

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 6 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2016

課題番号：26800211

研究課題名(和文) タイミング制御された伝令付き単一光子による二光子干渉の研究

研究課題名(英文) Two-photon interference of timing-controlled heralded single photons

研究代表者

吉川 純一 (YOSHIKAWA, Jun-ichi)

東京大学・大学院工学系研究科(工学部)・講師

研究者番号：60589943

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：光を用いた量子情報処理では、単一光子状態が重要なリソースであり、多数の高純度な単一光子状態を同期して入力し、部分透過鏡ネットワークで相互作用させることが求められる。高純度の単一光子状態は伝令付きの方法で生成できるが、この方法は、生成の成功が確率的という欠点がある。このため、生成に成功した単一光子状態を保存してタイミングを制御して干渉させることが重要となる。本研究では、ランダムに生成される高純度の単一光子状態を連結共振器型量子メモリーで保存し、放出タイミングを合わせて干渉させることに成功した。これは、光を用いた量子情報処理の大規模化に向けた重要な成果である。

研究成果の概要(英文)：In optical quantum information processing, single photon states are fundamental resources. It is required to synchronize many pure single photon states so that they interfere on a beam splitter network. Pure single photon states can be generated with the heralding scheme. However, with this scheme, the success of state generation becomes probabilistic. Therefore, an important task is to store pure single photon states for synchronization. In this research, we experimentally succeeded in storage of two single photon states which are generated randomly by means of concatenated cavity systems, and in simultaneous release of them, making interference pattern on a beam splitter. This is an important achievement toward advancement of quantum information processing.

研究分野：量子光学

キーワード：単一光子 量子メモリー パラメトリック下方変換 ホモダイン測定 ウィグナー関数

## 1. 研究開始当初の背景

光は光子として量子化され、その量子状態の重ね合わせは量子情報として利用できる。特に光子は量子通信への利用において唯一性を持っているが、量子計算においても、光子干渉の有用性が十年以上前に指摘されている [Knill et al., Nature 409, 46 (2001)]。こういったプロトコルの基本として主に利用されるのは単一光子状態であり、これは、理想的には或る一つの波束(光パルス)の中に、一つだけ光子が存在する状態である。

単一光子源の研究は、これまで多く存在する。物理系として代表的なものには、量子ドット [山本グループ Phys. Rev. Lett. 89, 233602 (2002)] や、単一原子 [Kimble グループ Science 303, 1992 (2004)] などが挙げられる。これらの多くは、アンチバンチング、つまり、一つ目の光子が検出されたときには二つ目の光子は検出されないという、光子の統計によって検証されてきた。しかし、このアンチバンチングによる検証では、光子が1つも存在していない場合が反映されない。実際、このアンチバンチングにより単一光子源と示された光子源の大多数において、放出する光波束は、ほとんどが光子数ゼロであり、たまに単一光子を含むという、単一光子“状態”とは程遠いものである。このような光子源では、多数の光子干渉を用いる高度な量子光学実験への応用は難しい。

単一光子を確率 50%以上で含むような高純度の単一光子“状態”は、現在まで、確率的な方法でしか実現されていない。その方法は、非線形光学効果である光パラメトリック下方変換により確率的に光子対を生成し、その対の片側で光子検出を行うことで、光子対生成の成功を確かめるといったものである。この光子検出に成功したときには、対のもう片側が、“伝令付けられた”単一光子として存在する。概念図を図1に示した。

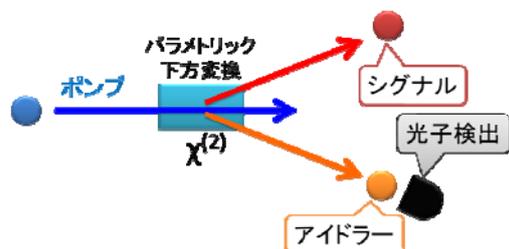


図1：伝令付き単一光子生成の概念図。アイドラー光子が伝令し、シグナル光子が単一光子状態として利用される。

この方法は、単一光子状態の高純度という最大の利点の他に、周期分極反転の非線形光学素子で位相整合を取れば、常温常圧で様々な波長において単一光子源が実現可能であるなどの便利さもあり、多くの最先端の量子光

学実験において利用されてきた。一方、最大の欠点は光子生成が確率的であることであるが、高純度を保ったままこの光子を量子メモリーにおいて保持することができれば、原理的にこの問題は解決される。

