

令和 6 年 6 月 9 日現在

機関番号：82118

研究種目：国際共同研究加速基金（国際共同研究強化(B)）

研究期間：2019～2023

課題番号：19KK0079

研究課題名（和文）CMB偏光観測による原始重力波の探索：Simons Arrayから次世代実験へ

研究課題名（英文）Quest for Primordial Gravitational Wave: from Simons Array to next generation CMB experiments

研究代表者

長谷川 雅也（HASEGAWA, MASAYA）

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・准教授

研究者番号：60435617

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,900,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、世界初の望遠鏡群によるCMB偏光実験「Simons Array」を実現しCMB偏光の精密測定を行い、次世代実験での超精密観測の実現に向けた基盤技術の確立を目的としている。本研究をとおして、日米欧のより強固な信頼関係が気づかれ、国際協力によって、Simons Array望遠鏡の1号機・2号機をチリ観測サイトに導入し、試験観測を経て、科学観測の開始を実現した。また次世代に向けた系統誤差制御に向けて、画期的な較正装置を提案し、実装して、期待される性能が出ている事を確認した。本研究を通してCMB観測の将来に向けて確固たる基盤を築く事が出来た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

「宇宙がどのようににはじまったのか？」宇宙創成は人類究極の問いである。この問いに科学的に答える手段としてCMB偏光の精密測定による原始重力波の探索が提案されている。非常に微弱な信号をとらえる必要があるが、近年の超伝導センサーとよばれる高感度センサーの登場と、本研究を通して、それをアレイ化して運用できる技術の実現により、次世代実験によって実際に検出が視野に入ってきたことは学術的に大きな意義がある。実際に観測できれば、社会的な関心やインパクトも非常に大きいと考える。

研究成果の概要（英文）：This study aims to achieve the world's first precise measurement of CMB polarization through the "Simons Array" experiment, a groundbreaking telescope array, and to establish foundational technologies for ultra-precise observations in next-generation experiments. Through this research, stronger relationships have been built among Japan, the US, and Europe, enabling international collaboration that led to the installation of the first and second Simons Array telescopes at the Chilean observation site. Following commissioning observations, scientific observations have commenced. Additionally, to address systematic error control for future generations, an innovative calibration device was proposed, implemented, and confirmed to perform as expected. This research has laid a solid foundation for the future of CMB observations.

研究分野：宇宙物理

キーワード：宇宙背景放射 インフレーション 原始重力波 偏光 重力レンズ 検出器開発 超伝導検出器

1. 研究開始当初の背景

宇宙の極初期に爆発的な加速膨張があったとするインフレーション仮説は、熱いビッグバン以前の宇宙を記述する最も有力な宇宙創成の物理学である。CMB の観測衛星 WMAP 以降のデータで次々と検証され現在状況証拠が出そろった段階と言えるが、インフレーション仮説を実証するラストピース「時空の量子ゆらぎに起因する重力波（原始重力波）」はまだ未発見である。原始重力波を検出する最良のプロープが CMB の偏光成分の精密測定である。原始重力波は CMB に B モードと呼ばれる渦巻き状の特殊な偏光パターンを刻印するため、偏光 B モードをとらえる事で実験的検証が可能になる。

したがって、本研究課題の核心をなす学術的問いは「偏光 B モードの強度は？」である。この強度は一般的に偏光強度との相対比（テンソル・スカラー比“ r ”で表記）で議論され、現在の上限値は $r \sim 0.07$ である。主要なインフレーションモデルが予言する強度は $r > 0.0025$ のため、ここからさらなる装置の感度向上が求められるが、すでに個々のセンサーの感度は入射する光子数のゆらぎによって制限されつつある。そのため、如何に多くのセンサーを焦点面に配置するか、もしくは複数の望遠鏡を用いた観測を実現するかが、CMB 実験の共通の課題となっている。これを本研究を通して実現する。現在多くのインフレーションモデルが提案されているが、それぞれ予言する r の値は異なるため、偏光 B モードの強度が決定出来れば、モデルの選定が可能になる。これはインフレーション仮説の背後にある、量子重力の定量的な実験的検証が可能になる事を意味し、宇宙のはじまりに迫ると共に素粒子実験の新時代が切り拓かれる。

