

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 4 年 6 月 17 日現在

機関番号：32619

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2021

課題番号：17K18107

研究課題名(和文)一般確率論に基づく情報理論の構築と量子力学の原理的特徴付けへの応用

研究課題名(英文) Information theory based on general probabilistic theories and its application to the foundation of quantum mechanics

研究代表者

木村 元 (Kimura, Gen)

芝浦工業大学・システム理工学部・教授

研究者番号：80517011

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、量子論や一般確率論を用いて量子論基礎や量子情報理論への応用を行うものである。本研究により、操作主義的に一般的な確率モデルにおける状態空間の幾何学的構造と情報符号化の普遍的な関係が明らかにされ、なぜ量子ビット系のみ点対称を持つのかといった素朴な疑問に対する情報理論的な理解を与えた。その他、情報対称性原理の整備や各種情報量の一般確率論に基づく特徴づけなどを行った。また、量子開放系の一般的特徴と考えられている完全正值性の物理普遍則を見出した。さらに、量子論の不完全性具合を特徴づける隠れ度を用いたベル不等式の拡張、真空エンタングルメントによるテレポーテーションの研究などを行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

近年量子情報科学の発展を受けて、情報理論的な量子力学の理解の可能性が高まっている。従来は道具主義的な理解しかできていなかった量子物理学に新たな光を当てることになり、より深い理解につながることを期待される。また、様々な情報処理や物理法則の間の連関性の理解が深まり、新たな応用につながることも期待できる。例えば、我々の成果により状態空間の幾何学構造から、物理系の情報蓄積量が見積もれるようになった。また、量子開放系の研究は、量子コンピュータなどの実現の最大の障壁であるデコヒーレンスの理解を深めることになった。これらの研究は、自然観の在り方を探る基礎から情報科学への応用まで幅広い意義を持っている。

研究成果の概要(英文)：We investigated the foundations of quantum theory and quantum information theory mainly based on general probabilistic theories. We clarified the universal relationship between the geometrical structure of the state space and information storing, and provided an information-theoretic understanding of simple questions such as why only qubit systems have point symmetry (Bloch Ball). In addition, the principle of information symmetry was developed and various information quantities were characterized based on general probabilistic theories. We also discovered the universal law of relaxation times for completely positive dynamics and a new relaxed Bell's inequality by introducing a hiddenness which characterizes the extent how much we need a hidden variable. Quantum teleportation based on the vacuum entanglement was also studied where we have clarified the optimal protocol with a given entanglement.

研究分野：量子力学基礎論，量子情報科学

キーワード：量子力学基礎論 量子情報理論 一般確率論 量子開放系理論 ベルの定理

1. 研究開始当初の背景

量子力学は原子や素粒子など微視的な世界を記述する物理法則であるが、不確定性関係や非局所相関など不思議で非直観的な現象にあふれ、その解釈をめぐるはまだ統一的な見解がない。この不思議さをダイレクトに応用するのが量子コンピュータや量子暗号などの量子情報科学である。この研究は、逆に情報理論的側面からの量子力学の基礎にもフィードバックを与えることになり、情報理論的な量子力学の理解の可能性がぐっと高まってきていた。実際、ニュートン物理学、熱力学、相対性理論といった他の古典物理学が直接実験検証可能な物理原理から構成されるのに対し、標準的な量子物理学の理論は、Hilbert 空間や線形作用素論、あるいは作用素代数といった抽象的な数学を天下りの導入し、それらの組み合わせを經由して物理的予言 (Born 確率則など) をするといった冗長性を持っている。これは量子物理学の理解を妨げる大きな原因の一つであり、量子力学の理論を物理原理により特徴付けることは長年の物理学者の悲願でもあった。これに対し、量子情報科学の勃興は、量子物理学の理解に情報概念が本質的に有用であることを示唆しており、情報処理の言葉を用いた物理原理を探索する試みが世界中で始まった。他方、量子情報科学は、古典情報科学では達成できない様々な情報処理を可能とするが、特定の物理理論である量子力学を土台としているために、必ずしも情報理論の最終形というわけではない。情報理論の創始者である Shannon は物理デバイスに依存しない情報処理の本質を追求したが、量子情報科学の展開を受けて、その幅は当初考えられていたよりもはるかに広い世界であることがわかってきた。

2. 研究の目的

そこで本研究は、量子力学の基礎や量子情報科学への応用を一般確率論や情報理論的観点から研究することを目的とし、特に量子力学の情報理論的特徴づけや理解の深化、また、一般情報理論の構築を目指す。また、そのフィードバックとして、量子テレポーテーションなどの量子情報理論、量子開放系の物理、また量子非局所性 (エンタングルメント) を情報理論的な観点から追究する。

