

研究課題別評価書

1. 研究課題名

「キャビティ QED による原子と光子の量子操作」

2. 氏名

青木 隆朗

3. 研究のねらい

共振器に閉じ込められた光と原子が相互作用する系であるキャビティQED系の強結合領域では、原子と光子のコヒーレントな相互作用があらゆる散逸に対して支配的となる。このような系では、単一原子が単一光子レベルの入力光に対して大きな非線形性と非古典統計性をもたらす一方で、単一光子レベルの光が単一原子の量子状態に大きな影響を及ぼす。

これまで、このようなキャビティQED系の研究にはファブリーペロー共振器が用いられてきたが、高Q値化・微小化の技術的限界、ファイバー光学系との整合性の低さ、スケーラビリティの低さといった欠点があった。

そこで本研究では、これらの欠点を克服する新しい共振器としてトロイド型微小共振器を用いてキャビティQED系を構築し、原子と光の量子状態を操作する技術を確立することを目指す。

4. 研究成果

[A] カリフォルニア工科大学における成果

本研究は、2008年11月までの期間、カリフォルニア工科大学キンブル研究室において実施した。また、研究に用いたトロイド共振器は同大学バハラ研究室より提供いただいた。

(1) 単一セシウム原子とトロイド型微小共振器の強結合の観測

図1に示すように、真空槽内にトロイド共振器とテーパードファイバーを配置し、トロイド共振器の上方10mmの位置に磁気光学トラップによりセシウム原子集団を捕獲・冷却する。さらに偏光勾配冷却により10 μ Kまで冷却した後、原子をトラップから解放して自由落下させる。このとき、一部の原子はトロイド共振器のモードのエヴァネッセント成分中を通過し、共振器モードとの結合が発現する。

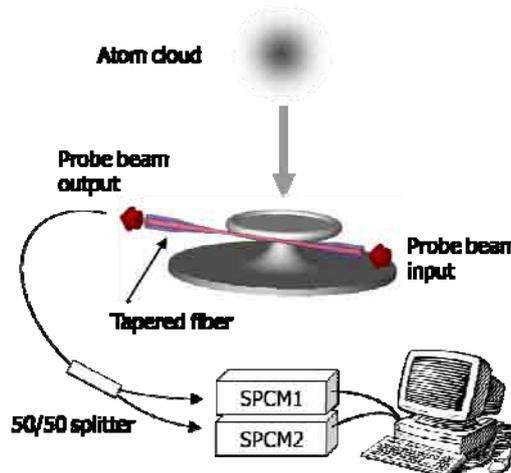


図1: 単一セシウム原子とトロイド型微小共振器の強結合測定系

この結合を検出するため、テーパードファイバーとトロイド共振器の結合条件を臨界条件に保持し、共振器に共鳴したプローブ光の出力を単一光子検出器で測定した。その結果を図2(a)(b)に示す。原子を落としたときのみ観測された、検出光子数の増加が原子と共振器の結合に起因する信号である。さらにプローブ光と共振器の離調 Δ_{AC} を変えて測定し、原子と共振器の結合信号を

