

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 5 日現在

機関番号：13601

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2010～2014

課題番号：22540272

研究課題名(和文)時空構造の拡張による素粒子の基礎理論の探究

研究課題名(英文) Research on fundamental theory of elementary particles based on an extension of space-time structure

研究代表者

川村 嘉春 (KAWAMURA, Yoshiharu)

信州大学・学術研究院理学系・教授

研究者番号：10224859

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,700,000円

研究成果の概要(和文)：オービフォールドを余剰空間として含む6次元ゲージ理論に基づいて3世代の物質粒子が統一的に記述されるモデルを多数構築した。一般的な超対称性ゲージ理論に基づいてD項の大きさに関する上限(不等式)を導出した。標準モデルを超える物理の可能性として、テラスケールに新粒子が存在しプランクスケールで力の大統一が実現するモデルを提案した。また、ヒッグス粒子の質量の量子補正に関する「2次発散の問題」に対して、有効的な場の量子論に究極の理論の特徴を反映させた解決法を提案した。

研究成果の概要(英文)：We construct many models to unify three generations of quarks and leptons based on the gauge theory on 6-dimensional space-time including an orbifold as an extra space. We study the magnitude of D-component in a generic supersymmetric gauge field theory and obtain inequalities relating F and D-components. We propose a model to realize the unification of gauge couplings at the Planck scale in the presence of extra particles around the terascale, as a physics beyond the standard model. We propose a new solution to the quadratic divergence problem concerning the Higgs boson mass, using the idea that unnaturalness would be improved if features of an ultimate theory are taken in.

研究分野：素粒子物理学

キーワード：余剰次元 素粒子 統一理論 世代構造 超対称性 ヒッグス粒子

1. 研究開始当初の背景

素粒子の標準模型を超える物理の探究は極めて重要な課題の1つで、「超対称性」、「力の大統一」、「余剰次元」に基づく理論の構築および超弦理論・M理論に基づく理論の導出が盛んに行われている。基礎理論に基づいて、素粒子や宇宙に関する様々な謎が解明される可能性がある。

2. 研究の目的

本研究の目的は時空構造の拡張や未知の概念の導入により標準模型を超える素粒子の基礎理論の特徴を暴き出し、それを基にして素粒子や宇宙に関する様々な謎の解明に挑むことである。

3. 研究の方法

(1) 余剰次元に基づいて「世代の統合」を実現するモデルを構築し、標準模型における世代構造の起源に迫る。

(2) 余剰次元に基づいて「インフレーション」を含む宇宙の起源に迫る。

(3) 「超対称性」、「力の大統一」、「余剰次元」などを駆使して、様々な観点から標準模型を超える物理について探求する。

(4) 未知の概念に基づいてヒッグス粒子の質量の量子補正に関する「2次発散の問題」を再考し、基礎理論の構造に迫る。

4. 研究成果

(1) オービフォールドを余剰次元として含むSU(N)ゲージ群を有する6次元時空上のゲージ理論に基づいて標準模型の3世代の物質粒子(クォーク・レプトン)を統一的に記述するモデルが多数存在することを示し、その分類を行った。結果の一部を表1に記載する。

	T^2/Z_2	T^2/Z_3	T^2/Z_4	T^2/Z_6
SU(8)
SU(9)	[9,3]:32	...	[9,3]:8	[9,3]:8 [9,4]:32
SU(10)	[10,3]:80 [10,4]:108
SU(11)	[11,3]:80 [11,4]:80	[11,4]:80	[11,3]:20 [11,4]:20	[11,3]:84 [11,4]:144 [11,5]:156
SU(12)	[12,3]:120	[12,3]:80	[12,4]:88 [12,6]:240	[12,3]:392 [12,4]:120 [12,5]:72 [12,6]:552
SU(13)	[13,3]:144	...	[13,4]:40	[13,3]:712 [13,4]:88 [13,5]:140 [13,6]:200

