

宇宙マイクロ波背景輻射 Bモード偏光観測の為の小型科学 衛星LiteBIRDの測定感度に関する シミュレーション

Mar. 25, 2011

日本物理学会 2010年年次大会

片山伸彦 (KEK)

小松英一郎 (テキサス大)

LiteBIRDワーキンググループ

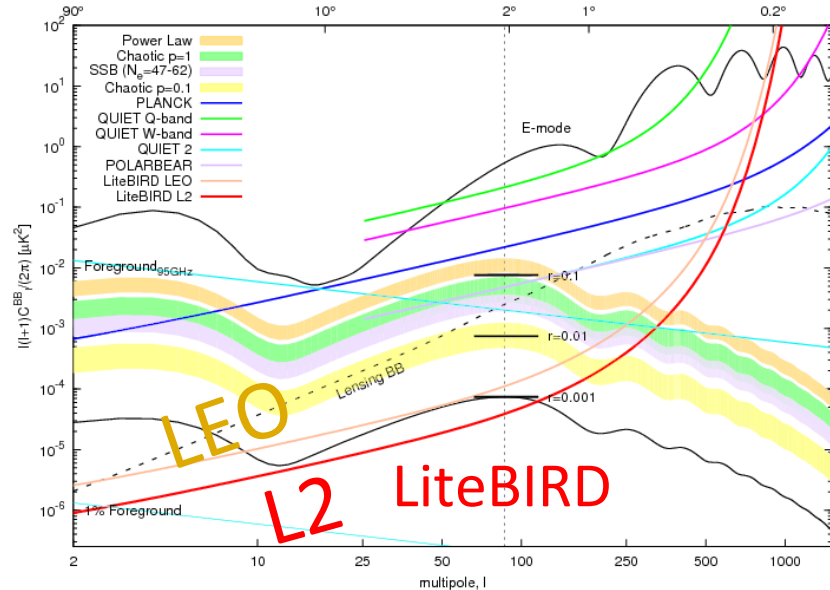
アウトライン

- 研究の背景
- シミュレーションとその結果
- まとめと今後の予定

研究の背景

3シグマ発見領域

- インフレーション時の原始重力波が、CMBのBモード偏光を引き起こす
- その大きさを表すパラメータとしてテンサー／スカラー比 r が使われる
- モデルにもよるが、 r の大きさはインフレーションを引き起こすポテンシャルの強さに依る
- r の値を測定したい



Planck

色々な理論の予言値

$r \sim 0.001$ の測定を
目指して実験を計画！
小型科学衛星 LiteBIRD

CMB衛星計画と本研究の目的

- 衛星の利点
 - 全天を観測出来る
 - 大気がなく、冷たい
- 衛星計画の現状
 - 米国Decadal Surveyでは(先行している)地上での観測を重視
 - 国内で進める為には「技術」を持っている事が重要
- 技術開発の一環として、
 - 新しい解析アルゴリズムの開発
 - 日々、解析に関する論文が発表されており、若く、進展の激しい分野
- 計算科学的興味
 - 計算量が非常に多くなる可能性

