

COBE に続く 温度ゆらぎの観測

1993年4月のCOBE（宇宙背景輻射探査衛星）による背景輻射のゆらぎの発見が宇宙論に与えた影響は計り知れない。だが、COBEの観測したゆらぎは10度角スケールという非常に大きなものであり、直接には我々の観測する大規模構造とは結びつかない。しかし、最近になって1度角スケールの観測がものすごい勢いで行われ、続々とその結果が発表されつつある。本小文ではそれらの現状をできる範囲でまとめ、あわせて大規模構造形成の理論に及ぼす意味付けを考えてみたい。

COBE (DMR) による宇宙背景輻射のゆらぎの発見以来、1年と半年ほど経過した。すでに最初の1年分のデータは公開され、2年目以降のデータについても国際会議の場などでは少しずつ発表されつつある。この発見はビッグバンの名残ともいえる背景輻射に（銀河からの放射や固有速度などによるものではない）非等方性を初めて見つけたという点で特筆すべきものである。これまでにはなかった全天の捜査である点も画期的であった。しかし、この観測には解像度が粗い（ビーム幅が7度）という問題点もある。この7度という角度スケールは知られている宇宙の大規模構造よりもはるかに大きなものである。そこで、大規模構造と直接関係する1度程度の角度スケールでの温度ゆらぎの観測が重要になってくる。理論的にも後述するようにこのあたりの角度スケールで大きな値の温度ゆらぎの存在が期待される。

このような動機から、最近急激に1度スケールあたりでのゆらぎの観測が増加している。驚くべきことに、その多くはゆらぎの測定を報告している。しかし、各々の観測が必ずしもお互いに矛盾のない結果をだしているわけでもない。観測の現

状がどうなっているのか以下で見ていきたい。

さて、温度ゆらぎの観測とはいったい何を観測しているのだろうか。普通行われているのは、天空上の2点（ないし3点）をほとんど同時に見る（通常はビームをすばやくチョッピングする）ことで、その2点の温度の‘差’を観測するというものである。ここで注意しなければいけないのは、この‘差’をどう定義するかが観測によってまちまちであることだ。極端な話、その2点が T_1 と T_2 という温度であったとして、 $T_1 - T_2$ で定義されたか $(T_1 - T_2)/2$ で定義されたかではゆらぎの大きさは2倍変わってしまう。実際に、かなり複雑な設定をおこなっている観測では、その定義が非常に分かりづらい場合が少なくない。なんとかして全ての観測を同じ土俵にのせたい。そうすることで、初めて理論的に期待される温度ゆらぎの値と比較することもできる。そこで考案されているのが、以下の2つの方法である。

1) ガウス型相関関数

観測された温度分布の角度相関を強引にガウス型でフィットしてしまう方法¹⁾。理論的には何の根拠もないのであるが、とにかく何らかの目安にはなる。観測家はこの方法を好んでいるのだが、難点は得られた温度ゆらぎの値（指数関数にかかる係数で定義される）を直接理論モデルと比較することができないことである。

2) ウインド関数

観測の設定を l 空間（球関数の足）上で展開して（いわゆる多重極展開）、観測の感度を l の関数として表す方法。当然差を見ている2点間の角度に対応する場所に感度の極大が存在し、解像度（ビーム幅）に対応する場所でカットオフが生じる。観測の感度であるから大きな面積のウインド関数を持った観測は大きな温度ゆらぎの測定が期待できる。逆に面積が小さい観測はたとえ報告された温度ゆらぎの上限値が小さくても、実際はそれほど厳しい制限になっていない。ウインド関数は観測値の定義を与える。また、これがわかれば容易

に観測と理論を比べることができる。詳しいことははぶくが、 W_l をウインド関数、 C_l が理論から期待される係数（宇宙モデルによって異なる）とすると $(\Delta T/T)^2 = \sum(2l+1)C_l W_l / 4\pi$ と表される。このゆらぎの期待値を観測値と比較することでモデルの正否を知ることができるのである。

