

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 5 月 24 日現在

機関番号：12608

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2008~2011

課題番号：20740194

研究課題名（和文）非一様ポテンシャル中のフェルミ粒子系における強相関効果

研究課題名（英文）Strong correlations in the fermionic system with confining potential

研究代表者

古賀 昌久 (KOGA AKIHISA)

東京工業大学・大学院理工学研究科・准教授

研究者番号：90335373

研究成果の概要（和文）：

非一様ポテンシャルを持つ粒子系における強相関効果が注目されている。本研究では、局所相関効果を取り入れることのできる動的平均場近似を用いて基底状態、有限温度のふるまいについて解析を行った。特に、引力相互作用を持つフェルミ粒子系に注目し、超固体状態の可能性について調べた。その結果、引力相互作用がある程度大きい時、この超固体状態が閉じ込めポテンシャル中の光格子系において安定化されることを明らかにした。

研究成果の概要（英文）：

Strongly correlated fermionic systems with a confining potential have attracted current interest. In this study, we have investigated low temperature properties in the system by means of dynamical mean-field theory. We have considered the optical lattice system which should be described by the attractive Hubbard model and clarified the role of the confining potential in stabilizing the supersolid state.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2009年度	600,000	180,000	780,000
2010年度	600,000	180,000	780,000
2011年度	600,000	180,000	780,000
年度			
総計	2,800,000	840,000	3,640,000

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：強相関系

1. 研究開始当初の背景

非一様ポテンシャルを持つ粒子系における強相関効果が、物性物理の分野において注目されている。典型例として、遷移金属酸化物におけるヘテロ接合系や閉じ込めポテンシャル中の光格子系が挙げられる。これらの系においては、金属-モット絶縁体や超伝導-モット絶縁体などの複数の量子相からなる共存相や BCS-BEC クロスオーバーなど興

味深い現象が観測されており、その低温物性が実験的にも理論的にも精力的に調べられている。しかしながら、有限温度の振る舞いや励起状態、さらにはポテンシャルの変化により共存相がどのように時間発展するのかについては、非一様系における強相関効果の理論的な取り扱いが難しく、これまであまり議論されていなかった。そのため、これらのことを明らかにすることが望まれていた。

2. 研究の目的

上記の背景のもと、非一様ポテンシャルを持つフェルミ粒子系を取り上げ、その系の基底状態、励起状態、有限温度の振る舞いについて注目した。非一様系における相間効果については、実空間動的平均場近似などの解析を行うことによってこの問題に取り組み、非一様ポテンシャル中の相関粒子系における物性を明らかにすることが本研究の目的である。

3. 研究の方法

本研究では、光格子系を念頭に置き、相関効果により誘起されるモット絶縁体 - 金属の共存状態について強相関関係を記述するハバード模型を用いて議論した。この系に関しては、量子モンテカルロ法や密度行列繰り込み群、変分モンテカルロ法によりすでに取り扱われており、基底状態の性質について調べられていた。しかしながら、低エネルギー領域や高エネルギー領域における励起状態に関する理論研究が不十分であった。そこで本研究では、局所相関効果について正確に記述し、有限温度の振る舞いについても議論することのできる実空間動的平均場近似を用いて系統的な解析を行った。

4. 研究成果

本研究では、非一様ポテンシャル中における強相関粒子系に注目する。これまでの研究では、基底状態についての議論が主になされてきたが、系の本質を理解するには励起状態についても調べる必要がある。そこで、本研究では光格子系における励起状態、動的性質について、局所相関効果を正確に取り入れることのできる動的平均場近似を用いて議論した。この方法により、金属 - モット絶縁体の共存、BCSBEC クロスオーバーなどの現象を記述することを確かめ、これまでに議論されていないそれらの有限温度の振る舞いについて注目した。

まず、調和振動子ポテンシャル中に閉じ込められた光格子系を取り上げ、超流動状態ならびに固体状態とみなすことのできる密度波状態の共存状態について、実空間動的平均場近似を用いて議論した。この研究においては、不純物問題の解法として、2 サイト近似を用いて解析を行い、密度波状態と超流動状態が共存する超固体状態がある領域に存在することを明らかにした。またこの領域は、システムサイズに対してスケールされ、熱力学極限においても実現することをこの近似の枠内で明らかにした。この方法では、局所相関効果については、正確に取り扱っているが、サイト間の相関効果については不十分であり、今後の詳細な解析が望まれている。

