

もつれ合い光子対の複数対発生に関する基礎的研究

学位論文内容の要旨

近年、量子力学の原理を積極的に利用した量子情報分野が活発に研究されている。なぜなら、この研究を用いて通信の安全性の向上や情報処理の高速化が期待できるためである。この量子情報分野において、もっとも重要な量子力学の原理の1つに量子もつれ合い状態がある。量子もつれ合い状態とは、空間的に分離された2つ以上の量子系の間に非局所な相関関係がある状態のことをいう。本論文において、量子もつれ合い状態を構成する物理系は偏光した光子である。偏光を用いた最も単純な量子もつれ合い状態は、1光子偏光間の量子もつれ合い (entangled one-photon-polarization state, 以後 EOP と呼ぶ) である。1光子における偏光の自由度は2であるため、EOP は2つの2状態系がもつれ合った状態である。また、本論文ではこの状態を単純にもつれ合った光子対 (entangled photon pairs) と呼ぶ場合もある。

量子情報分野において、量子もつれ合い状態の発生はその検証実験にとって必要不可欠な技術である。EOP を発生する場合、パラメトリック下方変換と呼ばれる非線形光学過程が用いられる。しかし、現在の技術では、この方法を用いて光子対の発生数を制御することはできない。それゆえ、EOP が一度に複数対発生する場合がある。本論文では特に、EOP が2組発生した状況を取り上げる。その理由として、以下に述べる2つの興味深い点があげられる。1つは、EOP が2組発生した状態というのは、2つの3状態系がもつれ合っている状態とみなすことができ、この状態が多状態系の量子もつれ合いの検証実験に用いられている点である。もう1つは、量子テレポーテーションにおいて、EOP の2組発生はその忠実度を低下させる原因になる点である。ここで、量子テレポーテーションとは、量子もつれ合い状態を用いて量子状態のみを転送するといった、量子情報分野における重要な技術の1つである。また、忠実度とは量子テレポーテーションにおける入力状態がどれだけ忠実に出力されるかを評価するための値である。

本研究ではもつれ合った光子対が2組発生した状態が、3状態系の量子もつれ合いを形成するために必要な条件を提案し、実験により検証を行った。また、現状では不可避であるもつれ合い光子対の2組発生を受け入れ、高忠実度の量子テレポーテーションの実現するための実験パラメータを解析により求めた。

本論文は以下の7章から構成される。

第1章では、もつれ合った光子対が複数対発生する事実についてふれ、このことが、2つの点に関して興味深い現象であることを述べる。1つは多状態系の量子もつれ合いの発生であり、もう1つは量子テレポーテーションの忠実度を低下させる原因となることである。また、本論文の目的と研究アプローチについて説明する。

第2章では、もつれ合った光子対の複数対発生の原理について述べる。まず、複数光子対を発生するパラメトリック下方変換について説明する。その後、パラメトリック下方変換を用いた、もつれ合った光子対の発生方法について紹介する。ここでは、本論文においても用いられている、**P. G. Kwiat** らによって提案された方法を説明する。最後に、もつれ合った光子対の複数対発生についてふれ、2組発生した状態を紹介する。

第3章では、複数光子対を用いた、多状態系の量子もつれ合いの研究について紹介する。第2章でも述べるが、もつれ合った光子対が2組発生した場合、もつれ合った2光子偏光状態を形成する。2光子偏光状態は互いに直交した3つの状態をもつ。そこで、2光子偏光状態を3状態の粒子とみなし、3状態系の量子もつれ合いの研究が行われた。この章ではその問題点を述べる。

第4章では、2つの光路に2光子偏光状態が発生したことを確認するための方法とその検証実験について報告する。実験条件によっては、1光路内の2光子が別々のモードに発生している場合があり、これは2光子偏光状態になっていない。つまり、3状態系の量子もつれ合いが発生しているとみなせない。したがって、2光子偏光状態が発生していることを確認することが重要になる。

第5章では、複数光子対発生が量子テレポーテーションにどのように影響するかを述べる。量子テレポーテーションとは、もつれ合い状態にある粒子を送信者と受信者で持ち合い、もつれ合った粒子間の非局所な相関を利用し、量子状態のみを転送する技術である。光子を用いて行われた量子テレポーテーションの検証実験では、光子対の複数発生の影響により、受信者に光子が届かない場合がほとんどであった。

第6章では、量子テレポーテーションの詳細な忠実度解析を行うことで量子テレポーテーションに必要な実験条件を明らかにする。また、現在達成されている技術を用いて、量子テレポーテーションの検証実験が可能であることを示す。この解析法は、第5章において問題となった複数対発生の影響を調べるために用いられた手法であり、他の量子情報分野にも応用が期待される。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 笹 木 敬 司

