

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 8 月 9 日現在

機関番号：14301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2016

課題番号：25800163

研究課題名(和文) 数値的手法を駆使した量子重力理論の非摂動的性質の解明

研究課題名(英文) Numerical Study of Nonperturbative Aspects of Quantum Gravity

研究代表者

花田 政範 (Hanada, Masanori)

京都大学・白眉センター・特定准教授

研究者番号：40626735

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、量子力学と一般相対論を統合する「量子重力理論」の有力な候補である超弦理論を研究した。特に、スーパーコンピューターを駆使した数値シミュレーションにより、これまで不可能であった定量的な計算を可能にし、「ゲージ重力対応予想」を精密に検証して、量子重力理論として望ましい性質がゲージ理論によって正しく記述できていることを示した。この結果は、単なる予想の検証を超えて、「量子重力の数値シミュレーション」という新しい研究分野につながると期待している。

研究成果の概要(英文)：We have studied superstring theory, -- a promising candidate of the theory of quantum gravity, which unifies quantum mechanics and general relativity. In particular, we have developed numerical techniques for quantitative calculations utilizing supercomputers. By using them we have tested the gauge/gravity duality conjecture with high precision, and confirmed that gauge theory correctly describes quantum nature of gravity. We expect that our result can lead to a new research field: numerical simulation of quantum gravity.

研究分野：素粒子論

キーワード：超弦理論 ゲージ理論 超対称性 量子重力 ブラックホール

1. 研究開始当初の背景

近年、超弦理論の研究は超対称ゲージ理論や量子色力学、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、ある種の超対称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(特にゲージ/重力対応)、超対称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標準模型の理解につなげる事が喫緊の課題になっている。しかし、超対称ゲージ理論の性質を理解するためには解析的な手法だけでは限界があり、数値シミュレーションを活用した計算物理学的なアプローチが不可欠である。本研究では、超対称ゲージ理論の数値シミュレーション手法を進展させ、かつ実際にシミュレーションを行う事で、超弦理論の研究に全く新しい手法を提供する。

2. 研究の目的

超弦理論は量子重力を記述する理論の有望な候補である。しかし、超弦理論の非摂動的な定式化を与えると予想されている超対称ゲージ理論の非摂動的な性質を調べるのが難しいため、本質的な理解が得られずに停滞を余儀なくされてきた。本研究では、独自に開発した数値的な手法を駆使して超対称ゲージ理論の非摂動的な性質を詳しく調べ、量子重力理論として望ましい性質を備えているかどうかを明らかにする。

3. 研究の方法

- 1) 現在遂行中の一次元、二次元の極大超対称ゲージ理論の詳細なシミュレーションを継続し、超弦理論の満たすべき性質がきちんと成り立つかどうかを調べる。特にゲージ/重力対応がどこまで成り立つかを詳しく調べる。このような研究は数値実験以外では困難である。平成25年度は特に超弦理論の古典的な性質の検証を目指す。
- 2) ある種の物理量について負符号問題が存在しない(複素位相を無視する近似が精度よく成り立つ)事を数値的に正当化する。(既に一部の物理量については正当化できているが、他の様々な物理量についても同様の数値実験を行う。負符号問題が存在しない物理量と存在する物理量のリストが出来れば、なぜある種の物理量に関しては問題ないのかの物理的な理由が明らかにできるかも知れない。)これは技術的な問題ではあるが、それ自身興味深く、かつ、将来のより大規模かつ精密なシミュレーションの準備として非常に重要である。
- 3) 一次元のゲージ理論について、有限Nでの不安定性を取り除くような変形に対応する超弦理論の側の変形を決定し、有限Nでのゲージ/重力対応の検証に道筋を付ける。(茨城大

学の百武に協力を仰いでいる。)

4) 上記3)を踏まえ、有限Nでゲージ重力対応が成り立つかを数値的に検証する。もし3)が順調に進まなかった場合には、局所化の方法で計算可能な状況に対応した超弦理論を解析する事で同様のテストを目指す。

5) 四次元の超対称ゲージ理論のシミュレーションを、まずはそれほど大きくない格子で行い、将来の大規模シミュレーションへの準備を進める。また、シミュレーションアルゴリズムの開発およびテストを行う。

4. 研究成果

本研究では、一次元の理論に関しては予想を大幅に上回る結果を出すことができた。特に、上記「研究の方法」3), 4)に関しては、変形なしに直接的にシミュレーションをする方法を見出し、2013年秋に有限Nでのゲージ/重力対応の検証に成功した。この結果は論文[2]で発表した。2)に関しては論文[13]の一部として研究結果を発表した。1)で言及した二次元理論のシミュレーションと5)に関しては、現実的な計算機資源で詳細なシミュレーションをするためには格子作用を改善する必要があることが分かり、そのための理論的研究に注力した。また、3), 4)が順調に完了したことを踏まえ、当初は想定していなかったゲージ理論の時間発展の研究にも力を注いだ。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計14件) 全て査読付き英文専門学術誌に掲載済、arXivプレプリントサーバーで閲覧可能

[1] T. Azeyanagi, M. Hanada, M. Honda, Y. Matsuo and S. Shiba, “A new look at instantons and large-N limit,” JHEP 405, 008 (2014) [arXiv:1307.0809 [hep-th]].

