

CMB観測衛星LiteBIRD によるB-mode偏光の 検出にむけて

市來淨與（名古屋大学・KMI）

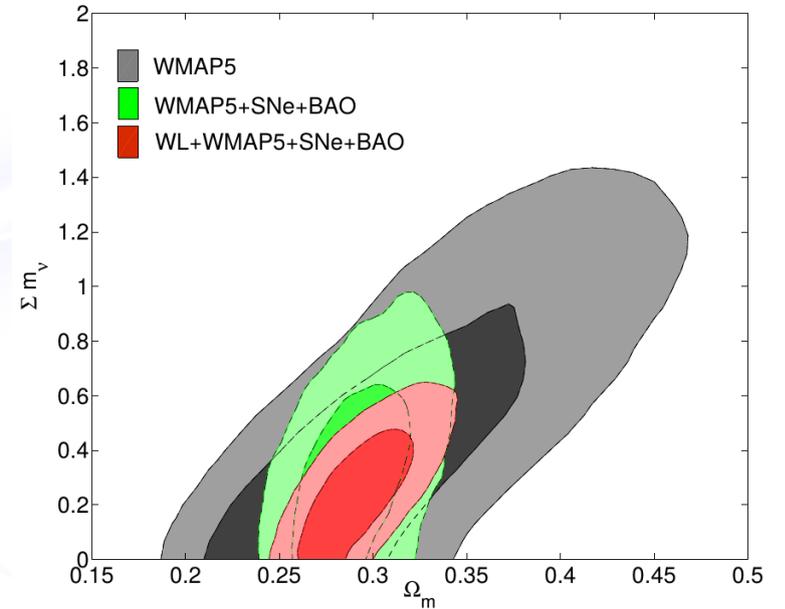
In collaboration with
T. Yamashita, N. Katayama, E. Komatsu
and the LiteBIRD Phase A-1 team

自己紹介

ポストドク時代 … WMAP宇宙論全盛期で、
パワースペクトルから宇宙論パラメタを
推定する研究してました。

「初期揺らぎのパワースペクトルに微細構造」,
Ichiki, Nagata & Yokoyama, PRD81, 2010

「ニュートリノ質量への制限」,
Ichiki, Takada & Takahashi, PRD79, 2009



「今後はパワースペクトルでなくて、マップだよね....」 (横山教授)

「Planck のデータにCOが混じっちゃって大変なんだって。」 (福井教授)

「独立成分分析によるCO成分の推定」, Ichiki, Kaji, Yamamoto et al., ApJ780, 2014

CMBgal195GHz.fits: UNKNOWN1

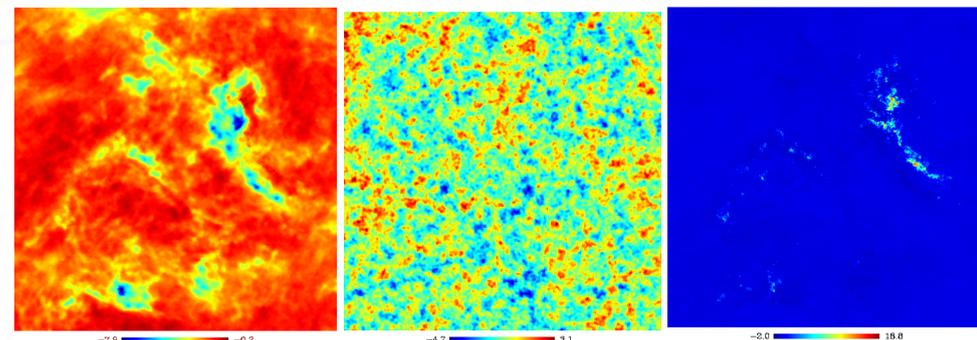
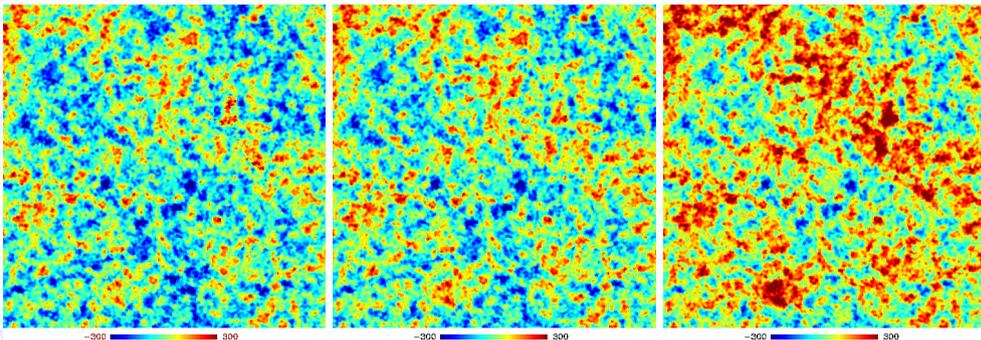
CMBgal150GHz.fits: UNKNOWN1

CMBgal215GHz.fits: UNKNOWN1

sources_fastica_sph_0.fits: UNKNOWN1

sources_fastica_sph_1.fits: UNKNOWN1

sources_fastica_sph_2.fits: UNKNOWN1



自己紹介

1877年創立、ノーベル物理学賞11名・同化学賞2名の受賞者を数える、会員約17,000名の学会です。



HOME 学会活動 学会概要 刊行物 公益・教育活動

HOME > 刊行物 > PTEP招待論文・特集論文

PTEP 招待論文・特集論文

PTEP 2014年6月号の特集論文

CMB Cosmology (宇宙背景放射 宇宙論)

「市來くん、前景放射の差っ引きは、君がこれまでやってきたどの研究よりも大事！間違いない！」

(小松教授ビールを手に)

「PTEPでCMBの特集組みます。市來さんには前景放射の問題を....」

(小玉教授)

「CMB Foreground: a concise review」,
Ichiki, PTEP, 2014

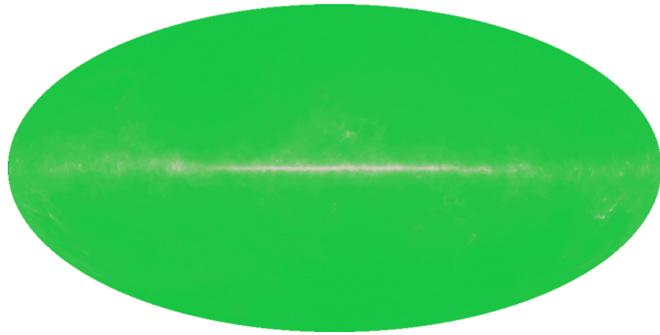


ということで始めます

- CMB背景輻射B-modeと前景放射
 - インフレーションとB-mode
 - 銀河系前景放射
 - LiteBIRD計画
- LiteBIRD前景放射WGによる前景放射除去アルゴリズム「デルタマップ法」
 - 先行研究(Katayama & Komatsu, ApJ '11)からのメッセージ
 - アルゴリズムとパフォーマンス
 - その他の前景放射除去法
- まとめ

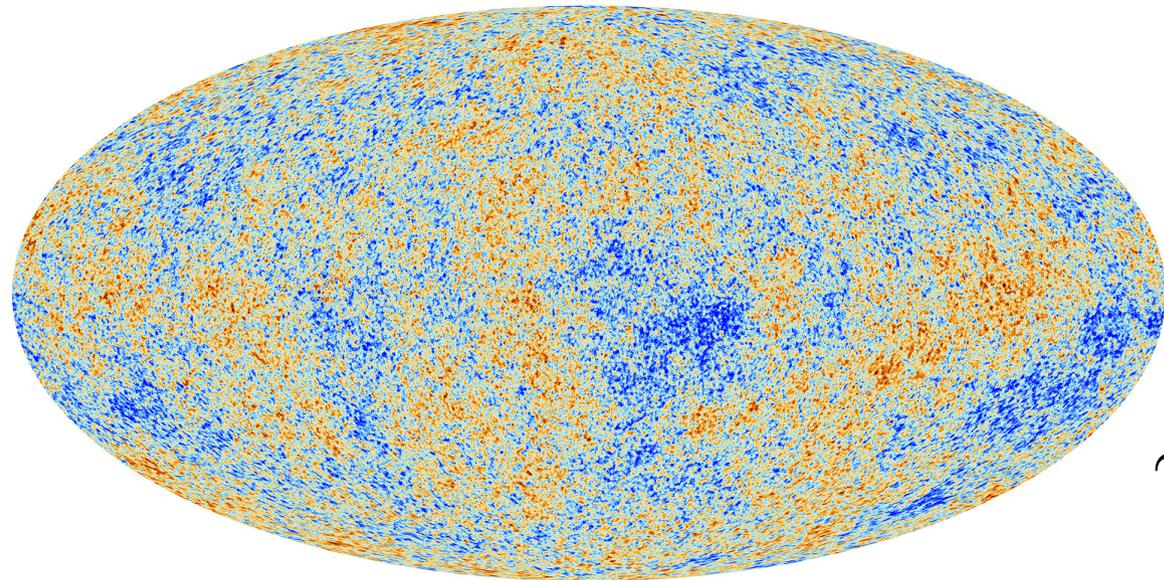
THE CMB: stats

(1) 3 Kの黒体輻射、 10^{-5} 程度の温度揺らぎ



$\sim 3\text{K}$

Penzias and Wilson (1965)

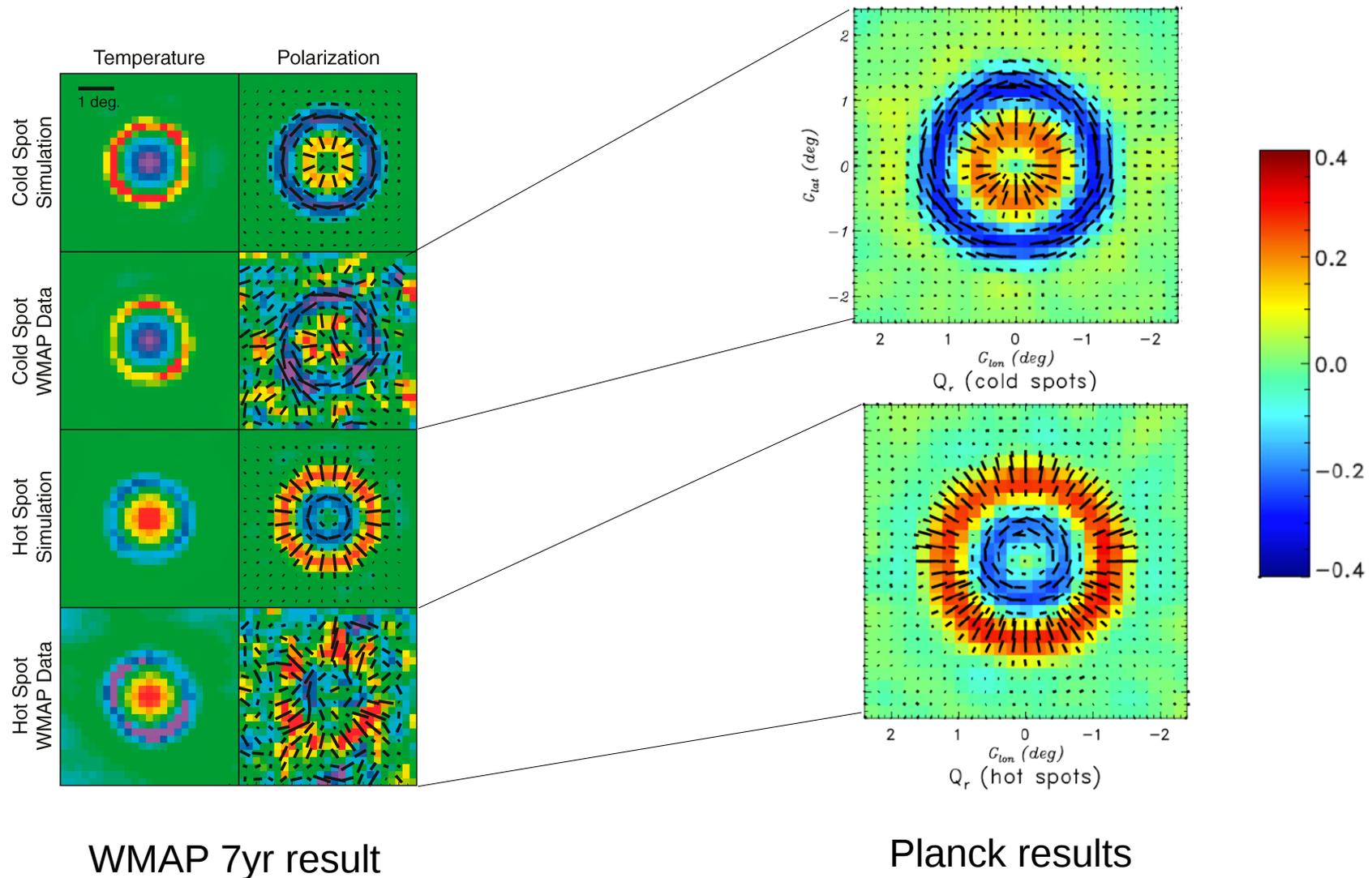


$\sim 30\mu\text{K}$

Planck collaboration (2013)

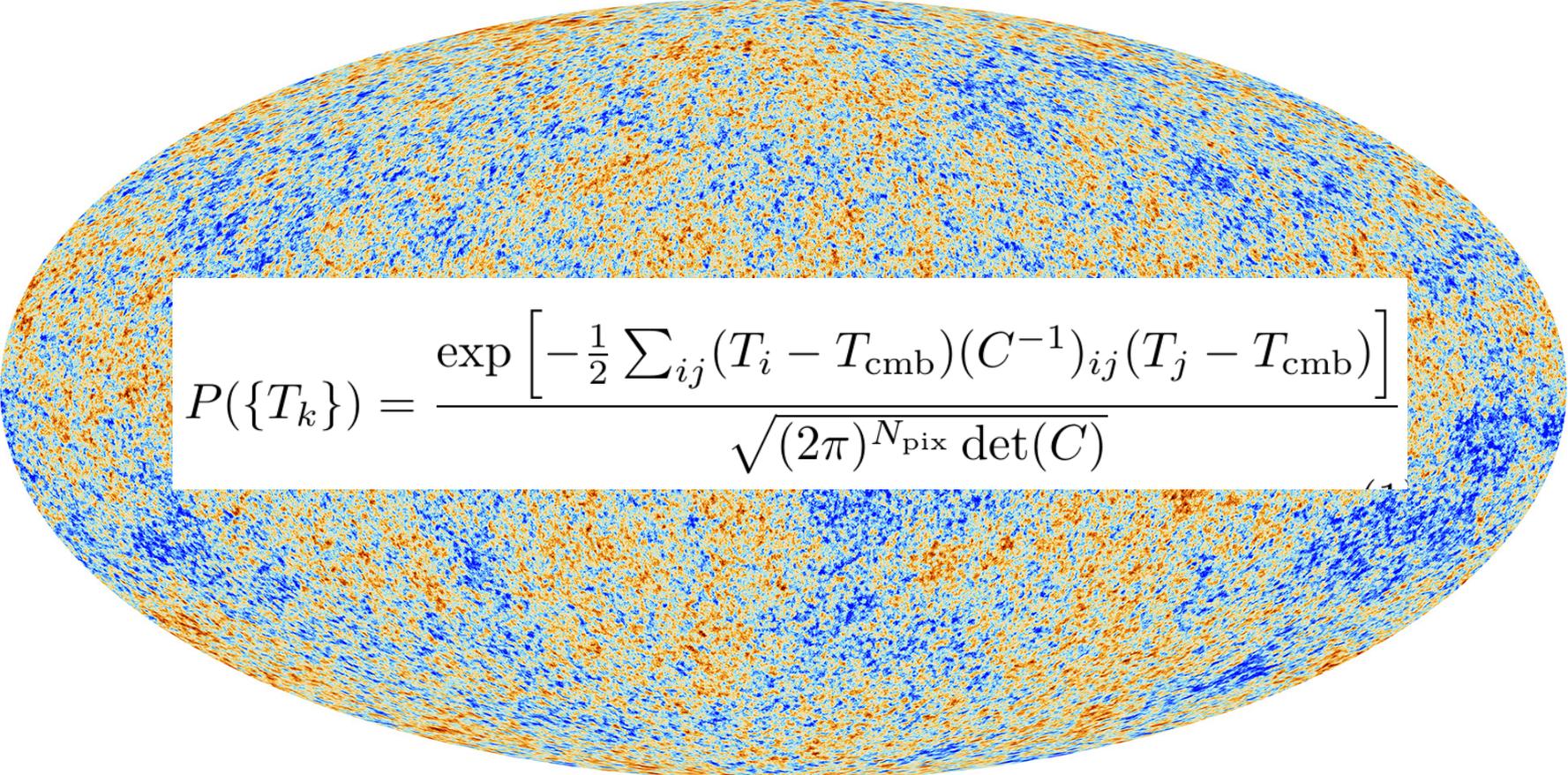
THE CMB: stats

(2) 10^{-6} 程度の偏光揺らぎ



THE CMB: stats

(3) 揺らぎはガウス統計に従う


$$P(\{T_k\}) = \frac{\exp \left[-\frac{1}{2} \sum_{ij} (T_i - T_{\text{cmb}}) (C^{-1})_{ij} (T_j - T_{\text{cmb}}) \right]}{\sqrt{(2\pi)^{N_{\text{pix}}} \det(C)}}$$

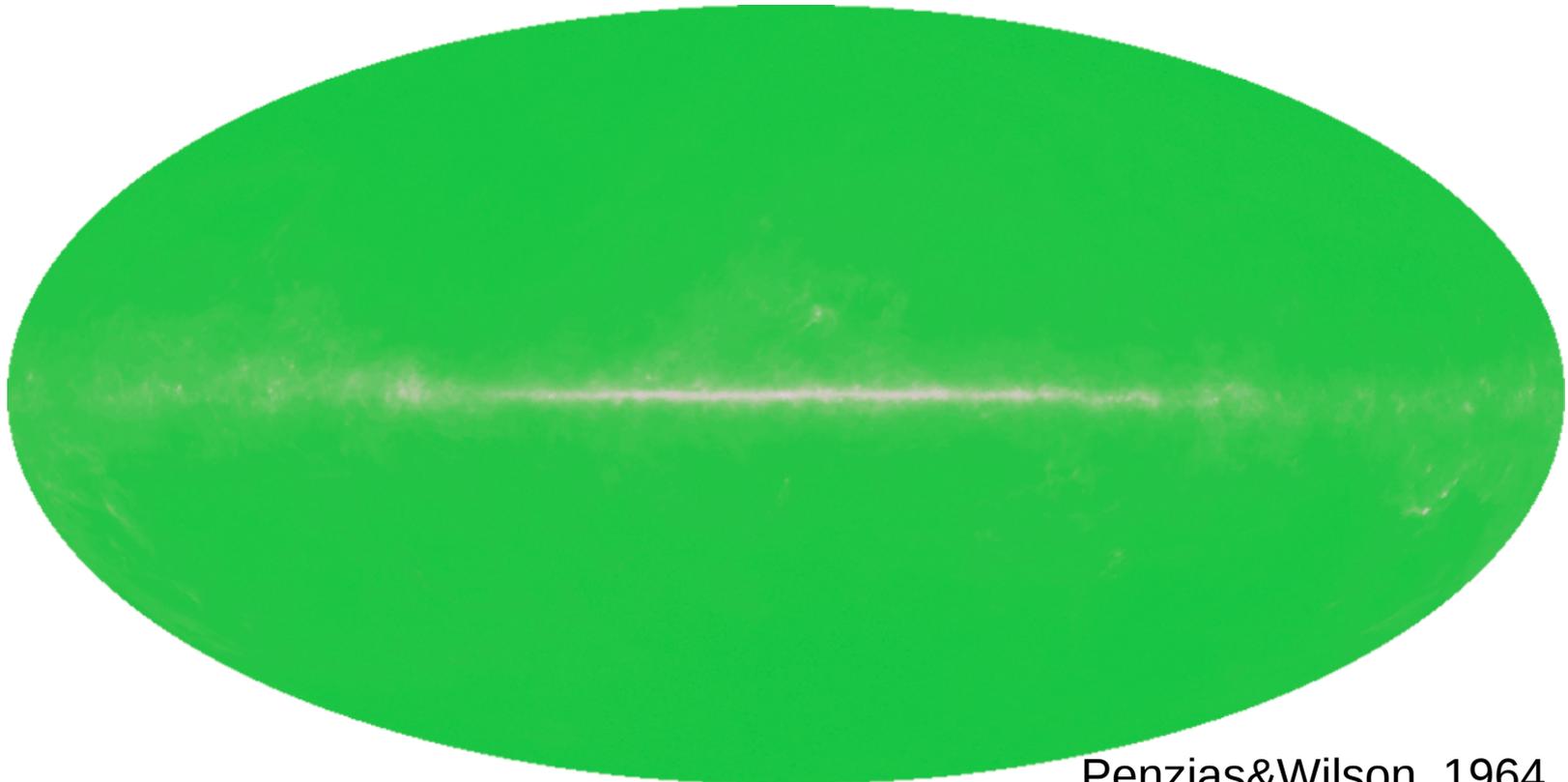
CMB偏光で インフレーション理論を検証する

「インフレーションはレースに勝ったのではない、
しかし今までのところ唯一の競争馬である」

Andrei Linde

CMBが意味すること

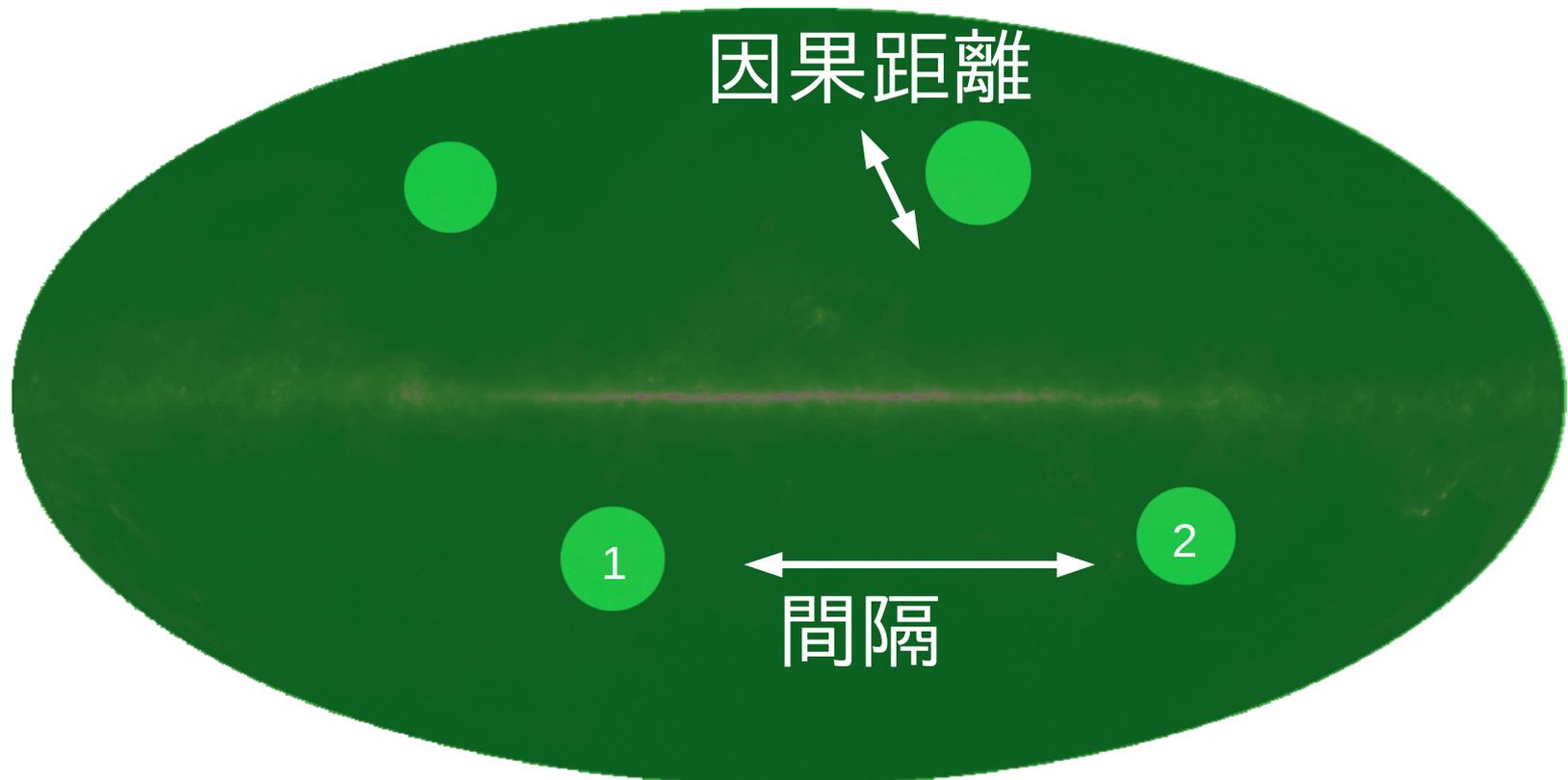
宇宙は(一様)・等方である



Penzias&Wilson, 1964

Q: なぜCMBはどの方向も同じ？

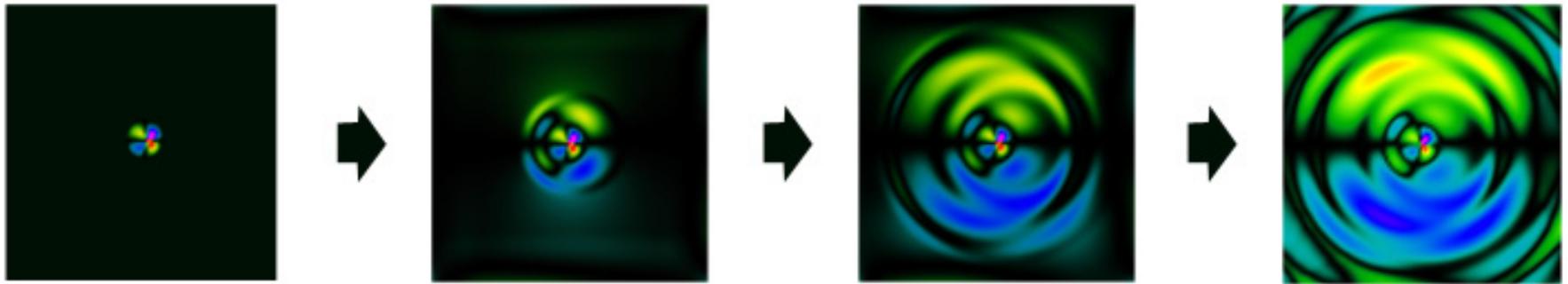
間隔 \gg 38万年で光が伝搬できる距離



(Starobinsky ('80); Sato ('81); Guth ('81); Linde ('82); Albrecht&Steinhardt ('82))

