

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 6 年 6 月 25 日現在

機関番号：14301

研究種目：新学術領域研究（研究領域提案型）

研究期間：2018～2022

課題番号：18H05535

研究課題名（和文）ニュートリノで拓く素粒子と宇宙

研究課題名（英文）Exploration of Particle Physics and Cosmology with Neutrinos

研究代表者

中家 剛（NAKAYA, Tsuyoshi）

京都大学・理学研究科・教授

研究者番号：50314175

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 25,000,000円

研究成果の概要（和文）：ニュートリノ物理学を基軸に、“素粒子と宇宙”×“理論と実験”の融合により、21世紀の「新しい素粒子・宇宙像」の確立を進めた。研究課題は、素粒子の性質や質量の起源、力と物質場の統一、宇宙の物質・反物質非対称性の起源、宇宙の構造形成などである。世界最先端のニュートリノ実験（スーパーカミオカンデ、T2K 実験、IceCube 実験）により、ニュートリノ振動、CP対称性の破れ、ニュートリノ天文学の研究が進んだ。素粒子の統一理論と宇宙初期を探るために、陽子崩壊の探索、宇宙背景放射の観測によるニュートリノ質量測定とインフレーション（原始重力波）の検証、ニュートリノのマヨラナ性の検証等、の研究が進展した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

素粒子、宇宙、ニュートリノの研究は、日本国民の関心が非常に高い基礎科学の研究分野であり、現在も日本の研究者が世界の最先端に立っている。本領域の成果は、ニュートリノによる粒子・反粒子対称性の兆候を捕まえたこと、ニュートリノ天文学を開拓しマルチメッセンジャー天文学に進展させたこと等、世界の素粒子と宇宙の研究分野を牽引する重要な成果を数多く輩出した。その結果を、マスメディアや一般講演で配信することに加え、4コマ漫画で簡易に説明することで、基礎科学の面白さを広く社会に向けて発信した。

研究成果の概要（英文）：Based on neutrino physics, we are establishing a "new vision of elementary particles and the universe" for the 21st century by combining "elementary particles and the universe" with "theory and experiment". Research topics include the nature of elementary particles and the origin of mass, the unification of forces and matter fields, the origin of matter-antimatter asymmetry in the universe, and the formation of the structure of the universe. World-leading neutrino experiments (Super-Kamiokande, T2K and IceCube) have advanced research on neutrino oscillations, CP violation and neutrino astronomy. Progress has been made in searching for proton decay, measuring neutrino mass and search for inflation (primordial gravitational waves) by observing cosmic microwave background radiation, and look for the Majorana nature of neutrinos, in order to explore the unified theory of elementary particles and the early universe.

研究分野：素粒子物理学

キーワード：ニュートリノ CP対称性 ニュートリノ天文学 加速器 インフレーション 宇宙マイクロ波背景放射  
宇宙論 素粒子論

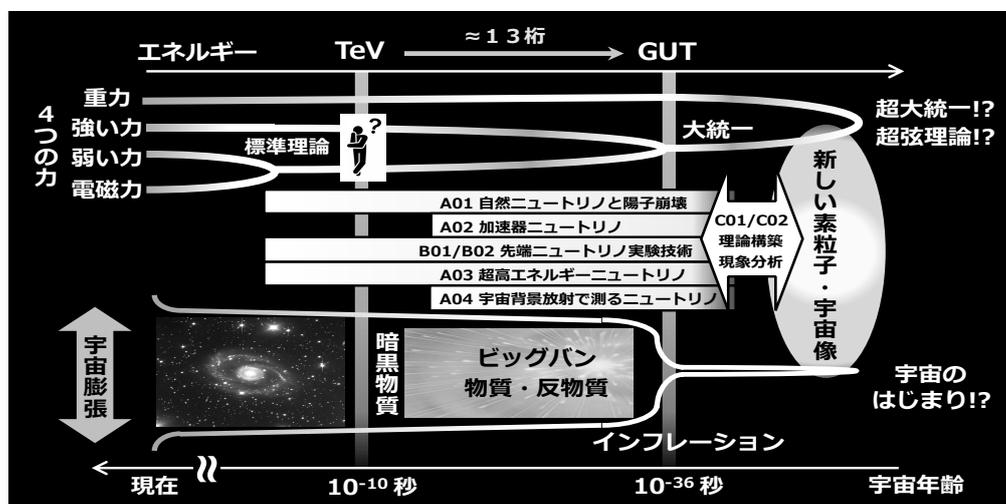
科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

