

## 光子の自在な同期に成功 —量子計算機など実用化へ前進—

1. 発表者： 古澤 明（東京大学大学院工学系研究科物理工学専攻 教授、  
同ナノ量子情報エレクトロニクス研究機構 教授兼務）  
吉川 純一（東京大学大学院工学系研究科物理工学専攻 助教）

### 2. 発表のポイント：

- ◆ 2光子の飛来タイミングの自在な同期に初めて成功。
- ◆ 生成タイミング差が1.8マイクロ秒の光子まで同期でき、同期効率が従来比25倍向上。
- ◆ 究極的な大容量光通信や超高速量子コンピューターの実用化へ突破口を開く画期的成果。

### 3. 発表概要：

東京大学大学院工学系研究科の古澤明教授と吉川純一助教らの研究グループは、光子メモリー（注1）を用いることにより光子の飛来タイミングを制御し、2光子の飛来タイミングの自在な同期（注2）に初めて成功しました。これまでは、量子論理ゲートにランダムに飛来する光子のうち、たまたま同時に来た光子を測定後に事後選択する手法をとらざるを得なく、量子論理ゲート動作の効率が非常に低くなるという致命的な問題がありました。今回の成果により、こうした問題は大きく緩和され、さらにこの技術を発展させれば、量子論理ゲートの連続動作が可能となります。したがって、この成果は大容量光通信や超高速量子コンピューターの実用化へ向けて突破口となるもので、光量子論理ゲートの確率的動作問題の解決に大きく近づきました。

### 4. 発表内容：

#### 《研究背景》

これまで目覚ましい進歩を遂げてきた現代の情報処理技術も、近年その性能が原理的限界に近づきつつあると言われていています。一方で、量子力学の原理を応用した新しいタイプの情報処理（量子情報処理）により、従来技術の限界を超える究極的な大容量通信（量子通信）や、超高速コンピューター（量子コンピューター）の実現が予測されています。

その中でも光を用いた量子情報処理はその先頭を走っています。光の量子である光子のエネルギーは環境のゆらぎのエネルギーに比べ非常に大きいため、室温でも光子の量子性が失われないからです。これは、スピンや超伝導などを用いた他の量子情報処理に比べて、光の量子情報処理が圧倒的に有利な点です。

光を用いた量子情報処理では、情報は単一光子を用いた量子ビットとして処理されています。そして従来の光量子情報処理では、量子論理ゲートにランダムに飛来する光子のうち、たまたま同時に来た光子を測定後に事後選択する手法が取られていました。この場合、量子論理ゲートは確率的にしか動作しませんから非常に効率が低くなるという致命的な問題（確率的動作問題）がありました。さらに、量子論理ゲートを複数動作させると指数関数的に成功確率が下がるため、事実上大規模な量子コンピューターを作製するのは不可能とされていました。

## 《今回の成果》

本研究グループは、光子メモリーを用いることにより光子の飛来タイミングを制御し、2光子の飛来タイミングの自在な同期に初めて成功しました（図1）。この光子メモリーは光子の生成とメモリー機能を持ち、2つの連結した光共振器からなります（図2、図4）。そのうちの1つの光共振器中には非線形光学素子が入っていて、光パラメトリック発振器となっています。もうひとつの光共振器中には光位相変調器が入っており、光位相変調器の電圧を制御することにより開閉できる光シャッターとなっています。光パラメトリック発振器は単一光子生成器となっていますが、通常は光シャッターが閉じられており、生成された光子は光パラメトリック発振器から外へ出ることができません。しかし、光位相変調器の電圧を制御し光シャッターを開けば、光子を取り出すことができます。つまり、この光子メモリーでは欲しいタイミングで光子を取り出すことを可能にしました。本研究グループは、この光子メモリーを2つ用意し、2光子の飛来タイミングを自在に制御し、2光子を同期してビームスプリッターに飛来させました。これにより、量子レベルでのオンデマンドな干渉に世界で初めて成功しました（図3）。この光子メモリーを用いると、生成タイミング差が1.8マイクロ秒までであれば同期することが可能で、従来に比べ同期効率が25倍向上しました。

この技術により、従来の光量子情報処理の確率的動作の問題は大きく緩和され、この技術をさらに発展させれば、量子論理ゲートの連続動作が可能となります。したがって、この成果は超大容量光通信や超高速量子コンピューターの実用化へ向けた突破口となるもので、光量子論理ゲートの確率的動作問題の解決に大きく近づきました。

## 《社会的意義と今後の展望》

本成果により、光量子コンピューターにおける光量子論理ゲートの確率的動作問題が解決に大きく近づきました。本研究グループは、今後この技術を発展させ、光量子論理ゲートの連続動作を目指します。また、本技術は、原子などを用いた量子メモリーと異なり、動作波長を選びません。したがって、あらゆるレーザー波長に対応でき、非常にフレキシブルなため、色々なシステムに組み込むことが容易です。また、この光メモリーは単一光子だけでなく、シュレーディンガーの猫状態（注3）などを含む、あらゆる量子状態にも使えることから、量子誤り訂正で最も重要な「魔法状態（注4）」を保存することも可能で、光量子情報処理の基本技術となることが期待されます。

なお、古澤 明研究室は、文部科学省による拠点形成事業「最先端の光の創成を目指したネットワーク研究拠点プログラム」の1つである「先端光量子科学アライアンス（APSA）」のメンバーであり、本研究は「JST CREST 新たな光機能や光物性の発現・利活用を基軸とする次世代フォトニクス」の助成を受けて行われました。

## 5. 発表雑誌：

雑誌名：米国科学雑誌「Science Advances」〈2016年5月27日（米国時間）〉

論文タイトル：Synchronization of optical photons for quantum information processing

著者：Kenzo Makino, Yosuke Hashimoto, Jun-ichi Yoshikawa, Hideaki Ohdan, Takeshi Toyama, Peter van Loock, and Akira Furusawa

Science Advances 2, e1501772 (2016)

DOI 番号：10.1126/sciadv.1501772

## 6. 問い合わせ先：

東京大学大学院工学系研究科物理工学専攻  
教授 古澤 明

## 7. 用語解説：

**注1 光子メモリー：** 光子は通常光速で進行するため止まることができません。この光子メモリーは鏡の間に光子を閉じ込めることにより光子を保持します。本研究では、光子メモリーは光子の生成とメモリー機能を持ち、2つの連結した光共振器からなります。そのうちの1つの光共振器中には非線形光学素子が入っていて、光パラメトリック発振器となっています。もうひとつの光共振器中には光位相変調器が入っており、光位相変調器の電圧を制御することにより開閉できる光シャッターとなっています。光パラメトリック発振器とは、光子ペアをランダムに生成する装置であり、片方の光子が生成後すぐに外に出て、もうひとつの光子の存在を知らせる働きをしています。

**注2 光子の同期：** 2つの光子を同じタイミングでビームスプリッターに飛来させること。これにより2つの光子は量子力学的に干渉し、その結果ビームスプリッターの片側のみに光子が2個出力されることとなります。これは量子もつれ状態となります。量子もつれ状態とは、2個以上の量子が、量子力学抜きには説明できない、特殊な相関を持っている状況を指します。この相関は量子同士が互いに離れていても成立します。

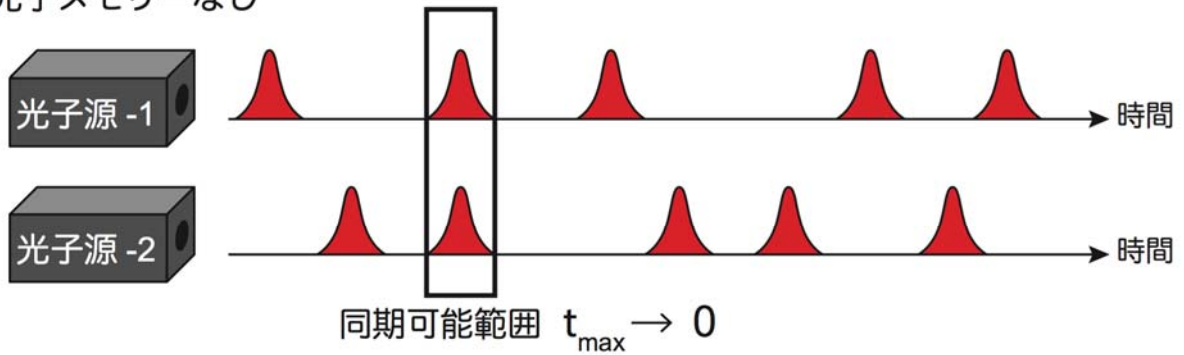
**注3 シュレーディンガーの猫状態：** 多数の量子で構成されている2つの状態の重ね合わせ。シュレーディンガーが生きている猫と死んでいる猫の重ね合わせに例えたことから、この名前が付いています。

**注4 魔法状態：** 量子誤り訂正には、「魔法状態」と呼ばれる補助状態が必要となります。「魔法」と呼ばれる理由は、量子誤り訂正が容易な量子論理ゲートのみで、不完全な状態から完全な状態にすることができるうえ、その量子誤り訂正が容易な量子論理ゲートにこの補助状態を加えればユニバーサルな量子計算ができるからです。

8. 添付資料 :

**A**

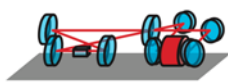
光子メモリーなし



**B**

光子メモリーあり

光子メモリー -1



光子メモリー -2

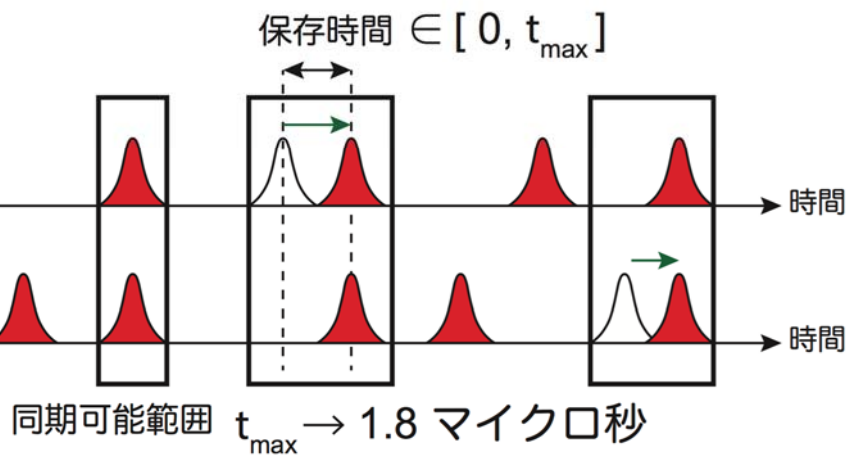
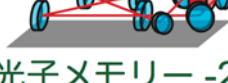


図 1 : 実験概念

- A 従来の実験** 独立な2つの単一光子源。光子の生成タイミングはランダムなため、たまたま同時に光子が生成された場合を事後選択する。そのため確率的動作となる。
- B 今回の実験** 2つの光メモリー。光メモリーには光シャッターが付いており、光子を取り出すタイミングを制御できる。光メモリーの寿命は1.8マイクロ秒であるため、その範囲内であれば同期可能。

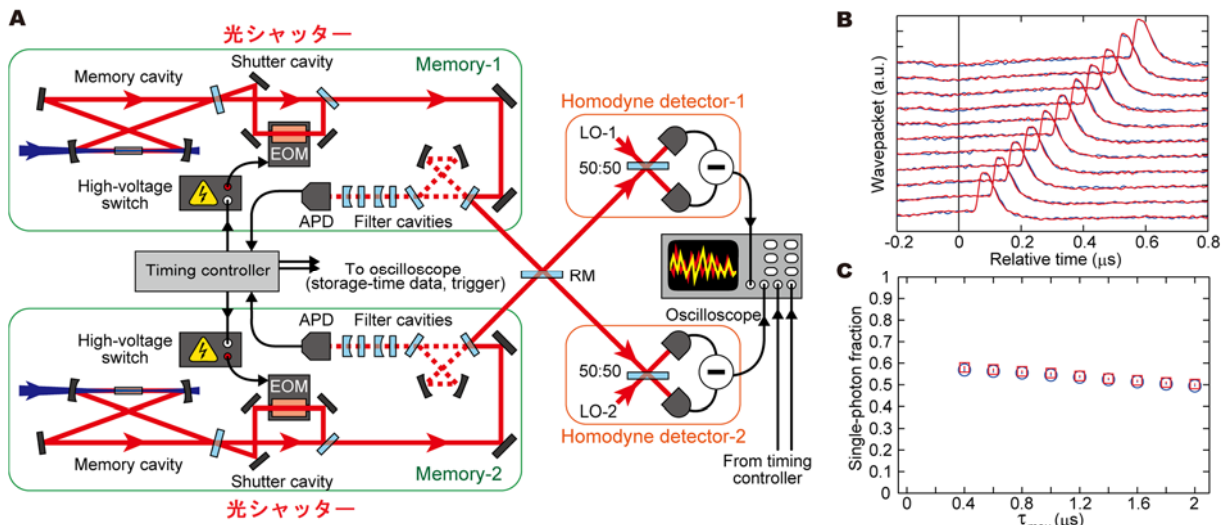


図2：実験セットアップ

メモリー共振器は光パラメトリック発振器となっており、伝令付き単一光子源となっている。さらにシャッター共振器と1つのミラーを共有している。シャッター共振器中の光位相変調器(EOM)の電圧を制御することにより、光シャッターを開閉する。光メモリーは同じものが2つあり、2つの光子を同期させてビームスプリッターで干渉させる。

