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)

## 論文紹介

#### A Joint Analysis of BICEP2/Keck Array and Planck Data BICEP2/Keck and Planck Collaborations: P. A. R. Ade,<sup>1</sup> N. Aghanim,<sup>2</sup> Z. Ahmed,<sup>3</sup> R. W. Aikin,<sup>4</sup>

arXiv:1502.00612 (2 Feb 2015)



K. D. Alexander,<sup>5</sup> M. Arnaud,<sup>6</sup> J. Aumont,<sup>2</sup> C. Baccigalupi,<sup>7</sup> A. J. Banday,<sup>8,9</sup> D. Barkats,<sup>10</sup> R. B. Barreiro,<sup>11</sup> J. G. Bartlett,<sup>12,13</sup> N. Bartolo,<sup>14,15</sup> E. Battaner,<sup>16,17</sup> K. Benabed,<sup>18,19</sup> A. Benoit-Lévy,<sup>20,18,19</sup> S. J. Benton,<sup>21</sup> J.-P. Bernard,<sup>8,9</sup> M. Bersanelli,<sup>22,23</sup> P. Bielewicz,<sup>8,9,7</sup> C. A. Bischoff,<sup>5</sup> J. J. Bock,<sup>13,4</sup> A. Bonaldi,<sup>24</sup> L. Bonavera,<sup>11</sup> J. R. Bond,<sup>25</sup> J. Borrill,<sup>26,27</sup> F. R. Bouchet,<sup>18,19</sup> F. Boulanger,<sup>2</sup> J. A. Brevik,<sup>4</sup> M. Bucher,<sup>12</sup> I. Buder,<sup>5</sup> E. Bullock,<sup>28</sup> C. Burigana.<sup>29, 30, 31</sup> R. C. Butler,<sup>29</sup> V. Buza,<sup>5</sup> E. Calabrese,<sup>32</sup> J.-F. Cardoso,<sup>33, 12, 18</sup> A. Catalano,<sup>34, 35</sup> A. Challinor, <sup>36,37,38</sup> R.-R. Chary,<sup>39</sup> H. C. Chiang,<sup>40,41</sup> P. R. Christensen,<sup>42,43</sup> L. P. L. Colombo,<sup>44,13</sup> C. Combet,<sup>34</sup> J. Connors.<sup>5</sup> F. Couchot,<sup>45</sup> A. Coulais,<sup>35</sup> B. P. Crill,<sup>13,4</sup> A. Curto,<sup>46,11</sup> F. Cuttaia,<sup>29</sup> L. Danese,<sup>7</sup> R. D. Davies,<sup>24</sup> R, J. Davis,<sup>24</sup> P. de Bernardis,<sup>47</sup> A. de Rosa,<sup>29</sup> G. de Zotti,<sup>48,7</sup> J. Delabrouille,<sup>12</sup> J.-M. Delouis,<sup>18,19</sup> F.-X. Désert,<sup>49</sup> 5 201 C. Dickinson.<sup>24</sup> J. M. Diego.<sup>11</sup> H. Dole.<sup>2,50</sup> S. Donzelli.<sup>23</sup> O. Doré.<sup>13,4</sup> M. Douspis.<sup>2</sup> C. D. Dowell.<sup>13</sup> L. Duband.<sup>51</sup> A. Ducout.<sup>18,52</sup> J. Dunklev.<sup>32</sup> X. Dupac.<sup>53</sup> C. Dvorkin.<sup>5</sup> G. Efstathiou.<sup>36</sup> F. Elsner.<sup>20,18,19</sup> T. A. Enflin.<sup>54</sup> H. K. Eriksen,<sup>55</sup> J. P. Filippini,<sup>4,56</sup> F. Finelli,<sup>29,31</sup> S. Fliescher,<sup>57</sup> O. Forni,<sup>8,9</sup> M. Frailis,<sup>58</sup> A. A. Fraisse,<sup>40</sup> Feb