

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 24 日現在

機関番号：92704

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25287104

研究課題名(和文)多成分冷却原子気体における新奇量子物性の探索

研究課題名(英文)Exploration of novel quantum phases in multi-component ultracold atomic gases

研究代表者

山下 眞 (Yamashita, Makoto)

日本電信電話株式会社 NTT 物性科学基礎研究所・量子光物性研究部・主任研究員

研究者番号：00393786

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 11,800,000円

研究成果の概要(和文)：原子のスピン自由度を利用して作成された多成分冷却原子気体が光格子中で示す新奇な量子物性を理論と実験の両面から探索した。理論的成果として、多成分系においては超流動のクーバーペア対称性や動的不安定性が成分間に働く相互作用の微妙なバランスによって著しく変化し、多様な物性の起源になっていることを解明した。一方、実験では、超伝導アトムチップ上で擬1次元的な高密度なボース凝縮体を作成し、強い量子揺らぎによって系の運動量分布が不安定になる現象を観測した。また、アトムチップ上で原子のスピン状態を制御する技術確立し、多成分ボース凝縮体を実現した。

研究成果の概要(英文)：We explore the novel quantum phases in ultracold atomic gases with the spin degrees of freedom, forming the typical many-body multi-component systems in optical lattices. We have theoretically clarified that Cooper-pairing symmetry of a fermionic superfluid and the dynamical instability of a bosonic superfluid greatly change via the subtle balance in the interactions between the atomic components. We consider such a role of interactions to be a possible origin of diverse quantum phases found in these multi-component systems. On the other hand, we have experimentally created quasi-one-dimensional Bose-Einstein condensates with high density on a persistent-supercurrent atom chip. We observe that the momentum distribution of condensates becomes fragile owing to the quantum fluctuations inherent in this low-dimensional system. We furthermore develop the experimental techniques for controlling atomic spins on an atom chip and then realize the multi-component condensates.

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 量子物性 スピン 超流動 アトムチップ 超伝導 擬一次元

1. 研究開始当初の背景

光格子中に閉じ込められた冷却原子気体はその高い制御性から量子多体効果を調べる上での理想的な物理系になっている。これまでも光格子中のボース原子気体を用いて多体効果が引き起こす典型的な量子相転移現象である超流動・モット絶縁体転移が欧米や国内の様々な研究機関で観測されている。

特に近年では、原子の持つスピン自由度や同位体などを利用して、複数の成分から構成される多成分冷却原子気体を作成し、これを光格子中に閉じ込めて、より複雑な多体効果を探る研究が大きな注目を集めている。このような原子気体では、異成分原子間に働く相互作用に起因して、多様な量子物性が光格子中で発現することが知られている。本研究グループもボース・フェルミ混合気体の混合モット絶縁体相・相分離相、SU(3)フェルミ原子気体の新奇超流動相、さらにスピン-1・ボース原子気体のスピン・ネマティック相等を解明し、多成分冷却原子気体の理論研究の進展に貢献してきた。

2. 研究の目的

(1) 実験上の制約から気体密度が希薄な領域でのみ行われてきた光格子の研究を、理論と実験とが協力して、これまで到達できなかった高密度・強相関の領域にまで進展させる。

(2) 原子のスピン自由度を利用して多成分化させた冷却原子気体が、高密度・強相関の極限的な領域において光格子中で発現する新奇な量子物性を理論主導で探索し、実験での検証を目指す。

(3) 系のエネルギー・スケールが非常に増大した高密度・強相関の領域の冷却原子気体が現状の冷却温度では実現困難な超固体相や新奇磁気秩序相といった量子物性を発現させる可能性を理論・実験の両面から探究する。

3. 研究の方法

密度・強相関という光格子系ではまだ実現されていない未開拓な領域を対象とし、研究体制として、3つの理論グループ(NTT理論、兵庫県立大学、東北大学)と1つ実験グループ(NTT実験)が互いに連携しながら、プロジェクトを進めた。以下に、理論と実験の研究手法の概要をそれぞれまとめる。

(1) 理論グループでは、単純な単一バンドのボース・ハバードモデルに加え、多成分ハバードモデル、さらに特殊な格子構造を反映した多軌道ハバードモデルに基づいて、強い相互作用と多成分自由度によって誘起される多様な量子物性や動的性質を詳細に解析する。得られた結果は実験グループにフィードバックし、実験の進展に利用する。

