

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 18 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26400345

研究課題名(和文) 反強磁性と共存する超伝導相の描像 フェルミ面測定からのアプローチ

研究課題名(英文) Aspects of the Superconducting State Coexisting with Antiferromagnetism:
Approach from the Fermi Surface Measurements

研究代表者

木村 憲彰 (Noriaki, Kimura)

東北大学・理学研究科・准教授

研究者番号：30292311

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、重い電子系超伝導体における磁性と超伝導の共存状態の理解を深めるために、重い電子系圧力誘起超伝導体のフェルミ面の圧力・磁場変化を調べた。その結果、CeRhSi₃では反強磁性の秩序-無秩序転移前後でフェルミ面の変化は見られず、反強磁性に伴う電子構造の変化は限定的であることが明らかとなった。一方CeIrSi₃では、CeRhSi₃とは定性的に異なる電子構造の圧力変化を示すことが明らかとなった。また、超伝導の性質も両者で異なる点が見出された。このことは、f電子と伝導電子との相関の微妙な変化は、電子構造に大きな影響を与え、超伝導の性質に違いをもたらしていることを示唆している。

研究成果の概要(英文)：Some heavy fermion compounds exhibit an unusual coexistence of antiferromagnetism and superconductivity. To gain deeper understanding this phenomenon, In this research project we focused on the electronic structure of these compounds. In particular, we performed the pressure dependence of the de Haas-van Alphen (dHvA) and magnetoresistance for the pressure-induced heavy-fermion superconductors CeRhSi₃ and CeIrSi₃. We revealed that the dHvA oscillation of CeRhSi₃ does not change between inside and outside the antiferromagnetic state. As for CeIrSi₃, we revealed that the electronic state is qualitatively different from that of CeRhSi₃. Some differences in the superconducting properties between CeRhSi₃ and CeIrSi₃ are also clarified. These results suggest that the electronic structure in CeTSi₃ series is sensitive to the correlation between f-electron and conduction electrons and that a difference of the correlation affects detailed nature of unconventional superconductivity.

研究分野：数物系科学

キーワード：強相関係

1. 研究開始当初の背景

従来知られている超伝導は、互いに符号が逆の運動量とスピンをもった伝導電子同士が、結晶格子の揺らぎによってクーロン引力を感じ、電子対となって凝縮する現象として理解されている。一方、磁気秩序はクーロン斥力とその起源となっており、超伝導形成にとって磁性は阻害要因といえる。ところが、重い電子系と呼ばれる物質群では、磁気的な揺らぎによって引き起こされる超伝導が見いだされている。興味深いことに、この非従来型超伝導は磁気秩序と共存することが可能である。

この「超伝導と磁性の共存相」について、これまで数多くの研究が行われてきたが、これまでのところ、この二つの性質を同時に満たす状態がどのようなものか、具体的な描像は分かっていない。

2. 研究の目的

従来知られている超伝導は磁性とは相いれない性質であるが、電子が強く関連した系では、磁性と超伝導の共存状態が実現する物質が数多くみだされている。この共存状態は既存の枠組みでは理解できない状態である。

本研究では、重い電子系超伝導体における常伝導状態と超伝導状態のフェルミ面の変化をとらえることにより、「磁性と超伝導の共存」の具体的な描像を明らかにすることを目指した。

3. 研究の方法

本研究では、重い電子系圧力誘起超伝導体 CeRhSi_3 の単結晶を用いて、電気抵抗の測定から、「反強磁性と超伝導の共存相」を同定する。これをもとに、圧力下における dHvA 効果の測定を行い、その振動周波数と振幅の圧力依存性から、超伝導あるいは磁性を担っているフェルミ面とその軌道を明らかにする。さらに、同型物質である CeIrSi_3 の単結晶を用いて、磁気抵抗及び交流帯磁率の圧力依存性から、磁性と電子構造の圧力変化を明らかにし、両者の関係を議論する。

