

研究種目：基盤研究（A）

研究期間：2006～2009

課題番号：18204035

研究課題名（和文） 量子縮退イッテルビウム原子気体の物理：多様性の新展開

研究課題名（英文） Physics of Quantum Degenerate Ytterbium Atomic Gases:  
new stage of diversity

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）：

これまで主に研究の対象とされてきたアルカリ原子系と大きく異なる、ユニークな特徴のある原子系として、イッテルビウム (Yb) 原子に着目し、Yb 原子のユニークな特徴を最大限に生かした全く新しい量子縮退系の実現と、その新たな可能性を探る研究を本格的に行おうというものである。特に、ボース・アインシュタイン凝縮体やフェルミ縮退の混合、軌道角運動量をもった準安定状態ボース・アインシュタイン凝縮体やフェルミ縮退、を対象として、「多成分混合多様量子縮退系の実現とその特異な物性解明」を研究目的とする。

研究成果の概要（英文）：

This study focuses ytterbium (Yb) atoms which are quite different from popular alkali-metal atoms so far used in most previous studies and have unique properties. The purpose of this study is to realize completely new quantum degenerate system using Yb atoms and the exploration of its new possibilities. In particular, we try to realize multi-component mixtures of various quantum degenerate systems and to reveal the novel properties by studying the mixture of Bose-Einstein condensate and Fermi degeneracy, Bose-Einstein condensates and Fermi degeneracy with the metastable states with an orbital angular momentum of Yb atoms.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	15,700,000	4,710,000	20,410,000
2007年度	7,300,000	2,190,000	9,490,000
2008年度	7,300,000	2,190,000	9,490,000
2009年度	5,800,000	1,740,000	7,540,000
年度			
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：物理学 原子・分子・量子エレクトロニクス

キーワード：量子縮退、イッテルビウム、フェルミ縮退、BEC、レーザー冷却

## 1. 研究開始当初の背景

希薄原子気体の量子縮退の研究は、約 10 年前にアルカリ金属原子のボース・アインシュタイン凝縮 (BEC) が実現されて以来非常に盛んに行われており、最近ではアルカリ金属のフェルミ原子系の研究へ展開し、急進展を遂げている。この進展著しい希薄原子気体の量子縮退の研究分野において、申請者は特に、これまで主に研究の対象とされてきたアルカリ原子系と大きく異なる、ユニークな特徴のある原子系にしか実現できない現象こそ今後の重要な研究課題となるとの認識のもと、数年前から 2 電子系である希土類金属のイッテルビウム原子 (Yb) を対象として選び、その量子縮退研究を構想してきた。Yb 原子系の大きな特徴として、1) 豊富な同位体の存在、2) 軌道角運動量をもった準安定状態の存在、があり、これは量子気体研究に様々な全く新しい可能性をもたらし得る。

本研究が開始されるまでに、申請者は Yb 原子のレーザー冷却・量子縮退の研究全般を包括的に、世界に先駆けて行ってきた。その結果現在までに、全光学的方法により  $^{174}\text{Yb}$  原子ボース凝縮体 (BEC) および  $^{173}\text{Yb}$  原子フェルミ縮退を実現し、また、 $^{176}\text{Yb}$  原子・ $^{174}\text{Yb}$  原子 BEC 混合を実現してきた。これらは 1 電子原子以外では唯一の量子縮退気体の系である。

## 2. 研究の目的

本研究においては、以上の準備的研究段階を経て、申請者がこれまで進めてきた研究全体構想の核心部分である、Yb 原子のユニークな特徴を最大限に生かした全く新しい量子縮退系の実現と、その新たな可能性を探る研究を本格的に行った。特に、「多成分混合多様量子縮退系の実現とその特異な物性解明」を研究目的とした。

## 3. 研究の方法

Yb 原子には多数の同位体がある。レーザー冷却のためのレーザー光の波長を変えたり、また 2 色にすることにより、異なる同位体を冷却したり、同時に冷却することが可能になる。また、準安定状態と基底状態の間には、非常に弱い光、光学遷移が存在する。この励起のための光源を開発することにより、軌道角運動量をもった準安定状態を生成することができる。さらに、多様な物性を調べるため、光格子中に Yb 原子を導入して研究を行った。

