

CMB 偏光を用いた 原始重力波観測の状況紹介

安東 正樹 (東京大学 理学系研究科)

研究室輪講 (2014年 10月 9日, 東京大学)

論文紹介

arXiv:1409.5738v1 19 Sep 2014

Planck intermediate results. XXX. The angular power spectrum of polarized dust emission at intermediate and high Galactic latitudes

Planck Collaboration: R. Adam⁷⁶, P. A. R. Ade⁸⁶, N. Aghanim⁶¹, M. Arnaud⁷⁴, J. Aumont⁶¹*, C. Baccigalupi⁸⁵, A. J. Banday⁹⁴⁹, R. B. Barreiro⁶⁷, J. G. Bartlett^{1,68}, N. Bartolo³¹, E. Battaner^{97,98}, K. Benabed^{62,93}, A. Benoit-Lévy^{23,62,93}, J.-P. Bernard^{94,9}, M. Bersanelli^{34,51} P. Bielewicz^{94,9,85}, A. Bonaldi⁶⁹, L. Bonavera⁶⁷, J. R. Bond⁸, J. Borrill^{14,89}, F. R. Bouchet^{62,93}, F. Boulanger⁶¹, A. Bracco⁶¹, M. Bucher¹, C, Burigana^{50,32,52}, R, C, Butler⁵⁰, E, Calabrese⁹¹, J.-F, Cardoso^{75,1,62}, A, Catalano^{76,73}, A, Challinor^{64,70,12}, A, Chamballu^{74,16,61}, R.-R, Charv⁹⁹ H. C. Chiang^{26,6}, P. R. Christensen^{82,38}, D. L. Clements⁵⁸, S. Colombi^{62,93}, L. P. L. Colombo^{22,68}, C. Combet⁷⁶, F. Couchot⁷¹, A. Coulais⁷³ A. Curto^{5,67}, F. Cuttaia⁵⁰, L. Danese⁸⁵, R. D. Davies⁶⁹, R. J. Davis⁶⁹, P. de Bernardis³³, G. de Zotti^{47,85}, J. Delabrouille¹, J.-M. Delouis^{62,93}, F.-X. Désert⁵⁶, C. Dickinson⁶⁹, J. M. Diego⁶⁷, K. Dolag^{96,79}, H. Dole^{61,60}, S. Donzelli⁵¹, O. Doré^{68,11}, M. Douspis⁶¹, A. Ducout^{62,58}, J. Dunkley⁹¹, X. Dupac⁴¹, G. Efstathiou⁶⁴, F. Elsner^{62,93}, T. A. Enßlin⁷⁹, H. K. Eriksen⁶⁵, E. Falgarone⁷³, F. Finelli^{50,52}, O. Forni^{94,9}, M. Frailis⁴⁹. A. A. Fraisse²⁶, E. Franceschi⁵⁰, A. Frejsel⁸², S. Galeotta⁴⁹, S. Galli⁶², K. Ganga¹, T. Ghosh⁶¹, M. Giard^{94,9}, Y. Giraud-Héraud¹, E. Gjerløw⁶⁵ J. González-Nuevo^{67,85}, K. M. Górski^{68,99}, S. Gratton^{70,64}, A. Gregorio^{35,49,55}, A. Gruppuso⁵⁰, V. Guillet⁶¹, F. K. Hansen⁶⁵, D. Hanson^{80,68,8}, D. L. Harrison⁶⁴⁷⁰, G. Helou¹¹, S. Henrot-Versillé⁷¹, C. Hernández-Monteagudo^{13,79}, D. Herranz⁶⁷, E. Hivon^{62,93}, W. A. Holmes⁶⁸, K. M. Huffenberger²⁴, G. Hurier⁶¹, A. H. Jaffe⁵⁸, T. R. Jaffe^{94,9}, J. Jewell⁶⁸, W. C. Jones²⁶, M. Juvela²⁵, E. Keihänen²⁵, R. Keskitalo¹⁴, T. S. Kisner⁷⁸, R. Kneissl^{40,7}, J. Knoche⁷⁹, L. Knox²⁸, N. Krachmalnicoff³⁴, M. Kunz^{18,61,2}, H. Kurki-Suonio^{25,46}, G. Lagache⁶¹, J.