

## 審査の結果の要旨

論文提出者氏名 和久井 健太郎

量子情報処理とは、究極の物理法則である量子力学を用いて、従来の古典力学に基づいた情報処理の限界を超えることを目的とした研究分野である。この分野では、まず実現すべき情報処理性能に対する仕様が設定されており、それが達成できればどのような媒体を用いても構わない。このユニークな分野の中で、ボソンによる量子情報処理は、これまで主に光の分野において目覚ましい発展を遂げてきた。この光を用いた量子情報処理は、2つの領域に大別することができる。その1つは、量子ビットを初めとする離散変数が情報処理の担い手となった、離散量量子情報処理と呼ばれる領域である。ここでは光子の持つエネルギーの離散性が有効活用されており、現在の光量子情報処理の主流となっている(光子制御)。そして、もうひとつの無視できない流れが、連続量量子情報処理と呼ばれる領域である。ここでは、直交位相成分と呼ばれる連続変数が情報処理の基底として用いられているため、光の波動性を積極的に生かした領域であるといえる(光波制御)。上記2つの領域における研究は、同じ光という媒体を用いながら、離散変数と連続変数という異なる基底を情報処理に用いているという本質的な違いがある点や、最適化されてきた実験技術の相違のために、これまで相互に乗り入れられることは乏しかった。ところが近年になり、光を用いた連続量量子計算における劇的な精度向上や、損失で失われた連続量量子もつれ抽出に関する不可能定理などの観点から、光子制御と光波制御、二つの領域の技術を統合した制御に関する注目が高まっている。本研究ではそれを「光子・光波同時制御」と位置付け、その嚆矢となり得る系において、実験を行い新しい量子状態の生成に成功した。それが本研究で生成に成功した、「シュレーディンガーの子猫」状態と呼ばれる、光の重ね合わせ量子状態の生成に関するものである。

コヒーレント光の重ね合わせ状態は「マクロ」に識別可能な二つのピークを持つことから、有名なシュレーディンガーの猫のパラドックスにちなんで「光のシュレーディンガーの猫」状態と名づけられた。シュレーディンガーの子猫状態は、この光の重ね合わせ状態と極めて類似性が高い状態として、その生成方法が紹介された。この状態はスクィーズド光を光源としてその少量をビームスプリッターで反射させて量子もつれを形成した後、アバランシェフォトダイオードを用いて単一光子検出することによって生成可能である。入力のスィーズド光が「ガウス型」の量子状態とされるのに対し、光子検出後の量子状態はサイズの小さいシュレーディンガーの猫状態に似て、極めて「非ガウスの」な量子状態となる。このシュレーディンガーの子猫状態の生成に関しては、生成に関する実験的・理論的な難しさから、現在までに世界で3つの機関しかが実験に成功していない。そのうちの 하나가我々のグループであり、最初の原理実証実験は叶わなかったが、さまざまな損失を低減することで、先行2機関を遥かに凌駕する品質の子猫状態を生成することに成功した。その鍵となるのが、周期分極反転燐酸チタン酸カリウム(PPKTP)と呼ばれる新しい非線形光学材料である。また、本研究では2つのアバランシェフォトダイオードを用いて、単一光子検出時とは異なる特性を持

った子猫状態の生成に成功しており、これは世界初の結果である。

本論文は以下の5章からなる。以下に各章の内容を要約する。

第1章では、光を用いた量子情報分野において重要な標石となる研究を紹介しながら、研究背景と動機について述べた。より具体的には従来の光子制御、光波制御の長所と短所を指摘し、そこから光子・光波同時制御の必要性、さらには本研究のテーマである、スクィーズド光と光子検出を用いた実験の必要性を浮き彫りにした。また、最後に本論文の構成について述べている。

第2章では、本研究を理解するうえで重要であると考えられる、基礎的な事項について列挙した。具体的な項目は、電磁場の量子化、コヒーレント状態やスクィーズド状態などの光の量子状態、またそれら量子状態の最構成法である光ホモダイントモグラフィの技術について示し、再構成されるWigner関数と呼ばれる擬確率分布関数の諸性質についても示した。最後に、コヒーレント重ね合わせ状態と、シュレーディンガーの子猫状態の生成手法について解説している。

第3章は本研究のハイライトである。本章では、単一光子検出によるシュレーディンガーの子猫状態の生成について述べている。章の前半ではまず理論的な表式についての準備を行い、章の後半では実験について詳述した。我々が実験に用いているのは連続波のスクィーズド光光源であり、光子検出で生成できる子猫状態は、光源のスクィーズド光のコヒーレンスに依存する。理論部分では、連続波スクィーズド光の諸特性を考慮した際の時間・周波数特性について議論し、そこからWigner関数の表式を得た。また章の後半部分では、本研究で開発した実験技術に関して詳述した。本研究ではいくつもの光共振器をレーザー周波数にロックし、なおかつ単一光子レベルでS/Nよく光子検出を行う必要があった。そのため、一体型光学フィルタやサンプル・ホールドの手法を用いた時間分割ロック法などを開発した。また、最後に実験結果について説明した。本研究では光学損失の大きい従来の非線形光学結晶に変わり、PPKTPを用いて先行研究を凌駕する品質の状態を得たので、そこから得られた結果についても考察している。

第4章では、第3章の実験技術を拡張して、2光子検出による、異なるシュレーディンガーの子猫状態の生成実験について報告している。

第5章では、まとめと展望について示し、これから進むべき道についての示唆を与えている。

以上のように、本研究はこれからの光子・光波同時制御の嚆矢となる研究である。その基礎技術を開発したことは量子情報工学の見地から大変意義のあるものであり、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)の学位論文として認める。