

一つの量子的なシャッターにより、二つのスリットを同時に閉じることに成功

概要

京都大学大学院工学研究科の岡本亮准教授、竹内繁樹教授らは、光子を用いた量子回路により、量子重ね合わせ状態をとりうる「シャッター」を実現することに成功しました。そして、光子を2重スリットに入射する実験において、特定の条件下では、重ね合わせ状態にある1つの量子シャッターで、2つのスリットを同時に遮断できることをはじめて実験的に示しました。これは、量子力学のもつ不思議な性質を、より本質的に浮かび上がらせるとともに、将来の量子コンピュータの実現にも寄与する成果です。

1. 背景

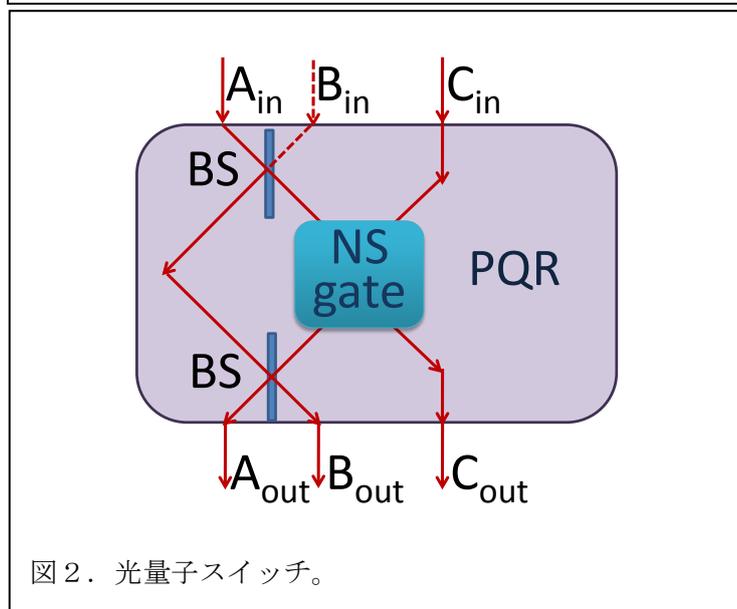
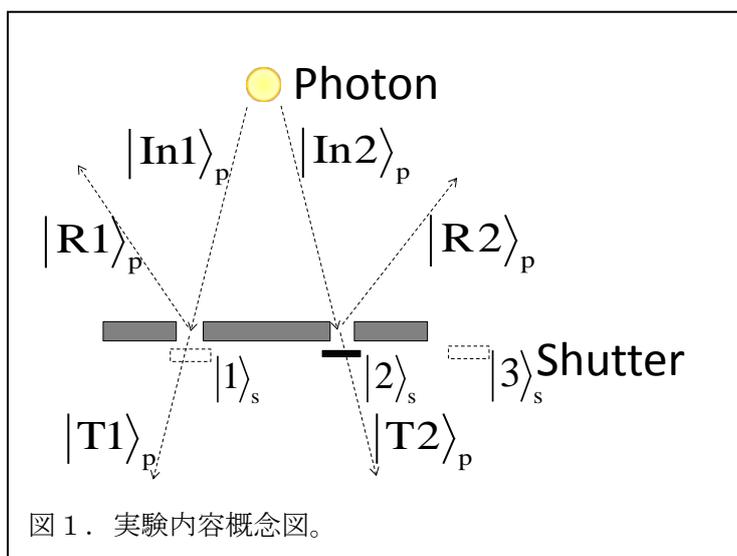
量子力学では、1つの粒子が複数の場所に同時に存在する量子重ね合わせ状態をとることができます。光の波の性質を確認した、「ヤングの2重スリット実験」を、光子を1個ずつ用いて行った場合も、実験を繰り返すと、光子の検出位置の分布は、干渉縞を形成されることが知られています。この光子の2重スリット実験は、1個の光子が重ね合わせ状態になり、同時に2つのスリットを通ったと考えないと説明がつかず、量子力学の重ね合わせ状態をもっとも端的に示す実験です。また、通常シャッター1個で一方のスリットを遮断すると、この干渉が失われることもよく知られています。

