

研究終了報告書

「プログラマブルなループ型光量子プロセッサの開発」

研究期間：2017年10月～2021年3月

研究者：武田 俊太郎

1. 研究のねらい

本研究の狙いは、大規模かつ汎用の光量子コンピュータを実現しうる新しいアーキテクチャの原理実証である。光を用いた量子コンピュータは、室温動作可能・通信にも利用可能という利点から、量子コンピュータ実現の有力候補の1つである。近年、光量子コンピュータの研究は、1モード・1ステップの小規模な原理実証実験から、多モード・多ステップの応用実験へとシフトしつつある。しかし、最終的に光を用いた大規模な汎用量子コンピュータを実現するにあたり、以下の2項目の両立が課題となっている。

- (1) プログラマビリティ: 従来の典型的な光量子コンピュータの実験では、異なる計算を行うには光回路そのものを組み替える必要があった。汎用の光量子コンピュータの実現には、物理的には同じ光回路のまま、プログラム次第で別の計算が実行できる必要がある。
- (2) スケーラビリティ: 従来の方式では、モード数・計算ステップ数に比例して光回路の規模が増大し、複雑な計算には膨大な数の光学素子が必要となった。大規模な計算も必要最小限のリソースでコンパクトに実装でき、また計算ステップ数が増えても計算成功レートが落ちないよう、個々の計算ステップが決定論的に(確率100%で)実行できる必要である。

本研究では、これら2点を両立させる「プログラマブルなループ型光量子プロセッサ」の原理実証を目指す[S. Takeda & A. Furusawa, Phys. Rev. Lett. **119**, 120504 (2017)]。これは、量子情報をコードした多数の光パルスを一列に並べてループ型光回路を周回させ、これらをループ内で逐次処理して計算を実行する方式である。この方式では、行いたい計算に応じて光回路パラメータ(ビームスプリッタ透過率、測定・操作デバイスの機能等)をダイナミックに時間変化させることで、プログラマブルかつ決定論的に量子計算を実行できる。さらに、任意のモード数・計算ステップ数の計算を同じ光回路構成のまま決定論的に実装できるスケーラビリティも併せ持つ。この方式はプログラマビリティとスケーラビリティの両立において、従来の方式よりも優位性があると考えられる。本研究では「プログラマブルなループ型光量子プロセッサ」を用いた基本的な計算の実行を検証することで、本方式の優位性を実証すると共に、本方式の汎用量子コンピュータの実現可能性を示すことを目的とする。

2. 研究成果

(1) 概要

本研究では、ループ型光量子プロセッサの原理実証実験を目指し、はじめにループ型光量子プロセッサのキーコンポーネントとなる「透過率可変ビームスプリッタ」および「ループ型遅延路」の技術開発に着手し、その開発に成功した。次に、それらの要素技術を組み合わせてループ型光量子プロセッサの一部の光回路を構築した。その光回路を動作させることで、スクイーズド光源から順次出力される独立なスクイーズド光パルス群を、様々なタイプの量子もつれ光パルス群に変換する実験を行った。動作プログラムを変更することで、2、3個の光パル

スの量子もつれ状態から、1000個以上の光パルスの量子もつれ状態まで、様々な規模・種類の量子もつれ状態を生成することに成功した。この実験は、ループ型光量子プロセッサの強みであるスケーラビリティとプログラマビリティを示した重要な結果と言える。

以上の実験は波長 860nm のレーザーを用い、空間光学系のセットアップを利用したものである。これまでの成果で、数個の光パルス(=量子ビット数)を処理できる小規模な光量子プロセッサの開発見通しが立ちつつある。一方、将来的に数十~数百個以上の光パルスを扱う大規模な量子プロセッサへと拡張していく場合、レーザー波長を通信波長帯(1.5 μ m)に変更し、光ファイバベースの光学システムを構築した方が有利である。このため、通信波長帯における量子計算の基盤技術として、通信波長帯スクイーズド光源(光パラメトリック発振器)の開発に着手した。スクイーズド光源の設計・構築および検出器の開発が完了し、もう間もなくスクイーズド光の評価が行えるレベルまでシステムを構築することができた。これにより、大規模な量子プロセッサへ向けた第一歩が踏み出せたと言える。

(2) 詳細

研究テーマ A「ループ型光量子プロセッサのキーコンポーネントの開発」

本ループ型光量子プロセッサの原理実証実験へ向けて新たに技術開発が必要な要素として、「透過率可変ビームスプリッタ」と「ループ型遅延路」の2つがあった。まずこれらの開発および評価を行った。

「透過率可変ビームスプリッタ」については、本研究では 50ns 程度の時間刻みで時々刻々と透過率を変化させることのできるビームスプリッタが必要であった。これを実現するため、偏光を回転させるポッケルスセルと偏光ビームスプリッタを組み合わせ可変ビームスプリッタとして動作させる手法を採用した。特注仕様のポッケルスセルおよびドライバを利用することで、実際に 50ns 刻みで透過率を複数種類の値に変化させることに成功した。

