

CMB 偏光観測実験 POLARBEAR の最初の結果

東京大学カブリ数物連携宇宙研究機構

西野 玄記

haruki.nishino@ipmu.jp

KEK 素粒子原子核研究所

茅根 裕司

chinoney@post.kek.jp

2014 年 (平成 26 年) 8 月 10 日

1 はじめに

2014 年 3 月 17 日、南極で宇宙マイクロ波背景放射 (Cosmic Microwave Background, 以下 CMB と呼ぶ) の偏光を観測している BICEP2 チームが “First direct evidence of cosmic inflation” というタイトルで記者発表を行い、数度の角度のスケールでの CMB の B モード偏光の検出を報告した [1]。そのニュースは CMB 実験業界のみならず広く一般に知れ渡ることになり、高エネルギーニュースの読者の方々も耳にされていることと思う。一方、その一週間前には我々 POLARBEAR 実験が BICEP2 とは異なる角度スケールにおける B モードのパワースペクトルの測定結果を発表しており、CMB の B モード偏光観測はこのわずか一週間の間に劇的な進展を遂げた。そのようにエキサイティングな状況にある CMB 偏光観測について、本記事では BICEP2 実験の結果についても触れながら、日本グループが重要な貢献をしている POLARBEAR の最新成果を中心に紹介する。比較的短い時間スケールの間に新たな結果が出てくる可能性もあり、本記事が読まれるまでにいくらか状況が変わっているかも知れないが、本記事は基本的には 2014 年 7 月時点における情報を元にして執筆する。

1.1 CMB の B モード偏光と宇宙論

CMB の B モード偏光の物理に関しては、既に高エネルギーニュースにおいても過去に記事がある [2, 3] が、ここでも簡単に紹介しておきたいと思う。

1.1.1 インフレーション起源 B モード

我々がなぜ CMB の B モードを観測したいかという、B モードを見ることは宇宙のインフレーションの直接的

な検証を可能とするからである。インフレーションでは宇宙の始まりの直後 $\sim 10^{-35}$ 秒の間に宇宙が $\sim e^{60}$ 倍にも膨張したとされているが、その特徴的な予言の一つとして原始重力波の存在がある。インフレーションは原始宇宙のミクロなスケールにおける時空の量子揺らぎを一瞬にして観測可能なスケールの揺らぎへと引き伸ばす。その揺らぎのうち、テンソル揺らぎがいわゆる重力波であり、これが CMB の偏光成分に渦状の特徴的なパターン、奇パリティの B モードを作る。したがって、B モード偏光の観測は宇宙の晴れ上がりと再電離の時点での原始重力波の壮大なイメージ観測である。図 1 が期待される B モード偏光マップの例であり、ところどころにおよそ $1\sim 2$ 度スケールの渦のようなパターンが見て取れる。(同様に偶パリティの E モードの偏光分布パターンの例も示した。こちらの E モード偏光は B モード偏光より二桁以上大きいと期待され、2001 年の DASI による初検出 [4] を皮切りに既に多くの実験、例えば QUIET 実験 [5, 6] など、によりスペクトルが測定されている。) B モード偏光の強度は原始宇宙のテンソル揺らぎと密度揺らぎの強度の比 r と呼ばれるパラメータに比例する。一方で、 r は次のようにインフレーションのポテンシャルエネルギー V に関係付けられる。

$$V^{1/4} \sim \left(\frac{r}{0.01}\right)^{1/4} \times 10^{16} \text{ GeV} \quad (1)$$

したがって、B モード偏光のパワースペクトルを測定することはインフレーションのエネルギースケールを決定することに繋がり、さらに、数あるインフレーションの理論モデルを選別することも可能とする。標準的なインフレーションモデルでは $r > \mathcal{O}(0.01)$ であり、大変興味深いことに、その場合インフレーションのエネルギースケールは大統一理論のエネルギースケールに相当することになる。

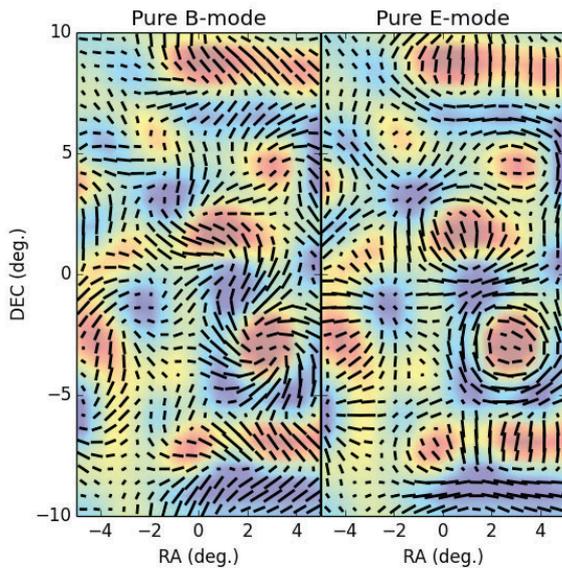


図 1: 左半分が原始重力波により作られると期待される B モードの偏光分布 (E モードなし) の例である。右半分には逆に、E モードの偏光分布 (B モードなし) の例を示した。

1.1.2 重力レンズ効果起源 B モード

さて、CMB の光子が宇宙の晴れ上がりの時点、すなわち、最終散乱面から我々観測者のもとに届くまで、実際にはまっすぐ飛んできているわけではない。宇宙誕生から現在に至るまでに形作られた宇宙の大規模構造の重力ポテンシャルにより、その軌跡は曲げられてしまっているのである。この効果を重力レンズ効果といい、これにより、CMB の偏光分布も宇宙の晴れ上がりの時点のそれと比べて歪められた分布が見えることになる。その結果、重力レンズ効果は CMB 偏光の E モードと B モードを混ぜ合わせ、元々強度の大きかった E モードから B モードが作られる。重力レンズ効果自体は既に CMB の温度揺らぎスペクトルの形を変える二次的な効果としても検出されているのだが、偏光成分の観測はさらなる高感度を実現する可能性を将来的に持っている。というのは、重力レンズ効果が小角度スケール (数分角) における主な B モード偏光源だからである。また、宇宙の大規模構造はニュートリノ質量による影響を受けるため、数分角スケールにおける B モード偏光測定はニュートリノ質量和に関する重要な情報を与える。具体的には、次世代の CMB 偏光実験は 100 meV を下回るニュートリノ質量和測定精度を達成できると期待されている。

CMB 偏光に対する重力レンズ効果は以下のように表すことができる。

$$(Q \pm iU)(\mathbf{n}) = (\tilde{Q} \pm i\tilde{U})(\mathbf{n} + \mathbf{d}(\mathbf{n})) \quad (2)$$

