

宇宙マイクロ波背景放射偏光観測実験 POLARBEARによる重力レンズ起源 B-mode偏光の観測



茅 根

西 野

茅 根 裕 司

〈高エネルギー加速器研究機構 (KEK) 〒305-0801 茨城県つくば市大穂1-1〉
e-mail: chinoney@post.kek.jp

西 野 玄 記

〈東京大学カブリ数物連携宇宙研究機構 (Kavli IPMU) 〒277-8583 千葉県柏市柏の葉5-1-5〉
e-mail: haruki.nishino@ipmu.jp

2014年3月、POLARBEAR実験は世界で初めて、宇宙マイクロ波背景放射 (CMB) の重力レンズ起源B-mode偏光パワースペクトルの観測を報告した。この結果は、将来期待されるB-mode偏光によるニュートリノ総質量の測定に向けた第一歩である。本稿ではB-mode偏光観測の意義をレビューすると共に、POLARBEAR実験の装置、観測、解析について解説する。さらにPOLARBEAR実験の成果と、その1週間後に報告されたBICEP2実験による原始重力波起源B-mode偏光パワースペクトルの測定結果を踏まえ、観測の現状と今後について総括する。

1. はじめに

2014年3月、筆者等を含むPOLARBEAR Collaborationは、世界で初めて重力レンズ起源B-mode偏光パワースペクトルの観測を報告した¹⁾(図1)。この成果は、近い将来期待されるB-mode偏光の精密測定によるニュートリノ総質量の決定につながる、画期的な結果である*1。その一週間後、今度はBICEP2実験により、世界で初めての原始重力波起源B-mode偏光パワースペクトルの検出が報告された³⁾。驚くべきことに、測定された原

始重力波の大きさは、テンソル・スカラー比で $r=0.2$ という、大方の予想を上回る大きなものであった。この結果は瞬く間に世界中を駆け巡り、人々を熱狂させた。POLARBEAR実験の結果も誇れるものであると自負してはいるが、我々の結果がこの衝撃の陰に隠れてしまった感は否めない。寂しい限りである。なおBICEP2実験の結果に関しては、発表当初からその系統誤差評価と我々の銀河からの放射成分 (前景放射) の寄与評価に懸念が示されているが^{4),5)}、エキサイティングな状況に変わりはない。

*1 2013年にSPTpol実験とHerschel衛星 (宇宙赤外背景放射, CIB) の相関から、重力レンズ起源B-mode偏光自体は既に検出されている。POLARBEAR実験は、世界で初めてB-modeのパワースペクトル (二点相関) と四点相関を報告した。またCIBとの相関についても、SPTpol実験と無矛盾な結果を得ている。詳細は§6を参照して頂きたい。

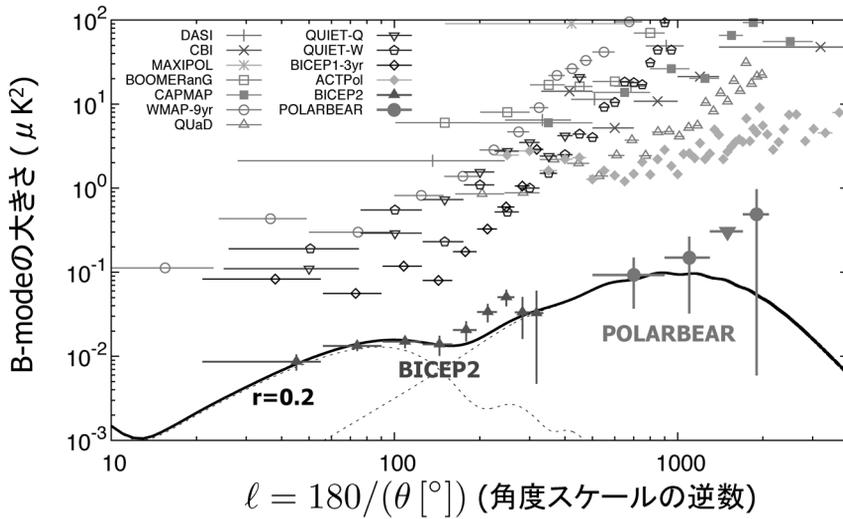


図1 2013年9月現在のB-mode偏光パワースペクトル. POLARBEAR実験とBICEP2実験以外は全て95%上限を示している. POLARBEAR実験のデータ点で中心値が負の1点(逆三角形)についても、上限で表示してある. 図中のデータ点は、各実験の公開データもしくは論文に記載されている数値を使用している. 黒実線は $r=0.2$ の場合の理論曲線. 小角度スケール ($l \sim 1,000$) の起源が重力レンズ効果, 大角度スケール ($l \sim 90$) の起源が原始重力波である.

本稿では、始めに最近急速に観測が進み注目を浴びているB-mode偏光観測について、その意義を簡単にレビューする。その後、筆者等が進めているPOLARBEAR実験を具体例とし、観測装置や実際の観測、解析そして結果について解説する。最後にBICEP2実験の結果発表以降、争論となっている系統誤差や前景放射の問題とその解決の手だてについて議論し、B-mode偏光観測の将来について総括する。

2. CMBのB-mode偏光

文頭で「B-mode偏光」と言ってきたものは、正確には「宇宙マイクロ波背景放射 (Cosmic Microwave Background radiation, CMB)」のB-mode偏光である。CMBの偏光にはB-mode (奇パリティ) とE-mode (偶パリティ) の2つの偏光パターンが存在する (これらの詳細に関してはHu-WhiteとMartin Whiteによる優れた解説⁶⁾を参照して頂きたい)。

CMBは1964年のペンジアスとウィルソンによ

る温度の初観測に始まり、様々な地上実験及びCOBEやWMAP、最近ではPlanckといった衛星により温度揺らぎの測定が行われてきた。そして近年では地上実験を中心に、偏光観測が精力的に行われている。これまでのCMB温度揺らぎの精密測定、およびE-mode偏光の観測結果 (その他の観測的宇宙論の成果) により、ビッグバン宇宙論は確かなものとなった。これらの成果により宇宙は平坦で、そのエネルギーの大部分がダークマター、ダークエネルギーといった未知なもので構成されていることがわかってきている。このダークマターとダークエネルギーの謎を、理論と観測を駆使して解明していくことが現代宇宙論の大きな目標であると言える。

一方で、ビッグバンでは説明しきれない問題 (地平線問題、平坦性問題、構造の起源等) も存在する。これらを解決する理論として、宇宙のインフレーションが考えられるようになった。インフレーション理論では、初期の宇宙が指数関数的な膨張を引き起こしたと考えることで、様々な問題

を解決することが可能である。インフレーションによって原始重力波が作られたと考えられており、これが宇宙の再結合および再電離の時期に、CMBの「大角度スケール（数度角）」に*B-mode*偏光を残す。よってもしこれが観測出来れば、インフレーションを検証することが出来る。

*B-mode*偏光の大きさは、原始重力波の大きさ（テンソル・スカラー比： r ）と直接対応している。最も標準的なシングルフィールド・スローロールインフレーションを仮定した場合（ $r > 0$ （0.01））、インフレーション時のエネルギースケール（ V ）は、 r を用いて $V^{1/4} = 1.06 \times 10^{16} \times (r/0.01)^{1/4}$ GeVと書くことが出来る。これは偶然にも素粒子物理の大統一理論（GUT）と同程度のエネルギースケールであり、*B-mode*偏光を観測することで、GUTスケールの物理に迫れることを意味している（かも知れない）。

CMBは宇宙の最も遠い所からやって来る、素性の良く知られた光である。宇宙の果てから我々に届く迄に、CMBは宇宙の大規模構造による重力レンズ効果を受け変化する。宇宙の大規模構造はニュートリノの総質量によって変わるため、CMBを通じてこの変化を測定することで、ニュートリノの総質量を決定することが可能となる。この影響は「小角度スケール（数分角）」の*B-mode*偏光に最も顕著に表れる。

標準的な理論を考えた場合、大角度スケールでは原始重力波以外に、小角度スケールでは重力レンズ効果以外に*B-mode*偏光を作る原因が存在しない。その為、それぞれの角度スケールで*B-mode*偏光を観測することで、2つの効果を独立に精度よく測定することが可能となる。

多くの人にとってCMBの観測というと、COBEやWMAP、Planck等の衛星による温度揺らぎの測定を連想すると思われるが、時代の最先端は偏光測定である。近年の技術革新は凄まじく、最新技術を一早く取り入れることが可能な地上での偏光観測が急速に発展している。最新の衛星実

