

平成 26 年 5 月 29 日現在

機関番号：32660

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2013

課題番号：24740276

研究課題名(和文) 蜂の巢光格子中におけるクーパー対液体相の擬ギャップ状態としての可能性

研究課題名(英文) Cooper pair liquid phase and pseudogap effect of attractive fermions in a honeycomb optical lattice

研究代表者

土屋 俊二 (Tsuchiya, Shunji)

東京理科大学・理学部・助教

研究者番号：80579772

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

研究成果の概要(和文)：蜂の巢光格子中の引力フェルミ原子気体において、クーパー対液体相は半金属相と超流動相の量子相転移点の近傍に出現すると期待され、擬ギャップの原因となると考えられる。そこで、相転移点近傍における集団励起の振る舞いについて、一般化乱雑位相近似を用いて調べた。その結果、半金属相においては、クーペロンとエキシトンと呼ばれる集団励起が安定に存在し、それらが超流動相において、超流動秩序パラメタの振幅と位相の揺らぎに伴うヒッグスモードとアンダーソンモードと呼ばれる安定な集団励起へと連続的に変化することを見出した。安定なクーペロン、ヒッグスモードの存在は、クーパー対液体相、及び擬ギャップの存在を強く裏付けている。

研究成果の概要(英文)：We propose the emergence of the novel quantum phase so called "Cooper pair liquid" and investigate the possibility of pseudogap effect in the vicinity of the quantum critical point between the semimetal and superfluid phases of attractive fermions in optical lattices with the honeycomb geometry. For this purpose, we study elementary excitation in the vicinity of the quantum critical point applying the generalized random phase approximation to the attractive Hubbard model. We find sharp collective mode excitations that are stable against decay into quasiparticle pairs. In the semimetal phase, the collective modes have "Cooperon" and exciton character. These modes smoothly evolve across the quantum phase transition, and become Anderson mode and the Higgs mode that are associated with phase and amplitude fluctuation of the superfluid order parameter. The existence of these stable collective modes strongly implies the emergence of the Cooper pair liquid phase and the pseudogap effect.

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学、原子・分子・量子エレクトロニクス

キーワード：蜂の巢光格子 冷却フェルミ気体 クーパー対液体 擬ギャップ ヒッグスモード ディラックフェルミオン クーペロン

1. 研究開始当初の背景

(1) 近年、光格子中のフェルミ原子に対する研究が盛んになされている。この系は高い操作性を有し、原子間相互作用や格子の形状などを自由に制御することが可能である。そのためこの系は、超流動、磁性といった物性やトポロジカルな性質をシミュレートするのに適した系として注目を集めている。また、フェルミ原子気体において高温超伝導と同様の擬ギャップ現象が観測されたことを契機に、冷却原子系を用いて高温超伝導の起源に対して新しい角度から迫ることが可能になりつつある。

(2) 蜂の巣光格子中の引力フェルミ原子系は、引力相互作用の変化に伴い、半金属相から超流動相へと量子相転移を示す。最近の量子モンテカルロ計算の結果は、相転移点近傍において、局所的にクーパー対が形成されているが、強い量子揺らぎにより超流動の長距離秩序が破壊された新しい量子状態の出現を示唆している。本研究では、この新奇量子相を「クーパー対液体相」と呼ぶ。

(3) クーパー対液体相についてはこれまで研究がほとんどなされていない。クーパー対液体相において1粒子励起は、対の束縛エネルギーに伴うギャップを持つが、対は局在し、そのため超流動の長距離秩序は存在しないと予想できる。この状況は、高温超伝導の擬ギャップ状態と類似している。そのため、クーパー対液体は高温超伝導体における擬ギャップの起源の一つの候補と考えられる。

2. 研究の目的

(1) 本研究では、蜂の巣光格子中の引力フェルミ気体において、強い量子揺らぎを適切に取り込み、クーパー対液体を記述するミクロな理論を構築する。この理論により、相図におけるクーパー対液体相の領域を特定し、1粒子励起などの性質を調べる。そして、クーパー対液体の物性を明らかにすることにより、クーパー対液体の擬ギャップ状態としての可能性について検証する。

