

# 宇宙マイクロ波背景放射の偏光：現状と将来の展望

小松英一郎 <マックスプランク宇宙物理学研究所 komatsu@mpa-garching.mpg.de>

羽澄昌史 <高エネルギー加速器研究機構 masashi.hazumi@kek.jp>

「火の玉宇宙の残光」宇宙マイクロ波背景放射はわずかに偏光している。天球上の各点における背景放射の偏光方向の分布は「Eモード」と「Bモード」と呼ばれる分布に分解できる。Eモード、Bモード偏光の分布は鏡像変換に対してそれぞれ対称、反対称である。Eモード偏光は火の玉宇宙においてプラズマが重力ポテンシャルに落ち込む際に生成されるが、Bモード偏光は重力ポテンシャルでは生成できない。宇宙の標準理論の枠組みでは、Bモード偏光を生成する源は二つある。一つは重力レンズ効果によってEモードがBモードに転化される現象で、もう一つは初期宇宙に起こったとされる急激な宇宙膨張「インフレーション」中に、時空の量子揺らぎとして生成された原始重力波である。これまでEモードの測定は数多く行われてきたが、2013年夏から2014年春にかけてBモードの測定が飛躍的に進んだ。本稿では宇宙マイクロ波背景放射の偏光観測の現状と将来の展望を解説する。

## 1. 宇宙マイクロ波背景放射と重力レンズ効果

「火の玉宇宙の残光」宇宙マイクロ波背景放射の光子は、宇宙がおよそ3,000 Kまで冷え、電離物質が再結合して中性原子となった頃に物質との散乱をやめ、その後は「ほぼ」まっすぐ進む。それから数億年後に最初の星々が形成されると、それらが放射する強い紫外光によって宇宙が再電離し、9%の光子は電離物質によって再散乱される。それ以外の光子はそのまま我々に届くが、宇宙空間の物質分布の不均一性のため、光子の軌跡はわずかに曲げられる。

一般相対性理論は、重力場によって光の軌跡が曲がる「重力レンズ」現象を予言する。1919年の皆既日食の際、英国ケンブリッジ天文台のアーサー・エディントン率いる観測隊は、一般相対性理論に予言される通り、太陽の重力場によって背後の星の光の軌跡が曲がり、星の位置が変化する事を確認した。以来、天文学において重力レンズ効果は重要な役割を果たしてきた。

重力レンズ効果は光子の軌跡を変えるが、エネルギーは変えない。従って、宇宙マイクロ波背景放射の温度は変わらないが、視線方向がわずかに変わる。レンズを受けない宇宙マイクロ波背景放射の天球上の温度分布を  $T_p(\hat{n})$  とすると、観測される温度分布は  $T(\hat{n}) = T_p(\hat{n} + \mathbf{d})$  で与えられる。 $\hat{n}$  は天球上の視線方向をあらわすベクトルで、 $\mathbf{d}$  は「曲がり角」と呼ばれるベクトルである。曲がり角は、「重力ポテンシャル」と呼ばれるスカラー量  $\phi$  の天球上における勾配で  $\mathbf{d} = \nabla\phi$  のように書け、 $\phi$  は重力ポテンシャル  $\Psi$  の視線方向積分で

$$\phi(\hat{n}) = -2 \int_0^{d_A} d\chi \frac{d_A - \chi}{d_A \chi} \Psi(\hat{n}\chi, \chi), \quad (1)$$

と与えられる。 $d_A$  は宇宙マイクロ波背景放射の光子が物質との散乱をやめてから現在までの間(138億年間)に進んだ距離で、約14ギガパーセク(456億光年)である。

$\phi$  は視線方向に存在する全物質の寄与を含む。従って、宇宙マイクロ波背景放射の重力レンズ効果を測定できれば、

暗黒物質を含む全物質の分布(の視線方向積分)が求まる。典型的な光の曲がり角は数分角程度であるため、アメリカ航空宇宙局(NASA)が2001年に打ち上げた宇宙マイクロ波背景放射観測衛星「ウィルキンソンマイクロ波異方性探査機」(WMAP)の角度分解能(12分角)ではこの効果を測定できなかった。2011年、WMAPよりも10倍程度良い角度分解能を持つ地上望遠鏡、アタカマ宇宙論望遠鏡<sup>1)</sup>(ACT)と南極望遠鏡<sup>2)</sup>(SPT)により、重力レンズ効果による宇宙マイクロ波背景放射の光の曲がり角が測定された。これらの測定は全天の10%以下の限られた領域で行われたが、欧州宇宙機関(ESA)が2009年に打ち上げたプランク衛星は全天にわたってレンズポテンシャルを測定した。

レンズポテンシャルの天球上の分布を定量化するため、2点相関関数  $\langle \phi(\hat{n})\phi(\hat{m}) \rangle$  を考えよう。 $\langle \dots \rangle$  は統計的な平均作業をあらわす。 $\hat{n}$  と  $\hat{m}$  はそれぞれ天球上の任意の2点をあらわす。宇宙の一様等方性より、2点相関関数は2点間のなす角度  $\theta \equiv \cos^{-1}(\hat{n} \cdot \hat{m})$  のみに依存するため、ルジャンドル多項式を用いて展開できる。

$$\langle \phi(\hat{n})\phi(\hat{m}) \rangle = \sum_L \frac{2L+1}{4\pi} C_L^{\phi\phi} P_L(\hat{n} \cdot \hat{m}). \quad (2)$$

この展関係数はパワースペクトル  $C_L^{\phi\phi}$  と呼ばれ、 $L(2L+1)C_L^{\phi\phi}/(4\pi)$  は角度  $\theta = \pi/L$  で  $\phi$  を平均化した時の  $\phi$  の分散に対応する。

図1に、プランク衛星が測定した温度異方性のデータから得られたレンズポテンシャルのパワースペクトルを示す。実線は宇宙の標準理論<sup>\*1</sup>から導かれる理論曲線を示す。データと理論との一致は見事である。

測定されたレンズポテンシャルは、宇宙マイクロ波背景放射の光子が最後に物質に散乱されてから我々に届く間に

\*1 宇宙の標準理論(ΛCDMモデルとも呼ばれる)とは、一般相対性理論に基づく宇宙モデルのことで、エネルギー成分として光子と3世代のニュートリノからなる放射、通常の物質と暗黒物質、そして暗黒エネルギーを含み、空間の幾何学は曲率がゼロの平坦な空間で記述される。

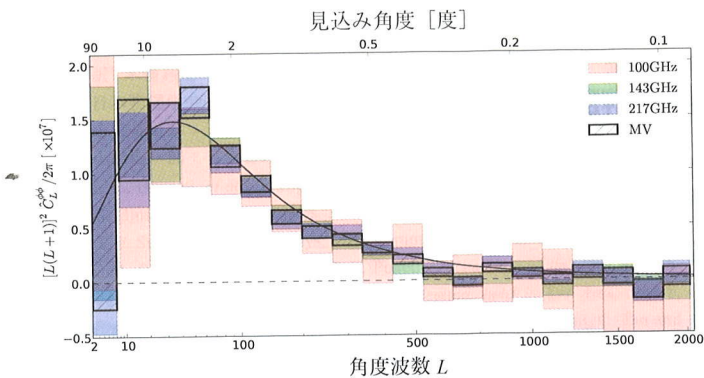


図1 プランク衛星の温度異方性のデータから測定されたレンズポテンシャルのパワースペクトル。図は  $[L(L+1)]^2 C_L^{\phi\phi} / (2\pi)$  を角度波数  $L$  の関数として示す。  $L$  は見込み角度  $\theta$  と  $L = \pi/\theta$  で関係する。文献3より抜粋。ピンク、緑、青の領域はそれぞれ 100, 143, 217 GHz のデータから測定されたパワースペクトルを、黒の領域は 143, 217 GHz の測定を足したものを示す。それぞれの領域の縦幅は  $1\sigma$  の不定性を示す。実線は宇宙の標準理論 (ACDM モデル) から導かれる理論曲線を示す。

