

CMB偏光観測実験 POLARBEARの最新の結果と 今後の展望

(と、BICEP2の結果について)

長谷川雅也 (KEK)

2014.11.09

@日大理工・益川塾連携
素粒子物理学シンポジウム



最近のCMB観測の進展

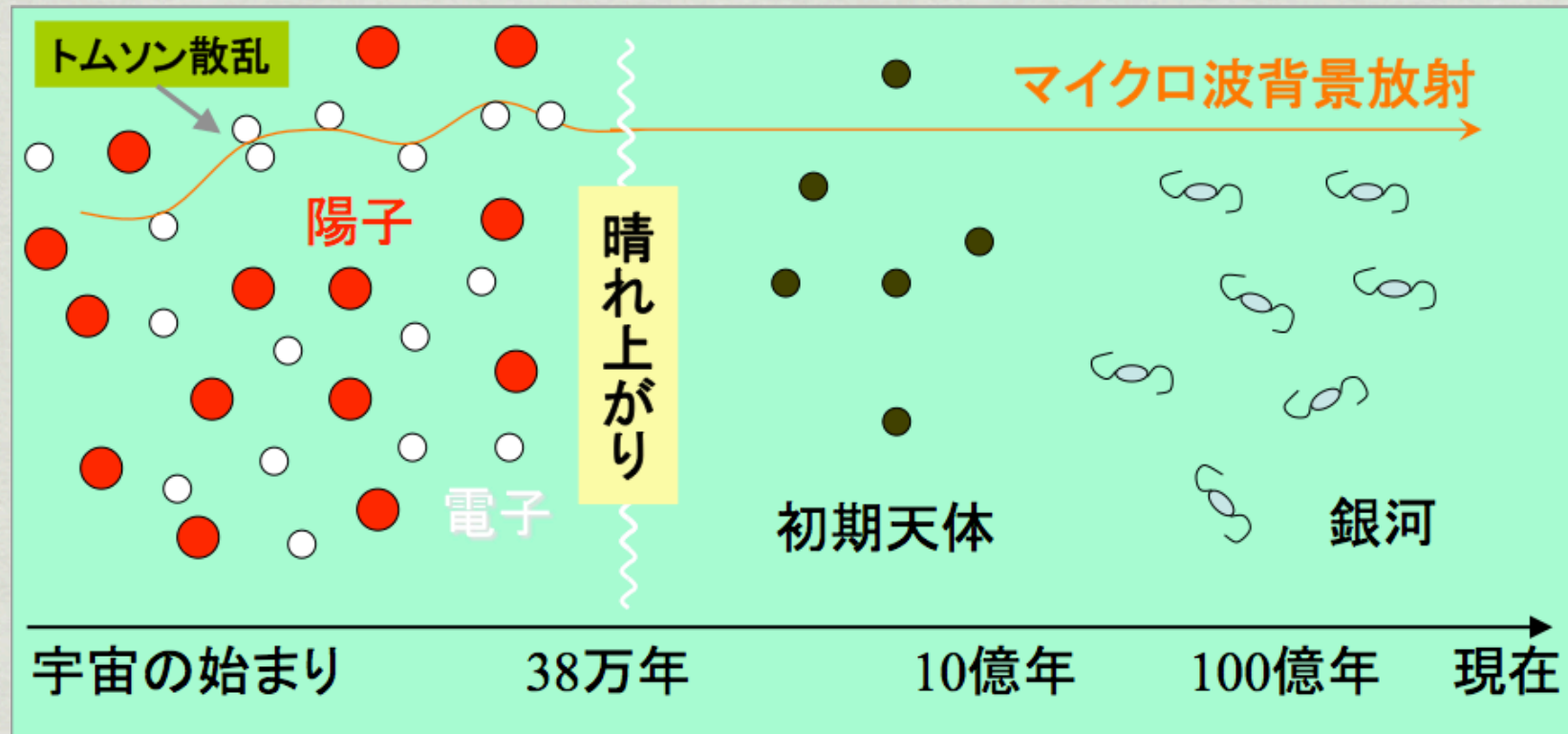
- 1303.5062～ : Planck CMB temperature fluctuation
- 1307.5830: SPTpol CMB-CIB cross correlation
- 1312.6645: **POLARBEAR** CMB-CIB cross correlation
- 1312.6646: **POLARBEAR** B-mode from 4-point correlation
- 1403.2369: **POLARBEAR** B-mode from 2-point function
- 1403.3985: **BICEP2** degree-scale B-mode
- 1405.0871: Planck(353GHz) dust polarization
- 1405.5524: ACTpol E-mode
- 1409.5738: Planck(353GHz) more results on dust pol.
- 1411.1042: SPTpol E-mode

本格的にCMB偏光観測の時代に突入

今日お伝えしたい事

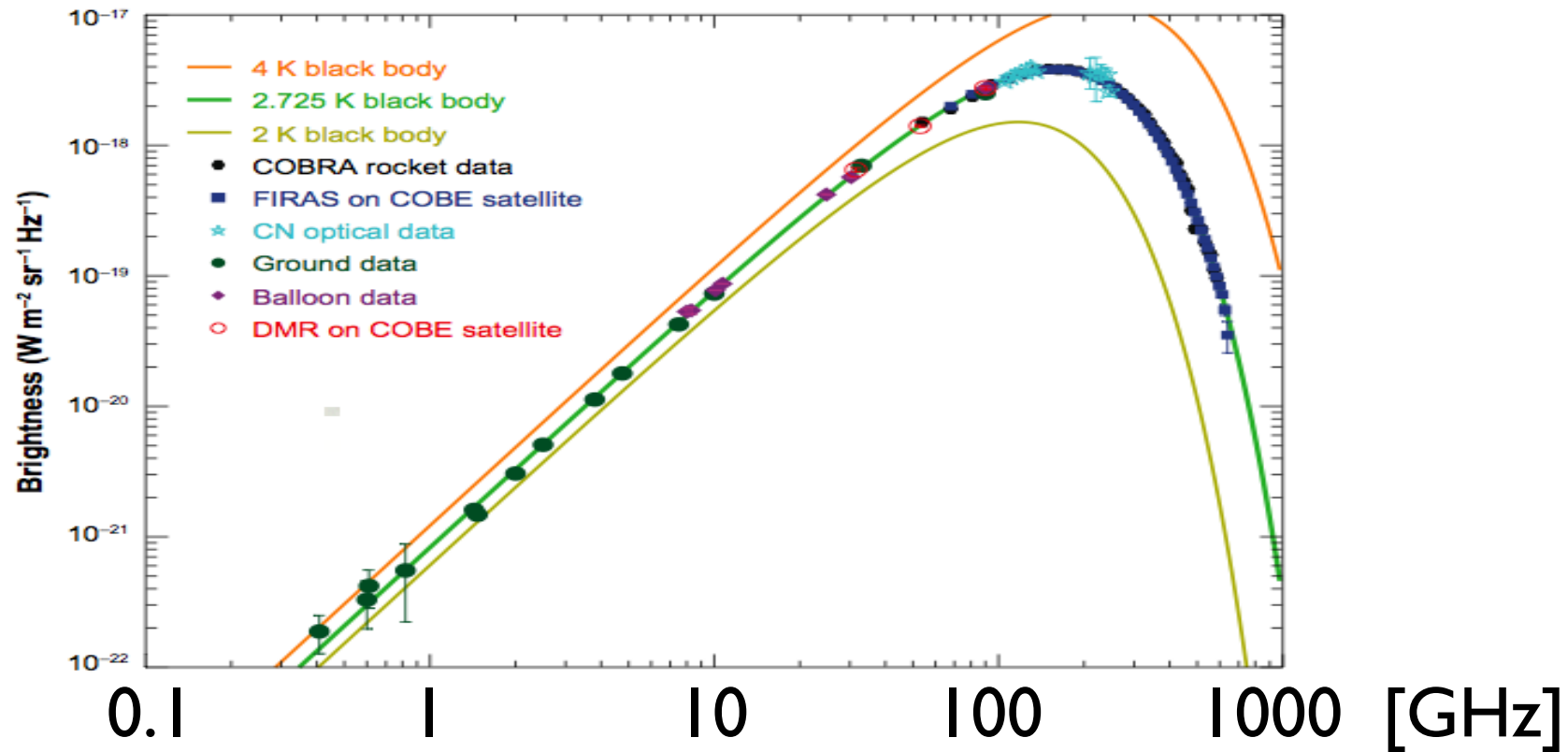
- 偏光Bモードとは？
- POLARBEARの結果について
(BICEP2の結果についても紹介)
- 偏光観測の今後の展望

宇宙マイクロ波背景放射 (CMB)



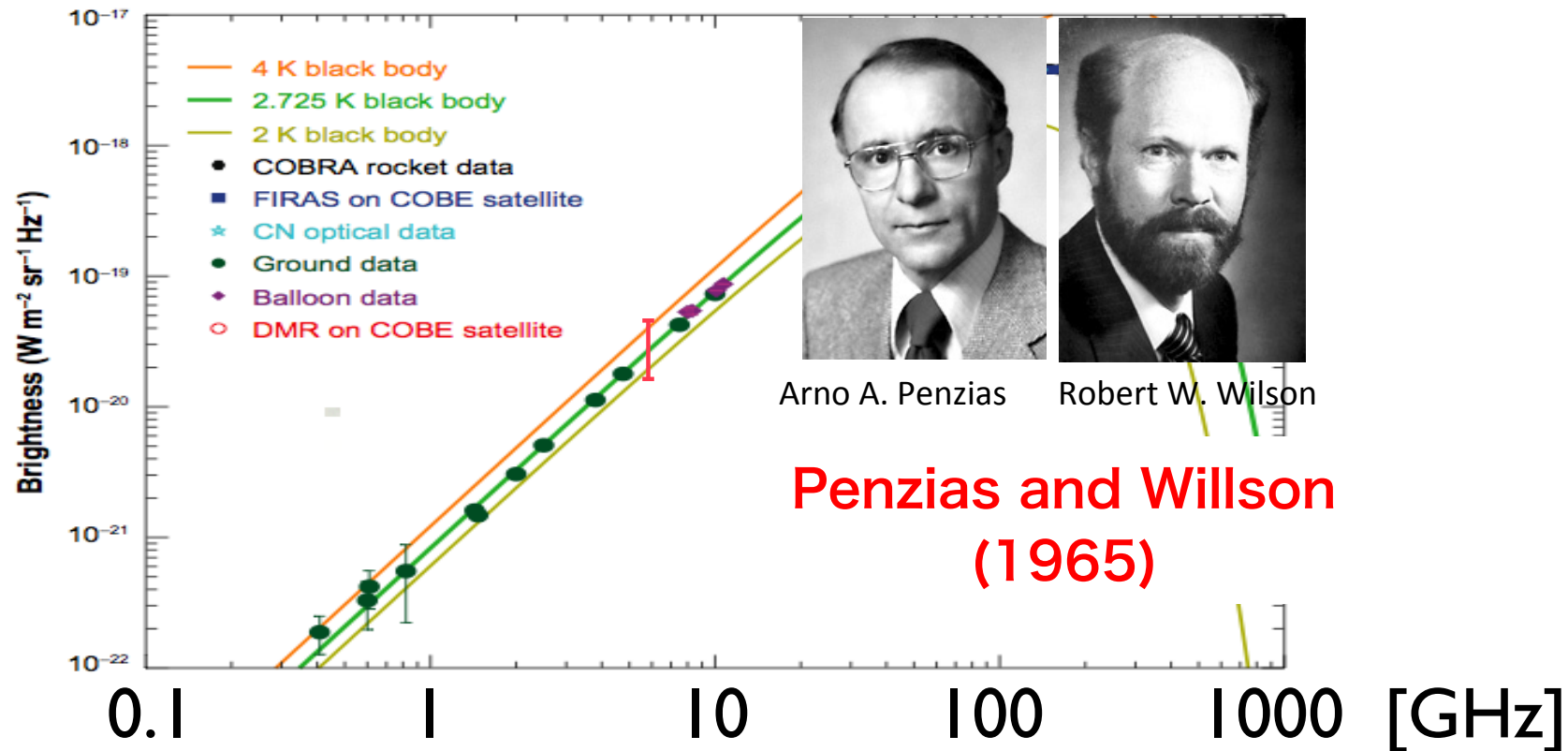
- ビックバンの残光 (宇宙誕生 38 万年後の光)

宇宙マイクロ波背景放射 (CMB)



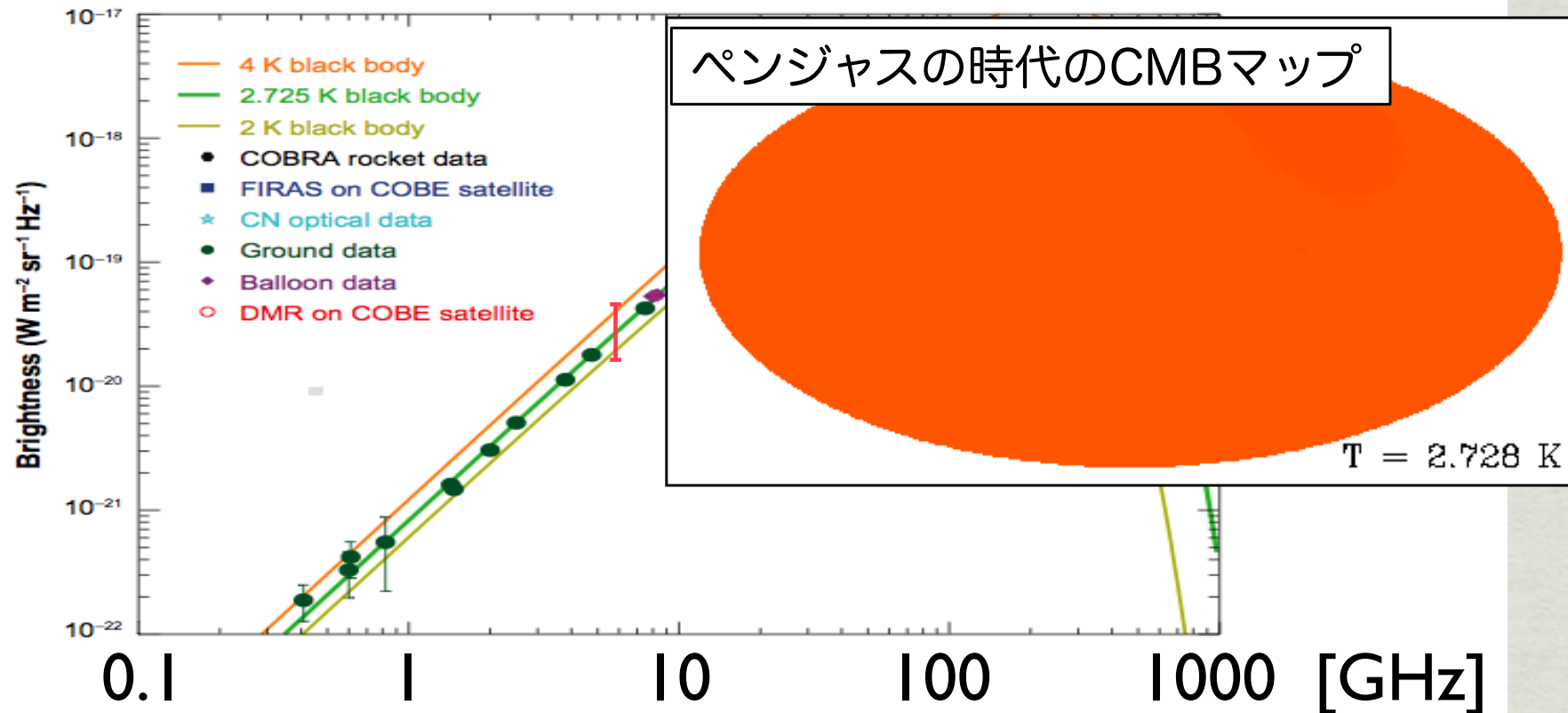
- ビックバンの残光 (宇宙誕生 38 万年後の光)
- 現在の温度 = 2.725K (COBE/FIRAS)

宇宙マイクロ波背景放射 (CMB)



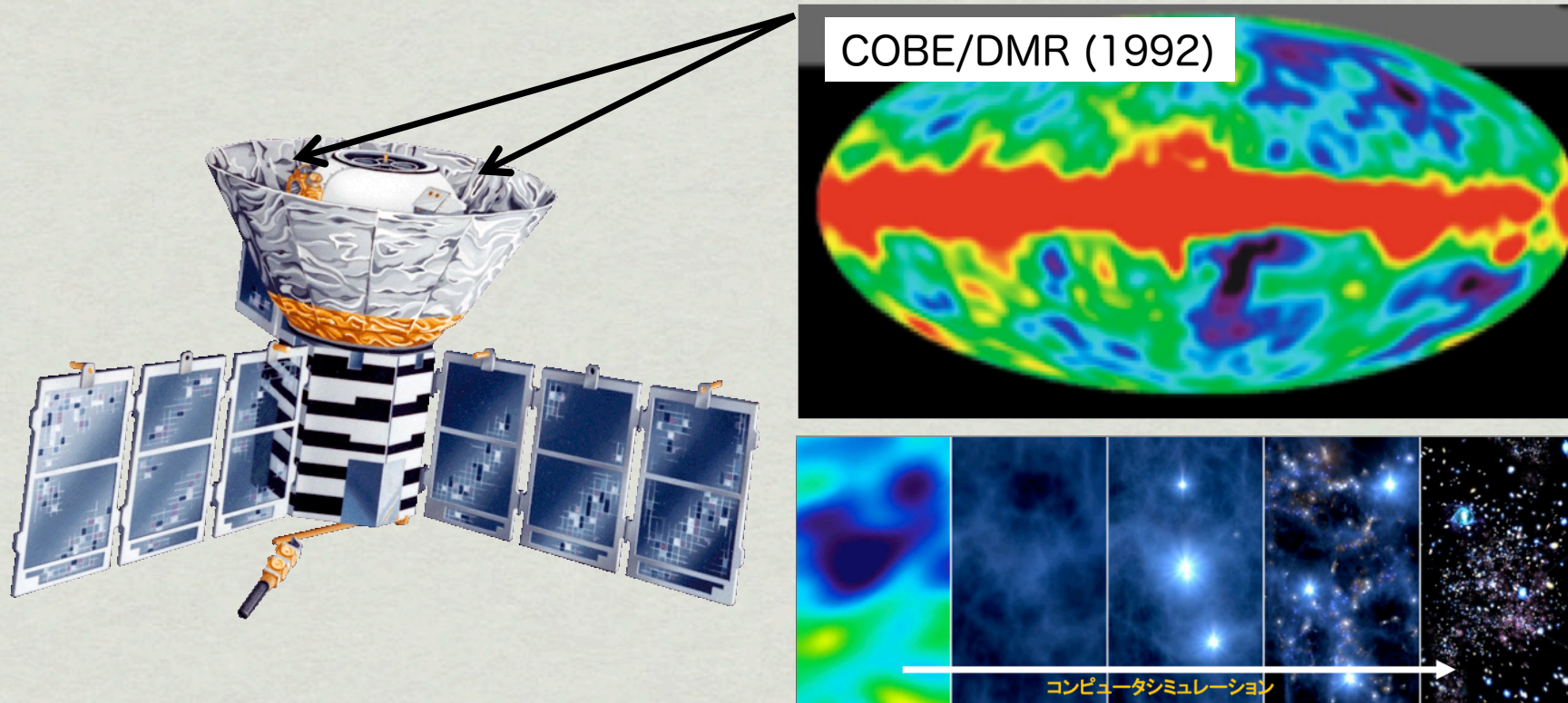
- ビックバンの残光 (宇宙誕生 38 万年後の光)
- 現在の温度 = 2.725K (COBE/FIRAS)

宇宙マイクロ波背景放射 (CMB)



