

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 16 日現在

機関番号：13801

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2012～2015

課題番号：24540264

研究課題名(和文) 超弦理論の行列模型による宇宙論の研究

研究課題名(英文) Study of cosmology using matrix model for superstring theory

研究代表者

土屋 麻人 (Tsuchiya, Asato)

静岡大学・理学部・准教授

研究者番号：20294150

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：超弦理論の非摂動的定式化を与えると期待される行列模型を研究した。すでに臨界時刻より後に $S_0(9)$ 対称性が $S_0(3)$ 対称性に自発的に破れることを見出していたが、これは $3+1$ 次元の膨張する宇宙のダイナミカルな出現と解釈される。本研究では、早い時刻と後の時刻での膨張の様子を有効的に記述する模型をそれぞれ提案し、それぞれでの膨張の仕方が宇宙論で知られている膨張の仕方と合致することを示した。また、後の時刻では行列模型の古典解が支配的になることが予想されるが、ここでは古典解を系統的に調べ、宇宙項問題を自然に解決する解を見出した。さらに、標準模型がこの行列模型のなかで実現される機構を研究した。

研究成果の概要(英文)：I studied the IIB matrix model which is expected to give a nonperturbative formulation of superstring theory. I had already showed that the  $S_0(9)$  symmetry is spontaneously broken down to the  $S_0(3)$  symmetry after a critical time in the matrix model. This can be interpreted as dynamical emergence of  $(3+1)$ -dimensional expanding universe. In this study, I proposed two simplified models which describe early and late times effectively, respectively, and showed that expanding behavior in each model agrees with that in cosmology. As a classical solution of the matrix model are dominant at late times, I examined the classical solutions systematically and found solutions that naturally solve the cosmological constant problem. Moreover, I studied mechanism that the Standard Model is realized in the matrix model.

研究分野：素粒子論

キーワード：超弦理論 行列模型 宇宙論 インフレーション宇宙 輻射優勢宇宙 モンテカルロシミュレーション  
ハイブリッド並列化

### 1. 研究開始当初の背景

量子重力を含む統一理論を構築することは素粒子論の大きな目標の一つである。弦理論はその最有力候補であるが、現在のところ D プレーンの非摂動効果を取り入れた摂動論しか完成していない。摂動論的に(準)安定な真空は無数に存在し、各真空に対して、時空の次元、ゲージ群、物質の構成、宇宙項の大きさなどが異なり、弦理論の予言能力は限定されてしまう。また、アインシュタイン方程式の宇宙論的解を過去に遡ったときに現れる特異点による理論の破綻は量子重力をもって解決されると期待されるが、摂動論に依る限り、弦理論はこの宇宙の始まりの特異点を解消できない。このような問題は、弦理論を非摂動論的に定式化し、その非摂動論的なダイナミクスをとらえることにより、解決されると期待される。行列模型は、非摂動論的な定式化を与えるものとして有望であり、実際、非臨界次元の弦理論という弦理論の雛型に対しては成功を収めた。超弦理論の非摂動論的定式化の候補として、私は 1996 年 IIB 行列模型 (IKKT 模型) を提案した。この模型は IIB 型超弦理論の行列正則化を与え、自然に多体の弦を含む第 2 量子化された定式化となっている。この模型は、時間を含む時空のすべてが行列の自由度から生成されるという、新しい概念を与える。すなわち、この模型は、弦理論における時空は弦のダイナミクスから決定されるということを実現したものであり、次元を含めた時空と物質場の構成を非摂動論的に決定できる可能性を持っている。さらに、非可換幾何学と深い関係がある、計算機に乗せて数値シミュレーション可能であるなどの特徴もあり、この模型は提案以来世界中の研究者に大きな影響を与え、この模型に関する研究は大きな広がりを見せている。2011 年に私はこの模型のローレンツ版を調べ、臨界時刻の後に SO(9) 対称性が SO(3) 対称性に自発的に破れることを見出した。この際、空間の 3 次元方向は広がっていき、6 次元方向は一定にとどまる。これは 3+1 次元の膨張する宇宙のダイナミカルな出現と解釈されうる結果である。

