

機関番号：14401

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2009～2010

課題番号：21840035

研究課題名（和文） 遍歴・局在二重性が生む新しい超伝導の理論

研究課題名（英文） Theory of new superconductivity generated by the itinerant-localized duality

研究代表者

伏屋 雄紀 (FUSEYA YUKI)

大阪大学・大学院基礎工学研究科・助教

研究者番号：00377954

研究成果の概要（和文）：奇振動数超伝導の提案以来40年にわたる安定性の問題を解決した。スピンゆらぎは遍歴・局在二重性を通して超流動密度を減少するなど、超伝導の性質に大きな影響を与えることが明らかとなった。遍歴・局在二重性は（スピンゆらぎが十分強い場合）ゼロ磁場 FFLO 状態を実現しうることも分かった。強相関電子系のみならず、強い電子-格子結合系においても奇振動数超伝導が実現することが分かった。

研究成果の概要（英文）：The “40 years problem” of the stability of odd-frequency superconductivity is solved. It is shown that the spin fluctuation largely affects the properties of superconductivity (e.g. the reduction of the superfluid density) through the itinerant-localized duality. It is also shown that the itinerant-localized duality can realize the zero-field FFLO state when the spin fluctuation is strong enough. We found that not only in the strongly correlated electron systems, but also in the strong electron-phonon coupling systems, the odd-frequency superconductivity can be realized.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,090,000	327,000	1,417,000
2010年度	990,000	297,000	1,287,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,080,000	624,000	2,704,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物性 II

キーワード：遍歴・局在二重性, 奇振動数超伝導, マイスナー効果, スピンゆらぎ

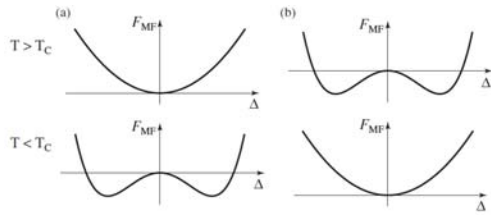
1. 研究開始当初の背景

固体中を運動する電子は、一般に遍歴成分と局在成分を併せ持っている。通常の場合、金属の性質は遍歴成分のみに支配されている。しかし強相関電子系では、遍歴成分と局在成分が複雑に絡み合い、通常金属とは著しく異なる性質を示す。

こうした遍歴・局在二重性は、金属の性質のみならず、超伝導の性質にも多大な影響を及ぼすことが当然予想される。しかし従来の

超伝導理論は遍歴成分のみに的を絞った研究がほとんどであった。この問題に対して、研究代表者は以前から遍歴・局在二重性を取り入れて超伝導の性質を調べてきた。その結果、二重性が強く現れる環境（反強磁性臨界点近傍）では、従来にない全く新しい超伝導、「奇振動数超伝導」が実現することを発見した。

こうして遍歴・局在二重性が新しい超伝導を生み出すという、新たな視点が生まれたが、



▲ 2種類の鞍点解による自由エネルギーの違い。(a)の解を選択すれば正しい相転移を記述できるが、(b)の解では物理的に正しくない状況になってしまう。従来の議論は(b)に基づいているため、正しい結論が得られなかった。本研究では、数学的に正しい解に2種類あり、物理的には(a)の解を選択する必要があることを初めて明確に指摘し、それに基づき奇振動数超伝導が安定に存在しうることを証明した。

その具体的な性質は謎に包まれたままで、どのようなふるまいが観測されるか、予測不能であった。さらに奇振動数超伝導については、40年前にその存在を提案されて以来、未だ解かれていない謎がある。それは安定性の問題で、様々な研究がなされたにもかかわらず、解明には至っていなかった。この難問が障害となり、奇振動数超伝導の研究はほとんど進んでいないのが現状であった。

