

機関番号：14401

研究種目：基盤研究 (B)

研究期間：2007 ~ 2010

課題番号：19340099

研究課題名 (和文) 新しいフェルミ超流動理論の展開

研究課題名 (英文) Development of New Theory for Fermi Superfluidity

研究代表者

三宅 和正 (MIYAKE KAZUMASA)

大阪大学・大学院基礎工学研究科・教授

研究者番号：90109265

研究成果の概要 (和文)：

臨界価数ゆらぎ超伝導の理論は従来の実験事実を統一的に理解できることが分かり、予想した以上に臨界価数ゆらぎが Ce や Yb を含む重い電子系で重要な役割を果たしていることが分かった。また、量子臨界価数転移は非フェルミ液体の新しいユニバーサリティクラスをなし、YbRh₂Si₂、β-YbAlB₄などで観測されている非フェルミ液体的な振る舞いを説明することが分かった。奇周波数超伝導に関連して、負マイスナー効果の問題を解決したのは大きな成果である。

研究成果の概要 (英文)：

We have developed a theory of superconductivity due to the critical valence fluctuations, showing that the theory explains existing experimental results in a unified way. This implies that the critical valence fluctuations play the important role in Ce- and Yb-based heavy fermion metals. We found that the quantum critical valence transition exhibit non-Fermi liquid behaviors of new universality class which gives a basis of understanding unconventional non-Fermi liquid behaviors such as in YbRh₂Si₂ and β-YbAlB₄. It is a great success that the paradox of negative Meissner effect in odd-frequency superconductivity was solved, releasing its superconductivity from skeptical atmosphere in the community of strongly correlated electron systems.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	800,000	240,000	1,040,000
2008年度	4,000,000	1,200,000	5,200,000
2009年度	4,000,000	1,200,000	5,200,000
2010年度	4,100,000	1,230,000	5,330,000
年度			
総計	12,900,000	3,870,000	16,770,000

研究分野：物性理論

科研費の分科・細目：物理学・物性II

キーワード：強相関電子系，異方的超伝導，臨界価数ゆらぎ，BCS-BEC クロスオーバー，量子臨界現象，奇周波数超伝導，反強磁性と超伝導の共存

1. 研究開始当初の背景

フェルミ粒子系の超流動・超伝導現象は物性物理学の中で重要な位置を占めてきてい

る。70年代の初頭には、これらの研究は基本的には既に終息したのではないかというのが大方の見方であったが、自然は豊富であ

った。その後の発展、即ち、液体ヘリウム3での超流動相の発見、 CeCu_2Si_2 など重い電子系物質や層状ペロブスカイト銅酸化物などのいわゆる強相関電子系での超伝導の発見などをみれば、事態はそう単純ではなかったことが分かる。また、最近ではフェルミ原子 ^40K 気体で擬対凝縮現象が観測されるに至って、フェルミ粒子系の超流動の研究はルネサンスを迎えたと言える。

2. 研究の目的

この研究の目的は上記の背景のもと、フェルミ粒子系の超流動研究のルネサンスに寄与すべく、

- 1) 臨界価数ゆらぎ超伝導理論の展開、
- 2) 奇周波数ギャップ超伝導理論の展開、
- 3) カルテットフェルミ超流動理論の展開、

の各研究テーマに関して理論的研究を通じて研究の進展に貢献することである。

3. 研究の方法

ファイマン図形を用いる量子多体問題の方法により基本的に解析的な理論手法に基づきつつ数値解析的手法も駆使して研究を進めた。国内外の研究者との討論も研究の発展にとって極めて有益であった。

4. 研究成果

(1) 臨界価数ゆらぎの物理に関する成果

① Ce を含む重い電子系物質 $\text{CeCu}_2(\text{Si,Ge})_2$ などで観測される臨界価数ゆらぎに起因する超伝導機構について実験と理論の総合報告をJ. Phys. Soc. Jpn.誌から依頼を受けて執筆した。

② Ce や Yb を含む重い電子系物質、 YbXCu_4 ($\text{X}=\text{In, Ag, Cd}$) and CeYIn_5 ($\text{Y}=\text{Ir, Rh}$), において臨界価数転移点が磁場により誘起されることを理論的に指摘し、メタ磁性的な振る舞いなどいくつかの従来説明が付かなかった実験事実を理解することに成功した。