出会った物質分布の不均一性をあらわす。一方、図に示す理論曲線は、光子が最後に散乱された時の情報のみから導かれたものである。両者が一致する事は、光子が最後に散乱された時刻から現在に至るまでの物質分布の不均一性の進化を記述する宇宙の標準理論が正しい事を意味する。これは、次節で述べる宇宙マイクロ波背景放射の偏光の測定と合わせて、標準理論の正しさを示す重要な測定である。

一方で、プランク衛星の温度異方性のデータから得られたレンズポテンシャルは、標準理論に含まれるある重要な要素の効果を測定するには精度が足りない。それは、ニュートリノの質量の効果<sup>4)</sup>である。岐阜県飛騨市神岡鉱山のスーパーカミオカンデ実験<sup>5,6)</sup>によるニュートリノ振動の発見から、ニュートリノに質量がある事が明らかとなった。しかし、この実験では世代の異なるニュートリノの間に質量差がある事はわかっていても、質量の値自身はわからない。一方、二重ベータ崩壊の実験より、電子型ニュートリノの質量は陽子の質量の10億分の1以下である事がわかっている。ニュートリノ振動から得られた質量差が小さい事も考慮すれば、3世代のニュートリノの質量がそれぞれ小さい事が期待される。そのような軽い粒子は運動速度が大きいため、銀河や銀河団に重力的に閉じ込める事ができない。すなわち、重力ポテンシャルを形成する物質の一部(ニュートリノ)は、重力的に束縛されずにあたりを飛び交う。宇宙膨張のため、重力的に束縛されない粒子間の距離は時間と共に増大し、それに伴って質量密度が減少する。結果として、重力ポテンシャルは時間と共に減衰する。ニュートリノの質量が大きいと、より多くの物質質量が重力的に束縛できなくなるため、レンズポテンシャルのパワースペクトルが小さくなる。この効果を用いれば、3世代あるニュートリノの質量和を測定できる。ニュートリノの質量和の測定は、将来の宇宙マイクロ波背景放射観測計画の最重要課題の一つである。

## 2. Eモード：重力ポテンシャル起源の偏光

宇宙マイクロ波背景放射はわずかに偏光している。偏光は、光が電子によって散乱されると生じる。ゼロでない偏光を生成するための必要十分条件は、電子の周囲の光の温度分布が四重極の異方性(電子の静止系から見た光の温度分布が、視線方向が90度変わる度に熱い、冷たい、熱い、冷たいとなる分布)を持つ事である。この四重極異方性が電子に散乱されて偏光が生じる。

四重極が必要である事から、宇宙マイクロ波背景放射の偏光が小さい事が導かれる。火の玉状態の宇宙では、電離した物質と光が自由電子を介して頻繁に散乱し、光はまっすぐ進む事ができない。光の平均自由行程が小さいため、光と物質はあたかも一緒に動いているかのように振る舞う。この時、電子の静止系から見れば電子の周囲の温度分布は等方的で、偏光は生じない。従って、偏光の強度は、光と物質の運動のわずかなずれ(速度差)に比例する。光子と物質の頻繁な散乱によって光子の平均自由行程は小さいが、ゼロではない。従って、小さな見込み角度の揺らぎを見ると、光子と物質の運動の速度差が無視できず、偏光が生じる。

WMAPの7年目のデータ<sup>7)</sup>から得られた、天球上における偏光方向の平均的な分布を図2の下図に示す。天球上の各視線方向における偏光ではなく「平均的」な分布である理由は、各視線方向の偏光を個別に精度良く測定するにはWMAPの感度は不足しているためである。しかし、温度揺らぎが必ず偏光を伴う事に着目すれば、平均的な偏光の姿を描き出せる。WMAP7年間の温度異方性のデータでは、高温のピークと低温のピークがそれぞれ12,387, 12,628個ある。高温と低温のピークはそれぞれ異なる偏光の分布を伴うので、それを考慮してピークの周囲の偏光データを足して平均する。すると、図2の下図を得る。比較のため、シミュレーションデータに同様の作業を施したのも示す。

高温のピークの周りには、中心から  $0.6^\circ$  のところに同心円状の偏光分布が、そして  $1.2^\circ$  のところに放射状の偏光分布が見られる。低温のピークの周りにはその反対の分布が見られる。物理的解釈<sup>7)</sup>は以下の通りである。光-電離物質流体に揺らぎを与える(ある領域の物質密度を上昇させる)。すると、重力の作用によってその領域は縮んでさらに密度が上昇する。散乱によって光は物質と共に動くので、光の密度も上昇する。すなわち、高温のピークは、重力ポテンシャルの底に対応する。  $1.2^\circ$  にある放射状の偏光分布は、ポテンシャルの底に光子-電離物質の流体素片が落ち込む際に生成されたものである。この過程をより掘り下げてみよう。重力ポテンシャルに流体素片が落ち込むと、ポテンシャルの勾配のため流体素片の前方が後方よりも速く運動する。従って、流体素片中央の電子から見ると、あたかも流体素片の前後が自分から遠ざかるように見える。ゼロでない光子の平均自由行程のため、流体素片の前後から

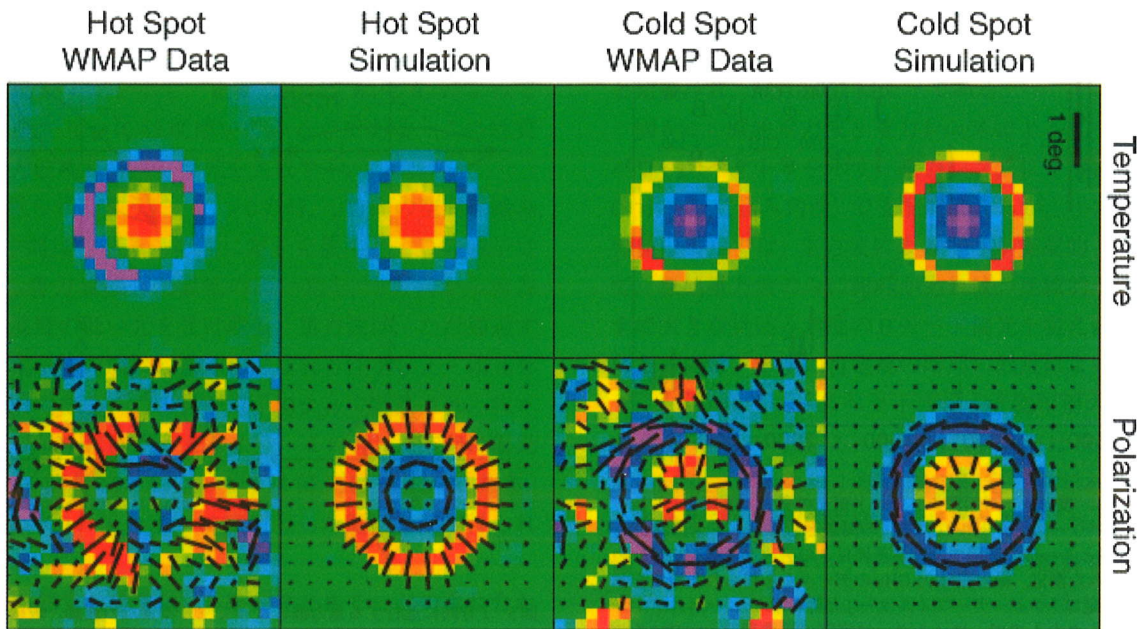


図2 温度と偏光の平均像。<sup>7)</sup> 上図は、WMAPの7年間の温度異方性のデータから12,387個の高温のピーク(Hot Spot)と12,628個の低温のピーク(Cold Spot)を取り出し、それぞれを全て足して平均した結果、および同様の操作をシミュレーションデータに施した結果を示す。赤色ほど高温、青色ほど低温をあらわす。下図は、それぞれのピークの周りの偏光のデータを全て足して平均した結果を示す。実線の向きは偏光の方向を、長さは偏光の強度をあらわす。赤色は偏光の向きが放射状の領域を、青色は偏光の向きが同心円状の領域をあらわす。それぞれの図の大きさは $5^\circ \times 5^\circ$ 。(クレジット：NASAおよびWMAPチーム。)プランク衛星のデータは、ここで示すシミュレーションデータと区別がつかないほどノイズが小さい。

