

令和 4 年 5 月 4 日現在

機関番号：13301

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2021

課題番号：18K03644

研究課題名（和文）中間エネルギースケールの新物理から探る拡張標準模型

研究課題名（英文）Study of extended standard models based on new physics at intermediate scales

研究代表者

末松 大二郎 (Suematsu, Daijiro)

金沢大学・数物科学系・教授

研究者番号：90206384

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,900,000円

研究成果の概要（和文）：強い相互作用におけるCPの破れの問題の解決や小さなニュートリノ質量生成、宇宙のインフレーションに強く関連すると考えられる 10^{9} から 10^{14} GeVの中間エネルギースケールにおける新物理存在の可能性に着目し、その新物理を基礎に素粒子の標準模型を越える理論構造の探索を進めた。中間エネルギースケールにおいて一重項スカラーとベクトル的フェルミオンを導入した高エネルギー領域での模型を想定することによって、クォーク・レプトンの質量階層構造とフレーバー混合、強い相互作用におけるCPの破れの問題、宇宙のインフレーションなどの標準模型の課題が互いに関連した形で説明され得ることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

標準模型は自然界の基本構造を記述する理論と考えられてきたが、ニュートリノ質量、暗黒物質、宇宙のバリオン数、インフレーション等の標準模型の枠組み内では説明が困難な実験・観測結果がもたらされ、標準模型を何らかの形で拡張することが必要であることが近年明らかになってきている。このような状況下で、本研究では中間エネルギースケールにおける新物理を切り口に検討を加え、これらの問題が中間エネルギースケールの物理を通して密接に関連しあっている可能性があることを明らかにし、拡張標準模型の研究に新たな一つの方向性を与えた。

研究成果の概要（英文）：We have studied extended theoretical frameworks of the standard model from a view point of possible new physics at intermediate scales from ten to the ninth GeV to ten to the fourteenth GeV which are strongly related to the strong CP problem, small neutrino mass generation and inflation of the Universe. We have shown that such models could explain hierarchical mass spectrum of quarks and leptons, their flavor mixing and CP violating phase, the strong CP problem, and inflation in a mutually related way if we introduce singlet scalars and vector-like fermions to the standard model.

研究分野：素粒子物理学

キーワード：ニュートリノ 暗黒物質 宇宙のバリオン数 インフレーション 標準模型の拡張 CP 対称性の破れ

1. 研究開始当初の背景

小さなニュートリノ質量生成と暗黒物質の存在を関係付ける輻射シーソー模型においては、ニュートリノ質量の1ループレベルでの生成と暗黒物質の存在を保証する Z_2 対称性の存在が鍵となっている。この Z_2 対称性をTeV領域の $U(1)$ ゲージ対称性の残存離散対称性で見做す模型も提案されている例はあるものの、その導入は人為的で起源を問題としないことが多い。これを標準模型の他の問題を解決するために導入される対称性と関連付けることは興味深い課題であり、 $U(1)_{PQ}$ をその候補と考えるという着想から出発した。強い相互作用におけるCP対称性の破れ問題をPeccei-Quinn(PQ)対称性を使って解決する際の問題の一つはドメインウォール問題である。この問題を通常考えられているように許される範囲でPQ対称性をあからさまに破るという方向ではなく、安定なドメインウォールが生成されないようなPQ電荷の付与を考えるという方向で模型の構築を行うことは興味深い試みである。その典型例であるKSVZ模型を輻射シーソー模型と融合させた場合、輻射シーソー模型における Z_2 対称性の役割を $U(1)_{PQ}$ に担わせることが可能となる。輻射シーソー模型の極僅かな拡張により、強い相互作用でのCP対称性の破れの問題が他の標準模型の問題、すなわちニュートリノ質量の存在や暗黒物質の存在などと互いに密接に関連する可能性が生まれる。このような事情は強い相互作用におけるCP対称性の破れ問題に関わる中間エネルギースケール以外でも、標準模型の問題を解決するために導入される新物理について成立する可能性がある。このような観点から、その存在が期待される中間エネルギースケールでの新物理から得られる有効理論を、より深く系統的に検討をすることを計画するに至った。

