

論文の内容の要旨

論文題目 二光子検出による非ガウス状態の生成と連続量量子エンタングルメント蒸留に関する研究

氏名 高橋 優樹

(本文) 本研究では、スクイズド光と呼ばれる非古典光を資源に光子検出とホモダイン検波を組み合わせて新奇な光の状態を生成し、測定評価した。その結果、二つの主要な実験成果を得た。一つは、スクイズド光に 2-photon subtractionと呼ばれる操作を施すことでシュレディンガーの猫状態と俗称される非常に非古典性の高い光の状態を実現したことである。他方の実験ではこの 2-photon subtractionの手法をやはりスクイズド光をもちいた 2-modeの系に援用することで、その系の量子纏れを増加させることに成功した。以下、これら2つの実験のおおのについて述べる。

1. 2-photon subtractionを用いたシュレディンガーの猫状態の生成

量子光学において”シュレディンガーの猫状態”(以下猫状態)とは、位相が互いに180度だけずれた二つのコヒーレント光の重ね合わせ状態のことを指す。特に構成するコヒーレント光の振幅値が大きい値をとる場合、この猫状態は古典的な状態からはかけ離れた状態となり、その違いは位相空間におけるWigner関数の振る舞いに顕著に反映される。このような状態は量子力学に於ける量子・古典境界の探索の見地などから80年代から注目を集めた。また、最近ではこれらの状態の量子情報処理における応用が発見され、実験的にこれらの状態を構成することがついに望まれるようになった。しかし、このような猫状態を生成するには巨大な非線形効果を極めて低損失な環境で引き起こす必要があり、唯一共振器QEDにおけるリドベルグ原子との相互作用を利用してマイクロ波領域の共振器場について報告がある限りである。一方で、エンタングルメントを介して射影測定の効果を実験的に非破壊的に利用し、実効的に非線形な状態変化を実現するという方法が知られている。本研究の主題であるphoton subtractionはまさにこの手法にのっとり顕に高次の非線形過程を利用せず、線形光学素子と測定を組み合わせることで猫状態またはそれに付随した状態を生成する。photon subtractionはその名が示す通り光子を引き抜く過程に相当するが、具体的には、スクイズド光のごく一部をビームスプリッターによる反射で取り出し、その部分に光子数測定を施すことでビームスプリッターの透過側の状態に変化を引き起こす。光子数測定の結果によって、生成される猫状態の振幅は変化するが、加えて光子数測定の結果の偶奇によって猫状態の光子統計性も変化する。すなわち、反射側で偶数個の光子が検出された場合は偶パリティの猫状態が生成

され、奇数個の光子が検出された場合は奇パリティの猫状態が生成される。本研究以前においてすでに一光子検出をもちいたphoton subtraction、すなわちsingle-photon subtractionの成功例が数件報告されていた。この場合は、先の対応から奇パリティの猫状態に相当する状態が生成されたことになる。この度、我々はこの手法を二光子検出に拡張し、すなわちスクイーズド光からの 2-photon subtractionを実現し、偶パリティの猫状態を生成することに成功した。single-photon subtractionからの基本的な変更点は光子検出の部分で、一台の検出器が使われていたところを二台の検出器の同時検出に置き換えるだけであるが、実験としては検出頻度が 1/1000 程度になるため格段の安定性が求められる。また、一光子検出から二光子の検出になったことでこれら二光子のおのおのが検出される時刻の時間差という新たな自由度が現れる。さらに、我々はこの時間差が生成される状態を本質的に変化させるということを見出した。検出される二光子の間に有限の時間差があると実効的に二つの独立な時間モードが励起され、そのどちらかから二光子が引かれるという状況ができる。そして、実際そのどちらかから光子がひかれたのかということは量子重ね合わせの意味で不確かとなっている。この事実は、生成される状態をこれらの時間モードで見た際に新たな重ね合わせの状態に置く。この効果を利用すれば二光子検出の時間差を選ぶことで、生成される状態の重ね合わせの具合を調節でき、猫状態の振幅を増やすことが可能となることがわかった。我々は、この時間差をふりつつ 2-photon subtractionの実験を行い、生成された状態をホモダイントモグラフィーで再構成した。そして、実際に時間差によって猫状態が変化することを確認した。結果として、時間差が 32nsの場合に、振幅値が 1.4 の猫状態に対応する状態を観測した。これは今まで、進行波で観測された猫状態としては最大の振幅値を持つものである。

2. photon subtractionを用いた連続量量子エンタングルメント蒸留

エンタングルメントは量子情報処理の根幹をなすものである。特に、量子通信の分野では離れたパーティーの間で純度の高いエンタングルメントを共有することがしばしば必要となる。例としては、量子暗号通信やそれに付随した量子中継器がある。またほとんどの場合、通信の手段としては光を用いた通信路が用いられる。しかしながら、通信路における不可避の損失のためにエンタングルメントはその分配の過程で必ず劣化してしまう。そのため、分配後にエンタングルメントの純度を取り戻す”エンタングルメント蒸留”と呼ばれる手続きが考案され、研究されている。エンタングルメント蒸留では、複数の劣化したエンタングルド状態に対してそれらを保有するそれぞれのパーティーで局所的に量子操作を行い、またパーティー間で古典通信を行うことで少数のよりエンタングルしたペアを取り出す。qubitを用いた系においてはエンタングルメント蒸留の実証実験はすでに複数件行われているが、一方連続量系ではいまだに本質的な実証は報告されていない。それは、連続変数系ではガウス操作のみによりガウス状態のエンタングルメントを上昇させることが不可能であるため、その実証には実験的により困難な非ガウス操作が必要となるためである。今回我々は、1で確立したphoton subtraction

の手法を2モードのガウス状態に適用し、その前後でのエンタングルメントの量を測定した。まずスクイズド光を50/50のビームスプリッターで分割することで2モードのエンタングルした状態を作る。スクイズド状態はガウス状態の一種であるので、分割して生成される状態もガウス状態となる。この2モードのおのおのから一光子を引き抜くとその作用により2モードにわたる非ガウス状態が生成される。さらに理論計算から、あるスクイーミングの領域においてはこの過程の前後で2モードの状態が有するエンタングルメントの量が増加することが示される。今回我々はそれを実証すべく実験をおこなった。実験系は2モードの片方に関しては以前の2-photon subtractionのものを流用し、それと対称的にもう片方のモードのための光学系を準備した。この実験においては2モードの状態のトモグラフィーが必要となる。シングルモードの場合と比べて2モードの状態の空間は次元が高いため通常であれば必要となるデータの量は急激に多くなるが、今実験の場合は状態のもつ対称性のためにそのデータ量を抑えることができ、結果として測定に要する時間をシングルモードの実験と同程度にすることが可能となった。ただし、二箇所のホモダイン検出においてそれぞれの位相を同調しつつ独立にロックし、なおかつそれらのロックのポイントを任意に設定できる必要があった。これらを従来のアナログ回路で実装すると実験上の手続きが非常に煩雑になってしまうので、FPGAを導入しPCから適宜コントロールできるようにした。この作業は、実験の負担を減らすとともに誤りを防ぎ、手順だっただけの実験を進めることを可能にした点で実験そのものの成功に大きく寄与したと言える。これらの準備の後、光子検出で条件づけられた状態のトモグラフィーを行い、エンタングルメントのネガティビティの計算を行った。その結果、photon subtractionによるエンタングルメントの上昇を確認した。