副 査 教 授 末 宗 幾 夫

副 査 教 授 武 藤 俊 一

副 査 助 教 授 竹 内 繁 樹

学 位 論 文 題 名

もつれ合い光子対の複数対発生に関する基礎的研究

近年、量子力学の原理を積極的に利用した量子情報分野が活発に研究されている。なぜなら、この研究を用いて通信の安全性の向上や情報処理の高速化が期待できるためである。この量子情報分野において、もっとも重要な量子力学の原理の1つに量子もつれ合い状態がある。量子もつれ合い状態とは、空間的に分離された2つ以上の量子系の間に非局所な相関関係がある状態のことをいう。本論文において、量子もつれ合い状態を構成する物理系として偏光した光子を用いている。偏光を用いた最も単純な量子もつれ合い状態は、1光子偏光間の量子もつれ合い (entangled one-photon-polarization state, 以後 EOP と呼ぶ) である。1光子における偏光の自由度は2であるため、EOP は2つの2状態系がもつれ合った状態である。また、本論文ではこの状態を単純にもつれ合った光子対とも呼ぶ。

量子情報分野において、量子もつれ合い状態の発生はその検証実験にとって必要不可欠な技術である。EOP を発生する場合、パラメトリック下方変換と呼ばれる非線形光学過程が用いられる。しかし、現在の技術では、この方法を用いて光子対の発生数を制御することはできない。それゆえ、EOP が一度に複数対発生する場合がある。本論文では特に、EOP が2組発生した状況を取り上げている。その理由として、以下に述べる2つの興味深い点をあげている。1つは、EOP が2組発生した状態というのは、2つの3状態系がもつれ合っている状態とみなすことができ、この状態が多状態系の量子もつれ合いの検証実験に用いられている点である。もう1つは、量子テレポーテーションにおいて、EOP の2組発生はその忠実度を低下させる原因になる点である。

本研究ではもつれ合った光子対が2組発生した状態が、3状態系の量子もつれ合いを形成するために必要な条件を提案し、実験により検証を行っている。また、現状では不可避であるもつれ合い光子対の2組発生を受け入れ、高忠実度の量子テレポーテーションの実現するための実験パラメータを解析により求めている。

本論文は以下の7章から構成されている。

第1章では、序論として本研究を行うにあたっての背景、目的そして本論文の構成が述べられている。

第2章では、もつれ合った光子対の複数対発生の原理について述べている。まず、複数光子対を発生するパラメトリック下方変換について説明がなされている。その後、パラメトリック下方変換を用いた、もつれ合った光子対の発生方法について紹介している。ここでは、本論文においても用いられている、P. G. Kwiat らによって提案された方法を

述べている。最後に、もつれ合った光子対の複数対発生について説明がなされ、2組発生した状態を紹介している。

第3章では、複数光子対を用いた、多状態系の量子もつれ合いの研究について紹介している。第2章でも述べられているように、もつれ合った光子対が2組発生した場合、もつれ合った2光子偏光状態を形成する。2光子偏光状態は互いに直交した3つの状態をもつ。そこで、2光子偏光状態を3状態の粒子とみなし、3状態系の量子もつれ合いの研究が行われた。この章ではその問題点を述べている。

第4章では、2つの光路に2光子偏光状態が発生したことを確認するための方法とその検証実験について述べている。実験条件によっては、1光路内の2光子が別々のモードに発生している場合があり、これは2光子偏光状態になっていない。つまり、3状態系の量子もつれ合いが発生しているとみなせない。したがって、2光子偏光状態が発生していることを確認することが重要になる。

第5章では、複数光子対発生が量子テレポーテーションにどのように影響するかを述べている。量子テレポーテーションとは、もつれ合い状態にある粒子を送信者と受信者で持ち合い、もつれ合った粒子間の非局所な相関を利用し、量子状態のみを転送する技術である。光子を用いて行われた量子テレポーテーションの検証実験では、光子対の複数発生の影響により、受信者に光子が届かない場合がほとんどであった。

第6章では、量子テレポーテーションの詳細な忠実度解析を行うことで量子テレポーテーションに必要な実験条件を明らかにしている。また、現在達成されている技術を用いて、量子テレポーテーションの検証実験が可能であることが示されている。

第7章では以上の結果、主に第4章と第6章の研究について総括を行っている。

これを要するに、光子を用いた量子情報処理・通信に応用が期待される2光子偏光状態が、3つの相互に直交した状態をもつことの実験的検証に成功するとともに、忠実度の解析から量子テレポーテーションに必要な実験条件を明らかにし、もつれ合い光子対の複数対発生に関する有益な知見を得たものであり、著者の研究は光量子エレクトロニクスの分野に貢献するところ大なるものがある。

よって著者は、北海道大学博士（工学）の学位を授与される資格あるものと認める。