

「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

井元 信之

(大阪大学大学院基礎工学研究科 教授)

「光子を用いた量子演算処理新機能の開拓」

## 1. 研究実施の概要

本プロジェクトでは光子を量子ビット(qubit)、または連続量、または両者のハイブリッドで行う量子情報処理の理論および実験的研究を行う。特に4光子の範囲でできる量子情報操作、5光子以上のゲート演算、連続量の操作と利用、これらの基礎となるトモグラフィ技術、これらを部分または全部総合した **multiparty quantum operation** について基礎的デモンストレーションを行うとともに、より高度な情報処理実現に向けての課題と方向性探索についての知見を得ることを目的としている。

手法を量子状態の発生・演算・読み出しで分類すると、本プロジェクトのうち光子 qubit の研究では、パラメトリック下方変換による発生、線形光学による演算、フォトンカウンティングによる読み出しが主たる手法となる。連続量研究ではコヒーレントあるいはスクイズドパルスの発生、線形光学による演算、単発ホモダイン検波による読み出しが主たる手法となる。

これまで、デコヒーレンスにより消失した量子情報や量子もつれの回復実証、量子暗号安全性理論の飛躍的進展と新知見獲得、クラスター状態の発生と確認、多者間量子演算研究、 $p(1)$ の高い単一光子源開発、C-NOT ゲートの実証、光子数 4 以上の多光子干渉、提案量子暗号(光子 qubit と連続量双方)の基礎実験、導波路光スクイジングの世界記録、を達成した。

## 2. 研究実施内容

量子情報・量子通信に関する理論および4光子までの量子情報処理を主として阪大グループが、4光子以上の量子情報処理を主として北大が、連続量量子情報処理を主として学習院大が担当している。それぞれについて記すが、以下にも記すように相互協力も行っている。

4光子までの量子情報処理については「デコヒーレンスにより消失した量子ビット状態の回復」「4光子クラスター状態の発生実験」「量子暗号の安全性の理論」「連続量の Wigner 表現トモグラフィ技術の確立」を行っている。それぞれ次のような進展があった。

「デコヒーレンスにより消失した量子ビット状態の回復」はこの CREST プロジェクト開始直前に Nature に出版した実験研究「エンタングルメントの抽出」（すなわちエンタングルメントの弱まった複数ペアから回復した 1 ペアを抽出する方法の提案と実証実験）を一般化した研究である。すなわちエンタングルメントに限定せず全く一般の状態を、デコヒーレンスにより壊された状態から回復する方法の理論および実験研究である。干渉計の安定化なくファイバーや大気位相雑音から単一光子状態を守る方法としては最も実用に近い。18 年度は 2 本の偏波保持ファイバーを用いた実験を行い、最終的な visibility は 97% に達した [IEEE LEOS NEWSLETTER(2006), New Journal of Physics, in press]。

クラスター状態は「測定誘起型量子計算」のリソースとして、またテレポーテーションベースの C-NOT ゲートのリソースとして今注目されている多粒子エンタングルメント量子状態である。18 年度は、17 年度考案した発生方法（PRA 掲載）の実験を行った。発生を実験的に確認するために定量的な witness operator（判別式）による確認法の理論も 18 年度構築し（PRA 掲載）、その理論に基づきクラスター状態の発生を確認した。最終的な visibility は 0.86 に達したが、これは従来の記録である 0.74（ドイツ）を越える記録であるとともに、発生した 4 光子がクラスター状態と同じランク 4 のエンタングルメントを有し、ランク 3 とははっきり異なることを初めて示した実験である（CLEO/QELS'07 発表予定）。

量子暗号の安全条件は、鍵の漏洩情報量の見積もりの巧拙により不要に厳しい条件を得てしまうことがある。このため同じ装置でも安全性の理論の進歩により性能が上がるという事情がある。光源が単一光子でないことの間隙を突く PNS(光子分岐)盗聴の対処法として最近 decoy 暗号、コヒーレント光 B92、SARG04 等の量子暗号が脚光を浴びているが、その安全性の理論は発展途上である。とくに、実際の実験で用いられる光子検出器の特性はほとんど考慮されていなかった。新しい手法として不確定性原理を直接用いる安全性証明の方法を開発し、18 年度は、光源のみならず、検出器についても現実に使用されている光子検出器を仮定しても、無条件安全性を持った通信が効率よく行えることを初めて証明した。この新しい手法により、量子暗号の安全性の理論の適用範囲が一気に拡大し、パラメトリック蛍光を用いた簡便かつ高効率な手法の提案および安全性証明も達成できた(国際会議発表)。一方、連続量量子暗号の安全性理論も進めており、これは無条件安全性よりは現実的安全性に視点を置いて進めている(PRA)。この理論の副産物として、量子状態コピー機の線形光学による実現のアイデアが今年度は得られた。

