

令和 3 年 5 月 2 日現在

機関番号：34428

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2017～2020

課題番号：17K05425

研究課題名（和文）行列模型の数値解析による超弦理論の非摂動的効果の研究

研究課題名（英文）Nonperturbative studies of superstring theory by numerical simulations of matrix models

研究代表者

東 武大 (Azuma, Takehiro)

摂南大学・理工学部・准教授

研究者番号：10516785

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 800,000円

研究成果の概要（和文）：ビッグバン宇宙論では、宇宙誕生の超高温・超高密度の状態は、弱い力・強い力・電磁気力だけでなく重力も元来一つであったと考えられている。超弦理論はこれ等4つの力の統一理論の有力な候補である。この研究課題では行列模型による超弦理論の定式化の数値シミュレーションを行った。超弦理論では理論の整合性から、時空が空間9次元と時間1次元から成る10次元であることが要求されるが、行列模型の数値シミュレーションによって私達の住む4次元時空の生成の仕組みについて調べた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

素粒子論に限らず基礎科学の発展は、私達の生活を豊かにする様々な科学技術に直結するとともに人類の文化としても重要な位置を占めるものである。本研究課題は私達の住んでいる4次元時空、延いては宇宙の成り立ちという根源的な問いに答えるうえで重要な位置を占めるものである。また、本研究課題は富岳等のスーパーコンピュータによる大規模数値計算を必要とするが、こうした数値計算の発展は様々な研究分野に対する波及効果が期待出来る。

研究成果の概要（英文）：According to the Big Bang Theory, the four interactions in the nature - weak, string, electromagnetic and gravitational interactions - were unified at the birth of the universe. Superstring theory is regarded as a strong candidate for unifying these four interactions. In this research project, I studied the matrix models as the nonperturbative formulation of superstring theory. In superstring theory, the spacetime must be 10-dimensional, consisting of 1-dimensional temporal and 9-dimensional spatial directions. Especially, I studied how our 4-dimensional spacetime originated through the numerical simulations of the matrix models.

研究分野：素粒子論

キーワード：素粒子論 超弦理論 行列模型 符号問題 複素ランジュバン法

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

私たちの住む宇宙は、約 100 億年前のビッグバンと呼ばれる大爆発から始まったと考えられている。現在では、自然界の相互作用は原子核崩壊の弱い相互作用、クォーク同士を結び付ける強い相互作用、電磁相互作用と重力相互作用の 4 つがある。一方、宇宙誕生の超高温、超高密度の状態ではこれらの相互作用は 1 つであったと考えられている。こうした初期宇宙の現象を理解するためには、すべての相互作用の統一理論を考える必要がある。

現在では、超弦理論は重力も含めた自然界の 4 つの相互作用を記述する理論の有力な候補として揺るぎない地位を占めている。超弦理論では量子論的な整合性から時空の次元が 10 次元に限られるが、1980 年代には 10 次元時空のうち 6 次元をコンパクト化することで 4 次元時空の標準模型を再現する見通しが立った。しかし摂動論の範囲では 4 次元にコンパクト化の際に無数の真空が存在し、どれが本当の真空かについて予言することが出来ない。そのため、超弦理論から私たちの住む 4 次元時空や、「標準模型」で記述される物質の相互作用のゲージ群を理論の力学的な性質から予言するためには超弦理論の非摂動的定式化が必要となる。

