

機関番号：32606

研究種目：基盤研究 (B)

研究期間：2008～2010年度

課題番号：20340108

研究課題名 (和文) パルス光連続変数エンタングルメントに関する研究

研究課題名 (英文) Study on continuous variable entanglement of pulsed light

研究代表者

平野 琢也 (HIRANO TAKUYA)

学習院大学・理学部・教授

研究者番号：00251330

研究成果の概要 (和文)：

パルス光による連続変数エンタングルメントの生成技術の開拓を進めた。通信波長帯の実験では、リング干渉計を用いた安定なエンタングルメントの生成を実現し、生成したエンタングルメントが非分離性基準を満たしていることを時間領域のホモダイン検出により確認した。また、事後変位操作による量子状態転送の実証実験を行い、転送後の状態が古典限界を越える相関を持つことが確認された。高繰り返しピコ秒パルスを用いた実験では、ホモダイン検出に用いる局部発振光の時間幅をパラメトリック増幅により短縮することにより、 $-4.5$  dB のスクイーミングが観測された。また、エンタングルした2つのパルス光の直交位相振幅の測定を互いに 4m 離れた場所で行い、これらの測定結果がエンタングルメントの基準を満たすことを確かめた。この 4m という距離は、パルス光の繰り返しの逆数と光速の積よりも大きく、2つの場所の測定を因果的に分離するのに十分な距離である。

研究成果の概要 (英文)：

We have studied methods for creating continuous variable entanglement of pulsed light, and demonstrated quantum correlations beyond the classical limit. We have proposed and demonstrated a scheme to stably generate quadrature-entangled optical pulses using a ring interferometer and generated entangled light pulses at telecommunication wavelength, and verified the inseparability of the states. We experimentally demonstrated transporting continuous quantum variables of individual light pulses by using continuous-variable Bell measurements and post-processing displacement techniques. Fidelity of  $F = 0.57 \pm 0.03$  was experimentally achieved, which is higher than the bound ( $F_c = 0.5$ ) of the classical case in the absence of entanglement. In the experiments using high-repetition rate picosecond pulse train, we have observed  $-4.5$  dB squeezing using a temporally shaped local oscillator pulse. Quantum correlations were verified at two measurement points separated by a distance of 4 m that is sufficient to causally separate two measurements.

交付決定額

(金額単位：円)

|        | 直接経費       | 間接経費      | 合計         |
|--------|------------|-----------|------------|
| 2008年度 | 6,800,000  | 2,040,000 | 8,840,000  |
| 2009年度 | 4,400,000  | 1,320,000 | 5,720,000  |
| 2010年度 | 3,000,000  | 900,000   | 3,900,000  |
| 年度     |            |           |            |
| 年度     |            |           |            |
| 総計     | 14,200,000 | 4,260,000 | 18,460,000 |

研究分野：量子光学

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：スクイーミング、エンタングルメント、EPR 基準、光導波路

### 1. 研究開始当初の背景

エンタングルメントは古典と量子を分ける最も重要な概念であり、エンタングルした状態では、系全体の状態を部分系の状態の直積として表すことができない。エンタングルメントは、量子情報技術において、高速な計算や絶対に安全な暗号を実現するための最も重要なリソースであると考えられている。

エンタングルメントが存在すると、空間的に離れた2つ以上の系が量子力学的な相関を持ち、離れた場所における測定の結果に相関が生じる。エンタングルメントの存在と古典的な描像が相容れないことを最初に議論したのは、1935年に出版されたアインシュタイン、ポドルスキーとローゼンによる論文である(Phys. Rev. 47, 777)。彼らは局所实在論が正しいという立場で、波動関数による量子力学の記述は不完全であると議論した。J.S. Bellは1965年に量子論と局所实在論のどちらが正しいのかを実験的に判定することを可能にする不等式を提唱した(Physica, 1, 195)。局所的な隠れた変数の理論を否定するためには、離れた場所における2つの測定が因果的に分離されている(光円錐の外側にある)必要がある。この条件を満たす最初の実験は、光子の偏光を測定することにより、Aspectらにより1982年に実現された(Phys. Rev. Lett. 49, 1804)。しかし、局所的な隠れた変数の理論を完全に否定するためには、光子検出の確率が高くなければならないことが指摘されている(J.F. Clauser and A. Shimony, Rep. Prog. Phys. 41, 1881 (1978))。申請者の知る限り、因果的な分離と高検出効率の2つの条件を同時に満たす実験は、これまでに行われていない。

