

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 28 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究（A）

研究期間：2010 ～ 2012

課題番号：22244050

研究課題名（和文）光格子中超低温イッテルビウム原子気体を用いた量子凝縮相の研究

研究課題名（英文）Study of quantum degenerate phase using a ultracold ytterbium atomic gas in an optical lattice

研究代表者

高橋 義朗（TAKAHASHI YOSHIRO）

京都大学・大学院理学研究科・教授

研究者番号：40226907

研究成果の概要（和文）：

核スピン 5/2 を持つフェルミ同位体 ^{173}Yb による SU(6) 系フェルミモット絶縁体の生成とポメランチュク冷却法のスピン増強効果の実証、ボース・フェルミ混合系における混合モット絶縁体相の生成と同定、高次スピン対称性を持ったフェルミ・フェルミ混合系の実現、などに成功した。また、光フェッシュバッハ共鳴法を、ボース凝縮および p-波相互作用するフェルミ原子系に適用し、基底および準安定状態間の磁気フェッシュバッハ共鳴を発見した。

研究成果の概要（英文）：

We have succeeded in the creation of a SU(6) Mott insulator state using fermionic isotope of ^{173}Yb with nuclear spin 5/2, the demonstration of enhanced Pomeranchuk cooling effect, the creation of mixed Mott insulator of boson and fermion, and the Fermi-fermi mixture with high spin symmetry. In addition, we have successfully applied optical Feshbach resonance technique to a Bose-Einstein condensate and fermions with a p-wave interaction, and magnetic Feshbach resonance between the ground and metastable states were discovered.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010 年度	19,200,000	5,760,000	24,960,000
2011 年度	10,100,000	3,030,000	13,130,000
2012 年度	6,800,000	2,040,000	8,840,000
総計	36,100,000	10,830,000	46,930,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：原子・分子・量子エレクトロニクス

キーワード：量子縮退、BEC、フェルミ縮退、レーザー冷却、イッテルビウム

1. 研究開始当初の背景

1980 年代に中性原子のレーザー冷却技術が本格的に開発されて以来、様々な分野でレーザー冷却原子を用いた研究が世界的に活発

に展開されている。特に、レーザー冷却による量子縮退気体の研究の勢いはとどまることを知らぬほど進展が著しい。1995 年にアルカリ原子のボース・アインシュタイン凝縮体

(BEC) が初めて生成され、弱く相互作用するボース気体の様々な物性が明らかにされると同時に、原子レーザー等の原子光学の分野も大きく進展した。さらに、いわゆるアトムチップが開発され、BEC を量子情報処理へ利用する研究が本格的に始動している。一方、1999 年にはアルカリ原子のフェルミ縮退が生成され、2004 年には固体の超伝導状態に対応する Bardeen Cooper Schrieffer (BCS) 状態が実現され、さらに、この BCS 状態と分子の BEC が連続的に移り変わる、いわゆる BEC-BCS クロスオーバーが実現されるなど、超低温のフェルミ原子の研究も大きく進展した。

このように進展著しいレーザー冷却された極低温原子気体を用いた研究分野において、特に注目を集めている重要な研究として、光格子と呼ばれる周期的なポテンシャルに極低温原子気体を導入した系を用いた量子多体系の量子シミュレーションの研究を挙げることができる。ここで、制御性のよい量子系を用いて別の量子系をシミュレートすることを、ファインマンに倣い、量子シミュレーションと呼んでいる。光格子中の冷却原子は、格子点間のトンネリング項と格子点内での原子間相互作用項の 2 つの項からなるハバードモデルで記述されることが知られている。このハバードモデルは、遍歴磁性や異方性超伝導などの強相関電子系を記述する凝縮系物理にとって大変重要なモデルであり、光格子中の冷却原子系は、極めて制御性の良いハバードモデルの新たな実験系として、大変注目を浴びている。これまでに、アルカリ原子を用いて、ボース原子の超流動・モット絶縁体転移の観測(2002 年)、フェルミ原子の金属・バンド絶縁体・モット絶縁体転移の観測(2008 年)、さらに、自然界にはまれにしか存在しないボース・フェルミ混合系におけるフェルミ原子によるボース原子

