

CMB観測の現状、成果、展望

杉山直*

国立天文台理論天文学研究系

概要

最近のCMBの観測の進展には目覚ましいものがある。これまでにいったい何がわかつてきただのか、そして近い将来、何が明らかにされるのかについて述べる。

1 CMB温度揺らぎで何がわかるのか

CMB(宇宙マイクロ波背景放射)は、宇宙誕生から30～50万年後の水素原子形成期の情報を我々に直接伝えてくれる、宇宙の最も古い化石と呼べるものである[1]。そのほとんど完璧なプランク分布は、宇宙がかつて熱平衡状態にあったことを物語っており、ビッグバンの直接的な証拠となる。また、空間的にもその温度分布は非常に等方であり、太陽系の固有運動による双極子成分を除けば、10万分の1という非常に小さな温度揺らぎしか存在していない。このことは、宇宙の一様等方性、すなわちフリードマン宇宙モデルの正しさを支持するものである。さらに、水素原子形成期の地平線の大きさが、共同座標で $100Mpc$ 程度であることから、温度揺らぎにはその時期の地平線を越えた情報が含まれていると考えられる。実際に、COBE衛星の測定した温度揺らぎは、その角度分解能の悪さから、地平線を越えたスケールしかみていないことになる。この揺らぎの空間パターンが、インフレーションの予想するスケールフリーなものと、一致したことは、インフレーションの正しさを示唆する証拠となると考えられている。

温度揺らぎの空間分布に関して、3つの重要な統計量が考えられている。角度パワースペクトル C_ℓ 、揺らぎのパターン(フェイズ)、そして、偏光である。

C_ℓ の ℓ は多重極をあらわし、観測の見込む角度 θ とは、およそ $\ell = \pi/\theta$ の関係がある。COBEの角度分解能は7度であったために、 C_ℓ のうち、 $\ell < 20$ の範囲のみを測定したことになっている。

図1に C_ℓ の理論曲線が示してある。これはCDMの $\Omega_M = 1, h = 0.5, \Omega_B = 0.05$ かつ宇宙項、曲率がない場合である。ここで特徴的なのは、 ℓ の小さなところ、すなわち大きなスケールではほぼ一定になっていることと、 $\ell = 100 \sim 1000$

*naoshi@th.nao.ac.jp

での振動、そして $\ell \simeq 3000$ での急激な減衰である。これらは、それぞれ重力による赤方偏移、いわゆる Sachs-Wolfe 効果、音波モードの振動、そして、Silk damping と呼ばれる粘性による減衰によって生じている。

