研究紹介



丸文研究奨励賞 受賞者

岡本 売 京都大学 大学院工学研究科 准教授

光子を用いた量子回路の 実現とその応用

光子の量子情報の自在な制御が切り拓く新しい地平

研究の背景

量子情報技術は、量子力学の「不確定 性関係」や、「もつれ合い状態」といった、非 直感的な性質を巧みに利用することで、従 来の古典力学的な限界を突破することを可 能にする。例えば、量子暗号は、不確定性 関係を利用することで、盗聴者の存在を検 知することができ、飛躍的に安全な通信を 可能にする。一方、量子コンピュータは、計 算速度の指数関数的な向上により、本質 的に高速な計算を可能とする。また、量子 計測技術は、もつれ合い状態を用いること で、古典的な限界を超える精度や信号雑音 比の実現を可能とする。

光の素粒子である光子は、環境との相互 作用が小さく、その物理量が環境からのノイ ズに強いため、量子情報の担体として有望 である。また、光ファイバを用いることで長距 離伝送が可能である。さらには、光子の偏 光を量子ビットとして用いた場合、1量子ビッ ト操作が既存技術で高精度に実現できると いった利点がある。一方で、光子間相互作 用が小さく、2光子間に働く量子ゲートの実 現が困難であるという問題があった。

研究の成果

光子間の相互作用を生成する方法とし て、主に下記の二つが提案されていた。一 つは、共振器内の単一原子といった光子と 強く相互作用する別の量子系を媒介とする 方法である。もう一つは、半透鏡における光 子間の量子干渉と事象選択を組み合わせ る方法である。本研究は、後者の物理原理 に基づいた、光量子ゲート及び、光量子回 路の実現とその展開に関するものである。

1. コンパクトで安定な光量子ゲートの開発

半透鏡における光子間の量子干渉と事 象選択を組み合わせる光量子ゲートで最も 基本的なものは、1回の2光子量子干渉と 事象選択からなるものである。そのような方 法で2光子間量子ゲートを実現する方法が 理論的に提案されていた。しかし、提案され た系には2つの結合した経路干渉計が含 まれており、実験的に安定に保つことが困 難であった。そこで、入射光の偏光に依存



した反射率を有する「部分偏光ビームスプ リッタ」を用いることで、経路干渉を含まな い、コンパクトで安定な光量子ゲートを実現 した[1]。

2. 光量子回路の実現

上記のコンパクトかつ安定な光量子ゲートの開発により、光量子ゲートを複数個組 み合わせた光量子回路が実現できるように なった。下記では、実現した3種類の光量子 回路について説明する。

〈量子もつれフィルタ〉

量子もつれフィルタは、2つの異なる光子 が、双方とも「垂直偏光」もしくは「水平偏 光」の場合のみ、それらの状態間の量子コ ヒーレンスを保ったまま保存するという機能 を持つ(図1)。これは、通常の偏光フィルタ を組み合わせても実現できない、量子的な 機能であり、また、独立した単一光子源と組 み合わせることで、オンデマンドの量子もつ れ光源の実現、長距離量子中継などで必 要となる量子もつれ合いの純化など、さまざ まな応用が可能である。この量子もつれフィ ルタを、ゲート数(4)、干渉光路数(4)にお いて世界最大級の光量子回路として実現 した^[2]。

〈KLM制御ノット操作量子回路〉

KLM制御ノ小操作量子回路は、半透鏡 における量子干渉を利用することで、光子1個 レベルでの非線形光学応答を実装し、その 「非線形素子」を組み合わせることで、制御 ノット操作を実現するものである。2001年 にKill、Laflamme、Milburn(KLM)らは、 この制御ノット操作量子回路と、テレポー テーション技術とを組み合わせることで、光 量子コンピュータの実現可能性を理論的に 示し、現在まで、この論文は 3000を超える引用を受けて いる。本研究では、KLMらの 理論提案以来10年間実現 されてこなかったKLM制御 ノット操作量子回路を、初め て実現した(図2)[3]。

〈量子シャッター〉

本研究では、光量子回 路の技術を、量子力学の基 礎理論の実証に用いた。 アハラノフ・ボーム効果で知 られるアハラノフらが理論 的に提唱した、「複数の位

置の重ね合わせ状態を取り得る量子シャッ ター1つだけを用いて、2つのスリットに入 射する光子を(ある条件下で)完全に反射 する」という非常に直感に反する理論予測 を、光量子回路として実現、その理論予想 を実証した^[4]。

