

星空のむこう側

～WMAPと21世紀の宇宙論～

東京大学大学院理学系研究科物理学専攻

須藤 靖

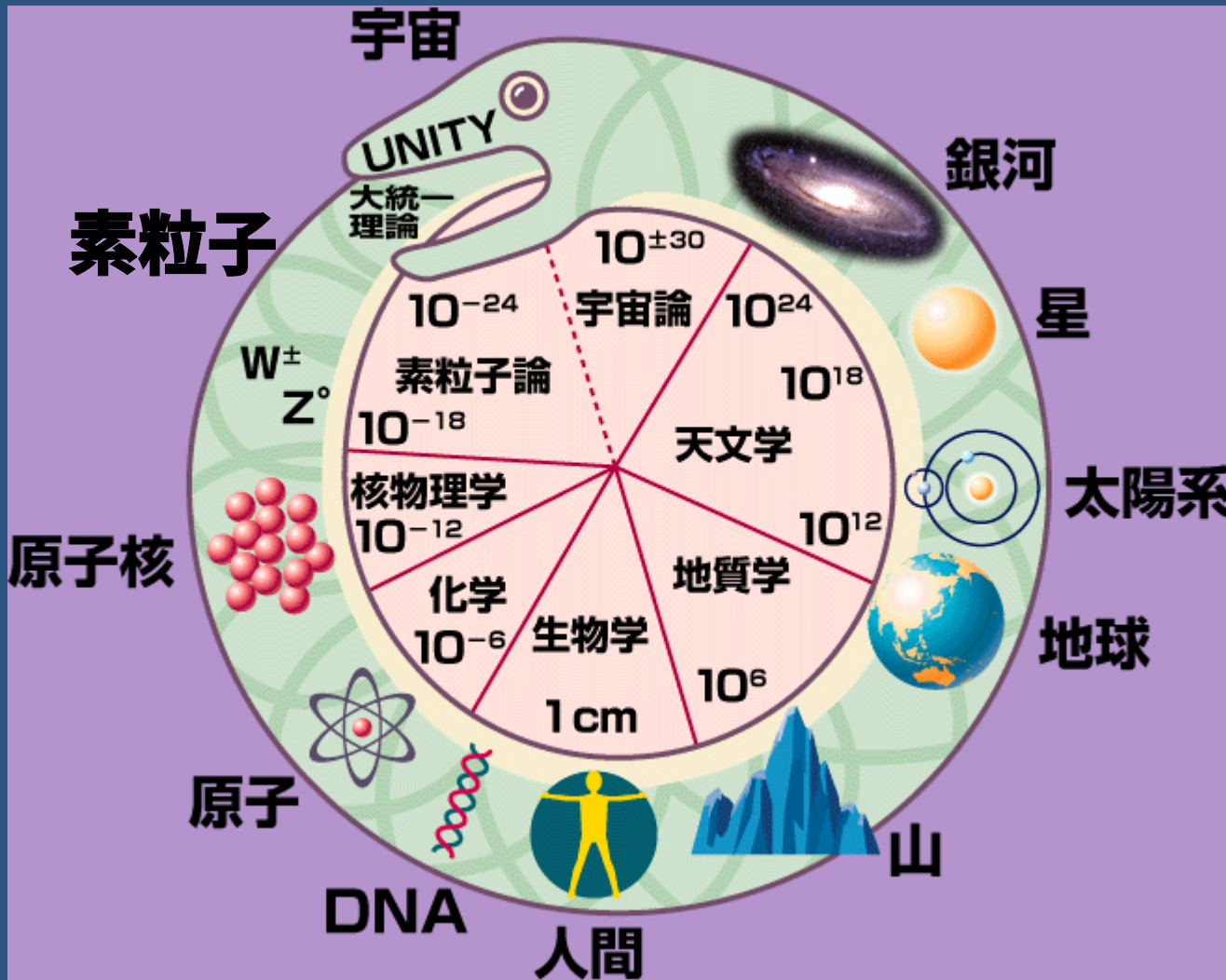


葛飾区郷土と天文の博物館 2003年10月11日

宇宙論の心：遠くには何があるのだろうか

- 宇宙はどうなっているのか：宇宙の階層
 - 月、太陽、太陽系、恒星、星団、銀河系 (天の川)、銀河、銀河団、宇宙の大構造
- 遠くの宇宙の研究は考古学
 - 光は有限の速度をもつ。つまり、今見ている遠く天体は、実はずっと昔の姿。
 - 毎日見ている太陽は、実は約8分遅れの姿。天文学者は、100億年以上前の昔の天体からやっと届いた光を、今、観測して研究している。
 - 遠くを見れば宇宙の過去がわかる。
- 我々人類は広い宇宙でひとりぼっちなのか？
- 第二の地球はあるか？

自然界の成り立ち



- 宇宙の大きさは約 10^{27} cm, すべての物質を形づくる素粒子の大きさは約 10^{-24} cm
- この約50桁も離れた巨視的世界と微視的世界とは宇宙の進化を通じて結びついている

