

## 論文の内容の要旨

論文題目 3次元相ゲートの実現に向けた光子数状態の重ね合わせ生成の研究

氏 名 湯川 光彬

量子情報処理とは量子力学的性質を利用することで従来の性能を圧倒的に超えることが理論的に示唆されている情報処理のことであり、その有用性の大きさから近年理論的にも実験的にも研究が盛んに行われている。実験が進んでいる例として、原理的に盗聴することができない量子暗号技術や、量子ネットワークや量子計算などが挙げられるが、これらは量子状態の重ね合わせ、量子エンタングルメントなどの非古典的な性質を利用することで初めて可能である。

量子情報処理を実現するためには様々な量子状態を操る技術が必要である。第一歩目の基礎的な研究として基本的な非古典的量子状態の生成実験が行われ、特徴的な非古典性を示すことが実験的にも確認されてきた。

そのような量子状態の例として1光子状態が挙げられる。この状態は光子数を測定すると常に1となるような量子状態である。実験的には非線形光学効果を利用した光パラメトリック変換により光子数相関のある量子もつれペアを生成し、片方を光子検出器で検出することによりもう片方で1光子状態を得ることができる。ここで2光子を検出したという情報があれば2光子状態を得ることができ、さらに任意の光子数状態へ拡張することもできる。より大きな光子数状態を生成することができるということは、それだけ高度な量子情報を扱えるということでもあり、その生成手法の発展の意義は大きい。

また、光子検出器の前で位相平面上での変位操作と呼ばれる状態操作を行うことで、任意の0光子状態から $n$ 光子状態までの重ねあわせが得られることも分かっている( $n$ は用いる光子検出器の数)。それぞれの光子検出器の前で独立に変位量を決められるため、任意の重ねあわせを得ることができる。現在のところ、この手法を用いることで0から2光子数状態までの重ね合わせについて実験的生成の報告がある。

この光子数状態の重ね合わせであるが、筆者の所属する研究室で取り組んでいる連続量量子状態変数の量子情報処理の分野においても重要な役割を果たすことが知られている。

情報処理とは入力情報を適当に変換して出力を得る過程であり、ここでその変換とは任意のユニタリー変換を指す。つまり、任意の計算を実現するためには任意のユニタリー変換を実装することが必要であるということである。ここで任意のユニタリー変換は

光の直交位相成分について任意の2次の量子状態操作と3次以上の量子状態操作が一つあれば、それらを組み合わせることで実現できることが知られている。前者に関しては既に実現されているが、後者は未だ研究段階である。その3次以上の量子状態操作を実現するためには3次以上の非線形光学効果が必要であるが、その小さい非線形光学定数や光学ロスなどの問題のために現状では実験的に実現することは困難である。

そこである特殊な量子状態を初めに準備し、その状態を補助状態として2次以下の量子状態操作で構成される量子ゲートに用いることで3次以上の量子状態操作を実現できることが理論的に提唱されている。

ここで2次以下の状態操作の技術は既に十分発達している一方、補助状態の状態準備が量子ゲートの実現において課題となる。3次位相ゲートの補助状態は3次位相状態と呼ばれる状態であるのだが、この状態は量子ゲートのゲインが小さいという極限で0から3光子状態までの重ね合わせで表現できる。0から2光子状態までの重ねあわせは既に実証されていると述べたが、そのような状態と2次以下の状態操作を組み合わせても3次以上の量子状態変換はできず、3光子状態まで存在することに大きな意義がある。

このような0から3光子状態までの重ね合わせは3つの光子検出器と変位操作を組み合わせることで生成できる。本研究ではその手法を実際に実装することで様々な0から3光子状態までの重ね合わせの生成と検証を行った。生成した状態は4種類であり、3光子状態、シュレディンガーの猫状態、0光子状態と3光子状態の重ね合わせ、3次位相状態であった。

本研究の光学系を図1に示した。光学系は主に光子対生成、光子検出、状態測定のみからなる。この研究のレーザー光源には連続波チタンサファイアレーザー(波長860nm、Coherent社、MBR-110)を使用した。

初めに光子対を生成する必要があるが、これは周波数が非縮退のパラメトリック変換によって生成した。周期分極反転リン酸酸化チタンカリウム(periodically-poled  $\text{KTiOPO}_4$ , PPKTP)を非線形光学結晶として用い、十分な非線形効果を得るために光パラメトリック共振器(OPO)中に入れて使用した。ポンプ光は、ニオブ酸カリウムを非線形光学媒質として用いて第二高調波を発生させ、さらにOPOのフリースペクトラルレンジ(FSR)だけ周波数を音響光学変調器(AOM)でシフトさせることで得た。FSRは約600MHzであった(以下  $\Delta \omega$  と表す)。約20mW程度のこの光をポンプ光として用いた。この過程によって周波数  $\omega$  の光子(シグナル光)と  $\omega + \Delta \omega$  の光子(アイドラー光)の対を発生させた。

次に光子対を空間的に分離する必要がある。そのためにFSRがOPOの倍である分離共振器(split cavity, SC)を用いた。この共振器のロックには別に用意した  $\omega + \Delta \omega$  の光を使用することで、 $\omega + \Delta \omega$  のアイドラー光は透過し、 $\omega$  のシグナル光は反射するようにした。

アイドラー光を光子検出する前に、2つの周波数フィルター共振器(filter cavity, FC)に通す。2つともファブリーペロー共振器である。OPOから出射される光子の周波数

帯域は非常に広いが、光子検出器まで到達してよい光の周波数は $\omega + \Delta\omega$ のみであり、周波数のフィルタリングをする必要がある。分離共振器のFSRは $2\Delta\omega$ だけなので、さらに周波数のフィルタリングをかける必要がありこの共振器を使う必要がある。ここで周波数フィルター共振器のFSRはなるべく大きくなるように共振器長を数mm程度と短く設計した。さらに十分なフィルタリングを実現するためにこの共振器を2つ直列に並べて使用した。

アイドラー光はその後で変位操作光と干渉させ、光子検出器につながっているファイバーカップラーに入射させた。本実験では、光子検出器としてアバランシェフォトダイオード(APD)を用いた。APDは光子を検出すると電氣的パルスを出力するが、3つの光子検出器の出力をAND回路に入力し、同時検出信号が得られるようにした。

一方のシグナル光は、その量子状態の直交位相成分をホモダイン測定で測定した。ホモダイン測定のために10mWの局所発振光をシグナル光と干渉させ、帯域が0P0の帯域と同程度である約10MHzのホモダイン検出器に入射させた。ホモダイン測定器の出力信号はデジタルオシロスコープで測定した。この時測定トリガーとして光子の同時検出信号を用いた。また、同時にホモダイン検出器からプローブ光と局所発振光の干渉信号も得られるので、それを局所発振光の位相の推定のために同じくオシロスコープで測定した。位相と直交位相成分の測定値のペアのリストから最尤推定法による数値計算によって生成状態を再構築した。

本研究では、光子検出器と変位操作を用いることで様々な0から3光子状態までの重ね合わせを生成することに成功した(図2)。シュレディンガーの猫状態が3つの負の値を持つ、0光子状態と3光子状態の重ね合わせが120度の回転対称性を持つなど、それぞれの量子状態について固有の特徴を見出すことができた。変位操作光の振幅と位相を変えることでそれに応じた状態を生成することが確認できたが、これは任意の0光子状態から3光子状態までの重ね合わせを同様の手法で生成することができることを意味している。

また、生成した状態には3次位相状態も含まれるが、これは3次位相ゲートの補助状態として用いられる。この量子ゲートはユニバーサルな量子演算に必要であるが、実験的困難さ故に実現されていない重要なものであると述べた。本研究では3次位相状態の生成に初めて成功し、これは3次位相ゲートの実現へ向け大きな成果である。

ここで、得られた状態はロスの補正を一切していないことも重要な点である。ロスの補正が必要であるということは光学系のロスが大きすぎることを意味しており、さらに実験系を拡張して量子ゲートを実装しても非古典的な量子状態操作は行えないことになる。つまり、ロスの補正をせずに済む程度にまでロスが抑えられていることが必要である。本研究の結果は、今後3次位相ゲートへの拡張が期待できるということを示している。

今後はこの3次位相状態を用いた3次位相ゲートの実現が期待される。そのために実験系を拡張しなくてはならないが、他に必要となる量子状態操作はすべて実験的に技術が

確立している2次以下の状態操作である。一方で、測定時間が長く、更に光学系が大きくなるので共振器や干渉計のロックの全自動化や、光子検出の量子効率の向上など現在の実験系にも改善できる余地は残されており、あわせて取り組むことにより期待する量子状態操作を実現できると考えている。

