

令和 5 年 6 月 27 日現在

機関番号：33924

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2022

課題番号：19K03834

研究課題名（和文）Resurgenceによる超弦理論における超対称性の破れの解明

研究課題名（英文）Elucidation of supersymmetry breaking in superstring theory via resurgence

研究代表者

黒木 経秀（Kuroki, Tsunehide）

豊田工業大学・工学（系）研究科（研究院）・教授

研究者番号：40442959

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,600,000円

研究成果の概要（和文）：先行研究において、我々は低次元の超弦理論の非摂動的定式化として超対称行列模型を提唱した。また、この行列模型において、超対称性を破る演算子の1点関数の摂動展開を全次数で求めた。本研究ではこの摂動級数に対し、resurgenceのアイデアを適用し、先行研究で得られていた行列模型のインスタントンの作用が厳密に再現されることを示した。さらに超対称性を破る演算子の2点関数の摂動展開を全次数で求め、これに対してもresurgenceを適用し、不定性が消えていること、およびインスタントン作用が正しく再現されることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

弦理論において、相関関数を摂動展開の全次数で求めることは対称性が高い場合などに限られていたが、本研究では超対称性を破る演算子の2点関数を全次数で求めており、存在価値が大きい。またこの導出の過程で、ランダム行列理論の2点関数を1点関数の積の和で表す一般的公式を導いており、この公式自体、今後様々な応用が期待される。またresurgenceの観点からは、同じ模型で複数種類の物理量に対して適用した例が少なく、この観点からも本研究は貴重な例を与えている。

研究成果の概要（英文）：In the previous work, we propose supersymmetric matrix model as nonperturbative formulation of a certain lower-dimensional superstring theory. We also derived a full perturbative expansion of one-point functions of non-supersymmetric operators. In this research, we first apply the idea of resurgence to it and succeed in reproducing the action of the instanton of the matrix model. Furthermore, we obtain a perturbative series of two-point functions of the non-supersymmetric operators at all order. We apply the resurgence to it and confirm that there is no ambiguity, and that the instanton action is correctly reproduced.

研究分野：素粒子論、弦理論

キーワード：超弦理論 超対称性 行列模型 resurgence インスタントン

1. 研究開始当初の背景

近年の弦理論研究では、弦理論の持つ高い対称性を有効に用いた解析が流行している。しかし弦理論が導出すべき標準模型は、超対称性のない 4 次元の場の理論である。よって今後は、弦理論の非摂動的定式化として期待されている、ゲージ理論の large-N 極限のダイナミクスに真摯に取り組み、弦理論の高い対称性、特に 10 次元ローレンツ対称性や超対称性等が非摂動的弦理論の枠内でどのように破れ、標準模型の対称性に帰着するかを真剣に研究するべき時に来ていると考えられる。対称性に基づく理論は美しい結果が得られるが、それではいつまでも弦理論が標準模型や加速器実験と乖離し、標準模型の導出、世代数や階層性の起源の解明等、統一理論としての弦理論の課題が未解決のままになってしまうからである。

弦理論における 10 次元ローレンツ対称性、超対称性は理論の無矛盾性から要請されるため、標準模型の導出には、これらの自発的破れが期待される。それには非摂動効果が重要であるが、現在まで非摂動効果は主に D-brane など非摂動的物体を人為的に導入して解析されており、真空における対称性の破れとの関係は不明のままである。このため非摂動的弦理論における対称性の自発的破れはこれまでほとんど解明されていない。よって弦理論における対称性の自発的破れを引き起こす非摂動効果の解析が、非常に重要であると思われる。

2. 研究の目的

弦理論の非摂動的定式化が未知の現状では、対称性の自発的破れを引き起こす非摂動効果の解明は一般には困難である。しかし自由度の少ない低次元の弦理論においては、行列模型の large-N 極限による定式化が知られている。target space の超対称性を持つ超弦理論の非摂動的定式化は未知であったが、先行研究において我々はその候補となる超対称行列模型を提唱した。この行列模型では摂動論の全次数で target space の超対称性が保たれているが、非摂動的にはそれが自発的に破れることを厳密に証明した。これは弦理論における超対称性の自発的破れの初の例であり、学術的重要性が高い。

一方で、この模型における超対称性の自発的破れの連続理論側、すなわち世界面の記述による物理的描像は未だに明らかになっていない。破れのオーダーパラメーターが、弦理論の非摂動効果特有の形を取ることから、D-brane 等非摂動的物体の生成や凝縮によるものと予想されるが、対応する連続理論での解析は困難である。また、先行研究では行列模型側で超対称不変でない演算子の 1 点関数の摂動展開の全次数の表式を得た。この摂動級数の結果自体も、非自明な超弦理論の相関関数を genus 展開の全次数で与えた稀有な例であり、学術的な意義が大きい。

一方、近年 resurgence が注目されている。これは発散する摂動級数の不定性が、非摂動的寄与の不定性と打ち消し合い、理論の無矛盾性が保証されるという主張で、近年様々な模型でその成立が確認されている。ここで重要なのは摂動的寄与と非摂動的寄与が関係付く点であり、摂動級数を十分高次まで求めることができれば、そこから非摂動効果についての情報を引き出すことを示している。この知見は弦理論にとって大きな意味を持つ。なぜなら、摂動論の定義しか持たない弦理論において、非摂動効果の直接解析は一般に困難であり、摂動論から非摂動効果を読み取る resurgence はまさに弦理論への応用に適しているからである。一方で弦理論において摂動級数を全次数に渡って求めることも一般に困難である。そのような結果が得られるのは対称性が高く、ダイナミクスを持たないような弦理論における、対称性を保つ演算子の相関関数等に限られる。ところが今度はこのような量は resurgence に適していないという問題がある。即ち、このような量の摂動展開は一般に性質が良く、Borel 和可能であるため、不定性がなくそこから非摂動効果を読み取ることは困難である。

