

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 26 日現在

機関番号：32612

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23740187

研究課題名(和文)ニュートリノ力学を礎とする新しい物理の探究とその検証

研究課題名(英文)Exploring New Physics from Neutrino Dynamics

研究代表者

吉岡 興一 (Yoshioka, Koichi)

慶應義塾大学・理工学部・准教授

研究者番号：80363323

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円、(間接経費) 990,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的は、ニュートリノに伴う新しい物理現象を多角的に考察し、その質量起源や力学の解明を通じて、自然界の基本的な構造を探究することである。主な課題は、世代対称性と統一理論、高次元と超対称性に関わる物理、CPおよび暗黒物質である。現象論的帰結を詳細に検討してゆくことにより、高次元とニュートリノの世代対称性、右手型ニュートリノの物理と暗黒物質、ヒッグス物理と超対称性におけるニュートリノ等に対して新しい知見を得た。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this research is to explore the fundamental structure of Nature by investigating the mass origin and dynamics of neutrinos from various new physical aspects. The main subjects are the grand unified theory and flavor symmetry, supersymmetry and extra dimensions, and CP symmetry and dark matter physics. Several new results are found by phenomenological analysis for the neutrino flavor symmetry in higher dimensions, the relation between the physics of dark matter and right-handed neutrinos, and the Higgs mass and neutrinos in supersymmetric standard models.

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 ニュートリノ 超対称性

1. 研究開始当初の背景

高エネルギー領域における統一原理の存在と、低エネルギー領域における観測結果は、自然界における未知のニュートリノ力学の存在を示唆する。近年の種々な実験より報告されたニュートリノの性質は、標準模型の帰結とは異なっているため、ニュートリノを手掛かりに自然界の構造を探究することは、現在の素粒子物理にとって非常に重要である。

ニュートリノがもつ質量は、標準模型のエネルギースケールより非常に小さく、世代混合はクォークの混合と全く異なる。よって、ニュートリノ力学の物理はニュートリノ質量の物理が中心となっている。その研究成果は、バリオン数生成・超新星爆発などの宇宙現象や、超対称性・高次元の理論的發展にも大きな影響を及ぼす。またさまざまな粒子観測実験の基礎となり、最終的には自然を司る基本理論の解明へつながる必要不可欠な鍵となる。

ニュートリノ力学については多くの先行研究がなされている。世代間対称性や高次元においても精力的な研究が行われているものの、これまでの主な対象は、レプトン部分のみであったり、ディラック型ニュートリノである等、限られたものとなっている。観測結果が示唆するニュートリノの豊富な物理像を描き出すには、従来の領域を超えて新たな探究に乗り出さなければならない。

2. 研究の目的

本研究の目的は、ニュートリノ力学に伴う新しい物理描像を多角的に考察し、自然界の基礎構造を探求することである。ニュートリノは、さまざまな現象に関連し、その質量起源・力学の解明から生み出される物理現象まで多岐に渡る研究対象である。すなわち検証可能な現象論的帰結を詳細に検討してゆくことによって、ニュートリノ力学の理解を深めることを目標とする。課題としては

(1) ニュートリノと世代

標準模型を超える物理は、とくに世代を変える過程に関して未解決問題を抱えており、ニュートリノ力学も例外ではない。そのため世代構造との関わりを検討することによって、ニュートリノ物理全体に大きな進展をもたらすと期待できる。

ニュートリノの実験的性質を手がかりとして、次の点に注目したい。第1は、世代間対称性の破れ微調整問題である。このような微調整を力学的に理解するには非可換対称性の更なる探究が欠かせない。第2は、統一原理との融合である。自然な融合はあまりなされていないが、両者の近未来における重要性や観測からの示唆をみれば、急務かつ遂行価値がある。

(2) ニュートリノと高次元

高次元の物理とニュートリノの関わりを示す。具体例として、ニュートリノ力学を通じた衝突加速器による検証を解析する。この

際、高次元中の右手型ニュートリノが重要な役割を果たす。予備的な計算によると、将来計画内において微小質量の起源と高次元のつながりを検証可能であることが見えている。

また時空の曲率依存性を考察することは欠かすことが出来ない。しかしながら、歪んだ時空上でのマヨラナニュートリノは、これまでほとんど扱われていない為、伝播関数の導出等の基礎から始め、現象論的な応用まで見据えて取り組む。これらを世代対称性の結果と交えて発展させてゆくことで、時空構造の解明に繋げる。

(3) ニュートリノとCP・宇宙

ニュートリノ力学におけるCP対称性の性質から新たな知見を見出す。具体例として電気双極子モーメントに着目する。実験からは厳しく制限されているが、ニュートリノが関わる新しい物理のため一般に0ではない。そのため重点的な解析を進めてゆくことにより、力学を制限することができる。

またニュートリノのCP位相は、宇宙現象と密接に関わる。さらに近年の探索により示唆される暗黒物質はレプトンと強い相関を持つため、ニュートリノ力学との関わりに着目する。ニュートリノ質量に伴う物理による暗黒物質の崩壊が、示唆される性質と整合するという予備解析を基に、統一的な描像を目指す。

