

令和 3 年 6 月 25 日現在

機関番号：14301
研究種目：研究活動スタート支援
研究期間：2019～2020
課題番号：19K23441
研究課題名（和文）新しい量子情報量とホログラフィー原理

研究課題名（英文）Odd entropy and holography

研究代表者

玉岡 幸太郎 (Tamaoka, Kotaro)

京都大学・基礎物理学研究所・特定研究員

研究者番号：30848354

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究の目的は、申請者が近年発見したオッド・エントロピーと呼ばれる量子情報量の物理的意義を明らかにすることであった。結果として、オッド・エントロピーが満たす基本的な関係式などの基礎的性質、および種々の物理現象（例えば、熱化、相転移現象、デコヒーレンス過程など）への応用可能性が明らかになった。それだけでなく、擬エントロピーと呼ばれる新しい量子情報量を発見し、同様な研究を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

オッド・エントロピーは、申請者が超弦理論の文脈から新たに見つけた量子情報量である。本研究は、このオッド・エントロピーがさまざまな物理現象（熱化、相転移現象、デコヒーレンス過程など）の理解へ役立つことを明らかにした。今後も、超弦理論の文脈から見つかった量子情報量たちが、さまざまな物理の基礎研究において応用されることが期待できる。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this study was to clarify the physical significance of the new quantum information theoretic quantity called odd entropy, which was recently discovered by the applicant. As a result, the fundamental properties of the odd entropy, such as the basic relations it satisfies, and its applicability to various physical phenomena (e.g., thermalization, phase transition, decoherence processes, etc.) were clarified. Not only that, the applicant discovered a new quantum information quantity called "pseudo entropy", and conducted similar research.

研究分野：素粒子論

キーワード：超弦理論 量子情報 ホログラフィー AdS/CFT対応 量子エンタングルメント

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

「時空・重力の微視的起源は何か?」を明らかにするために、様々な量子重力理論の定式化および、そこでの時空描像が調べられている。この問いに答えることは、将来ブラックホールの特異点、インフレーション以前の宇宙の成り立ち等を理解する上で本質的に重要である。本研究では、「ホログラフィー原理」に基づき、1次元の低い空間に住むある種の量子多体系からこの問いに迫った。先行研究から、量子情報量を用いて「ある種の量子多体系において、どのような量子相関が支配的になるか?」を解明することが重要だと分かっていた。近年、申請者はこの文脈で有用な、新しい量子情報量「オッド・エントロピー」を発見していた。一方、この新しい量の物理的意義は十分に解明されていなかった。

2. 研究の目的

本研究の目的は、申請者が発見した新しい量子情報量の物理的意義を解明し、時空・重力の起源を明らかにすることであった。また、より一般の量子多体系における物理現象への応用可能性を探ることも目的であった。

3. 研究の方法

スピン系・共形場理論などの基底状態の部分系や系を励起させた際の時間発展(熱化現象)などに着目した。解析方法は原理的には単純で、興味のある密度行列を用意し、部分転置と呼ばれる転置を一般化した操作を施す。そして、部分転置した密度行列に対して、フォンノイマン・エントロピーの類似物を計算するだけである。この一連の流れをやり遂げる方法として、主に数値的なアプローチと解析的なアプローチ(レプリカ法)の2通りを用いた。

4. 研究成果

関連する研究に関して、出版論文7本、解説記事1本、招待講演4件、受賞1件。以下では、主要な研究成果について出版論文を引用しながら報告する:

(1) オッド・エントロピーがどのように情報の拡散を捉えるかの理解を深めた。

具体的には、いくつかの量子クエンチを考え、そのもとでのオッド・エントロピーの時間発展の特徴を明らかにした。

該当論文の DOI:10.1007/JHEP02(2020)017 , 10.1016/j.physletb.2021.136105

(2) オッド・エントロピーの種々の物理現象(熱化現象[1]・デコヒーレンス過程[2]・相転移現象[3]など)への応用可能性を明らかにした。

それぞれにおいて、[1] subsystem ETH の反例になっている状態を発見し、その重力双対を明らかにした。[2] 重力双対を持つ系のデコヒーレンス過程に対して制限を与えた。[3] リフシッツ型固定点に対して、新しい分類方法を与えた。

該当論文の DOI:[1] 10.1007/JHEP02(2020)017 , 10.1016/j.physletb.2021.136105 [2]
10.1007/JHEP03(2021)214 [3] 10.1007/JHEP08(2020)078

補足：特に、[1]は混合状態に対してエンタングルメント・エントロピーの一般化を与える情報量たちのダイナミクスを、場の理論で解析した初めての論文である。本論文の大部分では、情報量の計算手法を発展させるだけでなく、先行研究で不備のあった部分の再定式化を行っており、当該分野における基礎的な部分への貢献を果たしている。また、重力双対を持つ理論は、ある意味で最もカオス的な場の理論だと思われる。このような理論が熱化における予想 (subsystem ETH) の反例になっている状態を多く (ラージN極限のleading orderでブラックホール・エントロピーを説明できる程度) 含んでいることは驚くべきことであり、関連分野において無視できない事実を与えた論文である。

