

LiteBIRD実験に向けた前景放射除去法の検討

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

シミュレーションによるBモード検出感度の研究

LiteBIRDのような低ノイズ(数 $\mu\text{K arcmin}$ 程度)、低解像度(30分角)で全天を観測する衛星実験の為にテンプレートを使用して前景放射の除去を行い、ピクセル空間における最尤法を用いて初期密度揺らぎ(曲率揺らぎ)と重力波揺らぎとの比、テンサ・スカラー比(r)に対する感度を調べた。Bモード測定には、3つのノイズソースがある。(1) 測定器のノイズ;(2) 銀河由来の前景放射;(3) 重力レンズである。マップ上での前景放射の除去法について議論し、除去しきれない前景放射による r へのバイアスに関して報告する。図1に、 $2\mu\text{K arcmin}$ のノイズ(黒)、原始重力波(破線、 $r=0.001$ と 0.01 の場合)と重力レンズ(点線)によるBモードのパワースペクトルを示す。更に前景放射の2主成分であるダスト(茶)とシンクロトン(青)のスペクトルも示す。前景放射はPlanck Sky Model(PSM v1.6.2)によるもので、全天の50%のみを観測するマスクをかけている。シンクロトンとダストのスペクトルは $l \leq 10$ の範囲で $10^{-3} \sim 10^{-2}(\mu\text{K})^2$ 程度であり、シグナルの5~500倍も大きい。このような状況で原始重力波によるBモードが検出出来るだろうか？