光子がしみ出してきて(拡散して)、電子に向かってくる。これらの光子は電子からみて赤方偏移しているため、電子は前後から「冷たい」光を受け取る。一方、流体素片の運動方向に直交する方向では光の温度に変化はないので、相対的に電子のまわりに「熱い、冷たい、熱い、冷たい」という四重極の温度異方性を生じる。この温度異方性を電子が散乱する事で偏光が生じ、その偏光方向は流体素片の運動方向に平行となる。

光の密度が上昇すると、圧力もそれに比例して上昇する。 $0.6^\circ$ にある同心円状の偏光分布は、ポテンシャルに落ち込んで来た流体素片が、ポテンシャルの底にある熱い流体の圧力によって押し返される際に生成されたものである。これは、ポテンシャルの底に落ち込む流体素片が圧力によって減速する事と、前述の考察を組み合わせる事で理解できる。このように、図2は光子-物質流体が重力ポテンシャルに対してどのように運動するかを示しているのである。

観測された偏光方向の分布はシミュレーションデータから得られる予言と一致する。これらのシミュレーションは、温度異方性のデータを用いて決めた(6つの)宇宙論パラメーターを用いて理論計算されたもので、計算に偏光のデータは使われていない。シミュレーションと測定が正確に一致する、すなわち、温度異方性から理論的に予言される偏光の分布が測定と一致するのは、宇宙の標準理論の正しさの何よりの証明である。

図2から得られるもう一つの重要な情報は、重力ポテンシャルに起因する運動から生成される偏光の分布は同心円状か放射状かどちらかしかない、という事である。このような分布を宇宙論業界では「Eモード」と呼んでいる。Eモ

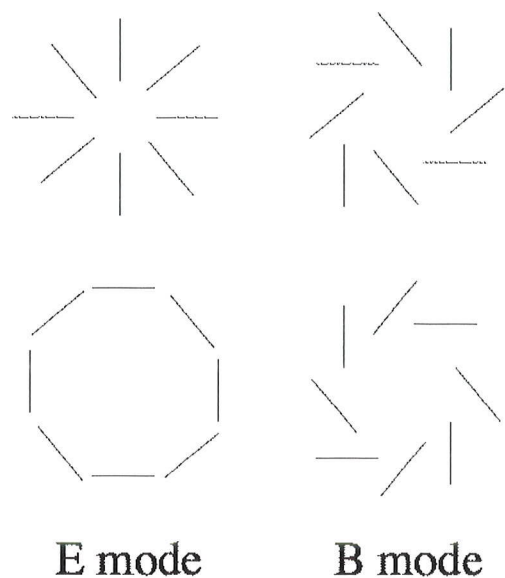


図3 Eモード偏光(左)とBモード偏光(右)の分布のスケッチ。

ードの分布を45度回転させたものは「Bモード」と呼ばれる。図3にEモードとBモードの偏光の分布のスケッチを示す。Bモードの偏光は重力ポテンシャルに起因する運動では生成できないが、重力レンズ効果や、インフレーション起源の原始重力波によって生成できる。

### 3. Bモード：重力レンズ起源の偏光

図2に見られるEモードの偏光は、138億年前に光子が電離物質に最後に散乱された時に生じた偏光である。その後、光子は重力レンズ効果によりわずかに軌跡を曲げつつ我々に届く。重力レンズにより、Eモード偏光の約6% (パ

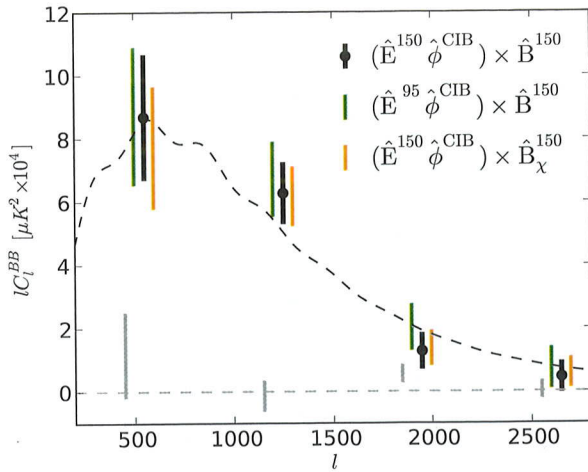


図4 SPTによる、重力レンズ起源のBモード偏光の発見。文献9より抜粋。Bモード偏光のパワースペクトル $\ell C_{\ell}^{BB}$ を $\ell$ の関数として示し、単位は $\mu K^2$ 。 $\ell$ は見込み角度 $\theta$ と $\ell = \pi/\theta$ で関係する。誤差棒付きのデータ点は150 GHzのデータから得られた測定、緑の線は95 GHzのデータから得られた測定を示す。これらの測定は「ウィナーフィルター」と呼ばれるローパスフィルターを用いて得られたもので、フィルターは宇宙の標準理論( $\Lambda$ CDMモデル: 波線)から計算された理論的な $C_{\ell}^{BB}$ に依存する。これらの測定は、理論的な $C_{\ell}^{BB}$ が観測データと一致する場合にはベストな結果を与える。オレンジの線は150 GHzのデータからウィナーフィルターを用いず得られた測定を示す。灰色の線は測定結果の信頼性を試すマルチテストの結果を示す。

ワーでは0.36%)がBモード偏光に転化する。<sup>8)</sup>従って、光子が最後に散乱された時にBモード偏光がゼロであっても、重力レンズ効果によってBモード偏光が生成される。

2013年、SPT<sup>9)</sup>によって重力レンズ起源のBモード偏光が発見された。測定されたBモード偏光のパワースペクトルを図4に示す。図1同様、理論曲線と測定データとの一致は見事である。ただし、この測定はSPTの偏光のデータのみから得られたものではない。SPTチームは、ESAが2009年に打ち上げた、サブミリ波宇宙望遠鏡ハーシェルから得られたサブミリ波銀河の分布のデータを用いて視線方向の物質分布を推定し、式(1)を用いてレンズポテンシャル $\phi$ を計算した。そして、測定されたEモード偏光を、推定された $\phi$ と組み合わせ、期待されるBモード偏光の分布を計算した。この期待されるBモード偏光と、実際に測定されたBモード偏光との相互相関スペクトルが、図4に示されたパワースペクトルである。宇宙マイクロ波背景放射の偏光のみを用いた重力レンズ起源のBモード偏光の測定は、5節で述べるPOLARBEAR(ポーラーベア)実験によって初めて達成された。

#### 4. 原始重力波とBモード偏光

インフレーション<sup>10-14)</sup>は、我々の宇宙が誕生してすぐ起こったとされる宇宙の加速膨張である。実に、 $10^{-36}$ 秒の刹那に宇宙が $10^{26}$ 倍も膨張するような、すさまじい膨張である。この時、量子力学が重要となるような極微の領域の量子揺らぎを考える。量子揺らぎによって、エネルギー密度は極微の領域ごとに異なる。インフレーションがなければ、量子揺らぎは極微の領域にとどまるが、インフレーション

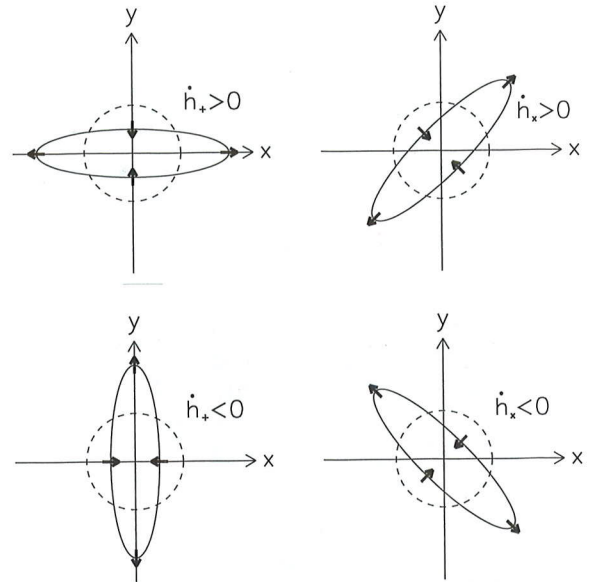


図5  $z$ 方向に進行する重力波によって生じる質点の運動。破線は重力波に影響される前の質点の位置を、実線は重力波が通過した時の質点の位置を示す。左図は $h_+$ による運動、右図は $h_x$ による運動を示す。

