

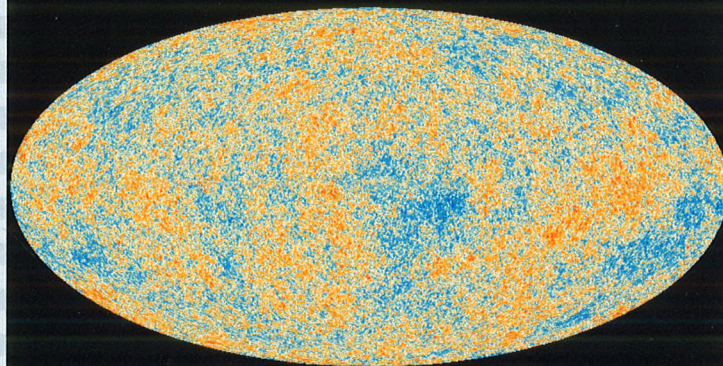
- BICEP2によるインフレーション起源
重力波の検出をめぐって
 - ゆらぎの定理
 - 滴の融合
- 小特集「宇宙マイクロ波背景放射の新展開」
 - 代議員候補者立候補のお願い

NO.

10

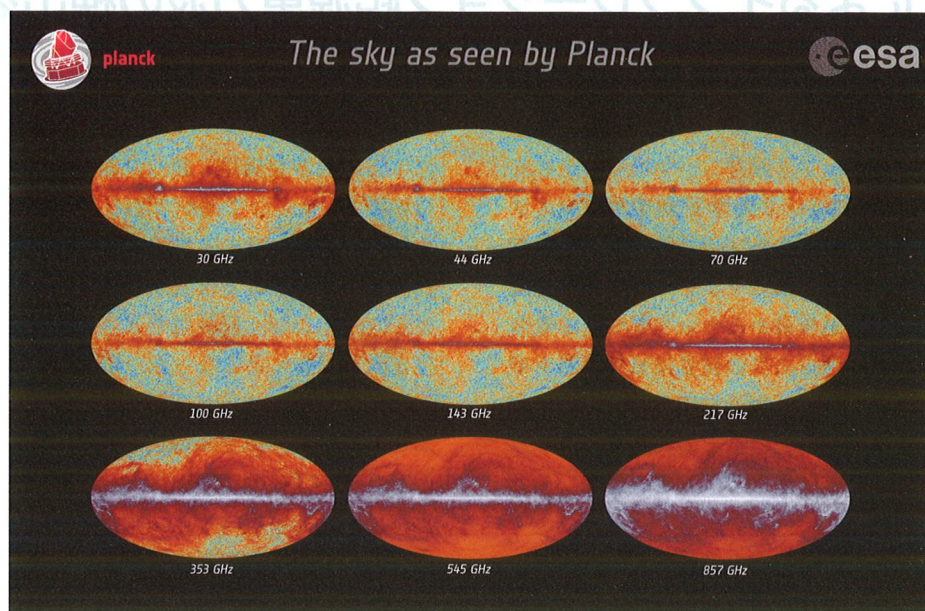
2014 | VOL. 69

B U T S U R I
日本物理学会誌



- 500 500 μK_{CMB}





小特集「宇宙マイクロ波背景放射の新展開」

プランク衛星が測定した各波長での全天の光の温度・強度分布を、銀河座標系でのモルワイデ図法で示す。(クレジット: ESA およびプランク衛星チーム。) 2.725 K を含む等方的な成分と、地球の運動に起因する双極的な異方性は取り除いてある。各図の中心は銀河中心で、銀経(銀河座標系での経度)と銀緯(同緯度)はそれぞれ0度である。上に向かうほど銀緯が増加し、北極(図の上端)は銀緯+90度、南極(下端)は銀緯-90度に対応する。東(図の左側)に向かうほど銀経が増加し、図の左端と右端は銀経180度に対応する。右端から中心に向かうと銀緯が180度から360度まで増加する。銀経0度と360度は同じ位置を表す。左上から右下にかけて、波長は10.0, 6.8, 4.3, 3.0, 2.1, 1.4, 0.85, 0.55, 0.35ミリ(周波数は30, 44, 70, 100, 143, 217, 353, 545, 857 GHz)である。最初の3つはLFI, 残りの6つはHFIの測定による。波長10.0から0.85ミリの図は温度分布を示し、0.55と0.35ミリの図は強度分布(単位は $W/m^2/Hz$)を示す。青色から赤色、赤色から白色になるほど温度・強度が高い。波長10.0から1.4ミリ(周波数30から217 GHz)の図において、高銀緯に見られる構造は全ての波長で同じである。これが宇宙マイクロ波背景放射の温度異方性である。

話題 COMET 実験

久野良孝 …… 712

JPSJの最近の注目論文から 6月の編集委員会より

安藤恒也 …… 717

PTEPの最近の招待・特集論文から 2014年6月号より

坂井典佑 …… 719

ラ・トッカータ 有機/無機、女性/男性のハイブリッド界面

石岡邦江 …… 721

新著紹介

723

掲示板 ■人事公募 ■学術の会合 ■その他

724

行事予定

729

会告 ■第70回年次大会・講演募集掲載号 ■第70回年次大会の企画募集 ■『大学の物理教育』誌20周年記念増刊号刊行および無料配布のお知らせ ■2014年9月1日付新入会者 ■日本物理学会代議員の選挙について ■第71~72期代議員候補者への立候補のお願い ■資料等在庫表兼購入申込書

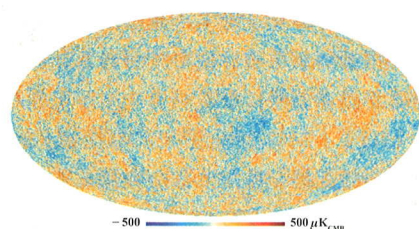
732

本会関係欧文誌目次

738

表紙の説明

欧州宇宙機関(ESA)のプランク衛星から得られた宇宙マイクロ波背景放射の温度異方性の全天マップ。銀河座標系でのモルワイデ図法で示す。(クレジット: ESA およびプランク衛星チーム。) プランク衛星は波長0.35ミリから1センチに渡る幅広い波長帯を9つに区切り、それぞれの波長帯で全天を観測した。その9波長のデータを組み合わせて銀河系の放射を取り除いたものが本図である。2.725 Kの等方的な成分と、地球の運動に起因する双極的な異方性も取り除いてある。単位は温度で、 $-500 \mu K$ から $+500 \mu K$ までを青色から赤色で示す。この温度異方性を統計的に解析すれば、宇宙年齢や宇宙の組成を決定できるだけでなく、インフレーション宇宙理論を観測的に検証できる。詳細は本号に掲載されている「小特集」記事を参照のこと。



プランク衛星による宇宙マイクロ波背景放射温度異方性の最新観測結果

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)

2013年3月21日、世界中の宇宙論研究者が待ち望んでいた、プランク衛星による初年度の測定結果が発表された。プランク衛星は波長0.35ミリから1センチに渡る幅広い波長帯を9つに区切り、それぞれの波長区分におけるマイクロ波の強度を全天に渡って測定した。これらのマイクロ波には「火の玉宇宙の残光」宇宙マイクロ波背景放射が含まれており、宇宙初期の物理を観測的に解明できる。プランク衛星から得られた温度異方性の観測データとWMAP衛星から得られた偏光のデータより、見込み角度が小さくなるほど原始曲率揺らぎの振幅が減少する事が発見された。これはインフレーション理論が予言する通りである。これにより、我々が住む宇宙は誕生直後急激な加速膨張を行い、その際に生成された時空の量子揺らぎによって宇宙を満たす物質の分布に不均一性が生じ、その不均一性から銀河や銀河団などの宇宙の構造が形成されたという仮説が有力となった。

1. 火の玉宇宙の残光「宇宙マイクロ波背景放射」

宇宙初期は高温・高密度の火の玉状態であった。火の玉状態の宇宙を満たしていた光は現在でも我々のまわりを飛び交っており、そのエネルギー分布は黒体放射のスペクトルを持つ。この観測事実は一見不思議である。黒体放射のスペクトルは、光と物質が熱平衡状態にあると現れる。光と物質が相互作用によって頻繁にエネルギーの交換を行うには、光子と物質の数密度が十分大きく、また物質が電離状態である必要があるが、現在の宇宙では、物質は電離状態であるが数密度が小さすぎて熱平衡状態にない。すなわち、現在の宇宙は熱平衡状態にないが、過去の一時期、宇宙は熱平衡状態にあった事になる。これが「宇宙初期が高温・高密度の火の玉状態であった」観測的証拠である。

