

令和 4 年 6 月 9 日現在

機関番号：13601

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19K03845

研究課題名（和文）ゲージ理論の厳密な結果から探る量子的な時空の構造

研究課題名（英文）Probing quantum spacetime structure via exact results of gauge theories

研究代表者

奥山 和美（Okuyama, Kazumi）

信州大学・学術研究院理学系・教授

研究者番号：70447720

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,000,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、酒井一博氏との共同研究で、JT重力の行列模型を用いた量子重力の研究を行った。JT重力は、その行列模型による記述が量子重力の非摂動的な定義を与えるため、量子重力のToyモデルとして非常に有用である。我々は、JT重力が2次元位相的重力の特別な場合であり、無限個の結合定数のある特殊値に選んだ背景に対応することを示し、分配関数のジューナス展開を漸化的に計算する手法を開発した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

自然界の4つの力（電磁気力、弱い力、強い力、重力）のうち、重力だけが未だに量子論的な記述がわかっていない。超弦理論が量子重力の有力な候補であるが、弦理論では量子重力の非摂動的な効果を見ることが困難であるため、具体的に計算可能なToyモデルを調べるのが重要である。JT重力の行列模型はそのようなToyモデルの中でもホログラフィー原理との相性が良く、本研究は量子重力の理解へ向けた重要な一歩である。

研究成果の概要（英文）：In collaboration with Kazuhiro Sakai, we have studied the matrix model of JT gravity, which is very useful as a toy model of quantum gravity because its description by the matrix model gives a non-perturbative definition of quantum gravity. We show that JT gravity is a special case of two-dimensional topological gravity, corresponding to a background with an infinite number of coupling constants chosen to some special value, and we develop a method for computing the genus expansion of the partition function recursively.

研究分野：素粒子理論、超弦理論

キーワード：JT重力 行列模型 量子重力

1. 研究開始当初の背景

量子重力の背後にはホログラフィー原理があり、時空の境界上の量子多体系と、境界に端を持つバルク時空上の量子重力理論が等価であると予想されている。ホログラフィー原理の具体例として、反ド・ジッター時空上の超弦理論と境界上のゲージ理論の間の、いわゆる AdS/CFT 対応が盛んに研究されており、様々な物理量の比較からこの対応が成り立つ証拠が蓄積されている。しかし、バルク時空上の超弦理論と境界上のゲージ理論の双方で計算できる量は限られており、ホログラフィー原理の完全な理解からは程遠いのが現状である。

そこで、AdS/CFT 対応のトイモデルとして、フェルミオンの多体系である Sachdev-Ye-Kitaev (SYK) 模型と、Jackiw-Teitelboim (JT) 重力というスカラー場が入った 2 次元重力 (ディラトン重力) の間のホログラフィー対応が近年注目を集めている。SYK 模型は多体のフェルミオンがランダムに結合した系であり、SYK 模型と JT 重力の間の対応はアンサンブル平均を伴うホログラフィーの例になっている。アンサンブル平均の帰結として、時空の境界が複数ある場合には境界をつなぐワームホール時空の寄与が現れることが、高次元の AdS/CFT 対応との大きな違いである。

量子重力の経路積分ではワームホールなどの非自明なトポロジーを持つ時空を全て足し上げる必要があるが、どのような重みで異なるトポロジーを足し上げるべきなのか、という計算ルールが一般には分かっていない。しかし、Saad ら (2019) によって JT 重力の経路積分は 2 重スケール極限での行列模型に等しいことが示され、時空のトポロジーの足し上げは行列模型のジータス展開によって与えられることが分かった。

2. 研究の目的

この研究の目的は、JT 重力の行列模型という具体例を通して、量子重力の非摂動的な定義とは何か、を明らかにすることである。重力の経路積分では可能な時空のトポロジーを全て足し上げることが期待されるが、一般にはどのような重み付けでそれを行うべきか指針がない。JT 重力では行列模型の記述を用いてこの問題を具体的に調べることができるため、量子重力の基本原理に対する深い理解が得られることが期待される。行列模型では時空のトポロジーの足し上げはジータス展開で与えられるが、この展開は漸近級数であるため、非摂動的には種々のプレーンの寄与があることが予想される。本研究では特に、JT 重力の行列模型に現れるプレーンを調べることで、量子重力の非摂動的な定義とは何か、という問いに対する解答を与えることを目指す。

3. 研究の方法

この研究では、まず JT 重力の行列模型のジータス展開を系統的に行う手法を開発した。これは Zograf による KdV 方程式を用いる計算法を JT 重力に応用したものであり、通常の位相的漸化式の方法よりも格段に計算時間を短縮できる。更に、この方法を時空の境界が複数ある場合にも拡張し、一般の相関関数に対するジータス展開を計算した。この結果から、スペクトル形状因子のランプとプラトーと呼ばれる振る舞いを再現することができる。また、JT 重力に FZZT プレーンと呼ばれるプレーンを導入する一般的な方法を考察した。この結果を用いて、Page 曲線の計算に対するプレーンのバックリアクションの効果を取り入れることができる。

