

令和 4 年 5 月 30 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(S)

研究期間：2017～2021

課題番号：17H06134

研究課題名（和文）史上最大のCMB望遠鏡群で観るビッグバン宇宙の種火とニュートリノ質量の絶対値

研究課題名（英文）Probing the origin of the Big-Bang and neutrino mass using the largest CMB telescope array to date

研究代表者

田島 治 (TAJIMA, Osamu)

京都大学・理学研究科・准教授

研究者番号：80391704

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 161,100,000円

研究成果の概要（和文）：Simons Observatoryは、チリ・アタカマ高地（海拔5,200 m）に複数の望遠鏡を設置して、宇宙背景放射（CMB）を世界で最も精密に観測するプロジェクトである。本研究でCMB望遠鏡の開発に成功し、さらに望遠鏡に搭載する較正装置の開発も行った。これからCMBの精密観測を行なっていくことで、ビッグバン宇宙の源である時空の加速膨張「インフレーション」の証拠「原始重力波」の探索と、ニュートリノ質量の測定が、世界最高感度で行われる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

世界最高感度で宇宙背景放射（CMB）の観測を行う展望を得た。今後の観測で原始重力波の検出に成功すれば、インフレーション宇宙論の直接的な検証になる。これは同時に、宇宙初期に重力場が量子化されていたことの証拠の発見にもなる。いわば、「究極の宇宙論」かつ「究極の素粒子理論」という学術的意義を有する。「宇宙の起源」という「人類究極の問い」に答えを与えることの社会的意義も絶大である。

研究成果の概要（英文）：Simons Observatory is the project to observe cosmic microwave background (CMB) using four millimeter-wave telescopes. The telescopes have been built at the Atacama desert (altitude of 5,200 m) in Chile. Japanese group is in charge of cryogenic optics tubes set in the telescope receivers. We succeeded in development them. The first telescope which is installed the optics tube is under commission towards "the first light" (starting observation) in 2023. Based on our design studies and laboratory test results, we obtained prospects to achieve the best sensitivity to date for detecting primordial gravitational waves from the cosmic inflation, and for measuring a sum of neutrino masses.

研究分野：宇宙素粒子物理学

キーワード：宇宙マイクロ波背景放射 インフレーション 原始重力波 ニュートリノ

## 1. 研究開始当初の背景

「インフレーション宇宙論」は、宇宙初期のビッグバン（高温・高密度状態）が時空の加速度的膨張を源として生み出されたと記述する宇宙創成の物理学である。近年、その正当性を示唆する観測結果が揃いはじめている [1]。そして、それを実証するラストピース「宇宙創成時の量子ゆらぎに由来する原始重力波」の検出が待望されている。図1左に示すように、原始重力波は、ビッグバン熱放射の残光「宇宙マイクロ波背景放射 (CMB)」の偏光成分に数度角スケールのひ対称パターン「Bモード」を刻印する [2]。このBモードの測定こそが、宇宙創成の物理に対する最良の観測プローブとなる。一方、小角度スケール  $0(0.1^\circ)$  のCMB 偏光 Bモードは、銀河団の重力レンズの強度を測るプローブにもなっており、その精密観測はニュートリノ質量和の有望な計測手法である (図1右)。研究開始当初は、これらの研究を追求するためのプロジェクトである史上最大のCMB 望遠鏡群 “Simons Observatory” が立ち上がった直後であった。Simons Observatory は、これまで日本が貢献してきたPOLARBEAR等を含む複数の有力実験が融合した次世代プロジェクトであり、日本が培ってきた技術・知見を本研究で進化させる格好の舞台であった。

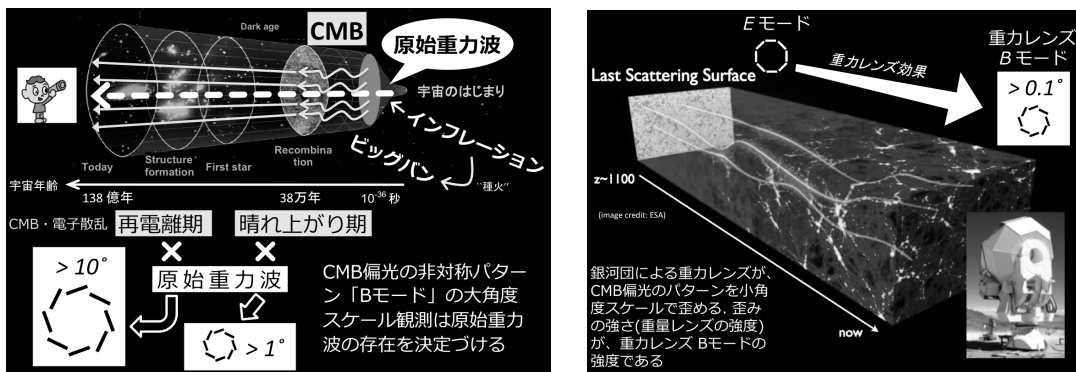


図1 [左] 時空の加速度的膨張インフレーションは、宇宙初期の高温・高密度状態ビッグバンの源である。宇宙創成時の量子ゆらぎを反映した「原始」重力波はインフレーションの一般的な予言であり、ビッグバン熱放射の残光CMBにBモードを刻印する。原始重力波の強度は“ $r$ ”というパラメータを用いて記述され、研究開始当初の上限値は $r < 0.07$ であった [3]。[右] 銀河団等の大規模構造による重力レンズもまた、小角度スケールにおいてBモードを生成する。その強度は銀河ハローの重力分布に依り、物質の根源である素粒子のひとつニュートリノの質量和の大きさに左右される。

[1] Planck Collaboration, A&A, {594}, A13 (2016).

[2] L. M. Krauss, S. Dodelson, and S. Meyer, Science, {328}, 989 - 992 (2010).

[3] BICEP2/Keck, Planck Collaborations, Phys. Rev. Lett. {114}, 101301 (2015).

## 2. 研究の目的

本研究は、Simons Observatory によって上述の研究テーマを追究する。Simons Observatory は 2016年5月に米国予算45Mドルを獲得し、発足した国際共同プロジェクトであり、これは従来CMB 実験の約5倍規模である。チリ・アタカマ高地 (海拔5,200 m) に複数の望遠鏡を設置、史上最多の検出器を搭載し、宇宙創成、ニュートリノ質量、銀河団等、幅広いサイエンスを史上最良精度で追究する (図2)。ここで、 $1^\circ$ をこえる大角度スケール測定を実現するための課題が「大気ゆらぎの影響を如何に抑えるか?」である。代表者らは大角度スケールを追究するCMB 偏光望遠鏡の開発に実績を有する。その強みを活かし、大角度スケール測定に特化した望遠鏡の開発を主導し、Simons Observatoryの第一号望遠鏡として設置・観測することで、ユニークな貢献を目指す。

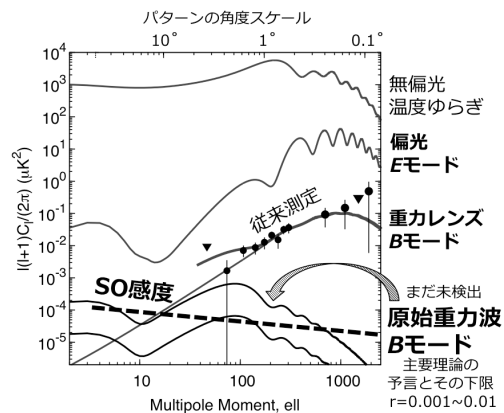


図2 Simons Observatory の CMB 偏光スペクトル計測感度

何をどこまで明らかにするか?

Simons Observatory プロジェクトのCMB 望遠鏡を開発し、観測を開始する。初期データに基

づき、大角度スケールにおける性能を定量的に評価し、その後観測を数年継続することで、目標感度 ( $r$  の誤差換算で  $\pm 0.003$ ) に到達することを示す。同様に、ニュートリノ質量についても、目標感度とする  $30 \text{ meV}/c^2$  に到達する道筋を定量的に示す。また、偶パリティの偏光パターン「Eモード」のさらなる精密計測も行う。

**当該分野における学術的な特色・独創的な点、予想される結果と意義**

Bモードを通じた原始重力波の検出は、インフレーション宇宙論の実証だけでなく、宇宙初期に重力場が量子化されていた証拠にもなる。特に後者は、基礎物理学最大の問題とも言える量子重力論に重大な示唆を与える。また、望遠鏡群という形を取るからこそ、個々のシステムをシンプルに設計できる。観測帯域の数を増やすという「前景放射に負けない工夫」(先行研究[3]で明かになった当該分野の重要課題の解決方法)も容易に実践できる。

**3. 研究の方法**

国際協力で Simons Observatory プロジェクトを遂行する。Simons Observatory では、CMB 偏光の大角度スケールパターン観測に特化した望遠鏡 (SAT) 3 台と、小角度スケールパターンの観測に特化した望遠鏡 (LAT) 1 台を製作し、目的達成を目指す(図 3)。本研究では SAT の開発に注力する。大角度スケールの CMB 偏光パターン観測を達成するためには、a) 広い観測視野、b) 大気ゆらぎの影響抑制、c) 高感度かつ高統計、が要求される。これらは、A) 大きな開口、B) 高速変調、C) 超伝導センサーの数と感度の両立、によって達成される。これらの要素を統合した望遠鏡は、GroundBIRD や POLARBEAR といった本研究チームの先行業績とそこで培った技術を取り込んだデザインとなる。

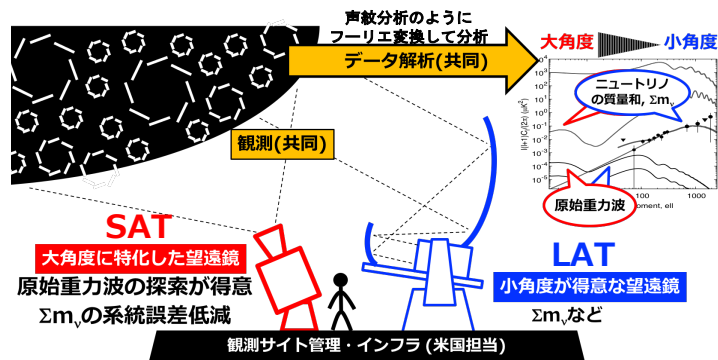


図 3 本研究を開始した当初のプロジェクト概念図。この概念設計を、本研究で具体的な装置設計とし、その開発を行う。なお、本研究では、原始重力波の検出に最適化した望遠鏡 SAT の設計・開発に注力する。