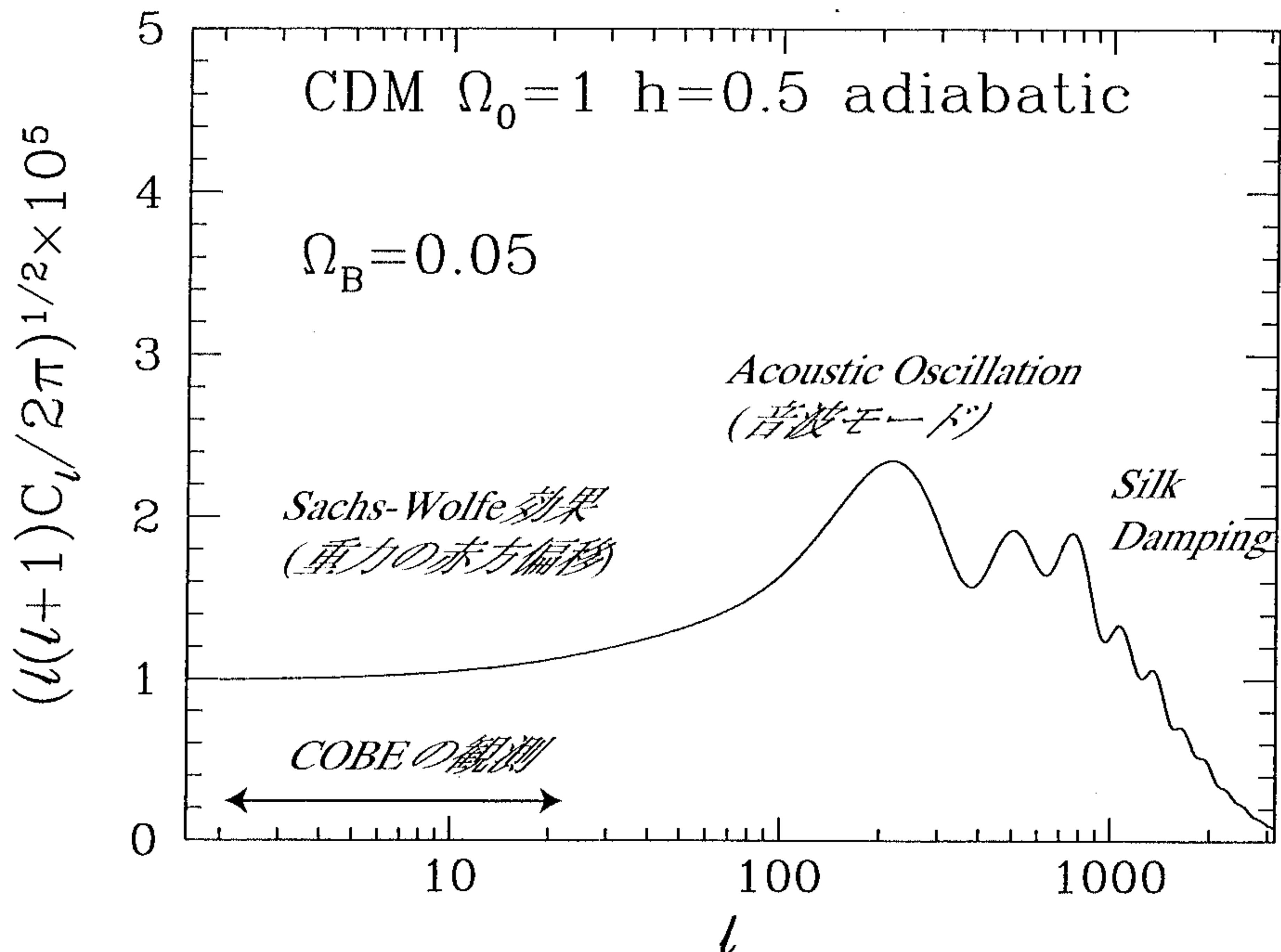


図 1: CDM モデルでの C_ℓ の理論曲線。

このピークの ℓ での位置や高さ、そして減衰の位置などに、多くの宇宙論パラメータの情報が含まれていることが明らかになった。例えば、ピークの位置に関しては曲率 Ω_K 、高さについては $\Omega_M h^2$ 、 $\Omega_B h^2$ 及び Ω_Λ 等の情報である。さらに、密度揺らぎの初期スペクトルのインデックス n 、ニュートリノのファミリーの数、また、近頃では G や α といった基礎物理定数の依存性に関する盛んに論じられている [2]。

揺らぎのパターンに関しては、特に、ガウス揺らぎか、非ガウス揺らぎなのかが、大きな興味がもたれる。宇宙の大規模構造などを用いると、揺らぎの成長の非線形成から、非ガウス的な成分が生成されてしまうが、CMB の揺らぎは線形でよいために、インフレーションでつくられたもとの揺らぎの性質を調べるために非常に的しているのである。さらに、大規模構造や背景 X 線放射の揺らぎとの相関を調べることでも、新たな情報が付け加わる可能性が指摘されている。また、宇宙の大域的トポロジーの情報も得られるのではないか、ということで盛んに研究が進められている [4]。

偏光は、特に CMB 光子が最後に電子と散乱した時の情報を伝えるものである。そのために、銀河形成に伴う宇宙の再イオン化の情報を得られるのではないかと期待されている。また、パリティの異なる 2 つのモード、E モー

