

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 19 日現在

機関番号：13801

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K05046

研究課題名(和文) 解析および数値的手法を用いた行列モデルによる超弦理論の非摂動的定式化の研究

研究課題名(英文) Analytic and numerical study of nonperturbative formulation for superstring theory by matrix model

研究代表者

土屋 麻人 (Tsuchiya, Asato)

静岡大学・理学部・教授

研究者番号：20294150

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：重力を含む統一理論の最有力候補である超弦理論を非摂動的に定義すると期待されるIIB行列モデルを大規模並列計算のモンテカルロシミュレーションにより調べ、インフレーション宇宙や輻射優勢宇宙が出現することを示唆する結果を得た。また、小さな行列サイズで大きな行列サイズでのシミュレーションを有効的に実現する繰り込み群の手法を開発した。また、赤外正則化の仕方の指針を得た。行列から幾何を読み取る方法の知見を得るために、ファジー球面上のスカラー場理論においてエンタングルメントエントロピーを計算し、一般化された面積則を得た。また相関関数を計算することにより、この理論が繰り込み可能であることを示した。

研究成果の概要(英文)：Superstring theory is the most promising candidate for a unified theory including gravity. The IIB matrix model is expected to define superstring theory nonperturbatively. I studied the model by Monte Carlo simulation with a large scale parallel computation and obtained the results which suggest that the inflationary and radiation dominated universes emerge dynamically in the model. I developed a renormalization group method that enables us to effectively obtain results for a large matrix size by simulating the model with a small matrix size. I found how the model is independent of an infrared cutoff introduced to well-define the model. To gain insights into deriving geometry from matrices, I calculated entanglement entropy in a scalar field theory on the fuzzy sphere, which is realized by a matrix model, and obtained a generalized area law for entanglement entropy. By calculating correlation functions, I also showed that the theory is renormalizable.

研究分野：素粒子論

キーワード：行列モデル 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 大規模並列計算
ファジー球面 エンタングルメントエントロピー

1. 研究開始当初の背景

超弦理論は重力を含む統一理論の最有力候補であるが、摂動論でしか定式化されておらず、摂動論的に(準)安定な真空は無数に存在し、超弦理論の予言能力は限定されてしまう。また、宇宙の始まりにおける特異点は摂動論によるかぎり解消されない。このような問題は超弦理論を非摂動論的に定式化し、その非摂動ダイナミクスをとらえることにより解決することが期待される。IIB 行列模型はそのような超弦理論の非摂動論的定式化の候補として 1996 年に提案された。2011 年に数値シミュレーションにより、この模型から 3+1 次元の膨張宇宙が出現すると解釈される結果が得られた。

2. 研究の目的

IIB 行列模型についての 2011 年の数値シミュレーションでは、宇宙のはじまりからプランク時間くらいの宇宙を見ていると考えられる。後の時刻でビッグバン宇宙や標準模型が出現するかを見たい。このために、行列サイズを大きくする必要があり、そのためのシミュレーション法の開発を行い、また行列から時空の幾何を読み取る方法を確立する。さらに、結果の物理的な妥当性を保証するために、模型を定義するために導入する赤外カットオフの入れ方に結果が依らないことを見る。

3. 研究の方法

スーパーコンピュータ「京」を用いて並列計算で大きな行列サイズでの大規模シミュレーションを行う。また、小さい行列サイズで有効的に大きなサイズでの計算を実現する繰り込み群の手法を開発する。さらに、赤外カットオフの入れ方を変えてシミュレーションを行う。行列から幾何を読み取る方法について知見を得るために、ゲージ重力対応におけるエンタングルメントエントロピーと幾何の関係を鑑み、行列模型から実現される非可換空間上の場の理論においてエンタングルメントエントロピーを調べる。

4. 研究成果

(1) IIB 行列模型において、フェルミオンの寄与を単純化することにより、早い時刻での膨張の様子を有効的に記述すると期待される模型と後の時刻でのそれを有効的に記述すると期待される模型を提案した。両者において大規模並列計算でモンテカルロシミュレーションを行うことによって、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た。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。さらに、前者においては膨張則が指数関数的であること、後者においては膨張則が時刻の 1/2 乗に比例することを見た。

これらは、それぞれインフレーション宇宙と輻射優勢宇宙での膨張則に等しい。

(2) IIB 行列模型においては、後の時刻を見るために大きな行列サイズで計算することが望まれるが、数値シミュレーションは難しくなっていく。そこで、小さいサイズで有効的に大きなサイズの計算ができるように行列サイズに関する繰り込み群を開発した。すでに、フェルミオンの自由度を落として単純化した模型については開発済であったが、ここではそれを元の模型の場合まで適用可能なようにした。

(3) IIB 行列模型においてフェルミオンの寄与を近似して単純化した模型において、赤外カットオフの入れ方に 1 つのパラメータを導入し、モンテカルロシミュレーションを行った。すると、パラメータのある範囲で結果が普遍的になり、かつカットオフの効果が無限体積極限で消えていく傾向を発見した。これにより、模型をどのように正則化して定義すべきかの指針が得られた。

