

令和 4 年 6 月 7 日現在

機関番号：15301

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2021

課題番号：19K14732

研究課題名（和文）CMB偏光観測実験における偏光変調器に用いる半波長板の極低温偏光特性測定

研究課題名（英文）Cryogenic polarization properties measurement of a half-wave plate for polarization modulator in CMB polarization experiments

研究代表者

櫻井 雄基（SAKURAI, YUKI）

岡山大学・自然科学学域・特任助教

研究者番号：50780847

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、宇宙のインフレーション探索を行う宇宙マイクロ波背景放射偏光観測実験に使用する偏光変調器用半波長板の精密偏光特性測定を目的とした。ベクトル・ネットワーク・アナライザを用いた常温光学測定系の構築、さらに4Kクライオスタットと組み合わせた低温光学測定装置の開発によって、サファイア半波長板の反射防止開発と偏光特性（透過率、反射率、変調効率）測定を行った。これらを使用し、地上実験に使用するサファイア半波長板の特性評価に成功した。また、低温光学測定系と小型回転機構と組み合わせることで、小型サンプルでの低温偏光特性評価に成功した。これらの成果を解析に使用することで、実験の高感度化が期待される。

研究成果の学術的意義や社会的意義

宇宙マイクロ波背景放射の観測によって、これまで多くの初期宇宙の情報をもたらしてきた。その偏光観測によって、宇宙のインフレーションの実験的検証が可能と予言されているが、そのためには実験のさらなる高感度化が不可欠である。そのためには、実験装置の中でも鍵となる偏光変調器の較正、系統誤差の正確な評価が求められる。本研究では、その主要部である半波長板の反射防止の開発から、常温、低温における偏光特性評価までを行った。将来実験における実際の観測が進み、本研究の測定結果が解析に使用されることで、実験の高感度化によるインフレーション検証の早期化に貢献した。

研究成果の概要（英文）：In this research project, we aim to measure the precise polarization characteristics of a half-wave plate for polarization modulator used in a cosmic microwave background (CMB) polarization experiment to search for cosmic inflation. We constructed a millimeter-wave optical measurement setup by using a vector network analyzer and developed cryogenic optical setup combined with 4K cryostat. We developed anti-reflective coatings on a sapphire half-wave plate and measured its polarization characteristics (transmittance, reflectance, and modulation efficiency) by using the constructed optical setup. We have succeeded in developing a sapphire achromatic half-wave plate used in ground experiments and in evaluating its characteristics. In addition, we succeeded in evaluating polarization characteristics at cryogenic temperatures by combining an optical measurement system and a rotation mechanism. The sensitivity of the CMB experiments will be increased by using these results in analysis.

研究分野：宇宙物理学、高エネルギー物理学

キーワード：CMB インフレーション 宇宙物理 偏光変調器 半波長板 極低温 ミリ波

1. 研究開始当初の背景

宇宙マイクロ波背景放射(CMB)は、全天に観測される電磁マイクロ波であり、宇宙誕生から 38 万年後に起きたビッグバン時に発生したとされる宇宙最古の光である。衛星実験による精密観測によって、ビッグバン宇宙論は現代の宇宙を正確に記述する標準宇宙論となった。しかしながら、未解決な宇宙の根幹的問題が存在するため、現在活発な新理論の構築と実験的検証が行われている。中でもインフレーション理論は、宇宙の初期(10^{-38} 秒後)に指数関数的膨張が起き、高温かつ高密度な宇宙に至ったとする初期宇宙論である。インフレーションにより様々な問題が一挙に解決可能であるため、その実験的検証が現代宇宙論の最重要課題の一つである。インフレーションの決定的証拠になるのが、量子揺らぎに起因する原始重力波の観測である。この原始重力波は、ビッグバンで生成された CMB に干渉し、「B モード」と呼ばれる特殊な偏光パターンを刻印すると予言されている。B モードを精密に観測することで原始重力波を検出し、インフレーションの存在を実験的に証明することが可能である。

研究開始当初、様々な CMB 偏光観測実験が進行中であったが、特に研究代表者が参加する地上実験 Simons Observatory と衛星計画 LiteBIRD は観測装置の設計、製造、検証段階にあった。両実験は、望遠鏡開口部に連続回転するサファイア半波長板を使用した偏光変調器を採用する。この装置は、入射偏光に対して恣意的に変調をかけることで、系統誤差とノイズを大幅に削減することが可能な重要装置である。特に、主要部となるサファイア半波長板の偏光特性を詳細に測定し、較正することは実験の科学成果達成の鍵を握る研究課題であったため、本研究が開始された。

2. 研究の目的

本研究の目的は、宇宙のインフレーションの探索に向けた CMB 偏光観測実験における偏光変調器の主要部である半波長板の偏光特性の精密測定である。本研究成果を次世代 CMB 偏光観測実験に適応することで、さらなる高感度化を実現する。

CMB 偏光観測実験では、大気や装置由来の CMB 信号に対して大きな $1/f$ ノイズ (パワーが周波数に反比例する低周波ノイズ) や、直交するアンテナを持った検出器の差分の系統誤差が観測に大きな影響を与えるため、これをいかに除去、回避するかが実験の鍵を握る。そこで望遠鏡の開口部に半波長板連続回転式の偏光変調器を多くの実験が採用している。直線偏光が連続回転する半波長板に入射すると、その回転角の 4 倍の周期に入射偏光が回転、変調される。これによって、 $1/f$ ノイズと系統誤差を大幅に削減する (図 1 参照)。しかしながら、この原理は常に完璧ではないため、実際には装置の不完全性の較正、系統誤差評価が必要になる。サファイアに代表される半波長板は屈折率が大きいので反射防止が必須であり、また複屈折材の不完全性に起因する変調に対する効率が存在する。これら透過率、変調効率に代表される偏光特性を実際の低温環境下で測定、評価することが実験感度、系統誤差の観点から重要である。そこで、本研究では CMB 偏光観測実験で広く使用されているサファイア半波長板の低温での偏光特性の精密測定を目的とした。

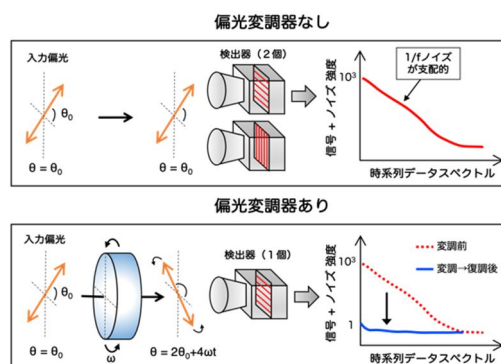


図 1 偏光変調器を搭載した場合の利点を示した概念図。

3. 研究の方法

本研究では、以下の光学測定装置の開発からサファイア半波長板の偏光特性測定を行った。

- 1) ベクトル・ネットワーク・アナライザ (VNA) を用いた常温光学測定装置の開発

サファイア半波長板の偏光特性を精密に測定するため、ミリ波を送受信する光学装置 VNA を用いる。VNA の対応周波数は単体では 10 MHz~20 GHz のため、逡倍器をかませることによって、本研究の目標周波数帯 40~300GHz における測定を行う。自由空間に送信された電磁波をホーン、鏡、黒体を使用して適切に伝搬、集光させることで、測定サンプルあり、なしでの電力測定から、透過率と反射率を導出する。具体的には以下の開発を行った。

 - 1.1) 各光学経路でのビーム形状測定、参考サンプルによる測定系の検証

- 1.2) 小型 (直径 100mm) サンプル透過率反射率測定系
 1.3) 大型 (直径 600mm, 実際の実験で使用されるサイズ) サンプル透過率反射率測定系
 2) 4K GM 冷凍機クライオスタット、極低温回転機構と小型光学測定系を組み合わせた低温光学測定装置の開発

実際の観測環境ではサファイア半波長板は 4-50K までの極低温環境下で使用される。極低温ではサファイアの物性が変化するため、透過率や変調効率などの光学パラメータも常温から変化する。さらに、低温回転機構と組み合わせることで、変調信号への回転機構による雑音も評価することが可能である。本研究では、小型 (直径 50mm) サンプルでの低温測定系の開発と実際の測定を行った。

