

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 6 月 16 日現在

機関番号：12601

研究種目：新学術領域研究(研究領域提案型)

研究期間：2016～2020

課題番号：16H06488

研究課題名(和文) ヒッグス粒子発見後の素粒子物理学の新展開～LHCによる真空と時空構造の解明～

研究課題名(英文) New developments in particle physics after the discovery of the Higgs boson: elucidation of the vacuum and the space-time structure with the LHC experiment

研究代表者

浅井 祥仁(Asai, Shoji)

東京大学・大学院理学系研究科(理学部)・教授

研究者番号：60282505

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 16,800,000円

研究成果の概要(和文)：LHC実験第1期に発見されたヒッグス粒子を、第2期では13TeVまで倍増された衝突エネルギーと約6倍の統計量を用いて精密に調べた。力を伝えるゲージ粒子だけでなく、物質粒子の質量もヒッグス粒子が担っていることが分かった。素粒子の世代の違いをヒッグス粒子が作り出していることも分かり、素粒子の未解決問題への大きな鍵が得られた。我々の宇宙の真空が準安定であり、標準模型を超えた新物理の存在を示唆している。系統的な新粒子探索の結果、幅広い質量領域を棄却し、新物理が存在する可能性のある領域を著しく狭めた。LHC及び他の実験で得られた結果を基に将来のLHCで観測が期待される物理現象を理論的に策定した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究によりヒッグス粒子の性質に関し多くの事実が判明した。素粒子が質量を獲得する機構は標準模型の柱の一つであり、誕生直後の宇宙の相転移やその後の長い年月をかけた宇宙進化の根幹に関わる重大な要素である。本課題の実験結果からヒッグス粒子と関わる粒子の種類、世代の謎を解く鍵が明らかとなり、人類の自然科学に対する認識レベルを大きく前進させることができた。一方、超対称性などの探索からは新粒子は未発見であり、標準模型を超える物理がより重い領域に存在するであろうことが示唆される。ここで得られた実験結果、理論研究から、暗黒物質の候補となる新物理を絞り込めたことで次世代の研究にとり大きなインプットとなる。

研究成果の概要(英文)：The Higgs boson discovered in LHC Run-1 was thoroughly studied in un-2 with the collision energy of 13 TeV and about six times higher statistics than Run-1. It was found that the Higgs boson is responsible not only for the mass of the gauge particles i.e. force carriers, but also for the mass of the matter particles. We also found that the Higgs boson is responsible for the three generations of the matter particles, which could be a significant key to the unsolved major problem of elementary particles. Also confirmed that the vacuum of our universe is metastable, suggesting the existence of new physics beyond the Standard Model. Systematical searches for new physics has led to the exclusion of a wide range of parameter spaces and significantly narrowed the region in which new physics may exist. Based on the results obtained from the LHC and other experiments, the phenomenology of the new physics which we expect to observe at LHC in the future has been theoretically formulated.

研究分野：素粒子実験

キーワード：超対称性粒子 ヒッグス粒子 暗黒物質

## 1. 研究開始当初の背景

2012年に我々アトラス実験グループによってヒッグス粒子が発見された(図1)。ヒッグス粒子の発見は素粒子質量の起源の解明へとつながるとともに、宇宙誕生後の極初期に起きた電弱相転移によって、ヒッグス場が真空中に満ちるようになったということの意味していた。翌年2013年のノーベル物理学賞のヒッグス氏、オングレール氏へのスピード受賞はこの発見の科学界における衝撃の強さを物語っている。ヒッグス粒子の発見からその測定へと研究の方向を転換させ**ヒッグス機構と真空の全容解明**をする必要がある。

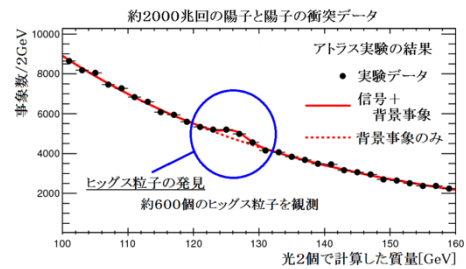


図1 ヒッグス粒子起源の不変質量ピークの観測

発見されたヒッグス粒子が1種類なのか、多種類の中の一つなのか、標準模型で仮定されている通りのものなのか、それとも超対称性などの新物理法則の一部なのか。ヒッグス粒子の性質を徹底的に調べることにより標準模型を超えた物理法則への手がかりが得られると考えられる。また、125 GeV(ギガ電子ボルト)の質量にヒッグス粒子が見つかったことで、テラ電子ボルト・エネルギースケール(1TeV=1000 GeV, テラスケール)に潜む、**新粒子、新物理事象**を世界最高エネルギーの衝突実験であるLHCで直接探索し**時空構造を解き明かす**ことが重要となる。