3. 研究の方法

本研究の主眼は、ニュートリノの織り成す自然現象を考察し、その力学構造を明らかにすることである。とくに世代相互作用は、ニュートリノ質量の起源と密接に関連しており、新たな力学を探る重要な鍵と考えられる。これまでの研究から得られたニュートリノ物理の特徴を念頭に、世代・高次元・宇宙・CP現象の理論考察・数値解析を相補的に行ってゆく。

本研究は、近い将来に測定されるニュートリノのさまざまな性質や、加速器実験の結果を視野に入れている。中でも右手型ニュートリノがもたらす物理を重点的に解析してゆく。得られた結果より、物質の世代対称性構造を観測視点から検証し、現在の理解をさらに発展させる。最終的に十分な観測結果が得られれば、総合的な統一描像により、新たな自然概念の確立を目指すことができる。

(1) レプトンの世代混合は、TBM型により良く記述される。その離散的な構造は非常に示唆的にも関わらず、対称性との関係は必ずしも明確になっていない。とくに対称性の破れに注目して行列形の考察を行い、TBM混合の本質を明らかにする必要がある。さらに荷電レプトンの影響も含めた、TBM型からのずれも興味深い。典型的な世代混合については、すでに系統的な解析を行っており、従来は困難であった微調整問題が、世代対称性と折り合う可能性を模索する。

また、これまでは右手型ニュートリノの世代構造はあまり取り入れられていない。その構造は、宇宙現象に深く関わり、電弱ヒッグス場のポテンシャル形にも影響する。そのため定量的解析を念頭に、系統的な取扱い法の開発等の研究を進める。

さらに大統一理論を念頭に置き、TBM混合の性質と、従来からのクォークの湯川階層性問題との関わりを考察し、生み出される物理現象を通じた検証を進めてゆく。最終的には総合的な大統一モデルの構成を目指す。

(2) 高次元時空におけるマヨラナ場を取扱う手法を編み出し、基礎を確立する必要がある。予備考察により、非因子型幾何の低エネルギー極限においては、マヨラナニュートリノ質量の正確な導出が可能となることを示した。この結論を推し進め、時空計量に対する条件を見出し、より一般の高次元時空構造の依存性を評価する。

並行して、レプトンの世代問題の観点から望ましい基礎モデルを構成し、ニュートリノ力学における対称性の破れを、高次元空間の境界条件に還元する。観測と合致する世代混合の定性的な理解には至っていないため、第一の課題として考察を進めてゆく。理解を得たのち、機構の単純化や他の現象論的対称性との統合を通じて、基本理論としての高次元物理の提案まで行く。

また、自然界にはさまざまな階層性が存在しており、時空構造はその重要な解決を与える。新しい力学を示唆するニュートリノ物理と階層性問題は、統一理論を目指すアプローチの中で密接に関連していると想定され、その可能性を追究する。

(3) CP物理の重要性から、ニュートリノ力学との関連は急務である。ニュートリノ振動におけるCPの破れは、TBM混合からのずれにより生じるため、重要な鍵は世代対称性の破れにある。世代とCPの結びつきにより、ニュートリノ物理を発展させてゆく。またニュートリノ力学はメソン系のCPや電気双極子モーメントへ影響するため、詳細な評価を行うことによって、超対称性を破る機構や高次元の検証へ興味深い展開が期待できる。

また独立に、崩壊する暗黒物質と右手型ニュートリノの関連を追究する。ニュートリノのタイプや質量依存性、反粒子やガンマ線の流束、残存量、他の宇宙現象との関わり等の詳細な評価を通じて検証をおこなってゆく。また世代対称性の名残りが、暗黒物質の安定につながる可能性にも注目する。その実現は高次元物理より得られると期待され、自然現象との接点を手がかりとして高いスケールの基本原理を探る。

4. 研究成果

(1) ニュートリノと暗黒物質の関わりについて考察した。とくに右手型ニュートリノに質量を与える複素スカラー場の力学を研究し

た。ニュートリノがマヨラナ粒子である場合、複素スカラー場の期待値は、統一スケール程度にあると推定され、レプトン数対称性と世代対称性の破れと大きく関連している。さらに期待値まわりの量子ゆらぎはテラスケール程度の質量を持ち、暗黒物質となる可能性がある。そのような大きな期待値と小さな質量は、加速器実験における検証可能性や、宇宙線中の反粒子成分の観測結果の両者に対して重要となるが、そのようなポテンシャルは超対称性理論もしくは大域的対称性の破れから容易に実現できる。ゆらぎの暗黒物質は、ニュートリノの混合を通じて標準模型の粒子へ多様な崩壊モードを持つ。ニュートリノがディラック型の場合は、すでに準備研究においてまとめた。ニュートリノがマヨラナ型の場合、ゆらぎの実部と虚部で場合分けが必要となる。実部が暗黒物質となる場合、電弱ゲージボソンやヒッグス粒子への2体崩壊が主要モードとなり、PAMELA実験やAMS-02実験による反陽子観測の結果と矛盾する。一方、ゆらぎの虚部が暗黒物質となる場合は、CP対称性からボソン2体崩壊は禁止され、3体崩壊もしくは荷電レプトン対への2体崩壊が主要モードとなる。そのため宇宙線中の陽電子成分に対して重要な寄与を与える。さらに3世代間の混合も含め、反陽子や陽電子の流束を評価した。

