

令和 3 年 6 月 7 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2018～2020

課題番号：18H01149

研究課題名（和文）連結共振器による光量子エンタングルメント状態の保存と取り出しの研究

研究課題名（英文）Storage and release of optical quantum entangled states using concatenated cavity system

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） 13,300,000円

研究成果の概要（和文）：我々が独自に持つ連結共振器型量子メモリの技術を発展させて、2台の連結共振器に跨った単一光子の量子エンタングルメントを保存し、タイミングを制御して放出することに成功した。放出された光の量子状態を推定し、高い量子性が保たれたままタイミング制御できていることを確かめた。特に、ウィグナー関数と呼ばれる擬確率分布の負領域が、量子力学と古典力学の違いとして重要であり、この負領域を持つ量子状態を保存できたことが重要である。

研究成果の学術的意義や社会的意義

量子力学の応用としての量子コンピューターが注目を集める中で、光という量子系の可能性を広げる意味で、光の特殊な量子状態のタイミング制御を行うという重要な研究に成功した。単なる光子のタイミング制御ではなく、光の位相に敏感な量子状態を扱い、複数台の光共振器メモリを位相同期できている点が重要である。これは、時間領域多重された光波束の巨大エンタングルメントと組み合わせることで、原理的にはユニバーサルな量子コンピューターの実現につながるものである。

研究成果の概要（英文）：We extend quantum memories composed of concatenated optical cavities, which are our original technique. We create and store a single photon straddling between two memory systems as an entangled state, and release it with controlled timings. We estimate the released quantum state and verify that they are controlled while keeping unique features of quantum mechanics. In particular, negative regions of the Wigner functions are important, distinguishing quantum mechanics from classical mechanics, and the important thing is that the quantum states are stored while keeping this negative regions.

研究分野：量子光学実験

キーワード：量子エンタングルメント 光子 量子メモリ

## 1. 研究開始当初の背景

近年、量子力学の原理を上手く利用した量子コンピューターが注目を集めている。量子コンピューターを実現する物理系は、量子力学に従ってさえいけば原理的には自由に選ぶことができるため、超伝導等、様々な物理系において研究が進められている。その中で、光の量子状態を利用した実装は、通信と相性が良い等、様々な利点がある。特に、近年は時間領域多重と呼ばれる方式で、多くの光波束がエンタングルした状態を作り出すことに成功している[S. Yokoyama et al., Nature Photonics 7, 982 (2013) 等]。量子エンタングルメントとは、複数の物理系が量子力学特有の相関を持っていることを表し、量子コンピューター等の様々な量子情報応用において重要な役割を持っている。量子コンピューターにおいては量子情報の担い手(量子ビット等と呼ばれる)を多数用意して相互作用させることで巨大なエンタングルメントを作る必要があり、このスケールビリティが難しい点の一つなのであるが、光を用いた量子情報処理においてはこの問題点は基本的に解決されていると考えてよく、光を用いた量子情報処理の大きなアドバンテージと考えられる。

しかし、光における上記の巨大なエンタングルメントは、ガウス型の量子揺らぎを持つ状態においてのみ実現されている。ガウス型の状態のみを用いた情報処理では、古典コンピューターの性能を超えないことが理論的に示されており、ガウス型の巨大エンタングルメントを、非ガウス型の補助入力と組み合わせることが必要になってくる。非ガウス型の量子状態には、例として単一光子状態などがあるが、これらの状態は現状、確率的な方法のみによって生成されている。

以上のような状況から、確率的に生成された非ガウス型の量子状態を、必要となるまで保存しておき、巨大エンタングルメントの波束のタイミングに合わせて放出して光同士を干渉させる技術が必要となる。このことから、我々は近年、独自の連結共振器型の量子メモリーを開発し、単一光子状態をタイミング制御して放出させることに成功している[J. Yoshikawa et al., Phys. Rev. X 3, 041028 (2013), K. Makino et al., Sci. Adv. 2, e1501772 (2016)]。この技術をさらに発展させ、様々な光の量子状態を保存することが次の重要なステップである。

## 2. 研究の目的

本研究では、連結共振器型の量子メモリーを2台用意して、その間に非ガウス型の量子エンタングルメントを保存し、放出のタイミング制御を行うことを目的とする。ここでの量子エンタングルメントは、具体的には単一光子状態の重ね合わせである。つまり、1台目の共振器の中に単一光子があるかもしれないし、2台目の共振器の中に単一光子があるかもしれないという、量子力学的な重ね合わせ状態である。この状態は、非ガウスであるため確率的に生成されるが、放出タイミングを制御できれば、時間領域多重のエンタングルメントと組み合わせることができる。

