

LiteBIRD実験に向けた前景放射除去法の検証

水上邦義(YNU), 片山伸彦(Kavli IPMU), 小松英一郎(MPA), 山下徹(YNU)
他 LiteBIRD WG

Bモード偏光検出シミュレーション

LiteBIRDは低ノイズ(数 μ Karcmin)、低解像度(30分角)で宇宙背景放射を全天にわたり観測する衛星実験である。LiteBIRD実験でBモード偏光を検出するには、ノイズを除去する必要がある、Bモード偏光測定には、3つのノイズソースがある。(1)検出器ノイズ(2)天の川銀河による前景放射(3)重力レンズ効果である。本発表では前景放射のダスト成分の除去について報告する。

ダストが支配的な周波数の全天マップをテンプレートとし、その周波数依存性を利用して標的となる周波数領域のダスト成分を除去し、ピクセル空間における最尤法により初期密度揺らぎ(曲率揺らぎ)と重力波揺らぎとの比、テンソル・スカラー比(r)に対する感度を調べる。

前景放射はこれまでの研究ではPlanck Sky Model v1.6.2が用いられていたが、このモデルではダストのスペクトル指数の空間分布が小さく、ダスト成分をよく除去することができていた。しかしplanck実験が2013年に発表したダストのスペクトル指数は空間分布が大きく、除去しきれない前景放射の成分がrのバイアスとなることが予想される。また、ダストは熱いダストと冷たいダストの2成分からなる2-componentモデルがあり、このモデルに関してもこれまでの除去法では除去しきれない成分が大きく残ると予想される。この残留成分がrのバイアスにどの程度影響を及ぼすかを報告する。

