

京都大学	博士 ( 理学 )	氏名	金杉 翔太
論文題目	Exotic superconductivity associated with parity symmetry breaking (パリティ対称性の破れに関連するエキゾチック超伝導)		
(論文内容の要旨)			
<p>空間反転対称性と時間反転対称性は物理学における基本的対称性の例である。これらの対称性が自発的に破れる現象は、微視的な世界の成り立ちを探る素粒子物理学等の研究で広く調べられてきたことに加えて、私たちの世界を構成する巨視的な物質の世界において様々な現象を引き起こすことが明らかにされてきた。後者に相当する物性物理学においては、マルチフェロイクス、スピントロニクス、非線形光学、トポロジカル相、磁性・多極子秩序、超伝導、など様々なトピックスにおいて、空間反転対称性や時間反転対称性の自発的破れが引き起こす物性現象が調べられてきた。また、強相関電子系の多体効果がこれら対称性の自発的破れを引き起こす秩序化現象が近年の注目を集めている。</p> <p>このような背景の下、本学位論文で金杉氏は、超伝導体における空間反転対称性の破れに関する理論研究を行った。本論文は主に、[1]強誘電超伝導の理論的提案とSrTiO<sub>3</sub>における実現可能性の検証 (2章)、[2]局所的な空間反転対称性が破れた系における多重スピン三重項超伝導の解析 (3章)、[3]空間反転対称性と時間反転対称性が同時に破れた超伝導体における非対称ボゴリウボフ準粒子の解明とアナポール超伝導の理論的提案 (4章)、の3つの部分から構成される。以下において、各項目を要約する。</p> <p>[1] 強相関電子系においては、磁性やネマティック秩序などの相転移近傍で異方的超伝導が現れることが知られている。これらの秩序は空間反転対称性を破らないのに対し、ポーラーな構造相転移近傍では空間反転対称性の自発的破れが超伝導により誘起されることが本研究により示された。その結果を量子常誘電体として知られているSrTiO<sub>3</sub>に適用し、現実的な3軌道模型の解析により熱力学的安定性を示した。このような現象を「強誘電超伝導」と名付けている。また、強誘電超伝導により、奇周波数クーパー対が現れることを群論的解析と3軌道模型の微視的解析の両面から示した。</p> <p>[2] スピン三重項超伝導体はトポロジカル超伝導体の候補であることが知られている。一方、強相関電子系の研究により、2次元三角格子ハバード模型においてスピン三重項超伝導が安定になることが知られている。しかし、通常の三角格子ハバード模型におけるスピン三重項超伝導相はトポロジカルに自明である。本研究は2層三角格子ハバード模型を解析し、局所的な空間反転対称性の破れによるスピン軌道相互作用の働きにより多彩なスピン三重項超伝導相が現れることを示した。また、その一つがトポロジカル超伝導になることを示した。</p> <p>[3] 空間反転対称性に加えて時間反転対称性が自発的に破れる超伝導相が近年の注目を集めている。群論的な解析により、そのような対称性の下では超伝導体の準粒子、すなわちボゴリウボフ準粒子が非対称なスペクトルを持つことが予想されているが、従来理論模型では対称なスペクトルしか得られていなかった。本研究では、金属電子が有する軌道や副格子などの多自由度性を考慮することによってはじめて非対称なボゴリウボフ準粒子が得られることを明らかにした。その要件を表す簡便な条件式を導出し、2自由度の系においては全部で8個のクラスが存在することを示した。また、これらの結果を最近発見された超伝導体であるUTe<sub>2</sub>に適用し、そこでは副格子自由度により条件式が満たされ、非対称ボゴリウボフ準粒子が現れることを示した。さらに、ギンツブルグ-ランダウ理論を導出し、群論的な解析と合わせて、クーパー対が有限の重心運動量を持つケースがあることを予言した。このような超伝導相を「アナポール超伝導」と名付けた。</p>			

(論文審査の結果の要旨)