他のトークで検出器・衛星については説明

実験の最適化

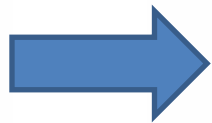
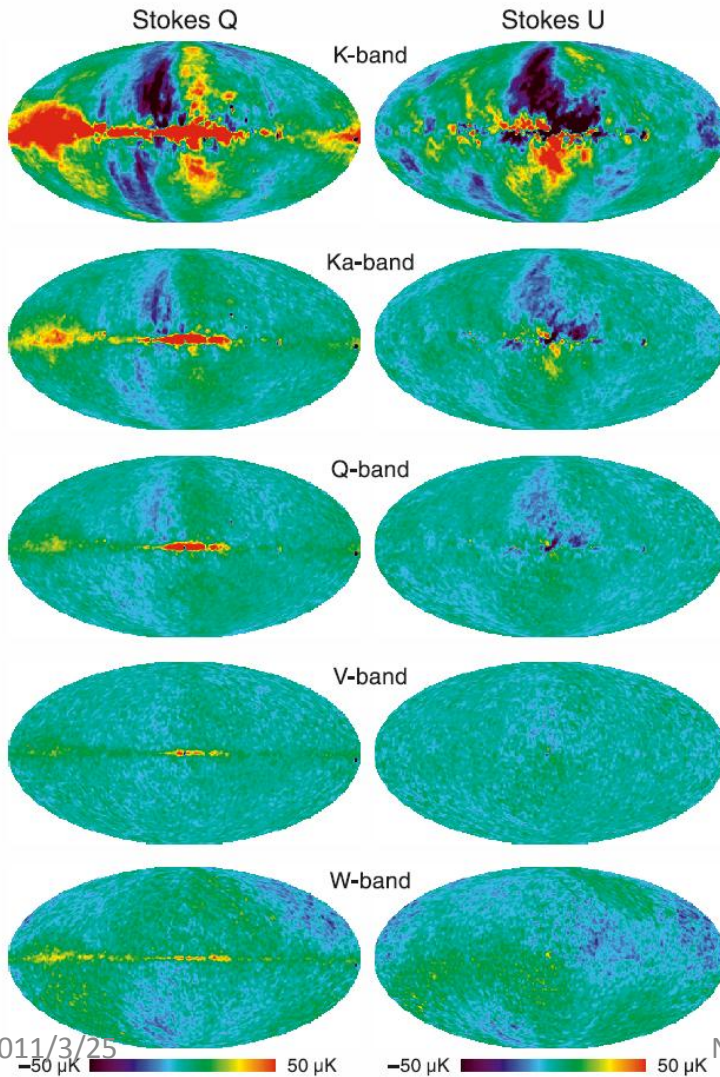
- 小型科学衛星：極めて制約が多い
 - シミュレーションによるフェージビリティ・スタディが必至
- 衛星・実験装置の最適化
 - 観測周波数、周波数数・センサー数の選択
 - 軌道・姿勢・測定時間・方向・通信量の選択
 - 衛星重量・構造・打ち上げロケットの選択
 - 打ち上げロケットにより、かかる加速度が違う