1935年のEPRの議論は、2つの粒子の位置と運動量がエンタングルした状態を扱ったものである。位置と運動量のように連続的な固有値を取る物理量(連続変数)のエンタングルメントは、電磁場の直交位相振幅により実現することができる。このような連続変数のエンタングル状態は、2つのスクイーミング光をビームスプリッターで重ね合わせることで実験的に生成することができる。最初の実験は、連続光を使ったtypeIIのパラメトリック過程により1992年に行われた(PRL 68.3663(1992))。このようにして生成する連続変数のエンタングル状態は正の値をとるウィグナー分布関数で表すことができ、ホモダイン検出のようなガウスの操作だけでは、ベルの不等式を検証することができない。ウィグナー分布関数を隠れた変数とみなす

ことができるからである。

しかし、EPRが議論したハイゼンベルクの不確定性関係の不等式の破れを実験的に検証することは可能である(M. D. Reid, Phys. Rev. A40, 913 (1989))。すなわち、共役な2つの直交位相振幅について、エンタングルメントの片方の測定値( $x_A$  or  $p_A$ )が与えられたとき、もう片方の測定値( $x_B$  or  $p_B$ )についての推定値の不確定さの積が不等式を破る( $(\Delta_{\text{inf}} x_B)(\Delta_{\text{inf}} p_B) < \hbar/2$ )かどうかを実験的に検証することができる。この基準をEPR基準と呼ぶ(Rev. Mod. Phys. 81, 1727 (2009))。この不等式の破れは、量子論と局所实在論のどちらが正しいかを定めることはできないという意味でベルの不等式ほど強くないが、これらが両立しないことを実験的に示すことができる。このEPR不等式の場合も、因果的な分離と高検出効率の2つの条件を満たすことが望ましいが、これまでに因果的な分離を達成した実験は行われていない。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、パルス光による連続変数エンタングルメントの生成技術の開拓を進めること、また、それを利用して、量子力学の基礎に関わる思考実験を実験的に実現することである。本研究では、2つの測定の因果的な分離を実現することが容易なパルス光を用いて、因果的な分離を実現することを目指す。また、スクイーミングの質を高めて、EPR基準の達成を目指す。

### 3. 研究の方法

本研究を進めるには、2つの重要な要素技術が必要である。一つは、パルス光を用いた連続変数エンタングルメントの生成技術、二つめはパルスモードのホモダイン検出技術である。連続変数エンタングルメントは2つのスクイーミング光を重ね合わせて生成するので、良質のパルス・スクイーミング光の発生が必要である。

従来は、主に非線型媒質の制限により、パルス光の大きなスクイーミングを実現することは困難であった。近年、擬位相整合を用いる非線型光導波路を用いた実験を進めており、大きな非線型光学効果を容易に実現できるようになった。パルス光の連続変数エンタングルメントを生成し、非分離性検証も行うことができた(Phys. Rev. A 76, 012314 (2007))。しかし、EPRの不等式を検証するためには、エンタングルメントの度合いが僅か

