

「量子情報処理システムの実現を目指した新技術の創出」
平成 15 年度採択研究代表者

古澤 明

東京大学大学院 工学系研究科・教授

量子ネットワークへ向けた量子エンタングルメント制御

1. 研究実施の概要

本研究では、量子ネットワークのための量子エンタングルメント制御に関する研究を行っている。この研究の究極の目的は、任意のガウス型量子操作と光子数測定を可能にし、万能型連続量量子情報処理を可能にすることである。具体的には、量子テレポーテーションに代表されるガウス型量子操作の高性能化、光子数識別器の開発、非ガウス型量子状態生成の研究を行っている。今年度は、量子テレポーテーションのフィデリティを 0.83 まで高め、非ガウス型量子状態として偶パリティのシュレディンガー猫状態を生成した。

2. 研究実施内容

【東大グループ】

昨年度に得られた量子テレポーテーションの世界最高フィデリティ 0.76 をさらに向上させ、0.83 を得た。この向上はフィデリティで見ると小さな向上に見えるが、量子テレポーテーションを連続で行うことのできる回数で考えると、フィデリティ 0.76 は 2 回であるのに対し、フィデリティ 0.83 は 5 回であることから大きな向上といえる。現在のスキュージングレベルから期待できるフィデリティは 0.89 であることから、今後はこれを追求していく予定である。

ガウス型量子情報処理の典型例として、狭帯域のユニバーサルスクイーズの実験に成功した。

【NICT グループ】

光の連続量と離散量を統合的に制御する汎用的な量子操作技術（非ガウス型操作）の確立に向けて、スクイーズド光と光子検出器による測定誘起型非線形操作の開発に取り組ん

だ。H18年度は1光子検出事象をトリガーとして、奇パリティシュレーディンガー猫状態の生成を達成したが、H19年度はさらに2光子検出事象まで拡張し、偶パリティシュレーディンガー猫状態の生成に成功した。特に、2光子検出の時間間隔が、スクイーミング相関時間と同程度となる領域で、時間対称モードと時間反対称モードからの識別不可能な2光子検出過程が量子的に干渉し、時間差ゼロの場合よりさらに大きな重ね合わせ状態を生成できることを見出した。ウィグナー関数分布として観測した出力状態は、奇パリティ猫状態、偶パリティ猫状態ともに、世界最高の非古典性（負のディップ）を有している。

一方、半導体光子数識別器の開発に向けて、以下の2つに取り組んだ。(1) Si JFETによる低雑音電荷蓄積型読出回路（雑音 ~ 4 電子@200Hz 繰返し@77K）を使って、従来の増倍率の測定下限（約2000倍）を3桁改善し、単一光電子レベルの低増倍過程を詳細に測定するシステムを構築した。(2) 浜松ホトニクスとの協力を得て、100ピクセルアレイ型 Si APDの詳細評価を行い、77Kへの冷却により量子効率を31%程度に保ったまま、ダークカウント1c/s程度で500MHzの検出速度が実現可能なことを確認した（ただし、アフターパルスが4.5%程度と若干大きく、実使用においては時間フィルタリングによる処理が必要）。

【お茶の水女子大学グループ】

量子情報の伝送や処理を担う物理システムは外部環境との相互作用が不可避な開放系である。この為に、外部環境との相互作用によって量子情報にデコヒーレンスが起る。このデコヒーレンスを如何に小さく抑えるかを研究することは、量子情報システムを実現する為に必要不可欠である。本研究では、これまでに量子情報のデコヒーレンスを制御する為の基礎となる外部環境の影響下でのシステムの不可逆的な時間発展を、非平衡量子統計力学において開発された方法を用いて詳細に調べてきた。本年度は、これらの研究結果に基づいて量子情報のデコヒーレンスを低減する為の方法を量子マスター方程式の理論を用いて定式化した。その結果、光子系のデコヒーレンスは次のようにして抑えることが可能であることを見出した。光子系にデコヒーレンスを引き起こす外部環境の物理量の相関時間を τ とすると、時間 τ の間に光子系に対して位相シフト(位相変調)を繰り返し行うことによって、光子系のデコヒーレンスを小さくすることができる。位相シフトの大きさが π の場合に最も効率的にデコヒーレンスを抑えることができる。特に、外部環境の相関時間 τ の間に位相シフト π を10回程度行えば、光子系のデコヒーレンスは殆ど完全に抑えることができることが明らかになった。また、位相シフトの大きさが π からずれてもデコヒーレンスを抑える効果は十分に得られることも示した。同様の方法によって、光子系だけでなく量子ビット系のデコヒーレンスも抑えることができる。量子ビット系の場合には大きさ π の位相シフトは量子ビット系に対して π パルスを照射することによって実現することができる。以上では、外部環境の物理量の2時間相関関数が指数関数的に減衰するという仮定を置いたが、厳密に解くことができるボゾン検出器模型を外部環境とした場合にも上記のデコヒーレンスの制御方法が有効であることを示した。更に、外部環境が注目するシステムに及ぼす影響が確率過程によって記述される場合にも、システムのデコヒーレンスを抑えることが可能であることを示した。これらの研究の過程で、