(4) ファジー球面上のスカラー場理論を行列模型で実現し、レプリカ法に基づく方法を用いてエンタングルメントエントロピーをモンテカルロシミュレーションにより計算した。相互作用がない場合は、エンタングルメントエントロピーは着目する領域の境界の面積の 2 乗に比例することを見出した。これは行列による正則化を行っていることにより理解できる。相互作用がある場合は、領域の体積を大きくしていくと、面積 2 乗則を積分して得られる一般化された体積則から面積 2 乗則への転移が観測された。これはファジー球面上では相互作用が非局所的であることから理解できる。

(5) 非可換空間上の場の理論が通常の場合の理論とどのくらい異なるのかを知るために、ファジー球面上のスカラー場理論における繰り込みを調べた。プロッホコヒーレント状態を用いて、行列から場を定義し、球面上での 2 点相関関数と 4 点相関関数をモンテカルロシミュレーションで計算した。理論の 1 つのパラメータを微調整することにより、相関関数が理論の紫外カットオフである行列サイズに依らなくなることを見出した。これにより、この理論は紫外赤外アノマリーを示すにもかかわらず、通常の場合の理論と同じ意味で繰り込み可能であることが強く示唆される。

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 8 件)

- 1) T. Azuma, Y. Ito, J. Nishimura and A. Tsuchiya, "A new method for probing the late-time dynamics in the Lorentzian type IIB matrix model," PTEP 2017, 083B03, 1-13 (2017), DOI:

- 10.1093/ptep/ptx106 査読有
- 2) K. Hatakeyama and A. Tsuchiya, ``Correlation functions and renormalization in a scalar field theory on the fuzzy sphere,`` PTEP 2017, 063B01, 1-15, (2017), DOI:10.1093/ptep/ptx070 査読有
 - 3) Y. Ito, J. Nishimura and A. Tsuchiya, ``Universality and the dynamical space-time dimensionality in the Lorentzian type IIB matrix model,`` JHEP 1703, 143, 1-19 (2017), DOI: 10.1007/JHEP03(2017)143 査読有
 - 4) M. Suzuki and A. Tsuchiya, ``A generalized volume law for entanglement entropy on the fuzzy sphere,`` PTEP 2017, 043B07, 1-14 (2017), DOI: 10.1093/ptep/ptx039 査読有
 - 5) A. Tsuchiya, ``Exponential and power-law expansion of the Universe from the type IIB matrix model,`` PoS CORFU 2015, 112 (2016). 査読有
 - 6) Y. Ito, J. Nishimura and A. Tsuchiya, ``Large-scale computation of the exponentially expanding universe in a simplified Lorentzian type IIB matrix model,`` PoS LATTICE 2015, 243, 1-7 (2016). 査読有
 - 7) S. Okuno, M. Suzuki and A. Tsuchiya, ``Entanglement entropy in scalar field theory on the fuzzy sphere,`` PTEP 2016, 023B03, 1-12(2016), DOI:10.1093/ptep/ptv192 査読有
 - 8) Y. Ito, J. Nishimura and A. Tsuchiya, ``Power-law expansion of the Universe from the bosonic Lorentzian type IIB matrix model,`` JHEP 1511, 070 1-22 (2015), DOI: 10.1007/JHEP11(2015)070 査読有

[学会発表](計 23 件)

- 1) 土屋麻人: ``Exponential and power-law expansion of the Universe from the type IIB matrix model,`` 国際研究集会「Numerical approaches to the holographic principle, quantum gravity and cosmology」, 京都大学基礎物理学研究所、2015年7月21日~7月24日、招待講演
- 2) 土屋麻人: ``Exponential and power-law expansion of the Universe from the type IIB matrix model,`` Corfu 2015 Workshop on Noncommutative Field Theory and Gravity, ギリシャコルフ島、2015年9月21日~9月27日、招待講演
- 3) 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、2015年7月10日、招待講演
- 4) 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2015、2015年、招待講演
 - 5) 土屋麻人: 総合研究大学院大学集中講義「弦理論と行列模型」, 2016年、招待講演
 - 6) 土屋麻人: ``Entanglement Entropy on the fuzzy sphere'', East Asia Joint Workshop on Fields and Strings, 2016年、招待講演
 - 7) 土屋麻人: ``Entanglement Entropy on the fuzzy sphere'', International Workshop on ``Theoretical Particle Physics 2016'', 2016年、招待講演
 - 8) 土屋麻人: ``Entanglement Entropy on the fuzzy sphere'', 国際研究集会「Progress in Quantum Field Theory and String Theory II」, 2017年、招待講演
 - 9) 土屋麻人: ``Entanglement Entropy on the fuzzy sphere'', 「離散的手法による場と時空のダイナミクス」研究会2016、2016年、招待講演
 - 10) 土屋麻人: ``Correlation functions and renormalization in a scalar field theory on the fuzzy sphere'', Discrete Approaches to the Dynamics of Fields and Space-time, 2017年、招待講演
 - 11) 土屋麻人: ``Appearance of chiral zero modes from classical dynamics of the type IIB matrix model'', East Asia Joint Workshop on Fields and Strings 2017, KEK Theory workshop 2017, 高エネルギー加速器研究機構、2017年、招待講演
- 他 12 件

[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
<https://wpp.shizuoka.ac.jp/tsuchiya/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

土屋 麻人 (Tsuchiya, Asato)
静岡大学・理学部・教授
研究者番号：20294150

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

()

研究者番号：

(4) 研究協力者

()