

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 8 日現在

機関番号：32601

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2016

課題番号：26610126

研究課題名(和文) 極低温 Rydberg 原子を用いた低周波帯単一光子源の開発

研究課題名(英文) Development of low-frequency single photon source using cold Rydberg atoms

研究代表者

前田 はるか (Maeda, Haruka)

青山学院大学・理工学部・教授

研究者番号：80260199

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、THz～サブ GHz 領域の低周波帯において動作する準波長可変単一光子源の可能性を追求することを目的とする。これを遂行するための独自の戦略として、磁気光学トラップ(MOT)中に蓄えた極低温 Rydberg ガスに特徴的に出現するダイポールブロック効果を利用する方法を目標とし、これを目標とし、ダイポールブロック効果創出のためのレーザーシステムの開発及びMOTの改良を行い、それに成功した。同時に、低温或いは常温 Rydberg原子ガス超放射を利用した低周波光の生成実験を行い、Rydbergガスが低周波光源として利用できることを実証した。その他Rydberg原子の新しい生成法を開発した。

研究成果の概要(英文)：The purpose of the present research is to develop a quasi-frequency-tunable, low-frequency single-photon source. In an effort to realize such a novel photon source, we aim to prepare a single cold Rb Rydberg atom inside a Fabry-Perot cavity in the magneto-optical trap (MOT). It is well known that dipole blockade effect allows us to excite a single cold Rydberg atom in the MOT, and intense, single mode 480-nm tunable laser system is required to do so for cold Rb atoms in the MOT. In the present experiment we have constructed 480-nm laser system. Furthermore, we have designed a Fabry-Perot cavity for driving transitions between Rydberg states to produce a low-frequency single photon.

At the same time, we have observed low-frequency superradiance which is emitted from the the Rb Rydberg atoms in a gas cell. In addition, a new method of exciting Rydberg has been developed.

研究分野：物理学

キーワード：Rydberg 原子 単一低周波光子 ダイポールブロック効果

1. 研究開始当初の背景

極低温にレーザー冷却された原子を波長可変レーザーにより励起することで生成される Rydberg 原子の集団は極低温 Rydberg ガス [1,2] などと呼ばれ、双極子双極子相互作用或いは van der Waals 力に起因する原子間長距離相互作用が系の物理的性質を大きく左右する興味深い量子多体系である。特に、この系に対して狭帯域共鳴レーザーを照射した時に、隣接する原子のうちたった一つの原子のみが Rydberg 状態に励起される Rydberg ダイポールブロケード現象 (図 1 参照) [3,4] は長距離双極子双極子相互作用の顕れの端的な例であり、これを利用した制御 NOT ゲートの可能性が示唆 [5]されて以降、多数の研究の対象となっているという背景があった。

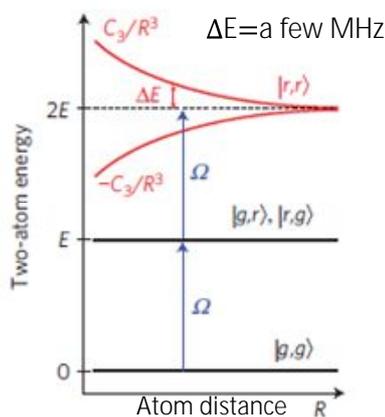


図 1 Rydberg ブロケード [4]

2. 研究の目的

本研究では、THz ~サブ GHz 領域の低周波帯において動作する準波長可変単一光子源の可能性を追求することを目的とする。これを遂行するための独自の戦略として、磁気光学トラップ (MOT) 中に蓄えた極低温 Rydberg ガスに特徴的に出現するダイポールブロケード効果を利用する方法を用いる [6]。単一光子源の開発は可視光域や量子情報処理のための 1.5 μm 帯の波長で精力的に行われているが、低周波領域での光源に関する研究例は少ない [7]。本研究の遂行はマイクロ波を利用した半導体チップ上での量子情報処理技術の発展に貢献するのみならず、学術的な興味の観点 [8] から、或いはその他将来的なニーズにも備えて行うべき萌芽的な研究である。更に、Rydberg ダイポールブロケード現象に関する新しい知見を得ることも目論む。