-M. Lamarre⁷³ A. Lasenby^{5,70}, M. Lattanzi³², C. R. Lawrence⁶⁸, J. P. Leahy⁶⁹, R. Leonardi⁴¹, J. Lesgourgues^{92,84,72}, F. Levrier⁷³, M. Liguori³¹, P. B. Lilje⁶⁵. M. Linden-Vørnle¹⁷, M. López-Caniego⁶⁷, P. M. Lubin²⁹, J. F. Macías-Pérez⁷⁶, B. Maffei⁶⁹, D. Maino^{34,51}, N. Mandolesi^{30,4,32}, A. Mangilli⁶², M. Maris⁴⁰, P. G. Martin⁸, E. Martínez-González⁶⁷, S. Masi³³, S. Matarrese³¹, P. Mazzotta³⁶, A. Melchiorri^{33,53}, L. Mendes⁴¹, A. Mennella^{34,51}, M. Migliaccio^{64,70}, S. Mitra^{57,68}, M.-A. Miville-Deschênes^{61,8}, A. Moneti⁶², L. Montier^{94,9}, G. Morgante⁵⁰, D. Mortlock⁵⁸, A. Moss⁸⁷ D. Munshi⁸⁶, J. A. Murphy⁸¹, P. Naselsky^{82,38}, F. Nati³³, P. Natoli^{32,3,50}, C. B. Netterfield¹⁹, H. U. Nørgaard-Nielsen¹⁷, F. Noviello⁶⁹, D. Novikov⁵⁸, I. Novikov⁸², L. Pagano^{33,53}, F. Pajot⁶¹, R. Paladini⁵⁹, D. Paoletti^{50,52}, B. Partridge⁴⁵, F. Pasian⁴⁹, G. Patanchon¹, T. J. Pearson^{11,59}. O. Perdereau⁷¹, L. Perotto⁷⁶, F. Perrotta⁸⁵, V. Pettorino⁴⁴, F. Piacentini³³, M. Piat¹, E. Pierpaoli²², D. Pietrobon⁶⁸, S. Plaszczynski⁷¹, E. Pointecouteau^{94,9}, G. Polenta^{3,48}, N. Ponthieu^{61,56}, L. Popa⁶³, G. W. Pratt⁷⁴, S. Prunet^{62,93}, J.-L. Puget⁶¹, J. P. Rachen^{20,79}, W. T. Reach⁹⁵ R. Rebolo^{66,15,39}, M. Remazeilles^{69,61,1}, C. Renault⁷⁶, A. Renzi^{37,54}, S. Ricciardi⁵⁰, I. Ristorcelli^{94,9}, G. Rocha^{68,11}, C. Rosset¹, M. Rossetti^{34,51}, G. Roudier^{1,73,68}, B. Rouillé d'Orfeuil⁷¹, J. A. Rubiño-Martín^{66,39}, B. Rusholme⁵⁹, M. Sandri⁵⁰, D. Santos⁷⁶, M. Savelainen^{25,46}, G. Savini⁸³, D. Scott²¹, J. D. Soler⁶¹, L. D. Spencer⁸⁶, V. Stolyarov^{570,90}, R. Stompor¹, R. Sudiwala⁸⁶, R. Sunyaev^{79,88}, D. Sutton^{64,70}, A.-S. Suur-Uski^{25,46} J.-F. Sygnet⁶², J. A. Tauber⁴², L. Terenzi^{43,50}, M. Tomasi^{34,51}, M. Tristram⁷¹, M. Tucci^{18,71}, J. Tucvinen¹⁰, L. Valenziano⁵⁰, J. Valiviita^{25,46}, B. Van Tent77, L. Vibert61, P. Vielva67, F. Villa50, L. A. Wade68, B. D. Wandelt62,93,30, R. Watson69, I. K. Wehus68, M. White77, S. D. M. White79, D. Yvon¹⁶, A. Zacchei⁴⁹, and A. Zonca²⁹