近年の実験研究において、物質の様々な制御法が開拓され、また実際に数多くの新物質が発見・創生されている。その柱の一つが対称性の制御であり、対称性の破れに由来する物理現象の発見は凄まじいスピードで進展している。なかでも、磁性や超伝導は多体系の協力現象としても興味深く、理論と実験が協力して研究が進められる舞台となっている。

このような研究においては、物質の様々な対称性のなかで空間反転対称性が特に重要なものと考えられている。例えば、近年進められた磁性体や多極子物質の分類学では、空間反転操作に対するパリティ固有値が交差応答や非線形応答の一般的な選択測を導くことが示されている。一方、超伝導体における空間反転対称性の制御については研究された例が非常に少なく、その理論研究が待たれていた。このような背景のもとで、本学位論文では超伝導体における空間反転対称性の破れに関する3つの理論研究の成果をまとめている。以下では、それぞれの結果の意義について述べる。

[1] 強誘電超伝導を理論的に提案し、 $\text{SrTiO}_3$ における実現可能性を検証した。この研究においては、量子常誘電体において超伝導がポーラーな構造相転移を引き起こし、結果として空間反転対称性が自発的に破れる現象を予言した。この理論的予言は $\text{SrTiO}_3$ 薄膜の実験により支持されている。従来の研究では、磁気秩序やネマティック秩序と超伝導の関係が広く調べられてきたが、そこでは複数の秩序化現象が競合することが一般的である。一方、本研究では、空間反転対称性が自発的に破れる相転移と超伝導が協力して秩序化することが示された。この点により、超伝導と他の秩序化の相関に対する新しい理解を与えた意義を認めることができる。また、本研究では磁場により強誘電超伝導が誘起される現象を示しており、それは非線形磁気電気効果の一例である。この点によりマルチフェロイクスの文脈でも進展が認められる。本研究の後に、強誘電超伝導や強誘電揺らぎによる超伝導の研究が数多く行われていることから、それらの先駆的な研究としても評価できる。

[2] 局所的な空間反転対称性が破れた系における多重スピン三重項超伝導相を解析した。この研究では2層三角格子ハバード模型において様々なスピン三重項超伝導が安定になることが示された。特に、局所的な空間反転対称性の破れが与える影響が詳細に調べられている。これまでは平均場理論の結果により導出された選択則が超伝導相を決定すると考えられてきたが、本研究では選択則に反する超伝導相が有効相互作用の異方性により安定化することも示しており、従来の認識を更新している。また、トポロジカル超伝導の研究においてスピン三重項超伝導が広く調べられているが、多くは現象論であり、強相関電子系の微視的模型からトポロジカル超伝導が結論された例は数少ない。本研究はその一例となる基本的模型を示したという点でも意義深い。

[3] 空間反転対称性と時間反転対称性が同時に破れた超伝導体における非対称ボゴリウボフ準粒子を解明し、アナポール超伝導の理論的提案を行った。この研究では、空間反転対称性に加えて時間反転対称性を自発的に破る超伝導相の特徴である、非対称ボゴリウボフ準粒子が現れるメカニズムが示された。非対称なボゴリウボフ準粒子は様々な物性現象を生み出すことが予想されるが、その一例として、本研究ではクーパー対が運動量を持つアナポール超伝導が予言されている。これは磁場下のFulde-Ferrell-Larkin-Ovchinnikov超伝導に類似しているが、ゼロ磁場で安定になることが特徴である。アナポール超伝導はPT対称な極性ベクトル(アナポールベクトル)により特徴づけられ、その特性として超伝導電流による制御が可能であることが示されている。したがって超伝導スピントロニクス観点でも意義がある。また、近年活発な研究が進められている $\text{UTe}_2$ に対する実現可能性が言及されており、そこでの非線形光学応答や輸送現象を調べる後続研究が複数行われている。それらの基礎となる理論的基盤を与えた点も評価できる。

対称性の自発的破れとその制御は物性物理学における重要課題であるが、なかでも基本的な空間反転対称性と量子凝縮相である超伝導の関係を明らかにした点において本研究は従来の理解を大きく更新しており、理論研究として重要な意義がある。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、令和4年1月24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： 年 月 日以降