

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 6月14日現在

機関番号：82118

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2008～2012

課題番号：20540287

研究課題名（和文） 特異的な多様体上の超弦による現実的な素粒子模型の実現

研究課題名（英文） Semi-realistic particle physics model building in string theory on singular manifolds

研究代表者

溝口 俊弥（MIZOGUCHI SHUNYA）

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・研究機関講師

研究者番号：00222323

研究成果の概要（和文）：非コンパクト剰余類に基づく $N=2$ 超対称共形場理論によって特異的なカラビヤウ多様体を記述し、それをヘテロティック弦に応用した。一般の極小共形場理論が結合した系での局在場のスペクトラムを導き、特に3世代模型を構成した。一方、孤立特異点をもつ非コンパクトカラビヤウが、NS5-ブレーンと双対である事実に基づいて、交差する5-ブレーンを表す超重力解中のゲージノのディラック方程式を解き、E6の27および27*に属するゼロモードがそれぞれ2および1世代存在することを示した。さらに、それが超対称シグマモデルの結果と一致することを示し、準南部・ゴールドストーンフェルミオンによる世代統一の可能性を指摘した。

研究成果の概要（英文）：Using the $N=2$ superconformal field theories based on noncompact group cosets, we described singular Calabi-Yau manifolds and studied heterotic string theories on these manifolds. We derived the spectra of localized modes of the noncompact models coupled to $N=2$ minimal models with an arbitrary level. In particular, we found among them a three generation model. Based on the duality between NS5-branes and isolated singularities, we solved the Dirac equations on an intersecting 5-brane background and showed that there exist two and one zero modes, respectively, in the 27 and 27* of E6. We also pointed out the coincidence of the spectrum and that of a supersymmetric nonlinear sigma model.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	900,000	270,000	1,170,000
2009年度	700,000	210,000	910,000
2010年度	600,000	180,000	780,000
2011年度	600,000	180,000	780,000
2012年度	600,000	180,000	780,000
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：素粒子理論

科研費の分科・細目：物理学、素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：素粒子理論、超弦理論

1. 研究開始当初の背景

およそ30年にわたり、超弦理論は4つの相互作用を矛盾なく統一する究極理論とし

て研究されてきた。しかし、未だに標準模型が超弦理論からどのように導かれ、標準模型を超えてどのような新物理を超弦理論が予

言するのか、依然として明らかになっていない。その困難の根本原因は、超弦が通常滑らかな多様体にコンパクト化される際に生ずる多数のモジュライにある。

モジュライとは、(10次元超弦理論から4次元時空を得るための)6次元(カラビ・ヤウ)内部空間の大きさ、形状その他の構造を特徴づけるパラメータのことである。これらの値には任意性があり、その揺らぎは低エネルギー有効理論において質量のない多数のスカラー粒子として現れ、次のような困難を引き起こす：

(i) 宇宙論的モジュライ問題

もし、そのようなスカラー粒子が質量のないまま存在すれば、それは第五の力探査実験と抵触する。しかし、仮に質量を獲得したとしても、宇宙の進化の過程で崩壊する時期によって、宇宙の元素合成シナリオを破綻させたりバリオン生成を希薄化させたりする危険性を孕む。

(ii) モジュライ安定化問題タイプ II 弦理論では、コンパクト空間内部にフラックスを手で導入し、さらに各種非摂動効果を仮定することによりすべてのモジュライに質量を与えることができる。ところが、そのような系に段階的に標準模型系を導入すると、その影響で一旦実現したモジュライ固定が無効になる場合がある。また、D-ブレーン模型自身、アップ型湯川結合を非摂動的にしか構成できないという深刻な困難を伴う。一方、ヘテロティック理論の(通常のスミューズな多様体による)コンパクト化では、すべてのモジュライを完全に固定することは非常に難しい。

