

令和 5 年 5 月 24 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2022

課題番号：19K03873

研究課題名（和文）細谷機構とゲージヒッグス統合

研究課題名（英文）Hosotani Mechanism and Gauge-Higgs Unification

研究代表者

細谷 裕（HOSOTANI, Yutaka）

大阪大学・大学院理学研究科・招へい研究員

研究者番号：50324744

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：ヒッグス粒子の背後にどんな新しい物理が待ち受けているのか、鍵となるのはゲージ対称性の自発的破れのメカニズムである。本研究では、ヒッグス機構に代わって細谷機構により力学的にゲージ対称性が自発的に破れる現実的なゲージヒッグス統合理論を構築した。4次元のヒッグスポソンはゲージ場の5次元目成分、AB位相の揺らぎとして出現し、ゲージ原理により相互作用が支配される。ゲージボソンの5次元目への励起モードの効果はLHCやILCでの実験で観測できる。

さらに、ゲージヒッグス統合理論ではアノマリフローという現象が起こり、ワープ空間上でホログラフィーが成立することが示された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

素粒子物理学における力の統一には対称性の自発的破れの機構が要となる。標準理論ではヒッグス機構により対称性が破られる。本研究ではヒッグス機構に代わって細谷機構により力学的に対称性が自発的に破れるゲージヒッグス統合理論を構築した。我々の時空には5次元目があり、ヒッグスポソンはゲージ場の5次元目成分の一部として現れる。5次元目の存在は高エネルギー加速器実験で確かめることができる。ゲージヒッグス統合理論は高次元理論であるにもかかわらず、様々な美しい性質を持つ。

研究成果の概要（英文）：What kind of new physics is hiding behind the Higgs boson? The key issue for this query is the mechanism for spontaneous gauge symmetry breaking. In this research project a realistic gauge-Higgs unification model is constructed, in which gauge symmetry is dynamically broken by the Hosotani mechanism instead of the Higgs mechanism in the standard model. The Higgs boson in four dimensions appears as a fluctuation mode of an Aharonov-Bohm phase in the fifth dimension, whose dynamics is governed by the gauge principle. There appear Kaluza-Klein excited states of the gauge bosons in the fifth dimension, whose effects can be measured in the experiments at LHC and ILC in future.

Furthermore the phenomenon of anomaly flow by an Aharonov-Bohm phase is discovered in gauge-Higgs unification models on orbifolds. In the Randall-Sundrum warped space the holography in anomaly flow is established.

研究分野：素粒子物理学

キーワード：素粒子論 対称性の自発的破れ 細谷機構 余剰次元 ゲージヒッグス統合 アノマリ

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

1983年、細谷(代表者)はゲージ対称性の自発的破れが5次元時空のゲージ相互作用の結果自然に起こることを発見した。余剰次元におけるアハロノフ・ボーム(AB)位相の力学によるゲージ対称性の自発的破れのメカニズムで細谷機構と呼ばれる。標準理論で適用されているヒッグス機構と異なり、この細谷機構は5次元時空でのゲージ原理に基づき任意性がない。この細谷機構を元に構成されたのがゲージヒッグス統合理論である。

2012年に発見されたヒッグス粒子はゲージ場の5次元成分の一部として現れる。標準理論は低エネルギー領域では実験観測データをほぼ完全に再現し、その妥当性は疑いない。しかし、理論的にはヒッグス粒子の相互作用部分には任意性が残り原理が欠落している。また量子補正によりヒッグス粒子の質量は大きくずれ、とてつもない理論パラメータの微調整が必要となる(ゲージ階層性問題と呼ばれる)。これらの問題を解決するのがゲージヒッグス統合理論である。ヒッグス粒子の相互作用はゲージ原理で定まり、ヒッグス粒子の質量は量子効果で有限に生成される。

細谷は現実的なモデルとして $S(5) \times U(1) \times SU(3)$ ゲージ・ヒッグス電弱統合理論を構成した。このモデルを精密化し、低エネルギー領域では標準理論と同じく実験観測データを再現することを示し、さらに将来の実験でいかにゲージ・ヒッグス電弱統合理論を検証できるかを明らかにすることが大きな課題であった。

### 2. 研究の目的

統一理論の根幹をなすゲージ対称性の自発的破れのメカニズムとしての細谷機構を理論的に確立する。細谷機構を基盤にしたゲージヒッグス統合理論を構成し、低エネルギーでの実験観測データを矛盾なく記述することを示す。さらに、5次元時空、余剰次元の存在をいかに間接的に検証できるか、今後の加速器実験でどのように確かめることができるかを明らかにする。これはまた、ヒッグス粒子の正体を明らかにすることにもなる。