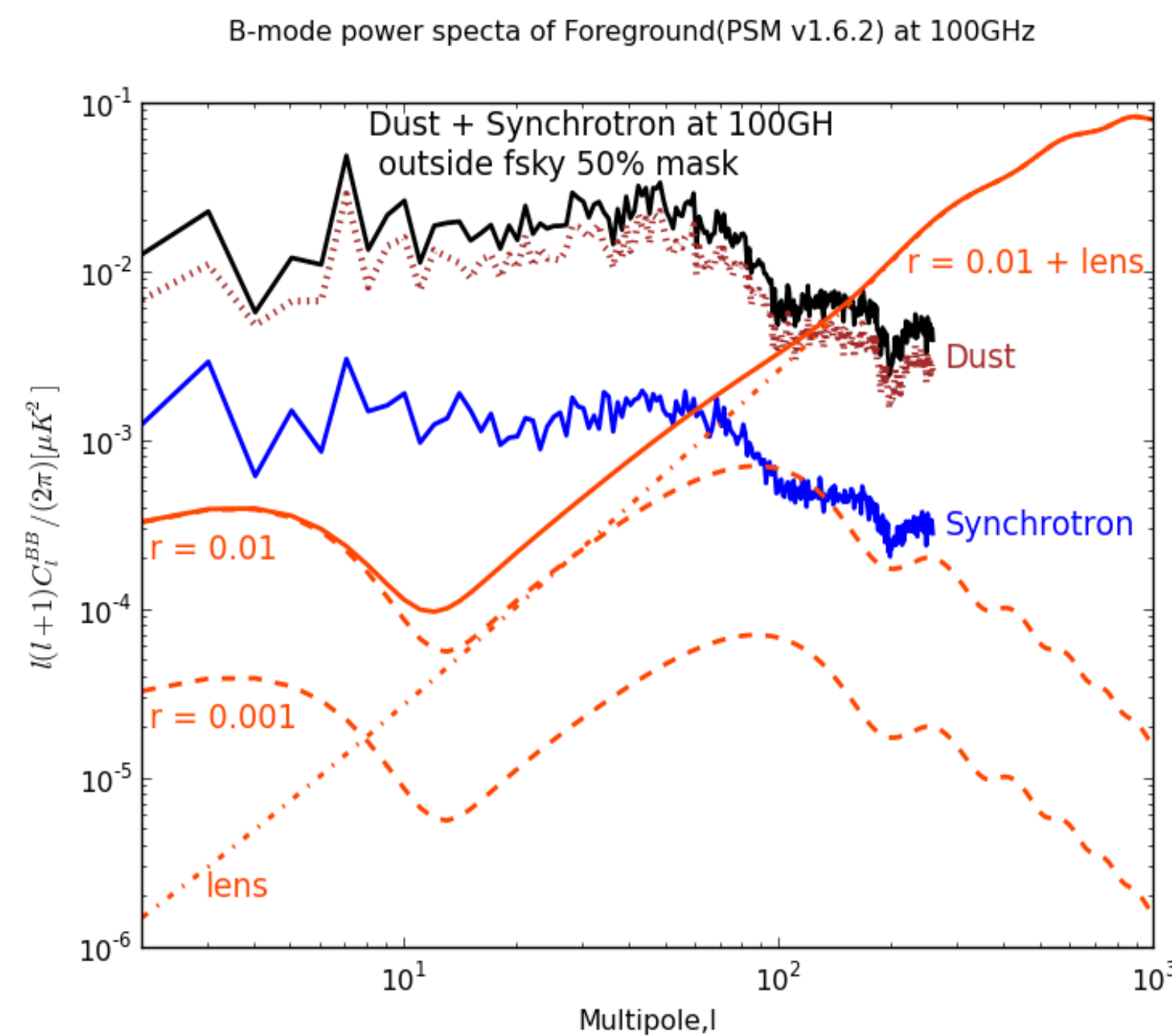