ここで、 Q 、 U は観測されたストークスパラメータで、 \tilde{Q} 、

\tilde{U} が重力レンズ効果を受ける前の元々のストークスパラメータを示す。図 2 の模式図で示すように重力レンズ効果による deflection \mathbf{d} を受けるため、視線方向ベクトル \mathbf{n} の観測は、実際には $\mathbf{n} + \mathbf{d}$ の方向の CMB を見ていることになる。後述するように、異なる波数ベクトルを持つ E モード、B モード間の相関から deflection \mathbf{d} の場を見積もることができる。POLARBEAR は、この重力レンズ効果の存在を (CMB 偏光のみを用いた解析では) 世界で初めて示した。

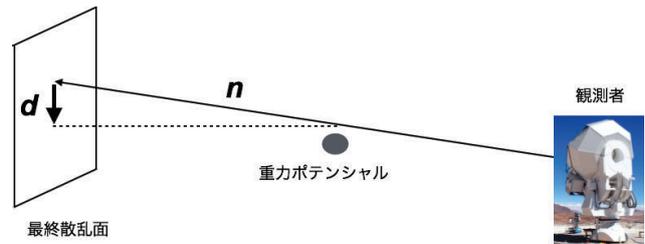


図 2: 重力レンズ効果による deflection の模式図。この模式図では重力ポテンシャルがどこか一点に存在するように描いてあるが、実際には最終散乱面から現在に至るまでの間の大規模構造による重力ポテンシャルの影響が積分された deflection を見ることになる

2 POLARBEAR 実験概要

2.1 POLARBEAR 略歴

POLARBEAR 実験は南米チリ、アタカマ砂漠における CMB 偏光の観測を目的とした地上実験である。Toco と呼ばれる山の中腹¹、標高約 5,200m² に望遠鏡を設置し、150 GHz 帯における偏光観測を行なっている。チリでの観測を始める前の 2009 年から 2010 年にかけては、アメリカ・カリフォルニア州の東部のミリ波天文の干渉計アレイ、CARMA³、のサイトに望遠鏡を建設し、試験観測を行い、そこでの経験を元に本観測へと移行した。2011 年、チリのサイト建設は正に何もなかったところにコンクリートを打つことから始められた。当然ながら、電気もない、麓までの回線もないといった状況であった。それらを基本的には全て自前で (学生、ポスドクを中心とした研究者らが酸素ボンベを背負いながら) 整備してきた。発電機が導入された後もサイトに大型の燃料タンクができるまでは、毎日ディーゼル燃料を満たしたドラム缶を積んで山に登る必要があり、年に数回の大雪でサイトの数 km 手前までしか車で到達できなくなると、燃料を持って雪道を数時間ハイキングするなどというこ

¹観測サイトを起点とすれば、「高尾山に登る感覚」で標高 5,600m のピークに登頂できる。

²wikipedia によれば、現時点で世界で三番目に標高の高い (永続的な) 天文観測所とのことである。

³Combined Array for Research in Millimeter-wave Astronomy

ともあった。そのような泥臭いサイト整備作業を経て、建設開始の4ヵ月後の2012年1月にはファーストライトを達成した。本格的に(解析に使われている)データの取得が開始されたのは2012年6月からであり、それから約一年間のデータセットを最初のシーズンと定義して、その解析結果を今回発表した。POLARBEAR コラボレーションはカリフォルニア大学バークレー校を中心とした7ヵ国、およそ70名の研究者からなる。日本グループの貢献は、2008年からのKEKの参加に始まり(当初はKEKのCMBグループの中でも少数派であったが)、年を追うごとに存在感を増してきている。今では、特にデータ解析や次期アップグレード計画などにおいて、実際にプロジェクトを推進する中心的な力となっているといえる。

2.2 Huan Tran Telescope

図3の写真がPOLARBEARで使われている望遠鏡、Huan Tran Telescopeである。この名前は不幸にも2009年に若くしてこの世を去った、望遠鏡の設計者であり、且つPOLARBEAR全体のプロジェクトマネージャでもあったHuan T. Tran氏(UC Berkeley)に敬意を表してつけられた。主鏡の直径は3.5mであり、これにより3.5分角(FWHM⁴)の分解能を達成する。一般に分解能($\Delta\theta$)と主鏡の直径(D)、観測する波長(λ)は次のような関係、

$$\Delta\theta \sim \frac{\lambda}{D}, \quad (3)$$

にあり、よい角度分解能を持つには大きな主鏡が必要になってくる。POLARBEARは3.5分角の分解能を持つことにより、原始重力波によるBモード偏光だけでなく、重力レンズ効果により生じるBモード偏光に対しても感度を得ることができる。

主鏡の下部には、光学系、焦点面検出器、冷却系などを収めたレシーバー(図4)が設置されている。冷却系は、パルス管冷凍機と液体ヘリウムを用いたソーption冷凍機からなり、焦点面検出器は0.25 Kに冷却されている。一方、レシーバーの入射窓近くには単結晶サファイアからなる半波長板が設置されている。半波長板とは、入射する偏光の向きによって光の屈折率が異なる光学素子で、検出器に入る偏光の向きを回転するために使うことができる。人為的に偏光の向きを回転させることは装置の系統誤差の軽減に有効である。なぜならば、レシーバーの外からやってくる「本物」の偏光は半波長板の回転と共に変調を受けるのに対して、レシーバーの中で作られる「偽物」の偏光信号は半波長板の影響を受けないためである。しかし、この半波長板が実は曲者であったということを4.3.1に述べる。



図3: チリ・アタカマ砂漠に設置された望遠鏡 (Huan Tran Telescope)。

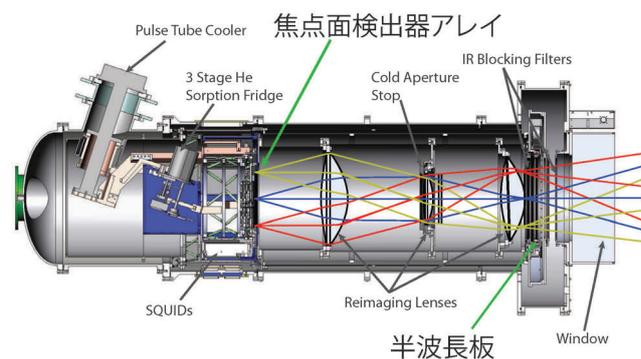


図4: レシーバーの模式図。CMBを含む外からの光は図右側の窓から入り、レンズなどの光学系を経て、図中心部の焦点面へと入射する。また、図の右側のレシーバーの窓近くには半波長板が設置されている。

