

令和元年6月14日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2015～2018

課題番号：15K05044

研究課題名（和文）高次元超対称理論における非摂動効果と弦理論

研究課題名（英文）Non-perturbative effects in higher-dimensional supersymmetric theories and string theory

研究代表者

今村 洋介（Imamura, Yosuke）

東京工業大学・理学院・准教授

研究者番号：80323492

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 1,500,000円

研究成果の概要（和文）：場の量子論は素粒子の相互作用を記述する枠組みであり、相互作用が強い領域における場の理論の振る舞いの理解は現実世界における素粒子の振る舞いを理解するうえで重要である。特に、場の理論においてどのような状態が存在するかを明らかにすることは中心的な問題である。私は強結合領域のある特定のクラスの場の理論について、高次元時空中の弦理論を用いることで、その粒子スペクトルの情報を含む量を計算する幾つかの方法を開発した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、高次元の時空上の弦理論とある特定のクラスの場の理論の関係を用いて、そのような理論に含まれる素粒子の状態に関する情報を得る幾つかの手法を開発した。ここで解析した素粒子の系はボース粒子とフェルミ粒子の間に対応関係のある特殊なものであるが、このような理想化された系について得られた知見は、将来的にはより複雑な現実世界を記述する素粒子のモデルの解析への応用につながると考えている。

研究成果の概要（英文）：The quantum field theory is a framework to describe the interactions among elementary particles. For the understanding of the physics in the real world it is important to understand the behavior of elementary particles in situations with strong interactions. In particular, it is a central problem to clarify the spectrum of states in various quantum field theories. I focused on a particular class of theories with strong interactions and developed several methods to calculate the spectrum of particles in such theories.

研究分野：素粒子論

キーワード：超対称性 双対性 弦理論 超共形指数

1. 研究開始当初の背景

強結合領域における場の理論の振る舞いを理解することは、素粒子論において常に重要な課題であった。一つの理由としては、現実世界においてクォークが束縛状態として陽子、中性子を形づくるときに働く強い相互作用がそのような強結合領域のゲージ理論として記述されるということが挙げられる。また、標準模型を超える模型として盛んに研究されている超対称性を持つモデルにおいては、超対称性の破れを説明するためには強結合領域の場の理論における非摂動効果が重要になると考えられている。さらに、このような現実的なモデルとは直接関係しないような理論であっても、強結合領域の場の理論に特有な、双対性などの性質の発見によって、我々の場の理論についての理解はより深まることとなった。

近年の強結合領域の場の理論の解析において特に重要な役割を果たしているのは超対称性、すなわちボーズ粒子とフェルミ粒子の間の対称性である。超対称性は量子効果を抑制し、有効作用の形などに対する制限を課す。この制限をうまく用いることで、超対称性のない理論では計算することができない量も場合によっては厳密に決定することができる。このような、超対称性の利点を用いて示された重要な性質に双対性の存在がある。双対性とは、見かけ上全く異なる理論、例えば全く異なる場の自由度、全く異なるラグランジアンによって定義された二つの理論が、完全に、あるいは低エネルギー極限において物理的に等価になる現象である。互いに双対な二つの理論において、片方の理論が強結合であれば、もう片方の理論は弱結合であるという状況がしばしば起こる。すると、弱結合である理論において摂動論に基づく計算を行うことで強結合の理論についての情報を得ることができる。また、多数の異なる超対称理論を双対性の関係を用いて整理することで、異なる理論におけるさまざまな現象が、少数の現象の異なる側面として統一的な解釈をすることができるようになる。こういった理由で、場の理論の間の双対性を理解し、その関係を用いてさまざまな物理量の計算手法を確立していくことは、本研究課題の開始以前から現在に至るまで、重要な課題であった。

特に近年重要視されているのは、AdS/CFT対応に代表される、次元の異なる場の理論や弦理論の間の関係である。AdS/CFTというものはある場の理論が、ある特殊な曲がった空間上の弦理論やM理論と互いに等価であるという関係のことである。弦理論やM理論はブレーンと呼ばれる高次元の膜のようなものを含み、その上にはさまざまな自由度が存在することが知られている。そのようなブレーン上の自由度はある場合にはゲージ理論によって記述されるが、M5ブレーンの場合にはいまだにその正体が良くわかっていない6次元の超共形理論によって記述されることが知られている。ゲージ理論の性質は、AdS/CFT対応を通してつながる弦理論、あるいはM理論に含まれるブレーンや、それを配置する背景時空の幾何学的な構造として現れるため、さまざまなブレーンを記述するための場の理論の解明が重要な課題であった。特にM5ブレーンを記述する6次元の超共形理論については、本研究課題応募時、双対性を用いたアプローチによってさまざまな新しい結果が得られ始めている頃であった。

