

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 1 日現在

機関番号：15401

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24540428

研究課題名(和文) 偏光の弱い量子測定の実現による逆説的量子相関の研究

研究課題名(英文) Investigation of paradoxical quantum correlation with weak measurement of photon polarization

研究代表者

飯沼 昌隆 (Inuma, Masataka)

広島大学・先端物質科学研究科・助教

研究者番号：00294512

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：光子の偏光の連続測定を実現し、下記の成果を得た。測定装置による誤り確率を評価することによって、弱い領域から強い領域まで任意の強さで測定した確率から測定前の量子状態の確率分布を得ることに成功した。結合確率は負となったが、量子論の予言と一致した。さらに位相に感度を持つ測定装置に改良し、複素数の結合確率も得た。また測定誤差の最適な値を求めることで、数学的には同じ定義でも物理的意味の異なる測定誤差を評価することに初めて成功した。この誤差は後段に行った測定結果との非古典相関によって原理的にゼロまで下げられることが分かった。上記の結果は光子対測定にも直ちに応用可能である。

研究成果の概要(英文)：We have realized a sequential quantum measurement of non-commuting observables in photon polarization and achieved following results in this project. One is to obtain intrinsic joint probability distribution of initial quantum state at any measurement strength from weak to strong regime, which is the probability distribution without the influence of the measurement process. It was realized by evaluating error probabilities due to the apparatus. One of obtained joint probabilities results in negative, but they are consistent with predictions. The Second is to obtain the joint probabilities with complex numbers by upgrading the apparatus to being sensitive to a quantum phase. Furthermore, we firstly evaluated measurement error in optimization and found that non-classical correlation between initial and final results reduces the error to zero in principle. These results are directly applicable to experiments to photon pairs.

研究分野：量子光学・量子エレクトロニクス

キーワード：量子測定 偏光 結合確率 逆説的量子相関 測定の強さ可変測定 非可換物理量 連続測定 測定誤差

1. 研究開始当初の背景

量子力学の基礎的研究は、古典的現象と矛盾する現象、「非局所性」と「文脈依存性」の二つの性質が基本となっている。これまでの研究方法は“量子状態の準備”に主眼が置かれ、量子操作技術の進展とともに究極的な状態操作や状態準備を目指して研究が進められてきた。その状況の中で、新たに“測定”を基本とした新しい潮流が起こってきた。それが Aharonov らによる弱測定と小澤が提唱した測定の不確定性関係である。これらは測定技術の進展にとともに、実証実験や応用実験をきっかけに独立に研究が進められてきた。特に弱測定は従来の射影測定に代わる新しい測定法として注目され、量子現象の本質を探るための測定や精密測定のための実験的手段として認められつつあった。このような状況の中で、「非局所性」と「文脈依存性」を示す量子現象や逆説的量子相関を示す現象について、弱測定がもたらす奇妙な結果に注目が集まった。特に“もつれ合い光子対”は非局所性を示す典型的な量子現象であり、量子情報技術には欠かせないため、その物理的解明には大きな意味を持つ。ところが弱測定から得られる測定値、弱値は一般に複素数となる上に固有値を大きく超えて増大するために、弱測定や弱値の物理的意味が明確となっていなかった。そのため弱測定が本質的に意味のある結果をもたらすのか分からない状況にあった。

2. 研究の目的

本研究の目的は光子の偏光の弱測定をもつれ合い光子対に適用し、光子対の測定前の途中段階を弱測定で測定することで、もつれ合い状態を物理的に解明しようとするものである。そのために当初は次の(1) (2) (3)を目的とした。しかしながら測定を深く理解するためと弱値と弱測定の物理的意味を明確にするために、(4)と(5)についての研究も進めた。

- (1) もつれ合い光子対発生源の構築
- (2) 測定装置の改良
- (3) 光子対の弱測定
- (4) 測定前の確率分布の再構成
- (5) 測定の不確定性関係との関連