2状態遷移マルコフ過程と呼ばれる確率過程と等価な外部環境の量子力学的モデルを見出した。

3. 研究実施体制

(1)「東京大学」グループ

① 研究者名: 古澤 明 (東京大学)

② 研究項目

・ガウス型量子エンタングルメント制御

(2)「情報通信研究機構」グループ

① 研究者名: 佐々木雅英 (NICT)

② 研究項目

・非ガウス型量子エンタングルメント制御

(3)「お茶の水女子大学」グループ

① 研究者名: 番 雅司 (お茶の水女子大学)

② 研究項目

・量子情報処理を支える物理過程の探索とその制御に関する理論的研究、及び量子情報処理の数理構造に関する研究

4. 研究成果の発表等

(1) 論文発表(原著論文)

<東京大学グループ>

・ M. Yukawa, H. Benichi and A. Furusawa

"High-fidelity continuous-variable quantum teleportation toward multi-step quantum operations"

Phys. Rev. A 77, 022314-1-5 (2008).

・ K. Honda, D. Akamatsu, M. Arikawa, Y. Yokoi, K. Akiba, S. Nagatsuka, T. Tanimura, A. Furusawa, and M. Kozuma

"Storage and retrieval of a squeezed vacuum"

Phys. Rev. Lett. 100, 093601 (2008).

・ M. Arikawa, K. Honda, D. Akamatsu, Y. Yokoi, K. Akiba, S. Nagatsuka,

A. Furusawa, and M. Kozuma

"Observation of electromagnetically induced transparency for a squeezed vacuum with the time domain method"

Optics Express 15, 11849-11854 (2007).

- H. Yonezawa, S. L. Braunstein, and A. Furusawa

"Experimental demonstration of quantum teleportation of broadband squeezing"

Phys. Rev. Lett. 99, 110503-1-4 (2007).

- H. Yonezawa, A. Furusawa, and P. van Loock

"Sequential quantum teleportation of optical coherent states"

Phys. Rev. A 76, 032305-1-5 (2007).

- C. Marquardt, U. L. Andersen, G. Leuchs, Y. Takeno, M. Yukawa, H. Yonezawa, and A. Furusawa

"Experimental demonstration of macroscopic quantum coherence in Gaussian states"

Phys. Rev. A 76, 030101(R)-1-4 (2007).

- J. Yoshikawa, T. Hayashi, T. Akiyama, N. Takei, A. Huck, U. L. Andersen, and A. Furusawa

"Demonstration of deterministic and high fidelity squeezing of quantum information"

Phys. Rev. A 76, 060301(R)-1-4 (2007).

- D. Akamatsu, Y. Yokoi, M. Arikawa, S. Nagatsuka, T. Tanimura, A. Furusawa, and M. Kozuma

"Ultraslow propagation of squeezed vacuum pulses with electromagnetically induced transparency"

Phys. Rev. Lett. 99, 153602-1-4 (2007).

<NICTグループ>

(国内)

- 鈴木 重成, 武岡 正裕, 佐々木 雅英, Ulrik Lund Andersen, 神成 文彦,

「ホモダイン検波によるコヒーレント重ね合わせ状態の純粋化 --量子もつれと測定を利用した量子状態制御の一例--」

日本物理学会 「日本物理学会誌」, 62 (11), pp 846--850, (2007).

