

「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5ヶ年を通じ光子を用いた量子演算処理として、4光子の範囲でできる光子間ゲート操作、5光子以上の処理、連続量の情報処理、これらの基礎となるトモグラフィ技術、これらを総合したmultiparty quantum computingについて理論および実験の両面から追究し、基礎的デモンストレーションを行うとともに、より高度な実現に向けての課題と方向性についての知見を得ることを目的としている。平成16年度の研究の経過・成果・今後の見通しは以下の通りである。

4光子の範囲でできる光子間ゲート操作に関しては新しいアイデアを考えつくことができ、PRA誌掲載に至った。また「能動補正の不要な伝送路雑音の除去」(計画に記載したように量子暗号でのトロイの木馬攻撃に有効と考えられる)については、アイデアを完成させることができ、投稿を終えた。これは信号光子に加えてリファレンス光子を短い時間差で送り、出側の量子測定によりノイズを無効にする方法である。(阪大)

以上の二つのアイデアについては実験を計画中である。光源としては新たに高強度パルスレーザーを導入し、現在実験に向けて調整中である。線形光学演算部およびディテクション系に必要なトモグラフィ技術については移転前の状態を回復し、さらに改善を行っている。引き続き性能向上を図る。(阪大)

4光子以上の多光子による量子演算については単一光子源の開発、光子数検出器の開発、線形光学素子量子計算についての理論研究に取り組んだ。まず、光子源については $P(1)=0.53 \pm 0.05$ の高効率の2光子源の開発に成功、それを利用して我々の提案している量子制御ノットゲートについて検証実験に成功、新たに簡便な忠実度の推定方法を提案し、その適用にも成功した(論文投稿準備中)。これまでに報告されている実現方法に比べてきわめてシンプルな光学系での実現である(北大、一部広大)。

また、2光子源の特性を理論的に解析する研究過程において、量子もつれ合い光源を用いた新たな光学定数測定法を提案した(特許取得、論文準備中)。現在多光子量子回路の実現に向けて、その光源で利用する励起用レーザーの選定、購入を行い、現在実験系を構築に移行している。(北大)

連続変数を用いる量子情報処理については、必要とされる大きなスクイーミングを達成

する必要があるが、導波路を用いて実現された中では最大のスクイーミングを得ることができた。現在論文化中である。また高繰り返しの単一光子検出器およびホモダイン検出器の開発に関しては装置を試作した。今後はplug & play方式実験へ移行する。(学習院大)

量子暗号理論としては位相変調B92の安全性証明に初めて成功しPRL誌掲載に至った。またより限定された状況での連続変数量子暗号の安全性についても定量的評価を与えることができ、PRA誌掲載に至るとともにもう一つの論文を現在投稿中である。(阪大・学習院大)

以上のような進展を踏まえ、当初の計画の遂行に向けて着実に進んでいる状況である。

2. 研究実施内容

線形光学を用いた量子演算の例として光子を4つしか用いないIC-NOTゲート実験系を提案した。2-qubit gateの実現を考えると、通常は二つのinput qubitsだけでなく手持ちの資源としていくつかの光子が必要である。このため実証実験の段階では多く(6個など)の光子を同時に発生する必要がある。本研究では経路qubitと偏光qubitをうまく組み合わせることにより4個の光子で実験できる系を提案した。この方法は最初から外部とエンタングルしている入力には対応できないが、通常の量子計算では初期入力状態は純粋状態であるので適応範囲は広い。また本方法は最近注目されているクラスター状態への発展性もあり、今後の展開が注目される。

通常のレーザー光を用いた量子暗号の無条件安全条件を雑音・損失等の仮定のもとに求めた。微弱コヒーレント光と強い参照光の相対位相にビット値を載せる方式でB92量子暗号を行うことを仮定し、伝送路や送受光システムにある程度の不完全性があっても安全に量子暗号を行えることを数学的に証明した。位相にビット値を載せる手法の安全性証明はこれが初めてである。さらに、通常の光源を用いた場合に安全に行える通信レートは、単一光子源の場合に比べ遜色ないこともわかった。

