



光子 1 個で動作するスイッチの集積化に成功

研究成果のポイント

- ・光の最小単位（光子）1 個レベルで動作する「非線形光スイッチ」を高精度で実現。
- ・それらの「非線形スイッチ」を組み合わせた、光量子回路により、2001 年に提案されていた光量子コンピューターの基本となる量子演算操作を初めて実現。
- ・安全な通信を実現する量子暗号通信や、これまでに解けない問題を解く量子コンピューター、また、より少ないエネルギーでの通信を実現する量子情報通信への応用が期待。

研究成果の概要

北海道大学電子科学研究所の竹内繁樹 教授（兼 大阪大学産業科学研究所 招へい教授）、岡本 亮 助教（同 招へい教員）らは、光の素粒子である光子 1 個レベルで動作する「非線形光スイッチ」を組み合わせて、光量子コンピューターの基本となる量子ゲート操作を初めて実現しました。今回の成果は、安全な通信を実現する量子暗号通信や、これまでに解けない問題を解く量子コンピューター、また、より少ないエネルギーでの通信を実現する量子情報通信への応用が期待されます。

本研究は英国・ブリストル大学のオブライアン・ジェレミ教授、広島大学のホフマン・ホルガ准教授らと共同で行われました。

論文発表の概要

研究論文名：Realization of a Knill-Laflamme-Milburn controlled-NOT photonic quantum circuit combining effective optical nonlinearities（実効的な非線形光学素子を組み合わせた光量子回路による、Knill-Laflamme-Milburn 制御 NOT 操作の実現）

著者：岡本 亮（北大電子研・阪大産研）、オブライアン・ジェレミ（英国ブリストル大）、ホフマン・ホルガ（広島大）、竹内繁樹（北大電子研・阪大産研）

公表雑誌：米国科学アカデミー紀要（Proceedings of the National Science Academy of the United States of America）

公表日：日本時間（現地時間）2011 年 6 月 7 日（火）午前 4 時（米国東部時間 2011 年 6 月 6 日午後 3 時）

研究成果の概要

（背景）

光の素粒子である光子は、量子コンピューターや量子通信における情報の伝達媒体として非常に有力です。ただし、2 つの光子を相互作用させる方法の実現が困難でした。

この問題に対し、米国およびオーストラリアのグループ（Knill, Laflamme, Milburn）は、半透鏡で生じる量子干渉を利用して、光子 1 個レベルで動作する「非線形スイッチ」が実現できること、ま

たそのようなスイッチを組み合わせることで、光量子コンピュータが実現できることを示しました。この提案は大変注目されましたが、半透鏡状での光子間の良質な量子干渉が必要となること、また4つの異なる光の経路を、ナノメートル（百万分の1ミリメートル）の精度で一致させる必要があるなど、その技術的な困難さから、提案後10年間実現されていませんでした。

（研究手法）

本研究グループは、光子源を改良することで、半透鏡上で良質な量子干渉(90%)を実現しました。また、これまで開発した特殊な半透鏡を、3種類利用、さらに光の干渉装置を工夫することで、コンパクトで非常に安定した実装を実現、光の経路を24時間以上にわたって特別な制御なしで、ナノメートル単位で一致させることが可能となりました。

（研究成果）

その結果として、Knillらの提案した、光子1個レベルで動作する「非線形スイッチ」を組み合わせ、光量子コンピュータの基本となる光量子回路（伝令付き制御ノット操作）を実現することに、初めて成功しました。得られた平均ゲート忠実度は0.82と、十分高い量子性を示しました。

（今後への期待）

今回の成果は、2000年にKnillらによって提案された光量子計算の可能性を実証するとともに、将来の量子コンピューターや超長距離の量子暗号の実現、低エネルギー通信としての量子情報通信などの実現へと繋がる成果です。また、今後、良質な単一光子源の開発などが期待されます。

本研究は、日本学術振興会（新学術領域研究）、科学技術振興機構（戦略的創造研究推進事業）、総務省（戦略的情報通信研究推進事業）、最先端研究開発支援プログラム「量子情報処理」、科学研究費補助金、科学技術振興調整費などの支援により行われました。

お問い合わせ先

所属・職・氏名：北海道大学電子科学研究所・教授 竹内 繁樹（たけうち しげき）

TEL：06-6879-8548 FAX：06-6876-3448 E-mail：takeuchi@es.hokudai.ac.jp

ホームページ：<http://www.sanken.osaka-u.ac.jp/labs/qip/index.html>

※この情報は、北海道教育庁記者クラブ、科学記者会、文部科学記者会加盟各社に提供しています。

【用語解説】

光子：

光のエネルギーの最小単位で、素粒子の1つ。1ワットの光（可視光）は、毎秒約 10^{19} 乗個の光子から出来ています。

非線形光スイッチ：

光の強さによって動作が代わるスイッチで、光通信においての主要な素子の一つ。本研究で実現したスイッチは、光子が1個の時と2個の時、実効的な光の経路長が光の波長の半分ずれるように働くという、究極の低エネルギー動作を実現。

