

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 5 月 2 日現在

機関番号：14501
 研究種目：基盤研究（C）
 研究期間：2010～2012
 課題番号：22540281
 研究課題名（和文）余剰次元に基づくカイラルフェルミオン生成の新しい機構と階層性問題の解決
 研究課題名（英文）A new mechanism of production of chiral fermions and a solution to the hierarchy problem based on extra dimensions
 研究代表者
 坂本 真人（SAKAMOTO MAKOTO）
 神戸大学・大学院理学研究科・助教
 研究者番号：30183817

研究成果の概要（和文）：

我々は、5次元ゲージ理論を考察することによって、標準模型のもつ問題点：1)ゲージ対称性の破れとなるヒッグス粒子の質量二乗はなぜ負なのか？ 2)なぜフェルミオンは全てカイラルフェルミオンなのか？ 3)フェルミオン質量の間に大きな階層性があるのはなぜか？ を解決するモデルを構築することに成功した。

研究成果の概要（英文）：

We succeeded to construct a phenomenological model with an extra dimension that solves the problems of the Standard Model: 1) Why is the mass square of Higgs negative? 2) Why are all fermions in the Standard Model chiral fermions? 3) Why is there a mass hierarchy of the fermions?

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	900,000円	270,000円	1,170,000円
2011年度	600,000円	180,000円	780,000円
2012年度	600,000円	180,000円	780,000円
年度			
年度			
総計	2,100,000円	630,000円	2,730,000円

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学、素粒子・原子核・宇宙物理

キーワード：余剰次元、世代数、質量階層性、高次元ゲージ理論

1. 研究開始当初の背景

素粒子理論における標準模型に残された未解決問題

(I) カイラルフェルミオンと世代数問題

(II) ゲージ対称性の破れとゲージ階層性問題

(III) クォーク・レプトン質量の階層性問題

がある。(I)~(III)の問題を解決する試みとして、オービフォールドモデルやゲージ・ヒッグス統一シナリオなど余剰次元モデルが国内外の多くの研究者によって精力的に調べられている。しかしながら、

これらの模型はヒッグス場に対する2次発散の問題は解決しているが、ゲージ階層性問題のもう一つの問題—2つの大きく異なるスケールに対するNaturalness問題—には何も答えていない。例えば、ゲージ・ヒッグス統一シナリオでは、余剰次元の半径 R は必然的に標準模型のスケール ($MW \sim 102\text{GeV}$) をもたねばならないが、重力から決まるはずの余剰次元の半径がなぜ MW のスケールを持つのか全く説明がつかない。また、高次元ゲージ結合定数も MW のスケールを持たねばならず、より基本的と思われる高次元理論のパラメータがなぜ重力のスケール ($MP \sim 10^{19}\text{GeV}$) ではなく標準模型のスケール MW なのか不自然である。更に、これらの研究では世代数問題はほとんど取り上げられることはなく、また(I)~(III)の問題に対して統一的な視点を持った研究は皆無である。

2. 研究の目的

本研究目的は、素粒子理論における標準模型に残された未解決問題

(I) カイラルフェルミオンと世代数問題

(II) ゲージ対称性の破れとゲージ階層性問題

(III) クォーク・レプトン質量の階層性問題

について、余剰次元の観点からこれらの問題の背後に共通する性質を抜き出し統一的な解決を与えることである。

3. 研究の方法

研究目的にも書いたように、我々のこれまでの研究によって本研究課題に対する一通りの基礎的研究を済ませてある。そこで、本研究計画で確実に結果を出すために、一般的な設定で余剰次元模型を取り扱うことは止めて、余剰次元をひとつ持つ5次元理論に限定する。しかし、この設定の中でより広い枠組みを取り扱うために、ブレーンの導入と5次元方向にはワープ因子と呼ばれる座標依存性を持たせることにする。この5次元理論に対して研究目的欄で掲げた研究課題(A)~(D)を実行することになる。研究期間は研究計画を確実に遂行できる3年間とした。

4. 研究成果

(1) 余剰次元のもつ幾何学から、フェルミオ

ンの世代、クォーク質量階層性、小林・益川行列を自然に説明する新しい模型を提案した。我々は余剰次元を線分と仮定し、点状相互作用を持ち込んだ。点状相互作用のある場所で、フェルミオンは余剰次元方向にディリクレ境界条件を満たさねばならないことが示され、その結果、フェルミオンにゼロモードが現れることがわかった。この機構では、フェルミオンの世代数は、ゼロモードの数として説明される。また、この機構は同時に、クォーク間のフレーバー混合を自然に説明することも明らかとなった。フェルミオンの質量階層性については、スカラー場がロビン境界条件を満たすことから、指数関数的な振る舞いをもつ期待値が得られ、その結果、4次元有効湯川相互作用に指数関数的な階層性が表れることが示された。我々の模型は、クォークの世代と質量、CKM行列を実現することが可能であることを、数値的に示すことに成功した。