## 4. 研究成果

得られた成果は、以下のようなものである。(1) 多様な Yb 原子の量子縮退気体を生成することに成功した。まず、フェルミ同位体  $^{171}\text{Yb}$  に対しては、ボソン同位体  $^{174}\text{Yb}$  との光トラッ

プ中で協同冷却により  $^{171}\text{Yb}$  をフェルミ温度の 0.3 倍以下までの冷却に成功した。 $^{173}\text{Yb}$  については、6 成分のスピン状態間の衝突を利用した蒸発冷却を行い、フェルミ温度の 0.1 倍までの冷却に成功した。特に、フェルミ縮退している核スピン成分の分離観測に成功し、高スピンのフェルミ系の実現を直接観測することに成功した。

また、 $^{170}\text{Yb}$  同位体については  $10^4$  程度の原子数の BEC を生成することに成功し、また共同冷却により  $^{176}\text{Yb}$  BEC と  $^{174}\text{Yb}$  BEC の混合系を生成することに成功した。さらに、自然存在比が 0.1% 程度と極めて小さい同位体  $^{168}\text{Yb}$  についてボース・アインシュタイン凝縮体を生成することに成功した。

(2) さらに量子混合気体として、斥力相互作用する  $^{173}\text{Yb}$  原子のフェルミ縮退と  $^{174}\text{Yb}$  原子のボース・アインシュタイン凝縮の混合、さらに斥力相互作用する  $^{174}\text{Yb}$  原子のフェルミ縮退と  $^{170}\text{Yb}$  原子のボース・アインシュタイン凝縮の混合、そして、スピン自由度をもった  $^{173}\text{Yb}$  原子と  $^{171}\text{Yb}$  原子のフェルミ縮退混合を実現することができた。

(3) 光による原子間相互作用の制御、いわゆる光フェッシュバツハ共鳴の手法の開発に成功した。散乱長がもともと小さい  $^{176}\text{Yb}$  同位体および負で大きい  $^{172}\text{Yb}$  同位体を用いて、光会合の効率をモニターしながら散乱長を変化させるためのコントロール光を入射することにより、光フェッシュバツハ共鳴特有のスペクトルの観測に成功した。さらに、ボース・アインシュタイン凝縮体に対して、光フェッシュバツハ共鳴を開発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。

(4) 各種量子縮退気体を光格子に導入して、様々なハバードモデルの量子シミュレーション研究を行った。まず、 $^{174}\text{Yb}$  原子のボース・アインシュタイン凝縮体を 3 次元光格子に導入し、明瞭な干渉パターンを観測することに成功し、量子縮退 Yb 原子集団が光格子に導入できていることを確認できた。光格子のポテンシャル高さを変えて、超流動・モット絶縁体転移を観測することに成功した。さらに、引力および斥力相互作用するボース・フェルミ混合系を光格子に導入し、2 重サイト占有やボソンとフェルミオンの対占有の様子を詳しく調べた。