どういう設計パラメタがあって、それらの因果関係がどうであるかも自明ではない

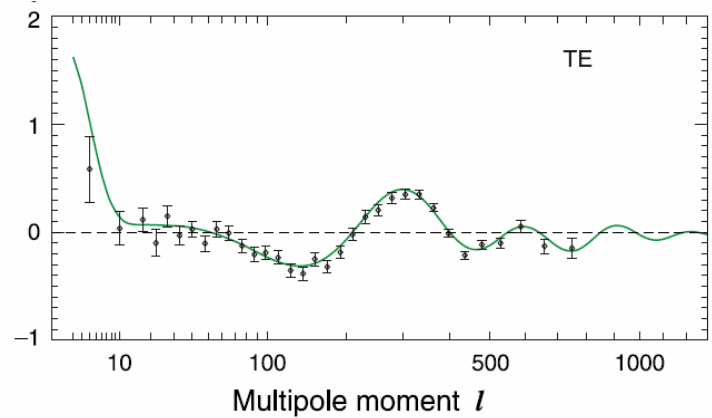
CMB偏光の測定方法

WMAP: Q/Uのマップ

WMAP: 温度とEモード偏光の
相関スペクトラム



$$(+1)C_l^{TE}/2\pi \text{ [}\mu\text{K}^2\text{]}$$



宇宙論パラメタ

Table 8. WMAP Seven-year Cosmological Parameter Summary

Description	Symbol	WMAP-only	WMAP+BAO+ H_0
Parameters for Standard Λ CDM Model ^a			
Age of universe	t_0	13.75 ± 0.18 Gyr	13.75 ± 0.11 Gyr
Hubble constant	H_0	71.0 ± 2.5 km/s/Mpc	$70.4^{+1.2}_{-1.1}$ km/s/Mpc
Baryon density	Ω_b	0.0449 ± 0.0028	0.0456 ± 0.0016
Physical baryon density	$\Omega_b h^2$	$0.02258^{+0.00052}_{-0.00050}$	0.02260 ± 0.00053
Dark matter density	Ω_c	0.222 ± 0.026	0.227 ± 0.014
Physical dark matter density	$\Omega_c h^2$	0.1109 ± 0.0056	0.1123 ± 0.0035
Dark energy density	Ω_Λ	0.734 ± 0.029	$0.728^{+0.015}_{-0.016}$
Curvature fluctuation amplitude, $\delta_0 = 0.002 \text{ Mpc}^{-1}$ ^b	Δ_δ^2	$(2.43 \pm 0.11) \times 10^{-9}$	$(2.441^{+0.088}_{-0.092}) \times 10^{-9}$
Fluctuation amplitude at $5h^{-1}$ Mpc	σ_8	0.801 ± 0.030	0.809 ± 0.024
Scalar spectral index	n_s	0.963 ± 0.014	0.963 ± 0.012
Redshift of matter-radiation equality	z_{eq}	3196^{+131}_{-133}	3232 ± 87
Angular diameter distance to matter-radiation eq. ^c	$d_A(z_{eq})$	14281^{+108}_{-101} Mpc	14238^{+120}_{-120} Mpc
Redshift of decoupling	z_*	$1090.79^{+0.34}_{-0.32}$	$1090.89^{+0.65}_{-0.69}$
Age at decoupling	t_*	379164^{+6187}_{-8421} yr	377730^{+2205}_{-2300} yr
Angular diameter distance to decoupling ^{c,d}	$d_A(z_*)$	14116^{+189}_{-183} Mpc	14073^{+120}_{-120} Mpc
Sound horizon at decoupling ^d	$r_s(z_*)$	$146.6^{+1.2}_{-1.2}$ Mpc	146.2 ± 1.1 Mpc
Acoustic scale at decoupling ^d	$\lambda_d(z_*)$	302.44 ± 0.80	302.40 ± 0.73
Reionization optical depth	τ	0.088 ± 0.015	0.087 ± 0.014
Redshift of reionization	z_{reion}	10.5 ± 1.2	10.4 ± 1.2

2011/3/25

N. Katayama (JPS)

r の測定感度

- センサー・光学系に起因する要素
 - センサー数、ノイズ、偏光、ビーム
- 測定・衛星に起因する要素
 - 測定可能時間、方向、通信
- 前景輻射
 - 銀河からの偏光した電波
- 解析に起因する要素
 - 計算量、行列の大きさなど解析手法の限界
- 他の宇宙論パラメタに起因する要素
 - re-ionization, lensing

他の
講演

今回の研究

沢山の事が絡みあっている

シミュレーションの
必要性

r 測定 of シミュレーション

- 宇宙論パラメタを仮定し、ボルツマン方程式を解いてCMBのスペクトルを計算する
 - 既存のプログラムCAMBを用いて行う。
 - r に依存するBモード偏光のスペクトルは、大きさが r に比例するが、形は変わらない
- スペクトルから、CMBのマップを生成する
 - 乱数が必要。実際に観測できる宇宙は一つだが、シミュレーションでは沢山の「宇宙」を生成する
- マップにノイズ・ビームサイズの影響を加え銀河系による不可視領域のマスクをかける

最尤法で r の測定感度を求める

- CMB は各点 (ピクセル) でガウス分布する
- ピクセル空間での最尤法はもっとも感度が高くバイアスも少ないが、計算量が多大である (Large factor $\times n_p^3$)

$$L(\mathbf{m}|r)d\mathbf{m} = \frac{\exp\left[-\frac{1}{2}\mathbf{m}^t(S(r) + N)^{-1}\mathbf{m}\right]}{|S(r) + N|^{1/2}} \frac{d\mathbf{m}}{(2\pi)^{2n_p/2}}$$

ここで

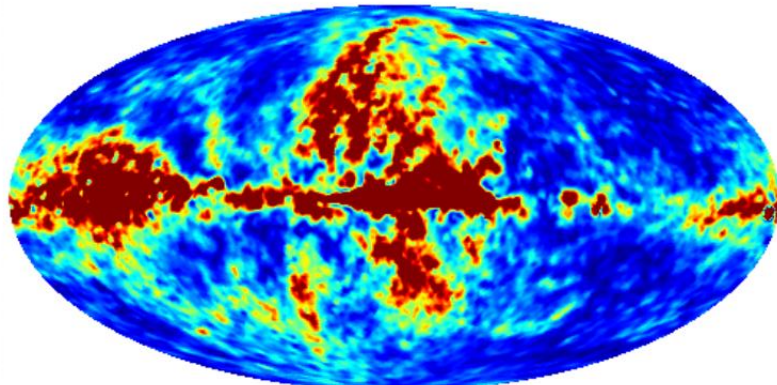
- \mathbf{m} は Q、U マップのベクタで、長さは $2n_p$
- S はシグナルの共分散行列 ($2n_p \times 2n_p$)
 - S は宇宙論パラメタを与えて計算出来る
- N はノイズの共分散行列
 - N は、スムージングの為に非対角