4. 研究成果

1) 小型、大型サンプル測定用の光学測定系を構築に成功した(図2)。自由空間での各光学経路におけるビーム形状を、自動3軸ステージを使用して測定し、偏光特性測定に対して大きな影響を与えないことを確認した。これを基に、透過率、反射率測定系を構築し、アルミナ参照サンプルで透過率と反射率が理論値と約-40dBの精度で一致することを確認した。

この構築した測定系を用いて、地上実験におけるサファイア半波長板に使用するセラミックスとエポキシ複合材を使用したサファイアに施す反射防止コーティングの開発に成功した。この成果は国際学会で報告され、現在論文出版に向けて順調に準備が進んでいる。この反射防止コーティングを実際の地上実験 Simons Array 及び Simons Observatory で使用する直径 505mm のサファイア半波長板に実装し、透過率と変調効率が実験の要求を満たすことを本研究で構築した大型の光学測定系で確認した。

さらに、衛星実験や地上実験に応用するサブミリ波構造を用いた反射防止の開発においても、本研究で構築した小型、大型測定系を使用した。この開発の成果を国内外の学会で報告し、論文の出版を行った。

2) 図3に示すように、構築した小型光学測定系と 4K 冷凍機を用いたクライオスタットを組み合わせることで低温光学測定系の開発に成功した。クライオスタットに新たに光学窓とミラーを設置することで、適切な光路を形成し、低温での透過率測定が可能な光学系を構築した。さらに、若手研究(B)17K14272で開発した低温小型回転機構と組み合わせることで、低温での変調効率測定を可能にした。さらに回転時の光学信号を解析することで、回転機構由来の偏光特性評価も行った。これらの成果を国際学会において報告した。測定精度が目標とした-50~60dBには未到達なこと、回転機構由来のノイズの詳細解析、実際の大型サンプルサイズでの測定等が今後の研究の課題点として挙げられる。

1), 2)の成果によって、本研究の目標としていた常温、低温でのサファイア半波長板の偏光特性(透過率、反射率、変調効率)の測定に成功した。実際の実験に使用するサファイア半波長板の反射防止膜を含めた偏光特性評価も行うことができたため、本研究によって実験の高感度化に貢献できた。

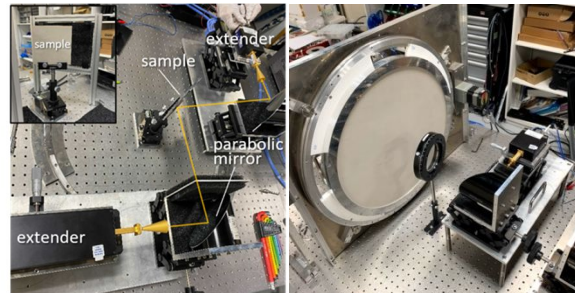


図2 開発したサファイア半波長板の常温測定セットアップ。左図)小型サンプル反射測定系右図)大型サンプル透過率、変調効率測定系

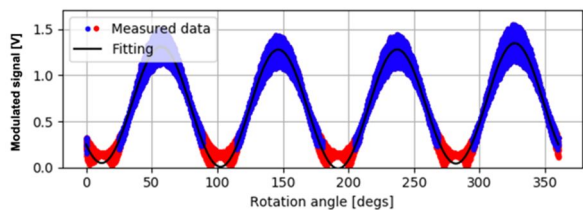
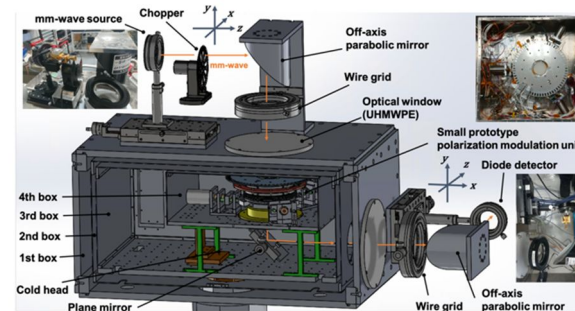