このほかにも、オッド・エントロピーを用いたトポロジカル相の分類に関しても研究が進んできている。(この研究は、別の研究グループによって行われた。) いずれにせよ、オッド・エントロピーの物理的意義が研究開始当時に比べるとかなり明白になっており、本研究の主目的は十分に達成されたと思われる。

(3) オッド・エントロピーの基礎的な性質(量子情報量が満たす種々の不等式や関係式など)の理解を深めた。

該当論文の DOI:10.1007/JHEP08(2020)078

(4) オッド・エントロピー同様に超弦理論の文脈から新しく発見した情報量「擬エントロピー」に関して、(1)-(3)と同種の研究を行った。具体的には、von Neumann entropy の 2 状態への一般化である擬エントロピー (pseudo entropy) と呼ばれる量を新しく導入し、その重力双対が虚時間に依存するユークリッド空間における極小曲面であることを明らかにした。そして、その基礎的な性質や操作論的な解釈を明らかにした。さらに、擬エントロピーが「与えられた二つの状態が異なる量子相に属しているかどうか判定可能」であることを具体例から明らかにした。

該当論文の DOI:10.1103/PhysRevD.103.026005, 10.1103/PhysRevLett.126.081601

補足：エンタングルメント・エントロピーと重力理論の曲面の面積の関係式(笠-高柳公式とその様々な一般化)は、発見されてから今まで量子重力の理解に非常に重要な貢献を果たしている。

今回新たに発見された「擬エントロピー」はこれまで知られていなかった新しい「情報量」であり、すでに明らかになった応用はもちろんのこと、今後量子重力だけではなく様々な分野で広く使われるようになることを期待している。具体的には、系のモジュラーハミルトニアンの特異性の理解などへの応用可能性が明らかになりつつあり、この成果を論文として出版予定である。また、相構造の判定可能性に関しても、さらなる正統性の議論が量子系はもちろんのことホログラフィーの観点からも行われている。

(5) 以上の研究成果のうち、オッドエントロピーに関する研究(の一部)の解説記事を、日本物理学会誌へ寄稿した。

該当記事の DOI:10.11316/butsuri.75.6_335

また、関連する研究で日本物理学会若手奨励賞を受賞し、受賞講演を行った。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 8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 Mollabashi Ali, Tamaoka Kotaro	4. 巻 2020
2. 論文標題 A field theory study of entanglement wedge cross section: odd entropy	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 078-078
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/JHEP08(2020)078	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 Nakata Yoshifumi, Takayanagi Tadashi, Taki Yusuke, Tamaoka Kotaro, Wei Zixia	4. 巻 103
2. 論文標題 New holographic generalization of entanglement entropy	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 026005-026005
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevD.103.026005	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 Mollabashi Ali, Shiba Noburo, Takayanagi Tadashi, Tamaoka Kotaro, Wei Zixia	4. 巻 126
2. 論文標題 Pseudo-Entropy in Free Quantum Field Theories	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 081601-081601
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevLett.126.081601	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 Kusuki Yuya, Tamaoka Kotaro	4. 巻 814
2. 論文標題 Dynamics of entanglement wedge cross section from conformal field theories	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physics Letters B	6. 最初と最後の頁 136105-136105
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.physletb.2021.136105	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 Anegawa Takanori, Iizuka Norihiro, Tamaoka Kotaro, Ugajin Tomonori	4. 巻 2021
2. 論文標題 Wormholes and holographic decoherence	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 214-214
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP03(2021)214	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 玉岡 幸太郎、梅本 滉嗣	4. 巻 75
2. 論文標題 混合状態に対する量子情報量とホログラフィー原理	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 日本物理学会誌	6. 最初と最後の頁 335-339
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11316/butsuri.75.6_335	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 Kusuki Yuya, Tamaoka Kotaro	4. 巻 2020
2. 論文標題 Entanglement wedge cross section from CFT: dynamics of local operator quench	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 017-017
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP02(2020)017	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 Takayanagi Tadashi, Tamaoka Kotaro	4. 巻 2020
2. 論文標題 Gravity edges modes and Hayward term	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 167-167
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP02(2020)167	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6件（うち招待講演 4件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 玉岡 幸太郎
2. 発表標題 混合状態の量子もつれを測る新たな量子情報量の導入
3. 学会等名 日本物理学会2020年秋季大会 素粒子論領域 日本物理学会若手奨励賞受賞記念講演(招待講演) (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 玉岡 幸太郎
2. 発表標題 Aspects of Odd Entropy and Holography
3. 学会等名 日本物理学会2020年秋季大会 素粒子論領域
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kotaro Tamaoka
2. 発表標題 Pseudo Entropy in Quantum Many-Body Systems and Holography
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 Kotaro Tamaoka
2. 発表標題 Odd Entropy and Holography
3. 学会等名 Simons Collaboration on It from Qubit Annual Meeting 2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 玉岡 幸太郎
2. 発表標題 混合状態の量子もつれを測る新たな量子情報量の導入
3. 学会等名 日本物理学会第75回年次大会（2020年）素粒子論領域 日本物理学会若手奨励賞受賞記念講演（招待講演）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 玉岡 幸太郎
2. 発表標題 エントロピーと重力エッジモードの関係について
3. 学会等名 日本物理学会第75回年次大会（2020年）
4. 発表年 2020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
---------	---------