

研究報告書

「単一イオンと単一光子間の量子インターフェースの実現」

研究タイプ: 通常型

研究期間: 平成 22 年 12 月～平成 26 年 3 月

研究者: 高橋 優樹

1. 研究のねらい

原子と光子の相互作用の大きさは、原子を光共振器に閉じ込めるとことで大きく増幅できることが知られている。特にQ値が高く、モード体積の小さい光共振器を用いることで、単一原子と単一光子の相互作用が他の散逸過程を凌駕し支配的になる状況を作り出すことが可能である。このような状況は強結合条件を満たすと呼ばれ、共振器電磁力学(cavity quantum electrodynamics 以下共振 QED と略記)の文脈で研究されてきた。このような物理系は、最近では単なる学術的興味からだけでなく、量子情報ネットワークの基幹デバイスとしてや新奇な量子光源または精密計測応用などの観点からも注目されている。

従来、共振器 QED の研究においては中性原子を用いた実証実験が広く行われてきたが、イオントラップを用いたものは数少ない。RF(= radio frequency)トラップ中に捕獲され、レーザー冷却された単一イオンは制御可能な人工量子系として最も成功した例の一つであるが、従来からの技術的要因により光共振器と共存させることは難しかった。光共振器を用いて光子と原子の強結合を達成する際に重要な要件の一つは、ミラー間の間隔を狭め、共振器の体積をできるだけ小さくすることである。イオントラップを用いる場合、この点において技術的な困難が存在する。まず、共振器を小さくしていった場合、それに伴いイオントラップも小型化する必要があるが、それには電極を微小化する高度な加工技術が要求される。さらに、イオンとミラーの間の距離が狭まるほどに、誘電体であるミラー表面がトラップポテンシャルを乱すとともに浮遊電荷などの悪影響を及ぼし、最終的にはトラップを不可能としてしまう。事実、従来のイオントラップを用いた共振器 QED の実験ではミラー間の間隔を約数 mm 程度と大きくせざるを得ず、そのため単一イオンを用いた系で強結合は未だに実現していなかった。

本さきがけ研究では、光ファイバーの表面を用いた新しい光共振器とそれと一体化した独自デザインのイオントラップを用いることで、上記のような限界を克服することに挑戦した。その結果、イオン-光共振器系で初めて強結合条件を達成し、単一イオンと単一光子を結ぶ量子インターフェースを実現することを目指した。単一イオンで強結合が可能になれば、従来からの共振器 QED 実験を高度化、高信頼化できるだけでなく、単一イオンの豊かな量子操作性を光子に転写し利用する全く新しい可能性を開拓できると期待される。

2. 研究成果

(1) 概要

本研究で、「光ファイバー共振器一体型イオントラップ」という新しいデザインのイオントラップを提案し、その動作実証を行った。そのために以下のような段階を踏んで研究を進めた。

1) 試作トラップによる誘電体近接下におけるイオントラップの検証 2) 光ファイバー共振器の

作製と評価、作製手法の開発 3)ファイバー共振器を内包したイオントラップおよびその周辺装置の作製。真空系、光学系の建設。動作実証。

1)の過程では、試作した系を用いてトラップされた単一イオンからの蛍光を近接ファイバーにより高効率で捕捉できることを実証し、さらに同系を単一光子源として動作させることに成功した。2)ではCO₂レーザーを用いた光ファイバー表面の加工において独自の手法を開発し、従来より広い共振器長の範囲で安定で、かつ複屈折の影響が低減された共振器を作製することに成功した。3)では、多くの時間を一体型共振器の作製とそれを周辺装置に統合し動作させるためのトライ&エラーに費やした。最終的には強結合の観測までには至らなかったが、設計どりの系でイオンをトラップすることに成功した。これにより単一イオンと光共振器の強結合が可能な系が初めて誕生したことになる。

(2)詳細

研究テーマA「試作トラップによるイオントラップの検証および単一光子の生成」

図1に光ファイバー共振器一体型イオントラップの設計模式図を載せる。二対の円筒型電極がイオントラップを形成しており、外部電極を接地し内部電極にRF電圧を加えることでトラップ電場を発生させる。さらに内部電極の内部には端面をミラー加工した光ファイバーが格納されており、上下のファイバーが対となって光共振器を形成している。このような構成をとることにより、誘電体表面とトラップ電場との干渉を避け、対称性を乱すことなく光共振器をイオントラップの内部まで導入できる。それにより、従来からの技術的問題を劇的に改善することが可能であると考えた。