上述のものと同様に平行して行う予備的な実験研究では、MOT 中に生成した低温 Rydberg 原子の超放射現象を観測することを目的とした。低温 Rydberg 原子ガスではドップラー効果を無視できるため、直感的には超放射が容易に起こり得ると考えられるが、実際には幾つもの要因によりそれが阻害される [9]。

本研究ではこれらを理解すると同時に MOT 中にため込まれた低温 Rydberg ガスを低周波光源として利用することを目論む。

更にもう一つの予備の実験研究では、Rb などの原子が封入された分光セルを利用した、簡単な THz ~サブ GHz 光源を開発することを目的とした。これらの予備実験が成功すれば、単色性に優れた準波長可変の簡易型低周波光源を実現する可能性が示唆される。

本実験における超放射、及び共振器を利用した低周波光の発生は、いずれの場合も Rydberg 準位間の遷移を利用しており、用いる原子の種類によって発振周波数が変わる。従って、幾つかの種類原子に Rydberg 状態を励起するための新しい方法の開発も試みる。

3. 研究の方法

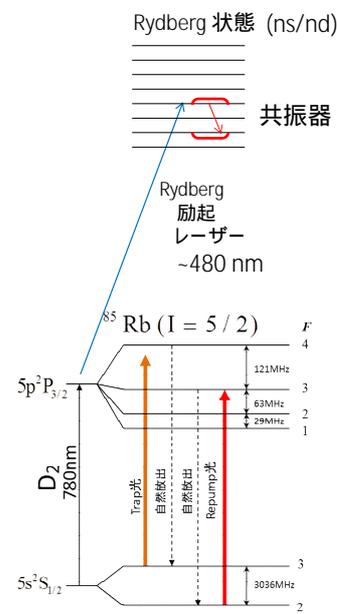


図 2 実験の概念図

図 2 に本研究の中心を担う実験手法の概念図を示す。MOT 中にてレーザー冷却サイクルにある Rb-85 (或いは Rb-87) 原子を 480 nm 程度の波長を持つ高分解能波長可変レーザーを用いて Rydberg 状態の一つに励起する。この時ダイポールブロケード効果を上手に利用することで、レーザー照射したサンプル中の一つの原子のみが Rydberg 状態へと励起され、残りの原子は 5p 状態にとどまる様に試みる。このレーザー励起が任意の Rydberg-Rydberg 準位間の遷移の周波数に同調された低周波共振器内で行われた場合、単一の Rydberg 原子は単一の低周波光を放出することになる。そこで本研究では以下に列記する方法に則り実験を行った。

A. 極低温 Rydberg ガスに特有なダイポールブロケード効果は、励起する準位の主量

子数や方位量子数、或いは原子数密度や励起レーザーのビーム径、励起レーザーのスペクトル幅などにより大きく影響を受ける。そこで本研究では、ダイポールプロケード効果の検出及び更には系統的な測定を行うために必要となる高出力波長可変単一モード発振 480 nm 光源の開発を計画した。

B. また、Rydberg-Rydberg 遷移を選択的に誘起するために必要な低周波用ファブリペロー共振器を MOT 中にインストールするための設計を行い導入する。

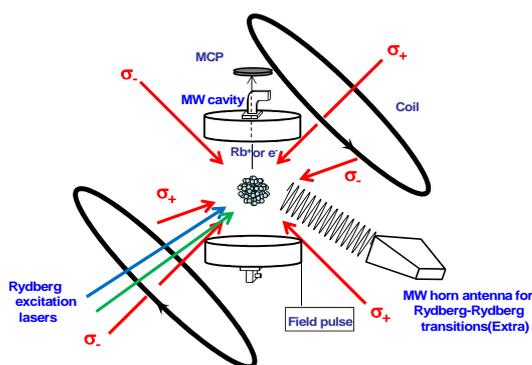


図3 MOT 中のファブリペロー共振器

C. 一方、MOT 中にトラップされた低温 Rydberg 原子ガスからの THz ~サブ GHz 超放射を効果的に観測するために、MOT 用レーザーのビーム径を広げ出力を高めることを重点的に、MOT の改良を行う。これは低周波超放射が効果的に誘起されるために必要と予測される、超放射光波長よりも巨大なサイズを持つ超放射サンプルを作成することを念頭に置いたものである。

