実験的宇宙物理研究グループ(CMB グループ)活動報告

2026 年 11 月 6 日（文責）長谷川　雅也

1. イントロダクション: ビッグバン以前を探る CMB 偏光観測と CMB グループ

宇宙マイクロ波背景放射(Cosmic Microwave Background, CMB と略記)は宇宙最古の電磁波である。CMB の観測に対して二度のノーベル物理学賞が授与されていることから明らかなように、私達が住むこの宇宙の誕生と進化を研究するために CMB の観測は欠かせない。

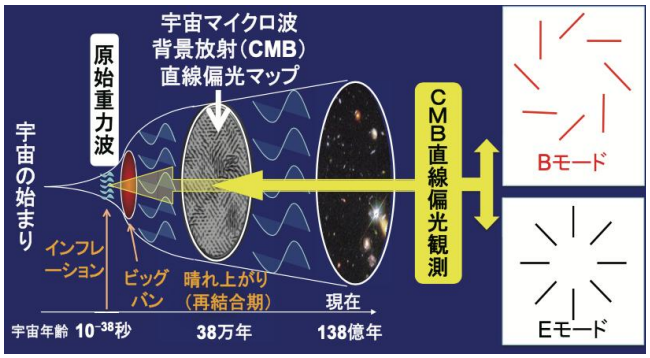

図 1:宇宙の進化と宇宙マイクロ波背景放射(CMB)

KEK-CMB グループ（正式名称は実験的宇宙物理研究グループ）は 2007 年度に活動を開始した。現在の構成は准教授 1（長谷川)、特任助教 1(高倉)、研究員 2 名(水野・廣瀬)、客員教授 1（田島)、客員准教授 1 (安達)、大学院生 4 名である（特別共同利用研究員として受け入れている外部の 1 名を含む)。グループの目的は、**「宇宙を実験室として、物理学の根本法則（「宇宙のルールブック」）を実験的に探求する」**ことである。現在は「CMB 観測によるインフレーション宇宙と背後にある量子重力理論の検証」が中心テーマである。インフレーション宇宙仮説は、熱いビッグバン以前に宇宙が急激な加速膨張を起こしたとする仮説で、その検証は現代宇宙論の最重要課題の一つとされている。インフレーションは原始重力波の存在を予言し、原始重力波は CMB 偏光マップに「B モード」と呼ばれる特殊な偏光パターンを刻印する。したがって、B モード偏光の測定を通してインフレーションの実験的検証が可能となる。まさに「時空に浮かぶ天然の原始重力波記録装置」であり（図 1 参照)、現在、原始重力波を発見する最も感度の高い方法となっている。さらに CMB 偏光観測は、インフレーションの背後にある量子重力理論（超弦理論等）を検証できる現在唯一無二の手段であるため、高エネルギー物理学の発展にも寄与できる。以上の目的を達成するため、グループでは**チリアタカマ高地における地上観測：Simons Observatory および Simons Array (観測は終了)を中心に活動を行っている。並行して次世代 CMB 実験に向けた基礎開発にも寄与している。**以下では、地上観測実験の今年度の進展を中心に報告する。

2. 地上観測の進展: Simons Observatory の現状

CMB グループは、現在 Simons Observatory (以下 SO)をメインプロジェクトとして活動を行っている。SO は 2016 年より準備を開始した国際共同実験であり、本グループは当初期からの参加グループの一つとして日本国内での活動の立ち上げと、観測装置（特に光学素子）の開発で貢献をしてきた。

SO は原始重力波探索に特化した小口径望遠鏡(SAT) 3 台および宇宙の大規模構造に感度をもつ大口径望遠鏡(LAT)1 台の計 4 台からなる世界最大の望遠鏡”群”実験である。2024 年度にファーストライトを達成して以降、望遠鏡のコミッショニングおよび科学観測を進めてきたが、この半年間で全ての望遠鏡が観測体制に入り、科学観測が本格的に進展している。この成果については Simons 財団からもニュース記事として紹介された(図 2)。

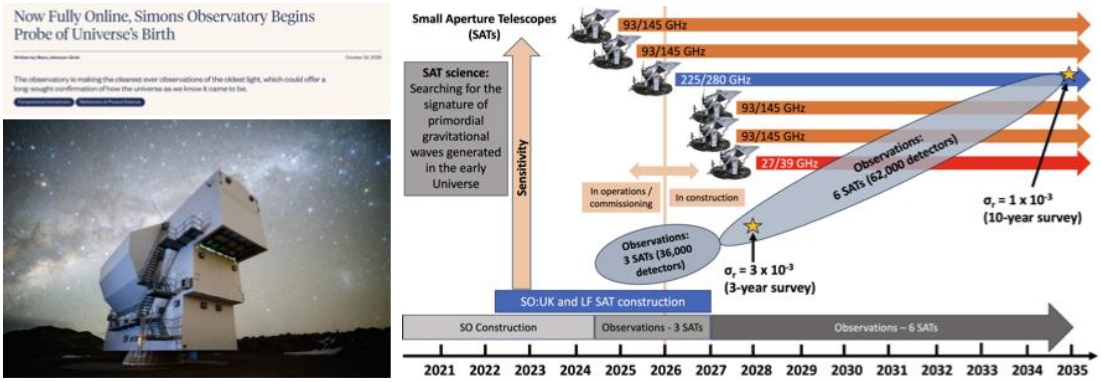

図 2. コミッショニングから本観測に移行した Simons Observatory (記事へのリンク)

また、コミッショニング期間に取得したデータを用いた装置性能の評価が進み、その結果をまとめた論文を投稿した [1]。検出器システム全体として、先行実験 POLARBEAR と比較して約 10 倍の感度向上を実現しており、今後の高精度 CMB 偏光観測に向けた性能が実証されつつある。さらに、アップグレード計画を含めた原始重力波探索感度の詳細評価をまとめた論文も JCAP 誌に掲載された [2]。

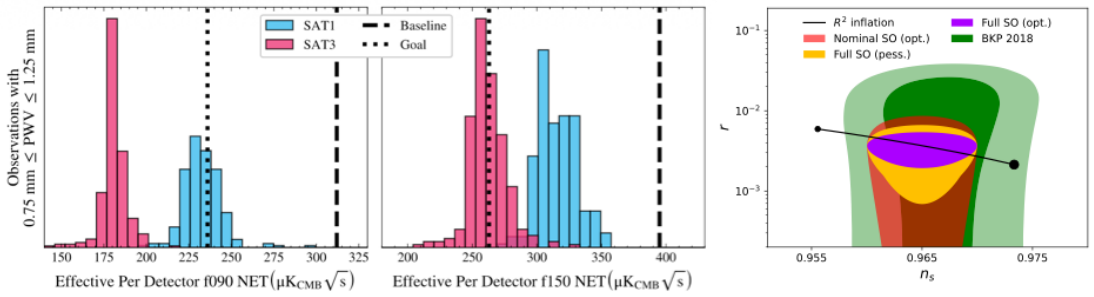

図 3. (左) コミッショニングデータを用いた性能評価結果。要求感度を達成している。(右) アップグレード計画を含めた Simons Observatory 実験の原始重力波に対する期待感度。10 年の観測で σ_r=1.0 x 10^{-3} の感度での探索を目指している。

また、SO では SAT を 3 台追加して 6 台体制にするアップグレード計画も進めている。このうち 1 台については、日本グループが中心となって、低周波帯（前景放射）に高い感度を有する SAT-LF (いわゆる JSAT)の開発を進めている。日本グループ全体の活動としては、チリ観測サイトに置いて旧 ACT 望遠鏡の基礎を再利用した望遠鏡プラットフォームの設置が完了し、京都大学ではクライオスタットの組み立ておよび冷却試験が進展している。2027 年の観測サイトへの展開を目指して、各コンポーネントの製作・評価およびシステム統合を進めている。

本グループも、アップグレード機の要素開発および基礎研究、特に低温や大型の装置の扱いが必要な(大学では比較的困難な箇所の)開発を中心に貢献している。この半年間では、英国グループが担当する 2 台のアップグレード機に用いるアルミナ赤外線フィルター4 枚および大型サファイアを用いた偏光変調装置（半波長板）2 台の製作・光学評価を完了し、現地に向けて発送を完了した。また、超伝導センサーの性能を保つための磁気シールド、迷光を低減するためのフォアバッフル等の調達を進めた。さらに、JSAT 向け光学素子の開発や、低温読み出し系の試験準備も進めている。