### 1. 研究開始当初の背景

今、素粒子物理学と宇宙物理学は大きな転換期にある。素粒子物理学の「標準理論」は加速器の発展により TeV のエネルギースケールまでの広い範囲で検証され、理論の予想値と実験の測定値が驚くほど良く一致している。また「標準宇宙論」は、宇宙の進化における元素合成を説明する一方で、暗黒物質・暗黒エネルギーの存在を揺るぎないものとした。しかしながら、宇宙に存在する物質・反物質非対称性の起源や暗黒物質・暗黒エネルギーの正体、インフレーションの起源、力・物質場の統一などは「標準理論」、「標準宇宙論」では説明できない。宇宙の初期から現在に至る描像を統一的に理解するには、物理学の革新となる「新しい素粒子・宇宙像」を創造する必要がある。「新しい素粒子・宇宙像」の構築には TeV のエネルギースケールを大きく超える新物理を探ることが不可避であり、この未知の領域に踏み込む研究において「ニュートリノ」が重要な鍵となる。

### 2. 研究の目的

ニュートリノを軸とし、「素粒子+宇宙」×「理論+実験」の多角的なアプローチにより、究極の素粒子・宇宙像を探っていく。ニュートリノ振動の発見 (2015 年ノーベル物理学賞) によ



り、ニュートリノが極端に小さい質量を持ち、クォークと異なり世代間で大きく混合していることが明らかになっている。ニュートリノの性質は他の素粒子と比べて特異なものであり、標準理論を超えた枠組みと密接に関わっていると考えられる。たとえば、ニュートリノ質量起源の有力な理論と考えられている「シーソー機構」ではニュートリノの質量の小ささが大統一理論のエネルギースケールによって説明されると同時に、宇宙の物質・反物質非対称性の起源も説明が可能である。ニュートリノの研究を通して、宇宙の進化、素粒子物理学における力の統一、等の未解決問題に挑戦する。本領域の研究課題と目指す物理を上図で紹介する。

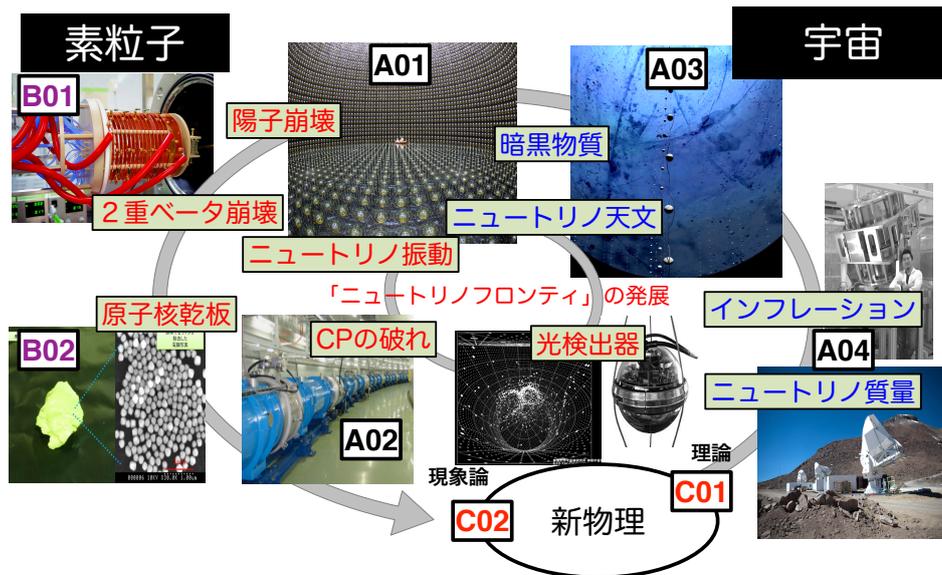
### 3. 研究の方法

本領域では、世界最先端のニュートリノ実験：スーパーカミオカンデ実験 (A01 班)、T2K 実験 (A02 班)、IceCube 実験 (A03 班) を進め、ニュートリノ振動を研究し、粒子と反粒子の対称性の破れを探り、ニュートリノ天文学を進めていく。さらに、素粒子の統一理論と宇宙初期を調べるために、スーパーカミオカンデ実験で陽子崩壊を探索し、宇宙背景放射の観測 (Simons Array /GroundBIRD 実験) (A04 班) からニュートリノ質量を測定し、インフレーション (原始重力波) の検証に挑戦する。他にも、ニュートリノのマヨラナ性の検証 (B01 班)、超高解像度を持つ原子核乾板を応用した研究 (B02 班) 等、より根源的な問題や応用研究も展開する。さらに次世代ニュートリノ実験であるハイパーカミオカンデ実験や IceCube Gen2 実験の基幹実験技術の開発を行う。

最新の結果をもとに新しい素粒子・宇宙像を構築していく理論研究は、指導原理を使ったトップダウンで素粒子と宇宙を研究する C01 班と、実験データを吟味しボトムアップで超高エネルギー・初期宇宙の物理を探る C02 班からなる。C01 班では、ニュートリノ物理を軸に標準理論を超える物理および宇宙論の考察を進め、これまでにある力・物質の統一理論を超えた暗黒物質インフレーションまでも含む新たな究極の統一理論を目指す。C02 班では、実験グループと協力し、最新の実験データが示唆する素粒子像をボトムアップなアプローチから研究し、近年報告されている標準理論で説明されない異常事象をも説明する多様な新ニュートリノ理論を構築する。

