

機関番号：12601

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2012～2013

課題番号：24840016

研究課題名(和文)高フィネス光共振器と冷却原子集団を用いた光子数状態の時間的分離

研究課題名(英文)Temporal separation of Fock states using cold atomic ensemble in a high-finesse cavity

研究代表者

鈴木 はるか(丹治はるか)(Suzuki, Haruka)

東京大学・工学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号：40638631

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,300,000円、(間接経費) 690,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、高い量子操作性とコヒーレンスを持つ冷却原子集団を高フィネス光共振器と組み合わせ、これら二つの間の強結合により得られる少数光子での光学非線形性を用いて、光パルス光子数状態に応じて時間的に分離することを目的とした。この目的を達成するために新たな共振器を考案し作製した。また、共振器安定化の機構の開発および、原子集団を共振器中にトラップするための光源の準備を行った。ここまでで、真空装置以外の実験装置の準備がほぼ整った。さらに、光子統計の時間変化と光子数状態の時間分離の関係についての理論的な解析を行った。これにより、実験を遂行する際に精緻な解析を行うことができると期待される。

研究成果の概要(英文)：In this work we aim to temporally separate Fock states using a cold atomic ensemble in a high-finesse cavity. The separation is enabled by few-photon nonlinearity in a strongly-coupled atom-cavity system. In order to achieve this goal, we designed and built a novel high-finesse cavity as well as a transfer cavity to stabilize the main cavity. We also prepared a laser source to be used for trapping an atomic ensemble within the cavity mode. Aside from the vacuum system, we have thus mostly completed the construction of the experimental setup. In addition, we have performed a theoretical analysis of the relationship between the separation of Fock states and the time evolution of photon statistics. Such a theoretical framework is expected to enable us a detailed analysis of the experimental data.

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：原子・分子・量子エレクトロニクス

キーワード：原子・分子物理 量子光学 共振器量子電磁力学

1. 研究開始当初の背景

光子を基軸とした量子情報処理は、理論と実験の両側面から目覚ましい進歩を遂げている。しかしながら、想定を超えた光子数の存在が様々な場面で大きな障壁となっており、光パルスに含まれる光子数を判別することの必要性が増してきている。たとえば、線形光学素子を用いる量子情報処理[1]の実装においては、多光子状態の存在により得られる結果のフィデリティが低下するという問題が生じる。そのため、古典光を光源として用いる場合、平均光子数を一光子以下に抑える必要がある、データレートが著しく低くなるという問題がある。この問題は、光パルスに含まれる光子数を判別することが可能となれば解消される。一方、量子暗号通信においては、通信の際に意図せず多光子が送られてしまった場合のセキュリティ証明がなされているのはごく一部のプロトコルに限られている[2]。したがって、現在理論的に提案されている数々の量子暗号通信プロトコルのセキュリティを担保するためにも、光子数の判別が重要となる。以上のことから、有効な光子数分解検出器の開発は量子情報処理において早急に実現すべき課題となっている。

光子数分解検出器の開発は、これまでさまざまな物理系で試みられてきている。特に注目すべき最近の成果としては、超伝導ナノ細線を用いた、高繰り返し、低暗計数率の光子数分解検出器の実現[3]が挙げられる。しかしながら、これまで報告されてきた光子数分解検出器は

1. 複数の単一光子検出器による光子の同時計測によるもの[4]

2. 検出時の電気信号の大きさが光子の数に比例するもの[3]

のいずれかに分類され、検出器の量子効率が100%でないと光子数の正確な同定はできない。この問題を回避するための全く新しい方法として、光パルス中の光子数状態を時間的

または空間的に分離する方法が考えられる。光子数状態を分離することにより、特定の光子数状態に対応する時間または位置で光子を一つでも検出すれば、その光子数状態の存在を確認することができる。これにより、 n 光子状態を検出するためには、量子効率が $1/n$ 以上の単一光子検出器を用いればよいことになり、現存する単一光子検出器を用いて確実に光子数を測定することが初めて可能になると期待される。

[1] E. Knill *et al.*, *Nature* **409**, 46 (2001).