図 4 に日本国内の研究組織と海外協力者も含めた役割分担を示す。シミュレーション研究に基づいて望遠鏡仕様を確定し、各コンポーネント設計を行う。そして、SAT の 1 号機に関して、各コンポーネントの開発を 3 年目にかけて行い、4 年目に海外協力者が分担するコンポーネントも含めた受信機の試験を行い、5 年目に SAT 1 号機による観測開始を目指す。初期データに基づいて望遠鏡の感度達成度を定量的に示す。また、系統誤差を評価し、観測の継続により目標感度が達成可能である事を示す。

本研究期間内に 3 台製作を行う SAT の極低温光学系 (略称 OT) に関しては、日本グループが全台数の開発と製作を担当する。超伝導センサーとその読み出し系の開発は多数の CMB 実験で実績をもつ米国グループが主担当するが、読み出しに必須となる同軸ケーブル等は日本の製品が優れているため、日本グループがその部分を担当する。また、現地インフラは米国グループを中心に建設が進められる。

観測の生データ (単なる電圧値) を物理量に変換するためには望遠鏡の較正が必須である。特に SAT の偏光角較正と LAT の応答性能の較正は重要であり、代表者と分担者の先行業績を生かして、これらの開発を日本グループが担当する (較正装置は当初予定してなかった展開である)。



図 4 海外協力者も含めた役割分担と研究計画 (左) と国内研究組織 (右)

#### 4. 研究成果

##### ●サイエンスケースの精査と望遠鏡の「概念」設計を具体的なデザインとすることに成功

Simons Observatory 発足時（2016 年秋）の段階で「概念」にとどまっていた望遠鏡を、波動光学シミュレーションに基づき設計し、従来実験の 10 倍の数のセンサーを搭載できるデザインの構築に成功した(図 5)。そして、先行実験の知見を反映したシミュレーション研究に基づいてサイエンスケースを精査した。これは、原始重力波の探索とインフレーション宇宙論に対する知見、ニュートリノ質量測定、銀河団サーベイまで、CMB の精密観測が実現するサイエンスケースとそのインパクトを網羅する。大気ゆらぎや、装置の系統誤差、前景放射の影響とその除去性能も考慮した研究は過去に例がなく、観測開始前の集大成的な成果である。本論文の波及性は高く、出版から 3 年で引用数が 500 を超えている。我々が中心的な役割を果たした望遠鏡の設計が、この感度予測に不可欠な土台になっている。

当初の予定を上回り、小口径望遠鏡“SAT”を 3 台建設することも国際コラボレーション（300 人超の研究者で構成）として決定した。ただし、一連の意思決定に時間を要した為、SAT 1 号機の観測時期を当初計画より数ヶ月遅らせ、2021 年度から開始することにした。これは観測の開始時期が遅れても、原始重力波の検出というサイエンスに対するインパクトを最大化するという前向きな決定である。一方、大口径望遠鏡“LAT”は、当初の予定通り 1 台製作することに決定した。これらを決定するうえで不可欠だった波動光学シミュレーション研究も日本グループが主導した。また、さらに、日本グループが光学シミュレーションと設計に中心的な役割を果たした事を受けて、SAT の心臓部とも言える極低温光学系（略称 OT）の開発は日本グループが担当することになった（全 3 台分すべて）。

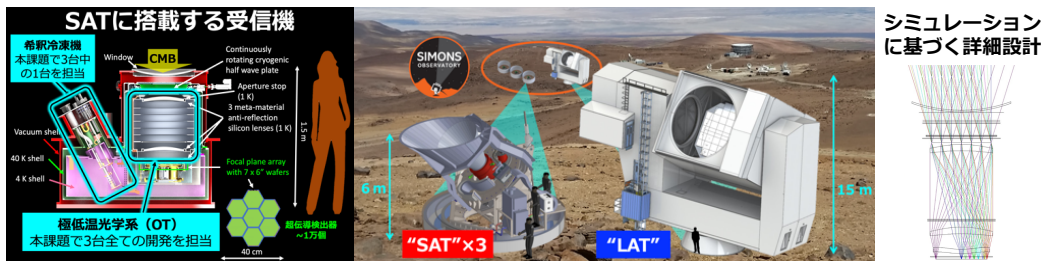


図 5 Simons Observatory は、複数の望遠鏡 (SAT 3 台と LAT 1 台) を開発し、究極の CMB 偏光観測を目指す。これらの光学シミュレーションと光学設計は日本グループ主導で行われた。また、日本グループは、SAT の心臓部ともいえる極低温光学系“OT”の開発を全台数担当している。

##### ●極低温光学系 (OT) の開発に成功

OT は SAT の性能を引き出す重要なコンポーネントである。高い光学性能を達成するため、1 K もの極低温に保つ必要性と高い公差(最も厳しい箇所では 0.1 mm)が要求される。純アルミで構成する部品数を最小化する方策(図 6 左)で要求精度を実現し、3 次元測定器を用いて公差を満たす事も確認した。さらに、極低温に冷却する試験も行った。極低温に冷却した OT 構造体の熱勾配の測定から、それが当初の熱設計仕様を満たす事も確認できた。また、OT (日本担当) と焦点面の構造体(米国担当)の組み上げ試験も日本にて行い、要求した公差を満たす事を確認した。

一方、光学シミュレーション研究を深めていく過程で、OT の内壁面の光反射率を 1%未満(従来の CMB 望遠鏡の 1/10 未満)に抑制することで、高い観測感度を担保できることが判明した。その為には、極低温に冷却できる事と電波吸収率が高い事を両立せねばならない。このような性質を持つ「黒体」を、3D プリント技術を用いて開発した。この 3D プリント黒体の写真と反射率の測定結果を図 6 に示す。従来の極低温用黒体と比較して一桁優れた性能を達成したことで、高い観測感度を担保できる見通しが立った。

