

連載

最新宇宙誌【17】

エポックⅣ：星と銀河の形成

～構造形成の時代（後編 4）～

福江 純（大阪教育大学）

7.3 太陽と非動径振動

ここで、いよいよ天体における振動現象の話に移ろう。天体の振動現象で有名なのは、変光星、とくに「脈動変光星」と呼ばれる星の振動だろう（降着円盤にも QPO と呼ばれる現象を代表に、さまざまなタイプの振動現象がある）。観測的にも目立つし、理論的解明もほとんど完成している（脈動変光星にはさまざまなタイプがあって、一部のメカニズムはまだ未解明だったかもしれない）。

脈動変光星ほど有名ではないが、母なる太陽の表面も常に小刻みの振動をしていて、典型的には 5 分の周期をもっていることから、「(太陽の)5分振動」として知られている(図 62)。この 5 分振動はロバート・B・レイトン (Robert B. Leighton ; 1919~1997) たちによって 1961 年に発見されたのだが、いまでは太陽表面で励起された音波振動であり、太陽表面における固有振動であることがわかっている。

少し補足しておく、弦や膜の振動と異なり、地球大気や星の大気の振動では（降着円盤の振動でも）、圧力を復元力とする音波以外にも、浮力を復元力とする重力波や遠心力を復元力とする慣性波など、さまざまな種類の波動が存在する（業界では、音波モードは圧力 pressure の p を取って「p モード」と、重力波モードは重力 gravity の g を取って「g モード」と呼ばれる）。したがって、振動現象が観測されたとしても、どの種類の振動なのかは理論計算などと厳密に比較しなければわからないことが多い。



図 62 太陽表面の細かい振動パターン

原図は振動のドップラー偏移に対応して、青（近づいている）と赤（遠ざかっている）の色で表示されている。

（出典：<http://solarscience.msfc.nasa.gov/Helioseismology.shtml>）

そこで、つぎに太陽の 5 分振動の理論的分析に入るが、一般に星が振動する場合、表面に垂直な半径方向だけではなく、表面の水平方向にも振動が起こる。このとき、星の表面全体が半径（動径）方向にのみ振動するものを「動径振動 (radial oscillation)」と呼んでいる。先に紹介した板・膜の振動では、必ずどこかに節線が存在するが、星の表面には端はないので、動径振動の場合には表面には節線は存在せず、表面全体が膨らんだり萎んだりする（動径方向には節が存在できるが、ここでの問題には関係ないので、省略する）。

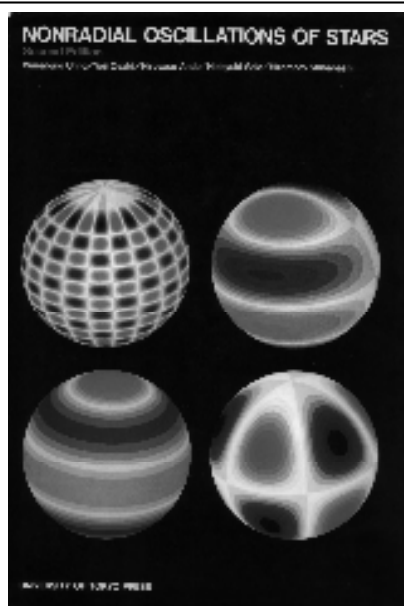


図 63 「星の非動径振動」のバイブル

原本では、非動径振動の理論的パターンが青と赤で塗り分けられている。

一方、表面の水平方向に振動が起こるものを「非動径振動 (non-radial oscillation)」と呼ぶ。球状をした星の非動径振動では、緯線や経線に沿った位置に、振動していない節線が生じる (図 63 や後の図 64)。

実は、この星の非動径振動は、日本の理論天文学の双璧をなす「海野スクール (東大の海野和三郎を中心としたグループ)」のお家芸で、この分野のバイブルとでも呼ぶべきテキストも書かれている (図 63)。ぼくが大学院に入った直後の 1979 年に出版された第 1 版の表紙はなんの変哲もないもんだったが、10 年後の 1989 年に出された第 2 版の表紙 (図 63) は衝撃的だった。とまれ、太陽の 5 分振動が p モードの固有振動であることに決着を付けたのも、海野スクールの安藤・尾崎たち (1975 年) である。現在では、このような星の振動の研究は「星震学 (asteroseismology)」や「日震学 (helioseismology)・陽震学 (solar seismology)」と呼ばれている。余談だが、同じく海野スクールの加藤正二は、降着円盤の振動現象に手を染めて、「円盤振動学

