

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 2 日現在

機関番号：16301

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23540414

研究課題名(和文) 臨界領域における奇周波数超伝導の微視的理論

研究課題名(英文) Microscopic theory for odd-frequency superconductivity in critical region

研究代表者

楠瀬 博明 (Kusunose, Hiroaki)

愛媛大学・理工学研究科・准教授

研究者番号：00292201

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,600,000円、(間接経費) 780,000円

研究成果の概要(和文)：奇周波数超伝導状態の基礎的事項の確立に貢献した。自由エネルギー汎関数における自発的な対称性の破れによって安定となる秩序変数を適切に選ぶことで、内部矛盾のないバルクな状態が可能であることを明らかにした。強結合局所電子格子相互作用モデルや臨界的な磁気揺らぎを取り入れたモデルを考察し、温度パラメータ相図を明らかにした。また、臨界揺らぎのような対数発散的引力では自己エネルギー効果を考慮しても奇周波数状態が安定に存在し得ることを示した。不純物まわりや境界における奇周波数成分の出現機構を自己無撞着な方程式を解くことで明らかにし、従来の半現象論的な理解と微視的な理解の間の繋がりを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：We have developed the fundamental theory for odd-frequency superconductivity. We found that a self-consistent bulk state is possible by choosing an appropriate order parameter that minimizes the free-energy functional in a spontaneous symmetry breaking. We elucidated the strong-coupling local electron-phonon model and the model having a critical magnetic fluctuation, we determined the phase diagram in temperature and parameter space. The critical fluctuation with logarithmically divergent attraction makes it stable against the self-energy effect. We further investigated the mechanism of the appearance of the odd-frequency component near an impurity site or on a surface boundary by solving the self-consistent equations with such boundary conditions, and showed the relationship between the microscopic and semi-phenomenological understandings for the nature of the order parameters.

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：奇周波数超伝導 常磁性マイスナー効果 エルミート性

## 1. 研究開始当初の背景

(1) 電子間の斥力を避けるため時間方向に節をもつ奇周波数超伝導状態が過去に提案されていたが、そのバルク相は熱力学的に安定ではなく負のマイスナー効果を示すなどの理論的な内部矛盾を含むことから、その実現は疑問視されていた。しかしながら、一方で界面などでは常磁性相に染み出した通常の超伝導対が奇の周波数依存性を持つことが知られていた。これらの内部矛盾の解決や統一的な理論的取り扱い、様々な理論的提案の理解や実験の解釈において重要であり、基礎理論の発展が望まれていた。

(2) 予備的考察として、奇周波数超伝導を導く自由エネルギー汎関数の構造と自発的対称性の破れについて詳細に検討した結果、正しい鞍点解を用いることで内部矛盾を解決することが可能であり、理論的に無矛盾な奇周波数超伝導理論が展開できることが分かった。また、ミニマルな模型として強結合局所電子格子模型を用いて、自己エネルギーの効果を見捨てた範囲で上記の理論を適用し、奇周波数超伝導が安定化する条件として、有効引力のエネルギースペクトルが低エネルギー領域に集中する臨界領域が最適であることが判明した。

## 2. 研究の目的

(1) 奇周波数超伝導の実現に有利な引力機構の特徴を明らかにする。現実的な引力機構として (i) 局所的な電子格子相互作用、(ii) 磁気量子臨界点近傍のスピンの揺らぎ、を取り上げ、それぞれの場合について、臨界性・引力強度と転移温度との関係、ギャップ関数の振動数依存性を明らかにする。特に、引力相互作用の振動数依存性の違いが、転移温度やギャップ関数の違いにどのように現れるかを明らかにし、その実現に有利な条件を考察する。

(2) 奇周波数超伝導相の熱力学的特徴を明らかにする。奇周波数ペアの特徴はギャップ関数の強い周波数依存性であり、強結合効果もその実現において重要である。これらの特徴に留意しながら比熱、超伝導粒子密度などの熱力学量を求め、その一般的な性質を明らかにする。また、他の超伝導相との競合、リエントラントな相構造などについても考察する。

(3) 強結合効果に対する超伝導相の安定性を

明らかにする。一般に強結合効果による有効質量の増大は超伝導を抑制するため、その効果について明らかにする。

## 3. 研究の方法

(1) 経路積分法を用いてギャップ関数の周波数依存性を考慮した自由エネルギー汎関数を構築し、それからギャップ方程式、異常グリーン関数、エリアシュベルグ方程式を導出することで、内部矛盾のない統一的な理論形式をより一般的な形で定式化する。