## 2. 研究の目的

従来の素粒子自体を研究対象とした姿勢から、素粒子を「プローブ」として、その背景にある「真空」、「時空」を研究するという素粒子研究の概念そのものをパラダイム・シフトさせる。図2のように、**真空、時空、素粒子を融合する新しい学術領域を創成する**。

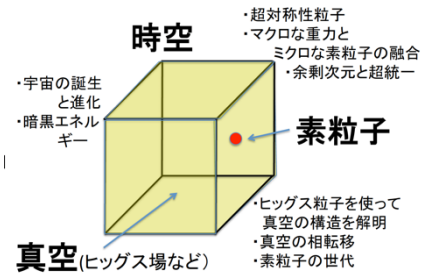


図2 素粒子・真空・時空の関係

**真空の研究**では、真空の構造のや素粒子の世代の謎を解明する。宇宙誕生直後の真空の相転移を理解し、宇宙の進化への知見も得る。

**時空の研究**では超対称性粒子の研究を基に、素粒子と時空のつながりを解明し、時空構造の謎に迫る。真空・時空・素粒子の関係を結びつけ、真空-時空の新しい自然科学像を導き出す。

本領域では3つの研究項目(時空、真空、重粒子)がそれぞれ2つの計画研究班から構成されている。その中心となり各班の研究対象の共通項となるのが、世界で唯一テラスケールでの研究が可能となるLHC加速器である。LHC加速器の衝突点の一つにあるアトラス実験で得られたデータをもとに新しい物理を直接的・間接的に調査することができる。

総括班ではこれらの研究活動の促進、計画の企画調整、会議開催、広報・アウトリーチ活動を行い、領域の活動全般を支援する。

図2に領域期間終了時に期待される成果を示す。**素粒子研究は「力を統一」する歴史**でもある。

- 1) ヒッグス粒子を用いて真空の構造を解明する。**質量の起源、三代構成の理解に加えて、電弱相転移の機構、宇宙の進化の検証と、将来に渡る真空の安定性**についての知見を得る。ヒッグスの理解により電弱理論を完成させることができる。

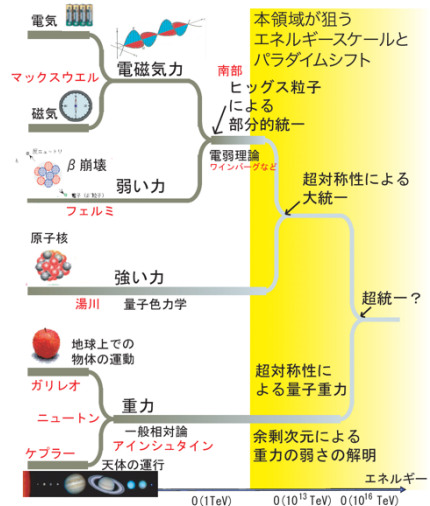


図3 「力の統一」と「真空と時空」

- 2) 125 GeVのヒッグス質量と矛盾しない、「自然さ」から期待される**TeVスケール以下の超対称性、暗黒物質候補の直接探索を行い、新粒子の発見を目指す**。超対称性は我々の4次元時空に素粒子スピンに関する次元を追加した、超時空へと拡張する概念である。図2にあるように超対称性の発見は、強い力との統一、量子重力との統一への第一歩である。超対称性粒子や余剰次元の発見は人類に全く新しい自然観を与えるものとなる。

### 3. 研究の方法

総括班は、各計画研究の代表者（時空班、真空班、重粒子班、それぞれの研究項目を2計画研究班から構成）と事務担当者で組織した。総括班会議を1ヶ月に一度の頻度で開催し、最新の研究成果に関する情報の共有、相互の活動の進捗を報告しあう。各計画研究班代表者が領域全体の最新の情報に接するようにし、ある一つの計画研究班での発展が、他の領域にも広がり展開をもてるようにした。

領域の研究会を随時開催する。ここでは各計画研究班、および各公募研究が新しい研究成果をまとめて発表し、情報の共有を行う。また国際会議開催により、国内外の研究者、他の研究領域の研究者とも連携し情報や意見の交換を行った。