ニュートリノを基軸にした、素粒子、原子核、宇宙線、宇宙にわたる分野を融合した研究内容

であり、各研究班のイメージ図と目指す物理を次の図で紹介する。



#### 4. 研究成果

本領域では、素粒子、原子核、宇宙線、宇宙にわたる広い分野でニュートリノを基軸に多様な研究成果が出ている。特に、素粒子と宇宙の問題を統一的に扱う多くの研究結果が出たことは、領域として期待以上の成果が挙げられていると言える。以下に研究計画班毎に、研究計画班を跨ぐ成果も含めて紹介する。

(1) A01 班： スーパーカミオカンデの性能を向上し、大気ニュートリノの観測と陽子崩壊の探索を行った。スーパーカミオカンデの性能向上に関して、ガドリニウム導入に成功、中性子検出能力を従来の 25%から倍以上に改善した。大気ニュートリノのデータと A02 班が進める T2K 実験の結果を併用することで、質量階層性は 98%の確率で逆階層を棄却した。陽子崩壊について寿命下限値を過去の結果に比べ 50%から 10 倍以上と大幅に拡張することに成功した。

さらに、ハイパーカミオカンデ計画が 2020 年に承認されたことは大きなニュースである。本研究班では、ハイパーカミオカンデ用光センサーについてガラス中の放射性物質を大幅に減らすことでダークノイズを 4k Hz 程度と半分以下とし、その性能向上に成功した。また、エレクトロニクスの性能向上も実現、ハイパーカミオカンデ検出器性能の向上に必要な開発を完了した。

(2) A02 班： T2K 実験でニュートリノ振動を測定し、粒子と反粒子の間の対称性 (CP 対称性) が破れている兆候を観測した。この結果を Nature 誌に発表し、CP 対称性の破れのパラメータを 99.7%の有意度で制限し、CP が破れていない仮説を  $2\sigma$  (95%) の有意度で排除した。さらに、ニュートリノ振動パラメータ  $\sin^2 \theta_{23} = 0.53^{+0.03}_{-0.04}$  と世界最高の精度で測定した。2022 年には、さらにデータを追加し、ニュートリノ国際会議で結果を更新している。T2K 実験と独立に新たにニュートリノと原子核反応を精密に測定するために NINJA 実験を立ち上げた。NINJA 実験でニュートリノ反応における生成粒子の多重度を測定し、後方に放出される低エネルギーの  $\pi$  中間子に理論予想との違いが見えて興味深い結果を示した。

(3) A03 班： 南極点ニュートリノ望遠鏡 IceCube 及びスーパーカミオカンデ実験による標準理論を超える物理信号探索の感度向上を目指し系統誤差の削減を目標としてきた。南極氷河中光伝搬起因の系統誤差削減に向け、次世代南極点ニュートリノ望遠鏡 IceCube-Gen2 の Phase-1 計画 (IceCube-Upgrade) に用いられる新型光検出器 D-Egg 100 台の製作、その実験室での較正を進めた。IceCube データを用いた解析及びその系統誤差の理解を進め、 $v/c > 0.8$  のモノポールに対する世界最高感度での探索の結果を論文とした。また、加速器では難しい標準理論の検証となる 6 PeV のグラシヨウ共鳴事象の観測にも成功した。スーパーカミオカンデ実験での暗黒物質間接探索として、銀河中心方向からの暗黒物質対消滅ニュートリノの探索し、10 GeV/c<sup>2</sup>以下の領域では最もよい対消滅断面積への制限を得た。

(4) A04 班： 宇宙背景放射 CMB を使って初期宇宙観測という他計画研究と大きく異なる切り口で、本領域の目標「ニュートリノを軸とした新しい素粒子・宇宙像の創造」に貢献した。Simons Array のデータ解析準備の一環として、前身実験である POLARBEAR 実験のデータ解析を進め、再構成した重力レンズマップとすばる/HSC の銀河サーベイから再構成した重力レンズマップを統合解析することで、 $3.5\sigma$  の有意性で相関を検出できた。この領域では相関の大きさが理論予測と無矛盾だがやや大きいことが見いだされた。また、POLARBEAR 実験データの再解析により、宇宙初期インフレーションに 95% C.L. で  $r < 0.33$  の制限を与えることに成功した。

(5) B01 班： 未発見の「ニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊」を、その頻度を定めるニュートリノ有効質量領域  $100 \text{ meV}/c^2$  を超えて探索することができるような希ガス検出器による新しい測定原理・技術を確立してきた。二重ベータ崩壊探索用の高圧 Xe TPC を開発し、半値全幅で 0.72% という世界最高レベルの高いエネルギー分解能を達成し、また飛跡の形状から背景事象を 1/100 に抑えられることを示した。これらにより、目標の性能を達成することに成功した

