

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 2 年 6 月 9 日現在

機関番号：32612

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K14285

研究課題名(和文)量子重力理論の構築へ向けた計算物理学的アプローチ

研究課題名(英文)Computational approach to the quantum theory of gravity

研究代表者

花田 政範 (Hanada, Masanori)

慶應義塾大学・自然科学研究教育センター(日吉)・訪問研究員

研究者番号：40626735

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：2017年度から2019年度までの間に14本の論文を執筆し、うち10本は査読を終えて査読付き専門誌に掲載済みである。本科研費終了直後の2020年5月にも関連する論文を一本完成させることができ、専門誌に投稿予定である。また、口頭発表を50回行った。(国際研究会23回、日本物理学会1回、セミナー26回。)超対称ゲージ理論のシミュレーションに加え、「部分的な非閉じ込め相」という新しい相の発見、部分的な非閉じ込め相の量子重力的な視点からの理解の進展、量子カオスについての新しい知見の発見など、満足のゆく進展が得られた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

重力と量子論の融合(量子重力)は理論物理学の長年の懸案である。本研究では、ゲージ理論と量子重力の双対性の研究に計算物理学的な手法を持ち込むことで、量子重力に関する新たな知見を得ることができた。本科研費の期間中に開始したドイツの研究機関との国際共同研究は順調に進展しており、今後も重要な進展があると期待している。本研究の過程で発見した「部分的な非閉じ込め相」はQCDにも存在すると期待されるほか、長流動ヘリウムに代表されるボーズアインシュタイン凝縮とも密接に関係しており、今後の学際的な研究の発展が期待される。

研究成果の概要(英文)：During the project, I have authored 14 papers. 10 of them have already appeared in peer-reviewed research journals, and for others peer-reviews are in progress. In addition, soon after the end of the project term (May 2020) another paper has been completed, which will be submitted for a peer-review. I presented 50 talks (international conference/workshop*23, JSPS*1, seminar*26). In addition to the precision-study of supersymmetric gauge theories on computer, there were unexpectedly rich progresses including the discovery of the partially-deconfined phase, the understanding of the partially-deconfined phase from the point of view of quantum gravity, and several new findings on quantum chaos.

研究分野：理論物理学

キーワード：場の量子論 超弦理論 量子重力 計算物理

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

量子力学と一般相対性理論を統一する量子重力理論の構築は、理論物理学の長年の最重要課題の一つである。超弦理論は量子重力を記述する理論の最有力候補として長年研究されてきた。1990年代半ば以降、超弦理論の研究は超対称ゲージ理論や量子色力学(QCD)、原子核物理学の研究と密接に関係している事が明らかになり、従来の枠を越えた広い視野に立った研究が重要になってきている。特に、ある種のゲージ理論が超弦理論の非摂動的な定式化を与えることが広く信じられており(特に1997年にマルダセナによって提唱された「ゲージ/重力対応」)、ゲージ理論を詳細に調べることでこの予想を確かめ、更には超弦理論の未知の性質を理解して初期宇宙やブラックホールの物理の理解につなげる事が喫緊の課題になっている。しかし、超弦理論の伝統的な研究手法ではゲージ理論の非摂動的な性質を調べるのが困難であり、20年近くにわたって量子重力についての本質的な理解が得られずに停滞を余儀なくされていた。私と共同研究者たちは、このような状況を打開して超弦理論の量子重力的性質を明らかにするために、従来の超弦理論の枠に捉われずに、他分野(特に格子ゲージ理論、原子核理論)の技術を積極的に学び、超弦理論に適用できるように改良したり、他分野の知識に触発された新しい手法を開発したりすることで、ゲージ理論の定量的な解析を可能にし、超弦理論を用いた量子重力の研究を進展させている。特に、京スーパーコンピューターをはじめとする大規模計算機を活用した計算物学的なアプローチを積極的に推進していた。本研究では、これまで以上に様々な技術を活用し、実際の実験・観測で検証可能な段階にまで到達するための第一歩を踏み出すことを目標とした。このような研究は一人の人間、一つの分野の力では不可能であり、超弦理論の枠を超えた、理論物理学、実験物理学、数学、計算科学などに渡る幅広い協力が欠かせないので、より多くの研究者を惹きつけて学際的な共同研究体制を構築することも目標とした。