OT の 1 号機は、米国で開発された SAT 1 号機の中に組み込まれ、設計通りの冷却性能を達成した。2、3 号機の OT 構造体の製作も完了し、順次米国へ搬送されて SAT 2 号機、3 号機に搭載される予定である。本研究課題で開発した OT は、大きな構造体を 1 K もの極低温を維持すると共に、特殊な内壁構造とそこに設置した黒体によって、究極の低ノイズ光学系となる。

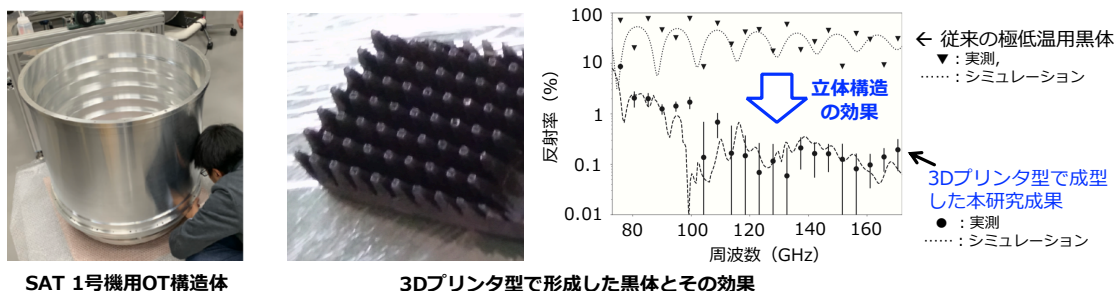


図 6 開発に成功した OT 構造体と、それに設置する 3D プリント黒体とその性能



## ●コロナ禍での望遠鏡と観測サイトの整備

COVID-19 流行の影響はゼロではないが、幸いにも元々のプロジェクト計画に「不測の事態に備えた時間的猶予」を盛り込んでいたため、その影響は最小限に留められている。最も影響を受けたのが、チリの観測サイトの整備であったが、2020年10月以降は米国等の研究者が定期的に訪問して現地での開発を行える状態までに回復した。予断を許さない状況ではあるが、先行実験で構築したインフラが充実していることもあり、2022年度末に観測開始することを基準計画としている。これに向けて、望遠鏡のプラットフォーム製作と観測サイトの整備も着実に進んでいる（図7）。

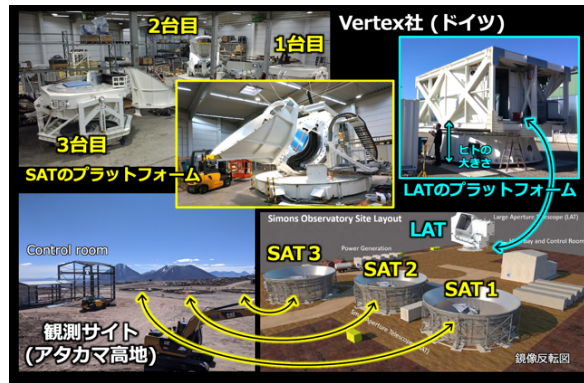


図7 望遠鏡プラットフォームと観測サイトの整備が着実に進んでいる。

本研究課題の当初目標は「SAT 1号機での観測を研究期間内に開始し、初期データよりサイエンス展望を確認する」ことであった。しかしながら、前述のようにサイエンスインパクトを最大化するための国際共同実験としての全体計画の変更とCOVID-19の影響により、観測開始の時期が2023年に変更となった。一方、**国際共同実験の中で、日本グループの担当範囲と重要度を拡大し、SAT 1号機は米国内での統合試験まで到達した。**コロナ禍のため、SATの統合試験は日本と米国各地の研究者がオンライン接続して、力を合わせて行なっている。このリモート国際実験の実施によって、2年以上にわたるコロナ禍の影響を最小化している。

当初に予見していなかった新たな展開と成果もある。観測データがあるだけでは研究は成功しない。データを活かすも殺すも望遠鏡の“較正”次第である。特に重要なのが、偏光角（CMB偏光軸とそれを検波するアンテナの向きがなす角度）の較正と、焦点面にある超伝導センサーの時間応答性の較正である。当初、本研究課題の装置開発ではSATの開発のみを行う予定であったが、代表者と分担者の先行実績を活かして、**較正装置の開発も新たに主担当することになった。**

## ●SAT（小口径望遠鏡）用の較正装置“Sparse Wire Grid Calibrator”の開発に成功

代表者・田島らが世界で初めて開発した“Sparse Wire Grid”を使った較正装置をSATに搭載する。図8に開発した較正装置を示す。“CMB観測モード”と“較正モード”を完全にリモート制御で切り替えられる装置が完成した。京大と東大の大学院生3名と若手ポスドク、分担者・木内とMATSUDAがその開発を主導した。学生達は、そのデータ解析も主導している。