相互作用する系の記述に関し便利な理論的スキームをいくつか構築した。たとえばKraus表現による理論形式を呈示し、量子ビットとして半導体量子ドットを用いた場合の得失を考察するためにエンタングルメント制御の可能性を理論的に検討した。特にエキシトンと制御光との相互作用を仮定してエンタングルメントの形成について解析した。この場合Kraus表現を用いると散逸の影響を論じやすい。また、相互作用をする系間の情報交換のダイナミクスについて、量子フィードバックを用いて相互作用ハミルトニアンをシミュレートすることの可能性を論じた。

4光子以上の多光子による量子演算について、まず基本素子となる我々の提案している量子制御ノットゲートについて、きわめてシンプルな光学系で実現する方法を考案、その検証実験にとりくんだ。2光子源については、CWポンプ光をもちいてtype-II型位相整合条件でビーム状に発生させたパラメトリック蛍光対を、シングルモードファイバ対に高効率で結合させることに成功、 $P(1)=0.53 \pm 0.05$ を得た。その光源をもちいて、制御ノットゲートの検証を行い、新規に提案した簡便な忠実度 F (プロセスフィデリティ)の推定方法を適

用し、推定値として $0.72 < F < 0.85$ を得た。並行して、多光子量子回路で利用する光子源用のレーザーの選定、購入・立ち上げ作業を行った。

また、2光子源の特性を理論的に解析する研究過程において、量子もつれ合い光源を用いた新たな光学定数測定法を提案、特許申請した。これまでの方法にくらべて、測定系がロバストである、広帯域を一括測定可能、などの特長がある。

波長 $1.06\mu\text{m}$ のピコ秒連続発振モード同期レーザーを光源とし、周期分極反転したLN光導波路を用いたスクイーズド光の発生では、 -2.7dB の雑音低減を実現することができた。これは我々の知る限りにおいて、導波路を用いて実現された最大のスクイーミングである。通信波長帯の実験では、繰り返し約 5kHz 、パルス時間幅 5nsec 、消費電力 1W の半導体レーザー励起のパルスレーザーを用い、 -3.4dB のパラメトリック増幅を実現することができたほか、パルス毎のホモダイン検出で -0.6dB のスクイーミングを実現できた。このような成果は、通信波長帯では我々の知る限りにおいて世界初の成果である。

高繰り返しの単一光子検出器およびホモダイン検出器の開発に関しては装置の試作を行った。連続変数量子暗号におけるplug&playについては、単一光子レベルの信号光に対して、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、plug&playに必要なシステムの動作を確認することができた。さらに、位相変調方式の量子暗号を安定して行う方法を考案し、特許出願を行ったほか、実験装置の整備を進めた。

3. 研究実施体制

井元グループ

研究分担グループ長：井元 信之（大阪大学基礎工学研究科、教授）

研究項目：多者間光子情報処理の研究

概要：4光子Wigner分布関数トモグラフィ、連続量量子暗号安全性、controlled-Uゲート、マルチパーティコンピューテーション実験提案、雑音性チャンネルを介した量子通信、量子暗号無条件安全性、4光子のnumber-state展開トモグラフィ、実験設備および研究環境整備、全体とりまとめ

竹内グループ

研究分担グループ長：竹内 繁樹（北海道大学電子科学研究所、助教授）

研究項目：多光子量子演算ゲートの研究

概要：5光子以上のゲート実現と量子回路、テレポーテーション的リピーター、制御NOTの新提案および実現、単光子状態発生およびフォトカウンティング技術発展、マルチパーティコンピューテーションへ多光子およびフォトカウンティング技術

平野グループ

研究分担グループ長：平野 琢也（学習院大学理学部物理学科、助教授）

研究項目：ホモダイン量子情報処理の研究

概要：パルス光スクイズド光やエンタングルメントの効率的な発生およびパルス毎のホモダイン検出、連続変数を用いた光の量子ゲート、単一光子と連続変数とのハイブリッドな量子情報処理、PPLN waveguide中のパラメトリック増幅、連続変数の量子暗号における空間伝送の実現、マルチパーティコンピューテーション実験へ連続変数技術

4. 主な研究成果の発表（論文発表および特許出願）

(1) 論文発表

研究グループ名：井元グループ

Y. Tokunaga, T. Yamamoto, M. Koashi, and N. Imoto: "Simple experimental scheme of preparing a four-photon entangled state for the teleportation-based realization of a linear optical controlled-NOT gate," *Physical Review A*, Vol.71.No.3, 030301, (Mar. 2005).

