

令和 3 年 6 月 22 日現在

機関番号：12612

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2020

課題番号：18K13479

研究課題名（和文）共振器中のRydberg原子を用いた量子光源の開発

研究課題名（英文）Quantum light source using Rydberg atoms in an optical cavity

研究代表者

鈴木 はるか（丹治はるか）（Haruka, Tanji-Suzuki）

電気通信大学・レーザー新世代研究センター・准教授

研究者番号：40638631

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,100,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、任意の数の光子を、任意時刻において空間の特定の向きへ発生させることを目指して、光共振器中にトラップされた冷却原子集団においてリュードベリ集団励起状態を生成するための実験系の構築を行った。具体的には、原子の冷却およびトラップ用の超高真空チャンバー、磁場発生用コイルおよびその制御回路、光源および光学系の構築を行い、さらに単一光子発生確率を増大させるための光共振器の設計と、光子の単一性を保証するためのリュードベリ励起用光源の構築およびそれを用いた87ルビジウム原子のリュードベリ遷移の観測を行った。また、発生した光子を評価するための光子統計評価システムの構築を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

量子情報処理技術に関する理論提案においては、しばしば光子数が自在に操れることが前提となっているが、現実的には、任意の数の光子を任意の時刻と空間モードに発生させるという要求は非常に高度なものである。実際、様々な物理系における試みにもかかわらず、任意時刻における特定の空間モードへの高効率な単一光子の発生はほとんど報告されておらず、複数光子を含む光子数状態の発生には、単一光子の発生よりもさらに大きな困難が伴う。しかしながら量子的な光の応用において光子数状態の生成技術の開発は避けて通れない課題であり、本研究はその解決への一つの糸口を与え得るものである。

研究成果の概要（英文）：In this work, we developed a system that enables us to generate a single collective Rydberg excitation within a cold atomic ensemble trapped inside an optical resonator for high-efficiency, arbitrary-number photon generation. Firstly, we built an ultra-high vacuum chamber, a coil system that enables fast turn-off of quadratic magnetic field, and laser systems for magneto-optical trap. Secondly, we designed an optical resonator for enhancing single-photon emission into a single spatial mode. Thirdly, we built a laser system for two-photon Rydberg excitation and obtained a transmission spectrum of electromagnetically induced transparency, which is used for laser frequency stabilization with respect to the two-photon Rydberg transition.

研究分野：量子光学、原子物理学

キーワード：リュードベリ原子 光共振器 冷却原子

## 1. 研究開始当初の背景

レーザー技術の発展に伴い、量子力学が予言する様々な現象の実証が可能になってきた。例えばレーザー光により物質中に量子力学的な重ね合わせ状態を自由に生成できるようになり、内部状態の干渉などの量子効果が観測されてきた。このような中、光そのものの量子状態にも焦点が当てられ、位相と振幅のどちらか一方の不確定性を抑圧した光(スクイーズド光)をはじめとした量子力学的な性質を持つ光を、レーザー光と物質の相互作用を用いて発生させることが可能になってきた。さらにこのような量子力学的に特異な光を新たな光源として用いる研究も活発化しており、これまで既に、位相の揺らぎを抑圧したスクイーズド光を用いた重力波検出器の感度の向上[1]などが報告されている。一方、振幅の揺らぎを抑圧されることにより光子数が定まった状態は光子数状態と呼ばれ、光の量子状態の基礎的な構成要素としてその性質自体が学術的な興味の対象であるのみならず、量子情報処理や量子計測などの分野ではこれを駆使して技術革新をもたらそうという試みが進められている。例えば、高効率な量子暗号通信[2]や線形光学素子のみを用いた量子計算法[3]などの研究の多くは、単一光子(一光子の光子数状態)の利用を前提としており、理論提案の実証のために単一光子を生成する研究も盛んに行われている[4]。また、複数の光子を含む光子数状態を利用することにより干渉計の古典的な感度限界を打破する試みも進められている[5]。

