

平成 29 年 6 月 15 日現在

機関番号：14301

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2013～2016

課題番号：25707034

研究課題名（和文）光子を用いたボソンサンプリングの実現

研究課題名（英文）Realization of boson sampling using photons

研究代表者

岡本 亮（Okamoto, Ryo）

京都大学・工学（系）研究科（研究院）・准教授

研究者番号：10435951

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 18,600,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、多光子を用いたボソンサンプリングの実現を目指し、単一光子生成、量子干渉、光子検出といった基礎技術の高度化に取り組み、さらに、それらをシリアル型のシステムと組み合わせた系に着目、研究を進めた。その結果、まず、伝令付き単一光子源の多重化と発生光子対数の識別を組み合わせたハイブリッド型伝令付き単一光子源を初めて実現し、さらに、そこからシリアル的に出力される光子間の量子干渉を確認した。また、ボソンサンプリングに必要な光ネットワーク内の光子の新たな制御法として、量子シャッター現象に着目、実証実験に初めて成功した。また、光子の光路の動的な制御法の一つとして、量子制御SWAPゲートを実現した。

研究成果の概要（英文）：Toward the realization of multi-photon boson sampling, we studied on the improvement of the fundamental technologies, such as single photon source, quantum interference and photon detection, and also investigated the development of a serial type boson sampling system. As the result, first we realized a hybrid heralded single photon source combining multiplexing method and photon pair number discrimination and furthermore we also succeeded in observing quantum interference between photons emitted from the photon source. We also realized a quantum controlled SWAP gate which may be available for the advanced active control of the optical path of photons.

研究分野：量子光学

キーワード：量子情報処理 量子干渉 単一光子源 量子ゲート

1. 研究開始当初の背景

「量子情報科学」は、量子力学の基本的な性質を応用することで「古典系」では不可能なことが「量子系」では可能になることを示してきた。たとえば、量子暗号通信は、不確定性原理により安全性を保証する。また、量子コンピュータは1つの量子プロセッサが量子重ね合わせ状態をとりいくつもの計算を行うことで、古典的なコンピュータよりも本質的に高速な計算を行うことができる。最近では、量子的な光を用いることで、通常の古典的な光を用いた場合の限界を超える計測を可能にする、量子メトロロジも注目されている。また、このような量子情報科学の研究は、量子力学を応用することで何がなし得るかを決定するだけでなく、量子と古典の境界を明らかにすることで、物理法則のより本質的な理解を可能にしてきた。

2011年、ボソンサンプリングという全く新しい古典限界を超える量子的な効果が発見された。全ての粒子は、ボソンかフェルミオンのどちらかであるが、ボソンサンプリングはその名の通り、粒子のボース統計性に立脚している。そして、ボソンサンプリング問題は、古典的には効率的に解くことができないことが分かっている。これらの点で、ボソンサンプリングの実験的な実現は、ボース統計性に基づいた量子と古典の新たな境界を明らかにするとともに、光を用いた新たな応用を切り拓くことで、量子物理学領域を基礎から応用にわたって大きく進展させると考えられる。

2. 研究の目的

光子は代表的なボソンであり、また、1光子であれば、その状態を市販の光学装置を用いて高精度で制御・検出できるなどボソンサンプリング系を実現するのに最適である。また、ボソンサンプリングに必要な任意のユニタリ変換は、単一光子源、ビームスプリッタ上での量子干渉、光子検出器の3つがあれば実現可能である。

本申請課題では、まず、ボソンサンプリングに必要な、「単一光子生成」、「量子干渉」、「光子検出」の3つの基礎技術の高性能化を検討する。さらに、シリアル型のシステムという新しいアイデアと組み合わせることで、複数光子を用いたボソンサンプリング系の実現を目指す。

3. 研究の方法

本研究では、以下の4つの項目について、研究を進めた。

(1) 単一光子源の高性能化

本研究の基礎技術の一つである、単一光子源を高性能化するために、多重化法と光子数識別を組み合わせたハイブリッド型の伝令付き単一光子源の開発し、その出力光子数分布の評価を行った。

(2) 時間的に連続した光子列間の量子干渉

本研究で提案する、シリアル型のシステムの構築を行うためには、単一光子源から発生した時間的に並んでいる光子を動的に制御し、量子干渉させる必要がある。そこで、高性能化した伝令付き単一光子源から、発生した光子列を、動的に制御することで干渉させ、古典的な限界を超えていることを確認した。

(3) 光ネットワーク内の光子の新しい制御法の実証

ボソンサンプリングでは、光子が、いくつもの光路に枝分かれし、また合波する光ネットワーク内で複雑な量子干渉を起こす。そこで、光ネットワーク内の光子の新しい制御法として、「量子シャッター現象」に着目、実証実験を行った。

(4) 量子ゲートを用いた光子の光路の動的な制御法の実現

本研究では、光子の光路を動的に制御する必要がある。そこで、その新しい手法として、量子制御 SWAP ゲートに着目した。量子制御 SWAP ゲートは、制御光子の状態に応じて、標的光子の光路を制御することが可能である。そこで、量子制御 SWAP ゲートを構築、その動作を実証した。

4. 研究成果

本研究では、研究の方法で述べたそれぞれの項目において、下記のような成果を得た。

(1) 単一光子源の高性能化

「伝令付き単一光子源の多重化」と「発生光子対数の識別」を組み合わせたハイブリッド型の伝令付き単一光子源を実現した。そして従来法に比べ、複数光子の発生率が、44%に抑制されていることを確認した(図1)。また、構築した理論により、多光子発生をより強く抑制するには、結合効率の向上と光子検出器の検出効率の向上が重要であることを明らかにした(雑誌論文2)。

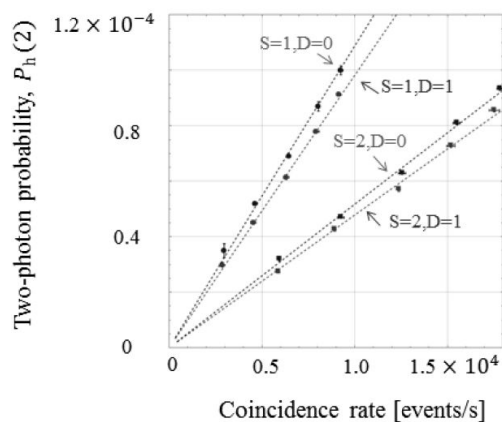


図1. 複数光子発生率の抑制結果。

(2) 時間的に連続した光子列間の量子干渉  
電気光学素子により、伝令付き単一光子源から発生される単一光子列を動的に制御(ルーティング)する実験に成功した。実験では、伝令信号の情報をうい、光子を2つの経路に分岐、分岐された光子間での2光子量子干渉の観測にも成功した。さらに、測定結果の明瞭度を評価し、古典的な限界を超えていることを確認した。これは、本研究で提案するシリアル型のボソンサンプリングの最小単位を実現したことに相当する。

### (3) 光ネットワーク内の光子の新しい制御法の実証

ボソンサンプリングに必要な光ネットワーク内の光子の新しい制御法として、「量子シャッター現象」に着目、実証実験に成功した。2003年、AharonovとVaidmanらは、光子による複数スリット実験において、スリットの場所に、複数の位置に関して重ね合わせ状態をとりうる「量子シャッター」を設置したらどうなるかという興味深い問いかけをおこない、量子シャッターの状態が、初期状態とは異なるある特定の重ね合わせ状態に変化した場合には、1個のシャッターを用いるだけで、複数のスリットに入射する光子を、コヒーレンスを保ったまま完全にはねかえせることを理論的に示した。しかし、「量子シャッター」の実現は困難であり、実験的検証はなされてこなかった。

本研究では、シャッターにも光子を用い、それを量子ゲートで制御することで、量子シャッター実験の検証に初めて成功、その「反射率」が  $0.61 \pm 0.027$  と、古典限界(0.5)を超える結果を得ることに成功し、また反射された光子のコヒーレンスが維持されていることを確認した(図2)(雑誌論文1)。これは、重ね合わせ状態を用いて複数光路に分布した光子を一括的に制御する新しい方法として、ボソンサンプリング等への応用が期待できる。

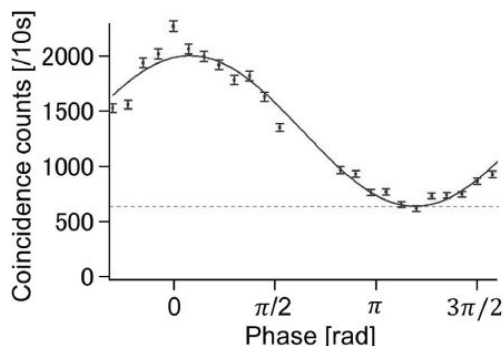


図2. 反射された光子の位相。

### (4) 量子ゲートを用いた光子の光路の動的な制御法の実現

光子の光路の動的な制御方法の新しい手法として、量子制御 SWAP ゲートに着目、外部入力光子に対する量子制御 SWAP ゲート操作を初めて実現した。量子制御 SWAP ゲートとは、3入力、3出力の量子ゲートであり、制御量子ビットが1のときのみ、2つの標的量子ビット間の状態を入れ替える操作を行う。そのため、光路の動的な制御に用いることができる。また、この量子ゲートは、量子回路の簡約化に寄与するだけでなく、「量子指紋認証」や「量子最適複製」などの量子プロトコルに直接適用することができる重要なゲートである。我々は、この量子制御 SWAP ゲートの実現に外部から未知の状態の光子を入力できるものとして、初めて実現することに成功(図3)、出力の3光子が新しい状態(GHZ)であることも確認し、その量子性を実証した(雑誌論文3)。