ションによる急激な宇宙膨張により、極微の領域が一瞬にして天文学的な大きさの領域にまで広がる。例えば、原子核の大きさを持つ領域が、瞬間に太陽系の大きさとなる。

これは途方もないアイデアであるが、今までのところ、インフレーション理論が与える予言は観測データと無矛盾である。インフレーションを仮説からより確かなものにするには、インフレーション中に生成される「原始重力波」の検出が必要だと考えられている。この重力波は様々な波長を持つが、現在の波長が数十億光年という、途方もないスケールの重力波の存在が予言されている。このような重力波を間接的に検出するには、原始重力波が産み出すBモード偏光<sup>15, 16)</sup>を測定すれば良い。

インフレーション中に生成され、引き伸ばされた量子揺らぎは、アインシュタイン方程式に従って空間を歪める。スカラー型の歪み<sup>17)</sup>を「曲率揺らぎ」、テンソル型の歪み<sup>18)</sup>を「重力波」と呼ぼう。両者とも空間の任意の2点間の距離を変える。曲率揺らぎによる空間の歪みを $\mathcal{R}$ 、重力波による空間の歪みを $h_{ij}$ と書けば、デカルト座標で書いた空間の2点間の距離の2乗は $\exp(2\mathcal{R}) \sum_{ij} \exp(h_{ij}) dx^i dx^j$ で与えられる。ここで、 $\exp(h_{ij}) = \delta_{ij} + h_{ij} + \dots$ で、 $h_{ij}$ は $\exp(h_{ij})$ の行列式が1であるように定義される。従って $h_{ij}$ はトレースがゼロ( $\text{Tr}[h] = 0$ )である。行列式が1なので、 $h_{ij}$ による空間の2点間の距離の変化は面積を変えない。(一方、 $\mathcal{R}$ は面積の変化をあらわす。)  $h_{ij}$ は電磁波で言うところの電場や磁場であり、振動する。重力波は電磁波と同様横波であるから、 $h_{ij}$ の振動方向は重力波の進行方向に直交する。

$z$ 方向に進行する重力波は

$$h_{ij} = \begin{pmatrix} h_+ & h_x & 0 \\ h_x & -h_+ & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad (3)$$

と書ける。  $h_+$  と  $h_\times$  は重力波の持つ二つの直線偏光をあらわす。図5は、  $z$  方向に進行する重力波が円形に並んだ質点をどう動かすかを示す。重要なのは、  $h_+$  と  $h_\times$  によって生じる運動が互いに45度傾いている点である。この性質により重力波はBモード偏光を生成する。

図5に見られるように、  $\dot{h}_+ > 0$  の時、  $y$  方向の空間は縮み、  $x$  方向の空間は伸びる。原点に電子を置くと、この電子は  $y$  方向から青方偏移した温度の高い光を、  $x$  方向から赤方偏移した温度の低い光を受け取る。重力波は、ただ通過するだけで電子の周囲に四重極の温度異方性を与え、偏光を生み出すのである。この光が電子によって散乱され、我々の方向 ( $z$  方向) に向かうとしよう。この光は  $x$  方向に偏光している。同様に、  $\dot{h}_+ < 0$  の時は偏光は  $y$  方向である。  $\dot{h}_\times > 0$  や  $\dot{h}_\times < 0$  の場合は、45度回転した偏光方向が得られる。

天球上の偏光の分布は、EモードとBモードの重ね合わせで完全に記述できる。2節で述べたように、重力ポテンシャルに起因する流体の運動が生み出す偏光はEモードのみで、Bモードはゼロである。重力波はEモードとBモード偏光をほぼ等量生み出す。これは、  $h_+$  (あるいは  $h_\times$ 、あるいは両者の線形結合) がある偏光の分布を生み出せば、  $h_\times$  (あるいは  $h_+$ 、あるいは直交する線形結合) が45度回転した偏光の分布を必ず生み出すからである。Eモード偏光の分布を45度回転させればBモード偏光の分布になるため、重力波はEモードとBモードの両方を生成する。

インフレーション中に生成された重力波の振幅の2乗はパワースペクトル  $P_h$  であらわされる。これは  $\langle h_+(\mathbf{k})h_+(\mathbf{k}') \rangle = \langle h_\times(\mathbf{k})h_\times(\mathbf{k}') \rangle = (2\pi)^3 \delta(\mathbf{k}+\mathbf{k}') P_h(k)$  と定義される ( $\mathbf{k}$  はフーリエ変換の波数ベクトル)。一様等方な宇宙では+と×モードの重力波は相関を持たず、  $\langle h_+(\mathbf{k})h_\times(\mathbf{k}') \rangle = 0$  である。宇宙論業界では、  $P_h$  の大きさをあらわすのに「テンソル・スカラー比」と呼ばれる量  $r$  が用いられる。これは

$$r \equiv \frac{4P_h(k_0)}{P_R(k_0)}, \quad (4)$$

と定義され、  $k_0 = 0.002 \text{ Mpc}^{-1}$  である。

図6に、原始重力波と重力レンズによるBモード偏光のパワースペクトルを示す。重力レンズによる寄与は大きな  $\ell$  (小さな見込み角度) で支配的となるが、小さな  $\ell$  では ( $r$  の値によっては) 重力波による寄与が支配的となる。従って、原始重力波のみに興味があれば、比較的小さなアンテナで大きな見込み角度のBモード偏光を狙えば良い。  $\ell < 10$  にある山は、宇宙の再電離の時期の散乱によって生じる山で、  $\ell > 10$  のパワースペクトルは138億年前の散乱によって生じたものである。  $\ell \approx 80$  にある山は次節で述べるPOLARBEAR等の地上望遠鏡で測定可能であるが、  $\ell < 10$  の山の測定には人工衛星が必要となる。これが、次世代の偏光衛星「LiteBIRD (ライトバード)」の設計を決めている。

## 5. 観測プロジェクトの現状と将来

### 5.1 Bモードハンター

さて、この節では、これまでの説明と少し趣きを変えて、観測装置を開発する側の視点から、宇宙マイクロ波背景放射の偏光観測プロジェクトについて解説していく。特に、日本グループのこれまでの成果と将来へ向けた取り組みを中心に説明する。前節までに述べたとおり、宇宙マイクロ波背景放射の偏光は宇宙論の新しいフロンティアと目されており、大角度相関を用いた原始重力波の発見、小角度相関を用いたニュートリノ質量和の精密測定、という二つが大目標となっている。

なんとといっても、原始重力波を発見し  $r$  を決定できる可能性に研究者は興奮している。ここで  $r$  の測定の重要性を端的にあらわす一つの簡単な数式<sup>19)</sup>を紹介する。

$$r^{1/4} = 1.06 \times (r/0.01)^{1/4} \times 10^{16} \text{ ギガ電子ボルト} \quad (5)$$

$r$  はインフレーションを説明する素粒子物理モデルとしてラグランジアンに新しいスカラー場を導入した場合に、そのスカラー場がインフレーション中に持つポテンシャルの高さである。  $r$  が決まれば、この式よりインフレーションが起こるエネルギースケールについての知見が得られる。

期待されるエネルギースケールが奇しくも素粒子物理の大統一スケール (4つの基本相互作用のうち、重力を除いた3つが統一されると期待されるエネルギースケールで  $10^{16}$  ギガ電子ボルトのオーダーを指す) になっていることも興味深い。<sup>20)</sup> 現在地上に存在する加速器が到達できるエネルギーより一兆倍も高いスケールであるため、既存の物理を超えた新しい物理が背後にあることは間違いない。原始重力波の観測は、宇宙論のみならず、素粒子物理にとっても極めてユニークなプローブなのである。