理論提案の多くが光子数を自在に操ることを前提としているのに対し、現実的には光子を確実に一つ、任意の時刻に特定の空間モードに発生させるという要求は、既に非常に高度なものである。実際、様々な物理系における試みにもかかわらず、任意時刻における特定の空間モードへの高効率な単一光子の発生はほとんど報告されていない[4]。さらに、複数の光子を含む光子数状態に至っては、単一光子と比べて発生が更に困難な上に、様々な損失過程によって簡単に壊れてしまうことから、任意の時刻かつ特定の空間モードへの生成までの道のりは長い。

上記のような困難を伴うものの、量子的な光の応用において光子数状態の任意生成技術の開発は避けて通れない課題である。そこで、本研究課題においては、任意の光子数状態を任意の時刻に特定の空間モードに生成することを目指す。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、上述のように任意の光子数状態の任意時刻における特定の空間モードへの生成である。この実現に向けて、本研究では物理系の有力な候補の一つと目される共振器と冷却原子の結合系を利用する。これまでに、高フィネス光共振器中の  $n$  原子を用いて、任意の時刻に  $n$  個の光子を共振器モードに生成する方法が理論的に提案されている[6]。しかしながら、正確に  $n$  個の原子を捕捉することは技術的に困難である上、高フィネス光共振器で使用される非常に高反射率のミラーでは、透過に対してミラー表面での損失が有意になり、共振器中で生成された光子数状態が外部に出る前に壊れてしまう。そこで本研究では、 $^{87}\text{Rb}$  原子を用い、Rydberg 状態への単一励起、電磁場誘起透明化(EIT)、光共振器中の原子集団による超放射という三つの要素技術を組み合わせ、 $n$  個の単一原子の代わりに  $n$  個の原子集団を、中程度のフィネスの光共振器中に捕捉することにより、上記の目的の達成を目指す。その第一段階として、まずは一個の原子集団により単一光子を任意時刻において特定の空間モードに発生させることを目指す。この方法では共振器中の原子集団の数により発生する光子数が決まるため、複数の原子集団を作製することで任意の光子数状態への拡張が可能になると期待される。

## 3. 研究の方法

原子集団から単一の光子を取り出すためには Rydberg 励起を用いる。Rydberg 状態の原子は電気双極子モーメントが大きいため、原子間に大きな双極子-双極子相互作用が働く。その結果、ある一つの Rydberg 原子の相互作用が及ぶ範囲(ブロック半径)内では他の原子のエネルギーが大きくシフトし、同じ光源で二つ目の原子を励起できないという性質がある。これを利用すると、たとえ原子が集団として存在していても、ブロック半径内では単一の原子のみが Rydberg 励起され、その原子が脱励起する際に単一光子を取り出すことが可能となる。この方法では原子集団を用いて単一光子を取り出せるので、単一原子を利用する方法[6]と比べ技術的な要件が大幅に緩和される。一方で、原子集団を利用するため、発生した光子の周囲の原子による再吸収を考慮する必要がある。しかし、制御光の入射により媒質の透明化を誘起する EIT と呼ばれる光学的手法により、この問題を解決することができる。

指定した時刻に原子の励起を行うためには、二光子吸収による Rydberg 励起の際にパルスを使用することで、指定した時刻に確実に単一励起状態を生成する。

特定の空間モードに光子を取り出すためには、共振器中の原子集団からの超放射を利用する。原子集団全体に励起光を照射することにより一つの原子を励起させると、集団内のどれか一つ

の原子が励起しているあらゆる場合の量子力学的な重ね合わせ状態（集団励起状態）となる。この状態が脱励起する際にある特定のモードへ光子を放出する確率は、原子集団内の原子数に比例する（超放射）。ここで超放射のモードを共振器モードに一致させれば、共振器モードへの自然放出の増大と超放射が同時におこることにより、共振器のモードへの光子の放出確率が、単一原子が自由空間に存在する場合と比較して大幅に向上する。この性質を利用すれば、共振器モード中に高確率で単一光子を生成することができると考えられる。

