

令和 6 年 6 月 11 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2023

課題番号：19K03838

研究課題名（和文）時空の量子情報と量子測定の研究

研究課題名（英文）Research of spacetime quantum information and quantum measurement

研究代表者

堀田 昌寛 (Hotta, Masahiro)

東北大学・理学研究科・助教

研究者番号：60261541

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究の成果は以下のようにまとめられる。量子スイッチの解析によりSN比に関する不等式を導出。ブラックホールの動的鏡モデルにおけるホーキング粒子の純粋化パートナーの公式導出や量子カオス系における量子情報カプセルの研究。漸近的対称性に関する研究で新たな対称性や量子情報の生成子を発見。量子測定理論の構築に向けた機械学習の研究や超弦理論における機械学習の役割についての提案。計量測定機による漸近的対称性の生成子の相補性仮説と量子宇宙シミュレータに関する予言などを行った。マクロ実在性に関するレゲット＝ガーグ不等式の新しい定式化とその機械学習に基づいた量子状態生成のプロトコルを開発。

研究成果の学術的意義や社会的意義

現在まで量子時空を記述する完成された量子重力理論は存在していないが、その1つの理由として量子時空の量子測定理論の欠如が挙げられる。この分野はほとんど未開拓であるが、本研究の成果によってそのような量子測定理論の性質の一部は明らかになった。特に時空の計量テンソルを測定する計量測定機概念は重要であり、例えばブラックホールの地平面に現れて、ブラックホールの熱的エントロピーの起源になると期待をされているミクロ状態は、観測者依存性をもつ創発的な概念であることがはっきりしてきた。量子的粒子の位置と運動量が同時測定可能でないのと同じように、地平面の物理量の間にも相補的關係があるという示唆は意義が大きい。

研究成果の概要（英文）：(1) In-depth analysis of quantum switches led to the derivation of inequalities regarding the signal-to-noise ratio (SNR). (2) Investigation into the dynamic mirror model of black holes resulted in the derivation of formulas for the purification partners of Hawking particles and the study of quantum information capsules in chaotic quantum systems. (3) Research on asymptotic symmetries led to the discovery of new symmetries and generators of quantum information. (4) Proposals were made regarding the role of machine learning in constructing quantum measurement theories and in superstring theory. (5) Hypotheses were formulated concerning the complementarity of generators of asymptotic symmetries observed by metric measurement devices and predictions were made regarding quantum universe simulators. (6) A novel formulation of the Leggett-Garg inequality concerning macroscopic reality was developed, along with a protocol for quantum state generation based on machine learning.

研究分野：量子情報物理学

キーワード：ブラックホール 量子宇宙 量子重力 量子情報 量子測定理論 機械学習

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

本応募者の堀田は量子情報理論と量子測定理論の、時空の物理学、特に BH 蒸発過程の応用の研究を行ってきた。ソフトヘアに関しては既に世界に先駆けてその存在を指摘しており、その後、ホーキングらによって再発見された経緯がある。最近では堀田らは質量無限大極限の BH 地平面上にあたるリンドラー地平面上において具体的にソフトヘアの電荷と量子複製禁止定理の関係を調べていた。また 4 次元シュワルツシルト BH 蒸発の特徴を再現する量子ビットモデルも構築し、この成果は Physical Review Letters に掲載されている。情報喪失問題や蒸発 BH の熱的エントロピーの問題は現在でも理論物理学の 1 つの中心的テーマとして世界的にも多くの研究者が関心をもち、また多数の論文が出版されている。最近では特に量子ビットなどの量子多体系で BH の量子情報を扱う解析が主流になってきている。量子情報解析に関してはプレプリントサーバーの arXiv の hep-th や gr-qc 分野に投稿されている論文で quantum information や entanglement というキーワードがアブストラクトに含まれるものは 1000 を超えている。

2. 研究の目的

量子重力理論構築のためには、強い重力場を伴う蒸発ブラックホールの情報喪失問題やその熱的エントロピーの起源の研究が有用と考えられる。近年多くの研究者により量子情報理論に基づいた様々な解析がなされており、興味深い知見が得られている。本研究でもブラックホールの量子情報物理学を深化させることを目的とする。