インフレーションを引き起こすエネルギー場として新しいスカラー場 (インフラトンと呼ばれる) を導入し、空間の加速膨張を起こすというシナリオは、とても本当とは思

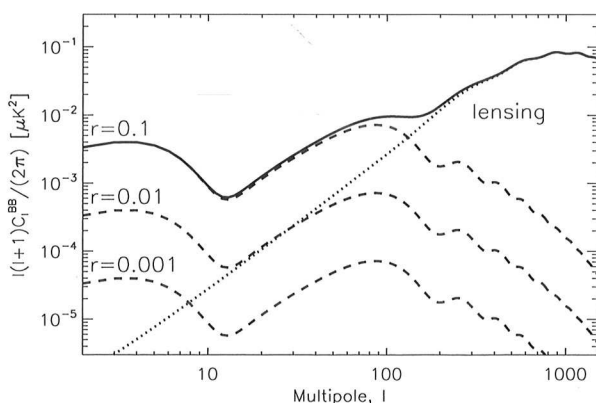


図6 Bモード偏光のパワースペクトルの理論曲線。図は  $\ell(\ell+1)C_\ell^{BB}/(2\pi)$  を  $\ell$  の関数として示し、単位は  $\mu\text{K}^2$ 。破線は原始重力波による寄与を3つのテンソル-スカラー比  $r=0.1, 0.01, 0.001$  に対して示し、点線は重力レンズ効果による寄与を示す。後者は図4の破線と同じ。

えない、と感じる方もあろう。しかし、新しいスカラー場によるインフレーションという考え方は、奇をてらっているのとは正反対であり、人類がこの奇天烈な仮説に追い込まれてきている、という感覚を宇宙論研究者は持っている。20世紀に人類が量子論と相対論という二つの奇天烈な理論に追い込まれて行った感覚と共通するものがある。

間接的にはあるが、インフラトン仮説を援護する実験結果が最近得られた。大きな話題となったヒッグス粒子の発見である。<sup>21)</sup> ヒッグス場とインフラトン場は性質が似ている。ヒッグス場の発見によって、インフラトンのアイデアは現実の対応例を得たのである。

原始重力波とニュートリノ質量は、ともに魅力的テーマである。これらのテーマを達成するのに必要な実験・観測の感度については、以下に掲げる明白な定量的目標がある。

- ・原始重力波については、テンソル・スカラー比  $r$  を 0.002 まで探索し、代表的なインフレーションモデルが予言する範囲を全てカバーする
- ・ニュートリノについては、3種類のニュートリノの質量和をニュートリノ振動の実験結果から得られる下限値(約60ミリ電子ボルト)まで探索する

目標の達成には、WMAP衛星やプランク衛星の温度異方性のデータから得られた現在の  $r$  の制約 ( $r < 0.11$ ) を二桁程度、現在のニュートリノ質量和の制約を一桁程度改良することが要求される。ただし、いきなり上記のゴールに到達できなくても、たとえば  $r$  の感度が一桁よくなれば、いち早く興味深い結果を得られるかもしれない。要は、「これまでと比べて桁違いな精度でBモード偏光を測りたい」という思いに尽きる。

現時点で、これを目指す世界中の野心的な「Bモードハンター」達によって、合計30を超えるプロジェクトが計画、準備されている。それらの一つ一つを見て行くと、Bモードハンター達の個性が立ち現れて興味深いのだが、とても紙面が足りない。ここでは、地上、気球、衛星の三種類があり、それぞれ感度、準備期間、コストに関する得失があることだけ述べておく。原始重力波Bモードに関しては、地上および気球のプロジェクトの感度目標が  $r = 0.01$  であるのに対し、衛星はそれを一桁上回る  $r = 0.001$  になっている。ニュートリノについては、地上で大型の望遠鏡を配備する計画が着々と進んでいる一方、衛星は大きな望遠鏡のコストがかさむため、なかなか現実的な解は見いだされていない。最適解は、おそらく比較的小型の衛星プラス地上の大望遠鏡群という組み合わせと考えられる。

これまでの取り組みの例として、プランク衛星<sup>22)</sup> がどんな観測装置を搭載しているかを見ておく。図7にプランク衛星の概観図と焦点面検出器の配置を示す。プランク衛星の偏光データは2014年中に公表されると期待されている。結果はふたを開けてみないとわからないが、予想される  $r$  の誤差は0.1程度とされており、温度異方性による制限と同程度である。

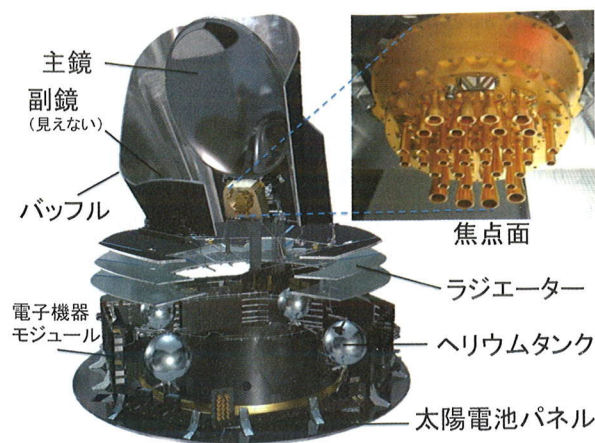


図7 プランク衛星の概観と焦点面検出器の配置。太陽電池パネルのついた底面からバツフルで覆われた上部までの高さが4.2メートルある。

では、プランク衛星の装置を超えた、いかなる改善が今後の鍵となるのか？ 答えはシンプルで、「もっと検出器を」である。より多くの検出器を搭載できれば、単位時間あたりに検出する宇宙マイクロ波背景放射の光子数が増え、統計誤差を減らすことができる。急いで言い添えると、目標達成には、その他の障害(系統誤差、前景放射、<sup>\*2</sup> 重力レンズの影響の三点)を抑えることも大事であることは論を待たない。プランク衛星の偏光計は27個なので、桁違いに増やすということは、つまり1,000個を超えるような検出器、ということになる。

近年になって超伝導検出器アレイの開発が大きな進展を遂げており、1,000素子を超えるアレイが実用化されている。Bモードハンターにとって、これがまさに重要なポイントである。今こそ、1,000個を超える検出器を開発し、宇宙マイクロ波背景放射の偏光を測り、インフレーションに決着をつけ、ニュートリノについても決定的な知見を得る時なのである。この点を念頭に置いて、次に日本グループの取り組みを説明する。

## 5.2 日本グループの取り組み

日本グループの取り組みは、高エネルギー加速器研究機構(KEK)に宇宙マイクロ波背景放射観測グループが誕生したのを契機として約6年前に始まった新しいものであるが、急速に世界の最先端に追いつきつつあり、トップレベルの国際共同研究を展開している。グループが最初に手がけたのはシカゴ大学・カリフォルニア工科大学を中心とした国際共同実験 QUIET (Q/U Imaging Experiment) であった。高電子移動度トランジスタ (High Electric Mobility Transistor; HEMT アンプ) と導波管などで構成される受信機をチップ化して焦点面に敷き詰めるというユニークな構成により、EモードとBモード偏光の観測結果を得た。<sup>23, 24)</sup>  $r$  の制限は温度異方性からの制限を凌駕することはできなかった

\*2 背景放射以外のマイクロ波を総称して前景放射と呼ぶ。宇宙磁場が荷電粒子の運動方向を曲げる事で放出されるシンクロトロン放射や星間塵の熱放射などが主な成分である。



図8 チリ・アタカマに設置されたPOLARBEARプロジェクトの望遠鏡。設計者の名前をとってHuan Tran Telescope (HTT)と呼ばれている。主鏡の直径は3.5メートル。

たが、特筆すべきは系統誤差に関するこれまでにない精査を行ったことである。その結果、 $r$ の誤差に換算すると系統誤差が $l \sim 100$ において0.01を下回ることを示した。宇宙マイクロ波背景放射観測の専門家の中で高い評価を得たこの結果は、素粒子実験で培ってきた技術を移転したものであり、KEKの田島浩が中心的な役割を果たした。また、装置の総合試験、運用、データ解析全般について、シカゴ大の日下暁人が中心となって活躍した。<sup>\*3</sup>