⁴Full Width at Half Maximum

2.3 焦点面検出器

POLARBEAR は焦点面の光検出器として、アンテナ結合型超伝導 TES (Transition Edge Sensor) ボロメータを用いている。図 5 はその焦点面検出器アレイの写真で、7 枚のウェハー上にそれぞれ 91 ピクセルがプロセスされており、総ピクセル数は 637 である。一つのピクセルは二つのボロメータからなり、互いに直交する偏光に対して感度を持つアンテナに繋がっている。したがって、各々のボロメータの出力の差が偏光信号として現れることになる。ボロメータの信号は SQUID⁵ を用いて読み出すが、多素子化による信号線の増大に伴う常温系から低温系への熱流入の増加を緩和するために、周波数多重読み出し技術を採用している。ノイズレベルは各ボロメータ毎で $540 \mu\text{K}_{\text{CMB}}\sqrt{\text{s}}$ 、アレイ全体としては $23 \mu\text{K}_{\text{CMB}}\sqrt{\text{s}}$ である。ここで K_{CMB} とは、2.7 K の黒体放射の強度に対する、信号の相対的な大きさを示す単位である。また、 $540 \mu\text{K}_{\text{CMB}}\sqrt{\text{s}}$ は、あるボロメータで 1 秒間データを積分すると $540 \mu\text{K}_{\text{CMB}}$ の精度で温度の揺らぎを測定できることを意味している。

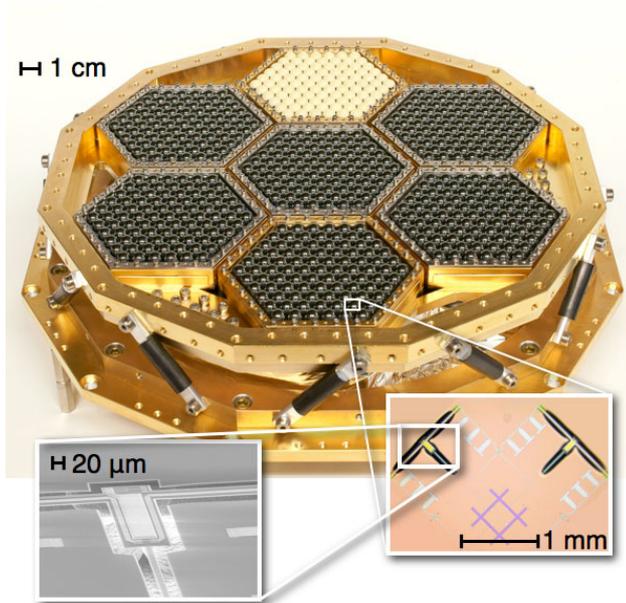


図 5: POLARBEAR の焦点面検出器アレイ。図右下の拡大図はある 1 ピクセルの拡大で、井桁状の構造はダイポールスロットアンテナ、T 字状の構造は TES ボロメータである。図左下は TES ボロメータの拡大写真である。

2.4 データ収集

CMB 実験では、トリガーやイベントといった概念はないので、観測中は常にデータを取り続けている。フロントエンドにおけるデータレートはおよそ 1 MB/sec で

⁵Superconducting Quantum Intereference Device

一日当りのデータ量 (圧縮後) は、10 ~ 15 GB 程度、一年では約 4 TB 程度である。POLARBEAR のデータ収集はボロメータのデータ読み出しから観測スケジュールの制御までを GCP と呼ばれるソフトウェアが一手に引き受けている。GCP は元々は CBI という CMB 実験のために 10 年以上前に開発されたものであるが、現在でも POLARBEAR を始めとして BICEP や SPT などといった数々の CMB 実験で使われ続けている。いまだきの高エネルギー実験と比べれば、データ量は大了ことないので、洗練されたシステムが必要とされているわけではなく、組織的な開発がされてこなかったという状況である。チリのサイト建設開始直前の土壇場になって、(当時まだ全チャンネルの読み出しが出来ていなかった状況で、) 前任者 (学部生) がいなくなるということが分かり、(筆者のうちの一人が) 急いで引き継ぎ、必要な改良を加え、何とか観測にこぎつけるという顛末もあった。

サイトから外へのネットワークに関しては、標高 5,200m から麓までケーブルが這っているわけではないので約 5 GHz の電波によるリンクを自前で構成し、麓にあるオフィスまで直接データを送っている。これにより観測を遠隔地から監視、制御することも可能となり、例えば、地球の裏側同士であるチリと日本の時差を利用して、チリの現地時間で深夜の間は、日本から観測状況を監視し、必要とあらば観測の遠隔制御などを行っている。麓のオフィスからのデータ転送は一般のインターネット回線を使い、カリフォルニア大学バークレー校のサーバーまで転送され、そこを起点としてローレンスバークレー国立研究所や KEK などの各地の研究機関の計算機施設にコピーされる。

2.5 観測領域

POLARBEAR の最初のシーズンの観測は重力レンズ効果による B モードの測定に焦点を絞った。前述した通り、この効果は数分角スケールに現れる効果であるため、小さな角度領域の観測で検出可能である。図 6 に示すように、一つあたりおよそ $3^\circ \times 3^\circ$ の天域を三つ観測した。この観測領域の幅がパワースペクトルの測れる最小の ℓ (ℓ_{min}) とビンの幅 ($\Delta\ell$) を決める⁶。POLARBEAR の最初の結果については $\ell_{\text{min}} = 500$, $\Delta\ell = 400$ である。観測領域を決めるにあたってもう一つ大切な要素は、他観測と重なった領域を見ることである。POLARBEAR は今回 Herschel 衛星の ATLAS サーベイと重なった天域において相互相関解析を行った。(これについては 4.2 に述べる。)

⁶ ℓ は角度スケールの逆数。ほかに $1/f$ ノイズも ℓ_{min} を決める主要な要素となる。

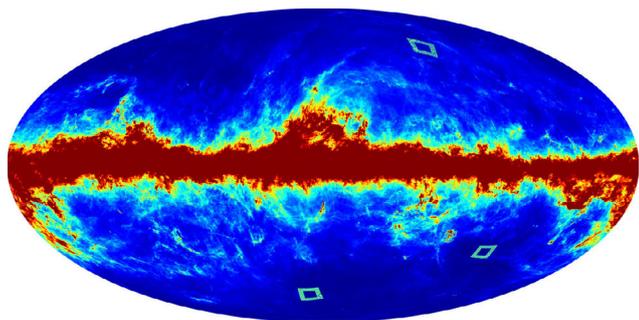


図 6: Planck の 857 GHz のマップ [7] 上に示された POLARBEAR の観測領域 (マップ中の三つの四角形)。中心が銀河面であり、帯状に広がっているのがおもに銀河系内のダストによる放射の成分である。

2.6 POLARBEAR と BICEP2 の比較

POLARBEAR と BICEP2 の違いについて端的に挙げるとすれば、以下の三つが挙げられる。

- 観測場所
- 観測領域の大きさ
- 角度分解能

第一に観測場所については、POLARBEAR はチリ・アタカマ砂漠、BICEP2 は南極における観測である。いずれも高地にあるため酸素濃度が低く、さらに、大気が乾燥していることから、電波天文の観測に適した世界有数の場所である⁷。有効観測領域については、POLARBEAR の有効観測領域が 25 deg^2 に対し、BICEP2 が 380 deg^2 である。POLARBEAR は重力レンズ効果起源の B モード検出を目指し、小角度スケールをより綿密に観測するという選択をした。三つ目に角度分解能の違いについては、POLARBEAR が 3.5 分角 (FWHM) の分解能を持つのに対し、BICEP2 の分解能は 30 分角 (FWHM) である。観測領域の大きさの違いの影響も合わせ、最新の結果で測定されている角度スケールはそれぞれ $500 < \ell < 2100$ (POLARBEAR), $20 < \ell < 340$ (BICEP2) である。

一方、共通点として、双方とも超伝導 TES ボロメータアレイを SQUID で読み出しているということが挙げられる。この二つの実験だけでなく、詳細の違いこそあれ、現在走っているほとんどの実験には類似の技術が使われている。観測開始時期については BICEP が先行しており、BICEP2 の前のフェーズの BICEP が 2006 年から、BICEP2 も 2010 年から観測を始めているため、蓄積したデータ量的には BICEP がほかの偏光観測実験の一步先を行っていることは間違いない。

⁷ただし、南極のほうが一年を通じた気候は比較的安定しているようである。一方で、アタカマの方が緯度が低い (南緯約 23°) ため、より広い領域を観測できるという利点がある。

3 観測から偏光マップが出来るまで

宇宙論を論じるために我々にとってもっとも基本的なツールは、二次元球面である天球上の CMB の揺らぎの角度相関、パワースペクトルである。そのためにまず CMB の揺らぎの二次元マップを作り、そのマップを球面調和関数展開 (もしくは二次元フーリエ変換) し、パワースペクトルを計算する。ここでは、パワースペクトルの話に入る前の準備段階として、観測から偏光マップが出来るまでを簡単に紹介する。

3.1 観測方法

表 1 はある一日の観測スケジュールの例である。マイクロ波で見た空は昼も夜も違いはないので、観測は昼夜を問わず行われる。ただし、観測したい天域が常に観測可能な高さにあるとは限らないので、それぞれの天域ごとに 3 ~ 7 時間観測しては、次の天域へと移行する。その合間に惑星や偏光天体を用いたキャリブレーション観測などが行われる。また、表中の冷凍機サイクルとはソーption冷凍機で用いられる液体ヘリウムを活性炭に吸着した状態から脱着させるために冷凍機の一部を温め、再び冷却するまでのサイクルのことで、約 6 時間程度の時間を要する。

表 1: ある日の観測スケジュールの例

時間	スケジュール
13:30 ~ 20:00	CMB(天域 1) 観測
20:00 ~ 22:00	惑星観測
22:00 ~ 24:00	ポインティングキャリブレーション
00:00 ~ 07:30	CMB(天域 2) 観測
08:00 ~ 09:00	偏光天体観測
09:00 ~ 13:30	CMB(天域 3) 観測
13:30 ~ 20:00	CMB(天域 1) 観測
20:00 ~ 02:00	冷凍機サイクル

CMB の観測は Constant Elevation Scan と呼ばれるスキャンで観測される。これは望遠鏡を鉛直方向には動かさず、水平方向に首を振るというスキャンをひたすら繰り返す方式である。仮に望遠鏡を鉛直方向に動かしたとすると視線方向の大気の厚みが変わってしまう。大気の厚みが変わるとボロメータへ吸収される大気の熱放射の熱量が変わり、ボロメータのバイアスに影響する。その結果として、ボロメータの信号強度が変わったり、超伝導の転移端から超伝導状態へと落ち込んでしまうといったことが起こる。そういった事態を避けるために一定時

間同じ高さを観測し続け、地球の自転に任せて観測天域が動くのを待つのである。

3.2 装置の較正

ここではCMB観測において必要な装置の較正のうち、上の観測スケジュールに含まれている惑星と偏光天体の観測について説明する。

火星、木星、土星といった惑星の観測はおもにビームの較正に使われる。ここで、ビームとはある光学系を通して点源を見たときにどう見えるかの角度プロファイルのことであり、ビームが小さいほど角度分解能がよいことを意味する。どの惑星もPOLARBEARのビームに対しては十分小さいので点源として扱うことができ、3.5分角のガウシアンビームを達成できていることを確認した。「達成した」と一言で終わらせることもできるが、その裏では、焦点を合わせるために、長時間にわたり(時には深夜に)、寒さと強風にさらされながらの、光学系の測量と調節の繰り返し(その多くはKEKのメンバーによる)があったことも付記しておく。また、このビーム較正において対をなす検出器の間でのビームの形の違いないかを確認することも系統誤差の理解に重要である。

装置の偏光特性較正はおもに偏光天体の観測により行われる。特に、空に投影された各検出器の偏光角度を如何にして較正するかはCMB偏光実験のもっとも重要なポイントの一つである。偏光特性が比較的良好に知られた天体として、かに星雲の名でも知られる超新星残骸Tau Aがあり、これをほぼ毎日の頻度で観測する。Tau AについてはIRAM 30m望遠鏡による詳細な偏光の観測データ[8]があることが知られ、POLARBEARでもこれを参照データとして偏光角較正を行った。これにより、各検出器ピクセルの相対角度を 1.0° (RMS)の精度で抑えることができた。ただし、絶対偏光角度の較正のためには不定性が大きいので、次に述べる方法で決められる⁸。

若干、奇異に聞こえるかも知れないが、絶対信号強度と絶対偏光角度の較正にはCMBデータ自身が使われる。絶対信号強度の較正はCMBの温度揺らぎのスペクトルを用いて合わせられる。そのスペクトルがWMAP-9 year [9]のベストフィットの宇宙論パラメータによる温度揺らぎスペクトルともっともよく合うようにスケールを合わせる。絶対偏光角度については、標準宇宙論では全宇宙的に偏光方向を回転させるような作用がないため、

⁸実際、Tau Aで決められた角度と次に述べる較正方法では約 1° のずれがある。また、最近になって、ACTPolという別のアタカマのCMB実験からも、同様の(POLARBEARと矛盾のない)結果が報告されている[10]。このずれの原因としては、参照データ(90 GHz周辺)との観測周波数の違い、すなわち、90 GHzと150 GHzではTau Aの偏光角度が変わっているのではないかとということが一つの可能性として考えられている。

EモードとBモードの相互相関スペクトルが $C_\ell^{EB} = 0$ となることを使う。もし、一時的に決めた絶対角度較正が $\Delta\alpha$ だけずれていたとすると、観測される C_ℓ^{EB} には C_ℓ^{EE} からの漏れ込みが入り、

$$C_\ell^{EB} \simeq 2\Delta\alpha C_\ell^{EE} \quad (4)$$

となる。したがって、これを利用して角度を補正することが出来る⁹。この較正方法により絶対偏光角度の系統誤差は 0.2° に抑えられている。ちなみにBICEP2でも絶対偏光角度は最終的には同様の方法で較正されている。

3.3 偏光マップ

装置の較正をした後には、解析に使えるデータを選別(詳細は割愛)し、偏光マップ、すなわち、直線偏光を表すストークスパラメータQとUのマップを作成する。QとUは図7に示されるようなX, Y、もしくは 45° 回転させた座標系A, Bのそれぞれ二つの軸の電場の2乗の差である¹⁰。

$$Q = E_X^2 - E_Y^2 \quad (5)$$

$$U = E_A^2 - E_B^2 \quad (6)$$

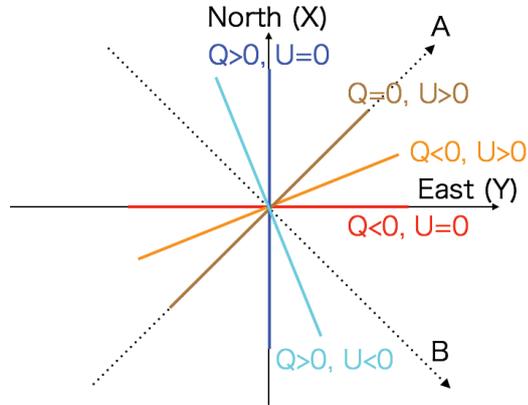


図7: ストークスパラメータQとU。例として様々な偏光の方向に対してQとUが正か負か、もしくは0かを示した。

ある一つの天域について最初のシーズンのデータをすべて足し上げて作ったストークスQのマップが図8である。この偏光マップのノイズレベルは $6 \mu\text{K-arcmin}$ (フィルター後)である。これは、1分角のピクセルサイズ

⁹ただし、標準宇宙論を超えたモデルでは角度較正の間違いと縮退するような効果を宇宙論的に作ることも出来る。したがって、現在のPOLARBEARのデータはそうした宇宙論に対する制限は与えることはできないが、いずれにせよ、重力レンズBモードを測定する上でそれらを区別する必要はないので影響はない。

¹⁰それぞれのボロメータの測定量は電場の二乗である。

ズでノイズのマップを作ったときに、マップのピクセルごとの Q の値が $6 \mu\text{K}$ (RMS) でばらつくということを示している。また、これは重力レンズ効果 B モードに対しておよそ $S/N \sim 1$ となる程度のノイズレベルである。

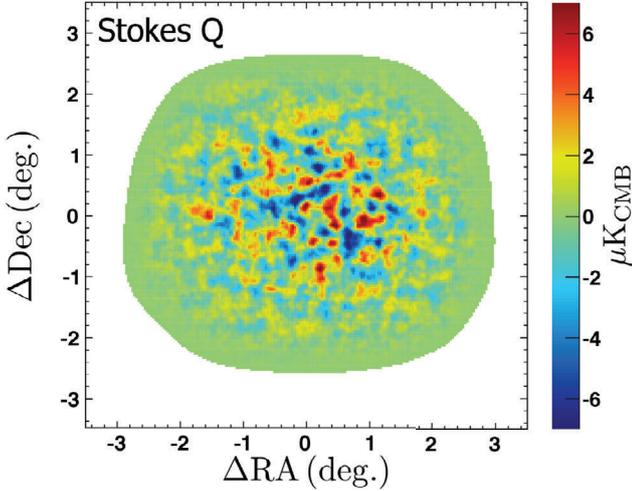


図 8: もっとも観測時間の長い天域のストークスパラメータ Q のマップ。ファーストシーズンのすべてのデータを足し上げたもの。

ところで、 Q, U は座標系の定義による量なので、宇宙論を論じるためにはそれらを座標系によらない定義の E モード、 B モードに変換しなくてはならない。

$$\begin{pmatrix} E(\mathbf{l}) \\ B(\mathbf{l}) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos 2\phi_\ell & \sin 2\phi_\ell \\ -\sin 2\phi_\ell & \cos 2\phi_\ell \end{pmatrix} \begin{pmatrix} Q(\mathbf{l}) \\ U(\mathbf{l}) \end{pmatrix} \quad (7)$$

ここで、 $Q(\mathbf{l}), U(\mathbf{l})$ はそれぞれフーリエ変換後の波数空間における Q, U で、 \mathbf{l} は波数ベクトル、 ϕ_ℓ は波数ベクトルと座標系の軸 X のなす向きである。次章に述べられる解析ではこの波数空間における $E(\mathbf{l}), B(\mathbf{l})$ が用いられる。

4 POLARBEAR の最新成果

POLARBEAR は昨年末から今年の 3 月にかけて最初の結果を 3 本の論文として発表した。

- 重力レンズ deflection field のパワースペクトル [11]
- 宇宙赤外背景放射 (Cosmic Infrared Background, 以下 CIB と呼ぶ) と deflection field の相互相関パワースペクトル [12]
- B モード偏光自己相関パワースペクトル [13]

以下、それぞれの結果について概要を述べる。

4.1 重力レンズ deflection field のパワースペクトル

重力レンズ効果は、元々(宇宙の晴れ上がりの時点では)存在しなかった異なるモード間 (E モード vs. B モード, \mathbf{l} vs. \mathbf{l}' ($\mathbf{l} \neq \mathbf{l}'$)) での相関を生み出す。その相関を適切な重みで足し上げてやることでレンズ効果の大きさ、deflection field を見積もることが出来る¹¹[14]:

$$d_{EE}(\mathbf{L}) \propto \int d^2\mathbf{l} E(\mathbf{l}) E(\mathbf{l}') F_{EE}(\mathbf{l}, \mathbf{l}'), \quad (8)$$

$$d_{EB}(\mathbf{L}) \propto \int d^2\mathbf{l} E(\mathbf{l}) B(\mathbf{l}') F_{EB}(\mathbf{l}, \mathbf{l}'). \quad (9)$$

ここで、 $\mathbf{L} = \mathbf{l} + \mathbf{l}'$, $F_{XY}(\mathbf{l}, \mathbf{l}')$ は最適な重み付けのための関数である。

Deflection field パワースペクトル C_L^{dd} は、 $\langle d_{EE}(\mathbf{L}) d_{EB}^*(\mathbf{L}) \rangle$ と $\langle d_{EB}(\mathbf{L}) d_{EB}^*(\mathbf{L}) \rangle$ という二通りの「四点相関」で求められる。

