

# 光子数状態の生成と制御—光子数マニピュレーションの実現にむけて—

光と制御」領域 竹内 繁樹

## 1. 要旨

我々は、「パルス内に光子が一つだけの状態である『単一光子状態』を、高い確率で生成する装置」の実現にむけた実験研究と、光子数状態の量子制御に関する理論研究に取り組んだ。その結果、「これまで報告されてきた値の4倍以上となる、 $P(1)=40\%$ という高い単一光子発生に成功」「室温での量子ドットからの光子反群集の観測」「単一原子の非線形性を用いた、光子数状態に対する自己位相変調素子の提案と理論解析」、「2光子状態間もつれ合いの検証方法の提案と観測」などの成果を得た。

## 2. 研究の狙い

「光は、光量子（光子）とよぶエネルギー素粒子からなっていると仮定しよう。」これは、いまからちょうど100年前の1905年に、アインシュタインが唱えた光量子仮説である。しかしそれから100年を経て、いまだに「光子1つだけを高い確率で取り出す」事は困難であった。本研究の狙いは、まさにこの「光子1つだけを高い確率で取り出す」ことだ。そして、究極の目標は、それを自在に操る—複数の光子間の量子状態を望みのままに制御する—事である。

### 量子情報技術と光子

近年、量子力学の本質的な性質を直接に利用する量子情報通信・処理の分野が急速に発展している。そのアプリケーションの代表が、量子コンピュータと量子暗号だ。前者は、量子重ね合わせ状態を用いることで、莫大な並列計算を可能にする。後者は、不確定性原理によって保証された、秘密通信を実現する。しかし、これらの量子情報通信・処理では、「量子状態」を運び、保持してくれる担体を準備し、また自在に制御できなければならない。

その担体として、光子は非常に優れた特性を持っている。

- 制御がしやすい。たとえばその偏光状態は、 $10^4$ 以上の正確さで決定可能。
- 高効率で検出可。可視で90%程度がすでに実現。シグナル/ノイズ比も高い。
- 長距離伝送が可。光ファイバ中100km以上を伝送した実験もある。

しかし、担体として用いるためには、もう一つクリアしなければならない条件がある。それは、「パルス内に光子が一つだけの状態である『単一光子状態』を、高い確率で生成する。」ことである。これまでの方法では、発生した光子を集光することが困難であり、パルス内の存在確率（出力部）は10%を上回るものは存在しなかった。

### 光子数状態の生成と制御

そこで我々は、「パルス内に光子が一つだけの状態である『単一光子状態』を、高い確率で生成する装置」の実現にむけた実験研究と、光子数状態の量子制御に関する理論研究に取り組んだ。

光子数状態の生成方法としては、2つの方法について平行して研究を進めた。一つは、パラメトリック蛍光光子対を動的に制御する方法である。我々の開発した「高効率ビーム状光子対発生方法」で発生した光子対の一方の光子を、光子検出器でモニターし、その検出結果に応じその場でもう一方の光子の射出を制御する方法を独自に提案し、パルス内の光子数制御を実現を目指した。

もう一つは、単一の量子ドットを光源として用いる方法である。この方法は近年急速に関心を持たれ、様々な研究が存在するが、それらは一般にヘリウム温度程度の低温でしか動作しなかった。本研究では、カドミウムセレン量子ドットに着目、室温で動作する光子源を旨とし研究を行った。

さらに、発生した単一光子の量子状態を制御する方法について、主に理論的な研究を行った。特に、「単一原子の非線形性を用いた、光子数状態に対する自己位相変調素子」「2(多)光子状態間のもつれ合いの生成と検証」などに取り組んだ。

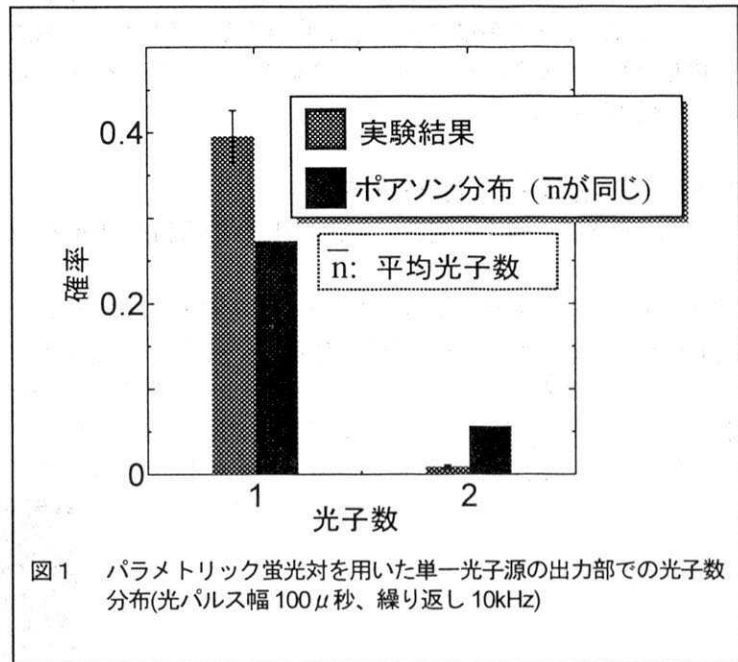


図1 パラメトリック蛍光対を用いた単一光子源の出力部での光子数分布(光パルス幅 100 $\mu$ 秒、繰り返し 10kHz)

