

氏 名	高瀬 祐介		
授与した学位	博 士		
専攻分野の名称	理 学		
学位授与番号	博甲第	7 2 6 4	号
学位授与の日付	2 0 2 5 年 3 月 2 5 日		
学位授与の要件	自然科学研究科 数理物理学専攻 (学位規則第 4 条第 1 項該当)		
学位論文の題目	Design of the full-sky scanning strategy and systematic effect control in a cosmic microwave background probe (宇宙マイクロ波背景放射観測衛星のための全天スキャン戦略の設計と系統的効果の制御)		
論文審査委員	教授 吉村 浩司	教授 横谷 尚睦	准教授 大槻 純也
学位論文内容の要旨			
<p>The quest for primordial <math>B</math>-mode polarization signatures in the Cosmic Microwave Background (CMB) is one of the most ambitious endeavors in contemporary cosmology. Such a discovery would serve as a smoking gun for primordial gravitational waves produced by tensor perturbations in the universe's nascent moments, and would allow the precise determination of the tensor-to-scalar ratio, <math>r</math> —a crucial parameter for distinguishing between competing inflationary models. This in-depth investigation requires unparalleled precision in mapping the large-scale angular scales of the CMB, necessitating full-sky observations from space-based platforms free from the distortions of the Earth's atmosphere.</p> <p>Given that the expected <math>B</math>-mode signatures are approximately three to four orders of magnitude fainter than the CMB temperature anisotropies, the search for their detection requires the implementation of well-designed in-flight calibration and systematic effects mitigation strategies. Our investigation begins with a comprehensive analysis of scanning strategy parameter optimizations, examining their influence on three critical areas: the efficiency of in-flight calibration procedures, the suppression of inherent systematic effects, and the development of robust null-test methods for characterizing systematic effects.</p> <p>The next generation of space-based observatories, exemplified by <i>LiteBIRD</i>, which incorporates Half-Wave Plate (HWP) modulation technology, heralds a paradigm shift in polarization measurements. This advanced approach enables single-detector observations, bypassing the traditional need for differential detection by orthogonal pairing employed in previous experimental configurations, and thereby eliminating the systematic complexities associated with it. While the HWP modulation mechanism is exceptionally effective in suppressing various systematic effects, residual perturbations remain. Through sophisticated analytical frameworks for the mapping process, emphasizing signals of spin corresponding to specific axiality, we systematically evaluate the suppression of these systematic effects and elucidate optimal scanning strategy characteristics within the multi-dimensional parameter space of spacecraft scan configurations, culminating in an optimized scanning strategy design for comprehensive full-sky polarization surveys.</p> <p>In addition, we explore the effectiveness of optimal scanning strategies in mitigating systematic effects through extensive simulation studies, including benchmark systematic effects both with and without the implementation of the HWP. Using the spin-based mapping formalism, we evaluate the performance of the HWP. The HWP-enabled configuration emerges as an effective solution in polarization reconstruction, with negligible residual systematic effects. Conversely, the configuration without HWP exhibits significant systematic effects that affect the estimation of <math>r</math>, although the application of mitigation techniques we develop effectively reduces systematic uncertainties and improves the estimation of <math>r</math>.</p>			

## 論文審査結果の要旨

宇宙背景放射 (CMB) における原始Bモード偏光の観測は、現代宇宙論における最も野心的な挑戦の一つであり、もし発見できれば、原始重力波の決定的な証拠となる。Bモード偏光観測によりスカラー・テンソル比  $r$  を正確に測定することで競合するインフレーションモデルを区別することが可能となる。予想されるBモードの信号は、CMBの温度異方性よりも3~4桁も弱いとされており、その検出には、CMBの大規模な角度スケールを前例のない精度でマッピングする必要がある、地球の大気による歪みがない宇宙ベースの観測プラットフォームからの全天観測、緻密に設計された飛行中のキャリブレーションおよび系統誤差軽減戦略が必要となっている。

高瀬氏は、次世代の宇宙ベースのCMB偏光観測実験LiteBIRDにおいて半波長板 (HWP) 変調技術により効果的に系統誤差を抑制するため、全天偏光観測のための最適なスキャン戦略を考案した。スキャンに関わる6つの変数について拘束条件を利用して、パラメータスペースを制限し、全天スキャンの一様性とキャリブレーション観測を両立させるスキャン戦略を実現させた。その結果は、LiteBIRD実験の基本スキャン戦略に採用されるとともに、将来の同等な実験にも適用可能であることが示され、*Journal of Cosmology and Astroparticle Physics*に第一著者としてまとめられた。

また、特定の信号軸に対応するスピンモーメントを使用して系統誤差を迅速に評価する新しいマッピング手法「スピンベースマッピング」を開発して、HWPの特性と系統誤差の関係を解析的に扱えるように拡張した結果、HWPの不完全性に起因する機器偏光誤差も軽減可能であることを示した。

以上のように、高瀬氏はLiteBIRD実験の性能を左右するスキャン戦略の設計、および系統誤差の軽減に対して独自の手法を開発して取り組み大きな成果をあげており、実験の精度向上に対して重要な貢献し、本学位論文にまとめている。公聴会においても論文内容を明瞭に報告し、すべての質疑において的確に応答したことから、本審査委員会は本論文を博士（理学）の学位に値するものであると判断する。