A: Inflation

宇宙誕生時の加速度的膨張



ミクロな領域
(homogeneous)

光速を越えた
膨張

マクロな領域

10^{-36} 秒の頃, 少なくとも 10^{26} 倍まで膨張

インフレーションの予言

- 量子揺らぎが宇宙のメトリックを揺らがせる

$$d\ell^2 = a^2(t) [1 + 2\zeta(\boldsymbol{x}, t)] [\delta_{ij} + h_{ij}] dx^i dx^j$$

ζ : 体積(面積)を変化させる「密度揺らぎ」



h_{ij} : 面積を変化させない「原始重力波」



こちらを観測してインフレーションの存在を証明したい。

テンソルスカラー比 r

- 重力波の大きさを、密度揺らぎ（観測済）で規格化したもの

$$r \equiv \frac{\langle h_{ij} h^{ij} \rangle}{\langle \zeta^2 \rangle}$$

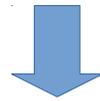
h_{ij} はインフレーション時のハッブルパラメータ $\sim (1/t)$ に比例

- インフレーションのエネルギースケールとの関係

$$V \sim \left(1 \times 10^{16} [\text{GeV}] \right)^4 \left(\frac{r}{0.01} \right)$$

$$\rho_{\text{GW}} = \langle \dot{h}_{ij} \dot{h}_{ij} \rangle \sim H^2 \langle h_{ij} h_{ij} \rangle$$

$$E_{\text{GW}} \approx \rho_{\text{GW}} V \approx \rho_{\text{GW}} H^{-3} \sim \langle h_{ij} h_{ij} \rangle H^{-1} \gtrsim 1/\Delta t \sim H$$

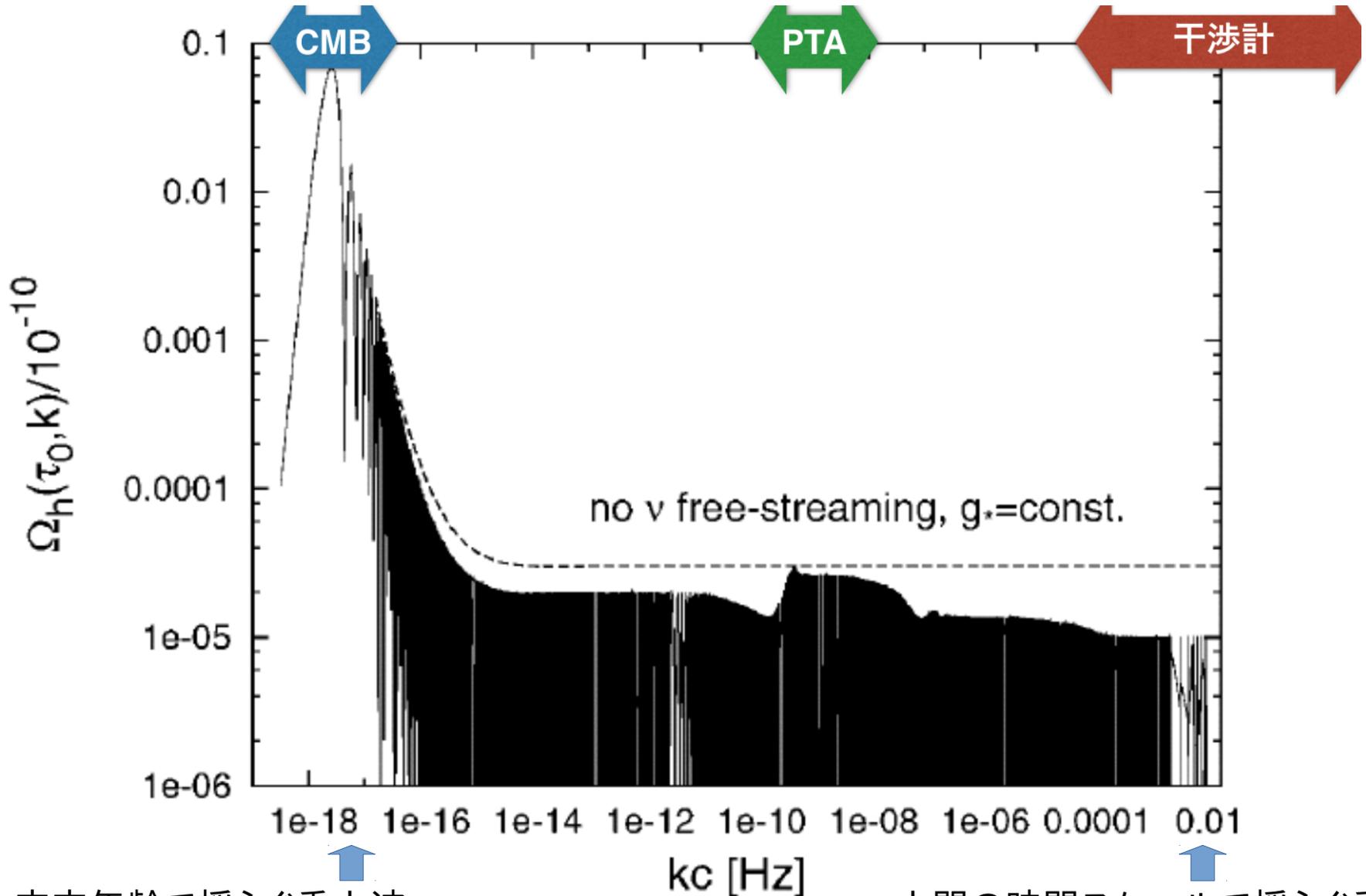


$$\langle h_{ij} h_{ij} \rangle \sim H^2$$

インフレーションが予言する重力波

Watanabe & Komatsu, PRD, '06

重力波のエネルギースペクトル



宇宙年齢で揺らぐ重力波

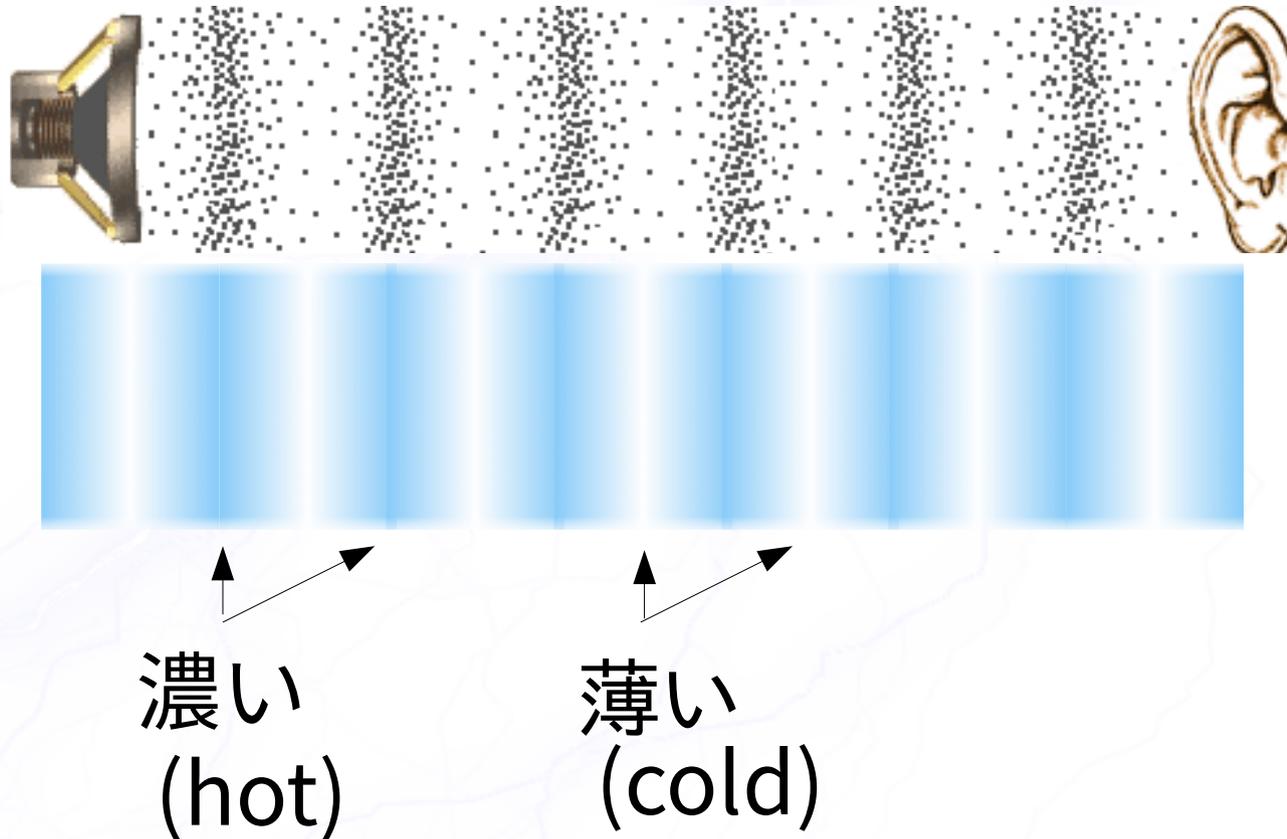
人間の時間スケールで揺らぐ重力波

**CMB偏光を用いて
どのように重力波を検出
するのか？**

CMB温度を揺らがす波

2つ

1) 音波（密度揺らぎ）



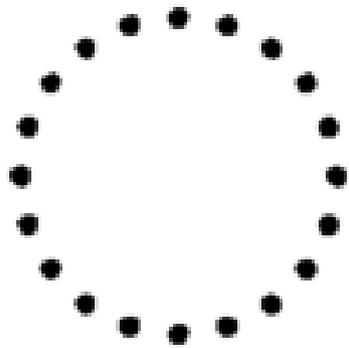
観測されているCMB揺らぎはこの成分

2) 重力波 h_{ij}

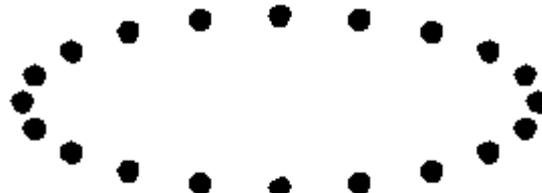
$$\lambda \sim 10^{26} [\text{m}]$$

$$T \sim 10^{10} [\text{yr}]$$

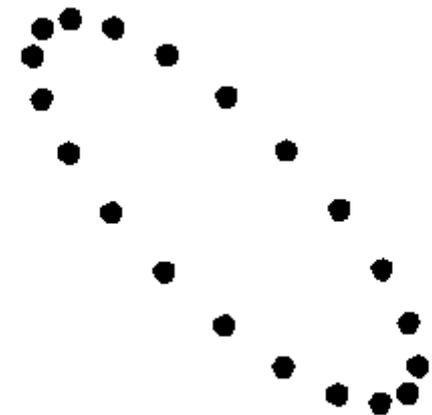
- 時空を伝わる波
- **CMB 偏光** によってのみ検出可能



No GWs

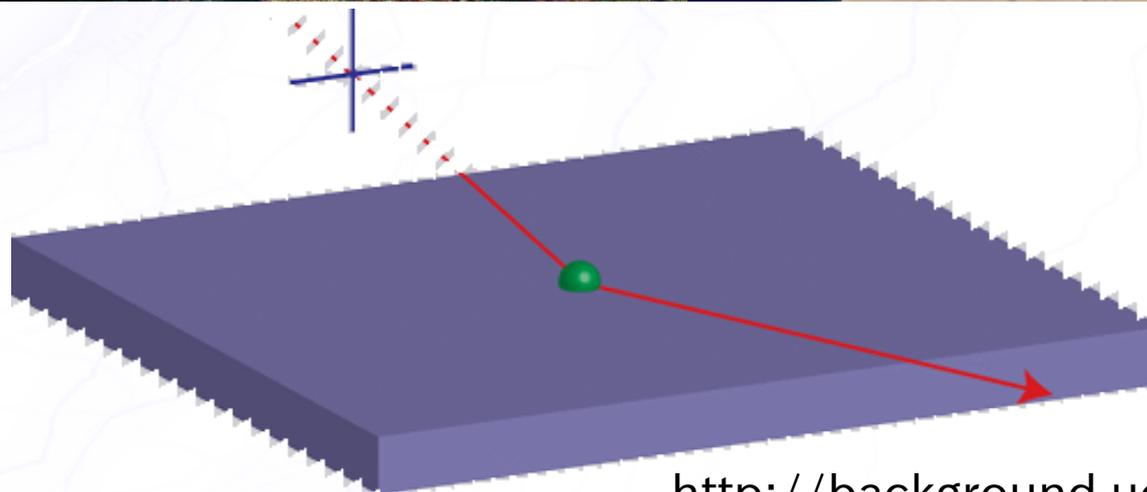


+ wave



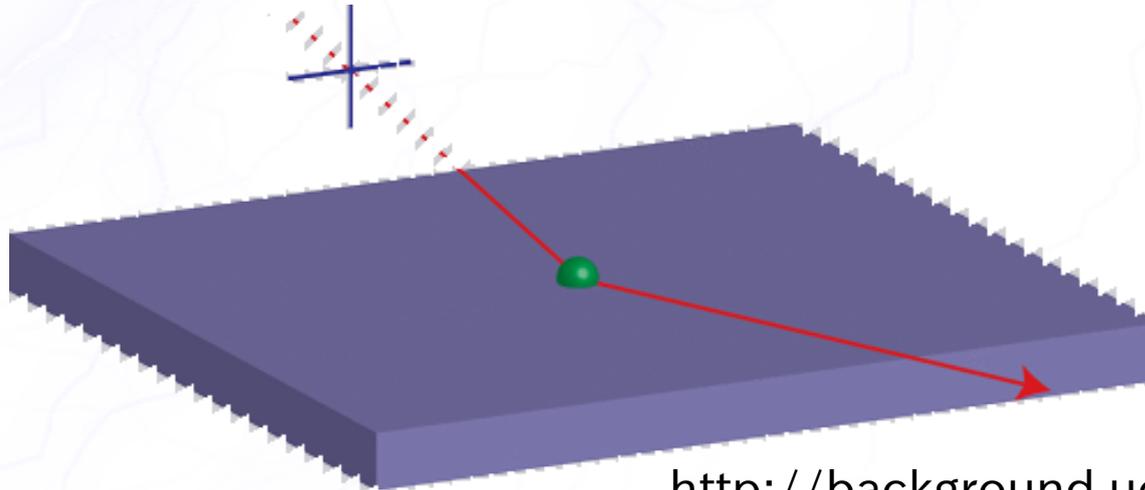
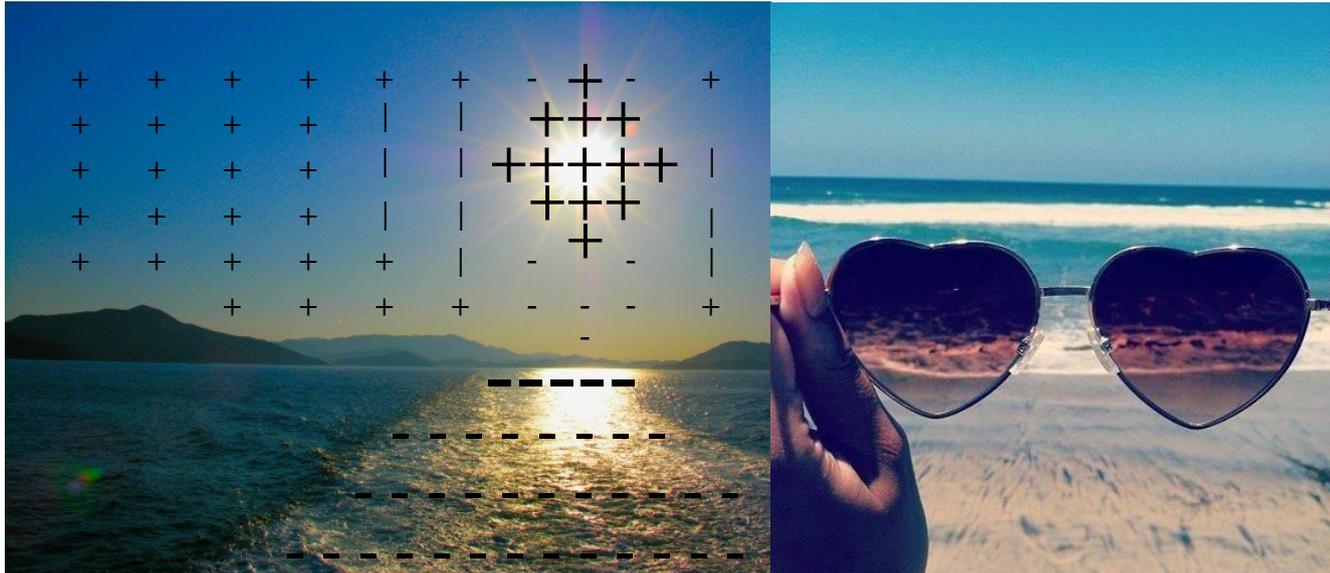
x wave

偏光は散乱から



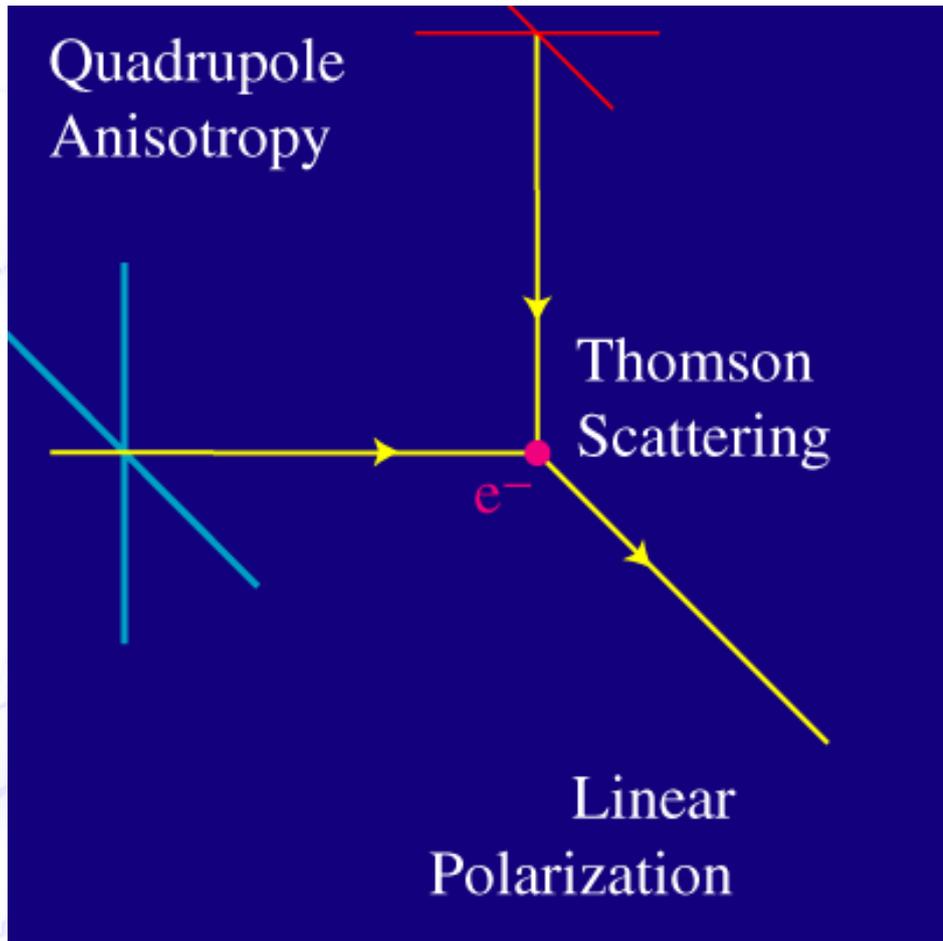
<http://background.uchicago.edu/~whu/>

偏光は散乱から



<http://background.uchicago.edu/~whu/>

トムソン散乱による偏光



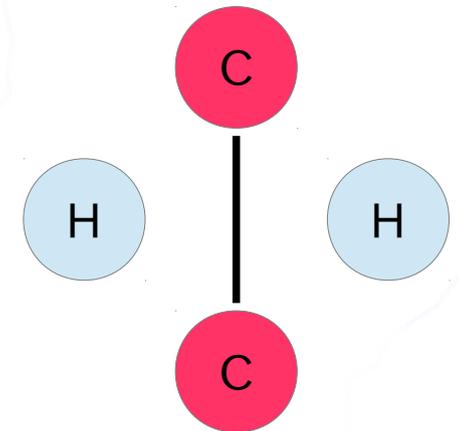
密度揺らぎ or 重力波



CMB温度揺らぎ

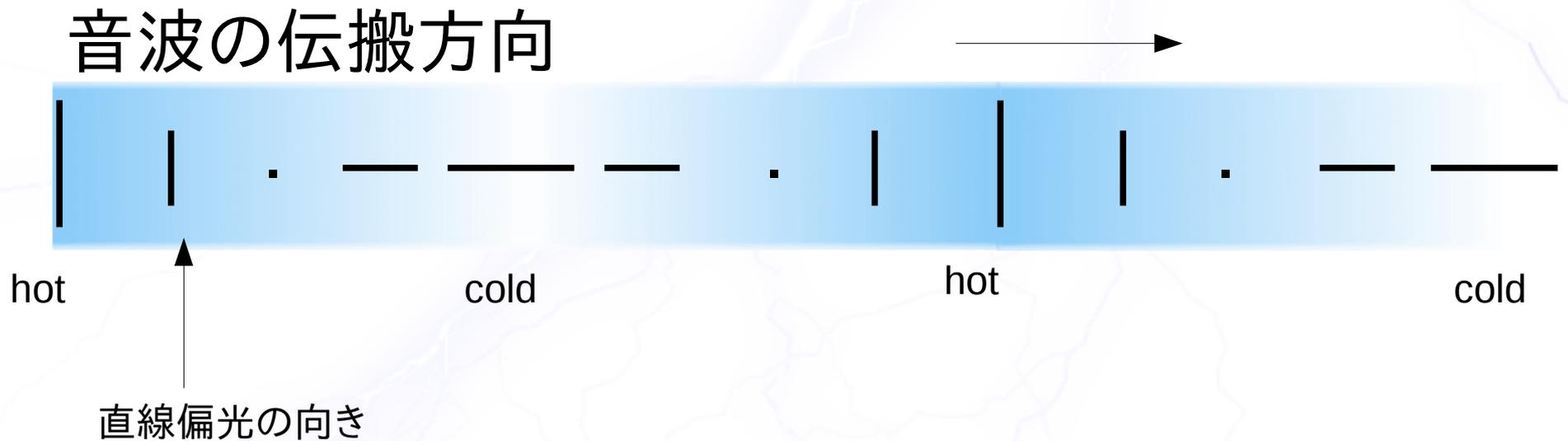


CMB偏光揺らぎ



Credit: W. Hu

音波による偏光生成



The E-mode:

偏光の向きがフリーエモードの方向に
対して直交か並行な成分 (ストークスQ)

(if not, what determines the polarization angle?)