また、本領域の研究内容や成果を一般社会にも広く伝えるため、一般講演会、中高生向けアウトリーチ活動など様々な手段を通じて情報公開を進める。社会生活や身近な科学とは一見、かけ離れているように思える素粒子物理学の最先端科学事業の内容、新しい自然観を知ってもらおうと共に、「宇宙はどうやってできたのか、世界はどう作られているのか」という人類にとって最も根源的な問いを一緒に考えてもらう機会とした。

平成28～30年度（2016～2018年度）はLHC第二運転期（Run-2）が進められた。総括班からは、LHCでのヒッグス物理を含め標準模型物理の更なる検証とテラスケールにおける新物理発見に向けて、発見能力を最大限に高めるよう各計画研究への研究支援を行った。領域全体の研究活動が相乗的、相補的に進むよう補助した。令和元年度（2019年度）以降は、Run-2の全データを使った解析を進めるとともに、LHC第三運転期への準備、高輝度LHC（HL-LHC）に向けた次世代実験用最先端加速器や検出器の研究開発、プロトタイプ製作を進めた。本総括班ではその実現に向けた活動を支援した。

### 4. 研究成果

#### A) ヒッグス粒子を用いた真空の構造の解明：

ヒッグス粒子の詳細な性質測定により、ヒッグス粒子と各素粒子の結合の強さを測定することができ、図4のように質量値との相関を確認することに成功した。発見したヒッグス場が、ゲージ力を担う素粒子（W、Zボソン）だけでなく、クォークや荷電レプトンなどの物質粒子の質量も担っていることが分かった。

#### B) 素粒子世代とヒッグス場の関係：

第2世代の $\mu$ 粒子との結合強度が確認された。統計量の制限から、まだ発見には至っていないが第3世代の $\tau$ 粒子との違いが明白になったことで、素粒子の世代を作っているのがヒッグス場であることが判明した。

#### C) 真空の安定性に関する研究成果：

ヒッグス粒子とトップクォークの質量を精密に測定したところ、我々の宇宙の真空が準安定であることが分かった。これにより、新たな別の真空の安定状態の存在とそれに伴う、標準模型を超えた新しい物理現象の存在を示唆している。これらの知見は領域内での理論研究班との連携研究から生まれたものである。

#### D) 超対称性等、標準模型を超えた物理の探索：

超対称性等の標準模型を超えた新物理事象がTeVエネルギー領域付近に存在することを示唆する実験結果（アノマリー）が別の実験から報告されている。

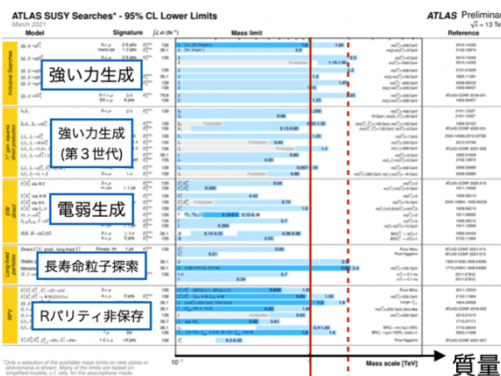


図6 超対称性粒子質量に課された制限

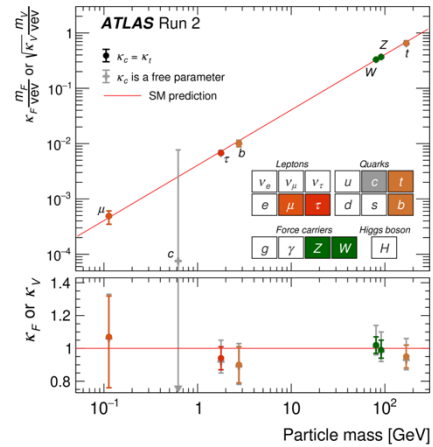


図4 ヒッグス粒子との結合強度と各粒子の質量値の関係

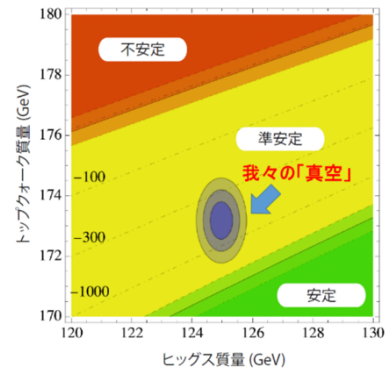


図5 真空の安定性

ミュオン異常磁気能率( $g-2$ )の標準模型からの大きなずれ( $4.2\sigma$ )、またBメソンを用いた物理におけるレプトンフレーバー対称性の破れが観測されており、本領域内で理論研究を進めたところ、LHC実験におけるゲージノやスカラーレプトンの探索が有効であることが分かった。

