

宇宙マイクロ波背景放射 B -mode 偏光観測の 現在と未来: POLARBEAR 実験と 次の10年間の展望



茅 根 裕 司

〈東京大学理学系研究科附属ビッグバン宇宙国際研究センター 〒113-0033 東京都文京区本郷 7-3-1〉
e-mail: chinonei@cmb.phys.s.u-tokyo.ac.jp, chinonei@gmail.com

皆さんは2014年3月にあった「【宇宙誕生直後の瞬間膨張】インフレーション初観測 [1]」というセンセーショナルな報道を覚えていらっしゃるだろうか？ 本稿では、報道から6年の間に何があったのか、結局「検出」はどうなったのかを解説し、現状と将来の見通しについてまとめる。特に、筆者が観測と解析に心血を注いできた宇宙マイクロ波背景放射観測実験「POLARBEAR」を中心に、過去を振り返り、現状を整理し、そして次の10年間のこの分野の研究を俯瞰したいと思う。

1. Introduction

1.1 はじめに

現在は観測的宇宙論研究の黄金時代であると言われている。精度の高い観測が精力的に行われ、昔は不可能であった理論と観測を精密に比較・検証することが可能になっている。この分野で長年中心的な役割を果たしてきたのが、宇宙マイクロ波背景放射 (CMB) の観測である。1964年のペンジアスとウィルソンによる3K背景放射の発見に始まり、多くの地上・飛行体観測で温度揺らぎと偏光の測定が行われてきた。CMBの観測は標準宇宙論 (ACDMモデル) の確立に大きな役割を果たしてきた。近年では日本が主導するCMB偏光観測衛星LiteBIRDが、宇宙科学研究所の戦略的中型2号機に選定されたことが記憶に新しい。

本稿ではCMBの「 B -mode」偏光観測の過去、現状と未来を、2014年の「あの検出報告」から遡り解説していく。特に、2011年から個人的に深く携わっているPOLARBEAR実験の歩みと最新の結果、そしてそのアップグレードであるSimons

Array実験、そしてその次世代実験となるSimons Observatoryを中心に、CMB観測研究の過去と現在、次の10年間について述べていく。

1.2 CMB B -mode 偏光観測の目的

ここではCMB B -mode 偏光観測の意義を簡単に説明する。宇宙開闢直後の指数関数的急速膨張「インフレーション」時の時空の量子揺らぎにより「原始重力波」が生成される。原始重力波は宇宙の晴れ上がりと再電離の際に、トムソン散乱を通じてCMBに B -modeと呼ばれる特殊な直線偏光の渦巻きパターンを残す[2, 3]。標準的なインフレーションモデルによれば、生成される原始重力波の大きさ「テンソル・スカラー比: r 」は $r \geq 10^{-3}$ と予言され、十分観測可能である。これにより数多あるモデルの峻別が可能になる。またインフレーション期のエネルギースケールは r を使って $1.06 \times (r/0.01)^{1/4} \times 10^{16}$ GeVと書ける。これは大統一理論 (GUT) により予言される重力を除く3つの力が統一されるエネルギースケールと一致することから、 B -modeの測定はインフレーションの背後にある物理を理解する足がかりになると期待されてい

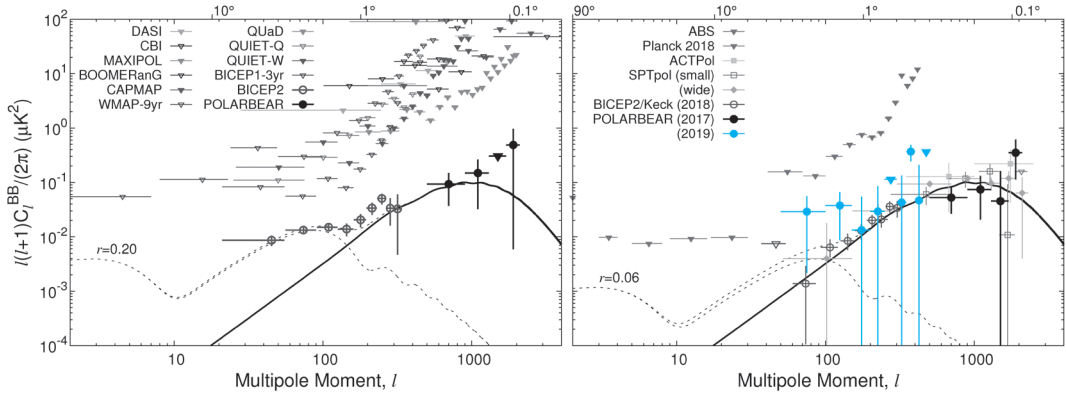


図1 B-modeパワースペクトル。縦軸がB-modeのパワー (μK^2)，横軸，多重極モーメント“Multipole Moment”が角度スケール (の逆数: $l=180^\circ/\theta$)。インフレーション起源が大角度スケール ($l < 10$ と $l \sim 90$; 点線)，重力レンズ起源が小角度スケール ($l \sim 1,000$; 実線) に現れる。左: 2014年3月迄の結果で，POLARBEAR (黒点) と BICEP2 (白抜き点) 以外は全て95%上限を示している (逆三角形)。右: 2020年4月現在の状況。図中のデータ点は，各実験の公開データもしくは論文に記載されている数値を使用。尚，その他のプロジェクト名はスペースの都合上列挙しない。

