

WMAP, 3年目の成果: ここまでわかった宇宙論

小松英一郎

〈Department of Astronomy, The University of Texas at Austin, 1 University Station, C1400, Austin, TX 78712, U.S.A.〉

e-mail: komatsu@astro.as.utexas.edu

ウィルキンソンマイクロ波異方性探査衛星 (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe) — 通称 WMAP — は、ビッグバンの残光「宇宙マイクロ波背景放射」を史上最高の精度で観測する天文衛星だ。2001年6月30日の打ち上げ、2003年2月11日の初年度の観測成果発表に続き、去る2006年3月16日、3年間のデータから得られた成果を発表した。今回の発表のハイライトは、宇宙マイクロ波背景放射の微小な偏光の直接測定である。そこから何が得られるのか、またこれから何が期待されるのか、本稿で簡単に紹介する。

1. CMB, 2度目のノーベル物理学賞

宇宙マイクロ波背景放射 (Cosmic Microwave Background; CMB) は宇宙を埋め尽くす光の海、ビッグバンの残光、我々が目にできる宇宙最古の光だ。そのスペクトルはほぼ完全な黒体放射で、全天の平均温度は2.725 K、ピーク波長は1ミリ程度だ。^{*1}

月のない夜、漆黒の空。満天の星々。人間の目が感知できる光の波長帯は0.4から0.8マイクロメートル程度だ。幸運なことにこの波長帯は星々が輝く波長帯とほぼ同じであり、美しい夜空の源である。

果たして、肉眼で目にできない、他の波長帯で夜空を見ると、どう見えるのだろうか？

例えば、「超高性能超低雑音電波メガネ」なんてものがあるとしよう。それを波長1ミリメートルに合わせて装着し、夜空を見上げたらどう見えるだろうか？

夜空は一面、一様な光で覆い尽くされ、輝いて見えるだろう。これがCMBだ。ベル研究所のペンジアス (A. A. Penzias) とウィルソン (R. W. Wilson) が1965年に発見して以来、CMBは宇宙論業界の中心で重要な役割を果たし続けてきた。

昨年、再びCMBがノーベル物理学賞を受賞し話題となった。これで、1978年にペンジアスとウィルソンに与えられたものに加え、CMBは宇宙論業界で唯一、しかも2度に亘り、ノーベル賞を受賞したこととなる。

賞を与えられたのは、NASAゴダード宇宙飛行センターのマーザー (J. C. Mather)、およびカリフォルニア大学バークリー校のスムート (G. F. Smoot) だ。両氏はCMB観測衛星「COBE」の開発、打ち上げ、データ解析に深く関わり、特にCMBがほぼ完璧な黒体放射であることの証明、¹⁾ およびCMBの温度分布におけるわずかなムラ (揺らぎ) の発見²⁾ に対して賞を贈られた。

マーザーはCOBEミッション全体の統括責任者、また黒体放射を証明した検出器FIRASの主任研究者であり、ス

ムートは温度揺らぎを発見した検出器DMRの主任研究者であったから、両氏がCOBEチーム全体を代表して受賞するのは当然であった。

実際、以前からCOBEチームが受賞すべきである、という話はされていたし、1992年の温度揺らぎの発見を受けたホーキング (S. W. Hawking) のコメント「科学における空前絶後の大発見、控えめにみても世紀的な大発見である」^{*2} からも、COBEが宇宙論業界に与えたインパクトの大きさが伺える。

それから14年の歳月が流れた。どうしてこのタイミングで、昨年の受賞だったのだろうか？

ヒントは、ノーベル委員会の記者発表に隠されているのかもしれない。少し長いが、該当部分をここに引用する。^{*3}

“It was not long before it was followed up, for instance by the WMAP satellite, which yielded even clearer images of the background radiation.”

ノーベル委員会は、COBE衛星の後継機に相当するWMAP衛星によってCOBEの結果が追確認されるのを待っていたのではないだろうか？

2003年のWMAP初年度の観測結果発表によってCOBEの観測がより高精度で確認され、それによってノーベル賞授与へのカウントダウンが始まった、とみるのは穿ち過ぎだろうか。

なにはともあれ、COBEが漸くノーベル賞を受賞したことは、同じ業界に身を置くものとして大変エキサイティングであり、WMAPの結果がそれに一役買ったと思えるのであれば、さらに喜ばしいのである。

ただ、個人的には、WMAPの主任研究者であり、COBE/DMRの副主任であったベネット (C. L. Bennett) が受賞できなかったのは痛恨の極みであった。単に両方のミッションで重要な役割を果たした、という以上に彼の存在が果たした役割は大きい。^{*4}

2. WMAPのこれまで

Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) が2001

^{*1} ウィーンの変位則より、ピーク波長は $\lambda = 2.898 \text{ mm}/T$ で与えられる (T の単位は K)。ただし、ピーク振動数は単に $\nu = c/\lambda$ で与えられない。これは、黒体放射のスペクトルが単位波長、あるいは単位振動数あたりの輝度で定義されるためであり、 $\nu B_\nu = \lambda B_\lambda$ であるから $B_\nu = (\lambda^2/c) B_\lambda$ 。余分に λ がかかっている分だけ、ピーク振動数に対応する波長は1ミリよりも長波長側にずれ、1.9ミリとなる。(振動数で言えば160 GHz)

^{*2} “The scientific discovery of the century, if not all time.”

