

機関番号：14301

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2008～2010

課題番号：20740135

研究課題名（和文） モジュライの織り成す新しい物理とその観測可能性

研究課題名（英文） New physics from moduli dynamics and its detectability

研究代表者

吉岡 興一（YOSHIOKA KOICHI）

京都大学・理学研究科・助教

研究者番号：80363323

研究成果の概要（和文）：フレーバー、CP、宇宙現象に関わる現在および将来の実験観測を通じて新しい物理の探求をおこなった。とくに自然界においてモジュライが果たす役割の検証を目指し、超対称理論、高次元理論、高エネルギー素粒子実験など多方面から研究を進めた。レプトン数・フレーバーの破れや超対称性の破れにともなうモジュライ場が、暗黒物質や加速器物理と関わる現象に着目して重点的に解析し、標準模型を超える新しい物理におけるモジュライ力学の観測可能性を議論した。

研究成果の概要（英文）：We have explored new physics beyond the standard model of elementary particles in light of present/future experiments about flavor physics, CP, and cosmology. In particular, we have examined the role of modulus field in Nature from various aspects such as supersymmetry, extra dimensions, and high-energy particle experiments. Focusing on symmetry-breaking moduli in dark matter and collider physics, we have investigated the moduli dynamics in microscopic regime and its detectability.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2009年度	1,300,000	390,000	1,690,000
2010年度	1,000,000	300,000	1,300,000
年度			
年度			
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

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・宇宙線・宇宙物理

キーワード：素粒子論

1. 研究開始当初の背景

自然界に超対称性が存在するならば、その性質は近い将来に控えた素粒子実験において観測される可能性がある。それは、ゲージ結合定数の統一、電弱対称性の破れの自然さ、宇宙の暗黒物質の存在など、標準模型では説明されない物理現象により支持されている。そのため超対称性の生み出す物理の研究は素粒子物理学の急務と言える。

現在まで、標準模型を超えるエネルギー領域の研究をおこなってきた。基礎理論構造が自然界にどのように実現するかを調べる事は重要であり、多方面より取り組んでいる。主な課題として、(1) 超対称性の破れの物理：超対称性の現実への適用に際しては、CPと世代数の破れという稀現象が重要である。この問題に対し、くり込み群の解析、非摂動力学による研究、時空に関わる場による機構の提唱等をおこなってきた。(2) 統一理

論とフレーバー物理：クォークとレプトンの性質の違いを手がかりとして、大統一理論などにおけるフレーバー物理を模索した。非平行世代構造の存在、および最小型質量行列の解析結果は、本研究の基礎となっている。

(3) 高次元物理：余剰空間の存在は、対称性原理に代わる標準模型の新しい発展となる。高次元くり込み群、高次元場の局在化の新技术と湯川階層性、ゲージ/重力対応と電弱対称性の破れ等へ取り組んできた。これらの課題の延長線上にある本研究においては、互いに密接に関連しながら研究目標へ向けた礎となる。

超対称性は、標準模型のスケールでは自然界の対称性として成り立っていない。これまでにさまざまな破れの機構が提案されているが、モジュライによる破れに注目する。モジュライとは、真空を特徴付けるスカラー場のことである。超対称理論は一般に縮退した真空を持ち、対応した場を伴っている。超対称性の破れを司るモジュライの性質は、観測との対比により探ることができる。とくにCP不変性から強く制限され、超ポテンシャルは非物理的自由度を除き唯一に限られる。得られた機構は次のような興味深い性質を備える：(1) モジュライが安定化され、軽粒子探査の結果と無矛盾になる。(2) モジュライや重力の超対称パートナーが重くなり、宇宙論問題の解となる。(3) 超弦理論におけるモジュライ安定機構の帰結と一致し、明らかな力学的起源をもつ。(4) モジュライと超重力の相乗効果により、新しい超対称性の破れが起こる。これらは理論的な興味だけでなく、将来実験において特徴を持って現れることを示しており、蜃気楼伝達機構として知られている。これらの流れを踏まえ、本研究ではモジュライ物理を中心に置く素粒子現象の研究を進める。

2. 研究の目的

本研究の目的は、モジュライの織り成す新しい物理描像を多角的に追究し、自然界におけるその役割を探求することである。モジュライは、超対称理論等においては普遍的に存在し、その力学の解明から、生み出される現象まで多岐に渡る研究対象である。

本研究の主な課題として、世代(フレーバー)の物理、宇宙に関わる物理、CPの物理が挙げられる。観測可能な現象論的帰結を検討してゆくことによって、モジュライ力学の理解を深めることを目的とする。