2. 研究の目的

主要なインフレーションモデルが予想する偏光 B モードの強度は $r > 0.0025$ であり、この感度に到達する事が CMB 実験の最大のマイルストーンである。一方、本研究申請当時の上限値は $r < 0.07$ (95%信頼度)となっており、このマイルストーンを達成するためには、2桁程度の感度向上が必要である。今後の感度向上に向けて、複数の望遠鏡に大型(O(10000)個の検出器を配置した)の焦点面を搭載して行う望遠鏡“群”実験の実現が望まれている。本研究では、

1. 世界初となる望遠鏡群実験「サイモンズアレイ」を立ち上げて偏光観測を行い、
2. 現行実験を超える感度での CMB 実験を実現し、
3. さらに、将来の精密測定に耐えうる観測の基盤技術（系統誤差の削減、測定系の安定化）を確立し、次世代実験へのフィードバックをかける

事を目的としている。サイモンズアレイを足がかりとして次世代実験でも中核を担う足がかりとし、本国際共同研究の基盤が中長期的に堅固に維持・発展していく事を旨とする。

3. 研究の方法

本計画では、世界初の望遠鏡“群”による CMB 偏光実験「サイモンズアレイ」を実現し、偏光 B モードを高感度で観測を行う。さらにその過程で系統誤差削減に関する詳細研究を行い、次世代の大規模望遠鏡群実験による精密観測の実現に向けた基盤技術の確立を目指す。確実に本研究の目的を達成するために、特に系統誤差削減に関して以下の2つのアイデアを試みる。

(1) 人工校正光源の導入による高精度な装置校正

CMB 偏光観測における主要な系統誤差の要因は、検出器が観測する偏光角のバイアスである。偏光角を誤ると、偽の B モード信号を生成する。現行実験では TauA 等の天体を用いて偏光角の校正を行なっているが、カタログの精度が本研究で目指す感度には耐え難い。そこで、先行実験で実績のある偏光子を大型化し、適応する事でこの系統誤差を削減していく。また、モデルの仮定なしで校正する手法が、本研究分担者によって提案されており、これを試みる。

(2) 検出器システム応答性のリアルタイム

TES ボロメータを配置する焦点面温度がわずかでも変動して応答性が変化したり、望遠鏡のミラーの温度の変化により入射偏光パワーが変わると、CMB の信号と区別がつかないためノイズとなる。これらの過剰ノイズへの対策として、応答性に関しては基準信号を連続して入射しモニターする。そのための校正光源“スティミュレータ”を開発して実装する。ミラーの温度については、温度をモニターして補正をかけるためのシステムを開発する。

これらの研究を通して目的を達成していく。

4. 研究成果

サイモンズアレイ実験の立ち上げについては、「世界最大レベルの超伝導検出器アレイ (7588 個の TES ボロメータ)」の実現が最大の挑戦である。実現の課題として、空を観測しながら (外部から赤外線による熱負荷を受けながら) 如何に検出器を冷却し転移端に状態を保つか、が挙げられる。この課題の達成に向けて、先行実験で実現した「ミリ波を透過して赤外線を効率的に落とす光学素子 (2016)」に加えて、「信号読み出し線を通して入る熱負荷を効率的に落とす為の超伝導材を用いたケーブルの開発 (Journal of Low Temperature physics 193(3-4), 547-555 (2018))」や「超伝導検出器の多重化読み出しの検出器本体への実装 (Journal of Low Temperature physics 193(5-6), 1094-1102 (2018))」を実現し、超伝導検出機を実際の観測環境を模擬した条件下で期待通り運用できる事を確認した。

これらの技術に基づき、観測装置をチリに移設し、2019年に1台目の、2022年に2台目のファーストライトを迎えた (J. Low Temp. Phys., 199, 1137 (2020))。なお2台目については米国チームの担当であるが、コロナ禍の中、上記光学素子の製作を米国で行うことが困難であったため、日本にて製作を行い導入した。本研究を通して国際協力がより強固になっていたため、スムーズに行うことが出来た。また、初期の観測データを用いて装置の光学特性を評価し、期待通りの無偏光 (強度)・偏光角の特性を有している事を確認した。これらの較正観測およびデータ解析は日本チーム (本研究チーム) が主導して行なった。

