

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2007～2008

課題番号：19340115

研究課題名（和文）準巨視的量子重ね合わせ状態の生成・制御・検出技術の研究

研究課題名（英文） Generation, control, and detection of mesoscopic quantum superposition states.

研究代表者

佐々木 雅英 (Sasaki Masahide)

独立行政法人 情報通信研究機構 新世代ネットワーク研究センター
量子 ICT グループ グループリーダー

研究者番号 50359064

研究成果の概要：

連続波スクイーズド状態から任意の時間 t_1 、 t_2 において光子を一個ずつ抜き取る操作を実現し、偶・奇の両パリティのシュレーディンガーの猫状態を自在に生成する技術を開発した。特に、100ns 程度のコヒーレンス時間内で時間間隔 $t_2 - t_1$ を変化させることにより、シュレーディンガーの猫状態の振幅サイズを増強できることを見出し、その機構が 2 つの異なる時間波形モードからの識別不可能な 2 光子抜き取り過程が量子的に干渉に起因すること解明した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	12,500,000	3,750,000	16,250,000
2008 年度	2,400,000	720,000	3,120,000
総計	14,900,000	4,470,000	19,370,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：原子・分子・量子エレクトロニクス・プラズマ

キーワード：量子情報、スクイーズド光

1. 研究開始当初の背景

光の量子効果を用いた情報通信技術は、その難易度から (1) 単一光子レベルの制御、(2) 複数光子の量子もつれの制御、(3) 巨視的量子の制御、の 3 段階に分けられる。単一光子制御は量子鍵配送技術の基礎であり、実用化を狙う段階に近づきつつあるが、現実の IP ネットワークへの適用性についてはまだ多くの検討課題を残している。複数光子の量子もつれ制御は、実験室レベルで 6 光子の量子もつれ状態の生成が可能になってきたが、このような状態は損失に極めて弱くネットワーク展開にはおのずと厳しい限界が存在する。

一方、現実の光ネットワークは、コヒーレ

ント状態を搬送波として構成されている。コヒーレント状態は光子のボーズ・アインシュタイン凝縮状態であり、伝送損失があっても純度が劣化しない理想的搬送波の状態である。現在の光通信は、コヒーレント状態とそれに対するガウス操作によって成り立っている。一方、最新の量子情報理論

(V. Giovannetti, et al., Phys. Rev. Lett. 92, 027902 (2004)) によると、与えられた電力制限の下で究極の通信路容量を達成する方法は、送信側でコヒーレント状態に稠密変調を施して符号化し、受信側ではコヒーレント状態にいったん量子計算処理を施してから測定を行って情報を復号するというものである。つまり量子制御は送信側では不要

で、受信側でこそ求められる。その過程では、コヒーレント状態やスクイーズド状態などのガウス状態からなる巨視的重ねあわせ制御が必要でありであり、上述(3)の最も難易度の技術に相当する。その第一歩となる巨視的重ねあわせ状態の生成は 2006 年に、シャルル・ファブリ研究所、ニールス・ボーア研究所、情報通信研究機構で成功した。

2. 研究の目的

スクイーズド光に光子検出による測定誘起型非線形操作を施して準巨視的量子の重ねあわせ状態を自在に生成する技術及びそれらの状態を検出し評価する手法を開発する。

3. 研究の方法

進行波のシュレーディンガーの猫状態は、図 1 のようなスキームで生成できる。まずスクイーズド光の一部（数%）を高透過率のビームスプリッターごとにわずかに分岐させ、2つの光子検出器へと導く。分割されたビームには量子エンタングルメントが形成されており、光子が検出されたときのみ透過モードを観測することで高い非線形効果を誘起でき、シュレーディンガーの猫状態が生成される。光子検出イベントをトリガーとして透過光にはホモダイン測定を行い、量子トモグラフィを実行することで、量子状態のウィグナー関数が再構成される。

この実験で用いるスクイーズド光は連続波であり、直感的には指数関数型の波束 $\psi(t)$ の連続した系列とみなせる。各光子検出器での光子検出時間を t_1 、 t_2 とすると、これらの光子検出イベントをトリガーとして透過光には2つの波束 $\psi(t-t_1)$ 、 $\psi(t-t_2)$ が選択される（図 1(a)）。この2つの波束は、一般に重なっており非直交モードであるが、線形結合を取って直交する対称、反対称モード $\Psi_+(t)$ 、 $\Psi_-(t)$ を構成できる（図 1(a)の上のモード波形）。

