

概要

現代科学の最高到達点の一つが、ビッグバン理論の確立である。高温・高密度の状態から始まった宇宙が、その微小な密度ゆらぎを重力によって増幅し、宇宙の大規模構造が形成されたというものである。ビッグバンの残光として、宇宙背景放射 (Cosmic Microwave Background; CMB) が 1948 年に予測され、1964 年に観測されたことが、この理論を確固たるものにした。更に、この微小な密度ゆらぎの起源をも説明するのが、1981 年に提唱されたインフレーション仮説である。時空の性質として内在する量子ゆらぎが、真空の相転移を経て、宇宙規模にまで瞬時に膨張したとする。インフレーション仮説は、ビッグバン理論が抱える非自明な問題 (平坦性問題や地平線問題) をも説明する有力な説であり、これを観測的に検証することが、宇宙の根源的理解へとつながる。

現在、インフレーション仮説を検証する現実的に唯一の方法が、CMB の偏光観測である。インフレーションによる時空の急激な膨張は、天空の大角度スケールにわたる原始重力波を生み出す。この原始重力波により、四重極性を持つ重力波でのみ生成される密度揺らぎが、CMB の直線偏光の角度分布パターン (B モード) として刻印される。LiteBIRD 計画は、その初検出を目指す、2030 年代前半に打ち上げ予定の衛星である。日本を中心に、欧州や北米各国が参画し、全世界的な開発が進んでおり、基礎科学への大きなインパクトが期待される。

LiteBIRD 衛星では、約 0.1 K で動作する超伝導遷移端センサー (Transition Edge sensor; TES) 型極低温検出器を用いて CMB 放射を観測する。TES は、常伝導状態から超伝導状態に遷移する際の急激な電気抵抗変化を利用した高感度な光センサーである。LiteBIRD ではさらに、微弱な CMB 偏光信号に対し、偏光変調器や衛星スピンをを用いて低周波の AC 変調をかける。従って、特に低周波帯域 ($\lesssim 100$ Hz) において低雑音が要求される。しかしこの帯域には、衛星搭載機器による多数の強い雑音が発生することが知られている。TES 型検出器の軌道上実績はないが、極低温検出器として前世代の半導体型については欧州の Planck 衛星 (CMB 観測) や日本の ASTRO-H, XRISM 衛星 (X 線観測) で実績がある。いずれにおいても、衛星特有の低周波雑音環境によって観測データの質が劣化した。同様の問題が LiteBIRD 衛星の目標達成に対して深刻な障害となる可能性がある。ここで、半導体型 (約 $100\text{M}\Omega$ の高抵抗) と TES 型 (約 $1\ \Omega$ の低抵抗) では、雑音に対する応答が全く異なることが予想される。故に、衛星環境に起因する低周波雑音に対する TES 型検出器の応答を新たに調べ尽くすことが、喫緊の課題である。

本研究では、この大きな目標に向けて、以下の三つの課題を設定し、実施した (図 1)。まず課題 1 で、TES 型検出器の読み出し環境の整備を行った。外来雑音の TES 型検出器への影響を評価するためには、衛星環境を模擬した地上実験室での試験が必要である。宇宙研では、先行研究によって、POLARBEAR 実験用に開発された単素子 TES 検出器を冷却し読み出すシステムが構築されている。ただし、測定が手動で網羅的なデータ取得ができず、TES のノイズレベル評価も予備的なものにとどまっている。そこで、本課題では、読み出しを自動化することから始めた。これにより、TES の基礎指標 (電流-電圧曲線、抵抗-温度曲線、ノイズスペクトル、時系列サンプルデータ) を網羅的に測定し、検出器及び読み出し系の固有パラメータを導出した上で、TES 固有のノイズレベルを推定した。更に、低周波で見られた過剰ノイズを低減させるため、実験室系におけるノイズ源を調査した。最も効果的な改善策として、クライオスタットと常温読み出しエレキ間のケーブルを新規作成してのシールドを強化し、超伝導状態および常伝導状態におけるノイズスペクトルを 1/10 程度低減することに成功した。ただし、まだ TES 固有ノイズ以外の過剰ノイズは残存する。

課題 2 では、衛星搭載機器の雑音レベルの評価を行った。衛星搭載機器からの雑音は、主に、高周波電磁場、低周波磁場、振動 (微小擾乱) がある。この中で磁場雑音は、半導体型検出器で感受性が低いために十分な評価がされておらず、かつ、TES 型検出器で感受性が高いことが知られているため、重点的な調査が必要である。LiteBIRD ではじめて搭載される 2K 級 Joule-Thomson (JT) 冷凍機システムについては、磁場雑音特性が未知である。その測定と評価を本研究の課題とした。宇宙研の磁気遮蔽室内に、(1) JT ドライバ部品、(2) JT 冷凍機を設置し、その低周波磁場を初めて測定した。JT 冷凍機については、駆動周波数や電圧による違いを調べ、モデル化し、衛星 CAD と合わせて検出器面での磁場雑音強度予測を行い、LiteBIRD での要求値を満たすことを確認した。更に、複

数の圧縮機の駆動位相を調整することで、検出器面での磁場強度を抑制することを見出した。

課題3では、TES 検出器に対して外来雑音を印加しその応答を調査した。課題1で整備した TES 読み出しシステムを使い、加振器を用いた低周波振動および XRISM 衛星フライト品スペアの磁気トルカを用いた低周波磁場を TES 検出器に印加した。それぞれの雑音印加に対して、雑音源の振幅に対する TES 応答の線形性、雑音源の周波数に対する TES 応答の周波数依存性、雑音源の変調に対する TES 応答性について調査を行った。振動と磁場の雑音印加に対する TES の応答性は大きく異なっていた。振動に対しては周波数及び TES 状態（遷移、常電導、超電導）に強く依存する応答を示したのに対し、磁場に対してはそれらにほとんどよらない応答であった。これより、振動は熱的に、磁場は電氣的に TES 読み出し系と結合しているものと推測された。更に、振動応答においては、高周波数のキャリア (555.5 Hz) を低周波数 (9.5 Hz) で AM 変調した雑音を印加すると、変調周波数に TES の応答が見られた。これは、サイエンス帯域外での雑音でも帯域内に入り込めることを実証する結果である。これらの結果は、今後の衛星試験で得られる結果との比較材料として活用できる。また、試験から得られた試験方法に関する知見は一般化をし、今後の衛星試験に応用可能な形でまとめた。

49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60