(5) ディッケのサブラディアント状態に対応する長寿命分子を発見した。

(6) さらに、Li-Yb の混合気体を光トラップすることに成功した。

(7) スピン 3 重項準安定状態原子間、および

スピン3重項準安定状態原子と基底状態原子との衝突特性を明らかにした。

#### 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 30 件)  
すべて査読有

- (1) T. Takano, S. Tanaka, R. Namiki, and Y. Takahashi, “Manipulation of Nonclassical Atomic Spin States”, Phys. Rev. Lett 104, 013602-1-4 (2010)
- (2) M. Okano, H. Hara, M. Muramatsu, K. Doi, S. Uetake, Y. Takasu, and Y. Takahashi, “Simultaneous magneto-optical trapping of lithium and ytterbium atoms towards production of ultracold polar molecules”, Applied Physics B 98, 691-696 (2009)
- (3) K. Shibata, S. Kato, A. Yamaguchi, S. Uetake, and Y. Takahashi, “A scalable quantum computer with an ultranarrow optical transition of ultracold neutral atoms in an optical lattice”, Applied Physics B 97, 753-758 (2009)
- (4) Y. Takasu and Y. Takahashi, “Quantum degenerate gases of ytterbium atoms”, (invited paper) J. Phys. Soc. Jpn. 78, 012001-1-11 (2009)
- (5) M. Borkowski, R. Ciurylo, P. S. Julienne, S. Tojo, K. Enomoto, and Y. Takahashi, “Line shapes of optical Feshbach resonances near the intercombination transition of bosonic ytterbium”, Phys. Rev. A 80, 012715-1-14 (2009)
- (6) M. Sato, Y. Takahashi, and S. Fujimoto, “Non-Abelian Topological Order in s-Wave Superfluids of Ultracold Fermionic Atoms”, Phys. Rev. Lett. 103, 020401-1-4 (2009)
- (7) T. Fukuhara, S. Sugawa, M. Sugimoto, S. Taie, and Y. Takahashi, “Mott insulator of ultracold alkaline-earth-metal-like atoms”, Phys. Rev. A 79, 041604(R) 1-4 (2009)
- (8) T. Fukuhara, T. Tsujimoto and Y. Takahashi “Quadrupole oscillations in a quantum degenerate Bose Fermi mixture”, Applied Physics B 96, 271-274 (2009)
- (9) T. Fukuhara, S. Sugawa, Y. Takasu, and Y.

Takahashi, “All-Optical Formation of Quantum Degenerate Mixtures”, Phys. Rev. A 79, 021601(R) 1-4 (2009)

- (10) T. Takano, M. Fuyama, R. Namiki, and Y. Takahashi, “Spin squeezing of a cold atomic ensemble with the nuclear spin of one-half”, Phys. Rev. Lett 102, 033601-1-4 (2009)
- (11) J. Kobayashi, K. Shibata, T. Aoki, M. Kumakura, Y. Takahashi, “Fictitious Magnetic Resonance by Quasi-Static Field”, Appl. Phys. B 95, 361-365 (2008)
- (12) K. Enomoto, K. Kasa, M. Kitagawa, and Y. Takahashi, “Optical Feshbach Resonance Using the Intercombination Transition”, Phys. Rev. Lett 101, 203201-1-4 (2008)
- (13) J. Kobayashi, Y. Izumi, K. Enomoto, M. Kumakura, Y. Takahashi, “Spinor Molecule in Atomic Bose-Einstein Condensate”, Appl. Phys. B 95, 37-42 (2008)
- (14) S. Uetake, A. Yamaguchi, S. Kato, T. Fukuhara, S. Sugawa, K. Enomoto, Y. Takasu, and Y. Takahashi, “Quantum Degenerate Gases of Ytterbium Atoms”, Proceedings of the 9th International Symposium on Foundations of Quantum Mechanics in the light of new technology, 9 (2008)
- (15) S. Uetake, A. Yamaguchi, D. Hashimoto, Y. Takahashi, “High-resolution laser spectroscopy of ultracold ytterbium atoms using spin-forbidden”, Appl. Phys. B 93, 409-414 (2008)
- (16) A. Yamaguchi, S. Uetake, D. Hashimoto, J. M. Doyle, Y. Takahashi, “Inelastic Collisions in Optically Trapped Ultracold Metastable Ytterbium”, Phys. Rev. Lett 101, 233002-1-4 (2008)
- (17) S. Uetake, A. Yamaguchi, S. Kato, Y. Takahashi, “High power narrow linewidth laser at 556 nm for magneto-optical trapping of ytterbium”, Appl. Phys. B 92, 33-35 (2008)
- (18) T. Takano, M. Fuyama, R. Namiki, and Y. Takahashi, “Continuous variable quantum swapping gate between light and atoms”, Phys. Rev. A 78, 010307-1-4 (2008)
- (19) A. Yamaguchi, S. Uetake, Y. Takahashi,

“A diode laser system for spectroscopy of the ultranarrow transition in ytterbium atoms”, Appl. Phys. B 91, 57-60 (2008)

(20) M. Kitagawa, K. Enomoto, K. Kasa, Y. Takahashi, R. Ciurylo, P. Naidon, and P. S. Julienne, “Two-color photoassociation spectroscopy of ytterbium atoms and the precise determinations of  $s$ -wave scattering lengths”, Phys. Rev. A 77, 012719 1-8 (2008)

(21) K. Enomoto, M. Kitagawa, S. Tojo, and Y. Takahashi, “Hyperfine-structure-induced purely long-range molecules”, Phys. Rev. Lett 100, 123001 1-4 (2008)