偶パリティのシュレーディンガー猫状態は、この対称モード $\Psi_+(t)$ に生成される。 $\Psi_-(t)$ には、わずかな光子数しかふくまれないが、4章で述べるように重ね合わせ振幅増強を行う際に重要な補助モードとして利用される。

一方、もともとの2つの波束 $\Psi(t-t_1)$ 、 $\Psi(t-t_2)$ には、それぞれには奇パリティのシュレーディンガー猫状が生成されている。ホモダイン測定では、ホモダイン電流にこれらのモード関数によるフィルタリングを掛けることによって、所望の重ね合わせ状態にアクセスすることができる。

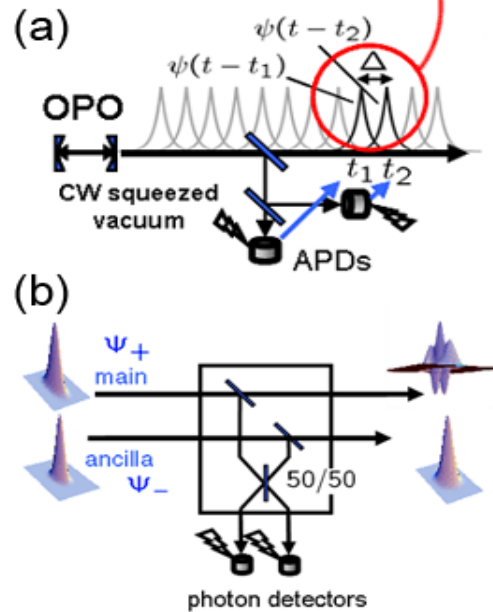
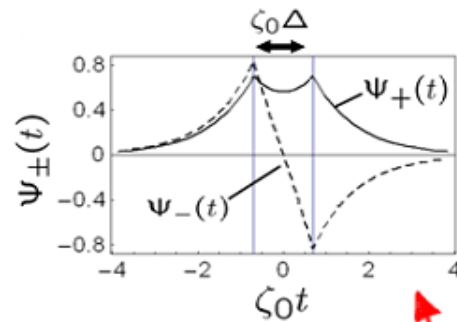


図 1 「2 光子抜き取り操作による」シュレーディンガーの猫状態生成と補助状態によるサイズ制御。

(a) CW スクイーズド光と時間モード。(b) 等価的な 2 モードモデル。

4. 研究成果

連続波スクイーズド光のコヒーレンス時間内は 100ns 程度であるが、この範囲でトリガー光子の検出時間間隔 $\Delta = t_2 - t_1$ を徐々に伸ばすことによって、偶パリティのシュレーディンガー猫状態の振幅サイズを増強できることを見出した。

その機構は以下のように理解される[雑誌論文 1-2]。図 1(a)での 2 光子抜き取り操作では、互いに直交する対称モード $\Psi_+(t)$ 、あるいは反対称モード $\Psi_-(t)$ のいずれかのみから 2 光子が抜き取られる。図 1(b)はこれをわかりやすく 50/50 ビームスプリッターを用いた空間モードのモデルで等価的に表したものである。光子のボーズ統計性によりそれ以外

の可能性は排除される。ただし、対称、反対称モードのどちらから抜き取られたかは、量子力学的に全く識別不可能である。

この量子力学的識別不可能性は、 $\Psi_+(t)$ 、 $\Psi(t)$ の 2 モード空間上の重ね合わせ状態を生成させる。重ね合わせ状態の 2 つの成分の比重は、トリガー時間間隔 Δ に依存する。ここで、 Δ を徐々に増やすと、補助モード $\Psi(t)$ の光子数もわずかに増加するが、その増加分が、メインの信号モード $\Psi_+(t)$ では、少数光子成分を抑圧するように働き、結果として信号モード $\Psi_+(t)$ での平均光子数が増加して、シュレーディンガー猫状態の振幅サイズが増加する。

