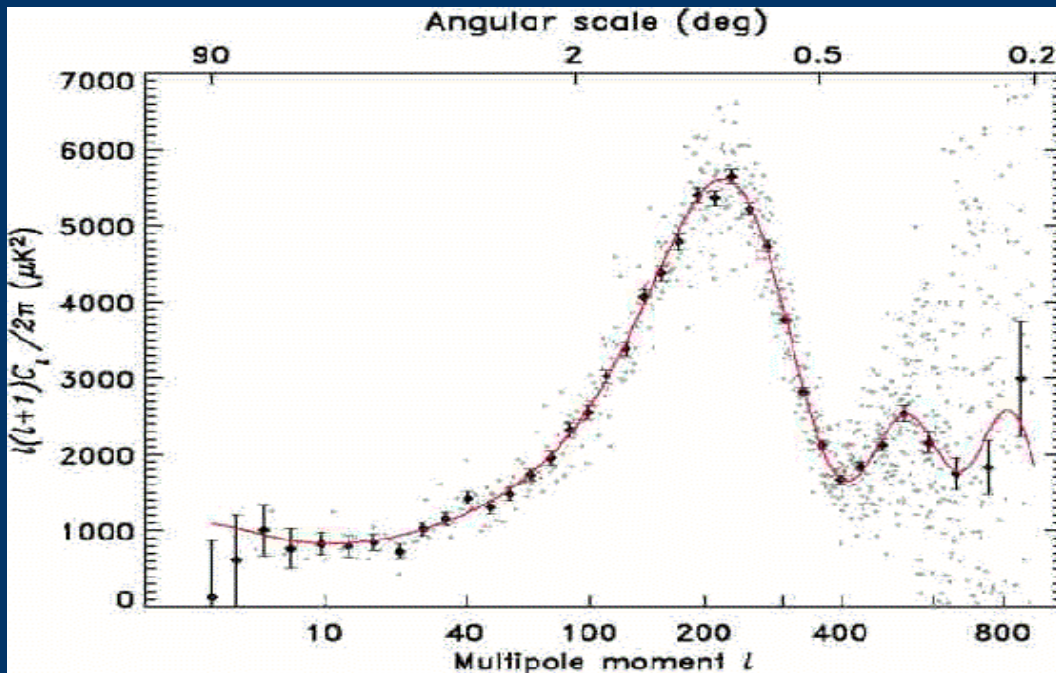
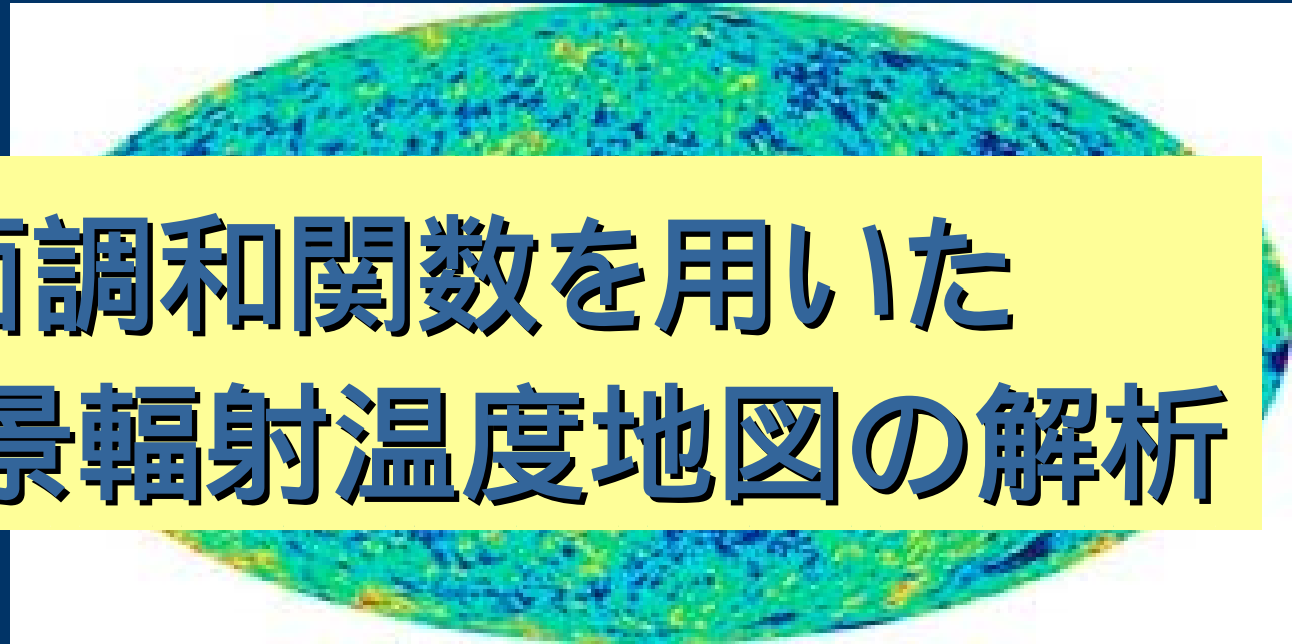


