

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 26 日現在

機関番号：85303

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23540332

研究課題名(和文)弦の場の理論を用いた超弦理論の非摂動的性質の探求

研究課題名(英文)study of nonperturbative aspects of superstring theory using string field theory

研究代表者

村上 公一 (MURAKAMI, Koichi)

岡山光量子科学研究所・その他部局等・研究員

研究者番号：00400698

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円、(間接経費) 1,170,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、超対称な弦の場の理論が抱える、コンタクト項の問題と呼ばれる、長年にわたって超弦の場の理論の構成の障害となり続けている発散の問題を、解決することを目的に遂行された。我々はこの問題を解決するために、時空の次元を大きく負の値にずらすことにより正則化するという新たな正則化の処方案を提案し、特に光円錐ゲージのNSR形式の超弦の場の理論においてその正当性を検証した。その結果、少なくともtree振幅においては正則化がうまくいっていることを確かめ、また多重ループ振幅についても研究を進めた。またこれとは別に、全く新たな弦の場の理論の定式化や、弦理論の宇宙論への応用を追求した。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this research is to overcome the "contact term problem", which is a divergence problem possessed by superstring field theory and has been an obstacle to the formulation of the theory for a long time. We proposed a novel regularization scheme in which the number of space-time dimensions are shifted to a sufficiently large negative value. We verified our regularization mainly in the context of the light-cone gauge superstring field theory in the NSR formalism. We have shown that our regularization works well at least for the tree-level amplitudes. We have made a progress also in the analysis of the multiloop amplitudes.

In addition to these analyses, we have pursued a new formulation of string field theory in which the string worldsheet is discretized. We also have studied cosmology particularly including quantum effects and back-reaction of matter fields.

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学 素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理学

キーワード：素粒子論 超弦理論 場の理論 素粒子論的宇宙論

1. 研究開始当初の背景

1990年代後半以降に、弦理論の非摂動的側面に対する理解が進んだことにより、物質を記述するゲージ場の理論と、重力との関係が次第に明らかになってきている。このような、弦理論の非摂動的な振舞の理解の鍵となるのが、弦理論のソリトンである D-ブレーンである。

D-ブレーンとは、1995年に Polchinski により弦理論において定式化された、拡がりを持つ物体であり、開いた弦が付着できるという性質を持つ。D-ブレーンに付着した開いた弦を量子化することで、D-ブレーン上にゲージ場が誘起される。他方、D-ブレーンは張力を持っているので、重力場の源となる。これは、弦理論の言葉では、D-ブレーンは閉じた弦を放出・吸収するという形で記述される。このように、D-ブレーンは物質の量子論であるゲージ場の理論と、重力とを自然に結び付ける物体である。弦理論のソリトンである D-ブレーンがこのような性質を持つということは、弦理論の非摂動的側面を解明することにより、自然界の物質と重力を含むすべての力に対して、統一的な記述が得られることを強く示唆している。

このように、弦理論の非摂動的な性質の解明は重要であり、この課題を研究する機運が大きく高まって今日に至っている。その間、M 理論などの弦理論の統一理論の探求や、あるいは無限サイズの行列を用いた超弦理論の定式化などの研究が盛んになり、弦理論の非摂動的な定式化が模索された。こうした中、点粒子の量子論の成功を鑑みると、弦理論を第二量子化することにより、非摂動的な定式化を探るというアプローチが最も自然な道筋と考えられる。これが弦の場の理論であり、実際、すでに 1980 年代後半にはこうした動機のもとで盛んに研究されていた。しかし、次第に、超弦の場の理論にはコンタクト項の問題と呼ばれる、取扱いが難しい発散の問題が存在することがわかり、この取扱いがよく分からないまま、弦の場の理論の研究は下火になってしまいうとともに、この理論に対する不信感が広がってしまった。

こうして、長年にわたって弦の場の理論に対して否定的な考え方が広まっていたのであるが、2000年に Sen によって打ち立てられた、不安定な D-ブレーンの非摂動的効果に対する予想を、Schnabl が弦の場の理論を用いて 2007年に精密な形で解決をしたことにより、弦の場の理論の有用性が認識され、その重要性が再確認される形となり、弦の場の理論を取り巻く状況は大きく変化した。

本研究では、このような弦理論の非摂動的効果の重要性と、その解析における弦の場の理論の有用性が示されたことを受け、もう一度弦の場の理論を見直すことにより、弦理論の非摂動的側面の解明に資することを

目指して研究を行った。

2. 研究の目的

本研究では、超弦理論の非摂動的側面を解明するために、超対称な閉じた弦の場の理論を構成し、それを用いて超弦理論のソリトンである D-ブレーンなどの、超弦理論の非摂動的性質に迫ることを目的とする。