宇宙空間が膨張すると光子と物質はエネルギーを失い、数密度も減少する。光と物質の温度が3,000 K程度まで下がると、陽子とヘリウム原子核が自由電子を捕獲し、物質は電離状態でなくなる。この時(宇宙年齢にして38万年)、光と物質は相互作用をやめ、宇宙は熱平衡状態でなくなるが、光のスペクトルは引き続き黒体放射のままである。現在測定されるこの光の温度は2.725 Kである。宇宙空間が膨張すると温度はそれに反比例して下がるため、光と物質の相互作用が切れてから宇宙空間は約千倍膨張した事になる。

このような極低温の光は、可視光や赤外線では測定する事ができない。2.725 Kを持つ黒体放射の輝度は波長2ミリ程度で最大となるため、マイクロ波での測定が必要となる。よって、この光は「宇宙マイクロ波背景放射」と呼ばれる。

2. 宇宙初期にすでにあった物質分布の不均一性

宇宙マイクロ波背景放射は、1965年、米国ニュージャージー州のベル研究所(当時)に勤務していた電波天文学者アーノ・ペンジアスとロバート・ウィルソン¹⁾によって発見された。発見はベル研究所が所有する口径20フィー

ト(約6メートル)の電波望遠鏡による波長7.3センチの測定^{*1}でなされた。単一の波長の測定ではこの光が黒体放射のスペクトルを持つかどうかまではわからないが、翌年プリンストン大学のデービッド・ウィルキンソンとピーター・ロール²⁾による波長3.2センチでの測定が報告され、(データ点はまだ2点ではあるが)この光が黒体放射のスペクトルを持つ事が示唆された。

その後、地上の望遠鏡に加えて気球、ロケットを用いた様々な波長での測定が行われた。決定版は、アメリカ航空宇宙局(NASA)が1989年に太陽同期軌道^{*2}に打ち上げた人工衛星COBE(Cosmic Background Explorer)である。COBEに搭載された分光器の測定³⁾により、宇宙マイクロ波背景放射が2.725 Kの黒体放射である事が高精度で確認され、宇宙が過去に熱平衡状態、すなわち火の玉状態にあった事が事実となった。

これだけでもすごいですが、COBEが宇宙論に与えた衝撃はもっとすごかった。それは「温度異方性の発見⁴⁾」である。COBEは分光器だけでなく、マイクロ波放射計を3台^{*3}搭載していた。各々の放射計はホーンアンテナのペアを持ち、天球上で互いに60度離れた2方向から到来する光の強度差を測定するように設計されていた。強度差の測定を全天に渡って繰り返し行えば、天球上のあらゆる方向の宇宙マイクロ波背景放射の温度と平均温度2.725 Kとの差を測定できる。もし温度があらゆる方向で同じであれば、放射計はゼロを計測するはずである。しかし、この放射計による測定により、宇宙マイクロ波背景放射の温度は全天に渡って同じではなく、方向によってわずかに異なる事がわかった。

*1 当時実際に使用された受信機のシステムは、ドイツ・ミュンヘン出身のベンジアス氏の厚意により、ミュンヘンのドイツ博物館に寄贈・展示されている。

*2 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。COBEに搭載された分光器は太陽光から常に約94度離れた方向を観測する。

*3 この放射計の予備ユニットの一つは、COBEチームのジョージ・スムート氏の厚意により、ドイツ博物館に寄贈・展示されている。

この「温度異方性」には二つの起源がある。一つは、地球の運動による光のドップラーシフトで、もう一つは138億年前、宇宙が火の玉状態であった時にすでに存在していた温度の不均一性によるものである。地球の運動起源の異方性を取り除いて測定された温度異方性の標準偏差は30マイクロKであった。この、微小ながらもゼロではない不均一性の発見は画期的であった。

火の玉宇宙を満たす光の温度がわずかに不均一なので、光と熱平衡状態にあった物質分布もわずかに不均一であったはずである。一方、現在の宇宙を満たす物質の分布は非常に不均一で、銀河や銀河団といった大規模構造が存在する。もちろん、より身近な星、惑星、ひいては我々自身も物質分布の不均一性を代表する存在である。宇宙の物質分布が均一であれば、物質がどこかに集中して星や惑星をつくる事はなく、我々が産まれる事もない。それでは、これらの不均一性はいつ、どのようにして生じたのか？ これは我々の起源に関わる万物の根源への問いである。

COBEが発見した宇宙マイクロ波背景放射の温度異方性は、138億年前の火の玉宇宙の段階で、わずかな物質分布の不均一性がすでに存在していた事を示した。このわずかな不均一性が重力の作用によって増幅され、138億年かけて現在見られる宇宙の大規模構造が形成されたのである。つまり、どこにどのような構造ができるかは、宇宙誕生間もない時期にすでに定められていたのである。

3. より良く、より早く、より安く

1992年のCOBEによる温度異方性の発見は画期的なものであった。しかし、物質分布の不均一性が宇宙初期にすでに存在していた事がわかっても、その不均一性がどのようにして生じたかを調べるにはCOBEの精度は不十分であった。そこで、米国と欧州ではほぼ同時期にCOBEの後継機の検討がなされた。

3.1 米国

1995年、COBEの後継機となる三つの人工衛星の提案がNASAに提出された。そのうち二つはカリフォルニア工科大学とNASAジェット推進研究所のチームによるFIRE⁵⁾(Far Infrared Explorer)とPSI⁶⁾(Primordial Structure Investigation)で、もう一つはプリンストン大学とNASAゴダード宇宙飛行センターのチームによるMAP⁷⁾(Microwave Anisotropy Probe)である。MAPは、温度異方性を発見したCOBEの放射計チームのメンバーが中心で、リーダーは当時NASAゴダード宇宙飛行センターにいたチャールズ・ベネットであった。

これらの提案のうち、採択されたのはMAPであった。なぜFIREやPSIでなくMAPが採択されたのか？ NASAは挑戦的な計画ではなく、技術的に安全な計画を好む傾向にある。(ただし、ハッブル宇宙望遠鏡やその後継機であるジェームズ・ウェッブ宇宙望遠鏡などの超大型計画は除く。) MAPの受信機は、入射マイクロ波の増幅に低雑音の

高電子移動度トランジスタ(High Electric Mobility Transistor; HEMTアンプ)を用いたマイクロ波放射計である。COBEはHEMTアンプを用いていなかったが、それを除けばMAPとCOBEの放射計の設計は良く似ていた。従って、MAPに必要な技術のほとんどが既に開発・実証済みなのは大きな利点であった。

COBEとMAPの放射計は、入射マイクロ波を増幅した後、ダイオードを用いた2乗検波でマイクロ波の強度を測定する。一方のFIREの設計は、マイクロ波の強度の測定にボロメーターを採用していた。FIREの利点は、ボロメーターの方が放射計よりも圧倒的に高い感度を達成できる点である。しかし、その感度を得るためには、ボロメーターを極低温まで冷やす必要があった。

FIREの設計では、ボロメーターを液体ヘリウムで0.15 Kまで冷やす必要があったが、そのような低温を達成した科学衛星は当時まだ存在していなかった。(科学衛星における0.1 Kは、2009年7月3日、プランク衛星によって達成された。宇宙航空研究開発機構(JAXA)が打ち上げたX線観測衛星「すざく」の検出器の一つであるX線微少熱量計(XRS)は、2005年7月27日に0.06 Kまで冷却されたが、8月8日、充填されていた液体ヘリウムが全て気化してしまふ不具合のため、天体の観測には至らなかった。)一方、MAPの設計では冷凍機を用いる事なく、HEMTアンプを放射冷却で90 Kまで冷やせば良かった。PSIもHEMTアンプを採用していたが、より低雑音を実現するためHEMTアンプを冷凍機で冷やそうとしていた。従って、液体ヘリウムや冷凍機を必要とするFIREとPSIは技術開発が未熟で、リスクが大きい計画とみなされ、不採択となった⁸⁾のである。「一見魅力的に見える最先端の技術にとらわれる事なく、実証済みの技術でより良く、より早く、より安く実行する」というNASAのポリシーがわかるエピソードである。不採択になりはしたが、PSIとFIREのチームはその後欧州が主導するプランク衛星のチームに合流し、それぞれの計画を実現する事になる。

MAPは、提案から6年後の2001年6月30日に打ち上げられた。予算がオーバーする事も、スケジュールが遅れる事もなかった。打ち上げの費用を合わせたMAPの総費用は1億4,500万ドルである。COBEが、(1986年のチャレンジャーの事故のためスペースシャトルからデルタロケットでの打ち上げに変更されるという不運もあったが)提案が提出された1974年から打ち上げまで15年を要し、予算オーバーを重ねて総費用が5億ドルまで膨れ上がった事を思えば「格安」と言って良い。

