

氏 名 田邊 大樹

学位(専攻分野) 博士(理学)

学位記番号 総研大甲第 2233 号

学位授与の日付 2021年3月 24日

学位授与の要件 高エネルギー加速器科学 素粒子原子核
学位規則第6条第1項該当

学位論文題目 Precise room temperature monitoring for accurate
measurements of degree-scale cosmic microwave background
anisotropy at POLARBEAR-2

論文審査委員 主 査 吉田 誠

素粒子原子核専攻 講師

長谷川 雅也

素粒子原子核専攻 講師

DE HAAN, Tijmen Joseph Olivier

素粒子原子核専攻 助教

羽澄 昌史

素粒子原子核専攻 教授

辻本 匡弘

物理科学研究科 宇宙科学専攻 准教授

井上 優貴

国立中央大学 物理系 助理教授

(様式3)

博士論文の要旨

氏 名 田邊 大樹

論文題目 Precise room temperature monitoring for accurate measurements of degree-scale cosmic microwave background anisotropy at POLARBEAR-2

本論文は、宇宙マイクロ波背景放射(CMB)偏光観測実験POLARBEAR-2において、常温部にある反射鏡や読み出し電子回路の温度変化が検出器信号に及ぼす影響が、次世代のCMB偏光観測実験の目指す観測精度に対して無視できないことに着目し、高精度な常温用の温度モニターシステムを構築した上で、検出器の時系列データに表れる温度変化の影響を補正することで、CMBのBモード偏光の精密測定を目指すものである。

CMBは、宇宙の誕生から約38万年後に、電離していた電子が陽子に捕獲されたことで直進できるようになった光子であり、人類が観測できる中で最古の光である。今日では宇宙の全方位からやってくる約2.7 Kの黒体輻射として観測することができ、その温度と偏光にはわずかな非等方性がある。CMBはビッグバン宇宙論の直接の証拠となったほか、宇宙の歴史に関する多くの情報を含んでいる。中でも、ビッグバン以前の宇宙の進化を記述するインフレーション仮説の検証を目指して、複数の国際共同CMB観測実験が行われている。

インフレーション仮説は、宇宙の初期に時空が指数関数的な加速膨張を経たと仮定するものであり、その具体的な理論モデルは数多く提案されているが、初期宇宙の計量に生じた量子ゆらぎのテンソル成分とスカラー成分の振幅の比、すなわちテンソル・スカラー比(r)によって各モデルが特徴付けられる。この r の値を制限し、インフレーション仮説を検証するための有力な手段が、CMBの偏光のうちBモードと呼ばれる奇パリティの偏光パターンを精密観測することである。現在、BICEP2/Keck arrayとPlanck衛星による観測から、 r には0.06の上限が与えられている。しかし、 r の測定に特に重要な大角度スケールのBモード偏光の観測精度は、数秒以上の時間スケールで変動する低周波ノイズによって制限されており、その主要な要因として観測装置の温度ゆらぎがある。従って、観測装置の温度ゆらぎの影響を低減することが、将来のさらなる高精度な観測とインフレーション仮説の検証に不可欠である。

本論文ではまず、装置の温度変化が検出器の信号に及ぼす影響を定量的に評価した。0.3 Kの検出器面、4 Kの光学系、300 Kの信号読み出し回路、300 Kの反射鏡について、それぞれの輻射と熱伝導のモデル、及び実測値を用いて、温度変化と信号の変調の間の温度係数を求めた。これらを検出器信号のモデルに組み込み、大気ノイズの影響を低減するための偏光変調装置である回転半波長板を用いる場合と用いない場合のそれぞれについて、温度変化が信号に及ぼす影響が検出器アレイの統計感度と同程度以下になるための温度安定性への要求値を算出した。これにより、従来のCMB観測実験においては考慮されていなかった常温部の、20秒(50 mHz)スケールにおいて $10 \text{ mK}\sqrt{s}$ のレベルの温度変化が、さらなる観測精度向上のためには無視できないことを示した。しかし常温部の温度を要求値以

下に安定させることは困難であるため、観測中に温度をモニターし、解析の段階で温度変化による信号の変調を補正することが必要であると結論付けた。

続いて、温度安定性への要求値を補正精度への要求値として、これらを満たす常温用の温度モニターシステムを構築した。温度の絶対的な値への確度ではなく、相対的な変動を検出する精度に着目することで、300 Kの装置に対して $10\text{mK}\sqrt{\text{s}}$ 以下の測定ノイズという高い精度の実現を図った。高感度で小型かつ安価な温度センサーであるサーミスタと、低ノイズな測定装置として選定したKeysight 34980Aデジタルマルチメータ及びKeysight 34925A光アイソレータを組み合わせ、インフレーション仮説の検証のために重要な20秒の時間スケールにおける測定ノイズが、電波天文観測実験における常温用の温度モニターシステムとしては最高水準の $1\text{mK}\sqrt{\text{s}}$ オーダーであることを確認した。サーミスタを実験室で較正し、抵抗値の測定に伴う自己発熱による誤差を評価した上で、このシステムをPOLARBEAR-2実験の望遠鏡に搭載した。二枚の反射鏡と信号読み出し回路に温度計を設置し、約半年にわたり温度計データを取得した。現地において温度計に対し、風による温度ゆらぎを低減するためのシリコン封止剤と、直射日光による非平衡な温度上昇を低減するための遮光フィルムを取り付ける改善を行うことで、測定ノイズを $0.1\text{mK}\sqrt{\text{s}}$ オーダーまで低減した。

その上で、従来のCMB観測実験では行われていなかった、観測中の装置温度ゆらぎの補正を行う手法を実証した。これは信号読み出し電子回路を例に取り、回路の温度変化による信号の変調を補正するものである。検出器信号と並行して取得した読み出し電子回路の温度データを、あらかじめ測定した温度係数をかけて検出器信号から引き去ることにより、低周波のノイズが低減されることを確認した。

加えて、この補正に伴い新たに生まれる誤差として、温度計の較正による統計誤差、各装置の温度係数の見積もりの不確かさによる統計誤差、温度計と測定対象の距離による系統誤差、温度測定装置の内部抵抗や導線の抵抗による系統誤差、温度をデジタル値で測定した際の計算誤差を評価した。特に装置の温度係数の不確かさによる統計誤差に基づいて、温度係数測定の確度に対する要求値を算出した。そして、補正によってもたらされる r の測定精度の向上と宇宙論へのインパクトを評価した。温度変化を補正しない場合、POLARBEAR-2で予測される r の標準偏差はおよそ0.04となるが、補正によっておよそ0.03まで低減することを示した。

博士論文審査結果

Name in Full
氏名 田邊 大樹Title
論文題目 Precise room temperature monitoring for accurate measurements of degree-scale cosmic microwave background anisotropy at POLARBEAR-2

本論文は、宇宙マイクロ波背景放射(CMB)観測実験 POLARBEAR-2 において、ミラーや読み出しエレクトロニクスの温度変化が観測精度に影響を及ぼすことに着目して、温度モニターシステムの構築、性能評価試験を行うことで、Bモード偏光の精密測定を目指すものである。

本論文では、まず CMB 偏光の精密観測によるテンソル-スカラー比(r 値)の実測によってインフレーション仮説の直接的検証が可能であることが示されている。CMB の B モード偏光は、インフレーション仮説で予言される原始重力波によって生成されるが、重力レンズ効果と区別するために、特に 1 度程度の角度スケールにおける偏光測定が重要となる。これまでの CMB 観測実験においては、超伝導 TES (Transition Edge Sensor) ボロメータ等の温度が観測に及ぼす影響は考慮されているが、今後さらなる精度向上のためには、ミラーや読み出しエレクトロニクスの温度揺らぎも無視できない誤差を生じることが論じられている。これら室温機器の温度揺らぎが観測信号に与える影響を吟味した結果、目標精度を達成するためには、50mHz 帯におけるミラーの温度揺らぎは $15\text{mK}\sqrt{s}$ 以下、読み出しエレクトロニクスの温度揺らぎは $9\text{mK}\sqrt{s}$ 以下に抑える必要があることが示された。出願者は、この要求を達成するために、これまでの観測実験では行われていなかった逐次補正を行うことを提案し、温度モニターシステムを開発した。実験室で温度センサーを較正することでノイズレベルが $1\text{mK}\sqrt{s}$ 以下であることを確認し、これを現地観測機器に設置した。加えて、読み出しエレクトロニクスの逐次補正に関して実験室で模擬データを取得し、4mHz におけるノイズレベルを半分にできることを実測した。現地観測機器においてはミラー等の温度計データを取得し、日射や風による影響を排除する改善を行うことで安定してデータ取得できたことが示された。逐次補正によるバイアスを評価し、POLARBEAR-2 においては、測定温度データから信号補正するための係数に関して 2.5%(読み出しエレクトロニクス)、6.5%(ミラー)の精度が必要であることが示された。

以上のように、CMB 観測に置いてこれまで考慮されていなかった CMB データ取得中の環境温度変化の重要性を示しその補正手法を示したことから、本論文の内容は今後の CMB 観測実験に大きなインパクトを与えるものと認められる。本論文は適切な英語で記述されており、審査においても英語を用いて発表、質疑できていた。さらに、南米チリの現地観測機器に温度モニターシステムをインストールするなど、国際コラボレーションに対して大きな貢献をしており、英語能力を含め十分な研究能力を有することを認めた。以上により、本論文は博士論文に必要な水準を満たすものと判断した。