#### 4. 研究成果

原子集団の Rydberg 励起に向けては、まず超高真空チャンパー中で磁気光学トラップ（MOT）により冷却原子集団の生成を行う必要がある。そこで、本研究期間中には、まず、(1)超高真空チャンパーの構築、(2)四重極磁場発生用コイルとその制御回路の作製、および(3)原子冷却用の光源および光学系の構築を行った。さらに、単一モードへの単一光子の発生効率を増大させるために、(4)光共振器の設計および共振器用マウントとミラーの作製を行った。また、(5)Rydberg 励起用光源の開発および Rydberg 遷移の観測と、(6)発生した光子を評価するための光子統計評価システムの構築を行った。

##### (1) 超高真空チャンパーの構築

超高真空チャンパーの構築にあたっては、共振器導入部分のガラスセルの耐熱温度が低いため、まずはそれ以外の部分を組み立て、Rb 原子源であるディスペンサーを設置した上で約 200 でベーキングを行った。さらに共振器導入部分のガラスセルを設置し、約 120 でベーキングを行った。その結果、真空度は  $10^{-10}$  Torr 台に達し、原子のレーザー冷却に必要な真空度が得られた。

##### (2) 四重極磁場発生用コイルとその制御回路の作製

MOT の作製に必要な四重極磁場を発生させるコイルおよびその制御回路の構築を行った。高効率な単一光子発生のためには、MOT 用の四重極磁場を、単一光子発生の試行時に速やかに消失させる必要がある。本研究では、磁場切断時に発生する渦電流を最小化するために、超高真空チャンパーの共振器導入部分はガラスセルとし、その周辺においては金属部品を排除した（図 1）ため、磁場の消失にかかる時間は、コイルの電流の切断にかかる時間で決まると考えられる。そこでコイルに流れる電流を高速に切断するための回路を設計・構築し、その特性評価を行った。その結果、 $131.0 \pm 0.4 \mu\text{s}$  で磁場を消失させることができた（図 2）。これは原子の散逸時間より十分に短く、当初の目的を達せられたといえる。

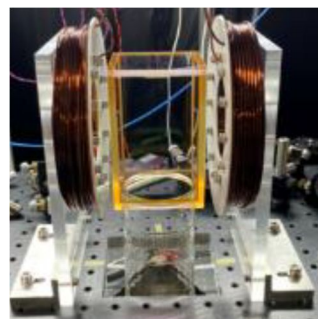


図 1. 超高真空チャンパーのガラスセル部分と四重極磁場発生用コイル

##### (3) 原子冷却用の光源および光学系の構築

MOT の作製にあたり、まず、原子冷却用の光源の構築を行った。今回原子の冷却に使用する光源は、 $^{87}\text{Rb}$  原子の D2 遷移に対して周波数が安定化された基準レーザー、磁気光学トラップ用の冷却レーザーとリボンレーザーの三台である。本研究では、フィルター型外部共振器レーザー [7] を三台構築し、まずは基準レーザーの周波数を Doppler-free DAVLL 法 [8] により  $^{87}\text{Rb}$  原子の D2 遷移に対して安定化させた。また、冷却レーザーとリボンレーザーの周波数を、遅延線を用いた方法 [9] により基準レーザーに対して安定化させた。

