

平成30年 4月24日現在

機関番号：14501

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K05055

研究課題名(和文)点状相互作用をもつ余剰次元模型の真空配位に基づくクォーク世代構造の解明

研究課題名(英文)Elucidation of the quark generation structure based on the vacuum configuration of extra dimensional models with point interactions

研究代表者

坂本 真人(sakamoto, makoto)

神戸大学・理学研究科・准教授

研究者番号：30183817

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,400,000円

研究成果の概要(和文)：クォーク・レプトンの世代構造の謎に「クォーク・レプトンの世代問題」がある。この問題を解明するために、余剰次元に点状相互作用をもつ模型を考察した。そこでは、世代数が点状相互作用の数として与えられることが明らかになった。また、点状相互作用をもつ5次元余剰次元模型において、カシミアエネルギーの最小化によって余剰次元のサイズの安定性、および、クォーク・レプトンの質量階層性を導くことに成功した。これまでの模型は、余剰次元のサイズやクォーク・レプトンの質量階層性は手でパラメータを決めていた。我々は、それらのパラメータをカシミアエネルギーを最小化することによって、ダイナミカルに決定することができた。

研究成果の概要(英文)：As the quark and lepton's mystery of the generation structure, there is the "quark/lepton generation problem". In order to elucidate this problem, we considered a model with point-like interactions in an extra dimension. It became clear that the number of generations is given as the number of point interactions. We succeeded in deriving the stability of the size of the extra dimension and the mass hierarchy of the quark/lepton by minimizing the Casimir energy in a five-dimensional extra dimensional model having point-like interactions. Although in the previous models, the parameters of the size of the extra dimension and the mass hierarchy of quark/lepton have been determined by hand, we have found that these parameters can be determined dynamically by minimizing the Casimir energy.

研究分野：素粒子理論

キーワード：クォーク・レプトン 世代構造 世代数 フェルミオン質量階層性 余剰次元 点状相互作用 ニュートリノ質量 カシミアエネルギー

1. 研究開始当初の背景

素粒子物理の標準模型を越えた理論として、オービフォールド模型やゲージ・ヒッグス統一模型など余剰次元をもつ高次元模型が、国内外の多くの研究者によって調べられている。しかし、世代の起源を説明する模型は、球面やトーラス上に一様磁場のかかった余剰次元模型など数が限られている。これらの模型では磁束量子数が世代数を与える。

先行研究の問題点：

オービフォールド模型やゲージ・ヒッグス統一模型は、世代の起源について何も答えられない。また、フェルミオン質量階層性を導くことはできるが、理論のパラメータを手で恣意的に調整しなければならない。磁場中の余剰次元模型では真空配位の問題が生じる。それは、磁場が存在する状態は明らかに磁場のない場合よりもエネルギーが高いのに、なぜ真空状態として選ばれたのか？という問題である。

2. 研究の目的

以下の(A)～(C)の課題を3年間で遂行することが本研究の目的である。

(A) 点状相互作用をもつ余剰次元模型におけるカシミアエネルギーの計算：

高次元理論において可能な点状相互作用の分類は、我々の先行研究で行われた。初めの課題は、それらの点状相互作用をもつ余剰次元模型に対して、スカラー場、スピノル場、ゲージ場ごとにカシミアエネルギーへの寄与を計算することである。

(B) カシミアエネルギーの最小化と点状相互作用のパラメータの決定：

我々の模型で有効ポテンシャルを計算すると、点状相互作用の位置や数、種類の関数としてカシミアエネルギーが求まる。カシミアエネルギーは真空エネルギーに対する量子補正なので、それを最小化する配位が真空配位である。したがって、真空配位を求めることによって、点状相互作用のパラメータがダイナミカルに決まることになる。

(C) 点状相互作用をもつ余剰次元模型の真空配位に基づくクォーク世代構造の解明：

最後の課題は、現象論的余剰次元模型、あるいは、それを拡張した模型で真空配位を求め、クォークの質量や世代混合(CKM行列)の実験値を定性的に再現できるか、さらには、世代数を正しく与えるかを確かめることである。

