

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 2 日現在

機関番号：32660

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25400419

研究課題名(和文) 光格子中の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 Superfluidity in Ultracold Atomic Gases in Optical Lattices

研究代表者

二国 徹郎 (Nikuni, Tetsuro)

東京理科大学・理学部・教授

研究者番号：50360160

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,700,000円

研究成果の概要(和文)：光格子中の冷却原子気体における新奇超流動現象を理論的に研究した。Bose原子気体については、ヒッグスモードに対するポテンシャル障壁の効果調べ、ヒッグス束縛状態の存在と南部・ゴールドストーンモードのトンネル現象における非対称ピークの出現を見出した。また、スピン-1 Bose気体の量子相と素励起スペクトルの関係を明らかにした。Fermi原子気体については、カゴメ格子中において非一様な超流動状態が実現すること、蜂の巣格子中では安定なヒッグスモードが出現することを示した。

研究成果の概要(英文)：We theoretically studied novel superfluid phenomena in ultracold atomic gases in optical lattices. For Bose gases, we investigated the effect of a potential barrier, and found the existence of Higgs bound state. We also studied tuning properties of Nambu-Goldstone mode, and found asymmetric resonance peak in a tunneling probability. We also studied ground-state properties and elementary excitations in spin-1 Bose gases. For Fermi gases, we found nonuniform superfluid states in Kagome lattice, and emergence of a stable Higgs mode in Honeycomb lattice.

研究分野：原子・分子・量子エレクトロニクス

キーワード：冷却原子気体 光格子 超流動

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いる。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変えることができるので、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いる。

Fermi 原子気体の系では、Feshbach 共鳴を用いた超流動状態が実験的に実現されている。Fermi 超流動では粒子間引力相互作用によってクーパー対が形成され、それが凝縮する。Feshbach 共鳴では粒子間相互作用の強さを容易に制御できるため、Fermi 原子二つから分子ボソンが形成されるような強い相互作用を実現することも可能である。この技術によって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になった。この現象は BCS-BEC クロスオーバーと呼ばれ、電子系の超伝導においても理論的にはその可能性が調べられてはいたが、実験的には冷却原子気体において初めて実現された。

近年では特に、冷却原子気体を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)に閉じ込めた系が新しい強相関量子気体の系として注目されている。光格子はレーザーの配置やレーザーの波長、強度を変化させることによって、格子の幾何学的構造、格子間隔、格子ポテンシャル強度を自由に制御することができる。このような優れた制御性を活かすことによる、量子多体系の詳細な理解と新奇な物理現象の開拓に期待が持たれている。光格子の Bose 原子気体において、格子ポテンシャル強度を変化させることにより Mott 絶縁体相から超流動相への量子相転移が観測されている。また、光格子中の Fermi 原子気体は固体中の強相関電子系を記述する理論模型を実験的にシミュレートできる系として注目されており、光格子中の BCS-BEC クロスオーバーは高温超伝導の機構解明に大きく関わるものと考えられ注目を集めている。今まで実験的に用いられてきた光格子は一次元光格子、二次元正方格子、三次元立方格子など単純な構造のものであったが、近年、複数のレーザー光を組み合わせることで三角格子、蜂の巣格子、カゴメ格子などの多彩な格子構造を実現することが可能となった。これらの格子の幾何学的形状に起因する新奇な量子相が実現することが期待され、注目を集めている。

2. 研究の目的

以上の研究背景を念頭に、申請者がこれまでにやってきた光格子中原子気体における量子相および励起スペクトルの理論研究を更

に発展させ、光格子中の冷却原子における新奇超流動現象を理論的に調べることが本研究の目的である。Bose 系、Fermi 系それぞれについて、具体的に以下について研究を推進した。

(1) Bose 超流動気体

光格子中の多成分気体:原子種の違いや原子の内部状態(スピン)の違いを利用した多成分 Bose 気体を作ることが実験的に可能になっている。このような多成分系においては相互作用や格子ポテンシャル強度によって、一成分 Bose 気体で見られる Mott 絶縁体相、超流動相の他にペア超流動相、対向流超流動相、超固相、スピン構造を持つ超流動相など多彩な量子相が実現し得る。本研究では基底状態の量子相を決定し、得られた様々な量子相における励起スペクトルを計算した。

光格子中 Bose 気体におけるヒッグスモード:光格子中の Bose 超流動体においては、超流動秩序変数の位相の振動に起因する南部・ゴールドストーンモードの他に、秩序変数の振幅が振動することによる高エネルギー励起が存在する。このようなモードは素粒子物理学との類似により「ヒッグス」モードと呼ばれる。最近、実験的にも光格子中の「ヒッグス」モードが観測可能となっており、注目されている。本研究では Bose 系においても「ヒッグス」モードを観測できる可能性について研究した。回転する超流動 Bose 気体における量子渦格子:超流動体を回転させると、量子化された渦が発生し自発的に格子を組むことが知られている。本研究では熱的に励起された常流動成分が渦格子生成に果たす役割を研究した。