(discoseismology)」という分野を切り拓いている。ただし、その弟子 (つまりぼく) は不肖で、振動学の系譜をきちんと引き継げなかった、というのは、まあ、どうでもいい話かもしれない。

話をもとに戻すと、図 63 で示されているような球面上のパターンは、数学分野では以前から既知の「球面調和関数 (spherical harmonic function)」と呼ばれるもので表されることがわかっている (大学の理学部だと、水素原子のシュレジンガー方程式を解くときに、この球面調和関数が出てきて、オロオロする)。

球面の振動現象なので、密度や速度など物理量の変化は、いわゆる球座標 (r, θ, ϕ) で表すと都合がいい。実際、球座標で表すと、物理量の変化は、動径方向の変化を表す関数と水平方向の変化を表す関数の積に分離できる。その結果、動径方向の振動は動径 r のみの独立の関数になるので、いまは考えない。一方、水平方向の振動は極角 θ と方位角 ϕ のみの関数で、その振動を表す関数が件の球面調和関数であり、その球面調和関数 Y_l^m も $Y_l^m(\theta, \phi)$ と表される。まず球面調和関数の一般的な形を数式で表すと、

$$Y_l^m(\theta, \phi) = (-1)^m (2l+1)^{1/2} \sqrt{\frac{2l+1}{4\pi} \frac{(l-m)!}{(l+m)!}} P_l^m(\cos\theta) e^{im\phi}$$

と書ける。ここで、 l は「次数 (degree)」、 m は「位数 (order)」と呼ばれる整数で、

$$l \geq 0 \\ -l \leq m \leq l$$

という制限がある。2 番目の範囲からわかるように、ある一つの次数 l に対して、 $2l+1$ の値が存在する。

また、 $P_l^m(\cos\theta)$ は、「ルジャンドルの陪関数 (associated Legendre function)」と呼ばれるもので、 $\cos\theta$ のみの関数だ。ここらへんまで来ると、もうゴメンナサイという感じ

だけど、とにかく、こいつも極角 θ については \cos 関数で表されている点だけ、確認して欲しい。また、方位角方向も指数関数だけしか出ない（つまり、 θ 方向と ϕ 方向も実は分離されている）。

いろいろな l と m について、球面調和関数を具体的に書き下すと、

$$Y_{0,0} = \frac{1}{\sqrt{4\pi}}$$

$$Y_{1,0} = \sqrt{\frac{3}{4\pi}} \cos\theta$$

$$Y_{1,\pm 1} = \mp \sqrt{\frac{3}{8\pi}} \sin\theta e^{\pm iz\phi}$$

$$Y_{2,0} = \sqrt{\frac{5}{16\pi}} (3\cos^2\theta - 1)$$

といった感じで、一般形に比べれば、案外と単純な形をしていることがわかり、少しはホットする。

数式を出さないと説明しきれないところが、まだ力不足で申し訳ないが、ここからふたたび、振動パターンの説明に戻りたい。

振動パターンとの対応で重要なのは、球面調和関数を特徴づける整数値である次数 l と位数 m で、これらの数値は球面上にできる節線の数と関係している。具体的には、次数 l は球面上にできる節線の総数を、位数 m は赤道を横切る（緯度方向の）節線の数を表しているのだ（それが上の制限範囲を決めている）。

たとえば、次数 l が 3 のときの振動パターンは図 64 上のようなになる。このとき、位数 $m=0$ なら緯線に沿って 3 本の節線ができ、 $m=\pm 1$ なら緯線に沿って 2 本と経線に沿って 1 本（手前側と向こう側で勘定すると 2 本）の節線ができ、 $m=\pm 2$ なら経線が 1 本と緯線が 2 本、そして $m=\pm 3$ だと経線に沿ってのみ 3 本の節線ができる。次数 l が 3 のときのパターンはこれですべてである。その他のいろいろなパターン例も図 64 下に示す。