図3 上図: 開発した低温光学測定系。下図: 小型 (50mm) サファイア半波長板の低温での変調信号。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計12件（うち査読付論文 8件／うち国際共著 6件／うちオープンアクセス 6件）

1. 著者名 Takaku Ryota, Wen Qi, Cray Scott, Devlin Mark, Dicker Simon, Hanany Shaul, Hasebe Takashi, Iida Teruhito, Katayama Nobuhiko, Konishi Kuniaki, Kuwata-Gonokami Makoto, Matsumura Tomotake, Mio Norikatsu, Sakurai Haruyuki, Sakurai Yuki, Yamada Ryohei, Yumoto Junji	4. 巻 29
2. 論文標題 Large diameter millimeter-wave low-pass filter made of alumina with laser ablated anti-reflection coating	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Optics Express	6. 最初と最後の頁 41745 ~ 41745
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/OE.444848	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 Komatsu Kunimoto, Ishino Hirokazu, Katayama Nobuhiko, Matsumura Tomotake, Sakurai Yuki	4. 巻 7
2. 論文標題 Design of a frequency-independent optic axis Pancharatnam-based achromatic half-wave plate	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems	6. 最初と最後の頁 34005
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1117/1.JATIS.7.3.034005	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 Toda Takayuki, Sakurai Yuki, Ishino Hirokazu, Matsumura Tomotake, Komatsu Kunimoto, Katayama Nobuhiko	4. 巻 8
2. 論文標題 Mechanical strength and millimeter-wave transmittance spectrum of stacked sapphire plates bonded by sodium silicate solution	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems	6. 最初と最後の頁 14008
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1117/1.JATIS.8.1.014008	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 Otsuka T., Adachi S., Hattori M., Sakurai Y., Tajima O.	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 Applied Optics	6. 最初と最後の頁 7678 ~ 7678
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/AO.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 Takaku Ryota, Wen Qi, Cray Scott, Devlin Mark, Dicker Simon, Hanany Shaul, Hasebe Takashi, Iida Teruhito, Katayama Nobuhiko, Konishi Kuniaki, Kuwata-Gonokami Makoto, Matsumura Tomotake, Mio Norikatsu, Sakurai Haruyuki, Sakurai Yuki, Yamada Ryohei, Yumoto Junji	4. 巻 29
2. 論文標題 Large diameter millimeter-wave low-pass filter made of alumina with laser ablated anti-reflection coating	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Optics Express	6. 最初と最後の頁 41745 ~ 41745
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/OE.444848	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 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 Sakurai Yuki et. al.	4. 巻 11453
2. 論文標題 Breadboard model of polarization modulator unit based on a continuously rotating half-wave plate for the low-frequency telescope of the LiteBIRD space mission	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 SPIE, Millimeter, Submillimeter, and Far-Infrared Detectors and Instrumentation for Astronomy X	6. 最初と最後の頁 743 ~ 762
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1117/12.2560289	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 Komatsu Kunimoto, Ishino Hirokazu, Kataza Hirokazu, Konishi Kuniaki, Kuwata-Gonokami Makoto, Katayama Nobuhiko, Sugiyama Shinya, Matsumura Tomotake, Sakurai Haruyuki, Sakurai Yuki, Takaku Ryota, Yumoto Junji	4. 巻 11453
2. 論文標題 Demonstration of five-layer phase-flat achromatic half-wave plate with anti-reflective structures and superconducting magnetic bearing for CMB polarization experiments	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 SPIE, Millimeter, Submillimeter, and Far-Infrared Detectors and Instrumentation for Astronomy X	6. 最初と最後の頁 779 ~ 794
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1117/12.2560486	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 Takaku Ryota, Hanany Shaul, Hoshino Yurika, Imada Hiroaki, Ishino Hirokazu, Katayama Nobuhiko, Komatsu Kunimoto, Konishi Kuniaki, Kuwata Gonokami Makoto, Matsumura Tomotake, Mitsuda Kazuhisa, Sakurai Haruyuki, Sakurai Yuki, Wen Qi, Yamasaki Noriko, Young Karl, Yumoto Junji	4. 巻 11453
2. 論文標題 Demonstration of anti-reflective structures over a large area for CMB polarization experiments	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 SPIE, Millimeter, Submillimeter, and Far-Infrared Detectors and Instrumentation for Astronomy X	6. 最初と最後の頁 236 ~ 247
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1117/12.2562028	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 Toda Takayuki, Ishino Hirokazu, Komatsu Kunimoto, Matsumura Tomotake, Sakurai Yuki, Katayama Nobuhiko	4. 巻 11453
2. 論文標題 Mechanical strength and millimeter-wave transmission spectrum of stacked sapphire plates bonded by sodium silicate solution	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 SPIE, Millimeter, Submillimeter, and Far-Infrared Detectors and Instrumentation for Astronomy X	6. 最初と最後の頁 788 ~ 799
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1117/12.2562366	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 Takaku R., Hanany S., Imada H., Ishino H., Katayama N., Komatsu K., Konishi K., Kuwata-Gonokami M., Matsumura T., Mitsuda K., Sakurai H., Sakurai Y., Wen Q., Yamasaki N. Y., Young K., Yumoto J.	4. 巻 128
2. 論文標題 Broadband, millimeter-wave anti-reflective structures on sapphire ablated with femto-second laser	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 225302 ~ 225302
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0022765	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 Yuki Sakurai, Tomotake Matsumura, Nobuhiko Katayama, Teruhito Iida, Kunimoto Komatsu, Hajime Sugai, Hiroyuki Ohsaki, Yutaka Terao, Yukimasa Hirota, Hisashi Enokida	4. 巻 1293
2. 論文標題 Development of a contact-less cryogenic rotation mechanism employed for a polarization modulator unit in cosmic microwave background polarization experiments	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Physics: Conference Series	6. 最初と最後の頁 12083
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1742-6596/1293/1/012083	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18件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 6件）

