

連載

最新宇宙誌【7】

エポックⅡ：宇宙の晴れ上がり

～輻射と物質の時代の終わり&暗黒時代の始まり（後編2）

福江 純（大阪教育大学）

看板に偽りあり？

純白の時代のつぎには、暗黒の時代が到来する。それまで光とエネルギーに満ちていた宇宙は暗転し、宇宙開闢時の残光以外、何一つ見えなくなってしまった。暗黒というよりは、宇宙全体が無色透明になってしまったといった方が適切だろう。宇宙開闢時の残光は相変わらず宇宙全体を 1000K ほどの温度で赤黒く照らしてはいたが、その時代の宇宙で光り輝くモノが見あたらないのである。宇宙が晴れ上がり无色透明になったのは、宇宙開闢から計って約 38 万年（赤方偏移は約 1088）、宇宙のサイズは約 1 億光年（現在の約 100 分の 1）のことである。

……ということ、空間的には 30 ページほど前（時間的には半年以上前）に書いたのだが、元素合成の時期はまだまだ宇宙全体が光り輝いていて、なかなか純白の時代が終わらなかった。やっと晴れ上がりの話である。

6. 宇宙の晴れ上がり

宇宙が非常に高温だったころは、初期の火の玉のなかで作られた水素やヘリウムは、原子核と電子に電離したままだった。宇宙の温度が 4000K から 3000K ぐらいまでに下がると、プラズマ状態で自由に飛び回っていた陽子と電子の大部分は結合して水素原子になった。これを（陽子と電子の）「再結合（recombination）」という。もともと、それ以前に陽子と電子が結合していたことはないのだから、“再”とは変な気がするが、まあ、そういう。

再結合より以前の宇宙では、宇宙の温度が高くて陽子と電子が電離したプラズマ状態になっていたため、光子は自由な電子に邪魔されてまっすぐに進めず、ちょうどロウソクの炎やオーロラさらには太陽内部のように、宇宙は不透明であった。しかし再結合以後は、陽子と電子が結合して水素原子になり、水素ガスは光に対して透明なので、光子に対して宇宙は透明になった（図 34）。これを「宇宙の晴れ上がり（clear up）」というのだ。

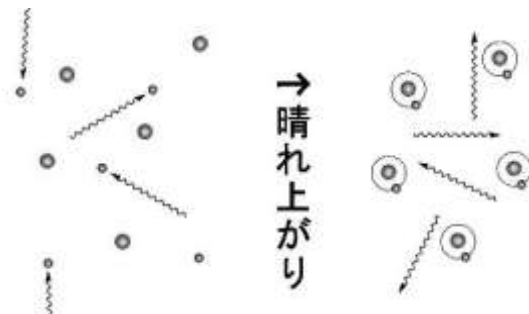


図 34 宇宙の晴れ上がり

高温で陽子（赤玉）と電子（青玉）が電離していると、光（波線）は電子に邪魔されてしまうが、陽子と電子が結合して原子になってしまうと、光線はまっすぐに進めるようになる。

宇宙が晴れ上がる以前では、物質と光（放射）は同じ温度のプラズマ放射混合体になっていたが、宇宙の晴れ上がり以降、物質と光は袂を分かち、それぞれの道を歩むことになる。物質と放射が分離するという意味で「脱結合（decouple）」という言い方をしたこともあるが、最近はあまり聞かないようだ。

宇宙の晴れ上がり以降、物質は、超銀河団・

銀河団・銀河・星・生命などの構造を形成し、複雑性の度合いをますます深めていった。一方、物質との相互作用が途切れた宇宙初期の光（放射）は、一様で均質なまま、宇宙が膨張するにつれ希薄になって温度が下がり、宇宙の晴れ上がりのときには約 3000K であったものが、現在では絶対温度で約 3K の黒体放射スペクトルになった。これが、現在観測される 3K 宇宙背景放射だ。宇宙背景放射は、火の玉宇宙の残照といえる。

晴れ上がり前後は、似たような現象が続いてややこしいので、この時代のタイムテーブルをもう一度まとめておこう。

表 10 晴れ上がり前後のできごと

時刻	赤方偏移	温度	出来事
4 万 7000 年	3570	9700K	等密度時
24 万年	1370	3700K	陽子と電子の再結合
38 万年	1088	3000K	晴れ上がり 最終散乱