(6) B02 班： 既存の装置の 10 倍規模の新しい乳剤製造装置群を新規導入し、製造工程の作成し、運転をしながら改善を行い、製造装置群の長期稼働体制を構築した。新しい製造装置で供給する原子核乾板のユーザーが進めるニュートリノ実験 DsTau、FASER  $\nu$  と  $\gamma$  線望遠鏡 GRAINE 実験に 2021 年度に原子核乾板の供給を実現した。これらの実験は、ビーム照射を完了し、解析に入っており、プリリミナリーな結果が学会・国際会議で報告されている。また 2022 年度も、引き続き、DsTau 実験、FASER 実験、NINJA 実験に供給する原子核乾板の作成を行った。当初の計画通り、大量の原子核乾板を供給することに成功した。

(7) C01 班： 素粒子現象論、宇宙論、および弦理論を含む基礎理論をニュートリノ物理に現れる様々な対称性を通して結びつけることで既存の分野に囚われない新たな理論仮説を提案し、ニュートリノ物理で探ることの出来る新物理の範囲を広げていった。本研究期間内では、物質反物質の非対称性の新たな起源の模型とニュートリノ実験の関係、大統一模型における陽子崩壊の再検討、新たなインフレーション模型の考案、新たな暗黒物質模型の考案、宇宙初期に現れる位相欠陥の新たな側面の研究、超弦理論の真空解の分類など新物理に関わる幅広い研究において成果を得た。更に、量子重力と有効場の理論の整合性を図る「沼地条件」と呼ばれる議論に関して、標準模型のヒッグス粒子のポテンシャルの性質を精査し、その不備を指摘した。「沼地条件」はニュートリノの質量のタイプに関するものも存在し、今後の発展が大いに期待できる。

(8) C02 班： 標準理論では説明できない新現象とニュートリノ物理(とその間の関係)を手がかりに、素粒子の標準理論を拡張・修正するボトムアップ型の理論研究を行い、実験からのインプットを積極活用して新しい素粒子像を切り拓いてきた。ニュートリノ振動実験の詳細解析を行うことで、質量階層性の縮退、 $\theta_{23}$ 、CP 位相  $\delta$ 、非標準相互作用を決定できることを示した。バリオン数やレプトン数の対称性とその破れが新しい形で暗黒物質と結びつき、例えば、暗黒物質と陽子の寿命が関係する可能性が示された。レプトン数の破れに伴う南部ゴールドストーンボソンを活用してハッブル定数の不一致模型を解くことで、複数の標準模型を超えた物理を説明する模型を提案した。

(9) 公募研究： 「超伝導技術を利用したニュートリノ研究の新展開」、「超新星残骸における宇宙線加速限界の直接測定」、「初期宇宙のニュートリノ振動の宇宙論的研究」を含め、全部で 41 の公募研究が行われ、多くの研究成果がでている。その中の一つで、当初予想できなかった革新的な成果を紹介する。宇宙観測において、最新の多波長データを用い、高赤方偏移領域における宇宙の大規模構造からニュートリノ質量和を始めとする宇宙論パラメータに制限を付けることを進めた。すばる望遠鏡 Hyper Suprime-Cam (HSC) で検出された  $z \sim 4$  の大規模超遠方銀河サンプル(ライマンブレイク銀河)の Planck 衛星データを用いた CMB 重力レンズ効果測定及びライマンブレイク銀河の CMB 重力レンズ効果と空間クラスタリングを組み合わせた宇宙論パラメータを制限することに成功した。結果は Physical Review Letters (PRL) 誌に発表し、Editor's suggestion や Physics Magazine の Viewpoint に選出されるなど非常に高い注目を集めた。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計37件（うち査読付論文 37件 / うち国際共著 26件 / うちオープンアクセス 35件）

