

令和元年6月25日現在

機関番号：14301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2018

課題番号：17K14339

研究課題名(和文) Cd₂Re₂O₇における空間反転対称性を破る相転移とスピン三重項超伝導研究課題名(英文) Spatially inversion broken phase transition and spin-triplet superconductivity on Cd₂Re₂O₇

研究代表者

北川 俊作 (KITAGAWA, Shunsaku)

京都大学・理学研究科・助教

研究者番号：50722211

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的は、空間反転対称性の破れを伴う相転移の量子臨界点で発現するスピン三重項状態を実験的に実証することおよびその超伝導状態の理解である。申請者はCd₂Re₂O₇の超伝導状態を調べるとともに、様々な超伝導体の性質を調べ、それらを比較することでスピン三重項超伝導体の性質の理解を深めた。

Cd₂Re₂O₇においては2万気圧下においても超伝導状態がs波であることを示唆する結果を得た。

また、スピン三重項超伝導が期待されている超伝導体UCoGeをはじめとした他の超伝導体の研究を行い、UCoGeにおいて強磁性ゆらぎが超伝導に重要なことなどを示す結果を得た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の意義はスピンと軌道の相互作用によって現れる新たなスピン三重項超伝導の発現機構に着目し、それを実験的に検証した点である。スピン三重項超伝導は、その特異性から基礎・応用両面から多くの注目を集めているが、実験的に確証を得られている例は少ないため、磁氣的相互作用とは異なる超伝導の新たな発現機構を提案するCd₂Re₂O₇の超伝導状態は、当該領域のみならず、超伝導研究分野全体へ新奇超伝導物質探索の指針として大きなインパクトを与えることが期待できる。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this study is to experimentally demonstrate the spin triplet state appearing at the quantum critical point of the phase transition accompanied by the space inversion symmetry breaking and to understand its superconducting state. The applicant examined the superconducting state of Cd₂Re₂O₇, and also investigated the properties of various superconductors and compared them to deepen the understanding of the properties of the spin triplet superconductor. In the case of Cd₂Re₂O₇, the results suggest that the superconducting state is s-wave even at 2 GPa. We also study other superconductors such as the superconductor UCoGe, which is expected to have spin triplet superconductivity, and find that ferromagnetic fluctuation is important for superconductors in UCoGe. In addition, in the heavy-fermion superconductor CeCu₂Si₂ and UPd₂Al₃, we obtained the result that high-field superconducting phase, which is different from the superconducting phase in the zero magnetic field, exists.

研究分野：強相関電子系

キーワード：超伝導 高压物性 低温物性

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

スピン軌道相互作用が強い系では、電子スピンと軌道角運動量が結合した全角運動量 J が重要となる。近年、この J が重要な役割を果たす非従来型超伝導や、量子臨界現象などの多彩な物理現象に注目が集まっている。

このような背景の下、新たにマサチューセッツ工科大学の Liang Fu によって、スピン軌道相互作用の強い金属において自発的に空間反転対称性(パリティ)が破れる相転移が提案された。また、この新たな相転移を抑制した先では、オーダーパラメーターのゆらぎがスピンと結合することで、スピンの自由度をもったスピン三重項超伝導($S = 1$)が安定化することが、複数のグループによって予言された。このスピン軌道相互作用の効果によって現れるスピン三重項超伝導が実現している物質として 最有力候補に挙げられているのは $\text{Cd}_2\text{Re}_2\text{O}_7$ である。

2. 研究の目的

本研究の目的は、空間反転対称性の破れを伴う相転移の量子臨界点で発現するスピン三重項状態を実験的に実証することおよびその超伝導状態の理解である。

3. 研究の方法

本研究では、 $\text{Cd}_2\text{Re}_2\text{O}_7$ で理論的に予測されている空間反転対称性の破れを伴う相転移およびそのゆらぎを媒介としたスピン三重項超伝導状態および関連物質を以下の2つの測定手段により検証した。

A. 核磁気共鳴(NMR)/核四重極共鳴(NQR)を用いた超伝導状態 / 常伝導状態の測定

B. 新型圧力セルを用いた圧力下 NMR/NQR 測定

NMR/NQR 測定を用いて、超伝導対称性と、超伝導に重要となるゆらぎの種類を明らかにした。

4. 研究成果

本研究の目的は、空間反転対称性の破れを伴う相転移の量子臨界点で発現するスピン三重項状態を実験的に実証することおよびその超伝導状態の理解である。申請者は $\text{Cd}_2\text{Re}_2\text{O}_7$ の超伝導状態を調べるとともに、様々な超伝導体の性質を調べ、それらを比較することでスピン三重項超伝導体の性質の理解を深めた。