まず、“等密度時 (equal density time)” は、物質のエネルギー密度が輻射のエネルギー密度に等しくなるときである（「天文教育」2008 年 1 月号掲載の 3 節参照）。輻射の時代の終わり & 物質の時代の始まりの時刻であり、等密度時以降は物質優勢の宇宙になる。

つぎの“(陽子と電子の) 再結合 (recombination)” は、水素原子核（陽子）と自由電子が結合して中性水素になるときだ。わざわざ“陽子と電子の”と断っているのは、ヘリウム原子核（ α 粒子）と自由電子が結合してヘリウム原子になる「ヘリウムの再結合」もあるためだ。

さらに、“宇宙の晴れ上がり (clear up)” は、再結合よりは少し後になる。というのも、

電離水素がすべて中性水素になるには若干の温度幅があり、ほとんどの水素が中性状態になるには、再結合の温度（だいたい 4000K）よりもう少し温度が下がる（だいたい 3000K まで）必要があるためだ。

なお、晴れ上がりとはほぼ同じ意味だが、微妙に違う現象として「最終散乱 (last scattering)」というものがある。これについては、また後で触れたい。

6.1 3K 宇宙背景放射

3K から始めるのが順当だろう。

現在の宇宙のあらゆる空間には、非常に低エネルギーの光子（マイクロ波放射）が充満している。これらの光子は、場所による偏りがなく（一様）、また方向による偏りもない（等方）。そして、光子のスペクトルは、絶対温度で 3 度（正確には 2.728K）の黒体放射スペクトルに非常に近い。

これらのことから、この宇宙を満たす低エネルギー光子を「3K 宇宙背景放射／マイク

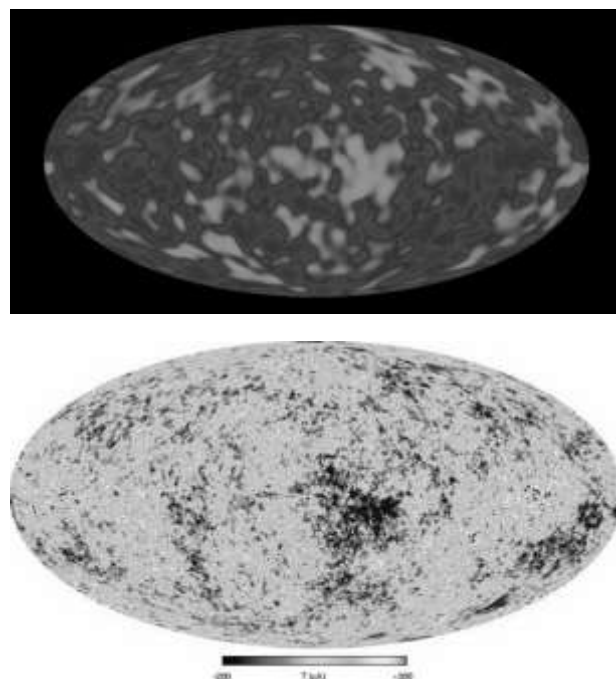


図 35 COBE 衛星の見た 3K 宇宙地図（上）と WMAP 衛星の見た 3K 宇宙地図

口波背景放射（3K cosmic background radiation/microwave background radiation/CBR）」と呼んでいる。まあ、とりあえず、COBE 衛星や WMAP 衛星で有名になった 3K の宇宙地図を出しておこう（図 35）。内容については、順次、説明していく。

6.1.1 3K 宇宙背景放射の発見

まずは歴史のおさらいから。

膨張宇宙の基本モデルは、宇宙項がない場合についてはフリードマンが、宇宙項がある場合についてはルメートルが、それぞれ提案した（1922 年、1927 年）。そしてまもなく、遠方の銀河ほど大きな速度で遠ざかっているというハッブルの法則によって、たしかに宇宙が全体として膨張していることがわかった（1929 年）。

さらに、ガモフらの計算によって、現在の宇宙に存在する水素やヘリウムなどの元素は、そのような膨張宇宙初期の火の玉の中で無理なく生成されることが証明された（1948 年）。そしてついに、宇宙初期の火の玉の残照が、観測的に発見される日がやってきたのである。アメリカのベル電話研究所（当時）のアーノ・ペンジアス（Arno Allan Penzias ; 1933～）とロバート・ウィルスン（Robert Woodrow Wilson ; 1936～）が、背景雑音電波の観測中に偶然発見したのだ。1965 年のことである。