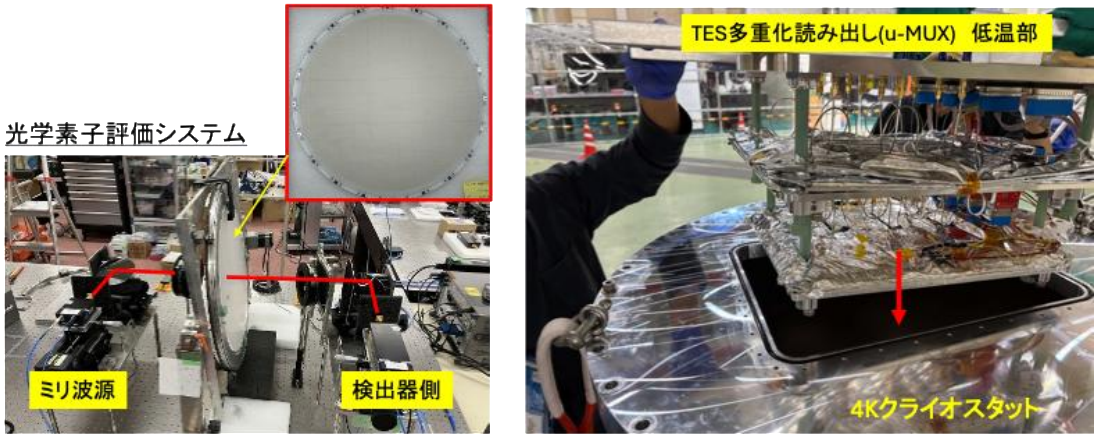

図 4: (左) UK アップグレード機用の半波長板と VNA を用いた性能評価の様子、(右) TES 多重化読み出しに用いる低温読み出し系の冷却試験。

一方、前身の Simons Array 実験のデータ解析についても成果が得られている。検出器アレイの性能および目標感度に到達しなかった要因について詳細に評価した総括論文が Review of Scientific Instruments 誌に掲載された [3]。また、新たな科学目標として CMB の円偏光探索を進めており、1/4 波長板を用いた円偏光測定手法について、天体観測による原理実証を行った結果を論文としてまとめ、arXiv に投稿した [4]。現在、この手法を用いた CMB 円偏光の探索に向けてデータ解析を進めている。

3. 要素技術開発および基礎開発

観測装置の高度化に向けた要素技術開発も継続的に進展した。

- アップグレード機に用いるアルミナ赤外線フィルターおよびサファイア半波長板の製作・光学評価を進め、英国向けの光学素子の納入を完了
- 低周波帯に対応した光学素子の反射防止膜の開発を開始し、スケールモデルを用いた原理検証を実行
- JSAT のクライオスタット冷却試験に参加し、温度計の製作・設置等に貢献するとともに、超伝導センサー読み出し系の低温試験に向けた準備を推進
- 次世代 CMB 実験に向けて開発を進めてきた、電気絶縁性を有する極低温熱リンクに関する論文が IEEE Transactions on Applied Superconductivity 誌に掲載 [5]。本技術は極低温環境における熱設計の自由度向上に寄与することが期待される

また、前回報告した CMB 観測技術を応用した暗黒光子探索（100 GHz 帯）についても、関連する要素技術の開発を進めている。CMB 観測で培ってきたミリ波受信および極低温センサー技術を、新たな研究分野へ展開することを目指している。

4. コミュニティ連携・アウトリーチ・教育活動

国内外、および宇宙理論グループとの連携・学術活動も活発に行った。

- 次世代 CMB 観測に向けた国際ワークショップ「Challenges at the CMB Frontier」を長野県諏訪市にて開催（6/29〜7/3）。長谷川および茅根が Scientific Organizing Committee（SOC）のメンバーとして運営に参画し、廣瀬・高島・藤野がポスター発表を行った。
- SO 日本グループの全体会議を開催（4/2、7/15）。7 月の会議では高倉がオーガナイザーを務めた。また、トロント大学で開催された SO 全体会議（7/20〜7/24）において、高倉・茅根・高島が研究成果を報告した。
- 日本物理学会において、CMB 観測に関する 3 件、暗黒物質探索に関する 2 件の計 5 件の研究成果を報告した。
- 天文夏の学校にて高島・渡邉が SO に関する研究成果を発表した（7/28〜7/31）。
- 理論グループと合同で開催しているセミナーシリーズ（https://cosmophysics.gitlab.io/jointseminar.gitlab.io/）を継続し、第 5 回（8/21）には雲南大学の島袋隼人氏を、第 6 回（10/19）には LBNL の Aritoki Suzuki 氏を招いた。第 6 回には対面・オンラインを合わせて約 50 名が参加した。

また、アウトリーチ活動として、KEK 一般公開に置いて「冷やすと見える、宇宙の始まり」と題したブース展示を行い、CMB 観測や超伝導センサーを用いた宇宙研究について一般来場者に紹介した。

主要な論文リスト

[1] “Simons Observatory: Commissioning of the Mid-Frequency Small Aperture Telescopes”, K. Harrington, Y. Chinone, M. Hasegawa O. Tajima et. al, arXiv:2609.26938 (2026), Submitted to ApJ.
[2] “The Simons Observatory: forecasted constraints on primordial gravitational waves with the expanded array of Small Aperture Telescopes”, The Simons Observatory Collaboration, JCAP 2026 (04) 051 (2026). https://doi.org/10.1088/1475-7516/2026/04/051
[3] “Performance characterization of the transition-edge sensor array, readout system, and optical coupling of the Simons Array cosmic microwave background experiment”, N. Farias, M. Hasegawa et al., Review of Scientific Instruments (2026). https://doi.org/10.1063/5.0319093
[4] “Development and characterization of a millimeter-wave circular polarization observation method using a quarter-wave plate with Simons Array”, K. Sakaguri, M. Hasegawa et. al, arXiv:2610.19621 (2026).
[5] “Thermal Conductance Characterization of Electrically Isolated Thermal Strap for Cryogenic Application”, S. Hasegawa, M. Hasegawa, H. Akamatsu, D. Kaneko, R. Takaku, T. Fujino, IEEE Transactions on Applied Superconductivity (2026). https://ieeexplore.ieee.org/document/11538371