

論文の内容の要旨

論文題目

スクイーズド光と光子検出器を用いた準巨視的重ね合わせ状態の生成・制御に関する研究

氏名 和久井 健太郎

ボソンによる量子情報処理は、これまで主に光の分野において目覚ましい発展を遂げてきた。これらは2つの領域に大別することが可能であり、1つは qubit を初めとする離散変数が情報処理の担い手となった、離散量量子情報処理と呼ばれる領域である。ここでは光子の持つエネルギーの離散性が有効活用されており、現在の光量子情報処理の主流となっている。もうひとつの大きな流れが連続量量子情報処理と呼ばれる領域である。こちらでは直交位相成分と呼ばれる連続変数が情報処理の基底として用いられているため、光の波動性を積極的に生かした領域であると言える。これらはそれぞれ異なる基底を用いており、例えば量子テレポーテーションのようなプロトコルに関して言えば、質的には異なるものの、双方の領域において高精度な実験実証がなされている。

これら光の量子情報処理に関して重要な役割を果たすのが量子エンタングルメント、もしくは量子もつれと呼ばれる非局所的量子相関である。ある系が量子エンタングルメントを持つ場合、その2つ以上の部分系はエネルギーや直交位相において互いに非局所的量子相関を持つ。このような非局所相関は、実験的には非線形光学効果を用いて実現可能であり、例えば2次の非線形光学効果を用いたパラメトリック過程は、単一光子レベルでのもつれ合いやスクイーズド光を生成するために有効な手段であることが知られている。このパラメトリック過程を用いた量子もつれ光源は、尖頭値の大きいパルス光を用いる手法や、光共振器を用いて光電場を増幅する手法によって実現されている。本研究においても、高純度のスクイーズド光の生成のため、光共振器を用いた縮退パラメトリック過程が活用されている。

一方、光の連続量量子情報処理の領域において、量子情報処理の可能性を最大限に引き出すためには、3次以上の非線形性が必須であることが近年明らかになってきている。これは以下に例示した定理を初めとする、幾つかの重要な定理からの要請である。

1. 量子エンタングルメント抽出に関する不可能定理：伝送路の損失等のため部分的に壊れた連続量量子エンタングルメントを、2次までの非線形性を用いた物理過程で回復させることは出来ない
2. 量子ゲート操作に関する定理：3次以上の非線形相互作用が利用できれば、連続量量子情報処理の任意の基本的ゲート操作が可能になる

以上は連続量の量子情報処理において大変重要な定理であり、実用まで見据えた場合、長い道のりの中で避けて通れないポイントとなることは間違いない。ところが、単一光子レベルの信号に関して、そのような高次の非線形光学過程を直接実現するような非線形光学材料は、未だ現在知

られていない。その代わりに近年最も注目されているのが『測定誘起型非線形過程』と呼ばれる手法であり、これが本研究の中心となる概念である。

この手法においては、一連の過程の中に

- ・ 状態の生成：光子検出器による離散的エネルギーの測定
- ・ 状態の測定：ホモダイン検波による連続的位相分布の測定

という二つの要素が含まれており、実はこれまで殆ど相容れてこなかった離散量と連続量、双方の技術を統合的に制御する技術が必要となる。この新しい技術を実験的に開発することが本研究の目的であり、この技術は、光を用いた量子情報処理の潜在能力を最大限に引き出すため、必ずや将来的に役立つものになるであろう。

測定誘起型非線形過程とは、量子もつれと光子検出器の性質を用いて、実効的に強い非線形過程を誘起する手法である。この過程を実現するための最も簡単な配置は以下の通りである。まず入力量子状態がビームスプリッターで分割され、もつれ合い状態が生成される。量子もつれはその部分系が非局所的相関を持っているため、そのうちの片方を光子検出器で測定すると、その測定結果に応じてもう片方の量子状態が非局所的に変化するという効果が生じる。ここで、光子数を識別する測定や光子の有無を判別する測定は一般に光子数への射影測定となっており、この離散量への射影が非常に強い非線形性を誘起するため、残った状態は非線形な状態変化を受ける。

この一連の過程では、光子検出器で測定した状態は壊れてしまい、またその操作自体も確率的なものであるというデメリットがあるものの、単一光子レベルでの高次の非線形過程を実現できるため近年大きく注目されている。この新規的な領域の中で、最近になり実験的に最も盛んに研究され始めたのが、『シュレーディンガーの子猫状態』と呼ばれる準巨視的重ね合わせ状態の生成に関するものである。