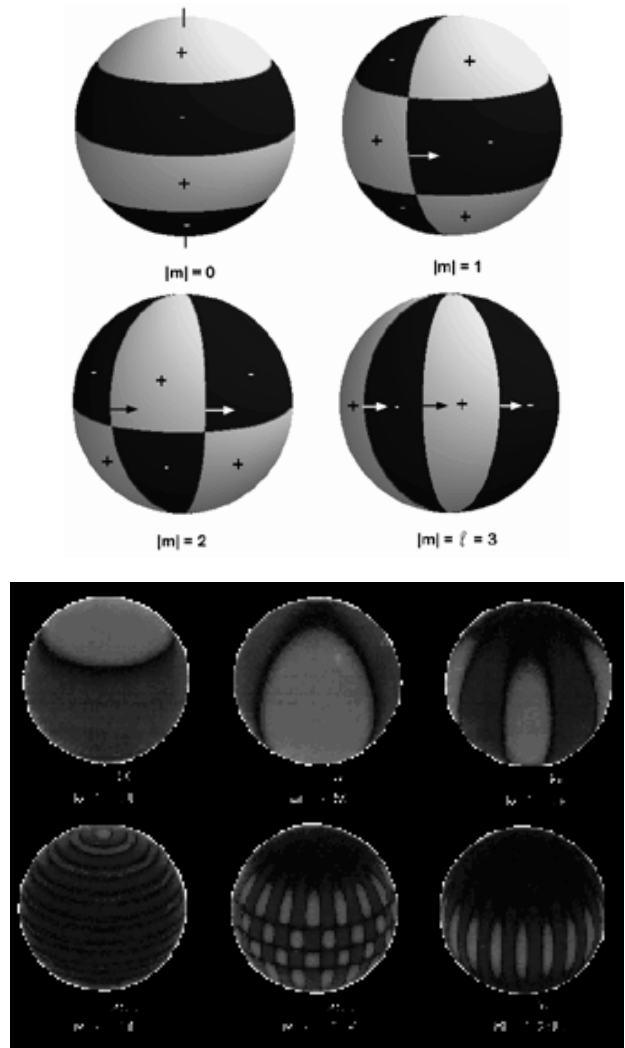


図 64 次数 l および位数 m と振動パターンの例

上は $l=3$ の場合のすべての振動パターン。下の $l=20$ 、 $m=17$ だと、経線に沿って 3 本の節線が、緯線に沿って 17 本の節線ができている。

さて、振動の次数 l が大きくなると、節線の数が増えるわけだから、一般には球面上は細かい振動パターンに覆われることになる（図 63 の左上や図 64 の下中）。そして、そのような細かい振動の波長は、非常に大ざっぱには、太陽表面（球面）の一周の長さを次数 l で割った長さ程度になる。振動は単位時間あたりの振動数 ν と波長 λ で特徴づけられるが、球面上の細かい振動の場合は、波長の

代わりに次数を使って、振動数 ν と次数 l で特徴づけてもいいだろう。

そのような考えで理論的に作成した、太陽 5 分振動を特徴づけるダイアグラムが図 65 である。振動を分析するこのようなダイアグラムはしばしば「診断図（diagnostic diagram）」と呼ばれるが、図 65 は振動を特徴づける量として、振動数 ν と（波長代わりの）次数 l を用いているので、「 (l, ν) 図」とも呼ばれる。

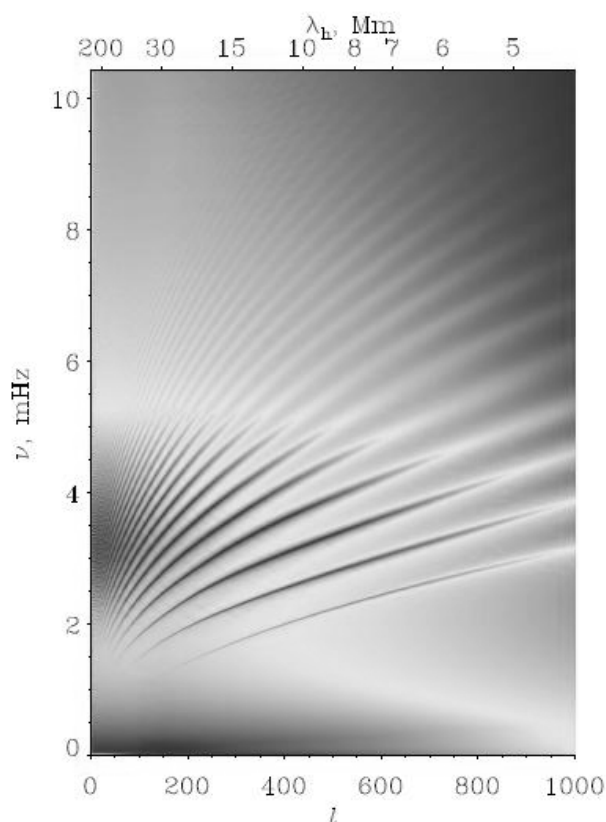


図 65 太陽 5 分振動の診断図

波長の代わりに次数 l を用いているので、 (l, ν) 図とも呼ばれる。横軸が次数で縦軸が振動数 ν （図の上部に波長も示してある）。横軸の数値が大きいほど振動の波長は短い。この図は、図の中程にある黒い筋の部分（原図では赤）の振動が強く励起されることを表している。

