

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 16 日現在

機関番号：13301

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2010～2014

課題番号：22540271

研究課題名(和文)フレーバー対称性に基づく素粒子の標準理論の拡張

研究課題名(英文)Extension of the standard model based on flavor symmetry

研究代表者

久保 治輔(Kubo, Jisuke)

金沢大学・数物科学系・教授

研究者番号：40211213

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：フレーバー対称性と超対称性を導入することによって、素粒子の標準理論を拡張し、その現象論的帰結と実験的検証可能性を調査した。クォークの質量と混合行列が更に精密に測定されれば、フレーバー対称性は検証可能であることを明らかにした。また、フレーバー対称性のために暗黒物質の質量と中性子の電気双極子モーメントが、B中間子のCPの破れの大きさと密接に関連していることを見だし、LHCbでBs中間子のCPの破れが高精度で測定されれば、フレーバー対称性は検証可能であることを示した。これらの結果を様々な国際会議で発表し、総合報告を行なった。

研究成果の概要(英文)：The Standard Model of Elementary Particles is extended on the basis on flavor symmetry and supersymmetry. Flavor symmetry is introduced to fix the flavor structure of the quarks and leptons, while supersymmetry is introduced to soften the problem caused by the quadratic divergence in the Higgs mass correction. We have found that, if the quark masses and the Kobayashi-Maskawa quark mixing matrix are more precisely measured, the presence of a low energy flavor symmetry can be experimentally confirmed. We also have found that the dark matter mass and the electric dipole moment of the neutron are due to flavor symmetry closely related to CP violation of the Bs meson, so that a precise measurement of CP violation of the Bs meson can confirm a low energy flavor symmetry. These results are reported in various renowned international conferences and published in different renowned international journals, including a review article in Fortschritt der Physik.

研究分野：素粒子論

キーワード：素粒子論 自発的対称性の破れ 暗黒物質

1. 研究開始当初の背景

(1) 現在の素粒子の標準理論には、重力理論を含んでいない等の幾つかの理論的問題と、ニュートリノの質量がゼロであることや暗黒物質の候補粒子が存在していないという近年の観測と矛盾しているという基本的問題がある。これらの問題は標準理論を拡張することで解決されると広く信じられているが、果たしてどのように拡張されるべきなのか分かっていない。このため、素粒子物理学研究の最大の興味は、この点に集中していると言っても過言ではないだろう。更に、底エネルギーレベルに於いても問題がある。それは、物質粒子のフレーバーの構造を決めている湯川相互作用を決定する原理が欠けているという問題である。この原理が欠けているため、クォーク・レプトンの質量とその混合の構造を決められない。

(2) 当研究代表者は、非可換有限群に基づくフレーバー対称性の導入とその帰結や超対称標準理論に於ける超対称フレーバー問題に関する研究を行ってきた [参 1-参 5]。特に、底エネルギーで(場の量子論的に)hardに破れていないフレーバー対称性に注目してきた。フレーバー対称性は hard に破れていると、実験的に検証可能な定量的な予測を行うことが難しくなる。フレーバー対称性の破れは超対称性の破れと密接に関係しており、自然界では超対称性は明らかに破れているので、フレーバー対称性の破れの実験的検証は超対称性の間接的な実験的検証であると考えられることもできる。

(3) 当研究代表者は、超対称フレーバー問題の解決方法を幾つか提案してきたが、近年、低エネルギーフレーバー対称性を導入することによって、この問題を柔らげることができることを指摘した[参 1, 参 2, 参 4]。低エネルギーで自発的にしか破れていない非可換有限群に基づいたフレーバー対称性に関する研究は散発的にしか行われていなかった。しかし、ニュートリノ間の混合が大きいことが実験的に判明した後、ニュートリノ間の大きな混合を非可換有限群に基づいたフレーバー対称性で説明する試みが始まった。ニュートリノ混合行列の (1,3) 成分が小さいことや、大気ニュートリノの混合が maximal であることがこのフレーバー対称性の帰結として理解できる。論文[参 5]は、低エネルギーで自発的にしか破れていない非可換有限群 S_3 を基にしたフレーバー対称性を使ってこれらのことを示した世界最初の例であるという背景がある。