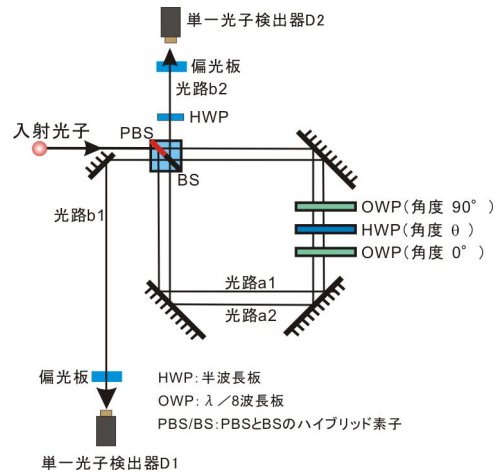
3. 研究の方法

(1) 次の二段階で進める。

レーザーを直接非線形結晶に入射させ、発生する光子対を二台の単一光子検出器で同時計測する。その後、カウント数が多くなるように全体のアライメントを行う。この実験を通じて、アライメント方法を確立する。もつれ合い光子対発生源構築のために、非線形結晶をサニャック干渉計内部に設置

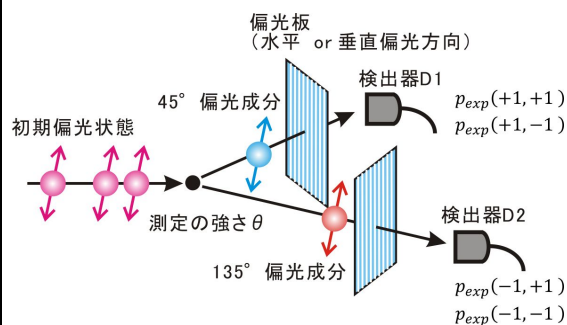
して光子対の同時計測を行う。干渉計を含め全体のアライメントを行い、カウント数と明瞭度をできるだけ向上させるとともにアライメント方法を確立する。

(2) 複素数の弱値の実部と虚部の両方が測定できるように、下記のような変形サニャック干渉計を基本とするセットアップを構築する。系統誤差の原因を調べ、それらを抑えられるように全体のセットアップの改善を行うとともに、系統誤差を打ち消すようにデータ解析の方法も確立する。



(3) (1)で確立した発生源からの光子対を(2)で確立した測定装置を使って、もつれ合い状態の測定を行う。

(4) (2)のセットアップは非可換物理量の連続測定が可能なセットアップでもある。(2)のセットアップを模式的に書いた図が下記の図である。



初段の測定は測定の強さが干渉計内部のHWPの角度で可変な測定で、後段の測定が偏光板による射影測定である。初段は45°と135°方向を測定基底とする物理量 S_{PM} の測定で、これはパウリ行列の x の測定に対応する。後段は水平方向および垂直方向を測定基底とする物理量 S_{HV} の測定で、パウリ行列の z 測定に対応する。検出器 D1 と D2 の光子をカウントすることによって、 $S_{PM} = \pm 1$ と $S_{HV} = \pm 1$ の4通りの出力に対応する4つの結合確率が測定できる。まずは既知の固有状態

を測定装置に入射することで、初段の測定による測定結果の誤り確率を実験的に評価する。今度は任意の初期状態を入射したときの確率を測定し、前もって評価した誤り確率を使って、測定前の確率分布を再構成する。この方法は弱測定とは異なる方法であり、任意の測定の強さで測定可能である。この方法と弱測定で得られた実験結果を比較することで、弱測定の物理的意味を明らかにする。

(5) 実験的に評価した測定装置の誤り確率は、小澤の提唱した測定誤差・擾乱と深い関連がある。その関係性を実験的に見出し、小澤の誤差の物理的意味を明確にする。

4. 研究成果

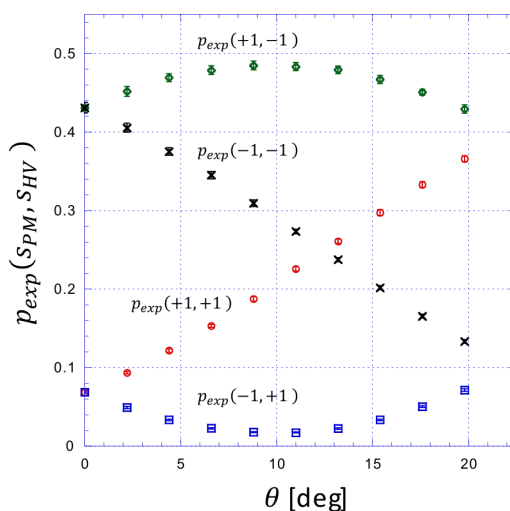
(1) については最終年度で発生光源が確立されたこと、(2) については系統誤差を十分に抑えきれない状況にあることから(3)の段階まで至らなかった。しかしながら(4)と(5)の研究を通じて、量子測定プロセスの理解が深まり、弱測定や弱値の物理的意味も明確になってきた。弱測定とは異なる方法で測定前の情報が得られることも分かってきた。また我々の測定装置は測定をしない状態から射影測定まで測定の強さが制御できる測定装置であるが、その装置が量子測定の研究のために重要な役割を果たすことも分かってきた。今回の成果として(3)以外について、それぞれ述べる。