4. 研究成果

主に得られた研究成果は以下のとおりである。

(1) CeRhSi_3 の電子構造と反強磁性

圧力下での磁気抵抗を測定することにより、 CeRhSi_3 の反強磁性及び超伝導の磁場温度相図の圧力依存性を明らかにした。これをもとに、 CeRhSi_3 の *a* 軸方向に磁場を印加した時の dHvA 効果の測定を行った。図 1 に示すように、検出された dHvA 振動の周波数は 2.8GPa まで圧力変化が見られなかった。また、特定のフェルミ面に注目し、サイクロトロン有効質量の圧力変化も測定したが、圧力とともに緩やかな現象がみられるだけで、臨界的なふるまいは見られなかった。dHvA 効果を測

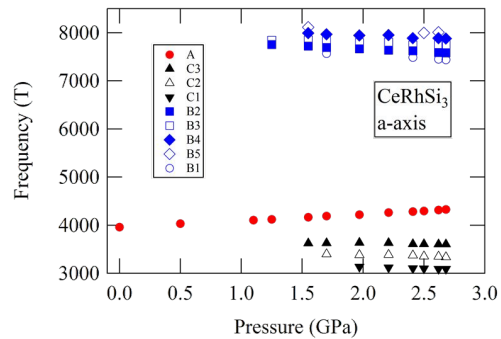


図 1 CeRhSi_3 の *a* 軸方向に磁場を印加した時の dHvA 周波数の圧力依存性。測定した磁場範囲における反強磁性の秩序無秩序転移圧力は 2.5GPa である。

定した磁場範囲では、およそ 2.5GPa で反強磁性の秩序 - 無秩序転移が起きる。すなわち、実験結果は、この転移圧力前後で電子構造の変化は見られなかったことを意味する。

圧力を 2.4GPa に固定し、磁場の変化によって反強磁性の秩序無秩序転移をまたいだ測定を行っても、同様の結果が得られた。以上の結果から、 CeRhSi_3 では、反強磁性の相転移が *f* 電子の遍歴局在転移を伴うとする、いわゆる Kondo-Breakdown のシナリオではなく、反強磁性秩序がある特定のフェルミ面のネスティングによって生じるとするシナリオによって理解されることが明らかとなった。

(2) CeIrSi_3 の歪誘起超伝導

CeRhSi_3 や CeIrSi_3 は常圧で反強磁性、圧力印加によって超伝導が発現する。ところが、本研究を推進する過程で、常圧においても CeIrSi_3 で超伝導が発現する試料が見出された。試料調整条件を検討したところ、試料整形時に試料表面に残った歪が局所的に高圧となり、超伝導が誘起されることを明らかにした。通常、圧力下の超伝導特性の測定には電気抵抗が用いられることから、圧力誘起超

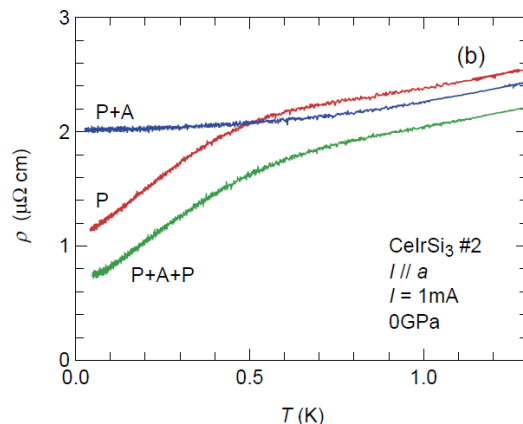


図 2 CeIrSi_3 の電気抵抗。P は研磨(歪印加)、A はアニール(歪除去)を意味する。

伝導一般でこのような現象が観測される可能性がある。本研究では、圧力誘起超伝導の電気抵抗測定を行う上で注意すべき、実験上の指針を示した。さらに、歪を除いた試料で再度温度-圧力相図を作成したところ、 CeIrSi_3 では、いわゆる磁性と超伝導が共存する圧力領域が極めて狭く、両者は強い競合関係にあることが確かめられた。