球面調和関数を用いた 宇宙背景輻射温度地図の解析



2003年夏学期

東京大学物理学教室

物理数学II

須藤 靖

第5回講義

2003年5月13日

http://www-utap.phys.s.u-tokyo.ac.jp/~suto/mypresentation_2003j.html

ビッグバン宇宙モデル： 3つの観測的証拠

ハッブルの法則

十分遠方にある銀河は
すべて我々に対して遠ざ
かっている

軽元素の起源

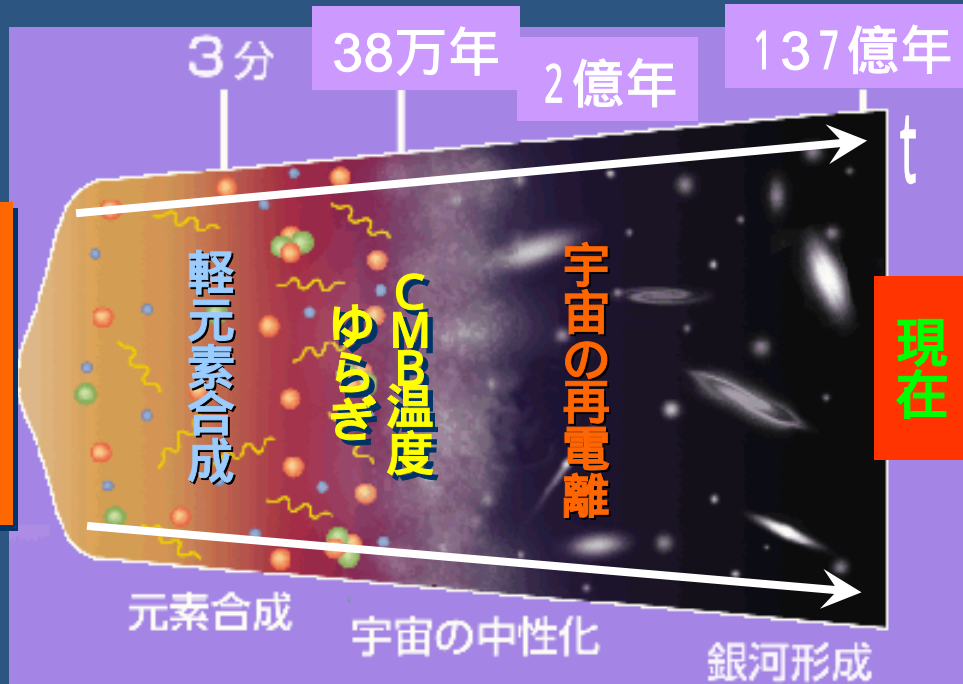
現在の宇宙には大量のヘリ
ウムが存在する(質量密度に
して全元素の約 25%)

宇宙マイクロ波背景輻射

現在の宇宙は、等方的な強度分布を示す電磁波
(絶対温度約2.7Kに対応する熱放射)に満たされている

宇宙マイクロ波背景輻射

CMBは、晴れ上がり直後の宇宙を満たしていた電磁波
(今から100億年以上も前の宇宙の光の化石)



- 宇宙の晴れ上がり
 - 誕生後約38万年で、電子と陽子が結合して水素原子となる (宇宙の中性化)
 - その結果、宇宙は電磁波に対して透明となる

量子ゆらぎの生成

第一世代天体の誕生

銀河の形成

銀河団の形成

宇宙の大構造

CMB:
Cosmic Microwave
Background

CMB: Cosmic Microwave Background

- 1940年代後半、ガモフとその学生達が元素の起源の研究から、理論的に存在を予言
- 1960年前半からプリンストン大学のディッキーを中心とするグループが検出実験を計画
- 1964年に、ベル研究所のペンジアスとウィルソンが発見



A MEASUREMENT OF EXCESS ANTENNA TEMPERATURE AT 4080 Mc/s

free from seasonal variations (July, 1964–April, 1965). A possible explanation for the observed excess noise temperature is the one given by Dicke, Peebles, Roll, and Wilkinson (1965) in a companion letter in this issue.