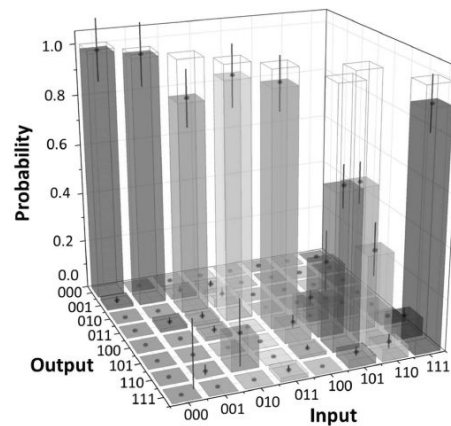


図3. 制御 SWAP ゲート実験結果。

### 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3件)

R. Okamoto and S. Takeuchi, "Experimental demonstration of a quantum shutter closing two slits simultaneously", Scientific Reports, vol. 6 (2016) 35161(1-10). DOI: 10.1038/srep35161, 査読あり。

T. Kiyohara, R. Okamoto and S. Takeuchi, "Realization of multiplexing of heralded single photon sources using photon number resolving detectors", Optics Express, vol. 24 (2016) 27288-27297. DOI: 10.1364/OE.24.027288, 査読あり。

T. Ono, R. Okamoto, M. Tanida, H. F.

Hofmann and S. Takeuchi, "Implementation of a quantum controlled-SWAP gate with photonic circuits", Scientific Reports, vol. 7 (2017) 45353(1-9). DOI: 10.1038/srep45353, 査読あり.

〔学会発表〕(計 11 件)

岡本 亮、「光子で見る量子力学の非局所性」、フォトニック材料学セミナー、神戸大学(兵庫県・神戸市)、2016年7月8日

R. Okamoto and S. Takeuchi, "Realization of a quantum shutter enabling closing two slits", Frontiers of Nonlinear Physics, Nizhny Novgorod - St. Petersburg, Russia, 2016年7月19日

T. Kiyohara, R. Okamoto and S. Takeuchi, "An excess-photon suppressed heralded single photon source combining multiple down-converters and cascaded detectors", SPIE Optics + Photonics 2016, San Diego, California, USA, 2016年8月29日

S. Takeuchi, T. Ono, R. Okamoto, M. Tanida and H. F. Hofmann, "Realization of a quantum controlled-SWAP gate with photonic quantum circuits", SPIE Optics + Photonics 2016, San Diego, California, USA, 2016年8月29日

R. Okamoto, "Quantum optical measurement technologies using entangled photons", OIST-JST Presto joint symposium on Frontiers in Optics and Photonics, 沖縄科学技術大学院大学(沖縄県・国頭郡), 2016年10月31日

清原孝之、岡本 亮、竹内繁樹、「光子対数識別と多重化を用いた伝令付き単一光子源の出力光子数分布の評価」、第34回量子情報技術研究会、高知工科大学永国寺キャンパス(高知県・高知市)、2016年5月30日

岡本 亮、「量子もつれ光子を用いた計測技術」、一般社団法人レーザー学会学術講演会第37回年次大会、徳島大学常三島キャンパス(徳島県・徳島市)、2017年1月9日

S. Takeuchi, R. Okamoto, T. Ono, K. Yamagata, A. Fujiwara, S. Hara and T. Washio, "Quantum state estimation and discrimination", SPIE Photonics West 2017, San Francisco, California, USA, 2017年2月1日

岡本 亮、「光子で見る量子力学の非局所性」、第13回多自由度コロキウム、名古屋大学東山キャンパス(愛知県・名古屋市)、2017年2月23日

岡本 亮、「光子を使った非局所性の検証-量子シャッター実験とその周辺-」、第6回量子基礎論懇話会、名古屋大学東京オフィス(東京都・千代田区)、2017年3月7日

岡本 亮、竹内繁樹、「一つの量子的なシャッターで二つのスリットを同時に閉じる」、日本物理学会 第72回年次大会、大阪大学豊中キャンパス(大阪府・豊中市)、2017年3月17日

〔図書〕(計 1 件)

岡野真之、岡本 亮、竹内繁樹、社団法人レーザー学会、レーザー研究、44巻、10号、663-667、2016年

〔その他〕

(1)報道関連(計 3 件)

岡本 亮、「1つの光子で素子2つ動作」、日経新聞、2016年10月17日

岡本 亮、竹内繁樹、「量子力学の不思議裏付け」、京都新聞、2016年10月15日

Physics Today誌 解説記事  
<http://physicstoday.scitation.org/doi/10.1063/PT.5.9076/full/>

(2)ホームページ

<http://qip.kuee.kyoto-u.ac.jp/>

6. 研究組織

(1)研究代表者

岡本 亮 (OKAMOTO, Ryo)  
京都大学・大学院工学研究科・准教授  
研究者番号: 1043595

(2)研究分担者

なし

(3)連携研究者

なし