

氏名	小松 国幹		
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	6488	号
学位授与の日付	2021年 9月 24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	Development of a polarization modulator for the observation of CMB B-modes in search of primordial gravitational waves with LiteBIRD (原始重力波探索を目的とする宇宙マイクロ波背景放射 Bモード観測における LiteBIRD 用偏光変調器の開発)		
論文審査委員	教授 吉村 浩司	教授 小林 達生	准教授 吉見 彰洋
学位論文内容の要旨			
<p>インフレーション理論はビッグバン理論で説明できない諸問題を解決し、初期の宇宙の状態についての知見を与える。LiteBIRD は宇宙マイクロ波背景放射(CMB)の B モード偏光の観測からインフレーション期に発生した原始重力波の強度にあたるテンソル・スカラー比 r を誤差 $\delta r < 0.001$ で測定し代表的なインフレーションモデルの検証を行う科学衛星である。目標感度の達成には B モードの強度を nK オーダーの精度で測定する必要があり系統誤差の低減が不可欠となる。LiteBIRD では 3 つの望遠鏡が搭載される予定でその全てで連続回転半波長板を用いた偏光変調器を用いる。変調器は半波長板とその回転機構で構成され、入射した偏光の方向を回転させることで変調を行い、幾つかの系統誤差を低減する。本研究では LiteBIRD 低周波望遠鏡用の偏光変調器の開発を行った。開発の以下の 3 つの貢献について紹介する。</p> <p>一つ目は、CMB 偏光実験での使用に向けた新規の広帯域半波長板デザインの考案である。複数の複屈折材を特定の光学軸角度の組み合わせで重ね合わせて作製した広帯域多層半波長板は、広帯域化される一方で実行的な光学軸角度に周波数依存性を持つため、それが系統誤差の原因となると懸念される。私は、半波長板デザインのために必要な定式化を行いデザインの最適化を行った。光学軸角度に特定の条件を課すことで実行的な光学軸角度の周波数依存のない全く新しいタイプのデザインの構築に成功した。</p> <p>二つ目は、考案した半波長板デザインが観測に与えるインパクトの見積もりである。マップベースのシミュレーションから半波長板の光学軸の周波数依存性によって観測される B モードパワースペクトルへ生じる影響の大きさの見積もった。加えて地上での較正光源の検討や半波長板の偏光効率と光学軸角度の測定精度、熱ダストとシンクロトロンスペクトルの理解度に起因する E モードからの B モードへの漏れ込みによる系統誤差の大きさを見積もった。新たに考案した半波長板デザインと従来のデザインの比較を行い、考案した半波長板デザインがより理想的な半波長板に近いこと、偏光効率と前景放射の強度スペクトルの測定精度からの影響に対して優れていることを示した。</p> <p>最後は光学的な性能評価を行う測定環境の構築とそれを用いた偏光変調器の検証である。偏光変調器の開発を行う中で実機による性能の検証は不可欠である。私は常温および約 20K で光学測定が可能な環境を構築した。波長板を実機で作製し、9 層広帯域多層半波長板について常温で変調効率と変調信号位相を測定しモデルと実験結果の一致を確認した。低温では低周波望遠鏡用偏光変調器の 1/10 スケールモデルの光学的な検証を行い、低温(< 33K)での新しいデザインの半波長板の動作が期待通りであることや変調器を装置として構築した際に見られる変調信号に含まれる周波数成分とその起源についての考察を行った。</p>			

論文審査結果の要旨

科学観測衛星LiteBIRDは、宇宙マイクロ波背景放射(CMB)のBモード偏光の観測を通して宇宙初期に発生した原始重力波の痕跡を見だし、インフレーション模型の検証を行うことを目的としている。その目標感度を達成するためには、偏光測定における系統誤差の低減が不可欠であるが、小松氏はそのために重要な役割を果たす偏光変調器の開発を行い、実験的に性能評価を行った。

本研究では、まず偏光変調器の中で、偏光方向を回転させる役割を担う半波長板について、波長により光学軸が変動しないという特長を備えた新しいタイプの半波長板を独自に考案し、デザインを行った。その新しいタイプの半波長板に対し、様々な観測状況において従来型の半波長板との比較・評価を行い、系統誤差の低減において従来型よりも優れていることを示した。また、半波長板の性能評価を行うために、常温および約20Kでの光学観測ができる測定装置を作り上げ、自ら考案した新しいタイプの半波長板のプロトタイプをテストして、期待通りの性能が得られていることを実験的に確認し、偏光変調器の動作のデモンストレーションに成功した。

以上のように、小松氏は、実験の成否を握る重要な要素について自らのアイデアで新しいデザインを考案し、その観測に与えるインパクトを評価し、試作機を製作して実験的に性能評価を行い、大きな成果をあげている。また、査読付き論文を第一著者として2本出版した。

本審査会の発表、質疑応答においても、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、小松氏が本研究全般を主導してきたことが窺える。

これらのことから、本審査委員会は、この論文は博士の学位に値すると認める。