Y. Tokunaga, T. Okamoto, and N. Imoto: "Threshold quantum cryptography," *Physical Review A* 71, 012314 (Jan. 2005).

S.K.Ozdemir, J.Shimamura, F. Morikoshi, and N. Imoto: "Dynamics of a discoordination game with classical and quantum correlations" *Physics Letters A* 333, p.218 (2004).

Yu-xi Liu, S. K. Ozdemir, A. Miranowicz, and N. Imoto: "Kraus representation of a damped harmonic oscillator and its application," *Physical Review A* 70, 042308 (2004).

M. Koashi: "Unconditional security of coherent-state quantum key distribution with a strong phase-reference pulse," *Physical Review Letters*. 93, 120501 (2004).

J. Shimamura, S. K. Ozdemir, F. Morikoshi, and N. Imoto: "Entangled states that cannot reproduce original classical games in their quantum version," *Physics Letters A* 328, 20-25 (2004).

山本 俊:「エンタングルメントの抽出」*光学*, 33巻5号, 294 (2004).

研究グループ名：竹内グループ

K. Kojima, H. F. Hofmann, S. Takeuchi and K. Sasaki: "A study on the shape of two-photon wavefunctions after the nonlinear interaction with a one-dimensional atom," *Nonlinear Optics, Quantum Optics*, 32, 4, 221-245 (2005).

H. Oka, H. F. Hofmann, S. Takeuchi and K. Sasaki: "Effects of decoherence on the nonlinear optical phase shift obtained from a one-dimensional atom," *Japanese Journal of Applied Physics*, 43, 11A, 7495-7500 (2004).

S. Takeuchi, R. Okamoto and K. Sasaki: "High-yield single-photon source using gated spontaneous parametric downconversion," *Applied Optics*, 43, 30,

5708-5711 (2004).

- H. F. Hofmann: “Generation of highly nonclassical n -photon polarization states by superbunching at a photon bottleneck,” *Physical Review A*, 70, 023812/1-7 (2004).
- K. Kojima, H. F. Hofmann, S. Takeuchi and K. Sasaki: “Efficiencies for the single-mode operation of a quantum optical nonlinear shift gate,” *Physical Review A*, 70, 013810/1-6 (2004).
- 竹内繁樹: 「線形光学素子を用いた量子コンピューティング, A review on quantum computation using linear optics」, *光学*, 33巻5号, 284, (2004). 2004.5GATU
- H. F. Hofmann and S. Takeuchi: “Quantum-state tomography for spin- l systems,” *Physical Review A*, 69, 042108/1-8 (2004).
- K. Tsujino, H. F. Hofmann, S. Takeuchi and K. Sasaki: “Distinguishing genuine entangled two-photon-polarization states from independently generated pairs of entangled photons,” *Physical Review Letters*, 92, 15, 153602/1-4 (2004).

研究グループ名：平野グループ

- 並木亮、平野琢也: 「光学から見た量子通信・鍵配布」 *光学*, 2004年8月号
- T. Kuwamoto, K. Araki, T. Eno, T. Hirano: “Magnetic field dependence of the dynamics of 87Rb spin-2 Bose-Einstein condensates,” *Phys. Rev. A* 69, 063604, (2004).
- R. Namiki and T. Hirano: “Practical limitation for continuous-variable quantum cryptography using coherent states,” *Phys. Rev. Lett.* 92, 117901, (2004).

(2) 特許出願

H16年度特許出願件数：2件 (CREST研究期間累積件数：2件)