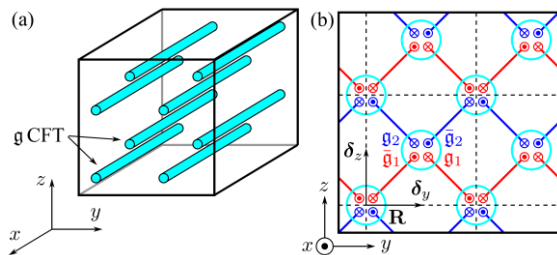


図3：(a) 3次元のトポロジカル相を記述する量子細線の模型。(b) 模型を横から見た図。赤と青の色分けされた量子細線の模型でそれぞれ2次元のレイヤーを作っているように見せる。

つ Z2 ゲージ理論で記述されるトポロジカル相を、相互作用するスピン鎖の模型から構成した。この結果は、さらに 3 次元トポロジカル相の非自明な表面状態の構成などに応用できると期待される。以上の結果は、Physical Review B の速報版である Rapid Communication に受理されており（雑誌論文①）、学会発表①②で報告されている。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕（計 2 件）

- ① Yohei Fuji and Akira Furusaki, “From coupled wires to coupled layers: Model with three-dimensional fractional excitations”, Physical Review B (Rapid Communication), 査読有, 採録決定済
- ② Yohei Fuji and Akira Furusaki, “Quantum Hall hierarchy from coupled wires”, Physical Review B 99, 035130(1-34), 2019, 査読有
DOI: 10.1103/PhysRevB.99.035130

〔学会発表〕（計 6 件）

- ① 藤陽平、古崎昭、3 次元的な分数励起を持つ量子細線の模型、日本物理学会第 74 回年次大会、2019
- ② Yohei Fuji and Akira Furusaki, “From coupled wires to coupled layers: model with 3D fractional excitations”, Anyons in Quantum Many-Body Systems (ANYON19), 2019
- ③ 藤陽平、古崎昭、量子細線から作る分数量子 Hall 状態の階層構造 I、日本物理学会 2018 年秋季大会、2018
- ④ 藤陽平、古崎昭、量子細線から作る分数量子 Hall 状態の階層構造 II: 複合 Fermi 液体と Pfaffian 状態、日本物理学会 2018 年秋季大会、2018
- ⑤ Yohei Fuji and Akira Furusaki, “Quantum Hall hierarchy from coupled wires”, Topological phases of matter (TOPMAT): from the quantum Hall effect to spin liquids, 2018
- ⑥ Yohei Fuji, Yin-Chen He, Subhro Bhattacharjee, and Frank Pollmann, “Dirac composite fermion theory for kagome spin liquids”, Novel Quantum States in Condensed Matter (NQS2017), 2017

6. 研究組織

(1) 研究分担者

なし

(2) 研究協力者

研究協力者氏名：古崎昭

ローマ字氏名：(Furusaki, Akira)

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。