

平成22年5月12日現在

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2008～2009

課題番号：20740232

研究課題名（和文）雑音耐性のある量子情報通信の高効率化に関する研究

研究課題名（英文）Research on robust and efficient quantum communication

研究代表者

山本 俊（YAMAMOTO TAKASHI）

大阪大学・大学院基礎工学研究科・助教

研究者番号：10403130

研究成果の概要（和文）：量子情報処理は量子力学の性質を利用して、物理法則で守られる究極のセキュリティ通信や従来の計算方式を超越した超高速演算を達成する方法として注目されている。しかし、量子状態は壊れやすく、それを保護する方法が重要となっている。本研究では、量子もつれ光子対を利用し、雑音耐性のある量子情報通信を効率化する新たな手法を確立し、高効率で雑音耐性のある安定な長距離量子情報ネットワーク構造の基礎を築くことを目標とする。

研究成果の概要（英文）：Quantum communication and computation will achieve secure communication provided by low of physics and speedup of computation. Quantum states, however, are degraded by unavoidable coupling with environment. Thus, protection of quantum state is an important issue in quantum information science. In this research project, our target is to demonstrate a robust and efficient quantum communication system utilizing quantum entanglement of photon pair.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	2,100,000	630,000	2,730,000
2009年度	1,200,000	360,000	1,560,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・原子・分子・量子エレクトロニクス

キーワード：量子エレクトロニクス

1. 研究開始当初の背景

量子情報科学はこれまで様々な量子効果の理解を情報理論的な観点から行う手助けをし、同時に量子コンピューティング、量子暗号通信や量子計測技術といった新しい応用を生み出してきた。このような量子情報処理を達成するには光や物質の量子状態の

生成、保持、通信、演算および測定が必要となる。この過程において量子状態のコヒーレンスを保ち、正しい結果を効率的に得ることは量子情報処理における基本的な課題である。しかし、処理過程での外界との相互作用によって量子状態は容易に壊れてしまう。したがって、コヒーレンスの長い物理系の準

備が実験的に重要な課題となる。一方、個別の量子系のコヒーレンスが短い場合であっても、多体量子系の構造をうまく見直すことで、実効的にコヒーレンスの長い系を実現する量子エラー訂正、エンタングルメント蒸留や Decoherence-free subspace(DFS)などが理論的に研究されている。量子エラー訂正やエンタングルメント蒸留は量子ビット毎に作用する雑音からより一般的な雑音まである程度の範囲をカバーする汎用的な方法である。しかし、これらの実現には多くの量子ビットやそれらの相互作用を用いるため、小規模な実証実験は行われているが、応用にはより高い技術が必要となる。一方、現実的な状況では特定の雑音が支配的な場合が多く、いくつかの量子ビット間に加わる雑音には相関がある。このような雑音に有効な DFS は、多数の量子ビットや複雑な相互作用を必要としないため、雑音耐性を持たせる実用的な方法として、注目を浴びている。また、その雑音耐性は量子情報処理だけではなく、超精密分光にも応用されている。

これまで我々光量子情報通信において2光子によって作られる DFS と二光子干渉効果を同時に利用する頑強な量子情報通信が提案し、単一光子の偏光状態（信号光子）の送信実験に成功していた。

2. 研究の目的

DFS を作り出すには多光子状態が必要となる。そのため DFS を構成している光子が損失をうける場合には、望みの状態が保持される確率が低下してしまう。これまで提案され実証されてきたいくつかの通信法でも、1光子送信のために最低でも2光子必要であり、それらを同時に送信するものであった。そのため、通信路に損失がある場合は、光の透過率の2乗で成功確率が減少し、効率的ではないという問題を残していた。これに対して、本研究では光の透過率の1乗程度で成功確率が減少する効率的な量子情報通信を実現することを目的とする。また、より進んだ損失に強い量子情報通信の探求を行う。

3. 研究の方法

これを達成するためにまず重要となるのは、雑音耐性のある量子情報通信を利用して量子もつれ光子対を配信することである。量子もつれ光子対の非常に重要な特性として対をなす光子の一方に加わった雑音はもう一方で取り除くことが出来ることである。この特性を利用すると、雑音耐性を持たせるために必ずしも2光子が同時に同じ受信者へ到達する必要がなく、効率的な方法を実現することができる。このような方法を実現するため、まず、雑音耐性のある量子もつれ光子対の配信実験を行い、これを効率的にする方法を提

案し、その実現を行う。また、更なる効率化や頑強性に関する研究を行う。

量子もつれ光子対の発生は非線形光学結晶を紫外短パルスレーザーで励起することによって起こる光パラメトリック変換によって行った。図1のようにして発生された光子対状態の評価は量子状態トモグラフィーによって行われる。光子Bの状態をDFSに移