3. 研究の方法

本研究では標準的な量子力学の理論やそれを一般化する一般確率論を数学的道具として活用し、特殊なモデルケースの調査ではなく普遍的な性質をあぶりだす研究を行う。中でも一般確率論は、操作主義的に最も一般的な確率モデルを提供するもので、量子力学の原理的特徴付けおよび一般情報理論構築の格好の舞台を提供する。例えば、古典確率論は、一般確率論に「(純粋)状態の複製可能性 (あるいは、識別可能性)」といった情報原理を置くと導かれることが知られている。同様にして、一般確率論上の情報理論的な原理を課すことにより、量子力学の理論を導きだすことができれば、それが量子物理学の物理原理となる。例えば、量子暗号の「安全な鍵共有の可能性」や「ビットコミットメントの不可能性」、あるいは、より物理的な「不確定性原理」や「非局所相関の存在」、あるいは、近年量子相関限界の特徴づけに大きな貢献を果たした「情報因果律」などが候補として知られている。一般情報理論の構築に対しては、いたずらに一般化や抽象化を目指すものではなく、むしろ様々な情報処理や物理法則の連関性を理解することに主眼を置く。例えば、「非局所相関の存在」や「瞬間伝送禁止則 (No-Signaling 条件)」を仮定すると「安全な鍵共有が可能」となることが知られている。

4. 研究成果

1) 一般確率論の研究

古くから古典や量子の状態空間は、ビット系や量子ビット系を除き点非対称性があることが良く知られていたが、その背景や理由はよくわかっていなかった。例えば量子ビット系は、3次元単位球 (Bloch 球) という綺麗な構造を持つが、不随する量子系の次元が増えるにつれ、複雑な構造を持ち、点対称性が失われる。我々は、一般確率論において、この性質が普遍的に成立する事実が気付き、物理系に符号化する情報量と状態空間の歪み度 (非点対称度) に定量的なトレードオフがあることを発見した。これにより「状態空間が歪まざるをえない理由は情報符号化量を増やすためである」といった理由を、しかも定量的に理解することに成功した。また、古典や量子系で成り立つ、情報取得量と最大識別状態数の等号条件の特徴づけや最大混合状態

の特徴付けを行った (with K. Matsumoto; ArXiv:1802.01162).

近年 Banik らが提案している「情報対称性」の原理に着目し、一意性に基づく曖昧性を解決するために、弱情報対称性と強情報対称性を導入し、多くの一般確率モデルが弱対称性によって排除されないこと、また、強情報対称性を量子論が満たすことを示し、情報対称性の物理原理としての整備を行った。また、以前研究代表者らが開発した一般確率論上の Helstrom 集団の方法を用い、情報対称性の幾何学的特徴づけを行った (with K. Nagaishi)。

量子情報で重要となる最小エントロピーの一般確率版を導入し、凸最適化問題を解くことで最適状態識別による操作主義的な特徴づけを行った (with S. Uchida)。

因果律を仮定しない Oreshkov らの局所量子論に着目し、測定型量子計算の非適応測定が可能であることを明らかにした (with S. Takakuwa)。

これらは投稿中や投稿準備中であり、近日中の論文掲載を目指す。その他にも、近年我々が導入した「誘導エントロピー法」を用いて、各種のエントロピーをつなぐ研究や、情報源符号化定理や通信符号化定理など情報理論への応用、また、最終的には量子力学の原理的特徴付けを目指し、引き続き調査を続ける予定である。

2) 量子ダイナミクスの普遍則の研究

量子論や一般確率論におけるダイナミクスを特徴づける研究を行った。特に、量子開放系の時間発展の一般的性質と考えられている完全正值性に着目し、量子 Markov 過程の緩和時間に対する普遍則を任意の有限準位量子系において発見した。これは、量子計算などの実現の最大の障害となるデコヒーレンスの解明に加えて、完全正值性の直接実験検証につながる成果である。

Gorini, Kossakowski, Sudarshan によって量子ビット系の Pauli マスター方程式において緩和時間に制約が課せられることが知られていたが、以前研究代表者によって、これは完全正值性に基づく普遍則であることが示された。その後、一般の量子系の緩和時間則は特殊なモデルで調査が行われていたが、普遍則は知られていなかった。本研究では、任意の準位を持つ量子系において、やはり完全正值性が課す普遍則を発見し証明した。これにより、あらゆる量子系で完全正值性を直接実験検証する可能性が開かれた (with S. Ajisaka and K. Watanabe)。

数値実験によると、この制約はさらにタイト化できることが示唆され、最もタイトな制約の予想がなされた。我々は、環境と弱結合する量子ダイナミクスやエントロピー増大に従う Markov 過程において、この普遍則が成り立つことを証明した (with D. Chruściński, A. Kossakowski, and Y. Shishido)。

緩和関数という演算子汎関数を導入し、演算子不等式を改良することで、この結果をよりタイトにした普遍則を示した (with D. Chruściński, R. Fujii, H. Ohno, and Y. Shishido)。また、 q -変形交換子に対する演算子不等式を発見 (with D. Chruściński, H. Ohno, and T. Singal)、緩和関数の不等式と BW 交換子の不等式を等号する方法などを見出した (with D. Chruściński, H. Ohno)。これらは緩和時間普遍則への応用に加え、量子不確定性関係への応用が期待できる。

