

I

研究室別 2021年度 研究活動報告

0.1 日下研究室

宇宙は高温高密度の原始宇宙から始まり、膨張・冷却を経て現在に至るとされる。日下研究室では、宇宙マイクロ波背景放射 (Cosmic Microwave Background radiation, CMB) の観測を通じて、この高温高密度の原始宇宙がどうやって作り出されたのかを調べ、宇宙の進化が何によって支配されているのか、宇宙物理の、そして素粒子物理の根本にも関わりうる謎を解き明かすことを目指している。

インフレーション仮説によれば、宇宙創成 10^{-32} 秒の間に時空の加速度的膨張が起き、高温高密度の原始宇宙が作られた。この仮説の決定的証拠となるのが重力場の量子ゆらぎに起因する「原始重力波」である。この重力波が、「*B* モード」と呼ばれる負のパリティを持つパターンを、CMB のおよそ 2 度の角度スケールに刻印する。我々が探索するこのパターンが検出されれば、インフレーション宇宙論を証明するだけでなく、重力の量子化の確認という、現代物理学における一大ブレイクスルーとなる。

一方、CMB の精密測定を通して未知の粒子の探索と宇宙進化メカニズムの解明も目指している。地球に届く過程で、CMB は「暗黒物質」による重力レンズ効果の影響を受ける。この効果を測定することで、宇宙進化を探り、それに影響を及ぼす「宇宙背景ニュートリノ」の質量を測定することが出来る。また、CMB が銀河団を通過する際には、そこに分布する高エネルギー電子との相互作用により周波数スペクトルにゆがみが生じる。これは Sunyaev-Zel'dovich (SZ) 効果と呼ばれ、この効果を CMB 観測を通して測定することで、銀河団の分布図を作り、宇宙進化、そしてそれを司る暗黒エネルギーや宇宙背景ニュートリノを探ることが出来る。重力レンズ効果や SZ 効果は、インフレーションとは異なり、より小さな $1 \sim 3$ 分角の角度スケールに現れる。

我々は、チリ・アタカマ高地で観測を継続してきた POLARBEAR 実験、その後継である Simons Array 実験を通して研究を進めてきた。これに加えて、Simons Array と Atacama Cosmology Telescope (ACT) のグループを統合して発足した Simons Observatory 実験においても、2023 年の観測開始へ向けた設計・開発を進めている。

0.1.1 POLARBEAR 実験

POLARBEAR 実験は、インフレーション測定と重力レンズ効果の両方を同時に測定する事を目指してデザインされている。POLARBEAR 実験は 2012 年から 2016 年末まで観測を行い、これまでに 10 報以上の科学論文を出版してきた。データ解析の進展としては、2020 年に報告したインフレーション測定に特化したワイド観測データの再解析を行った結果、統計量を約 80% 向上させることに成功した [1]。その他現在までに、CMB 偏光データの AC oscillation を使った Axion-like particle (ALP) への制限解析、ワイド観測データによる宇宙論的複屈折解析や宇宙論的円偏光への制限解析が進められている。

0.1.2 Simons Array 実験

Simons Array 実験は POLARBEAR 実験の後継であり、POLARBEAR のおよそ 6 倍に当たる一台あたりおよそ 7,000 チャンネルの検出器を擁する望遠鏡を、最終的に合計 3 台同時運用することで POLARBEAR 実験の約 20 倍の感度を実現することを目指している。

2020 年度に引き続き 2021 年度も、世界的な新型コロナウイルスの流行による影響が、観測や現場作業に支障を来してきた。そんな中でも観測サイトのエンジニアと連携しながら、既に運用が始まっている 1 台目の望遠鏡による較正観測・科学観測を可能な限り進めてきた。これまでのデータ解析により検出器の感度・ノイズ特性、ゲイン、時定数、偏光角、更に望遠鏡のビーム・指向性能評価等の初期パラメータの決定を行った。また一部の CMB 観測データを元に「ベンチマークデータセット」を定義し、観測データの理解と *B* モード解析パイプラインの開発を進めている。特に観測された時系列データをフィルタリングすることで生じる *E* モードから *B* モードへの漏れ込みを、「観測行列」を元に導出した「純 *B* モード固有ベクトル」によって分離・除去する手法を開発している。

また 1 台目と並行して、2 台目の望遠鏡の準備も進められた。本研究室においても、国内外の共同研究者らとともに光学系の反射防止膜の測定・検証を行い、その後チリへの輸送を完了させた。現在は 2022 年度中の観測開始に向けて、準備が進められている。

0.1.3 Simons Observatory 実験

Simons Observatory は、2016 年に発足した史上最大規模の地上 CMB 実験・国際共同研究グループであり、当研究室もその推進に中心的な役割を果たす。Simons Observatory 実験においては、インフレーション測定における感度向上に特化した口径 42 cm 程度の小口径望遠鏡群と、重力レンズ効果や SZ 効果の測定を主眼に置いた口径 6 m の大口径望遠鏡との両方を建設し、これまでの測定を遙かに上回る精度で CMB を測定し、宇宙の始まりから進化までの姿を解き明かす。

望遠鏡作成においては、本研究室では、特に小口径望遠鏡群に注力して開発を行ってきた。Kavli IPMU の共同研究グループとともに、光学設計および光学筒の設計を進め、直径 460 mm の単結晶シリコンレンズを有する屈折光学系を採用し、光学筒自身からの熱放射を抑えるため 1 K まで冷却するという基本設計を固めた。焦点面は、希釈冷凍機により 100 mK 以下まで冷却される。本研究室では、これまでに開発してきた光学鏡筒に加えて細い金属線を偏光光源とした校正装置を開発した (図??)。本研究室と京都大学の修士学生が主体となって共同開発を行い、遠隔かつ自動で校正が可能なシステムを構築した。すでに、試作機をシカゴ大学とカリフォルニア大学サンディエゴ校に提供して校正データの取得と解析を

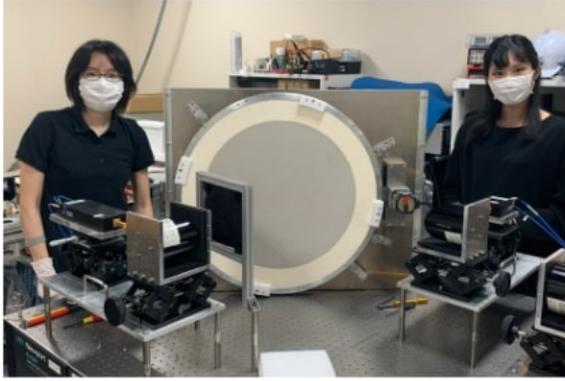


図 0.1.1: KEK および KavliIPMU と共同で Simons Observatory 実験用の低温反射防止膜を開発し、光学特性を KavliIPMU にて測定した。

進めており、観測に向けて 2022 年度初期に完成させ望遠鏡との統合試験を予定している。

また、偏光変調のための冷却型連続回転式半波長板システムの開発において本研究室は世界の先端を走っており、Kavli IPMU との共同研究により開発した世界最大の内径 55 cm の超伝導ベアリングは、Simons Observatory に採用され、1 台目の望遠鏡システムへの統合・評価を進めている。2021 年度には 2 台目の半波長板システムを完成させ (図 0.1.3)、本研究室大学院生がプリンストン大学に二ヶ月間滞在し、望遠鏡との統合を行なった。大口径サファイアを 3 枚積層し、防反射加工を施した半波長板光学素子についても、Kavli IPMU および KEK との共同で開発を進め、1 台目分の光学素子作成を完了した。現在、3 台目の作成を順調に進めると共に、非接触による位置・温度計測システムや、位相補償によりモーターの効率を大きく向上する仕組みの開発など、観測開始に向けた性能向上を進めている。