4. 研究成果

この研究では、JT 重力の行列模型のジータス展開の KdV 方程式を用いた手法を開発した。その過程で、JT 重力が昔の 2 次元重力の行列模型の特別な場合であり、位相的重力の結合定数を無限個ある値に置いたものに等しいことを示した。次に、この計算手法を時空の境界が複数ある場合にも拡張し、特に境界が二つある場合のスペクトル形状因子の振る舞いについて調べ、JT 重力でもランプとプラトーの間の転移が起こることを具体的な計算により示した。また、この計算は、JT 超重力の場合にも拡張できることを発見し、Berezin-Gross-Witten のタウ関数と関係することを見出した。この過程において、JT 重力の分配関数の低温展開に特徴的な構造があることを発見し、一般的な 2 次元位相的重力でも低温展開を系統的に行う手法を開発した。行列模型の分配関数はループ方程式と呼ばれる恒等式を満たすことが知られているが、この式と重力のゲージ不変性には密接な関係があることが昔から示唆されていた。この問題について近年の発展を踏まえて重力のゲージ不変性とループ方程式の関係を再考する考察を行った。次に、

JT 重力に FZZT プレーンと呼ばれるプレーンを導入する一般的な処方を発見した。これを用いて AdS/CFT 対応における因子化の問題について考察した。また、このプレーンを導入する手法を用いて、ブラックホールの蒸発に伴うホーキング輻射のエントロピーの時間変化を表す Page 曲線に対するプレーンのバックリアクションを計算し、バックリアクションの効果を取り入れるとエントロピーが遅い時間では減少することが見出された。この結果はブラックホールが蒸発する際にエントロピーが減少するという描像と整合している。

JT 重力の行列模型の研究とは別に、ランダム行列の性質に関する研究も行った。ガウス型行列模型でクエンチ自由エネルギーを考察し、温度に関して単調減少することを示した。また、一般のランダム系で、クエンチ自由エネルギーを分配関数の母関数によって表す表式を発見し、エアリー行列模型の場合に適用して具体的な計算を行った。更に、ランダム純粋状態におけるエンタングルメント・キャパシティーの計算を行い、有限の N での厳密な表式を得た。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計13件（うち査読付論文 13件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 13件）

1. 著者名 Kazumi Okuyama, Kazuhiro Sakai	4. 巻 8
2. 論文標題 Multi-boundary correlators in JT gravity	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 126
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP08(2020)126	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 Kazumi Okuyama, Kazuhiro Sakai	4. 巻 10
2. 論文標題 JT supergravity and Brezin-Gross-Witten tau-function	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 160
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP10(2020)160	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 Kazumi Okuyama	4. 巻 12
2. 論文標題 Quenched free energy in random matrix model	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 80
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP12(2020)080	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 Kazumi Okuyama, Kazuhiro Sakai	4. 巻 3
2. 論文標題 Genus expansion of open free energy in 2d topological gravity	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 217
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP03(2021)217	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 Kazumi Okuyama	4. 巻 3
2. 論文標題 Quenched free energy from spacetime D-branes	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 73
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP03(2021)073	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 Kazumi Okuyama, Kazuhiro Sakai	4. 巻 6
2. 論文標題 Holomorphic anomaly of 2d Yang-Mills theory on a torus revisited	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 25
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP08(2019)025	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 Kazumi Okuyama, Kazuhiro Sakai	4. 巻 1
2. 論文標題 JT gravity, KdV equations and macroscopic loop operators	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 156
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP01(2020)156	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 Kazumi Okuyama	4. 巻 803
2. 論文標題 Replica symmetry breaking in random matrix model: A toy model of wormhole networks	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physics Letters B	6. 最初と最後の頁 135280
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.physletb.2020.135280	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 Kazumi Okuyama, Kazuhiro Sakai	4. 巻 8
2. 論文標題 t Hooft expansion of multi-boundary correlators in 2D topological gravity	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Prosess in Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 083B03
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/ptep/ptab090	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 Kazumi Okuyama	4. 巻 820
2. 論文標題 Capacity of entanglement in random pure state	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physics Letters B	6. 最初と最後の頁 136600
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.physletb.2021.136600	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 Kazumi Okuyama, Kazuhiro Sakai	4. 巻 10
2. 論文標題 A proof of loop equations in 2d topological gravity	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 107
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP10(2021)107	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 Kazumi Okuyama, Kazuhiro Sakai	4. 巻 9
2. 論文標題 FZZT branes in JT gravity and topological gravity	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 191
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP09(2021)191	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 Kazumi Okuyama, Kazuhiro Sakai	4. 巻 2
2. 論文標題 Page curve from dynamical branes in JT gravity	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 87
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP02(2022)087	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 -

〔学会発表〕 計4件(うち招待講演 3件/うち国際学会 2件)

1. 発表者名 奥山和美
2. 発表標題 JT重力の最近の進展
3. 学会等名 日本物理学会第76回年次大会(招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 奥山和美、酒井一博
2. 発表標題 トラス上の2次元Yang-Mills理論の正則アノマリー再考
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kazumi Okuyama
2. 発表標題 FZZT branes in JT gravity and topological gravity
3. 学会等名 East Asia Joint Symposium on Fields and Strings 2021(招待講演)(国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kazumi Okuyama
2. 発表標題 Page curve from dynamical branes in JT gravity
3. 学会等名 KIAS-YITP Joint Workshop 2021 (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〕

Witnessing the birth of baby universes 46 times https://eurekaalert.org/pub_releases/2020-02/su-wtb022720.php

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
---------	---------