(1): 最終年度で発生源を確立し、光子対のカウント数として 800c/sec を得た。この数値自体は大きくないが、水平偏光と垂直偏光の明瞭度は 98%、45° 偏光と 135° 偏光の明瞭度は 95% を達成できた。この結果はもつれ合い状態として測定に支障ない性能である。

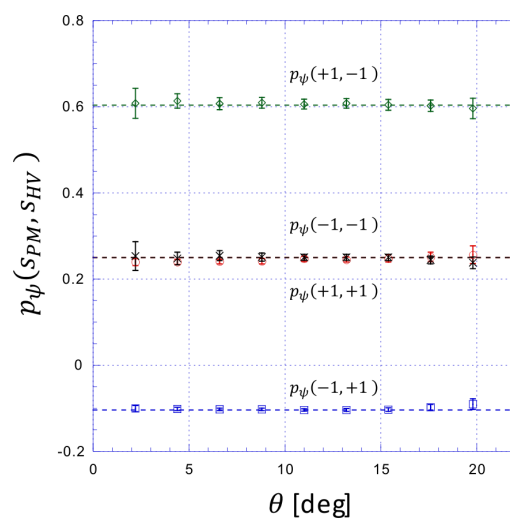
(2): 変形サニャック干渉計をベースにすることで、格段に高い安定性を持つセットアップを実現することができた。弱値の実部と虚部の測定にも成功したが、系統誤差を十分に下げることが出来なかった。原因を調べた結果、PBS および BS のハイブリッド光学素子の系統的ズレが最大の原因であることを突き止めた。その結果を踏まえ、光学素子の系統的ズレがキャンセルできるようなセットアップの改善とデータの解析方法を見出した。しかしながら最終的には系統誤差を十分に下げられず、セットアップの基本形を見直す必要があることがわかった。現在はその新しいセットアップの設計と構築に取り組んでいるところである。

(4): (2) のセットアップを使って、測定前の確率分布を得ることに成功した。ポイントは、測定で得られた確率分布は初段の測定の影響を含むために測定の強さに依存して

しまうが、測定前の確率分布は測定の影響を含まないため、測定の強さに依存しない点にある。測定前の任意の初期状態の確率分布を得るために、前もって装置の較正を行い、初段の測定による誤り確率を実験的に評価した。その誤り確率を使って、ある特定の初期状態の測定結果から測定前の確率分布を再構成した。



上記の図は偏光状態を水平方向から 22.5° 傾けた直線偏光を入射したときに測定された測定確率である。図の横軸が測定の強さを表し、 $\theta = 0^\circ$ が測定しない場合、 $\theta = 22.5^\circ$ が射影測定をした場合を示す。この測定結果は測定の強さに依存するため測定の影響を含んでいる。これを初段の測定の誤り確率を使って測定の影響を排除した結果が下記の図である。



この結果は測定の強さに依存しないため、測定前の初期状態の結合確率分布を示していると言える。確率の一つは負の確率となったが、数学的には密度行列と一対一に対応するカークウィッド・ディラック分布と定量的に一致した。得られた結合確率にベイズの定理を適用すると、測定前の条件付き確率が得られる。同様な測定を弱測定でも行い結果を

比較したところ、弱値は得られた測定前の条件付き確率の平均値と一致した。さらに円偏光成分を含んだ一般の初期状態に対しても測定を行い、同様の方法で解析した結果、複素数の結合確率分布を得ることに成功した。同様にベイズの定理を使って測定前の条件付き確率を求めると、その平均値は複素数となって複素数の弱値と一致した。求まった複素数の条件付き確率は測定の影響が排除された測定前の確率である。したがって、弱測定は測定前の情報をもたらす測定法であり、弱値は測定前の条件付き確率の平均値として解釈できることが分かった。この結果から一般の初期状態の測定前の結合確率分布は、複素数で表現される可能性が高いと言える。しかし複素数の結合確率分布の測定では系統誤差の影響が大きく、予想値とのずれが無視できない結果となった。