次に最新の観測結果を示す。それぞれよく使われているニックネームによって表した。括弧内は主たる研究機関名。ゆらぎが測定されたものには測定、上限値だけのものは上限と記した。また分解能は FWHM (半値幅) で表した。温度ゆらぎの値はガウス型相関関数を用いて定義してある。複数の周波数を用いて観測している実験が多いのは、周波数によって強度が変わる銀河面からの放射の影響を除去するためである。

a) FIRS (MIT, NASA/Goddard) : (測定)²⁾

気球による観測、全天の 30% を走査、3.8 度の分解能、周波数 170 GHz. COBE の結果と非常に良い一致を示した。

b) Tenerife (Jodrell Bank) : (測定)³⁾

地上での観測、40 度の赤緯で赤経 161-230 度の領域を 8.1 度離れた 2 点をスイッチング、5.5 度の分解能、10, 15, 33 GHz の 3 つの周波数。 $\Delta T/T = 2 \times 10^{-5}$ 。

c) ACMT HEMT South Pole (UCSB) : (上限)⁴⁾, (測定)⁵⁾

南極での地上の観測、3 度でスイッチングしながら 2.1 度間隔づつ離れた 9 点 (Gaier) と 13 点 (Shuster) 測定、1.5 度の分解能、25-35 GHz で 4 チャンネル。上限は $\Delta T/T < 1.4 \times 10^{-5}$ (95%)、測定は 8.6×10^{-6} 。

d) Saskatoon (Princeton) : (測定)⁶⁾

地上での観測、天の北極から 4.9 度離れた場所を 4.9 度でスイッチングしながら測定、1.44 度の分解能、25-36 GHz で 3 チャンネル。 $\Delta T/T = 1.5 \times 10^{-5}$ 。

e) ARGO (Italy) : (測定)⁷⁾

気球による観測、1.8 度のスイッチングで 63 点測

定、52 分の分解能、150-600 GHz で 4 チャンネル。 $\Delta T/T = 1.6-2.6 \times 10^{-5}$ (90%)。

f) MAX (UCSB, UCB, LBL) : (測定)⁸⁾, (上限)⁹⁾ (2 つの観測は見ている領域が異なる)

気球による観測、1.3 度のスイッチングで 16 点と 21 点測定、0.5 度の分解能、180-360 GHz で 3 チャンネル。 $\Delta T/T = 4.2 \times 10^{-5}$ (Gundersen), $\Delta T/T < 2.35 \times 10^{-5}$ (Meinhold)。その後新しい観測を今年になって行い、それぞれの領域で 4.5×10^{-5} , 1.8×10^{-5} の測定値が得られたとの発表があった。

g) MSAM (NASA/Goddard, MIT, Princeton) : (測定)¹⁰⁾

気球による観測、1.3 度のスイッチングで 14 点測定、28 分の分解能、170-680 GHz で 4 チャンネル。 $\Delta T/T = 0.8-2.4 \times 10^{-5}$ (90%)。これは 10^{-4} 程度の正体不明の点源を省いた結果である。

h) White Dish (UBC, Princeton) : (上限)¹¹⁾

南極点での地上の観測、28 分の直径の円形ビームで 15 分離れた 5 点を測定、12 分の分解能、90 GHz。 $\Delta T/T < 2.3 \times 10^{-5}$ (95%)。

驚くなかれ COBE の後、なんと既に 7 つ (国際会議の場では他にも Pyson というグループが測定値を発表している。これを含めれば 8 つ) のグループが何らかの測定を発表している。もちろんどのグループも銀河からの影響は注意深く除去したとはいつているものの、これが本当の (ビッグバンの名残の) 温度ゆらぎかどうかはそれでも疑問が残るのであるが、ではこれらの観測を理論のモデルと比較するとどうなるのであろうか。

先にも書いたように、観測と理論を比較するにはウインド関数 W_l と宇宙モデルから期待される C_l を用いるのが容易である。そこで W_l と C_l を並べて図 1 に示す。少しわかりにくいかもしれないが、 l は天空上の角度にほぼ逆比例していて、例えば $l = 1$ が 180 度に対応する。また W_l は各々の観測の感度を示していて、 C_l はパラメータが異なる様々な宇宙モデルが期待する値、すなわち天空上の温度ゆらぎの 2 乗平均のスペクトルである。

