

Cosmic Microwave Background (CMB) Experiments

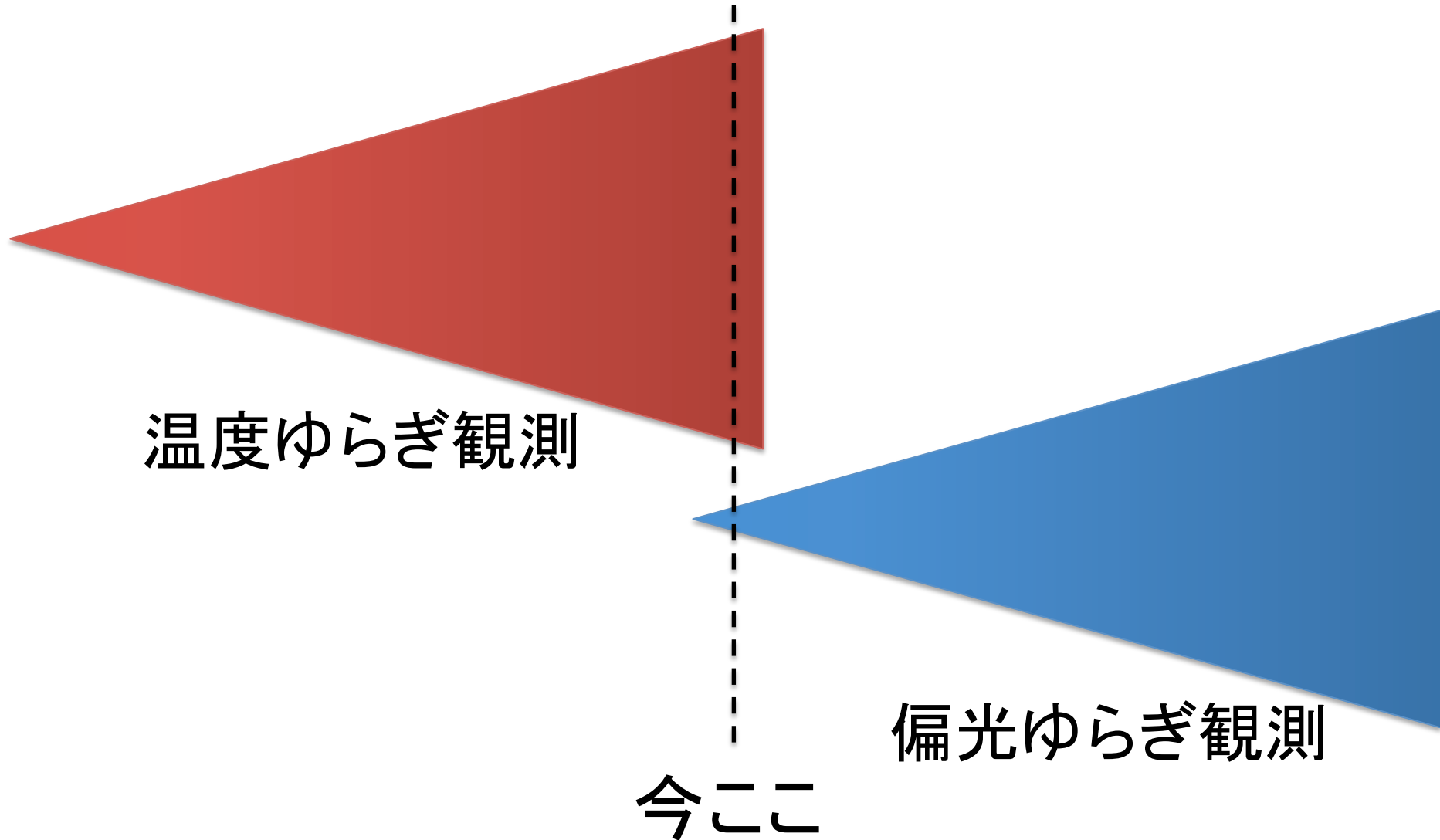
POLARBEAR

LiteBIRD

羽澄 昌史

高エネルギー加速器研究機構/
東京大学カブリ数物連携宇宙研究機構/
総合研究大学院大学

CMB観測の進展



素粒子物理学の進展2013
2013/08/06 @ 基研

CMB観測を用いた観測的宇宙論の現状
PLANCKの結果を中心に

市来淨與 (名古屋大学 KMI)



本講演は続編のようなもの

最近の成果 (数字はarXiv番号)

全て偏光観測

- 1303.5062他: Planck衛星のCMBゆらぎ初期観測
- 1307.5830: SPTpolのCMB-CIB相関によるCMB B-mode検出
- 1312.6645: POLARBEARのCMB-CIB相関によるCMB B-mode検出
- 1312.6646: POLARBEARのCMBのみによるB-mode検出
- 1403.2369: POLARBEARのB-mode自己相関パワースペクトル
- 1403.3985: BICEP2による原始重力波の「発見」
- 1405.0871: Planck (353GHz) ダスト前景放射の初期観測
- 1405.5524: ACTpolによる高精度E-mode観測
- 1405.5857: Mortonson-Seljak, BICEP2結果を前景放射で説明
- 1405.7351: Flauger-Hill-Spergel, BICEP2結果を前景放射で説明



10月に(遅くとも11月中には)
新しい観測結果が出る予定

- 1) 温度揺らぎ全データ解析結果
- 2) 偏光揺らぎ初期結果！

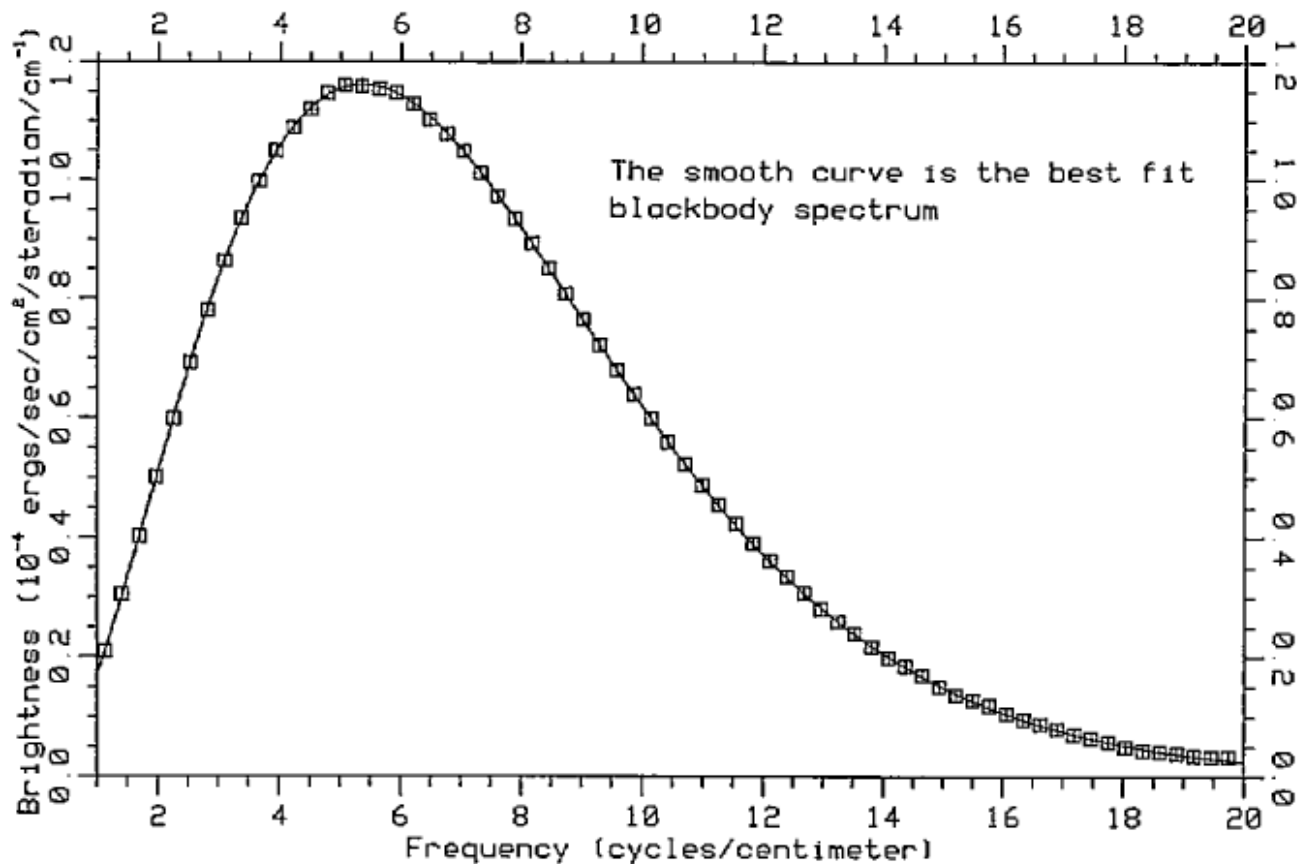
目次

1. 温度ゆらぎ観測サマリ
2. 偏光ゆらぎを用いた原始重力波観測原理
3. BICEP2の観測結果と前景放射の最新情報
4. 重力レンズBモードとPOLARBEAR
5. 今後の展望とLiteBIRD

1. 温度ゆらぎ観測サマリ

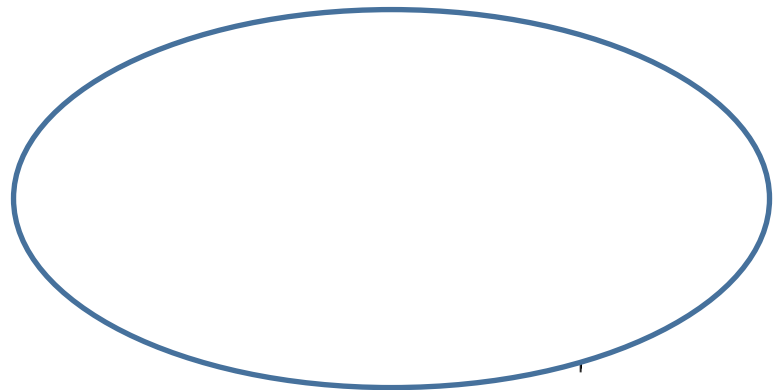
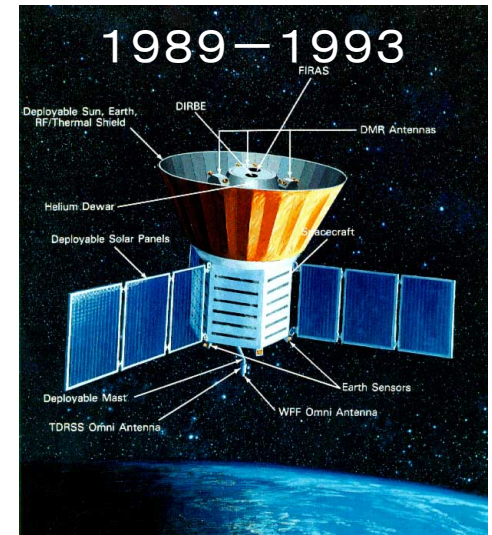
宇宙論パラメータについては
佐藤先生の講演を参照してください

CMBフォトン

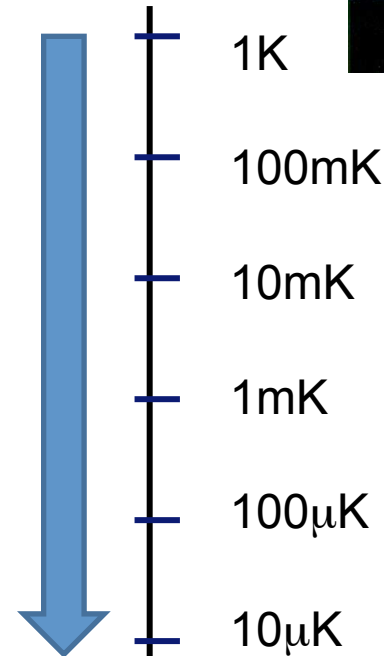
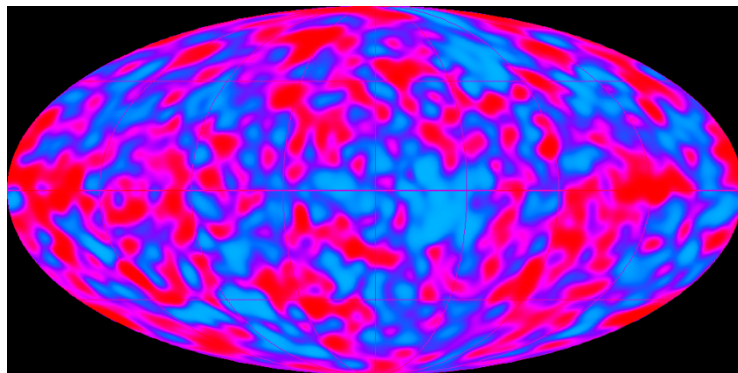


- (2.725 ± 0.002) Kの黒体放射 (160GHzでピークを持つプランク分布)
- ~ 400 個/cm³

COBEによる 温度ゆらぎの発見



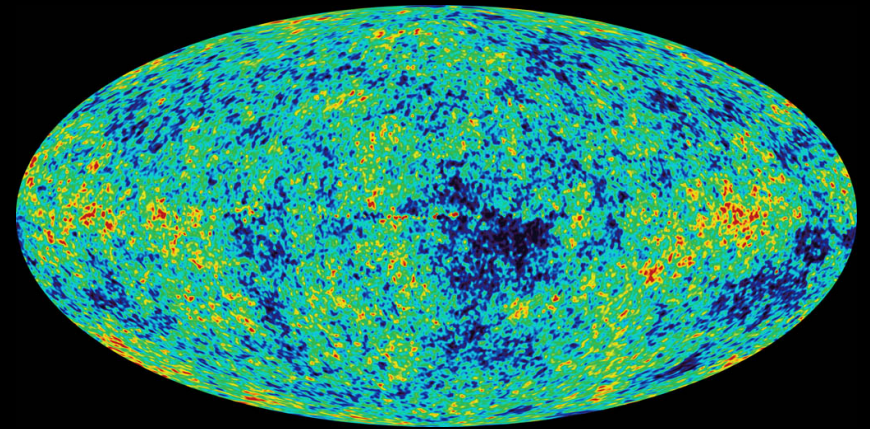
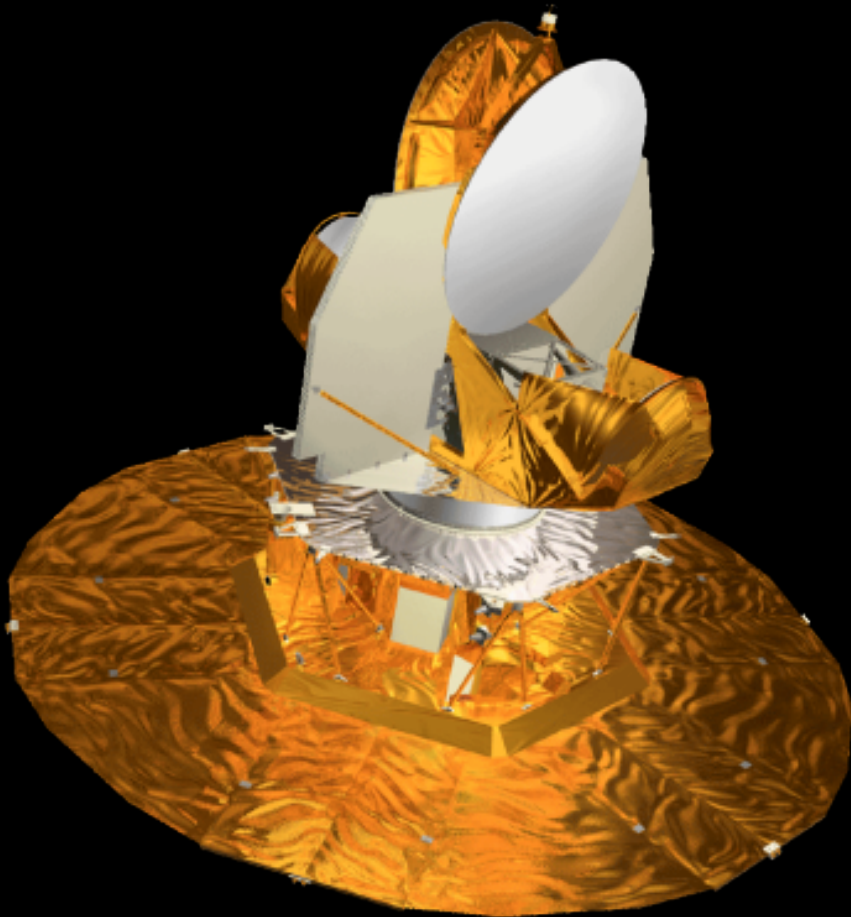
$\Delta T = 0K$



平均(と
ダイポール成分)
を差し引いた残り
の分布

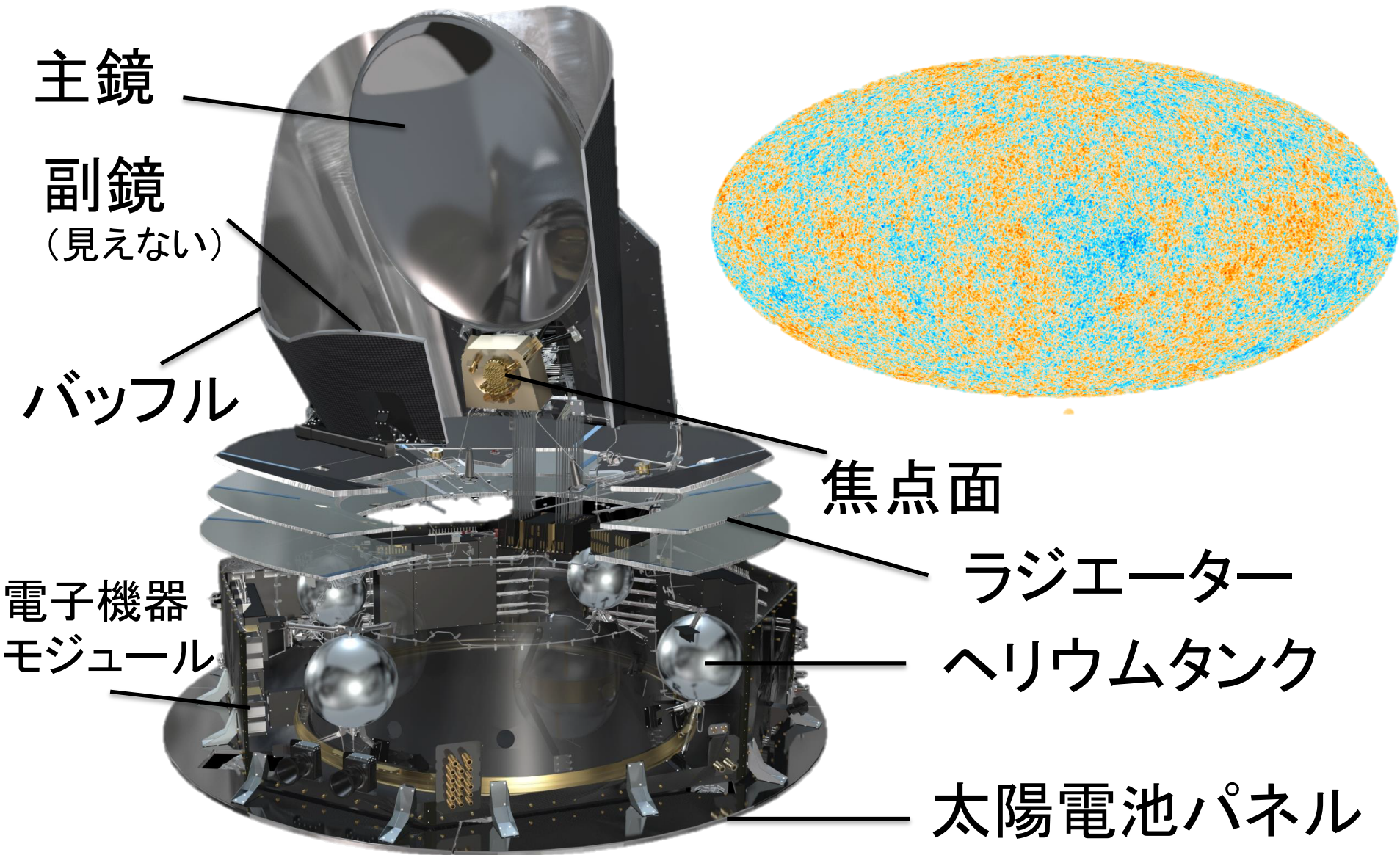
30マイクロケルビン程度の
むら(ゆらぎ)がある

WMAP



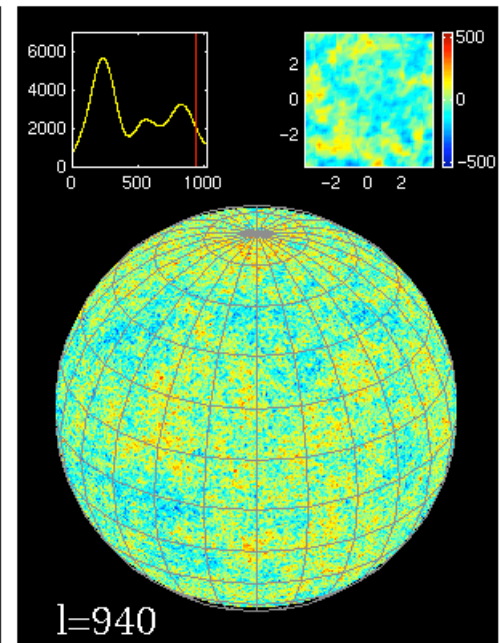
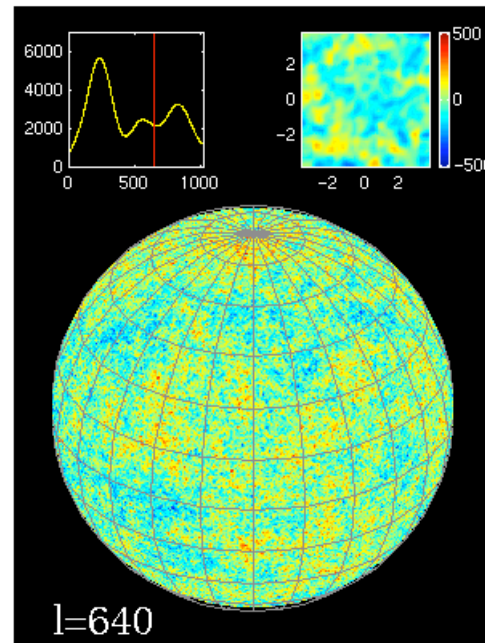
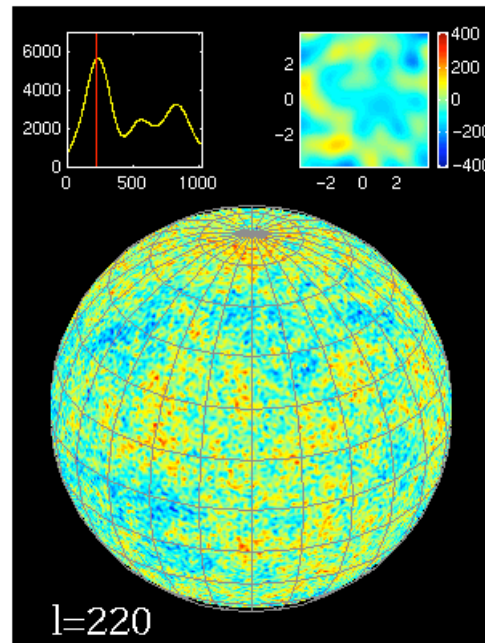
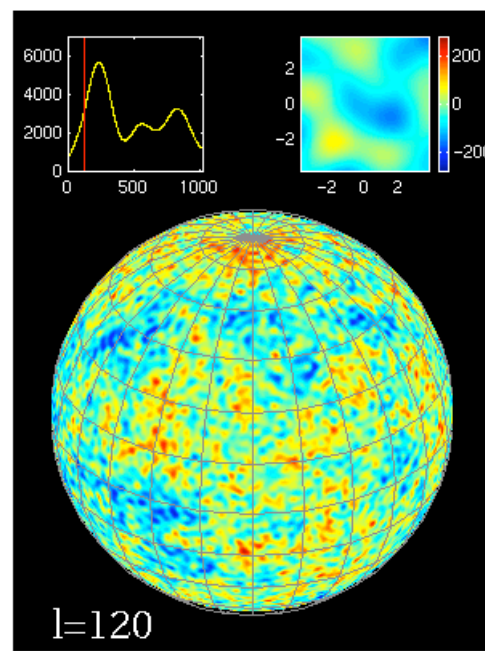
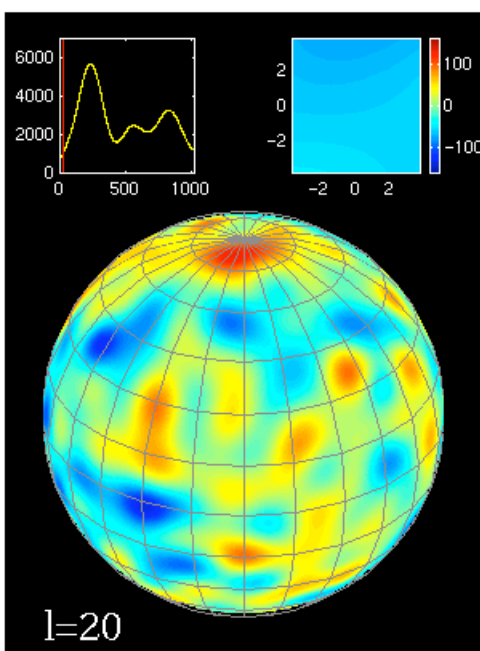
2001年打ち上げ
2010年8月観測終了

Planck衛星 (2013年に初期観測結果発表)