重力波による偏光生成

重力波の伝搬方向

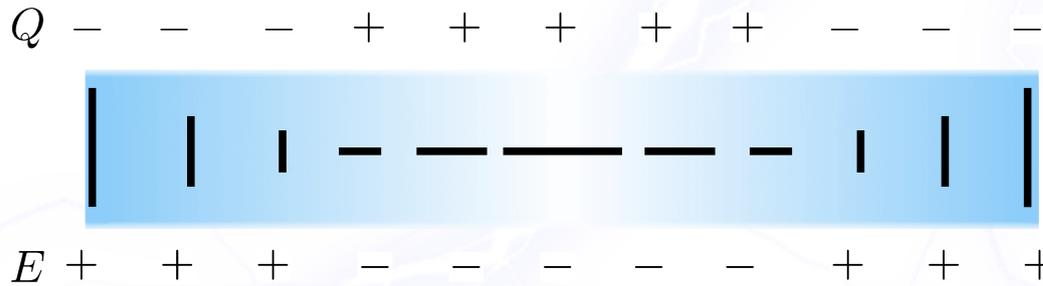


The B-mode:

偏光の向きがフリーエモードの方向に
対し45度傾いている成分 (ストークスU)

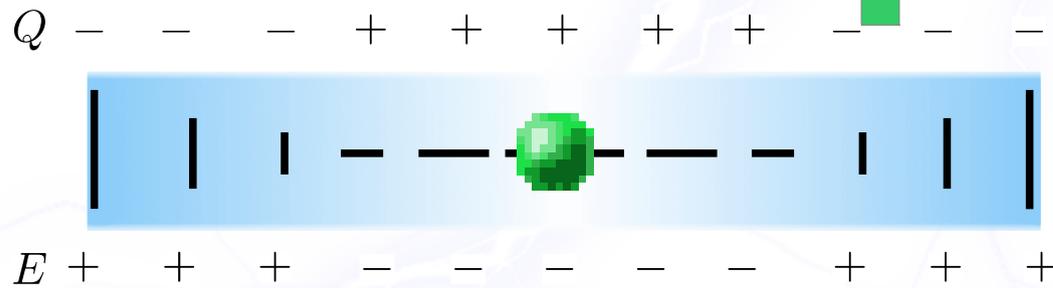
If you have only the E-mode...

- E is $-Q$ in the coordinate system such that $\ell \parallel e_1$



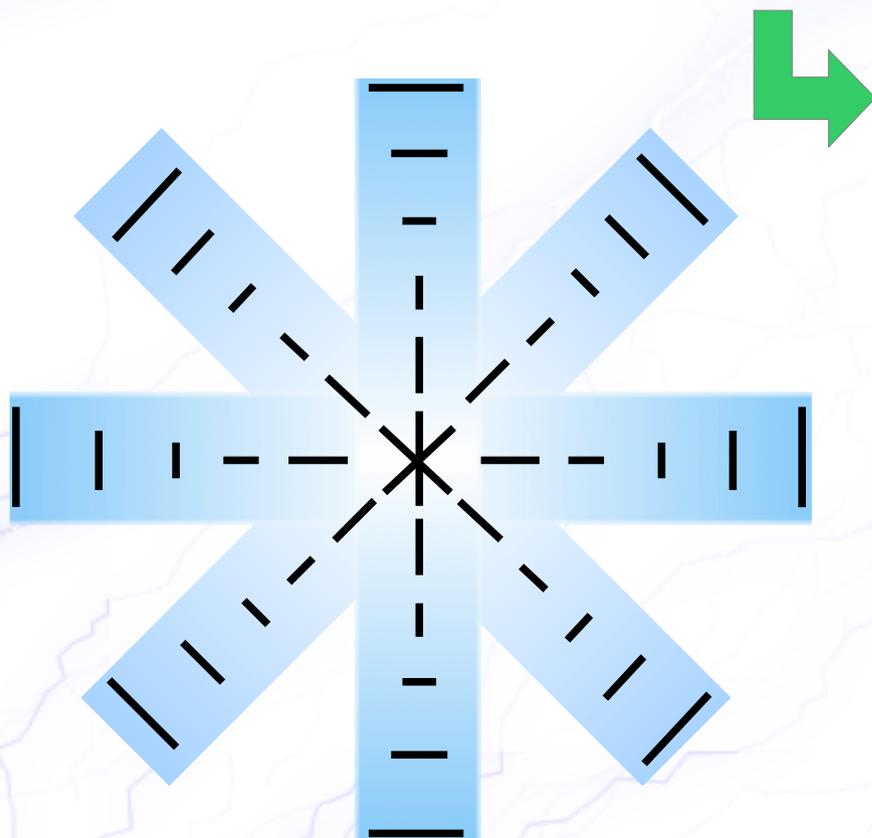
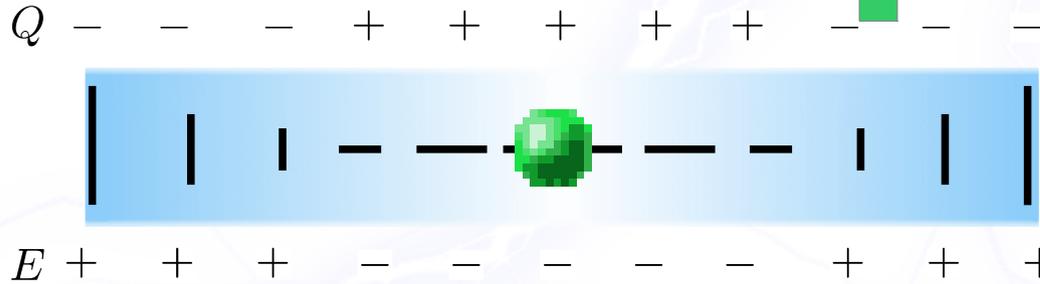
If you have only the E-mode...

- E is $-Q$ in the coordinate system such that $\ell \parallel e_1$



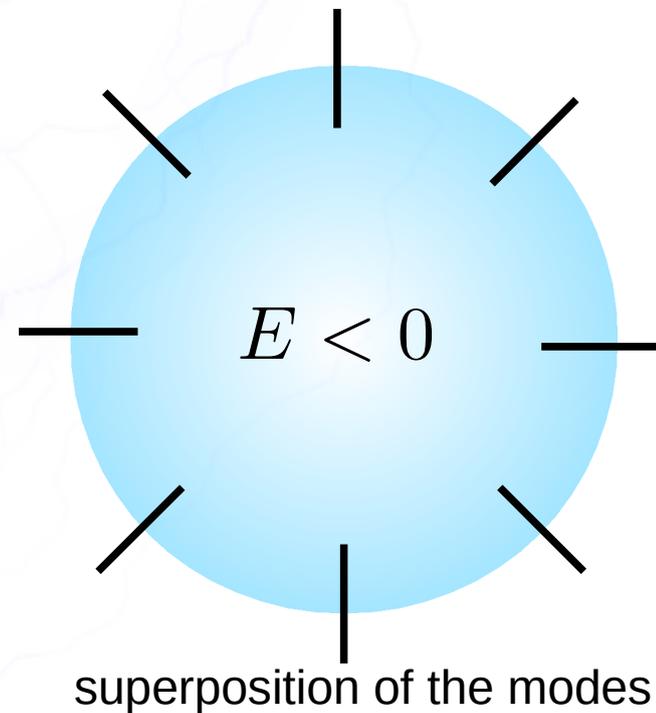
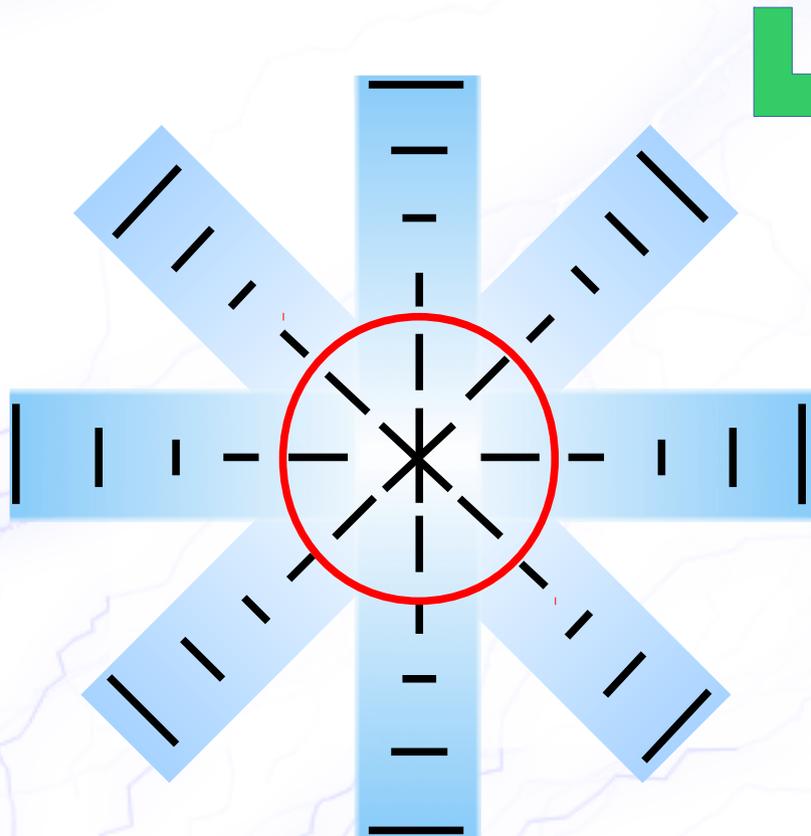
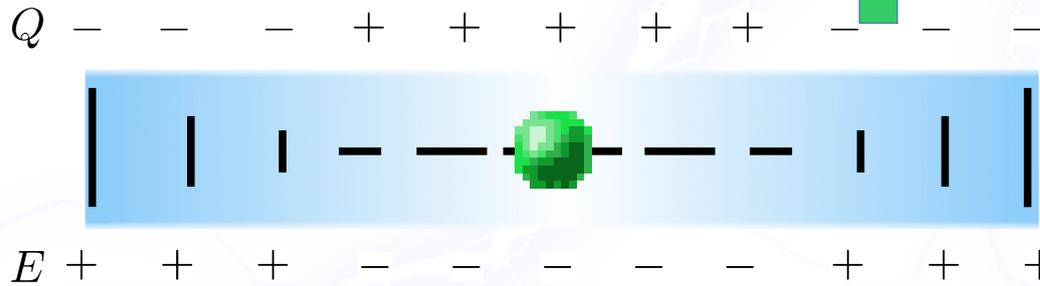
If you have only the E-mode...

- E is $-Q$ in the coordinate system such that $\ell \parallel e_1$



If you have only the E-mode...

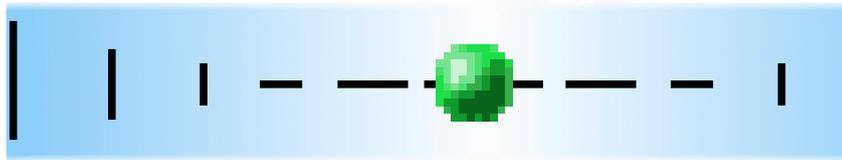
- E is $-Q$ in the coordinate system such that $\ell \parallel e_1$



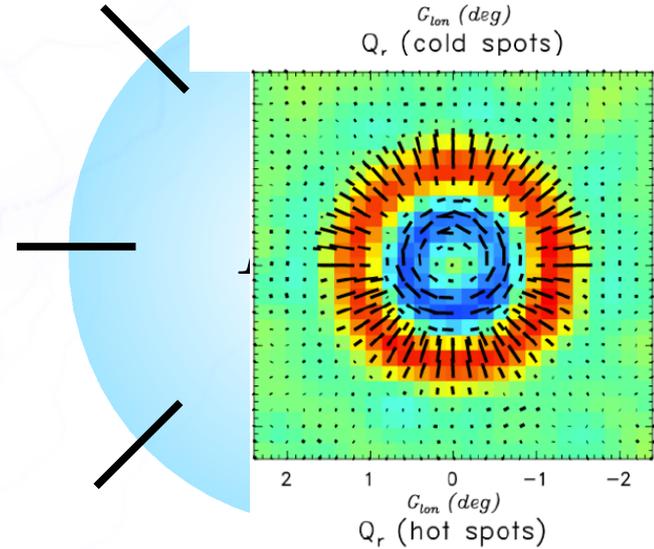
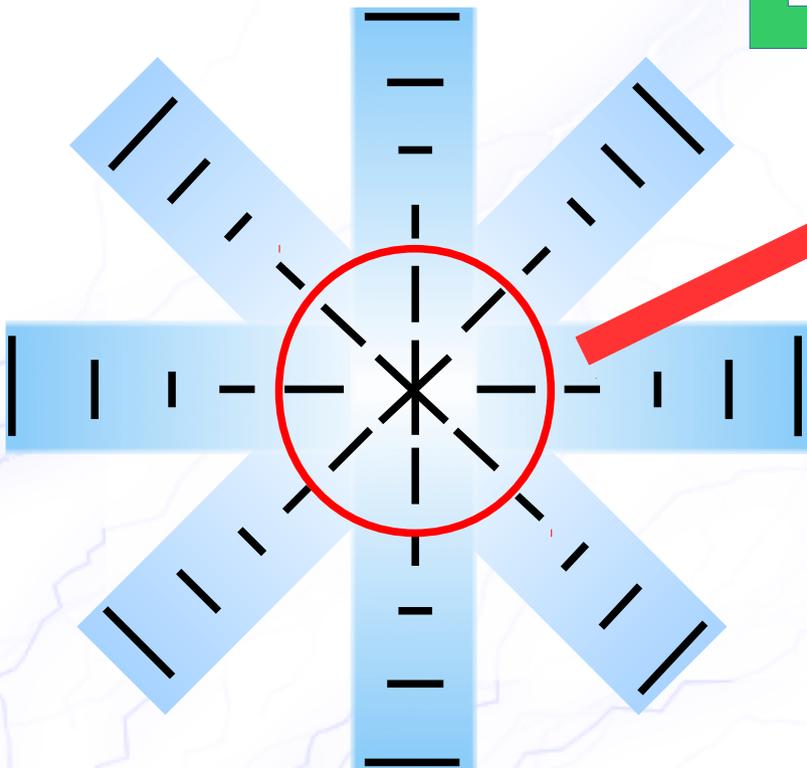
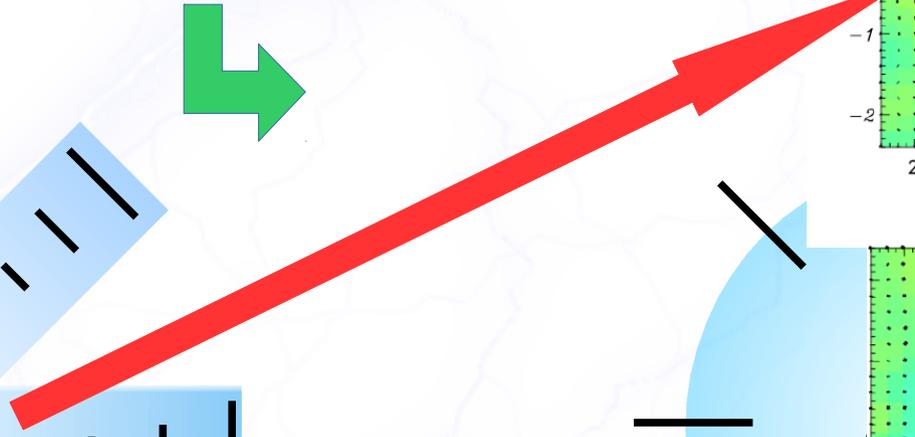
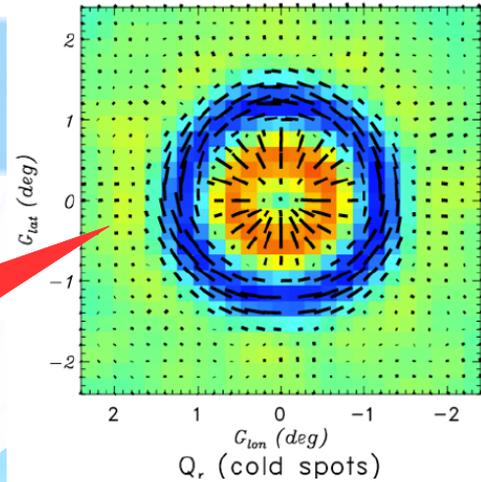
If you have only the E-mode...

- E is $-Q$ in the coordinate system such that $\ell \parallel e_1$

Q - - - + + + + - - -



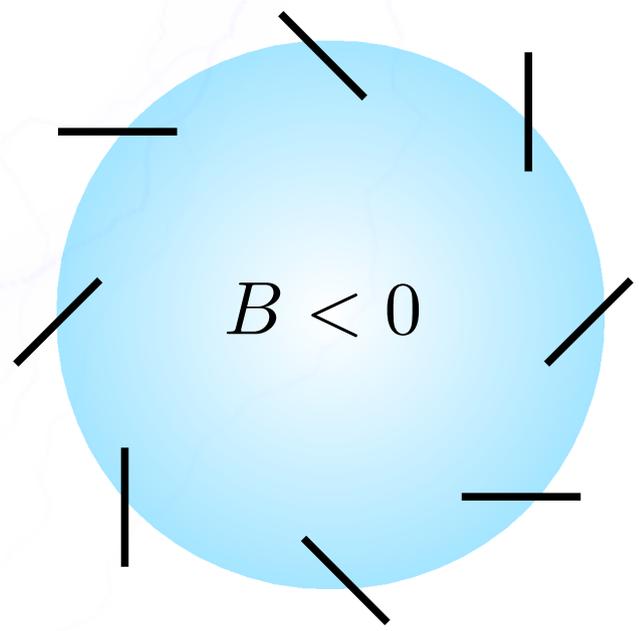
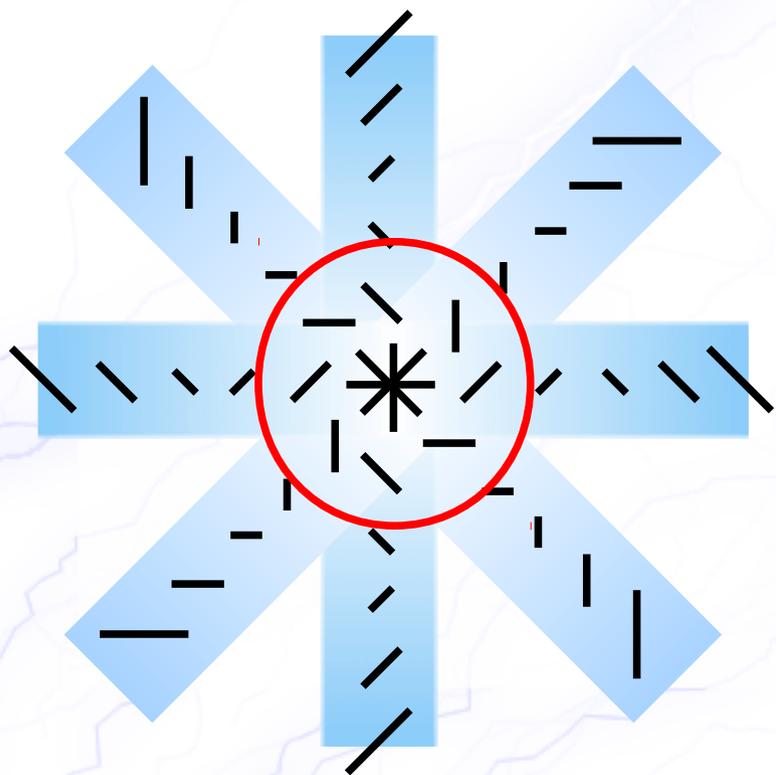
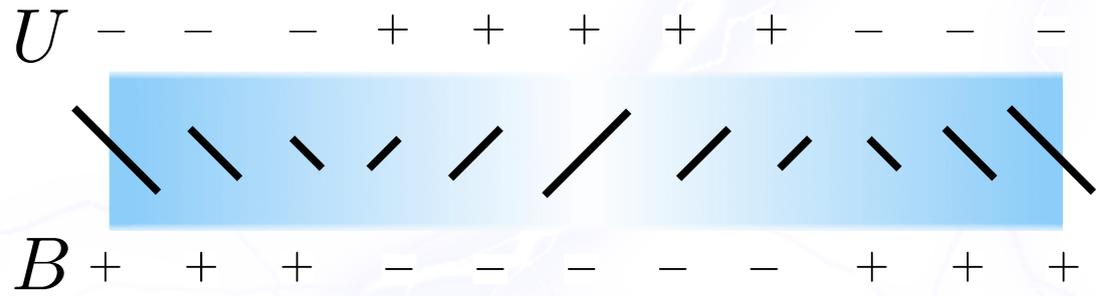
E + + + - - - - - +



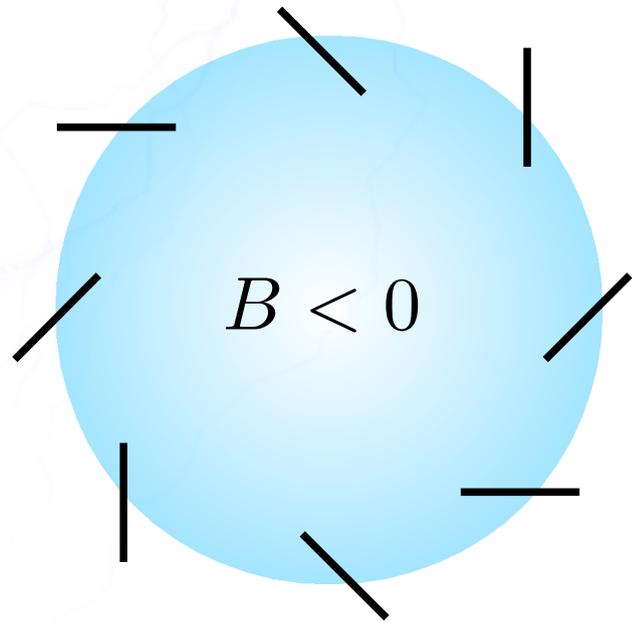
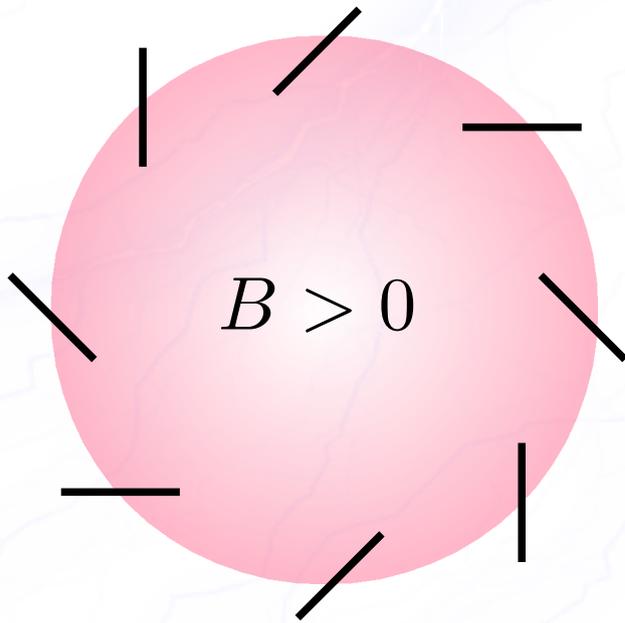
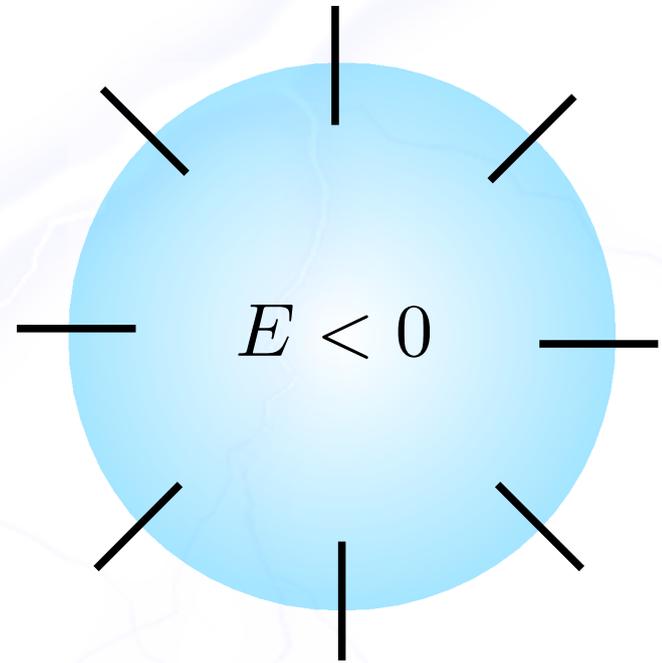
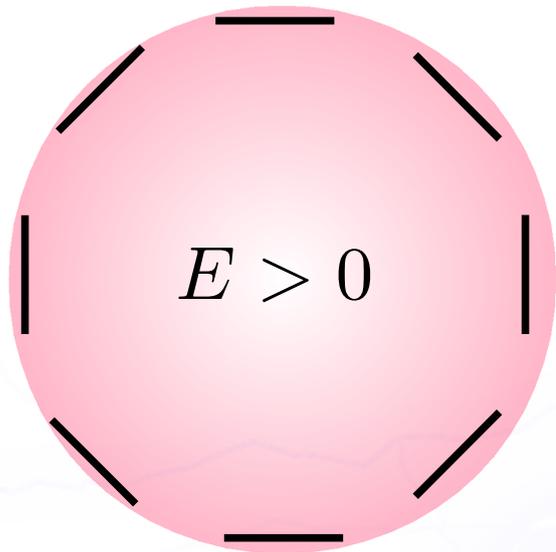
superposition of the modes

If you have only the B-mode...

- B is $-U$ in the coordinate system such that $\ell \parallel e_1$



superposition of the modes

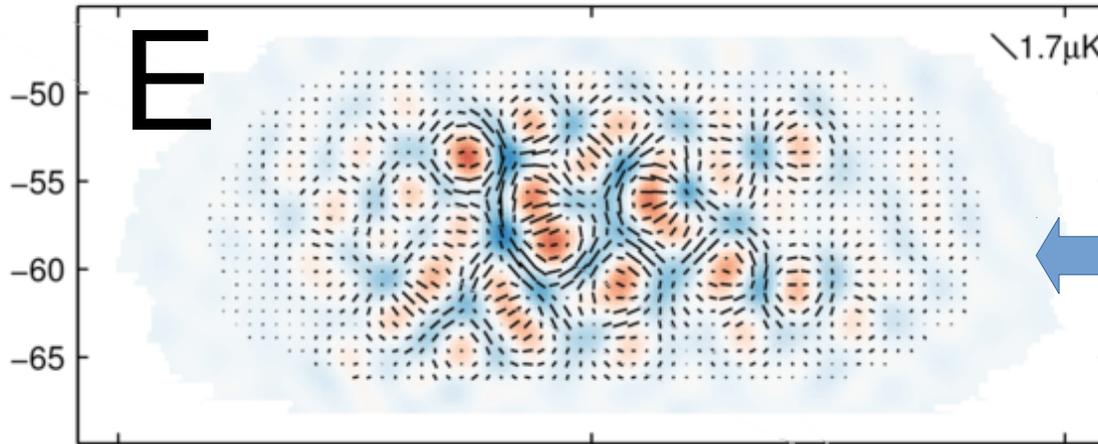


Note: sign convention matched to R. Durrer's text book

BICEP2 Results

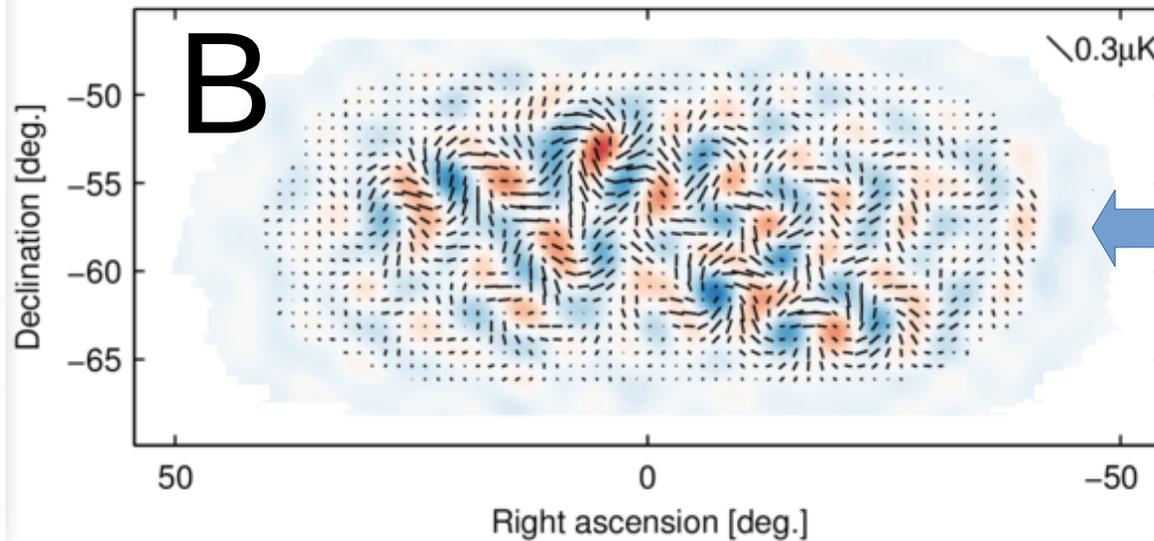


BICEP2: E signal



密度揺らぎ起源

BICEP2: B signal

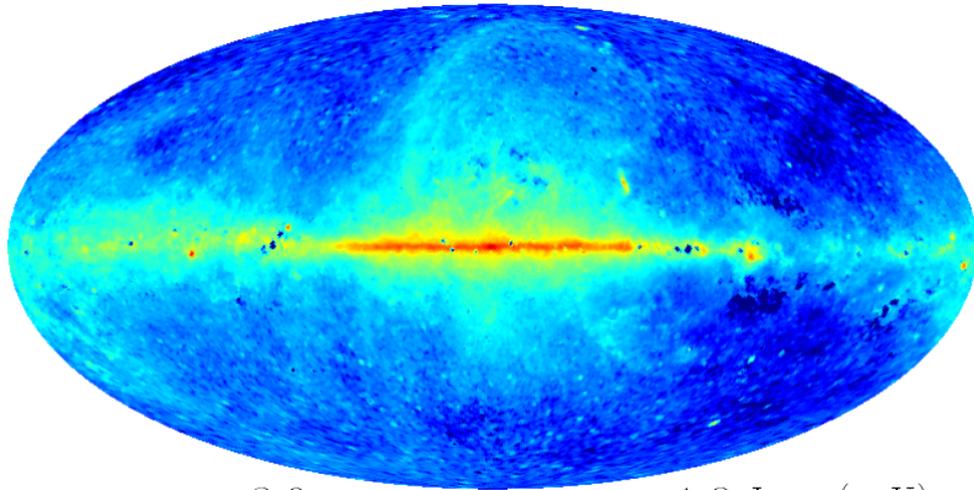


重力波

or Foreground?

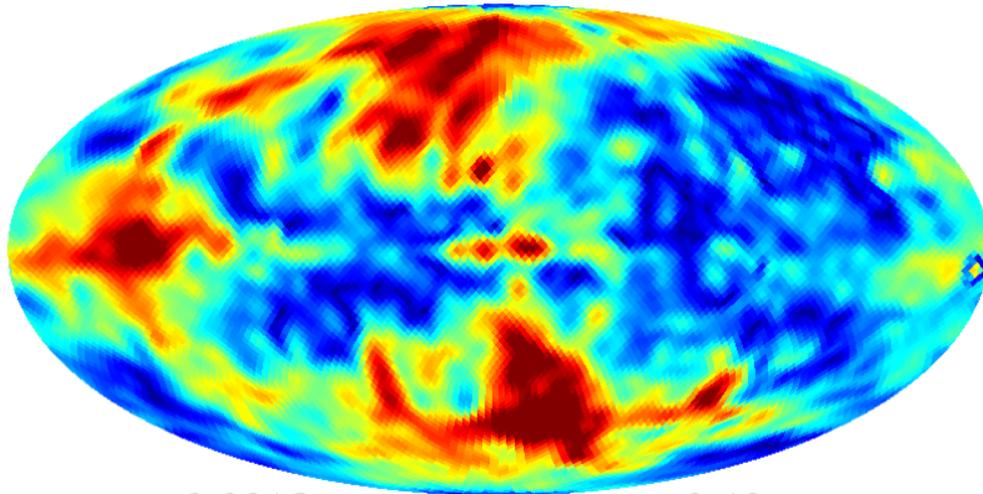
(BICEP2 collaboration, PRL, 2014)

Polarized Foreground: Synchrotron



-2.0 1.8 Log (mK)

放射強度



0.0012 0.40

偏光度 (%)

銀河磁場に巻き付く高エネルギー電子による放射

投影された磁場に**垂直に偏光**

$$T_{\text{sync}} \propto \nu^{\beta}$$

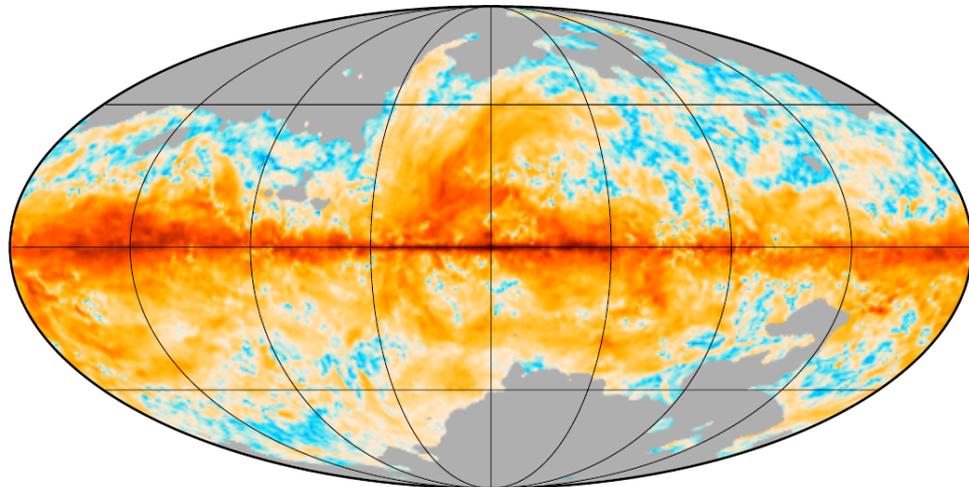
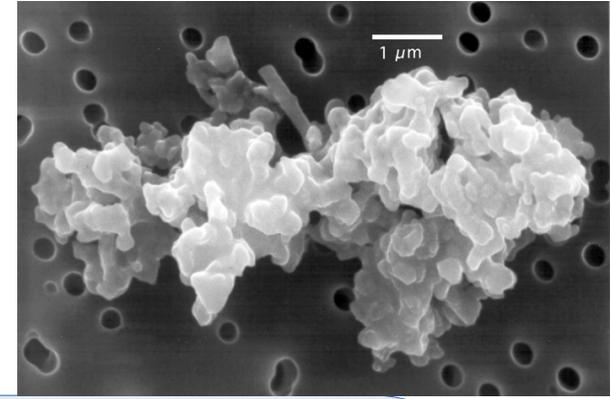
電波域 $\beta \approx -2.5$

マイクロ波域 $\beta \approx -3.0 \pm 0.2$ } 曲率

偏光度 $\Pi \sim 14\%$

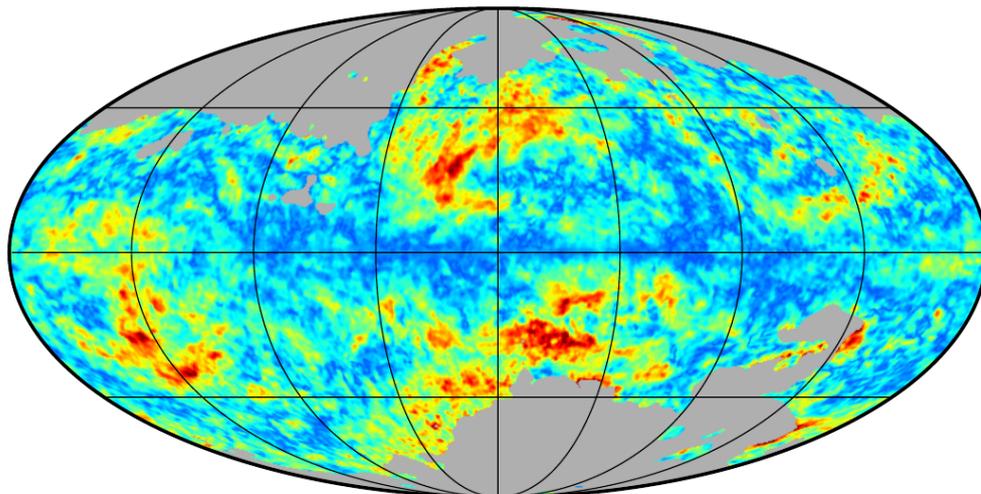
(Kogut et al., ApJ665, '07)

Polarized Foreground : Thermal Dust



-4.0 0.10 $\log_{10}(P_{353}/(\text{MJy.sr}^{-1}))$

放射強度



0.0 20.0 p [%]

偏光度 (%)

- 紫外線で暖められた宇宙塵の熱放射 (重ねあわせ)
- 投影された磁場に垂直に偏光
- $\beta \approx 1.53 \pm 0.05$
(Planck 2015 results X)
- 偏光度 as high as $\sim 20\%$

やってみないと分からない!

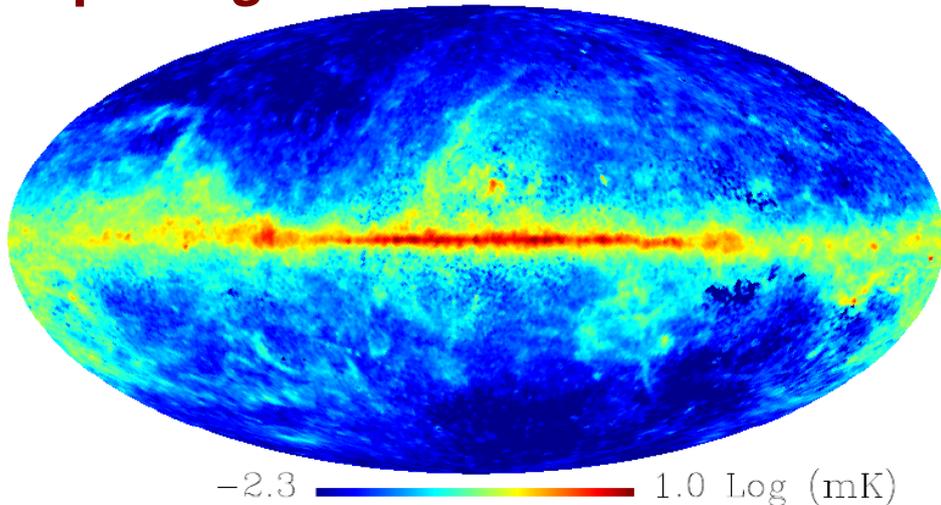
WMAP: $3.6 \pm 1.1\%$ (outside p06 mask)
(Kogut et al., ApJ, '07)

Archeops: 4–5 %
(Benoit et al., A&A, '04)

(Planck collaboration, arxiv:1405.0871)

Other Foregrounds: Free-Free & Spinning dust

Spinning dust



(a) estimate map for spinning dust at WMAP K band

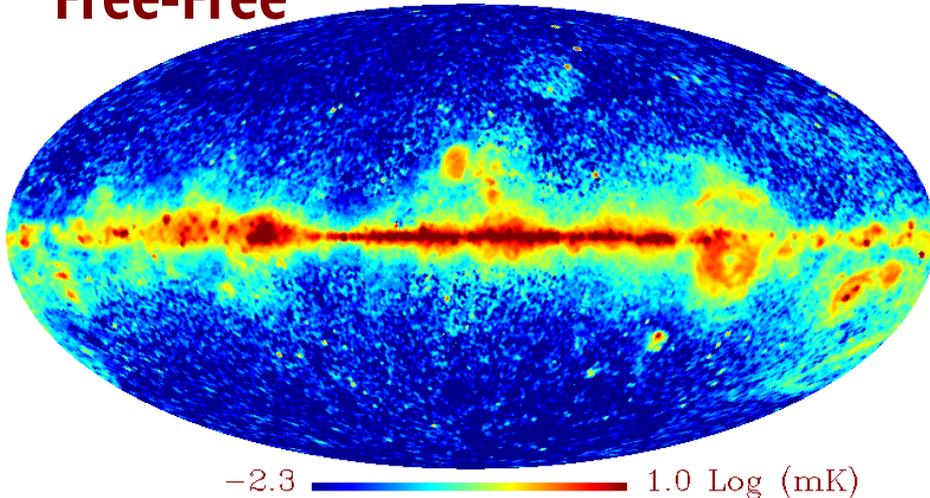
$$\beta \approx -2.5$$

$\nu \gtrsim 60$ GHzで強度落ちる
(Macellari et al., MNRAS, 2011)

無偏光, less than 0.5%

(Lazarian&Draine, ApJ, 2000)

Free-Free



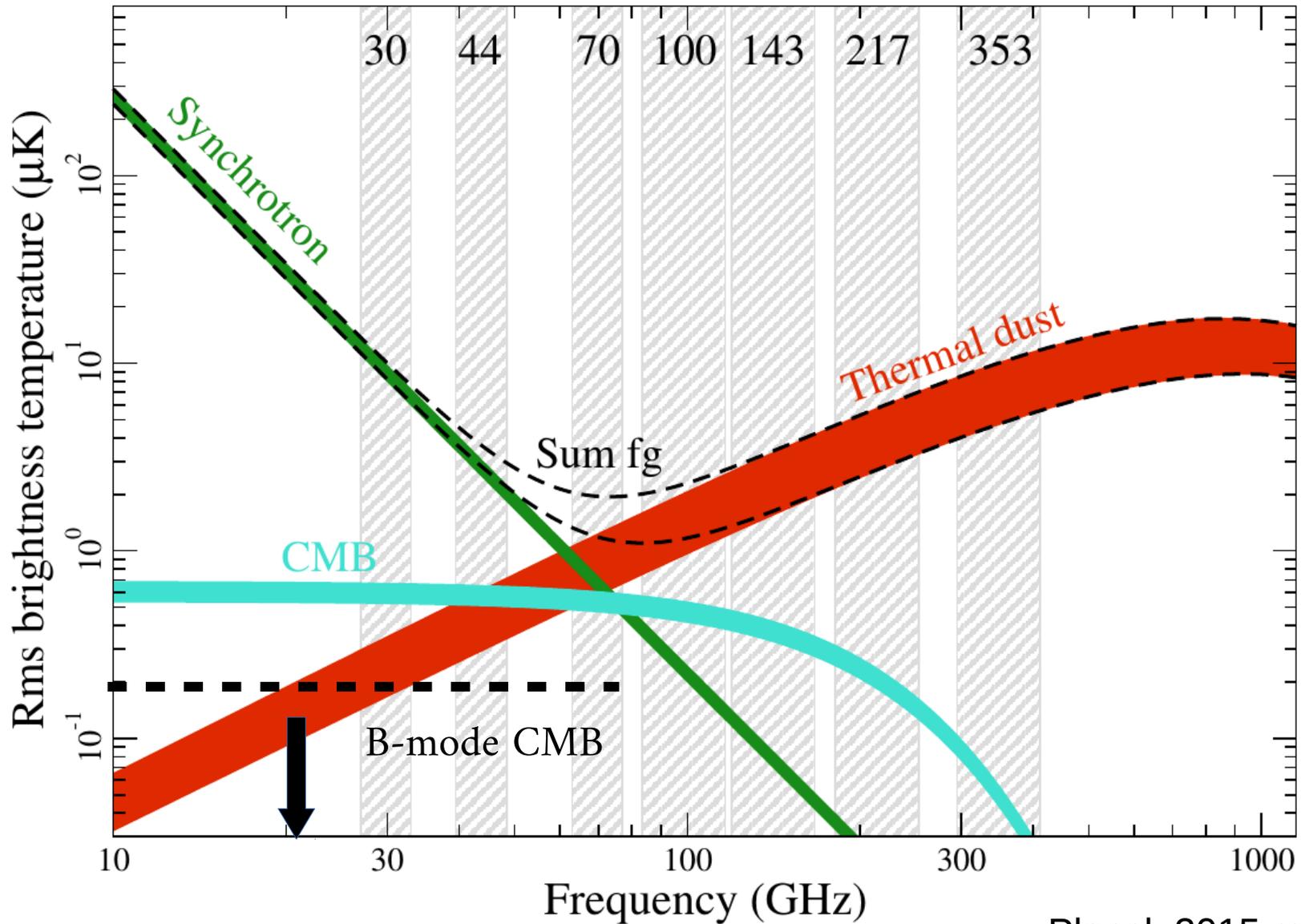
$$\beta \approx -2.1$$

(Bennet et al., ApJS, 2011)

無偏光, 観測からの上限 $\lesssim 3.4\%$

(Macellari et al., MNRAS, 2011)

Polarization foreground summary



LiteBIRD

Lite (Light) Satellite for the Studies of **B**-mode Polarization and Inflation from Cosmic Background **R**adiation **D**etection

インフレーション宇宙を検証する

羽澄昌史氏 (KEK/Kavli IPMU/総研大) スライドより

JAXA

T. Dotani
 H. Fuke
 H. Imada
 I. Kawano
 H. Matsuhara
 K. Mitsuda
 T. Nishibori
 K. Nishijo
 A. Noda
 A. Okamoto
 S. Sakai
 Y. Sato
 K. Shinozaki
 H. Sugita
 Y. Takei
 T. Tomida
 T. Wada
 R. Yamamoto
 N. Yamasaki
 T. Yoshida
 K. Yotsumoto

KEK

M. Hazumi (PI)
 M. Hasegawa
 N. Kimura
 K. Kohri
 M. Maki
 Y. Minami
 T. Nagasaki
 R. Nagata
 H. Nishino
 S. Oguri
 T. Okamura
 N. Sato
 J. Suzuki
 T. Suzuki
 O. Tajima
 T. Tomaru
 M. Yoshida

Osaka U.

