

# LiteBIRDに向けた前景放射除去シミュレーション

山下徹, 金井啓晃, 市來淨與<sup>A</sup>, 片山伸彦<sup>B</sup>, 小松英一郎<sup>C</sup>,  
他 LiteBIRDフェーズA1チーム

横浜国立大学, 名古屋大学<sup>A</sup>, カブリIPMU<sup>B</sup>, マックス・プランク研究所<sup>C</sup>

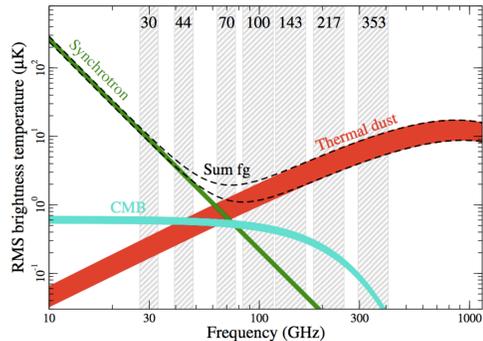
## 1. OVERVIEW

### 1.1 宇宙マイクロ波背景放射とインフレーション仮説

宇宙マイクロ波背景放射(CMB)は、かつて灼熱の宇宙を満たしていた光が宇宙膨張に伴ってマイクロ波にまで引き伸ばされた姿である。CMBの精密観測によって可能となることの一つに、インフレーション宇宙仮説の検証がある。インフレーション宇宙仮説は宇宙の誕生から約 $10^{-38}$ 秒後に空間の急膨張があったとする仮説で、これまでの宇宙論が持つ「平坦性問題」、「地平線問題」などの問題を解決するために提案された。インフレーション宇宙仮説を検証するにはCMBの全天地図(マップ)に現れるB-modeと呼ばれる偏光パターンを精密に観測する必要があり、これまでにおこなわれたいくつかのCMB観測実験は(衛星実験も含め)インフレーション宇宙仮説の検証に十分な精度は持っていなかった。LiteBIRDはB-modeの検出に特化した低ノイズのCMB偏光観測衛星で、2025年頃の打ち上げを目標に計画が進行中である。

### 1.2 前景放射とその周波数特性

CMBは観測可能な光の中で最も遠くからやってくるものであるため、それよりも手前に存在する天体からの放射がノイズとして観測される。本来の観測対象が背景放射であるのに対し、このようなノイズは前景放射(foreground)と呼ばれる。前景放射の中でも銀河系内のシンクロトロン放射および宇宙塵(ダスト)による熱放射はB-modeを作り出しており、CMBが元来持っているB-modeを隠してしまっている。そのためインフレーション仮説の検証には前景放射の高精度な除去が必須となる。CMBと前景放射の偏光強度は全く異なる周波数依存性を持つため(右図)、複数の周波数帯で観測されたマップを用いることでCMBの信号を抽出することができる。これをテンプレート法[1]といい、本講演ではその発展形であるデルタマップ法のアルゴリズムおよびシミュレーション結果を報告する。

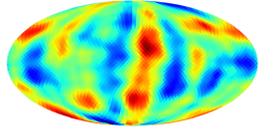


CMBと前景放射の偏光強度が持つ周波数依存性の違い [2]

## 3. SIMULATION

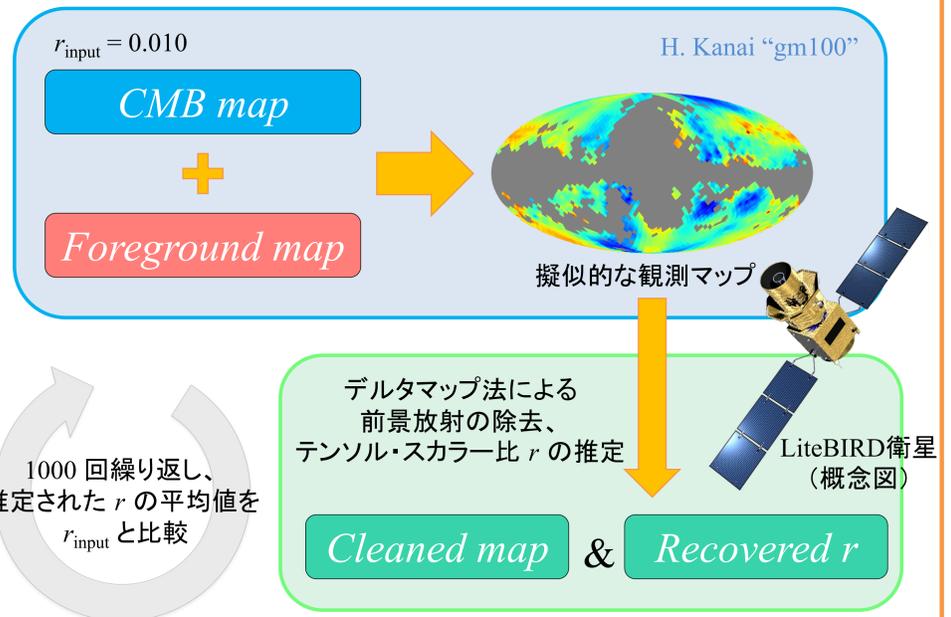
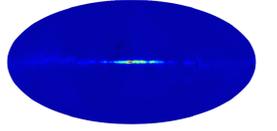
### CMBマップ:

今回のシミュレーションではB-modeの強度指標 $r=0.010$ であると仮定した場合のCMBマップを作成し、使用した。CMBマップを作成する際に必要となるパワースペクトルはCAMB Codeによって得られたものを使用した。



### 前景放射マップ:

Planck衛星の観測によって得られた成分別のマップをもとに、シンクロトロン放射はpower-lawを、ダストの熱放射はModified Black Bodyを仮定することで6周波数帯分の前景放射マップを作成した。



## 2. METHODOLOGY

### 2.1 デルタマップ法

前景放射の偏光強度は観測する周波数に対する依存性を持ち、CMBの偏光強度は(熱力学温度で表せば)周波数に依らず一定となるため、ある周波数 $\nu$ (GHz)帯を観測することで得られるデータ(Mapと書く)は次のように表すことができる。

$$\text{Map}(\nu, \hat{n}) = \text{CMB}(\hat{n}) + g_\nu \left(\frac{\nu}{\nu_*}\right)^{\beta_S(\hat{n})} \text{Synch}(\nu_*, \hat{n}) + g_\nu \frac{e^{x_*} - 1}{e^x - 1} \left(\frac{\nu}{\nu_*}\right)^{\beta_D(\hat{n})+1} \text{Dust}(\nu_*, \hat{n})$$

$\hat{n}$ : 天球上での位置,  $g_\nu$ : アンテナ温度から熱力学温度への変換係数,  $\beta$ : 前景放射のスペクトル指数  
ここで $x = h\nu/kT(\hat{n})$ で、 $T$ はダストの温度を表す。これまではダストの温度やスペクトル指数の異方性は無視していたが、デルタマップ法ではまず次のように近似する。

$$\text{Map}(\nu, \hat{n}) \approx \text{CMB}(\hat{n}) + g_\nu \left(\frac{\nu}{\nu_*}\right)^{\bar{\beta}_S} [1 + \ln(\nu/\nu_*)\delta\beta_S(\hat{n})] \text{Synch}(\nu_*, \hat{n}) + g_\nu \frac{e^{x_*} - 1}{e^x - 1} \left(\frac{\nu}{\nu_*}\right)^{\bar{\beta}_D+1} \left[1 + \ln(\nu/\nu_*)\delta\beta_D(\hat{n}) + \frac{\bar{x}e^{\bar{x}}}{e^x - 1} \frac{\delta T(\hat{n})}{\bar{T}}\right] \text{Dust}(\nu_*, \hat{n})$$

