

令和元年6月13日現在

機関番号：12102

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2018

課題番号：25400242

研究課題名(和文) 弦の場の理論を用いた超弦理論・D-ブレーンの研究

研究課題名(英文) Study of superstrings and D-branes using string field theory

研究代表者

石橋 延幸 (Ishibashi, Nobuyuki)

筑波大学・数理物質系・教授

研究者番号：70211729

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：超弦理論は重力を含んだ素粒子の統一模型の最も有望な候補として活発に研究されている。しかし、超弦理論を用いて素粒子の模型を構築するためには、この理論の「非摂動効果」と呼ばれる効果を理解する必要がある。超弦理論の非摂動効果を研究するために最も有効な方法と考えられているのが、弦の場の理論である。この弦の場の理論のアプローチを用いて、超弦理論を研究することが本研究の目的である。本研究の主な成果を挙げると以下ようになる：

1. 光円錐ゲージを用いたコンタクト項問題の解決と超弦の場の理論の構築
2. 弦の場の理論の古典解の構築

研究成果の学術的意義や社会的意義

現在の素粒子理論における最大の目標の一つは、重力の量子論を理解することである。量子力学は現在の我々の日常生活で出会う様々なテクノロジーの基礎となっている。また、重力は我々にとって最も身近な力である。残念ながら、今のところ重力を量子力学の枠組みで理解することができていない。本研究の結果はこの大目標への一歩となっている。このような研究は遠い未来のテクノロジーを支える基礎になる可能性がある。

研究成果の概要(英文)：Superstring theory is considered to be the most promising candidate for the unified theory of elementary particles including gravity. In order to construct viable models of elementary particles using superstring theory, we need to understand the so-called "nonperturbative effects" of the superstring theory. String field theory is supposed to be the most promising approach to study such effects of superstring theory. The goal of this project is to study superstring theory using the string field theory. In this project, we have

1. solved the contact term problem and constructed a superstring field theory using the light-cone gauge approach
2. obtained classical solutions of string field theories

研究分野：素粒子理論

キーワード：超弦理論 弦の場の理論

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

超弦理論は、重力を含む素粒子の統一理論の候補であるだけでなく AdS/CFT 対応により強結合ゲージ理論や物性理論を解析する方法を与える、非常に有用な理論であると考えられている。しかし、その基本的定式化が未完成であり、多くの提案があるものの、その非摂動的定義が完全にわかっているとはいえない。

弦理論の非摂動的定義を与えるアプローチの一つが弦の場の理論である。この理論では、通常の粒子の理論において用いられる第二量子化を弦の理論にも適用することにより、弦理論の非摂動的定式化を得る。

弦の場の理論は長年研究されてきたが、現在以下に述べるような問題がある：

(1) コンタクト項の問題

超弦理論の場合に弦の場の理論を作ろうとすると、弦の場の相互作用項に picture changing operator あるいはそれに類した世界面上の演算子が現れ、この演算子のために散乱振幅の摂動計算をすると発散してしまう。この発散は「コンタクトタームの発散」と呼ばれ、弦の場の理論を構築する際の最大の問題であると考えられている。

(2) 弦の場の理論の古典解

近年、Witten 型の弦の場の理論の古典解としてタキオン真空解が発見されたことを契機に、様々な古典解が作られるようになり、摂動論によっては議論できないような問題が、厳密に議論できるようになってきた。このおかげで弦の場の理論が弦理論の定式化として見直されるようになった。この研究を進展させて、通常の場合の理論におけるインスタントン等の有用な古典解を求めることが今後の課題になっている。

2. 研究の目的

弦の場の理論は、完成すれば弦の摂動展開を弦の場の簡単な相互作用から導き出すことができる理論であり、弦の基本的定式化に最も近いものである。摂動展開を正しく再現することが証明されれば、行列模型、AdS/CFT 等を議論する際にも、重要な役割を果たすと考えられる。本研究では

(1) 超弦の場の理論が摂動展開を正しく再現することを示す

(2) 弦の場の理論の古典解についての理解を深める

ことを目標とする。

3. 研究の方法

(1) 次元正則化を用いた散乱振幅の計算

超弦の場の理論の正当性を確立するためには、超弦の場の理論から正しい摂動展開が出ること示すことが必要になる。近年、超弦の場の理論から散乱振幅を摂動計算する手法の研究が進展しており、長年問題とされてきたコンタクトタームの問題は解決に近付きつつある。

