

LiteBIRDのための前景放射除去アルゴリズムの検証

金井 啓晃¹, 市来 淨與², 片山伸彦³, 小松英一郎⁴, 他 LiteBIRD phase A1 team
 横浜国立大学¹, 名古屋大学², Kavli IPMU³, Max Planck 研究所⁴

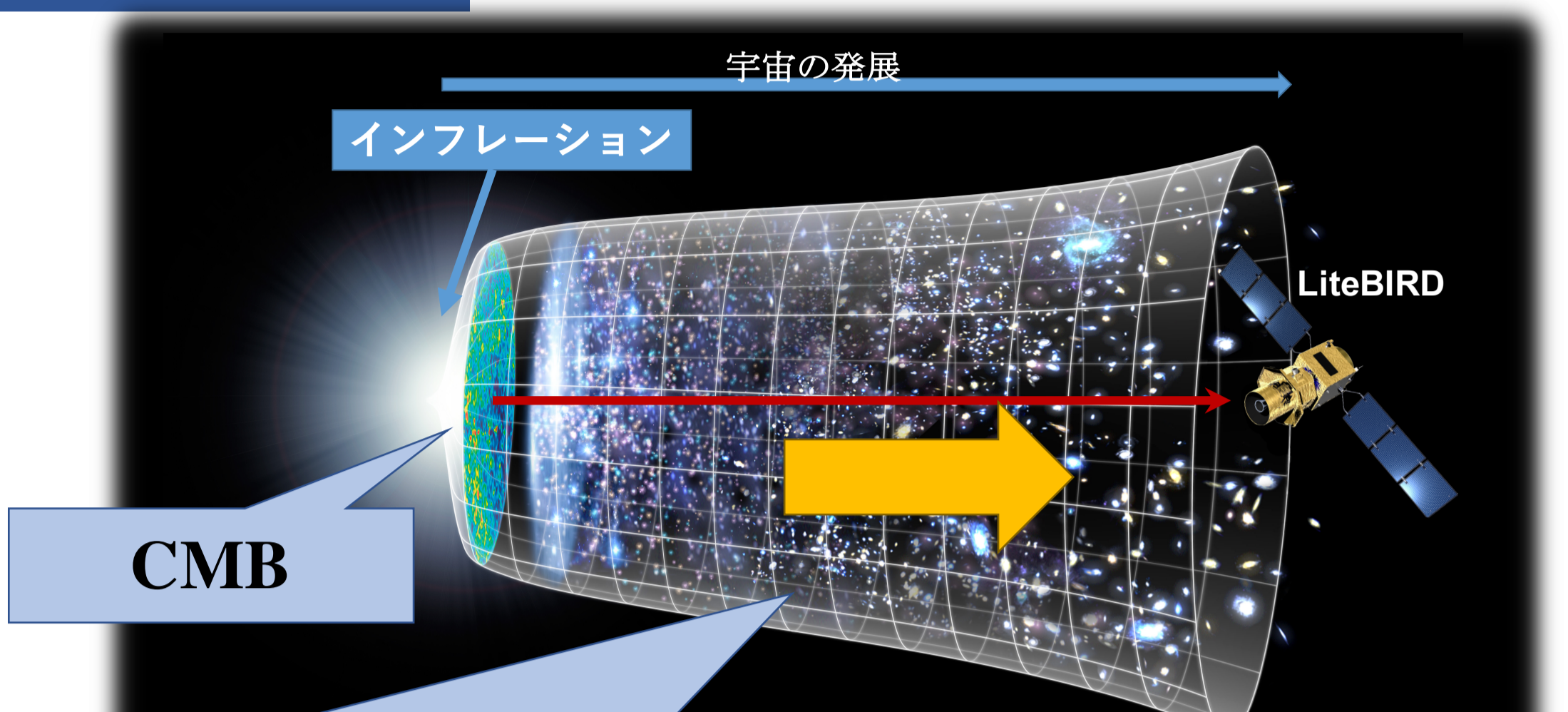
Introduction

宇宙開闢を記述するインフレーション仮説の解明に迫る重要な手がかりとして注目を集めているのが宇宙マイクロ波背景放射 (Cosmic Microwave Background; CMB) の偏光観測の分野である。LiteBIRDは全天を低ノイズで観測し、CMBの偏光からインフレーションの痕跡を見つけることを目的とする科学衛星計画である。