### 3. 研究の方法

低エネルギーで標準理論を再現する $S(5) \times U(1) \times SU(3)$ ゲージ・ヒッグス統合理論を精密化する。クォーク・レプトンのスペクトル、ゲージ相互作用を正確に再現するモデルの構築である。これを元に、クォーク・レプトン、ゲージボソンの5次元目への励起モード(Kaluza-Klein(KK)励起モード)のスペクトル、ゲージ相互作用を評価し、LHCやILCの将来実験でKK励起モードの効果をいかに観測できるかを明らかにする。

さらにゲージ・ヒッグス統合理論のような5次元時空(オービフォールド)でのゲージ理論の特性を $S(5) \times U(1) \times SU(3)$ ゲージ・ヒッグス統合理論だけでなくより簡単な $SU(2)$ 理論で調べる。

### 4. 研究成果

#### (1) GUT inspired $S(5) \times U(1) \times SU(3)$ ゲージヒッグス統合理論の構築

将来、 $S(11)$ 大統一理論(GUT)に拡張可能な $S(5) \times U(1) \times SU(3)$ ゲージヒッグス統合理

論 (B-モデル) を構成した。以前の A-モデルでは up-type quarks がうまく入らなかったが、B-モデルではクォーク・レプトンは  $S_0(5)$  のスピノル表現、ベクトル表現および一重項の組み合わせで入り、クォーク・レプトンのスペクトルが再現されることを示した。

(2) Cabibbo-小林-益川行列の再現と FCNC の抑制

この B-モデルではクォークセクターで Cabibbo-小林-益川 (CKM) 行列を再現できることを示した。さらにフレーバーを変える中性カレント (FCNC) が自然に 6 桁のオーダーで抑制されることも示された。トップクォーク以外のクォーク・レプトンのゲージ相互作用は 4 桁の精度で標準理論と一致することが示された。

(3) GUT inspired ゲージヒッグス統合模型の普遍性

モデルには低エネルギーの情報だけでは決まらないいくつかのパラメータがある。しかしながら、多くの観測量は 5 次元目のアハロノフ・ボーム (AB) 位相  $\theta_H$  と KK 質量スケール  $m_{KK}$  の値のみでほぼ決まることを示した。この AB 位相  $\theta_H$  の値は大体 0.1 ぐらいと予想される。KK 質量スケール  $m_{KK}$  は 13 TeV ぐらいである。

(4) 電子陽電子衝突実験でのフェルミオン対生成

ゲージヒッグス統合理論ではゲージボソンの KK 励起モードが 10 TeV 程度の領域に预言される。特に、光子、Z ボソンの励起モードは電子陽電子衝突の中間状態に現れる。質量は 10 TeV 程度と非常に大きいですが、日本で計画されている ILC (250 GeV から 500 GeV) でもその効果を見ることが出来る。KK ゲージボソンのクォーク・レプトン結合には大きなパリティの破れがあり、そのため入射電子陽電子の偏極を変化させることによりフェルミオン対生成の頻度が大きく変わる。ILC 実験で余剰次元の存在を間接的に確認できる。(図 1)

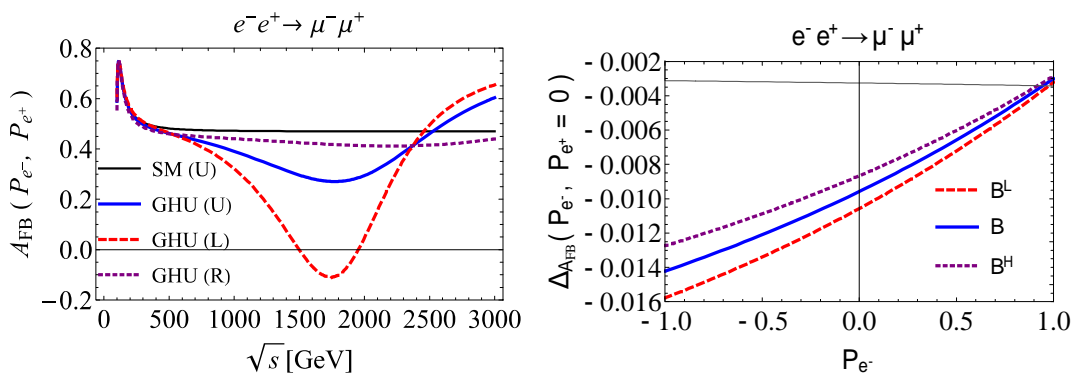


図 1 : 前方後方非対称性  $A_{FB}$  と  $\Delta_{AB} = A_{FB}^{GHU} / A_{FB}^{SM} - 1$

左 : 偏極度  $(P_{電子}, P_{陽電子}) = (0,0)(U), (-0.8, 0.3)(L), (0.8, -0.3)(R)$ .

右 : エネルギー 250 GeV、 $m_{KK} = 11, 13, 15$  TeV ( $B^L, B, B^H$ ) の場合.

(5) 電弱相転移と左右相転移

宇宙初期での GUT inspired  $S_0(5) \times U(1) \times SU(3)$  ゲージヒッグス統合理論の振る舞いは興味深い。宇宙の温度  $T$  が 163 GeV で電弱対称性  $SU(2)_L \times U(1)_Y$  が回復される。弱い 1 次相転移である。この振る舞いは標準理論とほぼ同じである。さらに温度を上げると  $T$  が 4000 GeV 程度で  $\theta_H=0$  状態と  $\theta_H=\pi$  状態がほぼ縮退し、宇宙初期に左右相転移およびドメ

イン構造が現れることを明らかにした。(図2)

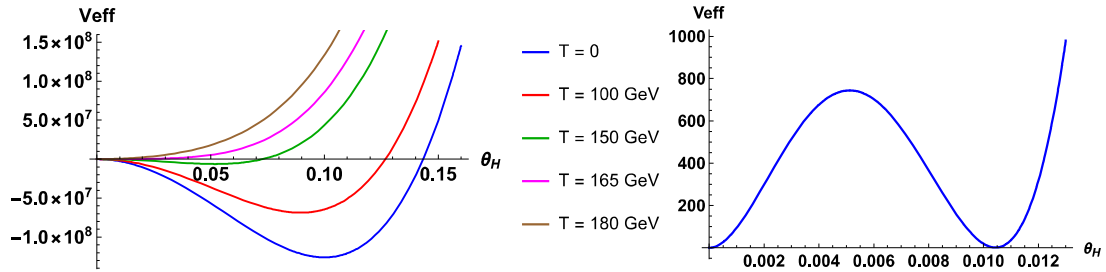


図2：電弱相転移における有効ポテンシャル  $V_{\text{eff}}(\theta_H, T)$  .

左：温度  $T$  が 163.2 GeV で電弱対称性  $SU(2)_L \times U(1)_Y$  が回復される。  
 右： $T = 163.2$  GeV での原点付近での振る舞い。弱い1次相転移である。

(6) アハロノフ・ポーム位相によるアノマリ・フロー

オービフォールド上、特に Randall-Sundrum ワープ空間で定義されたゲージ理論では量子異常項(アノマリ)がアハロノフ・ポーム位相  $\theta_H$  とともに変化することを発見した。この現象はアノマリ・フローと呼ばれる。これは  $\theta_H$  の値とともにフェルミオンのゲージ結合がカイラル(左右非対称)な状態からベクトルの(左右対称)な状態に連続的に変わることと関係している。カイラル・フェルミオンからベクトル・フェルミオンへの遷移がおこるのである。

オービフォールド上ではゲージ場やフェルミオンの質量は  $\theta_H$  とともに変化する。SU(2)ゲージ理論の場合のスペクトルが図3に表示されている。左図は平坦なオービフォールドの場合、右図は Randall-Sundrum(RS)ワープ空間の場合である。RS空間では質量は  $\theta_H$  とともにスムーズに変化することが見て取れる。ゲージ場は  $\theta_H = 0$ 、および  $\theta_H = \pi$  でゼロ質量である。フェルミオンのゼロモードは  $\theta_H = 0$  ではゼロ質量だが、 $\theta_H = \pi$  では有限の質量をもつ。これがカイラル・フェルミオンからベクトル・フェルミオンへの遷移を表す。