ただし、超弦の場の理論における計算方法は、第一量子化における世界面上の picture changing operator を用いたものに対応すると考えられるが、このような計算方法は 2 ループ以上の振幅の計算においてはうまくいかない。弦の摂動論の現れる世界面は、リーマン面と呼ばれる数学的概念でとらえることができる。弦の摂動計算にはリーマン面の幾何学が重要な役割を果たす。超弦理論の摂動計算を矛盾なく遂行するためには、超リーマン面と呼ばれる、面の幾何学を超対称化した概念を用いなければならない。上記の picture changing operator を用いた計算方法は、超リーマン面の幾何学を通常の面の幾何学で解釈しようとするものであり、ところどころでほころびが出る。joining-splitting 型の弦の場の理論の一種である光円錐ゲージ弦の場の理論の場合には、コンタクト項の発散の問題に目をつぶれば、その摂動計算を超リーマン面の概念を用いて書きなおすことができる。我々の提案した次元正則化の方法によってコンタクト項の発散の問題は解決できるので、これを摂動の高次に適用し、超弦理論の散乱振幅の矛盾のない表式を得る。

(2) 弦の場の理論の古典解

Witten 型の弦の場の理論の古典運動方程式は、世界面上の共形場の理論のテクニックを駆使することによって、解くことができる。例えば、Erler と Maccaferri は境界のある面上の共形場の理論に現れる boundary condition changing operator を用いて、時間によらない運動方程式の解の構築法を提案している。弦の場の理論の古典解の研究を共形場の理論の様々なテクニックを用いて行い、共形場の理論への応用も考える。

4. 研究成果

(1) ボゾン弦の場合の multi-loop 散乱振幅

超弦理論のおもちゃのモデルとして、ボゾン弦と呼ばれるものがある。ボゾン弦はタキオンを含むため、素粒子のモデルを作るために用いることはできないが、理論構成が超弦理論に似ているため、この理論を用いて超弦理論の原理的問題に関する示唆を得ることができる。

超弦の場合の手がかりを得るため、光円錐ゲージボゾン弦の場の理論を用いた multi-loop 振幅の計算を行った。非臨界次元のボゾン弦の理論から出発して、multi-loop に対応した世界面上での世界面理論に現れる相関関数を計算した。その結果を用いて、非臨界次元の multi-loop 散乱振幅を計算し、共形ゲージの弦理論から得られる振幅として解釈できることを

示した。

(2) 超弦の場の理論と multi-loop 散乱振幅

超弦の場の理論の散乱振幅は、一般に上で述べたコンタクト項による発散のために、tree level でさえ発散してしまう。光円錐ゲージの超弦の場の理論の場合、我々の提案した次元正則化によってコンタクト項の発散を正則化できるので、光円錐ゲージの超弦の場の理論の multi-loop 散乱振幅を計算し、望ましい結果が出るかどうかを調べた。

まず、非臨界次元の超弦理論の世界面理論に現れる相関関数を計算した。その結果を用いて、非臨界元の multi-loop 散乱振幅を計算し、共形ゲージの弦理論から得られる振幅として解釈できることを示した。この事実をもとに、次元正則化を用いて光円錐ゲージの超弦の場の理論の multi-loop 散乱振幅を定義し、その結果が Sen と Witten によって与えられた超弦の散乱振幅の定義と一致することを示した。

(3) 高橋-谷本解の研究

Witten 型の弦の場の理論の古典運動方程式の解として、高橋と谷本によって提案されたタキオン真空に対応すると考えられている解がある。この解は、identity-based 解と呼ばれるクラスのもので、作用の値等の物理量を計算すると発散してしまうという弱点を持ちながらも、その解の周りの弦の場の理論が簡単な形になるという長所を持っている。最近、Maccaferri によってこのような解を正則化して物理量を計算する方法が提案された。この結果を高橋-谷本解に適用し、この解がタキオン真空に対応していることを見た。また、この解の周りの弦の場の理論を研究し、様々な量をどのように計算すればよいのかということについて指針を与えた。開弦の場の理論におけるタキオン真空が閉弦を記述するのではないかという古くからの予想について、研究を進めるための突破口を与える研究として注目された。

(4) 一様な磁場に対応する開弦の場の理論の古典解

高橋氏(奈良女子大)、岸本氏(新潟大)とともに、Witten 型の弦の場の理論の古典運動方程式の解に関する Erler-Maccaferri の方法を一様な磁場がある場合に適用し、この配位も対応する古典解を構築した。時空がトラスコンパクト化されている場合には、この配位は非自明なトポロジを持った解になっている。この解の gauge field profile 等の様々な性質を調べ、非自明なトポロジに関する手がかりを探した。

(5) sine-square deformation

物性理論において発見された sine square deformation と呼ばれる現象に関連して、2次元の共形場の理論においてハミルトニアンにあたる演算子を通常とは異なる形にした場合に起こる現象を明らかにした。このハミルトニアンは(3)の高橋-谷本解の研究に現れる弦の場の理論の運動項と非常によく似ている。最近この関連についての研究がなされ、非常に注目を浴びている。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計10件)

N. Ishibashi, and K. Murakami, “Multiloop Amplitudes of Light-cone Gauge Superstring Field Theory: Odd Spin Structure Contributions”, JHEP 1803 (2018) 063. 査読有