1. 著者名 T. Nakaya, T. Nakadaira, Y. Seiya, T. Kikawa et al. ( T2K collaboration)	4. 巻 103
2. 論文標題 Improved constraints on neutrino mixing from the T2K experiment with $3.13 \times 10^{21}$ protons on target	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Phys. Rev. D	6. 最初と最後の頁 112008
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.103.112008	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 Y. Hayato and L. Pickering	4. 巻 230
2. 論文標題 The NEUT neutrino interaction simulation program library	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 European Physical Journal	6. 最初と最後の頁 4469
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1140/epjs/s11734-021-00287-7	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 Masahiro Ibe, Shin Kobayashi, Satoshi Shirai, Yuhei Nakayama	4. 巻 7
2. 論文標題 Muon $g-2$ in gauge mediation without SUSY CP problem	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 JHEP	6. 最初と最後の頁 98
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP07(2021)098	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 Takahiro Ohata, Kengo Takeuchi, Koji Tsumura	4. 巻 3
2. 論文標題 Baryon number non-conservation as Peccei-Quinn mechanism	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Phys. Rev. D	6. 最初と最後の頁 1
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.104.035026	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 A. Ishihara, C. Hill, M. Meier, R. Nagai, N. Shimizu, S. Yoshida (IceCube collaboration)	4. 巻 128
2. 論文標題 Search for Relativistic Magnetic Monopoles with Eight Years of IceCube Data	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 PRL	6. 最初と最後の頁 51101
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.128.051101	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 Y. Hayato, A. K. Ichikawa, M. Ishitsuka, Y. Itow, I. Shimizu et al. (Hyper-Kamiokande Collaboration)	4. 巻 916
2. 論文標題 Supernova Model Discrimination with Hyper-Kamiokande	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Astrophys. J.	6. 最初と最後の頁 15
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/abf7c4	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 T. Ariga, T. Nakano, H. Rokujo, O. Sato et al. (FASER Collaboration)	4. 巻 104
2. 論文標題 First neutrino interaction candidates at the LHC	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Phys. Rev. D	6. 最初と最後の頁 L091101
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.104.L091101	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 Y. Sueno, S. Honda, H. Kutsuma, S. Mima, C. Otani, S. Oguri, J. Suzuki, and O. Tajima	4. 巻 2022
2. 論文標題 Characterization of two-level system noise for a microwave kinetic inductance detector comprising niobium film on a silicon substrate	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 PTEP	6. 最初と最後の頁 033H01
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/ptep/ptac023	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 T.Otsuka, S.Adachi, M.Hattori, Y.Sakurai, O.Tajima	4. 巻 60
2. 論文標題 Material survey for a millimeter-wave absorber using a 3D-printed mold	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 A0	6. 最初と最後の頁 7678-7685
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/A0.433254	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 K.Lee, R.T.Genova-Santos, M.Hazumi, S.Honda, H.Kutsuma, S.Oguri, C.Otani, M.W.Peel, Y.Sueno, J.Suzuki, O.Tajima, E.Won	4. 巻 915
2. 論文標題 A Forecast of the Sensitivity on the Measurement of the Optical Depth to Reionization with the GroundBIRD Experiment	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 ApJ	6. 最初と最後の頁 88
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ac024b	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 Y. Hayato, M. Ishitsuka, M. Kuze, Y. Nishimura, W. Roger, A. Suzuki et al. (SK Collaboration)	4. 巻 101
2. 論文標題 Search for proton decay into three charged leptons in 0.37 megaton-years exposure of the Super-Kamiokande	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Phys. Rev. D	6. 最初と最後の頁 52011
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.101.052011	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 T. Nakaya, T. Nakadaira, Y. Seiya, T. Kikawa et al. ( T2K collaboration)	4. 巻 580
2. 論文標題 Constraint on the matter-antimatter symmetry-violating phase in neutrino oscillations	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Nature	6. 最初と最後の頁 7803
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41586-020-2177-0	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 A. Ishihara, R. Nagai, K. Mase et al. ( IceCube Collaboration)	4. 巻 124
2. 論文標題 Time-Integrated Neutrino Source Searches with 10 Years of IceCube Data	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Phys. Rev. Lett.	6. 最初と最後の頁 51103
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.124.051103	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 A. Kusaka, O. Tajima et al. (POLARBEAR Collaboration)	4. 巻 897
2. 論文標題 A Measurement of the Degree Scale CMB B-mode Angular Power Spectrum with POLARBEAR	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Astrophys. J	6. 最初と最後の頁 55
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ab8f24	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 A.K. Ichikawa, Y. Nakajima, K. Sakashita et al. (AXEL collaboration)	4. 巻 2020
2. 論文標題 Design and performance of a high-pressure xenon gas TPC as a prototype for a large-scale neutrinoless double-beta decay search	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 PTEP	6. 最初と最後の頁 033H01
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/ptep/ptaa030	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 A. Ariga, T. Ariga, Osamu Sato et al.	4. 巻 80
2. 論文標題 Detecting and Studying High-Energy Collider Neutrinos with FASER at the LHC	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 European Physical Journal C	6. 最初と最後の頁 61
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1140/epjc/s10052-020-7631-5	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 M. Ibe et al.	4. 巻 2001
2. 論文標題 Oscillating Composite Asymmetric Dark Matter	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 JHEP	6. 最初と最後の頁 27
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP01(2020)027	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 Asai Kento, Okawa Shohei, Tsumura Koji	4. 巻 2021
2. 論文標題 Search for $U(1)_{L\mu-L}$ charged dark matter with neutrino telescope	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 47
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP03(2021)047	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 Hayashi Kohei, Ibe Masahiro, Kobayashi Shin, Nakayama Yuhei, Shirai Satoshi	4. 巻 103
