

機関番号：10101

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2009～2010

課題番号：21740296

研究課題名（和文） 量子シャッターの実証実験

研究課題名（英文） Experimental demonstration of quantum shutter

研究代表者

岡本 亮 (OKAMOTO RYO)

北海道大学・電子科学研究所・助教

研究者番号：10435951

研究成果の概要（和文）：

本研究では、量子シャッターの実証実験を目指した。量子シャッターはたった一つのシャッターで重ね合わせ状態にあるすべての光子をはね返すことができる。これは、量子力学の非局所性の新たな側面を明らかにするものである。量子ゲートを組み合わせることで、これまで困難と思われていた量子シャッターを実験的に構築した。そして、構築した系の評価を行い、量子シャッター動作を示す実験結果を得ることができた。

研究成果の概要（英文）：

The objective of this research is the demonstration of quantum shutter. Only one quantum shutter can reflect a photon which is in the quantum superposition state over multiple slits. It shed new light on non-locality of quantum mechanics. We realized quantum shutter effect by combining quantum gates. Using the constructed system, we have obtained experimental results which prove the quantum shutter effect.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	2,600,000	780,000	3,380,000
2010 年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,200,000	960,000	4,160,000

研究分野：数理系科学

科研費の分科・細目：原子・分子・量子エレクトロニクス

キーワード：量子情報

1. 研究開始当初の背景

「非局所性」は量子力学の構築直後である約 70 年前から注目されてきた。また、最近では量子情報処理や量子メトロロジーといった分野における技術的なツールとしても重要な役割を果たしている。しかしながら、その非直感的な性質から最近でも議論の対象となっている。例えば、2006 年 P. G. Kwiat のグループが、実際に量子計算器を稼働させること無く、全ての計算結果を得る方法を

Nature 誌に発表した。この論文の内容はいわゆる「爆弾検知装置」（光子の「非局所性」を用いて、爆弾（光子に反応して爆発する）を爆発させることなく検知する装置）を巧妙に発展させたもので、上手くいくように思われた。しかしながら、その翌年、L.Vaidman(爆弾検知問題の提案者の一人)が実はそれが不可能であることを指摘した。彼は光子が通っていないように思われる（量子計算器が設置してある）光路にも、実際には光子が「非局

所」に存在していることを示した。これは、量子計算器が稼動してしまっていることを意味する。この例のように、「非局所性」はいまだに十分には理解されていないと思われる。

2003年、Y.Aharonov、L.Vaidmanらは、以下のような問いに答えることで「非局所性」に新たな光を投げかけた。

・問：1光子がNヶ所のスリットに放出される。スリットには1個のシャッターがある。シャッターの測定結果のみから、全てのスリットの光子がシャッターにブロックされた場合のみを選び出すことができるか。

ここで、光子の通過が明らかに検知できる場合を排除するため、以下の二つを仮定する。

・仮定1：光子は測定しない（もしくは、その測定結果を利用しない）。

・仮定2：光子がシャッターにぶつかっても、シャッターの状態は変化しない。

上記の二つの仮定が満たされる場合、光子がスリットを通らなかった場合のみを選び出すことは一見不可能に思われる。なぜなら、仮定2より、シャッターの状態は光子がぶつかっても変化しないため、シャッターの測定のみ（仮定1）から光子がシャッターにぶつかったかどうかは分からないためである。

驚くべきことに Y.Aharonov、L.Vaidmanらは、シャッターもまた量子的なものであれば、この問いの答えを「Yes」にすることができることを示した。

このように、彼らの提案は、量子力学の「非局所性」から得られる新しい非直感的な現象であり、その実証実験は興味深い。しかしながら、この実験は Aharonovら自身も認めているように困難である。それは、シャッターとして上記①、②を可能とし、さらに、光子がぶつかったとき、その光子の状態は変化させるが、シャッターの状態は変化しないようなものが要求されるためである。

2. 研究の目的

Y.Aharonov、L.Vaidmanらによって提案された量子力学の非局所性の新たな側面を実験的に実証する。彼らは、1光子がNヶ所のスリットを重ね合わせ状態で通ろうとしたときに、たった一つの（量子的な）シャッターで全てのスリットを塞ぐ方法を示した。ここでは、このような機能を持つシャッターを「量子シャッター」と呼ぶ。量子シャッターは、粒子（シャッター）が非局所な状態にあるとき、その粒子（シャッター）が「そのどこかの場所に存在している」のではなく、「全ての場所に存在している」ことの裏付けの一つであるといえる。

