慶應義塾大学学術情報リポジトリ
Keio Associated Repository of Academic resouces

Title	フェルミ原子気体のBCS-BECクロスオーバー領域における擬ギャップの研究
Sub Title	Pseudogap effects in the BCS-BEC crossover regime of a Fermi gas
Author	大橋, 洋士(Ohashi, Yoji)
Publisher	
Publication year	2010
Jtitle	科学研究費補助金研究成果報告書 (2009.)
JaLC DOI	
Abstract	極低温フェルミ原子ガスのBCS-BECクロスオーバー領域における強結合効果を研究した。超流動転移温度以上のノーマル相を考え、強結合理論を用いて状態密度や1粒子励起スペクトル中に現れる擬ギャップ現象を調べた。温度が高くなるにつれ擬ギャップがどのように消えていくかを明らかにし、擬ギャップが消失する温度（擬ギャップ温度）をBCS-BECクロスオーバー全領域で決定した。
Notes	研究種目：基盤研究(C) 研究期間：2007～2009 課題番号：19540420 研究分野：凝縮系物理学理論 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・プラズマ
Genre	Research Paper
URL	https://koara.lib.keio.ac.jp/xoonips/modules/xoonips/detail.php?koara_id=KAKEN_19540420seika

慶應義塾大学学術情報リポジトリ(KOARA)に掲載されているコンテンツの著作権は、それぞれの著作者、学会または出版社/発行者に帰属し、その権利は著作権法によって保護されています。引用にあたっては、著作権法を遵守してご利用ください。

The copyrights of content available on the KeiO Associated Repository of Academic resources (KOARA) belong to the respective authors, academic societies, or publishers/issuers, and these rights are protected by the Japanese Copyright Act. When quoting the content, please follow the Japanese copyright act.

様式Ｃ-19

科学研究費補助金研究成果報告書

平成 22 年 3 月 31 日現在

研究種目：基盤研究（Ｃ）
研究期間：2007～2009
課題番号：１９５４０４２０
研究課題名（和文）　フェルミ原子気体のＢＣＳ－ＢＥＣクロスオーバー領域における擬ギャップの研究

研究課題名（英文）　Pseudogap effects in the BCS-BEC crossover regime of a Fermi gas

研究代表者
大橋　洋士（OHASHI　YOJI）
慶應義塾大学・理工学部・准教授
研究者番号：60272134

研究成果の概要（和文）：
極低温フェルミ原子ガスの BCS-BEC クロスオーバー領域における強結合効果を研究した。超流動転移温度以上のノーマル相を考え、強結合理論を用いて状態密度や１粒子励起スペクトル中に現れる擬ギャップ現象を調べた。温度が高くなるにつれ擬ギャップがどのように消えていくかを明らかにし、擬ギャップが消失する温度（擬ギャップ温度）を BCS-BEC クロスオーバー全領域で決定した。

研究成果の概要（英文）：
I have theoretically investigated strong coupling effects in the BCS-BEC crossover regime of an ultra-cold Fermi gas. Using a strong-coupling fluctuation theory, I have studied pseudo-gap phenomena in the density of states, as well as single-particle spectral weight, in the normal state above the superfluid phase transition temperature. I showed how the pseudo-gap disappears as one increases the temperature, and determined the pseudo-gap temperature over the entire BCS-BEC crossover region.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合　計
2007 年度	2,500,000	750,000	3,250,000
2008 年度	500,000	150,000	650,000
2009 年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総　計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：凝縮系物理学理論
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・プラズマ
キーワード：超流動、フェルミ原子ガス、BCS-BEC クロスオーバー

１．研究開始当初の背景

2004年に^{40}K、^{6}Liで相次いで実現されたフェルミ原子ガス超流動の最大の特徴は、フェッシュバッハ共鳴と呼ばれる現象により原子間相互作用を自在に制御できるという点である。これを最大限活かして実現されたのがBCS-BECクロスオーバー（引力相互作用を強くするにしたがって、超流動の性質が弱結合BCS状態から転移温度以上で形成されたクーパー対分子のボーズアインシュタイン凝縮（BEC）

へと連続的に移行する現象）であり、これにより、様々な相互作用領域の超流動現象を統一的に研究できるようになった。実現する超流動転移温度はフェルミ縮退温度（T_F）の２０%程度にまで達しており、これは金属超伝導の場合(T_F＝１万度～１０万度)に換算すると室温をはるかに越えた超高温超伝導の実現に相当している。このため、フェルミ原子ガス超流動の研究を通じ室温超伝導実現へのヒントが得られるのでは、との期待も持たれている。