験であるPlanckは、地上で約10年前に使用された検出器を搭載しているに過ぎない。一方、POLARBEAR実験やBICEP2実験は、最先端の超伝導検出器を搭載した実験である。これ以外にもSPTpol⁷⁾、ACTPol⁸⁾やABS⁹⁾などの実験が、最先端の検出器を用い観測を行っている。以下では筆者等が参加しているPOLARBEAR実験を例にして、最近の地上観測実験を解説する。

3. POLARBEAR実験の概要

POLARBEAR実験は、チリのアタカマ砂漠標高5,200 mの高地で、2012年初頭から150 GHz帯でCMB観測を行っている。アメリカのカリフォルニア大学バークレー校を中心に、七カ国およそ七十人余りのメンバーが参加している。日本からは、高エネルギー加速器研究機構（KEK）とKavli IPMUが実験に参加している。



図2 POLARBEAR実験で使用しているHuan Tran望遠鏡の外観。3.5 mの主鏡（軸外しグレゴリアン光学系。水口・ドラゴン条件を満たすことで、交差偏波を低く抑えている）と250 mKまで冷やされた検出器をクライオスタット内に搭載し、CMB偏光を観測している。

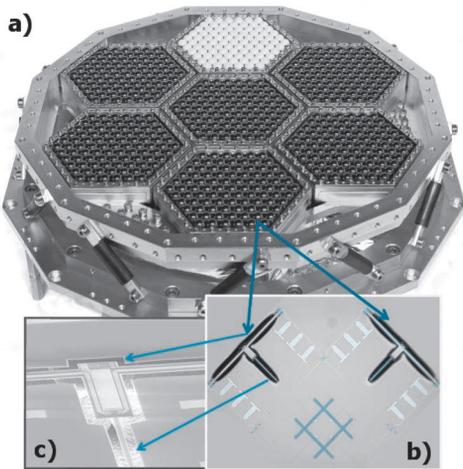


図3 POLARBEAR実験の検出器. a) 1,274個のTESボロメータが、望遠鏡に搭載されたクライオスタット内に設置されている。検出器は250 mKにまで冷却されている。b) それぞれの粒粒（レンズレット）の下に、ダブルスロット・ダイポールアンテナ（井桁の形）と、TESボロメータが配置されている。図の上方向から入射した光をアンテナで受けた後、c) 最終的にそのパワーをTESボロメータで測定する。

POLARBEAR実験の目的は、大角度スケールと小角度スケール両方のB-mode偏光を測ることである。図2に見られる3.5 mの主鏡によって、小角度スケールを測るのに十分な解像度（FWHMで3.5分角）を実現している。一方で、大角度スケールを測定するために、高速なスキャン観測が可能な駆動能力も有している。焦点面に置かれた検出器は、微小なB-mode偏光の信号をとらえられるように、250 mKまで冷やされた1,274個のTES（Transition-Edge Sensor）ボロメータで構成されている（図3）。この検出器により、 $23 \mu\text{K s}^{1/2}$ の高感度を達成している。これは簡単に言えば、1秒間の観測で23 μK のCMB揺らぎを観測できることを意味している。

TESボロメータの利点は、個々の検出器の感度

が優れているのは勿論、リソグラフィー技術により大量に作成が可能なのである。もし個々のボロメータの性能が同じならば、観測精度はボロメータの数に比例して向上する。この10年間の技術発展により、検出器の数は10倍から100倍程に増えた。その結果、現在の地上実験は今迄に無い超高感度観測が可能となった。

個々の検出器はダブルスロット・ダイポールアンテナ（井桁の形、図3のb）とカップルしている。この直交する縦横2つのアンテナにカップルしている“top”と“bottom”検出器が、電磁波の E_x^2 成分と E_y^2 成分（とそれらを45度回転させたアンテナと検出器ペアによって、 E_a^2 成分と E_b^2 成分）をそれぞれ測定する。この“top”と“bottom”の差をとることで、直線偏光を測定することが可能である（ $Q=E_x^2-E_y^2$ と $U=E_a^2-E_b^2$ ）。それぞれの検出器で観測されるシグナルは、大気の揺らぎの影響を受けている。しかし大気は無偏光であり、2つの検出器は同じ大気を見ている。その為、差をとることで大気の揺らぎを打ち消すことが可能である。この様にして大気の揺らぎの影響を受けずに、地上から偏光を測定することが出来る。

