

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 18 日現在

機関番号：32612

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25400418

研究課題名(和文)人工ゲージ場を用いて p 波超流動をフェルミ原子気体で実現させるための理論研究

研究課題名(英文) Theoretical studies on the realization of a p-wave superfluid Fermi gas by using a synthetic gauge field

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

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000 円

研究成果の概要(和文)：人工ゲージ場で誘起された反対称スピン軌道相互作用を有する s 波フェルミガス超流動を用い、p 波超流動を実現させる方法を理論的に研究した。様々なタイプのスピン軌道相互作用について、それぞれどのような p 波対振幅が誘起されるか、また、大きな p 波対振幅が得られる状況は実験的に到達可能な超流動転移温度を有するか、を明らかにした。更に、これを初期状態とし、引力相互作用を s 波から p 波に変換することで、p 波超流動を作り出せることを理論的に示した。

研究成果の概要(英文)：I have theoretically investigated a possible idea to realize a p-wave superfluid Fermi atomic gas, starting from the s-wave superfluid phase with a synthetic anti-symmetric spin-orbit interaction. I clarified what type of p-wave pair amplitude is induced by various kinds of spin-orbit couplings. I also confirmed that the superfluid phase transition temperature where large p-wave pair amplitude is induced is accessible within the current experimental technology. Using the induced p-wave pair amplitude in an s-wave superfluid Fermi gas, I showed that, when one suddenly changes the symmetry of pairing interaction from the s-wave one to a p-wave one, one can immediately realize a p-wave superfluid state.

研究分野：凝縮系物理学理論

キーワード：フェルミ原子気体 p 波超流動 人工ゲージ場 反対称スピン軌道相互作用 BCS-BEC クロスオーバー

1. 研究開始当初の背景

2014年にリチウム原子ガスやカリウム原子ガスにおいてs波超流動が実現して以降、p波超流動の実現はフェルミ原子ガス研究の分野で次なる大きな目標と考えられてきた。その理由は、(1)この系ではフェッシュバハ共鳴と呼ばれる機構により対形成に關与するフェルミ原子間の引力相互作用を外部磁場により自在に制御することが可能であり、一たびp波対凝縮が実現すれば、弱結合から強結合にいたる幅広い相互作用領域における「p波超流動物性」を系統的に研究できるようになること、および、(2)既に実現しているp波超流動である液体ヘリウム3の超流動や、p波超伝導が実現していると考えられている強相関電子系超伝導に対する「量子シミュレータ」として、フェルミ原子気体がこれらの系の物性解明に貢献できると期待されること、が挙げられる。

しかし、こうした重要性にもかかわらず、研究開始当時、p波のフェルミ原子ガス超流動の実現は重大な困難に直面していた。すなわち、s波クーパー対とは異なり、p波クーパー対は、p波相互作用に起因する3体ロスなどの影響で寿命が短く($\sim O(10\text{ms})$)、系を超流動転移温度以下にしても、凝縮体の成長に必要な時間($\sim O(100\text{ms})$)まで系を保持することができないのである。このため、ほとんど全てのフェルミ粒子系超流動で行われているアプローチ=対形成相互作用がある状況で系の温度を下げ、超流動(超伝導)状態を実現する=が使えず、これまでとは根本的に異なる新しいアプローチを考え出す必要があった。

2. 研究の目的

本研究の目的は、上述の困難を克服し、p波超流動を極低温フェルミ原子気体で実現するための新しい方法を理論的に探ることである。p波超流動を実現するには、p波の引力相互作用の存在は必須であるが、この異方的相互作用は、原子ロスという負の効果ももたらすことから、後者の効果をできるだけ避けなくてはならない。この目的のため、本研究では、p波超流動を特徴付ける「p波超流動秩序パラメータ」がp波引力相互作用とp波対振幅の「積」で与えられることに着目し、以下のようなアイデアの実現可能性を理論的に探る：

- (1) 近年冷却原子ガスの分野で実現された人工ゲージ場を用い、s波相互作用するフェルミ原子ガス超流動に反対称スピン軌道相互作用を印可、系の空間反転対称性を破る。
- (2) するとパリティはクーパー対の分類には良い指標とはならなくなり、対振幅にはスピン三重項(シングレット)とスピン