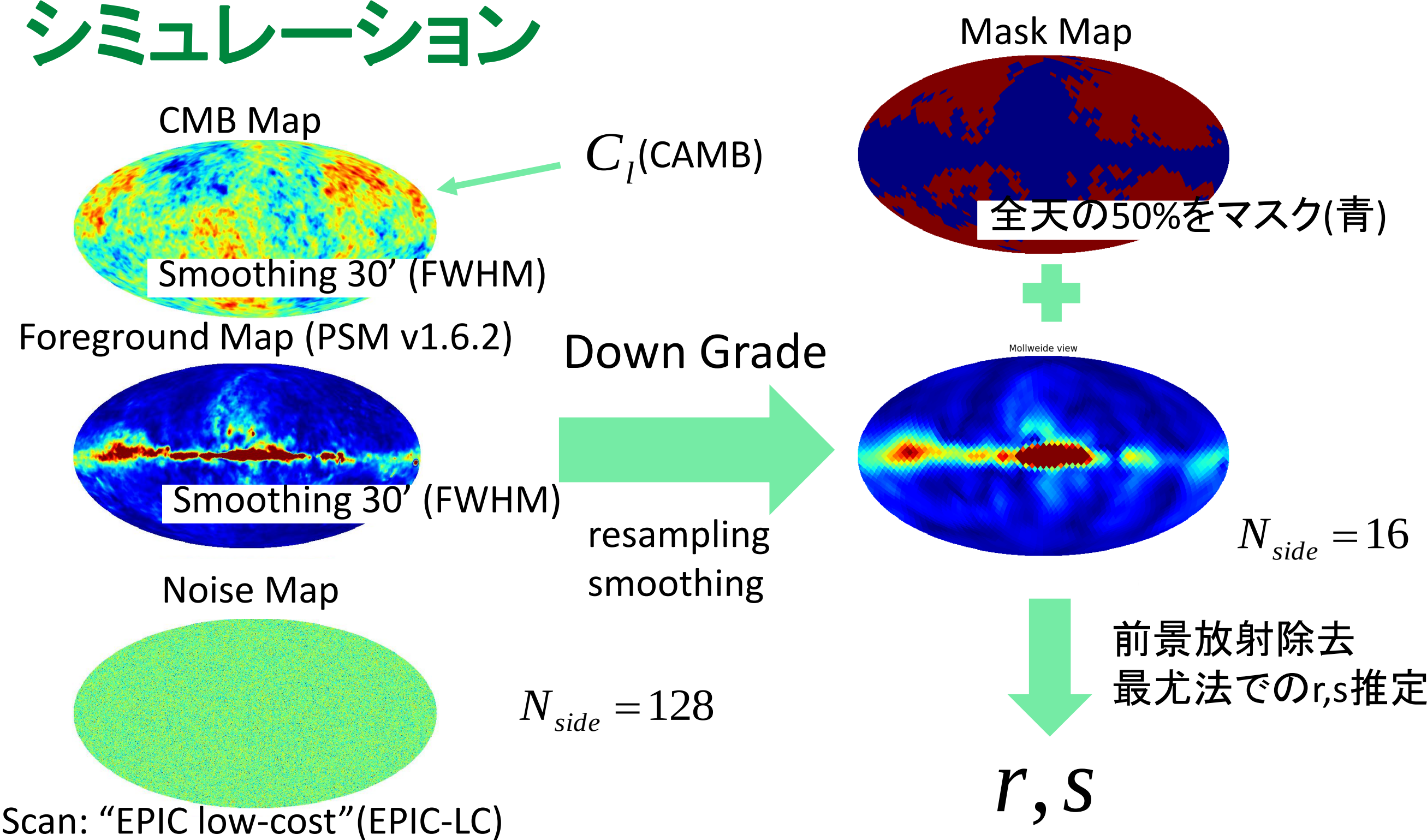


図1: Bモード偏光のパワースペクトル。破線は原始重力波によるもの($r=0.001$ と $r=0.001$)、点線は重力レンズ効果によるもの。茶と青は、それぞれダストとシンクロトンによるパワースペクトル、黒はダスト・シンクロトンに50%マスクをかけたパワースペクトル。

シミュレーション



マップモデル

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

$$Dust(v_i, \hat{n}) = \frac{g(v_i)}{g(v_j)} Dust(v_j, \hat{n}) \left(\frac{v_i}{v_j} \right)^{\beta_D(\hat{n})} \quad Synch(v_i, \hat{n}) = \frac{g(v_i)}{g(v_j)} Synch(v_j, \hat{n}) \left(\frac{v_i}{v_j} \right)^{\beta_S(\hat{n})}$$

$g(v)$: アンテナ温度/熱力学的温度の変換係数

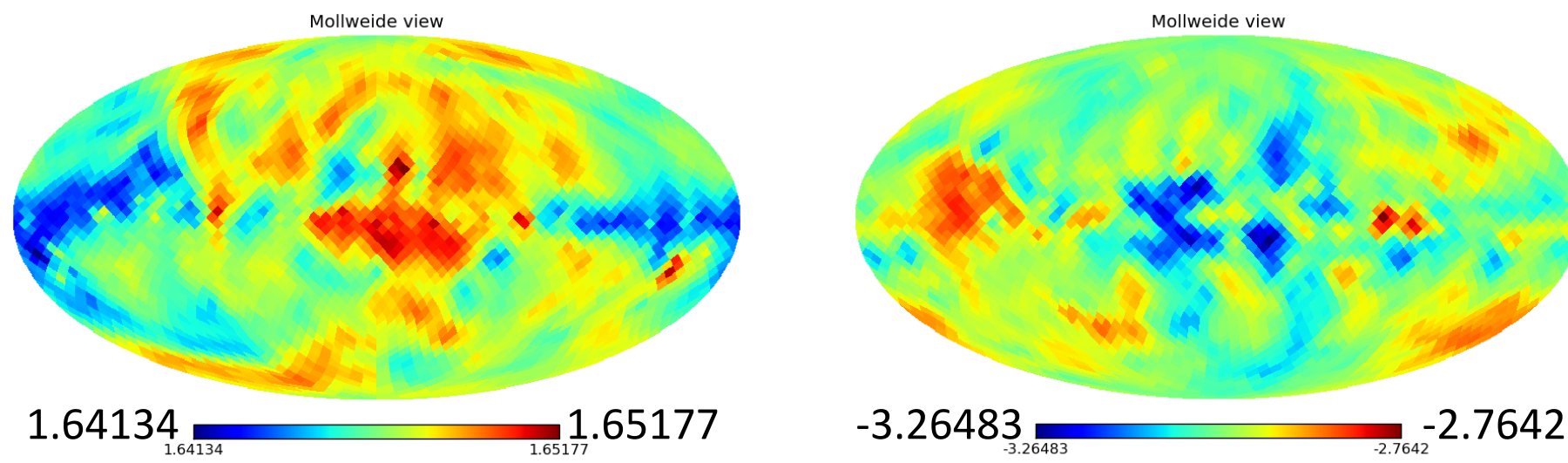


図2: β_D (右), β_S (左)の空間分布。 β_S の空間分布は β_D と比較して非常に大きい。

Band [GHz]	60	78	100	Sub total
Noise level [$\mu\text{K arcmin}$]	10.3	6.4	4.6	3.5

Band [GHz]	140	190	280	Sub total
Noise level [$\mu\text{K arcmin}$]	4.0	3.1	4.1	2.1

表1: 本研究で使した観測周波数・ノイズレベル

Method I

テンプレート除去マップ:

$$x'(v_i, \hat{n}) = [Q,U](v_i, \hat{n}) - \alpha_D \Delta D - \alpha_S \Delta S \quad \begin{aligned} \Delta D &= [Q,U](280, \hat{n}) - [Q,U](190, \hat{n}) \\ \Delta S &= [Q,U](60, \hat{n}) - [Q,U](78, \hat{n}) \end{aligned}$$

尤度関数:

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

r はテンサ・スカラー比, s はスカラーモードのパワースペクトルの係数、 α_i ($i = S_{1 \sim 12}, D$) は前景放射のテンプレート係数。

共分散行列:

$$C(r, s, \alpha_D^0, \alpha_S^0) = rc^{tensor} + sc^{scalar} + N_1(v_i) + \sum_{j=\Delta D, \Delta S_i} \alpha_j^{0^2} \cdot N_{1,j} + N_2$$

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、微小な対角ノイズの共分散行列。

シンクロトン放射のスペクトル指数の空間分布によって、前景放射除去を行うマップと60, 78GHzのシンクロトン放射ではミスマッチが起こるため、 $f_{sky} = 0.5$ のマスクをかけ、12リージョンでテンプレート係数で最適化する。12リージョンの空間分布は図3のa,bの2種類を使用した。前景放射除去は100, 140GHzで行い、前景放射除去の最終結果としては100, 140GHzの結果の加重平均とした。