3. 適応量子状態推定の実証

量子力学の本質的な不確定性から、量 子状態(例えば光子の偏光状態)を小数個 のサンプルでできる限り誤差無く推定する ことは非常に困難な問題だった。本研究で は、量子状態1個1個の測定結果に応じて 適応的に測定系を最適化する「適応量子 状態推定」を、光子の偏光状態に対して実 現(図3)、その最適性を実証した^[5]。さらに、 この実験のパラメータ数を拡張することで、 1量子ビットに対する適応量子状態推定を 実現している^[6]。

4. 量子位相測定の実現と その顕微鏡への応用

半透鏡での光子間の量子干渉と事象



選択は、量子計測技術に必要なもつれ合い状態の生成と制御にも用いることができる。光干渉計による位相測定は、天文学から生物学まで幅広く利用されているが、 光の量あたりの測定精度、すなわち感度には限界(標準量子限界)がある。本研究では、半透鏡での光子間の量子干渉と、事象選択を用いることで、4光子NOON状態と呼ばれる4つの光子がもつれ合った状態を生成、標準量子限界を打ち破ることが可能な量子干渉計を実現した[7.8]。また、この原理を顕微鏡に応用した微分干渉顕微鏡である、「量子もつれ顕微鏡」も実現している[9]。

将来の展望

光量子回路は、基本的な量子情報操作 を組み合わせることで、様々な量子デバイス を実現することができる。今後、さらなる大規 模化により、より高度で複雑な機能を実現 できるようになるだろう。現在、大規模化に 向けて、光子源の高性能化や、回路の集積 化に向けた研究が活発に行われている。ま た、「量子シミュレータ」や「ボソンサンプリン グ」のように、光量子回路により実現可能な 機能も広がりを見せている。量子計測技術 については、量子位相測定、量子イルミネー ション、量子吸収計測や、量子光断層撮影 といった様々な提案がなされており、基本原 理は実証されている。しかし、実際に様々な 用途に応用するには、より一層の技術革新 が必要とされている。今後も、光子を用いた 量子情報技術のさらなる発展の礎を築くべ く、研究を推進させていきたい。

謝辞

本研究は、多くの方々のご支援、ご協力 の下に実現したものです。特に、京都大学 の竹内繁樹 教授、北海道大学の笹木敬 司 教授には深く感謝申し上げます。また、 スペースの都合でここにはお名前を記すこ とができませんが、共同研究者の方々、秘 書の方々、同僚や学生の方々、学生時代 の研究室の先輩、同輩、後輩の方々にも、 この場を借りて深く御礼申し上げます。

References(参考文献)

- [1] R. Okamoto, H. F. Hofmann, S. Takeuchi and K. Sasaki, Physical Review Letters, 95, 210506/1-4 (2005).
- [2] R. Okamoto, J. L. O' Brien, H. F. Hofmann, T. Nagata, K. Sasaki and S. Takeuchi, Science, 323, 483-485 (2009).
- [3] R. Okamoto, J. L. O'Brien, H. F. Hofmann and S. Takeuchi, Proceedings of the National Academy of Sciences, 108, 11067-10071 (2011).
- [4] R. Okamoto and S. Takeuchi, Scientific Reports, 6, 35161 (2016).
- [5] R. Okamoto, M. lefuji, S. Oyama, K. Yamagata, H. Imai, A. Fujiwara and S. Takeuchi, Physical Review Letters, 109, 130404/1-4 (2012).
- [6] R. Okamoto, S. Oyama, K. Yamagata, A. Fujiwara, S. Takeuchi, Physical Review A, 96, 022124 (2017).
- [7] T. Nagata, R. Okamoto, J. O' Brien, K. Sasaki and S. Takeuchi, Science, 316, 726-729 (2007).
- [8] R. Okamoto, H. F. Hofmann, T. Nagata, J. L. O' Brien, K. Sasaki and S. Takeuchi, New Journal of Physics, 10, 073033/1-9 (2008).
- [9] T. Ono, R. Okamoto, and S. Takeuchi, Nature Communications, 4, 2426/1-7 (2013).