

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年6月14日現在

機関番号：82118

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2008～2012

課題番号：20540286

研究課題名（和文） ゲージ／重力対応の直接検証及びそれに基づく時空構造の研究

研究課題名（英文） Direct confirmation of the gauge/gravity correspondence and its application to the studies of the space-time structure

研究代表者

西村 淳 (NISHIMURA JUN)

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・准教授

研究者番号：90273218

研究成果の概要（和文）：1次元超対称ゲージ理論の数値シミュレーションを行い、超弦理論から予想される「ゲージ／重力対応」を検証した。又これにより、ブラックホールの内部構造に関する新しい知見を得ることができた。一方、超弦理論の非摂動的定式化として提唱されている行列模型を、ローレンツ計量の場合について数値シミュレーションを行うことにより、微視的な9次元の空間から、ある時刻を境に3次元方向だけが膨張し始めるという結果を得た。これは宇宙の誕生を示唆するものとして重要である。

研究成果の概要（英文）：We have performed numerical simulations of one-dimensional supersymmetric gauge theory and confirmed the gauge/gravity correspondence conjectured from superstring theory. This also enabled us to get new insights into the interior structure of black holes. On the other hand, we have studied a matrix model, which was proposed as a nonperturbative formulation of superstring theory, in the case of Lorentzian metric, and obtained results which show that only three directions of a microscopic nine-dimensional space start to expand at some point in time. This is an important observation, which is reminiscent of the birth of our Universe.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	700,000	210,000	910,000
2009年度	600,000	180,000	780,000
2010年度	600,000	180,000	780,000
2011年度	600,000	180,000	780,000
2012年度	600,000	180,000	780,000
総計	3,100,000	930,000	4,030,000

研究分野：素粒子理論

科研費の分科・細目：物理学、素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：超弦理論、行列模型、ゲージ理論、超対称性、ブラックホール

1. 研究開始当初の背景

(1) 「ゲージ／重力対応」の典型的な例として、有限温度における超対称量子力学(1次元のゲージ理論)と10次元のブラックホール間の双対性が予想されている。特にゲージ理論の強結合領域における振る舞いが、古典的なブラックホールによって記述される事

が予想されていたが、ゲージ理論側の計算は、大変難しいと考えられていた。

(2) 超弦理論を非摂動的に記述する模型として IKKT 模型が提唱されている。特にこの模型では、10次元の時空から4次元の時空が力学的に生成する可能性が考えられる。実際、

これまでの研究では、ガウス展開法を用いた計算により、 $S_0(10)$ 対称性が自発的に破れることが示唆されていた。

2. 研究の目的

(1) 超対称量子力学(1次元の超対称ゲージ理論)の数値シミュレーションを行うことにより、「ゲージ/重力対応」を直接検証する。また、ブラックホールの持つ熱力学的性質を、弦理論の立場から微視的に理解する。

(2) IKKT 行列模型の数値シミュレーションを行うことにより、10次元の時空がコンパクト化する力学的なメカニズムを明らかにする。

3. 研究の方法

(1) 超対称量子力学(1次元のゲージ理論)の数値シミュレーションには、既に我々が開発していた方法を用いた。この方法では、ゲージ対称性を固定した上で、運動量に上限を設定することにより、有限自由度の系にする。この系を RHMC アルゴリズムと呼ばれる方法により、数値シミュレーションを行った。

(2) IKKT 模型のシミュレーションでは、フェルミオン行列式の位相の取り扱いが困難である為、これまで難しいと考えられてきた。この問題を克服する為、「因子化法」と呼ばれる新しい手法を用いた。

4. 研究成果

(1) 超対称量子力学(1次元のゲージ理論)の数値シミュレーションを行うことにより、様々な物理量について、「ゲージ/重力対応」を直接検証することに成功した。また、これらの研究を高次元のゲージ理論の場合に拡張するための理論的基礎を確立し、具体的な計算を行った。

① ゲージ理論側で Wilson ループや相関関数を計算することにより、重力側での計算結果が再現されることを数値的に示した。また、内部エネルギーの計算から、ブラックホールの持つ熱力学的性質を、弦理論の立場から再現できることを数値的に示した。

② ラージ N リダクションの考え方をを用いることにより、これらの研究を4次元の超共形ゲージ理論に拡張できることを、弱結合領域において具体的な確認した。さらに強結合領域において、ウィルソンループや相関関数を計算し、ゲージ/重力対応に基づく予言を支持する結果を得た。

