

論文審査の結果の要旨

氏名 森田 辰弥

量子力学は物理学の微視的理論として大きな成功を収めたが、その基礎付けには多くの問題が残されており議論が続いている。本論文は、観測を含めて量子力学を時間反転対称な形で定式化したAharonovらによる二状態ベクトル形式に基づいて、複素数値に拡張した確率測度を新たに提案したもので、以下の6章からなる。

第1章は序論であり、全体的な問題意識と論文の構成を与えている。第2章では、量子力学の基礎について、本論文の背景となる事項をまとめている。量子力学の非古典性としては、量子力学の示す非局所的な相関、すなわちEinstein-Podolsky-Rosen(EPR)相関と、それを定量化するBellの不等式が良く知られている。しかし、非局所性を別にしても、量子力学は非古典性を内在している。その一つに物理量が観測過程の選択に依存するという文脈依存性があり、量子力学では非可換な物理量が同時に確定しないことを反映している。文脈依存性は、EPRが提起した物理的实在の要素を量子力学に求めることの困難さを表している。また、量子力学が非古典的であることを認めるとしても、量子力学自体の理論的な完全性についても疑問が残っている。たとえば、量子力学における時間発展は時間反転対称性を持つ形で記述される。しかし、通常の定式化では、観測過程を純粋な量子力学系の時間発展と区別して扱う必要があり、そこでは時間反転対称性が破れるように見えてしまう。第3章では、観測過程も含めて時間反転対称性を回復した定式化として、Aharonovらにより提案された二状態ベクトル形式についてレビューを行っている。始状態と終状態が射影測定により与えられたものとして、その間の過程において「弱測定」を考えると、弱測定も含めた量子過程が時間反転対称な形で記述できる。弱測定は、実験的な観測の提案や実現もあつて、最近盛んに研究されるようになってきている。特に、Dananらにより構成された干渉計における実験は、弱測定の観点からも、また後に本論文で新たに提案する干渉計の基本としても重要である。弱測定においては、非可換な物理量であっても同時に観測可能であり、文脈依存性を解消して量子力学に物理的实在の概念を復活させる一つの可能性を与えている。しかし、弱測定においては物理量（弱値）を確定的に得ることはできず、多数の観測により統計的に求めることができるだけである。従って、弱測定を確率的なアンサンブルの立場から理解することが求められるが、量子力学における既存の確率測度は全確率の公式を満たさないなど、文脈依存性の解消の観点からは不適切である。

第4章と第5章が本論文のオリジナルな部分であり、量子過程に対して、複素数値を取る一般化された確率測度を新たに提案し、その応用を論じている。第4章では、まず二状態ベクトル形式における量子過程について、複素数値を取る確率測度を射影演算子の弱値を用いて定義している。これは一般に複素数値を取るので通常の確率解釈を行うことはできないが、一方で、全事象の分割を考えた場合に全確率の公式を満たすなど、値が複素数であること以外は確率測度としての条件を全て満たしている。複素数値を取る確率測度の物理的意味については、Dananらによる干渉計を元に新たな干渉計の提案を行い、観測方法によって光子が通過する経路に付随する確率測度の実部と虚部をそれぞれ観測することが可

能であることを論じている。第5章では、量子過程における観測を、第4章で導入した複素数値を取る確率測度の観点から再検討している。まず、弱測定で見出される弱値は、複素数値を取る確率測度を用いた単純な平均で与えられることを指摘している。この点でも、本論文で導入した確率測度は二状態ベクトル形式に対して自然なものであると言える。さらに、通常の射影測定における期待値も、時間反転した量子過程を考慮すると複素数値を取る確率測度によって記述できることを示している。さらに、複素数値を取る確率測度を用いて間接測定を統一的に理解できることを論じている。最後に、第6章で全体のまとめと、将来の課題を含めた議論を行っている。

以上のように、本論文では量子力学の基礎に関して複素数値を取る確率測度という新たな概念を導入し、その数学的性質や物理的意味、また様々な応用を論じている。特に、この確率測度の実部と虚部をそれぞれ検出できる干渉計の提案を通じて、本研究で提案した概念が新たな物理を開拓する可能性を示している。なお、本論文は、筒井泉氏らとの共同研究に基づいているが、本人の寄与は主体的で十分であると認められる。

よって、論文審査委員会は全員一致で博士（理学）の学位授与が適当であると認めた。