では、もし2つのスリットの位置に同時に存在する、すなわち「重ね合わせ状態」をとりうるシャッター（量子シャッター）を用いて、このスリットを制御すると、どのようなことが起こるでしょうか。2003年に米国とイスラエルの物理学者らは、重ねあわせ状態にある量子シャッターを用いると、その量子シャッターが光子と相互作用したあと別の重ね合わせ状態に変化したばあい、入射した光子はまったくスリットを透過できず、重ね合わせ状態をたもったまま跳ね返されることを理論的に予言しました。これは、たった1つの「量子シャッター」を用いて、複数のスリットを同時に遮断することができるという奇妙な、また驚くべき予言です。しかし、必要な性質を満たす「量子シャッター」の実現が困難だったため、実験的に実証されていませんでした。

2. 研究手法・成果

我々は、今回、光量子回路を用いて2003年の理論提案を初めて実験的に実証しました。まず、たった1個のシャッターで、古典的な限界を超えて、2つのスリットを同時に遮断することが可能なことを確認しました。さらに、シャッターで弾き返された光子が干渉することを確認、その量子性を保っていることを実証しました。

実験では、まず、光子が、2つのスリット（光路）間の重ね合わせ状態になるように準備します（図1 $|In1\rangle, |In2\rangle$ に相当）。一方、シャッターは、2つのスリットともう一か所別の場所（図1 $|3\rangle$ ）の3か所の重ね合わせ状態にする必要があります。そこで我々は、シャッター自体も光子で実現することにしました。これにより、半透鏡を用いて、容易に重ね合わせ状態を作ることができます。しかし、このままでは、シャッターで光子をはじき返すという相互作用を実現することができません。そこで、私たちは、各スリットに光子で光子を制御することができる光量子スイッチを用いました（図2）。この光量子スイッチは、光子間の量子的な干渉効果を用いたもので、量子コンピュータの基本ゲートの技術に応用したものです。このようにして、2003年の理論提案を、光量子回路を用いて実装可能な方法を考案・実現しました。



実験では、まず、スリットを透過した光子と、シャッターによって弾き返された光子の数を測定し、どの程度、光子を遮断できているかを見積もりました。重ね合わせ状態を取ることができない、古典的なシャッターを用いた場合、光子をシャッターで弾き返すことができる確率は、50%を超えることが

できません。(ここでは、各スリットには、等分に光子が到達するとしています。) 実験の結果、光子がシャッターで弾き返された割合は、 $61 \pm 3\%$ でした。これにより古典的な限界である 50% を有意に超えて、光子が遮断できていることを確認しました。さらに、同時に 2 つのスリットがシャッターで閉じられていることを確認するために、シャッターで弾き返された光子が干渉することを確認しました (図 3)。もし、シャッターが片方のスリットしか閉じていなかった場合、決してこのような干渉縞は得ることはできません。我々は、このようにして、2003 年の理論提案をはじめて実験的に実証しました。

