

## 論文の内容の要旨

論文題目 非ガウス型状態の時間領域量子テレポーテーションの研究

氏名 竹野 唯志

量子情報処理や量子情報通信の分野は近年盛んに研究が行われており、量子力学に特有な「状態の重ね合わせ」や「量子エンタングルメント」などの性質を積極的に用いることで従来の古典力学の枠組みでは達成できない高速計算や大容量通信、原理的に盗聴不可能な通信など、様々な応用の実現が期待されている。その中でも量子テレポーテーションは特に重要なプロトコルであり、量子ネットワークや量子計算の実現に重要な役割を果たす技術であるとして注目されている。量子テレポーテーションとは、二者間で量子エンタングルメントを共有することによって可能となるプロトコルで、情報のキャリアを直接伝送することなく、古典的な情報通信によって任意かつ未知の量子状態を原理的には完全に伝送することができるというものである。最近になって量子テレポーテーションをベースとした量子計算の手法が提案され、量子テレポーテーションはますます重要な技術として注目されている。

量子情報処理においては扱う物理量によって離散変数と呼ばれる場合と連続変数と呼ばれる場合の二通りがある。離散変数を扱う実験では光子の偏光状態や電子のスピンといった二準位系が用いられる。それに対して連続変数を扱う実験においては調和振動子の位置と運動量といった共役な物理量の組が用いられる。光の実験では直交位相振幅と呼ばれる電場の $\sin$ 成分と $\cos$ 成分に対応する物理量が用いられる。量子テレポーテーションは既にどちらの場合においても実験的に実現されている。また現在までに光の量子状態にとどまらず、原子の量子状態に対する量子テレポーテーションや、光と原子の間での量子テレポーテーションが行われている。

一方、非ガウス型状態は2006年になって相次いで生成に成功したことが報告された。非ガウス型状態を生成するためには3次以上の高い非線形性が必要であることが知られている。しかし単一光子レベルの微弱な信号に対して、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材料は未だ知られていない。その代わりに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る。これは量子エンタングルメントと光子検出器の性質を用いて、実効的に高次の非線形過程を誘起する方法である。光子検出は非ガウシアンな基底への射影測定を行うので、エンタングルした一方の系に対して光子検出を行い、その結果に応じて事後選択することで、他方の系に対して非ガウシアンな状態操作を行うことが可能となる。最近の報告例においてもこの手法が用いられており、偶数光子統計性を持つスクイーズド光からビームスプリッターによって一部取り出し、取り出したモードを光子検出し光子が検出された時にのみ残りのモードを測定する

ことによって奇数光子統計性を持った非ガウス型状態の観測に成功している。この状態は特に「シュレーディンガーの猫状態」というマクロな状態の量子力学的な重ね合わせ状態に近い状態であることが知られている。非ガウス型で非古典的な状態であるだけでなく、量子力学の黎明期に思考実験として提案された状態がようやく実現されたという意味においても重要な進歩であったと言える。

本研究では光の直交位相振幅に対する量子テレポーテーションを、上記の例と同様にして生成した非ガウス型状態に対して実現した。前述のように非ガウス型状態を生成するためには光子検出を行う必要がある。そのために非ガウス型状態のモードは光子検出の時刻周辺に局在しており、時間領域でのみ定義される。ところがこれまでに報告されてきた量子テレポーテーションの実験においては光のサイドバンドの狭帯域な成分でモードが定義されており、周波数領域でのみ量子テレポーテーションが実現されてきた。したがって非ガウス型状態を転送するためには量子テレポーテーションを時間領域で行えるようにする必要がある。

さて連続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非ガウシアンな状態操作が必要とされており、量子テレポーテーションをベースとした量子計算のスキームにおいては非ガウシアンな基底での測定を行うことによって、または補助入力に非ガウス型状態を用いることによって達成される。前者は任意の状態に対して非ガウシアンな基底での測定を行うことが実験上の困難となることが予想される。後者は非ガウシアンな特性を状態準備に押し込めることができるという点で有利であると考えられる。したがって量子テレポーテーションで非ガウス型状態を扱えるようにすることは量子計算のユニバーサルティを目指す上で重要であると言える。本研究では「シュレーディンガーの猫状態」に近い状態という特定の状態を扱ってはいるものの、量子計算のユニバーサルティへ向けた大きな一歩であると言える。また量子テレポーテーションを含む大規模な実験系に光子検出器を取り入れることを可能としたという点も重要である。以下実験の具体的な内容について述べていく。