ドとBモードを区別することで、その揺らぎの起源が、スカラータイプであるか、ベクトル、またはテンソルタイプであるかも明らかにできることは興味深い。

2 観測の現状

まず、図2に観測の現状を挙げておく。これは Tegmark によるまとめである。

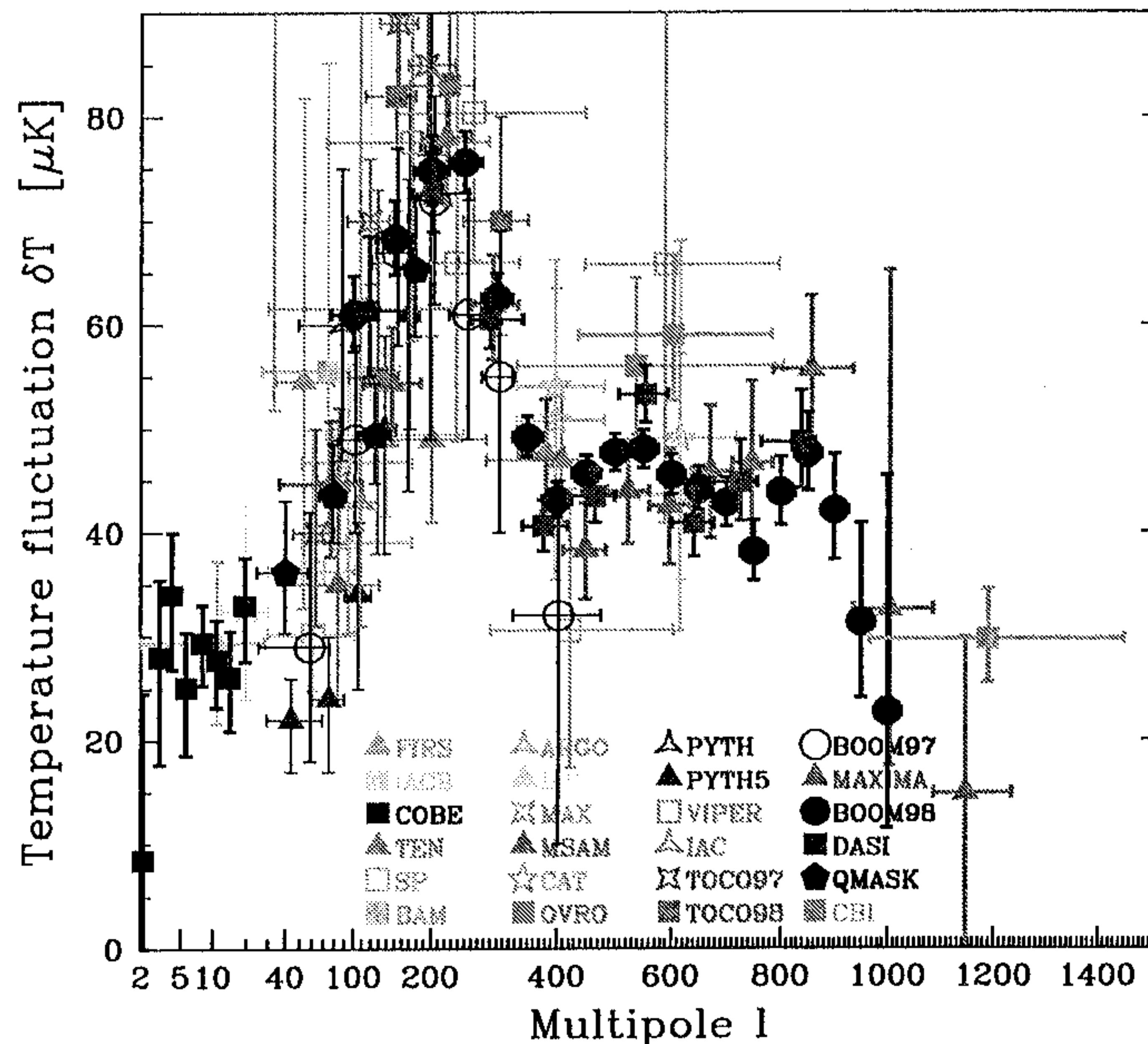


図2: 最近の C_ℓ の観測値。Tegmark より転載。

温度揺らぎの観測に関して、COBE/DMR による 1992 年の発見が大きなエポックメイキングになったことは、異論がないであろう [3]。これ以前もいくつかのグループによって測定が試みられていたが、その観測の難しさから、上限をつけるにとどまっていた。では、COBE によって何が明らかになったのだろうか。まず、COBE は水素原子形成期の地平線よりも大きなスケールしかみていないことに注意されたい。ここで測定されたのは、インフレーションによって初期につくられた揺らぎだけをみていることになる。Sachs-Wolfe 効果だけを見ているのである。そこで明らかになったことは、 $n = 1.2 \pm 0.3$ 、すなわちインフレーションの期待する $n = 1$ (COBE スケールでは、わずかな音波モードも寄与すると考えられるので、 $n = 1$ でも実際に観測されるインフレクティブな傾きは $n = 1.1$ 程度であると期待される) と見事に合ってい