### 2. 研究の目的

ローレンツ版の IIB 行列模型における 3 次元空間の膨張の様子を詳しく調べ、宇宙論との整合性を見る。さらに、IIB 行列模型において素粒子の標準模型がどのように実現されるかを明らかにする。

### 3. 研究の方法

膨張の様子を詳細に調べるために、行列のサイズを大きくする必要があるが、フェルミオン部分の計算が主な原因で数値シミュレーションは困難になる。本研究では、フェルミオンの寄与を簡略化し、早い時刻の膨張の様子を有効的に記述すると期待される模型

(VDM 模型) と後の時刻のそれを有効的に記述する期待される模型 (ボソニック模型) を提案する。さらに、ハイブリッド並列化による大規模計算を行い、大きな行列サイズでのモンテカルロシミュレーションを実現する。また、非常に後の時刻では膨張により作用の値が大きくなるため、行列模型の古典解が支配的になると期待されるので、古典解を解析する。

### 4. 研究成果

VDM 模型とボソニック模型においても、やはり臨界時刻の後に SO(9) 対称性が SO(3) 対称性に自発的に破れることがわかった。膨張の仕方は VDM 模型では指数関数的であり、ボソニック模型では冪関数的 ( $t^{(1/2)}$ ) であることを見出した。前者はインフレーション宇宙における膨張の振る舞い、後者は輻射優勢宇宙での膨張の振る舞いと一致することは興味深い。また、VDM 模型についてくりこみ群的手法を開発し、小さな行列サイズを用いて、大きな行列サイズで見られる後の時刻での振る舞いを調べられることを見出した。行列模型の古典解については、古典解を系統的に調べ、3+1 次元の膨張する宇宙を表し、宇宙項問題を自然に解決する解を発見した。標準模型の実現については、まずワープ空間に相当する行列の配位を考えないと、カイラルフェルミオンが実現できないことを示した。その上で、交差する D プレーンによる標準模型の実現の研究を参考にして、余剰 6 次元内で交差するファジー球面の直積空間を考えることにより、標準模型に現れるすべての粒子が得られることを示した。

### 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 19 件)

[1] S. Okuno, M. Suzuki and A. Tsuchiya, "Entanglement entropy in scalar field theory on the fuzzy sphere," Progress of Theoretical and Experimental Physics 2016, 023B03 1-12 (2016). 査読有

[2] Y. Ito, J. Nishimura and A. Tsuchiya, "Power-law expansion of the Universe from the bosonic Lorentzian type IIB matrix model," Journal of High Energy Physics 1511, 070 1-22 (2015). 査読有

[3] 土屋麻人 "弦理論と時間" 数理科学 (サイエンス社) 2015 年 1 月号 38 頁 ~ 43 頁 査読無

[4] A. Tsuchiya, "Realizing the Standard Model particles in the type IIB matrix model," Fortschritte der Physik 62, 765-770 (2014). 査読無

[5] A. Tsuchiya, "Expanding (3+1)-dimensional universe from the IIB matrix model," Physics of Particle and Nuclei Letters 11, 894-898 (2014). 査読