[2] M. Hanada, Y. Hyakutake, G. Ishiki and J. Nishimura, “Holographic description of a quantum black hole on a computer,” Science 23 May 2014: Vol. 344 no. 6186 pp. 882-885 [arXiv:1311.5607 [hep-th]].

[3] M. Hanada, J. Maltz and L. Susskind, “Deconfinement transition as black hole formation by the condensation of QCD strings,” Phys. Rev. D 90, no. 10, 105019 (2014) [arXiv:1405.1732 [hep-th]].

[4] M. Hanada and H. Shimada, “On the continuity of the commutative limit of the 4d N=4 non-commutative super Yang-Mills theory,” Nucl. Phys. B 892, 449 (2015) [arXiv:1410.4503 [hep-th]].

[5] S. Aoki, M. Hanada and A. Nakamura, “Taming the pion condensation in QCD at finite baryon density,” JHEP 1505, 071 (2015) [arXiv:1410.7421 [hep-lat]].

[6] S. Aoki, M. Hanada and N. Iizuka, “Quantum Black Hole Formation in the BFSS Matrix Model,” JHEP 1507, 029 (2015) [arXiv:1503.05562 [hep-th]].

[7] M. Hanada, Y. Matsuo and T. Morita, “Instanton dynamics in finite temperature QCD via holography,” Nucl. Phys. B 899, 631 (2015) [arXiv:1505.04498 [hep-th]].

[8] G. Gur-Ari, M. Hanada and S. H. Shenker, “Chaos in Classical D0-Brane Mechanics,” JHEP 1602, 091 (2016) [arXiv:1512.00019 [hep-th]].

[9] E. Berkowitz, M. Hanada and J. Maltz, “Chaos in Matrix Models and Black Hole Evaporation,” Phys. Rev. D 94, no. 12, 126009 (2016) [arXiv:1602.01473 [hep-th]].

[10] M. Hanada, Y. Hyakutake, G. Ishiki and J. Nishimura, “Numerical tests of the gauge/gravity duality conjecture for D0-branes at finite temperature and finite N,” Phys. Rev. D 94, no. 8, 086010 (2016) [arXiv:1603.00538 [hep-th]].

[11] E. Berkowitz, M. Hanada and J. Maltz, “A microscopic description of black hole evaporation via holography,” Int. J. Mod. Phys. D 25, 1644002 (2016) [arXiv:1603.03055 [hep-th]].

[12] M. Hanada, “What lattice theorists can do for superstring/M-theory,” (Invited Review Article) Int.J.Mod.Phys. A31 (2016) no.22, 1643006 [arXiv:1604.05421 [hep-lat]].

[13] E. Berkowitz, E. Rinaldi, M. Hanada, G. Ishiki, S. Shimasaki and P. Vranas, “Precision lattice test of the gauge/gravity duality at large-N,” Phys. Rev. D 94, 094501 (2016) [arXiv:1606.04951 [hep-lat]].

[14] M. Hanada and J. Maltz, “A proposal of the gauge theory description of the small Schwarzschild black hole in AdS₅*S⁵,” JHEP 1702, 012 (2017) [arXiv:1608.03276 [hep-th]].

〔学会発表〕 (計28件) 発表者は全て花田

[1] Jul 4, 2013, KIAS-YITP joint workshop 2013: String Theory, Black Holes and Holography at Yukawa Institute for Theoretical Physics, Kyoto University, Kyoto, “Numerical test of the gauge/gravity duality: supergravity, alpha' and gs”

[2] Aug 2, 2013, LATTICE 2013 at University of Mainz, Germany, “Does super Yang-Mills theory describe quantum gravity?”

[3] Aug 5, 2013, Extreme QCD (XQCD) at the University of Bern, Switzerland, “A new look at instantons at large-N” (Poster)

[4] Sept 10, 2013, Workshop on Non commutative Field Theory and Gravity, 13th Hellenic School and Workshops on Elementary Particle Physics and Gravity at the Corfu Summer Institute, Greece, “Does Super Yang-Mills theory describe quantum gravity?”