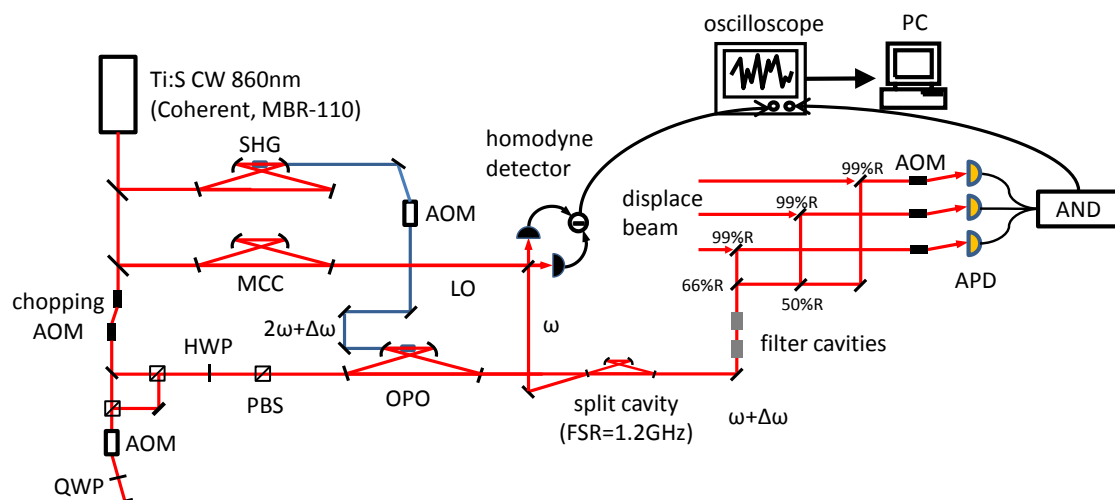


図1：光学系全体の概略図。SHG:第二高調波共振器、MCC:モードクリーニング共振器、OPO:光パラメトリック共振器、AOM:音響光学変調器、PBS:偏光ビームスプリッター、HWP:半波長板、QWP:1/4波長板

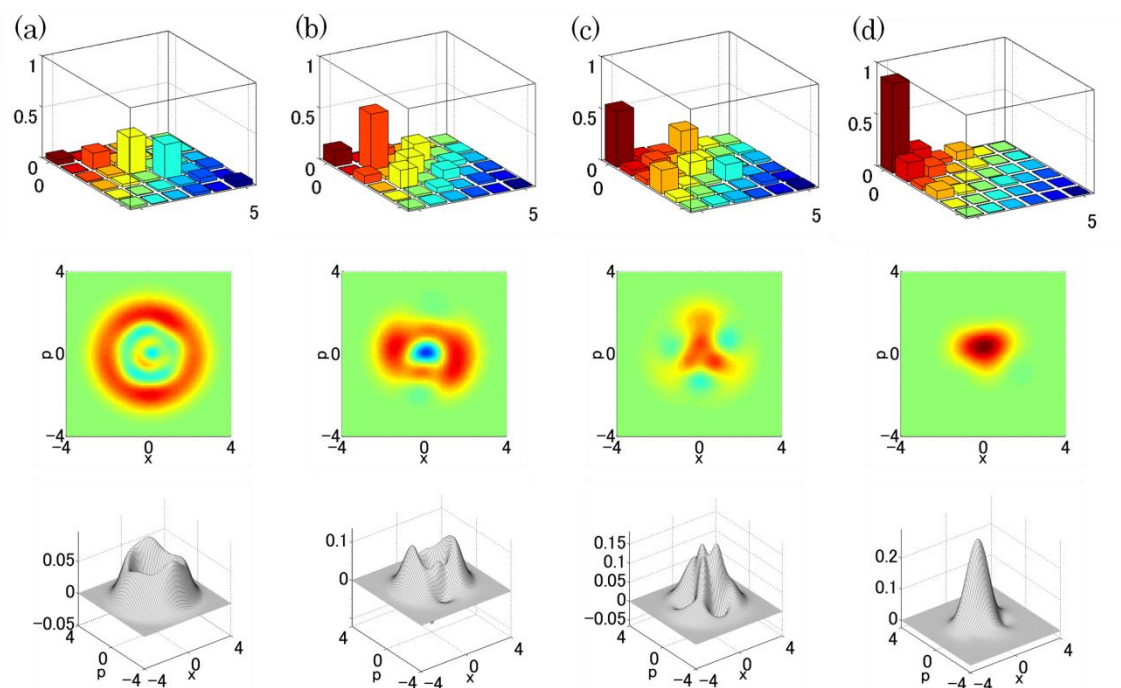


図2：実験結果。上段が密度行列で中央と下段がWigner関数。(a)3光子状態、(b)シュレディンガーの猫状態、(c)0光子状態と3光子状態の重ね合わせ、(d)3次位相状態