2. 研究の目的

遍歴・局在二重性が生む新しい超伝導（奇振動数超伝導）に関して、

(1) 積年の課題である安定性の問題を解決する。

(2) 遍歴・局在二重性の効果（特にスピンゆらぎ）が強相関電子系超伝導の性質に及ぼす影響を調べる。

(3) 奇振動数超伝導の実験的に検証可能で特徴的なふるまいを調べる。ことを本研究の目的とした。

3. 研究の方法

(1) 安定性については、径路積分の手法に乗り取り、自由エネルギーを求め、そこからマイスナー効果等を調べる。

(2) 特徴的なスピンゆらぎを摂動論に基づき取り込み、マイスナー効果、超流動密度、侵入長について調べる。

(3) 現実的な模型（ハバード-ホルスタイン模型など）に用い、ギャップ方程式を数値的に解くことで、奇振動数超伝導が実現する具体的な条件について調べる。

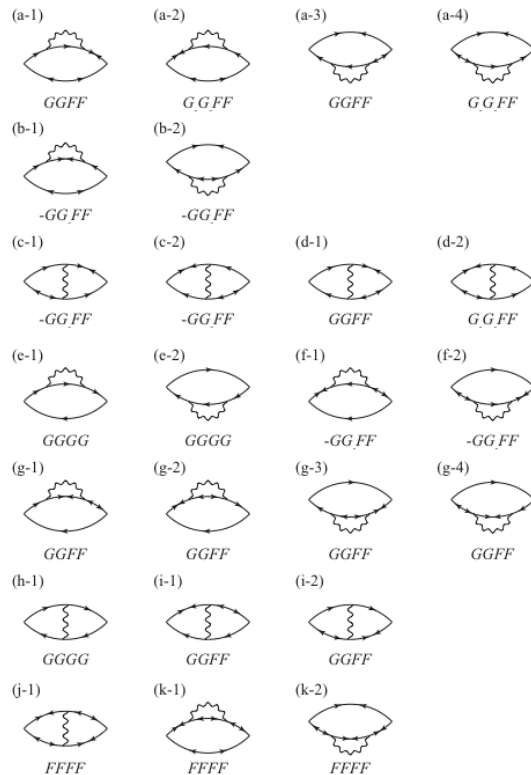
4. 研究成果

(1) ベレジンスキーによる最初の提案（1972年）以来、「奇振動数超伝導は熱力学に安定な状態として存在し得ないのではないか」という根本的性質について長らく疑問がもたれてきた。40年経ようとしている現在でも、その解明には至っていなかった。この問題が障壁となり、奇振動数超伝導は興味を持たれながらもその研究は進展せず、停滞し続けてきた。

本研究では、この問題を解決するに際して、自由エネルギーを最小にする適切な鞍点解を選ぶことが重要な鍵を担っていることを突き止めた（左上図参照）。このことは、物理的には極めて自然な点ではあるが、これまでの議論で見落とされてきた点である。

この視点に基づき、我々は径路積分の手法を用いて奇振動数超伝導の性質を調べたところ、奇振動数超伝導も通常超伝導と同じく、熱力学的にも電磁気学的にも安定であることを証明した。

この結果により、40年にわたる長年の謎が解明されるに至った。そればかりではなく、これまで奇振動数超伝導研究が停滞していた原因となる問題を取り除いたことで、今後一気に奇振動数超伝導の研究が進展することが期待される。実際、本研究の結果を受け、これまで独立に進められてきた超伝導-金属



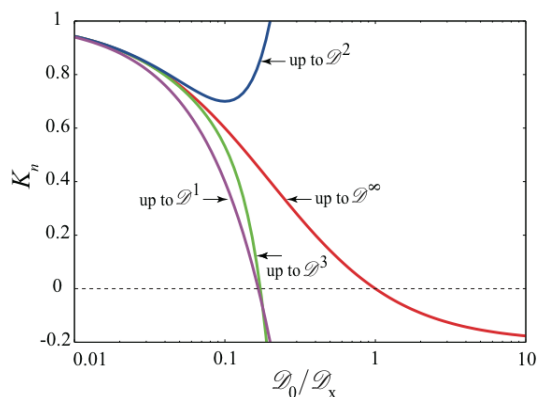
▲ 電流-電流応答関数（マイスナー核）のファインマン・ダイアグラム。スピンゆらぎ（波線）の3次摂動まで。

接合系でも奇振動数超伝導の性質が早くも見直され始めている。

(2) (1)の研究により、奇振動数超伝導は安定に存在しうることが明らかとなった。ただしその理論は準粒子の遍歴成分（コヒーレント成分）のみに着目したものであって、局在成分（インコヒーレント成分）まで考慮されたものではなかった。強相関電子系では、この局在成分が金属の性質に多大な影響を及ぼすことがこれまでの研究で明らかとなっており、その影響は超伝導状態にまで及ぶことが当然予想される。そこで、(1)で見出した正しい鞍点解に基づいた上で、局在成分（特にスピンゆらぎの効果）を取り込み、遍歴・局在二重性が強相関電子系超伝導の電磁応答に及ぼす影響を調べた。

電磁応答は、電流-電流相関（マيسナー核）を計算することで調べることが出来る。本研究では、このマيسナー核に（局在成分としての）スピンゆらぎの補正を摂動論に基づき取り込んで計算した（前頁右下図参照）。その結果、ある程度スピンゆらぎが存在しても、超伝導は安定に存在しうることが分かった。また、スピンゆらぎの増大に伴い、超流動密度は減少し、ロンドンの侵入長は長くなることも分かった。こうした理論的予測は、実験的に検証できるもので、強相関電子系超伝導の理解を、理論・実験両面から深めるための一助となる。

