

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 5 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：24540427

研究課題名(和文)量子プロセスにおける非古典的な相関の生成と制御

研究課題名(英文)Generation and control of non-classical correlations in quantum processes

研究代表者

Hofmann Holger・F (Hofmann, Holger F.)

広島大学・先端物質科学研究科・准教授

研究者番号：90379909

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：このプロジェクトでは、量子プロセスにおける非古典相関の制御や最適化の可能性について新しい量子統計的手法と実験によって研究した。その結果、非古典相関は弱測定や量子クローニング・量子制御測定などの関連する測定によって直接測定できることがわかった。典型的には、非古典相関は統計の虚数部として現れ、量子系がどれだけ変化に反応しているかを示している。非古典的統計は外力の効果を示しているため、量子プロセスの最適化に直接応用可能である。

研究成果の概要(英文)：In this research project, the possibility to control and optimize non-classical correlations in quantum process was explored using new quantum statistical methods and their experimental implementations. The results show that non-classical correlations can be measured directly by weak measurements and related methods such as quantum cloning or quantum controlled measurements. Typically, non-classical correlations appear as imaginary parts of the statistics and indicate how the quantum system will respond to transformation processes. This insight into non-classical statistics has direct applications in the optimization of quantum processes, since it describes the effects of external forces on outcome efficiencies.

研究分野：数物系科学

キーワード：量子測定 量子相関 量子プロセス 弱値 非可換物理量 複素結合確率

1. 研究開始当初の背景

量子情報の技術に係る研究については、今や新しい段階に移りつつある。それは基本的な方法が十分確立され、大きなスケールでのプロセス実現に向けて、実験研究者が複合システムの問題に注目してきたためである。しかしながら、もつれあい状態の複雑さがシステムのサイズとともに指数関数的に増大するにつれ、我々のそのようなプロセスの理解は未だ限定されている。それゆえ、この重要な分野における大きな発展のためには、早急に非古典相関のさらに深い理解が必要となっている。

近年、新しい量子情報技術によって高精度なレベルでの相互作用制御が実現可能となったために、量子測定の分野でいくつか重要なブレイクスルーが起こった。そのようなブレイクスルーの一つは、弱測定の実現と応用である。弱測定は、非可換な物理量の間の非古典相関の直接観測を可能にする。この方法によって古典統計の限界を超える、つまりしばしば矛盾と思われていた相関を明らかにすることが可能となってきている。これらの結果の詳細な物理的意味は未だに不明であるが、同じような測定によって自然や非古典相関についての深い洞察をもたらす可能性が高い。これらの洞察は大きなスケールでの量子技術の発展に大いに価値のあるものと思われる。

2. 研究の目的

この研究のプロジェクトの目的は、近年発展した実験的方法の実験データに基づいて、量子プロセスの非古典的性質の解析を行うための新しい理論的方法を開発することであった。この目的の一部としては、さらに詳細な測定結果を得るための新しい実験的アプローチを進展させる必要があった。さらに新しい解析方法は、量子デバイスでの非古典相関を示す方法や評価する方法を探索し、かつ最適化するためのツールとして役に立った。まとめると、非古典的效果に関連した実験で得られるシグナルを系統的に特定することによって、すべての非古典的效果に関する我々の基礎的理解を改善することがこの研究の主要目的であったといえる。

3. 研究の方法

量子論は信頼性の高い新しい量子デバイスを記述したり予言したりする強力な方法を与えてくれる。しかし方法は抽象的で、単純なアルゴリズムの手続きに帰着できない。その結果、わずかな研究者がある特定のプロセスがどのくらい実行できるのか明確なアイデアを持つことになる。この分野の実験研究者は常に一握りの理論研究者によって発展した理論に依存してしまい、実験的に実現可能性を秘めた理論を勉強するために必要な時間を使ってしまう。量子プロセスが実験的に実現した提案の記録をたどると、私は

この分野におけるそのような最先端の専門家の一人であろう。私の研究では、なぜそのような量子効果が簡単に実現し他の量子効果がほとんど不可能のように見えるのか、説明可能な単純化された法則を探索するために、実現可能な量子プロセスについての幅広い知識を活用している。一般的な演算子形式の一部として、弱値は単に量子システム間の弱い結合から得られる結果だけではなく、非古典相関の理論的解析における解析ツールも与えてくれる。射影演算子の弱値に基づいて量子プロセスの完全な数学的評価を進展させるために、私は演算子形式の広い知識を利用した。重要なことは、この方法は複素数による確率論に対応しており、それは良く知られた統計的方法を量子的統計やプロセスの評価に応用することを容易にする。