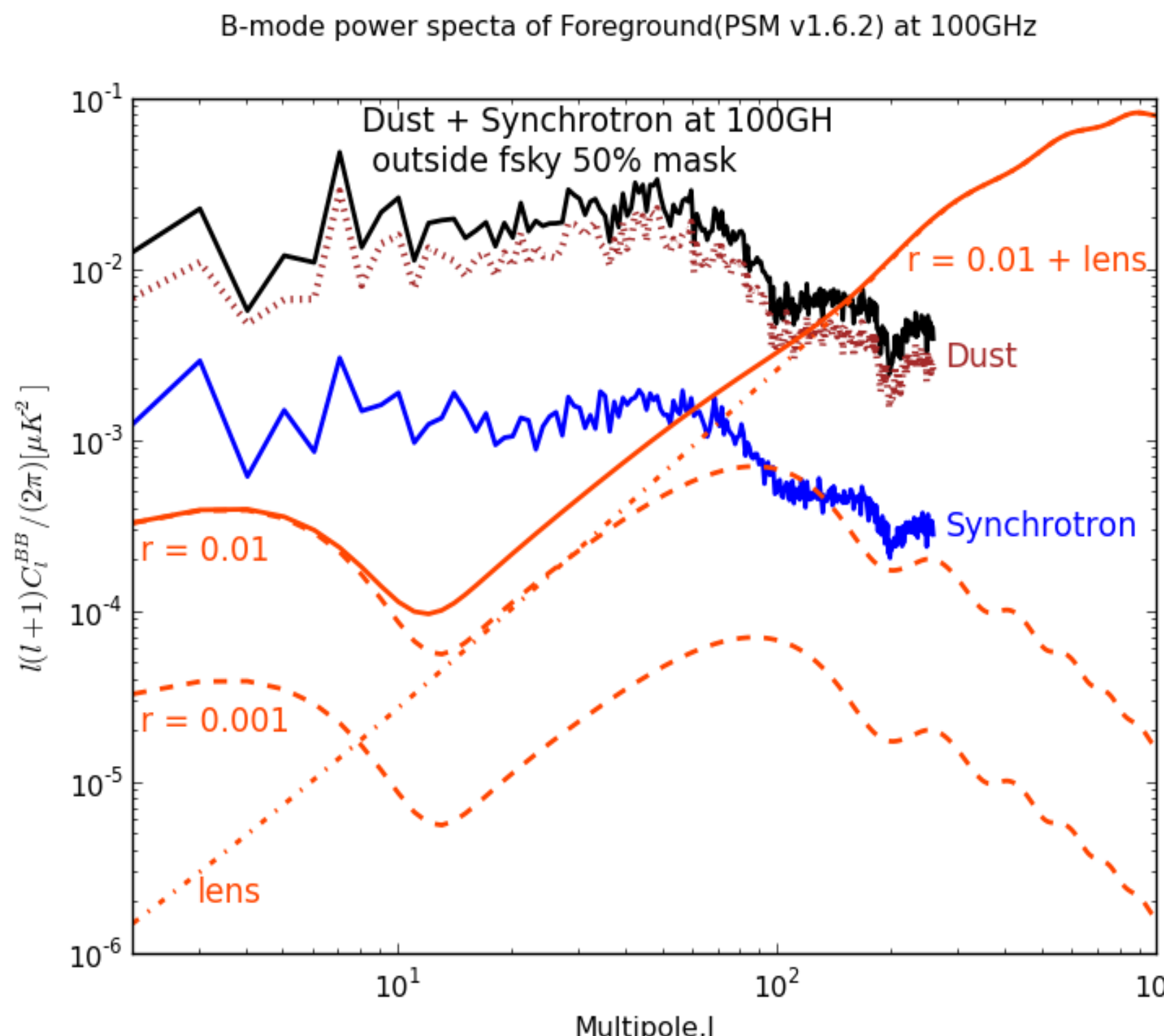


図1: Bモード偏光のパワースペクトル。破線は原始重力波によるもの(r=0.001とr=0.001)、点線は重力レンズ効果によるもの。茶と青は、それぞれダストとシンクロトロンによるパワースペクトル、黒はダスト・シンクロトロンに50%マスクをかけたパワースペクトル。

ダストモデル

使用したダストモデルは以下の3つである。

- (1) PSM v1.6.2 1-component
- (2) Planck2013 data sets 1-component
- (3) Finkbeiner's model 2-components

最も単純なモデルを考えるため、ダスト成分が支配的なマップ(240GHz)には検出器ノイズを考慮しない。CMBマップ(100GHz)では2 μ Karcminの検出器ノイズを想定する。

各モデルのダストの周波数依存性

(1)および(2)

$$Dust(v_i, \hat{n}) = \frac{g(v_i)}{g(v_*)} Dust(v_*, \hat{n}) \left(\frac{v_i}{v_*} \right)^{\beta_D(\hat{n})}$$

(3)

$$Dust(v_i, \hat{n}) = \frac{T(v_i)}{T(v_*)} [Q, U](v_*, \hat{n})$$

$$T(v_i, \hat{n}) = \frac{f_1 \left(\frac{v_i}{v_0} \right)^{\beta_1} B(v_i, T_1(\hat{n})) + (1 - f_1) \frac{q_2}{q_1} \left(\frac{v_i}{v_0} \right)^{\beta_2} B(v_i, T_2(\hat{n}))}{f_1 \left(\frac{v_*}{v_0} \right)^{\beta_1} B(v_*, T_1(\hat{n})) + (1 - f_1) \frac{q_2}{q_1} \left(\frac{v_*}{v_0} \right)^{\beta_2} B(v_*, T_2(\hat{n}))} I_{v_*}$$

$g(v)$: アンテナ温度/熱力学的温度の変換係数
 v_* : リファレンス周波数。本研究ではPSM v1.6.2 94GHzのダストマップを用いている。
 v_0 : Finkbeinerが用いているリファレンス周波数

テンプレート除去法

テンプレート除去マップ:

$$[Q, U](v, n) = CMB(v, n) + Dust(v, n) + Noise(v, n)$$

$$x'(v_{cmb}, \hat{n}) = [Q, U](v_{cmb}, \hat{n}) - \alpha_D [Q, U](v_{dust1}, n)$$

尤度関数:

$$L(r, s, \alpha_D) \propto \frac{\exp \left[-\frac{1}{2} x'(v_{cmb}, \hat{n}, \alpha_D)^T C^{-1}(r, s, \alpha_D^0) x'(v_{cmb}, \hat{n}, \alpha_D) \right]}{\sqrt{|C(r, s, \alpha_D^0)|}}$$

r はテンサ・スカラー比, s はスカラーEモードのパワースペクトルの係数、 α_D はダストのテンプレート係数。

共分散行列:

$$C(r, s, \alpha_D^0) = r c^{tensor} + s c^{scalar} + N_1(v_{cmb}) + N_2$$

c はCMBシグナルの共分散行列(r=1, s=1における)、 N_1 は検出器によるノイズの共分散行列、 N_2 は共分散行列を正則行列に整えるために人工的に加えた、微小なホワイトノイズの共分散行列である。

