

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 29 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2014

課題番号：23540300

研究課題名(和文) 質量の起源と複合模型

研究課題名(英文) Origin of Mass and Composite Models

研究代表者

山脇 幸一 (YAMAWAKI, Koichi)

名古屋大学・素粒子宇宙起源研究機構・特任教授

研究者番号：90135301

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：ウォーキングテクニカラーで予言した複合ヒッグス粒子としての「テクニディラトン」の性質を「はしご近似」および「ホログラフィー」に基づいて研究し、LHC実験で発見されたヒッグス粒子がテクニディラトンと同定できることを示した。さらに今後発見されるであろう他の複合粒子「テクニパイオン」、「テクニロー」の性質を明らかにし、H27年再開のLHCでの検証に備えた。さらに格子ゲージ理論における計算機シミュレーションで、SU(3)ゲージ理論のフレーバー数8の理論がウォーキングテクニカラーの候補であること、さらにこの理論がテクニディラトンの候補としての軽い複合スカラー粒子をもつことを世界に先駆けて発見した。

研究成果の概要(英文)：The walking technicolor was studied based on the ladder approximation and holography, which showed that the technidilaton as a composite Higgs particle can be identified with the Higgs particle discovered at the LHC. Other composite particles such as Technipion, Technirho, predicted in this theory were also studied as to be tested at the upcoming LHC experiments starting in 2015. The lattice SU(3) gauge theory with 8 flavors was also studied by the computer simulations and found to be a candidate for the walking technicolor and for the first time in the world was discovered to have a light composite scalar meson as a candidate for the technidilaton.

研究分野：素粒子論

キーワード：質量の起源 複合模型 ウォーキングテクニカラー テクニディラトン 格子ゲージ理論 計算機シミュレーション LHC 複合ヒッグス

1. 研究開始当初の背景

質量の起源の解明は現代素粒子論の当面する最大の課題であり、超大型加速器実験 LHC の主要なターゲットとなっている。本研究計画は、質量の起源を担うヒッグス粒子はより基本的な理論の複合粒子であり、代表者山脇らが提唱してきた「ウォーキングテクニカラー」(以下 WTC と略記)、「強結合 ETC テクニカラー」「隠れた局所対称性」による複合ゲージボソンなどを総合的に研究する事とした。その解明のために本研究計画では LHC 実験の進行に合わせて複合模型の模型的研究・現象論的研究を行い、別途進行させていた基盤研究 S「対称性の破れとゲージダイナミクス」(益川敏英代表)による格子ゲージ理論の計算機シミュレーションによる研究と相補的に行うことを目指していた。

開始当初ヒッグス粒子は未発見であり研究対象も広範なものであった[論文リスト 18]が、開始後 2012 年 7 月に LHC でヒッグス粒子が発見されて、研究の焦点はより具体的に絞られてきた。

とくに、山脇らの提唱した WTC はコンフォーマル(スケール)対称性をもつゲージ理論にもとづく模型でありスケール不変なゲージダイナミクスの結果大きな(1に近い)異常次元を獲得し、これが初期のテクニカラー模型の困難を解決するとともに、スケール不変性の自発的破れに伴う南部・ゴールドストーン粒子として軽い複合ヒッグス粒子「テクニディラトン」を予言した。最近の LHC 実験の進展とともに世界的に注目されている(同論文の被引用数は 700 を超えている)。この模型で予言された複合ヒッグス粒子としてのテクニディラトンをはじめ「テクニ」など理論の様々な側面が山脇らにより「はしご近似」や「ホログラフィー」による研究で明らかになっていた。

テクニを系統的に扱う理論は 30 年前に山脇らによって提案された「隠れた局所対称性」の理論である。これは複合ベクトルメソンをゲージボソンとして扱う一般的な処方として発展した。「隠れた局所対称性」は QCD 物理のみならず「ムース、リトルヒッグス」「ヒッグスレス模型」「ホログラフィー」など余剰次元によるヒッグス物理の中核に位置する概念となっている(被引用数の多い論文 2 篇はそれぞれ 900 強, 700 弱である)。