E. Franceschi,<sup>29</sup> A. Frejsel,<sup>42</sup> S. Galeotta,<sup>58</sup> S. Galli,<sup>18</sup> K. Ganga,<sup>12</sup> T. Ghosh,<sup>2</sup> M. Giard,<sup>8,9</sup> E. Gjerløw,<sup>55</sup> S. R. Golwala,<sup>4</sup> J. González-Nuevo,<sup>11,7</sup> K. M. Górski,<sup>13,59</sup> S. Gratton,<sup>37,36</sup> A. Gregorio,<sup>60,58,61</sup> A. Gruppuso,<sup>29</sup> J. E. Gudmundsson,<sup>40</sup> M. Halpern,<sup>62</sup> F. K. Hansen,<sup>55</sup> D. Hanson,<sup>63, 13, 25</sup> D. L. Harrison,<sup>36, 37</sup> M. Hasselfield,<sup>62</sup>  $\sim$ G. Helou,<sup>4</sup> S. Henrot-Versillé,<sup>45</sup> D. Herranz,<sup>11</sup> S. R. Hildebrandt,<sup>13,4</sup> G. C. Hilton,<sup>64</sup> E. Hivon,<sup>18,19</sup> M. Hobson,<sup>46</sup> [astro-ph.CO] W. A. Holmes,<sup>13</sup> W. Hovest,<sup>54</sup> V. V. Hristov,<sup>4</sup> K. M. Huffenberger,<sup>65</sup> H. Hui,<sup>4</sup> G. Hurier,<sup>2</sup> K. D. Irwin,<sup>3,66,64</sup> A. H. Jaffe,<sup>52</sup> T. R. Jaffe,<sup>8,9</sup> J. Jewell,<sup>13</sup> W. C. Jones,<sup>40</sup> M. Juvela,<sup>67</sup> A. Karakci,<sup>12</sup> K. S. Karkare,<sup>5</sup> J. P. Kaufman,<sup>68</sup> B. G. Keating,<sup>68</sup> S. Kefeli,<sup>4</sup> E. Keihänen,<sup>67</sup> S. A. Kernasovskiv,<sup>3</sup> R. Keskitalo,<sup>26</sup> T. S. Kisner,<sup>69</sup> R. Kneissl,<sup>70,71</sup> J. Knoche,<sup>54</sup> L. Knox,<sup>72</sup> J. M. Kovac,<sup>5</sup> N. Krachmalnicoff,<sup>22</sup> M. Kunz,<sup>73,2,74</sup> C. L. Kuo,<sup>3,66</sup> H. Kurki-Suonio,<sup>67,75</sup> G. Lagache,<sup>76,2</sup> A. Lähteenmäki,<sup>77,75</sup> J.-M. Lamarre,<sup>35</sup> A. Lasenby,<sup>46,37</sup> M. Lattanzi,<sup>30</sup> C. R. Lawrence,<sup>13</sup> E. M. Leitch,<sup>78</sup> R. Leonardi,<sup>53</sup> F. Levrier,<sup>35</sup> A. Lewis,<sup>79</sup> M. Liguori,<sup>14,15</sup> P. B. Lilje,<sup>55</sup> M. Linden-Vørnle,<sup>80</sup> M. López-Caniego,<sup>53,11</sup> P. M. Lubin,<sup>81</sup> M. Lueker,<sup>4</sup> J. F. Macías-Pérez,<sup>34</sup> B. Maffei,<sup>24</sup> D. Maino,<sup>22,23</sup> N. Mandolesi,<sup>29,82,30</sup> A. Mangilli,<sup>18</sup> M. Maris,<sup>58</sup> P. G. Martin,<sup>25</sup> E. Martínez-González,<sup>11</sup> S. Masi,<sup>47</sup> P. Mason,<sup>4</sup> S. Matarrese,<sup>14,15,83</sup> K. G. Megerian,<sup>13</sup> P. R. Meinhold,<sup>81</sup> A. Melchiorri,<sup>47,84</sup> L. Mendes, <sup>53</sup> A. Mennella, <sup>22, 23</sup> M. Migliaccio, <sup>36, 37</sup> S. Mitra, <sup>85, 13</sup> M.