A. A. PENZIAS
R. W. WILSON

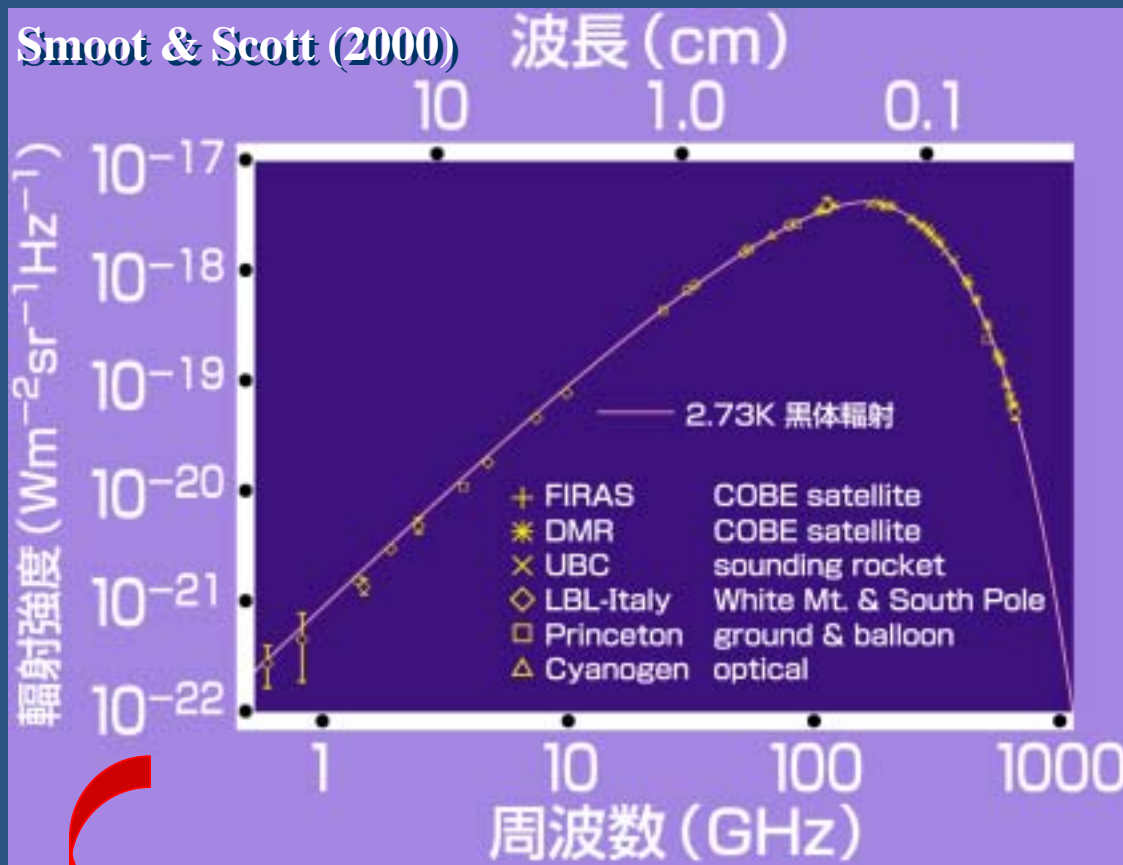
May 13, 1965

BELL TELEPHONE LABORATORIES, INC
CRAWFORD HILL, HOLMDEL, NEW JERSEY

The Astrophysical Journal 142(1965)419

CMB: エネルギースペクトル

- 10^{-4} の精度で熱輻射分布(プランク分布)と一致

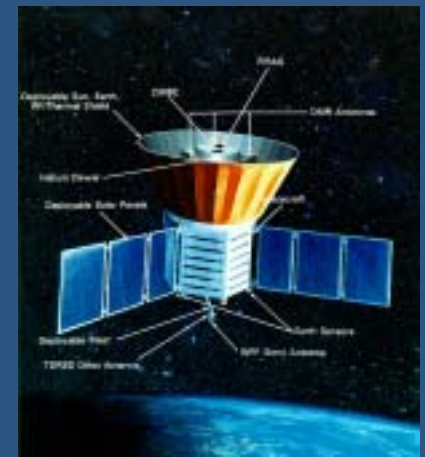


温度 T の熱平衡にある光子の単位時間・単位面積・単位周波数・単位立体角あたりのエネルギー分布

$$I_{\nu} = \frac{2h\nu^3}{c^2(e^{h\nu/kT} - 1)}$$

現在の“宇宙”の温度: $T_{CMB} = 2.728 \pm 0.002$ [K]

CMB: 全天温度地図



■ 1965: 一様成分
(宇宙の温度)

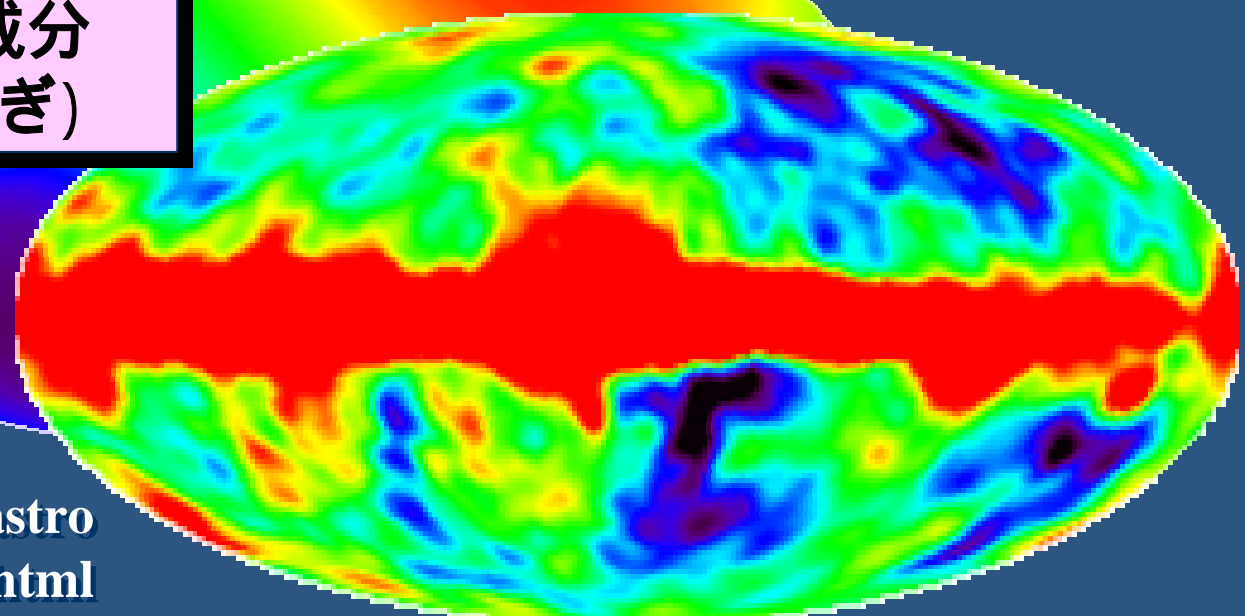
$$T_{CMB} = 2.73 \text{ [K]}$$

■ 1976: 二重極成分

$$(\delta T / T_{CMB})_{180^\circ} \approx 10^{-3} \Rightarrow \text{太陽系の運動 } 371 \text{ km/s}$$

■ 1992: 多重極成分
(宇宙の温度ゆらぎ)