本提案では、この「量子シャッター」の実験的な実証を目指す。具体的には、まず、実現が難しいとされてきたシャッター部分を

光子と線形光学量子ゲートを用いて実現する。また、系全体は、複数の干渉計を組み合わせて構築する。従って、全ての干渉計の長時間安定化が不可欠である。そこで、変型サニアック干渉計を用い、干渉計を安定化する。

3. 研究の方法

以下のように順次必要な系を構築、検証した。

(1) 光源の構築

本実験に必要な2光子（プローブ光子、シャッター光子）を、UVポンプレーザーを非線形光学結晶に入射し、パラメトリック下方変換過程によって発生させた。発生した光子対はそれぞれシングルモードファイバにカップリングさせた。

(2) 量子ゲートの構築、動作評価

プローブ光子を量子ゲートに入射し、シャッター光子の存在によるシグナル光子の偏光の変化を評価した。

(3) 変型サニアック干渉計の構築とテスト

変型サニアック干渉計を構築し、安定性等の評価を行った。

(4) 「量子フィルター」としての動作評価

シャッター光子を特定の重ね合わせ状態で測定した時に、シグナル光子がシャッターではじかれていることを確認した。

4. 研究成果

まず、2光子源を構築した。そのために、パラメトリック下方変換過程によって2つの光子を発生させた。発生させた光子は、それぞれシングルモードファイバにカップリングさせた。ファイバに光子検出器をつなぎ、その発生光子数を評価した。そして、発生光子数が実験に十分な量得られていることを確認した。

次に、量子ゲート部分を構築し、2光子源を用いてその評価を行った。量子ゲートには、特別に設計した部分偏光ビームスプリッターを用いた。構築した2光子源と量子ゲートを接続し、その動作評価を行った。その結果、シャッターに相当する光子が、入射されているときに、プローブ光子の状態が反転することを確認した。これは、シャッターによって光子がはじかれる動作を再現できていることを意味する。実験の結果、その成功率として、88%という高い値を得ることができた。

また、上記と並行して、量子ゲートの性能と実験的なエラーの関係についても詳細な解析を行った（雑誌論文④）。具体的には、考えられる各エラー要因の寄与を、プロセスマトリックスを用いて理論的に解析した。その結果、特にエラー量が小さい領域で、各要因ごとに異なる依存性を持つことを明らかにし

た(図1)。またエラー間の相乗・相殺効果が全エラー量の10%に達する場合があることなどを明らかにした。これにより、実験的に減らすべきエラー要因の指針を得ることができた。

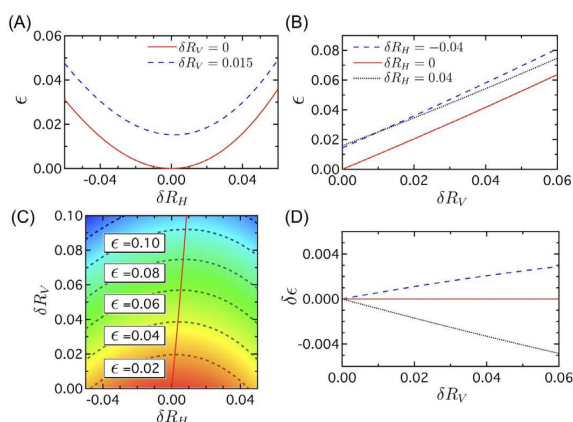


図1. 量子ゲートエラー解析

次に、構築した量子ゲートを変型サニアック干渉計内に組み込むことで、量子シャッターを構築した。まず、干渉計となっているプローブ光子、シャッター光子の光路の安定化及びその性能評価を行った。その結果、どちらの干渉計も非常に高い安定性をもっていることを確認した。これにより、測定時間中にとくに干渉計の制御が必要ないことが分かった。また、干渉計の明瞭度も、98%以上という非常に高い性能を実現できた。これは、重ね合わせ状態を非常に高い精度で制御できることを意味する。次に、構築した量子シャッターの動作の評価を行った。それにより、プローブ光子とシャッター光子全体の入力状態のうち、もつれ合い状態となっている部分状態の位相が重要であることが分かった。そこで、もつれ合い状態の位相の設定方法や、安定化について研究を行った。そして、位相を適切な値に設定し、実験を行うことに成功した。その結果、量子シャッター動作を示す実験結果を得ることができた。現在、研究成果をまとめているところである。