$$n_p = 3072$$
$$(N_{\text{side}} = 16)$$

前景輻射

シンクロトロン放射: 銀河中の相対論的な電子が銀河磁場の中でらせん運動することによる。 ν^{β_s} , ($\beta_s \sim -3$) のような周波数依存性を持つ

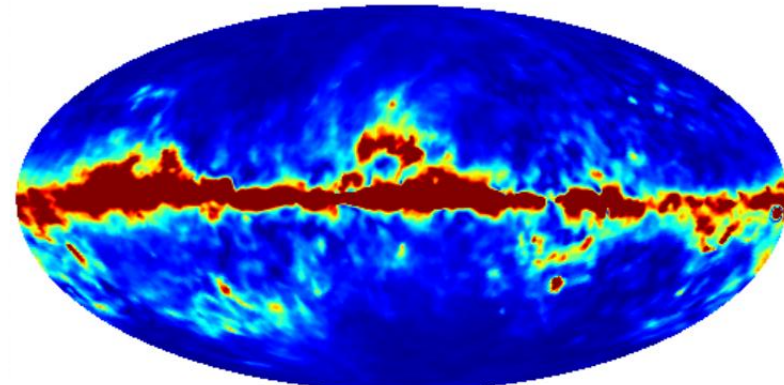
Synchrotron P (90 GHz)



0.0  1.0 μK

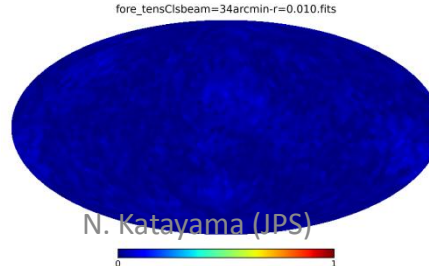
熱的ダスト放射: 銀河中の熱的平衡状態にあるダストによる黒体放射。ダストの粒は磁力線と垂直な向きに整列しやすい。そのために、その向きの偏光成分を含みやすい。

Dust P (90 GHz)



0.0  1.0 μK

シグナル(Q, $r=0.01$)



N. Katayama (IPS)



これまでの研究(by Efsthathiou, G. et al):
簡単な除去法では除去後、 $r \sim 0.03$ のオフ
セットが生じ、 $r = 0.1$ 程度までの測定しか出
来ない事がわかっている