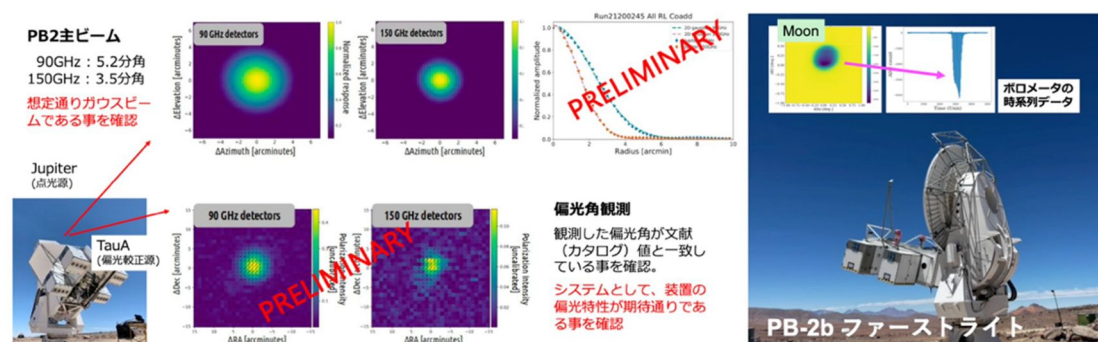


図1 光学特性評価(左図)とPB2B(2台目)のファーストライト(右図)。期待通りのアンテナパターン・偏光角が得られている。

並行して系統誤差削減に向けて、基準信号を常時入射出来る人工較正源 (スティミュレータ) を分担者の金子を中心に立ち上げ、5年にわたる長期間にわたる安定した運用に成功している。性能を論文にまとめて報告している (JATIS 10, 018003 (2024))。また焦点面および装置全体の精密な温度モニターシステムの導入等をおこなって、系統誤差制御に関する研究を進めた (Journal of Low Temperature Physics, 199, 1137-1147(2020), JATIS.8, 036003 (2022))。

POLARBEAR データの再解析を行い、2つの特筆すべき成果を発表した。1つは原始重力波探索によるものであり、データ解析手法を改良して再解析した結果、探索感度を2.7倍改良する事に成功した (Astrophys. J, 931, 191 (2022))。チリ・アタカマ高地からの観測としては最良の結果となっている。2つめは CMB 偏光角の時間変動を精密に測定し宇宙論的複屈折の検出を目指したものである。有意な信号は得られなかったが、複屈折がアクシオン起源であると仮定する事で、超軽量アクシオンに対して厳しい上限値を得る事に成功した。さらに、超新星残骸(TauA)の偏光信号を用いる事で、さらに感度の高い探索が出来る事が提案され、解析を行なった。結果として現在最も厳しい上限値を得る事に成功し、論文として発表している。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計15件（うち査読付論文 9件 / うち国際共著 6件 / うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 Inoue Yuki, Hasegawa Masaya, Hazumi Masashi, Takada Suguru, Tomaru Takayuki	4. 巻 62
2. 論文標題 Development of an epoxy-based millimeter absorber with expanded polystyrenes and carbon black for an astronomical telescope	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Applied Optics	6. 最初と最後の頁 1419 ~ 1419
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/AO.480162	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 Sakaguri Kana, Hasegawa Masaya, Sakurai Yuki, Hill Charles, Kusaka Akito	4. 巻 209
2. 論文標題 Broadband Multi-layer Anti-reflection Coatings with Mullite and Duroid for Half-wave Plates and Alumina Filters for CMB Polarimetry	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Low Temperature Physics	6. 最初と最後の頁 1264 ~ 1271
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10909-022-02847-0	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 Adachi S, M. Hasegawa (18番目) 他51名	4. 巻 931
2. 論文標題 Improved Upper Limit on Degree-scale CMB B-mode Polarization Power from the 670 Square-degree POLARBEAR Survey	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 101 ~ 101
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ac6809	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 Tanabe Daiki, Hasegawa Masaya, Hazumi Masashi, Katayama Nobuhiko, Kikuchi Shuhei, Lee Adrian, Nishino Haruki, Takakura Satoru	4. 巻 8
2. 論文標題 High-precision temperature monitoring system for room-temperature equipment in astrophysical observations	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 36003
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1117/1.JATIS.8.3.036003	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 K. Abazajian, M. Hasegawa (94番目) 他146名	4. 巻 926
2. 論文標題 CMB-S4: Forecasting Constraints on Primordial Gravitational Waves	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 54 ~ 54
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ac1596	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 E. Allys, M. Hasegawa (60番目) 他148名	4. 巻 2023
2. 論文標題 Probing cosmic inflation with the LiteBIRD cosmic microwave background polarization survey	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 1-143
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/ptep/ptac150	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 S. Adachi, M. Hasegawa(18番目) 他51名	4. 巻 -
2. 論文標題 Improved upper limit on degree-scale CMB B-mode polarization power from the 670 square-degree POLARBEAR survey	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Astrophysical Journal	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 -

