

論文の内容の要旨

論文題目 高フィデリティ量子テレポーテーション実験と量子トモグラフィの研究

氏名 米澤 英宏

量子情報処理は、古典力学に基づき構築されてきた情報処理技術を量子力学の枠組みで捉え直すものである。量子力学のもつ特異な性質は、情報処理に新しい道を開き、量子計算・量子暗号・量子通信等様々な応用が期待されている。例えば量子暗号では、量子力学の原理によって安全性が保障された通信(量子暗号鍵配布)が実現出来る。また量子通信では、古典通信路ではリソースが二倍になったとき通信路容量も二倍にしかならないが、量子通信路ではその限界を超えることが出来る(通信路容量の超加法性)。さらには、量子計算では幾つかのアルゴリズム(素因数分解、検索等)に関して古典計算機をはるかに凌ぐ高速計算が達成できる。

これら量子情報処理において重要なリソースとなるのが量子エンタングルメントである。量子エンタングルメントは二つの量子系が個々の量子系の積に分離して記述できない状態を指し、このような状態には非局所的な相関が存在する。つまり、片方の量子系への測定がもう一方の量子系に影響を及ぼすことになる。この量子エンタングルメントをリソースとして用いることで、様々な処理が可能となってくる。その意味で量子エンタングルメントの生成と制御は非常に重要な問題といえる。

量子テレポーテーションは量子エンタングルメントを用いることで達成される、非常に基本的かつ重要なプロトコルである。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で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、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出来る。特に量子テレポーテーションは、量子ネットワークや量子計算機を構成する基本要素に用いることができ、応用上の観点からも重要といえる。

量子テレポーテーションは、まず光による実験が行われ、それに続いて近年では原子間での量子テレポーテーション、光と原子の間での量子テレポーテーションが実現されている。これらの実験は扱う物理量によって離散変数と連続変数に分けられ、特に本研究で扱うのは連続変数の光による量子テレポーテーションである。

量子光学では光の直交位相振幅 x 、 p は消滅演算子の実部と虚部に対応し($a=x+ip$)、位置と運動量のような交換関係($[x,p]=i/2$)を満たす。連続変数の量子テレポーテーションはこのような物理量を対象としている。これまでの実験は主にコヒーレント状態を入力としたものであるが、量子エンタングルメントやスクイズド状態といった非古典的な状態を入力とした実験も行われている。

量子テレポーテーションは原理的には任意かつ未知の量子状態の完全な伝送を可能とする。しかし、実際の実験条件下では完全な量子テレポーテーションは不可能である。これはリソースとして用いている量子エンタングルメントが完全ではなく、有限の相関しか持ち得ないためである。通常量子テレポーテーションの精度、つまり入力かどの程度出力で再現されるかはフィデリティという量で評価される。フィデリティは二つの量子状態がどの程度近いかを示す量で、完全に等しければ 1、完全に異なれば 0 となる。フィデリティはその定義から入力状態に依存する量なので、量子テレポーテーション装置自体を評価する場合には入力がコヒーレント状態の場合で比較するのが一般的である(以降、特に断らない限りフィデリティは、コヒーレント光をテレポーテーションした際の入出力状態のフィデリティを指すものとする。)。このとき、古典的に達することの出来る限界(すなわち量子エンタングルメントを用いない)は 0.5 であることが示されている。これまで報告されているフィデリティの最大値は 0.70 であり、古典限界を超えて成功が確かめられているが、より高いフィデリティを得ることが量子テレポーテーションを応用していく上では重要であり、本研究ではフィデリティの向上をめざし実験を行った。

量子テレポーテーションは任意の状態が伝送できることが重要な点であり、原理的には非古典的状态の伝送も可能である。非古典的状态をテレポーテーションし、出力側でもその非古典性を観測するためにはフィデリティが少なくとも $2/3$ 以上でなければならないことが知られている。これまで、エンタングルメントの量子テレポーテーションが実現されており、これはフィデリティ 0.70 の実験系で行われた。しかし、この実験では、テレポーテーションの入力は量子エンタングルした 2 つの系のうち一つであり、非古典性はこの二つの系に保持されており、厳密な意味での非古典状態のテレポーテーションは実現されていない。また、過去に行われたスクイズド状態の量子テレポーテーション実験では、出力側でスクイズを観測するには至っていない。これは、フィデリティが $2/3$ の場合、入力が無限大のスクイズでなければ出力側でスクイズを観測することが出来ないためである。このように、現実的には非古典的状态(スクイズド状態、単一光子状態、シュレディンガーの猫状態、等)をテレポーテーションするためにはより高いフィデリティが望まれる。例えばスクイズド光のテレポーテーションではおよそ 0.75 程度のフィデリティが現実的には必要と考えられる。本研究ではテレポーテーションの高フィデリティ化を行い、特にスクイズド状態のテレポーテーションの実現を目指した。

量子テレポーテーションのフィデリティは、量子エンタングルメントの強さによって決まる。実際の実験では実験系の安定度やロスが存在等も重要な点であるが、支配的な要因はリソースである量子エンタングルメントである。量子エンタングルメントは実験的には、2 つの直交位相スクイズド状態を部分透過ミラーで重ね合わせることで生成される。このとき用いるスクイズド光のスクイーディングレベルが量子エンタングルメ

ントの強さを決めることになり、つまり高レベルのスクイズド光を生成することが、テレポーテーションの高フィデリティ化に最も重要である。本研究では、非線形光学結晶として周期分極反転燐酸酸化チタンカリウム(Periodically-Poled KTiOPO₄)を用いた光パラメトリック発振器(OPO)を閾値以下で駆動することによって、スクイズされた真空場を生成した。従来の実験では非線形結晶としてニオブ酸カリウムを用いていたが、ニオブ酸カリウムには BLIIRA (Blue Light Induced IR Absorption) とよばれるポンプ光誘起のロスがあった。スクイズド光は非常にロスに敏感なため、この BLIIRA によるロスが高レベルのスクイズド光を生成する妨げとなっており、ひいてはテレポーテーションの高フィデリティ化を困難としていた。しかし、PPKTP 結晶では、本実験条件下において BLIIRA が観測されず、OPO 内部ロスを大きく低減することができた。その結果従来最大-4.7dB 程度であったものを-7.4dB 程度まで改善することに成功した。これにより量子テレポーテーションのフィデリティは 0.76 を得るに至った。さらにこの高フィデリティの量子テレポーテーション装置を用いて、スクイズド状態を入力としたテレポーテーション実験を行った。このとき、出力側で-0.8dB のスクイズを観測することに成功した。これは入力状態の非古典性が出力側でも保持されていることを示し、初めて非古典的状态のテレポーテーションに成功した。

また、本研究では量子トモグラフィの手法を導入した。量子状態に対し我々が知りうる情報の全ては、密度行列または Wigner 関数のような位相空間における準確率分布関数で表される。つまり、密度行列または Wigner 関数が与えられれば、ある測定を行ったとき、どのような結果が得られるかを統計的に予測することが出来る。特に、光の直交位相成分をホモダイン測定し、その結果から量子状態を再構成する手段を光ホモダイントモグラフィという。本研究では量子トモグラフィを用いて量子テレポーテーションの入出力を表現することを試みた。これにより、従来と異なる量子テレポーテーションのより詳細な検証を行った。