インフレーション仮説：最初期の宇宙に指数関数的な急膨張があったとする仮説。地平線問題など宇宙論的な問題を解決可能。原始重力波を生むと予言。

CMB：かつて灼熱の火の玉宇宙を満たしていた光の残照で、観測可能な最古の光。原始重力波が存在すると B-mode と呼ばれる渦状の偏光パターンが刻まれる。この B-mode は微弱であると考えられ、高精度の偏光観測が必須。

Mission



前景放射 (Foreground; FG)：宇宙空間の星間物質からの放射。非常に強力でCMBの信号を覆い隠してしまう。

※ 画像は <https://map.gsfc.nasa.gov/media/060915/index.html> を加工

LiteBIRD の重要な課題は B-mode の強さ指標であるパラメータ tensor-scalar 比 r の正確な推定を行うことである。代表的インフレーションモデルによる制限から LiteBIRD では $0.002 < r$ の範囲での探索を目標としている。

r の推定でノイズとなってくるのが前景放射である。前景放射 (Synchrotron, Dust) と CMB は周波数特性が異なる (Fig1 実線, 破線) ため、複数の周波数帯における観測データを使用することで前景放射を除去できると期待される。LiteBIRD は 40-400 GHz にわたり広い周波数帯域幅で計 15 band (Fig1 Bar) の測定を行う予定である。本講演ではシミュレーションによる前景放射除去アルゴリズムの精度の検証結果を紹介する。

