

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 7 日現在

機関番号：82118

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2016

課題番号：25400285

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構築と標準模型を超えた新物理描像

研究課題名(英文) Realistic particle physics model building by superstrings and branes 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) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：従来の超弦による素粒子模型は「なぜクォーク・レプトンは三世代なのか？」という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い。この困難を打破するため、本研究は例外群のコセット  $E7/((SU(5) \times U(1))$  がちょうど3つの  $SU(5)$  の  $10+5^*+1$  表現を含むという事実に基づいて、それらをクォーク・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、その新しいコンパクト化の理論的研究を行った。

研究成果の概要(英文)：Conventional particle physics models based on string theory can not answer to very fundamental questions such as "Why are there three generations of quarks and leptons in nature?" To overcome this difficulty, base on the fact that the exceptional group coset  $E7/((SU(5) \times U(1))$  includes precisely three sets of  $10+5^*+1$  representations of  $SU(5)$ , we have considered a F-theory compactification in which such a coset spectrum is locally achieved by string junctions near a multiple singularity, to implement the idea of "family unification" in string theory.

研究分野：超弦理論

キーワード：超弦理論 素粒子模型 F理論

1. 研究開始当初の背景

本研究は、LHC においてヒッグズ粒子が発見された直後において、標準模型を超えた物理への期待の高まりの中で超弦理論が素粒子物理として果たす役割を問うことが根本にあった。すなわち、30年にわたり、超弦理論は4つの相互作用を統一する究極理論として研究されてきたが、未だに標準模型がどのように導かれ、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。その困難の原因は、超弦を滑らかな多様体にコンパクト化すると無数の可能な4次元理論を導くことにある。そのため、従来の超弦による素粒子模型は、パラメータの巧みな微細調節によって標準模型的な系を構成することはできても、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かった。

2. 研究の目的

本研究の目的は、ヘテロティック弦の交差 NS5-ブレーンによる E8 対称性の自発的破れに伴う南部・ゴールドストーンボゾンとその超対称パートナーを用いて現実的なコセット (E8 に拡張された九後・柳田モデル) をターゲット空間とする超対称非線形シグマモデルを実現し、フェルミオンが局在するブレーンの横方向次元をコンパクト化することによって現実的な 4 + 1 余剰次元モデルを超弦の枠内で構成し、その理論的・現象論性質を調べて標準模型を超えたヒッグズ後の新物理描像を探求することであった。

3. 研究の方法

(1) 実際に観測される世代構成に非常に近い超対称非線形シグマモデルを E8 x E8 ヘテロティック弦理論の NS-ブレーン上に局在する準南部・ゴールドストーン (準 NG) フェルミオンを用いて実現する方法を平成 25 年度は採用した。

(2) 平成 26 年度以降は、「F 理論」という超弦理論の枠組みを用いれば現実的な超対称シグマモデルがより自然に実現できることが本研究によって明らかになったので、この枠組みを用いた方法に基づいて研究を行った。

4. 研究成果

(1) 「世代統一」(family unification) とは、現在観測されるすべてのクォーク・レプトンは一つの例外群超対称コセットシグマモデルから生じる、という古くからの考え方であり、特に E7/(SU(5) x U(1)<sup>3</sup>) に基づく模型は、ちょうど三世代のクォーク・レプトンを自動的に実現する。これらは「F 理論」という超弦理論の枠組みを使えば自然に実現できることを示した。すなわち、合流 7-ブレーンの特異性がそこで拡大しているような点の近傍には、ブレーンをつなぐ軽いストリング・ジャンクションが局所的に存在し、その特異性が小平分類の III' (E7) 型の際には上記のシグマモデルと対応した超対称多重項が生成されることを初めて指摘した。

SU(5)	10 <sub>1</sub>	10 <sub>2</sub>	10 <sub>3</sub>
			5
		$\bar{5}_1$	$\bar{5}_2$
			$\bar{5}_3$
	U(1) <sub>3</sub>	1 <sub>1</sub>	1 <sub>2</sub>
		U(1) <sub>2</sub>	1 <sub>3</sub>
			U(1) <sub>1</sub>

図 1 E7/(SU(5) x U(1)<sup>3</sup>) 九後・柳田世代統一模型のスペクトラム。ちょうど三世代の SU(5) 多重項が互いに等価でない形で含まれている。

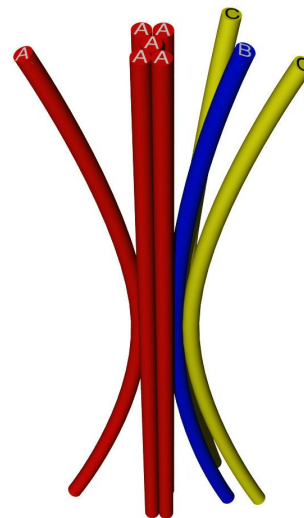


図 2 E7/(SU(5) x U(1)<sup>3</sup>) (九後・柳田模型) に対応する多重特異点の概念図。ブレーンが集まって特異性が上がるところにストリングジャンクションが局在する。

(2) このような幾何学的配位は、E7/(SU(5) x U(1)<sup>3</sup>) シグマモデルに対応するスペクトラムを実現するばかりでなく、自発的に破れた U(1) 荷電をもつスカラー場の期待値により湯川結合を説明するフロガット・ニールセン機構に必要な荷電多重項を内在していることも判明した。この機構を用いて、クォーク・レプトンの湯川階層構造の違いや大きなレプトン混合角をよく説明する不均衡 (lopsided) 型の湯川テクスチャが必然的に導かれることを示した。

(3) 多重特異点における余計に現れるカイラル場の生成のため一見量子異常 (アノマリー) が相殺しなくなるように見える、という問題は、ゲージブレーン上で複数のマターブレーンの接点が発流することにより矛盾なく回避できることを示した。

(4) 6次元理論における構成を、より現実的な4次元理論に拡張し、特にヒルツェブルフ曲面上に楕円ファイバーされたカラビヤウ3-フォルドにコンパクト化されたヘテロティック弦で3世代となる Curio による模型のF双対を一般化されたヒルツェブルフを用いて構成し、ゲージ対称性がSU(5)の場合に完全に分類した。

(5) F理論の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として知られる、ルイエンハの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、またF理論における(1/2)K3ファイバー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双対理論として本質的な役割を果たしていることを示した。この事実はF理論における、特異点とカイラル物質場の生成との関係の理解にも役立つことがわかった。

#### 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8件)

Shun'ya Mizoguchi, Taro Tani, Anomaly-free multiple singularity enhancement in F-theory, Prog Theor Exp Phys, 査読有、2016(7):073B05 巻、2016、1-27

DOI: 10.1093/ptep/ptw087

Naoto Kan, Shun'ya Mizoguchi, On dimensional reduction of magical supergravity theories, Physics Letters B, 査読有、762 巻、2016、177-183

DOI: 10.1016/j.physletb.2016.09.01

Shun'ya Mizoguchi, Tomoki Sakaguchi, Note on three-generation models in heterotic string and F-theory on elliptic Calabi-Yau manifolds over Hirzebruch varieties, Prog Theor Exp Phys, 査読有、2016(10):101B01 巻、2016、1-8

DOI: 10.1093/ptep/ptw142

Shinya Tomizawa, Shun'ya Mizoguchi, New Solution-generation-techniques Using SL(2,R)-duality and General Black Holes, Proceedings of the MG13 Meeting on General Relativity, 査読無、3 巻、2015、1327-1329

DOI: 10.1142/9789814623995\_0162

K.Hinoue, S.Mizoguchi and Y.Yasui, Supersymmetric heterotic solutions via non-SU(3) standard embedding, Phys.Rev.D, 査読有、90(10)巻、2014、106009-1 -7

DOI: 10.1103/PhysRevD.90.106009

S. Mizoguchi, F-theory family unification, Journal of High Energy Physics, 査読有、1407 (2014) 018 巻、2014、1-39

DOI: 10.1007/JHEP07(2014)018

Shinya Tomizawa, Shun'ya Mizoguchi, General Kaluza-Klein black holes with all six independent charges in five-dimensional minimal supergravity, Phys.Rev.D, 査読有、87 巻、2013、024027-1-11

DOI: 10.1103/PhysRevD.87.024027

Shun'ya Mizoguchi, Masaya Yata, Family Unification via Quasi-Nambu-Goldstone Fermions in String Theory, Prog. Theor. Exp. Phys., 査読有、053B01 巻、2013、1-27

DOI: 10.1093/ptep/ptt019

#### [学会発表](計10件)

Shun'ya Mizoguchi, Looijenga's weighted projective space, Mordell-Weil lattice and Yukawa textures from horizontal U(1) symmetries in F-theory, Progress in Quantum Field Theory and String Theory II(招待講演)(国際学会)、2017年03月27日、大阪市立大学(大阪府・大阪市)

谷太郎、溝口俊弥、Tate's algorithm と Looijenga's weighted projective space、日本物理学会2016年秋季大会、2016年09月24日、宮崎大学(宮崎県・宮崎市)

簡直人、溝口俊弥、On Dimensional Reduction of Magical Supergravity Theories、日本物理学会2016年秋季大会、2016年09月21日、宮崎大学(宮崎県・宮崎市)

坂口智樹、溝口俊弥、F理論の3世代模型におけるclassの制限、日本物理学会2016年秋季大会、2016年09月21日、宮崎大学(宮崎県・宮崎市)

谷太郎、溝口俊弥、Anomaly-free Multiple Singularity Enhancement in F-theory、日本物理学会2015年秋季大会、2015年09月28日、大阪市立大学(大阪府・大阪市)

溝口俊弥、F-theory Family Unification 3世代と大レプトン混合角を帰結する幾何学機構とシナリオ、日本物理学会2014年秋季大会、2014年09月21日、佐賀大学(佐賀県・佐賀市)

溝口俊弥、30分で理解するF理論、3rd Workshop on Particle Physics of the Dark Universe(招待講演)、2014年04月19日、東京大学(東京都・文京区)

溝口俊弥、F-theory Family Unification、KEK-TH 2014(招待講演)、2014年02月19日、高エネルギー加速器研究機構(茨城県・つくば市)

樋ノ上和貴、廣岡隆孝、溝口俊弥、安井幸則、例外群E8に基づく素粒子の統一模型II、日本物理学会第69回年次大会、2014年03月27日、東海大学(神奈川県・

平塚市)  
廣岡隆孝、樋ノ上和貴、溝口 俊弥、安井  
幸則、例外群 E8 に基づく素粒子の統一模  
型、日本物理学会 2013 年秋季大会、2013  
年 09 月 23 日、高知大学 (高知県・高知  
市)

〔図書〕(計 0 件)

出願状況 (計 0 件)

取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

ホームページ:

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

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

溝口 俊弥 (MIZOGUCHI, Shun 'ya)

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: 0 0 2 2 2 3 2 3

### (2) 研究分担者

なし

### (3) 連携研究者

なし

### (4) 研究協力者

小林 達夫 (KOBAYASHI, Tatsuo)

北澤 敬章 (KITAAWA, Noriaki)

阪村 豊 (SAKAMURA, Yutaka)