

## 研究課題別事後評価結果

1. 研究課題名： 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

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： 古澤 明（東京大学大学院工学系研究科 教授）

主たる共同研究者：

佐々木 雅英（（独）情報通信研究機構 新世代ネットワーク研究センター グループリーダー）

＜非ガウス型量子エンタングルメント制御＞

番 雅司（お茶の水大学大学院人間創成科学研究科 教授）

＜量子情報理論＞

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

このチームは、東大、NICT、お茶の水大からなる体制で、光電場の振幅や位相といった連続量を用いた量子情報処理の実験及び理論研究を行ない、優れた成果を上げた。特に、このチームを率いる研究代表者（古澤 明）は、連続量光量子情報処理の実験分野で世界の第一人者の地位を築く重要な実験を次々と成功させた、また共同研究者の佐々木雅英は非ガウス型光情報処理の実験で量子光学の発展に大きな貢献をした。また東大－NICT間の共同研究は人的交流を積極的に行った結果、大きな成功を収めた。

3-2. 東大グループ（古澤明）の研究内容

このグループは、従来の結晶より光学特性の優れたPPKTP結晶という2次の非線形光学結晶を共振器に配した縮退型光パラメトリック増幅による高品質の光スクイーズド状態の発生技術にその基盤を置いている。パラメトリック増幅によるスクイーズド状態の発生については、1965年の高橋秀俊の論文にその概念が提示され、1985年にはパラメトリック増幅や4光波混合により実証実験がなされている。研究代表者はCaltechのKimbleの研究室に滞在中、スクイーズド状態を用いた連続量のエンタングル状態の発生とその量子テレポーテーションへの応用というBraunstein等の提案を取り上げ、この実証実験に成功し、この研究テーマを日本へ持ち帰った。本CRESTの研究期間中に、PPKTPという新しい結晶を用いた光パラメトリック増幅技術が開花し、量子テレポーテーションの高フィデリティ化、量子テレクローニング、多者間量子エンタングルメント生成、連続量量子誤り訂正、などの重要な目標を次々とクリアした。また、東工大上妻グループと協力して真空スクイーズド状態の原子アンサンブルへのトラップという実験にも着手し成功を収めた。最近では、連続量を用いた量子コンピューターの概念にも研究の幅を拡張しようとしている。研究グループの中心的人材であった青木助教はCREST期間中CaltechのKimble研究室を訪問し、ここで原子Cavity QEDシステムを用いた量子中継の基礎実験に成功した。この実験のインパクトもさることながら、今後の活躍が楽しみである。

3-3. NICTグループ（佐々木雅英）の研究内容

このグループは光パラメトリック増幅過程で発生されたスクイーズド状態に対して、単一光子検出という非ガウス型の量子情報処理制御を施して、非古典光を発生、検出することに取り組んだ。独自に開

発した単一光子検出技術と東大古澤研究室から導入した光スクイーミング技術を組み合わせて、この目標の達成にGrangierのグループとほぼ同時期に成功した。将来量子光学の教科書に載るような美しい実験であった。このグループは、また光子数識別器の開発にそのリソースを使い、高入力インピーダンス増幅器付Si-APDや超伝導単一光子検出器(SSPD)の自主技術を立ち上げ、これはNECやNTTの量子暗号システム実験にも使われることとなった。このグループはまた伝統的に量子情報理論に強く、今回のCREST期間中にも、量子符号化理論やPOVM測定法などのテーマで優れた理論論文が多数発表された。

#### 3-4. お茶の水大グループ(番雅司)の研究内容

このグループでは、量子情報のデコヒーレンス機構の解明やその制御に関する理論的研究を担当した。具体的には、非平衡量子統計力学的の手法を用いて、外部環境による量子情報のデコヒーレンスの性質を様々な観点から解析し、パルス照射によって量子情報のデコヒーレンスが制御可能であることを示した。

#### 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

このチームの発表論文数は 11 件(国内)、115 件(国際)、招待講演数は 30 件(国内)、37 件(国際)であった。

主なものを以下にリストアップした。

1. K. Honda, D. Akamatsu, M. Arikawa, Y. Yokoi, K. Akiba, S. Nagatsuka, T. Tanimura, A. Furusawa, and M. Kozuma  
"Storage and retrieval of a squeezed vacuum"  
Phys. Rev. Lett. 100, 093601-1-4 (2008)
2. H. Yonezawa, S. L. Braunstein, and A. Furusawa  
"Experimental demonstration of quantum teleportation of broadband squeezing"  
Phys. Rev. Lett. 99, 110503-1-4 (2007)
3. D. Akamatsu, Y. Yokoi, M. Arikawa, S. Nagatsuka, T. Tanimura, A. Furusawa, and M. Kozuma  
"Ultraslow propagation of squeezed vacuum pulses with electromagnetically induced transparency"  
Phys. Rev. Lett. 99, 153602-1-4 (2007)
4. S. Koike, H. Takahashi, H. Yonezawa, N. Takei, S. L. Braunstein, T. Aoki, and A. Furusawa  
"Demonstration of quantum telecloning of optical coherent states"  
Phys. Rev. Lett. 96, 060504-1-4 (2006)
5. N. Takei, H. Yonezawa, T. Aoki, and A. Furusawa  
"High-fidelity teleportation beyond the no-cloning limit and entanglement swapping for continuous variables"  
Phys. Rev. Lett. 94, 220502-1-4 (2005)
6. H. Yonezawa, T. Aoki, and A. Furusawa  
"Demonstration of a quantum teleportation network for continuous variables"

