

「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 准教授)

「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。

2. 研究実施内容

《東大グループ》

ガウス型量子エンタングルメント制御

量子テレポーテーションの高フィデリティ化

量子テレポーテーションのフィデリティ向上には 2 つの重要な要因がある。1 つは量子テレポーテーション装置の機械的安定性であり、もう 1 つは量子エンタングルメントを生成するために用いるスクイーズされた真空場のスクイージングレベルである。仮に完全な機械的安定性が得られたとすると、 $F = 1 / (1 + e^{-2r})$ という関係になっている (e^{-2r} はスクイージングレベルである)。

昨年度までは、機械的安定性を高める努力をし、ほぼ完全な機械的安定性、つまりスクイージングレベルとフィデリティがほぼ理論式の関係になるようにした。このとき安定して得られるスクイージングレベルは約 4dB であり、それに相当するフィデリティ $F=0.70$ を得た (非線形光学結晶としては KNbO_3 を用いた)。これは当時の世界最高値であり、 $F=2/3$ というクローン禁止限界を超えていたため、非古典性の量子テレポーテーションが可能となった。また、連続した複数回の量子テレポーテーションが可能となった。

ただし、当時用いていた非線形光学結晶 KNbO_3 では、安定して得られるスクイージングレベルの最高値は約 4dB 程度だったため、フィデリティとしては $F=0.7$ 程度が限界値で

あった。そこで、新しい非線形光学結晶の探索に着手した。その結果、疑似位相整合非線形光学結晶である PPKTP を用いれば、スクイーディングレベルをさらに上げられることを見出し、現時点で約 9dB のスクイーディングレベルを得ている (Y. Takeno et al., *Optics Express* 15, 4321 (2007))。したがって、理論的にはフィデリティを $F=0.89$ まで上げることが可能となった。このように高レベルのスクィーズの場合、量子テレポーテーション装置に要求される機械的安定性はさらに高まり、現時点では要求される機械的安定性には到達していないが、それでも $F=0.76$ の高いフィデリティを得ている。この高フィデリティ量子テレポーターのデモンストレーションとして、スクィーズド状態の量子テレポーテーションを行い、世界で初めて成功した (論文投稿中)。これは、非古典状態の量子テレポーテーションの初めての例である。また、2 回連続の量子テレポーテーションに成功した (論文投稿準備中)。

今後はさらにスクイーディングレベルを上げる努力をするだけでなく、量子テレポーテーション装置の機械的安定性を追求する予定である。

《情報通信研究機構グループ》

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、スクィーズド光に光子検出器による部分的測定を施して高次非線形効果を誘起する技術を開発した。これを用いて準巨視的重ね合わせ状態を生成することに成功した。すでに Grangier グループ (*Science* 312, 83 (2006).)と Polzik グループ (*Phys. Rev. Lett.* 97, 083604 (2006).)による先行研究があるが、新たに PPKTP 結晶による低損失のスクィーズド光源を用いて、これらの結果を上回る強い非古典性を実現した (*Opt. Express* 15, 3568 (2007).)。

通信波長帯用光子数識別器へ向けて、InGaAs pin photodiode と低雑音電荷蓄積型読出回路により、光子数分解能 0.3 光子を実現し、さらに(古典的)非ポアソン統計の直接計測を実証した。動作温度は4K、読出速度は現在 40Hz、暗計数 1000counts/hours、量子効率 80%である。可視波長帯用光子数識別器へ向けて、Si APD の増倍雑音と pn 接合構造の関係解明を行い、接合容量のバイアス依存性と増倍雑音に関係があることを見出した。

任意の 2 値射影測定が光子検出器、線形光学素子、コヒーレント光、古典的フィードバックのみで構成できることを厳密に証明した。2 値射影測定は通信や情報処理の基本操作であり、今後、様々な系への応用が期待される。

《日立グループ》

量子情報処理は外部環境の影響下で行われる為に、量子情報のデコヒーレンスは避けることはできない。従って、量子情報処理を実現する為には、外部環境の影響を小さくし、量子情報のデコヒーレンスを可能な限り抑える必要がある。本年度の研究では、デコヒーレンス制御の為に必要となる外部環境の影響下での量子情報のダイナミクス(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た。理論的方法としては、外部環境が注目