また、最近進展の著しい数値計算手法であ

る連続時間量子モンテカルロ法を取り入れた。特に、磁氣的秩序だけでなく、超流動状態も同時に取り扱うことのできる南部形式に基づく量子モンテカルロ法を用いて、超流動状態に関する有限温度の解析を注意深く研究を行った。注目されている現象の一つは、粒子数インバランス系における相転移現象であり、これまでの研究においては、定性的な議論のみであった。本研究では、数値的に厳密な量子モンテカルロ法を用いて精密に調べ、相境界を決定した。また、相転移温度付近において議論されている擬ギャップ現象についても詳細に調べ、無限大次元系においては、擬ギャップと超流動ギャップを区別することは、この数値計算ではできないことがわかった。現実の有限次元系における擬ギャップ現象の有無に関しては、今後の研究課題となっている。

本研究では、非一様ポテンシャルを持つ光格子系に注目し、相間効果により誘起される興味深い現象を議論し、超固体状態の可能性、擬ギャップ現象、粒子数インバランスなどについて明らかにした。

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 27 件)

1. Low temperature properties of the fermionic mixtures with mass imbalance in optical lattice, N. Takemori and A. Koga, J. Phys. Soc. Jpn. 81, 063002 1-4 (2012) 査読有
2. A study on correlation effects in two dimensional topological insulators, Y. Tada, R. Peters, M. Oshikawa, A. Koga, N. Kawakami, and S. Fujimoto, Phys. Rev. B 85, 165138 1-18 (2012) 査読有
3. Low temperature properties of the infinite-dimensional attractive Hubbard model, A. Koga and P. Werner, Phys. Rev. A 84, 023638 1-7 (2011) 査読有
4. Superfluid state in the periodic Anderson model with attractive interactions, A. Koga and P. Werner, J. Phys.: Conf. Ser. 302, 012040 1-6 (2011) 査読有
5. Superfluid gap formation in a fermionic optical lattice with spin imbalanced populations, A. Koga and P. Werner, J. Phys.: Conf. Ser. 273, 012116 1-4 (2011) 査読有
6. Pseudogap behavior in the infinite dimensional attractive Hubbard model, A. Koga and P. Werner, Mod. Phys. Lett.