(2014年 10月 9日, 東京大学)



Planck HFIの観測データを用いてCMB偏光フォアグラウンドの 評価を行った. -> ダストの影響が支配的であることが示された.

ABSTRACT

The polarized thermal emission from diffuse Galactic dust is the main foreground present in measurements of the polarization of the cosmic microwave background (CMB) at frequencies above 100 GHz. In this paper we exploit the uniqueness of the Planck HFI polarization data from 100 to 353 GHz to measure the polarized dust angular power spectra C_{ℓ}^{EE} and C_{ℓ}^{BB} over the multipole range 40 < ℓ < 600 well away from the Galactic plane. These measurements will bring new insights into interstellar dust physics and allow a precise determination of the level of contamination for CMB polarization experiments. Despite the non-Gaussian and anisotropic nature of Galactic dust, we show that general statistical properties of the emission can be characterized accurately over large fractions of the sky using angular power spectra. The polarization power spectra of the dust are well described by power laws in multipole, $C_{\ell} \propto \ell^{\alpha}$, with exponents $\alpha^{EE,BB} = -2.42 \pm 0.02$. The amplitudes of the polarization power spectra vary with the average brightness in a way similar to the intensity power spectra. The frequency dependence of the dust polarization spectra is consistent with modified blackbody emission with $\beta_d = 1.59$ and $T_d = 19.6$ K down to the lowest *Planck* HFI frequencies. We find a systematic difference between the amplitudes of the Galactic B- and E-modes, $C_{\ell}^{BB}/C_{\ell}^{EE} = 0.5$. We verify that these general properties are preserved towards high Galactic latitudes with low dust column densities. We show that even in the faintest dust-emitting regions there are no "clean" windows in the sky where primordial CMB B-mode polarization measurements could be made without subtraction of foreground emission. Finally, we investigate the level of dust polarization in the specific field recently targeted by the BICEP2 experiment. Extrapolation of the Planck 353 GHz data to 150 GHz gives a dust power $\mathcal{D}_{\ell}^{\mathcal{BB}} \equiv \ell(\ell+1)C_{\ell}^{\mathcal{BB}}/(2\pi)$ of $1.32 \times 10^{-2} \,\mu \text{K}_{\text{CMB}}^2$ over the multipole range of the primordial recombination bump (40 < ℓ < 120); the statistical uncertainty is $\pm 0.29 \times 10^{-2} \mu K_{CMB}^2$ and there is an additional uncertainty (+0.28, -0.24) $\times 10^{-2} \mu K_{CMB}^2$ from the extrapolation. This level is the same magnitude as reported by BICEP2 over this ℓ range, which highlights the need for assessment of the polarized dust signal even in the cleanest windows of the sky. The present uncertainties are large and will be reduced through an ongoing, joint analysis of the *Planck* and BICEP2 data sets.

Key words. Submillimetre: ISM - Radio continuum: ISM - Polarization - ISM: dust, magnetic fields - cosmic background radiation

マイクロ波背景放射の偏光観測

BICEP-2マイクロ波望遠鏡

2014年3月18日 ナショナルジオグラフィックWeb版

ナショナルジオグラフィック ニュース

ニューストップ | 動物 | 古代の世界 | 環境 | 文化 | 科学 & 宇宙 | 風変わりコ

💆 ツイート 🛛 151 🔍

宇宙膨張の決定的証拠を発見

Dan Vergano, National Geographic News March 18, 2014

宇宙が誕生した瞬間、驚くほど強力な重力波が広がっていった事実が最新の研究によって明らか となった。「誕生直後に急膨張した」とする「宇宙インフレーション理論」を裏付ける決定的な証 拠が、初めて観測されたことになる。

研究室輪講

① チェック



写真を拡大

インフレーション理論は、初期宇宙の誕生直後から想像を絶す るほどの大きさまで膨張した成り立ちを説明す る進化モデルで、 「火の玉の爆発で始まった」とするビッグバン理論を補完する位 置付けにある。

〒いいね!

研究チームの一員でアメリカにあるミネソタ大学ツインシ ティー校の物理学者クレメント・プライク (Clement Pryke)氏 は、「<u>重力波の信号検出に初めて成功した。今回の観測結果は十</u> 分な検証を重ねており、絶対の自信を持っている」と語る。

(2014年 10月 9日, 東京大学)

BICEP2論文





BICEP2, (POLARBEAR,...) マイクロ波望遠鏡を用いた 宇宙背景放射 B-mode偏光 成分の観測. DECIGO, (KAGRA, aLIGO,...)
 レーザー干渉計重力波望
 遠鏡を用いた宇宙背景
 重力波の観測.



研究室輪講 (2014年 10月 9日, 東京大学)

マイクロ波背景放射の偏光観測

2014年5月15日 ナショナルジオグラフィックWeb版

"宇宙膨張の決定的証拠"は誤り?