^{*3} http://nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2006/press.html

^{*4} COBE, WMAPの舞台裏とも言うべきこれらの話は、「ビッグバン宇宙からのこだま」³⁾ に詳しく述べられているので、興味のある方にはこの本を強くお勧めします。

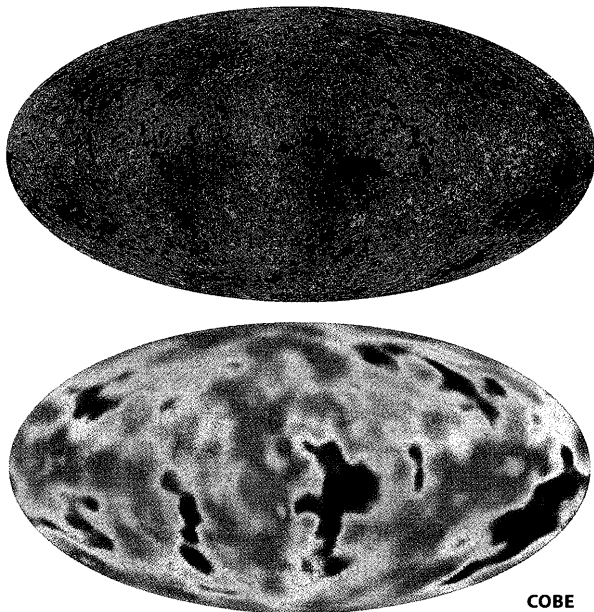


図1 (上図) WMAP 3年間のデータから得た高角度分解能の温度揺らぎの全天写真.⁹⁾ (下図) COBE 4年間のデータから得た温度揺らぎの全天写真.⁹⁾

年6月30日に打ち上げられてから、6年が経過しようとしている。衛星は順調に動作し、データの質も申し分ない。

やることは山ほどあるが、3年目の解析を終え、昨年3月の結果発表と論文の投稿、そしてすべての論文⁴⁻⁷⁾が受理された今では、以前のように生命の危機を感じるような多忙さ⁸⁾は薄れつつある。

すべてが順調にいけば、今年中に5年目の観測結果を発表できる運びだ。WMAPは8年間の観測が予定されており、2009年が最終年となる。

前述のように、初年度のデータおよび解析結果を発表したのは2003年2月11日。WMAPの高い角度分解能を生かし、6,000画素しか持たなかったCOBEを遥かに凌ぐ300万画素のヴィヴィッドなCMBの温度揺らぎの全天写真を公表した。

COBEは角度スケールにして7度角以上に存在する構造を検出し、揺らぎの大きさは平均温度のわずか十万分の一、約30マイクロKであった。WMAPの分解能は0.2度。CMBの温度揺らぎが最大となる、約1度角スケールに存在する74マイクロKの構造を詳細に描き出した(図1)。

2.1 機械工学科、音響学セミナーにて

先日、テキサス大学工学部機械工学科の、音響学のセミナーに招かれた。

天文の人を呼ぶことはなかなかないだろうし、こちらでも機械工学科でセミナーをするのは初めてなので、お互い大変勉強になった良い時間だった。

CMBとWMAPの話をするにあたり、図1を見せて「さて、音響学のプロであるみなさんが、こういうデータを与えられたときにまず行うべきことは？」と質問した。

即座に「スペクトル解析」という模範解答が返ってきたので、「実は、この写真にはみなさんの大好きな音波が潜

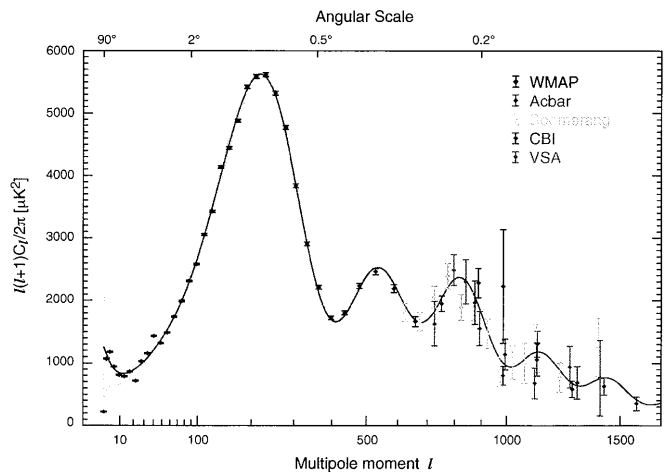


図2 WMAP 3年間のデータから得た温度揺らぎのパワースペクトル、 $l(l+1)C_l/2\pi$ (単位は μK^2)、および地上望遠鏡(ACBAR)、気球実験(Boomerang)、地上干渉計(CBI, VSA)から得られたパワースペクトル。⁹⁾ 誤差棒付きの点が測定点で、誤差は検出器のノイズによる。本来はすべての l に対して測定点があるが、見やすさのためにある l の区間ごとに区切って平均化してある。実線はベストフィットの宇宙論パラメータから予想される理論曲線。影で示しているのは、全天データから得られたパワースペクトルの持つ、コスミックバリエーションと呼ばれる統計的な不定性。例えば $l=2$ では全天から $m=-2, -1, 0, 1, 2$ と5つしかサンプルが取れないことによる。 l が大きくなるほど、不定性は $\sqrt{2l+1}$ に反比例して小さくなる。さらにコスミックバリエーションはパワースペクトルそのものにも依存し、トータルの不定性は $\sqrt{2C_l/(2l+1)}$ で与えられる。コスミックバリエーションは理論曲線を中心に68%の信頼領域を示している。図の見やすさのため、横軸は l に対して単純な線形でも対数でもなく、それらの組み合わせとしている。

ています。」と続けた。

ざわめき。

この写真をスペクトル解析した結果得られた、パワースペクトルのスライド(図2)を見せた。⁹⁾

どよめき。

縦軸は揺らぎの大きさで、単位が μK^2 なのはパワースペクトルが温度を2乗した量であるためだ。

横軸は球面調和展開の「角運動量」に相当する l で、今の場合は角度にして $\theta=180^\circ/l$ に対応している。小さい l ほど大きな見込み角に対応する揺らぎ、大きい l ほど小さな見込み角に対応する揺らぎのモードを表している。⁶⁾

図2より明らかなように、観測されたパワースペクトルは見事な波形をしている。 $l=220$ 、あるいは角度にして約1度角のところで揺らぎが最大値 $5,500\mu\text{K}^2$ を取っており、その平方根は74Kである。そして、小さな角度にいくに従ってさらなる振動が見られる。