このアイデアを実証し、実際にこのトラップによりイオンを捕獲することが可能であることを示すため、本研究では図2のような試作トラップをさきがけ研究開始以前にすでに作製していた。この試作機においては電極中のファイバーは端面をミラー加工していないマルチモードファイバーであり、そのため、この実験は共振器 QED の実験とはなり得ないが、近接したファイバー表面がトラップされたイオンに与える影響を調べるには十分であった。実際、本研究ではファイバー表面からの距離が 270 マイクロメートルの位置においてイオンを安定的にトラップすることに成功した(ここまでがさきがけ以前)。これは当時において、最も誘電体表面に近接したイオントラ

ップであり、その距離は従来にくらべて一桁以上小さい。

また、このようにファイバー表面がイオンに近接した状況ではファイバーを用いて直接イオンからの蛍光を効率的に捕捉することが可能である。ファイバー対の表面は全立体角の約6%を占めている。一方で、その単一性ゆえ、トラップされた単一イオンからの蛍光は単一光子から成ると考えられる。図3は、両ファイバーからの出力光をそれぞれ光子検出し、その検出時刻の相関を時間差に関して図示したものである。時間差ゼロにみ

られるくぼみはアンチバンチングと呼ばれ、イオンから得られた蛍光が実際に単一光子である

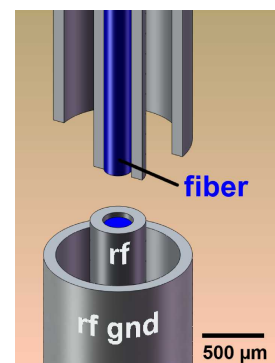


図1 ファイバー共振器一体型イオントラップ模式図

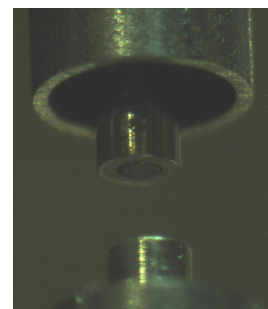


図2 試作イオントラップ

ことを示している。さらにこの現象を利用し、イオンをパルス光で励起することにより単一光子パルス列を生成することが可能である。その結果を図 4 に示す。この結果はこの系が単一光子源として有用であることを示している。これらは論文1にまとめ、発表した。

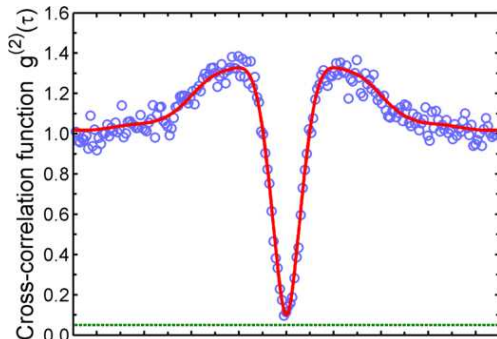


図 3 単一イオンからの共鳴蛍光のアンチバンチング

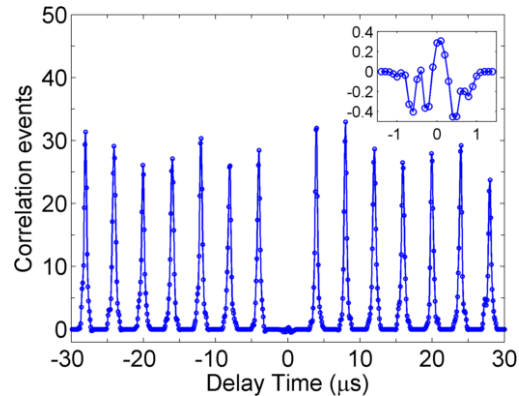


図 4 単一光子パルスの生成

研究テーマB「光ファイバー共振器の作製と評価」

光ファイバーを用いた光共振器、光ファイバー共振器とは、ファイバーの端面にミラーコーティングを施した上で図5のように対向させ、光共振器としたものである。共振器とするためにはファイバーの端面は凹面状に加工する必要がある。CO₂レーザーを用い、光強度、集光度、パルス幅などのパラメーターを適切に選んだ上でファイバーの劈開面に照射すると、部分的な蒸発作用が起り、所望の凹曲面を作り出すことが可能である。さらにその際、表面のごく薄い層が溶融し、表面張力により拡散することで原子スケールで非常に滑らかな表面が形成される。

