様式 C-19

科学研究費補助金研究成果報告書

平成２２年　６月２日現在

研究種目：基盤研究（C）
研究期間：2006 ～ 2009
課題番号：18540259
研究課題名（和文）　余剰次元に基づく素粒子の統一理論の探究

研究課題名（英文）　Research on unified theory of elementary particles based on extra dimensions

研究代表者
川村　嘉春　（KAWAMURA YOSHIHARU）
信州大学・理学部・教授
研究者番号：10224859

研究成果の概要（和文）：オービフォールドを余剰次元として含む高次元時空上で定義されたゲージ場の理論に基づき、1 種類の粒子から 3 世代の物質粒子の大部分が導出される模型を提案した。また、様々な 2 次元オービフォールド上のゲージ理論に関して、ゲージ対称性に関する同値関係を用いてバルク場の境界条件の分類を行った。さらに，高次元時空上のゲージ理論に基づいて「Strong CP の問題」について，リフシッツ型のゲージ理論に基づいて「陽子崩壊の問題」について再考した。

研究成果の概要（英文）：We propose family unification models where most particles of three families of matters are derived from a single bulk field in gauge theory on higher-dimensional space-time including a space called orbifold. The classification of boundary conditions for bulk fields on various two-dimensional orbifolds is carried out using the gauge equivalence relations. Furthermore we reconsider the strong CP problem based on a gauge theory on a higher-dimensional space-time and the proton decay problem based on a Lifshitz type gauge theory.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合　計
２００６年度	700,000	0	700,000
２００７年度	600,000	180,000	780,000
２００８年度	600,000	180,000	780,000
２００９年度	700,000	210,000	910,000
年度			
総　計	2,600,000	570,000	3,170,000

研究分野：素粒子物理学
科研費の分科・細目：物理学，素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理
キーワード：余剰次元，素粒子，統一理論，超対称性，超弦理論

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である。標準模型を超える物理として有望なのは「超対称性」と「力の大統一」である。また、超弦理論や M 理論に基づく現実的な理論の探究も素粒子や宇宙に関する謎を解き明かす上で重要である。

２．研究の目的

本研究の目的は、高次元時空に基づいて素

粒子の性質や法則を解明することにより標準模型を超える現実的な理論を発見し、宇宙の謎を解き明かすことである。

３．研究の方法

（１）高次元時空上の統一理論から３世代の物質粒子を導出する。
（２）高次元時空上のゲージ理論から Strong CP 問題の解決を図る。
（３）高次元時空上の統一理論から標準模型や４次元時空（宇宙の構造）の起源に迫る。

４．研究成果

研究計画（１）については、Z_2 オービフォールドを含む５次元時空上の SU(N)ゲージ理論に基づき５次元時空内に存在する SU(N)群の１種類の多重項から素粒子の標準模型に存在する３世代の物質粒子の大部分が導出される模型（Orbifold Family Unification Models）を提案した。具体例として、S^1/Z_2 を余剰空間として含む５次元上の SU(9)ゲージ理論において、１つの多重項[9,6]から SU(5)大統一理論における３世代の物質粒子

Representation	$(-1)^k\eta_k$	$(-1)^k\eta'_k$	$n_{\bar{d}}$	n_l	$n_{\bar{u}}$	$n_{\bar{e}}$	n_q	$n_{\bar{\nu}}$
[9, 1]	+1	+1	1	0	0	0	0	1
	+1	−1	0	1	0	0	0	3
[9, 2]	+1	+1	1	3	1	1	0	3
	+1	−1	3	1	0	0	1	3
[9, 3]	+1	+1	3	3	2	2	3	3
	+1	−1	3	3	3	3	2	1
[9, 4]	+1	+1	4	1	4	4	6	0
	+1	−1	1	4	6	6	4	1
[9, 5]	+1	+1	1	4	6	6	4	1
	+1	−1	4	1	4	4	6	0
[9, 6]	+1	+1	3	3	3	3	2	1
	+1	−1	3	3	2	2	3	3
[9, 7]	+1	+1	3	1	0	0	1	3
	+1	−1	1	3	1	1	0	3
[9, 8]	+1	+1	0	1	0	0	0	3
	+1	−1	1	0	0	0	0	1

が導かれる。また、SU(9)ゲージ対称性が標準模型のゲージ対称性 SU(3)×SU(2)×U(1)に直接壊れた場合、１つの多重項[9,k]から次の表１のようなフレーバーを持つ粒子が出現する。[9,6]から３世代の物質粒子の大部分が導出できることが分かる。

表１

さらに、このような３世代の物質粒子の創生が正しいかどうかを検証する手段の提案も行った。具体的には、スーパーパートナーおよび標準模型の粒子の質量の間の関係式（質量に関する和則）を様々な模型について導出した。一例として、[9,3]から導かれた物質粒子のスーパーパートナーの質量に関する和則を表２に列挙した。多くの場合、質量に関する和則は模型に特有の形をしていて、近い将来、スーパーパートナーを発見しその質量や結合定数を精密に測定し、その値を使って質量に関する和則をチェックすることにより、３世代の物質粒子の創生の検証・模型の取捨選択および余剰次元の構造の解明が可能になると考えられる。研究のインパクトとしては、例えば、超対称性の破れの

rep.	(p,q,r,s)	sfermion mass relations
	(3,2,4,0)	$9\sum_{\alpha=1}^{4} {m^{(\alpha,1)}_{(1,1,1)}}^2 = 5\sum_{\alpha=1}^{6} {m^{(\alpha,1)}_{(1,0,2)}}^2 + 6{m^{(1,1)}_{(1,2,0)}}^2$, ${m^{(1,1)}_{(1,1,1)}}^2 - {m^{(2,1)}_{(1,1,1)}}^2 = {m^{(4,1)}_{(1,0,2)}}^2 - {m^{(2,1)}_{(1,0,2)}}^2 = {m^{(5,1)}_{(1,0,2)}}^2 - {m^{(3,1)}_{(1,0,2)}}^2$, ${m^{(1,1)}_{(1,1,1)}}^2 - {m^{(3,1)}_{(1,1,1)}}^2 = {m^{(4,1)}_{(1,0,2)}}^2 - {m^{(1,1)}_{(1,0,2)}}^2 = {m^{(6,1)}_{(1,0,2)}}^2 - {m^{(3,1)}_{(1,0,2)}}^2$, ${m^{(1,1)}_{(1,1,1)}}^2 - {m^{(4,1)}_{(1,1,1)}}^2 = {m^{(5,1)}_{(1,0,2)}}^2 - {m^{(1,1)}_{(1,0,2)}}^2$
	(3,2,3,1)	$\sum_{\alpha=1}^{3} {m^{(\alpha,1)}_{(1,0,2)}}^2 + \sum_{\alpha=1}^{3} {m^{(\alpha,1)}_{(1,1,1)}}^2 = \sum_{\alpha=1}^{3} {m^{(\alpha,1)}_{(0,1,1)}}^2 + 3{m^{(1,1)}_{(2,0,0)}}^2$, $\sum_{\alpha=1}^{3} {m^{(\alpha,1)}_{(1,0,2)}}^2 + 4\sum_{\alpha=1}^{3} {m^{(\alpha,1)}_{(0,1,1)}}^2 + 3{m^{(1,1)}_{(1,2,0)}}^2 = 6\sum_{\alpha=1}^{3} {m^{(\alpha,1)}_{(1,1,1)}}^2$, ${m^{(1,1)}_{(1,1,1)}}^2 - {m^{(2,1)}_{(1,1,1)}}^2 = {m^{(3,1)}_{(1,0,2)}}^2 - {m^{(2,1)}_{(1,0,2)}}^2 = {m^{(2,1)}_{(0,1,1)}}^2 - {m^{(1,1)}_{(0,1,1)}}^2$, ${m^{(1,1)}_{(1,1,1)}}^2 - {m^{(3,1)}_{(1,1,1)}}^2 = {m^{(3,1)}_{(1,0,2)}}^2 - {m^{(1,1)}_{(1,0,2)}}^2 = {m^{(3,1)}_{(0,1,1)}}^2 - {m^{(1,1)}_{(0,1,1)}}^2$
[9, 3]	(3,2,2,2)	${m^{(1,1)}_{(1,0,2)}}^2 + \sum_{\alpha=1}^{2} {m^{(\alpha,1)}_{(1,1,1)}}^2 = {m^{(1,1)}_{(1,0,0)}}^2 + \sum_{\beta=1}^{2} {m^{(1,\beta)}_{(2,0,0)}}^2$, $3\left(\sum_{\alpha=1}^{2} {m^{(\alpha,1)}_{(1,1,1)}}^2 + \sum_{\beta=1}^{2} {m^{(1,\beta)}_{(2,0,0)}}^2\right) = 2{m^{(1,1)}_{(1,2,0)}}^2 + 5\left({m^{(1,1)}_{(1,0,0)}}^2 + {m^{(1,1)}_{(1,0,2)}}^2\right)$, $2{m^{(1,1)}_{(1,0,0)}}^2 + 2{m^{(1,1)}_{(1,0,2)}}^2 = \sum_{\alpha=1}^{2}\sum_{\beta=1}^{2} {m^{(\alpha,\beta)}_{(0,1,1)}}^2$, ${m^{(1,1)}_{(1,1,1)}}^2 - {m^{(2,1)}_{(1,1,1)}}^2 = {m^{(2,1)}_{(0,1,1)}}^2 - {m^{(1,1)}_{(0,1,1)}}^2 = {m^{(2,2)}_{(0,1,1)}}^2 - {m^{(1,2)}_{(0,1,1)}}^2$, ${m^{(1,1)}_{(2,0,0)}}^2 - {m^{(1,2)}_{(2,0,0)}}^2 = {m^{(1,2)}_{(0,1,1)}}^2 - {m^{(1,1)}_{(0,1,1)}}^2$
	(3,2,1,3)	$\sum_{\beta=1}^{3} {m^{(1,\beta)}_{(1,0,0)}}^2 + \sum_{\beta=1}^{3} {m^{(1,\beta)}_{(2,0,0)}}^2 = \sum_{\beta=1}^{3} {m^{(1,\beta)}_{(0,1,1)}}^2 + 3{m^{(1,1)}_{(1,1,1)}}^2$, $\sum_{\beta=1}^{3} {m^{(1,\beta)}_{(1,0,0)}}^2 + 4\sum_{\beta=1}^{3} {m^{(1,\beta)}_{(0,1,1)}}^2 + 3{m^{(1,1)}_{(1,2,0)}}^2 = 6\sum_{\beta=1}^{3} {m^{(1,\beta)}_{(2,0,0)}}^2$, ${m^{(1,1)}_{(2,0,0)}}^2 - {m^{(1,2)}_{(2,0,0)}}^2 = {m^{(1,3)}_{(1,0,0)}}^2 - {m^{(1,2)}_{(1,0,0)}}^2 = {m^{(1,2)}_{(0,1,1)}}^2 - {m^{(1,1)}_{(0,1,1)}}^2$, ${m^{(1,1)}_{(2,0,0)}}^2 - {m^{(1,3)}_{(2,0,0)}}^2 = {m^{(1,3)}_{(1,0,0)}}^2 - {m^{(1,1)}_{(1,0,0)}}^2 = {m^{(1,3)}_{(0,1,1)}}^2 - {m^{(1,1)}_{(0,1,1)}}^2$
	(3,2,0,4)	$9\sum_{\beta=1}^{4} {m^{(1,\beta)}_{(2,0,0)}}^2 = 5\sum_{\beta=1}^{6} {m^{(1,\beta)}_{(1,0,0)}}^2 + 6{m^{(1,1)}_{(1,2,0)}}^2$, ${m^{(1,1)}_{(2,0,0)}}^2 - {m^{(1,2)}_{(2,0,0)}}^2 = {m^{(1,4)}_{(1,0,0)}}^2 - {m^{(1,2)}_{(1,0,0)}}^2 = {m^{(1,5)}_{(1,0,0)}}^2 - {m^{(1,3)}_{(1,0,0)}}^2$, ${m^{(1,1)}_{(2,0,0)}}^2 - {m^{(1,3)}_{(2,0,0)}}^2 = {m^{(1,4)}_{(1,0,0)}}^2 - {m^{(1,1)}_{(1,0,0)}}^2 = {m^{(1,6)}_{(1,0,0)}}^2 - {m^{(1,3)}_{(1,0,0)}}^2$, ${m^{(1,1)}_{(2,0,0)}}^2 - {m^{(1,4)}_{(2,0,0)}}^2 = {m^{(1,5)}_{(1,0,0)}}^2 - {m^{(1,1)}_{(1,0,0)}}^2$

源となる隠れたセクターの効果によるスーパーパートナーの質量に関する和則の研究成果は、J. Ellis たちの論文（arXiv:0810.4877 [hep-ph]）や T.S. Roy たちの論文（arXiv:0811.3206 [hep-ph]）で引用されている。

表２

研究計画（２）については、Z_2 オービフォールドを含む５次元時空上の Mixed Chern-Simons term を有する $SU(3)_C$×U(1)ゲージ理論（ここで、U(1)は標準模型を含まれていない余分なゲージ対称性に関する可換群）に基づき、θ パラメータの値が５次元のゲージ変換の下で不変に保たれること、つまり、θ パラメータに関して力学的な再整列が起こることを確かめた。これは、θ パラメータが物理量であることを意味する。その結果、θ パラメータの値は余剰次元に関する境界条件と解釈することができる。このような知見から、strong CP problem の解決のヒントが生まれる可能性がある。

研究計画（３）については、以下のような3種類の研究を遂行した。

① Z_3オービフォールド(T^2/Z_3)上のゲージ理論に関して、ゲージ対称性に基づく同値関係を用いて、場の境界条件の分類を行った。同値関係の存在は細谷機構と関連している。具体的な模型を使って、ウィルソンライン位相に関する有効ポテンシャルを計算し、ゲージ対称性の力学的な破れを調べた。さらに