⁹⁾ 図1は天球を投影した写真であるから、スペクトル解析はフーリエ変換やラプラス変換ではなく、球面調和関数を用いて行う。天球上の方向余弦 \hat{n}_i に対応する各ピクセル i の温度揺らぎ $\Delta T(\hat{n}_i)$ を、 $\Delta T(\hat{n}_i) = \sum_{lm} a_{lm} Y_{lm}(\hat{n}_i)$ のように展開する。パワースペクトル C_l は a_{lm} の2乗平均。

⁶⁾ 「磁気量子数」 m は各 l ごとに平均化してある。各 l に対して $2l+1$ 個の独立な m のモードが取れるため、統計的な不定性は l が増えるに従って $1/\sqrt{2l+1}$ のように減少する。つまり、大きな見込み角の揺らぎほど不定性が大きく、小さな見込み角の揺らぎほど不定性が小さい。この不定性は、図中の灰色の帯で示されている。一方、検出器のノイズおよび有限な角度分解能のため、小さな見込み角の揺らぎほどノイズが乗りやすい。この不定性は、図中の誤差棒で示されている。

これこそ、CMBの温度揺らぎが音波として宇宙を伝播していた証拠だ。物質を伝播する音波の波形を用いて金属とセラミックを選り分けるように、宇宙を伝播する温度揺らぎの波形を用いて様々な宇宙モデルを選別できる。例えば、宇宙に存在するヘリウムの量やダークマターの量を変えれば、宇宙を伝播するCMBの波形もそれに応じて変化するので。

ここで、聴衆から核心に触れる質問が出た。「音波というのであれば、どうしてこんなコヒーレントなスペクトルが得られるのか？異なる時刻の波が打ち消し合うのではないか？」

様々な時刻/波長の入り乱れた音波を扱う専門家の視点から言えば、このようなパワースペクトルは奇異に映るのだろう。事実、これはCMBの起源に迫る大変に重要な質問である。結論から言えば、CMBはある特定の時刻に発せられたものなので、波の打ち消しは起こらないのだ。

宇宙開闢38万年後、宇宙の温度にして約3,000 K、赤方偏移にして約1,100の時期に、陽子が自由電子を捕獲して水素原子を作った。最早光子は電子に散乱されず、真っ直ぐ進めるようになる。俗に言う「宇宙の晴れ上がり」だ。そして、それまでに形作られた音波はその時の波形を保ったまま、現在まで届いているのだ。

プールで泳いでいる人を想像するとわかりやすいかもしれない。プールで泳ぐ人が作り出す波を、ある時刻で瞬時に凍らせる。すると、その時刻での波形が保存され、我々はあたかも波がそこに貼り付いたように観測するだろう。

コサインで与えられる単純な波 $\cos(\omega t)$ を考えてみる。振動数 ω を固定すれば、これは時間 t の方向に振動する波と考えることができる。しかし逆に、時間を $t=t_*$ のように固定してやれば、これは ω の関数 $\cos(\omega t_*)$ となり振動は振動数の方向に現れる、というわけだ。

音響学を専門としている方々には、音波が宇宙論でも大活躍していることを知って喜んで頂けたようだった。

2.2 距離から宇宙年齢を決める

WMAPの成果の一つとして、宇宙年齢の測定がある。最新の値は137億3,000万歳で、誤差は1.6億年だ。しかし、まっとうな感覚を持つ天文学者であれば、この数値を頭から信じることはできないと思う。

WMAPがこのような精度を出せた理由は、宇宙年齢測定の方法が従来の方法と180度異なるからだ。

従来の方法は、文字通り「年齢」を測ることで得られていた。ここでいう年齢とは古い天体の年齢、すなわち古い星の年齢や古い銀河の年齢だ。それらの古い天体が現在の宇宙と同じくらい長寿であると仮定すれば宇宙年齢を推定できる。一方、WMAPの方法は「距離」に基づいている。得られた距離を光速で割ることによって時間、すなわち年齢を算出する。

CMBの最大の利点は、CMBが宇宙の非常に早期に発せ

られた光である、という事実だ。宇宙においては「遠方」と「早期」は同じ意味を持つから、CMBが発せられた地点は非常に遠方にある、とも言える。宇宙年齢の測定誤差は1.6億年、一方CMBが発せられたのは宇宙開闢わずか38万年後だから、CMBが宇宙開闢と同時に発せられたと仮定しても何の問題もない。

WMAPはこの「距離」を正確に測定し、それを光速で割ることで宇宙年齢を正確に測定できたのだ。^{*7}

2.3 音波から宇宙の組成を決める

宇宙の組成はどうか？

水素やヘリウムといった、陽子と中性子から構成される通常の物質（バリオン）は、宇宙のエネルギーの4%しか占めない。20%は暗黒物質（ダークマター）であり、76%は暗黒エネルギー（ダークエネルギー）で占められる。ダークエネルギーの解説は文献10に譲るとして、WMAPはこれらの数値をどうやって弾き出したのか、簡単に解説する。

前述の通り、宇宙の組成は図2に示される音波の波形から算出する。込み入った話は他の文献（例えば11-15）に譲るとして結論だけ述べると、これらの波形からは

- (i) バリオンと光子のエネルギー密度比、 ρ_b/ρ_r
- (ii) 物質と輻射のエネルギー密度比、 ρ_m/ρ_r

が得られる。(i)は流体力学的な効果によるもので、バリオンの量が増えると音波の音速が減少することによる。(ii)は重力による一般相対論的な効果で、輻射のエネルギーが大きいと物質揺らぎが成長できないことによる。

ここで非常に面白いのは、(i)がバリオン ρ_b と光子 ρ_r にしかよらないのに対し、(ii)がすべての物質（バリオンとダークマター： $\rho_m = \rho_b + \rho_{dm}$ ）およびすべての輻射（光子とニュートリノ： $\rho_r = \rho_\gamma + \rho_\nu$ ）によることだ。