従来の、ファイバー共振器は主に共振器長が非常に小さい(<100 マイクロメートル)領域でのみ用いられ、そのためファイバー表面の大局的な構造には注意が向けられなかった。一方、本実験ではイオントラップとの兼ね合いにより比較的長い共振器長(約 300-500 マイクロメートル)が必要であり、ファイバー表面のより広範囲に亘る構造が重要になる。そこで本実験ではCO₂レーザーによる加工に独自の工夫を行い、ファイバーを回転させつつ多数のパルスを照射する手法を開発した。その際CO₂レーザーの集光を適度に調節することで、ファイバー表面全体に滑らかな変形を起こさせた。また、ファイバーを回転させたことによりビームの非対称性の影響を排し、非常に対称的な形状を作り出すことに成功した。その一例を図6に示す。

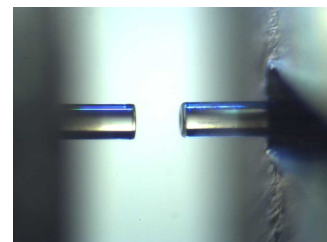
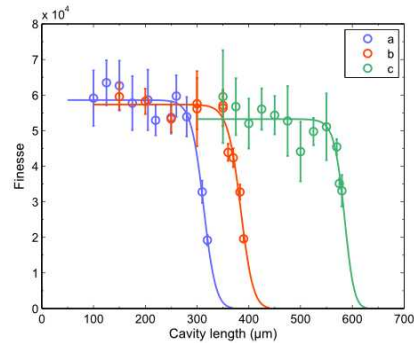
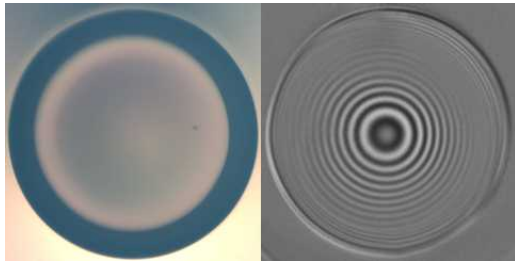


図 5 光ファイバー共振器

このように加工された上で波長 866nm に対する高反射ミラーコーティングを施したファイバーミラーを用いて光共振器を構成してその評価を行った。特に共振器フィネスの共振器長依存性に着目した。図7に示した結果のように広い共振器長の範囲(=数 100 マイクロメートル)にわたって高いフィネス(>50,000)を有する共振器を得ることができ、当初の目標を達することが

できた。またこれらの共振器では複屈折に起因する共振器ピークの分裂がほぼ見られないこと($\ll 10\text{MHz}$) がわかった。これはファイバーを回転させたことで得た良好な対称性の結果だと考えられ、従来研究での分裂はおよそ数 100MHz から GHz にのぼったことを考えると大きな改善であると言える。



研究テーマC「共振器一体型イオントラップの作製と動作実証」

イオントラップに適したファイバー共振器を得た後、実際に内部にファイバー共振器を導入した一体型イオントラップの作製ならびにその周辺装置、真空系、光学系の組み立てを行った。

図8にイオントラップを含む装置の概観を示す。この装置の組み立てではその過程で多くの技術的問題が発生し、その都度解決していく必要があったものの、最終的にはファイバー共振器を破損させずに組み立ては成功裡に完了した。この装置のトラップ領域にイオン化用のレーザー(423、375 nm)、レーザー冷却用レーザー(397 nm) およびリポンプ用レーザー(850、854 nm) を照射し、単一カルシウムイオンのトラップに成功した。図9に実際にトラップされた単一イオンを捉えた CCD 画像を示す。中央の