3. 研究の方法

事象の地平面上のマイクロ状態を生むソフトヘア、量子場の零点振動の自由度を採り入れたブラックホール蒸発を記述する新しい量子多体系モデルを構築し、時空の局所性を保った量子情報の解放機構を研究する。また古典及び量子的な計量場や時空曲率の測定機数理モデルを導入して、ソフトヘア電荷に対する新しい量子測定理論の構築を行う。この測定の原理的効率上限の探究のために、測定機間の量子もつれだけでなく、量子的な深層学習機能も測定機内部に採り入れる。単体の量子的なウンルー-ドウィット粒子測定機の研究はこれまで多数なされてきたが、これを多数連携させて作る量子深層学習を伴う古典及び量子計量場の測定機の研究はこれまでになく独自性が高い。初期宇宙に関する量子的なマルチバース理論等にも新しい量子時空の測定概念を与える可能性もある。

4. 研究成果

(1)時空の量子測定の基礎素子となる量子スイッチの解析を行い、量子 SN 比に対してタイトで普遍的な不等式を導くことに成功した。量子的な信号の入力がないときには、スイッチ装置内の

量子自由度であるメーター M に変化をさせず、信号が入る時にこのメーターを動かすような一般的なモデルを構築した。例えば量子光学では無信号状態である真空状態 $|0\rangle$ と、有信号状態であるコヒーレント状態 $|c\rangle$ は厳密には直交せず、量子的な重なりが残る。このようなことは他の一般的な量子理入力にも起こる。そのような場合に、 M の期待値の変化から信号の有無に関する SN 比を定義し、その達成可能な原理的な上限を、無信号状態と有信号状態の忠実度 (フィデリティ) を用いて書き下した。またブラックホールのようにホーキング輻射を出す動的鏡モデルにおいて、ホーキング粒子の純粋化パートナーを求める一般公式を導出した。このモデルの動的鏡は物性アナロジーとして高密度プラズマを用いた実験が提案され、我々が得た結果は将来実験的に確認される可能性があり、注目されている。またブラックホール物理でも注目されている量子カオス系において、独立した多数の量子情報カプセルの構造が高温極限で現れることも指摘した。これはブラックホール蒸発の最後のバーストにおいて、どの量子媒体にどのような形でブラックホール内部の情報が担われるのかに関しての興味深い示唆を与える結果である。またこれは物性系を用いた実験でも将来確認できる可能性があり、興味深い。また場の量子論における量子情報カプセルのモード関数を定める一般公式を与えた。これは量子場を情報記憶メディアとみなしたときに、どこに外部からの情報が記憶されるのかの解析に役立つものになっている。

(2) ブラックホールの事象の地平面に現れるマイクロ状態を生成する漸近的対称性の研究と、その対称性の電荷を時空計量の測定を通じて測るための、量子測定機の原理的な研究を主に行った。一般相対性理論に現れる事象の地平面や反ドジッター空間の無限遠の境界に現れる漸近的なキリングベクトルは量子重力理論構築の手掛かりとしても重要である。しかしそれを求めるには、まず境界近傍における時空の漸近的な計量テンソルの各成分のフォールオフ条件を手で決めて、その後でキリング方程式を解いて、非自明な漸近的キリングベクトルを解くということが標準的であった。ところがそのプロセスを経て解の候補を見つけても、それが単なるゲージ自由度になっていることが頻繁に起きる。そのためまた最初の計量のフォールオフ条件を設定し直して同じ過程を繰り返す作業を、ゲージ自由度ではない大域的な物理的対称性が非自明な電荷をもつ漸近的キリングベクトルを見つけるのに成功するまで続ける必要があった。この成功確率は決して高くなく、そのため従来の方法ではなかなか新しい漸近的対称性を見つけるのが困難であった。本研究では、その漸近的キリングベクトルが最初からゲージ自由度ではない条件を課す新しいプロトコルを提唱し、その結果リンドラー地平面の新しい非自明な漸近的対称性である超ディラレーション対称性を発見することができた。またエネルギー保存則がある場合の一般的な量子測定の拘束条件も発見をした。この結果は加法的な保存則におけるウィグナー=荒木=柳瀬理論の非加法的な保存則への拡張になっており、シグナルを検出する測定機が設計段階で持たなければならない条件を具体的に示すことに成功した。

