HOKKAIDO UNIVERSITY

| | |
|---|---|
| Title | 2バンド超伝導体における奇周波数Cooper対の物理［論文内容及び審査の要旨］ |
| Author(s) | 佐々木, 章宏 |
| Degree Grantor | 北海道大学 |
| Degree Name | 博士(工学) |
| Dissertation Number | 甲第15833号 |
| Issue Date | 2024-03-25 |
| Doc URL | https://hdl.handle.net/2115/91906 |
| Rights(URL) | https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/ |
| Type | doctoral thesis |
| File Information | Akihiro_Sasaki_abstract.pdf, 論文内容の要旨 |

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

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　佐々木　章宏

学　位　論　文　題　名

2 バンド超伝導体における奇周波数 Cooper 対の物理

(Physics of odd-frequency Cooper pairs in two-band superconductors)

超伝導とは極低温において金属の電気抵抗が消失する、あるいは金属が完全反磁性 (Meissner 効果) を示すなど、電磁気学的に異常な物理現象を指す。そのような現象を起こす物質を超伝導体と呼んでいる。超伝導が発現する機構は、1957 年 Bardeen、Cooper、Schrieffer の三人の研究者によって明らかになった。それによると、Fermi 面上の 2 電子に有効な引力相互作用が働いた結果 Cooper 対という束縛状態を形成し、多くの Cooper 対が位相を揃えて低エネルギーの状態に凝縮することで超伝導状態は実現している。電子が従う Fermi-Dirac 統計性により、Cooper 対を記述する対相関関数は 2 粒子の交換に対して反対称でなければならない。各々の電子がスピンと空間座標の自由度をもつことを考えると、対相関関数はスピン一重項偶パリティもしくはスピン三重項奇パリティの対称性クラスに分類できる。実際、多くの超伝導体がスピン一重項 $s$ 波対称性クラスに属する超伝導秩序を持つことがわかっている。$d$ 波対称性の超伝導が発現する銅酸化物高温超伝導体の発見以来、超伝導の対称性と物理現象の特徴について多くの研究がなされている。その一方で、スピン三重項対称性の超伝導体は希少であり、現在でも物質探索が行われている。スピン三重項超伝導体に特有の物理現象を明らかにすることは、スピン三重項超伝導体を特定する上においても重要な研究課題である。

超伝導秩序を担う Cooper 対の対称性は、今のところ上述の二種類に限られている。しかし、超伝導秩序にはならないが超伝導体中に対相関としてのみ存在する Cooper 対があり、このような副次的な対相関が超伝導現象に深く関わっていることが、この 20 年ほどの研究で明らかになってきた。その代表例が奇周波数 Cooper 対である。電子は、座標とスピンに加えて時間の自由度を持つため、Cooper 対を組む 2 電子の時間の入れ替えに対して対相関関数は偶奇性をもつ。冒頭で述べた、超伝導秩序を担う Cooper 対の二つの対称性クラスは偶周波数対称性に属する。こうした超伝導体の表面、磁束芯、接合界面に現れる副次的な対相関が奇周波数対称性に属することがわかっている。超伝導体が Meissner 効果を示すのは、超伝導秩序を担う偶周波数 Cooper 対が磁場に対して反磁性応答をするからである。その一方、超伝導体中に局所的に現れる奇周波数 Cooper 対は常磁性であるということが、これまでの研究で明らかになっていた。最近の研究成果を総合すると、奇周波数 Cooper 対こそが、超伝導秩序の対称性を反映した特徴的な物理現象の担い手であると解釈することもできる。

2001 年の二ホウ化マグネシウムや 2008 年の鉄系超伝導体の発見は、新たに多軌道・多バンド超伝導という研究分野を拓くことになった。これらの超伝導体では、複数の伝導バンドが Fermi 準位の上に重なっているために、Cooper 対を組む 2 電子における座標部分の自由度が有効的にバン

ドとパリティに分割されることになる。電子状態の内部自由度として、縮退軌道やバンドに加えて副格子や谷などの自由度を持つ物質が最近の超伝導研究において注目を集めている。トポロジカルに非自明な絶縁体・半金属を基盤とする超伝導体や、原子層物質の超伝導体が、これらに該当するからである。このような多バンド超伝導体では、超伝導秩序を担うのは偶周波数 Cooper 対であるにもかかわらず、奇周波数 Cooper 対が空間的に一様な副次対相関として存在し基底状態の一部を形成することが 2013 年に指摘されていた。しかし、そうした超伝導体に一様に広がった奇周波数 Cooper 対の特徴的な物理現象に関する研究は全く行われていなかった。

本研究では、2 バンドの超伝導体に一様に現れる奇周波数 Cooper 対が担う物理現象を理論的に調べた。同じバンド内の 2 電子が Cooper 対を形成し超伝導秩序を担う超伝導体に加え、異なるバンド内の 2 電子が Cooper 対を形成し超伝導秩序を担う 2 バンド超伝導体のハミルトニアンを仮定し、Gor'kov 方程式を解くことにより Cooper 対の存在を表す異常 Green 関数を解析的に導出し、線形応答の範囲で物理量を計算した。得られた主要な結論を以下にまとめる。

1. 異常 Green 関数から、副次的に存在する奇周波数 Cooper 対の対称性クラスを明らかにした。

2. 2 バンド超伝導体の軌道磁場に対する磁気応答を調べた結果、奇周波数 Cooper 対はすべて常磁性を示し超流動密度を減少させることが明らかになった。すなわち、奇周波数 Cooper 対は超伝導状態を熱力学的に不安定化させ、超伝導転移温度を低下させる。

3. 2 バンド超伝導体のスピン磁化率について解析を行った結果、奇周波数 Cooper 対の磁化率は、基本的には偶周波数 Cooper 対のそれとは逆方向の寄与を持つということがわかった。

4. 二つの 2 バンド超伝導体の間を流れる Josephson 電流を調べた結果、奇周波数 Cooper 対が担う電流は、偶周波数 Cooper 対が流す電流とは反対向きであることがわかった。