さらにその量子効果(ループ効果)は「カイラル摂動論」として知られており、隠れた局所対称性を含むカイラル摂動論は山脇らによって創始されていた。

一方、下部のゲージ理論を第一原理から直接計算する信頼性の高い方法として QCD の手法をこれに応用した格子ゲージ理論の計算機シミュレーションによる研究が近年世界的規模で盛んになってきてコンフォーマル対称性をもつゲージ理論の研究は新段階に突入していた。平行して進行させた基盤 S の研究は主にこの方面に主力を注ぐことになっていた。

さらに異常次元の大きな複合ヒッグス模型として「トップクォーク凝縮模型」が山脇らによって提案され、これも世界的な注目を集めてきた(当該する 2 つの論文の被引用数の合計は 1,200 を超えている)。

山脇らはこのようなゲージダイナミクスとその素粒子模型への応用について、SCGT(Strong Coupling Gauge Theories)と銘打った国際会議を 1988 年から過去 6 回(88、90、96、02、06、09)主催して、大きな成果を挙げていた。

2. 研究の目的

そこで本研究では、質量の起源を解明するため複合ヒッグス模型とそれに関連する複合ゲージボソン、とくに WTC が主要なターゲットであった。

模型の帰結を「はしご近似」「ホログラフィー」などの解析的研究と計算機シミュレーションの両面から行い、とくに WTC をはじめとする標準模型を超える理論の探索を LHC 実験の進展に合わせて集中的に展開することを目的とした。

名古屋大学素粒子宇宙起源研究機構(以下 KMI と略記)の格子ゲージ理論計算機シミュレーショングループ(一部他機関のメンバーを含む)(LatKMI Collaboration)を結成し、コンフォーマル対称性をもつゲージ理論の研究を、この研究に特化した高速クラスター計算機を駆使して行った。フレーバー数が $N_f=4,8,12,16$ をもつ QCD を組織的・系統的に研究し、大きな N_f (とくに 8 および 12)でのコンフォーマルの兆候および WTC の候補を探ることとした。

3. 研究の方法

WTC を「はしご近似」「ホログラフィー」などに基づき、とくに軽い複合粒子としての複合ヒッグス粒子「テクニディラトン」の質量および結合定数を計算して、LHC 実験における WTC の実験的検証を行った。さらに、スケール不変な「隠れた局所対称性」を含むカイラル摂動論およびホログラフィーに基づき、他の複合粒子「テクニパイオン」および「テクニメソン」の現象論を推進した。格子ゲージ理論の計算機シミュレーションの解析のため「スケール不変

な非線形表現(カイラル摂動論)」を提唱した。

また、ホログラフィック模型を最低次の隠れた局所対称性をもつ非線形表現に帰着させる方法を見出して新しいハドロン現象論を展開した。

一方、LatKMI Collaborationにおいて H 2 3 年 3 月の専用計算機導入後直ちに配位生成と物理量測定を開始した。多くの先行研究と同様スタガードフェルミオン採用したが、先行する研究との差別化を図り、異なる $N_f=4, 8, 12, 16$ の結果を系統的に比較するため、同じセッティングで解析を行う方針をとった。これは世界で初めてでその後海外のグループが追従した。さらに格子理論の離散化誤差、スタガード特有のフレーバー(テイスト)対称性の破れを最小にするため、この系のミュレーションでは初めて HISQ (Highly Improved Staggered Quark) アクションを採用した。最適のパラメータ探索のため、格子サイズ、フェルミオン質量のみならず結合定数 についても複数の値で同時進行した。

4. 研究成果

1) 複合ヒッグス粒子「テクニディラトン」の質量、結合定数の理論的解析

WTCの予言する複合ヒッグス粒子としての軽いスカラー粒子「テクニディラトン」の解析を「はしご近似」および「ホログラフィー」で行った。ヒッグス粒子発見の直前に行った解析[17]はテクニディラトンの現象論の基礎として先導的な役割を果たした。「はしご近似」においては、テクニディラトンは「フレーバー数 N_f とテクニカラー数 N_c がともに大きい極限(ヴェネチアーノ極限)で弱スケール 246 GeV に比べて無限小になり南部・ゴールドストーンボソンとして振舞い、とくに「1世代テクニフェルミオン模型」という弱2重項が4個($N_f=8$)の模型でSU(4)ゲージ群($N_c=4$)の場合にLHCで発見された125 GeVのヒッグス粒子と整合する結果が得られた[10, 14, 15, 19]。