火の玉の残照——3K 宇宙背景放射の発見によって、ビッグバン膨張宇宙論は宇宙初期まで含めて実証されたとと言えるだろう。

はじめて 3K を捉えたホーンアンテナの有名な写真を図 36 に示す（どっから拾ってきたか忘れた）。また、3K のスペクトルを図 37 に示す。図 37 を見ると、3K 黒体放射スペクトルの上で、ペンジアスとウィルスンが観測したのは、ただ一点にすぎないことがよくわかる。もちろん、それでもノーベル賞級の発見だったのだが。そしてさらに、COBE 衛星

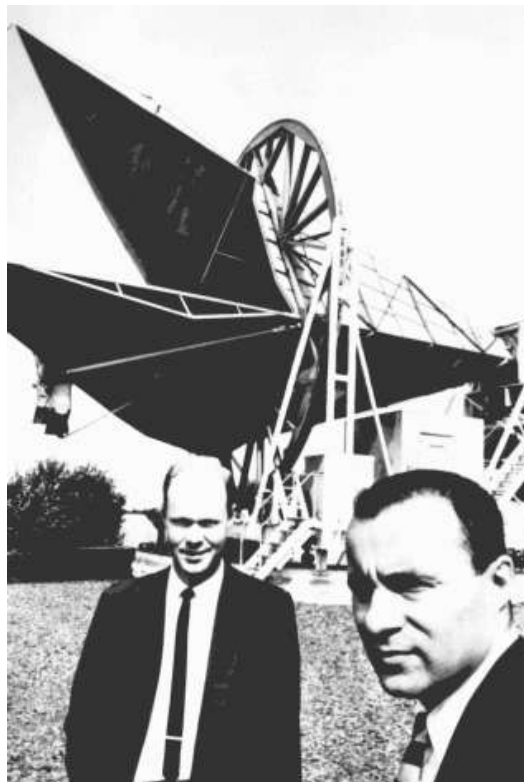


図 36 ホーンアンテナとペンジアスおよびウィルスン

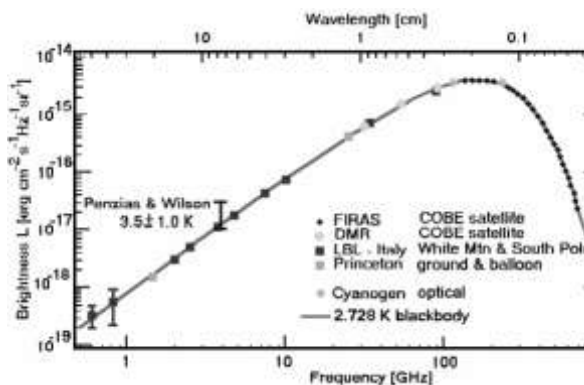


図 37 3K 宇宙背景放射のスペクトル
ペンジアスとウィルスンの観測以来、COBE 衛星にいたるまで、さまざまな観測によって確定されてきたスペクトル。

（出典：<http://ircamera.as.arizona.edu/NatSci102/NatSci102/images/cobe3k.gif>）

がスペクトルのピークの部分を精密に測定した。よく知られているように、COBE 衛星の成果に対しても、中心となったジョン・マザー（John Cromwell Mather ; 1946～）とジ

ジョージ・スムート (George Fitzgerald Smoot ; 1945) に対して、2006 年度のノーベル物理学賞が与えられた。

6.1.2 COBE の成果

どこが違うのか案外と知らない人も多いと思うので、ここで、COBE 衛星の成果と WMAP 衛星の成果、あるいは、先に示した有名な図 (図 35) の違いなどに、少し触れておきたい。

まず、いろいろな紆余曲折を経て、1989 年に宇宙背景放射探査衛星／COBE (Cosmic Background Explorer) が打ち上げられた (図 38)。



図 38 COBE 衛星

(出典 : http://www.lbl.gov/Publications/Nobel/assets/img/hires_COBE_Sat3.jpg)

この COBE 衛星の重要な成果の一つは、3K 宇宙背景放射のスペクトルをピークの部分を含む領域で精密に測定し、たしかにほぼ厳密な 2.728K の黒体放射スペクトルになっていると確かめたことだ。宇宙中のどこを探しても、これほどまでに黒体に近いスペクトルを見つけることは至難の業だろう。それほどまでに綺麗なスペクトルが得られて、ビッグバ

