

「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ー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

(東大グループ)

東大グループで行っている具体的研究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

以下では、これらの個々の課題に関する今年度の研究実施内容について記す。

① 量子テレポーテーションの高フィデリティ化

高フィデリティ化のためには、量子エンタングルメントを生成するスクイーズド光のスクイージングレベルを上げる必要がある。ここで、フィデリティとスクイージングレベルの関係は以下のようなものである。

$$F(r) = \frac{1}{1 + e^{-2r}}$$

ただし、 r はスクイーミングパラメーターである。今年度の目標は、フィデリティ 0.8 を可能にするスクイーミングレベル、つまり 6dB のスクイーズド光生成を目標とした。スクイーズド光生成のための光パラメトリック発振器 (OPO) 用の非線形光学結晶としては PPKTP を選んだ。これは、昨年度の PPKTP を用いた 946nm での同様な実験に於いて、高レベルスクイーミング達成の最大の阻害要因であるポンプ光誘起吸収 (BLIRA) が観測されなかったからである。今回 860nm での実験を行い、目標以上の 7dB を達成し、フィデリティ 0.8 を達成するためのスクイーミングレベルを得ることに成功した。さらに、実験系を安定させれば、もう少しスクイーミングレベルを上げることができそうな感触を得た。(論文を Phys. Rev. Lett.誌に投稿した。)

② マルチパーティトエンタングルメント生成および検証

9 モード量子エラーコレクション実験の前段階として、9 つの光ビームをエンタングルさせ、それをディスエンタングルさせる実験を行った。これは、一昨年度成功した 3 者間量子エンタングルメントを 3 つ重ね合わせた実験となっている。マルチパーティトエンタングルメント生成実験には成功し、9 者間量子エンタングルメントを生成することができた。

③ 量子テレポーテーションネットワーク

昨年度成功した、新しいタイプの量子ネットワークである量子テレクローニング実験について、「スクイーズド状態に関する国際会議」ICSSUR05 (フランス、ブザンソン) で発表し、論文を Phys. Rev. Lett.誌に投稿した。論文は Phys. Rev. Lett.誌に掲載され、Physics News Update、New Scientist、Physics Web などで紹介された。

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スワッピング実験の発展として、2 連続量子テレポーテーション実験を行い成功した。

⑤ 量子エラーコレクション

②で述べたように、9 モード量子エラーコレクション実験の前段階として、9 モードエンタングル・ディスエンタングル実験を行った。エンタングル実験には成功したが、ディスエンタングル実験はまだ完全成功には至っていない。これを成功させると次は、エラーを導入し、実際のエラーコレクション実験を行うことになる。

(NICT グループ)

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非ガウス型制御の研究を進めた。光子検出器とホモダイン検波器のモード整

合の設計理論を構築し、光回路を構築して、最初の実験データを取得した。これにより、量子相関を最適に見るための信号の処理回路の条件が明らかになった。

非ガウス型制御に必要となる高性能の光子検出器として電荷蓄積型光子検出器（CIPD）性能改善を進め、読出し回路の雑音を半減させて、ポアソン統計のピーク構造を分離して観測することができるようになった。

（日立グループ）

外部環境によって引き起こされる量子情報のディコヒーレンスに関する理論を非平衡量子統計力学の方法を用いて、次に述べるように様々な角度から定式化した。

- ・ 現象論的なパラメータを用いた定式化

現象論的な縦緩和時間と横緩和時間を用いて量子情報のディコヒーレンスを記述し、エンタングルメントの減衰や量子デンスコーディングの Holevo 通信路容量にそれぞれの緩和時間がどのような役割を果たしているかを明らかにした。

- ・ 確率過程を用いた定式化

外部環境が注目するシステムに及ぼす影響を確率過程を用いて記述し、エンタングルメントの緩和、量子テレポーテーションのフィデリティ、量子デンスコーディングの Holevo 通信路容量の調べ、確率過程の性質と量子情報のディコヒーレンスの間の関係を明らかにした。

- ・ 射影演算子法を用いて微視的な定式化

注目するシステムと外務環境の運動方程式から射影演算子法を用いて非 Markov 近似で外務環境の情報を消去し、非 Markov 近似での量子チャンネルを導出し、量子情報のディコヒーレンス理論の定式化を行った。その結果、エンタングルメントの緩和、量子テレポーテーションの情報伝送特性に対する外部環境の非 Markov 効果を秋からにした。