例：2バンド観測によるダストの除去

- ダストをモデルにより生成

$$m_{100} = cmb + dust_{100} + noise$$

$$m_{240} = cmb + dust_{240}$$

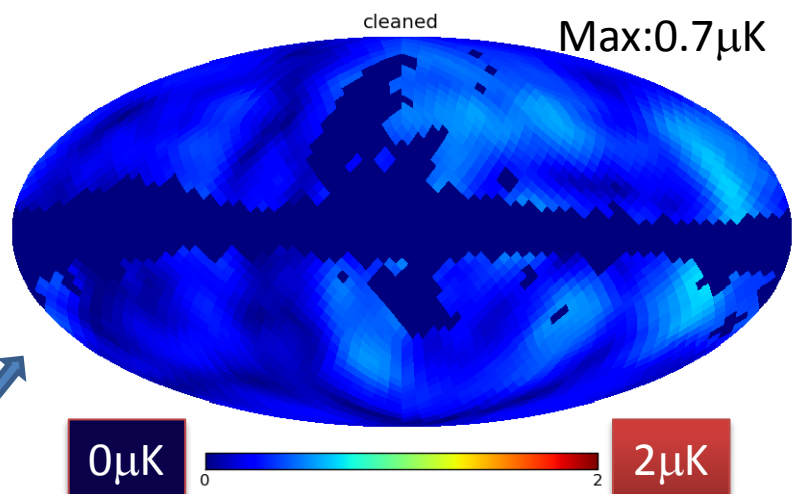
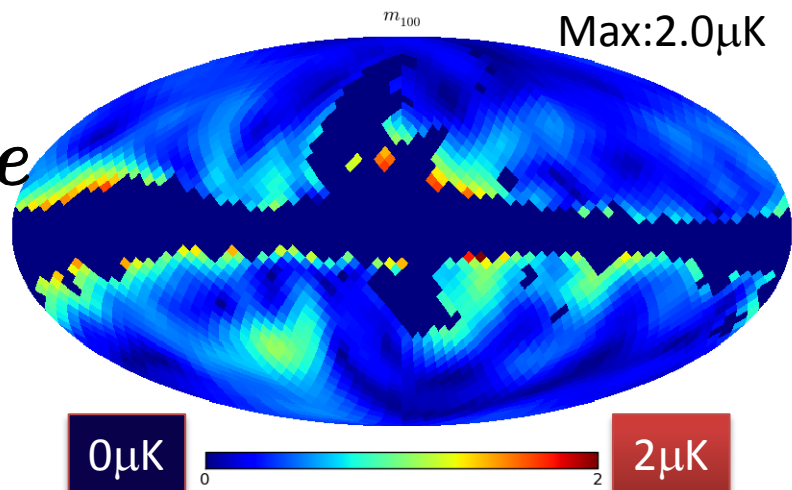
$$dust(\nu) = dust_0 \left(\frac{\nu}{\nu_0} \right)^\beta$$

$$\chi^2 = (m_{100} - \alpha m_{240})^T (S + N)^{-1} (m_{100} - \alpha m_{240})$$

- χ^2 を α に関して最小化

$$\ln L \quad m \Rightarrow \frac{m_{100} - \alpha m_{240}}{1 - \alpha}$$

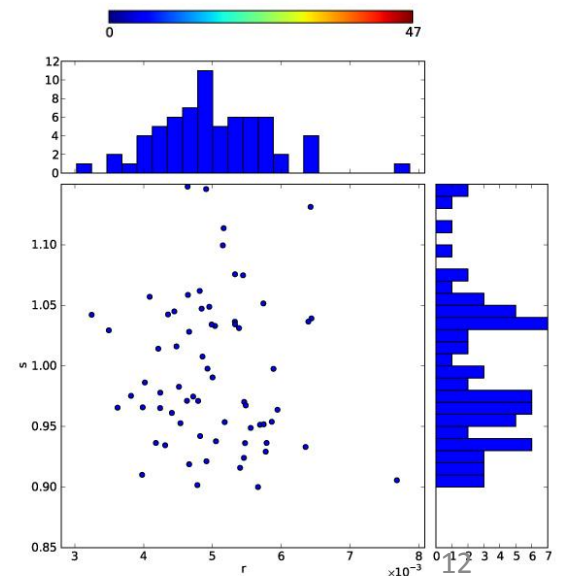
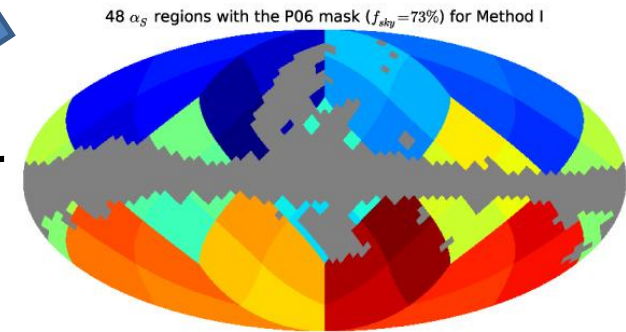
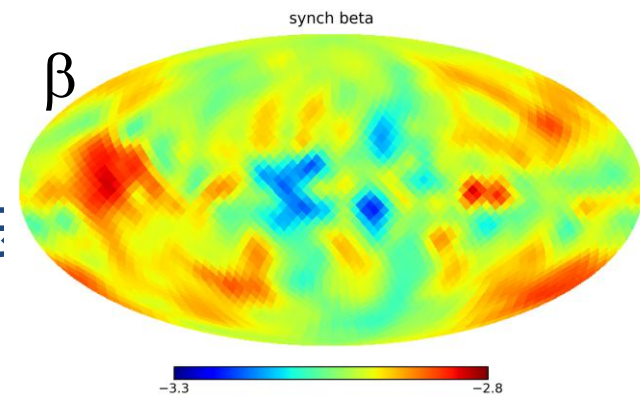
$$N \Rightarrow \frac{N}{(1 - \alpha)^2}$$