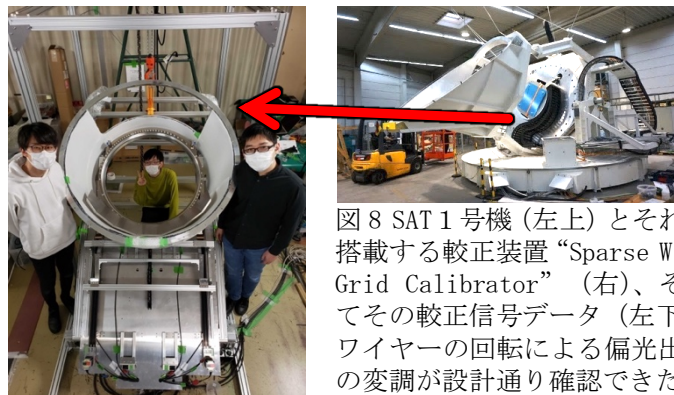


図8 SAT 1号機（左上）とそれに搭載する較正装置“Sparse Wire Grid Calibrator”（右）、そしてその較正信号データ（左下）。ワイヤーの回転による偏光出力の変調が設計通り確認できた。

## ●LAT（大口径望遠鏡）用の較正装置“Stimulator”の開発に成功

分担者の長谷川・片山らが実績を有する人工の黒体放射源を用いた較正装置“Stimulator”をLATに搭載する。図9に示すように、Simons Observatoryに最適化したStimulatorの開発に成功した。さらに、米国シカゴ大学でおこなっているLAT受信機の実験室試験にて性能評価を行った。受信機には超伝導センサーTES（Transition Edge Sensor）が搭載されており、その時間応答を把握することが、LATの観測にとって最も重要である。試験データを解析した結果、期待通りの性能でLATの較正が行えることも定量的に評価できた。