### 3. 研究成果

#### 3.1 パラメトリック蛍光対を用いた単一光子源

(共同研究者：博士研究員：ソージャエフ・アレキサンドレ、大学院生 岡本亮)

光子対の動的制御法により、パルス内部に光子が1個存在する確率 P(1)が射出部で 40%の単一光子の生成に成功した。これは、これまでの報告に比べて4倍以上高い値である。

非線形光学結晶にポンプ光を入射すると、それらの一部が、半分のエネルギーを持った光子2個に分裂する。この発生した2つの光子をパラメトリック蛍光対と呼ぶ。この光子対はフェムト秒程度の時間内に同時に発生する事が知られている。その光子対の一方(アイドラー光子)を検出し、その検出信号で他方の光子(シグナル光子)の出射をシャッターで制御することで、光子が2つ含まれるパルスの発生を排除できる。

光子対の発生には、独自に開発した、ビーム状に発生させる方法を用いた。光子対は確率的に発生するため、必ず最低1つのアイドラー光子が検出されるようにポンプ光強度を調整した(53mW)。この実験では、100 $\mu$ 秒幅の1パルス(繰り返し 10kHz)に平均 11 個のアイドラー光子(波長 702nm)が検出された。それらの内最初の光子対の一方を検出した場合に限り、超高速シャッターを短時間(30ns)開き、検出された光子と対の光子の射出を許した。

実験の結果、これまで報告されてきた値の4倍以上となる、**P(1)=40%**という高い単一光子発生確率が得られた(図1)。さらに、ポンプ光強度を増大することで、繰り返し 50kHz で同様の光子数分布(**P(1)=0.39**)を得ることに成功した。単一分子や単一量子ドットから蛍光を用いるなど、他の方法での単一光子源の開発も進められているが、その集光の難しさから、集光された状況での P(1)は 8%程度が知る限り世界最

高値であった。P(2)は0.7%であったが、これは同じ平均光子数の微弱光によるものに比べて十分小さい。この方法は、すべて室温で安定して動作する、赤外から可視までの波長が得られ、かつ波長可変が容易であるなどの特徴を持っている。この研究で得られた知見を元にした、現在、通信波長帯用単一光子源の研究に現在取り組んでいる。

### 3. 2 単一発光体を用いた単一光子源

(共同研究者 博士研究員：大橋弘明、大学院生：千葉孝志)

パラメトリック蛍光対を用いる方法は非常に有力であるが、現状では、ポンプ光源が必要であること、制御回路や光速シャッターなど付随装置群が必要になるなどの問題点も抱えている。

それに相補的な方法として、2光子を同時に発生しない単一発光体を用いる方法がある。中でも量子ドットはサイズや材料による波長選択制などから注目されている。これまでに単一量子ドットを用いた研究としては、GaAs, InAs, InPなどを光源とした研究がなされてきた。しかし、これらの光源はすべて10K以下の低温でしか動作しなかった。

CdSe量子ドット(ZnSコート)からは、2光子の同時発生(励起子分子発光)が、オージェ過程により禁止されるという報告がある。そこで、我々はCdSe量子ドットに着目し、室温で動作の光子源開発を目指して研究を行った。その結果、単一CdSeドットからの発光の光子反群集 (photon antibunching) を、室温において確認することに成功した。

試料は trioctylphosphine oxide (TOPO)修飾 CdSe 量子ドット (平均粒径 5 nm, 発光ピーク 670 nm, 北大島本助教授提供) を PMMA/トルエン溶液に分散させ、カバーガラス上にスピンコートし作成した。cw-Ar<sup>+</sup>レーザー (波長 488 nm) 励起光を用い、倒立型顕微鏡を用いた、共焦点顕微鏡光学系 (水平分解能 0.2 μm)

で蛍光を測定した。単一光子検出モジュールでの光子計数、ならびに分光測定を行った。

図2にPMMA相中に分散させたCdSe量子ドットからの発光強度の2次元分布像を示す。ステージを図中A点に移動し、CdSe量子ドットからの発光のtime-trace測定、分光測定を行い、A点からの発光がCdSe量子ドット(多数)の発光スペクトルと一致すること、また、蛍光は、単一量子ドットに特長的な、blinking と呼ばれる明滅現象を有することを確認した。以上の確認の後、A点からの発光に対して、Hanbury-BrownTwiss型強度相関装置を用い、時間相関測定を行った。単一CdSe量子ドットが単一光子源として機能しているのであれば、同時に2つの光子は放出されないので、2つの光子検出器の検出時間差 $\tau=0$ における同時計数は0になるはずである。