[2] N. J. Beaudry *et al.*, *Physical Review Letters* **101**, 093601 (2008).

[3] A. Divochiy *et al.*, *Nature Photonics* **2**, 302 (2008).

[4] D. Achilles *et al.*, *Journal of Modern Optics* **15**, 1499 (2004)

2. 研究の目的

本研究では、高い量子操作性とコヒーレンスを持つ冷却原子集団を高フィネス光共振器と組み合わせ、これら二つの間の強結合により得られる少数光子での光学非線形性を用いて、光パルスを光子数状態に応じて時間的に分離することを目的とする。

2. 研究の方法

上記目的を達成するために、真空場誘起透明化 (Vacuum-induced transparency, VIT) [5]という現象を利用する。VITとは、高フィネス光共振器の真空場により原子集団の光学応答が変化する現象である。これまでに、原子の共鳴周波数を持つ入射光に対して原子集団を透明化すると同時に、入射光パルスの群遅延が生じることが、研究代表者らによって実験的に観測されている[5]。この実験に先立って立てられた理論予測によると、この群遅延は入射光に含まれる光子数に依存する[6]。この原理に基づけば、入射光パルスを、含まれる光子数に応じて時間的に分離することが

可能となる[6]。しかしながら、実験的に観測された群遅延(25 ns)は、入射パルスの幅(1.73 μ s)に比べて非常に小さく、光子数の時間依存性を確認することはできなかった。これを改善するためには、

1. 原子の光学深度を増大させること
2. 原子と光共振器の結合強度を高めること

この2点が必要となる。本研究では、上記の2点を実現すべく新たな共振器を考案し作製した。また、共振器安定化の機構の開発および、原子集団を共振器中にトラップするための光源の準備を行った。さらに、光子統計の時間変化と光子数状態の時間分離の関係についての理論的な解析も行った。

[5] H. Tanji-Suzuki *et al.*, *Science* **333**, 1266 (2012).

[6] G. Nikoghosyan and M. Fleischhauer, *Physical Review Letters* **105**, 013601 (2010).

4. 研究成果

(1) 高フィネス光共振器の製作およびフィネスの評価

本研究で用いる共振器は、

- A. 異なる2つの縦モードが原子の持つ2つの電子励起遷移に共鳴する
- B. 原子と共振器モードの強結合実現のため、小さいモード径を持つ

という二つの要請を満たす必要がある。共振器の長さはAの要請により規定される。この長さを固定した状態で、十分な結合強度を得るためにモード径を小さくしていくと、共振器の安定性が低下するというトレードオフが生じる。そこで、結合強度と共振器の安定性の最適な解がどこにあるかを検討し、共振器を設計した。この設計に基づき、透過率が20 ppm程度の共振器用の鏡を特注し、図1に示す共振器を作製した。

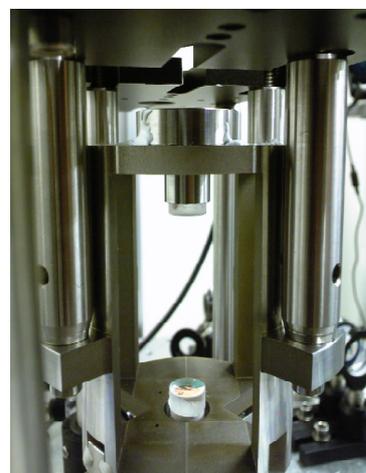


図1：高フィネス光共振器

当初計画通りの共振器が作製できたことを確認するために、まず大気中でフィネスを評価した。具体的には、周波数を一定に保ったレーザー光を入射した状態で共振器長に変調を加え、共振器内の光の減衰を観測した(図2)。その結果、減衰時間は $\tau=2.00 \pm 0.02 \mu$ sであり、これに対応するフィネスは $F=(8.4 \pm 0.2) \times 10^4$ であった。

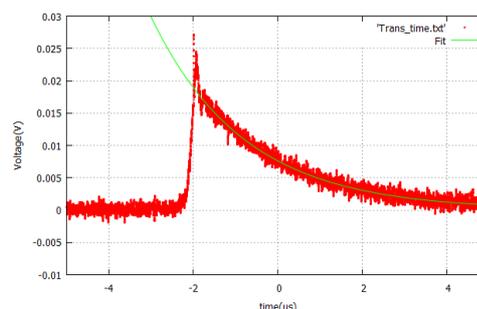


図2：共振器内における光強度の減衰

続いて、フィネスとともに強結合に寄与するパラメータである、共振器のウェストサイズを評価した。共振器からの出射光の空間モードを測定し、それを共振器中に外掃することによりウェストサイズを求めた。その結果、ウェストサイズは $w_0=17.9 \pm 0.5 \mu$ mであった。

以上により実現する協働パラメータ(結合強度を表すパラメータ)は $\eta=31.0 \pm 1.7$ である。これは強結合条件($\eta > 1$)を満たすだけでなく、先行研究[5]における $\eta=7.2 \pm 0.5$ を大きく上回る。これにより群遅延の効果は4倍程度になり、光子数の時間依存性が測定可

能となることが期待される。

今後はこの共振器の真空装置中への導入を目指す。それに向けて、真空装置中に保持することのできるマウントの設計を行った。

(2) 冷却原子集団トラップ用の光源開発

冷却原子集団と光共振器を強く結合させるために、原子集団を共振器の空間モード中にトラップする必要がある。そのために、非共鳴光を共振器に通して定在波を立てることにより一次元光格子を生成し、そこに原子集団をトラップすることを計画している。この方法には、

A. 共振器による増幅を用いることで、数十mWの光強度で十分な深さのトラップポテンシャルを作ることができる（すなわち、高強度レーザーを必要としない）

B. 原子集団が自動的に共振器の空間モード中にトラップされる

という二つの利点がある。このトラップを実現するために、波長852 nmのレーザーダイオードを準備し、電流および温度変調の入力と、ノイズフィルターおよび逆電圧クランプ機構を備えたレーザーダイオードマウントを作製した。今後はこのトラップ用光源の共振器に対する安定化および共振器中での冷却原子集団の捕捉を進める予定である。

(3) 共振器周波数安定化用の参照共振器の開発

本研究の実験を成功させるためには、共振器の周波数を原子の共鳴周波数付近で安定化させることが必須である。このとき、原子に対して近共鳴な光を用いて実験用共振器を直接安定化させようとする、この光を共振器に入射することが必要となるため、原子の量子状態に影響を及ぼしてしまう。そこで、独立な参照共振器を準備し、その共振器に対してPDH法[7]により近共鳴光と非共鳴光を同時に安定化させる。これにより、非共鳴光の

周波数が近共鳴光に対して相対的に安定化される。次に、実験用共振器を、同じくPDH法[7]により非共鳴光に対して安定化させれば、近共鳴光を直接入射することなく実験用共振器を近共鳴光に対しても安定化させることができる。これまでに参照共振器の開発および2種の光源と同時安定化用の電気回路の準備を完了し、これから安定化を行うところである。

(4) 参照共振器を介した実験用共振器の原子共鳴に対する安定化および強結合の確認に向けた準備

上述の参照共振器を用いて実験用共振器の共鳴周波数を原子の共鳴と一致させると、原子集団と共振器の結合により真空ラビ分裂が生じ、共振器の透過スペクトルの一本の共鳴線が二本に分裂する。また、共振器の共鳴周波数を原子の共鳴からある程度離調すると、共振器の縦モードのシフトが観測される。この二つの透過スペクトルの変化から、共振器中にトラップされている原子数と、原子と共振器の間の結合強度を同時に評価することができる。これまでに、原子共鳴に対して安定化した参照光および電気回路の作製が完了した。今後は共振器中にトラップした原子を用いて実際に結合強度を測定し、既知の共振器パラメータから計算で得られる結合強度の整合性を確認する予定である。

(5) 捕捉された単一光子によりゲートされた全光スイッチとトランジスタの原理実証

マサチューセッツ工科大学、ハーバード大学、ウィーン工科大学との共同研究により、高フィネス光共振器内の冷却原子集団に捕捉された単一光子（ゲート）を用いて、光ビーム（ソース）の強度を制御した。これは、単一光子に対して感度を持つ全光トランジスタの原理実証に相当する。これにより全光量子回路や量子情報処理において様々な可

能性が広がることが期待される。この成果は、雑誌論文として発表した。

(6) 光子統計の時間変化と光子数状態の時間分離の関係についての理論解析

先行研究[6]において、VITの群遅延が入射光に含まれる光子数に依存することが示されているが、その過程で多くの極端な仮定が用いられている。そこで、より現実に即した理論を構築し、系の非線形性を評価した。具体的には、実験的に群遅延よりも高精度な観測が可能な光子統計に着目し、2つの共振器モードと相互作用する型三準位原子についてマスター方程式による数値計算と低励起極限の解析計算を行った。その結果、出力光の強度相関関数の各種パラメータへの依存性が明らかになり、比較的透過率の高い領域において、コヒーレント光を入射した際の出力光が非古典性を示すことが確認された。また、先行研究[6]で予言されていた光子数に依存した群遅延についても、光子統計の時間変化を用いて定量的に再現することができた(図3)。以上の結果は先行研究をより現実に即した形で拡張したことに相当し、これにより今後実験を進める上でさらに精緻な解析を行うことができるかと期待される。

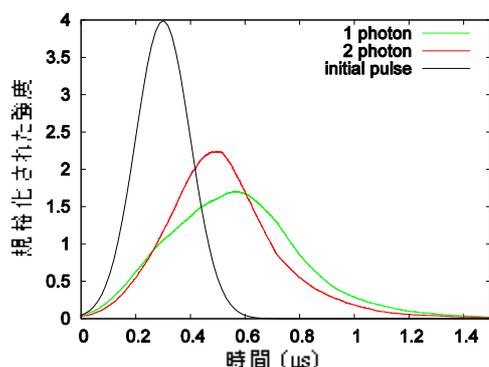


図3：半値幅100 nsのパルスを入射した場合の出力パルスの形状

[7] R. W. P. Drever *et al.*, Applied Physics B 31, 97 (1983).

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)

Wenlan Chen, Kristin M. Beck, Robert Bücke, Michael Gullans, Mikhail D. Lukin, Haruka Tanji-Suzuki, and Vladan Vuletic, All-Optical Switch and Transistor Gated by One Stored Photon, Science **341**, 768 (2013), 査読有

〔学会発表〕(計4件)

市田昌己、鈴木泰成、永松剛、丹治はるか、小芦雅斗、Rb原子を用いたcQEDのための高フィネス共振器の設計と評価、日本物理学会第69回年次大会、東海大学湘南キャンパス、神奈川県、2014年3月27日~30日

鈴木泰成、市田昌己、永松剛、丹治はるか、小芦雅斗、真空場誘起透明化における光子統計と非線形ダイナミクス、日本物理学会第69回年次大会、東海大学湘南キャンパス、神奈川県、2014年3月27日~30日

鈴木泰成、市田昌己、永松剛、丹治はるか、小芦雅斗、真空場誘起透明化における光子統計と非線形ダイナミクス、量子情報の新展開、京都大学基礎物理学研究所、京都府、2014年3月23日~25日
Yasunari Suzuki, Masaki Ichida, Haruka Tanji-Suzuki, and Masato Koashi, Analysis of vacuum induced transparency with a dual-resonance cavity, The 11th US-Japan Joint Seminar on Quantum Electronics and Laser Spectroscopy "Ultimate Quantum Systems of Light and Matter-Control and Applications," Nara Prefectural New Public Hall, Nara, Japan, April 4-11, 2013.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

鈴木 はるか (SUZUKI, Haruka)

東京大学・工学系研究科・助教

研究者番号：40638631