(iii) ランドスケープの問題多数のモジュライに起因する最大の問題は、内部カラビ・ヤウ空間自体の多様性とも相まって、無数の可能な4次元理論を導くことである。すなわち、従来の超弦による素粒子模型は、標準模型を超えた新しい物理描像を一意的に予言することはできない。このため、現在まで様々な超弦のコンパクト化が提唱されてきたが、それらはいずれも標準模型をパラメータの巧みな微細調節によって構成することはできても、例えば「なぜクォーク・レプトンは三世代なのか？」などのような疑問に対する理由や、標準模型が現実に観測されているようなものである必然性を説明するものではない。

このような困難を避けるため、従前の超弦のスミューズな多様体へのコンパクト化の枠を超えた、もっと別の新しいコンパクト化スキームの理論研究が求められていた。(今現在も求められている。)

2. 研究の目的

特異なカラビヤウ空間上への超弦のコンパクト化に基づいて、素粒子の標準模型を越

える現実的な模型を構成してその理論的性質及び現象論的帰結を調べ、LHC稼働後に予想される素粒子理論研究の新しい方向性に超弦理論として対応することを目的として本研究は計画された。

3. 研究の方法

(1) 特異なカラビヤウ多様体を共形的場の理論で記述し(非コンパクトなゲプナー模型)、超弦のモジュラー不変な分配関数を決定してその性質、特に局在する物質場のスペクトラムについて調べる。特に三世代モデルを実現可能性について検証する。

(2) 孤立特異点をもつ非コンパクトカラビヤウは、NS5-ブレーンとT双対であることが知られている。一般に超重力のブレーン解は対称性を自発的に破り、それに付随する南部-ゴールドストーンモードがブレーン近傍に局在する。よく知られた例はD-ブレーン上の超対称ヤン-ミルズだが、E8x E8ヘテロティック5-ブレーンではE7の56になり、ADE特異点との双対性と矛盾しない。そこで、交差するE8x E85-ブレーン上には南部-ゴールドストーンモードとしてE6の27に属するカイラル超多重項が存在することが期待され、それを具体的なゲージノディラック方程式の研究により検証する。

(3) ブレーンの存在のために自発的に破れた対称性に付随するモードから帰結されるカイラルな場には一般にアノマリーが存在し、バルクからのアノマリー流入と相殺が起こるかどうか整合性のチェックになる。また、E8群のコセットに付随する超対称非線形シグマモデルのカイラルスペクトラムと比較を行なう。

4. 研究成果

(1) 特異なカラビヤウ多様体を共形的場の理論で記述するアプローチ(非コンパクトなゲプナー模型)において、複素3次元カラビヤウ上の超弦のモジュラー不変かつ離散表現も含んだ新しい分配関数を決定し、E6の27表現が「葉巻」型余剰次元の先端に局在することを示して三世代モデルを実現した。

(2) E8x E8ヘテロティック弦理論における交差する5-ブレーン解に局在するゼロモードについて調べた。この系はN=1超対称性を保つ4次元の交差をもち、SU(3)に属する一般化されたスピン接続がゲージ群に埋め込まれることによりE6ゲージ対称性が残る。研究の結果、南部・ゴールドストーンモードとしてE6の27表現に属する3つの超多重項がブレーンに局在し、そのうちの1つが他の2つと逆のカイラリティをもって正

味1世代のカイラル多重項として4次元理論に現れることを示した。

(3) 一般に、ブレーンによって時空をワーブコンパクト化するためには負の張力をもつブレーンが必要であることが知られている。オリエンティフォールドを定義できないヘテロティック弦における負張力をもつブレーンの起源を明らかにするため、アティヤ・ヒッチン多様体と呼ばれるハイパーケーラー多様体が遠方で負のNUTチャージをもつタウプナット空間に指数関数的に近づくという事実に着目し、ヘテロティック弦の負張力ブレーンは、アティヤ・ヒッチン多様体のT-双対として自然に理解できることを提唱した。

(4) E8群に基づく超対称非線形シグマモデルにおける自発的対称性の破れを交差ブレーン系で実現し、準南部ゴールドストーンフェルミオンのカイラルスペクトラムの一致を確かめた。

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10件)

- ① 溝口俊弥、矢田雅哉、Family Unification via Quasi-Nambu-Goldstone Fermions in String Theory, Prog. Theor. Exp. Phys., 査読有、053B01、2013、1-27
- ② 富沢真也、溝口俊弥、General Kaluza-Klein black holes with all six independent charges in five-dimensional minimal supergravity, Phys. Rev. D、査読有、87 024027、2013、1-11
- ③ 溝口俊弥、富沢真也、Flipped SL(2, R) duality in five-dimensional supergravity, Phys. Rev. D、査読有、86 024022、2012、1-13
- ④ H. Imazato, S. Mizoguchi and M. Yata, Taub-NUT Crystal, Int. J. Mod. Phys. A、査読有、26、2011、5143-5169
- ⑤ S. Mizoguchi and S. Tomizawa, New approach to solution generation using SL(2, R)-duality of a dimensionally reduced space in five-dimensional minimal supergravity and new black holes, Phys. Rev. D、査読有、84、2011、104009 1-13
- ⑥ H. Imazato, S. Mizoguchi and M. Yata, Note on Anomaly Cancellation on SO(32) heterotic 5-brane、査読有、Mod. Phys. Lett. A、26、2011、1453-1457
- ⑦ T. Kimura, S. Mizoguchi、Chiral

Generations on Intersecting 5-branes in Heterotic String Theory、査読有、JHEP、2010-4、2011、1-24

- ⑧ S. Mizoguchi、Localized modes in singular Calabi-Yau conformal field theories、Proceedings of OCU2007、査読無、Int. J. Mod. Phys. A23、2008、2184-2186
- ⑨ S. Mizoguchi、Localized Modes in Type II and Heterotic Singular Calabi-Yau Conformal Field Theories、JHEP 0811:022、2008
- ⑩ S. Mizoguchi、Warped string compactification via singular Calabi-Yau conformal field theory、Phys. Lett. B669、2008、352-356

[学会発表] (計11件)

- ① 富沢真也 他、SL(2, R)-duality and Most General Black Hole Solutions、日本物理学会 第67回年次大会、2012年3月25日、関西学院大学(兵庫県)
- ② 藤塚理史 他、Embedding Omega background in heterotic string theory、日本物理学会 第67回年次大会、2012年3月24日、関西学院大学(兵庫県)
- ③ 富沢真也 他、SL(2, R)-duality and new black holes、日本物理学会 2011年秋季大会、2011年9月18日、弘前大学(青森県)
- ④ 矢田雅哉 他、Taub-NUT crystal - ヘテロティック弦における負張力ブレーンの起源、日本物理学会 2011年秋季大会、2011年9月16日、弘前大学(青森県)
- ⑤ 今里晴敦 他、Taub-NUT lattice in heterotic string theory、日本物理学会 第66回年次大会、2011年3月28日、新潟大学
- ⑥ 矢田雅哉 他、Taub-NUT lattice、日本物理学会 第66回年次大会、2011年3月28日、新潟大学
- ⑦ 今里晴敦 他、Anomaly cancellations on heterotic 5-branes、日本物理学会 2010年秋季大会、2010年9月14日、九州工業大学
- ⑧ 溝口俊弥、Chiral Generations on Intersecting 5-branes in Heterotic String Theory、日本物理学会 第65回年次大会、2010年3月21日、岡山大学
- ⑨ Shun'ya Mizoguchi、Chiral Generations on Intersecting 5-branes in Heterotic String Theory、APCTP 2010 YongPyong, YongPyong Astro-Particle and Conformal Topical Physics 2010、2010年2月25日、YongPyong, Korea

- ⑩ 木村哲士 他、Yet Another Alternative to Compactification、日本物理学会 2009 年秋季大会、2009 年 9 月 13 日、甲南大学
- ⑪ 溝口俊弥 他、歪んだ M2-brane 重力解と 5 次元重力対応、日本物理学会、2009 年 3 月 29 日、立教大学

[その他]

ホームページ等

<http://research.kek.jp/people/mizoguch/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

溝口 俊弥 (MIZOGUCHI SHUNYA)

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・研究機関講師

研究者番号：00222323