

京都大学	博士 (工学)	氏名	玉手 修平
論文題目	Geometry of weak measurements and its application to optical interferometry (弱測定 of 幾何学とその光干渉測定への応用)		
<p>(論文内容の要旨)</p> <p>本論文は、弱測定における基礎的なアンサンブルである事前・事後選択されたアンサンブルの幾何学的な性質を明らかにし、それをもとに弱測定を用いた光干渉測定の手法を実証したものである。論文は7章からなっている。</p> <p>第1章は序論であり、本研究の背景となる弱測定について述べ、量子力学の基礎理論との関連や精密測定への応用など、これまでの研究状況について概説している。それらを踏まえた上で、本研究の目的と概要について述べている。</p> <p>第2章は、弱測定に関連する基礎的な理論について述べている。まず、量子力学における測定の定式化の方法について述べている。さらに、弱測定の基礎となる考え方として、2状態形式について述べている。2状態形式とは、事前・事後選択された量子アンサンブルを基礎とした量子力学の定式化である。次に、弱測定の基礎原理について述べ、事前・事後選択アンサンブルに対して弱測定を行うことで弱値と呼ばれる特徴量が測定できることを示している。また、弱測定の計測上の利点についても議論している。</p> <p>第3章は、弱測定と幾何学的位相の関連について述べている。まず、弱測定と量子消去系のアナロジーに着目し、これら2つの系が内部自由度をもった干渉系として統一的に捉えられることを示している。次に、量子消去系において、状態の事後選択を行うことで、幾何学的位相の大きさに応じて干渉縞が移動することを示している。また、量子消去系とのアナロジーから、弱測定におけるプローブの変位が幾何学的位相に起因するものとして理解できることを示している。さらに、弱測定における信号増幅が幾何学的位相の特異な変化と密接に関連していることを示している。最後に、弱測定における測定上の制約が幾何学的位相の非線形性をもとに理解できることを示している。</p> <p>第4章は、弱測定において重要な役割を果たす事前・事後選択アンサンブルの状態を幾何学的に記述する手法について述べている。まず、事前・事後選択アンサンブルの状態を記述する2状態演算子を導入し、この演算子が量子状態のつくる空間上でどのように幾何学的に表現されるかを述べている。次に、2状態演算子をブロッホ球上に表示する手法について述べている。弱測定の測定値である弱値を、ブロッホ球表示をもとに理解する手法を考案し、弱値が定義する複素確率分布の性質について検討を行っている。最後に、ブロッホ球表示を用いて、与えられた成功確率のもとで弱値を最大化するためのアンサンブル選び方について述べている。</p> <p>第5章は、弱測定を用いて事前・事後選択アンサンブルの状態を推定するためのトモグラフィの手法について述べている。従来、弱測定は事前・事後選択アンサンブルの1つの物理量の弱値を測定するために用いられてきた。しかし、弱測定の相互作用として交換相互作用を用いることで、測定結果をもとに事前・事後選択アンサンブルの状態自体を完全に決定できることを示している。また、このトモグラフィの手法を実現する光学系を提案している。</p> <p>第6章では、完全な混合状態をプローブとして用いた場合でも弱測定が可能であることを実証している。まず、混合状態を用いた弱測定について定式化を行い、混合状態を</p>			

京都大学	博士 (工学)	氏名	玉手 修平
<p data-bbox="161 271 1422 607">プローブとして用いた場合の信号雑音比を導出している。また、プローブとして用いる状態が測定の前でデコヒーレンスを起こした場合の影響を考察し、弱測定がどのようなノイズに対して強い測定であるかを明確にしている。その結果、完全な混合状態をプローブとした場合の方が純粋状態を用いた場合よりもノイズに強い測定となることを示している。さらに、完全な混合状態を用いた弱測定を光干渉測定に応用する実験を行っている。実験では、完全な混合状態として無偏光状態を用いており、無偏光状態を用いた場合でも、干渉系を組み合わせることで、偏光回転素子の作用を測定することが可能であることを示している。</p> <p data-bbox="209 613 1190 651">第7章は結論であり、本論文で得られた成果について要約している。</p>			

氏名	玉手 修平
----	-------

(論文審査の結果の要旨)

量子力学の基礎的な性質を解明することは、量子情報や量子計測といった応用分野の発展に繋がってきた。弱測定は特に事前・事後選択された量子アンサンブルの性質を調べるために考案された測定手法である。近年では、この事前・事後選択アンサンブルのもつ特異な性質を利用することで、弱測定は精密測定的手法としても応用されつつある。本論文では、弱測定において重要な役割を果たす事前・事後選択されたアンサンブルの状態を幾何学的に表現する手法を構築している。また、その表現をもとに弱測定を光干渉測定に応用し、無偏光な光を用いた偏光光学素子の測定手法を実証している。本論文は主に以下の4つ内容から構成されている。

(1)幾何学的位相と呼ばれる量子力学の基礎的な概念と弱測定の関連を明らかにしている。また、弱測定と幾何学的位相との関連を用いることで、弱測定における事後選択の作用を幾何学的に捉える手法を提案している。

(2)弱測定において重要となる事前・事後選択された量子アンサンブルの状態をブロッホ球上で幾何学的に表現する手法を構築している。この表現を利用することで、事前・事後選択されたアンサンブルの特微量である弱値を幾何学的に取り扱う手法を確立している。さらに、与えられた成功確率のもとで弱値を最大化する手法を幾何学的な観点から明確化している。これにより、弱測定における測定の感度を最適化するための指針が明らかにされている。

(3)弱測定を用いて事前・事後選択されたアンサンブルの状態のトモグラフィを行う手法を提案している。弱測定の相互作用として交換相互作用を用いることで、単一の相互作用のみを用いてアンサンブルの状態を推定できることを示している。また、このトモグラフィを光学系において実現するための実験系を提案している。

(4)混合状態を用いた弱測定を光干渉測定に応用し、無偏光な光を用いた偏光光学素子の測定実験を行っている。まず、混合状態を用いた弱測定の定式化を行い、弱測定がどのようなノイズに対して強い測定となるかを明確化している。この結果から、完全な混合状態を用いた場合でも弱測定が行えることを示している。さらに、完全混合状態を用いた弱測定を光干渉測定に応用することで、無偏光な光を用いて偏光回転素子の微弱な作用を計測できることを示し、これを実験的に検証している。

以上のように、本論文では弱測定を幾何学的に取り扱う手法を確立し、それをもとに弱測定を用いた新たな光干渉実験を提案している。弱測定の幾何学的な理解は、新しい応用実験を考案するための基礎となると考えられる。また、完全混合状態を用いた弱測定はノイズ下での効率的な計測手法を与えており、微弱な相互作用の計測手法として有用である。このように、本論文は、弱測定の基礎的な取り扱いから実際のノイズ下での測定手法まで、幅広い知見を与えており、学術上、實際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士(工学)の学位論文として価値あるものと認める。また、平成25年2月22日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行って、申請者が博士後期課程学位取得基準を満たしていることを確認し、合格と認めた。