2版

様　式　C－１９、F－１９－１、Z－１９　（共通）

科学研究費助成事業　　研究成果報告書

令和　４ 年　 ６ 月 １３ 日現在

機関番号：１２４０１

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2021

課題番号：２０Ｋ１４４５９

研究課題名（和文）統一的な世代構造におけるCPの破れの探索とその観測的検証

研究課題名（英文）Search for CP violation in a unified flavor structure and its observational verification

研究代表者

梁　正樹（Yang, J.S. Masaki）

埼玉大学・理工学研究科・非常勤講師

研究者番号：５０８１５９４１

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費）　　　600,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、湯川相互作用（ヒッグス粒子と通常粒子の間に働き、質量を生み出す力）における統一的なCP対称性（粒子反粒子の間の対称性）の破れをもつ世代構造を探索した。結果、diagonal reflection symmetriesという標準模型における新しいCP対称性を発見した。

これはCPの破れを最も軽い第１世代のみに限定するもので、four-zero textureという世代構造と組み合わせることで現在観測されているクォーク・レプトンの質量と混合行列を説明し、現在観測されつつあるニュートリノ振動におけるCPの破れを予言できる。この一般化されたCP対称性のさまざまな現象論的展開を行なった。

研究成果の学術的意義や社会的意義
ヒッグス粒子が発見されたとはいえ、その相互作用を決定する原理や法則は未だ謎のまま残されている。『ヒッグスとは何か？』という問いになんらかの形で答えることは、この時代における素粒子理論の主要課題の一つである。ここで発見された新しいCP対称性はヒッグスが第１世代のみを特別扱いすることを示唆し、この性質の解明や新たな展開をもたらすものと考える。

研究成果の概要（英文）：In this study, we searched for flavor structures with a unified violation of CP symmetry (symmetry between particle-antiparticle) in Yukawa interactions (the force acting between the Higgs boson and ordinary particles and producing mass). As a result, we found a new (generalized) CP symmetry in the Standard Model called diagonal reflection symmetries.

These symmetries restricts the CP violation to the lightest first generation, and in combination with a flavor structure called the four-zero texture, explain the currently observed quark-lepton masses and mixing matrices, and predicts the CP violation in the currently observed neutrino oscillations. Various phenomenological developments of these generalized CP symmetries are presented.

研究分野：素粒子物理学（現象論）

キーワード：ニュートリノ振動　世代の謎　CPの破れ

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

様 式 Ｃ－１９、Ｆ－１９－１、Ｚ－１９（共通）

１．研究開始当初の背景

近年多くの振動実験の結果からニュートリノ振動行列（牧-中川-坂田行列）のパラメーターが精度良く決定され、23 世代混合はほぼ最大(45 度、bimaximal)であることがわかっている。ニュートリノの CP の破れであるディラック位相も最大に近いことが分かっているが、現在でも 135 度→366 度(3σrange)[Esteban, Gonzalez-Garica, et.al, hep-ph 1811.05487]とはっきり決まってはいない。ここから、tri-bimaximal mixing などといった特徴的な混合行列とそれに付随する質量行列の構造が提唱されてきた。

一方で、標準模型では説明できないような現象（例えばμ粒子の異常磁気能率 (g-2)μ）がいくつか報告されている。とくに、Icecube 実験の観測データに 400 TeV～1 PeV のエネルギー領域でニュートリノの欠損（IceCube gap）が存在し、これが新物理の兆候の可能性であることが指摘されている[M.Ibe and K.Kaneta, Phys.Rev.D 90, 053011 (2014)]。

２．研究の目的

近年のニュートリノ振動実験の結果を元に、統一的な世代構造と CP 対称性の破れをもつ模型を構築し、他の CP を破る物理量の解析から模型の観測的・宇宙物理的な検証を行うこと。

３．研究の方法

(1) μ-τ反射対称模型の構築と観測量の評価

μ-τ対称性と複素共役を組み合わせたμ-τ反射対称性(reflection symmetry)は、荷電レプトンの質量が対角的な基底で定義され、CP を破る位相はニュートリノの質量行列のみから来る。もしこれを素朴にクォークセクターに適用すると、CP 位相が up-type quark と down-type quark で相殺してしまい、CP の破れがゼロとなり観測と合わない。また、CKM 行列の CP 位相は標準的な PDG 表示では 70 度程度で完全に最大とは言えないが、小林益川表示やその他の表示であれば、ほぼ 90 度になり最大になる基底が存在する。そのような基底における CP 対称性の構造や性質を調査し、統一的な記述をもつ模型を構築する。そこからクォーク・レプトンそれぞれの混合行列を求め、実際の観測との比較から模型の制限を行う。

(2) Lμ-Lτ模型の宇宙物理的制限

μ-τ対称性に強く関連する模型として、Lμ-Lτ模型の制限と構築を行う。これは標準模型のゲージ群に新たな U(1)Lμ-Lτ群を導入し、新しいゲージボソン Z’を予言する模型である。この Z’粒子の共鳴散乱によって、IceCube gap とμ粒子の異常磁気能率が同時に解決できる可能性が示されている。このような MeV 程度の軽いゲージボソンを導出するようなヒッグス機構を持つ模型を構築し、観測的検証が可能か議論を行う。