-A. Miville-Deschênes, <sup>2, 25</sup> A. Moneti, <sup>18</sup> arXiv:1502.00612v1 L. Montier,<sup>8,9</sup> G. Morgante,<sup>29</sup> D. Mortlock,<sup>52</sup> A. Moss,<sup>86</sup> D. Munshi,<sup>1</sup> J. A. Murphy,<sup>87</sup> P. Naselsky,<sup>42,43</sup> F. Nati,<sup>40</sup> P. Natoli,<sup>30,88,29</sup> C. B. Netterfield,<sup>89</sup> H. T. Nguyen,<sup>13</sup> H. U. Nørgaard-Nielsen,<sup>80</sup> F. Noviello,<sup>24</sup> D. Novikov, <sup>90</sup> I. Novikov, <sup>42,90</sup> R. O'Brient, <sup>13</sup> R. W. Ogburn IV, <sup>3,66</sup> A. Orlando, <sup>68</sup> L. Pagano, <sup>47,84</sup> F. Pajot, <sup>2</sup> R. Paladini,<sup>39</sup> D. Paoletti,<sup>29,31</sup> B. Partridge,<sup>91</sup> F. Pasian,<sup>58</sup> G. Patanchon,<sup>12</sup> T. J. Pearson,<sup>4,39</sup> O. Perdereau,<sup>45</sup> L. Perotto, <sup>34</sup> V. Pettorino, <sup>92</sup> F. Piacentini, <sup>47</sup> M. Piat, <sup>12</sup> D. Pietrobon, <sup>13</sup> S. Plaszczynski, <sup>45</sup> E. Pointecouteau, <sup>8,9</sup> G. Polenta,<sup>88,93</sup> N. Ponthieu,<sup>2,49</sup> G. W. Pratt,<sup>6</sup> S. Prunet,<sup>18,19</sup> C. Pryke,<sup>57,28</sup> J.-L. Puget,<sup>2</sup> J. P. Rachen,<sup>94,54</sup> W. T. Reach. 95 R. Rebolo. 96, 97, 98 M. Reinecke. 54 M. Remazeilles. 24, 2, 12 C. Renault. 34 A. Renzi, 99, 100 S. Richter,<sup>5</sup> I. Ristorcelli,<sup>8,9</sup> G. Rocha,<sup>13,4</sup> M. Rossetti,<sup>22,23</sup> G. Roudier,<sup>12,35,13</sup> M. Rowan-Robinson,<sup>52</sup> J. A. Rubiño-Martín.<sup>96,98</sup> B. Rusholme.<sup>39</sup> M. Sandri.<sup>29</sup> D. Santos.<sup>34</sup> M. Savelainen.<sup>67,75</sup> G. Savini.<sup>101</sup> R. Schwarz.<sup>57</sup> D. Scott, <sup>102</sup> M. D. Seiffert, <sup>13,4</sup> C. D. Sheehy, <sup>57,103</sup> L. D. Spencer, <sup>1</sup> Z. K. Staniszewski, <sup>4,13</sup> V. Stolyarov, <sup>46,37,104</sup> R. Sudiwala,<sup>1</sup> R. Sunvaev,<sup>54,105</sup> D. Sutton,<sup>36,37</sup> A.-S. Suur-Uski,<sup>67,75</sup> J.-F. Sygnet,<sup>18</sup> J. A. Tauber,<sup>106</sup> G. P. Teply,<sup>4</sup> L. Terenzi,<sup>107,29</sup> K. L. Thompson,<sup>3</sup> L. Toffolatti,<sup>108,11,29</sup> J. E. Tolan,<sup>3</sup> M. Tomasi,<sup>22,23</sup> M. Tristram,<sup>45</sup> M. Tucci,<sup>73</sup> A. D. Turner, <sup>13,78</sup> L. Valenziano, <sup>29</sup> J. Valiviita, <sup>67,75</sup> B. Van Tent, <sup>109</sup> L. Vibert, <sup>2</sup> P. Vielva, <sup>11</sup> A. G. Vieregg, <sup>103,110</sup> F. Villa,<sup>29</sup> L. A. Wade,<sup>13</sup> B. D. Wandelt,<sup>18,19,56</sup> R. Watson,<sup>24</sup> A. C. Weber,<sup>13</sup> I. K. Wehus,<sup>13</sup> M. White,<sup>111</sup> S. D. M. White, <sup>54</sup> J. Willmert, <sup>57</sup> C. L. Wong, <sup>5</sup> K. W. Yoon, <sup>3,66</sup> D. Yvon, <sup>112</sup> A. Zacchei, <sup>58</sup> and A. Zonca<sup>81</sup> <sup>1</sup>School of Physics and Astronomy, Cardiff University,

