

## 研究課題別事後評価結果

1. 研究課題名： 光子を用いた量子演算処理機能の開拓
2. 研究代表者名及び主たる研究参加者名 (研究機関名・職名は研究参加期間終了時点)

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)

主たる共同研究者：

竹内 繁樹 (北海道大学 電子科学研究所 教授)

<多光子量子演算ゲートの研究>

平野 琢也 (学習院大学 理学部 教授)

<ホモダイン量子情報処理の研究>

3. 研究内容及び成果：

### 3-1. 研究課題全体の研究内容及び成果

この研究チームは、光子をキュービットとする量子情報処理の研究 (阪大グループと北大グループ) と光の連続量を用いた量子情報処理の研究 (学習院大グループ) に取り組み、独創的で優れた研究成果を上げた。3つの研究グループは、それぞれの独自性を発揮しつつも連携を重視し、CRESTらしいプロジェクト研究を遂行した。また、理論研究と実験研究のバランスを良く取り、若手研究者や学生の育成にも努力し優れた人材を育てた。

### 3-2. 阪大グループ (井元信之) の研究内容

このグループは光子キュービットを用いた量子情報処理の中でも、少数キュービット系にフォーカスして、特に基本的で新しい概念の提案と実験による実証に優れた成果を上げた。その成果の内、最も重要なものは光子キュービット4つからなるクラスター状態を用いた量子演算である。これまでの量子計算の概念は、キュービットの初期化、ユニタリ演算、射影測定といった3ステップから構成されていた。この従来方式の最大の弱点は、雑音や誤動作に弱いことであった。この問題を解決する方法として、量子誤り訂正を用いる方法が提案されていたが、必要とされるキュービット数 (リソース) が膨大な量になり、現実的には不可能であった。クラスター状態と呼ばれる多数キュービット系のエンタングル状態を初めに作成しておき、その後は射影測定だけでユニタリ変換を実行する量子計算の手法がインスブルック大学の **Briegel** と **Raussendorf** によって提案されたのは2001年である。このクラスター状態を用いた量子計算 (一方向量子計算ともいう) が、誤り耐性を持ちうるものが後になって明らかとなり、一気に量子計算の研究の主流となった。最初のクラスター状態量子計算の実証実験は、やはり光子キュービット系でウィーン大学の **Zeilinger** グループにより行われたが、阪大グループはこの実験をより改善して少数キュービットながら非古典領域での実証に成功した。このグループのもう一つの重要な成果は、量子暗号の安全性の理論の一般化である。BB84プロトコルに代表される単一光子を用いた量子暗号の安全性に関しては、エンタングルメント純粋化と量子訂正符号 (CSSコード) を用いる手法が、**Shor** と **Preskil** により2000年に確立されていたが、このグループの小芦等はこの手法と相補的な関係にある不確定性原理に基づく手法を開発し、様々な量子暗号プロトコルの安全性の証明と鍵生成レートの評価に成功した。

### 3-3. 北大グループ(竹内繁樹)の研究内容

このグループは光子キュービットを用いた量子情報処理の中でも、多数キュービット系にフォーカスして、特に実用的な実験手法の開発に優れた成果を上げた。その成果の内、最も重要なものは光路干渉計を必要としない制御NOT量子演算回路の提案とその実証実験である。単一光子と線形光学素子と単一光子検出器だけで量子計算が実現できることを Knill, Laflamme, Milburn が提案したのは2000年のことであった。この提案には、いくつかの問題点があった。その内の一つは、複雑な光干渉計を必要とするため、その異なる光路間の位相安定化が難しいというものであった。北大グループはこの問題点を解決することに成功し、線形光学量子コンピューターを一步実用的なものに近づけた。このグループのもう一つの重要な成果は、光のNOON状態の生成とこれを用いた光干渉計のS/N比の改善である。光干渉計を用いた微小な位相シフトの測定では、ショット雑音により、その限界が与えられる。従って、同じパワーを用いるのであれば、より短波長(高エネルギー)の光を用いるのが有効であることは良く知られている。長波長の光を用いて短波長の光と同じ位相測定の精度を出す方法として、光ド・ブロイ波あるいは光NOON状態と呼ばれる非古典光を用いることが10年ほど前から提案されていた。これまでは、2つの光子が1かたまりとなって、2つの光路を同時に伝搬する実験が行われていたが、北大グループはこれを4つの光子に拡張することに初めて成功した。

### 3-4. 学習院大(平野琢也)グループの研究内容

このグループは光の連続量への情報の書き込み、ホモダイン検波による情報の読み出しに基づく量子情報処理にフォーカスして、特に量子暗号の分野で優れた成果を上げた。その成果の内、最も重要なものは、ポストセレクションを用いた連続量量子暗号方式の概念とその実証実験である。光子キュービットの代わりに、光の連続量(振幅や位相)を用いて量子暗号を実現する方法を世界に先駆けて初めて提案したのは、このグループである。その後、Grangier 等により、その状態を改善する提案や実証実験、実用方式としての実験までがヨーロッパで行われている。実用化フェーズではヨーロッパ勢に先行されたものの、このグループは、光パルスホモダイン検波の技術の開発に優れた成果を上げた。

## 4. 事後評価結果

### 4-1. 外部発表(論文、口頭発表等)、特許、研究を通じての新たな知見の取得等の研究成果の状況

このチームの発表数は1件(国内)、90件(国際)、招待講演数は55件(国内)、51件(国際)、特許出願数は4件であった。発表論文の内、主なものを以下にリストアップする。

1. T. Tashima, T. Wakatsuki, S. K. Ozdemir, T. Yamamoto, M. Koashi, and N. Imoto: "Local transformation of two EPR photon pairs into a three-photon W state," Phys. Rev. Lett., in press.
2. R. Namiki, M. Koashi, and N. Imoto: "Fidelity Criterion for Quantum-Domain Transmission and Storage of Coherent States Beyond the Unit-Gain Constraint," Phys. Rev. Lett. 101, 100502(2008).
3. Y. Tokunaga, S. Kuwashiro, T. Yamamoto, M. Koashi, and N. Imoto: "Generation of High-Fidelity Four-Photon Cluster State and Quantum-Domain Demonstration of One-Way Quantum Computing," Phys. Rev. Lett. 100, 210501 (2008).

