

## 論文の内容の要旨

論文題目 奇数光子状態の重ね合わせに対する  
直交位相振幅スクイーミング操作の研究

氏名 三輪 佳史

本研究では、光の2つの非古典な状態間を直交位相振幅スクイーミング操作で遷移させる実験を行った。入出力状態は、単一光子状態と呼ばれる光子がただ一つだけある状態と、互いに位相の反転した2つのコヒーレント状態の重ね合わせである。前者は最も粒子的な光の状態であり、後者はレーザー光の状態であるコヒーレント状態が電磁場に正弦波の波形を持つので波動性を持った状態である。光子数の観点ではいずれも奇数光子状態の重ね合わせであり、位相空間上の準確率密度関数である **Wigner** 関数で表現すると負の領域を持ちかつ非ガウスであることから非ガウス型非古典状態と呼ぶことができる。

スクイーミング操作は光子間に相関を持たせる基本的な量子操作である。波動描像ではその名の通り、直交位相振幅の一方がスクイーミング(圧搾)され、他方が増幅される操作である。一方で粒子描像では、2光子生成・消滅の繰り返しであり、光子数の偶奇性を保ったまま光子数分布を変化させる。実験では広帯域でかつロスが少ないスクイーミング操作を行う必要があり、技術的に難しい。まず、広帯域が必須なのは、入力状態である非ガウス型非古典状態が光子検出を用いることでしか生成できないため、十分な頻度で生成するためには帯域を広くするしかないためである。また、ロスの軽減は、一般に非古典状態を扱うためには必須で、本研究では奇数光子の光からロスして偶数光子との混合を抑える。本研究ではロスが少ない万能スクイザー[1]を広帯域化した。実験結果の評価では、状態間の遷移とスクイーミング操作の特徴とを確認した。

スクイーミング操作は任意の量子状態操作に必須の操作の一つであり、量子もつれ操作に用いられる多モードガウス型操作を構築できる [2]。すでに多モード操作に応用が行われていて、それらに非ガウス型非古典状態を組み込むことを可能にした。非ガウス型状態を操作できたことは量子計算の観点でも重要である。ガウス型操作+ガウス型状態では単に可能な量子計算が制限されるだけでなく、古典コンピュータで多項式時間内にシミュレート可能であることから、古典計算に対する優位性を確保できないことが指摘されているためである [3]。

広帯域スクイザーの重要な応用としては、3次位相ゲートの実現がある。3次位相状態とスクイザーで構成できる。用いられる3次位相状態はまだ生成されていないものの、原理上、光子数検出を用いて生成される [4]。そのためスクイザーも広帯域である必要がある。

以下では、実験に関する理論、実験方法、実験結果についてそれぞれ概説する。また、概

要では省略するが、狭帯域のスクイザーを組み合わせた実験として量子増幅器、量子クローニング、量子消去も行った。

#### 理論：

本実験では量子情報の担い手として、光学定盤上の空間を伝搬する単一モードの光を用いている。具体的には、偏光と空間モードはともに単一で、光源の周波数の回り 10MHz 程度の帯域の波束を用いる。単一モードは強度と位相の自由度 2 の系であり、1 次元の調和振動子と等価である。

最も粒子的な光の状態といえるのは、単一光子状態  $|1\rangle$  であり場の第一励起状態である。エネルギーの固有状態であるため、その振幅の分布は位相に依らない。また第一励起状態であり、振幅 = 0 に分布の節を持つ。

逆に最も波動的な状態はレーザー光の状態であり、電磁場が正弦波の波形を持つ。この波形ゆえに共振器や干渉計で干渉を示す。レーザー光の状態はコヒーレント状態  $|\alpha\rangle$  と呼ばれ、光子数状態をポアソン分布に従う重みで重ね合わせた状態である。振幅の平均値は正弦波になり、分散は位相に依らず一定である。

コヒーレント状態を重ね合わせると波動的かつ非古典な状態になる。これはコヒーレント状態の重ね合わせ (CSS: Coherent State Superposition) と呼ばれ、状態ベクトルでは  $|\text{CSS}\rangle \propto |\alpha\rangle + |-\alpha\rangle$  で表される。その振幅の波形はコヒーレント状態 2 つを足したものに似るが、状態間の干渉によって交点に節ができる。光子数描像ではコヒーレント状態の偶数光子状態の項が打ち消され奇数光子状態の重ね合わせとなる。

実験では単一光子状態とコヒーレント状態の重ね合わせとの間の変換をおこなった。この変換にはスクイージング操作  $\text{Sq}(\gamma)$  を用いた。波動描像では直交位相の振幅が増幅あるいは圧搾される。光子数描像では 2 光子生成と 2 光子消滅の繰り返しである。

