

機関番号：13801

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2007～2010

課題番号：19540294

研究課題名（和文）行列模型およびゲージ理論による弦理論の非摂動ダイナミクスの研究

研究課題名（英文） Nonperturbative dynamics of string theory via matrix models and gauge theories

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

研究成果の概要（和文）：ラーズN還元とは、ゲージ理論のプラナー極限はそれを次元還元して得られる行列模型で記述できることをいう。本研究では、まずラーズN還元を曲がった空間上のゲージ理論の場合に拡張した。これを用いて、N=4 超対称ヤン・ミルズ理論の非摂動的定式化を構築し、AdS/CFT 対応の検証を行った。このラーズN還元の拡張は、超弦理論の非摂動的定式化を与えると考えられている IIB 行列模型の今後の研究において大きな役割を果たすと期待される。さらに、IIB 行列模型において膨張する 3+1 次元の時空がダイナミカルに生成されることを発見した。これは、我々がなぜ 3+1 次元の時空に住んでいるのか、宇宙はどのように始まったのか、という問題に対する答えを与えると期待される。

研究成果の概要（英文）：The large-N reduction asserts that the planar limit of gauge theory is described by the matrix model obtained by its dimensional reduction. I extended it to the case of gauge theory on curved space. By using this result, I constructed a nonperturbative formulation of N=4 super Yang-Mills theory, and tested the AdS/CFT correspondence. This extension of the large-N reduction is also expected to play a crucial role in future work on the IIB matrix model, which is considered to be a nonperturbative formulation of superstring theory. Furthermore, I found that expanding (3+1)-dimensional universe appears dynamically in the IIB matrix model. This result is expected to give answers to the questions why we live in (3+1)-dimensional space-time and how our universe begins.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2008年度	800,000	240,000	1,040,000
2009年度	800,000	240,000	1,040,000
2010年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：素粒子物理学、場の量子論、弦理論

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：行列模型 ラーズN還元 N=4 超対称ヤン・ミルズ理論
チャーレン・サイモン理論 AdS/CFT 対応 ゲージ重力対応

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も有

望な候補であるが、現在のところ摂動的に
安定な真空のまわりの摂動論でしか定義さ

れておらず、このような真空は無限個あるために、予言能力を今の段階では持っていない。真の真空を見出すためには、超弦理論の非摂動的な定義を与え、その非摂動的ダイナミクスを理解する必要がある。この非摂動的定義として、行列模型あるいはラージNゲージ理論に基づいたものが有力である。主要なものに、Banks-Fischler-Shenker-SusskindによるMatrix Theory、私とIshibashi-Kawai-KitazawaによるIIB行列模型、Dijkgraaf-Verlinde-VerlindeによるMatrix string theory、MaldacenaによるAdS/CFT対応としてのN=4 超対称ヤン・ミルズ理論がある。

2. 研究の目的

本研究では、以下の(1)～(4)のような超弦理論の非摂動的定義に共通して存在する問題に取り組み、超弦理論の非摂動的定義のあるべき姿を探り、そこで得た知見をもとに超弦理論の非摂動的定義を完成させることを目指す。

(1) 弦の励起状態が行列模型やゲージ理論の中でどのように見えるか。

(2) 曲がった時空と一般座標変換不変性が行列模型やゲージ理論の中でどのように記述されるか。

(3) ブラックホールが行列模型やゲージ理論においていかに記述されるか。

(4) 行列模型あるいはゲージ理論と弦理論あるいは重力理論の対応はどのような条件のもとで成立するか。

3. 研究の方法

(1) ラージN還元を曲がった空間に拡張する。

(2) (1)の拡張されたラージN還元を用いて、行列模型による超対称ヤン・ミルズ理論の非摂動的定式化を構築する。

(3) (2)で構築した定式化を調べ、重力側の結果と比較することにより、AdS/CFT対応またはゲージ重力対応の検証を行う。

(4) (1)の結果を用いて、超弦理論の非摂動的定式化を与えていると期待される行列模型において曲がった時空がどのように記述されるかを研究する。

(5) (4)の行列模型のシュヴィンガー・ダイソン方程式を調べることにより、弦の励起状態がどのように行列模型の中に見えるかを研究する。

4. 研究成果

(1) ファイバー束の行列による記述に成功した。

(2) (1)の結果をもとにplane wave 行列模

型を用いた $R \times S^3$ 上のN=4超対称ヤン・ミルズ理論の非摂動的定式化を提唱した。これはゲージ対称性と16個の超対称性を保つ画期的な正則化になっており、この理論の数値シミュレーションを可能にする。またこれは、ラージN還元の曲がった空間への拡張になっている。