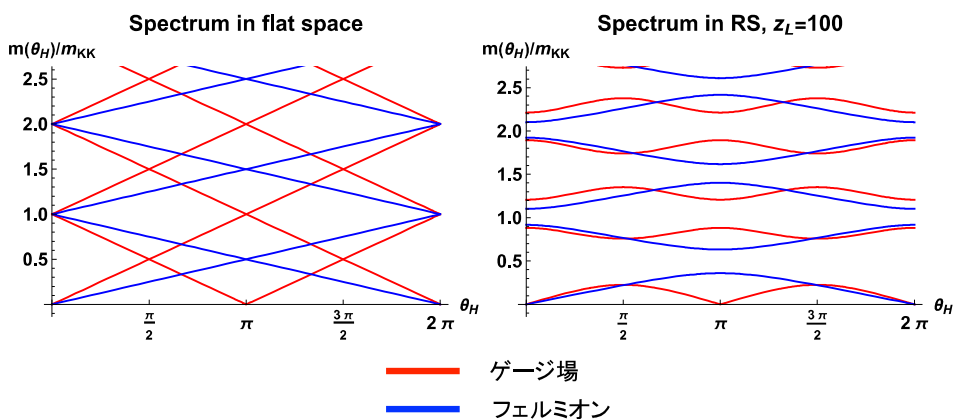


図3：SU(2)理論でのゲージ場とフェルミオンの質量スペクトル  
 左：平坦オービフォールド 右：Randall-Sundrum(RS)ワープ空間

アノマリの大きさは  $\theta_H$  の値とともに変わるが、それはフェルミオンのパリティ境界条件だけで決まることも判明した。フェルミオンの質量には依存しないのである。

さらにアノマリの大きさはゲージボソンのオービフォールド固定プレーン上での波動

関数の値で決まることも導いた。(図4)アノマリにはホログラフィが成り立つことを意味する。これは現実的な GUT inspired  $SO(5) \times U(1) \times SU(3)$  ゲージヒッグス統合理論でゲージ・アノマリが相殺することを可能にする。

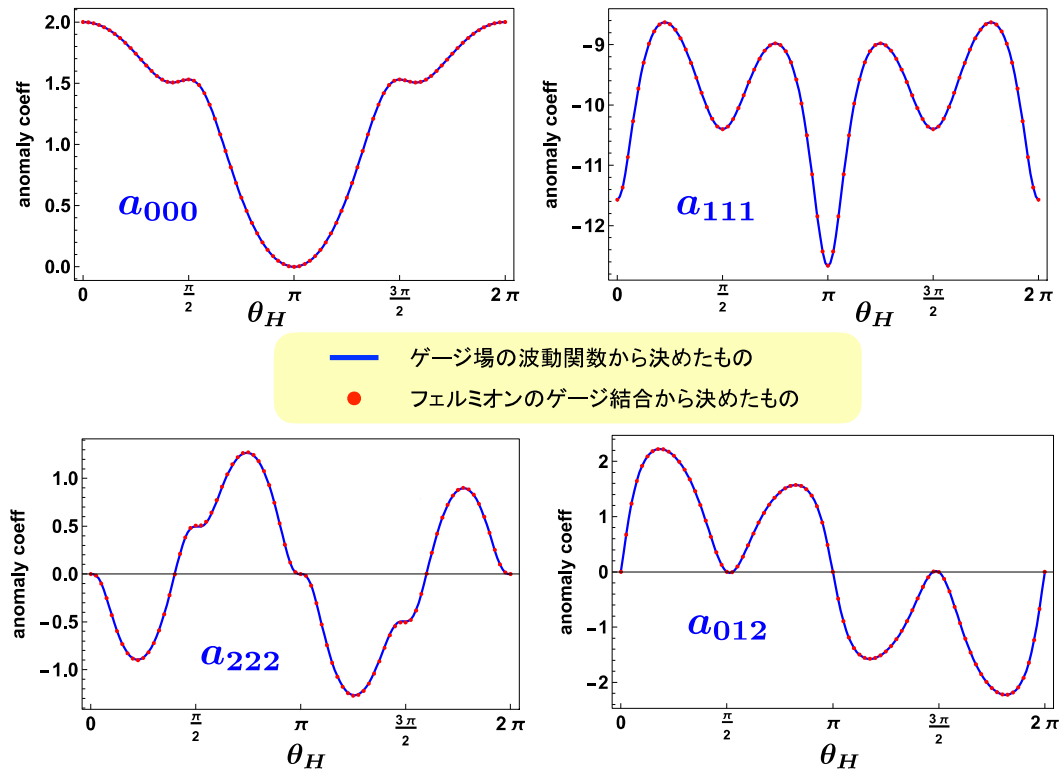


図4：アノマリ係数の  $\theta_H$  依存性。青線はゲージ場の波動関数から決めたもの。赤丸はフェルミオンのゲージ結合から決めたもの。両者は見事に一致する。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計9件（うち査読付論文 9件/うち国際共著 8件/うちオープンアクセス 9件）