シミュレーション

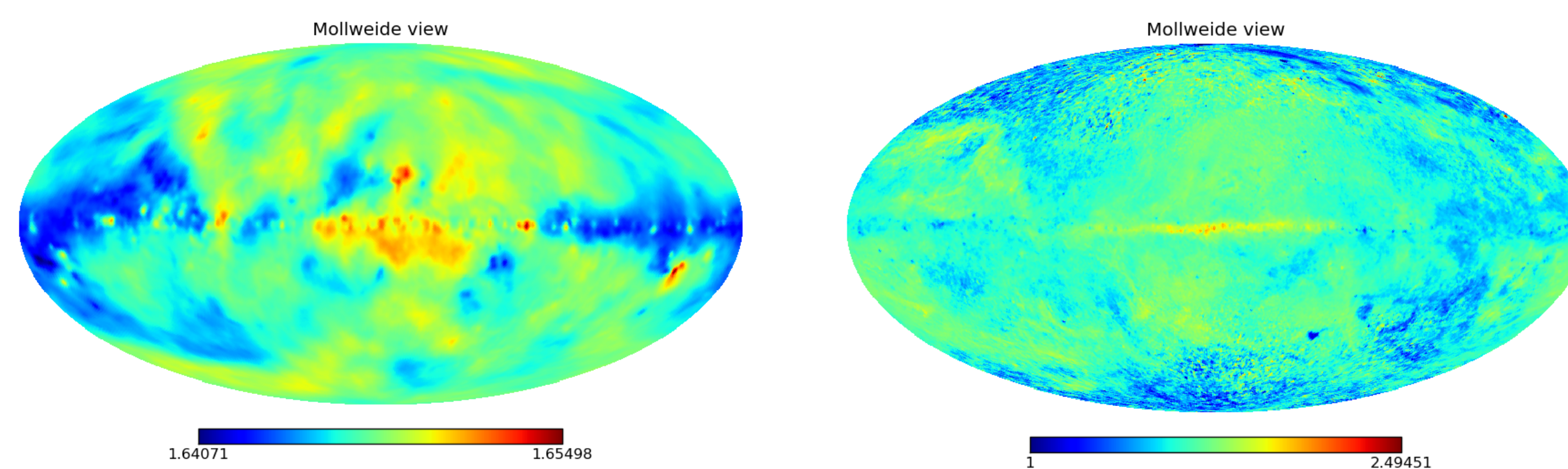
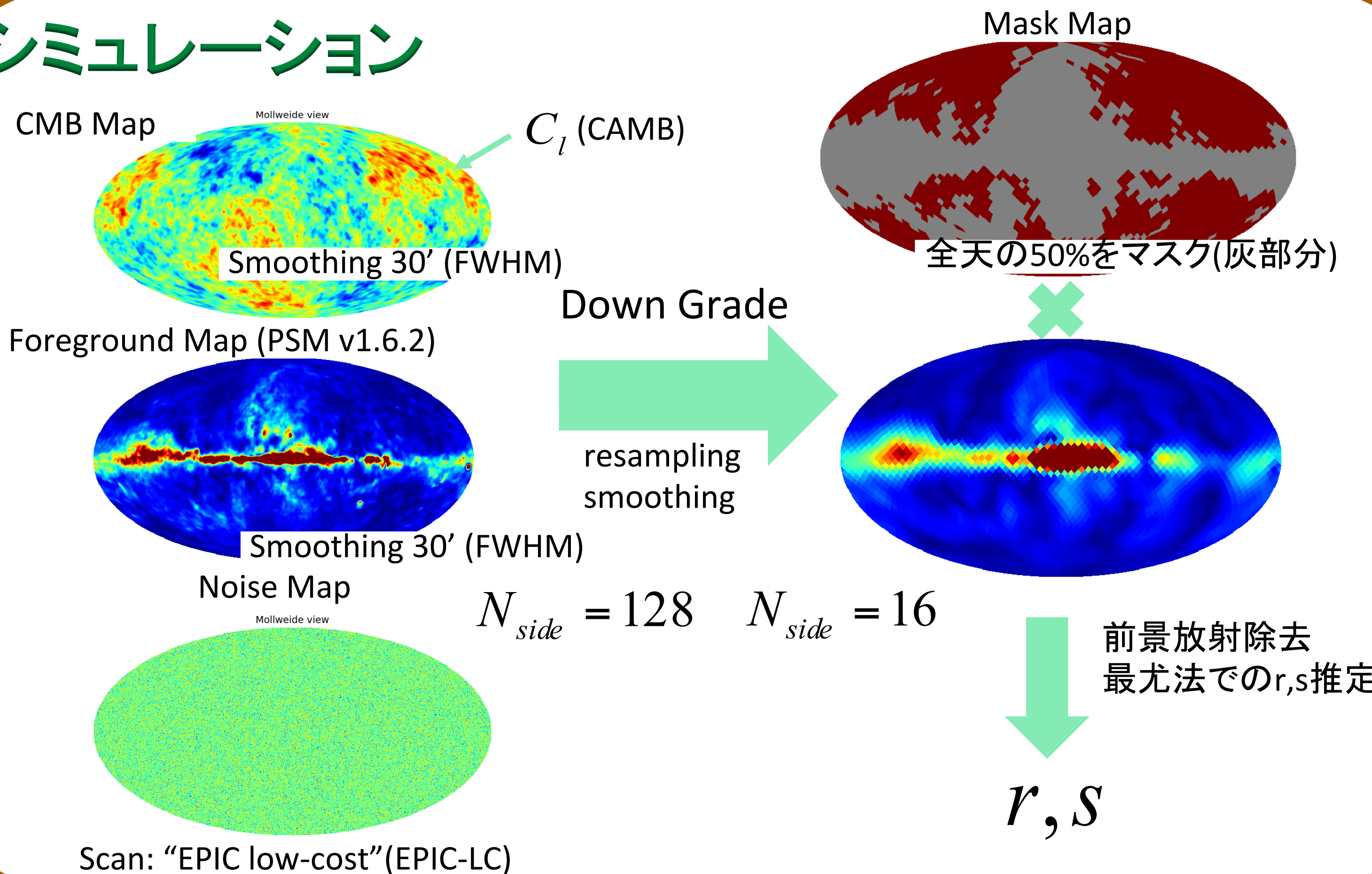