1990 年代には、超弦理論の非摂動的定式化としての行列模型が提唱された。こうした試みの 1 つに、石橋・川合・北沢・土屋によって提唱された IIB 型行列模型がある。IIB 型行列模型は 10 次元の $N=1$ スーパーヤンミルズ理論を 0 次元に次元還元することで定義されるが、同時に IIB 型超弦理論のグリーン・シュワルツ作用をシルド型に書いて行列正則化することで得られる理論でもある。また、IIB 型行列模型は、古典解として BPS D プレーンを含むこと、及びウィルソンループが IIB 型超弦理論の基本弦と見做せる等の際立った性質を持つ。超弦理論の枠組みで私たちの住む 4 次元時空が生成される仕組みを理解することは非常に重要な問題の一つである。IIB 型行列模型のモンテカルロシミュレーションについては長らく時間方向をウィック回転して虚時間に読み替えたユークリッド時空上での模型についてなされてきた。フェルミオンを積分して得られるパフィアン(簡単化した模型では行列式になることもある)は複素数になり、符号問題による困難を伴う。これについて複素数の分配関数の位相と相関のある物理量に拘束を課すことで符号問題を克服する「因子化法」を用いた解析を行ってきた。その結果得られた時空は 4 次元ではなく 3 次元であり、広がった方向と潰れた方向の広がり比が有限であることから現実の時空とは対応しない。これを契機として、時間を実時間として扱うローレンツ時空上での IIB 型行列模型の数値的研究が 2011 年 8 月に Kim、西村、土屋(arXiv:1108.1540)によってなされた。それによると過去では小さく 9 次元的に広がっていた空間が、ある時刻を境に 3 次元だけ膨張し、時間 1 次元と合わせて 4 次元時空が生じることが分かった。

2. 研究の目的

超弦理論は重力も含めた自然界の相互作用の統一理論の候補として揺るぎない地位を占めている。近年、行列模型による超弦理論の摂動論に依らない定式化が成功を収めており、数値解析等を通して私たちの住む 4 次元時空の生成の機構について様々な興味深い知見が得られた。この研究課題では、主に行列模型の数値解析を通して、ビッグバン宇宙論で予言される宇宙膨張がどのように起こるのかについて追究することを目標としてきた。

3. 研究の方法

力学変数を複素化して仮想的な時間発展を表すランジュバン方程式を解く「複素ランジュバン法」は符号問題を持つ系の数値解析の有力な手法である。複素ランジュバン法では数値結果が経路積分と等価になるかどうかは自明ではなく間違った値に収束する危険性があるという問題点があったが、近年の様々な先行研究により経路積分と等価な正しい結論を導くための条件について急速に理解が進んだ。本研究課題の始まった 2017 年度以降、複素ランジュバン法を用いてユークリッド時空上での IIB 型行列模型の数値解析を行った。

また、ローレンツ時空上での IIB 行列模型では、フェルミオンを積分して得られるパフィアン(行列式)は実数であるが、 e^{iS} (S は作用)の項に起因する符号問題がある。これまでの先行研究では近似を行いこの符号問題を避けてきたが、この近似を行った場合には膨張して得られた 3 次元空間は中が空の球殻状であり、パウリ行列的な特異な構造を持っていることが分かった。これを契機として、ローレンツ時空上の IIB 型行列模型に対しても、複素ランジュバン法を用いて e^{iS} から起因する符号問題を取り扱い、連続的な膨張する 3 次元空間が得られることを目指した。

4. 研究成果

発表論文 arXiv:1712.07562、2002.07410 ではユークリッド時空上の IIB 型行列模型に対して複素ランジュバン法を用いて数値計算を行った。まず arXiv:1712.07562 で簡単化した 6 次元の模型について調べ、然る後に arXiv:2002.07410 で 10 次元時空の IIB 型行列模型について調べ

た。この解析では複素ランジュバン法で経路積分と等価な結果が得られるためにフェルミオンの質量項を導入し、質量が0の極限の外挿によって時空の構造を調べた。特に10次元時空の場合では数値的にこの外挿が困難であり質量項のある模型についてガウス展開法と呼ばれる解析的計算の近似方法を用いて計算を行い、複素ランジュバン法との結果の比較検討を行った。結果として3次元の広がった方向と残りの潰れた方向の広がり比が有限であるような時空が得られた。

