

令和元年6月26日現在

機関番号：32660

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K05504

研究課題名(和文) 冷却原子気体における新奇超流動現象の研究

研究課題名(英文) Novel superfluid phenomena in ultracold atomic gases

研究代表者

二国 徹郎 (Nikuni, Tetsuro)

東京理科大学・理学部第一部物理学科・教授

研究者番号：50360160

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,400,000円

研究成果の概要(和文)：極低温におけるBose超流動体、Fermi超流動気体、Bose-Fermi混合気体のダイナミクスを研究した。具体的には、トラップポテンシャル中のBose凝縮気体の集団振動における非線形効果や、量子渦生成における非凝縮体の効果を明らかにした。二次元Bose超流動体ではダークソリトンの減衰過程を調べた。Fermi超流動体においては、秩序変数の振幅が振動するHiggsモードの励起をBCS-BECクロスオーバーの全領域にわたって調べた。最後に、Bose-Fermi混合気体における集団励起を解析し、量子統計性がもたらす動的性質への効果を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

高い制御性を持ち、微視的理論と実験の定量的な比較が可能な冷却原子の研究によって、量子多体系の基礎理論に関する理解が深まることが期待される。また、冷却原子における超流動現象は電気抵抗がゼロとなる超伝導と類似した現象である。超伝導現象を利用した様々な新しい技術が開発されているが、冷却原子気体における超流動ダイナミクスを詳細に理解することにより、新しいタイプの超伝導体の開発や高温超伝導メカニズムの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 studied dynamics of ultracold quantum gases, in particular, Bose superfluids, a superfluid Fermi gas, and a Bose-Fermi mixture gas. As for the Bose superfluids, we studied nonlinear mode-coupling effects in the collective modes, effect of the thermal cloud in vortex lattice formation, decay of a dark soliton in a two-dimensional trap. As for the superfluid Fermi gas, we studied the Higgs mode associated with the amplitude oscillations of the superfluid order parameter in the entire region of BCS-BEC crossover. Finally, we studied collective excitations in a Bose-Fermi mixture gas above the superfluid transition temperature to clarify the effect of the quantum statistics on the dynamical property of the system.

研究分野：凝縮系理論

キーワード：冷却原子気体 Bose凝縮 Fermi超流動 集団励起 量子渦 ソリトン

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19(共通)

1. 研究開始当初の背景

1995年にアルカリ原子気体の Bose-Einstein 凝縮(BEC)が実現されて以来、レーザー冷却された極低温原子気体の研究は実験及び理論共に世界各国で活発に行われてきた。特に、レーザーの定在波を利用して作る周期ポテンシャル(光格子)による強相関量子気体の実現や、Feshbach 共鳴を用いた二原子分子の生成及び Fermi 原子気体による超流動の実現など、この分野での研究は急速な発展を遂げてきた。原子気体では不純物や欠陥も無く、粒子密度、外部ポテンシャル、相互作用などを自由に制御できることから、従来の物性物理学では実現し得なかった理想的な状況での量子多体系の研究が可能になってきた。さらに、系が希薄であることから実験結果と微視的理論の定量的な比較が可能である。このように高い制御性を持つ冷却原子系を理論的に研究することにより、超流動体の動的性質の理解が深まるとともに、さらに新奇な超流動現象の発見にもつながることを期待した。

2. 研究の目的

本研究では、冷却原子気体における超流動ダイナミクスを理論的に解析した。超流動気体の運動は、複素数の秩序変数(超流動秩序変数)によって特徴づけられる。特に、超流動速度場は秩序変数の位相の勾配によって与えられ、系の超流動性は速度場の非回転性によって特徴付けられる。これを反映した位相欠陥(量子渦、ソリトン)や低エネルギー集団励起は、理論的にも実験的にも精力的に研究されている。本研究では、トラップポテンシャル中の非一様な超流動原子気体における動的性質を理解し、新奇な超流動ダイナミクスを理論的に探索することを目的とした。

3. 研究の方法

本研究では(1)Bose 超流動気体 (2)Fermi 超流動気体 (3)Bose-Fermi 混合気体を対象として、それぞれの系に適した研究手法を用いることにより包括的な理論研究を展開した。(1)Bose 凝縮気体のダイナミクスを Gross-Pitaevskii(GP)方程式の数値シミュレーションにより解析した。有限温度効果については、三次元系については GP 方程式と非凝縮体の運動論方程式を結合させた Zaremba-Nikuni-Griffin 方程式を用いた。揺らぎが大きい二次元系については秩序変数の揺らぎを取り入れた Projected GP 方程式を用いた。(2)Fermi 超流動気体については時間依存 Bogoliubov-de Gennes 方程式を数値的にシミュレートした。(3)Bose-Fermi 混合気体については、線形化された Boltzmann 方程式の解析的な取り扱い(モーメント法)の定式化を行い、集団励起の解析を行った。