(1) モジュライとフレーバー物理

超対称性と現実世界の融合は、フレーバー物理、とくに世代を変える稀過程に関して未解決問題を抱える。モジュライ力学もその例外ではなく、フレーバーとの関わりを考察す

ることによって、モジュライ物理全体に大きな進展をもたらすと期待できる。

(2) モジュライと宇宙物理

初期宇宙の物理とモジュライの関わりを示す。具体例として、モジュライの崩壊により宇宙進化シナリオがどのような影響を受けるか解析する。さらにモジュライに関わる暗黒物質の宇宙論的な振舞いを考察する。その際、モジュライ安定化機構の解明が重要な鍵となると考えられる。

(3) モジュライとCP物理

一般的なモジュライ力学におけるCP対称性の性質を研究する。CPの破れに伴う現象は、フレーバー物理より強い制約を導く。とくに複数のモジュライが存在する場合は、安定化機構・超対称性を破る質量パラメータの複素性・蜃気楼伝達との関連等に対して、新しい物理が期待され、重点的な解析を行う。

このように現象論的手法を通じたボトムアップ型の研究を推し進め、自然界におけるモジュライの役割を探求する。そして、基本理論領域にあるモジュライ力学の解明を目指す。モジュライの豊富な物理像を描き出すには、新しい現象論的研究対象の探求に乗り出す必要がある。その際、蜃気楼伝達の特徴を念頭におく。とくに着目する性質は、離れた高エネルギー領域の物理(理論構造や結合定数の値など)が蜃気楼のように低エネルギー領域に投影され、将来実験において観測されうることである。そのため、従来のくり込み群を通じた解析とは異なり、高エネルギー理論が直接的に検証される。この特有の現象を生かし、モジュライ物理の検証へ新たな発展をもたらすことができると期待される。

3. 研究の方法

本研究の主眼は、モジュライ自然現象を考察し、目指すべき統一理論におけるその力学構造を明らかにする事である。また力学構造の研究を通じて、自然界におけるモジュライの役割に迫りたい。これまでの議論を念頭に、世代・CP・宇宙現象の理論考察・数値解析を相補的におこなってゆく。

「研究の目的」の各項目について、それぞれ次のように計画する。

(1) モジュライ場による破れを取り扱う手法・模型についての基礎を作る必要がある。予備的な考察において、結合定数が統一される場合に、そのような取り扱いを見出した。この結論を推し進め、蜃気楼現象の条件を導出し、一般のモジュライ超対称性の破れを構成する。並行してフレーバー問題の観点から望ましいポテンシャル構造を検討する。その結果は後の重要な基盤となる。

例として、モジュライの寄与が量子レベルとなる場合、および複数のモジュライが存在

する場合に注目する。ケーラーに対する従来の仮定を改善するには、アノマリー伝達の完全な形式がひとつの鍵と考えられるため、フレーバー研究に必要なスカラー質量項の導出に取り組む。また大きな湯川結合は層気楼現象やフレーバーを破る過程に重要であるため、詳しく定量的解析をおこなう。そして超対称フレーバー物理におけるモジュライ力学の効果を解明してゆく。

高次元空間におけるモジュライも重要な研究対象となる。とくに空間の変形・内部並進にともなうモジュライに対し、取扱い手法等の考察をおこないながら、高次元空間における境界条件との関わりを探求する。

(2) 一般にモジュライやグラビティーノは重くなるため、元素合成等の観点から好ましいと言えるが、より正確な解析に従うと、モジュライ崩壊は宇宙論的問題を引き起こす。この問題に対する解は、超対称性を保つようなモジュライ安定化により与えられる。その実現性を考察し、具体的なモデルを構成する。

また、元素合成・物質-反物質非対称性などに対するモジュライの影響を考察する。中でも、モジュライの超対称パートナーが暗黒物質の起源となる点に注目し、残存量・検出率等の数値評価をおこなう。また宇宙線中の陽電子過剰は、ニュートリノ物理を通じてモジュライ力学と密接な関連があり、注目して研究を進めてゆく。

(3) モジュライおよび超重重力アノマリーに関連した超対称性の破れについて、両者の複素性は一般には揃わず CP 不変性が損なわれる。その場合に有効スカラー質量について解析し、関連したフレーバー・CP 物理と合わせて統一的評価をおこなう。パラメータの複素性は、複数のモジュライがある場合にも生じ、物質場の起源に対応してさまざまな現象を生み出す。ボトムアップ型的手法において重要な鍵は、複数モジュライのポテンシャルおよび還元性の解明にある。前者については複雑な解析が想定されるが、系統的な手法を編み出しながら取り組む。また特徴的な質量スペクトラムや、フレーバー・CP 物理との結びつきを評価し、多重モジュライの物理を発展させてゆく。