2. 研究の目的

素粒子論における重要課題の一つは、強結合の場の理論の性質を理解することである。さまざまな場の理論のうち、現実世界を記述することを目指すという現象論的な観点においては最も重要なのは4次元時空の場合であるが、それ以外の次元の理論も数理科学的に重要な対象である。特に超対称性がある場合には、さまざまな理論の強結合における性質が高次元の弦理論や6次元の超共形理論などから導かれることが期待されている。本研究の当初の目的としては、6次元の超共形理論や、6次元理論との等価性などが示唆されている5次元の超対称ゲージ理論等に焦点を当て、そこから得られる知見を他の場の理論、特に現実世界と密接に関係する4次元の理論の性質の解明へと応用することであった。

後述するように、本研究開始以降に、4次元の超対称場の理論の分野において、 $N = 3$ の超対称性をもつ理論が発見されるという進展があった。この理論は、6次元の超共形理論と同様に弱結合極限を取ることができない、本質的に強結合な理論であり、この理論について何らかの新しい知見を得ることができれば、それをより広いクラスの理論へ応用することができ、本研究課題が目指す4次元理論の強結合理論の理解に役立つと期待されるものであった。そのため、本研究課題の後半では、 $N = 3$ 理論の解明、より具体的には、その超共形指数の計算も研究の目的とした。

3. 研究の方法

本研究ではさまざまな超対称性を持つ場の理論を扱うが、その解析の中心的な道具として超共形指数を用いた。これは相互作用のある理論であっても、ラグランジアンがわかっているならば超対称性をうまく用いることで厳密に計算することができ、しかも理論の状態についての情報(BPS状態と呼ばれるある条件を満たす状態に対して、それらの量子数の情報)を内包している、理論の重要な性質を含むものである。コンパクト化、双対性などによって関係する理論については超共形指数についても互いに関係しているため、調べたい理論の超共形指数が直接計算できなかったとしても、それと双対性などでつながる別の理論の超共形指数が計算でき

ば、知りたい理論の超共形指数が得られるというもくろみであった。

本研究課題開始時においては6次元の超共形理論が主要なターゲットであったが、後半では4次元 $N = 3$ 理論について超共形指数を計算することを目標に定め、そのためにAdS/CFTを用いた解析を行った。4次元 $N = 3$ 理論はもともと弦理論におけるブレーンを用いて構成されたものであるため、それをAdS/CFTの枠組みに収めることは簡単である。AdS/CFT対応を通して $N = 3$ 理論はある特殊な10次元時空上の弦理論と等価であるとみなされるが、問題なのは、 $N = 3$ 理論のさまざまな状態がどのような形でAdS空間上の現れるかということである。私は、AdS空間上の超重力理論の場の励起によって現される状態と、内部空間中に存在するDブレーンによって表される状態に注目し、それらからの超共形指数への寄与を超重力理論やDブレーン上の有効理論を用いることで計算した。

4. 研究成果

大きく3つに分けて研究成果について説明する。

(1)

まず、本研究で中心的な役割を果たす超共形指数について、その計算手法(いくつもの手法のうち、超対称局所化の手法に基づき、内部空間中の場を調和関数展開することで指数を計算する手法)を、テクニカルな部分に注目しながらまとめて次項論文(1)として発表した。

(2)

コンパクト化によってさまざまな次元を関係付けることで、6次元超共形理論をはじめとする、幾つかの理論の超共形指数を計算することが本研究の当初の目標であったが、そのような解析のためには、超対称性を保つようなさまざまな背景時空を構成し、その上で定義した理論に対して超共形指数を計算する必要がある。

6次元超共形理論については、超共形指数に関する計算結果を出すところまでは残念ながら到達できなかったが、その準備段階として超対称性を残すような高次元の時空についての解析を行った。特に、弦理論をトーラスコンパクト化することで得られる、極大超重力理論と呼ばれる理論において、余次元2のブレーンを含むような、古典的場の方程式の解について調べ、次元が9, 8, 7の場合の結果について、次項(5)の論文としてまとめて発表した。