量子テレポーテーションにおいて重要な役割を果たす量子エンタングルメントは、実験的には二つのスクイーズド光を直交する位相関係で合わせることで生成することができる。量子テレポーテーション装置の性能は量子エンタングルメントの相関の強さによって決まり、量子エンタングルメントの相関の強さは使用するスクイーズド光のスクイージングレベルによって決まるため、高レベルのスクイーズド光を生成することが重要となる。また本研究で用いた非ガウス型状態の生成には高い純粋度(purity)のスクイーズド光が必要である。したがって本研究においてスクイーズド光は最も重要なリソースであり、高レベルのスクイーズド光と純粋度の高いスクイーズド光という二通りのスクイーズド光の生成が求められる。スクイーズド光生成のためには従来からニオブ酸カリウム(KNbO<sub>3</sub>:KN)結晶が用いられてきた。しかしこの結晶を用いた場合、励起光由

来の吸収などによる大きなロスが発生してしまい、高レベルなスクイズド光も純粋なスクイズド光もどちらも生成が困難であった。我々は周期分極反転燐酸化チタンカリウム(Periodically-Poled KTiOPO<sub>4</sub>: PPKTP)結晶を用いることで、最終的にはどちらの要求も満たすことが可能となった。PPKTP結晶を用いた場合には励起光由来のロスが非常に小さく、純粋なスクイズド光を容易に生成することが可能となった。しかしながら高レベル化を望んだ場合には、ロスの問題が解決されることで新たに観測における位相揺らぎの問題が明らかとなった。つまりこれまではロスの影響で高レベル化が困難であり、位相揺らぎの影響が無視できるレベルであったが、ロスを大幅に低減できたことによって位相揺らぎの影響が支配的になったと言える。観測時に位相揺らぎが存在すると、位相揺らぎの大きさに応じてアンタイスクイズされた成分がスクイズされた成分の測定に混入してきてしまうため、観測されるスクイーディングレベルが目減りしてしまう。この問題は単に測定時のみの問題ではなく、実際にスクイズド光を利用する場合にも効いてくるために解決しなければいけない問題である。本研究ではPPKTP結晶の使用と、位相揺らぎの低減によってスクイズド光の高レベル化にも成功した。

次に高い純粋度のスクイズド光を用いて非ガウス型状態の生成を行った。手法はこれまでに報告されたものを踏襲しているが、時間領域で定義されたモードの低周波成分の寄与の大きさに注目し、レーザーノイズ除去の方法を工夫することでより低周波成分まで測定することで、これまで報告された状態よりもさらに非古典性の強い状態の生成に成功した。

上記で生成した非ガウス型状態を実際に量子テレポーテーションの入力状態とするために、時間領域の量子テレポーテーションを実現した。これまでの量子テレポーテーションが周波数領域のみでしか実現できなかったのは、ディテクターの帯域の問題、古典情報を送るための通信路の問題、位相ロックのための補助ビームに乗った変調信号の問題などによっている。これまでの量子テレポーテーションの実験では全てガウス状態を入力状態としており、状態を周波数領域で定義することが可能であった。したがってこれまでは量子テレポーテーションの装置全体がある特定の周波数成分でうまく動作していればよく、その周波数よりも低周波側や高周波側において量子テレポーテーションは実現されていなかった。本研究ではレーザーノイズの問題でDC付近はフィルタによって除去してはいるものの、量子テレポーテーション装置が非ガウス型状態の帯域全体にわたって同時に正しく動作するように改善した。これによって波束の転送が可能となり、時間領域で定義されたモードを転送できるようになった。この量子テレポーテーション装置に非ガウス型状態を入力し、出力状態においても非ガウシアンな特性を観測した。この非ガウシアンな特性は明らかに光子検出によって誘起されたものである。したがって非ガウス型状態の量子テレポーテーションを実現したと言える。

非ガウス型状態は一般にロスに対して脆弱であるため、本研究を発展させて量子計算を目指していく上ではさらに量子テレポーテーション装置の性能向上を追求する必要

があるが、同時により質の高い非ガウス型状態の生成も必要となる。また今回は「シュレーディンガーの猫状態」に近い状態を使用した。が、どのような非ガウス型状態によってどのような計算が可能となるのかについても今後追求していく必要がある。