(3) ブラックホール時空に現れる地平面の漸近的対称性が創発するマイクロな量子的自由度の研究を行った。これまで漸近的対称性を見つけることは漸近計量テンソルの fall off 条件を試行錯誤で置いて、結果が悪い場合には、また最初からやり直すという効率の悪い方法しか、知られて

いなかった。その条件の下で対称性の生成子の積分可能条件を確認しても、多くの場合は、積分できずに、振り出しに戻るようになっていた。今回の研究では、1つの背景計量から大域的座標変換によって生成される漸近計量テンソルの集合を考えて、それから自然な fall off 条件を読みだす方法を採用入れた。またその集合において対称性の生成子の積分可能性を確かめる効率の良い手法を開発した。これまで多数回必要だった上手い fall off 条件の発見に至るまでの試行錯誤を圧倒的に減らすことに成功をした。その結果 super dilatation という新しい漸近的対称性がリンドラー地平面上に存在することを示した。これは地平面を通過する物体の量子情報を記憶するブラックホールの新しい自由度になる可能性があり、興味深い結果となっている。また深層学習プロトコルを伴った時空計量測定装置の研究を継続しており、まもなく第1論文を発表する予定になっている。これはブラックホール時空やリンドラー時空の漸近的対称性が生成するミクロな自由度などを直接測定できる測定の一般理論構築に繋がると期待をされる。そのことによって地平面上の自由度が、自由落下する観測者(測定機)と加速して地平面外部に留まる観測者(測定機)に対して全く異なる描像を与えることを確立することに繋がると期待をされる。

(4) 量子重力における量子測定理論の構築を視野にいた、機械学習の研究を行った。量子重力理論では、量子的時空の重ね合わせを観測する観測者の存在が重要と考えられるが、その「観測者」を機械学習に基づいた AI とした場合に、時空計量の測定における原理的諸問題は何かを明らかにした。時空にばら撒かれたダストや小天体の軌道の画像データを基にして、教師付き学習のためのデータを生成し、それを AI に学習させたのちに、新しい時空における軌道画像データを入力して、その時空計量のパラメータを推定させる問題を考えている。AI がどうしても区別できない異なる時空が存在することを示し、その2つの時空の関係性を Deep Learning Isometry として理論的に整備を行った。これは量子重ね合わせにある2つの時空を AI が量子測定をしても、その重ね合わせが壊れない場合があることを意味し、従来の量子重力理論では議論をされてこなかった新しい側面を明確にしたことになっている。また超弦理論で議論をされてきた AdS/CFT 対応における機械学習の新しい役割を提案した。2+1次元の反ドジッター時空(AdS)に双対である1+1次元共形場において、状態推定を行う機械学習的 AI にも AdS バルク側に対応する機械学習 AI が存在すべきと予想される。本研究では、それが境界近傍の情報だけでなく、バルクの深層の情報まで採り入れた軌道画像データを学習した AI であろうという示唆を与える結果を得ている点でも重要な結果となっている。また AdS の宇宙項やブラウン=ヘノーの電荷の大きさを推定する具体的なプログラムも作成し、その効率を論じている。

(5) 真空中を加速度運動する測定機は熱浴を観測するというウンルー効果と同様に、漸近的対称性の生成子としての物理量(観測量)は運動する時計群が成す計量測定機を通じて、観測者に対して実在化するという仮説を構築し、海外の大学における滞在においてその共同研究を開始している。特にオーストラリアのマッコリー大学の一般相対論の研究グループなどとともに、地平面近傍の supertranslation(ST)と superdilatation(SD)という2つの対称性が計量測定機において同時観測できない古典一般相対論における新しい相補性概念を研究した。これは量子力学にお