本研究課題で中心的な役割を果たす超共形指数の計算には、いくつもの方法がある。適用範囲が最も広いのは局所化と呼ばれる手法であるが、これはラグランジアンがわかっていなければ用いることができない。これとは別の手法として、IR公式と呼ばれるものが知られている。これは理論のゲージ対称性が破れたクーロン相において現れる、BPS粒子と呼ばれる粒子の電荷と磁荷に関する情報から超共形指数(正確にはその特殊化であるシューア指数)を計算する手法である。以前から知られているIR公式は、ある特定の時空上でのシューア指数を与えるものであった。私はこの手法をオービフォルドと呼ばれる背景上時空上へ一般化できることを指摘し、そのシューア指数を与えるようなIR公式の一般化について検討した。その結果、理論がハイパー多重項と呼ばれるある特定の種類の場のみを含む場合については適用可能な新しい公式を見出し、次項(4)の論文として発表した。

(3)

4次元 $N = 3$ 理論の超共形指数を、AdS/CFTの枠組みを用いて10次元超重力理論のある背景上の励起モードの解析によって計算し、次項(2)の論文として発表した。この解析は既に詳しく調べられている $N = 4$ 理論の解析手法を応用したものであり、この結果は理論 $N=3$ 理論のランクが大きい極限での超共形指数を与えるものである。そこで次に問題となるのは、ランクが小さい場合の $N = 3$ 理論をどのように解析するかである。まず私はそのような理論の励起状態にはストリングジャンクションと呼ばれる枝分かれのある弦が寄与するという考えのもと、そのような励起が持つ電荷、磁荷についての解析を行った。その結果は、少し前に他の研究者らによって指摘されていた、超対称性の拡大と呼ばれる現象とつじつまの合うものであった。この結果をまとめ、次項(3)の論文として発表した。その後、AdS/CFTの枠組みにおいて内部空間中に存在するブレーンが有限ランクにおいて固有な超共形指数への寄与を与えるはずであるという考えのもと、AdS空間中に存在するブレーンの振動モードの解析を行い、まずはBPS分配関数の解析を行った。BPS分配関数は、大まかにいえば超共形指数に寄与する状態を制限してより単純にしたものであり、超共形指数同様理論の状態に関する情報を含んでいる。解析の結果得られたBPS分配関数は、上記の超対称性の拡大とつじつまが合った結果を得ることができ、次項(6)の論文として発表した。さらにその後、この解析をBPS分配関数から超共形指数へと拡張することにも成功した。次項(2)の論文において発表したランクが大きい極限での超共形指数に対して、ブレーンの寄与として得られる超共形指数を加えると、超対称性の拡大につじつまの合う結果となり、結果の正しさを強く示唆している。さらに、 $N = 3$ 理論のみならず、 $N = 4$ 理論についても、ブレーンの寄与を加えることによって有限ランクの効果を完全にではないもののある程度再現できることを見出した。これらの結果も論文としてまとめ、現在は雑誌に投稿中である。

5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 6 件)

- (1) Yosuke Imamura, “ Index calculation by means of harmonic expansion, ” PTEP 2015 (2015) no. 11, 11B105, (査読あり)
- (2) Yosuke Imamura and Shuichi Yokoyama, “ Superconformal index of N=3 orientifold theories, ” J. Phys. A49 (2016) no 43, (査読あり)
- (3) Yosuke Imamura, Hirotaka Kato, and Daisuke Yokoyama, “ Supersymmetry Enhancement and Junctions in S-folds, ” JHEP 10 (2016) 150, (査読あり)
- (4) Yosuke Imamura, “ Orbifold Schur Index and IR formula, ” PTEP 2018 (2018) no. 4, 043B01, (査読あり)
- (5) Yosuke Imamura, Hirotaka Kato, “ Codimension-2 brane solutions of maximal supergravities in 9, 8, and 7 dimensions, ” PTEP 2018 (2018) no.5, 053B01, (査読あり)
- (6) Reona Arai, Shota Fujiwara, and Yosuke Imamura, “ BPS Partition Functions for S-folds, ” JHEP 1903 (2019) 172, (査読あり)

〔学会発表〕(計 3 件)

- (1) Yosuke Imamura, “ Supersymmetric background in 5d supergravity, ” Quantum Geometry, Duality and Matrix Models 2015 (国際会議), 2015年8月28日, Lebedev Physical Institute, Moscow, Russia
- (2) Yosuke Imamura, “ Supersymmetry Enhancement and Junctions in S-folds, ” Workshop on String and M-theory in Okinawa (国際会議), 2017年3月7日, Okinawa Institute of Science and Technology Graduate University
- (3) Yosuke Imamura, “ String junctions in N=4 and N=3 background, ” Progress in Quantum Field Theory and String Theory II (招待講演) (国際会議), 2017年3月30日, Osaka City University

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

6 . 研究組織

(1)研究分担者

(2)研究協力者

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。