具体的には、超対称な閉じた弦の場の理論を構成するにあたっては、光円錐ゲージの理論を定式化することを当面の目標とする。この理論の構成においては、「研究開始当初の背景」において述べたように、コンタクト項問題と呼ばれる発散の問題がある。本研究では、この発散に対して、うまい正則化の処方を見つけることにより、発散を取扱い可能な形にすることを旨とする。こうして理論の散乱振幅等の計算処方を確立することにより、理論を無矛盾な形で定式化することを目的とする。

3. 研究の方法

超弦の場の理論のコンタクト項の問題を考えるに当たっては、光円錐ゲージの NSR 形式に基づく閉じた超弦の場の理論が持つコンタクト項の問題の解析から研究を始める。この理論においては、非物理的な自由度がゲージ固定により完全に消去されていて、こうした自由度の取り扱いを気にする必要がない。そのため取り扱いがしばしば容易となり、どのような定式化においても、弦理論自体を定義する段階においては、出発点の役割を果たしてきたからである。

我々は、まず、散乱振幅の計算においてコンタクト項の発散を正則化する処方を提案する。具体的には、散乱振幅を、弦が伝播する時空の次元 d の解析関数とみなして、 d を十分大きな負の値に取る。まず、この処方に依って、散乱振幅で生じるコンタクト項の発散がとりあえず正則化されることを見る。次に、すべての計算を終了したあと、 d を元の臨界次元の値 10 に解析接続する。その際に、理論のローレンツ対称性、あるいは共形ゲージでの BRST 対称性が回復するか、および解析接続の際に発散が生じて、相殺項を理論の action に付け加える必要があるかどうかを検討し、この正則化の処方を確立する。

以上の解析を、まず tree 振幅において行う。まず NS-NS セクターの弦のみの散乱振幅を考察し、ついで R-R セクターや R-NS セクターの弦がかかわる振幅について考察を進める。次いで、多重ループレベルの振幅について同様の解析を進める。

こうした解析が光円錐ゲージの理論である程度成功裏に解決すれば、我々の処方をゲージ不変な理論に拡張することを試みる。

4. 研究成果

(1) NS-R セクターの弦を含んだ場合の弦の場の理論における次元正則化の処方

時空のフェルミオンに対応する弦の場である NS-R セクターに属する弦の場がかかわる弦の場の理論の散乱振幅に対して、我々の提案した次元正則化の処方を適用する際には、NS-NS セクターや R-R セクターのみしか関係しない弦の散乱振幅で行ったように、単純に時空の次元を負の値にずらすだけではうまくいかないことを見出した。これは、このような単純な処方では、正則化した段階において、NS-R セクターの弦の状態が level-matching 条件を満たすものが存在しなくなってしまうことに起因する。これでは正則化段階においては時空のフェルミオンに相当する状態が理論から排除されることになって、問題である。我々は、正則化の処方の核心は次元をずらすことにあるのではなく、弦理論を記述する世界面の共形場理論の Virasoro 代数のセントラルチャージであることに注目して、負のセントラルチャージを持つ自由度を結合させ、これらの自由度が計算が終わったのちに、余計に加えたセクターのセントラルチャージを 0 にした際に、理論から完全に分離するようにすることができ、その際には弦理論の散乱振幅が、少なくとも tree レベルにおいては再現されることを確かめることに成功した。NSR 形式の超弦理論においては、Ramond セクターの取り扱いがしばしば難しくなるが、そこでも我々の正則化の処方をうまく拡張して適用可能にできたことは、超弦の場の理論の完成へ向けて重要な意義があると考えられる。

(2) ボソンの弦の場の理論の非臨界弦における多重振幅の計算

上で述べたように、光円錐ゲージの超弦の場の理論の tree レベル振幅においては、Ramond セクターを含めて、我々の提案した次元正則化がうまくいくことを示すことができた。そこで、残された課題は多重ループ振幅においても、我々の処方がうまく適用できるかどうかである。我々は、その研究の第一歩として、ボソンの弦の場の理論に制限した範囲で、多重ループ振幅においてうまく次元をずらせるかどうかを検証した。その結果、多重ループ振幅で次元をずらしても、散乱振幅の持つモジュラー不変性は阻害されることがないこと、また、ループ振幅に対応するリーマン面が退化する極限で、振幅が正しく因子化すること、そして、次元をずらした段階においても、散乱振幅が共形ゲージの世界面理論の BRST 不変な相関関数として書き表

すことができることを見出した。

これらは tree 振幅において示すことに成功していたのであるが、その際に、散乱振幅を共形ゲージの世界面の理論の言葉で書き表すために、縦波方向に相当する自由度を表す、複雑に相互作用した共形場理論を構成していた。今回の解析により、これがループ振幅においてもそのまま適用可能であることを見出した。これは今後解析すべき超対称な場合に向けて、非常に希望を与える結果であり、研究遂行の上で重要な意味を持つ結果であると考えられる。

