

令和 5 年 6 月 4 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(A)（一般）

研究期間：2019～2022

課題番号：19H00674

研究課題名（和文）ビッグバンの起源を探る-最先端の超伝導技術と史上最大の望遠鏡群で挑むCMB測定

研究課題名（英文）Exploration of the origin of Big Bang - CMB observation using the largest telescope array and cutting-edge superconducting technologies

研究代表者

日下 暁人（Kusaka, Akito）

東京大学・大学院理学系研究科（理学部）・准教授

研究者番号：20785703

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 34,400,000円

研究成果の概要（和文）：Simons Observatoryは、標高5200mのチリ、アタカマ高地から宇宙背景放射（CMB）を精密観測する、史上最大規模の地上CMB実験である。本研究は、Simons Observatoryにおいて精密なCMBの偏光測定の際となる半波長板の開発・作成とその性能評価に成功した。これを用いて、近く観測をはじめめるSimons Observatoryは、高精度で「宇宙の始まり」の研究を行う。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究により、高い精度で宇宙背景放射（CMB）の偏光観測を行うための展望が開けた。この成果を用いて近くはじまるCMB精密観測により、我々の住む宇宙がどうやって始まったのかという根源的な問いに対する研究が大きく進むことが期待され、社会的意義は大きい。また、本研究では日本企業との共同開発による独自技術が複数採用されており、国際プロジェクトの中で日本にしかできない貢献を行っている。

研究成果の概要（英文）：The Simons Observatory will make an extremely accurate measurement of the cosmic microwave background radiation (CMB) on the Atacama plateau, Chile, at an altitude of 5200m. In this research, we succeeded to develop and evaluate a half-wave plate (HWP) system for Simons observatory, which is the key to the accurate measurement of the CMB polarization. Using the developed HWP technology, Simons Observatory will start observations to explore the beginning of the Universe.

研究分野：宇宙物理学

キーワード：宇宙マイクロ波背景放 インフレーション 超伝導

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

ビッグバンはなぜどうやって起きたのか？現代物理学の二つの柱である一般相対性理論と量子力学は統合できるのか？これら宇宙論と物理学の究極の問いに答えるべく、申請者は2016年に7名の共同研究者と共に**史上最大規模の地上 CMB 実験 Simons Observatory (SO)** プロジェクトを立ち上げた。SOは複数の望遠鏡と史上最多数の検出器を用いる国際共同実験である(<https://simonsobservatory.org/>)。2017年のプロジェクト再評価を経て、約80億円の米国予算を得て2020年代前半の観測開始に向け進行中である。SOは、これまでの観測を大きく上回る精度でのCMB観測を行う。初期宇宙の物理をはじめ、宇宙進化を通じた宇宙論観測、銀河団観測などいくつもの分野で革新的な科学成果を生み出すことを目指す。従来実験を大きく上回る感度は、約6万の超伝導検出器により達成され、そのための検出器生産・多検出器読み出し・大型望遠鏡開発・そしてサイトの整備にプロジェクト予算の大半が費やされる。本研究は、このような検出器システム大規模化とは相補的な研究手法により、系統誤差と雑音の低減を行うことでプロジェクトに貢献し、SOによる高感度でのCMB測定に鍵となる役割を果たす。

### 2. 研究の目的

インフレーション由来のBモード検出に向け、代表者らはチリ・アタカマ高地からCMB偏光の測定を行ってきた。これらの測定を行う上での**最大の困難の一つは、測定対象となるCMB偏光の角度スケールが2~10度と大きい事**に起因する。CMB観測では、望遠鏡を連続的に動かし天球上を「走査」することでCMB信号を時系列データに焼き直し、データ解析によりそれをマップとして再構成する。「走査」の典型的な速度は毎秒1度程度であり、2~10度角の信号は、時系列データにおいて2~10秒(~0.1Hz)という比較的長い時間スケールに対応する。~0.1Hzでは大気揺らぎによる雑音が検出器本来の雑音を1~2桁上回る。系統誤差も、大角度スケールで大きくなる傾向がある。~0.1Hzにおける雑音や系統誤差は、異なる検出器の間で相関しており、複数の検出器の間で平均を取っても減少しないので、**検出器数を増やして感度を向上させるという、近年のCMB実験を推進してきた方法論だけでは通用しない。**

