

# 論文審査の結果の要旨

氏名 三上 秀治

本論文は、全 8 章からなる。第 1 章は量子情報についての導入 (introduction) と研究動機の提示、第 2 章は量子情報の基礎概念と実験装置の解説、第 3 章が 3 光子の  $W$  状態の新しい生成方法の提案およびその実験結果、第 4 章が 4 光子の  $W$  状態および他の多光子エンタングル状態の生成方法、第 5 章がテレクローニング状態と呼ばれる 4 光子エンタングル状態の生成とこの状態を用いた量子テレクローニング過程の実演、第 6 章が光子を用いた更に一般的なテレクローニング状態実現についての考察、第 7 章が量子 3 準位系における遠隔量子状態の準備の実現、そして第 8 章が結論という構成である。

エンタングルメント (絡み合い) とは、量子系に内在する非局所的な性質を示す相関である。近年、量子力学特有の性質を計算や通信に応用することで、従来の古典力学に従う情報処理では不適當や不可能なタスクを実行しようとすることを目指した、量子情報科学という分野が大きな発展を遂げている。量子情報処理を可能とする本質的な量子系の性質はエンタングルメントであると考えられており、特に多体間のエンタングルメントは大規模量子計算や多者間通信を可能とする重要なリソースであると考えられている一方、多体間エンタングルメントに関する理論的・実験的な研究は、量子情報科学において重要な課題となっている。本論文では、特に光子の系を用いた多体間エンタングルメント生成と応用についての理論的・実験的な研究成果が示されている。

第 3 章では、パラメトリック下方変換から得られる 2 光子と、レーザー光を弱めて得られる 1 光子を用いることにより、高効率で 3 光子の  $W$  状態とよばれるタイプのエンタングル状態を生成する方法の提案およびその実験結果を示した。この方法を用いると、従来のパラメトリック変換 4 光子過程で生成された 4 光子を処理する場合と比べて、40 倍以上の効率で 3 光子  $W$  状態を生成することができる。このため、従来の方法では困難であった、実験で生成した  $W$  状態の測定による完全な特定が可能となるという画期的な結果を得た。次に第 4 章では、3 光子  $W$  状態生成実験の拡張として、4 光子  $W$  状態や更に一般的な  $n$  光子  $W$  状態の生成方法を理論的考察が行われた。

多光子エンタングルメントの応用に関する実験として、第 5 章では、テレクローン状態の生成と解析の結果が示されている。テレクローン状態は量子テレクローニングと呼ばれる量子情報処理プロトコルの実行に必要な多体エンタングル状態の一種である。量子テレクローニングは、ある種の量子計算の一例で

あるとみなすことができ、更にそれ自体をある種の量子暗号通信に応用することも可能である。量子テレクローニング過程におけるベル測定を行う代わりに仮想的な入力状態を想定した射影演算を行うことで、ベル測定をシミュレートする方法を考案し、実験を行った。その結果として、実験で得られた状態は量子テレクローニングのリソースとして十分な質を持っているということが確認された。この実験では量子テレクローニング過程そのものを実現しているわけではないが、テレクローン状態の生成から一歩進んで、量子テレクローニング過程の予備実験に成功した、という点で高い意義を持つと考えられる。更に第6章では、より一般の多光子テレクローン状態の生成方法に関して考察を行い、二つの異なるアプローチによる方法が提案されている。

第7章では、多光子エンタングルメントのもう一つの応用として、二光子波束（バイフォトン）の偏光エンタングル状態を用いて、任意の三準位系（キュートリット）の状態を生成する方法の実現が示されている。本論文で示した方法は、従来の干渉計を用いた方法と異なり、二光子波束の3種類の偏光状態二つの最大エンタングル状態（3準位系の2体間最大エンタングル状態）の一方に対して3準位系の基底における射影測定を行う remote state preparation (RSP) によって実行するものである。3種類の状態に対する実験の結果、ポストセレクション後の状態は、理想的な状態に近いものを得ることができた。また、この方法は、 $n$ 光子波束の偏光による一般の多準位系の、任意の状態準備に拡張することができることも理論的に示されている。この実験では、非常に高い精度で理論値を実現して点が注目に値する。

なお、本論文第3章から第7章までの研究は、小林孝嘉教授、Yongmin Li、Haibo Wang、福岡郷介との共同研究であるが、論文提出者が主体となって実験・分析および検証を行ったもので、論文提出者の寄与が十分であると判断する。

したがって、博士（理学）の学位を授与できると認める。