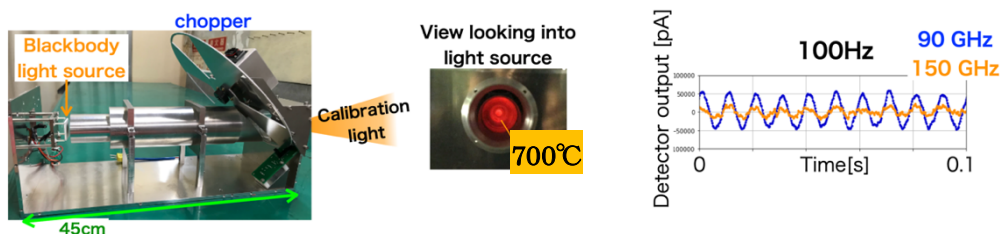


図9 LATに搭載する較正装置“Stimulator”（左）と、その較正信号をLAT受信機に照射したときの超伝導センサーの時系列データ。設計通りの較正信号が確認できた。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計21件（うち査読付論文 8件 / うち国際共著 20件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Xu Zhilei, et al.	4. 巻 60
2. 論文標題 The Simons Observatory: metamaterial microwave absorber and its cryogenic applications	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Applied Optics	6. 最初と最後の頁 864 ~ 864
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/AO.411711	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 Kiuchi Kenji, et al.	4. 巻 11445
2. 論文標題 The Simons Observatory Small Aperture Telescope overview	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 SPIE Astronomical Telescopes + Instrumentation Proceedings: Millimeter, Submillimeter, and Far-Infrared Detectors and Instrumentation for Astronomy X	6. 最初と最後の頁 1372 - 1379
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1117/12.2562016	査読の有無 無
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 Yuki, Ashton Peter, Kusaka Akito, Hill Charles A., Kiuchi Kenji, Katayama Nobuhiko, Tajima Osamu	4. 巻 1590
2. 論文標題 Half-meter Scale Superconducting Magnetic Bearing for Cosmic Microwave Background Polarization Experiments	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Physics: Conference Series	6. 最初と最後の頁 012060 ~ 012060
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1742-6596/1590/1/012060	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 Hill C. A., Kusaka A., Ashton P., Barton P., Adkins T., Arnold K., Bixler B., Ganjam S., Lee A. T., Matsuda F., Matsumura T., Sakurai Y., Tat R., Zhou Y.	4. 巻 91
2. 論文標題 A cryogenic continuously rotating half-wave plate mechanism for the POLARBEAR-2b cosmic microwave background receiver	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Review of Scientific Instruments	6. 最初と最後の頁 124503 ~ 124503
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0029006	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. Sakurai, P. Ashton, A. Kusaka, C. A. Hill, K. Kiuchi, N. Katayama, O. Tajima	4. 巻 -
2. 論文標題 Half-meter Scale Superconducting Magnetic Bearing for Cosmic Microwave Background Polarization Experiments	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Physics: Conference Series (JPCS), Proc. of ISS2019	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) なし	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 Aamir M. Ali, Kenji Kiuchi(23番目), Osamu Tajima(45番目) 他43名	4. 巻 -
2. 論文標題 Small Aperture Telescopes for the Simons Observatory	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 J. Low Temp. Phys.	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) なし	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 M. Nashimoto, M. Hattori, R. G. Santos, and F. Poidevin	4. 巻 72-1
2. 論文標題 Thermal emission from the amorphous dust: An alternative possibility of the origin of the anomalous microwave emission	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Publications of the Astronomical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psz124	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 S. Adachi, M. Hattori, F. Kanno, K. Kiuchi, T. Okada and O. Tajima	4. 巻 91
2. 論文標題 Production method of millimeter-wave absorber with 3D-printed mold	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Review of Scientific Instruments	6. 最初と最後の頁 6103
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5132871	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 The Simons Observatory Collaboration, Yuji Chinone (38番目), Masaya Hasegawa (81番目), Makoto Hattori (83番目), Nobuhiko Katayama (112番目), Kenji Kiuchi (117番目), Haruki Nishino (165番目), Osamu Tajima (209番目), 他232名	4. 巻 2019-02
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 Jason R. Stevens, Yuji Chinone (8番目), 他24名	4. 巻 10708
2. 論文標題 Designs for next generation CMB survey strategies from Chile	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 SPIE Astronomical Telescopes + Instrumentation Proceedings: Millimeter, Submillimeter, and Far-Infrared Detectors and Instrumentation for Astronomy IX	6. 最初と最後の頁 698, 712
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1117/12.2313898	査読の有無 無
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 Nicholas Galitzki, Kenji Kiuchi(42番目), 他76名	4. 巻 10708
2. 論文標題 The Simons Observatory: Instrument Overview	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 SPIE Astronomical Telescopes + Instrumentation Proceedings: Millimeter, Submillimeter, and Far-Infrared Detectors and Instrumentation for Astronomy IX	6. 最初と最後の頁 1, 13
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1117/12.2312985	査読の有無 無
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 Charles A. Hill, 他36名	4. 巻 10708
2. 論文標題 BoloCalc: a sensitivity calculator for the design of Simons Observatory	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 SPIE Astronomical Telescopes + Instrumentation Proceedings: Millimeter, Submillimeter, and Far-Infrared Detectors and Instrumentation for Astronomy IX	6. 最初と最後の頁 712, 718
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1117/12.2313916	査読の有無 無
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 Maria Salatino, 他26名	4. 巻 10708
2. 論文標題 Studies of Systematic Uncertainties for Simons Observatory: Polarization Modulator Related Effects	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 SPIE Astronomical Telescopes + Instrumentation Proceedings: Millimeter, Submillimeter, and Far-Infrared Detectors and Instrumentation for Astronomy IX	6. 最初と最後の頁 769, 790
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1117/12.2312993	査読の有無 無
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 Kevin T. Crowley, Yuji Chinone (8番目), 他38名	4. 巻 10708
2. 論文標題 Studies of Systematic Unvertainties for Simons Observatory: Detector Array Effects	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 SPIE Astronomical Telescopes + Instrumentation Proceedings: Millimeter, Submillimeter, and Far-Infrared Detectors and Instrumentation for Astronomy IX	6. 最初と最後の頁 658, 684
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1117/12.2313414	査読の有無 無
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 Stephen C Parshley, 他15名	4. 巻 10700
2. 論文標題 The optical design of the six-meter CCAT-prime and Simons Observatory telescopes	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 SPIE Astronomical Telescopes + Instrumentation Proceedings: Ground-based and Airborne Telescopes VII	6. 最初と最後の頁 1292, 1304
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1117/12.2314073	査読の有無 無
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 Sean A Bryan, Yuji Chinone (6番目), 他20名	4. 巻 10708
2. 論文標題 Development of Calibration Strategies for the Simons Observatory	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 SPIE Astronomical Telescopes + Instrumentation Proceedings: Millimeter, Submillimeter, and Far-Infrared Detectors and Instrumentation for Astronomy IX	6. 最初と最後の頁 685, 697
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1117/12.2313832	査読の有無 無
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 Sara M. Simon, 他22名	4. 巻 10708
2. 論文標題 Feedhorn development and scalability for Simons Observatory and beyond	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 SPIE Astronomical Telescopes + Instrumentation Proceedings: Millimeter, Submillimeter, and Far-Infrared Detectors and Instrumentation for Astronomy IX	6. 最初と最後の頁 787, 798
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1117/12.2313405	査読の有無 無
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 Ningfeng Zhu, 他33名	4. 巻 10708
2. 論文標題 Simons Observatory Large Aperture Telescope Receiver Design Overview	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 SPIE Astronomical Telescopes + Instrumentation Proceedings: Millimeter, Submillimeter, and Far-Infrared Detectors and Instrumentation for Astronomy IX	6. 最初と最後の頁 259, 273
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1117/12.2312871	査読の有無 無
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 Gabriele Coppi, 他21名	4. 巻 10708
2. 論文標題 Cooldown Strategies and Transient Thermal Simulations for the Simons Observatory	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 SPIE Astronomical Telescopes + Instrumentation Proceedings: Millimeter, Submillimeter, and Far-Infrared Detectors and Instrumentation for Astronomy IX	6. 最初と最後の頁 246, 258
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1117/12.2312679	査読の有無 無
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 John L. Orłowski-Scherer, 他24名	4. 巻 10708
2. 論文標題 Simons Observatory large aperture receiver simulation overview	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 SPIE Astronomical Telescopes + Instrumentation Proceedings: Millimeter, Submillimeter, and Far-Infrared Detectors and Instrumentation for Astronomy IX	6. 最初と最後の頁 644, 657
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1117/12.2312868	査読の有無 無
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 S. R. Dicker, 他28名	4. 巻 10700
2. 論文標題 Cold optical design for the Large Aperture Simons Observatory telescope	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 SPIE Astronomical Telescopes + Instrumentation Proceedings: Ground-based and Airborne Telescopes VII	6. 最初と最後の頁 1064, 1076
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1117/12.2313444	査読の有無 無
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

〔学会発表〕 計48件 (うち招待講演 2件 / うち国際学会 4件)

