

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 30 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：2012～2013

課題番号：24840048

研究課題名(和文)トポロジカル超伝導体・超流動体のエッジ状態についての解析的理論研究

研究課題名(英文)Analytic study on edge states in topological superconductors and superfluids

研究代表者

堤 康雅 (Tsutsumi, Yasumasa)

独立行政法人理化学研究所・古崎物性理論研究室・基礎科学特別研究員

研究者番号：10631781

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,300,000円、(間接経費) 690,000円

研究成果の概要(和文)：Eilenberger方程式を解くことで、トポロジカル超伝導体・超流動体のエッジ状態を明らかにした。トポロジカル超流動体である超流動ヘリウム3-A相のエッジ流が境界条件に強く依存することを明らかにし、クーパ対による角運動量とエッジ流に直接的な関係がないことを示した。また、トポロジカル超伝導体であるUPt3とPrOs4Sb12のエッジ状態において、ポイントノードに起因するフェルミアークが形成されることを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：We study edge states in topological superconductors and superfluids by solving the Eilenberger equation. We demonstrate that angular momentum by Cooper pairs in the superfluid helium-3 A-phase, which is a topological superfluid, has no relation to edge current because the edge current depends on the boundary condition at the edge strongly. We also demonstrate that UPt3 and PrOs4Sb12, which are topological superconductors, has Fermi arcs in edge states owing to point nodes of their gap functions.

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学、物性II

キーワード：物性理論 トポロジカル超伝導・超流動 エッジ状態 マヨラナフェルミオン エッジカレント

1. 研究開始当初の背景

(1) 超流動ヘリウム3-A相のエッジ質量流による角運動量はエッジが滑らかな場合には、系のヘリウム3原子の総数を N として $N\hbar/2$ となることが研究代表者により見出されていた。この角運動量の大きさは、超流動ヘリウム3-A相のクーパー対による巨視的角運動量の大きさと一致している。

(2) 重い電子系超伝導体 UPt_3 のギャップ関数が研究代表者と実験グループとの共同研究で明らかにされ、トポロジカル超伝導体としての性質を示すことが指摘されていた。

2. 研究の目的

(1) 超流動ヘリウム3-A相のクーパー対による角運動量がエッジ質量流として現れているのかを明らかにする。エッジが滑らかな場合には、クーパー対による巨視的角運動量として期待される値と、エッジ質量流による角運動量が一致している。エッジ質量流がバルクでのクーパー対の角運動量を反映したものであれば、エッジの境界条件にかかわらず角運動量の大きさ $N\hbar/2$ は変化しないと考えられる。そこで、エッジが粗い場合のエッジ質量流による角運動量を導出することで、クーパー対による角運動量とエッジ質量流の関係を明らかにする。

(2) 重い電子系超伝導体 UPt_3 のトポロジカルな性質が実験でどのように観測されるかを明らかにする。 UPt_3 のギャップ関数のスピン状態はヘリカル構造であり超流動ヘリウム3-B相と同じである。一方でフェルミ面の北極と南極にポイントノードが存在することはA相と同じである。そのため、A相とB相の特徴を併せ持ったエッジ状態が実現することが期待できる。特に、超流動ヘリウム3のエッジ状態に存在していることが知られているマヨラナフェルミオン、トポロジカルフェルミアークに注目する。

3. 研究の方法

トポロジカル超伝導体・超流動体のエッジ状態を明らかにするために、微視的理論に基づくGor'kov方程式に準古典近似を行うことで得られる準古典グリーン関数の従うEilenberger方程式を解く。具体的にはEilenberger方程式をRiccati方程式の形式に変形し、エッジでの境界条件を満たす秩序変数と準古典グリーン関数が自己無撞着になる解を求める。こうして得られた準古典グリーン関数から準粒子状態、エッジカレントを計算することで、エッジ状態の物理的本質を明らかにする。