2. 研究の目的

素粒子の標準模型は多様な実験結果を見事に説明することで大きな成功を納めてきたが、ニュートリノ振動現象に基づくニュートリノ質量の発見と暗黒物質の存在を明らかにした宇宙観測などにより、現在大変革を迫られている。今後、素粒子実験・宇宙観測によってもたらされる各種の実験データは、標準模型の拡張に関する重要なヒントをもたらすことが期待される。このような状況の中で素粒子の標準模型を越える理論的枠組みについて考察を進めることは、基礎科学の分野における極めて重要な学術的課題である。本研究では、様々な実験・観測を通して明らかになってきたニュートリノ質量とフレーバー混合の存在、暗黒物質の存在、バリオン・反バリオン数非対称性等について、標準模型の問題を解決するために導入される中間エネルギースケールの新物理に着目し、そこから得られる有効理論として拡張標準模型を捉えることにより、標準模型の課題を矛盾なくかつ包括的に説明する可能性を持つ模型を構築することを目指す。

30年を越えて続けられた標準模型におけるゲージ階層性問題の解決という理論的動機付けを基礎に置いた研究は、超対称性の導入をはじめ、多くの興味深い理論的可能性を提示してきた。しかし、LHC実験の結果は現時点でこれらに対して必ずしも肯定的なデータを示しているとは言えず、標準模型を越える物理の探索はその有力な方向を見失った状態にあるとも言える。標準模型は極めてシンプルな構造でありながら驚くほど多様な実験結果を説明する。このような模型の性質を維持しつつ標準模型で説明できない実験・観測結果を説明するためには、それぞれの問題に対してその解決に必要な個別の拡張を考えるのではなく、ある共通の拡張に伴い互いにこれらの問題が関連する形で解決されるという形をとる可能性が高いと予想される。そのような拡張の代表例は中間エネルギースケールにおける新物理の導入である。標準模型で説明できない実験・観測結果の説明のために要求される中間エネルギースケールの典型例として以下のものが挙げられる。

* 強い相互作用におけるCP対称性の破れ問題の解決に係るPeccei-Quinn(PQ)対称性のやぶれのスケール(10^9 - 10^{12} GeV)

* シーソー機構による小さなニュートリノ質量生成に係る右巻きニュートリノの質量スケール(模型に大きく依存するが典型的には 10^9 - 10^{13} GeV)

* 宇宙背景放射の揺らぎの振幅から要請されるインフレーションに係るエネルギースケール(10^{14} GeV)

このエネルギースケール周辺にこれらの問題に係る新物理が存在する場合、その有効理論として拡張標準模型が導かれる。その枠組み内で標準模型の問題が互いに関連しつつ同時に解決されるという可能性は、標準模型の拡張に対して一つの有望な指導原理を与え得る。本研究では、このような視点から拡張標準模型の構築を行い、その現象論的帰結について検討する。

3. 研究の方法

本研究の課題の一つである強い相互作用におけるCP対称性の破れの問題に係る中間エネルギースケールにおける新物理に関連して、ドメインウォール問題を回避するPQ電荷の付与を行うことにより構築された拡張模型においては、輻射シーソー模型における Z_2 対称性の役割を $U(1)_{PQ}$ が担い、ニュートリノ振動を説明するニュートリノ質量生成と暗黒物質残存量、及び宇宙のバリオン数生成が可能であること、 $U(1)_{PQ}$ とその自発的破れがクォークの質量階層構造の説

明に係り得ること等を既に明らかにしてきた。これらの研究成果を踏まえながら強い相互作用における CP 対称性の破れに係る新物理について系統的な研究を進めるとともに、研究対象を他の中間エネルギースケールにおける新物理へと広げることにより、拡張標準模型構築へ向けたヒントを見出すことを目指す。

本研究において主として取り扱う具体的な課題と研究方法は次のようなものである。

- (1) PQ 対称性の低エネルギー領域での物理的役割の検討
- (2) 具体的な再加熱過程を組み込んだインフレーション模型から導かれる拡張標準模型の構築と現象論的解析
- (3) 複数の新たな $U(1)$ ゲージ対称性を持つ超対称模型における中間エネルギースケールのもたらし新物理の解明

