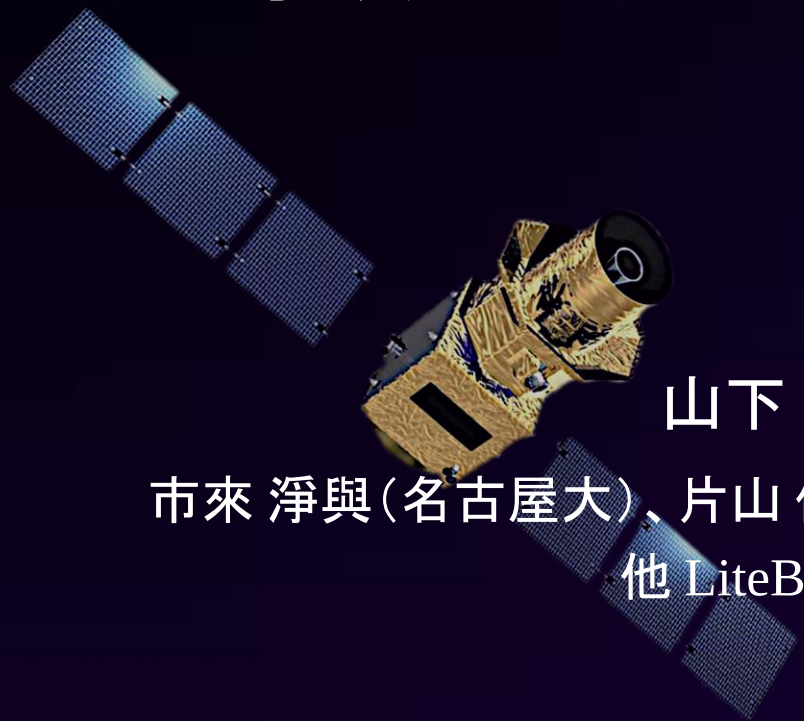


2015.9.25

日本物理学会 2015年秋季大会

LiteBIRDに向けた 前景放射除去シミュレーション



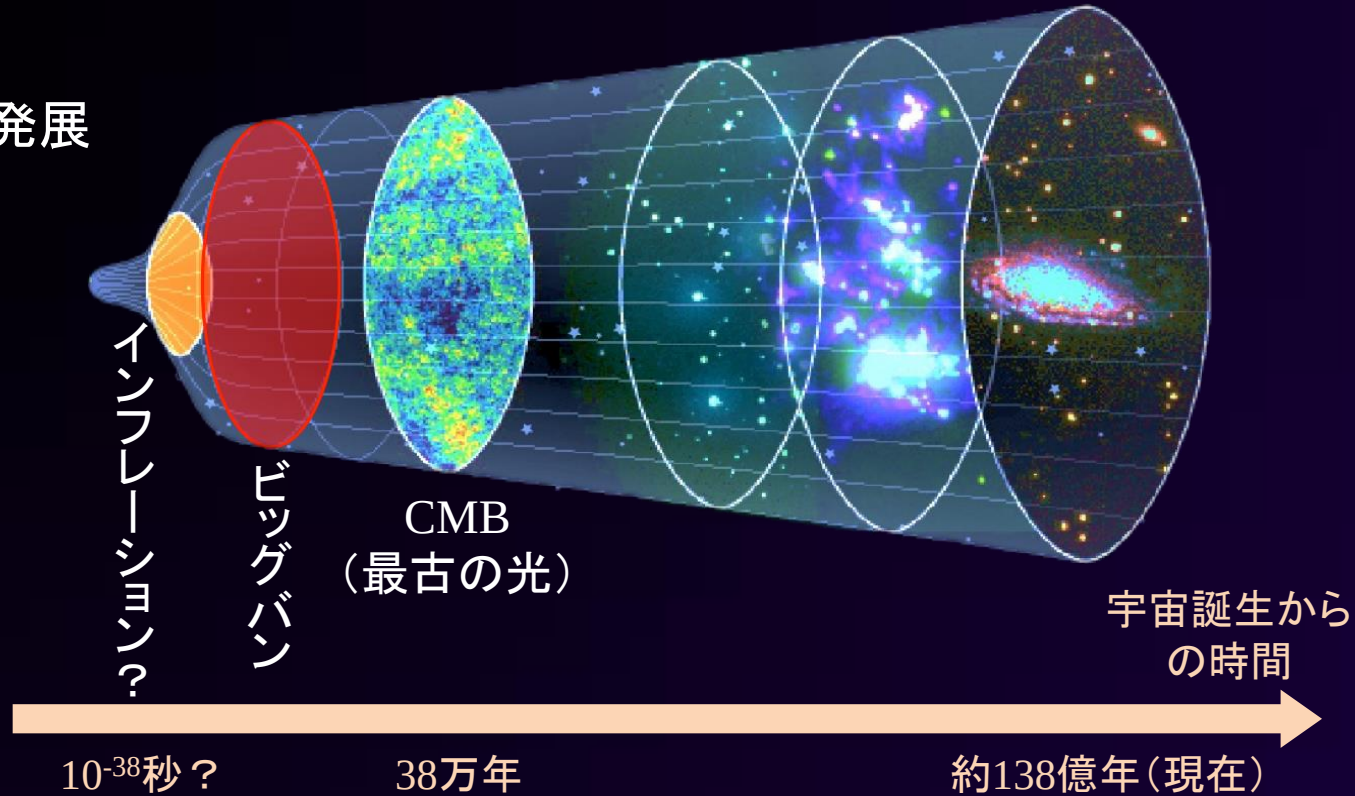
山下 徹(横浜国大)

市來 淨與(名古屋大)、片山 伸彦(Kavli IPMU)、小松 英一郎(MPA)

他 LiteBIRD working group

インフレーション仮説とCMBの偏光 1/10

宇宙の発展



ビッグバン以前に空間の
指数関数的な急膨張

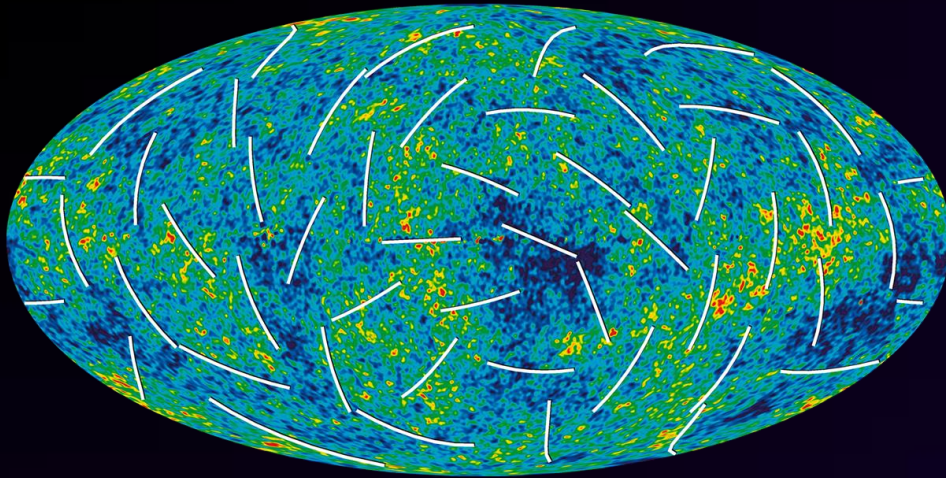
↓
原始重力波を生成(未検出)