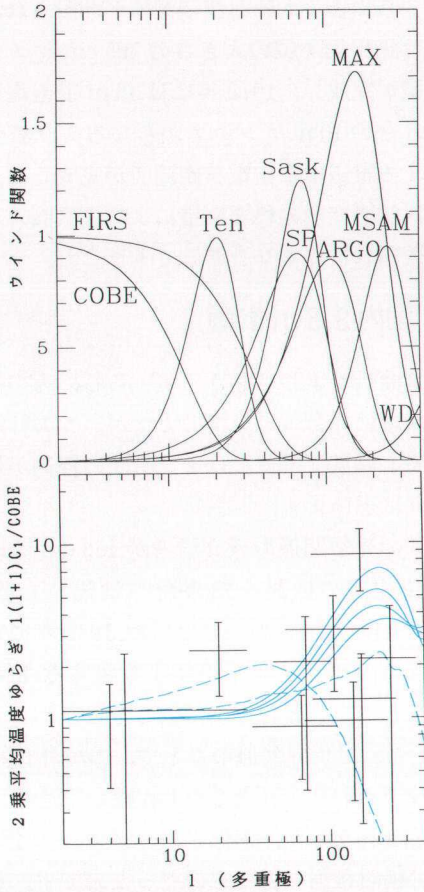


図1 様々な観測のウィンド関数 W_l (上図) と COBE の観測値で規格化した宇宙モデルの期待するゆらぎの値 C_l (下図). 上図では、各観測をニックネームで表わしてある. 下図では標準的な Cold Dark Matter 優勢な宇宙モデルで Harrison-Zeldovich スペクトルを考え、実線のピークの大きなものから順にバリオンの量が全密度に対して10%, 6%, 3%, 1%となっている. また破線は宇宙がいったん透明になった後の再加熱を考慮したモデルで、その時期が $z=150$ ($l=40$ にピーク), $z=50$ ($l=200$ にピーク) の場合である. また下図には各々の観測から期待される値もある近似の下に記してある. 縦は誤差を横はウィンド関数の幅を表している. 左から順に COBE, FIRS, Tenerife, ACMT HEMT South Pole (13点), Saskatoon, ARGO, MSAM (2-beam), MAX (上が Gundersen, 下が Meinhold), MSAM (3-beam). (協力 M. White)

となどが挙げられよう. しかし、宇宙モデルがわずかに異なるだけで C_l の振る舞いが度スケールでは大きく変化することから、これらの観測が宇宙モデルの選定に大きな役割を果たすことは間違いない. ここ数年の内にさらに数多くの観測が行われることは確実で、その結果として大規模構造の形成の問題に決着がつくようになるかもしれない.

杉山 直 (California 大 Berkeley 校, 東大理)

参 考 文 献

- 1) 例えば、佐藤文隆 1993, 天文月報, 86(9), 327.
- 2) Ganga, K. et al. 1993, *Astrophys. J. Letters*, 419, L57.
- 3) Hancock, S. et al. 1993, submitted to *Nature*.
- 4) Gaier, T. et al. 1992, *Astrophys. J. Letters*, 398, L1.
- 5) Shuster, J. et al. 1993, *Astrophys. J. Letters*, 412, L47.
- 6) Wollack, E. J. et al. 1993, *Astrophys. J. Letters* in press.
- 7) de Bernardis, P. et al. 1993, submitted to *Astrophys. J. Letters*.
- 8) Gundersen, J. O. et al. 1993, *Astrophys. J. Letters*, 413, L1.
- 9) Meinhold, P. R. et al. 1993, *Astrophys. J. Letters*, 409, L1.
- 10) Cheng, E. S. et al. submitted to *Astrophys. J. Letters*.
- 11) Tucher, G. S. et al. 1993, *Astrophys. J. Letters* in press.

たいていの場合 C_l は極大を $l=200$ あたりに持つ. すなわちこのあたりに極大がある W_l をもった観測がもっとも温度ゆらぎを測定できる可能性が高いのである. それがまさに度スケールに対応する. そのため、最近急激にこの角度スケールの観測が増加してきたのである. 図1には理論の期待する C_l と共に測定値がある近似の下で記入してある. おおむね、この測定値の誤差の範囲内を C_l が横切るかどうかで観測と理論が矛盾のないものであるかどうか判定できる. しかし、この図からは観測同士の間にもまだ不明瞭な点があること、そのため、全ての観測を満足させる理論を考えることは現段階では不可能であることがわかれると思う. 現時点での観測の問題点は、COBE と FIRS を除くと空のわずかな部分しか探索していないこと、銀河面からの影響の見積りが難しいこ