

学位論文題名

光子の軌道角運動量もつれ合いの生成と 制御に関する研究

学位論文内容の要旨

近年、量子力学の基本的な性質を、直接情報通信や情報処理に応用する量子情報科学の研究が急速に進展している。そのアプリケーションとして、特定の問題を圧倒的に高速に解ける量子コンピュータや、不確定性原理により盗聴を排除可能な量子暗号などがある。この量子情報科学において、いわゆる量子もつれ合い(エンタングルメント)は中心的な課題である。量子もつれ合いとは、複数の粒子間の相関で、とくに古典力学(確率論)では解釈できないものを指す。最初、量子もつれ合いがシュレーディンガーによって指摘された際には、仮想実験的な色彩の概念であったが、現在では量子暗号や量子コンピュータにおいて、その量子論的な操作を行うための「資源(リソース)」として非常に重要な概念となっている。

これまで量子もつれ合いの理論的研究および検証実験などに用いられてきた量子系は、光子の偏光状態など二状態(二次元)量子系にほぼ限られていた。しかし近年、多状態(多次元)を取りうる量子間でのもつれ合いを実現する系として光子の軌道角運動量状態(ラグールガウス・モード)が注目されている。多次元量子状態は、二次元の場合に比べてもつれ合い状態がノイズに強いこと、より安全性の高い量子暗号プロトコルが実現可能であることなどが報告されている。

これまでに、非線形結晶中のパラメトリック下方変換過程により発生させた光子対を用いて、軌道角運動量もつれ合い検証実験がザイリンガーらによって行われている。その実験では、光子の軌道角運動量の重ね合わせ状態を作成するにあたり、中心にのみ枝分かれ部をもつ回折格子(ホログラム)が用いられていた。たとえば角運動量が0(通常のガウスモード)の光子を、光軸の中心がホログラムの中心(欠陥)に一致するように入射すると、一次回折された光子は、欠陥の枝分かれ数や向きに対応する角運動量(例えば-1)に変換されて出力される。また、入射光子の光軸中心と、欠陥位置を恣意的にずらすことで、2つの角運動量状態の重ね合わせに変換することも可能である。その際、ずらす方向を変化させることで、その2状態間の位相差も制御できる。この方法は現在に至るまで、その後の研究で幅広く用いられている。

しかし、この方法には2つ大きな問題が存在した。まず、第一には、変換された光子が実際には2つではなくそれ以上の角運動量の重ね合わせ状態に変換される点である。その余剰な状態は10%以上にも達し、実験上無視できない値である。また第二に、異なる角運動量間の位相差を、状態の振幅を保ったまま操作することができない、という点である。例えば光子の垂直偏光と水平偏光の間であれば、波長板などの複屈折媒質を用いて、それらの確率振幅の大きさを変えることなく、位相のみを操作可能である。しかし、そのような操作方法が、光子の角運動量に対してはこれまで知られていなかった。

本研究では、おもにこれら2つの課題に対して研究を行った。前者に対しては、パラメトリック下方変換に用いられる結晶長を無視できるほど薄いとしていた英国のグループによる先行理論研究を、実験に即した、有限長の結晶に拡張した。その結果、結晶長が、パラメトリック下方変換において生成される光子のもつれ合い状態の多次元性に非常に強い影響を与えており、それ故、光軸をホログラム欠陥位置からずらす方法を利用した実験結果が(それら余剰な次元の影響により)大きく変化することを発見した。たとえば、ホログラムを光軸に対して円周スキャンした時の同時計数値が、これまで近似的に用いられてきたサインカーブからずれた形状になることである。

次に、この余剰な次元の影響を排除するために、ホログラムとファイバー干渉計を組み合わせる余剰な成分を含まずに観測モードを操作する手法を考案し、実際に実験を行った。結果、余剰な成分が含まれないことを示すサインカーブに近い同時計数値の変化を確認した。

さらに、異なる角運動量間の位相差を、状態の振幅を保ったまま操作することができない、という問題点を解決する方法として、今回新たに、光の幾何学的位相 (Gouy 位相) を用いた制御方法を提案、実際に光子の軌道角運動量もつれ合い状態を用いた実験により実証することに成功した。