４．研究成果

(1)新たな generalized CP 対称性の研究

近年のニュートリノ振動における CP の破れ(CPV)を説明するために、generalized CP 対称性 (GCP、複素共役とユニタリー変換を合わせたもの)の研究を行った。[論文 1]では、観測されたクォーク質量、CKM 行列と矛盾しない four-zero texture ($m_{11} = m_{13} = m_{31} = 0$)をもつ質量行列が、別の基底でμ-τ反射対称性を持つことを示した。また、標

準模型フェルミオン(f=u,d,ν,e)の質量行列 m_{f}が２つのμ-τ reflection 対称性, T_{u} m_{u,ν}T_{u}= m_{u,ν}^{*}, T_{d} m_{d,e} T_{e} = m_{d,e}^{*}をもつことを仮定すると、すべての fermion 質量、混合と CP の破れを精度良く（誤差 O(10^{-3})程度で）再現することができる。レプトンの混合行列(MNS 行列)の CP 位相に対する予言としてδ_{CP}　 203°を得た。これは、最新の global fit における通常階層の best fit δ_{CP} / °= 197^{+27}_{-24} [Esteban:2020cvm]に非常に近いため、今後の T2K 実験やハイパーカミオカンデによる精密検証が待たれる。

[論文 2]では、この２つのμ-τ反射対称性を元の four-zero texture の基底に戻すと R m_{u,ν}^{*} R = m_{u,ν}, m_{d,e}^{*} = m_{d,e}, R = diag (-1,1,1), という新しい GCP になっていることを示した。これはμ-τreflection 対称性からμ-τ対称性を引いた結果現れた GCP と考えることができるため、diagonal reflection symmetries (DRS)と呼ぶことにした。

この対称性は CP 位相を１行１列のみに限定するため、世代混合における CP の破れの起源が第１世代のカイラル対称性の破れに付随し、Higgs の相互作用が第１世代のみを”特別扱い”することを意味している。対称性の破れを考慮すれば、CP を破るスカラーと破らないスカラーの存在を示唆している。

また、第１世代の湯川結合は非常に小さいので、これらの DRS と zero textures はほとんど繰り込みを受けないことを数値的に示した。よって、この世代構造は GUT スケールのような高エネルギーからそのまま受け継がれている可能性がある。対称性の形は、左右対称模型や Pati--Salam 統一模型を示唆している。

この DRS の現象論的展開を行った。CKM 行列の測定は O(10^{-4})程度の精度を持つため、上の結果では最も小さな|V_{ub}|　 0.003 を説明できない。この点を改善するために、[論文 4]では 0 でない(m_{u})_{11}成分を許容することで、CKM 行列の再現度が O(10^{-4})にできることを示した。このとき上記の DRS はほぼ厳密な対称性になる。

また、ニュートリノ振動行列 U_{MNS}の２列目は絶対値の成分がほぼ等しい trimaximal mixing をもち、これは magic 対称性という Z_{2}対称性から予言される。[論文 5]では、上記の DRS を持つ four-zero texture に対して、magic 対称性を課すことの帰結を調べた。結果、ニュートリノ質量行列は２つのパラメーター、レプトンセクター全体は６つのパラメーターで表される。精度は O(10^{-2})と低くなるが、５つの質量パラメーターと１つの混合角(ここではθ_{23})を input とすれば他の全ての物理量を予言できることがわかった。

(2) Lμ-Lτ模型における majoron の影響

宇宙論の分野では、観測方法の違いにより宇宙膨張の速度を表す Hubble 定数の推定値が大きく異なるという問題がある。Hubble 定数の測定方法には大きく分けて、近傍宇宙の観測から推定する方法と、遠方宇宙の観測結果からΛCDM モデルに基づいて推定する方法があるが、これらそれぞれから推定される Hubble 定数の間に 3-5σ程度のずれがあることが報告されている。このずれは Hubble tension と呼ばれている。

[論文 3]では、ニュートリノの質量起源まで説明できる繰り込み可能な U(1)Lμ-Lτ 模型において、Hubble tension と(g-2)μ anomaly を同時解決できるようなパラメータが存在

するかを探索した。この模型においてはレプトン数の破れに付随する Majoron という南部ゴールドストンボソンが生じるため、この Majoron を含むような形で宇宙の時間発展を追うボルツマン方程式を拡張した。その結果、Hubble tension と$(g-2)\mu$ を同時解決するパラメーター領域 に Majoron の寄与が影響することを示した。

(3)　type-I シーソー機構の公式と一般的性質の研究

type-I シーソー機構の一般的な構造について研究を行なった。上述の four-zero texture はシーソー不変性という性質をもち、右巻きニュートリノ質量行列M_{R}とニュートリノ湯川行列$Y\nu$が four-zero texture ならば、シーソー機構によって現れる$m\nu=Y\nu M_R^{-1} Y\nu^T$もまた four-zero texture を持つ。