の超流動性への影響(2006 年)、などが研究されている。

本研究代表者のグループでは、これまで主に研究の対象とされてきたアルカリ原子系ではなく、特に 2 電子系である希土類金属の イッテルビウム (Yb) 原子を対象として選び、その特徴を最大限に生かした、“Yb 原子にしかできない量子縮退研究”を推進してきた。ここで、特に、強調すべきこととして、Yb 原子のような 2 電子系原子の量子縮退の研究は、本研究代表者のグループがその重要性を世界ではじめて認識して研究を開始し、ほとんどの主要な成果を独占してきている、‘日本発’の研究分野である。本研究代表者が注目した Yb 原子の有利な特徴の一つである、多数の同位体の存在(5 種類のボソン、2 種類のフェルミオン)を生かして、これまでに全光学的方法による 3 種類のボース凝縮体および 2 種類のフェルミ縮退の生成、および 2 種類のボース・フェルミ混合、ボース・ボース混合、さらに、フェルミ・フェルミ混合、といった混合量子気体の生成にこれまでに成功している。

これら Yb 原子の量子気体は、本研究代表者のグループのみが生成に実現している系である。さらに、世界初の狭線幅遷移の高分解能光会合分光、およびそれによる全同位体間の原子間相互作用 (s 波散乱長) の決定、狭線幅遷移を用いた光 Feshbach 共鳴の実現、など、全て世界に先駆けた業績である。さらに極最近、これらの量子気体を光格子に導入することに成功し、大変注目を浴びている。光格子を用いた実験により、これまでに、1) ボース同位体の超流動・モット絶縁体転移の観測および 2) Yb 原子の大きな特徴である 10 mHz 台の超狭線幅遷移を用いた超流動・モット絶縁体転移の高分解能平均場レーザー分光、3) 光格子中でのフェルミ縮退のプロッホ

振動とその引力相互作用による抑制の観測、
4) フェルミ粒子を混合することにより誘起されたボース粒子の多重占有の直接的証拠の観測、など多くの独自の成果を得ている。

2. 研究の目的

以上を踏まえ、これをさらに飛躍的に発展させるべく、本研究により、Yb 原子を用いることにより初めて可能になる極めて特徴ある量子多体凝縮相の研究を総合的に推進することを研究目的とした。具体的には、Yb 原子量子気体を光格子に導入して、フェルミ系において、核スピン $5/2$ を持つフェルミ同位体 ^{173}Yb による $\text{SU}(6)$ 系フェルミ強相関係の研究、ボース・フェルミ混合系において、新奇量子相の生成と同定、さらに、フェルミ・フェルミ混合系において、核スピン自由度を生かした新しい高次スピン対称性を持った状態の生成、などの研究を行うことを研究項目に設定した。

また、このための研究開発として、光による原子間相互作用の制御技術である、光フェッシュバッハ共鳴法を、量子縮退した原子気体に適用する。さらに s-波相互作用だけでなく、フェルミ粒子の p-波相互作用にも応用展開する。

さらに、以上のような光格子中の各種量子縮退原子気体を、特殊光学吸収イメージングによる 2 次元光格子の超高空間分解能観測することにより直接的「その場」観察を実現することを目指した。

3. 研究の方法

まず、大量の原子数の量子縮退した Yb 原子気体を安定に光格子中に生成する技術を確認しその手法を適用して超低温の量子気体を用意する。そして、特殊光学吸収イメージングによる 2 次元光格子の超高空間分解能観測を行い、原子気体の振る舞いの測定に

適用する。また、光会合のロスの影響の少ない狭線幅光源を用意して、量子気体に光フェッシュバッハ共鳴法の応用開発を行う。さらに、ボース・フェルミ混合系でも、狭線幅光源を用意して、それを用いた異重項遷移に関する同核および異核光会合を行い、ボソンおよびフェルミオン占拠数の完全決定することによって、新奇量子相の同定を行う。また、異種フェルミ原子間の共同蒸発冷却法を駆使して超低温を実現することにより、核スピン自由度を生かした新しい高次スピン対称性を持った状態の生成を行う。また、核スピンを分離して観測することが可能な新しい手法の開発を行う。