る。これが「インフレーション起源」のB-modeを観測する目的である。

インフレーション起源のB-modeは，数度角から数十度角の大角度で観測されると期待されている (図1)。一方，小角度で観測される「重力レンズ起源」B-modeも存在する。詳細は省くが，宇宙の晴れ上がり時に密度揺らぎから偏光のもう一つの成分「E-mode」が生成される。宇宙の大規模構造は未知の暗黒エネルギーや暗黒物質に支配されていることが知られているが，大規模構造の重力レンズ効果によりE-modeの一部がB-modeに変換される。これを重力レンズ起源B-modeと呼び，精密に測ることで大規模構造に迫ることができる。特に熱い暗黒物質たるニュートリノは大規模構造の成長を抑制する。そしてその質量和に応じて抑圧度に違いが生じるため，重力レンズ起源B-modeを通じてこれを測定できれば，質量和の決定が可能となる。既にニュートリノ振動実験により質量の二乗差が測定されているため，これによりニュートリノ階層問題に答えることが可能となる。

1.3 「2014年3月 BICEP2事件」

2014年3月は宇宙論業界としても個人的にも重要な節目であった。まず2014年3月10日 (UTC)，我がPOLARBEAR実験は，世界で初めて重力レンズ起源B-modeパワースペクトルの観測を報告した [4] (図1左)。その1週間後の17日に，今度はBICEP2実験により世界初のインフレーション起源B-modeパワースペクトルの「検出」が報告された [5]。その時の興奮は凄まじかった。何故なら，BICEP2が当時検出を主張していた原始重力波の大きさは $r=0.20^{+0.07}_{-0.05}$ という値であり，この時既にPlanck衛星などの温度揺らぎ測定により間接的に与えられていた上限: $r < 0.11$ (95% CL) よりも大きかったからである。もちろん，両者の誤差を考えれば矛盾は決定的ではないが，発表直後から多くの論文がarXivを賑わす結果となった。特に筆者のように同種の観測・解析を生業としている人間からすると，装置の系統誤差や「前景放射」の解析などでいくつか気になる点があった。

前景放射とは我々の銀河からやってくる放射で，B-modeでは主にシンクロトン放射とダストの熱放射起源が支配的である。ダスト放射は赤外線

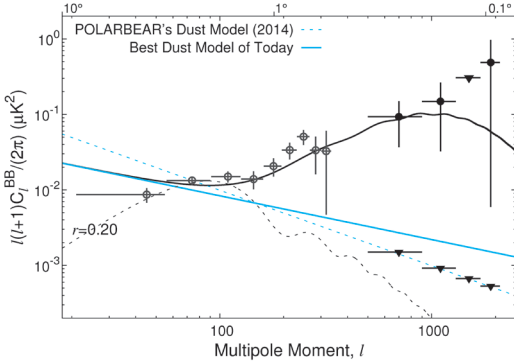


図2 青点線：2014年3月10日にPOLARBEARが結果を報告した際に仮定したダストモデル。この際POLARBEARはレフリーの指摘により、論文出版時にはこの2倍大きな上限を計上した。青線：Planck, BICEP2/Keck Array および POLARBEAR (2019) による最新のダストモデル。

領域でよく観測され、周波数が下がるにつれ冪乗で強度が落ちていくが、CMBを観測する100 GHz帯前後でもその影響が無視できない可能性が指摘されていた。我々POLARBEARは、BICEP2に先駆けてその影響を、当時確固たる証拠がない中、かなり保守的に推定していた(図2)。その大変さを知る身として、当時の限られた観測から、如何にBICEP2が前景放射を評価し、大々的な「検出」の発表に至ったのか大変興味があったのである。

筆者は当時、カリフォルニア大学バークレー校(UC Berkeley)に勤めていたが、我々の結果発表の翌日に日本へ飛び、POLARBEARの結果を東北大学、九州大学、大阪市立大学、日本天文学会、高エネルギー加速器研究機構(KEK)、名古屋大学で宣伝行脚する計画であった。しかしながら九州大学でのセミナー直後にBICEP2の発表があったため、その後のセミナーではPOLARBEARの結果はそっち退けて「BICEP2は正しいのか?何か間違っていないのか?分野の当事者として解説してくれ」とリクエストされることとなった。その際、BICEP2の論文を慎重に読み進めて見えてきたのは、やはり前景放射の情報が限られている中、どうにかこうにかして、この「検出」した信

