

令和 5 年 6 月 13 日現在

機関番号：11301

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2021～2022

課題番号：21K20363

研究課題名（和文）軽いスカラー新粒子の精密計算が拓く新物理理論のヒッグスセクター

研究課題名（英文）Probe of the Higgs sector by precise calculations of the light new scalar particles

研究代表者

桜井 亘大（Kodai, Sakurai）

東北大学・理学研究科・特任助教

研究者番号：70910256

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 1,600,000円

研究成果の概要（和文）：軽い暗黒物質や付加的ヒッグス粒子を予言する新物理模型に対し以下の成果を得た。軽い暗黒物質がヒッグス粒子や付加的ヒッグス粒子と強結合を持つ場合、その強結合を通じた将来加速器実験における暗黒物質生成過程により、その様なシナリオを検証出来ることを示した。また、この様なシナリオは2022年CDF II実験で報告されたWボソン質量の標準理論予言からのずれを最大で5MeV緩和することを示した。軽い暗黒物質が将来実験で発見されれば、付加的ヒッグス粒子の質量スケールが決定される事を示した。また、付加的ヒッグス粒子の崩壊過程やヒッグス粒子の軽い暗黒物質に対する崩壊過程に対する量子効果の理論的性質を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

学術的意義は、以下二つの点を明らかにした事である。(1):

軽いスカラー暗黒物質を探索する上で付加的ヒッグス粒子の影響は、その質量スペクトラムによらず重要であること（軽い場合は付加的ヒッグス粒子の崩壊が重要になり、重い場合は量子補正を通じて125GeVヒッグス粒子の崩壊に影響する。）。(2): 軽いスカラー暗黒物質が発見されれば、付加的ヒッグス粒子との関連性によりヒッグスセクターの構造解明に迫り得ること。

本研究で得られた理論的帰結を検証するためには、素粒子現象を超高精度で測定出来る新たな加速器が必要である。社会的意義は、この様な最先端の加速器を作る上で様々な産業技術の発展が期待される点である。

研究成果の概要（英文）：We focus on various models with light scalar dark matter (DM) and additional Higgs bosons. First, we consider the scenario where the light scalar DM strongly couples with the 125 GeV Higgs boson and additional Higgs bosons. We show that this scenario can be probed by the DM production process induced by the strong couplings at future Lepton colliders. In addition, this model with light scalar DM can alleviate the anomaly in the W boson mass measurement reported in CDF II experiment. Model prediction for deviation in W boson mass from the SM prediction can be 5 MeV at the most. Second, we demonstrate that the scale of the additional Higgs bosons can be fixed if the light DM is detected in future experiments. Finally, we clarify the theoretical behavior of quantum corrections for additional Higgs boson decays and the Higgs boson invisible decay.

研究分野：ヒッグス粒子や軽いスカラー暗黒物質の現象論

キーワード：軽いスカラー暗黒物質 付加的ヒッグス粒子 ヒッグスセクター 量子補正

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

素粒子物理学における標準理論は電弱スケールの物理(100GeV 程度のエネルギースケール)を記述する理論として確立し、現行の LHC 実験(大型ハドロン衝突型加速器実験)で測定されている様々な素粒子散乱現象のデータを説明している[1]。その一方で、様々な未解決現象(ニュートリノ振動、暗黒物質、宇宙のバリオン数非対称性やインフレーション)や理論的問題(強い strong CP 問題、階層性問題、大統一理論の解明)が存在することが知られている。

標準理論の別の問題としては、ヒッグスセクター(理論の電弱対称性の破れるを記述するパート)が詳細に検証されていない点が挙げられる。すなわちヒッグスセクターの構造は依然として解明されていない。真のヒッグスセクターに含まれるヒッグス粒子の数はいくつか、付加的なヒッグス粒子が存在する場合どのような性質(質量や結合、量子数)を持つか等の様々な疑問がある。上記の標準理論の未解決問題を説明する新物理模型の多くは、拡張されたヒッグスセクターを伴っており、ヒッグスセクターを徹底的に調べることで、新物理理論を構築する大きな指針を得ることが出来ると考えられる。

これまで様々な拡張ヒッグスセクターを伴う理論が研究されており、理論に含まれる付加的ヒッグス粒子の質量が 100GeV 以上のシナリオが広く研究されてきた。一方、本研究は軽いスカラー新粒子を预言する拡張ヒッグスセクターのシナリオに注目する。何故なら、その様な軽いスカラー粒子のシナリオの中には、強い CP 問題や暗黒物質(DM: Dark Matter)を説明できるものがあり、また加速器のみならず宇宙観測(宇宙線、宇宙背景放射、超新星爆発等)を用いた実験的検証が盛んに行われている為である。