するシステムに及ぼす影響を確率過程として扱う方法と微視的なモデルとして扱う方法を用いた。まず、確率過程を用いる方法では、纏れ合った2つのシステムに対する外部環境の影響を表す確率過程の間に相関がある場合を考え、2つの確率過程の間の相関が量子状態のエンタングルメントの緩和にどのような影響を及ぼすかを調べた。その結果、2つの確率過程が正の相関を持つか、或いは負の相関を持つかによって、全く相関を持たない場合に比べてエンタングルメントのディコヒーレンスが抑制されたり促進されたりすることが明らかになった。一方、外部環境を対応した微視的なモデルを用いた定式化では、任意の量子状態の非古典性やエンタングルメントが完全に破壊される為の十分条件を求めた。この条件を満足する外部環境の下では如何なる量子情報処理も不可能なので、量子情報処理を実現する為には、少なくともこの条件を満足しない範囲に外部環境の影響を抑える必要がある。また、外部環境が熱平衡状態になく時間的に変動する場合の量子情報のディコヒーレンスの性質を調べた。その結果、外部環境の非マルコフ効果と熱的な効果の競合によって、量子情報の時間発展に特徴的な振る舞いが現れることが分かった。量子情報のディコヒーレンスに関する研究以外では次のような研究を行った。エンタングルメントを持たないワナーナー状態の可分な表現を具体的に求め、隠れた変数理論との関係を明らかにした。また、"retrodiction"と呼ばれる量子系の時間発展の記述方法を Thermo Field Dynamics を用いて従来の方法に比べて扱いやすい見通しの良い形式で定式化した。

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 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

(2)「情報通信研究機構」グループ

①研究者名

佐々木 雅英(NICT 研究マネージャー)

②研究項目

・ 非ガウス型量子エンタングルメント制御

(3)「日立」グループ

①研究者名

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

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》

○Y. Takeno, M. Yukawa, H. Yonezawa, and A. Furusawa

“Observation of -9 dB quadrature squeezing with improvement of phase stability in homodyne measurement”

Optics Express 15, 4321-4327 (2007).

○K. Yoshino, T. Aoki, and A. Furusawa

“Generation of continuous-wave broadband entangled beams using periodically-poled lithium niobate waveguides”

Appl. Phys. Lett. 90, 041111-1-3 (2007).

○N. Takei, N. Lee, D. Moriyama, J. S. Neergaard-Nielsen, and A. Furusawa

“Time-gated Einstein-Podolsky-Rosen correlation”

Phys. Rev. A 74, 060101 (R)-1-4 (2006)

○T. Tanimura, D. Aquanauts, Y. Yokoi, A. Furusawa, and M. Kozuma

“Generation of a squeezed vacuum resonant on Rubidium D_1 line with periodically-poled KTiOPO_4 ”

Opt. Lett. 31, 2344-2346 (2006).

○S. Suzuki, H. Yonezawa, F. Kannari, M. Sasaki, and A. Furusawa

“7 dB quadrature squeezing at 860 nm with periodically-poled KTiOPO_4 ”

Appl. Phys. Lett. 89, 061116-1-3 (2006).

○T. Aoki, G. Takahashi, and A. Furusawa

“Squeezing at 946nm with periodically-poled KTiOPO_4 ”

Optics Express 14, 6930-6935 (2006).

《情報通信研究機構グループ》

(国内)

○佐々木 雅英

“量子情報技術とエネルギー”

電子情報通信学会誌 90 (3), pp 220--225 (Mar, 2007)

○藤原 幹生

“光子数分布測定技術:サブポアソン分布光源の光電子計測”

OPTRONICS 300 号 pp230-240 (Dec, 2006)

○北川 晃, 武岡 正裕, 佐々木 雅英, アンソニー シェプレス, ノーバート リュートケンハウス

“非ガウス型量子操作による信号制御と測定”

情報通信研究機構季報 52 (3) pp 77--86 (Sep, 2006)

○佐々木 雅英, 川西 哲也

“NICT における光・量子通信の研究”

情報通信研究機構季報 52 (3) pp 1--1 (Sep, 2006)

○佐々木 雅英

“量子情報通信の概要と NICT における取組”

