

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 5 月 24 日現在

機関番号：82401

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2022

課題番号：18K13550

研究課題名（和文）物質と重力のダイナミクスに基づく蒸発するブラックホールの場の理論的定式化

研究課題名（英文）A field-theoretic description of evaporating black holes based on matter and gravity dynamics

研究代表者

横倉 祐貴（Yokokura, Yuki）

国立研究開発法人理化学研究所・数理創造プログラム・上級研究員

研究者番号：50775616

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,600,000円

研究成果の概要（和文）：物質と重力の量子論的ダイナミクスからブラックホールの正体を理解することを目指した。まず、蒸発する性質を考慮し半古典的アインシュタイン方程式をプランク定数について非摂動的に解くと、重力崩壊する物質が生む強い曲率に伴って真空の量子ゆらぎにより大きな圧力が生じ、ホライズンのない高密度物体が形成される。これがブラックホールだと考えられる。次に、ホライズンをもつ古典的ブラックホールに対し、摂動的に様々な量子効果を有効場理論の立場から調べると、従来のホライズン描像に矛盾が生じることが示された。そして、一般の量子多体系の時間発展の熱力学的有効理記述を構成し、エントロピーを対称性によって特徴づけた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ブラックホールの正体は不明である。古典力学に基づく概念であるホライズンの存在は現在の観測精度で確認されておらず、またブラックホールは有限のエントロピーを持つため量子多体系であるはずだ。その正体を理解するには本質的に量子論から考えねばならない。本研究では第一原理から再考し量子効果が本質的な役割を担う高密度物体というブラックホール描像に到達した。これは将来の観測で確認でき、また情報問題を具体的に調べる枠組みを与える。これは従来の古典的描像の限界によっても支持される。さらにエントロピーの対称性はブラックホールにも適用できる。本研究成果は量子論・重力理論・熱力学が密接に関わる領域で役立つはずだ。

研究成果の概要（英文）：We aimed to understand the true picture of black holes is from the quantum dynamics of matter and gravity. First, by taking into account the evaporating nature and solving the semi-classical Einstein equations in a non-perturbative manner for Planck's constant, it was shown that a large pressure is generated by the vacuum quantum fluctuations induced with the strong curvatures of a collapsing matter, to form a dense object without a horizon. This can be considered as a black hole. Next, various perturbative quantum effects on a classical black hole with a horizon were investigated from the viewpoint of effective field theory, and it was shown that the conventional horizon picture is inconsistent. Then, a thermodynamic effective description of the time evolution of quantum many-body systems was constructed, where entropy is characterized by symmetry in quantum theory.

研究分野：素粒子論

キーワード：ブラックホール 量子重力 半古典的アインシュタイン方程式 エントロピー 情報問題 対称性 低エネルギー有効理論 非摂動解

## 1. 研究開始当初の背景

ブラックホールは蒸発する。この性質とホライズンをもつ古典的ブラックホール描像はユニタリー時間発展と矛盾する (情報問題)。では、量子論と整合的なブラックホールとはどんなものだろうか？それは、物質と重力の量子論的ダイナミクスに従い、強い重力下で物質が最も小さくなった配位だと考えられる。そこで、私は蒸発する性質を第ゼロ近似とした半古典的 Einstein 方程式と self-consistent なモデルを構築した。その結果、物質は重力崩壊すると、その間に生じる粒子生成により高密度な配位に漸近し、最終的に蒸発することがわかった。それは (ホライズンの代わりに) Schwarzschild 半径のわずか外側に表面を持ち、その内部にはプランクスケールに近い大きな圧力が生じている。これが量子論におけるブラックホールの候補だろう。

## 2. 研究の目的

上のモデルでは、崩壊物質を粒子集団として扱うなど、全てを場の理論的に記述できていない。本研究では、このモデルを発展させブラックホールを場の理論的に完全に定式化する。それは、励起状態から出発する物質場が、重力相互作用により束縛状態としてのブラックホールになり蒸発する、という一連の過程を場の理論的に記述することである。これを通して情報問題やエントロピーを理解したい。