3) 量子非局所性の研究

1964 年ベルにより、量子相関は、測定独立な局所实在論では説明できない不思議な相関であることが示された。近年 Hall によって、各仮定の定量化が行われ、仮定間のトレードオフ関係を与えるベル不等式が見出された。我々は、隠れ度という隠れた変数の定量化を与え、あらゆる局所理論において成り立つ隠れ度と測定非独立性の間のトレードオフ関係を与えるベル不等式を発見した (with Y. Susuki, K. Morisue)。

4) 量子テレポーテーションの研究

その他、真空場からエンタングルメントを抽出し、量子テレポーテーションへ応用する研究などを行った (with J. Koga, K. Maeda)。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 6件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Jun-ichirou Koga, Kengo Maeda, and Gen Kimura	4. 巻 100
2. 論文標題 Entanglement extracted from vacuum into accelerated Unruh-DeWitt detectors and energy conservation	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 65013
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevD.100.065013	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
1. 著者名 Jun-ichirou Koga, Gen Kimura, and Kengo Maeda	4. 巻 97
2. 論文標題 Quantum teleportation in vacuum using only Unruh-DeWitt detectors	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review A	6. 最初と最後の頁 062338(1-16)
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevA.97.062338	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
1. 著者名 Kimura, G., Ajisaka, S. & Watanabe, K.	4. 巻 24
2. 論文標題 Universal Constraints on Relaxation Times for d-Level GKLS Master Equations	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Open Systems and Information Dynamics	6. 最初と最後の頁 1740009-1,8
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1142/S1230161217400091	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
1. 著者名 Dariusz Chruscinski, Gen Kimura, Andrzej Kossakowski, and Yasuhito Shishido	4. 巻 127
2. 論文標題 Universal Constraint for Relaxation Rates for Quantum Dynamical Semigroup	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 50401
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevLett.127.050401	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

1. 著者名 Dariusz Chruscinski, Ryohei Fujii, Gen Kimura, Hiromichi Ohno	4. 巻 630
2. 論文標題 Constraints for the spectra of generators of quantum dynamical semigroups	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Linear Algebra and its Applications	6. 最初と最後の頁 293-305
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.laa.2021.08.012	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

1. 著者名 Dariusz Chruscinski, Gen Kimura, Hiromichi Ohno, Tanmay Singal	4. 巻 646
2. 論文標題 Bounding the Frobenius norm of a q-deformed commutator	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Linear Algebra and its Applications	6. 最初と最後の頁 95-106
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.laa.2022.03.021	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11件 (うち招待講演 6件 / うち国際学会 5件)

1. 発表者名 永石健人, 木村元
2. 発表標題 情報対称性の原理は量子論を特徴づけられるか?
3. 学会等名 日本物理学会第76回年次大会 (2021)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 鱸優吾, 木村元
2. 発表標題 測定非独立性を考慮したBell-CHSH不等式の一般化
3. 学会等名 日本物理学会第76回年次大会 (2021)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Gen Kimura, Yasuto Shishido, Dariusz Chruscinski, Andrzej Kossakowski
2. 発表標題 Universal constraints on relaxation times of GKLS master equations
3. 学会等名 "020 International Workshop on Quantum Information, Quantum Computing and Quantum Control" (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 永石健人, 木村元
2. 発表標題 一般確率論における情報対称性の考察
3. 学会等名 第75回年次大会(2020年)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 木村元
2. 発表標題 GKLSマスター方程式における緩和時間の普遍則
3. 学会等名 量子論の諸問題と今後の発展 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Gen Kimura
2. 発表標題 Informational origin of point-asymmetry of state space in general probabilistic theories
3. 学会等名 50 Symposium on Mathematical Physics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Gen Kimura
2. 発表標題 Information storing yields a point asymmetry of state space
3. 学会等名 Quantum Information Theory and Mathematical Physics 2017 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 深沢幸希, 木村元
2. 発表標題 一般確率論における情報取得量の下限
3. 学会等名 日本物理学会 2018年年次大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 木村元, 松本啓史
2. 発表標題 状態空間の点非対称性の情報理論的起源 一般確率論の観点から
3. 学会等名 日本物理学会 2018年年次大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Gen Kimura
2. 発表標題 Universal constraint for relaxation rates of quantum dynamical semigroups II: Based on r-function approach
3. 学会等名 Two-Day Workshop to celebrate the 60th anniversary of the paper on dynamical maps by E. C. G. Sudarshan, P. M. Mathews and J. Rau (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Gen Kimura
2. 発表標題 Universal constraint for relaxation rates for quantum dynamical semigroup - physical manifestation of completely positive condition
3. 学会等名 52 Symposium on Mathematical Physics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021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

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関		
ポーランド	Copernicus university		