4. POLARBEAR 実験の初期観測

2011年から始まった建設作業に合わせて、我々は観測装置のパフォーマンスやその当時の状況を踏まえた上で、初期の観測目標を決定した。当時の理解では、WMAPをはじめとする観測結果から原始重力波の大きさは $r < 0.13^{10)}$ と予想されていた*2。このような状況を踏まえ、業界としても個人的にも $r=0$ (0.01) 程度の感度が実現できて初めて、原始重力波が見えてくるものだと考えていた。一方で重力レンズ起源B-mode偏光は、測定こそされてはいなかったが、（ニュートリノの総質量でその大きさは変わり得るとしても）その存在は確かである。我々が選択したスト

*2 その後Planck衛星の結果が加わり $r < 0.11^{11)}$ 。

ラテジーは、この重力レンズ起源*B-mode*偏光を確実に観測し、ニュートリノ総質量測定への足がかりを得るといふものであった。そこで、これを達成するために最適な観測天域の選定と、スキャン方法の検討が行われた。そして建設が終り各装置の準備も整った2012年上旬から、本格的にこの観測を開始したのである。

重力レンズ起源*B-mode*偏光は小さい角度スケールで見られるため、銀河系からの前景放射を避ける様に設定した幾つかの小さい空の領域を、可能な限り長い時間かけて観測することが最も効率的である。ある天域を地球上から24時間ずっと観測することは出来ないため、我々は3つの天域を設定した。冷凍機のサイクルや較正用の観測以外のすべての時間を、これらの天域の観測に費やした。この様にして2012年6月から2013年6月の間に、延べ2,400時間余りのCMB観測データを取得したのである。

5. POLARBEAR 実験のデータ解析

5.1 解析の概要

CMBデータ解析のおおまかな流れは、1. 取得した時系列データの較正、2. 時系列データからCMBマップを作成(偏光パターンの再構成)、3. マップからパワースペクトルを推定(偏光パターンの分析)、4. パワースペクトルからの宇宙論的解析、となる。2から4は多くの(宇宙論の)研究者にとって馴染み深いものだと思われる。これらの解析は、もし得られたデータが理想的であれば容易である。しかし実際は、実験固有の問題に悩まされることになる。これに適切に対処し、間違った結果を導かないことが重要である。通常、解析のほとんどの時間をこの点に費やすことになる。特に重力レンズ起源*B-mode*偏光の場合、 Λ CDMモデルの確固たる予言があるだけに重要である。

*B-mode*偏光の信号はとても小さい。一方で観測機器や観測条件によって変化する様々な系統誤

差や前景放射からの寄与は、本当に測定したい*B-mode*偏光の信号や統計誤差よりも大きい可能性がある。つまりこれらの推定を誤ると、原始重力波の大きさや重力レンズ効果の大きさを間違っ

て評価してしまう恐れがある。人間は簡単に誤りを犯すものであり、「*B-mode*偏光はこれぐらいの大きさであるはずだ」と考えながら解析を行っている

と、結果を誤った方向に誘導してしまう恐れがある。

この様に系統誤差評価や、人的バイアスを如何にして避けるかが、解析の最も重要な点である。以下では、POLARBEAR実験で特に重要であった較正解析と系統誤差解析、及び前景放射からの寄与の推定について解説する。

5.2 較正

5.2.1 温度の較正

CMB温度の較正は、観測された時系列データ(デジタル化された電氣的信号)を温度(ケルビン)に変換する操作である。この変換値を一般的にゲインと読んでいる。ゲインは通常、検出器の状態等によって変化するため、数千時間あまりの観測データを正確に積算していく為には、この変化を正確にトレースする必要がある。POLARBEAR実験では、副鏡に穴を開けその背後に設置した“stimulator”(700度Cの黒体をチョッピングしている)から一時間おきに信号を入射させることで、この変化をトレースしている。

一方でstimulatorで得られたゲインを、絶対的な温度較正に使用することは困難である。何故ならば、確かにstimulatorは700度Cの黒体ではあるが、反射や吸収等によって必ずしもこれが検出器上で700度Cの黒体として観測される訳ではないからである。そこでよく使われるのが、CMBの温度揺らぎ自身である。CMBの温度揺らぎは、過去の実験により精密に測定されている。まずstimulatorを使いゲインの時間変化を較正した上で、マップもしくはパワースペクトルを作成する。我々はこれらの結果と、過去の実験による測