日本グループ(KEKの宇宙マイクロ波背景放射グループおよびカブリ数物連携宇宙研究機構(Kavli IPMU))が現在最も力を入れているのがカリフォルニア大学バークレー校などと推進する国際共同プロジェクトPOLARBEARである。図8にPOLARBEAR望遠鏡の概要を示す。3.5メートルの主鏡と一枚の副鏡を持つオフセットグレゴリアン型反射望遠鏡と、冷却系を持つ受信機システムで構成されている。受信機システムには高密度ポリエチレンでできたミリ波レンズが3段搭載されており、像の歪みを最小に抑える設計になっている。パルスチューブ冷凍機が50 Kおよび4 Kの温度ステージを与え、ソーption冷凍機により焦点面を0.25 Kまで冷却する。

POLARBEARの受信機システムの最大の特徴は、カリフォルニア大学バークレー校で開発されたアンテナ結合型の超伝導転移端センサー(TES)を用いた焦点面検出器アレイである。TESの動作原理は簡単である。超伝導体を適切なバイアス電圧により転移温度付近に保っておく。そこに電磁波が入射するとわずかなエネルギーを与えるだけで抵抗値が大きく変化する。つまり超高感度の電磁波感応型「可変抵抗」となるので、適切な読み出し装置(しばしばSQUIDセンサー<sup>\*4</sup>が使われる)を用いれば検出器となる。

<sup>\*3</sup> QUIETグループは受信機の増強計画を提案したが、実験代表であったシカゴ大のブルース・ウィンスタイン教授が亡くなられたこともあり、残念ながら実現しなかった。

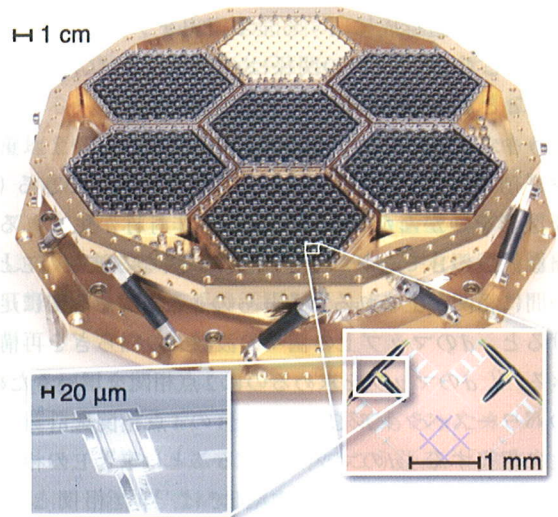


図9 POLARBEARのTESボロメーターアレイ。1,274個のTESが搭載されている(写真提供:カリフォルニア大学バークレー校)。

POLARBEARの場合は(図9)、フォトリソグラフィにより形成されたスロットアンテナで入射した宇宙マイクロ波背景放射の信号を受け、マイクロストリップラインを通してその信号をTESボロメーターへ送る。ストリップラインにはフィルターがあり、地上の観測に適した150 GHz帯を受信する設計となっている。TESはアルミニウムとチタンのバイレイヤーで構成され、ベース温度0.25 Kと適合するよう転移温度は0.58 K程度に調整されている。一つのピクセルは2個のアンテナとボロメーターの組み合わせからなる。直交するアンテナが対になっており、それぞれが直交する方向の偏光に対して感度を持つ。各ピクセルの上には直径6.5ミリのシリコン小レンズが貼りつけられており、アンテナのビームを絞って効率を高めている。1枚のウェーハに91個のピクセルがある。焦点面全体は7枚のウェーハで構成されるので合計637ピクセルのミリ波カメラとなっている。TESの個数はその2倍なので、1,274個である。

POLARBEARは2012年初頭に観測を開始し、現在も観測を継続中である。2013年12月24日に、初期観測結果を発表し、論文を2編投稿した。そのうちのひとつ<sup>25)</sup>は、3節で述べたSPTの結果と同様にハーシェル望遠鏡のデータと相関をとって重力レンズ起源のBモード偏光を確認したものである。もう一つ<sup>26)</sup>は、更に歩を進め、宇宙マイクロ波背景放射の偏光データのみを用いて世界で初めて重力レンズ起源Bモードの証拠を得たものである。1節で述べたとおり、曲がり角ベクトル $\mathbf{d}$ は重力レンズの情報を持つ。 $\mathbf{d}$ の大きさ $d$ に関するマップをつくり、そのパワースペクトル $C_L^{dd}$ を求めると、それは宇宙の物質分布のよいトレー

<sup>\*4</sup> 超伝導量子干渉計を用いたセンサーで、微弱な磁場の測定に利用される。Superconducting QUantum Interference Deviceを縮めてSQUIDと呼ばれる。

サーになる。全ての赤方偏移での曲がりを積分したものであるため、構造形成に関する全宇宙史をプローブできる。1節で示した  $C_L^{\phi\phi}$  と  $C_L^{dd}$  の関係は  $C_L^{dd} = L(L+1)C_L^{\phi\phi}$  である。これは  $\mathbf{d}$  と  $\phi$  の関係が  $\mathbf{d} = \nabla\phi$  である事による。

どうやって  $d$  のマップおよび  $C_L^{dd}$  を測定するか？ 重力レンズ効果によって、EモードからBモードができる(対称な図形をゆがんだレンズで見ると非対称が生まれる)。色々な波数のBモードができるので、異なる波数のEとBとの間に相関が生まれる。それらの2点相関を適切に足し上げると、 $d$  のマップ上の個々の波数  $L$  の揺らぎを再構成できる。<sup>27)</sup>  $d$  のマップを求めるのに2点相関を用いるため、そのパワースペクトル  $C_L^{dd}$  はEとBの4点相関を計算することに相当する。 $d$  のマップを作ることはEとEの相関からも可能であり、POLARBEARでは、4点相関として  $\langle EBEB \rangle$ ,  $\langle EEBB \rangle$  の二通りを用いた解析を行った。その結果、4.2シグマの有意度(系統誤差の不定性も含む)で、重力レンズの効果がないモデルを棄却した。

図10にその結果を示す。天空の限られた領域を観測する地上実験ではあるが、偏光の測定精度はプランク衛星の約10倍を達成しており、大規模超伝導検出器アレイの威

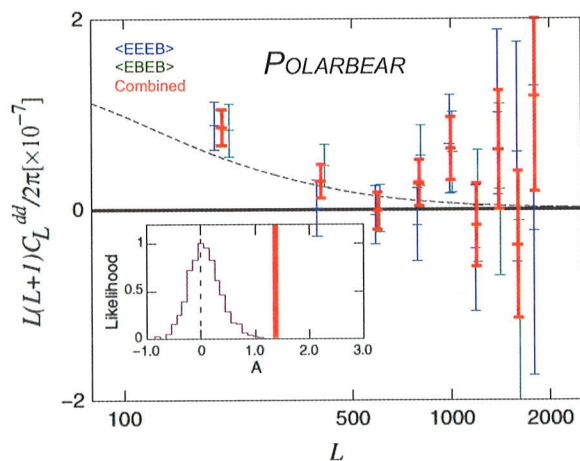


図10 POLARBEARの初期観測により得られた、曲がり角(1節を参照)の大きさのパワースペクトル  $L(L+1)C_L^{dd}/(2\pi)$  を  $L$  の関数として示す。これは図1に示す  $[L(L+1)]^2 C_L^{\phi\phi}/(2\pi)$  と同じ量である。 $\langle EEBB \rangle$  (青),  $\langle EBEB \rangle$  (緑), および両者を統合した結果(赤)が示されている。実線は宇宙の標準理論の予想を示す。挿入図のヒストグラムは、重力レンズ効果がないという条件で500回の実験シミュレーションを実施し、得られた信号の大きさを示す。重力レンズ効果がないと、実際の観測で得られた信号の大きさ(赤い線)を再現することは極めて難しいことがわかる。