2. 研究の目的

底エネルギーレベルに於ける素粒子標準理論の持つ最大の問題の一つは、物質粒子のフレーバーの構造を決めている湯川相互作用を決定する原理が欠けていることである。即

ち標準理論の枠組みでは、クォーク・レプトンの質量とその混合(小林・益川のクォーク混合と牧・中川・坂田のニュートリノ混合)の構造を決めることができない。また、Higgs 粒子の質量補正が 2 次発散をしていること、Higgs 場の自己相互作用が漸近自由ではないという二つの理論的事実から、標準理論は Fermi エネルギースケールの約 10 倍以上では理論的・数学的に意味をなさないものであるという理論的欠陥がある。当研究目的の要旨は、この二つの問題の一つ目は底エネルギーフレーバー対称性を導入することで、二つ目は超対称性を導入することによって、標準理論を拡張し、拡張した理論の現象論的帰結とその実験的検証可能性を調査することである。

3. 研究の方法

当研究は、素粒子の理論的・現象論的研究である。その方法は、素粒子の模型、またはあるクラスの模型を考察し、それらの模型が予測する物理量(素粒子の質量、その混合、素粒子の反応、暗黒物質の性質等)を定量的且つ定性的に評価し、既に知られている実験結果を再現することができるか否か、或は、まだ実験結果がない場合は、将来の実験で検証可能か否かを調査することによって新しい知見を得ることである。

4. 研究成果

(1) 将来、クォークの質量と小林・益川クォーク混合行列が格子 QCD や SuperKEKB 等で更に精密に測定されれば、低エネルギーフレーバー対称性は検証可能であることを明らかにした。特に有限群 Q_6 に基づくフレーバー対称性を導入した超対称モデルにおいて、フレーバー対称性と CP の対称性が自発的に破れる可能性を探り、その場合の FCNC 反応や CP の破れを定量的に評価することを行なった。また、暗黒物質の質量と中性子の電気双極子モーメントが、B 中間子における CP の破れの大きさと密接に関連していることを見だし、LHCb 等で B_s 中間子における CP の破れが高精度で測定されれば、ここでも低エネルギーフレーバー対称性は検証可能であることを示した(研究業績[11,12,13])。これらの結果を様々な国際会議で発表し[⑦, ⑧]、総合報告(研究業績[6])を行なった。この単名の論文はこの分野の研究で業績を上げた研究者がドイツの権威のある雑誌 Fortschritte der Physik に共に書いた Special Issue “Flavor Symmetries and Neutrino Oscillations” が含む 11 編の一つである。

(2) しかし、最近の原子炉を使ったニュートリノ振動の実験によって、ニュートリノ混合行列の第(1,3)成分が比較的大きいことが判明した。第(1,3)成分が小さいという仮定はフレーバー対称性を導入する一つの大きな

動機になっていたが、それが実験的に排除されてしまった。また、最新の LHC の実験結果は、超対称性のエネルギースケールが期待されていたより高いことを示唆している。つまり、当研究の基本的前提が最近の実験データによって揺るがされていることになった。一方、フレーバー対称性のおかげで複数の暗黒物質が存在できることに着目し、そのような系についての研究を新たに展開した。

(3) 離散的フレーバー対称性を導入することによって摂動最低次でニュートリノ質量を禁止し、量子補正で生成する輻射シーソー模型に関する研究を行なった。この離散対称性は同時に暗黒物質の安定性を保証するもので、さらに対称性を拡張すると、複数種類の暗黒物質が存在できる。複数種類の暗黒物質が存在する系は以前から知られていたが、特に最近注目を浴びるようになった。今回考察した模型には $Z_2 \times Z_2$ 対称性があり、3 種類の暗黒物質が対消滅し単色エネルギーのニュートリノを生成する。太陽に捉えられた暗黒物質の対消滅によって生成される単色エネルギーのニュートリノフラックスを計算し、南極でニュートリノの観測を行なっている IceCube における検出可能性を議論した(研究業績[1,7,8,10])。これらの結果を様々な国際会議で発表した[⑤,⑥]。将来は、IceCube の実験家と議論を重ね、さらに精度の高い予言を行なう計画である。