3.2 欧州

欧州では1993年、イタリアとフランスのチームが欧州宇宙機関(ESA)に衛星実験の提案をしていた。イタリアのチームはナッツァレーノ・マンドレージを主任研究者とするCOBRAS¹⁴⁾(Cosmic Background Radiation Anisotropy Satellite)を、フランスのチームはジャンルー・ブジェを

主任研究者とする SAMBA¹⁵⁾ (Satellite for Measurements of Background Anisotropies) を提案した。そこで下された決断は、「COBRAS と SAMBA を合わせた衛星計画を立てる」というものであった。COBRAS が後の LFI, SAMBA が後の HFI で、マンドレージとプジェがそれぞれの主任研究者となった。COBRAS/SAMBA と名称を変えたこの計画は、3年間の検討を経て1996年に正式に採用され、プランク衛星となった。

プランク衛星は試練を迎える。ESA が財政的に苦しくなり、打ち上げ費用を削減する必要が生じた。そのため、1998年、プランク衛星と、当時 FIRST と呼ばれていたハーシェル衛星 (サブミリ波天文学) とを抱き合わせで打ち上げる事が決まり、打ち上げ目標が2007年に延期された。抱き合わせで打ち上げるという事は、どちらかの準備が遅ればどちらも打ち上がらない事を意味する。筆者は、プランク衛星チームが初年度の観測データを発表した2013年の春、当時の事情を知る ESA 関係者に、財政難とはいえ、どうしてこのような選択をしたのか聞いてみた。返ってきた答えは、「私はこの (プランクとハーシェルを抱き合わせで打ち上げるといふ) 選択をした事を誇りに思っている。こうでもしなければ、どちらも決して打ち上がる事はなかっただろう」というものであった。

プランク衛星とハーシェル衛星は、2009年5月14日、アリアン5ロケットでラグランジュ点 L2^{*4)} に打ち上げられた。COBRAS と SAMBA の提案から、16年が経過していた。打ち上げの費用を合わせたプランク衛星の総費用は7億ユーロ、ハーシェル衛星は11億ユーロであった。

プランク衛星の歴史は、COBE と似ている。COBE も、もとは三つの独立な衛星計画から成っていたが、それらを合わせた計画を立てるよう、NASA が指示したのであった。異なるチームを合わせれば効率が落ち、お金も年月も余計にかかるという教訓が、これらの歴史から学べるであろう。

4. COBE から WMAP へ

打ち上げから3ヶ月後、MAP は L2 に到達した。2003年2月11日、MAP の初年度の観測データとその科学的解釈をまとめた論文が発表された。その半年前、世界2番目の宇宙マイクロ波背景放射の測定を行い、COBE の放射計チームで重要な役割を果たし、MAP 計画を立ち上げ、MAP チームの精神的支柱であったウィルキンソンが亡くなった。そこで、彼の業績を讃え、チームの総意で彼の名前をプロジェクトの名称に加え、WMAP (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe) とした。

WMAP は順調に観測を続け、着実に成果を挙げた。⁹⁻¹¹⁾ 一方、2009年にプランク衛星が打ち上がり、L2 に到達し

^{*4)} 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150万キロ離れた地点で、そこから見ると太陽と地球は常に同じ方向にある。従って、その逆方向を観測する事で太陽、地球 (および月) を視野に入れる事なく全天を観測できる。

た事が確認された。後継機の登場により、WMAP はその役割を終えたと判断した WMAP チームと NASA は、2010年8月9日に9年間の観測を終えた後、WMAP を L2 から別の軌道に移す事にした。そして9月8日、WMAP は全ミッションを終え、太陽を周回する軌道に投入された。2012年12月21日、WMAP の総決算として、9年間の観測データとその科学的解釈をまとめた論文が発表された。^{12, 13)}

WMAP と COBE の大きな違いは、その「視力の良さ」、つまり角度分解能である。COBE では口径の小さいホーンアンテナを直接宇宙空間に向けて光を導入するのに対し、WMAP では1.4メートル×1.6メートルのパラボラアンテナで光を集めてからホーンアンテナに光を導入する。すると、パラボラアンテナの大きさの分だけ角度分解能で得をする。COBE の角度分解能は7度であったが、WMAP はそれより35倍も良い0.2度である。また、低雑音 HEMT アンパの採用、および L2 では放射冷却で90 K まで冷やせる事より、WMAP の放射計の雑音強度は COBE よりも15倍から20倍程度低い。(太陽同期軌道の COBE では放射冷却で140 K までしか冷やせない。)

5. プランク衛星登場

プランク衛星は、WMAP よりも角度分解能がさらに2倍良い。プランクのパラボラアンテナの大きさは1.5メートル×1.9メートルで WMAP と同程度であるが、観測する波長が短い分だけ角度分解能で得をするからである。

COBE が観測した波長帯は9.5, 5.7, 3.3 ミリで、WMAP は13.6, 9.1, 7.3, 4.9, 3.2 ミリであった。プランク衛星の受信機システムは二つに分かれている。一つは低周波装置 (LFI; Low Frequency Instrument) で、波長帯は COBE や WMAP とほぼ同じ10.0, 6.8, 4.3 ミリ (周波数では30, 44, 70 GHz) である。もう一つは高周波装置 (HFI; High Frequency Instrument) で、波長帯は3.0, 2.1, 1.4, 0.85, 0.55, 0.35 ミリ (100, 143, 217, 353, 545, 857 GHz) である。角度分解能と、宇宙マイクロ波背景放射の観測の邪魔になる銀河面放射の強度との兼ね合いから、プランク衛星の波長帯で特に有用なのが2.1 ミリと1.4 ミリである。

LFI は機械式冷凍機で20 K まで冷やした HEMT アンパで、HFI は液体ヘリウムで0.1 K まで冷やしたボロメーターである。HFI のボロメーターは WMAP の放射計よりも10倍から30倍低い雑音強度を達成した。雑音強度は観測時間の平方根に反比例するので、WMAP が1年間の観測で到達する信号-雑音比に、HFI はたった12時間で到達する。ただし、冷媒に液体ヘリウムを用いるため、ヘリウムが尽きれば観測を続ける事はできない。WMAP は9年間運用したが、HFI は2年半で運用を停止した。

WMAP は COBE と同様、天球上の異なる2方向から到来する光の強度差を測定するよう設計されていた。一方、プランク衛星は異なる2方向の強度差ではなく、ある方向から到来する光の (平均成分を含む) 全強度を全天に渡っ

て測定した。つまり、COBEとWMAPが天球上のあらゆる2点間の温度差を測定したのに対し、プランク衛星はあらゆる点の温度を測定したのである。

プランク衛星の個々の測定器はWMAPのものよりはるかに雑音が小さい。加えて、異なる2方向の強度差を取らないので、必要な検出器の数を半分にできる。その分たくさん検出器をアンテナの焦点面に配置でき、トータルでさらに雑音の小さい測定が可能となる。

しかし、実際にはこれは大変な作業である。我々の仕事は、均一な2.725 Kの上に乗った、標準偏差にしてわずか10万分の1程度の異方性を測定する事である。プランク衛星が、ある時刻にある方向から到来する光の強度を測定し、別の時刻に別の方向の強度を測定したとしよう。もし温度異方性がなければ、測定される信号の強度は等しいはずである。しかし、HEMTアンプやボロメーターの性質は時間とともに変わるため、測定される信号の強度は変化し、温度異方性がなくても温度異方性があるように見えてしまう。従って、HEMTアンプやボロメーターの性質の時間変化を正確にモニターし、測定された信号強度を物理的な温度に変換する際に補正を施す必要がある。この補正、いわゆる較正(キャリブレーション)が、WMAPに比べてプランク衛星ははるかに難しい。

もう一つやっかいなのが、HFIのボロメーターの特性である。LFIの放射計は電子回路であり、マイクロ波を電気信号に変換し、電圧の変化を読み取る。一方ボロメーターは、入射エネルギーに敏感に反応する温度計のようなものである。従って、マイクロ波以外にも、何か大きなエネルギーが入射すれば反応してしまう。L2では宇宙線(主に陽子)の強度が高く、プランク衛星と頻りに衝突している。宇宙線が直接ボロメーターと衝突したり、衛星の他の場所に衝突した宇宙線が生成する粒子シャワーにボロメーターが反応したりすると、反応したボロメーターが一時的に使えなくなる。この影響も取り除かねばならない。

他にも、プランク衛星に搭載されている冷凍機が生み出す周期的なノイズを取り除いたり、アナログ信号をデジタル信号に変換するアナログ-デジタル変換回路(ADC)に見つかった不具合を補正したりと、プランク衛星のデータ解析には、WMAPのデータ解析以上に様々な困難が伴った。(実際、WMAPでは上に挙げた問題は存在しない。)10倍以上高い信号-雑音比を達成するために必要な困難であったとも言えるかもしれない。

以上のデータ解析上の困難を乗り越え、2013年3月21日、プランク衛星チームは、最初の15ヶ月半の観測から得た宇宙マイクロ波背景放射の温度異方性のデータと、その科学的解釈をまとめた論文を発表した。

6. 全天の温度異方性分布図

プランク衛星が9つの波長で測定した全天の温度異方性の分布を本誌目次に示す。まず目を引くのは、銀河座標系

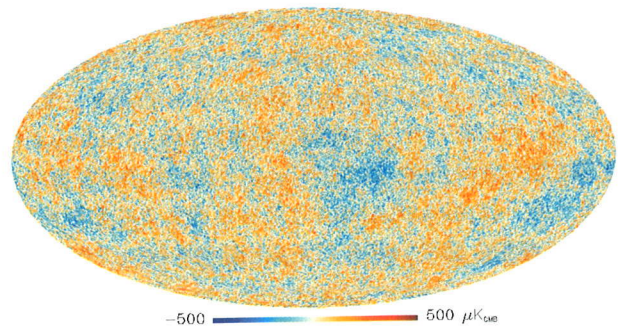


図1 プランク衛星の全9波長のデータ(本誌目次)を組み合わせて銀河系からの放射を引き去り、得られた宇宙マイクロ波背景放射の温度異方性の分布。文献16より抜粋。-500 μ Kから+500 μ Kまでを青色から赤色で示す。

で東西に伸びる銀河面からの放射である。周波数30 GHzから高い周波数になるにつれて銀河系放射が小さくなり、70 GHzで最小になる。さらに高周波数になると銀河系放射は増加する。350 GHzより高周波数ではほぼ全天が銀河系放射に支配されるため、宇宙マイクロ波背景放射の測定には向かない。一方、角度分解能は高周波数ほど良くなるため、宇宙マイクロ波背景放射を測定する目的には、銀河系放射と角度分解能との兼ね合いから143 GHzと217 GHzが最適である。

本誌目次に示す周波数30から217 GHzのデータにおいて、銀河面から離れた天域に見られる構造は全ての波長で同じである。これが宇宙初期に存在した温度の不均一性、宇宙マイクロ波背景放射の温度異方性である。宇宙マイクロ波背景放射は黒体放射なので、周波数によって温度が変化しない。一方、銀河系放射は周波数によって変化するため、複数の周波数のデータを用いて宇宙マイクロ波背景放射と銀河系放射とを区別できる。図1に、全9周波数のデータを組み合わせて銀河系放射を引き去り、宇宙マイクロ波背景放射の温度異方性を取り出した全天図を示す。

図1は美しいが、データの科学的解釈には向かない。なぜなら、銀河面からの放射は強力なため、その影響が図1でうまく引けているように見えても、低銀緯の領域には影響が残っている可能性が高いからである。従って、プランク衛星チームは、図1は用いず、本誌目次の図に戻り、中段の100, 143, 217 GHzのデータのみを用いた。そして、銀河系放射を引き去る代わりに、銀河系放射の強い天域のデータを使わないという保守的な決断をした。銀河系に加え、銀河系外の銀河からの放射も除く必要があるため、問題となる銀河系外銀河の方向のデータも使わない。100 GHzのデータで使われたのは全天の48.77%で、143 GHzと217 GHzのデータで使われたのは全天の30.71%である。¹⁷⁾

7. 2点相関関数とパワースペクトル

7.1 WMAPデータからプランクデータへ

図1を見ると、宇宙マイクロ波背景放射の温度分布は一樣、すなわち、温度のばらつきがどの方向を見ても同じ(温度分布の分散が等方的)なように見える。このような分布

を統計的に解釈するには、「2点相関関数」が便利である。これは、天球上のある点*i*での温度*T_i*が与えられた時、別の点*j*が取り得る温度の値*T_j*の確率を与える量である。

9節で解説するが、別な解析¹⁹⁾から、宇宙マイクロ波背景放射の温度異方性の確率分布がガウス分布で記述できる事が確認されている。すなわち、観測データが温度異方性の集合 $\{T_k\} = T_1, T_2, \dots, T_{N_{\text{pix}}}$ で記述できる確率分布関数 $P(\{T_k\})$ は

$$P(\{T_k\}) = \frac{\exp\left[-\frac{1}{2} \sum_{ij} (T_i - T_{\text{cmb}})(C^{-1})_{ij}(T_j - T_{\text{cmb}})\right]}{\sqrt{(2\pi)^{N_{\text{pix}}} \det(C)}} \quad (1)$$

与えられる。ここで $T_{\text{cmb}} = 2.725$ KはCOBEの分光器によって測定された宇宙マイクロ波背景放射の平均温度、 N_{pix} はマスクされていない天域のピクセル数、そして行列 C_{ij} が2点相関関数である。

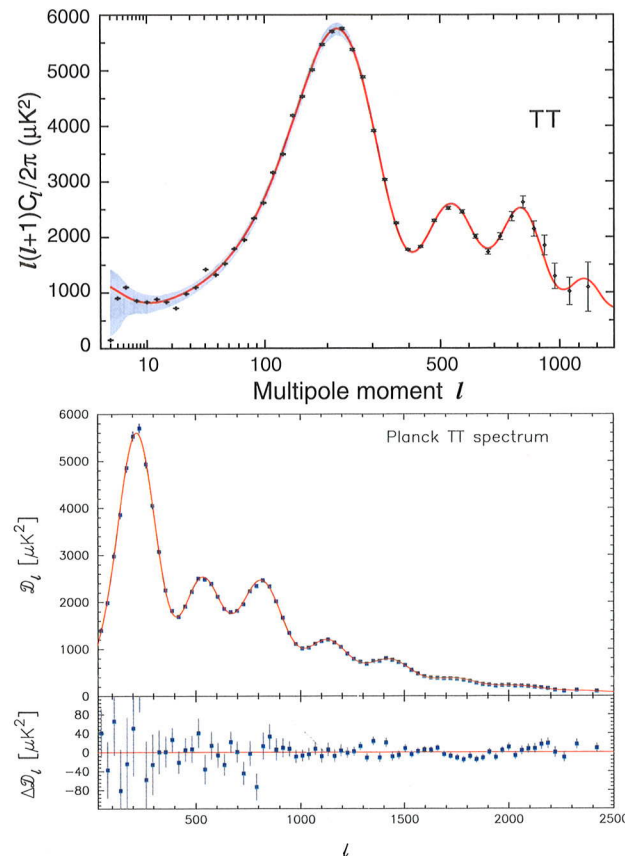


図2 宇宙マイクロ波背景放射温度異方性のパワースペクトル。図は $l(l+1)C_l/(2\pi)$ を l の関数として示し、単位は μK^2 。上図はWMAPの9年間の観測から得られたパワースペクトル(文献12より抜粋)。下図はプランク衛星の15ヶ月半の観測から得られたパワースペクトル(文献18より抜粋)。誤差棒付きの点は観測データ点、実線はデータ点を最も良く説明する宇宙モデルの理論曲線。下図の下のパネルはデータ点と理論曲線との差を示す。本来は全ての l に対してデータ点があるが、図では見やすさのためにある l の区間ごとに区切って平均化してある。下図では誤差棒の中に受信機のノイズの寄与と、「コスミック・バリエーション」と呼ばれる寄与を両方含めてあるが、上図では受信機のノイズの寄与を誤差棒で、コスミック・バリエーションの寄与をグレーの領域で示してある。コスミック・バリエーションとは、各 l で温度異方性の分散を求める際に使える独立なサンプル数が $2l+1$ 個しかない事由来するもので、コスミック・バリエーションの寄与は $1/\sqrt{2l+1}$ に比例して減少する。

分布関数が一様等方であるという仮定、すなわち天球上には特別な位置も方向も存在しないという仮定(この仮定の正しさもプランク衛星のデータで確認されている^{20,21)})より、2点相関関数が2点間のなす角度の大きさ θ_{ij} のみの関数である事が導かれる。つまり $C_{ij} \equiv C(\theta_{ij})$ で、温度異方性の統計的性質は1次元の関数 $C(\theta_{ij})$ で記述できる。

宇宙マイクロ波背景放射の業界では、 $C(\theta_{ij})$ を直接扱わず、これをルジャンドル関数 $P_\ell(x)$ で展開したものをを用いる。すなわち

$$C(\theta_{ij}) = \frac{1}{4\pi} \sum_{\ell} (2\ell+1) C_\ell P_\ell(\cos \theta_{ij}) \quad (2)$$