SOは検出器数でCMB実験の先端に行く。それに応じて、**系統誤差と長い時間スケールの雑音を抑制することが、最高感度でのインフレーション探索には不可欠であり、それこそが本研究の目的である。**

### 3. 研究の方法

連続回転式低温半波長板を開発し(図1)、これをSOの大角度専用望遠鏡に設置・観測することで、**最高感度でのインフレーション探索を可能にする。**複屈折素材からなる半波長板に入射した直線偏光した光は、半波長板を通過することでその偏光角が回転する。この回転の大きさは、複屈折素材の結晶軸と入射偏光がなす角度 $\chi(t) = 2\pi ft$ に比例する( $f$ は半波長板の回転周波数で2Hz程度)。入射光が偏光 $Q(t)$ と無偏光強度 $I(t)$ を持つとき、偏光感度を持つ検出器により測定される時系列データ $d(t)$ は、以下の式により表される。

$$d(t) = I(t) + Q(t) \cos 4\chi(t)$$

半波長板により、もともと $\sim 0.1\text{Hz}$ の偏光信号が $8\text{Hz}$ 付近に変調され、やはり $\sim 0.1\text{Hz}$ 付近に大きな大気揺らぎによる雑音を持つ $I(t)$ と分離される。データ解析において $d(t)$ に変調関数 $\cos 4\chi(t)$ をかけて $4\text{Hz}$ 付近にカットオフを持つローパスフィルタをかけると、 $Q(t)$ の $\sim 0.1\text{Hz}$ の部分が再構成される一方、 $I(t)$ の $\sim 0.1\text{Hz}$ の部分は変調関数をかけたことにより $8\text{Hz}$ 付近に移動し、ローパスフィルタにより除去される。これにより、検出器本来の雑音に比べ $1\sim 2$ 桁大きかった $I(t)$ の低周波数ゆらぎは、 $\sim 0.1\text{Hz}$ では無視できるレベルに低減される。また、半波長板と焦点面の間のレンズなどによる「偽偏光」(装置に起因する偽の偏光で、大きな系統誤差要因)についても、半波長板による変調を受けないため、 $I(t)$ の $\sim 0.1\text{Hz}$ の部分と同様に除去される。本研究の推進する「連続回転式低温半波長板」により、 $\sim 0.1\text{Hz}$ の雑音と系統誤差を大幅に低減することで、最高感度でのインフレーション探索が可能になる。

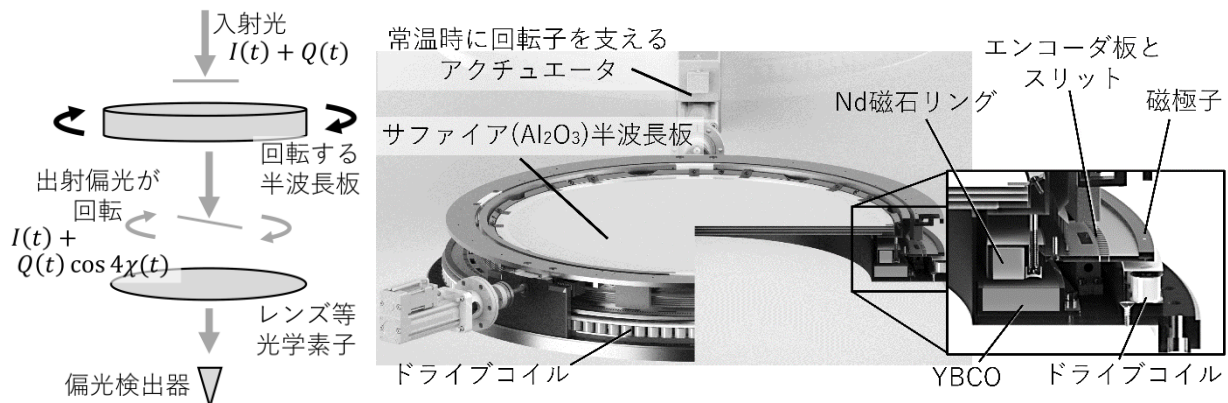


図 1: 左:連続回転式半波長板の原理を示す模式図。入射偏光 $Q(t)$ は半波長板により変調され、変調されない強度信号 $I(t)$ の $\sim 0.1\text{Hz}$ 成分と弁別される。光学素子による系統誤差も変調を受けないため、大幅に低減する。右:申請者らが設計した低温連続回転式半波長板の概略図。サファイア半波長板、ネオジウム(Nd)磁石リング、エンコーダ板、それに埋め込まれた磁極子が浮揚・回転する回転子をなす。YBCO(高温超伝導体)、ドライブコイルなどがステータ(固定子)をなす。Nd磁石リングが一様な磁場を持つため、YBCOと組み合わせてベアリングとして働く。エンコーダ板にスリットがあり、上下に配置した発光ダイオードとフォトダイオードにより回転角を読み出す。磁極子として小型永久磁石をSN交互に配置し、エンコーダ読み出しに同期してドライブコイルに電流を流すことで、回転を実現する。サファイアの光学直径は約 $50\text{cm}$ 。

#### 4. 研究成果

##### 半波長板回転機構の研究開発

Simons Observatory においては、3 台の小口径望遠鏡がインフレーション探索に特化した観測を行う。本研究では、この3 台のための低温半波長板システムの開発を担い、それを成功させた。本研究がこの回転機構の設計と作成を担っただけでなく、大学院生を米国に派遣し望遠鏡への統合を主導するなど、望遠鏡作成の中で主導的な役割を果たすと共に、若手・学生の育成においても成果を得た。また、回転機構の作成にとどまらず、その回転による振動や磁場が超伝導検出器に与える影響の評価し、これらの系統誤差を十分に小さくするための改善を施した。加えて、超伝導浮遊される回転子の下垂の精密な評価方法や、発熱を抑えた高効率のドライブ方法など、当初想定していなかった改善

も達成した。これらの研究成果をまとめた投稿論文が投稿目前の段階にあり、Simons Observatory グループの内部査読中である。本研究の大きな貢献もあり、Simons Observatory は 2023 年に試験観測開始、2024 年から本格観測をはじめの見込みである。

### **半波長板光学素子の研究開発**

複屈折素材であるサファイアを用いた光学素子の開発においても大きな進捗を得た。複屈折素材からなる半波長板は本質的に狭帯域の光学素子であるが、複数の半波長板を重ねることで広帯域が実現できる。我々は、サファイアを 3 枚重ねることで Simons Observatory 検出器の帯域幅に対応する広帯域の半波長板光学素子を開発・作製した。サファイアの光軸測定法、重ねたサファイアの張付け方法、そして広帯域の防反射加工方法など、作成に必要な技術を開発・確立した。ここで作製された光学素子は、Simons Array がチリ観測サイトにおける使用・性能評価を既にはじめており、Simons Observatory においても光学試験を行い、期待される性能を確認した。

### **半波長板を用いた観測におけるデータ解析の進展**

我々が開発した連続回転式半波長板を用いた場合、取得したデータにおける偏光信号は 8 Hz の変調を受けるため、その解析のために特化した復調のためのソフトウェアの開発が必要となる。特に、温度揺らぎに比べて 9 桁近く小さなインフレーション由来の偏光信号検出を目的とする本研究においては、この復調をいかに精密に行うかが鍵となる。取得されたデータに欠陥があることは避けられず、エンコーダ信号を解析してデータ中の欠陥を修復することや、検出器データのグリッチの除去を復調処理への影響を最小にするように行うなど、一つ一つの解析ステップを吟味して行う必要がある。我々はこのためのソフトウェアの開発を進め、その一部は実験室で取得したデータを用いて検証した。2024 年の本格観測開始に向け、取得したデータを即座に解析できる体制が整いつつある。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 4件/うちオープンアクセス 1件）