BCS-BECクロスオーバーの特徴の一つに強結合領域における擬ギャップ現象がある。これは強い引力相互作用により、ボーズ凝縮していないクーパー対が超流動転移温度以上で熱的に揺らいで存在していることに起因する。擬ギャップは、銅酸化物高温超伝導のアンダードープ領域における異常金属相と関連して議論され、１粒子励起スペクトルに“擬ギャップ”が開くなど物理量に様々な異常が起こることが実験的に知られている。しかし、その機構についてはいくつかのアイデアが提案されており、現在もなお活発な議論が続いている。この問題に対し、相互作用をはじめとする様々な物理量を精密かつ自在に制御できるフェルミ原子気体は、現象の本質を解明するうえで格好の系である。

２．研究の目的

フェルミ原子ガスの研究は、これまで主に転移温度以下の超流動物性に主眼が置かれてきたが、本研究では新たな研究の方向性として超流動転移温度以上の擬ギャップ領域に着目、その物性解明を目指す。ボーズ凝縮していない熱的に揺らいだクーパー対の性質を強結合効果を加味して理論的に研究、弱結合領域から強結合領域まで一貫した理論により説明することを目指す。上述したように、擬ギャップの物性解明は未だ多くの問題を抱えた銅酸化物超伝導の理解にも大いに貢献するものと期待される。

３．研究の方法

まずBCS-BECクロスオーバー領域の超流動転移温度 Tc を決定するため、Thouless criterion を T 行列近似の範囲で評価、Tc の決定方程式を導出する。化学ポテンシャルμは弱結合 BCS 領域を離れるとフェルミエネルギーから大きくずれることが知られているが、この強結合補正を加味するため、超流動揺らぎの効果をT行列近似の範囲で考慮した自己エネルギーを含む１粒子温度グリーン関数から粒子数方程式を導出、これを与えられた粒子数に対する化学ポテンシャルの決定方程式とみなす。そして、これを Tc の方程式と連立させて数値的に解き、Tc とμを相互作用強度毎に決定する。こうして求まった Tc から出発、Tc 以上のノーマル相における化学ポテンシャルの値を粒子数方程式から決定する。

次に Tc 以上で計算された化学ポテンシャルを用い、ノーマル相における１粒子スペクトル強度や状態密度を計算する。前者は（超流動揺らぎの効果をT行列理論のレベルで考慮している）自己エネルギーを含む１粒子温度グリーンを解析接続し、その虚部を取ることで得られる。また、スペクトル強度の運動量和をとることで状態密度が計算される。

以上の手順で得られた1粒子スペクトル強度、状態密度に現れる擬ギャップ現象の温度変化から、これら物理量に対する超流動揺らぎの影響をBCS-BECクロスオーバー全領域、Tc以上の全温度領域で明らかにする。

４．研究成果

(1)　ガウス揺らぎの理論との比較

「研究の方法」で述べたT行列近似に基づく強結合理論を用いる前に、BCS-BEC クロスオーバー現象に対しその有用性が広く知られているNozieresとSchmitt-Rinkによるガウス揺らぎの理論を用いて擬ギャップ現象の計算を行ってみたところ、非物理的な結果が得られることが分かった。すなわち、超流動揺らぎが強くなると状態密度の正値性がフェルミエネルギー近傍で破れ、また、低エネルギー領域で非物理的な発散が生じる。これは、T 行列理論と比較してガウス揺らぎの理論が自己エネルギーの効果を１次までしか考慮していないことに因るものである。これにより、ガウス揺らぎの理論は BCS-BEC クロスオーバーにおける超流動転移温度の振る舞いなどについては良い結果を与えるものの、本研究には使えないことが明らかとなった。一方、T 行列理論ではそうした問題はなく、BCS-BEC クロスオーバー全域で擬ギャップ現象を議論することが可能であることも明らかとなった。

(2) 超流動転移温度における擬ギャップ

先ず、擬ギャップが現われる相互作用領域を明らかにするため超流動転移温度上での状態密度、１粒子スペクトル強度を調べた。弱結合BCS領域では超流動揺らぎの効果は弱く、状態密度や１粒子スペクトル強度は超流動転移温度においても自由粒子における結果にほとんど等しい。しかし、引力相互作用が強くなりクロスオーバー領域に入ると、フ