ける点粒子の位置と運動量が同時測定できないという相補性概念と類似した状況になっている。古典時空や一般相対論も本来は量子時空(量子重力)理論のある古典領域の状態の振る舞いを記述しているのは確実であり、その量子性の名残として、ST と SD の間の相補性が現れてくると予想される。この仮定は、未知のままである量子重力理論の測定理論構築の上で非常に大きな示唆を与えており、今後の研究の進展への期待が大きくなっている。また膨張する量子ホール系エッジ電流を使った量子宇宙シミュレータの実験で、ホーキング輻射の観測を予言した。またその量子性を確認できる1つのツールとしてのレグット=ガーグ不等式の新しい定式化を行った。数学の一般確率論の枠組みの中に、仮想的なマクロ実在を記述する空間を作り、その中に量子力学の体系を埋め込むことで、理想的なマクロ実在論の定式化を行った。特に量子的状態の構成に関して、これまでにはなかった機械学習的手法を取り込むことに成功をした。

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 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Ryota Katsube, Wai-Hong Tam, Masahiro Hotta, and Yasusada Nambu	4. 巻 106
2. 論文標題 Deep learning metric detectors in general relativity	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 44051
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevD.106.044051	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 Takeshi Tomitsuka, Koji Yamaguchi, Masahiro Hotta	4. 巻 38
2. 論文標題 A Lie algebra based approach to asymptotic symmetries in general relativity	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Classical and Quantum Gravity	6. 最初と最後の頁 225007
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	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 Masahiro Hotta, Koji Yamaguchi	4. 巻 384
2. 論文標題 Strong Chaos of Fast Scrambling Yields Order: Emergence of Decoupled Quantum Information Capsules	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physics Letters A	6. 最初と最後の頁 126078
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	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 Takeshi Tomitsuka, Koji Yamaguchi, Masahiro Hotta	4. 巻 101
2. 論文標題 Partner formula for an arbitrary moving mirror in 1+1 dimensions	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 24003
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	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 Koji Yamaguchi, Masahiro Hotta	4. 巻 -
2. 論文標題 Quantum Information Capsule in Multiple-Qudit Systems and Continuous-Variable Systems	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physics Letters A	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 Ryota Katsube, Masahiro Hotta, Koji Yamaguchi	4. 巻 -
2. 論文標題 A Fundamental Upper Bound for Signal to Noise Ratio of Quantum Detectors	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 -

〔学会発表〕 計7件 (うち招待講演 6件 / うち国際学会 4件)

1. 発表者名 Masahiro Hotta
2. 発表標題 Asymptotic symmetries at horizons
3. 学会等名 5th International Conference on Holography, String Theory and Discrete Approach (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 堀田昌寛
2. 発表標題 Quantum Information Capsules and Generalized Partners in Condensed Matters and Quantum Fields
3. 学会等名 巨視的量子現象と量子重力 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Masahiro Hotta
2. 発表標題 General partner formula in 1+1 dimensional moving mirror models
3. 学会等名 LeCosPA 4th International Symposium Unity of Physics - From Plasma Wakefields to Black Holes (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 勝部瞭太、堀田昌寛、小澤正直
2. 発表標題 エネルギー保存則による量子スイッチ実装の制約
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Masahiro Hotta
2. 発表標題 Soft-Hair Symmetries at Horizons
3. 学会等名 Recent progress in theoretical physics based on quantum information theory (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Masahiro Hotta
2. 発表標題 Emergence of Decoupled Quantum Information Capsules in Fast Scrambling at High Temperature
3. 学会等名 Relativistic Quantum Information-North 2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Masahiro Hotta
2. 発表標題 Dynamical Duality of Entanglement Harvesting in Quantum Field Theory
3. 学会等名 QMKEK7 (招待講演)
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 堀田昌寛	4. 発行年 2021年
2. 出版社 講談社	5. 総ページ数 279
3. 書名 入門現代の量子力学	

〔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
---------	---------