$$(\delta T / T_{CMB})_{7^\circ} \approx 10^{-5} \Rightarrow \text{宇宙の構造の起源}$$

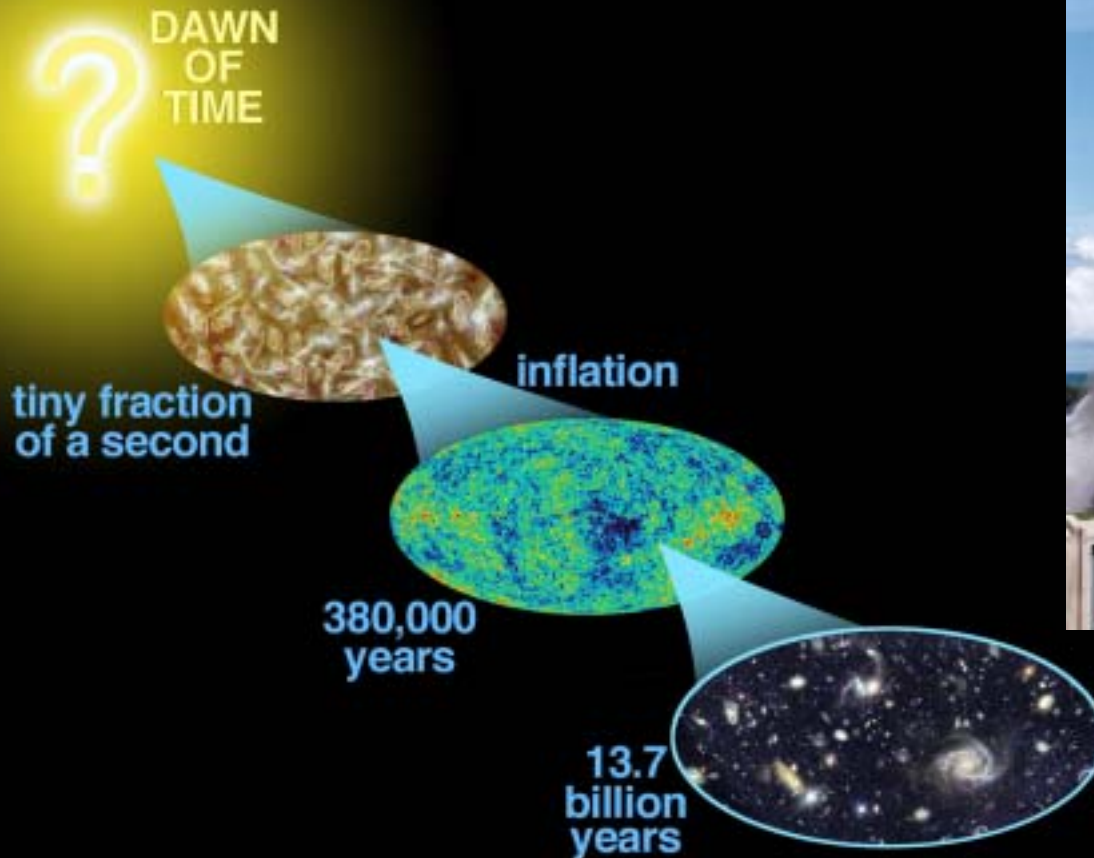


http://space.gsfc.nasa.gov/astro/cobe/ed_resources.html

WMAP (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe)

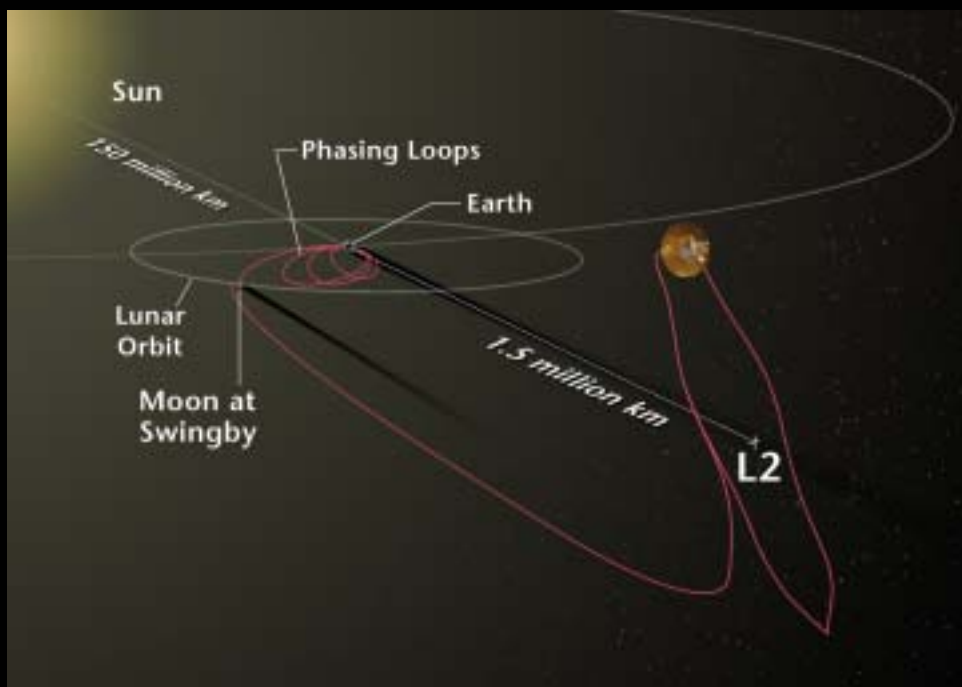
<http://lambda.gsfc.nasa.gov>

2001年6月30日
15:46:46 EDT 打ち上げ



**NASA/WMAP
Science Team**

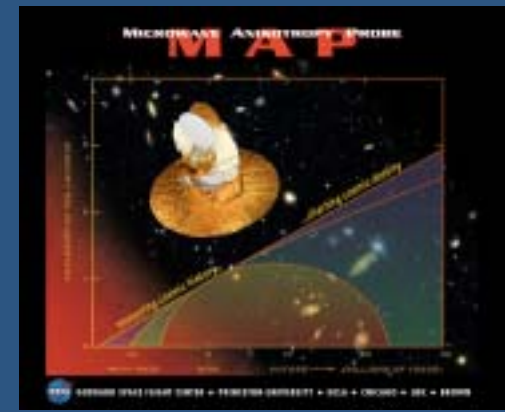
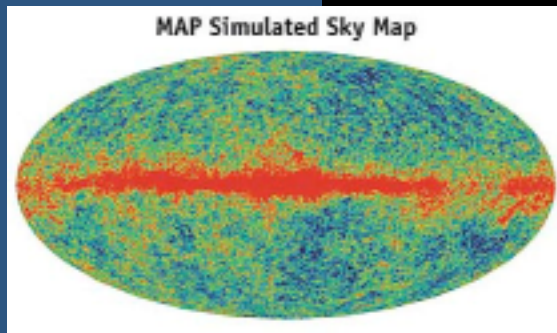
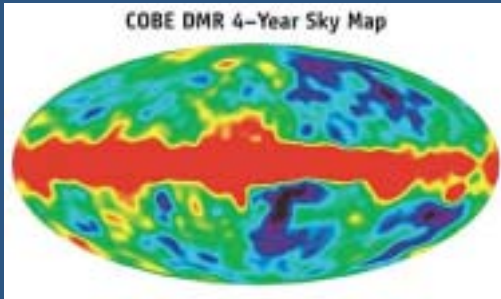
WMAP 衛星打ち上げ