さらに、スピンゆらぎが十分強い場合は、通常の重心運動量がゼロである超伝導は安定に存在し得ず、その代わりに重心運動量が有限の超伝導（FFLO 状態）がゼロ磁場中にも関わらず実現しうる、という新しい現象を発見した（下図参照）。FFLO 状態は近年様々な



▲超流動密度 (K_n) のスピンゆらぎ強度 (D_0) 依存性。 D^n は取り込んだスピンゆらぎの次数 (n) を表す。スピンゆらぎが強くなる程超流動密度が減少することが分かる。 K_n が負になっている領域で、ゼロ磁場 FFLO が実現する。

超伝導体で観測されており、活発に研究が進められているが、これらはすべて磁場中でのみ現れる現象であり、それが常識となっていた。本研究で得た結論は、この従来の常識を覆すものである。「ゼロ磁場であってもスピンゆらぎが大きければ FFLO 状態が現れ得る」という結論は、当該分野に新たな視点を提供する。この新現象は、まさに「遍歴・局在二重性が生む新しい超伝導状態」といえる。

(3) 新たな奇振動数超伝導の舞台として、「強い電子-格子結合系」でも奇振動数超伝導が実現することを明らかにした。ホルスタイン-ハバード模型を用い、s 波奇振動数スピン三重項超伝導が、通常の偶振動数超伝導に打ち勝って実現することを証明した。こうした奇振動数超伝導の実現のためには、対形成相互作用に十分な遅延効果があることが必要である。ギンツブルグ-ランダウ理論に基づく解析によると、比熱の飛びは BCS の値に比べて非常に小さいことが分かった。さらに温度降下により超伝導の 2 段階転移が起こり、それは比熱の 2 段階のとびとして観測されることも予測した。

このように、強相関電子系に限らずとも、新しい超伝導「奇振動数超伝導」が実現しうるということが分かり、その研究対象が以前に比べて格段に広がった。これまで、従来型の偶振動数超伝導と考えられていた超伝導も奇振動数超伝導である可能性が十分あることを本研究で得た結果は示唆している。

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 3 件)

① Y. Fuseya, K. Miyake:

“On the Meissner effect of the odd-frequency superconductivity with critical spin fluctuations: Possibility of zero field FFLO pairing”,
J. Phys. Soc. Jpn. 80 (2011) 054705. 査読あり。

② H. Kusunose, Y. Fuseya, K. Miyake:

“On the puzzle of odd-frequency superconductivity”,
J. Phys. Soc. Jpn. 80 (2011) 054702. 査読あり。

③ H. Kusunose, Y. Fuseya, K. Miyake:

“Possible odd-frequency superconductivity in strong-coupling electron-phonon systems”,
J. Phys. Soc. Jpn. 80 (2011) 044711. 査読あり。

り。

〔学会発表〕(計 14 件)

①Y. Fuseya: “Meissner effect of the odd-frequency superconductivity”, International workshop in honor of Jacques Flouquet, On the heavy fermion road”, 2010. 8. 31, ESPCI, Paris

②伏屋雄紀:「ビスマス中ディラック電子の磁気光学応答」, 日本物理学会, 2010. 3. 21, 岡山大学

③伏屋雄紀:「磁場中擬一次元超伝導の理論」, 新学術領域研究「分子自由度が拓く新物質科学」第3回領域会議, 2010. 1. 5, 仙台

④伏屋雄紀, 三宅和正:「odd-frequency超伝導のマイスナー効果」, 特定領域研究「スーパークリーン物質で実現する新しい電子層の物理」A04 班研究会, 2009. 12. 13, 和歌山県教育センター学びの丘

⑤伏屋雄紀:「磁場中擬一次元超伝導における次元性の効果」, 新学術領域研究「分子自由度が拓く新物質科学」第2回領域会議, 2009. 10. 6, 東京大学

⑥伏屋雄紀, 三宅和正, C. Bourbonnais:「くりこみ群からみた擬一次元超伝導の磁場依存性」日本物理学会, 2009. 9. 27, 熊本大学

⑦伏屋雄紀, 三宅和正:「奇振動数超伝導のマイスナー効果」, 日本物理学会, 2009. 9. 26, 熊本大学

〔図書〕(計 1 件)

①H. Fukuyama, A. Kobayashi, Y. Fuseya: “Transport currents and persistent currents in solids: Orbital magnetism and Hall effect of Dirac electrons”, in Perspectives of mesoscopic physics, World Scientific, (2010) p.69-78.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

伏屋 雄紀 (FUSEYA YUKI)

大阪大学・大学院基礎工学研究科・助教

研究者番号: 00377954

(2) 研究分担者
()

研究者番号:

(3) 連携研究者
()

研究者番号: