

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 24 日現在

機関番号：63903

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2016

課題番号：15K17730

研究課題名(和文) ボーズ・アインシュタイン凝縮体における電気双極子相互作用ダイナミクスの観測と制御

研究課題名(英文) Observation and control of dynamics under electric dipole-dipole interaction in a Bose Einstein condensate

研究代表者

武田 俊太郎 (TAKEDA, Shuntaro)

分子科学研究所・光分子科学研究領域・助教

研究者番号：80737304

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：レーザー冷却で実現される量子縮退気体は、現実の物質が持つ物性の起源をシミュレートしたり、新規な量子多体現象を探るための有益な量子系である。本研究ではまず、量子縮退気体として、ルビジウム原子集団のボーズ・アインシュタイン凝縮体の生成に成功した。この原子集団をパルス光により Rydberg状態へと励起することで、原子が互いの電気双極子により強く相互作用し合う量子縮退気体を作り出すことに成功し、その相互作用の下での時間発展を観測することにも成功した。

研究成果の概要(英文)：Quantum degenerate gases generated by laser cooling are useful quantum systems for simulating origins of physical functionalities in real materials and finding novel quantum many-body phenomena. In this project, we first succeeded in generating a Bose-Einstein condensate of rubidium atoms. Pulsed laser excitation of these atoms to Rydberg states lead to a quantum degenerate gas in which atoms strongly interact with each other through their electric dipoles. We also succeeded in observing dynamics of the gas under the interaction.

研究分野：原子物理学

キーワード：冷却原子 レーザー冷却 ボーズ・アインシュタイン凝縮体 リュードベリ原子 ポンプ・プローブ法

## 1. 研究開始当初の背景

レーザー冷却の技術により原子集団を高密度・低温にすることで生成されるボース・アインシュタイン凝縮体 (BEC) は、多数の原子が全て同時に運動量ゼロの基底状態に凝縮した状態である。この BEC は超伝導・超流動の基本メカニズムを含むと同時に、量子コンピューターなどの情報処理にも応用できる貴重な物理系である。近年の BEC の研究では、運動量のような外部自由度に加えて、内部自由度によって原子間が相互作用を持つ BEC が新規な物理現象や量子相を示すことが明らかになってきた。例えば、原子のスピンの自由度による磁気双極子相互作用を持つ BEC では、スピンの空間構造の形成や BEC の回転・崩壊などの興味深い現象が理論や実験により示されている。

一方、磁気双極子の代わりに電気双極子による相互作用 (双極子-双極子相互作用やファンデルワールス相互作用) を持つ BEC も考えられる。原子間にそのような相互作用を誘起するには、光により各原子の最外殻電子 1 個を高い主量子数  $n$  の準位に励起する (Rydberg 状態) 方法がある。この方法で BEC に相互作用を誘起する場合の利点は、励起光の制御により励起準位を選ぶことで、相互作用の向きや強さを能動的に制御できること、かつその相互作用の強さを磁気双極子のものより数倍以上大きくできることである。

しかし、BEC が内部で強い相互作用を持つほど高密度に Rydberg 状態へと励起する手法はこれまでなかった。この原因は、「Rydberg ブロッキング」という機構で高密度の励起が妨げられるからである。このメカニズムは以下の通りである。まず図 1(a) のように、従来の BEC の励起実験 [Phys. Rev. Lett. **100**, 033601 (2008), Phys. Rev. Lett. **107**, 060402 (2011)] では、BEC を連続波レーザーで励起する。この場合、ある原子が光に共鳴して Rydberg 状態へ励起されると、励起原子が周囲の原子のエネルギー準位を変化させ、周囲の原子は励起されなくなる。この結果、実際に Rydberg 状態に励起される原子は BEC の原子集団のごく一部となり、強い相互作用は現れない。

## 2. 研究の目的

本研究では、従来のように連続波レーザーではなく、図 1(b) のようにパルスレーザーにより BEC を励起するという手法でこの問題を回避する。パルスレーザーを用いた場合、励起光は広い周波数スペクトルを持つため、エネルギー準位がシフトした原子も光に共鳴し、Rydberg 状態へ励起される。この結果、Rydberg ブロッキングを回避して高密度での励起が可能になる。近年、申請者の所属グループでは、冷却原子集団をパルス光で Rydberg 状態へ励起し、その多体相互作用の観測に成功している [Takei *et al.*, Nature