シェルドン グラショー 著 ‘‘Interaction’’のなかの図をもとに作成
星空のむこう側

宇宙の階層構造

宇宙の大構造

銀河群

矮小銀河

太陽系



銀河



銀河団

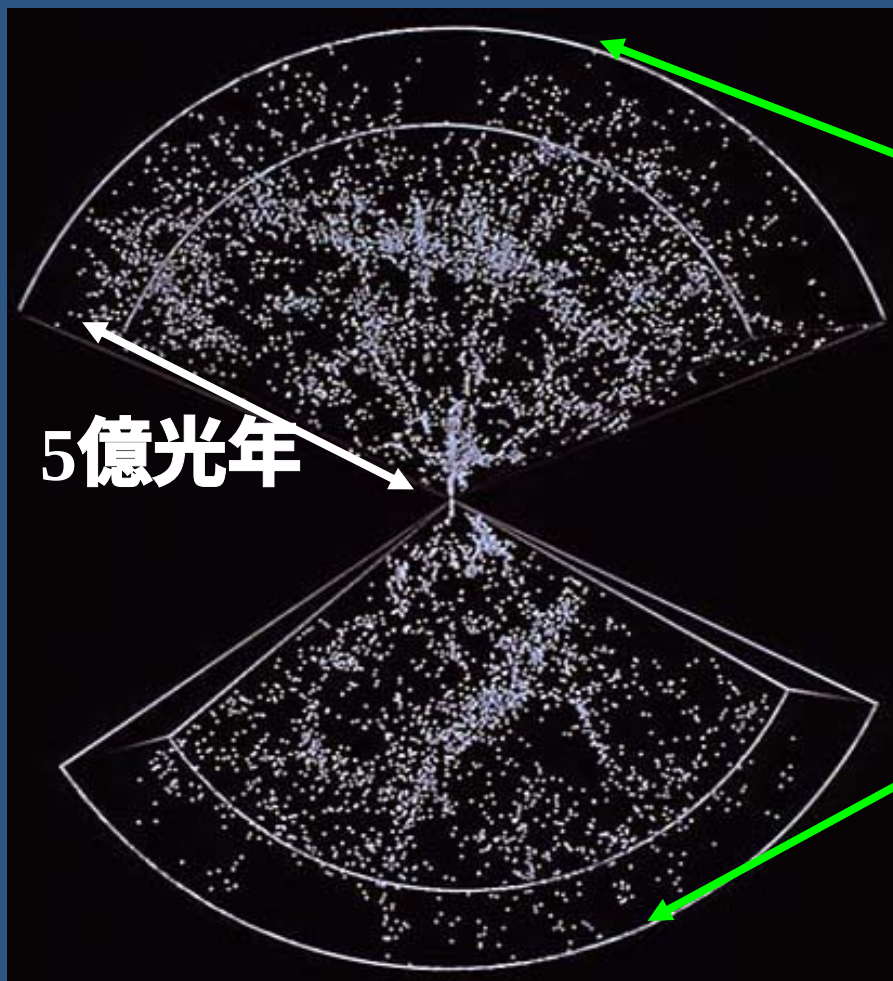


星団



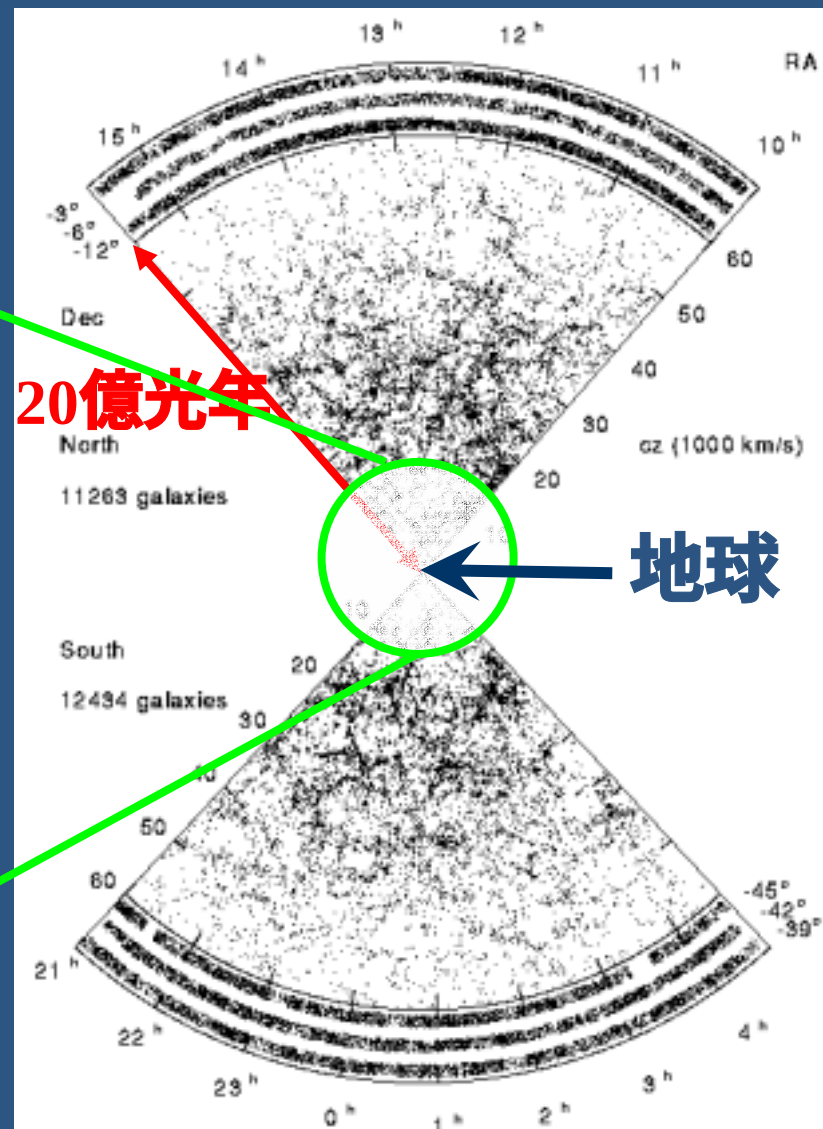
典型的大きさ [パーセク (～3.1光年)]

銀河の3次元分布地図



CfA galaxy redshift survey:
Geller, da Costa & Huchra (1992)

星空のむこう側



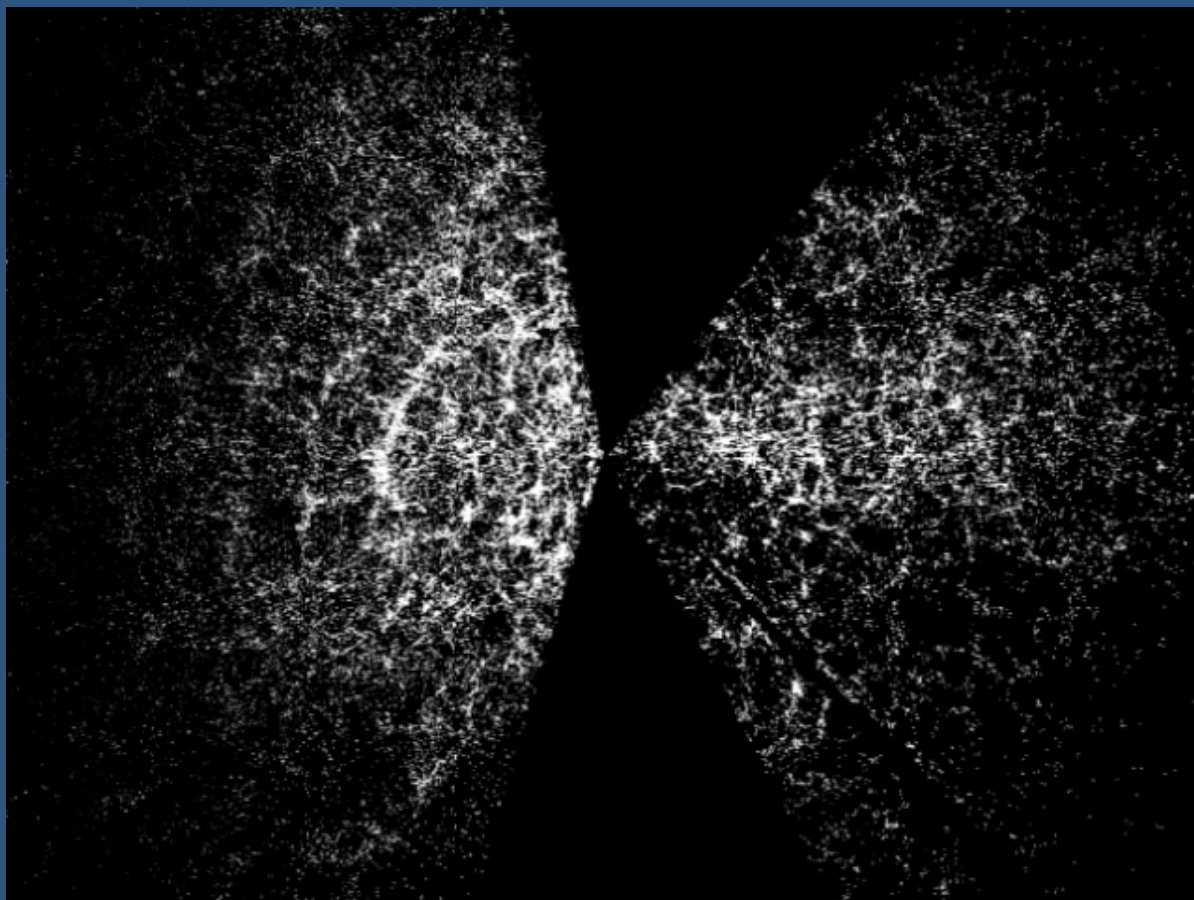
Las Campanas redshift survey:
Schectman et al. (1996)