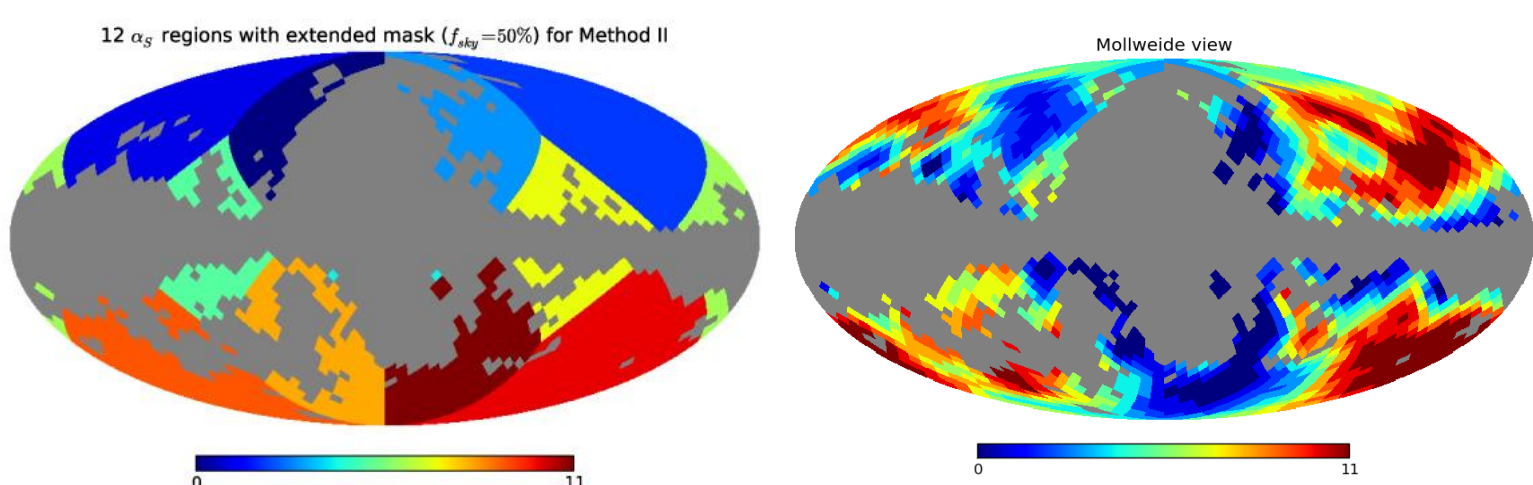


図3: α_S に仮定した空間分布。a(右図), b(左図)の場合

aの場合は隣り合うピクセルは近い分布と仮定した空間分布である。それに対してbの場合は、 α_S の空間分布は β_S の空間分布によるため、PSMの β_S をソートして12分割したものである。

Method II

テンプレート除去マップ:

$$x'(v_i, \hat{n}) = \frac{[Q,U](v_i, \hat{n}) - \alpha_D [Q,U](280) - \alpha_S \Delta S}{1 - \alpha_D}$$

α_S は最尤法のフリーパラメータとして決めるのではなく、以下の χ^2 乗式を最小二乗法で求めた β_S を使用し、解析的に求める。(I: pixel index)

$$\chi_I^2(\beta_{S_i}) = \left(\frac{[Q_i, U_i](60) - [Q_i, U_i](100) - (\alpha_D^0(60) - \alpha_D^0(100))\Delta D}{[Q_i, U_i](60) - [Q_i, U_i](78) - (\alpha_D^0(60) - \alpha_D^0(78))\Delta D} - \frac{g(60) \cdot 60^{\beta_{S_i}} - g(100) \cdot 100^{\beta_{S_i}}}{g(60) \cdot 60^{\beta_{S_i}} - g(78) \cdot 78^{\beta_{S_i}}} \right)^2$$

$$\alpha_{S_i}(v_i) = \frac{g(v_i) \cdot v_i^{\beta_{S_i}}}{g(60) \cdot 60^{\beta_{S_i}} - g(78) \cdot 78^{\beta_{S_i}}}$$

尤度関数:

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

共分散行列:

$$C(r, s, \alpha_D^0) = \frac{rc^{tensor} + sc^{scalar} + N_1(v_i) + \alpha_D^{0^2} N_1(280) + N_{1, \alpha_S \Delta S} + N_2}{(1 - \alpha_D^0)^2}$$

$N_{side}=16$ の空間で求めた β_S マップは図4(上)であった。全天での空間分布の考慮を期待したが、図4(下)のようにマスク外の領域では非常に悪い結果であった。これはマスク領域内のSN比が非常に低いためである。(図5)よって、 $N_{side}=16$ の空間で得た β_S より1つの α_S を求め、使用した。 $f_{sky}=0.5$ のマスクをかけた、140, 190GHzのマップより前景放射除去を行い最終結果は140, 190GHzの結果の加重平均とした。

