

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 5 月 11 日現在

機関番号：15401

研究種目：基盤研究 (C)

研究期間：2009 ~ 2011

課題番号：21540409

研究課題名（和文） 光量子プロセスにおける精度の解析

研究課題名（英文） Analysis of precision in optical quantum processes

研究代表者

Hofmann Holger F. (ホフマン ホルガ)

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

研究成果の概要（和文）：

本研究では、量子トモグラフィ、量子計量学、そして弱測定の最近の進展に基づいて、量子計量学でのパラメータ推定における精度とコヒーレントな量子揺らぎで表現される不確定性との関係を理論的に調べた。その結果、複素結合確率を使った記述法が精度と量子統計の解析を著しく簡単にすることが分かった。特に弱測定で見られる複素数統計は量子システムの変換ダイナミクスを記述すること、さらにこの複素数統計は、量子システムの外力に対する応答を予言・制御することに利用できることを示した。

研究成果の概要（英文）：

In this research project, the relation between the sensitivity of parameter estimation used in quantum metrology and the uncertainties expressed by coherent quantum fluctuations was investigated based on recent advances in quantum tomography, quantum metrology, and weak measurements. The results indicate that a unified description in terms of complex joint probabilities greatly simplifies the analysis of sensitivities and quantum statistics. In particular, I was able to show that the complex statistics observed in weak measurements describe the transformation dynamics of the quantum system and can be used to predict and control the response of quantum systems to external forces.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2010年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2011年度	1,100,000	330,000	1,430,000
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・原子・分子・量子エレクトロニクス

キーワード：量子情報、量子プロセス、位相精度、量子測定

1. 研究開始当初の背景

量子コヒーレンスの効果によって、測定精度や多光子干渉、量子ゲート、弱測定などでの量子プロセスの精度を大幅に向上させることができる。しかしながら、量子プロセスでの精度向上に寄与する物理的効果は明確になっていない。しばしば複数の粒子間のもつれ合いが本質的に寄与するであろうと思われるが、量子計量学の成果は、単一の量子システムでのダイナミクスにも適用できる。そのため、量子プロセスにおける量子コヒーレンスの効果のさらに一般的な理解が望まれている。

2. 研究の目的

今回の研究では、量子コヒーレンスが光学的な量子システムにおける測定や他のプロセスでの精度をどのように向上させるか理論的に調べた。特に、連続した位相変換による不連続な光子計測数の変化の高精度な制御は、計測による統計と量子力学における変換との一般的な関係についての興味深い問題につながる。今回の研究の目的はこの関係を明確にすること、それから測定と統計の両方を一緒に扱うことで、量子状態のコヒーレントな制御をより詳細に理解することであった。

3. 研究の方法

これまで量子計量学、量子トモグラフィ、そして弱測定は、各々対象とする分野の狭い領域の問題のみにフォーカスした理論的扱いがなされていたため、それぞれ異なる分野として扱われていた。しかしながら近年の実験では、同じリソースを使うことによってこれらの効果を実現しており、異なったアプローチの同一性を示している。そのため量子プロセスで用いられる量子システムの基礎的な特

性を調べることによって、量子コヒーレンスの影響がどのようにある特定のプロセスの精度を向上させるのか示すことができる。この研究によって、ある特定の応用下での非古典的なリソースの利用法を改善させるだけでなく、基礎的なレベルでの量子効果の理解が大きく前進することが期待できる。

4. 研究成果

(1) 光学的量子情報プロセスにおいて本質的な物理メカニズムを明らかにするために、量子的統計を使った方法を適用し、量子計算の解析のための一般的なフレームワークを提案した [13]。光学的量子制御NOTゲートから得られた実験データを解析し、ある特定のエラー発生源の影響を説明することができた [4, 7]。時間一周波数自由度におけるもつれ合いを基本にした新しい量子テクノロジーの開発をサポートするため、光の量子コヒーレンスについて原子の非線形性の効果を調べ、光子・光子間相互作用の特性を出力で観測される光のコヒーレンスから明らかにした [12]。時間領域での光子もつれの詳細な測定について、参照パルスに対して短い時間での光子バンチング効果を調べ、時間分解量子トモグラフィという新しい方法を提案した [3]。