4. 研究成果

1. トラップされた Bose 凝縮体の実験において外部パラメータひとつのみを時間的に変化させることで複数の集団励起を同時に誘起し、モード間の非線形結合現象を観測した結果が報告された。この現象を理解するために、GP 方程式を用いた理論解析を行った。まず GP 方程式の数値シミュレーションを行い複数モードの同時励起がトラップポテンシャルの弱い異方性に起因すること、モード間の非線形結合が生じることを確認した。この非線形効果のメカニズムを理解するために、摂動論を用いた理論解析を行った。この手法では平衡状態からの揺らぎについて線形化された方程式の解を無摂動解として、非線形項(揺らぎの2次以上の項)を摂動的に扱うことにより集団励起間のモード結合の効果を取り入れることができる。この解析によって、特定のモード間に非線形結合が起こることを明らかにし、実験および数値シミュレーションにおいて観測された非線形効果を理解することに成功した。

2. Bose 凝縮気体において、熱的に励起された非凝縮気体の動的効果を取り入れた理論研究を行った。まず、Zaremba-Nikuni-Griffin 方程式を用いて蒸発冷却をシミュレートする手法を開発した。次にこの手法を、非凝縮体が回転しているという初期状態に適用し、蒸発冷却に伴って量子渦格子が自発的に形成されることを確認した。このシミュレーション結果によって、非凝縮体と凝縮体の間の角運動量の移行により量子渦が生成されつというメカニズムを明らかにし、JILA の実験グループが観測した量子渦格子生成機構を理解することができた。

3. 2次元 Bose 超流動気体におけるダークソリトンのダイナミクスを、PGP 方程式を用いた数値シミュレーションによって調べた。2次元系では強い熱揺らぎに起因するソリトンの減衰が起こることを確認した。特に、系のエネルギーに対してソリトンの寿命がべき的依存性を持つことを明らかにした。

4. Fermi 粒子系の超流動では粒子間引力相互作用によって Fermi 粒子対(クーパー対)が形成され、それらが凝縮する。冷却原子系の実験では、Feshbach 共鳴の機構を利用して原子間相互作用を制御することによって、BCS-BEC クロスオーバー(超流動の性質が弱く束縛されたクーパー対による所謂 BCS 的なものから強く束縛された分子ボソンによる BEC 的な超流動へと連続的に移行する現象)の観測が可能となっている。BCS-BEC クロスオーバー領域における Fermi

原子超流動気体の動的な振舞いとしては、超流動秩序変数の振幅が振動するモード (Higgs モード) が注目を集めている。実験的に Higgs モードを観測する方法として、S 波散乱長を Feshbach 共鳴で時間変化させる方法が提案されていた。この手法の有効性を検証するために、時間依存 Bogoliubov-de Gennes 方程式を用いて超流動秩序変数の時間発展を計算し、BCS-BEC クロスオーバー全領域において Higgs モードの振動が励起可能であることを確認した。また、Higgs モードの固有振動数や減衰の振舞いを詳細に調べた。特に、一様系に対して理論的に予言されていたべき減衰がトラップ系でも起こることを確認し、BCS 的な超流動状態から BEC 的な超流動状態への移行に伴いべき指数が連続的に変化することを見出した。また、一様系におけるシミュレーションによって、集団励起を効率的に観測するために最適な実験的パラメータを導いた。

5. 正常相 (非超流動状態) における一様な二種 Fermi 原子混合気体の集団励起を Boltzmann 方程式を用いて解析し、二成分間の粒子数インバランスや質量インバランスが集団励起に及ぼす影響を明らかにした。次に、この計算手法を Bose-Fermi 混合気体の場合に拡張し、系の統計性の違いが集団励起に及ぼす影響を明らかにした。さらに、Bose-Fermi 混合気体の調和振動子ポテンシャル中における集団振動を調べた。トラップ系に特有な固有振動として双極子振動、単極子振動、四重極振動に対する定式化を行った。特に、双極子振動については、温度や密度の変化に伴う無衝突領域から衝突領域へのクロスオーバーを解析的に導いた。