データ解析においては、2023 年の観測開始と早期の結果報告を目標に、パイプラインの開発を進めてきた。特に小口径望遠鏡群によるインフレーション測定データを解析する「B モードパイプライン」の開発を、共通する要素を多く含む Simons Array のパイプライン開発と連携させながら進めている。また、パイプライン開発、及びシカゴ大学やカリフォルニア大学サンディエゴ校での試験データの解析を行うために、計算機 (64 コア CPU、1TB メモリ) を新たに導入した。

0.1.4 次世代 CMB 実験用 装置開発

超伝導体を用いた検出器として、超伝導力学的インダクタンス検出器および超伝導転移端センサが挙げられるが、いずれも従来の半導体検出器などでは達成不可能だった高感度・多チャンネル化が達成できる。CMB 観測実験、暗黒物質探索実験を始め、素粒子・宇宙分野の実験でも採用例が増加している。これまでに、希釈冷凍機を利用した検出器の試験環境を構築し超伝導検出器の測定・評価を行ってきた。新

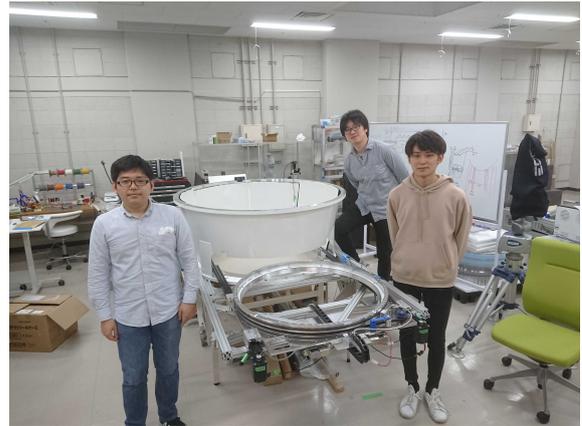


図 0.1.2: 京都大学と共同で Simons Observatory 実験用に偏光校正装置を開発した。自動で校正する機構を有している。

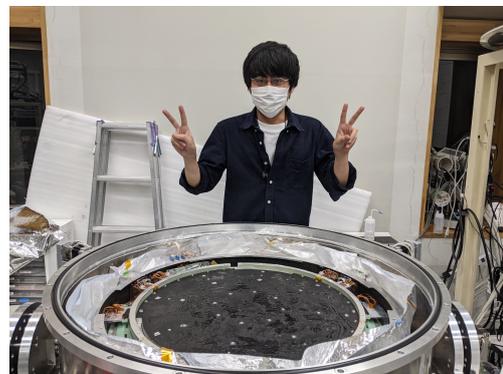


図 0.1.3: Kavli IPMU、岡山大学と共同で作成した 2 台目半波長板システム。

たに、CMB 実験用検出器のミリ波応答を評価するため、冷凍機内に設置可能な黒体光源を開発し黒体光源の温度を調節することで実際の空からの放射を模擬しその光学応答を評価した。また、暗黒物質探索等をめざす単一光子検出器開発では、作製した素子に約 900 nm 程度の赤外 LED を照射しその応答を取得・評価した。光学素子の分野においては、半波長板用サファイアや赤外光フィルタ用アルミナなど、高屈折率素材のための広帯域防反射加工の開発を、高エネルギー加速器研究機構および Kavli IPMU との共同研究により進めている。ムライト溶射とプラスチック素材を用いた二層防反射加工を確立し、90~160 GHz 帯に加えて 200~300 GHz 帯についても開発を進めた他、低温での誘電損失の評価も行なった。また、30~40 GHz 帯のための三層の防反射加工の開発も進めている。

<報文>

(原著論文)

- [1] The POLARBEAR Collaboration, “Improved upper limit on degree-scale CMB *B*-mode polarization power from the 670 square-degree POLARBEAR survey,” arXiv:2203.02495 (Mar 2022)

- [2] Maximilian H. Abitbol, *et al.*, “The Simons Observatory: gain, bandpass and polarization-angle calibration requirements for B -mode searches,” JCAP05(2021)032 (May 2021)
- [3] Toshiya Namikawa, *et al.*, “Simons Observatory: Constraining inflationary gravitational waves with multitracer B -mode delensing,” Physical Review D, 105, 023511 (Jan 2022)
- [4] Kevork Abazajian, *et al.*, “CMB-S4: Forecasting Constraints on Primordial Gravitational Waves,” ApJ 926 54 (Feb. 2022)
- [5] Kevin D Crowley, *et al.*, “The Simons Observatory: Design and Measured Performance of a Carbon Fiber Strut for a Cryogenic Truss,” arXiv:2201.06094 (Jan. 2022)
- [6] Heather McCarrick, *et al.*, “The Simons Observatory Microwave SQUID Multiplexing Detector Module Design,” ApJ 922 38 (Nov. 2021)
- (国内雑誌)
- [7] 茅根 裕司, 西野 玄記, “宇宙マイクロ波背景放射によるインフレーション起源重力波観測-POLARBEAR 実験と次の 10 年の展望,” 日本物理学会, 第 6 号, 2021 年
- (学位論文)
- [8] 坂栗佳奈, “CMB 偏光観測に用いる反射防止膜の開発,” 修士論文 (2022/01)
- [9] 寺崎友規, “軽い暗黒物質探索と宇宙マイクロ波背景放射 (CMB) 観測のためのマイクロ波多重読み出しを用いた超伝導検出器の開発,” 修士論文 (2022/01)
- <学術講演>
- (国際会議)
- 一般講演
- [10] K. Yamada, *et al.*, “Development of inductively coupled position and temperature sensors for cryogenic rotating half wave plate,” The 19th International Workshop on Low Temperature Detectors (LTD19), オンライン開催 (2021/7)
- [11] Yume Nishinomiya, *et al.*, “Development of the characterization methods for tes bolometers for cmb measurements,” The 19th International Workshop on Low Temperature Detectors (LTD19), オンライン開催 (2021/7)
- [12] Kana Sakaguri, *et al.*, “Broadband multi-layer Anti-reflection coatings with mullite and duroid used for half wave plate and alumina filter for CMB polarimetry,” The 19th International Workshop on Low Temperature Detectors (LTD19), オンライン開催 (2021/7)
- [13] Tomoki Terasaki, *et al.*, “Development of Al-Nb hybrid Lumped-Element Kinetic Inductance Detectors for infrared photon detection,” The 19th International Workshop on Low Temperature Detectors (LTD19), オンライン開催 (2021/9)
- 招待講演
- [14] Yuji Chinone, “POLARBEAR/Simons Array,” Cosmoglobe Kickoff Meeting, University of Oslo, Online, June 2021
- (国内会議)
- 一般講演
- [15] 茅根 裕司 他, “インフレーション起源 B モード検出に向けた E/B モード分手法の開発,” 日本天文学会 2021 年秋季年会, オンライン開催 (2021/09)
- [16] 木内 健司 他, “Simons Observatory 実験の概要と開発状況,” 日本物理学会第 76 回年次大会, Online (2021/03)
- [17] 山田恭平, 他 POLARBEAR コラボレーション, “Simons Array 実験における惑星観測による検出器評価,” 日本天文学会 2021 年秋季年会, オンライン開催 (2021/9)
- [18] 山田恭平, 他 Simons Observatory Collaboration, “Simons Observatory 実験の低温半波長板回転機構の性能評価,” 日本物理学会 2021 年秋季大会, オンライン開催 (2021/9)
- [19] 西ノ宮ゆめ, 他, Simons Observatory Collaboration, “CMB 偏光観測に用いる TES ボロメータの特定数測定,” 日本物理学会 2021 年秋季大会, オンライン開催 (2021/3)
- [20] 西ノ宮ゆめ, 他 POLARBEAR コラボレーション, “Simons Array 実験における電波天体観測による望遠鏡の視線方向評価,” 日本物理学会第 77 回年次大会, オンライン開催 (2022/9)
- [21] 坂栗佳奈, 他, “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,” 日本物理学会 2021 年秋季大会, オンライン開催 (2021/3)
- [22] 坂栗佳奈, 他, “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,” 日本物理学会第 77 回年次大会, オンライン開催 (2022/9)
- [23] 村田雅彬, 他, “Simons Observatory 実験に搭載するワイヤグリッドを用いた偏光角校正装置の光学試験状況,” 日本物理学会 2021 年秋季大会, オンライン開催 (2021/3)
- [24] 村田雅彬, 他, “Simons Observatory 実験に搭載するワイヤグリッドを用いた偏光校正装置の光学試験結果,” 日本物理学会第 77 回年次大会, オンライン開催 (2022/9)
- [25] 杉山純菜, 他, “CMB 偏光観測実験に用いるアクロマティック半波長板の設計と性能評価,” 日本物理学会 2021 年秋季大会, オンライン開催 (2021/3)
- [26] 杉山純菜, 他, “Simons Observatory 実験に用いる変調器の開発,” 日本物理学会第 77 回年次大会, オンライン開催 (2022/9)
- [27] 寺崎友規, 他, “CMB 偏光観測用マイクロ波多重読み出し回路の測定,” 日本物理学会 2021 年秋季大会, オンライン開催 (2021/3)

- [28] 寺崎友規、他, “単一光子検出用集中定数型力学的インダクタンス検出器の開発,” 日本物理学会第 77 回年次大会, オンライン開催 (2022/12)

招待講演

- [29] 茅根 裕司, “Synergies between ALMA/LST and wide-field high-cadence CMB surveys,” Synergies between ALMA and wide-field high-cadence multi-wavelength surveys, Online (2022/03)
- [30] 茅根 裕司, “次世代地上実験による広天域・高精度・高頻度 CMB 偏光観測と将来の素粒子・宇宙論解析,” Upcoming CMB Observations & Cosmology, 京都大学, 京都 (2022/03)

(セミナー)

- [31] Yuji Chinone, “The search for primordial gravitational waves from cosmic inflation with CMB experiments in the Atacama desert and space,” KMI Colloquium, Nagoya University, Nagoya, Japan (2021/12)

II

Summary of group activities in 2021

1 Kusaka Group

Research Subjects: Observational Cosmology, Cosmic Microwave Background (CMB) Observation. (1) Study of Inflation in the early universe and the evolution of the universe through gravitational lensing using POLARBEAR and Simons Array experiment; (2) Design, Development, and Construction of Simons Observatory aiming to study Inflation, evolution of the universe, Neutrinos, Dark Energy, and Dark Radiation; (3) Research and Development of technologies for Simons Observatory and CMB-S4.

Member: A. Kusaka and K. Kiuchi

- POLARBEAR experiment and its successor, Simons Array, are optimized to measure both inflationary signature and the gravitational lensing effect in CMB polarization. POLARBEAR experiment has concluded its observation campaign, and Simons Array experiment started the observation. Our focus is on data analysis as well as the development and characterization of the continuously-rotating half-wave plate (HWP) enabling accurate measurement of CMB polarization.
- Simons Observatory experiment is under construction, with the first light expected in two years. We plan to deploy an array of what we call “small aperture telescopes,” which are dedicated for the inflationary signal, and a six-meter “large aperture telescope,” which enables observation for Neutrinos and the dark content of the universe. We are primarily focusing on the design and development for the small aperture telescope.
- Research and Development for the next generation experiments such as Simons Observatory and CMB-S4 are crucial component of our research program. We specifically work on superconducting technologies used in the detectors, cryogenic bearing system for HWP, and anti-reflection coating for high-index optical material. We also develop techniques for high-performance computation (HPC) enabling data analysis for new experiments producing order-of-magnitude larger data volume than the current instruments.