$\text{Cd}_2\text{Re}_2\text{O}_7$ においては、圧力下核磁気共鳴(NMR)、核四重極共鳴(NQR)測定を行い、加圧に伴い NQR 共鳴周波数が減少すること、また NQR スペクトルの線幅が増大することを確認した。通常物質では、NQR 周波数が減少すると線幅は減少するため、この線幅の増大は空間反転対称性の破れに伴うパリティゆらぎの増大に関連している可能性がある。また、新たに設計した新型圧力セルを用いることで NMR パルスによるヒーティングを抑制し、超伝導状態の核スピン格子緩和率の測定に成功した。核スピン格子緩和率の温度依存性は2万気圧下においても超伝導状態は s 波であることを示唆している。

また、スピン三重項として知られている CeCu_2Si_2 、 UPd_2Al_3 の超伝導状態の性質についても調べた。どちらの物質でも超伝導状態でナイトシフト(スピン磁化率に対応)は減少し、その減少量から見積もったパウリ臨界磁場は実験で観測されている上部臨界磁場とほぼ一致する。これは、両物質でパウリ対破壊効果が強く効いていることを示唆している。また、上部臨界磁場近傍では低磁場の超伝導状態と異なる超伝導状態となっていることも明らかにした。

通常非 s 波スピン三重項超伝導では超伝導状態でナイトシフトは減少し、核スピン-格子緩和率は単調に減少する。 UPd_2Al_3 の上部臨界磁場近傍ではスピン三重項超伝導にも関わらず、超伝導転移温度以下でもナイトシフトが減少せず、NMR スペクトルの線幅が対称的に広がる。

これは空間的に不均一な超伝導状態が実現していることを示唆している。

加えて、スピン三重項超伝導が期待されている超伝導体 UCoGe をはじめとした他の超伝導体の研究を行い、 UCoGe において強磁性ゆらぎが超伝導に重要なことや、重い電子系超伝導 CeCu_2Si_2 において高磁場に新しい超伝導相が存在することを示す結果を得た。

この結果は、上記 $\text{Cd}_2\text{Re}_2\text{O}_7$ の超伝導状態を調べるうえでも非常に重要である。

5 . 主な発表論文等

[雑誌論文](計 13 件) すべて査読あり

1. Genki Nakamine, Takayoshi Yamanaka, [Shunsaku Kitagawa](#), Masahiro Naritsuka, Tomohiro Ishii, Takasada Shibauchi, Takahito Terashima, Yuichi Kasahara, Yuji Matsuda, and Kenji Ishida “Modification of magnetic fluctuations by interfacial interactions in artificially engineered heavy-fermion superlattices” Phys. Rev. B 99 081115(R) (2019)
DOI: 10.1103/PhysRevB.99.081115
2. Masahiro Manago, [Shunsaku Kitagawa](#), Kenji Ishida, Kazuhiko Deguchi, Noriaki K. Sato, Tomoo Yamamura “Enhancement of superconductivity by pressure-induced critical ferromagnetic fluctuations in UCoGe” Phys. Rev. B 99 020506(R) (2019)
DOI: 10.1103/PhysRevB.99.020506
3. [Shunsaku Kitagawa](#), Kenji Ishida, Wataru Ishii, Takeshi Yajima, and Zenji Hiroi “Nematic transition and highly two-dimensional superconductivity in BaTi₂Bi₂O revealed by ²⁰⁹Bi-nuclear magnetic resonance/nuclear quadrupole resonance measurements” Phys. Rev. B 98 220507(R) (2018)
DOI: 10.1103/PhysRevB.98.220507
4. [Shunsaku Kitagawa](#), Genki Nakamine, Kenji Ishida, H. S. Jeevan, C. Geibel, and F. Steglich “Evidence for the Presence of the Fulde-Ferrell-Larkin-Ovchinnikov State in CeCu₂Si₂ Revealed Using ⁶³Cu NMR” Phys. Rev. Lett. 121 157004 (2018)
DOI: 10.1103/PhysRevLett.121.157004
5. [Shunsaku Kitagawa](#), Kenji Ishida, Oudah Mohamed, Jan Niklas Hausmann, Atsutoshi Ikeda, Shingo Yonezawa, and Yoshiteru Maeno “Normal-state properties of the antiperovskite oxide Sr_{3-x}SnO revealed by ¹¹⁹Sn-NMR” Phys. Rev. B 98 100503(R) (2018)
DOI: 10.1103/PhysRevB.98.100503
6. Anlu Shi, [Shunsaku Kitagawa](#), Kenji Ishida, Anna E. Bohmer, Christoph Meingast, and Thomas Wolf “High-Field Superconductivity on Iron Chalcogenide FeSe” J. Phys. Soc. Jpn. 87 065002 (2018)
DOI: 10.7566/JPSJ.87.065002
7. Anlu Shi, Takeshi Arai, [Shunsaku Kitagawa](#), Takayoshi Yamanaka, Kenji Ishida, Anna E. Bohmer, Christoph Meingast, Thomas Wolf, Michihiro Hirata, Takahiko Sasaki “Pseudogap Behavior of the Nuclear Spin-lattice Relaxation Rate in FeSe Probed by ⁷⁷Se-NMR” J. Phys. Soc. Jpn. 87 013704 (2018)
DOI: 10.7566/JPSJ.87.013704
8. [Shunsaku Kitagawa](#), Ryoichi Takaki, Masahiro Manago, Kenji Ishida, Noriaki K. Sato “Spatially Inhomogeneous Superconducting State near Hc₂ in UPd₂Al₃” J. Phys. Soc. Jpn. 87 013701 (2018)
DOI: 10.7566/JPSJ.87.065002
9. [Shunsaku Kitagawa](#), T. Higuchi, M. Manago, T. Yamanaka, K. Ishida, H. S. Jeevan, and C. Geibel “Magnetic and superconducting properties on S-type single-crystal CeCu₂Si₂ probed by ⁶³Cu nuclear magnetic resonance and nuclear quadrupole resonance” Phys. Rev. B 96 134506 (2017)
DOI: 10.1103/PhysRevB.96.134506

