

「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

1-2 光子の量子情報処理については、任意の単一量子ビット状態のデコヒーレンスからの回復実験を行い(既出版)、さらに量子もつれの回復実験に成功、光ファイバーの距離も伸ばした(投稿中)。多粒子量子情報処理についてはまずクラスター状態の発生実験の可干渉度で 0.86 を実現し(従来記録はドイツの 0.74)、0.75 を超えたことで明確に量子計算の領域に入った。同時にこの実験はランク 3(手が 3 つ)でなくランク4の状態を初めて発生した実験である(国際会議発表)。同じく多粒子では「W状態」を拡張する一般的な光学システムの提案し(既出版)、現在実験に着手している。

量子暗号の安全性理論についてはパラメトリック光源を用いる方法で通信速度が従来の 1 万倍または距離で数十キロ改善する方法を提案し(既出版)一般の疑似光子源の理論も完成した(投稿中)。

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、4個の光量子ゲートを含んだ光量子回路によって実現される「非局所量子フィルター」の構築を行った。また、高忠実度光子間制御ノットゲートの実現に向けたエラー原因を解析、また、量子リソグラフィーの実現に向けて重要なステップである、回折限界を超える2光子量子干渉縞の直接観測に成功した。

連続量量子情報処理に関しては、コレクティブアタックに対して安全な連続量量子暗号の実証実験および通信波長帯パルス光エンタングルメントの実現などを行った。

## 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。またグループ間の相互協力も行っている。

少数光子系の量子情報処理に関しては、単一量子ビット状態の回復実験に関する New Journal of Physics (インパクトファクターが Phys. Rev. Lett. に迫る on line 専門誌) の論文が 2007 年の IOP Select に選ばれた。この方法を用いて量子もつれの回復実験に初めて成功し、安定化しない光ファイバーの伝送距離を伸ばした。これについては現在投稿中である。

多体量子情報処理に関しては、まず 4 光子クラスター状態の生成の理論に関し昨年度と一昨年度に Phys. Rev. に出版したが、その実験を行った。発生し量子ゲート実験も行ったと称する実験はオーストリアから Nature 誌に出版されているので、「真に量子論の必要な実験結果か？あるいは古典論で説明できてしまうものか？」がポイントである。これについては前記論文で 0.75 の可干渉度を超す必要があることを明らかにしたが、ドイツの実験は 0.74 である。我々は発生において 0.86 の過干渉度を達成 (CLEO/QELS'07 にて発表)、さらにそれを用いた量子ゲートの実験で初めて古典限界を超えた一方向性量子演算の実験を成功した。現在投稿中である。さらに一方向性量子演算の量子プロセストモグラフィを行い、量子プロセスの決定及び忠実度の推定を行った (CLEO/QELS'08 発表予定)。

同じく重要な多体量子状態である W 状態を拡張する一般的な光学システムの提案を行った (PRA77, 030302(R) (2008))。GHZ 状態については同種の提案があるが、W 状態については少なくとも決定論的にはできないことが知られており、「あいまい無く確率的に」できるかがポイントであったが、これに肯定的結論を出した。現在実験にとりかかっている。

量子暗号の安全性理論については、厳密な単一光子発生源が実現困難であることから、レーザー光やパラメトリック光源を用いる方法が検討されてきたが、レーザー光に関してはデコイ暗号 (盗聴発見のためのおとり信号) を混ぜることによりかなり改良できることがわかっていた。しかし厳密な単一光子発生源にはまだ見劣りがする。そこでパラメトリック光源を用いて「おとり」の方法が使えるかがポイントであるが、これは困難であった。しかし我々は従来捨てていた「発生源において光子のカウントに失敗した場合」がおとり信号として利用できることを見だし、これを用いて通信速度にして 1 万倍または距離で数十キロ改善する方法を提案した。これは 19 年度 Phys. Rev. Lett. 誌に出版し、日本経済新聞の科学面でもとりあげられた。これを一般化した任意の疑似光子源の理論も完成した (投稿中)。

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、4個の光量子ゲートを含んだ光量子回路によって実現される「非局所量子フィルター」の構築を行った。また、高忠実度光子間制御ノットゲートの実現に向けたエラー原因を解析、また、量子リソグラフィの実現に向けて重要なステップである、回折限界を超える 2光子量子干渉縞の直接観測に成功した。