研究代表者の近年の研究において、この、高純度の単一光子状態を量子メモリーに保存して任意時間に取り出すという実験に成功している [Yoshikawa et al., Physical Review X 3, 041028 (2013)]。手法としては、連結共振器を動的に駆動して、量子メモリーとして利用するものであった。実験系の概略図を図2に示す。

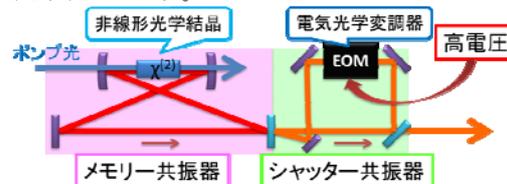


図2：連結共振器型量子メモリーの概念図。

メモリー共振器とシャッター共振器と呼ぶ2つの光共振器を連結させた構造を持つ。メモリー共振器は二次の非線形光学結晶を内部に含み、共振器内部で図1にあるような光パラメトリック下方変換を起こす。メモリー共振器の出力口にシャッター共振器が連結されているため、パラメトリック下方変換で生成されたシグナル光子とアイドラー光子と呼ぶ周波数の異なる2つの光子のうち、シャッターにおいて共振する光子のみが、シャッターを通り自由空間に放出される。これを用いて、先にアイドラー光子のみを放出して光子対生成を伝令させ、後にシャッターの共振点を高速にシフトしてシグナル光子を取り出すということが可能になる。共振点のシフトは電気光学効果によって行う。

構成は簡単であるが、共振器長の制御等、実験的困難の多くを解決し、実験に成功した。結果、世界で初めて、量子メモリーの出力において、ウィグナー関数の負の値を得ることに成功した。ウィグナー関数とは、量子状態を記述する擬確率分布である。負の確率は古典的には実現不可能であるので、負値を持つウィグナー関数は高い量子性の証明であり、量子情報処理において重要な役割を果たすとされている [Phys. Rev. Lett. 109, 230503 (2012)]。単一光子状態の場合には、ウィグナー関数が負の値を持つための十分条件はその純度が 50%を超えることであり、それを達成した。

## 2. 研究の目的

光子のタイミング制御は、2つ以上の光子を干渉させる時にこそ強みが現れるので、本研究では、上記の実験の発展として、独立な2つの連結共振器型量子メモリーからタイミ

ングを制御して放出する、2つの光子を干渉させるという実験を目的とする。このとき、光子はバンチングを起こし、半透過鏡後には、2つの出力の片側に光子が2つとも集まる (Hong-Ou-Mandel 現象) [Phys. Rev. Lett. 59, 2044 (1987)]。従来の実験ではこれを、様々なタイミングで飛来する光子の中で、2つの光子のタイミングが揃ったときに半透過鏡後の2つの出力での光子同時検出確率が下がる (Hong-Ou-Mandel dip) という、光子統計から確認していた。つまり、光子の飛来タイミングがランダムな中から、“偶然” 同時にやってきた光子2つの干渉を見ていた。本研究では、バンチングした状態を、光子の飛来タイミングを合わせることで積極的に作り出す。つまりは、従来の、バンチングという現象を“観測”する実験と異なり、本研究では干渉後のバンチングした量子状態を“生成”する実験となっている。2つの光子のタイミング同期の概念図を図3に示した。

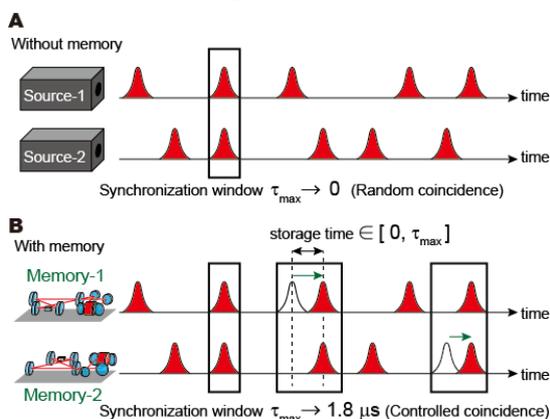


図3：2つの光子のメモリーによる同期の概念図。Aではメモリーを利用せず、光子のタイミングが合うのは偶然でしかないが、Bではメモリーによってタイミングを積極的に合わせている。或る設定した時間幅内にある2つの光子は、メモリーの解放タイミング制御により同時に放出される。

