

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 8 日現在

機関番号：34428

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2011～2014

課題番号：23740211

研究課題名(和文) 超弦理論の非摂動的効果に関する研究

研究課題名(英文) Nonperturbative studies of the string theory

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) 1,200,000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・超高密度の状態では、弱い力・強い力・電磁気力だけでなく重力も元来ひとつであったと考えられている。超弦理論はこれ等4つの相互作用の統一理論の有力な候補である。この研究では行列モデルによる超弦理論の定式化の解析を行った。超弦理論では理論の整合性から時空の次元が4次元ではなく10次元であることが要求されるが、計算機を用いた行列モデルの数値計算によって私たちの住む4次元時空が生成した仕組みについて調べた。

研究成果の概要(英文)：According to the Big Bang Theory, the four interactions in the nature -weak, strong, electromagnetic and gravity interactions- were unified at the birth of the universe. Superstring theory is regarded as the strong candidate for the theory unifying these four interactions. In this research project, I studied the matrix models as the nonperturbative formation of the superstring theory. In superstring theory, the spacetime must be 10-dimensional, instead of 4. Especially, I studied how our 4-dimensional spacetime originated through the Monte Carlo studies of the matrix models.

研究分野：素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：素粒子(理論) 超弦理論 行列モデル 計算物理学

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ます。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 つがあります。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ます。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ります。

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ます。超弦理論では量子論的な整合性から時空の次元が 10 次元に限られますが、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ちました。しかし摂動論の範囲では 4 次元にコンパクト化する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ません。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ります。

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ました。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 型行列模型があります。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ものですが、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ります。また、IIB 型行列模型は、古典解として BPS D ブレーンを含むこと、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ちます。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す。研究課題を開始した 2011 年度当初の時点までにも、IIB 型行列模型における時空の生成の研究は盛んになされてきました。

また、超弦理論の研究において興味深い課題の一つにブラックホールの問題があります。開弦の端が乗れる、広がりを持った膜状の「D ブレーン」は、場の理論のソリトン解に対応するものであり超弦理論の非摂動的な側面を表すものと考えられています。超弦理論の低エネルギーの極限は、超対称性をもった重力理論であり、「超重力理論」と呼ばれます。超重力理論では D ブレーンは古典解として実現されます。1997 年にはマルダセナによって超弦理論と $N=4$ スーパーヤンミルズ理

論の間の対応が提唱され、「ゲージ重力対応」と呼ばれています。この対応を用いてこれまでブラックホールに関する様々な興味深い性質が解明されてきました。

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ます。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ております。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ました。また、ゲージ理論の数値解析によりゲージ重力対応からブラックホールの性質を調べることによって、超弦理論の非摂動的側面を明らかにすることを目標としました。

3. 研究の方法

(1) 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 IIB 型行列模型の数値計算を行いました。このアプローチでは経路積分が有限に収束する一方、フェルミオンを積分して得られるパフィアン(単純化した模型では行列式になることもある)が複素数となり、いわゆる「符号問題」に直面します。一方、ユークリッド時空上の IIB 型行列模型ではこの複素成分が時空の対称性の破れに本質的な役割を果たすため、「符号問題」は避けて通れません。「符号問題」を克服して数値計算を行う上で、「因子化法」と呼ばれる手法を用いました。

(2) ユークリッド時空上での IIB 型行列模型の研究を契機に、2011 年に Kim、西村、土屋によって時間方向をウィック回転しないローレンツ時空上の IIB 型行列模型の数値計算がなされ、9 次元の空間成分のうちある時刻を境に 3 次元に膨張することが示唆されました。ローレンツ時空上の IIB 型行列模型の数値計算では数値計算を行う上で正則化が必要となる一方、フェルミオンを積分して得られるパフィアンは実数で「符号問題」はありません。この系の数値計算を通して、宇宙膨張の仕組みの解明を目指しました。(1)(2)ともフェルミオンを扱う上で「有理ハイブリッドモンテカルロ法 (RHMC)」を用いました。

(3) D ブレーンの振る舞いはスーパーヤンミルズ理論で記述出来ませんが、フェルミオンを数値的に扱うには計算時間が膨大にかかります。この理論の高温極限はボゾンだけからなるゲージ理論に相当し、この場合について数値計算を行いました。