次に、「ループ型遅延路」については、本研究では数十 m 程度の遅延路を安定かつ低損失で実現する必要があった。このため、2 枚の凹面ミラー間で光を繰り返し往復させる Herriott 遅延路を採用した。試作として光路長約 30m の Herriott 遅延路を構築・評価したところ、損失は4%程度に抑えられ、かつ遅延路を通った後の光のポインティングが60分以上にわたってほぼ変化することなく安定であった。これにより、本実験に十分なレベルで安定・低損失な遅延路が実現した。

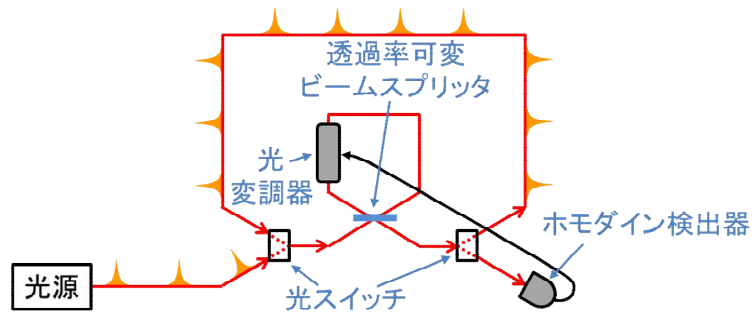
研究テーマ B「ループ型光回路を用いた量子もつれ合成」

研究テーマ A で開発した要素技術を組み合わせ、ループ型光量子プロセッサ(図 1(a))の一部の光回路(図 1(b))を構築した。この回路を動作させることで、様々な光の量子もつれ状態をプログラマブルに発生させる実験に成功した(5.(1)1 の論文)。

構築した図 1(b)の光回路は、スクイーズド光源、透過率可変ビームスプリッタ、可変位相シフタ、および測定基底可変ホモダイン検出器から構成される。ここで、透過率・位相シフト量・測定基底という 3 つのパラメータをタイミング同期しながらナノ秒の時間スケールで動的に切り替えられるような制御系も開発した。この光回路の動作を適切にプログラムし制御することで、スクイーズド光源から順次出力される独立なスクイーズド光パルス群を、様々なタイプの

量子もつれ光パルス群に変換する実験を行った。動作プログラムを変更することで、2、3個の光パルスの量子もつれ状態から、1000個以上の光パルスの量子もつれ状態まで、様々な規模・種類の量子もつれ状態を生成することに成功した。この実験は、「プログラマブルなループ型光量子プロセッサ」の機能の一部を示したに過ぎないが、このプロセッサの強みであるスケールビリティ(最小限の回路構成で大規模な量子もつれが作れる)とプログラマビリティ(回路の動作プログラムを変更すれば同じ回路で異なる量子もつれが作れる)を示した重要な結果と言える。

(a) ループ型光量子プロセッサ



(b) ループ型光回路を用いた量子もつれ合成実験

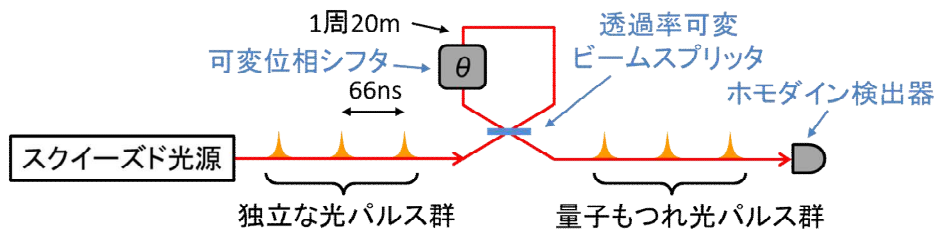


図1 ループ型光回路の構造。

研究テーマ C「通信波長帯におけるスクイズド光源の開発」

研究テーマ A、B の実験は波長 860nm のレーザーを用い、空間光学系のセットアップを利用したものである。これまでの成果で、数個の光パルス(=量子ビット数)を処理できる小規模な光量子プロセッサの開発の見通しが立ちつつある。一方、将来的に数十~数百個以上の光パルスを扱う大規模な量子プロセッサへと拡張していく場合、レーザー波長を通信波長帯(1.5 μ m)に変更し、光ファイバベースの光学システムを構築した方が有利である。このため、通信波長帯における量子計算の基盤技術として、通信波長帯スクイズド光源(光パラメトリック発振器)の開発を行った。