(2) 余剰次元模型における非自明なヒッグス期待値に基づく新しいCP位相の機構を提案した。ヒッグス場にtwistされた境界条件を余剰次元方向に課すことによって、ヒッグス場の真空期待値の複素位相が余剰次元方向の座標依存性を持つことを見出した。この機構をもちいて、円周を余剰次元にもつ現象論的模型を構築した。この模型は、クォークの世代、質量階層性、CP位相をもつ小林・益川行列を正しく再現することが確かめられた。我々の模型の重要な点は、クォークは1世代分しか導入しておらず世代数をダイナミカルに生じる模型になっていることと、そのため、標準模型とは違って湯川相互作用を通してCP位相を導入することはできないことである。

(3) 我々は標準模型における物質場の世代数を説明する機構を余剰次元模型の立場から提案した。余剰次元はトラス T^d を考え、そこに磁束が通っている状況を考えた。そこに Z_N シフト対称性を導入して、 T^d/Z_N オービフォールドを余剰次元として考察した。この余剰次元模型には、物質場に磁束の量子化数の分だけゼロモードが現れ、それがフェルミオンの世代数を与えることがわかった。我々は、演算子形式と波動関数をもちいた二通りの解析によって、様々な場合を考察し、どのようなオービフォールド模型の場合に、3世代が現れるかの分類を与えることに成功した。この結果から、望ましい湯川構造をもつ現象論的模型の構築が期待出来る。

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 5 件)

① "Quark mass hierarchy and mixing via geometry of extra dimension with point interactions",
Yukihiro Fujimoto, Tomoaki Nagasawa,
Kenji Nishiwaki, Makoto Sakamoto,
査読有り、
Published in PTEP 2013 (2013) 023B07,
DOI: 10.1093/ptep/pts097.

② "Phase Structure of Gauge Theories on an Interval",
Yukihiro Fujimoto, Tomoaki Nagasawa,
Satoshi Ohya, Makoto Sakamoto,
査読有り、
Published in Prog. Theor. Phys. 126 (2011)
841-854,
DOI: 10.1143/PTP.126.841.

③ "Emergent Supersymmetry in Warped Backgrounds",
Tomoaki Nagasawa, Satoshi Ohya, Kazuki Sakamoto, Makoto Sakamoto,
Published in SIGMA 7 (2011)
査読有り、 065,
DOI: 10.3842/SIGMA.2011.065.

④ "Gauge-Higgs Unification in Lifshitz Type Gauge Theory",
Hisaki Hatanaka, Makoto Sakamoto,
Kazunori Takenaga,
査読有り、
Published in Phys. Rev. D84 (2011) 025018,
DOI: 10.1103/PhysRevD.84.025018.

⑤ "Running Boundary Condition",
Satoshi Ohya, Makoto Sakamoto, Motoi Tachibana,
査読有り、
Published in Prog. Theor. Phys. 125 (2011)
225-245,
DOI: 10.1143/PTP.125.225.

[学会発表] (計 5 件)

① "高次元理論における Higgs 場の境界条件と CP 位相",
藤本教寛 (講演者)、
第 68 回日本物理学会年次大会・春季大会、
2013. 03. 26 ~ 2013. 03. 29,
広島大学。

② "Three generations on shifted orbifold with magnetic flux",
三浦貴司 (講演者)、
日本物理学会、
2013 年 3 月 27 日、
広島大学東広島キャンパス。

③ "高次元ゲージ理論における点状相互作用の導入とクォーク/レプトンの世代、質量階層性及び Flavor Mixing について",
藤本教寛 (講演者)、
日本物理学会、
2012. 09. 11 ~ 2012. 09. 14,
京都産業大学。

④ "高次元ゲージ理論の境界条件によるフェルミオンの世代数/質量階層性問題および flavor mixing の解決に向けて",
藤本 教寛 (講演者)、
日本物理学会、
2012 年 3 月 24 日、
関西学院大学。

⑤ "Higgs mechanism without Higgs potential with an extra dimension",
藤本 教寛 (講演者)、
日本物理学会、
2011 年 3 月 28 日、
新潟大学。

[図書] (計 1 件)

① "量子力学から超対称性へ",
坂本真人
サイエンス社
2012 年発行
190 ページ

[その他]
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

坂本 真人 (SAKAMOTO MAKOTO)
神戸大学・大学院理学研究科・助教
研究者番号：30183817

(2) 研究分担者

谷村 省吾 (TANIMURA SHOGO)
名古屋大学・情報科学研究科・教授
研究者番号：90273482

竹永 和典 (TAKENAGA KAZUNORI)
熊本保健科学大学・保健科学部・准教授

研究者番号：50379294

長澤 智明 (NAGASAWA TOMOAKI)
苫小牧工業高等専門学校・その他の部局・
准教授
研究者番号：20435465

(3)連携研究者
()

研究者番号：