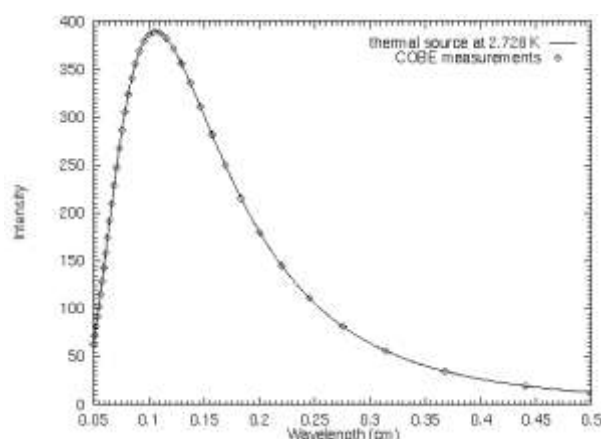


図 39 COBE 衛星の得た 3K 宇宙背景放射のスペクトル

ほぼ 1mm の波長にピークをもち、ピークより低振動数領域 (レイリージーンズ領域) ではべき乗でゆっくりと減少し、高振動数領域 (ウィーン領域) では指数的に急激に減少する。

ンの火の玉はほぼ完全に実証され、ビッグバン標準モデルがほぼ完全に確立した。

もう一つは、宇宙背景放射の非等方性の確認で、宇宙背景放射が完全に等方的ではなく、空間の方向によって、わずか (10 万分の 1 程度) ではあるが、有限のゆらぎがあることを発見したことだ (図 40、図 41)。

地球から天界を眺めたとき、奥行き方向の情報は圧縮され、無限の彼方にある仮想的な球面——天球 (celestial sphere) ——に天体が貼り付いたようにみえる。球状の地球の表面を変形し平面上に引き延ばして地図にするように、球状の天球を裏側からみた眺めを平面上に引き延ばして“宇宙全体地図”を作成することができる。

図 40 と図 41 は、どちらも COBE 衛星の得た 3K 宇宙背景放射の全天マップ、いわば宇宙地図である。

どちらの図も、天球の裏側を楕円形に引き延ばしてある。このような図では、楕円の中央で左右に伸びる上下の対称軸 (赤道) を、われわれの銀河系——天の川とするのがふつ

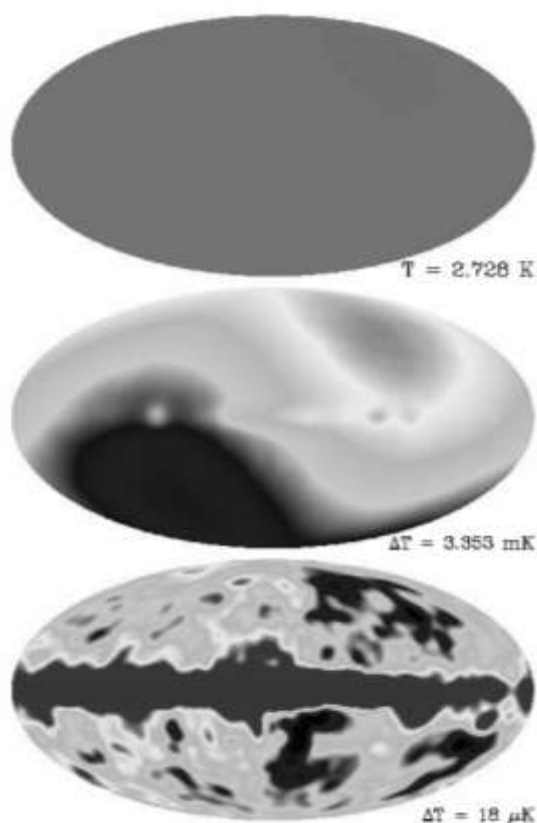


図40 COBE 衛星の 3K 宇宙地図 1

うだ（いわゆる銀河座標というものになっている）。楕円の真ん中が天の川銀河の中心方向（いて座方向）であり、一方、楕円の左端と右端は同じ方向で、天の川銀河の中心とは反対方向（ぎょしゃ座方向）になる。楕円の上端は銀河面の北方向で、下端は南方向である。類似の地球地図でいえば、天の川が赤道で、上端と下端がそれぞれ北極と南極に対応する。