（出典：<http://solarwww.mtk.nao.ac.jp/heliology/heliology.html>）

図 65 は理論的に作成した (l, ν) 図で、図の中程にある黒い筋の部分（原図では赤）の振動が強く励起されることを表している。

一方で、観測的には、太陽 5 分振動の時間変化から振動数 ν を、表面の振動パターン分析——ようやく WMAP のパターン分析に関係しそうな感じになってきた——から次数 l を測定することができる。したがって、観測的にも (l, ν) 図を作成することができる。そして、理論的に得られた診断図（安藤&尾崎 1975 年）と観測的に得られた診断図（Deubner 1975）が見事に一致して、太陽 5 分振動が p モードの固有振動であることが確立したのだ。

なお、このような診断図の上では、強く励起される振動が筋状（嶺状）になっていて、その数本の嶺の強度（パワー）として振動の性質が表される。この嶺の現れ方を、一般に「パワースペクトル（power spectrum）」と呼んでいる。

たとえば、図 65 の診断図では、振動数でいえば 3 mHz とか 4 mHz ぐらいの振動がもっとも強いことがわかる（5 分の周期に対応する振動数は 3 mHz になる）。

最後に、太陽 5 分振動の仕組みに一言だけ触れておく。太陽の表面は内部から上昇してくる対流によって常に叩かれ続けている。その結果、太陽の表面では、次数や位数の異なる無数の振動がわき起こっているのだが、診断図では、それらの振動のパワーがどこらへんに集中的に配分されているかが示されているのである。そして、上で書いたように、振動数でいえば 3 mHz とか 4 mHz ぐらいの振動がもっとも強いのである（5 分の周期に対応する振動数は 3 mHz になる）。これはかなり低い重低音の音波で、ふつうの音に比べても 10 数オクターブも低い。もちろん人間の耳には聞こえないが、太陽の超々バスの歌声だ、と書いておけば収まりがよからうか。

7.4 天球と WMAP

ようやく本題である WMAP のパワースペクトルの話だ。ここまで長々と準備(?)してきたが、すべては(ぼく自身も正確には把握していなかった)以下に出てくる図 67 を説明するためだ。

(1) WMAP の復習

何度か出した図 53 は全天を楕円に投影した図だが、球面に投影したものを図 66 に示しておく。オリジナルな画像は横並びだが、紙面の都合で縦並びにした。

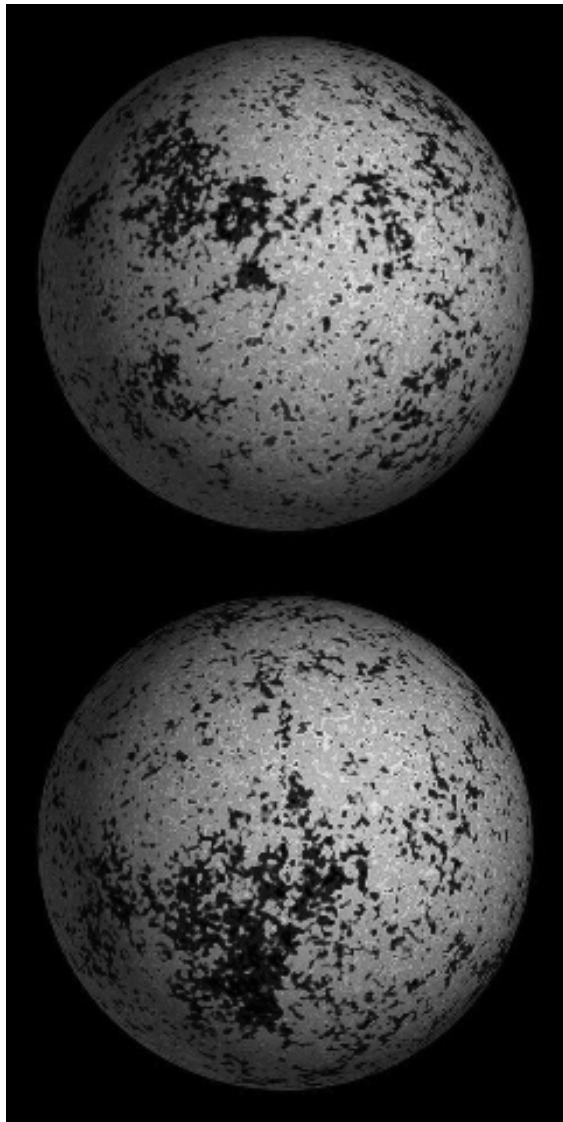


図 66 球面に投影した WMAP データ

(出典: http://apod.nasa.gov/apod/image/0312/globes_wmap_big.jpg)