定を直接比較する事で絶対ゲインを求めた。

5.2.2 角度の較正

偏光を測定する為には、検出器上での偏光角度と空の上での偏光角度を対応させる必要がある。検出器上の偏光角度は、検出器面でのアンテナの角度で決まる。これらの角度が空の上でどの様に変換されるかを、偏光角度が既知の天体を使い較正する。

Tau A (かに星雲) は電波・ミリ波サブミリ波帯で最大強度の偏光源である。中心のパルサー及び周辺のガスからのシンクロトロン放射によって、強力な偏光を放っている。Tau AはWMAPとIRAMの30 m電波望遠鏡によって精密に測定されているため、これらの結果と比較することで角度を決定することが出来る。一方で、これらの観測は95 GHz以下でしか行われていない。低周波数から95 GHz迄の観測は、Tau Aの偏光角度が一定であることを示唆しているが、POLARBEAR実験の観測周波数である150 GHz帯でも、その仮定が正しい保証はない。そこで重要になってくるのが、E-mode偏光とB-mode偏光の相互相関スペクトルを用いた角度較正である。一般にパリティの対称性から、この相互相関は零になると期待されている ($C_l^{EB}=0$)。一方で、もし角度較正を誤ると ($\Delta\psi$)、偽の信号を観測することがわかっている ($C_l^{EB}\approx 2\Delta\psi C_l^{EE}$)。POLARBEAR実験ではこの相互相関シグナルが零となるように角度を調整することで、最終的な角度較正を行っている。その結果得られた角度は、Tau Aから得られた角度と約1度ほどずれていることがわかった(図4)。これはTau Aの偏光角度が、100 GHzから150 GHzにかけて変化している可能性を示唆している。なおPOLARBEAR実験の結果公表後、ACTPol実験も同様の結果を報告しており、興味深い¹²⁾。

5.3 系統誤差の評価

観測装置は必ずしも設計通りに作成できる訳ではない。例えば検出器のビームは、必ずしも真円

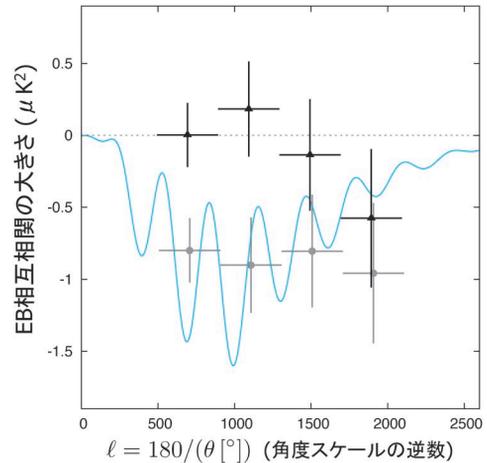


図4 E-mode偏光とB-mode偏光の相互相関シグナル (C_l^{EB})。丸点: Tau Aの観測による較正。三角点: 相互相関シグナルによる較正。実線: 丸点を $C_l^{EB}\approx 2\Delta\psi C_l^{EE}$ でフィットした場合の理論線。

ではない。観測も何時も期待通りに行える訳ではない。例えば何らかの原因で、ある観測にだけ迷光が紛れ込んでしまう可能性がある。これらの影響を、結果を見る事無く事前に検証することが重要である。

もし十分な検証を行わず、最終的な結果、ここではB-mode偏光スペクトルを見てしまうとどういった問題が起こるだろうか? 極端な例として、もし Λ CDMモデルが予想するよりも2倍大きなB-mode偏光が得られた場合、それをどう理解することになるのか? 十分な系統誤差評価が行われていなかった場合、 Λ CDMモデルを否定する新発見なのか、単なる系統誤差なのか判断不可能である。そしてもしこれが1.5倍であった場合、判断は変わってしまうだろうか? その判断は恣意的になってしまわないだろうか?

一旦この様な結果を目の当たりにしてしまった以上、その後の判断に人的バイアスが紛れ込んでしまう恐れは否定できない。一方、十分な検証が終わった上でこの結果を目の当たりにしていれば、胸を張って新発見だと主張することが出来

る。このような人的バイアスを避ける為に、POLARBEAR実験では以下に述べる「シミュレーションによる系統誤差評価」及び「Null testによる系統誤差評価」を事前に行った。

