

平成22年 4 月 5 日現在

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2006～2009

課題番号：18540347

研究課題名(和文) 空間反転対称性の破れた超伝導における新奇物性と強相関効果

研究課題名(英文) Novel phenomena and strong correlation effects in noncentrosymmetric superconductors

研究代表者

藤本 聡 (FUJIMOTO SATOSHI)

京都大学・大学院理学研究科・准教授

研究者番号：10263063

研究成果の概要(和文)：近年発見された空間反転対称性を持たない超伝導物質の物性を理論的に研究してきた。その結果、これらの系では、従来の超伝導体とは異なる新しい電磁気現象が実現可能であることが明らかになった。特に、磁場による超伝導破壊効果に対して、従来の超伝導体と比べて、数十倍も強固であることが分かった。

研究成果の概要(英文)：We have studied theory of noncentrosymmetric superconductors which were discovered recently. It has turned out that in these systems novel electromagnetic phenomena are possible to occur because of broken inversion symmetry. In particular, we have shown that noncentrosymmetric superconductors can be enormously robust against pair breaking effects raised by applied magnetic field compared to conventional superconductors known so far.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	1,100,000		1,100,000
2007年度	700,000	210,000	910,000
2008年度	700,000	210,000	910,000
2009年度	700,000	210,000	910,000
年度			
総計	3,200,000	630,000	3,830,000

研究分野：数物系分野

科研費の分科・細目：物理学・物性II

キーワード：強相関系、超伝導

1. 研究開始当初の背景

2004年にウイーン大学の実験グループによって空間反転対称性のない結晶構造を有する新しい重い電子系超伝導物質 CePt₃Si が発見された。反転対称性の欠如は、運動量空間とスピン空間の間に非自明な結合を生み出し、超伝導物性に著しい影響を及ぼして、新奇な電磁気現象を引き起こす可能性がある。

このような観点から実験、理論両面で空間反転対称性のない超伝導の研究が世界的に活発に行われるようになった。

2. 研究の目的

本研究課題は近年発見され活発に研究が行われている空間反転対称性の破れた超伝導体の新奇物性に関する理論研究を行うもの

である。例えば、反転対称性の無い超伝導体では、超伝導電流が、磁石のもとになる電子スピンの分極を誘起することが可能である。これは、通常の超伝導体が磁石と反発し合うのとはまるで逆のような振る舞いである。このような磁性と超伝導の新しい関係が、空間反転対称性の破れによって生ずるのである。また、このような超伝導体は重い電子系と呼ばれる電子相関の強い系で多く発見されており、これらの新奇物性に対して、強い電子相関がどのような効果をもたらすかを理解することが重要である。空間反転対称性の欠如と強相関効果が絡んで生じる新しい電磁氣的性質を記述する理論の構築と、それによる新しい現象の理解を目的とする。

3. 研究の方法

上述の問題を理論的に解析するため、フェルミ液体論、ダイアグラム展開、Eliashberg 方程式の数値計算、Eilenberger 方程式の解析、Bogoliubov-de-Gennes 方程式の数値解析等といった、解析的手法と数値計算的手法を併用した方法で研究を行ってきた。

4. 研究成果

(1) 空間反転対称性の破れに起因する新奇物性に対する電子相関効果を解明した。反転対称性の欠如によって生み出される新奇現象-磁気電気効果、異常ホール効果、スピンホール効果、異常な常磁性効果に対する電子相関効果を記述する一般的な理論をフェルミ液体論に基づいて構築した。この理論枠組みに基づいて磁気電気効果が強相関効果で増強されることを示した。これは、スピン分極が超伝導電流を誘起したり、また、逆に超伝導電流が電子スピンを分極して磁化を発生させる現象である。空間反転対称性の破れに起因するスピン軌道相互作用が、このような現象をもたらすことは、これまで理論的に指摘されていたが、その効果は非常に小さく、実験的に観測するのは困難と考えられてきた。しかし、我々の研究によると、この効果が重い電子系に固有の電子相関効果によって著しく増大され、実験で観測可能な現象となることが明らかになった。