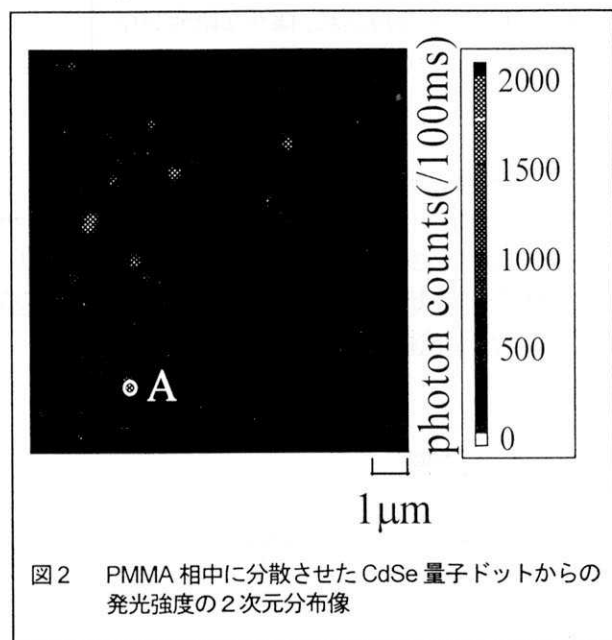


図2 PMMA相中に分散させたCdSe量子ドットからの発光強度の2次元分布像

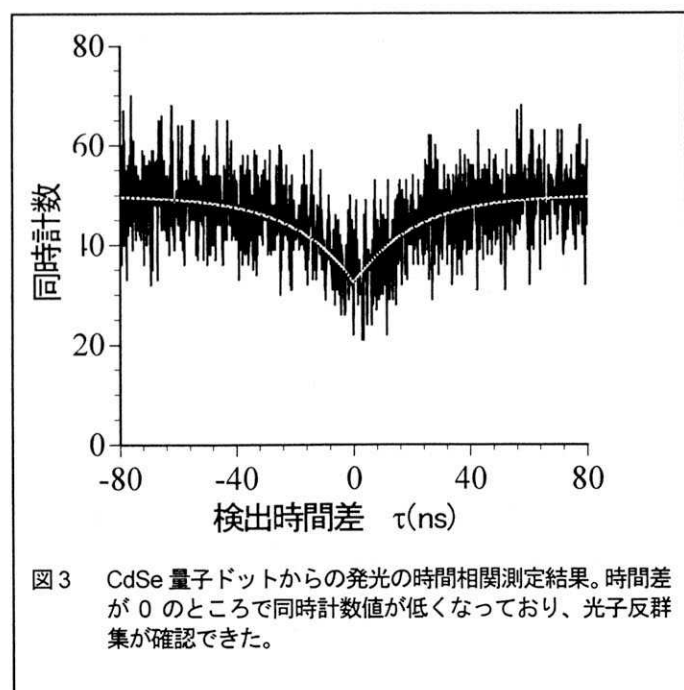


図3 CdSe量子ドットからの発光の時間相関測定結果。時間差が0のところでは同時計数値が低くなっており、光子反群集が確認できた。

図3(a)に、時間相関測定における検出系の概略図を、図3に PMMA 相中に分散させた CdSe 量子ドットからの発光の自己相関測定結果を示す。2つの検出器の検出時間差 $\tau=0$ 付近において、自己相関が1より小さくなる、光子反群集が観測された ( $g^{(2)}(\tau=0)=0.57$ )。  $g^{(2)}(\tau=0)$ は、理想的な単一光子源ではほぼ0になるはずだが、この実験ではそこまでには達しなかった。現在、これらの原因を解明し、 $g^{(2)}(\tau=0)$ の低減化を図ると共に、共振器内に閉じ込めなどの方法により高効率化を図り、引き続き室温動作量子ドット単一光子源の可能性を追求したい。(最近、CdSe/ZnS 量子ドットからの蛍光について  $g^{(2)}(\tau=0)<0.1$  の値を得た。)

### 3.3 光子数状態の量子状態制御

(共同研究者 博士研究員：ホフマン・ホルガ、大学院生：小島邦裕、辻野賢治、岡寿樹)

(a) 単一原子の非線形性を用いた、光子数状態に対する自己位相変調素子

光子は、真空中では互いに相互作用することがない。このことは、長距離伝送に関してみると非常に強力なメリットであるが、量子コンピュータや量子通信などで不可欠な、複数の光子の量子相関操作にとっては大きなボトルネックとなっている。

我々は、このボトルネックの解消を目指し、単一原子の非線形性を用いた自己位相変調効果について理論的な研究を行った。適当な条件化では、1光子状態の場合には、光子は「原子に吸収され、放出される。」その際、一度原子に吸収されることに起因して、位相反転が生じる。2光子状態の場合には、それを2回くりかえす「2つの光子がそれぞれ原子に吸収され、放出される」が、いわゆる線形プロセスである。しかし、単一の2準位原子は、一度に光子を1つしか吸収することができないため、このプロセスは禁止される。よって、2光子状態に対する位相シフトも単に「光子が1個の時の2倍」にはならず、非線形的な振る舞いをする。これが、単一原子の非線形性による、自己位相変調効果である。