(2) 実験グループではボース凝縮を実現した超伝導アトムチップの実験系を改良して、高密度・強相関領域の達成に適したシステムを組み立てる。特に、高密度化に有利な擬1次元ボース凝縮体を実現するために、新しい

チップを設計・作成する。多成分化に向けては、マイクロ波やレーザー光を用いた原子スピンの状態制御法を確立する。そして、1次元光格子の導入を経て、最終的に1次元多成分ボース原子気体を実現し、その量子状態の観測を目指す。

4. 研究成果

平成25年度から平成27年度の3年間に得られた研究成果の概要を理論と実験に分けて報告する。

(1) NTT理論グループは、低密度領域に限られてはいるが、1次元光格子において、格子点での原子数が1000程度という非常に多い場合のボース凝縮体の基底状態を解析する計算手法の開発に成功した。この解析により、通常の光格子の実験条件ではまだ閉じ込めが弱く、本研究が目指している強相関の領域には達することができないことが明らかになり、高密度・強相関の領域を実現するには、本研究が提案する閉じ込めが非常に強い超伝導アトムチップと光格子を組み合わせたハイブリッド方式がきわめて有望であることが確かめられた。また、この計算手法は高密度・多成分へ拡張可能な有用な方法になっている。

(2) 兵庫県立大学グループとNTT理論グループは共同で、光格子中で斥力的に相互作用している三成分冷却フェルミ原子気体の超流動状態を動的平均場近似法と呼ばれる理論を用いて、詳細に解析した。その結果、ハーフフィリング近傍においては成分間の相互作用強度を制御すると、超流動のクーペペア対称性が拡張s波と $d_{x^2-y^2}$ 波の間で変化することを見出した。これは、三成分系では相互作用の強度バランスを通して、密度揺らぎから支配的な領域から、反強磁性的なスピン揺らぎが支配的な領域に系が遷移することに起因した現象である。多成分冷却原子気体では相互作用に起因して、多様な量子物性が出現することを明らかにした極めて重要な結果である。

(3) 東北大学グループとNTT理論グループは共同で光格子中のスピン-1の内部自由度をもつ3成分ボース原子気体の動的性質を詳細に調べた。強相関領域にも適用可能な動的グッツウィラー近似法と呼ばれる計算手法を用いて、精密な数値計算を実行した。その結果、多成分系固有の現象として、スピン混成を引き起こす原子間相互作用により、超流動の動的不安定性が格子点上の平均原子数の偶奇によって大きく変化することを見出した。また、これに付随して、強相関ボース気体が示す一般的な動的性質として、動的不安定性の前駆現象として超流動流に密度変動が発現することも明らかにした。これらの成果は、多成分ボース原子気体の動的性質に関する理解を大きく進展させるものである。

(4) 本研究課題から派生したテーマとして、最近光格子で実現されている特殊な格子構

造に注目し、これらの系を対象とした基礎理論を実験に先駆けて構築した。NTT 理論グループでは、層状 Lieb 格子中の 2 成分フェルミ原子に対して BCS 理論を展開し、フェルミ面での状態密度の発散度と超伝導・磁気転移温度の上昇とを関係づける一般的な解析式の導出に成功した。その結果、バンドエンジニアリングに基づく状態密度制御により、転移温度を大幅に増大させることが可能であることが示された。また、兵庫県立大グループは蜂の巣光格子上の冷却原子系でカタエフ・スピン液体を実現する機構が提案された事に刺激され、まず Na_2IrO_3 などの候補物質を記述するミニマルモデルの動的性質・比熱の温度依存性を調べ、マヨラナ粒子はスピン液体相近傍の磁気秩序相の励起状態においても存在する事を明らかにした。いずれの理論グループの成果も、光格子を用いた新奇量子物性探索の可能性を大きく広げるものであり、内外の実験グループから注目を集めている。

(5) NTT 実験グループは本研究課題の予備実験として、超伝導アトムチップ上に作成されたルビジウム原子のボース凝縮体に対する三体ロスの影響を詳細に調べた。実験データを NTT 理論グループによる理論解析と定量的に比較し、チップ上のボース凝縮体の量子状態を決定することに成功した。実験と理論の定量的比較を行うに際しては、外部から印加するバイアス磁場とアトムチップとのわずかな傾きなど、これまで無視されていた量を精密に求める必要があった。これには、磁場を少しずつ変化させて凝縮体の位置を測定し、これを数値シミュレーションと比較しながら傾きを決めるという困難な作業が発生したが、最終的にはすべて解決した。これらの成果は Applied Physics B 誌に掲載された。