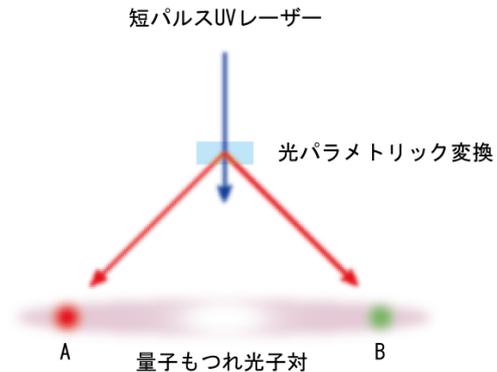


図1：光パラメトリック変換による量子もつれ光子対発生

すために必要となるもう一つの光子は弱めたレーザー光から用意する。

光子Bの状態を DFS を利用し、光ファイバーで送信する実験の概略は以下の図2のようである。



図2：DFS を用いた雑音耐性のある量子もつれ光子対発生

4. 研究成果

発生された量子もつれ光子対の忠実度は量子状態トモグラフィーを用いて評価される。実験で測定された状態を表す密度行列は図3.1である。非対角成分が大きく、コヒーレンスが大きいたことがわかる。この密度行列から望みの量子もつれ状態との忠実度や量子もつれの度合いを求めることができる。発生した量子もつれ光子対は忠実度 1.00 ± 0.03 、量子もつれ度合い 0.958 ± 0.010 であり、非常に高い量子もつれを持つことがわかった。一方、DFS を用いずに光ファイバーで光子Bを受信者へ送信した場合に測定された密度

行列は図 3.2 である。密度行列の非対角項がほぼ 0 になっていることから、光ファイバー中の雑音によりコヒーレンスが消失していることがわかる。忠実度や量子もつれの度合いは 0.46 ± 0.03 及び 0.020 ± 0.017 と計算され、量子もつれは通信の雑音によってほぼ消失してしまうことがわかった。

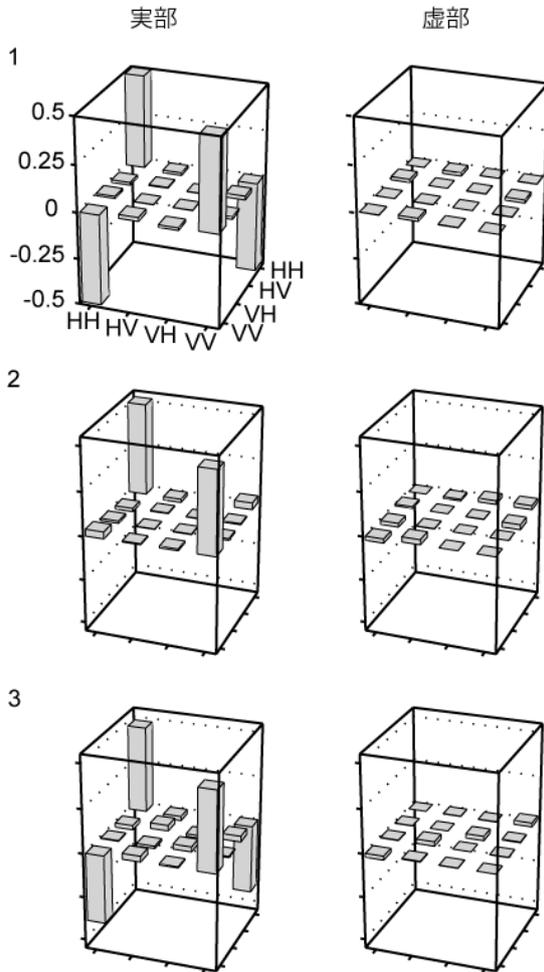


図 3 : 量子状態トモグラフィーにより測定された密度行列。3.1)発生した量子もつれ光子対。3.2)送信後の量子もつれ光子対。3.3)DFS 利用後の量子もつれ光子対

これをレーザーからの 1 光子を利用し、送信する光子 B の状態を DFS に移して送信した場合に測定された密度行列は図 3.3 のようになる。密度行列の非対角項が再び現れ、コヒーレンスが回復していることがわかる。計算された忠実度や量子もつれの度合いは 0.87 ± 0.07 及び 0.60 ± 0.11 であり、高い量子も

つれがあることがわかる。また、この配信された量子もつれはベルの不等式を破るほど高いものであることもわかった。これにより雑音耐性のある量子もつれ光子対の配信実験を実証した[論文④]。