[5] Sept 28, 2013, Discretization approaches to the dynamics of space-time and fields at High Energy Accelerator Research Organization (KEK), Tsukuba, “A new look at instantons in the large-N limit”

[6] Dec 5, 2013, Lattice Meets Experiment 2013: Beyond the Standard Model at Brookhaven National Laboratory, NY, USA, “Lattice Gauge Theory Meets Quantum Gravity -- the holographic principle at quantum gravity level and the fate of evaporating black hole --”

[7] Dec 21, 2013, Concluding Workshop for Grant-in-Aid for Scientific Research on Innovative Areas, Research on the Emergence of Hierarchical Structure of Matter by Bridging Particle, Nuclear and Astrophysics in Computational Science” at Naruko, Miyagi, Japan, “Lattice Gauge Theory Meets Quantum Gravity”

[8] Jan 22, 2014, Lattice QCD at finite temperature and density at High Energy Accelerator Research Organization (KEK), Tsukuba, “From un-importance sampling to importance sampling”

[9] May 8, 2014, Field Theoretic Computer Simulations for Particle Physics and Condensed Matter at Boston University, MA, USA, “Deconfinement transition as black hole formation by the condensation of QCD strings” (Poster)

[10] May 16-17, 2014, 41-st Hokuriku-Shinetsu Spring School at Kanazawa, Ishikawa, Japan, “Numerical simulation of supersymmetric Yang-Mills theories and test of the gauge/gravity duality” (2 talks)

[11] Jun 21, 2014, Extreme QCD (XQCD) at Stony Brook University, NY, USA, “Why the deconfinement phase describes a black hole”

[12] Jun 23, 2014, LATTICE 2014 at Columbia University, NY, USA, “Deconfinement transition as a black hole formation by the condensation of QCD string”

[13] Jun 25, 2014, STRINGS 2014 at Princeton University and Institute for Advanced Study, “Monte Carlo approach to string/M-theory”

[14] Aug 28, 2014, PANIC 2014 (20th Particles & Nuclei International Conference) at University of Hamburg, Hamburg, Germany, “Why does black hole describe the deconfinement phase?”

[15] Nov 13, 2014, School on Lattice Gauge Theory at High Energy Accelerator Research Organization (KEK), Tsukuba, “Simulation of Supersymmetric Gauge Theories”

[16] Jan 28, 2015, KEK Theory Workshop 2015 at High Energy Accelerator Research Organization (KEK), Tsukuba, “A classical window into a quantum black hole?”

[17] Mar 21, 2015, Spring meeting of The Physical Society of Japan at Waseda University, Tokyo, “Testing AdS/CFT duality conjecture by computer simulation”

[18] Apr 16, 2015, Gauge/Gravity Duality 2015 at Galileo Galilei Institute for Theoretical Physics, Florence, Italy, “Chaos in the matrix model, and formation and evaporation of a black hole”

[19] Sept 12, 2015, Progress in Superstring Theory and Quantum Field Theory at Kyoto University, Kyoto, “Three decades of large- N reduction”

[20] Sept 15, 2015, Lattice Gauge Theory for the LHC and Beyond at KITP, Santa Barbara, CA, USA, “What lattice can do for quantum gravity”

[21] Sept 23--24, 2015, Workshop on Noncommutative Field Theory and Gravity, 15th Hellenic School and Workshops on Elementary Particle Physics and Gravity at the Corfu Summer Institute, Greece, “Yang-Mills theory on noncommutative space: does it exist?”

[22] Nov 24, 2015, Microstructures of Black Holes at Yukawa Institute for Theoretical Physics, Kyoto University, Kyoto, “Chaos in classical D0-brane mechanics”

[23] May 25, 2016, Numerical methods in asymptotically AdS spaces at Technion, Haifa, Israel, “Black hole evaporation seen from gauge theory”

[24] Jun 10, 2016, Quantum Information in String Theory and Many-body Systems at Yukawa Institute for Theoretical Physics, Kyoto University, Kyoto, “Black hole evaporation and emergent geometry from gauge theory”

[25] Jun 15, 2016, Quantum Information in String Theory and Many-body Systems at Yukawa Institute for Theoretical Physics, Kyoto University, Kyoto, “Toward Experimental Quantum Gravity with Cold Atoms” (Poster)

[26] July 17, 2016, 3rd Workshop on holography, gauge theories, and black holes at University of Southampton, Southampton, UK, “Gauge Theory Description of Black Hole Evaporation”

[27] July 25, 2016, LATTICE 2016 at University of Southampton, Southampton, UK, “How to make a quantum black hole with ultra-cold gases”

[28] Aug 24, 2016, Black Holes and Emergent Spacetime at Nordic Institute for Theoretical Physics, Stockholm, Sweden, “Gauge Theory Description of Black Hole Evaporation”

〔図書〕 (計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

○取得状況 (計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕
ホームページ等

6. 研究組織
(1)研究代表者 花田政範 (Hanada, Masanori)
京都大学白眉センター特定准教授

研究者番号：40626735