まず、非局所量子フィルターの構築について述べる。昨年度、4光子 NOON 状態による干渉実験を実施、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 (2007))。この成果は、米国科学雑誌 Scientific American による、2007 年度のベスト 50 研究にも採択された。この実験にあたって、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。

今年度はこの成果を元に、我々が 2002 年に提案した「非局所量子フィルター」の構築を目指した。非局所量子フィルターとは、線形光学素子で構成された2光子入力2光子出力の光量子回路である。入力された2つの光子間の量子コヒーレンスは保持しながら、互いの偏光成分が垂直-垂直、あるいは水平-水平といったように同じ場合だけを抜き出す働きを持つ。理想的に動作した場合、出力結果を観測せずとも、伝令信号によって操作の成功、不成功を知ることができる。例えば、このフィルターに右回り偏光と左回り偏光の2つの光子を入力すると、もつれ合った光子として出力されるため、単一光子から伝令付きもつれ合い光子を生み出す光源として利用することもできる。ただし、4つの量子ゲート、2つの補助単一光子源、ならびに4経路間の経路干渉を含む、非常に複雑で高度な光量子回路を構築しなければならない。今年度、我々はこの光量子回路を、サニャック型干渉計と部分偏光ビームスプリッタを組み合わせて、コンパクトな形で構築することに成功した。まだ予備的なデータを取得している段階であるが、垂直、水平などの偏光の組み合わせに対しては良好な結果が得られている。

次に、制御ノットゲートの実現に向けたエラー原因解析について述べる。我々が 2005 年に実現した、部分偏光ビームスプリッタを用いた2光子間制御ノットゲートのプロセス忠実度は 80%程度と推定されていた。プロセス忠実度は、おおざっぱにプロセスの成功確率と考えてよい。このため、多段にゲートを作用させる光量子回路を実現するためには、プロセス忠実度の向上は非常に重要である。我々はこのエラー原因について解析を行い、2光子量子干渉実験における明瞭度で評価されるモードミスマッチと、光学素子で生じるエラー(反射率ならびに位相シフト量)の2つによって実験結果を説明することに成功した。また、その解析から、ゲートの忠実度が高くなるほど、2光子干渉明瞭度に忠実度が敏感になること、また光学素子で生じるエラーは、入出力の一方に、適当な線形光学素子を挿入することで補正できることを見いだした。また、光源の2光子干渉性の向上にも取り組み、現在 2nm のバンドパスフィルタを利用し、88%程度と高い干渉性を達成している。

最後に、回折限界を超える2光子量子干渉縞の直接観測について述べる。通常的光を用いた場合、1光子、多光子干渉を問わず、干渉縞の縞間隔の最小値は半波長である(レイリー回折限界)。しかし、NOON 状態と呼ばれるもつれ合い光子群を用いれば、この回折限界以下の干渉縞間隔を達成することが可能である。しかし、これまで、波長よりも十分小さい空間分解を有する2光子検出器が存在しないことなどから、その干渉縞の直接観測はされてこなかった。今回我々は、高安定干渉計や、特殊形状の NSOM プローブを利用した2光子検出器を開発、回折限界を超える2光子量子干渉縞の直接観測に初めて成功した(Opt. Exp. (2007))。この他、光子の軌道角運動量もつれ合いを操作・評価する方法として、あらたに幾何学的位相である Gouy 位相を用いる方法を考案、実証した。

