

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 19 日現在

機関番号：34304

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24340049

研究課題名(和文) 標準模型を越えて統一理論へ

研究課題名(英文) Towards Unified Theories Beyond the Standard Model

研究代表者

九後 太一 (KUGO, Taichi)

京都産業大学・理学部・教授

研究者番号：00115833

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,800,000円

研究成果の概要(和文)：クォークとレプトンの間で対照的な階層的世代間混合構造を手がかりとして、標準模型を越えた所に想定される素粒子の統一理論を探求することを目的として、

(1) 全国にまたがる研究代表者・分担者達がそれぞれの分担課題を個別に研究して研究成果を上げた。特に、混合構造の背後に超弦理論の示唆する離散的対称性やE6ゲージ対称性が隠れている可能性が大きいことを明らかにした。

(2) また、毎年一回Summer Instituteを企画・組織し、全国の研究者(特に若手)の、国内およびアジアでの国際的な、実り多い共同研究・研究協力を推進することができた。

研究成果の概要(英文)：This project aims to build Unified Theories of Elementary Particles which are expected to exist beyond the Standard Model, taking the sharp contrast of hierarchical generation mixing structures between quarks and leptons as a big clue.

(1) The members of this project have individually produced their own good results; in particular, they elucidated that there must be some hidden discrete symmetries and E6 gauge symmetry behind those mixing structures as suggested by superstring theory.

(2) They also organized Summer Institute every year and successfully promoted active young researchers in this field in Japan as well as in East Asia to make fruitful collaborations among them.

研究分野：素粒子論

キーワード：階層的世代間混合性 暗黒物質 ニュートリノ 統一理論 超弦理論 E6大統一理論 超重力理論 フレーバー対称性

1. 研究開始当初の背景

わが国のスーパーカミオカンデの実験によって、1990年代の後半には、大気ニュートリノや太陽ニュートリノでニュートリノ振動が発見され、驚くべきことにレプトンセクターでの世代間混合がクォークセクターとは対照的に大変大きいことがわかった。

これを受けて、素粒子の複合模型の理論で世界をリードしてきた我が国から素粒子統一理論を出すべく、この研究分野の研究者を全国的にかつ有機的に組織して、実り多い共同研究・研究協力を推進することが必要であるとして、坂東昌子氏は1995年以来毎年 Summer Institute を組織してきた。これに協力して九後は、2000-2003年度に特定領域研究(A2)「ニュートリノ振動をめぐる理論的諸問題」、2004-2007年度に基盤研究(B)「余次元世界と素粒子統一理論」、2008-2011年度に基盤研究(B)「素粒子の世代の起源と大統一理論」の科研費を受けて、研究分担者たちと共同してこの Summer Institute を毎年開催して来た。この流れの中で Summer Institute での研究討論を契機にした共同研究が多く行われるようになった。また韓国や台湾からの参加者も増え、現象論分野のアジアの Summer Institute という形に発展してきていた。

2. 研究の目的

わが国の実験グループが発見したニュートリノ振動によって明らかにされたクォークとレプトンの対照的な世代混合構造を大きなヒントとして、また今後出てくる LHC 実験や、Planck 衛星、Fermi 衛星などの観測・実験データを基礎として、超弦理論などの示唆する様々なアイデアや多くの理論的試みを総合的に検討し、標準模型を超えたところに想定される素粒子の(大)統一理論を探究することを目的とする。

この目的に向けて全国にまたがる研究分担者達がそれぞれの分担課題を個別に研究すると共に、毎年一回宿泊型 Summer Institute を企画・組織し、この研究分野の研究者を全国的にかつ有機的に組織し、実り多い共同研究・研究協力を推進するための核とする。近年はこの SI も東アジアの国際 SI へと発展したが、これを本当に東アジアから新しい素粒子論の展開を作り出すアジアの国際共同研究プロジェクトとする。

3. 研究の方法

京都、名古屋、金沢、新潟にいる本研究分担者達は、1995年から続いてきているこれまでの Summer Institute の強力な推進者達であると同時に、各自の研究拠点や SI の場を共同研究の場として、自ら「素粒子統一理論」の分野でそれぞれ特色ある研究を行ってきた。この研究計画でも、さらにそれらの研究を、研究分担者達を核にして、それぞれの

学で、その周りの研究者・ポスドク・大学院生らと、この研究課題「標準理論を越えて統一理論へ」に関するそれぞれのアプローチの研究を遂行する。また、研究分担者が課題としている個別テーマについて、ごく少人数で討論する研究会合を、物理学会の機会やその他で、随時開催する。その上で、年一回の Summer Institute を企画・開催して、全国の理論研究者の有機的な共同研究を組織し、クォーク・レプトンの対照的な世代階層混合構造から暗黒物質・暗黒エネルギーまでの解明をスコープに入れた、新しい素粒子統一理論構築を目指す。