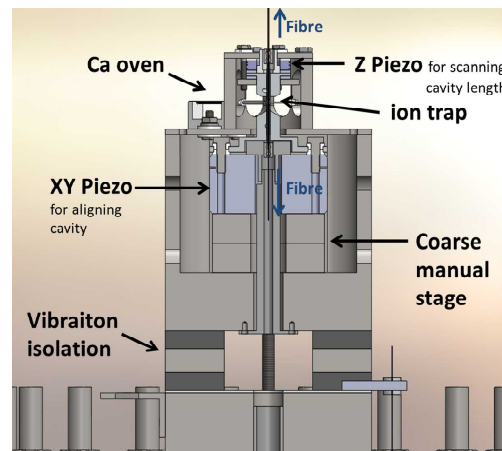


図 8 一体型イオントラップならびにその周辺の概観

白い点が単一イオンであり、397nm のレーザー光に共鳴して蛍光を発しているのが見える。その上下に見えるのは、トラップの内部電極である。このように、このイオントラップが確かに単一イオンをトラップする能力を有していることが実証できた。トラップ領域の上下150マイクロメートル先にはフィネス 40,000 の共振器の表面が控えており、その意味で単一イオンと光共振器の強結合が可能な系がはじめて誕生したと言え、大きな一歩となったと考える。

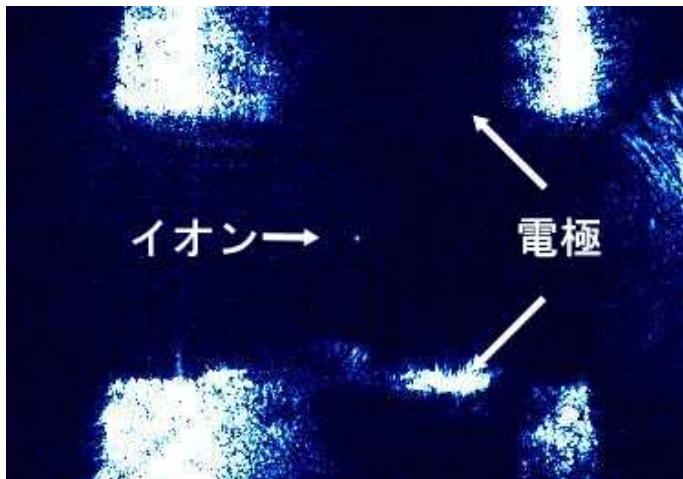


図 9 トラップされた単一カルシウムイオンの CCD 画像

3. 今後の展開

光ファイバー共振器一体型イオントラップを作製し、初期的なイオントラップに成功したものの、これにはまだまだ大いに改善の余地がある。まずはレーザー冷却やマイクロモーション補正の最適化を図り、さらに安定したトラップを実現する必要がある。その上で、ファイバー共振器をイオンの遷移周波数にロックし、イオンと共振器の結合強度を測定する。計算によれば強結合を観測することは十分に可能であり、そうなれば世界初の快挙となる。

強結合が達成されたならば、それを土台に当初の計画のように単一イオンと単一光子の間の量子状態の転写の実験に進むことができる。特に強結合ならではの双方向の状態転写が実現できれば、真の量子インターフェースの実現に向け大変意義深い。またここからさらに量子波長変換などの技術と組み合わせれば、実用的な量子リピーターとしての応用も視野に入ってくる。また、単一イオンの強結合共振器 QED 系は全く新奇な物理系であり、過去の例をみれば未知の物理・応用が開拓される可能性も高い。

一方、ハードウェアの面では本研究では三次元RFトラップのみを扱ってきたが、より一般的な線形トラップとファイバー共振器の組み合わせも当然考えられる。線形トラップを矮小化すれば、本研究と同様、エンドキャップ内にファイバー共振器を格納・遮蔽することは可能だと考えられる。その場合、複数の単一イオンを同時に共振器内に配置することができ、これは単に結合強度を増幅するだけでなく、単一光子と同時に強結合する多体量子系の実現として大変興味深い。

また、本研究で作製技術を確立したファイバー共振器はイオントラップとの組み合わせだけでなく、新しい光共振器としての潜在能力を多分に有していると思うので、他の系との組み合わせも模索していきたい。

4. 評価

(1) 自己評価

本研究の当初の目標は、ファイバー共振器を組み合わせたイオントラップを構築し、強結合を実現し、さらに自在な量子状態の転写を行うというものだった。それに比べれば、今回得ら