号は宇宙論起源であって前景放射ではない、と主張しようと悪戦苦闘している姿であった。

BICEP2は確かに7σの確度でB-modeの信号を報告している一方、そのスペクトルが(前景放射とは異なり)黒体放射(=CMB)と一致すると主張できている確度はたかだか2σ程度であった。そのためか、その後出版された論文では、観測された信号が全て前景放射である可能性は排除できていないことを慎重に述べている。当時は特にダスト放射がどれほど偏光しているのかという情報が不足しており、そこには大きな仮定が入っていた。個別の天体やダスト雲のような比較的偏光度が高い領域が報告されていた一方、CMB実験で観測されるような「選択的に選ばれたダスト放射の影響が小さいと思われる場所」ではそこまで高くないのではないかと考えられていた。

観測天域の位置・サイズ、角度スケールは違えど、POLARBEARもBICEP2もそのようなダスト放射が小さいと思われる天域で観測を行っていた。論文を公表するにあたりPOLARBEARでは、当時入手可能な最良のダストモデル[6]を採用しながらも、保守的な偏光度を仮定し上限の推定を行った。これによりPOLARBEARでは、大角度スケールでrに換算してr~0.2相当を系統誤差として計上したのである(図2)。

最終的な顛末は、およそ一年後にBICEP2がPlanckグループとタッグを組むことで迎えた。Planck衛星の特色は、大気の影響により地上CMB観測では困難な高周波数での観測である。この解析では、Planckが持つ偏光に感度のある最高周波数である353 GHz帯とBICEP2の150 GHz帯を使い「分光」することで、周波数依存性が黒体放射に一致するCMBと、それとは大きく異なるダストを分離することが可能となった。その結果、BICEP2が当初検出を主張したr=0.20相当の信号は全てダストで説明可能であると結論づけられた。興味深いことに、最終的に決定されたダストの大きさは、POLARBEARが当時かなり保

守的に計上した値と同等であった。もちろん、このような推定が可能だったのは当時POLARBEARがインフレーション起源*B-mode*の観測を目的としていなかったからだ、とも言えるかもしれない。一方、インフレーション起源を目的としていたBICEP2にとって、その推定が如何に困難なものであったのか、想像に難くない。

2. CMB実験の現在と未来

2014年以降、いくつかの実験が*B-mode*の測定を報告してきたが、インフレーション起源*B-mode*の検出報告は未だなされていない(図1右)。現在も多くの研究者がこの信号を求めて研究を行っている。BICEP2によって再確認された前景放射の問題も含め、2010年代半ばまでにいくつかの課題も見えてきた。そしてその課題を解決するための最新実験が、今まさに稼働している。さらには5-10年先を見据えた次世代実験の開発が急速に進められている。以降は私が心血を注いできたPOLARBEAR実験を軸に、これまでの成果と現状、次の10年間の展望について述べる。

2.1 POLARBEAR 実験

POLARBEARはUC Berkeleyを中心に、2012年からチリ・アタカマ砂漠の標高5,200 mの高地で*B-mode*の観測を150 GHz帯で行っている実験である。筆者は2011年7月から2019年9月までUC Berkeleyに勤め、POLARBEARによる観測とそのデータ・科学解析を進めてきた。POLARBEARは2014年の*B-mode*スペクトルの世界初検出を報告後、観測天域を変更し、BICEP2の結果の独立な検証として2014年から2017年まで、BICEP2と同じ天域を観測してきた。インフレーション起源*B-mode*を測定するためには、大角度スケールを観測する際に如何に大気の揺らぎを抑えるかが肝となる。地上の場合、観測中に大気の厚みが変わること避け、Elevationを固定しAzimuth方向に望遠鏡を行ったり来たりさせる「スキャン」を行う。インフレーション起源の信号は数度角以上

で現れるため、望遠鏡がスキャンする間に大気が揺らいでしまうと、大気の揺らぎとインフレーション起源の信号を分離することが困難になってしまう。つまり、大気が揺らぐよりも速くスキャンしてしまうか、大気揺らぎを取り除く操作が必要になる。前者は望遠鏡のスキャン速度を上げることで、後者は大気放射が無偏光であることから、例えば「偏光信号だけを変調する」ことで実現可能である。POLARBEARは、3.5 mの主鏡(precision surface径は2.5 m)により半値幅で3.5分角の高分解能を実現する一方、比較的速く安定したスキャンができるように設計されている。また2014年の観測からは「半波長板」と呼ばれる特殊な光学素子を導入し、大気揺らぎより速い数ヘルツで回転させ偏光信号だけを変調することで、大角度スケールでの観測を実現させたのである[7](図1右)。

BICEP2同様POLARBEARは150 GHz帯のみであり、独自に高周波数を観測することができない。そこでPlanckを使い同様に「分光」を行った結果、BICEP2が報告したダスト放射と無矛盾な結果を得た。前景放射を取り除いた後の最終的な結果は $r < 0.90$ であった。BICEP2/Keck Arrayによる最新の制限： $r < 0.06$ [8]に比べれば精度は悪いが、「次世代実験」とLiteBIRD衛星で使われる半波長板の実証、前景放射の整合性を確認する当初の目的は達成されたと言える。