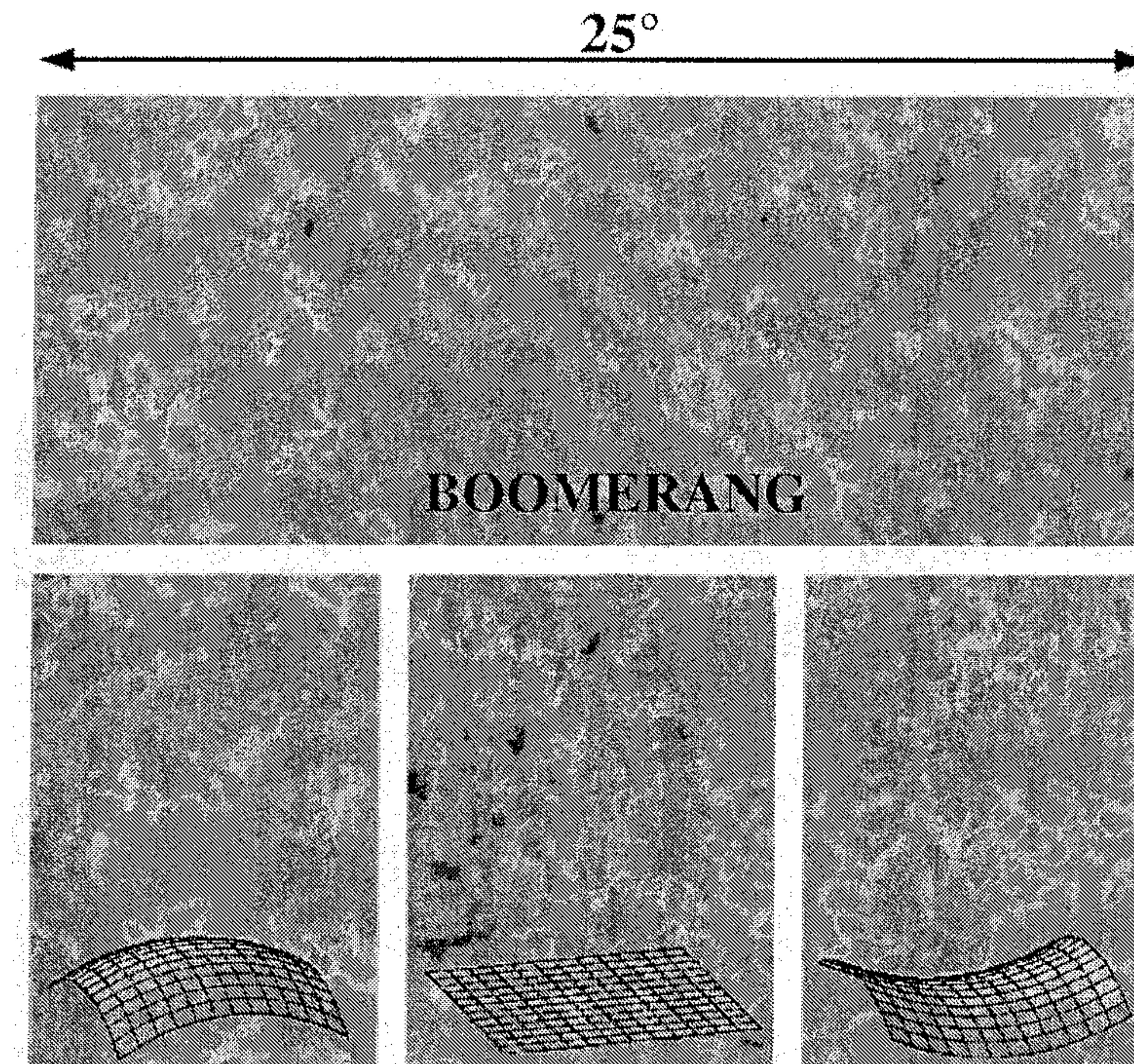


図 3: CMB のマップ。上図:BOOMERanG での観測、下図左:正曲率の場合、下図中:曲率 0 の場合、下図右:負曲率の場合、の理論計算。揺らぎのパターンの大きさは平坦な場合と一致。<http://oberon.roma1.infn.it/boomerang/> より転載。