図40と図41には、そんな図が3枚ずつあるのだが、図40の上と図41の下が共通ではないので、両方の図を比べながら、違いを説明していこう。

まず、図40（上）：宇宙背景放射の強度は、全天のどの方向をみても一定一様で、絶対温度で約2.7度の黒体放射になっている。あらゆる方向から同じ強さでやってくる同じ温度の放射であり、宇宙初期の高温火の玉が冷えた残照なのだ。だから、やや粗い精度で見れ

ば、マイクロ波で眺めた宇宙は、図40（上）のように、まったく一様で等方的でのっぺりとして見えるのである。まさに「宇宙原理」が成り立っている姿なのだ。

ただし、宇宙背景放射が一様だということは、当時の宇宙の物質分布も一様だったこと

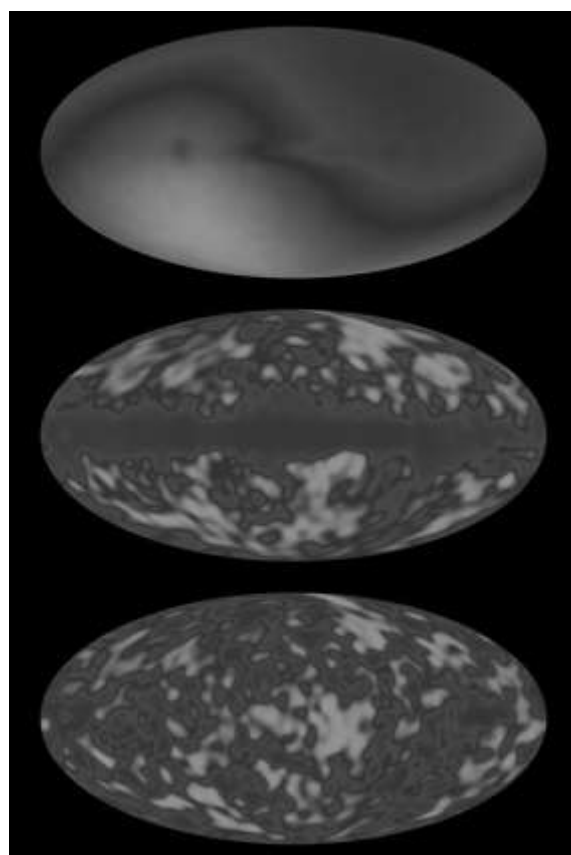


図41 COBE 衛星の 3K 宇宙地図 2

を意味しているが、完璧に一様だと具合が悪い。というのも、現在の宇宙には星や銀河や銀河団などの複雑な構造があるので、宇宙のごく初期にも現在の宇宙の構造を形作れるようなわずかなムラムラが物質分布にあったはずなのだ。物質分布にわずかなムラムラがあれば、背景放射にもそのムラムラが反映される。それを洗い出していくのが、以下の図の処理である。

では、つぎに図40（中）＝図41（上）：これらは、いろいろな方向から到来する3K宇宙背景放射を完全黒体放射とみなして、その

黒体放射スペクトルの温度を求めたとき、 2.728K からのずれを約 1000 分の 1 の精度で表したものである（図では 3.353mK 、すなわち 3.353 ミリ K となっている）。そうした精度を高めた図を作成すると、天球がおおざっぱに 2 分されて、ある方向では 2.728K よりも少し温度が高く見えて、最大で $2.728\text{K} + 3.353/1000\text{K} = 2.731\text{K}$ ぐらいの放射になっており、逆の方向では $2.728\text{K} - 3.353/1000\text{K} = 2.724\text{K}$ ぐらいに低くなっていることを表している。これは、 3K 絶対静止系に対する太陽運動のドップラー双極子成分が見えてきたものである。

知ってのとおり、地球は太陽のまわりを秒速 20 数 km で公転しており、太陽は銀河系のまわりを秒速 200km 程度で回転しており、銀河系も空間運動をしている。相対論ではニュートンの絶対空間は否定されたはずだが、実は宇宙においては、 3K 宇宙背景放射に相対的に静止しているという意味で、“絶対静止系”が存在している。そして、観測者（地球）が、その絶対静止系に対して運動していると、絶対静止系においては完全に 2.728K の放射が、運動方向前方からの 3K は青方偏移して温度が高くなり、運動方向後方からの 3K は赤方偏移して温度が低くなるのだ（全体では双極子パターンとなる）。