6. その他に、量子情報や機械学習との関連について研究を行なった。光格子系の量子情報への応用が注目を集めているが、本研究では量子ウォークを用いた量子探索に注目した。特に、フラクタル格子における最適な探索時間サイズ依存性 (スケーリング則) を理論的に調べた。フラクタル格子では系を特徴付ける次元が複数存在するため、どのようなスケーリング則が成立するかは自明でない。先行研究においてはスケーリング則が系のスペクトル次元に関するとの理論的予言が与えられていたが、本研究では Sierpinski carpet 上の量子探索のシミュレーションを具体的にを行い、スケーリング則が成り立っていることを確認した。また、波動関数の最大振幅と最適探索時間に関する新しいスケーリング仮説を提案した。また、近年、機械学習を用いた量子多体系へのアプローチが注目されている。本研究では冷却原子系の理論研究への機械学習の応用を目指し、Boltzmann 機械学習の高速アルゴリズムの開発を行い、その有効性を検証した。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 9 件)

- [1] Yoji Asanno, Masato Narushima, Shohei Watabe, [Tetsuro Nikuni](#), “Collective Excitations in Bose-Fermi Mixtures”, *Journal of Low Temperature Physics*, 査読有, Vol. 196, 2019, pp. 133-139
DOI: <https://doi.org/10.1007/s10909-018-2105-y>
- [2] Hiroki Ohya, Shohei Watabe, [Tetsuro Nikuni](#), “Decay of phase-imprinted dark soliton in Bose-Einstein condensate at non-zero temperature”, *Journal of Low Temperature Physics*, 査読有, Vol. 196, 2019, pp.140-146.
DOI: <https://doi.org/10.1007/s10909-019-02180-z>
- [3] Jun Tokimoto, Shunji Tsuchiya, [Tetsuro Nikuni](#), “Excitation of Higgs Mode in Superfluid Fermi Gas in BCS-BEC Crossover”, *Journal of the Physical Society of Japan*, 査読有, Vol. 88, 2019, 023601.
DOI: <https://doi.org/10.7566/JPSJ.88.023601>
- [4] Shu Tamegai, Shohei Watabe, [Tetsuro Nikuni](#), “Spatial Search on Sierpinski Carpet Using Quantum Walk”, *Journal of the Physical Society of Japan*, 査読有, Vol. 87, 2017, 085003.
DOI: <https://doi.org/10.7566/JPSJ.87.085003>
- [5] 元木大介、渡部昌平、[二国徹郎](#), “高速デシメーションアルゴリズムの開発 ~ スパース 2 パラメータボルツマンマシンをベンチマーク関数として ~”, *電子情報通信学会技術研究報告*, 査読無, Vol. 117, 2018, pp.91-95.
- [6] Masato Narushima, Shohei Watabe, [Tetsuro Nikuni](#), “Density and spin modes in imbalanced normal Fermi gases from collisionless to hydrodynamic regime”, *Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics*, 査読有, Vol. 187, 2018, 055202
DOI: [10.1088/1361-6455/aaa594](https://doi.org/10.1088/1361-6455/aaa594)
- [7] Jun Tokimoto, Shunji Tsuchiya, [Tetsuro Nikuni](#), “Higgs Mode in a Trapped Superfluid Fermi Gas”, *Journal of Low Temperature Physics*, 査読有, Vol. 187, 2017, pp.765-768.
DOI: [10.1007/s10909-017-1766-2](https://doi.org/10.1007/s10909-017-1766-2)
- [8] Takahiro Mizoguchi, Shohei Watabe, [Tetsuro Nikuni](#), “Nonlinear mixing of collective modes in harmonically trapped Bose-Einstein condensates”, *Physical Review A*, 査読有, Vol. 95, 2017, 33623.
DOI: [10.1103/PhysRevA.95.033623](https://doi.org/10.1103/PhysRevA.95.033623)

[9] Emiko Arahata, Tetsuro Nikuni, “Formation of Vortex Lattices in Superfluid Bose Gases at Finite Temperatures”, Journal of Low Temperature Physics, 査読有, Vol. 183, 2016, 191-198.
DOI: 10.1103/PhysRevA.95.033623