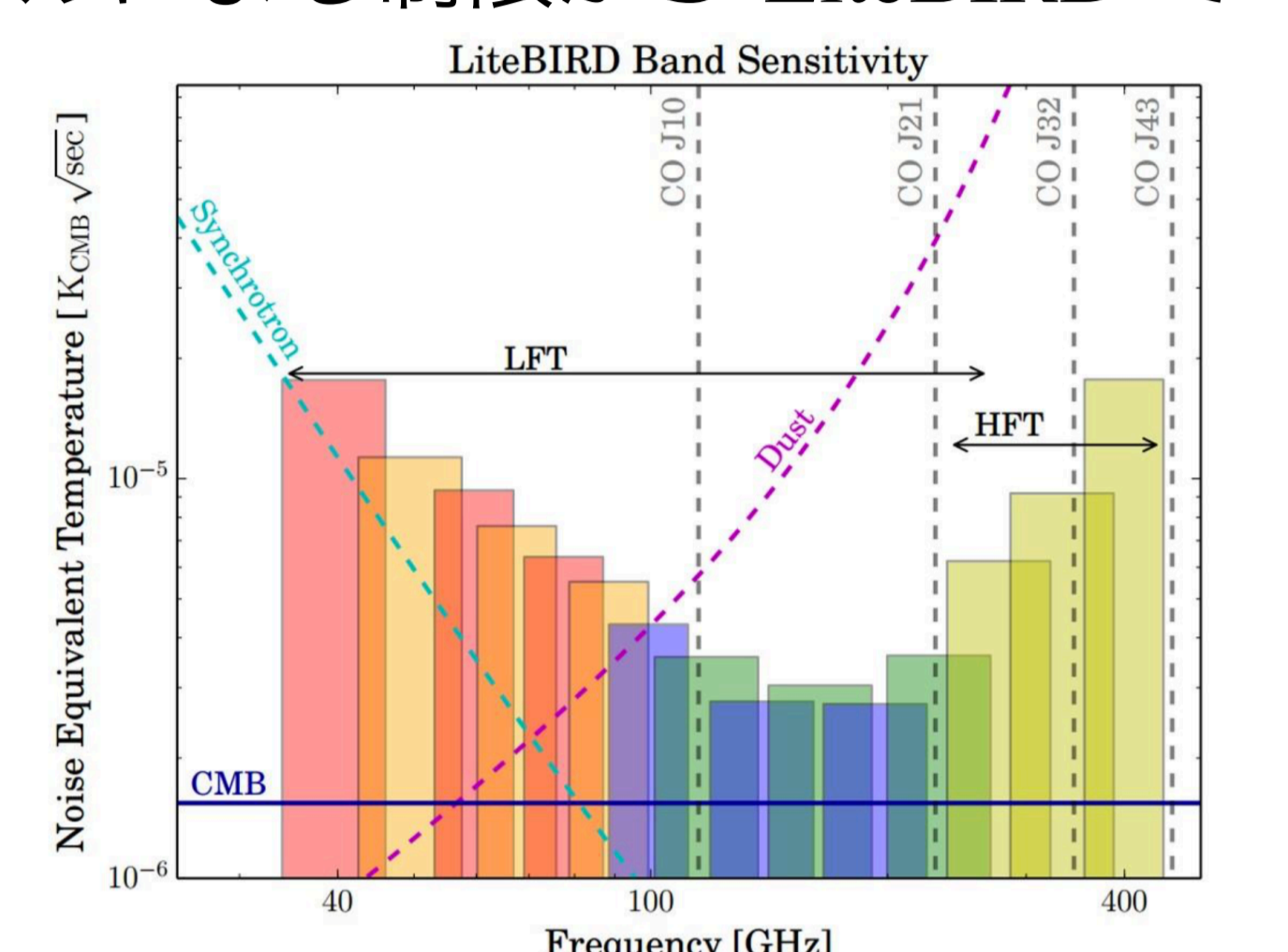


Fig1. H. Ishino et al., SPIE Conference Series, Vol. 9904 of Proc. SPIE, p. 99040X (2016) より

Simulation

Step1 Map making $r_{\text{input}} = 0.001$

1.1 tensor-scalar比を決めてCMBマップを作成
理論モデルに従うパワースペクトルから作成。

1.2 foreground mapを作成

強い偏光成分を持つ前景放射には低周波数域で支配的な synchrotron 放射, 高周波数域で支配的な dust の熱放射の二つがある。これまでに観測・解析された特定の周波数における synchrotron, dust のマップをテンプレートとし、それを周波数特性のあるモデルでスケールングすることで LiteBIRD の観測周波数に外挿する。

$$FG(\nu, \hat{n}) = FG_{\text{ref}}(\nu_{\text{ref}}, \hat{n}) \times I(\nu, \hat{n}) / I(\nu_{\text{ref}}, \hat{n})$$

衛星の観測周波数帯域幅を Top hat 型の band-pass として考えると

$$\langle FG(\nu) \rangle = \frac{1}{\Delta\nu} \int_{\nu-\Delta\nu/2}^{\nu+\Delta\nu/2} FG(\nu') d\nu'$$

・ Synchrotron 放射

周波数特性は power-law model がベース。

今回シミュレーションで用いたのもシンプルな Power law model $I_s(\nu, \hat{n}) \propto \nu^{\beta_s(\hat{n})}$

・ Dust の熱放射

Dust の熱放射は黒体放射のスペクトルに、周波数依存を持った不透明度 $\kappa \propto \nu^{\beta_d}$ をかけた Modified Black Body (MBB) がベース。

今回シミュレーションで用いたのは強度が熱いダストと冷たいダストの和で表されるような two-component MBB model

$$I_D(\nu, \hat{n}) \propto a_1 \nu^{\beta_1} B(\nu, T_1) + a_2 \nu^{\beta_2} B(\nu, T_2)$$

1.3 mapを足し合わせる

$$Map(\nu, \hat{n}) = CMB(r, \nu) + \langle g(\nu) \rangle \langle FG_{\text{dust}}(\nu, \hat{n}) \rangle + \langle g(\nu) \rangle \langle FG_{\text{synch}}(\nu, \hat{n}) \rangle$$

ここで $\langle g(\nu) \rangle$ は強度 (Jy/str) から熱力学的温度 (K_{CMB}) への変換係数である。 $\langle \dots \rangle$ は周波数 bandpass で積分された平均値を示す。

Step3 MC シミュレーション (Result)