(4) 標準理論の hidden sector におけるカイラル対称性の自発的に破れによって生成されたエネルギースケールをスカラー場によって標準理論側に伝達させ、標準理論のスケールの起源を dynamical に理解する模型を考察した(研究業績[2,3,4])。この模型では、複数の南部-Goldstone ボゾンが暗黒物質の候補であり、複数種類の暗黒物質が存在する系の一つである。この系の現象論的帰結(直接・間接観測による検出可能性)を調べた。特に、hidden sector のフェルミオンが電荷を持つように模型を拡張し、Fermi Lat や HESS 等の宇宙観測実験からの制限が満たされているパラメータ領域があることを確かめた(研究業績[2])。hidden sector のフェルミオンが電荷を持つと、hidden sector はもはや dark ではなく、明るく”なり、将来の加速器実験で検証できることを指摘した。これらの結果を様々な国際会議で発表した[①, ②, ③, ④]。この研究結果は加速器の実験家からも注目され、特に ILC 関係の実験家と共同で研究を進める計画である。

<参考文献>

① N. Kifune, J. Kubo and A. Lenz, "Flavor Changing Neutral Higgs Bosons in a Supersymmetric Extension based on a $U(1)$ Family Symmetry",

Phys. Rev. D77 (2008) 076010 (査読有). DOI: 10.1103/PhysRevD.77.076010

② Y. Kajiyama, E. Itou and J. Kubo, "NonAbelian discrete family symmetry to soften the SUSY flavor problem and to suppress proton decay", Nucl. Phys. B743 (2006) 74-103 (査読有).

DOI: 10.1016/j.nuclphysb.2006.02.042

③ K-S. Babu and Jisuke Kubo, "Dihedral families of quarks, leptons and Higgses", Phys. Rev. D71 (2005) 056006 (査読有).

DOI: 10.1103/PhysRevD.71.056006

④ T. Kobayashi, J. Kubo and H. Terao, "Exact S_3 symmetry solving the supersymmetric flavor problem", Phys. Lett. B568 (2003) 83-91 (査読有).

DOI: 10.1016/j.physletb.2003.03.002

⑤ J. Kubo, A. Mondragon, M. Mondragon and E. Rodriguez-Jauregui, "The Flavor symmetry", Prog. Theor. Phys. 109 (2003) 795-807 (査読有).

DOI: 10.1143/PTP.109.795010

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 13 件)

① M. Aoki, J. Kubo and H. Takano, "Multicomponent Dark Matter in Radiative Seesaw Model and Monochromatic Neutrino Flux", Phys. Rev. D90 (2014) 7, 076011 [10 pages] (査読有).

DOI: 10.1103/PhysRevD.90.076011

② J. Kubo, K-S. Lim, M. Lindner, "Gamma-ray Line from Nambu-Goldstone Dark Matter in a Scale Invariant Extension of the Standard Model", JHEP 1409 (2014) 016 [23 pages] (査読有).

DOI: 10.1007/JHEP09(2014)016

③ J. Kubo, K-S. Lim, and M. Lindner, "Electroweak Symmetry Breaking via QCD", Phys. Rev. Lett. 113, 091604 (2014) [5 pages] (査読有).

DOI: 10.1103/PhysRevLett.113.091604

④ M. Holthausen, J. Kubo, K-S. Lim and M. Lindner, "Electroweak and Conformal Symmetry Breaking by a Strongly Coupled Hidden Sector", JHEP 1312 (2013) 076 [28 pages] (査読有).

DOI: 10.1007/JHEP12(2013)076

⑤ M. Aoki, J. Kubo and H. Takano, "Two-loop radiative seesaw mechanism with multicomponent dark matter explaining the possible excess in the Higgs boson decay and at the Fermi LAT", Phys. Rev. D87 (2013) 11, 116001 [11 pages] (査読有).

