

CMB 偏光観測衛星 LiteBIRD 低周波望遠鏡に用いるミリ波吸収体の平面近傍界反射測定と低温透過測定

中村 研究室 三浦 史弥

The LiteBIRD project is underway to search for the B-mode polarization of the cosmic microwave background (CMB), which is evidence for the inflation theory. In this study, we evaluated the characteristics of the millimeter-wave absorbers to select the optimal absorber for stray light mitigation. We applied the planar near-field measurement method to the absorber reflection measurement, enabling the measurement of two-dimensional diffuse reflection and specular reflection. We measured that the reflection pattern differs depending on the absorber. We conducted low-temperature transmission measurements using a low-temperature chamber. The measurements revealed that the transmission of the CNTUM, an absorber made of carbon nanotubes, increases as the temperature decreases.

1. 研究背景

宇宙のインフレーション理論は原始重力波が宇宙マイクロ波背景放射(CMB)の偏光マップに B-mode と呼ばれる特徴的な偏光パターンを生成することを予測する^[1]。現在、CMB 偏光観測を目指す LiteBIRD 衛星計画 (34 – 448 GHz) が進行中である^[2]。

Planck 70 GHz

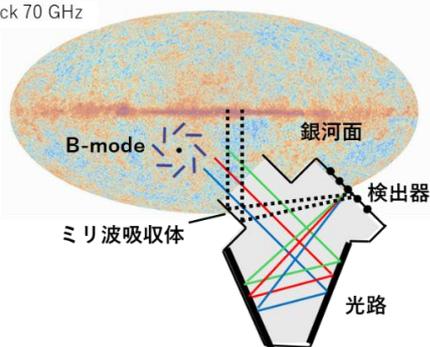


図1 銀河面からの放射による迷光

偏光観測では図 1 のように銀河面からの放射が望遠鏡に入射することによる迷光が系統誤差になることが分かっている。LiteBIRD に搭載される低周波望遠鏡 (34 – 161 GHz) は検出器が鏡や吸収体で囲われた系であるため、吸収体で反射した光も迷光となる。そのため低反射率なミリ波吸収体を用いて迷光を抑制することが重要となる。

反射率の要求値は使用する箇所によって異なるため、複数の吸収体を併用することが想定されている。我々は低周波望遠鏡に最適な吸収体を選定するため、さまざまなミリ波吸収体の特性評価を行った。

2. 平面近傍界反射測定

迷光には、入射角と反射角が等しい鏡面反射のみならず、拡散反射した光も含まれるため、これらを含めた評価が望ましい。従来、自由空間におけるミリ波吸収体の反射率は、2つのホーンと集光光学系を使用してホーン間の光学結合を測定することで特徴づけられてきた。た

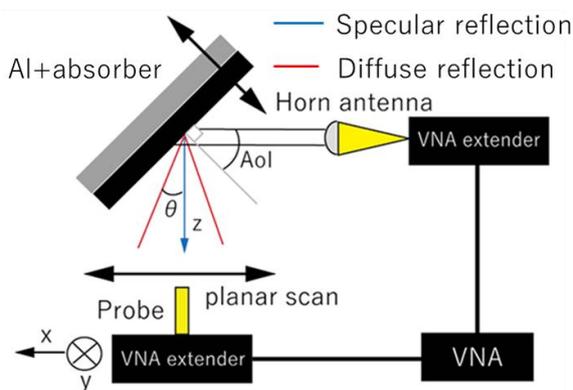


図2 近傍界反射測定のセットアップ

だし、従来法では2次元拡散反射の測定が難しい点や定在波の影響を受けやすい点などの懸念点が存在した。

我々は平面近傍界測定法をミリ波吸収体の反射測定に適用することで、鏡面反射の特性評価に加えて、2次元拡散反射の測定を可能にした^[3]。5種類のサンプル (TKRAM Large および Small Tiles、Eccosorb AN-72、HR-10、LS-22) に加えて開発中のカーボンナノチューブ(CNT)を用いた超軽量電磁波遮蔽材料 CNTUM の反