1. 著者名 Segawa Yuuko, Masaya Hasegawa (4番目) 他81名	4. 巻 2319
2. 論文標題 Method for rapid performance validation of large TES bolometer array for POLARBEAR-2A using a coherent millimeter-wave source	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 AIP Conference Proceedings	6. 最初と最後の頁 40019
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0038197	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 Haruki Nishino, Masaya Hasegawa (8番目) 他25名	4. 巻 10
2. 論文標題 Data acquisition and management system for the CMB polarization experiment: Simons Array	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proc. SPIE 11453, Millimeter, Submillimeter, and Far-Infrared Detectors and Instrumentation for Astronomy	6. 最初と最後の頁 1145329
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1117/12.2560616	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 Shunsuke Adachi, Masaya Hasegawa (23番目) 他54名	4. 巻 904
2. 論文標題 A Measurement of the CMB E-mode Angular Power Spectrum at Subdegree Scales from 670 Square Degrees of POLARBEAR Data	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 65 ~ 65
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/abbacd	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 M. Aguilar Faundez, M. Hasegawa (19番目), M. Hazumi(20番目), H. Nishino(36番目), Y. Minami(34番目) 他47名	4. 巻 893
2. 論文標題 Measurement of the Cosmic Microwave Background Polarization Lensing Power Spectrum from Two Years of POLARBEAR Data	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 85-93
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ab7e29	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 D. Kaneko, M. Hasegawa(36番目), M. Hazumi(37番目), Y. Minami (56番目), H. Nishino(58番目) 他73名	4. 巻 199
2. 論文標題 Deployment of POLARBEAR-2A	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Low Temperature Physics	6. 最初と最後の頁 1137-1147
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10909-020-02366-w	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 S. Adachi, M. Hasegawa (22番目), M. Hazumi(23番目), Y. Minami (36番目), H. Nishino(39番目) 他 49名	4. 巻 124
2. 論文標題 Internal Delensing of Cosmic Microwave Background Polarization B-Modes with the POLARBEAR Experiment	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 131301 1-7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.124.131301	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. Namikawa, M. Hasegawa(33番目) M. Hazumi(34番目), D. Kaneko(38番目), Y. Minami (46番目), H. Nishino(50番目) 他66名	4. 巻 882
2. 論文標題 Evidence for the Cross-correlation between Cosmic Microwave Background Polarization Lensing from Polarbear and Cosmic Shear from Subaru Hyper Suprime-Cam	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 62~62
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ab3424	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 Minami Yuto, Ochi Hiroki, Ichiki Kiyotomo, Katayama Nobuhiko, Komatsu Eiichiro, Matsumura Tomotake	4. 巻 2019
2. 論文標題 Simultaneous determination of the cosmic birefringence and miscalibrated polarization angles from CMB experiments	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 083E02 (13ページ)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/ptep/ptz079	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28件(うち招待講演 1件/うち国際学会 4件)