4. 研究成果

(1) 超流動ヘリウム3-A相
エッジが粗い場合には、超流動ヘリウム3-A相のエッジ質量流が小さくなるのが、研

究開始後まもなく他の研究グループにより明らかにされた。このグループとは独立に、研究代表者は境界条件によるエッジ状態の変化を詳細に解析することで、エッジが粗くなることでエッジ状態の分散がエネルギー幅を持つことがエッジ質量流減少の原因であることを明らかにした。これは、温度上昇によるエッジ質量流の減少と本質的に等しく、エッジの粗さによる影響を調べるだけでは、エッジ質量流とクーパー対による角運動量の関係を理解することができないことを意味している。

そこで、エッジとは本質的に境界条件が異なる超流動ヘリウム3-A相のカイラルドメインウォール上の質量流と束縛状態についての研究を行った。その結果、カイラルドメインウォールにおける質量流の向きが、クーパー対の角運動量から期待される向きとは逆向きになることを明らかにした。カイラルドメインウォールに束縛された準粒子が有限な運動量を持つときにフェルミエネルギーを横切るため、束縛状態によって運動量が運ばれるスペクトラルフローと呼ばれる現象が、質量流の向きの逆転の原因である。境界条件によっては束縛準粒子に運ばれる質量流の向きの逆転さへも起こることから、エッジ質量流は巨視的角運動量と独立であると理解することができる。

クーパー対の角運動量の大きさをエッジ状態から明らかにすることはできないが、角運動量の向きを決めるクーパー対のカイラリティは不純物による準粒子散乱の異方性として観測できることを示した。準粒子散乱の中間状態において、クーパー対の角運動量が部分波の角運動量をシフトすることで、異方的な準粒子散乱が起きる。実際に超流動ヘリウム3-A相中に入射した電子が準粒子散乱の反作用により入射方向から曲がるのが観測された。この実験は、初めてのカイラリティの直接観測である。カイラリティの存在はトポロジカル超流動体であることの決定的な証拠となる。

(2) トポロジカル超伝導体

重い電子系超伝導体 UPt_3 のトポロジカルな性質を明らかにした。エッジ状態に束縛された準粒子の分散関係を解析計算により導出することで、束縛された準粒子がマヨラナフェルミオンでありフェルミエネルギーを横切る線形分散を持つことを示した(図1)。このため、エッジでのみ超伝導ギャップ内にトポロジカルフェルミアークとして有限な状態密度が現れる。マヨラナフェルミオンの性質から、このトポロジカルフェルミアークは特定方向の磁場に対してのみ消失する異方的な磁場応答を示すので、磁場中のトンネル分光でのゼロバイアス伝導率の減少としてマヨラナフェルミオンを観測可能であることを提案した。

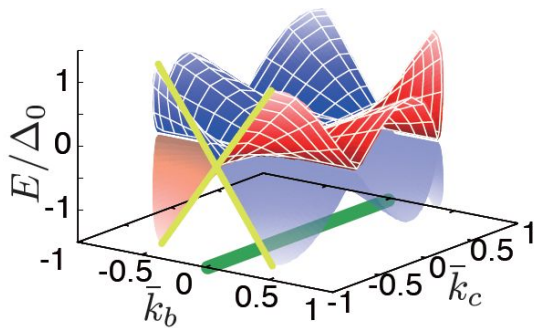


図1 UPt₃のエッジ状態の線形分散とトポロジカルフェルミアーク。

PrOs₄Sb₁₂のギャップ関数は明らかになっていないが、サイクリック *d*波超伝導状態が実現している可能性がある。サイクリック *d*波状態のギャップ関数は8つのポイントノードを持ち、時間反転対称性が破れることでトポロジカル超伝導体としての性質を示す。研究代表者は、エッジに質量が流れることや、ポイントノードを射影した点をつなぐトポロジカルフェルミアークがエッジ状態に現れることを明らかにした。トポロジカルフェルミアークによるゼロエネルギー状態は比較的容易に観測されることが期待できるので、PrOs₄Sb₁₂はトポロジカル超伝導体としての性質からギャップ関数が決定される初めての超伝導体となるかもしれない。

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4件)

Y. Tsutsumi, “Mass Current at a Domain Wall in Superfluid ³He A-Phase”, *Journal of Low Temperature Physics* **176**, 51-55 (2014). 査読有

