

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 28 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009～2012

課題番号：21540360

研究課題名（和文） 空間変調する超伝導・超流動相とその発現機構

研究課題名（英文） Mechanism of spatially modulated superconducting and superfluid phases

研究代表者

池田 隆介 (RYUSUKE IKEDA)

京都大学・大学院理学研究科・准教授

研究者番号：60221751

研究成果の概要（和文）：

重い電子系 CeCoIn₅ の高磁場低温相等を主な対象として、パウリ常磁性もたらす Fulde-Ferrell-Larkin-Ovchinnikov (FFLO) 超伝導や超伝導と共存する反強磁性秩序といった、磁場下の超伝導に関する新規現象を理論的に調べ、実験事実をコンシステントに説明することに成功した。また、適当な条件下にある d 波超伝導体の薄膜では、ゼロ磁場下においても FFLO 超伝導が実現し、その磁場下での安定性を調査し、奇妙な磁場中超伝導相図が理論的に予言されることを指摘した。

研究成果の概要（英文）：

We have theoretically studied the high field and low temperature superconducting phase of the heavy fermion superconductor CeCoIn₅ and have pointed out the presence of FFLO and antiferromagnetic orders, both of which are novel effects induced by the paramagnetic pair-breaking, in the above-mentioned novel phase. Satisfactory results consistent with experimental observations have been obtained. Further, we have considered a possibility of a FFLO-like spatially modulated superconducting state in a d-wave superconducting film in zero field and argued that stability of this state against the magnetic field results in an intriguing magnetic phase diagram which may be verified in an experimental under a natural set up.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	700,000	210,000	910,000
2010 年度	500,000	150,000	650,000
2011 年度	600,000	180,000	780,000
2012 年度	599,870	180,000	779,870
年度			
総計	2399,870	720,000	3,119,870

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・物性 II

キーワード：超低温・量子凝縮系

1. 研究開始当初の背景

2003年に重い電子系超伝導体 CeCoIn₅の高磁場低温域には、奇妙な超伝導相があることがわかっており、当研究代表者のグループは当初からこの相は FFLO 超伝導であると提案していた。ところが、2008年に発表された海外の国際共同研究による中性子散乱の実験結果から、この相には反強磁性秩序が出現していることが指摘され、上記高磁場相を FFLO 相であるとする見解に疑問を投げかける事態となっていた。一方で、同年に米国ロスアラモス研究所のグループが報告した、高磁場低温相が不純物の導入に対して極めて脆い、という実験事実により、高磁場低温相は空間変調した超伝導相でなければ理解できないことがわかってきた。これらの実験事実を背景に、この新奇超伝導相が FFLO 秩序と反強磁性とが共存した相であると考え、このアイデアを理論的に確立させることを目的として研究を進めた。

2. 研究の目的

当研究代表者は、1. の欄での 2008 年の反強磁性秩序の発見をきっかけに、パウリ常磁性の強い d 波超伝導体では高磁場下で超伝導と共存する反強磁性が誘起される、というこれまで知られていなかった 2 つの秩序の共存の機構があることを理論的にみつけていた。さらに、FFLO 相のような空間変調する超伝導相では、空間的に一様な d 波超伝導よりも他の相と共存しやすいことは比較的容易にわかる。これらの知見に基づき、CeCoIn₅ の高磁場低温相の全貌を理論的に明らかにすることを研究目的とした。さらに、d 波超伝導の薄膜では磁場はなくても膜の境界条件により、FFLO 相に類似の空間変調超伝導秩序が実現する、という理論的アイデアを具体化し、実験的な検証を促す提案をすることも目的とした。

3. 研究の方法

反強磁性の揺らぎや秩序と超伝導秩序とがカップルする問題なので、弱結合近似での BCS 理論の拡張はここでは用いることができない。そのため、確立した方法がなかったので、場の理論的方法に基づき、ギンツブルク・ランダウ (GL) 作用を導出して、相図に関わる解析をする方法と、量子渦を誘起する効果は近似的に無視して GL の導出にこだわらず

に直接自由エネルギーを計算して、相図を得る方法とを組み合わせで解析した。特に計算を難解なものにしていたのが、磁場下での軌道対破壊とパウリ常磁性効果を前者の方法で同時に考慮し、かつ反強磁性秩序と超伝導秩序パラメタの空間変調をカップルさせる形で取り入れる必要がある点であった。この状況で、いわゆるグリーン関数を用いた伝統的な場の理論的な方法はかなり多くのファインマンダイアグラムの解析を必要とした。また、最終年度から取り組み始めている強結合モデルの解析では、ハバードモデルから反強磁性揺らぎを効かせて自己無撞着に d 波超伝導を研究するのに使われる揺らぎ交換 (FLEX) 近似という数値的手法をパウリ常磁性効果を取り入れて用いている。

また、d 波超伝導薄膜の題材では、いわゆる準古典近似 (Eilenberger 方程式) を数値的に解く手法と GL 自由エネルギーを導出する手法とを組み合わせで用いた。