史上最大の銀河地図作りをめざして： 日米独共同スローンデジタルスカイサーベイ

8千万個の銀河を観測、そのなかの80万個の銀河の3次元地図作り

<http://www.sdss.org/dr1/>



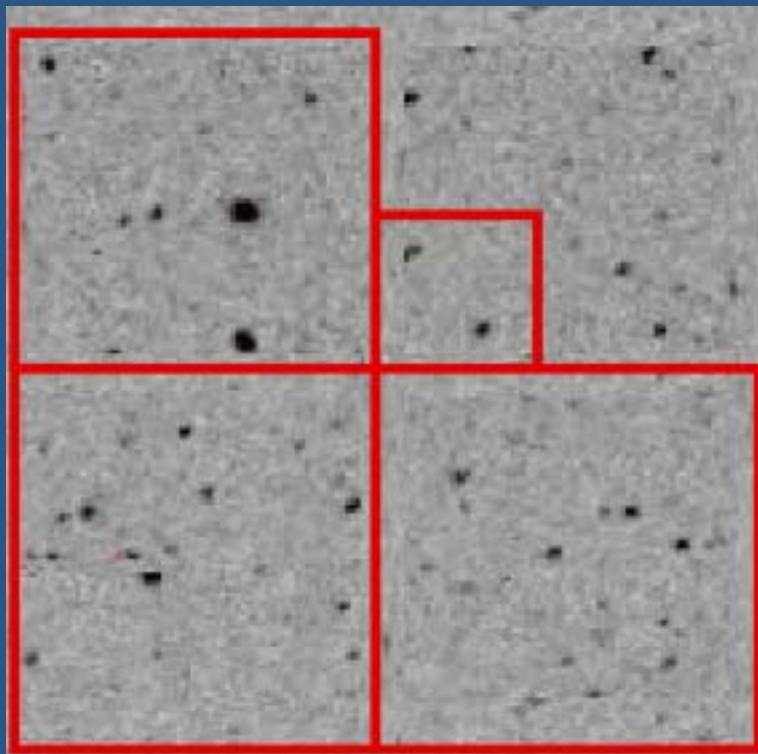
スローンデジタルスカイサーベイ銀河間旅行



NHK教育 サイエンスZERO 2003年6月11日 0:00 放映

星空のむこう側

より遠くの宇宙へ： ハッブル深宇宙



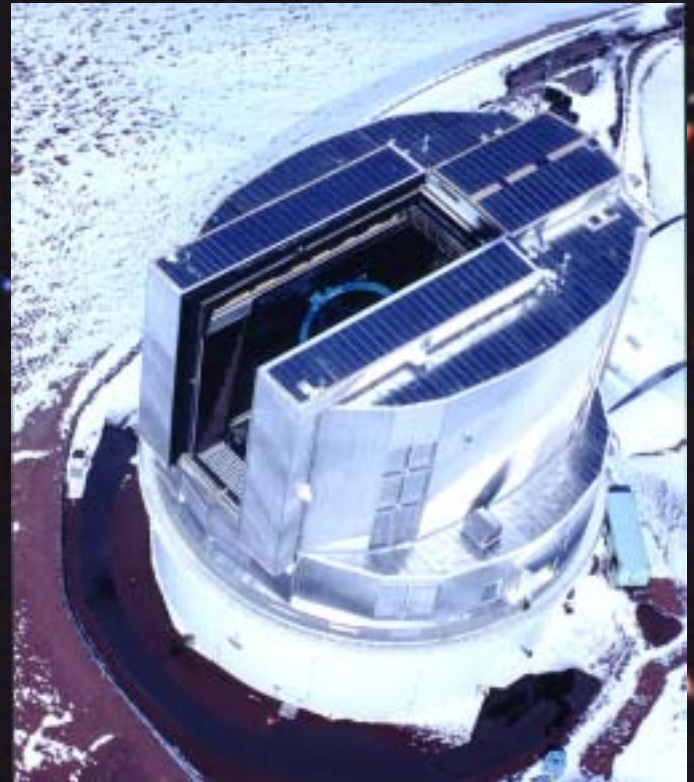
地上4m望遠鏡+CCD：
100×写真乾板

星空のむこう側



ハッブル宇宙望遠鏡+CCD：
1000×地上望遠鏡

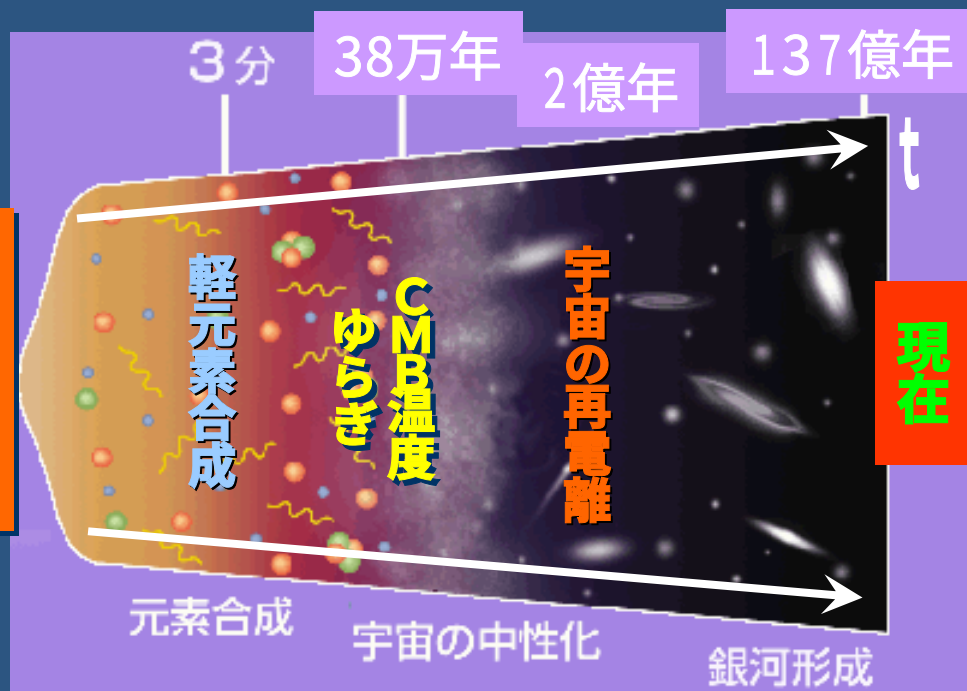
すばる望遠鏡の見た夜空のむこう



<http://www.naoj.org/Gallery/>

かつて人類が見たもっとも遠くの宇宙の映像の一つ
～宇宙の果て～

宇宙の歴史



量子ゆらぎの生成

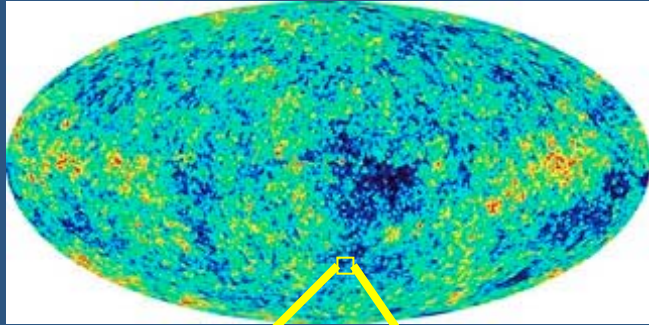
第一世代天体の誕生

銀河の形成
銀河団の形成

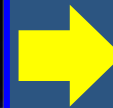