[論文 6]では、この不変性がある行 i に対する整列条件 $(Y_{\nu})_{ij}\propto(M_{R})_{ij}\Rightarrow(Y_{\nu})_{ij} \propto (m_{\nu})_{ij}$ for $j = 1,2,3$ から来ることを示した。つまり、Y_{ν}とM_{R}の行ベクトルが比例すれば、m_{ν}の行ベクトルも比例することになる。このような整列は、type-I シーソー機構が大きな fine-tuning を持たないために広いクラスの世代構造で必要になると考えられる。

この type-I シーソー機構に対する自然さの研究を通して、[論文 7]では任意の基底で成立する type-I シーソー機構の一般的な公式を導出した。これは１次摂動による MR の近似的なスペクトル分解に対応していて、数学的には対称行列 $M^{-1} = L M^{-1}_{diag} L^{T}$という修正コレスキー(または LDL^{T})分解に基づいている。ここで、L は対角要素がすべて１であるような下単三角行列(lower unitriangular matrix)である。

シーソー機構の表示の多くはある特定の基底に依存したものが多いが、この公式によって、シーソー機構の対称性や大きな相殺による fine-tuning がない条件などを任意の基底で解析することが可能になる。また、通常の対角化とは違い複雑な３次方程式を解く必要がないため、シーソー機構の一般的な性質を調べる上でも有用であると考えられる。

５．主な発表論文等

〔雑誌論文〕　計7件（うち査読付論文　7件／うち国際共著　0件／うちオープンアクセス　6件）

１．著者名 Yang J.S. Masaki	４．巻 806
２．論文標題 Interplay between exact μ-τ reflection symmetries, four-zero texture and universal texture	５．発行年 2020年
３．雑誌名 Physics Letters B	６．最初と最後の頁 135483
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.physletb.2020.135483	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 －

１．著者名 Yang J.S. Masaki	４．巻 45
２．論文標題 Diagonal reflection symmetries and universal four-zero texture	５．発行年 2021年
３．雑誌名 Chinese Physics C	６．最初と最後の頁 43103
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1088/1674-1137/abdeab	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 Araki Takeshi, Asai Kento, Honda Kei, Kasuya Ryuta, Sato Joe, Shimomura Takashi, Yang J. S. Masaki	４．巻 2021
２．論文標題 Resolving the Hubble tension in a U(1)_{Lμ-Lτ} model with the Majoron	５．発行年 2021年
３．雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	６．最初と最後の頁 103B05
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1093/ptep/ptab108	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 Yang J.S. Masaki	４．巻 972
２．論文標題 Almost exact diagonal reflection symmetries and three-zero texture	５．発行年 2021年
３．雑誌名 Nuclear Physics B	６．最初と最後の頁 115549～115549
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.nuclphysb.2021.115549	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 Yang J.S. Masaki	4．巻 2022
2．論文標題 Diagonal reflection symmetries, four-zero texture, and trimaximal mixing with predicted θ13 in an A4 symmetric model	5．発行年 2021年
3．雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6．最初と最後の頁 013B12
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1093/ptep/ptab162	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 Yang J.S. Masaki	4．巻 2022
2．論文標題 Conditions of naturalness and fine-tuning for the type-I seesaw mechanism with four-zero texture	5．発行年 2022年
3．雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6．最初と最後の頁 043B05
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1093/ptep/ptac054	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 Yang Masaki J S	4．巻 2022
2．論文標題 A general formula by LDL^T decomposition for the type-I seesaw mechanism	5．発行年 2022年
3．雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6．最初と最後の頁 051B01
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1093/ptep/ptac060	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6件（うち招待講演　0件／うち国際学会　2件）

1．発表者名 梁　正樹
2．発表標題 Reflection symmetries and universal four-zero texture
3．学会等名 日本物理学会
4．発表年 2020年

１．発表者名 梁　正樹
２．発表標題 Reflection symmetries and universal four-zero texture
３．学会等名 Flavor Physics WorkShop 2020（KEK）
４．発表年 2020年

１．発表者名 梁　正樹
２．発表標題 Reflection symmetries and universal four-zero texture
３．学会等名 素粒子現象論研究会（大阪市立大）
４．発表年 2020年

１．発表者名 Yang J.S. Masaki
２．発表標題 Diagonal reflection symmetries and universal four-zero texture
３．学会等名 SUSY 2021（国際学会）
４．発表年 2021年

１．発表者名 Yang J.S. Masaki
２．発表標題 Diagonal reflection symmetries and universal four-zero texture
３．学会等名 DISCRETE 2021（国際学会）
４．発表年 2021年

１．発表者名 梁　正樹
２．発表標題 Diagonal reflection symmetries, universal four-zero texture, and trimaximal mixing
３．学会等名 日本物理学会 秋季大会
４．発表年 2021年

〔図書〕　計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

－

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