

論文審査の要旨及び担当者

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

論文審査の要旨

本論文は、高繰り返しパルス光を発生するレーザー光源を用いて、導波路型の非線形光学結晶中の縮退パラメトリック増幅により連続変数エンタングルメントを生成し、測定結果に強い量子相関が現れることを実証したものである。本論文の成果は、量子力学の基礎を検証するという基礎的な観点だけでなく、量子情報処理への応用にも意義があり、博士（理学）の学位に値すると判断した。

〔論文の概要〕

第1章は序論として、研究背景と先行研究について述べ、本研究の特徴と本論文の構成をまとめている。研究背景としては、まず、1935年に Einstein, Podolsky, Rosen の3名が量子力学による物理的実在の記述が不完全であると主張した論文を発表したこと、それにより量子力学と素朴な自然観が両立しえないことが認識されるようになったことについて簡単に述べ、次に、検証実験とその基礎となる実験報告を先行研究として紹介している。そして、本研究の意義を、従来の研究と比較した特徴を述べることにより明らかにしている。

第2章では、本研究の理論的なバックグラウンドとして、古典的な非線形光学理論の概略と二次高調波の発生、位相整合と疑似位相整合、さらに、本研究で重要な縮退パラメトリック増幅についてまとめている。第3章では、量子光学の理論をまとめており、電磁場の量子化の手続きを述べた後、光の量子状態として、エネルギー固有状態である光子数状態と、レーザー光の状態を表すコヒーレント状態の定義と性質を述べている。次に、電磁場の直交位相振の定義とその交換関係と不確定性関係を示している。そして、量子揺らぎを圧搾した状態であるスクイーズド状態の定義と性質を述べている。その後、直交位相振幅を測定する手段であるホモダイン検出、エンタングルメントの生成、光損失の理論的な取り扱いについて述べている。本研究では、スクイーズド状態の光ビームを二つ発生し、それらを重ね合わせることでエンタングルメントを生成し、直交位相振幅を実験的に測定しており、学位申請者は、研究の背景となる知識を的確にまとめている。最後に、Einstein, Podolsky, Rosen による1935年の論文の内容を述べ、EPRパラドックスとsteeringとは何か、そして、実験的にこれらを実証する基準であるEPR-Reid基準を明らかにしている。Einstein, Podolsky, Rosen は2粒子の位置と運動量

が相関した状態を考え、量子力学の記述が完全ではないと主張したが、その議論は局所实在論と呼ばれる素朴な世界観を仮定したものであった。そのため、Einstein らが指摘した現象を実験的に実現することは、量子力学と局所实在論が両立しないことを実験で示すという意義がある。

第4章では、本研究で使用したホモダイン検出器について述べている。このホモダイン検出器は、広帯域低雑音のオペアンプを用いて学位申請者が自作したものであり、本論文の成果を達成するための鍵となった実験技術の一つである。具体的には、回路図と用いた部品等を説明した後、性能評価について述べている。ホモダイン検出器の性能評価では、パルス一つひとつの直交位相振幅を独立に測定することに焦点をあてて、その特性を明らかにしている。RF スペクトラムアナライザを用いて測定した周波数領域の特性について述べたあと、デジタルオシロスコープで測定した時間領域の測定データから、どのようにデータ処理をしてパルス毎の直交位相振幅を得るかについて詳細に述べている。そして、申請者の自作したホモダイン検出器を用いて不確定性関係に起因する量子揺らぎを測定できること、パルス一つひとつを独立に測定可能であることを述べている。

第5章は、エンタングルメントの時間領域測定により、EPR-Reid 基準を満たすことができたことを詳細に述べている。特に、どのような工夫により EPR-Reid 基準を満たす相関の強いエンタングルメントを達成することができたのについて詳しく述べている。強い相関を達成するためには、相関の強いエンタングルメントを生成するだけでなく、効率よく相関を測定することが重要である。効率よく相関を測定するためには、ホモダイン検出に用いる LO 光パルスとエンタングルパルスの時間・空間モードを一致させること、優れた性能を持つホモダイン検出器を用いることが重要であり、これらを達成したことは、申請者が光学技術と回路技術ともに優れた技量を持つことを示している。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測定において、LO 光のパルス時間幅を短縮し、時間モードの一致を改善したことは、本研究で初めて学位申請者が実現した実験手法であり、その詳細を述べている。次の節では、スペクトラムアナライザを用いた周波数領域の測定において、EPR-Reid 基準を達成したことを報告している。そして、測定結果を様々な損失を考慮して、定量的な評価を行っている。その次に、本論文の最も重要な研究成果として、時間領域の測定データから、共分散行列を求め、EPR-Reid 基準を達成したことを報告している。そして、パルス一つひとつの測定の独立性を検証している。

第6章に簡潔に結論がまとめられている。

〔審査の方法〕

論文の査読と口頭試問により審査した。

〔内容の評価〕

本論文は、パルス光の直交位相振幅をパルス一つひとつに対して独立に測定し、EPR-Reid 基準を満たす強いエンタングルメントを実現したことを報告したものである。EPR-Reid 基準を満たすエンタングルメントの実現は、量子力学と局所实在論が両立しえないことを実験によ

り実証するという意義がある。本論文では、二つの非線形導波路中の縮退パラメトリック増幅によりスクイズド状態の光ビームを二つ発生し、それらを重ね合わせてエンタングルメントを生成した。学位申請者が測定した物理量は電磁場の直交位相振幅であり、粒子の位置と運動量と同様に連続的なスペクトルを持つ物理量なので、本論文の実証実験は、Einsteinらのオリジナルの提案に沿って、量子力学の本質的な特徴を明らかにしたものであるといえる。パルス光の独立な測定により、EPR-Reid基準を満たす強いエンタングルメントを実現したのは、本論文が初めてであり、高い意義のある成果と考えられる。繰り返し周波数の高いパルス光独立に測定する本論文の手法は二つの測定を因果的に分離することが可能であるので、量子力学の原理的な側面の検証という基礎的な意義だけでなく、量子通信や量子計測につながる応用面でも重要な研究成果である。

〔結論〕

以上により、審査委員会は全会一致で本論文が博士（理学）の学位に値すると結論した。

論文審査主査	平野 琢也	教授
	荒川 一郎	教授
	渡邊 匡人	教授