DOI: 10.1103/PhysRevD.87.116001

- ⑥ J. Kubo,
 “ Super Flavorsymmetry with Multiple Higgs Doublets ”, Fortsch.Phys. 61 (2013) 597-621 (査読有).
 DOI: 10.1002/prop.201200119
- ⑦ M. Aoki, M. Duerr, J. Kubo and H. Takano, “ Multicomponent dark matter system with nonstandard annihilation processes of dark matter ”, AIP Conf.Proc. 1534 (2012) 31-38 (査読無).
 DOI: 10.1063/1.4807340
- ⑧ M. Aoki, M. Duerr, J. Kubo and H. Takano, “ Multi-Component Dark Matter Systems and Their Observation Prospects ”, Phys. Rev. D86 (2012) 076015 [28 pages] (査読有)
 DOI: 10.1103/PhysRevD.86.076015
- ⑨ T. Araki, J. Heeck and J. Kubo,
 “ Vanishing Minors in the Neutrino Mass Matrix from Abelian Gauge Symmetries ”, JHEP 1207 (2012) 083 [16 pages] (査読有).
 DOI: 10.1007/JHEP07(2012)083
- ⑩ M. Aoki, J. Kubo, T. Okawa and H. Takano, “ Impact of Inert Higgsino Dark Matter ”, Phys.Lett. B707 (2012) 107-115 (査読有).
 DOI: 10.1016/j.physletb.2011.12.012
- 11 K.S. Babu, K. Kawashima and J. Kubo,
 “ Variations on the Supersymmetric Q6 Model of Flavor ”, Phys. Rev. D83 (2011) 095008 [11 pages] (査読有).
 DOI: 10.1103/PhysRevD.83.095008
- 12 Y. Kaburaki, K. Konya and J. Kubo,
 “ Triangle Relation of Dark Matter, EDM and CP Violation in B0 Mixing in a Supersymmetric Q6 Model ”, Phys. Rev. D84 (2011) 016007 [12 pages] (査読有).
 DOI: 10.1103/PhysRevD.84.016007
- 13 J. Kubo and A. Lenz,
 “ Large loop effects of extra SUSY Higgs doublets to CP violation in B0 mixing ”, Phys. Rev. D82 (2010) 075001 [12 pages] (査読有).
 DOI: 10.1103/PhysRevD.82.075001

〔学会発表〕(計 8 件)

- ① 招待講演 発表者:久保治輔
 “ A Dynamical Origin of the Electroweak Scale and Nambu-Goldstone Dark Matter ”, 新物理の実証策を考える会, 沖縄科学技術大学院大学, 沖縄, 2015年3月11日-17日
- ② 招待講演 発表者:久保治輔
 “ Scale invariant extension of the standard model and Nambu-Goldstone dark matter ”, Fourth workshop on flavour symmetries and consequences in accelerators and cosmology, Jun. 17-21, 2014, University of Sussex, Brighton, UK

- ③ 招待講演 発表者:久保治輔
 “ Hidden Dark Matter ”, International conference on Flavor Physics and Mass Generation, Feb. 10-14, 2014, Nanyang Technical University, Singapore
- ④ 招待講演 発表者:久保治輔
 “ Combined breaking of electroweak and conformal symmetry by a QCD-like hidden sector ”, The 3rd KIAS Workshop on Particle Physics and Cosmology, Nov.11-15, 2013, Korea Institute for advanced Study, Seoul, Korea
- ⑤ 招待講演 発表者:久保治輔
 “ Multi-Component Dark Matter System with Non-Standard Annihilation Processes of Dark Matter ”, 2nd Workshop on Flavor Symmetries, June 30-July 4, 2012, Technical University of Dortmund, Germany.
- ⑥ 招待講演 発表者:久保治輔
 “ Multi-Component DM System and Their Observation Prospects ”, CETUP(Center for Underground Theoretical Physics and Related Areas) workshop on Dark Matter and Neutrino Physics and Unification, July 19-21, 2012, Deadwood, South Dakota, USA.
- ⑦ 招待講演 発表者:久保治輔
 “ Flavor-Symmetry based Flavor Violation (FSbFV) and CP Violation in Supersymmetry ”, International conference on Flavor Physics in the LHC Era, Nov. 8-12, 2010, Nanyang Technical University, Singapore.
- ⑧ 招待講演 発表者:久保治輔
 “ Flavor-Symmetry based Flavor Violation in Supersymmetry ”, LHC Topical Program 2010, Oct. 25-29, 2010, National Tsing University, Hsinchu, Taiwan

〔図書〕(計 1 件)

- ① J. Kubo, 他 6 名,
 “ Reduction of couplings and its application in particle physics, Finite theories, Higgs and top mass predictions ”, Proceeding of Science, Higgs&top (2014) 001 [339 pages].

6. 研究組織

(1) 研究代表者

久保 治輔 (KUBO, Jisuke)

金沢大学・理工研究域・数物科学系・教授
 研究者番号: 40211213