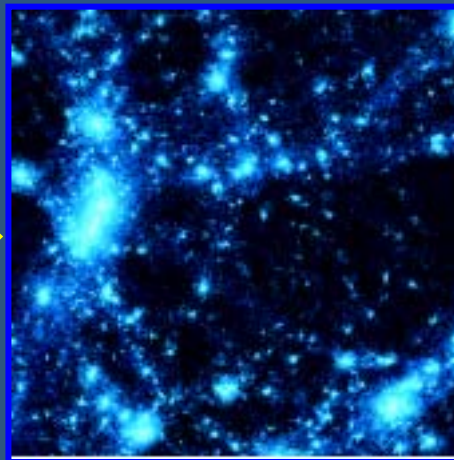
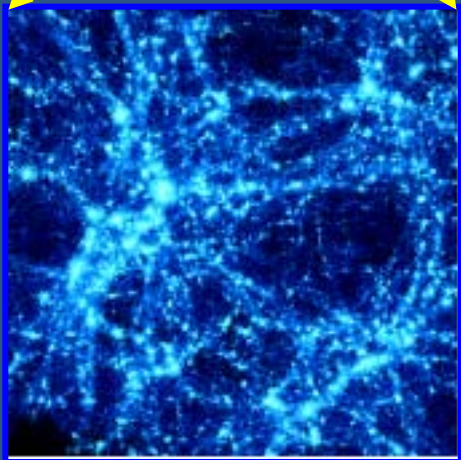
宇宙の大構造

- $t \sim 10^{-40}$ 秒: インフレーション・量子ゆらぎの生成
- $t \sim 3$ 分: 軽元素 (ヘリウム、重水素、リチウム) 合成
- $t \sim 38$ 万年 ($z=1089$): 宇宙の中性化・宇宙の晴れ上がり
- $t \sim 2$ 億年 ($z=20$): 第一世代天体の誕生
- $t \sim 8$ 億年 ($z=6$): 宇宙の再電離ほぼ終了
- $t = 8$ 億年 ($z=6$) $\sim$ 137億年 ($z=0$): 銀河形成、銀河団形成、宇宙の大構造
- $t \sim 70$ 億年 ($z=0.7$): 宇宙のエネルギーがアインシュタインの宇宙定数によって支配される
- $t \sim 137$ 億年 ($z=0$): 現在

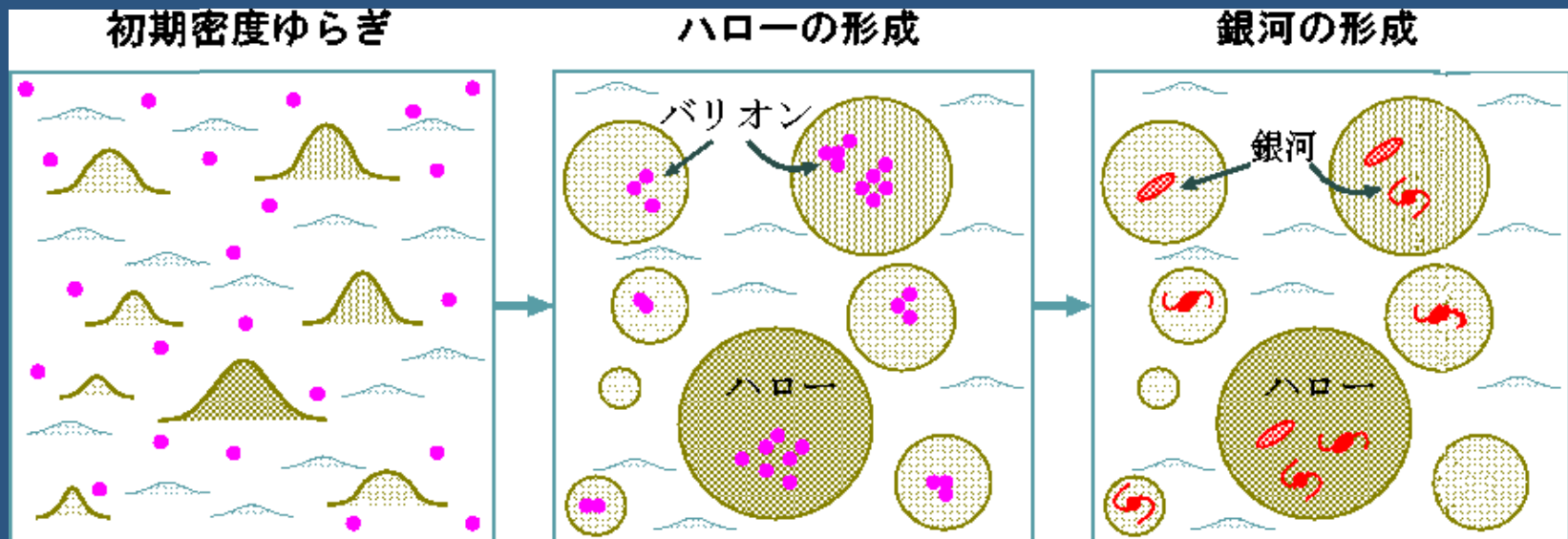
宇宙の構造形成シナリオ



- 小さなスケールの構造ほど初期に形成される
- いったんできた構造が重力的に合体あるいは集団化することで、より大きなスケールの構造へと進化する



重力不安定による構造形成パラダイム



重力進化

ガスの冷却
輻射過程
星形成進化

...