4. 研究成果

- (1) 中間エネルギースケールで自発的に破れる局所 $U(1)$ 対称性と Froggatt-Nielsen 機構に寄与する大域的 $U(1)$ 対称性で標準模型を拡張することにより、標準模型における未解決課題であるクォーク・レプトンの質量階層構造とフレーバー混合、強い相互作用における CP 対称性の破れ問題、及び暗黒物質の存在が互いに密接に関連し合う形で説明されることを示した。同時に、強い相互作用における CP 対称性の破れ問題を解決する Peccei-Quinn 対称性がこれらの対称性の自発的破れの結果として、量子重力による破れを満足いく程度に制限する十分に良い対称性として実現されること、及びドメインウォール問題を回避する形で導かれることを示した。
- (2) 強い相互作用における CP 対称性の破れ問題について、自発的 CP 対称性の破れを想定する Nelson-Barr 模型と Peccei-Quinn 機構に基づく axion 模型を組み合わせた形で解決する模型を Pati-Salam 型統一模型の枠組みで構築し、この模型においては強い相互作用における CP 対称性の破れ問題を回避しつつ、小林・益川行列の CP 位相と PMNS 行列の CP 位相を同時に導けることを示した。さらに、模型の低エネルギー領域での有効理論は輻射ニュートリノ質量模型の形をとることを示し、ニュートリノ質量や暗黒物質について定量的な解析を与えた。
- (3) ニュートリノ質量と暗黒物質を関連付けるタイプ III 型輻射ニュートリノ質量模型においてタイプ I 型輻射ニュートリノ質量模型とのハイブリッド模型を提案し、TeV スケールに近い低エネルギー領域でレプトジェネシスが可能となることを示した。右巻きニュートリノと 3 重項フェルミオンの質量起源をもたらし 1 重項スカラーを導入することにより、ニュートリノ湯川結合定数の大きさに依ることなく 1 重項スカラーにより媒介される散乱過程を通して、最も軽い右巻きニュートリノが十分な量だけ熱浴中に生成されることを示し、右巻きニュートリノ質量が TeV スケールに近い場合においても十分な宇宙のバリオン数が生成され得ることを示した。
- (4) 右巻きニュートリノ質量の起源を与え、かつインフレーションの起源をもたらし 1 重項スカラー場を輻射ニュートリノ質量模型に導入することにより拡張模型を構成し、その現象論的性質を調べた。特にその質量が暗黒物質候補となる不活性 2 重項スカラーとの間で共鳴条件を満たす領域にある場合について、暗黒物質の物理やバリオン数生成への影響について検討し、暗黒物質対消滅による 2 光子生成過程の観測可能性や低エネルギースケールでのレプトジェネシスの実現可能性を指摘した。
- (5) 自発的 CP 対称性の破れを想定する Nelson-Barr 模型と Peccei-Quinn 機構に基づく axion 模型を組み合わせ、輻射補正を考慮した場合にも強い相互作用における CP 対称性の破れ問題を回避でき、かつ小林・益川 CP 位相と PMNS 行列の CP 位相を同時に導ける模型を新たに提案した。さらにこの模型で CP 問題に解を与えつつ、ニュートリノ質量や暗黒物質に関する実験結果の説明を可能とするパラメータに対して、 10^9 GeV より低いエネルギー領域におけるレプトジェネシスを調べ、この領域においても十分な宇宙のバリオン数生成が可能となることを示した。
- (6) 標準模型においては、CP 対称性の破れは湯川結合定数の複素位相に由来すると考えられており、CP 対称性は模型の対称性とはなっていない。CP 対称性が模型の厳密な対称性であるとした場合、CP の破れは 1 重項スカラー場による自発的破れによりもたらされ、強い相互作用での CP 対称性の破れの問題の回避と湯川結合の複素位相の実現は Nelson-Barr 機構により実現される可能性が生まれることに注目し、複数の 1 重項スカラー場とベクトル型のフェルミオンによる模型の拡張を提案した。これらのスカラー場が重力と非最小結合を持つと宇宙のインフレーションを引き起こすインフラトンとして機能するため、CP 対称性の破れとインフレーションが密接に関連する可能性が生じることを指摘した。さらに、この模型でのインフレーションと再加熱の特徴、更には宇宙背景放射の揺らぎの観測結果を満たす条件下での低エネルギー領域の物理として、小林・益川 CP 位相の実現可能性と 10^9 GeV より低いエネルギー領域でのレプトジェネシスを解析し、十分なバリオン数生成が可能であることを示した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 6件）

