

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25年 3月31日現在

機関番号：32612

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2010～2012

課題番号：22540412

研究課題名（和文） トラップされたフェルミガスのBCS-BECクロスオーバー領域における超流動揺らぎ

研究課題名（英文） Superfluid fluctuations in the BCS-BEC crossover regime of a trapped Fermi gas

研究代表者

大橋 洋士 (OHASHI YOJI)

慶應義塾大学・理工学部・教授

研究者番号：60272134

研究成果の概要（和文）：

トラップポテンシャル中のフェルミ原子気体のBCS-BECクロスオーバーを理論的に研究、空間的非一様性により、超流動秩序パラメータが発達したガス中心部の周囲に擬ギャップが支配的な領域が存在、その外側に自由フェルミ気体的な領域を取り囲むという殻構造が出現することを明らかにした。この構造を加味することで、光電子分光スペクトル、局所圧力の実験結果を定量的レベルで説明できることを示した。また、温度、相互作用強度、ガス中心部からの距離に対するフェルミ原子ガスの相図を完成させた。

研究成果の概要（英文）：

I have theoretically investigated strong coupling effects of a trapped gas of Fermi atoms in the BCS-BEC crossover region. I have clarified that spatial inhomogeneity due to the trap potential leads to the shell structure where the superfluid region around the trap center is surrounded by the pseudogapped regime, and the outer region is close to a free Fermi gas. Including this, I have shown that the calculated photoemission spectra, as well as the local pressure, agree well with experimental results. I have also determined the pseudogap regime in the phase diagram of a Fermi gas in terms of the temperature, strength of a pairing interaction, and the spatial position.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,800,000	540,000	2,340,000
2011年度	500,000	150,000	650,000
2012年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	2,800,000	840,000	3,640,000

研究分野：凝縮系物理学

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：BCS-BEC クロスオーバー トラップポテンシャル フェルミ原子ガス 擬ギャップ 超流動 超流動ゆらぎ

1. 研究開始当初の背景

2004年に ^{40}K や ^6Li を用いて実現されたフェルミ原子ガス超流動の大きな特徴は、Feshbach共鳴と呼ばれる機構により粒子間相互作用を自在に制御できる、という点である。このユニークな特徴を最大限活かして達成されたのがBCS-BECクロスオーバーであり、そこでは粒子間の引力相互作用が強くなるにつれ、超流動の性質が金属超伝導で議論されているBCS状態的なものから、強く結合した分子ボソンのBose-Einstein凝縮(BEC)へと連続的に移行する現象が実現している。これにより、今まで別々に研究されてきたフェルミ粒子系超流動(超伝導など)とボソン系超流動(超流動 ^4He や希薄ボーズガスBEC)を統一的に扱うことが可能となった。クロスオーバー領域と呼ばれる中間結合領域は、従来の超流動系では調べることができなかった新しい研究領域として、現在、理論実験共に活発な研究が行われている。

BCS-BECクロスオーバーを理解するうえで重要な鍵となるのが超流動揺らぎである。これは、「Bose凝縮していない熱的に揺らいだクーパー対(preformed pair)」に起因するもので、クロスオーバー領域から強結合BEC領域における系の性質に重大な影響を与える。例えば、超流動転移温度は、超流動揺らぎを無視した平均場近似(弱結合BCS理論)での値に比べ顕著に低くなる。更に、BCS-BECクロスオーバー領域では、preformed pairの存在により、正常相でありながらBCS状態に見られる励起ギャップに似た構造が1粒子励起スペクトルや状態密度に現れる擬ギャップ現象の出現が期待される。

本研究を開始した2010年頃、光電子分光型実験がフェルミ原子気体でも可能となり、1粒子スペクトル強度の詳細な観測ができるようになった。 ^{40}K に対し行われた実験では、引力相互作用が強くなるにつれ、スペクトル構造が単純な自由粒子の分散から明らかにずれていく様子が観測され、擬ギャップを示唆するものとして注目された。その一方で、同時期に ^6Li のユニタリ領域で観測された局所圧力は、有効質量を仮定したフェルミ液体論で理解できることが報告され、こちらは擬ギャップの存在を否定するものであった。フェルミ原子ガスのBCS-BECクロスオーバー領域に擬ギャップは存在するのかわからないのか——は本研究開始当初、当該研究領域