- B 25, 973-978 (2011) 査読有
7. Polarized superfluid state in a three-dimensional fermionic optical lattice, A. Koga, J. Bauer, P. Werner, Th. Pruschke, *Physica E* 43, 697-701 (2011) 査読有
 8. Superfluid state in the periodic Anderson model with attractive interactions, A. Koga and P. Werner, *J. Phys. Soc. Jpn.* 79, 114401 1-7 (2010) 査読有
 9. Superfluid properties of ultracold fermionic atoms in two-dimensional optical lattices, Y. Fujihara, A. Koga and N. Kawakami, *Phys. Rev. A* 81, 063627 1-7 (2010) 査読有
 10. Polarized Superfluidity in the Imbalanced Attractive Hubbard Model, A. Koga and P. Werner, *J. Phys. Soc. Jpn.* 79, 064401 1-6 (2010) 査読有
 11. Analysis of superfluid state of ultracold fermions with attractive interactions in two-dimensional optical lattices, Y. Fujihara, A. Koga, and N. Kawakami, *Physica C* 470, S991-S992 (2010) 査読有
 12. Magnetic transition in the Hubbard model on the triangular lattice, T. Yoshioka, A. Koga, and N. Kawakami, *Physica B* 405, S179-S181 (2010) 査読有
 13. Mott transition in the Hubbard model on the triangular lattice, T. Yoshioka, A. Koga, and N. Kawakami, *Phys. Status Solidi B* 247, 635-637 (2010) 査読有
 14. Magnetically Ordered State of Cold Fermions on a Decorated Square Lattice, K. Noda, A. Koga, N. Kawakami and Th. Pruschke, *J. Low Temp. Phys.* 158, 79-84 (2010) 査読有
 15. Ferromagnetism of cold fermions loaded into a decorated square lattice, K. Noda, A. Koga, N. Kawakami, and Th. Pruschke, *Phys. Rev. A* 80, 063622 1-7 (2009) 査読有
 16. Quantum Phase Transitions in the Hubbard Model on a Triangular Lattice, T. Yoshioka, A. Koga, and N. Kawakami, *Phys. Rev. Lett.* 103, 036401 1-4 (2009) 査読有
 17. Supersolid state in fermionic optical lattice systems, A. Koga, T. Higashiyama, K. Inaba, S. Suga and N. Kawakami, *Phys. Rev. A* 79, 013607 1-6 (2009) 査読有
 18. Spatially-modulated Superfluid States in Fermionic Optical Ladder Systems with Repulsive Interactions, Y. Fujihara, A. Koga, and N. Kawakami, *Phys. Rev. A* 79, 013610 1-7 (2009) 査読有
 19. Superfluidity and magnetism in two-dimensional fermionic optical lattice systems, Y. Fujihara, A. Koga, and N. Kawakami, *Physica B* 404, 3324-3327 (2009) 査読有
 20. Magnetic and Orbital Properties of the two-band Hubbard Model with Different Bandwidths, Y. Koyama, A. Koga, N. Kawakami, and P. Werner, *Physica B* 404, 3267-3270 (2009) 査読有
 21. Supersolid state in a fermionic optical lattice system, A. Koga, T. Higashiyama, K. Inaba, S. Suga and N. Kawakami, *J. Phys.: Conf. Ser.* 150, 032046 1-4 (2009) 査読有
 22. Mott insulating state in a quarter-filled two-orbital Hubbard chain with different bandwidths, S. Miyashita, Y. Yamashita, K. Yonemitsu, A. Koga, and N. Kawakami, *J. Phys.: Conf. Ser.* 150, 042128 1-4 (2009) 査読有
 23. Zero-temperature Phase Diagram of Two Dimensional Hubbard Model, K. Inaba, A. Koga, S. Suga, and N. Kawakami, *J. Phys.: Conf. Ser.* 150, 042066 1-4 (2009) 査読有
 24. Frustration effects in an anisotropic checkerboard lattice Hubbard model, T. Yoshioka, A. Koga, and N. Kawakami, *Phys. Rev. B* 78, 165113 1-6 (2008) 査読有
 25. Mott Transition in the Hubbard Model on Checkerboard Lattice, T. Yoshioka, A. Koga, and N. Kawakami, *J. Phys. Soc. Jpn.* 77, 104702 1-7 (2008) 査読有
 26. Supersolid state of ultracold fermions in an optical lattice, A. Koga, T. Higashiyama, K. Inaba, S. Suga, and N. Kawakami, *J. Phys. Soc. Jpn.* 77, 073602 1-4 (2008) 査読有
 27. Variational Monte Carlo analysis of singlet-pairing state in a system with inhomogeneous potential, Y. Fujihara, A. Koga, and N. Kawakami, *J. Phys. Chem. Solid* 69, 3388-3391 (2008) 査読有
- [学会発表] (計 7 件)
1. 多田靖啓、相互作用のあるトポロジカル絶縁体に関する研究、日本物理学会、2011/9/23, 富山大学
 2. 大川内康晴、二層構造を持つ光格子系における FFL0 状態の安定性、日本物理学会、

- 2011/9/22, 富山大学
3. 齋藤孝允、サイト依存した相互作用をもつ光格子系における金属絶縁体転移、日本物理学会、2011/9/22, 富山大学
 4. 古賀昌久、フェルミ粒子系光格子系における擬ギャップ的振る舞い、日本物理学会、2011/9/22, 富山大学
 5. 古賀昌久、光格子フェルミ粒子系における超流動状態の安定性、日本物理学会、2010/9/24/大阪府立大学
 6. 古賀昌久、光格子フェルミ粒子系における粒子数インバランスの効果、日本物理学会、2010/3/20, 岡山大学
 7. 古賀昌久、トラップされた光格子フェルミ粒子系における超固体状態、日本物理学会、2008/9/22, 岩手大学

6. 研究組織

(1) 研究代表者

古賀 昌久 (KOGA AKIHISA)

東京工業大学・大学院理工学研究科・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