2.2 最新の実験: Simons Array

最新の制限 $r < 0.06$ は、Planckを使ったダスト放射の除去精度ではほぼ限界にきている。ダスト放射は高周波数で大きくなるため、最新の地上実験に比べてそれほど高くないPlanckの感度でもある程度高いS/Nを実現できた。しかし既に観測を終えたPlanckの感度が改善されることはない。従って今後インフレーション起源*B-mode*を検出するためには、自身で前景放射の分光・差し引き、そしてCMBの測定を行う必要がある。そのため最新のCMB実験では、CMBを観測する100

GHz帯前後だけでなく、前景放射を取り除くための周波数での観測にも重きを置いている。

例えばBICEPチームはBICEP2以降、Keck Array, BICEP3そしてBICEP Arrayを段階的に実施しており、30/40, 95, 150, 220, 270 GHz帯での観測が進められている。一方我々は現在、POLARBEARのアップグレード実験である「Simons Array」を実施している(図3)。検出器の数を増やすことで統計感度を約20倍改善させる一方、今までと同じ場所・テクノロジー、同種の望遠鏡3台を使うことでその実現可能性を高めている。Simons Arrayは90, 150, 220, 270 GHz帯での観測を予定しており、2019年には日本のKEKで組み上げた90 GHz帯と150 GHz帯を観測する検出器「POLARBEAR-2a」をチリに設置し、運用を開始した。2020年中には米国で作成中の2,3台目の検出器を追加する。これにより高感度と4周波数帯での観測が実現可能であり、3年間の科学観測により $r < 0.01$ を達成する計画である。

ここで紹介した実験以外にも、SPT (South Pole Telescope)/SPTpolやその進化版であるSPT-3G, ACT (Atacama Cosmology Telescope)/ACTPolやその進化版であるAdvACT, 大角度スケールに特化したCLASSやGroundBIRDが観測を進めている。CMB地上観測は、場所、技術、思想の異なる多様な実験が入り乱れる群雄割拠の様相を呈しており、この分野の一研究者として血湧き肉躍る思いである。



図3 チリ・アタカマ砂漠でのCMB実験: 左手側3台の望遠鏡がSimons Array (今までは中央の望遠鏡をPOLARBEARで使用していた), 右手側がACT. 中央付近にSimons Observatoryを建設中. 写真はKEKの長谷川雅也氏提供.

2.3 次の10年の実験: Simons Observatory & CMB-S4

ここ数年の観測の進展およびインフレーションモデル周辺で進展がある中、依然として $r \geq 10^{-3}$ でのインフレーションの発見の可能性が残されている [9]. その点で言えば、Simons Arrayをはじめとした最新の実験でも感度が十分であるとは言えず、「次世代」の実験が必要となってくる。このようなことを書くと、他の波長や分野の方々に「多くの実験・グループで観測するのではなく、最初から究極の実験を設計し、それを皆でやればいいのか?」と言われることがある。また「2010年代初頭から今までに多くの実験があったが、インフレーション起源B-modeを『検出』したBICEP2以外の実験は、上限を更新するだけだったり重力レンズ起源B-modeの『観測』に成功しただけで、なにも新しい科学成果を出していない。そんな実験に意味はあるのか?」と言われることもある。

まず言えることは、CMB温度揺らぎをはじめとした観測により、 Λ CDMの基本6パラメータが良く決まっており、単に偏光情報を追加するだけでは、そこまでインパクトがないということである。これはある意味でCMBの有用性を示すものであり、偏光観測の価値を下げるものではない。そして感度の点で言えば、本当の勝負は2020年代のB-mode観測であり、そこに新たな発見の可能性はある。一方では、「それは分かった。ではやはり最初から「それ」を目指して開発すればいいのではないか?」ということになる。よく言われるのは、「地上実験などやらずに人工衛星を10-20年かけて開発し、最初から究極的な観測を目指せばいいのではないか?」と。

我々が観測したいインフレーション起源のB-modeの大きさ(r)は未知である。一方で理想的な場合、 r の測定感度は検出器の数と時間に比例して良くなる。20年後の観測を目指して開発を進めるのか、3-5年といったスパンで最新の