まず、図 53 や図 66 の意味を復習しておこう。これらの図で表されているのは、温度ゆらぎだった。すなわち、3K 宇宙背景放射は絶対温度でほぼ 2.725K の黒体放射になっているが、その温度からのわずかなずれ(相対的に 10 万分の 1 程度)を表したものだ。

そもそもどうして温度ゆらぎが生じたかについて、簡単に復習しておきたい。

宇宙が誕生して直後は、素粒子のスープはごった煮状態で大変だったが、3 分ぐらい経つと宇宙は少し冷えて、光子とバリオン物質とダークマターぐらいが残った状態になる。このころから宇宙の晴れ上がりまでの 38 万年間(赤方偏移で 1088)ほどは、宇宙は非常に不透明な時代だった。この時期、光子はとにかく飛び回って周囲のバリオン物質に圧力(輻射圧)を及ぼしていた(バリオン物質のガス圧もあるが、この時期は輻射圧に比べれば無視できる)。一方、バリオン物質は自分自身の重力で集まろうとする。こうしてこの時代は、バリオン物質の重力と光子の輻射圧がせめぎ合っていた時代である。

もし宇宙が全体で完全に一樣だったならば、重力と輻射圧も宇宙中で完全に拮抗して、温度むらなどは生じなかつただろう。しかし、自然界には必ずゆらぎが存在している。とくにこの場合は、宇宙誕生時の量子論的なゆらぎが存在していたはずである。その初期条件として存在していた量子ゆらぎのために、その後生成されたバリオン物質にもわずかなゆらぎが存在する。そして、バリオン物質が平均よりもわずかに密な部分(疎な部分)は重力(輻射圧)によって縮まろう(広がろう)とするが、そうすると輻射圧(重力)が強くなって広がろう(縮まろう)とする。その結果、宇宙中で振動が生じるが、これは圧力(輻射圧)で生じる振動なので、まさしく音波振動の一種である。

また実際的には、銀河形成のところで述べ

たように、ジーンズ波長よりも十分小さいスケールの振動では重力はほとんど無視できるので、そういう意味でも、圧力（輻射圧）を復元力とする音波振動そのものといえる。

(2) WMAP のパワースペクトル

本題の 3K 宇宙背景放射は、天球全体から到来し、また周知のように天球は球面の裏側としてみなすことができるので、(奥行き方向の情報を脇に置けば) 球面である太陽表面の振動と同じように扱うことができる。また、3K 宇宙背景放射に関しては、宇宙の晴れ上がりが起こった時期（赤方偏移で 1088）を見ているのだから、地球からの距離はほぼ同じで、まさに球面を裏側から観測している状態になっている。

ただし、3K 宇宙背景放射については、太陽の 5 分振動と異なり、振動数はゆっくりすぎて観測できないため（以下に述べる診断図の最初のピークに相当する基本振動で、振動の周期は 152 万年と見積もられている）、太陽 5 分振動のような診断図は描けない。しかし、図 53 のゆらぎパターンから次数 l について分析して、どの次数 l の波が強いのかのパワースペクトルを作成することはできる（図 65 の診断図を縦に足し合わせたようなもの）。

具体的に、WMAP のデータを分析して、横軸を次数 l (宇宙論の分野では多重極モーメントと呼ぶようだ)、縦軸を強度（パワー）として作成したダイアグラム「角度パワースペクトル (angular power spectrum of CMB)」が図 67 である。太陽 5 分振動のような 2 次元の診断図でないので、情報は圧縮されて少なくなるが、分析はこちらの方が簡単である。

なお、次数（図 67 の上側のスケール）が大きいほど振動の波長は短いのだが、いまの場合は、振動（ゆらぎ）の見かけの角度（図 66 の下側のスケール）に対応する。次数が

100 だと角度で 2° ぐらいで、次数が 1000 になると角度も 0.2° ぐらいになる。COBE 衛星の角度分解能は 7° だったので、このようなパワースペクトルを作成できなかった。しかし、WMAP 衛星では 13 分角（約 0.2° ）にまで精度が上がったので、ここまで詳細にゆらぎの分布を解析してパワースペクトルを作成できたのだ。