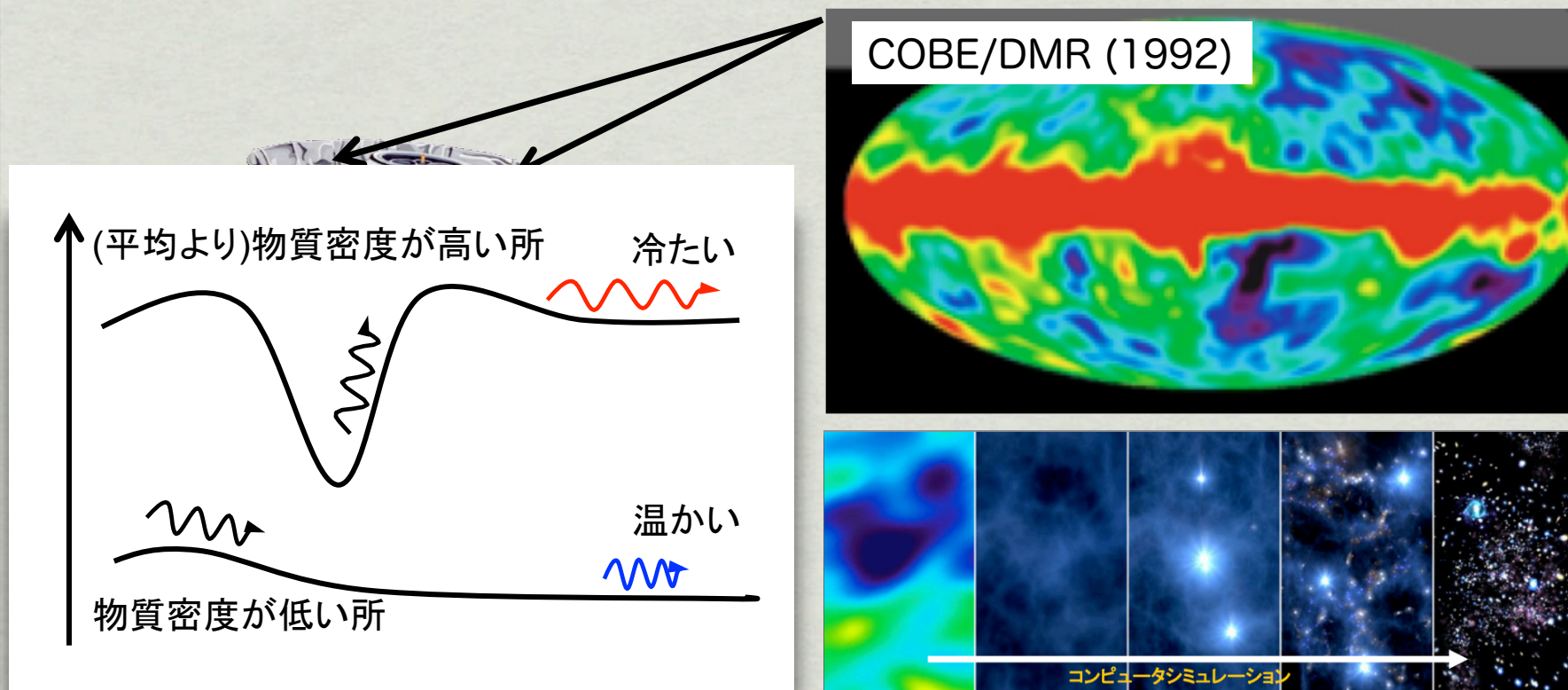
- ビックバンの残光 (宇宙誕生 38 万年後の光)
- 現在の温度 = 2.725K (COBE/FIRAS)

宇宙マイクロ波背景放射 (CMB)



- ビックバンの残光 (宇宙誕生 3 8 万年後の光)
- 現在の温度 = 2.725K (COBE/FIRAS)
- 温度の異方性 : 10^{-5} (大規模構造=現在の宇宙 の種)

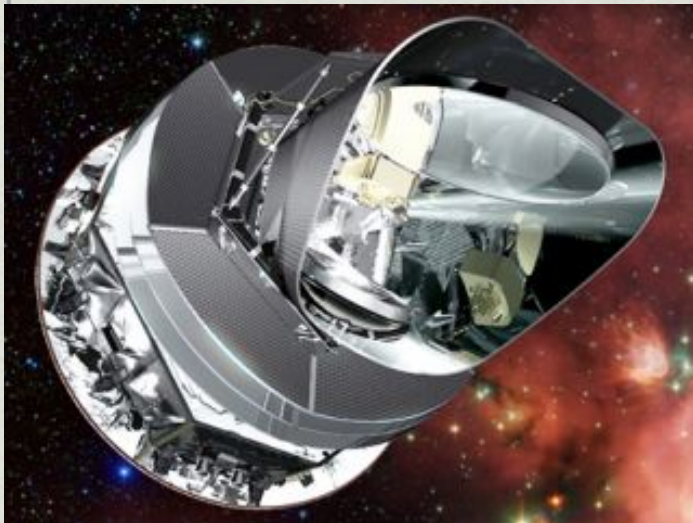
宇宙マイクロ波背景放射 (CMB)



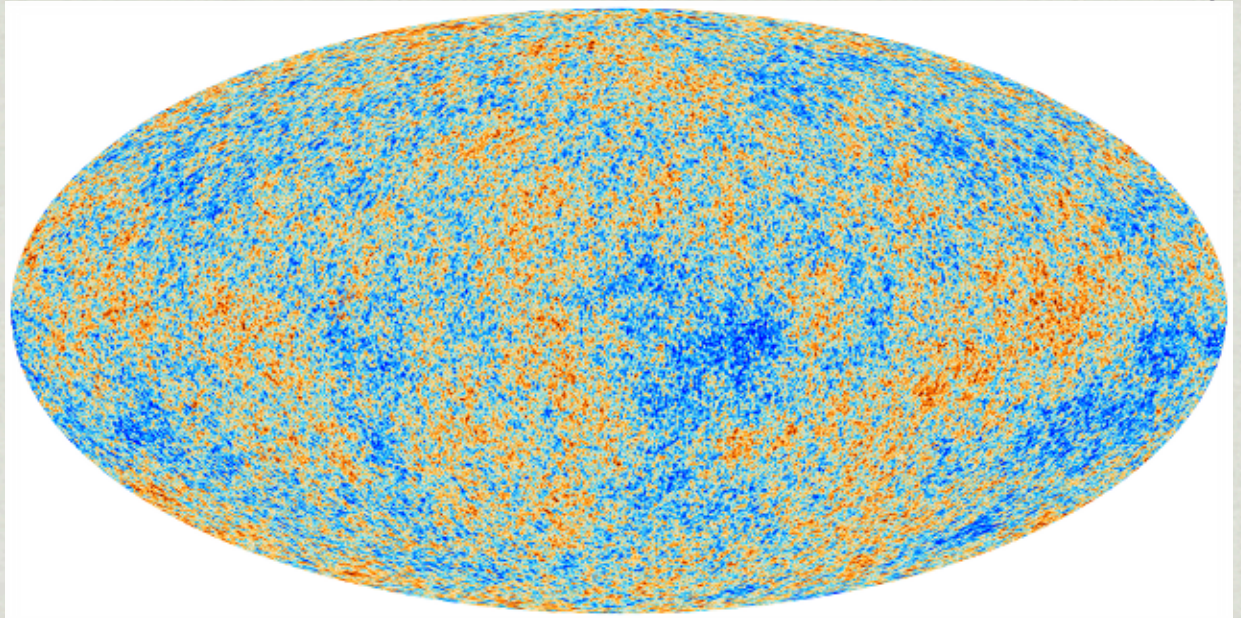
- ビックバンの残光 (宇宙誕生 38 万年後の光)
- 現在の温度 = 2.725K (COBE/FIRAS)
- 温度の異方性 : 10^{-5} (大規模構造=現在の宇宙 の種)

宇宙マイクロ波背景放射 (CMB)

PLANCK衛星(2009-2013)

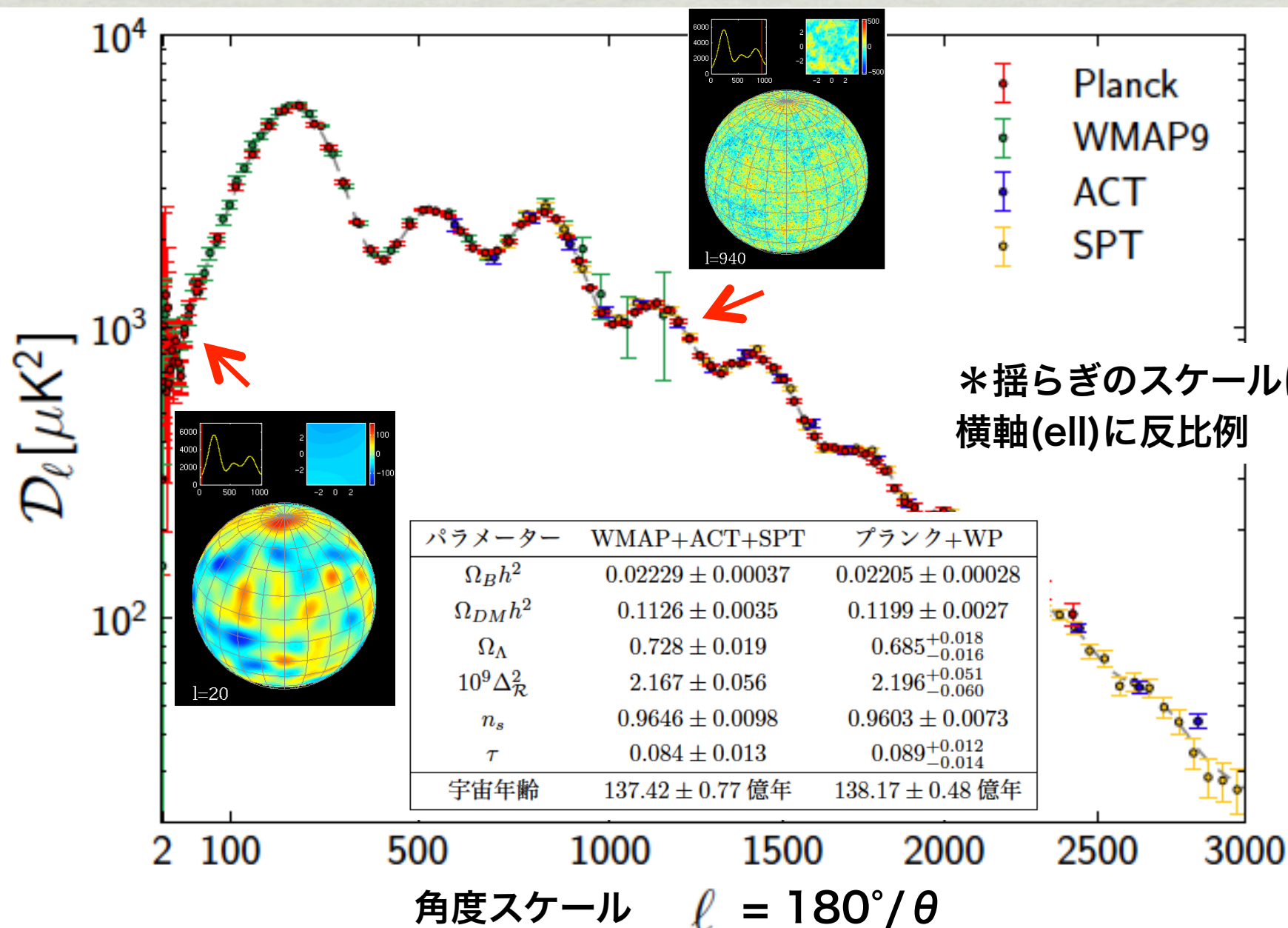


PLANCK衛星による温度揺らぎの全天マップ



- ビックバンの残光 (宇宙誕生 38 万年後の光)
- 現在の温度 = 2.725K (COBE/FIRAS)
- 温度の異方性 : 10^{-5} (大規模構造=現在の宇宙 の種)

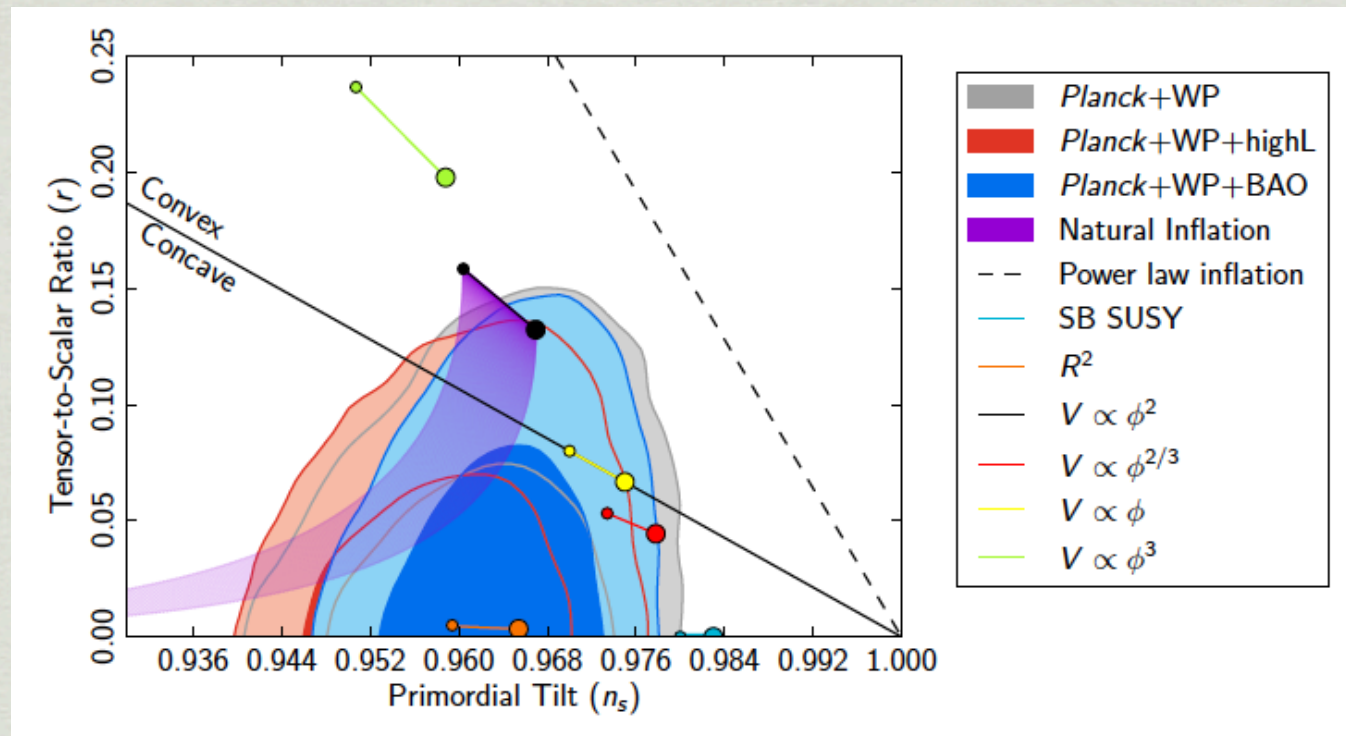
温度揺らぎのパワースペクトル解析



Beyond Λ CDM at Planck

1) 非ガウス性 : $f_{\text{NL}} = 2.7 \pm 5.8$

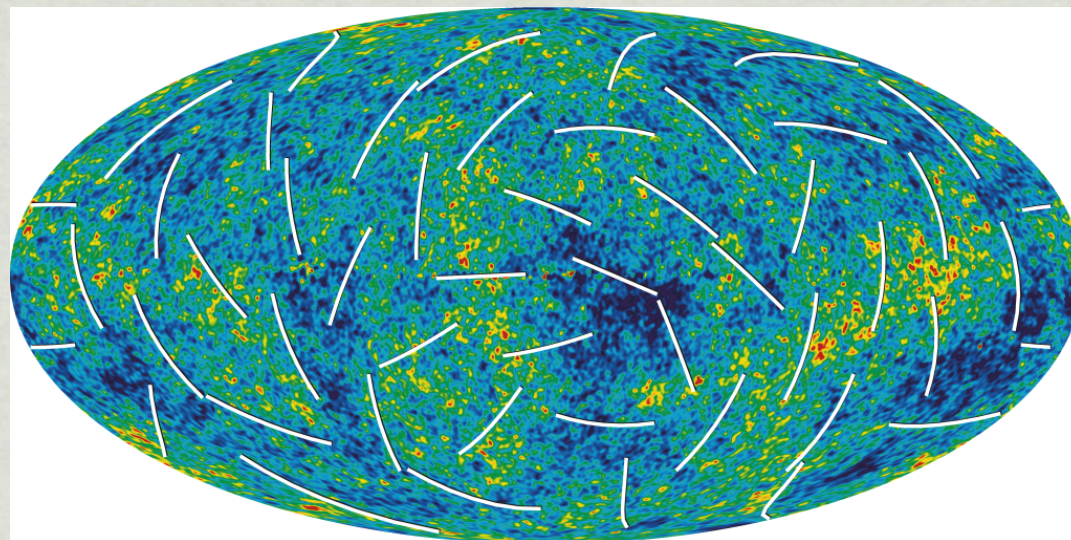
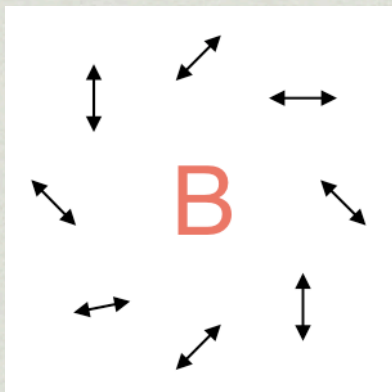
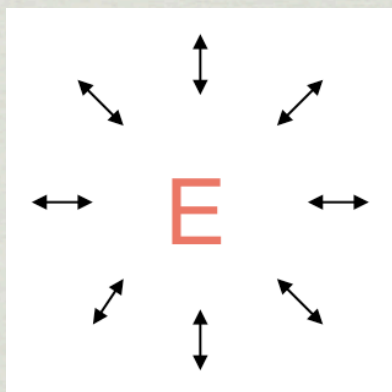
2) テンソル・スカラー比: $r < 0.11$ (95%CL)



Λ CDMを越えた物理は偏光観測で探索

宇宙マイクロ波背景放射 (CMB)

WMAP衛星による偏光の全天マップ



- ビックバンの残光 (宇宙誕生 3 8 万年後の光)
- 現在の温度 = 2.725K (COBE/FIRAS)
- 温度の異方性 : 10^{-5} (大規模構造=現在の宇宙 の種)
- 直線偏光 (Eモード、Bモード)