↓
CMBに偏光パターン
を刻み付ける(非常に微弱)

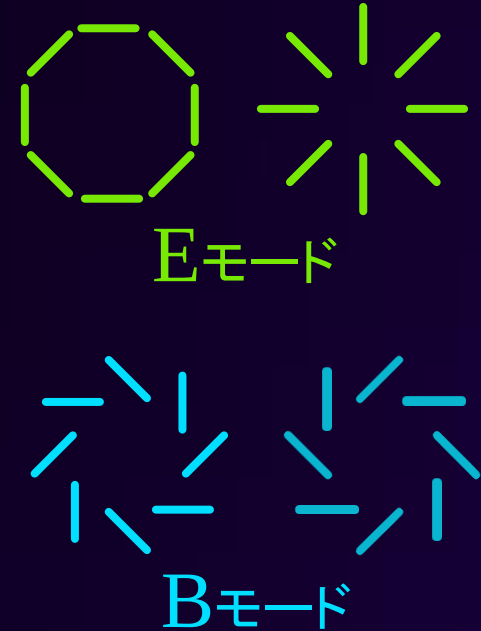
CMBの偏光を精密に観測し、原始重力波に由来するBモード偏光を検出することでインフレーション仮説の検証ができると期待されている！

なぜBモード偏光か？

2/10



全天にわたったCMBの偏光を
2種類のパターンで区別



密度ゆらぎ → Eモード (支配的, 発見済み)

原始重力波 → Eモード + Bモード (微弱, 未検出)



Bモード偏光であれば原始重力波に由来するものを区別可能！

前景放射

3/10

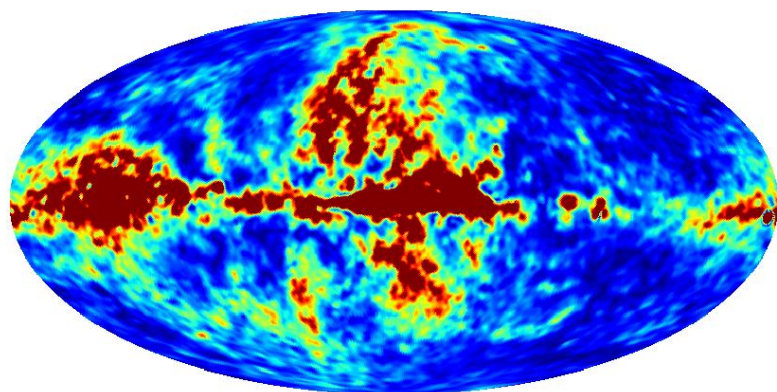
- ・シンクロトロン放射

相対論的な電子が銀河磁場の中で螺旋運動することによる放射

- ・ダスト放射

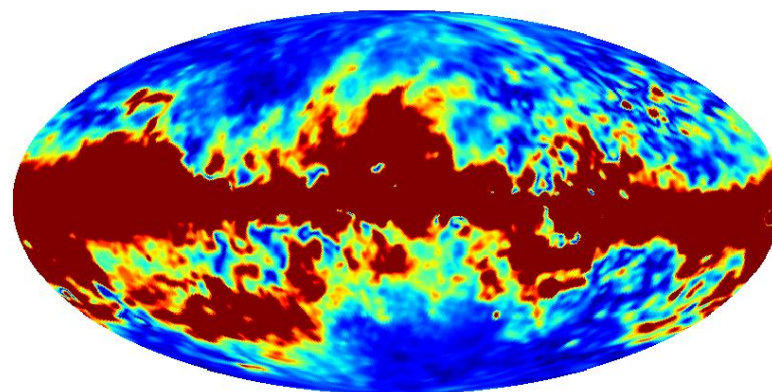
銀河系内の星間塵(ダスト)による熱放射
ダストは磁力線に対して垂直に整列しやすいため、その向きの偏光成分を含む

シンクロトロン放射



0.0 1.0 μK

ダスト放射



0.0 1.0 μK

100GHzにおける前景放射の偏光強度分布

前景放射の周波数依存性

4/10

前景放射モデル (Planck Sky Model)

