

主論文の内容の要旨

学位申請者 氏名	新城 亜美	ローマ字 氏名	Ami Shinjo
-------------	-------	------------	------------

論文題名

高繰り返しパルス光源を用いた連続変数エンタングルメントの研究

内容の要旨

量子エンタングルメントは量子力学特有の現象であり、エンタングルした状態を二手に遠く離しても、片方の測定結果がもう片方の状態に瞬時に影響を及ぼす非局所的な相関を持つ。

Einstein, Podolsky, Rosen の3人はこの非局所的な相関のことを遠隔怪作用 (spooky action at a distance) と呼び、量子力学の記述の不完全さを指摘した。彼らは1935年の論文の中で位置と運動量が相互作用した2粒子系についての思考実験を行い、局所实在論 (古典論) と量子論の記述の完全さとの間には矛盾があると指摘した。これがのちに3人の頭文字を取って名付けられた EPR パラドックスである。Schrödinger は EPR が論文で用いた状態をエンタングルメントと名付け、エンタングルメントによる非局所的な効果のことをステアリングと呼んだ。EPR パラドックスを実験で実証することは1992年に初めて行われた。この実験では連続光源を用いて量子化した光の電磁場の sin 成分、cos 成分の振幅である直交位相振幅 X, P を用いる直交位相振幅エンタングルメント (連続変数エンタングルメント) の生成を行い、二手に分けてエンタングルメントの測定を行い、測定したエンタングルメントの相関の強さが直交位相振幅の不確定性関係を破ったことから EPR パラドックスの実証に成功した。2007年にはステアリングの操作的な定義が提案され、これ以降 EPR パラドックスとステアリングの実証の実験がいくつも報告されている。

連続変数エンタングルメントによる EPR パラドックスとステアリングの実証の報告の多くは連続光源を用いている。連続光源のメリットとしては連続変数エンタングルメント生成の際に用いるスクイーズド光 (直交位相振幅 X, P のうち片方の量子雑音の大きさを大きくする代わりに、もう片方の量子雑音の大きさを標準量子限界より小さくした光) の圧搾の度合いを大きくすることが容易であるが、ある時間間隔で区切って直交位相振幅値を得る時間領域測定においては、1回1回の測定の間に関係を持ってしまい、独立な測定ができないという問題がある。一方でパルス光源を用いると、個々のパルスは独立したモードを持っているために1回1回の測定を独立に行える検出器さえあれば、時間領域測定において独立な測定を行うことができる。これは EPR パラドックスやステアリングの実証において望ましいことであるだけでなく、量

子情報通信への応用にも有利である。しかし、今までパルス光源を用いて連続変数エンタングルメントを生成し、時間領域測定を行い、EPR パラドックスやステアリングの実証を行ったという報告はない。

本研究ではパルス光源で連続変数エンタングルメントを生成し、時間領域測定によって EPR パラドックスやステアリングの実証を世界で初めて行うことを目標とした。この目標の達成のためには、生成したエンタングルメントと、ホモダイン検出を行う際に必要な局部発振光 (LO 光) の間の時間的・空間的モードマッチを向上させること、1 回 1 回の測定が独立に行えるホモダイン検出器を用意することが求められた。一つ目のエンタングルメントと LO 光の間の時間的モードミスマッチを解消させることについては、LO 光のパルス時間幅をパラメトリック増幅によって短くするパルスシェイプを行い、さらに空間モードマッチを向上させることについては光学系の調整方法を改善させた。次にホモダイン検出器については、市販のもので時間領域測定を行うために必要な性能を持っているものがなかったため、高速なフォトダイオードと高速・広帯域なオペアンプを用いてホモダイン検出器を自作した。隣り合うパルスの相関係数を測ることで独立な測定が行えているかの検証を行った。結果として相関係数は 0.1 を下回るものの、0 にはしきれていないため、さらなる改良を継続中である。

エンタングルメントの時間領域測定を行っていく過程で、レーザー由来のノイズが見つかり、測定結果に影響を及ぼしていることが分かった。そのため、ノイズ対策を行うためにホモダイン検出器に光を入れる際の調整方法を変えることで検出するノイズを低減させた。

これらの工夫によって時間領域測定において相関の強いエンタングルメントの生成・観測に成功した。また、同じ条件で行った周波数領域測定 (ホモダイン検出器で検出した信号のうち 5 MHz の成分の信号強度を見ることで、エンタングルメントの相関の強さの時間平均を見る) においても相関の強いエンタングルメントの観測に成功している。今回測定したエンタングルメントの相関の強さは、EPR パラドックスやステアリングの実証を行うことが可能になる相関の基準である EPR-Reid 基準を満たすものであった。周波数領域測定・時間領域測定の両方で EPR-Reid 基準を満たすエンタングルメントの生成・観測をパルス光源を用いた実験で成功したのはこれが世界で初めてである。