(3) Witten 型の開いた弦の場の理論における次元正則化

上で述べた、光円錐ゲージの場の理論の解析した次元正則化の処方を、ゲージ不変な Witten 型の開いた弦の場の理論に拡張することを試みた。光円錐ゲージの場合、(2)の最後で述べた縦波方向の自由度を表す共形場理論の構成の際には、振幅のリーマン面を特徴づける abel 微分が重要であったのであるが、今回の場合は振幅のリーマン面は 2 次微分で特徴づけられる。この点に注目することにより、光円錐ゲージを解析する際に構成した共形場理論を、Witten 型の弦の場の理論への拡張する方法を見出した。この結果については、現在論文を準備中である。

(4) 新たなアプローチに基づいて弦の場の理論を定式化する試み

研究分担者の二宮は、互いに可換な left-mover と right-mover を離散化の方法を用いて構成し、これらを基本的な自由度として弦理論を記述し、これに基づく弦の場の理論の定式化することを提案した。こうして従来とは大きく異なる弦の場の理論へのアプローチを行った。まず、この定式化の第一量子化において、正しい質量スペクトラムが再現されることを見出した。次いで、上で定式化した、新たな弦の場の理論における散乱振幅の計算処方を提案し、これが正しくベネチアーノ振幅を再現するかを模索し、現段階で一定の成果を得るに至った。この考察において、研究代表者の村上と光円錐ゲージ理論の場合との類似点および相違点について議論を重ねたことは有益であった。現在この結果に関して論文を準備中である。

(5) 宇宙論の研究

研究分担者の二宮は、インフラトンを用いない宇宙初期の揺らぎの研究を進めた。特に物質場の量子論的な効果に注目して、物質場の back-reaction を取り入れた Einstein 方

程式を考察した。これにより、CMB の温度揺らぎに十分な寄与を与えることが可能であることを見出した。

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7件)

1 H.B. Nielsen and M. Ninomiya, "A novel string field theory solving string theory by liberating left and right movers," Journal of High Energy Physics 1405 (2014) 036, DOI: 10.1007/JHEP05(2014)036 査読有

2 N. Ishibashi, K. Murakami, "Multiloop amplitudes of Light-cone gauge bosonic string field theory in noncritical dimensions," Journal of High Energy Physics 09 (2013) 053. DOI: 10.1007/JHEP09(2013)053 査読有

3 H.B. Nielsen, M. Ninomiya, "Our String Field Theory Liberating Left and Right Movers as Constituent 'Objects'," Bled Workshops in Physics 13, Ljubljana, Slovenia: DMFA (2012). 査読無

4 Y. Habara, H. Kawai, M. Ninomiya, Y. Sekino, "Possible origin of CMB temperature fluctuations: Vacuum fluctuations of Kaluza-Klein and string states during inflation era," Physical Review D 85 (2012) 104027, DOI: 10.1103/PhysRevD.85.104027 査読有

5 Y. Habara, H. Kawai, M. Ninomiya, Y. Sekino, "CMB Fluctuations and string compactification scales," Physics Letters B 707 (2012) 198-202, DOI: 10.1016/j.physletb.2011.12.018 査読有

6 H.B. Nielsen, M. Ninomiya, "An Idea of New String Field Theory - Liberating Right and Left Movers -," Bled Workshops in Physics 12 (2011) 査読無

7 N. Ishibashi, K. Murakami, "Spacetime Fermions in Light-cone Gauge Superstring Field Theory and Dimeinsional Regularization," Journal of High Energy Physics 1107 (2011) 090 DOI: 10.1007/JHEP07(2011)090 査読有

[学会発表](計3件)

1 村上公一, 石橋延幸 「非臨界次元光円錐ゲージボゾン弦の場の理論における

multiloop 振幅」2012年9月,日本物理学会 2012 秋季大会(京都産業大学)

2 村上公一 「Multiloop amplitudes of light-cone gauge bosonic string field theory and noncritical dimensions」2011年9月 ``String Field Theory and Related Aspects 2011'' (チェコ共和国, プラハ)

3 村上公一 「Multiloop amplitudes of light-cone gauge bosonic string field theory and noncritical dimensions」2011年7月, 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)

[図書](計1件)

1 石橋延幸, 村上公一 「弦の場の理論 - 弦理論のより深い理解のために」SGC ライブラリ 92, サイエンス社 2012, 全 184 ページ

[その他]

アウトリーチ活動情報 (計4件)

1 村上公一, ブース出展「CDからのぞく「量子力学」の世界」, 平成25年度「集まれ! 科学好き」にて, 2014年1月(岡山大学創立五十周年記念館)。

2 村上公一, ミニ講座「弦理論 - 統一理論を求めて」全国物理コンテスト 物理チャレンジ2012 フィジックスライブ 2012年8月

3 村上公一, 「第4回科学チャレンジコンテスト」(科学 Try アンゲル岡山主催)にて審査員 2012年2月

6. 研究組織

(1)研究代表者

村上 公一 (MURAKAMI, Koichi)
岡山光量子科学研究所・研究員
研究者番号: 00400698

(2)研究分担者

二宮 正夫 (NINOMIYA, Masao)
岡山光量子科学研究所・所長
研究者番号: 40198536