さらに、ホログラフィーによるテクニディラトンの質量および結合定数の評価に成功し、テクニグルーオン凝縮の大きい場合はヴェネチアーノ極限に加えてさらに早いゼロ質量極限が存在することを示した。数値的には125 GeVの質量領域に対しては結果的にはしご近似と似た予言を与えることとなった[12]。

計算機シミュレーションによるテクニディラトンの分析のために、スケール不変カイラル摂動論を創始した[6]。

また、この $N_f=8, N_c=4$ の模型が拡張された模型から自然に導かれることを示した

[1]。

2) 「テクニパイオン」「テクニ」のLHC現象論

典型的なWTCである「1世代テクニフェルミオン模型」では擬南部・ゴールドストーン粒子としてテクニパイオンが予言される。この質量および結合定数をスケール不変なカイラル摂動論に基づき初めて具体的な模型で明示的に評価し、今後のLHC実験での発見可能性を示した[4, 11]。

さらに同じ「1世代テクニフェルミオン模型」に対するスケール不変なカイラル摂動論に隠れた局所対称性を導入し、テクニメソンのLHCでの発見可能性を具体的に示した[2]。

3) 格子数値シミュレーション

$N_f=12$ については赤外固定点を持つコンフォーマルな理論との結論を得た[12]。先行研究の多くと一致する結論であるが、 $N_f=8, 4$ との比較は最初であり、異常次元の評価についてフェルミオン質量の高次項の重要性を指摘した点も新しい。これははしご近似による研究[16]に基づいている。こうして $N_f=12$ はコンフォーマル相でカイラル対称性が自発的に破れていないのでWTCの候補とはならないことが結論された。

一方、「1世代テクニフェルミオン模型」に対応するフレーバー数8のQCDは、自発的に破れた相であるとともに近似的コンフォーマル対称性をもち異常次元が1に近いWTCの候補となる理論であることを世界に先駆けて発見した[9]。($N_f=8$ に関しては我々より後でUSBSMグループ(Appelquist et al)が我々と同じHISQ作用で我々より遥かに膨大な計算機資源を投入したものの、成果なく約1年半後に撤退した。)我々の結果は、同じアメリカのLSDグループ(Appelquist et al)およびA. Hasenfratzらがごく最近追認した。

さらに、 $N_f=12$ で予想外のパイオンより軽いフレーバー1重項の複合スカラー粒子を世界で初めて観測した[8]。この衝撃的事実はその後複数の他のグループでも追認されている。この理論はWTCの候補ではないが、コンフォーマル不変性を持つ理論であり業界に大きなインパクトを与えた。

さらに決定的な発見は、 $N_f=8$ の理論で同様に軽いフレーバー1重項の複合スカラー粒子を発見したことである[3]。今度はWTCの候補となる理論であるので125 GeVのテクニディラトンとしての軽い複合ヒッグス粒子の候補を理論的に信頼できる計算機シミュレーションによって初めてとらえたことを意味し、業界への衝撃はさらに大きいものであった。この分析に[6]で提唱したスケール不変なカイラル摂動論が本質的役割を果たした。

4) その他の関連する成果

125 GeV のヒッグス粒子をトップクォーク凝縮モデルにおける擬南部・ゴールドストーンボソンとして解釈できることを示した [5]。ホログラフィーの QCD の $g-2$ への寄与の解析も行った [7]。カイラル異常の絡むベクトルメソンのプロセスに対して混乱した文献を隠れた局所対称性に依る分析で正した [20]。

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 20 件)

[1] “Determination of $SU(4)$ TC Technicolor Gauge Group from Embedding in Extended Technicolor”, M. Kurachi, R. Shrock, K. Yamawaki, Phys. Rev. D91, 055032 (1-6), 2015 (refereed)

DOI: [10.1103/PhysRevD.91.055032](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.91.055032)

[2] “Discovering Walking Technirho Mesons at the LHC”, M. Kurachi, S. Matsuzaki, K. Yamawaki, Phys. Rev. D90, 055028 (1-18), 2014, (refereed)