[学会発表](計 51 件)

1. 発表者：北川俊作 表題：“Cu-NMR で明らかにする CeCu₂Si₂ における FFL0 状態の可能性”
学会名：超伝導かけはし WS2 (2019)
2. 発表者：北川俊作 表題：“FFLO state in CeCu₂Si₂ revealed by ⁶³Cu-NMR”
学会名：The 21st International Conference on Magnetism with SCES (2018)
3. 発表者：真砂全宏 表題：“Ferromagnetic fluctuations and Superconductivity of UCoGe under Pressure”
学会名：The 21st International Conference on Magnetism with SCES (2018)
4. 発表者：仲嶺元輝 表題：“NMR studies on the magnetic fluctuations in the artificial heavy-fermion superlattices of CeCoIn₅/YbCoIn₅ and CeCoIn₅/CeRhIn₅”
学会名：The 21st International Conference on Magnetism with SCES (2018)
5. 発表者：金城克樹 表題：“¹⁰¹Ru-NQR study on Sr₂RuO₄ under uniaxial strain”
学会名：Oxide Superspin 2018 Workshop (2018)
6. 発表者：北川俊作 表題：“Cd₂Re₂₀₇ における圧力下 Re-NQR”
学会名：日本物理学会 2018 年秋季大会 (2018)
7. 発表者：北川俊作 表題：“NMR study on antiperovskite oxide Sr_{3-x}SnO”
学会名：Oxide Superspin 2017 workshop (2017)

8. 発表者：北川俊作 表題：“NMR/NQR study on heavy-fermion superconductor CeCu₂Si₂”
学会名：J-Physics 2017: International Workshop on Multipole Physics and Related Phenomena (2017)
9. 発表者：真砂全宏 表題：“NMR study of magnetic fluctuations and superconductivity of UCoGe under pressure”
学会名：J-Physics 2017: International Workshop on Multipole Physics and Related Phenomena (2017)
10. 発表者：仲嶺元輝 表題：“Magnetic fluctuations at the interface region in the artificially engineered heavy-fermion superlattices”
学会名：J-Physics 2017: International Workshop on Multipole Physics and Related Phenomena (2017)
11. 発表者：北川俊作 表題：“重い電子系超伝導体 CeCu₂Si₂ の H_{c2} 近傍での NMR”
学会名：日本物理学会 2017 年秋季大会 (2017)

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年：
国内外の別：

取得状況(計0件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年：
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

個人ホームページにて研究成果を発信している。

<http://www.ss.scphys.kyoto-u.ac.jp/person/skitagawa/index.html>

6. 研究組織

(1)研究分担者

研究分担者氏名：なし

ローマ字氏名：

所属研究機関名：

部局名：

職名：

研究者番号(8桁)：

(2)研究協力者

研究協力者氏名：なし

ローマ字氏名：

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。