連続量量子情報処理については Wigner 関数によるトモグラフィ技術の確立とその応用研究を行っている。この項目は世界先端を迫る状況であるが、H18 年度は光学系、検出回路系、データ解析アルゴリズム系をすべて確立し、トータルな S/N 比で世界の先端に追いついた。

4 光子以上の多光子による量子演算については、多光子量子回路の実現に向け、その多光子間干渉ならびに安定した経路干渉計の構築技術を得る目的で、4 光子 NOON 状態による干渉実験を行った。また、昨年度開発した、通信波長帯パルス励起伝令付き単一光子源

については、その性能向上ならびに量子暗号通信実験への応用に取り組んだ。

まず、4光子NOON状態による干渉実験については、標準量子限界をこえる感度をもつ多光子干渉計の構築に、3光子以上ではじめて成功した[Science, accepted (2007)]。これまでも、3光子あるいは4光子NOON状態により、コヒーレント光の干渉にくらべて干渉縞間隔が短くなる（超解像）ことの観察は数例報告されていた。しかし最近、コヒーレント光（古典光）と光子検出によるポストセレクションを用いるだけでも、超解像が実現できることが示され、超解像は、多光子干渉における量子性の本質ではないことが示唆された。今回我々は、光子1個あたりに得られる測定精度（感度）に着目、標準量子限界を超える感度こそが多光子干渉における量子性の特徴であることを、同じく超解像を実現しながら、4光子NOON状態を用いた場合には標準量子限界を超える感度を持つが、複数の2光子NOON状態を用いた場合にはその感度を持ち得ないことを示す実験に成功した。

この実験に当たって、我々は変型サニャック型の干渉計を採用、数時間にわたり経路長差が数ナノメートル以下でしか変化しない干渉計を実現した。また、光子対源の最適化や調整方法の工夫により、4光子干渉の明瞭度も91%と極めて高い値を得ることが出来た。これらは、今後の多光子量子回路（量子もつれ合いフィルタ）の実現にむけて重要な技術である。本研究は、ブリストル大学のジェレミ・オブライアン博士と共同して研究を進めている。

単一光子源の開発とその応用に関しては、開発した波長1.55ミクロンの、伝令信号付き単一光子源を用い、無条件安全性証明下での40km鍵配布実験に成功した(三菱電機との共同研究、Soujaeff et. al., Opt.Exp(2007))。これは、パルス状伝令付き単一光子源を用いたはじめての鍵配布実験である。さらに距離を80kmにのばした原理検証実験にも成功した。

19年度は、本年度の成果を踏まえ、量子もつれ合いフィルタの実験、制御ノットゲートの高フィデリティ化実験等に取り組む予定である。

ホモダイン量子情報処理については、通信波長帯で4dBを越えるスクイーピングを実現したほか、2つのスクイズしたパルス光をビームスプリッタで重ね合わせることで連続変数エンタングルメントを生成し、その非分離性を直接確認した。連続変数の量子暗号では、伝送距離10kmの光ファイバーを量子通信路とするプラグアンドプレイ方式と、自由空間を通信路とする同軸光学系方式の双方で量子鍵配送を行った。これらの実験では、過剰雑音の大きさを定量的に調べ、その制御方法を明らかにした。これらは、パルス光を用いた量子通信の進展に資する結果と考える。

パルス光の連続変数エンタングルメントに関する研究では、非線型デバイスに周期分極反転した光導波路を用いることで、最大で4.2dBのスクイーピングを得ることができた。この実験は通信波長帯である波長1535nmの光源を用いた実験であり、通信波長帯における2次の非線型性を用いた実験、パルス一つ一つを区別する時間領域の測定、そして、光導波路の実験という3つの観点で、我々の知るかぎりにおいて、最も大きなスクイーピング