光子のエネルギー密度 ρ_γ は既知の量であるから、^{*8} (i) からバリオン密度が4%と弾き出される。(ii) から全物質密度を算出するためには、ニュートリノの密度を知らねばならない。ニュートリノの世代数を3（電子ニュートリノ、ミューニュートリノ、タウニュートリノ）とし、宇宙の標準理論から導かれるようにニュートリノの温度が光の温度よりも $(4/11)^{1/3}$ だけ低い1.945 Kとすれば $\rho_\nu = 0.690\rho_\gamma$ となる。全輻射密度は光子の密度のみで書けて $\rho_r = 1.69\rho_\gamma$ と計算でき、(ii) から全物質密度は24%と出る。このうち4%はバリオンなので、ダークマター密度が20%と弾き出される。

そして残りの76%は、バリオンでもダークマターでもない、ダークエネルギーというわけだ。

^{*7} ただし、ここで言う「距離」は、単純に光速×時間で与えられない。宇宙が膨張しているため、距離は光速×時間よりも大きくなる。物質で満たされている宇宙の場合、距離は光速×時間の3倍、輻射で満たされている宇宙の場合は距離は2倍となる。現在の宇宙はそのどちらでもなく、3割弱が物質、7割強がダークエネルギーで満たされているため、距離は3倍より少し大きい。

^{*8} CMBの平均温度がはっきり測定されているため。

3. WMAP, 3年目の成果

3年目の成果のハイライトは、一言で言えば「CMBの偏光の直接測定」だ。

初年度の結果発表では、偏光の直接測定のデータを公表せず、間接的な測定である温度揺らぎと偏光の相互相関を公表した。直接測定のデータをすぐ公表しなかった理由は、初年度の時点では解析が追いつかず、信号-雑音比も全然良くなかったからだ。しかし、その後の血の滲むような努力を経て、昨年、満を持して偏光のデータを公表した。

図3は、図1に示す温度揺らぎの分布に大角度スケールの偏光の方向を示す線を書き加えたものだ。どうして偏光のデータが重要で、そこから何がわかったのか？

3.1 偏光ができるまで

込み入った話は再び文献11-15に任せ、とりあえずCMBがなぜ偏光するのか大雑把に概観してみる。一言で片付けるなら、

「なぜCMBは偏光しなければならなかったのか！」

「トムソン散乱だからさ。」

となる。

偏光は散乱や反射があれば生じる。今は非相対論的な光子と電子の散乱を考えるから、トムソン散乱だ。キーポイントは、トムソン散乱の散乱断面積が等方的でなく、散乱角 θ に対して $(\cos\theta)^2$ の依存性、すなわち四重極の依存性を持つことだ。このため、電子の周囲の温度分布が一様でなく四重極分布を持っている場合、四重極モーメントに比例して偏光が生じる。

ひらたく言えば、電子の視点からぐるりと見回して光子の温度が「熱い、冷たい、熱い、冷たい」となっている場合、その熱さと冷たさの差に比例して偏光が生じるのだ。

とにかく電子がいないと始まらない。宇宙がまさに晴れ上がらんとしているそのとき、光子が電子に最後に散乱された際、温度揺らぎから偏光が生じてそれがそのまま我々まで届く。

晴れ上がった後は電子の大部分が陽子に捕獲されて水素原子となり、電子の密度が非常に薄くなって散乱は起こらず、新たに偏光が生じることもない。

しかし一方、クエーサーのスペクトル線の観測から、現

在の宇宙は完全電離しており、電子に満ち満ちていることもわかっているのである。宇宙の歴史のどこか、晴れ上がり(宇宙年齢38万年)と現在(宇宙年齢137億年)の間で宇宙が再電離したことは、実は疑いようのない観測事実なのだ。

電子が満ち満ちているのだから、CMBは再び散乱されてしまう。せっかく、晴れ上がりから遠路はるばる我々に向かってやってきた光子の一部は散乱され、別の方向へ弾き飛ばされてしまう。この状況は「宇宙に薄い霧がかかった状態」と言える。水蒸気にはじかれて光がまっすぐ進めないように、再電離で新たに出てきた電子にはじかれて光がまっすぐ進めないのだ。

しかし悪いことばかりではない。弾かれて別の方向へ行く光子もあれば、別の方向に行く予定だった光子が弾かれて我々に届くことだってあるわけなのだ。しかも、それらの光子は偏光している！

このように、CMBで観測される偏光には

(i) 晴れ上がり起源の偏光

(ii) 再電離起源の偏光

の2種類がある。WMAPがこの度直接測定に成功したのは(ii)だ。⁶⁾(i)の方は、間接検出(温度揺らぎと偏光の相互相関)を通じてのみ測定に成功しており、初年度の測定¹⁶⁾からさらに精度の向上したデータを発表した。⁶⁾

3.2 業界用語: “Eモード”と“Bモード”

図3に示す偏光データから得られる情報を紹介する前に、準備として、CMBの偏光方向の空間分布に使われる“業界用語”に触れておく。

百聞は一見に如かず。とりあえず図3を見た後、図4を見て頂きたい。左側のパターンでは、偏光方向がある点を中心に放射状に伸びているのに対し、右側のパターンでは渦をなしている。

左側のようなパターン、およびこのパターンのそれぞれの棒を同じ方向に90度回転させたパターン(図4では正八角形となる)を、業界では“Eモード”と呼んでいる。Eモードの回転を取ると $\text{rot } \mathbf{E} = 0$ だ。これは電場の持つ性質と同じなので、Eモードと呼ばれる。

右側のパターン、およびそれぞれの棒を同じ方向に90度

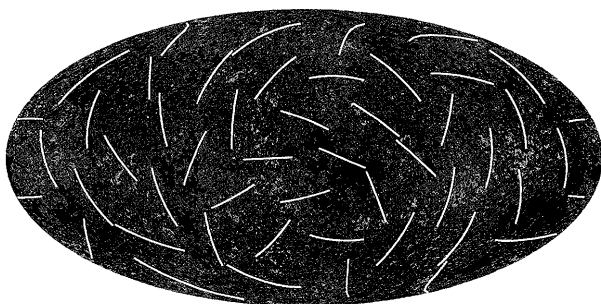
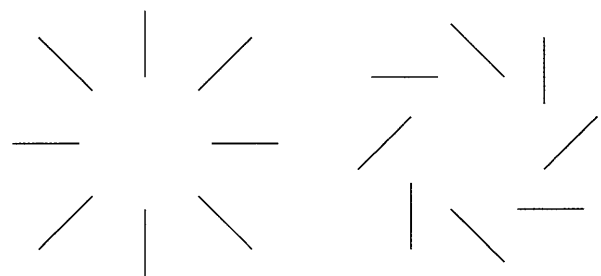


図3 図1に示す温度揺らぎに大角度スケールの直線偏光の方向を重ねたもの。偏光データは文献6による。線の長さは偏光度の強さを表す。偏光の角度分解能は温度揺らぎに比べて大幅に落としてある。



Eモード

Bモード

図4 偏光のEモード(左図)とBモード(右図)のスケッチ。

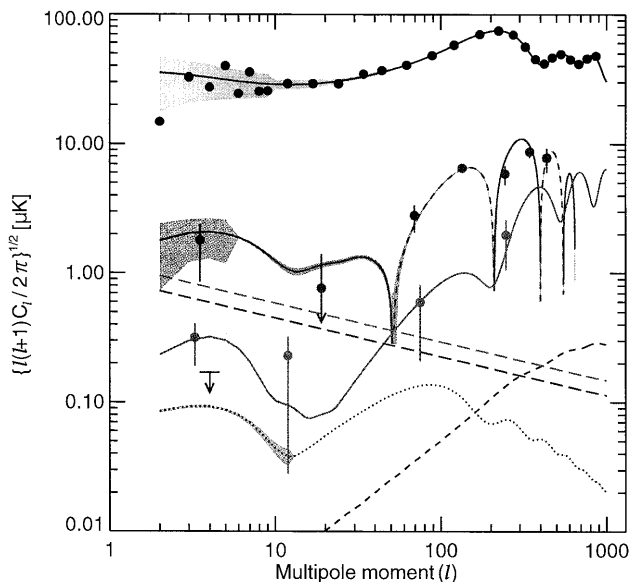


図5 WMAP 3年間のデータから得た温度揺らぎと偏光度のパワースペクトル。⁶⁾ 上から順に温度揺らぎ、温度揺らぎと偏光の相互相関、Eモード偏光、Bモード偏光のパワースペクトルの平方根。単位は μK 。 (μK^2) ではない。) 誤差棒と影で示された領域の意味は図2と同じ。Bモード偏光は上限値のみを示す。実線は理論曲線。温度揺らぎと偏光の相互相関は正と負の両方の値を取るため、負の値は破線で示す。点線は、あるインフレーションモデルから予言される原始重力波によるBモード偏光の予想曲線。 $l=20$ から右上に伸びる短い破線は重力レンズ効果によるBモード偏光の予想曲線。右斜め下に向かって伸びている2本の長い破線は天の川の電波放射による偏光スペクトルで、上からそれぞれE、Bモード。天の川の放射を取り除くことが偏光の測定、とりわけBモードの測定にとって重要なことがわかる。

回転させたパターン(図4では渦の向きが逆向きとなる)は、“Bモード”と呼ばれる。Bモードの発散を取ると $\text{div } B = 0$ だ。これは磁場の持つ性質と同じなので、Bモードと呼ばれる。

すぐわかるように、Eモードを45度回転させるとBモードになり、その逆もまた然りだ。

これら二つのモードは、電場と磁場のように物理的に異なった性質を持つ。例えば、パリティ変換をほどこしたと思って、図4を裏から見たとする。すると、Eモードは全く同じように見えるが、Bモードは渦の方向が変わる。すなわち、Eモードはパリティ正の偏光場だが、Bモードはパリティ負の偏光場なのだ。

WMAPの偏光データから、温度揺らぎのときと同じようにパワースペクトルを測定できる。さらに、温度揺らぎと偏光の相互相関も取ることができる。

図5に、上から順に温度揺らぎ、温度揺らぎと偏光の相互相関、Eモード偏光、そしてBモード偏光のパワースペクトルを示す。

Eモードは l が小さい大角度スケールで有意に信号が検出されている。Eモードのパワースペクトルを $l=2$ から6まで平均した値は $0.086 \pm 0.029 \mu K^2$ だ。一方、Bモードに関しては有意な信号が得られなかったため、上限値($< 0.03 \mu K^2$)のみを示す。同じ偏光でも、EとBで信号強度に差があるということだ。

温度揺らぎと偏光の相互相関では、大きな l でも有意に

信号が検出されている。Eモード偏光は、大きな l ではまだノイズが大きく有意な検出に至っていない。⁹⁾

これがWMAP 3年目のデータのハイライトだ。このデータは我々に何を伝えようとしているのか?

3.3 偏光からインフレーション宇宙へ: 風が吹けば桶屋は儲かったのか

「風が吹けば桶屋が儲かる」というが、WMAPの偏光データが宇宙論にどういう意義を持つか、一言で表現するならこの言葉が最もふさわしい。「偏光を見たらインフレーションがわかる」のだ。ただし、前者が複雑怪奇なプロセスなのと同様に、後者も単純ではない。

3.3.1 桶屋=インフレーション

宇宙論業界における「インフレーション」は、原始宇宙の急激な加速膨張を指す。ここで言う原始宇宙とは、宇宙開闢間もない頃を指す。エネルギーで言えば $10^{19} \sim 10^3 \text{ GeV}$ のオーダー、放射優勢宇宙を仮定して宇宙年齢に直せば $10^{-43} \sim 10^{-11}$ 秒のオーダーだ。インフレーションはこの期間のどこかで起こったであろうと予想されている。

インフレーション理論は現代宇宙論で最も有力視されている原始宇宙の理論であり、この理論なくしてCMBの温度揺らぎや偏光の観測結果、あるいは銀河や銀河団の分布に代表される宇宙の大規模構造の観測結果を説明することは困難である。

この理論から導かれるいくつかの予言を紹介すると、

- (1) 一様等方性: 観測可能な宇宙は一様等方的。

微小な揺らぎを除けば、密度分布は至る所一様でどの方向を見ても同じ。

- (2) 平坦性: 観測可能な宇宙の空間曲率はゼロ。

宇宙空間は平坦で、3角形の内角の和は、3角形がどんなに大きかろうと観測可能領域内では常に180度。

- (3) ガウス性: 原始揺らぎの分布はガウス分布に従う。

CMBの温度揺らぎ、物質の密度揺らぎ、重力波の揺らぎなど、あらゆる揺らぎは振幅が小さく非線形性が無視できるとき、ガウス分布で記述できる。

- (4) スケール不変性: 原始揺らぎの振幅は観測するスケールによらない。

例えば、インフレーション直後の原始温度揺らぎは1,000メガパーセクの領域であろうが100メガパーセクの領域であろうが同じ振幅を持つ。¹⁰⁾

現在のところこれらの予言に反するような観測事実はなく、インフレーションは観測テストに合格している。

3.3.2 桶屋の憂鬱

一見、万能なインフレーション理論であるが、一つ大変

⁹⁾ 図5では大きな l でもEモード偏光が検出されているように見えるが、これは縦軸がlogスケールなのでそう見えるだけだ。

¹⁰⁾ 直接観測することはできないが、もし音波が卓越する前の時期、インフレーション直後までさかのぼって原始温度揺らぎを直接観測できれば、そのパワースペクトルは図2のような振動を伴わず、 l によらない平坦な直線となる。図2に見られる振動は、2.1節で触れたように晴れ上がり時期の音波によるものだ。逆に言えば、音波を差し引くことで原始温度揺らぎの形を求めることができる。

重大な問題がある。それは、インフレーションを起こすモデルがありすぎるという問題だ。

一口に「インフレーション理論」と言った場合、大抵は個々のモデルを指さずに、大きな枠組みとしての「インフレーションコンセプト」のようなものを指す。しかし、実際どのようなメカニズムでインフレーションが起こったのか、まだ判然としていない。

インフレーション理論は1980年代にセンセーションを巻き起こした。初期に提唱されたモデルのうち、日本の佐藤勝彦、米国のグース (A. H. Guth) が提唱したモデルは力の統一 (GUT) に伴う相転移が加速膨張の原動力であったが、旧ソ連のスタロビンスキー (A. Starobinsky) のモデルは高エネルギー下における重力場への量子補正が原動力だった。

その後の研究で、インフレーションを起こすのはさほど難しいことではないことがわかってきた。高次元重力理論、スカラーテンソル重力理論、超対称性理論、超重重力理論、最近では超ひも理論やM理論などに基づくインフレーション理論が続々と提唱されている。

数百もあるインフレーションモデルをどう判別すれば良いのか？ そもそも、何かしらの観測を使って判別することなど可能なのだろうか？

観測から判別することは可能だ。

そのための強力なツールとなるのが、上記の予言からの「わずかなズレ」だ。実は、異なるインフレーションモデルは、モデルに応じてわずかな

- (1) 一様等方性からのズレ
- (2) 平坦性からのズレ
- (3) ガウス分布からのズレ
- (4) スケール不変性からのズレ

を生じ、どのくらい、そしてどのようにズレるかがモデルによって異なるのである。

そのズレを測定することさえできれば、インフレーションモデルを判別し、ひいては加速器では到底到達することのできない超高エネルギーの素粒子物理や重力現象に対し、唯一無二と言える観測的テストを与えることができる。

3.3.3 風=Eモード偏光

この観測テストを実現するのに、絶対に必要な条件がある。それは、「原始揺らぎ」を観測することだ。

例えば、太陽系を例にとってみる。太陽系も、元をたどればインフレーションで生成された原始揺らぎが非線形成長してできたものだから、インフレーションの情報を含んでいても良さそうなものである。が、もちろん、大きな非線形性のためにインフレーション時の情報などとうの昔に消え去ってしまっている。

しかし、大きなスケールにいけばいくほど、また、遠方宇宙 (宇宙の初期) にいけばいくほど、非線形成長が弱まり、まだ線形領域にある原始揺らぎを直接観測するチャンスがあるのだ。CMBは、揺らぎの小ささ、スケールの大きさ、時期の若さと、どれを取っても原始揺らぎ探査のベ

ストターゲットだ。三冠王なのだ。

そんな三冠王なCMBにも、わずかな弱点がある。それが、前述の「宇宙の再電離」だ。再電離は、宇宙に生まれた最初の星々によって起こったと考えられている。¹⁷⁾ 星から放出された強烈な紫外線が、周囲の水素原始を電離して電子をまき散らしたのだ。

これらの電子のため、晴れ上がりからやってきたCMBの一部は弾き飛ばされて我々まで届かない。結果、我々の観測するCMBが、『必ずしも原始揺らぎを代表してはいない』ことになってしまう!!