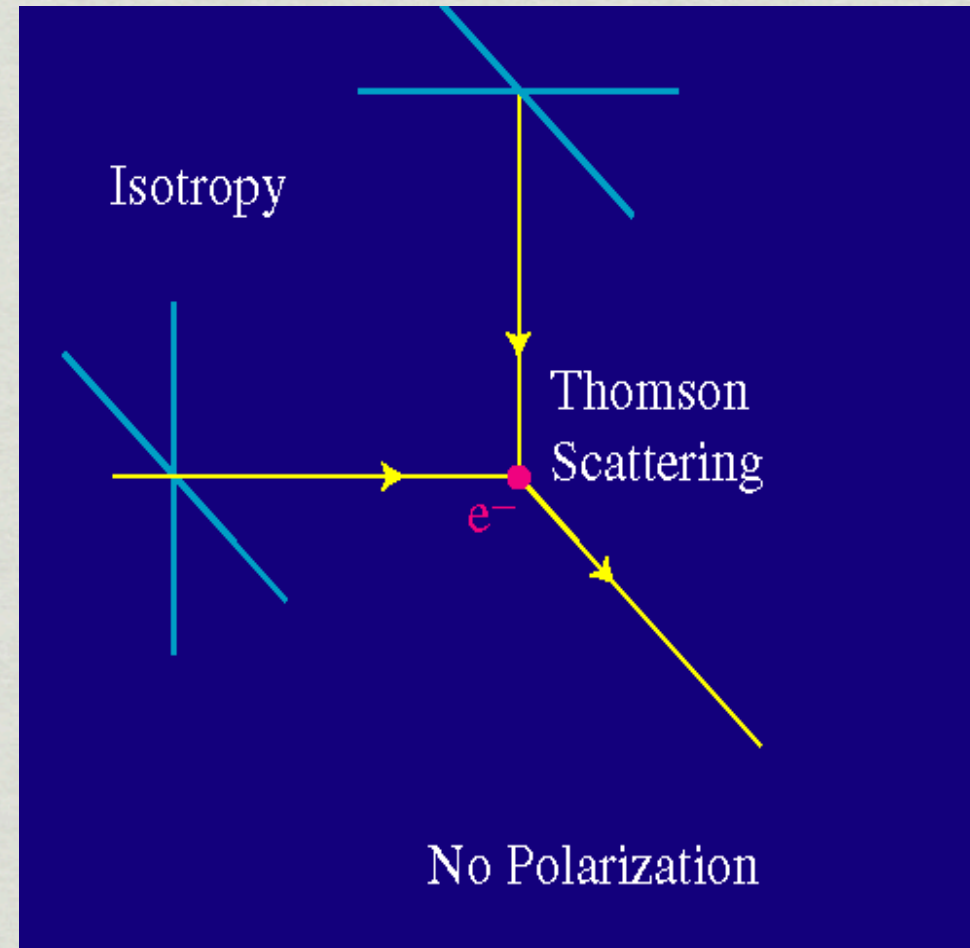
← CMB研究の最前線₃

CMB偏光について

- CMBは晴れ上がり(直前)の電子との散乱により直線偏光している。

$$\frac{d\sigma_T}{d\Omega} \propto |\hat{\epsilon} \cdot \hat{\epsilon}'|^2$$

- しかし、どの方向から同じ温度のCMBが入射して来ると、正味の偏光は0になる。

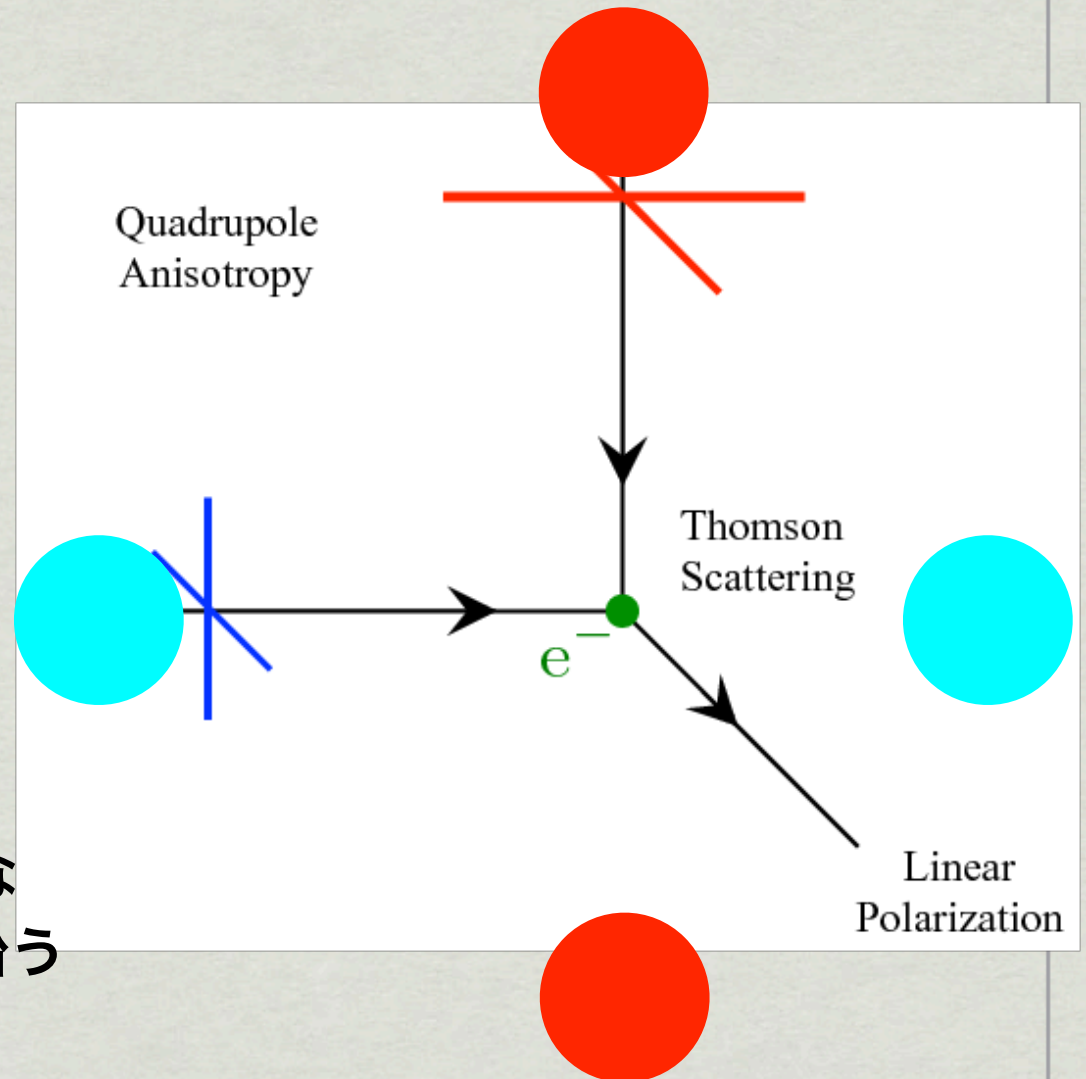


CMB偏光について

- (4重極の)温度揺らぎがあると、観測にかかる偏光成分が残る。

偏光の由来は
トムソン散乱
+ 温度揺らぎ

偏光マップを理解するのに便利な
ルール：偏光の向きは”熱い”に沿う

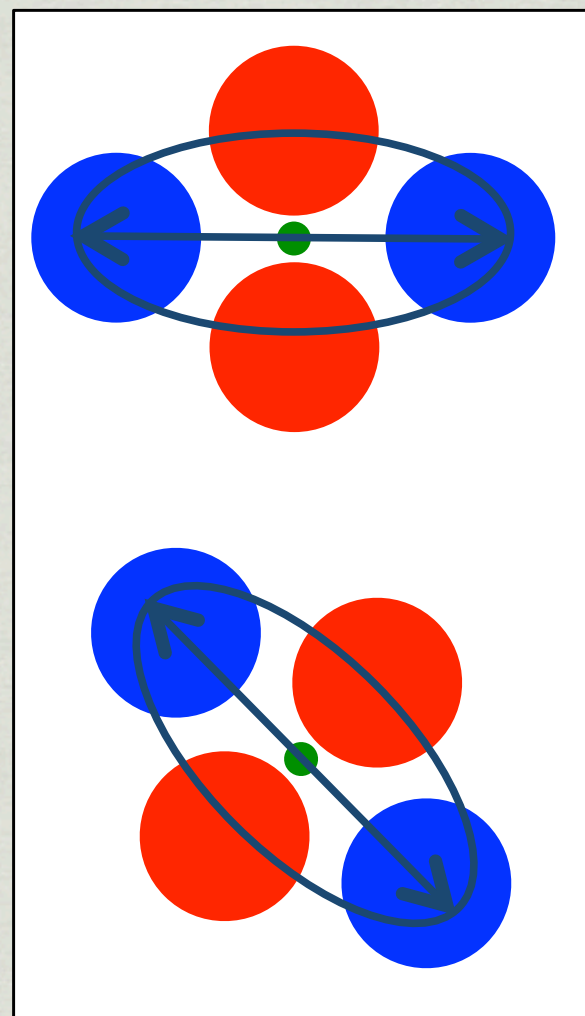


温度揺らぎの起源は？

- 温度揺らぎの起源は、
 - 密度揺らぎ と
 - 原始重力波
 - > 時空（メトリック）のゆらぎ
 - 空間が伸びる -> 赤方偏移 -> 冷たい
 - 空間が縮む -> 青方偏移 -> 熱い
- 四重極揺らぎを生成

二つの起源は分離可能か？

YES !



偏光のパターンが違う！

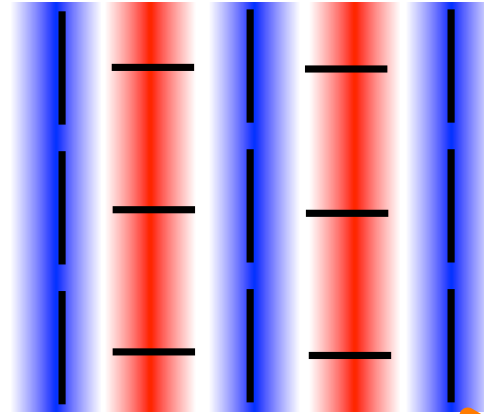
- パターンには2種類ある

密度揺らぎの場合

- 偏光の向きがゆらぎの進行方向に対して**垂直**か**平行**。

密度揺らぎの場合

冷 熱 冷 熱 冷



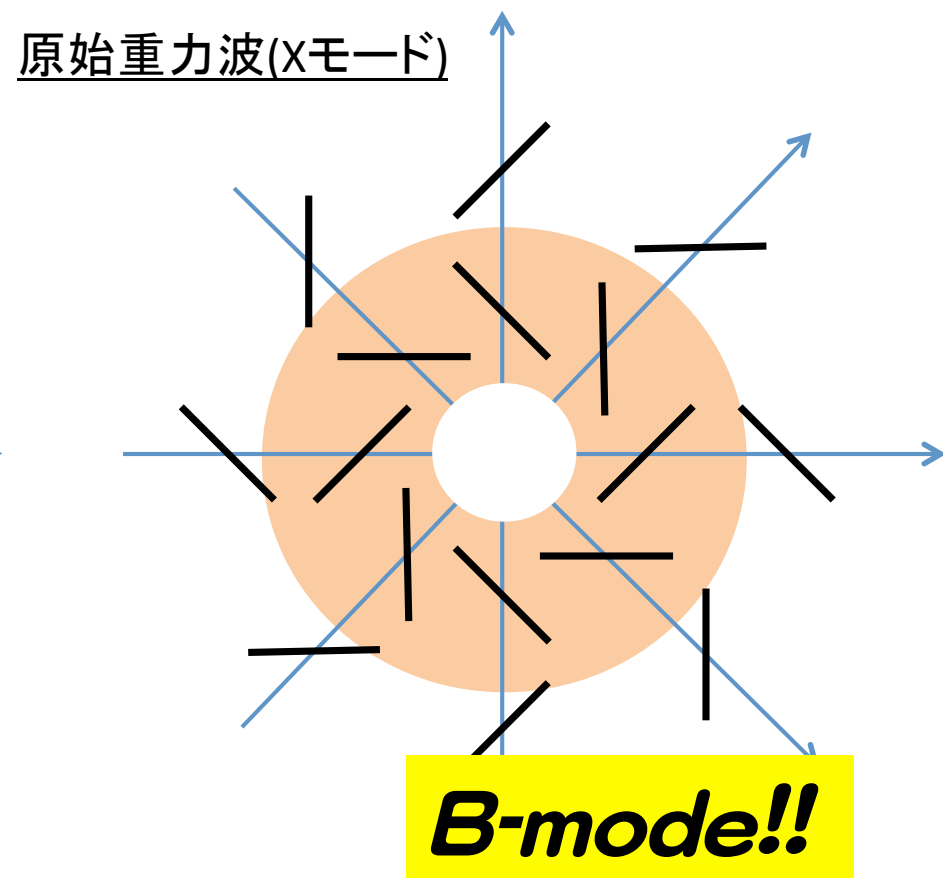
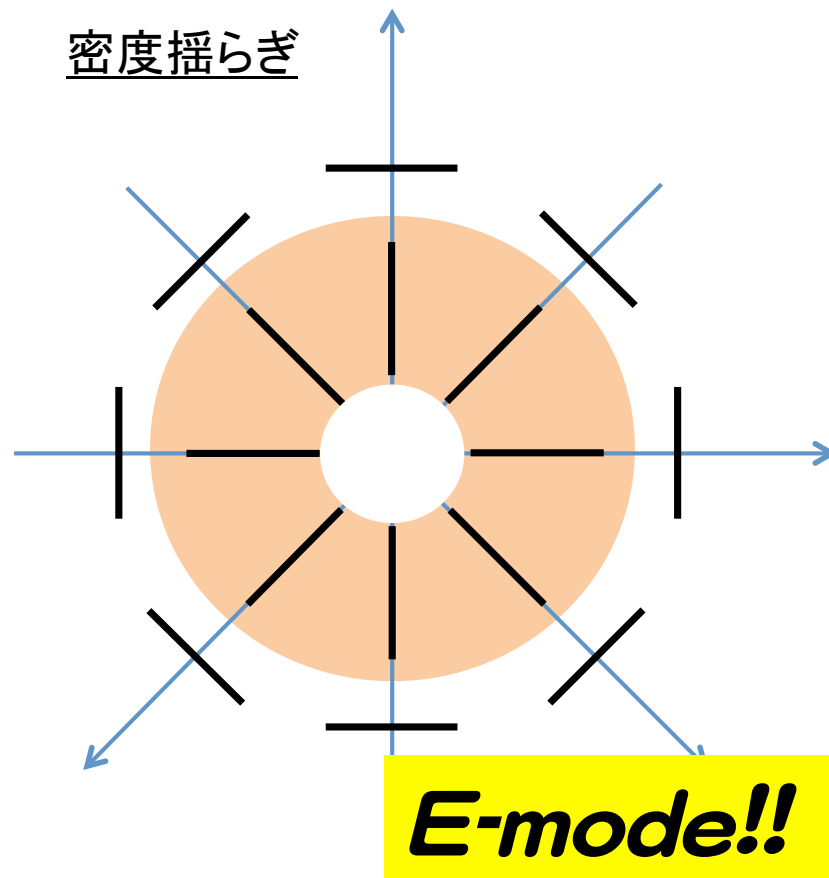
重力波(xモード)の場合

- 偏光の向きがゆらぎ(重力波)の進行方向に対して**45度傾いている**。

原始重力波の場合



様々な方向の揺らぎが重なると



偏光Bモードを通して原始重力波を検出出来る！

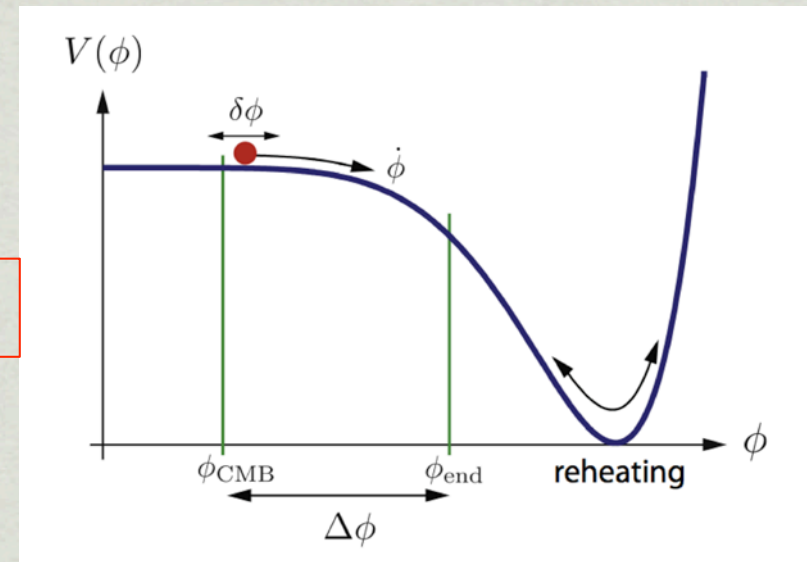
インフレーションエネルギーの決定

インフレーションポテンシャル(V)が大きい程強い原始重力波を放出 → より明瞭な偏光Bモードを生成

- B モードの明瞭さの度合いを" r "と書くと

$$V^{1/4} = 1.06 \times 10^{16} \times (r/0.01)^{1/4} \text{ GeV}$$

- $r=0.2$ (BICEP2の中心値)
→ $2 \times 10^{16} \text{ GeV}$



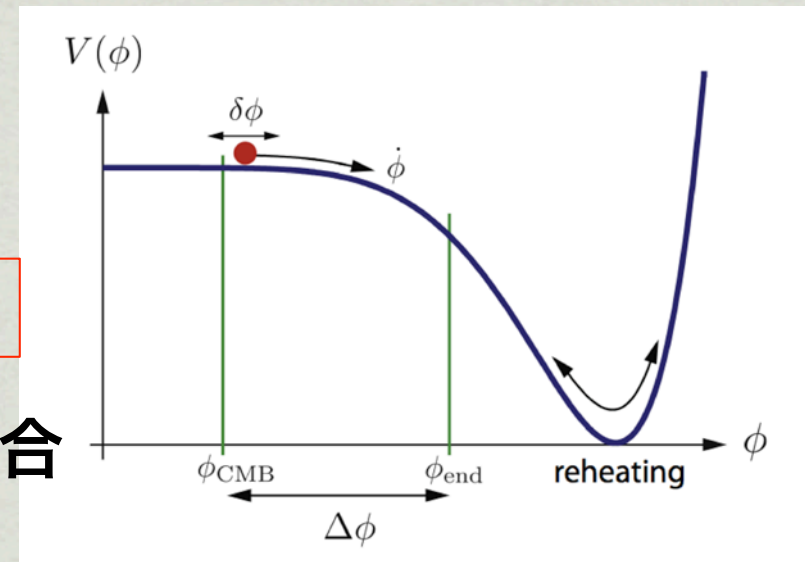
インフレーションエネルギーの決定

インフレーションポテンシャル(V)が大きい程強い原始重力波を放出 → より明瞭な偏光Bモードを生成

- B モードの明瞭さの度合いを" r "と書くと

$$V^{1/4} = 1.06 \times 10^{16} \times (r/0.01)^{1/4} \text{ GeV}$$

- (もし) B モードが見つからない場合
→ エネルギーの上限値を得る

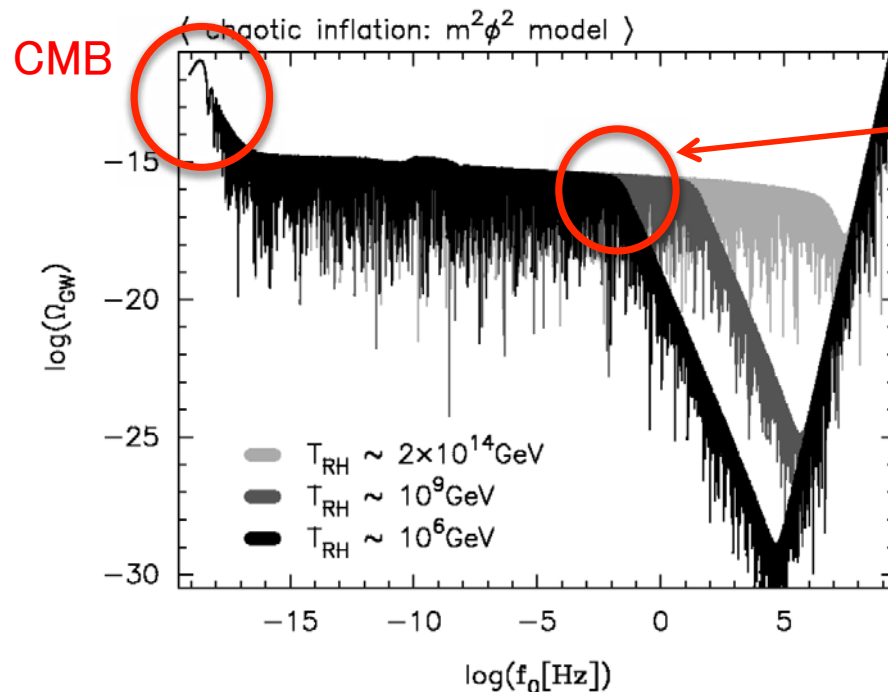


場合によっては我々の宇宙はGUTを経験していないかもしれない…

($r \sim 0.01$ まで探索出来るとlarge fieldはほぼ棄却可能 by 小玉さん)

B モード探索は負けの無い勝負！ (と言い聞かせてやってます)

干渉計実験との比較



広帯域で重力波が受かると
再加熱の時期
(=インフレーションの終わり)
等が分かる。

↔ CMB偏光(はインフレーションの始まりを探る) とも
とても相補的

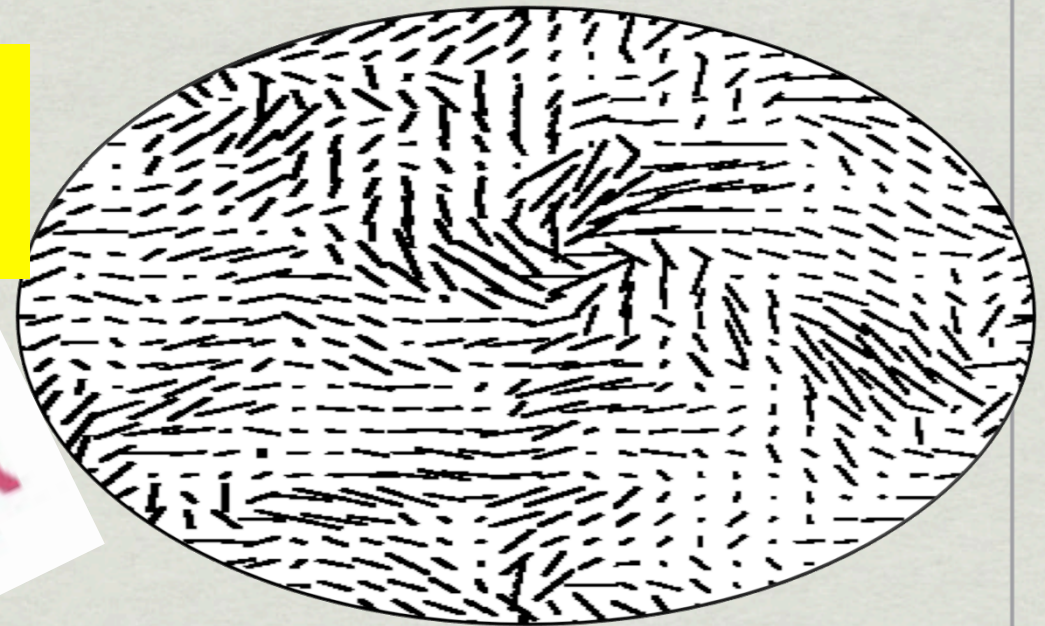
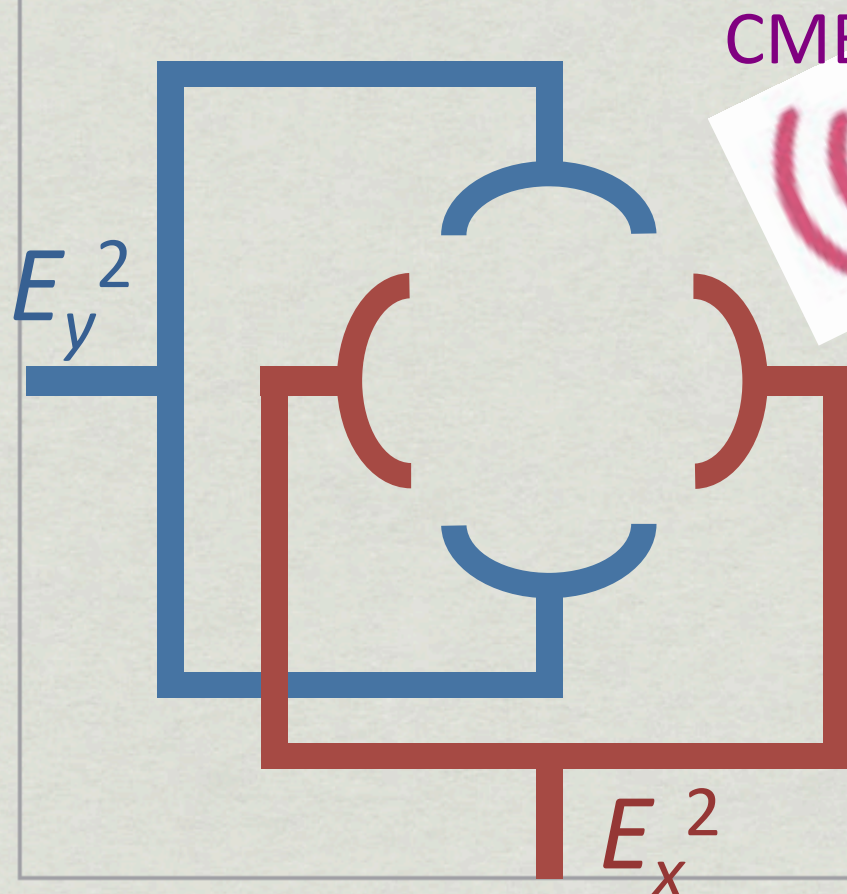
Kuroyanagi et PRD, 79 1013501 (2009)

