

令和 2 年 6 月 16 日現在

機関番号：32665

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2019

課題番号：15K01123

研究課題名(和文)量子力学における確率概念

研究課題名(英文)Concepts of Probability in Quantum Mechanics

研究代表者

北島 雄一郎 (KITAJIMA, Yuichiro)

日本大学・生産工学部・准教授

研究者番号：40582466

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：量子論は確率的な理論であり、すべての観測可能量の確定した値を予測することはできない。隠れた変数理論によれば量子論は不完全であり、すべての観測可能量の値を一意に決定するような隠れた変数が存在する。量子論は隠れた変数を導入することによって完全になるという主張は、アインシュタインによってなされた。彼は、その議論において局所性条件を使った。本研究では、アインシュタインによる局所的操作を代数的場の量子論において定式化した。量子論における隠れた変数の他の結果は、KCBS不等式である。この不等式は局所性条件ではなく非文脈依存性条件を用いる。本研究では、代数的場の量子論が文脈依存的な理論であることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

量子力学が誕生し現在に至るまで、その概念的基礎に関して様々な議論がなされてきた。有名な例は、アインシュタイン・ポドルスキー・ローゼン(EPR)による議論である。この議論で使われていた量子的な性質は、現在量子情報の分野に応用されている。

こうした量子的な性質の概念的基礎を調べることによって、量子情報において何が行われているのか、さらには量子情報の背後にある世界観がどのようなものであるかを明らかにする一助となるであろう。

研究成果の概要(英文)：Quantum theory is a probabilistic theory. It is impossible to predict a definite value of every observable, and only the probability distributions are given. The basic idea of hidden variable theories is to argue that probability arises because quantum states do not represent the ultimate information about the system, and that there are hidden variables by which values of all observables would be uniquely determined. The necessity of a completion of quantum theory with additional hidden variables was advocated by Einstein. He used the locality condition in his argument. In my research, I formulated Einstein's local operation in algebraic quantum field theory. Another result of hidden variables in quantum theory is Klyachko-Can-Binicioglu-Shumovsky (KCBS) inequality. In this inequality, the noncontextuality condition is used instead of the locality condition. In this research, I showed that any normal state violates this inequality in the case of algebraic quantum field theory.

研究分野：科学哲学

キーワード：科学哲学 確率 量子論 局所性 非文脈依存性

1. 研究開始当初の背景

Einstein, Podolsky, and Rosen (1935)は、量子力学は不完全であると主張した。しかし、アインシュタインはこの論文の議論には不満であった。Einstein (1948)において局所性と分離可能性と現在呼ばれる性質を導入し、これらの性質に基づいて Einstein, Podolsky, and Rosen (1935)とは異なる議論を行い、量子力学は不完全であると主張した。分離可能性とは2つの空間的に離れた系はそれぞれ別々の状態をもつということを表す性質であり、局所性とはある時空領域における操作が他の空間的に離れた時空領域に影響を及ぼさないという性質である。

Howard (1985)によれば、ベルの不等式は局所性と分離可能性から導かれ、ベルの不等式の破れは分離可能性が成り立たないことを意味している。そして、ベルの不等式の破れは局所性原理と両立可能である。つまり、量子力学は局所的な分離不可能な理論である。

Einstein (1948)は、物体が時空領域に配置されていると考えて、こうした議論を行った。近年、代数的場の量子論の枠組みのもとで、アインシュタインの議論や、ベルの不等式の破れが考察されるようになってきている。代数的場の量子論とは、有界な時空領域にフォン・ノイマン代数を対応させ、そのフォン・ノイマン代数に含まれる自己共役作用素を、対応する時空領域の観測可能量とみなす理論である。この理論をもちいる利点は、どの時空領域で観測が行われたかが明確になることである。

本研究では、主に代数的場の量子論の枠組みで、量子論の概念的基礎について考察した。

2. 研究の目的

本研究の目的は、量子論における非局所性と文脈依存性の概念を明確にすることである。いずれも、Einstein, Podolsky, and Rosen (1935)が行った議論に関係している。

(1)

非局所性に関する研究は、空間的に離れた領域において確率的に相関しているような状態に関わる。この状態は、Einstein, Podolsky, and Rosen (1935)が、量子力学の不完全性の議論を行う際に導入した状態である。本研究の非局所性に関する目的は、この確率的な相関をライヘンバッハによって提案された共通原因の考え方で説明できるかどうかを明確にすることである。

(2)