4. 研究成果

ここでは、先ず、研究代表者、研究分担者が本研究計画の下で得た具体的な研究成果を順に述べる。そして最後の(6)で、本科学研究費のもう一つの主たる目的である Summer Institute の3回の開催について述べる。

(1) 九後は、超対称弦の場の理論において長年の懸案であったゲージ固定の問題に取り組み、いわゆる描像変換演算子のカーネルの存在の下で正しい量子化に導くゲージ固定条件を同定した。また、場の理論と Einstein の重力理論の双方にまたがる基本的な問題としての宇宙項問題解決への試みの一つとして、de Rham-Gabadadze-Tolley により最近提案された、重力変数の行列の平方根を含む質量項を持つ新しい「質量を持つ重力理論」を研究した。その理論は、任意の一般的な背景時空計量の周りで、負計量を持つスカラーモード(いわゆる Boulware-Deser ghost) が現れないまっとうな理論であることをあらわに証明した。また、この「質量を持つ重力理論」の超対称化理論を作る事を目指し、線形化レベルではその作用を作るのに先ず成功した。

(2) 谷本は、世代の対称性の現象論的研究を行った。特に、非可換離散群をフレーバー対称性に適用し、クォークとレプトンの世代構造にとどまらず、超対称性粒子、すなわちスクォークとスレプトンの世代構造を研究した。その主要な成果は以下の通りである。

ニュートリノのフレーバー混合の大きさは実験によって精密に決まってきた。これらの混合の大きさをニュートリノ質量行列の簡単な構造から導かれることを示した。とりわけ¹³の実験値の大きさが必然的に言われる。

世代に A_4 や S_4 の非可換離散対称性を課すことにより、スクォークの世代混合の構造を現象論的に導き出すことに成功した。その際、LHCb と B ファクトリーで測定された B 中間子の精密な CP 対称性の破れの実験結果をインプットとするとともに、未発見のスクォークの質量の下限を考慮した。この解析によって超対称性粒子の効果が低エネルギー物理に

どの程度寄与するかを明らかになった。あわせて K 中間子の CP の破れへの寄与も評価した。

超対称性粒子のエネルギースケールが 10TeV を越えて直接探査が困難な場合、量子効果を通じた B 中間子の CP 対称性の破れの寄与の間接探査について、その感度を定量的に明らかにした。

2013 年 7 月に、ヨーロッパを中心として海外のフレーバーの研究者 50 名を招聘して、参加者 100 名のワークショップ (FLASY13) を新潟大学において開催した。フレーバー研究最前線の研究者が参加し、その後、国際的な研究連携がすすめられることとなった。

(3) 久保は、先ず、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、FCNC (電荷は変えないが素粒子の種類が変わる) 反応や CP の破れを定量的に評価することを行ない、暗黒物質の質量と中性子の電気双極子モーメントが、B 中間子による 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 で検証可能であることを示した。

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 においての検出可能性を議論した。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。

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。この模型では、南部-Goldstone ボゾンが暗黒物質の候補であり、特にその現象論的帰結 (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。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。

(4) 小林は、この 3 年間、超弦理論から導出される現実的な素粒子模型の様々な現象論的性質や宇宙論的研究を行ってきた。まず 1 つは背景磁場をもつコンパクト空間上の D-brane 模型による標準模型のゲージ群とクォーク・レプトン 3 世代の導出であり、そのような性質をもつ模型を多数見出すことができた。それに引き続き湯川結合の計算を行い、クォーク・レプトンの質量の階層構造や混合角の再現を試みた。最終的には、パラメータの微調整をすることなく質量行列の階層構造の再現が可能であることを示すことができ、今後この方向性を推し進めることが非常に重要である。一方ヘテロ型弦理論においては、低エネルギー有効場の理論を支配する離散的対称性の研究を主に行った。超対称模型で現れる離散的な R 対称性やそのアノマリー、更に離散的なフレーバー対称性の導出を行った。今後は、有効理論においてその対称性の現象論的意味を研究する計画である。宇宙論的側面においては、超弦理論の枠内で実現可能なインフレーション模型としてアクシオンによるインフレーションの可能性を研究し、観測値等の詳細を解析し、今後の観測で検証可能なインフレーションのシナリオ作りを推し進めてきた。今後、このアクシオンによるインフレーションを上述の現実的な模型に埋め込み、アクシオンと標準模型の粒子のとの結合を解析し、インフレーション後の宇宙の熱史等を研究していく計画である。

(5) ここ 20 年のニュートリノ質量や混合角の測定の結果、クォーク、レプトンの質量と混合角の全貌が分かってきた。前川は、その様々な階層性の定性的な違いが SU(5) 大統一理論では「10 次元場は 5 次元場よりも強い階層性を誘起する」と仮定するだけで説明できることが大統一理論に対する定性的な証拠と考える。一方でこの仮定が正しいとすると、大統一理論の最も重要な予言である核子崩壊の予言を行う上での任意性の大きな原因の 1 つが無くなるので、この新しい知見の上で核子崩壊を予言することは重要な仕事である。前川らはこの仮定の下での核子崩壊を初めて計算し、その分岐比を測定することで統一群が SU(5) であるか SO(10) であるか、 E_6 であるか、を判別できることを示した。この研究は将来の核子崩壊実験を計画する際に考慮すべき重要な仕事である。また SU(5) 大統一理論では単に大きいとしか予言できないニュートリノの 13 混合角が SO(10) や E_6 大統一理論の予言であるカピボ角程度に実験で測定された (2012 年) ことは SO(10) や E_6 大統一理論が有望であることを示唆しており、その意味でも重要な仕事と言える。LHC で比較的重いヒッグス (125GeV) が発見されたことは超対称粒子が比較的重いこと

を示唆しており電弱スケールの安定性が問題になってくる。一方超対称性理論には、グラビティーノ問題と呼ばれる宇宙論的な問題(グラビティーノの崩壊により軽元素を壊してしまうという問題)が知られていた。我々はグラビティーノ問題を解くためにグラビティーノ質量を $O(100)\text{TeV}$ とし、一方で他の超対称粒子の質量は $O(1)\text{TeV}$ と仮定するだけで電弱スケールの安定性がかなり改善することを示した。重要な点はアノマリー媒介効果が大きくなるため重力媒介の寄与の繰り込み効果を相殺するためである。その際にある低いスケール(ミラージュスケールと呼ぶ)において大統一スケールにおける重力媒介の寄与が直接観測される可能性があり、その場合低エネルギー実験で大統一理論の検証が可能になることを指摘した。

(6) 最後にこの3年間に開催した3回の Summer Institute について、外形的なことを報告しておく。そのプログラムや講演記録に関しては、下の5.[その他]に URL を記載したホームページにアクセスされたい。

第18回「Summer Institute 2012」は、2012年8月18-24日の7日間台湾の Sun Moon Lake で開催。台湾の国立中央大学(NCU)の Otto Kong 氏が代表世話人で、日本からの参加者のとりまとめ世話人は久保治輔氏。日本から68名、韓国から15名、台湾・中国から52名、欧米・インド・タイから10名、計145名の参加を得た。

第19回「Summer Institute 2013」は、2013年8月17-23日の7日間韓国 Jirisan 国立公園で開催。韓国チョンナム大学の Jae Sik Lee 氏を代表世話人とし、日本側とりまとめは久保治輔氏。日本から48名、韓国から51名、台湾・中国から14名、欧米から8名、計121名の参加を得た。

第20回「Summer Institute 2014」は、2014年8月21-28日の8日間富士吉田市の人材開発センター富士カームで開催した。金沢大学が主担当校となり、久保治輔氏が代表世話人。日本から75名、韓国から11名、台湾・中国から17名、欧米から5名、計108名の参加を得た。

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69件)全て査読あり

M. Tanimoto, K. Yamamoto, “KL 0 decay correlating with k in high scale SUSY”, PTEP(2015) 印刷中 arXiv:1503.06270 [hep-ph].

T. Kugo and N. Ohta, “Covariant approach to the no-ghost theorem in massive gravity”, Prog. Theor. Exp. Phys. (2014) 043B04 [DOI: 10.1093/ptep/ptu046]

S. F. King, A. Merle, S. Morisi, Y.

Shimizu, M. Tanimoto, “Neutrino Mass and Mixing: from Theory to Experiment”, New J. Physics 16 (2014) 045018

[DOI:10.1088/1367-2630/16/4/045018]

T. Kobayashi, O. Seto and Y. Yamaguchi, “Axion monodromy inflation with sinusoidal corrections”, PTEP 2014 (2014) 10, 103C01.

[DOI: 10.1093/ptep/ptu145]

H. Abe, T. Kobayashi, K. Sumita and Y. Tatsuta, “Gaussian Froggatt-Nielsen mechanism on magnetized orbifolds”, Phys. Rev. D90 (2014) 10, 105006. [DOI: 10.1103/PhysRevD.90.105006]

F. Beye, T. Kobayashi, and S. Kuwakino, “Gauge Origin of Discrete Flavor Symmetries in Heterotic Orbifolds”, Phys. Lett. B736 (2014) 433-437 [DOI: 10.1016/j.physletb.2014.07.058]

N. Maekawa and K. Takayama, “The heavy gravitino, naturalness, and sizable anomaly mediation”, Prog. Theor. Exp. Phys. 093B(2014) 04 [DOI: 10.1093/ptep/ptu118]