感度の面ではCMBが圧倒的優勢

→ CMB偏光は現時点で、原始宇宙を探る最良のプローブ。

CMB偏光実験のアプローチ

直交したアンテナで
直線偏光を測定



無偏光成分: $E_x^2 + E_y^2$

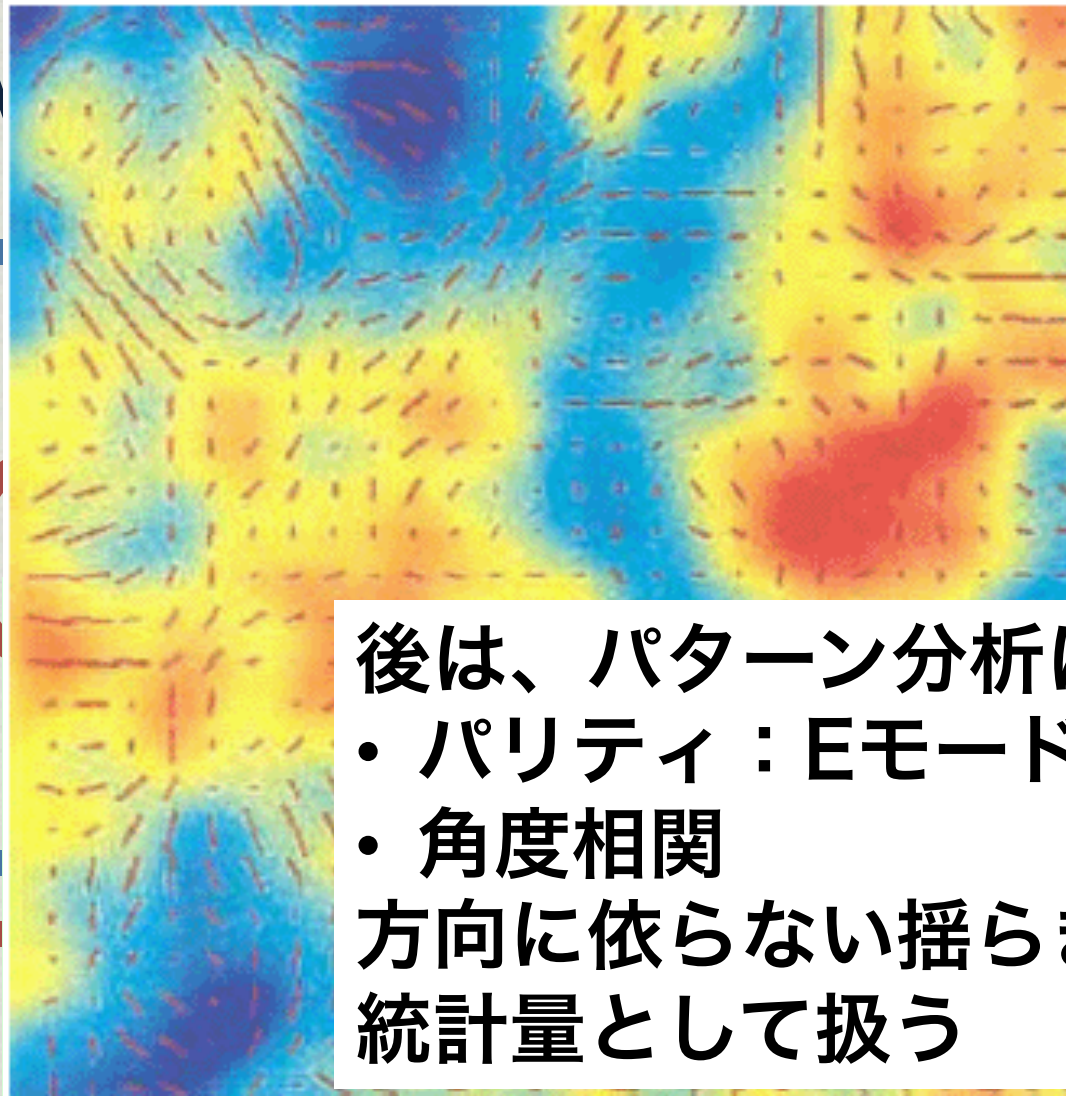
偏光成分 : $E_x^2 - E_y^2$

これだけじゃ向きはわからない

CM

ーチ

E_y^2



後は、パターン分析にかけて

- ・ パリティ：Eモード or Bモード
- ・ 角度相関

方向に依らない揺らぎを
統計量として扱う

→ 偏光強度分布図ができる。

$(E_y)^2/2$

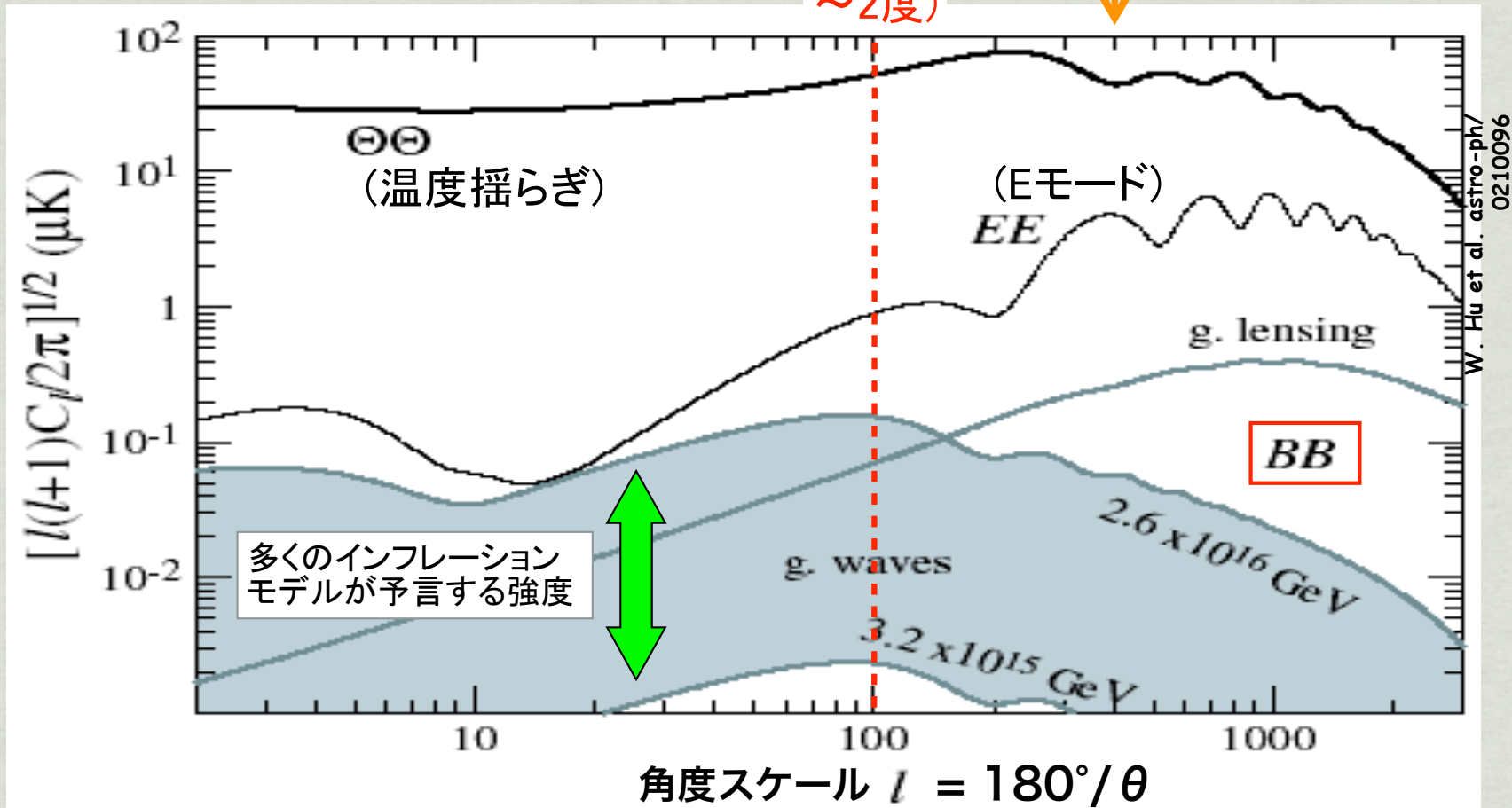
$$= 2 E_x E_y$$

偏光Bモードパワースペクトル

月の視直径($\sim 0.5^\circ$)

$\sim 2^\circ$

偏光パターンの強度



- ・ 偏光Bモードの強度は $\sim 100 \text{ nK}$ 以下 (Eモードの $\sim 1/10$ 以下)
- ・ パターンの大きさは $\sim 2^\circ \rightarrow$ 地上実験でも十分探索可能。

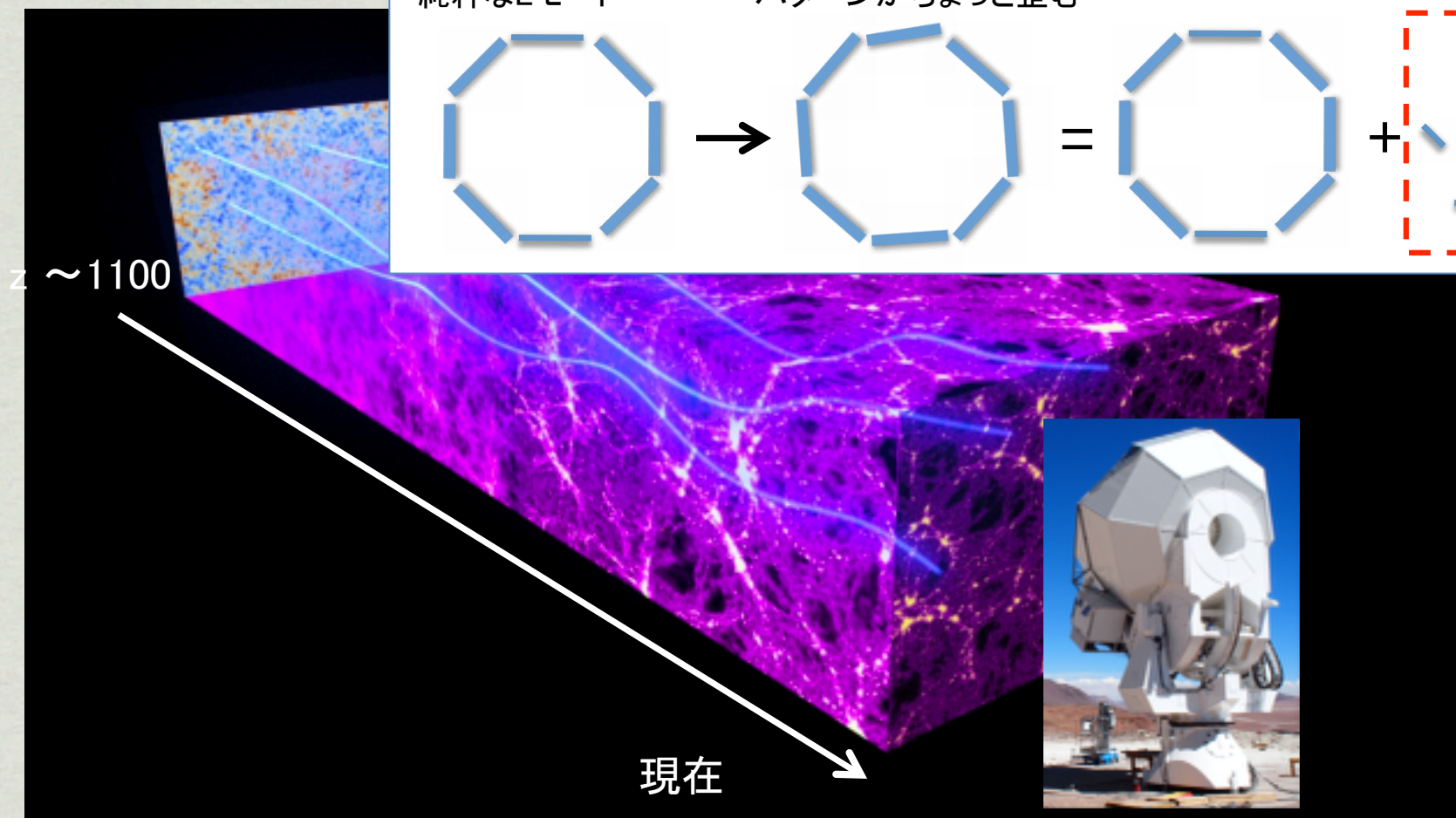
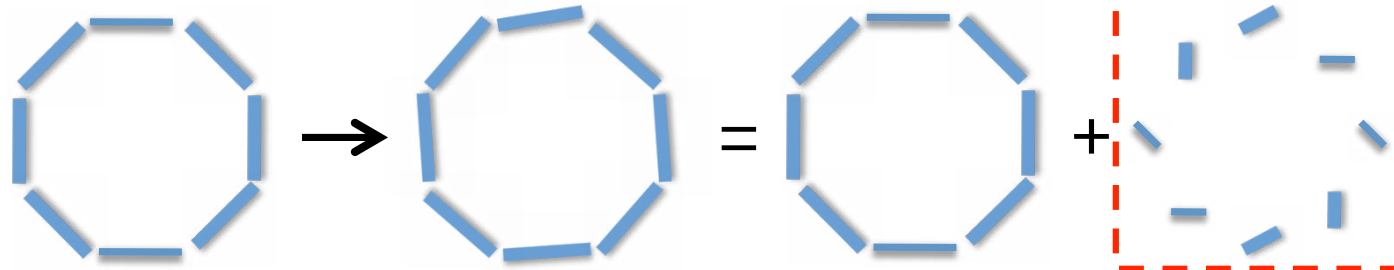
重力レンズ偏光Bモード

これは1つの偏光Bモード

晴れ上がりの時には
純粋なEモード

重力レンズ効果で
パターンがちょっと歪む

Bモード成分が生まれる

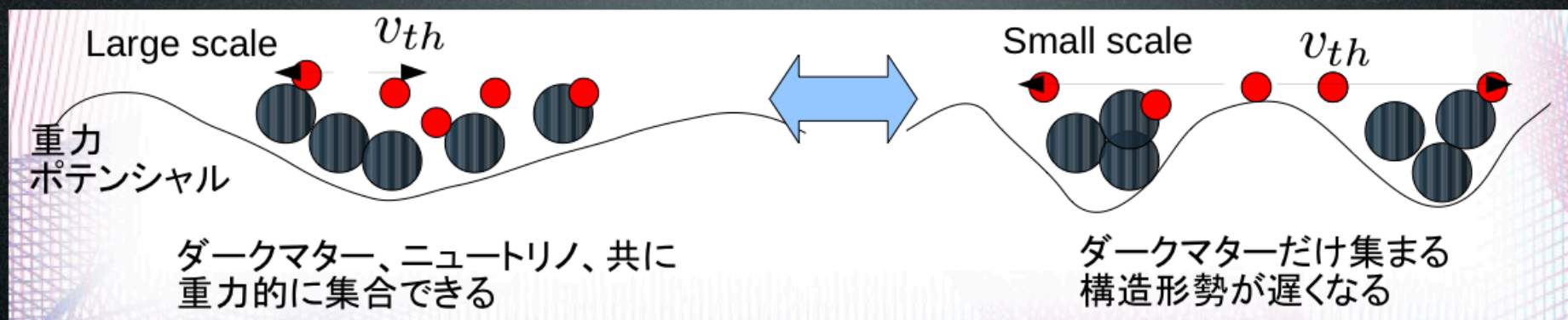


重力レンズ効果によって偏光Bモードパターンが生成される

宇宙大規模構造への影響

大スケール

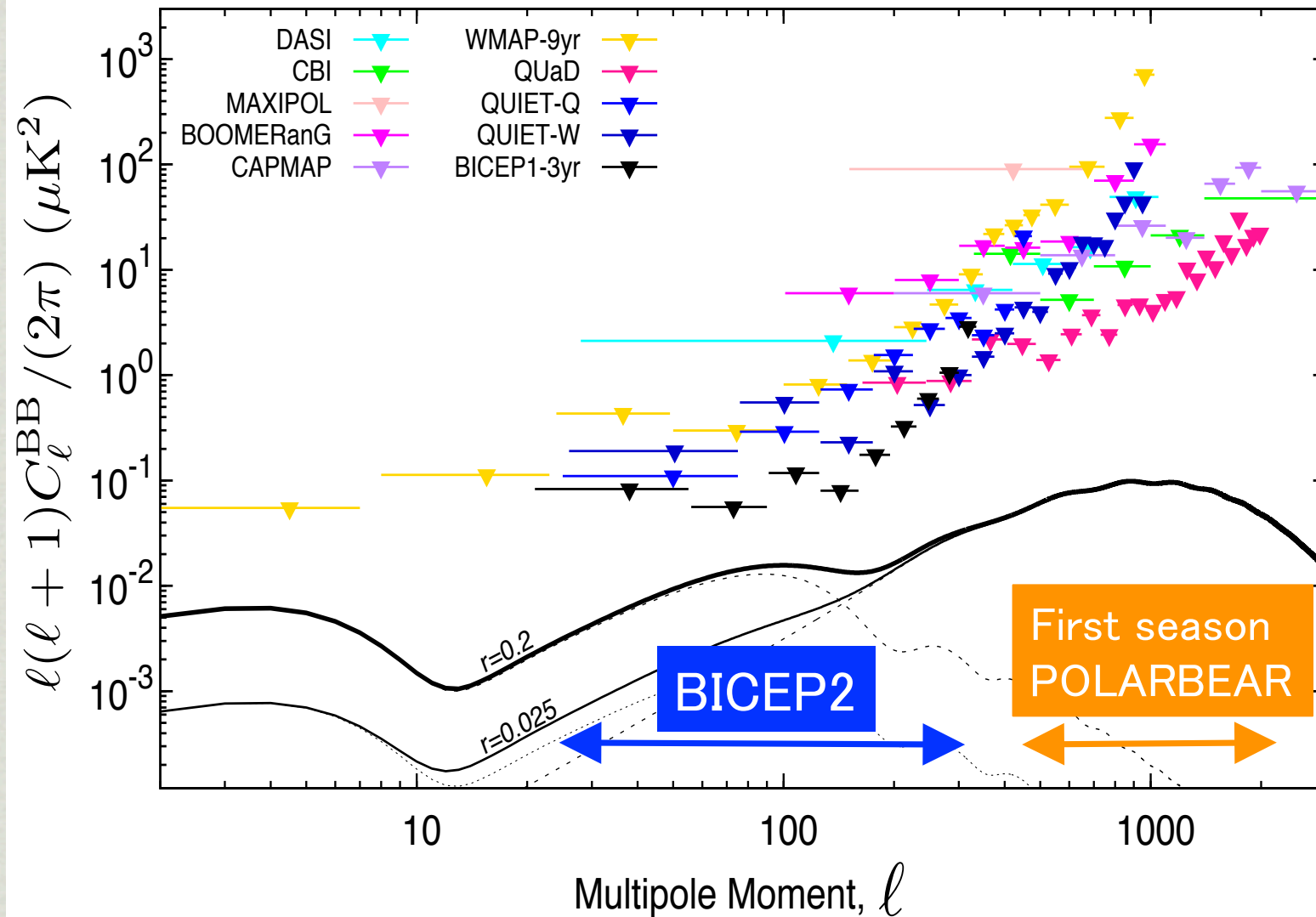
小スケール



市来氏(名古屋)
2011年春物理学会ニュートリノシンポジウムスライド

- ニュートリノは非常に大きな速度分散を持つ
- あるスケール以下には留まらない(物質としてゆらぎに寄与できない)
- 小スケールで大規模構造がならされる。

観測の現状:偏光Bモード (3月以前)