2. 研究の目的

本研究の目的は、軽いスカラー新粒子を预言する拡張ヒッグスセクターの理論的性質を詳細に調べることで、暗黒物質とヒッグスセクターの関連性を理解し、さらにヒッグスセクターの構造解明に迫ることである。

3. 研究の方法

軽いスカラー粒子を预言する複数の拡張ヒッグス模型に注目し、预言されるヒッグス粒子、軽いスカラー粒子や付加的ヒッグス粒子の現象論的性質を調べる。また、軽いスカラー粒子と付加的ヒッグス粒子がどのように関連しているかを調査する。具体的には以下の研究を進めていく。

(1) CP-odd ヒッグス粒子と荷電ヒッグス粒子崩壊に対する量子効果

軽いスカラー粒子を導入する前に、まず代表的な拡張ヒッグス模型であるヒッグス 2 重項場を二つ含む模型(2HDM:Two Higgs doublet model)[2]に注目し、预言される CP-odd ヒッグス粒子と荷電ヒッグス粒子に対する崩壊分岐比の精密理論計算を行う。摂動の 1 次で現れる全ての量子補正を計算し、摂動の最低次の理論预言に対する影響を解析する。

(2) ヒッグス粒子の暗黒物質崩壊に対する量子効果

2HDM にヒッグス 1 重項場を加えた模型(N2HDM:Next-to two Higgs doublet model)[3]を扱う。この模型は離散的対称性 Z_2 が課されており、预言される付加的スカラー粒子はフェルミオンと結合せず、その最も軽い粒子が DM 候補となる。DM の質量が 62GeV 以下の場合に焦点を当て、このシナリオで预言されるヒッグス粒子の DM への崩壊過程に対する量子効果の影響を解析する。

(3) 軽いスカラー暗黒物質を预言する単純な模型の構築とその検証可能性

(1)、(2)の研究では、既存の代表的な拡張ヒッグス模型の 2HDM とその暗黒物質候補を含む理論への拡張を考えた。ここではより最小限のセットアップで軽いスカラー暗黒物質を预言する新たな拡張ヒッグス模型を構築し、预言される付加的ヒッグス粒子や軽いスカラー暗黒物質の現象論的性質を明らかにする。

(4) 軽いスカラー暗黒物質と付加的ヒッグス粒子の関連性

軽いスカラー暗黒物質が、超高エネルギースケールにおける $U(1)$ 対称性の破れに起因して現れる南部ゴールドストーンボソン[4]であり、かつその質量が keV スケールにある場合を考察する。keV スケールの軽いスカラー暗黒物質は X 線探索により厳しい制限がつくことが知られている[5]。この制限を上手く回避できるような性質を持つ軽いスカラー暗黒物質が预言される拡張ヒッグス模型を構築する。この模型で预言される軽いスカラー暗黒物質に対する現状の直接探索実験や X 線観測等の間接探索実験の制限を満たすパラメータ領域が存在するかどうかを調査する。そして、軽いスカラー暗黒物質と预言される付加的なヒッグス粒子の関係性を明らかにする。

4. 研究成果

(1)-(4)の研究をそれぞれ遂行し、以下の研究成果を得た。

(1):本研究により CP-odd ヒッグス粒子と荷電ヒッグス粒子の崩壊過程 $A \rightarrow Zh, H^\pm \rightarrow W^\pm h$ (A : CP-odd ヒッグス粒子, H^\pm : 荷電ヒッグス粒子, h : ヒッグス粒子, Z, W : 弱ゲージボソン) に対する量子効果が摂動最低次の寄与よりも重大になり得るパラメータ領域が存在することを定量的に明らかにした。上述の崩壊過程に対する量子効果を解析した先行研究は存在するが、本研究によりどのような物理的状況でこの効果が重要になり得るかが定量的に示された。これは LHC 実験や将来の高輝度 LHC 実験における付加的ヒッグスボソン直接探索実験によって調べられる理論のパラメータ領域が、量子効果により、変わり得ることを示唆している。

また、当初は、付加的ヒッグス粒子崩壊に対する量子効果のみに着目していたが、ヒッグスボソンの崩壊率に対する量子効果も調べた。図 1 に示すように、摂動の高次効果を取り入れることで付加的ヒッグスボソンの崩壊分岐比とヒッグス粒子の崩壊率の間に非自明な相関が得られることがわかった。

