



Title	Split Fermi Surface Properties and Superconductivity in the Non-centrosymmetric Crystal Structure
Author(s)	河井, 友也
Citation	大阪大学, 2008, 博士論文
Version Type	VoR
URL	<a href="https://hdl.handle.net/11094/419">https://hdl.handle.net/11094/419</a>
rights	
Note	

*The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA*

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

氏 名	かわいともや 河井友也
博士の専攻分野の名称	博 士 (理 学)
学 位 記 番 号	第 2 1 7 4 2 号
学 位 授 与 年 月 日	平成 20 年 3 月 25 日
学 位 授 与 の 要 件	学位規則第 4 条第 1 項該当 理学研究科物理学専攻
学 位 論 文 名	Split Fermi Surface Properties and Superconductivity in the Non-centrosymmetric Crystal Structure (空間反転対称性を持たない結晶構造における分裂したフェルミ面の性質と超伝導)
論 文 審 査 委 員	(主査) 教 授 大貫 惇睦  (副査) 教 授 野末 泰夫    教 授 田島 節子    教 授 萩原 政幸 准教授 摂待 力生

### 論 文 内 容 の 要 旨

2004 年からこの数年、結晶に空間反転対称性を持たない反強磁性体  $\text{CePt}_3\text{Si}$  や強磁性体  $\text{Ulr}$ 、反強磁性体  $\text{CeRhSi}_3$ ,  $\text{CeIrSi}_3$ ,  $\text{CeCoGe}_3$  における超伝導の対称性が盛んに議論されている。これらの化合物では、空間反転対称性の欠如に起因する非対称な結晶ポテンシャルにより、有限の電場が自発的に生じる。この電場中を運動する伝導電子が自ら生じさせる有効磁場とその伝導電子スピンとの相互作用が反対称スピン・軌道相互作用である。この相互作用によりアップとダウンのスピン縮退が解けバンド構造は約 10~1000 K 離れて分裂する。その結果、例えば  $E(k, \uparrow)$  と  $E(-k, \uparrow)$  は別のフェルミ面に属するため、単純なスピン三重項状態はとり得ない。理論的には空間反転対称性の欠如、即ち、パリティ保存則の欠如により、スピン一重項とスピン三重項が混成した超伝導クーバー対の形成が示唆されている。また、興味深いことに、スピン一重項とスピン三重項の混成の度合いは反対称スピン・軌道相互作用の大きさに依存すると指摘されている。しかしながら、その超伝導クーバー対を特徴付ける最も基幹部分である反対称スピン・軌道相互作用の大きさが何に依存して、通常どの程度の大きさなのかはこれまで実験的に明らかにされていない。

この博士論文では、空間反転対称性をもたない正方晶  $\text{BaNiSn}_3$  型結晶構造を示す  $\text{RTX}_3$  (R: 希土類, T: 遷移金属, X: Si, Ge)、及び、斜方晶  $\text{Ce}_2\text{TGe}_6$  (T: Pd, Pt) の純良な単結晶を育成し、電気抵抗、磁化・磁化率、比熱、ドハース・ファンアルフェン (dHvA) 効果測定、更に、圧力下電気抵抗測定から、それぞれの物質の磁性や超伝導、及び、反対称スピン・軌道相互作用の大きさを系統的に研究した。

反対称スピン・軌道相互作用の大きさが何に依存するのかを明らかにするため、 $\text{LaTGe}_3$  の遷移金属 T を Co, Rh, Ir と変化させて dHvA 効果測定からその大きさを系統的に研究した。 $\text{LaCoGe}_3$ ,  $\text{LaRhGe}_3$ ,  $\text{LaIrGe}_3$  の反対称スピン・軌道相互作用の大きさはそれぞれ 460 K, 510 K, 1090 K になることを dHvA 効果測定による主要フェルミ面の検出から明らかにした。 $\text{LaIrGe}_3$  で特に大きくなるのは Ir の大きな有効原子数と Ir の 5d 電子の動径波動関数が原子核の中心近傍で大きな振幅を持つためであることを定性的に明らかにした。 $\text{LaIrGe}_3$  と  $\text{LaIrSi}_3$  の反対称スピン・軌道相互作用の大きさはそれぞれ dHvA 効果測定から 1090 K, 1100 K であり、Si と Ge の変化は反対称スピン・軌道