たのである。また、この揺らぎの大きさによって、大規模構造をつくる密度揺らぎのパワースペクトルの振幅が、モデルをきめれば一意的に決まることがとなった。さらに、顕著な非ガウス成分が認められなかつたことも、インフレーションをサポートすると言えよう。

COBE の後、数多くの気球や地上からの実験が計画立案され実行に移された。その実験の名前は、FIRS, IACB, Tenerife, South Pole, BAM, ARGO, MSAM, CAT, OVRO, Python, VIPER, IAC, TOCO, BOOMERang, MAXIMA, DASI などである。これらは、ほとんど、COBE の測ることのできなかつた C_ℓ の音波モードの振動を測定することを目的としてた。なかでも、BOOMERanG[5] と MAXIMA[6] という最近の気球の実験は非常に大きな空の領域を測ることに成功し、またその感度も非常に高く、精度のよい測定を行うことができた。これから、図 2 に見るように、音波モードの振動が C_ℓ に存在していることはほとんど疑いの余地がなくなつたと言ってよいのではないだろうか。そのピークの位置から、宇宙の曲率はほぼ 0 であることが明ら

かになった。実際に BOOMERanG の観測した揺らぎのパターンと理論計算を比べてみると、平坦を示唆することが一目瞭然であろう(図3、4)。

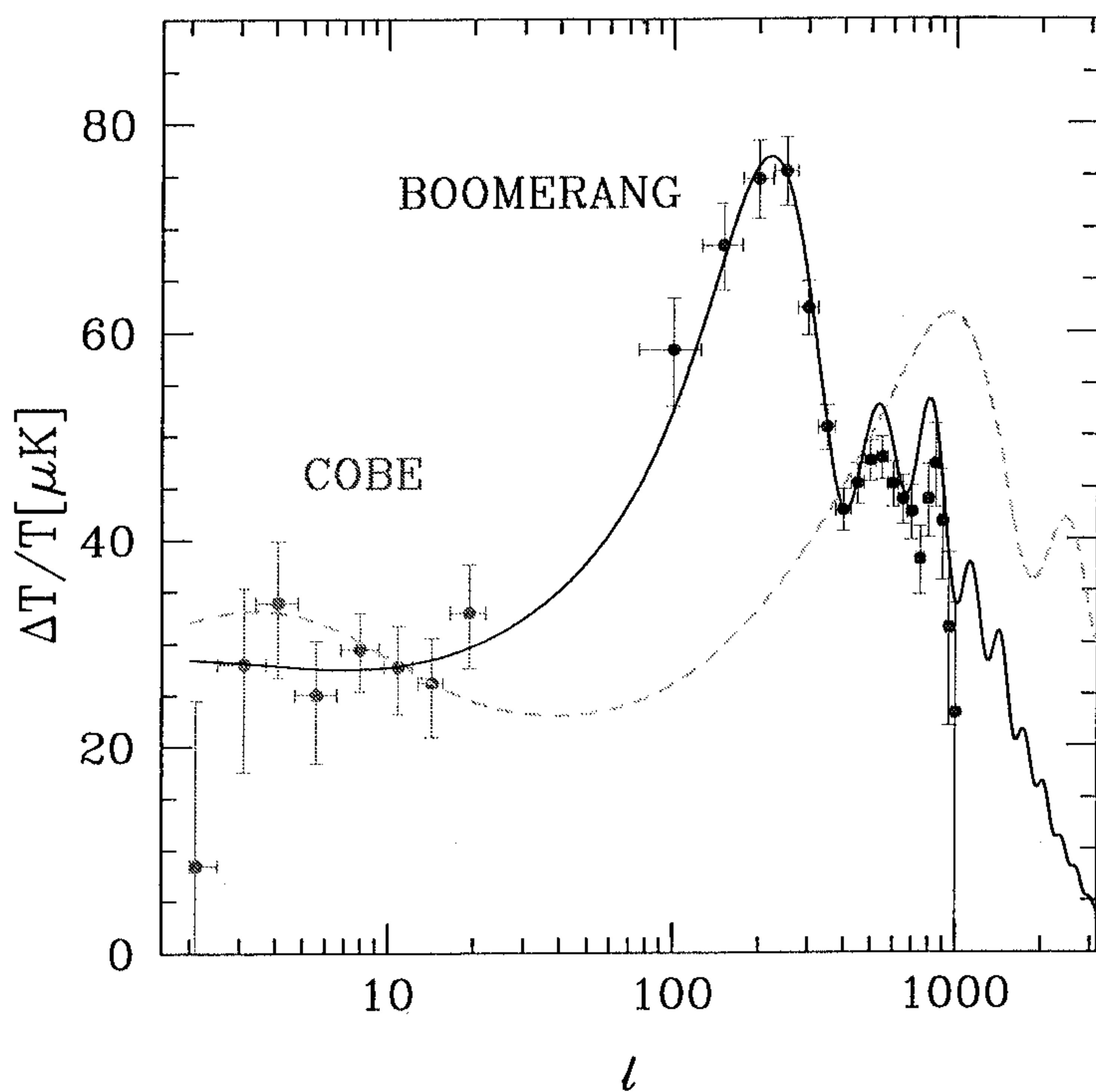


図 4: BOOMERanG と COBE の観測による C_ℓ と理論計算との比較。実線が曲率 0、点線が負曲率。

この結果と超新星サーベイの結果を重ねると、 $\Omega_M = 0.3, \Omega_\Lambda = 0.7$ という、現在標準的な CDM 宇宙モデルが出てくるのであるが、これはできすぎであろうか。Wang et al.[7] は 9 パラメータフィットを行っているので、興味のある向きは一読いただきたい。

偏光に対しては今のところ上限しか付けられていない。今後の進展を多いに期待したい。

3 今後の進展

まず、 $\ell < 1000$ での温度揺らぎの測定に関しては現在決定的とも言えるミッションが進行中である。昨年の 6 月末に打ち上げられた MAP 衛星によるものである。非常にクオリティの高いデータが既に L2 ポイントでの観測によって、得られているとの情報も入ってきてている。今年の秋には、結果が

発表され、宇宙論パラメータの高精度の決定がなされることであろう。また、PLANCK 衛星も 2007 年の打ち上げを目指して準備中である。さらに高い ℓ での情報、及び偏光の測定に威力を發揮することが期待される。

高い角度分解能による、 $\ell > 1000$ の測定も、いくつか計画されている。例えば、ATCA や CBI と呼ばれる計画である。さらに日本でもチリでの sub-mm での観測計画 ASTE がある。期待したい。このスケールでは、宇宙の再イオン化に伴う揺らぎなど、二次的揺らぎが検出されることが期待されている。MAP や PLANCK とは全く異なった情報をもたらしてくれるのである。

同時に、非常に多くの偏光の測定計画も立案されている。POLAR, COMPASS, PIQUE, CAPMAP, DASI, CBI, VLA, ATCA, AMiBA, QUEST, PLARBear, MAXIPOL, SPOrt 等である。

21 世紀のはじめの 10 年間は CMB の観測が洪水のようにでて、宇宙論の研究が一気に精密科学へと転換していく時代となるのであろう。

参考文献

- [1] 日本語での解説として、杉山直「膨張宇宙とビッグバンの物理」(岩波書店)
- [2] 最近の解説は杉山直、数理科学 2002 年 3 月号参照
- [3] G. Smoot et al., ApJ. 396, L1
- [4] 井上太郎、天文月報 2001 年, Vol.94, No.11, 518 に詳しい解説がある
- [5] P.de Bernardis et al., Nature 404 (2000) 955, C.B. Netterfield et al, submitted to ApJ. (astro-ph/0104460)
- [6] S. Hanany et al., ApJ. 545 (2000) L5
- [7] X. Wang, M. Tegmark, M. Zaldarriaga, astro-ph/0105091