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 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 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 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., et al.	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 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20件（うち招待講演 3件 / うち国際学会 8件）

1. 発表者名 山田恭平, 他 Simons Observatory Collaboration
2. 発表標題 Simons Observatory実験の低温半波長板回転機構の性能評価
3. 学会等名 日本物理学会2021年秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 K. Yamada, et al.
2. 発表標題 Development of inductively coupled position and temperature sensors for cryogenic rotating half wave plate
3. 学会等名 The 19th International Workshop on Low Temperature Detectors (LTD19) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 坂栗佳奈、他
2. 発表標題 低温で用いるサファイア・アルミナの広帯域・多層反射防止膜製作
3. 学会等名 日本物理学会2021年秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 坂栗佳奈、他
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 Kana Sakaguri, et al
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 The 19th International Workshop on Low Temperature Detectors (LTD19) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 山田 恭平 他
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 坂栗 佳奈 他
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 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 他
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 坂栗 佳奈 他
2. 発表標題 CMB観測に用いるサファイア・アルミナフィルタの反射防止膜製作と性能評価
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 Junna Sugiyama for Simons Observatory collaboration
2. 発表標題 Development of a Cryogenic Half-wave Plate for Simons Observatory
3. 学会等名 International Conference on the Physics of the Two Infinities (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Akito Kusaka
2. 発表標題 The next generation of CMB observation that will realize the neutrino mass measurement and the exploration of super-TeV physics
3. 学会等名 International Conference on the Physics of the Two Infinities (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Akito Kusaka
2. 発表標題 Cosmic Microwave Background - challenges and future prospect
3. 学会等名 Frontiers in Cosmology (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年



1. 発表者名 Akito Kusaka
2. 発表標題 Exploration of Inflation and Dark Universe through Cosmic Microwave Background
3. 学会等名 2nd International Symposium on Trans-Scale Quantum Science (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 坂栗佳奈
2. 発表標題 CMB 偏光観測に用いる反射防止膜の開発
3. 学会等名 日本物理学会 2022 年秋季大会 企画講演 (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 杉山純菜, 他 Simons Observatory コラボレーション
2. 発表標題 Simons Observatory 実験に用いる低温偏光変調器の効率化と性能評価
3. 学会等名 日本物理学会 2022 年秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 杉山純菜, 他 Simons Observatory コラボレーション
2. 発表標題 Simons Observatory 実験に用いる低温偏光変調器の運転試験および望遠鏡との統合試験
3. 学会等名 日本物理学会 2023 年春季大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 茅根 裕司 他
2. 発表標題 インフレーション起源Bモード検出に向けたE/Bモード分離手法の性能評価
3. 学会等名 日本天文学会2022年秋季年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yuki Sakurai
2. 発表標題 Exploring the origin of the universe: Cosmic Microwave Background Experiment
3. 学会等名 2nd Japan Canadian Frontier of Science (JCFoS) Symposium (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 桜井雄基、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 の現状報告
3. 学会等名 日本天文学会2023年春季年会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Yuki Sakurai, et. al.
2. 発表標題 Instrumental Performance and Scientific Requirements of Polarization Modulation Unit for LiteBIRD low frequency telescope
3. 学会等名 SPIE Astronomical Telescopes + Instrumentation (国際学会)
4. 発表年 2022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
研究分担者	櫻井 雄基 (Sakurai Yuki) (50780847)	岡山大学・自然科学学域・特任助教  (15301)	
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	茅根 裕司 (Chinone Yuji) (90649675)	東京大学・大学院理学系研究科(理学部)・特任助教  (12601)	2022年よりKEKへ異動
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)	

	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
研究協力者	高倉 理 (Takakura Satoru)		

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
研究協力者	マツダ フレドリック  (Matsuda Frederick)		

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研究所	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	他2機関