4. 研究成果

これらの目標に向けて、まず、研究計画全体に関わる基礎的な実験技術の整備として行った、大量の原子数の量子縮退した Yb 原子気体を安定に光格子中に生成する技術の確立では、特にフェルミ原子の ^{173}Yb では、フェルミ温度の 14% の温度にまで冷却した気体を用意し、さらに 3 次元光格子にほぼ断熱的に導入することに成功した。

フェルミ系では、このようにして得られた超低温の核スピン $5/2$ を持つフェルミ同位体 ^{173}Yb による $\text{SU}(6)$ 系フェルミ強相関係モット絶縁状態を実現することに成功した。特に、ポメランチュク冷却という、液体ヘリウム 3 で知られた冷却法が、この系で、非常に効率的に働くことを見出した。また、光シュテルン・ゲルラッハ法と呼ばれる、日共鳴な円偏光の光を利用した、核スピンを分離して観測することが可能な新しい手法の開発を行い、実際、スピン成分の存在比を測定することに成功し、 $\text{SU}(6)$ および $\text{SU}(2) \times \text{SU}(6)$ 対称性の系であることを確かめた。さらに、フェルミ同位体においても、原子ロスの振る舞い等から、基底状態と準安定状態との間の磁気フェッ

シュバツハ共鳴を示唆する現象を発見した。これは、今後、異なる電子状態間のクーパ対の生成の形成により、非常に新規性の高いバーディーン・クーパー・シュリーファー状態を生成する可能性を示唆し、大変興味深い結果である。

ボース・フェルミ混合系では、狭線幅光源を用意して、それを用いた異重項遷移に関する同核および異核光会合を行い、ボソンおよびフェルミオン占拠数の完全決定を行い、ボーズ・フェルミ混合モット絶縁体、ボーズ・フェルミ相分離モット相、および種々の複合粒子形成などを確認することに成功した。

ボーズ系に対しては、異重項遷移を用いたレーザー分光により、これまで研究が困難であった、常流動/モット絶縁体クロスオーバーの振る舞いを詳細に調べた。温度が十分低温の時には、原子集団の密度は高く、2重占有の割合も大きい、温度が高くなるにつれて、2重占有の割合が減少することを、レーザー分光により明らかにすることに成功した。また、このほかにも、電子基底状態のワンドアワールス分子を直接観測する方法を確立し、光格子中で基底状態分子が約8秒という非常に長い寿命を持つことを見出した。さらに、基底状態と準安定状態との間の磁気フェッシュバツハ共鳴を、複数のボース同位体に対して発見し、それを原子間相互作用の異方性による、新しいメカニズムであることを突き止めた。174Yb ボース同位体の場合には、さらに、角運動量が2以上の状態による、形状共鳴状態が、フェッシュバツハ共鳴の閉チャンネルとなっていることを突き止めた。

光による原子間相互作用の制御技術である、光フェッシュバツハ共鳴法を、基底状態1S0から励起状態3P1への遷移を用いて、量子縮退した原子気体に適用することに成功した。具体的には、光会合共鳴に近共鳴の光

をパルス的に定在波でボース・アインシュタイン凝縮体に印加して、その原子波回折パターンの振舞いから、原子間相互作用が300nm以下のスケールで変調させることに成功していることを確認した。また、フェルミオン原子のp-波相互作用についても、これまでに我々が観測している、純長距離分子の状態を利用して、高効率な、相互作用制御を実現し、理論的計算とよい一致を得た。

さらに、特殊光学吸収イメージングによる2次元光格子の超高空間分解能観測についても、2次元系の生成、高いNAのレンズ系による吸収イメージング画像の観測、トラップ原子からの微弱発光の観測、などに成功した。

さらに発展した研究に向けて、1064nmと532nmの光格子、および直交する2つの532nmの光格子の干渉、をそれぞれ組み合わせ興味深い多重バンド構造をした光格子系を実現した。確認は、多重物質波干渉を観測することにより、行った。それぞれの光格子の強度をコントロールすることにより、様々な光格子系を準備することが可能になった。