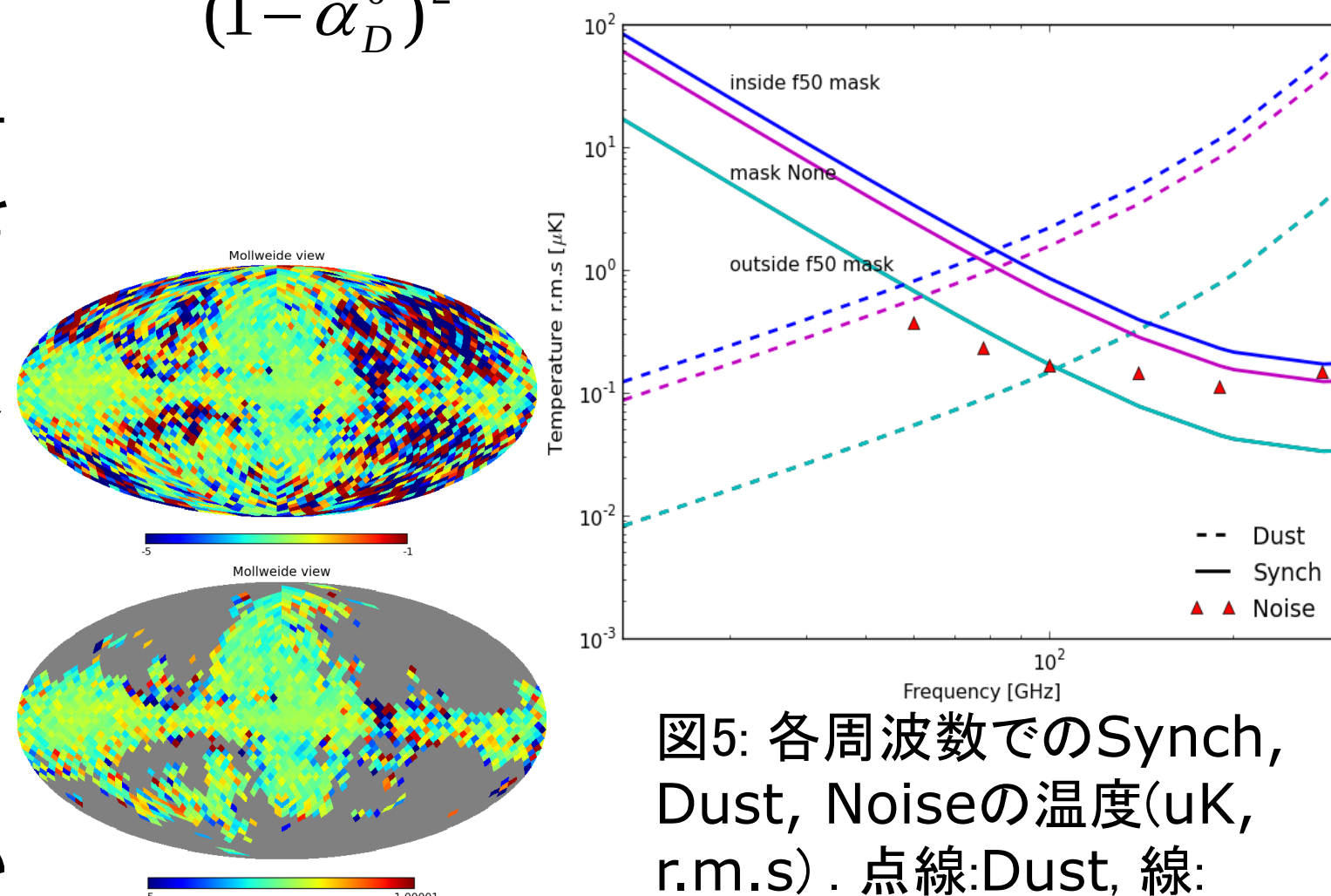


図4: 求めた β_S マップ

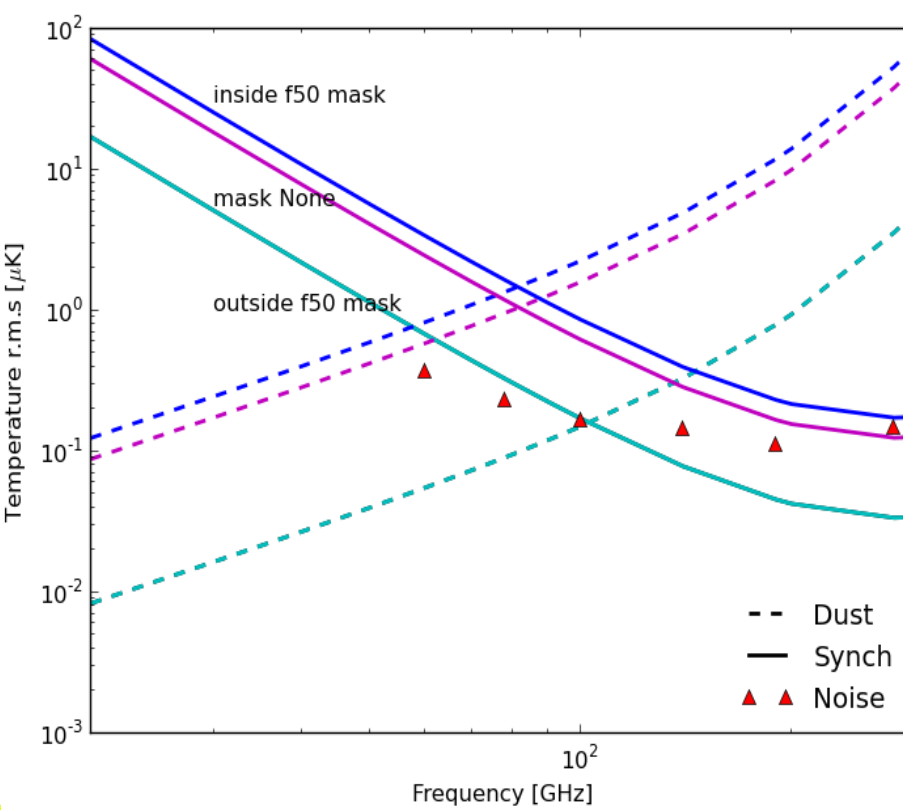


図5: 各周波数でのSynch, Dust, Noiseの温度(μK , r.m.s.)。点線:Dust, 線: Synch, 三角: Noise, 青: 50%マスク内, 桃: マスク無し, 水: 50%マスク外

結果

r_{recover} (mean(r))とエラー(std(r))の結果を図6, 表2に示す。

点線は $r_{\text{recovered}} = r_{\text{input}} + \text{offset}$ でポイントに χ^2 fitを行った結果である。緑: Method I-a, 赤: I-b, 青: II

Offsetは、 0.0006 ± 0.0003 (I-a), 0.0003 ± 0.0003 (I-b), 0.0002 ± 0.0002 (II)だった。結果、offset <

0.0003 に抑える事に成功した。(method I-b, II)

0.0003 に抑える事に成功した。(method I-b, II)				
	r_{input}	Method I-a	Method I-b	Method II
	0.003	-	0.0034 ± 0.0005	0.0033 ± 0.0005
	0.001	0.0016 ± 0.0004	0.0013 ± 0.0003	0.0012 ± 0.0003
		Method I-a	Method I-b	Method II
0.003	100(190)GHz	-	0.0039 ± 0.0010	0.0032 ± 0.0008
	140GHz	-	0.0032 ± 0.0006	0.0033 ± 0.0007
0.001	100(190)GHz	0.0021 ± 0.0008	0.0021 ± 0.0008	0.0011 ± 0.0004
	140GHz	0.0014 ± 0.0004	0.0011 ± 0.0004	0.0012 ± 0.0004