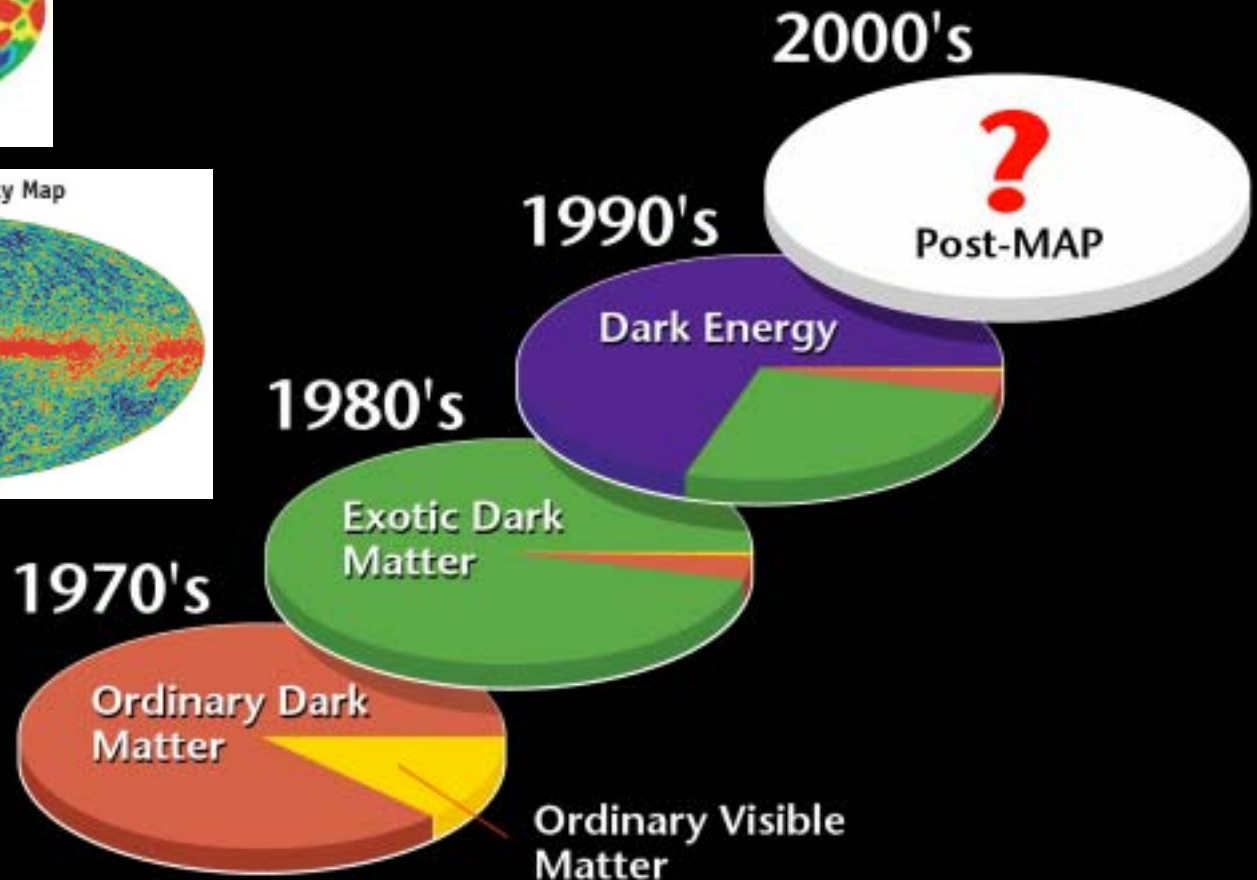
NASA/WMAP
Science Team

<http://lambda.gsfc.nasa.gov>

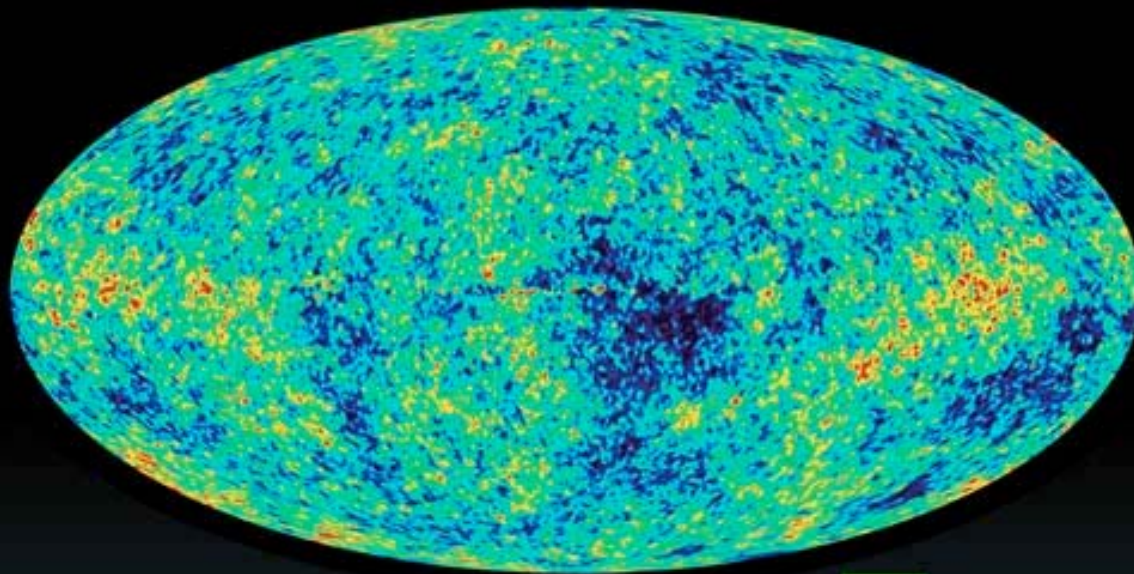
WMAP Science Goals



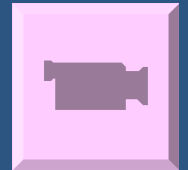
NASA/WMAP
Science Team



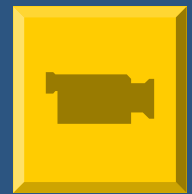
WMAP衛星が見た誕生後38万年の 宇宙の温度ゆらぎ全天地図



WMAP衛星
宇宙の旅



CMBから
現在へ



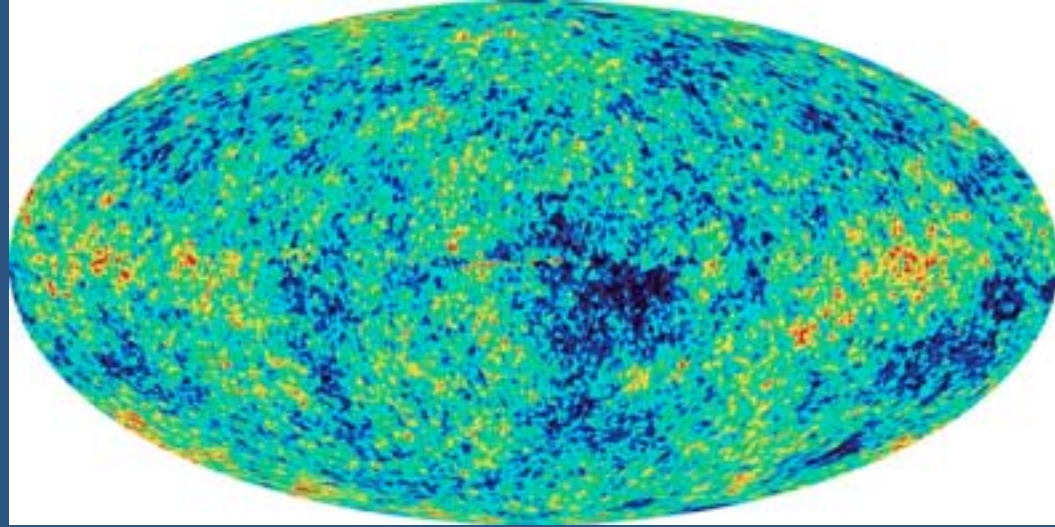
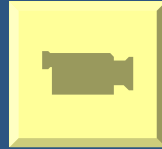
NASA/WMAP
Science Team