Communications **7**, 13449 (2016)]。本研究ではこの手法を応用し、制御性が高く強い相互作用を持つ新しい量子縮退系を実現すると共に、その量子縮退系に特有の相互作用ダイナミクスを調べることを目的とする。

本研究で実現する制御性の高い相互作用 BEC 系は、励起電子の特殊なエネルギー準位構造や時空間分布の形成・超固体等の未解明の量子相など、新たな物理現象を示す可能性があり、量子縮退系の理解を深める上で大きな意義を持つ。また、超伝導や磁性などの量子多体効果がどのような相互作用の下で現れるかを解き明かすための多体シミュレート系としても有益である。さらに、本研究で確立される励起・観測・制御の一連のテクノロジーは、BEC やその他の冷却原子集団における多体エンタングルド状態の生成・量子コンピューティングなど、量子情報処理へも応用可能であると期待される。

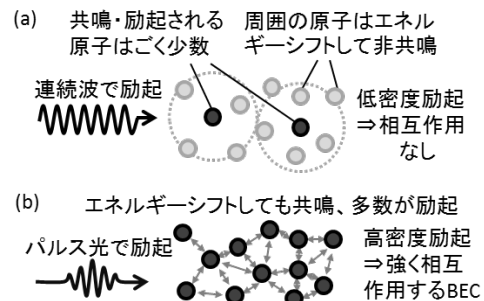


図 1 BEC の Rydberg 状態への励起。

## 3. 研究の方法

(1) まず、パルス光励起による新手法で、BEC を強く相互作用する Rydberg 状態へと励起した「新しい量子縮退系」が生成できることを確認する。さらに、パルス光励起から観測までの時間をスキャンすることで、相互作用による非平衡な状態変化を追う。原子集団の BEC への転移温度前後でこの測定を行えば、相転移後に相転移前にはない電子の特異的振る舞い (エネルギー準位の変化やデコヒーレンス) が見えると予測される。この振る舞いを理論・実験の両面から解明することで、量子縮退系のより深い理解へとつなげる。

(2) 光による相互作用の制御性を実証し、新しい BEC 系の応用可能性を明らかにする。(1) の励起手法では、光パルスにより励起準位を選択し、励起電子の空間的広がり (波動関数) を変化させることで、原子同士の相互作用の向きや強さが自在に制御できる。この高い制御性を実証することで、今回の BEC 系が、様々な相互作用を設計し、その下での量子現象を探索できる有益な物理系であることを示す。このため、まずパルスの波長により励起準位の主量子数  $n$  を変化させ、相互作用の距離依存性や強さを制御する。さらに、励起準位以外の量子数も制御することで励起電子の空間分布を変化させ、相互作用の角度依存性も

制御可能であることを示す。

#### 4. 研究成果

##### (1) 原子集団の準備

本研究の開始時、研究のターゲットとなるルビジウム原子の BEC の生成装置は保有しておらず、磁気光学トラップ中でルビジウム原子を捕獲する装置のみが準備できていた。そこで、磁気光学トラップ中の原子集団をさらに冷却・高密度化して BEC を生成するため、新たに光双極子トラップの実験系を構築した。この結果、全光学的手法を用いて研究グループ初となるルビジウム原子の BEC を生成することに成功した。初の BEC 観測から徐々に実験系及び生成手法を改善し、最終的に原子数約 4 万個で純度が 100% に近い BEC を安定して生成できるに至った。原子数・純度ともに、本研究で利用するに十分な質と言える。また、この BEC の生成プロセスにおいてルビジウム原子を単一のスピン状態に準備し ( $F=1$ ,  $m_F=+1$ )、さらにマイクロ波を用いて Rydberg 状態への励起の初期状態となる別のスピン状態 ( $F=2$ ,  $m_F=+2$ ) へ遷移させることにも成功した。以上により、BEC の Rydberg 励起の準備は整ったことになる。この結果を、2015 年 6 月の Gordon Research Conference: Atomic Physics におけるポスター発表、及び 2016 年 3 月の日本物理学会第 71 回年次大会における口頭発表にて報告した。

BEC 特有の量子現象を調べるためには、BEC ではない別の原子集団で起こる現象との比較実験が必要となる。比較対象としては、原子の密度や温度が近く、かつ原子が規則的に配列した光格子中の原子集団が適切であると考えられた。このため、BEC をレーザーの定在波が作る光格子ポテンシャル中に導入する実験系を新たに組み立てた。さらに、原子の光格子への導入プロセスを工夫することにより、原子を光格子の各格子点に 1 個ずつ、格子欠陥なく導入することに成功した。これらの結果を、2017 年 3 月の日本物理学会第 72 回年次大会における口頭発表にて報告した。

