

論文の内容の要旨

論文題目 量子エンタングルメントスワッピングの研究

氏名 武井 宣幸

現在、次世代の情報処理技術として量子情報処理が盛んに研究されている。情報処理に量子力学的効果を取り入れることによって、従来の情報処理の性能を大きく上回ることが期待されている。その量子的効果の中核となるのは、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とは複数の系からなる全系の状態をそれぞれの系に分けて記述できないことを指し、各系の間には非局所的な相関が存在する。量子情報の研究において、そのエンタングルメントを生成・制御することは最も重要な課題の一つである。この量子エンタングルメントを積極的に活用することにより、量子テレポーテーションなどの新たな通信技術が研究されている。

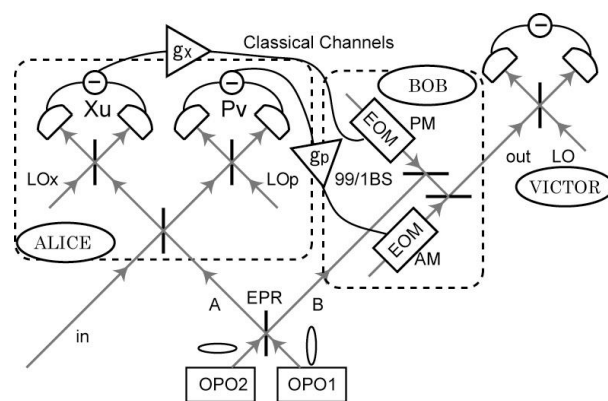
量子テレポーテーションとは、未知の量子状態を量子エンタングルメントと古典通信を用いて転送するプロトコルであり、原理的には量子状態の完全な転送を可能とする。量子テレポーテーションは、量子エンタングルメントの生成・制御とベル測定という量子情報における重要な技術を含むため、量子情報処理の中核技術と捉えることができる。このプロトコルには、2準位系などのいわゆる量子ビットで行うものと、連続変数で行うものがあり、どちらも実験で検証されている。量子ビットを扱う場合に比べ、連続変数の場合には量子エンタングルメントの生成とベル測定を高い効率で容易に行うことができるという利点がある。本研究ではその利点に注目し、連続変数での量子テレポーテーション実験を行う。

連続変数のテレポーテーションは、位置と運動量といった共役物理量に対して提案された。これまでの実験は、量子光学の手法を用いて、光の量子状態を扱うことで実現されてきた。それは、光の直交位相振幅、あるいは \cos 成分と \sin 成分が共役物理量と見なせるからである。量子テレポーテーションは入力状態として任意の量子状態を転送することができるが、これまでは実験的な容易さからコヒーレント状態のみが転送されてきた。量子テレポーテーションの成功を検証するために、入出力の状態がどの程度等しいかを評価するフィデリティ F という量が定義されている。入力が純粋状態 $|\phi_{in}\rangle$ の場合は、出力が一般に混合状態 ρ_{out} になるとして、 $F = \langle \phi_{in} | \rho_{out} | \phi_{in} \rangle$ と表される。 F は 0 から 1 の間の値をとり、 $F=1$ が完璧なテレポーテーションを表す。量子エンタングルメントを用いずに古典的に達成できる最大値を古典限界と呼び、コヒーレント状態を転送する場合は、 $F=0.5$ であることが示されている。これまでに報告されている最も高い値は 0.64 であるが、本研究ではこの値を更新し、さらに質の良いテレポーテーション実験を行うことが重要と考える。

本研究では、次の段階として非古典的な状態の一つであるスクイズド状態を入力として選び、量子テレポーテーション装置が非古典的な入力状態に対しても適切に動作するかどうかを検証することを考えた。実験で得られるスクイズド状態は、損失のために混合状態となるため、混合状態としての扱いと考察が必要となる。さらに本研究では、非古典状態を入力する次の段階として、エンタングルした状態を転送する実験を行い、量子エンタングルメントという量子的な相関が量子テレポーテーション過程において保存されることを検証することを考えた。この量子エンタングルメントのテレポーテーションは、量子エンタングルメントスワッピングとも呼ばれ、量子情報処理において最も重要なプロトコルの一つである。本研究の目的は、この量子エンタングルメントスワッピング実験を行うことである。

量子テレポーテーション実験を行う上での鍵は、量子エンタングルメントの生成・制御である。この量子エンタングルメントの概念は **Einstein, Podolsky, Rosen (EPR)** らによって議論されたために、(2 者間で)エンタングルした状態は **EPR 状態** と呼ばれる。本研究では光の直交位相振幅を用いて **EPR 状態**(光を用いるので以後 **EPR ビーム** と呼ぶ)を生成する。そのような **EPR ビーム** は、直交位相成分がスクイズされた真空場を 2 つ用意し、それらの相対位相を **90 度** にしてハーフビームスプリッター(**HBS**)で合波することで生成できる。本研究では、スクイズされた真空場を、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生成する。その際、非線形光学結晶としてニオブ酸カリウムを使い、タイプ I の温度位相整合を行う。波長 **860nm** の CW チタンサファイアレーザーの出力から、外部共振器で第 2 次高調波を発生させ、**OPO** の励起光とする。