無

- [6]H. Aoki, J. Nishimura and A. Tsuchiya, ``Realizing three generations of the Standard Model fermions in the type IIB matrix model,'' *Journal of High Energy Physics* 1405, 131 1-30 (2014). 査読有
- [7]Y. Ito, S.-W. Kim, Y. Koizuka, J. Nishimura and A. Tsuchiya, ``A renormalization group method for studying the early universe in the Lorentzian IIB matrix model," *Progress of Theoretical and Experimental Physics* 2014, 083B01 1-19 (2014). 査読有
- [8]Y. Ito, S.-W. Kim, J. Nishimura and A. Tsuchiya, ``Monte Carlo studies on the expanding behavior of the early universe in the Lorentzian type IIB matrix model," *PoS LATTICE* {¥bf 2013}, 341 1-7 (2013). 査読有
- [9]S.-W. Kim, J. Nishimura and A. Tsuchiya, ``Classical solutions in the Lorentzian matrix model for superstring theory," *International Journal of Modern Physics Conference Series* 21, 197-199 (2013). 査読無
- [10]M. Honda, G. Ishiki, S.-W. Kim, J. Nishimura and A. Tsuchiya, ``Direct test of the AdS/CFT correspondence by Monte Carlo studies of  $N=4$  super Yang-Mills theory," *Journal of High Energy Physics* 1311, 200 1-37 (2013). 査読有
- [11]J. Nishimura and A. Tsuchiya, ``Realizing chiral fermions in the type IIB matrix model at finite  $N$ ," *Journal of High Energy Physics* 1312, 002 1-11 (2013). 査読有
- [12]M. Sato and A. Tsuchiya, ``Note on consistent truncation of supergravity over higher dimensional spheres," *Modern Physics Letters A* 28, 1350104 1-4 (2013). 査読有
- [13]J. Nishimura and A. Tsuchiya, ``Local field theory from the expanding universe at late times in the IIB matrix model," *Progress of Theoretical and Experimental Physics* 2013, 043B03 1-8 (2013). 査読有
- [14]S.-W. Kim, J. Nishimura and A. Tsuchiya, ``Monte Carlo study on the birth of our universe by a Lorentzian matrix model for superstring theory," *PoS LATTICE* 2012, 230 1-7 (2012). 査読有
- [15]S.-W. Kim, J. Nishimura and A. Tsuchiya, ``Late time behaviors of the expanding universe in the IIB matrix model," *Journal of High Energy Physics* 1012, 147 1-25 (2012). 査読有
- [16]Y. Asano, H. Kawai and A. Tsuchiya,

- ``Factorization of the effective action in the IIB matrix model," *International Journal of Modern Physics A* 27, 1250089 1-19 (2012). 査読有
- [17]S.-W. Kim, J. Nishimura and A. Tsuchiya, ``Expanding universe as a classical solution in the Lorentzian matrix model for nonperturbative superstring theory," *Physical Review D* 86, 027901 1-5 (2012). 査読有
- [18]S.-W. Kim, J. Nishimura and A. Tsuchiya, ``Expanding (3+1)-Dimensional Universe from a Lorentzian matrix model for superstring Theory in (9+1) dimensions," *Physical Review Letters* 108, 011601 1-5 (2012). 査読有
- [19]M. Honda, G. Ishiki, J. Nishimura and A. Tsuchiya, ``Testing the AdS/CFT correspondence by Monte Carlo calculation of BPS and non-BPS Wilson loops in  $N=4$  super Yang-Mills theory," *PoS LATTICE* 2011, 244 1-7 (2012). 査読有  
〔学会発表〕(計 19 件)
- [1]A. Tsuchiya, ``Entanglement Entropy on the fuzzy sphere," 「East Asia Joint Workshop on Fields and Strings」, 中国科学技術大学, 中国合肥市, 2016年5月28日~2016年5月31日, 招待講演
- [2]奥野静華, 鈴木真理子, 土屋麻人, ``非可換球面上のスカラー場理論におけるエンタングルメントエントロピー," 「日本物理学会第71回年次大会」, 東北学院大学, 宮城県仙台市, 2016年3月19日~2016年3月22日
- [3]S. Okuno, M. Suzuki and A. Tsuchiya, ``Entanglement entropy on fuzzy sphere," 「KEK Theory Workshop 2015Dec」, 高エネルギー加速器研究機構, 茨城県つくば市, 2015年12月1日~2015年12月4日
- [4]鈴木真理子, 土屋麻人, 奥野静華, ``Fuzzy sphere上のエンタングルメントエントロピー," 「日本物理学会2015年秋季大会」, 大阪市立大学, 大阪府大阪市, 2015年9月25日~2015年9月28日
- [5]A. Tsuchiya, ``Exponential and power-law expansion of the Universe from the type IIB matrix model," 「Corfu 2015 Workshop on Noncommutative Field Theory and Gravity」, Mon-Repos, ギリシャコルフ島, 2015年9月21日~2015年9月27日, 招待講演
- [6]土屋麻人, ``Exponential and power-law expansion of the Universe from the type IIB matrix model," 「離散的手法による場と時空のダイナミクス研究会」, 岡山衛生会館, 岡山県岡山市, 2015年9月14日~2015年9月18日, 招待講演
- [7]A. Tsuchiya, ``Exponential and power-law expansion of the Universe from the type IIB matrix model," 「Numerical

approaches to the holographic principle, quantum gravity and cosmology」, 京都大学基礎物理学研究所, 京都府京都市, 2015年7月21日~2015年7月24日, 招待講演