れた結果は当初目標の端緒にようやく辿りつけたに等しい。しかしながら、最終目標に向け着実に歩を進め、その距離を縮めることができた。特に、ファイバー共振器一体型イオントラップをゼロから作製し、実際にイオンをトラップするところまで到達したことで、ハードウェアの面では一定の完成を果たすことができた。さらに、このことは、当初の懸案だった共振器のごく近傍にイオンをトラップするという永年の課題が、提案した方法で克服されたことを意味する。よって、現在いまだ単一イオンの強結合が報告されていない中では、この実験がこの分野で世界の先頭を切って走り続けていることが改めて明らかとなった。また研究の過程で、ファイバー共振器という次世代の光共振器の基盤技術を固めることができ、これは将来における幅広い応用が期待できる。このように、本研究では将来の発展的研究に向けて相応の実りがあったと考えている。

(2) 研究総括評価(本研究課題について、研究期間中に実施された、年2回の領域会議での評価フィードバックを踏まえつつ、以下の通り、事後評価を行った)。

原子と光子の相互作用の大きさは、原子を光共振器に閉じ込めるとことで大きく増幅し、ある条件下では原子と光子の相互作用の大きな強結合状態が起こる。このような物理系は、単なる学術的興味のみならず、量子情報ネットワークの基幹デバイスとしてや新奇な量子光源または精密計測応用などの観点からも注目されている。

これを実現するためには光共振器のミラー間の間隔を狭め、共振器の体積をできるだけ小さくすることである。高橋研究者は、光ファイバーを用いた新しい光共振器とそれと一体化した新たなデザインのイオントラップ「光ファイバー共振器一体型イオントラップ」を提案し、その動作実証を行った。実証実験の結果、設計どおりの系でイオンをトラップすることに成功し、単一イオンと光共振器の強結合が可能な系を始めて実現した。

物理系では、自分の新奇なアイデアを実証するためには、自分で新しい装置を立ち上げなくてはならない。新規性が高いほど、その立ち上げ期間が長くなる傾向がある。高橋研究者は、さきがけ研究期間のほとんどすべてを装置の立ち上げに費やし、最後の数ヶ月で実証実験に成功した。研究期間中に全く成果が得られない可能性もあったチャレンジングな提案を採用し、3年半もの時間と研究資金、さらには研究者の身分を与えることができたのは「さきがけ」ならではの制度である。実証された新奇な「光ファイバー共振器一体型イオントラップ」のこれからの展開を多いに期待したい。

5. 主な研究成果リスト

(1) 論文(原著論文)発表

- | |
|--|
| 1. Hiroki Takahashi, Alex Wilson, Andrew Riley-Watson, Fedja Oručević, Nicolas Seymour-Smith, Matthias Keller and Wolfgang Lange
"An integrated fiber trap for single-ion photonics" New Journal of Physics, 2013, 15, 053011 |
| 2. Hiroki Takahashi
"Towards strong coupling between a single ion and fiber cavity" The Review of Laser Engineering, 2013, 41, 507 |

(2)特許出願

該当なし

(3)その他の成果(主要な学会発表、受賞、著作物、プレスリリース等)

1. H. Takahashi, A. Wilson, A. Riley-Watson, M. Keller and W. Lange "Fiber-coupled single ion as an efficient quantum light source" International Conference of Laser Spectroscopy, Aerzen, Germany (May 31 2011)
2. H. Takahashi, A. Riley-Watson, A. Wilson, M. Keller and W. Lange "An integrated fiber-trap for ion-photon quantum interface" The 23rd International Conference on Atomic Physics ICAP 2012, Ecole Polytechnique Palaiseau, France (July 23 2012)
3. H. Takahashi, A. Riley-Watson, S. Begley, E. Brama, N. Seymour-Smith, M. Keller and W. Lange "Interfacing single ions and photons via cavity QED" The Second European Conference on Trapped Ions, Obergurgl, Austria (Sep. 11 2012)
4. Hiroki Takahashi, Stephen Begley, Ezra Kassa, Markus Vogt, Jack Morphew, Sahar Hejazi and Matthias Keller "Interfacing ions and photons at the single quantum level" IonTech2: Techniques for Trapped Ions, Paris France (23-25 Oct. 2013)