

令和 2 年 6 月 10 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2017～2019

課題番号：17K05407

研究課題名（和文）量子もつれによるホログラフィー原理の微視的仕組みの解明

研究課題名（英文）Microscopic Mechanism of Holographic Principle by Quantum Entanglement

研究代表者

大栗 博司（Hirosi, Ooguri）

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）：大栗は、Daniel Harlowと共同で、ホログラフィー原理を用いて、量子重力にグローバル対称性が存在しないなどの、量子重力に関する基本的な定理を証明した。この証明においては、ホログラフィー原理の微視的機構と量子情報理論の量子誤り訂正符号との密接な関係を使用した。また、大栗は、Matthew Dodelsonと共同で、通常の場合の量子論のランダウ型の特異点が超弦理論においてどのように解消するかを示した。

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）：Ooguri with Daniel Harlow used the holographic principle to derive fundamental theorems on quantum gravity such as absence of global symmetry. To prove these theorems, they made use of the close connection between the holographic principle and quantum error correction codes in quantum information theory. Ooguri with Matthew Dodelson used the holography to clarify how Landau singularities in particle physics amplitudes are resolved in string theory.

研究分野：素粒子論

キーワード：超弦理論 量子重力理論 ホログラフィー原理

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

大栗博司は AdS/CFT 対応発見当初から、ホログラフィー原理の理論物理学のさまざまな問題への応用に取り組んできた。2006 年の笠-高柳公式の発見とその後の 10 年の研究により、ホログラフィー原理と量子情報理論の深い関係が明らかになり、研究開始の 2017 年ごろには、量子情報理論によってホログラフィー原理の微視的なメカニズムを解明しようという機運が高まってきていた。

2. 研究の目的

ホログラフィー原理と量子情報理論の深い関係を使ってホログラフィー原理の微視的理解を深めることが本研究の主要な目的であった。ホログラフィー原理のメカニズムを理解することで、量子重力理論自身の理解を深め、超弦理論の新しい理論手法を開発することも目的とした。さらに、このような理解の促進や理論的手法の開発が、理論物理学の諸分野におけるより幅の広い問題についての、ホログラフィー原理のより深い応用に結び付くことも期待された。

3. 研究の方法

大栗は、研究開始の 2017 年当時、すでにホログラフィー原理と量子情報理論に関し、量子もつれの不等式の重力理論の幾何学的理解を発展させる論文① - ③を発表しており、こうした成果を発展させて、ホログラフィー原理の微視的仕組みを明らかにする計画を立てた。また、2015 年秋より当時ハーバード大学のポストドクトラル・フェローであった Daniel Harlow (現 MIT 助教授) と量子重力理論の対称性について、ホログラフィー原理の観点から研究を続けており、本研究中にその完成を目指した。

大栗が主任研究員を務める東京大学カブリ数物連携宇宙研究機構 (Kavli IPMU) では、准教授の Simeon Hellerman がホログラフィー原理や対応する共形場の理論の様々な側面を研究しており、またポストドクトラル・フェローの Kallol Sen は、共形ブートストラップの見地から AdS/CFT 対応に新しい見地を切り開きつつあったので、彼らとの議論によって研究を深めた。また、本研究の共同研究者の Daniel Harlow をこの科研費の旅費で Kavli IPMU に招聘し、共同研究を行った。また、2018 年から Kavli IPMU で雇用しているポスト・ドクトラルフェローの Matthew Dodelson とも、本研究の課題について共同研究を行い、その成果の一部はすでに発表されており、またさらなる研究も進めている。

4. 研究成果

2015 年秋に Daniel Harlow と開始した共同研究は、3 年以上の長期の努力を経て、2018 年秋に発表された ④, ⑤。この研究開始当時に、量子もつれを使った量子誤り訂正符号の理論とホログラフィー原理との深い関係が明らかになりつつあり、この研究ではそれをを

積極的に活用した。この研究では、「量子重力理論はグローバル対称性を持たない」という半世紀近くにわたって議論されてきた予想について、ホログラフィー原理の範囲で証明を与えることに成功した。この証明の過程で、場の量子論や量子重力における対称性の概念について、これまで以上に精密な定義を与えた。この証明は、対称性が自発的に破れている場合にも当てはまるので、たとえば、質量のないスカラー場が完全に平坦なポテンシャルを持つことがない、ということが結論付けられる。これは、インフレーション宇宙模型の構成にも重要な知見である。グローバル対称性を持たないのなら、許される対称性はゲージ対称性でなければならない。これについては、「ゲージ対称性がある場合には、ゲージ群の有限次元ユニタリー表現がすべて現れる」という予想があった。これについても、証明を完成した。これが、本研究の最も大きな成果と言える。

また、Ning Bao との共同研究によって、量子情報理論の重要な概念である「ホレボ情報」のホログラフィー原理における意味を明らかにした⑥。またそれを応用して、反ドジッター空間の中にあるブラックホールの微視的状态を、対応する共形場の理論のコーシー面の一部の領域における観測によってどの程度区別することができるのかを、定量的に示した。特に、観測する領域がある大きさに達するまではブラックホールの微視的状态はまったく区別できず、それ以降は領域を大きくしていくとブラックホールについての情報が徐々に明らかになり、ある大きさに達すると微視的状态が完全に区別できるようになる。「ホレボ情報」のホログラフィー原理における意味の解明については、本研究の申請をした時には視野に入っていなかった問題であり、さらに新しい展開が期待される。