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 16件) 査読有

①R. Inoue, S. Tanaka, R. Namiki, T. Sagawa, and Y. Takahashi, Unconditional quantum-noise suppression via measurement-based quantum feedback, Phys. Rev. Lett., 110, 163602-1-5, 2013,

(DOI:10.1103/PhysRevLett.110.163602)

②R. Yamazaki, S. Taie, S. Sugawa, K. Enomoto, and Y. Takahashi, Observation of a p-wave optical Feshbach resonance, Phys. Rev. A, Vol. 87, Issue. 1, pp. 010704-1(R)-5, 2013

(DOI:10.1103/PhysRevA.87.010704)

- ③S. Kato, R. Yamazaki, K. Shibata, R. Yamamoto, H. Yamada, and Y. Takahashi, Observation of long-lived van der Waals molecules in an optical lattice, Phys. Rev. A, Vol. 86, Issue 4, 2012, 043411-1-5 (DOI:10.1103/PhysRevA.86.043411)
- ④S. Uetake, R. Murakami, J. M. Doyle, and Y. Takahashi, Spin-dependent collision of ultracold metastable atoms, Phys. Rev. A, Vol. 86, Issue 3, 2012, 032712-1-5 (DOI:10.1103/PhysRevA.86.032712)
- ⑤S. Taie, R. Yamazaki, Seiji Sugawa & Y. Takahashi, An SU(6) Mott insulator of an atomic Fermi gas realized by large-spin Pomeranchuk cooling, Nature Physics, Vol. 8, 2012, 825-830 (DOI:10.1038/nphys2430)
- ⑥Y. Takasu, Y. Saito, Y. Takahashi, M. Borkowski, R. Ciurylo, and P. S. Julienne, Controlled Production of Sub-Radiant States of a Diatomic Molecule in an Optical Lattice, Physical Review Letters, 108(17), 2012, 173002-1-5, (DOI:10.1103/PhysRevLett.108.173002)
- ⑦S. Kato, K. Shibata, R. Yamamoto, Y. Yoshikawa, and Y. Takahashi, Optical magnetic resonance imaging with an ultra-narrow optical transition, Appl. Phys. B 108, 2012, 31-38 (DOI:10.1007/s00340-012-4893-0)
- ⑧M. Borkowski, R. Ciurylo, P. S. Julienne, R. Yamazaki, H. Hara, K. Enomoto, S. Taie, S. Sugawa, Y. Takasu, and Y. Takahashi, Photoassociative production of ultracold heteronuclear ytterbium molecules, Phys. Rev. A 84, 030702(R)-01 -05, 2011 (DOI:10.1103/PhysRevA.84.030702)
- ⑨S. Sugawa, R. Yamazaki, S. Taie, and Y. Takahashi, Bose-Einstein condensate in gases of rare atomic species, Phys. Rev. A 84, 2011, 011610-1-4, (DOI:10.1103/PhysRevA.84.011610)
- ⑩S. Sugawa, K. Inaba, S. Taie, R. Yamazaki, M. Yamashita, and Y. Takahashi, Interaction and filling-induced quantum phases of dual Mott insulators of bosons and fermions, Nature Physics, 7, 2011, 642-648, (DOI:10.1038/nphys2028)
- ⑪R. Namiki, S.-I. Tanaka, T. Takano, and Y. Takahashi, Measurement schemes for the spin quadratures on an ensemble of atoms, Applied Physics B, 105, 2011, 197-201 (DOI:10.1007/s00340-011-4717-7)
- ⑫H. Hara, Y. Takasu, Y. Yamaoka, J. M. Doyle, and Y. Takahashi, Quantum Degenerate Mixtures of Alkali and Alkaline-Earth-Like Atoms, Physical Review Letters, 106, 2011, 205304-1-4, (DOI:10.1103/PhysRevLett.106.205304)
- ⑬S. Taie, Y. Takasu, S. Sugawa, R. Yamazaki, T. Tsujimoto, R. Murakami, and Y. Takahashi, Realization of a SU(2)*SU(6) System of Fermions in a Cold Atomic Gas, Phys. Rev. Lett. 105, 2010, 190401-1-4 (DOI:10.1103/PhysRevLett.105.190401)
- ⑭R. Yamazaki, S. Taie, S. Sugawa, Y. Takahashi, Submicron Spatial Modulation of an Interatomic Interaction in a Bose-Einstein Condensate, Phys. Rev. Lett. 105, 2010, 050405-1-4 (DOI:10.1103/PhysRevLett.105.050405)
- ⑮A. Yamaguchi, S. Uetake, S. Kato, H. Ito, and Y. Takahashi, High-resolution laser spectroscopy of a Bose-Einstein,