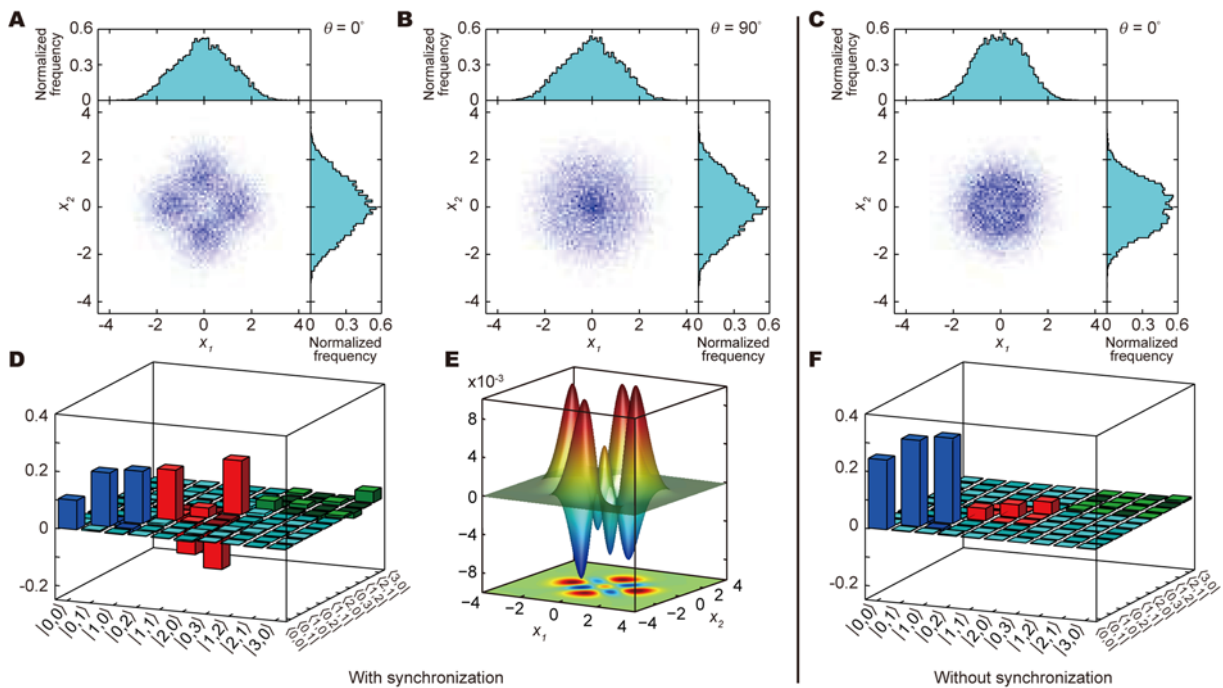


図3：実験結果

ビームスプリッターで干渉させた後、2つのホモダイン測定器により量子トモグラフィを行う。量子干渉に特徴的なパターンの観測に成功。

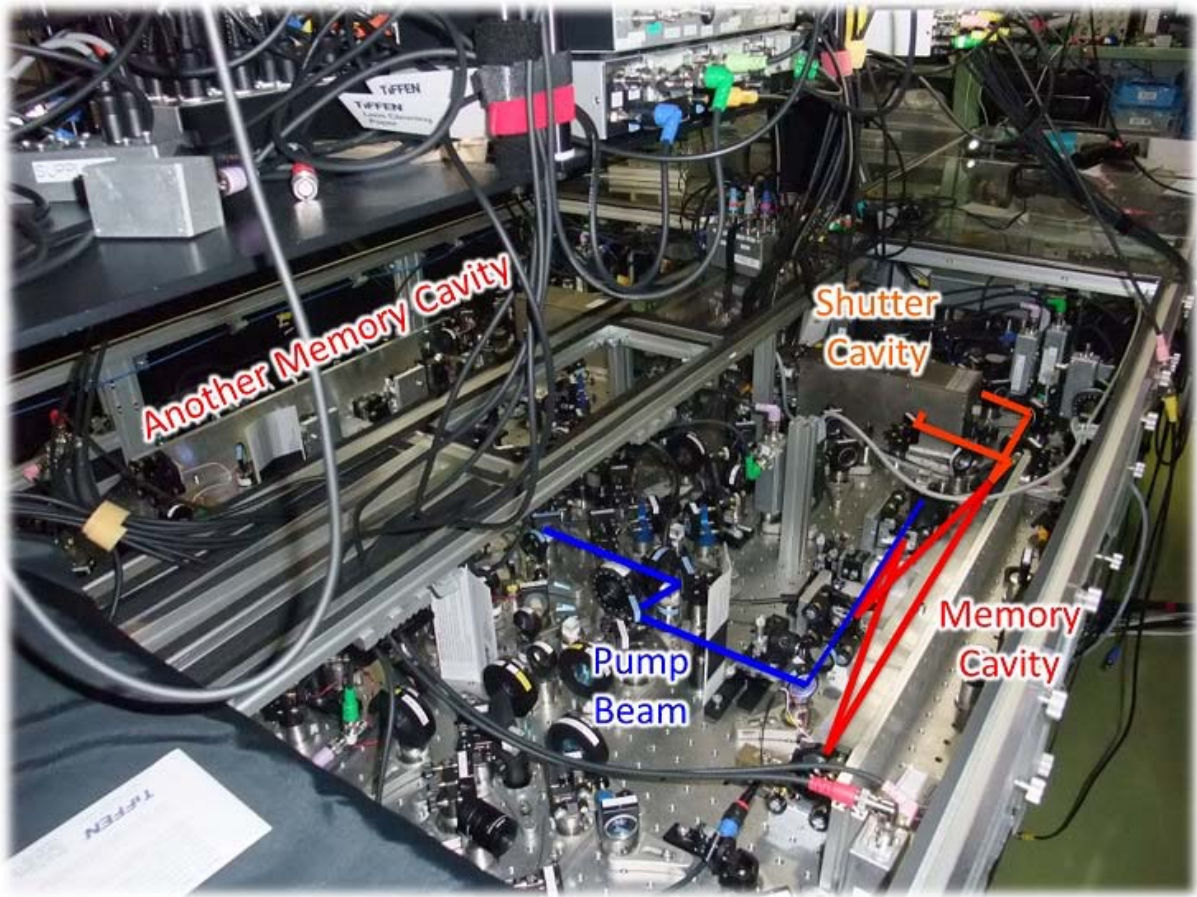


図4：実験装置全体の写真  
2つの光メモリー。