D. 本研究では低温 Rydberg 原子からの低周波光放射が興味の対象である。ところで室温 (~300 K) 程度の環境では低周波光がバックグラウンド光子として多数存在する。そこで、バックグラウンド低周波光の検出を低温 Rydberg 原子の原子状態の分布を測定することで行い、ノイズの要因の一つとして考察を行う。

E. 更に、Rb 原子の分光セル中に高励起 Rydberg 状態を、短パルスレーザーを含む波長可変レーザーを用いて生成し、そこに超放射状態を生成することにより Rydberg 準位間に THz ~サブ GHz 超放射遷移を誘起し、それを直接光検出する。同時に、低周波光を予備的に検出するために、従来法である EO サンプリグ法を適用する。また、分光セルではなく原子線を用いた Rydberg 超放射の観測を行うための装置を立ち上げ、Rydberg 超放射の高感度検出を行う。並行して、超放射を強制的に誘起するための課題として、Rydberg-Rydberg 準位間のマイクロ波遷移の観測、及び強マイクロ波場における Rydberg 原子の挙動の観測を行う。

F. 幾つかの種類原子に Rydberg 状態を励起する新しい方法としてレーザーアプレ

ーション法を適用することを行う。具体的には、基底状態からの励起が困難である Rydberg 状態の励起を、対象原子に準安定状態を生成し、そこからの遷移を利用することで試みる。

4. 研究成果

A. について、ダイポールプロケード効果の検出及び更には系統的な測定を行うために必要となる高出力波長可変単一モード発振 480 nm 光源の開発を行い、外部共振器型ダイオードレーザー (ECDL) 及びボウタイ型キャビティを含むレーザーシステムを完成することに成功した。本システムは MOT 中に生成された低温 Rydberg 原子生成時にダイポールプロケード効果を誘起するのに必要な数 MHz ~ 数十 MHz のスペクトル線幅で発振し、ECDL 及びボウタイキャビティの微調によって狭帯域ではあるが波長の掃引が可能なシステムである。目下、本装置を用いて Rydberg 原子の励起の確認作業を行っている。

B. について、共振器の設計が終了し、MOT 中に共振器の試作器のインストールを試み、その動作特性を精査した。得られた動作特性データは、現在作成中の新しい共振器の設計に反映させた。

C. について、MOT 用レーザービームの拡大を行い、それを利用して Rydberg 超放射の観測を試みたが、超放射の観測には至らなかった。目下、新しい MOT レーザー光源を導入し、測定を継続中である。

D. について、MOT 中に低温 Rydberg 原子を励起し、Rydberg 原子のエネルギー分布を、Rydberg 原子が 300K 黒体放射場に晒される時間の関数として系統的に観測することに成功した。低温 Rydberg 原子が黒体放射場の超高感度検出デバイスとして動作することを実証すると共に、デバイスとして利用する場合に書き毛悦しなれば成らない幾つかの問題点 (例えば隣あう原子の衝突による効果など) をあぶり出すことに成功した。得られた成果は学会発表①及び④にて報告した。

E. について、Rb 原子の分光セルからの超放射低周波光の直接測定を、市販の低周波検出器を用いて行うことに成功した。これにより分光セルを低周波光源として活用することが期待される。また、EO サンプリグ法を用いることで Rydberg 原子分光セル中を低周波光が伝播する様子を詳細に理解することに成果を収めた。分光セルを低周波光源として活用する場合には、当然低周波光が分光セルをどの様に伝播するか、そのダイナミクスが明らかにされなければならない、その点で有意義な成果である。これらの成果は学会発表⑥にて報告した。