(22) T. Isoshima, M. Okano, H. Yasuda, K. Kasa, J. A. Huhtamaki, M. Kumakura, and Y. Takahashi, “Spontaneous splitting of a quadruply charged vortex”, Phys. Rev. Lett 99, 200403-1-4 (2007)

(23) T. Fukuhara, S. Sugawa, and Y. Takahashi, “Bose-Einstein condensation of an ytterbium isotope”, Phys. Rev. A 76, 051604-1-4 (2007)

(24) M. Takeuchi, S. Ichihara, T. Takano, M. Kumakura, and Y. Takahashi, “Spin Noise Measurement with Diamagnetic Atoms”, Phys. Rev. A 75, 063827-1-4 (2007)

(25) M. Okano, H. Yasuda, K. Kasa, M. Kumakura, and Y. Takahashi, “Splitting of a quadruply quantized vortex in the Rb Bose-Einstein condensate”, Journal of Low Temperature Physics 148, 447-451 (2007)

(26) T. Fukuhara, Y. Takasu, S. Sugawa, Y. Takahashi, “Quantum Degenerate Fermi Gases of Ytterbium Atoms”, Journal of Low Temperature Physics 148, 441-445 (2007)

(27) K. Enomoto, M. Kitagawa, K. Kasa, S. Tojo, and Y. Takahashi, “Determination of the  $s$ -Wave Scattering Length and the C6 van der Waals Coefficient”, Phys. Rev. Lett 98, 203201-1-4 (2007)

(28) T. Fukuhara, Y. Takasu, M. Kumakura, Y. Takahashi, “Degenerate Fermi Gases of Ytterbium”, Phys. Rev. Lett 98, 304012 - 1-4 (2007)

(29) M. Kumakura, T. Hirotsu, M. Okano, Y. Takahashi, and T. Yabuzaki,

“Topological Formation of a multiply charged vortex in the Rb Bose-Einstein”, Phys. Rev. A 73, 063605-1-7 (2006)

(30) S. Tojo, M. Kitagawa, K. Enomoto, Y. Kato, Y. Takasu, M. Kumakura, and Y. Takahashi, “High-resolution photoassociation spectroscopy of ultracold ytterbium atoms by using the intercombination transition”, Phys. Rev. Lett 96, 153201-1-4 (2006)

[学会発表] (計26件)

(1) Y. Takahashi, “Ultracold ytterbium in an optical lattice”, Physics and Chemistry of Coherently Controlled Quantum Systems, (Inuyama City) (2010. 3. 19)

(2) Y. Takahashi, “Quantum simulator Using ytterbium”, International Conference on Cold Ions and Atoms 2010 (ICCIA10), (Kolkata, India) (2010. 1. 18)

(3) 高橋義朗, “冷却原子を用いた凝縮系の量子シミュレーション”, 量子エレクトロニクス研究会(軽井沢) (2010. 1. 8)

(4) Y. Takahashi, “Neutral Atom Quantum Simulator and Quantum Computer”, Symposium on Physical Realizations of Quantum Information Processing and Quantum Computation, (近畿大学) (2009. 12. 21)

(5) 高橋義朗, “光格子中冷却原子を用いた量子シミュレーション”, 久保記念シンポジウム, (東京お茶ノ水) (2009. 10. 17)

(6) Y. Takahashi “Quantum Simulation Using Ytterbium Atoms”, International Workshop on Dynamics and Manipulation of Quantum Systems 2009, (Univ. of Tokyo) (2009. 10. 16)

(7) 高橋義朗, “量子スピン集団の量子ノイズ制御”, 量子ICT会議, (東京 四谷) (2009. 10. 02)

(8) Y. Takahashi, “Quantum Simulator Using Ytterbium”, International Workshop on Ultracold Group II Atoms : Theory and Applications (Maryland, USA) (2009. 9. 18)

(9) Y. Takahashi, “Quantum Degenerate

Mixtures of Ytterbium Atoms” , LENS-Tokyo Joint Workshop, (Firenze, Italy) (2009. 9. 14)