技術の開発・観測・上限更新を繰り返すのかの二択が考えられるが、大きさが未知である以上、後者の方が「発見」の確率は高い。そもそもCMBの観測装置は研究開発(R&D)要素が多く、2010年代の段階ではどうすれば「究極的」な観測が可能なのか明確ではなかった。筆者が所属していたUC BerkeleyはPOLARBEARを主導する機関であったが、2010年代中盤にかけてPOLARBEARでの観測・データ解析を進めながら、得られた知見を生かして次の実験(=Simons Array)を実現するために様々なR&Dを数年のスパンで実施していた。その後2020年までは開発した装置を実際組み上げ、観測サイトでの調節を行ってきた。その際得られた生きた知見は、さらに「次の」実験へのフィードバックとして確実に生かされている。このように実際の観測・解析と、装置のR&Dとを繰り返すことで様々な知見、例えば前景放射の性質や装置の系統誤差の理解などが成熟していき、「究極」の実験計画が形となってきたのである。その意味で2010年代は、「未知の信号」の検出を目指し断続的に観測を続けながら、その有用性を再確認しつつ、我々が進めている方向性、観測の技術や解析手法を成熟させてきた期間であったと言える。

それでは現在、その究極的な実験はどのようなものかと考えられているのだろうか？ここでは日本も深く関わっている次世代実験「Simon Observatory」を例に説明していきたい(図3)。Simons ObservatoryはPOLARBEAR/Simons Arrayと、隣接しているACTがタッグを組んで進めている計画である。既にSimons Foundationなどから100億円弱の資金を得ており、次世代実験の急先鋒である。POLARBEARは比較的大きな口径でありながら半波長板を活用することで、大小両方の角度スケールでB-modeパワースペクトルの観測を成功させてきた。またACTは6mの大口径を生かし、優れた小角度スケールの温度揺らぎ観測を実現したのち、ACTpol, AdvACTと発展させ、

やはり小角度での偏光観測を実現してきた。我々はこれらの実験の良いところを生かしつつも、高感度観測で問題になる系統誤差を改善させ、またBICEP2から学んだことを踏まえながらSimons Observatoryを設計してきた。その結果我々は、大口径望遠鏡(6mの“Large Aperture Telescope”, LAT)1台と、半波長板を搭載した小口径望遠鏡(0.4mの“Small Aperture Telescope”, SAT)3台を建設することとした。

ACTやSimons Arrayのように単一の種類の望遠鏡にしない理由は、以下の通りである。インフレーション起源の信号を測ろうとした場合、一番重要なのは大角度スケールの観測を実現することである。これまでに大角度スケールの測定を実現してきた大・小様々な望遠鏡の結果は、LATによる効率の良い大角度スケール観測が困難であることを示唆している。そもそも大角度スケールを測るだけであれば、LATによる高解像度観測は非効率・高コストである。単純に統計を稼ぐには、口径の小さい望遠鏡(=SAT)にできるだけ多くの検出器を搭載し、それを複数台運用するのがベストである。これだけであればSATのみでいいのだが、ここにインフレーション起源信号検出の難しさがある。図1で見たように、大角度と小角度でB-modeがそれぞれインフレーション起源と重力レンズ起源とに分かれているとは言っても、 $r \leq 0.01$ では重力レンズ起源がインフレーション起源に比べて圧倒的に大きくなってしまふ。現在の上限が $r < 0.06$ であるため、今後の探査ではこの重力レンズ起源信号の除去「delensing」が重要となってくる。そのため、重力レンズ起源の信号を精密に測定できる大口径の望遠鏡が必要になるのである。このようにして、LATとSAT×3という「ハイブリッド」モデルが選ばれたのである。

もちろんこの最適化に際しては、前景放射の除去も考慮されている。前景放射としては100 GHz帯を境に低周波数側ではシンクロトロン放射、高

表1 Simons Observatoryの主な科学目標 [11, 12].

インフレーション	$\sigma(r)=0.002$
密度揺らぎの傾き	$\sigma(n_s)=0.002$
重力レンズ効果	110 σ で検出(偏光のみで)
ニュートリノ総質量 (meV)	$\sigma(M_\nu)=20$ (含 DESI)
ニュートリノ有効世代数	$\sigma(N_{\text{eff}})=0.05$
ハッブル定数 (km/s/Mpc)	$\sigma(H_0)=0.3(\Lambda\text{CDM})$
バリオン量	$\sigma(\Omega_b h^2)=0.00005(\Lambda\text{CDM})$
ヘリウム量	$\sigma(Y_p)=0.007$
SZ 銀河団 (tSZ)	20,000 個
運動論的SZ 銀河団 (kSZ)	190 σ (DESI との相関)
ダークエネルギー	$\sigma(w_0)=0.06(\text{tSZ}+\text{LSST})$
(赤方偏移依存)	$\sigma(w_z)=0.2(\text{tSZ}+\text{LSST})$
シアバイアス較正	$\sigma(m_z=1)=0.007$ (含 LSST)
ノン・ガウシアニティ	$\sigma(f_{\text{NL}}^{\text{local}})=1$ (含 LSST)
活動銀河 (AGN)	10,000 個
(偏光)	300 個

周波数側ではダスト放射が支配的である。BICEP2 を含む 2010 年代の知見を元に、Simons Observatory では 27 GHz から 280 GHz までの 6 周波数帯で観測する予定である。実際はさらに、多周波数観測のための反射防止膜の開発、検出器を冷やす冷凍機、装置ごとの系統誤差、観測時間や予算等が最適化の境界条件となる。詳細は、筆者らの論文 [10] を参照していただきたい。