以上を要するに、本研究では、多次元の量子もつれ合いを実現する手段である光子の軌道角運動量の重ね合わせ状態を操作方法に関し研究を行い、特に欠陥付き回折格子を用いた場合の高次の量子もつれ合いの影響について理論的に解明、またその影響を排除する実験方法を提案、実証した。さらに、軌道角運動量状態間の位相差を、光の幾何学的位相 (グイ位相) を用いて単独に制御する方法を提案、実証した。これらは、光子の多次元量子状態を用いる量子情報技術の進展に貢献する物である。

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 竹 内 繁 樹

学 位 論 文 題 名

光子の軌道角運動量もつれ合いの生成と 制御に関する研究

近年、量子力学の基本的な性質を、直接情報通信や情報処理に応用する量子情報科学の研究が急速に進展している。そのアプリケーションとして、特定の問題を圧倒的に高速に解ける量子コンピュータや、不確定性原理により盗聴を排除可能な量子暗号などがある。この量子情報科学において、いわゆる量子もつれ合いは中心的な課題である。これまで量子もつれ合いの理論的研究および検証実験などに用いられてきた量子系は、光子の偏光状態など二状態(二次元)量子系にほぼ限られていた。しかし最近、多状態(多次元)量子系での量子もつれ合いを用いることで、よりノイズに強く、また安全性の高い量子暗号プロトコルが実現可能であることが明らかにされ、それを実現する系として光子の軌道角運動量状態が注目されている。

これまでに、非線形結晶中のパラメトリック下方変換過程により発生させた光子対を用いて、軌道角運動量もつれ合いの先駆的な検証実験がザイリンガーらによって行われた。その実験では、光子の軌道角運動量制御に、中心にのみ枝分かれ部(欠陥)をもつ回折格子(ホログラム)が用いられている。たとえばガウスモードの光子を、光軸の中心をホログラムの欠陥に一致させて入射すると、一次回折された光子は、異なる角運動量に変換されて出力される。また、入射光子の光軸中心と、欠陥位置ずらすことで、2つの角運動量状態の重ね合わせに変換することも可能である。この方法は、その後の研究でも幅広く用いられている。しかし、この方法には2つ大きな問題が存在した。まず、第一に、変換された光子が実際には対象とする2つだけではなく、高次の角運動量を含んだ重ね合わせ状態に変換される点である。第二に、異なる角運動量間の位相差のみを、それぞれの状態の振幅を保ったまま操作することができない、という点である。

本論文は、おもにこれら2つの課題に対してその詳細な解析と、解決方法の考案を目標に研究を行ったものである。前者に対しては、パラメトリック下方変換に用いられる結晶長を無視できるほど薄いとしていた先行理論研究を、実験に即した、有限長の結晶の場合に拡張している。その結果、結晶長が、パラメトリック下方変換において生成される光子の量子もつれ合い状態の多次元性に非常に強い影響を与えており、それ故、光軸をホログラム欠陥位置からずらす方法を利用した実験結果が、余剰な次元の影響により大きく変化することを発見している。たとえば、ホログラムを光軸に対して円周スキャンした時の同時計数値が、これまで近似的に用いられてきたサインカーブか

らずれた形状になることである。これらは、下方変換過程で発生する高次の量子もつれ合いがこの種の実験結果に与える影響について、初めて理論的に解明した成果であるといえる。この成果は *Journal of Optical Society of America B* 誌に掲載されている。

次に、この余剰な次元の影響を排除するために、ホログラムとファイバー干渉計を組み合わせて余分な成分を含まずに観測モードを操作する手法を考案し、実際に実験を行い、その結果、余分な成分が含まれないことを示す実験結果の確認に成功している。

さらに、異なる角運動量間の位相差を、状態の振幅を保ったままで操作することができない、という問題点を解決する方法として、今回新たに、光の幾何学的位相 (Gouy 位相) を用いた制御方法を発案、実際に光子の軌道角運動量もつれ合い状態を用いた実験により実証することに成功し、この成果は *Physical Review Letter* 誌において出版されている。

以上を要するに、本研究では、多次元の量子もつれ合いを実現する手段として光子の軌道角運動量の重ね合わせ状態を操作方法に関し研究を行い、高次の量子もつれ合いの実験結果に与える影響について理論的に解明し、さらに、軌道角運動量状態間の位相差を、光の幾何学的位相 (グイ位相) を用いて単独に制御する方法を初めて提案、実証した。これらの研究成果は、光子の多次元量子状態を用いる量子情報科学の進展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。