実験では、2 光子が同時検出されるイベント数は 1 光子検出の確率の約 2 乗で極端に減少するため (数 count/sec)、光学系の位相ロックを長時間安定化させるための制御系の改良などを行った。実験結果を図 2 に示す [雑誌論文 3]。系の不完全性を含めた数値解析ともよい一致が見られ、特に $\Delta = 32\text{ns}$ では、 $|\alpha|^2 = 2.0$ というこれまでで世界最高のサイズの進行波のシュレーディンガーの猫状態を生成することに成功した。特に、このサイズで非古典性の直接的証拠である明瞭な負のウィグナー関数を観測したのは初めてである。

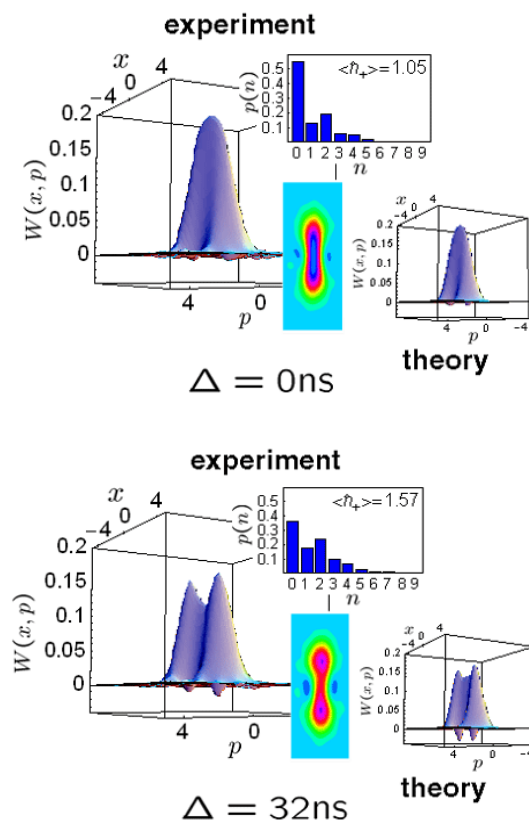


図 2 偶パリティ・シュレーディンガーの猫状態の生成とサイズ制御の実験結果。

< 成果の位置付け >

本成果は、最大のサイズの重ね合わせ状態の生成に成功したことに加え、補助状態との量子干渉を導入した点、連続波光の時間的なマルチモードの構造を初めて積極的に利用した点など、量子光学の物理としても新しい点が多く、世界の実験研究者、理論研究者の双方から注目を集めている。類似研究としては、シャルル・ファブリ研究所のグループにより行われた実験がある。彼らは 2 光子状態に条件付ホモダイン測定を行うことで、 $|\alpha|^2 = 1.2$ 程度離れたスクイーズド状態の重ね合わせ状態の生成に成功している。これは、さらにアンチスクイーミングを施すことでまで増大できることがわかっている。ただし現実的には、光子数状態の生成、条件付ホモダイン測定、アンチスクイーミングを同時に高い精度で行うことは現在の技術では困難だろう。しかし長期的に見れば、それぞれの手法にメリット、デメリットがあり、今後、より複雑な量子情報プロトコルへ応用していく際にどちらの方法が主流となるかは、これからの研究により明らかになっていくものと思われる。

このような技術を集積することによって、ネットワークのノードにおいてコヒーレント光に自在な量子操作を施す量子ノード技術の実現が期待される。これはコヒーレント状態にエンコードされた情報を最大限に取り出す、いわゆる量子符号化や量子最適受信機に関するものであり、我々の理論研究においても、信号受信過程においてスクイーミングと光子検出器を適切に組み合わせることで、現在の光通信技術の理論限界を超える受信感度、通信容量が得られることが強く示唆されている。また、長期的には、各種の非ガウス状態を保存しておく量子メモリも今後の重要課題である。この方向の研究は、現在の光ネットワーク技術の自然な延長上にくる次世代の通信技術の有力な候補として、社会にも大きなインパクトを与える重要なものになると期待される。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 9 件)

1. M. Takeoka, H. Takahashi, and M. Sasaki, "Large-amplitude coherent-state superposition generated by a time-separated two-photon subtraction from a continuous-wave squeezed vacuum," Phys. Rev. A 77, , pp. 062315/1--9, 2008 年 (査読有) .

