

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和元年6月8日現在

機関番号：82118

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K05337

研究課題名(和文) 超弦とブレーンによる現実的な素粒子模型の普遍的实现と標準模型を超えた新物理描像

研究課題名(英文) Universal realization of realistic particle physics models using branes in superstring theory and new physics beyond the standard model

研究代表者

溝口 俊弥 (Mizoguchi, Shun'ya)

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

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：LHCで判明したやや重いヒッグズやTeVスケールにおける超対称性の不存在、あるいはPLANCKによるCMB観測データは、標準模型を超えた新物理が非常に高いエネルギーの物理と関係する可能性を示唆している。膨大な数の超弦理論の真空の問題を解決するため、本研究では「あらゆる内部空間に生じる普遍的で局所的な幾何学的構造が初期宇宙加速膨張の引き金となった」という「局所世代統一仮説」を提唱し、それをF理論と呼ばれる超弦の枠組みのブレーンの多重交差によって実現し、標準模型を超えた物理に関する、内部空間の詳細によらない、普遍的な予言のできる模型構築に関するさまざまな研究を行なった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

超弦は万物の理論(theory of everything)などと言われながら、現実にはその膨大な数に上る真空のため新物理を予言できないで来た。「局所世代統一仮説」は、そのような物理を一意的に決められない従前の超弦理論の枠組みとは異なる発想から現実物理の由来(たとえば素粒子はなぜ三世代かなど)を説明しようとするものであり、その仮説を保証する幾何学的局所構造が実際に存在することが示されたことは、本当に予言のできる超弦理論のためにきわめて重要な結果である。このような模型ができれば、日程に登っているLiteBIRD宇宙初期重力波観測、hyper-K陽子崩壊実験などへのインパクトも大きい。

研究成果の概要(英文)：The Higgs was rather heavy, and there was no low-energy SUSY at around the TeV scale. These observations revealed by the LHC experiment, as well as the CMB data gathered by the PLANCK satellite, both suggest that new physics beyond the standard model may be related to ones at very high energy scales. To solve the problem of many vacua in string theory, we have proposed the "local family unification hypothesis", which assumes that there exists a local, universal geometric structure, which can emerge in whatever the compact space, and that it triggers the inflation of the early universe. We have found that such a geometric structure indeed exists as a multiple intersection of branes in F-theory, and investigated many issues about particle physics model building using the geometric structure.

研究分野：素粒子理論

キーワード：超弦理論

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

2012年LHC実験においてついに発見されたヒッグズ粒子は標準模型を完結させる最後の未発見粒子であったが、右巻きニュートリノがないことをはじめ、17個ものパラメータを与える必要性、ダークマター候補の欠如などの理論の不完全性、素粒子の量子数やアノマリー相殺、ゲージ結合統一などが一致して示す力の大一統、現在説得力をもつようになったインフレーション/再加熱のメカニズム、さらには重力の量子化、ダークエネルギーの正体、宇宙項の謎など、素粒子の標準模型には解明すべき問題が数多く残されている。また、標準模型自体にも、なぜゲージ群は $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$ でクォーク・レプトンは三世代なのか、なぜトップクォークはアップクォークの10万倍も重いのか、なぜクォークミキシングは小さいのにレプトンは大きいのかなど多くの疑問点がある。さらに、ヒッグズが125GeVとかなり重いこととLHC実験において超対称粒子の兆候が見られないことから、少なくとも「自然」な低エネルギーSUSYは否定されることが判明した当時、標準模型を超えた物理、特にヒッグズセクターやフレーバー構造への理論的な示唆が求められていた。

一方、超弦理論は重力を含む素粒子の全相互作用を統一的に記述する理論とし30年にわたり研究されてきたが、未だ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。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アドホックな微細調節によって構成することはできても、上述のような素粒子理論の根源的な疑問に答えることはできなかった。

2. 研究の目的

例外群のコセット $E7/(SU(5) \times U(1)^3)$ 超対称シグマモデルがちょうど3つの $SU(5)$ の $10 + 5^* + 1$ の超対称多重項を含むという事実に基づいて、その超対称パートナーを標準模型のクォーク・レプトンと同一視する「世代統一」(family unification) のアイデア(九後・柳田模型)を、F理論の多重特異点に局在するストリングジャンクションを用いて実現することにより、その新しいコンパクト化の理論的ならびに現象論的帰結の詳細を調べ、標準模型を超えた新物理、特にヒッグズセクターやフレーバー構造に関する具体的な提言を行なうことを目的とする。