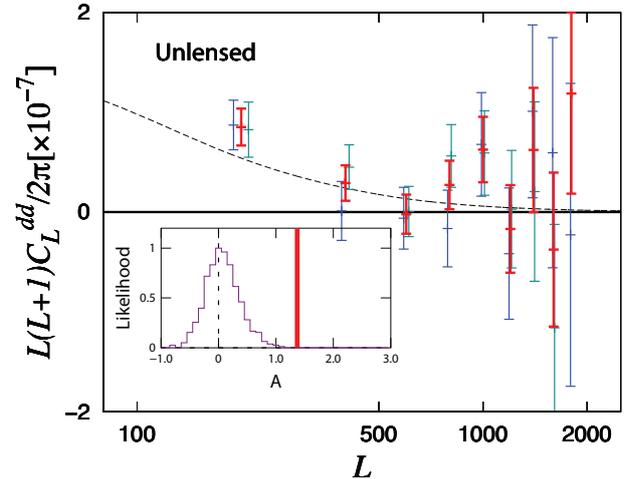


図 9: 重力レンズ deflection パワースペクトル C_L^{dd} . 各ビンに三つデータ点があるが、左側が $\langle d_{EE}(\mathbf{L}) d_{EB}^*(\mathbf{L}) \rangle$, 右側が $\langle d_{EB}(\mathbf{L}) d_{EB}^*(\mathbf{L}) \rangle$, 中央がそれら両方を用いた見積もりである。図中に挿入されているヒストグラムは、レンズ効果なしのシミュレーション 500 回の重力レンズ効果の大きさ A_{dd} の分布である。

図 9 に示したのが今回得られた重力レンズ deflection field のパワースペクトルであり、ポジティブなパワーが見えているのが分かる。Deflection field は $\sim 2^\circ$ のスケールで揃っているため (ピークは $L < 100$ にあるため)、この図の中では小さい L ほどより大きなパワーを持つ。点線が標準宇宙論からの予想であり、その点線をどれだけスケールすればデータ点ともっとも合うかで重力レンズ効果の大きさ (A_{dd}) を表すと、 $A_{dd} = 1.37 \pm 0.30$ (stat.) ± 0.13 (sys.) となった。したがって、

¹¹式 9 は、 $\mathbf{l} \neq \mathbf{l}'$ の $E(\mathbf{l})$ と $B(\mathbf{l}')$ の相関であるという点で、絶対角度較正に用いられる $C_L^{EB} = \langle E(\mathbf{l}) B^*(\mathbf{l}') \rangle$ と異なる。

4.2 σ の有意性で重力レンズ効果の証拠が得られ、さらに、重力レンズ効果の大きさは標準宇宙論と矛盾がなかった。この結果は「CMB 偏光だけによる世界で初めての重力レンズ効果の証拠」であり、CMB 偏光による宇宙の大規模構造の測定（さらにはニュートリノ質量と測定）の道を切り拓く重要な一歩であるといえる。

4.2 CIB との相互相関パワースペクトル

赤外領域での宇宙背景放射, CIB, は赤方偏移にして $z = 1 \sim 3$ の質量分布をよく反映しており, CMB の温度揺らぎから求められる重力レンズ効果と CIB のフラックスがよく相関していることが既に示されている [15, 16]。CMB の偏光データが同様に重力レンズ効果の影響を受けているとすれば, 偏光データから求めた deflection field (式 8, 9) と CIB の間に相関が生じるはずである。そこで, 計算された相互相関スペクトル $C_{\ell}^{\kappa I} = \langle \kappa(\mathbf{l}) I_{\text{CIB}}^*(\mathbf{l}) \rangle$ (ただし, $\kappa = -\nabla \cdot \mathbf{d}/2$) を図 10 に示す。ここで, I_{CIB} は CIB のフラックスであり, Herschel 衛星 (SPIRE instrument) の ATLAS サーベイ [17] の $500\mu\text{m}$ の公開データを用いた。

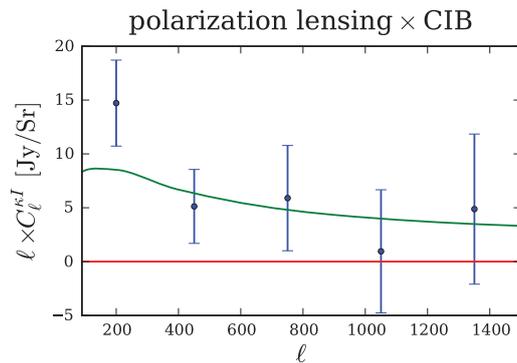


図 10: CMB 偏光により見積もられたレンズ効果と CIB フラックスとの相互相関スペクトル。実線は標準宇宙論による予想曲線である。

図 10 から標準宇宙論で予想される相関が, POLARBEAR のレンズ効果見積もりと CIB フラックスの間でも見えていることが分かる。統計的な有意性は 4.0σ である。南極の SPTpol 実験によっても同等の解析結果 [18] が昨年に報告されており, その結果を以て SPTpol は重力レンズ効果起源 B モードの初検出を主張している。POLARBEAR の相互相関解析はそれを異なる天域において追認したことになる。また, 混乱を避けるために繰り返し述べておくと, 4.1 における POLARBEAR の「世界初」との違いは, CIB という別の観測データを持ってきて相互相関を見たか, CMB 偏光データのみを用いたかである。一般に, 独立な観測の相互相関を用いると各観測装置独自の系統誤差がキャンセルされるため, 自

己相関による解析の方が系統誤差を抑えることが難しいといえるだろう。(と言っても「B モードの初検出」を出し抜かれた悔し紛れと取られるかも知れないが...)

4.3 B モード自己相関パワースペクトル

POLARBEAR の最初のシーズンの解析結果としてもっとも最近発表されたのは CMB の B モード自身の自己相関パワースペクトル $C_{\ell}^{BB} = \langle B(\mathbf{l}) B^*(\mathbf{l}) \rangle$ である。この解析は重力レンズ効果を測定するためには必ずしも最適な方法ではないため, 重力レンズ効果に対する S/N は前に述べた解析と比べて小さいが, 重力波起源 B モードの探索とまったく同じ解析であるため, CMB によるインフレーションの検証へ至るステップとして重要である。

4.3.1 系統誤差

B モードの自己相関スペクトルは, 4.1 での異なるモード間の相関を取る解析や 4.2 での他観測との相関を取る解析などと比べると装置の系統誤差の影響を受け易い。したがって, 注意深い系統誤差のスタディが必要となる。

B モードスペクトル測定にとって問題に成り得る系統誤差の代表的なものは “differential beam systematics” と呼ばれるものである。偏光信号が各ピクセルのボロメータ対の差分によって得られることは 2.3 で述べたが, このとき対をなす二つのボロメータの間でビームの特性に違いがあると本来なら差分に残らないはずの無偏光信号が偏光信号に漏れ込んできてしまうのである。さらに無偏光信号, すなわち, CMB の温度揺らぎは期待される B モードの揺らぎのレベルに対して, パワースペクトルにして 4 桁も 5 桁も大きいいため, 見るべき信号がその漏れ込みの中に埋もれてしまうことも十分ありうる。そこで, 漏れ込みの分をモンテカルロシミュレーションを用いて見積もった。その結果は図 11 に示されており, どの系統誤差も期待される重力レンズ B モードのレベルに対して十分小さいことを確かめることができた。ところで, BICEP2 ではこの種の漏れ込みが非常に大きく, 補正なしでは検出された信号を凌駕する擬似 B モードができてしまう。そこで, 彼らは “deprojection” と呼ばれる方法でそれを補正しているのであるが, POLARBEAR では半波長板回転による系統誤差の軽減効果などにより, そうした補正をすることなく系統誤差を抑えることが可能である。