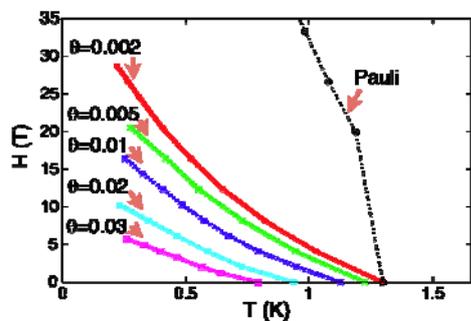
(2) 重い電子系超伝導体 CePt_3Si に対する NMR 実験 (ナイトシフト) の結果を理解することに成功した。この系は正方晶の結晶構造を有するが、 c 軸に垂直に磁場をかけた場合に、超伝導状態ではスピン帯磁率が減少することが、これまでの理論で予測されていた。しかし、NMR 実験によると、この予測に反し、スピン帯磁率は全く減少を示さず、低温まで正常相とほぼ同じ大きさのままである。我々は、一見、理論予想と矛盾するこの実験結果が、電子状態の詳細と、重い電子系に特徴的

な電子相関効果を取り入れることによって説明できることを示した。すなわち、このような空間反転対称性のない系では、スピン帯磁率には、通常のパウリ帯磁率だけでなく、スピン軌道分裂したバンド間の遷移に支配された軌道的な帯磁率も存在する。後者は、スピン軌道分裂が十分大きい場合には、超伝導転移の影響を受けず、低温まで正常相での値に留まる。 CePt_3Si では、 c 軸に垂直な磁場に対して、この軌道的寄与はパウリ帯磁率の大きさと同程度と予想されていたが、従来の理論で無視されていて、かつ重い電子系で重要である電子相関効果を取り入れると、機動的寄与がパウリの寄与よりも遥かに大きくなり得ることを示した。このため、実験では超伝導転移に伴うスピン帯磁率の変化が観測されないと考えられる。また、同様の実験結果が別の重い電子超伝導体 CeIrSi_3 でも観測され、これも、上述のシナリオで理解できることが示された。

(3) 空間反転対称性の破れた超伝導体 CePt_3Si では、単結晶において、空間反転対称性の破れの向きが逆方向の双晶ドメインが形成されている可能性が高いことが示唆されている。このようなドメインが存在すると超伝導物性に著しい影響を及ぼすと考えられる。このような観点から我々は、ドメイン間のジョセフソン接合を考慮したモデルにもとづく超伝導状態の計算を行った。その結果、ドメイン上では、通常の超伝導体のように磁束量子が整数でなく、任意の端数の値を取りえる分数渦糸状態が実現されることが明らかになった。また、この端数渦糸の存在は、クーパー対が s 波と p 波対の混合した状態であることと密接に関わっており、このような端数渦糸の実験的観測がクーパー対のパリティ混合の実験的検証となり得ることも指摘された。双晶界面における端数渦糸の存在は、磁束のダイナミクスに著しい影響を及ぼす。flux creep の観測等によって、この特異な渦糸状態が観測されることが議論された。

(4) 重い電子系超伝導体 CeRhSi_3 , CeIrSi_3 の超伝導発現機構の解明と巨大上部臨界磁場の起源の解明。これらの超伝導体は圧力下で反強磁性臨界点近傍において超伝導を示すが、その起源が反強磁性揺らぎによって媒介される引力であることを微視的なモデル計算によって示した。また、これらの系では超伝導転移温度が僅か 1 K 程度であるにもかかわらず、上部臨界磁場が 30 T を越えるほど巨大である。この巨大な上部臨界磁場の起源の解明は興味深い問題であったが、我々はこれを解決することに成功した。我々の理論

によると、磁気量子臨界点近傍に於ける引力の爆発的増大と、空間反転対称性の破れに起因するパウリ対破壊効果の抑制が、このような巨大上部臨界磁場を生み出しているということが明らかになった。我々のモデル計算で得られた上部臨界磁場を下図に示す。また、これらの系の実験によると上部臨界磁場の圧力依存性にも興味深い振る舞いが見られている。すなわち、印加されている圧力がある値に近づくと、零磁場での超伝導転移温度は弱い圧力依存性しか示さないのに対して、上部臨界磁場は急激に圧力とともに増大する。この振る舞いも上述の我々の理論計算でよく再現されることが明らかにされた。我々の研究結果は、これらの系における超伝導が反強磁性揺らぎを媒介する引力によって実現していることを確立するものである。



理論計算で得られた H_{c2} の温度依存性。
 θ は磁気量子臨界点からの距離を表すパラメータ。
 $\theta=0$ が量子臨界点。 θ が0に近づくにつれて H_{c2} が急激に増大する。

