

平成 29 年 6 月 12 日現在

機関番号：12608

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2016

課題番号：25800193

研究課題名(和文)非摂動論的アプローチによる強相関超伝導：非一様性と周波数依存性への展開

研究課題名(英文)Unperturbed approach to strongly correlated superconductivity: inhomogeneity and frequency dependence

研究代表者

古賀 昌久(Koga, Akihisa)

東京工業大学・理学院・准教授

研究者番号：90335373

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)：量子力学的粒子集団の一つであるフェルミ粒子系において、空間非一様性がもたらす新奇な超伝導現象が注目されている。これらの現象においては、粒子間相互作用の強い強相関効果による周波数(エネルギー)依存性が重要になるが、非一様系の理論的な取り扱いが難しく、チャレンジングな問題となっている。本研究では、動的平均場近似を用いた非摂動論的アプローチによりこの問題に取り組み、冷却原子系や準周期系の強相関超伝導・超流動における非一様性や周波数依存性の役割について明らかにした。

研究成果の概要(英文)：Unconventional superconductivity in inhomogeneous systems has attracted much interest in strongly correlated fermion systems. In our study, we have treated dynamical correlations and inhomogeneity by means of the unperturbative approach. We have studied the superconductivity and superfluid states in the cold atomic and quasiperiodic systems to clarify the role of the frequency dependence in the strongly correlated systems.

研究分野：数物系科学

キーワード：強相関系

1. 研究開始当初の背景

最近、粒子間相互作用の強い系である強相関系において超伝導の空間非一様性が注目されている。よく知られている典型例として、ヘテロ接合系 $\text{LaTiO}_3/\text{SrTiO}_3$ がある。この系のバンド絶縁体-モット絶縁体界面においては、強相関効果により繰りこまれた金属相から超伝導相への相転移が観測され、電荷の空間分布や電氣的、磁氣的特性に関心がもたれている。また、研究の進展がめざましい系に冷却原子系がある。この系においては、閉じ込めポテンシャルの大きさ・形状だけでなく、相互作用などのパラメータを自由自在に制御することができる利点を持っている。そのため、擬ギャップ現象やスピン偏極した系における新しい超流動状態である FFLO 状態など超流動に関する詳細な研究がなされており、非一様ポテンシャル中における強相関効果が超流動に及ぼす影響について明らかにすることが求められている。また、超伝導・強磁性接合系においては、近接効果により従来とは異なる周波数(エネルギー)に依存した対関数を持つ超伝導(奇周波数超伝導)が指摘されており、空間非一様性と周波数依存性が織りなす特異な超伝導にも興味を持たれている。この奇周波数超伝導は、一様系である CeCu_2Si_2 、 CeRhIn_5 や三角格子系においても、その可能性が指摘されており、超伝導における周波数依存性は最近注目されているトピックの一つである。このように、強相関超伝導・超流動における系の非一様性や対関数に対する周波数依存性はこれまでになく興味深い現象を生み出し、強相関効果の取り扱いがより重要になっている。しかしながら、これまでの多くの理論解析においては、現象論的な取り扱いもしくは相関効果を摂動論的に取り扱うことが多く、周波数に依存した強相関物性を系統的に議論されてこなかった。そのため、非摂動論的アプローチを用いて強相関効果をより正確に扱い、超伝導・超流動における非一様性や周波数依存性の役割を明らかにすることが必要である。

2. 研究の目的

量子力学的粒子集団の一つであるフェルミ粒子系において、空間非一様性がもたらす新奇な超伝導現象が注目されている。ヘテロ界面における超伝導や冷却原子系における超流動はその典型例である。これらの現象においては、粒子間相互作用の強い強相関効果による周波数(エネルギー)依存性が重要になるが、非一様系の理論的な取り扱いが難しく、チャレンジングな問題となっている。本研究では、非摂動論的アプローチによりこの問題に取り組み、強相関超伝導・超流動における非一様性や周波数依存性の役割について明らかにすることが目的である。

3. 研究の方法

強相関系における非一様性、周波数依存性が超伝導・超流動物性にどのように影響を及ぼすのかわかるようにするため、具体的なテーマを取り上げ、系統的に研究を展開する。相関粒子系における空間非一様性と強相関効果を正確に取り扱うため、本研究では、南部形式に拡張した連続時間量子モンテカルロ法と動的平均場理論を組み合わせた方法を用いて解析を行い、超伝導対関数における周波数依存性を求める。