1. 発表者名 木内健司
2. 発表標題 The Simons Observatory Small Aperture Telescope overview
3. 学会等名 SPIE (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 松田フレドリック
2. 発表標題 Optics Design Development of the Simons Observatory Small Aperture Telescopes
3. 学会等名 SPIE (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 木内健司
2. 発表標題 SimonsObservatory実験の概要と開発状況
3. 学会等名 日本物理学会 第76回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 木内健司
2. 発表標題 Simons Observatory実験の小口径望遠鏡に用いる低温光学筒の開発状況
3. 学会等名 日本物理学会 2020年 秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 桜井雄基
2. 発表標題 次世代マイクロ波背景放射偏光観測実験 Simons Observatory の開発状況
3. 学会等名 日本天文学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 桜井雄基
2. 発表標題 The Simons Observatory status and roles of the Japanese group
3. 学会等名 新学術「ニュートリノで拓く素粒子と宇宙」研究会2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 安達俊介
2. 発表標題 CMB 観測実験 Simons Observatory の開発状況 Development status of the CMB experiment “ Simons Observatory ”
3. 学会等名 日本物理学会 2020年 秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 安達俊介
2. 発表標題 新素材による3Dプリンタ型電波吸収体の開発
3. 学会等名 日本物理学会 第76回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 安達俊介
2. 発表標題 Development of Blackbody Absorber by using a 3D-Printed Mold for Millimeter-Wave Measurements
3. 学会等名 新学術「ニュートリノで拓く素粒子と宇宙」研究会2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 安達俊介
2. 発表標題 3Dプリンタ型を用いた電波吸収体の開発
3. 学会等名 第21回ミリ波サブミリ波受信機ワークショップ
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 西ノ宮ゆめ
2. 発表標題 CMB偏光観測に用いるTESの熱的特性評価および光学試験の進捗状況
3. 学会等名 日本物理学会 2020年 秋季大会
4. 発表年 2020年



1. 発表者名 西ノ宮ゆめ
2. 発表標題 CMB偏光観測に用いるTESの光学特性評価における測定環境・手法の開発
3. 学会等名 日本物理学会 第76回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 西ノ宮ゆめ
2. 発表標題 Development of the evaluation methods and the test bed for TES bolometers for CMB polarization measurements
3. 学会等名 新学術「ニュートリノで拓く素粒子と宇宙」研究会2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 大塚稔也
2. 発表標題 3Dプリンタで作る多様な黒体の性能比較
3. 学会等名 日本物理学会 2020年 秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 中田嘉信
2. 発表標題 Simons Observatory実験に向けたスパースワイヤグリッド較正装置の制御系の構築
3. 学会等名 日本物理学会 第76回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 寺崎友規
2. 発表標題 CMB偏光観測に用いるマイクロ波多重化読み出し回路の性能評価
3. 学会等名 日本物理学会 2020年 秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 寺崎友規
2. 発表標題 The measurement of noise level of the readout module for CMB observation
3. 学会等名 新学術「ニュートリノで拓く素粒子と宇宙」研究会2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 村田雅彬
2. 発表標題 次世代CMB偏光観測実験Simons Observatoryに向けたスパースワイヤーグリッドを用いた偏光較正装置の作成と性能評価
3. 学会等名 日本物理学会 2020年 秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 村田雅彬
2. 発表標題 Simons Observatory実験に向けたワイヤーグリッドを用いた偏光較正装置の性能評価
3. 学会等名 日本物理学会 第76回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 村田雅彬
2. 発表標題 Development of sparse wire grid calibrator for Simons Observatory experiment
3. 学会等名 新学術「ニュートリノで拓く素粒子と宇宙」研究会2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 山田恭平
2. 発表標題 CMB観測における連続回転式低温半波長板のリモートモニタリング
3. 学会等名 日本物理学会 2020年 秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 山田恭平
2. 発表標題 Simons Observatory実験の連続回転式低温半波長板の開発
3. 学会等名 日本物理学会 第76回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 山田恭平
2. 発表標題 Development of a cryogenic Half-Wave Plate Rotator and its contactless monitoring system for the Simons Observatory
3. 学会等名 新学術「ニュートリノで拓く素粒子と宇宙」研究会2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Y. Sakurai, P. Ashton, A. Kusaka, C. A. Hill, K. Kiuchi, N. Katayama, O. Tajima
2. 発表標題 Half-meter Scale Superconducting Magnetic Bearing for Cosmic Microwave Background Polarization Experiments
3. 学会等名 The 32nd International Symposium on Superconductivity (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Shunsuke Adachi, Fumiyasu Kanno, Kenji Kiuchi, Makoto Hattori and Osamu Tajima
2. 発表標題 A Novel Production Method of Millimeter-wave Absorber by a 3D-printed Mold
3. 学会等名 18th International Workshop on Low Temperature Detectors (LTD-18) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 安達俊介 他Simons Observatory Collaboration
2. 発表標題 CMB偏光観測実験 Simons Observatoryの開発状況
3. 学会等名 日本物理学会第75回年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 木内健司, 安達俊介, 松田フレドリック, 櫻井雄基, 仲村佳悟, 大塚稔也, 村田雅彰, 西ノ宮ゆめ, 長谷川雅也, 日下暁人, 田島治, 片山信彦
2. 発表標題 Simons Observatory実験の小口径望遠鏡に用いる低温光学筒の開発
3. 学会等名 日本物理学会第75回年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 松田フレドリック, 日下暁人, Jake Spisak, Grant Teply, 他Simons Observatory Collaboration
2. 発表標題 CMB望遠鏡群実験Simons Observatoryの小口径望遠鏡に用いるパフリング開発
3. 学会等名 日本物理学会第75回年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 村田雅彬, 安達俊介, 木内健司, 日下暁人, 松田フレドリック, 田島治, 他Simons Observatory Collaboration
2. 発表標題 Simons Observatory実験におけるCMB偏光測定に向けたスパースワイヤーを用いた偏光較正装置の製作と自動化機構の制御
3. 学会等名 日本物理学会第75回年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 西ノ宮ゆめ, 木内健司, 日下暁人, Johannes Hubmayr, Adrian Lee, Christopher Raum, Trevor Sasse, Aritoki Suzuki, Ben Westbrook
2. 発表標題 CMB偏光観測に用いるTESの熱的・電気的特性評価の進捗および光学評価の準備状況
3. 学会等名 日本物理学会第75回年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 桜井雄基 他Simons Observatory Collaboration
2. 発表標題 次世代マイクロ波背景放射偏光観測実験 Simons Observatoryの開発状況
3. 学会等名 日本天文学会2020年春季年会
4. 発表年 2020年