力を如実に示している。データ解析でもKEKの茅根裕司、Kavli IPMUの西野玄記など、若手の活躍が目立った。

POLARBEARは今後も観測を続け、いよいよ本丸の原始重力波探索を目指す。受信機システムをアップグレードし、2015年に95, 150 GHzの同時観測を開始する予定である。TESボロメーターの総数は7,588個に達し、その時点で史上最大のTESボロメーターアレイとなる予定である。多波長観測は銀河や星間塵に由来するマイクロ波を宇宙背景放射からうまく分離(前景放射分離)する上で決定的に重要である。POLARBEAR-2と名付けられたこの新しい受信機システム(図11)はKEKが主導で開発を進めており、都丸隆行、長谷川雅也、松村知岳などの若手スタッフとポスドク、大学院生が中心となって活躍している。全体計画としては、HTT望遠鏡(図8)を合計三台用意し、KEKが開発するPOLARBEAR-2受信機システムと同型のシステムを合計三台搭載する体制を整えることを目標としている。この全体計画をサイモンズアレイプロジェクトと呼んでいる。これがうまく行けば、ニュートリノ質量和の観測精度は(銀河サーベイのデータと組み合わせる事により)19ミリ電子ボルトに達すると予想されており、質量階層構造の如何に関わらず有限質量の証拠が得られると期待される。系統誤差や宇宙進化の非線形性など、解決すべき課題に挑戦し、最終的には上記の数字を達成したいと思っている。原始重力波については、 $r=0.01$  までの探索を確実にし、大気、前景放射、重力レンズ効果と戦いながら地上でできる限界まで行きたいと考えている。

$r=0.001$  に到達するには、大気の影響を受けず全天をカバーする究極の測定が必要となる。したがって、POLARBEAR-2とサイモンズアレイの完成後には科学衛星が必須と考えられている。欧州、米国、そして日本それぞれで計画が検討されている。日本の研究者が中心となって検討しているLiteBIRD衛星計画<sup>28)</sup>では、「統計誤差、系統誤差、前景放射に起因する誤差、重力レンズに起因する誤差の全てをあわせて  $r$  の誤差を0.001以下にすること」を主たるミッション要求としている。そのために60センチ程度の小型反射望遠鏡、超低温冷却系(0.1 K)、多色超伝導検出器アレイを搭載した衛星を開発し、宇宙マイクロ波背景放射の偏光を全天にわたり精密測定する(図12)。銀河系からの前景放射を分離するため50から320 GHzの周波数帯

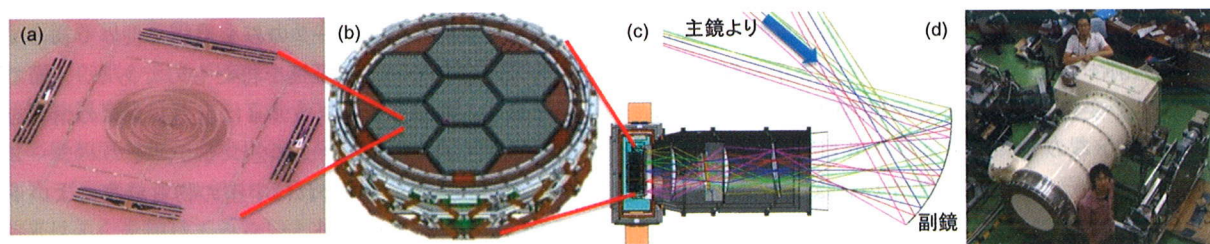


図11 POLARBEAR-2受信機システムの概要。(a) 偏光検出器(2バンド4TES素子)、(b) 焦点面検出器アレイの全体図、(c) POLARBEAR-2受信機の断面図、および(d) 試験中のPOLARBEAR-2受信機を示す。



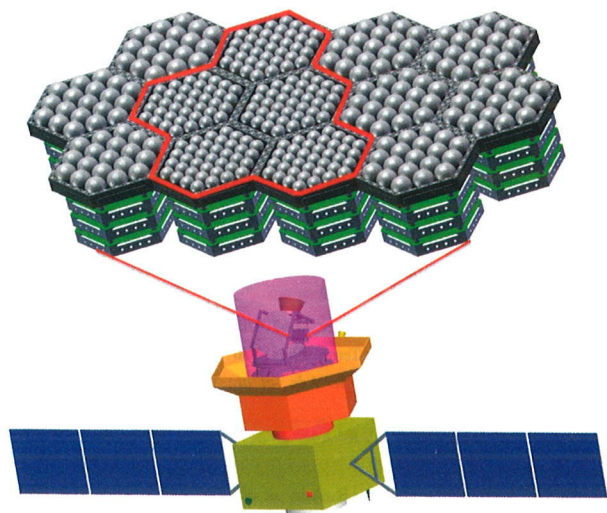


図12 LiteBIRD衛星と超伝導検出器アレイの概要。検出器アレイの図で赤線で囲まれた部分は高い周波数(中心周波数140, 195, 280 GHz)を、それ以外の部分は低い周波数(60, 78, 100 GHz)を観測する。

域をカバーし、3年間の観測を行う。宇宙航空研究開発機構(JAXA)のロケットによる打ち上げを前提としている。軌道はWMAPやプランク衛星が観測を行ったラグランジュ点L2,<sup>\*5</sup> および高度600キロ程度の太陽同期軌道<sup>\*6</sup>を検討している。どちらのケースでも歳差運動するコマのような運動をするスキャンにより、まんべんなく全天を観測する方式を考えている。

地上における観測実績を有し、要素技術開発を推進するKEK, 宇宙論研究の中心としてのKavli IPMU, 衛星開発・試験・打ち上げの中心としてのJAXA, の三機関をはじめ、国立天文台, カリフォルニア大学バークレー校, マギル大学, マックスプランク宇宙物理学研究所など, 国内外の研究者のネットワークを構築して推進する事を目指している。X線天文学や赤外線天文学の研究者などを含め, 現在約70名の学際的かつ国際的なチームで検討を進めている。

実現に向けて, POLARBEARのアップグレード等の地上観測プロジェクトでLiteBIRDと相補的な科学成果を出しつつ技術実証を行うのも本計画の大きな特長である。焦点面検出器アレイの構成例も図12に示した。図はPOLARBEAR-2と同様のデザインを持つ(バークレータイプの)TESボロメーターを使用したケースである。約2,000個のTESボロメーターで, POLARBEAR-2やサイモンズアレイと比べて桁違いの感度が出せる。宇宙空間という「極限の実験室」の効果はやはり大きいと言える。更に, TESボロメーターの限界を超え, より多くの信号を多重化する新しい検出器として, MKID(Microwave Kinetic Inductance Detector)の開発も手掛けている。LiteBIRD用MKID開発は国立天文台, 理研テラヘルツイメージング研究チーム, 岡

\*5 ラグランジュ点は太陽と地球が及ぼす重力の和と人工衛星の遠心力がつりあう地点で, 5つ存在する。L2は地球から150万キロ離れた点で, そこから見ると太陽と地球は常に同じ方向にある。

\*6 地球を周回する軌道のうち, 人工衛星の軌道面と太陽の入射光とがなす角度が一定となる軌道。

山大, KEKの共同研究が進んでいる。

2014年3月に, LiteBIRD計画は学術会議が策定した大型研究計画に関する「マスタープラン2014」の中で最も重要とされる「重点大型研究計画」の一つに選ばれた。この1, 2年で地上での実証を進め, かつデザインを確かなものに高め, 2020年代初頭の打ち上げを実現させたいとワーキンググループでは考えている。LiteBIRD衛星のデザインに関しても, KEKの松村知岳(現JAXA), 永田竜, 岡山の石野宏和など, 若手の活躍が光っている。

## 6. おわりに

米国の天文学者で, 売れっ子作家でもあったカール・セーガンは, 著書『コスモス』の中でこう語る。「途方もない主張には, 途方もない証拠が必要である。」インフレーションのような途方もない主張を証明するのに必要な証拠とは, 原始重力波に起因するBモード偏光の発見である。

この目的のため, 世界中でBモード偏光の観測が行われている。KEKを中心とする日本チームは, 米国のチームと共同でQUIET実験を成功させ, POLARBEAR実験を遂行している。また, 近い将来に次世代の偏光衛星LiteBIRDを打ち上げ,  $r=0.001$ に到達すべく日々準備を進めている。