樽家篤史 (2001) 日本物理学会誌

暗黒物質が自らの重力で塊となった系 (ハロー) が
まず形成され、その中で光り輝く天体が誕生する

宇宙構造進化シミュレーションの例



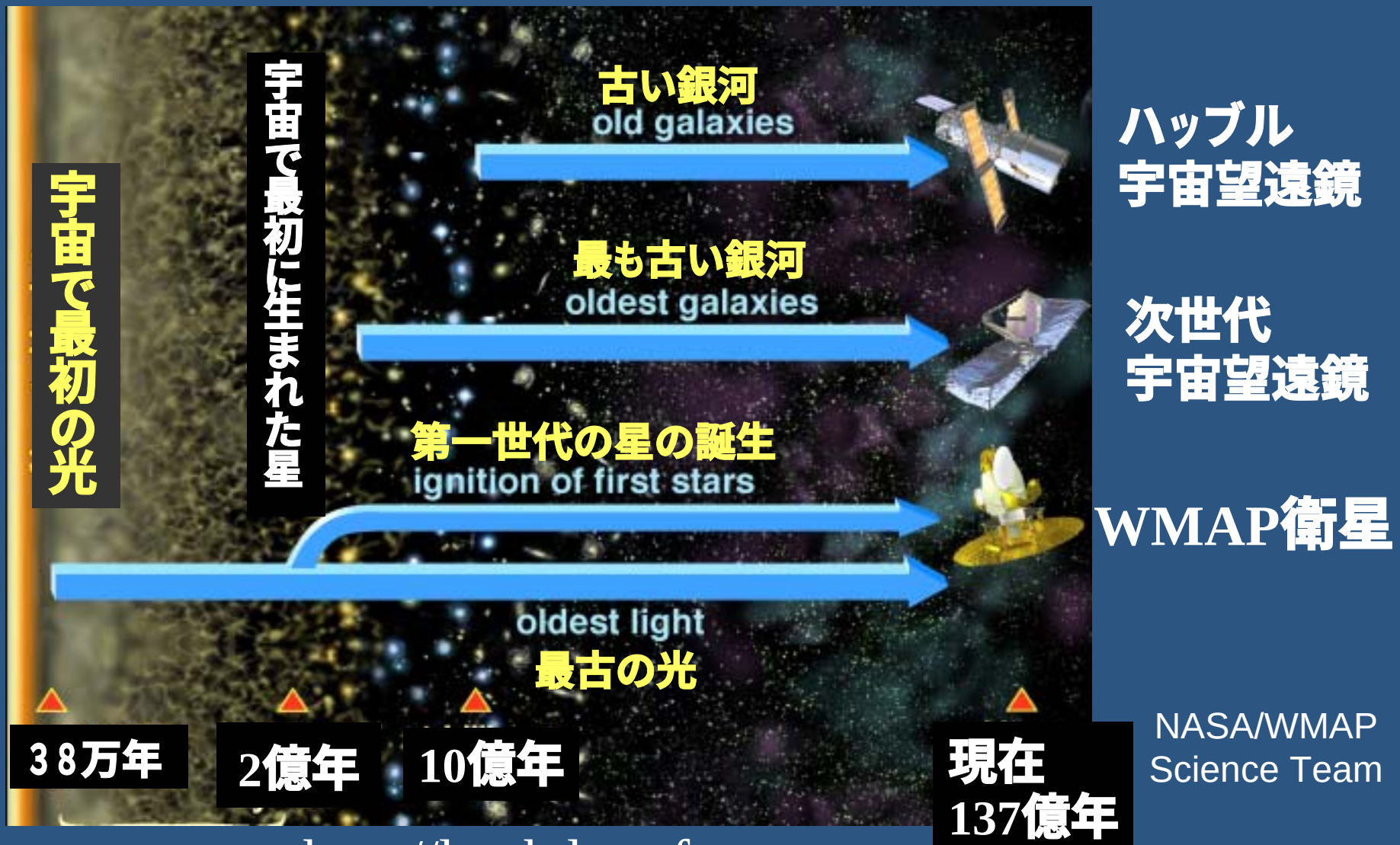
吉川 耕司、
樽家 篤史、
景 益鵬、
須藤 靖
(2001)

ダークマター分布の進化

⇒ X線で見える現在の高温ガス分布

⇒ 可視光で見える現在の宇宙の銀河分布

何がどこまで見えるか？



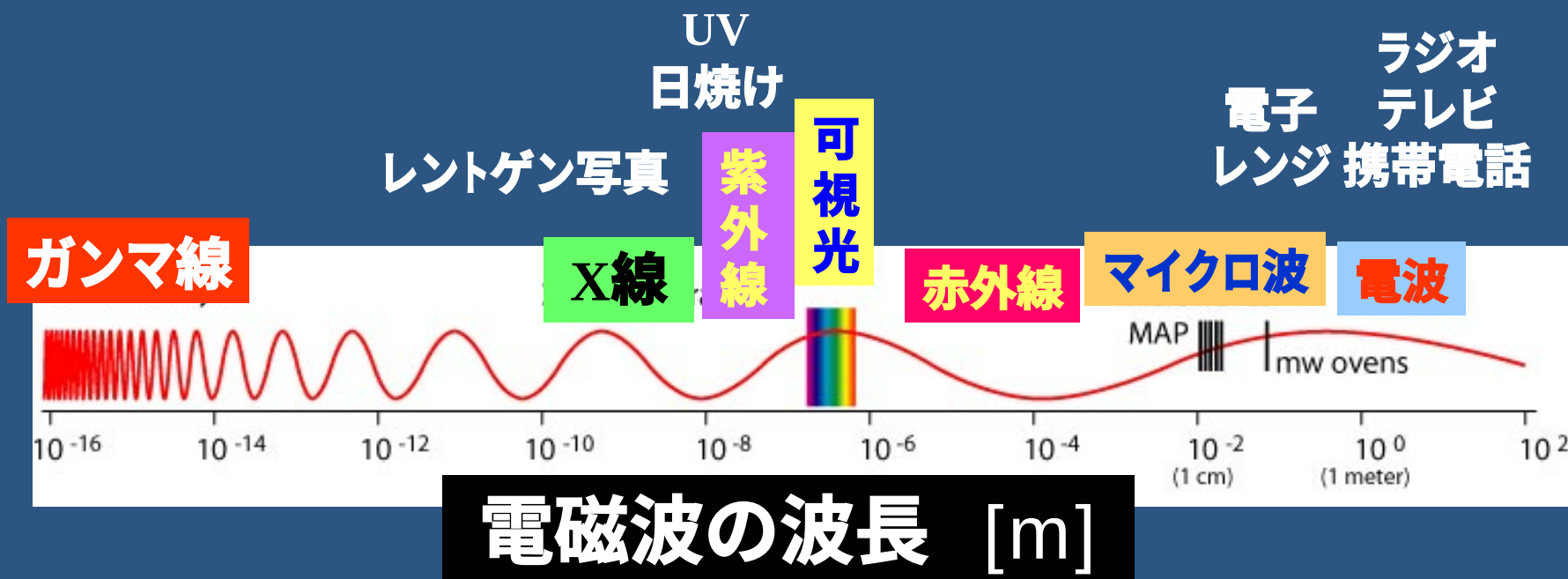
さらに遠く (=過去) を見たい

- 現在は、宇宙が誕生してから137億年
- 宇宙が誕生してから8億年後 (つまり、今から129億年前!) の姿はすでに観測可能な時代
- しかし、さらにその昔はまだ天体が誕生していないので、可視光では見たくても見ることができない
 - ⇔ **宇宙が生まれたときの最初の光を見る**
- 現在はマイクロ波と呼ばれる波長0.1cm程度の電磁波として全宇宙を満たしている
 - ⇔ **宇宙マイクロ波背景放射 (CMB)**

マイクロ波とは？：電磁波の名前と波長

通常、「光」と呼ばれているものは、電磁波と呼ばれる波の一種である。これらは波長に応じて異なる名前をもつ。現代の天文学ではこれらすべての波長を駆使した観測を行っている。

マイクロ波は、波長1mm(300GHz)から1m(300MHz)の領域で極超短波とも呼ばれる。電波望遠鏡は主としてこの波長域を利用する。



宇宙マイクロ波背景輻射 (CMB)