## 3. 研究の方法

(1) 半古典的 Einstein 方程式を self-consistent に直接解いて量子状態を特定する。さらに、内部の大きな圧力を場の理論的に調べその起源を明らかにする。そして、エントロピーの微視的起源を理解したい。

(2) この描像はプランク定数に関して非摂動的な結果になっている。では、古典論的ブラックホール描像は何が悪いのだろうか。そこで、有効場の理論の立場から、量子効果を摂動的に取り入れて、何が生じるのかを調べてみる。

(3) ブラックホールは1つの量子多体系である。そこで、時間依存する外部場中の量子多体系の波動関数の時間発展を熱力学的立場から定式化し、エントロピーを調べる。

## 4. 研究成果

(1) ① 4次元球対称の蒸発するブラックホールの内部の計量上で量子スカラー場を直接解き、その配位と状態を特定することに成功した。その内部計量が実際に半古典的 Einstein 方程式の self-consistent 解であることを陽に示した。その解は「ブラックホールとはホライズンも特異点もない高密度半古典的配位である」を表している。特に次の点が分かった：(i) 角運動量を持つ内部の bound modes は基底状態にあり、その量子ゆらぎが大きな接線方向圧力を生む。(ii) 出入りする S 波は励起状態にあり、それが崩壊物質の情報を担う。内部でのそれらのパターン数を数え上げると、エントロピー面積則が再現される。(iii) 真空の量子ゆらぎに由来する負エネルギー流が崩壊物質と重なることにより、エネルギーが減少する。(iv) conformal matter field を考えた場合、matter content に (weak gravity conjecture のように) 自動的に制限がかかる。以上の内容は「物質が重力崩壊して時空曲率が大きくなると、物質を成すモードはそのまま保存してエントロピーを担い、それとは別のモードが曲率によって誘起され、その量子揺らぎが大きな圧力を生み高密度配位を形成するが、最終的には負のエネルギーによって蒸発する」を示している。これはブラックホールの正体に迫る非常に大きな成果である。今後、様々なモード間の相互作用を考慮することにより、情報回復の仕方を詳しく調べたい。

② これまでの解析では、蒸発する性質を外部に適用しその時間発展から内部計量を構成した。これは物理的である一方で外部計量に関するある程度の仮定に依存していた。そこで、Hawking 温度の熱浴中で可逆形成された配位を考え、その内部計量を直接構成した。まず、そのような配位は統計的に最も典型的な配位である。また、conformal matter fields を仮定し、4D Weyl anomaly を使用したが、それは量子状態に依存しない。これらの普遍性をもち Hawking 輻射と整合的な内部計量は、上記の高密度配位のものとして一意的に定まった。従って、この高密度配位は外部の詳細に依らず非常に普遍的なものであることがわかった。

(2) ホライズンを持つ古典的ブラックホールに対する量子効果を摂動的に様々な方法で調べた結果、以下がわかった。(i) 4D Weyl anomaly による真空揺らぎの backreaction を摂動的に取り入れると、ホライズンが現れるためには境界条件に fine tuning を要するため、generic にはホライズンは生じない。(ii) 仮に重力崩壊によってホライズンが生じ、蒸発に伴いホライズンが小さくなるとする。このとき、ホライズン内に入った物質とホライズンの距離がプランクスケール程しか離れていない。これは上記の高密度配位と実質的に似ている。(iii) 蒸発の効果を無視し、重力崩壊してホライズンが形成される時空を考える。このとき、ホライズン近くにおける物質場の繰り込み不可能な相互作用は、遠くにいる観測者に対しては relevant になり、自由落下する