2. M. Sasaki, M. Takeoka, and H. Takahashi, "Temporally multiplexed superposition states of continuous variables," *Physical Review A* 77, , pp 063840/1--11 2008 年 (査読有) .
3. 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, , pp 233605/1--4, 2008 年 (査読有)
4. 和久井健太郎, 「非ガウス型量子状態の生成について」レーザ学会「レーザ研究」, 36(7), pp 41--420, 2008 年 (査読有)
5. 鈴木重成, 「高レベル・高純粋度のスクイーズド光生成について」レーザ学会「レーザ研究」, 36(7), pp 39--403, 2008 年 (査読有)
6. 武岡 正裕, 「連続量変数の光量子計算と量子情報通信」*光学* 37(12), pp 692--697, 2008 年 (査読有)
7. 和久井 健太郎, 「非ガウス型量子操作によるシュレーディンガーの子猫状態の生成」*光学* 37(12), (査読有), pp 712--715, 2008 年 (査読有)
8. M. Sasaki, "Control of optical continuous variable systems using photon counting and feedforward," *Proc. of The 8th International Conference on Quantum Communication, Measurement and Computing(QCMC2006)* Vol.1, pp 469--474, 2007 年 (査読有)
9. M. Takeoka, and M. Sasaki, "Conditional generation of an arbitrary superposition of coherent states," *Phys. Rev. A* 75(2), pp 064302/1-4, 2007 年 (査読有)
- [学会発表] (計 11 件)
1. M. Sasaki, "Ancilla-assisted control of quantum superposition states of continuous variables," (Invited Talk) SPIE Photonics West, OPTO 2009, San Jose Convention Center, San Jose, USA, 2009 年 1 月 28 日.
2. M. Sasaki, "Quantum superposition states of continuous variables," (Invited talk) UK-Japan Workshop: Quantum Application, the British Embassy in Japan

Tokyo, Japan, 2009 年 1 月 22 日.

3. M. Takeoka, "Generation of optical Schroedinger cat-like states and classical-quantum channel coding," Workshop on topological cluster state computing in optics, The National Institute of Informatics (NII), Tokyo, Japan, 2008 年 12 月 11 日.
4. H. Takahashi, "Generation of large-amplitude coherent-state superposition via ancilla-assisted photon-subtraction," 2008 International Symposium on Physics of Quantum Technology, Nara Prefectural New Public Hall, Nara, Japan, 2008 年 11 月 25 日.
5. 佐々木雅英, 「量子情報通信の概要」(招待講演), 第 75 回テレコム技術情報セミナー, コクヨホール, 東京, 2008 年 10 月 24 日.
6. 佐々木雅英, 「連続量量子情報」(招待講演), 第四回量子情報未来テーマ開拓研究会, ホテルサンライズ知念, 南城市, 沖縄, 2008 年 9 月 11 日.
7. M. Sasaki, "Temporally multiplexed Schroedinger kitten states," (Invited talk), The Ninth International Conference on Quantum Communication, Measurement and Computing (QCMC2008), The University of Calgary, Canada, 2008 年 8 月 21 日.
8. M. Sasaki, "Control of Superposition States of Continuous Variables by Photon Counting and Filtering with cw Squeezed Light," (Invited talk), 3rd International Conference on Quantum Information (ICQI), Boston Marriott Copley Place, Boston, Massachusetts, USA, 2008 年 7 月 14 日.
9. M. Sasaki, "Generation and control of flying Schroedinger kitten states," (Invited talk), The Fourth Asia Pacific Conference in Quantum Information Science (APCQIS), Cairns, Queensland, Australia, 2008 年 7 月 4 日.
10. H. Takahashi "Demonstration of 2-photon subtraction from a squeezed vacuum," SPIE Optics East, Seaport World Trade Center, Boston, Massachusetts, USA, 2007 年 9 月 12 日.
11. M. Sasaki, "Non-Gaussian control of

continuous variables with photon counting and filtering (Invited talk), " SPIE Optics East, Proc. of SPIE Optics East, pp 678006/1--8, Seaport World Trade Center, Boston, Massachusetts, USA, 2007年9月10日.

〔図書〕 (計0件)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計0件)

○取得状況 (計0件)

〔その他〕

6. 研究組織

(1) 研究代表者

佐々木雅英 (SASAKI MASAHIDE)
独立行政法人 情報通信研究機構
新世代ネットワーク研究センター 量子 I
CTグループ グループリーダー
研究者番号 50359064

(2) 研究分担者

(3) 連携研究者