3. 研究の方法

実際に観測される素粒子の世代構成に非常に近い超対称コセットをF理論の多重特異点に局在するストリングジャンクションを用いて実現し、コンパクト化の理論的・現象論的帰結を調べることが本研究の目的である。このため、具体的には平成28年度はカラビヤウ4-フォルドにおける多重特異点と4次元模型の構成、多重特異点が示唆するグローバル $U(1)$ 対称性と特徴的なヒッグズセクターなどについて、また平成29年度以降は Mordell-Weil 群と物質場の局在機構、フロガット・ニールセン機構による湯川結合、さらにプローブプレーン上のマージナル安定性とE弦、非摂動超ポテンシャルの生成とモジュライ固定機構、Gフラックスおよび余次元3の特異点の幾何学、多重特異点近傍の超重力解としての性質とインフレーションなどについての研究を行う。

4. 研究成果

- 3世代標準模型が偶然でなく実現されるシナリオとして、広いクラスのコンパクト化空間に遍く存在する局所的幾何学的構造がプレーン型インフレーションをトリガーする「局所ファミリー統一仮説」を提唱し、F理論の枠組みにおいて3世代を実現するそのような局所構造としてのE8ポイントの重要性を指摘し、その性質を調べた。
- 一般化されたヒルツェブルフ多様体に楕円ファイバーされたカラビヤウ上のF理論3世代模型を分類した。
- 双対なヘテロティック弦のベクター束のモジュライ空間であるルイエン八重み付き射影空間束と、F理論の複素構造を特徴付けるワイエルシュトラス形式の独立係数断面との関係を明らかにし、 $1/2K3$ のモデルベユ格子と特異点とのE8相補性がヘテロティック側におけるヒッグズ機構の実現に本質的な役割を果たしていることを示した。
- 5次元 $N=1$ 超重力でその対称性が多元体とそれに付随するジョルダン3代数の対称性に関係して「魔法陣」と呼ばれる一群のリー代数のコセットになっている、いわゆる“magical supergravity”の次元縮約により、長年予想されていたシグマモデルが実際に現れることを厳密に証明した。超対称性を半分保つ $K3$ 曲面の特殊な極限(stable degeneration)において現れる有理楕円曲面(rational elliptic surface)のセクションがなすモデル・ベユ群の小木曾・塩田の74種の分類中、非カルタン型に対応するワイエルシュトラス形式を具体的に構成し、双対なヘテロティック弦側の指数定理によるスペクトラムとの一致を示した。
- ピカル数が19から特別なモジュライ空間の点で20になるような $K3$ 曲面にコンパクト化したF理論について調べた。
- ミラー対称性を用いて得られた本間・大塚によるF理論のスカラーポテンシャルについて、そのスカラーダイナミクスについて詳しく調べ、F理論におけるインフレーション模型の構築に向けた研究を行った。有理楕円曲面のセクションがなすモデル・ベユ群の74種の分類中、双対なヘテロティック弦側でゲージ対称性を破るインスタントが $U(1)$ を含むときに対応する「非カルタン型」のワイエルシュトラス方程式を具体的に構成し、指数定理によるスペクトラムとの完全一致を示した。

- 超弦理論、特に F 理論において新しいブレイン的オブジェクト「モノドロミフォルドブレイン」を導入することにより、D-ブレインとは異なる (p, q) -ブレインやオリエンティフォルドブレインにはサブ構造があり、それらは D-ブレインと「モノドロミフォルドブレイン」の結合状態の有効的な記述に過ぎないことを示した。また、モノドロミフォルドブレインの導入は、これまで読み取るのが容易でなかったサーバーク・ウィッテン曲線のモノドロミーを極めて簡単に求めることを可能にし、さらに「ストリングジャンクション」や「ハナニー・ウィッテン効果」とこれまで呼ばれていたものの具体的な幾何学描像を明らかにした。(この成果は学会招待講演でも発表した。)

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計 8 件)

“Non-Cartan Mordell-Weil lattices of rational elliptic surfaces and heterotic/F-theory compactifications,” S. Mizoguchi and T. Tani, JHEP 1903 (2019) 121 [arXiv:1808.08001 [hep-th]]

“Monodromifold planes: Refining (p, q) -branes and orientifold planes in string theory,” S. Fukuchi, N. Kan, S. Mizoguchi and H. Tashiro arXiv:1808.04135 [hep-th] Submitted to JHEP

“On an Algebraic Structure of Dimensionally Reduced Magical Supergravity Theories” Shin Fukuchi, Shun'ya Mizoguchi, Phys.Lett. B781 (2018) 77-82 e-Print: arXiv: 1802.06555 [hep-th]

“Enhancements in F-theory models on moduli spaces of K3 surfaces with ADE rank 17” Yusuke Kimura, Shun'ya Mizoguchi, PTEP 2018 (2018) 043B05 e-Print: arXiv: 1712.08539 [hep-th]

“Anomaly-free multiple singularity enhancement in F-theory” Shun'ya Mizoguchi, Taro Tani PTEP 2016 (2016) no.7, 073B05

“On Dimensional Reduction of Magical Supergravity Theories” Naoto Kan, Shun'ya Mizoguchi Phys.Lett. B762 (2016) 177-183 e-Print: arXiv:1605.01904 [hep-th]

“Note on three-generation models in heterotic string and F-theory on elliptic Calabi-Yau manifolds over Hirzebruch varieties” Shun'ya Mizoguchi, Tomoki Sakaguchi PTEP 2016 (2016) no.10, 101B01 e-Print: arXiv:1607.02890 [hep-th]

“Looijenga's weighted projective space, Tate's algorithm and Mordell-Weil Lattice in F-theory and heterotic string theory” Shun'ya Mizoguchi, Taro Tani JHEP 1611 (2016) 053 e-Print: arXiv:1607.07280 [hep-th]

[学会発表](計 13 件)

“超弦は三世代を説明するか？-F 理論の最近の進展と素粒子模型構築への展望-” (招待講演). 溝口俊弥, 日本物理学会第 74 回年次大会, 九州大学 (福岡県・福岡市) 2019 年 3 月 15 日

“Domain wall webs of monodromifolds dividing K3 and Rational elliptic surfaces”. 田代眸 (登壇者), 簡直人, 福地晋, 溝口俊弥. 日本物理学会 2018 年秋季大会, 信州大学 (長野県・松本市) 2018 年 9 月 15 日

“Local geometry of monodromifolds and the Kodaira classification”. 福地晋 (登壇者), 簡直人, 溝口俊弥, 田代眸. 日本物理学会 2018 年秋季大会, 信州大学 (長野県・松本市) 2018 年 9 月 15 日

“Monodromifolds: Brane-like objects constituting (p, q) -branes and orientifolds”. 簡直人 (登壇者), 福地晋, 溝口俊弥, 田代眸. 日本物理学会 2018 年秋季大会, 信州大学 (長野県・松本市) 2018 年 9 月 15 日

“Multi-scalar dynamics via mirror symmetry: Toward inflation in F-theory” Shun'ya Mizoguchi, Mini-workshop on inflation, mirror symmetry and F-theory (招待講演) KEK (茨城県・つくば市) 2018 年 3 月 20 日

“Realizing E6 GUT in F-theory” Shun'ya Mizoguchi, KMI workshop "GUTs" (招待講演)(国際学会) 名古屋大学 (愛知県・名古屋市) 2017 年 12 月 19 日

“Introduction to the theory of Gravity for Nonspecialists” Shun'ya Mizoguchi, Workshop on Gravitational physics with particle accelerators 2017 (招待講演)(国際学会) KEK 東海 (茨城県・東海村) 2017 年 11 月 30 日

“Non-Cartan Mordell-Weil lattice of rational elliptic surfaces and heterotic/F-theory compactifications” 溝口俊弥 (登壇者) 谷太郎

日本物理学会第 73 回年次大会、東京理科大学 (千葉県・野田市) 2017 年 3 月 25 日

大阪市立大学 (大阪府・大阪市) 2017 年 3 月 27 日 “マジカル超重力の次元還元と E6(+2) の代数構造” 福地晋 (登壇者) 溝口俊弥

日本物理学会 2017 年秋季大会、宇都宮大学 (栃木県・宇都宮市) 2016 年 9 月 13 日

“Looijenga's weighted projective space, Mordell-Weil lattice and Yukawa textures from horizontal U(1) symmetries in F-theory” Shun'ya Mizoguchi

Progress in Quantum Field Theory and String Theory II (招待講演)

“Tate’s algorithm と Looijenga’s weighted projective space” 谷太郎 (登壇者)、
溝口俊弥

日本物理学会 2016 年秋季大会、宮崎大学 (宮崎県・宮崎市) 2016 年 9 月 24 日

“On dimensional reduction of magical supergravity theories” 簡直人 (登壇者)、
溝口俊弥

日本物理学会 2016 年秋季大会、宮崎大学 (宮崎県・宮崎市) 2016 年 9 月 21 日

“F 理論の 3 世代模型における class の制限” 坂口智樹 (登壇者)、溝口俊弥

日本物理学会 2016 年秋季大会、宮崎大学 (宮崎県・宮崎市) 2016 年 9 月 21 日

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年：
国内外の別：

取得状況 (計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年：
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名：

ローマ字氏名：

所属研究機関名：

部局名：

職名：

研究者番号 (8 桁)：

(2) 研究協力者

研究協力者氏名：

ローマ字氏名：

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。