観測者に対しては irrelevant のままである。これはホライズン近くでは通常の場合の理論的記述が破綻し何かしらの Planck スケールの物理が関与することを示している。以上より、通常のホライズン描像は変更せざるを得ないことがわかった。(これらは National Taiwan University の研究者との共同研究に基づく。)

(3) 時間依存した外場中の量子多体系を考え、そのユニタリー時間発展を記述する新しい経路積分表示を開発した。それは熱力学的状態空間における経路積分であり、そこにはエントロピーとそれに正準共役な運動量の有効作用が現れる。外場の時間変化が遅い場合、その経路積分にその運動量の並進対称性が現れ、量子論レベルでエントロピー保存則が得られる。この対称性はネーターチャージとしてのブラックホールエントロピーを導く対称性と同じ形をしている。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計9件（うち査読付論文 8件/うち国際共著 6件/うちオープンアクセス 7件）

1. 著者名 Ho Pei-Ming, Kawai Hikaru, Yokokura Yuki	4. 巻 1
2. 論文標題 Planckian physics comes into play at Planckian distance from horizon	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 19
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/JHEP01(2022)019	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する
1. 著者名 Kawai Hikaru, Yokokura Yuki	4. 巻 105
2. 論文標題 Interior metric of slowly formed black holes in a heat bath	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 no.4, 045017
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevD.105.045017	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する
1. 著者名 Ho Pei-Ming, Yokokura Yuki	4. 巻 7
2. 論文標題 Firewall from Effective Field Theory	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Universe	6. 最初と最後の頁 241
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/universe7070241	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する
1. 著者名 Ho Pei-Ming, Matsuo Yoshinori, Yokokura Yuki	4. 巻 104
2. 論文標題 Distance between collapsing matter and apparent horizon in evaporating black holes	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 no.6, 064005
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevD.104.064005	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 Hikaru Kawai, Yuki Yokokura	4. 巻 6
2. 論文標題 Black Hole as a Quantum Field Configuration	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Universe	6. 最初と最後の頁 77
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/universe6060077	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Pei-Ming Ho, Yoshinori Matsuo, Yuki Yokokura	4. 巻 102
2. 論文標題 An Analytic Description of Semi-Classical Black-Hole Geometry	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 24090
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.102.024090	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Ho Pei-Ming, Kawai Hikaru, Matsuo Yoshinori, Yokokura Yuki	4. 巻 2018
2. 論文標題 Back reaction of 4D conformal fields on static black-hole geometry	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 56
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP11(2018)056	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Shin-ichi Sasa, Sho Sugiura, Yuki Yokokura	4. 巻 99
2. 論文標題 Thermodynamical path integral and emergent symmetry	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review E	6. 最初と最後の頁 22109
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevE.99.022109	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 横倉祐貴	4. 巻 7
2. 論文標題 ネーター保存量としての熱力学エントロピー	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 物性研究・電子版	6. 最初と最後の頁 No.2,072218
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 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

[学会発表] 計27件(うち招待講演 8件/うち国際学会 16件)

1. 発表者名 Yuki Yokokura
2. 発表標題 Interior of Thermodynamical Black Holes
3. 学会等名 String theory, gravity and cosmology 2021, in Posco International Center (招待講演)(国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yuki Yokokura
2. 発表標題 Interior of Typical Black Holes
3. 学会等名 16th Marcel Grossmann Meeting (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yuki Yokokura
2. 発表標題 Universality of Interior Metric of Typical Black Holes
3. 学会等名 Strings and Fields 2021 at YITP
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 横倉祐貴
2. 発表標題 Interior of Typical Black Holes
3. 学会等名 日本物理学会2021年秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 横倉祐貴
2. 発表標題 Field Dynamics inside Evaporating Black Holes
3. 学会等名 日本物理学会第77回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yuki Yokokura
2. 発表標題 Black Hole as a Quantum Field Configuration
3. 学会等名 KEK Theory Workshop 2020 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yuki Yokokura
2. 発表標題 Black Hole as a Quantum Field Configuration
3. 学会等名 4th International Conference on Holography, String theory and Discrete approach in Hanoi (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yuki Yokokura
2. 発表標題 Black Hole as a Quantum Field Configuration
3. 学会等名 Strings and Fields 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 横倉祐貴
2. 発表標題 Black Hole as a Quantum Field Configuration
3. 学会等名 日本物理学会秋大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yuki Yokokura
2. 発表標題 Black Hole as a Quantum Field Configuration
3. 学会等名 Strings and Fields 2019 (YITP) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yuki Yokokura
2. 発表標題 A Self-Consistent Description Of Time Evolution Of Black Holes Including Collapsing Matter and Hawking Radiation
3. 学会等名 GR22 (Valencia) (国際学会)
4. 発表年 2019年