POLARBEAR実験(とBICEP) の初期観測結果について

- 実験装置と観測について
- 初年度のデータと解析結果
- BICEP2の結果についての紹介と考察



POLARBEAR コラボレーション



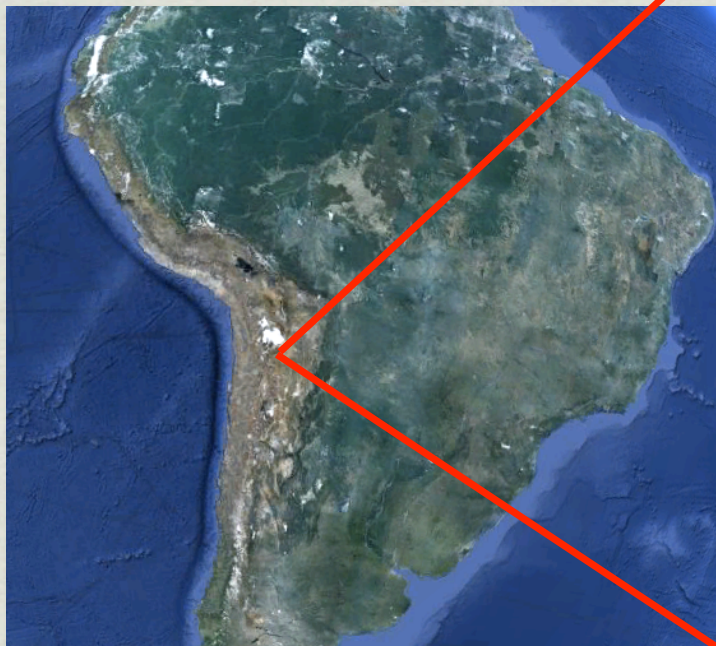
現在日本が本格的に参加し、
中心的役割を果たしている、
世界最高レベルCMB実験

POLARBEAR Collaboration Meeting @ KEK, Japan, Mar. 24-28, 2013

- 5カ国16機関から成る国際共同実験 (PI Adrian Lee, UCB)
 - (アップグレード計画に携わっている人も含め) ~70人
 - 日本はKEK, IPMU, 核融合研, JAXAから~20人参加

POLARBEAR実験の概要

- チリ・アタカマ砂漠、標高5,200mで、
- CMBの温度揺らぎと偏光を、
- 2012年1月のfirst light以降、継続的に観測。

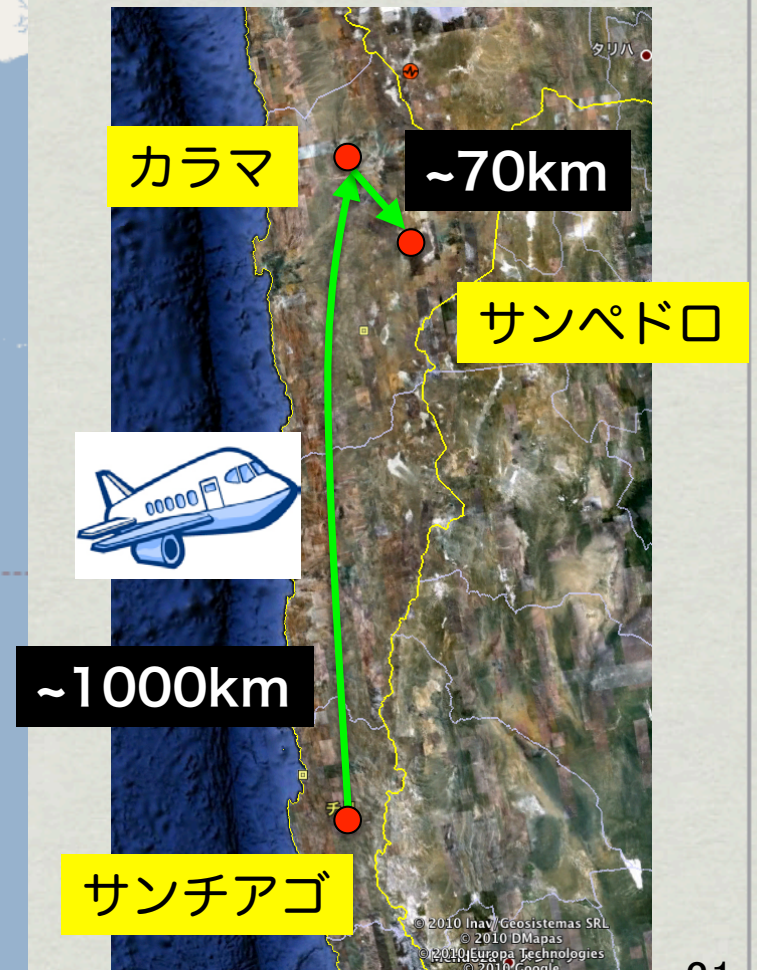


サイトへの道のり



飛行機とバスを乗り継いでふもとの町まで約40時間。

＋
町からサイトまでは車で往復3時間



観測サイト概観

- 標高5,200mにあるJames Ax観測所
 - 酸素が薄い
 - 非常に乾燥した大気
 - 一年を通して比較的天気が良い
 - ベースキャンプ地(2400m)から通勤圏内
 - 24時間365日観測可能
 - **B-mode観測には、 $O(1000)$ 時間の統計が必要**
- 大気からの雑音が小さい



観測サイト概観



NHKが先月撮影の為サイトを訪問

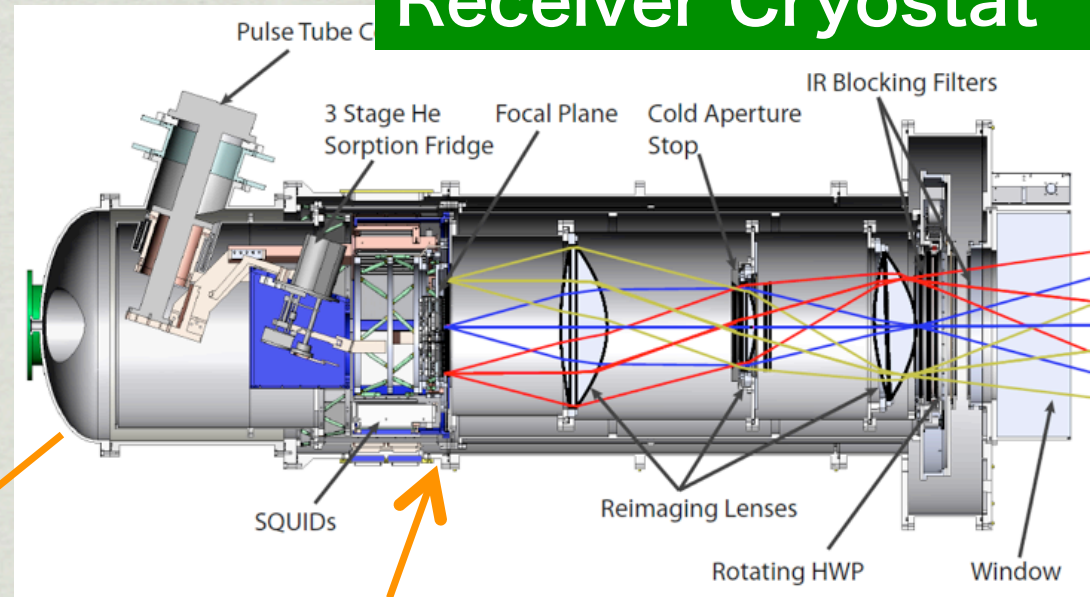
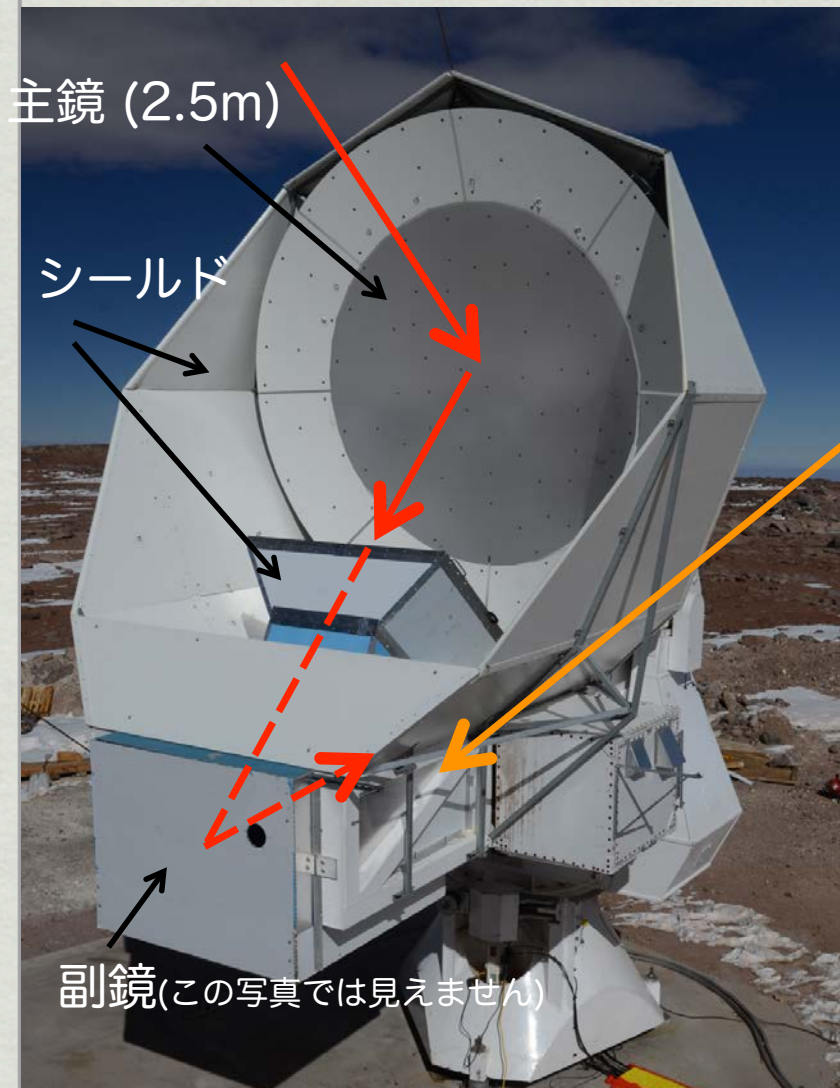
11月27日(木)のコズミックフロントを
是非ご覧下さい



POLARBEAR望遠鏡

Huan Tran Telescope

Receiver Cryostat



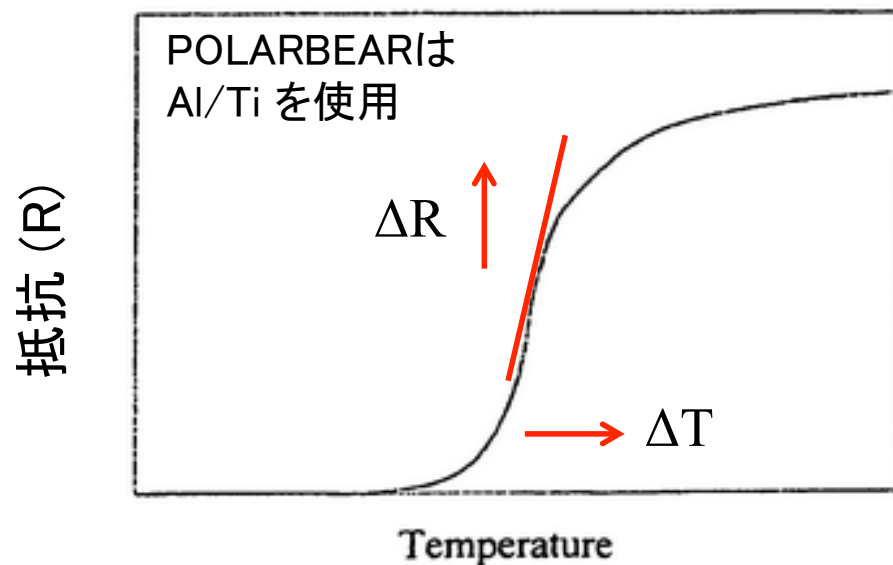
焦点面(250mK)

- Off-axis Gregorian-Dragone
- 2.5mの主鏡 + 150GHz検出器
 - 角度分解能: 3.5arcmin (FWHM)
↔ ~30arcmin (BICEP2)

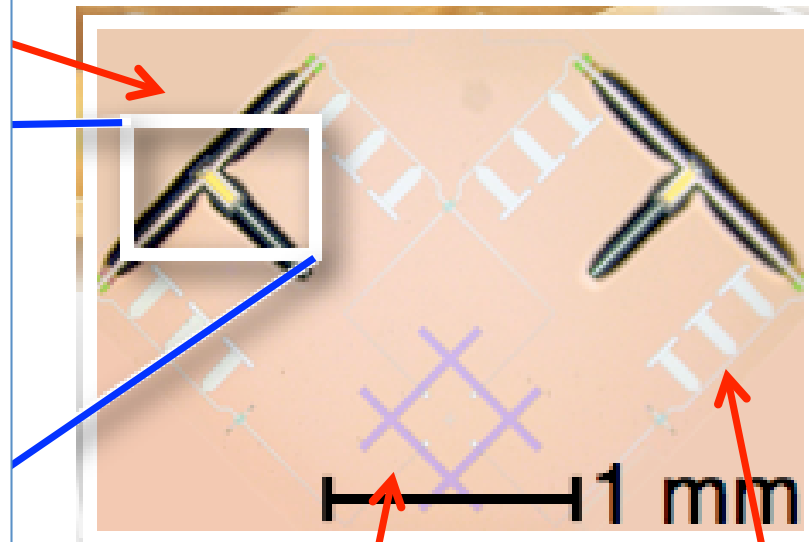
両方の偏光Bモード (インフレーション, 重力レンズ) に感度を持つ

焦点面検出器

TES ボロメータ (transition-edge sensor)



僅かな温度変化(CMBが入ってくる)に対し、
抵抗が大きく変化する (低雑音・高感度)



アンテナ(直交二偏波)

マイクロストリップフィルタ
(150GHz)

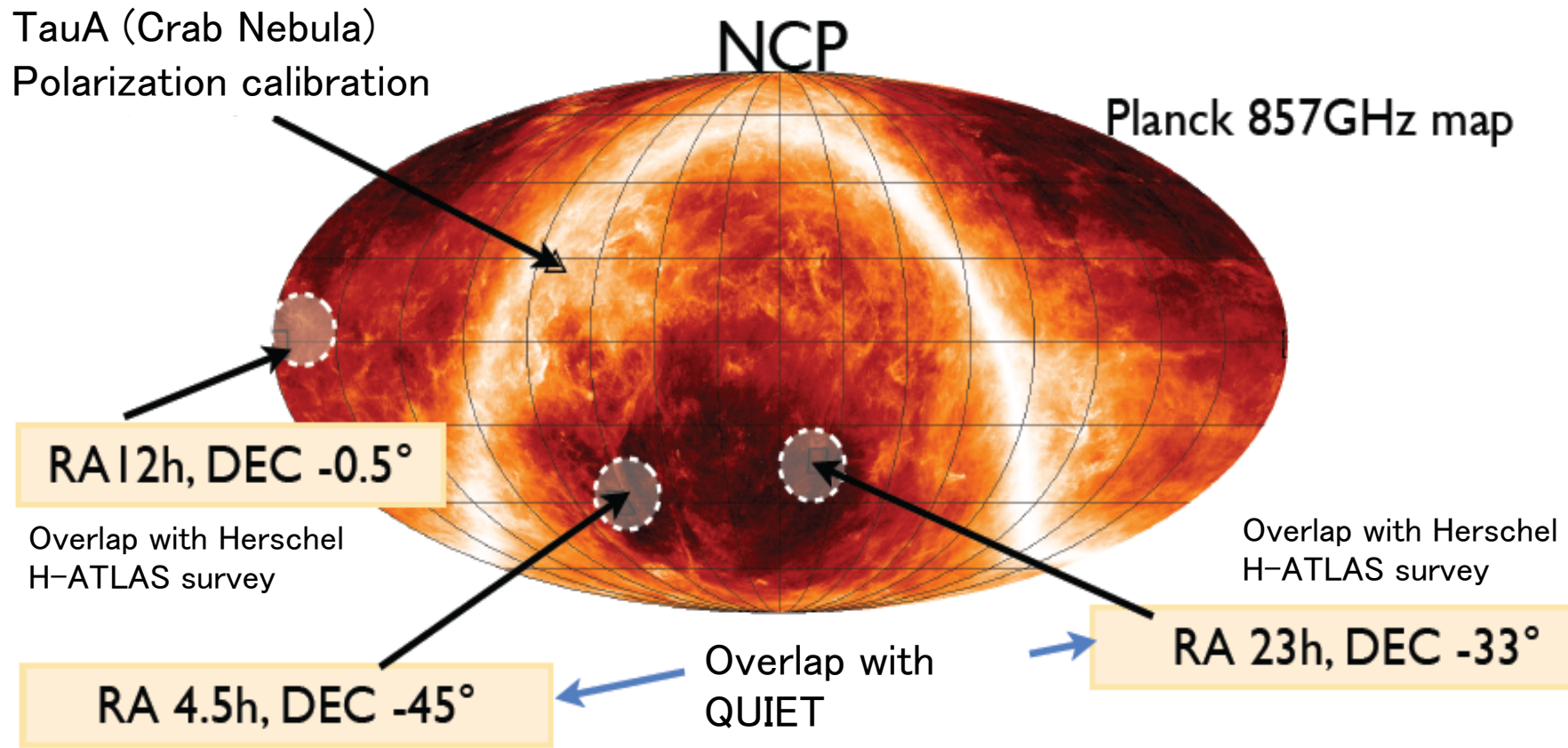
ノイズレベル: $23\mu\text{K}\sqrt{s}$
 $\leftrightarrow 17\text{--}24\mu\text{K}\sqrt{s}$ (BICEP2)

Wafer module

$$\leftarrow \Delta C_1^{\text{BB}} \propto \text{Noise}^2$$

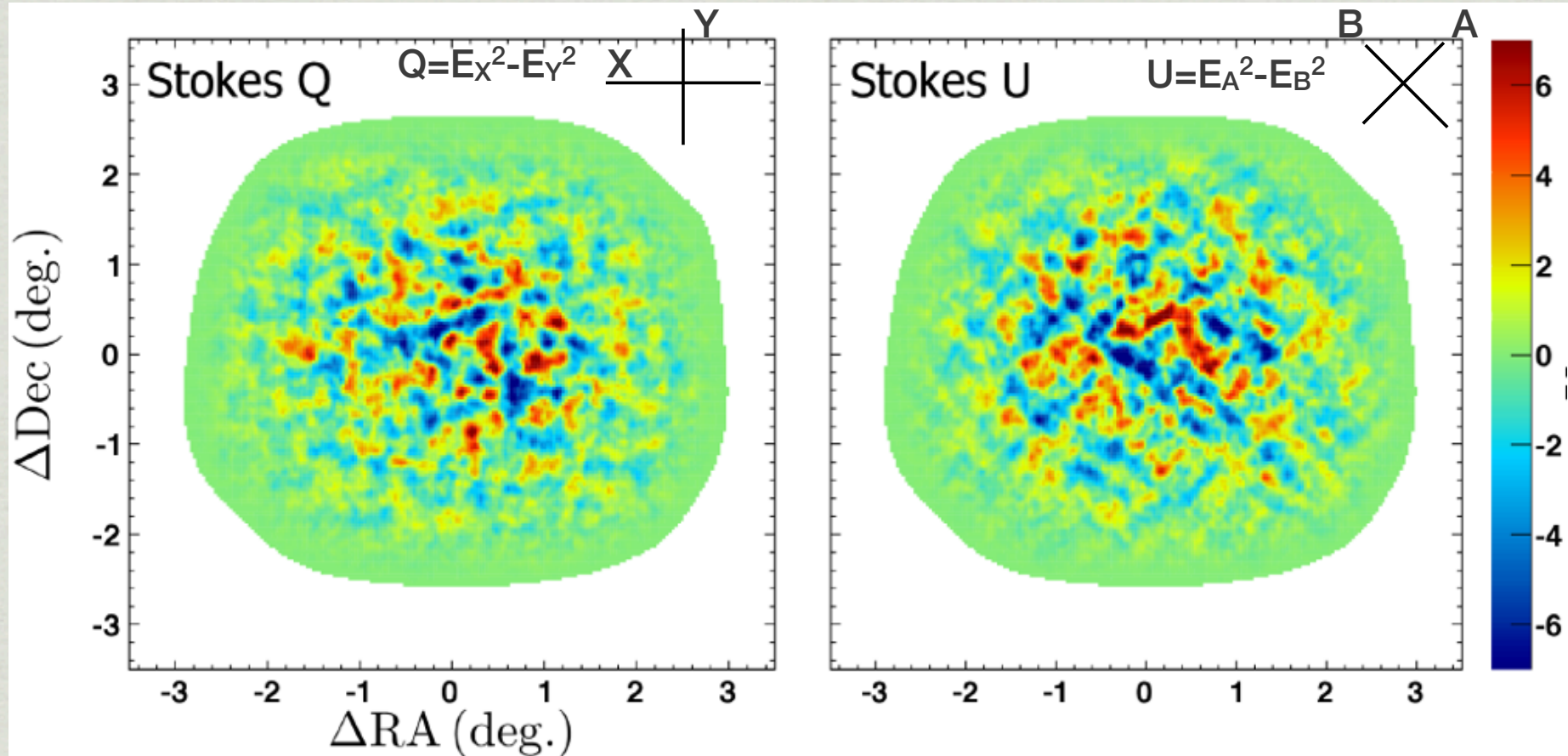
スロットアンテナ

初年度の観測領域



- クリーンなパッチを観測 (foregroundは無視できる)
- 赤外線観測(Herschel)とのオーバーラップ有り
- 初年度は小さなパッチ (3deg x 3deg) を集中的に観測 (>4000時間)