に不十分（8%程度）であった。

また、もう一つの重要技術であるパルスモードのホモダイン検出によりエンタングルメントを測定する必要がある。パルスモードのホモダイン検出は、一つのパルスに対して、一回の直交位相振幅測定を行い、一つの実数測定値を得る微弱光の検出方法である。通常、ホモダイン検出が低雑音の電圧増幅器を用い、RFスペクトラムによってサイドバンド周波数成分の揺らぎの大きさを測定するのに対し、パルスモードでは、通常は電荷敏感増幅器を用いることにより、一つのパルスごとに電荷の量をS/N良く増幅する。RFスペクトラムアナライザを用いる場合は、特定の周波数領域でのみ量子雑音限界に達していれば良いのに対し、パルスモードでは測定時間の逆数からパルスの繰り返し周波数までの周波数帯域ですべて量子雑音限界に達している必要があり、特に高い繰り返しのパルス光に対応するには技術的なハードルが高い。最初にパルスモードのホモダイン検出を実現したのはオレゴン大学のグループで、確率分布関数が測定できることを利用して密度行列の測定も行った(PRL70, 001244 (1993))。申請者のグループでは、通信波長帯のスクイーズ光のパルスモード検出に初めて成功したほか(JJAP45, L821 (2006))、量子暗号の実験を行っている(PRA68, 042331 (2003))。最近、イタリアのグループが低雑音のオペアンプを用いた高繰り返しホモダイン検出器を開発した(Science 306, 660 (2004))。本研究でも、オペアンプを用いて自作したホモダイン検出器を用いた。

以上のように、本研究では、非線形導波路とパルス光を組み合わせることで高い光非線型性を実現し、連続変数エンタングルメントを実現し、さらに、パルス毎の測定を行って2つの測定の因果的な分離を実現することが特色である。これにより、量子力学の基礎的な問題についての検証実験を実現し、新しい知見を明らかにしていく。

#### 4. 研究成果

平成20年度は、主に、通信波長帯のパルス光源（繰返周波数5kHz以下）、および高繰り返し周波数（76MHz）のモード同期パルスレーザー（波長1064nm）を光源として用いた実験を行った。

通信波長帯の実験では、リング干渉計を用いた安定なエンタングルメントの生成を実現し、生成したエンタングルメントが非分離性基準（全系の状態をそれぞれの直積で書くことができないことを示す基準、エンタングルメント基準と呼ぶ）を満たしていることを時間領域のホモダイン検出により確認した。時間領域の検出とは、一つのパルスをもつモードとして近似することが妥当な条件下

で検出を行い、一つのパルスについて一つの直交位相振幅を測定するもので、通信波長帯エンタングルメントの時間領域の検出を実現したのは、我々の知る限りにおいて、本研究が初めてである。さらに、エンタングルペアの対応関係が明確であるという本実験の特徴、すなわち、ある一つのモードとエンタングルしているペアとなるモードを実験的に明確に分離して測定できるという特徴を生かして、事後変位操作による量子テレポーテーションの実証実験を行い、古典限界を上回ることを示すことができた。

高繰り返しパルス光源を用いた実験は、パルス時間幅が7pssecであり、パルス間隔が13nssecであるという特徴により、空間的に離れた2つの場所における測定を、因果的に分離することが容易である。本研究では、自作した高速ホモダイン検出器を用いて、従来よりも2桁程度高い繰り返しのパルス光に対して、時間領域で非分離性基準を確認し、さらに、2つの検出器を4m離すことにより、我々の知る限りで初めて、連続変数エンタングルメントを因果的に分離可能な距離で非分離性を実証することができた。

この他、光ファイバーを通して量子状態を伝送する実験も行ったところ、過剰雑音の増加が見られた。今後、エンタングルメントの光ファイバー伝送を行うためには、過剰雑音を低減する必要があることが分かった。

平成21年度から22年度にかけても、通信波長帯のナノ秒のパルス光を用いた実験と、高繰り返しのピコ秒パルス光を用いた実験において、エンタングルメントの質の改善に取り組んだ。

通信波長帯の実験では、バルク型の非線形結晶を用いることで、パラメトリック増幅のための励起光を4倍程度に高出力化することができた。しかしながら、これを用いたスクイージングは導波路を用いた以前の数値よりも劣り、従来からバルク結晶を用いていたピコ秒の実験とほぼ同じ数値が得られた。導波路とバルクの違いは、励起光のパルス時間幅にあり、導波路では内部変換効率が100%に近づくために、励起光のパルス幅が元のレーザーと同程度になるのに対し、バルク型結晶では、変換効率が強度に比例するために、元のレーザーのルート2分の一程度となる。この違いがスクイージングに影響を与えるのは、スクイーズ光とLO光のパルス幅の関係であり、励起光のパルス時間幅が短いと、LO光のパルスの方が時間幅が長いためにスクイーズの度合いが小さな部分を測定してしまうためと考えられる。すなわち、スクイーズ光とLO光のパルス時間幅の関係が決定的な影響を与えていることが示唆された。モードフィールド径の大きな光導波路を用いた励起光の高出力化は、以前よりも優れ