4. 研究成果

強相関系における長距離秩序の理論を展開した。これまでに、二成分ハバード模型を用いて予備的な計算により、引力相互作用により超流動が実現するが、斥力相互作用を持つ系にはクーパーペアが凝縮されないことを確認した。本研究では、相互作用する四成分フェルミ粒子系に注目した。この系は現実遷移金属酸化物にしばしば現れる軌道縮退系と同一視できる。ここでは動的平均場近似と連続時間量子モンテカルロ法を用いてこの系の低温秩序状態について詳細に調べ、斥力相互作用を持つハバード模型において s 波超伝導が出現することを明らかにした。この超伝導は、フラーレン系において観測されている超伝導と同等であることが示唆されている。

さらに、超伝導の理論を任意の多成分系に展開した。精密な議論を行うため、動的平均場近似と連続時間量子モンテカルロ法を用いて低温秩序状態について定量的に調べた。その結果、斥力相互作用を持つハバード模型においては、磁気秩序相がより安定であり、格子系にフラストレーションがあるときにのみ超伝導相が出現することを明らかにした。また、磁気秩序相の相図についても定量的に調べ、成分の偶奇性により、低温物性が大きく変わることを明らかにした。

引力系についても詳細に調べた。この系においてもフラストレーションが存在する場合には超伝導相が安定化するが、ない場合には、密度波状態が出現することを明らかにした。このときには、秩序相への転移温度が大きく上昇するため、将来、実験的観測が期待される。

非一様系の例として、準周期系における強相関効果についても研究を行った。特に、電子の価数が準周期系においてどのような役割をはたしているかについても、アンダーソン格子模型を用いて解析を行った。まず、非交差近似を用いて、大きな系を取り扱い、準周期特有の物理がどのように出現するかについて調べた。その結果、価数転移が起こりにくいこと、さらに f 電子の価数の空間分布が低温において大きく変化することを明らかにした。また、連続時間モンテカルロ法を用いて極低温の物理について詳細に調べ、上記の物理が低温において確かに起こることを確認した。

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 21 件)

