

氏 名 福田 教紀

学位(専攻分野) 博士(理学)

学位記番号 総研大甲第 1827 号

学位授与の日付 平成28年3月24日

学位授与の要件 高エネルギー加速器科学研究科 素粒子原子核専攻
学位規則第6条第1項該当

学位論文題目 On the Significance of Quasi-Probability in Quantum
Mechanics

論文審査委員 主 査 准教授 筒井 泉
教授 北澤 良久
教授 磯 暁
教授 熊野 俊三
准教授 森松 治
特命教授 細谷 暁夫 東京工業大学

論文内容の要旨
Summary of thesis contents

福田氏の博士論文は、従来の確立概念を一般化した「擬確率」(quasi-probability) という概念に基づいて、近年、Aharonov が提唱し量子基礎論の研究において注目されている弱値と呼ばれる新たな量子物理量に対して確固たる概念的基礎を与えるとともに、その測定方法である弱測定 (weak measurement) の操作論的な意味を明確にしたものである。加えて、これらの新しい知見に基づいて、量子力学と等価でありながら、実在論的な解釈を可能とする隠れた変数の理論の代表例である (de Broglie-) Bohm 理論に、より確実な基礎を与えている。

本論文の構成は以下の通りである。まず第 1 章で導入としての研究の背景の説明と、本学位研究の概要、及び各章の記述内容の要約が与えられている。研究の背景としては、有名な 1935 年の EPR 論文において指摘された量子力学の問題点と、「完全」な物理理論としての隠れた変数の理論の構想、そしてこれを受けた PBR 定理などの最近の研究の進展が述べられている。その上で、別のアプローチとして弱値という最近の視点が導入され、その基盤にある「擬確率」の概念の重要性が強調されている。

第 2 章では基本概念としての「擬確率」がどのような意味で量子力学における自然な概念として見なされるかについて、公理的な数学的枠組みと、決定論及び同時測定可能といった物理的要請の両者に基づいて述べられる。その後、この「擬確率」と弱値及び弱測定との関係性が、標準的な確率の数学的定式化を援用して、条件つき確率分布、同時確率分布等の一般化の議論を通して、詳しく説明されている。取り分け「擬確率」の特徴として、許される任意性についても指摘されており、続く第 3 章以下で行われる議論の基礎的な前提を確認する作業が行われている。

次の第 3 章では、操作論的観点からの確率論と測定記述の関係が確立され、同時測定可能性と決定論との関係や、さらに確率論の中における古典力学と量子力学の位置づけが論じられる。加えて、操作論的な確率論についての説明がなされ、その上で弱測定を特徴づける事後測定 (post-selection) の下では通常確率の代わりに自然な形で「擬確率」が導かれることが、明快な形で議論されている。

続く第 4 章では、まず代表的な隠れた変数の理論として見なされている Bohm 理論が導入される。そしてその中の物理量(「局所期待値」として従来知られたもの)が、実は事後選択測定という条件下で得られる弱値と同定できることが示され、さらに物理量が射影演算子の場合には、その量が「擬確率」として知られた特性を有するものになることが明らかにされる。その上で、近年、試みられている Spekkens らによる隠れた変数の理論の分類を精密化し、拡張することにより、これまで隠れた変数の理論として曖昧さのあった Bohm 理論に確固とした位置づけが与えられ、結果として同時に Bohm 理論の実在論的枠組の中での特殊性を明確にすることができることを明らかにしている。さらに加えて、「擬確率」に基づく Bohm 理論の定式化により、その中での確率解釈の根幹を成す Born 則の導出が極めて簡明なものになることを指摘しており、本論文で導入した「擬確率」が、隠れた変数の

(別紙様式 2)
(Separate Form 2)