##### (2) Rydberg 励起実験

真空チャンバー内で生成した BEC は、光パルスによって Rydberg 状態へと励起される。この Rydberg 状態の原子は電場を印加すると容易にイオン化することができる。そこで、真空チャンバー内に電場を印加する電極と、イオンを検出するマイクロチャネルプレートを実験系に導入した。これにより、Rydberg 状態の原子を検出できるようになり、Rydberg 状態へ励起後の原子集団の時間発展を調べることができる。今回、この Rydberg 原子検出系を設計して新たに真空装置に導

入した。試みに磁気光学トラップ中のルビジウム原子集団を Rydberg 状態へと励起した後、イオン化して検出を行い、測定系が正しく動作することを確かめた。

前の(1)で準備した BEC および光格子中の原子集団を光パルスで Rydberg 状態へと励起して原子間相互作用を誘起し、その非平衡ダイナミクスを調べた。BEC と光格子中の原子集団を比較した結果、励起直後にこれら 2 つは異なるダイナミクスを示した。また、光パルスの波長を制御して Rydberg 状態の主量子数を変えて相互作用強度を変化させると、ダイナミクスも変わることが分かった。現在、理論モデルによりこれらの現象の理解を進めている。

原子集団が Rydberg 状態へと励起され、相互作用を始めた後に、どのように時間発展するかを理論的に考察した。Rydberg 原子同士がイジング型に似たハミルトニアンで相互作用するモデルを立て、それを原子間距離がランダムな多体系に適用すると、研究グループの過去の実験の観測データ [Takei *et al.*, *Nature Communications* 7, 13449 (2016)] が説明できることが分かった。さらに、光格子中のように原子が規則正しく配列した多体系では、ランダムな系とは異なる時間発展を示すことが分かった。これらの理論研究の成果を、論文で発表した [Sommer *et al.*, *Review A* 94, 053607 (2016)]。

#### 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 1 件)

1. Christian Sommer, Guido Pupillo, Nobuyuki Takei, Shuntaro Takeda, Akira Tanaka, Kenji Ohmori, and Claudiu Genes, "Time-domain Ramsey interferometry with interacting Rydberg atoms", *Physical Review A* 94, 053607 (2016), 査読有, 10.1103/PhysRevA.94.053607

[学会発表](計 10 件)

【国際学会】

1. Akira Tanaka, Shuntaro Takeda, Nobuyuki Takei, Christian Sommer, Michiteru Mizoguchi, Kuniaki Koyasu, Claudiu Genes, Guido Pupillo, Matthias Weidemüller, Hisashi Chiba, and Kenji Ohmori, "Ultra-high vacuum system for probing many-body dynamics of Rydberg wave-packets in an optical lattice", 1st International Symposium on Advanced Photonics, April 13, 2016, ホテル九重(静

岡県浜松市)

2. Michiteru Mizoguchi, Shuntaro Takeda, Akira Tanaka, Nobuyuki Takei, Christian Sommer, Kuniaki Koyasu, Claudiu Genes, Guido Pupillo, Hisashi Chiba, Matthias Weidemüller, and Kenji Ohmori, "All-optical generation of a  $^{87}\text{Rb}$  Bose-Einstein condensate for probing many-body dynamics of Rydberg wave-packets in an optical lattice", 1st International Symposium on Advanced Photonics, April 13, 2016, ホテル九重(静岡県浜松市)

3. Michiteru Mizoguchi, Shuntaro Takeda, Akira Tanaka, Nobuyuki Takei, Christian Sommer, Kuniaki Koyasu, Haruka Goto, Claudiu Genes, Guido Pupillo, Hisashi Chiba, Matthias Weidemüller, and Kenji Ohmori, "All-optical generation of a  $^{87}\text{Rb}$  Bose-Einstein condensate to be transformed into a defect-free Rydberg crystal in an optical lattice", OIST Mini Symposium "Rydberg Atoms for Quantum Technologies", March 3, 2016, OIST(沖縄県国頭郡)

4. Shuntaro Takeda, Akira Tanaka, Nobuyuki Takei, Christian Sommer, Claudiu Genes, Guido Pupillo, Haruka Goto, Kuniaki Koyasu, Hisashi Chiba, Matthias Weidemüller, and Kenji Ohmori, "Ultrafast many-body electron dynamics of ultracold Rydberg atoms in disordered and ordered systems", Gordon Research Conference: Atomic Physics, June 17, 2015, Newport (United states)

