HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	Physics of J=3/2 superconductors [an abstract of dissertation and a summary of dissertation review]
Author(s)	金, 多景
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(工学)
Dissertation Number	甲第14864号
Issue Date	2022-03-24
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/85128
Rights(URL)	https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Type	doctoral thesis
File Information	Dakyeong_Kim_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　金 多景

学　位　論　文　題　名

Physics of J=3/2 superconductors
(角運動量 J=3/2 の電子が担う超伝導現象の理論的研究)

金属や絶縁体のフェルミ準位近傍に複数の電子軌道準位が存在する場合、スピン軌道相互作用がその縮退を解くあるいは軌道のエネルギー準位を入れ替える事によって、異質な (トポロジカルに非自明な) 基底状態が実現する。これは、トポロジカル絶縁体や半金属の研究に於いて徐々に明らかになった重要な知見である。こうしたトポロジカルに非自明な絶縁体に電子をドープし、現れた金属相が低温で超伝導転移を起こす物質群の存在も明らかになり、これらの超伝導相もトポロジカルに非自明なのではないかと考えられている。スピン軌道相互作用が極端に強い場合には、元々電子が持つ $S = 1/2$ のスピン自由度と軌道角運動量 L を分離することが出来なくなり、電子を合成角運動量 (擬スピン) $J = S + L$ をもつ荷電フェルミ粒子として記述すべきである。これら大きな擬スピンをもつ電子がクーパー対を組み発現する超伝導相とは、どのような性質を持つのであろうか? この問いに対する答えは無く、知見の空白を埋めるのが本研究の動機である。念頭においた候補物質は YPtBi であり、自由電子密度がとても小さいにも関わらず $T = 0.77K$ において超伝導転移することが知られている。本研究では二つの p 波原子軌道 ($L = 1$) がフェルミ準位近傍で縮退して強いスピン軌道相互作用によって $J = 3/2$ の擬スピンを持つ模型を理論的に解析した。このように半金属に近い物質の電子状態を記述する模型は 1950 年代から知られており、本研究でもその模型を採用した。以下では、超伝導体のスピン磁化率、$J = 3/2$ 超伝導体のジョセフソン効果、およびボゴリューボフ・フェルミ面の準粒子と奇周波数クーパー対の関連について、研究の概要を示す。

$S = 1/2$ の電子が作る超伝導秩序の対称性は、クーパー対を形成する 2 電子の入れ替え操作の基で秩序パラメータが反対称であることを用いて、スピン 1 重項偶パリティ対称性とスピン 3 重項奇パリティに大別される。スピン 1 重項 ($S = 0$) クーパー対はスピンを持たないので、超伝導体は磁気的に不活性になる。スピン磁化率は絶対零度に向かって指数関数的に消失し、この結果は等方である事が知られている。その一方スピン 3 重項クーパー対はスピン $S = 1$ を持つので、ペアのスピンと平行な方向のスピン磁化率は低温まで定数で残り、ペアのスピンと垂直な方向のスピン磁化率は低温で消失するという異方性が発生する。$J = 3/2$ の電子から成るクーパー対の対称性は擬スピン 1 重項偶パリティ ($J = 0$) と擬スピン 3 重項奇パリティ ($J = 1$) に加え、擬スピン 5 重項偶パリティ ($J = 2$) 擬スピン 7 重項奇パリティ ($J = 3$) に分類することが出来る。本研究では擬スピン 5 重項対称性の超伝導体のスピン磁化率を線形応答の公式を用いて計算した。その結果、様々な擬スピンを持つ超伝導状態に共通の性質として、磁気的な異方性が弱いこと、磁化率の対角成分は温度の低下に従って低下するが絶対零度でも有限な磁化率に留まることを見いだした。スピン軌道相互作用が強いために磁気異方性が弱くなってしまったと考えられる。また、強いスピン軌道相互作用のために、磁化率の非対角成分が超伝導状態でも有限に残る事がわかった。

ジョセフソン効果は全ての超伝導体が示す共通の性質だと考えられている。本研究では二つの異なる超伝導体の間で流れるジョセフソン電流の選択則について調べることにした。スピン $S = 1/2$ の

超伝導体でも、秩序変数の軌道対称性に起因する選択則と秩序変数のスピン構造における選択則がある事が知られている。例えば、スピン 1 重項超伝導体とスピン 3 重項超伝導体の接合では互いのスピン角運動量の差が 1 になり、スピン状態が直交するために選択則を満たせず最低次のジョセフソン電流が消失する。$S = 1/2$ スピン 3 重項の場合には 3 次元スピン空間における d ベクトルがペアのスピン状態を表し、$J = 3/2$ 擬スピン 5 重項の場合には 5 次元擬スピン空間における η ベクトルがペアの擬スピン状態を表す。擬スピン 5 重項超伝導体同士の選択則を調べたところ、より高次元空間における二つのベクトル直交関係の解析から、スピン 3 重項超伝導体同士の選択則よりも厳しくなっていることがわかった。また、擬スピン 1 重項超伝導体と擬スピン 5 重項超伝導体の間では、クーパー対の角運動量の差が 2 になるため、やはり選択則がより厳しくなる事がわかった。
電子構造に内部自由度のある超伝導体の特徴の一つに、超伝導ギャップよりも低エネルギーをもつ準粒子が、ボゴリューボフ・フェルミ面 (以下 BFS と略す) と呼ばれるフェルミ面を形成する事が知られている。BFS が現れる必要条件やその準粒子の性質はまだほとんど未解明のままであるが、トポロジカルに非自明な超伝導を特徴付ける存在として注目されている。これまでに、スピン $S = 1/2$ の超伝導体において構築された知見によると、超伝導ギャップ以下のエネルギーを持つ準粒子は、必ず奇周波数クーパー対を伴っている。奇周波数クーパー対は、空間的に一様な超伝導状態からの基底状態の変形を表わすクーパー対であり、通常の偶周波数クーパー対が反磁性的であるのとは違い常磁性的な性質を持つ事も知られている。本研究では、奇周波数クーパー対が発生する条件と、BFS が現れる条件を解析比較した。その結果、時間反転対称性を破った秩序変数で特徴付けられた $J = 3/2$ の 5 重項超伝導体において BFS を形成する準粒子は、必ず奇周波数クーパー対を伴っている事や、そのクーパー対がカイラリティを持つこと、また擬スピン 3 重項偶パリティ対称性や擬スピン 7 重項偶パリティ対称性に属する事を明らかにした。また、奇周波数クーパー対の形成は BFS 上の準粒子の発生よりも広い物理概念であることも確認した。