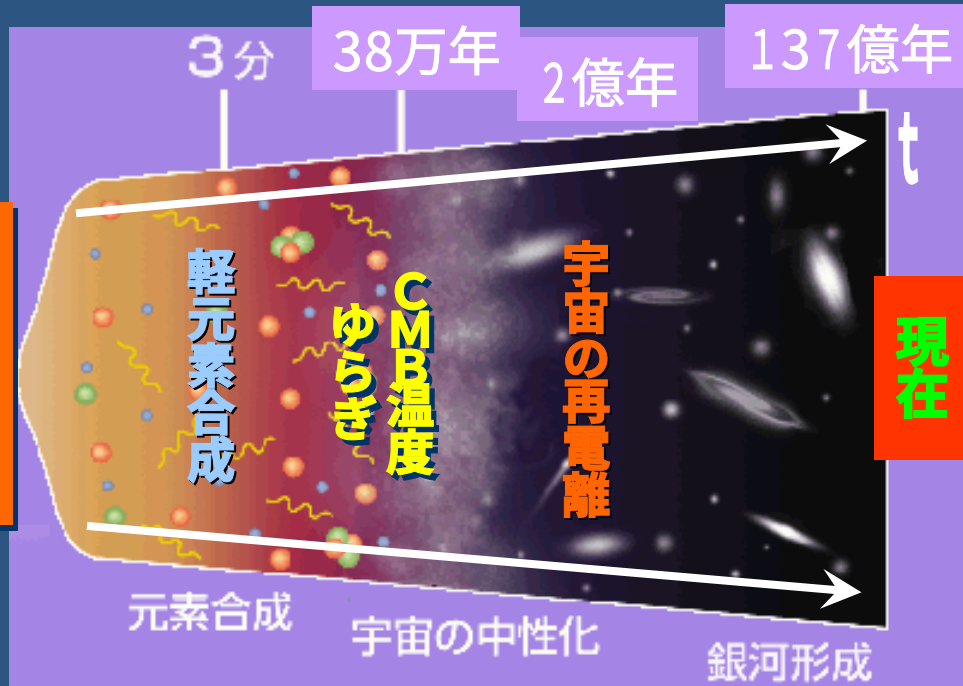
CMBは、晴れ上がり直後の宇宙を満たしていた電磁波
(今から137億年前の宇宙の光の化石)

■ 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

CMB:

Cosmic Microwave Background



量子ゆらぎの生成

星空のむこう側

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: 発見の歴史

- 1940年代にジョージ ガモフ (ビッグバン宇宙モデルの創始者) とその学生達が元素の起源の研究から、理論的にその存在を予言
- 1964年に、ベル研究所のペンジアスとウィルソンが偶然発見 (1978年ノーベル賞)

Bell Labs/Lucent Technologies 提供画像



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

Diagram illustrating the Mars Global Surveyor spacecraft in orbit, showing its various instruments and antennas labeled:

- Orbiter's Eye, Earth, W. Parabolic Dish
- DRRS
- RDRS
- DRRS Calibrator
- Rollout Sensor
- Deployment Solar Panels
- Deployable Solar
- TDRS S-Band Antenna
- Earth Sensors
- WPP Direct Antenna
- Earth Sensors

$$T_{CMB} = 2.73 \text{ [K]}$$
$$(\delta T / T_{CMB})_{180^\circ} \approx 10^{-3} \Rightarrow \text{太陽系の運動 } 371 \text{ km/s}$$

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

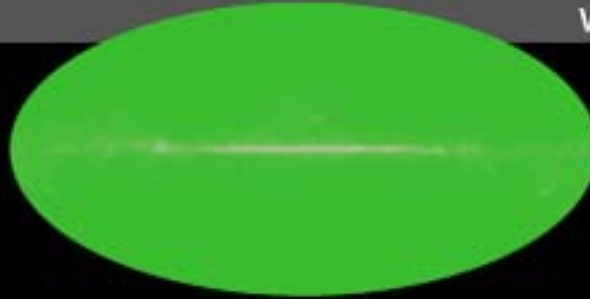
http://space.gsfc.nasa.gov/astro/cobe/ed_resources.html

MAP (Microwave Anisotropy Probe) 計画

1965



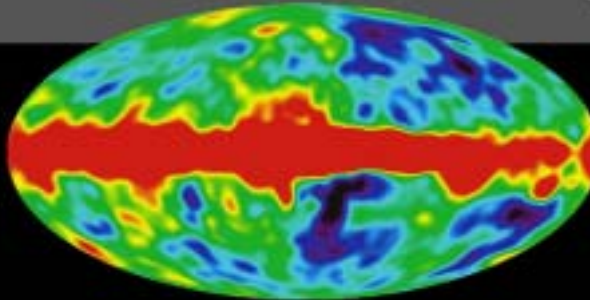
Penzias and
Wilson



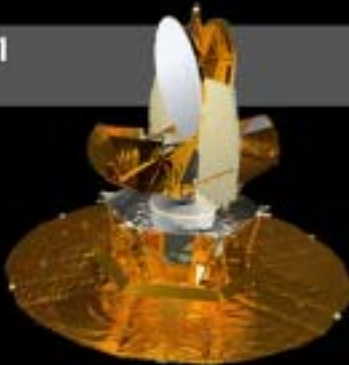
1992



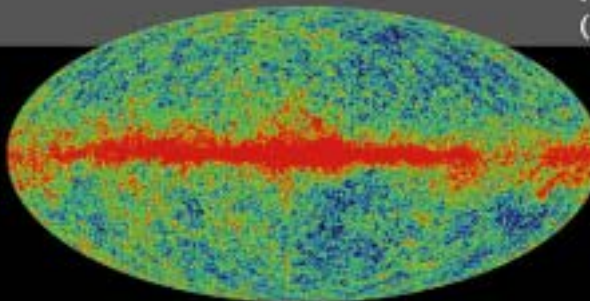
COBE



2001



MAP
(Simulated)

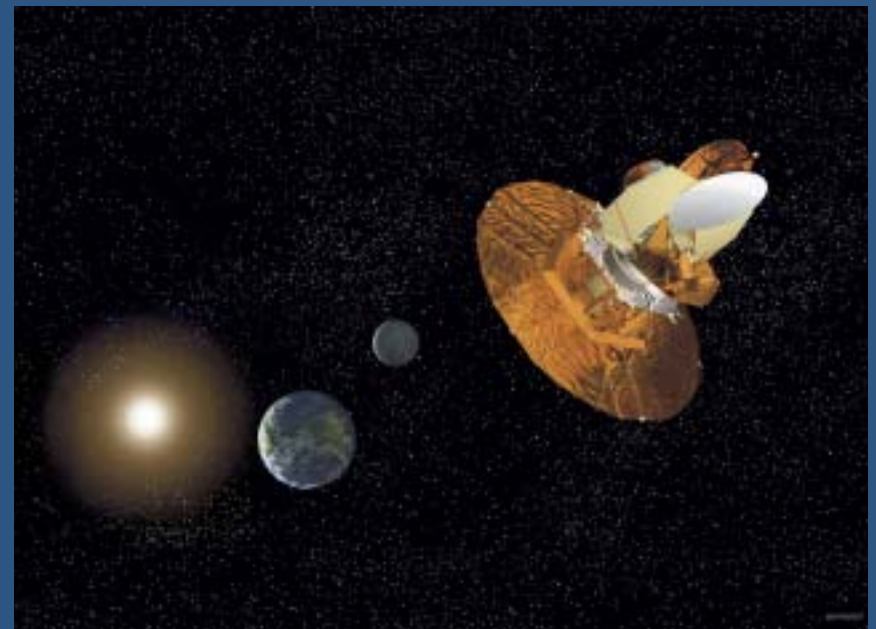
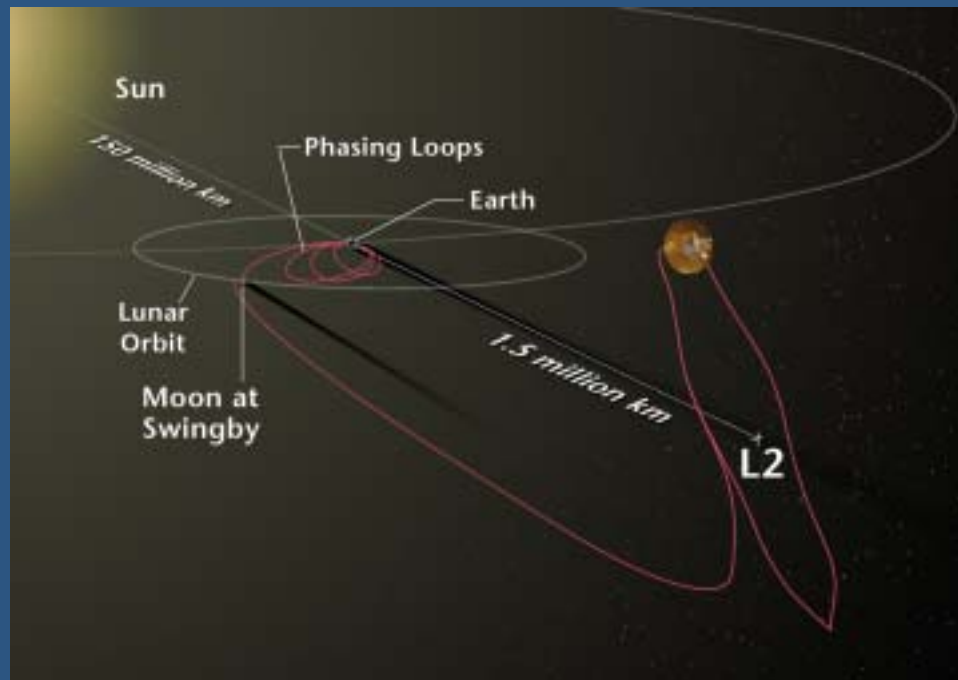