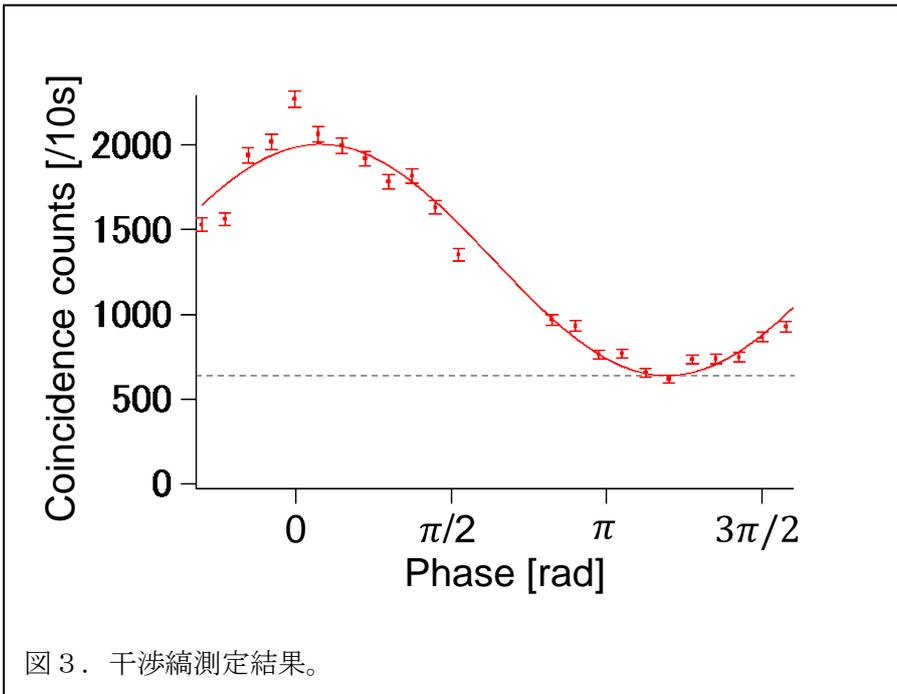


図 3. 干渉縞測定結果。

3. 波及効果、今後の予定

今回の成果は、量子物理学のより深い理解に役立つだけでなく、重ね合わせ状態で、重ね合わせ状態を制御することが可能なことを示すもので、将来の量子コンピュータの実現につながります。今後は、光量子回路による具体的な応用方法を示し、実現していく予定です。

4. 研究プロジェクトについて

日本学術振興会 科学研究費補助金(21740296, 25707034, 26220712)、日本学術振興会 量子サイバネティクス、日本学術振興会 FIRST、科学技術振興機構 戦略的創造研究推進事業、科学技術振興調整費、公益財団法人 光科学技術研究振興財団、GCOE プログラム。

<論文タイトルと著者>

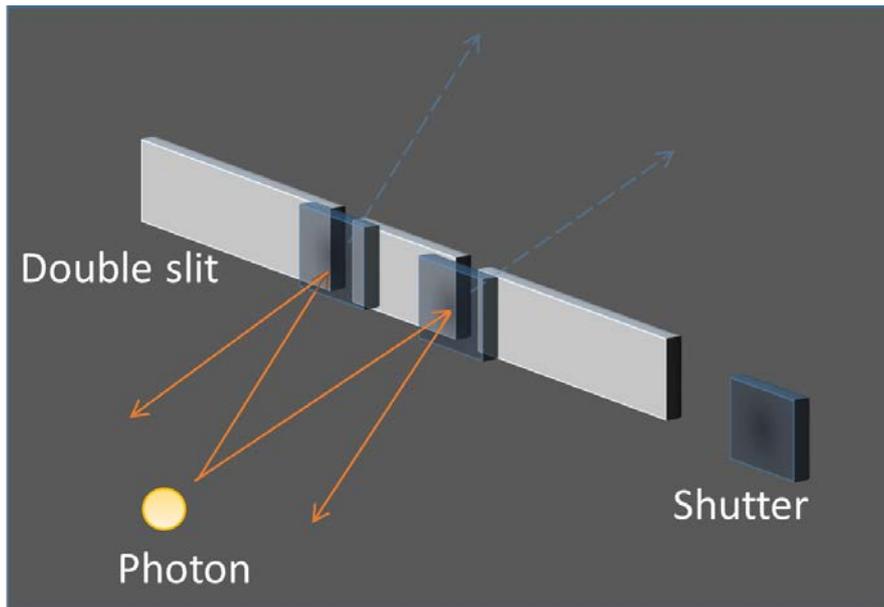
タイトル: Experimental demonstration of a quantum shutter closing two slits simultaneously
(2つのスリットを同時に閉じることが可能な量子シャッターの実証実験)

著者: Ryo Okamoto & Shigeki Takeuchi
(岡本 亮、竹内繁樹)

掲載誌: Scientific Reports

掲載日: 2016年10月14日(金) 18時(日本時間)

<イメージ図>



※一つのシャッターが複数の場所の重ね合わせ状態にある様子のイメージを、シャッターを半透明にすることで表しています。

<用語解説>

1) ヤングの 2 重スリット実験： 二つのスリットを通した光がスクリーンに干渉縞を形成することを見る実験です。歴史的には、光の干渉性を初めて実証し、光に波の性質があることを決定づけた実験です。

2) 重ね合わせ状態： 量子力学の基本的な性質の一つです。物理量（例： 時間、位置、運動量等）が複数の異なる値を同時に取ることができます。

3) 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。

4) 半透鏡： 入射した光の一部を透過し、一部を反射する鏡です。光子を入力すると、透過した状態と反射した状態の重ね合わせ状態を作ることができます。