4. 研究成果

本課題における研究目的の一つは、平行磁場下の CeCoIn₅ の高磁場・低温超伝導 (HFLT) 相においてのみ実験的に見出された反強磁性秩序と、この相を FFLO 超伝導とする解釈の整合性を理論的に明らかにすることであった。我々が得た研究成果は、大別して、以下の 4 つにまとめることができる。まず、実験的に報告された HFLT 相における反強磁性秩序の構造を CeCoIn₅ の既存のフェルミ面に関する知見を基に詳細に調査し、実験的に見出された、ほとんど磁場値に依らない Q-ベクトルの正体を明らかにした。また、この物質の高磁場下で実現した渦構造の異常な磁場依存性が、当研究グループが先駆的に見出したパウリ常磁性により超伝導体内で誘起される反強磁性揺らぎにその起源があることを、渦構造における磁束密度分布を計算して明らかにした。これらの研究成果はそれぞれ、フィジカルレビュー B 誌に 23 年度中に掲載論文として報告された。さらに、この研究をより現実の電子相関の強い超伝導体の記述に適切な強結合モデルを用いたものに拡張し、平均場近似の超伝導転移が低温高磁場で 1 次転移になること、d 波超伝導体では超伝導転移近くで反強磁性秩序

が誘起されること、など弱結合近似で既に得られていた結果を再現できた。この結果をFFLO 相の可能性も含めた形に今後拡張する予定である。

また、空間反転対称性のない超伝導体における渦構造の過去の研究と理論的に関連する問題として、ギャップノードを持つd波超伝導体の薄膜において実現が期待されるFFLO相とその磁場に対する安定性を詳しく調べた。このFFLO相と高磁場で実現が期待される従来型のFFLO相との競合により、ゼロ磁場下で超伝導相がない薄膜においても磁場下では超伝導がむしろ誘起されるという、磁場誘起超伝導の一例が見出されることを突き止めた。この成果に関する論文は現在フィジカルレビュー誌に投稿中である。

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 6 件)

1. Kazushi Aoyama and Ryusuke Ikeda, “Fluctuations and order of anti ferromagnetism induced by paramagnetic pair breaking”, Physical Review B 誌, 84 巻, 184516-1 ~ 184516-21 (2011) 査読有 DOI:10.1103/PhysRevB.84.184516
2. Yuhki Hatakeyama and Ryusuke Ikeda, “Emergent antiferromagnetism in a d-wave superconductor with strong paramagnetic pair breaking”, Physical Review B 誌, 83 巻, 224518-1 ~ 224518 - 17 (2011) 査読有 DOI:10.1103/PhysRevB.83.224518
3. Ryusuke Ikeda, Yuhki Hatakeyama, and Kazushi Aoyama, “Antiferromagnetic ordering induced by paramagnetic depairing in unconventional superconductors”, Physical Review B 誌, 82 巻, 060510-1~060510-4 (2010) 査読有 DOI:10.1103/PhysRevB.82.060510
4. 池田 隆介, “磁場下の超伝導”, 日本物理学会誌 65 巻, No.8, 598-607 (2010) (依頼による執筆) 査読有
5. Ryusuke Ikeda, “Impurity-induced broadening of the transition to a Fulde-Ferrell-Larkin-Ovchinnikov phase”, Physical Review B 誌, 81 巻, 060510-1~060510-4 (2010) 査読有 DOI: 10.1103/PhysRevB.81.060510
6. Norihito Hiasa, Taro Saiki, and Ryusuke Ikeda, “Vortex lattice structure dependent on pairing symmetry in Rashba superconductors”, Physical Review B 誌, 80 巻, 014501-1 ~014501- (2009) 査読有 DOI:10.1103/PhysRevB.80.014501

[学会発表] (計 8 件)

1. 池田 隆介, 「超伝導渦糸状態の相図」 日本物理学会第67回年次大会(2012年3月27日 関西学院大学) シンポジウムにおける招待講演
2. 畠山 雄気、池田 隆介, 「パウリ常磁性による反強磁性とFFLO共存状態」 日本物理学会 2010 秋季大会(2010年9月24日 大阪府立大学) 一般講演
3. 畠山 雄気、池田 隆介, 「常磁性効果によるFFLO超伝導相内の反強磁性秩序とその磁気構造」 日本物理学会 2011 秋季大会(2010年9月22日 富山大学) 一般講演
4. 畠山 雄気、池田 隆介, 「超伝導相における磁場誘起反強磁性相」 日本物理学会第65回年次大会(2010年3月22日 岡山大学) 一般講演
5. 青山 和司、池田 隆介, 「パウリ常磁性が強い超伝導体の磁束分布と反強磁性揺らぎ」 日本物理学会第65回年次大会(2010年3月22日 岡山大学) 一般講演
6. 池田 隆介, 「FFLO 転移への不純物効果」 日本物理学会第65回年次大会(2010年3月22日 岡山大学) 一般講演
7. 青山 和司、池田 隆介, 「パウリ常磁性の強い超伝導渦糸格子における反強磁性揺らぎの効果」 日本物理学会 2009 秋季大会(2009年9月25日 熊本大学)
8. 池田 隆介、青山和司, 「異方的超伝導薄膜におけるゼロ磁場FFLO状態」 日

本物理学会 2009 秋季大会(2009 年 9 月
25 日 熊本大学)

〔図書〕(計 1 件)

池田隆介、「超伝導転移の物理」(丸善出版)、2012 年 12 月発刊、157 ページ。

〔その他〕

ホームページ等

<http://cond.scphys.kyoto-u.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

池田 隆介 (RYUSUKE IKEDA)

京都大学・大学院理学研究科・准教授

研究者番号：60221751