1. 発表者名 桜井雄基
2. 発表標題 次世代CMB偏光観測実験における偏光変調技術
3. 学会等名 Upcoming CMB observations and Cosmology (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 高久諒太, Qi Wen, Scott Cray, Mark Devlin, Simon Dicker, Shaul Hanany, 長谷部孝, 飯田光人, 片山伸彦, 小西邦昭, 五神真, 松村知岳, 三尾典克, 櫻井治之, 桜井雄基, 山田涼平, 湯本潤司
2. 発表標題 超短パルスレーザーによるモスアイ反射防止構造加工を施した大型アルミナIRフィルターの開発
3. 学会等名 日本物理学会第77回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 星野百合香, 松村知岳, 桜井雄基, 長谷部孝, Tommaso Ghigna, 片山伸彦, 田代信, 寺田幸功, 佐藤浩介, 勝田哲, 杉山真也, 小松国幹, 高久諒太, 他 LiteBIRD Joint Study Group
2. 発表標題 LiteBIRD低周波望遠鏡のための半波長板の結晶軸のずれがCMB観測に与える影響について
3. 学会等名 日本物理学会第77回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 桜井雄基, 松村知岳, 片山伸彦, 高久諒太, 小松国幹, 杉山真也, 星野百合香, 長谷部孝, Tommaso Ghigna
2. 発表標題 CMB観測衛星LiteBIRDにおける連続回転半波長板に同期する系統誤差の研究
3. 学会等名 日本物理学会第77回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 坂栗佳奈, 杉山純菜, 長谷川雅也, 桜井雄基, 松村知岳, 日下暁人
2. 発表標題 CMB観測に用いるサファイア・アルミナ用反射防止膜の低温性能評価
3. 学会等名 日本物理学会第77回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 杉山純菜, 坂栗佳奈, 山田恭平, 長谷川雅也, 桜井雄基, 松村知岳, 日下暁人, SO collaboration
2. 発表標題 Simons Observatory実験に用いる偏光変調器の開発
3. 学会等名 日本物理学会第77回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 桜井雄基、他
2. 発表標題 LiteBIRD低周波望遠鏡用偏光変調器の開発概要
3. 学会等名 第22回宇宙科学シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kana Sakaguri, Masaya Hasegawa, Yuki Sakurai, Charles Hill, Akito Kusak
2. 発表標題 Broadband multi-layer Anti-reflection coatings with mullite and duroid used for half wave plate and alumina filter for CMB polarimetry
3. 学会等名 19th International Workshop on Low Temperature Detectors (国際学会)
4. 発表年 2021年