情報通信研究機構季報 52 (3) pp 47--53 (Sep, 2006)

○藤原 幹生, 辻野 賢, 秋葉 誠, 佐々木 雅英

“光子数識別器の開発と現状”

情報通信研究機構季報 52 (3) pp 69--76 (Sep, 2006)

○M. Sasaki and S. Suzuki

“擬似位相整合 KTiOPO₄ 素子を用いた -7dB 直交位相スクィージング -7dB quadrature squeezing with pp-KTiOPO₄”

TELECOM FRONTIER No.52, pp 21--26 (Aug, 2006)

(国際)

○K. Wakui, H. Takahashi, A. Furusawa, and M. Sasaki

“Photon subtracted squeezed states generated with periodically poled KTiOPO₄”

Opt. Express 15 (6) pp 3568--3578 (Mar, 2007)

○K. Tsujino, M. Akiba, and M. Sasaki

“Ultralow-noise readout circuit with an avalanche photodiode: Toward a photon-number-resolving detector”

Appl. Opt. 46 (7), pp 1009--1014 (Mar, 2007)

○A. Tada, K. Hirose, F. Kannari, M. Takeoka, and M. Sasaki

“Photon-number squeezing in a soliton-like Raman Stokes component during propagation of ultrashort pulses in a microstructure fiber”

J. Opt. Soc. Am. B 24 (3), pp. 691-698 (Feb, 2007)

○K. Nagata, W. Laskowski, and T. Paterek

“Bell inequality with an arbitrary number of settings and its applications”

Phys. Rev. A 74, pp 062109 /1--8 (Oct, 2006)

○M. Takeoka, M. Sasaki, and Norbert Luetkenhaus

“Binary projective measurement via linear optics and photon counting”

Phys. Rev. Lett. 97(4), pp 040502/1--4 (Jul, 2006)

○K. Nagata,

“Comment on “All quantum observables in a hidden-variable model must commute

Simultaneously” ”

Phys. Rev. A 73, pp 066101/1--3, (Jun, 2006)

○M. Sasaki, and S. Suzuki

”Multimode theory of measurement-induced non-Gaussian operation on wideband squeezed light”

Phys. Rev. A 73, pp 043807/1--18. (Apr, 2006)

○A. Kitagawa, M. Takeoka, M. Sasaki, A. Chefles

”Entanglement evaluation of non-Gaussian states generated by photon subtraction from squeezed states”

Phys. Rev. A 73(4), pp 042310/1--12, (Apr, 2006)

○S. Suzuki, M. Takeoka, M. Sasaki, Ulrik L. Andersen, and F. Kannari

”Practical purification scheme for decohered coherent-state superpositions via partial homodyne detection”

Phys. Rev. A 73(4), pp 042304/1--7.(Apr, 2006)

○H. Nagata, J. Kobayashi, H. Matsuo, M. Akiba, and M. Fujiwara

”Cryogenic readout integrated circuits for submillimeter-wave camera”

Nuclear instruments & methods in physics research, A559, pp 823--825, (Apr, 2006)

《日立グループ》

○M. Ban, F. Shibata and S. Kitajima

”On phase relaxation processes”

Journal of Modern Optics vol. 54, 555 (2007).

○M. Ban

”Quantum retrodiction in Non-equilibrium Thermo Field Dynamics”

International Journal of Theoretical Physics vol. 46, 189 (2007).

○M. Ban

”Decoherence of qubit entanglement caused by transient environments”

Journal of Physics B vol.40, 689 (2007).

○M. Ban

”Decoherence of nonclassicality and entanglement in transient environments”

Physics Letters A vol.361, 48 (2006).

○M. Ban

”Decoherence in phase-preserving linear dissipative processes”

Physics Letters A vol.359, 402 (2006).

○T. Tomaru and M. Ban

”Secure optical communication using antisqueezing”

Physical Review A vol.74, 032312 (2006).

○M. Ban and F. Shibata

“Correlated and collective stochastic dephasing of qubit entanglement”

Physics Letters A vol.354, 35 (2006).

○H. Azuma and M. Ban

“Another convex combination of product states for the separable Werner state”

Physical Review A vol.73, 032315 (2006).