ここで上述した我々の先行研究の結果が重要な学術的意義、独自性を持つ。まず我々の模型は target space の自由度があり、超対称性の自発的破れを起こし非自明なダイナミクスを持つ。また、超対称不変でない演算子の 1 点関数を摂動論の全次数で求めており、実際我々が得た摂動級数は Borel 和可能でない。即ち非自明な超弦理論における、超対称不変でない演算子の摂動級数を与えており、まさに resurgence を適用し、非摂動効果の情報を得るのに適した設定となっている。従って本研究の主要な目的の一つは、この模型における resurgence 構造を解明し、そこから非摂動効果の情報を読み取り、超対称性の自発的破れとの関係を明らかにしてその物理的描像を明確にすることである。

さらに超対称不変でない演算子の 2 点関数についても、摂動展開の全次数の表式を得ることを目標にする。それが得られた場合、resurgence を再び適用し、Borel 和可能性や、不定性が消えているか否かの確認を行う。また、そこから非摂動効果を読み取り、1 点関数で得られたものと比較する。同じ模型内で、異なる相関関数の resurgence 構造を比較する研究もこれまであまり例がないため、この解析も今後の resurgence の進展に対し重要な知見を与えると思われる。

3. 研究の方法

先行研究において、超対称不変でない演算子の1点関数については Nicolai mapping を用いた積分表式がすでに得られているため、これを用いて instanton 計算を行う。その際、有限区間の積分となるため、そのどこから不定性が生じるかを綿密に解析する。一方、先行研究で得られた摂動展開の表式から Borel 変換によって不定性を導出することは直接的であり、両者が打ち消し合うことを、具体的に両者を独立に計算することにより確認する。この際、不定性の寄与として、先行研究ですでに得られている、行列模型の instanton 作用が再現されることを確認する。

一方、超対称不変でない演算子の2点関数についても、Nicolai mapping によってランダム行列理論の相関関数の積分として表す表式をまず導出する。この表式は2重積分の形をしており、両者が独立でないため、直接積分は困難であるが、今興味のある超対称行列模型の double scaling limit が、ランダム行列模型の soft edge scaling limit であることに着目し、この極限において2重積分が実行できる可能性を追究する。積分を実行後は、摂動級数が Borel 和可能でないことを確認し、その不定性を具体的に求める。また、2点関数における instanton 計算も同時に行い、不定性が両者で消えていること、および非摂動効果として1点関数と同じ instanton 作用が再現されることを確認する。

4. 研究成果

1点関数に対する resurgence 構造を明らかにした。この模型における instanton 計算においては、通常見られる無限区間の積分に対する不定性でなく、有限区間の積分における不定性を評価する必要があるが、鞍点を通るように積分路を回転して計算すると、摂動展開の不定性を厳密に打ち消し、resurgence が成立することを明らかにした。またこれによって得られた非摂動効果の形は、先行研究で我々が求めた行列模型の instanton 作用の形を再現していることを示した。我々の模型はこの instanton 効果によって超対称性の自発的破れを起こすことがすでに証明されているため、超対称不変でない演算子の1点関数の resurgence によって、超対称性の破れを引き起こす自由度が同定できることが明らかになった。一般に超対称性の自発的破れは非摂動的であり解析が困難であるが、その情報が超対称不変でない演算子の摂動展開によって得られることを示した本研究は、今後超対称性の破れの解析に大きな知見を与えることが期待される。

2点関数に対する resurgence の解析においては、それが Nicolai mapping によってランダム行列理論の2点関数の積分に帰着することを示した。この積分は独立でない2重積分であり、厳密に実行することは困難である。しかし、Soft edge scaling limit においてはそれが1点関数の積の和の形で表されることを見出し、その陽な表式を与えた。ランダム行列理論は応用範囲が広いが、その2点関数の表式は従来このように扱いづらかったため、本研究で得た結果は非常に有用であり、今後広い範囲で適用されると思われる。instanton 計算においても、本質的に1点関数の場合に帰着し、有限区間の積分を鞍点を通るように回転させることにより、不定性が厳密に消えることを示した。

両者の研究は、同じ理論内で別の物理量の resurgence 構造を明確にした稀有な例であり、その学術的価値は高く、今後の resurgence の進展に多大な知見を与えると期待される。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Kawamoto Shoichi, Kuroki Tsunehide	4. 巻 2021
2. 論文標題 Momentum-space entanglement in scalar field theory on fuzzy spheres	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 1-39
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/JHEP12(2021)101	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

1. 著者名 Kuroki Tsunehide	4. 巻 2020
2. 論文標題 Two-point functions at arbitrary genus and its resurgence structure in a matrix model for 2D type IIA superstrings	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 1-50
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/JHEP07(2020)118	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Kuroki Tsunehide, Sugino Fumihiko	4. 巻 5
2. 論文標題 Resurgence of one-point functions in a matrix model for 2D type IIA superstrings	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/JHEP05(2019)138	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計0件

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関			
中国	National Tsing Hua University			
韓国	Institute for Basic Science			