ェルミ面近傍の状態密度の値は小さくなり、１粒子スペクトル強度にはダブルピーク構造が現れるようになる（擬ギャップ構造）。自由粒子系の１粒子スペクトル強度は運動エネルギーに相当するエネルギーにδ関数的なピークがあり、一方 BCS 平均場理論ではエネルギーギャップに相当するエネルギー±Δに２つのδ関数的なピークが現れる。BCS 理論におけるダブルピーク構造は超流動秩序パラメータΔに因る particle-hole coupling(粒子励起とホール励起の結合)に起因するものであるが、超流動転移温度（ここでは秩序パラメータは０である）での１粒子スペクトル強度に見られるダブルピーク構造は、超流動揺らぎがある種の particle-hole coupling を引き起こすことを示している。しかし、BCS 状態とは異なり数値計算で得られた２つのピークは有限な幅を持っており、これは超流動揺らぎにより準粒子励起が有限な寿命を持っている結果と理解される。

引力相互作用を更に強くすると状態密度に見られる擬ギャップはより顕著になり、化学ポテンシャルが負の値を取るほどの強結合 BEC 領域では大きなギャップ構造になることが分かった。また、１粒子スペクトル強度に見られる２つのピークのうち、負のエネルギー領域に存在する低エネルギー側のピーク強度は相互作用が強くなるにつれ次第に弱くなり、BEC 領域ではほとんど消失してしまうことも明らかとなった。強結合 BEC 極限では、系は強く結合した分子ボーズガスで記述されるが、そこでの分子形成は単純な２体問題で決まっている。したがって、この領域ではホールの存在は対形成には必要なく、結果、励起スペクトルも単純な粒子励起で記述され、ホールの励起に対応する低エネルギー側のピーク構造は現れない。しかし、BEC 極限から逆にクロスオーバー領域に近づくとフェルミ粒子の多体効果が次第に重要になり、フェルミ面の存在と密接に関連したホールが対形成に関与、１粒子スペクトル強度にもそれを反映した負エネルギー領域におけるピークが見られるようになる。

(3) 擬ギャップ現象の温度変化

状態密度は１粒子スペクトル強度の運動量和で与えられるため、一見、両者に見られる擬ギャップ構造は同じ温度で消失すると思われるが、実際に調べてみると擬ギャップが完全に消える温度（擬ギャップ温度）はこれら２つの物理量で異なり、しかもその違いは相互作用の強さに強く依存することが明らかとなった。すなわち、BCS 領域では状態密度における擬ギャップ構造の方が１粒子スペクトル強度中のダブルピーク構造より高温まで残り、他方、クロスオーバー領域から強結合 BEC 領域ではこの関係は逆転する。

BCS 領域では、高温で１粒子スペクトル強度のダブルピーク構造が消えても超流動ゆらぎの影響でフェルミ面近傍のスペクトル強度はフェルミ面から離れたところに比べブロードになり、スペクトル強度の値がフェルミ面近傍で小さくなる。結果、フェルミ面近傍の状態密度が自由フェルミガスに比べ小さくなり擬ギャップ構造がより高温まで残る。他方、BEC 領域では、分子形成が 2 体レベルになることを反映してスペクトル強度における低エネルギー側のピーク構造が弱くブロードになる。この傾向は高温ほど顕著になり、スペクトル強度の運動量和で与えられる状態密度には反映されにくくなる。このためスペクトル強度のダブルピーク構造（擬ギャップ構造）の方がより高温まで残るのである。

以上のように状態密度と１粒子スペクトル強度では擬ギャップ温度が異なるため、それぞれの物理量から擬ギャップ温度を決定し、フェルミ原子ガスの相互作用－温度相図における擬ギャップ領域を決定した。

(4) 光電子分光型実験との比較

2008 年、JILA のグループにより光電子分光型実験がフェルミ原子 ^{40}K ガスに対し行われた。観測されたスペクトルは１粒子スペクトル強度と密接に関係しているが、今回計算された一様系でのスペクトル強度では実験結果の全てを説明することはできなかった。実験では、強結合 BEC 領域でもあたかも一部の原子が弱結合領域にあるかのようなスペクトルが報告されているが、このような２重構造は現在の理論計算では説明できず、トラップの効果による非一様性がなんらかの効果をもたらしていると予想される。従って、今後、実験結果を説明するためにトラップ効果を取り込めるよう理論を拡張することが重要である。

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 15 件）

① S. Tsuchiya, R. Watanabe, Y. Ohashi, Single-particle properties and pseudogap effects in the BCS-BEC crossover regime of an ultracold Fermi gas above Tc, Physical Review A, 査読有, 80巻, 2009, 033613-1～033613-9.

② S. Tsuchiya, R. Watanabe, Y. Ohashi, Pseudogap in fermionic density of

states in the BCS-BEC crossover of atomic Fermi gases, Journal of Low Temperature Physics, 査読有,185巻, 2009, 29-35.