シンクロトロン放射

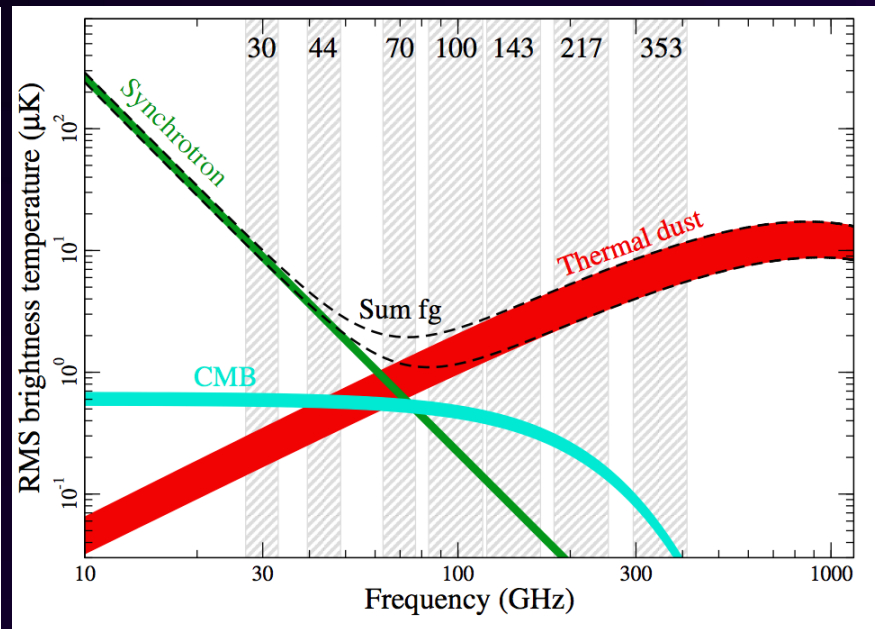
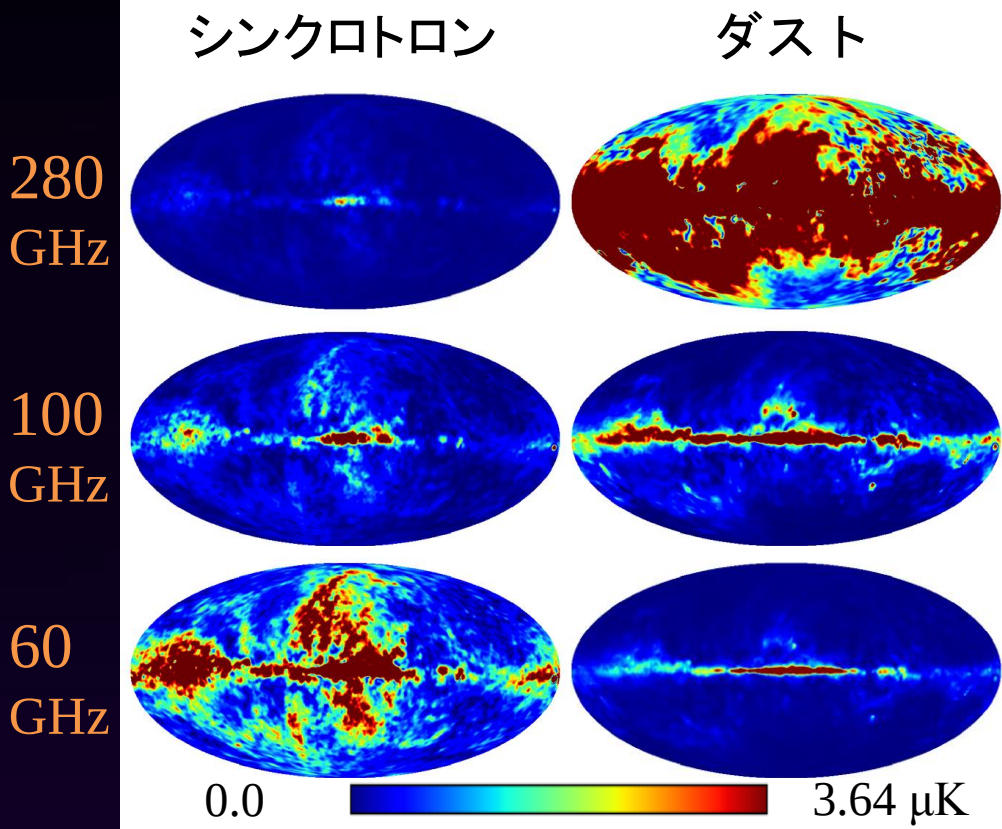
ダスト放射

$$S(\nu, \hat{n}) = \left(\frac{\nu}{\nu_*}\right)^{\beta_S(\hat{n})} S(\nu_*, \hat{n})$$

$$D(\nu, \hat{n}) = \left(\frac{\nu}{\nu_*}\right)^{\beta_D(\hat{n})} D(\nu_*, \hat{n})$$

$\beta(\hat{n})$: スペクトル指数

前景放射の周波数依存性を表現するパラメータ
(位置ごとに異なる値)



↑ 前景放射とCMBの偏光強度が持つ周波数依存性の違い

Planck 2015 results. I.

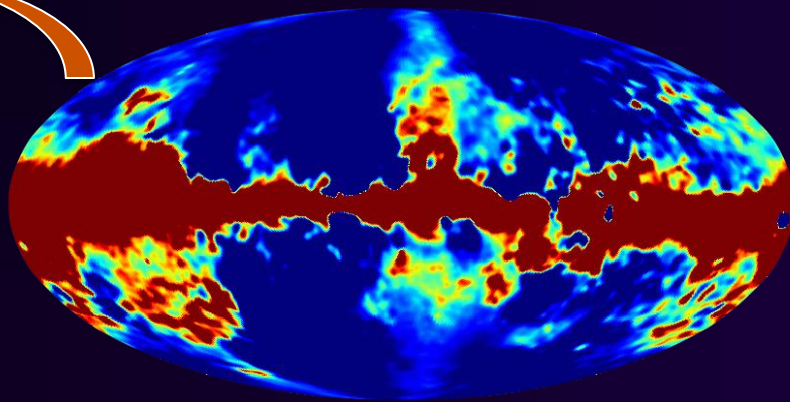
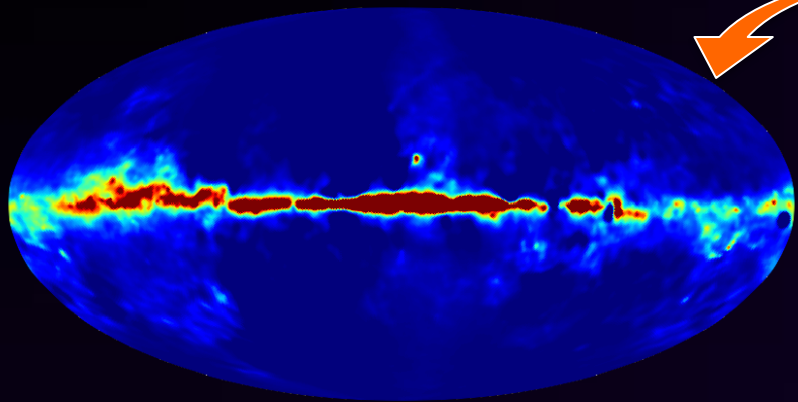
前景放射のテンプレート除去

5/10

CMB偏光観測のターゲット
となる周波数の観測マップ

差し引く

前景放射が支配的となる
周波数の観測マップ



$$x' = \frac{\text{Map}(\nu) - \alpha \text{Map}(\nu_1)}{1 - \alpha}$$

x' : 前景放射除去後のマップ
 α : 適切な係数(全てのピクセルで共通)

問題点

スペクトル指数の空間的ばらつきが大きいと除去精度が下がる

テンプレート除去法の改良

6/10

ひとつの前景放射に対して、2つの観測マップから得られる“デルタマップ”をテンプレートとして用いることにより、スペクトル指数の空間的ばらつきを考慮

$$D(\nu, \hat{n}) = \left(\frac{\nu}{\nu_*}\right)^{\beta_D(\hat{n})} D(\nu_*, \hat{n}) \quad \longrightarrow \quad D(\nu, \hat{n}) = \left(\frac{\nu}{\nu_*}\right)^{\bar{\beta}_D + \delta\beta_D(\hat{n})} D(\nu_*, \hat{n}) \\ \approx \left(\frac{\nu}{\nu_*}\right)^{\bar{\beta}_D} \left[1 + \ln\left(\frac{\nu}{\nu_*}\right) \delta\beta_D(\hat{n}) \right] D(\nu_*, \hat{n})$$