$\bar{T}, \bar{\beta}$ : 温度、スペクトル指数の空間平均,  $\delta T, \delta\beta$ : 平均値からのずれ

次に、6つの異なる周波数帯で観測されたマップを組み合わせることで、シンクロトロン放射とダストの熱放射を除去したマップ $m'$ が次のように書ける。

$$m'(\nu, \hat{n}) = \frac{\text{Map}(\nu, \hat{n}) - \sum_i \alpha_i (\bar{\beta}_S, \bar{\beta}_D, \bar{T}) \text{Map}(\nu_i, \hat{n})}{1 - \sum_i \alpha_i (\bar{\beta}_S, \bar{\beta}_D, \bar{T})}$$

$\alpha_i$ : 適切な係数

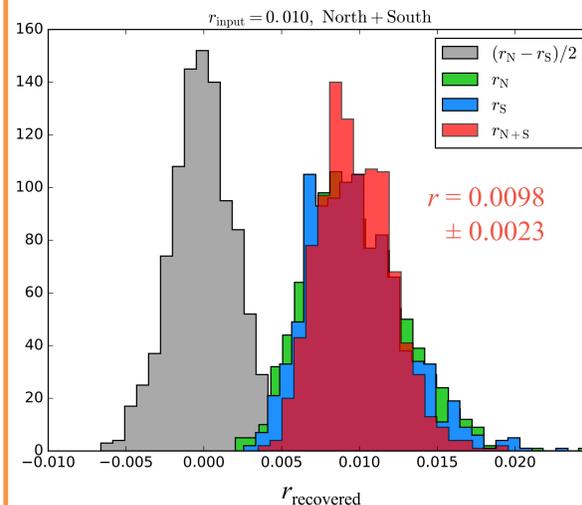
### 2.2 最尤法によるパラメータの推定

実際のデータ解析では、最尤法を用いて前景放射の除去( $\alpha_i$ の決定)とテンソル・スカラー比 $r$ の推定を同時におこなう。テンソル・スカラー比 $r$ とはCMBが元来持つB-modeの強度指標となるパラメータで、これを決定することがインフレーション宇宙仮説の直接的な検証となる。ここで用いる尤度関数 $\mathcal{L}$ は以下のようである。

$$\mathcal{L}(r, \bar{\beta}_S, \bar{\beta}_D, \bar{T}) \propto \frac{\exp\left[-\frac{1}{2} m'(\bar{\beta}_S, \bar{\beta}_D, \bar{T})^T C^{-1}(r) m'(\bar{\beta}_S, \bar{\beta}_D, \bar{T})\right]}{\sqrt{|C(r)|}}$$

$C$ : 理論的なパワースペクトルから計算されるCMBの共分散行列

## 4. RESULTS



擬似的な観測マップの作成からテンソル・スカラー比 $r$ 推定までのシミュレーションを1000回おこない、得られた $r$ の値をヒストグラムで表示した。今回はマップを北天と南天に分割し、それぞれに対して $r$ の推定をおこなった。赤いヒストグラムは北天と南天から推定される $r$ の加重平均を計算したものである。結果として、デルタマップ法によって前景放射が高精度に除去できること、そして北天と南天で推定される $r$ に矛盾がないことが確認された。

## 5. SUMMARY

LiteBIRD衛星によるCMB偏光観測に向けて、新しい前景放射除去法であるデルタマップ法を開発してそのシミュレーションをおこなった。また、その際に必要となる疑似観測マップ生成コード(gm100)も作成した。テンソル・スカラー比 $r$ の推定に系統誤差が生じなかったことから、ここでは前景放射が正確に除去されたと言える。また、北天と南天で別々に $r$ を推定し、これらに矛盾がないことも確認した。

## 6. REFERENCES

- [1] N. Katayama and E. Komatsu, ApJ. **737** (2011) 78.
- [2] Planck Collaboration, A&A. **594** (2016) 38.