表1

表1において、 T^2/Z_k は2次元オービフォールドを、 $[N, k]$ は6次元フェルミオンのSU(N)ゲージ群のもとでの表現を、その隣の数に3世代の物質粒子を導くモデルの数を表す。(詳しくは[雑誌論文]を参照)

以前に遂行した5次元時空上のゲージ理論に基づく解析では、標準模型の3世代の物質粒子を完全に再現するようなモデルを導出できなかったことを考慮すれば、特記すべき成果と考えられる。

また、これらのモデル(Orbifold family unification models)に共通する特徴の一つである「世代数は(標準模型のゲージ群を壊さないような)ウィルソンライン位相に依存しない」という性質に着目し、その理由を理論的に探究した。その結果、これらのモデルの背後に余剰次元に関する量子力学的超対称性が潜んでいて、世代数をウィッテン指数の対応物として捉えることができた。モデルの性質をより詳しく追及することにより、世代の起源に迫れる可能性がある。

さらに、高次元のリフシッツ型ゲージ理論に基づいて、フロガット・ニールセン機構に類似した機構を通じて物質粒子に関する質量の階層性や世代間混合が生成される可能性があることを示した。(詳しくは[雑誌論文]を参照)

(2) ゲージ場およびフェルミオン場を含む5次元時空上の重力理論に基づいて理論に含まれる樹木レベルで質量がゼロの2種類のスカラー場(レディオン、ウィルソンライン位相)に関する有効ポテンシャルを導出し、その安定性を調べた。その結果、ポテンシャルが最小値を取る場の空間上でレディオンおよびウィルソンライン位相の双方が有限の真空期待値と質量を獲得することがわかった。典型的なポテンシャルの概形を図1に記載する。

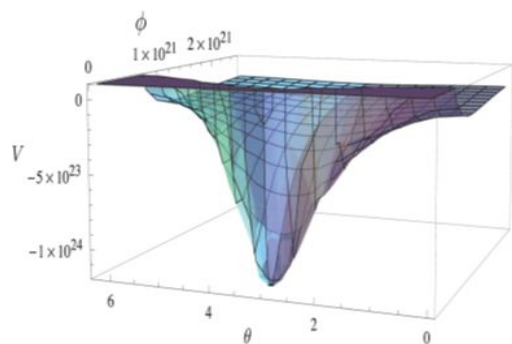


図1

図1において、 ϕ はレディオンを、 θ はウィルソンライン位相を表す。その結果、得られた有効ポテンシャルがインフレーションの引き金となるインフラトンポテンシャルの役割を果たす可能性があることを指摘した。(詳しくは[雑誌論文]を参照)

実際に、ウィルソンライン位相をインフラトンの主成分とした場合、宇宙論的な観測結果と整合するインフレーションが起こることがわかった。(この研究結果は arXiv:1504.06905 に発表済)

(3) 以下のような3種類の研究を遂行した。

一般的な超対称性ゲージ理論に基づき D 項の大きさに関する上限(上限を示す不等式)を導出した。多くの場合、F 項の方が D 項よりも大きく、F 項が超対称性の破れに関して主導権を握っていることが確認された。得られた不等式は超対称性の破れの機構の解明および現実的なモデルの構築に際してヒントや No Go 定理のような制約を与えるため、有用である。(詳しくは[雑誌論文]を参照)

5次元および6次元時空上の E_6 ゲージ対称性を有する超対称性大統一理論に基づいて、検証可能な現象論的特徴を調べた。具体的には、標準モデルの粒子のスーパーパートナーの質量に関する和則を導出した。和則はモデルに特有の形をしているため、将来、実験で検証される可能性がある。(詳しくは[雑誌論文]を参照)

テラスケールに新粒子が存在し、それらを含めて拡張された標準モデルがプランクスケールまで有効であるという仮定に基づいて、プランクスケールで「超対称性」が復活し、「力の大統一」が実現するモデルを提案した。このモデルは予言能力を兼ね備え、将来、実験で検証される可能性がある。(詳しくは[雑誌論文]を参照)

(4) 標準モデルがプランクスケールまで有効であるという仮定に基づいて有効理論の観点からヒッグス粒子の質量の量子補正に関する「2次発散の問題」について再考した。基礎理論の特徴を有効理論に反映させることにより、問題が解決されるという予想のもとで、標準モデルの背後に隠れた対称性として量子補正の計算に現れる積分領域に関する「双対性」を要請した。その結果、量子補正に現れる2次発散は双対変換のもとで不変ではなく、見かけのもの・非物理的なものと解釈され2次発散の問題が解決される可能性を指摘した。さらに、双対性に基づく量子補正の計算処方に関する提案を行った。(詳しくは[雑誌論文]を参照)

このような双対性の応用は斬新で論文の引用件数が20件以上あることからわかるように標準モデルを超える物理の探究に対して、少なからずインパクトを与えた。

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14件)

Yugo Abe, Takeo Inami, Yoshiharu Kawamura, Yoji Koyama, “Radion

stabilization in the presence of a Wilson line phase”, Progress of Theoretical Experimental Physics 査読有 **2014**, 073B04(10 pages), 2014, DOI:10.1093/ptep/ptu097

Yoshiharu Kawamura, “Naturalness, conformal symmetry, and duality”, Progress of Theoretical Experimental Physics 査読有 **2013**, 113B04(13 pages), 2013, DOI:10.1093/ptep/ptt098

Yuhei Goto, Yoshiharu Kawamura, Takashi Miura, “Orbifold family unification on six dimensions”, Physical Review D 査読有 **88**, 055016(15 pages), 2013, DOI:10.1103/PhysRevD.88.055016

Yoshiharu Kawamura, “Terascale remnants of unification and supersymmetry at the Planck scale”, Progress of Theoretical Experimental Physics 査読有 **2013**, 081B01(7 pages), 2013, DOI:10.1093/ptep/ptt055

Yoshiharu Kawamura, Takashi Miura, “Classification of standard model particles in E_6 orbifold grand unified theories”, International Journal of Modern Physics A 査読有 **28**, 1350055(20 pages), 2013, DOI:10.1142/S0217751X13500553

Yoshiharu Kawamura, “Limitation on Magnitude of D-components”, Progress of Theoretical Physics 査読有 **125**, 509 - 520, 2011

Kunio Kaneta, Yoshiharu Kawamura, “Fermion mass hierarchy in Lifshitz type gauge theory”, Modern Physics Letters A 査読有 **25**, 1613 - 1623, 2010, DOI:10.1142/S021773231003327X

[学会発表](計20件)

Yoshiharu Kawamura, “Conjectures on physics beyond the standard model”, Workshop on geometry, extra dimensions and string phenomenology in Miyazaki 2014.11.5 宮崎(招待講演)

川村嘉春, “力の統一と余剰次元に基づく世代の統合”, KEK 理論研究会 2013 - 超弦理論から現象論への新たな展望 - 2013.3.13 高エネルギー加速器研究機構(招待講演)

Yoshiharu Kawamura, “SUSY breaking from exotic $U(1)$ ”, International Workshop “GUT2012” 2012.3.16 京都大学基礎物理学研究所(招待講演)

Yoshiharu Kawamura, “Soft SUSY breaking masses from dynamical rearrangement”,

International Workshop “The Standard Model and The Origin of Higgs”
2012.3.13 神戸大学 (招待講演)
Yoshiharu Kawamura,
“Orbifold GUTs and related topics”,
International Workshop “Extra Dimensions in the Era of the LHC”
2011.12.12 大阪大学 (招待講演)
Yoshiharu Kawamura,
“Orbifold GUTs and related topics”,
International Conference “StringVac 2011” 2011.9.5 釜山 (韓国) (招待講演)

[図書] (計 1 件)

川村嘉春, 裳華房 “ 相对論的量子力学 ”,
2012, 353 頁

6 . 研究組織

(1) 研究代表者

川村 嘉春 (KAWAMURA, Yoshiharu)
信州大学・学術研究院理学系・教授
研究者番号 : 10224859