

## 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：若手研究（A）

研究期間：2010 ～ 2012

課題番号：22684022

研究課題名（和文）多成分量子縮退気体を用いた新しい物質相の研究

研究課題名（英文）Study on novel phase in multi-component quantum degenerate gases

研究代表者

高須 洋介（TAKASU YOSUKE）

京都大学・大学院理学研究科・助教

研究者番号：50456844

研究成果の概要（和文）：

Li を Yb を用いた蒸発冷却で共同的に冷却することにより、Li と Yb の混合系を用いて、量子縮退混合系の生成に成功した。また、1064nm の波長を用いた 3 次元光格子の実験系を構築し、そこに LiYb 混合原子団を導入し、光格子の影響を観測することに成功した。また、LiYb 分子生成の手法として、基底状態 Li と準安定状態 Yb 原子間のフェシュバッハ共鳴法を用いることを提案し、3 次元光格子中での準安定 Yb 原子生成を確認した。

研究成果の概要（英文）：

We successfully obtained quantum degeneracy mixture of Li and Yb by sympathetic evaporative cooling of Li by Yb. We developed three-dimensional optical lattice system whose wavelength was 1064nm, and observed lattice effects by loading LiYb quantum degenerate mixture. We proposed new control method of new atom-atom interaction by use of Feshbach resonance between Li in the ground state and Yb in metastable excited state, and confirmed our successfully excitation to the excited state of Yb atoms in three-dimensional optical lattice.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010 年度	14,800,000	4,440,000	19,240,000
2011 年度	2,800,000	840,000	3,640,000
2012 年度	2,800,000	840,000	3,640,000
年度			
年度			
総計	20,400,000	6,120,000	26,520,000

研究分野：

科研費の分科・細目：

キーワード：量子縮退・イッテルビウム・リチウム・極低温分子

### 1. 研究開始当初の背景

近年、量子縮退原子団およびそれらの混合気体を用いた研究が実験的・理論的に盛んに行われ、特にアルカリ金属原子を用いて大きな成果を生み出されている。特に近年は、光格子と呼ばれる周期ポテンシャルに量子縮退原子団を導入した系に注目が集まっている。光格子中のフェルミ原子は固体中の電子と同様なハバード模型で記述されることが知られている。しかし、冷却原子系では、ボース凝縮原子団やフェルミ縮退原子団をそれぞれ使うことで、光格子中においてフェルミオンだけでなく、ボソンについても Mott 転移することが実験的に示された。このように冷却原子を用いた研究は、歴史的に先行する固体中の電子などを用いた研究などを模倣したのみでない。それらの系では実現・観測が困難な物理現象や新しい量子凝縮相を研究することが、近年の光技術・原子冷却技術の進歩により可能になり、物性物理学の多くの分野から大変注目を集めている。

### 2. 研究の目的

本研究の最終目標は、光格子に量子縮退領域まで冷却された Yb 原子および Li 原子を捕獲し、光会合法により YbLi 分子を生成し、その物性的研究を行うことである。特に、電子基底、振動基底、かつ回転基底状態にある YbLi 分子が実現されれば、これまでに実現されてきた、アルカリ原子種同士の極性分子と異なり、スピンを持った極性分子であり、量子スピン系の 1 つである、Lattice-spin 模型を実現することができるなど、非常に注目されている。

### 3. 研究の方法

Yb 原子団、および Li 原子団を同時に同一の光トラップに捕獲し、同時に量子縮退を実現する。原子団としては、 $^{174}\text{Yb}-^6\text{Li}$ 、 $^{173}\text{Yb}-^6\text{Li}$  を用いる。その後 3 次元光格子に導入し、光格子中の 1 つの格子に Yb 原子、Li 原子を 1 つずつ捕獲する。その後、LiYb 分子を光会合の手法で生成する。

### 4. 研究成果

(1) 量子縮退した混合原子団の生成： $^6\text{Li}-^{174}\text{Yb}$ 、 $^6\text{Li}-^{173}\text{Yb}$