で、 C_ℓ は「パワースペクトル」と呼ばれる。大雑把に言えば C_ℓ は $C(\theta)$ の2次元フーリエ変換で、 l と見込み角度 θ は $l = \pi/\theta$ で関係する。大きな l はより細かい構造に対応し、 C_ℓ はある見込み角度に存在する異方性の強度を表す量である。例えば、 $l=1$ は天球を熱い領域と冷たい領域の2つに分ける双極型の異方性($\theta = \pi$)を表す。地球の運動に起因する異方性は $l=1$ を生成する。 $l=2$ は天球を4つに分ける四重極型の異方性($\theta = \pi/2$)を表す。

COBEの角度分解能と感度では $l=2$ から $l \approx 20$ までしか測定できなかった。WMAPは $l \approx 1,200$ まで測定した。そしてプランク衛星は $l \approx 2,500$ まで測定した。図2に、WMAPとプランク衛星が測定したパワースペクトルを示す。プランク衛星の角度分解能はWMAPよりも2倍程度良いため、2倍程度大きな l まで測定できる。

図2のプランク衛星のパワースペクトルには、 $l=2$ から2,500まで2,499個のほぼ独立なデータ点がある。これらのデータ点を説明する宇宙モデルの理論曲線には、自由なパラメータは6つしかない。従って、測定されたパワースペクトルからこれらのパラメータを精度良く決定できる。

7.2 パワースペクトルの振動の起源

何がパワースペクトルの振動を生み出しているのか? *5 一言で言えば、パワースペクトルの振動の起源は光-電離物質流体に生じた疎密波(音波)であり、これもまた、宇宙がかつて高温・高密度の火の玉状態であった事を証明するものである。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。その結果、光の平均自由行程は小さく、光と電離物質はあたかも一緒に動いているかのように振る舞う。つまり、それらは単一の流体のように振る舞い、宇宙初期は高温・高密度のスープ状態であった。

一方、重力ポテンシャルの大部分(約8割)は光や通常の物質と相互作用を持たない暗黒物質によって占められているため、この物理系は「暗黒物質の重力ポテンシャル中を運動する光-電離物質流体」として記述できる。

この系に揺らぎを与える。例えば、ある初期時刻に空間

*5 本稿の性格上ここでは定性的な説明しかできないが、もう少し詳しい解説には文献10が、より詳しく学びたい方には文献22,23や、本格的な教科書²⁴⁾が有用である。

のある1点での重力ポテンシャルを深くして電離物質の密度を上昇させる。散乱によって光は物質とともに動くので、光の密度も上昇する。光の密度が上昇すると圧力もそれに比例して上昇し、光-電離物質の密度揺らぎは周囲に音波として伝わる。相対論的流体の音速は光速の $1/\sqrt{3}$ であるが、光-電離物質の流体は物質の影響で音速が若干小さい。ある時刻 t までに音波が伝わる事のできた距離は、音速を c_s として $r_s = \int_0^t c_s dt/a$ で与えられる。(aは宇宙膨張をあらわすスケール因子で、時間とともに増大する。宇宙膨張のため、2点間の固有距離はaに比例して増大する。)

COBEの放射計のデータが教えてくれたように、宇宙初期の物質密度はいたるところで不均一であり、重力ポテンシャルの揺らぎはいたるところに存在していた。そこで、ある重力ポテンシャルの空間分布を初期時刻に与え、これをフーリエ分解する。後に説明するが、初期時刻でのポテンシャルのフーリエ分解の波長に特別なものはなく、あらゆる波長を持つ揺らぎが「ほぼ」同じ分散を持つとすれば、図2に示すデータをうまく説明する事がわかった。実はこの「ほぼ」が重要で、完全に同じ分散ではなく、長波長の初期揺らぎほどわずかに分散が大きい事を示したのがプランク衛星の最も重要な成果である。

このようにして、様々な波長を持つ音波が宇宙を伝播する。この様子を空間の各点で見ると、流体の密度は圧縮されたり希薄になったりして振動する。音波の分散関係式より、揺らぎの波長が長いほど振動周期が長いので、大きな領域が圧縮を始める頃、小さな領域は圧縮が終わって膨張に転じているかもしれないし、より小さな領域は圧縮、膨張を経て再び圧縮に転じているかもしれない。これらの考察より、半径Rの領域の温度は $-\cos(\pi r_s/R)$ に比例する事が導かれる。あるいは、フーリエ変換の波数kを用いれば、温度揺らぎの空間分布のフーリエ変換は $-\cos(kr_s)$ に比例する。

光-電離物質流体を伝播する音波は、光と物質が散乱しなくなり、系を流体で記述できなくなるまで続く。宇宙誕生から38万年経ち、温度が3,000 Kになる頃、陽子とヘリウム原子核が自由電子を捕獲して中性水素とヘリウム原子となる。中性原子は光をあまり散乱しないため、この時刻($t_* = 38$ 万年)で振動は止まり、光はまっすぐ進む。この時刻の r_s を r_{s*} と書けば、温度の不均一性は $-\cos(\pi r_{s*}/R)$ に比例する。 r_{s*} が固定されたため、いまや振動はRのみの関数となる。パワースペクトルは温度異方性の2乗であるから、 $\cos^2(\pi r_{s*}/R)$ に比例する。

半径Rの領域を、我々はある見込み角 θ で観測する。光子が138億年かけて飛んで来た距離を d_A と書けば、見込み角は $\theta = R/d_A$ である。例えば、 r_{s*} は148メガパーセクで、見込み角度は約0.6度である。 ℓ と θ は $\ell = \pi/\theta$ で関係しているので、 $\ell = \pi d_A/R$ である。(波数kを用いれば $\ell = kd_A$)するとパワースペクトルは $\cos^2(\ell r_{s*}/d_A)$ で与えられる。これが図2の振動の起源である。

7.3 パワースペクトルの形を決める物理

宇宙初期の音波の存在が明らかとなったが、図2は単純に $\cos^2(\ell r_{s*}/d_A)$ で記述できるようには見えない。

まず、図2のパワースペクトルの谷が、ゼロではなく有限の値を持っている。これは、 $\cos^2(\ell r_{s*}/d_A)$ が密度の不均一性のみを考慮し、光-電離物質流体の速度場によるドップラー効果を考慮していないためである。流体力学の連続の式より、速度場は密度場の時間微分に比例する。密度場によるパワースペクトルが $\cos^2(\ell r_{s*}/d_A)$ に比例するので、速度場によるパワースペクトルは $c_s^2 \sin^2(\ell r_{s*}/d_A)$ に比例する。しかし、速度場の方向がランダムなため、視線方向に沿って向かってくる流体素片の寄与と離れてゆく流体素片の寄与が部分的に相殺し、速度場の寄与は密度場の寄与に比べて小さく抑えられる。従って、基本的な C_ℓ の形は $\cos^2(\ell r_{s*}/d_A)$ に比例するが、 $\cos^2(\ell r_{s*}/d_A)$ がゼロとなる ℓ では $\sin^2(\ell r_{s*}/d_A)$ に比例する速度場の寄与が谷を埋める。

次に、図2のパワースペクトルは、 ℓ が大きくなるに従って減衰している。大きな ℓ は、短波長の揺らぎに相当する。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、揺らぎの波長が短くなると、光子と物質の運動のずれが無視できず、揺らぎの山と谷から光子がしみ出して拡散し、温度揺らぎをならしてしまう。その結果、振動の振幅が指数関数的に減衰する。パワースペクトルの減衰は近似的に $\exp(-\ell^2 r_D^2/d_A^2)$ で与えられる。 r_D は特徴的な拡散の長さで、ランダムウォークの原理から $r_D = \sqrt{N} L_\gamma$ で与えられる。 $N \approx 3ct_*/L_\gamma$ は時刻 t_* までに光子が散乱された回数、 L_γ は光子の平均自由行程である。

最後に、図2の $\ell \approx 540$ にあるパワースペクトルの2番目の山の高さが、1番目に比べてやけに低い。4番目の山の高さも、3番目に比べて急激に低くなっている。拡散減衰の効果を考えなければ、奇数番目の山の高さが、偶数番目よりも高いようである。これは、電離物質の存在のためである。電離物質の量を増やすと、光-電離物質流体の慣性が増す。すると、流体の圧縮を押しとどめにくくなり、流体はより圧縮され、温度が上昇する。パワースペクトルの奇数番目の山は、流体が最も圧縮された状態に相当する(偶数番目の山は、最も希薄な状態に相当する)ので、電離物質の量が多いほど奇数番目の山の高さが偶数番目に比べて高くなる。この性質を用いれば、山の高さの比から電離物質の質量密度を推定できる。この時期の宇宙は完全電離しているので、電離物質の質量密度はすなわち陽子やヘリウム原子核といった既知の物質の全質量密度である。

