

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 6 年 6 月 10 日現在

機関番号：22604

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2023

課題番号：17K14364

研究課題名（和文）トポロジカル超流動の実現可能生

研究課題名（英文）Possibility of realizing a topological superfluidity

研究代表者

吉見 恵美子（荒畑恵美子）（Yoshimi, Emiko）

東京都立大学・理学研究科・准教授

研究者番号：30706411

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、弱強度光格子BCS-BECクロスオーバー領域における弱強度光格子中のスピン軌道相互作用(SOC)をもつフェルミ原子気体超流動の実現可能生の検証、及び、その性質を解明を行った、発生する超流動がトポロジカル超流動であるか検証し、トポロジカル超流動と超伝導の関連性およびその普遍的な性質について解明した。

具体的には、弱強度光格子を利用したSOCを持つフェルミ原子気体の超流動超流動転移温度やs波超流動とp波超流動の混成比率の光強度依存性や相互作用依存性を明らかにした。また、光格子を等速運動させた場合における超流動の崩壊などの動的性質を詳細に調べ、超流動の安定性について明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、超流動がトポロジカル超流動であるか検証し、トポロジカル超流動と超伝導における普遍的な物理現象の詳細な解明を目指した。本研究では実験できる状況を念頭に置いて結果を出しているため、実験との比較が容易に出来ることから、これまで不確かであったトポロジカル量子現象について新たな解釈を与えることが期待される。

本研究で行った、超流動の崩壊といった動的性質は超流動の素励起や集団励起の性質をよく反映するが、その研究は少ない。光格子がある場合についてはスピン軌道相互作用のない超流動ですら理論的研究は不十分であり、本研究により、新奇な物理現象・性質の発見・解明につながることを期待される。

研究成果の概要（英文）：We study superfluid Fermi gasses with spin-orbit coupling (SOC) in a 1D shallow optical lattice in BCS-BEC crossover. We investigated feasibility of generating superfluidity with SOC in a 1D shallow optical lattice in BCS-BEC crossover.

In particular, We revealed the optical intensity and interaction dependence of the superfluid transition temperature with the mixing ratio of s-wave and p-wave superfluidity with SOC in a 1D shallow optical lattice in BCS-BEC crossover.

Furthermore, We investigated dynamic properties of superfluidity with SOC in a 1D shallow optical lattice in BCS-BEC crossover. Moving the optical lattice at a constant velocity, We study instability of superfluidity with SOC in a 1D shallow optical lattice in BCS-BEC crossover.

研究分野：量子エレクトロニクス

キーワード：超流動 トポロジカル

### 1. 研究開始当初の背景

レーザーによって捕捉された原子気体を nK 程度の極低温まで冷却することで、極低温原子気体の超流動が実現されている[1]。フェルミ原子気体では、対を形成し分子となることで Bose-Einstein 凝縮(BEC)が起こり、超流動現象が発生するが、フェルミ原子気体では対形成のための相互作用を容易に変えられるため、超流動の性質が超伝導に代表される BCS 理論的なものから分子ボソンの BEC の超流動へと連続的に移行する BCS-BEC クロスオーバー観測されている[2]。

さらに、極低温原子気体において、ラマン散乱過程を用いたスピン軌道相互作用(SOC)を持つ系の作成が実験的に実現され[3]、SOC を持つフェルミ原子気体の超流動、特に s 波超流動と p 波超流動の混成した超流動の実現が期待されていた

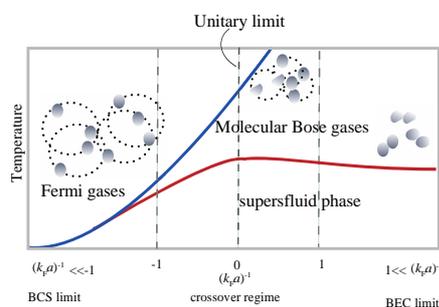


図 1 光学格子がない時の BCS-BEC クロスオーバーの相図

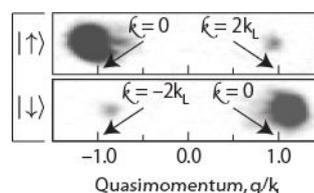


図 2 原子気体の SOC 実現の様子

[1] M. W. Zwierlein, et al., *Nature London* **435**, 1047 (2005)

[2] Y. J. Lin, K. Jimenez-Garcia, and I. B. Spielman, *Nature*, **471**, 83 (2011)

[3] K. Winkler, et al., *Nature* **441**, 853(2006)

### 2. 研究の目的

本研究では、弱強度光格子 BCS-BEC クロスオーバー領域における弱強度光格子中のスピン軌道相互作用をもつフェルミ原子気体超流動の実現可能性の検証、及び、その性質を解明することを目的としている。特に、発生する超流動がトポロジカル超流動であるか検証し、トポロジカル超流動と超伝導の関連性およびその普遍的な性質について解明することを目的とした。極低温原子気体において超流動の実現を阻む最大の原因は原子対の非弾性散乱による散逸にあるが、弱強度光格子を利用することで散逸が減少する。本研究では、この点に着目し、これまで取り組んだ弱強度光格子用シミュレータを応用することで、実験可能なパラメータを用いたトポロジカル超流動の実現可能性の検証及び新たな量子現象の探索・解明を目指した。

### 3. 研究の方法

#### (1) NSR 理論の拡張

BCS-BEC クロスオーバー領域では、超流動の性質が超伝導に代表される BCS 理論的なものから分子ボソンの BEC の超流動へと連続的に移行する。BCS-BEC クロスオーバー領域では超流動は平均場 BCS 理論を基礎とした Nozieres and Schmitt-Rink(NSR)理論で記述される。本研究では、弱光格子中の SOC を持つフェルミ原子の系に NSR 理論を拡張した。