ローレンツ時空上のIIB型行列模型に関しては、本研究課題の初期にarXiv:1705.07812の論文を発表した。この当時では e^{iS} (S は作用)の符号問題を差し挟まない近似を用いたモンテカルロシミュレーションであるが、時間が十分たった後に対応する部分行列の有効理論を用いた新しい数値計算方法について調べた。本研究課題の後半の2019年あたりから e^{iS} の符号問題を含んだ系に対する複素ランジュバン法を用いた数値シミュレーションに着手した。これまでの成果として、パウリ行列的な構造ではなく連続的な時空に対応する新しい時空の相の発見に成功した。研究課題が終了した現在でもこの方向性の研究は継続中であり、富岳を用いた大規模数値計算によって新しい時空の相に於ける3次元空間の膨張の振る舞いを明らかにすることを目指している。この成果については論文は準備中であるが既に多くの研究会・国際会議に於いて口頭発表を行ってきた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 5件/うちオープンアクセス 6件）

| | |
|---|-----------------------|
| 1. 著者名 Konstantinos N. Anagnostopoulos, Takehiro Azuma, Yuta Ito, Jun Nishimura, Stratos Kovalkov Papadoudis | 4. 巻 65 |
| 2. 論文標題 Dynamical compactification of extra dimensions in the Euclidean type IIB matrix model: A numerical study using the complex Langevin method | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 PoS CORFU2018 | 6. 最初と最後の頁 N/A |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.22323/1.347.0065 | 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 Takehiro Azuma, Yuta Ito, Jun Nishimura, Asato Tsuchiya | 4. 巻 no. 8, 083B03 |
| 2. 論文標題 A new method for probing the late-time dynamics in the Lorentzian type IIB matrix model | 5. 発行年 2017年 |
| 3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics | 6. 最初と最後の頁 N/A |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1093/ptep/ptx106 | 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 Takehiro Azuma, Pallab Basu, Prasant Samantray | 4. 巻 09(2017)071 |
| 2. 論文標題 Phase transitions of a (super) quantum mechanical matrix model with a chemical potential | 5. 発行年 2017年 |
| 3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics | 6. 最初と最後の頁 N/A |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/JHEP09(2017)071 | 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 Konstantinos N. Anagnostopoulos, Takehiro Azuma, Yuta Ito, Jun Nishimura, Stratos Kovalkov Papadoudis | 4. 巻 02(2018)151 |
| 2. 論文標題 Complex Langevin analysis of the spontaneous symmetry breaking in dimensionally reduced super Yang-Mills models | 5. 発行年 2018年 |
| 3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics | 6. 最初と最後の頁 N/A |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/JHEP02(2018)151 | 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 Konstantinos N. Anagnostopoulos, Takehiro Azuma, Yuta Ito, Jun Nishimura, Toshiyuki Okubo, Stratos Kovalkov Papadoudis | 4. 巻 2020 |
| 2. 論文標題 Complex Langevin analysis of the spontaneous breaking of 10D rotational symmetry in the Euclidean IKKT 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 N/A |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP06(2020)069 | 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 Konstantinos N. Anagnostopoulos, Takehiro Azuma, Yuta Ito, Jun Nishimura, Toshiyuki Okubo, Stratos Kovalkov Papadoudis | 4. 巻 183 |
| 2. 論文標題 Dynamical Compactification of Extra Dimensions in the Euclidean IKKT Matrix Model via Spontaneous Symmetry Breaking | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 PoS CORFU2019 | 6. 最初と最後の頁 N/A |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.22323/1.376.0183 | 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11件(うち招待講演 0件/うち国際学会 7件)

| |
|---|
| 1. 発表者名 Konstantinos N. Anagnostopoulos, Takehiro Azuma, Yuta Ito, Jun Nishimura, Toshiyuki Okubo, Stratos Kovalkov Papadoudis |
| 2. 発表標題 Complex Langevin analysis of the spontaneous rotational symmetry breaking in the Euclidean type IIB matrix model |
| 3. 学会等名 Fugaku QCD coding workshop |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Konstantinos N. Anagnostopoulos, Takehiro Azuma, Yuta Ito, Jun Nishimura, Toshiyuki Okubo, Stratos Kovalkov Papadoudis |
| 2. 発表標題 Complex Langevin analysis of the spontaneous rotational symmetry breaking in the Euclidean type IIB matrix model |
| 3. 学会等名 National Strings Meeting 2019 (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--|
| 1 . 発表者名 Konstantinos N. Anagnostopoulos, Toshihiro Aoki, Takehiro Azuma, Mitsuaki Hirasawa, Yuta Ito, Jun Nishimura, Stratos Kovalkov Papadoudis, Asato Tsuchiya |
| 2 . 発表標題 Complex Langevin studies of the continuum limit of the Lorentzian type IIB matrix model |
| 3 . 学会等名 The 2nd R-CCS International Symposium (国際学会) |
| 4 . 発表年 2019年 |