2. 論文標題 Probing dark matter self-interaction with ultrafaint dwarf galaxies	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 23017
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.103.023017	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 Y. Hayato, M. Ishitsuka, M. Kuze, Y. Nishimura, W. Roger, A. Suzuki et al. (SK Collaboration)	4. 巻 2019
2. 論文標題 Atmospheric Neutrino Oscillation Analysis With Improved Event Reconstruction in Super-Kamiokande IV	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 PTEP	6. 最初と最後の頁 053F01
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/ptep/ptz015	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 T. Nakaya, T. Nakadaira,, Y. Seiya, T. Kikawa et al. ( T2K collaboration)	4. 巻 99
2. 論文標題 Search for light sterile neutrinos with the T2K far detector Super-Kamiokande at a baseline of 295 km	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Phys. Rev. D	6. 最初と最後の頁 71103
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.99.071103	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 A. Ishihara, R. Nagai, K. Mase, et. al. ( IceCube Collaboration)	4. 巻 99
2. 論文標題 Measurement of Atmospheric Tau Neutrino Appearance with IceCube DeepCore	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Phys. Rev. D	6. 最初と最後の頁 32007
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.99.032007	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 A. Kusaka, O. Tajima et al. (POLARBEAR Collaboration)	4. 巻 886
2. 論文標題 Cross-correlation of CMB Polarization Lensing with High-z Submillimeter Herschel-ATLAS Galaxies	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Astrophys. J	6. 最初と最後の頁 38
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ab4a78	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 A.K. Ichikawa, Y. Nakajima, K. Sakashita et al. (AXEL collaboration)	4. 巻 958
2. 論文標題 AXEL: High-pressure Xe gas TPC for BG-free $0\ 2$ decay search	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Nucl. Instrum. Meth. A	6. 最初と最後の頁 162803
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.nima.2019.162803	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 A. Ariga, T. Ariga, Osamu Sato et al.	4. 巻 1
2. 論文標題 DsTau: Study of tau neutrino production with 400 GeV protons from the CERN-SPS	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 JHEP	6. 最初と最後の頁 33
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP01(2020)033	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 Ibe Masahiro, Kamada Ayuki, Kobayashi Shin, Kuwahara Takumi, Nakano Wakutaka	4. 巻 100
2. 論文標題 Baryon-dark matter coincidence in mirrored unification	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 75022
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.100.075022	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 Abe Yoshihiko, Toma Takashi, Tsumura Koji	4. 巻 2019
2. 論文標題 A $\mu$ -philic scalar doublet under Zn flavor symmetry	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 142
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP06(2019)142	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 Y. Hayato, T. Nakaya, M. Ishitsuka, Y. Itow, M. Shiozawa et. al. (Super-Kamiokande collaboration)	4. 巻 97
2. 論文標題 Atmospheric neutrino oscillation analysis with external constraints in Super-Kamiokande I-IV	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 72001
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.97.072001	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 Y. Hayato, T. Nakaya, M. Ishitsuka, Y. Itow, M. Shiozawa et. al. (Super-Kamiokande collaboration)	4. 巻 120
2. 論文標題 Search for Boosted Dark Matter Interacting With Electrons in Super-Kamiokande	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 221301
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.120.221301	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 A.K. Ichikawa, Y. Hayato, T. Nakaya, M. Ishitsuka, M. Shiozawa et. al. (T2K collaboration)	4. 巻 121
2. 論文標題 Search for CP Violation in Neutrino and Antineutrino Oscillations by the T2K Experiment with $2.2 \times 10^{21}$ Protons on Target	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 171802
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.121.171802	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 A. Ishihara, S. Yoshida et. al. (IceCube collaboration)	4. 巻 361
2. 論文標題 Neutrino emission from the direction of the blazar TXS 0506+056 prior to the IceCube-170922A alert	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Science	6. 最初と最後の頁 147-151
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1126/science.aat2890	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 Y. Chinone, A. Kusaka, S. Takakura, O. Tajima et. al. (Simons Observatory Collaboration)	4. 巻 1902
2. 論文標題 The Simons Observatory: Science goals and forecasts	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Cosmology and Astroparticle Physics	6. 最初と最後の頁 56
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1475-7516/2019/02/056	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 K.D. Nakamura, S. Ban, A.K. Ichikawa, Y. Ishiyama, T. Nakaya et. al. (AXEL collaboration)	4. 巻 13
2. 論文標題 Angular dependence of columnar recombination in high pressure xenon gas using time profiles of scintillation emission	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 JINST 13 (2018) no.07, P07015	6. 最初と最後の頁 P07015
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1748-0221/13/07/P07015	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 H. Rokujo, O. Sato et. al. (GRAINE Collaboration)	4. 巻 2018
2. 論文標題 First demonstration of gamma-ray imaging using a balloon-borne emulsion telescope	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 063H01
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/ptep/pty056	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 Yuta Hamada, Ryuichiro Kitano, Wen Yin	4. 巻 1810
2. 論文標題 Leptogenesis via neutrino oscillation magic	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 178
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP10(2018)178	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 Koichi Hamaguchi, Masahiro Ibe, Takeo Moroi	4. 巻 1812
2. 論文標題 The swampland conjecture and the Higgs expectation value	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 23
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP12(2018)023	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 E. Ma, K. Tsumura.	4. 巻 98
2. 論文標題 Syndetic Extension of Baryon and Lepton Numbers: Proton Decay and Long-Lived Dark Matter	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 35037
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.98.035037	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25件 (うち招待講演 18件 / うち国際学会 21件)