この方法の興味深い特徴として 2 光子干渉効果を利用していることで使用している干渉計の光路差を波長以下の精度で安定化する必要がないことである。これを確認するために光路差と干渉性の変化を測定した結果が図 4 である。図からわかるように使用した波長 790nm よりも干渉幅が非常に長く $\sim 100 \mu\text{m}$ 程度であることがわかる。

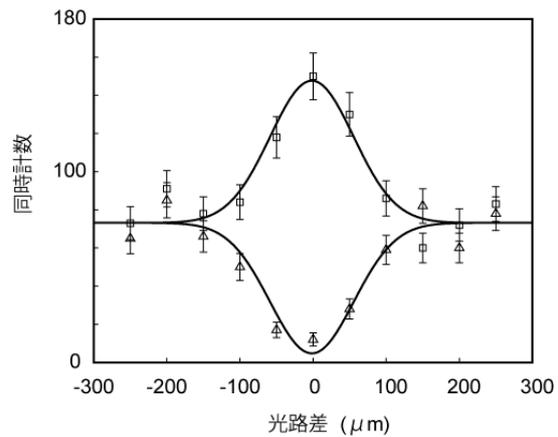


図 4 : 2 光子干渉性の変化

この実験によって量子もつれ光子対を DFS を利用して送信可能であることがわかった。これにより DFS を利用した高効率な状態送信の基礎実験に成功した。更に実際に効率化するための方法としてレーザー光を受信者側から送信者に送る方法を新たに発案した。これまでの方法では同じ方向に 2 光子を送信していたため、2 光子の到達が必要であった。しかし、一方の光子を反対側つまりレーザー光を受信者側から送ることで、DFS を作るための補助光子は通信路の損失を考慮する必要がなくなる。これにより DFS を用いた雑音耐性のある量子情報通信の効率化が図られる[学会発表①]。現在、実証実験の論文執筆中である。また、より効率的な通信方法に関する理論的な検討を行った。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 4 件)

- ① Toshiyuki Tashima, Sahin Kaya Ozdemir, Takashi Yamamoto, Masato Koashi, Nobuyuki Imoto, Local expansion of

photonic W state using a polarization dependent beamsplitter, New J. Phys., 査読有, 11, 2009, 023024-1-10.

- ② Koji Azuma, Naoya Sota, Ryo Namiki, Sahin Kaya Ozdemir, Takashi Yamamoto, Masato Koashi, and Nobuyuki Imoto, Optimal entanglement generation for efficient hybrid quantum repeaters, Phys. Rev. A, 査読有, 80, 2009, 060303(R).
- ③ Yoritoshi Adachi, Takashi Yamamoto, Masato Koashi, Nobuyuki Imoto, Boosting up quantum key distribution by learning statistics of practical single-photon sources, New J. Phys. 11. 113033 (2009).
- ④ Takashi Yamamoto, Kodai Hayashi, Sahin Kaya Ozdemir, Masato Koashi, Nobuyuki Imoto, Robust photonic entanglement distribution by state-independent encoding onto decoherence-free subspace, Nature Photonics, 査読有, 2, 2008, 488 – 491.

[学会発表] (計 5 件)

- ① Takashi Yamamoto, Kodai Hayashi, Sahin Kaya Ozdemir, Masato Koashi, Nobuyuki Imoto, DFS-based entanglement distribution through an optical fiber, QIPC 2009 International Conference on Quantum Information Processing and Communication, 2009/9/21, Rome, Italy
- ② 山本 俊, DFS-based entanglement distribution through an optical fiber, 平成 21 年度 G-COE若手秋の学校「新しい量子物質・物性・機能の研究」, 2009/9/14, 休暇村 近江八幡
- ③ 山本俊, “量子雑音除去方法によるエンタングルメント送信に関する研究” (招待), 日本物理学会第 64 回年次大会 2009/3/27, 立教大学
- ④ Takashi Yamamoto, Kodai Hayashi, Sahin Kaya Ozdemir, Masato Koashi, Nobuyuki Imoto, Robust photonic entanglement distribution via decoherence-free subspace (DFS), Quantum Optics IV, 2008/10/14, Jurere Beach Village Hotel, Florianopolis, Brazil.
- ⑤ Takashi Yamamoto, Kodai Hayashi, Sahin K. Ozdemir, Masato Koashi, Nobuyuki Imoto, Robust entanglement distribution via decoherence-free subspace, QCMC 2008, 2008/8/21, University of Calgary, Canada.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

山本 俊 (YAMAMOTO TAKASHI)
大阪大学・大学院基礎工学研究科・助教
研究者番号：10403130

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

井元 信之 (IMOTO NOBUYUKI)
大阪大学・大学院基礎工学研究科・教授
研究者番号：00313479

小芦 雅斗 (KOASHI MASATO)
大阪大学・大学院基礎工学研究科・准教授
研究者番号：90322099