国内外では、「ゲージ/重力対応」を素粒子宇宙理論分野のみならず、原子核や物性物理学の問題に応用する研究もさかんに行われている。我々の成果は、「ゲージ/重力対

応」に対して、確固たる基盤を与えるものとして、大きなインパクトがある。今後、高次元のゲージ理論の場合の研究が進展し、より多くの知見が得られることが期待される。

(2) IKKT 行列模型において、10次元の時空がコンパクト化する力学的なメカニズムを明らかにした。また、これを示すために様々な方法を新しく開発した。

① 従来研究されてきたユークリッド型の IKKT 行列模型に対して、ガウス展開法の計算を系統的に行った結果、10次元の時空がコンパクト化の結果、3次元の時空になることが示された。また、行列模型から現れる時空が有限の広がりを持っていること、又その時空の次元に依らず、一定の体積を持ち、潰れた方向が決まった広がりを持つことを明らかにした。

又、このような結果を数値シミュレーションにより検証するためには、「符号問題」と呼ばれる技術的な困難を克服しなければならない。我々は、そのために有用な方法として、「因子化法」という方法を確立し、単純化した模型において、その有用性を確認した。

② 上記の結果は興味深いものであるが、我々の時空に対応するものとして解釈することは難しい。これは重力を含む理論において知られる、ユークリッド化の問題に起因すると我々は考えた。そこで、ローレンツ型の IKKT 行列模型の数値シミュレーションを行った結果、微視的な9次元空間から、ある時点を境にして、3次元方向のみが膨張し始めることが明らかになった。これは超弦理論が、10次元の時空を4次元にコンパクト化する力学的なメカニズムを内蔵していることを意味するだけでなく、宇宙誕生の様子を示唆する重要な結果である。

また、十分時間が経過したときには、古典運動方程式による解析が有効であると考えられる。実際、(3+1)次元の膨張宇宙を表す解の中には、自然に宇宙項問題を解決するなど、興味深い性質を持つものが得られた。

超弦理論が重力を含む統一理論として提唱されてから40年になるが、非摂動的な研究の難しさのために、国内外では数学的な性質の研究が中心となっている。本研究は、非摂動的定式化としての行列模型の正しさ、有用性を示すものであり、インフレーションを含む宇宙論的な研究および素粒子理論の研究に対して大きなインパクトがある。

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 22件)

- ① “The Origin of space-time as seen from matrix model simulations”, J.Nishimura, 査読有, PTEP 2012 (2012) 01A101.
DOI: [10.1093/ptep/pts004](https://doi.org/10.1093/ptep/pts004)
- ② “Numerical studies of the ABJM theory for arbitrary N at arbitrary coupling constant”, M. Hanada, M. Honda, Y. Honma, J.Nishimura, S. Shiba and Y. Yoshida, 査読有, JHEP 1205 (2012) 121.
DOI: [10.1007/JHEP05\(2012\)121](https://doi.org/10.1007/JHEP05(2012)121)
- ③ “Direct test of the gauge-gravity correspondence for Matrix theory correlation functions”, M. Hanada, J.Nishimura, Y. Sekino and T. Yoneya, 査読有, JHEP 1112 (2011) 020.
DOI: [10.1007/JHEP12\(2011\)020](https://doi.org/10.1007/JHEP12(2011)020)
- ④ “Expanding (3+1)-dimensional universe from a Lorentzian matrix model for superstring theory in (9+1)-dimensions”, S.-W. Kim, J.Nishimura and A. Tsuchiya, 査読有 Phys. Rev. Lett. 108 (2012) 011601.
DOI: [10.1103/PhysRevLett.108.011601](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.108.011601)
- ⑤ “Systematic study of the SO(10) symmetry breaking vacua in the matrix model for type IIB superstrings”, J.Nishimura, T. Okubo and F. Sugino, 査読有, JHEP 1110 (2011) 135.
DOI: [10.1007/JHEP10\(2011\)135](https://doi.org/10.1007/JHEP10(2011)135)
- ⑥ “General approach to the sign problem: Factorization method with multiple observables”, K. N. Anagnostopoulos, Takehiro Azuma, Jun Nishimura, 査読有 Physical Review D 83 (2011) 054504.
DOI: [10.1103/PhysRevD.83.054504](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.83.054504)
- ⑦ “Monte Carlo studies of Matrix theory correlation functions”
Masanori Hanada, Jun Nishimura, Yasuhiro Sekino, Tamiaki Yoneya, 査読有
Phys. Rev. Lett. 104 (2010) 151601.
DOI: [10.1103/PhysRevLett.104.151601](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.104.151601)
- ⑧ “Higher derivative corrections to black hole thermodynamics from supersymmetric matrix quantum mechanics”
Masanori Hanada, Yoshifumi Hyakutake, Jun Nishimura, Shingo Takeuchi, 査読有,
Phys. Rev. Lett. 102 (2009) 191602.
DOI: [10.1103/PhysRevLett.102.191602](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.102.191602)
- ⑨ “Schwarzschild radius from Monte Carlo calculation of the Wilson loop in supersymmetric matrix quantum

mechanics”