(2): 付加的ヒッグスボソンがヒッグス粒子が軽い場合と重い場合の二つのシナリオに対してヒッグス粒子の暗黒物質への崩壊率 $h \rightarrow DM$ DM に対する量子補正を、種々の加速実験の制限や暗黒物質に対する実験的制限を考慮して解析した。図 2 は付加的ヒッグスボソンが重い場合のシナリオにおける、量子効果のインパクトを示す図であり、パラメータ領域によっては、量子補正により理論予想が大きく変わり得ることを明らかにした。また、3 つの異なる量子効果の計算手法を用いて、その理論予想の比較を行なった。このヒッグスの崩壊過程に対する量子効果を調べた先行研究は存在せず、本研究によりその影響が初めて明らかにされた。本研究により、 $h \rightarrow DM$ DM に対する量子効果の重要性が認識されて、他の様々な暗黒物質を预言される模型で同様の解析が進められることが期待される。

(3): 軽いスカラー暗黒物質を预言する単純な拡張ヒッグス模型は、 $U(1)$ 対称性を持つヒッグス 1 重項場を追加することで実現できることがわかった。このセットアップでは、ヒッグスセクターに含まれる $U(1)$ 対称性の微弱の破れの効果により、軽い暗黒物質が質量を持つ。結合定数に対しては、ヒッグスセクターが CP 対称性を持つことから CP-even スカラー型の相互作用を持つことがわかった。この模型で预言される軽いスカラー粒子は、従来考えられている軽いスカラー粒子と異なる結合の構造を持っており、また、ヒッグス粒子と強く結合することが出来る。このような新しい性質をもつ軽いスカラー粒子を预言する模型は、これまで殆ど考えられておらず、本研究により新たに提案された。加えて、軽いスカラー粒子がヒッグス粒子または、付加的なヒッグス粒子と強く結合している場合に、この模型を検証できるかどうかを解析した。その結果、国際線形加速器実験 (ILC) におけるヒッグス・付加的ヒッグス粒子崩壊を通じた軽いスカラー生成過程により模型の多くのパラメータ領域を調査出来ることを明らかにした (図 3)。さらに、この新たな模型の枠組みで、2021 年の CDF II 実験で報告された W ボソン質量の標準理論予想からのずれの結果 [6] を説明できるかどうかを調査し、W ボソン質量におけるずれを最大で 5MeV 程度緩和できることを明らかにした。

(4): keV スケールの軽いスカラー暗黒物質を预言する模型としてヒッグス 2 重項場が 3 つ含まれる模型を構築し、预言される軽いスカラー暗黒物質と付加的ヒッグス粒子の現象論的性質を解析した。軽いスカラー暗黒物質については、付加的ヒッグス粒子との混合の効果が重大になり得ることを明らかにした。この混合の効果は軽いスカラー暗黒物質と光子との結合に寄与し、この混合が無視できないような模型のパラメータ領域は X 線探索の制限により

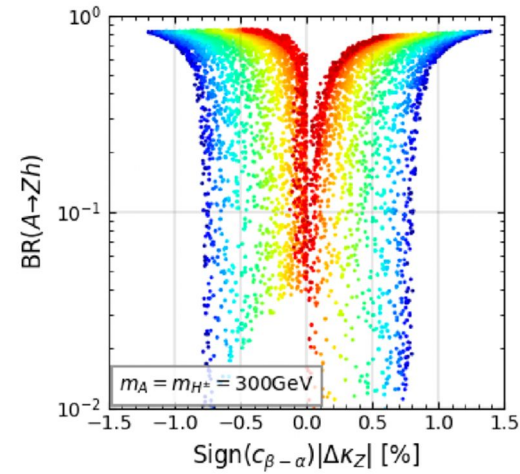


図 1: CP-odd ヒッグス粒子崩壊分岐比 $BR(A \rightarrow Zh)$ とヒッグス粒子の Z ボソンへの崩壊率の標準理論予想からのずれ $\Delta\kappa_Z$.