(2) わずかな位相差に対する多光子状態の感度について、光子損失の影響を調べた。結果としては、位相精度のハイゼンベルグ限界は光子損失の確率が低い場合のみ達成することが可能であることが確認できた [9]。

(3) 光学的量子測定の精度を改善するために、新しい技術を開発した。ナノ光八木・宇多アンテナによる光の吸収と放出の指向性制御の可能性を実験的に確かめた [8]。また弱

測定の効率的な実現のための新しい実験セットアップの提案も行った [5]。

(4) 弱測定精度についての解析を行い、弱測定統計の完全な特性評価を実現するための弱測定トモグラフィーの方法を提案した [10]。位相性度は弱値の虚部の揺らぎと等しいことを見出した。その結果から、位相エラーと弱値の実部の揺らぎとの間の不確定性関係を見出した [6]。それゆえ弱測定の理論的な解析で得られる複素数は、弱測定統計と弱い外力に対する量子系の精度との基礎的な関係から、説明できることがわかった。

(5) 弱測定統計でみられる複素数の位相を詳細に調べることによって、弱測定統計は可逆な変換に対する量子システムの応答であることを示した。特に弱測定の結果は、複素条件付き確率によって記述できること、またその複素確率の位相は、初期状態から終状態への遷移を最大にするユニタリー変換の作用を示していることがわかった [2]。この結果は、状態間の変換の構造を解析することによって量子相関が理解できることを示している。古典的統計は情報の統計性のみに関係する一方で、量子的統計は、異なった物理的特性へ同時に値を与えることを妨げるようなダイナミカルな関係を含んでいるように見える。この重要な結果は、量子状態を非交換特性を持つ結合確率として表現することでまとめられる。それゆえ異なる物理的特性の間関係は複素条件付き確率として現れ、その確率は別の測定間の不確定性のない可逆な変換を表している [1]。

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 13 件)

- 1) H. F. Hofmann, Complex joint probabilities as expressions of reversible transformations in quantum mechanics, *New J. Phys.* (査読有) 14 (2012) article no. 043031 DOI: [10.1088/1367-2630/14/4/043031](https://doi.org/10.1088/1367-2630/14/4/043031)
- 2) H. F. Hofmann, On the role of complex phases in the quantum statistics of weak measurements, *New J. Phys.* (査読有) 13 (2011) article no. 103009, DOI: [10.1088/1367-2630/13/10/103009](https://doi.org/10.1088/1367-2630/13/10/103009)
- 3) C. Ren and H. F. Hofmann, Time-resolved measurement of the quantum states of photons using two-photon interference with short-time reference pulses, *Phys. Rev. A* (査読有) 84 (2011) article no. 032108, DOI: [10.1103/PhysRevA.84.032108](https://doi.org/10.1103/PhysRevA.84.032108)
- 4) R. Okamoto, J. L. O'Brien, H. F. Hofmann, S. Takeuchi, Realization of a Knill-Laflamme-Milburn controlled-NOT photonic quantum circuit combining effective optical nonlinearities, *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* (査読有) 108 (2011) 10067-10071, DOI: [10.1073/pnas.1018839108](https://doi.org/10.1073/pnas.1018839108)
- 5) M. Iinuma, Y. Suzuki, G. Taguchi, Y. Kadoya, and H. F. Hofmann, Weak measurement of photon polarization by back-action-induced path interference, *New J. Phys.* (査読有) 13 (2011) article no. 033041,

DOI: [10.1088/1367-2630/13/3/033041](https://doi.org/10.1088/1367-2630/13/3/033041)

6) [H. F. Hofmann](#), Uncertainty limits for quantum metrology obtained from the statistics of weak measurements, Phys. Rev. A (査読有) 83 (2011) article no. 022106, DOI: [10.1103/PhysRevA.83.022106](https://doi.org/10.1103/PhysRevA.83.022106)