③ H. Tamaki, K. Miyake, Y. Ohashi. d-wave spin density wave phase in the attractive Hubbard model with spin polarization, Journal of Physical Society of Japan, 査読有, 78巻, 2009, 073001-1～073001-4.

④ Y. Ohashi, Tunneling properties of a bound pair of Fermi atoms in an optical lattice, Physical Review A, 査読有, 78巻, 2008, 063617-1～063617-9.

⑤ Y. Ohashi and S. Tsuchiya, Supercurrent behavior of low-energy Bogoliubov phonon and the anomalous tunneling effect in a Bose-Einstein condensate, Physical Review A, 査読有, 78巻, 2008,043601-1～043601-10.

⑥ H. Tamaki, Y. Ohashi, and K. Miyake, BCS-BEC crossover and effects of density fluctuations in a two-component Fermi gas described by the three dimensional attractive Hubbard model, Physical Review A, 査読有, 77巻, (2008), 063161-1～063161-9.

⑦ E. Taylor, A. Griffin, Y. Ohashi, Spin polarized Fermi superfluid as Bose-Fermi mixtures, Physical Review A, 査読有, 76巻, 2007, 023614-1～023614-12.

⑧ Y. Ohashi, Superfluid density in the BCS-BEC crossover regime of a two-component Fermi gas at finite temperatures, Journal of Superconductivity and Novel Magnetism, 査読有, 20巻, 2007, 609-612.

〔学会発表〕(計 20 件)

① Y. Ohashi, S. Tsuchiya, R. Watanabe, Strong-coupling fluctuation effects in the BCS-BEC crossover regime of an ultracold Fermi gas, 5th cross-strait and international conference on quantum manipulation, 2009.12.19, Institute of Physics, Chinese academy of science, Beijing, China.

② S. Tsuchiya, R. Watanabe, Y. Ohashi, Pseudogap behaviors of atomic Fermi gases above Tc in the BCS-BEC crossover, M2S-IX, International conference on materials and mechanisms of superconductivity, 2009.9.11, Keio Plaza Hotel, Tokyo, Japan.

③ R. Watanabe, S. Tsuchiya, Y. Ohashi, Pairing fluctuations and pseudogap effects in the BCS-BEC crossover regime of a superfluid Fermi gas, 2009.9.11, Keio Plaza Hotel, Tokyo, Japan.

④ S.Tsuchiya, R. Watanabe, Y. Ohashi, Pseudogap in fermionic density of states in the BCS-BEC crossover of atomic Fermi gases, QFS2009, International Symposium on Quantum Fluids and Solids, 2009.8.10, North western University, Evanston, Illinois, USA.

⑤ Y. Ohashi, N. Fukushima, Superfluid properties of an ultracold Fermi gas in the BCS-BEC crossover region, The 9th international symposium of frontier of quantum mechanics in the light of new technology, 2008.8.27, Advanced Research Laboratory, Hitachi Ltd., Saitama, Japan.

⑥ Y. Ohashi, Molecular wavefunction and tunneling properties of a bound pair of Fermi atoms in an optical lattice, International conference on low temperature physics (LT25), 2008.8.11, Amsterdam, RAI congress center, Netherlands.

⑦ Y. Ohashi, Superfluid density in the BCS-BEC crossover, International Symposium on Physics of New Quantum Phases in Superclean Materials, 2007.11.1, Nagaragawa convention center, Gifu, Japan.

⑧ Y.Ohashi, N. Fukushima, H. Matsumoto, E. Taylor, A. Griffin, Superfluid density in the BCS-BEC crossover regime of a Fermi superfluid, Joint ESF and JSPS conference on Vortex matter in nanostructured superconductors, Vortex V, 2007.9.10, Aldemar Paradise Royal Mare,Rhodes, Greece.

〔図書〕(計 2 件)

① Y. Ohashi, N. Fukushima, World Scientific, Foundation of Quantum Mechanics in the Light of New Technology, Ed. by S. Ishioka, K. Fujikawa, 2009, 共著, 18-23.

② S. Tsuchiya, Y. Ohashi, World Scientific, Foundation of Quantum Mechanics in the Light of New Technology, Ed. by S. Ishioka, K. Fujikawa, 2009, 共著, 37-40.

〔その他〕
研究成果データベース：
http://k-ris.keio.ac.jp/Profiles/0170/0012288/pblc1.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・准教授
研究者番号：60272134

(2)研究分担者
該当なし

(3)連携研究者
該当なし