量子コンピューター：

量子力学的な重ね合わせの原理を利用して、莫大な数の並列演算を実施する、まったく新しい原理に基づく計算機。因数分解など、既存のスーパーコンピュータでは時間がかかりすぎて全く解けない問題を解くことができるとして、注目されている。

量子暗号通信：

量子力学の不確定性原理を利用して、盗聴者を検知することで、物理的に安全性が保証できる通信方法。一般には、送信者は受信者に光子一つ一つを送受信して行う。

（量子）ゲート：

古典的な情報処理では、0または1の値をとる「ビット」に対して、「ゲート」と呼ばれる基本操作を行っていくことで情報を操作する。1つのビットの値を反転させる「ノットゲート」や、2つの入力ビットの値が両方1の場合だけ、1を出力する「アンドゲート」などがある。またその操作を行うデバイスは「ゲート（素子）」と呼ばれる。一方、量子情報処理では、0と1の重ね合わせ状態をとる「量子ビット」に対して、「量子ゲート」操作を行う。古典的な情報処理と同様、1つの入力量子ビットの状態を変化させる「回転ゲート」や、制御量子ビットと信号量子ビットという2つの量子ビットに対し、制御量子ビットが1の時のみ、信号量子ビットの値を反転させる「制御ノットゲート」などがある。

半透鏡（ビームスプリッター）：

入射したレーザー光などの光を2つ（場合によってはそれ以上）に分割する光学装置。半透鏡に入射した光は、一部は反射し、一部は透過して分割される。反射光と透過光の強さがほぼ1:1の場合はハーフミラーとも呼ばれる。民生品で一般向けとしては、光ピックアップ、反射型液晶プロジェクター、光通信機器などに使われている。

部分偏光ビームスプリッター：

2005年の「コンパクトな量子ゲート」を実現する際に開発した、入射する偏光ごとに反射率が異なるビームスプリッター。

変型サニャック型干渉計：

2007年の「4つのもつれ合い光子を用い、標準量子限界をうち破る」実験において開発した光学系技術。通常の干渉計（マッハツェンダー干渉計など）では、レーザー光などを入力部の半透鏡に入射し、それが2つの経路に分割される。光は波でもあるので、それらの分割波が出力部の半透鏡で合波される際に、それぞれの経路の長さの差によって生じる位相差により、干渉が生じる。その干渉結果は、出力での光強度として

得られる。ただし、安定した干渉状態を保つためには、双方の経路の長さ（経路長）をナノメートルオーダーで、長時間（24時間）一致させ続けなければならないが、通常の干渉計ではそれぞれの経路で別々の光学部品を経由するため、双方の経路長を一致させ続けるのは非常に困難である。

これを解決するのが変型サニャック型干渉計である。経路は双方で異なっているものの、それらの経路がまったく同じ光学部品を経由するため、たとえいずれかの光学部品の位置が、温度変化や振動でずれて経路長が変化しても、その経路長の差（位相差）はほとんど変化しない。このようにして今回、実験で要求される非常に高い安定性が実現された。

Knill, Laflamme, Milburn らの論文：

量子情報処理に光子を用いる場合、2つの光子を相互作用させる方法の実現が困難であった。2001年に、Knill, Laflamme, Milburnの3名は、半透鏡や、単一光子源、光子検出器を組み合わせることで、この相互作用が実現可能であることを示した。(Knill E, Laflamme R, Milburn GJ (2001) A scheme for efficient quantum computation with linear optics. Nature 409:46-52.) この論文により、「線形光学量子計算」という新たな分野が生まれ、また論文は非常に注目されこれまでに1500回程度引用されている。しかし、技術的な困難さから、この10年間彼らの提案した基本ゲート操作（伝令付き制御ノット操作）は実現していなかった。

【補足図】

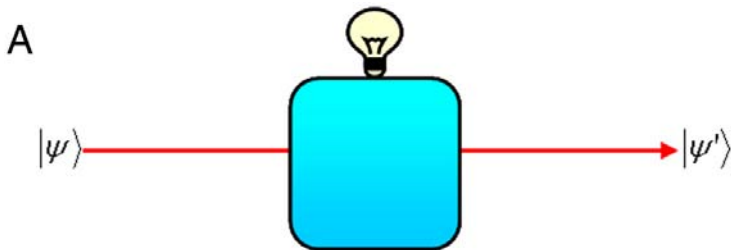


図1 単一光子レベルで動作する、非線形スイッチ素子。この素子は確率的にしか動作しないが、成功すると成功信号を発生し、成功信号が出たときには100%動作する。光子が1個の時と2個の時で、実効的な光の経路長が光の波長の半分ずれるように働くという、究極の低エネルギー動作を実現する。

