

博士論文（要約）

時間領域多重と高速化による
大規模量子情報処理の研究

横山 翔竜

原子などの非常に小さなスケールの世界での奇妙な振る舞い、すなわち量子特有の現象を積極的に取り入れることで、さまざまなデバイスの性能を飛躍的に向上させることができる。通信や計算といった情報処理に量子力学の原理を応用した量子情報処理では、超大容量通信（量子通信）や超高速計算（量子コンピューター）が可能になると期待されている。量子情報処理の根幹を成すのが、量子系の持つ特殊な相関である量子エンタングルメントである。

例えば、量子コンピューター（量子状態操作）実現へ向け近年提唱された間接的に量子状態を操作する手法（クラスター状態を用いた測定誘起型の量子状態操作[R. Raussendorf and H. J. Briegel, Phys. Rev. Lett. **86**, 5188 (2001)])では、補助状態としてクラスター状態と呼ばれる量子エンタングルド状態を利用する。入力状態とクラスター状態をエンタングルさせた後、量子状態の一部を測定し、測定値に応じた補正を加えることで入力状態に対する操作を行う。特に、測定基底を適切に制御することで、任意の入力状態に対し任意の操作が実現可能である。これまでに当研究室では、4量子間のエンタングルメントを利用した2入力に対するエンタングリング操作を始めとした、光による小規模な量子状態操作の実証実験が既になされている。

測定型量子状態操作では操作の自由度が補助状態を構成する量子状態数によって決まるため、大規模な量子状態操作の実現へは大規模量子エンタングルド状態の生成が重要な鍵となる。従来、さまざまな量子系を用いて量子もつれを大規模化する試みが盛んになされていたものの、イオンを用いた14量子間のエンタングルメントの生成が最大であった。光を用いる場合、スクイーズド光を干渉させることで容易にエンタングルメントを生成できるという利点はあるものの、従来の手法では大規模化に伴い装置が拡大してしまうという問題があった。以上のように、量子もつれ生成の大規模化は非常に困難であり、大規模な量子状態操作実現への大きな障壁となっていた。

本研究では、光を用いた量子エンタングルメント生成を時間的に多重化する新手法、および高速化の新技术により、従来の問題の解決に取り組んだ。従来の手法では、光の量子状態（モード）として光の中心周波数から1MHz離れた狭帯域な周波数成分を持つサイドバンドモードを取り扱っていたのに対し、時間領域多重の手法では、光の中心周波数周りの広帯域な周波数成分を含む波束モードを取り扱う。波束として取り扱うことにより、モードが時間領域で局在するので、装置の規模を拡張することなく大規模な量子状態を効率的に取り扱うことが可能となる。従来とは異なり、空間的な広がりや自由度の他に、時間的な自由度が一つ増えるため、それを制御するための光遅延を上手く取り入れる必要がある。さらに、波束モードとして取り扱う、すなわち高速に信号処理を行うための技術的な課題も生じる。

時間領域多重の手法と光遅延を用いて、大規模なクラスター状態を生成する手法は、2010年シドニー大学のMenicucciらにより初めて提案された[N. C. Menicucci, X. Ma,

and T. C. Ralph, Phys. Rev. Lett. **104**, 250503 (2010)]. さらに翌年の2011年、それとは少し形が異なる構成でも同様に、時間領域多重による大規模なクラスター状態を生成することが可能であるとMenicucciにより報告された[N. C. Menicucci, Phys. Rev. A **83**, 062314 (2011)].