1. A. Koga and H. Yanatori, Spontaneously symmetry breaking states in the attractive SU(N) Hubbard model, J. Phys. Soc. Jpn. 査読有, 86, 2017, 034702 1-7
DOI: 10.7566/JPSJ.86.034702
2. S. Sakai, N. Takemori, A. Koga, and R. Arita, Superconductivity on a Quasiperiodic Lattice: Extended-to-Localized Crossover of Cooper Pairs, Phys. Rev. B 査読有, 95, 2017, 024509 1-5
DOI: 10.1103/PhysRevB.95.024509
3. R. Shinzaki, J. Nasu, and A. Koga, Magnetic Response and Valence Fluctuations in the Extended Anderson Lattice Model with Quasiperiodicity, J. Phys. Soc. Jpn. 査読有, 85, 2016, 114706
DOI: 10.7566/JPSJ.85.114706
4. H. Yanatori and A. Koga, Finite Temperature Phase Transitions in the SU(N) Hubbard model, Phys. Rev. B 査読有, 94, 2016, 041110 1-5
DOI: 10.1103/PhysRevB.94.041110
5. S. Kojima, J. Nasu, and A. Koga, Phase transitions in the Hubbard model for the bismuth nickelate, Phys. Rev. B 査読有, 94, 2016, 045103 1-6
DOI: 10.1103/PhysRevB.94.045103
6. H. Yanatori and A. Koga, Finite Temperature Properties of Three-Component Fermion Systems in Optical Lattice, J. Phys. Soc. Jpn. 査読有, 85, 2016, 014002 1-5
DOI: 10.7566/JPSJ.85.014002
7. B. Hara, A. Koga, and T. Aono, Transport properties for a quantum dot coupled to normal leads with pseudogap, Phys. Rev. B 査読有, 92, 2015, 081103 1-5
DOI: 10.1103/PhysRevB.92.081103
8. S. Takemura, N. Takemori, and A. Koga, Valence Fluctuations and Electric Reconstruction in the Extended Anderson Model on the Two-Dimensional Penrose Lattice, Phys. Rev. B 査読有, 91, 2015, 165114 1-6
DOI: 10.1103/PhysRevB.91.165114
9. A. Koga and P. Werner, Superconductivity in the two-band Hubbard model, Phys. Rev. B 査読有, 91, 2015, 085108 1-7
DOI: 10.1103/PhysRevB.91.085108
10. N. Takemori and A. Koga, Local Electron Correlations in a Two-dimensional Hubbard Model on the Penrose Lattice, J. Phys. Soc. Jpn. 査読有, 84, 2015, 023701 1-5
DOI: 10.7566/JPSJ.84.023701
11. Y. Okanami, N. Takemori and A. Koga, Stability of the Superfluid State in Three-Component Fermionic Optical Lattice Systems, Phys. Rev. A 査読有, 89, 2014, 053622 1-8
DOI: 10.1103/PhysRevA.89.053622
12. R. Suzuki and A. Koga, Supersolid states in a hard-core Bose-Hubbard model on a layered triangular lattice, J. Phys. Soc. Jpn. 査読有, 83, 2014, 064003 1-6
DOI: 10.7566/JPSJ.83.064003
13. R. Shinzaki, J. Nasu, and A. Koga, Cluster Size Effects on Electronic Reconstruction in Quasiperiodic System, J. Phys.: Conf. Ser. 査読有, 809, 2017, 012022
DOI: 10.1088/1742-6596/809/1/012022
14. R. Shinzaki, J. Nasu, and A. Koga, DMFT Study for Valence Fluctuations in the Extended Periodic Anderson Model, J. Phys.: Conf. Ser. 査読有, 683, 2016, 012041
DOI: 10.1088/1742-6596/683/1/012041
15. N. Takemori, A. Koga, and H. Hafermann, Intersite electron correlations in a Hubbard model on inhomogeneous lattices, J. Phys.: Conf. Ser. 査読有, 683, 2016, 012040
DOI: 10.1088/1742-6596/683/1/012040
16. N. Takemori and A. Koga, DMFT study of the local correlation effects in quasi-periodic system, J. Phys.: Conf. Ser. 査読有, 592, 2015, 012038
DOI: 10.1088/1742-6596/592/1/012038
17. A. Koga, Diagrammatic Quantum Monte Carlo Study of Nonequilibrium Transport through a Quantum Dot coupled to Normal and Superconducting Leads, JPS Conf. Proc. 査読有, 4, 2015, 011003
DOI: /10.7566/JPSCP.4.011003
18. N. Takemori and A. Koga, Stabilities of Superfluid and Density Wave States in Fermionic Mass Imbalanced Optical Lattices, JPS Conf. Proc. 査読有, 4, 2015, 011006
DOI: 10.7566/JPSCP.4.011006
19. R. Suzuki and A. Koga, Cluster mean-field approach with density matrix renormalization group: Application to the hard-core bosonic Hubbard model on a triangular lattice, JPS Conf. Proc. 査読有, 3, 2014, 016005
DOI: 10.7566/JPSCP.3.016005
20. A. Koga, Nonequilibrium transport through a quantum dot coupled to normal and superconducting leads, JPS Conf. Proc. 査読有, 3, 2014, 012018
DOI: 10.7566/JPSCP.3.012018

21. Y. Kojima and A. Koga, Valence Fluctuations in the Extended Periodic Anderson Model at Finite Temperatures, JPS Conf. Proc. 査読有, 1, 2014, 012106
DOI: 10.7566/JSPSCP.1.012106

〔学会発表〕(計 22 件)