5. Akira Tanaka, Shuntaro Takeda, Nobuyuki Takei, Christian Sommer, Quynh Nguyen, Kuniaki Koyasu, Claudiu Genes, Guido Pupillo, Matthias Weidemüller, Hisashi Chiba, Ryuji Yokogawa, Ryota Iino and Kenji Ohmori, "Towards observation of Rydberg wave-packet dynamics in an optical lattice", Gordon Research Conference: Atomic Physics, June 17, 2015, Newport (United states)

#### 【国内学会】

6. 武田俊太郎, 田中陽, 溝口道栄, 武井宣幸, Christian Sommer, 子安邦明, 千葉寿, 大森賢治, "超高速量子シミュレーターの実現に向けた  $^{87}\text{Rb}$  原子の unit filling モット絶縁体の生成", 日本物理学会第 72 回年次大会, 2017 年 3 月 19 日, 大阪大学(大阪府・豊中市)

7. 田中陽, 溝口道栄, 武田俊太郎, 武井宣幸, Christian Sommer, 子安邦明, 千葉寿, 岸本哲夫, 大森賢治, "超高速量子シミュレーターの実現に向けた光格子中の  $^{87}\text{Rb}$  原子の超流動 モット絶縁体相転移の観測", 日本物理学会第 72 回年次大会, 2017 年 3 月 19 日, 大阪大学(大阪府・豊中市)

8. 溝口道栄, 武田俊太郎, 田中陽, 武井宣幸, Christian Sommer, 子安邦明, 千葉寿, 大森賢治, "光格子中における  $^{87}\text{Rb}$  原子集団の超流動 モット絶縁体転移点を横切るクエンチダイナミクス", 日本物理学会第 72 回年次大会, 2017 年 3 月 19 日, 大阪大学(大阪府・豊中市)

9. 武田俊太郎, 田中陽, 武井宣幸, Christian Sommer, 溝口道栄, 子安邦明, 千葉寿, 大森賢治, "3 ビーム交差型光双極子トラップを用いた全光学的手法による  $^{87}\text{Rb}$  原子の BEC 生成", 日本物理学会第 71 回年次大会, 2016 年 3 月 21 日, 東北学院大学(宮城県・仙台市)

10. 田中陽, 武田俊太郎, 武井宣幸, Christian Sommer, 溝口道栄, 子安邦明, 千葉寿, 大森賢治, "光格子中のリユードベリ原子集団の超高速多体ダイナミクスの観測を目指した超真空装置の開発", 日本物理学会第 71 回年次大会, 2016 年 3 月 21 日, 東北学院大学(宮城県・仙台市)

【図書】(計 0 件)

【産業財産権】

出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

【その他】

・1 サイト 1 原子で格子欠陥のない光格子(unit filling Mott 絶縁体)の生成について、以下のページで報告した。  
"Rb 原子の unit-filling Mott 絶縁体の生成に成功", 2016 年 12 月 28 日  
[https://groups.ims.ac.jp/organization/ohmori\\_g/unitfilling.html](https://groups.ims.ac.jp/organization/ohmori_g/unitfilling.html)

・BEC の光格子への導入(Mott 絶縁体の生成)について、以下のページで報告した。  
"3 次元光格子中での超流動 Mott 絶縁体量子相転移の観測に成功", 2016 年 7 月 25 日  
[https://groups.ims.ac.jp/organization/ohmori\\_g/lattice.html](https://groups.ims.ac.jp/organization/ohmori_g/lattice.html)

・BEC の生成について、以下のページで報告した。

“All-optical BEC in Okazaki, Japan”,  
2016年6月8日

<https://ucan.physics.utoronto.ca/News/report.2015-06-08.8920876916/view>

“全光学的手法による Rb 原子のボーズアインシュタイン凝縮の生成に成功”, 2016年6月8日

[https://groups.ims.ac.jp/organization/ohmori\\_g/bec.html](https://groups.ims.ac.jp/organization/ohmori_g/bec.html)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

武田 俊太郎 (TAKEDA, Shuntaro), 分子科学研究所・光分子科学研究領域・助教, 研究者番号: 80737304

### (2) 研究分担者

なし

### (3) 連携研究者

なし

### (4) 研究協力者

なし