Step1~step2を十分な回数繰り返し、(CMB の分布は乱数によって振られる)

r_{input} に対する r_{output} の分布からアルゴリズムの精度を確認する。

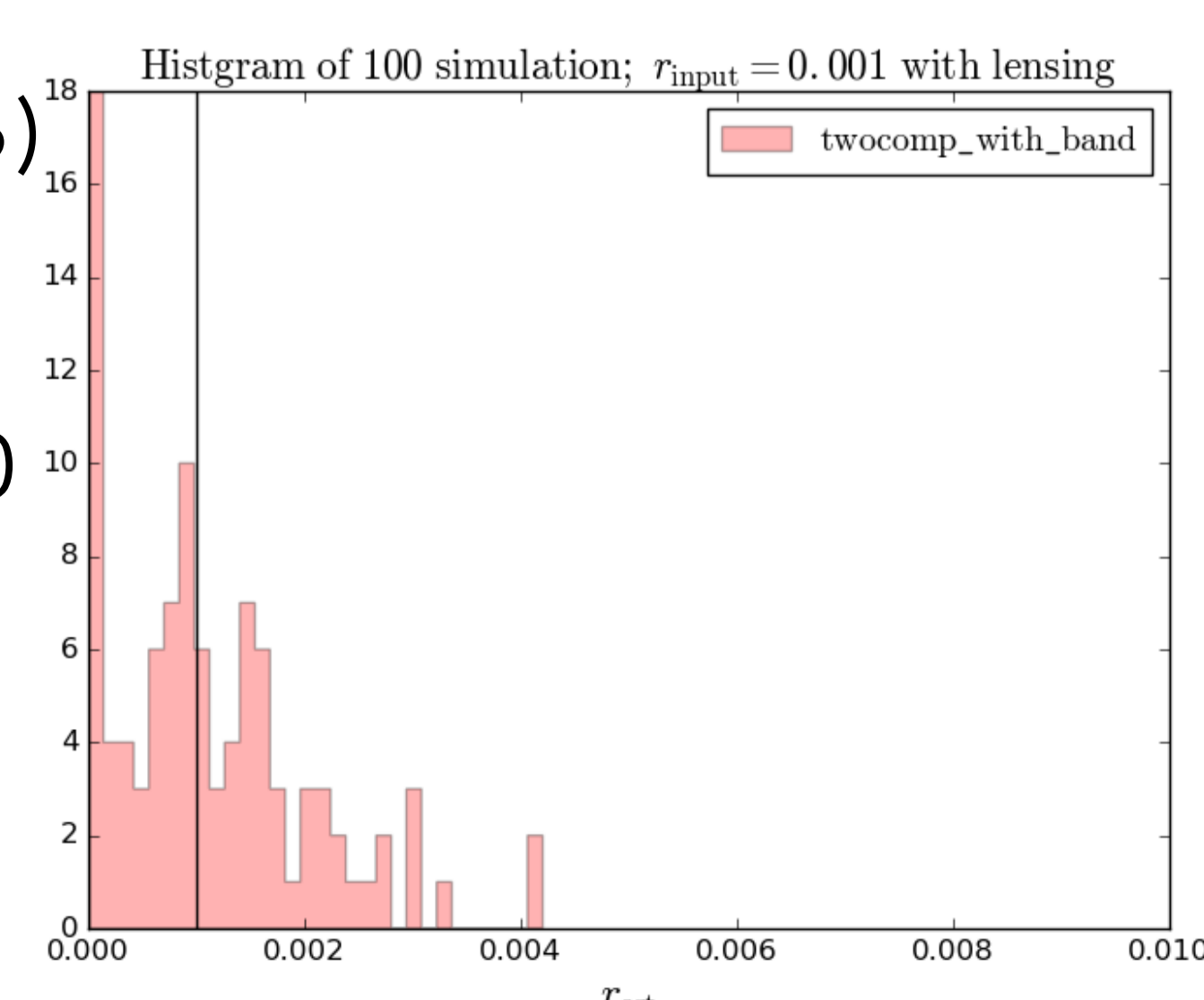
右図は今回のシミュレーションを100回行ったヒストグラムである。

$r_{\text{input}} = 0.001$ に対して推定値は

$$r_{\text{output}} = 0.0011 \pm 9 \times 10^{-5}$$

$$\sigma_r = 9.4 \times 10^{-4}$$

であった。



Step2 Foreground cleaning

2.1 Internal template methodを用いた r の推定

このアルゴリズムは最尤推定法に基づき

(1) 観測で得た異なる周波数のマップに適切な係数 α_i をかけて足し引きして、FG を取り除いた CMB マップ

$$m'(\alpha_i) = \frac{Map(\nu, \hat{n}) - \sum_i \alpha_i Map(\nu_i, \hat{n})}{1 - \sum_i \alpha_i}$$