DOI: [10.1103/PhysRevD.90.055028](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.90.055028)

[3] “Light Composite Scalar in Eight-flavor QCD on the Lattice”, Y. Aoki, T. Aoyama, M. Kurachi, T. Maskawa, K. Miura, K.-i. Nagai, H. Ohki, E. Rinaldi, A. Shibata, K. Yamawaki, T. Yamazaki, Phys. Rev. D89, 111502 R (1-5), 2014 (refereed)

DOI: [10.1103/PhysRevD.89.111502](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.89.111502)

[4] “Walking Technipions in a Holographic Model”, M. Kurachi, S. Matsuzaki and K. Yamawaki, Phys. Rev. D90, 095013 (1-12), 2014 (refereed).

DOI: [10.1103/PhysRevD.90.095013](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.90.095013)

[5] “Higgs boson as a top-mode pseudo Nambu-Goldstone boson”, H.S. Fukano, M. Kurachi, S. Matsuzaki, K. Yamawaki, Phys. Rev. D90, 055009 (1-18), 2014. (refereed)

DOI: [10.1103/PhysRevD.90.055009](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.90.055009)

[6] “Dilaton Chiral Perturbation Theory - Determining Mass and Decay Constant of Technidilaton on the Lattice”, S. Matsuzaki and K. Yamawaki, Phys. Rev. Lett. 113, 082002-082006, 2014. (referred)

DOI: [10.1103/PhysRevLett.113.082002](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.113.082002)

[7] “Gluonic Effects on $g-2$: Holographic View”, M. Kurachi, S. Matsuzaki, K. Yamawaki, Phys. Rev. D88, 055001 (2013) 1-13. (refereed).

DOI: [10.1103/PhysRevD.88.055001](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.88.055001)

[8] “Light composite scalar in twelve-flavor QCD on the lattice”, Y. Aoki, T. Aoyama, M. Kurachi, T. Maskawa, K.-i. Nagai, H. Ohki, E. Rinaldi, A. Shibata, K. Yamawaki, T. Yamazaki, Phys. Rev. Lett. 111, 162001 (2013) 1-5. (refereed).

DOI: [10.1103/PhysRevLett.111.162001](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.111.162001)

[9] “Walking signals in $N_f=8$ QCD on the lattice”, Y. Aoki, T. Aoyama, M. Kurachi, T. Maskawa, K.-i. Nagai, H. Ohki, A. Shibata, K. Yamawaki, T. Yamazaki, Phys. Rev. D 87, 094511 (2013) 1-22. (refereed).

DOI: [10.1103/PhysRevD.87.094511](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.87.094511)

[10] “Is 125 GeV techni-dilaton found at LHC,” S. Matsuzaki and K. Yamawaki, Phys. Lett. B719, 378-382 (2013). (refereed).

DOI: [10.1016/j.physletb.2013.01.031](https://doi.org/10.1016/j.physletb.2013.01.031)

[11] “Walking technipions at LHC”, J. Jia, S. Matsuzaki and K. Yamawaki, Phys. Rev. D87, 016006 (2013) 1-14. (refereed).

DOI: [10.1103/PhysRevD.87.016006](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.87.016006)

[12] “Holographic techni-dilaton at 125 GeV,” S. Matsuzaki and K. Yamawaki, Phys. Rev. D86, 115004 (2012) 1-12 (refereed)

DOI: [10.1103/PhysRevD.86.115004](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.86.115004)

[13] “Lattice study of conformality in twelve-flavor QCD”, Y. Aoki, T. Aoyama, M. Kurachi, T. Maskawa, K.-i. Nagai, H. Ohki, A. Shibata, K. Yamawaki, T. Yamazaki, Phys.

Rev. D 86, 054506 (2012) 1-19. (refereed).