Queens Buildings, The Parade, Cardiff, CF24 3AA, U.K. <sup>2</sup>Institut d'Astrophysique Spatiale, CNRS (UMR8617) Université Paris-Sud 11, Bâtiment 121, Orsay, France <sup>3</sup>Department of Physics, Stanford University, Stanford, California 94305, U.S.A. <sup>4</sup>California Institute of Technology, Pasadena, California, U.S.A. <sup>5</sup>Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics, 60 Garden Street MS 42, Cambridge, Massachusetts 02138, U.S.A. <sup>6</sup>Laboratoire AIM, IRFU/Service d'Astrophysique - CEA/DSM - UNIVERSITÉ Paris Diderot, Bât, 709, CEA-Saclay, F-91191 Gif-sur-Yvette Cedex, France

Monete previously Monete Pre



# 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<sub>0.05</sub> < 0.12 (信頼度 95%)</li> 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 deg<sup>2</sup> patch of sky centered on RA 0h, Dec.  $-57.5^{\circ}$ . The combined maps reach a depth of 57 nK deg in Stokes Q and U in a band centered at 150 GHz. Planck has observed the full sky in polarization at seven frequencies from 30 to 353 GHz, but much less deeply in any given region  $(1.2\,\mu\text{K} \text{ deg in } Q \text{ and } U \text{ at } 143 \text{ GHz})$ . We detect  $150 \times 353$  cross-correlation in B-modes at high significance. We fit the single- and crossfrequency power spectra at frequencies above 150 GHz to a lensed- $\Lambda$ CDM model that includes dust and a possible contribution from inflationary gravitational waves (as parameterized by the tensor-toscalar 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. → 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.
 → SPT (South Pole Telescope), ACT, WMAPと合わせて *r*<sub>0.002</sub> < 0.11
 (信頼度95%, pivot scale *k* = 0.002 Mpc<sup>-1</sup>)
 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 $\rightarrow$ 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.  $ightarrow D_l^{BB} = A^{BB} (l/80)^{-0.42 \pm 0.02}$ 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  $I_d(v) \propto v^{\beta_d} B_v(T_d)$  $\rightarrow T_d = 19.6 \text{ K}, \ \beta_d = 1.59 \pm 0.17$ 

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





## 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 :  $0.05 \text{ Mpc}^{-1}$ - BICEP2/Keck **&** Planck (217 GHz, 353 GHz) の相関スペクトルを用いて計算. -  $\mathbf{X}^{\boldsymbol{\beta}_d} P_{\boldsymbol{\lambda}_d}(\boldsymbol{\nu}) \propto \boldsymbol{\nu}^{\boldsymbol{\beta}_d} B_{\boldsymbol{\nu}}(T_d) \boldsymbol{\mathcal{T}}_d$  $\beta_d = 1.59 \pm 0.17$ を使用 (データからは良く求まらない).

### 3-A, 3-B. Likelihood Analysis

A<sub>d</sub>の尤度



•結果:

r の尤度

-  $r = 0.048^{+0.035}_{-0.032}$ , r < 0.12 (信頼度95%). Zero-to-Peak 尤度比: 0.38  $\rightarrow r = 0$ の時にこれより小さい値が生じる確率は8%. -  $A_d = 3.3^{+0.9}_{-0.8}$ .  $5.1\sigma$ 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 (1依存性を求める際). • Relaxing the  $\beta_d$  prior : 周波数依存性の補正  $\beta_d$  を 1.59でなく 1.3~1.9まで変化.

### **3-C.** Variations from data and model

• Varying the dust power spectrum shape : ダストの 1 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 : 1 Fiducial analysis 共相関計算でr = 0.2のIGWを追加. Y1xY2 0.9 no 217GHz Only BKxBK&BKxP353 0.8 Adding synchrotron : 9 bandpowers Inc. EE (EE/BB=2) 0.7 relax  $\beta_d$  prior 19.0 シンクロトロン放射のモデルを加え、 Gauss det alt. HL fid. model 低周波数観測データも用いる. 0.40.3 Varying lensing amplitude : 0.2 ACDMに加えるレンズの効果を変化. 0.1 0

0.05

0

0.1

0.15

0.2

0.25

0.3

## 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 う解析.
- 空間・周波数依存性を加味.
   Lensed ACDM+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:  $(BK \times BK - \alpha BK \times P)$ (ただし α = 0.04)  $1-\alpha$ を作成し解析. - 実データと同様に, r 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.
 → 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
  - $\rightarrow r = 0$ 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

100000

10,000,000,000,000,000

20.00.0162.00.000





研究室輪講 (2015年 2月 26日, 東京大学)

and the constraint of the second s

the party of the type of the party of the pa