#### (2)実験に即したパラメータを用いた、超流動密度の計算

(1)で得られた弱光格子中の SOC を持つフェルミ原子の系に拡張した NSR 理論を用い、超

流動密度について数値的に計算し超流動の実現可能性について明らかにする。特に、実験に即したパラメータを用いて数値計算を行った。

### (3) 超流動がトポロジカル超流動であるかの検証

s 波と p 波の混合超流動はトポロジカル不変量がゼロではないトポロジカル超流動である可能性がある。トポロジカル不変量が変化するときその界面(エッジ)にギャップレスモード(エッジ状態)が存在する。(2)で得られた実現性の高いパラメータにおいて、Bogoliubov-de Gennes(BdG)方程式を用いた解析を行い、エッジ状態があるか確認し、超流動がトポロジカル超流動であるか確認した。

### (4) 超流動の崩壊機構

光格子を超流動臨界速度よりも速く等速運動させることで、超流動の崩壊を誘起させることができる(図3)[3]。超流動臨界速度にはクーパー対の崩壊に起因したものと、超流動が音速を超えたために起こる Landau 不安定性(集団励起)に起因したものの二つがあり、超流動を担う原子対の性質を反映し、質的な違いが現れることが期待される。

クーパー対の崩壊に起因する超流動臨界速度を BdG 方程式から求め、低エネルギーにおける集団振動については一般乱雑位相近似による密度応答関数の計算より求めた。

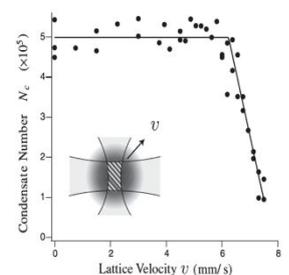


図 3 等速で光格子を動かした場合の超流動の崩壊[4]

[4] J. T. Stewart, J. P. Gaebler, and D. S. Jin, Nature **454**, 744 (2008).

## 4. 研究成果

BCS-BEC クロスオーバー領域では超流動は平均場 BCS 理論を基礎とした Nozieres and Schmitt-Rink(NSR)理論によって記述される。本研究では、弱光格子中の SOC を持つフェルミ原子の系に NSR 理論を拡張した。得られた弱光格子中の SOC を持つフェルミ原子の系に拡張した NSR 理論を用い、現在所持する計算機資源の範囲で、実験に即したパラメータを用いて数値計算を行った。SOC を持つフェルミ原子の系では s 波と p 波の混合超流動の実現が期待されるが、実験に即したパラメータを用いた数値計算の結果、s 波と p 波の混合超流動の実現の可能性があることが示された。また、この超流動はトポロジカル不変量がゼロではないトポロジカル超流動である可能性があることが示された。

光格子を超流動臨界速度よりも速く等速運動させることで、超流動の崩壊を誘起させることができる。流動臨界速度にはクーパー対の崩壊に起因したものと、超流動が音速を超えたために起こる Landau 不安定性(集団励起)に起因したものの二つがあり、超流動を担う原子対の性質を反映し、質的な違いが現れることが期待されていた

本研究では、超流動の崩壊機構から超流動の性質を探った。SOC を持つフェルミ原子の系でも、クーパー対の崩壊に起因したものと、Landau 不安定性に起因した超流動の崩壊が起こることが明らかになった。また、この二つの崩壊の他に、当初、予定されていなかった、超流動の崩壊機構が存在する可能性があることが示せた。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Rei;Hatsuda, and Emiko Arahata	4. 巻 89
2. 論文標題 Ground-state and Excitation Spectra of Bose-;Fermi Mixtures in a Three-Dimensional Optical Lattice	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 J. Phys. Soc. Jan	6. 最初と最後の頁 024601-1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.89.024601	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Yosuke Ono, Rei Hatsuda, Kenta Shiina, Hiroyuki Mori, Emiko Arahata	4. 巻 88
2. 論文標題 Three Sound Modes in a Bose-Fermi Superfluid Mixture at Finite Temperatures	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 34003
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.88.034003	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Ryohei Sakamoto, Emiko Arahata, Hiroyuki Mori	4. 巻 87
2. 論文標題 Spin Current of Fermions Induced in Spin-Orbit Coupled Bose-Fermi Mixture	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 74004
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.87.074004	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Ryohei Sakamoto, Yosuke Ono, Rei Hatsuda, Kenta Shiina, Emiko Arahata, and Hiroyuki Mori	4. 巻 86
2. 論文標題 Ground State of Bosons in Bose-;Fermi Mixture with Spin-Orbit Coupling	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 J. Phys. Soc. Jpn.	6. 最初と最後の頁 75003
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 伊藤義士, 吉見一慶, 二国徹郎, 荒畑恵美子
2. 発表標題 シミュレーションデータを教師とした機械学習によるBose原子気体超流動の温度推定
3. 学会等名 日本物理学会 第76回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 初田黎, 坂本良平, 小野洋輔, 椎名拳太, 森弘之, 荒畑恵美子
2. 発表標題 三次元光格子中ボーズ-フェルミ混合系の基底状態及び励起状態の解析II
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 荒畑恵美子, 二国徹郎
2. 発表標題 回転するBose原子気体の蒸発冷却シミュレーション
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Emiko Arahata and Tetsuro Nikuni
2. 発表標題 Formation of Vortex Lattice in Superfluid Bose Gases at Finite Temperatures
3. 学会等名 28th International Conference on Low Temperature Physics (国際学会)
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------