我々の先行研究における単一光子状態の場合と比べて、本研究は技術的な要求度が大きく上がっており、様々な開発を行う必要がある。具体的には、光の位相に関して、これまでにない制御を行う必要がある。良く知られている通り、光は波であり、光波長(我々の実験系では860nm)で360°回る位相の自由度がある。しかし、過去に実験で用いた単一光子状態は、非常に特殊な、光の粒子性が最も顕著な状態であるため、この位相に関して全く不敏感な量子状態である。そのため、過去の連結共振器型メモリー実験では、この光位相をメモリー共振器内部で制御する必要がなかった。しかし、量子コンピューターで求められる補助入力は、基本的には位相敏感な非ガウス型状態であるため、本研究において、メモリー共振器内の位相制御技術開発を行う。量子エンタングルメントにおいては、位相の情報が非常に重要になっており、もし位相の情報を失えば、量子エンタングルメントは失われ、古典的な混合状態に落ちてしまう。量子エンタングルメントを保存するには、2台の連結共振器で位相が同期されている必要がある。将来的には多数の量子メモリーを位相同期して時間領域多重エンタングルメントと組み合わせる必要があるが、その目標に向けた重要なステップである。

## 3. 研究の方法

本研究では、レーザー光と光学機器を用いて、単一光子の重ね合わせである量子エンタングルメントを2台の連結共振器型量子メモリー内に跨って生成し、それをタイミング制御して取り出し、取り出し後の量子状態を推定、エンタングルメントの存在を確かめる実験を行う。また、その前段階として、1台の連結共振器において、位相敏感な状態、具体的には単一光子が居る場合

と居ない場合の重ね合わせ状態を保存し、タイミング制御して取り出す実験を行う。取り出した量子状態は、光ホモダイン測定と呼ばれる方法で測定し、量子状態の最尤推定を行う。光ホモダイン測定とは、局部発振光と呼ばれる補助光を、測定したい量子力学的な光と干渉させて、光の直交位相振幅を測定するものである。局部発振光が光モードのフィルターとしても働くので、原理的に単一の光波束に関する測定が可能であり、正確に光の量子状態を推定することが可能である。この点は、光子（または光エネルギー）の測定と比べて大きなアドバンテージである。後述の、ウィグナー関数の負領域の確認も、このホモダイン測定を行うことで可能になる。

連結共振器型の量子メモリーは、2台の共振器を連結させることで実現できる。共振器とは、複数のミラーで光を周回させて閉じ込めるものである。1台が量子状態を保存するメモリー共振器であり、1枚のミラーを部分透過ミラーにして、光の出口にする。もう1台の共振器はシャッター共振器と呼ばれ、メモリーの出口に連結させて、共振器外部とメモリー共振器の間のカップリングを制御する。詳しくは以下ようになる。まず、共振器に閉じ込められる光は、共振器を一周して位相が一致する波長のものに限られる（共振条件）。従って、保存される光の波長はメモリー共振器の共振器長が決めるが、その波長がシャッター共振器においても共振であれば外界とメモリー共振器のカップリングが大きくなり、逆にシャッター共振器において非共振であれば外界とメモリー共振器のカップリングが小さくなる。メモリー共振器と外界とのカップリングが小さいときにメモリー内部の量子状態が保存され、カップリングが大きいときにメモリーから外界に量子状態が波束として放出される。放出を制御するために、シャッター共振器の共振器長は高速に制御されなければならないが、ここには電気光学効果を用いる。ポッケルスセルと呼ばれる素子をシャッター共振器内部に挿入し、瞬間的に1000ボルト程度の電圧をかけることで、共振器長をシフトする。

また、共振器内部への単一光子の生成には、伝令付きの手法を用いる。これは、2次の非線形光学効果により確率的に光子対を生成し、その対の一方を検出することで、量子力学的な波束の収縮を起こし、もう一方の光子の存在を確定させる方法である。本研究では、非線形光学素子をメモリー共振器内部に置く。光子対は両方ともメモリー共振器に共振する波長で生成されるが、光子対を非縮退とし、対の一方をシャッターに共振、もう一方をシャッターに非共振となるように波長関係を設定することで、一方の光子のみを先に放出し、それを光子検出器で測定することで伝令を行う。保存された量子状態は、シャッターの共振器長をシフトすることで、外界に放出できる。本研究では単一光子のエンタングルメントを生成するが、これは、2台の連結共振器の出力を干渉させてから伝令用の光子検出にかけることで、どちらの連結共振器からの光子であるかを量子力学的に不確定にして、重ね合わせ状態にすることで生成できる。また、その前段階の実験である、光子が居る場合と居ない場合の重ね合わせは、光子検出前に補助光と干渉させることで、光子が連結共振器系から来たのか補助光から来たのか不確定にすることで生成できる。

メモリーにおいて光位相の情報を保持するのは、実験的に試行錯誤が必要な部分である。基本的にはプローブとなるレーザー光を用意して、共振器の中を通し、プローブ光を基準に位相を制御する。しかし、位相を制御したい閉じ込められた光は、外界とのカップリングが非常に小さく抑えられており、実効的に非常に高フィネスになっているため、少しの共振器の変動がプローブ光に大きな位相揺れを与えてしまう。共振器の安定化、位相の安定したレーザー光の使用、サンプルアンドホールド方式による光学系の制御、全体のタイミングテーブルを管理するデジタル制御器のプログラミング等を行い、実験系を構築する。

#### 4. 研究成果

本研究における主要な成果は、以下の2つになる。まず、単一光子が居るまたは居ないの重ね合わせ状態を1台の連結共振器内に生成し、それをタイミング制御して放出し、放出された状態の高い非古典性を確認した。この成果は、Y. Hashimoto et al., Phys. Rev. Lett. 123, 113603 (2019)において発表を行った。次に、2台の連結共振器に跨った単一光子状態の重ね合わせ状態となる量子エンタングルメントを生成し、タイミングを制御して放出して、放出された状態の高い非古典性、特に、量子エンタングルメントの存在を確認した。この成果は、F. Okamoto et al., Phys. Rev. Lett. 125, 260508 (2020)において発表を行った。

まずは前者の研究において、高い非古典性として、具体的にはウィグナー関数の負の領域を実験的に確認した。ウィグナー関数とは、擬確率分布であり、古典力学における位相空間での同時分布に対応するものである。量子力学においては位置と運動量の間には不確定性が存在するので、それによりウィグナー関数上の各点は確率分布としての意味を失い、結果、負の値を取ることが許される。つまり、ウィグナー関数の負領域は不確定性という量子力学特有の性質に由来しており、古典力学では実現できない性質を表している。量子コンピューター等において古典を上回るために、ウィグナー関数の負領域が重要であることが示されている。しかし、この負領域は非常に脆く、光学的な損失等で簡単に失われる。この負領域を、放出された重ね合わせ状態に残した状

態で、タイミング制御を行うことに成功した。特に、今回保存した負領域はウィグナー関数の原点から外れたところに存在するもので、これは量子状態の位相情報を失ったら消えてしまうものである。これを保持できたということは、連結共振器型量子メモリーにおいてメモリー内部の位相を安定に外部系と同期できたことを意味する。ここで開発された実験技術は、次のエンタングルメント保存実験の基礎になった。

後者のエンタングルメント保存実験は、位相同期を2台に拡張することで実現した。こちらの実験でも、ウィグナー関数の負領域を保存することができた。また、出力のタイミングを変えても量子エンタングルメントを保つことができた。量子エンタングルメントは位相情報を失うと消えてしまうので、エンタングルメントの保存は2台の連結共振器における位相同期の成功を表しているともいえる。また、2台の放出タイミングを同時にシフトするのではなく、それぞれを別々のタイミングで放出させる実験も行った。この場合でもエンタングルメントは保存されていることが確認でき、時間領域多重の実験系と柔軟な形で組み合わせられる可能性を示すことができた。タイミング等はデジタル機器で制御されており、組み合わせたい他のシステムに合わせてある程度柔軟にプログラミング可能である。