20 年度は、非局所量子フィルターの動作検証実験に全力で取り組むとともに、多光子量子回路の鍵となる高忠実度量子ゲート操作の実現を目指す。

ホモダイン量子情報処理については、パルス光連続量エンタングルメントの生成・検出技術や連続量量子暗号の実装技術などで大きな進展があった。昨年度は、波長 1064nm、繰り返し周波数 76MHz のモード同期パルス光源を用い、周期分極反転 LiNbO<sub>3</sub> 光導波路中の縮退パラメトリック増幅により、連続量エンタングルビームを発生し、周波数領域でその非分離性を確認した。今年度は、本研究の一つの大きな目標であった時間領域のエンタングルメント測定を実現した。時間領域の測定は、パルス一つ一つを区別した測定であり、異なる場所で測定したパルス光ペアの直交位相振幅値の間の相関を調べるものである。そのために、まず、高速低雑音オペアンプで製作したホモダイン検出器を使って、時間的に隣り合うパルスを独立に測定できることを確かめた。これは、従来のチャージアンプを使用する手法に比べて、2桁程度の高速化を実現したものである。この検出器を使って、エンタングルしたパルス光ペアの測定値の和および差の分散を測定したところ、量子雑音限界以下となった。すなわち、高速繰り返しパルス光がペア毎に独立にエンタングルしていることを初めて確かめることが出来た。通信波長帯の連続量エンタングルメントについては、本年度特許出願を行ったコンパクトな光学系を用いることで、安定にエンタングルパルスを発生することができた。これにより、通信波長帯の連続量エンタングルメントの時間領域の測定を初めて実現した。連続量の量子暗号については、光ファイバーを通信路とする実験および自由空間を通信路とする実験を行った。光ファイバーを用いた実験では、受信者側に光源を置く往復伝送光学系において、過剰雑音の振る舞いを定量的に明らかにすることができた。そして、伝送路長 10km の実装実験の過剰雑音の大きさは、コレクティブ攻撃に対して安全な鍵を生成できる領域であった。自由空間の実装実験では、2005年に特許出願を行った光学系を用いて、10m の距離の実証実験を行い、安全な鍵が生成できることを示した。

### 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)
- ② 研究項目
  - ・多者間光子情報処理

#### (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)
- 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)

## 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)

- T. Tashima, Ş. K. Özdemir, T. Yamamoto, M. Koashi, and N. Imoto: "Elementary optical gate for expanding an entanglement web," *Phys. Rev. A* 77, 030302(R) (2008).
- S. K. Ozdemir, K. Barkiewicz, Y. Liu, and A. Miranowicz: "Teleportation of qubit states through dissipative channels: Conditions for surpassing the no-cloning limit," *Phys. Rev. A*, 76, 042325 (2007).
- Y. Adachi, T. Yamamoto, M. Koashi, and N. Imoto: "Simple and Efficient Quantum Key Distribution with Parametric Down-Conversion," *Phys. Rev. Lett.* 99, 180503 (2007).
- 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 J. Phys.* 9 191(2007) chosen in IOP Select
- T. Nagata, R. Okamoto, J. L. O'Brien, K. Sasaki and S. Takeuchi: "Beating the Standard Quantum Limit with Four Entangled Photons," *Science*, 316, 726-729 (2007).
- H.F. Hofmann, T. Kosako, and Y. Kadoya: "Design parameters for a nano-optical Yagi-Uda antenna," *New Journal of Physics*, 9, 217/1-217/12 (2007).
- T. Ide and H.F. Hofmann: "Accidental cloning of a single-photon qubit in two-channel continuous-variable quantum teleportation," *Phys. Rev. A*, 75, 062311/1-062311/7 (2007).
- Y. Kawabe, H. Fujiwara, S. Takeuchi and K. SASAKI: "Investigation of the Spatial Propagation Properties of Type-I Parametric Fluorescence by Use of Tuning Curve Filtering Method," *Jpn. J. Appl. Phys.* ,46, 9A, 5802-5808 (2007).
- H.F. Hofmann and T. Ono: "High photon-number path entanglement in the interference of spontaneously down-converted photon pairs with coherent laser light," *Phys. Rev. A* ,76 , 031806/1-031806/4 (2007).
- Y. Kawabe, H. Fujiwara, R. Okamoto, K. Sasaki and S. Takeuchi: "Quantum interference fringes beating the diffraction limit," *Opt. Exp.* ,15, 21, 14244-14250 (2007).
- H. Takashima, H. Fujiwara, S. Takeuchi, K. Sasaki and M. Takahashi: "Control of spontaneous emission coupling factor  $\beta$  in fiber-coupled microsphere resonators," *Appl. Phys. Lett.*, 92 , 7 , 07115/1-07115/3 (2008).
- Yun Zhang, Tatsuya Furuta, Ryuhi Okubo, Kosuke Takahashi, and Takuya Hirano: "Experimental generation of broadband quadrature entanglement using laser pulses," *Phys.*

Rev. A 76, 012314 (2007).

- Yujiro Eto, Takashi Tajima, Yun Zhang, and Takuya Hirano: “Observation of squeezed light at  $1.535\ \mu\text{m}$  using a pulsed homodyne detector,” Optics Letters, Vol. 32, Issue 12, pp. 1698–1700 (2007).
- 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 86, 643 (2007).

(2) 特許出願

平成 19 年度 国内特許出願件数:1 件 (CREST 研究期間累積件数:2 件)