しかし、拡散減衰や電離物質の質量の効果も考慮しても、1番目の山の高さは他に比べて高すぎる。ここで登場するのが暗黒物質と一般相対論である。これまでの議論は、光と既知の物質との相互作用と流体力学で理解できた。しかし、暗黒物質は光と相互作用しないため、これまでの議論では理解できない。

重要な点は、暗黒物質が重力ポテンシャルを決めている

事である。暗黒物質の質量密度は既知の物質の質量密度の5倍程度であり、最も支配的な重力源である。この重力の効果により、光子は青方偏移や赤方偏移を受け、エネルギーを得たり失ったりする。もし重力ポテンシャルが時間一定であれば、光子がポテンシャルに入る時に得たエネルギーはポテンシャルを出る時に失われるため、エネルギーに変化はない。しかし、ポテンシャルが時間とともに減衰すれば、ポテンシャルを出るときに失われるエネルギーがポテンシャルに入る時に得るエネルギーよりも小さいため、光子はエネルギーを得る。この効果により、ポテンシャルが減衰すると温度異方性が増加する。(既知の物質と暗黒物質を含む)全物質の質量密度が(光子とニュートリノを含む)全放射エネルギー密度よりも十分大きければポテンシャルは安定する。しかし、そうでなければポテンシャルは減衰する。物質密度が小さいほどポテンシャルは早く減衰する。

この効果は、主に光と物質の相互作用が切れた時刻でのポテンシャルの減衰によって決まる。この時刻での全物質量は全放射量のためか3倍程度であり、ポテンシャルは減衰する。ある時刻のポテンシャルの減衰によって生じる温度揺らぎの波長は、その時刻までに光が進む事のできた距離にはほぼ等しい。光と物質の相互作用が切れた時刻までに光が進む事のできた距離は、パワースペクトルにおいて1番目の山の位置付近に対応する。従って、全物質の量が減るほど1番目の山の高さが他と比べて高くなる。この性質を用いると、重力ポテンシャルに寄与する全ての物質の質量密度を推定できる。

7.4 パワースペクトルの形から得られる情報

既知の物質の質量密度は奇数番目と偶数番目の山の高さの比から得られ、全物質の質量密度は1番目と他の山の高さの比から得られる。その差が暗黒物質の質量密度である。

山の位置からは比 r_{s*}/d_A が得られる。 r_{s*} は音速 c_s と光と物質が相互作用をやめた時刻 t_* で決まる。音速は電離物質の質量密度が決まれば求まるので、山の位置と高さの比より、時刻 t_* から現在時刻まで光子が旅した距離 d_A が求まる。この距離は、3次元空間の曲率がゼロの平坦な宇宙において

$$d_A = 3 \text{ Gpc} \int_0^{z_*} \frac{dz}{\sqrt{\Omega_M h^2 (1+z)^3 + \Omega_\Lambda h^2}} \quad (3)$$

と書ける。1 pc (パーセク)は3.26光年で、1 Mpc, 1 Gpcはそれぞれ $10^6, 10^9$ pcである。 $z_* = 1,091$ は時刻 t_* に対応する赤方偏移、 $^6 \Omega_M$ は現在の宇宙の全エネルギー密度に対する全物質密度の割合、 Ω_Λ は暗黒エネルギー密度(宇宙定数)の割合、 h は無次元定数で、現在の宇宙の膨張率(ハッブル定数)を $H_0 = 100 h \text{ km/s/Mpc}$ と与える。平坦な宇宙で

は $\Omega_\Lambda = 1 - \Omega_M$ であるから、この測定より Ω_Λ (あるいは h)が求まる。距離が求まるので、この距離を移動するのにかかる時間 t もおのずと求まる。

$$t = 9.9 \text{ 億年} \int_0^{z_*} \frac{d \ln(1+z)}{\sqrt{\Omega_M h^2 (1+z)^3 + \Omega_\Lambda h^2}} \quad (4)$$

正確に言えばこの積分には放射密度も含めねばならないが、ここでは無視する。積分の上限 z_* に対応する宇宙年齢は38万歳で、現在の宇宙年齢に比べて十分無視できるため、この式から宇宙年齢が求まる。

もし時刻 t_* 以降の宇宙が光に対して透明であり続けられ、 t_* で得られるパワースペクトルの形はそのまま保存される。しかし、現在の宇宙で銀河と銀河の間を満たす物質は再び完全電離しているため、宇宙マイクロ波背景放射の光子の一部は再び自由電子によって散乱される。この散乱された光子の割合を τ とすれば、散乱によって $l > 20$ のパワースペクトルが一様に $C_l \rightarrow C_l e^{-2\tau}$ と減衰する。この減衰の効果は後述の Δ_R や n_s と区別するのが難しいが、再散乱された光子が偏光する事から、WMAPの偏光のデータを用いる事で τ を独立に測定できる。

以上で、既知の物質の質量密度 Ω_B 、暗黒物質の質量密度 Ω_{DM} 、暗黒エネルギー密度 Ω_Λ 、再散乱の割合 τ の4つのパラメーターを説明した。あと2つのパラメーターが残っており、これらが本稿の主題の一つであるインフレーションに関わるパラメーターである。

7.5 原始揺らぎとインフレーション

図2に見られる振動を説明するには、音波が必要であった。その音波を生み出すには、光-電離物質流体に揺らぎを加える必要があった。では、その初期揺らぎはどこからやって来たのか? 一体、何が流体に「一撃を加えた」のか? この揺らぎの起源を「原始揺らぎ」と呼ぶ事にしよう。

現在広く受け入れられている考え方²⁵⁻²⁹⁾では、原始揺らぎは量子力学の不確定性原理から生じる「量子揺らぎ」を起源とする。極微の世界を記述する量子力学が、大きさにしてその対極にある宇宙の構造をつくったとは、どういう事であろうか。ここで登場するのがインフレーション理論³⁰⁻³⁴⁾である。

インフレーションは、我々の宇宙が誕生してすぐ起こったとされる宇宙の急激な加速膨張である。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、瞬く間に太陽系の大きさまで広がる。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。そしてプランク衛星のデータは、インフレーション

⁶ 赤方偏移 z は宇宙膨張によって光の波長がどの程度引き伸ばされたかをあらわす指標で、宇宙膨張によって2点間の距離が x 倍になると赤方偏移は $x=1+z$ で与えられる。 $z_* = 1,091$ であるから、 t_* から現在時刻までに宇宙は1,092倍膨張した事になる。

ション理論をより強固なものとした。

量子揺らぎによってエネルギーの空間分布がわずかに不均一になる。一般相対性理論により、これは空間がわずかに歪む事を意味する。この空間の歪みを「曲率揺らぎ」と呼び、 \mathcal{R} と書く。これは、デカルト座標で書いた空間の2点間の距離の2乗が $a^2 \exp(2\mathcal{R}) dx \cdot dx$ で与えられる事に相当する。

曲率揺らぎの分散を、フーリエ変換の波数 k の関数として

$$\Delta_{\mathcal{R}}^2(k) = \Delta_{\mathcal{R}}^2(k_0) \left(\frac{k}{k_0} \right)^{n_s - 1} \quad (5)$$

と書く。 $\Delta_{\mathcal{R}}^2(k_0)$ はある波数 $k_0 = 0.05 \text{ Mpc}^{-1}$ での揺らぎの分散で、無次元量である。 n_s は、揺らぎの分散が揺らぎの波長に応じてどう変化するかを表す。長波長ほど分散が大きければ $n_s < 1$ であり、短波長ほど分散が大きければ $n_s > 1$ である。 $n_s = 1$ であれば、分散は波長に依らず一定で、これは「スケール不変な揺らぎ」と呼ばれる。この量を用いれば、宇宙マイクロ波背景放射温度異方性のパワースペクトルは

$$C_\ell = 4\pi \Delta_{\mathcal{R}}^2(k_0) \int \frac{dk}{k} \left(\frac{k}{k_0} \right)^{n_s - 1} g_{\ell}^2(k) \quad (6)$$

と与えられる。ここで、 $g_{\ell}(k)$ は「放射輸送関数」と呼ばれ、曲率揺らぎと温度異方性との関係を与える。例えば、速度場を無視すると $g_{\ell}(k)$ は $\cos(kr_{*}) j_\ell(kd_A)$ に比例する。 $j_\ell(x)$ は球ベッセル関数で、 $\ell \gg 1$ では $\ell = x$ に鋭いピークを持ち、関係式 $\ell = kd_A$ を与える。この関係式より、 $\ell \gg 1$ ではパワースペクトルが $\ell(\ell+1)C_\ell \propto \ell^{n_s-1}$ のように n_s に依存する事が導ける。すなわち、 $n_s < 1$ であれば大きな見込み角度ほど温度異方性が強い。