5.3.1 シミュレーションによる系統誤差の評価

先ほども述べた様に、観測装置は必ずしも設計通りに作成できる訳ではない。また100%の精度で較正を行える訳でもない。このような期待とのズレによって生じる偽の信号が、最終的な結果に与える影響をシミュレーションを駆使して推定する。例えば検出器のビームが真円ではなく楕円になってしまった場合、“top”と“bottom”の検出器の差をとる際に、無偏光成分が完全には打ち消されず、偽の偏光信号を作ってしまう。2つのビームの違いは、点源や惑星を観測することで分かるため、このズレをインプットとしてシミュレーションを行うことで、影響を調べることが可能である。

このような偽の偏光シグナルを虱潰しに調査し、最終的なB-mode偏光スペクトルにどれだけの影響を与えるかを推定した。具体的には、望遠鏡のポインティング、アンテナの角度、ゲイン等の較正の不定性、検出器ペアのビームの楕円率の違い、検出器ペアのビームサイズの違い、電気読み出し系のクロストーク、サイドローブ等が見る地上からの迷光の影響、解析アルゴリズムによる系統誤差、それぞれを評価した。その結果、全ての偽B-mode偏光が統計誤差に比べて十分小さいことを確認した。

5.3.2 Null testによる系統誤差の評価

しつこいようだが、観測装置は必ずしも設計通りに作成できている訳でもなく、また何時も期待通りの観測が出来る訳ではない。例えば、天候が悪いときの観測と良いときの観測とでは、果たして同じくCMBを観測出来ているのだろうか？

このような系統誤差を、実際に測定したCMBデータを元に調査するのが“Null test”と呼ばれる解析である。Null testは、CMBのデータ解析

で広く用いられている手法である。例えば、天候が悪いときのデータと天候が良いときのデータそれぞれで解析し、その差のスペクトルを計算する。このときそれぞれのスペクトルは見ず、差のスペクトルだけを確認することで、人的バイアスを避ける。もし天候による系統誤差が統計誤差よりも小さければ、差のスペクトルは統計誤差の範囲内で零になるはずである。もし実際に系統誤差を含んでいれば、何らかの信号が観測されることになる。この場合、解析を改善しなければならず、この改善は系統誤差が零コンシステントになるまで繰り返されることになる。

POLARBEAR実験では、例えば季節変化等を確認する為に2012年6月から12月までの観測 v.s. 2013年1月から6月までの観測、また大気の厚みの効果を確認する為に観測天域が高いelevationでの観測 v.s. 低いelevationでの観測についてNull testを行った。これ以外には、天域が上昇(rising)している方向の観測 v.s. 下降(setting)している方向の観測、ゲインが高い観測 v.s. 低い観測、良い天候の観測 v.s. 悪い天候の観測、検出器のアンテナの種類(E_x^2 と E_y^2 を観測する検出器 v.s. それを45度回転させた E_a^2 と E_b^2 を観測する検出器)、検出器面の左側にある検出器 v.s. 右側にある検出器、左方向に動いているスキャン v.s. 右方向に動いているスキャン、月(太陽)と観測方向の距離が近い観測 v.s. 遠い観測、それぞれに対してNull testを行った。幾度かの改善・テストの試行後、最終的にすべての系統誤差が統計誤差に比べて十分小さいことを確認した。

5.4 前景放射の寄与の評価

CMBの観測は少なからず前景放射の影響を受ける。BICEP2実験の結果とその後の議論を受け、その扱いの重要性は更に増している。

POLARBEAR実験の観測周波数である150 GHz帯では、ダストからの熱放射が特に問題となる。ミリ波帯でのダストからの放射を推定する際には、赤外線領域での観測結果を元に作られた

PSM (Planck Sky Model) が広く用いられている。POLARBEAR実験でもこのモデルを使用した。より用心深く倍の大きさを仮定しダストからの寄与を評価した。

POLARBEAR実験は、全天で最もダスト放射が少ない小さな天域を観測している。また一般にダスト放射の大きさは、小角度スケールになるにつれて小さくなる。よってPOLARBEAR実験の様に小さな天域で小角度スケールの重力レンズ起源 B -mode 偏光を測定する場合、大きな天域で大角度スケールの原始重力波起源 B -mode 偏光を測定する場合に比べて、その影響はとても小さい。

6. POLARBEAR 実験の結果

較正と系統誤差、及び前景放射の評価を終えた時点で、初めて「差」ではない B -mode 偏光パワースペクトルを計算する。一度結果を見てしまったらもう後には引けないため、緊張の瞬間である。このようにして計算されたスペクトルが、既に示した図1に描かれている。この B -mode 偏光スペクトルは、 Λ CDMモデルとエラーバーの範囲内で無矛盾であり、信号が重力レンズ起源 B -mode 偏光でない仮定を 2.2σ で棄却する。これは世界初の B -mode 偏光パワースペクトルの観測であった。