4. 研究成果

現在の研究の主要な結果は、実験的に測定可能な複素数確率の観点からの量子効果の説明である[10]。特に量子的統計は、これまでユニタリー変換によって記述された動力学に由来するように見える。量子物理学の研究者や先生は、量子状態を波と比較する、つまり古典的振動の位相と量子の位相とを誤って同一視することによって、量子効果の間違った説明をしているかもしれない。新しい結果は、位相の正しい物理的な意味は外力に対する量子システムの応答から得られることを示している。その結果量子システムの非古典相関は、デバイスが量子システムの物理的特性を決めるような動力学から実際に生じる。現在の量子物理研究における多くの混乱は、私も含めたこの分野の研究者が動力学の役割を無視し、代わりにシステムの初期状態に対する統計モデルだけに注目している事実が原因である。この研究プロジェクトで得られた新しい結果は、それゆえ、コミュニティで熱く論じられている基本的な問題を解決することによって、量子物理研究に大変革を与えるであろう。

この基礎的ブレイクスルーに加えて、このプロジェクトはいくつかの実際に役立つ提案も与えた。非古典相関に対する測定の感度を改善するために、非可換物理量の結合測定における不確定性のトレードオフを最適化する可能性を調べた。その結果、強い結合での弱値統計の実験的観測となった[4]。最適な不確定性のトレードオフは測定するときとしないときの重ね合わせを実現する量子制御を利用することで達成できることを示した。それは反作用がないか測定をしないかに関連したノイズバックグラウンドと反作用の影響のない測定との最適な統計的混合に対応する[12]。二光子干渉を使った光子の到着時間測定を提案するために、同じようなやり方を使った[3,7]。

海外の実験グループとの国際共同研究においては、新しく発展した解析方法を非古典

的多光子相関に関する実験結果の評価[9]や、弱値を使った相互作用の強さの高感度な推定にも応用した[5]。

非古典プロセスにおける弱値の一般的な重要性は、最適クローニングや量子テレポーテーションの量子相関が弱値で説明されることを示すことによって、証明された[2,6]。非古典相関の系統的な特定は単一光子の周波数コム状態における量子相関の発見につながった。それはミクロとマクロスケールにおける時間と周波数の分離によって制限された不確定性を超える可能性がある[11]。もし共役な物理量での相補的なマクロ不確定性があっても、標準量子限界以下のミクロな素性は可能であることが示されている。

現在進行中の研究としては、新しい結果の動力学への応用で、例えば光と物質の相互作用における非線形プロセス[8]や、一般的な量子プロセスでの時間の解析[1]などがある。しかしながらもっと重要な仕事は、すべての物理的システムにおいて、運動の基本法則として結果を定式化することである。特に、量子状態は準備したプロセスによって動力学的に平均化されているという新しい見方は、量子相関の非古典的な特性を我々は理解していないことを示している。なぜならば、我々は運動の法則が一つの物理特性からもう一方の物理特性へどのように変換するのか理解していないからである[10]。この研究で得られた結果は、すべての量子プロセスを将来究極的に説明することを目的とする長く重要な研究の単なる始まりにすぎない。異なった測定プロセスからの証拠として、プランク定数は実際には外力の作用とシステムの性質を変化させる作用の容量を記述している。制御の精度がプランク定数で決められた制限を超えたとき、非古典相関は相互作用による動力学のシグナルとして現れる。すべての古典的な運動方程式を適切な量子力学的表現に置き換える適切な物理法則、それは古典物理学のすべてを小さな作用に反応しないプロセスの近似的極限として含んでいる法則であるが、それを定式化することが可能なはずである。重要なことは、量子物理のそのような理論はもっとずっと直観的で、それゆえ、実際の応用にずっと近いものであると思われる。間違いなくもっと研究が必要であるものの、これらの結果は決定的に将来の量子技術について大きなインパクトを有している。

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12件)

[1] Sequential measurements of non-commuting observables with quantum controlled interactions
H. F. Hofmann

New J. Phys. (査読有) 16, 063056 (2014).
doi:10.1088/1367-2630/16/6/063056

[2] Simultaneous suppression of time and energy uncertainties in a single-photon frequency-comb state
C. Ren and H. F. Hofmann
Phys. Rev. A (査読有) 89, 053823 (2014).
doi: 10.1103/PhysRevA.89.053823

[3] Derivation of quantum mechanics from a single fundamental modification of the relations between physical properties
H. F. Hofmann
Phys. Rev. A (査読有) 89, 042115 (2014).
doi: 10.1103/PhysRevA.89.042115

[4] Optimal multi-photon phase sensing with a single interference fringe
G. Y. Xiang, H. F. Hofmann, and G. J. Pryde
Sci. Rep. (査読有) 3, 2684 (2013).
doi: 10.1038/srep02684

