

## 7. CMB 偏光観測望遠鏡の高感度化による原始重力波の世界最高感度探索

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 長谷川 雅也

### 概要

本研究は、宇宙マイクロ波背景放射(CMB)偏光観測を通して”宇宙のはじまり”に実験的に迫るため、クライオメカトロニクス技術を応用してCMB観測装置の高感度化を実現し、宇宙のはじまりを記述する有力なモデルであるインフレーションの徹底的な検証を可能とする技術基盤を確立する事である。観測装置の主要な系統誤差源となるセンサーの応答性・時定数(ステイミュレータ)、偏光角(スパーズワイヤーグリッド)を精密較正する装置をチリで稼働中のサイモンズアレイに適応し、原理検証を行って期待される性能を確認した他、バンドパス(コンパクトフーリエ分光計)較正装置については光学素子作成を終え検証試験を開始した。また、過去のデータの再解析により未知の量子場の存在による偏光角の時間変動が示唆されたため、開発した装置を用いた較正頻度をあげて、その追試を行っている。データの取得を完了し現在結果をまとめているところである。

### 背景および目的

宇宙のはじまりを説明するインフレーション宇宙仮説の検証は宇宙物理の最重要課題の一つであり、その決定的な予言である「時空の量子ゆらぎに起因する重力波(原始重力波)を検出すれば科学史に残る大発見となる。

本計画では、宇宙マイクロ波背景放射(CMB)偏光の精密観測を通して「原始重力波」の痕跡を探すという手法により、この実験的検証を行う。本計画代表者が中心となって開発し、チリ・アタカマ高地で稼働中のサイモンズアレイ実験において、画期的な検出器較正法を施して検出器の高感度化を実現し、主要なインフレーション理論により予言されている”発見が期待できる”レベルでの原始重力波探索を目指す。

### 方法

CMB実験では、個々のセンサーの感度は大気からの輻射強度の統計揺らぎによって制限されているため、より高感度を実現するために多数のセンサーを焦点面に敷き詰めて観測を行う。センサー数は過去10年あまりで二桁程度向上しており、現在申請者を中心としておよそ10000個のセンサーアレイが実現している。それら大型センサーアレイを用いて3年程度観測を行う事で、主要なインフレーション理論が予言する原始重力波を検出できると期待されている。ただし、実際はCMB以外の放射(前景放射)との分離の不完全性等の系統誤差によって実験感度が頭打ちになっている。これを打破するためには、センサーの種々の特性を精密に較正する必要がある。ただし、いくつかの較正については基準光源として使用するカタログ天体の精度によって較正精度が制限されるなどしており、要求を満たす精度での人工較正光源の開発が重要である。

主要な系統誤差源として、センサーの応答性・偏光角そしてバンドパスのバイアスがあげられ、これらの(従来実験を超える)高精度較正の手法開発が本研究の研究テーマとなる。応答性に関しては、基準信号を断続的にセンサーに打ち込むための新装置(“Stimulator”)、偏光角についてはワイヤーを粗く配置し偏光CMBを模した信

号を発生させる装置(“スパースワイヤーグリッド”)、バンドパスについては従来よりもコンパクトなマイケルソン干渉系を卓上サイズで実現した(“ミリ波フーリエ分光計”)の開発を行う。これらを実験室にて開発し、原理検証を行った上で、サイモンズアレイ実験に適用し、系統誤差の削減を実証する。

## 結果および考察

Stimulator については、サイモンズアレイに組み込み5年以上の安定運用を実現した。得られたデータから、センサーの応答性について較正精度を評価し、十分に我々の科学目標を達成できる事を確認している。初期の結果をまとめてすでにジャーナル論文に掲載されている他、さらに高感度な解析結果を現在まとめて論文発表の準備を行っている。また次世代実験においても採用が決まっており、共同研究者によって望遠鏡への搭載が行われる。

スパースワイヤーグリッドについても、サイモンズアレイを用いた実証実験を行い、統計精度としては従来を1桁超える精度での較正が可能である事が実証されている。ワイヤーグリッドも次世代実験での使用が決まっており、共同研究者によってすでに性能がまとめられジャーナル論文に掲載されている。過去の超新星残骸のデータからアクション等の未知の量子場により偏光角が時間変動をしている可能性が提案されており、これら較正装置による較正頻度をあげた観測を開始しデータ収集を完了した。現在結果をまとめて論文発表の準備を行っている。

フーリエ分光計については、近年の物価高騰に対応するため、内作による光学素子の試作を行い、表面荒さ等の基本特性が本研究で要求されるレベルをクリアしている事を確認した。すでに製作した光学系を用いた実証試験を開始している。

本研究ですすめている CMB 望遠鏡の較正技術は、サイモンズアレイのみならず次世代実験でも必須の基盤技術となる。今後原始重力波が発見された際の鍵となる技術が本研究で開発された物となるよう、早急に本研究をまとめ、論文として報告する予定である。

(完)

## 発表論文

- 1) “A Measurement of Atmospheric Circular Polarization with POLARBEAR” , Takuro Fujino, Satoru Takakura, Shahed Shayan Arani, Darcy Barron, Carlo Baccigalupi, Yuji Chinone, Josquin Errard, Giulio Fabbian, Chang Feng, Nils W. Halverson, Masaya Hasegawa, Masashi Hazumi, Oliver Jeong, Daisuke Kaneko, Brian Keating, Akito Kusaka, Adrian Lee, Tomotake Matsumura, Lucio Piccirillo, Christian L. Reichardt, Kana Sakaguri, Praween Siritanasak, Kyohei Yamada, *Astrophys. J.* 981 (2025) 1, 15
- 2) “The Simons Observatory: Design, Integration and Testing of the Small Aperture Telescopes” , SO Collaboration: Nicholas Galitzki, Masaya Hasegawa et. al., *Astrophys. J. Suppl.* 274 (2024) 2, 33
- 3) “Exploration of the polarization angle variability of the Crab Nebula with POLARBEAR and its application to the search for axionlike particles” , POLARBEAR Collaboration: Shunsuke Adachi et al., *Phys. Rev. D* 110 (2024) 6, 063013