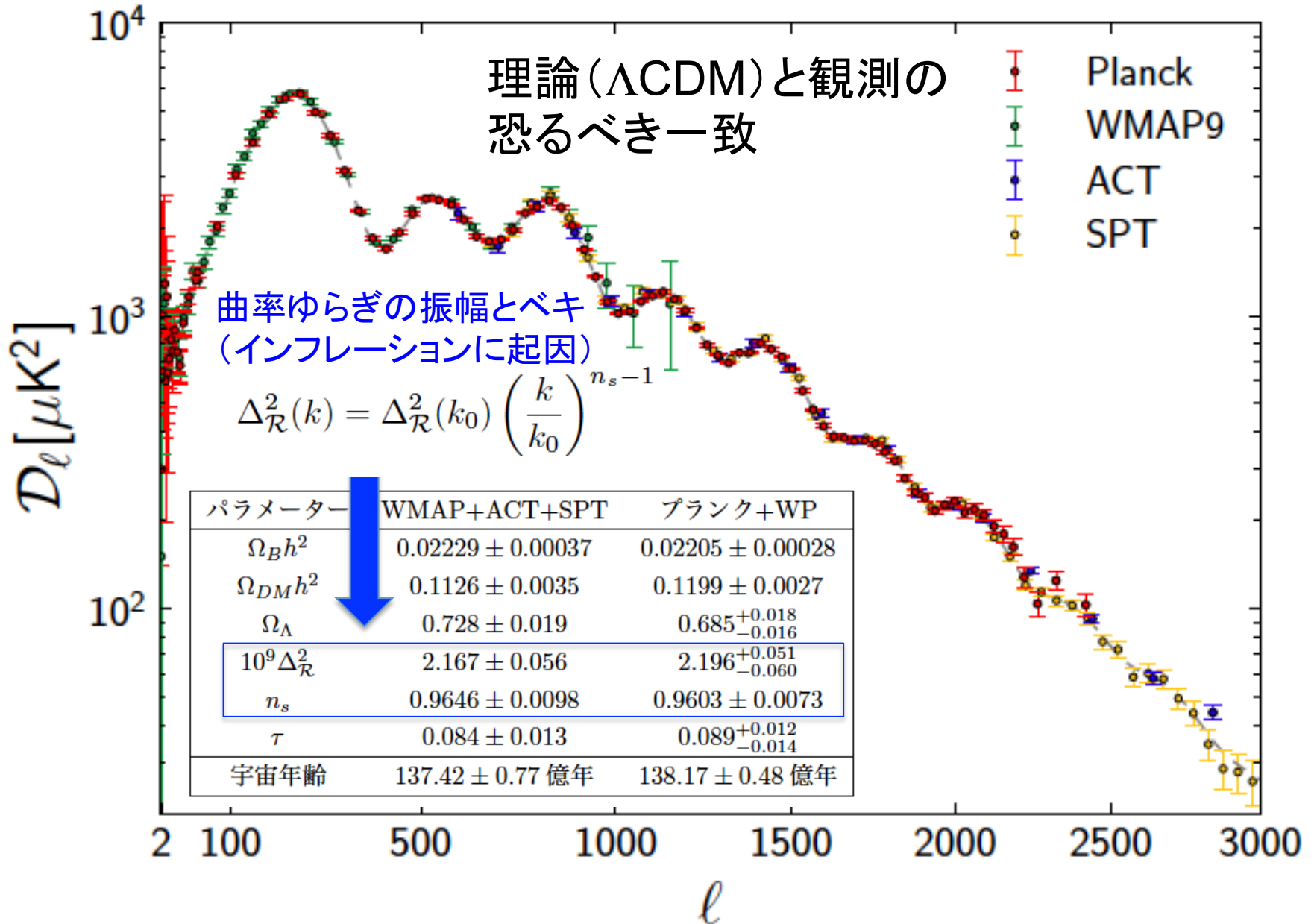
CMBゆらぎの スペクトル解析

天空は2次元球面だから
球面調和関数で展開

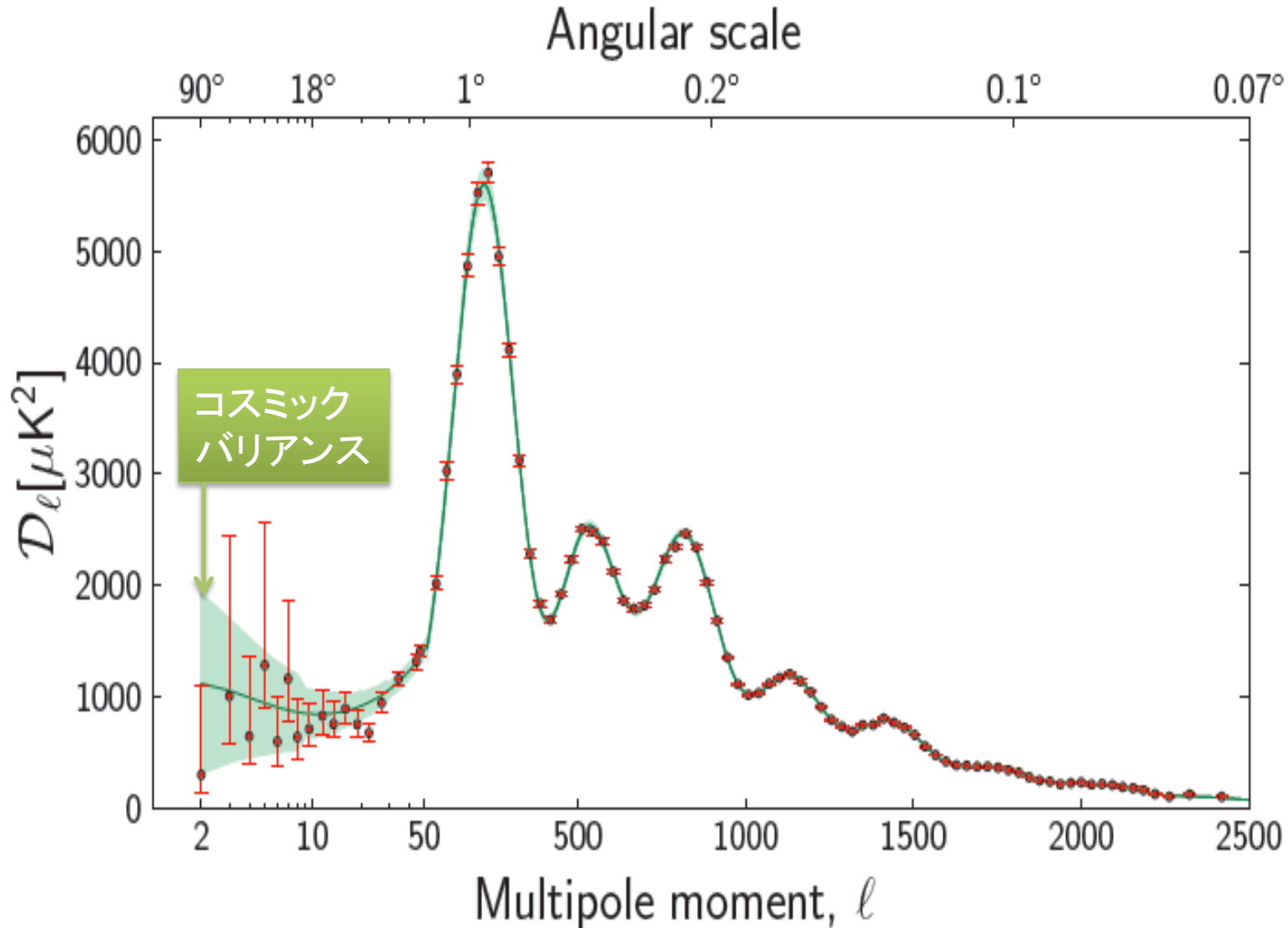


By Clem Pryke

地上観測も含めたCMB温度揺らぎ



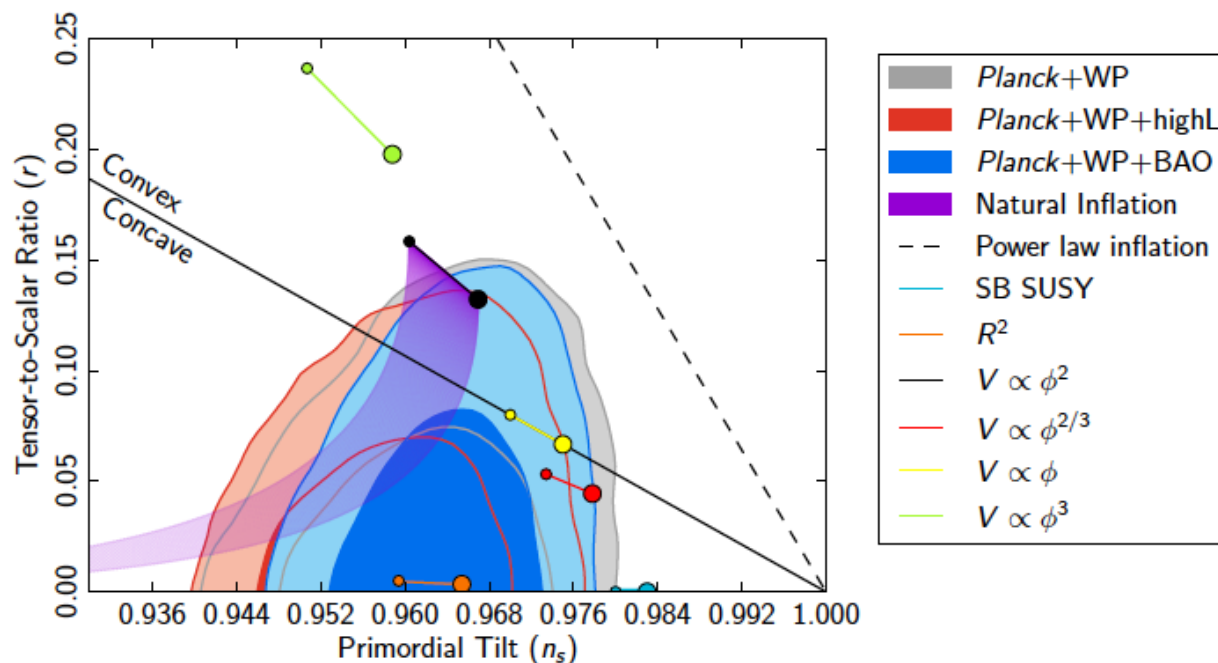
Planckによる温度ゆらぎ観測



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% C.L.)

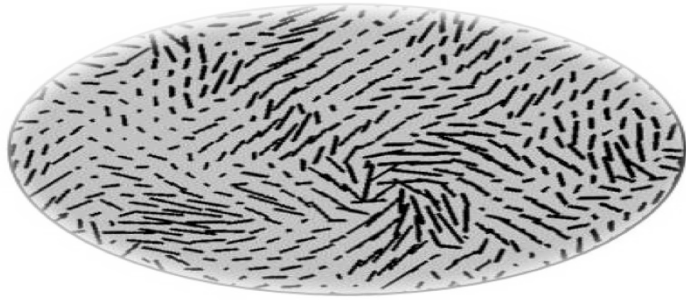


Cosmic Varianceのため、温度観測によるこれ以上の r 決定精度向上は期待できない

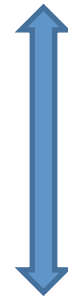
2. 偏光ゆらぎを用いた 原始重力波観測原理

ー CMB偏光マップは原始重力波の記録媒体

偏光の二通りの表し方

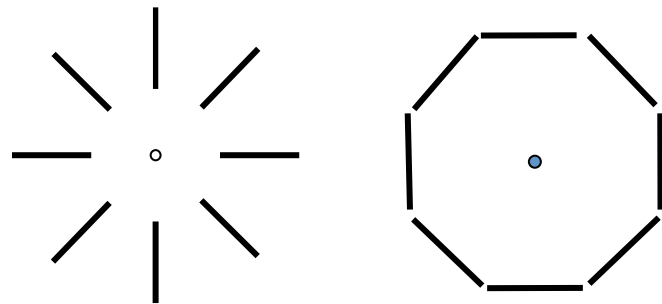


棒の長さとか向きで表す

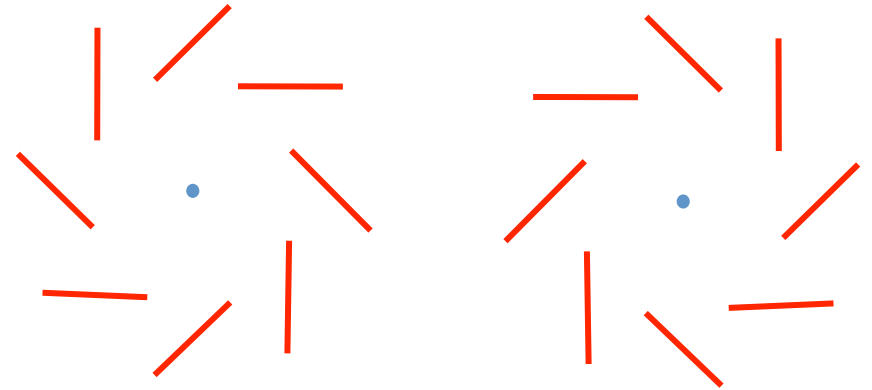


どちらも自由度2だから

「湧き出し・吸い込みの成分」と「**回転の成分**」でも表せる

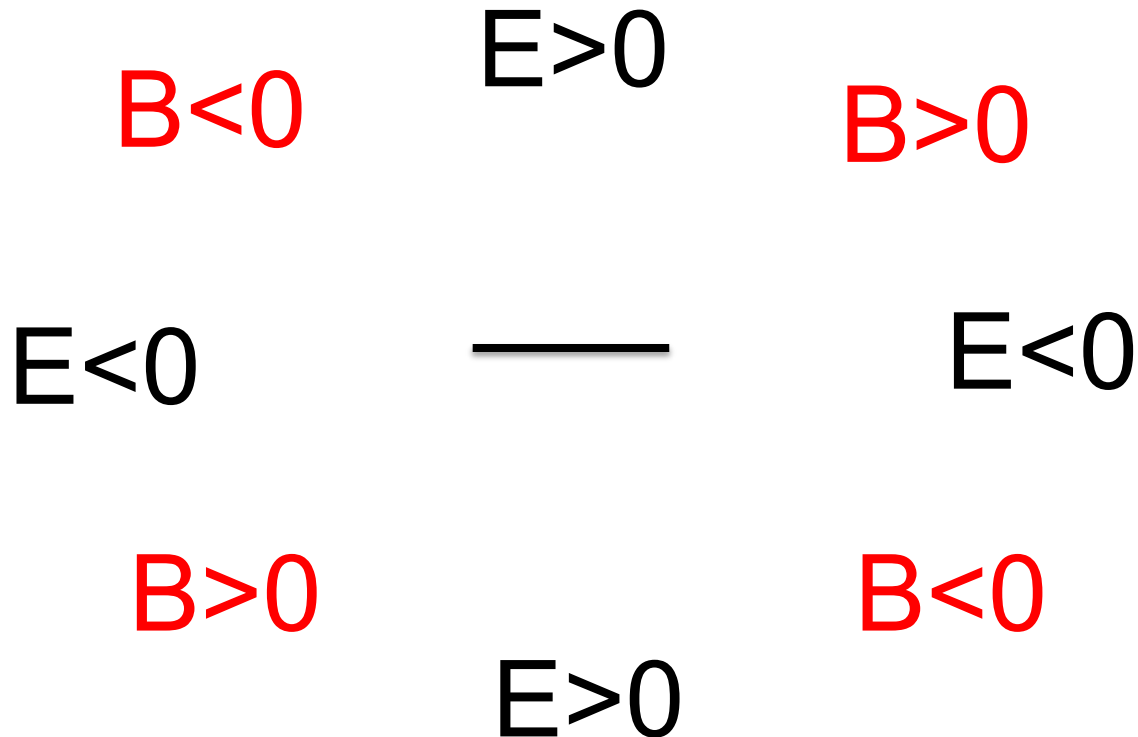


E-mode

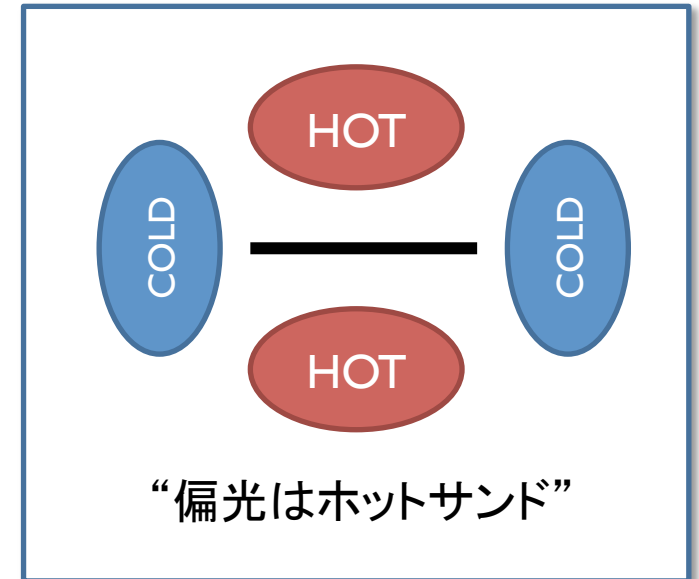
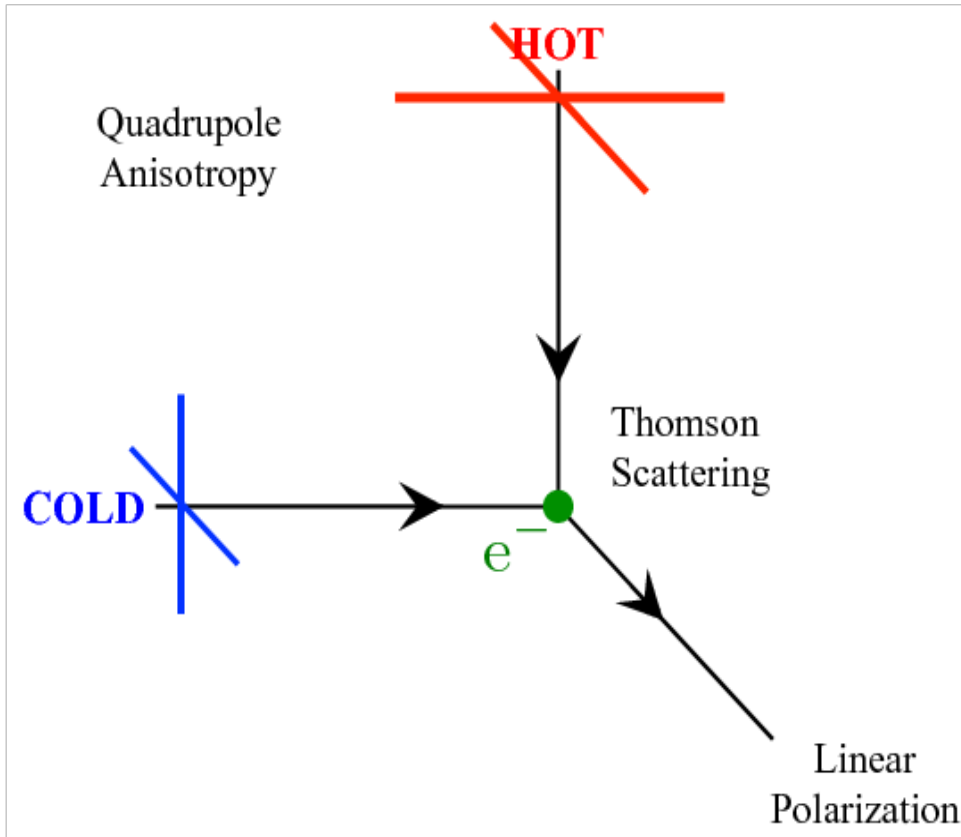


B-mode

偏光EモードとBモード



CMBのローカルな温度分布と偏光の生成



Courtesy of Wayne Hu

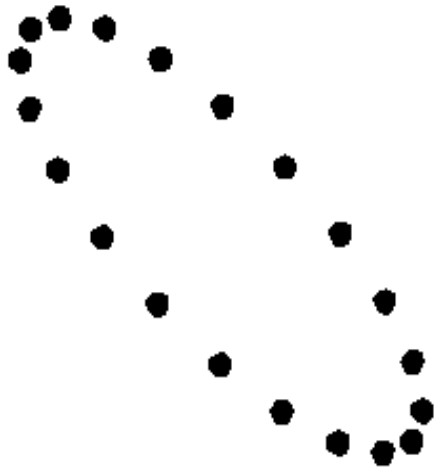
観測者

重力波のつくるHOT-COLD

$$g_{ij} = \begin{pmatrix} 1 + h_+ & h_\times & 0 \\ h_\times & 1 - h_+ & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$\ddot{h}_\alpha + 2\frac{\dot{a}}{a}\dot{h}_\alpha + k^2 h_\alpha = 0, \quad (\alpha = +, \times)$$

アインシュタイン方程式→波動方程式



空間が縮む = HOT
空間が伸びる = COLD

電子が感ずる輻射を球面調和関数で展開

四重極成分が偏光を生む

Y_l^m の直交性から、他の l では偏光を生じない

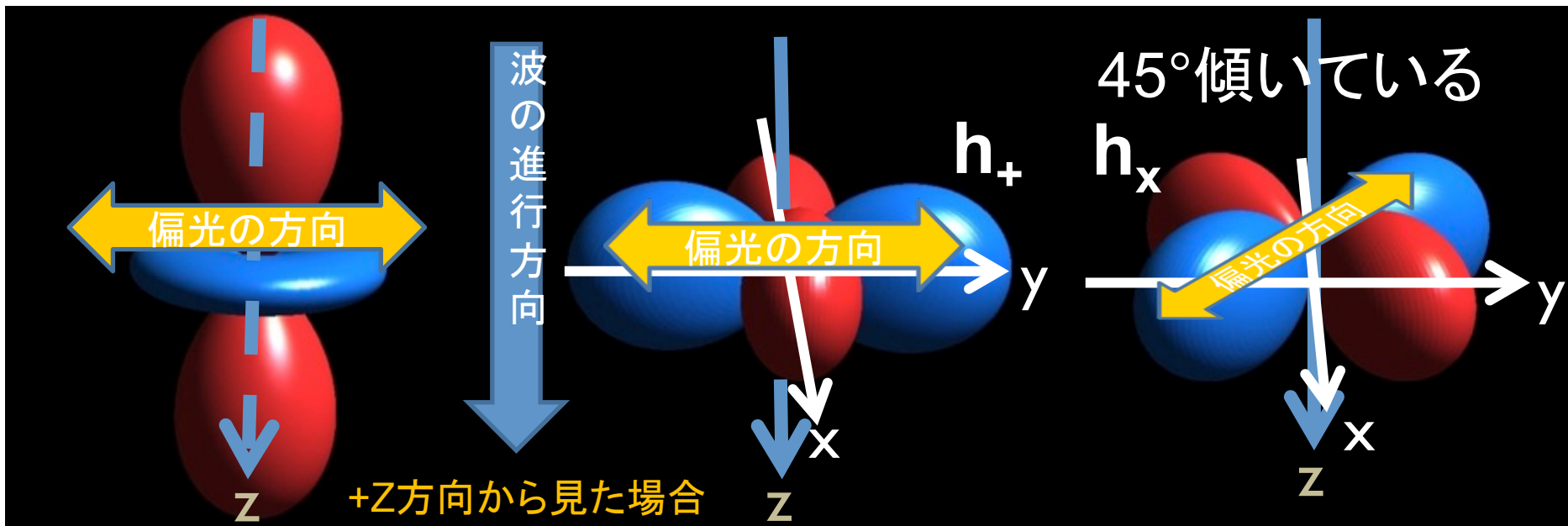
スカラー量の場合 $\Rightarrow Y_2^0$

テンサー量の場合 $\Rightarrow Y_2^m, m=\pm 2$ 直線偏光の場合は線形結合で以下の実部、虚部の様になる (h_+, h_x という)

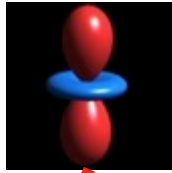
Y_2^0 (実)

$Y_2^{\pm 2}$ の実部

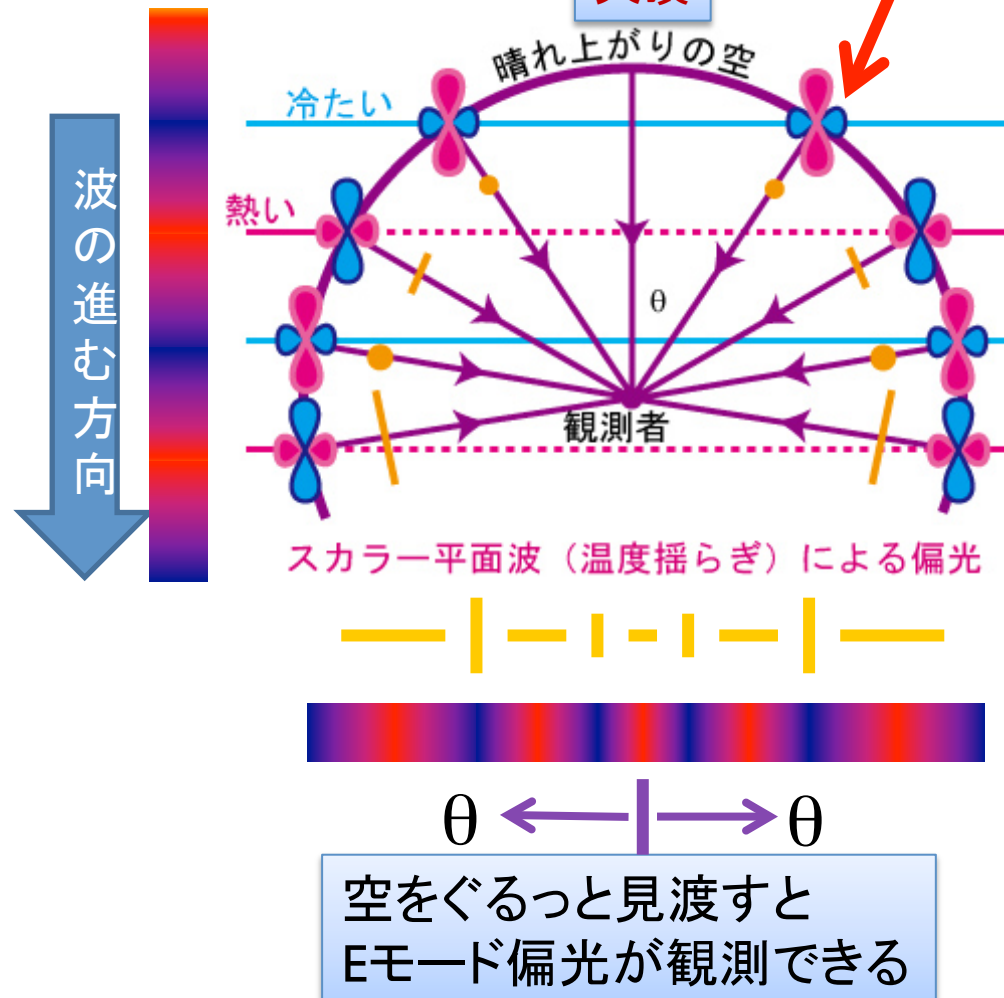
$Y_2^{\pm 2}$ の虚部



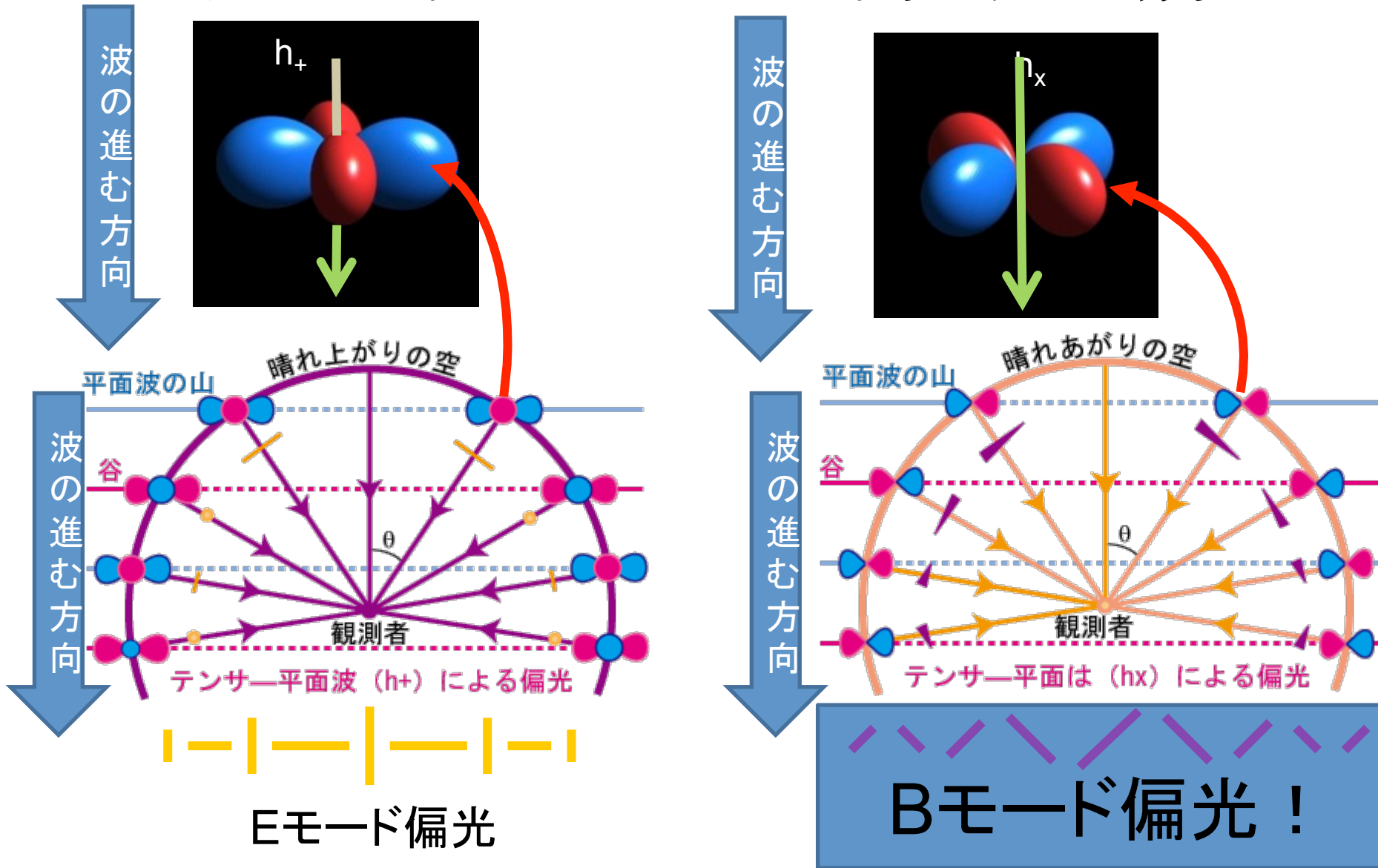
スカラー平面波による偏光



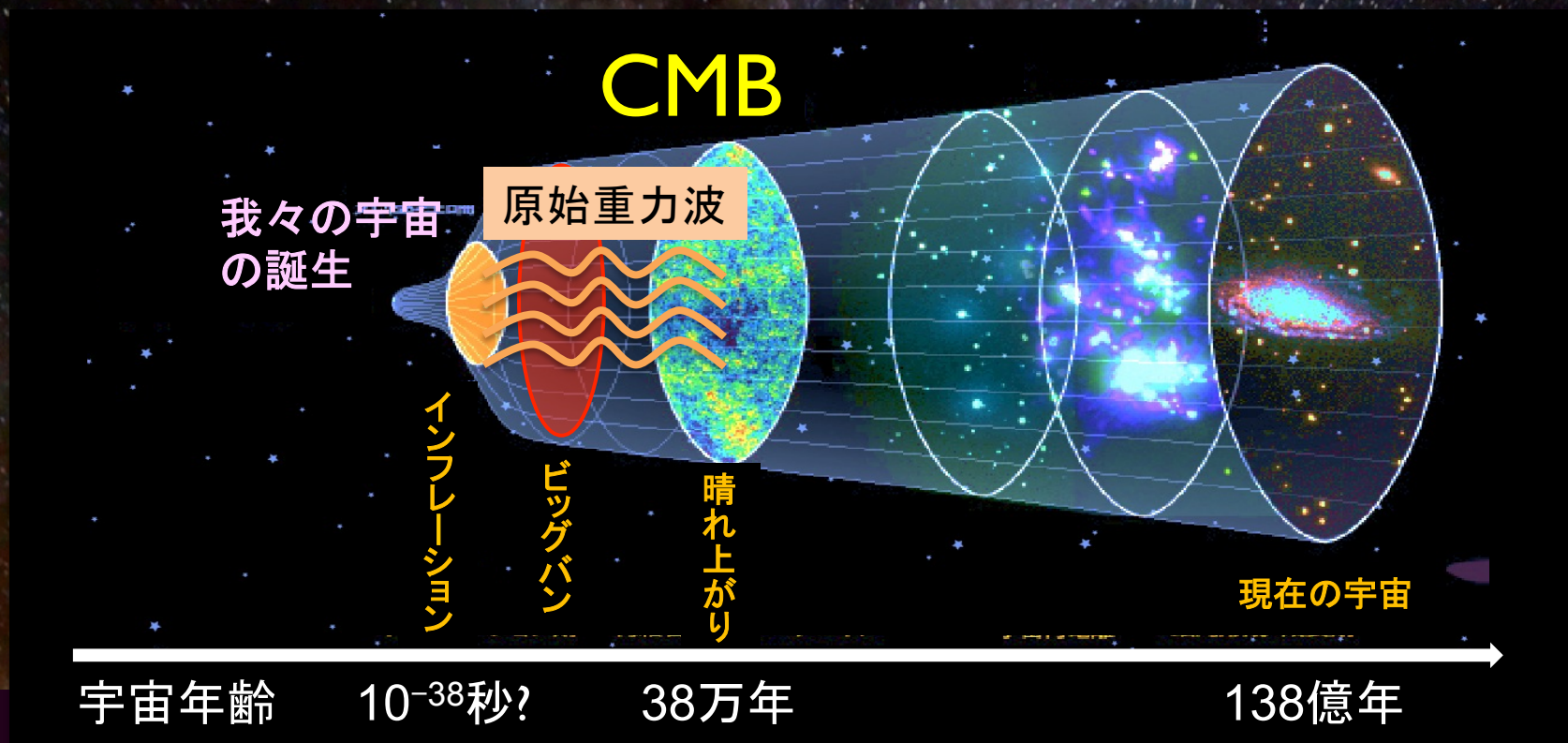
- 密度揺らぎはスカラー量
 - プラズマの疎密波
- 天頂から観測者に向かって来る平面波を考える
 - Eモード偏光を生ずる
 - 実際は全ての方向からの波を足し合わせる要あり



天頂から来るテンサー平面波の場合



インフレーションと原始重力波

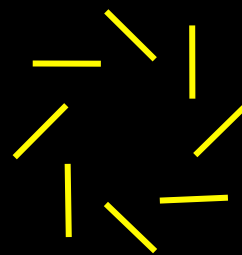


原始重力波はインフレーション仮説の最も重要な予言

CMBを用いた原始重力波の検出

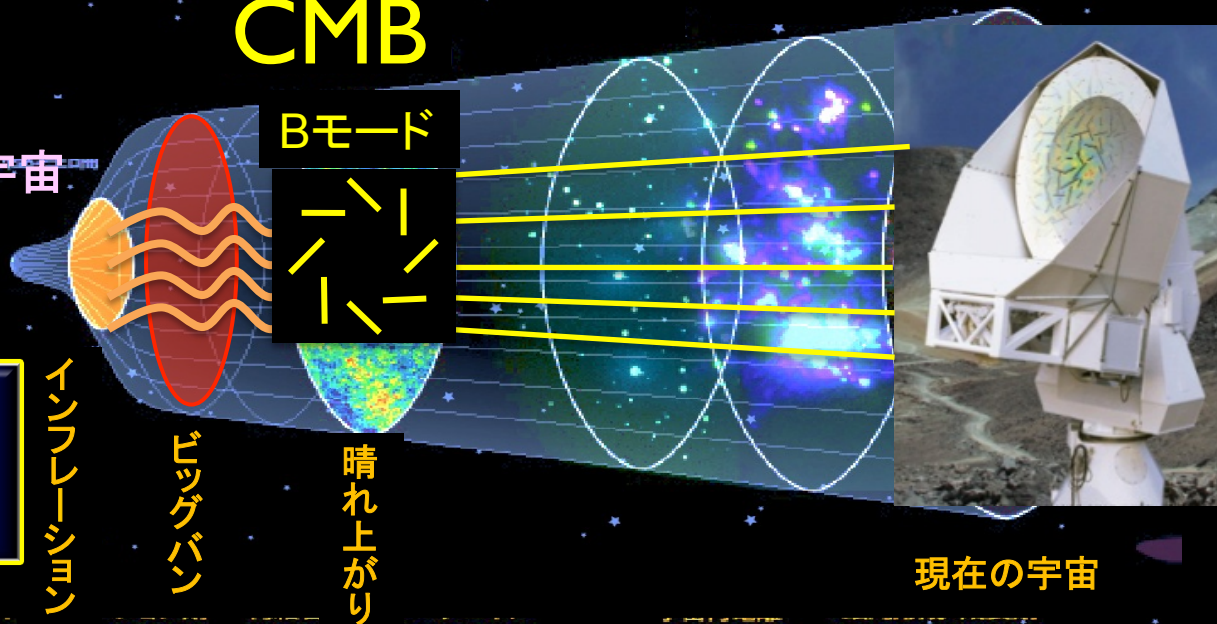
- 原始重力波は、CMBの偏光マップに**Bモード**と呼ばれる大きな渦模様の痕跡を残す
- Bモード専用電波望遠鏡により**原始重力波を検出できる**

Bモード



CMB

我々の宇宙の誕生



インフレーションを証明できる！

インフレーション

ビッグバン

晴れ上がり

現在の宇宙

宇宙年齢

10^{-38} 秒?

38万年

138億年

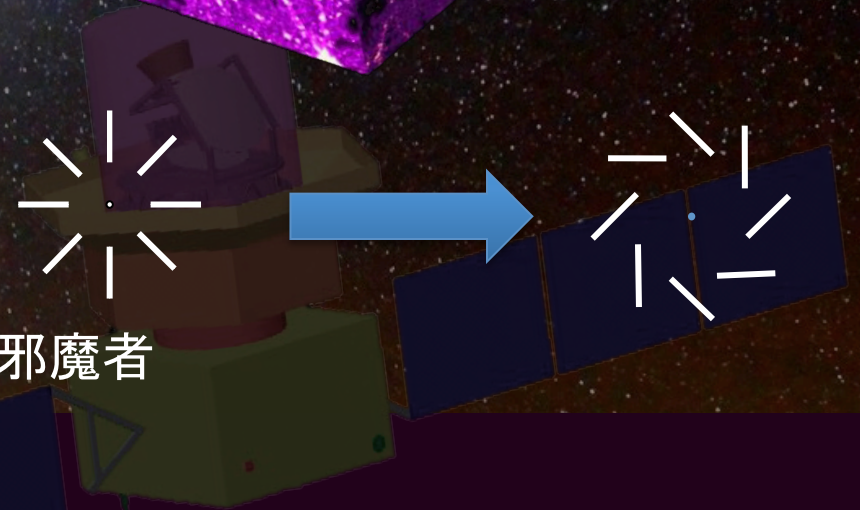
Bモードは原始重力波の観測を可能にする現在唯一の手段

重力レンズBモード

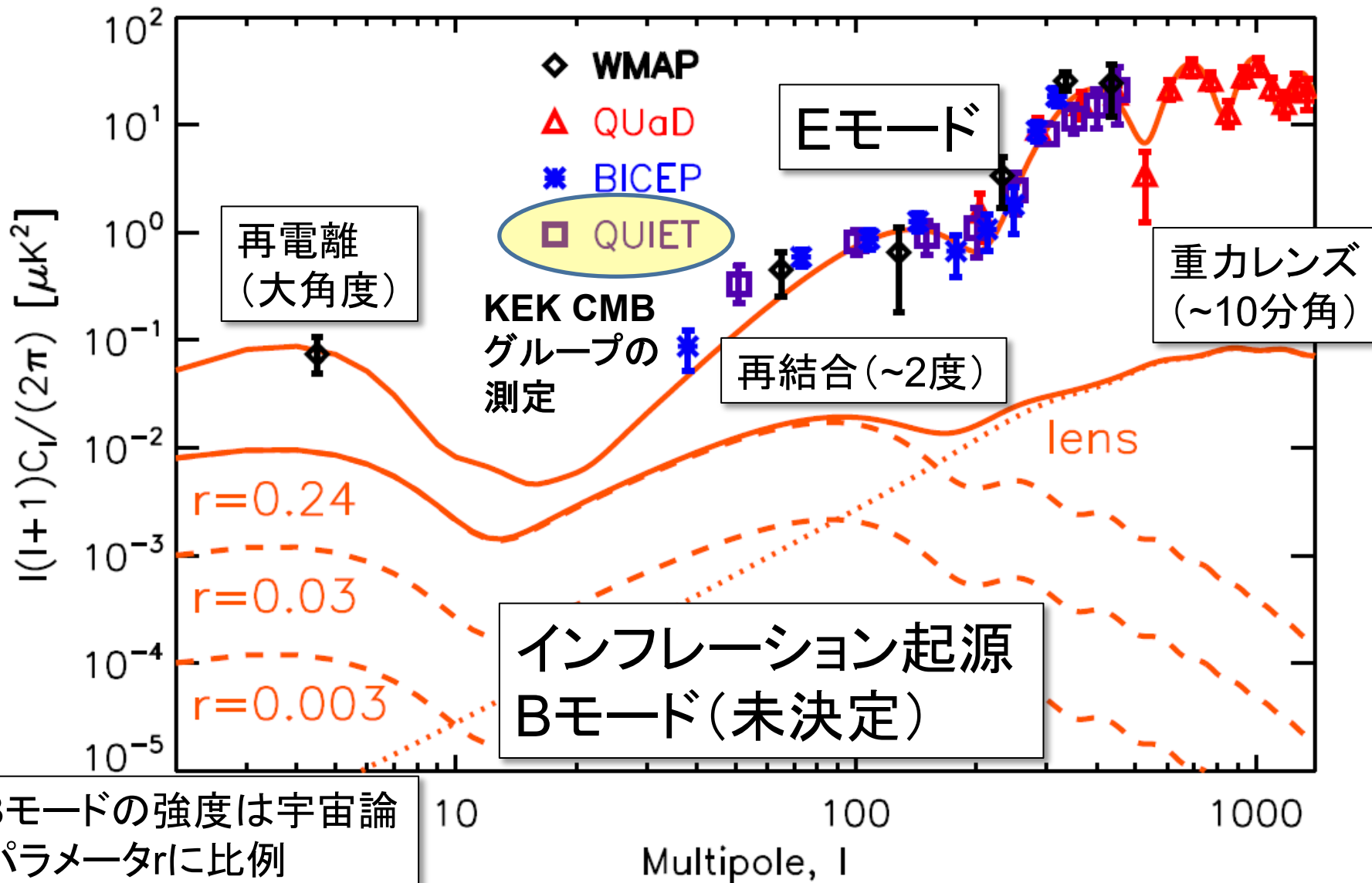
最終
散乱面

晴れ上がり後の物理

- 重力レンズ効果により、もともとのCMB偏光マップに歪みが生ずる
- EモードからBモードへの漏れ込み
- Bad news: 原始重力波探索にとっては邪魔者
- Good news:
 - 大角度スケールでは、影響は小さい
 - それ自身が豊かな宇宙論情報を持つ:
ニュートリノ質量和、未知のエネルギー密度(ダークエネルギー、グラビティーノ等)



CMB偏光パワースペクトル



量子重力理論

↓ ↑
インフレーションモデル

↓ ↑
宇宙の初期条件 量子重力効果が
反映されている

↓ ↑
既知の物理

パワースペクトル

↑
CMB観測

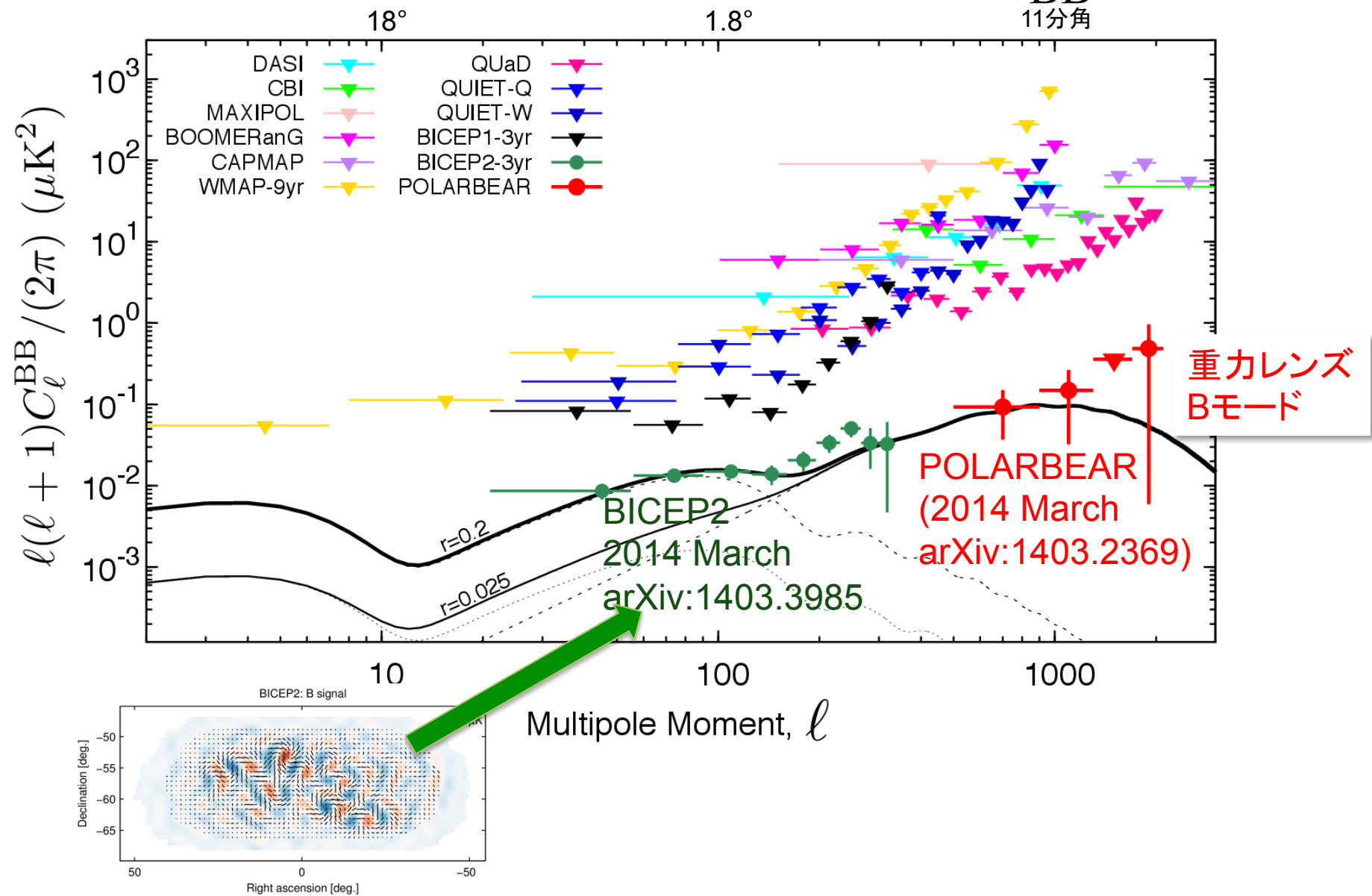
↑
逆問題を解く

$$V_{\text{inf}} \simeq (2 \times 10^{16} \text{ GeV})^4 \left(\frac{r}{0.1} \right)$$

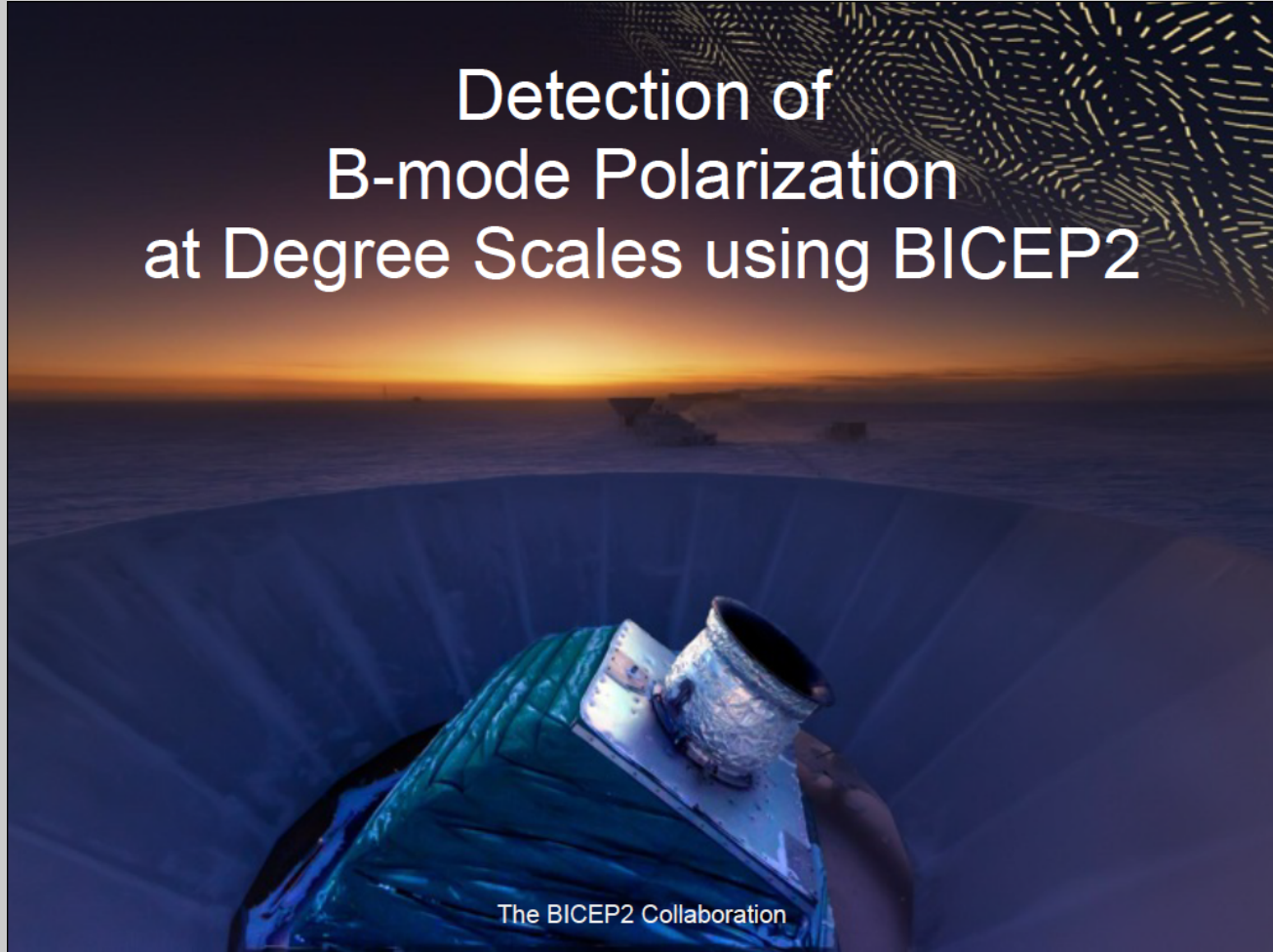
$r \sim 0.1$ なら

力の大統一(GUT)のエネルギースケールが、
力の大統一と独立に出現する

Bモードパワースペクトル (C_{ℓ}^{BB}) の現状



3. BICEP2の観測結果と 前景放射の最新情報



Detection of
B-mode Polarization
at Degree Scales using BICEP2

南極点に設置された
CMB専用望遠鏡

The BICEP2 Collaboration

かれン究在論費生表どと誌論一原

2014年(平成26年)3月18日

宇宙誕生時の急膨張証明

約138億年前の宇宙誕生直後に宇宙が急膨張したことを示す「信号」を初めて観測したと、米カリフォルニア工科大などの研究グループが17日、発表した。理論として予測されていた宇宙の急膨張現象を裏づける観測結果と考えられる。専門家は「この観測結果を手がかりに、謎の多い宇宙初期の状態の

宇宙急膨張の痕跡観測

原始重力波裏付け
米大グループ

「ビッグバン」の直後に、宇宙は急激に膨張した。当初は超高温、超高密度の状態だったが、膨張を続けるうちに冷え、今の宇宙になった。「インフレーション」(暴走)と呼ばれる理論で、宇宙誕生直後に急激に膨張したと示す「信号」を初めて観測した。米カリフォルニア工科大などの研究グループが17日、発表した。理論として予測されていた宇宙の急膨張現象を裏づける観測結果と

米国のハーバード・スミソニアン天体物理学センターは17日、宇宙が誕生直後に急激に膨張した「インフレーション」の際に出た「原始重力波」を示す新たな観測結果を発表した。インフレーションが実際に起きたことが裏付けされるのは初めてという。宇宙創成期の様子を探る貴重な手がかりとみられる。



宇宙誕生時の重力波観測

「インフレーション」裏付け

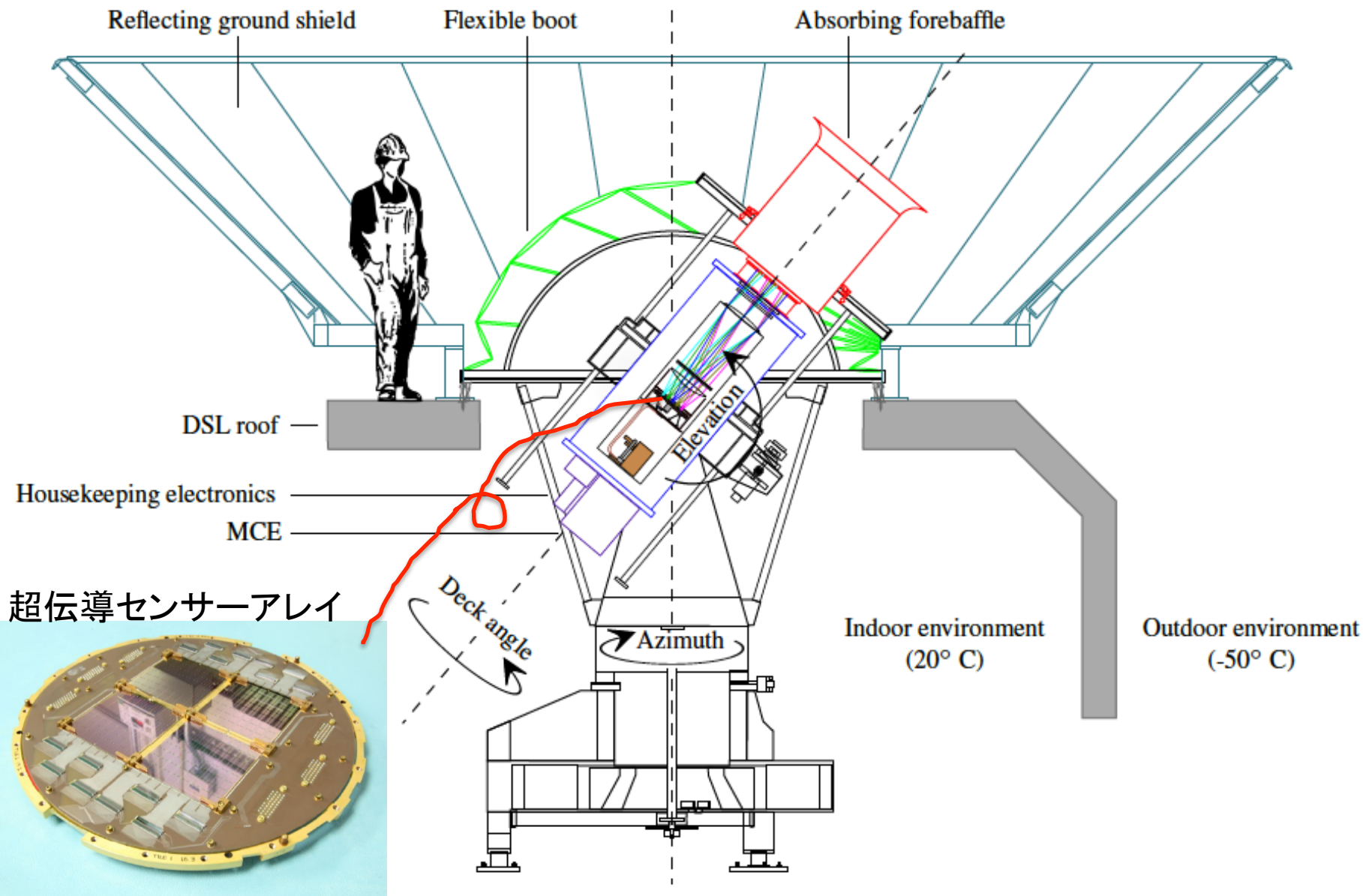
米チーム

宇宙誕生時の膨張裏付け

インフレーション理論裏付け

米チーム

宇宙誕生時の重力波観測



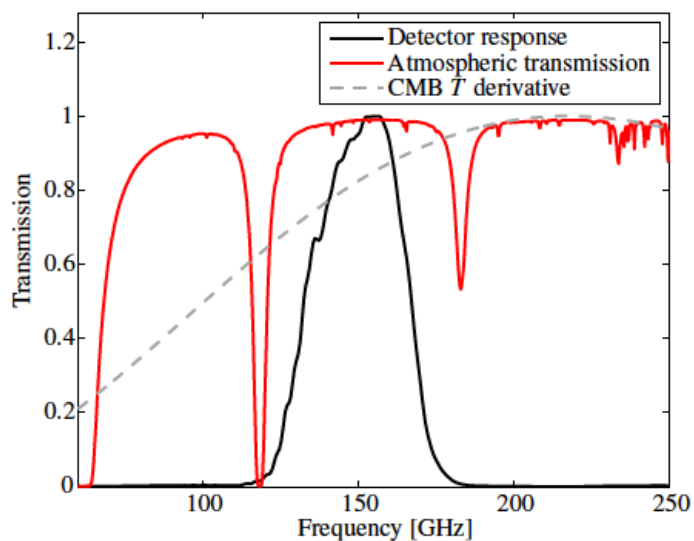


実効観測領域：天空の約1%
(ダストの少ない領域)

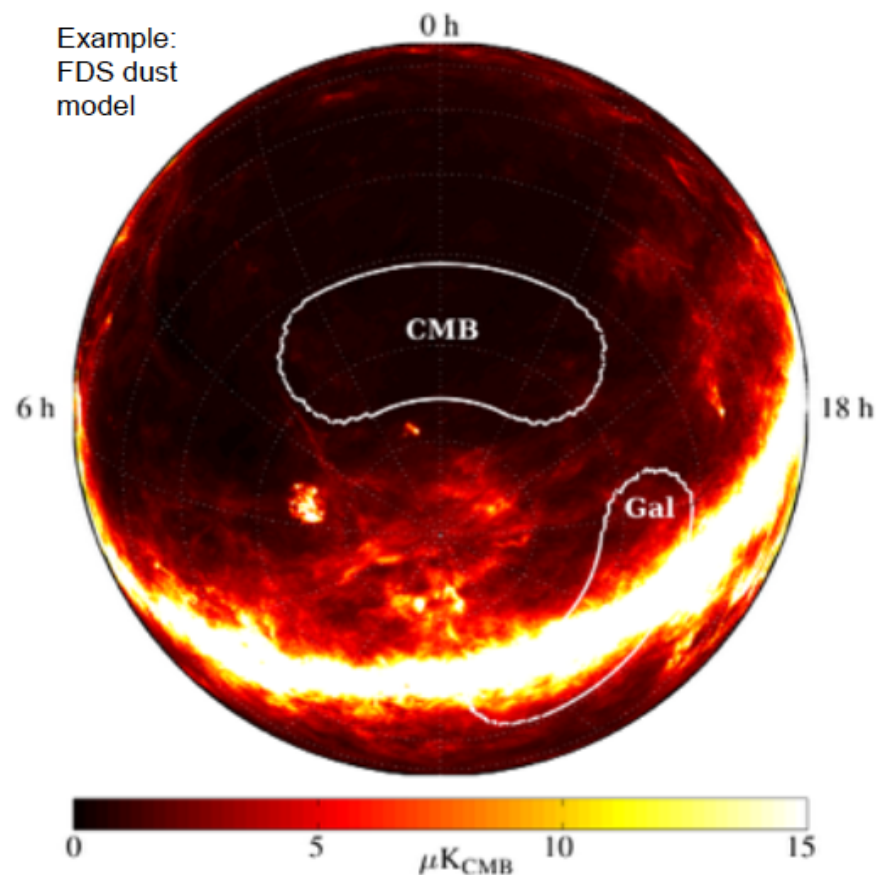
観測周波数：150GHz

観測期間：2010-2012

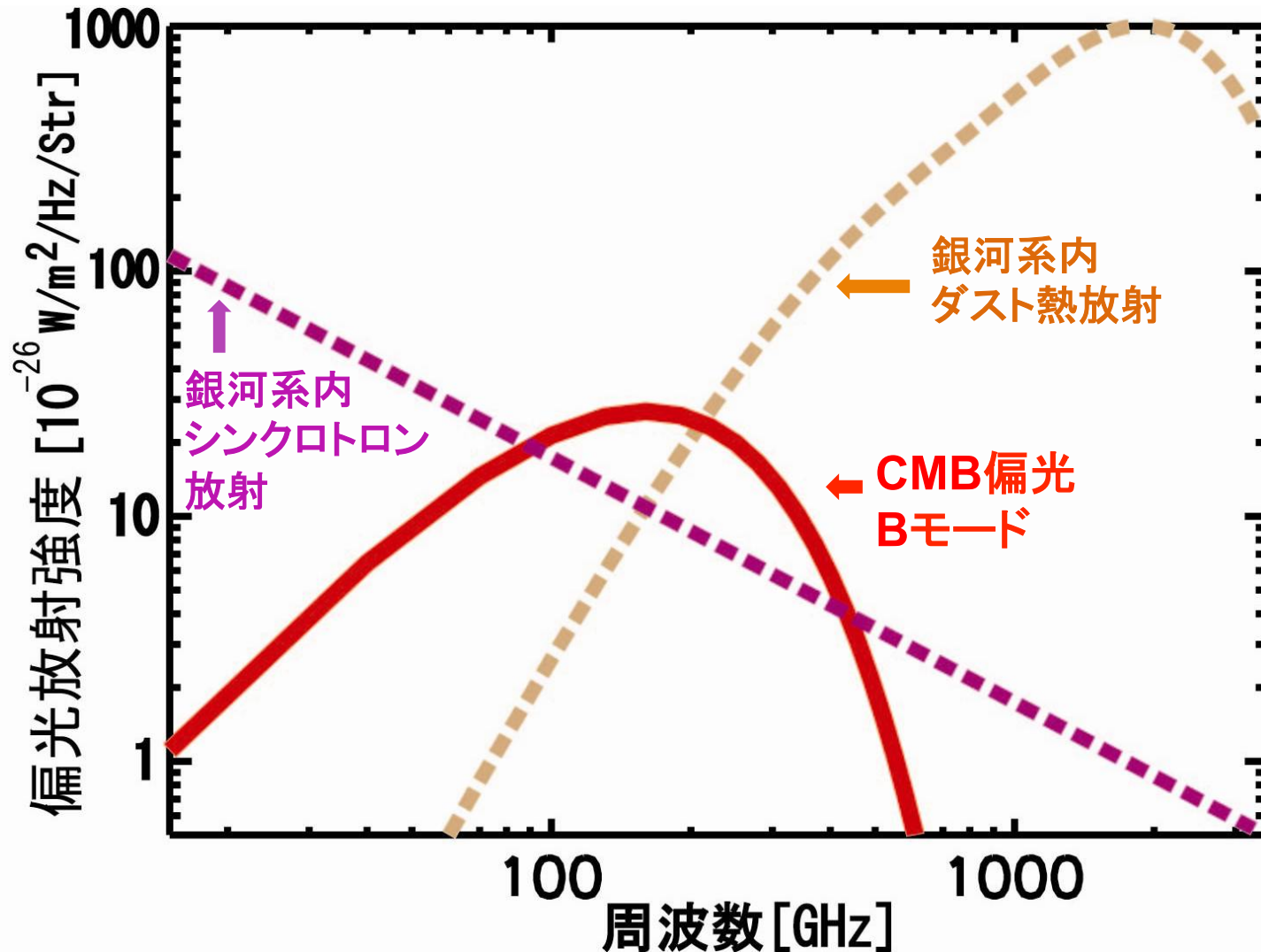
達成感度： $5.2\mu\text{Karcmin}$



ダスト前景放射のモデル

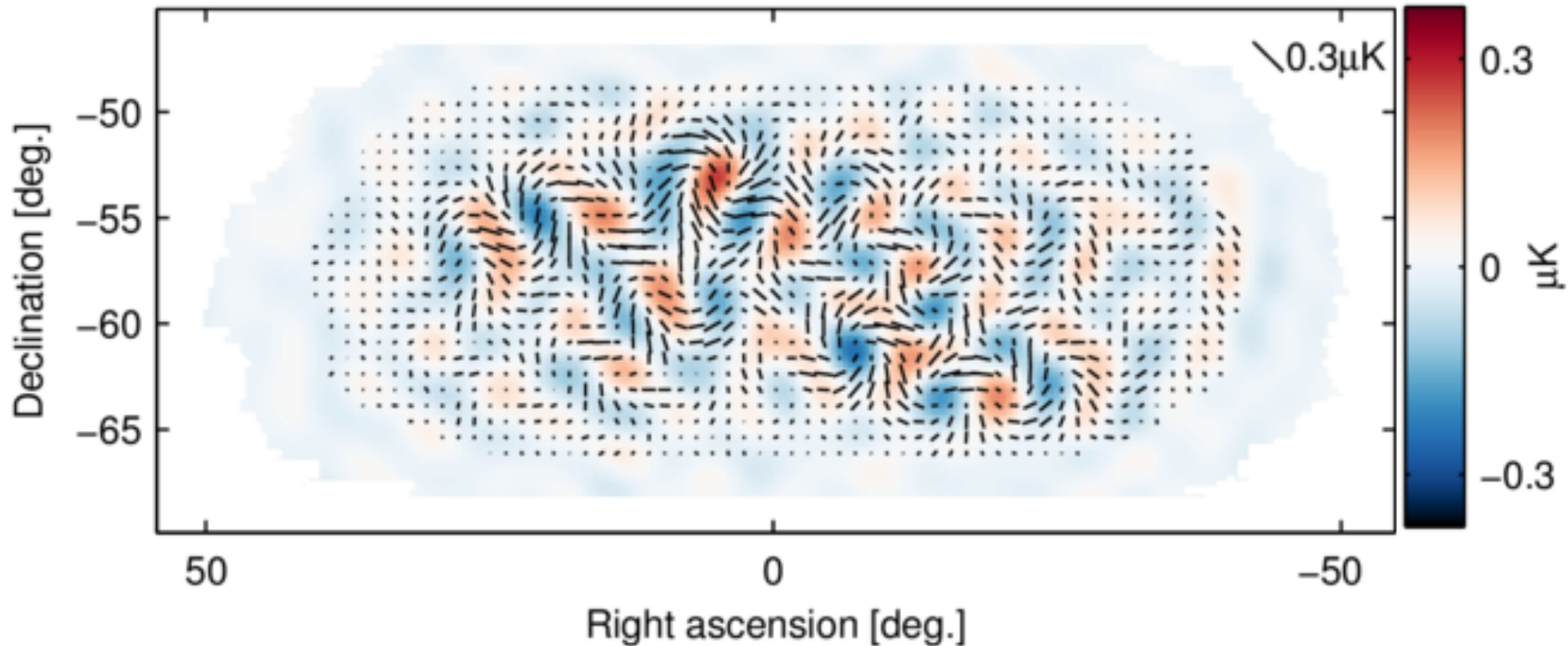


観測周波数



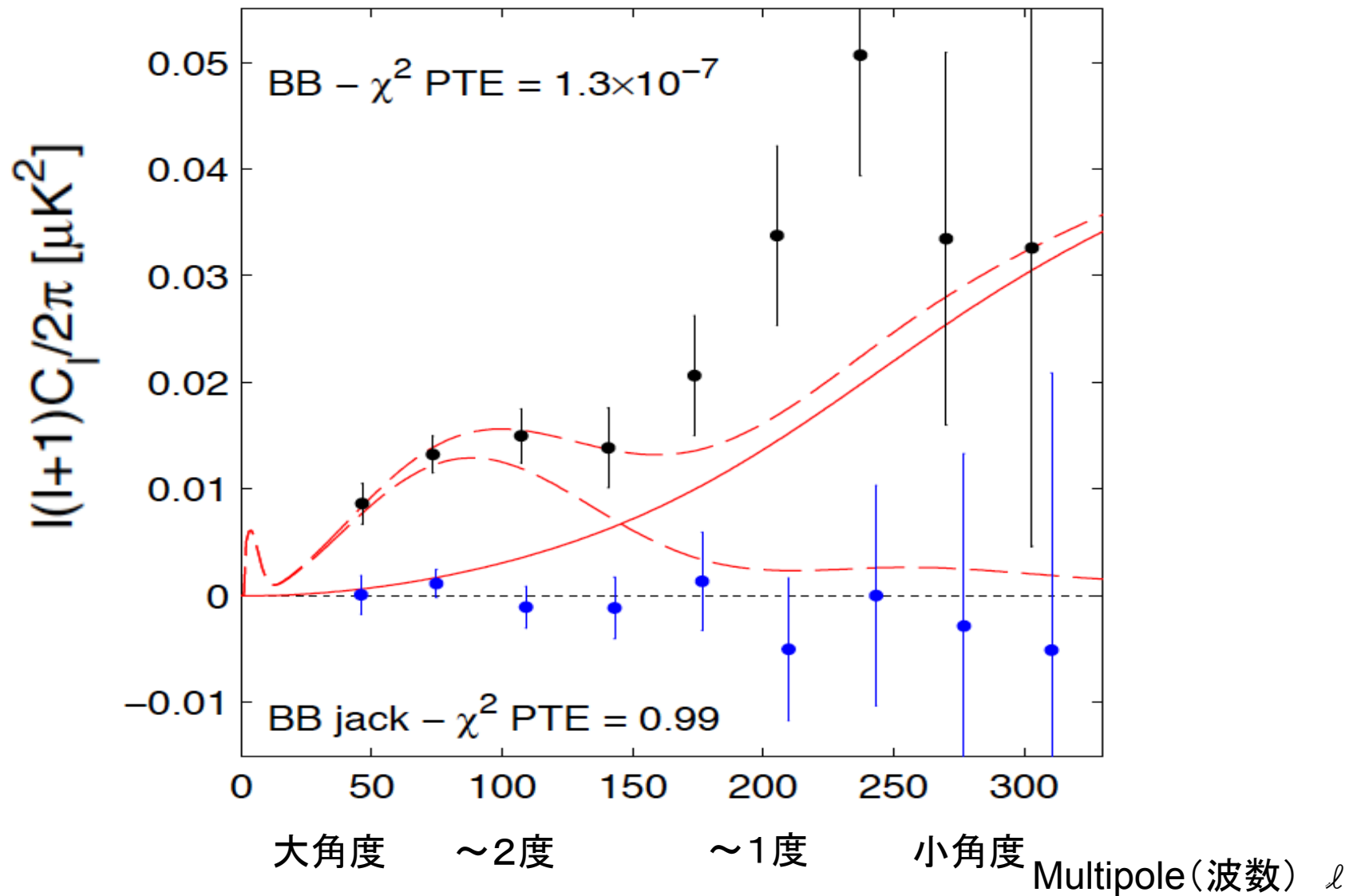
BICEP2: Bモードマップ

BICEP2: B signal

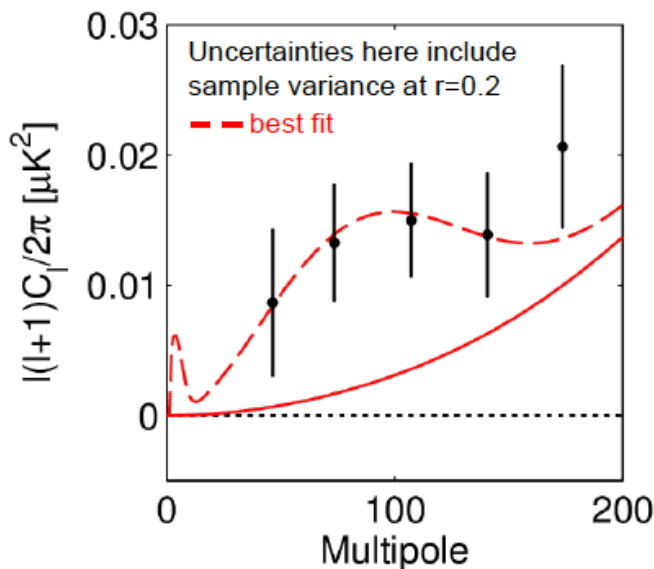


青・赤はその場所での渦巻き度を示す。揺らぎ(場所によって青かたり赤かたりしていること)の観測に成功している。BICEP2グループはこれが原始重力波によるものだと主張

BICEP2 Bモードパワースペクトル



Constraint on Tensor-to-scalar Ratio r



Substantial excess power in the region where the inflationary gravitational wave signal is expected to peak

Find the most likely value of the tensor-to-scalar ratio r

Apply “direct likelihood” method, uses:

- lensed- Λ CDM + noise simulations
- weighted version of the 5 bandpowers
- B-mode sims scaled to various levels of r ($n_T=0$)

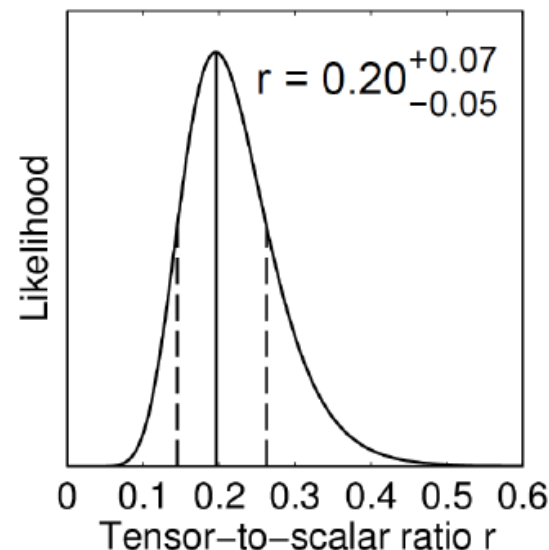
Within this simplistic model we find:

$r = 0.2$ with uncertainties dominated by sample variance

PTE of fit to data: 0.9

→ model is perfectly acceptable fit to the data

$r=0$ ruled out at 7.0σ

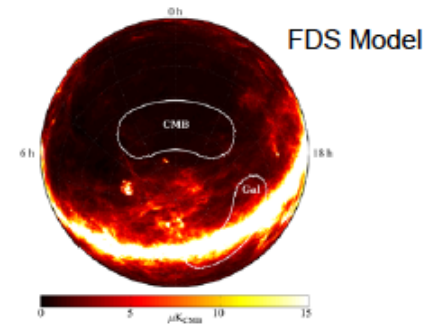
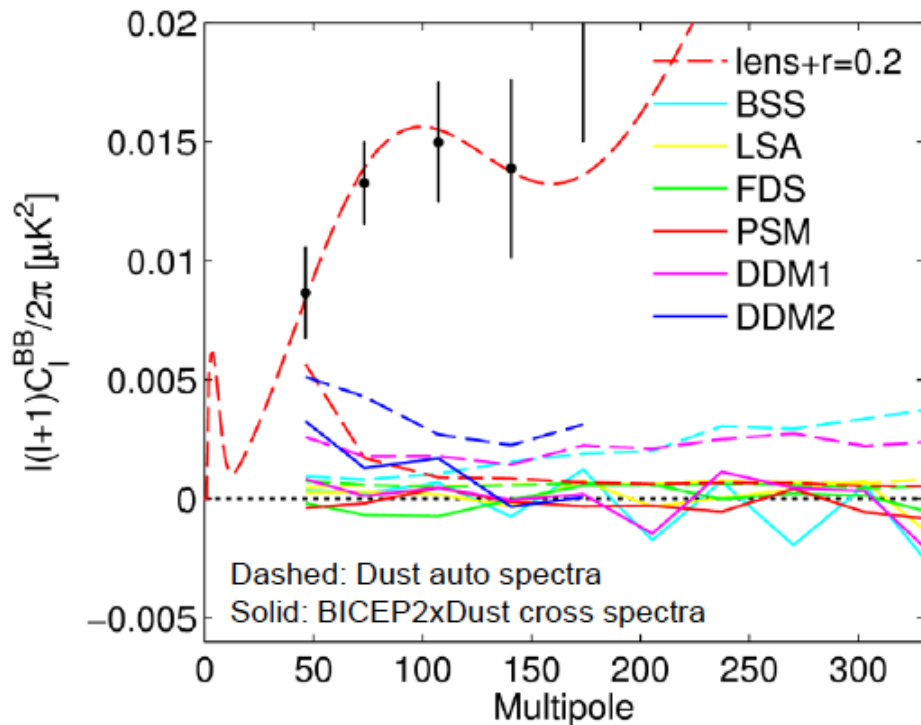


The Bicep2 Collaboration

5点を使いフィット
エラーバーは
コスミックバリエーション
を含んでいるので、
前頁より大きい。

Polarized Dust Foreground Projections

Polarization fractionは一律5%を仮定



The BICEP2 region is chosen to have extremely low foreground emission.

Use various models of polarized dust emission to estimate foregrounds.

All dust auto spectra well below observed signal level.

Cross spectra consistent with zero.

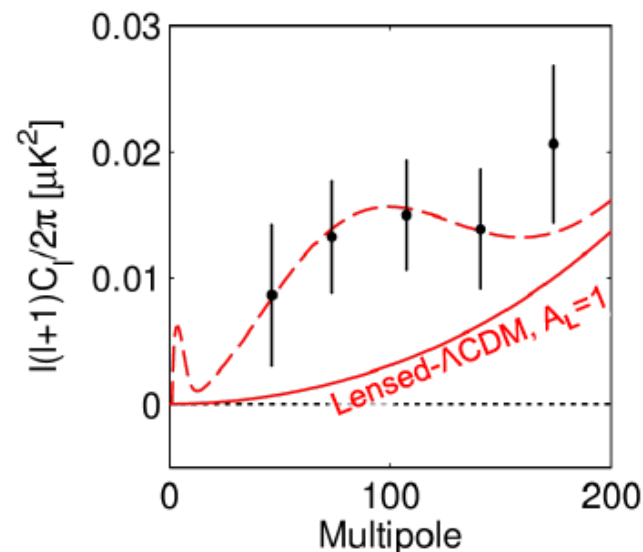
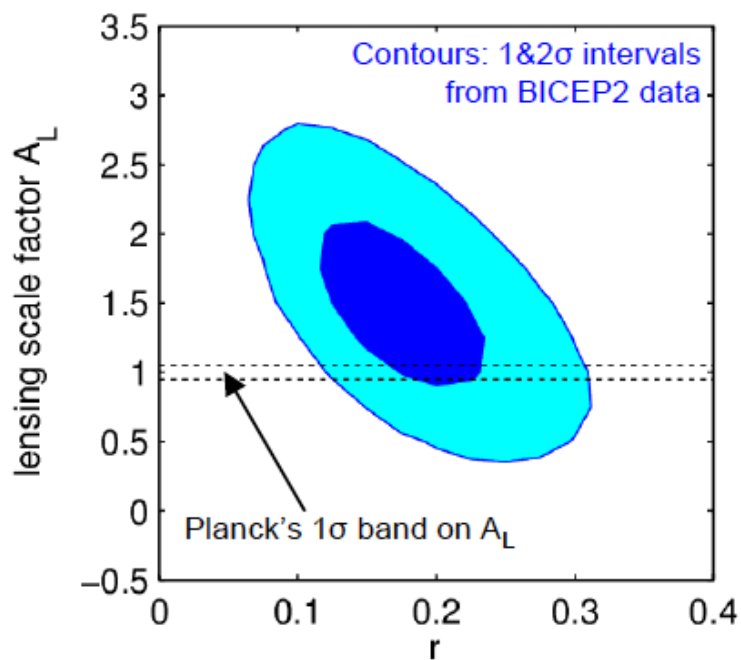
補足: 前景放射のモデルを用いて差し引きをすると $r=0$ の rejection は 5.9 シグマ

The Bicep2 Collaboration

Joint Constraint on r and Lensing Scale Factor

Lensing deflects CMB photons, slightly mixing the dominant E-modes into B-modes -- dominant at high multipoles

Planck data constrain the amplitude of the lensing effect to $A_L = 0.99 \pm 0.05$.



In the joint constraint on r and A_L we find:

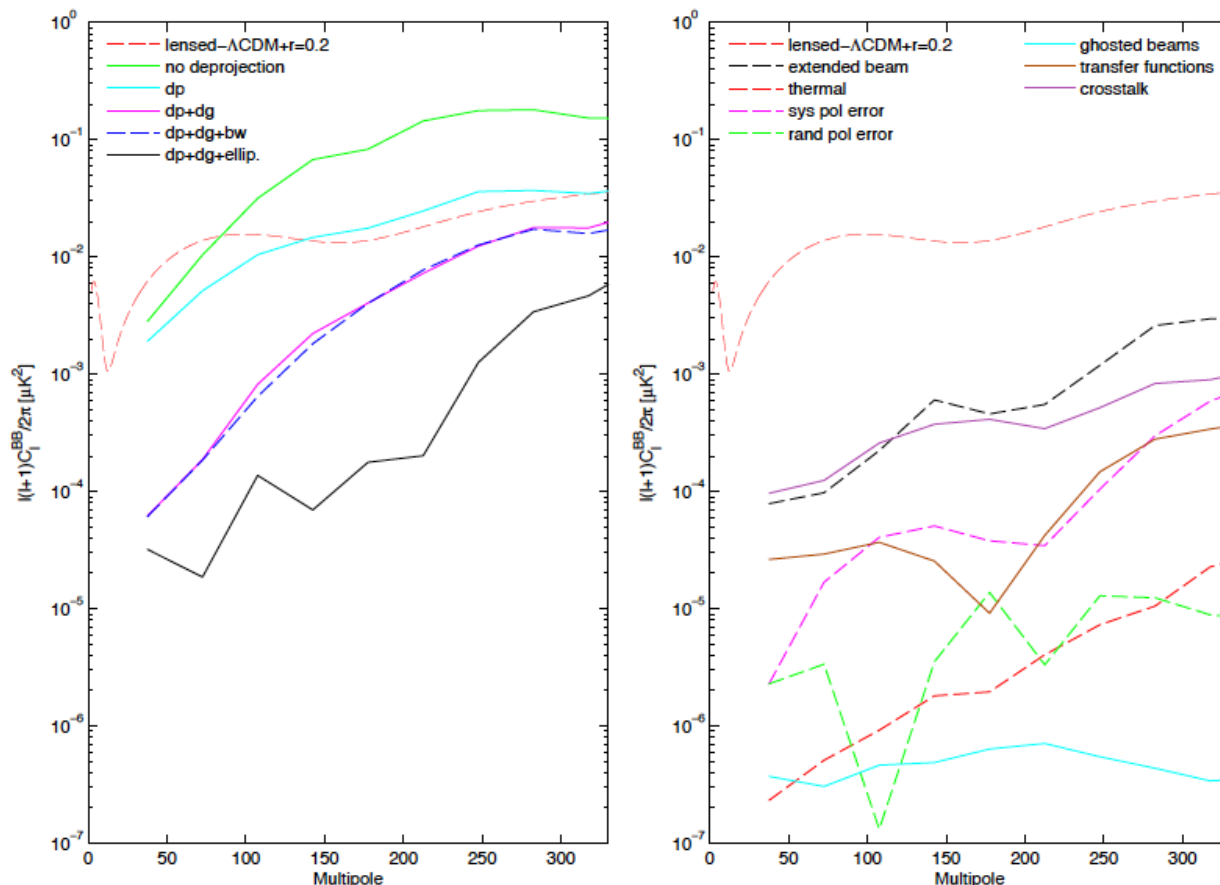
BICEP2 data is perfectly compatible with a lensing amplitude of $A = 1$.

Marginalizing over r , we detect lensing B-modes at 2.7σ

The Bicep2 Collaboration

系統誤差について（プロ向き）

しばしば一番重要だが、しばしば一番語られない、..



詳細はSystematics Paperを見よ、となっているが、まだ準備中である(7月28日現在)

BICEP1 100GHzを併用して、スペクトル指数から シンクロトン前景放射:2.3シグマで棄却 ダスト前景放射:2.2シグマで棄却

14

BICEP2 Collaboration

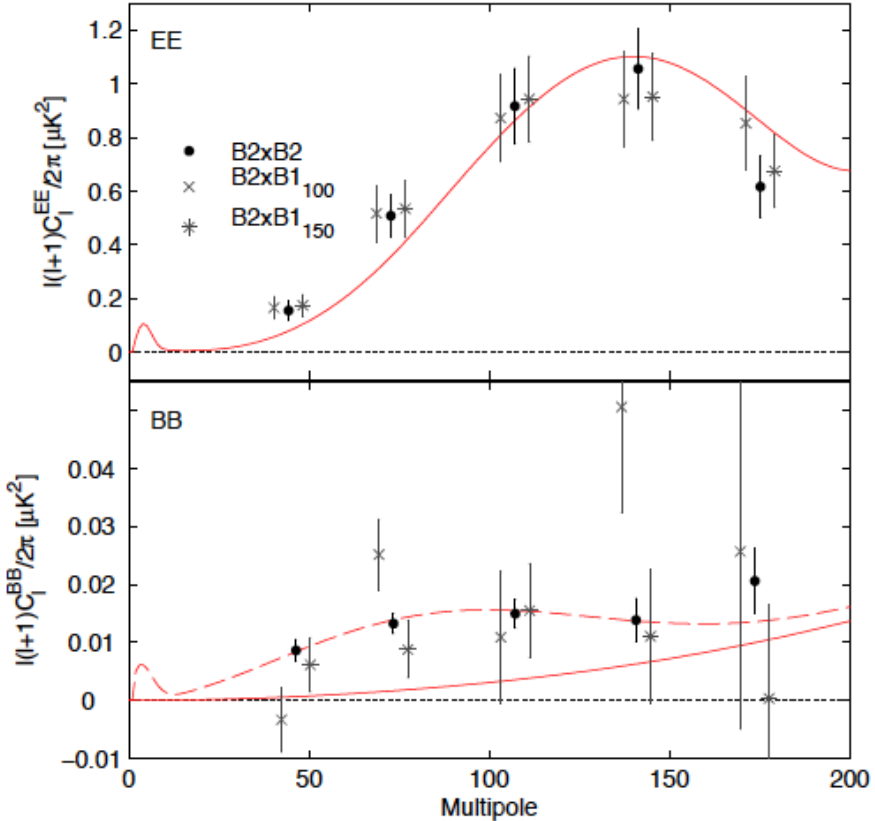


FIG. 7.— The BICEP2 *EE* and *BB* auto spectra (as shown in Figure 2) compared to cross spectra between BICEP2 and the 100 and 150 GHz maps from BICEP1. The cross spectrum points are offset horizontally for clarity.

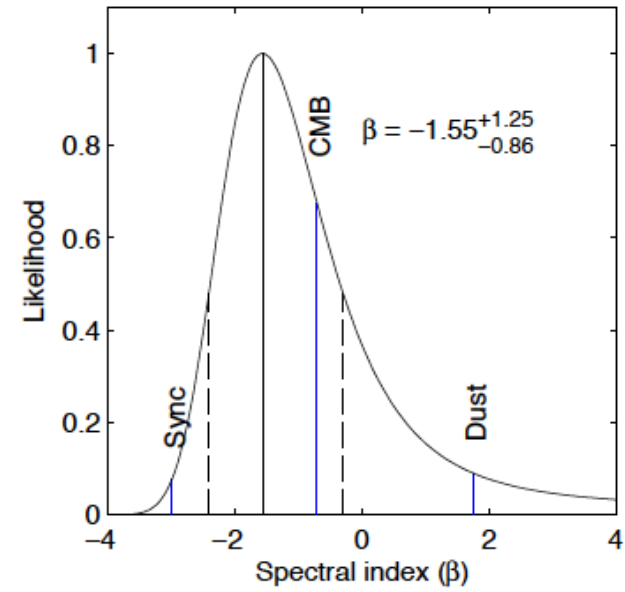
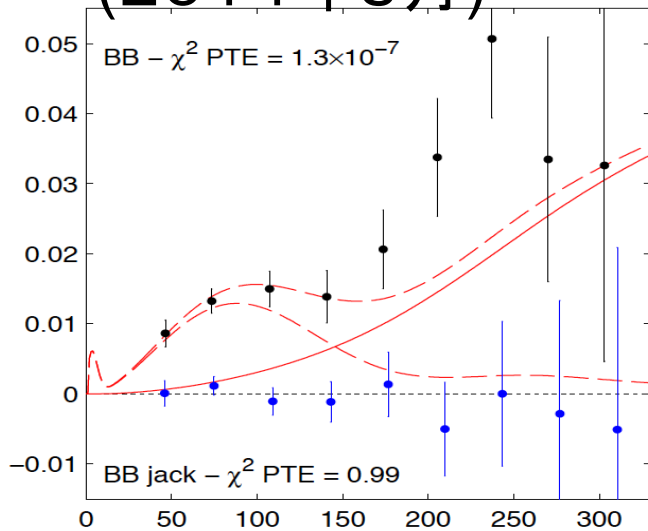


FIG. 8.— The constraint on the spectral index of the *BB* signal based on joint consideration of the BICEP2 auto, BICEP1₁₀₀ auto, and BICEP2 × BICEP1₁₀₀ cross spectra. The curve shows the marginalized likelihood as a function of assumed spectral index. The vertical solid and dashed lines indicate the maximum likelihood and the $\pm 1\sigma$ interval. The blue vertical lines indicate the equivalent spectral indices under these conventions for the CMB, synchrotron, and dust. The observed signal is consistent with a CMB spectrum, while synchrotron and dust are both disfavored by $\gtrsim 2\sigma$.

bine the latter³⁶. Figure 9 compares the result to the BICEP2

原始重力波探索の現状

BICEP2偏光Bモード
(2014年3月)

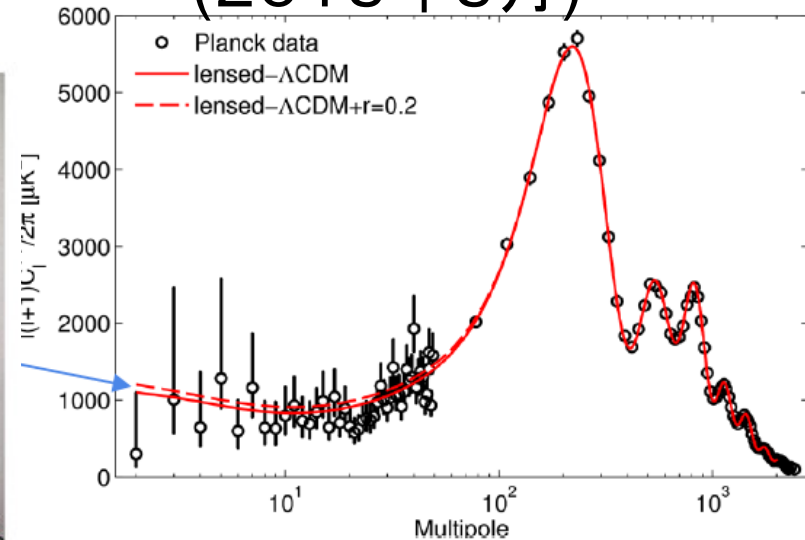


$$r = 0.20^{+0.07}_{-0.05}$$

Tension !



Planck温度揺らぎ
(2013年3月)



$$r < 0.11 \text{ (95\% C.L.)}$$

他実験による検証が重要

以上ここまでの 2014年3月の状況



Detection of *B*-Mode Polarization at Degree Angular Scales by BICEP2

P. A. R. Ade,¹ R. W. Aikin,² D. Barkats,³ S. J. Benton,⁴ C. A. Bischoff,⁵ J. J. Bock,^{2,6} J. A. Brevik,² I. Buder,⁵ E. Bullock,⁷ C. D. Dowell,⁶ L. Duband,⁸ J. P. Filippini,² S. Fliescher,⁹ S. R. Golwala,² M. Halpern,¹⁰ M. Hasselfield,¹⁰ S. R. Hildebrandt,^{2,6} G. C. Hilton,¹¹ V. V. Hristov,² K. D. Irwin,^{12,13,11} K. S. Karkare,⁵ J. P. Kaufman,¹⁴ B. G. Keating,¹⁴ S. A. Kemasovskiy,¹² J. M. Kovac,^{5,*} C. L. Kuo,^{12,13} E. M. Leitch,¹⁵ M. Lueker,² P. Mason,² C. B. Netterfield,^{4,16} H. T. Nguyen,⁶ R. O'Brient,⁶ R. W. Ogburn IV,^{12,13} A. Orlando,¹⁴ C. Pryke,^{9,7,†} C. D. Reintsema,¹¹ S. Richter,⁵ R. Schwarz,⁹ C. D. Sheehy,^{9,15} Z. K. Staniszewski,^{2,6} R. V. Sudiwala,¹ G. P. Teply,² J. E. Tolan,¹² A. D. Turner,⁶ A. G. Vieregg,^{5,15} C. L. Wong,⁵ and K. W. Yoon^{12,13}

(BICEP2 Collaboration)

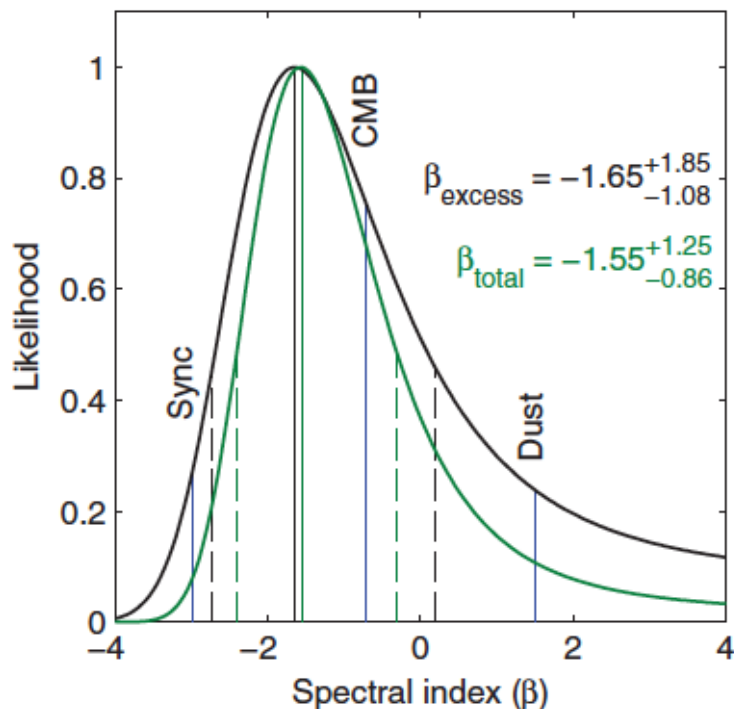
Abstractより

Galactic synchrotron makes a negligible contribution to the observed signal. We also examine a number of available models of polarized dust emission and find that at their default parameter values they predict power $\sim(5-10)\times$ smaller than the observed excess signal (with no significant cross-correlation with our maps). However, these models are not sufficiently constrained by external public data to exclude the possibility of dust emission bright enough to explain the entire excess signal. Cross correlating

「発見！」からは、大きくトーンダウン、、、

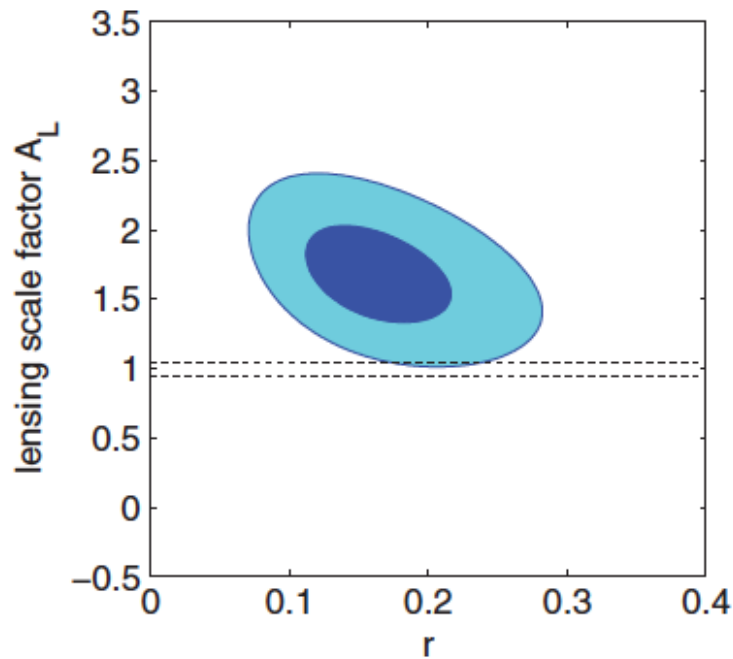
使用した前景放射モデルが
希望的観測（観測的希望？）
だった、、、

その他の主な変更点



観測周波数依存性の解析で、
重力レンズの効果を除いたexcessを表示

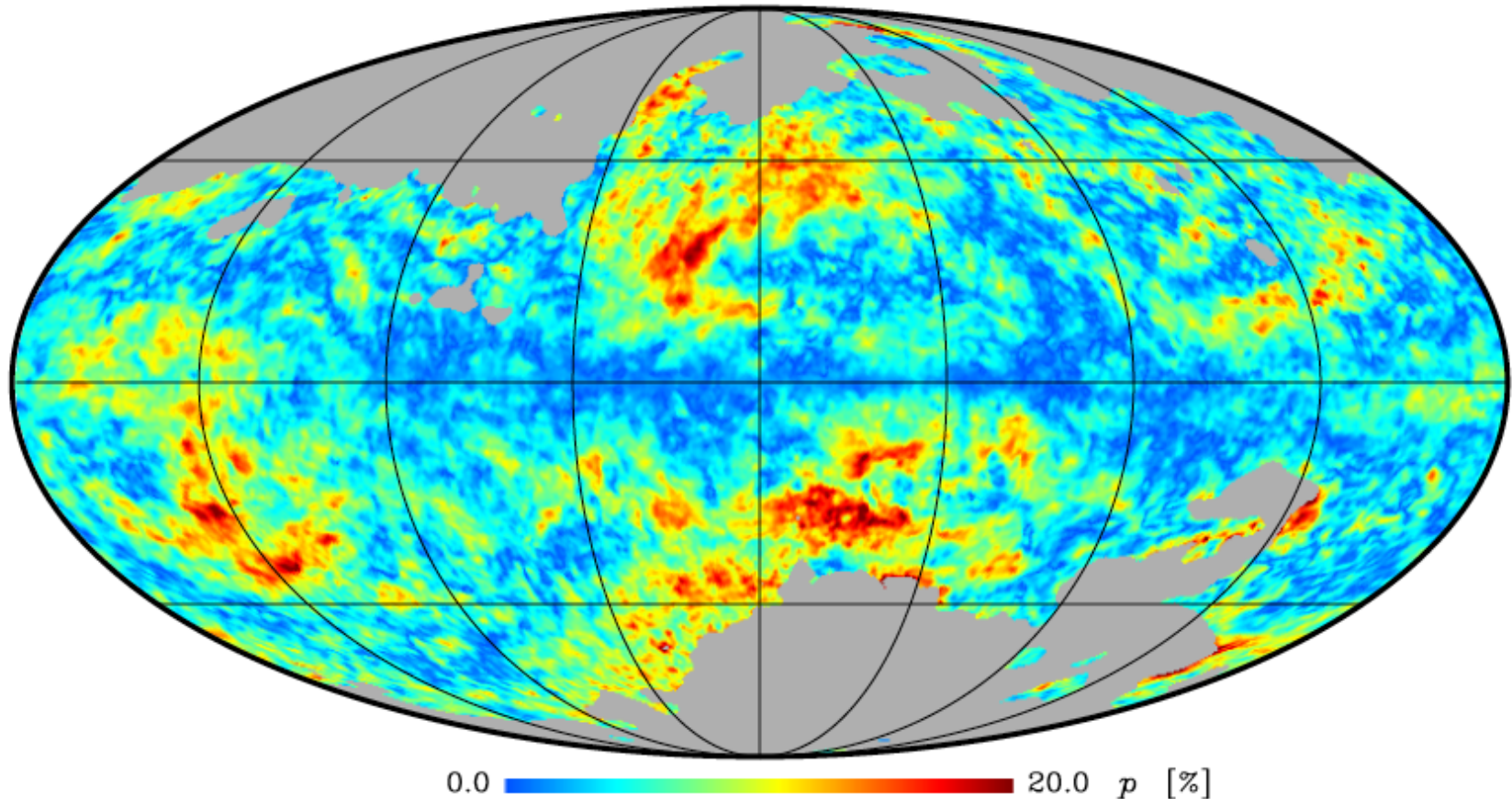
→ foregrounds are less disfavored



原始重力波と重力レンズの同時フィットを
観測した9点すべて用いて実施

→ Lensing B-mode is $\sim 2\sigma$ higher
than expected

Planck 353 GHz ([arXiv:1405.0871](https://arxiv.org/abs/1405.0871))



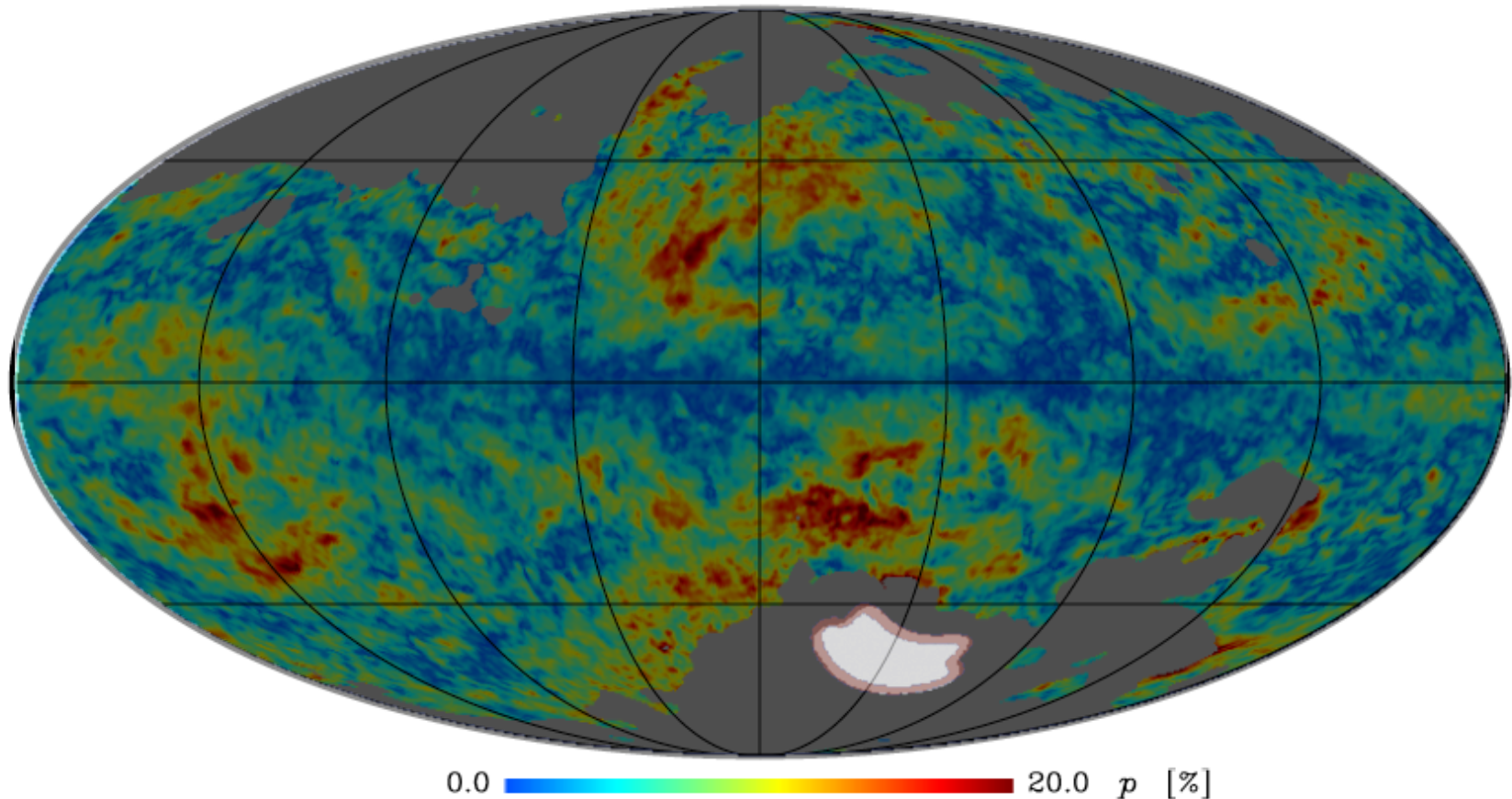
Tendency: the smaller the power is, the larger the polarization fraction is

Assumption in BICEP2 analysis is likely to be optimistic.

Polarization fraction (p)
が20%に達する場所がある

パワースペクトル $C_l^{\text{BB,dust}} \sim p^2$

Planck 353 GHz ([arXiv:1405.0871](https://arxiv.org/abs/1405.0871))

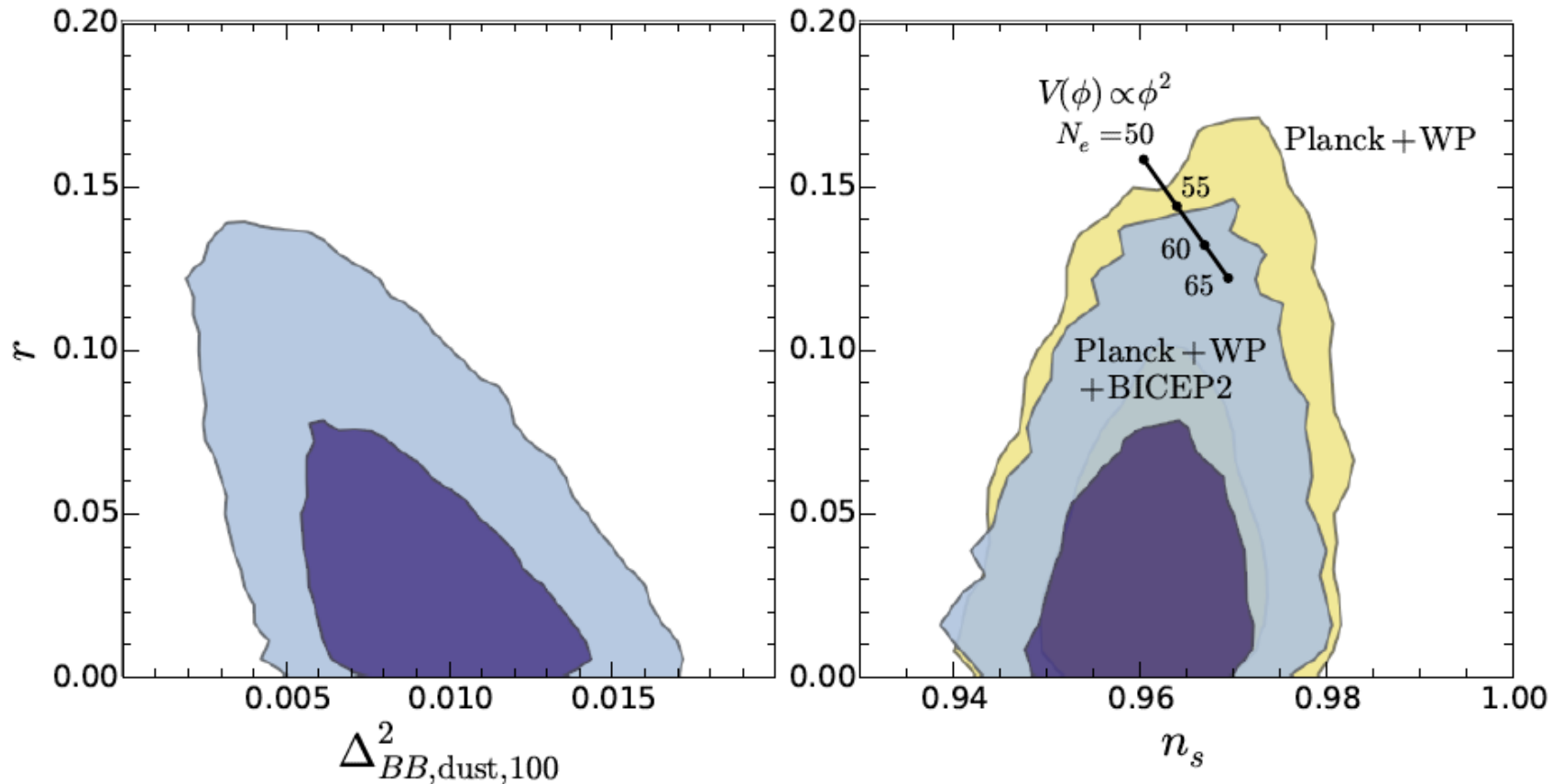


Tendency: the smaller the power is, the larger the polarization fraction is

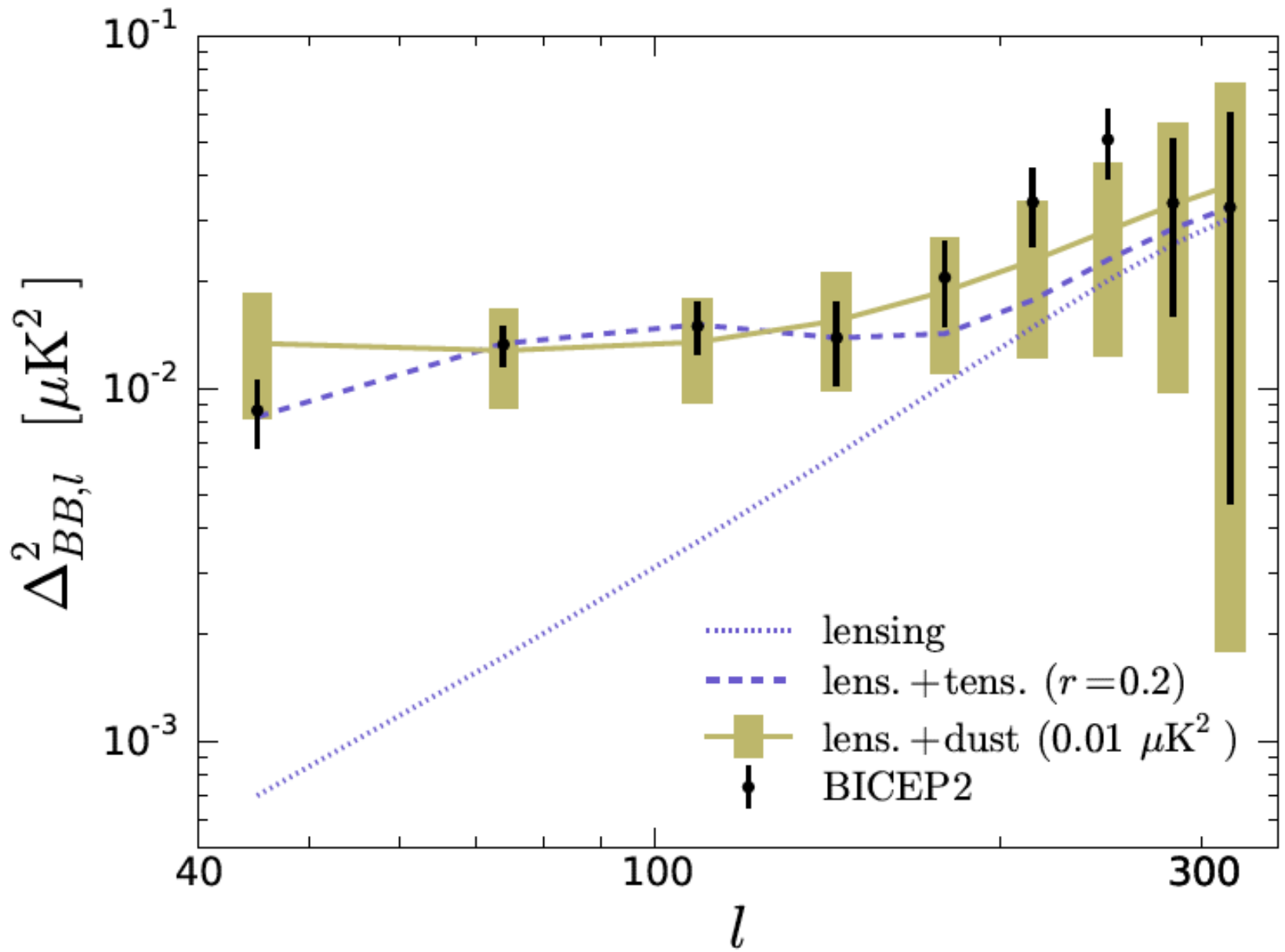
Note that the result for the BICEP2 patch is not yet available.

A joint analysis of Planck and BICEP2 B modes including dust polarization uncertainty

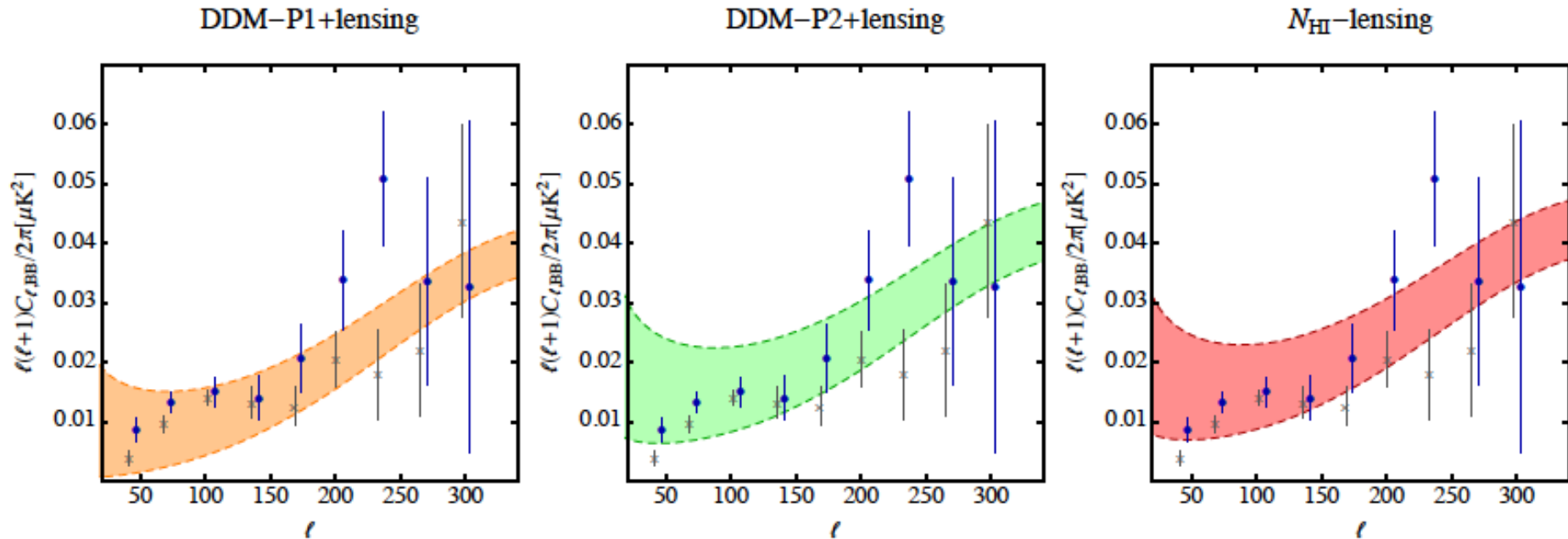
[Michael J. Mortonson, Uroš Seljak](#) arXiv:1405.5857v1



$= |2C_l^{BB,dust}/2\pi \sim l^{-0.3}$ のみ仮定



Another example (R. Flauger, J. Hill, D. Spergel, [arXiv:1405.7351](https://arxiv.org/abs/1405.7351))



大きな不定性が許されているモデルの例。
ダスト前景放射のみでBICEP2の信号強度に達してしまう。
これらのモデルを棄却するデータがない以上、BICEP2の信号が原始重力波だと結論することは出来ないと主張

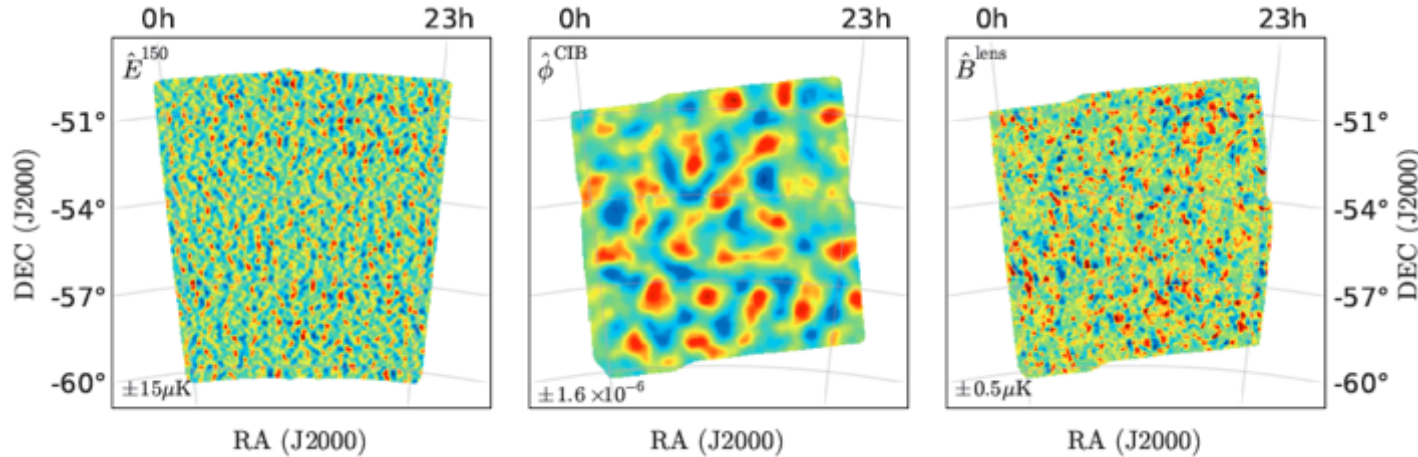
何をどこまで明らかにしたか

- 新しい偏光ゆらぎを発見した。
- (Availableな) 前景放射モデルを仮定すれば、観測されたパワースペクトルがインフレーションモデルの予想と矛盾していないことを示した
 - 実験家の視点からは、まずこの感度を達成したことが偉業！
- 本当に原始重力波をとらえたか？ とらえたと言い切るのはまだ早い。
 - ダスト前景放射の確かな差し引きが必要
 - 重力レンズとの、より確かな分離も必要
 - 複数の実験による検証が進行中(最後のセクション)

4. 重力レンズBモードと POLARBEAR

Lensing B-mode Discovery by SPTPol

arXiv:1307.5830



South Pole Telescope (SPT)

E map from SPTPol 150GHz

Lensing potential " ϕ " from Herschel 500um

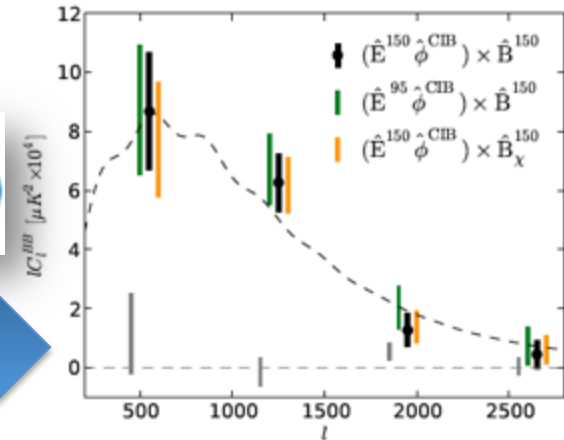
Reconstructed B map, or " $E\phi$ "

$$"E\phi" = B^{\text{lens}}(\vec{l}_B) = \int d^2\vec{l}_E \int d^2\vec{l}_\phi W^\phi(\vec{l}_E, \vec{l}_B, \vec{l}_\phi) E(\vec{l}_E) \phi(\vec{l}_\phi)$$

Correlation b/w B map from SPTPol (" B ") and reconstructed B map (" $E\phi$ ") examined



7.7 σ ($E\phi \times B$ and $EB \times \phi$ combined)



POLARBEARの観測結果

[Phys. Rev. Let. 112, 131302 \(2014\)](#)

<http://arxiv.org/abs/1312.6645>

Evidence for Gravitational Lensing of the Cosmic Microwave Background Polarization from Cross-correlation with the Cosmic Infrared Background

POLARBEAR Collaboration

[Phys. Rev. Let. 113, 021301 \(2014\)](#)

<http://arxiv.org/abs/1312.6646>

世界初のCMB偏光のみを用いた重力レンズ効果検出

Measurement of the Cosmic Microwave Background Polarization Lensing Power Spectrum with the POLARBEAR experiment

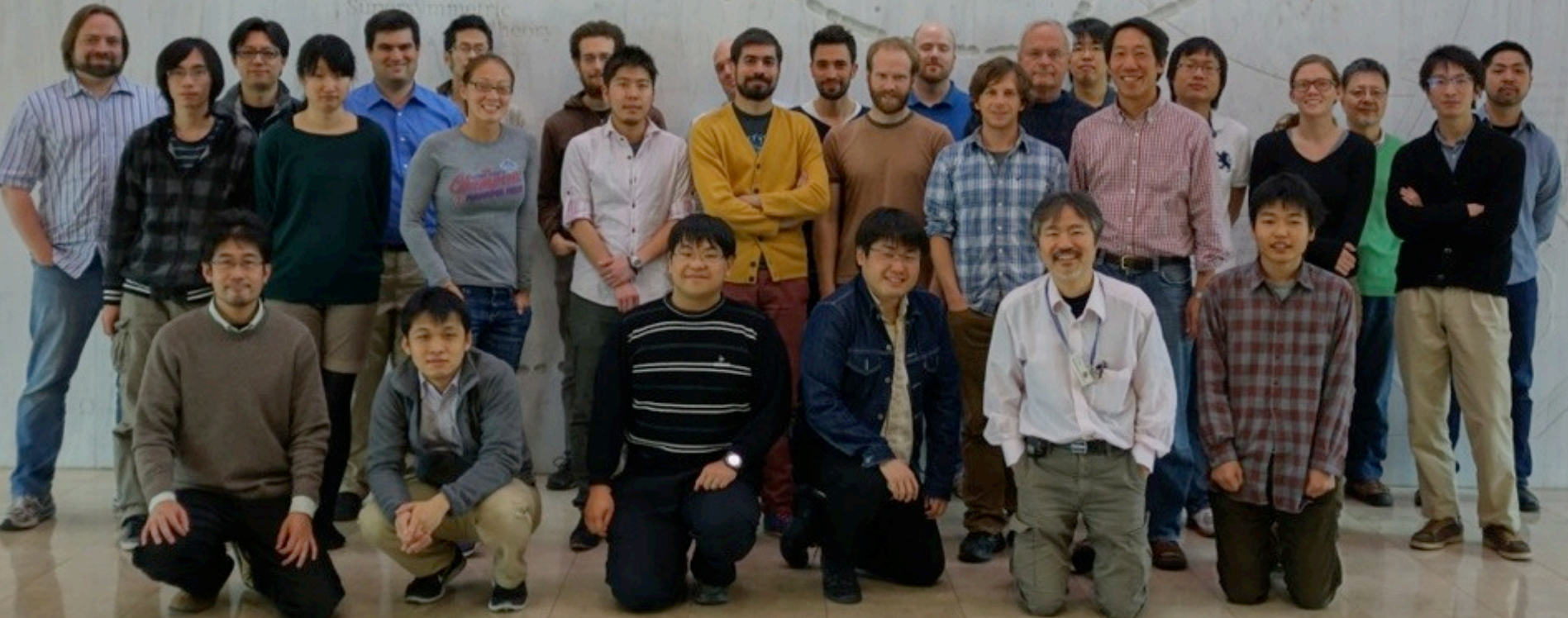
POLARBEAR Collaboration

<http://arxiv.org/abs/1403.2369>

A Measurement of the Cosmic Microwave Background B-Mode Polarization Power Spectrum at Sub-Degree Scales with POLARBEAR

POLARBEAR Collaboration

POLARBEAR Collaboration



POLARBEAR Collaboration

UC Berkeley

Ari Cukierman
William Holzapfel
Adrian Lee
Michael Myers
Paul Richards
Blake Sherwin
Bryan Steinbach
Aritoki Suzuki

Lawrence Berkeley National Lab.

Julian Borrill
Josquin Errard
Reijo Keskitalo
Theodore Kisner
Eric Linder
Michael Sholl
Oliver Zahn

University of Melbourn

Christian Reichardt

Princeton University

Zigmund Kermish

UC San Diego

Christopher Aleman
Kam Arnold
Darcy Barron
David Boettger
Tucker Elleflot
Chang Feng
Guangyuan Feng
Brian Keating
Frederick Matsuda
Martin Navaroli
Hans Paar
Praween Siritanasak
Nathan Stebor
Brandon Wilson

Goddard Space Flight Center

Nathan Miller

CU Boulder

Nils Halverson
Greg Jaehnig

KEK

Yoshiki Akiba
Yuji Chinone
Masaya Hasegawa
Kaori Hattori
Masashi Hazumi
Yasuto Hori
Hideki Morii
Takahiro Okamura
Jun-ichi Suzuki
Takayuki Tomaru

JAXA

Tomotake Matsumura

SOKENDAI

Yoshiki Akiba
Yuki Inoue
Yuuko Segawa

Kavli IPMU

Nobuhiko Katayama
Haruki Nishino

National Institute for Fusion Science

Suguru Takada

McGill University

Amy Bender
Matt Dobbs
Adam Gilbert
Graeme Smecher

Dalhousie

Scott Chapman
Colin Ross
Kaja Rotermund

Austin College

Peter Hyland

Rutherford Appleton Laboratory

William Gainger

Laboratoire Astroparticule & Cosmologie

Maude LeJeune
Julien Peloton
Davide Poletti
Radek Stompore

SISSA

Giulio Fabbian

Cardiff University

Peter Ade

Imperial College

Andrew Jaffe
Stephen Feeney



Site

POLARBEAR Site:
Atacama, Chile
(5150m above sea level)

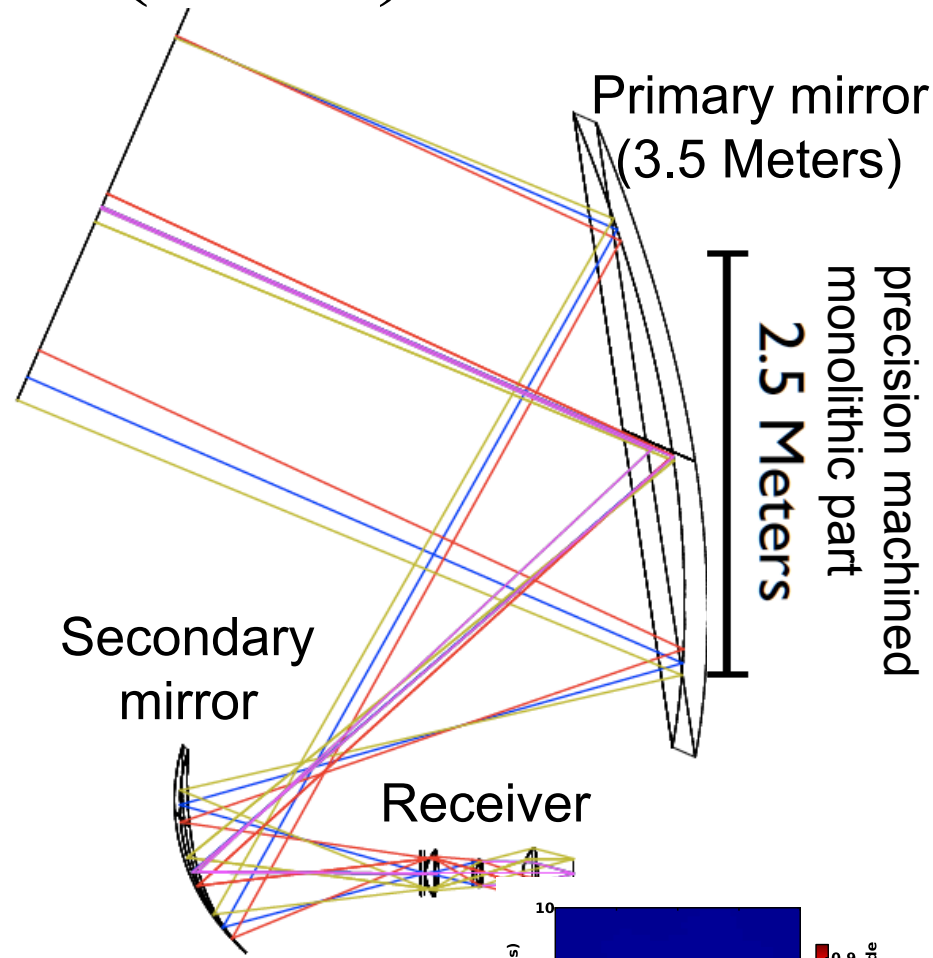
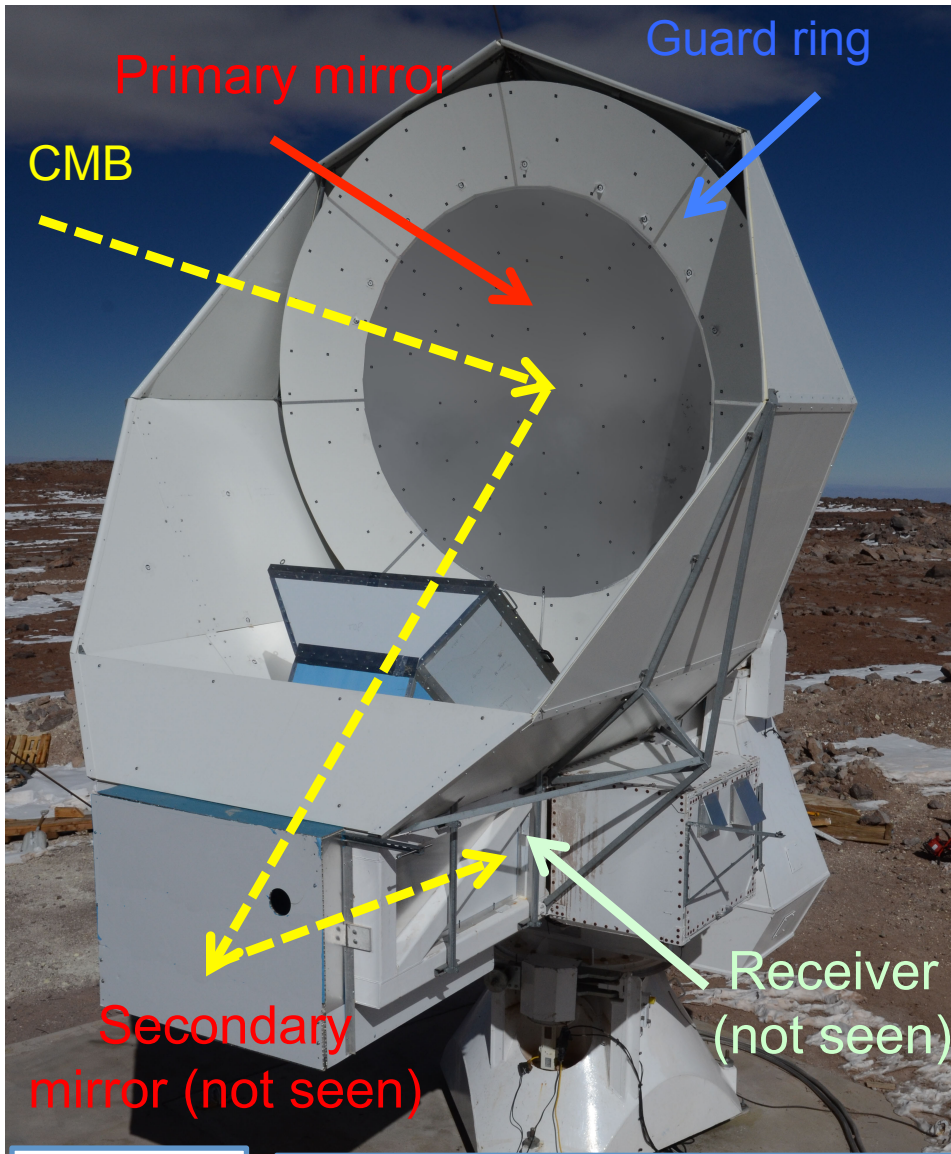


Oxygen tank

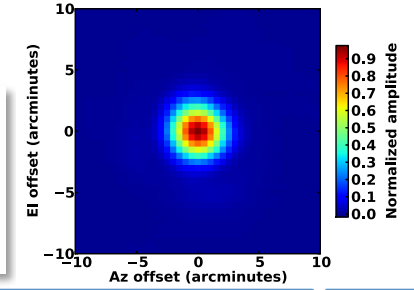


Huan Tran Telescope (HTT)

Off-axis
Gregorian-Dragone



FWHM=3.5'
achieved

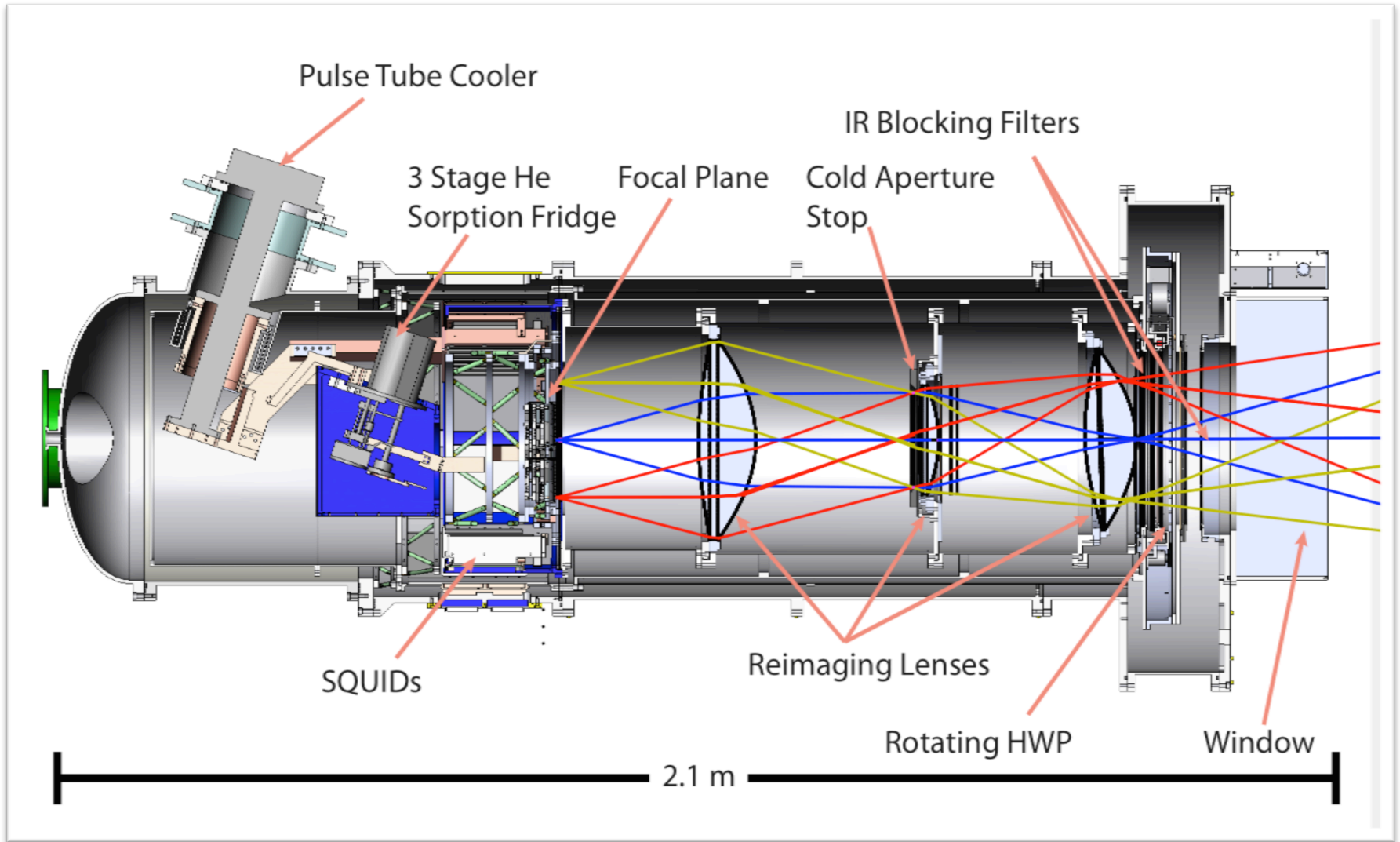


HTT @ Chile on 2013-05-03T22:25:10Z



Logitech HD Webcam C510

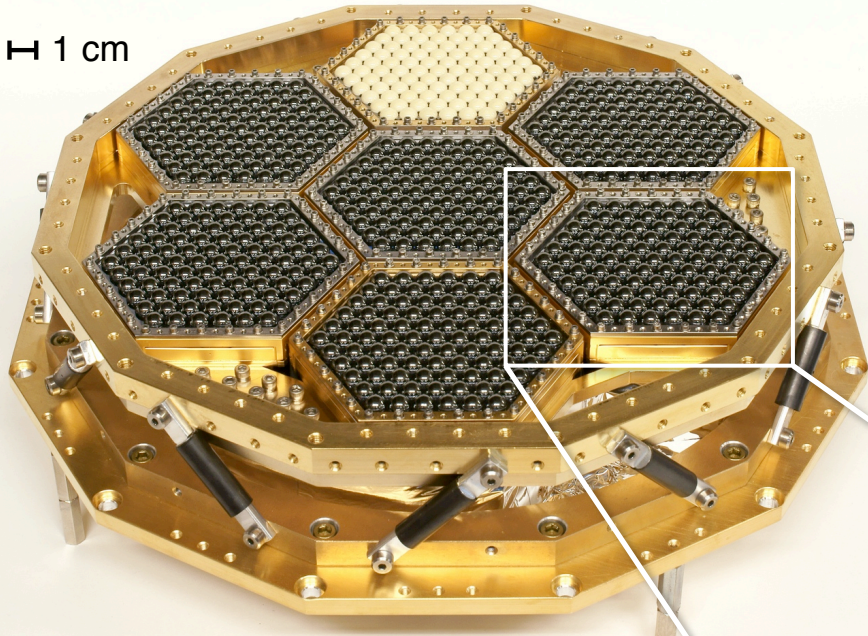
Receiver System



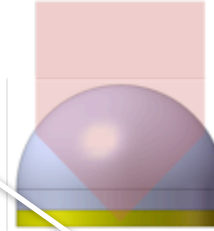
POLARBEAR-1

Focal Plane

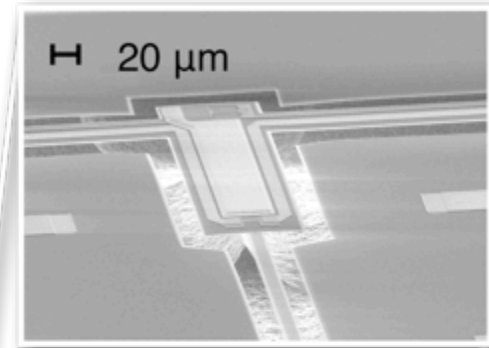
H 1 cm



Lenslet

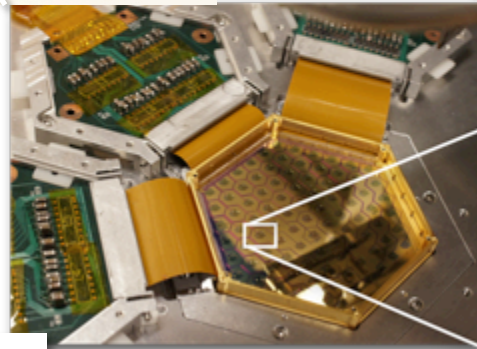


TES

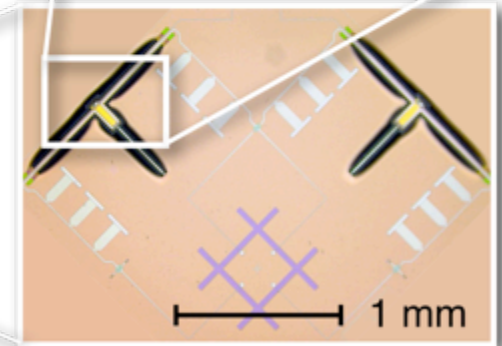


H 20 μm

637 pixels
(91 pixels/wafer x 7 wafers)
1274 TES bolometers



Wafer module
assembly



2 TES bolometers/pixel
with dual-polarization
double-slot dipole antenna

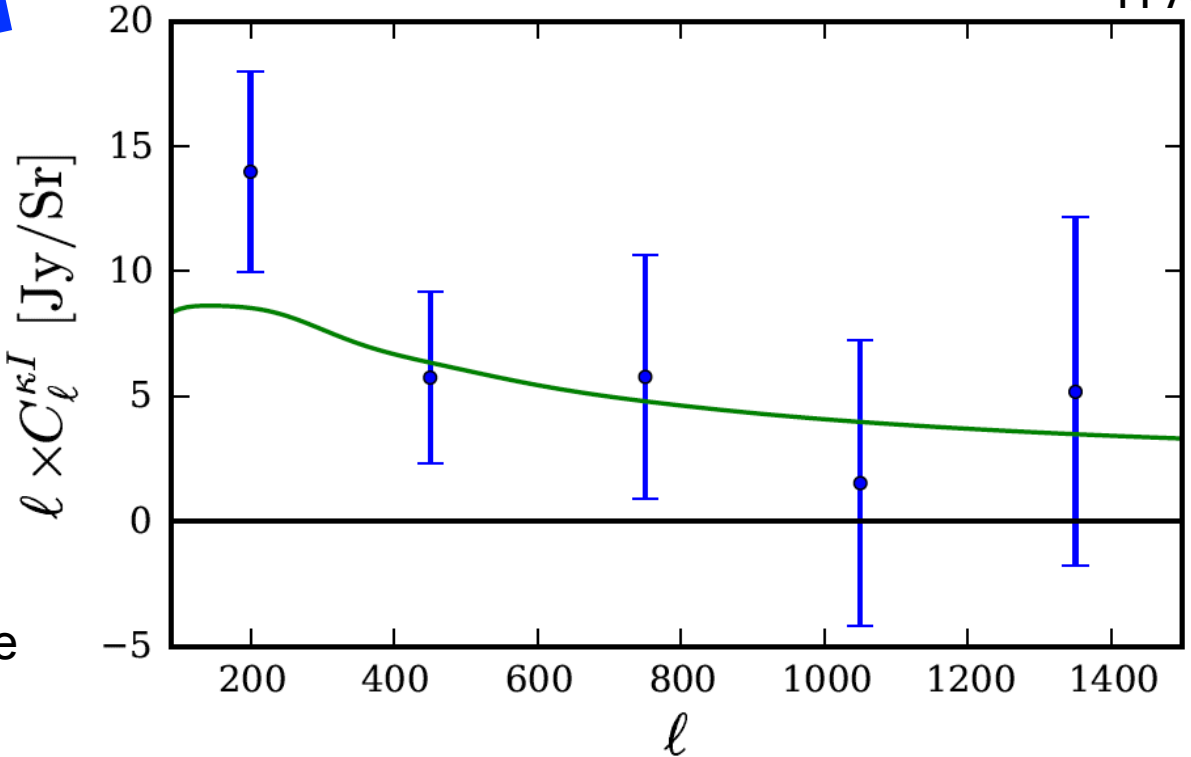
$23 \mu\text{K}\sqrt{\text{s}}$ array NET
(achieved typically
during observations)

Evidence for Gravitational Lensing of the Cosmic Microwave Background Polarization from Cross-correlation with the Cosmic Infrared Background

POLARBEAR Collaboration

New!

polarization lensing \times CIB (Herschel 500 μ m H-ATLAS survey)



4.0 σ stat
syst < 0.2 σ

κ : lensing convergence
 l : CIB

First detection of lensing signals
with CMB polarization alone !

[Phys. Rev. Let. 113, 021301 \(2014\)](#)

Measurement of the Cosmic Microwave Background Polarization
Lensing Power Spectrum with the POLARBEAR experiment

Lensing B-mode detection with CMB 4-point correlations

$$\begin{aligned}
 C_l^{dd} &= \langle d_{EB} d_{EB} \rangle = \langle EBEB \rangle \\
 &= \langle d_{EE} d_{EB} \rangle = \langle EEEB \rangle
 \end{aligned}$$

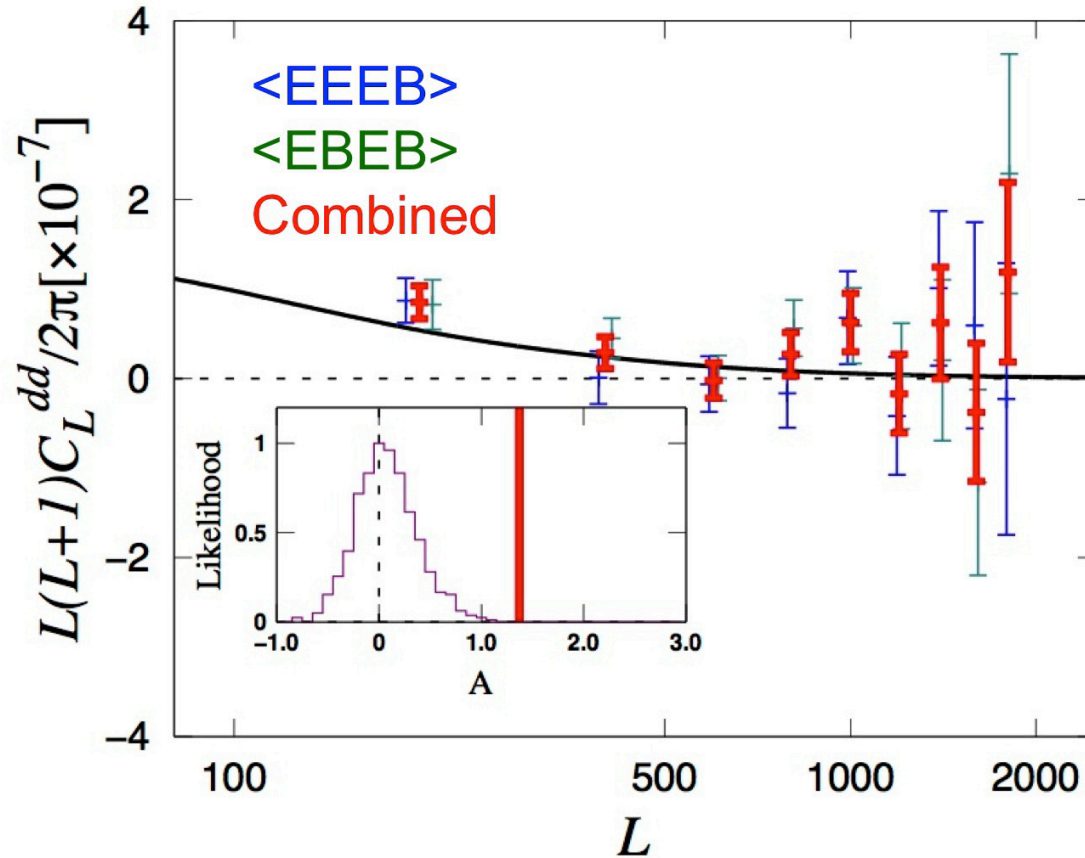
d for deflection field

- E leaks into B due to gravitational lensing.
 - symmetric pattern viewed through a distorted lens
- Many wave numbers of B created
 - E-B correlation between different wave numbers : $E(l)B(l') \neq 0$

$$d_{EB}(\mathbf{L}) = \frac{A_{EB}(L)}{L} \int \frac{d^2l}{(2\pi)^2} E(l)B(l') \frac{\tilde{C}_l^{EE} \mathbf{L} \cdot \mathbf{l}}{C_l^{EE} C_l^{BB}} \sin 2\phi_{ll'}$$

POLARBEAR 2013 C_L^{dd}

[Phys. Rev. Let. 113, 021301 \(2014\)](#)

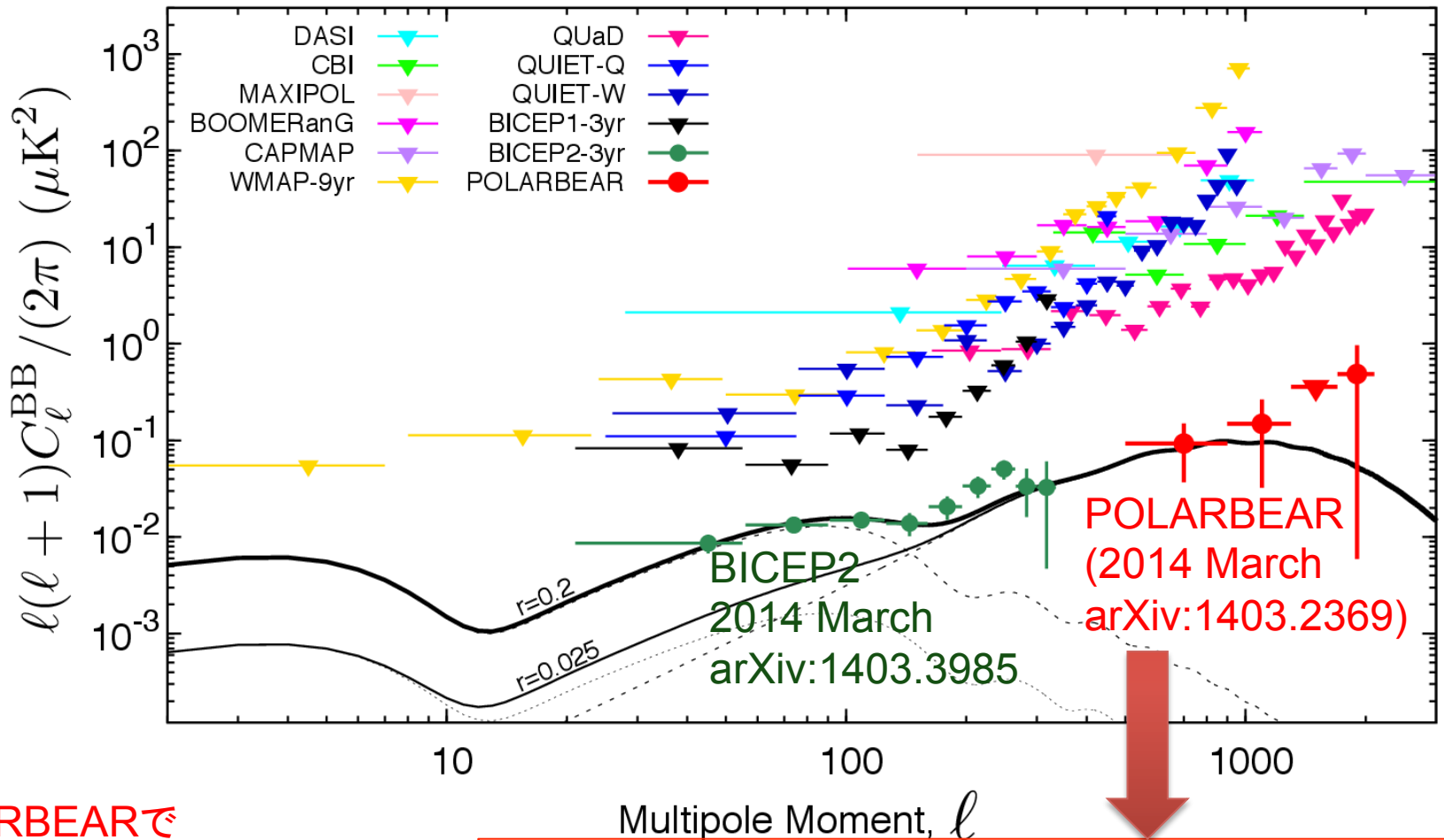


Amplitude = $1.37 \pm 0.30(\text{stat}) \pm 0.13(\text{syst})$

4.2 σ

stat & syst
combined

Bモードパワースペクトル ($C_{l_{BB}}$) の現状



POLARBEARで
BICEP2の結果を今後
検証していく

重カレンズBモードの
Amplitude = $1.12 \pm 0.61(\text{stat})^{+0.04}_{-0.12}(\text{sys}) \pm 0.07(\text{multi})$

若手の活躍

- 都丸(較正源開発、受信機開発)
 - 長谷川(データ較正)
 - 松村(スキャンストラテジー等)
 - 西野(データ解析、オンライン系)
 - 茅根(データ解析)
 - 高倉(データ解析)
-
- 観測・運用は全員でがんばった
(上記+服部、森井、堀、清水、井上、秋葉)



5. 今後の展望とLiteBIRD

- どんなプロジェクトがあるか？
- どんな検証作業ができるか？
- ラグランジアンを決定できるか？
- 未解決問題は？

世界のCMB偏光観測プロジェクト

1. Ground

QUIET

POLARBEAR

ACTPol

Atacama,
Chile

In addition,
ABS, CLASS, POLARBEAR-2,
GroundBIRD, Simons Array, MuSE, ...

BICEP1 BICEP2
SPTPol DASI QUAD KECK

South
Pole

In addition, BICEP3, POLAR, QUBIC, ...

Data SIO, NOAA, U.S. Navy, NGA, GEBCO
© 2011 Inav/Geosistemas SRL

2. Balloon

EBEX

SPIDER

LSPE

PIPER

3. Satellite

WMAP
(obs. end
in 2010)

Planck

PIXIE

COrE

LiteBIRD

EPIC
(CMBpol)

PRISM

In addition, QUIJOTE in Canary island, AMiBA in Hawaii

1-2年のBICEP2検証作業

- Planck (温度、および偏光)
- Keck array
- SPTPol
- POLARBEAR
- ABS
- EBEX ?
- ACTPol

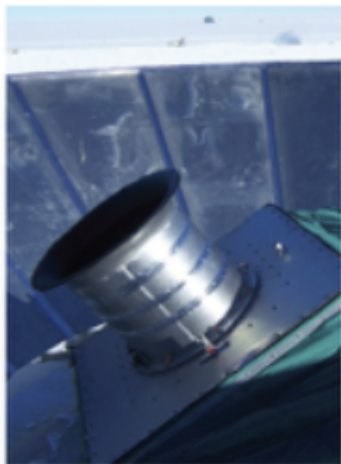


- BICEP2との相関解析
- 別の空での結果
- 90GHzの結果
- Planckのダスト前景放射マップを用いた解析

What do we need ?

1. More frequencies for foreground separation
2. More precise measurements of lensing B mode
3. More sky (BICEP2 already sample-variance limited if $r=0.2$)

BICEP1 (2006-2008)



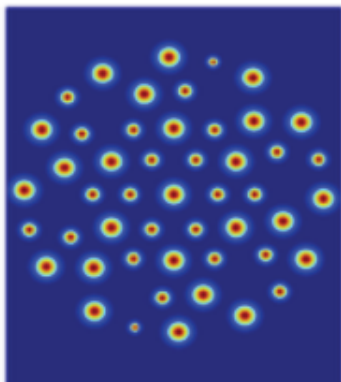
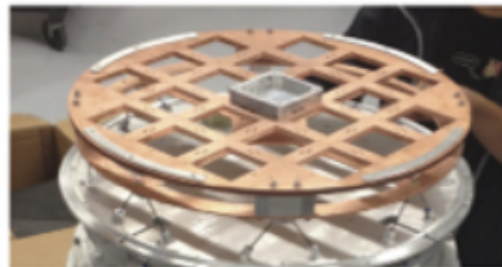
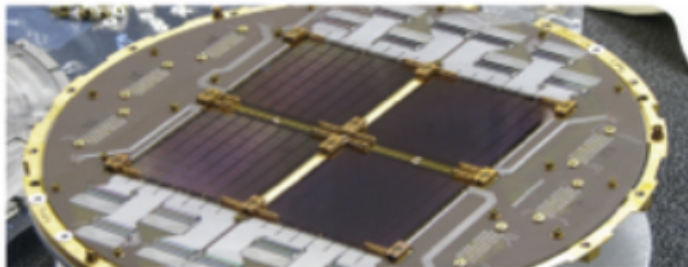
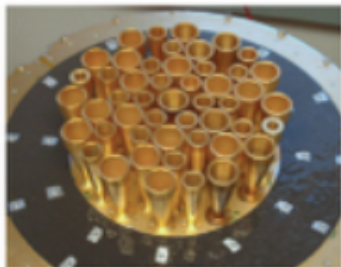
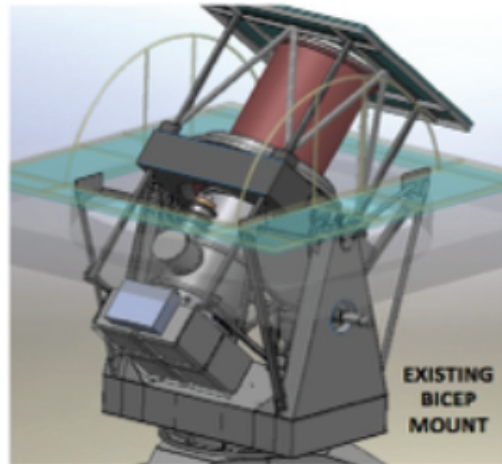
BICEP2 (2010-2012)



Keck Array (2011-2016)



BICEP3 (2015-2016)



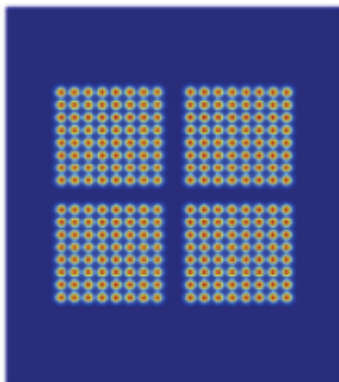
-5 0 5
Longitude (degrees)

98 NTDs (95/150 GHz)

0.93°/0.60° FWHM

18° FOV

44 m² deg² AΩ



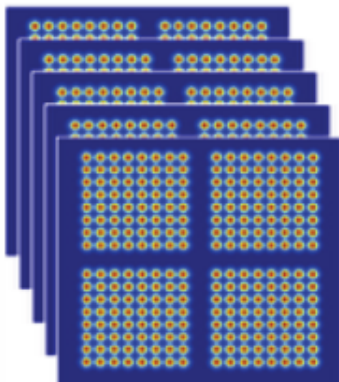
-5 0 5
Longitude (degrees)

512 TESs (150 GHz)

0.52° FWHM

17° FOV

44 m² deg² AΩ



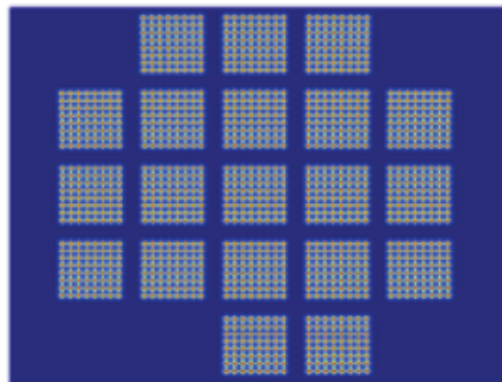
-5 0 5
Longitude (degrees)

2560 TESs (150 GHz)

0.52° FWHM

17° FOV

222 m² deg² AΩ



-10 -5 0 5 10
Longitude (degrees)

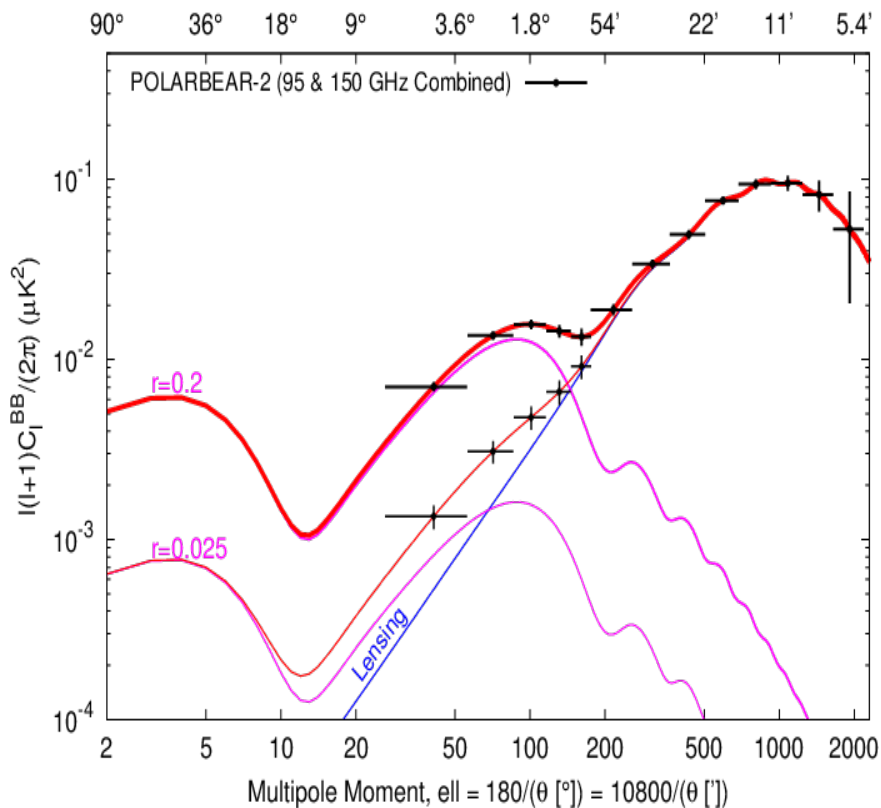
2560 TESs (95 GHz)

0.37° FWHM

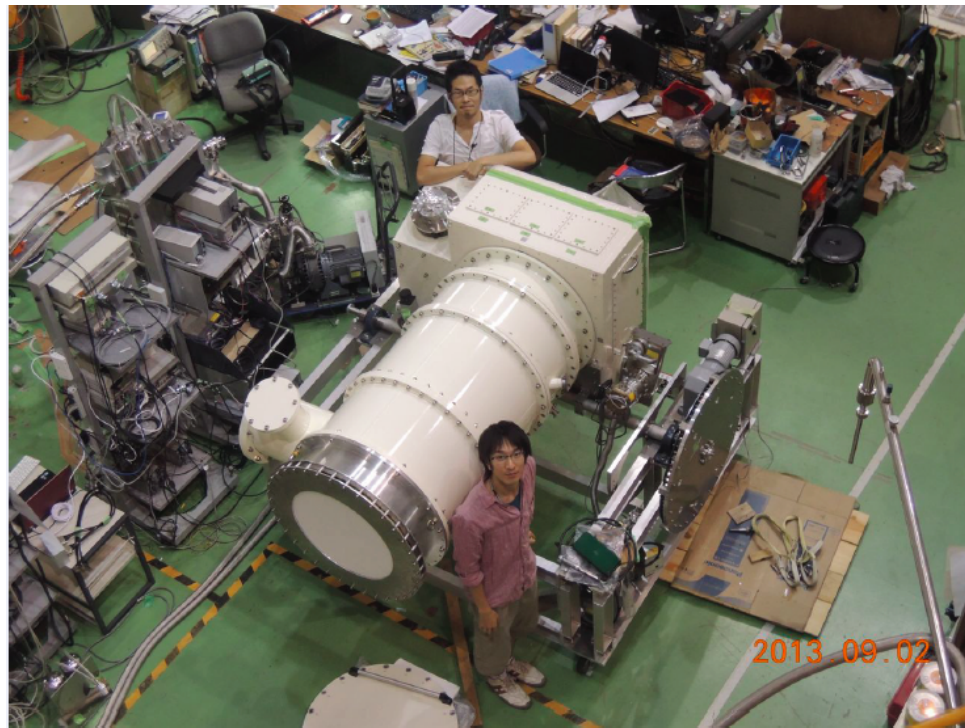
26° FOV

502 m² deg² AΩ optical throughput

POLARBEAR-2



ゴール: $\delta r < 0.01$



KEKが中心となって開発中
2015年度観測開始予定

計画の全体像

2014	2015	2016	2017
------	------	------	------



PB-1

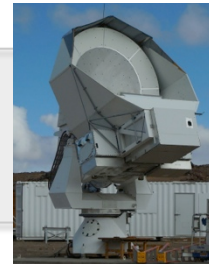


PB-2
コピー1

POLARBEAR-1
(PB-1)



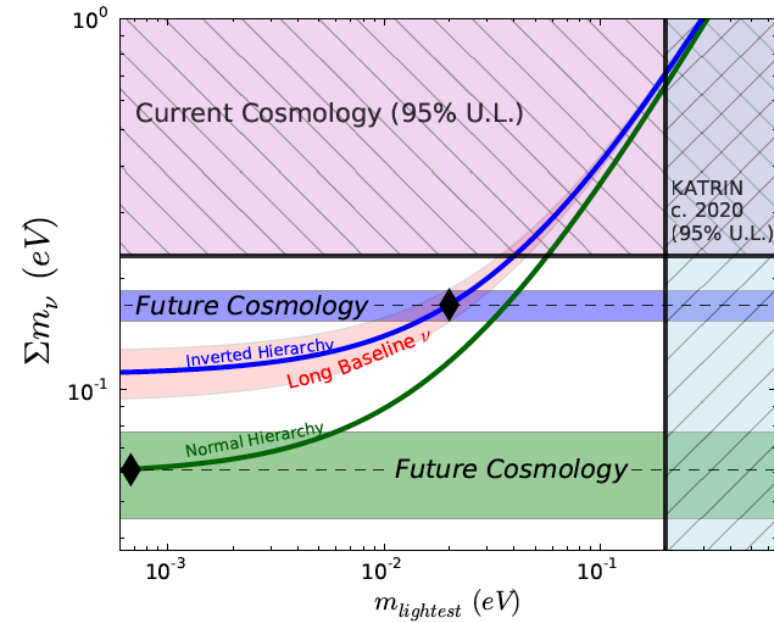
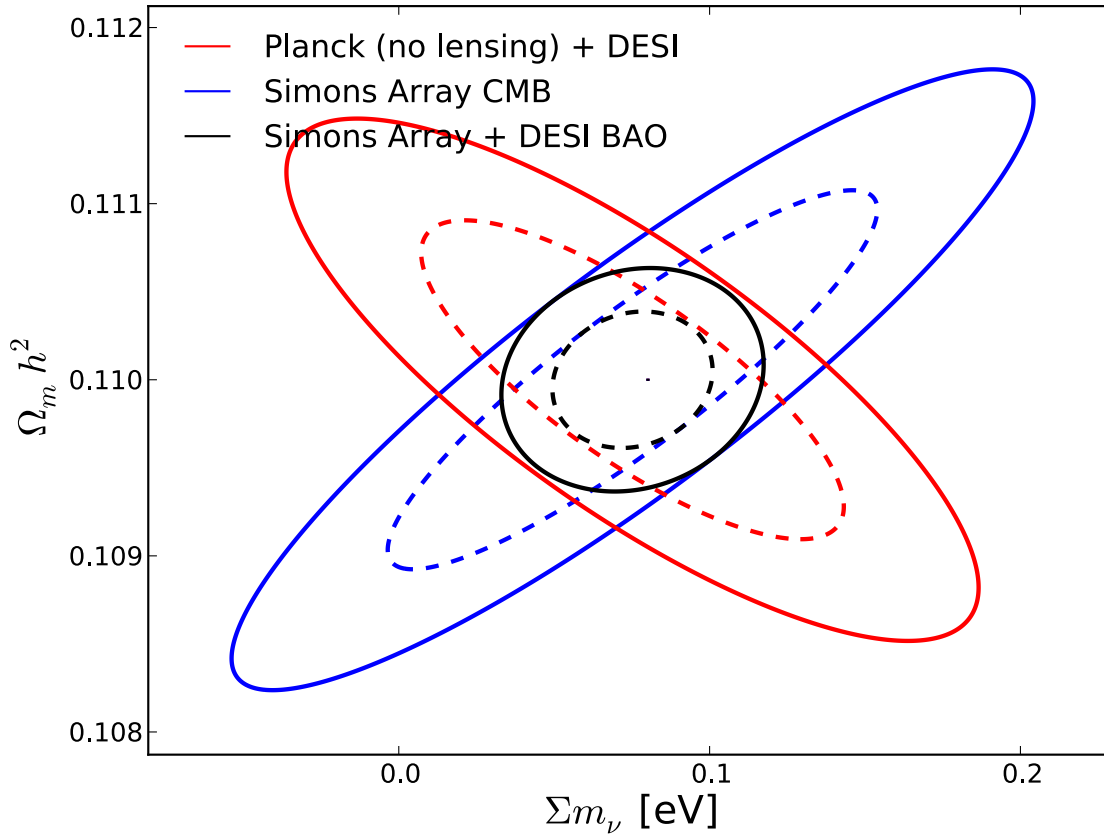
PB-2



PB-2
コピー2

2016年には3台同時観測を目指す
この全体像をサイモンズアレイ計画と呼ぶ

Simons Arrayは重力レンズB-mode観測にも大きな貢献が期待される



total error $\sim 19\text{meV}$ with 3 POLARBEAR-2 receivers,
project named Simons Array

Program and planning at JAXA-Space Science

Saku Tsuneta
Institute of Space and Astronautical Science
Japan Aerospace Exploration Agency

JAXA宇宙科学研究所・常田所長のスライド
(National Research Council Space Science
Week, March 3-5, 2014)



LiteBIRDは
戦略的中型の候補
として認識されている

ミッション

代表的インフレーション宇宙モデルを全て検証する

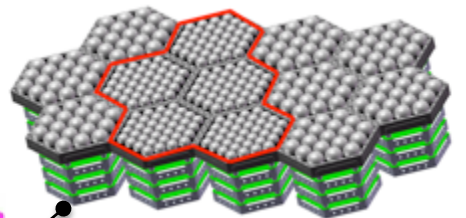
戦略

- 緊急度が高くスペースでしか出来ない観測に的を絞り、大きな成果を世界に先駆けて獲得
- 明確な定量的目標(原始重力波強度パラメータ r を誤差0.001以下で測定)に依る設計
 - r が大きい場合(BICEP2の測定値が正しい場合)に必要な観測精度も満たしている
- 小型光学系と多色焦点面により重量・コスト減
- 準備段階では地上観測プロジェクトによりサイエンスの成果を出しつつ技術実証をおこなう

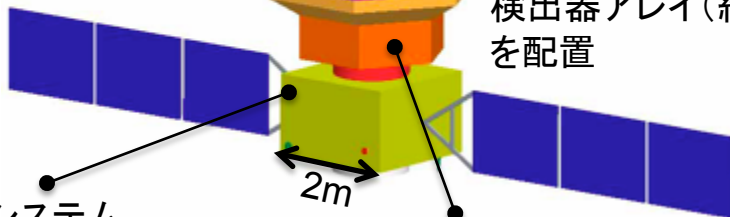
衛星システム

光学系

- 回転半波長板による変調
- クロスドラゴン方式の主鏡、副鏡(直径約60cm)を4ケルビンに保持



100ミリケルビンに冷却した焦点面に多色超伝導検出器アレイ(約2000ch)を配置



バスシステム

- データ取得系
- 制御系
- スターリング冷凍機
- ジュールトムソン冷凍機
- 断熱消磁冷凍機 (X線天文学のノウハウ活用)

観測

- 全天CMB偏光サーベイ
- スピンレート: 0.1rpm
- 50~320GHzの間で6バンド観測
- 角度分解能: 30分角 @ 150GHz

主な仕様

- 観測期間: 2020年代初頭より3年
- 軌道: L2 (ただしLEOと比較検討中)
- 重量: 約1t

LiteBIRD mission

- Check representative inflationary models

- *requirement on the uncertainty on r*

(stat. \oplus syst. \oplus foreground \oplus lensing)

$$\delta r < 0.001$$

No lose theorem of LiteBIRD

➤ Many inflationary models predict $r > 0.01 \rightarrow > 10\sigma$ discovery

➤ Representative inflationary models (single-large-field slow-roll models)

have a lower bound on r ,

$r > 0.002$, from Lyth relation.

$$r = \frac{1}{N^2} \left(\frac{\Delta\phi}{m_{\text{pl}}} \right)^2 \approx 2 \cdot 10^{-3} \left(\frac{\Delta\phi}{m_{\text{pl}}} \right)^2$$

➤ no gravitational wave detection at LiteBIRD \rightarrow exclude representative inflationary models (i.e. $r < 0.002$ @ 95% C.L.)

➤ Early indication from non-space-based projects \rightarrow power spectra at LiteBIRD !

Similar to LHC Higgs case (Occam's razor)

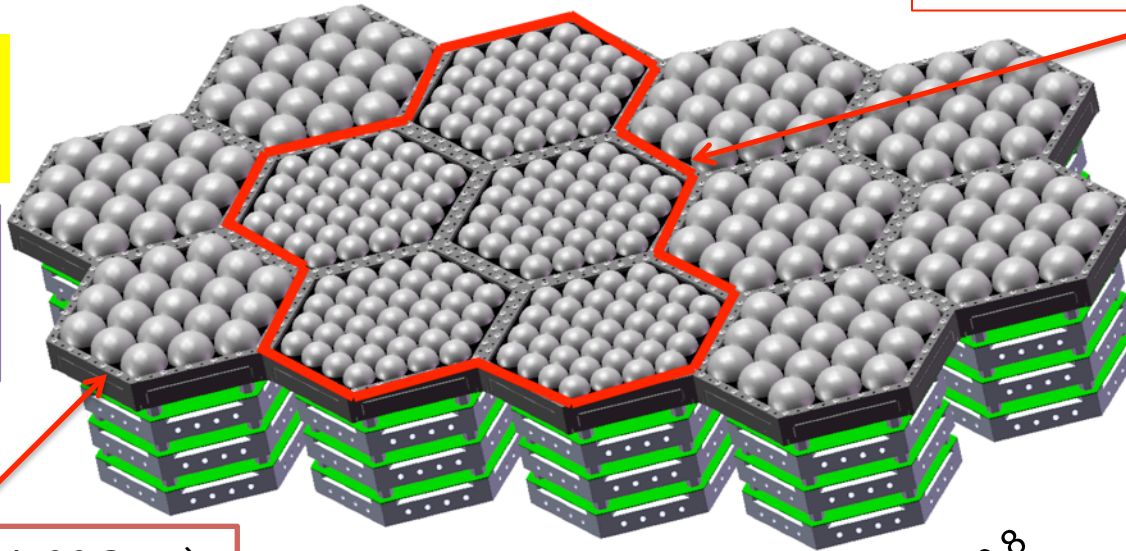
LiteBIRD focal plane design

UC Berkeley
TES option

2022 TES
bolometers

$T_{\text{bath}} = 100\text{mK}$

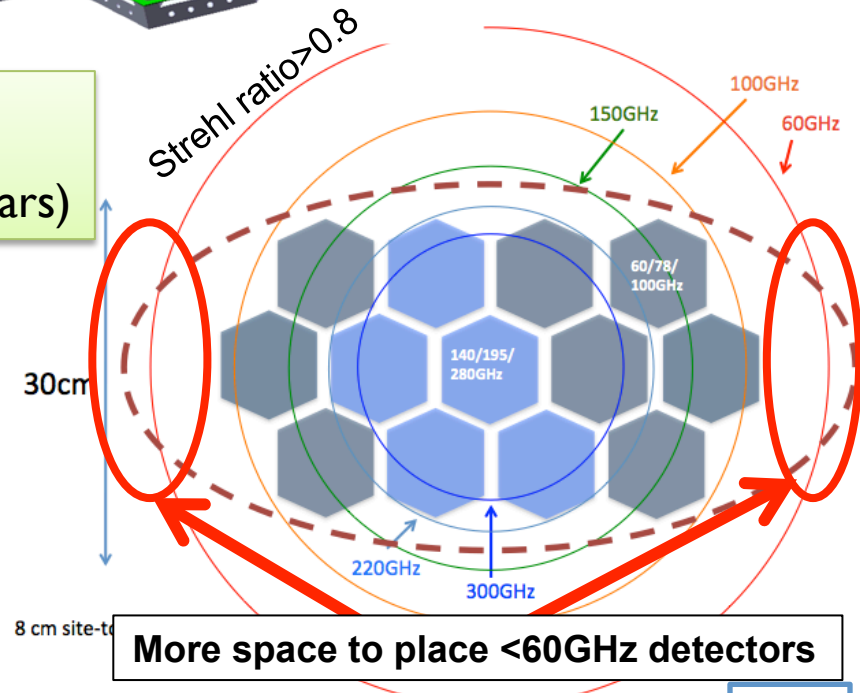
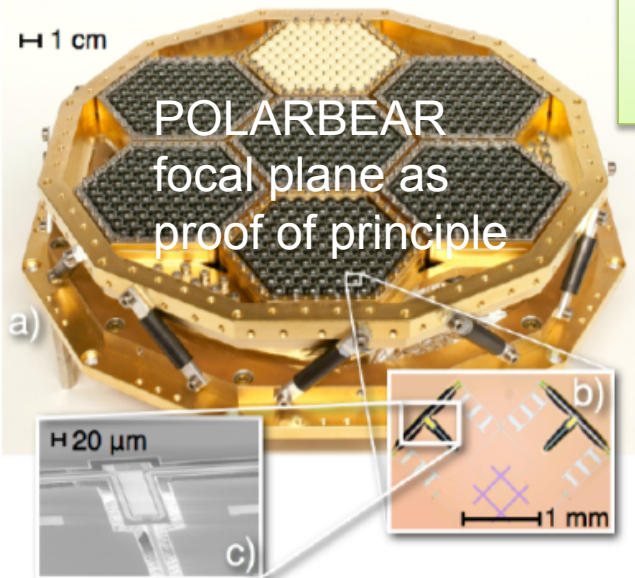
tri-chroic (60/78/100GHz)



tri-chroic (140/195/280GHz)

Band centers can be distributed to increase the effective number of bands

2 μ Karcmin
(w/ 2 effective years)

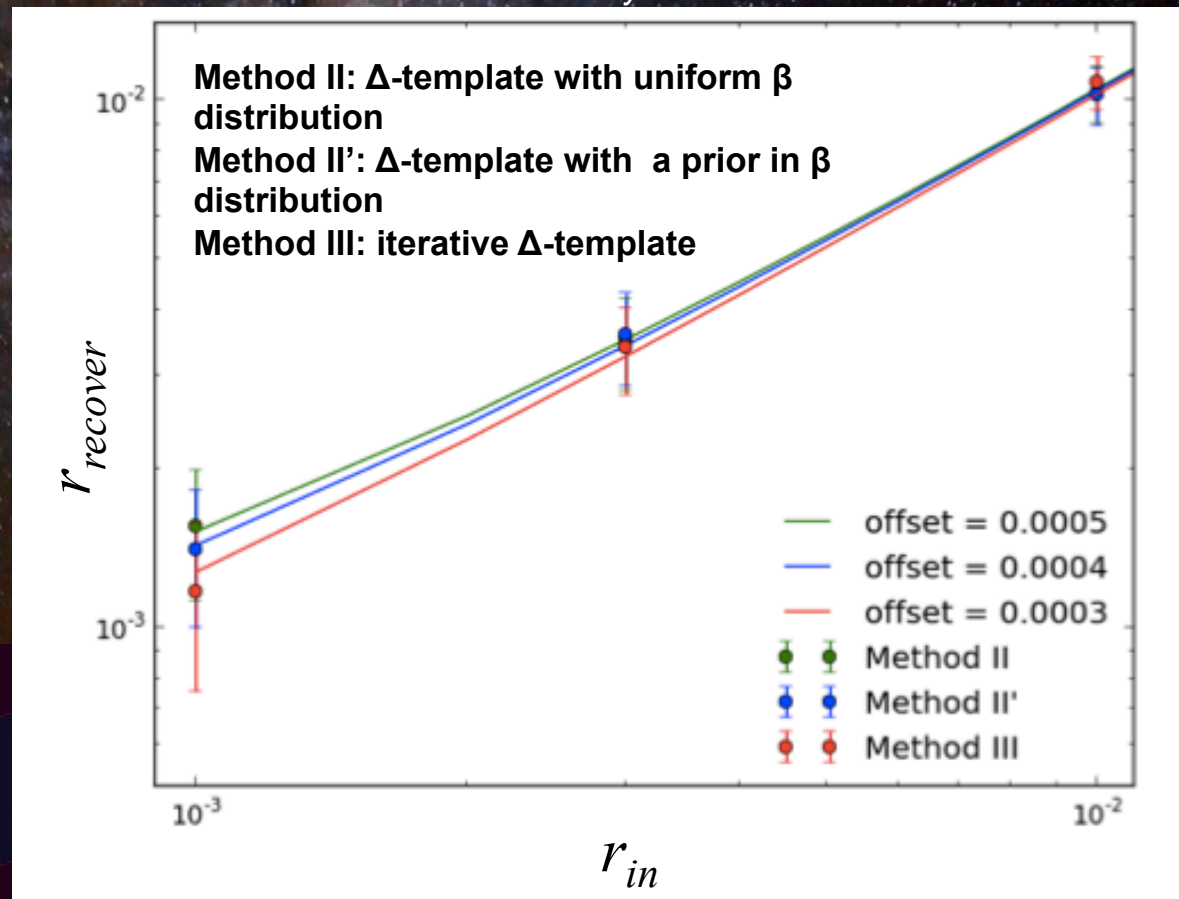


Foreground subtraction exercise using a template method with 6 bands

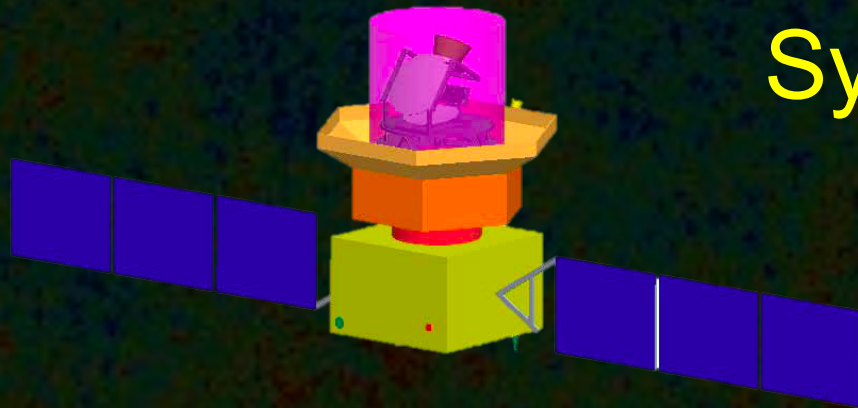
We apply the template method to the Planck sky model (Dust polarization fraction is set to be $\times 3$) using the 6 bands, and test the recovery of tensor-to-scalar ratio, r . Use $l < 47$ and f_{sky} of 50%.

Band (GHz)	Sensitivity (μK arcmin)
60	10.3
78	6.5
100	4.7
140	3.7
195	3.1
280	3.8
Total	1.8 (2.9 ^b)

Planck CMB polarization data will be released in late 2014 and we will revisit to this optimization with Planck data.

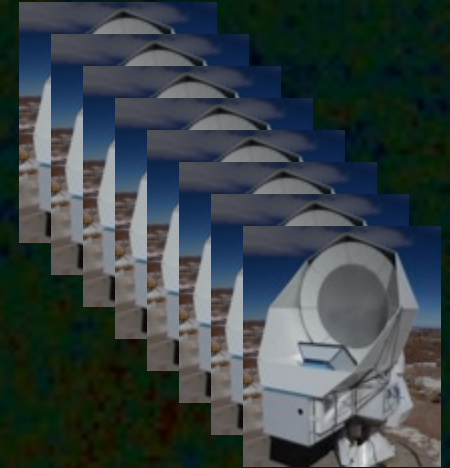


Strategy



Synergy

X



Small Satellite for
ultimate meas.
of r ($\delta r < 0.001$)

Super telescope array
on ground
 $40 < l < 3000 \sim 10000$

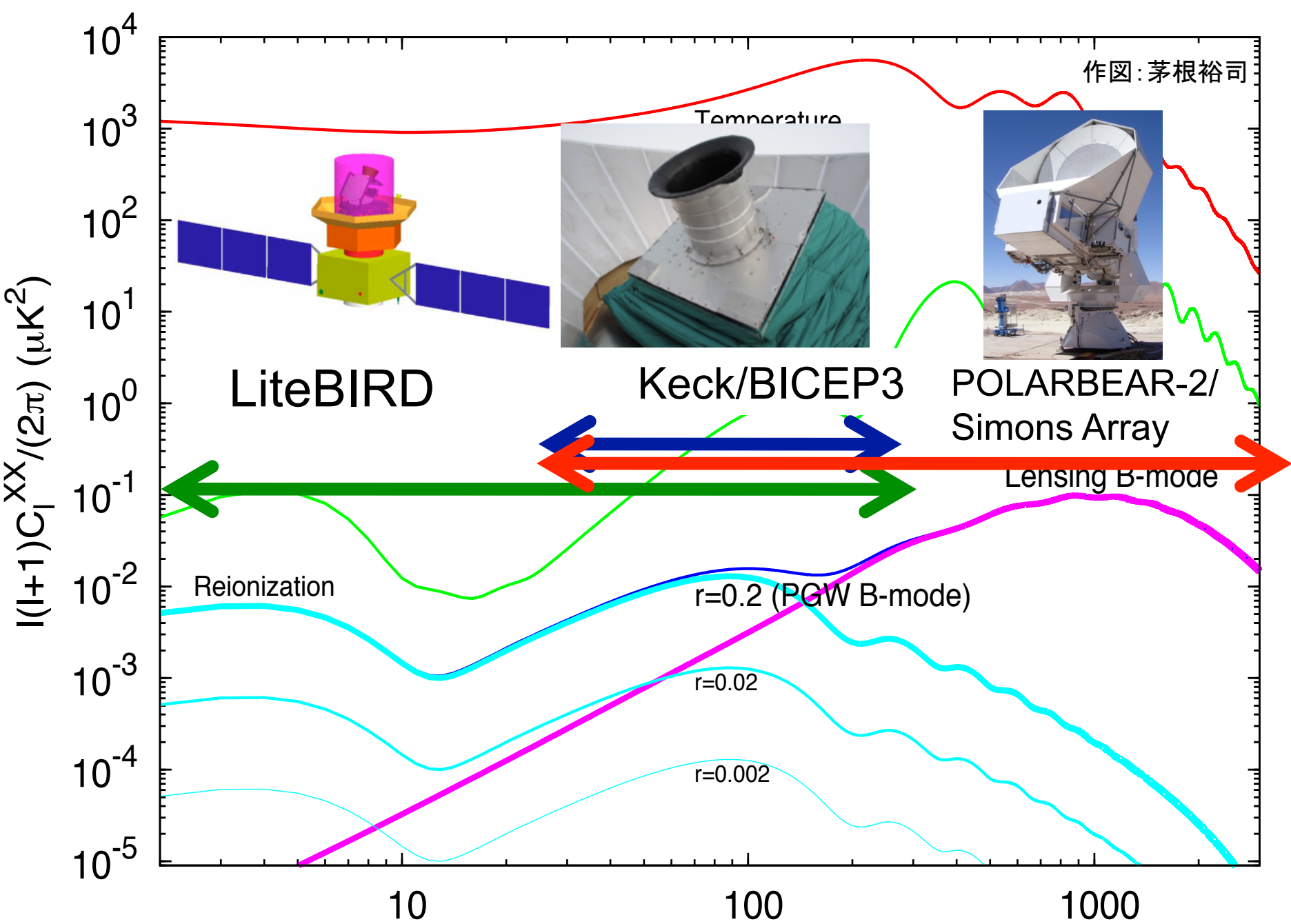
Powerful Duo

国際情勢

- 米国:PIXIE(地球周回)
 - 2017年頃提案の可能性あり→最速で2023年打ち上げ
- ヨーロッパ:
 - 2013年:PRISMをL class missionとして提案し、不採択
 - 2014年:CORe+をM class missionとして提案の予定



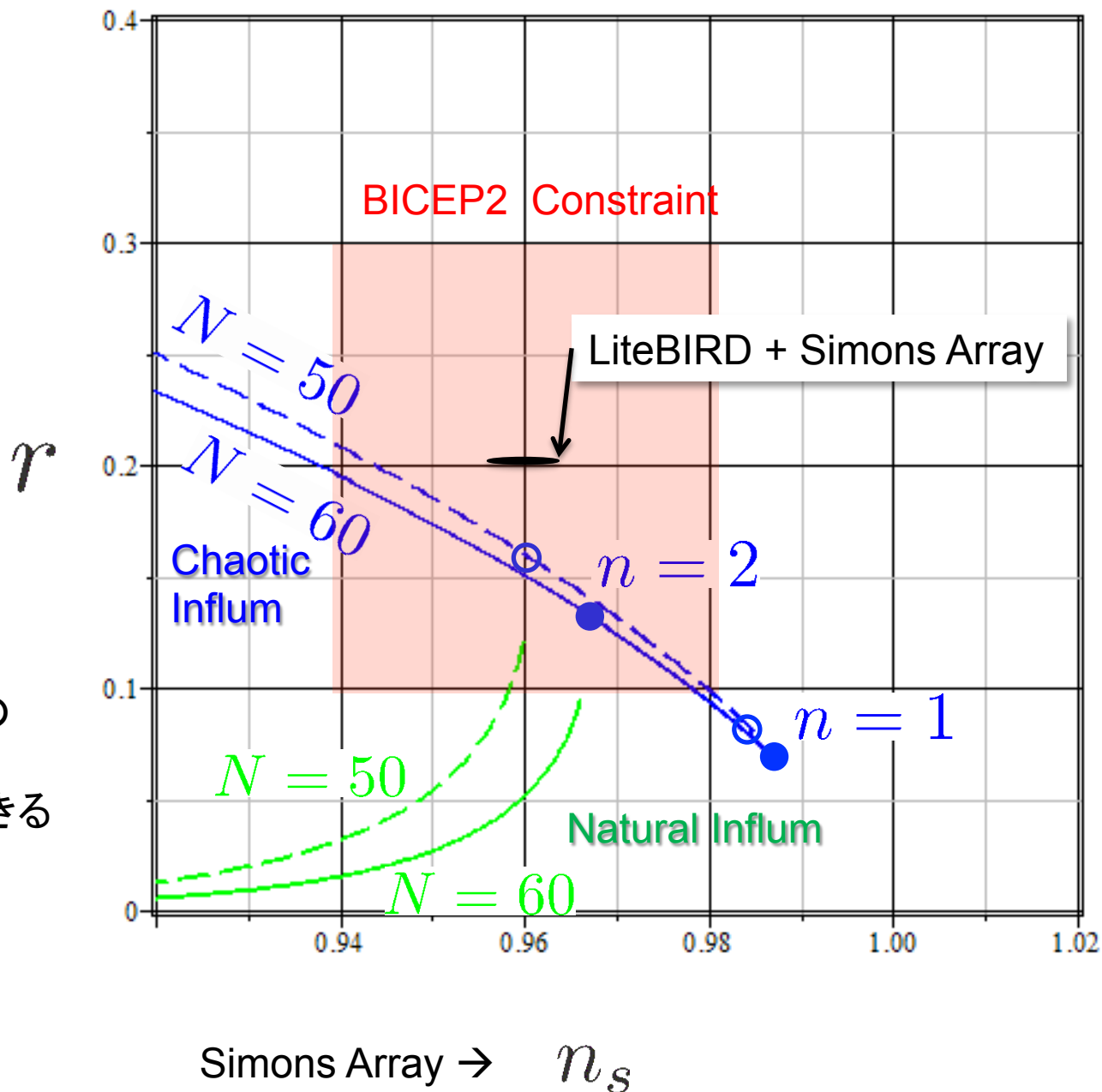
- 2020年代前半にLiteBIRDを打ち上げることが出来れば上記計画に先んじる可能性大
 - 緊急度は高く、我が国がリードするチャンス
 - 先んじられた場合には大魚を逃がす恐れ



LiteBIRD + Simons Array

LiteBIRD →
 r をおよそ1.6%
の精度で決定

インフレーションモデルの
徹底検証が可能となる
ラグランジアンを決定できる
可能性！



より深遠な未解決問題

もし r が本当に $O(0.1)$ で、

カオティックインフレーションがピタリと合えば、すべてめでたし？ → No !

1. ラージフィールド(スーパープランク)の問題

$$\text{Lyth Bound} \quad r \lesssim 8 \left(\frac{\Delta\phi}{N_o m_{\text{pl}}} \right)^2 \approx 2 \times 10^{-3} \left(\frac{\Delta\phi}{m_{\text{pl}}} \right)^2$$

$$r=0.2 \text{ なら、} 10 m_{\text{pl}} \lesssim \Delta\phi$$

大きな場の変位とスローロール条件をどう両立させるか？
functional fine tuningの問題

2. 暗黒エネルギーをどう統一的に扱うか？

新しい実験・観測のアイディアは、必ず生まれる