

「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 助教授)

「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

量子ネットワーク実現に向けて量子エンタングルメント制御の研究を行う。量子エンタングルメントは主にスクイズド光とビームスプリッターを用いて生成する。生成した量子エンタングルメントを線形光学素子と二次の非線形光学過程のみを用いて行うガウス型と三次以上の非線形光学過程を用いる非ガウス型に分け、その制御に関する研究を行う。また、それらを統合した理論的解析も併せて行う。

2. 研究実施内容

我々の行っている実験的研究の具体的内容は以下の通りである。

- ① 量子テレポーテーションの高フィデリティ化
- ② マルチパーティットエンタングルメント（多者間の量子エンタングルメント）生成および検証
- ③ 量子テレポーテーションネットワーク
- ④ 量子エンタングルメントスワッピング（量子エンタングルメントのテレポーテーション）
- ⑤ 量子エラーコレクション
- ⑥ 非ガウス型量子エンタングルメント制御への拡張

以下では、これらの個々の課題に関する今年度の研究内容について記す。

① 量子テレポーテーションの高フィデリティ化

コヒーレント状態を入力として、フィデリティ0.7を達成した。これは、ノークローニング限界と呼ばれる0.67を超え、正規の受信者に到達する情報量が最も高いことを保証するものである。また、フィデリティが0.67を超えると非古典生を送ることが可能になり、量子エンタングルメントのテレポーテーションである量子エンタングルメントスワッピングが可能となる。

② マルチパーティットエンタングルメント生成および検証

これまでに生成したマルチパーティットエンタングルメントは、GHZ状態的な3者間エンタングルメントであった。ここでGHZ状態的な3者間エンタングルメントとは、3者間では

エンタングルメントが存在するが、2者間ではエンタングルメントが存在しない状態である。今年度は、別のタイプの3者間エンタングルメントを生成した。それは、3者間エンタングルメントと2者間エンタングルメントを同時に有する状態である。

③ 量子テレポーテーションネットワーク

完全な3者間量子テレポーテーションネットワーク実験に成功した。この結果はNatureに掲載され大きな注目を集めた。また、②で述べた新しいタイプの量子エンタングルメントを用い、新しいタイプの量子ネットワークである量子テレクロニングの実験に成功した。

④ 量子エンタングルメントスワッピング

①で述べたように、高フィデリティ量子テレポーテーションが可能になったため、量子エンタングルメントスワッピング実験を成功させることができた。

⑤ 量子エラーコレクション

8つのスクイーズド光を同時に生成することに成功した。また、9モード量子エラーコレクションのための光学系も作製し終わった。あとは実際に動作させるだけである。

⑥ 非ガウス型量子エンタングルメント制御

スクイーズド光の一部をタッピングして光子検出し事後選択法によって位相依存の非ガウス状態を生成する、という最も単純な非ガウス型制御の研究を進めた。検出器の不完全性や系の損失を考慮したシステム設計を行い、光学回路を作製して、位相依存非ガウス状態生成に必要な実験条件の解析を行った。

非ガウス型制御に必要な高性能の光子検出器として電荷蓄積型光子検出器(CIPD)の開発を開始した。可視帯用CIPDとしてサブガイガーモード動作SiAPD(増倍率10.8)と77K動作の低温読出回路を組み合わせ、暗電流1 e/s, Excess noise factor=1.07, S/N~0.7eという高感度を達成した(量子効率61%、繰返し20Hz)。通信波長帯用CIPDとしてInGaAs PIN PDと4K動作の極低温読出回路を組み合わせ、暗電流0.24e/s, S/N~2eという高感度を達成した(量子効率80%、繰返し40Hz)。これは、識別誤差10%程度で光子数識別が可能となる性能に対応する。

理論的研究に関する実施内容は以下の通りである。

1. 連続変数量子テレポーテーションの擬確率分布関数を用いた解析を行い、送信者と受信者が共有したエンタングルメントの大きさと量子テレポーテーションによって伝送可能な量子状態の性質との間の関係を明らかにした。
2. 連続変数エンタングルメントスワッピングの一般論を展開し、最終的に共有される量子状態の性質のスワッピングに用いる量子状態、及びスワッピングの回数への依存性を明らかにした。
3. 送信者と受信者が完全に纏れ合った量子状態を共有し、符号化された量子状態が任意の量子チャンネルによって伝送される場合の量子デンスコーディングシステムの通信路容量を与える公式を導いた。