で大きな問題となっていた。

2. 研究の目的

上記の問題に決着をつけるには、この系特有の問題：トラップポテンシャルで捕獲されていることによる系の非一様性が超流動揺らぎにどのような影響を与えるか、を解明する必要がある。そこで本研究では、トラップされたフェルミ原子ガスのBCS-BECクロスオーバーにおける強結合効果を理論的に研究し、トラップポテンシャルに因る、空間的に非一様な超流動揺らぎの性質について、擬ギャップ現象を中心に弱結合領域から強結合領域まで統一的に解明することを目的とする。空間依存性を考慮した局所状態密度や、1粒子励起スペクトル強度の振る舞いをBCS-BECクロスオーバー全領域の超流動転移温度以上・以下で明らかにし、トラップ系の相図における擬ギャップ領域を決定する。更に、これらの結果を用いて、光電子分光型実験によるスペクトル強度、局所圧力の観測結果について理論的説明を行い、互いに矛盾するこれら観測結果が、擬ギャップ現象、という視点でどのように説明できるのか(できないのか)明らかにする。

3. 研究の方法

超流動揺らぎの効果は、BCS-BECクロスオーバー全域で有効なT行列理論(1粒子温度グリーン関数に対する超流動揺らぎの効果(自己エネルギー補正)をT行列近似の範囲で考慮する理論)を用い、トラップポテンシャルについては局所密度近似(LDA)を用いる。この枠組みにおいて、与えられた相互作用強度と温度に対し、まず、化学ポテンシャルと粒子数分布(density profile)を超流動転移温度以上において自己無撞着に(数値計算により)決定する。

次に、温度グリーン関数を解析接続し、数値的に得られた化学ポテンシャルを使って1粒子スペクトル強度や状態密度を空間の各点で計算、ガス中心部から周辺部に移るにしたがって超流動揺らぎによる擬ギャップ現象がどのように空間変化するか明らかにする。更に、これら物理量の温度依存性から擬ギャップ構造が1粒子励起スペクトル中に現れ始める温度(擬ギャップ温度)の決定を行う。ただし、超流動揺らぎは今の場合、空間的に非一様であり、擬ギャップ構造が励

起スペクトル中に現れる温度も場所ごとに異なるはずである。研究では、場所ごとに擬ギャップ温度を決定、そのうちの最高温度（これはトラップ中心で得られると考えられる。）を系の擬ギャップ温度と定義、それをBCS-BECクロスオーバー領域全域で決定、相図を作成する。この結果を一様系の場合と比較、擬ギャップ領域がトラップポテンシャルによりどう影響を受けるか明らかにする。

JILAにより行われた光電子分光型実験は今のところ空間分解能はなく、上述の局所的な計算結果を空間的に平均したものに相当している。そこで、空間平均した1粒子スペクトル強度を計算、実験結果と比較する。

次に、計算を超流動転移温度以下の超流動相に拡張する。転移温度直下では、超流動状態であっても超流動揺らぎは依然強く、擬ギャップと超流動ギャップの競合が1粒子励起スペクトル中に起こる。温度を下げるにつれ、超流動ギャップの成長により超流動揺らぎの効果は次第に抑制されるが、超流動秩序パラメータはトラップポテンシャルの中心付近で大きな値をとるため、超流動揺らぎの抑制もトラップの中心付近ほど顕著になると予想される。結果、超流動転移温度以上の場合とは異なり、超流動秩序パラメータの値が小さいガス周辺部の方が中心付近よりも超流動揺らぎが強い状況が実現する可能性がある。この点を考慮しつつ、本研究では、温度を下げるにつれ、(1) 超流動揺らぎの影響がどう消えていくか、(2) 移温度直上での非一様な擬ギャップ構造がどのように非一様な超流動ギャップに移り変わっていくか、についてBCS-BECクロスオーバー領域全域で解明する。この結果と転移温度以上の研究結果と併せ、トラップ系における超流動揺らぎの効果を広い温度範囲で明らかにする。