三重項(トリプレット)の混成が生じる(パリティ混成効果)。しかし、系はs波チャンネルのみ引力相互作用が働いているので、p波を含むスピントリプレット成分が対振幅として誘起されても、超流動秩序パラメータ自体は依然s波対称性を有しており、低温で実現する超流動はs波型のままである。また、p波の対振幅が誘起されたとしても、p波相互作用自体は存在しないので、従来のアプローチで問題となっていた「p波相互作用による粒子ロス」は起こらない。

- (3) この状況で、フェッシュバハ機構を用い、s波引力相互作用をp波引力相互作用に高速で変換する(これは実験的には外部磁場の制御で行うことができる)。すると、変換直後、あらかじめ系内に誘起されていたp波対振幅と印可されたp波相互作用の積で与えられるp波超流動秩序パラメータが有限となるため、p波超流動が実現する。p波相互作用が有限になると従来の場合と同様、粒子ロスが発生し系は崩壊していくが、凝縮体が成長できない通常のアプローチとは異なり、系は「p波超流動状態」として崩壊していく。また、s波引力相互作用はなくなるので、相互作用変換前には有限であったs波超流動秩序パラメータは0となり、s波の対振幅のみ残る。

本研究では、このアプローチが実際に機能するか、を理論的に検証する。人工ゲージ場で作り出された反対称スピン軌道相互作用とs波引力相互作用を有する2成分フェルミ原子気体において、大きなp波対振幅が得られる条件(相互作用強度、および、スピン軌道相互作用強度に関し調べる)および、その領域のs波超流動が実験的にアクセス可能であるかを明らかにする。次に、それを初期条件とし、系の相互作用をs波からp波に変えた後、p波超流動状態がどのように成長していくかを、時間発展計算を実際に行うことで明らかし、p波クーパー対の寿命内でp波超流動秩序パラメータが十分成長、あるいはある程度保持できるかを明らかにする。

3. 研究の方法

まず、絶対零度において、反対称スピン軌道相互作用のタイプにより、どのようなp波対振幅がs波超流動状態中に誘起されるかを、BCS平均場近似を基礎としたLeggettの強結合理論を用い、BCS-BECクロスオーバー全領域で調べる。

次に、大きなp波対振幅が得られる条件下で、実験的に到達可能な温度でs波超流動状態に転移できるかを調べる。この問題に対しては、平均場近似を越え、強結合効果を扱う必要があることから、超流動揺らぎの効果をガウス揺らぎの範囲で取り入れた、NSR

(Nozieres, Schmitt-Rink) 理論を用いる。

以上2つの課題を調べ、人工ゲージ場で p 波対振幅が誘起され、かつ、その状況が実験的に実現可能であること、を確認したうえで、粒子間引力相互作用を s 波から p 波に突限変換した際に p 波超流動秩序パラメータがその後、どのように時間発展していくかを、時間依存 Bogoliubov-de Gennes 方程式を使い研究する。

空間反転対称性の破れは、人工ゲージ場を導入せずとも、冷却フェルミ原子実験では必須のトラップポテンシャルによってもたらされると考えられる。そこで、本研究では、これによるパリティ混成で p 波対振幅を誘起することができないか、できる場合にその条件はどのようなものか、についても実空間 Bogoliubov de-Gennes 理論を用い研究する。

4. 研究成果

(1) 反対称スピン軌道相互作用で s 波超流動状態中に誘起される p 波対振幅

1 成分型の反対称スピン軌道相互作用 (例えば、z 成分のみ有する場合) が s 波超流動状態にあるフェルミ原子気体に印可された場合、誘起される p 波対振幅は絶対零度においてユニタリ極限近傍で最大となることを見出した。実験的に実現しているスピン軌道相互作用の強度で評価した場合、ユニタリ極限では全原子の約 7% 程度が p 波対振幅に寄与していることが分かり、p 波超流動状態を作り出す初期条件としては十分使用できるものであることがわかった。

このように p 波対振幅がユニタリ領域で大きな値を取る理由は、弱結合 BCS 領域ではそもそも s 波の対振幅自体が小さいため誘起される p 波対振幅も大きくはなれないこと、および、強結合 BEC 領域ではクーパ対は強く結合した分子ボソンを形成してしまうため、スピン軌道相互作用があまり重要ではなくなり、やはり p 波対振幅が抑制されることに因るものである。

