



# 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	<a href="https://hdl.handle.net/2115/85128">https://hdl.handle.net/2115/85128</a>
Rights(URL)	<a href="https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/">https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/</a>
Type	doctoral thesis
File Information	Dakyeong_Kim_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 金多景

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 戸田泰則  
副査 教授 野村竜司

### 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)

金属のフェルミ準位近傍に複数の電子軌道が存在し、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体の性質に関して理論的な研究を行い、その成果をまとめたのが本学位論文である。

第2章では、ホイスラー半金属超伝導体  $\text{YPtBi}$  を念頭に置き、 $p$  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微視的に導いている。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、本学位論文でもその模型を採用した。 $J = 3/2$  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、主に擬スピン 5 重項偶パリティ対称性に属する超伝導体の性質を議論している。

第3章には、超伝導体のスピン磁化率を線形応答の範囲で調べた結果が示してある。 $J = 2$  のクーパー対が超伝導をになう物質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。強いスピン軌道相互作用が働いた結果、磁化率の異方性が弱くなってしまったこと、また磁化率の非対角成分が超伝導状態でも有限に残る事を明らかにした。

第4章では  $J = 3/2$  超伝導体を示すジョセフソン効果の特徴的な性質のうち、二つの異なる超伝導体間で流れるジョセフソン電流の選択則を議論した。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  $\eta$  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を明らかにした。

第5章では、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議論を行っている。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し比較した。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。さらに、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。これを要するに著者は、 $J = 3/2$  の擬スピンを持つ電子が担う超伝導体の性質を理論的に調べ、その特徴的な性質を予言した。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。