2. 研究の目的

コンピューターの発展と研究対象の高度化に伴い、数値計算は理論物理学において欠かせない道具となった。これまで数値シミュレーションが活用されてきたとは言い難い超弦理論においても、超対称ゲージ理論の非摂動的性質の数値解析を通じた大規模な計算科学的研究が行われるようになり、既存の手法だけでは手が届かなかった非自明な結果が得られ始めている。本研究では、京スーパーコンピューター等の大規模計算機を用いて超対称ゲージ理論の性質を調べ、ゲージ重力対応を通じて量子重力理論に対する非自明な予言を与えることを当初の目的としていた。これに加え、研究の過程で量子重力と関連して重要な意味を持つゲージ理論の新たな相(部分的な非閉じ込め相)や、量子ブラックホールの性質と密接に関連すると期待される量子カオスの興味深い性質などを発見したので、これらについての理解を深めることも研究目的に追加した。

3. 研究の方法

本研究を遂行するために決定的に重要な要素としては(1) 確立された技術を用いて超対称ゲージ理論の詳細な数値シミュレーションを行い、そこから量子重力についての情報を引き出す、(2) そのために、比較対象となる量子重力理論の側で少なくとも定性的にはどのような結果が期待されるかを理解する、(3) 新たな数値シミュレーション手法を提案し、計算を高速化したり、これまで計算できなかった物理量を計算可能にする、の三点を想定していた。その後、ブラックホールの物理に本質的な特徴の一つ(部分的な非閉じ込め)が超対称ゲージ理論に限らないより一般のゲージ理論にも見られることが分かり、ある種の

行列模型では研究に利用可能な計算機資源でこの特徴を詳細に調べられることがわかったので、この特徴を見るための数値シミュレーションにも力を注いだ。

4. 研究成果

格子QCDシミュレーションでは、離散化誤差を減らすための格子作用の改善が重要である。超弦理論の文脈で重要な超対称ゲージ理論の場合、超対称性を壊さないような作用の改善法が知られていなかったが、加堂氏、松浦氏、杉野氏との論文 "O(a) Improvement of 2D N=(2,2) Lattice SYM Theory" で格子作用の改善方法を与えた。この手法を用いることで、計算効率が改善され、より精密なシミュレーションが可能になると期待される。

Berkowitz氏、Maltz氏、Rinaldi氏、Vranas氏との論文 "Toward Holographic Reconstruction of Bulk Geometry from Lattice Simulations" では、ゲージ理論で表されるブラックホールの表面近くの物理を理解するために、ブラックホールに対応する固有値の束縛状態とそこから引き離された固有値の間の相互作用をモンテカルロシミュレーションで詳細に調べた。Berkowitz氏、Rinaldi氏、Vranas氏との論文 "Gauged And Ungauged: A Nonperturbative Test" では、ブラックホールを記述する行列模型に関するMaldacena氏、Milekhin氏による予想を検証するための数値シミュレーションを行い、肯定的な結果を得た。伊敷氏、渡辺氏との論文 "Partial Deconfinement" では、2016年にMaltz氏と共に提唱した「部分的な非閉じ込め」というメカニズムが、当初念頭に置いていた超対称ゲージ理論にかぎらず、閉じ込め/非閉じ込め相転移を示すゲージ理論に共通の普遍的なものであることを予想し、理論的、数値的な手法を駆使して定性的な説明を与えた。Maltz氏との共同研究ではブラックホールの負の非熱を説明するために部分的な非閉じ込めという概念を導入していた。部分的な非閉じ込めの理解は、ゲージ理論によるブラックホールの記述、時空の双発のメカニズム、クオークグルーオンプラズマの生成といった様々な重要な物理と密接に関わる。Jevicki氏、Peng氏、Wintergerst氏との論文 "Anatomy of Deconfinement"では解析的な手法を用いて幾つかの基本的な例について部分的な非閉じ込め相の存在を証明した。島田氏、Wintergerst氏との論文 "Color Confinement and Bose-Einstein Condensation"では、部分的な非閉じ込めによって得られた新たな視点に基づくとボーズアインシュタイン凝縮とカラーの閉じ込めが本質的に同じ現象であることを指摘した。Bergner氏らとの論文 "Thermal phase transition in Yang-Mills matrix model", "Partial Deconfinement at Strong Coupling on the Lattice"では、超対称理論のブラックホールと本質的に同じ特徴を持つ数値シミュレーションがより容易な理論の一次相転移の構造を詳しく調べ、強結合領域における部分的な非閉じ込め相の存在を実証し、量子重力的な解釈との生合成を確認した。Robinson氏との論文 "Partial-Symmetry-Breaking Phase Transitions" では、部分的な非閉じ込めと類似した相転移が閉じ込め/非閉じ込め相転移以外でも存在することを指摘し、様々な具体例を示した。Alet氏、Jevicki氏、Peng氏との論文 "Entanglement and Confinement in Coupled Quantum Systems" では、部分的な非閉じ込めから示唆される時空の創発メカニズムを支持する証拠を与えた。