“デルタマップ”を計算

“デルタマップ”に含まれる前景放射成分は、ターゲットのマップに含まれる前景放射成分と $\delta\beta$ の一次までで等しい

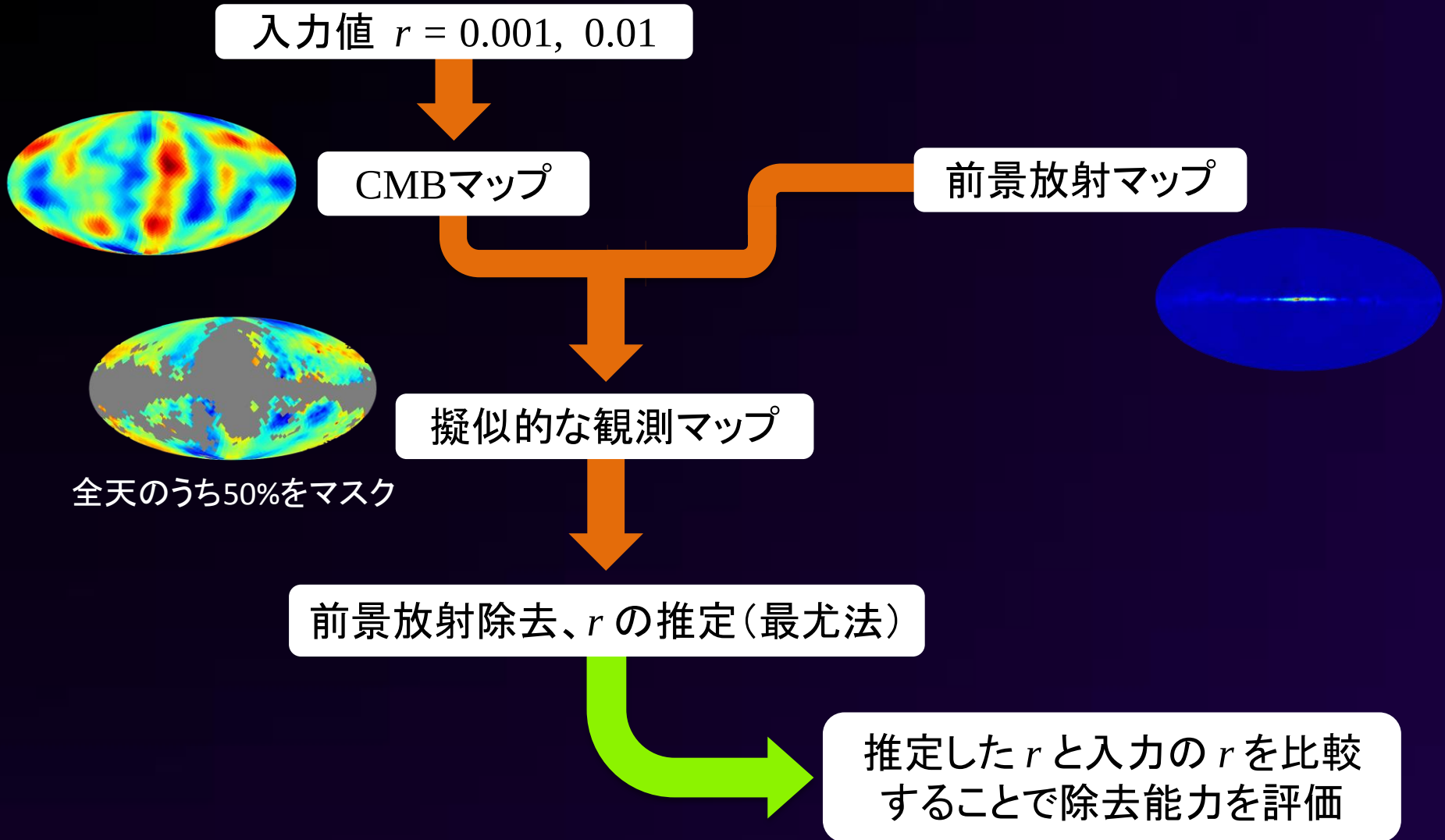
$$\Delta\text{Map}(\nu_1, \nu_2, \hat{n}) = \frac{g_\nu}{\ln(\nu_2/\nu_1)} \left\{ \left(\frac{\nu}{\nu_1}\right)^{\bar{\beta}_D} \frac{\text{Map}(\nu_1, \hat{n})}{g_1} \ln\left(\frac{\nu_2}{\nu}\right) - \left(\frac{\nu}{\nu_2}\right)^{\bar{\beta}_D} \frac{\text{Map}(\nu_2, \hat{n})}{g_2} \ln\left(\frac{\nu_1}{\nu}\right) \right\}$$

前景放射除去後のマップ

$$x'(\nu, \hat{n}, \bar{\beta}_D) = \frac{\text{Map}(\nu, \hat{n}) - \Delta\text{Map}(\nu_1, \nu_2, \hat{n})}{1 - \frac{g_\nu}{\ln(\nu_2/\nu_1)} \left\{ \left(\frac{\nu}{\nu_1}\right)^{\bar{\beta}_D} \frac{\text{Map}(\nu_1, \hat{n})}{g_1} \ln\left(\frac{\nu_2}{\nu}\right) - \left(\frac{\nu}{\nu_2}\right)^{\bar{\beta}_D} \frac{\text{Map}(\nu_2, \hat{n})}{g_2} \ln\left(\frac{\nu_1}{\nu}\right) \right\}}$$

シミュレーションフロー

7/10



テンソル・スカラー比の推定

8/10

テンソル・スカラー比の推定は、前景放射を除去した観測マップとCMB偏光の理論的なパワースペクトルを用いて以下の尤度関数を最大化することで実行

尤度関数

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

x' : 前景放射除去後の観測マップ

s : 密度ゆらぎに由来するEモード偏光の強度指標

$\mathbf{C}$: マップの共分散行列

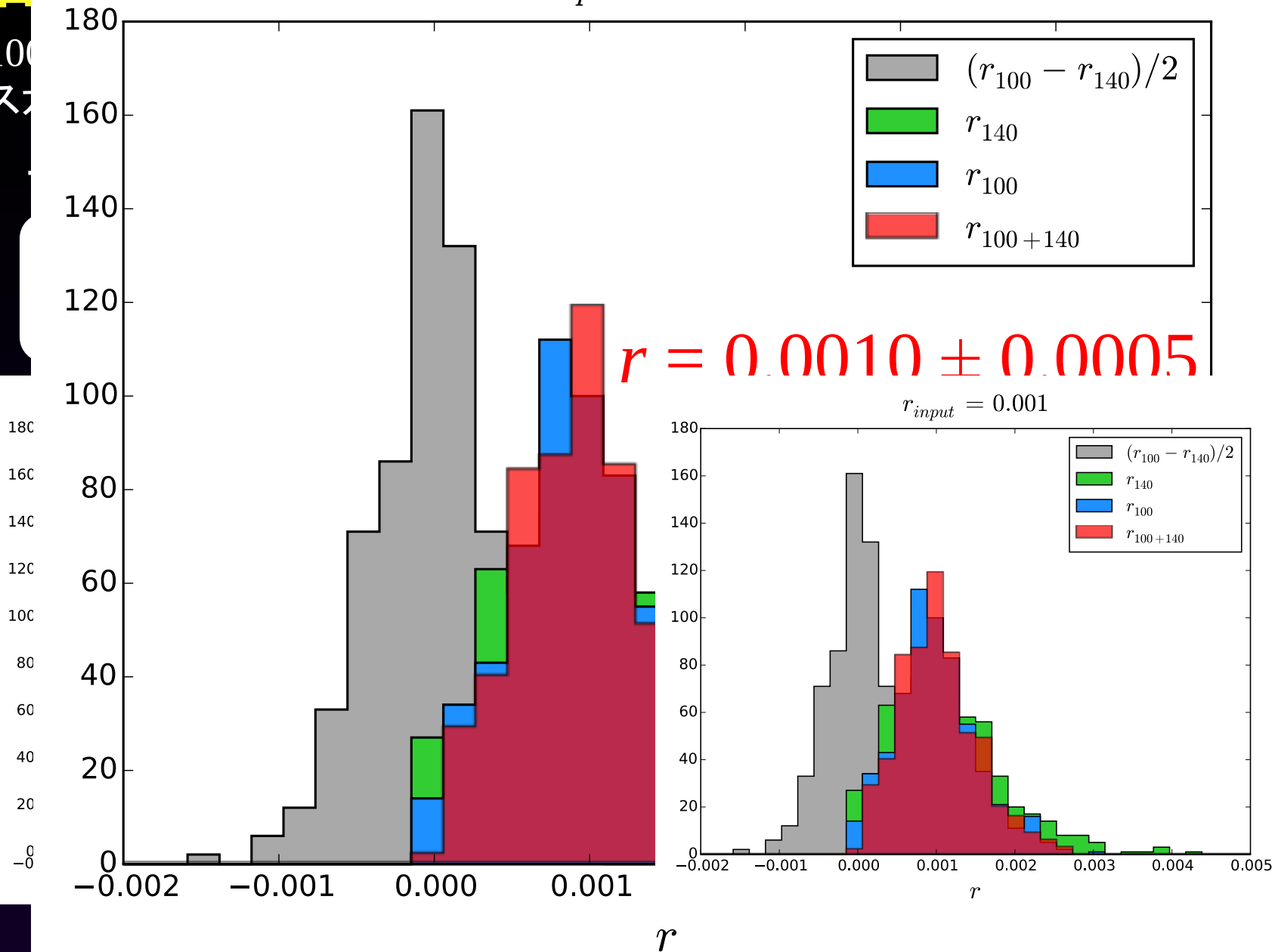
$$\mathbf{C}(r, s, \bar{\beta}_D) = r \mathbf{C}^{\text{tensor}} + s \mathbf{C}^{\text{scalar}} + \frac{N_1 + N_2}{(1 - \Delta_D(\bar{\beta}_D))^2}$$

N : ノイズの共分散行列

Δ_D : デルタマップの係数

結

$$r_{input} = 0.001$$



まとめ

- テンプレート除去法を改良し、スペクトル指数の空間的ばらつきを考慮して前景放射を差し引くことでテンソル・スカラー比を推定する際の系統誤差を小さくすることに成功した
- CMB偏光観測のターゲット周波数を100GHz帯と140GHz帯の2バンドにすることで、テンソル・スカラー比を推定する際の統計誤差を小さくすることに成功した

今後の展望

- ダスト放射と並び大きなノイズ源となるシンクロトロン放射も考慮して、ダスト放射とシンクロトロン放射を同時に除去する手法のシミュレーションをおこなう。

Back up

パワースペクトル

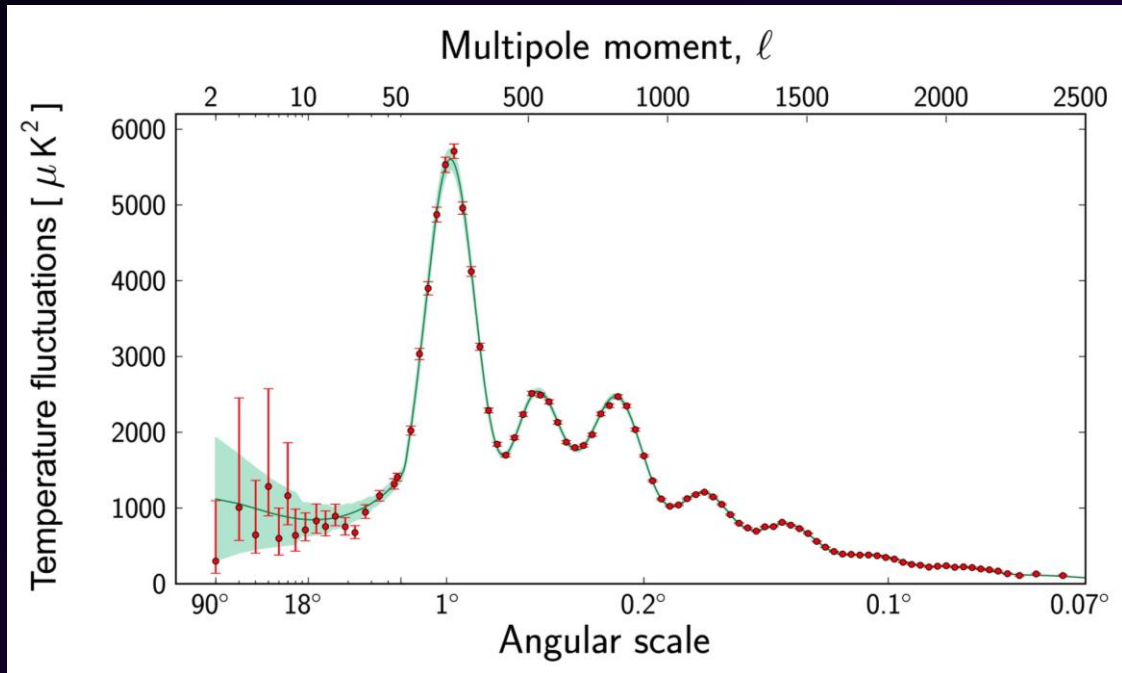
温度ゆらぎを球面調和展

$$\frac{\delta T}{T}(\hat{n}) = \sum_{l=2}^{\infty} \sum_{m=-l}^l a_{lm} Y_{lm}(\hat{n})$$