### 3. 研究の方法

研究代表者らによる先行研究である、連結共振器型の光子メモリーを、図4のように2台並べて対称に配置し、出力光子を干渉させる。

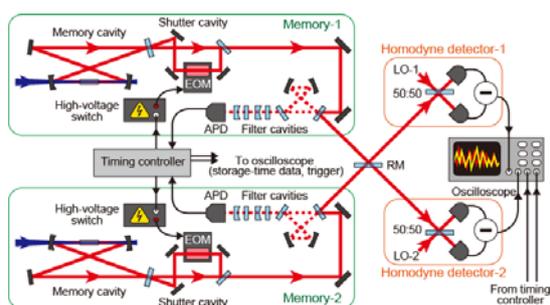


図4：実験図。上下に連結共振器型量子メモリーが並んでおり、放出された光子は半透過鏡で干渉する。二組の連結共振器は、同一の

デジタル制御装置で放出タイミングを制御する。

また、検証方法としては、従来の Hong-Ou-Mandel dip を見る方法ではなく、光振幅をホモダイン測定するという方法を取る。Hong-Ou-Mandel dip は光子統計を見る手法であり、単一光子のアンチバンチングを見る場合と同様に、良くも悪くも、光子が“居ない”場合が多い低純度の光子源でも美しい結果を示してしまう。それに対して、光振幅を見る方法では、光子が“居ない”場合が見た目にしっかり反映される。また、量子状態の完全な推定を可能にし、高い量子性の証明であるウィグナー関数の負値の存在も示すことができる。

### 4. 研究成果

2組の連結共振器型量子メモリーを同期させて、二光子干渉を行うことに成功した。本研究の成果はオープンアクセスの Science Advances 誌に掲載された [Science Advances 2, e1501772 (2017)]。以下にその結果をまとめる。

光子干渉を成功させるためには、2つの連結共振器の特性が一致して、同一形状の光パルスとして単一光子状態を放出できなければならない。まずは個々のメモリーの評価を行った。単一光子状態をメモリー内に生成後の待ち時間を変えながら、放出される光子の波束を調べた。結果は図5のようになり、同一の特性を持った連結共振器系を2組用意できたことが示された。また、放出タイミングを変えても光子の光パルスの形状が変わらず、タイミングだけを制御できていることも分かる。

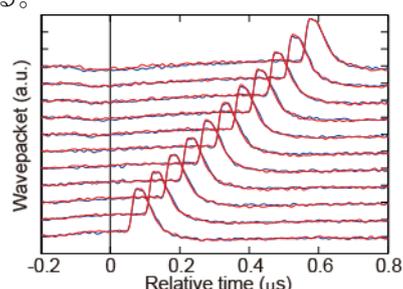


図5：メモリーから放出される単一光子の光パルス。赤線と青線がそれぞれ異なる連結共振器系を表しており、それらが重なっているので、同一形状の光パルスを放出できる、同一特性の連結共振器ができたことを示している。放出タイミングを変えながら光パルス形状を調べており、下から上にかけて徐々にタイミングを遅らせているが、光パルスはタイミングのみが変化して形状は変わらず、理想的に動作している。

次に、放出される2つの単一光子の同期を行い、同期幅を変えたときに平均の光子純度が

どう変わるかを調べた。結果は図6のようになった。

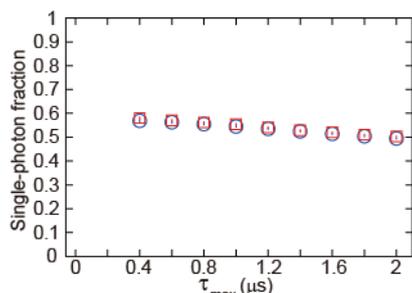


図6：メモリーによる同期時間幅と平均単一光子純度の関係。赤と青でそれぞれ異なる連結共振器系を表す。

同期幅が長いと、平均のメモリー保持時間が延びるため、有限のメモリー時間を持つ量子メモリーでは光子の純度が落ちる。しかし、本実験系では  $2\mu s$  近くまで、ウィグナー関数の負値の条件である平均光子純度 50%を保っていることが分かった。

最後に、同期された2つの単一光子を半透過鏡で干渉させ、2つの出力の光振幅の同時分布を見た。出力状態は位相敏感になり、光位相のどこを測定するかにより分布が変わる。結果を図7および図8に示す。