である。古典的なパラメトリック利得の測定では、 $-10.7\text{dB}$  の減衰、 $12.7\text{dB}$  の増幅が観測され、この結果から推定されるプローブ光と励起光のマッチング効率は  $96\%$  となり、このことは周期分極反転した光導波路が非常に理想的なパラメトリック増幅器として動作することを示している。また、波長  $1064\text{nm}$  の高繰り返し ( $76\text{MHz}$ ) パルス光源を用いた実験では、2つの導波路を用いて発生したスクイーズ光をビームスプリッタで重ね合わせることでエンタングルメントを生成した。2つのエンタングルビームの直交位相振幅を2つのホモダイン検出器で測定し、両者の差が量子雑音レベルよりも小さくなることを確認することができた。これは、パルス光の連続変数エンタングルメントによる非分離性を直接に検証した初めての実験である。この実験では、今年度新たに開発した  $200\text{MHz}$  まで量子雑音の測定が可能な高速ホモダイン検出器を用いており、同じ光学系を用いて時間領域の測定も可能である。

連続変数量子暗号の実験面では、長さ  $10\text{km}$  の光ファイバーを用いて、単一光子レベルの信号光の直交位相振幅の測定を行い、音響光学素子による信号光の強度の制御及び位相変調が正しく行われていることを確認し、安定性および簡便性を検証した。また、ランダムな位相変調を信号光に与え、連続変数プラグアンドプレイ量子暗号では初めてとなる鍵の生成実験を行った。この過程で、光ファイバー中で生じる後方散乱光が過剰雑音の原因になること、音響光学素子により過剰雑音を減少できることなどを見出した。さらに、空間伝送方式の実験では、伝送距離  $5\text{m}$  で実証実験を行い、過剰雑音の小さな状況で鍵生成を行うことができた。これらの成果は、連続変数を用いた量子暗号の実用的な実装が可能であることを示すという点で重要であるほか、最近注目を集めているコヒーレント状態をバスとして用いる量子中継・計算の観点からも重要であると考えられる。

### 3. 研究実施体制

#### (1) 「井元」グループ

##### ①研究者名

井元 信之 (大阪大学大学院基礎工学研究科 教授)

##### ②研究項目

・光子量子情報処理

#### (2) 「竹内」グループ

##### ①研究者名

竹内 繁樹 (北海道大学電子科学研究所 助教授)

##### ②研究項目

・多光子量子演算ゲート

(3) 「平野」グループ

①研究者名

平野 琢也 (学習院大学理学部 教授)

②研究項目

・ホモダイン量子情報処理

## 4. 研究成果の発表等

### (1) 論文発表 (原著論文)

#### 1) 井元グループ

- T. Yamamoto, R. Nagase, J. Shimamura, S. K. Ozdemir, M. Koashi, and N. Imoto:  
“Experimental ancilla-assisted qubit transmission against correlated noise using quantum parity checking,” *New Journal of Physics*, 9, 191 (2007).
- Y. Kinoshita, R. Namiki, T. Yamamoto, M. Koashi, and N. Imoto:  
“Selective entanglement breaking,” *Phys. Rev. A* 75, 032307 (2007).
- S. K. Ozdemir, J. Shimamura, and N. Imoto: “A necessary and sufficient condition to play games in quantum mechanical settings,” *New Journal of Physics*, 9, 43 (2007).
- A. Miranowicz, S. K. Ozdemir, Yu-xi Liu, G. Chimeczak, M. Koashi and N. Imoto:  
“Quantum Entanglement and Teleportation of Quantum-Dot States in Microcavities,”  
*e-J. Surf. Sci. Nanotech.* Vol. 5, p. 51 (2007)
- A. Miranowicz, S. K. Ozdemir, Jiri Bajer Masato Koashi, and Nobuyuki Imoto:  
“Selective truncations of an optical state using projection synthesis,” *JOSA B*,  
vol. 24, Issue 2, pp. 379-383 (2007)
- S. K. Ozdemir, A. Miranowicz, T. Ota, G. Yusa, N. Imoto and Y. Hirayama: “Nuclear Spins in a Nanoscale Device for Quantum Information Processing,” *e-J. Surf. Sci. Nanotech.* Vol. 4, p. 669 (2006)
- Yuuki Tokunaga, Takashi Yamamoto, Masato Koashi, and Nobuyuki Imoto: “Fidelity estimation and entanglement verification for experimentally produced four-qubit cluster states,” *Phys. Rev. A* 74, 020301(R) (2006)
- Y. Hirayama, A. Miranowicz, T. Ota, G. Yusa, K. Muraki, S. K. Ozdemir, and N. Imoto:  
“Nanometre-scale nuclear-spin device for quantum information processing,” *J. Phys.: Condens. Matter* vol. 18, S885 (2006).