1. 著者名 Tsuyoshi Hashimoto, Norma Sidik Risdianto, Daijiro Suematsu	4. 巻 104
2. 論文標題 Inflation connected to the origin of CP violation	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 075034 (1-22)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.104.075034	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 該当する
1. 著者名 Daijiro Suematsu	4. 巻 81
2. 論文標題 Low scale leptogenesis in a model with promising CP structure	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The European Physical Journal C	6. 最初と最後の頁 311(1-8)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1140/epjc/s10052-021-09109-5	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Tsuyoshi Hashimoto, Daijiro Suematsu	4. 巻 102
2. 論文標題 Inflation and DM phenomenology in a scotogenic model extended with a real singlet scalar	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 115041(1-18)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.102.115041	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Daijiro Suematsu	4. 巻 100
2. 論文標題 Low scale leptogenesis in a hybrid model of the scotogenic type I and III seesaw models	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 055008(1-9)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.100.055008	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Daijiro Suematsu	4. 巻 100
2. 論文標題 Pati-Salam unification with a spontaneous CP violation	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 055019(1-13)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.100.055019	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Daijiro Suematsu	4. 巻 78
2. 論文標題 An extension of the SM based on effective Peccei-Quinn Symmetry	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 The European Physical Journal C	6. 最初と最後の頁 881(1-12)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1140/epjc/s10052-018-6370-3	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

[学会発表] 計9件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 3件)

1. 発表者名 橋本剛、末松大二郎
2. 発表標題 拡張Scotogenic模型におけるインフレーションと暗黒物質の現象論
3. 学会等名 日本物理学会第76回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 橋本剛、末松大二郎
2. 発表標題 Inflation and dark matter phenomenology in an extended scotogenic model
3. 学会等名 Frontiers of Computational Physics from meV to MeV (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 橋本剛、末松大二郎
2. 発表標題 拡張 Scotogenic 模型におけるインフレーションと暗黒物質
3. 学会等名 2020年度 日本物理学会北陸支部定例学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 橋本剛，末松大二郎
2. 発表標題 Inflation and DM phenomenology in an extended scotogenic model with a real singlet scalar
3. 学会等名 KASHIWA DARK MATTER SYMPOSIUM (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 橋本剛，Idham Shay Alam，末松大二郎
2. 発表標題 自己相互作用を持つ暗黒物質の対消滅によるニュートリノフラックス
3. 学会等名 日本物理学会第75回年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 橋本剛，Idham Shay Alam，末松大二郎
2. 発表標題 自己相互作用を持つ暗黒物質とその間接探索
3. 学会等名 第1回地下宇宙若手研究会、東京大学
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Idham Syah Alam, 橋本剛, 末松大二郎
2. 発表標題 自己相互作用を持つ暗黒物質の対消滅によるニュートリノフラックス
3. 学会等名 2019年度 日本物理学会北陸支部定例学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 橋本剛, 末松大二郎
2. 発表標題 シーソー機構におけるニュートリノのMagnetic Transition
3. 学会等名 第47北陸信越地区素粒子論グループ合宿、金沢大学
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Daijiro Suematsu
2. 発表標題 Roles of Peccei-Quinn symmetry in an effective model for dark matter and neutrino mass
3. 学会等名 The XXVIII International Conference on Neutrino Physics and Astrophysics (Neutrino 2018) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

末松大二郎 素粒子物理と対称性 サイエンス社 数理科学2019年3月号

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------