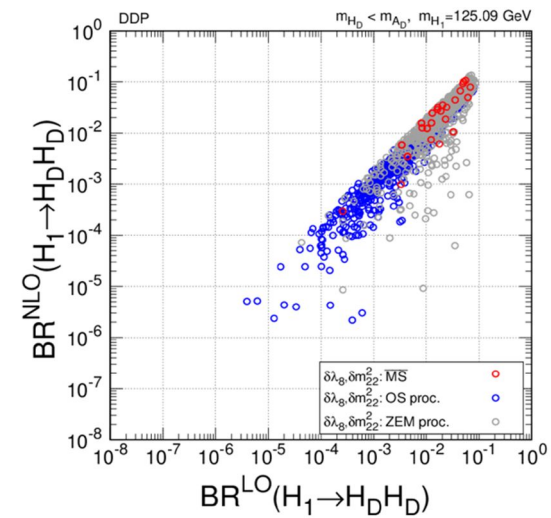


図 2: 量子補正を含むヒッグスボソン崩壊分岐比 $BR(H_1 \rightarrow H_D H_D)_{NLO}$ とその摂動の 0 次の预言 $BR(H_1 \rightarrow H_D H_D)_{LO}$ 。ここで H_1 はヒッグス粒子、 H_D は暗黒物質。

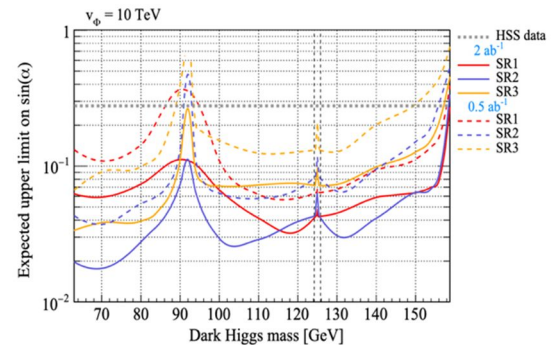


図 3: 軽いスカラー暗黒物質生成過程に対するヒッグス粒子と付加的ヒッグス粒子の混合角 α に対する感度。横軸は付加的ヒッグス粒子の質量を示す。

棄却されることを明らかにした。また、このモデルにおける軽いスカラーの性質(質量や結合の強さ)は付加的ヒッグス粒子と関連しており、将来実験によりこの軽いスカラー粒子が発見されれば、付加的ヒッグス粒子の質量に対する下限が与えられることを定量的に示した(図 4)。本研究で考察された軽いスカラー粒子と付加的ヒッグス粒子の関連性はこれまであまり調査されていなかったが、理論の特定のセットアップでは関連し合うことが明らかになった。

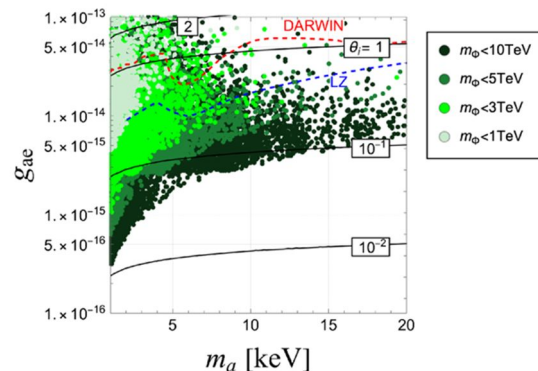


図 4: 付加的ヒッグス粒子の質量と軽いスカラー暗黒物質の性質の関連性を示す図。縦軸は軽いスカラーと電子の結合 g_{ae} 、横軸は軽いスカラー暗黒物質の質量を示す。

参考文献

- [1]: <https://twiki.cern.ch/twiki/bin/view/AtlasPublic>, <https://twiki.cern.ch/twiki/bin/view/CMSPublic/PhysicsResultsCombined>
- [2]: T.D. Lee, Phys.Rev.D 8 (1973) 1226-1239.
- [3]: I. Engeln, P. Ferreira, M. M. Mühlleitner, R. Santos and J. Wittbrodt, JHEP 08 (2020) 085, [2004.05382].
- [4]: 菅本 晶夫, 曹 基哲, 対称性の自発的破れ 2016 年 01 月号 [雑誌] (数理科学 別冊) 等
- [5]: <https://cajohare.github.io/AxionLimits/>
- [6]: <https://www.jahep.org/hepnews/2022/41-2-3-anomaly.pdf>