(2) Fermi 超流動気体

光格子中 Fermi 原子気体における新奇超流動:カゴメ格子など特殊な幾何学的構造を持つ格子ポテンシャル中の Fermi 気体においては、バンド構造の特異性や幾何学的フラストレーションなどの効果により新奇な超流動状態が出現する可能性がある。そこで、このような光格子中 Fermi 気体の系に BCS-BEC クロスオーバーの理論を適用し、弱結合領域から強結合領域にわたるパラメータ領域における超流動基底状態を探索する。特に、非一様な超流動状態が実現する可能性について詳しく調べた。

光格子中 Fermi 原子気体におけるヒッグスモード:超流動相における集団励起スペクトルの計算を行い、動的性質を調べる。さらに、光格子中の Fermi 超流動気体におけるヒッグスモードの観測可能性について検討した。

BCS-BEC クロスオーバー領域の Fermi 超流動気体からの粒子放出:BCS-BEC クロスオーバー領域における超流動の性質を理解

するためには、その超流動を構成する凝縮原子対が弱く束縛されたクーパー対であるか強く束縛された二原子分子であるかを特定することが重要である。本研究では原子対の性質を調べる手段として、光による原子の内部状態遷移を利用した原子対放出の方法を提案する。放出された原子対の流れ密度(DPE current)を具体的に計算した。

3. 研究の方法

(1) Bose 超流動気体

光格子中の多成分気体：スピン-1 内部自由度を持つ光格子中の Bose 気体を Bose-Hubbard 模型を用いて記述する。超流動-絶縁体相転移近傍における基底状態および励起スペクトルを、Gutzwiller 近似と呼ばれる平均場近似を用いて解析した。

光格子中 Bose 気体におけるヒッグスモード：整数充填率の超流動-Mott 絶縁体転移近傍において、Bose-Hubbard 模型から微視的に導かれる Ginzburg-Landau(GL)方程式を用いて超流動秩序変数の集団モードを解析した。

回転する超流動 Bose 気体における量子渦格子：有限温度における Bose 凝縮気体のダイナミクスを、Zaremba-Nikuni-Griffin (ZNG) 方程式によって記述する。ZNG 方程式は、凝縮体秩序変数に対する Gross-Pitaevskii 方程式と熱的に励起された非凝縮体原子に対する運動論方程式(Boltzmann 方程式)を連立させたものである。この方程式を数値的に解くことにより、有限温度における Bose 凝縮気体における量子渦格子生成のダイナミクスのシミュレーションを行った。

(2) Fermi 超流動気体

光格子中 Fermi 原子気体における新**奇超**流動：カゴメ格子中の Fermi 気体に対して BCS-Legget 理論を適用し、BCS-BEC クロスオーバーの性質を調べた。特に有限な超流動カレントが存在する場合の、非一様な超流動状態の実現可能性について詳しく調べた。

光格子中 Fermi 原子気体におけるヒッグスモード：一般化された乱雑位相近似 (GRPA)を用いて超流動相における集団励起スペクトルを計算する。特に蜂の巣格子に着目し、ヒッグスモードの観測可能性について検討した。

BCS-BEC クロスオーバー領域の Fermi 超流動気体からの粒子放出：原子の内部状態遷移を誘起する外場を摂動として、摂動論を用いて原子対の放出確率を計算した。

4. 研究成果

(1) Bose 超流動気体

光格子中の多成分気体：スピン-1 Bose-Hubbard 模型の基底状態には絶縁体

相と超流動相の両方において内部自由度に起因した多様な量子相が表れることを見出した。特に絶縁体相では、格子点あたりの平均粒子数(フィリング)が偶数であるか奇数であるかによって性質が極めて異なる状態が表れる。さらに、この系の励起スペクトルを計算した結果、絶縁体相の励起スペクトルにもフィリングの偶奇による違いが顕著に表れることを発見した。以上より、励起スペクトルを調べることが量子相の探索において有効であることを示した。

光格子中 Bose 気体におけるヒッグスモード：光格子中の超流動 Bose 気体の集団励起、特にヒッグスモードに対するポテンシャル障壁の効果調べた。その結果、障壁近傍に局在したヒッグスモードの束縛状態(ヒッグス束縛状態)が現れることを明らかにした。また、障壁に南部・ゴールドストーン (NG) モードを照射した場合のトンネル問題を考えた。その結果、NG モードとヒッグス束縛状態の結合により NG モードのトンネル確率が非対称な共鳴ピークを示すことを明らかにした。この現象は、ファノ効果として知られている現象と類似している。