ヒッグス・フレーバー・宇宙物理などの新しい物理の探索を目前に控え、モジュライ特有の力学機構の探求は意義深いと言える。高エネルギー理論におけるモジュライの存在と生み出される自然現象を、近年の観測結果や Large Hadron Collider における振舞いとを比較・検討をおこなうことによって明らかにしたい。結果を発展させてゆくことで、新しい物理への知見が得られ、最終的に総合的な理論構成をおこない、新たな自然描像の確立を目指す。

4. 研究成果

(1) 低エネルギー(電弱相互作用)の領域で、ゲージノ質量が縮退している現象は、これまでに考慮されて来なかった新たな超対称性の観測可能性を生む。超共形変換のアノマリー効果が存在する系において、質量縮退が実現する一般的な条件を導出した。また、縮退したスペクトラムは、低エネルギー領域の観測値によってのみ決まり、あたかもゲージ結合定数に対する中間領域の閾値補正が無いように振る舞うことを明らかにした。さらに閾値の存在による縮退の安定性や、超重重力理論の枠組みにおける縮退条件の力学的実現を考察し、一定の成果を挙げた。

(2) ニュートリノ振動実験によれば、レプトンの世代間混合は tri-bimaximal 型と呼ばれる特徴的な構造で非常に良く近似される。ニュートリノおよび荷電レプトンの質量行列がカスケード型と呼ばれる形状である場合を提唱し、もたらされるさまざまな現象(フレーバーの破れやバリオン数生成等)の解析をおこなった。

(3) ニュートリノの世代間混合の実験値は、フレーバー空間において整列した真空構造を強く示唆しているが、理論的には一般に縮退した真空(モジュライ)から、どのように実現されるのか定かにはなっていない。これに対し、高次元空間における境界条件を用いた真空整列の新しい機構を提唱した。真空を張るスカラーに対するこれまでの複雑なポテンシャル解析を必要とせず、かつ余剰空間の無矛盾条件から、真空整列の方向もごく限られる可能性を指摘した。

(4) 右手型ニュートリノが高次元時空にある場合に、さまざまなシーソー機構を提示し、将来実験において検証可能であることを示した。とくに Large Hadron Collider における 3 レプトン終状態のモードを重点的に解析し、観測可能性を考察した。

(5) 高次元シーソーモデルを考察し、導出されるニュートリノ質量に対する時空の曲がりの影響を調べた。高次元におけるマヨラナ粒子の効果を取り扱う手法を開発し、一般的な重力背景でのニュートリノ質量を評価した結果、曲がりを表す計量因子は全体的な係数としてのみ現れ、その他には全く影響を与えないことを見出した。

(6) ニュートリノ質量起源の高次元シーソー機構を通じた検証可能性を追究した。これまでの解析に加えて、新たにレプトンの世代間構造を取り入れた重点的な数値解析をお

こない、シーソー機構・右手型ニュートリノ・余剰次元の観測可能性を考察した。

(7) PAMELA 実験等における反粒子 flux の観測により、レプトンに結合する暗黒物質の存在が示唆されている。崩壊する暗黒物質に対して、その寿命とニュートリノ質量との間に強い関連があることを見出した。また右手型ニュートリノが高次元を伝搬する場合には、radion モジュライがこの性質をもつスカラー暗黒物質となることを示し、具体的な理論構成、陽電子 flux の議論をおこなった。

(8) シーソー機構の高次元実現をさらに追究した。特徴的に生み出されるニュートリノの質量パターンや、レプトン世代混合角との対比を詳細に解析してゆくことによって、実現可能性の議論へつなげる結果が得られ、総合的にまとめて発表した。

(9) 高次元時空にある右手型ニュートリノの将来加速器実験 (International Linear Collider) における物理を解析した。3レプトン終状態のモードを通じて、世代間構造や右手型ニュートリノのスペクトラム、radion モジュライの期待値の実験的検出を数値評価し、シナリオの観測可能性を考察した。

(10) 宇宙線観測衛星実験における反粒子線束の観測により、暗黒物質の存在が示唆されている。長寿命で崩壊する暗黒物質を考えると、寿命とニュートリノ質量の間に、大統一理論を通じた強い関連性がある。その場合の暗黒物質は、ニュートリノ質量を与えるスカラーモジュライ場 (すなわち小質量・大期待値)、もしくはゲージ重項フェルミオンであり、低エネルギー理論における有効演算子解析を通じて、フレーバーを司る非可換離散対称性との関わりと陽電子線束の評価をおこなった。

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 10 件)

- ① N. Haba, Y. Kajiyama, S. Matsumoto, H. Okada, K. Yoshioka, "Universally Leptophilic Dark Matter From Non-Abelian Discrete Symmetry", Physics Letters B695 (2011) 476-481 (査読有)
- ② A. Watanabe, K. Yoshioka, "Seesaw in the bulk", Progress of Theoretical Physics 125 (2011) 129-148 (査読有)
- ③ M. Asano, K. Fujii, N. Haba, S. Matsumoto,