| |
|--|
| 1 . 発表者名 Konstantinos N. Anagnostopoulos, Takehiro Azuma, Yuta Ito, Jun Nishimura, Toshiyuki Okubo, Stratos Kovalkov Papadoudis |
| 2 . 発表標題 Complex Langevin analysis of the spontaneous rotational symmetry breaking in the dimensionally-reduced super-Yang-Mills models |
| 3 . 学会等名 Strings 2018 (国際学会) |
| 4 . 発表年 2018年 |

| |
|--|
| 1 . 発表者名 Konstantinos N. Anagnostopoulos, Takehiro Azuma, Yuta Ito, Jun Nishimura, Toshiyuki Okubo, Stratos Kovalkov Papadoudis |
| 2 . 発表標題 Complex Langevin analysis of the spontaneous rotational symmetry breaking in the Euclidean type IIB matrix model |
| 3 . 学会等名 The 1st R-CCS International Symposium (国際学会) |
| 4 . 発表年 2018年 |

| |
|--|
| 1 . 発表者名 Konstantinos N. Anagnostopoulos, Takehiro Azuma, Yuta Ito, Jun Nishimura, Toshiyuki Okubo, Stratos Kovalkov Papadoudis |
| 2 . 発表標題 Complex Langevin analysis of the spontaneous rotational symmetry breaking in the Euclidean type IIB matrix model |
| 3 . 学会等名 日本物理学会第74回年次大会 |
| 4 . 発表年 2018年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Konstantinos N. Anagnostopoulos, Takehiro Azuma, Yuta Ito, Jun Nishimura, Stratos Kovalkov Papadoudis |
| 2. 発表標題 Complex Langevin analysis of the spontaneous symmetry breaking in dimensionally reduced super Yang-Mills models |
| 3. 学会等名 East Asia Joint Workshop on Fields and Strings 2017, KEK Theory workshop 2017 (国際学会) |
| 4. 発表年 2017年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Takehiro Azuma, Pallab Basu, Prasant Samantray |
| 2. 発表標題 Phase Transitions of a (Super) Quantum Mechanical Matrix Model with a Chemical Potential |
| 3. 学会等名 第40回四国セミナー |
| 4. 発表年 2017年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Takehiro Azuma, Pallab Basu, Prasant Samantray |
| 2. 発表標題 Phase Transitions of a (Super) Quantum Mechanical Matrix Model with a Chemical Potential |
| 3. 学会等名 日本物理学会 第73回年次大会 |
| 4. 発表年 2017年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Konstantinos N. Anagnostopoulos, Takehiro Azuma, Yuta Ito, Jun Nishimura, Toshiyuki Okubo, Stratos Kovalkov Papadoudis |
| 2. 発表標題 Complex Langevin analysis of the spontaneous breaking of 10D rotational symmetry in the Euclidean IKKT matrix model |
| 3. 学会等名 Asia-Pacific Symposium for Lattice Field Theory (APLAT 2020) (国際学会) |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Konstantinos N. Anagnostopoulos, Takehiro Azuma, Kohta Hatakeyama, Mitsuaki Hirasawa, Yuta Ito, Jun Nishimura, Stratos Kovalkov Papadoudis, Asato Tsuchiya |
| 2. 発表標題 Complex Langevin studies of the spacetime structure in the Lorentzian type IIB matrix model |
| 3. 学会等名 The 3rd R-CCS International Symposium (国際学会) |
| 4. 発表年 2020年 |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

| |
|--|
| ホームページ等 http://www2.yukawa.kyoto-u.ac.jp/~takehiro.azuma/index.html |
|--|

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 | | |
|---------|---------|--|--|
| ギリシャ | アテネ工科大学 | | |