(5) 空間反転対称性のない超伝導においてクーパー対のパリティ混合を検出する方法を提唱した。クーパー対のスピンの重項対-スピン3重項対混合を実験的に確実に検出することを従来の実験手法では難しい。そこで本研究ではcrossed Andreev 散乱という現象を利用したパリティ混合の新しい検出方法を提案した。この方法は、クーパー対のパリティが破れていることをダイレクトに検出するものであり、パリティ混合を曖昧なく同定できるという点で優れている。簡単なモデル計算から、このような実験測定によるスピン1重項対とスピン3重項対の混合の検出が可能であることを示した。

(6) 空間反転対称性のない超伝導、超流動状態におけるトポロジカル秩序の実現可能性を理論的に調べた。ここで考えるトポロジカル秩序状態とは、系の表面や渦糸内部にマヨラナ・フェルミオン状態を実現する状態である。マヨラナ・フェルミオンは生成演算子と消滅演算子が等しいという際立った性質をもち、それ単独では有るとも無いともいえない

い奇妙な粒子である。従来の研究ではカイラル p+ip 波超伝導（超流動）においてこのような准粒子が実現できることが理論的に指摘されていた。本研究では、通常の s 波超伝導（超流動）であっても、空間反転対称性の破れによるスピン軌道作用と印可磁場が十分大きい場合には、このトポロジカル秩序が実現可能であることを示した。また、このような超伝導（超流動）状態を、冷却フェルミ原子気体で実現するためのスキームについても議論し、その実現可能性を示した。

(7) Rashba 型スピン軌道相互作用を有する p 波超伝導体において、トポロジカル絶縁体に類似したトポロジカル超伝導状態が実現することを示した。このトポロジカル超伝導状態とは、系の表面にギャップレスのモードが存在し、それがスピン流を運ぶことに特徴づけられる。その意味で量子スピンホール効果の状態の超伝導アナロジーと言える。

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 12 件)

- ① Y. Tada, N. Kawakami, and S. Fujimoto, "Spin fluctuation and superconductivity in noncentrosymmetric heavy fermion systems CeRhSi3, CeIrSi3", *Physical Review B* 81, 104506-1-104506-16 (2010). 査読有
- ② M. Sato, Y. Takahashi, and S. Fujimoto, "Non-Abelian Topological Order in s-Wave Superfluids of Ultracold Fermionic Atoms", *Physical Review Letters* 103, 020401-1-020401-4 (2009). 査読有
- ③ S. Fujimoto, "Unambiguous probe of parity mixing of Cooper pairs in noncentrosymmetric superconductors", *Physical Review B* 79, 220506-1-220506-4 (2009). 査読有
- ④ M. Sato and S. Fujimoto, "Topological Phases of Noncentrosymmetric Superconductors: Edge States, Majorana Fermions, and the Non-Abelian Statistics", *Physical Review B* 79, 094504-1-094504-16 (2009). 査読有
- ⑤ Y. Tada, N. Kawakami, and S. Fujimoto, "Pairing state at an interface of Sr2RuO4: parity-mixing, restored time-reversal symmetry, and topological superconductivity", *New Journal of Physics*, 11, 055070-1-16 (2009). 査読有
- ⑥ Y. Tada, N. Kawakami, and S. Fujimoto,

“Colossal Enhancement of Upper Critical Fields in Noncentrosymmetric Heavy Fermion Superconductors near Quantum Criticality: CeRhSi₃ and CeIrSi₃”, Physical Review Letters 101, 267006-1-267006-4 (2008). 査読有

⑦ S. Fujimoto, “Topological order and non-Abelian statistics in noncentrosymmetric s-wave superconductors”, Physical Review B 77, 220501-1-220501-4(R), (2008). 査読有

⑧ C. Iniotakis, S. Fujimoto, and M. Sigrist, “Fractional Flux Quanta at Intrinsic Metallic Interfaces of Noncentrosymmetric Superconductors” Journal of the Physical Society of Japan 77, 083701-1-083701-4 (2008) 査読有

⑨ Y. Tada, N. Kawakami, and S. Fujimoto, “Microscopic Mechanism and Pairing Symmetry of Superconductivity in the Noncentrosymmetric Heavy Fermion Systems CeRhSi₃ and CeIrSi₃”, Journal of the Physical Society of Japan 77, 054707-1-054707-7 (2008). 査読有

⑩ S. Fujimoto, “Theory of parity-violated Cooper pairs in weakly noncentrosymmetric superconductors”, Physical Review B 76, 184504-1-184504-7 (2007). 査読有

⑪ S. Fujimoto, “Fermi liquid theory for heavy fermion superconductors without inversion symmetry: Magnetism and transport coefficients”, Journal of the Physical Society of Japan 76, 034712-1-034712-16 (2007). 査読有