更に、Rydberg 原子に共鳴マイクロ波が照射された場合に誘起される Rydberg の非線形光学現象に関して、幾つかの新しい知見を

得ることに成功し、その成果は学会発表②、③、⑤にて報告した。

F. について、レーザーアブレーションを利用した準安定原子状態の新しい生成法を創出した。更にこれを用いて Mg 原子の Rydberg 状態に関する新しい分光データを得ることに成功した。成果は学会発表⑥及び⑦にて報告した。また、これらの成果については学術論文にまとめ、既に欧文誌に投稿済みである。

<引用文献>

- [1] W. R. Anderson *et al.*, Phys. Rev. Lett. **80**, 249 (1998).
- [2] I. Mourachko *et al.*, Phys. Rev. Lett. **80**, 253 (1998).
- [3] E. Urban *et al.*, Nature Phys. **5**, 110 (2009).
- [4] A. Gaëtan *et al.*, Nature Phys. **5**, 115 (2009).
- [5] M. D. Lunkin *et al.*, Phys. Rev. Lett. **87**, 037901 (2001).
- [6] Y. O. Dudin and A. Kuzmich, Science **336**, 887 (2012).
- [7] A. A. Houck *et al.*, Nature **449**, 328 (2007).
- [8] K. Koshino and Y. Nakamura, New J. Phys. **14**, 043005 (2012).
- [9] J. Han and H. Maeda, Canadian J. Phys. **92**, 1130 (2014).

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 0 件)

T. Amemiya, Y. Kobune, K. Kitano, H. Ito, S. Kato, Y. Mizugai, and H. Maeda, (submitted to Spectrochimica Acta Part B on May 6, 2017).

[学会発表](計 7 件)

- ① 高峰愛子, 塩塚梨貴, 高野将之, 前田はるか, “極低温 Rydberg 原子の準位再分布”, 日本物理学会第 70 回年次大会, 2015 年 3 月, 早稲田大学.
- ② Haruka Maeda, “Microwave Ionization of Rydberg Atoms”, 韓国物理学会, 2015 年 10 月, 韓国 新慶州.
- ③ 前田はるか, “高強度マイクロ波中の Rydberg 原子の多光子イオン化抑圧”, 日本物理学会第 71 回年次大会, 2016 年 3 月, 東北学院大学.
- ④ A. Takamine, R. Shiozuka, and H. Maeda, “Prolonged observation of redistributing populations for cold Rydberg atoms”, The 12th International Conference of Low Energy Antiproton Physics (LEAP2016), March 2016, Kanazawa.

⑤ 前田はるか, “発散しない Rydberg 原子波束”, 第 16 回分子分光研究会, 2016 年 5 月, 東工大 大岡山キャンパス.

⑥ 北野健太, 前田はるか, “高密度リドベルグ原子中におけるテラヘルツパルス伝搬”, 日本物理学会 2016 年秋季大会, 2016 年 9 月, 金沢大学 角間キャンパス.

⑦ 小舟雄登, 北野健太, 水谷由宏, 前田はるか, “レーザーアブレーション放電励起法を用いた Mg 原子の三重項 Rydberg 状態のレーザー分光”, 平成 29 年度日本分光学会年次講演会, 2017 年 5 月, 早稲田大学理工学術院.

⑧ Y. Kobune, T. Amemiya, H. Ito, K. Yamane, K. Kitano, Y. Mizugai, and H. Maeda, “Two-step laser excitation of triplet Rydberg states of Mg atom from the $3s3p\ ^3P_0^0$ metastable state”, Colloquium Spectroscopicum Internationale (CSI) XL, 2017 年 6 月, Pisa Italy.

[その他]

ホームページ等

<http://www.phys.aoyama.ac.jp/~maeda/>

セミナー・研究会等

前田はるか, “Rydberg 原子のポピュレーション制御”, 理研セミナー, 2015 年 1 月, 理研.

前田はるか, “Rydberg 原子のマイクロ波多光子イオン化”, 「新しい光科学の創成とナノ情報デバイスへの展開 III」研究会, 2015 年 10 月, 東北大学.

前田はるか, “レーザーアブレーションによる準安定状態原子線の生成”, 「光科学の最先端 2016 研究会」, 2016 年 11 月, 千葉大学.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

前田はるか (MAEDA, Haruka)

青山学院大学 理工学部 教授

研究者番号: 80260199