B -mode 偏光のパワースペクトル=自己相関(2点相関)に加え、POLARBEAR実験では同じデータを使い「CMB偏光とCIB (Cosmic Infrared Background; 宇宙赤外背景放射)との相関による重力レンズ効果の検出¹³⁾」と世界初の「CMB偏光による重力レンズスペクトルの測定(4点相関)¹⁴⁾」を報告している。なお前者は、昨年報告されたSPTpolの結果²⁾とも一致している。最終的に、POLARBEAR実験による2点相関と4点相関の結果を合わせた場合、信号が重力レンズ起源 B -mode 偏光でない仮定を 4.7σ で棄却することが可能である。

7. B -mode 偏光観測の今後

POLARBEAR実験の結果により、重力レンズ起源 B -mode 偏光の存在が確かなものとなった。今後は、最終的な目標の1つであるニュートリノ総質量の精密測定を目指し、観測精度を上げていくことになる。

一方、原始重力波起源 B -mode 偏光については、BICEP2実験の系統誤差評価、及びダストからの放射の評価について明確な決着を付けることが課題である。もし系統誤差が実験固有のものである場合、他の観測結果と比較をすることで確認することが出来る。ダストからの放射については、様々な検証が既に始まっている。CMBとダストではその強度の周波数依存性が異なるため、多周波数の観測により分離が可能である。BICEP2実験は150 GHz帯だけで観測を行っているため、単独で分離することは原理的に不可能である。BICEP2実験の前身であるBICEP1実験は、100 GHz帯と150 GHz帯のデータを有するが、CMBとダストの区別を行うには感度が足りない。ダストの評価については、BICEP2チームとは独立な議論も行われており興味深い^{4),5)}。ただしいずれにしても、現時点で公式に入手可能な情報は限られており、結論を出すのは時期尚早だと思われる。

明確な結論を得るには、2014年中に公開される予定のPlanck衛星の偏光データ(特にダストを検証するのに有効な217 GHz帯と353 GHz帯)と、現在は100 GHz帯でも観測を行っているKeck Array (BICEP2実験のアップグレード実験)の結果が待たれる。また現在POLARBEAR実験は、原始重力波起源 B -mode を目指した観測を行っている。加えて、ダストを効率よく観測する為の高周波検出器の搭載も検討しており、近い将来BICEP2実験とは独立な検証が可能になる。この様に、1-2年以内には様々な周波数、様々な実験による結果が出そろう、検証が進むと考えられる。

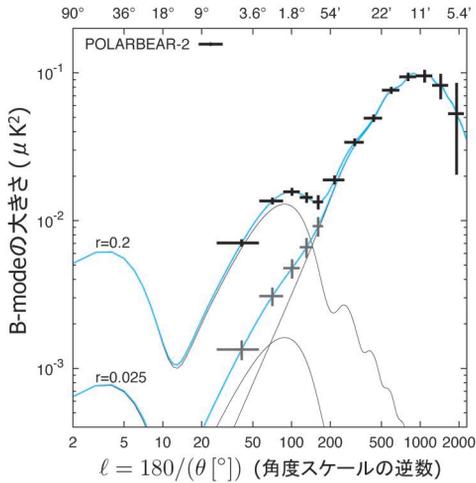


図5 POLARBEAR-2で期待される感度. $r=0.2$ と $r=0.025$, それぞれの場合の統計誤差を示した. 原始重力波起源B-mode偏光と重力レンズ起源B-mode偏光を, 精密に同時測定可能であることがわかる. 一方, 角度スケールにして20度以上 ($l < 10$ で見られる“再電離バンプ”)の広い天域を観測するためには, LiteBIRDのような人工衛星での全天観測が必要不可欠である.

その先の将来はどうだろうか? テンソル・スカラー比の精密測定によるインフレーションモデルの決定は勿論, スローロールインフレーションでの“consistency relation”の確認, B-mode偏光によるニュートリノ総質量の精密測定が期待される. 我々はこれらを達成するために, 高感受度受信機POLARBEAR-2へのアップグレードを計画している¹⁵⁾.