③ 重い電子物質 CeRhIn_5 が加圧により反強磁性相から常磁性相に転移し、de Haas-van Alphen 効果で決められるフェルミ面のトポロジーが変化する現象は、 Ce イオンの価数転移として理解できることを、f-c クーロン相互作用を含む「拡張アンダーソンモデル」にもとづいて、理論的に示した。

④ 重い電子物質 CeCu_2Si_2 の加圧下の超伝導状態は低圧側(1GPa以下)と高圧側(1.5GPa)

と異なる対称性をもつd波超伝導が実現していることを示唆する実験事実を理論的に分析し、低圧側では B_{1g} 対称の高圧側では B_{2g} 対称の超伝導状態であるとすれば矛盾がないことを示した。

⑤ YbRh_2Si_2 , $\beta\text{-YbAlB}_4$ などで観測されている非フェルミ液体的な振る舞いは従来の反強磁性量子臨界点でのそれと異なり新しいユニバーサリティクラスをなすものとしてこの10年あまり注目を集めてきた。これに対する統一的な視点を与える理論を展開した。すなわち、f電子と伝導電子の間のクーロン斥力を取り込んだ周期アンダーソン模型によりf電子の価数転移の臨界終点が絶対零度で実現する場合が可能であり、その近傍で発達する価数ゆらぎに対するモード結合理論を適用すると、比熱、帯磁率、電気抵抗、NMRの縦緩和率などの温度依存性が(従来の磁気量子臨界点とは異なる)新しいユニバーサリティクラスをなすことを示した。その結果は上記の実験を統一的に説明する。

⑥ $\text{CeCu}_2(\text{Si,Ge})_2$ に加圧すると臨界価数ゆらぎにより転移温度が2倍以上増大した超伝導ギャップにラインノードをもつ異方的超伝導が発現する。と同時に、臨界価数ゆらぎによって不純物ポテンシャルが長距離的になり、残留電気抵抗も顕著な増大を示す。これは、「異方的超伝導は不純物散乱に弱い」ので、パラドクスであった。長距離ポテンシャルを持つ不純物に対する様々なタイプの超伝導転移温度についてファイマン図形的手法を用いて調べた。その結果、異方的超伝導状態においても、長距離不純物ポテンシャルには多くの異方的散乱が含まれるため、クーパー対の感受率が自己エネルギーによる抑制される効果がバーテックス補正により部分的に回復することにより、転移温度の減少が緩和されることが分かった。これは上記のパラドクスを解決する成果である。

⑦ 価数ゆらぎに伴う超伝導発現機構の研究では、銅酸化物高温超伝導体における価数ゆらぎ(電荷移動のゆらぎ)の役割を解明する研究で進展があった。すなわち、銅のd電子と酸素のp電子の間のクーロン斥力を露わに考慮したd-pモデルについてドーピング量の関数としてd-p電荷移動感受率の1/N展開方による微視的な計算を行ったところ超伝導転移温度が最大になるドーピングの辺りで発

散的増大を示すことが分かった。これは⑤の成果から見て、銅酸化物の転移温度最大に対応するドーピングの近傍で非フェルミ液体的異常が観測されていることとの理解につながる可能性を秘めている（論文準備中）。

(2) 磁性と超伝導の共存に関する成果

① 重い電子系超伝導物質 CeCoIn_5 が $H \sim H_{c2}$ 近傍で示す非フェルミ液体的振る舞いは、磁場中の超伝導ゆらぎの効果で反強磁性の出現を抑えていたモード結合項が抑えられた結果、反強磁性の相転移が誘起されると考えることで無理なく理解できることを示した。

② 同じく CeCoIn_5 の $H \sim H_{c2}$ 近傍に現れる、いわゆる FFLO 相内において不整合なスピン密度波の誘起される実験事実を、スピン密度波と FFLO 型の d 波超伝導およびスピン 3 重項 π ペアリングとのモード結合項の存在にもとづいて明快に理解する理論的提案を行った。