(2) 対称性の破れやニュートリノ力学への応用を目指し、超対称性について研究を行った。ゲージ伝達機構は、さまざまな現象論的利点をもつが、F項による破れは一般的にゲージノに質量を与えることができないことが知られているため、D項を用いる手法を提案した。まずF項のみのスカラーポテンシャルの停留点において、超対称性が破れる場合と破れない場合の2つに分け、D項の影響を考察した。前者の破れる場合は、D項の存在により真空が場空間の無限遠点となることを明らかにした。また後者の破れない場合には、複素ゲージ変換を考えることにより、Dの線形項がない限り超対称性が回復してしまう。また、D項の存在に伴い荷電場のF項が必ず現れるため、破れの伝達機構も特徴あるものとなる。伝達場とその相互作用の構成や輻射補正の評価を遂行し、ゲージノ質量が非零で現れることを示した。

さらに、F項のみのポテンシャルが有限の場の配位をもたず、D項により安定な真空が現れる場合に着目した。この場合の利点として、ゲージノ質量の問題を引き起こすF項ポテンシャルの真空縮退が現れず、かつ古典レベルでR対称性の破れが起きる可能性がある。そのようなモデルを系統的に調べ、最も簡潔な形を提唱した。またポテンシャル解析や伝達部分の構成により、非零のゲージノ質量の生成を示した。

(3) 標準模型の3世代を拡張し、ベクトル的な2世代を加えたモデルの解析をおこなった。ベクトル的世代のこれまでの研究より、

ニュートリノや荷電フェルミオンの質量行列、湯川結合定数の赤外固定点、加速器における探索等に注目する。ヒッグス粒子の質量は、最小超対称標準理論では説明し難く、またミュー粒子の磁気双極子能率は、 3σ 以上で標準模型の結果と離れている。この2点に注目し、ベクトルの世代が及ぼす物理を詳細に検討した。その結果、ヒッグス質量へは、ダウン型クォークのベクトルの世代の量子補正が効き、またミュー粒子の磁気双極子能率へは、荷電レプトンとニュートリノのベクトルの世代の超対称粒子が大きく寄与し、それらの結果、重力相互作用による最小の超対称性の破れにおいても、実験結果を再現できることを明らかにした。

5. 主な発表論文等 (研究代表者には下線)

[雑誌論文] (計 2 件)

- ① Runaway, D term and R-symmetry Breaking, T. Azeyanagi, T. Kobayashi, A. Ogasahara, K. Yoshioka, Physical Review D86, 95026, 査読有, DOI: 10.1103/PhysRevD.86.095026.
- ② D term and Gaugino Masses in Gauge Mediation, T. Azeyanagi, T. Kobayashi, A. Ogasahara, K. Yoshioka, Journal of High Energy Physics 1109, 112, 査読有, DOI: 10.1007/JHEP09(2011)112.

[学会発表] (計 6 件)

- ① Runaway, D term and R-symmetry Breaking, T. Azeyanagi, T. Kobayashi, A. Ogasahara, K. Yoshioka, 18th International Summer Institute on Phenomenology of Elementary Particles and Cosmology, 2012年8月19, 20日, Sun Moon Lake, Taiwan.
- ② Runaway and D term in gauge-mediated supersymmetry breaking, T. Azeyanagi, T. Kobayashi, A. Ogasahara, K. Yoshioka, YITP workshop "Field Theory and String Theory", 2012年7月26日, 基礎物理学研究所.
- ③ Runaway and D term in gauge-mediated supersymmetry breaking, T. Azeyanagi, T. Kobayashi, A. Ogasahara, K. Yoshioka, YITP workshop "Progress in Particle Physics 2012", 2012年7月19日, 基礎物理学研究所.
- ④ Runaway vacuum and D terms in SUSY breaking, T. Azeyanagi, T. Kobayashi, A. Ogasahara, K. Yoshioka, 日本物理学会第67回年次大会, 2012年3月25日, 関西学院大学.
- ⑤ F項およびD項による超対称性の破れとゲージ伝達機構, T. Azeyanagi, T. Kobayashi, A. Ogasahara, K. Yoshioka, 日本物理学会2011年秋季大会, 2011年9月16日, 弘前大学.
- ⑥ F項およびD項による超対称性の破れとゲ

ージ伝達機構, T. Azeyanagi, T. Kobayashi, A. Ogasahara, K. Yoshioka, YITP workshop "Field Theory and String Theory", 2011年7月28日, 基礎物理学研究所.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

吉岡 興一 (YOSHIOKA, Koichi)
慶應義塾大学・理工学部・准教授
研究者番号: 80363323