表 1 に Simons Observatory の主な科学目標・達成可能感度を示す。Simons Observatory はインフレーション起源 *B*-mode の検出誤差 $\sigma(r)=0.002$ が最も重要な目的の一つであるが、LAT を持つことで可能なサイエンスの幅が広がった。重力レンズ効果の測定はもちろん、*high- l* からのニュートリノ有効世代数 N_{eff} の測定、スニヤエフ・ゼルドビッチ効果 (SZ 効果) の測定、POLARBEAR がすばる望遠鏡 HSC と実現した相互相関解析 [13] のように、DESI や LSST 等の光赤外サーベイをはじめとする多周波数観測との相関解析による宇宙論など、その応用は多岐にわたる。

Simons Observatory は 2021 年に初観測を予定しており、2022 年には 5 年間の科学観測を開始する。実は Simons Observatory は容易に拡張できるように設計されている。検出器の数を 2 倍に増やし感度を倍増する計画 (“SO-Enhanced”) も検討されており、これが実現した暁には、Simons

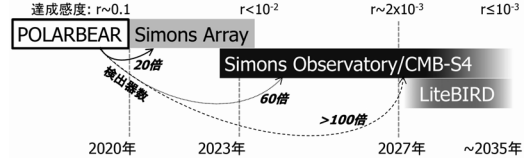


図4 POLARBEARから10-15年間のCMB観測。数年以内に Simons Array, 10年以内に Simons Observatory, そして次の15年程度で CMB-S4 と LiteBIRD による科学結果が期待できる。

Observatory が究極の地上 CMB 実験「CMB-S4」の一翼となる予定である (図4)。

2.4 メインサイエンス以外の目標

読者の中には、Jim Simons (ジム・サイモンズ) の名をご存知の方もおられるだろう。“Chern-Simons theory” にその名を残す偉大な理論家である。彼は Stony Brook University の数学科教授を辞めた後、投資会社ルネサス・テクノロジーズを起し巨万の富を得た。そして基礎科学を支援する Simons Foundation を設立し様々な研究に資金を援助している。我々が進めている Simons Array と Simons Observatory もこの基金からの資金援助を受けている。特に Simons Observatory 実現のために我々は、他の援助源も含めると 100 億円弱の資金を得ている。その甲斐もあって、熾烈な競争を繰り広げている次世代実験争いにおいて、Simons Observatory は優位な立場にいる。因みに「ライバル」は南極で CMB 実験を進めているグループであり、大・小口径望遠鏡の連携という意味でも、SPT グループと BICEP グループの連合が考えられている。

興味深いことに、*E*-mode と *B*-mode の相関 (例えば、通常はゼロである C_l^{EB} スペクトル) を測ることで、対称性を破る Chern-Simons 項を検証できる可能性が指摘されている。この *EB* 相関に関しては、TauA (かに星雲) の偏光角度の周波数依存性、Axion 質量や宇宙論的複屈折の検証など、さらに幅広い話題につながると期待されている。この測定には、絶対偏光角度の精密な較正

という難問が立ちだかっているが、主たる出資者の意向がどうであれ、個人的にはチャレンジする価値のある目標であると考えている。

3. 「ブラインド」データ解析

1.3節の「2014年3月BICEP2事件」で議論した問題の本質は、「限られた情報の中でどう解析し、結論を出すか」である。前景放射の場合、それを「分光」するのに十分な情報を持ってなければ、分離はそもそも無理である。前景放射に限らず、観測されるデータには様々な好ましくない信号(=系統誤差)が混在している。そのため、これを如何に取り除くかがデータ解析の肝となる。この点を踏まえて、「ブラインド解析」の観点からCMBのデータ解析について簡単に解説する。

最近のCMB実験では主に、超伝導検出器を使用している。これらの検出器は現在、半導体リソグラフィー技術の力を借り大量生産が可能となった。一つ一つの検出器の感度が原理的な限界を迎えつつある現在、検出器の数を増やすことで測定精度を向上させている。Simons Arrayは検出器の総数がPOLARBEARの約20倍、Simons ObservatoryはPOLARBEARの約60倍である。また感度は観測時間に比例して改善することから、安定したデータ取得・積算が肝となる。例えばPOLARBEARの場合、2012~2017年に、合計12,000時間以上のCMB観測を行った。

現在は数十テラバイトであるデータ量が、Simons Array以降ではペタバイトを優に超える。CMBデータ解析では、この大量のデータを質と系統誤差をコントロールしながら数千時間にわたり積算する必要がある。典型的には一回の観測で、一つの検出器から100 Hzを超えるサンプリングレートで1時間ほどの次元時系列データが記録される。これを数万の検出器で数千回以上繰り返すことになる。このデータサンプルの一点一点に宇宙論的な情報が含まれているが、通常は「好ましくない」様々な信号、例えば天候や外気