量子テレポーテーションの実験系を右図に示す。ここでは、送信者アリスが受信者ボブへある量子状態(in)を転送し、検証者ヴィクターが出力(out)を評価するとする。まず初めに前述の方法で **EPR ビーム** を生成し、その片方 **A** をアリス、もう片方 **B** をボブに配ることによって、アリスとボブで量子エンタングルメントを共有する。アリスは



入力状態(in)と自分の **EPR ビーム A** を **HBS** で重ね合わせ、その **HBS** からの 2 つの出力に対してそれぞれ直交した位相成分をホモダイン測定する。このアリスが行う操作を(連続変数での)ベル測定と呼ぶ。アリスは測定結果を電気信号としてボブに送り、ボブはその情報を元にして自分の **EPR ビーム B** にユニタリー変換を行う。それは連続変数の場合、位相空間での変位に対応し、電気光学変調器(**EOM**)と高反射ミラーを用いて行うことができる。最後にヴィクターは、ボブからの出力をホモダイン測定し、量子テ

レポーテーションの成功を検証する。

本研究では、非古典的な入力として、スクイーズされた真空場の転送実験を行った。実験では3つめの OPO を製作しスクイーズされた真空場を生成し入力状態とした。まず真空場を転送し、出力側に基準となる量子ゆらぎを決める。次にスクイーズされた真空場を転送し、スクイーズされた位相では、出力の量子ゆらぎが基準の量子ゆらぎを下回ることを観測した。これは、スクイーズという非古典的性質が確かに転送されたことを示している。しかしながら、出力された量子ゆらぎは本当の真空場のゆらぎよりは小さくなっておらず、真の意味でスクイーズされた出力を得るには至らなかった。また、本研究で用いたスクイーズド状態は、損失などのために混合状態となっている。入力状態を混合状態として古典限界を求めると $F=0.73$ となり、量子テレポーテーションでは $F=0.85$ を得た。よって、古典限界を越えているため、スクイーズド状態の量子テレポーテーションに成功したと言える。純粋状態である普通の真空場は、古典限界 $F=0.5$ に対し、テレポーテーションでは $F=0.67$ を得た。このように純粋状態よりも混合状態の方がフィデリティ、特に古典限界が高い。したがって、混合状態の方が転送しやすいと考えることができる。

さらに本研究では、入力状態として量子エンタングルメントを転送する、つまり量子エンタングルメントスワッピング実験も行った。EPR ビームの片方を転送してボブから出力した状態と、アリスの手元に残っている EPR ビームのもう片方の状態の量子相関を調べる。もし相関が観測されれば、量子テレポーテーションが量子相関を転送する能力を持つことを検証することができる。実験では、4つの OPO からスクイーズド光を生成し、2つのペアの EPR ビームを生成する。reference モードと in モードから成る EPR1 と、A モードと B モードから成る EPR2 である。EPR2 を量子テレポーテーションのリソースとしてアリスとボブで共有し、in モードを入力状態とする。このとき、量子テレポーテーションによって、入力状態は出力モード(out)へ転送される。その結果、reference モードと out(あるいは B)モードがエンタングルするようになる(上図を見ると out モードは元々 B モードである)。したがって、reference モードと in モードの間のエンタングルメントが、reference モードと B モードの間に移る。よって EPR1 と EPR2 の間でエンタングルメントがスワップされた形になるため、このプロトコルを量子エンタングルメントスワッピングと呼ぶ。注目すべき点は、reference モードと B モードは全く相互作用していないことである。ゆえに、このプロトコルによって、相互作用のない離れた2点をエンタングルさせることが可能になる。また、ここで用いたテレポーテーションの実験系はスクイーズド状態を転送した時から改良を加えており、この実験系でコヒーレント状態を転送したところ、フィデリティ 0.70 を得た。

本研究では、量子光学の手法を用いて、連続変数での量子テレポーテーション実験を行った。特に非古典状態を入力とした実験では、その非古典性がテレポーテーションの過程で保存されることを検証した。スクイーズド状態を転送する実験では、スクイーズ

ド状態の非対称な量子ゆらぎが転送されていることを検証した。また、混合状態に対するフィデリティを使用して実験を評価し、古典限界 0.73 に対し量子テレポーテーションでは 0.85 を得た。量子エンタングルメントの転送実験では、量子エンタングルメントが維持されることを検証した。このテレポーテーションの系を用いてコヒーレント状態を転送したところ、フィデリティ 0.70 を得た。今後の課題として、さらにフィデリティの高い実験を実現することが挙げられる。特にスクイーズド状態の転送に関して、出力側でもスクイーズさせることが課題である。また、本研究に用いた実験手法を用いて、量子情報処理のより高度なプロトコルの検証実験を行うことが考えられる。