回転する超流動 Bose 気体における量子渦格子：数値シミュレーションにより、回転ポテンシャルの有限温度 Bose 凝縮気体では非凝縮成分(常流動成分)が最初に角運動量を持ち、その角運動量が凝縮成分(超流動成分)に受け渡されることにより量子渦が生成されることがわかった。以上のように、量子渦生成において常流動成分が担う役割を明らかにした。

(2) Fermi 超流動気体

光格子中 Fermi 原子気体における新**奇超**流動：カゴメ格子中において有限の超流動流が存在する場合には空間的変調を伴う超流動状態が出現することを発見した。

光格子中 Fermi 原子気体におけるヒッグスモード：蜂の巣格子中では集団励起にギャップを伴う「ヒッグス」モードが安定なモードとして表れ、実験的にも十分に観測可能であることを示した。

BCS-BEC クロスオーバー領域の Fermi 超流動気体からの粒子放出：Fermi 超流動から放出された DPE current の表式を導出し、そのエネルギー依存性や角度依存性に凝縮対の性質が強く反映されることを示した。このことから DPE current の観測によって凝縮対の性質を調べることが可能であることを示した。

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7件)

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
10.1007/s10909-016-1559-z

Takeru Nakayama, Ippei Danshita, Tetsuro Nikuni, Shunji Tsuchiya, Fano resonance through Higgs bound states in tunneling of Nambu-Goldstone modes, Physical Review A, 査読有, Vol. 92, 2015, 43610
10.1103/PhysRevA.92.043610

Emiko Arahata, Tetsuro Nikuni, Theory of the Two-Particle Emission from Superfluid Fermi Gases in the BCS-BEC Crossover, Physical Review A, 査読有, Vol. 90, 2014, 53601
10.1103/PhysRevA.90.043601

T. Kaminaka, J. Sato, T. Nikuni, Exact Analysis of a One-Dimensional Weakly Repulsive Bose-Fermi Mixture, Journal of Low Temperature Physics, 査読有, Vol. 175, 2014, 287
10.1007/s10909-013-0960-0

M. Shinozaki, S. Tsuchiya, S. Abe, T. Ozaki, T. Nikuni, Elementary Excitations of Antiferromagnetic Spin-1 Bosons in an Optical Lattice, Journal of Low Temperature Physics, 査読有, Vol. 175, 2014, 236
10.1007/s10909-013-0960-0

D. Yamamoto, C. Sato, T. Nikuni, S. Tsuchiya, Flow-Induced Charge Modulation in Superfluid Atomic Fermions Loaded into an Optical Kagome Lattice, Physical Review Letters, 査読有, Vol. 110, 2013, 145304
DOI: 10.1103/PhysRevLett.110.145304

Shunji Tsuchiya, R. Ganesh, Tetsuro Nikuni, Higgs mode in a superfluid of Dirac fermions, Physical Review B, 査読有, Vol. 88, 2013, 14527
DOI: 10.1007/s10909-013-0993-4

[学会発表](計 17 件)

段下一平, 中山健, 二国徹郎, 土屋俊二, 粒子・正孔対称性が僅かに破れた超流動体の集団励起を記述する場の量子論の定式化, 日本物理学会第 71 回年次大会, 2016 年 3 月 19 日, 東北学院大学泉キャンパス (宮城県仙台市)

Emiko Arahata, Tetsuro Nikuni, Formation of Vortex Lattice in Superfluid Bose Gases at Finite Temperatures, International Symposium on Quantum Fluids and Solid, 2015 年 8 月 9 日, New York (USA)

S. Tsuchiya, R. Ganesh, T. Nikuni, Higgs mode in a superfluid of Dirac fermions, Higgs Modes in Condensed Matter and Quantum Gases, 2014 年 6 月 23 日, 京都大学基礎物理学研究所 (京都)

中山健, 段下一平, 二国徹郎, 土屋俊二 ヒッグス束縛状態を介する南部ゴールドストーンモードの非対称共鳴トンネル現象, 日本物理学会第 70 回年次大会, 2014 年 3 月 21 日, 早稲田大学早稲田キャンパス (東京)

C. Sato, H. Iramina, S. Tsuchiya, and T. Nikuni, Fermi superfluid on the Lieb lattice, International Symposium on Quantum Fluids and Solids, 2013 年 8 月 1 日, くにびきメッセ (鳥根県松江市)

M. Shinozaki, S. Tsuchiya, S. Abe, T. Ozaki, and T. Nikuni, Elementary excitations of antiferromagnetic spin-1 bosons in an optical lattice, International Symposium on Quantum Fluids and Solids, 2013 年 8 月 1 日, くにびきメッセ (鳥根県松江市)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

二国 徹郎 (NIKUNI, Tetsuro)
東京理科大学・理学部一部物理学科・教授
研究者番号: 50360160

(2) 研究分担者

()

研究者番号:

(3) 連携研究者

()

研究者番号: