

氏 名 高取 沙悠理

学位(専攻分野) 博士(理学)

学位記番号 総研大甲第 2310 号

学位授与の日付 2022 年 3 月 24 日

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

学位論文題目 A Gain Calibration System for Accurate Measurements of  
Cosmic Microwave Background Polarization at  
POLARBEAR-2 Experiment

論文審査委員 主 査 岡村 崇弘  
素粒子原子核専攻 准教授  
住澤 一高  
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  
羽澄 昌史  
素粒子原子核専攻 教授  
関本 裕太郎  
国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構  
宇宙科学研究所 教授  
石野 宏和  
岡山大学 学術研究院 自然科学学域 教授

(様式3)

## 博士論文の要旨

氏 名 高取 沙悠理

論文題目 A Gain Calibration System for Accurate Measurements of Cosmic Microwave Background Polarization at POLARBEAR-2 Experiment

宇宙の進化を説明するビッグバン宇宙論は多くの観測事実に支えられているが、地平線問題や平坦性問題に代表される未解決の謎はいまだ存在する。しかし、これらの問題は熱いビッグバン宇宙以前に時空の急激な加速膨張(インフレーション)が起こったと仮定すると解決できる。インフレーション理論では時空の量子揺らぎにより重力波が生成されることが予言される。インフレーション理論はこれまでの宇宙マイクロ波背景放射(Cosmic Microwave Background、以下 CMB)などの観測により良く支持されているが、インフレーション起源の原始重力波は 2021 年現在において未だ観測されていない。本研究では、発生した重力波が CMB に作用し、大角度スケールで“B モード”と呼ばれる特殊な偏光パターンを生成することに着目し、この B モード偏光パターンの観測によってインフレーション理論の検証を目指す。一方、CMB の B モード偏光パターンは宇宙の大規模構造による重力レンズ効果によっても作られる。この重力レンズ効果起源 B モードは角度パワースペクトルにおいて角度スケール  $1\sim 1000$  の小角度スケールにピークを持つ。重力レンズ効果起源の B モードを観測することで、大規模構造のレンジングポテンシャルからニュートリノ質量和の推定を行うことも重要な観測目標となる。

POLARBEAR-2 実験は南米チリのアタカマ高地(標高 5,200m)にて、CMB の偏光観測を行う。POLARBEAR-2 実験はパワースペクトルが角度スケール  $30 < l < 2500$  の広い範囲で観測を行うため、原始重力波起源の B モード偏光と重力レンズ効果起源の B モード偏光両方に感度を持つ。さらに、7588 個の超伝導検出器(TES)を搭載することで、統計感度を向上、さらに 90GHz と 150GHz の 2 つの観測周波数帯での同時観測を実現することで前景放射に対する分離能力も向上した観測を行う。POLARBEAR-2 実験の 3 年間の観測では、インフレーションモデルに対して、インフレーションのポテンシャルに関連するパラメータであるテンソル・スカラー比  $r$  について  $r \leq 0.01(95\%C.L.)$ 、ニュートリノの質量和  $\sum m_\nu$  に対しては、 $\sum m_\nu \leq 40\text{meV}(68\%C.L.)$  の制限をかけることができると期待される。

これらの目標を満たす為には、観測における系統誤差の理解が欠かせない。主要な系統誤差の一つに検出器の応答性の不定性がある。観測に使用する検出器は超伝導体が常伝導から超伝導状態に転移する際の急激な抵抗値の変化を利用し、CMB の微小な信号を検知する。検出器は観測ごとに転移温度付近にバイアスさせる。その為、観測中、検出器の応答性は焦点面の温度や大気ゆらぎ等の影響を受け変化する。そこで、検出器の状態や相対的な応答性の変動を評価し較正を行う装置(以下、stimulator)を開発した。stimulator は望遠鏡の副鏡の真後ろに設置し、副鏡に空けた直径 9mm ほどの小さな穴からレーザーとレーザーに搭載された検出器に向けて無偏光で強度一定の微弱な光を打ち込む。光源には広い周波数帯で黒体放射する高温(1000K)のセラミックヒーターを使用、また周波数

に依らない反射集光型のホーンを採用し、複数周波数での同時較正を可能にした。光はチョッパーの開閉により変調され、変調された信号に対する各検出器の出力から、検出器の応答性の評価を行う。また、**stimulator**により検出器の応答性の較正を行う際に、信号の変調周波数を段階的に変えることで時定数の較正も行う。**stimulator**による較正技術はPOLARBEAR-2実験だけでなく、**Simons Observatory**と言った将来実験にも採用される予定である。

本研究ではゲイン較正と時定数の不定性の較正のために必要な装置に対する要求を実際に見積もり、**stimulator**のハードウェアの設計、開発、実験室での性能評価試験を行った。また、観測サイトでの統合評価試験においても、**stimulator**が実際に要求値を満たすことを確認した。さらに**stimulator**を使ったゲイン較正の精度は主要な系統誤差の抑制に十分である事を確認した。また、POLARBEAR-2実験の予定感度においてインフレーション理論の実験的検証が期待できることを示した。

## 博士論文審査結果

Name in Full  
氏名 高取 沙悠理

論文題目 A Gain Calibration System for Accurate Measurements of Cosmic Microwave Background Polarization at POLARBEAR-2 Experiment

本論文は、宇宙マイクロ波背景放射(CMB)観測実験 POLARBEAR-2 における系統誤差抑制のための人工校正光源装置 (stimulator) の開発ならびに観測サイトでの統合評価試験を行うことで、開発装置の有効性ならびに同実験の予測感度でインフレーション理論ならびにニュートリノ質量和に関する実験的検証が可能であることを実証する研究である。

POLARBEAR-2 実験は、南米チリのアタカマ高地(標高 5200m)にて、CMB の B モード偏光の精密観測を行う。この実験で採用されるレーザーシステムは、90GHz と 150GHz の周波数帯での同時観測により前景放射に対する分離能力をもち、統計感度を向上させるために 7588 個の超伝導検出器 (TES) が 0.3K を温度にもつ焦点面に搭載されたものである。このシステムは原始重力波由来の B モードと重力レンズ効果由来の B モードの両方に感度を持つことから、テンソル・スカラー比 ( $r$  値) の実測によるインフレーション理論の直接的検証ならびにニュートリノ質量和に関する制限を与えることができる。これらの目標を満たす為には、系統誤差の主要因である検出器のゲインと時定数不定性を校正する必要がある。出願者は 7588 個の超伝導検出器を同時校正するための人工校正光源 (stimulator) を開発した。これは 1000K の黒体輻射をもち 90GHz, 150GHz の周波数帯域に最適化された 9mm の内径をもつパイプならびに Winston cone などから構成され、無偏光で一定強度の光が焦点面に向けて射出される。射出される光はチョッパーにより変調され、変調信号に対する各検出器の出力から、検出器の応答性の同時評価が可能となる。副鏡の裏に設置し、観測を阻害することなく観測中のいつでも稼働できる点が本装置の独自のなところである。出願者は、開発に先立ち校正のために必要な装置に対する要求値を評価した後、ハードウェアの設計から開発を行っている。開発された stimulator は、観測サイトの望遠鏡に設置し統合評価試験を行うことで要求値を満足することを確認するとともに検出器の応答性を詳細に評価した。また 7588 個の超伝導検出器の信号読み出しは各チャンネルに異なる周波数を割り当てる多重化読み出しシステム (Digital Frequency-domain Multiplexing) を用いており、各信号位相が非ゼロになる場合は測定誤差につながる。出願者は開発した stimulator を用いて各チャンネルに割り当てられた信号に発生した位相を同時評価するという新しい方法を導入し、こうした位相発生によるノイズを低減する方法も明らかにしている。さらに stimulator を使った校正により、POLARBEAR-2 実験が目標とする  $r$  値の精度 (0.006) と比べてゲインに起因する系統誤差を十分小さく抑えられることを計算により示した。この結果は、インフレーション理論の実験的検証が可能であることを示している。出願者が開発した stimulator による校正技術は POLARBEAR-2 の拡張計画であるサイモンズアレイ実験等でも導入される予定である。

昨今のコロナ禍により研究計画の遅延を余儀なくされながらも、出願者はチリのアタカマ高地に実機を置く観測サイトで自身が手掛けた **stimulator** を組み込んだ統合評価試験を主導的に行うなど国際コラボレーションに対して大きな貢献をしている。また海外コラボレーターとの共同作業を長期にわたり行う中で自身の考えを英語で的確に伝えることを継続して実践してきており、英語能力を含め十分な研究能力を有することを認めた。国際学会での発表も経験している。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。