[8]土屋麻人, ``行列模型の解析および数値的研究の最近の進展," 「第1回日露 working seminar」, 大阪市立大学文化交流センター, 大阪府大阪市, 2015年7月10日, 招待講演

[9]土屋麻人, ``超弦理論の行列模型による宇宙論の研究," 「ポスト京重点課題9サブ課題A 究極の自然法則と宇宙の進化にかかわる超弦理論、超対称理論関連の計算の検討会」, 高エネルギー加速器研究機構, 茨城県つくば市, 2015年2月24日, 招待講演

[10]土屋麻人, ``行列模型の大規模数値計算による初期宇宙の研究," 「離散的手法による場と時空のダイナミクス研究会」, 慶應義塾大学日吉キャンパス, 神奈川県横浜市, 2014年9月12日~2014年9月15日, 招待講演

[11]A. Tsuchiya, ``Direct Test of the AdS/CFT Correspondence by Monte Carlo Studies of N=4 SYM," 「国際研究集会 Aspects of Holography」, Asia Pacific Center for Theoretical Physics, 韓国浦項市, 2014年7月14日~2014年7月23日, 招待講演

[12] 本田正純, 伊敷吾郎, Sang-Woo Kim, 西村淳, 土屋麻人, ``N=4 超対称ヤン・ミルズ理論のモンテカルロシミュレーションによる AdS/CFT 対応の直接検証," 「日本物理学会第69回年次大会」, 東海大学湘南キャンパス, 神奈川県平塚市, 2014年3月27日~2014年3月30日

[13]土屋麻人, ``IIB 行列模型における標準模型粒子の実現," 「離散的手法による場と時空のダイナミクス研究会」, 高エネルギー加速器研究機構, 茨城県つくば市, 2013年9月27日~2013年9月30日, 招待講演

[14]A. Tsuchiya, ``Realizing the Standard Model particles in the type IIB matrix model," 「Corfu 2013 Workshop on Noncommutative Field Theory and Gravity」, Mon-Repos, ギリシャコルフ島, 2013年9月8日~2013年9月15日

[15]土屋麻人, ``行列模型による弦理論の非摂動的定式化," 「2013年度原子核三者若手夏の学校 素粒子論パート講師」, ホテルたつき, 愛知県蒲郡市, 2013年8月4日~2013年8月9日, 招待講演

[16]A. Tsuchiya, ``Expanding (3+1)-dimensional universe from the IIB matrix model," 「The International Workshop "Supersymmetries and Quantum Symmetries - SQS'2013」, Bogoliubov Laboratory of Theoretical Physics, ロシアデュブナ, 2013年7月29日~2013年8月3日, 招待講演

[17]土屋麻人, ``Late time behaviors of the

expanding universe in the IIB matrix model," 「離散的手法による場と時空のダイナミクス」, 理化学研究所, 埼玉県和光市, 2012年8月30日~2012年9月2日, 招待講演

[18]A. Tsuchiya, ``A novel large-N reduction for N=4 SYM on  $R^3 \times S^1$  and the AdS/CFT correspondence," 「国際会議 Progress in Quantum Field Theory and String Theory」, 大阪市立大学, 大阪府大阪市, 2012年4月3日~2012年4月7日, 招待講演

〔図書〕(計 1 件)

土屋麻人, 「弦理論と行列模型」, サイエンス社, 2014年3月10日, 156頁

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

〔その他〕

ホームページ

<http://www.ipc.shizuoka.ac.jp/~satsuch/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

土屋 麻人 (Asato Tsuchiya)

静岡大学・理学部・准教授

研究者番号: 20294150

### (2) 研究分担者

なし

### (3) 連携研究者

なし