表2(上):加重平均
表2(左):各前景
の結果表

表2(上): 加重平均
表2(左): 各前景除去の結果表

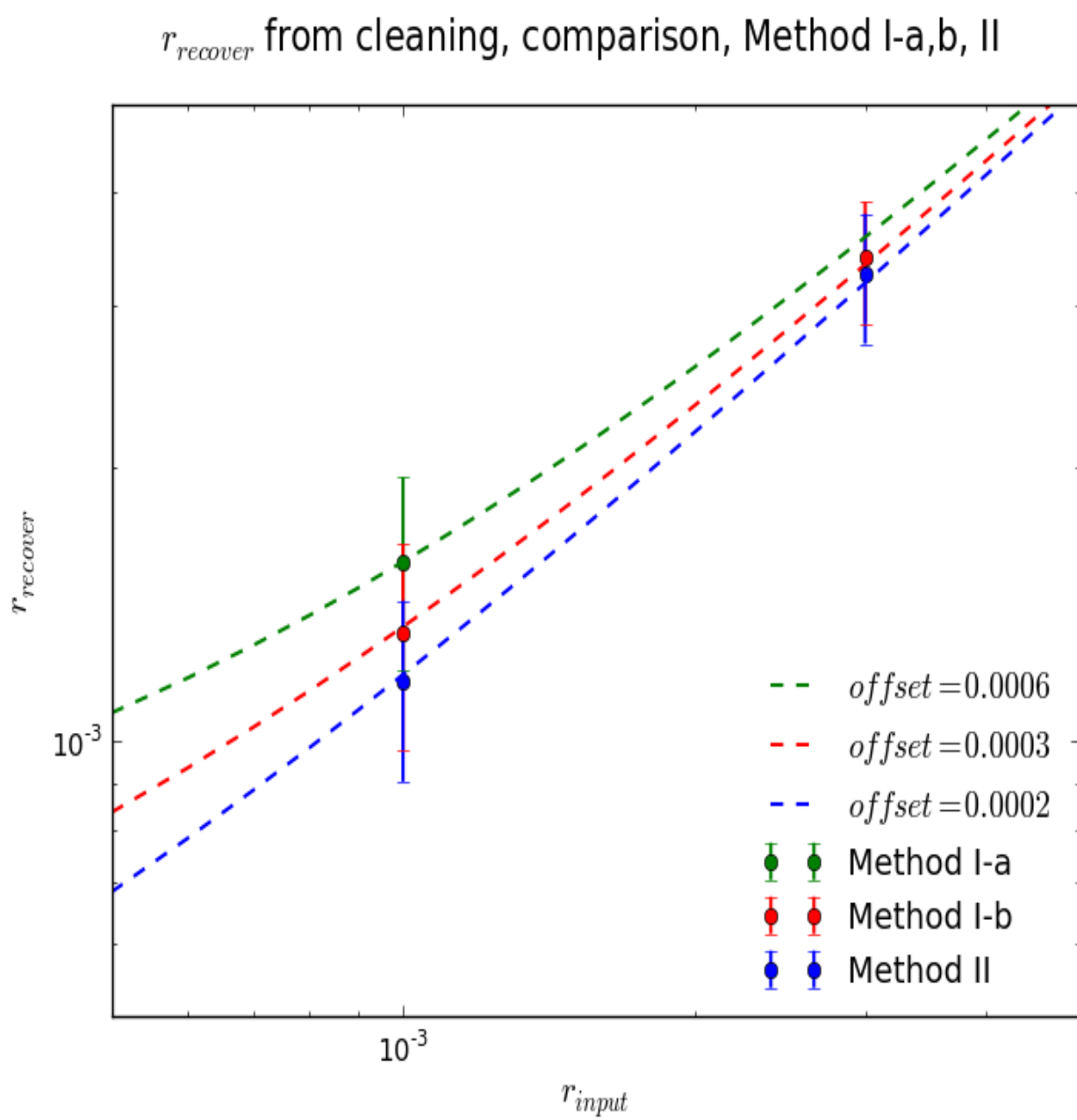


図6: r_{recover} , σ_r の結果

結論

LiteBIRD (Light satellite for the studies of B-mode polarization and Inflation from cosmic background Radiation Detection; <http://cmbpol.kek.jp/litebird>) のような、次世代の低ノイズでのCMB偏光観測衛星実験に向けた前景放射除去法としてinternal template fittingを検討した。簡単なテンプレート除去法を用いて、シミュレーションで与えた r (テンサ・スカラー比)に対して、 $\Delta r < 0.0003$ の小さいoffsetで得ることに成功した(Method I-b, II)。これは以前の研究結果の $\Delta r < 0.0006$ の半分以下であった。また、offsetの要因はシンクロトン放射の空間分布を正確に考慮できていないためである。よって、offsetを軽減するためにはMethod Iではフリーパラメーターである α_S の数を増やすこと、Method IIではSN比が低い領域で空間分布を用意できるようになることが必要であろう。

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