具体的には以下の仕組みである。弱いコヒーレント状態の重ね合わせはスクイーズド光  $\text{Sq}(\gamma) |0\rangle$  から 1 光子を引くことによって生成できる  $a \text{Sq}(\gamma) |0\rangle$  によって近似できる [5]。この状態は単一光子状態をスクイーズした状態  $\text{Sq}(\gamma) |1\rangle = \text{Sq}(\gamma) a^\dagger |0\rangle \propto a \text{Sq}(\gamma) |0\rangle$  と同じである。逆に弱いコヒーレント状態の重ね合わせをスクイーズすることで  $\text{Sq}(\gamma) a \text{Sq}(-\gamma) |0\rangle \propto a^\dagger |0\rangle = |1\rangle$  となって単一光子状態が得られる。ここで  $a$ ,  $a^\dagger$  は光子の生成消滅演算子である。

#### 実験：

実験系は図 1 のように入力状態の生成、スクイザー、出力状態の評価となっている。

入力状態生成の部分は茶の実線で囲まれた単一光子状態生成系 [6]、茶の点線で囲まれたコヒーレント状態の重ね合わせ生成系 [7] のどちらにも変えることができる。いずれも光パラメトリック発振器 (OPO-1) で生成される相関した光子対を用い、一方の光子の存在を avalanche photo diode (APD) で観測することで、他方の光子検出に対応する波束に非古典状態が生成される。

スクイザーの部分はまず、ビームスプリッターでスクイーズド光と入力モードとを合波

する。ここで、スクイズド光が入力モードと別々に用意されているので、入力光を直接非線形光学素子に入射する必要がなくロスを避けることができる。ある位相については分散の少ないスクイズド光と合わさったことでスクイズされる。一方、直交する位相についてはスクイズド光が大きな分散を持ち入力状態を覆い隠している。続いて、ビームスプリッターの出力モードの一方を測定し、他方にフィードフォワードすることでスクイズド光の大きな分散の成分を打ち消し、また交換関係の保存から入力状態の成分が増幅される。

出力状態の評価には量子トモグラフィを用いた。特に、ホモダイン測定を用いるのでホモダイントモグラフィと呼ばれる。ホモダイン測定をしながら LO 光の位相をスキャンすることにより、各位相に対する振幅の分布を測定する。この周辺分布から光子数分布や Wigner 関数を計算するために最尤推定を行った [8]。本実験では光子検出の時のみに非ガウス型非古典状態が得られるので、光子検出をトリガーとして光子検出時間付近の信号波形を 10 万点程度蓄積していった。

#### 結果：

その結果は図 2 のようになった。入力状態は周辺分布は位相に依らず振幅 0 に節を持つ分布になった。これは理想的な単一光子状態とよく対応している。光子数の描像では 84% の純度の単一光子状態であった。文献[6]の 63%と比較して大幅に改善した。

スクイズした結果がその右の 3 列である。左から  $T=0.59, 0.48, 0.26$  の実験結果であり、スクイーディングレベルが順に強くなっていく。振幅については 2 つの正弦波の波形に沿って分布が濃くなっており、これらは位相の反転した 2 つのコヒーレント状態に対応している。また、2 つの波形がクロスする部分は分布が薄くなっており、コヒーレント状態が重ね合わせられた時の状態間の量子論的な干渉を再現している。

Wigner 関数については、スクイーディング操作の名前の通り  $x$  軸の方向に圧搾され逆に  $p$  軸の方向に引き伸ばされている。また入力状態も出力状態も Wigner 関数に負の部分を持っていることから、非古典性を維持しつつスクイーディング操作ができたと結論する。

また、コヒーレント状態の重ね合わせをスクイーディングして単一光子状態とする実験も同じ同様に成功した。

#### 参考文献：

- [1] J. Yoshikawa, *et.al.*, Phys. Rev. A **76**, 060301(R) (2007).
- [2] S. L. Braunstein, Phys. Rev. A **71**, 055801 (2005).
- [3] S. D. Bartlett, *et.al.*, Phys. Rev. Lett. **88**, 097904 (2002).
- [4] D. Gottesman, *et.al.*, Phys. Rev. A **64**, 012310 (2001).
- [5] A. P. Lund, *et.al.*, Phys. Rev. A **70**, 020101(R) (2004).
- [6] J. S. Neergaard-Nielsen, *et.al.*, Opt. Exp. **15**, 7940 (2007).
- [7] K. Wakui, *et.al.*, Opt. Exp. **15**, 3568 (2007).
- [8] A. I. Lvovsky and M. G. Raymer, Rev. Mod. Phys. **81**, 299 (2009).