さらに、上記の研究と並行して、新たな量子ゲート構築実験も行った。本研究で用いている量子ゲートはシンプルである反面、量子シャッター動作に対して一部分で不完全な動作を引き起こしてしまう。我々はそのような不完全性を原理的には完全に無くすることができる新しい量子ゲートを構築した(図2)。この量子ゲートは2001年に提案されていたものの、光路干渉と量子干渉を複数個含んだ複雑な系であったため、これまで実現されてこなかった。我々は、近年用いてきた光学的な技術を組み合わせることでこれを

実現した(図2)。そして、その量子的なプロセスとしての評価を行った。その結果、構築したゲートが約80%という高い忠実度で動作していることを確認できた(雑誌論文①)。

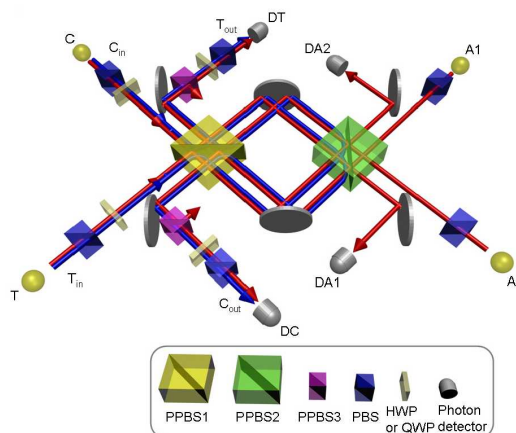


図2. 新しく構築した量子ゲート

本研究では、世界で初めて量子シャッターの実証実験を行い、量子力学の非局所性の新たな一面を明らかにした。本研究成果は、複数の場所に重ね合わせ状態で存在する光子を同時に制御する新しい方法につながるものと期待できる。今後は、そのような光子の同時制御を用いた、より複雑な系の実現に向けた研究を展開していきたい。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計4件)

① Ryo Okamoto, Jeremy L. O' Brien, Holger F. Hofmann, Shigeki Takeuchi,

「Realization of a Knill-Laflamme-Milburn controlled-NOT photonic quantum circuit combining effective optical nonlinearities」 Proceedings of the National Academy of Sciences, 査読有, 掲載受理済

② Hideki Fujiwara, Yoshio Kawabe, Ryo Okamoto, Shigeki Takeuchi, and Keiji Sasaki, 「Quantum lithography under imperfect conditions: effects of loss and dephasing on two-photon interference fringes」 Journal of the Optical Society of America B, 査読有, Vol. 28, pp. 422-431 (2011)

③ Akira Tanaka, Takeshi Asai, Kiyota Toubaru, Hideaki Takashima, Masazumi Fujiwara, Ryo Okamoto, and Shigeki Takeuchi, 「Phase shift spectra of a fiber-microsphere system at the single photon level」 Optics Express, 査読有, Vol. 19,

pp. 2278-2285 (2011)

④ Tomohisa Nagata, Ryo Okamoto, Holger F. Hofmann, Shigeki Takeuchi, 「Analysis of experimental error sources in a linear-optics quantum gate」 New Journal of Physics, 査読有, Vol.12 pp. 043053 (2010)

〔学会発表〕 (計 2 件)

① 岡本 亮, Jeremy L. O'Brien, Holger F. Hofmann, 竹内繁樹,

「Knill-Laflamme-Milburn 制御ノットゲートの実現—高効率な光非線形性に基づく光量子回路」公開シンポジウム「ナノ量子情報エレクトロニクスの進展」, 2010/12/22, 東京大学ナノ量子情報エレクトロニクス研究機構 東京都目黒区駒場 4-6-1

② Ryo Okamoto, Jeremy L O'Brien, Holger F Hofmann, Tomohisa Nagata, and Shigeki Takeuchi, 「Linear optics quantum circuits」, International Conference on Coherent and Nonlinear Optics/Lasers, Applications, and Technologies 2010, 2010/8/26, Hotel Korston 1 Yershova street Kazan. Russia

6. 研究組織

(1) 研究代表者

岡本 亮 (OKAMOTO RYO)
北海道大学・電子科学研究所・助教
研究者番号: 10435951

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし