

# 博士論文(要約)

低コヒーレンス光励起によるパラメトリック下方変換を使った非古典光生成の試みと散逸・擾乱のある環境下での通信・計測への応用に関する研究

Nonclassical light generation by parametric down conversion using low-coherence light excitation and its application to communication and sensing under noisy environment

大川 洋平

本論文では低コヒーレンスな半導体レーザーを使ったパラメトリック下方変換 (Parametric Down Conversion, PDC) で非古典的な光を生成し、その量子効果を利用した通信・計測におけるデコヒーレンスの影響について調べた。PDCによって生成される量子状態は伝令付き単一光子源やエンタングルメント光源として利用でき、古典的な波動論では説明できない様々な現象を見ることができる。干渉現象を舞台として現れるこのような量子効果が現実的な環境との相互作用によってどのように影響を受けるのかを、特に光が重要な役割を演じる通信・計測分野での応用を意識して調べた。また偏光自由度は時間や周波数自由度と比べると制御がしやすい一方で雑音に弱いことが多い。これらの自由度をうまく制御して光の量子効果を利用する方法について検討した。

### パラメトリック下方変換による非古典光生成と励起光コヒーレンスの影響

非共軸のType-II BBO結晶を使ったPDCで生成される2光子偏光状態は、環状に放射される二つの直交した直線偏光の交線間でエンタングルさせることができる。今回励起光源に使用した青紫のレーザーは、Blue-rayの普及に伴い低コヒーレンスだがハイパワーのものが容易に入手可能である。一般にPDCを用いた偏光エンタングルメント生成では、結晶長に比べて十分な励起光のコヒーレンス長が必要とされているが、ここでは低コヒーレンス励起での非古典光生成を試みた。長さ3 mmのBBO結晶に対しコヒーレンス長約0.2 mmの励起光でPDCの生成状態を量子状態トモグラフィを用いて推定した結果、密度行列のコンカレンスは0.83と比較的高水準であった。外部共振器を用いて励起光コヒーレンスを変化させたところ、コンカレンスへの影響は予想より少なく、集光するシングルモードファイバ(SMF)による空間モード制限で十分に抑制されることが示唆される結果を得た。通常PDCに用いられる狭帯域のハイエンドなレーザーでなくてもエンタングルメント生成が可能であることが示された。

### 光子の周波数変換とその応用

PDCで用意した伝令付きの単一光子源を用いて、音響光学変調器 (AOM) を使ったフォノン吸収による周波数シフトが量子性を壊さないコヒーレントなものであることを示し、1光子ビートを高い明瞭度で測定した。これによりDCノイズに強く、広く利用されているヘテロダイン干渉法が単一光子流などの微弱光にも適用できることを示した。また、このAOMによる周波数シフトを利用したスペクトル位相符号化による古典ビット送信法を提案し、実験的に検証した。

### 同一空間モードに存在する二光子の偏光状態

光子対が同一空間モードに存在するとき、各光子に直接アクセスできない状況が典型的に生じる。これはもし光子を識別できる僅かな違いが時間-周波数の自由度にあっても、通常の単一光子検出器では分解できないためである。このような限られた測定しかできない状況における偏光状態トモグラフィでは、対称なtriplet状態で張られる3次元の空間と反対称なsinglet状態の1次元の空間に直和分解された密度行列が得られる。このとき各光子に時間や周波数などの“隠れた”自由度で違いがなければ、偏光状

態は対称な空間に制限されるが、隠れた自由度で違いがあると反対称成分が生じる。アクセスできない隠れた自由度に違いを持つ可能性がある場合、その自由度で光子を区別した状態が光子同士の間でエンタングルしているかどうかを言うことは一概にはできない。これは「原理的に区別できない対称な2光子状態」と「区別できる光子同士がエンタングルした対称な状態」を識別することができず、同じ密度行列になってしまうためである。ところがsinglet状態のような反対称なエンタングル状態は光子が区別できないと存在し得ずこのような同一化が起こらないため、隠れた自由度にアクセスすることなくエンタングルしていることを知ることができると考えられる。これらを実験的に検証するため、同一SMF上にある光子対が異なる周波数を持つ偏光エンタングル状態に対し状態トモグラフィを行ったところ、理論とよく一致する結果が得られた。

### SMFにおける偏光状態のデコヒーレンスと量子通信への応用

偏光状態のファイバ伝送においては曲げや振動による雑音が大きき問題となる。各光子が受ける雑音が同じであるとき、2光子偏光状態のうちsinglet状態は唯一不変に保たれる純粋状態である。これはsinglet状態が全スピンの非古典的な状態だからである。そこで異なる波長間で偏光エンタングルしたsinglet状態を生成し、波長差を利用して同一のSMファイバに合波してランダムに曲げられたファイバ雑音路の前後で（波長を分解した）状態トモグラフィを行った。実験の結果、忠実度 ( $F = \langle \psi | \rho | \psi \rangle$ ) <sup>1/2</sup> は  $F_{前} = 0.958 \pm 0.004 \rightarrow F_{後} = 0.951 \pm 0.006$  でほとんど変化せず、生成したsinglet状態がファイバ雑音に対し耐性を持つことが示された。さらにこのような口バスタな状態空間の通信への利用を考え、偏波保持ファイバによる位相雑音路では2光子状態を使って口バスタなQubit伝送ができることを示した。ファイバによる偏光伝送において、単色性の欠如は偏波モード分散の影響によりネガティブな効果を与えられ てきたが、非単色性が各波長間に量子的な相関を許すことで偏光状態の保護に役立つことを示した。

### 量子増幅効果を使った散逸のある媒質中のファラデー回転の測定

2光子偏光状態の量子計測への利用を考えて、磁場中に置かれたガラスのファラデー回転の測定を試みた。ファラデー回転は左右円偏光に対する位相シフトであり、円偏光モードについての2光子NOON状態 ( $|2_R 0_L\rangle + |0_R 2_L\rangle$ ) は1光子の場合の2倍の位相シフトを受けるため、古典的な限界を超える精度で測定が可能になる。このとき、ガラス試料との相互作用長が長いほど回転量は大きくなるが、それに伴いロスも増大する。よって回転量の推定精度 (SNR) にトレードオフが生じるが、2光子NOON状態の透過確率は1光子の場合の二乗になるためロスの影響を受けやすい。そこで1光子ずつ測定する古典的なプロトコルと2光子ずつNOON状態で入射するプロトコルの推定精度 ( $S_e, S_q$ ) を同じ光子数で比較した場合、ガラス枚数を変化させるとどのように影響を受けるのか実験的に検証した。実験の結果、2光子プロトコルはガラス枚数が

少ない領域では古典的な推定精度を上回る( $S_c=13.5$ ,  $S_q=16.5$ )が、ガラス枚数が多くなりロスが増えると優位性が失われる( $S_c =27.0$ ,  $S_q =17.7$ )ことが確認された。この結果は、本実験の設定におけるNOON状態を使ったプロトコルでは、相互作用長を変化させたとき推定精度の最大値は古典的なプロトコルのそれを下回り $1/\sqrt{N}$ 倍になるが、最大値を達成する相互作用長は $1/N$ 倍に短縮化できるという理論予測とよく一致する。