パワースペクトル

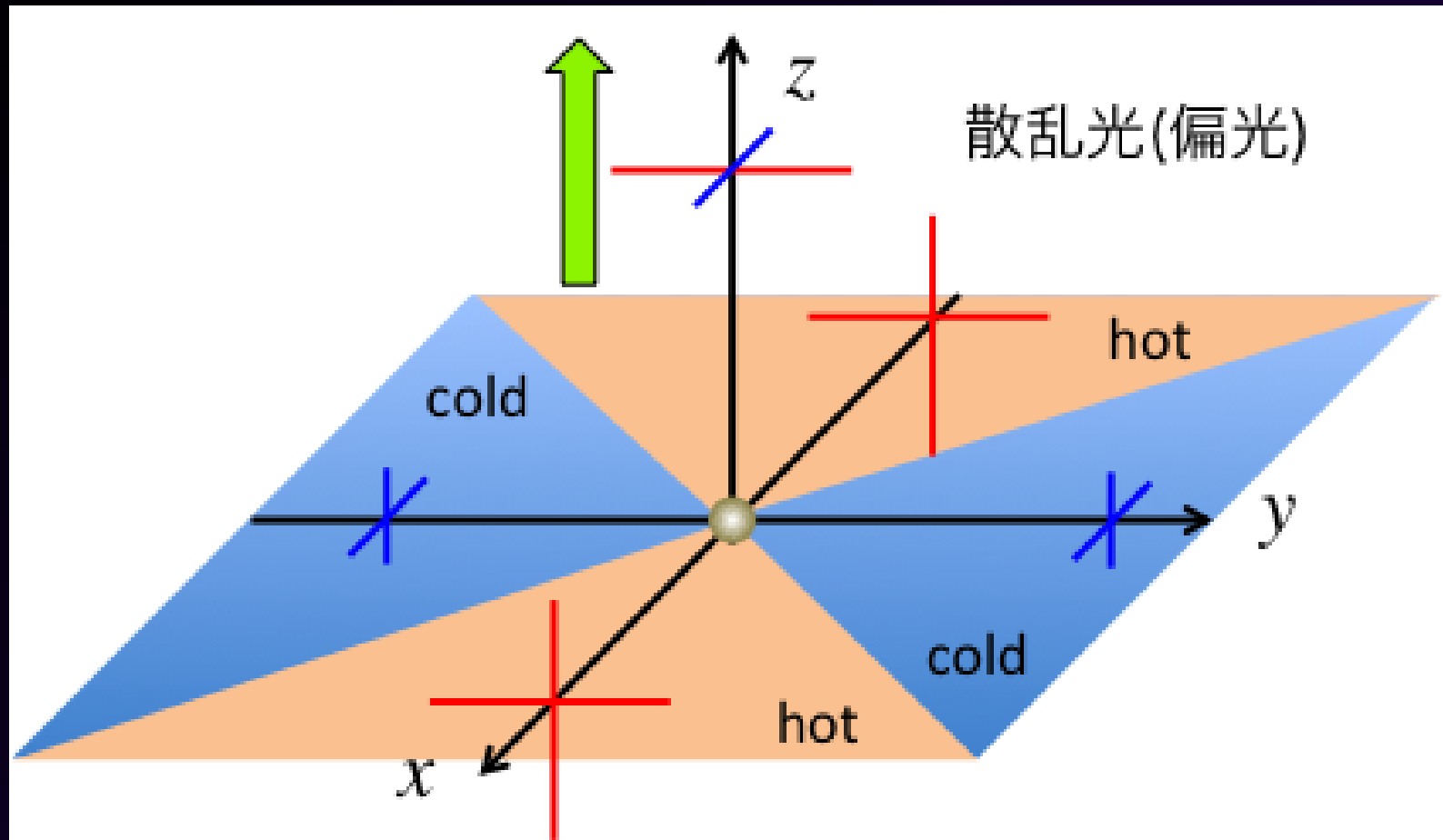
$$C_l \equiv \frac{1}{2l+1} \sum_{m=-l}^l |a_{lm}|^2$$