(2) 理論的な CMB マップの covariance matrix $C(r)$

を比較をして尤もらしいパラメータを推定する。このときに動かすパラメータは(1)の係数 α_i と(2)の tensor-scalar 比 r である。CMB のマップ上のゆらぎはガウス分布に従うと予言されているので、尤度関数は次のように記述できる。

$$L(r, \alpha_i) \propto \frac{\exp[-\frac{1}{2} m'(\alpha_i)^T C^{-1}(r) m'(\alpha_i)]}{\sqrt{|C(r)|}}$$

$r_{\text{output}} = ?$

この尤度 L が最大になるような r が求めるべき tensor-scalar 比である。どの周波数のデータをいくつ使うか、 α_i がどのようなパラメータに依存すると考えるかはメソッド、モデルによって異なる。

* Modified Delta Map method (with band-pass)

今回は modified Delta Map method により推定する。Internal template method では異方性のあるマップに共通の係数 α_i がかかるため r の推定にバイアスが生じてしまう。そこでその異方性をテイラー展開した一次の項で表現する。

Synchrotron に power-law, dust に one-component MBB を仮定すると FG の項を取り除くために $A(\nu) = \langle g(\nu) \rangle \langle \nu^{\beta_s} \rangle$ Band-pass 平均の影響を計算に導入
 $B(\nu) = \langle g(\nu) \rangle \langle \nu^{\beta_d} \log \nu \rangle$
 それらの係数 α_i は次の連立方程式を解けば良い。

$$\begin{pmatrix} A(\nu) \\ B(\nu) \\ C(\nu) \\ D(\nu) \\ E(\nu) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A(\nu_1) & A(\nu_2) & A(\nu_3) & A(\nu_4) & A(\nu_5) \\ B(\nu_1) & B(\nu_2) & B(\nu_3) & B(\nu_4) & B(\nu_5) \\ C(\nu_1) & C(\nu_2) & C(\nu_3) & C(\nu_4) & C(\nu_5) \\ D(\nu_1) & D(\nu_2) & D(\nu_3) & D(\nu_4) & D(\nu_5) \\ E(\nu_1) & E(\nu_2) & E(\nu_3) & E(\nu_4) & E(\nu_5) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \alpha_3 \\ \alpha_4 \\ \alpha_5 \end{pmatrix} = \vec{0}, \quad \begin{matrix} C(\nu) = \langle g(\nu) \rangle \left\langle \frac{\nu^{\beta_d+3}}{\exp(h\nu_i/k_B T_D) - 1} \right\rangle \\ D(\nu) = \langle g(\nu) \rangle \left\langle \frac{\nu^{\beta_d+3}}{\exp(h\nu_i/k_B T_D) - 1} \log \nu \right\rangle \\ E(\nu) = \langle g(\nu) \rangle \left\langle \frac{\nu^{\beta_d+3} \frac{h\nu}{k_B T_D} \exp(h\nu_i/k_B T_D)}{(\exp(h\nu_i/k_B T_D) - 1)^2} \log \nu \right\rangle \end{matrix}$$

Summary

前景放射除去アルゴリズム Modified Delta Map method により高精度な前景放射除去に成功した。

- $\Delta r \sim 0.0001$ のバイアスは生じたが、代表的インフレーションモデルの下限 $0.002 < r$ に対して非常に小さいバイアスで tensor-scalar 比 r の推定ができた。
- 入力モデル (two-component MBB dust) と仮定したモデル (one-component MBB dust) が異なっている場合でも推定はうまくいった。
- 衛星の観測周波数帯域幅を考慮したモデルの作成に成功した。