(2) 蜂の巣光格子中の引力フェルミ原子気体においてクーパー対液体を実際に観測する実験手法について提案する。光原子分光と呼ばれる冷却原子気体特有の実験手法により1粒子励起の性質を調べ、クーパー対液体における擬ギャップ現象の観測可能性について検証する。

3. 研究の方法

(1) クーパー対液体相を記述するミクロな理論を構築するため、蜂の巣格子中の引力フェルミ原子気体を良く記述すると考えられる引力ハバードモデルに対して、対揺らぎと密度揺らぎを適切に取り込むことが可能である多体T行列近似を適応する。この近似により1粒子励起スペクトル、超流動感受率を計算し、相図を明らかにするとともに、クーパー対液体相の領域を特定する。

(2) T行列近似に基づくミクロな理論を用いて、光原子分光実験を想定し、実際の実験に

おける空間的な非一様性などの条件を考慮し、実験と直接比較可能な量として光原子分光スペクトルを計算する。

4. 研究成果

(1) 蜂の巣格子中の引力フェルミ系において、クーパー対液体相は、半金属相と超流動相の量子相転移点近傍に出現すると予想できる。これより、相転移点近傍において集団励起の振る舞いに、何らかの兆候が現れることが期待できる。そこで、論文②において、一般化乱雑位相近似を用いて種々の感受率の計算を行い、量子相転移点近傍における集団励起の性質を調べた。一般化乱雑位相近似は、強い引力相互作用に伴う対揺らぎと密度揺らぎを適切に取り込み、集団励起について半金属相から超流動相へ量子相転移点も含め統一的に記述することが可能である。また、今後理論を発展させ、T行列近似を用いて自己無撞着に計算を行う際にも、一般化乱雑位相近似により計算した感受率を元に、散乱行列を評価する必要があるため、後の研究の土台となる計算となっている。

(2) 感受率の極から集団励起の性質について調べた結果、半金属相においては、クーパーロンとエキシトンと呼ばれる集団励起が、連続体の下限よりも低いエネルギーを持ち、そのため1粒子励起に分解せず、安定に存在することがわかった(図1)。これらの励起は、それぞれ、粒子-粒子、粒子-ホールの束縛状態として密度揺らぎ、対揺らぎを担っている。特に、クーパーロンは、非凝縮のクーパー対とみなすことができるため、安定なクーパーロン励起は、擬ギャップの原因と考えられる。

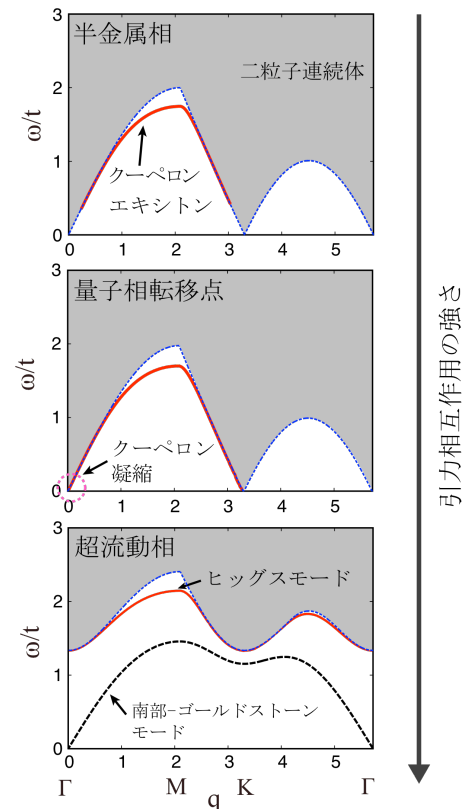


図1. 量子相転移点近傍の集団励起の振る舞い

(3) 超流動相においては、対称性の破れに伴う南部-ゴールドストーンモードであるアンダーソン-ボゴリウボフモードに加え、ヒッグスモードと呼ばれる、秩序パラメタの振幅の揺らぎに伴う集団モードが存在することを見出した(図 1)。通常の超伝導体、超流動体においてヒッグスモードは、連続体と縮退したエネルギーを持つため、一粒子励起への分解に対して不安定ですぐに減衰してしまう。しかし、興味深いことに、今回の系では、ヒッグスモードは連続体の下限より低いエネルギーを持ち、安定に存在することを見出した(図 1)。これまでの研究において、純粋な振幅モードとしての安定なヒッグスモードの存在は報告されておらず、本研究において初めて発見された。また、これらの安定な集団励起の存在は、蜂の巣格子中におけるディラックフェルミオンの線形分散のために、二粒子の連続体が空洞を持つことに加え、ブリルアンゾーンの M 点近傍で状態密度がファンホープ特異点のために大きくなっていることが原因であることを見出した。