Δ_{AC} の関数としてプロットしたのが図2(c)である。理論計算との比較から、原子と共振器の結合強度として50MHzが得られ、強結合系の実現が示された。

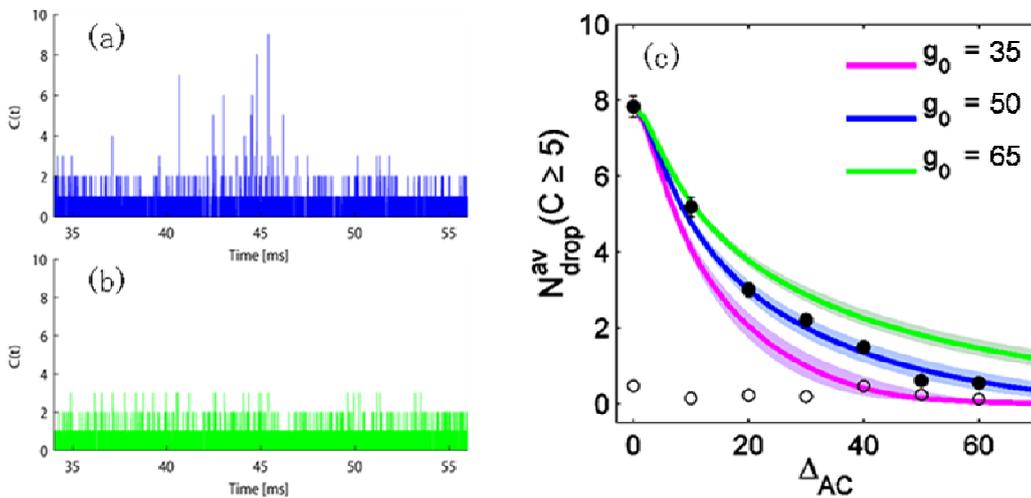


図2: 測定結果 (a)原子がある場合と(b)原子がない場合の単一光子検出器の出力
(c)原子と共振器の結合信号の離調依存性

(2) 臨界結合条件下キャビティQED系における単一原子の共鳴蛍光の観測

(1)と同じ実験系において、テーパー・ファイバーと臨界結合条件下にあるトロイド共振器と単一原子との結合が1次元原子領域にある場合、テーパー・ファイバーの透過光はPurcell効果によって増強された単一原子の共鳴蛍光と考えることができる。そこで、この系においてコヒーレント光を入力したときの透過光の光子統計を測定した結果、2次の相関関数の振る舞いとして $g^{(2)}(\tau) > g^{(2)}(0)$ (光アンチバンチング)および $g^{(2)}(0) < 1$ (サブポアソン統計)が観測された。

(3) 過結合条件下キャビティQED系の実現と光子ターンスタイル効果の観測

上記のトロイド共振器キャビティQED系で研究者は、従来のファブリーペロー共振器キャビティQED系と比較しても高い内部結合効率を達成したが、さらにトロイド共振器の持つスケラビリティやファイバー光学系への整合性の高さを活かすためには、外部導波路としてのテーパー・ファイバーへの外部結合効率を高める必要がある。これは、テーパー・ファイバーを過結合条件下に保持することで可能となる。そこで、このような系の実現のために、上記の実験系とは独立にトロイド共振器キャビティQED系を立ち上げた。この系では(i)原子の冷却・捕獲とキャビティQED系に個別の真空槽を割り当てた2槽式真空槽を差動排気によって接続することによる、捕獲原子数の増加、キャビティQED系の真空度の向上、キャビティ性能の劣化を引き起こす不純物原子のキャビティ表面への吸着の抑制、(ii)光ベルトコンベヤーに基づく2槽間の原子の安定な輸送、(iii)超高真空対応3軸ピエゾステージの導入によるテーパー・ファイバーの高安定・高精度駆動を実現した。この系を用いて、過結合条件下キャビティQED系を初めて実現した。