シッイート (153) Q

研究室輪講

ナショナルジオグラフィック ニュース

ニューストップ | 動物 | 古代の世界 | 環境 | 文化 | 科学 & 宇宙 | 風変わりニュース | ニュース特集 | おす

① チェック

Dan Vergano, National Geographic News May 15, 2014

初期宇宙の成り立ちを説明する"決定的な証拠"が発見され、高い評価を受けていた。ところが、 この発見は間違いだったのではないかという風評が広がっている。



写真を拡大

3月、ハーバード大学のジョン・コバック(John Kovac)氏率 いるBICEP(Background Imaging of Cosmic Extragalactic Polarization)2チームが、アルベルト・アインシュタインが予言 した宇宙の"重力波"の観測に成功したと発表し、世界中で話題を さらった。宇宙は誕生直後から指数関数的に膨張したという通説 が裏付けられたかに思えた。

〒いいね!

8+1 43

研究チームは南極の望遠鏡で観測を行い、ビッグバンの名残で

(2014年 10月 9日, 東京大学)

マイクロ波背景放射の偏光観測

2014年9月25日 ナショナルジオグラフィックWeb版

ナショナルジオグラフィック ニュース	
ニューストップ 動物 古代の世界 環境 文化 科学 & 宇宙 風変わりニュース	ニュース特集 おすす
"宇宙膨張の証拠"、窮地に	
ダツイート {75 🛛 😵 📴 💷 チェック 😭 いいね! {100	8+1 33

Dan Vergano, National Geographic News September 25, 2014

観測衛星が捉えた宇宙のちりの地図が新たに発表され、先ごろ話題をさらった"原始宇宙の重力波 を観測した"という報告の雲行きが怪しくなってきた。



今年3月、南極にあるBICEP2望遠鏡で観測を行った物理学者の チームが、宇宙マイクロ波背景放射(CMB)の地図上に、驚くほ ど強力な重力波の痕跡を見つけたと報告した。全天に広がるCMB は、ビッグバンの余波で残った余熱と考えられている。

BICEP2チームは、宇宙のごく狭い領域におけるCMBの温度の ゆらぎの中に、時空の織物の"さざ波"という形で、重力波の強力 な信号が見られると報告していた。こうしたさざ波の検出は、約 138億年前に起こったビッグバン直後に宇宙が急激な膨張したと



- 1. Introduction
- 2. Planck polarization maps
- 3. Computation of angular power spectra of polarized emission
- 4. Dust polarized angular power spectra at intermediate Galactic latitude
- 5. Statistical study of the dust power spectra at high Galactic latitudes
- 6. BB angular power spectrum of dust in the BICEP2 field7. Conclusion



1. イントロダクション

・高い銀緯の100GHz以上の周波数でのマイクロ波観測 → 星間物質, 特に, 0.1µm程度の大きさの ダスト粒からの熱放射が支配的. 非対称形状のダストが星間磁場で向きが揃う → 偏光した放射が生成される. の探査研究が行われている. ・偏光放射は、CMBのForegroundの意味でも重要. CMBのB-mode偏光から、インフレーションなどの宇宙論 的な知見を得ることは、科学の大きな目標となっている.

☆ 多くの地上・気球実験.

10

1. イントロダクション

・Planck衛星: ダスト放射が支配的な353GHzでの全天観測. → 銀河磁場やダスト偏光の特性への知見が得られている. - 今回, 球面調和関数の 40 < l < 600 の偏光を、 銀河面から離れた領域について調べた. - 地上実験で行われたのと同じ領域のダスト特性も調べた.

・BICEP2で得られた結果に対して、ダストの寄与の情報を示す.



・ESAの衛星

- 2009年5月打ち上げ, 7月にL2到着.
 - HFIとLFIの双方での
 全天サーベイを5回実施.

- 2013年10月運用終了.





研究室輪講 (2014年 10月 9日, 東京大学)

2. プランク偏光マップ

・Planckデータ

- 2つの観測機器で得られた. * LFI (Low Frequency Instrument) * HFI (High Frequency Instrument) 周波数带:100,143,217,353 GHz → 本論文では, HFIで得られた全データ(30か月)を 使用した最初の結果をしめす. - 系統誤差の評価のためにデータセットを分ける * 60周回を2つに分け、2つのサブセットを得る.
 - * 観測期間を前半と後半に分ける.

- COの分布を見るために, Planck 857GHzのマップも使用.

2. プランク偏光マップ



(1) ダストからの偏光放射: Planck HFIの主要フォアグラウンド * 磁場で向きが揃った非対称ダストからの熱放射. * 偏光度 <1% ~ 18%. * 修正の入った黒体輻射と一致 $I_d(\nu) \propto \nu^{\beta_d} B_{\nu}(T_d)$ ν : **周波数**, $B_{\nu}(T_d)$: プランク関数 \rightarrow 温度 T_d =19.6 K, べき乗パラメータ β_d =1.59. 中緯度 (全天の39%)を400領域 (f^{eff}=0.0076) **に分けたとき**, β_d の分布は 0.17. $\rightarrow \beta_d$ の不定性は $(0.0076/f_{skv}^{eff})^{0.5}$ とする. (データの雑音の影響も含んだ保守的な見積もり)

2. プランク偏光マップ

 (2) CMB

 * C_l^{EE}: ACDMモデルとよく一致.
 高緯度の小スケール(l>400)では、CMB E-mode はダストの影響を同程度受けている.
 * CMB B-modeは、353GHzではダスト偏光に比べて 無視できる.

(3) シンクロトロン放射

- * 偏光度が高い <75%.
- * **強度の周波数依存性が** ~-3**乗であることから**、 Planckの観測周波数帯では無視できる.

2. プランク偏光マップ

(4) 偏光点光源

* 電波源は数%程度の偏光度を持っている. * Planck HFI観測程度の低/中次数では無視できる. * 赤外銀河観測から上限値が与えられているが、 それからの見積もりでも無視できる. → 明るく偏光した点源は、スペクトル推定で リンギングを起こす可能性があるのでマスクする. (5) CO放射 * CO**の最初の3輝線**:115GHz (J=1→0), 230GHz (J=2→1), 345GHz (J=3→2)**t**, HFIバンド(100, 217, 353GHz)に影響する. → CO放射領域はマスクする. 偏光角の周波数依存性からコンタミが無いことを確認.

2. プランク偏光マップ

·系統誤差要因

- 高次数(1>200)では宇宙論モデルとよく一致. → より大角度スケールでのみ問題になる. - 今回のデータ解析では2つの系統誤差要因を改善. * マッピングを行う前の時系列データ (ADCの非線形性,長時間ドリフト)の補正. * 強度から偏光への漏れの補正. (i) 検出器毎の効率の違い (?). (ii) ボロメータ間のキャリブレーションのミスマッチ. (iii) ダストスペクトルのずれの項. ボロメータ毎にフィルタ特性が違う. CMB dipoleで 校正する際にずれが生じる. - 総合的な系統誤差は、分けたデータを用いたnull testで評価.

3. 角度パワースペクトルの計算

•2つのアルゴリズム: Xpol と Xpure

- 全天の一部, フィルターの影響, ピクセルとビーム窓関数などの影響に対処する一連の手法.

・相関スペクトルの計算 - 雑音によるバイアスを避けるため、2つの独立なデータセット マップ間で相関をとる. 同じ周波数: $C_l(\nu \times \nu) \equiv C_l(D_{\nu}^1 \times D_{\nu}^2)$ 違う周波数: $C_l(\nu \times \nu') \equiv \frac{1}{4} [C_l(D_{\nu}^1 \times D_{\nu'}^1) + C_l(D_{\nu}^1 \times D_{\nu'}^2) + \cdots]$

3. 角度パワースペクトルの計算

 - 高緯度での統計を調べるために 小領域(パッチ)で計算.
 → 他の実験と同程度の大きさ.



Fig. 1: Masks and complementary selected large regions that retain fractional coverage of the sky f_{sky} from 0.8 to 0.3 (see details in Sect. 3.3.1). The darkest blue is the CO mask, whose complement is a selected region with $f_{sky} = 0.8$. In increments of $f_{sky} = 0.1$, the retained regions can be identified by the colours dark red (0.3) to dark blue (0.8), inclusively. Also shown is the (unapodized) point source mask used.

3. 角度パワースペクトルの計算

- 大領域

* Planck CO Mapを利用. → 全天の2割をマスク(濃い青) * 残りをCO強度に応じて 6分割. f_{sky}: 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8 * スムージングを施し、端の影響を 抑える. → 実効 f_{sky} が減少. * 点光源をガウス関数でマスク.

- 小領域



Fig. 1: Masks and complementary selected large regions that retain fractional coverage of the sky f_{sky} from 0.8 to 0.3 (see details in Sect. 3.3.1). The darkest blue is the CO mask, whose complement is a selected region with $f_{sky} = 0.8$. In increments of $f_{sky} = 0.1$, the retained regions can be identified by the colours dark red (0.3) to dark blue (0.8), inclusively. Also shown is the (unapodized) point source mask used.