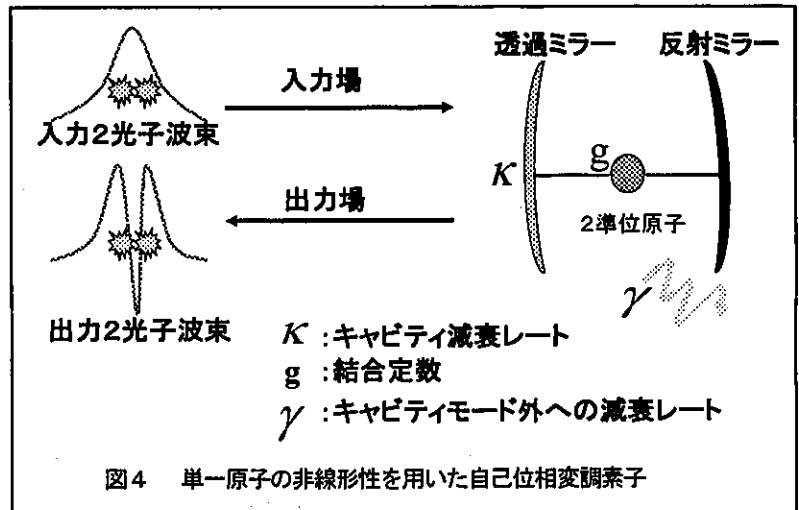
研究の結果、

- 片側キャビティと、共鳴条件を用いた自己位相変調素子の提案
- 半古典論を用いた、入力光強度に対する位相シフトの非線形性の解析
- 入力が光子数状態の場合に、入力光子波動関数に対する出力光子波動関数の応答を与える全量子力学的理論の構築
- 条件の最適化により、ガウス型把捉に対し78%の効率(量子忠実度)を達成などの成果を得た。

(b) 2(多)光子状態間のもつれ合いの生成と検証

これまで発展してきた、単一光子と単一光子の間のもつれ合いの研究の発展の方向として、我々は「多光子状態-多光子状態間もつれ合い」について研究を行った。

光子数が1、すなわち単一光子の偏光状態は、たとえば垂直偏光(|V>)と水平偏光(|H>)という、2つの直交する基底状態をもちいて表すことができる。それに対して、光子数が2の状態(2光子状態)は、2つの光子が両方とも垂直(|VV>)、両方とも水平|HH>、ならびに一方が水



平でもう一方が垂直 ( $|HV\rangle$ ) の3つの基底状態で記述することができる。これは、2つの光子が「区別できる」場合 ( $|H\rangle|H\rangle$ ,  $|H\rangle|V\rangle$ ,  $|V\rangle|H\rangle$ ,  $|V\rangle|V\rangle$  の4通りの基底が存在) とは異なることに注意してほしい。たとえば、2光子状態と2光子状態間のもつれ合いは、これら3つの偏光状態間で相関が見られることになり、「2つの独立している、もつれ合い光子対」とは本質的に異なる。

しかし、一般に用いられている、2個の光子検出器と半透鏡を組み合わせた検出装置では、「2光子状態」と、「区別できる2つの光子」を見分けることはできない。これまでにも、2光子状態間もつれ合いの生成に成功したとの報告は存在したが、それは2つの「2つの独立している、もつれ合い光子対」によっても再現可能であった。

我々は、「2光子状態間もつれ合い状態」と、「2つの独立している、もつれ合い光子対」を見分ける方法を発案した。それは、( $|HV\rangle$ ,  $|RL\rangle$ ,  $|PM\rangle$ ) という、さきほどのものとは別の偏光基底の組の間の相関を見る方法である。R (L) は右回り (左回り) 円偏光、P (M) は+45度 (-45度) の斜め直線偏光である。さらに、この検証実験を行った結果、「2光子状態間もつれ合い状態」の生成を検証することに初めて成功した。

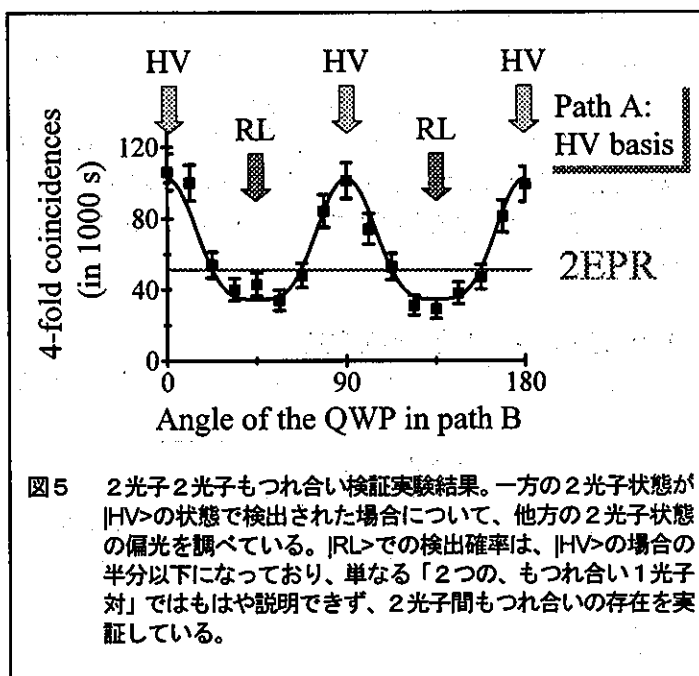


図5 2光子2光子もつれ合い検証実験結果。一方の2光子状態が  $|HV\rangle$  の状態で検出された場合について、他方の2光子状態の偏光を調べている。 $|RL\rangle$  での検出確率は、 $|HV\rangle$  の場合の半分以下になっており、単なる「2つの、もつれ合い1光子対」ではもはや説明できず、2光子間もつれ合いの存在を裏証している。