1. 発表者名 金子大輔
2. 発表標題 Simons Array実験2021年の準備状況
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 藤野琢郎
2. 発表標題 POLARBEAR実験によるCMB円偏光探索に向けた半波長板の評価3
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 金子大輔
2. 発表標題 Simons Array実験 観測サイトにおけるコミッションング
3. 学会等名 物理学会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 高取沙悠理
2. 発表標題 Simons Array実験における人工較正光源を用いた検出器感度最適化の手法の開発
3. 学会等名 物理学会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 金子大輔
2. 発表標題 Simons Observatory, Large Aperture Telescopeのための較正光源の開発
3. 学会等名 天文学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 山田恭平
2. 発表標題 Simons Array実験における惑星観測による検出器評価
3. 学会等名 天文学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 高取沙悠理
2. 発表標題 Simons Array実験における較正光源を用いた検出器性能評価試験
3. 学会等名 天文学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 廣瀬開陽
2. 発表標題 Simons Array望遠鏡の検出器の偏光特性評価のための狭帯域RF発信器を用いた光学試験装置の開発
3. 学会等名 天文学会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 金子大輔
2. 発表標題 CMB偏光観測実験Simons Arrayの現状
3. 学会等名 第22回ミリ波・サブミリ波受信機ワークショップ
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 廣瀬開陽
2. 発表標題 強度可変光源を用いたCMB観測用TES検出器の特性評価手法の開発
3. 学会等名 第22回ミリ波・サブミリ波受信機ワークショップ
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 高取沙悠理
2. 発表標題 CMB偏光観測装置Simons Arrayのための検出器較正用光源装置の開発
3. 学会等名 第22回ミリ波・サブミリ波受信機ワークショップ
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 金子大輔
2. 発表標題 宇宙マイクロ波背景放射と最近の観測の状況
3. 学会等名 Flavor Physics workshop 2021 (FPWS2021)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 長谷川雅也
2. 発表標題 POLARBEAR-2/Simons Array実験 -観測機器コミッショニング状況-
3. 学会等名 天文学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 長谷川雅也
2. 発表標題 POLARBEAR-2/Simons Array実験 -観測サイトでの観測機器準備状況-
3. 学会等名 天文学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 西野玄記
2. 発表標題 Simons Array実験の現状報告
3. 学会等名 物理学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 金子大輔
2. 発表標題 POLARBEAR-2aにおける較正光源を利用した検出器の監視と評価
3. 学会等名 天文学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 西野玄記
2. 発表標題 Simons Array実験の進捗報告
3. 学会等名 物理学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Haruki Nishino
2. 発表標題 Data acquisition and management system for the CMB polarization experiment: Simons Array
3. 学会等名 SPIE (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 西野玄記
2. 発表標題 POLARBEAR-2実験の現状
3. 学会等名 物理学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 長谷川雅也
2. 発表標題 宇宙マイクロ波背景放射偏光観測実験POLARBEAR-2 -観測開始に向けた観測サイトでの準備状況-
3. 学会等名 天文学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 金子大輔
2. 発表標題 POLARBEAR-2A較正光源の現地への設置と運用
3. 学会等名 天文学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 西野玄記
2. 発表標題 POLARBEAR-2/Simons Array実験の現状
3. 学会等名 物理学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 南雄人
2. 発表標題 将来衛星計画LiteBIRDのための宇宙線の影響を軽減する超伝導検出器の研究
3. 学会等名 物理学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 長谷川雅也
2. 発表標題 POLARBEAR-2/Simons Array実験 -本観測に向けた観測機器コミッショニング状況
3. 学会等名 天文学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 金子大輔
2. 発表標題 POLARBEAR-2aの高温黒体放射光源を利用した検出器データの検証と較正
3. 学会等名 天文学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Masaya Hasegawa
2. 発表標題 Cosmic inflation and Neutrino masses at POLARBEAR/Simons Array
3. 学会等名 日米40周年シンポジウム（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Masaya Hasegawa
2. 発表標題 Contributions from IPNS/KEK
3. 学会等名 LiteBIRDキックオフシンポジウム（国際学会）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Masaya Hasegawa
2. 発表標題 Simons Array
3. 学会等名 新学術「加速宇宙」シンポジウム（国際学会）
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>KEK-CMBグループ cmb.kek.jp POLARBEARグループweb http://bolo.berkeley.edu/polarbear Masaya Hasegawa's Homepage http://research-up.kek.jp/people/masayan/index.html 量子場計測システム国際拠点 www2.kek.jp/qup KEK-CMBグループ cmb.kek.jp POLARBEARグループweb http://bolo.berkeley.edu/polarbear Masaya Hasegawa's Homepage http://research-up.kek.jp/people/masayan/index.html 量子場計測システム国際拠点 www2.kek.jp/qup KEK-CMBグループ cmb.kek.jp POLARBEARグループweb http://bolo.berkeley.edu/polarbear Masaya Hasegawa's Homepage http://research-up.kek.jp/people/masayan/index.html KEK-CMBグループ</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	羽澄 昌史 (Hazumi Masashi) (20263197)	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・教授 (82118)	
研究分担者	金子 大輔 (Kaneko Daisuke) (60790342)	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・研究員 (82118)	
研究分担者	西野 玄記 (Nishino Haruki) (80706804)	公益財団法人高輝度光科学研究センター・情報技術推進室・テニュアトラック研究員 (84502)	
研究分担者	南 雄人 (Minami Yuto) (80788240)	大阪大学・核物理研究センター・特任助教(常勤) (14401)	
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)	

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	カリフォルニア大学バークレー校	カリフォルニア大学サンディエゴ校	ローレンス・バークレー国立研究所	他14機関
カナダ	マギル大学	ダルハウジー大学		
英国	マンチェスター大学	インペリアルカレッジロンドン	ケンブリッジ大学	他2機関
フランス	オルセー大学	サクレー大学	パリ大学	
イタリア	SISSA			