

令和 5 年 5 月 25 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20K03965

研究課題名(和文)スワンプランド条件の精密化

研究課題名(英文)Refinement of Swampland Conditions

研究代表者

大栗 博司(Ooguri, Hirosi)

東京大学・カブリ数物連携宇宙研究機構・特任教授

研究者番号：20185234

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：量子重力理論の低エネルギー有効理論について、一般的な性質をいくつか明らかにした。特に、ゲージ対称性をもつ量子重力理論について、反ドジッター時空間におけるブラックホールについて、その事象の地平線の半径が時空間の曲率半径より大きい場合に、量子状態が対称性の既約表現によってどのように分解されるかを明らかにした。たとえば、ゲージ対称性が有限群の場合には、量子状態をランダムに選んだ場合、それが既約表現 $R$ に属する確率が $R$ の次元の2乗に比例することを明らかにした。また、この結果を、対称性がコンパクトなリー群の場合にも拡張し、非アベリアンヘアを持つブラックホールの熱力学的性質を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

一般相対性理論と量子力学の統合を目指す超弦理論の完成は、自然界の最も基本的な法則を解明しようとする人類の大きな知的作業の到達目標の一つである。大栗の研究は、数学的に矛盾のない量子重力理論の満たすべき定理を明らかにしたものであり、超弦理論の完成に向けた大きな一歩である。

研究成果の概要(英文)：We clarified several general properties of low-energy effective theories of quantum gravity. In particular, for any consistent quantum gravity in anti-de Sitter space, with gauge symmetry, we showed how quantum states are decomposed by into irreducible representation of the symmetry when the radius of the event horizon is larger than the curvature radius of the spacetime. For example, when the gauge symmetry is a finite group and if a quantum state is chosen at random, the probability that it belongs to the irreducible representation  $R$  is proportional to the square of the dimension of  $R$ . We also extended this result to the case of compact Lie groups and clarified the thermodynamic properties of black holes with non-Abelian hairs.

研究分野：素粒子論

キーワード：超弦理論 量子重力理論

## 1. 研究開始当初の背景

Cumrun Vafa は、2005年に、量子重力理論においては、低エネルギー有効理論に、ウィルソン流の思想を越えた条件が課せられると主張をし、このような条件を満たさない有効理論の集合を「スワンプランド(沼地)」と呼んだ。超弦理論のように、矛盾のない量子重力理論から導かれる低エネルギー有効理論の集合は、「ランドスケープ」と呼ばれるが、スワンプランドはその補集合と考えることもできる。

研究代表者である大栗は、この方面の研究では、その初期から現在にわたって影響力のある論文を発表してきたリーダーである。

Cumrun Vafa がスワンプランドの存在を主張した翌年の2006年に、大栗はVafaと共同で、新しいスワンプランド条件を提案した。これは低エネルギー有効理論におけるスカラー場の空間(いわゆるモジュラ空間)の幾何学的性質に関するものであり、これらの予想は「Distance Conjecture(距離予想)」として知られている。また、同じ年には、Nima Arkani-Hame、Lubos Motl、Alberto Nicolis、と Cumrun Vafa により、「Weak Gravity Conjecture(弱い重力予想)」も提案された。

距離予想と弱い重力予想は、提案から研究開始当初の14年の間に、超弦理論から導かれてきた数々の低エネルギー有効理論のすべてについて成り立っていることが確認されてきた。また、超弦理論に限らず、数学的に整合性のある量子重力理論一般についても、低エネルギー有効理論の満たすべき条件であるという証拠も見つかってきた。さらに、距離予想と弱い重力予想の間の論理的関係も明らかになりつつあった。

このような状況の下で、大栗は、Vafaらとの共同研究で、「反ドジッター予想」「ドジッター予想」などの新たなスワンプランド予想を提案していた。これらの予想は、宇宙の加速膨張の原因や初期宇宙のインフレーションモデルの検証、ニュートリノのタイプ(マヨラナ型かディラック型か)や質量などに深く関係しており、今後10年以内に行われる宇宙精密観測や素粒子実験との協奏が期待される。そのため、これらの予想の理論的根拠を精査し、より精密な予想を提案することは、スワンプランド予想のみならず、超弦理論の実験的検証のために中心的な課題であると考えられた。これが研究当初の背景である。

## 2. 研究の目的

本研究では、重力を含む量子理論においてはウィルソン流の低エネルギー有効理論の思想に修正が必要となり、低エネルギーにおける整合性だけでは明らかでない条件があるとする「スワンプランド予想」を理論的に検証し、その精密化を行うことを目的とした。

スワンプランド予想には、「量子重力にはグローバル対称性が存在しない」という主張のようにすでに証明が完成しているものから、「反ドジッター予想」や「ドジッター予想」のように最近提案されその是非が議論されているものまで、その厳密度はさまざまである。

そこで、この十数年のあいだに提案されてきた様々なスワンプランド予想の各々について、より精密な導出を行うことを目的とした。そのプロセスで、反例が見つければ、予想が棄却できるとも考えた。逆に、AdS/CFT 対応など、広く受け入れられている事実からの理論的導出も視野に入れた。それにより、スワンプランド予想をより精密化し、今後10年間に行われる宇宙精密観測や素粒子実験に、より確かな指針を与えることが目標であった。

これらの予想は、今後十年間の宇宙精密観測や素粒子実験により検証・棄却される可能性がある。そこで、これらの予想を精査し、その理論基盤をより確かなものとし、またその主張を定量化することで、宇宙観測や素粒子実験に指針を与え、超弦理論の実験的検証につなげることを目指した。