Masanori Hanada, Akitsugu Miwa, Jun Nishimura, Shingo Takeuchi, 査読有
Phys. Rev. Lett. 102 (2009) 181602.
DOI: [10.1103/PhysRevLett.102.181602](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.102.181602)

- ⑩ “Deconfinement phase transition in N=4 super Yang-Mills theory on $R \times S^3$ from supersymmetric matrix quantum mechanics”
Goro Ishiki, Sang-Woo Kim, Jun Nishimura, Asato Tsuchiya, 査読有
Phys. Rev. Lett. 102 (2009) 111601.
DOI: [10.1103/PhysRevLett.102.111601](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.102.111601)

[学会発表] (計 20件)

- ① Jun Nishimura, “3D out of 9D—the birth of our Universe from the superstring theory on computer”, 招待講演、TRIUMF workshop 「Lattice Field Theory in the LHC Era」, 2012年11月2日-11月3日、TRIUMF、University of British Columbia、バンクーバー、カナダ
- ② Jun Nishimura, “(3+1)-dimensional expanding universe from a Lorentzian matrix model for superstring theory in (9+1) dimensions” 招待講演、国際会議 「Progress in Quantum Field Theory and String Theory」, 2012年4月3日-7日、大阪市立大学、メディアセンター
- ③ Jun Nishimura, “Large-N reduction and supersymmetry”、招待講演、MCFP workshop on Large-N gauge theories、2010年5月13日-15日、メリーランド大学、College Park、アメリカ
- ④ Jun Nishimura, “Does 4d space-time emerge dynamically from the IKKT matrix model?” 招待講演、国際ワークショップ “Numerical Approaches to AdS/CFT, Large N and Gravity”、2009年9月28日-10月2日、Imperial College、ロンドン、イギリス
- ⑤ 西村 淳、「超弦理論の数値シミュレーション」、招待講演、日本物理学会2009年秋季大会、2009年9月10日-13日、甲南大学 岡本キャンパス
- ⑥ J.Nishimura, “Non-lattice simulation of supersymmetric gauge theories as a probe to quantum black holes and strings”、招待講演、LATTICE2009、2009年7月26日-31日、北京大学、中国
- ⑦ Jun Nishimura, “Simulating Quantum Black Holes and Quantum Universe”, 招待講演、2008年9月12日-16日、IPMU focus week “Quantum Black Holes”、東京大学 数物連携宇宙研究機構 (IPMU)

[図書] (計3件)

- ① 小玉英雄ほか、サイエンス社、別冊数理学 2008 年 10 月号「量子重力理論－広がる多彩な最前線－」、2008 年、56-61 ページ
西村 淳「超弦理論の数値シミュレーション」
- ② 宇川彰ほか、岩波書店、岩波講座「計算科学」 第二巻、2012 年、205-224 ページ、西村 淳「宇宙の始まりと超弦理論」
- ③ 丸善、パリティ 2013 年 6 月号、24-30 ページ、西村 淳「超弦理論の数値シミュレーションが示唆する宇宙の誕生」

[その他]

- ① 宇宙誕生の様子を示唆する数値シミュレーションの結果に関して、KEK の広報室を通してプレスリリース、記者会見を行い、テレビ (NHK)、新聞 (朝日、日経、産経、日刊工業)、英国のウェブ (Physics World) などで取り上げられた。
- ② 7 月 28 日、朝日カルチャーセンター (新宿住友ビル) において、「超弦理論の数値シミュレーションが描く宇宙誕生の様子～9 次元空間から 3 次元空間への相転移」というタイトルで一般の方を対象にした講演を行った。(「スーパーコンピュータが明かす宇宙と物質の起源」というシリーズ)
- ③ ホームページ
<http://research.kek.jp/people/jnishi/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

西村 淳 (NISHIMURA JUN)

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・准教授
研究者番号：90273218