DOI: [10.1103/PhysRevD.86.054506](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.86.054506)

[14] "Discovering 125 GeV techni-dilaton at LHC," S. Matsuzaki and K. Yamawaki, Phys. Rev. D86, 035025 (2012) 1-17 (refereed)

DOI: [10.1103/PhysRevD.86.035025](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.86.035025)

[15] "Techni-dilaton at 125 GeV", S.Matsuzaki, K.Yamawaki, Phys.Rev.D85, 095020 (2012) 1-5 (refereed)

DOI: [10.1103/PhysRevD.85.095020](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.85.095020)

[16] "Study of the conformal hyperscaling relation through the Schwinger-Dyson equation", Y. Aoki, T. Aoyama, M. Kurachi, T. Maskawa, K.-i. Nagai, H. Ohki, A. Shibata, K.Yamawaki, T. Yamazaki, Phys. Rev. D85, 074502 (2012). (refereed).

DOI: [10.1103/PhysRevD.85.074502](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.85.074502)

[17] "Techni-dilaton Signatures at LHC", S.Matsuzaki and K.Yamawaki, Prog. Theor. Phys. 127, 209-228 (2012), (refereed).

DOI: [10.1143/PTP.127.209](https://doi.org/10.1143/PTP.127.209)

[18] "Composite Avenue beyond the Standard Model – Legacy of Sakata in LHC Era", K. Yamawaki, Prog.Theor.Phys.Suppl. 197 (2012) 76-91. (non-refereed).

DOI: [10.1143/PTPS.197.76](https://doi.org/10.1143/PTPS.197.76)

[19] "Techni-dilaton at Conformal Edge", M. Hashimoto and K. Yamawaki, Phys. Rev. D 83 (2011) 015008, 1-15 (refereed)

DOI: [10.1103/PhysRevD.83.015008](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.83.015008)

[20] "Anomalous Omega-Z-Gamma Vertex from Hidden Local Symmetry" M.Harada, S.Matsuzaki, and K.Yamawaki, Phys. Rev. D84 (2011) 36010, 1-11 (refereed)

DOI: [10.1143/PTPS.180.1](https://doi.org/10.1143/PTPS.180.1)

〔学会発表〕(計 8 件)

1. 山脇 幸一, "Walking Technicolor on the LHC and the Lattice", 25th Busan ParticlePhysicsWorkshop,2014.12.04-08, Busan, Korea
2. 山脇 幸一, "Discovering Walking Technicolor at LHC and on the Lattice", Tohoku Workshop on Higgs and Beyond, 2013.06.05-09, Sendai, Japan
3. 山脇 幸一, "Walking Technicolor at the LHC and on the Lattice", Opening talk at Workshop on Strongly Interacting Dynamics Beyond the Standard Model, 2013.04.24-26, Higgs Centre for Theoretical Physics, Edinburgh, UK
4. 山脇 幸一, "Walking Technicolor on the LHC and the Lattice", Rencontres de Moriond EW, 2013.03.02-09, La Thuile, Italy
5. 山脇 幸一, "Technidilaton - Discovering Walking Technicolor", Strongly Coupled Physics beyond the Standard Model, 2012.01.25-27, ICPT, Trieste, Italy
6. 山脇 幸一, "Composite Avenue beyond the Standard Model: Legacy of Sakata in the LHC Era", Shoichi Sakata Centennial Symposium, 2011.10.27-28, KMI, Nagoya, Japan

〔図書〕(計 3 件)

1. Y. Aoki, T. Maskawa and K. Yamawaki (Editors), Proceedings of KMI-GCOE Workshop "Strong Coupling Gauge Theories in the LHC Perspective (SCGT12)", World Scientific Publishing Co. Ltd., Singapore (2014) 498 pages
2. Y. Aoki, K. Hayasaka, T. Iijima, T. Maskawa, M. Tanabashi and K. Yamawaki, "Quest for the Origin of Particles and the Universe", Proceedings of the KMI Inauguration Conference, World Scientific Publishing Co. Ltd., Singapore (2013) 415 pages

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：

種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

取得状況（計 0 件）

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.kmi.nagoya-u.ac.jp/Projects/SCGT/>

http://www.kmi.nagoya-u.ac.jp/CT/jpn/news/2013/post_5.php

6. 研究組織

(1) 研究代表者

山脇 幸一 (YAMAWAKI, Koichi) 名古屋大学・
素粒子宇宙起源研究機構・特任教授

研究者番号： 90135301

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

()

研究者番号：