初年度の偏光データ



- CMBの偏光信号をクリアに検出
- ノイズレベル : 5.5uK-arcmin (Planckより10倍深い)
 - Sub-degree 領域で最も精度の良いCMB偏光マップ

観測の系統誤差

2つの検出器の出力の差を見る。

$$\begin{aligned}\text{偏光} : P_A - P_B \\ = g_A E_x^2 - g_B E_y^2\end{aligned}$$

3大系統誤差

(1) ゲインの不一致

g_A, g_B を1%間違えると強度の1%が偏光に漏れ込む

(2) 視野(Beam)に関する不一致

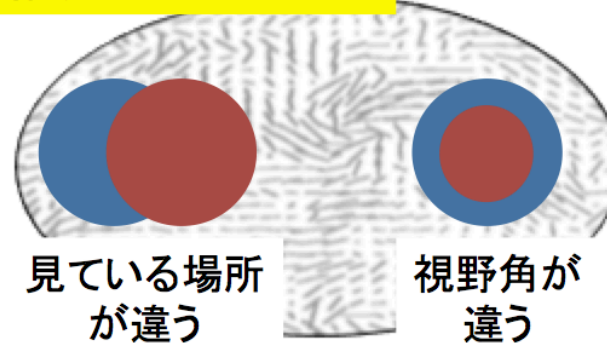
A,Bの見ている所が違くと(CMBには温度ムラがあるので)偽偏光を生む

(3) アンテナの方向の較正ミス

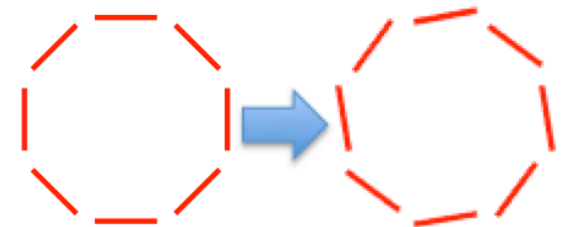
EモードがBモードになれ込む

無偏光 $\rightarrow$ B-mode

縦と横の引き算で失敗

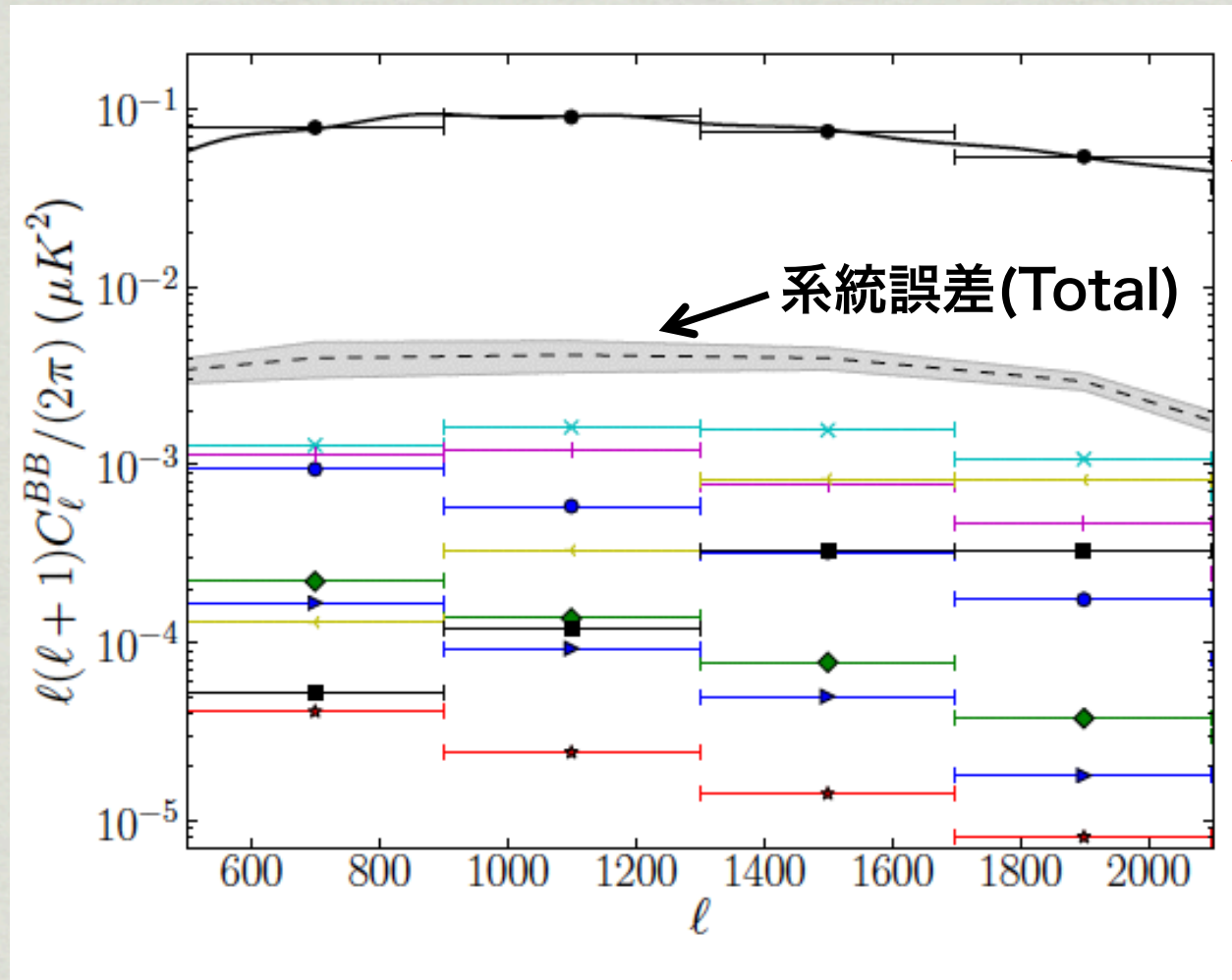


E-mode $\rightarrow$ B-mode



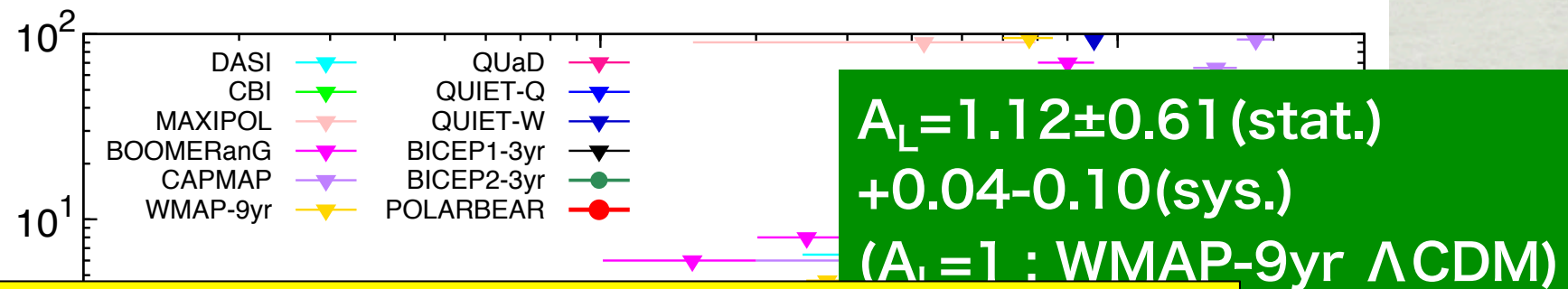
観測の系統誤差

偏光Bモードに対する系統誤差

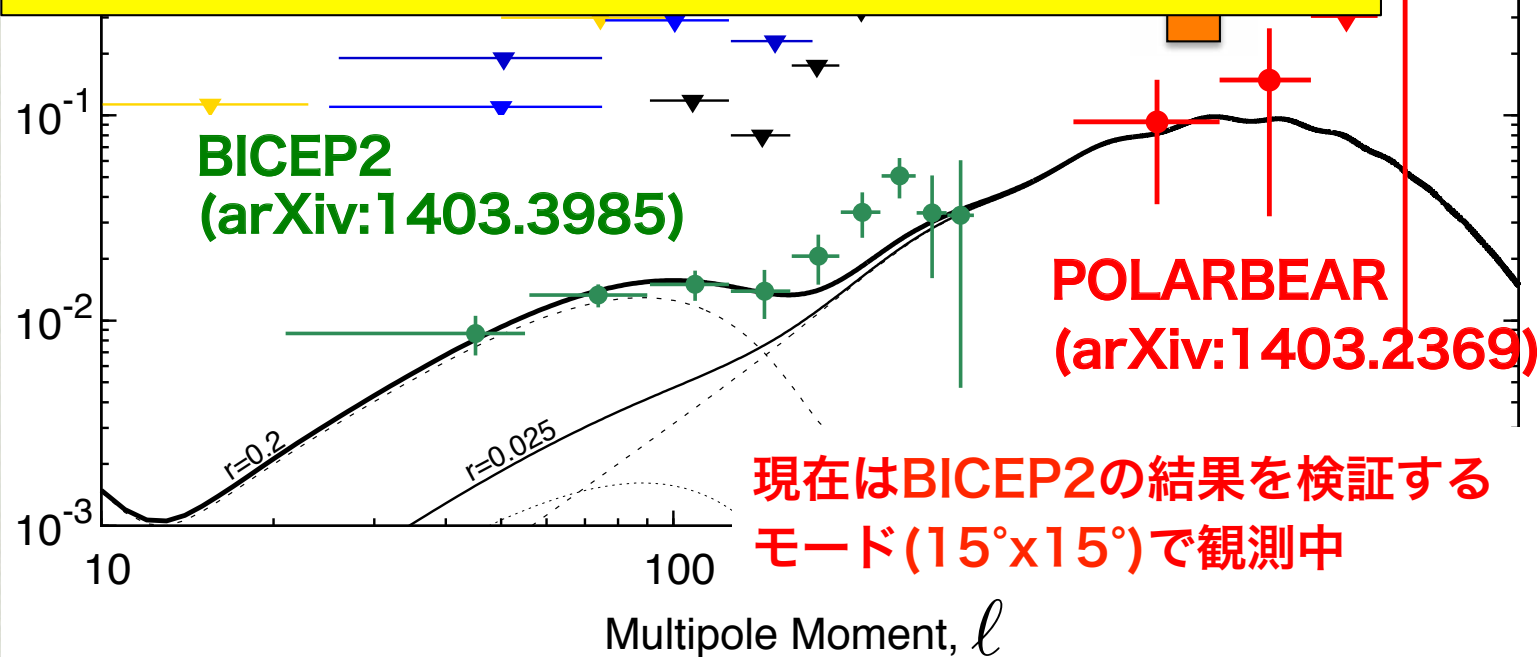


系統誤差は信号強度と比べて十分小さい (<10%以下)

最新のBモードパワースペクトラム



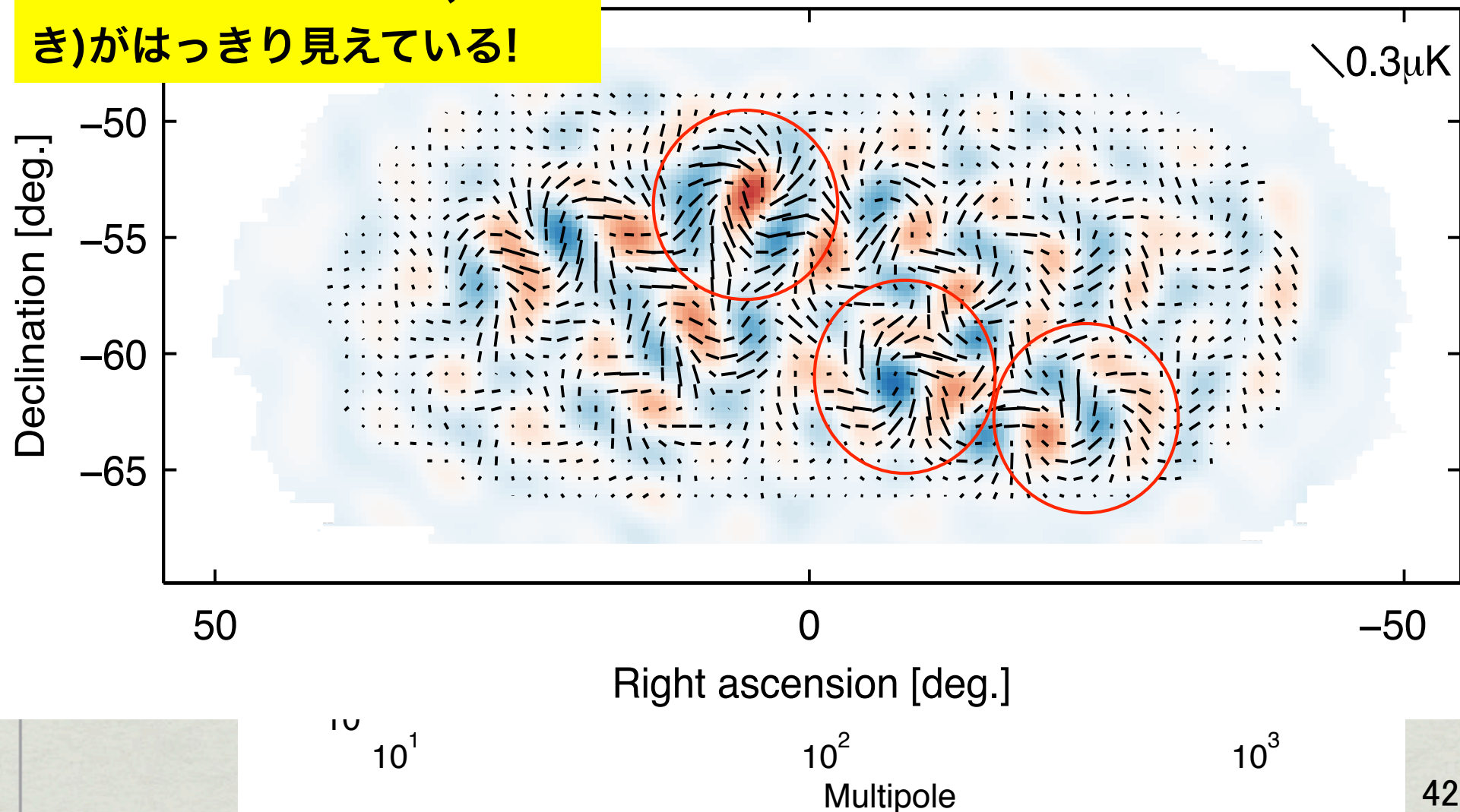
探索の時代から観測の時代へ
偏光Bモードを用いた宇宙論の幕開け

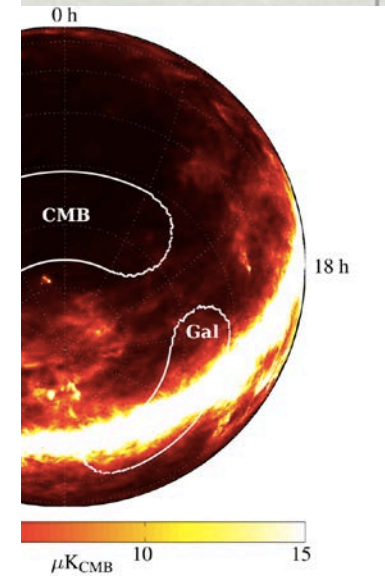
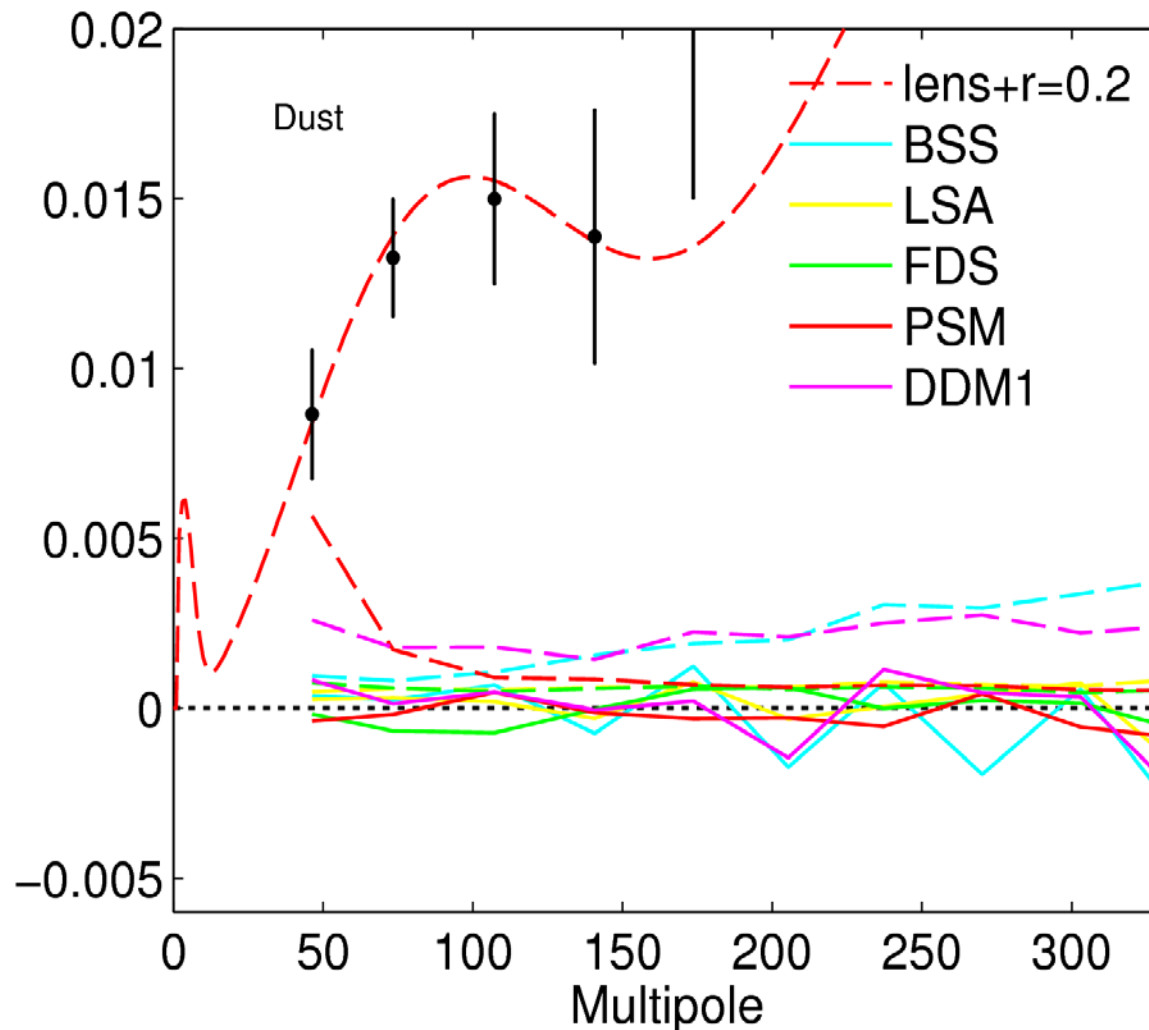
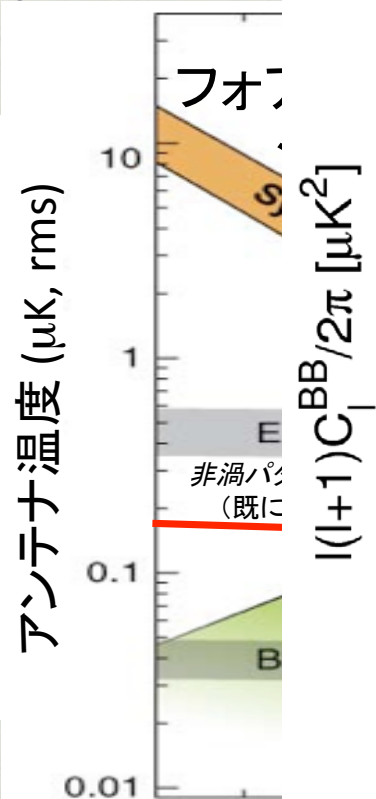


BICEP2の結果について

マップ上でもBモード(渦巻き)がはっきり見えている!

BICEP2: B signal



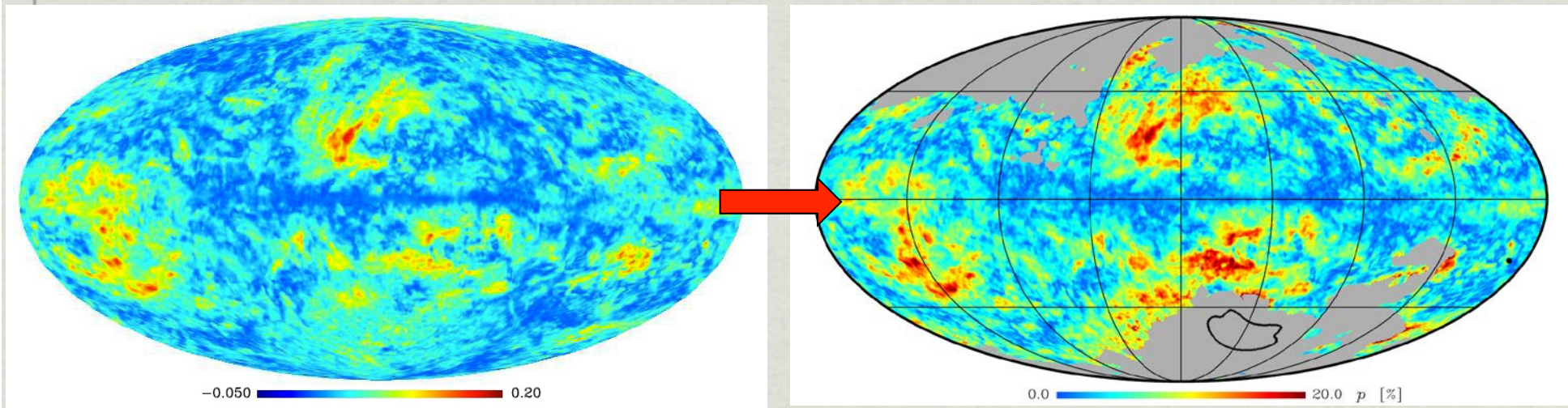


パッチを観測して
ダストの寄与はこ
さいはずだが....
はいかは？

- BICEP2は単一周波数の為、外部データ(Planck)やモデルから影響を推定した。のだが...

新しいPlanck ダスト偏光 (353GHz)

Polarization fraction map @353GHz



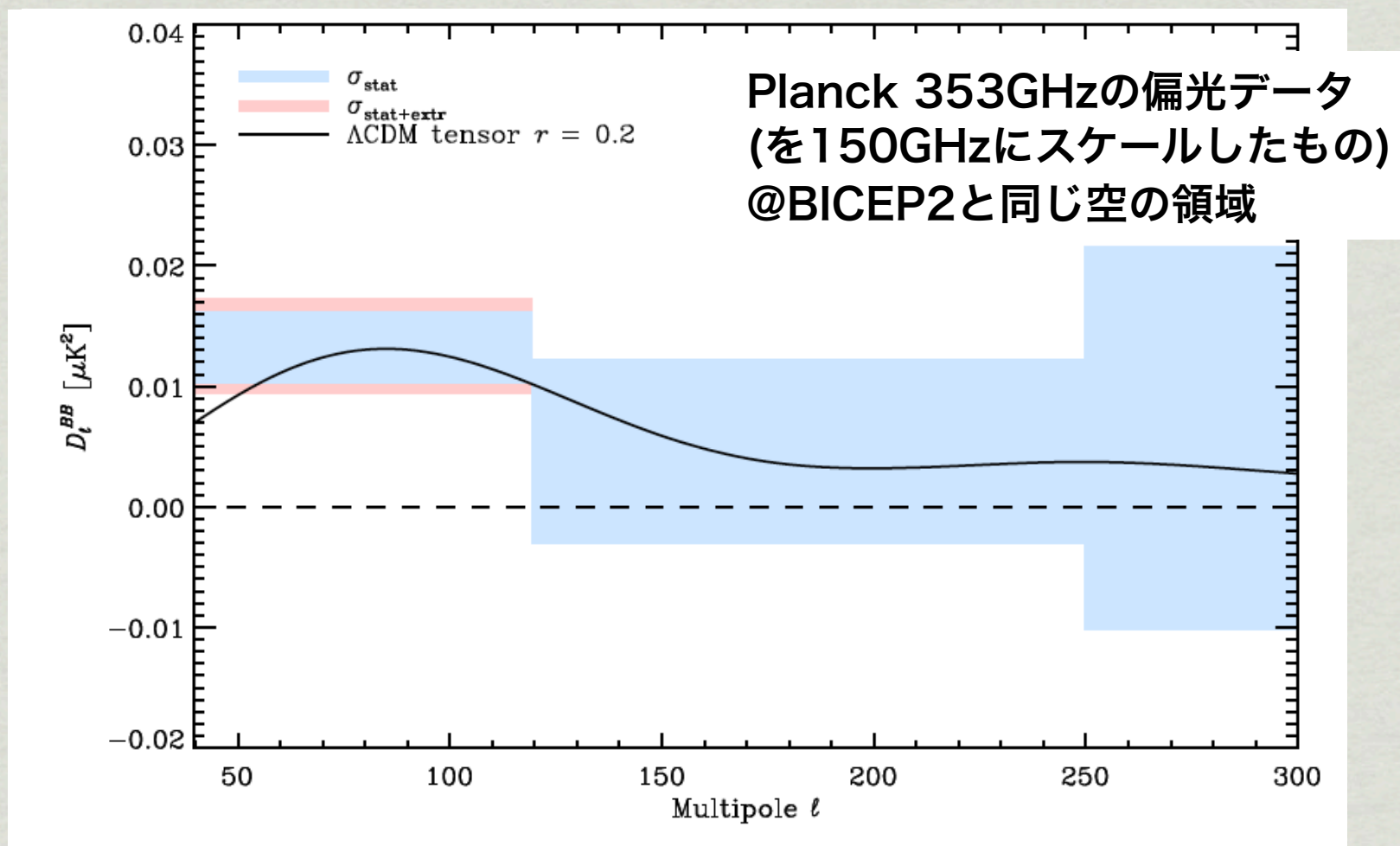
ESLAB 2013 (赤外線背景放射込み)

1405.0871 (赤外線背景放射の寄与は除いてある)

- Planckが新しいダスト偏光(割合= P/I)のマップを最近リリース
 - 偏光強度が増えている様に見えるが、以前のマップは赤外線背景放射(CIB)の寄与も込みのマップ
 - * CIBは偏光していないので、見かけの偏光割合は低く見えていた
 - BICEP2はDustの寄与を少なめに見積もっていた可能性有り

Dustに関する最新結果

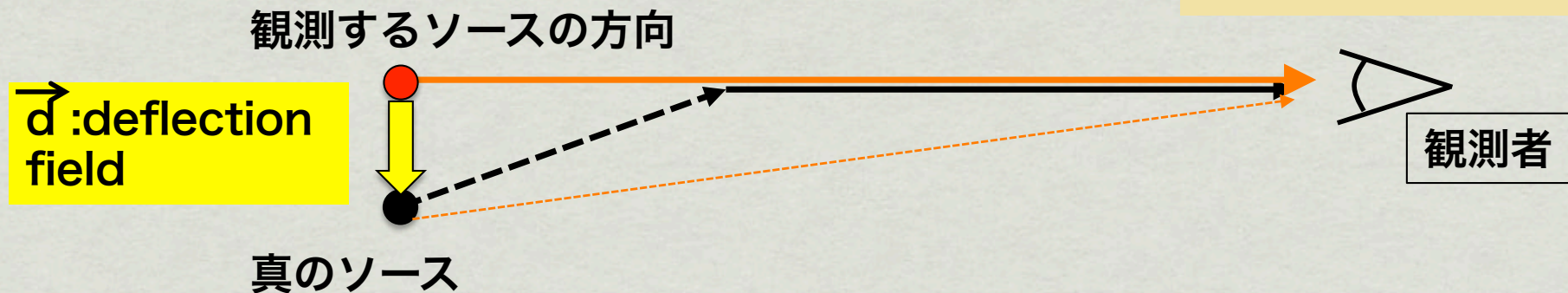
(arXiv:1409.5738)



BICEP2の観測した信号($r \sim 0.2$)は前景放射で説明可能

多点相関による重力レンズ解析

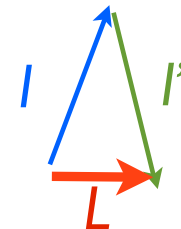
POLARBEAR



CMBに見る重力レンズの影響

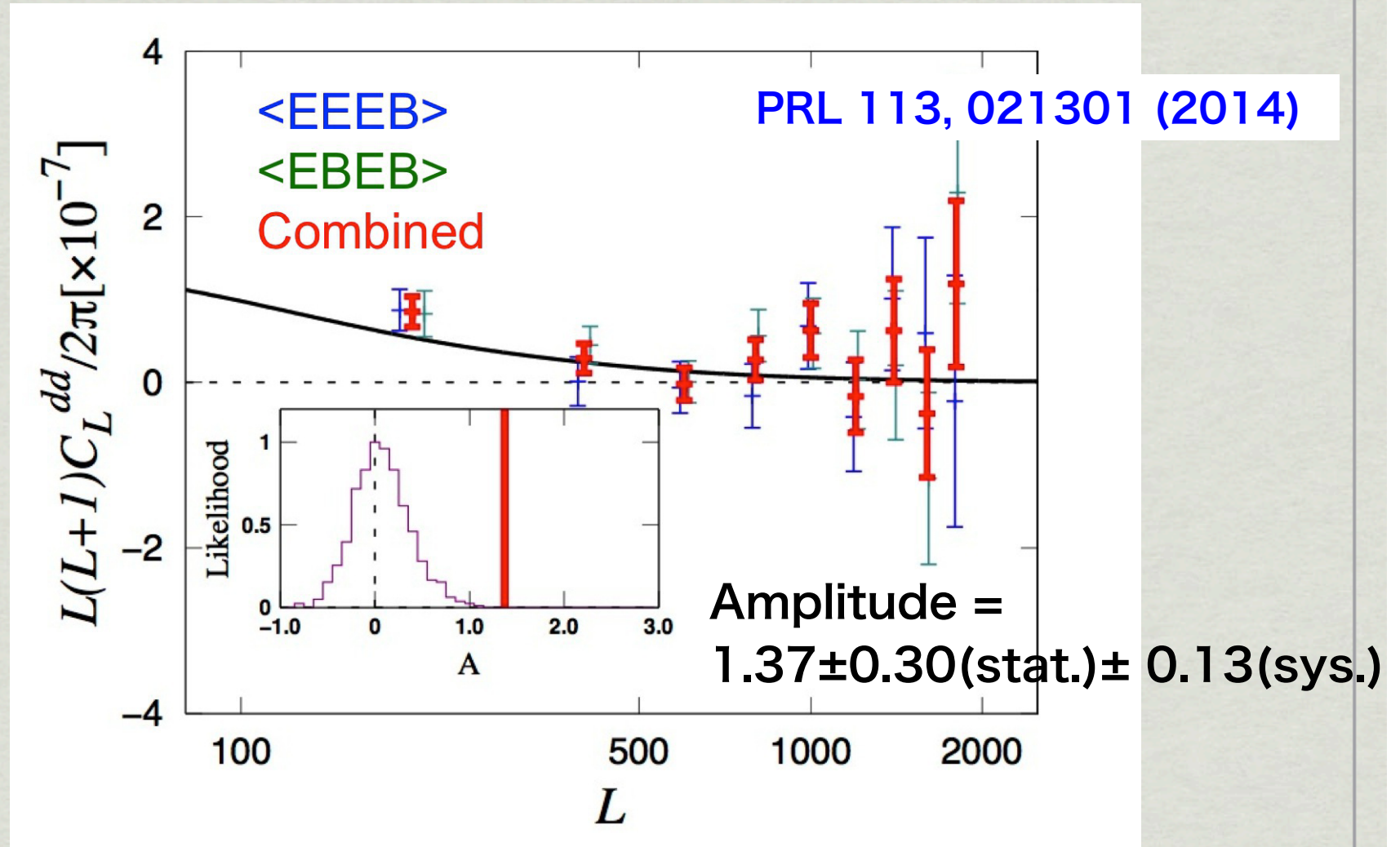
1. EからBモードができる (対称な図形を歪んだレンズ見ると非対称が生まれる)
2. いろんな波数のBができるので、違う波数のEとBに相関ができる。

$$\underline{d_{EE}(L)} \propto \sum_l \underline{E(l)} \underline{E(l')}$$
$$\underline{d_{EB}(L)} \propto \sum_l \underline{E(l)} \underline{B(l')}$$



(Hu, Okamoto, 2002)

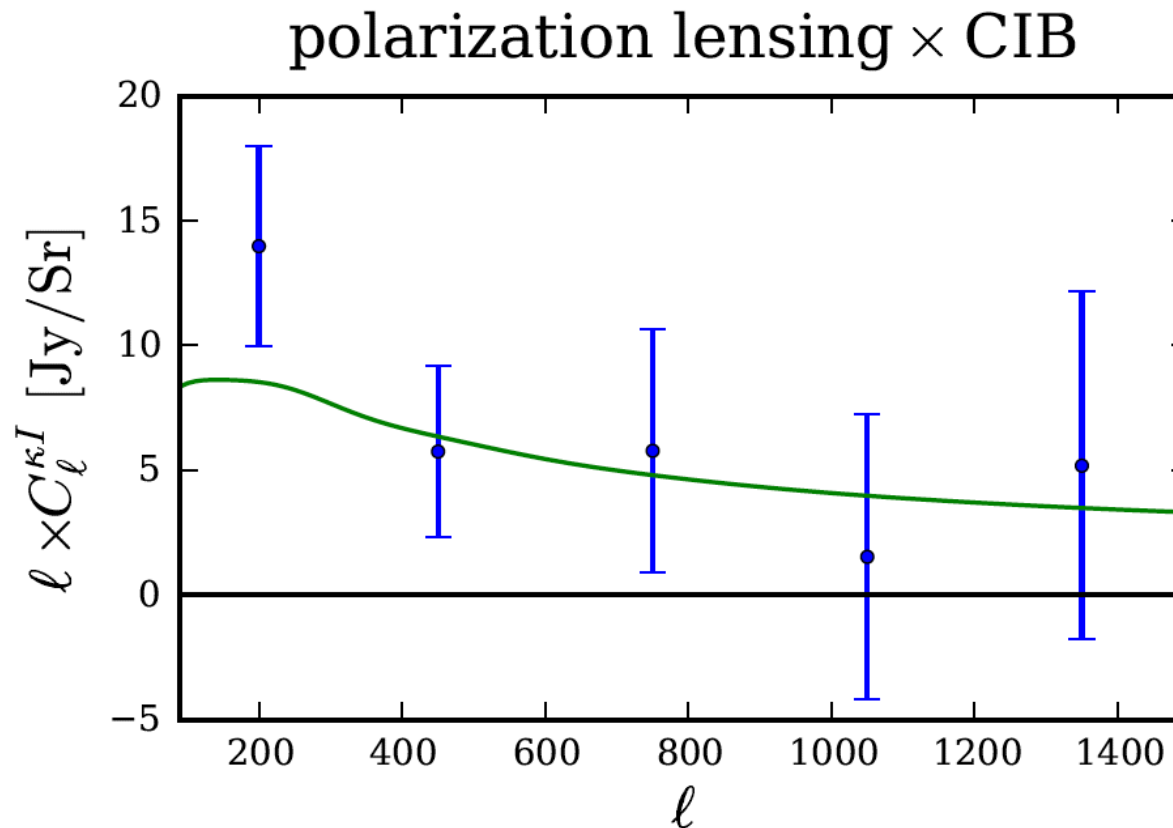
Lensing Power Spectrum (C_L^{dd})



CMB偏光データのみを用いた初の重力レンズ効果の観測
(C_l^{BB} と合わせて 4.7σ)

CMB-CIB correlation

PRL 112, 131302 (2014)



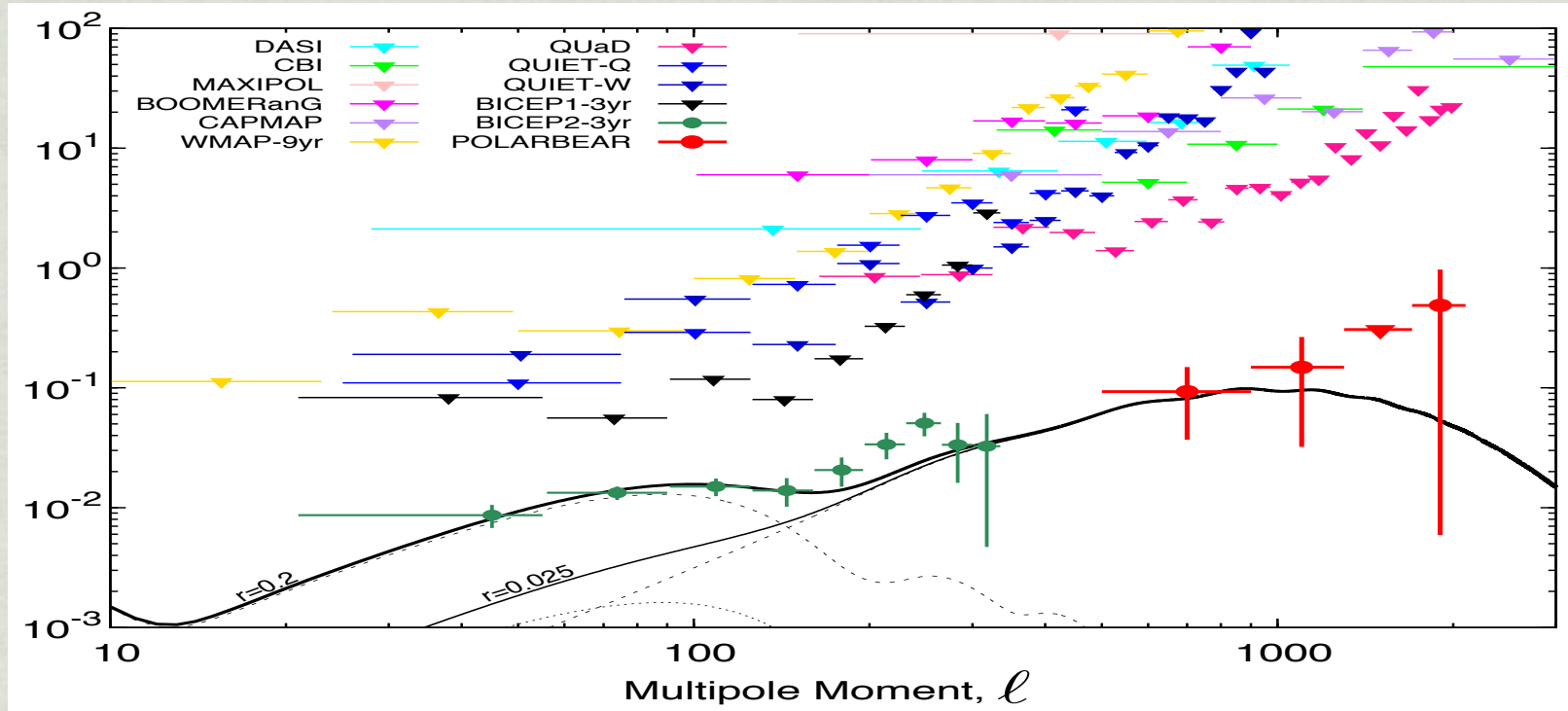
$$\frac{d_{\text{EB}}}{d_{\text{EE}}} \times \text{CIB}$$

CIB: Herschel
~500 μm の観測

CIBはmatterの良い
トレーサー ($z=1\sim3$)
--> うまく波長帯を選
ぶとCMBと相関が見
える。

- 4.0σ の信頼度で相関を確認
- SPTpolの結果(Hanson et al, 2013) の結果を確認

偏光観測の今後の展望



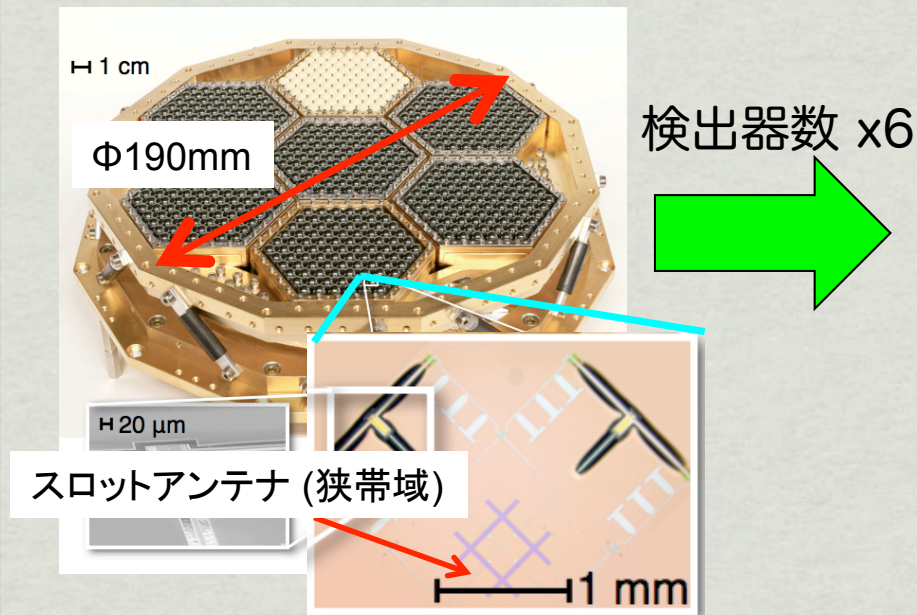
高感度観測 (>10000検出器) に加えて

- 複数の周波数帯域で観測する (95, 150 + >200GHzがベター)
- 広い角度スケールが測れる ($\sim 50 < \ell < \sim 2000$ まで一気に)
- 広い空 (地上ではチリがベスト)

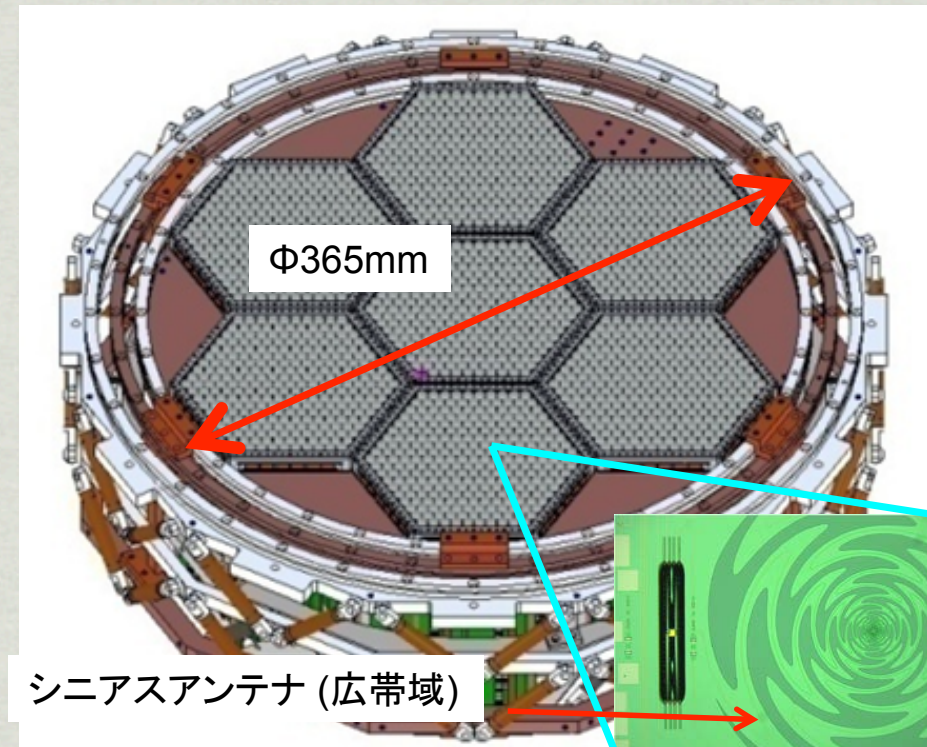
POLARBEAR-2 & Simons Array ! 49

POLARBEAR-2 レシーバシステム

POLARBEAR-1 焦点面



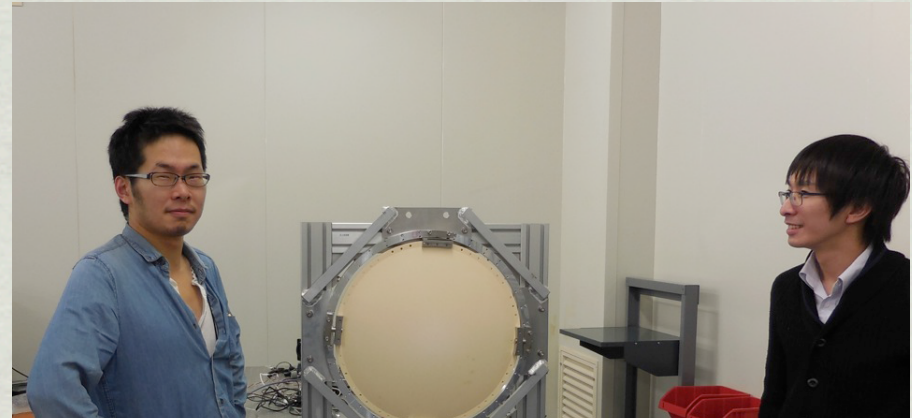
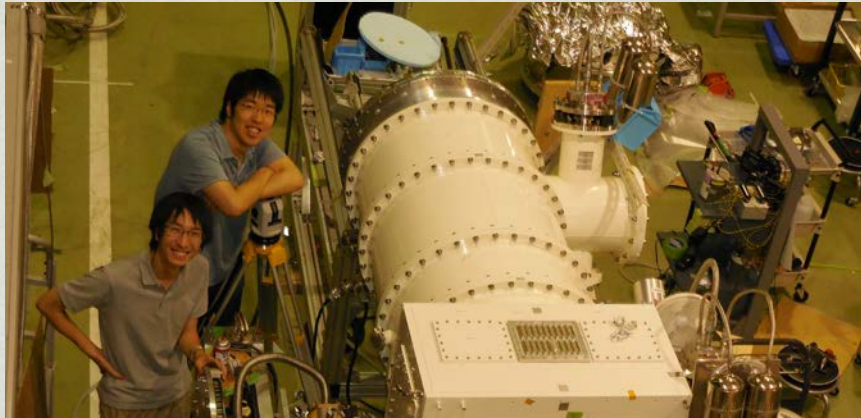
POLARBEAR-2 焦点面



- $\Phi 365$ の焦点面 (単一の焦点面としてはCMB史上最大)
- 7588個のボロメータ (POLARBEAR-1の6倍の感度)
- スロット → シニアスアンテナで多色化 (95/150GHz同時観測)

2015年度中の観測開始を目指し、KEKにて開発中！

POLARBEAR-2 レシーバ



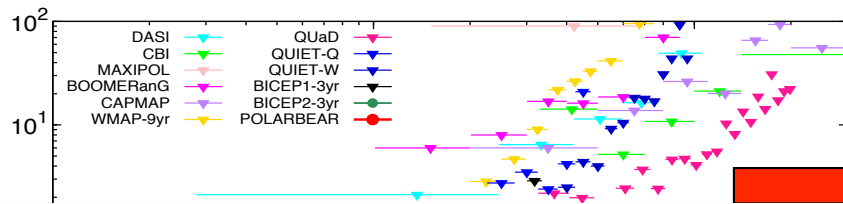
今秋からインテグレーション作業を本格的に開始。
来年中にチリへの移設と望遠鏡への設置を目指している。
日本初のCMB観測装置の開発とBモードに興味が出て来た方、
参戦お待ちしております。

が中心となって準備を進める初のCMB偏光観測装置
(になるはず)。

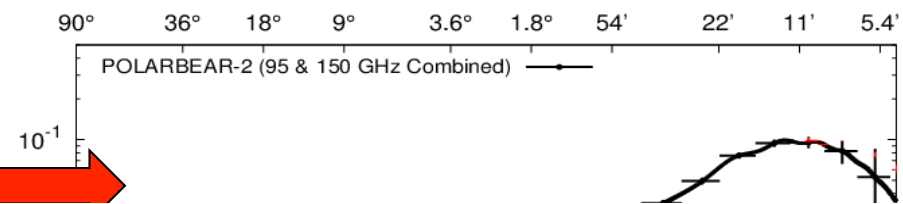


期待される結果(統計感度)

偏光Bモード観測の現状



PB2で期待される観測精度

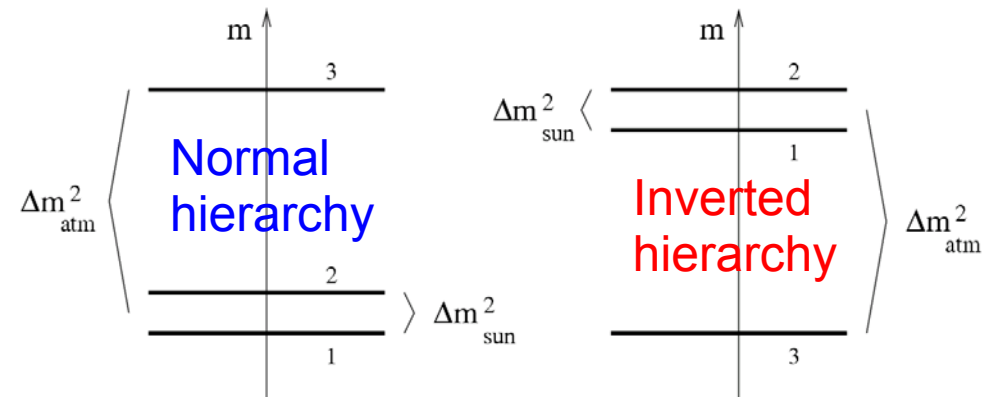


ニュートリノ振動

$$\Delta m_{\text{atm}}^2 \sim 10^{-3} \text{ eV}^2$$

$$\Delta m_{\text{sun}}^2 \sim 10^{-5} \text{ eV}^2$$

$$\rightarrow \Sigma m_\nu > 0.10 \text{ (IH)} \text{ or } 0.05 \text{ eV (NH)}$$

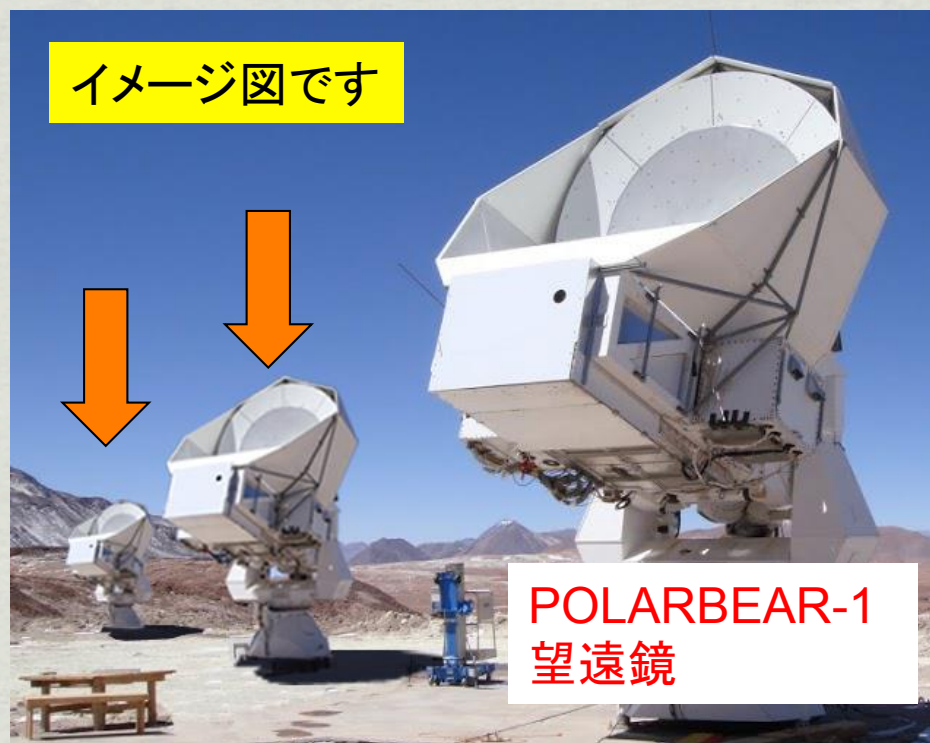


• Bモードスペクトルの精密測定

- σ (テンサースカラー比: r) $< 0.01 \iff r = 0.20^{+0.07}_{-0.05}$ (BICEP2)
- σ (ニュートリノ質量和) $< 0.1 \text{ eV}$

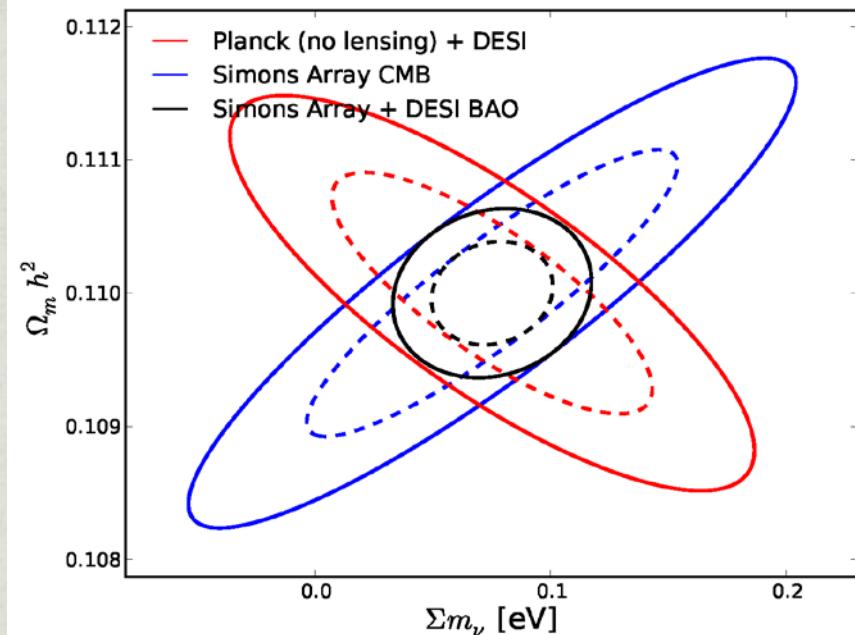
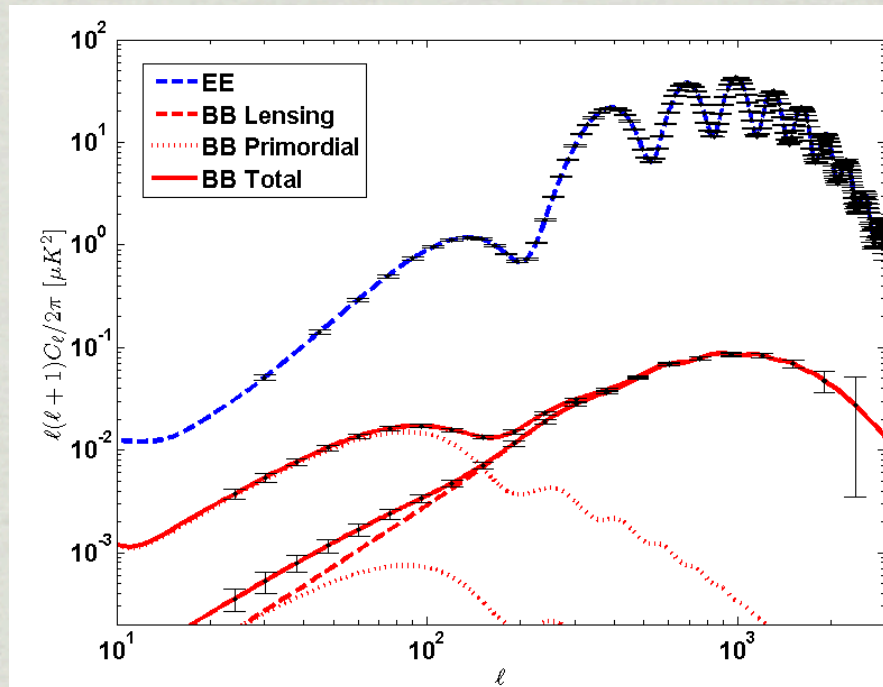
注) 前景放射と系統誤差は考慮されていないので、あくまで最終ゴール

Simons Array 計画



- 新しいレシーバシステム(POLARBEAR-2)を開発し、望遠鏡3台体制で、95/150/220GHz帯域の観測を行う。
- (地上でほぼ究極的な)Bモードスペクトルの測定

期待される結果 (まだ皮算用です)



- Eモード/Bモードスペクトルの精密測定
 - $r=0.01$ を 5σ で検出可能。→ モデルの選別が可能になる
 - ニュートリノ質量和: 19meV @ 1σ w/ Planck, DESI

注) 前景放射と系統誤差は考慮されていないので、あくまで最終ゴール

LiteBIRD - Lite (Light) Satellite for the Studies of B-mode Polarization and Inflation from Cosmic Background Radiation Detection

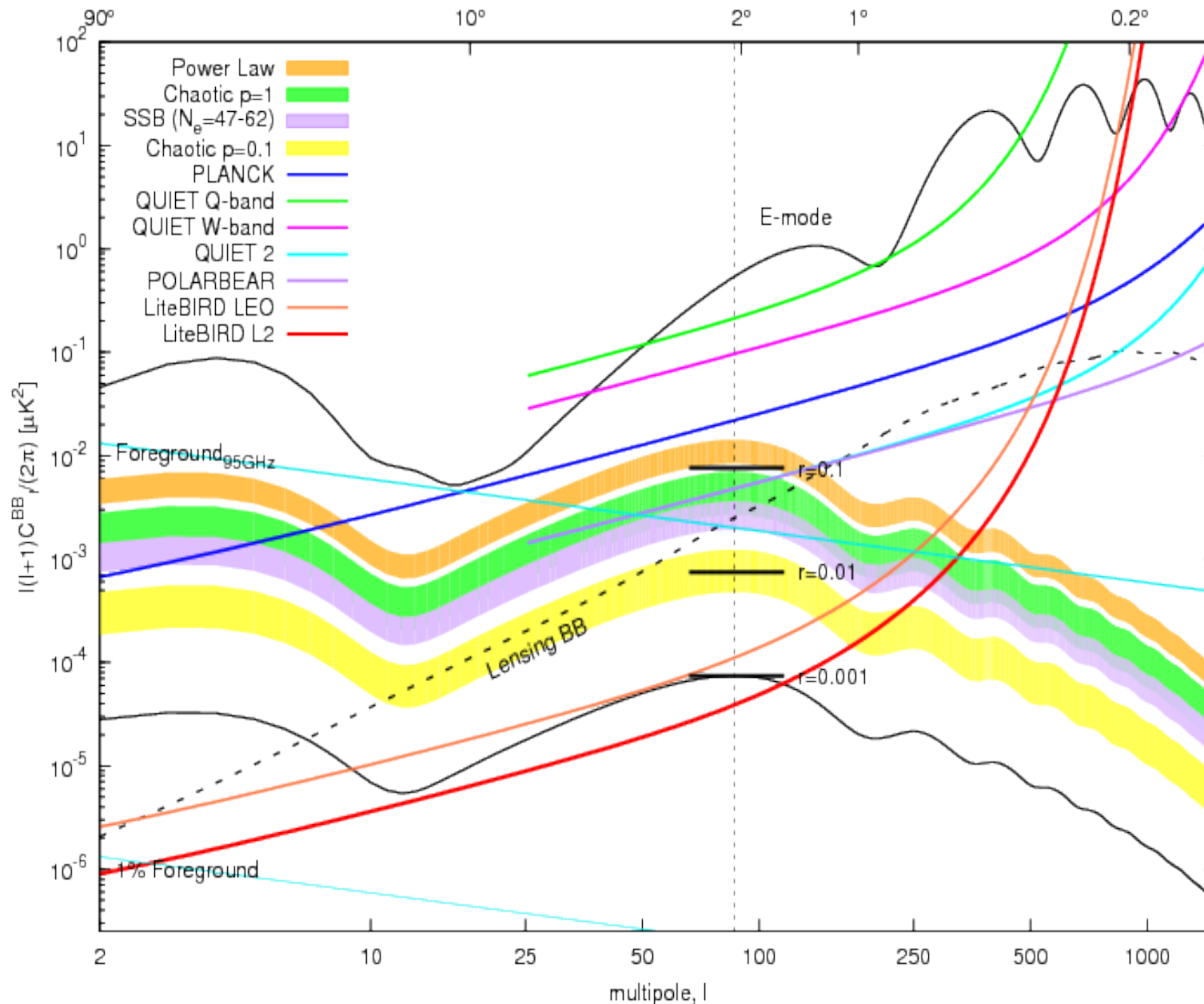
戦略

- 緊急
- 小型
- 準備
- X線

衛星

- 光学系
- 回転
 - クロス
- 副鏡 (4ケル)

- バス
- デ
 - 制
 - 通



けて獲得
をおこなう

ド観測
50GHz

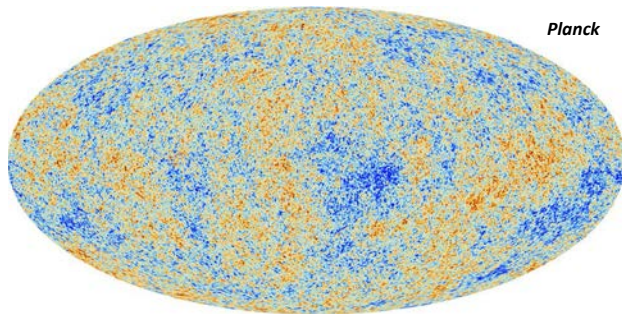
検討中)

まとめ

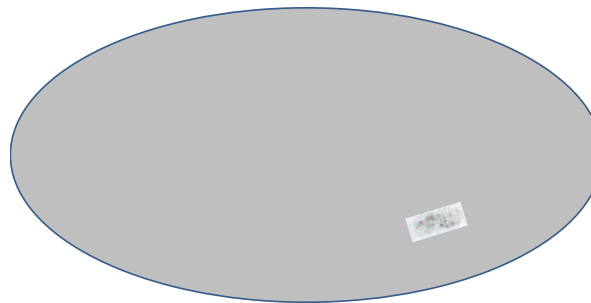
- 偏光Bモードを用いた宇宙論の時代に突入！

Three fundamental maps of our universe

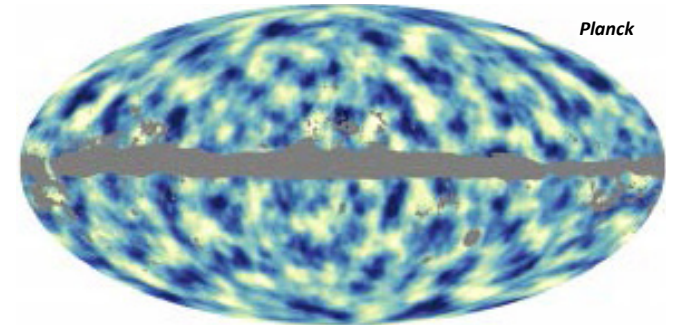
Map1 : スカラー揺らぎ



Map2 : テンサー揺らぎ



Map3 : deflection field



- Keck Array, SPTpol, BICEP3
- 日本グループは PB-2/Simons array (小角度) + LiteBIRD(大角度) の2本立てで勝負。

応援よろしくお願いします