#### 4. 今後の展望

光と制御では、「光子数状態の生成と制御」をテーマに、3年間研究を遂行した。まず、「光子数状態の生成」に関しては、パラメトリック蛍光対で  $P(1)=0.4$  と、光パルス10個のうち4個が、ほぼ単一の光子のみを含んでいる状態を作り出すことができた。この実験結果についてのエラーの定量的な解析から、一部の光フィルターをより透過率の高い物に交換するなどの方法で、同じ実験装置を使って  $P(1)=0.6$  程度までの値を得られることもわかった。また、量子ドットを用いる方法についても、アンチバンチングの確認に成功し、室温動作の可能性を示すことができた。

また、「光子数状態の制御」に関しては、2光子状態間の真のもつれ合い検証実験に理論的に考察を行い、その検証実験につなげることに成功した。また、単一原子の非線形性を用いた、1光子状態と2光子状態間で非線形な自己位相変調素子の提案と理論検証を行った。

単一モード、単一周波数、単一偏光の光場は、古典的には振幅と位相のたった2つのパラメータで記述することができる。一方、同じ単一モード、単一周波数、単一偏光の光場を量子化して記述した場合、「無限個の光子数状態の重ね合わせ状態」として記述される。その時には、無限個の複素数がパラメータとして必要になる。いま知られている限りにおいては、これこそが本当の「光」の姿だ。非古典光の代表として有名なスクィーズド状態では、パラメータが4つと、古典的な光に対して2つ増えたに過ぎない。また我々は、その豊かな光の状態の、ごく一部を見、制御することしかできていないとも言える。

今後本研究を発展させ、光子一つ一つを自在に生成し、制御し、(量子相関を持たせるという意味で) つなぎ合わせる事を実現したい。その研究を通じて、光の「真の姿」をより広く、深く明らかにしたい。

その意味で、この3年間の研究(単一光子の生成、2光子状態間の制御等)は、自分にとって大きな一歩になったと考えている。

## 5. 謝辞

本研究を遂行するにあたりお世話になりました、「光と制御」領域事務所の吉谷川貢技術参事、千田義彦事務参事、川嶋淳子様はじめ事務所の皆様、JST本部関係各位、領域アドバイザーの皆様ならびに花村榮一領域統括に深く感謝します。また、さきがけ研究者より、特にCdSe量子ドットに関して北海道大学の鳥本司助教授の、ならびに希土類ドーパガラスに関して京都大学の高橋雅英助教授の協力を得ました。本文に記載しました研究室内共同研究者に加え、笹木敬司教授、堀田純一助手、藤原秀樹博士研究員のご協力に感謝いたします。また、多光子状態間もつれ合いの研究の一部、ならびに自己位相変調素子の研究の一部に対する、JST-CREST「結晶量子コンピュータ」(北川勝浩研究代表者)ならびに総務省戦略的情報通信研究制度の支援に感謝します。

## 6. 研究成果リスト

### 論文

1. Holger F. Hofmann, Kunihiko Kojima, Shigeki Takeuchi and Keiji Sasaki 'Optimized phase switching using a single atom nonlinearity' *Journal of Optics B*, vol.5, 218-221 (2003)
2. Holger F. Hofmann 'Uncertainty characteristics of generalized quantum measurements' *Physical Review A*, vol.67, 022106 (2003)
3. Holger F. Hofmann, Kunihiko Kojima, Shigeki Takeuchi and Keiji Sasaki 'Entanglement and four-wave mixing effects in the dissipation free nonlinear interaction of two photons at a single atom' *Physical Review A*, vol.68, 043813 (2003)
4. Kunihiko Kojima, Holger F. Hofmann, Shigeki Takeuchi and Keiji Sasaki 'Nonlinear interaction of two photons at a one-dimensional atom: spatiotemporal quantum coherence in the emitted field' *Physical Review A*, vol.68, 013803 (2003)
5. Holger F. Hofmann and Shigeki Takeuchi 'Violation of local uncertainty relations as a signature of entanglement' *Physical Review A*, vol.68, 032103 (2003)
6. Holger F. Hofmann 'Bound entangled states violate a nonsymmetric local uncertainty relation' *Physical Review A*, vol.68, 034307 (2003)
7. Kenji Tsujino, Holger F. Hofmann, Shigeki Takeuchi and Keiji Sasaki 'Distinguishing genuine entangled two-photon-polarization states from independently generated pairs of entangled photons' *Physical Review Letters* vol.92, 153602 (2004)
8. Holger F. Hofmann and Shigeki Takeuchi 'Quantum-state tomography for spin-1 systems' *Physical Review A*, vol.69, 042108 (2004)
9. Kunihiko Kojima, Holger F. Hofmann, Shigeki Takeuchi, and Keiji Sasaki 'Efficiencies for the single-mode operation of a quantum optical nonlinear shift gate' *Physical Review A*, vol.70 013810 (2004)
10. Holger F. Hofmann 'Generation of highly nonclassical n-photon polarization states by superbunching at a photon bottleneck' *Physical Review A*, vol.70 023812 (2004)
11. Kunihiko Kojima, Holger F. Hofmann, Shigeki Takeuchi and Keiji Sasaki 'A Study on the Shape of Two-Photon Wavefunctions after the Nonlinear Interaction with a One-Dimensional Atom' *Nonlinear Optics, Quantum Optics*, to be published (2004)