この 1 成分型スピン軌道相互作用の場合、超流動転移温度に対する影響を NSR 理論で評価したところ、p 波対振幅は誘起されるにもかかわらず、超流動転移温度自体はスピン軌道相度作用がない場合と同じになることを見出した。現在、スピン軌道相互作用を含まない場合では、s 波のフェルミ原子ガス超流動がユニタリ極限でも得られており、「大きな p 波対振幅を有する s 波フェルミ原子ガス超流動」は、現在の実験技術で十分実現可能であることが分かった。

研究では、より一般的な 2 成分型、および、すべての成分が入っている 3 成分型の反対称スピン軌道相互作用の場合についても研究した。結果は 1 成分型の場合とは異なり、大きな p 波対振幅はスピン軌道相互作用の

結合定数が比較的大きく、引力相互作用が弱結合 BCS 領域にある場合に得られることを明らかにした。通常の (スピン軌道相互作用を含まない) s 波超流動の超流動転移温度は弱結合領域で低いため、この結果は、一見、p 波超流動実現には不利に見えるが、実際に NSR 理論で評価したところ、この場合はスピン軌道相互作用によってこの領域の超流動転移温度が増大、通常の場合の強結合 BEC 領域における値と同程度になることを見出した。これはスピン軌道相互作用により、1 粒子のバンド構造が低次元系のそれに近くなり、2 体の束縛状態が形成されやすくなった結果、s 波引力相互作用自体は弱くとも、系の性質は分子ボースガスに近くなることに因る。結果、2 成分型、3 成分型のスピン軌道相互作用を用いた場合でも、大きな p 波対振幅を実験的に準備できることが理論的に示された。

(2) トラップポテンシャルを用いた p 波対振幅の誘起

「研究の方法」欄で述べたトラップポテンシャルに因るパリティ混成効果の可能性を探るため、3 次元調和振動子ポテンシャル中に捕獲された s 波フェルミ原子ガス超流動を、実空間 Bogoliubov de Gennes 方程式により扱った。結果、トラップ中心以外では空間反転対称性が局所的に破れているにもかかわらず、p 波対振幅は誘起されなかった。しかし、この状況に加え、スピン (フェルミ原子ガスの場合、クーパ対形成に参与する 2 種類の原子状態を擬スピン、とラベルしている) の回転対称性も同時に破れていると、p 波対振幅がトラップ中心以外の場所で誘起されることを見出した。この状況は、クーパ対形成に参与する 2 種類のフェルミ原子数が異なる「スピンインバランス系」に対応しており、実験的に既実現しているスピンインバランス系 s 波超流動フェルミ原子ガスでは、既に p 波対振幅が存在していることを示している。

(3) p 波引力相互作用の印可による p 波超流動状態の成長

(1) で誘起することに成功した p 波対振幅を初期状態として使用し、引力相互作用を (フェッシュバハ共鳴を用い) s 波から p 波に急速に変換した後の系の時間発展を絶対零度の場合について時間依存 Bogoliubov de-Gennes 方程式を用いて研究した。最初の状態としては、一番単純な 1 軸型のスピン軌道相互作用の場合を用意、p 波引力相互作用の印可直後から有限な p 波超流動パラメータが出現、非平衡状態ではあるものの、確かに、p 波超流動状態が実現することを示した。初期状態の p 波対振幅が小さい場合、p 波相互作用印可後、p 波超流動秩序パラメータは

増大、熱平衡状態で期待される値に急速に近づく一方、初期状態のp波対振幅が非常に大きい場合、p波相互作用印可後のp波秩序パラメータは時間とともに減少しながら、熱平衡値に近い値に近づいていく。今回の計算では原子の3体ロスは無視しているが、両者の場合とも、フェルミ原子気体で期待されるp波クーパ対の寿命より短時間で熱平衡値に近づくため、分子の寿命を考慮しても系が崩壊するある程度までは、p波超流動状態が保持されると期待される。

以上の成果により、「人工ゲージ場を用い、s波超流動状態中にp波対振幅を誘起しておき、その後、相互作用をp波に替えることでp波超流動状態をフェルミ原子気体で実現させる」という本研究の有効性が理論的に示された。

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15件)

Pieter van Wyk, Hiroyuli Tajima, Ryo Hanai, Yoji Ohashi, Specific heat and effects of pairing fluctuations in the BCS-BEC-crossover regime of an ultracold Fermi gas, *Physical Review A*, 査読有, Vol. 93 (2016) 013621(1-9). DOI: 10.113/PhysRevA.93.013621.

Daisuke Inotani, Yoji Ohashi, Pairing fluctuations and an anisotropic pseudogap phenomenon in an ultracold superfluid Fermi gas with plural p-wave superfluid phases, *Physical Review A*, 査読有, Vol. 92 (2015) 063638(1-13). DOI: 10.113/PhysRevA.92.063638.

Tokitake Yamaguchi, Yoji Ohashi, Proposed method to realize the p-wave superfluid state using an s-wave superfluid Fermi gas with a synthetic spin-orbit interaction, *Physical Review A*, 査読有, Vol.92 (2015) 013615(1-12). DOI: 10.113/PhysRevA.92.013615.

Yuki Endo, Daisuke Inotani, Ryo Hanai, Yoji Ohashi, Triplet pair amplitude in a trapped s-wave superfluid Fermi gas with broken spin rotation symmetry, *Physical Review A*, 査読有, Vol.92 (2015) 023610(1-11). DOI: 10.113/PhysRevA.92.023610.

Ryo Hanai, Yoji Ohashi, Heteropairing and component-dependent pseudogap phenomena in an ultracold Fermi gas with different species with different masses, *Physical Review A*, 査読有, Vol.90 (2014) 043622(1-11). DOI: 10.113/PhysRevA.90.043622.

Shohei Watabe, Yoji Ohashi, Green's function formalism for a condensed Bose gas consistent with infrared-divergent longitudinal susceptibility and Nepomnyshchii-Nepomnyashchii identity, *Physical Review A*, 査読有, Vol.90 (2014) 013603(1-12). DOI: 10.113/PhysRevA.90.013603.

Ryota Watanabe, Shunji Tsuchiya, Yoji Ohashi, Low-dimensional pairing fluctuations and pseudogapped photoemission spectrum in a trapped two-dimensional Fermi gas, *Physical Review A*, 査読有, Vol.88 (2013) 013637(1-8). DOI: 10.1103/PhysRevA.88.013637.

Shohei Watabe, Yoji Ohashi, Comparative studies of many-body corrections to an interacting Bose-Einstein condensate, *Physical Review A*, 査読有, Vol.88 (2013) 053633(1-9). DOI: 10.113/PhysRevA.88.053633.

[学会発表](計24件)

山口辰威, 猪谷太輔, 大橋洋土, 人工ゲージ場下の冷却フェルミ原子気体におけるp波超流動実現に向けた理論解析2, 日本物理学会, 2016年3月21日, 東北学院大学(宮城県・仙台市).

山口辰威, 猪谷太輔, 大橋洋土, 人工ゲージ場下の冷却フェルミ原子気体におけるp波超流動実現に向けた理論解析, 日本物理学会, 2015年9月17日, 関西大学(大阪府・吹田市).

Daisuke Inotani, Yoji Ohashi, Parity-mixing effect in a trapped s-wave superfluid Fermi gas with broken spin-rotation symmetry, International symposium on Quantum Fluids and Solids (QFS2015), 2015年8月13, 14日, New York (USA).

Tokitake Yamaguchi, Daisuke Inotani, Yoji Ohashi, Rashbon bound states associated with a spherical spin-orbit coupling in an ultracold Fermi gas with an s-wave interaction, International symposium on Quantum Fluids and Solids (QFS2015), 2015年8月13, 14日, New York (USA).

山口辰威, 大橋洋土, スピン軌道相互作用を有する強結合フェルミ原子気体におけるp波対振幅の誘起, 日本物理学会, 2014年9月7日, 中部大学(愛知県・春日井市).

山口辰威, 大橋洋土, パリティを破った人工スピン軌道相互作用を有する冷却フェルミ原子ガス超流動における強結合効果とp波対振幅の誘起, 研究会「熱場の

量子論とその応用 J, 2014 年 9 月 3 日, 理化学研究所 (埼玉県・和光市).
松浦辰威, 大橋洋士, スピン軌道相互作用のある強結合フェルミ原子気体に対する有限温度解析, 日本物理学会, 2014 年 3 月 27 日, 東海大学 (神奈川県・平塚市).
松浦辰威, 花井亮, 田島裕之, 大橋洋士, スピン軌道相互作用のある冷却フェルミ原子気体における BCS-BEC クロスオーバー, 日本物理学会, 2013 年 9 月 25 日, 徳島大学 (徳島県・徳島市).

〔その他〕

ホームページ: 慶應義塾研究者情報総覧・理工学部物理学科・大橋洋士:
<http://k-ris.keio.ac.jp/Profiles/123/0012288/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: 60272134