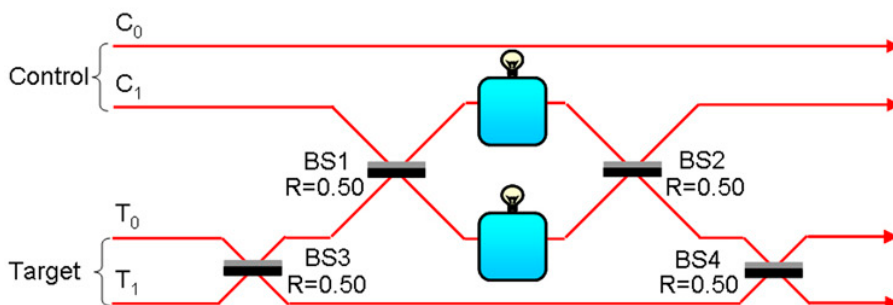


図2 Knill らの提案した、基本ゲート操作（伝令付き制御ノット操作）を実現する光量子回路。非線形スイッチ（青色）2つが、複雑な光の経路干渉計のなかに埋め込まれている。これら2つの非線形スイッチは、成功した際、成功信号を発生する。

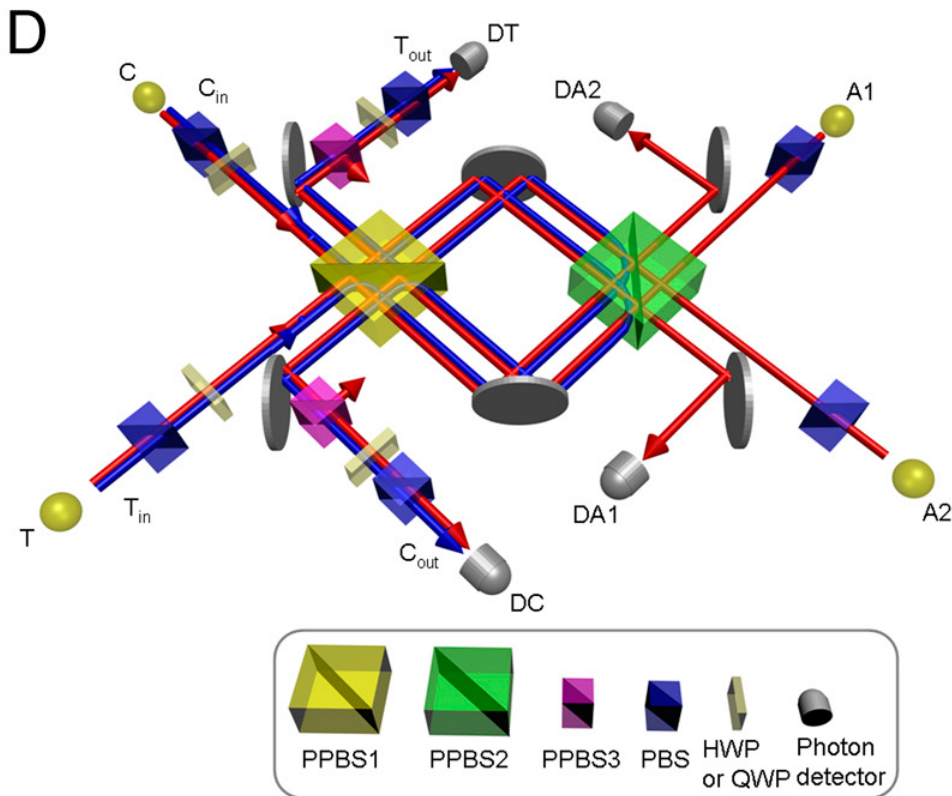


図3 今回実現した光量子回路。PPBS は部分偏光ビームスプリッター，PBS は偏光ビームスプリッター，HWP は半波長板，QWP は1/4 波長板，Photon detector は光子検出器を表す。

入力光子(C と T)は，PPBS1 で最初に量子干渉した後，PPBS2 において，補助光子 A1, A2 とさらに量子干渉を行う。この部分が，2つの非線形光スイッチに相当する。その後，結果の状態は再度 PPBS1 で量子干渉したのち，出力分(Cout および Tout)で結果が解析・検出される。

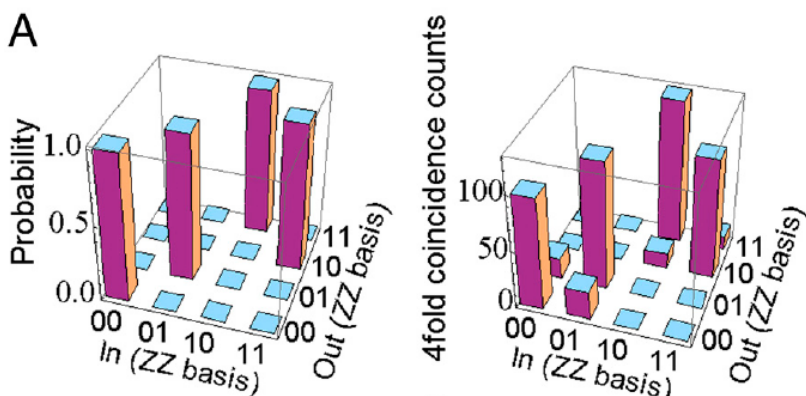


図4 理想的な理論予測(左)と実験結果(右)。入力(In)の左側が制御ビット，右側が標的ビット，縦軸は頻度を表す。制御ビットが1の時のみ，標的ビットが反転しており，制御ビット動作が実現していることが分かる。