もう一つの重要な課題は, 重力レンズ効果によるBモード偏光を用いたニュートリノ質量和の測定である。ニュートリノ振動の実験結果より, 3世代のニュートリノの質量和は60ミリ電子ボルトより大きい事がわかっている。KEKでは, POLARBEAR-2, およびその後継であるサイモンズアレイによってこの値に到達すべく, 日々開発を行っている。

## 補遺

この原稿を書き終えた後に, 大きなニュースが飛び込んできた。米国の研究者を中心としたBICEP2(バイセップ・ツーと読む)グループが, 2014年3月17日にセミナーと記者会見を開催し, 大きな原始重力波の信号を発見したと発表したのである。日本でも新聞報道などで大きく取り上げられたこのニュースは, 発表の数日前からハーバード・スミソニアン天体物理学センターがウェブページで“March 17th Press Conference on Major Discovery at Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics”と, 異例とも言える予告を行った。報告された値は,  $r=0.2^{+0.07}_{-0.05}$ (前景放射を考慮しない場合)であり,  $r=0$ を7シグマで棄却する。発表と同時にプレプリントも掲載され,<sup>29)</sup>その後, 結果の解釈に関する論文が多数投稿された。 $r$ の値がこのように大きいことが確定すれば, 信号の大きさを利用することによって, その後の精密観測(日本が主導する計画ならPOLARBEAR-2, LiteBIRD)でインフレーションを支配するラグランジアンを決定できる可能性すら出てきたのである。宇宙論と素粒子物理における影響は計り知れないほど大きい。

BICEP2は, SPTと同様, 南極点に設置された望遠鏡だが, SPTとは違って屈折式の小さな望遠鏡で, 角度分解能は

30分角程度である。すなわち、重力レンズ効果の観測は捨てて、原始重力波観測一本に絞った設計となっている。また、今回の結果は150 GHzの観測のみに基づいており、前景放射をデータから直接差し引くことはできていなかった。そこでBICEP2では前景放射の様々なモデルを得られた信号と比較することによって、前景放射では説明がつかないと主張した。

しかし、2014年5月5日にプランク衛星のチームが353 GHz(宇宙塵による前景放射に感度が高い周波数)の観測結果を発表し、<sup>30)</sup> 前景放射の偏光強度がBICEP2の論文で仮定された前景放射モデルより大きい可能性を示した。そのため、BICEP2の観測結果を前景放射のみで解釈する可能性が有意には排除できないという見方が強まった。

そして、2014年6月19日に、BICEP2の論文がフィジカルレビューレーターズに25ページ(!)の論文として掲載された。<sup>31)</sup> 要旨を読むと、3月のプレプリントと同じく前景放射モデルに基づいた主張を述べた文章の次に、以下の重要な一行が付け加えられている。“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.” すなわち、3月の発表時と比較すると、かなりトーンダウンしたことになる。

大発見がかかった研究であり、3月の時点でも他実験の検証が重要と思われていたが、プランクの結果を契機として、複数の周波数による観測で前景放射をしっかりと差し引く重要性がクローズアップされた形となった。いずれにせよ、極めてホットな状況であり、今後もプランク、POLARBEAR、SPT、その他のプロジェクトから、新しい結果が次々に出てくるのが期待される。進展については、また稿をあらためて説明できればと考えている。

#### 参考文献

- 1) D. Das, *et al.*: Phys. Rev. Lett. **107** (2011) 021301.
- 2) A. van Engelen, *et al.*: Astrophys. J. **756** (2012) 142.
- 3) Planck Collaboration, P. A. R. Ade, *et al.*: Astron. Astrophys., submitted, arXiv: 1303.5077.
- 4) 井上邦雄, 二間瀬敏史: 日本物理学会誌 **64** (2009) 20.
- 5) 梶田隆章: 日本物理学会誌 **58** (2003) 326.
- 6) 中畑雅行, 鈴木洋一郎: 日本物理学会誌 **58** (2003) 337.
- 7) E. Komatsu, *et al.*: Astrophys. J. Suppl. **192** (2011) 18.
- 8) M. Zaldarriaga and U. Seljak: Phys. Rev. D **58** (1998) 023003.
- 9) D. Hanson, *et al.*: Phys. Rev. Lett. **111** (2013) 141301.
- 10) A. A. Starobinsky: Phys. Lett. B **91** (1980) 99.
- 11) K. Sato: Mon. Not. R. Astron. Soc. **195** (1981) 467.
- 12) A. Guth: Phys. Rev. D **23** (1981) 347.
- 13) A. Linde: Phys. Lett. B **108** (1982) 389.
- 14) A. Albrecht and P. J. Steinhardt: Phys. Rev. Lett. **48** (1982) 1220.
- 15) U. Seljak and M. Zaldarriaga: Phys. Rev. Lett. **78** (1997) 2054.
- 16) M. Kamionkowski, A. Kosowsky and A. Stebbins: Phys. Rev. Lett. **78** (1997) 2058.
- 17) V. F. Mukhanov and G. Chibisov: JETP Lett. **33** (1981) 532.
- 18) A. A. Starobinsky: JETP Lett. **30** (1979) 682.
- 19) D. Baumann: *TASI Lectures on Inflation*, arXiv: 0907.5424.

- 20) S. Weinberg: *Cosmology* (Oxford Univ. Press, 2008); (邦訳)小松英一郎: 『ワインバーグの宇宙論』上・下巻(日本評論社, 2013).
- 21) 田中純一: 日本物理学会誌 **69** (2014) 83.
- 22) Planck Collaboration, P. A. R. Ade, *et al.*: Astron. Astrophys. **536** (2011) 16464.
- 23) QUIET Collaboration, D. Araujo, *et al.*: Astrophys. J. **760** (2012) 145.
- 24) QUIET Collaboration, C. Bischoff, *et al.*: Astrophys. J. **741** (2011) 111.
- 25) POLARBEAR Collaboration, P. A. R. Ade, *et al.*: Phys. Rev. Lett. **112** (2014) 131302.
- 26) POLARBEAR Collaboration, P. A. R. Ade, *et al.*: Phys. Rev. Lett. **113** (2014) 021301.
- 27) T. Okamoto and W. Hu: Phys. Rev. D **67** (2003) 083002.
- 28) T. Matsumura, *et al.*: J. Low Temp. Phys. **176** (2014) 733.
- 29) BICEP2 Collaboration, P. A. R. Ade, *et al.*: Phys. Rev. Lett., submitted, arXiv: 1403.3985.
- 30) Planck Collaboration, P. A. R. Ade, *et al.*: Astron. Astrophys., submitted, arXiv: 1405.0871.
- 31) BICEP2 Collaboration, P. A. R. Ade, *et al.*: Phys. Rev. Lett. **112** (2014) 241101.

#### 著者紹介



小松英一郎氏: 専門は宇宙論。宇宙論に少しでも該当するあらゆる現象に興味があり、自分の理論予言を自分の手で検証するのが生き甲斐。宇宙マイクロ波背景放射は学生時代からのライフワーク。2001年の打ち上げ後よりWMAPチームのメンバー。



羽澄昌史氏: 素粒子と時空の根本法則をもとめて、実験・観測のアイデアを出し、プロジェクトを立ち上げ実行し、科学論文を書くことが仕事。KEKのBファクトリー実験を含むいくつかの素粒子実験を経て、2007年より実験宇宙論に転じ、宇宙マイクロ波背景放射の偏光観測実験によるインフレーション宇宙の検証を目指している。

(2014年7月5日原稿受付)

#### Polarization of the Cosmic Microwave Background: Current Status and Future Prospects

Eiichiro Komatsu and Masashi Hazumi

abstract: The cosmic microwave background is polarized, and the pattern formed by polarization directions in the sky can be decomposed into the so-called “E-mode” and “B-mode” patterns. Motion of plasmas falling into gravitational potential wells at the photon decoupling epoch generates E-mode polarization, whereas it cannot generate B-modes. There are two sources of B-mode polarization within the context of the standard cosmological model: one is the gravitational lensing effect converting E-modes to B-modes; and the other is the primordial gravitational waves generated during cosmic inflation. The E-mode polarization has been measured repeatedly over the past years, and we have witnessed a revolutionary growth in the quality and quantity of the B-mode measurements from the summer 2013 to the spring 2014. We review the current status of the polarization measurements and discuss future prospects.