Planck衛星による
CMB温度ゆらぎのパワースペクトル



多重度 l が大 $\rightarrow$ 細かいゆらぎ

四重極によるCMBの偏光

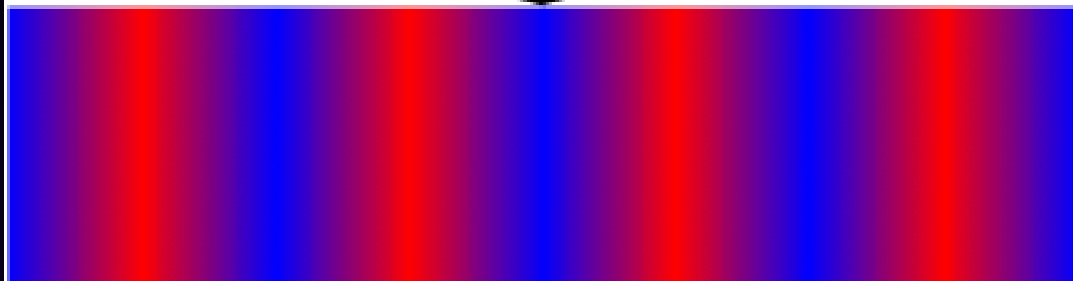


密度ゆらぎに由来するEモード偏光

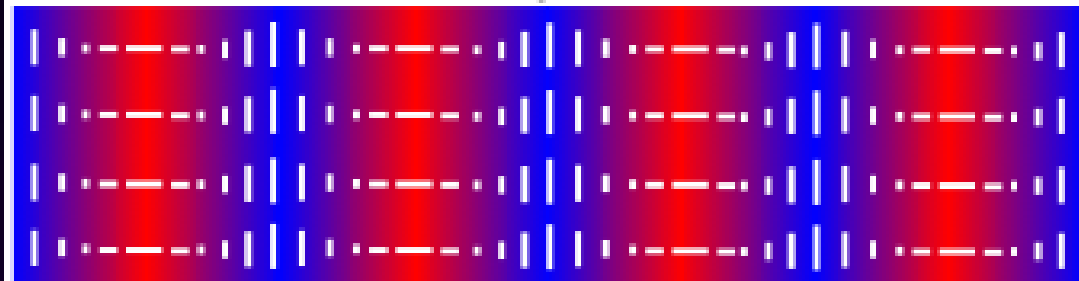
密度の変化する向き



温度



偏光

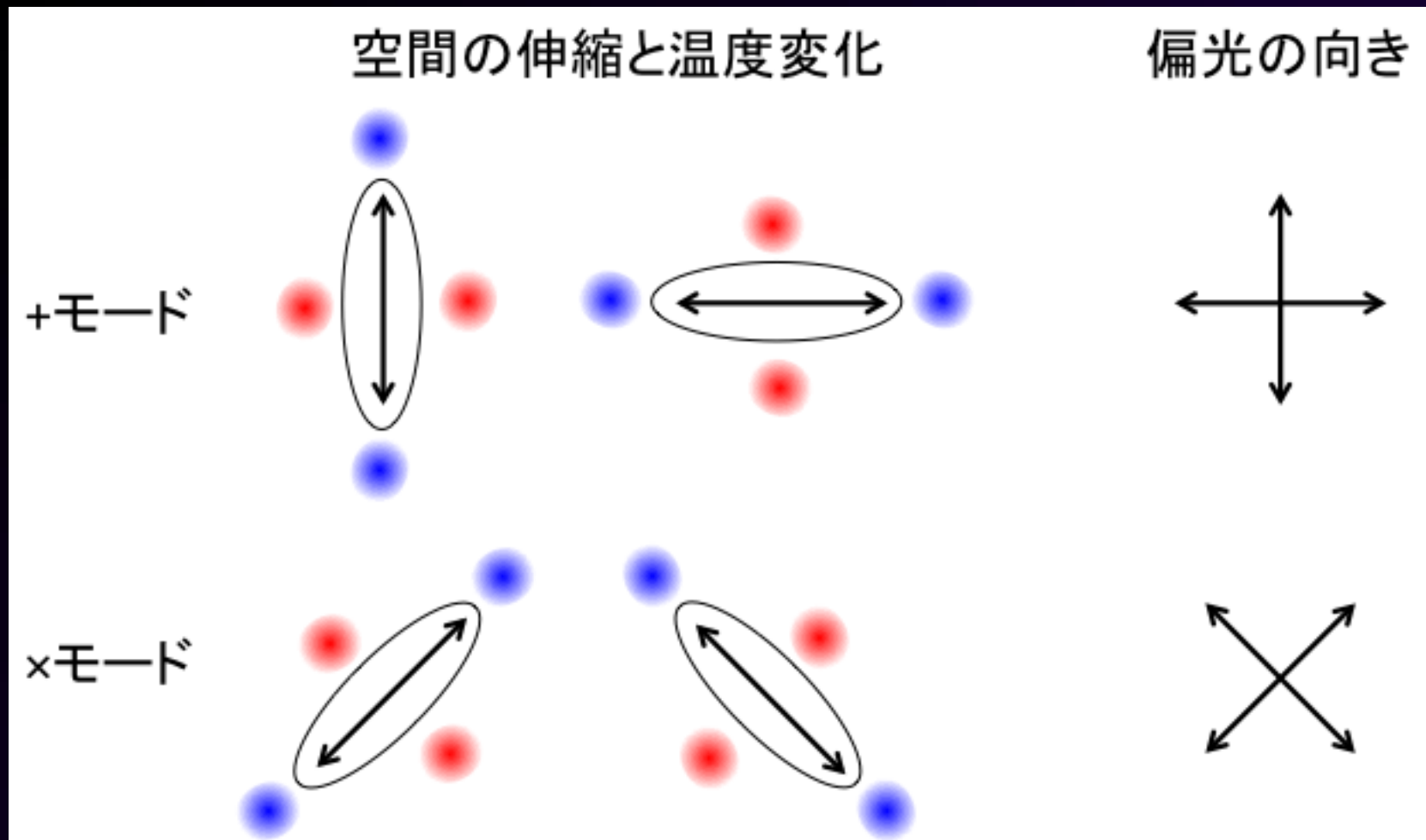


偏光の強度が変化する
方向に対して偏光の向
きが垂直・平行



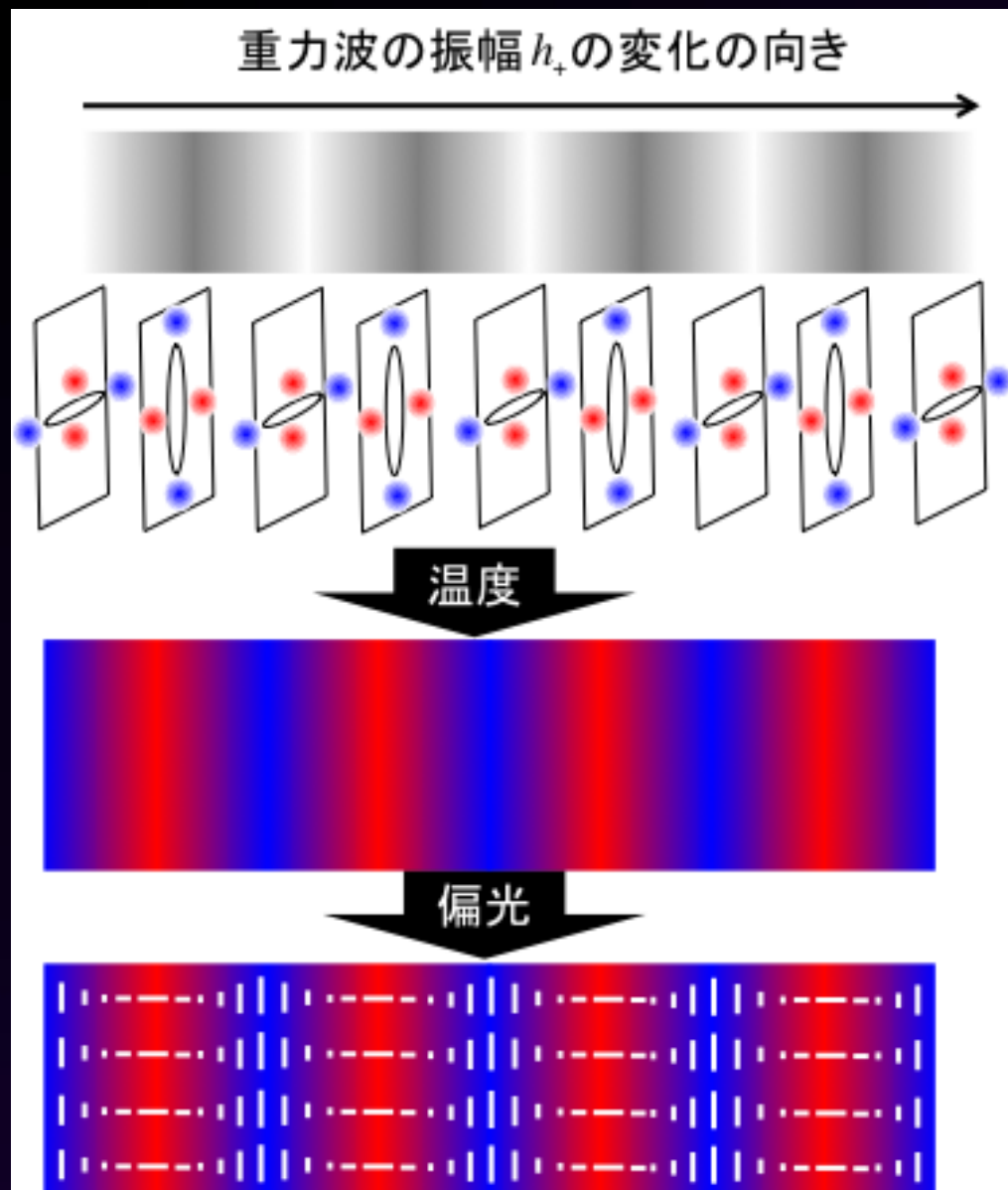
Eモード偏光

原始重力波による偏光



空間が縮むと青方偏移で熱くなる
空間が伸びると赤方偏移で冷たくなる

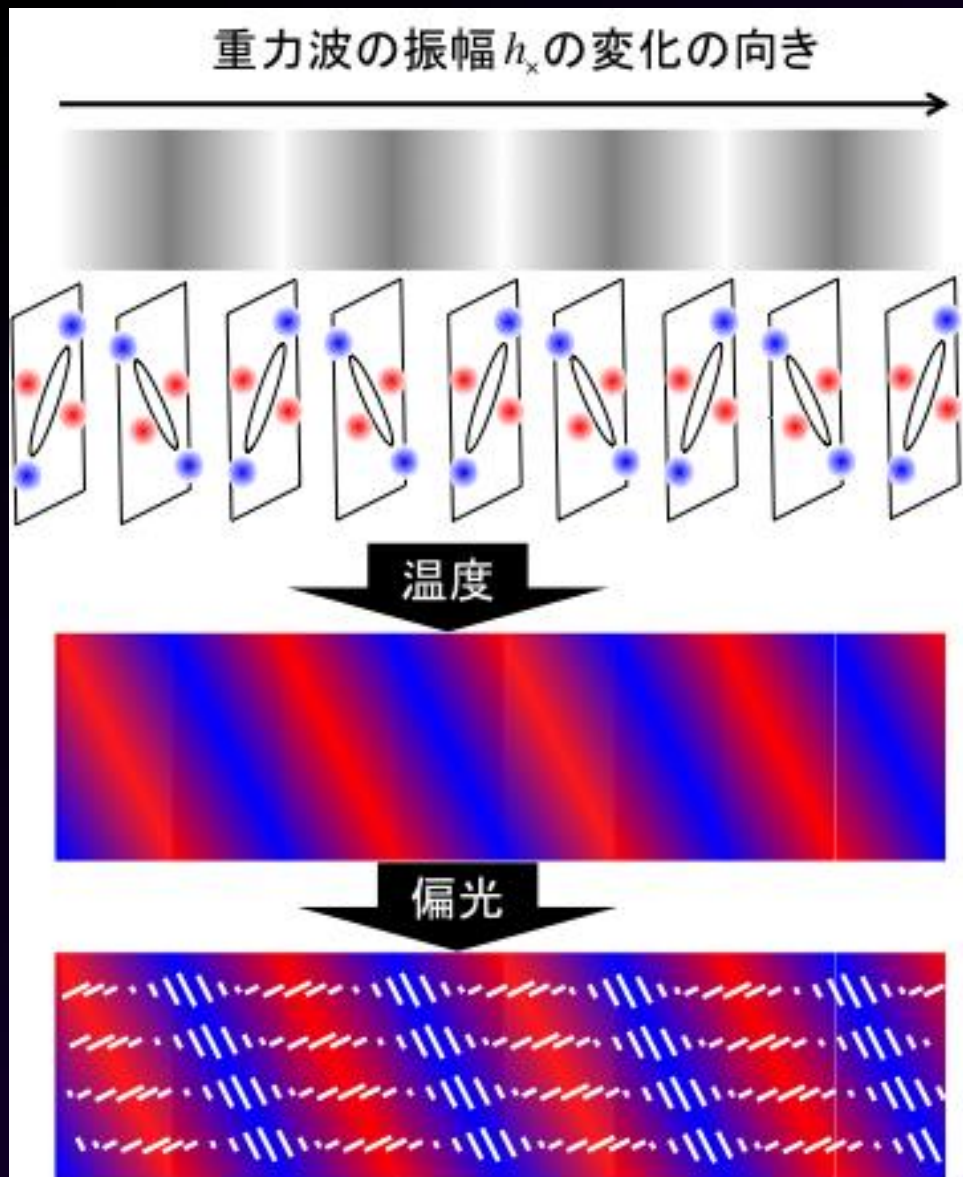
原始重力波によるEモード偏光



偏光の強度が変化する
方向に対して偏光の向
きが垂直・平行

Eモード偏光

原始重力波によるBモード偏光



偏光の強度が変化する
方向に対して偏光の向
きが 45° 傾く

**Bモード偏
光**

春の学会 (水上さんの発表) から進んだ点

- テンソル・スカラー比を推定する際、尤度関数の変数として r, s のみを設定していたが、今回はスペクトル指数の平均値も変数として最尤法を実行した

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

- 100GHz帯と140GHz帯の2バンドをCMB偏光観測のターゲットとし、それぞれから推定されるテンソル・スカラー比の相関を用いることで r 推定の統計誤差を小さくした

$$r_{100+140} = \frac{\sum_{i,j} C^{-1}_{i,j} r_j}{\sum_{i,j} C^{-1}_{i,j}}$$

$i, j = 100\text{GHz}, 140\text{GHz}$
 $C : r_{100}, r_{140}$ の共分散行列

詳しいテーブル

	100 GHz		140 GHz		100 GHz + 140GHz			$(r_{100} - r_{140}) / 2$	
