

論文審査の結果の要旨

氏名 中山 健

物性におけるトポロジーの果たす役割については、多くの研究がなされている。最近ではノードのある超伝導体に対しても、トポロジーの概念が当てはめられ、トポロジカル超伝導体として活発に研究が行われている。本研究は、この問題に対し、さらに軌道自由度がある場合を考え、これまで考えられてきた以上の興味深い現象が生じることを2つのモデルについて理論的に研究した。トポロジカル超伝導体の研究に、新しい観点からの情報が得られると考えられる。

本論文の第一章は序論であり、それに続いて第二章では、これまでのトポロジカル超伝導体の理論についてまとめられている。とくに最近提唱された、ボゴリウボフ・フェルミ面という、超伝導状態における部分的フェルミ面の出現という理論の紹介と、そこにおけるトポロジカル数について紹介している。第三章と第四章が、本論文での主な2つの研究成果であり、第五章はまとめと結論に当てられている。

具体的に第三章では Sr_2TiO_3 上の単層 FeSe の超伝導のモデルについて調べている。この物質はノードのない d 波超伝導の候補物質である。この物質に対して 2 軌道のモデルを考え、対称性から許される超伝導状態を議論し、特徴的な 2 種類の d 波超伝導状態があることを示した。両者の波数空間内の複数のノードについてトポロジカル数が決定できるが、両者のトポロジカル数の配置が異なるということを示した。さらにスピン軌道相互作用を減少させていくと、ノードは対消滅しトポロジカルに自明な状態に相転移するが、その過程が 2 種類の d 波超伝導体で異なるということを見出した。とくに同じ符号のトポロジカル数をもつ2つのノードが対消滅する場合に、新しいタイプの消滅の仕方が生じることを見出した。また、試料端でのアンドレーエフ束縛状態の違い、横磁場をかけることによる新しいノーダル・ラインの発生などを議論した。

次に、第四章ではボゴリウボフ・フェルミ面をもつ超伝導状態の可能性を調べた。時間反転対称性を破った多軌道超伝導体では、ノーダル・ラインが拡張されて部分的に面状のフェルミ面をもつ状態が可能であるという議論があるが、このアイデアを UPt_3 という重い電子系の物質に当てはめたらどうなるかということも議論した。 UPt_3 は複雑な相図を持ち、複数のノード成分を持つと考えられている。まず、結晶のもつ対称性から E_{1g} の既約表現に属する超伝導状態を提唱し、この仮定のもとで平面内 p 波超伝導成分が存在すると、ボゴリウボフ・フェルミ面が生じることを見出した。このボゴリウボフ・フェルミ面について、トポロジカル数の定義を与え、今の場合に非自明な状態であることを示した。さらに、得られた状態において、簡単なボルツマン方程式を用いた熱伝導度を求め、実験で得られている異方

性などを説明できる可能性を示した。また、この新しい状態の相図上での実現の可能性について議論している。UPt₃の複雑な物性を完全に理解できるまでには至っていないが、ボゴリウボフ・フェルミ面という新しい解釈の可能性を提唱した点が評価できる。

以上のように本研究では、トポロジカル超伝導体を多軌道の場合に拡張し、具体的な2つの物質系を念頭に新しいタイプの状態を理論的に研究した。とくに、非自明なトポロジカル数を持つノードに関して、これまでに知られていなかったタイプの消滅の仕方の発見したこと、および、超伝導状態でありながら部分的なフェルミ面をもつというボゴリウボフ・フェルミ面の可能性の具体的物質における提唱など、非自明で興味深い結果を含んでいる。実験的な検証、新しく提唱された状態のエネルギー的な安定性、相図上の実現可能性などについてはまだ完璧に理解されておらず、今後の研究が必要であると考えられるが、いくつかの新しい提案を具体的に示したことは評価できる。

本論文の内容の内、第三章の部分は、すでに英文雑誌に発表済みである。また第四章の部分も投稿する準備がなされている。また本研究はアメリカ・ミルウォーキー大学のAgterberg教授ほか数名との共同研究であるが、論文提出者は、実際のモデルの提唱・解析・物理量の計算などの点において本質的な寄与をしていると認められる。以上をもって審査員一同は、本論文が博士(理学)の学位を授与するにふさわしいものであると認定した。