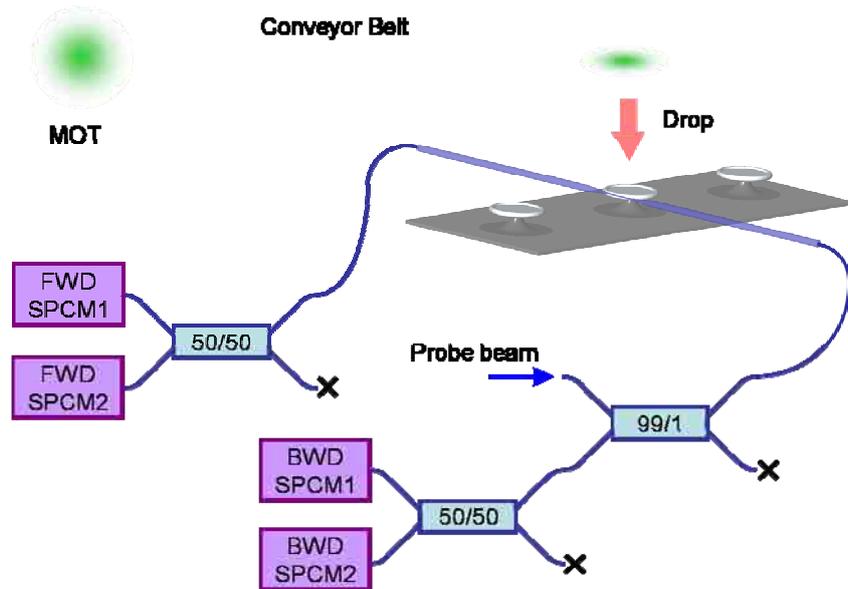


図3: 過結合条件下キャビティQED系の実験セットアップ

図3に示すように、光ベルトコンベヤーによって原子槽からキャビティQED槽へと冷却原子を輸送し、テーパ・ファイバーと過結合条件下にあるトロイド共振器へと落下させた。コヒーレント光を入力し、原子がトロイド共振器のモードを通過する間の透過光と反射光の両方について出力光子数および光子統計を測定した。

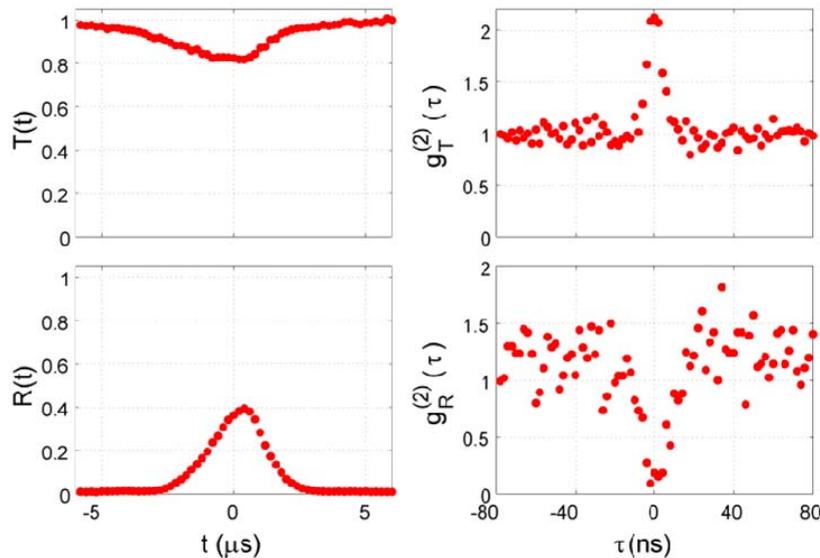


図4: 測定結果

図4に示すように、原子と共振器の結合の結果、透過光強度の減少と反射光強度の増加、さらに透過光における光バンチング ($g^{(2)}(\tau) < g^{(2)}(0)$) とスーパーポアソン統計性 ($g^{(2)}(0) > 1$)、反射光における光アンチバンチング ($g^{(2)}(\tau) > g^{(2)}(0)$) とサブポアソン統計性 ($g^{(2)}(0) < 1$) が得られた。これは、大きなPurcell効果によって単一原子が共振器モードに対して選択的に光子を放射し、励起光とコヒーレントに量子干渉する結果、入射した光子のうち最初の光子は反射され、残りの光子は透過する(光子ターンスタイル効果)ことを示している。

上記で実現した過結合領域の大きな特徴は、共振器内部損失が導波路への外部結合と比較して無視できるため、共振器内部の光の量子状態を、忠実度を損なうことなく外部導波路に取り

出すことができることにある。これは、光を用いた量子情報処理において必須の性質であり、またトロイド共振器のスケラビリティと組み合わせることで、これまで小規模な原理実証実験に留まっていた光学的量子情報処理の研究を、有意義な規模にまで拡張できることが期待される。

[B] 京都大学における成果

本研究は、2008年12月より研究終了までの期間は京都大学にて実施した。

(1) 超低損失テーパー・ファイバーの作製

上記で実現した過結合条件下キャビティQED系の低損失性を活かすには、共振器と結合している外部導波路としてのテーパー・ファイバーの損失を抑制することが必要である。そこで、テーパー・ファイバーの本質的な損失機構である放射モードへの結合について検討し、それを抑制することで透過率が99%を超える超低損失なテーパー・ファイバーの作製に成功した。これは、真空クラッド・サブ波長ファイバーの透過率としては世界最高のものである。

(2) トロイド共振器の作製

カリフォルニア工科大学において実施した研究に用いたトロイド共振器は、同大学バハラ研究室に提供いただいたが、京都大学においては研究者自ら作製した。その結果、セシウム原子のD2線に対応する852nmにおいて約 3×10^8 という、比較的高いQ値を実現した。これは、世界の複数のグループで作られているトロイド共振器の中でも最も高い値の一つである。