(10) Y. Takahashi, “Ultracold Ytterbium Atoms in an Optical Lattice” , International Conference on Bose-Einstein Condensation(BEC2009), (San Feliu, Spain) (2009. 9. 9)

(11) Y. Takahashi, “Ultracold Ytterbium Atoms in an Optical Lattice” , International Conference on Laser Spectroscopy(ICOLS2009) (Hokkaido) (2009. 6. 11)

(12) Y. Takahashi, “Quantum simulation and quantum interface using ultracold ytterbium” , UK-Japan Workshop on Quantum Information(the British Embassy, Tokyo) (2009. 1. 22)

(13) Y. Takahashi, “Quantum Simulation Using Ultracold Ytterbium Atoms in an Optical Lattice” , International Symposium on Physics of Quantum Technology (Nara) (2008. 11. 29)

(14) Y. Takahashi, “Quantum Degenerate Gases of Ytterbium Atoms in an Optical Lattice” , International Workshop on Dynamics and Manipulation of Quantum Systems 2008(Univ. of Tokyo) (2008. 10. 20)

(15) 高橋義朗, “冷却原子気体のスピンスケーリング” , 第3回量子ICT運営会議(メルパルク東京) (2008. 9. 30)

(16) Y. Takahashi, “Quantum Degenerate Gases of Ytterbium Atoms” , The 9th International Symposium of Foundations of Quantum Mechanics in the Light of New Technology(ISQM-TOKYO' 08) (Hatoyama, Saitama) (2008. 8. 27)

(17) 高橋義朗, “原子スピン集団の量子非破壊測定とその展開” , 第5回AMO討論会(首都大学東京) (2008. 6. 14)

(18) 高橋義朗, “原子気体のBECと量子縮退状態” , 日本物理学会第63回年次大会(近畿大学) (2008. 3. 24)

(19) Y. Takahashi, “Novel Cold Atomic Gas from ultra high resolution laser spectroscopy to scalable quantum computation” , 4th Annual Symposium Japanese - German Frontiers of Science(Shonan) (2007. 11. 4)

(20) Y. Takahashi, “Quantum Degenerate Gases of Ytterbium Atoms” , International Symposium on Physics of New Quantum Phases in Superclean Materials (PSM2007) (Gifu) (2007. 10. 30)

(21) Y. Takahashi, “High resolution laser spectroscopy of ultracold Ytterbium Atoms” , 7th CLEO Pacific Rim conference on lasers and electro-optics (Seoul, Korea) (2007. 8. 28)

(22) Y. Takahashi, “High resolution laser spectroscopy of ultracold Ytterbium” , International Conference on Laser Spectroscopy(ICOLS2007) (Telluride, Colorado, USA) (2007. 6. 28)

(23) Y. Takahashi, “High resolution laser spectroscopy of ultracold Ytterbium” , Seminar in Center for Ultracold Atom of Harvard-MIT(Cambridge, USA) (2007. 4. 3)

(24) Y. Takahashi, “Toward Quantum Simulation and Quantum Interface Using Cold Atoms” , US-Japan workshop on Quantum Information Science and Technology (Hawaii, USA) (2006. 10. 17)

(25) Y. Takahashi, “Quantum Degenerate Gases of Ytterbium atoms” , US-Japan Seminar on Quantum Electronics (Colorado, USA) (2006. 8. 24)

(26) Y. Takahashi, “Quantum Degenerate Gases of Ytterbium Atoms” , International Symposium on Quantum Fluids and Solids (Kyoto) (2006. 8. 2)

[図書] (計4件)

(1) 高橋義朗, 光学 37巻 第7号, “レーザー冷却技術とその応用” , 2008, 8

(2) 高橋義朗, オプトロニクス社, 月間オプトロニクス2008. 2 No314 連載 基礎からの

量子光学 第26回 “冷却原子を用いた量子シミュレーション” , 2008, 6

(3) 嶺重慎 高橋義朗 田中耕一郎, 京都大学学術出版会, 「光と物理学」第2章 “レーザー光で創る量子気体” , 2007, 16

(4) 高橋義朗 高野哲至, オプトロニクス社, 「量子情報通信－基礎から最前線まで－」第5部, “原子スピン集団による量子インターフェース” , 2006

〔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

<http://yagura.scphys.kyoto-u.ac.jp/>

## 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