- Nature 431, 430-433 (2004)
7. T. Aoki, N. Takei, H. Yonezawa, K. Wakui, T. Hiraoka, A. Furusawa, and P. van Loock  
"Experimental creation of a fully inseparable tripartite continuous-variable state"  
Phys. Rev. Lett. 91, 080404-1-4 (2003)
  8. H. Takahashi, K. Wakui, S. Suzuki, M. Takeoka, K. Hayasaka, A. Furusawa, and M. Sasaki  
"Generation of large-amplitude coherent-state superposition via ancilla-assisted  
photon-subtraction"  
Phys. Rev. Lett. 101, 233605-1-4 (2008)
  9. M. Takeoka, M. Sasaki, and N. Luetkenhaus  
"Binary projective measurement via linear optics and photon counting"  
Phys. Rev. Lett. 97(4), 040502-1-4 (2006)
  10. K. Hirose, H. Furumochi, A. Tada, F. Kannari, M. Takeoka, and M. Sasaki  
"Photon Number Squeezing of Ultrabroadband Laser Pulses Generated by Microstructure  
Fibers"  
Phys. Rev. Lett. 94, 203601-1-4 (2005)
  11. K. Nagata, W. Laskowski, M. Wiesniak, and M. Zukowski  
"Rotational Invariance as an Additional Constraint on Local Realism"  
Phys. Rev. Lett. 93, 230403-1-4 (2004)
  12. Y. Mitsumori, J. Vaccaro, S. M. Barnett, E. Andersson, A. Hasegawa, M. Takeoka, and M.  
Sasaki  
"Experimental Demonstration of Quantum Source Coding"  
Phys. Rev. Lett. 91, 217902-1-4 (2003)
  13. M. Fujiwara, M. Takeoka, J. Mizuno and M. Sasaki  
"Exceeding classical capacity limit in quantum optical channel"  
Phys. Rev. Lett. 90, 167906-1-4 (2003)

文献2は、非古典光(スクイズド状態)の量子テレポーテーションに成功したものである。文献4、5と6はコヒーレント状態の量子テレポーテーション、no cloning 理論限界を超える量子テレクローニングにそれぞれ成功した報告である。文献7は、3モードの連続量エンタングル状態の生成に成功したものである。文献8は単一光子の検出(非ガウス過程)により生成された非古典光の生成に関する報告である。文献9は、Pegg-Bennett位相固有状態を識別するPOVM測定の実現法を提案したものである。文献12は古典限界を超えた量子符号化を実証した実験を報告したものである。

#### 4-2. 成果の戦略目標・科学技術への貢献

このチームは光電場の連続量を用いた量子光学の基礎実験や量子情報処理の基礎実験に関して、その実力は世界のトップレベルにある。PPKTPを用いた光スクイズド状態の発生技術、SSPMを中心とする単一光子の検出技術の中核として周辺技術の成熟度も高く非常に有利な地位を築いた。今後は、これらの光技術の具体的応用分野や基礎科学への貢献を積極的に探るフェーズに入るものと期待される。光だけを用いた量子情報処理で実現できることには限界があり、今後は原子やスピンといった物質キュー

ビットの技術をどう取り込んでいくか、が大切であるように思われる。幸い、東大グループ、NICTグループ共に、優秀な若手が育っていて、次の挑戦が楽しみである。

#### 4-3. その他の特記事項(受賞歴など)

このチームの受賞リストを以下に示す。

1. 古澤明

International Quantum Communication Award、平成 20 年 8 月

2. 古澤明

日本学士院学術奨励賞、平成 19 年 3 月

3. 古澤明

平成 18 年度日本学術振興会賞、平成 19 年 3 月

4. 古澤 明

平成 17 年度東京テクノフォーラムゴールドメダル賞

5. 古澤 明

平成 17 年度久保亮五記念賞

6. レーザー学会学術講演会優秀論文発表賞：武岡正裕

(鈴木 重成、武岡 正裕、佐々木 雅英、U. L. Andersen、神成 文彦)

「ホモダイン測定によるコヒーレント重ね合わせ状態の純粋化」

2006 年 5 月 31 日、レーザー学会総会

以上