文脈依存性に関する研究は、量子力学は不完全であるという Einstein, Podolsky, and Rosen (1935)の結論に関わる。量子力学が不完全であるならば、我々が知らない隠れた変数を補うことによって量子力学は完全になり、物理的対象は確定した値をもつと考えることができるようになる。隠れた変数の一つとして、非文脈依存的な隠れた変数がある。非文脈依存的という性質は、観測可能量のもつ値は測定に依存しないという性質である。本研究の文脈依存性に関する目的は、非文脈依存的な隠れた変数が存在するかどうかを明確にすることである。

3. 研究の方法

本研究では、代数的場の量子論と有限自由度の量子力学を含むような代数的量子論の枠組みで、非局所性と文脈依存性を考察した。

(1)

非局所性を考察するにあたって注目した概念は、ライヘンバッハの共通原因である。ライヘンバッハは、互いに因果関係がない二つの事象の確率的な相関に対して、それらの共通原因がみだすべき性質を考察した。互いに因果関係がない二つの事象の間の確率的な相関に対して、ライヘンバッハが提案した共通原因が必ず存在するという原理は、ライヘンバッハの共通原因原理とよばれる。本研究では、この原理をもとに量子論における非局所性を考察した。

本研究では、さらにライヘンバッハに提案された共通原因をもとに考えられた共通原因系とよばれる考え方も考察した。ライヘンバッハの共通原因の直観的なアイデアは、対象としている系を2つの排反な部分系に分割すれば、それらの部分系では確率的な相関がなくなるというものである。この部分系が共通原因とみなされる。ライヘンバッハがもともと定義した意味での共通原因で相関を説明できなかったとしても、つまり2つの部分系に分割して相関がなくならなかったとしても、3つ以上の部分系に分割したらそれらの部分系において相関はなくなる

かもしれない。3 つ以上の部分系に分割して、それらの系で相関がなくなると、これらの系はライエンバッハの共通原因系とよばれる。そして、部分系の数はその系のサイズと呼ばれる。本研究では、ライエンバッハの共通原因系を、古典的な確率論やフォン・ノイマン代数に適用できる一般的な枠組みであるオーソモジューラ束の枠組みで考察した。

(2)

非文脈依存性を考察する際は、KCBS 不等式に注目した。コッヘン・シュペッカーの定理によって、非文脈依存的な隠れた変数が存在しないということは示されていたが、実験で検証はできなかった。その後、非文脈依存的な隠れた変数が存在するかどうかを実験で検証可能な形にする試みが出てきた。その一つが、KCBS 不等式とよばれるものである。KCBS 不等式は非文脈依存的な隠れた変数が存在することを仮定すると導かれる不等式である。したがって、この不等式が破れている場合、非文脈依存的な隠れた変数は存在しないことになる。

本研究では、ライエンバッハの共通原因原理と KCBS 不等式の観点から、代数的場の量子論の枠組みにおいて非局所性と文脈依存性について考察した。

4. 研究成果

(1)

本研究では、代数的場の量子論の枠組みで、局所性を考察した。まず、代数的場の量子論において、アインシュタインが考えた局所性がどのように表すことができるかという問題を考えた。そして、ある時空領域に影響を及ぼしその時空領域と空間的に離れた時空領域には影響を及ぼさないような局所的な操作は完全正写像で表すことができることを示した。つまり、代数的場の量子論において、アインシュタインが考えた局所性原理に基づく操作は完全正写像で表わされることが正当化された。このことによって、アインシュタインが考えていた局所性をより明確に表現することが可能になったと言える。(主な発表論文の 4 の論文)

次に、ライエンバッハの共通原因原理の観点から非局所性を考察した。ライエンバッハの共通原因原理に関して注意すべきことは、この原理は反証することはできないということである。例えば、ある確率空間において互いに因果関係がない二つの事象が相関しているにもかかわらず、その相関に対する共通原因が存在しないとしよう。この事実は共通原因原理に否定的な証拠であるようにみえるが、このことから共通原因原理を反証することはできない。なぜなら、もとの確率空間を含むより大きい確率空間が存在して、その確率空間はこの相関と共通原因を含んでいる可能性があり、いわば共通原因が隠されているだけかもしれないからである。このように、ある確率空間が相関に対する共通原因を含んでいないということは、共通原因原理の反証とはならない。

以上の議論は、ライエンバッハの共通原因原理と、互いに因果関係がない二つの事象の確率的な相関に対する共通原因が確率空間に含まれているということとを区別すべきであることを示唆している。本研究では、確率空間が後者の性質をみたくしているとき、共通原因で閉じているとよんだ。そして、ある確率空間が共通原因で閉じているという性質の特徴づけを与えた。その結果によれば、量子力学と相対論を数学的に厳密に統合しようとする試みである代数的場の量子論における確率空間は、共通原因で閉じている。つまり、空間的に離れた二つの事象が確率的に相関していたら、この理論はライエンバッハの共通原因を常に含んでいる。したがって、代数的場の量子論は、ライエンバッハの共通原因原理を支持する証拠とみなすことができることになる。(主な発表論文の 1 の論文)