4. 微小共振器を用いた光子数の量子非破壊測定を利用した2モードスクィーズド状態のエンタングルメントの確率的な増強法（ディステーション）の提案を行った。
5. 非平衡量子統計力学において用いられている解析方法が、量子情報のダイナミクス、或いはディコヒーレンスの解析に有効であることを示した。

3. 研究実施体制

東京大学グループ

東京大学大学院工学系研究科物理工学専攻（古澤 明）

研究実施項目：ガウス型量子エンタングルメント制御

情報通信研究機構グループ

情報通信研究機構 量子情報技術グループ（佐々木雅英）

研究実施項目：非ガウス型量子エンタングルメント制御

日立グループ

日立製作所基礎研究所（番 雅司）

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. 主な研究成果の発表

(1) 論文発表

- A. Furusawa: “Quantum teleportation and its applications”, Proceedings of SPIE 5631, 36-41 (2004)
- H. Yonezawa, T. Aoki, and A. Furusawa: “Demonstration of a quantum teleportation network for continuous variables”, Nature 431, 430-433 (2004)
- M. Fujiwara, and M. Sasaki: “Multiphoton discrimination at telecom wavelength with charge integration photon detector,” Appl. Phys. Lett. 86(11), 111119 (2005).
- M. Akiba, M. Fujiwara, and M. Sasaki: “Ultrahigh-sensitivity high-linearity photodetection system using a low-gain avalanche photodiode with an ultralow-noise readout circuit,” Opt. Lett. 30(2), 123 (2005).
- M. Takeoka, M. Sasaki, P. van Loock, and N. Lütkenhaus, “Implementation of projective measurements with linear optics and continuous photon counting,” Phys. Rev. A 71, 022318 (2005).
- J. Mizuno, K. Wakui, A. Furusawa, and M. Sasaki: “Experimental demonstra-

tion of entanglement-assisted coding using a two mode squeezed vacuum state,” Phys. Rev. A 71, 012301(2005).

- A. Kitagawa, and K. Yamamoto: “Analysis for practical realization of number-state manipulation by number-sum Bell measurement with linear optics,” Phys. Rev. A 70, 052311 (2004).
- M. Fujiwara, and M Sasaki: “Performance of GaAs JFET at a Cryogenic Temperature for Application to Readout Circuit of High-Impedance Detectors,” IEEE Transactions on Electron Devices, 51(12), 2042 (2004).
- M. Takeoka, M. Sasaki, P. van Loock, and N. Lutkenhaus: “Quantum State Discrimination with Linear Optics and Continuous Measurement,” Quantum Communication, Measurement and Computing, pp67–70 (American Institute of Physics 2004).
- K. Nagata, W. Laskowski, M. Wiesniak, and M. Zukowski: “Rotational Invariance as an Additional Constraint on Local Realism,” Phys. Rev. Lett. 93, 230403 (2004).
- M. Fujiwara and M. Sasaki: “Photon Number Resolving Detector At Telecommunication Wavelength,” Quantum Communication, Measurement and Computing, pp40–43 (American Institute of Physics 2004).
- M. Sasaki, K. Wakui, J. Mizuno, M. Fujiwara, and M. Akiba: “EPR Beams and Photon Number Detector: Toward Synthesizing Optical Nonlinearity,” Quantum Communication, Measurement and Computing, pp44–47 (American Institute of Physics 2004).
- M. Takeoka, M. Fujiwara, J. Mizuno, and M. Sasaki: “Implementation of generalized quantum measurements: Superadditive quantum coding, accessible information extraction, and classical capacity limit,” Phys. Rev. A 69, 052329 (2004).
- Masashi Ban: “Properties of Continuous Variable Quantum Teleportation”, Journal of Optics B vol. 6, 224 (2004).
- Masashi Ban: “Correlation and Information in Quantum Channels”, International Journal of Theoretical Physics vol. 43, 323 (2004).
- Masashi Ban: “Phase-space Approach to Continuous-variable Quantum Teleportation”, Physical Review A vol. 69. 054304 (2004).
- Masashi Ban: “Continuous Variable Entanglement Swapping”, Journal of Physics A vol. 37, L358 (2004).
- Masashi Ban, Sachiko Kitajima and Fumiaki Shibata: “Classical Capacity of Quantum Dense Coding System”, Journal of Physics A vol. 37, L429 (2004).
- Masashi Ban, Sachiko Kitajima and Fumiaki Shibata: “Von Neumann Mutual

Information in Nonequilibrium Quantum dynamics” , Journal of the Physical Society of Japan vol.73, 2908 (2004).

- Masashi Ban: “Measurement-induced Enhancement of Entanglement of Two-mode Squeezed-vacuum State” , Journal of Optics B vol.7, L4 (2005).