希土類原子であるイッテルビウム (Yb) 原子と、アルカリ原子であるリチウム (Li) をスピン自由度を生かしたまま、フェルミ縮退を実現した。フェルミオン ( $^6\text{Li}$ )-フェルミオン ( $^{173}\text{Yb}$ ) 原子の同時フェルミ縮退では、温度は Li 原子が 220 nK でフェルミ温度の 0.07 倍、Yb 原子が 170 nK でフェルミ温度の 0.52 倍であった。また、フェルミオン ( $^6\text{Li}$ )-ボソン ( $^{174}\text{Yb}$ ) の混合系を用いて、BEC-フェルミ縮退混合系の生成にも成功した。温度は Li が 290 nK でフェルミ温度の 0.08 倍、Yb は BEC 転移温度以下の 280nK であった。アルカリ・2 電子系の混合における量子縮退の実現は、ボース凝縮・フェルミ縮退のいずれの組み合わせを含めても本研究が世界で初めての成果であり、その意義はとて高いと考えている。また、Yb と Li 原子の大きな質量比 ( $m(\text{Yb}) : m(\text{Li}) \sim 29:1$ ) を反映して、 $^6\text{Li}$  原子がフェルミ温度と比較すると、効率よく冷却され、深い縮退が得られることも、大きな利点である。

## (2) 量子縮退原子団の光格子中への導入

我々により初めて実現された Yb-Li 混合量子縮退系を光格子に導入して、その物性的な研究を行うことを計画している。混合量子縮退系はこれまでにさまざまな系で実現されているが、他の系と比較した時、Yb-Li 混合系の特徴の一つとして、Yb と Li 原子の質量比が大きい ( $m(\text{Yb}) : m(\text{Li}) \sim 29 : 1$ ) ことがあげられる。光格子中の Yb、Li 原子は、質量の違いにより、光格子のポテンシャル高さが同じでも、サイト間のホッピングが大きく異なる。そのため、Yb 原子は光格子の各サイトに局在するのに対し、Li 原子はポテンシャルの影響をあまり受けない。その大きな非対称性により、Yb-Li 混合系を用いた不純物系の研究や Falicov-Kinball 模型の研究、または Anderson Orthogonality の研究が期待されている。また、Yb 原子による Li 原子の光格子中でのさらなる冷却の可能性も提案されている。このために、1064nm の波長を用いた 3 次元光格子を新規に構築して LiYb 混合原子団を導入した。質量が重く光格子の影響を受けやすい Yb 原子を用いて、光格子の影響を観測することに成功した。以上の結果は、世界で初めての成果であり、その意義はとて高い。

## (3) Yb Li 原子間相互作用の制御に向けた準安定状態 Yb 状態の生成

アルカリ原子では、いわゆる Feshbach 共鳴が存在するため、外部磁場を制御することで、原子間相互作用を制御することができる。一方基底状態 Yb 原子にはスピンがないため、原理的に Feshbach 共鳴が存在しないと考えられてきた。しかし近年、準安定励起  $^3P_2$  状態 Yb と基底  $^1S_0$  状態 Yb との間で Feshbach 共

鳴が発見された。我々は準安定励起  $^3P_2$  状態 Yb と基底  $^2S_{1/2}$  状態  $^6\text{Li}$  との間でも同様の機構は働くと考えられ、それを用いた原子間相互作用の制御の手法を提案した。また、3 次元光格子中での準安定 Yb 原子生成を確認した。

## (4) 準安定状態の Yb<sub>2</sub> 分子の生成

3 次元光格子中の Yb 原子を用いて準安定状態の 2 原子分子の生成にも成功した。3 次元光格子中で制御された形での生成は世界で初めての成果であり、この意義はとて高いと考えている。

## 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 4 件)

1) Y. 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, Phys. Rev. Lett., 108, 2012, 173002-1-5, 査読有

(DOI:10.1103/PhysRevLett.108.173002)

2) Hideaki Hara, Yosuke Takasu, Yoshifumi Yamaoka, John M. Doyle, and Yoshiro Takahashi, Quantum Degenerate Mixtures of Alkali and Alkaline-Earth-Like Atoms, Physical Review Letters, 106, 205304-1-4, 2011, 査読有

(DOI:10.1103/PhysRevLett.106.205304)

3) M. Borkowski, R. Ciurylo, P. S. Julienne, R. Yamazaki, H. Hara, K. Enomoto, S. Taie, S. Sugawa, Y. Takasu, Y. Takahashi, Photoassociative production of ultracold heteronuclear ytterbium molecules, Physical Review A, 84, 030702 (R)-1-5, 2011,

査読有

(DOI:10.1103/PhysRevA.84.030702)

