

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 23 日現在

機関番号：34315
 研究種目：基盤研究(C)
 研究期間：2008～2012
 課題番号：20540282
 研究課題名（和文） 次世代標準模型の構成 SUSY SO(10) GUT

研究課題名（英文） The construction of the Standard Model of next generation-SUSY SO(10) GUT

研究代表者

福山 武志 (FUKUYAMA TAKESHI)
 立命館大学・立命館グローバル・イノベーション研究機構・教授
 研究者番号：40167622

研究成果の概要（和文）:

最終年度の 2012 年に、2 つの総合報告を出した。それにこの 5 年間を含む研究の概要が集約されている。1 つは、SO(10) GUT、すなわち次世代標準模型としてもっとも有力視されている模型の集約であり、今 1 つは、既存の標準模型を越える新物理にもっとも鋭敏な素粒子の電気双極子モーメントの探索の広汎な集約である。後者は、新物理とそれから予言される電気双極子モーメントの値を、素粒子から原子・分子にいたる広範囲の現象から探るもので今後の大いなる発展が期待される。前者は、LHC のヒッグス粒子の発見と SUSY 粒子の未発見で佳境にはいつてきた。

研究成果の概要（英文）:

In 2012 I have published two review papers: one is SUSY SO(10) GUT and one is on the electronic dipole moments of elementary particles, atoms and molecules. Both are the resume of my works in these five years.
 I have organized the international workshop of GUT2012 sponsored by Yukawa Institute of Kyoto University.

交付決定額

(金額単位：円)

| | 直接経費 | 間接経費 | 合計 |
|---------|-----------|---------|-----------|
| 2008 年度 | 700,000 | 210,000 | 910,000 |
| 2009 年度 | 600,000 | 180,000 | 780,000 |
| 2010 年度 | 900,000 | 270,000 | 1,170,000 |
| 2011 年度 | 500,000 | 150,000 | 650,000 |
| 2012 年度 | 500,000 | 150,000 | 650,000 |
| 総計 | 3,200,000 | 960,000 | 4,160,000 |

研究分野：素粒子・原子核・宇宙

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：標準模型、SUSY, GUT

1. 研究開始当初の背景

(1) ニュートリノ振動実験、BeII の実験などから標準模型の限界が見えていた。

(2) 我々の GUT 模型は、とりわけクォーク・レプトンのスペクトルだけでなくニュートリノ振動の結果をも説明することで注目を集めていた。

(3) ただ模型の予言性の高さゆえにこれら

の実験精度があがるにつれ、それらからのずれも見えてきた。其の代表が、MNS 行列の 1-3 角が大きく出過ぎることであった。

(4) また、われわれの模型は、其の繰り込み可能性の故に、GUT から標準模型への破れのパターンまで詳しく調べられ、其のことが、逆に理論の整合性に問題をつきつけてくるという状況があった。

(5) このような包括的で長期にわたる研究は、世界的に少ないと言う背景もあった。

2. 研究の目的

(1) 研究の目標は、現在適用範囲の限界が見えてきた、素粒子の標準模型を超える次世代標準模型の構築であった。そのためには、単なる現象論的模型によく見られるような個々の現象を説明できるだけでなく、低エネルギーの諸現象から、陽子崩壊、暗黒物質など、素粒子のあらゆる既存の現象と予想される現象を1つの理論体系の中で包括的に議論できねばならない。それが唯一できるのが GUT の特徴である。

(2) 実験精度の向上と、模型の予言領域(内部整合性も含む)の拡大に応じて、模型の修正も必要となった。

(3) とりわけ、2012年度の LHC の Higgs の発見と、SUSY 粒子の未発見は、SUSY GUT にとって極めて重要である。まず Higgs の質量が、126GeV であることは、標準模型が、プランクスケールまで正しくはない(なぜなら4次結合定数が負になるから)ことを意味する。また SUSY 粒子の未発見は SUSY の破れの機構に決定的に重要である。これにより、修正の確固としたガイドラインができてきた状況にあり、(1)で述べた目的が、時期的にも非常に重要なポイントに差し掛かっている。

3. 研究の方法

(1) 観測の精度の向上とあわせて、模型の不備とその改善を目指した。前節で述べたように、それは、観測との整合性だけでなく、理論の内部整合性も吟味された。

(2) 研究は国内だけでなく、休み期間を利用して、広く海外に長期滞在して、共同研究を行った。

(3) 研究対象は、高エネルギーの素粒子反応だけでなく、宇宙背景放射の情報や、暗黒エネルギーを通して観測宇宙論との整合性、さらには、とりわけミュオン $g-2$ や電気双極子モーメントの研究を通して、実験家との共同研究も進めている。レーザー科学の進展や、分子分光学の精密な理論が、素粒子(電子)の電気双極子能率の決定に役立つというのは、近年新しくあらわれて来た処方で、単にその観測結果を使うということだけでなく、観測の解析に積極的に参加しつつあることは非常に喜びである。このように広範な分野の研究に精通することは、実は今とても重要な要素となっている。