このほか、ブラックホール、量子重力の実時間的な性質を理解するための量子カオスの研究も行った。

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 10件／うちオープンアクセス 9件）

1. 著者名 H. Gharibyan, M. Hanada, B. Swingle and M. Tezuka	4. 巻 1904
2. 論文標題 Quantum Lyapunov Spectrum	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 JHEP	6. 最初と最後の頁 082-116
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) doi:10.1007/JHEP04(2019)082	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 M. Hanada, G. Ishiki and H. Watanabe	4. 巻 1903
2. 論文標題 Partial Deconfinement	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 JHEP	6. 最初と最後の頁 145-169
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) doi:10.1007/JHEP03(2019)145	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 P. V. Buividovich, M. Hanada and A. Schafer	4. 巻 99, no.4
2. 論文標題 Quantum chaos, thermalization and entanglement generation in real-time simulations of the BFSS matrix model	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Phys. Rev. D	6. 最初と最後の頁 46011
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) doi:10.1103/PhysRevD.99.046011	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 M. Hanada and P. Romatschke	4. 巻 1901
2. 論文標題 Real Time Quantum Gravity Dynamics from Classical Statistical Yang-Mills Simulations	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 JHEP	6. 最初と最後の頁 201-220
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) doi:10.1007/JHEP01(2019)201	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 H. Gharibyan, M. Hanada, S. H. Shenker and M. Tezuka	4. 巻 1807
2. 論文標題 Onset of Random Matrix Behavior in Scrambling Systems	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 JHEP	6. 最初と最後の頁 124-181
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) doi:10.1007/JHEP07(2018)124	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 E. Berkowitz, M. Hanada, E. Rinaldi and P. Vrana	4. 巻 1806
2. 論文標題 Gauged And Ungauged: A Nonperturbative Test	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 JHEP	6. 最初と最後の頁 124-160
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) doi:10.1007/JHEP06(2018)124	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 M. Hanada, D. Kadoh, S. Matsuura and F. Sugino	4. 巻 929
2. 論文標題 O(a) Improvement of 2D N=(2,2) Lattice SYM Theory	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Nucl. Phys. B	6. 最初と最後の頁 266-297
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) doi:10.1016/j.nuclphysb.2018.02.008	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 Rinaldi Enrico, Berkowitz Evan, Hanada Masanori, Maltz Jonathan, Vranas Pavlos	4. 巻 2018
2. 論文標題 Toward holographic reconstruction of bulk geometry from lattice simulations	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 42
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP02(2018)042	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 Hanada Masanori、Shimada Hidehiko、Tezuka Masaki	4. 巻 97
2. 論文標題 Universality in chaos: Lyapunov spectrum and random matrix theory	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review E	6. 最初と最後の頁 22224
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevE.97.022224	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 Hanada Masanori、Romatschke Paul	4. 巻 96
2. 論文標題 Lattice simulations of 10d Yang-Mills toroidally compactified to 1d, 2d, and 4d	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 94502
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.96.094502	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 Cotler Jordan S.、Gur-Ari Guy、Hanada Masanori、Polchinski Joseph、Saad Phil、Shenker Stephen H.、Stanford Douglas、Streicher Alexandre、Tezuka Masaki	4. 巻 2017
2. 論文標題 Black holes and random matrices	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 118
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP05(2017)118	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 Bergner Georg、Bodendorfer Norbert、Hanada Masanori、Rinaldi Enrico、Sch?fer Andreas、Vranas Pavlos	4. 巻 2020
2. 論文標題 Thermal phase transition in Yang-Mills 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 53
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP01(2020)053	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 Hanada Masanori、Jevicki Antal、Peng Cheng、Wintergerst Nico	4. 巻 2019
2. 論文標題 Anatomy of deconfinement	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 167
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP12(2019)167	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

