



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_abstract.pdf, 論文内容の要旨



学 位 論 文 内 容 の 要 旨

博士の専攻分野の名称 博士（工学） 氏名 佐藤 匠

学 位 論 文 題 名

Discontinuous Transition to Superconducting Phase

(超伝導相への不連続転移)

BCS 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二電子の内部自由度 (スピン、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、スピン一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。例えば単体金属における超伝導の対称性は前者に属し、重い電子系化合物で発現する超伝導の対称性は後者に属すると考えられている。クーパー対のスピン、パリティといった内部自由度が物理現象に及ぼす影響は、長年の研究によって徐々に明らかになってきた。では、クーパー対の対称クラスはこの二種類で尽きているだろうか? 1974 年に ベレジンスキーは新たな対称性をもつクーパー対を提案した。今日、奇周波数クーパー対と呼ばれるその電子対の生成は、二電子間の「相対時間」の自由度を考慮することで生まれた概念である。これまでの研究により、奇周波数クーパー対は磁束芯、不純物近傍、そして超伝導体の表面など、空間的に不均一な領域に局所的に現れることがわかっている。マイスナー効果は超伝導体が完全反磁性を示す現象であり、多くのクーパー対が位相を揃えて凝縮した結果であると理解されている。その意味で、クーパー対は通常、反磁性を示すと言ってよい。しかし、この局所的に現れる奇周波数クーパー対は常磁性応答を示し、そのために、微小な超伝導体や超伝導接合系で起きる電磁気学的な異常の原因となっている。奇周波数クーパー対の形成という概念を用いることによって、不均一超伝導系における様々な物理現象の性質を統一的に理解しようとする模索が、今も続いている。すなわち、奇周波数クーパー対の形成とは、合理的に超伝導現象を理解するための有効な描像であると言えるのである。

上述のように、局所的に現れる奇周波数クーパー対に関して既に多くの成果が得られているが、空間的に一様な超伝導体には奇周波数クーパー対は存在しないのだろうか? 実は、これはあまり自明な問いではなかった。実際に当初、単一の伝導帯で記述される金属のように単純な構造の電子系で発現する超伝導体中に、奇周波数クーパー対は現れないと考えられていた。2010 年代半ばの時点で、空間的に一様な奇周波数クーパー対を内包する超伝導状態とは何か? 磁気応答は反磁性なのか常磁性なのか? その特徴的な物理現象とは何か? が研究課題として挙げられていた。これまでの研究によって、空間的に一様な奇周波数クーパー対を内包するような超伝導状態の条件を厳密に示すことができています。一般的に、フェルミ準位近傍の電子構造が軌道縮退に起因する内部自由度を持つ場合、この条件が満足できる傾向が強い。従って、トポロジカルに非自明な絶縁体や半金属を母物質とする超伝導体は、この条件を満たす。これらの超伝導状態において、奇周波数クーパー対は副次的な対相関として一様な基底状態を構成している。実際に、内部自由度をもつ超伝導体の特徴として知られるボゴリューボフ・フェルミ面における準粒子と奇周波数クーパー対が共存することが明らかになっている。また、このようにして現れた奇周波数クーパー対は、常磁性を示すこと、またその結果、超伝導転移温度を低下させることも示された。しかしこの事実と同時に、その特徴

的な物理現象を極めて不明瞭にしてしまったのである。奇周波数クーパー対が通常の偶周波数クーパー対よりも大きな振幅を持ち支配的になってはじめて、奇周波数クーパー対に特有の物理現象を示すと期待されるが、常磁性的である奇周波数クーパー対は熱力学的に不安定であるため支配的な対相関になり得ないのである。そのため、超伝導体中に一様に存在する奇周波数クーパー対が物理現象に及ぼす影響が、全くわかっていなかった。本研究の目的は、この知見の空白を埋めることにある。以下では、空間的に一様な奇周波数クーパー対が存在する超伝導の性質について、本研究で得られた結果の概要を示す。

常伝導相から超伝導相への転移が二次相転移であることは広く知られている。しかし、最近 $J = 3/2$ 電子系と呼ばれる一群の超伝導体において、転移が一次相転移 (不連続転移) になる場合があることが数値シミュレーションを用いて示された。このような不連続転移の認識は、しかし、1960 年代に遡ることになる。当時議論されたのは、ゼーマン磁場中のスピナー重項 s 波超伝導体である。さらに、同様な不連続転移が多軌道/多バンド超伝導体でも報告されていた。本研究では、これらの超伝導を記述するモデルに共通する特徴として、一様な奇周波数クーパー対の存在が挙げられることに着目し、不連続転移と奇周波数クーパー対の関係性について調べた。具体的には、ギンツブルグ・ランダウ (GL) 自由エネルギーを異常グリーン関数を用いて展開し、奇周波数クーパー対の存在と超伝導相の安定性の関係を議論した。一般に、展開の二次係数が超伝導転移の有無を記述し、四次係数が正であることによって超伝導相の安定性が保証されている。計算の結果、奇周波数クーパー対は GL 自由エネルギーの四次係数を減じる、すなわち超伝導相を不安定化させることがわかった。ハミルトニアンのパラメータを変えて奇周波数クーパー対の振幅を大きくすると、四次項が符号変化し、常伝導-超伝導転移が不連続転移になることを示した。超流動密度の計算から、この不連続転移は (1) 奇周波数クーパー対が常磁性応答を示すこと、(2) 対応する異常グリーン関数が松原周波数に比例すること、の二つの事実に起因することがわかった。この二つの性質は一様に存在する奇周波数クーパー対がもつ基本的な性質であるため、超伝導相への不連続転移は奇周波数クーパー対を内包する超伝導体に共通する一般的な性質であることを見出した。

多くの s 波超伝導は結晶構造の乱れ等に起因する非磁性不純物散乱に対して頑強であり、その転移温度は不純物の濃度に依らない。しかし、ある種の高軌道/多バンド超伝導体においては、転移温度が不純物濃度の増大とともに減少することが指摘されていた。高軌道/多バンド超伝導体は一様な奇周波数クーパー対が現れる系の典型例である。本研究では様々な超伝導の秩序が提案されている高軌道超伝導体 $\text{Cu}_x\text{Bi}_2\text{Se}_3$ を念頭に置き、非磁性不純物が転移温度に及ぼす影響をボルン近似の範囲内で調べた。このモデルにおいて、不純物効果は超伝導秩序変数が二電子の軌道自由度の入替操作に対して対称な軌道偶パリティの場合と、反対称な軌道奇パリティの場合で大きく変わることがわかった。軌道奇パリティの秩序の転移温度は不純物濃度の増大とともに急激に減少する。これは高軌道系に特有の軌道間不純物散乱により、ダーティ・リミットにおいて二つの軌道が等質化することが理由であることがわかった。その一方で、軌道偶パリティの秩序は不純物散乱に対して基本的には頑強であることがわかった。しかし転移温度は、クリーン・リミットにおいて奇周波数クーパー対が存在すると不純物濃度の減少関数になることもわかった。不純物効果は奇周波数クーパー対の存在を反映し、質的に変わりうるということが明らかになった。