近年、当研究室では、時間領域化（光の波束モードを取り扱うため）の技術開発が進み、光の波束モードとして存在する量子状態の量子テレポーテーションが可能となってきた[N. Lee *et al.*, Science **332**, 330-333 (2011)]. しかしながら、各装置の対応帯域が～10MHz程度と低速で、高速な処理を行うことが難しいばかりか、それに応じた光遅延を多く必要とするなど、応用上の技術的な課題が多数存在する。量子エンタングルメントの元となるスクイーズド光は損失に非常に弱く光遅延により大きな損失を受けてしまうため、多重化による量子エンタングルメント生成装置の具現化には至っていなかった。

上記を踏まえ、本研究では、損失の非常に少ない光遅延系の構築、～100MHz帯域のスクイーズド光発生機・光検出機を利用するなど、多くの技術開発を行い、装置を構築し、時間領域多重と高速化による以下3つの実証実験を行った。

1. 超大規模量子エンタングルド状態の生成実験（時間的に変調信号を遮断する方法）

2011年の理論提案に基づき、時間領域で多重化された2台のスクイーズド光発生機と光ファイバーによる光遅延を組み合わせ、超大規模エンタングルド状態を生成する装置を構築した。全てのビーム干渉箇所において、変調信号を加えたビームを基準に相対位相を制御しているが、変調信号は最終的な測定値に対してノイズとなる。これを遮断するために、フィードバック制御とデータ取得を交互に切り替え、データ取得時にビームを音響光学素子により遮断し測定を行った。その結果、従来比1,000倍超となる16,000モード以上がもつれあった超大規模量子エンタングルド状態の生成に成功した。

2. 超大規模量子エンタングルド状態の生成実験（周波数的に変調信号を遮断する方法）

1. で構築した装置は、データ取得中にフィードバック制御を行わないため外乱による経時劣化は不可避である。そこで、損失を少し増やす代わりにシステムの安定性を増やした実験系へ一部改良し実験を行った。具体的には電気フィルターにより測定信号から変調信号を遮断している。変調信号と共に信号の主成分の一部も遮断するためスクイージングレベルが前者に比べると低くなるものの、フィードバック制御が常になされているため経時変化はしない。構築した装置を用いて生成された超大規模な量子エンタングルド状態は、120万モード以上がもつれあっていること

を確認した。この数は測定装置により制限されているため、実質的にはもつれあつたモード数に制限の無い超大規模な量子エンタングルド状態の生成に成功したといえる。

3. 波束モードに対し動作する量子非破壊相互作用ゲートの実証実験

上記の実証実験により、大規模量子情報処理の核となる大規模エンタングルド状態を生成することが可能となった。実際に大規模量子情報処理を行うための次のステップは、入力状態と大規模エンタングルド状態をエンタングルさせた後、量子状態の一部を測定し、測定値に応じた補正を加えることである。これらの処理を高速に繰り返すことで、大規模な量子情報処理が可能となる。そこで多入力に対する最小単位の量子情報処理の実証実験として、波束モードに対し動作する量子非破壊相互作用 (QND: Quantum Non-Demolition) ゲートを構築した。このゲートは 2010 年に提唱された大規模エンタングルド状態生成法の核でもある。

本実験では、当研究室で開発された従来の10倍以上高速に動作する新型光検出器・スクイーズド光発生器を利用した。その結果、光遅延系を1/4程度にまで短縮し光損失やシステムの不安定性を減らす、システム全体としての動作速度を10倍以上高速化するなどに成功した。構築した装置に二つの真空場を入力し、QNDゲートにより加減算され、出力状態の分散がそれぞれ正しく増幅していることを確認した。さらに、QNDゲートにより完全に無相関な二つの入力が相互作用し、出力状態でエンタングルしていることを分離不可能条件により示した。

本研究で得られた時間領域多重と高速化の技術の応用として、二つ方向性が考えられる。一つは、実際に得られた大規模エンタングルド状態を補助状態として利用し、大規模な測定誘起型量子状態操作を行う事である。もう一つは、時間領域で動作するQNDゲートを構築した技術を生かし、任意の量子状態操作を実現するうえで唯一達成できていない非ガウス型操作の実現を目指す事である。いずれも、今後の任意の量子状態に対する大規模量子状態操作には必要不可欠な要素である。今後の研究により、これらの実証が行われ、実用的な量子計算機の実現につながる事が期待される。