POLARBEAR-2は, 2015年のチリでの観測に向けて高エネルギー加速器研究機構(KEK)を中心に開発が進んでいる. TESボロメータの数が現在の約6倍の7,588個に増えるだけでなく, 観測周波数も95 GHz帯と150 GHz帯の2つとなる(図5に期待されるパワースペクトルを示す). POLARBEAR-2により, テンソル・スカラー比及びニュートリノ総質量に対しての精度が飛躍的に向上する予定である.

更に, POLARBEAR-2を3台同時運用する (=

22,764個のTESボロメータ) Simons Arrayの準備も着々と進んでおり(最終的には220 GHz帯の検出器も搭載され, 計3周波数帯での観測), 数年以内には地上から全天の80%が, 大角度スケールと小角度スケール両方で観測可能になる. そしてこれらの実験で得られた経験と結果は, B-mode偏光観測衛星LiteBIRDへつながっていく¹⁶⁾. 地上観測と衛星観測を併せることで, 全天から小角度スケールまでの超精密なB-mode偏光観測が, 今後5年から10年の間に達成されると期待している.

この様にCMB観測は今まで以上にエキサイティングな時期を迎える. この記事を読まれた方が, 少しでもCMB観測に興味を持って頂ければ幸いである.

謝 辞

本稿は筆者等を含むPOLARBEAR Collaborationが執筆した論文を踏まえ書かれたものです. 苦楽を共にしてきたPOLARBEAR Collaborationの皆様方に感謝致します. 本研究を遂行するにあたり, 筆者等は日本学術振興会, 高エネルギー加速器研究機構(KEK)からの援助を受け, カリフォルニア大学バークレー校に長期に渡り滞在致しました. 最後に, 本稿を書くことを勧めて下さった大栗真宗氏に感謝致します.

参考文献

- 1) The POLARBEAR Collaboration: P. A. R. Ade et al., 2014, ApJ 794, 171
- 2) Hanson D., Hoover S., Crites A., et al., 2013, Phys. Rev. Lett. 111, 141301
- 3) Ade P. A. R., Aikin R. W., Barkats D., et al., 2014, Phys. Rev. Lett. 112, 241101
- 4) Mortonson M. J., Seljak U., 2014, arXiv: 1405.5857
- 5) Flauger R., Hill J. C., Spergel D. N., 2014, arXiv: 1405.7351
- 6) Hu W., White M., 1997, New Astronomy 2, 323
- 7) Carlstrom J. E., Ade P. A. R., Aird K. A., et al., 2011, PASP 123, 568
- 8) Niemack M. D., Ade P. A. R., Aguirre J., et al., 2010, Proc. SPIE 7741, 77411S
- 9) Essinger-Hileman T., Appel J. W., Beal J. A., et al., 2009, AIP Conference Proceedings 1185
- 10) Hinshaw G., Larson D., Komatsu E., et al., 2013, ApJS 208, 19
- 11) Planck Collaboration, Ade P. A. R., Aghanim N., et al., 2013, arXiv: 1303.5076
- 12) Sigurd Naess et al., 2014, JCAP 10, 007
- 13) Ade P. A. R., Akiba Y., Anthony A. E., et al., 2014, Phys. Rev. Lett. 112, 131302
- 14) Ade P. A. R., Akiba Y., Anthony A. E., et al., 2014, Phys. Rev. Lett. 113, 021301
- 15) Tomaru T., Hazumi M., Lee A. T., et al., 2012, Proc. SPIE 8452, 84521H
- 16) Matsumura T., Akiba Y., Borrill J., et al., 2014, J. Low Temp. Phys. 176, 733

A Measurement of the Cosmic Microwave Background Lensing *B*-mode Power Spectrum with POLARBEAR

Yuji CHINONE¹ and Haruki NISHINO²

¹ *High Energy Accelerator Research Organization (KEK), 1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki 305-0801, Japan*

² *Kavli IPMU, The University of Tokyo, 5-1-5 Kashiwanoha, Kashiwa, Chiba 277-8583, Japan*

Abstract: The POLARBEAR Collaboration reported a first measurement of the Cosmic Microwave Background lensing *B*-mode power spectrum on March, 2014. This result is a mile-stone event in the future use of the lensing *B*-mode to measure the sum of neutrino masses. In this article, we review science from the CMB *B*-mode signal and details of the POLARBEAR instrument, observation, and data analysis. We also explain results of the BICEP2 experiment, which claimed a detection of the inflationary *B*-mode a week later from POLARBEAR. We also mention prospects of CMB polarization experiments.