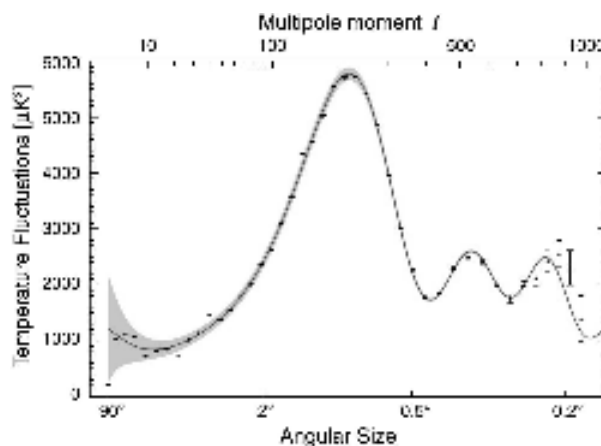


図 67 WMAP のゆらぎから得られた 3K 宇宙背景放射の角度パワースペクトル

横軸は次数（多重極モーメント）/（上側のスケール）あるいはそれに相当する角度サイズ（下側のスケール）で、縦軸は温度ゆらぎの強さ。黒い点が WMAP のデータで、なめらかな曲線は理論カーブ。

（出典：http://www.nasa.gov/images/content/216401main_graph_wmap.jpg）

(3) パワースペクトル

観測データから実際にパワースペクトルを作成する手法（理論というより統計的手続き）について、少し触れておく。和洋 4 冊ほどのテキストを比べてみたところ、数学的には何通りか方法があり、人によって、細かい係数などの取り方も微妙に違うが、(ぼくにとっては) 一番わかりやすかった方法をまとめておく (Longair 2008)。

まず観測的に測定されるのは、ある (θ, ϕ) 方向の 3K 宇宙背景放射の温度分布 $T(\theta, \phi)$

だが、これから平均温度 T_0 ($=2.725\text{K}$) を引いたもの、すなわち、

$$\Delta T(\theta, \phi) = T(\theta, \phi) - T_0$$

が温度ゆらぎである。あるいは平均に対する相対的な温度ゆらぎとしては、

$\Delta T(\theta, \phi) / T_0 = [T(\theta, \phi) - T_0] / T_0$ となる。図 53 や図 66 など示した COBE や WMAP の図はこれらの温度ゆらぎの大きさを示したもので、また相対的な温度ゆらぎの値が 10 万分の 1 程度であることはすでに述べたとおりだ。

さて、この相対的な温度ゆらぎを先の球面調和関数で展開すると、(73) 式のような形に表すことができる。ここで係数 a_{lm} は、各次数と位数における球面調和関数の振幅で、以下述べるように、この 2 乗がパワースペクトルの値になる。また、積分 (和) の範囲については、次数 l に関しては 1 (0 のものは平均値としてすでに引いているので) から ∞ (実際には有限個で打ち切る) まで、位数 m に関しては先の範囲内とする。

$$\frac{\Delta T}{T_0}(\theta, \phi) = \frac{T(\theta, \phi) - T_0}{T_0} = \sum_{l=1}^{\infty} \sum_{m=-l}^{m=l} a_{lm} Y_{lm}(\theta, \phi) \quad (73)$$

$$\int_{4\pi} Y_{lm}^* Y_{l'm'} d\Omega = \delta_{ll'} \delta_{mm'} \quad (74)$$

$$a_{lm} = \int_{4\pi} \frac{\Delta T}{T_0}(\theta, \phi) Y_{lm}^* d\Omega \quad (75)$$

$$C_l = \frac{1}{2l+1} \sum_{m=-l}^{m=l} a_{lm} a_{lm}^* = \frac{1}{2l+1} \sum_{m=-l}^{m=l} |a_{lm}|^2 \quad (76)$$

必要なのは係数 a_{lm} の情報だが、これは球面調和関数の正規直交性を利用して求める。すなわち、(74) 式のように、二つの球面調和関数を掛け合わせて全方位で積分すると、

それぞれの球面調和関数の次数と位数が共に等しいときにのみ積分の値は 1 となり、どちらかが異なると 0 となる性質をもっている。このような性質を「正規直交性 (orthogonality)」と呼んでいる。なお、(74) 式で、 $d\Omega$ は角方向の積分要素で、球座標の場合、 $d\Omega = \sin \theta d\theta d\phi$ である。

このような正規直交性があるので、(75) 式のように、観測で得られた温度ゆらぎに球面調和関数を掛けて全方位で積分すれば、掛けた球面調和関数の次数と位数に対応する係数 a_{lm} が得られる。なお、(74) 式や (75) 式の球面調和関数についている * (アスタリスク) は、「複素共役 (complex conjugate)」を表していて、球面調和関数の中に複素数が含まれる場合には、虚数単位の符号をマイナスにしろという意味である。高校数学で複素数の絶対値を取るときには、虚数単位の符号が ± のものを掛け合わせるが、それと同じことをしているだけだ。

こうして各次数と位数における係数 a_{lm} が得られたなら、(76) 式のように、その係数 a_{lm} の 2 乗を位数全体で積分 (和) して、さらに各次数の個数 $(2l+1)$ で割って規格化して、ある次数 l に対応するパワースペクトル C_l が得られる。このパワースペクトルが図 66 の縦軸 (観測的な黒い点の方) に相当するものだ。