condensate using the ultranarrow magnetic quadrupole, Transition, New J. Phys. 12, 2010, 103001-1-13
(DOI:10.1088/1367-2630/12/10/103001)

〔学会発表〕 (計 64 件)

- ① Y. Takahashi, Ultracold Ytterbium atoms in an optical lattice, Workshop on Orbital Physics in Cold Atom Systems, Institute of Physics, Chinese Academy of Science, Beijing, China, 2013/1/5
- ② Y. Takahashi, Ultracold, Ytterbium Atoms in an Optical Lattice, CUA seminar talk, MIT, Cambridge, MA, USA, 2012/5/1
- ③ Y. Takahashi, Quantum Simulation using Ultracold Ytterbium in an Optical Lattice, Yale University Seminar, Yale University, New Heaven, USA, 2012/4/30
- ④ Y. Takahashi, Quantum Simulation Using Two-Electron Atoms, Bose-Einstein Condensation 2011 Frontiers in Quantum Gases, Costa Brava, Spain, 2011/9/13
- ⑤ Y. Takahashi, Quantum Gas with SU(N) Symmetry, ULT2011, Daejeon Korea,
- ⑥ Y. Takahashi, Quantum Simulation Using Two-Electron Atoms, 26th International Conference on Low Temperature Physics (LT26), Beijing China, 2011/8/12
- ⑦ Y. Takahashi, Novel Quantum Phases of Ytterbium Atoms in an Optical Lattice, Gordon Research Conferences (Atomic Physics), West Dover, VT, USA, 2011/6/29
- ⑧ Y. Takahashi, Realization of an enlarged spin Symmetry of fermions in an atomic gas, 20th International Conference on Laser Spectroscopy ICOLS 2011, Aerzen, Germany, 2011/5/30,
- ⑨ Y. Takahashi, SU(6) Fermi system in an

optical lattice, Quantum Magnetism in Ultracold Atoms, Haifa (Israel), 2011/5/17
⑩ Y. Takahashi, Realization of an SU(6) invariant Fermi system, APS March Meeting, 2011/3/24, Dallas, USA

⑪ Y. Takahashi, Ultracold ytterbium atoms in an optical lattice, 41st Annual Meeting of the Division of Atomic Molecular and Optical Physics, 2010/5/26, Houston USA

〔図書〕 (計 4 件)

- ① S. Sugawa, Y. Takasu, K. Enomoto and Y. Takahashi, Chapter1 “Ultracold Ytterbium: Generation, Many-body Physics, and Molecules”, in Annual Review of Cold Atoms and Molecules: Vol. 1. (edited by K. W. Madison, Y. Wang, A. Maria Rey, and K. Bongs, World Scientific), 2013, p49 (p540)
- ② 田家慎太郎, 素川靖司, 山崎歴舟, 高橋義朗, 株式会社アグネ技術センター, 光格子を用いた量子シミュレーション 固体物理 <動的 光物性の新展開> 特集号, Vol. 46, No. 11, 2011, p121-p128
- ③ 植竹智, 高橋義朗, 社団法人レーザー学会, 超狭線幅遷移を用いた量子気体の高分解能レーザー分光, レーザー研究第 38 巻第 7 号「光格子時計が拓く光の新時代」特集号, 2010, p487
- ④ 素川靖司, 高橋義朗, 光格子を用いた量子シミュレーション, 応用物理第 79 巻第 2 号, 2010, p140-144,

〔その他〕

ホームページ等
<http://yagura.scphys.kyoto-u.ac.jp/research/index.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

高橋 義朗 (TAKAHASHI YOSHIRO)
京都大学・大学院理学研究科・教授
研究者番号：40226907