

Observing the Weak Value through Quantum Interference

その他のタイトル	量子干渉を通して観る弱値
学位授与年月日	2015-03-24
URL	http://doi.org/10.15083/00008086

論文審査の結果の要旨

氏名 森 琢 也

本論文は、5章と補遺 A、B からなる。

第1章は、全体のイントロダクションであり、研究の背景として、量子力学における不確定性原理、相補性の原理や二重スリット実験及びその解釈、また、弱値についての歴史が述べられている。

第2章は、弱値と弱測定のリビューにあてられている。まず、量子測定過程における時間反転対称性について述べられた後、弱値が導入されている。弱値は1998年に Aharonov らによって提唱されたもので、通常物理量が演算子の一つの状態による期待値として定義されるのに対して、弱値は始状態と終状態の二つの状態の間の行列要素として定義される。弱値は演算子の固有値の範囲を超えうるので、精密測定への応用が期待されている。また、波動関数の測定や量子力学のパラドックスの解釈の議論にも弱値は用いられている。Hardy の Mach-Zehnder 干渉計を用いたパラドックスにおいては、その直感的説明が弱値を用いて提案され、実験でも確かめられている。また、Danan らによって Mach-Zehnder 干渉計の結果を合理的に説明するために弱値を用いた実験が提案されている。始状態から推測される光子の通る経路と実験結果は一致しないことがあるが、Danan らは、終状態からの時間逆発展も考慮することで実験結果を直感的に説明できることを示した。この結果は Aharonov らの提唱する two-state vector formulation とも整合的である。また、弱測定とその弱値による解釈が説明されている。

第3章では、運動量の弱値と量子干渉の関係についての議論にあてられている。まず、一般的な議論として、干渉を議論するにあたっては、暗黙のうちに経路が選ばれていることが指摘され、ある経路の選択のもとで、弱値の虚部が遷移確率の対数微分と一致することが示されている。次に、実際に、二重スリット実験とスピン系を例にとり、二重スリット実験においては運動量の弱値の虚部が干渉効果に対応していること、スピン系においてはスピン演算子の弱値の虚部が干渉効果とみなせることを議論している。

第4章では、位置の弱値として定義される弱軌道と古典軌道の関係についての議論にあてられている。まず半古典近似のレビューの後、Ehrenfest の定理が弱値の場合に拡張され、自由粒子や、調和振動子ポテンシャルの元での位置の弱値の実部が古典軌道に一致することが議論されている。次に、二重スリット実験においては、位置の弱値の実部が古典軌道の平均値と一致することが示されている。三重スリット以上の多重スリット実験においては、位置の弱値の実部は古典軌道の平均値とは必ずしも一致しないが、複素確率を導入することで、位置の弱値が古典軌道の平均値として理解できることが指摘されている。

また、内部自由度（スピン）がある場合には、干渉縞が現れる系において、得られる弱値が古典軌道と対応すること、この結果は、弱値が統計量であるので相補性の原理とは矛盾しないことが議論されている。最後に、完全反射する壁（Lloyd's mirror）の下では、位置の弱値は古典経路とは異なり、時間に関してなめらかな複素関数として表されることが示されている。

第5章は、論文の内容のまとめと議論にあてられている。

補遺 A は、弱測定における結合確率の詳しい導出、補遺 B は、量子消しゴムの干渉にあてられている。

本論文の意義は、弱値と干渉効果や経路についての関係を明らかにした点にある。弱値の虚部と遷移確率の関係はすでに知られていたが、特に、経路の分け方を適切に指定した上で初めて、干渉と弱値の虚部の適切な関係が得られることを示した点が本論文における新しい点であると考えられる。

なお、本論文第3章及び第4章は、筒井泉との共同研究であるが、論文提出者が主体となって分析及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。