温度変動、環境電磁波などの影響も含まれることになる。これらをシミュレーションで完全に再現することは不可能であるため、この汚染されたデータを効率良く除去することが、解析の品質保証につながり、系統誤差を低減する鍵となる。

自然に考えると、1. 適当なデータセレクションと系統誤差の軽減、較正を実施、2. CMBのマップを作成し、そこからパワースペクトルを計算、何かおかしいことが起っていないか確認、3. 起っていたらそれを元に1を改善していく、といった試行が考えられる。ここで問題なのは、「何かおかしいことが起っていないか」をどう判断するかである。もちろん「 Λ CDMが予言するパワースペクトルと比較して判断する」とした場合、「何のために新しい実験をやっているのだろうか」という思いを抱くことになる。先に述べたように、今までのCMB観測の成果は素晴らしく、我々が見ようとしているB-modeも「ある程度」予想できてしまう。しかし我々はそのようなバイアスなくB-modeを測りたいのであって、まして「期待に合わせて解析を調節したり、恣意的に解釈を変えてしまう」のは言語道断である。

そこで重要になるのが、ブラインド解析である。例えば天候の良し悪し、検出器の感度・安定性、望遠鏡の視線方向と太陽の相対的な位置関係(サイドローブや望遠鏡が太陽に温められる効果等)、検出器の型番など、系統誤差の原因となる様なものに「良い」と「悪い」が存在し得る。そういった良し悪しを特徴付ける統計量や指標を考え、悪さをする外れ値を見つけることで、それらを取り除くことが可能になる。実際は系統誤差は予想通りに現れるわけではないため、この「特徴」を如何に網羅するかが解析の鍵となる。

では「良い」「悪い」の判断は、どうすればいいのだろうか。例えば「ある統計量がXより大きい場合は悪いと考え、それらのデータを除去する。その上でデータ解析を進め、パワースペクトルを計算し、 Λ CDMと比較する」のは駄目であ

る。そこで、悪いデータを取り除いた後のデータを「良い方のデータ」と「悪い方のデータ」にさらに分けることを考えてみる。この時、「良い方」「悪い方」に分けたとしても「悪さをするデータを取り除き切れていれば」、2つのデータは統計的に等価であるはずである。つまり2つのデータの差のパワースペクトルを計算すれば、統計的に“null”となることが期待される。この時、我々が見たい宇宙論的シグナルは相殺されるはずなので、「答えを見ながら調節する」という呪縛から逃れることができる。もしこの“null”スペクトル内になんらかの信号が見えてしまった場合、統計量・指標に関係する系統誤差が残っていることを示す証拠となる。これにより「悪いデータ」を判断する基準を変える、厳しくする、異なる統計量・指標を導入するといったフィードバックをかけることが可能になる。

データ解析では実際、ここで説明したデータセレクションだけではなく、例えば時系列データをプロセスする際にどういった信号を取り除くか、較正や積算をどう最適化するか等様々な選択肢がある。重要なのは系統誤差をきちんと押さえることである。一方でデータを除去し過ぎれば感度を失うため、そのバランスが重要である。

このように良し悪しの「特徴」を捉えられる統計量や指標、それを顕在化させる“null test”、系統誤差を取り除くデータセレクションと時系列操作等を組み合わせることで、「答え」を見ることなく解析にフィードバックをかけることが可能になる。その際、装置・観測・データを理解し、解析に動的に反映させていくことが極めて重要であり、これらを機械的に分けることが困難であることを理解していただけるかと思う。

もちろん、どういったフィードバックをかけるのかは人間が判断する。しかしこれは「答え」を見ない「ブラインド解析」であり、結果に恣意性は混入しづらい。POLARBEAR/Simons Arrayでは筆者らが率先してブラインド解析を実施して

り、Simons Observatoryでもその予定である。過去を顧み、「次の検出」で間違いが許されないB-mode解析においては、こうしたブラインド解析がより重要になると、個人的には考えている。

4. まとめ：次の10年間を俯瞰して

今日のB-mode観測の状況は、2000年ごろの温度揺らぎの観測の状況に似ている。当時、約1度角スケールで1st acoustic peakが観測され、小角度スケールでのdamping tailも徐々に観測され始めていた。一方で精密測定には程遠く、次世代の地上実験と衛星計画が積極的に進められていた。そしてその15年後の2015年ごろまでには、地上と衛星により $l \sim 4,000$ までの極めて高感度な測定がなされ、そこから精密宇宙論が可能となったのである。2020年現在、B-modeは大角度から小角度まで測定されたが、精密観測には程遠い(図1右)。次の数年はSimons Array, 5-10年でSimons Observatory, そしてCMB-S4といった地上実験が観測を牽引していく。これにより2030年ごろまでには、例えばインフレーションは誤差 $\sigma(r) = 0.002$ 、ニュートリノ総質量は誤差 $\sigma(M_\nu) = 20 \text{ meV}$ で決定しているはずである。