しかしながら, 「半波長板回転による系統誤差の軽減」は実際にはそう簡単に実現された訳ではなかった。予期していなかった効果をビームに及ぼすことや半波長板が意図した角度に回らなかったり, さらには, その角度のモニターが役に立たず, どの角度にあるか分からないな

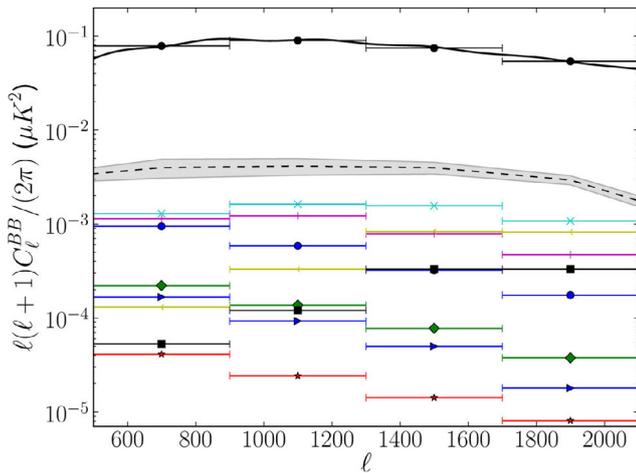


図 11: 期待される B モードのスペクトル (実線) と装置の系統誤差により生じ得る擬似 B モード (点線)。見積もられている系統誤差の内訳は、ポインティング (×), 偏光角度 (+), 信号強度 (○), 信号強度較正源の偏光 (◇), 電子回路上のクロストーク (▷), ビームの大きさ (<), ビームの楕円率 (□), 信号強度の時間変化 (☆) である。点線はこれらをすべて足し上げたものである。

どといった不具合がしばしば起こったのである¹²。半波長板の角度が分からないまま解析すると、系統誤差の軽減どころか、真の偏光信号を打ち消してしまいかねない。そこで、前述した Tau A の偏光データ、人工の信号強度較正源¹³の (本来ならば望ましくない) 僅かな偏光成分、さらには (元々予期していなかった) 半波長板のビームへの影響などを逆に利用して、偏光特性の時間変化を検出することにより、半波長板の角度の変化を再構成した。そして、その再構成の精度でも問題なく系統誤差が抑えられていることを示した。

上に述べた系統誤差の見積もり以外にも、系統誤差の確認手段として「null テスト」を行った。Null テストとは、予期される何らかの系統誤差が際立つようにデータを二分し、それぞれのデータで計算されたパワースペクトルの差がゼロになることを確認することで、データに有意な系統誤差の混入がないことを確認する手法である。たとえば、良い天気の日 vs. 悪い天気の日、シーズン前半のデータ vs. シーズン後半のデータといった具合である。合計 9 種類のテストが行われ、有意な系統誤差の証拠は見つからなかった。POLARBEAR では、解析における人的バイアスを排除するため、いわゆるブラインド解析の手法を採用しているが、実際に B モードのパワースペクトル C_l^{BB} を見ることなく、データを検証する手段としてこの null テストが

¹²現在はこれらの不具合が起きないように別の回転機構とモニター、そして、根本的に異なる運用方法が採用されている。

¹³3.2 では触れなかったが、二枚目の反射鏡 (中心に小さな穴が空いている) の裏に 700°C の黒体放射源を置き、その信号により信号強度の相対較正を行っている。

非常に有効であった。ブラインド解析は、必ずしも CMB 実験の標準的な解析手法ではないため、共同研究者内の抵抗も少なからずあったが、高エネルギー実験出身者の多い KEK グループが主張し、筆者のうちの一人が全面的に責任をもって上記の null テスト解析を進めることにより実現された。

4.3.2 結果

系統誤差が統計誤差より十分小さいことを確認した後、最終的に出てきたパワースペクトルが図 12 である。標準宇宙論の予想スペクトルで規格化したパワースペクトルの大きさ A_{BB} は、 $A_{BB} = 1.12 \pm 0.61$ (stat.) $_{-0.12}^{+0.04}$ (sys.) ± 0.07 (multiplicative) となった。ここで、(multiplicative) というエラーは、絶対信号強度のように、B モードパワースペクトルの振幅を上下させるが擬似 B モードを作ることのないエラーのことで、B モードがゼロか否かという有意性を議論する際には影響がないエラーである。この結果から、重力レンズ B モードがないという仮説を 97.2% の有意性で棄却した。

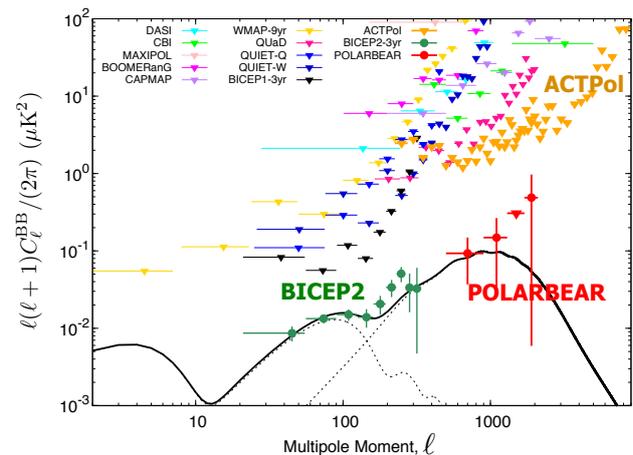


図 12: B モードパワースペクトル。POLARBEAR の結果を過去の上限值、最近の測定と共に示した。ただし、POLARBEAR の $l = 1500$ のピンは 95% C.L. の上限値である。実線は標準宇宙論による重力レンズ B モードの期待曲線とテンソル・スカラー比 $r = 0.2$ のときの原始重力波 B モードを足しあわせたスペクトルである。

POLARBEAR の結果は 2014 年 3 月 10 日にプレプリントサーバに投稿されたが、御存知の通り、その一週間後の 3 月 17 日には BICEP2 が数度スケールにおける B モードの初検出を報告した。図 12 には両実験の結果が示されているが、それぞれ違う角度スケールを測る、相補的な結果であるということが分かる。前景放射が全く無視できるとすると BICEP2 の B モードパワースペクトルから得られるテンソル・スカラー比 r のベストフィットは $r = 0.20$ である。その結果に関する最近の議論に

については次章に述べる。また、2014年5月には ACTPol が最初の観測結果を発表した [10]。そこから得られた上限値も図 12 に描かれているが、現時点 (2014年7月) ではまだ POLARBEAR のスペクトルが、1 度を下回る角度スケールにおける最良の B モードパワースペクトル測定であると言ってよいであろう。