1 . 発表者名 Sakurai Yuki et. al.
2 . 発表標題 Breadboard model of polarization modulator unit based on a continuously rotating half-wave plate for the low-frequency telescope of the LiteBIRD space mission
3 . 学会等名 SPIE 2020, Millimeter, Submillimeter, and Far-Infrared Detectors and Instrumentation for Astronomy X (国際学会)
4 . 発表年 2020年

1 . 発表者名 Komatsu Kunimoto, Ishino Hirokazu, Kataza Hirokazu, Konishi Kuniaki, Kuwata-Gonokami Makoto, Katayama Nobuhiko, Sugiyama Shinya, Matsumura Tomotake, Sakurai Haruyuki, Sakurai Yuki, Takaku Ryota, Yumoto Junji
2 . 発表標題 Demonstration of anti-reflective structures over a large area for CMB polarization experiments
3 . 学会等名 SPIE 2020, Millimeter, Submillimeter, and Far-Infrared Detectors and Instrumentation for Astronomy X (国際学会)
4 . 発表年 2020年

1 . 発表者名 Takaku Ryota, Hanany Shaul, Hoshino Yurika, Imada Hiroaki, Ishino Hirokazu, Katayama Nobuhiko, Komatsu Kunimoto, Konishi Kuniaki, Kuwata Gonokami Makoto, Matsumura Tomotake, Mitsuda Kazuhisa, Sakurai Haruyuki, Sakurai Yuki, Wen Qi, Yamasaki Noriko, Young Karl, Yumoto Junji
2 . 発表標題 Demonstration of anti-reflective structures over a large area for CMB polarization experiments
3 . 学会等名 SPIE 2020, Millimeter, Submillimeter, and Far-Infrared Detectors and Instrumentation for Astronomy X (国際学会)
4 . 発表年 2020年

1 . 発表者名 Toda Takayuki, Ishino Hirokazu, Komatsu Kunimoto, Matsumura Tomotake, Sakurai Yuki, Katayama Nobuhiko
2 . 発表標題 Mechanical strength and millimeter-wave transmission spectrum of stacked sapphire plates bonded by sodium silicate solution
3 . 学会等名 SPIE 2020, Millimeter, Submillimeter, and Far-Infrared Detectors and Instrumentation for Astronomy X (国際学会)
4 . 発表年 2020年

1. 発表者名 坂栗佳奈, 長谷川雅也, 桜井雄基, Charles Hill, 日下暁人
2. 発表標題 CMB偏光観測実験に用いる半波長板、アルミナフィルタ用反射防止膜開発
3. 学会等名 第76回日本物理学会年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 星野百合香, 松村知岳, 桜井雄基, 片山伸彦, 田代信, 寺田幸功, 佐藤浩介, 勝田哲, 杉山真也, 小松国幹, 高久諒太, 他 LiteBIRD Joint Study Group
2. 発表標題 CMB観測実験のための半波長板における結晶軸のずれによる変調の高調波の生成について
3. 学会等名 第76回日本物理学会年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 安達俊介, 大塚稔也, 桜井雄基, 田島治, 服部誠
2. 発表標題 新素材による3Dプリンタ型電波吸収材の開発
3. 学会等名 第76回日本物理学会年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yuki Sakurai, LiteBIRD PMU development team
2. 発表標題 Development of space compatible Polarization Modulator
3. 学会等名 B-mode from space 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 櫻井雄基、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 2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 櫻井雄基、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年春季大会
4. 発表年 2019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
---------	---------