#### 2) 竹内グループ

- T. Nagata, R. Okamoto, J. L. O’Brien, K. Sasaki and S. Takeuchi: “Beating the Standard Quantum Limit with Four Entangled Photons,” *Science*, vol. 316, 726 (2007).
- H. Takashima, H. Fujiwara, S. Takeuchi, K. Sasaki and M. Takahashi:

- “Fiber-microsphere laser with a sub-micrometer sol-gel silica glass layer co-doped with erbium, aluminum and phosphorus,” Appl. Phys. Lett., vol. 90, 101103 (2007).
- H. Fujiwara, Y. Kawabe, S. Takeuchi and K. Sasaki: “Numerical analysis of spatial propagation of parametric fluorescence photon-pairs using the tuning curve filtering method,” Phys. Rev. A, vol. 75, 023802 (2007)
- A. Soujaeff, T. Nishioka, T. Hasegawa, S. Takeuchi, T. Tsurumaru, K. Sasaki and M. Matsui: “Quantum key distribution at 1550 nm using a pulse heralded single photon source,” OPT. EXP. , 15, 2, pp. 726-734 (2007)
- A. Soujaeff, S. Takeuchi, K. Sasaki, T. Hasegawa and M. Matsui: “Heralded single photon source at 1550 nm from pulsed parametric down conversion,” J. Mod. Opt., 54/2-3, pp. 467-475 (2007)
- H. Konishi, H. Fujiwara, S. Takeuchi and K. Sasaki: “Polarization-discriminated spectra of a fiber-microsphere system,” Appl. Phys. Lett., 89, 12, 121107/1-3 (2006)
- R. Okamoto, S. Takeuchi and K. Sasaki: “Tailoring two-photon interference with phase dispersion,” Phys. Rev. Lett., 74, pp. 011801/1-4 (2006)
- H. F. Hofmann, R. Okamoto and S. Takeuchi: “Analysis of an experimental quantum logic gate by complementary classical operations,” Mod. Phys. Lett. A, . 21, pp. 1837-1850 (2006)
- H.F. Hofmann: “Generation of a highly phase sensitive polarization squeezed N-photon state by collinear parametric downconversion and coherent photon subtraction,” Phys. Rev. A 74, 013808 (2006)
- H.F. Hofmann and T. Ide: “Optimal cloning of single photon polarization by coherent feedback of beam splitter losses,” New Journal of Physics 8, 130 (2006)

### 3) 平野グループ

- R. Namiki and T. Hirano: “Efficient-phase-encoding protocols for continuous-variable quantum key distribution using coherent states and postselection,” Phys. Rev. A 74, 032302 (2006).
- Y. Eto, T. Tajima, Y. Zhang and T. Hirano: “Pulsed Homodyne Detection of Squeezed Light at Telecommunication Wavelength,” Japanese Journal of Applied Physics, Vol. 45, No. 31, 2006, pp. L821-L823 (2006).
- Yun Zhang, Kazuhiro Hayasaka, and Katsuyuki Kasai, “Efficient suppression of an amplified diode-laser noise by optical filter and resonant optical feedback,” Applied Physics B, vol. 86, pp.643-646 (2007).
- Yun Zhang, Kazuhiro Hayasaka, and Katsuyuki Kasai, “Generation of two-mode bright

squeezed light using a noise-suppressed amplified diode laser,” *Optics Express* 16 13083 (2006).

○Yun Zhang, Katsuyuki Kasai, and Kazuhiro Hayasaka “Experimental realization of quantum correlation transfer,” *Optics communications* 266, 598 (2006).

○Yun Zhang, Katsuyuki Kasai, and Kazuhiro Hayasaka, “Conditional generation of twin sub-Possionian states,” *International Journal of Modern Physics B* 20, 1564-1569 (2006).

## (2) 特許出願

平成 18 年度特許出願：1 件（CREST 研究期間累積件数：3 件）