5 BICEP2 の結果に関する議論

BICEP2 実験の結果はその結果の重要性から様々な観点から議論が繰り広げられている。中でも最近もっぱら議論的となっているのは「前景放射」の取り扱いである。CMB 観測における前景放射とは銀河系内の放射源による信号のことで、一般的な実験用語的には「バックグラウンド」に対応する。しかし、観測対象の CMB 自体が「background」であるので、観測者にとってより前方に広がる信号源として前景放射 (foreground) と呼ばれる。現在問題となっているのは銀河系内の星間に漂うダストと呼ばれる粒子の熱放射の成分で、100 GHz 以上の CMB 観測で重要になるとされる。ダストの無偏光成分の測定は既に観測データが存在するが、それらがどれだけの偏光度を持っているかはまだ詳細には分かっていないため、CMB の B モードパワースペクトルにどれだけ混入するかの不定性は大きい。この前景放射による混入を CMB と選り分けるには、周波数依存性の違いを使うことが有効である。ダストの熱放射成分は CMB と比べて強い周波数依存を持ち、数 100 GHz の周波数領域では、観測周波数が大きいほど信号強度は大きくなる。しかしながら、POLARBEAR も BICEP2 も 3 月に発表した結果で観測している周波数は 150 GHz 付近のみであり、その意味で自らのデータでそれらを分別することは原理的にできない。したがって、何らかのモデルや、他観測のデータに頼るしかない。ダストによる前景放射のパワースペクトルは一般に大角度スケールにパワーを持ち、小角度スケールへの影響は小さい。POLARBEAR では conservative な仮定のもとにその評価を行い、期待される B モードの信号より前景放射が一桁以上小さいと見積もられている。一方、BICEP2 のダストの成分の偏光度は過小に評価されているのではないかという議論がある。実際に、それに対応する部分は最初のプレプリント版と PRL へ掲載された版との間でいくらか修正されており、PRL 版では “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.” という文章がアブストラクトに追加されている。

この現状に対して、ここ一年のうちにもっとも重要な情報を提供する可能性があるのは Planck 衛星である。

Planck は検出器の総数は現在走っている地上実験と比べると多くはないが、30 GHz から 857 GHz に至るまでの 9 つの周波数帯に感度を持つことから、信号の成分分離に対して非常に有効な情報を提供する可能性がある。5 月に Planck はダストの放射の偏光成分に関する結果を発表した [19]。そこでは BICEP2 や POLARBEAR の観測領域は含まれていなかったのだが、Planck が非常に近いタイムスケールで BICEP2 の領域も含めた解析結果を出すと言われており、もしかしたら、本記事が読者の方々の手元に届く頃には白黒がついているかも知れない。さらに、BICEP チーム と Planck は互いにデータを共有して解析するために既に MoU を結んでいるという話もあり、その解析結果も数ヶ月のタイムスケールで出てくると思われる。

一方、前景放射の議論とは別に理論方面の議論として話題となるのは、Planck の温度揺らぎなどのフィットから得られる間接的な r の制限 ($r < 0.11$ at 95% C.L.) [20] と比べると $r = 0.20$ は大きすぎる、との議論である。しかしながら、こちらも前景放射が大きく影響するため、前景放射の不定性の成り行き次第で議論の流れは大きく左右されることになるだろう。

6 おわりに

POLARBEAR は昨年末から今年の 3 月にかけて最初のシーズンの観測結果を発表した。POLARBEAR の当初の目論見は、まず確実に存在すると予想される重力レンズ効果による B モードを見てから、原始重力波起源の B モードを狙おうということであった。前述した Planck の温度揺らぎからの r の制限を考えると、短期間ではまだ検出に届かないというのが大方の予想であった。BICEP2 の結果はそれを見事に覆したかも知れない。

POLARBEAR は今シーズンから原始重力波起源 B モードの観測を可能にするために大角度スケールの観測を始めている。さらに世界には POLARBEAR や BICEP 以外にも多くの実験が走っており、ここ 1~2 年のうちに今回の BICEP2 の結果に対する大方の結論も着くであろう。結果が追認されれば、より精密にスペクトルを測定することで B モードによる宇宙論が可能となる。もし、否定されれば、さらに小さい r の B モードを検出を目指さなくてはならない。いずれにせよ、さらなる感度の向上が必要なことに変わりはない。POLARBEAR では既に進行中の POLARBEAR-2/Simons Array というアップグレード計画 [21, 22] があり、測定感度を飛躍的に向上する予定である。特に POLARBEAR-2 は KEK が主導するレーザー開発プロジェクトである。さらには、GroundBIRD [23]、LiteBIRD [24] といった日本主導プロジェクトも控えている。これからの CMB の偏光観測に

よる宇宙論の進展に, さらには日本グループの活動に, 注目していただければと思う。

参考文献

- [1] BICEP2 Collaboration, Phys. Rev. Lett. **112**, 241101 (2014).
- [2] 羽澄昌史, 高エネルギーニューズ **27-4**, 245 (2009).
- [3] 田島治, 高エネルギーニューズ **30-1**, 10 (2011).
- [4] J. Kovac *et al.*, Nature **420**, 772 (2002).
- [5] QUIET Collaboration, Astrophys. Journal **741**, 111 (2011).
- [6] QUIET Collaboration, Astrophys. Journal **760**, 145 (2012).
- [7] Planck Collaboration, arXiv:1303.5062.
- [8] J. Aumont *et al.*, Astron. & Astrophys. **514**, A70 (2010).
- [9] C. L. Bennet *et al.*, Astrophys. Journal Suppl. **208**, 20 (2013).
- [10] S. Naess *et al.*, arXiv:1405.5524.
- [11] POLARBEAR Collaboration, Phys. Rev. Lett. **113**, 021301 (2014).
- [12] POLARBEAR Collaboration, Phys. Rev. Lett. **112**, 131302 (2014).
- [13] POLARBEAR Collaboration, arXiv:1403.2369.
- [14] W. Hu and T. Okamoto, Astrophys. Journal **574**, 566 (2002).
- [15] Planck Collaboration, arXiv:1303.5078.
- [16] G. P. Holder *et al.*, Astrophys. Journal **771**, L16 (2013).
- [17] S. Eales *et al.*, Publications of the Astronomical Society of the Pacific **122**, 499 (2010).
- [18] D. Hanson *et al.*, Phys. Rev. Lett. **111**, 141301 (2013).
- [19] Planck Collaboration, arXiv:1405.0871.
- [20] Planck Collaboration, arXiv:1303.5076.
- [21] T. Tomaru *et al.*, Proc. SPIE **8452**, 84521H (2012).
- [22] A. Suzuki *et al.*, Journal of Low Temperature Physics **176**, 719 (2014).
- [23] O. Tajima *et al.*, Proc. SPIE **8452**, 84521M (2012).
- [24] T. Matsumura *et al.*, Journal of Low Temperature Physics **176**, 733 (2014).