(2) カゴ状物質中のゲストイオン振動を念頭においた局所的電子格子相互作用や重い電子系における磁気量子臨界点近傍のスピンの揺らぎによる引力をモデル化する。それらの引力を用いたエリアシュベルグ方程式およびバーテックス補正を現象論的に取り入れた方程式を (i) 自己エネルギーの効果、(ii) バーテックス補正の効果に着目して数値的に解く。自己エネルギーのある場合とない場合の両者について、2つのタイプ尾引力について転移温度、温度・パラメータ空間の相図などを決定する。これらを見比べることで、自己エネルギーの効果や引力構造の違いを明らかにし、奇周波数超伝導の安定化に寄与する要素を抽出する。さらに、比熱、超伝導粒子密度などの熱力学量を計算し、奇周波数超伝導の熱力学特性を明らかにする。

(3) 当初の計画にはなかったが、本研究が進展するにつれて、偶周波数と奇周波数の成分が混合した超伝導の可能性とそれらを研究することによって得られる知見の重要性を認識した。そこで、混合状態を考える上で最もシンプルかつ本質的な外部磁場中の超伝導の問題を考える。(1)の定式化を混合状態について拡張し、(2)の計画を混合状態についても適用する。さらに、自由エネルギー汎関数の数学的構造を調べることで、偶周波数と奇周波数超伝導の違い、奇周波数超伝導において自発的に破れる本質的な対称性の同定などを試みる。また、不純物や界面においても偶奇周波数ペアの混合が見られるので、上記の観点から対波動関数の性質を見直す。とくに、1不純物問題や平面境界の場合について、ギャップ方程式を自己無撞着に解いて得られる解に基づき、界面や不純物付近で奇周波数ペアが形成される機構と対称性との関係を調べる。

#### 4. 研究成果

(1) 奇周波数超伝導の基礎方程式を見出した。この超伝導状態は周波数依存性があることが本質なので、経路積分法を用いて自由エネルギー汎関数の構造について考察を行った。この結果、バルク状態の熱力学的安定性やマイスナー効果について、正しい理解が得られた。研究の進展につれて偶奇周波数ペアの混合状態の重要性を認識したため、偶奇周波数混合ペアの場合や反対称スピン軌道相互作用がある場合について理論を一般化した。正しい自由エネルギーの表式が得られたことで、ギャップ方程式、正常・異常グリーン関数、エリアシュベルグ方程式などの基本方程式が統一的に導かれた。

(2) 自由エネルギーの実数性と最小条件の考察から、どのような場合に奇周波数成分が優勢になるか、また、奇周波数成分が優勢なとき粒子とホールの中に成り立つ共役関係の符号が逆転し、エルミート性が自発的に破れていることが明らかになった。正しい符号関係を選んだ場合に限りギャップ方程式が解を持つことも確認された。非エルミートな「分子場」は一見非物理的であるように見えるが、同時刻で超伝導対振幅がゼロであるため、静的な成分に非エルミート性は現れない。偶奇ペアが混成する具体的な例として外部磁場中の一重項三重項混合問題を解き、磁場・温度相図、ギャップ関数の偶奇周波数成分の特徴、ギャップ関数および比熱や超伝導粒子密度などの熱力学量の温度依存性を明らかにした。

(3) 引力の性質の違いによる奇周波数超伝導の安定性を明らかにした。低エネルギー極限で一定となる局所電子格子相互作用と対数的に発散する臨界的な磁気揺らぎを用いて奇周波数超伝導の安定性を比較し、後者の引力の場合は自己エネルギー効果を考慮しても絶対零度まで奇周波数超伝導が安定に存在することを見出した。前者の引力では、リエントラントな振る舞いを示し、絶対零度では通常の超伝導状態に打ち勝つことは出来ない。

(4) 自己エネルギーを通じた質量増強因子の効果を明らかにした。バーテックス補正を現象論的に導入したエリアシュベルグ方程式を解き、質量増強因子が転移温度や熱力学量に与える効果を明らかにした。バーテックス補正を無視し、質量増強因子の効果のみを考慮すると通常の引力では奇周波数超伝導は破壊される。バーテックス補正が質量増強因子を抑制する場合、奇周波数ペアの安定性が回復する。また、引力が低エネルギー極限に