(3) CeIrSi_3 の反強磁性相内における異常物性

CeIrSi_3 の反強磁性相内で磁化曲線の異常を見出した。この異常は磁場印加方向[100]で起きるが、初期磁化過程のみで見られる。このことから、この異常はドメインの整列と解釈できそうだが、磁気抵抗では、初期磁化以降でも観測される。現時点では、この異常は磁気的なドメインの整列を伴う磁気あるいは電子構造の相転移と解釈される。また、1.5K以下でヒステリシスを伴う電気抵抗の異常が観測され、それとともに磁化曲線で見られた異常は高磁場側にシフトする。さらに、その磁気抵抗の履歴は複雑で(図3)、この物質は低温で複雑な磁気相あるいは電子相を有していることが示唆される。

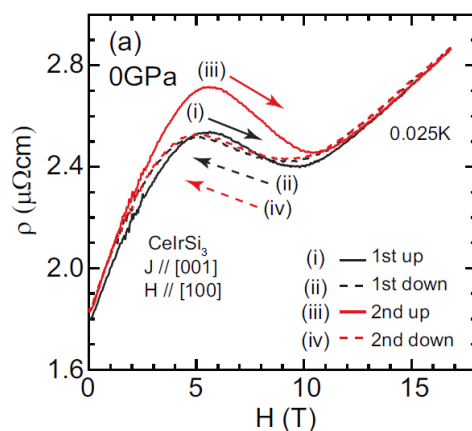


図3 CeIrSi_3 の横磁気抵抗。

(4) CeIrSi_3 における電子構造の圧力誘起転移

CeIrSi_3 の磁気抵抗の圧力依存性を調べ、2GPa前後で磁気抵抗が大きく変化することを見出した。磁気抵抗の変化は、磁気転移あるいは電子構造の変化(転移)によってもたらされるが、2GPaは反強磁性状態であり、このことから、電子構造の変化を強く示唆する結果といえる。この結果は、これまでに報告されてきた dHvA 効果の圧力依存性とも矛盾はなく、Hoshino, Kuramoto によるフェルミ面の相転移(リフシツ転移)の理論と対応している。また、これまで、常圧における CeIrSi_3 の dHvA 効果の角度依存性は CeRhSi_3 や CeCoSi_3 など f 電子を遍歴としたフェルミ面のモデルと大きく異なっていることが知られていた。本研究で見出した磁気抵抗の圧力

変化がリフシツ転移だとすると、これらの違いが、電子構造の逐次転移によるものと考えられることができる。

(5) 磁性と超伝導と電子構造の関係

CeIrSi_3 と CeRhSi_3 を比較すると、 CeIrSi_3 は複雑な磁気(あるいは電子)相を示しており、その圧力効果も著しいことが明らかとなった。また、これまで両者は似たような磁性と超伝導の相図をもつと考えられていたが、(2)で示したように、磁性と超伝導の競合・共存関係が異なる可能性があるなど、両者の違いが明らかになってきた。また、海外のグループとの共同研究から、両者の超伝導ギャップ構造は異なることも示唆されており、本研究の解釈と矛盾しない。以上の結果は、電子構造の違いは超伝導の発現そのものには大きな影響は与えないが、超伝導の安定性やギャップの構造といった違いをもたらす要因となっていることを示唆している。このことは、f 電子と伝導電子との相関のわずかな変化で「重い電子」を伴う電子構造を決定すると同時に超伝導の性質の決定要因となることを意味している。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計7件)

H. Iida, M. Sato, N. Kimura, Superconductivity Induced by Surface Polishing in CeIrSi_3 , J. Phys. Soc. Jpn., 査読あり, 85, 2016, 073708/1-3, DOI: 10.7566/JPSJ.85.073708