<http://lambda.gsfc.nasa.gov>

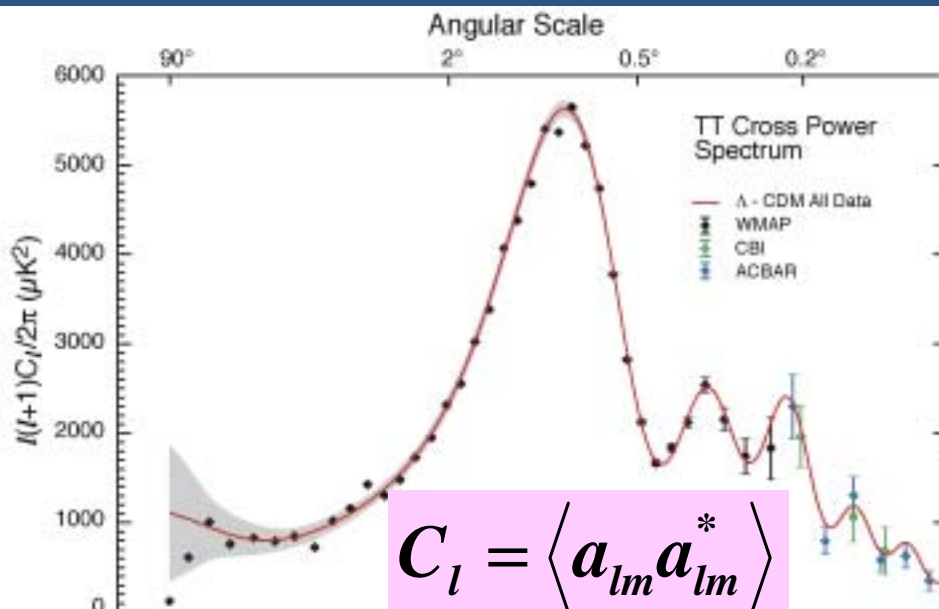
WMAPの成果 (2003年2月12日発表)

NASA / WMAP
Science Team

温度ゆらぎ
地図の作成



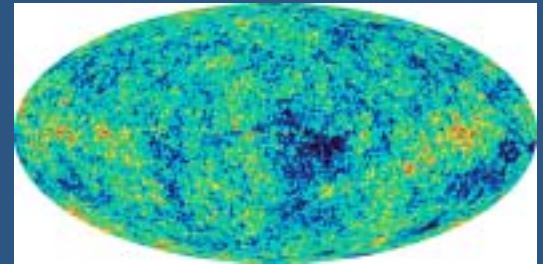
$$\frac{\delta T}{T}(\theta, \varphi) = \sum_{l,m} a_{lm} Y_{lm}(\theta, \varphi)$$



$$C_l = \langle a_{lm} a_{lm}^* \rangle$$



球面調和関数による展開 古文書の解読



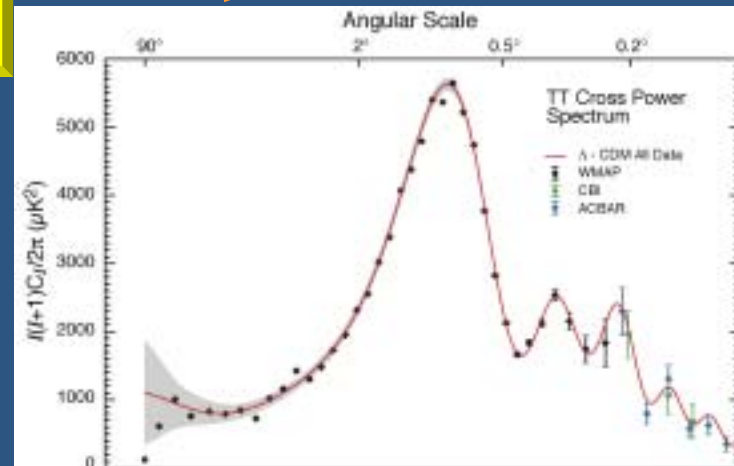
- 宇宙で最初の星がいつ誕生したのか
- 宇宙の元素の存在量
- 宇宙の暗黒物質の存在量
- 宇宙の曲率
- 宇宙の年齢
- 宇宙のデコボコ度合い