放射が黒体放射スペクトルの場合は、観測される温度が、赤方偏移を z として、

$$T(\text{観測}) = T/(1+z)$$

となることがわかっているのです、この関係から観測される温度に焼き直し、平均からのズレを出すことができる。

さらに、図 40（下）と図 41（中）：地球の運動によるドップラー双極子成分は、その性質がわかっているのです、簡単に取り除くことができる。そこで、それらを取り除いて、より精度を高め、10 万分の 1 の精度にまでもつ

ていったのが、これらの図だ（図では $18\mu\text{K}$ 、すなわち 18 マイクロ K とある）。10 万分の 1 である。かなり、相当、すごいことだ。どれくらいすごいかというと、強度の差異を高さの違いにたとえれば、たとえば、地球の半径 6400km に対して、 64m のデコボコを検出しているということになる。

さて、これらの図では、赤道面にかなり強いパターンがあるが、これはもちろん銀河系の影響だ。マイクロ波の電波は、宇宙背景放射だけではなく、銀河系内の低温のガスも放射しているので、その影響が赤道面横一直線のパターンとなって見えてきているものだ。

最後に図 41（下）：そこで、さらにもう一回処理をして、銀河系内に起源をもつマイクロ波電波を取り除いたものが、図 41 の一番下の図である。具体的な方法はあまりよく知らない。もしかしたら、銀河系以外でも、起源がわかっているマイクロ波成分は差っ引いているかもしれない。

ともあれ、COBE 衛星の成果が出たとき、新聞などマスコミに一番よく出たのは、図 41 一番下のこの図だろう。ぼくもはじめて見たときは、あまり図の意味がよくわからなかったことを覚えている。

最後のこの図で見えているのは、 2.728K （平均）からの 10 万分の 1 程度のずれで、 3K 宇宙背景放射“そのもの”に内在するくゆらぎ成分である。 3K 宇宙背景放射に、強度比で 10 万分の 1 程度の非常にわずかなものだが、わずかに強い領域や弱い領域があることを意味している。COBE 衛星は分解能があまりよくなかったのです、強い領域の“面積”はまだピンボケだ（次の WMAP の項参照）。COBE 衛星の段階で重要なのは、強度比の方である。宇宙背景放射は完璧に一樣ではなく、わずかなものではあるが、たしかに現在の宇宙構造のタネであるムラムラが存在することを COBE 衛星は実証したのである。

6.1.3 WMAP の成果

ただし、COBE 衛星は角度（空間的広がり）方向の分解能が悪くて、ムラムラの大きさの解像度が低かった。そこで 2001 年、分解能の高い観測をするため、あらたにウィルキンソン・マイクロ波異方性探査衛星／WMAP（Wilkinson Microwave Anisotropy Probe）衛星が打ち上げられた（図 42）。



図 42 太陽－地球系の第 2 ラグランジュ点に位置する WMAP 衛星

（出典：<http://plus.maths.org/latestnews/sep-dec06/CTC/WMAP.jpg>）

この WMAP 衛星は、地球周回軌道や太陽周回軌道ではなく、天文衛星としてはじめて、太陽－地球系の第 2 ラグランジュ点に投入された。ラグランジュ点というのは 2 体の天体周辺における力学的な安定点で、第 1 から第 5 まで五つある。太陽と地球という 2 天体周辺の第 2 ラグランジュ点は、太陽と地球を結ぶ直線上で、地球から見て太陽と反対側、距離約 160 万 km の宙域にある。この第 2 ラグランジュ点は、地球周回軌道に比べて十分遠方にあるために、地球からの電波雑音の影響が少ない。また常に、太陽電池パネルを太陽方向に向け、反対側に望遠鏡を向けて、太陽と反対側の天空を観測することができるので、効率もよく太陽からの電波雑音も少ない。この地球近傍ではもっとも暗くて静かな場所か

