

審査の結果の要旨

論文提出者氏名 高橋 優樹

90年代初頭からの量子情報科学の勃興に伴い、量子光学実験の分野においては新奇な量子状態を生成し観測する研究が精力的に行われてきた。特に、連続量を用いた量子情報の文脈ではスクイーズド光に代表されるガウス状態を用いた研究が大きく進展してきたが、一方でガウス状態のみに限定された場合の本質的な限界が認識され、近年では非ガウス状態を実験的に生成する試みがいくつか行われている。一般の光学的な量子計算における困難と同様、非ガウス状態を生成する際の問題は高次の非線形過程を実現する困難に起因する。論文提出者は測定誘起型非線形過程と呼ばれる、エンタングルメントを介した射影測定⁽¹⁾の反作用を利用して確率的に非ガウス状態を生成する手法を用いた。光子の引き抜き⁽²⁾ (photon subtraction) はこの手法に法りスクイーズド光からシュレディンガーの猫状態⁽³⁾ (コヒーレント状態の重ね合わせ状態) を近似的に生成する技法として知られており、本研究以前には一光子を引き抜く実験が行われていたが、本研究ではそれをより高精度化するとともに二光子を引き抜く実験を行った。一光子の引き抜きが奇パリティ (奇数個の光子の重ね合わせ) のシュレディンガーの猫状態を生成するのに対して、二光子の引き抜きは偶パリティ (偶数個の光子の重ね合わせ) のシュレディンガーの猫状態を生成する。偶奇のシュレディンガーの猫状態を両方生成する能力を得るということはコヒーレント光を用いた量子計算の観点から非常に重要であると考えられる。

また、光子の引き抜きを2モードの系に適用することにより、ガウス型のエンタングルメントを局所操作により増加させることが可能であることが分かっている。これはエンタングルメント蒸留と呼ばれる量子操作の一種と見なせるが、ガウス型の操作のみではガウス型のエンタングルメントを増強することが不可能なことが証明されており、光子の引き抜きによるエンタングルメント蒸留は代表的な非ガウス操作の応用と考えられている。本研究ではこのエンタングルメント蒸留の実験を行った。

本論文は以下の8章からなる。以下に各章の内容を要約する。

第1章では、導入として本研究の背景について述べ、その上で本研究の概略を示し、さらに本論文の構成について述べている。

第2章では、後続の章を通じて必要となる基本的な量子光学の理論について述べている。代表的な量子状態の特性とその表現を紹介している。また、ガウス状態とガウス型操作の概念を共分散行列およびシンプレクティック変換を導入して説明している。その他、ホモダイン測定および最尤推定法による量子状態の再構成についても述べている。

第3章では、前章の内容を下敷きとして実験と直接対応する理論モデルを与えている。具体的には共振器を用いたスクイーズド状態生成と光子引き抜き操作について詳細な計算を行っている。

第4章では、実験系および実験に用いられた種々の技術について述べ、また補足的な実験データを示している。全体の実験図を示した後、主たる非線形光学デバイスである光パラメトリック発振器と第二高調波生成用外部共振器についてそれぞれ述べている。次に、光の相対位相をロックする方法の一般論について述べている。ホモダイン検出器の特性に触れた後、実際にスクイズド状態を生成した結果を示し、実験結果と理論との比較をして前章で与えたモデルの妥当性を確認している。次に、APD 前に構築された、フィルター共振器系の記述が続き、最後に FPGA を用いた位相ロックの手法について述べている。

第5章では一光子引き抜きの実験とその結果について述べている。まず、光パラメトリック発振器から生成されるスクイズド光の周波数特性を考慮したより詳細な理論モデルを与えている。次に実験方法を述べ、さらに実験結果について述べている。

第6章では二光子引き抜き実験とその結果について述べている。前章同様、まず詳細な理論モデルの記述を行うがその際、二つの光子引き抜きのイベントの時間差に依存して非自明な量子干渉が起こることを説明している。次に実験手法を説明した後、イベントの時間差に応じて形状の異なる Wigner 関数が得られた結果を示し、議論している。

第7章では光子引き抜きを用いたエンタングルメント蒸留の実験について述べている。エンタングルメントおよびエンタングルメント蒸留の一般論を説明し、光子引き抜きを用いた場合の状態の計算を行っている。それを踏まえて、2モードの状態のトモグラフィーを効率的に行う指針を示し、その手法について述べている。続いて実験結果を示し、そのエンタングルメントの評価について述べている。とくに、密度行列の次元に依存した評価エラーについての考察を行っている。その結果低ポンプの領域においてはエンタングルメントの増加が観測されたと結論している。

第8章では、本研究の結果をまとめ、最後に課題と今後の展望を述べている。

以上のように、本研究は、光子引き抜きという共通の実験技法を基盤として、シュレディンガーの猫状態の生成とエンタングルメント蒸留という二つの実験を行った。前者においては、まず従来の一光子の引き抜きを改善するとともに初めて二光子の引き抜きの実証に成功した。さらに、イベントの時間差によって量子干渉効果が観測されることを発見した。後者では、ガウス型操作のみでは不可能である量子操作の典型例として長らく手付かずであったガウス型エンタングルメントの蒸留に初めて試み、肯定的な結果を得た。両者ともに、量子光学における量子状態の準備、操作をいまだ未開拓の非ガウス領域に拡張し成功した点で重要であり、光を用いた量子情報処理に向けて次なる実験研究の基礎を築いた点からも物理工学の発展への寄与は大きい。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。