〔学会発表〕（計 17 件）

- [1] 田村和大, 渡部昌平, 二国徹郎, “双極子ボースハバードモデルの有限温度効果と相図”, 日本物理学会, 2019 年 3 月, 福岡県福岡市九州大学伊都キャンパス.
- [2] 佐藤嶺, 為我井脩, 渡部昌平, 二国徹郎, “量子ウォークを用いたフラクタル格子上の空間探索”, 日本物理学会, 2019 年 3 月, 福岡県福岡市九州大学伊都キャンパス.
- [3] 麻野曜司, 渡部昌平, 二国徹郎, “調和トラップ中の Bose-Fermi 混合気体に置ける集団振動の解析”, 日本物理学会, 2019 年 3 月, 福岡県福岡市九州大学伊都キャンパス.
- [4] Shohei Watabe, Shu Tamegai, Rei Sato, Tetsuro Nikuni, “Scaling Hypothesis of Spatial Search on Fractal Lattice Using Quantum Walk” APS March Meeting 2019, 国際学会, 2019 年 3 月, Boston, Massachusetts, USA.
- [5] Hiroki Ohya, Shohei Watabe, Tetsuro Nikuni, “Decay of phase-imprinted dark soliton in Bose-Einstein condensate at non-zero temperature” International Symposium on Quantum Fluids and Solids (QFS2018), 国際学会, 2018 年 7 月, 東京都東京大学.
- [6] Jun Tokimoto, Shunji Tsuchiya, Tetsuro Nikuni, “Higgs mode in a superfluid Fermi gas in the BCS-BEC crossover”, International Symposium on Quantum Fluids and Solids (QFS2018), 国際学会, 2018 年 7 月, 東京都東京大学.
- [7] Yoji Asano, Masato Narushima, Shohei Watabe, Tetsuro Nikuni, “Collective Excitations in Bose-Fermi Mixtures”, International Symposium on Quantum Fluids and Solids (QFS2018), 国際学会, 2018 年 7 月, 東京都東京大学.
- [8] Jun Tokimoto, Shunji Tsuchiya, Tetsuro Nikuni, “Higgs mode in a superfluid Fermi gas in the BCS-BEC crossover”, 49th Annual Meeting of the APS Division of Atomic, Molecular and Optical Physics APS Meeting, 国際学会, 2018 年 5 月, Ft. Lauderdale, Florida, USA.
- [9] 麻野曜司, 飯島祐樹, 成嶋優人, 渡部昌平, 二国徹郎, “Bose-Fermi 混合気体の集団励起”, 日本物理学会, 2018 年 3 月, 千葉県野田市東京理科大学.
- [10] 荒畑恵美子, 二国徹郎, “回転する Bose 原子気体の蒸発冷却シミュレーション”, 日本物理学会, 2018 年 3 月, 千葉県野田市東京理科大学.
- [11] 元木大介, 渡部昌平, 二国徹郎, “高速デシメーションアルゴリズムの開発 ~ スペース 2 パラメータボルツマンマシンをベンチマーク関数として ~”, 情報論的学習理論と機械学習 (IBISML) 研究会, 2018 年 3 月, 福岡県福岡市九州大学西新プラザ.
- [12] Jun Tokimoto, Shunji Tsuchiya, Tetsuro Nikuni, “Higgs mode in a trapped Fermi gas”, 28th International Conference on Low Temperature Physics, 国際学会, 2017 年 8 月, Gothenburg, Sweden.
- [13] Emiko Arahata, Tetsuro Nikuni, “Formation of vortex lattices in superfluid bose gases at finite temperatures”, 28th International Conference on Low Temperature Physics, 国際学会, 2017 年 8 月, Gothenburg, Sweden.
- [14] 麻野曜司, 武田陸歩, 渡部昌平, 二国徹郎, “Fermi 超流動気体の BCS-BEC クロスオーバーにおける動的密度・スピン応答関数の性質”, 日本物理学会, 2017 年 3 月, 大阪府豊中市大阪大学豊中キャンパス.
- [15] 秋山雅治, 渡部昌平, 二国徹郎, “BCS-BEC クロスオーバーにおける質量及び粒子数 Imbalance の解析”, 日本物理学会, 2017 年 3 月, 大阪府豊中市大阪大学豊中キャンパス.
- [16] 荒畑恵美子, 二国徹郎, “有限温度における超流動 Bose 原子気体の量子渦格子形成シミュレーション”, 日本物理学会, 2017 年 3 月, 大阪府豊中市大阪大学豊中キャンパス.
- [17] Jun Tokimoto, Shunji Tsuchiya, Tetsuro Nikuni, “Higgs mode in a trapped superfluid Fermi gas”, International Conference on Quantum Fluids and Solids, 国際学会, 2016 年 8 月, Prague, Czech Republic.

〔図書〕（計 0 件）

〔産業財産権〕

○出願状況（計 0 件）

○取得状況（計 0 件）

〔その他〕

ホームページ等

<https://www.rs.tus.ac.jp/~nikunigroup/>

6. 研究組織

(1) 研究分担者

なし

(2) 研究協力者

なし

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。