一方、理論的なモデルからもパワースペクトルを計算するのだが (図 67 の曲線の方)、その方法は勉強不足なため省略する。

重要なのは、観測データから何がわかったかということだろう。

(4) WMAP データの解析でわかったこと

■宇宙は平坦であった

図 67 のパワースペクトルで目立つのは、角度で 1° 付近 (多重極モーメント l で 200 付近) にはっきりしたピークがあることだ。

これを「第一音響ピーク（first acoustic peak）」と呼んでいる。

この第一音響ピークの角度サイズは、宇宙が晴れ上がったときの音波振動のスケールに相当する。宇宙の曲率が正（閉じた宇宙）の場合は、遠くのもののは見かけ上大きく見えるが、曲率が負（開いた宇宙）の場合は小さく見える。したがって、このピークの角度サイズがわかれば、宇宙の曲率に関する情報を得ることができる。

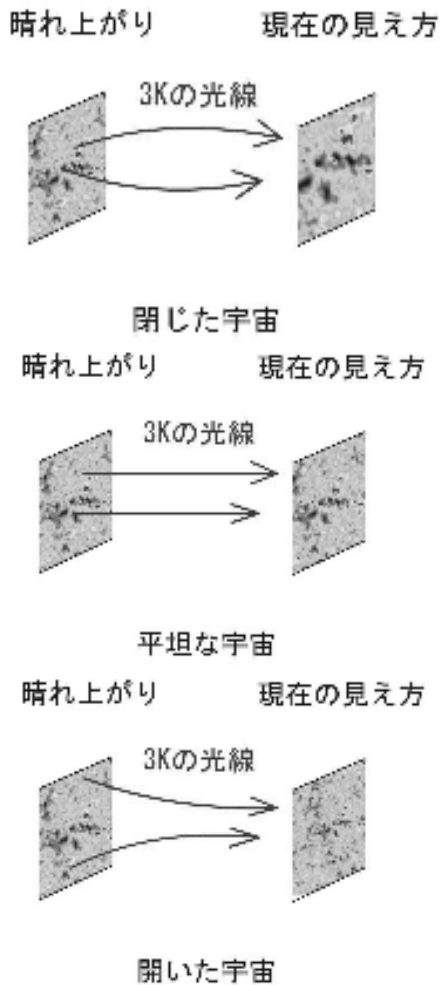


図 68 閉じた宇宙、平坦な宇宙、開いた宇宙での光線の伝播の仕方と宇宙背景放射の見え方

具体的には、インフレーション宇宙モデルでは宇宙は平坦（曲率はゼロ）だと予想されるが、その場合には、光線はまっすぐに届き、ゆらぎの角度サイズは 1° 程度になる（図 68

中）。しかし、もし宇宙が閉じていれば（曲率が正）、光線は収束する方向に曲がるので、観測される角度サイズは 1° よりも大きくなったはずだ（図 68 上）。逆に、宇宙が開いていれば（曲率が負）、光線は発散する方向に曲がるので、観測される角度サイズはもっと小さなものになっただろう（図 68 下）。

すなわち、ピークの角度サイズが 1° ということは、宇宙の曲率が 0、すなわち平坦な宇宙であることを意味しているのだ。

■宇宙の内容物

さらに第一音響ピークは、もちろん最低の振動数をもつ基本振動だが、開放端をもつ管内の振動と比較すると、ビッグバンを固定端（節）とし宇宙の晴れ上がりを開放端（腹）とする基本振動に相当する（図 69 参照）。すなわち、宇宙の晴れ上がりの 38 万年までが振動の $1/4$ 周期に相当するので、この第一音響ピークの振動周期は約 152 万年ということ