12. Hisaki Oka, Holger F. Hofmann, Shigeki Takeuchi and Keiji Sasaki 'Effects of Decoherence on the Nonlinear Optical Phase Shift Obtained from a One-Dimensional Atom' Japanese Journal of Applied Physics, to be published (2004)
13. Shigeki Takeuchi, Ryo Okamoto, and Keiji Sasaki 'High-yield single photon source using gated spontaneous parametric down conversion' Applied Optics, vol.43 5708-2711 (2004)

#### 総説・解説

1. 竹内 繁樹 '量子コンピューター研究の近況レポート' 応用物理 71, 1367-1371 (2002)
2. 竹内 繁樹 'II 量子計算と量子情報理論 量子計算の実験' 別冊・数理科学 量子情報科学とその展開 量子コンピューター・暗号・情報通信 57-63 (2003)
3. 竹内 繁樹 'V 量子情報通信 量子計算・量子情報通信の未来と展望' 別冊・数理科学 量子情報科学とその展開 量子コンピューター・暗号・情報通信 191-198 (2003)
4. Shigeki Takeuchi 'I wish to be a photon juggler' Japan Society of Applied Physics International no.7 25-26 (2003)
5. 竹内 繁樹 '量子コンピューター -光の量子的な性質の究極の応用-O plus E vol.26 53-57 (2004)
6. 竹内 繁樹 '線形光学素子を用いた量子コンピューティング' 光学 33巻 284-290

#### 国際会議招待講演

1. Shigeki Takeuchi 'Quantum mechanics and single photon technology' 10th Anniversary RIES-Hokudai International Symposium (2002 12/11)
2. Shigeki Takeuchi 'Quantum Computation using Photons' The 8th International Symposium on Advanced Physical Fields (2003 1/16)
3. Shigeki Takeuchi, Ryo Okamoto and Keiji Sasaki 'Single photon source using parametric down conversion' SPIE Annual Meeting 2003 (2003 8/6)
4. Shigeki Takeuchi 'A high efficient single photon source and quantum phase gates for photonic qubits' ERATO Conference on Quantum Information Science 2003 (2003 9/6)
5. Shigeki Takeuchi 'Quantum information processing using Photons' 第6回日米先端科学技術-JAFoS (Japanese-American Frontiers of Science) シンポジウム (2003 12/8)
6. Shigeki Takeuchi 'Distinguishing genuine entangled two-photon-polarization states' Japan- Germany Colloquium 2004 on Quantum Optics (2004 2/12)
7. Shigeki Takeuchi 'Distinguishing entangled two-photon states and a highly efficient single photon source' The International Symposium on Quantum Info-Communications and Related Quantum Nanodevices 量子情報通信と量子ナノデバイスに関する国際シンポジウム (2004 3/12)
8. Shigeki Takeuchi, Kenji Tsujino, Holger F. Hofmann and Keiji Sasaki 'Distinguishing genuine entangled two-photon polarization states from independently generated pairs of entangled photons' SPIE Annual Meeting 2004 Optical Science and Technology (2004 8/5)
9. Shigeki Takeuchi 'Quantum information technologies using photons' KIAS-KAIST 2004 Workshop on Quantum Information Science (2004 8/30)

#### 国際会議発表

1. Shigeki Takeuchi, Ryo Okamoto and Keiji Sasaki 'A Single photon source using parametric down conversion' International Conference on Quantum Information: Conceptual Foundations, Developments and Perspectives (2002 7/13)