1. 発表者名 Yuki Yokokura
2. 発表標題 Black Hole as a Quantum Field Configuration
3. 学会等名 1-day workshop on Quatum Gravity (RIKEN) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 横倉祐貴
2. 発表標題 Black Hole as a Quantum Field Configuration
3. 学会等名 日本物理学会秋季大会(山形大学)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 横倉祐貴
2. 発表標題 Thermodynamical Path Integral and Emergent Symmetry
3. 学会等名 日本物理学会秋季大会(山形大学)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yuki Yokokura
2. 発表標題 Entropy inside evaporating black holes
3. 学会等名 One day workshop of quantum field theory and strings (大阪市大) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 横倉祐貴
2. 発表標題 ネーター保存量としての熱力学エントロピー
3. 学会等名 第63回物性夏の学校(西浦)(招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 横倉祐貴
2. 発表標題 A Self-consistent Model of Evaporating Black Holes
3. 学会等名 第三回若手による重力・宇宙論研究会(基礎物理学研究所)(招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yuki Yokokura
2. 発表標題 A self-consistent solution of evaporating black holes
3. 学会等名 Sigrav2018 (Sardinia)(国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yuki Yokokura
2. 発表標題 Energy-momentum tensor inside evaporating black holes
3. 学会等名 Strings and Fields 2018(基礎物理学研究所)(国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yuki Yokokura
2. 発表標題 A self-consistent solution of evaporating black holes
3. 学会等名 15th Marcel Grossmann Meeting (University of Roma) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 横倉祐貴
2. 発表標題 蒸発するブラックホール内部の物質場の厳密解
3. 学会等名 日本物理学会 2018年秋季大会 (信州大学)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yuki Yokokura
2. 発表標題 Entropy-Area Law from Gravity of Information
3. 学会等名 TJR workshop: "Connecting the hierarchies: from cosmos to life", Osaka University (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Yuki Yokokura
2. 発表標題 Entropy-Area Law from Interior Semi-classical Degrees of Freedom
3. 学会等名 NTU-Kyoto/Kawai-fest, National Taiwan University, Taipei (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yuki Yokokura
2. 発表標題 Black Hole as a Bound state of Semi-classical Degrees of Freedom
3. 学会等名 Loops22, ENS, Lyon (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yuki Yokokura
2. 発表標題 A semi-classical model of quantum black holes
3. 学会等名 Quantum Field Theory in Curved Spacetimes Workshop, online (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 横倉祐貴
2. 発表標題 Entropy-Area Law from Interior Semi-classical Degrees of Freedom
3. 学会等名 場の理論と弦理論2022、基礎物理学研究所
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 横倉祐貴
2. 発表標題 A semi-classical configuration satisfying the entropy-area law
3. 学会等名 日本物理学会春[online]
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

2020年7月8日 理化学研究所プレスリリース「蒸発するブラックホールの内部を理論的に記述」  
[https://www.riken.jp/press/2020/20200708\\_3/index.html](https://www.riken.jp/press/2020/20200708_3/index.html)

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			
その他の国・地域(台湾)	National Taiwan University			
カナダ	Perimeter Institute			