相互作用の大きさに変化を与えない。また、比較的大きなサイクロトロン有効質量を持つ  $\text{PrCoGe}_3$  と  $\text{LaFeGe}_3$  の dHvA 効果からサイクロトロン有効質量が大きくなると反対称スピン・軌道相互作用は小さくなることも明らかにした。

加えて、反強磁性体  $\text{CePtSi}_3$  と  $\text{CeTGe}_3$  (T: Co, Rh, Ir) の压力下電気抵抗測定から、 $\text{CePtSi}_3$ 、 $\text{CeRhGe}_3$ 、 $\text{CeIrGe}_3$  は量子臨界点から遠く離れており 8 GPa の圧力印加でも反強磁性は消失しないが、 $\text{CeCoGe}_3$  は加圧に伴いネール温度は徐々に減少し、5.4~7.5 GPa の圧力範囲で超伝導を観測した。 $\text{CeCoGe}_3$  の 6.5 GPa の超伝導転移温度  $T_{\text{sc}}=0.69$  K における上部臨界磁場の傾きは  $H//[001]$  方向で  $-dH_{c2}/dT_{\text{sc}}=200$  kOe/K と非常に大きい、また、上部臨界磁場の温度依存性は降温とともにそり上がって増大する強結合超伝導の振る舞いを示し、常磁性効果による抑制がないことを明らかにした。この実験結果は、 $H//[001]$  でスピン三重項超伝導が出現するという理論と合致する。

## 論文審査の結果の要旨

空間反転対称性を持たない化合物  $\text{RTX}_3$  (R: 希土類、T: 遷移金属、X: Si, Ge) と  $\text{Ce}_2\text{TGe}_6$  の単結晶を育成し、その電子状態を研究した。特に正方晶の結晶構造で  $[001]$  方向 ( $c$  軸) に空間反転対称性を持たない  $\text{RTX}_3$  のフェルミ面の性質と超伝導に関して大きな研究成果を得た。 $\text{LaTGe}_3$  の T を Co, Rh, Ir と系統的に変化させたとき、フェルミ面の分裂に対応する反対称スピン・軌道相互作用がそれぞれ 460 K, 510 K, 1090 K になることをドハース・ファンアルフェン (dHvA) 効果による主要なフェルミ面の検出から明らかにした。Ir の 5d 電子で特に大きくなるのは Ir の大きな有効原子数と Ir の 5d 電子の動径波動関数が原子核の中心近傍で大きな振幅を持つことによる。また、La 化合物に比べて比較的大きなサイクロトロン有効質量を持つ  $\text{PrCoGe}_3$  と  $\text{LaFeGe}_3$  の dHvA 効果から、サイクロトロン有効質量が大きくなると反対称スピン・軌道相互作用は小さくなることも明らかにした。

更に、反強磁性体  $\text{CeTGe}_3$  (T: Co, Rh, Ir) に対する 8 GPa までの压力下電気抵抗測定から、 $\text{CeRhGe}_3$  と  $\text{CeIrGe}_3$  のネール点は圧力とともに増大、もしくはあまり大きな変化をせず、量子臨界点から遠く離れていることが分かった。一方、 $\text{CeCoGe}_3$  のネール点は圧力とともに減少し、量子臨界点はおよそ 6.5 GPa と推測された。この量子臨界点近傍の 5.4 GPa~6.9 GPa で超伝導を観測した。6.5 GPa での超伝導転移温度  $T_{\text{sc}}$  は  $T_{\text{sc}}=0.69$  K であり、磁場を正方晶の  $[001]$  方向に印加したときの  $T_{\text{sc}}$  での上部臨界磁場  $H_{c2}$  の傾きは  $-dH_{c2}/dT_{\text{sc}}=200$  kOe/K と非常に大きく、降温とともに上部臨界磁場はそり上がって増大した。この実験結果は、常磁性効果は働いていないことを意味する。以上の超伝導に関する実験結果は、結晶に反転対称性がないにも関わらずスピン三重項超伝導が  $H//[001]$  方向で出現する理論と合致する。

よって、本論文は博士（理学）の学位論文として十分価値あるものと認める。