2. Holger F. Hofmann and Shigeki Takeuchi 'Quantum computation with photonic qubits using linear optics and single photon technologies' International Conference on Quantum Information: Conceptual Foundations, Developments and Perspectives (2002 7/17)
3. Shigeki Takeuchi, Ryo Okamoto and Keiji Sasaki 'A single photon source using parametric down conversion' Erato Quantum Information Science symposium 2002 (2002 9/6)
4. Holger F. Hofmann 'Quantum teleportation: Information dynamics and non-local operations' Workshop on quantum information and quantum dynamics (2002 10/22)
5. Kunihiko Kojima, Holger F. Hofmann, Shigeki Takeuchi and Keiji Sasaki 'Nonlinear interaction in a two photon pulse at an atom-cavity system' 10th Anniversary RIES-Hokudai International Symposium (2002 12/10)
6. Kunihiko Kojima, Shigeki Takeuchi, Keiji Sasaki and Holger F. Hofmann 'A fully quantum mechanical approach to the nonlinear interaction in two photon pulses at an atom-cavity system' CLEO EUROPE EQEC 2003 (2003 6/24)
7. Shigeki Takeuchi, Ryo Okamoto and Keiji Sasaki 'A single photon source using parametric down conversion' CLEO EUROPE EQEC 2003 (2003 6/25)
8. Holger F. Hofmann, Shigeki Takeuchi, Kunihiko Kojima and Keiji Sasaki 'Generation of spatiotemporal two photon entanglement by an atom-cavity nonlinearity' CLEO EUROPE EQEC 2003 (2003 6/26)
9. Holger F. Hofmann, Shigeki Takeuchi, Kunihiko Kojima and Keiji Sasaki 'Spatiotemporal coherence in the interaction of a two photon input pulse with an atom-cavity system' 16th International Conference on Laser Spectroscopy (2003 7/14)
10. Ryo Okamoto, Shigeki Takeuchi and Keiji Sasaki 'A single photon source using parametric down conversion' 16th International Conference on Laser Spectroscopy (2003 7/14)
11. Kenji Tsujino, Holger F. Hofmann, Shigeki Takeuchi and Keiji Sasaki 'Generation of entanglement between a pair of two photon polarization states using TYPE-II parametric down-conversion' 16th International Conference on Laser Spectroscopy (2003 7/15)
12. Shigeki Takeuchi 'Quantum information processing using photons' CREST&QNN03 Joint International Workshop (2003 7/23)
13. Holger F. Hofmann and Shigeki Takeuchi 'Violation of local uncertainty relations by entangled N-level systems' Non-locality of Quantum Mechanics and Statistical Inference (A Satellite Workshop to EQIS'03) (2003 9/9)
14. Hisaki Oka, Holger F. Hofmann, Shigeki Takeuchi and Keiji Sasaki 'Nonlinear phase shift obtained from a single atom embedded in a one-sided solid-state microcavity' The 5th RIES-Hokkaido Symposium on Advanced Nanoscience 織 [shoku] (2003 12/1)
15. Hiroaki Ohashi, Jun-ichi Hotta, Shigeki Takeuchi, Keiji Sasaki, Shin-ya Murakami, Tsukasa Torimoto and Bunsho Ootani 'Photoluminescence measurement of single CdSe nanoparticles' The 5th RIES-Hokkaido Symposium on Advanced Nanoscience 織 [shoku] (2003 12/1)
16. Hisaki Oka, Holger F. Hofmann, Shigeki Takeuchi and Keiji Sasaki 'Effects of dephasing on the nonlinear phase shift obtained from a one-dimensional atom' Nonlinear Optics: Materials, Fundamentals and Applications (NLO) (2004 8/4)

#### 国内会議招待講演

1. 竹内 繁樹 '量子情報技術とナノサイエンス' 公開シンポジウム「光とナノサイエンス」(2002 11/30)
2. 竹内 繁樹 '光子を用いた量子情報通信処理' レーザー学会学術講演会第23回年次大会(2003 1/31)
3. 竹内 繁樹 '光子数状態の生成制御' 計測自動制御学会第3回制御部門大会 (2003 5/29)



4. 竹内 繁樹 ‘光子を用いた量子計算’ レーザー学会創立30周年記念レーザー学会学術講演会第24回  
年次大会 (2004 1/30)
5. 竹内 繁樹 ‘光量子ビット’ 第42回茅コンファレンス「量子情報処理の物理と技術」(2004 8/23)
6. 竹内 繁樹 ‘光子を用いた量子計算’ 電子情報通信学会2004ノサイエティ大会 (2004.9/23)