[5] Quantum effects in the interaction of off-resonant coherent light with a single atom
A. Yamaguchi and H. F. Hofmann
Phys. Rev. A (査読有) 88, 013809 (2013).
doi: 10.1103/PhysRevA.88.013809

[6] Direct observation of temporal coherence by weak projective measurements of photon arrival time
H. F. Hofmann and C. Ren
Phys. Rev. A (査読有) 87, 062109 (2013).
doi: 10.1103/PhysRevA.87.062109

[7] An investigation of the transfer dynamics of quantum teleportation by weak measurement statistics
M. Hiroishi and H. F. Hofmann
J. Phys. A: Math. Theor. (査読有) 46, 245302 (2013).
doi:10.1088/1751-8113/46/24/245302

[8] Estimation of a quantum interaction parameter using weak measurements: Theory and experiment
H. F. Hofmann, M. E. Goggin, M. P. Almeida, and M. Barbieri
Phys. Rev. A (査読有) 86, 040102(R) (2012).
doi: 10.1103/PhysRevA.86.040102

[9] Violation of Leggett-Garg inequalities in quantum measurements with variable resolution and back-action
Y. Suzuki, M. Iinuma, and H. F. Hofmann
New J. Phys. (査読有) 14, 103022 (2012).
doi:10.1088/1367-2630/14/10/103022

[10] Analysis of the time-energy entanglement of down-converted photon pairs by correlated single-photon interference

C. Ren and H. F. Hofmann

Phys. Rev. A (査読有) 86, 043823 (2012).
doi: 10.1103/PhysRevA.86.043823

[11] Clock synchronization using maximal multipartite entanglement

C. Ren and H. F. Hofmann

Phys. Rev. A (査読有) 86, 014301 (2012).
doi: 10.1103/PhysRevA.86.014301

[12] How weak values emerge in joint measurements on cloned quantum systems
H. F. Hofmann

Phys. Rev. Lett. (査読有) 109, 020408 (2012).

doi: 10.1103/PhysRevLett.109.020408
〔学会発表〕(計 1 1 件)

1) Holger F. Hofmann, How to uncover the physics of quantum correlations through combinations of weak and strong measurements

(invited) International Workshop on Weak Value and Weak Measurement, 2015/3/19-2015/3/20, Tokyo

2) Holger F. Hofmann, From experimental evidence to quantum physics: what measurement reveals about the dynamical structure of reality

(invited) Nagoya Winter Workshop 2015, 2015/3/9-2015/3/13, Nagoya University, Nagoya

3) Holger F. Hofmann, Why complex probabilities make sense: New insights into the relations between weak measurements, paradoxical correlations, and causality in quantum systems

(invited) AQIS 2014, 2014/8/21-2014/8/24, Shirankaikan, Kyoto, Japan

4) Holger F. Hofmann, How photons get from A to B: quantum measurements of motion

CEWQO 2014, 2014/6/23-2014/6/27, Palace of the Royal Academies, Bruxelles, Belgium

5) Holger F. Hofmann, Weak valued statistics and physical reality in quantum mechanics

(invited) APCWQIS 2013, 2013/12/15-2013/12/18, Korea Institute of Advanced Study, Seoul, South Korea

6) Holger F. Hofmann, Fundamental laws of quantum physics: On the meaning of weak measurement statistics

(invited) IMS workshop on quantum optics and quantum information, 2013/8/21, Institute for Molecular Science, IMS, Higashi Okazaki, Japan
Institute of Technology, Tokyo

7) Holger F. Hofmann, Fundamental laws for quantum physics: How inequality violations originate from weak value statistics

CQIQC, 2013/8/12-2013/8/16, University of Toronto, Toronto, Canada

8) Holger F. Hofmann and Changliang Ren, A closer look at photons: how to map the quantum statistics of energy and time (invited) NSTEP, 2013/7/8-2013/7/9, Osaka University, Osaka, Japan

9) Holger F. Hofmann, Quantum evidence in classical data: How recent experiments in optics inspire a new look at fundamental physics

(invited) CQO-X/QIM-2, 2013/6/17-2013/6/20, Rochester University, Rochester, NY, USA

10) Holger F. Hofmann, Complex probabilities as fundamental physics: how Hilbert space unifies dynamics and statistics

(invited) Nagoya Winter Workshop, 2013/2/18-2013/2/22, Nagoya University

11) Holger F. Hofmann, What the complex joint probabilities observed in weak measurements tell us about quantum physics,

2012/7/30, QCMC 2012, Wien, 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

6. 研究組織

(1) 研究代表者

Holger F. Hofmann (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

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

()

研究者番号：