

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

研究代表者の専門分野：物性理論

科研費の分科・細目：物理学・物性

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，奇振動数超伝導，反強磁性と超伝導の共存

1. 研究計画の概要

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 ^{40}K 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。この研究の目的は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，
 の研究テーマに関して研究の進展に貢献することである。

2. 研究の進捗状況

(1) 臨界価数ゆらぎの物理に関する成果

Ceを含む重い電子系物質 $\text{CeCu}_2(\text{Si}, \text{Ge})_2$ 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。

CeやYbを含む重い電子系物質、 YbXCu_4 ($X=\text{In}, \text{Ag}, \text{Cd}$) and CeYIn_5 ($Y=\text{Ir}, \text{Rh}$)、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。

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「拡張アンダーソン模型」にもとづいて、理論的に示した。

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)とで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。

(2) 磁性と超伝導の共存に関する成果

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。

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 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

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} の効果を (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

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.

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) 奇数周波数超伝導状態に関する成果

奇数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は, カレント応答関数に対するインコヒーレント過程 (反強磁性スピン波) を考慮することで回避できることを示した.

3. 現在までの達成度

おおむね順調に進展している.

(理由)

臨界価数ゆらぎに物理に関しては, 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判明したのは大きな成果といえる. 実際, 2009 年 9 月開催の超伝導機構・物質に関する国際会議 (M²S2009) で Keynote Lecture に採用されるなど, いくつかの国際会議で招待講演を依頼されている.

奇数周波数超伝導に関連して, 最も難かしいと考えられた負マイスナー効果を回避する道を発見したことは大きな成果といえる.

カルテットフェルミ超流動理論の展開については, 研究が具体的な成果に結びついていない. 今後の課題である.

4. 今後の研究の推進方策

(1) 価数ゆらぎに伴う新しいクラスの量子臨界現象の研究: Ce や Yb を含む重い電子系金属のいくつかの系で反強磁性揺らぎに起因する量子臨界現象とは異なる異常性を示すが, これらの原因を解明するために前年度までに展開して来た理論を拡張整備して研

究を進め, 包括的な理解を得ることをめざす.

(2) 価数ゆらぎに伴う超伝導発現機構の研究: 臨界価数ゆらぎによる超伝導転移温度は反強磁性ゆらぎによるものよりも高くなる可能性について, 理論の精密化をめざす. さらに, 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.

(3) 奇数周波数ギャップ超伝導に対する微視的理論の構築: 「奇数周波数ギャップ超伝導」での G-L 流の枠組みを構成することと, 転移温度より低温側の状態の解明をめざす.

(4) カルテット・セクステット状態の安定性の評価: 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バ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. また, 「2 時間グリーン関数の運動方程式の連鎖を物理的考察に基づいて切断する方法」を用いてカルテット凝縮温度の評価を行う研究を引き続き追及する.

5. 代表的な研究成果

[雑誌論文] (計 14 件)

1. 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
2. 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
3. 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
4. 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
5. 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 16 件)

1. 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. (2008.09.26). 熊本大学黒髪キャンパス (熊本市)
2. 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)