この効果を正しく評価しなければ、原始揺らぎの大きさを過小評価してしまう。原始揺らぎが100あったのに、再電離で10失われ、観測される揺らぎが90になったとしよう。再電離の効果を補正しなければ、原始揺らぎが90だと勘違いし、間違ったインフレーションが正しいという結論にたどり着きかねない。それはまずい。

この事態を打開するには、一体どれほどのCMBが弾き飛ばされたか測定できなくてはならない。温度揺らぎにのみ頼っていたのでは、それが不可能であるのは明白だ。

ここで頼りになるのが偏光なのである。

前述のように、再電離は本来我々に届くべきCMBを散乱してしまうと同時に、本来我々に届かなかったはずのCMBを散乱して我々の方向に向ける。それらのCMBは散乱のため偏光し、偏光強度は「どれほどのCMBが弾き飛ばされたか」に比例する。これを「光学的厚さ」と呼び、 τ で書く。^{*11} 「宇宙の薄曇り指数」と呼んでも良い。偏光強度は τ に比例し、大角度スケールの偏光のパワースペクトルはEモード、Bモード共に τ^2 に比例する。

WMAPの3年目のデータから得たEモード偏光より、 $\tau=0.09\pm 0.03$ と求まった。^{6,7)} つまり、晴れ上がりからやってきたCMBの9±3%が弾き飛ばされてしまった計算になるのだ。

この効果を補正して初めて、原始揺らぎ、ひいてはインフレーション理論の選別が可能となる。

さて、Bモード偏光は検出できていないので今は何の役にも立たないが、実はこのモードも大層重要な情報を含んでいる。Bモード偏光に関しては後に紹介する。

3.3.4 風が吹けば…

これまでの話を総合し、「風が吹けば」どうやって「桶屋が儲かる」のか見てみよう。以下のような具合である。

Eモード偏光を見れば、

CMBの何割が再電離期に弾かれたかわかって、晴れ上がり時の温度揺らぎを正しく割り出し、原始揺らぎの分布を正しく見積もって、インフレーション理論への制限をつけられる。実際、桶屋はどれくらい儲かったのだろう。

^{*11} より正確には、弾き飛ばされたCMBの割合は $1-e^{-\tau}$ で与えられる。WMAPのデータから τ は1より十分小さいので、近似的に $1-e^{-\tau}\approx\tau$ となる。

1つの指標は、インフレーションの予言(4)「スケール不変性」からの微小なズレだ。このズレは、 n_s というパラメータで表され、完全にスケール不変な原始揺らぎは $n_s=1$ を持つ。このとき、温度揺らぎのパワースペクトルは $l(l+1)C_l \propto l^{n_s-1}$ と振舞う。すなわち、 $n_s > 1$ のときは小さな角度スケールの揺らぎが大きな角度スケールよりも相対的に大きな振幅を持ち、 $n_s < 1$ はその逆だ。

異なるインフレーションモデルは異なる n_s を予言する。

WMAP 3年目のデータから、 $n_s=0.958 \pm 0.016$ と得られた。3シグマ弱の統計的有意性で、スケール不変性からの微小なズレが検出できた。風が吹いて、現在の儲けは3シグマ程度で $n_s < 1$ 、と覚えておいてもらえれば良いと思う。

これから、8年目のデータの解析が終わるまでにこの統計的有意性をどこまで向上できるか、チャレンジとなる。

WMAP 3年目のデータで得られた制限だけでも、多くのインフレーションモデルを棄却できる。そのうちの1つが、自己相互作用する質量ゼロのスカラー場によるインフレーション理論だ。このように、観測を用いてインフレーションモデルを棄却できるようになったことは素晴らしいことであり、ついにインフレーションも「観測でテストできる真の科学となった」との思いがする。

データはより良くなる。より多く、十、いや、百以上に及ぶモデルが棄却されていくだろう。最後に生き残るのはどのモデルなのだろうか！

3.3.5 神風=Bモード偏光

Eモードの持つ意味について紹介したが、Bモードはどうか。結論から言えば、Bモードが検出できれば、インフレーション理論の解明に大きな役割を果たす。そういう意味で、Bモードに対しても確かに「風が吹けば桶屋が儲かる」と言える。

いや、ただ儲かるだけでなく、大儲けだ。Bモードは、CMB業界にとってただの風ではなく、「神風」と呼んで良い！

Bモード偏光が重要な理由は、それが「原始重力波」によって生成されるからだ。

重力波は時空の歪み、あるいはさざなみであり、光速で伝播する波だ。光は電磁場の振動によって伝わるが、重力波は時空の振動によって伝わる。光がスピン1の場合であるのに対し、重力波はスピン2を持つ。これは電磁場の振動が二重極(ダイポール)であるのに対し、時空の振動は四重極(クワドルポール)であることを意味する。

インフレーションは原始密度揺らぎを生成すると同時に原始重力波も生成する。重力波が存在すると、時空が伸ばされる(縮められる)効果で光が赤方偏移(青方偏移)し、CMBの温度分布に非等方向性が生じる。時空の振動が四重極であるため、生じる温度分布も四重極であり、その四重極モーメントから3.1節で述べたメカニズムを通して偏光が生じる。

詳細には立ち入らないが、このようにスピン2の場合から

生じる偏光はEモードと同時にBモードも生成する。

Bモード偏光を通じた原始重力波の測定は、インフレーションの物理を直接観測する究極の“目”となる可能性を秘めている。神風が吹くと、桶屋は大儲けだ。

Bモード偏光を見れば、

CMBの何割が原始重力波によるものかわかって、揺らぎが原始宇宙のいつ頃生成されたか割り出せ、インフレーションの時期を正しく見積もって、インフレーション理論への制限をつけられる。

WMAPは、まだBモード偏光を検出できていない。が、現在の制限から「我々の観測する揺らぎが原始宇宙のいつ頃生成されたか」、制限をつけることはできる。

揺らぎが宇宙の初期に生成されればされるほど、つまり時間スケール Δt が小さければ小さいほど、不確定性関係 $\Delta E \Delta t \sim \hbar$ で与えられるエネルギー揺らぎ ΔE が大きくなり、それに比例して大きな重力波が生成され、大きな温度揺らぎ、さらに大きなBモード偏光を生む。

WMAPによる現在の制限は、エネルギースケールにして 3×10^{16} GeV以下、あるいは時間スケールにして宇宙開闢 10^{-38} 秒より後、だ。上限値ではあるが、力の大統一(GUT)のエネルギースケールに近いのが面白い。

