

論文の内容の要旨

Measurements in Time Symmetric Quantum Mechanics

(時間対称な量子力学における測定について)

氏 名 森 田 辰 弥

量子力学はミクロな系を記述することに成功した理論である。今日の研究の進展を見れば、量子力学がミクロな系を極めて正確に記述する方法であることは疑う余地はない。しかし、量子力学が認知されて 100 年を経ても、量子力学の背景にある構造を整合的に理解できていない。特に、量子系の測定の機構は古典力学によって説明することができていない。

今我々が慣れ親しんでいる量子力学の構成は、直感的な理解が可能な量子力学の構成もしくは解釈が見つかっていないために、古典力学に依拠した直感的な理解ができないものとなっていると考えられる。量子系の直感的な理解ができないというひとつの例として、量子系への物理量の値の割り当ての問題が存在する。例えば、局所的な割り当てに関する Einstein-Podolsky-Rosen の議論[2]が知られている。この議論の 30 年後、Kochen と Specker によってすべての物理量に対する値の割り当てが同時にはできないことが示された[3]。この物理量の値の割り当ての問題は、測定する物理量を予め指定しなければ物理量の割り当てができないことから、量子力学における物理量の値の文脈依存性と呼ばれている。この文脈依存性は古典力学には存在しないため、量子系を記述するためには古典力学に存在しない性質を考える必要があると考えられる。量子系の記述のために Bohm 理論[4]等の全く新しい動力学を構成する選択もあるが、整合的な構成はまだ見つかっていない。

その中で、物理量の値の割り当ての文脈依存性を説明できる構成が時間対称な量子力学の構成の中で提案された[5,6,7]。二状態形式と呼ばれるこの時間対称な構成は、ミクロな系において始状態と終状態を指定した量子過程のアンサンブルによって量子力学を直感的に理解しようとい

う議論から生まれた。この構成では、マクロ系との相互作用である測定によってミクロな系の始状態と終状態が定まると考えている。その間の量子過程は、始状態から時間順方向に時間発展する状態と、終状態から時間逆方向に時間発展する状態の 2 つの状態によって記述される。文脈依存性の問題に対しては、ミクロ系に対するすべての射影測定を境界条件と考え、量子過程に対して実際に行われる測定を限定することで、値を割り当てるべき物理量を制限し、問題を回避している。その一方で、確率の解釈を変えることによって量子力学を理解しようという議論もある [8,9]。そこでは、量子力学で扱われる確率を主観的確率とみなすことによって、確率空間の標本に対応する物理的アンサンブルを想定しない構成を可能とする。この構成では、古典的な理解に必要とされていた確率分布が変化する際の物理的な機構の説明も必要としない。

この論文では、主観的確率ではなく客観的確率による量子力学の構成を行う。従来の量子力学では、確率はヒルベルト空間の直交する射線上の確率測度に対応する量子状態によって計算される。この確率の対応はボルンの確率規則として与えられている。従来の量子力学の確率は、条件付き確率として遷移が記述できないため、確率遷移も量子状態の遷移として記述される。この論文の主目的は、時間対称な量子力学の構成の中に量子過程上の確率分布を導入することで、物理的アンサンブルで定義される確率による量子力学の記述を試みることである。つまり、新しく導入する確率によって量子測定の新しい見地を得ることとなる。Aharonov らによる時間対称な量子力学の構成には、物理量の値を割り当てられたアンサンブルの確率分布という概念は明確に定義されていなかった。

我々は始状態と終状態の 2 つの状態によって指定された確率過程上の確率分布の一般的な表式を求めた。確率の値を複素数まで拡張することで、系の射影演算子の弱値に対応する表式が得られる。この我々の導いた一般化された確率の導出については参考文献[1]にて議論している。二状態形式においては、この弱値を物理量の値として割り当てる[10]。これは従来、物理量の値として割り当てていた固有値を含んだ文脈依存性を満たす割り当てとなっている[11]。一方で、弱値はすべての物理量に対して定まる量として定義されており、これは確率分布に要請される条件と等しい。つまり、弱値はすべての射影演算子に対して定まる我々の導いた確率による期待値としても理解できる。加えて、この一般化された確率は全確率の法則を満たす。全確率の法則は、古典的集合上の確率が満たすべき法則であるが、ボルンの確率規則による従来の量子力学の確率では満たされなかった。さらに、全確率の法則によって定まる条件付き確率が、量子過程上の確率分布の遷移則に正確に一致する。これも従来の量子力学の確率では満たされなかった性質である。また測定過程を考えると、二状態形式では、全く異なる取り扱いが必要だった射影測定と弱値を測定する弱測定の 2 つの測定過程は、一般化された確率で分布する量子過程の選択方法の違いとして記述できる。この記述には時間順方向に進む量子過程と、時間逆方向に進む量子過程の一般化された確率分布が自然に現れる。

この論文の構成は、まず第 2 章で、量子力学における物理量の値の古典的な記述が困難であることを紹介する。物理量の局所性に関する議論もなされているが、ここでは量子力学と古典力学の決定的違いである物理量の値の文脈依存性の問題を主に取り上げる。第 3 章では、Aharonov らによって提案された時間対称な量子力学の構成について紹介する。この形式が文脈依存性の問題をどのように回避しているかを示す。しかし、この構成によってどのようなアンサンブルが問

題を解決したか明らかではないという点、つまり、時間順方向に時間発展する状態と時間逆方向に時間発展する状態を扱うにもかかわらず、物理量の値の分布が状態にどのように定まっているか記述されていない点を指摘する。第4章にて我々は量子過程上の一般化された確率を導入する。量子過程の分布を複素数まで拡張された一般化された確率によって定義する。この確率が古典的なアンサンブルを定義するために必要な条件である、全確率の法則と条件付き確率による確率分布の遷移則を満足することを示す。そして第5章では、量子系の測定過程の一般化された確率による記述を見る。その中で、射影測定と量子過程に対して定まる弱値を引き出す弱測定の違いは、測定器系の事前選択と事後選択の違いによる時間順方向の量子過程と時間逆方向の量子過程の制限として解釈できることを示す。

- [1] T. Morita, T. Sasaki and I. Tsutsui, Prog. Theor. Exp. Phys. 053A02 (2013)
- [2] A. Einstein, B. Podolsky and N. Rosen, Phys. Rev. **47** (1935) 777-780
- [3] S. Kochen and E. P. Specker, J. Math. Mech. **17**(1967) 59-87
- [4] D. Bohm, Phys. Rev. **85** 166 (1952)
- [5] S. Watanabe, Rev. Mod. Phys. **27** 179 (1955)
- [6] Y. Aharonov, P. G. Bergmann and J. L. Lebowitz, Phys. Rev. **134** B1410 (1964)
- [7] Y. Aharonov, and D. Z. Albert, Phys. Rev. D **29** 228 (1984)
- [8] S. D. Bartlett, T. Rudolph, and R. W. Spekkens, Phys. Rev. A **86** 012103 (2012)
- [9] M. F. Pusey, S. D. Bartlett, T. Rudolph, Nature Physics **8**, 475-478 (2012)
- [10] Y. Aharonov, D. Z. Albert and L. Vaidman, Phys. Rev. Lett. **60** 1351 (1988)
- [11] L. Vaidman, Found. Phys. **26**(1996) No.7 895.