S. Kuromiya
 M. Nakajima
 S. Takakura
 K. Takano

Kavli IPMU

A. Ducout
 T. Iida
 D. Kaneko
 N. Katayama
 T. Matsumura
 Y. Sakurai
 H. Sugai
 B. Thorne
 S. Utsunomiya

Osaka Pref. U.

M. Inoue
 K. Kimura
 H. Ogawa
 N. Okada

SOKENDAI

Y. Akiba
 Y. Inoue
 H. Ishitsuka
 Y. Segawa
 S. Takatori
 D. Tanabe
 H. Watanabe

Kansei Gakuin U.

S. Matsuura

Kitazato U.

T. Kawasaki

Konan U.

I. Ohta

NAOJ

A. Dominjon
 T. Hasebe
 J. Inatani
 K. Karatsu
 S. Kashima
 T. Noguchi
 Y. Sekimoto
 M. Sekine

Okayama U.

T. Funaki
 N. Hidehira
 H. Ishino
 A. Kibayashi
 Y. Kida
 K. Komatsu
 S. Uozumi
 Y. Yamada

NICT

Y. Uzawa

NIFS

S. Takada, Masao Scales, Hiroshim

U. Tsukuba

M. Nagai

TIT

S. Matsuoka
 R. Chendra

U. Tokyo

S. Sekiguchi
 T. Shimizu
 S. Shu
 N. Tomita

Tohoku U.

M. Hattori

Nagoya U.

K. Ichiki

Yokohama Natl. U.

T. Fujino
 H. Kanai
 S. Nakamura
 R. Takaku
 T. Yamashita

RIKEN

S. Mima
 C. Otani

AIST

K. Hattori

APC Paris

J. Errard
 R. Stompor

Cardiff U.

G. Pisano

CEA

L. Duband
 J.M. Duval

CU Boulder

N. Halverson

McGill U.

M. Dobbs

MPA

E. Komatsu

NIST

G. Hilton
 J. Hubmayr

Stanford U.

S. Cho
 K. Irwin
 S. Kernasovskiy
 C.-L. Kuo
 D. Li
 T. Namikawa
 K. L. Thompson

Saitama U.

M. Naruse

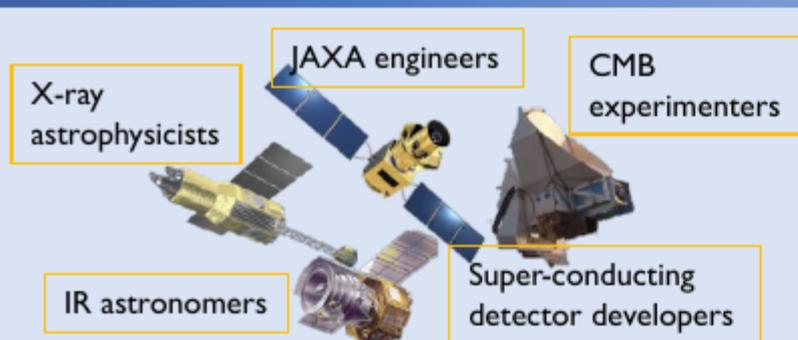
UC Berkeley / LBNL

D. Barron
 J. Borrill
 Y. Chinone
 A. Cukierman
 D. Curtis
 T. de Haan
 L. Hayes
 J. Fisher
 N. Goeckner-wald
 C. Hill
 O. Jeong
 R. Keskitalo
 T. Kisner
 A. Kusaka
 A. Lee(US PI)
 E. Linder
 D. Meilhan
 P. Richards
 E. Taylor
 U. Seljak
 B. Sherwin
 A. Suzuki
 P. Turin
 B. Westbrook
 M. Willer
 N. Whitehorn

UC San Diego

K. Arnold
 T. Elleot
 B. Keating
 G. Rebeiz

LiteBIRD working group



148 members, international and interdisciplinary (as of Feb 1, 2017)

LiteBIRD計画の進捗

ISAS/JAXAでの状況

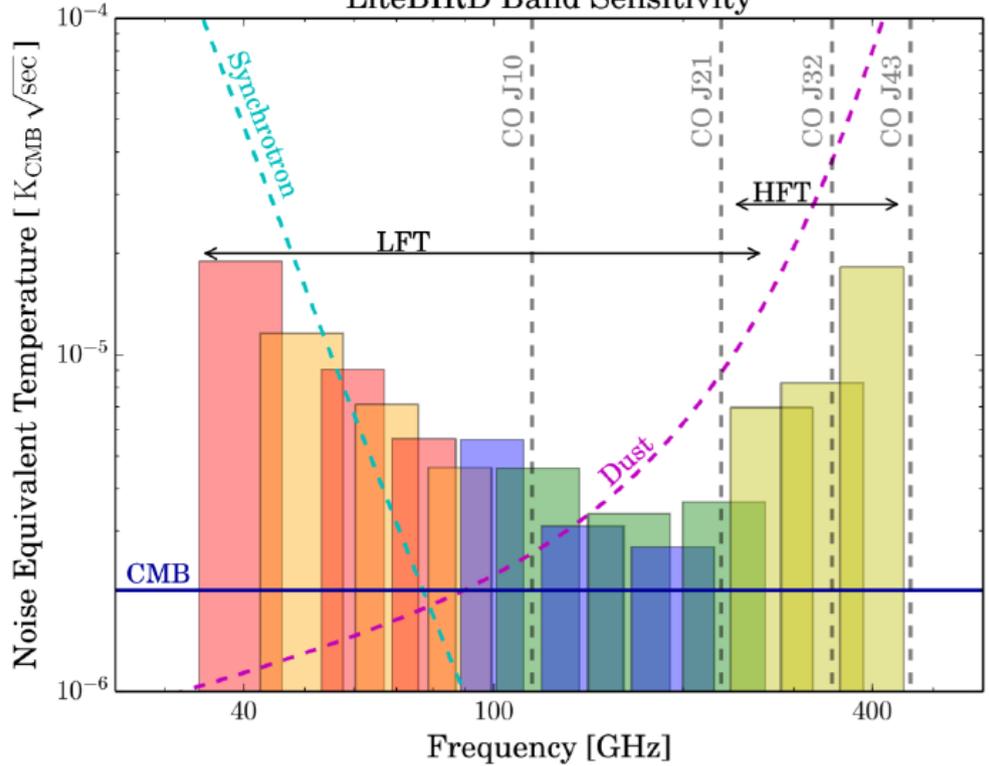
- 2015年2月、戦略的中型ミッションの公募に応募。
- 2015年6月、理学委員会から推薦。
- 2016年5月、国際レビュー、8月に計画審査。
- 2016年9月、Phase A1スタート（ノミナル2年間。2件のうちのひとつ）

- 日本学術会議マスタープラン2014、重点大型研究計画のひとつ。
- 文科省の指定する新大型研究計画のひとつ（ロードマップ2014）。
- 日本学術会議マスタープラン2017、重点大型研究計画のひとつ。

米国側の状況

- 2014年12月、MASA MO (Mission of Opportunity)に応募。
- 2015年8月、NASA MOに採択(全2件のひとつ)。Phase Aスタート。
- 2016年7月、Concept Study ReportをNASAに提出。
- 2017年4月、NASA MO down-selection予定。

LiteBIRD Band Sensitivity



周波数帯域

前景放射対策として
15バンドで観測

LFT (12 band)

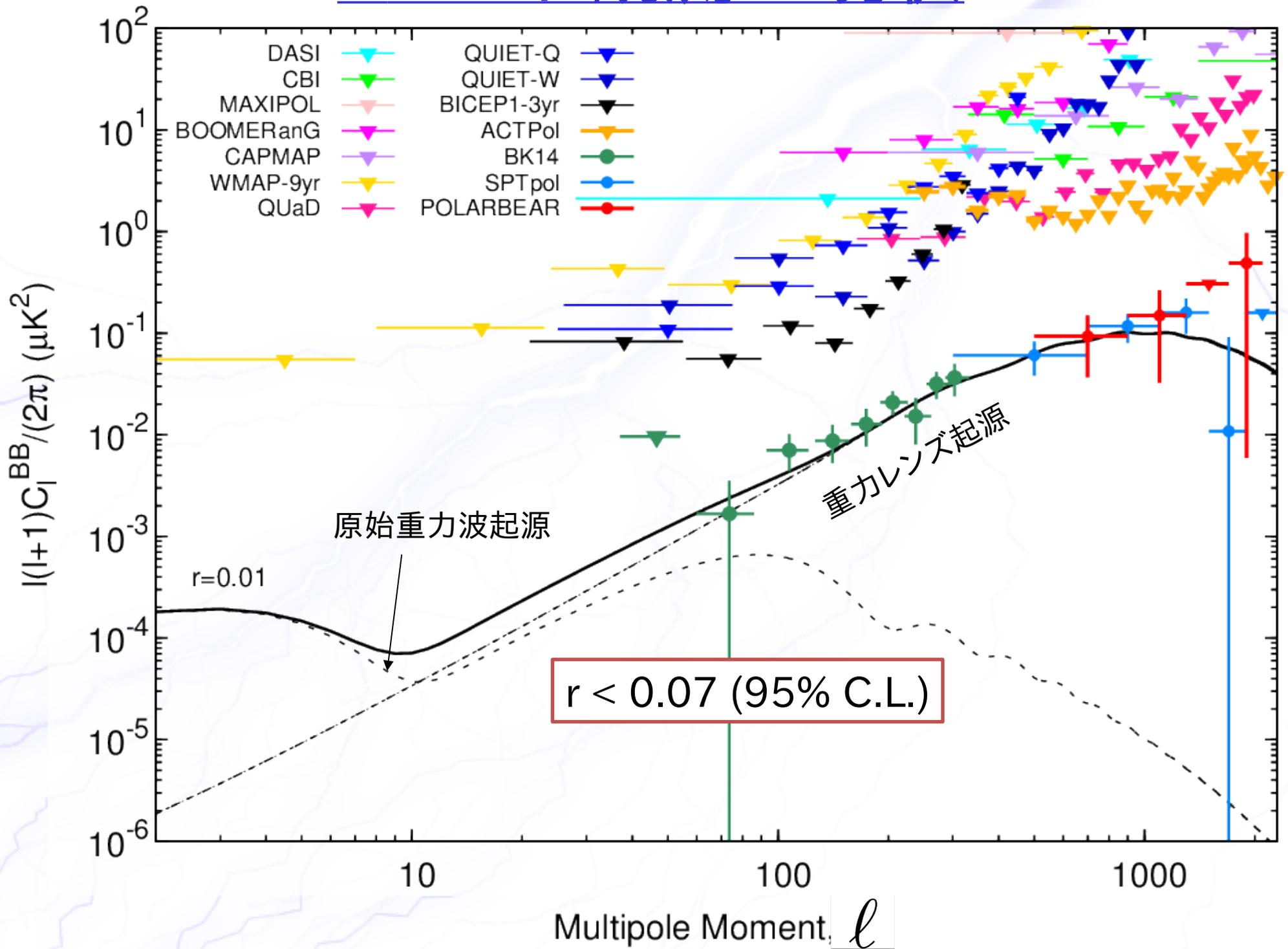
HFT (3 band)

Band GHz	Bandwidth $\Delta v/v$	NEP $\text{aW}/\sqrt{\text{Hz}}$	NET $\mu\text{K}\sqrt{\text{s}}$	N_{bolo}	NET_{arr} $\mu\text{K}\sqrt{\text{s}}$	Sensitivity with margin $\mu\text{K}\cdot\text{arcmin}$
40	0.30	7.74	225.9	152	18.3	53.4
50	0.30	7.86	136.9	152	11.1	32.3
60	0.23	7.06	106.2	152	8.6	25.1
68	0.23	7.10	82.9	152	6.7	19.6
78	0.23	7.08	64.7	152	5.2	15.3
89	0.23	7.00	52.4	152	4.3	12.4
100	0.23	8.55	79.7	222	5.3	15.6
119	0.30	9.48	52.5	148	4.3	12.6
140	0.30	8.99	42.3	222	2.8	8.3
166	0.30	8.31	36.2	148	3.0	8.7
195	0.30	7.62	34.1	222	2.3	6.7
235	0.30	6.86	35.8	148	2.9	8.6
280	0.30	9.14	55.4	72	6.5	19.0
338	0.30	8.34	78.0	108	7.5	21.9
402	0.23	6.69	154.4	74	17.9	52.3
total				2276		3.2

Table 1 The LiteBIRD sensitivity. The last column is the sensitivity to polarization with the units $\mu\text{K}\cdot\text{arcmin}$ and it includes the 3 sources of margin, i) the observational time of 3 years with the time efficiency of 0.72, ii) the yield of 0.8, and iii) $1.25 \times \text{NET}$.