1. 発表者名 T. Nakaya
2. 発表標題 Water Cherenkov Detector
3. 学会等名 International Neutrino Summer School (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Y. Hayato
2. 発表標題 Neutrino-Nucleus Interactions in the Standard Model and Beyond
3. 学会等名 NEUT status and prospects (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 K. Tsumura
2. 発表標題 Pseudo-Nambu-Goldstone Dark Matter from Grand Unified Theory
3. 学会等名 The 7th Quantum Science (QS) symposium (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 A. Ishihara
2. 発表標題 Photo-Sensors for the South Pole Neutrino Observatory: IceCube and IceCube-Gen2
3. 学会等名 IEEE NSS-MIC 2021 Neutrino Workshop (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 O.Sato
2. 発表標題 Study of tau neutrino production with nuclear emulsion at CERN-SPS
3. 学会等名 The 22nd International Workshop on neutrinos from accelerators (NUFACT2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 A.K.Ichikawa
2. 発表標題 ニュートリノ振動とCP対称性の破れ
3. 学会等名 仁科記念講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 A. Takenaka
2. 発表標題 Search for Proton Decay via $p \rightarrow e \gamma$ and $p \rightarrow \mu \gamma$ in 450 kiloton*years Exposure of the Super-Kamiokande Detector
3. 学会等名 ICHEP2020 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 T. Nakaya
2. 発表標題 Neutrino oscillations in long baseline experiments
3. 学会等名 5th International Conference on Particle Physics and Astrophysics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 中村 和広
2. 発表標題 AXEL実験 ニュートリノレス二重ベータ崩壊探索のための高圧XeガスTPC大型試作機の開発状況
3. 学会等名 日本物理学会 第76回年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 永田夏海
2. 発表標題 中性子星の温度観測を用いた暗黒物質探索
3. 学会等名 日本物理学会 2020 年秋季大会 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 R. Wendell
2. 発表標題 Atmospheric Neutrinos and Proton Decay
3. 学会等名 29th International Symposium on Lepton Photon Interactions at High Energies (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 T. Nakaya
2. 発表標題 The worldwide status and outlook: What's next: Asia
3. 学会等名 The 27th edition of the International Workshop on Weak interactions and Neutrinos (WIN2019) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 A. Ishihara
2. 発表標題 The IceCube Upgrade -- Design and Science Goals
3. 学会等名 36th ICRC2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 S. Ban
2. 発表標題 AXEL experiment: High pressure Xe gas TPC for neutrinoless double-beta decay search
3. 学会等名 The 16th International Conference on Topics in Astroparticle and Underground Physics (TAUP2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 T. Mastuo
2. 発表標題 Upgrade of momentum measurement techniques in emulsion based particle detectors
3. 学会等名 ICMASS2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 R. Kitano
2. 発表標題 Leptogenesis via Neutrino Oscillation Magic
3. 学会等名 Intensity Frontier in Particle Physics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 K. Tsumura
2. 発表標題 The Origin of Pseudo-Nambu-Goldstone Dark Matter
3. 学会等名 RIS-TCS 2020 -Frontier of Physics and Chemistry- (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Y. Hayato
2. 発表標題 Atmospheric Neutrino Results from Super-Kamiokande
3. 学会等名 XXVIII International Conference on Neutrino Physics and Astrophysics (Neutrino 2018) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 T. Nakaya
2. 発表標題 Search for Neutrino CP violation in accelerator neutrino experiments.
3. 学会等名 Discrete Symmetries in Particle, Nuclear and Atomic Physics and implications for our Universe (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 A. Ishihara
2. 発表標題 Recent results on astrophysics and particle physics from IceCube
3. 学会等名 XLVIII International Symposium on Multiparticle Dynamics (ISMD 2018) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 日下暁人
2. 発表標題 ニュートリノ質量和測定・TeV を超える物理の探索を実現する次世代CMB 観測
3. 学会等名 日本物理学会 第74回年次大会 (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 S.Ban
2. 発表標題 High pressure Xe gas TPC for $0$ decay search : AXEL
3. 学会等名 DBD18 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 O. Sato
2. 発表標題 Final results from the OPERA experiment in the CNGS neutrino beam
3. 学会等名 14th Recontres du Vietnam, INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON NEUTRINO FRONTIER (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 M. Ibe
2. 発表標題 A Gauged U(1) PQ symmetry
3. 学会等名 Invisible 18 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 K. Tsumura
2. 発表標題 An SU(2) $\mu$ model for Muon g-2 Anomaly
3. 学会等名 Workshop on Multi-Higgs models (国際学会)
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計4件