	平均値	誤差	平均値	誤差	平均値	誤差	相関係数	平均値	誤差
$r_{\text{input}} = 0.010$	0.00953	0.00169	0.00947	0.00220	0.00952	0.00164	0.56	0.00003	0.00094
$r_{\text{input}} = 0.003$	0.00299	0.00094	0.00298	0.00103	0.00299	0.00081	0.36	0.00002	0.00056
$r_{\text{input}} = 0.001$	0.00103	0.00054	0.00110	0.00078	0.00104	0.00053	0.49	-0.00004	0.00035
$r_{\text{input}} = 0.000$	0.00006	0.00011	0.00016	0.00024	0.00007	0.00011	0.16	-0.00005	0.00013
バイアス	0.00005 ± 0.00011		0.00014 ± 0.00023		0.00006 ± 0.00010				

Band (GHz)	Beam (arcmin)	NET ($\mu\text{K}\sqrt{\text{s}}$)	Pixels per wafer	N_{wf}	N_{bolo}	NET _{arr} ($\mu\text{K}\sqrt{\text{s}}$)	Sens. ($\mu\text{K}\cdot\text{arcmin}$)	Sens. with margin ($\mu\text{K}\cdot\text{arcmin}$)
60	54.1	94	19	8	304	5.4	9.6	15.7
78	55.5	59	19	8	304	3.4	6.0	9.9
100	56.8	42	19	8	304	2.4	4.3	7.1
140	40.5	37	37	5	370	1.9	3.4	5.6
195	38.4	31	37	5	370	1.6	2.9	4.7
280	37.7	38	37	5	370	2.0	3.5	5.7
total					2022		1.6	2.6

r_{100} と r_{140} の相関