### 3. 研究の方法

量子重力に関する最も古い予想のひとつは、「量子重力理論にはグローバルな対称性はない」というものである。大栗は、Daniel Harlowとともに、AdS/CFT 対応を使うと、この予想が証明できることを 2018 年に示していた。そこで、本研究では、この証明を、宇宙項がゼロの場合（すなわち、平坦なミンコフスキー時空を解とする場合）に拡張することを考えた。また、Thomas Banks と Lance Dixon の摂動的な超弦理論における証明を有限群の場合に拡張することも考えた。

量子重力理論にグローバルな対称性がないのなら、低エネルギーで見られる対称性は高エネルギーでは破れているか、もしくはゲージ対称性になっているはずである。大栗と Harlow は、量子重力理論のグローバル対称性に関する結果を拡張し、弱い重力予想を AdS/CFT 対応を使って証明することを考えた。

### 4. 研究成果

- 1) スワンプランド条件の重要な例である「弱い重力予想」は、0-形式の対称性と呼ばれる通常の対称性について最初に定式化され、その後n-形式の対称性についても拡張された。この予想は、 $n > -1$ の場合には、ブラックホールを使った説明があったが、 $n=-1$ の場合については成り立つかどうか不明であった。大栗は、Stefano Andriolo、Tzu-Chen Huang、Toshifumi Nouri、Gary Shiuと共同で、アクシオンとディラトンを含む重力系について、双対性を仮定すれば $n=-1$ の場合の弱い重力予想が導かれることを示した。一方、双対性が成り立たない場合には反例を見つけた。これは、弱い重力予想は、低エネルギー有効理論から導ける条件だけでなく、双対性のような高エネルギー物理の知識を使わないと導けない例である。
- 2) 本研究の初年度に、Cumrun VafaとJacob McNamaraが「コボルディズム予想」と呼ばれる新しいスワンプランド予想を提案した。この予想は、すべての超弦理論がなんらかのプレーンをインターフェースとしてつながっているというものである。大栗と高柳匡は、この予想をAdS/CFT対応の枠組みの中で理論的に検証した。特に、ゲージアノマリーや重力アノマリーが異なる値を取る理論についても、インターフェースによって結びつけることができることを示した。
- 3) 大栗はIPMUのポストドクトラル・フェローのMatthew Dodelsonと共同で、ブラックホールの光子球面上で周回する粒子の相関関数が発散して無限大となり特異点を生み、物理的予言と矛盾するという従来指摘されてきた問題を、超弦理論の考え方にに基づき光子を点粒子ではなく閉じた弦として考えることで解決できることを示した。
- 4) 大栗は、Nathan Benjamin、Christoph Keller、Ida Zadehとともに、共形場の理論のモジュライ空間上の有利点の分布を解析し、モジュライ空間上で平均された共形場とAdS重力理論の双対対応も研究した。
- 5) 大栗とHarlowは、2018年に量子重力理論の「完全性定理」を証明し、量子重力理論がゲージ対称性を持つ場合には、ディラック量子化で許されるすべてのユニタリー規約表現が物

理的ヒルベルト空間内に実現されることを、AdS/CFT対応を使って証明した。大栗とHarlowは、この成果をさらに進めて、対称性が有限群の場合に、ヒルベルト空間の高エネルギー状態の規約表現への分解を決定した。具体的には、ユークリッド重力を用いて、ブラックホールの量子状態を規約表現に分解する公式を導いた。これは、完全性定理の有限具に関する新しい証明となる。さらに、この式が有限群のグローバル対称性を持つ任意の量子場の理論において高エネルギーで適用されることを提案し、この予想に対するいくつかの証拠を与えた。

- 6) 大栗とMonica Kang、Jaeha Leelは、上記のHarlowとの結果をコンパクトなリー群の場合に拡張した。そして、この公式を自由場理論やホログラフィック共形場理論についても検証し、これらの場合の $b$ の値を具体的に求めた。この解析の副産物として、反ドジッター空間における非アベリアンヘアを持つブラックホールの熱力学的性質を明らかにした。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 5件/うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 Kang Monica Jinwoo, Lee Jaeha, Ooguri Hiroshi	4. 巻 107
2. 論文標題 Universal formula for the density of states with continuous symmetry	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 26021
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.107.026021	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 Harlow Daniel, Ooguri Hiroshi	4. 巻 39
2. 論文標題 A universal formula for the density of states in theories with finite-group symmetry	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Classical and Quantum Gravity	6. 最初と最後の頁 134003 ~ 134003
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6382/ac5db2	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 Benjamin Nathan, Keller Christoph A., Ooguri Hiroshi, Zadeh Ida G.	4. 巻 2021
2. 論文標題 On rational points in CFT moduli spaces	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 67
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP04(2021)067	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 Dodelson Matthew, Ooguri Hiroshi	4. 巻 103
2. 論文標題 Singularities of thermal correlators at strong coupling	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 66018
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.103.066018	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 Andriolo Stefano, Huang Tzu-Chen, Noumi Toshifumi, Ooguri Hiroshi, Shiu Gary	4. 巻 102
2. 論文標題 Duality and axionic weak gravity	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 46008
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.102.046008	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 該当する

〔学会発表〕 計2件 (うち招待講演 2件 / うち国際学会 2件)

1. 発表者名 大栗博司
2. 発表標題 Conference Summary
3. 学会等名 Strings 2021 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 大栗博司
2. 発表標題 Perspectives and Prospects
3. 学会等名 Strings 2022 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022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			
米国	MIT			
米国	プリンストン大学	ウィスコンシン大学	アリゾナ大学	
イタリア	ICTP			