近年、LIGO によるブラックホール連星からの重力波の直接観測やイベントホライゾン望遠鏡による超巨大ブラックホールの事象の地平線の近くの撮影の成功などにより、ブラックホールの事象の地平線の観測的理解が進みつつある。そこで、ブラックホールの事象の地平線のあたりにおける超弦理論特有の現象が理論的に考えられるかは重要な問題である。通常の次元解析によると、LIGO やイベントホライゾン望遠鏡で観測されているブラックホールの事象の地平線のあたりでは、時空間の曲率が String Scale よりも小さいので、超弦理論特有の効果は見られないように思われる。しかし、スタンフォード大学の Eva Silverstein と彼女の学生であった Matthew Dodelson は、そのような状況でも超弦理論特有の現象があり得ることを指摘していた。そこで、大栗は、Dodelson を Kavli IPMU のポストドクトラル・フェローに雇用し、彼とともに、ブラックホールの事象の地平線のあたりの現象を超弦理論のホログラフィー原理を使って解明するプロジェクトを行っている。その準備として、純粋な反ドジッター空間における類似の現象を考え、それが超弦理論の効果でどのような変更を受けるかを解明した。具体的には、反ドジッター空間における粒子の相関関数に見られる「ランダウ型特異点」が、超弦理論の効果でどのように解消されるかを定量的に明らかにした。また、その研究の過程で、共形場の理論の相関関数のメリン変換に対する普遍的な不等式を導出した⑦。大栗と Dodelson は、この研究成果を発展させ、ブラックホールの事象の地平線のあたりの超弦理論的效果の研究を推進しており、その成果についても近く発表の予定である。この研究は、「理論物理学の諸分野におけるより幅の広い問題についての、ホログラフィー原理のより深い応用」という本研究の長期的目標の達成を目指すものである。

引用文献

- The Holographic Entropy Cone, N. Bao, S. Nezami, H. Ooguri, B. Stoica, J. Sully, M. Walter, JHEP 1509, 130 (2015).
- Locality of Gravitational Systems from Entanglement of Conformal Field Theories, J. Lin, M. Marcolli, H. Ooguri, B. Stoica, Phys. Rev. Lett. 114, 221601 (2015).
- Gravitational Positive Energy Theorems from Information Inequalities, N. Lashkari, J. Lin, H. Ooguri, B. Stoica, M. Van Raamsdonk, PTEP 2016 (2016) no.12, 12C109.
- Constraints on Symmetries from Holography, D. Harlow, H. Ooguri, Phys. Rev. Lett. 122 (2019) 191601.
- Symmetries in quantum field theory and quantum gravity, D. Harlow, H. Ooguri, arXiv:1810.05338.
- Distinguishability of black hole microstates, N. Bao, H. Ooguri, Phys. Rev. D96 (2017) no.6, 066017.
- High-energy behavior of Mellin amplitudes, M. Dodelson, H. Ooguri, Phys.Rev. D101 (2020) 066008.

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 4件/うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 Hirosi Ooguri, Eran Palti, Gary Shiu, Cumrun Vafa	4. 巻 B788
2. 論文標題 Distance and de Sitter Conjectures on the Swampland	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Phys. Lett.	6. 最初と最後の頁 180-184
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） https://doi.org/10.1016/j.physletb.2018.11.018	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 Hirosi Ooguri, Lev Spodyneiko	4. 巻 D96
2. 論文標題 New Kaluza-Klein instantons and the decay of AdS vacua	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Physical Review	6. 最初と最後の頁 26016
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevD.96.026016	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 Ning Bao, Hirosi Ooguri	4. 巻 D96
2. 論文標題 Distinguishability of black hole microstates	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Physical Review	6. 最初と最後の頁 66017
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevD.96.066017	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 Hirosi	4. 巻 122
2. 論文標題 Constraints on Symmetries from Holography	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 191601
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.122.191601	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 101
2. 論文標題 High-energy behavior of Mellin amplitudes	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 66008
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1103/PhysRevD.101.066008	査読の有無 無
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4件 (うち招待講演 4件 / うち国際学会 4件)

1. 発表者名 Hiroshi Ooguri
2. 発表標題 How to Quantize Gravity
3. 学会等名 Feynman Centennial Symposium (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Hiroshi Ooguri
2. 発表標題 Symmetry of Quantum Gravity and Other Swampland Constraints
3. 学会等名 PASCOS 2017 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Hiroshi Ooguri
2. 発表標題 On Distinguishability of Black Hole Microstates
3. 学会等名 20 Years Later: Many Faces of AdS/CFT (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Hiroshi Ooguri
2. 発表標題 Bounds on Mellin Amplitudes
3. 学会等名 Strings 2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019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
--	---------------------------	-----------------------	----