そしてトリを飾るのが人工衛星である。2010年代の実績を元に地上実験が究極実験へ進む中、やはりその実績・知見を元に衛星計画が進められている。その急先鋒が、既に述べたLiteBIRD衛星である。インフレーション起源B-modeには $l \sim 90$ と $l < 10$ の2つの角度スケールにピークがある。前者は晴れ上がり($z \sim 1,100$)、後者は再電離($z \sim 6-10$)のころにCMBに印加されたものであり、2つの角度スケールで無矛盾な信号が見えるはずである。しかしながら $l < 10$ を地上から観測するのは困難であり、全天観測が可能な人工衛星の出番となる。LiteBIRDの打ち上げ予定は2027年であり、L2にたどり着くのに半年、観測に3年を予定していることから、データ解析が活発化するのには2020年代後半から2030年代前半だ

と予想される。これらを総合すると、温度揺らぎのような大角度スケールから小角度スケールに及ぶ究極的な偏光観測が、2035年頃までには成し遂げられると期待している(図4)。メインターゲットであるインフレーションに関して具体的な例を考えれば、もしその大きさが $r \sim O(10^{-2})$ であれば、10年以内にまず地上実験によって $l \sim 90$ での「検出」がなされ、インフレーションモデルの峻別が可能となる。そして最終的にLiteBIRDによる $l < 10$ での「検出」をもって、インフレーション起源B-mode観測が結実するのである。

筆者がCMB研究に興味を持ち始めた2000年代半ば、日本国内でCMBの観測研究を行っている研究室は皆無であった。しかしながら様々な幸運に恵まれ、日本で初めて本格的に観測研究に参画したKEKとそのコラボレーターであるシカゴ大学で、2011年7月以降はUC Berkeleyを拠点に世界最先端の研究に従事することができた。そして東京大学に赴任した現在では、日本国内で複数の研究室がPOLARBEAR/Simons Array, Simons Observatory, そしてLiteBIRDを推進するに至っている。人によっては、CMBは理論・観測・解析ともに「終わって」しまった分野に映るかもしれない。しかし次の10年間は、日本にしながら世界最高のデータに確実に触ることができるバラ色の期間であることに間違いない。皆さんにもこのエキサイティングなCMB研究に、引き続き興味を持っていただければ幸いである。そして、国内でCMB研究の裾野を広げていくことで、私に貴重な機会を与え、私を育ててくれた日本のコミュニティーへ恩返しできればと考えている。

謝 辞

本稿の多くは、筆者が参加するPOLARBEAR/Simons ArrayおよびSimons Observatory Collaborationが執筆した論文を踏まえて書かれたものです。苦楽を共にしてきたコラボレーターに感謝いたします。特にPOLARBEARでブラインド解析を進

めるにあたり、筆者に至らぬ点多々あったかと思いますが、皆様のおかげでやり遂げることができました。この場を借りまして、改めて御礼申し上げます。最後に、本稿を書くことを勧めてくださった岡部信広氏に感謝いたします。

参 考 文 献

- [1] 例えば『朝日新聞2014/03/18朝刊』
- [2] Seljak, U., & Zaldarriaga, M., 1997, Phys. Rev. Lett., 78, 2054
- [3] Zaldarriaga, M., & Seljak, U., 1997, Phys. Rev. D, 55, 1830
- [4] The POLARBEAR Collaboration, et al., 2014, ApJ, 794, 171
- [5] Ade, P. A. R., et al., 2014, Phys. Rev. Lett., 112, 241101
- [6] Schlegel, D. J., et al., 1998, ApJ, 500, 525
- [7] Adachi, S., et al., 2019, arXiv:1910.02608
- [8] Ade, P. A. R., et al., 2014, Phys. Rev. Lett., 113, 021301
- [9] Linde, A., 2017, J. Cosmol. Astropart. Phys., 1702, 006
- [10] Barron, D., et al., 2018, J. Cosmol. Astropart. Phys., 1802, 009
- [11] The Simons Observatory Collaboration, et al., 2019, arXiv:1907.08284
- [12] Namikawa, T., et al., 2019, ApJ, 882, 62
- [13] Ade, P., et al., 2019, J. Cosmol. Astropart. Phys., 1902, 056

The Current Status and Future of Measurements of the CMB B-Mode Polarization: POLARBEAR and Its Future

Yuji CHINONE

Research Center for the Early Universe, School of Science, The University of Tokyo, 7-3-1 Hongo, Bunkyo, Tokyo 113-0033, Japan

Abstract: Do you remember a sensational announcement of the first detection for the cosmic inflation on March 2014 by the BICEP2 experiment? In this article, I describe a conclusion of this “detection” and discuss what were/are the problems. I also summarize the current status of measurements of the CMB B-mode polarization and its prospect for the next 10 years based on the science results/achievements, future plan of the POLARBEAR experiment.