4. 研究成果

(1) まず4次元時空での GUT で、どこまで整合的に GUT 理論を構築できるか徹底的に議論した。

(2) その結果として、余剰次元の重要性が指摘され、そこで4次元理論がどのように改善されるかが示された。

(3) これらは、特に2012年度末に刊行された代表者によるレビューで詳しく説明された。

(4) 一方で標準模型を超える新物理は、LHC や Bell 等の高エネルギー加速器だけでなく、原子や分子の電気双極子モーメントとして現れる。2012年度に代表者によってこの電気双極子モーメントのレビューが刊行され、広くこの分野の実験、理論の研究者に受け入れられている。

(5) 新しい物理を予言するものとして、とくにミュオンの異常磁気モーメントがあるが、これらも我々の模型で整合的に捉えられた。

(6) この5年間で、代表者は2つの GUT 国際会議を世話人代表として開き、その Proceedings を AIP から刊行した。

(2007年度に行われた GUT07 の Proceedings を2008年度に、2012年3月(京大基礎物理研主催)に行われた GUT2012 の Proceedings を同6月に刊行した)。

(7) また2013年2月にインドで行われた CP の破れの workshop PCPV 2013では、電気双極子モーメントの総合講演を行った。
<http://www.icts.res.in/program/details/328/>

(8) 残念ながら、次世代標準模型の構築という目標は、期限内に完成までには到らなかったが、素粒子の発展の流れの中で、代表者は非常に重要な役割を果たしてきたし、今後も果たせると思う。今後はもっと積極的に海外にでるとともに、国内の若手への波及を計りたいと思う。(これに関連して代表者は、2010年4月-2013年3月まで京都産業大学の益川塾の指導教官にも任命され、若手と共同研究も行った)。

(9) また研究成果は、海外も含めた多数の大学でのセミナーで講演したほか、立命館大学で毎年行われた、スーパーサイエンスハイスクールの世界フェアで数年にわたって世界の高校生にこれらの成果を伝えた。

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) 3, 4, 5, 7, 10, 22, 25 は、Proceedings、そのうち 3, 5 は、編集者でもある。それ以外はすべて査読有)

[雑誌論文](計25件)

(1) T. Fukuyama 99ppS0(10) GUT in Four and Five Dimensions: A Review. Int. J. Mod. Phys. A28, 1330008 (2013) DOI:10.1142/S0217751X13300081