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 7件/うち国際共著 4件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Azevedo Duarte, Gabriel Pedro, Muhlleitner Margarete, Sakurai Kodai, Santos Rui	4. 巻 2021
2. 論文標題 One-loop corrections to the Higgs boson invisible decay in the dark doublet phase of the N2HDM	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 1~33
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/JHEP10(2021)044	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 Aiko Masashi, Kanemura Shinya, Sakurai Kodai	4. 巻 973
2. 論文標題 Radiative corrections to decays of charged Higgs bosons in two Higgs doublet models	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Nuclear Physics B	6. 最初と最後の頁 1~57
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.nuclphysb.2021.115581	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 -
1. 著者名 Aiko Masashi, Kanemura Shinya, Sakurai Kodai	4. 巻 973
2. 論文標題 Radiative corrections to decays of charged Higgs bosons in two Higgs doublet models	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Nuclear Physics B	6. 最初と最後の頁 115581~115581
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.nuclphysb.2021.115581	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Sakurai Kodai, Takahashi Fuminobu	4. 巻 2022
2. 論文標題 Anomaly-free axion dark matter in three Higgs doublet model and its phenomenological implications	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 124
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/JHEP07(2022)124	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Sakurai Kodai, Yin Wen	4. 巻 2022
2. 論文標題 Phenomenology of CP-even ALP	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 113
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP04(2022)113	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Haghighat Gholamhossein, Mohammadi Najafabadi Mojtaba, Sakurai Kodai, Yin Wen	4. 巻 107
2. 論文標題 Probing a light dark sector at future lepton colliders via invisible decays of the SM-like and dark Higgs bosons	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 35033
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.107.035033	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Sakurai Kodai, Takahashi Fuminobu, Yin Wen	4. 巻 833
2. 論文標題 Singlet extensions and W boson mass in light of the CDF II result	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physics Letters B	6. 最初と最後の頁 137324 ~ 137324
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.physletb.2022.137324	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

〔学会発表〕 計18件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 9件)

1. 発表者名 桜井 巨大
2. 発表標題 NLO corrections to the Higgs boson invisible decay in N2HDM
3. 学会等名 新ヒッグス勉強会第30回定例会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 桜井 巨大
2. 発表標題 Full NLO corrections to charged Higgs boson decays in the NMSSM
3. 学会等名 SUSY2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 桜井 巨大
2. 発表標題 Charged Higgs boson decays with NLO corrections in the NMSSM
3. 学会等名 Charged Higgs Online workshop (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 桜井 巨大
2. 発表標題 Impact of NLO corrections to the Higgs boson invisible decay in N2HDM
3. 学会等名 LHC Higgs Working Group WG3 (BSM) - Extended Higgs Sector subgroup meeting (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 桜井 巨大
2. 発表標題 Probing the Higgs sector by precise calculation of the Higgs invisible decay
3. 学会等名 素粒子物理学の進展 2 0 2 1
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 桜井 巨大
2. 発表標題 Precise calculation of charged Higgs boson decays in two Higgs doublet models
3. 学会等名 ILC 夏の合宿 2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 桜井 巨大
2. 発表標題 ヒッグスボソンのインビジブル崩壊に対する輻射補正
3. 学会等名 日本物理学会秋季大会 2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 桜井 巨大
2. 発表標題 Charged Higgs boson decays with NLO corrections in two Higgs doublet models
3. 学会等名 ILCX2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 桜井 巨大
2. 発表標題 Testability of CP-even ALP at ILC
3. 学会等名 Mini-workshop on BSM at ILC (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 桜井 巨大
2. 発表標題 CP-evenスカラーの結合を持つアクシオンの粒子の検証
3. 学会等名 第77回日本物理学会年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 桜井 巨大
2. 発表標題 CDF II result in the singlet extension of the SM
3. 学会等名 33rd New Higgs Working Group Regular meeting
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 桜井 巨大
2. 発表標題 Phenomenological implications of anomaly-free axion for 3HDM
3. 学会等名 Physics in LHC and Beyond (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 桜井 巨大
2. 発表標題 Phenomenological impact of anomaly-free axion in three Higgs doublet model
3. 学会等名 PASC0SS2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 桜井 巨大
2. 発表標題 A relation between extra Higgs bosons and anomaly-free axion in 3HDM
3. 学会等名 multi Higgs workshop 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 桜井 巨大
2. 発表標題 Anomaly-free axion in three Higgs doublet model
3. 学会等名 34th New Higgs Working Group Regular meeting
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 桜井 巨大
2. 発表標題 拡張ヒッグス模型におけるanomaly-free axionの現象論
3. 学会等名 日本物理学会 2022年秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 桜井 巨大
2. 発表標題 Probing light dark sector by invisible decays of dark and SM-like Higgs bosons at the ILC
3. 学会等名 ILC IDT-WG3 physics working group (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 桜井 巨大
2. 発表標題 Probe of ALP DM by invisible decays of SM-like and dark Higgs bosons at ILC
3. 学会等名 日本物理学会 2023年春季大会
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
---------	---------