(3) (2)の定式化の妥当性を次のように摂動的に検証した。まず、この定式化において1ループのベータ関数が消えていることを示した。これはN=4超対称ヤン・ミルズ理論が共型不変な理論であることと合致している。次に、連続理論で行われているようにBPSウィルソンループの真空期待値をファインマンゲージでプラナーラダー図を足し上げるにより計算し、連続理論での正確な結果を再現した。さらに、カイラルプライマリ演算子の2点関数を1ループで計算し、連続理論での1ループの結果を再現した。

(4) (2)ラージN還元の拡張を S^3 上のチャーン・サイモン理論に適用し、既知のプラナー極限の結果を再現することに成功した。これは、曲がった空間でのラージN還元を示しきった初めての例であり、他の理論への応用の基礎付けとなる。

(5) (2)の定式化を用いて、モンテカルロシミュレーションにより、N=4超対称ヤン・ミルズ理論におけるカイラルプライマリ演算子の2点、3点相関関数について非くりこみ定理が成立することを見た。これは重力側からの予言と一致しており、多点関数についてのAdS/CFT対応の初めての非自明な検証である。さらに、4点関数もモンテカルロシミュレーションで計算した。今後、すでに存在する重力側の結果を比較できる形に計算してもっていききたい。また、non-BPSのウィルソンループ演算子としてトラック型のループを考え、まず重力側でその真空期待値を最小曲面の面積を計算することにより求めた。将来的にはモンテカルロシミュレーションでこの演算子の真空期待値を計算し、重力側の結果と比較したい。このようにして、さらなるAdS/CFT対応の非自明な検証を行う予定である。さらには、この定式化を用いてAdS空間とブラックホールの相転移を調べられる可能性がある。

(6) ラージN還元の拡張をさらに進めて、一般の群多様体上およびcoset空間でラージN還元が成立することを示した。群多様体やcoset空間は曲がった空間の典型例であり、これらの結果はラージNゲージ理論の非摂動的定式化という観点から重要であるだけでなく、行列模型における曲がった時空の記述に発展をもたらすはずである。

(7) 超弦理論の非摂動的定式化を与えていると期待されるIIB行列模型のシュヴィンガー・ダイソン方程式を調べて、何を数値シミ

ュレーションを用いて計算すべきかを明らかにした。この数値シミュレーションは現在進行中である。

(8) IIB 行列模型のローレンツ版が非摂動的に矛盾なく定義されることを示した。具体的には、カットオフを導入して経路積分を定義し、ラーゼNの極限でこのカットオフを取り除けることを示した。このようにして得られた理論はスケールパラメータ以外のパラメータを持たず、非摂動的弦理論に期待される性質を持つ。さらに、時間および時間発展がダイナミカルに生成されることを見出すとともに、ある臨界時刻が存在して、その時刻以降は空間のSO(9)対称性がSO(3)に自発的に破れて、3+1次元の膨張する宇宙がダイナミカルに出現することを発見した。これは、我々がなぜ3+1次元の時空に住んでいるのか、宇宙はどのように始まったのか、という問題に対する答えを与えると期待され、今後のさらなる研究が望まれる。また、インフレーションの機構やダークエネルギー、ダークマター、ヒッグス粒子の正体などの素粒子物理学と宇宙論に残された問題がこの模型を調べることにより、解決されていくことを期待している。

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 17 件)