(5): 小澤の測定誤差の定義から、光子の偏光のような二準位系では、測定誤差と擾乱は装置の誤り確率と等しいことが分かった。(4)で評価した誤り確率を使って、測定の不確定性関係を実験で検証することができた。また小澤の測定誤差は測定値を固有値に限定しない場合も含めて表現されていることがわかった。したがって誤差が最小となる場合が存在し、そのときの測定値が弱値であることも実験で検証できた。なお測定値を固有値にした場合は、誤差が最大になることも分かった。また後段の測定結果を用いると、初段の測定結果との非古典相関によって測定誤差が格段に下がることも分かった。このとき後段の測定は測定の反作用、つまり初段の測定の影響を見ているわけではない。さらに測定誤差は理想的にはゼロにまで下がること、さらにゼロでない誤差の原因は測定装置の不完全性に起因することも分かった。

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 2件)

Kouji Nakamura and Masataka Iinuma
Reinterpretations of an experiment on the backaction in a weak measurement
Phys. Rev. A 88, 42106, 2013
doi:
<http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevA.88.042106>

Yutaro Suzuki, Masataka Iinuma, and Holger F. Hofmann
Violation of Leggett-Garg inequalities in quantum measurements with variable resolution and back-action
New Journal of Physics 14, 103022, 2012
doi:10.1088/1367-2630/14/10/103022

[学会発表](計 22件)

(Invited) Masataka Iinuma, Yutaro Suzuki, Taiki Nii, Ryuji Kinoshita, Holger F. Hofmann
Non-classical correlation between intermediate and final results in a two-level system
International workshop on weak value and weak measurement
May/19/2015-May/20/2015
Tokyo Institute of Technology (Tokyo)

Masataka Iinuma, Yutaro Suzuki, Taiki Nii, Ryuji Kinoshita, Holger F. Hofmann
Physical meaning and experimental evaluation of error and disturbance in a two-level system
Asian Quantum Information Science 2014 (AQIS2014)
Aug/20/2014-Aug/24/2014
Kyoto University (Kyoto)

Yutaro Suzuki, Masataka Iinuma, Ryuji Kinoshita, Holger F. Hofmann
Reconstruction of the complex joint probabilities for sequential measurements of photon polarization
Jun/23/2014-Jun/27/2014
Brussels (Belgium)

Masataka Iinuma, Yutaro Suzuki, and Holger F. Hofmann
Measurements of negative probabilities in optical quantum systems
8th International Workshop on Natural Computing
Mar/18/2014-Mar/19/2014
Hiroshima YMCA (Hiroshima)

(招待講演) 飯沼昌隆
弱測定の物理的本質と有用性
第10回原子・分子・光化学(AMO)討論会
2013年6月14日~6月15日
電気通信大学(東京都調布市)

Masataka Iinuma, Yutaro Suzuki, Holger F. Hofmann
Experimental observation of paradoxical correlation in sequential measurements of photon polarization
Asian Quantum Information Science Conference 2012 (AQIS2012)
Aug/23/2012-Aug/26/2012,
Suzhou (China)

Yutaro Suzuki, Masataka Iinuma, and Holger F. Hofmann
Experimental demonstration of Leggett-Garg inequality violation by measurements with high resolution and

back-action
11th Conference on Quantum
Communication, Measurement, and
Computation (QCMC2012)
Jul/29/2012-Aug/3/2012
Vienna (Austria)

〔図書〕(計 0件)

〔産業財産権〕
出願状況(計 0件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

取得状況(計 0件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等
QFG ホームページ(主に海外向け)
<http://home.hiroshima-u.ac.jp/qfg/qfg/index.html>
高エネルギー物理研究室ホームページ
(主に国内向け)
http://www.huhep.org/Home/weak_measurement

6. 研究組織

(1) 研究代表者

飯沼昌隆 (Masataka Inuma)
広島大学・大学院先端物質科学研究科・
助教
研究者番号：00294512

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

ホフマンホルガ (Holger F. Hofmann)
広島大学・大学院先端物質科学研究科・
准教授
研究者番号：90379909