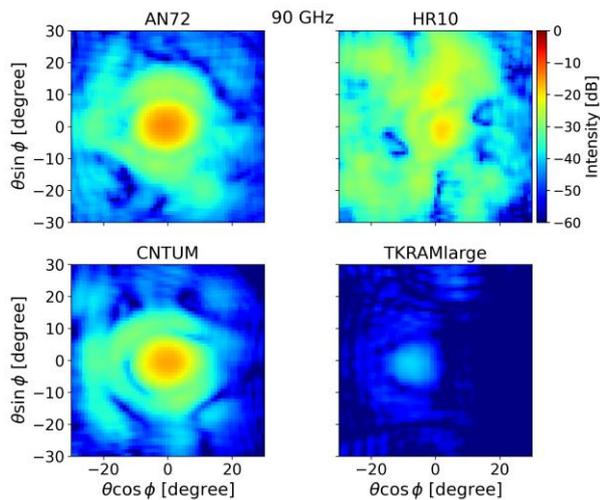


図3 90 GHz, S-pol, 入射角 30° におけるミリ波吸収体の反射波の2次元分布

射率を、33 GHz – 110 GHz の周波数範囲で入射角 30° で測定した。測定セットアップを図2に示す。この手法は、従来手法で課題であったアラインメント誤差や定在波の影響を受けづらく、2次元に拡散・散乱した成分を含む反射波の高精度な測定を可能とする。

図3に示すように各吸収体の反射波の2次元分布を測定することで吸収体によって反射パターンが異なることを測定した。加えて2次元反射パターンから拡散反射を含む反射率を導出することで CNTUM (厚み 5 mm) は CMB 地上実験でも使われている AN-72 (厚み 6 mm) よりも低反射率であることが分かった。

また、TKRAM Large の反射率が最も小さく拡散反射を含めても 40 GHz 以上では -30 dB 以下となっていることが分かった。加えて、放射線耐性について評価するため観測期間に想定される照射量の陽子線を照射し照射前後で同様に平面近傍界測定を行った。その結果、照射前後の反射率の差が十分小さいことを測定した^[4]。

3. 低温透過測定

LiteBIRD は熱雑音低減のため望遠鏡全体を極低温に冷却して運用される。我々は低温での

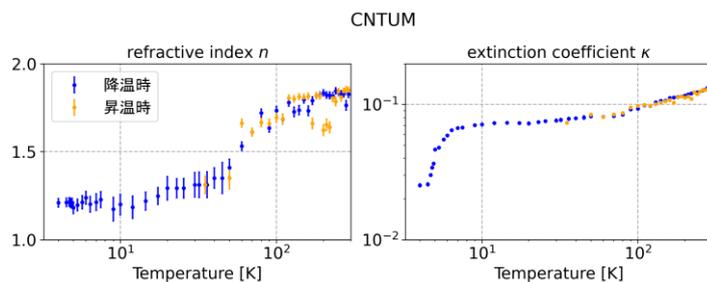


図4 複素屈折率の温度依存性。左図は屈折率、右図は消衰係数を表す

ミリ波吸収体の特性評価を行うため低温チェンバーを用いた低温透過測定を行った。図4に CNTUM の透過率から導出した複素屈折率の温度依存性を示す。温度が下がるにつれて消衰係数が減少し透過率が大きくなることが分かった。原因として CNT の電気伝導度が低温時に減少することが考えられる。

4. 結論、展望

我々は平面近傍界測定法をミリ波吸収体の反射測定に適用することで鏡面反射に加えて2次元拡散反射の測定を行った。測定結果より LiteBIRD 低周波望遠鏡に用いる吸収体として、反射要求の観点からは TKRAM Large が適切であると考えられる。しかし、重く、曲面に適用できないためすべての箇所に使用するのは難しい。そこで AN-72 と比較しても軽量で良好な反射特性を示した CNTUM の発展が期待される。また、低温時に吸収量が低下するという CNTUM の問題点を発見し、さらなる検討が必要なことを明らかにした。

参考文献

- [1] 小松英一郎, 宇宙マイクロ波背景放射. (日本評論社, 2019)
- [2] LiteBIRD collaboration, PTEP, ptac150, 2022, <https://doi.org/10.1093/ptep/ptac150>
- [3] Fumiya Miura et al. Appl. Opt, Vol. 63, No. 25, 2024, <https://doi.org/10.1364/AO.531654>
- [4] Fumiya Miura et al. SPIE, 131021S, 2024, <https://doi.org/10.1117/12.3016033>