

(続紙 1)

京都大学	博士 (理学)	氏名	太田 卓見
論文題目	Theoretical study of entanglement and dynamical properties of topological phases of Majorana fermions in one dimension		
(論文内容の要旨)			
<p>いわゆるトポロジカルな物質相においては、系のバルクの性質は少なくとも局所的には自明な相と区別できないが、その境界に現れる端状態や量子エンタングルメントなどの非局所的性質にその特徴が現れることが知られている。いっぽう、トポロジカル相においては、その固有の保存量の存在のために、特徴的なダイナミクスが現れることがわかってきている。本論文では、非自明なマヨラナ端状態を持ち、BDIクラスとして知られているさまざまなトポロジカル相を実現する可解な一次元フェルミオン模型 (Kitaevチェーン) を用いて、量子エンタングルメントや非局所相関関数などの非局所的物理量の動的性質と、トポロジカル相の空間変調に対する安定性を研究した。本論文の最初の部分 (第2章、第3章) は本研究に必要な知識、手法などの詳細なレビューに充てられており、本研究のオリジナルな結果は (I) 動的性質 (第4章) と (II) 空間変調を含む場合 (第5章) に分けて述べられている。</p> <p>第4章では、長距離のホッピング、ペアリングを含む拡張されたKitaevチェーンの基底状態の問題とダイナミクスを考察している。まず異なるタイプのペアリングの競合から起こるトポロジカル相間の量子相転移を含む基底状態の相図と量子相転移の性質を完全に決定した。次に、得られた相図を基に2つの異なるトポロジカル相をピックアップし、パラメータを時間的に掃引してその2つの相をつないだ時に、エンタングルメント、非局所相関などがどのような振る舞いを見せるかを解析的手法と数値的手法を組み合わせて調べた。その結果、掃引速度が系の典型的な時間スケールに比較して十分に短い場合と長い場合とで定性的に全く異なる結果が得られた。具体的には、掃引速度が遅い時には、掃引に伴ってトポロジカル相に特有のエンタングルメント固有値の縮退構造の分裂が見られ、エンタングルメントエントロピー、非局所相関関数の空間構造に顕著な (4倍) 周期構造が出現することがわかった。このような振る舞いの起源を解明するために、パラメータ掃引に伴ってどのような準粒子が励起されるのかを調べ、十分にゆっくりした掃引では、トポロジカル系特有の保存量 (フェルミオン数の偶奇性) の縛りのため、多くの可能な準粒子のうち特定の一種類のみが励起されることがわかった。この準粒子の波動関数の空間構造を子細に調べることにより、数値的に得られた周期構造の出現を説明することに成功している。これに対し、掃引が速い場合には、多数の準粒子が励起されるためにこのような著しい特徴は見られなかった。</p> <p>ダイナミクスにおいては、パラメータ掃引によって励起された準粒子の空間構造がエンタングルメントなどの周期構造を引き起こしたが、ハミルトニアン自体に空間的な周期構造を導入することで系の基底状態のトポロジカルな性質を変えることもできる。第5章では、化学ポテンシャル (あるいはゲート電圧) に空間変調を導入したKitaevチェーンを考察し、空間変調がバルクのマヨラナフェルミオンのペアリングと競合することにより引き起こされる量子相転移を、端に出現するマヨラナゼロモードやエンタングルメントの観点から調べた。大きな局所的化学ポテンシャル (ゲート電</p>			

圧) は、非トポロジカルな状態を安定化させる傾向があるため、その空間変調の振幅と位相を変化させると、トポロジカル相を特徴づけるマヨラナフェルミオンのペアリングと競合によって、トポロジカル相をコントロールできる。まず、化学ポテンシャルの変調の位相のパターンと空間変調のパターンとが競合することにより、マヨラナエッジモードの数が1から0 (非トポロジカル相) へと変化するトポロジカルな量子相転移が起こることがわかった。変調の波数を変えると、マヨラナフェルミオンのペアリングパターンとの整合性が変わるので、エッジモード数が2から0に変わる転移も引き起こすことができる。また、これらの転移を、エンタングルメントのスペクトロスコピーと非局所ストリング相関の計算からも確認した。次に、化学ポテンシャルの変調の振幅を変化させると、ある値で系の半分のサイトが非トポロジカルな状態に変化することにより、マヨラナエッジモードの数が2から1へと変化するトポロジカルな量子相転移が起こることもわかった。最後に、トポロジカルな量子数 (まきつき数) を具体的に数値計算することにより、(i) エンタングルメント・スペクトロスコピー、(ii) 非局所相関関数、(iii) トポロジカル数の3つの異なる手法全てで各トポロジカル相とその間の量子相転移がコンシステントに特徴づけられ、これらを通常の相における局所秩序パラメータの代わりに用いることができることを確認した。最後に、結論 (第6章) に続いて、付録でいくつかの計算の詳細が与えられている。

(続紙 2)

(論文審査の結果の要旨)

トポロジカルな性質を持つ量子相は、境界に創発されるエキゾチック粒子や、量子計算との関連もあって、理論、実験ともに学際的な研究が活発に行われている。中でも、スピンレス p 波超伝導体のモデルであるKitaevチェーンは、その取り扱いやすさ、冷却気体や、量子細線と超伝導体の近接効果を用いた実現の提案などもあり関心を集めている。最近になって、このような系はトポロジカル相特有の保存量(フェルミオン数の偶奇性)のため、そのダイナミクスが通常のパラダイムとは異なりうることなどが認識されてきた。いっぽう、非局所相関関数、量子エンタングルメント(スペクトル)など、トポロジカルな性質を特徴づける量のダイナミクスがどうなるか、系に非一様性を導入した際にトポロジカルな性質はどう影響を受けるか、については未解明であった。

第4章に述べられている一般化されたKitaevチェーンの動的性質の研究はこの点に光を当てるものであり、そこでは掃引時間による非局所相関関数やエンタングルメントの振る舞いの定性的な違いが見出された。特に、系の時間スケールに対して十分に遅い掃引の場合に、トポロジカルな保存量のために特定の準粒子が励起され、それが原因となって非局所相関関数やエンタングルメントに特徴的な空間周期構造が形成されるという興味深い現象を見出している。以上の動的性質の研究のための予備的研究として、一般化されたKitaevチェーンの基底状態の相図を得ているが、これ自体一次元トポロジカル相の問題として価値のある結果である。

また、第5章で行われている空間変調に対するトポロジカル相の安定性の考察は、Kitaevチェーンのトポロジカル状態を特徴づけるマヨラナフェルミオンのペアリングのパターンと空間変調のもたらす非一様性との競合により、どのような量子相が形成されるかを明らかにすることを狙ったものである。そこでは、空間変調の周期とマヨラナフェルミオンのペアリングの整合性に応じて、変調の位相、振幅を変えた時に、トポロジカル相と非トポロジカル相間に異なるタイプの量子相転移が起こることを明らかにした。これは、空間変調するゲート電圧などにより系のトポロジカルな性質をいろいろ制御する可能性を示唆しており、応用上も興味深いと考えられる。

第4章、第5章で述べられている研究内容は、完全な理解のためにはさらなる研究の余地をまだ残してはいるが、すでに十分に興味深い内容であると考えられる。よって、本論文は博士(理学)の学位論文として価値あるものと認める。また、平成30年1月17日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。

要旨公表可能日： 2018年4月1日以降