種々の超対称性模型が予言する数多くの崩壊モードを組織的にデータ解析し、強い相互作用する超対称性粒子は1-2 TeVの範囲で制限を設けることができた(図6)。超対称性探索における指導原理である「自然さ」を見直すこととなり、発

見がなかったこと自体が重要な結論となった。

**E) 次世代実験の基幹技術開発：**

- 1) **高輝度 LHC や、次世代加速器の開発**を行った。高輝度実験で必要となる最終収束部ビーム分離双極磁石の試作機の作成・試験を重ね、仕様を満たす超伝導磁石の開発に成功した。(図 7) また、次世代加速器の基幹技術となる超伝導線材の開発に成功した。
- 2) **次世代シリコン半導体飛跡検出器の開発**を進めた。シリコンピクセルモジュールとストリップセンサーの開発を行った。50 ミクロン・バンプボンディング技術でセンサー開発をすることに成功した。また高輝度 LHC に対応する放射線量への耐性をもつモジュールの開発に成功した。

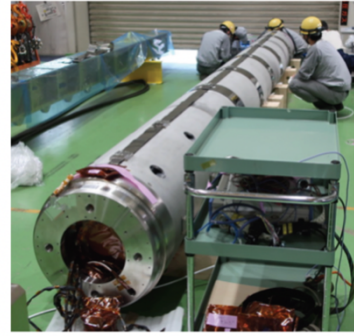


図 7 完成した D1 磁石実証機

**F) 次世代データ解析の技術開発：**

データ解析に於いて、発見感度や測定精度を著しく高めるために、機械学習を全面的に導入した。これにより素粒子研究と機械学習という計算科学分野を融合した新しい領域の創成につながった (図 8)。

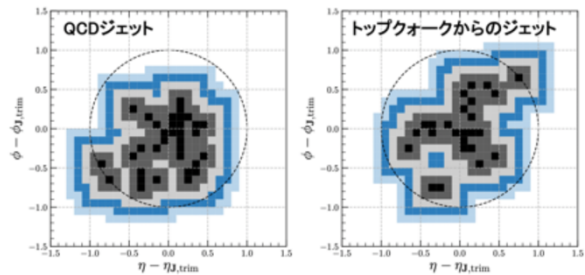


図 8 ジェットオブジェクトの識別

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計11件（うち査読付論文 11件 / うち国際共著 11件 / うちオープンアクセス 8件）

1. 著者名 The ATLAS Collaboration (S.Asai et al)	4. 巻 816
2. 論文標題 Measurement of the associated production of a Higgs boson decaying into b-quarks with a vector boson at high transverse momentum in pp collisions at $\sqrt{s}=13$ TeV with the ATLAS detector	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physics Letters B	6. 最初と最後の頁 136204 ~ 136204
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.physletb.2021.136204	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 The ATLAS Collaboration (S.Asai et al)	4. 巻 812
2. 論文標題 A search for the dimuon decay of the Standard Model Higgs boson with the ATLAS detector	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physics Letters B	6. 最初と最後の頁 135980 ~ 135980
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.physletb.2020.135980	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 ATLAS Collaboration (R. Sawada, and S. Asai et al)	4. 巻 97
2. 論文標題 Search for long-lived, massive particles in events with displaced vertices and missing transverse momentum in $\sqrt{s} = 13$ TeV pp collisions with the ATLAS detector	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 052012 ~ 052012
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.97.052012	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 ATLAS Collaboration (K. Hanagaki et al)	4. 巻 97
2. 論文標題 Evidence for the associated production of the Higgs boson and a top quark pair with the ATLAS detector	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 072003 ~ 072003
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.97.072003	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 ATLAS Collaboration (S. Asai et al)	4. 巻 96
2. 論文標題 Search for squarks and gluinos in events with an isolated lepton, jets, and missing transverse momentum at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 112010 ~ 112010
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.96.112010	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 ATLAS Collaboration (J. Tanaka, T. Masubuchi et al)	4. 巻 1712
2. 論文標題 Evidence for the $H \rightarrow b\bar{b}$ decay with the ATLAS detector	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 024 ~ 024
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP12(2017)024	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 The ATLAS collaboration (M. Aaboud, S. Asai, O. Jinnouchi, J. Tanaka et al.)	4. 巻 34
2. 論文標題 Search for new phenomena with large jet multiplicities and missing transverse momentum using large-radius jets and flavour-tagging at ATLAS in 13 TeV pp collisions	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 1 ~ 50
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP12(2017)034	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 The ATLAS collaboration (M. Aaboud, K. Hanagaki, J. Tojo, F. Ukegawa et al.)	4. 巻 12
2. 論文標題 Evidence for the $H \rightarrow b\bar{b}$ decay with the ATLAS detector	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 24
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP12(2017)024	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 The ATLAS collaboration (M. Aaboud, M. Ishino, H. Nanjo, T. Sumida, K. Yorita et al.)	4. 巻 3
2. 論文標題 Search for WW / WZ resonance production in 1vqq final states in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 42
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP03(2018)042	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 Sano Y., Horii Y., Ikeno M., Sasaki O., Tomoto M., Uchida T.	4. 巻 874
2. 論文標題 Subnanosecond time-to-digital converter implemented in a Kintex-7 FPGA	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment	6. 最初と最後の頁 50 ~ 56
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.nima.2017.08.038	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 Abe Tomohiro, Hisano Junji, Nagai Ryo	4. 巻 2018
2. 論文標題 Model independent evaluation of the Wilson coefficient of the Weinberg operator in QCD	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP03(2018)175	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12件 (うち招待講演 2件 / うち国際学会 11件)