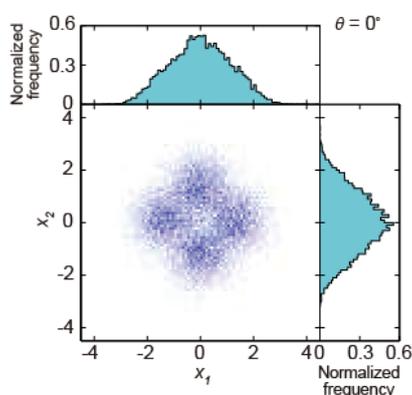


図5：単一光子同士の干渉後の光振幅の同時分布。或る位相差を選んだとき。

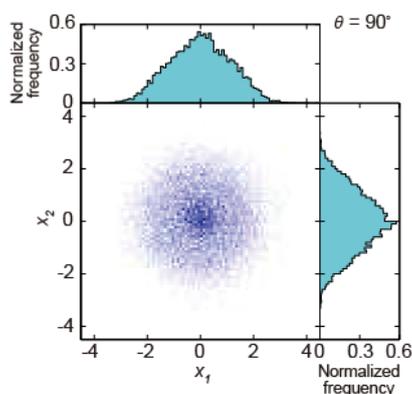


図6：単一光子同士の干渉後の光振幅の同時分布。図3と直交した位相差を選んだとき。従来の HOM dip を見る方法では、干渉後の状

態の位相依存性は見ない。しかし本研究では光振幅をみることにより、この位相依存性を実験的に美しく示すことができた。ここで一つ注目すべき点は、個々の出力の分布（周辺分布）には位相依存性が無く、同時分布における相関としてのみこの位相依存性が現れることである。この、相関の位相依存性は、二光子干渉後の状態が量子エンタングルメントを持っていることと深く関係している。

以上のように、高い純度を持つ2つの単一光子状態を、同期して干渉させることに成功した。これは、光を用いた量子情報処理の大規模化に向けた重要な成果である。

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計1件)

- ① Kenzo Makino, Yosuke Hashimoto, Jun-ichi Yoshikawa, Hideaki Ohdan, Takeshi Toyama, Peter van Loock, Akira Furusawa, “Synchronization of optical photon for quantum information processing,” *Science Advances* 2, e1501772 (2016). DOI: 10.1126/sciadv.1501772 (査読有り)

[学会発表] (計23件)

- ① J. Yoshikawa, Y. Hashimoto, H. Ogawa, S. Yokoyama, Y. Shiozawa, T. Serikawa, A. Furusawa, “Continuous-variable quantum optical experiments in the time domain using squeezed states and heralded non-Gaussian states,” SPIE Photonics West 2017, San Francisco, USA (2017年2月1日) (招待講演)
- ② J. Yoshikawa, K. Makino, Y. Hashimoto, H. Ogawa, K. Miyata, A. Furusawa, “Heralded optical quantum states and their storage in optical cavities,” EMN Spring Meeting 2016, Taipei, Taiwan (2016年3月10日) (招待講演)
- ③ J. Yoshikawa, “Continuous-variable quantum optical experiments with conditional non-Gaussian states,” PRACQSYS Workshop 2015, Sydney Australia (2015年7月23日) (招待講演)
- ④ J. Yoshikawa, “Heralded quantum states characterized by homodyne detection,” Photons beyond qubits 2015, Olomouc, Czech Republic (2015年3月16日) (招待講演)
- ⑤ J. Yoshikawa, K. Makino, Y. Hashimoto, A. Furusawa, “Heralded optical quantum states and their storage in

optical cavities,” SPIE/COS  
Photonics Asia, Beijing, China (2014  
年 10 月 9 日) (招待講演)

- ⑥ J. Yoshikawa, “Storage and on-demand  
release of single photons by means of  
concatenated cavities,” Photons  
beyond qubits 2014, Olomouc, Czech  
Republic (2014 年 4 月 17 日) (招待講演)

[図書] (計 1 件)

- ① Jun-ichi Yoshikawa, Kenzo Makino,  
Akira Furusawa, “On-demand release of  
a heralded quantum state from  
concatenated optical cavities,” pp.  
217-240 (Chapter 8) in “Engineering  
the atom-photon interaction” edited  
by Ana Predojević, Morgan W. Mitchell  
(Springer, 2015)

[その他]

ホームページ等

<http://www.alice.t.u-tokyo.ac.jp/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

吉川 純一 (YOSHIKAWA, Jun-ichi)  
東京大学・大学院工学系研究科・講師  
研究者番号： 60589943