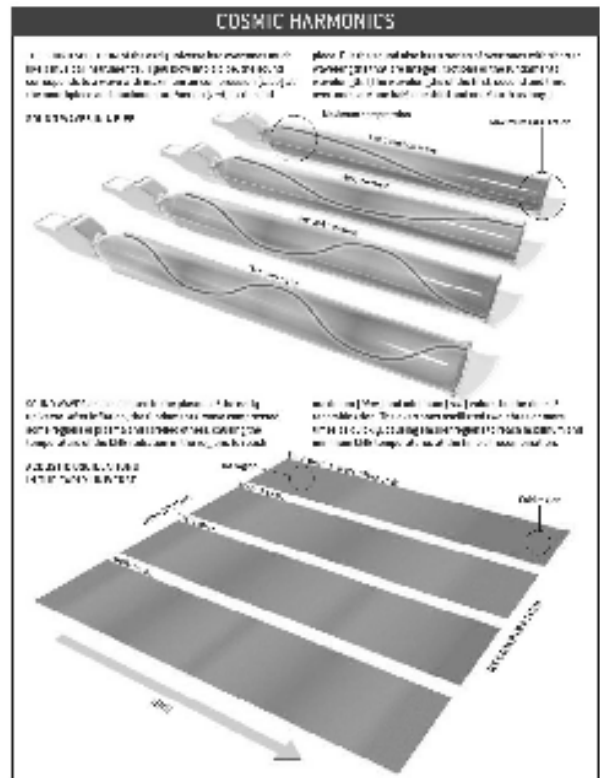


図 69 管内の音波と宇宙背景放射の音波 (Krauss and Turner 2004)

になる。

ちなみに、第二ピーク以降のより小さいスケールの振動は、それぞれ、振動の 3/4 周期、5/4 周期、7/4 周期などとなる（図 56、図 69 参照）。

そして、第一ピーク、第二ピーク、第三ピークの強さの比較から、音波振動に影響を与えるダークマターなどに関する情報が得られる。それらの詳細な分析の結果、宇宙の内容物に関して、

ダークエネルギー	73%
ダークマター	23%
通常のバリオン物質	4%

という値が得られたのだ。

7.5 バリオン音響振動

すでに述べたように、バリオン物質（通常物質）のゆらぎは、WMAP など観測された 3K 宇宙背景放射のゆらぎパターンと連動している。宇宙の晴れ上がり前は、宇宙全体が不透明で、宇宙全体は、バリオン物質と（後に 3K 宇宙背景放射となる）光子が混ぜ合わさった高エネルギーのスープだった。そして、そのようなスープの中でのゆらぎでは、バリオン物質と光子は同時に振動することになる。

すなわち、バリオン物質が少し濃い領域では光子も少し多くなり、光子が少し多い領域ではバリオン物質も少し濃いわけだ。そして、光子のゆらぎの振動パターンは 3K 宇宙背景放射に残された。同じように、バリオン物質の振動パターンも存在したはずで、それが現在の宇宙の物質分布にも刻み込まれていると予想される。それを「バリオン音響振動 BAO (baryon acoustic oscillations)」と呼んでいる。

事実、SDSS (Sloan digital sky survey) や 2dFGRS (two degree field galaxy redshift survey) などの広域銀河探査で、銀河の分布の分析から、BAO の痕跡が発見されている (2005 年)。すなわち、銀河の分布について

パワースペクトルを作成すると、音響パターンが見つかったのである (図 70)。

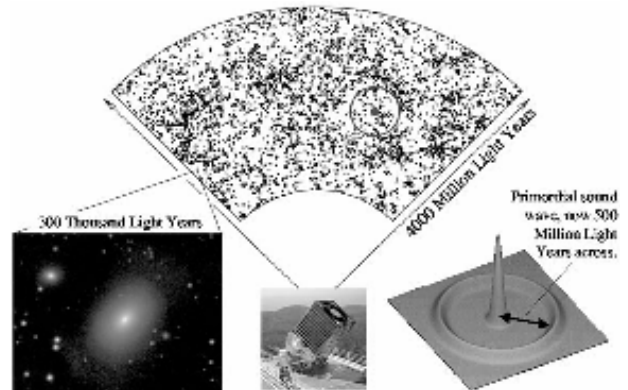


図 70 銀河分布の音響ゆらぎ

BAO についての詳細については(力尽きてきたので)省略するが、WMAP や BAO のゆらぎ分析によって、ダークマターのゆらぎを背景にして、バリオン物質が銀河や銀河団を形作っていったというシナリオは、現時点ではおおむね認められたと思われる。すなわち、宇宙が晴れ上がった後、暗黒時代を経て、現在に至るまでの宇宙の構造形成は、大筋としては理解できたと考えてよからう。

もちろん、初期宇宙や宇宙の暗黒時代にはまだ未解決のさまざまな謎が残されており、たとえば、ぼくの関連分野だと、銀河中心に存在する超巨大ブラックホールの形成だとか、超巨大ブラックホールと銀河の共進化などが、いまホットな話題である。さらにまた、ダークマターやダークエネルギーがいったいなにものなのかという、根元的な問題は、大きく残されている。

参考文献

Krauss, L. M., Turner, M. S. (2004) *Sci. Am.*, Dec.
 Hinshaw, G., Naeye, R. (2008) *Sky and Telescope*, May, 18
 Longair, M. S. (2008) *Galaxy Formation* (Springer, New York)

福江 純 (大阪教育大学)