

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 8 日現在

機関番号：14301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2015

課題番号：24740159

研究課題名(和文) 弦理論におけるエキゾチックブレーンの物理

研究課題名(英文) Physics of exotic branes in string theory

研究代表者

重森 正樹 (Shigemori, Masaki)

京都大学・白眉センター・特定准教授

研究者番号：60608256

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：エキゾチックブレーンは、最近までその意義が見過ごされてきた弦理論の重要な構成要素である。本研究では、エキゾチックブレーンの基本的性質を調べ、例えばその電荷の定義方法や分類問題を明らかにした。また、エキゾチックブレーンはブラックホールの微視的物理に重要な役割を果たすと期待される。具体的には、ブラックホールの微視的状態は一般にエキゾチックブレーンを含むsuperstratumという配位を取る可能性がある。本研究では簡単なsuperstratumを超重力理論の枠内で構成し、それが任意曲面によってパラメトライズされるため大きなエントロピーを持つことを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：Exotic branes are important ingredients of string theory whose significance has long been unappreciated. In the present research, we studied basic properties of exotic branes, and clarified how to define their charges and how to classify them. Exotic branes are expected to play an important role in black hole microphysics, because black hole microstates may be represented by superstrata which generically include exotic branes. In this research, we constructed simple superstrata in the framework of supergravity, and showed that they are parametrized by arbitrary surfaces, leading to large entropy.

研究分野：弦理論

キーワード：弦理論 エキゾチックブレーン ブラックホール 量子重力

1. 研究開始当初の背景

(1) 弦理論は弦に基づく理論であるが、その物理のより完全な(非摂動的な)理解には「ブレーン」と呼ばれる励起が重要な役割を果たすことが知られている。最近、研究代表者は研究[1]において弦理論に存在する「エキゾチックブレーン」の基本的な性質を明らかにし、その弦理論における位置付けを明確にした。特に、エキゾチックブレーンが、普遍的に存在するにも関わらずその重要性が見過ごされてきた、弦理論の不可欠な構成要素であることを明らかにした。

(2) しかし、弦理論におけるエキゾチックブレーンの研究はまだ始まったばかりである。次の段階として、エキゾチックブレーンの性質を掘り下げて調べ、それが弦理論の非摂動的物理に果たす役割を具体的に明らかにすることが極めて重要である。

2. 研究の目的

(1) エキゾチックブレーンの基本的性質の1つに、それが通常の幾何学の枠内では記述できない、つまり「非幾何学的」である、ということがある。近年、弦理論における非幾何学的な状況を記述するために“double field theory (DFT)”などの「弦理論的に拡張された超重力理論」の枠組みが発展しつつあり、エキゾチックブレーンを記述するのに有効だと期待される。本研究の目的の1つは、エキゾチックブレーンがDFTなどの枠組みでどう記述されるのかを調べるということである。

(2) ブラックホールはエントロピーを持つため、多くの微視的状態から構成されていると考えられている。しかし、それらの微視的状態がどのようなものなのかは未だによく分かっておらず、現代物理学の重要な未解明問題の1つである。研究代表者は、少なくとも弦理論におけるブラックホールに関しては、微視的状態はエキゾチックブレーンを不可欠な構成要素として含むと予想した[1]。本研究の目的の1つは、この予想を、エキゾチックブレーンを含んだブラックホールの微視的状態を具体的に構成することにより証明(または否定)するということである。

(3) D-ブレーンとエキゾチックブレーンを組み合わせた配位を考えることにより、エキゾチックな振る舞いをする場の理論を実現できると期待される。そのような場の理論の物理を探るのも本研究の目的の1つである。

3. 研究の方法

(1) 非幾何学的なエキゾチックブレーンがDFTの中でどう記述されるのかを明らかにするためには、まず[1]で考察したエキゾチックブレーンの中でも簡単なものである“T-fold型”のものが実際にDFTの運動方程