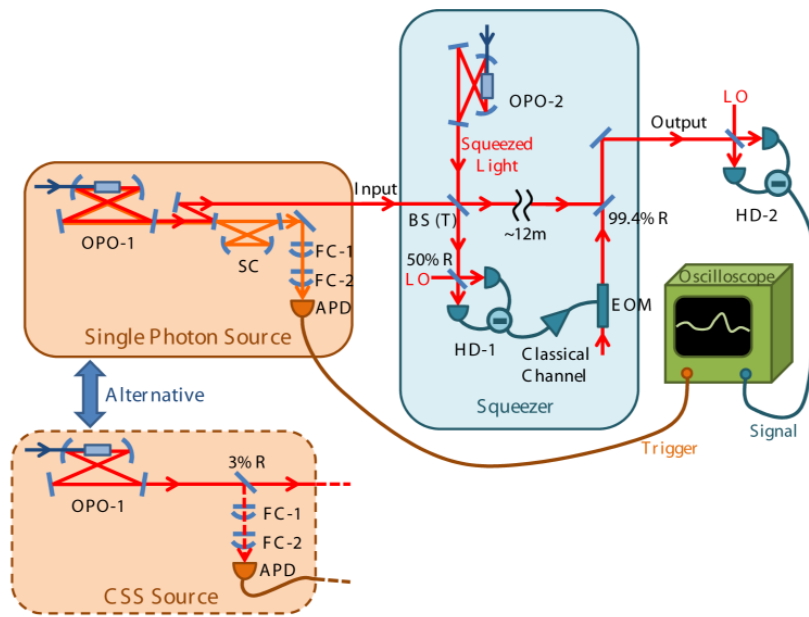


図1 実験系の概念図。OPO: 光パラメトリック発振器、SC: 光子対分離共振器、FC: フィルター共振器、APD: avalanche photo diode、BS: beam splitter、LO: 局部発振光、HD: homodyne detector、EOM: electro-optic modulator.

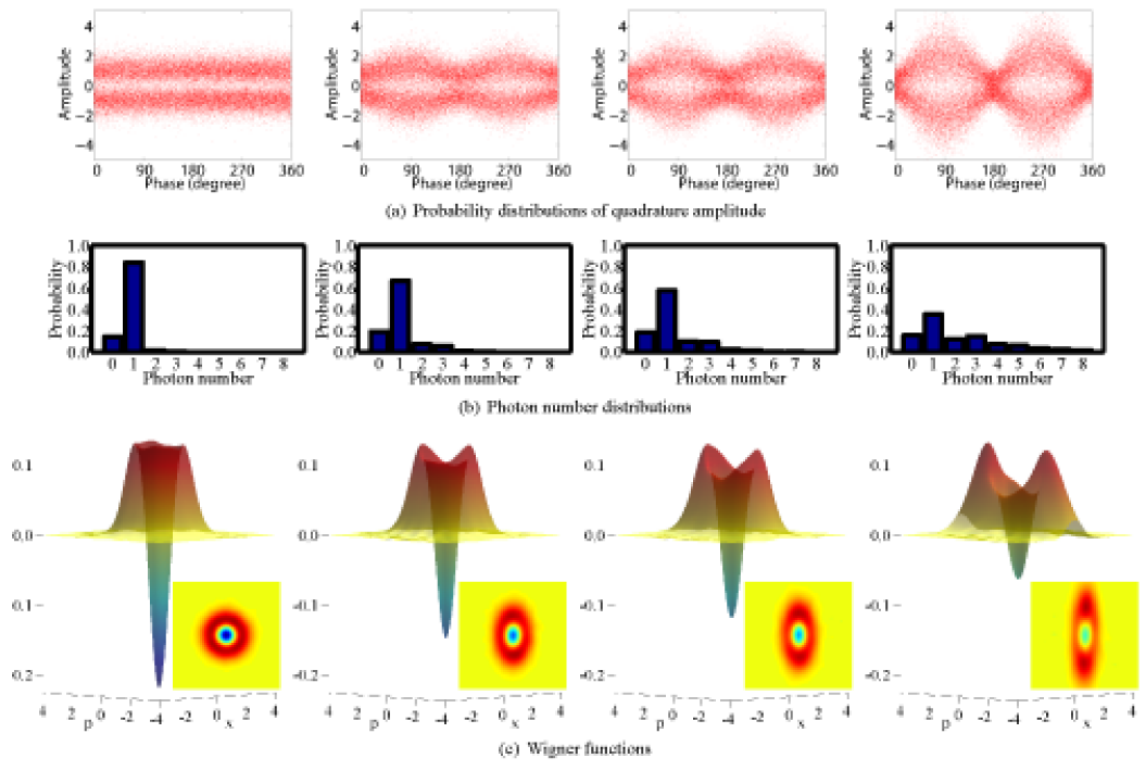


図2 単一光子状態に対するスクイーミングの実験結果。左から入力状態、それぞれ  $r=0.26, 0.37, 0.67$  のスクイーミングレベルでスクイーズした出力状態である。