

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 5 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(S)

研究期間：2010～2014

課題番号：22224003

研究課題名(和文) 対称性の破れとゲージダイナミクス

研究課題名(英文) Symmetry Breakings and the Gauge Dynamics

研究代表者

益川 敏英 (Maskawa, Toshihide)

名古屋大学・素粒子宇宙起源研究機構・特別教授

研究者番号：60022612

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 165,900,000円

研究成果の概要(和文)：質量の起源を担うヒッグス粒子が発見されたが、その本性は未解決のままである。本計画は「はしご近似」や「ホログラフィー」の模型的計算に基づき、ヒッグス粒子が「ウォーキングテクニカラー理論」で予言された軽い複合粒子「テクニディラトン」として説明できることを示した。

一方、第一原理計算方法である格子QCDの計算機シミュレーションにより、フレーバー8のQCDが「ウォーキングテクニカラー理論」の候補となること示し、他のグループも追認した。さらに、フレーバー12(複数の他グループが追認)とフレーバー8において軽いフレーバー1重項スカラーメソンを発見した。後者は「テクニディラトン」の候補である。

研究成果の概要(英文)：Although the Higgs particle responsible for the origin of mass has been discovered, its dynamical origin still remains mysterious. This project showed, based on the ladder approximation and also the holographic model, that the discovered Higgs particle is consistent with the composite particle “Technidilaton” predicted by the “Walking Technicolor”.

We further made the first-principle calculations of lattice QCD simulations and found that flavor 8 QCD is a candidate for the Walking Technicolor, the result later confirmed by other groups. We also discovered light flavor-singlet scalar meson for flavor-12 (later confirmed by several other groups), and also for flavor-8, the latter being a candidate for the technidilaton to be identified with the discovered Higgs particle as a composite.

研究分野：素粒子論

キーワード：対称性の破れ ゲージダイナミクス ウォーキングテクニカラー テクニディラトン 複合ヒッグス
格子ゲージ理論 LHC コンフォーマル対称性

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。質量の起源の解明のためには、対称性とその破れ（非線型表現）の一般的構造を明らかにしつつ、その力学的起源についてのゲージダイナミクスを探求することが重要である。

代表者益川は 60 年代から一貫して非線型表現を追求してきた。非線型表現は山脇らによって複合ゲージボソンを含む「隠れた局所対称性」の理論としてさらに発展した。「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)。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、原田および棚橋によって創始されていた。

一方、標準模型を超える理論として山脇らはコンフォーマル（スケール）対称性をもつゲージ理論にもとづく複合ヒッグス模型「ウォーキング・テクニカラー」（以下 WTC と略記）を提唱した。この模型は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った。

一方、より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。

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、棚橋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）。

名古屋大学で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

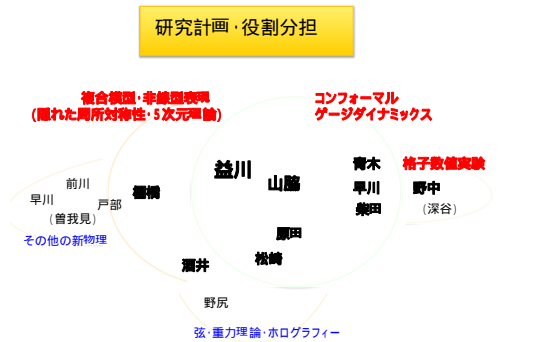
そこで本研究では、対称性の非線型表現とその力学的起源を探るゲージダイナミクスをとくに質量の起源との関連で探求することとした。本研究ではとくに WTC に関連するコンフォーマル対称性をもつゲージダイナミクスの探求が主要なターゲットであった。

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。

これとの関連で対称性の破れとゲージダイナミクスの研究を、非線形表現や「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。

3. 研究の方法

当初の研究計画・役割分担はおおむね添付図の通りでありこれに従って推進した。代表者（益川）は研究全体の総括をし、分担者山脇は上記主たる課題全般について研究の推進を担当した。



[複合模型・非線型表現]

山脇および松崎は、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。

一方、榎橋は隠れた局所対称性に関連する5次元理論を中心に現象論を展開した。

原田は隠れた対称性をもつカイラル対称性の非線形表現に基づき様々なハドロン現象を研究した。

山脇、原田、松崎は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。

[格子理論計算機シミュレーション]

益川、山脇、青木、柴田は LatKMI Collaborationにおいて H23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、この系のシ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。

早川は別のグループでフレーバー数 12, 10の場合にコンフォーマルな性質があることを示した。

野中は QCD におけるスカラー粒子の格子数値実験による研究および高密度、高温 QCD の計算機シミュレーションや数値研究を行った。

[コンフォーマルなゲージダイナミックスの関連研究]

山脇、松崎は大きなフレーバー数の QCD をはしご近似やホログラフィーを用いて考察し、ま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。

[弦・重力・ホログラフィー]

酒井は酒井-杉本模型の発展を含めホログラフィーの強結合理論への応用について研究した。

山脇、松崎、原田はホログラフィーにもとづく WTC の研究を展開した。

野尻は修正重力模型に基づき暗黒エネルギーの研究を展開した。

[その他の新物理]

前川は主に超対称性や GUT 模型の考察を行い、戸部は超対称性やリトルヒッグス模型などのレプトンフレーバー対称性の研究を行った。早川はレプトンの異常磁気能率の高次 QED 効果を通して新物理への制限を研究。(曾我見は代数的手法によりフレーバーの起源を研究した。H22-24。)

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

山脇、松崎は 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。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 one-family model 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[9,13,14,16]。

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[11,18]。

山脇はこの $N_f=8, N_c=4$ 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」「テクニメソン」の LHC 現象論

山脇、松崎は典型的な WTC である one-family model 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[4,10]。

さらに同じ one-family model 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

WTC の示唆するコンフォーマルなゲージダイナミックスの研究に集中するため、本研究計画からとくに2名の KMI の特任助教の雇用および関連する国際会議、人的交流、九州大学、名古屋大学の汎用計算機の有料使用などに主要な資源投入を行った。

$N_f=12$ 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[15]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、one-family model 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[8]。($N_f=8$ 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歴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[7]。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。この分析のためスケール不変カイラル摂動論を創始した[6]。

一方、早川は KMI 計算機を使ってウィルソンフェルミオンによる計算機シミュレーションを行い、 $N_f=10$ の結合定数のスケール依存性から、赤外固定点の兆候をとらえた[22]。また、 $SU(2)$ ゲージ理論の $N_f=6$ の場合には、赤外固定点の存在の兆候は見えなかった[20,21]。

野中は通常の QCD におけるフレーバー 1 重項スカラーメソンに対する 4-クォーク演算子の寄与をはじめて計算した[24]。

4) その他の関連する成果

山脇、松崎は 125 GeV のヒッグス粒子をトップクォーク凝縮模型における擬南部・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]。

山脇、原田、松崎はホログラフィーの高い励起モードを積分して得られた隠れた局所対称性理論によりハドロン形状因子

等の予言を行った[17]。

早川はミュオンの異常磁気能率に対するハドロンの light-light 振幅への寄与を格子 QCD で評価した[19]。また、ミュオンおよび電子の異常磁気能率についての 10 次 QED 効果の計算を完成させた。

以上の成果は従来からの SCGT 国際会議のシリーズを KMI が主催し発表してきた。

<http://www.kmi.nagoya-u.ac.jp/workshop/SCGT15/>

<http://www.kmi.nagoya-u.ac.jp/workshop/SCGT14Mini/>

<http://www.kmi.nagoya-u.ac.jp/workshop/SCGT12/>

<http://www.kmi.nagoya-u.ac.jp/workshop/SCGT12Mini/>

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 137 件)

[本研究で雇用した研究者が独自に行った発表論文は含めていない。]

[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] "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)

[8] "Walking signals in Nf=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)

[9] "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)

[10] "Walking techni-pions 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)

[11] "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)

[12] "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)

[13] "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)

[14] "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)

[15] "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)

[16] "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)

[17] "Holographic QCD Integrated Back to Hidden Local Symmetry", M. Harada, S. Matsuzaki, K. Yamawaki, Phys. Rev. D 82 (2010) 766010, 1-17 (refereed)

DOI: [10.1103/PhysRevD.82.076010](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.82.076010)

[18] "Holographic Techni-dilaton", K. Haba, S. Matsuzaki, K. Yamawaki, Phys. Rev. D82 (2010) 55007, 1-13 (refereed)

DOI: [10.1103/PhysRevD.82.055007](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.82.055007)

[19] "Hadronic light-by-light scattering contribution to the muon anomalous magnetic moment from lattice QCD", T. Blum, S. Chowdhury, M. Hayakawa, T. Izubuchi, Phys. Rev. Lett. 114 (2015), 012001(1-5), (refereed)

DOI: [10.1103/PhysRevLett.114.012001](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.114.012001)

[20] "Running Coupling Constant and Mass Anomalous Dimension of Six-flavor SU(2) Gauge Theory", M. Hayakawa, K.-I. Ishikawa, S. Takeda, N. Yamada, Phys. Rev. D88 (2013) 094504 (1-19), (refereed)