7) T. Nagata, R. Okamoto, [H. F. Hofmann](#), and S. Takeuchi, Analysis of experimental error sources in a linear-optics quantum gate, New J. Phys. (査読有) 12 (2010) article no. 043053, DOI: [10.1088/1367-2630/12/4/043053](https://doi.org/10.1088/1367-2630/12/4/043053)

8) T. Kosako, Y. Kadoya, and [H. F. Hofmann](#), Directional control of light by a nano-optical Yagi-Uda antenna, Nature Photonics (査読有) 4 (2010) 312-315, DOI: [10.1038/nphoton.2010.34](https://doi.org/10.1038/nphoton.2010.34)

9) T. Ono, [H. F. Hofmann](#), Effects of photon losses on phase estimation near the Heisenberg limit using coherent light and squeezed vacuum, Phys. Rev. A (査読有) 81 (2010) article no. 033819, DOI: [10.1103/PhysRevA.81.033819](https://doi.org/10.1103/PhysRevA.81.033819)

10) [H. F. Hofmann](#), Complete characterization of post-selected quantum statistics using weak measurement tomography, Phys. Rev. A (査読有) 81 (2010) article no. 012103, DOI: [10.1103/PhysRevA.81.012103](https://doi.org/10.1103/PhysRevA.81.012103)

11) G. Taguchi, T. Dougakiuchi, M. Iinuma, [H. F. Hofmann](#), Y. Kadoya, Reconstruction of spatial qutrit states based on realistic measurement operators, Phys. Rev. A (査読有) 80 (2009) article no. 062102, DOI: [10.1103/PhysRevA.80.062102](https://doi.org/10.1103/PhysRevA.80.062102)

12) [H. F. Hofmann](#), H. Nishitani, Pulse-shape effects on photon-photon interactions in nonlinear optical quantum gates, Phys. Rev. A (査読有) 80 (2009) article no. 013822, DOI: [10.1103/PhysRevA.80.013822](https://doi.org/10.1103/PhysRevA.80.013822)

13) [H. F. Hofmann](#), How to simulate a quantum computer using negative probability, J. Phys. A: Math. Theor. (査読有) 42 (2009) article no. 275304, DOI: [10.1088/1751-8113/42/27/275304](https://doi.org/10.1088/1751-8113/42/27/275304)

[学会発表] (計 10 件)

1) G. Xiang, [H. F. Hofmann](#), G. Pryde, Optical multi-photon phase sensing with a single interference fringe, QIM 2012, 2012/03/19, Berlin, Germany

2) [H. F. Hofmann](#), Weak joint probabilities as informationally complete representations of quantum statistics, QIPC 2011, 2011/09/06, Zurich, Switzerland

3) [H. F. Hofmann](#), Characterization of decoherence in a quantum channel using weak measurement, CLEO pacific rim/IQEC 2011, 2011/08/30, Sydney, Australia

4) [H. F. Hofmann](#), Causality and completeness in weak measurement statistics, Nagoya Winter Workshop 2011, 2011/02/17, Nagoya University

5) [H. F. Hofmann](#), On the relation between quantum parameter estimation and weak values, AQIS 2012, 2010/08/29, Tokyo University

- 6) G. Xiang, H. F. Hofmann, G. Pryde,
Phase estimation using four and six photon
Holland-Burnett states, QCMC 2010,
2010/07/20, Queensland University, Australia
- 7) H. F. Hofmann, On the estimation of int
eraction parameters in weak measurements,
QCMC 2010, 2010/07/23, Queensland Univers
ity, Australia
- 8) H. F. Hofmann, Resolution of pure state
uncertainties by weak measurement tomogra
phy, Nagoya Winter Workshop 2010, 2010/02/
18, Nagoya University
- 9) H. F. Hofmann, R. Okamoto, J.L.
O'Brien, S. Takeuchi, Quantum parallelism
of an entanglement filter, QIPC 2009,
2009/09/21, Rome, Italy
- 10) H. F. Hofmann, Achieving the uncertain
ty limit of phase estimation in two-path
Interferometers, CLEO pacific 2009, 2009/09/01,
Shanghai, China

6. 研究組織

(1) 研究代表者

Hofmann Holger F. (ホフマン ホルガ)
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：