

研究種目：基盤研究 (C)

研究期間：2006～2008

課題番号：18540393

研究課題名 (和文) 光量子情報システムの解析と最適化

研究課題名 (英文) Analysis and optimization of optical quantum information systems

研究代表者

Holger F. Hofmann (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：

本研究では、量子情報処理での量子統計特性を探索し、実験的に避けられない不備の状況下で、いかに強い非古典的な効果が観測できるかを示した。この結果は2光子偏光エンタングルメントフィルターの初の実証実験で実験的な指標を表すために使用された。さらに、情報の担体として光の空間自由度の利用や、位相感度の高い状態を発生する新しい方法、及び単一光子キュービットの突発的なクローニングの実現方法を提案した。

交付額

(金額単位:円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	1,200,000	0	1,200,000
2007年度	1,300,000	390,000	1,690,000
2008年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
年度			
総計	3,400,000	660,000	4,060,000

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・プラズマ

キーワード：量子情報、量子プロセス、密度行列、多光子干渉、光学量子回路

1. 研究開始当初の背景

近年、より複雑な光学的量子情報システムの開発が注目を集めている。線形光学により、単一光子状態の量子コヒーレンスを制御する方法が得られる。光子間相互作用は光子バンディングと光子検出、もしくは光学的非線形

性によって実現可能である。特に、強い非線形効果はパラメトリック下方変換によって発生したエンタングル光子の使用により観測されている。これらの発展をより大きくより複雑な量子情報回路へ応用するためには、多モード、多光子の光の本質的な非古典的特

性を知ることが必要である。

2. 研究の目的

本研究では、現実的な量子デバイスの性能向上に寄与する量子相関の詳しい解析を行なうことにより、光学的な量子情報処理のためのより優れた戦略を確立することを目的とする。具体的には、量子論的な特性が直接観測できるような実験的な場合に焦点を当て、すでに確立されている量子統計的な解析方法を用いることにより、非古典的な性質やエンタングルメントの最適な指標を探索する。非古典的な少数光子状態やスクイズ状態の応用を含む最近の光学的な方法は、非古典的な性質に対する直接的な観測の良い例である。本研究で提案した詳しい解析は、実験的な量子光学や光を用いた量子情報の発展のための基礎を与えることが期待される。

3. 研究の方法

光量子情報システムは、量子場の理論と基礎的な量子統計を結び付けている。理論的には、光の側面は場の演算子により表され、量子統計は光子数状態によって張られるヒルベルト空間上で表される。量子化された光のこれら2つの側面を結びつけることは、新しくそして驚くべき効果をもたらし、光量子情報の分野において最新の発見の基礎を与える。現在の研究は、(a) 光学モードの線形光学変換、(b) 量子状態基底のユニタリ変換、(c) 光学測定の変換、を含む光統計の変換特性に基礎を置いている。密度行列形式とそれに関連するプロセス行列形式をこれらの変換特性に適用することで、実験的に実現可能な表記で完全な量子情報処理理論を形式化することができる。それによって、それぞれの処理

での適切な特性を見つけ、また実験的に実現可能な新しいアイデアを提案することが可能となる。

4. 研究成果

(1) 実験的に実現可能な入出力統計における量子処理の記法が開発された。[9, 10]に示されているように、この記法は目的のデバイスの最も特徴的な機能を示しているプロセス行列形式の特殊な表現である。これにより、通常必要とされるよりも少ない測定でデバイスの性能を評価することが可能となる。近年この評価方法は、アメリカの雑誌 Science [2] で報告されたように、エンタングルメントフィルターの初の検証実験での指標を導くために用いられた。このフィルターは以前の研究の妥当性を説明する、これまでで最も新しい光量子回路である。特に、同じ水平偏光もしくは垂直偏光をもつ光子対のみを通過させるフィルターに関する実験準備を行うためのこの理論研究は、正しく機能する2光子フィルターが斜め偏光の光子対へ働くコヒーレンスによって、2つの入力偏光のうち1つを正確に反転させ、また円偏光の相関も作る、ということを示した。実際の実験で観測されたこれらの操作のエラー確率は、プロセス行列要素によって同定でき、またエラーを引き起こす実験的問題への重要な手掛かりを与える。新しい解析方法に基づく量子フィルター実験の完全な解析と議論は現在進行中である。

(2) 量子光学処理において統計パターンを同定することは、新しい空間量子ビット (qubits) や多重干渉での光学コヒーレンスに基づく量子情報の多次元担体 (qudits) などの新しいソースの開発へも応用された[4]。こ

の場合、干渉縞から得られる連続的な情報は、量子トモグラフィーの手法を用いた干渉縞要素の解析によるd次元量子システムの密度行列要素を用いて同定された。完全な密度行列は干渉縞のシングルスキャンから得られるので、我々はこの新しい方法を“シングルスキャン量子状態トモグラフィー”と名付けた。

(3) 光の非古典的な多光子コヒーレンスの探索により、位相感度の高い光の発生に関するいくつかの新しい提案を行った[5, 6, 12]。特に重要な結果は、最大のN光子コヒーレンス(最大のパスエンタングル状態もしくはNOON状態としても知られている)が、コヒーレント光と下方変換されたもしくはスクイーズド光の適切な強度間での干渉から、N光子要素をセレクトした時に観測されるという発見である[6]。非古典的な位相感度の起源の詳しい探索により、位相感性の位相依存や2つの経路を持つ干渉計における対称性の役割に対する新しい見識が得られた[1, 3]。これらの結果は超敏感な量子技術の開発において非常に役立つものになると思われる。

