

科学研究費助成事業（基盤研究（S））公表用資料
〔令和2（2020）年度 研究進捗評価用〕

平成29年度採択分
令和2年3月31日現在

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

Quest for the origin of the Big-Bang and measurements of sum of the neutrino masses by using the world's largest CMB telescope array

課題番号：17H06134

田島 治 (TAJIMA, OSAMU)

京都大学・大学院理学研究科・准教授



研究の概要（4行以内）

史上最大のCMB望遠鏡群プロジェクト“Simons Observatory”の望遠鏡の開発と観測、データ解析を国際共同で行う。初期データに基づいた性能実証で、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和の測定を世界最高感度で行えることの展望を示す。

研究分野：宇宙物理学

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。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。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奇パリティ・パターン「Bモード」を刻印する。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（ $<1^\circ$ ）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でもあり、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。

2. 研究の目的

本研究では、史上最大のCMB望遠鏡群Simons Observatory (S0)によって、これらの研究を追究する。S0はこれまで日本が貢献してきた複数の有力実験が融合した国際共同プロジェクトであり、日本が培ってきた技術・知見を進化させる。

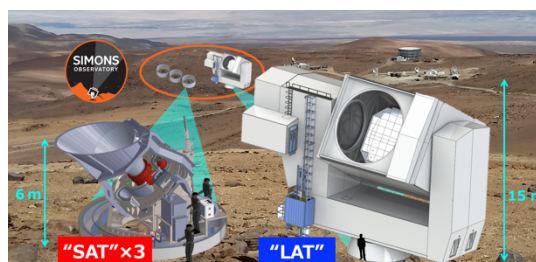
チリ・アタカマ高地（海拔5,200m）に複数の望遠鏡を設置、史上最多の検出器を搭載し、宇宙創成、ニュートリノ質量、銀河団等、幅広いサイエンスを史上最良精度で追究する。初期データに基づき、大角度スケールにおける性能を定量的に評価し、その後観測を数年

継続することで、目標感度（ $\sigma(r) = 0.003$ ）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 meVに到達する道筋を定量的に示す。

3. 研究の方法

S0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（Small Aperture Telescope: 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（Large Aperture Telescope: LAT）1台を製作し、目的達成を目指す（下図）。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) 超伝導検出器の数と感度の両立、によって達成される。

これらの要素を統合した望遠鏡を国際共同で製作・設置し、CMB観測を行う。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。望遠鏡の焦点面に搭載する超伝導センサーの開発は多数のCMB実験で実績をもつ米国グループが主担当する。



4. これまでの成果

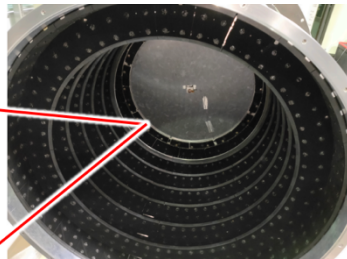
提案当初では「概念」にとどまっていた SAT を具体的なデザインとして成立させることに成功した。さらに、3 台製作することで原始重力波の探索感度を最大化する見通しを立てた。特に、日本グループは波動光学シミュレーション研究に中心的な役割を果たした。この実績もあり、SAT の心臓部とも言える OT の製作を担当することになった。また、較正装置の開発を新たに主担当することになった。これらは、国際共同研究チームの中で日本グループの信頼と実績が向上した結果であり、当初の期待以上に進展している。

OT は 1K もの極低温に保つ必要があり、その構造体は純度の高いアルミニウムで構築することにした。一方、純度の高いアルミニウムの機械的強度と公差を要求値（もっとも厳しい箇所でも 0.1mm）に保つ必要もある。最終的に、構成するパーツを一回り大きく作り、一度組み上げた後に切削加工をすることで要求精度を達成した。

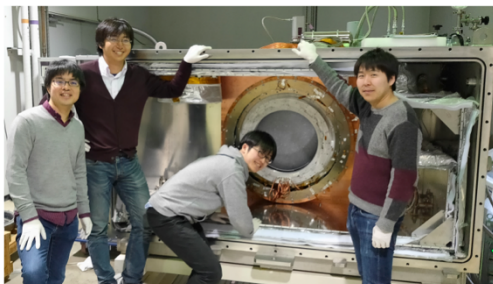
光学シミュレーション研究を深めていく過程で、OT の内壁面の光反射率を 1% 未満（従来の CMB 望遠鏡の 1/10 未満）に抑制することで、高い観測感度を担保できることが判明した。その為には、極低温にできること（つまり熱伝導が良いこと）と、電波吸収率が高い事を両立せねばならない。このような性質を持つ「黒体」を、3D プリント技術を用いて開発した。従来の極低温用黒体と比較して一桁優れた性能を達成したことで、高い観測感度を担保できる見通しが立った。

そして、黒体を設置した OT を、極低温に冷却する試験も行った。下図に冷凍機内に OT を設置した際の写真を示す。極低温に冷却した OT 構造体の要所要所で生じている熱勾配の測定を行い、それが当初の熱設計仕様を満たすことが確認できた。また、OT（日本担当

3D プリント技術
を応用した電波
吸収材“黒体”



黒体を貼り付け完成した OT 構造体



OT の冷却試験の様子

パーツ）と焦点面（米国担当パーツ）の組み上げ試験も日本にて行い、こちらも要求した公差を満たされている事を確認した。

5. 今後の計画

今後は SAT 1 号機用の OT を日本で完成させ、国際共同で SAT 1 号機をチリ・アタカマ高地に設置し、観測開始を目指す。また、較正装置も開発し、SAT 1 号機の偏光応答性能の理解に役立てる。そして、初期データを解析し、SAT 1 号機が目標感度を達成していること、十分に小さな系統誤差を達成していること、それぞれを定量的に示す。

以上と並行して、SAT 2 号機、3 号機を製作し、本研究期間内の観測開始も目指す。

6. これまでの発表論文等（受賞等も含む）

発表論文

- “Half-meter Scale Superconducting Magnetic Bearing for Cosmic Microwave Background Polarization Experiments”, Y. Sakurai, *et al.*, Journal of Physics: Conference Series (JPCS), Proc. of ISS2019, 掲載確定。
- “Small Aperture Telescopes for the Simons Observatory”, Amir M. Ali, *et al.*, J. Low Temp. Phys. 掲載確定。
- “Production method of millimeter-wave absorber with 3D-printed mold”, S. Adachi, *et al.*, Review of Scientific Instruments 91, 016103 (2020).
- “The Simons Observatory: Astro2020 Decadal Project Whitepaper”, The Simons Observatory Collaboration, Bull. Am. Astron. Soc. 51, 147 (2019).
- “The Simons Observatory: Science goals and forecasts”, The Simons Observatory Collaboration, Journal of Cosmology and Astroparticle Physics 1902, 056 (2019).

一般講演会

- 京都大学市民講座「物理と宇宙」（2019.10.20）講演者：田島治「宇宙背景放射でみる宇宙のゆらぎと量子のゆらぎ」
- 京都大学×チャンネル・ネクサス・ホール特別企画「科学と音楽の出会い」（2019.10.11）講演者：田島治「宇宙背景放射でみる量子宇宙 - 宇宙創世を奏でた楽器の音色」
- フロムページ社「夢ナビライブ 2019-大阪会場」（2019.7.24）講演者：田島治「宇宙背景放射でみる量子宇宙のゆらぎ」

7. ホームページ等

- <https://www.simonsobservatory.org/>
- <https://www-he.scphys.kyoto-u.ac.jp/research/CMB/index.html>