まず通信波長帯スクイズド光源の非線形光学結晶・共振器の設計を新たに行い、共振器の構築および共振器を制御するための光学系・電気系を開発した。さらに、スクイズド光の検出および評価を行うための高効率・広帯域ホモダイン検出器の開発にも成功した。これにより、もう間もなくスクイズド光の評価が行えるレベルまでシステムを構築することができた。以上の成果により、現在も進めている 860nm の小規模なループ型光量子プロセッサの原理実証実験が、通信波長における大規模なループ型光量子プロセッサの開発へとスムーズ

に接続され、今後も継続的に発展させていくことができると期待される。

3. 今後の展開

本研究では、波長 860nm においてループ型光量子プロセッサの心臓部となる光回路を構築し、その動作の原理実証実験を達成した。今後は、この光回路を拡張することでループ型光量子プロセッサの小規模なプロトタイプを完成させ、多入力・多出力の量子計算の原理実証へと進めていく。これと同時に、通信波長帯における大規模な光量子プロセッサの開発を同時並行で進め、将来的にはそれを用いた量子アルゴリズムの原理実証実験などへと展開していく。以上に加え、本研究で開発することのできた要素技術は、量子ビットのような離散変数だけでなく連続変数を利用でき、かつ光回路の機能をプログラマブルに変更しながら情報処理ができるという点で世界的に見てもユニークである。この技術は、量子コンピューティングのみならず、量子通信や量子センシングなど幅広い光量子情報処理への応用展開も可能だと考えられる。

4. 自己評価

本研究では、当初の提案に沿って「ループ型光量子プロセッサ」の原理実証実験を進めた。研究費を新技術開発のために積極的かつ効果的に投資し、目標へ向かって一直線に研究を進めることができたと自負している。さきがけ期間中にはループ型光量子プロセッサの完全形の構築までは至らなかったが、その心臓部となる光回路を実現し、動作を実証できたため、当初の目的は八割方達成できたといえる。ここまでの研究成果では、本方式のプログラマブル・スケラブルという2つの強みを具体的に示すことができた。これは、本方式が真に大規模・汎用量子コンピュータとなりうる方式であることを裏付けたものであり、科学的にも価値のある成果が得られたと考えている。

一方で、今回プロトタイプとなる量子プロセッサの開発を通じて、本方式特有の難しさやスケールアップするための課題も見えてきており、それを克服するために波長を通信波長帯へシフトするという重要な指針を得ることができた。さらに、さきがけ期間中にその足掛かりとなる研究を進めることができたため、今後の継続的な発展も期待できると考えている。

5. 主な研究成果リスト

(1) 代表的な論文(原著論文)発表

研究期間累積件数:2件

1. Shuntaro Takeda, Kan Takase, Akira Furusawa, “On-demand photonic entanglement synthesizer”, Science Advances **5**, eaaw4530 (2019).

ループ型光量子プロセッサの心臓部となる光回路の開発に世界に先駆けて成功した。この回路を用いて、最小限の回路でさまざまな量子もつれの光パルスを自在に合成するという、効率的かつ汎用的な量子もつれ合成動作を実証した。この量子もつれの合成動作は、ループ型光量子プロセッサでの計算原理の本質ともいえる動作である。本成果を発展させることで、高い拡張性と汎用性を兼ね備えた光量子コンピュータが実現しうる。

2. Shuntaro Takeda, Akira Furusawa, “Toward large-scale fault-tolerant universal photonic quantum computing”, APL Photonics **4**, 060902 (2019).

光を用いて大規模・汎用の誤り耐性量子コンピュータを実現するために近年注目されているアイデアを2つ示し、展望を述べた。1つ目のアイデアとして量子ビットと連続量という2つの手法をハイブリッドして効率よく量子計算を実装することを述べた。2つ目のアイデアとして、ループ型光量子プロセッサのように時間的に一列並んだ光パルスを用いたアーキテクチャを採用することで大規模量子計算の道が拓けることを示した。

(2) 特許出願

研究期間累積件数: 0 件 (特許公開前のものも含む)

(3) その他の成果 (主要な学会発表、受賞、著作物、プレスリリース等)

1. 「文部科学省 令和 2 年度科学技術分野の文部科学大臣表彰 若手科学者賞」を受賞 (2020 年 4 月)。
2. 「安藤研究所 安藤博記念学術奨励賞」を受賞 (2019 年 6 月)。
3. プレスリリース『最小限の光回路でさまざまな光の量子もつれを効率的に合成—「究極の大規模光量子コンピュータ」の心臓部を実現—』を発表 (2019 年 5 月)。なお、本発表成果は、NHK ニュースや日経新聞等で取り上げられた。
4. 一般向け書籍「量子コンピュータが本当にわかる! —第一線開発者がやさしく明かすしくみと可能性」(技術評論社、2020 年 2 月)を出版。
5. 教科書「新版 量子光学と量子情報科学」(サイエンス社、2020 年 3 月)を出版。