式の解であることを示し、次にさらに難しい“U-fold型”に進む計画である。

(2) ブラックホールの微視的状態を幾何学的な配位として(つまり、超重力理論の解として)構成しようという試みが近年精力的に行われており、実際にそのような幾何学的微視的状態(「幾何状態」)がこれまでに数多く発見されている。このような幾何状態は、超重力理論における超対称な解をそれが持つ微分幾何学的な構造を利用して構成する手法を用いることにより、発見された。本研究では、このような微分幾何学的手法を応用・拡張することによりエキゾチックブレーンを含む微視的状態を構成することを計画している。

(3) D-ブレーンとエキゾチックブレーンを組み合わせた配位は、ゲージ・重力対応(AdS/CFT対応)と呼ばれるものによってAdS空間中のエキゾチックブレーンに対応付けることができる。本研究では、この対応を用いて場の理論の性質を調べる計画である。

4. 研究成果

(1) エキゾチックブレーンの周囲では場の配位が振れているため、その周りを1周しても場の配位が元に戻って来ず、多価性(モノドロミー)を持つ。モノドロミーの存在する状況下では、存在しない通常の場合では起こり得ない様々な現象が起こり、その物理を明らかにすることはエキゾチックブレーンの理解につながる。例えば、エキゾチックなモノドロミー下では電荷の保存則が破れるように見えるが、我々は、このような状況下では電荷をどう定義するかが重要であり、適当な定義の元では電荷が保存することを示した。その他にも我々は、モノドロミーと超対称性との両立性等のエキゾチックブレーンの基本的な側面を明らかにした。

(2) エキゾチックブレーンの持つ電荷はモノドロミーで特徴づけられるが、それだけではまだ、具体的にどのような電荷を持つエキゾチックブレーンが弦理論に存在するのか、ということは明らかではない。そこで我々は3次元超重力理論の枠組みを用いて超対称性を持つエキゾチックブレーンの分類を行った。これにより、超対称なエキゾチックブレーンの配位の分類が数学的に nilpotent orbit と呼ばれるものの分類と対応することが明らかになり、その結果を用いて、様々な量の超対称性を持つエキゾチックブレーンの配位を具体的に構成することができた。

(3) エキゾチックブレーンが起こす新しい物理の1例として、エキゾチックブレーンが「supertube 転移」と呼ばれる自発的分極現象を起こして余次元1のドメインウォールが生成される過程を調べた。特に、複数の異

なるエキゾチックブレーンが共存する系におけるドメインウォールと背景場との非自明な相互作用を調べ、その理解を深めた。

(4) ブラックホールのエキゾチックブレーンを含む微視的状态は“superstratum”と呼ばれる、任意曲面（あるいは、2変数の関数）によってパラメトライズされる複雑な配位である、と以前に研究代表者は予想した[2]。一般のsuperstratumはエキゾチックブレーンを含み非幾何学的であるが、特別な場合は幾何学的となつて、通常の超重力理論の枠内で構成可能である。しかも、その場合にも任意曲面によってパラメトライズされるというsuperstratumの重要な性質は保たれる。研究代表者は、superstratumの性質を明らかにするため、このような幾何学的なsuperstratum解に特に注目し、超重力理論を用いてその具体的構成に取り組んだ。

① 一般のsuperstratum解をいきなり構成することは困難であるため、まずは簡単なものを構成するための解生成テクニックを発展させた。これは、さらに一般的な解を構成するための基盤となる。

② Superstratumが存在するという間の間接的証拠は幾つかあるが、我々はそれが実際に存在し、さらにブラックホールの持つ微視的状态を説明するだけの揺らぎの自由度を持つことの証拠を、AdS/CFT対応を援用することにより見出した。これは、一般的なsuperstratum解を構成するための指針として役立つ。

③ 我々は6次元超重力理論における微分方程式の線形構造を利用して、幾何学的superstratum解を具体的に構成し、それが実際に任意の曲面によってパラメトライズされる滑らかな時空となっていることを示した。つまり、幾何学的superstratumの存在を具体的構成により証明した。これは、ブラックホールの微視的状态をsuperstratumから構成するための大きな一歩である。研究代表者は、弦理論の分野で最も権威ある国際会議Stringsを含む多くの国際研究会に招待されて本研究に関する講演を行った。ただし、今回構成できたタイプの幾何学的superstratumではブラックホールの統計力学的エントロピーを再現するにはその数が足りないことも分かった。つまり、もっと一般の幾何学的superstratumが存在すると期待され、その構成が将来の課題である。

④ さらに一般的な、3変数の任意関数に依存するsuperstratum解を線形近似で構成した。これは、超重力理論には、ブラックホールの微視的状态を表す、これまで考えられていなかった非常に豊かなクラスの解が存在することの証拠である。この結果は、存在が予

想されるさらに一般のsuperstratumを構成する足がかりとなり、ブラックホールの微視的状态への理解を深めるのに重要な役割を果たすと期待される。

(5) 非幾何学的なブラックホールの微視的状态を、簡単な場合に限り、弦理論的に拡張された超重力理論の枠内で具体的に構成した。これは上述の幾何学的superstratum解よりもずっと簡単なものではあるが、将来的に非幾何学的な一般のsuperstratumを構成する際に有用な知見となるであろう。

(6) 京都大学基礎物理学研究所において国際研究会「Exotic Structures of Spacetime」および「Microstructures of Black Holes」を主催して、本研究のテーマの1つであるdouble field theory (DFT)の研究者やブラックホールの微視的状态の研究者を国内・海外から招聘して講演をしてもらい活発に意見交換を行った。特に、DFTの一線の研究者と議論し最新の知識を収集することができた。また、研究会に付随して市民講演会を企画・開催し、一般の方にブラックホール研究の最先端を紹介し、参加者と交流を図った。

引用文献

[1] J. de Boer and M. Shigemori, “Exotic branes and non-geometric backgrounds”, *Phys. Rev. Lett.* 104, 251603 (2010), DOI:10.1103/PhysRevLett.104.251603

[2] I. Bena, J. de Boer, M. Shigemori, N. P. Warner, “Double, Double Supertube Bubble”, *JHEP* {bf 10}, 116 (2011), DOI: 10.1007/JHEP10(2011)116

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9件)

① M. Park and M. Shigemori, “Codimension-2 Solutions in Five-Dimensional Supergravity,” *JHEP* 1510, 011 (2015), 査読有り DOI: 10.1007/JHEP10(2015)011

② I. Bena, S. Giusto, R. Russo, M. Shigemori and N. P. Warner, “Habemus Superstratum! A constructive proof of the existence of superstrata,” *JHEP* 1505, 110 (2015), 査読有り DOI: 10.1007/JHEP05(2015)110

③ I. Bena, M. Shigemori and N. P. Warner, “Black-Hole Entropy from Supergravity Superstrata States,” *JHEP* 10, 140 (2014), 査読有り DOI: 10.1007/JHEP10(2014)140

④ J. de Boer, D. R. Mayerson and M. Shigemori, “Classifying Supersymmetric Solutions in 3D Maximal Supergravity,” *Class. Quant. Grav.* 31, 235004 (2014), 査読有り
DOI: 10.1088/0264-9381/31/23/235004

⑤ M. Shigemori, “Perturbative 3-charge microstate geometries in six dimensions,” *JHEP* 10, 169 (2013), 査読有り
DOI: 10.1007/JHEP10(2013)169

⑥ M. Shigemori, “Exotic branes and black hole microstates,” *Int. J. Mod. Phys. Conf. Ser.* 21, 77 (2013), 査読無し
DOI: 10.1142/S2010194513009422

⑦ J. de Boer and M. Shigemori, “Exotic Branes in String Theory,” *Phys. Rep.*, 532, 65 (2013), 査読有り
DOI: 10.1016/j.physrep.2013.07.003

[学会発表] (計 40 件)

① 重森正樹, “ABJ Theory in the Higher Spin Limit”, 素粒子理論研究会 2016 ~ 量子場理論・超弦理論の進展~, 2016 年 3 月 16 日, 立教大学 (東京都豊島区)

② 重森正樹, “Codimension-1 supertubes”, *Duality and Novel Geometry in M-theory*, 2016 年 1 月 27 日, 浦項 (韓国)

③ 重森正樹, “Branes and black holes in string theory”, 20th APCTP Winter School on Fundamental Physics, 2016 年 1 月 23 日 ~ 24 日, ソウル (韓国)

④ 重森正樹, “Habemus Superstratum”, *KEK Theory Workshop 2015 Dec.*, 2015 年 12 月 2 日, 高エネルギー加速器研究機構 (茨城県つくば市)

⑤ 重森正樹, “The microstate geometry program and superstrata”, 8th Taiwan String Workshop, 2015 年 11 月 16 日 ~ 18 日, 新竹 (台湾)

⑥ 重森正樹, “Superstratum 解について”, 日本物理学会, 2015 年 9 月 26 日, 大阪市立大学 (大阪府大阪市)

⑦ 重森正樹, “Codimension-2 solutions in five-dimensional supergravity”, *KIAS-YITP Joint Workshop 2015 - Geometry in Gauge Theories and String Theory*, 2015 年 9 月 16 日, ソウル (韓国)

⑧ 重森正樹, “Habemus Superstratum”,

International Workshop on Strings, Black Holes and Quantum Information, 2015 年 9 月 10 日, 東北大学 (宮城県仙台市)

⑨ 重森正樹, “Codimension-2 solutions in five-dimensional supergravity”, *CERN-CKC TH Institute on Duality Symmetries in String and M-Theories*, 2015 年 8 月 14 日, ジュネーブ (スイス)

⑩ 重森正樹, “Habemus Superstratum”, *Strings 2015*, 2015 年 6 月 26 日, バンガロール (インド)

⑪ 重森正樹, “Habemus Superstratum”, *de Sitter and Microstate Landscapes in String Theory*, 2015 年 6 月 16 日, Gif-sur-Yvette (フランス)

⑫ 重森正樹, “The Microstate Geometry Program - the Past, Present and Future”, *Second String Theory in Greater Tokyo*, 2015 年 6 月 9 日, 理化学研究所 (埼玉県和光市)

⑬ 重森正樹, “Toward construction of supergravity superstrata states”, 第 6 回静岡素粒子集中セミナー, 2014 年 12 月 5 日, 静岡大学 (静岡県静岡市)

⑭ 重森正樹, “Black holes and exotic branes in string theory”, *Advanced String School*, 2014 年 9 月 22 日 ~ 25 日, プリー (インド)

⑮ 重森正樹, “The black hole puzzle and string theory”, *スウェーデン-京都大学共催シンポジウム*, 2014 年 9 月 12 日, ウプサラ (スウェーデン)

⑯ 重森正樹, “Aspects of exotic branes”, *Fourth Joburg Workshop on String Theory*, 2013 年 9 月 20 日, ヨハネスブルグ (南アフリカ)

⑰ 重森正樹, “Aspects of exotic branes”, *KIAS-YITP joint workshop 2013 - String Theory, Black Holes and Holography*, 2013 年 7 月 2 日, 京都大学 (京都府京都市)

⑱ 重森正樹, “Aspects of exotic branes”, *KEK Theory Workshop 2013*, 2013 年 3 月 21 日, 高エネルギー加速器研究機構 (茨城県つくば市)

⑲ 重森正樹, “Exotic branes and black hole microstates”, *Progress in Quantum Field Theory and String Theory*, 2012 年 4 月 4 日, 大阪市立大学 (大阪府大阪市)

〔その他〕

アウトリーチ活動:

市民講演会「一般相対性理論100年とブラックホール ～ブラックホール理論の最前線～」を2015年11月22日に京都大学基礎物理学研究所にて企画・開催。

講演: 重森正樹, 「ブラックホールの中はどうなっているのか?」

URL:

<http://www2.yukawa.kyoto-u.ac.jp/~shimin.kouenkai/lec20151122/lec20151122.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

重森 正樹 (Shigemori, Masaki)

京都大学・基礎物理学研究所・特定准教授

研究者番号: 60608256

(4) 研究協力者

Iosif Bena (CEA Saclay)

Jan de Boer (アムステルダム大学)

Nicholas Warner (南カルフォルニア大学)