

博士論文の要旨及び審査結果の要旨

氏名 吉田 智大
 学位 博士 (理学)
 学位記番号 新大院博 (理) 第 391 号
 学位授与の日付 平成 26 年 9 月 22 日
 学位授与の要件 学位規則第 4 条第 1 項該当
 博士論文名 局所的な空間反転対称性が欠如した系におけるエキゾチック超伝導の理論研究

論文審査委員 主査 教授・大野 義章
 副査 教授・摂待 力生
 副査 教授・武田 直也
 副査 准教授・柳瀬 陽一
 副査 准教授・奥西 巧一
 副査 准教授・金 鋼

博士論文の要旨

「局所的な空間反転対称性がない系のエキゾチック超伝導」とは、結晶全体として空間反転対称性を保存しているが結晶構造の一部を見ると空間反転対称性が欠如しているように見える物質で発現する超伝導を意味する。現在の超伝導研究の対象となる物質の大半はこのクラスに入るが、これまでそのような結晶構造の特徴に着目した研究は存在しなかった。申請者は、局所的な空間反転対称性がない結晶構造には特有のスピン軌道相互作用が存在し、それが数々のエキゾチック超伝導相を生み出すことを、世界に先駆けて発見した。その成果をまとめたものが本博士論文である。

本博士論文の第 1 章では、空間反転対称性が欠如した結晶構造に特有の反対称スピン軌道相互作用の構造とその微視的な起源について解説している。これまでに行われた理論研究では反対称スピン軌道相互作用を現象論的に導入していたため、その詳しい性質についての理解が不足していた。その正確な理解に基づいて本研究の着想を得たことを説明している。

第 2 章では、局所的な空間反転対称性が欠如した多層系の超伝導を記述するミニマルモデルを導入し、それを平均場理論に基づいて解析する計算手法を説明している。

第 3 章から第 5 章までが本博士論文の核心となる部分であり、まず第 3 章では平行磁場中の多層系超伝導体で複素ストライプ相が安定になることを示している。第 4 章では、垂直磁場中でペア密度波相が安定になることを示している。これらの超伝導相は、過去の研究で示されたことがない新しいタイプの超伝導相である。それらの新奇超伝導相が局所的な空間反転対称性がない結晶構造に特有の交替型反対称スピン軌道相互作用により安定となるメカニズムを丁寧に説明している。

第 5 章では、ペア密度波相が新しいタイプのトポロジカル超伝導体になることを示している。現在の物性物理学分野ではトポロジカルに非自明な量子相の研究が爆発的に進んでいる。その代表的なものがトポロジカル絶縁体とトポロジカル超伝導である。トポロジカル超伝導の候補について幾つかの提案がなされているが、そのほとんどがスピン三重項超

伝導体を対象としている。スピン三重項超伝導体は非常に稀な存在であるため、研究対象は限定的であり、人工的な制御も出来ない状況が続いている。本博士論文では、ペア密度波相のパリティが奇であることにより、本質的にスピン一重項超伝導であるにも関わらずトポロジカル超伝導となることが示された。この結果は世の中に数多く存在するS波超伝導体を用いてトポロジカル超伝導体を実現し制御する可能性に途を拓くものである。今後大きな注目を集めると期待される。

なお、これまでに用いられてきたトポロジカル周期表に基づいてペア密度波相のトポロジカル数を定義することは出来ないため、新しいトポロジカル数を定義する必要がある。第5章ではミラー対称性に基づいてトポロジカル数を定義したことを述べている。この手法により、トポロジカル超伝導に対する研究の幅が広がったことも重要な成果である。

本博士論文は局所的な空間反転対称性がない結晶構造におけるエキゾチック超伝導の存在を一般的な観点から示したものであり、その研究対象となりうる物質は数多くある。本博士論文中では特に、最近京都大学において作成された重い電子系人工超格子 $\text{CeCoIn}_5/\text{YbCoIn}_5$ に対する実験結果が紹介されており、本博士論文で示した理論的予言の一部が検証されたことも示されている。これらの研究成果を別の物質群に対して応用する研究も世界各地で始まっている。本博士論文はその端緒を作った独創性の高い研究と考えられる。

審査結果の要旨

本博士論文は、局所的な空間反転対称性がない結晶構造に特有のスピン軌道相互作用が生み出す新奇超伝導相を理論的に予言したものである。申請者はスピン軌道相互作用の微視的な起源に基づいてミニマルモデルを構成した。そして、平均場理論に基づく解析結果により、複素ストライプ相およびペア密度波相が安定な超伝導状態になることを発見した。また、申請者はペア密度波相が新しいタイプのトポロジカル超伝導体になることを示し、それを特徴づけるトポロジカル数を新たに導入した。これらの研究成果は超伝導分野における理論研究および実験研究を刺激し、国際的な研究の進展を導いた。その独創性を高く評価することが出来る。

これらの研究成果は4本の原著論文として出版されている。そのうち1本は *J. Phys. Soc. Jpn.* の注目論文に選定され、科学新聞により報道された。その他に、国際会議のプロシーディングス（査読付き）が2本出版されている。また、1本のレビュー論文を *J. Phys. Soc. Jpn.* の *Special Topics* として出版している。その内容は本博士論文の研究成果を中心としたものである。また、日本語解説誌「固体物理」において1本の解説を出版している。

よって、本論文は博士（理学）の博士論文として十分であると認定した。