また、2モードスクイーズド状態のエンタングルメントを共有する際に用いられる量子チャンネルが各モードで異なっている場合、量子チャンネルの非対称性が共有されるエンタングルメントに及ぼす影響を明らかにし、そのようなエンタングルメントを用いて行われる量子テレポーテーションの情報伝送特性を調べた。そして、非対称な量子チャンネルを用いてエンタングルメントを共有する場合に、量子テレポーテーションの性能を改善する方法を提案した。

3. 研究実施体制

東大グループ

①研究分担グループ長：古澤 明（東京大学、助教授）

②研究項目：ガウス型量子エンタングルメント制御

NICT グループ

- ①研究分担グループ長：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

日立グループ

- ①研究分担グループ長：番 雅司 (日立基礎研究所、主任研究員)
- 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解造に関する研究

4. 主な研究成果の発表

(1) 論文 (原著論文) 発表

- S. Koike, H. Takahashi, H. Yonezawa, N. Takei, S. L. Braunstein, T. Aoki, and A. Furusawa "Demonstration of quantum telecloning of optical coherent states" Phys. Rev. Lett. 96, 060504-1-4 (2006)
- N. Takei, H. Yonezawa, T. Aoki, and A. Furusawa "High-fidelity teleportation beyond the no-cloning limit and entanglement for continuous variables" Phys. Rev. Lett. 94, 220502-1-4 (2005)
- N. Takei, T. Aoki, S. Koike, K. Yoshino, K. Wakui, H. Yonezawa, T. Hiraoka, J. Mizuno, M. Takeoka, M. Ban and A. Furusawa "Experimental demonstration of quantum teleportation of a squeezed state" Phys. Rev. A 72, 042304-1-7 (2005)
- M. Fujiwara and M. Sasaki, "Photon-number-resolving detection at a telecommunications wavelength with a charge-integration photon detector" Optics Letters Vol. 31, No. 6, p1-3 (2006)
- S. Suzuki, K. Tsujino, F. Kannari, and M. Sasaki, "Analysis on generation schemes of Schrödinger cat-like states under experimental imperfections," Optics Communications, Vol.259, Issue 2, 758-764(2006)
- M. Takeoka: "Discrimination of quantum states with linear optics and continuous photon counting," Optics and Spectroscopy, 99(3), 418-424 (2005).
- K. Nagata: "Inequalities for experimental tests of the Kochen-Specker theorem," Journal of Math. Phys. 46, 102101/1-20 (2005).
- A. Kitagawa, M. Takeoka, K. Wakui, and M. Sasaki: "Effective squeezing enhancement via measurement-induced non-Gaussian operation and its application to the dense coding scheme," Phys. Rev. A 72, 022334/1-13 (2005).
- K. Nagata: "Kochen-Specker theorem as a precondition for secure quantum key distribution," Phys. Rev. A 72, 012325/1-4 (2005).
- K. Hirose, H. Furumochi, A. Tada, F. Kannari, M. Takeoka, and M. Sasaki: "Photon

Number Squeezing of Ultrabroadband Laser Pulses Generated by Microstructure Fibers,”
Phys. Rev. Lett. 94, 203601 (2005).

- M. Ban Symmetric and Asymmetric Quantum Channels in Quantum Communication Systems Journal of Physics A 38, 3595 (2005).
- M. Ban, S. Kitajima and F. Shibata Decoherence of Entanglement in Bloch Channel Journal of Physics A 38, 4235 (2005).
- S. Kitajima, M. Ban and F. Shibata A Model of Quantum Mechanical Communication Channel with Quantum and Thermal Noises Journal of the Physical Society of Japan 74, 1436 (2005).
- M. Ban, S. Kitajima and F. Shibata Decoherence of Quantum Information in Non-Markovian Qubit Channel Journal of Physics A 38, 7161 (2005).
- M. Ban, S. Kitajima and F. Shibata Decoherence of Quantum Information of Qubits by Stochastic Dephasing Physics Letters A 349, 415 (2006).
- M. Ban Decoherence of Continuous Variable Quantum Information in non-Markovian Channel Journal of Physics A 39, 1927 (2006).
- M. Ban Asymmetry and Decoherence of Quantum Channel in Quantum Communication System of Continuous Variables Journal of Physics B 39, 1125 (2006).