

論文審査の結果の要旨

氏名 渡辺 優

本論文は、全10章からなる。第1章は不確定性関係に関する導入、第2章は不確定性関係に関する先行研究の概説、第3章と第4章がそれぞれ古典推定理論と量子推定理論の概説、第5章が Lie 代数の生成子を用いた離散量子系の記述、第6章が Lie 代数を用いた Fisher 情報量および量子 Fisher 情報量の解析、第7章が任意の量子測定における測定誤差と擾乱の定式化、第8章が測定誤差と2つの物理量の測定誤差に対する不確定性関係、第9章が量子測定における誤差と擾乱の間の不確定性関係、そして第10章が結論と討論という構成である。

1927年に提案された Heisenberg の不確定性関係は、 γ 線顕微鏡を用いて粒子の位置を測定する思考実験から導かれた、位置の測定誤差と運動量の擾乱との積は Planck 定数で決まる一定の値よりも小さくすることができない、ということを表す不等式である。この不確定性関係は、ある物理量を測定するとその反作用により正準共役な物理量に擾乱を与えるという、量子力学における測定の相補性を表すと解釈され、量子力学と古典力学との本質的な相違を記述するものと考えられてきた。しかしこの不等式は、半古典論に基づいて導出されたものであり、完全に量子力学的な記述を行なって導出したものではなかった。一方、2つの物理量の分散の積を物理量の交換関係で決まる値より小さくすることはできない、という Kennard-Robinson の不等式を不確定性関係と呼ぶ場合もあるが、この関係式は測定誤差に関する擾乱の間の不確定性関係を記述するものではない。量子測定理論に基づいた測定誤差に対する不確定性関係は、1988年に Arthurs と Goodman によって不偏測定という特別なタイプの量子測定を用いた間接測定モデルに対して定式化され、測定誤差の効果により2つの物理量の分散の積は Kennard-Robinson 型の不等式の2倍の下限を持つという Heisenberg 型の不確定性関係が示された。これに対して、2004年に小澤は、Arthurs と Goodman のモデルを任意の間接測定に拡張し、測定誤差を記述する関数と擾乱を記述する関数を定義することによって、測定誤差と物理量の分散、そして擾乱の関係を示す不等式を導出した。この不等式は、Heisenberg 型の不確定性関係を破る場合がある。Arthurs と Goodman が定義した測定誤差を記述する関数は、測定によって得られる量子系の情報量に対する誤差という操作論的な

意味を持っていたが、小澤の定式化では任意の間接測定への拡張が行なわれたことにより、測定誤差と擾乱を記述する関数の操作論的な意味が不明確となっていた。

本論文は、測定によって量子系の情報をどのくらい知ることができるかという視点から、量子推定理論に基づき量子測定における測定誤差と擾乱を Fisher 情報量および量子 Fisher 情報量を用いて定義し、これらの中に成り立つ不確定性関係を導いたものである。第 6 章で導出された離散量子系における Lie 代数の生成子を用いた Fisher 情報量および量子 Fisher 情報量の記述により、量子推定理論の立場から第 7 章で定義された任意の量子測定における測定誤差と擾乱の関数が解析を容易にする簡潔な形で導かれている。そして、第 8 章において、2 つの物理量の測定誤差に関する Heisenberg 型の不確定性関係を導き、さらに、2 つの物理量の間量子相関を記述する関数を導入することで、達成可能な下限を示す新たな不等式が導出された。第 9 章では、測定誤差と擾乱に関する Heisenberg 型の不確定性関係が導かれ、さらに、2 つの物理量の間量子相関を記述する関数を用いて、測定誤差と擾乱に関する達成可能な下限を示す新たな不等式が導出されている。また、どのような測定を行なっても、量子 2 準位系においては、第 8 章と第 9 章で得られた達成可能な下限を示す新しい不等式が成立することを解析的に証明し、第 8 章で導いた新しい不等式については、量子 3 準位系から量子 7 準位系までの量子系で成立することを数値的に示した。

このように、情報論的な観点から不確定性を掘り下げることによって、一般的な量子測定に対して操作論的な意味を持つ測定誤差と擾乱を定式化し、その不確定性関係を導いた本論文の結果は、量子力学の本質的な理解に大きな知見を与える画期的な成果であると考えられる。

なお、本論文第 6 章から第 9 章までの研究は、上田正仁教授との共同研究、第 7 章と第 8 章の一部は、上田正仁教授および沙川貴大との共同研究であるが、論文提出者が主体となって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。