しかし、上限値しかわかっていないので、もっと低いエネルギー(例えばTeV)のインフレーションも十分許される。

4. 今後の展望：神風は吹くか？

多くのインフレーションモデルのうち、WMAPの n_s の測定で許されるものだけを取り出してきとしよう。

そのうち原始重力波、すわちBモード偏光を最大限に出すインフレーションモデルを引っ張り出してきても、WMAPがそのレベルに到達するには15年間の観測が必要で、現実的ではない。

しかし、Bモード検出を目的とした将来計画が、地上、気球、そして衛星実験と勢力的に模索されている。Bモード検出こそ、CMB業界の次の夢である。¹⁸⁾

これは、非常に難しい観測となる。一番の敵は検出器のノイズではなく、銀河面(天の川)からの電波放射だ。低周波側(90 GHz以下)では偏光したシンクロトロン放射が重要であり、高周波側では偏光したダスト放射が重要となる。

図5の右下に下がる破線は、WMAPから求められた銀河面放射によるEモードおよびBモード偏光の大きさだ。明らかに、Bモード偏光は銀河面放射の寄与よりも弱い。いかに銀河面放射の寄与を取り除くか？この問題を解決するには、宇宙論屋と天文屋の密接な連携が欠かせない。

Bモードの検出は、宇宙論業界のみならず、超高エネルギーの素粒子物理や重力の物理学に計り知れない影響を与えるだろう。そのときこそ、CMBの発見、温度揺らぎの発見に続き、偏光の発見に対して3つ目のノーベル賞が与

えられるに違いないのだ。COBEの打ち上げから18年、WMAPの打ち上げから6年。次の10年かかっても、Bモード偏光を追う追撃の手を緩めてはならない。

将来はとてもエキサイティングだ。でも、私個人のとりあえずの目標は、早くWMAPの8年間のデータを解析し終え、最終的な宇宙論パラメータの報告と、原始重力波およびインフレーションモデルへの制限を報告することであることを申し添えて、簡単ではあったが、WMAP3年目の成果の解説を終わる。

参考文献

- 1) J. C. Mather, *et al.*: *Astrophys. J.* **354** (1990) L37.
- 2) G. F. Smoot, *et al.*: *Astrophys. J.* **396** (1992) L1.
- 3) M. D. Lemonick: *Echo of the Big Bang* (Princeton University Press, 2003); (邦訳) 木幡起士: ビッグバン宇宙からのこだま (日本評論社, 2006).
- 4) N. Jarosik, *et al.*: *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **170** (2007) 263.
- 5) G. Hinshaw, *et al.*: *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **170** (2007) 288.
- 6) L. Page, *et al.*: *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **170** (2007) 335.
- 7) D. N. Spergel, *et al.*: *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **170** (2007) 377.
- 8) 小松英一郎: 天文月報 **98** (2004) 107—WMAPとプリンストンでの4年間をふりかえって; **98** (2004) 182.
- 9) C. L. Bennett, *et al.*: *Astrophys. J.* **464** (1996) L1.
- 10) 須藤 靖, 高田昌広, 相原博昭: 日本物理学会誌 **62** (2007) 83—宇宙の暗黒エネルギーを探る.
- 11) 杉山 直: 『膨張宇宙とビッグバンの物理』(岩波書店, 2001).
- 12) 日本物理学会(編): 『宇宙を見る新しい目』(日本評論社, 2004).
- 13) 小松英一郎: 天文月報 **96** (2003) 482—宇宙論はどこまで分かったか? WMAP, 初年度の成果.
- 14) 小松英一郎: 科学 **73** (2003) 862—WMAPの見た初期宇宙.
- 15) 二間瀬敏史, 千葉征司, 池内 了(編): シリーズ現代の天文学, 第3

巻『宇宙論II—宇宙の進化』(日本評論社, 近刊の予定).

- 16) A. Kogut, *et al.*: *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **148** (2003) 161.
- 17) 梅村雅之: 科学 **73** (2003) 852—宇宙構造の起源と第一世代の星.
- 18) J. Bock, *et al.*: “Task Force on Cosmic Microwave Background Research,” arXiv:astro-ph/0604101

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。

(2007年5月1日原稿受付)

The WMAP 3-Year Results: Cosmology That We Have Learned

Eiichiro Komatsu

abstract: The Wilkinson Microwave Anisotropy Probe—WMAP—is an astronomical satellite measuring the afterglow of the Big Bang, the “cosmic microwave background,” with unprecedented precision. Following the launch on June 30, 2001, and the first-year data release on February 11, 2003, we have announced the results from 3 years of observations on March 16, 2006. The highlight of our results is a direct measurement of small polarization of the cosmic microwave background. I shall give a brief review of what we have learned from this as well as what we are expecting in the future.

日本物理学会誌 第62巻 第9号(2007年9月号) 予定目次

巻頭言

IPAPの現状と課題 家 泰弘

最近のトピックス

米国 MiniBooNE ニュートリノ振動実験の最新結果 ... 金行健治
解説

重力波観測の現状と将来の展望 黒田和明, 河邊径太
超新星からのニュートリノバーストとニュートリノの物理

..... 佐藤勝彦, 安藤真一郎, 高橋慶太郎
流れる粉体の動力学—バグノルド則をめぐる—

..... 御手洗菜美子, 中西 秀

最近の研究から

超新星残骸プラズマでの非平衡電離過程 尾崎正伸

超弦理論とクォーク・グルーオン・プラズマの「予期せぬ
つながり」 夏梅 誠

アルカリ金属を吸蔵したゼオライトの電子状態: 「超原子」

結晶 有田亮太郎, 青木秀夫, 野末泰夫
定温分子動力学法におけるエルゴード性 渡辺宙志, 小林礼人

話題

立ち上がり跳躍する回転ゆで卵 下村 裕

JPSJの最近の注目論文から Vol. 76 (2007) No. 6 より

..... 高山 一

新著紹介

男女共同参画推進委員会だより

「女性研究者支援モデル育成」事業について

..... 男女共同参画推進委員会