また、ライエンバッハの共通原因系に関しては、以下の二つの問題を考察した。一つ目に考察した問題は、共通原因系と論理的独立性の関係に関する問題である。論理的独立性とは、一方の事象の真理値はもう一方の事象の真理値と独立であることを表した性質である。そして、二つの相関した事象に対してライエンバッハの共通原因系が存在するならば、それらの事象は論理的に独立であるということを示した。二つ目に考察した問題は、共通原因系の存在に関する問題である。そして、代数的場の量子論にも適用できる原子元を持たないオーソモジューラ束において、確率的に相関した二つの事象に対して、常にサイズ 3 のライエンバッハの共通原因系が存在することを示した。(主な発表論文の 3 の論文)

(2)

非文脈依存性に関しては、KCBS 不等式を有限自由度の量子力学のみならず代数的場の量子論も含む代数的量子論の枠組みで考察した。そして、有限自由度の量子力学においてはすべての状態において KCBS 不等式が破れるわけではないのに対して、代数的場の量子論において KCBS 不等式はすべての状態において破れるということを示した。したがって、KCBS 不等式

の観点から見ると、代数的場の量子論の方がより文脈依存的であるといえる。また、KCBS 不等式は非文脈依存的な隠れた変数が存在することを仮定すると導かれる不等式であり、この不等式が破れている場合、非文脈依存的な隠れた変数は存在しないことになるので、有限自由度の量子力学や代数的場の量子論において非文脈依存的な隠れた変数は存在しないことになる。
(主な発表論文の2の論文)

【主な発表論文】

1. Yuichiro K. and M. Rédei (2015) 'Characterizing common cause closedness of quantum probability theories', *Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, 52, 234-241.
2. Kitajima, Y. (2017) 'A state-dependent noncontextuality inequality in algebraic quantum theory', *Physics Letters A*, 381, 2305-2312.
3. Kitajima, Y. (2017) 'Reichenbachian common cause systems of size 3 in general probability theories', G. Hofer-Szabó and L. Wroński (eds.) *Making it Formally Explicit*, *European Studies in Philosophy of Science*, 6, 129-145
4. Kitajima, Y. (2018) 'Local Operations and Completely Positive Maps in Algebraic Quantum Field Theory' *Nagoya Winter Workshop: Reality and Measurement in Algebraic Quantum Theory*, 261, 83-95.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件 / うち国際共著 1件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Yuichiro KITAJIMA	4. 巻 261
2. 論文標題 Local Operations and Completely Positive Maps in Algebraic Quantum Field Theory	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Nagoya Winter Workshop: Reality and Measurement in Algebraic Quantum Theory	6. 最初と最後の頁 83-95
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1007/978-981-13-2487-1_3	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 北島雄一郎	4. 巻 45
2. 論文標題 代数的量子論における文脈依存性	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 科学基礎論研究	6. 最初と最後の頁 23-34
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.4288/kisoron.45.1-2_23	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Yuichiro KITAJIMA	4. 巻 381
2. 論文標題 A state-dependent noncontextuality inequality in algebraic quantum theory	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Physics Letters A	6. 最初と最後の頁 2305-2312
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.physleta.2017.05.033	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Yuichiro KITAJIMA	4. 巻 6
2. 論文標題 Reichenbachian common cause systems of size 3 in general probability theories	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 G. Hofer-Szabo and L. Wronski (eds.) Making it Formally Explicit, European Studies in Philosophy of Science 6.	6. 最初と最後の頁 129-145
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-319-55486-0_7	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Yuichiro KITAJIMA and Miklos Redei	4. 巻 52
2. 論文標題 Characterizing common cause closedness of quantum probability theories	5. 発行年 2015年
3. 雑誌名 Studies in History and Philosophy of Modern Physics	6. 最初と最後の頁 234-241
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.shpsb.2015.08.003	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計3件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件)

1. 発表者名 北島雄一郎
2. 発表標題 論理的観点からみた量子力学
3. 学会等名 日本科学哲学会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 北島雄一郎
2. 発表標題 量子力学における文脈依存性
3. 学会等名 日本科学哲学会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Yuichiro KITAJIMA
2. 発表標題 Common cause closedness in orthomodular lattices
3. 学会等名 15th CONGRESS OF LOGIC, METHODOLOGY, AND PHILOSOPHY OF SCIENCE (国際学会)
4. 発表年 2015年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----