理論を考察する上においても、概念的に有益なものであることを示唆している。

以上の本論文の成果をまとめれば、まず量子力学における「擬確率」の表現のための一般的な枠組を整備した上で、事後選択測定（「弱測定」）において得られる弱値という物理量の背後に「擬確率」が自然な概念として存在することを示したことが1つ。これは、これまで事後選択を行わない通常の測定によって定まる量子状態に、古典的な観点からの確率分布を割り宛てる際に用いていた「擬確率」に新しい役割を見つけたことになり、さらにこのことが、量子力学と「擬確率」との関係がこれまで考えられていたよりも深いものであることを示唆する結果になっている。

そして2つ目に、弱測定を操作論的に一般化確率論の中に埋め込むことにより、その認識論的な意義を明らかにしたことを挙げるができる。これは、量子力学における役割とは独立に、「擬確率」が「擬確率」として持つ意義を明確にするものである。最後に3番目として、Bohm 理論が実のところ「擬確率」に基づく隠れた変数の理論の一種と見なすことが可能であり、同理論に対する実在論的な位置づけに、新たな視点を与えたものになっていることが挙げられる。Bohm 理論には従来、様々な解釈が提出され、その隠れた変数の理論としての位置づけにも種々の解釈が可能であり、それが Bohm 理論の意義を曖昧にしてきたと言えるが、この論文の考察により、これに般性のある枠組みにおける規範的な解釈が与えられたことになる。以上、本論文では上述の3つの点の指摘を通して、「擬確率」の量子力学の意義と有用性を明らかにするものになっている。

(別紙様式 3)
(Separate Form 3)

博士論文の審査結果の要旨

Summary of the results of the doctoral thesis screening

近年の量子基礎論の研究において、Aharonov の提唱する新たな量子物理量としての弱値の概念的基礎の探求と、その測定方法である弱測定 of 精密測定への応用の確立の二つが、重要な課題として浮上している。その中で、前者の弱値の概念的基礎については、その基盤的概念として「擬確率」という従来の確率概念を一般化したものが重要であることが種々の観点から指摘されており、また後者の弱測定については、そのより確固たる操作論的な意味づけが、応用の確固たる確立とその適用範囲の拡大に必要とされてきた。

このような状況の下で、福田氏は大学院在学中、一貫して一般化された確率論の枠組における弱値と弱測定を、概念的及び操作論的に基礎づける研究を精力的に行ってきたものであり、本博士論文はこれらの疑問を正面から捉えて、本格的な回答を試みたものである。

その成果としては、まず量子力学における中心概念である「確率」表現のための一般的な枠組を整備し、数学的な整合性の観点から許される「擬確率」が、弱値の背後に自然な概念として存在することを示すことに成功したことを挙げるができる。さらにその上で、弱測定における事後選択 (post-selection) の手続きを操作論的な形で一般化確率論の中に埋め込むことにより、その認識論的な意義を明らかにしている。加えて、量子力学に実在論的解釈を与えるものとして最も良く知られる (de Broglie-) Bohm 理論における物理量の期待値が、形式的に弱値に等しいことを指摘し、これを通して Bohm 理論が「擬確率」に基づく隠れた変数の理論と見なせることを示すことにも成功している。この後者は、隠れた変数の理論として長年、周知されていながら、従来曖昧な点が残されていた同理論に対する実在論的な位置づけに、明瞭な視点を与えるものになっている。

以上のように、今回の福田氏の博士論文は、「擬確率」という概念を中核として、弱値の概念的基礎と弱測定 of 操作論的な意味の両者を同時に明確にするものであり、さらに Bohm 理論に、確実な実在論的基礎と新しい知見を与えたことは高く評価できる。

これらの理由により、本学位論文は物理学、特に量子基礎論の研究において重要な意義を持つ成果を含むものであると判断できる。猶、本研究は共同研究に基づくものであるが、本人が主導的な立場で行ったもので、その成果の中心的なものは本人の寄与だと認定できる。以上の理由により、本論文は福田氏の高い学識と研究能力を示すものであり、学位論文としてふさわしいものと判断した。