4. 研究成果

(1) ユークリッド時空中の IIB 型行列模型では、フェルミオンを積分したあとのパフィアン(単純化した模型では行列式)は複素数となります。論文 2.と 4.では、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」について一般化を行い、理解を深めました。そして、この手法を単純化した行列模型に対して適用し、時空の生成の仕組みについて理解を深めました。2.の論文で調べた 6 次元 IIB 型行列模型に関しては、生じる時空が 3 次元であり、広がった方向と潰れた方向の広がりの方が有限であることが分かり、ガウス展開法と呼ばれる解析計算による結果と一致することが分かりました。学会発表 1.と 3.では、10 次元ユークリッド時空中の IIB 型行列模型自体の数値計算の進展について発表しました。

(2) ローレンツ時空中での IIB 型行列模型では、9 次元の空間方向のうち 3 次元がある時刻を境に膨張することを示唆する結果が得られました。この系の数値計算を行う上では、分配関数が有限になるように積分領域を制限して模型を正則化する必要があります。時空の膨張に対する、赤外カットオフの効果を調べるために、Schwinger-Dyson 方程式の解析を行いました。学会発表 2.ではこの結果を発表しました。

(3) 有限温度のゲージ理論の閉じ込め・非閉じ込め相転移は、重力理論のブラックホールの Gregory-Laflamme 相転移に対応すると考えられています。論文 3.では、このゲージ理論の高温領域では、不安定な非閉じ込め相が、閉じ込め相に直接辿り着くのではなく、ゲージ場の固有値の配位が複数個の塊を成す中間状態を経ることを明らかにしました。また、この中間状態と black string の実時間における崩壊過程との対応について論じました。論文 1.では閉じ込め・非閉じ込め相転移の次数が模型の次元に依存するという興味深い性質を明らかにしました。高次元ブラックホールや、流体力学でも同様の相転移次数の次元依存性があることと照らし合わせると、ゲージ理論と、ブラックホール、流体力学の三者に密接な関係があることが示唆されます。

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 4 件)

1. 東武大、森田健、竹内紳悟、"Hagedorn Instability in Dimensionally Reduced Large-N Gauge Theories as Gregory-Laflamme and Rayleigh-Plateau Instabilities", Physical Review Letters、査読有、113 (2014) 091603、DOI: 10.1103/PhysRevLett.113.091603

2. Konstantinos N. Anagnostopoulos、東武大、西村淳、"Monte Carlo studies of the spontaneous rotational symmetry breaking in dimensionally reduced super Yang-Mills models", Journal of High Energy Physics、査読有、1311 (2013) 009、DOI: 10.1007/JHEP11(2013)009
3. 東武大、森田健、竹内紳悟、"New States of Gauge Theories on a Circle", Journal of High Energy Physics、査読有、1210 (2012) 059、DOI: 10.1007/JHEP10(2012)059
4. Konstantinos N. Anagnostopoulos、東武大、西村淳、"A practical solution to the sign problem in a matrix model for dynamical compactification", Journal of High Energy Physics、査読有、1110 (2011) 126、DOI: 10.1007/JHEP10(2011)126

〔学会発表〕(計 6 件)

1. Konstantinos N. Anagnostopoulos、東武大、西村淳、"Monte Carlo Studies of Dynamical Compactification of Extra Dimensions in a Model of Non-perturbative String Theory", 日本物理学会第 70 回年次大会、早稲田大学(東京都新宿区)、2015 年 3 月 24 日
2. 東武大、伊藤祐太、Sang-Woo Kim、西村淳、土屋麻人、"ローレンツ型 IIB 行列模型における赤外カットオフ効果の数値的研究", 日本物理学会第 70 回年次大会、早稲田大学(東京都新宿区)、2015 年 3 月 21 日
3. Konstantinos N. Anagnostopoulos、東武大、西村淳、"Monte Carlo Studies of Dynamical Compactification of Extra Dimensions in a Model of Non-perturbative String Theory", KEK 理論研究会 2015、高エネルギー加速器研究機構(茨城県つくば市)、2015 年 1 月 28 日
4. Konstantinos N. Anagnostopoulos、東武大、西村淳、"Monte Carlo simulations of a supersymmetric matrix model of dynamical compactification in nonperturbative string theory", KEK 理論研究会 2013、高エネルギー加速器研究機構(茨城県つくば市)、2013 年 3 月 19 日
5. Konstantinos N. Anagnostopoulos、東武大、西村淳、"Monte Carlo studies of the rotational symmetry breaking in dimensionally reduced super Yang-Mills models", 日本物理学会第 67 回年次大会(兵庫県西宮市)、関西学院大学、2012 年 3 月 25 日
6. 東武大、森田健、竹内紳悟、"Large-N 1 次元 有限温度系 ゲージ理論の相転移の

数値的解析”、 基研研究会「場の理論と弦理論」、京都大学基礎物理学研究所(京都府京都市)、2011年7月27日

〔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

(1) 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