* |b|>35度で 400 deg² の円形の領域. → 352パッチ.
 * 端面の処理など → 1パッチは f_{sky} = 0.0080

大領域のまとめ

Table 1: Properties of the large retained (LR) science regions described in Sect. 3.3.1. For each region, f_{sky} is the initial sky fraction, f_{sky}^{eff} its value after point source masking and apodization, $\langle I_{353} \rangle$ the mean specific intensity at 353 GHz within the region, in MJy sr⁻¹, and N_{HI} the mean H_I column density, in units of 10^{20} cm⁻² (Kalberla et al. 2005). For the power-law fits in multipole ℓ , we also list the exponents α_{EE} and α_{BB} (Sect. 4.2), the χ^2 of the fits with fixed exponents $\alpha_{EE} = \alpha_{BB} = -2.42$, the value A^{EE} of the fitted \mathcal{D}_{ℓ}^{EE} amplitude at $\ell = 80$ (in μK_{CMB}^2 at 353 GHz, Sect. 4.3), and the mean of the amplitude ratio $\langle A^{BB}/A^{EE} \rangle$ (see Sect. 4.4).

	LR24	LR33	LR42	LR53	LR63	LR72
	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8
$f_{\rm sky}^{\rm eff}$	0.24	0.33	0.42	0.53	0.63	0.72
$\langle I_{353} \rangle$	0.068	0.085	0.106	0.133	0.167	0.227
<i>N</i> _{HI}	1.65	2.12	2.69	3.45	4.41	6.05
<i>α_{EE}</i>	-2.40 ± 0.09	-2.38 ± 0.07	-2.34 ± 0.04	-2.36 ± 0.03	-2.42 ± 0.02	-2.43 ± 0.02
<i>α</i> _{BB}	-2.29 ± 0.15	-2.37 ± 0.12	-2.46 ± 0.07	-2.43 ± 0.05	-2.44 ± 0.03	-2.46 ± 0.02
$\chi^2_{FF} (\alpha_{EE} = -2.42, N_{dof} = 21) \dots$	26.3	28.1	31.8	38.3	32.7	44.8
χ^{2}_{BB} ($\alpha_{BB} = -2.42, N_{dof} = 21$)	18.9	14.0	21.1	22.1	15.4	21.9
$A^{EE} (\ell = 80) \dots \dots \dots \dots$	37.5 ± 1.6	51.0 ± 1.6	78.6 ± 1.7	124.2 ± 1.9	197.1 ± 2.3	328.0 ± 2.8
$\langle A^{BB}/A^{EE} \rangle \dots \dots$	0.49 ± 0.04	0.48 ± 0.03	0.53 ± 0.02	0.54 ± 0.02	0.53 ± 0.01	0.53 ± 0.01

・角度パワースペクトルの解析結果(f_{sky} = 0.3, 0.5, 0.7).

*f*_{sky} が大きいほど振幅は大きい. LR は重なっているが、
 実際は最も明るい部分が主に寄与. → ほぼ独立.
 Power Lawは、どの場合でもほぼ一定.



研究室輪講 (2014年 10月 9日, 東京大学)

- 得られたスペクトルは, ACDMの値より数桁大きい.
- 強度からの漏れの影響は問題ない.
- Null Test -> 系統誤差は問題ない.



• Power Law Fit * $D_l^{XX} = A^{XX} (l/80)^{\alpha_{XX}+2}$ でフィッティング. $\rightarrow \alpha_{EE} = -2.41 \pm 0.02$ $\alpha_{BB} = -2.45 \pm 0.03$ **→ 平均** -2.42 ± 0.02 は、 α_{TT} と一致. * χ^2 の評価 E: 26.3 (PTE 0.2) ~ 44.8 (PTE 0.002) B: 14.0 (PTE 0.87) ~ 22.1 (PTE 0.39)



Fig. 3: Best-fit power-law exponents α_{EE} (red squares) and α_{BB} (blue circles) fitted to the 353 GHz dust \mathcal{D}_{ℓ}^{EE} and \mathcal{D}_{ℓ}^{BB} power spectra for the different LR regions defined in Sect. 3.3.1, distinguished here with f_{sky} . Although the values in the regions are not quite independent, simple means have been calculated and are represented as red and blue dashed lines.