超流動転移温度以下の計算で得られるdensity profileを局所圧力に変換して実験結果と比較、擬ギャップ効果を考慮した強結合理論で計算された圧力が、実験結果をどの程度説明できるのか検証する。

4. 研究成果

(1) 超流動転移温度以上における非一様な擬ギャップ現象

超流動転移温度近傍の正常相における強結合効果をT行列理論とLDAを併用して計算、BCS-BECクロスオーバー領域では、ガス中心部では擬ギャップが支配的であってもガス周辺部では粒子密度が低いために自由フェルミガスに近いスペクトルを有することを明らかにした。これを考慮して計算された光電子分光スペクトルは、 ^4He フェルミガスでの実験結果とフィッティングパラメータなしで良く一致した。これより、ユニタリ領

域で観測されたブロードな光電子分光スペクトルは、ガス中心部から周辺部に移動するにしたがって次第に消失していく（非一様な）擬ギャップの重ね合わせによるものであることが明らかとなった。また、スペクトルの温度依存性についても研究、やはり、観測された温度依存性が、擬ギャップ効果が昇温と共に弱くなることを反映したものであることを明らかにした。

上記の理論的アプローチを2次元トラップ系に適用、低次元効果により、3次元系よりも顕著な擬ギャップがガス中心部に現れることを示した。計算された光電子分光スペクトルの擬ギャップサイズはBCS-BECクロスオーバー全領域で実験結果と一致、2次元、3次元共に、擬ギャップ現象がこの系の1粒子状態を理解するうえで本質的に重要であることが明らかとなった。同時に、本研究で用いたT行列理論+LDAという理論的枠組みが、この系に対し有効であることが確認された。

(2) 超流動状態における超流動秩序と揺らぎの競合

上記の正常相の研究を超流動転移温度以下に拡張、超流動転移温度における状態密度中の擬ギャップ構造が、降温と共に連続的に超流動ギャップに移行していく様子を明らかにした。超流動転移温度以下の中間温度領域では、ガス中心部の超流動秩序が支配的な領域を擬ギャップが優勢な領域が取り囲み、更に、その外側には自由粒子的な励起スペクトルを有する領域が現れるという、殻構造が実現することを示した。温度が下がるにつれ、超流動が支配的な領域が次第に広がり、絶対零度ではこの領域がガス全体を覆うが、この温度依存性をBCS-BECクロスオーバー全域で調べることにより、温度、相互作用、ガス中心部からの距離、の3つをパラメータとする、トラップされたフェルミ原子気体の相図を完成させた。

この計算で得られたdensity profileから局所圧力を計算、ユニタリ極限の ^6Li フェルミガスで観測された実験データをフィッティングパラメータなしで理論的に再現することに成功した。これまで、この実験結果は、擬ギャップが存在しないフェルミ液体で良く説明できるとされ、光電子分光実験とは対照的に、擬ギャップの存在を否定するものと考えられてきた。しかし、今回、擬ギャップ効果を含む強結合理論でも説明できることが分かったことにより、光電子分光実験、局所圧力実験、共に擬ギャップ現象と矛盾しないことが明らかとなった。計算結果の詳細な分析から、局所圧力には状態密度中の擬ギャップの影響は出にくく、そもそもこの物理量は擬ギャップの観測には不向きであることを指摘した。

以上の研究成果により、擬ギャップの存在を支持する光電子分光実験と、それを否定する局所圧力実験という2つの実験の存在により議論となっていた、この系の擬ギャップの有無について決着がついた。すなわち、フェルミ原子ガスのBCS-BECクロスオーバー領域には空間的に非一様な擬ギャップが確かに存在することが明らかとなった。

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 18 件)

- ① 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 , Physical Review A, 査読有, 86巻, (2012) 063603(1-11), DOI:10.1103/PhysRevA.86.063603.
- ② T. Kashimura, R. Watanabe, and Y. Ohashi, Spin susceptibility and fluctuation corrections in the BCS-BEC crossover regime of an ultracold Fermi gas, Physical Review A, 査読有, 86巻, (2012) 043622(1-8), DOI:10.1103/PhysRevA.86.043622.
- ③ S. Tsuchiya, R. Watanabe, and Y. Ohashi, Pseudogap temperature and effects of harmonic trap in the BCS-BEC crossover regime of an ultracold Fermi gas, Physical Review A, 査読有, 84巻, (2011) 043647(1-11), DOI:10.1103/PhysRevA.84.043647.
- ④ T. Kashimura, S. Tsuchiya, and Y. Ohashi, π -junction and spontaneous current state in a superfluid Fermi gas, Physical Review A, 査読有, 84巻, (2011) 013609(1-8), DOI:10.1103/PhysRevA.84.013609.
- ⑤ Y. Ohashi, Formation of magnetic impurities and pair-breaking effect in a superfluid Fermi gas, Physical Review A, 査読有, 83巻, (2011) 063611(1-12), DOI:10.1103/PhysRevA.83.063611.
- ⑥ R. Watanabe, S. Tsuchiya, and Y. Ohashi, Superfluid density of states and pseudogap phenomenon in the BCS-BEC crossover regime of a superfluid Fermi gas, Physical Review A, 査読有, 82巻, (2010) 043630(1-9), DOI:10.1103/PhysRevA.82.043630.
- ⑦ S. Tsuchiya, R. Watanabe, and Y. Ohashi, Photoemission spectrum and effect of

inhomogeneous pairing fluctuations in the BCS-BEC crossover regime of an ultracold Fermi gas, Physical Review A, 査読有, 82巻, (2010) 033629(1-5), DOI:10.1103/PhysRevA.82.033629.

- ⑧ T. Kashimura, S. Tsuchiya, and Y. Ohashi, Superfluid-ferromagnet-superfluid junction and π phase in a superfluid Fermi gas, Physical Review A, 査読有, 82巻, (2010) 033617(1-9), DOI:10.1103/PhysRevA.82.033617.

[学会発表] (計 41 件)

- ① T. Kashimura, R. Watanabe, Y. Ohashi, Magnetic properties and pseudogap phenomenon in an ultracold Fermi gas with population imbalance, APS March Meeting, 2012.3.21, Baltimore, US.
- ② 渡邊亮太, 土屋俊二, 大橋洋士, 二次元常流動 Fermi 原子気体の BCS-BEC クロスオーバーにおける photoemission スペクトル, 日本物理学会, 2012.9.12, 横浜国立大学.
- ③ 大橋洋士, フェルミ原子ガスで実現する強相関・強結合超流動: BCS-BEC クロスオーバーと擬ギャップ現象, 日本物理学会, 2011.9.18, 弘前大学 (INVITED).
- ④ Y. Kato, S. Watabe, and Y. Ohashi, Anomalous tunneling of spin wave in Heisenberg ferromagnet, 26th international conference on low temperature physics (LT26), 2011.8.13, Beijing international convention center, China.
- ⑤ T. Kashimura, S. Tsuchiya, and Y. Ohashi, π -phase and spontaneous supercurrent induced by pseudo ferromagnet in spin-polarized superfluid Fermi gas, 26th international conference on low temperature physics (LT26), 2011.8.12, Beijing international convention center, China.
- ⑥ Y. Ohashi, Formation of magnetic impurities, π -junction, and a spontaneous current in a superfluid Fermi gas, GriffinFest, 2011.5.14, Toronto University, Canada (INVITED).
- ⑦ 大橋洋士, 土屋俊二, 渡邊亮太, 猪谷太輔, Photoemission spectrum and pseudogap phenomena in the BCS-BEC crossover regime of an ultracold Fermi gas, 第18回渦糸物理国内会議 (VPWJ2010), 2010.12.1, 日本原子力開発機構システム計算科学センター、東京 (INVITED).
- ⑧ S. Tsuchiya, R. Watanabe, and Y. Ohashi, Pseudogap behavior of a ultracold Fermi gas in the BCS-BEC crossover regime, 11th Asia Pacific Physics Conference (APPC11), 2010.11.15, Shanghai Everbright Convention and

Exhibition Center, China (INVITED).

[その他]

研究成果データベース :

<http://k-ris.keio.ac.jp/Profiles/0170/012288/profile.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

大橋 洋士 (OHASHI YOJI)

慶應義塾大学・理工学部・教授
研究者番号 : 6027314

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし