背景: ESA Planck pageより

研究室輪講

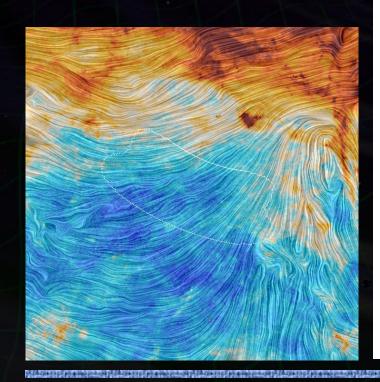
BICEP2/Keck Array と Planck のデータを用いたCMB偏光解析

安東 正樹 (東京大学 理学系研究科)

201

[astro-ph.CO]

arXiv:1502.00612v1



A Joint Analysis of BICEP2/Keck Array and Planck Data

BICEP2/Keck and Planck Collaborations: P. A. R. Ade, N. Aghanim, Z. Ahmed, R. W. Aikin, 4 K. D. Alexander, M. Arnaud, J. Aumont, C. Baccigalupi, A. J. Banday, 9, D. Barkats, 10 R. B. Barreiro, 11 J. G. Bartlett, ¹², ¹³ N. Bartolo, ¹⁴, ¹⁵ E. Battaner, ¹⁶, ¹⁷ K. Benabed, ¹⁸, ¹⁹ A. Benoit-Lévy, ²⁰, ¹⁸, ¹⁹ S. J. Benton, ²¹ J.-P. Bernard, 8,9 M. Bersanelli, 22,23 P. Bielewicz, 8,9,7 C. A. Bischoff, J. J. Bock, 13,4 A. Bonaldi, 24 L. Bonavera, 11 J. R. Bond, J. Borrill, 26, 27 F. R. Bouchet, 18, 19 F. Boulanger, J. A. Brevik, M. Bucher, 12 I. Buder, E. Bullock, 28 C. Burigana, 29, 30, 31 R. C. Butler, 29 V. Buza, E. Calabrese, 32 J.-F. Cardoso, 33, 12, 18 A. Catalano, 34, 35 A. Challinor, 36, 37, 38 R.-R. Chary, 39 H. C. Chiang, 40, 41 P. R. Christensen, 42, 43 L. P. L. Colombo, 44, 13 C. Combet, 34 J. Connors. F. Couchot, A. Coulais, B. P. Crill, A. Curto, A. Curto, R. J. Davis, ²⁴ P. de Bernardis, ⁴⁷ A. de Rosa, ²⁹ G. de Zotti, ^{48,7} J. Delabrouille, ¹² J.-M. Delouis, ^{18,19} F.-X. Désert, ⁴⁹ C. Dickinson, 24 J. M. Diego, 11 H. Dole, 2,50 S. Donzelli, 23 O. Doré, 13,4 M. Douspis, 2 C. D. Dowell, 13 L. Duband, 51 A. Ducout. 18, 52 J. Dunkley. 32 X. Dupac. 53 C. Dvorkin. 5 G. Efstathiou. 36 F. Elsner. 20, 18, 19 T. A. Enßlin. 54 H. K. Eriksen, 55 J. P. Filippini, 4,56 F. Finelli, 29,31 S. Fliescher, 57 O. Forni, 8,9 M. Frailis, 58 A. A. Fraisse, 40 E. Franceschi, ²⁹ A. Frejsel, ⁴² S. Galeotta, ⁵⁸ S. Galli, ¹⁸ K. Ganga, ¹² T. Ghosh, ² M. Giard, ^{8,9} E. Gjerløw, ⁵⁵ S. R. Golwala, J. González-Nuevo, 11,7 K. M. Górski, 13,59 S. Gratton, 37,36 A. Gregorio, 60,58,61 A. Gruppuso. 29 J. E. Gudmundsson, 40 M. Halpern, 62 F. K. Hansen, 55 D. Hanson, 63, 13, 25 D. L. Harrison, 36, 37 M. Hasselfield, 62 G. Helou, S. Henrot-Versillé, D. Herranz, S. R. Hildebrandt, S. G. C. Hilton, E. Hivon, M. Hobson, G. Helou, G. C. Hilton, G. E. Hivon, M. Hobson, G. Helou, G. C. Hilton, G. C. Hilt W. A. Holmes, ¹³ W. Hovest, ⁵⁴ V. V. Hristov, ⁴ K. M. Huffenberger, ⁶⁵ H. Hui, ⁴ G. Hurier, ² K. D. Irwin, ³, ⁶⁶, ⁶⁴ A. H. Jaffe, 52 T. R. Jaffe, 8,9 J. Jewell, 13 W. C. Jones, 40 M. Juvela, 67 A. Karakci, 12 K. S. Karkare, 5 J. P. Kaufman, 68 B. G. Keating, 68 S. Kefeli, 4 E. Keihänen, 67 S. A. Kernasovskiy, 3 R. Keskitalo, 26 T. S. Kisner, 69 R. Kneissl, 70,71 J. Knoche, 54 L. Knox, 72 J. M. Kovac, 5 N. Krachmalnicoff, 22 M. Kunz, 73, 2, 74 C. L. Kuo, 3,66 H. Kurki-Suonio, 67,75 G. Lagache, 76,2 A. Lähteenmäki, 77,75 J.-M. Lamarre, 35 A. Lasenby, 46,37 M. Lattanzi, 30 C. R. Lawrence, ¹³ E. M. Leitch, ⁷⁸ R. Leonardi, ⁵³ F. Levrier, ³⁵ A. Lewis, ⁷⁹ M. Liguori, ^{14,15} P. B. Lilje, ⁵⁵ M. Linden-Vørnle, 80 M. López-Caniego, 53,11 P. M. Lubin, 81 M. Lueker, 4 J. F. Macías-Pérez, 34 B. Maffei, 24 D. Maino, ^{22,23} N. Mandolesi, ^{29,82,30} A. Mangilli, ¹⁸ M. Maris, ⁵⁸ P. G. Martin, ²⁵ E. Martínez-González, ¹¹ S. Masi, ⁴⁷ P. Mason, ⁴ S. Matarrese, ^{14,15,83} K. G. Megerian, ¹³ P. R. Meinhold, ⁸¹ A. Melchiorri, ^{47,84} L. Mendes, 53 A. Mennella, 22, 23 M. Migliaccio, 36, 37 S. Mitra, 85, 13 M.-A. Miville-Deschênes, 2, 25 A. Moneti, 18 L. Montier, 8,9 G. Morgante, 29 D. Mortlock, 52 A. Moss, 86 D. Munshi, 1 J. A. Murphy, 87 P. Naselsky, 42, 43 F. Nati, 40 P. Natoli, 30, 88, 29 C. B. Netterfield, 89 H. T. Nguyen, 13 H. U. Nørgaard-Nielsen, 80 F. Noviello, 24 D. Novikov, 90 I. Novikov, 42, 90 R. O'Brient, 13 R. W. Ogburn IV, 3, 66 A. Orlando, 68 L. Pagano, 47, 84 F. Pajot, 2 R. Paladini, ³⁹ D. Paoletti, ^{29,31} B. Partridge, ⁹¹ F. Pasian, ⁵⁸ G. Patanchon, ¹² T. J. Pearson, ^{4,39} O. Perdereau, ⁴⁵ L. Perotto, 34 V. Pettorino, 92 F. Piacentini, 47 M. Piat, 12 D. Pietrobon, 13 S. Plaszczynski, 45 E. Pointecouteau, 8,9 G. Polenta, 88,93 N. Ponthieu, 2,49 G. W. Pratt, 6 S. Prunet, 18,19 C. Pryke, 57,28 J.-L. Puget, 2 J. P. Rachen, 94,54 W. T. Reach. S. R. Rebolo, 96, 97, 98 M. Reinecke, 54 M. Remazeilles, 24, 2, 12 C. Renault, 34 A. Renzi, 99, 100 S. Richter. J. Ristorcelli, 8,9 G. Rocha, 13,4 M. Rossetti, 22,23 G. Roudier, 12,35,13 M. Rowan-Robinson, 52 J. A. Rubiño-Martín, 96, 98 B. Rusholme, 39 M. Sandri, 29 D. Santos, 34 M. Savelainen, 67, 75 G. Savini, 101 R. Schwarz, 57 D. Scott, ¹⁰² M. D. Seiffert, ^{13,4} C. D. Sheehy, ^{57,103} L. D. Spencer, ¹ Z. K. Staniszewski, ^{4,13} V. Stolyarov, ^{46,37,104} R. Sudiwala, R. Sunyaev, 54,105 D. Sutton, 36,37 A.-S. Suur-Uski, 67,75 J.-F. Sygnet, 18 J. A. Tauber, 106 G. P. Teply, 4 L. Terenzi, 107, 29 K. L. Thompson, L. Toffolatti, 108, 11, 29 J. E. Tolan, M. Tomasi, 22, 23 M. Tristram, 45 M. Tucci, 73 A. D. Turner, ^{13,78} L. Valenziano, ²⁹ J. Valiviita, ^{67,75} B. Van Tent, ¹⁰⁹ L. Vibert, ² P. Vielva, ¹¹ A. G. Vieregg, ¹⁰³, ¹¹⁰ F. Villa.²⁹ L. A. Wade, ¹³ B. D. Wandelt, ¹⁸, ¹⁹, ⁵⁶ R. Watson, ²⁴ A. C. Weber, ¹³ I. K. Wehus, ¹³ M. White, ¹¹¹ S. D. M. White ⁵⁴ J. Willmert ⁵⁷ C. L. Wong ⁵ K. W. Yoon ^{3,66} D. Yvon ¹¹² A. Zacchei ⁵⁸ and A. Zonca ⁸¹

> ¹School of Physics and Astronomy, Cardiff University, Queens Buildings, The Parade, Cardiff, CF24 3AA, U.K.

² Institut d'Astrophysique Spatiale, CNRS (UMR8617) Université Paris-Sud 11, Bâtiment 121, Orsay, France
³ Department of Physics, Stanford University, Stanford, California 94305, U.S.A.
⁴ California Institute of Technology, Pasadena, California, U.S.A.

⁵Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics, 60 Garden Street MS 42, Cambridge, Massachusetts 02138, U.S.A.
⁶Laboratoire AIM, IRFU/Service d'Astrophysique - CEA/DSM - CNRS - Université Paris Diderot, Bât. 709, CEA-Saclay, F-91191 Gif-sur-Yvette Cedex, France



BICEP2/Keck Array と Planck の観測データを同時に用いてCMB偏光の相関解析.

- → テンソル-スカラー比 r の尤度曲線を得た.
 - r_{0.05} < 0.12 (信頼度 95%)
 - Lensing B-Modeを 7.0σで検出.

We report the results of a joint analysis of data from BICEP2/ $Keck\ Array$ and Planck. BICEP2 and $Keck\ Array$ have observed the same approximately 400 deg² patch of sky centered on RA 0h, Dec. -57.5° . The combined maps reach a depth of $57\,\mathrm{nK}$ deg in Stokes Q and U in a band centered at $150\,\mathrm{GHz}$. Planck has observed the full sky in polarization at seven frequencies from 30 to $353\,\mathrm{GHz}$, but much less deeply in any given region $(1.2\,\mu\mathrm{K}\,\mathrm{deg}$ in Q and U at $143\,\mathrm{GHz}$). We detect 150×353 cross-correlation in B-modes at high significance. We fit the single- and cross-frequency power spectra at frequencies above $150\,\mathrm{GHz}$ to a lensed- $\Lambda\mathrm{CDM}$ model that includes dust and a possible contribution from inflationary gravitational waves (as parameterized by the tensor-to-scalar ratio r). We probe various model variations and extensions, including adding a synchrotron component in combination with lower frequency data, and find that these make little difference to the r constraint. Finally we present an alternative analysis which is similar to a map-based cleaning of the dust contribution, and show that this gives similar constraints. The final result is expressed as a likelihood curve for r, and yields an upper limit $r_{0.05} < 0.12$ at 95% confidence. Marginalizing over dust and r, lensing B-modes are detected at $7.0\,\sigma$ significance.

1. イントロダクション

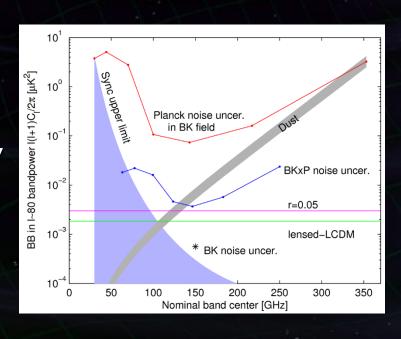
- ・CMB B-mode偏光の観測からインフレーション起源の 背景重力波が観測できる可能性.
 - ightarrow テンソル-スカラー比 r の観測値は, インフレーション モデルの情報を持っている.
- •Planck衛星: 30-353GHzの7つの周波数帯で観測.
 - \rightarrow SPT (South Pole Telescope), ACT, WMAPと合わせて $r_{0.002} < 0.11$

(信頼度95%, pivot scale $k = 0.002 \,\mathrm{Mpc^{-1}}$) の上限値を与えていた.

1. イントロダクション:ダスト

- •CMB B-mode偏光の観測では, 星間ダストの影響が問題.
 - 星間磁場でダスト粒子の向きが揃う.
 - それらからの熱輻射 → 偏光をもつ.
 - 偏光度合からダストの性質や星間磁場が調べられている.

CMB偏光観測に対するダストの影響は 100-150GHzあたりから大きくなり,350 GHzでは主要な要因となる.



1. イントロダクション:観測装置

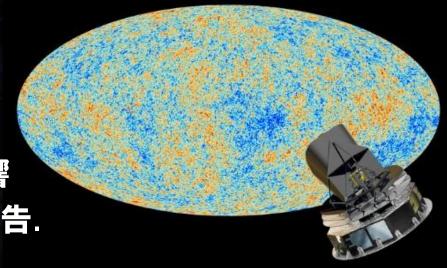
•BICEP2

- 地上(南極)のマイクロ波望遠鏡.
- 2010 2012年に観測.
- 150 GHz で 全天の約1%を観測.
- 2014年 有意なB-modeの観測 結果を発表. → 検証を要した.



Planck

- ESAの宇宙マイクロ波望遠鏡.
- 複数周波数帯で全天を観測.
- BICEP2の領域ではダストの影響 があってもおかしくないという報告.



1. イントロダクション:観測装置

- Keck Array
 - BICEP2と同様の,地上(南極)に 設置されたマイクロ波望遠鏡.
 - 2012 2013年にBICEP2と同じ 天球領域を150 GHzで観測.
 - 現在最も高感度のマイクロ波 偏光望遠鏡 (雑音レベル 57nK).



2-A. Map → Power Spectrum

・使用する偏光マップ

- BK-V: BICEP2/Keck Arrayを合わせたもの (ApJへ投稿中).
- PR2: Planckの全ミッション偏光マップ (2014年発表).
 - * データセットを半分に分ける (期間, サーベイ周回, 検出器).
 - * 各マップで, 雑音シミュレーションを 500回づつ実行し 検出器雑音を評価(時系列 > マップへの影響へ変換).

・データの処理

- フィルタ処理を揃えるために, Planck データを
 'Planck as seen by BICEP2/Keck' mapへ変換.
- BICEP2/Keckの観測を模擬し, 同様のデータ処理 でマップを作成.

BICEP2/Keckフィルタで再構成されたPlanckマップ

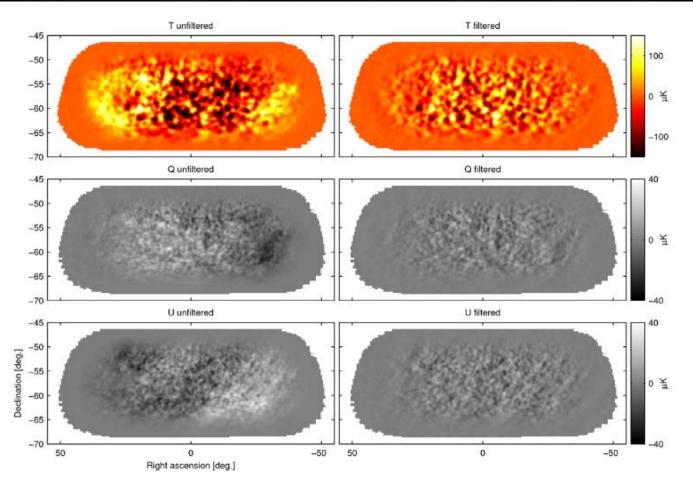


FIG. 1. Planck 353 GHz T, Q, and U maps before (left) and after (right) the application of BICEP2/Keck filtering. In both cases the maps have been multiplied by the BICEP2/Keck apodization mask. The Planck maps are presmoothed to the BICEP2/Keck beam profile and have the mean value subtracted. The filtering, in particular the third order polynominal subtraction to suppress atmospheric pickup, removes large-angular scale signal along the BICEP2/Keck scanning direction (parallel to the right ascension direction in the maps here).

2-B. ダストの影響

・ダスト偏光の空間依存性

- Planck観測から求められていた.

$$\rightarrow D_l^{BB} = A^{BB}(l/80)^{-0.42 \pm 0.02}$$

高緯度の1%パッチ領域でも この依存性に従っている.

・ダスト偏光の周波数依存性

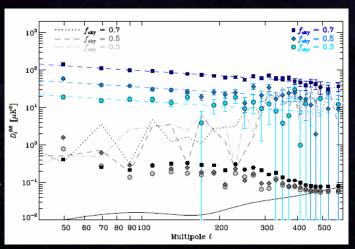
- Planck中緯度観測から SED (Spectrum Energy Distribution)を求める.

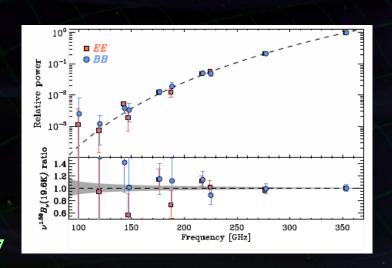
修正黒体輻射と一致

$$I_d(\nu) \propto \nu^{\beta_d} B_{\nu}(T_d)$$

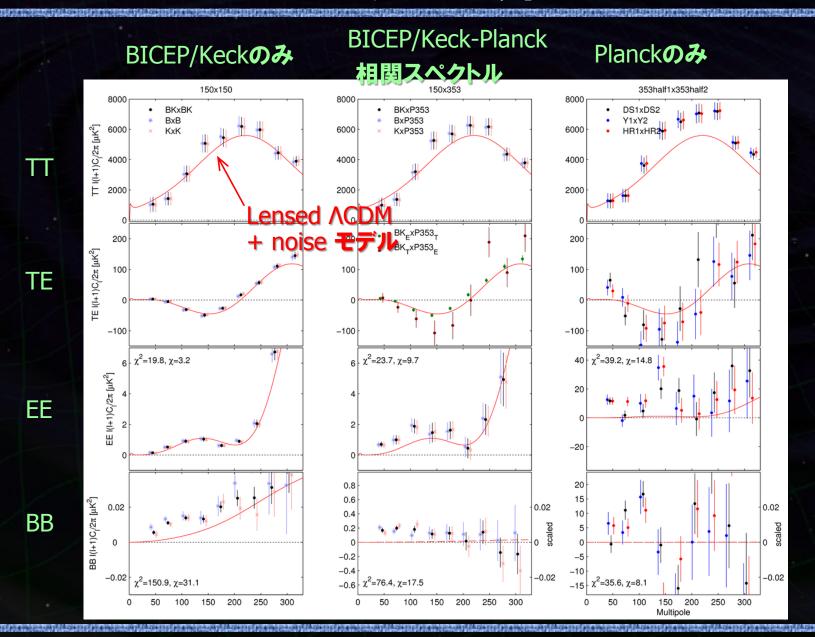
$$\rightarrow T_d = 19.6 \text{ K}, \ \beta_d = 1.59 \pm 0.17$$

$D_l^{BB} = l(l+1)C_l^{BB}/(2\pi)$



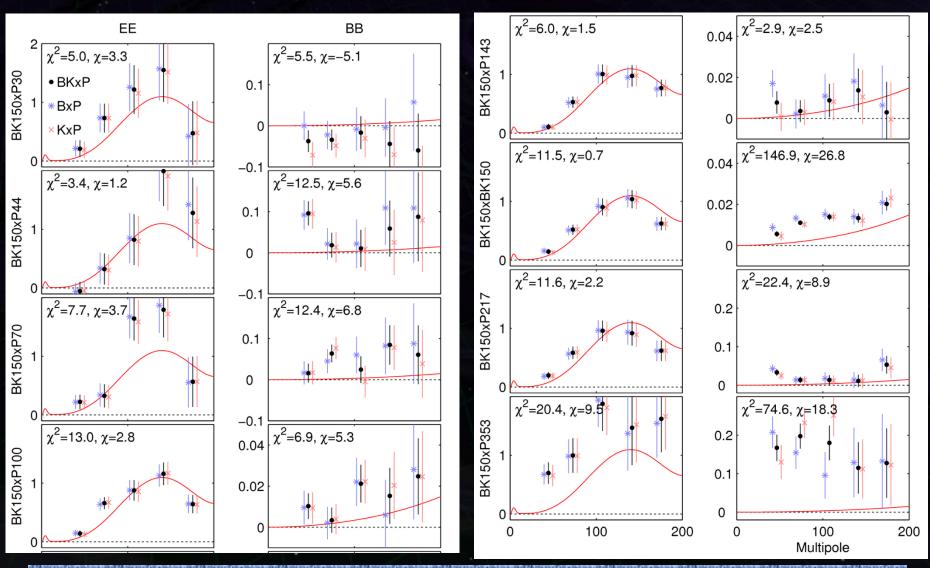


2-C. パワースペクトル



2-C. パワースペクトル

Planck各周波数観測データを用いた相関スペクトル



3-A, 3-B. Likelihood Analysis

- ・相関パワースペクトルから尤度(Likelihood)を求める.
 - モデルに対する尤度を求める手法: Hamimeche-Lewis近似 (PRD 77 103013, 2008).
 - Two-component モデル:

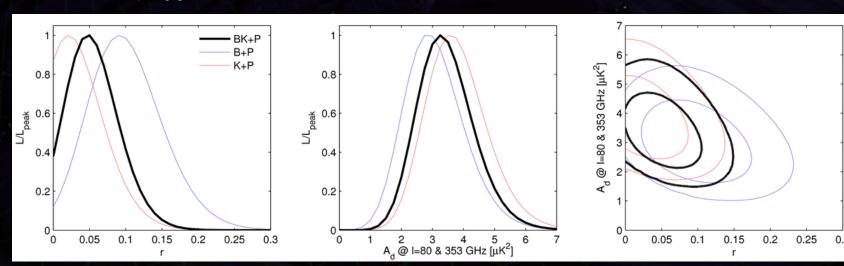
振幅rの $IGW+振幅A_d$ のダスト(353~GHz, l=80).

- * テンソルモードのSpectral Index n_t は0と仮定.
- * Scalar pivot scale: $0.05 \,\mathrm{Mpc^{-1}}$
- BICEP2/Keck と Planck (217 GHz, 353 GHz) の相関スペクトルを用いて計算.
- スペクトル $I_d(\nu) \propto \nu^{\beta_d} B_{\nu}(T_d)$ では, $\beta_d = 1.59 \pm 0.17$ を使用 (データからは良く求まらない).

3-A, 3-B. Likelihood Analysis

rの尤度

A_d の尤度



•結果:

 $-r = 0.048^{+0.035}_{-0.032}$, r < 0.12 (信頼度95%).

Zero-to-Peak 尤度比: 0.38

→ r = 0の時にこれより小さい値が生じる確率は8%.

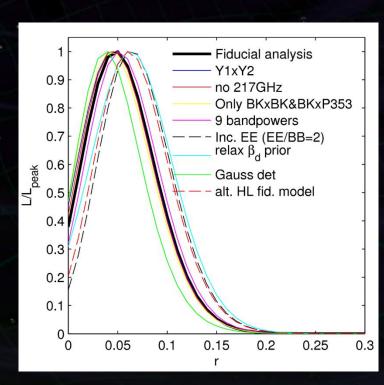
- $A_d = 3.3^{+0.9}_{-0.8}$. 5.1σ でダストを検出.

3-C. Variations from data and model

- •Choice of Planck single-frequency spectra: Planckで用いるデータセットを変える.
- •Using only 150 and 353 GHz: 217GHzを除いて解析.
- •Using only BK150xBK150 and BK150xP353: Planck 353GHzだけの場合を除く.
- •Extending the bandpower range: 各スペクトルで 20 < l < 330 の9点を使用.
- •Including EE spectra: EEスペクトルを補正して使用 (l 依存性を求める際).
- ・Relaxing the β_d prior : 周波数依存性の補正 β_d を 1.59でなく 1.3 \sim 1.9まで変化.

3-C. Variations from data and model

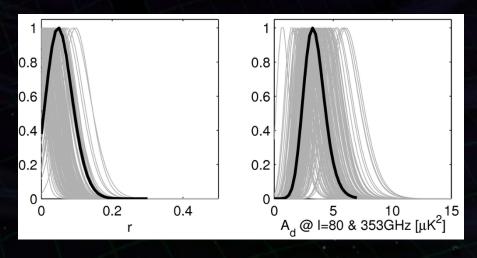
- •Varying the dust power spectrum shape: ダストの l 依存性の冪を-0.42でなく-0.8~0 に変化.
- Using Gaussian determinant likelihood:
 尤度を求める際の分布モデルとしてGauss分布を用いる.
- •Varying the HL fiducial model: 共相関計算でr = 0.2のIGWを追加.
- Adding synchrotron:シンクロトロン放射のモデルを加え, 低周波数観測データも用いる.
- Varying lensing amplitude:
 ACDMに加えるレンズの効果を変化.



4-A. Likelihood Variation

・ダストだけのモデルでのシミュレーション

- -r = 0 , $A_d = 3.6 \mu K^2$ でデータ作成 \rightarrow 解析.
- 空間・周波数依存性を加味.
- Lensed ΛCDM+noise
 - → 予想通り、~50%が 0以上で最大値などコンシ ステントな結果。



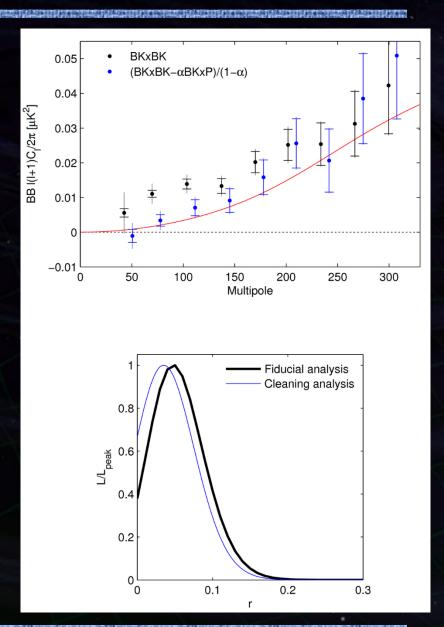
4-B. Subtraction of scaled Data

- ・クリーニングされたデータの解析.
 - BICEP2/Keckスペクトルから、 相関スペクトルを引いたもの:

$$\frac{(BK \times BK - \alpha BK \times P)}{1 - \alpha} \quad (\text{tt} \ \alpha = 0.04)$$

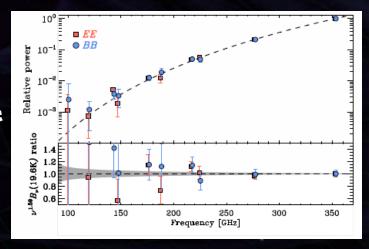
を作成し解析.

- 実データと同様に,
 - ァの尤度を求める.
 - → ダストの平均量は引かれる はずだが、その分散成分は 残る.



5. Possible Causes of Decorrelation

- ・ダスト放射の周波数依存性が場所によって違う可能性.
 - Planckデータ(全天の24%)で評価.
 - → 修正黒体モデルと良くあっている.
 - ダストだけモデルでのシミュレーションで 10%振幅を小さくしてみる.
 - $\rightarrow r$ が 0.018倍だけ上にシフト.



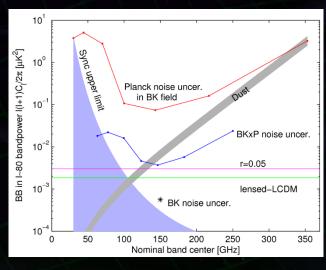
- •校正,解析,...
 - EEスペクトル(BK150xBK150, BK150xP143) の振る舞いから、解析手法で相関が失われる かがチェックできる.
 - → Decorrelationの影響は 2%以下.

まとめ

- •BICEP2/KeckとPlanckデータの相関解析を行った.
 - → テンソル-スカラー比の上限を与えた.
 - r < 0.12 (信頼度95%).
 - Zero-to-Peak 尤度比: 0.38
 - → r = 0の時にこれより小さい値が生じる確率は8%.

•今後,

- Planck単体で大スケールでの探査.
- 小スケールの探査では、今回の BICEP2/Keck程度の感度が他 の周波数帯でも必要.
- → Keck Arrayで 80-90GHz観測 (2014). BICEP3 95 GHzを追加 (2015-2016).



おしまい