Note: These map include both dust and synch (JPS)

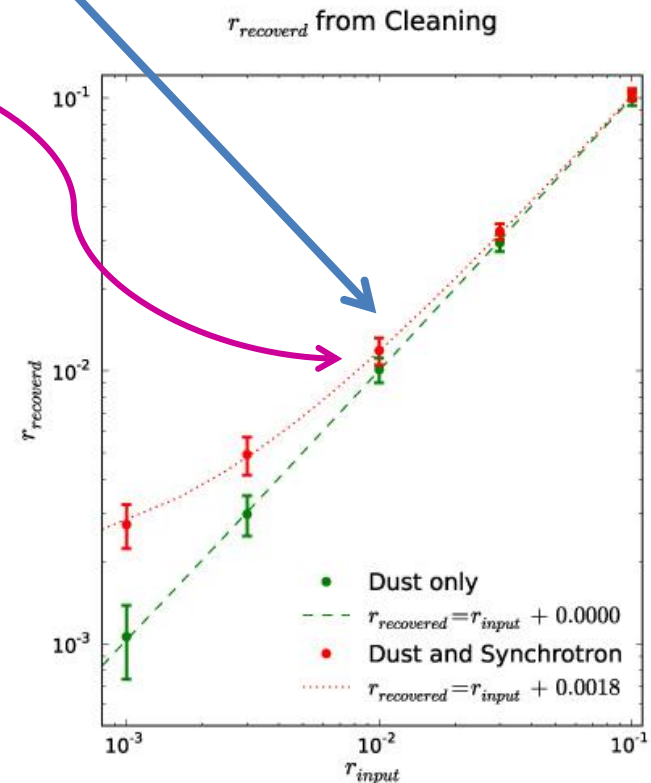
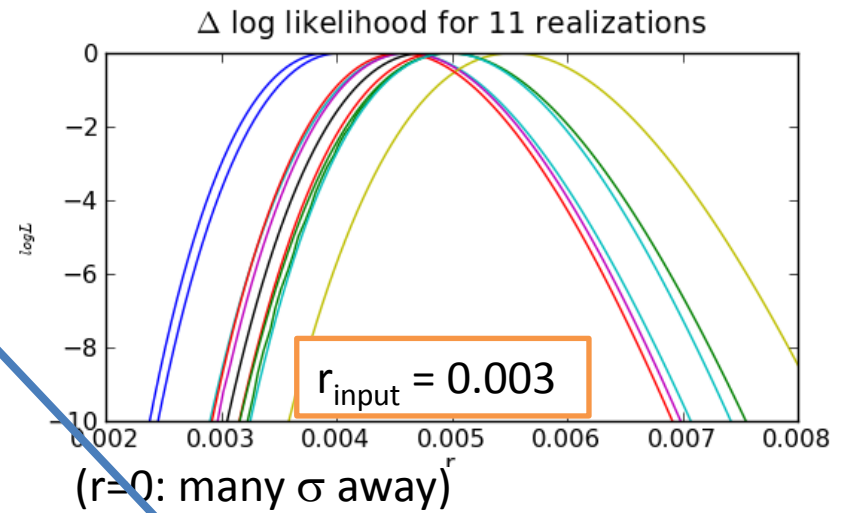
本研究による除去

- 3バンドでダストとシンクロトロンを除去
 - $\alpha_{\text{synch}}(\theta, \phi)$ を位置により変える
 - 48 のリージョンに分ける
 - 51 パラメタによる最尤法
 - 逆行列 $(S+N)^{-1}$ は $N \Rightarrow N/(1-\alpha)^2$ の為、すべてのパラメタに依存 $N/(1-\alpha)^2$
 - $(S+N)^{-1}$ の計算量が莫大となり、無理
 - $N/(1-\alpha)^2$ 中のは、最初の $\frac{\partial \chi^2}{\partial \alpha_i} = 0$ の解を使用
 - $(S+N/(1-\alpha)^2)^{-1}$ は r (と s) のみの関数
- ⇒ 計算可能



結果(1)