(4) 量子相転移点近傍の集団励起の振舞を調べたところ、クーペロンのエネルギーは相転移点に近づくにつれ減少し、クーペロンがソフト化し凝縮すると同時に系が超流動相へと量子相転移を起こすことがわかった(図 1)。更に、量子相転移が起きると同時にクーペロンとエキシトンが混成し、超流動相においてヒッグスモードとアンダーソン-ボゴリウボフモードへと連続的に変化することを発見した(図 1)。この結果は、一般に対称性の破れていない相においても、隣接する対称性の破れた相におけるヒッグスモードと南部-ゴールドストーンモードに対応する集団励起が常に存在する可能性を示唆しており、大変興味深い。

(5) 更に、論文②において、この系におけるヒッグスモードを観測する実験手法として、ブラッグ散乱を用いることを提案した。ブラッグ散乱により実際にヒッグスモードが観測可能であることを示すため、実験において測定される動的構造因子を理論的に計算し、動的構造因子の運動量-周波数スペクトルにおいて、ヒッグスモードのエネルギースペクトルが連続体の下に鋭いピークを持つことを示した。(図 2)

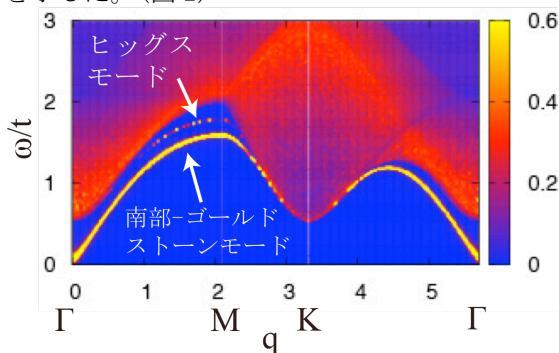


図 2. 動的構造因子のスペクトル
(6) 秩序パラメタの振幅の揺らぎを担うヒ

ッグスモードと、対揺らぎを担うクーペロンが安定に存在することは、量子相転移点近傍においてクーパー対液体相及び擬ギャップが出現する可能性を強く示唆する。本研究課題期間中には、クーパー対液体を記述する理論の構築及びクーパー対液体の擬ギャップとしての可能性の検証には至らなかったが、今後、これらの揺らぎを一粒子グリーン関数に取り込み、自己無撞着に計算を行うことにより、クーパー対液体相及び擬ギャップの存在についての検証を引き続き行う予定である。他方、上述したように、本研究では蜂の巣光格子中の引力フェルミ気体において、ヒッグスモードを含めた集団励起が大変興味深い振舞を示すことを初めて明らかにし、対称性の破れていない相においても一般にヒッグスモード、南部-ゴールドストーンモードに対応する励起が存在する可能性など、今後の研究の発展に繋がる数多くの知見が得られ、大きな成果を挙げることができたと考えている。これらの論文②における成果は注目を集めており、国際会議、国内の研究会において招待講演(2件)と基調講演(1件)を行った。

(7) 論文④において、最近の実験で観測された、2次元フェルミ原子気体における擬ギャップについて理論的な解析を行った。対揺らぎを取り入れた T 行列近似を用いて、一粒子スペクトル関数、及び状態密度を計算した結果、常流動状態において確かにこれらの物理量に擬ギャップが現れることが確認でき、実験結果と非常に良い一致が得られた。2次元においては、期待されるように、3次元フェルミ原子気体の結果(論文④)と比較すると、強い対揺らぎにより顕著な擬ギャップ構造が現れ、トラップの中心部分において最も顕著に現れることがわかった。これらの解析から得られた知見は、今後、蜂の巣光格子中のフェルミ原子系の擬ギャップの解析を進める上で、低次元性、トラップポテンシャルの効果についての考察において大きな指針を与える。