ゆらぎの展開



$$\frac{\delta T}{T}(\theta, \varphi) = \sum_{l,m} a_{lm} Y_{lm}(\theta, \varphi)$$

$$C_l = \langle a_{lm} a_{lm}^* \rangle$$

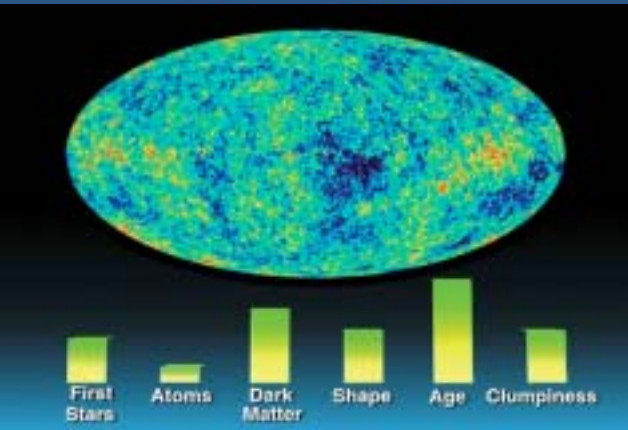


NASA / WMAP Science Team

<http://lambda.gsfc.nasa.gov>

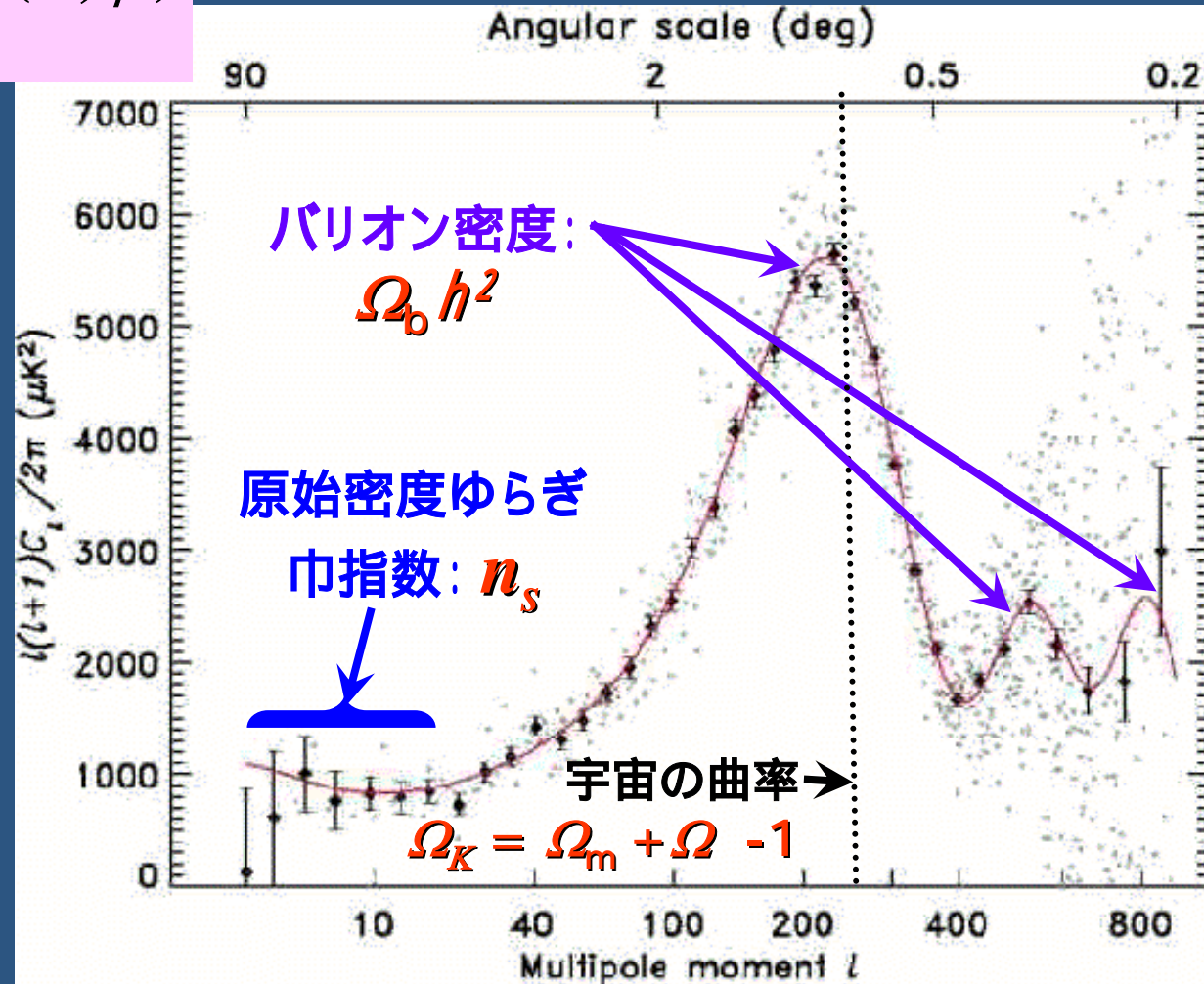
WMAPの観測した温度ゆらぎパワースペクトル

$$\frac{\delta T}{T}(\theta, \varphi) = \sum_{l,m} a_{lm} Y_{lm}(\theta, \varphi)$$