(3) スピン 3 重項超伝導体 Sr_2RuO_4 に関する成果

① Sr_2RuO_4 の超伝導機構に対する O サイトでのクーロン斥力 U_{pp} の効果 (Ru サイトでの U_{dd} とともに) 3 次摂動まで考慮した理論を展開し、 $\sin k_x + i \sin k_y$ 型のスピン 3 重項ペア状態は基本的に 2 次摂動の効果で出現することが分かった。また、スピン軌道相互作用と軌道間のフント結合の最低次の効果によってスピン 3 重項状態を特徴付ける d ベクトルは伝導 2 次元面 (ab 面) 内を向いた状態が基底状態になることが分かった。

(4) BCS-BEC クロスオーバーに関する成果

① 銅酸化物系における非整合 SDW と d 波超伝導の競合に関する理論を「斥力-引力カノニカル変換」を用いて研究した。同時に光学格子上にトラップされたフェルミ原子系の BCS-BEC クロスオーバーをクーパーペアと電荷密度に関する FLEX 近似に基づいて議論した。その結果、転移温度が Nozieres & Schmitt-Rink 理論によるものより抑えられることと、ハーフフィルドの場合には粒子・正孔対称性が回復することを示した。

② スピン分極した 3 次元引力ハバード模型のハーフフィルドでの温度-磁場相図を FLEX 近似の範囲で決定し、d 波スピン密度

状態が出現することを示した。

(5) 奇周波数超伝導状態に関する成果

① 奇周波数超伝導状態に関して最大のパラドクスであった、負マイスナー効果の問題を試行錯誤の末に解決した。これによって奇数周波数超伝導状態の存在を疑う原因は取り除かれたといえ、特筆すべき成果である。すなわち、奇周波数超伝導が安定化するにはペア相互作用の発散的な遅延効果が必用であるが、そのような場合は記述するためには、ハミルトニアンを用いる従来の方法では不十分であり、経路積分を用いた記述が不可欠であることを示した。そのことにより、負マイスナー効果の問題を解決するとともに、それと関連した熱力学的安定性の問題も生じないことを示した。

② 強い局所的電子格子相互作用をもつ系では「局所格子振動の振動数がソフト化すると、奇周波数超伝導状態が通常の偶周波数超伝導状態より安定化する場合がある」ことを示した。

③ 基底状態の性質を、周波数について対数的に発散するペア相互作用を仮定し (そのような相互作用は反強磁性との共存相で期待される) ギャップ方程式の解を調べたところ、偶周波数の状態より奇周波数の状態の方が安定化する場合が実質的なパラメタの領域で存在することが分かった (論文準備中)。

(6) その他の成果

カルテットフェルミ超流動理論の展開については、Ginzburg-Landau 理論を展開することには基本的な困難がないことが分かった。また、この理論はセクステット状態に対しても拡張が容易である (論文準備中)。

今後、この成果にもとづいて、現実的な系 (例えば、 ^{173}Yb) を念頭に、4 粒子系、6 粒子系に対するクーパー問題を観測される散乱長のデータにもとづいてカルテット・セクステット状態の安定性を評価することをめざす基盤ができた。

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 22 件)

1. A. Okada, K. Miyake: "Impurity Effect on Superconductivity in Critical-Valence-Fluctuations Region" J. Phys. Soc. Jpn. Vol.80,

- No.80, 084708-1-11 (2011) 査読有り
2. 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. Vol.80, No.5, 054705-1-10 (2011) 査読有り
 3. H. Kusunose, Y. Fuseya, K. Miyake: "On the Puzzle of Odd-Frequency Superconductivity" J. Phys. Soc. Jpn. Vol.80, No.5, 054702-1-7 (2011) 査読有り
 4. H. Kusunose, Y. Fuseya, K. Miyake: "Possible Odd-Frequency Superconductivity in Strong-Coupling Electron-Phonon Systems" J. Phys. Soc. Jpn. Vol.80, No.4, 044711-1-6 (2011) 査読有り
 5. S. Watanabe, K. Miyake: "Roles of Critical Valence Fluctuations in Ce- and Yb-Based Heavy Fermion Metals" J. Phys.: Condens. Matter Vol.23, 094217-1-11 (2011) 査読あり
 6. S. Watanabe, K. Miyake: "Quantum Valence Criticality as Origin of Unconventional Critical Phenomena" Phys. Rev. Lett. Vol.105, No.18, 186403-1-4 (2010) 査読あり
 7. S. Watanabe, K. Miyake: "Origin of Drastic Change of Fermi Surface and Transport Anomalies in CeRhIn₅ under Pressure" J. Phys. Soc. Jpn. Vol.79, No.3, 033707-1-4 (2010) 査読有り
 8. H. Tamaki, K. Miyake, Y. Ohashi: "d-Wave Spin Density Wave phase in the Attractive Hubbard Model with Spin Polarization" J. Phys. Soc. Jpn. Vol.78, No.7, 073001-1-4 (2009) 査読有り
 9. K. Miyake: "Theory for Coupled SDW and Superconducting Order in FFLO State of CeCoIn₅", J. Phys. Soc. Jpn. Vol.77, No.12, 123703-1-3 (2008) 査読有り
 10. S. Watanabe, A. Tsuruta, K. Miyake, J. Flouquet: "Magnetic-Field Control of Quantum Critical Points of Valence Transition", Phys. Rev. Lett. Vol.100, No.23, 236401-1-4 (2008) 査読有り
 11. Y. Fujimoto, A. Tsuruta, K. Miyake: "Antiferromagnetic Quantum Criticality Induced by Onset of Superconductivity around Upper Critical Field: Non-Fermi Liquid Behaviour of CeCoIn₅ at H \sim Hc2 " J. Phys.: Condens. Matter Vol.20, 325226-1-7 (2008) 査読有り
 12. Y. Yoshioka, K. Miyake: "Pairing Mechanism and Anisotropy of d-Vector of Spin-Triplet Superconductor Sr₂RuO₄", J. Phys. Soc. Jpn. Vol.78, No.7, 074701-1-8 (2008) 査読有り
 13. A. T. Holmes, D. Jaccard, K. Miyake: "Valence Instability and Superconductivity in Heavy Fermion Systems", J. Phys. Soc. Jpn.

Vol.76, No.5, 051002-1-10 (2007) 査読有り

- [学会発表] (計 27 件) (招待講演 8 件)
1. S. Watanabe, "New Universality Class of Quantum Criticality in Ce- and Yb-Based Heavy Fermions", 2011 International Conference on Strongly Correlated Electron Systems (invited talk), September 2, 2011, Cambridge, UK
 2. K. Miyake, "Roles of critical valence fluctuations in Ce- and Yb-based heavy fermion metals", 2010 International Conference on Strongly Correlated Electron Systems (invited talk), July 1, 2010, Santa Fe, New Mexico, USA
 3. K. Miyake, "Superconducting Duo in Ce-Based Heavy Fermions", 9th International Conference on Materials and Mechanisms of Superconductivity (keynote lecture), September 9, 2009, Keio Plaza Hotel, Tokyo, Japan
 4. 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年秋季大会. (2009.09.26). 熊本大学黒髪キャンパス (熊本市)
 5. 鶴田篤史, 三宅和正: "動的平均場+1/N 展開法による重い電子系の研究 III" 日本物理学会第 62 回年次大会. (2007.09.23). 北海道大学 (札幌市)

[図書] (計 1 件)

三宅和正 (共著, 福山秀敏・秋光純編集), 朝倉書店, 超伝導ハンドブック, 2009 年, 312 ページ(pp.101-112, pp.181-194, pp.235-240, 計 32 ページ)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

三宅和正 (MIYAKE KAZUMASA)
大阪大学・大学院基礎工学研究科・教授
研究者番号: 90109265

(2) 研究分担者

鶴田 篤史 (TSURUTA ATSUSHI)
大阪大学・大学院基礎工学研究科・助教
研究者番号: 40397716

(3) 研究分担者

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
(H22 から分担者として参加)

(4) 研究分担者

渡辺 真仁 (WATANABE SHINJI)
大阪大学・大学院基礎工学研究科・特任准教授、研究者番号: 40334346
(H22 から分担者として参加)