

令和 2 年 5 月 5 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2016～2019

課題番号：16K05444

研究課題名（和文）パウリ常磁性、臨界揺らぎ、多バンド性がもたらす磁場下の超伝導理論

研究課題名（英文）Theory of Superconductivity under magnetic fields in materials with Pauli paramagnetism, critical fluctuation, and multi-band effects

研究代表者

池田 隆介（Ikeda, Ryusuke）

京都大学・理学研究科・准教授

研究者番号：60221751

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,100,000円

研究成果の概要（和文）：鉄系超伝導体 FeSe は電子数密度が小さく、超伝導の構成要素である電子対（ペア）をもたらす電子間引力が非常に強いと示唆される系であるため、従来の超伝導の基礎理論が適用できない超伝導がそこでは起こっていると考えられる。実際、強いパウリ常磁性（ゼーマン効果）を示唆する高磁場超伝導相の存在、弱磁場下の超伝導転移温度より異常に高温域まで見られる強い超伝導揺らぎ現象、といった奇妙な実験事実が報告されていた。本研究では、これまでの超伝導理論を拡張して、特に強い超伝導揺らぎ現象の解明に焦点を当てた理論を開発し、主要な磁場下の実験事実を説明することに成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

超伝導の理論は、90年代に集中的に研究された銅酸化物高温超伝導も含む多くの超伝導の物理現象を説明できるBCS理論にこれまで基づいてきたが、近年発見され現在盛んに研究されている鉄系超伝導体の一つである FeSe では、BCS理論の枠を超えた引力の強い超伝導が実現しているため、この系を主たる対象とした研究により、超伝導理論を拡張し、その結果を実験事実との比較により検証し、量子凝縮系物理の更なる発展に寄与することができる。と期待される。

研究成果の概要（英文）：In an iron-based superconductor FeSe, the density of the conduction electrons is quite low, and the attractive interaction between the electrons leading to the electron-pair condensate and forming a superconductivity is unusually strong. Consequently, it is considered that the superconductivity occurring in this material cannot be described by the conventional theory describing superconducting properties in most of the materials discovered so far. In fact, two strange observations, a high field superconducting phase suggestive of the presence of a strong Pauli paramagnetism (or Zeeman effect) and a unusually broad fluctuation region at higher temperatures than the superconducting transition line in weak magnetic fields have been found there. In the present research, a theory is developed to explain the unusually strong fluctuation effect by extending the conventional superconducting fluctuation theory, and main experimental results in FeSe in magnetic fields have been explained.

研究分野：凝縮系物理の理論

キーワード：超伝導 パウリ常磁性 臨界揺らぎ

1. 研究開始当初の背景

熱伝導、磁化測定の実験を通して、鉄系超伝導体 FeSe ではフェルミエネルギーが有効的に小さく、換言すれば電子間引力が極端に強いいため、BCS-BEC クロスオーバー域という従来の BCS 理論の適用できない、臨界揺らぎ効果が無視できないタイプの超伝導がこの物質において起きているという指摘があった。また、FeSe の準 2 次元層構造に垂直な磁場下での熱伝導測定により、2 つの超伝導相を隔てる高磁場域での転移線の存在が示唆され、有効的に小さいフェルミエネルギーとの関連から、この系ではパウリ常磁性が高磁場域で強いことも推測された。この系に特有な 2 バンド性と上記の特徴から、FeSe にみられる現象の解明にはパウリ常磁性、超伝導揺らぎ効果がともに強い多バンド超伝導の理論的理解を進めることが必要と考えられた。

2. 研究の目的

主要な目標は、当初 1) 層に垂直磁場下での高磁場超伝導相がパウリ常磁性に起因する Fulde-Ferrell-Larkin-Ovchinnikov (FFLO) 状態であるのか、2) 1) とは別に、BCS-BEC クロスオーバー域の磁場中超伝導の超伝導揺らぎの理論を構築し、磁化などにみられる現象を説明すること、の 2 点を中心であった。ただ、1)と 2)は通常相反する超伝導特性であり、容易に両立できるとは考えにくいという前提で本課題の研究に着手した。

3. 研究の方法

本研究ではまず、層に垂直磁場下での BCS-BEC クロスオーバー域の超伝導を想定させる臨界揺らぎ現象を説明するための理論を発展させることを中心に研究を進めた。研究代表者の銅酸化物高温超伝導体での磁場下の繰り込まれた超伝導揺らぎに関する研究成果を拡張する方針で進めた。特に、FeSe の実験研究で強い超伝導揺らぎ効果を示した磁化を調べるための理論手法が確立していなかったため、弱磁場下での帯磁率の海外の理論グループによる研究で開発されていた手法が高磁場下でも適用できることを独自に明らかにし、磁化への繰り込まれた超伝導揺らぎ効果の一般的な理論を構築するところから研究を始めた。

4. 研究成果

まず、本研究課題の主な対象である FeSe が 2 バンド超伝導体であることから、単純化された 2 バンド電子構造を持つ電子系の超伝導を記述するギンツブルク ランダウ (GL) 自由エネルギー汎関数を導出し、これを超伝導臨界揺らぎを調査するためのモデルとして、3. で触れた磁化への揺らぎの繰り込みを実行した。この研究は、磁場下の超伝導揺らぎの一般論として確立していなかった問題に答えを与えたという意味でも重要な結果と云うことができる。FeSe において磁化に関する著しい実験事実である 1) 対破壊磁場 $H_{c2}(T)$ よりかなり高温・高磁場から見える揺らぎ反磁性磁化、2) 磁化の $H_{c2}(T)$ 線直下での交差現象、を今回の理論は半定量的に説明し、特に 2) が磁場下の超伝導揺らぎによる共通した現象であることを明らかにした。高磁場下では磁場依存スケールリング則が熱力学量、輸送係数に現れるべきであることが、当研究代表者や他の海外の研究グループにより銅酸化物高温超伝導に関連して以前に指摘されているが、2 バンド系ではこのスケールリング則が一般に不成立になることがこの研究で明らかとなった。

その次に着手したのが、BCS-BEC クロスオーバー域にある強結合超伝導体が磁場下にある場合での超伝導揺らぎの理論の開発であった。強結合な場合に 2 バンドの系を仮定して一般的に前述の磁化に対する繰り込みの解析を遂行するには困難があったため、単バンド系のみをここでは考察した。しかし、0.5 T を越える磁場下の FeSe では、この単バンドのモデルがより適当であることが後の実験で明らかとなった。簡単のために、化学ポテンシャルをゼロ磁場の値に固定するという、低磁場で正当な近似を用いて得られた結果は、先述の磁化の $H_{c2}(T)$ 直下での交差現象がかなり広い磁場域で見られるという FeSe の実験結果とコンシステントなものとなった。また、磁場依存スケールリング則が熱力学量に見られないという、銅酸化物系での現象とは明らかに異なる結果をもたらした。残念ながら、現在までのところ、FeSe での磁化データにおいてこのスケールリングの有無を判定した解析は存在しない。

本研究課題の最後の題材として、BCS-BEC クロスオーバー域に近い 3 次元強結合超伝導体の層構造に垂直磁場下での磁場 温度相図を調べた。銅酸化物系とは異なり、強結合系の場合には $H_{c2}(T)$ 線より高温側での揺らぎ領域が広く、リンデマン基準法により決定した渦格子融解線 $H_m(T)$ が比較的 $H_{c2}(T)$ 線に近い相図となることが主要な結論となった。

本研究課題が終了直後の 4 月に、層構造に平行磁場下での FeSe の磁場 温度相図に関する海外グループによる実験報告があり [F. Hardy et al., arXiv:2004.10848]、渦格子融解転移線と

パウリ常磁性による高磁場・低温超伝導相（おそらく FFL0 相）との相関が明らかにされた。この実験報告は、本研究課題の守備範囲からは若干はずれるものの、本研究を自然に拡張する強い動機付けに今後なると思われる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 7件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Kyosuke Adachi, Ryusuke Ikeda	4. 巻 98
2. 論文標題 Dimensionality-induced BCS-BEC crossover in layered superconductors	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review B 誌	6. 最初と最後の頁 184502 - 1 ~ 5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1103/PhysRevB.98.184502	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Kyosuke Adachi, Ryusuke Ikeda	4. 巻 99
2. 論文標題 Stabilization of the vortex-liquid state by strong pairing interaction	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review B 誌	6. 最初と最後の頁 064508-1 ~ 13
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1103/PhysRevB.99.064508	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Natsuo Nagamura, Ryusuke Ikeda	4. 巻 98
2. 論文標題 Stability of half-quantum vortices in equal-spin pairing states of ^3He	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review B 誌	6. 最初と最後の頁 094524-1 ~ 15
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1103/PhysRevB.98.094524	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Ken-ichi Hosoya, Ryusuke Ikeda	4. 巻 95
2. 論文標題 Possible triplet superconducting order in a magnetic superconducting phase induced by paramagnetic pair breaking	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 224513-1 ~ 16
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1103/PhysRevB.95.224513	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kyosuke Adachi, Ryusuke Ikeda	4. 巻 96
2. 論文標題 Enhanced superconducting fluctuation effects on thermodynamic properties in the BCS-BEC crossover regime	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 184507-1~11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1103/PhysRevB.96.184507	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Yuhki Hatakeyama, Ryusuke Ikeda	4. 巻 93
2. 論文標題 Coupled k-space structure of d-wave superconducting and magnetic orders induced by paramagnetic pair-breaking effect	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 104503-1~9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1103/PhysRevB.93.104503	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kyosuke Adachi, Ryusuke Ikeda	4. 巻 93
2. 論文標題 Fluctuation diamagnetism in two-band superconductors	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 134503-1~17
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1103/PhysRevB.93.134503	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計7件 (うち招待講演 1件/うち国際学会 4件)

1. 発表者名 Kyosuke Adachi
2. 発表標題 Dimensionality Induced BCS-BEC Crossover
3. 学会等名 12th International Conference on Materials and Mechanisms of Superconductivity and High Temperature Superconductors (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Ryusuke Ikeda
2. 発表標題 Stability of Half-Quantum Vortices in Polar Phase in Anisotropic Aerogel
3. 学会等名 International Symposium on Quantum Fluids and Solids (QFS2018) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Ryusuke Ikeda
2. 発表標題 Dangling Spin-Triplet Order in High Field Superconducting Phase induced by Strong Paramagnetic Pair-Breaking
3. 学会等名 International Conference on Strongly Correlated Electron Systems, SCES 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Ryusuke Ikeda
2. 発表標題 Superconducting-fluctuation effects in strong-coupling regime
3. 学会等名 28th International Conference on Low Temperature Physics (LT28) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 足立景亮, 池田隆介
2. 発表標題 強結合域で生じる超伝導ゆらぎ現象の理論研究
3. 学会等名 2016年日本物理学会秋季大会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 弾雄一郎, 池田隆介
2. 発表標題 空間反転対称性が無い超伝導体における横磁化の解析
3. 学会等名 第72回日本物理学会年次大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 足立景亮, 池田隆介
2. 発表標題 強結合域における磁場中超伝導ゆらぎの理論研究
3. 学会等名 第72回日本物理学会年次大会
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

京都大学大学院理学研究科凝縮系理論グループ http://cond.scphys.kyoto-u.ac.jp/
--

6. 研究組織		
氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考