DOI: 10.1007/s10909-013-0968-5

Y. Tsutsumi, M. Ishikawa, T. Kawakami, T. Mizushima, M. Sato, M. Ichioka, and K. Machida, “UPt₃ as a Topological Crystalline Superconductor”, *Journal of the Physical Society of Japan* **82**, 113707-1-5 (2013). 査読有

DOI: 10.7566/JPSJ.82.113707

H. Ikegami, Y. Tsutsumi, and K. Kono, “Chiral Symmetry Breaking in Superfluid ³He-A”, *Science* **341**, 59-62 (2013). 査読有

DOI: 10.1126/science.1236509

M. Ishikawa, Y. Tsutsumi, M. Ichioka, and K. Machida, “Surface Bound States and Spontaneous Current in Cyclic *d*-Wave Superconductors”, *Journal of the Physical Society of Japan* **82**, 043711-1-5 (2013). 査読有

DOI: 10.7566/JPSJ.82.043711

[学会発表](計10件)

Y. Tsutsumi, T. Kawakami, K. Shiozaki, M. Sato, and K. Machida, “Topological Vortex Bound State in Superfluid ³He B-Phase”, The 27th International Conference on Low Temperature Physics (LT27), 2014年8月6日~2014年8月13日, Buenos Aires (Argentina).

堤康雅、川上拓人、塩崎謙、佐藤昌利、町田一成、『超流動ヘリウム3-B相の量子渦束縛状態とトポロジー』、物性研短期研究会「スーパーマターが拓く新量子現象」, 2014年4月17日~2014年4月19日、東京大学物性研究所(千葉県)。堤康雅、『超流動ヘリウム3-A相のカイラルドメインにおける質量流』、日本物理学会第69回年次大会、2014年3月27日~2014年3月30日、東海大学(神奈川県)。

Y. Tsutsumi, “Topological mass current on a domain wall in superfluid ³He A-phase”, APS March Meeting 2014, 2014年3月3日~2014年3月7日, Denver (USA).

堤康雅、石川昌樹、川上拓人、水島健、佐藤昌利、市岡優典、町田一成、『UPt₃ as a Topological Crystalline Superconductor』、「対称性の破れた凝縮系におけるトポロジカル量子現象」第4回領域研究会、2013年12月19日~2013年12月21日、名古屋大学。

Y. Tsutsumi, M. Ishikawa, T. Kawakami, T. Mizushima, M. Sato, M. Ichioka, and K. Machida, “UPt₃ as a Topological Crystalline Superconductor”, International Workshop for Young Researchers on Topological Quantum Phenomena in Condensed Matter with Broken Symmetries, 2013年10月22日~2013年10月26日, カルチャーリゾートフェストーン(沖縄県)。

Y. Tsutsumi, M. Ishikawa, T. Kawakami, T. Mizushima, M. Sato, M. Ichioka, and K. Machida, “UPt₃ as a Topological Superconductor”, International Conference on Strongly Correlated Electron Systems (SCES 2013), 2013年8月5日~2013年8月9日, 東京大学。

Y. Tsutsumi, “Mass Current at a Domain Wall in Superfluid ³He A-Phase”, International Symposium on Quantum Fluids and Solids (QFS2013), 2013年8月1日~2013年8月6日, くまびきメッセ(島根県)。

堤康雅、石川昌樹、川上拓人、水島健、市岡優典、町田一成、『トポロジカル超

伝導体としての UPt_3 、日本物理学会第
68回年次大会、2013年3月26日～
2013年3月29日、広島大学。

Y. Tsutsumi, “Topological current at an
interface between superfluid ^3He
A-phases”, APS March Meeting 2013,
2013年3月18日～2013年3月22日,
Baltimore (USA).

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.riken.jp/lab-www/cond-mat-theory/tsutsumi/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

堤 康雅 (TSUTSUMI Yasumasa)

独立行政法人理化学研究所・古崎物性理論

研究室・基礎科学特別研究員

研究者番号：10631781