- ①S.-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 (2012) 1-5 査読有
- ②M. 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 4d N=4 super-Yang-Mills theory,” PoS LATTICE 2011, 244 (2011) 1-7 査読無
- ③G. Ishiki, S. Shimasaki and A. Tsuchiya, “Perturbative tests for a large-N reduced model of N=4 super Yang-Mills theory,” Journal of High Energy Physics 1111, 036 (2011) 1-37 査読有
- ④H. Kawai, S. Shimasaki and A. Tsuchiya, “Large N reduction on group manifolds,” International Journal of Modern Physics A 25 (2010) 3389-3406 査読有
- ⑤G. Ishiki, S. Shimasaki and A. Tsuchiya, “Large N reduction for Chern-

Simons theory on S^3 ,” Physical Review D 80:086004 (2009) 1-5 査読有

- ⑥T. Ishii, G. Ishiki, S. Shimasaki and A. Tsuchiya, “N=4 super Yang-Mills theory from the plane wave matrix model,” Physical Review D 78:106001 (2008) 1-21 査読有
- ⑦T. Ishii, G. Ishiki, S. Shimasaki and A. Tsuchiya, “Fiber bundles and matrix models,” Physical Review D 77:126015 (2008) 1-25 査読有

[学会発表] (計 41 件)

- ① 土屋麻人 「超弦理論の非摂動的定式化の進展と展望」日本物理学会第 67 回年次大会 2012 年 3 月 25 日 関西学院大学 (西宮市)
- ② 土屋麻人 “Expanding (3+1)-dimensional universe from a matrix model for superstrings,” 「第五回超弦理論と宇宙」 2012 年 2 月 22 日 別府温泉 (別府市)
- ③ 土屋麻人 “Expanding (3+1)-dimensional universe from the IIB matrix model,” 行列模型とその周辺 2012 年 2 月 21 日 立教大学 (東京都豊島区)
- ④ A. Tsuchiya, “Expanding (3+1)-dimensional universe from a matrix model for superstrings,” Novel Numerical Methods for Strongly Coupled Quantum Field Theory and Quantum Gravity, 2012 年 2 月 1 日, University of California, Santa Barbara (米国カリフォルニア州)
- ⑤ A. Tsuchiya, “Expanding (3+1)-dimensional universe from a matrix model for superstrings,” 2011 年 12 月 20 日高エネルギー加速器研究機構 (つくば市)

- ⑥ 土屋麻人 “Large N reduction on group manifolds and the AdS/CFT correspondence,” 離散的手法による場と時空のダイナミクス 2010年9月28日 京都大学基礎物理学研究所
- ⑦ A. Tsuchiya, “Large N reduction on group manifolds and the AdS/CFT correspondence,” Strong Dynamics beyond the Standard Model, 2010年6月1日, Aspen Center for Physics (米国コロラド州)
- ⑧ 土屋麻人 “Large N reduction on group manifolds and a novel non-perturbative formulation of supersymmetric gauge theories,” 新学術領域研究(研究領域提案型)「素核宇宙融合による計算科学に基づいた重層的物質構造の解明」計画研究A01班「量子色力学にもとづく真空構造とクォーク力学」第二回 A01班研究会 2010年2月15日 高エネルギー加速器研究機構(つくば市)
- ⑨ 土屋麻人 “Large N reduction on group manifolds,” 弦理論研究会(2010) 2010年1月6日 立教大学(東京都豊島区)
- ⑩ A. Tsuchiya, “A novel large N reduction for N=4 SYM on $R \times S^3$,” Numerical approaches to AdS/CFT, large N and gravity, 2009年9月30日, Imperial College London (英国ロンドン)
- ⑪ 土屋麻人 “N=4 super Yang-Mills from the plane wave matrix model,” 2008年11月1日 理化学研究所(和光市)
- ⑫ A. Tsuchiya, “Fiber bundles and matrix models,” Progress of String Theory and Quantum Field Theory, 2007年12月8日, Osaka City University (大阪市)

[その他]

論文①の研究成果についての記事が、2011年12月22日に朝日新聞、日本経済新聞、産経新聞、日刊工業新聞などに掲載された。また、同日朝のNHK BSニュースに取り上げられた。

6. 研究組織

(1) 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