T. Nabeshima, T. Saito, Y. Takubo, H. Yamamoto, K. Yoshioka, "Extra dimensions and Seesaw Neutrinos at the International Linear Collider", Physical Review D82 (2010) 093004 (査読有)

- ④ S. Matsumoto, K. Yoshioka, "Deep Correlation Between Cosmic-Ray Anomaly and Neutrino Masses", Physical Review D82 (2010) 053009 (査読有)
- ⑤ S. Matsumoto, T. Nabeshima, K. Yoshioka, "Seesaw Neutrino Signals at the Large Hadron Collider", Journal of High Energy Physics 1006 (2010) 058 (査読有)
- ⑥ A. Watanabe, K. Yoshioka, "Geometry-free neutrino masses in curved spacetime", Physics Letters B683 (2010) 289-293 (査読有)
- ⑦ N. Haba, S. Matsumoto, K. Yoshioka, "Observable seesaw and its collider signatures", Physics Letters B677 (2009) 291-295 (査読有)
- ⑧ T. Kobayashi, Y. Omura, K. Yoshioka, "Flavor Symmetry Breaking and Vacuum Alignment on Orbifolds", Physical Review D78 (2008) 115006 (査読有)
- ⑨ N. Haba, R. Takahashi, M. Tanimoto, K. Yoshioka, "Tri-bimaximal Mixing from Cascades", Physical Review D78 (2008) 113002 (査読有)
- ⑩ M. Endo, K. Yoshioka, "Low-scale Gaugino Mass Unification", Physical Review D78 (2008) 025012 (査読有)

[学会発表] (計 11 件)

- ① 齋藤智之, 浅野雅樹, 田窪洋介, 鍋島偉宏, 波場直之, 藤井恵介, 松本重貴, 山本均, 吉岡興一, "ILC における高次元シーソー模型の右巻きニュートリノに関する測定精度の検証", 日本物理学会 2010 秋季大会, 2010 年 9 月 14 日, 九州工業大学
- ② 渡邊篤史, 吉岡興一, "余剰次元におけるニュートリノと逆シーソー機構", 日本物理学会 2010 秋季大会, 2010 年 9 月 14 日, 九州工業大学
- ③ 波場直之, 梶山裕二, 松本重貴, 鍋島偉宏, 岡田寛, 吉岡興一, "Do the PAMELA anomaly and neutrino masses have the same origin?", 日本物理学会 2010 秋季大会, 2010 年 9 月 13 日, 九州工業大学
- ④ 松本重貴, 鍋島偉宏, 吉岡興一, 他 ILC 物理ワーキンググループ, "Seesaw

- Neutrino Signals at the Large Hadron Collider”, 日本物理学会 2010 年秋季大会, 2010 年 9 月 11 日, 九州工業大学
- ⑤ 渡邊篤史, 吉岡興一, “曲がった空間上のシーソー機構について”, 日本物理学会 第 65 回年次大会, 2010 年 3 月 23 日, 岡山大学
- ⑥ 齋藤智之, 田窪洋介, 鍋島偉宏, 波場直之, 藤井恵介, 松本重貴, 山本均, 吉岡興一, “ILC における余剰次元模型の右巻きニュートリノに関する測定精度の評価”, 日本物理学会 第 65 回年次大会, 2010 年 3 月 20 日, 岡山大学
- ⑦ 齋藤智之, 田窪洋介, 鍋島偉宏, 波場直之, 藤井恵介, 松本重貴, 山本均, 吉岡興一, “ILC 実験における余剰次元模型の右巻きニュートリノに関する測定精度の評価”, 日本物理学会 2009 年秋季大会, 2009 年 9 月 12 日, 甲南大学
- ⑧ 小林達夫, 大村雄司, 吉岡興一, “Flavor symmetry breaking and vacuum alignment on orbifolds”, 日本物理学会 第 64 回年次大会, 2009 年 3 月 28 日, 立教大学
- ⑨ 遠藤基, 吉岡興一, “超重力理論におけるアノマリーとスカラー質量について”, 日本物理学会 2008 年秋季大会, 2008 年 9 月 23 日, 山形大学
- ⑩ 遠藤基, 吉岡興一, “低エネルギー領域における縮退したゲージノ質量”, 日本物理学会 2008 年秋季大会, 2008 年 9 月 23 日, 山形大学
- ⑪ 高橋亮, 波場直之, 谷本盛光, 吉岡興一, “Tri-bimaximal Mixing from Cascades”, 日本物理学会 2008 年秋季大会, 2008 年 9 月 21 日, 山形大学

6. 研究組織

(1) 研究代表者

吉岡 興一 (YOSHIOKA KOICHI)
京都大学・理学研究科・助教
研究者番号：80363323

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

()

研究者番号：