ら、WMAP 衛星は 3K 宇宙背景放射の精密観測を行ったのだ。その結果、きわめて高精度でムラムラ（ゆらぎ）が検出され、2003 年に発表された（図 43）。

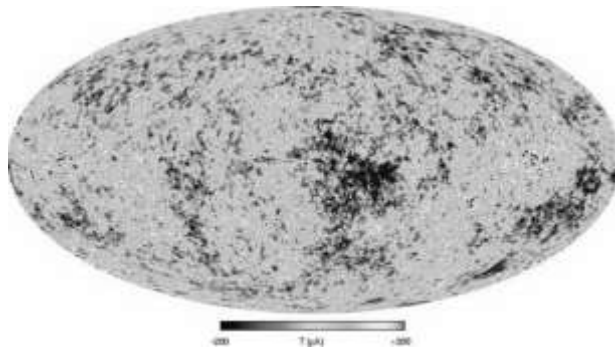


図 43 3K 宇宙背景放射の全天マップ

2001 年に打ち上げられた WMAP 衛星によって得られたもの。このときは宇宙の年齢が 137 億年ほどであることがわかった。

WMAP 衛星で得られた結果でも、ムラムラの強さの変化が 10 万分の 1 程度だということは COBE 衛星の結果と変わらない。違うのは、ムラムラのサイズが非常に細かくなっている点だ。COBE 衛星の角度分解能は 7 度だったが、WMAP 衛星では 13 分角にまでよくなった。デジカメなどの画素数にたとえると、COBE 衛星では 6000 画素だったものが、WMAP 衛星では 300 万画素になったことになる。

もっとも 300 万画素だと、2000×2000 程度で、さきほどの地球半径 6400km に対して、2000 分の 1 は 3km 程度なので、地形的なたとえていえば、偵察衛星の縦横高さ分解能が、COBE では 80km 四方×64m 高だったものが、WMAP で 3km 四方 64m 高になったぐらいだろうか。

とはいえ、図 43 に見るように、非常に微細なムラムラがたくさん見えてきた。これは宇宙の晴れ上がりの時期に、宇宙全体を駆けめぐっていた音波のパターン、あるいは、宇宙という太鼓の表面の振動パターンである。

そしてこのパターンの解析から、標準ビッグバンモデルの正しさや宇宙の年齢が137億歳であることなど宇宙論の基本パラメータが決定できたのだが、それについて詳しくは、エポックⅣの構造形成で触れられる予定である（いまはまだ不勉強で説明できない）。

・・・またまたつづく・・・

Gerhard Borner (1993) “The Early Universe”, Springer-Verlag.

横尾武夫 編 (1993) 『新・宇宙を解く』, 恒星社厚生閣, 101p.

参考文献

福江 純 (2005) 『100 歳になった相対性理論』, 講談社.

福江 純

早川幸男・佐藤文隆・松本敏雄 編 (1988) 『現代の宇宙論』, 名古屋大学出版会.

バーバラ・ライデン (2003) 『宇宙論入門』 (牧野伸義 訳), ピアソン・エデュケーション.

コラム 暦エトセトラ土用丑の日

編集委員長 作花一志

まだ梅雨のうっとうしさが残って蒸し暑い毎日ですが、暦の上では土用です。「土用丑の日」は昨年は1回だけでしたが、今年は7月24日と8月5日で、来年も7月19日と7月31日と2回あります。このことは決して珍しいことではありません。実は土用は年に4回あり、上記は正確には「夏の土用丑の日」です。夏の土用期間は太陽黄経117度となる瞬間を含む日から立秋(太陽黄経135度)前日までで、今年は7月19日から8月6日までです。秋 冬 春の土用期間は黄経を90度ずつ移動させれば求まります。土用の期間は17~18日ありますから、当然干支が同じになる日があります。

土用丑の日といえば「うなぎ」ですが、この習慣は江戸時代に平賀源内(1728-1780)が鰻屋から商売繁盛を相談されて発案したとか・・・さすが奇才の蘭学者、経営コンサルタントもやっていたようです。ところが、真夏に鰻を食べることは古く奈良時代からあったらしく、こんな大伴家持(718-785)の歌が万葉集巻十六に載っています。

いは^い石^は磨^ろに吾物申す夏^{なつ}瘦^しに 吉^{きち}しと云^いふ物そ^{むな}鰻^ぎ取^とり喫^めせ

五行思想では、春に木気、夏に火気、秋に金気、冬に水気を割り当てて、残った土気は季節の変わり目に割り当てられ、これを「土用」と呼んでいたそうです。