4) Shintaro Taie, Yosuke Takasu, Seiji Sugawa, Rekishu Yamazaki, Takuya Tsujimoto, Ryo Murakami, and Yoshiro Takahashi, Realization of a  $SU(2)*SU(6)$  System of Fermions in a Cold Atomic Gas, Physical Review Letters, 105, 2011, 190401-1-4, 査読有

(DOI:10.1103/PhysRevLett.105.190401)

[学会発表] (計 12件)

1) 渡邊俊介、田家慎太郎、中村悠介、高須洋介、高橋義朗, Yb フェルミ原子における磁気フェッシュバツハ共鳴, 日本物理学会第 68 回年次大会, 2013年03月27日, 広島大学(広島県)

2) 小西秀樹, 原秀明, 中島秀太, 高須洋介, 高橋義朗, 冷却 Yb-Li 原子混合系の光格子の開発, 日本物理学会第 68 回年次大会, 2013年03月27日, 広島大学(広島県)

3) 高須洋介, High resolution photoassociation spectroscopy of ultra-cold Yb atoms for testing the square inverse law of the gravity, GCOE シンポジウム「創発性豊かな分野の開拓」, 2013年02月13日, 京都大学百周年時計台記念館(京都府)

4) 原秀明、小西秀樹、中島秀太、高須洋介、高橋義朗, Towards Quantum Simulation using Ultracold Yb-Li Mixture in an Optical Lattice, GCOE シンポジウム「創発性豊かな分野の開拓」, 2013年02月13日, 京都大学百周年時計台記念館(京都府)

5) Y. Kikuchi, H. Yamada, K. Takahashi, Y. Takasu, and Y. Takahashi, High resolution photoassociation spectroscopy of Yb dimmers, The 5th International workshop on

ultracold group II atom, 2012年10月11日, NICT(東京都)

6) S. Nakajima, H. Hara, H. Konishi, Y. Takasu, and Y. Takahashi, Quantum simulation of doped superconductors using ultracold Yb-Li mixtures, 最先端研究開発プログラム 量子情報処理プロジェクト夏期研修会 2012~量子情報未来テーマ開拓研究会~, 2012年08月12日・2012年08月15日, ホテルブリーズベイマリーナ(沖縄県)

7) 原秀明、高須洋介、中島秀太、小西秀樹、John M. Doyle、高橋義朗, アルカリ原子とアルカリ土類様原子の同時量子縮退の実現, 日本物理学会, 2011/9/24, 富山大学

8) 山田裕貴、高橋走、菊池悠、高須洋介、榎本勝成、安東正樹、高橋義朗, 極低温イッテルビウム原子の超精密光会合分光とその重力逆二乗則の検証への応用, 日本物理学会, 2011/9/24, 富山大学

9) 高須洋介, Quantum degenerate mixture of alkali and alkaline-earth-like atoms, BEC 2011, 2011/9/12, イタリア Saint Feliu, 高須洋介, イッテルビウム原子ボース・アインシュタイン凝縮の実現, 日本物理学会(招待講演), 2011/9/22, 富山大学

10) Y. Takasu, Y. Saito, Y. Takahashi, Observation of Yb<sub>2</sub> molecules in metastable subradiant state, Quantum Control Conference on Ultracold Atoms and Molecules, 2011/01/24-26, 東京大学

11) 高須洋介 他, スピン自由度を持つフェルミ縮退混合気体実現に向けた調停音 Yb-Li 今後歌いの生成, 特定領域研究「光-分子強結合反応場の創成」および学術領域研究「半導体における動的相関電子系の光科学」合同シンポジウム, 2010/05/27-28, 日本科学未来館(東京)

12) Yosuke Takasu, Ultracold Diatomic

Molecules, Ultracold Fermi gas: Superfluidity and Strong-Correlation (招待講演), 2010/05/13, 日本原子力研究開発機構システム計算科学センター (東京)

[図書] (計 1 件)

S. Sugawa, Y. Takasu, K. Enomoto and Y. Takahashi, World Scientific, Chapter1 “ Ultracold Ytterbium: Generation, Many-body Physics, and Molecules”, in Annual Review of Cold Atoms and Molecules: Volume 1. (edited by K. W. Madison, Y. Wang, Ana Maria Rey, and K. Bongs, 2013, 49 頁 (全 540 頁))

[その他]

ホームページ等

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

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

高須 洋介 (TAKASU YOSUKE)

京都大学・大学院理学研究科・助教

研究者番号: 50456844

### (2) 研究分担者

なし

### (3) 連携研究者

なし