1. 発表者名 田中 純一
2. 発表標題 「素粒子物理実験」とAIの接点
3. 学会等名 JSAI2019 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 J. Tanaka
2. 発表標題 Search for additional neutral Higgs bosons in the MSSM
3. 学会等名 ICHEP2018 ( 国際学会 )
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 K. Nagano
2. 発表標題 Status and highlights from the ATLAS experiment
3. 学会等名 LHCP2018 ( 招待講演 ) ( 国際学会 )
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Y. Takubo
2. 発表標題 Single Event Upsets in the ATLAS IBL Frontend ASICs
3. 学会等名 Pixel2018 ( 国際学会 )
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 K. Nakamura
2. 発表標題 Study of efficiency and noise of fine pitch planar pixel detector for ATLAS ITk upgrade
3. 学会等名 Pixel2018 ( 国際学会 )
4. 発表年 2018年



1. 発表者名 M. Aoki
2. 発表標題 Searches for new physics in final states with top quarks with ATLAS
3. 学会等名 LHCP2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 S. Oda
2. 発表標題 Coupling and mass with 13 TeV data and expectations
3. 学会等名 52nd Recontres de Moriond in Electroweak Interactions and Unified Theories (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 K. Kawade
2. 発表標題 Measurements of $t\bar{t}+X$ using the ATLAS detector
3. 学会等名 EPS-HEP 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Masaya Ishino (for ATLAS collaboration)
2. 発表標題 ATLAS Detector Performance in Run2 and Upgrade Plans
3. 学会等名 High-Energy Physics International Conference in Quantum Chromodynamics (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Osamu Jinnouchi (for ATLAS and CMS collaborations)
2. 発表標題 Mono-jet searches
3. 学会等名 DM @ LHC 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Junji Hisano
2. 発表標題 Baryon-number violating nucleon decay - Review from theoretical
3. 学会等名 NNN17 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Soshi Tsuno
2. 発表標題 Searches for Beyond SM Higgs bosons
3. 学会等名 The 28th International Symposium on Lepton Photon Interactions at High Energies (国際学会)
4. 発表年 2017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11件

国際研究集会 Dark Matter searches in the 2020s	開催年 2020年～2020年
国際研究集会 KEK-PH2020	開催年 2020年～2020年

国際研究集会 DIS2018	開催年 2018年～2018年
国際研究集会 ATLAS Overview Week	開催年 2018年～2018年
国際研究集会 HC2018	開催年 2018年～2018年
国際研究集会 HPNP2019	開催年 2019年～2019年
国際研究集会 新テラスケール研究会	開催年 2018年～2018年
国際研究集会 AJ物理ワークショップ	開催年 2018年～2018年
国際研究集会 新テラスケール研究会	開催年 2017年～2017年
国際研究集会 Anomalies in b to sll and its implications	開催年 2017年～2017年
国際研究集会 新テラスケール研究会	開催年 2017年～2017年

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
---------	---------