DOI 10.1007/JHEP03(2018)063

N. Ishibashi, and K. Murakami, “Multiloop Amplitudes of Light-cone Gauge NSR String Field Theory in Noncritical Dimensions”, JHEP 1701 (2017) 034. 査読有

DOI 10.1007/JHEP01(2017)034

N. Ishibashi, I. Kishimoto and T. Takahashi, “String field theory solution corresponding to constant background magnetic field”, PTEP 2017 (2017) 013B06. 査読有

DOI 10.1003/ptep/ptw185

N. Ishibashi, “Light-cone gauge superstring field theory in linear dilaton background” PTEP 2017 (2017) 033B01. 査読有

DOI 10.1003/ptep/ptx012

N. Ishibashi, and K. Murakami, “Worldsheet theory of light-cone gauge noncritical strings on higher genus Riemann surfaces”, JHEP 1606 (2016) 087. 査読有

DOI 10.1007/JHEP06(2016)087

N. Ishibashi, and T. Tada, “Dipolar quantization and the infinite circumference limit of two-dimensional conformal field theories”, Int. J. Mod. Phys. A31 (2016) 1650170. 査読有

有

DOI 10.1142/S0217751X1651700

N. Ishibashi, and T. Tada, “Infinite circumference limit of conformal field theory”, J. Phys. A48 (2015) 315402. 査読有

DOI 10.1088/1751-8113/48/31/315402

N. Ishibashi, “Comments on Takahashi-Tanimoto’s scalar solution”, JHEP 1502 (2015) 168. 査読有

DOI 10.1007/JHEP02(2015)168

N. Ishibashi, and K. Murakami, “Multiloop Amplitudes of Light-cone Gauge Bosonic String Field Theory in Noncritical Dimensions”, JHEP 1309 (2013) 053. 査読有

DOI 10.1007/JHEP09(2013)053

T. Baba, and N. Ishibashi, “Energy from the gauge invariant observables”, JHEP 1304 (2013) 050. 査読有

DOI 10.1007/JHEP04(2013)050

[学会発表](計 11 件)

N. Ishibashi, “An overview of string field theory”, KEK theory workshop 2018 (17-20 December 2018, KEK, Tsukuba, Japan)

N. Ishibashi, “Light-cone gauge string field theory and dimensional regularization - Computation of FI D terms”, 西宮湯川記念国際滞在型研究会 "New Frontiers in String Theory 2018" (July 2- August 3, 2018, Yukawa Institute for Theoretical Physics, Kyoto, Japan)

N. Ishibashi, “Multiloop amplitudes of light-cone gauge superstring field theory: Odd spin structure contributions”, SFT@HIT (June 23-25, 2017, Holon Institute of Technology, Holon, Israel)

N. Ishibashi, “Light-cone gauge superstring field theory and dimensional regularization”, Recent Developments on Light Front (March 14-16, 2017, Arnold Sommerfeld Center for Theoretical Physics, Munich Germany)

石橋 延幸, “Light-cone gauge superstring field theory in linear dilaton background”, 日本物理学会 2016 年秋季大会 (宮崎大学木花キャンパス 9月21日-24日)

N. Ishibashi, “Light-cone gauge superstring field theory in linear dilaton background”, VIII Workshop on String Field Theory and Related Aspects (May 31- June 3, 2016, International Center for Theoretical Physics, South American Institute for Fundamental Research, Sao Paulo, Brazil)

石橋 延幸, “Dimensional regularization of light-cone gaugesuperstring field theory and multiloop amplitudes”, 日本物理学会 2015 年秋季大会 (大阪市立大学杉本キャンパス 9月25日-28日)

N. Ishibashi, “Dimensional regularization of light-cone gauge superstring field theory and multiloop amplitudes”, International Conference on String Field Theory and Related Aspects VII, SFT2015

(May 11-15, 2015, Center for Theoretical Physics, Sichuan University, ChengDu, China)

石橋 延幸, “Multiloop amplitudes of light-cone gauge superstring field theory in noncritical dimensions”, 弦の場の理論 15 奈良(2015年3月5-6日, 奈良女子大学、奈良)

N. Ishibashi, “Comments on the Takahashi-Tanimoto tachyon vacuum solution”, String

field theory and related aspects VI, SFT2014

(July 21-August 1, 2014, SISSA, Trieste, Italy)

N. Ishibashi, "Light-cone gauge string field theory and dimensional regularization",

KEK Theory Workshop 2014

(February 18-21, 2014, KEK, Tsukuba, Japan)

〔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:

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:

国内外の別:

〔その他〕

ホームページ等

Nobuyuki Ishibashi 's home page

<http://www-het.ph.tsukuba.ac.jp/~ishibash/index.html>

6 . 研究組織

(1)研究分担者

研究分担者氏名:

ローマ字氏名:

所属研究機関名:

部局名:

職名:

研究者番号(8桁):

(2)研究協力者

研究協力者氏名:

ローマ字氏名:

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。