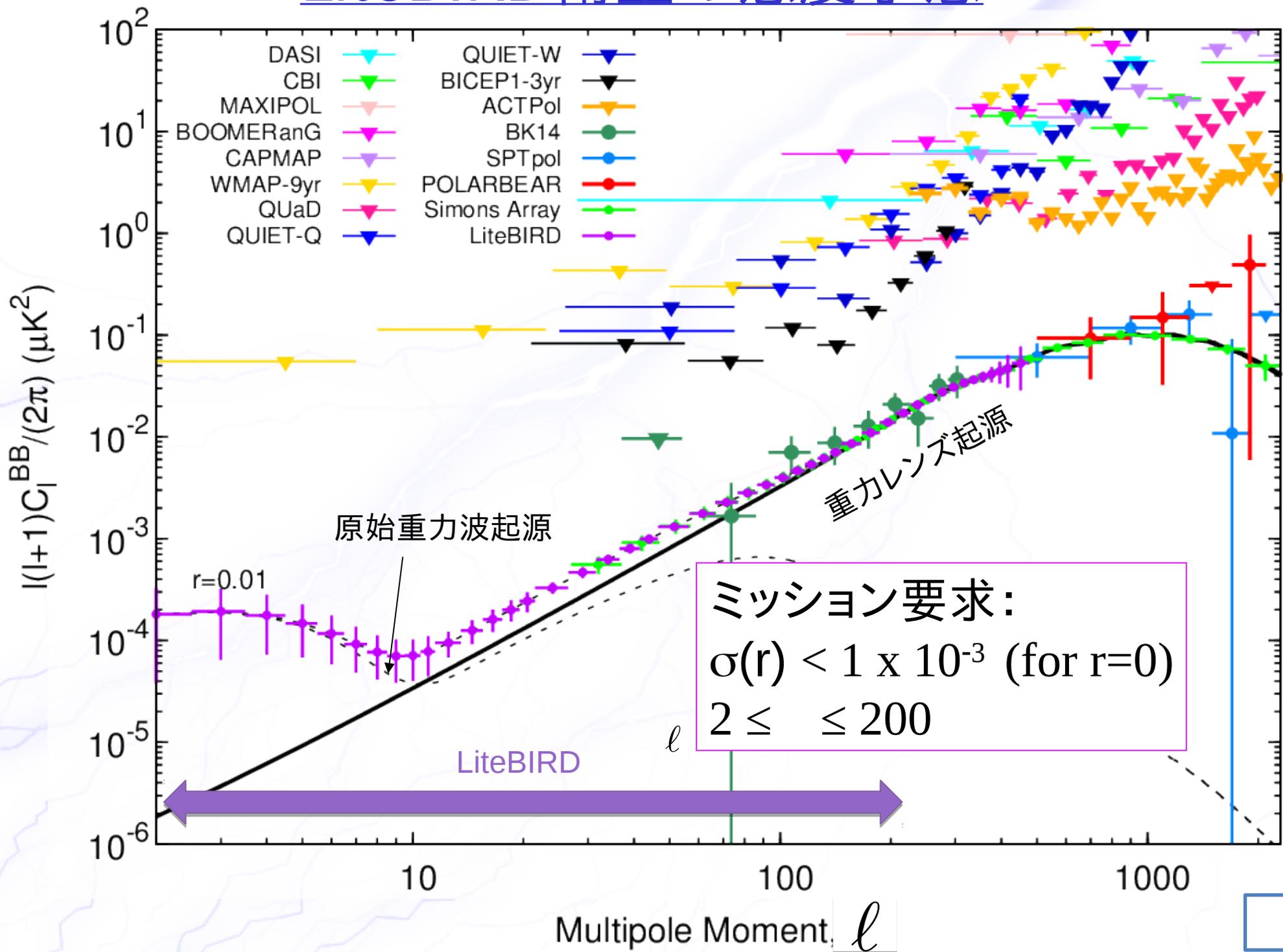
Bモード観測の現状

Yuji Chinone

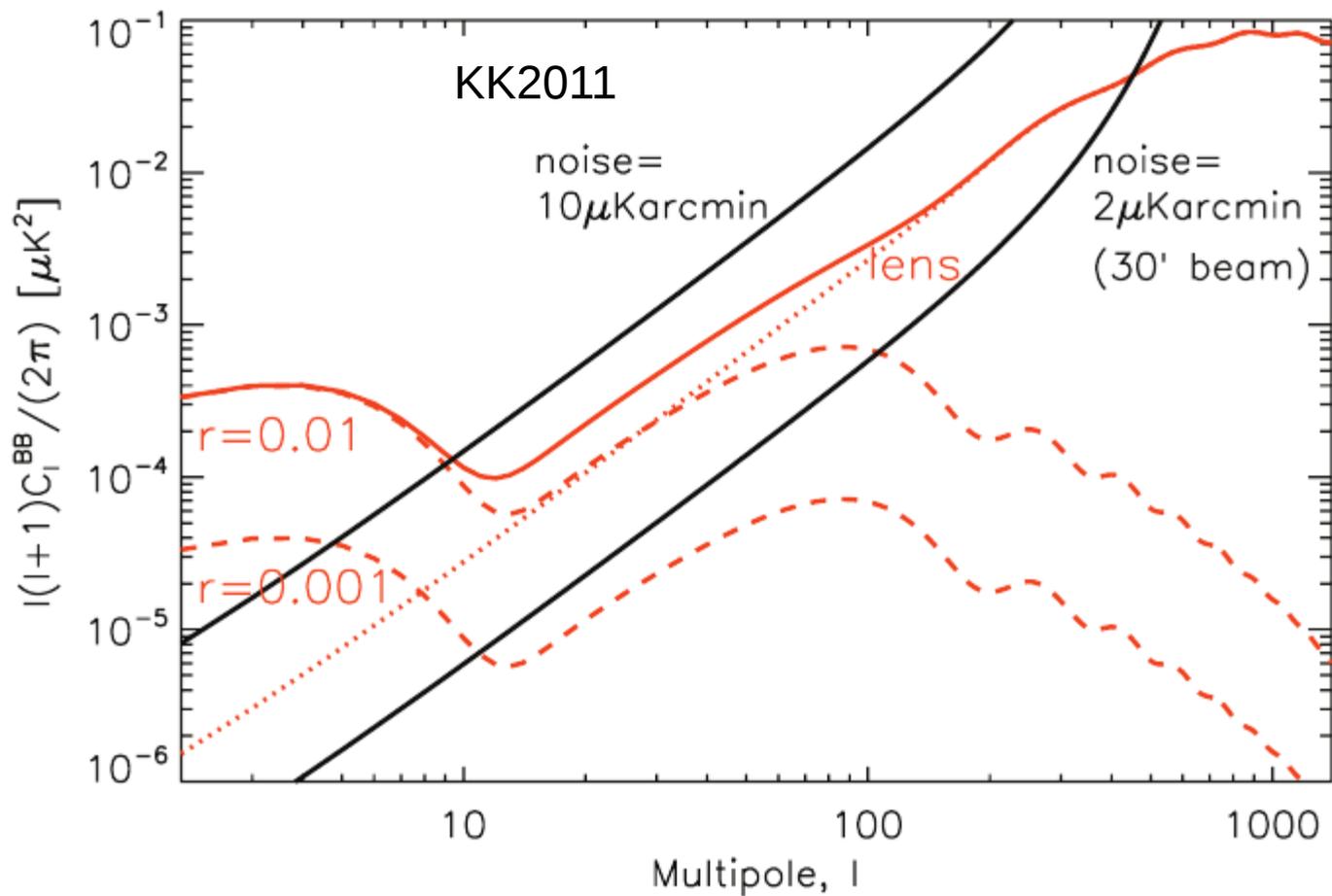


LiteBIRD衛星の感度予想

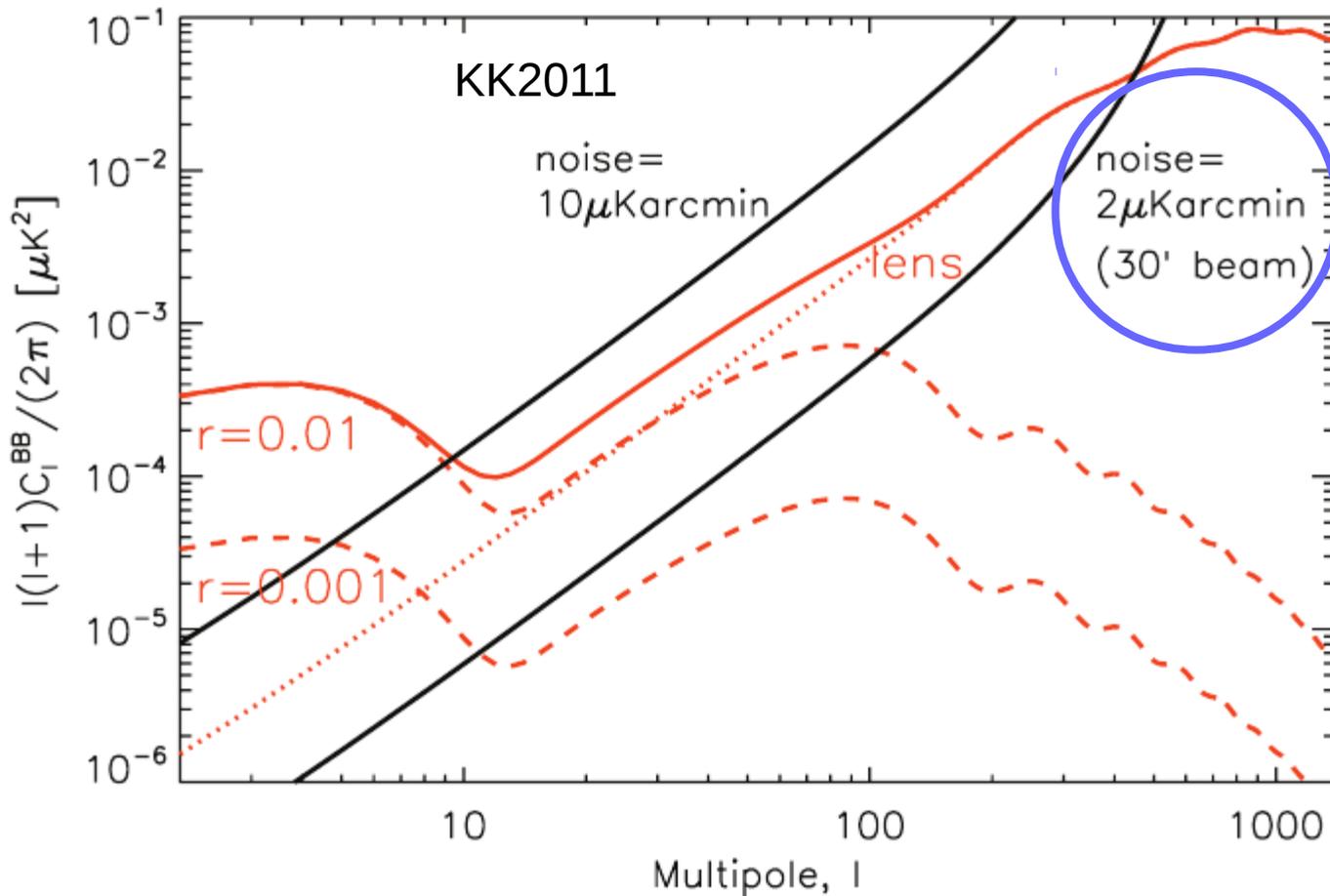
Yuji Chinone



Target: B-mode

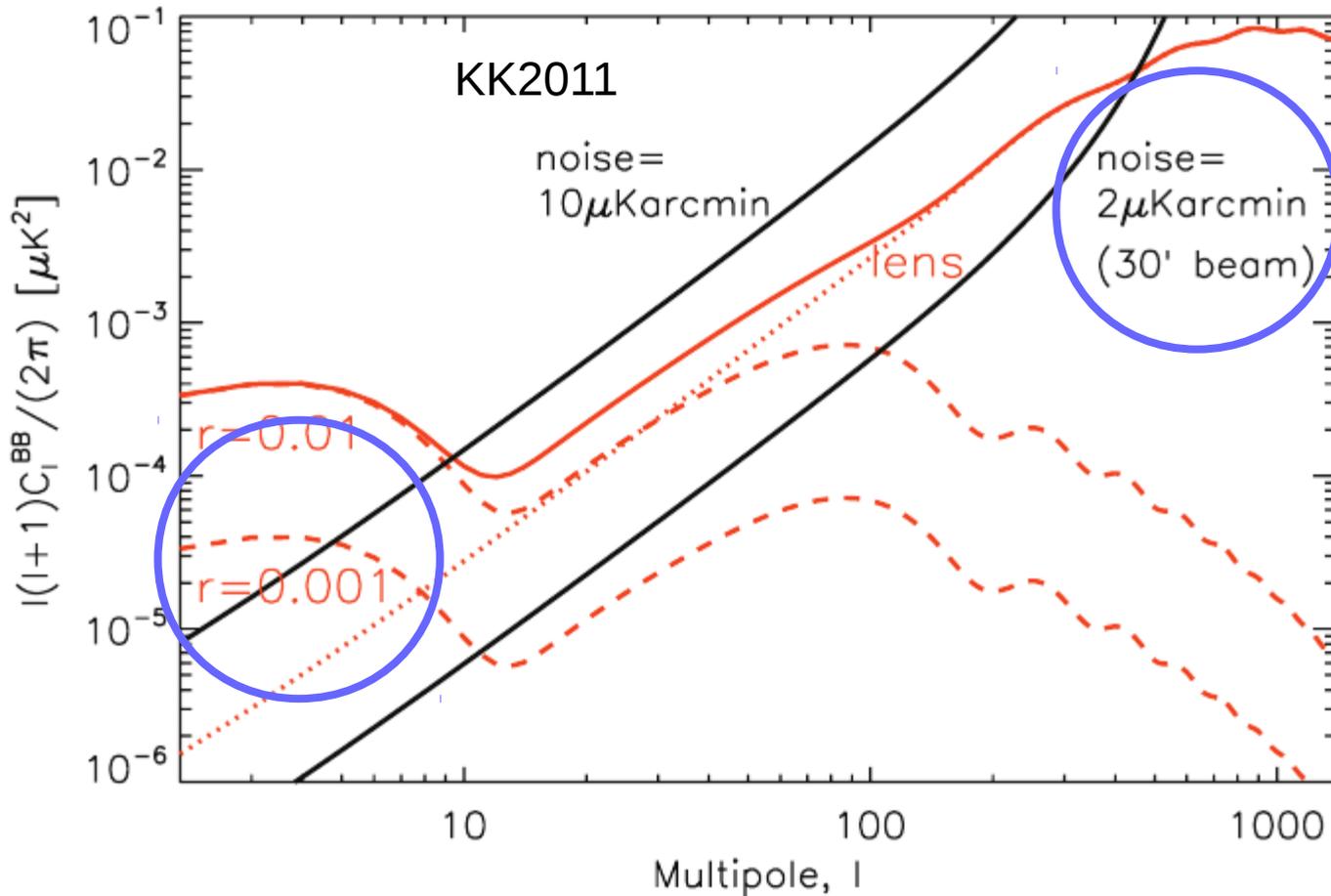


Target: B-mode



検出器ノイズが
 $\lesssim 5 \mu\text{K arcmin}$
であればノイズは
CMBレンズ

Target: B-mode

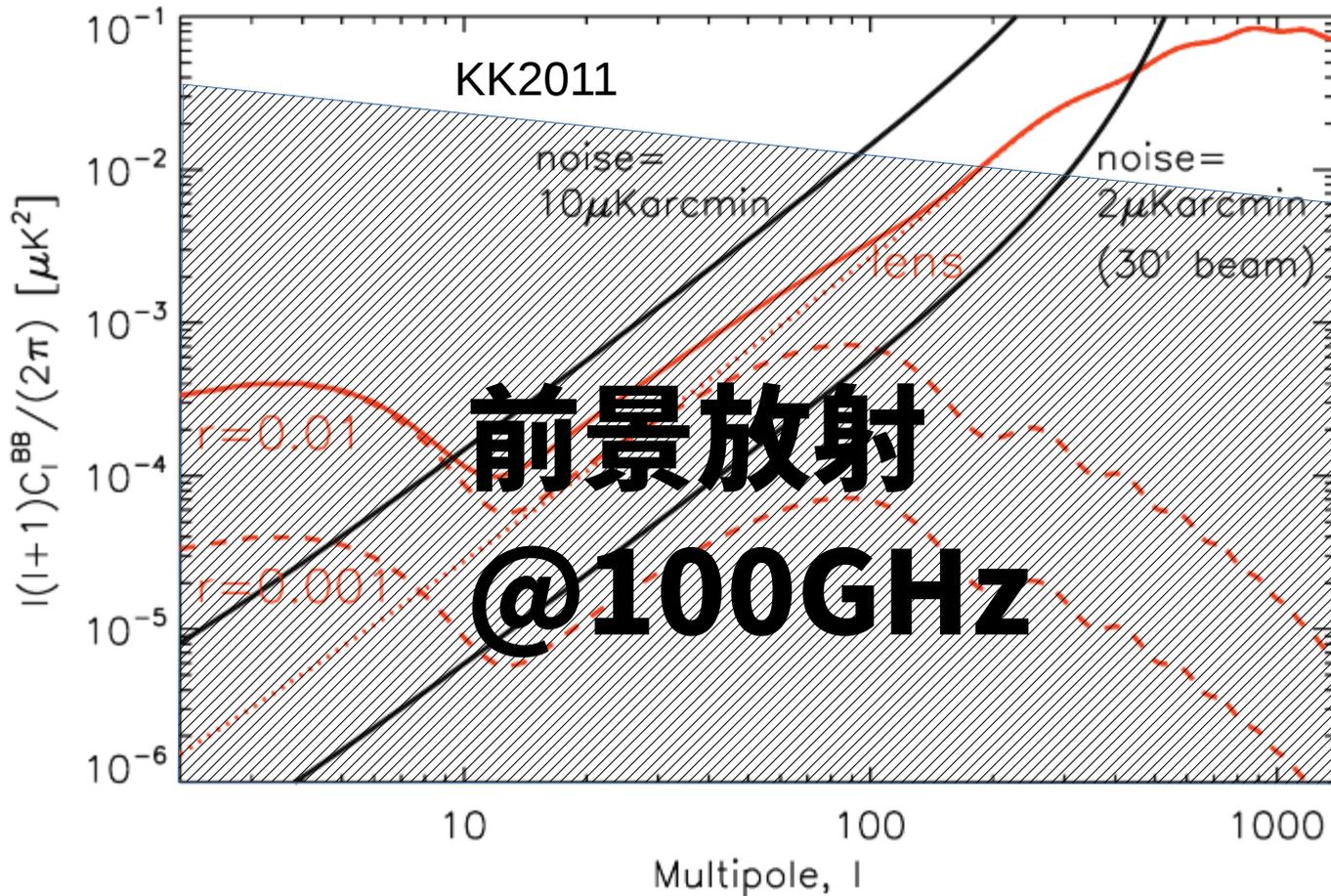


検出器ノイズが
 $\lesssim 5\mu\text{K arcmin}$
であればノイズは
CMBレンズ

$r=0.001$ B-mode シグナルは

$$l \lesssim 10$$

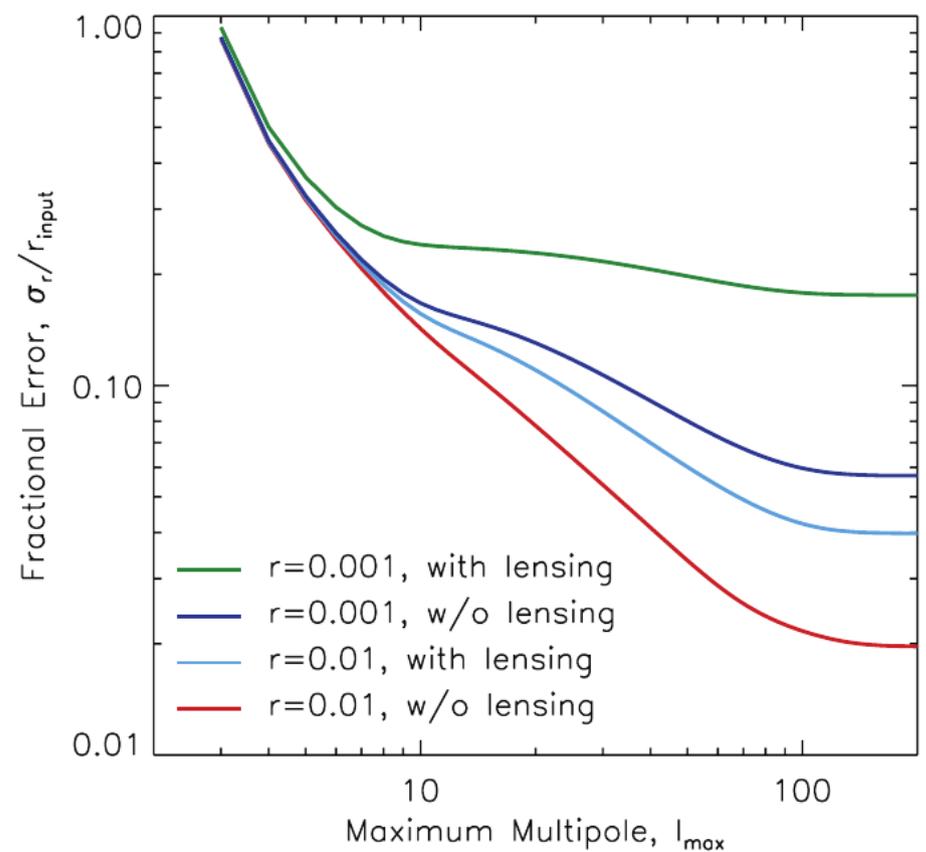
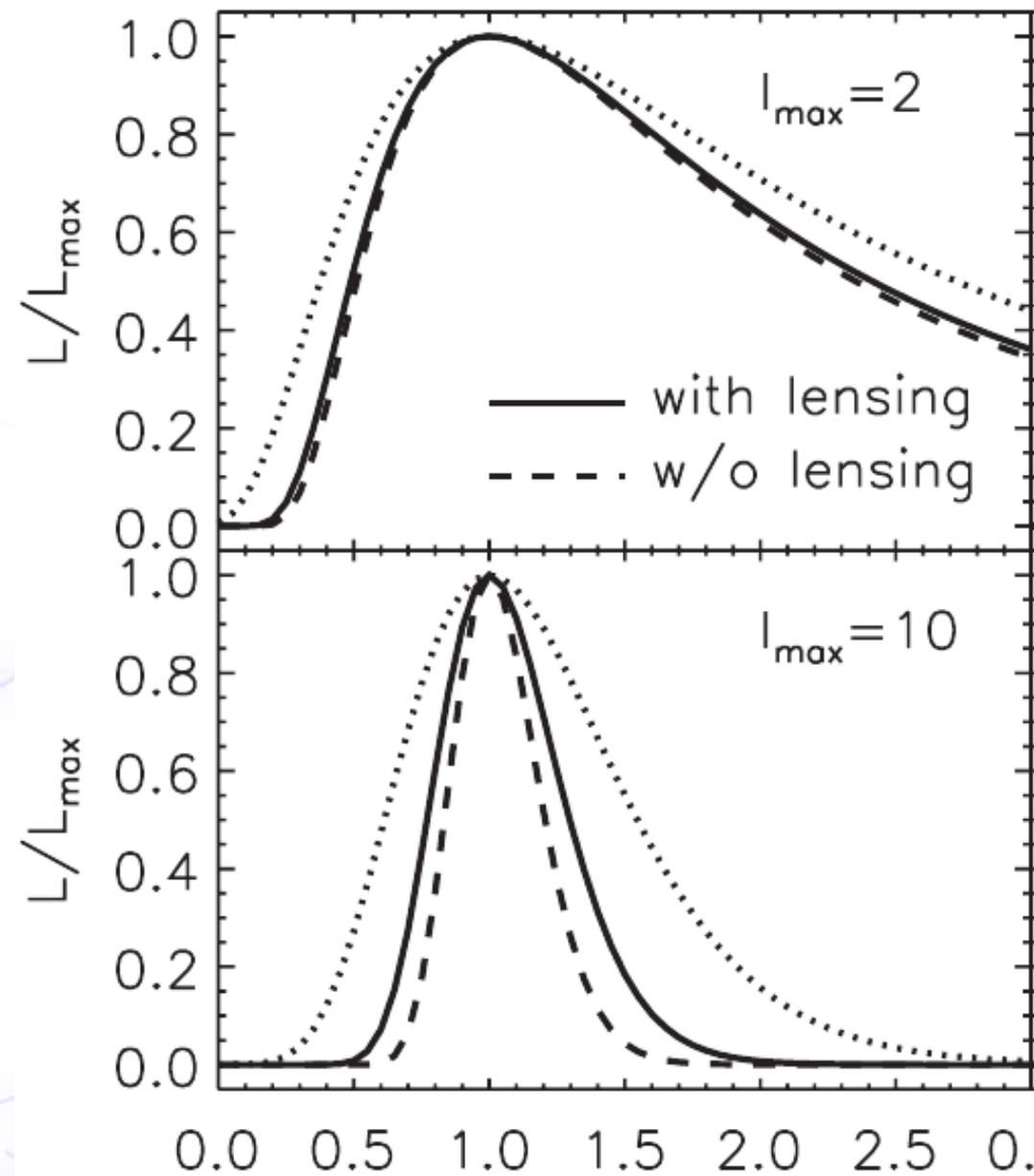
Target: B-mode



検出器ノイズが
 $\lesssim 5 \mu\text{K arcmin}$
であればノイズは
CMB レンズ

$r=0.001$ B-mode シグナルは

$$l \gtrsim 10$$



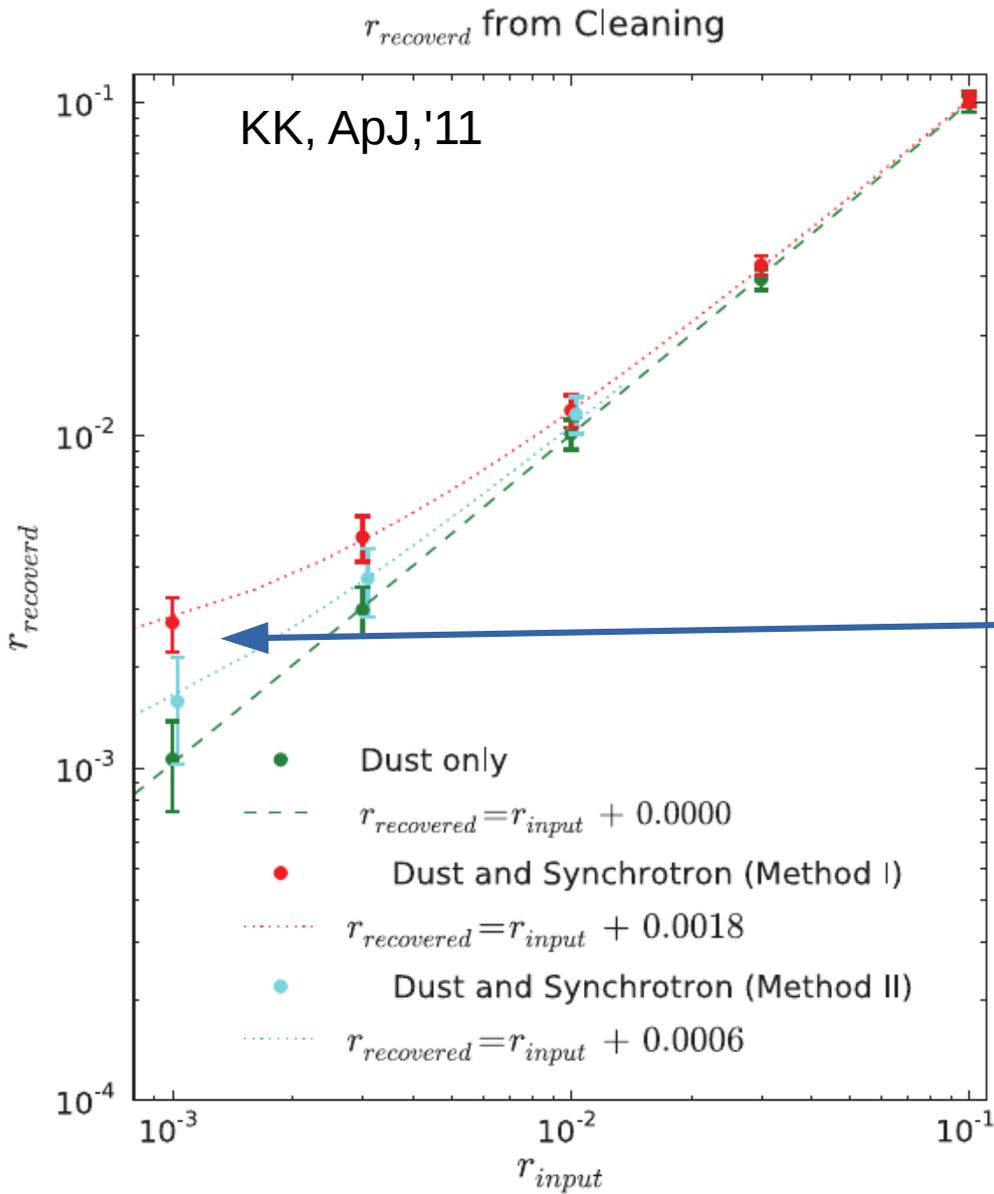
片山 & 小松(2011) から $r=0.001$ 重力波 へのメッセージ (1)

$l=2$ の観測だけでも重力波検出には十分 (前景放射除ければ)

CMB lensing がノイズとなる場合、情報は $l < 10$ の範囲 \leftrightarrow 低分解能

ということで始めます

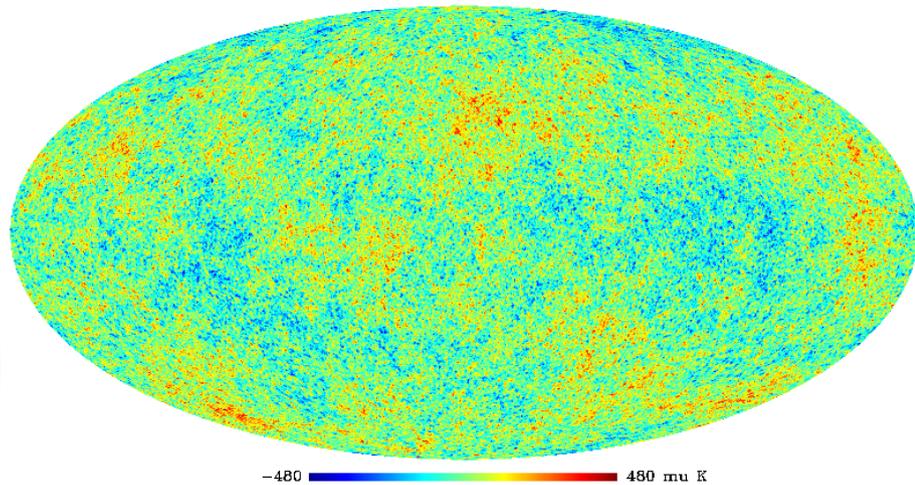
- CMB背景輻射B-modeと前景放射
 - インフレーションとB-mode
 - 銀河系前景放射
 - LiteBIRD計画
- LiteBIRD前景放射WGによる前景放射除去アルゴリズム「デルタマップ法」
 - 先行研究(Katayama & Komatsu, ApJ '11)からのメッセージ
 - アルゴリズムとパフォーマンス
 - その他の前景放射除去法
- まとめ



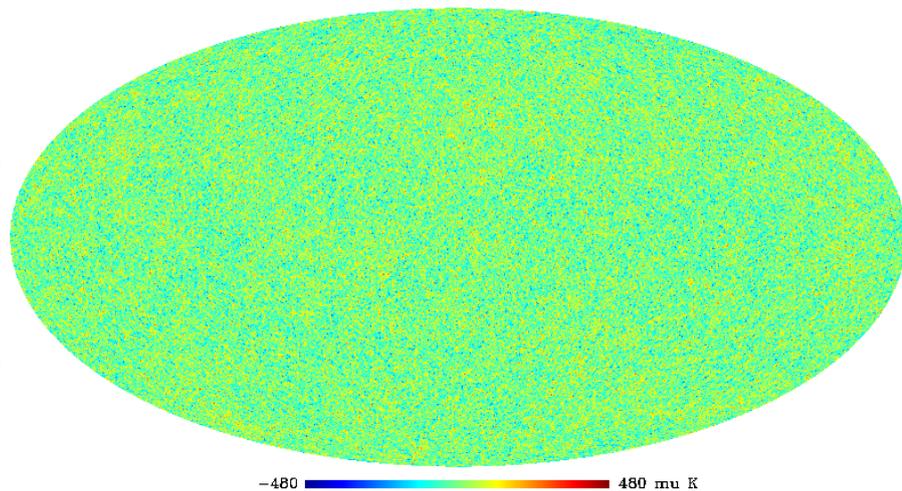
片山 & 小松(2011) から $r=0.001$ 重力波 へのメッセージ(2)

「シンクロトロン放射の
周波数冪の方向依存性
 $\beta_{\text{sync}}(\hat{n})$ が r の推定を
バイアスさせる」

前景放射差し引き(1)



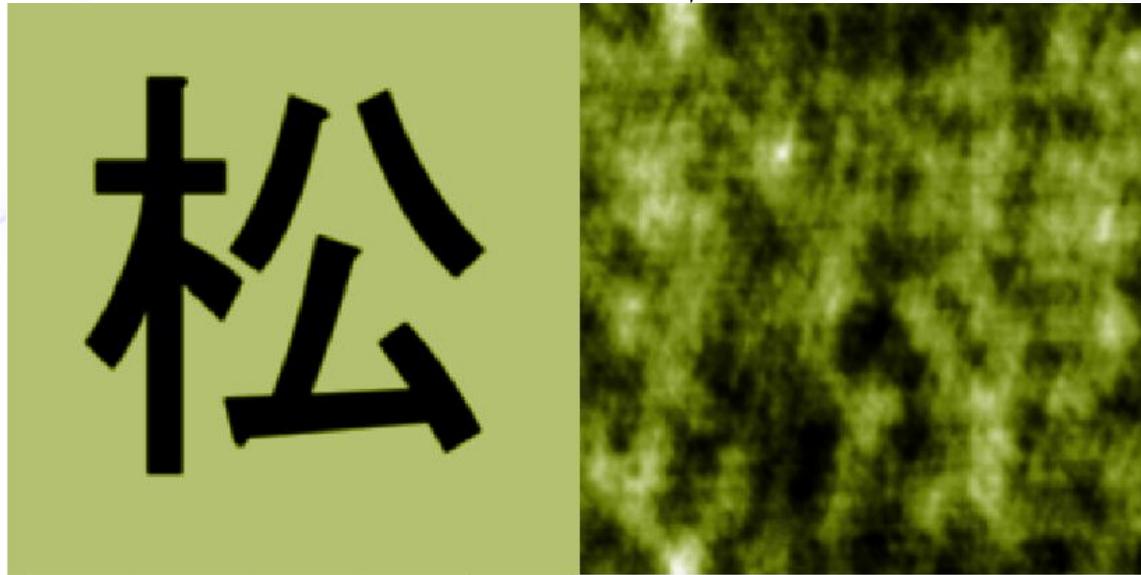
CMBは特徴的な角度スケール依存性を持つ



スペクトル解析

前景放射の差し引き(2)