(6) NTT 実験グループは、制御が容易で多成分化に有利な原子のスピン状態として、従来の超伝導アトムチップの実験では用いていなかった $F=1$, $mF=-1$ 状態を選択した。チップを流れる超伝導電流、印加するバイアス磁場、原子密度、蒸発冷却などの実験条件を最適化し、この新しいスピン状態におけるボース凝縮体の作成に成功した。その後、マイクロ波とラジオ波の 2 光子遷移によるスピン制御にも成功し、最終的に $F=1$, $mF=-1$ 状態と $F=2$, $mF=1$ 状態の 2 成分ボース凝縮体を超伝導アトムチップ上で実現した。

最近では、チップ上のボース凝縮体のスピン制御を高い空間分解能で実行するための実験技術の開拓にも取り組んでいる。マイクロ波とラジオ波を用いる標準的方法ではなく、2 本のレーザー光による D1 線 2 光子誘導ラマン遷移を採用して実験を行い、 $F=1$ 状態と $F=2$ 状態間のコヒーレントラビ振動の観測に初めて成功した。

(7) NTT 実験グループは原子気体の高密度化に向けた取り組みとして、一次元的な強い閉じ込め磁場ポテンシャルを発生するための

新しい超伝導アトムチップを作成した。このチップを用いて実験条件を最適化し、動径方向と軸方向のアスペクト比が 200 程度の一次元的な密度分布をもったボース凝縮体の生成に成功した。飛行時間法 (TOF) を用いたボース凝縮体の運動量分布の測定結果は、軸方向にいくつかのピークに分裂し、そのピークの大きさや形状は測定ごとに異なることが分かった。これは、3 次元の通常のボース凝縮体では見られない、擬一次元性による強い量子揺らぎを反映した実験結果である。またこれとは別の方法として、「その場観察」によるボース凝縮体の密度分布の実験データを、局所密度近似に基づく理論解析 (文献①) と比較し、一次元的な擬凝縮領域にほぼ到達していることも確認できた。TOF および密度分布の二つの測定結果からは、高密度の擬一次元的なボース凝縮体の作成に成功したと結論できる。

さらに、今後の実験指針となるように、多成分化によるラムゼー干渉を利用した量子揺らぎの時間変化測定法の提案を並行して行った。

<引用文献>

① V. Kheruntsyan, D. M. Gangardt, P. D. Drummond, and G. V. Shlyapnikov, “Finite-temperature correlations and density profiles of an inhomogeneous interacting one-dimensional Bose gas”, Physical Review A, 71 巻、2005、053615-1 ~ 053615-17

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 19 件)

① M. Yamashita, S. Kato, A. Yamaguchi, S. Sugawa, T. Fukuhara, S. Uetake, and Y. Takahashi, “Strongly interacting array of Bose-Einstein condensates trapped in a one-dimensional optical lattice”, Physical Review A, 査読有、87 巻、2013、041604-1~041604-5、DOI: 10.1103/PhysRevA.87.041604

② H. Imai, K. Inaba, H. Tanji-Suzuki, M. Yamashita, and T. Mukai, “Bose-Einstein condensate on a persistent-supercurrent atom chip”, Applied Physics B: Laser and Optics, 査読有、116 巻、2014、821~829、DOI: 10.1007/s00340-014-5768-3

③ K. Noda, K. Inaba, and M. Yamashita, “Flat-band ferromagnetism in the multilayer Lieb optical lattice”, Physical Review A, 査読有、90 巻、2014、043624-1~043624-10、DOI: 10.1103/PhysRevA.90.043624

④ S. Suga, “Controlled pairing symmetry of the superfluid state in systems of three-component repulsive fermionic atoms in optical lattices”, *Physical Review A*, 査読有、92 巻、2015、023617-1 ~023617-6、
DOI: 10.1103/PhysRevA.92.023617

⑤ T. Suzuki, T. Yamada, Y. Yamaji, and S. Suga, “Dynamical Properties of Honeycomb-Lattice Iridates Na_2IrO_3 ”, *Physical Review B*, 査読有、92 巻、2015、184411-1~184411-6、
DOI: 10.1103/PhysRevB.92.184411

⑥ R. Asaoka, H. Tsuchiura, M. Yamashita, and Y. Toga, “Dynamical instability in the $S = 1$ Bose-Hubbard model”, *Physical Review A*, 査読有、93 巻、2016、013628-1 ~013628-10、
DOI: 10.1103/PhysRevA.93.013628

[学会発表] (計 81 件)

① H. Imai, K. Inaba, M. Yamashita, and T. Mukai, “Production of a Bose-Einstein condensate on a persistent-supercurrent atom chip”, 21st International Conference on Laser Spectroscopy, 2013 年 6 月 9 日、バークレー市 (アメリカ)

② S. Suga and K. Inaba, “Pairing symmetry of superfluid state in repulsively interacting three-component fermionic atoms in optical lattices”, The International Conference on Strongly Correlated Electron Systems (SCES’13), 2013 年 8 月 7 日、東京大学 (東京都文京区)

③ 浅岡類, 榎裕太, 土浦宏紀, 山下眞, 内部自由度を持つ BEC の動的不安定性に現れる粒子数密度依存性、日本物理学会 2013 年秋季大会、2013 年 9 月 26 日、徳島大学 (徳島県徳島市)

④ 今井弘光, 稲葉謙介, 山下眞, 向井哲哉, 超伝導永久電流アトムチップにおけるボース凝縮体のスピン状態制御、日本物理学会 第 69 回年次大会、2014 年 3 月 28 日、東海大学 (神奈川県平塚市)

⑤ T. Suzuki, T. Yamada, and S. Suga, “Dynamical properties of honeycomb-lattice magnets Na_2IrO_3 ”, APS March Meeting 2015, 2015 年 3 月 4 日、サンアントニオ市 (アメリカ)

⑥ 今井弘光, 稲葉謙介, 野田数人, 山下眞, 向井哲哉, 擬 1 次元ボースガスの観測に向けた超伝導アトムチップ、日本物理学会

第 70 回年次大会、2015 年 3 月 22 日、早稲田大学 (東京都新宿区)

⑦ K. Noda, K. Inaba, and M. Yamashita, “Magnetism in the three-dimensional layered Lieb lattice: Higher transition temperatures via flat-band and Van Hove singularities”, 20th International Conference on Magnetism, 2015 年 7 月 10 日、バルセロナ市 (スペイン)

[その他]

ホームページ等

NTT 物性科学基礎研究所 量子光制御研究グループHP

<http://www.brl.ntt.co.jp/group/ryousei-g/index-j.html>

兵庫県立大学 工学部 応用物質科学科 金属物理学研究グループ 菅・鈴木研究室HP

<http://www.eng.u-hyogo.ac.jp/msc/msc11/index.html>

東北大学 工学部 応用物理学科 基礎物性物理分野HP

<http://www.apph.tohoku.ac.jp/kiso/>

新聞報道発表 (平成 26 年 3 月 14 日):

「世界最大、100 万ビット規模の量子コンピュータ実現に向けて新手法を確立～光格子中の原子すべてをもつれ合わせ計算リソースに～」

6. 研究組織

(1) 研究代表者

山下 眞 (YAMASHITA, Makoto)

日本電信電話株式会社 NTT 物性科学基礎研究所・量子光物性研究部・主任研究員

研究者番号: 00393786

(2) 研究分担者

向井 哲哉 (MUKAI, Tetsuya)

日本電信電話株式会社 NTT 物性科学基礎研究所・量子光物性研究部・主任研究員

研究者番号: 70393775

稲葉 謙介 (INABA, Kensuke)

日本電信電話株式会社 NTT 物性科学基礎研究所・量子光物性研究部・研究主任

研究者番号: 10564990

今井 弘光 (IMAI, Hiromitsu)

日本電信電話株式会社 NTT 物性科学基礎研究所・量子光物性研究部・研究員

研究者番号: 00649551

菅 誠一郎 (SUGA, Sei-ichiro)

兵庫県立大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号: 40206389

鈴木 隆史 (SUZUKI, Takafumi)
兵庫県立大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号： 40444096

土浦 宏紀 (TSUCHIURA, Hiroki)
東北大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号： 30374961

梅 裕太 (TOGA, Yuta)
国立研究開発法人物質・材料研究機構・元
素戦略磁性材料研究拠点・研究員
研究者番号： 70641231