1. 著者名 S. Funatsu, H. Hatanaka, Y. Hosotani, Y. Orikasa, and N. Yamatsu	4. 巻 104
2. 論文標題 Electroweak and left-right phase transitions in $S0(5) \times U(1) \times SU(3)$ gauge-Higgs unification	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 115018 1-26
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevD.104.115018	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する
1. 著者名 S. Funatsu, H. Hatanaka, Y. Hosotani, Y. Orikasa, and N. Yamatsu	4. 巻 105
2. 論文標題 Signals of $W'$ and $Z'$ bosons at the LHC in the $SU(3) \times S0(5) \times U(1)$ gauge-Higgs unification	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 055015 1-14
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevD.105.055015	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する
1. 著者名 S. Funatsu, H. Hatanaka, Y. Hosotani, Y. Orikasa, and N. Yamatsu	4. 巻 2022
2. 論文標題 Anomaly flow by an Aharonov-Bohm phase	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 043B04 1-21
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1093/ptep/ptac052	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する
1. 著者名 S. Funatsu, H. Hatanaka, Y. Hosotani, Y. Orikasa, and N. Yamatsu	4. 巻 102
2. 論文標題 Effective potential and universality in GUT-inspired gauge-Higgs unification	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 015005 1-14
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevD.102.015005	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

1. 著者名 S. Funatsu, H. Hatanaka, Y. Hosotani, Y. Orikasa, and N. Yamatsu	4. 巻 102
2. 論文標題 Fermion pair production at $e^-e^+$ linear collider experiments in GUT inspired gauge-Higgs unification	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 015029 1-25
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.102.015029	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 S. Funatsu, H. Hatanaka, Y. Hosotani, Y. Orikasa, and N. Yamatsu	4. 巻 99
2. 論文標題 GUT inspired $SO(5) \times U(1) \times SU(3)$ gauge-Higgs unification	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Phys Rev D	6. 最初と最後の頁 095010 1-29
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.99.095010	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 S. Funatsu, H. Hatanaka, Y. Hosotani, Y. Orikasa, and N. Yamatsu	4. 巻 101
2. 論文標題 CKM matrix and FCNC suppression in $SO(5) \times U(1) \times SU(3)$ gauge-Higgs unification	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Phys Rev D	6. 最初と最後の頁 055016 1-20
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.101.055016	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 S. Funatsu, H. Hatanaka, Y. Hosotani, Y. Orikasa, N. Yamatsu	4. 巻 106
2. 論文標題 Bhabha scattering in the gauge-Higgs unification	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Phys. Rev. D	6. 最初と最後の頁 015010, 1-12
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.106.015010	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Yutaka Hosotani	4. 巻 2022
2. 論文標題 Universality in anomaly flow	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 073B01, 1-20
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/ptep/ptac084	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計14件 (うち招待講演 6件 / うち国際学会 6件)

1. 発表者名 細谷 裕
2. 発表標題 Anomaly flow by AB phases
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 細谷 裕
2. 発表標題 湯川秀樹博士と大阪大学 ノーベル賞はかくして生まれた
3. 学会等名 日本物理学会 第7回オンライン物理講話 (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 細谷 裕
2. 発表標題 The effective potential and universality in GUT inspired gauge-Higgs unification
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2020年



1. 発表者名 細谷 裕
2. 発表標題 Left-right phase transition in gauge-Higgs unification
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Y. Hosotani
2. 発表標題 The Birth of the Nobel Prize in Japan -- Hideki Yukawa and Osaka University
3. 学会等名 HPNP2021 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Y. Hosotani
2. 発表標題 GUT inspired gauge-Higgs unification: CKM and ILC physics
3. 学会等名 Scalars 2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Y. Hosotani
2. 発表標題 ILC phenomenology of gauge-Higgs unification
3. 学会等名 LCWS 2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Y. Hosotani
2. 発表標題 Flavor mixing, FCNC, and CP violation in gauge-Higgs unification
3. 学会等名 New Higgs Working Group (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 細谷裕
2. 発表標題 CKM matrix and FCNC in $SO(5) \times U(1) \times SU(3)$ gauge-Higgs unification
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yutaka Hosotani
2. 発表標題 Holography in anomaly flow in orbifold gauge theory
3. 学会等名 Corfu Summer Institute 2022, Corfu, Greece (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yutaka Hosotani
2. 発表標題 Holography in anomaly flow and anomaly cancellation in GHU
3. 学会等名 Summer Institute 2022, Fuji-Yoshida, Yamanashi (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 細谷 裕
2. 発表標題 Coupling sum rules and oblique corrections in gauge-Higgs unification
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 細谷 裕
2. 発表標題 Holography in anomaly flow and anomaly cancellation
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Yutaka Hosotani
2. 発表標題 Holography and anomaly cancellation in gauge-Higgs unification
3. 学会等名 素粒子現象論研究会2022, 大阪公立大学
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関			
チェコ	Czech Technical University in Prague			
中国	Central China Normal University			