パワースペクトルは同じ



松原さんホームページより拝借

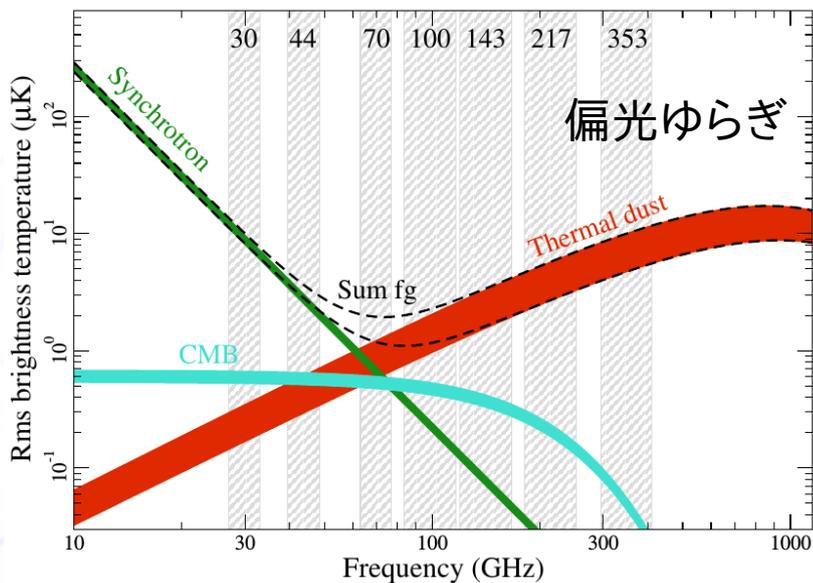
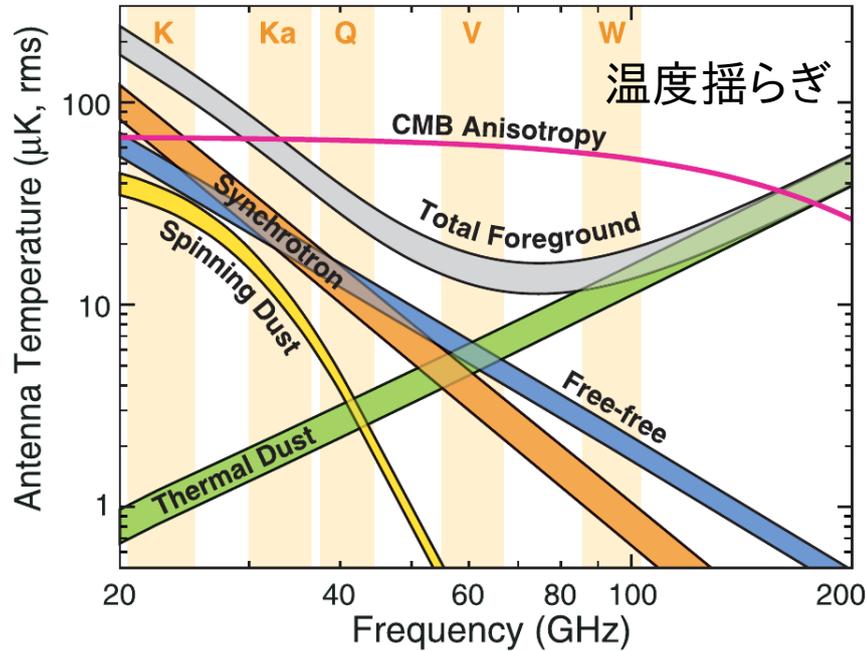
CMBはガウス統計に従う



多変量正規分布

$$P(\{T_k\}) = \frac{\exp \left[-\frac{1}{2} \sum_{ij} (T_i - T_{\text{cmb}})(C^{-1})_{ij}(T_j - T_{\text{cmb}}) \right]}{\sqrt{(2\pi)^{N_{\text{pix}}} \det(C)}}$$

前景放射差し引き(3)



CMBの特徴的な波長依存性を活用する



複数のチャンネルで観測

シンプルな前景放射除去法

- 高分解能観測は不要なので
 - 実空間で^②ガウス分布関数をフル活用

$$\mathcal{L}(r, s, \bar{\beta}) \propto \frac{\exp \left[-\frac{1}{2} [Q, U]^T \mathbf{C}^{-1} [Q, U] \right]}{\sqrt{|\mathbf{C}(r, s, \bar{\beta})|}}$$

コバリアンスには
理論から予想される
^①パワースペクトルを

CMB成分の推定は
^③多波長観測を

アルゴリズムを説明します(1)

- **モデル (説明のためダストは無視) :**

$$Q(\nu, \hat{n}) = \text{CMB}(\hat{n}) + g_\nu \left(\frac{\nu}{\nu_*} \right)^{\beta(\hat{n})} Q^{\text{sync}}(\nu_*, \hat{n}) + \text{noise}$$



Taylor expansion

$$\beta(\hat{n}) \equiv \bar{\beta} + \delta\beta(\hat{n})$$

$$Q(\nu, \hat{n}) \approx \text{CMB}(\hat{n})$$

$$+ g_\nu \left(\frac{\nu}{\nu_*} \right)^{\bar{\beta}} \left[1 + \ln \left(\frac{\nu}{\nu_*} \right) \delta\beta(\hat{n}) \right] Q^{\text{sync}}(\nu_*, \hat{n})$$

+noise



この部分を差し引きたい

アルゴリズムを説明します(2)

- 2バンド (60GHz, 78GHz) 使って '**delta map**' を作成し
ターゲットバンド (100GHz) に加えると

$$Q(\nu_0) + \alpha_1 Q(\nu_1) + \alpha_2 Q(\nu_2) = (1 + \alpha_1 + \alpha_2) \text{CMB}$$
$$+ f(\alpha_1, \alpha_2, \bar{\beta}) Q^{\text{synch}}(\nu_*)$$
$$+ g(\alpha_1, \alpha_2, \bar{\beta}) \delta\beta Q^{\text{synch}}(\nu_*)$$

アルゴリズムを説明します(2)

- 2バンド (60GHz, 78GHz) 使って '**delta map**' を作成し
ターゲットバンド (100GHz) に加えると

$$Q(\nu_0) + \boxed{\alpha_1 Q(\nu_1) + \alpha_2 Q(\nu_2)} = (1 + \alpha_1 + \alpha_2) \text{CMB} \\ + f(\alpha_1, \alpha_2, \bar{\beta}) Q^{\text{synch}}(\nu_*) \\ + g(\alpha_1, \alpha_2, \bar{\beta}) \delta\beta Q^{\text{synch}}(\nu_*)$$

- $f = 0$, $g = 0$ となるように $\bar{\beta}$ をパラメタとして
 α_1, α_2 を定める

アルゴリズムを説明します(3)

- $f = 0$, $g = 0$ となるように $\bar{\beta}$ をパラメタとして α_1, α_2 を定める



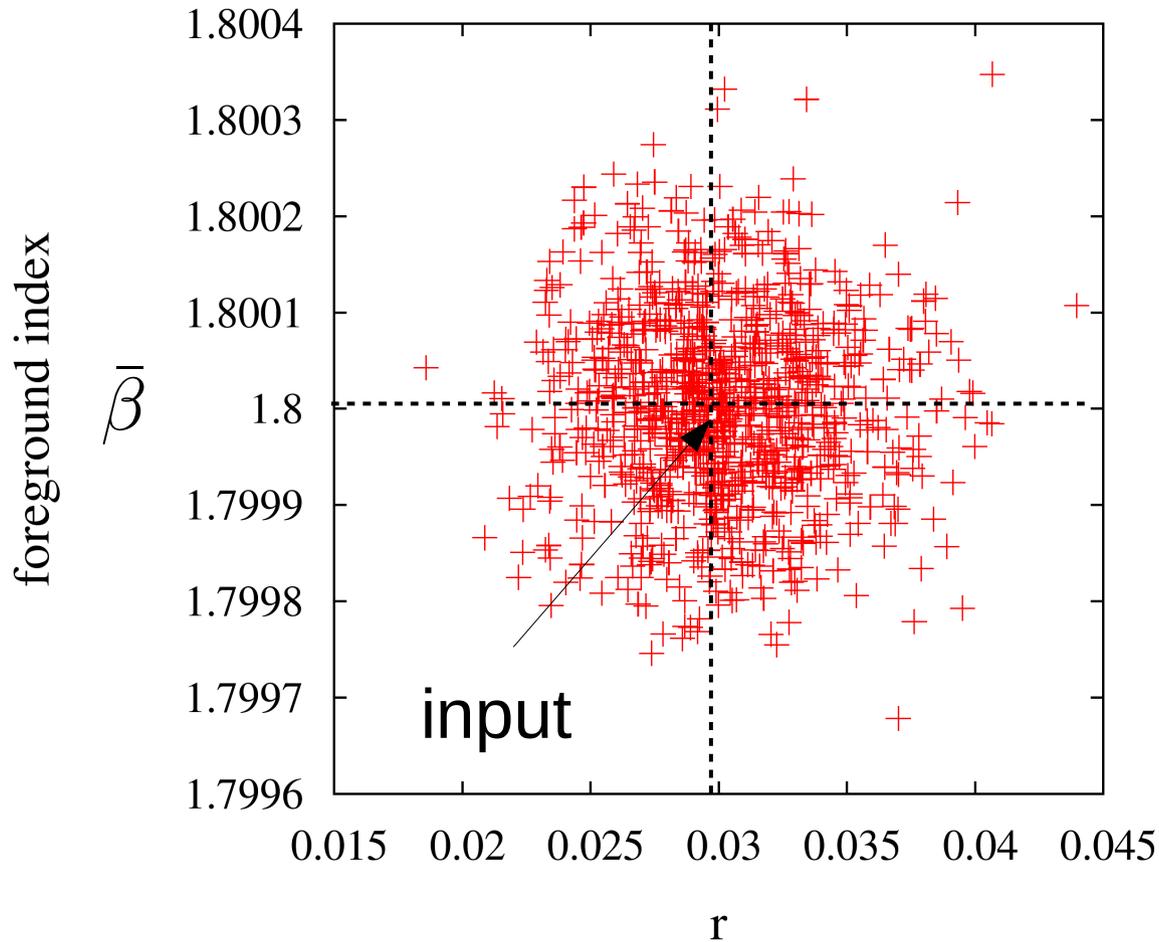
$$\alpha_1 = -\frac{g_\nu}{g_{\nu_1}} \left(\frac{\nu_0}{\nu_1} \right)^{\bar{\beta}} \frac{\ln \left(\frac{\nu_0}{\nu_2} \right)}{\ln \left(\frac{\nu_1}{\nu_2} \right)}$$

$$\alpha_2 = -\frac{g_\nu}{g_{\nu_2}} \left(\frac{\nu_0}{\nu_2} \right)^{\bar{\beta}} \frac{\ln \left(\frac{\nu_0}{\nu_1} \right)}{\ln \left(\frac{\nu_2}{\nu_1} \right)}$$

(\hat{n}, ν_*)

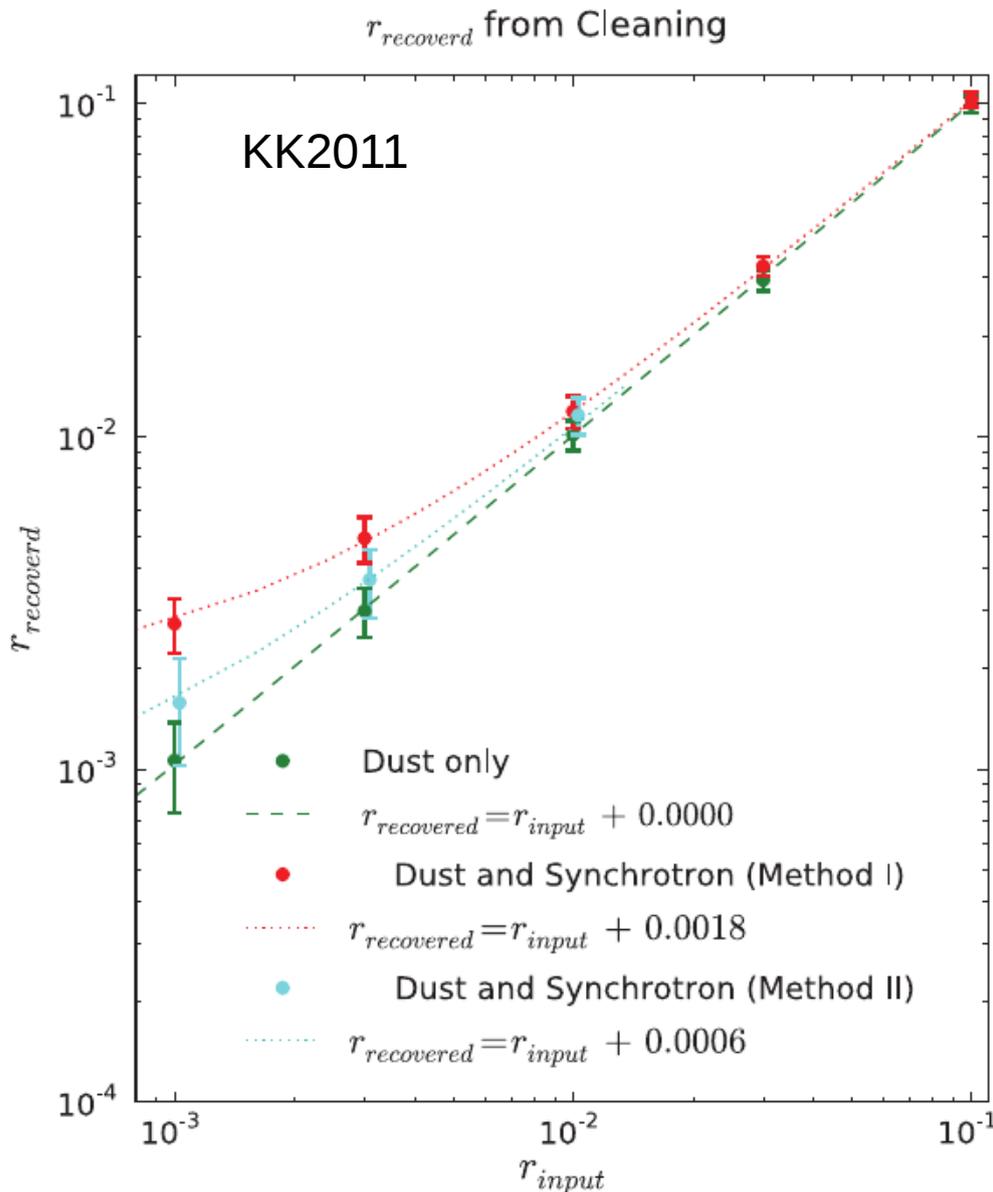
independent

performance test



Foreground and CMB parameters are estimated simultaneously

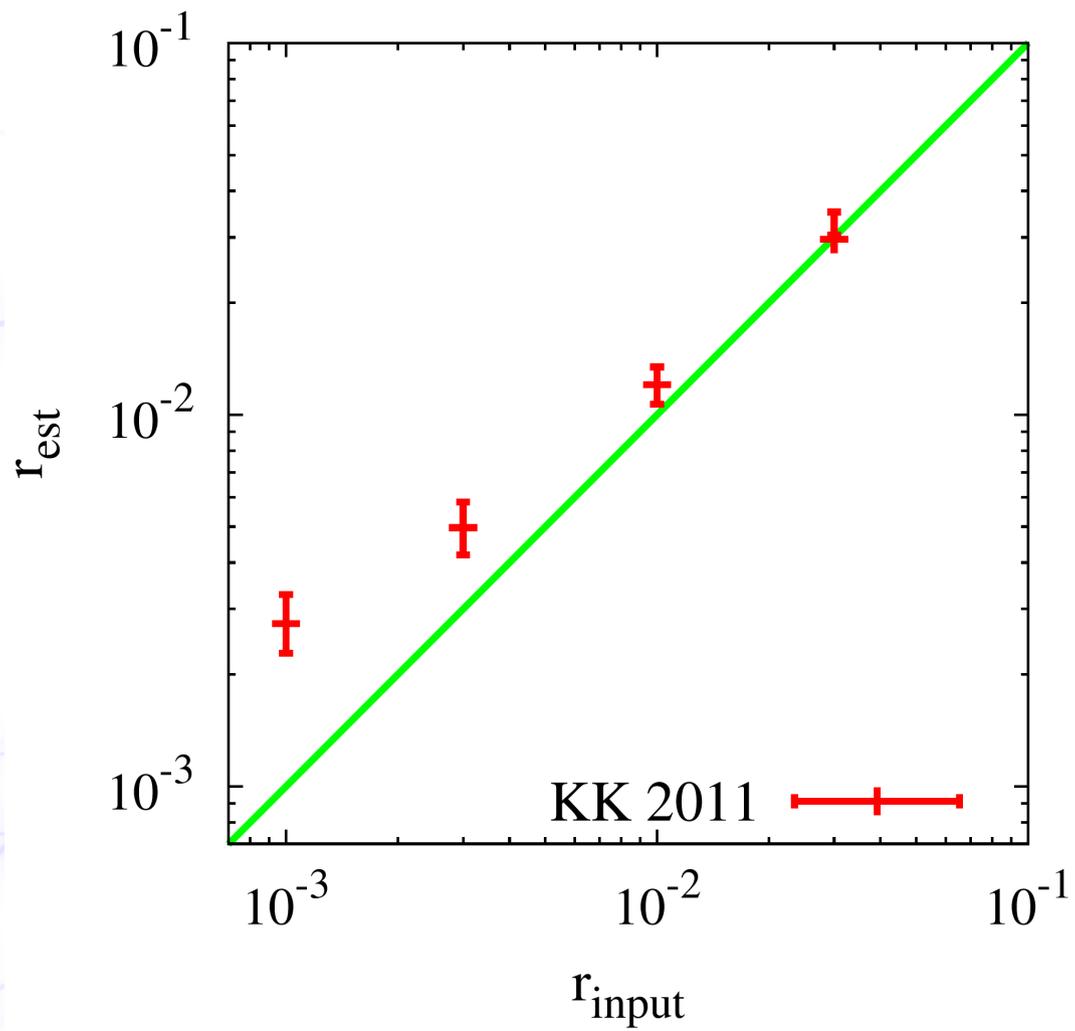
KK2011再び



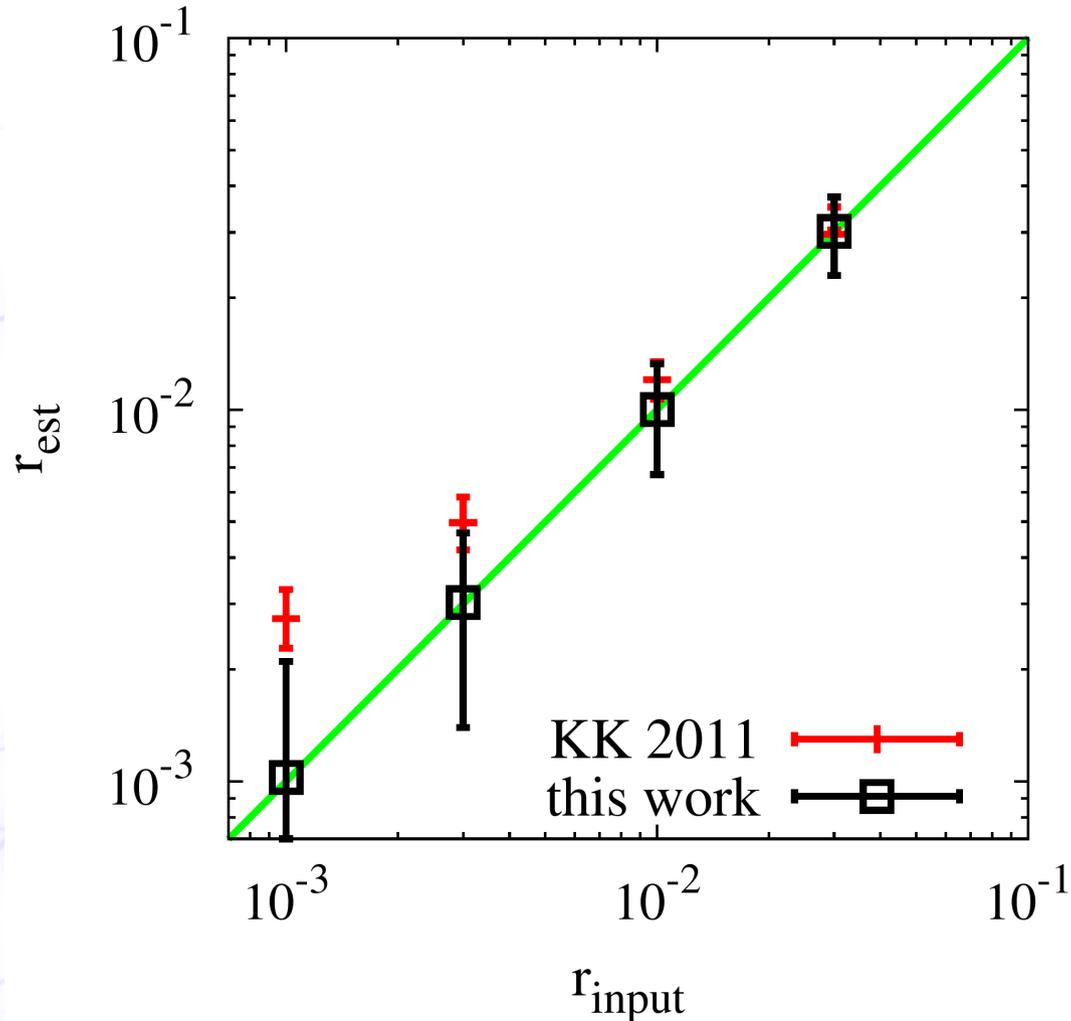
片山 & 小松(2011)
からのメッセージ

「シンクロトロン放射の
周波数冪の方向依存性
 $\beta_{sync}(\hat{n})$ が r の推定を
バイアスさせる」

Result



Result



Delta-map Method parameters

$$N_{\text{side}} = 4$$

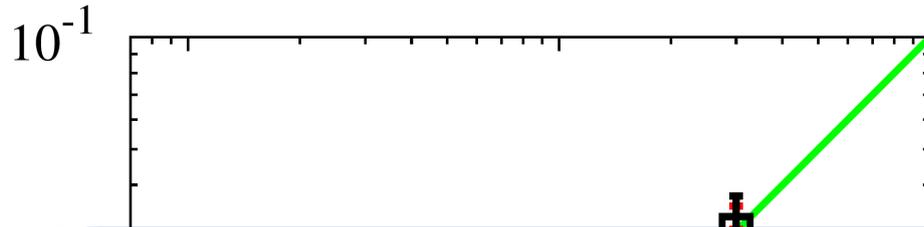
$$\begin{pmatrix} \nu_0 \\ \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \\ \nu_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 60 \\ 78 \\ 100 \\ 195 \\ 280 \end{pmatrix} \text{ GHz}$$