(8) 論文③においては、カゴメ光格子中のフェルミ原子気体の超流動特性について調べた。カゴメ格子は強い幾何学的フラストレーションを持つ代表的な格子で、フラストレーションの効果を理想的な状況でシミュレートできることから、カゴメ光格子中の原子気体の研究が最近注目されている。論文③では、カゴメ光格子中のフェルミ超流体において、フラストレーションと超流動流の複合的な効果により、超流動と密度波の秩序が共存し、超固体と呼ばれる状態と類似した状態が安定化することを示した。超固体は新しい物質の状態として注目を集め研究されてきたがこれまで実験的に確認されていない。この研究では、超固体が強い幾何学的フラストレーションにより現れる可能性を初めて理論的に示した。他方、スピン液体と呼ばれる、クーパー対液体と類似した状態がカゴメ格子

においてフラストレーションの効果により現れることが知られている。そこで今後は、クーパー対液体がカゴメ格子においてフラストレーションの効果により出現する可能性についても研究を行って行きたい。

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9件)

- ① R. Watanabe, S. Tsuchiya, and Y. Ohashi, “Low dimensional pairing fluctuations and pseudogapped photoemission spectrum in a trapped two-dimensional Fermi gas”, Phys. Rev. A 88, 13637 (2013).
- ② S. Tsuchiya, R. Ganesh, and T. Nikuni, “Higgs mode in a superfluid of Dirac fermions”, Phys. Rev. B 88, 14527 (2013).
- ③ D. Yamamoto, C. Sato, T. Nikuni, and S. Tsuchiya, “Flow-Induced Charge Modulations in Superfluid Atomic Fermions Loaded into an Optical Kagome Lattice”, Phys. Rev. Lett. 110, 145304 (2013).
- ④ R. Watanabe, S. Tsuchiya, and Y. Ohashi, “Coexistence of superfluid gap and pseudogap in the BCS-BEC crossover regime of a trapped Fermi gas below T_c ”, Phys. Rev. A 86, 063603 (2012).
- ⑤ D. A. Takahashi, S. Tsuchiya, R. Yoshii, and M. Nitta, “Fermionic solitons of chiral Gross-Neveu and Bogoliubov-de Gennes systems in nonlinear Schrodinger hierarchy”, Phys. Lett. B 718(2), pp.632-637 (2012).
- ⑥ S. Tsuchiya, R. Ganesh, and A. Paramekanti, “Superfluidity of Dirac Fermions in a Tunable Honeycomb Lattice: Cooper pairing, Collective Modes, and Critical Currents”, Phys. Rev. A 86, 033604 (2012).

[学会発表] (計14件)

- ① 土屋俊二, “Higgs amplitude mode in a superfluid of Dirac fermions”, 物性研究所短期研究会「スーパーマターが拓く新量子現象」(招待講演), 東京大学物性研究所, 2014年4月19日
- ② 土屋俊二, 「グラフェンにおけるスピン軌道相互作用による異方的超伝導の可能性」, 東京理科大学総合研究機構ナノカーボン研究部門ワークショップ(招待講演), 東京理科大学, 2014年3月14日
- ③ S. Tsuchiya, “The Higgs amplitude mode in a superfluid of Dirac fermions”, International Symposium on Quantum Fluids and Solids 2013 (招待講演), 松江くにびきメッセ, 2013年8月3日

④ 土屋俊二, 「ディラックフェルミオン超流体におけるヒッグスモード」京都大学基礎物理学研究所研究会「固体中におけるディラック電子系物理の新展開」(基調講演), 京都大学基礎物理学研究所, 2013年6月19日

⑤ S. Tsuchiya, “The Higgs amplitude mode in superfluids of Dirac fermions”, ICTP Workshop on Quantum Simulations with Ultracold Atoms, International Center for Theoretical Physics, Trieste, 2012年7月18日

6. 研究組織

(1) 研究代表者

土屋 俊二 (TSUCHIYA, Shunji)

東京理科大学 理学部物理学科 助教

研究者番号 : 80579772