$g_{\ell}(k)$ はすでに議論した電離物質や暗黒物質の密度などの4つのパラメーターの効果を実証する。残りのパラメーターは n_s と $\Delta_{\mathcal{R}}^2(k_0)$ で、インフレーション理論が決まれば予言できる量である。中でも、 n_s が重要な役割を果たす。

インフレーション中に生成された量子揺らぎの分散は、インフレーション中の宇宙膨張率 $H \equiv \dot{a}/a$ の2乗に比例する。これは、不確定性原理をエネルギーと時間の関係に適用する事でおおまかに理解できる。 H は時間の逆数の次元を持ち、エネルギーの分散は $\delta E^2 \approx \hbar^2 \delta t^2 \approx (\hbar H)^2$ で与えられる。(より詳しい解説は、例えば文献35がある。) 加速膨張を引き起こすには、 H はほぼ一定でなければならない。もし H が一定であれば $a \propto \exp(Ht)$ で、宇宙は指数関数的に膨張し、急激に冷却する。しかし、 H がずっと一定であればインフレーションは終了せず、火の玉宇宙を実現できない。インフレーションが終わるには、 H は時間とともに減少せねばならない。(より厳密には、インフレーションの原動力となるエネルギー要素が「ヌルエネルギー条件」を満たしていれば、 H は一定か減少せねばならない。) 従って、インフレーション初期に生成された量子揺らぎほど分散が大きい。

インフレーション初期に生成された量子揺らぎはインフレーションが終わるまでにより多くの宇宙膨張を経験するため、より大きな領域まで広がり、より大きな見込み角度の温度異方性として観測される。インフレーション中は H がほぼ一定であるから第ゼロ近似では $n_s \approx 1$ であるが、 H が時間とともに減少する事から、インフレーション理論は大きな見込み角度の温度異方性が強い、すなわち $n_s < 1$ を予言する。(厳密に言えば、全てのインフレーションモデルが $n_s < 1$ を予言するわけではない。) 1992年の温度異方性の発見以降20年間、 $n_s < 1$ を発見する事が、宇宙論研究者の悲願であった。WMAPはかなりいいところまでいったが、決定打となったのはプランク衛星であった。

8. プランク衛星がもたらした最も重要な結果

表1に、6つの宇宙論パラメーターの測定値を示す。本節では、プランク衛星の最も重要な結果である n_s に注目しよう。プランク衛星以前の宇宙背景放射のデータから得られた値は68%の信頼領域で $n_s = 0.9646 \pm 0.0098$ である。 $1 - n_s = 0.0354$ は誤差の3.6倍、つまり3.6シグマで $n_s < 1$ を示唆する結果である。しかし、通常「発見」と呼ぶのに必要な5シグマには至らない。この宇宙背景放射のデータに、銀河の分布の研究から得られた制限を加えると $n_s = 0.9579^{+0.0081}_{-0.0082}$ を得、¹³⁾ 5.2シグマで $n_s < 1$ である事が「発見」できた。しかし、宇宙マイクロ波背景放射の結果と銀河分布の結果を組み合わせるには、さらなる仮定が必要である。インフレーション理論のような、極めて途方もないアイデアを受け入れるには、異なる種類のデータを組み合わせるような事は避けたい。

そこでプランク衛星の登場である。プランク衛星も偏光を測定できるが、偏光はまだ解析の途中であり、2013年の結果発表の際には偏光のデータは用いられなかった。そこで τ を固定するため、プランク衛星チームはWMAPの偏光データを用いた。これらから得られた結果を表1の3列目に示す。プランク衛星の温度異方性のデータとWMAP

表1 宇宙マイクロ波背景放射から得られた宇宙論パラメーター。 Ω_B , Ω_{DM} , Ω_Λ はそれぞれ陽子やヘリウムなどの既知の物質、暗黒物質、暗黒エネルギーの密度(宇宙定数)が全エネルギー密度に占める割合。 h はハッブル定数を $H_0 = 100 h \text{ km/s/Mpc}$ と表す無次元パラメーター。 $\Delta_{\mathcal{R}}^2$ は原始曲率揺らぎの $k = 0.05 \text{ Mpc}^{-1}$ における分散。 n_s はその k 依存性。 τ は現在近くの宇宙の電離物質に再散乱される宇宙マイクロ波背景放射の光子の割合。2列目はWMAPの9年目のデータとアタカマ宇宙論望遠鏡(ACT)と南極望遠鏡(SPT)のデータを組み合わせて得られた値¹³⁾を、3列目はプランク衛星の温度異方性のデータとWMAPの偏光のデータ(WP)を組み合わせて得られた値¹⁸⁾を示す。誤差は68%の信頼領域をあらわす。最後の行は、それぞれの宇宙論パラメーターから得られた宇宙年齢を示す。

パラメーター	WMAP+ACT+SPT	プランク+WP
$\Omega_B h^2$	0.02229 ± 0.00037	0.02205 ± 0.00028
$\Omega_{DM} h^2$	0.1126 ± 0.0035	0.1199 ± 0.0027
Ω_Λ	0.728 ± 0.019	$0.685^{+0.018}_{-0.016}$
$10^9 \Delta_{\mathcal{R}}^2$	2.167 ± 0.056	$2.196^{+0.051}_{-0.060}$
n_s	0.9646 ± 0.0098	0.9603 ± 0.0073
τ	0.084 ± 0.013	$0.089^{+0.012}_{-0.014}$
宇宙年齢	137.42 ± 0.77 億年	138.17 ± 0.48 億年

の偏光のデータを組み合わせて得られた結果は $n_s = 0.9603 \pm 0.0073$, 5.4 シグマで $n_s < 1$ であった. ついに, 宇宙マイクロ波背景放射のデータのみから, 5 シグマ以上の統計的有意性で $n_s < 1$ が発見されたのである. 中心値 $n_s = 0.96$ は, アレクセイ・スタロビンスキー³⁰⁾ によって 1980 年に提唱された最初のインフレーションモデルの予言²⁵⁾ と一致した.

9. 原始揺らぎのガウス性

式(1)では, 観測される温度異方性がガウス分布に従うとした. 実際, 温度異方性の分布は驚くべき精度でガウス分布に従う. これも, インフレーション理論の正しさを裏付けるのに重要な役割を果たした.

インフレーション理論では, インフレーションを起こすエネルギー場の量子揺らぎが構造の種であるとする. この量子場が相互作用をしない自由場であり, かつ基底状態にあれば, シュレディンガー方程式の解としてガウス分布の波動関数が得られる. インフレーション中の量子場はほぼ基底状態にあり, 相互作用が弱くほぼ自由場である事から, 量子揺らぎがほぼガウス分布となる事が導かれる. (このトピックに関する包括的なレビューは文献38がある. 日本語の解説は文献39を参照.)

「ほぼ」ガウスのとは, どの程度ガウスのであろうか? 式(1)のガウス分布は, 2点相関関数のみの関数であり, 3点相関関数はゼロとなる. 従って, もしゼロでない3点相関関数が発見されれば, ガウス分布の仮定は棄却され, インフレーション理論に強い制限が与えられる. そこで, 原始曲率揺らぎの3点相関関数をフーリエ空間で

$$\langle \mathcal{R}_{\mathbf{k}_1} \mathcal{R}_{\mathbf{k}_2} \mathcal{R}_{\mathbf{k}_3} \rangle = (2\pi)^3 \delta(\mathbf{k}_1 + \mathbf{k}_2 + \mathbf{k}_3) B_{\mathcal{R}}(k_1, k_2, k_3), \quad (7)$$

と書く. $B_{\mathcal{R}}$ は「バイスペクトル」と呼ばれ, $\langle \dots \rangle$ は統計的な平均作業をあらわす. 同様に, パワースペクトルは $\langle \mathcal{R}_{\mathbf{k}_1} \mathcal{R}_{\mathbf{k}_2} \rangle = (2\pi)^3 \delta(\mathbf{k}_1 + \mathbf{k}_2) P_{\mathcal{R}}(k_1)$ と書ける. 前述の分散 $\Delta_{\mathcal{R}}^2(k)$ は $P_{\mathcal{R}}(k)$ を用いて $\Delta_{\mathcal{R}}^2(k) \equiv k^3 P_{\mathcal{R}}(k) / (2\pi^2)$ と書ける.

もしインフレーションが単一のエネルギー場によるものであれば, ある定理⁴⁰⁾ が存在する. すなわち, インフレーションが単一のエネルギー場によって起こり, 場の進化が2階微分方程式の2つの解のうち1つのみが支配的となるアトラクター解で記述され, かつ量子揺らぎの初期状態が真空中で基底状態にあれば,

$$\frac{6}{5} f_{\text{NL}} \equiv \frac{B_{\mathcal{R}}(k_1, k_2, k_3)}{P_{\mathcal{R}}(k_1) P_{\mathcal{R}}(k_2) + \text{cyc.}} \ll 1, \quad (8)$$

が成り立つ. もし $f_{\text{NL}} > 1$ が測定されれば, 上記の条件を満たすモデルは全て棄却される. なお, 過去30年間に提唱されたモデルは, ほとんどが上記の条件を満たし, $f_{\text{NL}} \ll 1$ を予言する.