クォークは点状相互作用の周りに局在化するので、もし点状相互作用の間隔がほぼ等間隔であれば、クォークの指数関数的質量階層性を定性的に説明できる。また、等間隔からのズレがクォーク間の世代混合に対応することが、我々の模型ではわかっている。我々はtoyモデルで予備的計算を行

った。そのモデルでは、点状相互作用の間隔が等間隔に並ぶ場合が最もエネルギーの低い真空配位であることがわかった。この結果は、我々のアプローチをもう少し前に進めるだけの価値があることを示唆しているように思える。

3. 研究の方法

本研究計画は、申請者のこれまでの研究に基づいて立案されている。本研究課題に対する一通りの基礎的研究は済ませてあるので、研究期間を3年間とした。初年度は主に点状相互作用をもつ余剰次元模型のカシミアエネルギーの計算に費やされる(課題(A)点状相互作用をもつ余剰次元模型におけるカシミアエネルギーの計算)。この結果を基に、カシミアエネルギーを最小化する真空配位として点状相互作用のパラメータを決定する(課題(B)カシミアエネルギーの最小化と点状相互作用のパラメータの決定)。点状相互作用のパラメータ、例えば、位置が決まれば、この余剰次元模型からクォークの質量や世代混合(CKM行列)が計算できる。最終課題は、研究目的欄で述べたクォークの世代構造が、点状相互作用をもつ余剰次元模型からダイナミカルに説明できるかどうかを考察すること(課題(C)点状相互作用をもつ余剰次元模型の真空配位に基づくクォーク世代構造の解明)である。課題(B)は課題(A)完了後の初年度後半から最終年度にかけて、課題(C)は次年度から実行される予定である。

4. 研究成果

(1) ニュートリノ質量の生成機構の研究：
ニュートリノの振動実験で、ニュートリノに質量があることが確定的になった。しかしながら、その質量は他のレプトンやクォークに比べて桁外れに小さい。ニュートリノ以外のレプトンとクォークはヒッグス粒子から質量を獲得すると考えられるが、ニュートリノはヒッグス粒子から質量を得ると考えるのは非常に不自然である。そこで、我々は、ニュートリノに小さな質量を与える新しい機構を提案し、実際に実験と矛盾しないニュートリノ質量を具体的模型を使って与えることに成功した。

(2) 磁束をもつオービフォールド模型の研究：

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d次元トーラス T^d を考え、そこに磁束が通っている状況考えた。そこに Z_N シフト、あるいは Z_N 回転対称性を導入して、 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。また、演算子形式による新しい解析方法を発展させ、三世代模型の構築に非常に有用であることが示された。

(3) 6次元ディラック作用に基づくクォーク・レプトンの世代数問題と質量階層性問題の解決：

6次元のディラック作用に基づいて、フェルミオンの世代、クォーク質量階層性、ニュートリノの非常に軽い質量起源、小林・益川行列、牧・中川・坂田行列等を自然に説明する新しい模型の可能性を詳しく調べた。我々の解析によって、6次元ディラック作用の理論で、余剰次元を長方形にとることによって、クォーク・レプトンに対して2世代を出す理論が得られることがわかった。また、質量階層性問題の解決の可能性もあることも明らかになった。ただし、この模型では世代数の数が2までしか出せないため、標準模型において観測されている3世代を出すためには、6次元以上の高次元ディラック作用を考える必要があることがわかった。また、この解析によって、6次元ディラック作用には、量子力学的超対称性が4次元スペクトラムに隠れていることが我々の研究によって明らかになった。この対称性は、4次元スペクトラムの構造を決める上で非常に重要であることが示唆されている。ここでの解析を6次元以上に拡張することが今後の目標である。

(4) 6次元時空理論における世代の導出：
研究内容：6次元時空において余剰2次元空間を長方形に設定した。可能な境界条件を分析した結果、4次元有効理論においてスピン2分の1を持つ物質場の世代構造が現れる機構を発見した。

(5) カシミアエネルギーの最小化によるクォーク・レプトン質量階層性問題のダイナミカルな解決：

点状相互作用をもつ5次元余剰次元模型において、カシミアエネルギーの最小化によって余剰次元のサイズ、および、クォーク・レプトンの質量階層性を導くことに成功した。これまでの模型は、余剰次元のサイズやクォーク・レプトンの質量階層性は手でパラメータを決めていた。我々は、それらのパラメータをカシミアエネルギーを最小化することによって、ダイナミカルに決定することができた。

(6) 超対称格子理論の研究：

超対称性理論の非摂動論的效果を調べるために、超対称性を格子上に乗せることが試みられた。ところが、格子超対称性理論は25年以上にわたって多くの研究者らによって研究されてきたにもかかわらず、未だに満足な形での定式化には誰も成功していない。その理由は我々によって明らかにされ、ライプニッツ則を満たす差分演算子は局所性の要請を課す限り不可能であること(No-Go定理)が示された。我々はその結果をもとに、ライプニッツ則に代わる格子上の巡回ライプニッツ則を提唱し、新しい超対称構造をもつ超対称量子力学格子模型を構築することに成功した。また、我々が発見した格子上でのコホモロジーを使って、超対称性理論の最も重要な特徴である、非くりこみ定理を格子上で初めて示すことに成功した。

(7) 有限温度におけるゲージ場の時間成分の起源：

有限温度のゲージ理論では、通常、経路積分表示を使ってナイーブに書き下すことが多い。しかしながら、演算子形式から、きちんと導こうとすると、ゲージ場の時間成分がどこから現れたのか、わからないという問題が生じる。これは、ゲージ場の時間成分は非物理的な自由度であるため、量子化を行うと、系から取り除かれてしまうからである。我々は、ゲージ場の量子化を演算子形式で行い、有限温度の経路積分表示でのゲージ場の時間成分の起源を明らかにした。

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9件)

1. Sakamoto Makoto, Takenaga Kazunori, Polyakov loop in a non-covariant operator formalism, Progress of Theoretical and Experimental Physics, 043B02, 2017, DOI: 10.1093/ptep/ptx026、査読有り

2. Tsuyoshi Houri, Makoto Sakamoto, Kentaro Tatsumi, Spectral intertwining relations in exactly solvable quantum-mechanical systems, Progress of Theoretical and Experimental Physics, 063A01, 2017, DOI: 10.1093/ptep/ptx074、査読有り

3. Kato Mitsuhiro, Sakamoto Makoto, So Hiroto, Non-renormalization theorem in a lattice supersymmetric theory and the cyclic Leibniz rule, Progress of

Theoretical and Experimental Physics、043B09、2017、DOI: 10.1093/ptep/ptx026、査読有り

4. Yukihiro Fujimoto, Kouhei Hasegawa, Kenji Nishiwaki, Makoto Sakamoto, Kentaro Tatsumi, Supersymmetry in the 6D Dirac action, Progress of Theoretical and Experimental Physics、073B03、2017、DOI: 10.1093/ptep/ptx0926、査読有り

5. Yukihiro Fujimoto, Kouhei Hasegawa, Kenji Nishiwaki, Makoto Sakamoto, Kentaro Tatsumi, 6d Dirac fermion on a rectangle; scrutinizing boundary conditions, mode functions and spectrum, Nuclear Physics、B922 (2017) 186-225、DOI: 10.1016/j.nuclphysb.2017.06.024、査読有り

6. Yukihiro Fujimoto, Tatsuo Kobayashi, Kenji Nishiwaki, Makoto Sakamoto, Yoshiyuki Tatsuta, Comprehensive analysis of Yukawa hierarchies on T2/ZN with magnetic fluxes, Physical Review D、D94 (2016) no.3, 035031、DOI: 10.1103/PhysRevD.94.035031、査読有り

7. Yukihiro Fujimoto, K. Hasegawa, Tomoaki Nagasawa, Kenji Nishiwaki, Makoto Sakamoto, Kentaro Tatsumi, Active Dirac neutrinos via SU(2)L doublets in 5d、JHEP、1606 (2016) 178、DOI: 10.1007/JHEP06(2016)178、査読有り

8. Tomo-hiro Abe, Yukihiro Fujimoto, Tatsuo Kobayashi, Takashi Miura, Kenji Nishiwaki, Makoto Sakamoto, Yoshiyuki Tatsuta、Classification of three-generation models on magnetized orbifolds, Nuclear Physics、B894 (2015) 374-406、DOI: 10.1016/j.nuclphysb.2015.03.004、査読有り

9. Yukihiro Fujimoto, Kenji Nishiwaki, Makoto Sakamoto, Ryo Takahashi、Realization of the Lepton Flavor Structure from Point Interactions、EPJ Web Conference、95 (2015) 04022、DOI: 10.1051/epjconf/20159504022、査読有り

[学会発表](計 17 件)

1. 藤本教寛、Dynamical generation of fermion mass hierarchy on an interval、Strings and Fields 2017、2017.8.10、基礎物理学研究所(京都市)

2. Kenji Nishiwaki、Magnetized extra dimensions generate quark flavor structure、the 21th Regular Meeting of New Higgs Working Group、2017.12.23、Osaka University (Osaka)

3. 上場一慶、高次元ディラック場における拡張された量子力学的超対称性、日本物理学会、2018.3.22、東京理科大学(千葉県)

4. 巽健太郎、高次元フェルミオンの境界条件の分類とモード関数の決定、日本物理学会、2017.3.20、大阪大学(大阪市)

5. 竹永和典、物理的演算子によるポリヤコフループの構成、日本物理学会、2017.3.20、大阪大学(大阪市)

6. 宝利剛、Spacetime symmetries and Eisenhart lift of Schrodinger equations、日本物理学会、2017.3.20、大阪大学(大阪市)

7. 長谷川耕平、Toward a solution to fermion generation problem from 6D space-time with a suitable boundary condition、Strings and Fields 2016、2016.8.8、基礎物理学研究所(京都市)

8. 巽健太郎、6次元フェルミオンの境界条件と質量スペクトラムの解析、日本物理学会、2016.9.24、宮崎大学(宮崎市)

9. 藤本教寛、6次元フェルミオンの境界条件と質量スペクトラムに潜む超対称量子力学構造、日本物理学会、2016.9.24、宮崎大学(宮崎市)

10. 巽健太郎、Hidden quantum mechanical supersymmetry in 6D fermion system with boundary、Strings and Fields 2016、2016.8.9、基礎物理学研究所(京都市)

11. Makoto Sakamoto、Cyclic Leibniz Rule, Cohomology and Non-renormalization Theorem in Lattice Supersymmetry、SUSY 2016、2016.7.7、The University of Melbourne (Australia)

12. 加藤光裕、Cohomological property of CLR-realized supersymmetric quantum mechanics on lattice、日本物理学会、2016.3.22、東北学院大学(仙台市)

13. 長谷川耕平、分割されたランドール・サンドラム時空による電弱スケールとニュートリノ質量スケールの導出、日本物理学会、2015.9.25、大阪市立大学(大阪市)

14. 巽健太郎、余剰次元に基づくディラック型ニュートリノ質量の生成機構、日本物理学会、2015.9.25、大阪市立大学(大阪市)

15. 巽健太郎、余剰次元に基づくディラック型ニュートリノ質量の生成機構、中部夏の学校 2015、2015.9.2、東海大学山中湖セミナーハウス(山梨県)

16. 藤本教寛、Electroweak and Neutrino mass scales from a Planck scale Extra Dimension、素粒子物理学の進展 2015、2015.9.16、基礎物理学研究所(京都市)

17. 藤本教寛、Neutrino mass scale from an extra dimension、KEK-PH 2016、2016.2.12、高エネルギー加速器研究機構(つくば市)

〔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：
出願年月日：
国内外の別：

取得状況(計0件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

〔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・准教授
研究者番号：30183817

(2) 研究分担者

竹永 和典 (Takenaga Kazunori)
熊本保健科学大学・保健科学部・教授
研究者番号：50379294

(3) 連携研究者

()
研究者番号：

(4) 研究協力者
()