巨視的重ね合わせ状態は、量子光学的にはコヒーレント状態の重ね合わせ(coherent superposition state : CSS)として記述される。これは、永らく量子力学のパラドクスであったシュレーディンガーの猫のパラドクスから俗にシュレーディンガーの猫状態とも言われ、これを光の進行波モードで生成するのが量子光学における積年の夢であった。そして、シュレーディンガーの猫状態そのものではないものの、この状態に非常に近いといわれているのが、シュレーディンガーの子猫状態と呼ばれる奇数光子の重ね合わせ状態である。

この状態は、先述の測定誘起型非線形過程の原理をスクイズド状態と光子検出器からなる系に適用することにより、原理的に生成可能であることが知られてきた。より具体的には、縮退パラメトリック過程により生成されるスクイズド光からアバランシェフォトダイオード(APD)を用いて近似的に光子を1つ抜き去ることで、位相空間において準巨視的に識別可能な二つのピークを持つ状態が生成される。この状態は、その生成のメカニズムから、『光子が除去されたスクイズド状態(photon-subtracted squeezed state : PSS)』とも呼ばれている。

この状態の生成に関して、2006年になって実験成功の報告が相次いだ。最初のグループはフ

ランス CNRS のグループで、次に続いたのがデンマークの Neels-Bohr 研究所のグループであった。我々のグループ(情報通信研究機構、東京大学)でも独自にこの状態の生成に取り組んでおり、世界初の原理実証は叶わなかったものの、世界で 3 番目に、先行の 2 研究を凌駕する高品質の状態を生成することに成功した。

生成された状態の特性は Wigner 関数と呼ばれる擬似確率分布で評価でき、これが大きな負の値を取るほど非古典的性質が強いとされる。この負の値は系の損失にきわめて弱いため、これを直接観測するのは技術的に大変困難であった。我々のグループでは系全体の損失を低く抑えることに加え、非線形結晶として標準的に用いられていたニオブ酸カリウム (KNbO_3) とは異なる、非常に光学損失の小さい周期分極反転燐酸酸化チタンカリウム (Periodically-Poled KTiOPO_4 : PPKTP) を採用することにより、それまでに報告されている値 ($W(0, 0) = -0.026 + 0.012$) より 3 倍以上大きな負の値 ($W(0, 0) = -0.091 + 0.011$) を持った状態を観測することに成功した。

例えば量子テレポーテーションにおいてこのような状態を伝送しようと試みたとき、伝送路における損失に打ち勝ち出力側でも負の部分を確認するためには、入力としてできるだけ負の値の大きい状態が必要となろう。今回得られた負の値は、実験的な効率を考慮した場合の限界値に近く、量子テレポーテーションで非古典性を伝送する際の強力な武器となることが期待される。

またシュレーディンガーの猫状態には、『-(マイナス)』と『+(プラス)』のパリティを持つ相補的な 2 種類の状態が存在する。上述の、スクイズド光から 1 光子を除去した子猫状態が『マイナス』のパリティの猫状態に対応しているのに対し、『プラス』に対応する状態は、スクイズド光から引き去る光子の数を 1 つから 2 つに増やすことにより生成可能である。これは、実験的には光子を引き去るための APD の数を 2 個に増やし、それらの同時計数信号を状態生成のトリガとして用いることで実現できる。ただし光子を 2 個同時に検出する場合、単一光子検出の場合と比較して検出確率が遥かに下がるため、1 個除去するケースより実験的な難しさが飛躍的に増大する。我々のグループでは、実験系全体の長時間安定性を向上させることにより、このプラスのパリティを持つ子猫状態に関しても、つい先ごろ世界で始めて生成に成功した。

これら正負のパリティを持つ 2 つの準巨視的重ね合わせ状態を生成・準備できたことは以下の点で非常に大きな意味がある。

- ・さらに巨視的な重ね合わせ状態を生成するための、"猫の育成"プロトコルへの応用
- ・これらの重ね合わせ状態を基底とする光の量子計算への応用

また、現在提案されているエンタングルメント抽出実験の手法を初めとして、量子もつれ光源と 2 光子除去の組み合わせが実現する量子プロトコルのバリエーションは非常に多彩であり、この一連の実験は、それらのための要素技術の開発という意味でも大変意義深いものであると言える。