宇宙マイクロ波背景放射の温度異方性は原始曲率揺らぎの統計的性質を反映するため, 原始曲率揺らぎのバイスペクトルがゼロでなければ温度異方性のバイスペクトルもゼロでない. プランク衛星のデータ¹⁰⁾ から得られた結果は

68%の信頼領域で $f_{\text{NL}} = 2.7 \pm 5.8$ であった. 従って, 観測された温度異方性の分布は誤差の範囲でガウスのであり, 単一エネルギー場のインフレーションモデルの予言と無矛盾である.

観測された温度分布がどのくらいガウスのであるのかを定量的に理解するため, 実空間の曲率揺らぎを $\mathcal{R}(\mathbf{x}) = \mathcal{R}_G(\mathbf{x}) + (3/5)f_{\text{NL}}\mathcal{R}_G^2(\mathbf{x})$ と書く. \mathcal{R}_G はガウス分布に従うとする. この形から式(7)のバイスペクトルが導かれる. 表1より \mathcal{R} の分散は 2×10^{-9} であるから, 2項目は1項目に比べて $3 \times 10^{-5} f_{\text{NL}}$ だけ小さい. 95%の信頼領域(2シグマ)の上限値は $f_{\text{NL}} = 14$ であるから, 2項目の大きさは1項目の0.04%以下に制限される. すなわち, 観測された温度異方性は0.04%の精度でガウス分布と無矛盾である. これは, n_s の値とは独立に, 温度異方性の起源がインフレーション中に生成された量子揺らぎである事を強く支持する結果である.

10. まとめ, そして偏光へ

プランク衛星による温度異方性の観測から得られた最大の成果は, インフレーション理論から予言される $n_s < 1$ を(WMAPの偏光データを含む)宇宙マイクロ波背景放射のデータのみを用いて5シグマ以上の統計的有意性で発見した事である. 揺らぎのガウス性と合わせ, プランク衛星の観測結果はインフレーション理論をより強固にした.

しかし, インフレーションのようなとてつもない説を「仮説」からより確実なものにするには, プランク衛星に搭載された検出器では精度が足りない. 特に, 偏光の測定精度を大幅に改善する必要がある. この目的のため, 南極とチリに宇宙マイクロ波背景放射を測定する専用の望遠鏡がいくつか設置され, 偏光観測に特化した観測が行われている. また, プランク衛星はすでに運用を停止しており, 偏光観測に特化した次の衛星計画も議論されている. 我が国の研究チームもいくつかの計画を主導的立場で進めている. これらの新しい観測装置を用いれば, インフレーション中に生成された原始重力波が宇宙マイクロ波背景放射の偏光に残した痕跡を発見できると期待している. 実際, 2014年3月17日, ハーバード大学等によるチーム⁴¹⁾ が原始重力波による偏光を発見したと報告した. この報告の信頼性はまだ確認段階であるが, 他の観測によって確認された時, 我々は「誕生直後の宇宙は急激に加速膨張し, そこで生成された量子揺らぎが我々の起源である」と結論できるであろう.

参考文献

- 1) A. A. Penzias and R. W. Wilson: *Astrophys. J.* **142** (1965) 419.
- 2) P. G. Roll and D. T. Wilkinson: *Phys. Rev. Lett.* **16** (1966) 405.
- 3) J. C. Mather, *et al.*: *Astrophys. J.* **354** (1990) L37.
- 4) G. F. Smoot, *et al.*: *Astrophys. J.* **396** (1992) L1.
- 5) A. E. Lange, J. J. Bock and P. Mason: *Space Sci. Rev.* **74** (1995) 151.
- 6) M. A. Janssen and C. R. Lawrence: *Astrophys. Lett. Commun.* **32** (1995) 289.

- 7) C. L. Bennett, *et al.*: *Astrophys. J. Suppl.* **583** (2003) 1.
- 8) M. D. Lemonick: *Echo of the Big Bang* (Princeton Univ. Press, 2003); (邦訳) 木幡尙士: 『ビッグバン宇宙からのこだま』(日本評論社, 2006).
- 9) 日本物理学会編: 『宇宙を見る新しい目』(日本評論社, 2004) 第1章.
- 10) 小松英一郎: *天文月報* **96** (2003) 482.
- 11) 小松英一郎: *日本物理学会誌* **62** (2007) 583.
- 12) C. L. Bennett, *et al.*: *Astrophys. J. Suppl.* **208** (2013) 20.
- 13) G. Hinshaw, *et al.*: *Astrophys. J. Suppl.* **208** (2013) 19.
- 14) G. F. Smoot, *et al.*: *Astrophys. Lett. Commun.* **32** (1995) 297.
- 15) F. R. Bouchet, R. Gispert and J.-L. Puget: *Proceedings of the 30th Rencontres de Moriond, Moriond Astrophysics Meeting, held in Les Arcs, Savoie, France, March 11-18, 1995*, ed. S. Maurogordato, C. Balkowski, C. Tao and J. T. T. Van. (Editions Frontiers, Paris, 1995) p. 537.
- 16) Planck Collaboration, P. A. R. Ade, *et al.*: *Astron. Astrophys.*, submitted, arXiv: 1303.5062.
- 17) Planck Collaboration, P. A. R. Ade, *et al.*: *Astron. Astrophys.*, submitted, arXiv: 1303.5075.
- 18) Planck Collaboration, P. A. R. Ade, *et al.*: *Astron. Astrophys.*, submitted, arXiv: 1303.5076.
- 19) Planck Collaboration, P. A. R. Ade, *et al.*: *Astron. Astrophys.*, submitted, arXiv: 1303.5084.
- 20) Planck Collaboration, P. A. R. Ade, *et al.*: *Astron. Astrophys.*, submitted, arXiv: 1303.5083.
- 21) J. Kim and E. Komatsu: *Phys. Rev. D* **88** (2013) 101301.
- 22) 杉山 直: 『膨張宇宙とビッグバンの物理』(岩波書店, 2001).
- 23) 二間瀬敏史, 池内 了, 千葉証司編: 『宇宙論II—宇宙の進化』(シリーズ現代の天文学第3巻, 日本評論社, 2008) 第4章.
- 24) 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).
- 25) V. F. Mukhanov and G. Chibisov: *JETP Lett.* **33** (1981) 532.
- 26) S. W. Hawking: *Phys. Lett. B* **115** (1982) 295.
- 27) A. A. Starobinsky: *Phys. Lett. B* **117** (1982) 175.
- 28) A. H. Guth and S. Y. Pi: *Phys. Rev. Lett.* **49** (1982) 1110.
- 29) J. M. Bardeen, P. J. Steinhardt and M. S. Turner: *Phys. Rev. D* **28** (1983) 679.
- 30) A. A. Starobinsky: *Phys. Lett. B* **91** (1980) 99.
- 31) K. Sato: *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **195** (1981) 467.
- 32) A. Guth: *Phys. Rev. D* **23** (1981) 347.
- 33) A. Linde: *Phys. Lett. B* **108** (1982) 389.
- 34) A. Albrecht and P. J. Steinhardt: *Phys. Rev. Lett.* **48** (1982) 1220.
- 35) 田中貴浩: *日本物理学会誌* **55** (2000) 932.
- 36) J. L. Sievers, *et al.*: *JCAP* **10** (2013) 60.
- 37) Z. Hou, *et al.*: *Astrophys. J.* **782** (2014) 74.
- 38) N. Bartolo, E. Komatsu, S. Matarrese and A. Riotto: *Phys. Rept.* **402** (2004) 103.
- 39) 向山信治: *日本物理学会誌* **67** (2012) 85.
- 40) X. Chen, H. Firouzjahi, E. Komatsu, M. H. Namjoo and M. Sasaki: *JCAP* **12** (2013) 039.
- 41) 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.

(2014年4月23日原稿受付)

Results on Temperature Anisotropy of the Cosmic Microwave Background from the Planck Satellite Eiichiro Komatsu

abstract: On March 21, 2013, the Planck collaboration has released the first 15.5-month data of temperature anisotropy of the cosmic microwave background, as well as the papers describing the cosmological interpretation. The most important discovery from the Planck data is that the amplitude of the primordial curvature perturbation on large scales is slightly larger than that on small scales. This is the first time that such a variation of the amplitudes of fluctuations on scales has been measured from the cosmic microwave background data alone with more than 5 standard deviations. This discovery provides the strongest ever evidence of the “cosmic inflation” paradigm.