1. 発表者名 木内健司 他Simons Observatory Collaboration
2. 発表標題 次世代CMB偏光観測実験Simons Observatoryの研究開発状況
3. 学会等名 日本物理学会秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 西ノ宮ゆめ 他Simons Observatory Collaboration
2. 発表標題 CMB偏光観測に用いるTES性能評価における環境・手法の開発
3. 学会等名 日本物理学会秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 村田雅彬 他Simons Observatory Collaboration
2. 発表標題 Simons Observatory実験でのCMB偏光測定に向けたワイヤーグリッドを用いた偏光較正装置の開発
3. 学会等名 日本物理学会秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 桜井雄基 他Simons Observatory Collaboration
2. 発表標題 Simons Observatory実験における小口径望遠鏡に搭載する低温半波長板回転式偏光変調器の開発
3. 学会等名 日本物理学会秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 安達俊介 他Simons Observatory Collaboration
2. 発表標題 Simons Observatory実験のための電波吸収材-黒体-の開発と実装
3. 学会等名 日本物理学会秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 松田フレドリック 他Simons Observatory Collaboration
2. 発表標題 CMB望遠鏡群実験 Simons Observatoryの研究計画とOptics Tubeの開発状況
3. 学会等名 天文学会2019年秋季年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 田島治
2. 発表標題 宇宙背景放射でみる宇宙のゆらぎと量子のゆらぎ
3. 学会等名 第17回京都大学 物性科学研究センター講演会・研究交流会（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 安達俊介
2. 発表標題 宇宙マイクロ波背景放射観測実験におけるノイズ削減を目的とした3Dプリンタで作る電波吸収材黒体の開発
3. 学会等名 日本物理学会第74回年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 松田フレドリック
2. 発表標題 CMB望遠鏡群実験Simons Observatoryの研究計画と開発状況
3. 学会等名 日本物理学会第74回年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 木内健司
2. 発表標題 CMB観測実験Simons Observatoryの開発状況
3. 学会等名 天文学会2019年春季年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 官野史靖
2. 発表標題 1.6K下における誘電体物質のミリ波光学特性測定システムの構築
3. 学会等名 天文学会2019年春季年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 松田フレドリック
2. 発表標題 宇宙マイクロ波背景放射観測実験Simons Observatory望遠鏡群の研究計画と開発状況
3. 学会等名 天文学会2018年秋季年会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 木内健司
2. 発表標題 次世代宇宙マイクロ波背景放射観測実験Simons Observatory用小口径望遠鏡の研究・開発状況
3. 学会等名 日本物理学会秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 安達俊介
2. 発表標題 次世代宇宙マイクロ波背景放射観測実験Simons Observatoryでの小口径望遠鏡の光学筒試験
3. 学会等名 日本物理学会秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 田島治
2. 発表標題 簡単・便利な超伝導計測-100倍精度の計測を非専門家の手で
3. 学会等名 第1回 TIA かけはし 成果報告会(招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 松田フレドリック
2. 発表標題 The Simons Observatory光学設計案
3. 学会等名 日本天文学会2018年春季年会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 松田フレドリック
2. 発表標題 The Simons Observatory計画と望遠鏡概念設計
3. 学会等名 日本物理学会第73回年次大会春季
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>Simons Observatory  <a href="https://simonsobservatory.org/index.php">https://simonsobservatory.org/index.php</a>          Kyoto CMB Group  <a href="https://www-he.scphys.kyoto-u.ac.jp/research/CMB/index.html">https://www-he.scphys.kyoto-u.ac.jp/research/CMB/index.html</a>          Kusaka Lab.  <a href="http://www.cmb.phys.s.u-tokyo.ac.jp/">http://www.cmb.phys.s.u-tokyo.ac.jp/</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	木内 健司  (KIUCHI Kenji)  (00791071)	東京大学・大学院理学系研究科(理学部)・助教   (12601)	
研究分担者	片山 伸彦  (KATAYAMA Nobuhiko)  (50290854)	東京大学・カブリ数物連携宇宙研究機構・教授   (12601)	
研究分担者	長谷川 雅也  (HASEGAWA Masaya)  (60435617)	大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・研究機関講師   (82118)	



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	Matsuda Frederick  (MATSUDA Frederick)  (40867032)	国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・特任助教    (82645)	

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			
米国	ローレンスバークレー国立研究所	カリフォルニア大学サンディエゴ校	プリンストン大学	他23機関
チリ	Pontificia Universidad Catolica de Chile			
カナダ	McGill	University of British Columbia	University of Toronto	
英国	Manchester University	Cardiff University	Cambridge University	他1機関
フランス	APC	Sussex		