(4) 光子数状態への連続的操作によって引き起こされる多光子コヒーレンスの探索により、テレポーテーションや増幅を誘導するフィードバックなどの操作の中で、クローニング効果が発見された[8, 11]。特に連続的操作は、場の振幅のホモダイン測定や、電気光学変調によって場の振幅を量子場状態へ付加することに基づいている。これらの操作は通常ガウス場揺らぎを付加する。分からない偏光を持つ単一光子へ適用するときには、出力光子数統計は最適もしくはそれに近い量子クローニング状態の混合となる。このガウス場揺らぎの影響下で光子がそれら自身を複製するという自然な振る舞いは、より頑強

な光子量子情報技術の開発において非常に役立つものである。

(5) 光学的非線形性を改善するために、プラズモニクスを光と単一量子放射体との間のカップリングへ応用する方法を探索した。この探索により、光子の放出と吸収を制御できる光学ナノアンテナ配列を提案した[7]。最初の実験結果は、この提案の実現可能性を確認できたように思われる。

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) H. F. Hofmann, All path-symmetric pure states achieve their maximal phase sensitivity in conventional two-path interferometry, *Physical Review A* (査読有) 79 (2009) article no. 033822

2) R. Okamoto, J.L. O'Brien, H. F. Hofmann, T. Nagata, K. Sasaki, and S. Takeuchi, An entanglement filter, *Science* (査読有) 323 (2009) 483-485

3) R. Okamoto, H. F. Hofmann, T. Nagata, J.L. O'Brien, K. Sasaki, and S. Takeuchi, Beating the standard quantum limit: phase super-sensitivity of N-photon interferometers, *New Journal of Physics* (査読有) 10 (2008) article no. 073033

4) G. Taguchi, T. Dougakiuchi, N. Yoshimoto, K. Kasai, M. Iinuma, H. F. Hofmann, and Y. Kadoya, Measurement and control of spatial qubits generated by passing photons through double-slits, *Physical Review A*

(査読有) 78 (2008) article no. 012307

5) T. Ono and H. F. Hofmann, Quantum enhancement of N-photon phase sensitivity by interferometric addition of down-converted photon pairs to weak coherent light, Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics (査読有) 41 (2008) article no. 095502

6) H. F. Hofmann and T. Ono, High photon-number path entanglement in the interference of spontaneously down-converted photon pairs with coherent laser light, Physical Review A (査読有) 76 (2007) article no. 031806(R)

7) H.F. Hofmann, T. Kosako, and Y. Kadoya, Design parameters for a nano-optical Yagi-Uda antenna, New Journal of Physics (査読有) 9 (2007) article no. 217

8) T. Ide and H. F. Hofmann, Accidental cloning of a single-photon qubit in two-channel continuous-variable quantum teleportation, Physical Review A (査読有) 75 (2007) article no. 062311

9) H. F. Hofmann, Characterization of errors in quantum processes using finite sets of test measurements, Proceedings of SPIE (査読有) 6305 (2006) article no. 63050F

10) H.F. Hofmann, R. Okamoto, and S. Takeuchi, Analysis of an experimental quantum logic gate by complementary classical operations, Modern Physics

Letters A (査読有) 21 (2006) 1837-1850

11) H. F. Hofmann and T. Ide, Optimal cloning of single photon polarization by coherent feedback of beam splitter losses, New Journal of Physics (査読有) 8 (2006) article no. 130

12) H. F. Hofmann, Generation of a highly phase sensitive polarization squeezed N-photon state by collinear parametric downconversion and coherent photon subtraction, Physical Review A (査読有) 74 (2006) article no. 013808

[学会発表] (計 8 件)

1) Holger F. Hofmann, On the phase sensitivity of two path interferometry using path-symmetric N-photon states, ISQM 2008, 2008/8/25, Hitachi Advanced Research Laboratories, Hatoyama

2) Holger F. Hofmann, Experimental evaluation of a quantum filter: truth tables and process matrix estimates, Quantum Information and Control in Queensland, 2008/6/30, Palm Cove Resort Convention Center, Cairns, Australia

3) Holger F. Hofmann, Evaluation of quantum effects from measurement data, KEK 研究会 量子論の諸問題と今後の発展, 2008/3/20, KEK つくば

4) Holger F. Hofmann, Interference between coherent light and down-converted photons: a tunable source of multi-photon coherence, Photons, Atoms, and Qubits 2007, 2007/9/3, Royal Society, London, United Kingdom

5) Holger F. Hofmann, Generation of N-photon phase squeezed states by interference of down-converted photon pairs with weak coherent light, CLEO pacific rim 2007, 2007/8/27, COEX, Seoul, Korea

6) Holger F. Hofmann, At the quantum limit

of classical interference: photon statistics of an extremely phase squeezed two-mode N-photon state, Quantum Information Processing 07, 2007/1/31, Griffith University Conservatory, Brisbane, Australia

7) Holger F. Hofmann, How to identify errors in quantum operations, QUPREST 2006, 2006/9/28, Budmerice Chateaux, Budmerice, Slovakia

8) Holger F. Hofmann, Characterization of errors in quantum processes using finite sets of test measurements, SPIE Optics and Photonics, 2006/8/13, San Diego Convention Center, San Diego, USA

6. 研究組織

(1) 研究代表者

Holger F. Hofmann (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

(3) 連携研究者