

論文の内容の要旨

論文題目 トポロジカル絶縁体と端状態の理論的研究
(Theory of topological insulator and edge state)

氏名 仲井 良太

近年精力的に研究されているトポロジカル絶縁体/超伝導体は自由フェルミオン系で実現される物質相であるが、超伝導相や強磁性相などの対称性の自発的破れによって特徴づけられる相とは異なり、ブロッホ関数のトポロジーによって特徴づけられる絶縁体相である。トポロジカル絶縁体/超伝導体の例として、量子ホール系、量子スピンホール系、3次元量子スピンホール系、カイラル p 波超伝導体、液体 ^3He の B 相などが知られており、これら以外にもトポロジカル絶縁体/超伝導体の性質を示す系が存在する可能性が理論的に予測されている。ところで、このようなトポロジカル絶縁体/超伝導体と同様の物質相は、自由フェルミオン系にとどまらずより広い量子多体系において実現する。量子スピン系においてトポロジカル絶縁体/超伝導体の性質を示す模型として、キタエフによって考案されたキタエフ模型という 2 次元量子スピン模型が知られている。

キタエフ模型は 2 次元の相互作用量子スピン模型であるが、適当な変換によって超伝導体模型に変換されるという特徴を持つ。ここで超伝導体模型とは BCS 平均場のもとで Bogoliubov-de Gennes 方程式に従うボゴリウボフ準粒子の自由フェルミオン模型であり、超伝導ギャップが開いていることに対応してボゴリウボフ準粒子はバンド絶縁体に相当するエネルギーバンドを形成する。自由フェルミオンの占有状態のエネルギーバンドからブロッホ関数のトポロジーに関連した不変量を計算することができ、キタエフ模型の基底状態にあらわれる超伝導体相を特徴づける。キタエフ模型ではエネルギーギャップを開くために外部磁場がかけられており、対応する超伝導体模型は時間反転対称性の破れた 2 次元トポロジカル超伝導体となる。このような超伝導体は Altland-Zirnbauer による対称性の分類でクラス D の模型であり、整数 (\mathbb{Z}) のトポロジカル不変量で特徴づけられる無限個の異なる基底状態の相を持つ。

一方、トポロジカル絶縁体/超伝導体の分類の理論によると、2 次元空間においては時間反転対称性が保たれている場合でもトポロジカル超伝導体相が実現する。この事実に基づいて、本研究ではキタエフ模型の時

時間反転対称な拡張を、内部自由度を増やしたディラック行列模型により実現した。ハミルトニアンは正方格子上に定義され、最近接サイト間相互作用と次近接サイト間相互作用からなる。本研究で得られた模型は、時間反転対称性の保たれたトポロジカル超伝導体に変換することのできる2次元量子スピン模型であり、このような超伝導体は対称性のクラス DIII にあたる。時間反転対称性の保たれた超伝導体は2つの異なる基底状態の相を持ち、それらは \mathbb{Z}_2 不変量で特徴づけられる。Kitaev 模型の拡張は様々なものが研究されているが、 \mathbb{Z}_2 不変量で特徴づけられる基底状態を持つ2次元量子スピン模型は本研究ではじめて導入された。本研究で導入された模型は、 \mathbb{Z}_2 不変量と関連した量子スピン系の性質を解析する際の基礎を与えることが期待される。

本研究では次にディラック行列模型の基底状態を解析した。構成したスピン模型においてトポロジカル超伝導体相が実現する場合、系の端に束縛された端状態が形成される。この性質はトポロジカル絶縁体/超伝導体において一般的に成り立つと考えられているが、このことを具体的にミクロな模型において確かめる必要がある。端のある2次元系において、数値的にエネルギースペクトルを求めると、超伝導体であることから端状態のバンドはマヨラナフェルミオンの状態で構成され、時間反転対称性を反映して端状態のバンドは時間反転対称の対であるクラマース対を形成してあらわれた。また、バルクの基底状態の波動関数から \mathbb{Z}_2 不変量を計算することで、 \mathbb{Z}_2 不変量の値と安定な端状態のバンドの有無が一致していることを確かめた。これらの結果から、本研究で構成したディラック行列模型においてトポロジカル相が実現していることが分かった。さらにトポロジカル相と端状態の関係を、平坦バンドに関するトポロジーを用いた議論で示した。2次元系の端にあらわれる端状態が平坦バンドとなる場合、これは1次元トポロジカル不変量で特徴づけられる。この不変量の結果と、時間反転対称性から来るクラマース対の縮退の安定性によって、トポロジカル相には安定な端状態が形成されることが結論付けられる。また、端状態と同様に、トポロジカル相にあらわれるマヨラナフェルミオンの束縛状態として渦糸束縛状態がある。本研究の模型から変換された超伝導体模型は、 \mathbb{Z}_2 ゲージ場と結合した自由フェルミオン模型であり、 \mathbb{Z}_2 ゲージ場に渦糸とみなせる位相欠陥を導入することができる。この渦糸に束縛されたマヨラナフェルミオンの1体状態の存在を数値的にエネルギースペクトルを求めることで確かめた。

また、ディラック行列模型の基底状態を特徴づける物理量を計算した。Kitaev 模型はスピン液体の基底状態を持つ。基底状態においてバルクにおける相関関数はすべて短距離相関を持ち、自発磁化も起こらない。しかし端状態のバンドが低エネルギーで線形分散を持つ場合、2点相関関数のなかでも端付近の端に沿った2点間の相関が冪的に振る舞うことを示した。これは端に形成された端状態が、線形分散を持つ1次元系として相関関数に寄与するためである。