DOI: [10.1103/PhysRevD.88.094504](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.88.094504)

[21] "Lattice Study on Quantum-Mechanical Dynamics of Two-Color QCD with Six Light Flavors", M. Hayakawa, K.-I. Ishikawa, S. Takeda, N. Yamada, Phys. Rev. D88 (2013) 094506 (1-21), (refereed)

DOI: [10.1103/PhysRevD.88.094506](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.88.094506)

[22] "Running Coupling Constant of Ten-flavor QCD with Schrodinger Functional Method", M. Hayakawa, K.-I. Ishikawa, S. Takeda, S. Uno, N. Yamada, Phys. Rev. D83 (2011) 074509 (1-15), (refereed)

DOI: [10.1103/PhysRevD.83.074509](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.83.074509)

[23] “Reconstruction of scalar field theories realizing inflation consistent with the Planck and BICEP2 results”, K. Bamba, S. Nojiri, S.D. Odintsov, Phys. Lett. B735 (2014) 376-382 (2014), (refereed)

DOI: [10.1016/j.physletb.2014.09.014](https://doi.org/10.1016/j.physletb.2014.09.014)

[24] “Lattice QCD study of four-quark components of the isosinglet scalar mesons: Significance of disconnected diagrams”, M. Wakayama, T. Kunihiro, S. Muroya, A. Nakamura, C. Nonaka, M. Sekiguchi, H. Wada, Phys. Rev. D 91, 094508 (1-10), (2015), (refereed)

DOI: [10.1103/PhysRevD.91.094508](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.91.094508)

〔学会発表〕(計 118 件)

1. 山脇 幸一, “Waking Technicolor on the LHC and the Lattice”, 25th Busan Particle Physics Workshop, 2014.12.04-08, Busan, Korea

2. 青木 保道, “SSM-Near Conformal Strong Dynamics”, Plenary Talk at Lattice 2014, 2014.06.23-28, NY, USA

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. 松崎 真也, “125 GeV Techni-dilaton at the LHC”, Frontiers beyond the Standard Model III, 2012.10.11-13, Minneapolis, USA

〔図書〕(計 9 件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

取得状況 (計 0 件)

〔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

益川 敏英 (MASKAWA, Toshihide) 名古屋大学・素粒子宇宙起源研究機構・特別教授

研究者番号: 60022612

(2) 研究分担者

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

(3) 研究分担者

棚橋 誠治 (TANABASHI, Masaharu) 名古屋大学・基礎理論センター・教授

研究者番号: 00270398

(4) 研究分担者

原田 正康 (HARADA, Masayasu) 名古屋大学・理学研究科・教授

研究者番号: 40311716

(5) 研究分担者

野尻 伸一 (NOJIRI, Shin'ichi) 名古屋大学・理学研究科・教授

研究者番号: 00432229

(6) 研究分担者

前川 展祐 (MAEKAWA, Nobuhiro) 名古屋大学・基礎理論センター・准教授

研究者番号: 40273429

(7) 研究分担者

早川 雅司 (HAYAKAWA, Masashi) 名古屋大学・理学研究科・准教授

研究者番号: 20270556

(8) 研究分担者

戸部 和弘 (TOBE, Kazuhiro) 名古屋大学・理学研究科・准教授

研究者番号: 20451510

(9) 研究分担者

酒井 忠勝 (SAKAI, Tadakatsu) 名古屋大学・理学研究科・准教授

研究者番号: 50375359

(10) 研究分担者

野中 千穂 (NONAKA, Chiho) 名古屋大学・基礎理論センター・准教授

研究者番号: 10432238

(11) 研究分担者

青木 保道 (AOKI, Yasumichi) 名古屋大学・基礎理論センター・准教授 (平成 23、24、25、26 年度分担)

研究者番号: 20292500

(12) 研究分担者

松崎 真也 (MATSUZAKI, Shinya) 名古屋大学・理学研究科・特任助教 (平成 25、26 年度分担)

研究者番号: 50712486

(13) 研究分担者

柴田 章博 (SHIBATA, Akihiro) 大学共同研究利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・その他部局等・講師

研究者番号: 30290852

(14) 研究分担者

曾我見 郁夫 (SOGAMI, Ikuo) 京都産業大学・理学部・名誉教授 (平成 22、23、24 年度分担)

研究者番号: 20065832

(15) 連携研究者

深谷 英則 (FUKAYA, Hidenori) 大阪大学・理学研究科・助教

(平成 22 年度のみ)