Mask: p06 mask

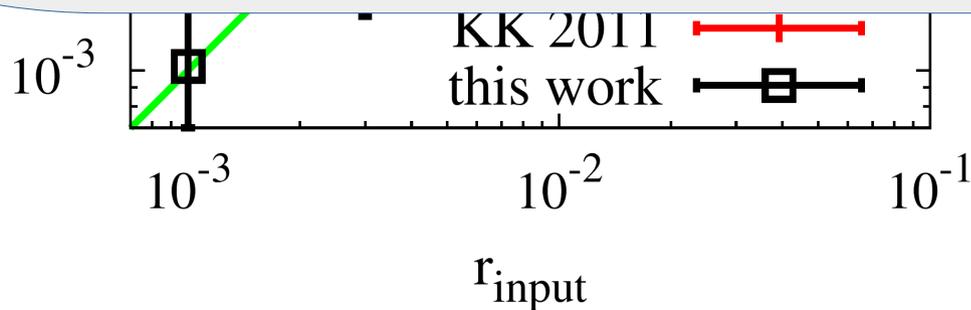
ノイズ 2 μ K arcmin

Result

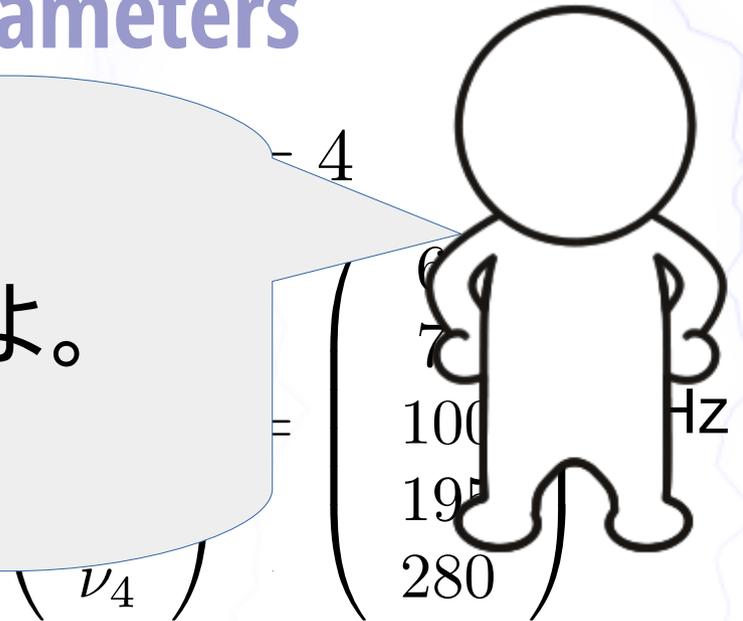
Delta-map Method parameters



安心して下さい。引けてますよ。



Mask: p06 mask
ノイズ 2muK arcmin



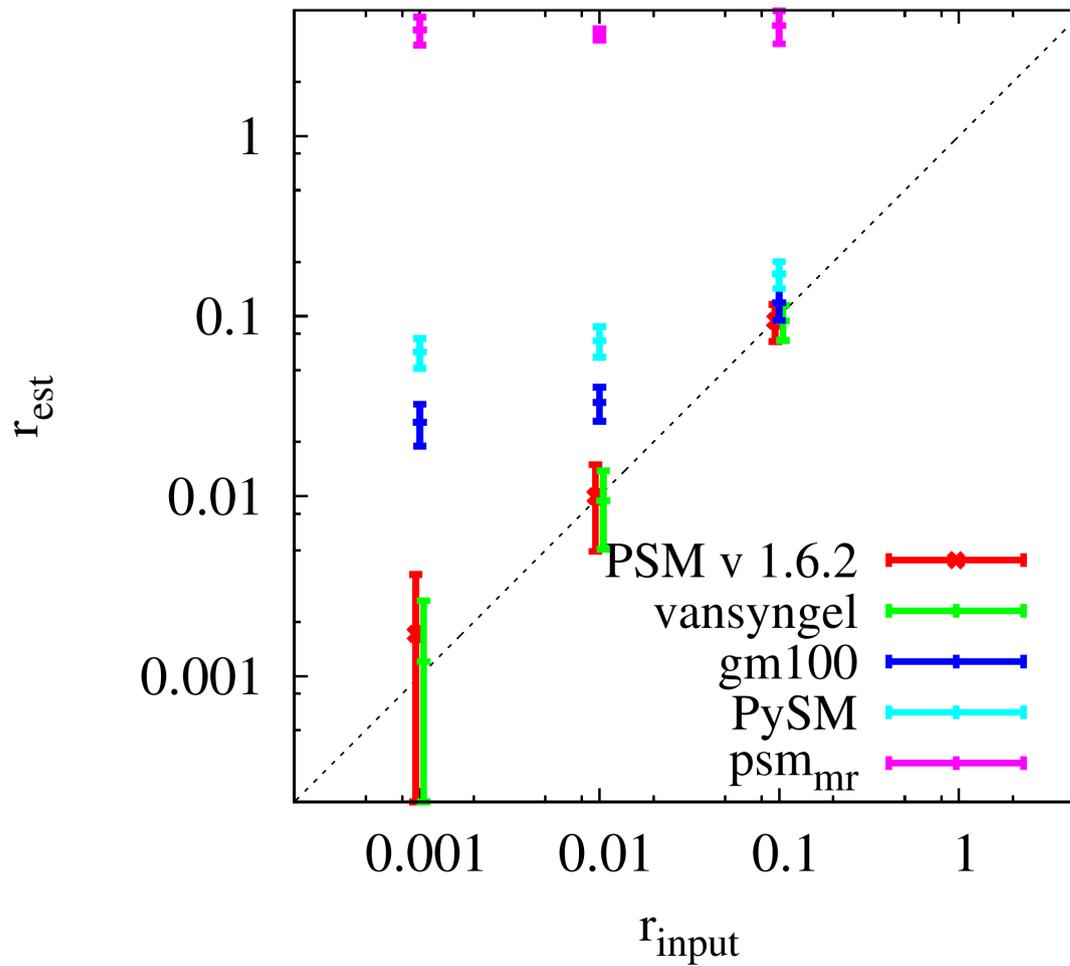
様々な前景放射モデル

We can download foreground maps from:

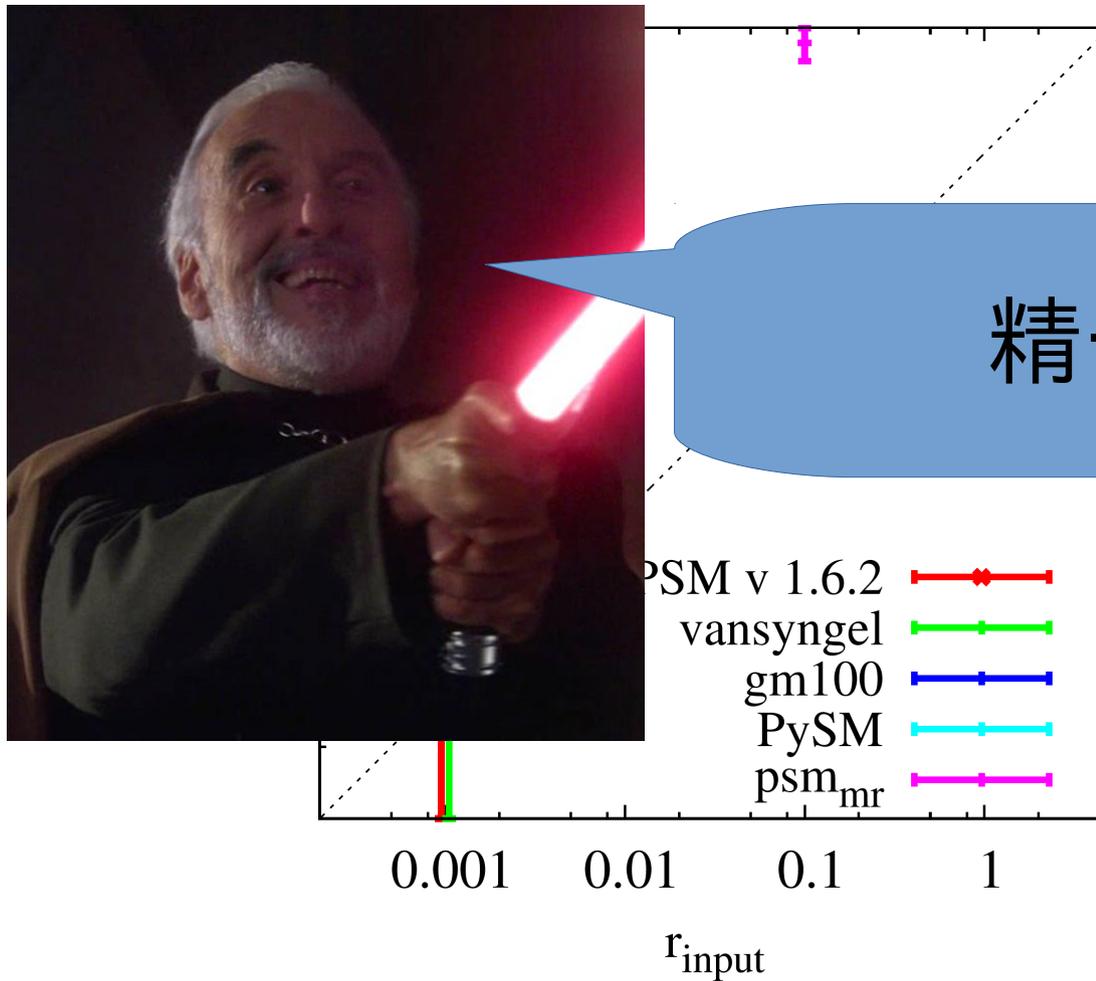
edison.neresc.gov:/project/projectdirs/litebird/data/simset1/components/foreground

	synchrotron	Thermal dust	Spin dust	Point source	FF	decorrelation
PSM v 1.6.2 (KK2011)	power law varying β	power law varying β	-	-	-	-
gm100	power law varying β	2 components modified BB varying T	-	-	-	on
PySM (1608.02841)	power law varying β	modified BB varying T& β	unpol	-	unpol	-
psm_mr	power law varying β	modified BB varying T& β	CNM 1% pol	4 types 1% pol	-	-
Vansyngel (1611.02577)	power law fixed β	modified BB fixed β	-	-	-	-

Delta map method performance



Delta map method performance



精一杯か？

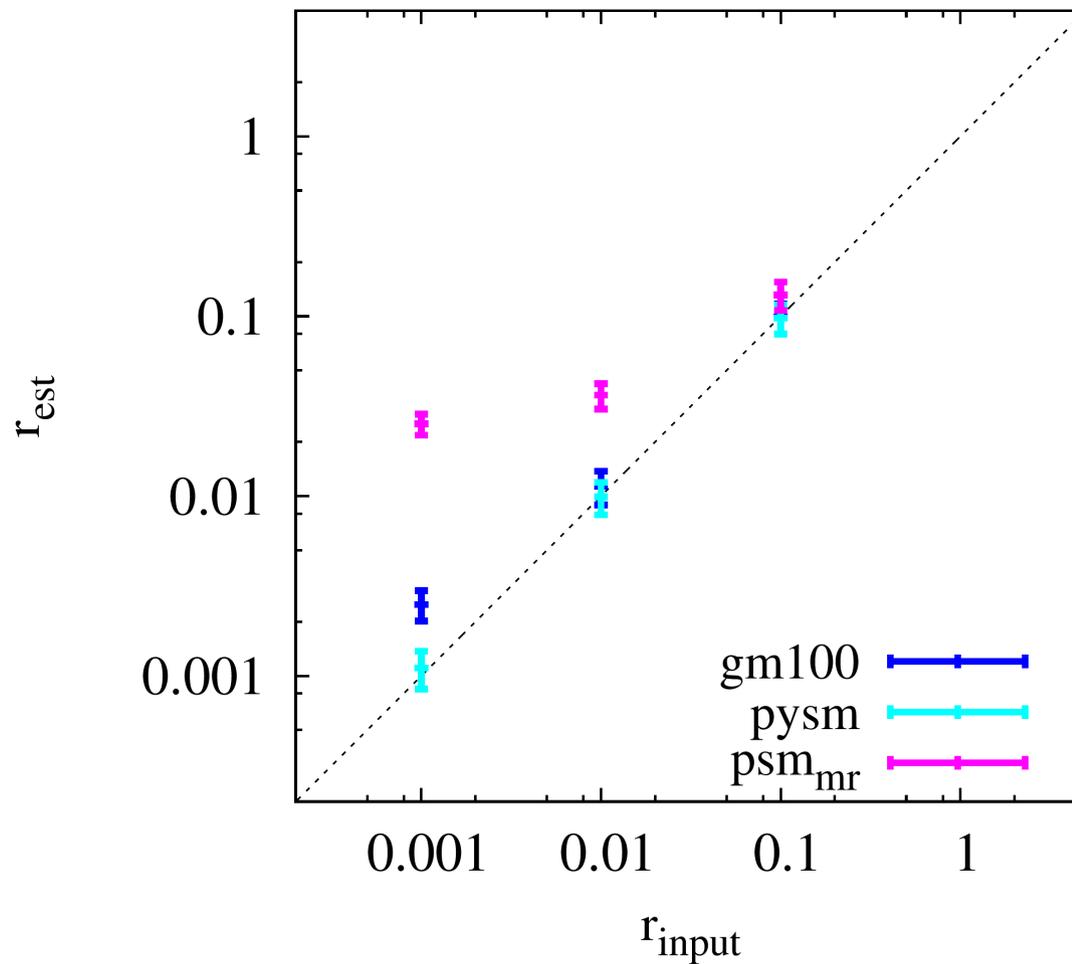
Modeling dust with a modified black body

- $Q^{\text{dust}}(\nu, \hat{n}) = g_{\nu} \left(\frac{\nu}{\nu_*} \right)^{\beta(\hat{n})} \frac{1}{e^{kT(\hat{n})/h\nu} - 1} Q^{\text{dust}}(\nu_*, \hat{n})$
- **The sky model is modified to:**

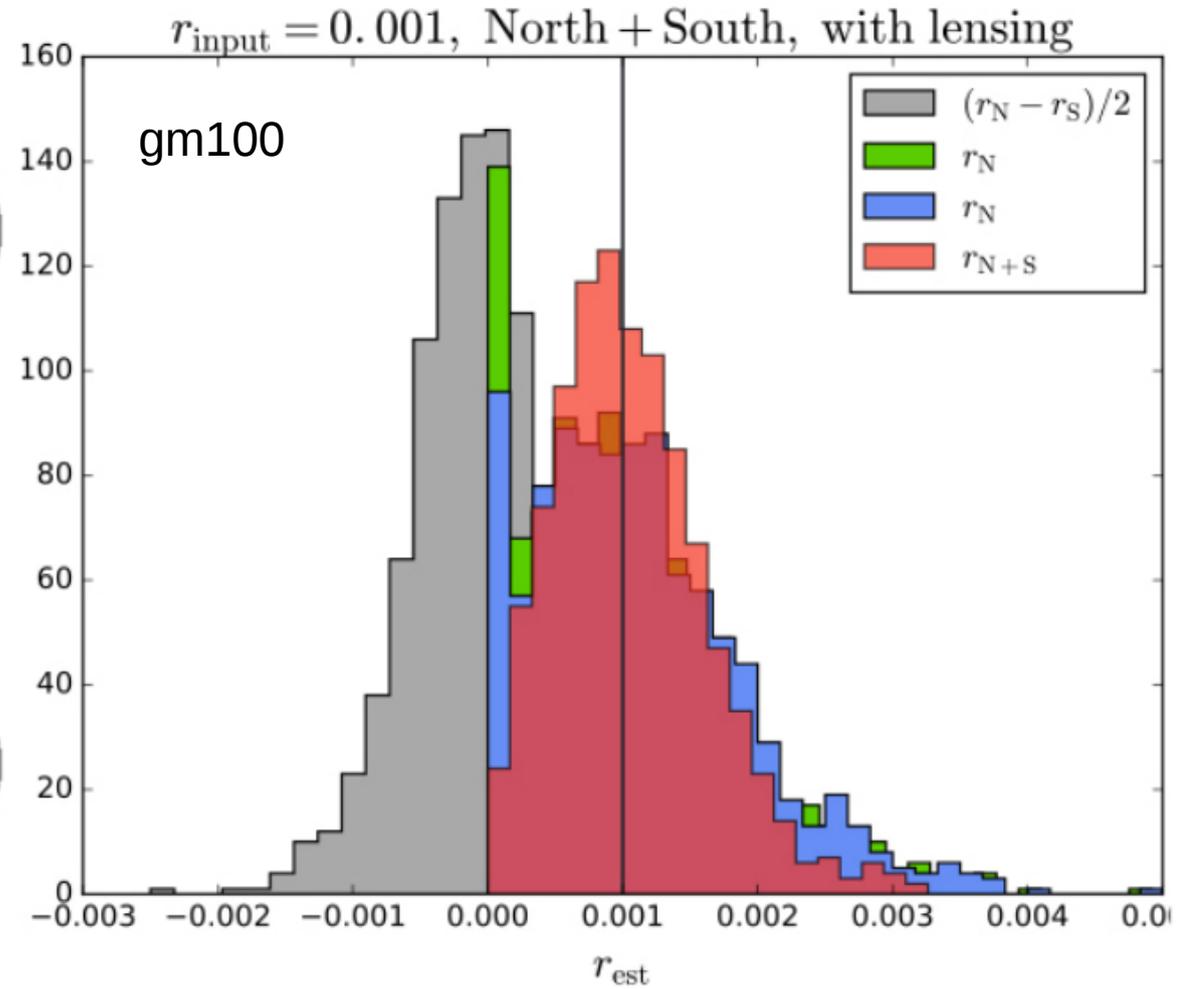
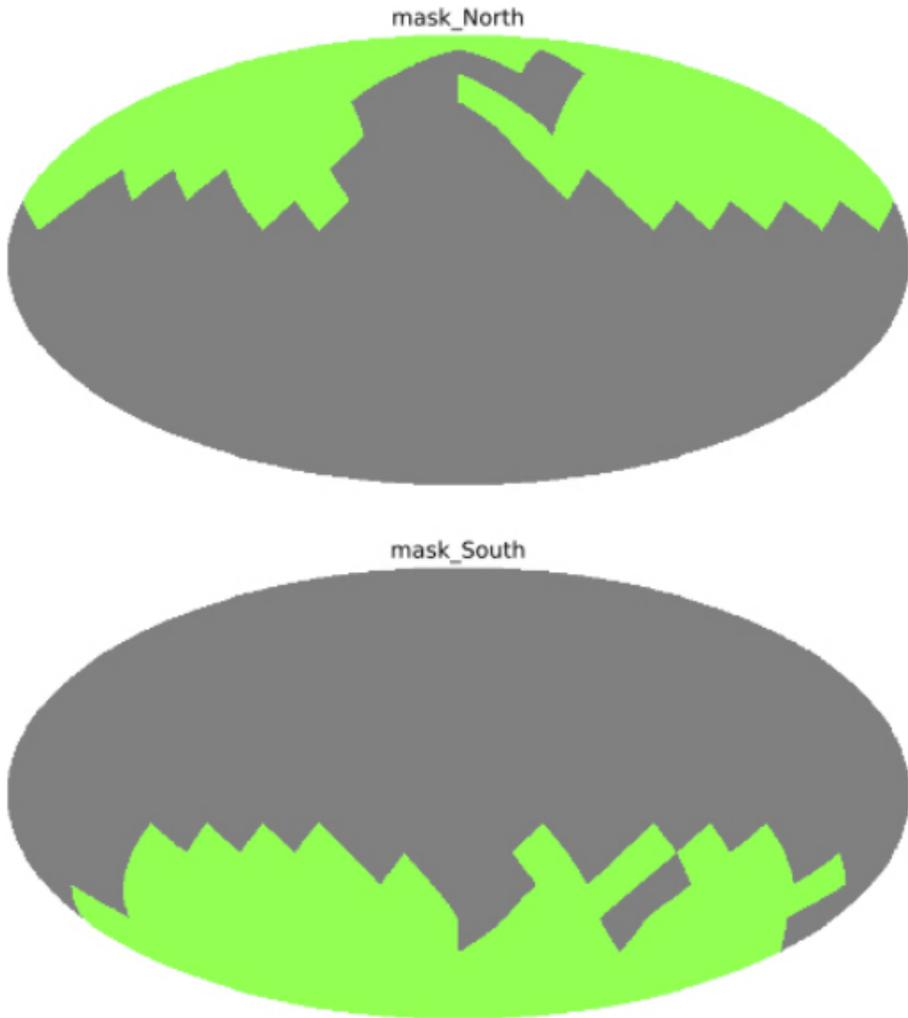
$$\begin{aligned}
 Q(\nu, \hat{n}) &\approx \text{CMB}(\hat{n}) \\
 &+ g_{\nu} \left(\frac{\nu}{\nu_*} \right)^{\bar{\beta}_d} \frac{1}{e^x - 1} \left[1 + \ln \left(\frac{\nu}{\nu_*} \right) \delta\beta(\hat{n}) + \frac{x e^x}{e^x - 1} \frac{\delta T(\hat{n})}{\bar{T}} \right] Q^d(\nu_*, \hat{n}) \\
 &+ \text{noise} \qquad \qquad \qquad (x = h\nu/k\bar{T})
 \end{aligned}$$

Again estimate $Q^d(\nu_*, \hat{n})$, $\delta\beta(\hat{n})Q^d(\nu_*, \hat{n})$ and $\delta T(\hat{n})Q^d(\nu_*, \hat{n})$ and subtract them ! (We now need four bands)

Delta map & modified Delta map (noiseless) comparison



空を分割する



gm100 でも無バイアスで推定可能になった

他の手法と議論

		アストロ寄り	CMB寄り	
スケール		コンポーネント セパレーション	foregroundサブトラクション	
大	↑	パラメトリック (物理の知識を用いる)	Planck Likelihood, Commander-Ruler, MCMC	“Delta map” Template fitting
小	↓	ノンパラメトリック (統計の知識を用いる)	FastICA, JADE	ILC, NILC, MILCA, PCA GMCA, SMICA

Though past performance is no guarantee of future success, we have consistently been able to clean foregrounds to within a factor of a few times the uncertainties of the raw measurements. As a community we have a set of tools ready for performing component separation and estimating the CMB signal from observed sky maps. (J.Dunkley, 0811.3915)



- 原始重力波を捉えてインフレーションの存在証明

- CMBのB-mode観測が使える

- B-modeは前景除去が必須

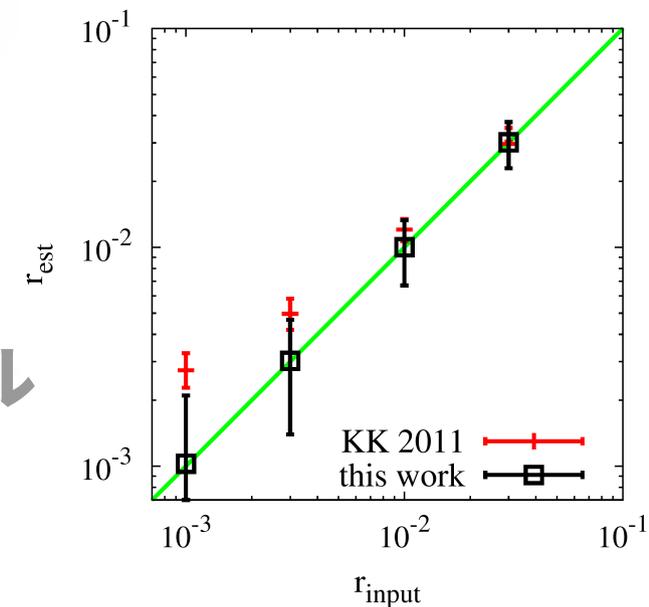
- シンクロトロンと宇宙塵

- 蓋を開けるまで分からない

- 我々のdelta map法

- 多波長・ガウス統計・スペクトル

- $r=0.001$ まで無バイアス



CONCLUSION