[学会発表] 計24件 (うち招待講演 24件 / うち国際学会 22件)

1. 発表者名 Masanori Hanada
2. 発表標題 A Characterization of Chaos
3. 学会等名 Aspen winter conference on Many-body Quantum Chaos (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Masanori Hanada
2. 発表標題 Evaporating Black Hole and Partial Deconfinement
3. 学会等名 Non-equilibrium Physics -- Hierarchy and Universality -- (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Masanori Hanada
2. 発表標題 Lattice Gauge Theory to Quantum Gravity via Holography
3. 学会等名 The SFB/TR55 "Hadron Physics from Lattice QCD" (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Masanori Hanada
2. 発表標題 Some real-time aspects of quantum black hole
3. 学会等名 Matrix Models for Noncommutative Geometry and String Theory (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Masanori Hanada
2. 発表標題 Can we study real time dynamics of string theory?
3. 学会等名 New Frontiers in String Theory 2018 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Masanori Hanada
2. 発表標題 Black Holes and Random Matrices II: New Universality at Early Time?
3. 学会等名 STRINGS 2018 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Masanori Hanada
2. 発表標題 Fifteenth Workshop on Non-Perturbative Quantum Chromodynamics
3. 学会等名 Lyapunov exponents in classical and quantum chaos (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Masanori Hanada
2. 発表標題 Black hole from lattice via holography: Precision test and emergent geometry
3. 学会等名 Lattice for BSM Physics 2017 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Masanori Hanada
2. 発表標題 Quantum Gravity from Lattice Gauge Theory via Holography
3. 学会等名 "Making Quantum Gravity Computable" summer school (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Masanori Hanada
2. 発表標題 Monte Carlo Approach to Quantum Gravity via Holography
3. 学会等名 ICTP Mini Workshop on String Theory (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Masanori Hanada
2. 発表標題 Chaos, Black Hole and Random Matrix
3. 学会等名 Quantum Thermodynamics: Thermalization and fluctuations (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Masanori Hanada
2. 発表標題 Integrability and Chaos in Multicomponent Systems
3. 学会等名 Chaos, Black Hole and Random Matrix (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Masanori Hanada
2. 発表標題 A black hole in a lab?
3. 学会等名 ick-off workshop for Bay Area qubitizers (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Masanori Hanada
2. 発表標題 Real-time aspects of quantum BH and universality in chaos
3. 学会等名 Workshop on Strongly-Interacting Field Theories at Friedrich-Schiller-Universitat Jena (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Masanori Hanada
2. 発表標題 Monte Carlo Approach to Superstring Theory for Dummies
3. 学会等名 The Second Mandelstam Theoretical Physics Workshop (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Masanori Hanada
2. 発表標題 A numerical Approach to Holography
3. 学会等名 Nonperturbative and Numerical Approaches to Quantum Gravity, String Theory and Holography (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Masanori Hanada
2. 発表標題 New Universality in Chaos
3. 学会等名 Nonperturbative and Numerical Approaches to Quantum Gravity, String Theory and Holography (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Masanori Hanada
2. 発表標題 Early-time Universality in Chaos?
3. 学会等名 IV Saha Theory Workshop: Modern Aspects of String Theory (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Masanori Hanada
2. 発表標題 From non-gravitational theory to quantum gravity via holography
3. 学会等名 BU/ICAM Workshop on Nonequilibrium Quantum Universality (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 花田政範
2. 発表標題 ゲージ重力対応とその「応用」
3. 学会等名 日本物理学会春季大会（招待講演）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Masanori Hanada
2. 発表標題 What QCD teaches us about Quantum Gravity, and vice versa
3. 学会等名 EDS Blois 2019: The 18th conference on Elastic and Diffractive Scattering（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Masanori Hanada
2. 発表標題 What the ants are telling us about Black Hole and QGP
3. 学会等名 Quantum and Gravity in Okinawa（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Masanori Hanada
2. 発表標題 Black Hole from Colors
3. 学会等名 19th Hellenic School and Workshops on Elementary Particle Physics and Gravity（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Masanori Hanada
2. 発表標題 Onset of quantum chaos and black hole formation
3. 学会等名 Korean Physical Society meeting, Pioneer Symposia: Quantum Chaos (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
--	---------------------------	-----------------------	----