5. 自己評価

トロイド共振器キャビティQED系を確立し、さらに古典的な光であるコヒーレント光の入力に対して光子ターンスタイル効果を観測したことで、光子の量子操作については当初の目的を達成したといえる。しかし、研究期間中に京都大学への異動があったこともあり、研究計画にあった共振器モード中への単一原子トラップの実現には至らなかった。本研究で実施した実験では、原子はトロイド共振器のモード中を自由落下しているため、原子のモード内滞在時間が短く、原子の量子操作については不完全なものとなった。

一方、当初の研究計画にはなかったが、キャビティQED系における外部結合効率の重要性に着目し、世界に先駆けて過結合条件下キャビティQED系を実現したこと、さらに超低損失テーパー・ファイバーの作製に成功したことと合わせ、外部導波路まで含めた全系で低損失なキャビティQED系による忠実度の高い量子状態の取り出しと複数のキャビティQED系の結合へ道を開いたことは大きな成果である。

6. 研究総括の見解

共振器に閉じ込められた光と原子が相互作用する系であるキャビティQED系において、新しい共振器としてトロイド型微小共振器を用いて系を構築し、原子と光の量子状態を操作する技術を確立することを目標に研究を行った。

下記3点の観測成果を得、トロイド共振器キャビティQED系を確立したと言える。これらの成果は、Nature, Scienceの論文に纏められるとともに、高い評価を受け「文部科学大臣表彰 若手科学者賞」を受賞している。

- 1) 単一セシウム原子とトロイド型微小共振器の強結合において、従来のファブリーペロー共振器キャビティQED系と比較しても高い内部結合効率を達成。
- 2) 臨界結合条件下キャビティQED系における単一原子の共鳴蛍光の観測
- 3) 過結合条件下キャビティQED系を世界で始めて実現し、光子ターンスタイル効果の観測に成功。

さらに下記2点の研究成果により、外部導波路まで含めた全系で低損失なキャビティQED系による忠実度の高い量子状態の取り出しと、複数のキャビティQED系の結合へ道を開いたことは大きな成果である。

- 1) テーパー・ファイバーの放射モード結合損失機構を抑制することで透過率が99%を超える超低損失なテーパー・ファイバーの作製に成功し、真空クラッド・サブ波長ファイバーの透過率として

は世界最高性能を実現。

2)セシウム原子のD2 線に対応する 852nmにおいて、世界で作られているトロイド共振器の中で最も高いQ値(約 3×10^8)を実現。

今後、本研究によって実現した過結合条件下キャビティQED系と超低損失テーパー・ファイバーをもとに、これまで小規模な原理実証実験に留まっていた光学的量子情報処理の研究を、有意義な規模にまで拡張することを期待する。

7. 主な論文等

(A)さきがけ個人研究者主導で得られた成果で主なもの

(1)論文(原著論文)発表

・Takao Aoki, A. S. Parkins, D. J. Alton, C. A. Regal, Barak Dayan, E. Ostby, K. J. Vahala, and H. J. Kimble, "Efficient Routing of Single Photons by One Atom and a Microtoroidal Cavity", Phys. Rev. Lett. 102, 083601 (2009).

・Takao Aoki, Barak Dayan, E. Wilcut, W.P. Bowen, A.S. Parkins, T.J. Kippenberg, K.J. Vahala, and H.J. Kimble, "Observation of strong coupling between one atom and a monolithic microresonator", Nature 443, 671 (2006).

(2)著書

・青木隆朗 「基礎からの量子光学」第2部第6章(分担執筆)、オプトロニクス社 2009年11月30日発行

(3)受賞

・2008年4月 平成20年度 文部科学大臣表彰若手科学者賞
表彰業績名:「量子光学分野における量子情報処理技術の研究」
表彰主催団体名:文部科学省

(B)本研究課題に関連した成果で主なもの

・Barak Dayan, A.S. Parkins, Takao Aoki, E.P. Ostby, K.J. Vahala, and H.J. Kimble, "A Photon Turnstile Dynamically Regulated by One Atom", Science 319, 1062 (2008).