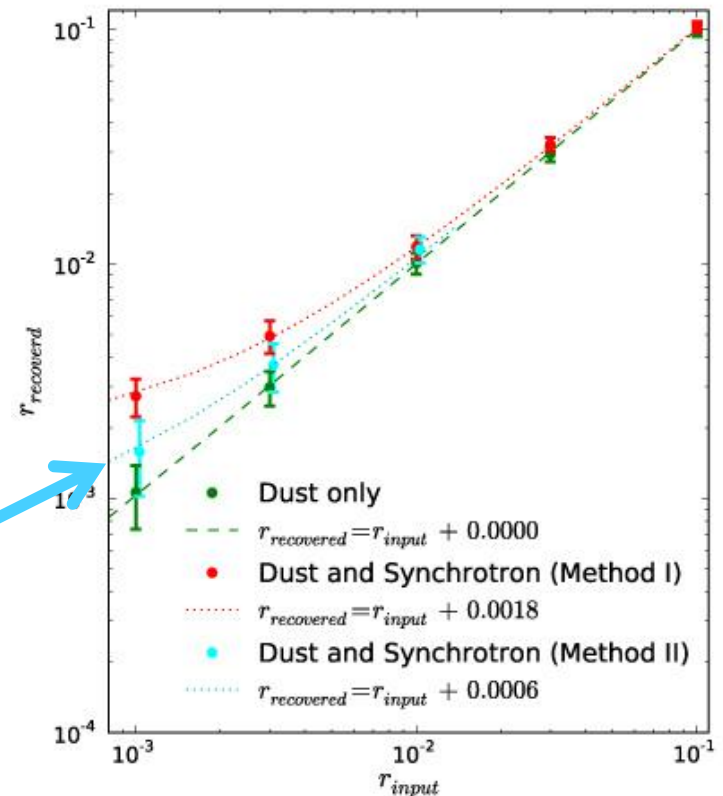
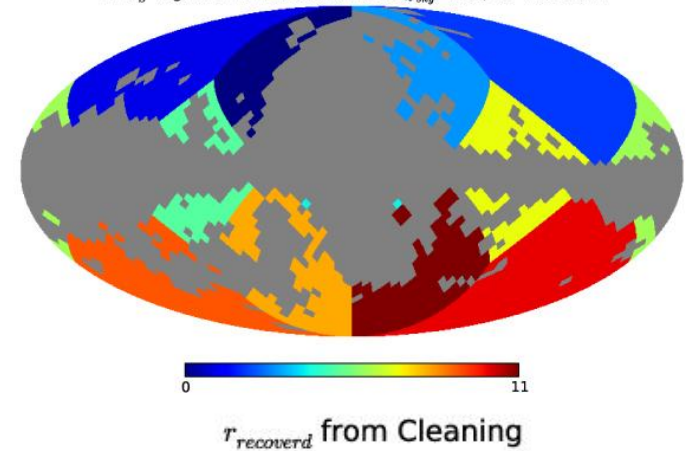
- ダストのみ
- 本研究(1)
- オフセットはまだある
 - $\Delta r \approx 0.002$
- $r \sim 0.01$ ならほとんどが影響ない
- 解析にはモデルを使用していないが、結果はシミュレーションで使ったモデルに依存している
- arXiv:1101.5210
 - E. Komatsu and nk



結果(2)

- バイアスを減らすにはどうするか？
 - マスクを大きくする
 - シンクロトロンリージョン分けに頭を使う
- マスクを $f_{\text{sky}} = 73\% \Rightarrow 50\%$ まで拡大した
 - 60GHzと240GHzのPSMを使用して最適化した
- バイアスは0.0006まで減った。これは、統計エラーと同程度である
 - 論文のアップデート中

12 α_S regions with extended mask ($f_{\text{sky}} = 50\%$) for Method II



まとめとこれから

- 宇宙マイクロ波背景輻射Bモード偏光観測の
為の小型科学衛星LiteBIRDのfeasibility studyを
開始した
 - r検出の有意性を調べる
- LiteBIRDの特徴を出来るだけ生かして、現実
に打ち上げられる衛星計画を立てる必要あり
 - どのパラメタがどういう風に効いてくるのかの理
解を深める
 - 目標達成の為に何が何処まで出来れば良いか、
言える様になりたい