



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	Discontinuous Transition to Superconducting Phase [an abstract of dissertation and a summary of dissertation review]
Author(s)	佐藤, 匠
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(工学)
Dissertation Number	甲第15834号
Issue Date	2024-03-25
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/91910
Rights(URL)	https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Type	doctoral thesis
File Information	Takumi_Sato_review.pdf, 審査の要旨



学位論文審査の要旨

博士の専攻分野の名称 博士(工学) 氏名 佐藤 匠

審査担当者 主査 准教授 浅野 泰寛
副査 教授 矢久保 考介
副査 教授 市村 晃一
副査 教授 野村 竜司

学位論文題名

Discontinuous Transition to Superconducting Phase

(超伝導相への不連続転移)

1957 年 Bardeen-Cooper-Schrieffer 理論により超伝導の発現機構が微視的に理解されて以来、超伝導を担うクーパー対の対称性と超伝導現象の特徴との関係解明は固体物理学における中心課題の一つであり続けている。クーパー対を構成する 2 電子の内部自由度 (スピンと空間座標) によって分類されるクーパー対の対称クラスは、スピナー重項偶パリティとスピン三重項奇パリティの二種類に大別される。スピンや空間座標に加えて、2 電子間の時間という内部自由度の交換に対する奇偶性に着目すると、新たに周波数対称性という分類指標が増えることになる。既述の二つのクラスは偶周波数対称性に属し、このクラスのクーパー対が引き起こす物理現象に関しては、すでに多くの研究がなされている。その一方で、奇周波数対称性に属するクーパー対に特有な物理現象が議論され始めたのはごく最近になってからである。特に、空間的に一様な超伝導体中に副次的な対相関として現れる奇周波数クーパー対に関する研究はほとんどなかった。この空白を埋めたのが本研究である。奇周波数クーパー対が空間的に一様な超伝導基底状態の一部を形成する理論モデルの電磁気学的性質や熱力学的性質を解析し、その成果をまとめたのが本学位論文である。

第 2 章では、超伝導現象を担うクーパー対の対称性に関して、その分類指標、研究の歴史的経緯、対称性クラスと超伝導現象の特徴を概観している。単純な電子構造の電子がクーパー対を作って凝縮した超伝導体中において、奇周波数クーパー対は常に局所的な対相関としてしか存在できないこと、また外部磁場に対して常磁性応答することなど、先行研究のまとめを行っている。

第 3 章では、空間的に一様な奇周波数クーパー対が現れる必要条件を一明らかにした上で、三つの理論モデルにおいて奇周波数クーパー対の出現と超伝導相の不安定性の関係を明らかにした。まず、強いスピン・軌道相互作用の下で大きな角運動量をもつ電子がクーパー対を組み超伝導を発現する $J=3/2$ 超伝導のモデルにおいて、スピン・軌道相互作用が奇周波数クーパー対を誘起する摂動であること、特に有限温度において奇周波数クーパー対のために超伝導相が不安定化すること、その結果スピン・軌道相互作用が大きくなると常伝導相から超伝導相への転移が不連続 (第 1 種の相転移) になることを示した。この結論を導くために、自由エネルギーのギンツブルグ・ランダウ (GL) 展開係数をゴルコフ方程式に従うグリーン関数を用いて厳密に表し、また超伝導現象を記述する上で不可欠な超流動密度の解析的な表式を導出した。その結果、まずこの二つの異なる物理量の表式が比例係数をのぞいて一致することを見出した。この成果から、以下のような解析が可能になった。奇周波数クーパー対が常磁性応答をするために熱力学的に不安定な存在であることの帰結とし

て、超流動密度を減少させることを明らかにした。有限温度においてこの効果は顕著であり、これは奇周波数クーパー対の相関関数が松原周波数に対して線形であることの帰結である。同時に、奇周波数クーパー対の振幅が相対的に大きくなると、GL 展開の 4 次係数が正から負へと符号を変えることを明らかにした。GL 展開の 4 次係数が正であることは超伝導相の熱力学的安定性を保証しており、展開の 4 次係数が正であること自体が自由エネルギーを GL 展開できる前提条件になっている。すなわち、奇周波数クーパー対が超流動密度を減少させることで有限温度における超伝導状態が著しく不安定になる、という物理描像を結ぶことに成功した。その一方絶対零度近傍では、奇周波数クーパー対の影響は極めて限定的であることも、相関関数が松原周波数依存性から説明した。このように二つの温度領域で奇周波数クーパー対が超流動密度に与える影響が顕著に異なる結果、常伝導相から超伝導相への転移が不連続になることを結論した。さらに強調すべきは、超伝導相が不安定になるという現象が $J=3/2$ 超伝導だけの特徴ではなく、空間的に一様な奇周波数クーパー対を副次的な対相関として含む超伝導体に共通する性質であると結論できることである。実際に、ゼーマン場中の金属超伝導体においてはゼーマン場が奇周波数クーパー対を誘起し、2 軌道超伝導体においては軌道混成が奇周波数クーパー対を誘起することを示した。また、これら超伝導状態にける超流動密度と GL 展開の 4 次係数は、 $J=3/2$ 超伝導において見出されたのと同じ数理構造で関係づけられること示した。この事実は現象の普遍性を表現している。

第 4 章では、奇周波数クーパー対を含む一様な超伝導体に空間的にランダムな不純物散乱ポテンシャルを導入した場合、転移温度が低下することを現実の物質に即した理論模型に基づいて明らかにした。一般に、s 波対称性に属するクーパー対は不純物散乱によって壊れることがないと考えられている。1960 年代に理論・実験両面で確立したこの知見は、単一の伝導帯で表されるような通常金属において正しい。MgB2 や鉄系超伝導体の発見により注目されるようになった多バンド/多軌道超伝導体においては、しかしこの知見が常に正しくはないことも知られていたが、その理由は長らく不明であった。この事態は、先行した理論研究における課題設定に起因している。先行研究では、極めて理想的な模型を採用し解析的に転移温度を計算するか、あるいはバンド計算に基づく複雑な多軌道模型を完全に数値解析するかのいずれかを行っており、結論が模型によらず一般性に成立するかどうかを議論できていなかった。本研究では、トポロジカル絶縁体 Bi3Se2 に Cu をドーピングすることによって金属化した際に現れる超伝導に関して提案された四種類の超伝導状態を仮定して、その転移温度と不純物ポテンシャルの大きさの関係を調べた。この物質の電子構造は比較的簡単な模型を用いて表されているため、グリーン関数の従うゴルコフ方程式を解析的に解くことができた。この利点を活かし解析を行なった結果、不純物ポテンシャルの無い極限において、空間的に一様な奇周波数クーパー対が基底状態を構成すると、不純物散乱の振幅を増加させるに従って転移温度が減少することがわかった。この結論は、奇周波数クーパー対が引き起こす顕著な物理現象の一例になっている。

これを要するに著者は、奇周波数クーパー対を含む超伝導体の一般的性質を理論的に明らかにした。これらの知見は、超伝導現象論の進展に貢献するところ大なるものがある。よって著者は、北海道大学博士 (工学) の学位を授与される資格があるものと認める。