図2: ダストのスペクトル指数の空間分布(左がPSM v1.6.2で右がplanck2013)

ダストのスペクトル指数が一様であれば、前景放射はすべて除去されることが期待される。しかしダストのスペクトル指数が空間分布する場合、その中央値からのずれがそのまま残留成分となり、rへのバイアスとなる。PSM v1.6.2のスペクトル指数に比べて、planck2013の結果は大きく空間分布しているため、より大きなバイアスが予想される。

結果

シミュレーションにより得られた r_{output} (mean(r))とエラー(std(r))の結果を図3,表1に示す。

r_{input}	PSM	planck2013	Finkbeiner
0.05	-0.00031 ± 0.0010	0.01224 ± 0.00068	0.00269 ± 0.00089
0.005	0.00016 ± 0.00019	-	0.00334 ± 0.00023
0.003	-	0.01667 ± 0.00033	-

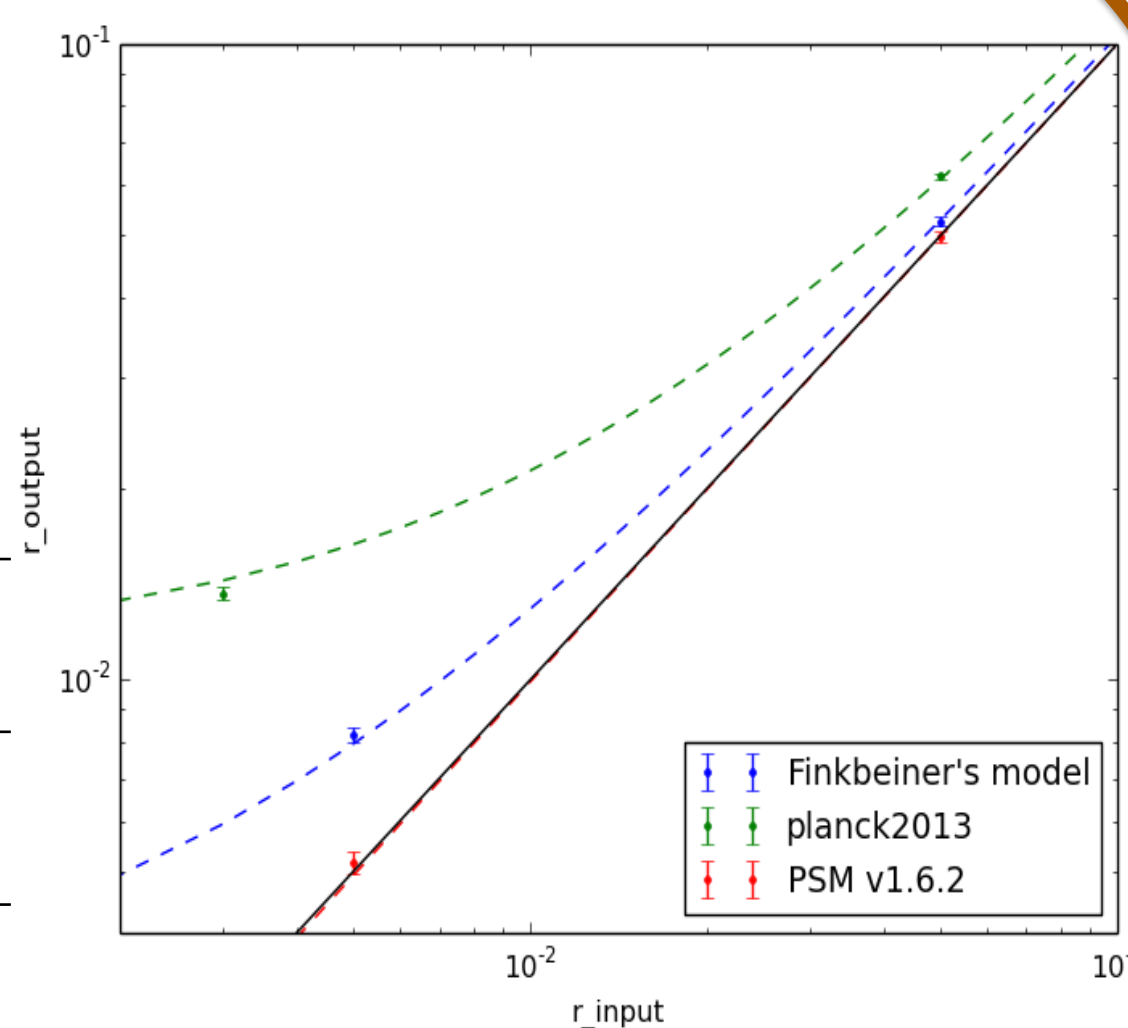


図3: r_{output} , σ_r の結果

結論

今回の結果ではダストのスペクトル指数が大きく空間分布する場合や、2-componentsの場合では除去しきれなかった前景放射が0.02程度のバイアスとなることが分かった。LiteBIRDが目指すrの決定精度は $\delta r < 0.001$ であるが、ノンバイアスでこれを達成するためには前景放射をより精度よく除去する必要がある。

LiteBIRDに向けて

ダストのスペクトル指数の空間分布を考慮したテンプレート除去を行なう必要がある。具体的には以下のようなテンプレートを想定している。

$$Dust(v_i, \hat{n}) = \frac{g(v_i)}{g(v_*)} Dust(v_*, \hat{n}) \left(\frac{v_i}{v_*} \right)^{\beta_D + \delta\beta_D(\hat{n})}$$

$\delta\beta_D(\hat{n})$ が十分小さいとき