4. T. Yamamoto, K. Hayashi, S. K. Ozdemir, M. Koashi and N. Imoto: "Robust photonic entanglement distribution by state-independent encoding onto decoherence-free subspace" *Nature Photonics* 2, 488 - 491 (2008).
5. 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).
6. T. Yamamoto, J. Shimamura, S. K. Ozdemir, M. Koashi, and N. Imoto: "Faithful Qubit Distribution Assisted by One Additional Qubit against Collective Noise," *Phys. Rev. Lett.* 95, 040503 (22 July 2005).
7. M. Koashi: "Unconditional security of coherent-state quantum key distribution with a strong phase-reference pulse," *Phys. Rev. Lett.* 93, 120501 (15 September 2004).
8. K. Tamaki, M. Koashi, and N. Imoto: "Unconditionally secure key distribution based on two nonorthogonal states," *Physical Review Letters*, 90, 167904 (24 April 2003).
9. R. Okamoto, H.F.Hofmann, T.Nagata, J.L.O'Brien, K.Sasaki and S.Takeuchi : "An Entanglement Filter," *Science*, 323, 483-485 (23 January, 2009).
10. D.Kawase, Y.Miyamoto, M.Takeda, K.Sasaki and S.Takeuchi: "Observing Quantum Correlation of Photons in Laguerre-Gauss Modes Using the Gouy Phase," *Phys.Rev.Lett.*101 050501-1-4(2008).
11. 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).
12. R. Okamoto, H. F. Hofmann, S. Takeuchi and K. Sasaki: "Demonstration of an optical quantum controlled-NOT gate without path interference", *Phys. Rev. Lett.*, 95, 21, pp. 210506/1-4 (2005).
13. H. F. Hofmann: "Complementary classical fidelities as an efficient criterion for the evaluation of experimentally realized quantum operations" *Physical Review Letters* 94 160504/1-160504/4(2005).
14. 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).
15. R. Namiki and T. Hirano: "Practical limitation for continuous-variable quantum cryptography using coherent states," *Phys. Rev. Lett.* 92, 117901, (2004).

この内、文献3は、いわゆる光子キュービットのクラスター状態の生成とこれを用いた一方向量子計算を非古典的な領域で初めて実証した実験結果を報告したものである。文献4はエラーを現実的な位相エラーに限定し、エラーが何回起きても訂正できる方法を提案し、光ファイバー伝送実験で実証したものである。文献7,8は、量子暗号の安全性理論に新しい手法を導入したものである。文献9は、光子キュービットのエンタングル状態の新しい生成法の提案とその実証実験の結果を報告したものである。文献11は、いわゆる4光子 NOON 状態の生成と検出に関する実験結果である。文献12は、経路干渉計を使わずに構成する線形光学制御 NOT ゲートの提案と実証実験を報告したものである。文献15は、光の連続性を用いた量子暗号の安全性を初めて議論したものである。

#### 4-2. 成果の戦略目標・科学技術への貢献

このチームが世界に先駆け実証実験に成功したクラスター状態(一方向)量子コンピューターは、将来の量子コンピューター開発の有力候補の一つである。原理実験とは言え、これにいち早く成功した意味は大きい。また、光路干渉計を使わない量子演算は、線形光学量子コンピューターの将来へ向けての有力なブレークスルーであった。ただし、光子キュービットを用いたクラスター状態量子コンピューターや線形光学量子コンピューターは光子の損失、系の物理的大きさなどによる制限のため、大規模なシステムへ発展させることは難しいと予想される。この分野の研究は、物質(原子やスピン)キュービットを用いた方式が今後の研究の主流となろう。このグループの強味である光子キュービットの技術を、物質キュービットの技術と組み合わせるための新たな共同研究体制の構築が期待される。学習院大グループは、原子BECと量子光学の実験技術を同時に有する世界的にも数少ない研究グループであり、この点でのリーダーシップを今後発揮されることを期待する。

#### 4-3. その他の特記事項(受賞歴など)

このチームの理論的研究の中核的存在であった阪大の小芦氏は、このCREST領域全体の若手研究者、学生を育成する目的で4度開催された量子情報未来テーマ開拓研究会の幹事として活躍し、多くの若手に多大な影響を与えた。将来の日本の量子情報分野の研究を担う人材の多くは、彼から量子情報の基礎を学んだと言っても過言ではない。このチームの受賞歴を以下にリストアップする。

1. 山本 俊, 日本物理学会若手奨励賞, 平成 21 年 3 月
2. 徳永 裕己, 井上研究奨励賞, 平成 21 年 2 月
3. 岡本 亮, 井上研究奨励賞 平成 19 年 2 月
4. 岡本 亮, 松本・羽鳥奨学賞 平成 19 年 3 月
5. 竹内 繁樹;  
文部科学省 平成17年度科学技術分野の文部科学大臣表彰 若手科学者賞平成17年4月
6. 竹内 繁樹;応用物理学会(日本光学会)光学論文賞平成18年3月

以上