S. Enomoto, S. Iida, N. Maekawa, T. Matsuda, “Beauty is more attractive: particle production and moduli trapping with higher dimensional interaction”, Journal of High Energy Physics 1401(2014) 141 [DOI: 10.1007/JHEP01(2014)141]

K-S. Lim, J. Kubo and M. Lindner, “Electroweak Symmetry Breaking via QCD”, Phys. Rev. Lett. 113, 091604 (2014) [5 pages]. [DOI: 10.1103/PhysRevLett.113.091604]

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] [DOI: 10.1007/JHEP12(2013)076]

N. Maekawa and Y. Muramatsu, “Nucleon decay via dimension-6 operators in anomalous $U(1)_A$ supersymmetric GUT”, Phys. Rev. D88(2013) 095008 [DOI: 10.1103/PhysRevD.88.095008]

M. Aoki, M. Duerr, J. Kubo and H. Takano, “Multi-Component Dark Matter Systems and Their Observation Prospects”, Phys. Rev. D86 (2012) 076015 [28pages] [DOI:10.1103/PhysRevD.86.076015]

M. Fukugita, Y. Shimizu, M. Tanimoto, T. T. Yanagida, “ 13 in Neutrino Mass Matrix with the Minimal Texture”, Phys.Lett. B716 (2012) 294-297

[DOI: 10.1016/j.physletb.2012.06.049]

[学会発表](計37件)全て招待講演

前川展祐, 「ニュートリノ、GUTそして陽子崩壊」, 日本物理学会第70回年次大会,

2015年3月21-24日, 早稲田大学(東京都)
T. Kugo, "Massive Gravity and Supergravity", 3rd International Conference "New trends in Field Theories", 2014年11月1-5日, Varanasi, India

N. Maekawa, "Heavy gravitino, naturalness and sizable anomaly mediation", The 20th International Symposium on Particles, Strings and Cosmology (PASCOS2014), 2014年6月22-27日, Warsaw, Poland

M. Tanimoto, "Neutrino mass textures", Fourth workshop on flavor symmetries and consequences in accelerators and cosmology (FLASY2014), 2014年6月20日, Sussex Univ., Brighton, UK

J. Kubo, "Scale invariant extension of the standard model and Nambu-Goldstone dark matter", Fourth workshop on flavour symmetries and consequences in accelerators and cosmology, 2014年6月17-21日, University of Sussex, Brighton, UK

T. Kobayashi, "Heterotic asymmetric orbifolds", at Bethe Forum "Non-geometry, asymmetric orbifolds and model building", 2014年6月10-13日, Bonn, Germany

M. Tanimoto, "Neutrinos and Flavor Symmetries", XXVI International Conference on Neutrino Physics and Astrophysics (Neutrino2014), 2014年6月4日, Boston Univ., Boston, USA

T. Kugo, "Gauge Fixing of Modified Cubic Open Superstring Field Theory", String Field Theory and Related Aspects V (SFT2012), 2012年10月29日, IIAS, The Hebrew Univ., Jerusalem, Israel

T. Kobayashi, "Phenomenological aspects of magnetized brane models", at the 4th Bethe Center Workshop on "Unification and String Theory", 2012年10月1日-5日, Bad Honnef, Germany

J. Kubo, "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, 2012年7月19-21日, Deadwood, South Dakota, USA.

[図書](計2件)

S. Heinemeyer, J. Kubo, M. Mondragon, O. Piguet, K. Sibold, W. Zimmermann and G. Zoupanos, "Reduction of couplings and its application in particle physics, Finite theories, Higgs and top mass predictions", Proceeding of Science, SISSA, 2014年, 348頁

H. Ishimori, T. Kobayashi, H. Ohki, H. Okada, Y. Shimizu and M. Tanimoto, "An Introduction to Non-Abelian Discrete Symmetries for Particle Physics"(Springer Lecture Notes in Physics 858), Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2012年, 227頁

[その他]

2012年から2014年の各年開催の Summer Institute のプログラム・参加者・講演プレゼンファイルなどはそれぞれ以下のURLのホームページにある:

SI2014:

<http://wwwhep.s.kanazawa-u.ac.jp/SI2014/>

SI2013:

<https://indico.cern.ch/event/230807/>

SI2012:

<http://phys.cts.ntu.edu.tw/si2012/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

九後 太一 (KUGO, Taichi)
京都産業大学・理学部・教授
研究者番号: 00115833

(2) 研究分担者

谷本 盛光 (TANIMOTO, Morimitsu)
新潟大学・自然科学系・フェロー
研究者番号: 90108366

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

小林 達夫 (KOBAYASHI, Tatsuo)
北海道大学・理学研究院・教授
研究者番号: 60322153

前川 展祐 (MAEKAWA, Nobuhiro)
名古屋大学・基礎理論研究センター・准教授
研究者番号: 40273429