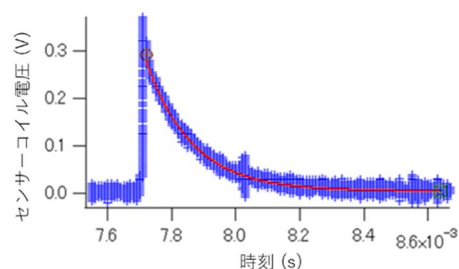


図 2. 四重極磁場発生用コイルの電流切断による磁束の変化

さらに、真空ガラスセルの周りに三軸折り返しの光学系を構築した上で、それぞれの軸に 6.7 mW の冷却光および 330  $\mu\text{W}$  のリボン光を導入した。さらに、Rb 原子を、ディスペンサーを用いてチャンパー中に導入し、その遷移周波数に対して安定化させたレーザー光を入射させて原子のトラップを試みた結果、原子からの蛍光が磁場のオン・オフとともに明滅する様子が観測された。

##### (4) 光共振器の設計および共振器用マウントとミラーの作製

光共振器に関しては、フィネスが高いほど原子が共振器モード中に光子を放出する確率が高くなる。しかしその一方で、ミラーの反射率が高いことによりミラー表面での損失が有意になり、共振器中に放出された光子を外部へ取り出すことが困難になる。そこで、本研究では中程度のフィネスの光共振器を用いる。また、共振器外部の単一空間モードに光子を放出させるためには、

非対称な共振器を用いて、共振器の片側のみから光子を外部に放出させることが有効である。そこで、最終的に外部に光子を取り出す確率を最大化するような共振器のフィネスおよびその際に得られる共振器の透過率をもとに、非対称共振器を構成する二種類の鏡の反射率および許容される散乱損失を決定した。この結果に基づいて、共振器の幾何学的配置を決定し、超高真空対応の共振器マウント(図3)および低損失の特注ミラーを作製した。

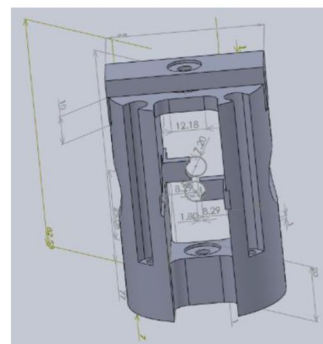


図3. 共振器マウント

作製した非対称光共振器の二種類のミラーのうち、まずは高反射率のもの特性評価を行い、同等の二枚の高反射率ミラーを用いたファブリペロー型光共振器のフィネスから透過率と散乱損失の合計を見積もった結果、 $33 \pm 2$  ppmであった。また、低反射・低損失ミラーについては、散乱損失の測定を従来と同様の方法で行うことが困難であることが判明したため、その新たな評価法についての理論的な検討に着手した。

### (5) Rydberg 励起用光源の開発および Rydberg 遷移の観測

本研究では、波長 780 nm と 480 nm の二光子遷移による Rydberg 励起を行う。そのためには、これら二つの光源を  $^{87}\text{Rb}$  の Rydberg 遷移に対して安定化させる必要がある。そこでまずは  $^{87}\text{Rb}$  原子の D2 遷移に対して安定化させた 780 nm の光源を準備した。さらに、Ti:sapphire レーザーの 960 nm の光を基本波とし、bow-tie 型共振器中の PPKTP 結晶を用いて 480 nm の倍波を発生させた。Bow-tie 型共振器のアラインメントと温度位相整合の最適化を行うことでパワーの最大化を図った結果、基本波パワー 710 mW において 190 mW の倍波パワーを得た。

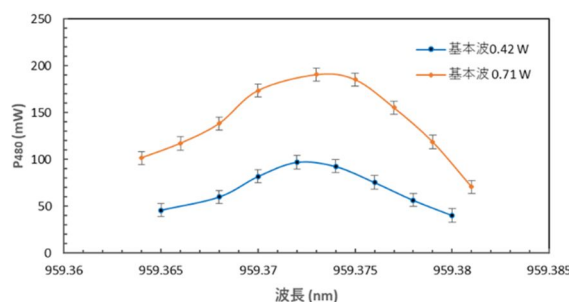


図4. Bow-tie 型共振器中の PPKTP 結晶による倍波発生

本研究では、Rydberg 状態に集団励起された原子集団の協働現象を利用して共振器モード中の光子の放出確率の増大を図る。現実的な原子集団の密度を仮定し、前項で決定した共振器のフィネスを用いて、目標とする単一光子発生確率を得るために必要なリュードベリ原子の主量子数の最低値および必要となる励起光強度について検討を行った結果、今回得られた倍波パワーは、その目的に対して十分であることが分かった。

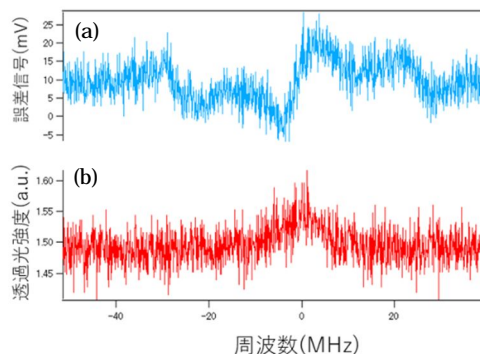


図5. 主量子数  $n = 41$  における EIT 透過スペクトルの観測と誤差信号の生成

これらの光源を用いて、室温のガスセル中で、主量子数  $n = 41, 50, 60, 70$  の Rydberg 状態について、EIT スペクトルを観測した(図5(b))。さらに、これらの透過スペクトルに対して FM 分光法を適用することにより、480 nm のレーザーを Rydberg 状態への二光子遷移に対して安定化させるための誤差信号を生成し(図5(a))、レーザーの周波数安定化に着手した。

また、冷却原子の Rydberg 集団励起状態を生成するための光学系を構築した。以上により、冷却原子を Rydberg 集団励起状態へと励起するための準備が整った。

### (6) 光子統計評価システムの構築

単一光子が発生していることの確認は、脱励起の際に放出される光子を検出し、自己相関関数を測定することにより行う。そこで、二つの単一光子検出器からの信号をマルチチャンネルスケールに入力することで取得された光子数データを用いて入力光の自己相関関数を計算する系を構築し、動作確認を行った。

以上により、光共振器中の冷却原子を用いたリュードベリ集団励起状態の生成の目処が立ち、高効率な単一光子発生を行うための準備が概ね整った。

<引用文献>

- [1] H. Grote *et al.*, Phys. Rev. Lett. **110**, 181101 (2013).
- [2] N. Gisin *et al.*, Rev. Mod. Phys. **74**, 145 (2002).
- [3] E. Knill, R. Laflamme, and G. Milburn, Nature (London) **409**, 46 (2001).
- [4] X. Ding *et al.*, Phys. Rev. Lett. **116**, 020401 (2016).
- [5] T. Ono *et al.*, Nature Communications **4**, 2426 (2013).
- [6] K. R. Brown *et al.*, Phys. Rev. A **67**, 043818 (2003).
- [7] X. Baillard *et al.*, Opt. Comm. **266**, 609 (2006).
- [8] T. Petelski *et al.*, Eur. Phys. J. D, **22**, 279 (2003).
- [9] U. Schünemann *et al.*, Rev. Sci. Instrum. **70**, 242 (1999).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Haruka Tanji-Suzuki
2. 発表標題 Towards on-demand single-photon generation with an atomic ensemble in a cavity
3. 学会等名 応用物理学会量子情報グループ研究会（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 松山佳生, 櫻井明彦, 高橋圭太, 茂木康伸, 丹治はるか
2. 発表標題 単一光子発生に向けた低ロス非対称光共振器の構築
3. 学会等名 日本物理学会第74回年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 櫻井明彦, 松山佳生, 高橋圭太, 茂木康伸, 丹治はるか
2. 発表標題 電磁場誘起透明化を用いた室温ガスセル中での87Rb原子の高リユードベリ準位の観測
3. 学会等名 日本物理学会第74回年次大会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------