様々なオービフォールド($S^1/Z_2 \times S^1/Z_2$, T^2/Z_2,T^2/Z_4,T^2/Z_6)上のゲージ理論に関して、場の境界条件の分類とその性質を探究した。量子効果を取り入れることにより、宇宙のトポロジーの解明に役立つ可能性がある。

② 「通常のボソニックな空間のほかにゴースト的なグラスマン座標を有する空間を余剰空間として含む拡張された時空上で力の大統一が実現され、余剰次元の構造を反映した高い対称性に関する非物理的なモードを消去することにより、標準模型あるいは超対称性標準模型が導出される」というシナリオを簡単な模型の提示とともに提案した。また、拡張された時空構造（＝初期宇宙の構造）の起源に関する少し異質なアイデアの提案も行った。

③ 大統一理論の問題点の１つである「陽子崩壊の抑制機構の解明」に対して、リフシッツ型のゲージ理論に基づく解決法を提案した。この理論におけるゲージ結合定数のエネルギー依存性を図１に記した。この種の理論が持つ力学的な性質により、ゲージ結合定数が一致するスケールM_X はゲージ対称性が統一されるスケールM_U と異なる可能性が生まれ、陽子崩壊を媒介する粒子の質量はM_U のオーダーと考えられるため、M_U がじゅうぶん大きければ陽子崩壊が抑制される。このような理論では、高エネルギーで時空構造が転移する可能性があり、通常とは異なる視点から時空の起源に関するヒントを与えてくれる可能性があり研究対象として興味深い。

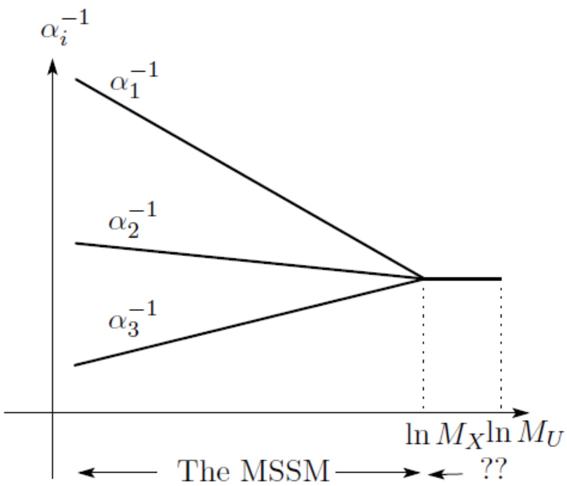

図１

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１２件）

① Yoshiharu Kawamura, “Misleading Coupling Unification and Lifshitz Type Gauge Theory”, Progress of Theoretical Physics 122, 831-845, 2009, 査読有

② Yoshiharu Kawamura, “Topological Grand Unification”, Progress of Theoretical Physics 121, 289-297, 2009, 査読有

③ Yoshiharu Kawamura, Teppei Kinami, Takashi Miura, “Superparticle Sum Rules in the presence of Hidden Sector Dynamics”, Journal of High Energy Physics 0901, 064, 2009, 査読有

④ Yoshiharu Kawamura, Teppei Kinami, Takashi Miura, “Equivalence Classes of Boundary Conditions in Gauge Theory on Z_3 Orbifold”, Progress of Theoretical Physics 120, 815-831, 2009, 査読有

⑤ Yoshiharu Kawamura, Teppei Kinami, Kin-ya Oda, “Orbifold family unification”, Physical Review D 76, 035001, 2007, 査読有

〔学会発表〕（計１４件）

① 川村嘉春,“時空構造の変革と標準模型を超える物理について”　「余剰次元物理研究会」2010.1.20. 大阪大学

② 川村嘉春, 三浦貴司“Orbifold Family Unification based on SO(2N)”日本物理

学会 2009 年秋季大会 2009.9.11. 甲南大学

③ 川村嘉春，三浦貴司“Classification of boundary conditions on Z_N Orbifolds” 日本物理学会第 64 回年次大会 2009.3.30. 立教大学

④ 川村嘉春，“Z_2 Orbifold GUT で学んだことをそれを超える試みに活かす。” 理研集中セミナー「余剰次元模型の理論的枠組み」2008.12.6. 理化学研究所大河内記念ホール（招待講演）

⑤ Yoshiharu Kawamura, “Search for a Realistic Orbifold Grand Unification”, International Workshop on Grand Unified Theories: Current Status and Future Prospects (GUT07), 2007.12.18. 立命館大学（招待講演）

〔図書〕（計１件）

① 川村嘉春，サイエンス社，“例題形式で学ぶ現代素粒子物理学”臨時別冊・数理科学 ＳＧＣライブラリ４８，2006, pp1-223

６．研究組織

(1)研究代表者

川村 嘉春（KAWAMURA YOSHIHARU）

信州大学・理学部・教授

研究者番号：10224859