⑫ S. Fujimoto, “Electron Correlation and Pairing States in Superconductors without Inversion Symmetry”, Journal of the Physical Society of Japan 76, 051008-1-051008-14 (2007). 査読有

[学会発表] (計 16 件)

① 藤本聡, “不均一超伝導状態におけるトポロジカル・ホール効果”, 日本物理学会第 65 回年次大会, 2010 年 3 月 22 日、岡山大学津島キャンパス

② 藤本聡, “Theory of Noncentrosymmetric Superconductors: Microscopic Mechanism and Novel Electromagnetic Properties” (招待講演), 9th International Conference on Materials and Mechanisms of Superconductivity, 2009 年 9 月 12 日、東京

③ 藤本聡, “Theory of Noncentrosymmetric Superconductors”, Novel Spin Pairing 2009, 2009 年 9 月 16 日、京都大学基礎物

理学研究所

④ 藤本聡, “Novel Phenomena in the mixed state of noncentrosymmetric superconductors” (招待講演), New Developments in Theory of Superconductivity, 2009 年 7 月 8 日、東京大学物性研究所

⑤ 藤本聡, “Topological Phases of Noncentrosymmetric Superconductors and Superfluids” (招待講演), IPMU Focus week, Condensed Matter Physics Meets High Energy Physics, 2010 年 2 月 9 日、東京大学 IPMU

⑥ 藤本聡, “空間反転対称性のない超伝導体におけるクーパー対のパリティ混合の検出法について”, 日本物理学会 2009 年秋季大会、2009 年 9 月 25 日、熊本大学

⑦ 藤本聡, “空間反転対称性のない超伝導体におけるトポロジカル秩序と非アーベル統計”, 日本物理学会 2008 年秋季大会、2008 年 9 月 22 日、岩手大学

⑧ 多田靖啓, 川上則雄, 藤本聡, “空間反転対称性のない超伝導体 CeRhSi₃, CeIrSi₃ における上部臨界磁場の解析 II”, 日本物理学会 2008 年秋季大会、2008 年 9 月 22 日、岩手大学

⑨ 藤本聡, C. Iniotakis, M. Sigrist, “Fractional flux quanta at intrinsic metallic interfaces of noncentrosymmetric superconductors”, 日本物理学会第 63 回年次大会、2008 年 3 月 25 日、近畿大学

⑩ 多田靖啓, 川上則雄, 藤本聡, “空間反転対称性のない重い電子系超伝導体 CeRh(Ir)Si₃ における上部臨界磁場の解析”, 日本物理学会第 63 回年次大会、2008 年 3 月 25 日、近畿大学

⑪ 多田靖啓, 藤本聡, 川上則雄, “空間反転対称性のない超伝導体 CeRhSi₃ についての Hubbard モデルによる解析 II”, 日本物理学会第 62 回年次大会、2007 年 9 月 23 日、北海道大学

⑫ 多田靖啓, 藤本聡, 川上則雄, “Sr₂RuO₄ の(001)界面における超伝導発現に関する微視的研究”, 日本物理学会第 62 回年次大会、2007 年 9 月 21 日、北海道大学

⑬ 多田靖啓, 藤本聡, 川上則雄, “空間反転対称性のない超伝導体 CeRhSi₃ についての Hubbard モデルによる解析”, 日本物理学会第 62 回年次大会、2007 年 3 月 21 日、鹿児島大学

⑭ 藤本聡, “空間反転対称性のない超伝導体における磁場誘起ギャップレス相の準古典近似解析と Y₂C₃ への応用”, 日本物理学会第 62 回年次大会、2007 年 3 月 21 日、鹿児島大学

⑮ 藤本聡, “空間反転対称性の破れた超伝導

の新奇な物性”，日本物理学会 2006 年秋季大会、2006 年 9 月 24 日、千葉大学

- ⑩ 藤本聡、“空間反転対称性の無い超伝導体における電子相関効果：磁性と輸送現象”、日本物理学会 2006 年秋季大会、2006 年 9 月 25 日、千葉大学

[図書] (計 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 件)

名称：

発明者：

権利者：

種類：

番号：

出願年月日：

国内外の別：

○取得状況 (計◇件)

名称：

発明者：

権利者：

種類：

番号：

取得年月日：

国内外の別：

[その他]

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

藤本聡 (FUJIMOTO SATOSHI)

京都大学・大学院理学研究科・准教授

研究者番号：10263063

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

()

研究者番号：