以上の成果により、当初の目的を本研究において達成できた。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計9件（うち査読付論文 9件/うち国際共著 6件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Y. Hashimoto, T. Toyama, J. Yoshikawa, K. Makino, F. Okamoto, R. Sakakibara, S. Takeda, P. van Loock, and A. Furusawa	4. 巻 123
2. 論文標題 All-optical storage of phase-sensitive quantum states of light	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Phys. Rev. Lett.	6. 最初と最後の頁 113603
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevLett.123.113603	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 K. Takase, M. Okada, T. Serikawa, S. Takeda, J. Yoshikawa, and A. Furusawa	4. 巻 99
2. 論文標題 Complete temporal mode characterization of non-Gaussian states by a dual homodyne measurement	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Phys. Rev. A	6. 最初と最後の頁 33832
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevA.99.033832	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Jun-ichi Yoshikawa, Yosuke Hashimoto, Hisashi Ogawa, Takahiro Serikawa, Yu Shiozawa, Masanori Okada, Warit Asavanant, Atsushi Sakaguchi, Naoto Takanashi, Fumiya Okamoto, Kan Takase, Masaya Kobayashi, Shota Yokoyama, Shuntaro Takeda, Peter van Loock, Akira Furusawa	4. 巻 10771
2. 論文標題 Optical quantum information processing and storage	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 SPIE Proceedings	6. 最初と最後の頁 107710Q
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1117/12.2320476	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Kan Takase, Masanori Okada, Takahiro Serikawa, Shuntaro Takeda, Jun-ichi Yoshikawa, and Akira Furusawa	4. 巻 99
2. 論文標題 Complete temporal mode characterization of non-Gaussian states by a dual homodyne measurement	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Phys. Rev. A	6. 最初と最後の頁 33832
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevA.99.033832	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 T. Serikawa, J. Yoshikawa, S. Takeda, H. Yonezawa, T. C. Ralph, E. H. Huntington, and A. Furusawa	4. 巻 121
2. 論文標題 Generation of a cat state in an optical sideband	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Phys. Rev. Lett.	6. 最初と最後の頁 143602
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.121.143602	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Y. Shiozawa, J. Yoshikawa, S. Yokoyama, T. Kaji, K. Makino, T. Serikawa, R. Nakamura, S. Suzuki, S. Yamazaki, W. Asavanant, S. Takeda, P. van Loock, and A. Furusawa	4. 巻 98
2. 論文標題 Quantum nondemolition gate operations and measurements in real time on fluctuating signals	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Phys. Rev. A	6. 最初と最後の頁 52311
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevA.98.052311	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Fumiya Okamoto, Mamoru Endo, Mikiyoshi Matsuyama, Yuya Ishizuka, Yang Liu, Rei Sakakibara, Yosuke Hashimoto, Jun-ichi Yoshikawa, Peter van Loock, and Akira Furusawa	4. 巻 126
2. 論文標題 Phase Locking between Two All-Optical Quantum Memories	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Phys. Rev. Lett.	6. 最初と最後の頁 260508
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.125.260508	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Kan Takase, Jun-ichi Yoshikawa, Warit Asavanant, Mamoru Endo, and Akira Furusawa	4. 巻 103
2. 論文標題 Generation of optical Schroedinger cat states by generalized photon subtraction	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Phys. Rev. A	6. 最初と最後の頁 13710
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevA.103.013710	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Shunya Konno, Atsushi Sakaguchi, Warit Asavanant, Hisashi Ogawa, Masaya Kobayashi, Petr Marek, Radim Filip, Jun-ichi Yoshikawa, and Akira Furusawa	4. 巻 15
2. 論文標題 Nonlinear Squeezing for Measurement-Based Non-Gaussian Operations in Time Domain	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Phys. Rev. Applied	6. 最初と最後の頁 24024
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevApplied.15.024024	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計3件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 3件)

1. 発表者名 M. Endo, F. Okamoto, M. Matsuyama, Y. Ishizuka, Y. Hashimoto, R. Sakakibara, J. Yoshikawa, P. van Loock, A. Furusawa
2. 発表標題 Generation of two-mode quantum states of light with timing controllable memories
3. 学会等名 CLEO 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 J. Yoshikawa, W. Asavanant, A. Furusawa
2. 発表標題 Purification of Photon Subtraction from Continuous Squeezed Light by Filtering
3. 学会等名 CLEO 2018, San Jose, USA (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Jun-ichi Yoshikawa, Yosuke Hashimoto, Hisashi Ogawa, Takahiro Serikawa, Yu Shiozawa, Masanori Okada, Warit Asavanant, Atsushi Sakaguchi, Naoto Takanashi, Fumiya Okamoto, Kan Takase, Masaya Kobayashi, Shuntaro Takeda, Akira Furusawa
2. 発表標題 Optical quantum information processing and storage
3. 学会等名 SPIE Optics + Photonics, San Diego, USA (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------