た結果を得ることはできず、これは導波路長が長いためであると考えられる。

ピコ秒パルスを用いた実験では、対称性が良くなるように光学系を新たに組みなおし、エンタングルメントの質を高めEPR基準を満たすことができるよう、スクイーミングを改善するための研究を行った。そして、ホモダイン検出に用いる局部発振光のパルス時間幅を制御することで、真空雑音の圧搾を大きく改善することができた。具体的には、パラメトリック増幅により、局部発振光のパルス時間幅を短くした。パラメトリック増幅は、位相に敏感な増幅であるため、基本波とパラメトリック増幅の励起光となる第2高調波の相対的な位相差が安定するように、これらが同じ光路を通る光学系を用いた。このとき、基本波と第2高調波のパルスの相対的な遅延時間を制御できるように、偏光ビームスプリッタと波長板、鏡で構成される簡便かつ安定な遅延時間制御用光学系を考案して用いた。これは、パラメトリック増幅の特性が遅延時間に敏感に依存することが分かったためである。ホモダイン検出の効率を測定される量子雑音の増減の非対称性からホモダイン検出の効率を見積もったところ、大きく向上したことを確認することができた。ピコ秒パルスに対する波形整形に成功したのは本研究が初めてである。測定された量子雑音は、真空の雑音よりも-4.5 dBも小さくなった。この値はEPR基準を達成するために十分なものであり、我々の知る限りにおいて、因果的な分離に有利なモード同期レーザーを光源とするパラメトリック過程の実験では最良であり、また、周期分極光導波路を用いた実験としても最良の値を達成することができた。

以上のように、本研究により、第1にスクイーミングの大幅な改善、第2に因果的に分離可能な長距離間のエンタングルメントの実証を行うことができた。これらの成果を組み合わせることで、ループホールフリーのエンタングルメント実験を実現することが可能である。

#### 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 5 件)

1. Transporting continuous quantum variables of individual light pulses, Yujiro Eto, Yun Zhang, and Takuya Hirano, Optics Express, Vol. 19, Issue 2, pp. 1360-1366 (2011). 査読有

2. ホモダイン方式による量子暗号通信, 平野琢也, 光学 39(1), 23-28, (2010). 査読無

3. Stable generation of quadrature entanglement using a ring interferometer, Yujiro Eto, Akihiro Nonaka, Yun Zhang, Takuya Hirano, Optics Letters, Vol. 33, Issue 13, pp. 1458-1460 (2008). 査読有

4. Observation of quadrature squeezing in a  $\chi^{(2)}$  nonlinear waveguide using a temporally shaped local oscillator pulse, Yujiro Eto, Takashi Tajima, Yun Zhang, and Takuya Hirano, Optics Express, Vol. 16, Issue 14, pp. 10650-10657 (2008). 査読有

5. Pulse-resolved measurement of quadrature phase amplitudes of squeezed pulse trains at a repetition rate of 76 MHz, Ryuhi Okubo, Mayumi Hirano, Yun Zhang, and Takuya Hirano, Optics Letters, Vol. 33, Issue 13, pp. 1458-1460 (2008). 査読有

[学会発表] (計 21 件)

1. 小塩あかね, CW モード同期レーザーと光導波路を用いたスクイズド光の生成(II), 日本物理学会第66回年次大会, 2011.3.26, 新潟大学.

2. Takuya Hirano, Continuous variable QKD in fiber network, Updating Quantum Cryptography and Communications 2010, 2010.10.20, ANA InterContinental Tokyo.

3. 吉村真勝, 高効率光導波路を用いた通信波長帯パルス光のスクイーミング, 日本物理学会平成22年度秋季大会, 2010.9.25, 大阪府立大学.

4. 平野琢也, ホモダイン方式による量子鍵配布の展開, 第22回量子情報技術研究会, 2010.5.10, 大阪大学.