大領域のまとめ

Table 1: Properties of the large retained (LR) science regions described in Sect. 3.3.1. For each region, f_{sky} is the initial sky fraction, f_{sky}^{eff} its value after point source masking and apodization, $\langle I_{353} \rangle$ the mean specific intensity at 353 GHz within the region, in MJy sr⁻¹, and N_{HI} the mean H_I column density, in units of 10^{20} cm⁻² (Kalberla et al. 2005). For the power-law fits in multipole ℓ , we also list the exponents α_{EE} and α_{BB} (Sect. 4.2), the χ^2 of the fits with fixed exponents $\alpha_{EE} = \alpha_{BB} = -2.42$, the value A^{EE} of the fitted \mathcal{D}_{ℓ}^{EE} amplitude at $\ell = 80$ (in μK_{CMB}^2 at 353 GHz, Sect. 4.3), and the mean of the amplitude ratio $\langle A^{BB}/A^{EE} \rangle$ (see Sect. 4.4).

	LR24	LR33	LR42	LR53	LR63	LR72
<i>f</i> sky	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8
$f_{\rm sky}^{\rm eff}$	0.24	0.33	0.42	0.53	0.63	0.72
<i353></i353>	0.068	0.085	0.106	0.133	0.167	0.227
<i>N</i> _{HI}	1.65	2.12	2.69	3.45	4.41	6.05
<i>α_{EE}</i>	-2.40 ± 0.09	-2.38 ± 0.07	-2.34 ± 0.04	-2.36 ± 0.03	-2.42 ± 0.02	-2.43 ± 0.02
<i>α</i> _{BB}	-2.29 ± 0.15	-2.37 ± 0.12	-2.46 ± 0.07	-2.43 ± 0.05	-2.44 ± 0.03	-2.46 ± 0.02
$\chi^2_{FF} (\alpha_{EE} = -2.42, N_{dof} = 21) \dots$	26.3	28.1	31.8	38.3	32.7	44.8
χ^2_{BB} ($\alpha_{BB} = -2.42, N_{dof} = 21$)	18.9	14.0	21.1	22.1	15.4	21.9
$A^{EE} (\ell = 80) \dots \dots \dots \dots$	37.5 ± 1.6	51.0 ± 1.6	78.6 ± 1.7	124.2 ± 1.9	197.1 ± 2.3	328.0 ± 2.8
$\langle A^{BB}/A^{EE} \rangle \dots \dots \dots$	0.49 ± 0.04	0.48 ± 0.03	0.53 ± 0.02	0.54 ± 0.02	0.53 ± 0.01	0.53 ± 0.01

・偏光スペクトルの強度依存性 * Planck >=353GHzデータと IRAS $\lambda = 100 \,\mu$ mの観測 データを比較して定量化. * 現象論モデルでフィット $A^{XX}(\langle I_{353} \rangle) = K_{XX} \langle I_{353} \rangle^{\varepsilon_{XX}}$ $\epsilon_{EE} = 1.88 \pm 0.02$ $\varepsilon_{BB} = 1.90 \pm 0.02$



Fig. 4: Amplitude of the dust A^{EE} (red squares) and A^{BB} (blue circles) power spectra, normalized with respect to the largest amplitude for each mode. These are plotted versus the mean dust intensity $\langle I_{353} \rangle$ for the six LR regions (top panel). A power-law fit of the form $A^{XX}(\langle I_{353} \rangle) = K_{XX}\langle I_{353} \rangle^{1.9}$, $X \in \{E, B\}$, is overplotted as a dashed line of the corresponding colour (these almost overlap). The bottom panel presents the ratio of the data and the fitted $\langle I_{353} \rangle^{1.9}$ power law; the range associated with the $\pm 1 \sigma$ uncertainty in the power-law exponent of 1.9 is displayed in grey. For details see Sect. 4.3.