$$C_l = \langle a_{lm} a_{lm}^* \rangle$$

Spergel et al.
astro-ph/0302209



現在の宇宙の組成



<http://lambda.gsfc.nasa.gov>
 NASA/WMAP Science Team

総量 = 1.02 ± 0.02

ダークエネルギー

(宇宙定数) 0.73 ± 0.04

全物質 0.27 ± 0.04

星

0.005 ± 0.002

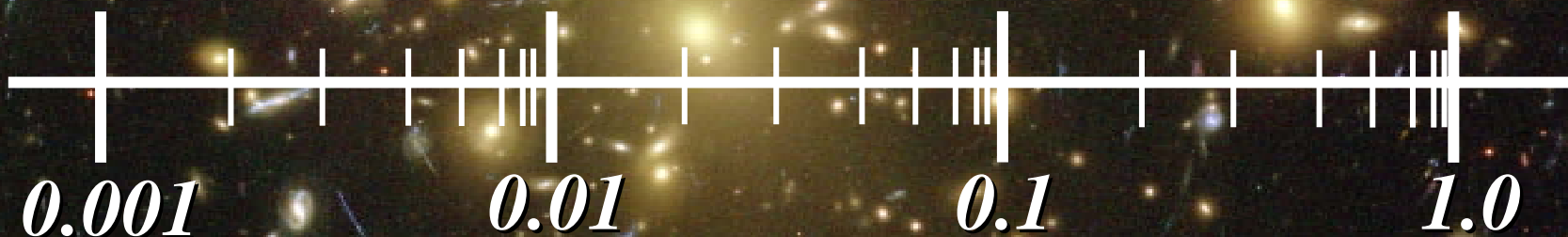
バリオン

0.044 ± 0.004

CDM

0.23 ± 0.04

理論予言



宇宙の全質量に占める割合

WMAP 1st year 成果の要約

- 容器としての宇宙モデルを確定
- 宇宙の再電離時期
- ほとんどすべてのデータが、驚くべき精度で「インフレーション+宇宙定数入りの冷たい暗黒物質モデル」の理論予言とぴたりと一致
- The most revolutionary result out of WMAP is that there is no revolutionary results. (J. Bahcall)



The cosmological standard model: What's next ?

Cosmology is now in a similar stage in its intellectual development to particle physics three decades ago when particle physicists converged on the current standard model. The standard model of particle physics fits a wide range of data, but does not answer many fundamental questions: “what is the origin of mass ? why is there more than one family ?, etc.”. Similarly, the standard cosmological model has many deep open questions: “what is the dark energy? what is the dark matter ? what is the physical model behind inflation (or something like inflation)?” Over the past three decades, precision tests have confirmed the standard model of particle physics and searched for distinctive signatures of the natural extension of the standard model: supersymmetry. Over the coming years, improving CMB, large scale structure, lensing, and supernova data will provide even more rigorous tests of the cosmological standard model and search for new physics beyond the standard model.

D.N.Spergel et al. astro-ph/0302209

参考：主な宇宙論パラメータ

記号	名前	物理的意味
h	ハッブル定数	宇宙の運動エネルギー、膨張率
Ω_b	バリオン密度パラメータ	宇宙のバリオン量
Ω_m	質量密度パラメータ	宇宙の重力エネルギー、暗黒物質
Ω	宇宙定数	真空のエネルギー密度
Ω_K	宇宙の曲率	$= \Omega_m + \Omega - 1$ (Einstein方程式 あるいはエネルギー保存に対応)
w	宇宙の状態方程式 (圧力/エネルギー密度)	$p=w$ ($w=0$:非相対論的物質、 $w=1/3$: 輻射、 $w=-1$:宇宙定数)
t_0	宇宙年齢	ビッグバン以後の宇宙の経過時間

Old Universe - *New* Numbers

WMAPが決定した 宇宙論パラメータ

$\Omega_{\text{tot}} = 1.02 \pm 0.02$	$\eta = (6.1^{+0.3}_{-0.2}) \times 10^{-10}$
$w < -0.78$ (95% CL)	$\Omega_b \Omega_m^{-1} = 0.17 \pm 0.01$
$\Omega_\Lambda = 0.73 \pm 0.04$	$\sigma_8 = 0.84 \pm 0.04$
$\Omega_b h^2 = 0.0224 \pm 0.0009$	$\sigma_8 \Omega_m^{0.5} = 0.44^{+0.04}_{-0.05}$
$\Omega_b = 0.044 \pm 0.004$	$z_{\text{dec}} = 1089 \pm 1$
$n_b = (2.5 \pm 0.1) \times 10^{-7} \text{ cm}^{-3}$	$\Delta z_{\text{dec}} = 195 \pm 2$
$\Omega_m h^2 = 0.135^{+0.008}_{-0.009}$	$h = 0.71^{+0.04}_{-0.03}$
$\Omega_m = 0.27 \pm 0.04$	$r_s = 147 \pm 2 \text{ Mpc}$
$\Omega_\nu h^2 < 0.0076$ (95% CL)	$d_C = 14.0^{+0.2}_{-0.3} \text{ Gpc}$
$m_\nu < 0.23 \text{ eV}$ (95% CL)	$\theta_A = 0.598 \pm 0.002$
$T_{\text{cmb}} = 2.725 \pm 0.002 \text{ K}$	$l_A = 301 \pm 1$
$z_r = 20^{+10}_{-9}$ (95% CL)	$t_0 = 13.7 \pm 0.2 \text{ Gyr}$
$t_r = 180^{+220}_{-80} \text{ Myr}$ (95% CL)	$t_{\text{dec}} = 379^{+8}_{-7} \text{ kyr}$
$r(k_0 = 0.002 \text{ Mpc}^{-1}) < 0.71$ (95% CL)	$\Delta t_{\text{dec}} = 118^{+3}_{-2} \text{ kyr}$
$A(k_0 = 0.05 \text{ Mpc}^{-1}) = 0.833^{+0.086}_{-0.083}$	$z_{\text{eq}} = 3233^{+194}_{-210}$
$n_\gamma = 410.4 \pm 0.9 \text{ cm}^{-3}$	$\tau = 0.17 \pm 0.04$
$n_s = 0.99 \pm 0.04$ (WMAP only)	
$n_s(k_0 = 0.05 \text{ Mpc}^{-1}) = 0.93 \pm 0.03$ with $dn_s/d \ln k = -0.031^{+0.016}_{-0.018}$	

These "best" cosmological parameter values are from a combination of a wide variety of cosmological measurements, including the WMAP, COBE, CBI, and ACBAR CMB measurements and 2dFGRS, HST, SNIa, and Lyman-alpha forest measurements.

<http://lambda.gsfc.nasa.gov>