#### 国内会議発表

1. Holger F. Hofmann and Shigeki Takeuchi ‘Realization of quantum operations on photonic qubits by linear optics and post-selection’第6回量子情報技術研究会 (2002 5/27)
2. 小島邦裕、Holger F. Hofmann、竹内繁樹、笹木敬司 ‘キャビティ-原子系に対する入出力関係の定式化’ 第6回量子情報技術研究会 (2002 5/27)
3. 小島邦裕、Holger F. Hofmann、竹内繁樹、笹木敬司 ‘2準位原子を介した2光子間非線形相互作用’ 日本物理学会 2002年秋季大会 (2002 9/7)
4. 竹内繁樹、ホフマン・F・ホルガ ‘Single entangled-photon pair generation using parametric down conversion and linear optics’ 日本物理学会 2002年秋季大会 (2002 9/9)
5. ホフマン・F・ホルガ、竹内繁樹 ‘Nonlinear quantum optics with beam splitters, single photon sources, and precise detectors’ 日本物理学会 2002年秋季大会 (2002 9/9)
6. 岡本亮、竹内繁樹、笹木敬司 ‘パラメトリック蛍光対を用いた単一光子源’ 日本物理学会 2002年秋季大会 (2002 9/9)
7. Holger F. Hofmann、Kunihiro Kojima、Shigeki Takeuchi and Keiji Sasaki ‘Realization of a resonant non-linear phase flip in cavity quantum electrodynamics’第7回量子情報技術研究会 (2002 11/11)
8. 岡本亮、竹内繁樹、笹木敬司 ‘パラメトリック蛍光対を用いた単一光子源’ 第7回量子情報技術研究会 (2002 11/11)
9. 小島邦裕、Holger F. Hofmann、竹内繁樹、笹木敬司 ‘単一2準位原子を用いた量子位相ゲートの効率’ 日本物理学会第58回年次大会 (2003 3/30)
10. Holger F. Hofmann and Shigeki Takeuchi ‘Characterization of entanglement using sum uncertainty relations for N-level systems’ 第8回量子情報技術研究会 (2003 6/30)
11. 辻野賢治、Holger F. Hofmann、竹内繁樹、笹木敬司 ‘パラメトリック下方変換を用いた2モード内4光子発生の検証実験’ 第8回量子情報技術研究会 (2003 6/30)
12. 岡寿樹、Holger F. Hofmann、竹内繁樹、笹木敬司 ‘単一原子ドープ片側固体共振器を用いた非線形位相シフトの実現’ 第8回量子情報技術研究会 (2003 7/1)
13. 川瀬大輔、辻野賢治、竹内繁樹、笹木敬司、和田篤、大湊寛之、西原昇、宮本洋子 ‘ホログラムおよびファイバー干渉計を用いた光子の軌道角運動量重ね合わせ状態の観測’ 第8回量子情報技術研究会 (2003 7/1)
14. 竹内繁樹 ‘光子量子ビットを用いた量子情報処理’ 文部科学省科学研究費補助金企画調査シンポジウム (2003 8/18)
15. 岡本亮、竹内繁樹、笹木敬司 ‘パラメトリック蛍光対を用いた単一光子源の実現’ 日本物理学会2003年秋季大会 (2003 9/21)
16. 川瀬大輔、辻野賢治、竹内繁樹、笹木敬司、和田篤、大湊寛之、西原昇、宮本洋子 ‘ホログラムとファイバー干渉計を用いた光子の軌道角運動量もつれ合い状態検証実験’ 日本物理学会2003年秋季大会 (2003 9/21)
17. 千葉孝志、大橋弘明、藤原英樹、堀田純一、竹内繁樹、笹木敬司 ‘単一DiI分子の遷移ダイナミクスの蛍光解析’ 日本物理学会2003年秋季大会 (2003 9/22)
18. Holger F. Hofmann and Shigeki Takeuchi ‘Uncertainty characteristics of entangled photons’ 日本物理学会2003年秋季大会 (2003 9/23)

19. 岡寿樹、Holger F. Hofmann、竹内繁樹、笹木敬司 ‘単一原子ドープ固体共振器における入出力微弱光の非線形位相シフト’ 日本物理学会2003年秋季大会 (2003/9/23)
20. 大橋弘明、堀田純一、竹内繁樹、笹木敬司、村上伸也、鳥本司、大谷文章 ‘単一 CdSe 量子ドットの光学特性’ 日本物理学会2003年秋季大会 (2003/9/23)
21. 川瀬大輔、辻野賢治、竹内繁樹、笹木敬司、和田篤、大湊寛之、西原昇、宮本洋子 ‘光子対における軌道角運動量もつれ合いのホログラム位置スキャンによる確認実験’ 第10回量子情報技術研究会 (2004/5/24)
22. 大橋弘明、堀田純一、竹内繁樹、笹木敬司、村上伸也、鳥本司、大谷文章 ‘単一 CdSe 量子ドットからの発光の光子統計’ 日本物理学会2004年秋季大会 (2004/9/12)
23. 岡寿樹、Holger F. Hofmann、竹内繁樹、笹木敬司 ‘1次元原子の非線形光学応答に対するデコヒーレンスの影響’ 日本物理学会2004年秋季大会 (2004/9/13)
24. 小島邦裕、ホルガ・F・ホフマン、竹内繁樹、笹木敬司 ‘一次元原子との非線形相互作用による2光子波束形状変化についての理論解析’ 日本物理学会2004年秋季大会 (2004/9/13)

#### 特許

1. 特開 2002-228997 (出願 2001-028533)、「低損失光スイッチング方法及び光スイッチ装置」、平成13年2月5日出願、平成14年8月14日公開  
竹内繁樹
2. 特開 2002-281029 (出願 2001-081501)、「量子暗号通信システム」、平成13年3月21日出願、平成14年9月27日公開  
竹内繁樹
3. 特開 2003-0228091 (出願 2002-026085)、「もつれ合い光子対発生装置」、平成14年2月1日出願、平成15年8月15日公開  
竹内繁樹
4. 特開 2004-20970 (出願 2002-176385)、「位相シフト光スイッチ」、平成14年6月17日出願、平成16年1月22日公開  
竹内繁樹、ホフマン・ホルガ (JST 研究員)

#### 国際特許

1. (特願 PCT/JP03/00762) 「Entangled Photon Pair Generator」、平成15年1月28日 PCT 出願  
竹内繁樹
2. 2 国際特許：(特願 PCT/JP02/02672) 「Quantum Cipher Communication System」、平成14年3月20日 PCT 出願  
竹内繁樹