振幅の周波数依存性
 * 10個の周波数組み合わせで解析
 100×100, 100×143, 100×217, 100×353,
 143×143, 143×217, 143×353, 217×217,
 217×353, 353×353.
 * 各周波数の結果は、353GHzの

- 結果とよく一致($\alpha_{XX} = -2.42$).
- * 修正黒体輻射と一致 $I_d(v) \propto v^{\beta_d} B_v(T_d)$ $\rightarrow T_d = 19.6 \text{ K}, \beta_d = 1.59$



Fig. 6: Frequency dependence of the amplitudes $A^{EE,BB}$ of the angular power spectra, relative to 353 GHz (see details in Sect. 4.5). Results for \mathcal{D}_{ℓ}^{EE} (red squares) and \mathcal{D}_{ℓ}^{BB} (blue circles) for the smallest intermediate latitude region, LR24, are shown in the top panel. These include evaluations from cross-spectra involving polarization data at two frequencies, plotted at the geometric mean frequency. The square of the adopted relative SED for dust polarization, which is a modified blackbody spectrum with $\beta_d = 1.59$ and $T_d = 19.6$ K, is displayed as a black dashed line. The bottom panel shows the relative discrepancy with respect to this model spectrum. The $\pm 1 \sigma$ uncertainty area from the expected dispersion of β_d for the size of LR24, as inferred from Planck Collaboration Int. XXII (2014) (see Sect. 2.2.1), is displayed in grey.

5. 高緯度での統計評価

・高緯度の小領域(パッチ)での統計評価. * 353GHz, 400 deg², 353 patches (|b|>35度) → それぞれで 40<l<370の角度スペクトル → α_{XX} = -2.42として振幅を求める → 偏光振幅の強度依存性評価.



研究室輪講 (2014年 10月 9日, 東京大学)

28

5. 高緯度での統計評価

・353GHzでの結果を 150GHzへ外挿する.
→ 黒体輻射の式を使用. (その誤差も含める) r_d : -0.17 ~ >10 σ(r_d): 5.6 × 10⁻²~ >10



6. BICEP2観測領域の解析

•Planck 353GHz観測結果を150GHzに外挿 $\rightarrow r_d = 0.207$ (最もダストが少ない領域の約2倍).



Fig. 9: *Planck* 353 GHz \mathcal{D}_{ℓ}^{BB} angular power spectrum computed on M_{B2} defined in Sect. 6.1 and extrapolated to 150 GHz (box centres). The shaded boxes represent the $\pm 1 \sigma$ uncertainties: blue for the statistical uncertainties from noise; and red adding in quadrature the uncertainty from the extrapolation to 150 GHz. The *Planck* 2013 best-fit Λ CDM \mathcal{D}_{ℓ}^{BB} CMB model based on temperature anisotropies, with a tensor amplitude fixed at r = 0.2, is overplotted as a black line.

研究室輪講

(2014年10月9日,東京大学)

6. BICEP2観測領域の解析

・BICEP2領域での周波数依存性. →修正黒体輻射モデルとよく一致していることを確認.



Fig. 10: Frequency dependence of the amplitude A^{BB} of the angular power spectrum \mathcal{D}_{ℓ}^{BB} computed on M_{B2} defined in Sect. 6.1, normalized to the 353 GHz amplitude (red points); amplitudes for cross-power spectra are plotted at the geometric mean frequency. The square of the adopted dust SED, a modified blackbody spectrum with $\beta_d = 1.59$ and $T_d = 19.6$ K, is over-plotted as a black dashed-line, again normalized to the 353 GHz point. The $\pm 1 \sigma$ error area arising from the expected dispersion of β_d , 0.11 for the M_{B2} patch size (Sect. 2.2.1), is displayed in light grey.

研究室輪講

(2014年 10月 9日, 東京大学)

31



・ダストによるCMB偏光のフォアグラウンド評価を主目的 として,ほぼ全天観測データを用いた統計的解析を行った. - 353GHzでの偏光観測結果は,角度依存性が全天の

24-72%において $\alpha_{EE,BB} = -2.42 \pm 0.02$ に一致.

- ダスト強度に対するる偏光振幅依存性は 1.9乗.
- 周波数依存性は,修正黒体輻射モデルによく一致.
- 高緯度の小領域の統計も上記によく一致.
- ・CMB B-mode観測に対して以下の知見.
 - 高緯度においてもダストの影響はある. 最もきれいな領域で
 r_d = 0.17 (3σ) 程度. → 0.1以下を目指すには減算が必須.
 地上や気球実験でもダストチャンネルを加えるべき.



・BICEP2の観測領域に関して

- Planck 353GHzの観測結果からのダスト量推定値は、 BICEP2で観測されたB-modeと同程度.
- 周波数依存性は, モデルとコンシステント.
- BICEP2との共同解析が必要.
- ダストによる偏光振幅が, BICEP2領域の約半分の 領域がある.

おしまい

100000

10,000,000,000,000,000

APRIL PROPERTY AND ADDRESS