$$Dust(v_i, \hat{n}) \approx \frac{g(v_i)}{g(v_*)} \left(\frac{v_i}{v_*} \right)^{\beta_D} \left[1 - \log \left(\frac{v_i}{v_*} \right) \delta\beta_D(\hat{n}) \right] Dust(v_*, \hat{n})$$

3周波数のマップを使用することで $\delta\beta_D(\hat{n})$ の0次の項と1次の項を除去するように係数を定めると、以下のように表現できる。

$$\chi(\hat{n}) = [Q, U](v_{cmb}, \hat{n}) - \frac{g(v_{cmb})}{g(v_1)} \left(\frac{v_{cmb}}{v_1} \right)^{\beta_D} \frac{\log \left(\frac{v_2}{v_{cmb}} \right)}{\log \left(\frac{v_2}{v_1} \right)} [Q, U](v_1, \hat{n}) + \frac{g(v_1)}{g(v_2)} \left(\frac{v_1}{v_2} \right)^{\beta_D} \frac{\log \left(\frac{v_1}{v_{cmb}} \right)}{\log \left(\frac{v_2}{v_1} \right)} [Q, U](v_2, \hat{n})$$

こうして前景放射を空間分布の1次の項まで除去することで、バイアスが小さくなることが予想される。今後はこのテンプレートがどの程度有効なのかを検証していく。

参考文献

N.Katayama & E.Komatsu, 2011, ApJ, 737, 78; Page, L. et. al., 2007, ApJS, 170, 335; Efasthiou, G., Gratton, S. & Paci, F., 2009, MNRAS, 397, 1355; Aaron M. Meisner & Douglas P. Finkbeiner, 2015, Apj, 798, 8