5. 平野琢也, 連続変数量子暗号の現状, 第4回量子ICT運営会議, 2009年10月1日, 主婦会館プラザエフ.

6. 宮野哲史, 単一光路干渉計を用いた連続変数量子鍵配送における過剰雑音, 電子情報通信学会第21回量子情報技術研究会, 2009年11月4日, 電気通信大学 講堂.

7. 櫻井潤一, パルス光を用いた連続変数量子エンタングルメントの時間領域における測定, 第20回量子情報技術研究会, 2009年5月21日, 広島大学.

8. 衛藤雄二郎, 事後変位操作によるパルス毎での量子テレポーテーションの実証, 日本物理学会第64回年次大会, 2009年3月27日,

立教大学.

9. 大久保竜飛, パルス光を用いた連続変数エンタングルメントの時間領域における測定 II, 日本物理学会 第 64 回年次大会, 2009 年 3 月 27 日, 立教大学.

10. Ryuhi Okubo, ulse-resolved measurement of quadrature-entangled pulse at a repetition rate of 76MHz, International Symposium on Physics of Quantum Technology, 25-28/November/2008, Nara Prefectural New Public Hall, Japan.

11. Yujiro Eto, Stable generation of continuous-variable entanglement using a ring interferometer, International Symposium on Physics of Quantum Technology, 25-28/November/2008, Nara Prefectural New Public Hall, Japan.

12. Yujiro Eto, Pulsed homodyne detection of squeezed light at telecommunication wavelength, International Symposium on Physics of Quantum Technology, 25-28/November/2008, Nara Prefectural New Public Hall, Japan.

13. Satoshi Miyano, Continuous-variable quantum key distribution using a single-path interferometer, International Symposium on Physics of Quantum Technology, 25-28/November/2008, Nara Prefectural New Public Hall, Japan.

14. Atsushi Furuki, Controlling excess noise in continuous-variable quantum key distribution using a two-way configuration, International Symposium on Physics of Quantum Technology, 25-28/November/2008, Nara Prefectural New Public Hall, Japan.

15. Takuya Hirano, Quantum information processing using homodyne detection, International Symposium on Physics of Quantum Technology, 25-28/November/2008, Nara Prefectural New Public Hall, Japan.

16. 宮野哲史, 単一光路干渉計を用いた連続変数量子鍵配送における過剰雑音, 日本物理学会 2008 年秋季大会, 2008 年 9 月 22 日, 岩手大学.

17. 平野真弓, CW モード同期レーザーと光導波路を用いたスクイーズド光の生成, 日本物理学会 2008 年秋季大会, 2008 年 9 月 22 日, 岩手大学.

18. Yun Zhang, Measurement of entanglement in

the time domain and Einstein-Podolsky-Rosen paradox with continuous variable using laser pulses, The 9th International Conference on Quantum Communication, Measurement and Computing, 19-24/August/2008, Calgary, Canada.

19. Yujiro Eto, Stable generation of continuous-variable entanglement using a ring interferometer, The 9th International Conference on Quantum Communication, Measurement and Computing, 19-24/August/2008, Calgary, Canada.

20. Ryuhi Okubo, Pulse-resolved measurement of quadrature phase amplitudes of squeezed pulse train at 76 MHz repetition rate, The 9th International Conference on Quantum Communication, Measurement and Computing, 19-24/August/2008, Calgary, Canada.

21. 大久保竜飛, 高速ホモダイナ検出器を用いたパルス光連続変数エンタングルメントの時間領域測定, 第 18 回量子情報技術研究会, 2008 年 5 月 22 日, 東京大学.

[図書] (計 2 件)

1. 平野琢也 (共著), 国際文献印刷社, 光科学研究の最前線 2 (I-1-2 節 非古典的光, 2009, p. 10.

2. 監修: 松岡正浩、江馬一弘、平野琢也、岩本敏, オプトロニクス社, 基礎からの量子光学, 2009, 552 ページ.

[その他]

ホームページ等

<http://qo.phys.gakushuin.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

平野 琢也 (HIRANO TAKUYA)

学習院大学・理学部・教授

研究者番号: 00251330