N. Kimura, N. Kabeya, K. Saitoh, K. Satoh, H. Ogi, K. Ohsaki, H. Aoki, Type II/1 Superconductivity with Extremely High H_{c3} in Noncentrosymmetric LaRhSi_3 , J. Phys. Soc. Jpn., 査読あり, 85, 2016, 024715/1-5, DOI: 10.7566/JPSJ.85.024715

J. Gouchi, A. Sumiyama, A. Yamaguchi, G. Motoyama, N. Kimura, E. Yamamoto, Y. Haga, Y. Onuki, Unusual pressure evolution of the Meissner and Josephson effects in the heavy-fermion superconductor UPt_3 , Phys. Rev. B, 査読あり, 93, 2016, 174514/1-5, DOI: 10.1103/PhysRevB.93.174514

N. Kimura, N. Kabeya, H. Aoki, K. Ohya, M. Maeda, H. Fujii, M. Kogure, T. Asai, T. Komatsubara, T. Yamamura, I. Satoh Quantum critical point and unusual phase diagram in the itinerant-electron metamagnet UCoAl , Phys. Rev. B, 査読あり, 92, 2015, 035106/1-9, DOI: 10.1103/PhysRevB.92.035106

K. Karube, T. Hattori, K. Ishida, N. Kimura, Ferromagnetic critical behavior in $U(\text{Co}_{1-x}\text{Fe}_x)\text{Al}$ ($0 \leq x \leq 0.02$) studied by Co-59 nuclear quadrupole resonance measurements, Phys. Rev. B, 査読あり, 91, 2015, 075131/1-6, DOI: 10.1103/PhysRevB.91.075131

H. Iida, M. Satoh, N. Kabeya, H. Aoki, N. Kimura, Anomalies in the antiferromagnetic phase on CeIrSi_3 , J. Phys.: Conf. Ser., 査読あり, 592, 2015, 012012/1-5, DOI: 10.1088/1742-6596/592/1/012012

N. Kimura, H. Ogi, K. Satoh, G. Ohsaki, K. Saitoh, H. Iida, H. Aoki, Robust Zero Resistance under Magnetic Fields in Non-Centrosymmetric Superconductor LaRhSi_3 , JPS Conf. Proc., 査読あり, 3, 2014, 015011/1-5, DOI: 10.7566/JPSCP.3.015011

〔学会発表〕(計5件)

N. Kimura, N. Kabeya, K. Ohyama, M. Maeda, H. Fujii, M. Kogure, T. Asai, H. Aoki, T. Komatsubara, T. Yamamura, I. Satoh, Quantum Critical Point of UCoAl determined by AC Magnetic Susceptibility, International Conference on Magnetism 2015, 2015.7.9, Palau de Congressos de Catalunya, Barcelona, Spain.

木村憲彰、前田瑞穂、大山一志、藤井宏行、小暮真佑子、壁谷典幸、青木晴善、 UCoAl の温度圧力磁場相図と量子臨界点, 日本物理学会第70回年次大会, 2015.3.24, 早稲田大学(東京)

飯田祐己、佐藤将、青木晴善、木村憲彰, 重い電子系 CeIrSi_3 の磁気抵抗の圧力効果, 日本物理学会第70回年次大会, 2015.3.22, 早稲田大学(東京)

飯田祐己、佐藤将、青木晴善、木村憲彰, 重い電子系 CeTX_3 (T:遷移金属) の磁性と超伝導の共存領域における超伝導の振る舞い, 日本物理学会 2014 年秋季大会, 2014.9.7, 中部大学(春日井)

H. Iida, M. Satoh, H. Aoki, N. Kimura, Anomalies in the antiferromagnetic phase on CeIrSi_3 , International Conference on Strongly Correlated Electron Systems, 2014.7.8, Campus Saint Martin d'Hres Grenoble, France

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.vlt.phys.tohoku.ac.jp/report>

.html

6. 研究組織

(1) 研究代表者

木村 憲彰 (KIMURA, Noriaki)

東北大学・大学院理学研究科・准教授

研究者番号: 30292311