1. 著者名 ステン オデンワルド (著), 中家 剛 (監修), 今田 マーサ (翻訳)	4. 発行年 2021年
2. 出版社 ニュートンプレス	5. 総ページ数 256
3. 書名 量子論がゼロからわかる~古代ギリシャの原子論から最新の量子重力理論まで	

1. 著者名 市川温子他	4. 発行年 2021年
2. 出版社 集英社	5. 総ページ数 189
3. 書名 宇宙はなぜ物質でできているのか : 素粒子の謎とKEKの挑戦	

1. 著者名 吉田滋	4. 発行年 2020年
2. 出版社 光文社	5. 総ページ数 400
3. 書名 深宇宙ニュートリノの発見	

1. 著者名 高原文郎、家正則、小玉英雄、高橋忠幸（安田修共著）	4. 発行年 2020年
2. 出版社 朝倉書店	5. 総ページ数 912
3. 書名 宇宙物理学ハンドブック	

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>ニュートリノで拓く素粒子と宇宙  <a href="https://www-he.scphys.kyoto-u.ac.jp/nucosmos/index.html">https://www-he.scphys.kyoto-u.ac.jp/nucosmos/index.html</a>          スーパーカミオカンデ  <a href="http://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/sk/">http://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/sk/</a>          T2K実験  <a href="https://t2k-experiment.org">https://t2k-experiment.org</a>          IceCube実験  <a href="https://icecube.wisc.edu">https://icecube.wisc.edu</a>          Simons Observatory  <a href="https://simonsobservatory.org">https://simonsobservatory.org</a></p>
---

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
研究 分 担 者	清水 格  (Shimizu Itaru)  (10400227)	東北大学・ニュートリノ科学研究センター・准教授   (11301)	若手研究者ネットワーク構築

## 6. 研究組織（つづき）

	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
研究分担者	佐藤 修  (Sato Osamu)  (20377964)	名古屋大学・未来材料・システム研究所・特任講師   (13901)	ニュートリノ測定器開発の総括
研究分担者	日下 暁人  (Kusaka Akito)  (20785703)	東京大学・大学院理学系研究科（理学部）・准教授   (12601)	領域の国際化推進、CMB観測によるニュートリノ研究の総括
研究分担者	石塚 正基  (Ishitsuka Masaki)  (40533196)	東京理科大学・理工学部物理学科・教授   (32660)	領域の国際化推進
研究分担者	石原 安野  (Ishihara Aya)  (40568929)	千葉大学・大学院理学研究院・教授   (12501)	宇宙ニュートリノ研究の総括
研究分担者	津村 浩二  (Tsumura Koji)  (40648101)	九州大学・理学研究院・准教授   (17102)	若手研究者ネットワーク構築、宇宙・素粒子現象論研究の総括
研究分担者	伊藤 好孝  (Itow Yoshitaka)  (50272521)	名古屋大学・宇宙地球環境研究所・教授   (13901)	領域運営のアドバイザー、評価担当
研究分担者	市川 温子  (Ichikawa Atsuko)  (50353371)	東北大学・理学研究科・教授   (11301)	研究会幹事、マヨラナニュートリノ研究の総括
研究分担者	伊部 昌宏  (Ibe Masahiro)  (50599008)	東京大学・宇宙線研究所・准教授   (12601)	領域運営の事務担当、宇宙・素粒子理論研究の総括

6. 研究組織（つづき）

	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
研究分担者	早戸 良成  (Hayato Yoshinari)  (60321535)	東京大学・宇宙線研究所・准教授    (12601)	Web担当、大気ニュートリノ・陽子崩壊研究の総括

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 NINJA mini-workshop with theorists	開催年 2021年～2021年
国際研究集会 KASHIWA DARK MATTER SYMPOSIUM 2021	開催年 2021年～2021年
国際研究集会 KASHIWA DARK MATTER SYMPOSIUM 2020	開催年 2020年～2020年
国際研究集会 YITP workshop "Connecting high-energy astroparticle physics for origins of cosmic rays and future perspectives"	開催年 2020年～2020年
国際研究集会 KEK Theory Meeting on Particle Physics Phenomenology (KEK-PH2020)	開催年 2020年～2020年
国際研究集会 Dark Matter searches in the 2020s - At the crossroads of the WIMP	開催年 2019年～2019年
国際研究集会 Prospects of Neutrino Physics	開催年 2019年～2019年
国際研究集会 New Physics at Low Scale 2020	開催年 2020年～2020年
国際研究集会 Workshop for Atmospheric Neutrino Production in the MeV to PeV range	開催年 2019年～2019年
国際研究集会 The 4th International Workshop on "Higgs as a Probe of New Physics" (HPNP2019)	開催年 2019年～2019年
国際研究集会 Physics of muonium and related topics	開催年 2018年～2018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

米国	UC Berkeley	Rochester	Wisconsin	他10機関
カナダ	TRIUMF	U. Victoria	York	他5機関
イタリア	INFN, U.Bari	INFN,U.Napoli	INFN,U.Padova	他1機関
ポーランド	IFJ PAN, Cracow	NCBJ, Warsaw	U. Silesia, Katowice	他3機関
スイス	ETH Zurich	U. Geneve	CERN	他1機関