1. 田口陽二郎, 那須讓治, 古賀昌久, 吉岡匠哉, 土浦宏紀, Nd-Fe-B 系の磁性に対する伝導電子の効果, 第 72 回年次大会 (17pK-PS-8), 2017/3/17, 大阪大
2. 新崎龍, 那須讓治, 古賀昌久, ペアホッピング由来の電荷近藤効果に対する軌道内斥力の影響, 第 72 回年次大会 (18aS-PS-2), 2017/3/18, 大阪大
3. 石垣耕祐, 那須讓治, 古賀昌久, 2 軌道ハバード模型における励起子相と軌道秩序相の競合, 第 72 回年次大会 (20aL22-7), 2017/3/20, 大阪大
4. 酒井志朗, 竹森那由多, 古賀昌久, 有田亮太郎, ペンローズ格子上の超伝導の理論研究, 第 72 回年次大会 (20aK25-2), 2017/3/20, 大阪大
5. 古賀昌久, 梁取大将, SU(N)ハバード模型における秩序相の解析, 2016 年秋季大会 (14pKE-14), 2016/9/14, 金沢大
6. 新崎龍, 那須讓治, 古賀昌久, 動的平均場理論によるペアホッピング由来の電荷近藤効果の解析, 2016 年秋季大会 (16aJD-4), 2016/9/15, 金沢大
7. 小嶋祥也, 那須讓治, 古賀昌久, 動的平均場理論による BiNiO₃ 有効模型の解析, 第 71 回年次大会 (19pBN-15), 2016/3/19, 東北学院大
8. 梁取大将, 古賀昌久, 光格子中の多成分フェルミ粒子系における秩序相の解析, 第 71 回年次大会 (20pBJ-5), 2016/3/20, 東北学院大
9. 那須讓治, 新崎龍, 古賀昌久, スピン 1/2 Falicov-Kimball 模型における準周期性と価数揺らぎ, 第 71 回年次大会 (21aBM-5), 2016/3/21, 東北学院大
10. 新崎龍, 那須讓治, 古賀昌久, 2 次元ペンローズ格子上の拡張周期アンダーソン模型における価数揺動現象, 第 71 回年次大会 (21aBM-6), 2016/3/21, 東北学院大
11. 中内子竜, 那須讓治, 古賀昌久, スピン軌道相互作用の強い t_{2g} 電子系に対するクラスター平均場による解析, 第 71 回年次大会 (21aPS-11), 2016/3/21, 東北学院大
12. 竹森那由多, 古賀昌久, Hartmut Hafermann, 準周期ハバード模型におけるサイト間電子相関効果, 第 71 回年次大会 (22aBR-4), 2016/3/22, 東北学院大
13. 竹森那由多, 古賀昌久, Hartmut Hafermann, 非一様系におけるサイト間相関を扱う計算手法開発と準周期系への適用, 2015 年秋季大会 (17pPSA-28), 2015/9/17, 関西大
14. 新崎龍, 那須讓治, 古賀昌久, 動的平均

場理論を用いた有限温度における価数転移の解析, 2015 年秋季大会 (18pDC-4), 2015/9/18, 関西大

15. 梁取大将, 古賀昌久, 3 成分フェルミ粒子系における秩序相の解析, 第 70 回年次大会 (21pAG-11), 2015/3/21, 早稲田大
16. 原文平, 古賀昌久, 擬ギャップ構造を持つリードに繋がれた量子ドットの輸送特性, 第 70 回年次大会 (22aBK-2), 2015/3/22, 早稲田大
17. 古賀昌久, 常次宏一, 二次元ペンローズハバード模型における磁氣的性質, 第 70 回年次大会 (24aAF-8), 2015/3/24, 早稲田大
18. 竹村信一, 竹森那由多, 古賀昌久, 2 次元準周期系における拡張周期アンダーソン模型の解析 II, 第 70 回年次大会 (24pBE-3), 2015/3/24, 早稲田大
19. 竹森那由多, 古賀昌久, Hartmut Hafermann, 2 次元ペンローズ格子におけるサイト間相関効果, 第 70 回年次大会 (24pBE-4), 2015/3/24, 早稲田大
20. 竹村信一, 竹森那由多, 古賀昌久, 準周期系における拡張周期アンダーソン模型の解析, 2014 年秋季大会 (8aBK-11), 2014/9/8, 中部大
21. 竹森那由多, 古賀昌久, 準周期系を扱う計算手法開発, 2014 年秋季大会 (8pPSA-16), 2014/9/8, 中部大
22. 古賀昌久, P. Werner, 縮退ハバード模型における s 波超伝導状態, 2014 年秋季大会 (9aBG-10), 2014/9/9, 中部大

〔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〕

ホームページ等 なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

古賀 昌久 (KOGA AKIHISA)
東京工業大学・理学院・准教授
研究者番号: 90335373

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし

(4) 研究協力者

なし