- 査読有
- (2) T. Fukuyama and H. Nishiura 6pp, Universality of Quark-Lepton Mass Matrix Mod.Phys.Lett. A28, 1350017 (2013) DOI:10.1142/S021773231350017X 査読有
- (3) T. Fukuyama (ed.) (Ritsumeikan U., SLLS), Rabindra Nath Mohapatra (ed.) (Maryland U.) GUT2012. Proceedings, International Workshop on Grand Unified Theories, Conference: C12-03-15 (AIP Conf. Proc. 1467 (2012) 312 pp 査読無
- (4) T. Fukuyama 4pp No-go theorems and GUT an opening address at Conference: C12-03-15 (2012) e-Print: arXiv:1207.3851 [hep-ph] 査読無
- (5) T. Fukuyama 6pp Minimal SO(10) GUT in 4D and its extension to 5D AIP Conf.Proc. 1467 (2012) 69-75 査読無 DOI: 10.1063/1.4742081
- (6) T. Fukuyama 90 pp Searching for New Physics beyond the Standard Model in Electric Dipole Moment Int.J.Mod.Phys. A27 (2012) 1230015 DOI: 10.1142/S0217751X12300153 査読有
- (7) T. Inoue et al., "129Xe atomic EDM search with nuclear spin maser technique", Proceedings of 5th International Workshop on "Fundamental Physics Using Atom 2011", 64-68 (2012) 査読無
- (8) N.G. Deshpande, T. Enkhbat, T. Fukuyama, X.-G. He, L.-H. Tsai, K. Tsumura (Oregon U.), T. Enkhbat (Natl. Taiwan U.), T. Fukuyama, X.G. He (Natl. Taiwan U.), L.H. Tsai (Natl. Taiwan U.) 5 pp. μ -e Conversion With Four Generations. Phys.Lett. B703 (2011) 562-566 DOI: 10.1016/j.physletb.2011.08.045 査読有
- (9) T. Fukuyama, Hiroaki Sugiyama (Ritsumeikan U.), Koji Tsumura (ICTP, Trieste & Taiwan, Natl. Taiwan U.). 25pp Phenomenology in the Zee Model with the A₄ Symmetry, Phys.Rev. D83 (2011) 056016 DOI: 10.1103/PhysRevD.83.056016 査読有
- (10) K. Asahi et al., Search for an Electric Dipole Moment in 129Xe Atom with nuclear Spin Oscillator Technique", J.Phys. Conf. Ser.. 302 (2011) 012039 査読無
- (11) Takeshi Fukuyama, Kozo Koizumi (Kyoto Sangyo U.). 16 pp. Toda Molecule and Tomimatsu-Sato Solution ? Towards the complete proof of Nakamura's conjecture? J.Phys. A44 (2011) 345201 DOI: 10.1088/1751-8113/44/34/345201 査読有
- (12) H. Nishiura (Osaka Inst. Tech.), T. Fukuyama 8 pp. Universal Mass Matrix and Leptonic 13 Angle Mod.Phys.Lett. A26 (2011) 661-667 DOI: 10.1142/S0217732311035158 査読有
- (13) T. Fukuyama, H. Sugiyama (Ritsumeikan U.), K. Tsumura (ICTP, Trieste). 31 pp. Phenomenology in the Higgs Triplet Model with the A₄ Symmetry Phys.Rev. D82 (2010) 036004 DOI: 10.1103/PhysRevD.82.036004 査読有
- (14) T. Fukuyama, N. Okada (Alabama U.). 13 pp. Non-thermal Leptogenesis in a simple 5D SO(10) GUT JCAP 1009 (2010) 024 DOI: 10.1088/1475-7516/2010/09/024 査読有
- (15) T. Fukuyama, H. Sugiyama (Ritsumeikan U.), K. Tsumura (ICTP, Trieste). 18 pp. Constraints from muon g-2 and LFV processes in the Higgs Triplet Model JHEP 1003 (2010) 044 DOI: 10.1007/JHEP03(2010)044 査読有
- (16) T. Fukuyama 8 pp. Comments on the Tetrad (Vielbeins) Mod.Phys.Lett. A24 (2009) 2459-2466 DOI: 10.1142/S0217732309031739 査読有
- (17) H. Nishiura (Osaka Inst. Tech.), T. Fukuyama 5 pp. Measuring the lower bound of neutrino mass at LHC in Higgs Triplet Model Phys.Rev. D80 (2009) 017302 DOI: 10.1103/PhysRevD.80.017302 査読有
- (18) T. Fukuyama, Masahiro Morikawa (Ochanomizu U.). 19 pp. Stagflation -- Bose-Einstein condensation in the early universe Phys.Rev. D80 (2009) 063520 DOI: 10.1103/PhysRevD.80.063520 査読有
- (19) N. Ikeda, T. Fukuyama (Ritsumeikan U.). 18 pp. Fermions in (Anti) de Sitter Gravity in Four Dimensions Prog.Theor.Phys. 122 (2009) 339-353 DOI: 10.1143/PTP.122.339 査読有
- (20) T. Fukuyama, N. Okada (Maryland U. & KEK, Tsukuba). 13 pp. A Simple 5D SO(10) GUT and sparticle masses. Phys.Rev. D78 (2008) 115011 DOI: 10.1103/PhysRevD.78.115011 査読有
- (21) T. Fukuyama, N. Okada (Maryland U. & KEK, Tsukuba), T. Osaka (Ritsumeikan U., Kusatsu). 15 pp. Realistic Hybrid Inflation in 5D Orbifold SO(10) GUT. JCAP 0809 (2008) 024 DOI: 10.1088/1475-7516/2008/09/024 査読有

- (22) T. Fukuyama, 19 pp. Renormalizable minimal $SO(10)$ GUT in 4D and 5D AIP Conf.Proc. 1015 (2008) 3-21 DOI: 10.1063/1.2939059 査読無
- (23) H. Nishiura (Osaka Inst. Tech.), K. Matsuda (Tsinghua U., Beijing), Takeshi Fukuyama (Ritsumeikan U.). 14 pp. Quark Mixing from Mass Matrix Model with Flavor $2 \leftrightarrow 3$ Symmetry Int.J.Mod.Phys. A23 (2008) 4557-4568 DOI: 10.1142/S0217751X08041463 査読有
- (24) T. Fukuyama, N. Okada (KEK, Tsukuba). 12 pp A Simple $SO(10)$ GUT in five dimensions Phys.Rev. D78 (2008) 015005 DOI: 10.1103/PhysRevD.78.015005 査読有
- (25) T. Fukuyama (ed.), Tatsuru Kikuchi (ed.) (KEK, Tsukuba). Grand unified theories: Current status and future prospects. Proceedings, International Workshop, GUT07, Prepared for Conference: C07-12-17.1 (AIP Conf. Proc. 1015 (2008) 269 p 査読無

〔その他〕

ホームページ等

GUT2012 ホームページ

<http://www-conf.kek.jp/past/GUT2012/GUT2012.htm>

福山研ホームページ

<http://www.ritsume.ac.jp/se/~fukuyama/jframe.html>

6 . 研究組織

(1)研究代表者

福山 武志 (FUKUYAMA TAKESHI)

立命館大学・立命館グローバル・イノベーション研究機構

研究者番号：40167622

(2)研究分担者

岡田 宣親 (OKADA NOBUTIKA)

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・理論部・助教

研究者番号：40360333