向かって発散的な場合、バーテックス補正がなくても奇周波数超伝導は安定に存在し得る。

(5) 通常の異方的超伝導の界面付近には奇周波数対振幅が現れることが知られていた。バルクの奇周波数超伝導で得られた知見に基づき、p 波超伝導に関して界面や不純物の効果について考察した。準古典近似により奇周波数依存性と空間依存性を考慮してギャップ方程式を解くことで、p 波超伝導と誘起される奇周波数ペアの性質を明らかにした。誘起された奇周波数対振幅を超伝導の準粒子波動関数の視点から解析することで、ギャップ内束縛状態が奇周波数ペアを作り出していることが分かった。奇周波数成分の対称性は、この束縛状態と強い相関があると結論でき、得られた計算結果は全てそのように解釈できた。

#### 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 11 件) [全て査読あり]

① Theory of Self-Induced Vortex State in Ferromagnetic Superconductors, H. Kusunose, Y. Kimoto, J. Phys. Soc. Jpn. **82** (2013) 094711 (8 pages)  
DOI:10.7566/JPSJ.82.094711

② Emergent Odd-Frequency Superconducting Order Parameter near Boundaries in Unconventional Superconductors, M. Matsumoto, M. Koga, H. Kusunose, J. Phys. Soc. Jpn. **82** (2013) 034708 (15 pages)  
DOI: 10.7566/JPSJ.82.034708

③ Strong-coupling superconductivity with mixed even- and odd-frequency pairing, H. Kusunose, M. Matsumoto, M. Koga, Phys. Rev. B **85** (2012) 174528 (11 pages)  
DOI: 10.1103/PhysRevB.85.174528

④ Coexistence of Even- and Odd-Frequency Superconductivities Under Broken Time-Reversal Symmetry, M. Matsumoto, M. Koga, H. Kusunose, J. Phys. Soc. Jpn. **81** (2012) 033702 (4 pages)  
DOI: 10.1143/JPSJ.81.033702

⑤ Magnetic Exciton Mediated Superconductivity in the Hidden-Ordered Phase of URu<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>,  
H. Kusunose, J. Phys. Soc. Jpn. **81** (2012) 023704 (4 pages)  
DOI: 10.1143/JPSJ.81.023704

⑥ Effect of Impurities with Singlet-Triplet Configuration on Multiband Superconductors,  
M. Koga, M. Matsumoto, H. Kusunose, J. Phys. Soc. Jpn. **80** (2011) 064708 (10 pages)  
DOI: 10.1143/JPSJ.80.064708

⑦ On the Puzzle of Odd-Frequency Superconductivity,  
H. Kusunose, Y. Fuseya, K. Miyake, J. Phys. Soc. Jpn. **80** (2011) 044711 (6 pages)  
DOI: 10.1143/JPSJ.80.054702

⑧ Possible Odd-Frequency Superconductivity in Strong-Coupling Electron-Phonon Systems,  
H. Kusunose, Y. Fuseya, K. Miyake, J. Phys. Soc. Jpn. **80** (2011) 044711 (6 pages)  
DOI: 10.1143/JPSJ.80.044711

[学会発表] (計 29 件)

① Fundamental aspect of odd-frequency superconductivity,  
H. Kusunose, International Workshop for Young Researchers on Topological Quantum Phenomena in Condensed Matter with Broken Symmetries 2013 (Okinawa, Japan) 2013 年 10 月 (招待講演)

② Theory for self-induced vortex phase in ferromagnetic superconductors,  
H. Kusunose, The international conference on strongly correlated electron systems (Tokyo, Japan) 2013 年 8 月

③ When superconductivity meets magnetism,  
H. Kusunose, The 13th Japanese-American Frontiers of Science Symposium (JAFoS) (Irvine, USA) 2012 年 11 月 (招待講演)

④ “Mean-Field” Theory for Self-Induced Vortex Lattice in Ferromagnetic Superconductors,  
H. Kusunose, Current Topics in Theory of Correlated Materials (Wako, Japan) 2012 年 9 月 (招待講演)

⑤ The odd-frequency superconductivity in Holstein-Hubbard model,  
H. Kusunose, Y. Fuseya, K. Miyake, NQS2011 (Kyoto, Japan) 2011 年 11 月 (招待講演)

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]  
○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者  
楠瀬博明 (KUSUNOSE HIROAKI)  
愛媛大学・大学院理工学研究科・准教授  
研究者番号: 00292201

(2) 研究分担者  
松本正茂 (MATSUMOTO MASASHIGE)  
静岡大学・理学研究科・教授  
研究者番号: 20281058  
古賀幹人 (KOGA MIKITO)  
静岡大学・教育学部・教授  
研究者番号: 40324321

(3) 連携研究者  
なし