(国際)

- H. Nagata, J. Kobayashi, H. Matsuo, M. Nakahashi, K. Kobayashi, H. Ikeda, M. Fujiwara

"Fabrication of cryogenic readout circuits with n-type GaAs-JFETs for low

- temperature detectorsm"
 J Low Temp Phys, 1--6, (2008).
- K. Hirose, F. Kannari, M. Takeoka and M. Sasaki
 "Quantum correlated pulse-pair generation during pulse-trapping propagation in optical fibers"
 Phys. Rev. A 76 (4), 043817 /1--5 (2007).
 - M. Takeoka, M. Sasaki, and N. Luetkenhaus
 "Implementing projective measurements with linear optics"
 Proc. of The 8th International Conference on Quantum Communication, Measurement and Computing(QCMC2006), 413--416 (2007).
 - M. Fujiwara, and M. Sasaki
 "Photon Number Resolving Detector at Telecom Wavelengths: Charge Integration Photon Detector (CIPD) " (Invited paper)
 IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics (JSTQE), 13 (4), 952--958, (2007).
 - M. Sasaki, K. Wakui, H. Takahashi, A. Furusawa, M. Fujiwara, K. Tsujino, M. Akiba and S. Suzuki
 "Control of optical continuous variable systems using photon counting and feedforward"
 Proc. of The 8th International Conference on Quantum Communication, Measurement and Computing(QCMC2006), Japan, 469--474 (2007).
 - K. Tsujino, M. Akiba, and M. Sasaki
 "Charge-Integration Photon Detector with Silicon APD in The Linear Mode "
 Proc. of The 8th International Conference on Quantum Communication, Measurement and Computing(QCMC2006), Japan, 549--552 (2007).
 - M. Fujiwara, and M. Sasaki
 "Direct measurement of non-Poissonian distribution by charge integration photon detector: CIPD"
 Proc. of The 8th International Conference on Quantum Communication, Measurement and Computing(QCMC2006), 389--392 (2007).
 - A. Kitagawa, M. Takeoka, M. Sasaki, and A. Chefles
 "Entanglement evaluation of non-Gaussian states generated by photon subtraction from squeezed states"
 Proc. of The 8th International Conference on Quantum Communication, Measurement and Computing(QCMC2006), 509--512 (2007).
 - K. Tsujino, M. Akiba, and M. Sasaki

"A charge-integration readout circuit with a linear-mode silicon avalanche photodiode for a photon-number resolving detector"

Opt. Spectrosc. 103 (1), 86--89 (2007).

- M. Takeoka and M. Sasaki

"Conditional generation of an arbitrary superposition of coherent states"

Phys. Rev. A 75 (6), 064302 /1--4 (2007).

- A. Chefles, A. Kitagawa, M. Takeoka, M. Sasaki, J. Twamley

"Unambiguous discrimination among oracle operators"

J. Phys. A: Math. & Theor. 40, 10183--10213, (2007).

- M. Takeoka

"Projective measurements via linear optics and photon detectors "

Opt. Spectrosc. 103 (1), 98--106 (2007).

- M. Fujiwara and M. Sasaki

"Direct measurement of photon number statistics at telecom wavelengths using a charge integration photon detector"

Appl. Opt. 46 (16), 3069--3074 (2007).

<お茶の水女子大学グループ>

- M. Ban, S. Kitajima, K. Maruyama and F. Shibata

"Quantum mechanical model for two-state jump markovian process"

Phys. Lett. A 372, 351-355 (2008).

- S. Kitajima, M. Ban and F. Shibata

"Exactly solvable model of suppression of quantum decoherence"

Phys. Lett. A 370, 228-233 (2007).

- M. Ban, S. Kitajima and F. Shibata

"Dynamical suppression for decoherence of continuous variable quantum information"

Phys. Lett. A 370, 222-227 (2007).

- M. Ban, S. Kitajima and F. Shibata

"Dynamical suppression of decoherence by phase kicks: Master equation approach"

Phys. Rev. A 76, 022307-1-8 (2007).

- M. Ban, S. Kitajima and F. Shibata

"Quantum master equation approach to dynamical suppression of decoherence"

J. Phys. B 40, 2641-2651 (2007).

- S. Kitajima, M. Ban, T. Arimitsu and F. Shibata

"Rigorous quantum treatment of dynamical coherence recovery"

J. Phys. B 40, S239-S248 (2007).

- M. Ban, F. Shibata and S. Kitajima
"Dynamical suppression of stochastic dephasing of qubit"
J. Phys. B 40, S229-S238 (2007).