MAPの打ち上げ: 2001年6月30日

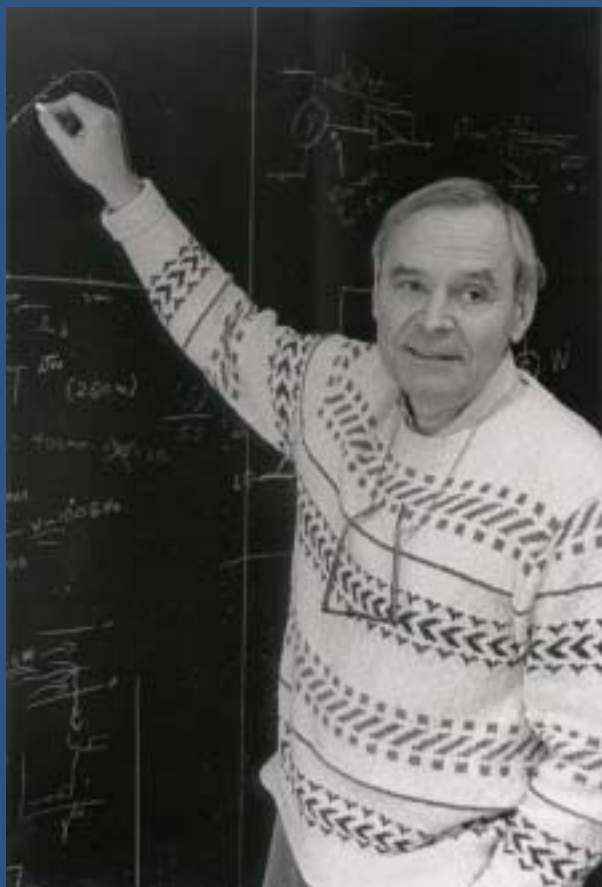
15:46:46 EDT



MAP 衛星打ち上げ成功！



David Wilkinson (1935~2002)



2002年9月5日逝去

星空のむこう側



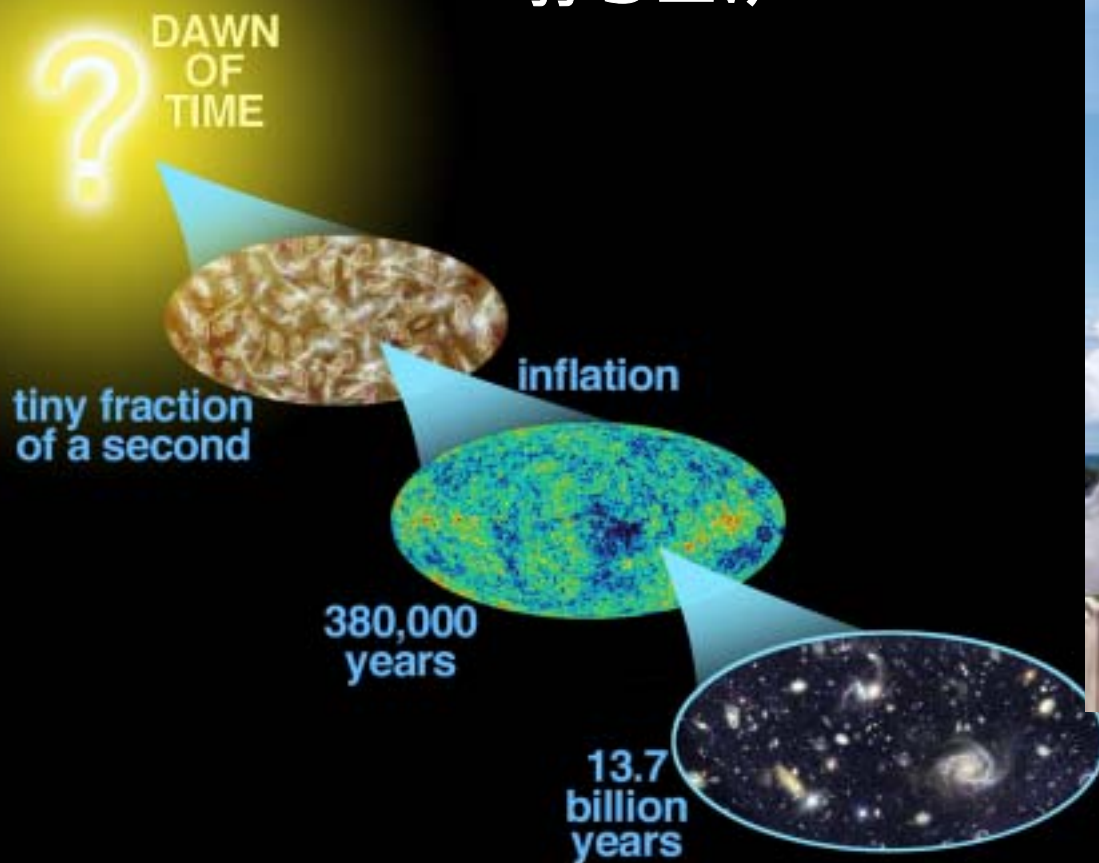
(W)MAP Science Team Meeting
Princeton, 2002年7月
(小松英一郎氏提供)

WMAP (ウィルキンソンマイクロ波非等方性探査衛星)

2001年6月30日 15:46:46

米国東海岸標準時間

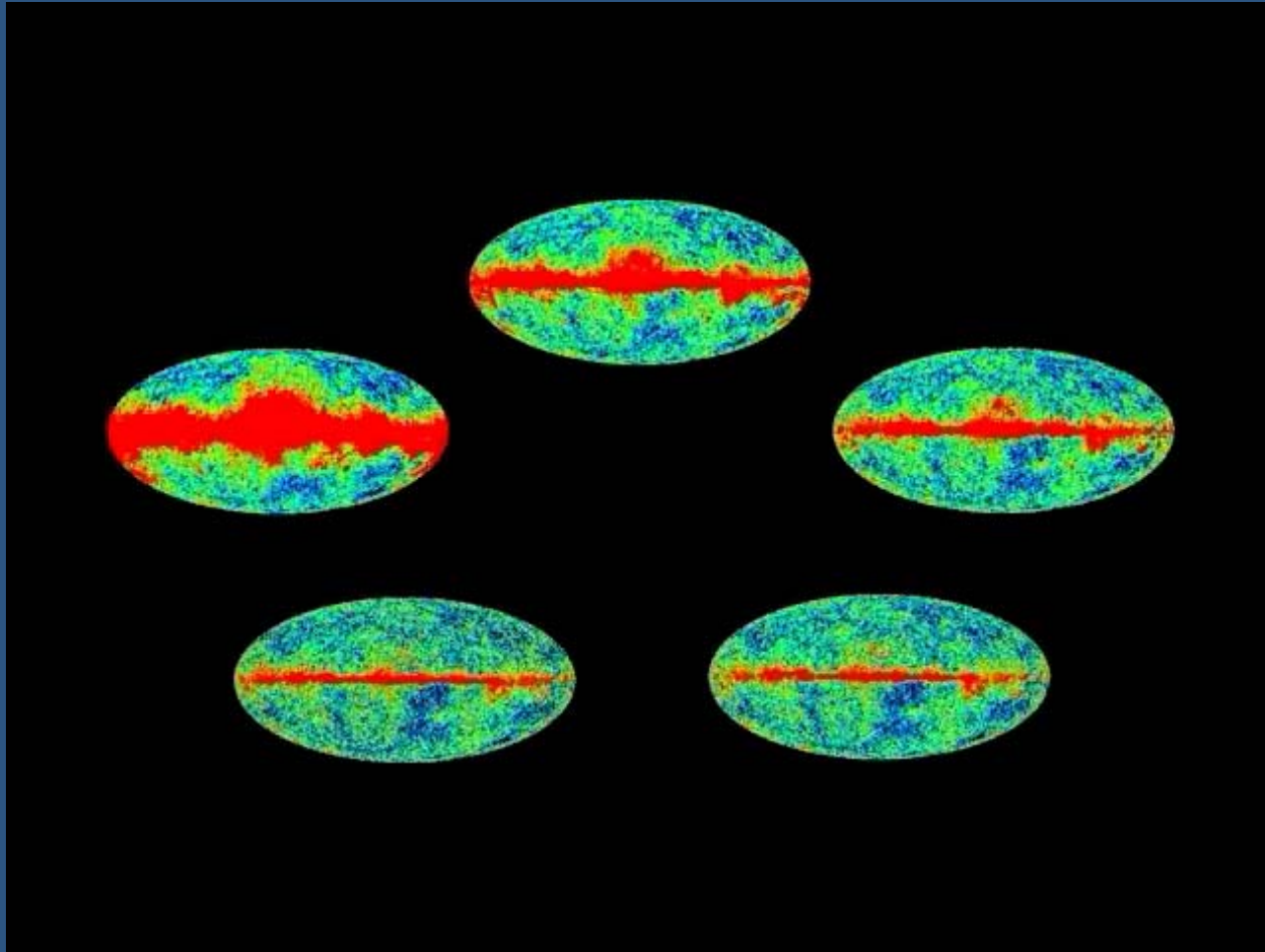
打ち上げ



**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

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

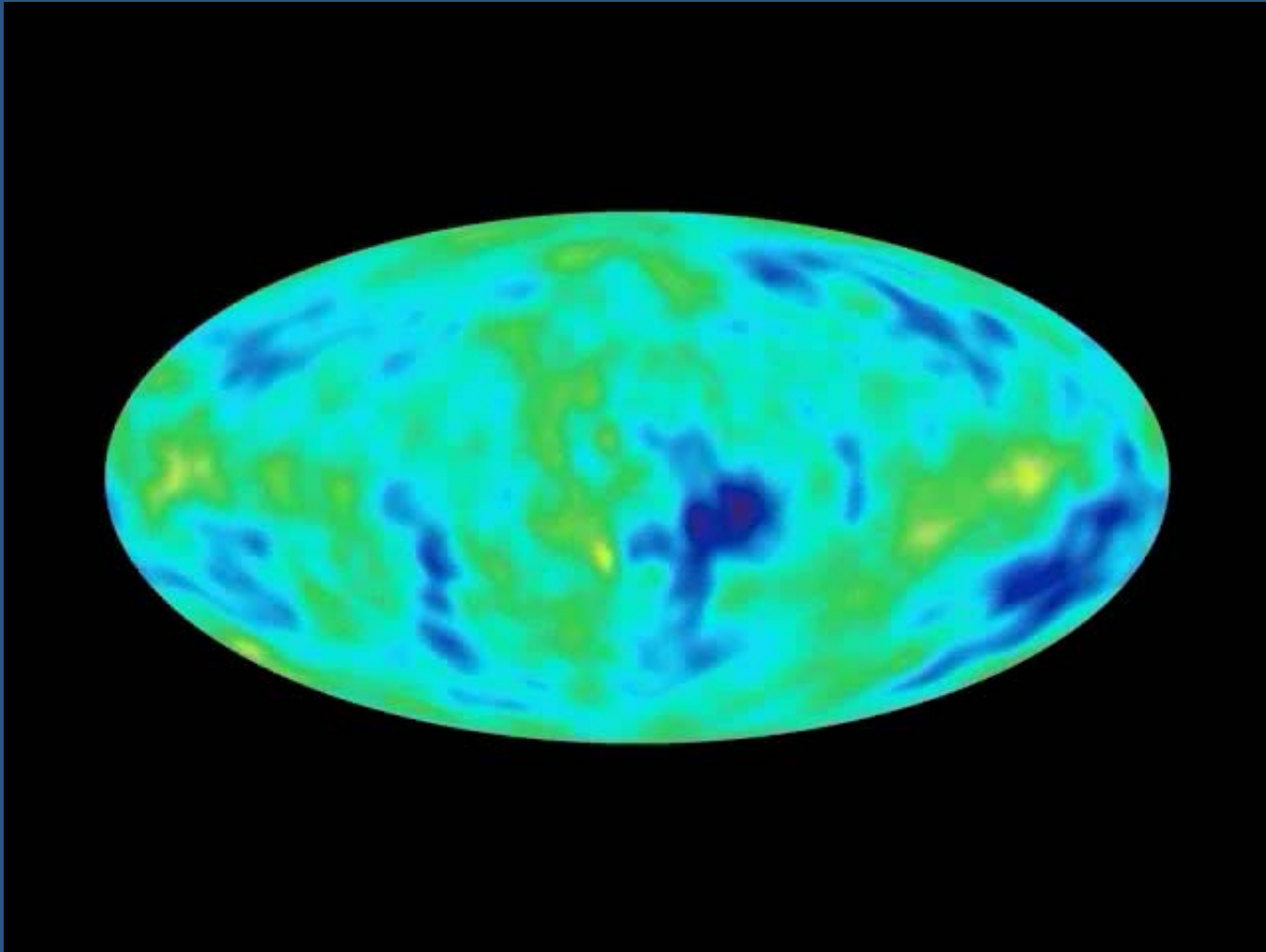


NASA/WMAP Science Team

(2003年2月12日発表)

COBE衛星 vs. WMAP衛星

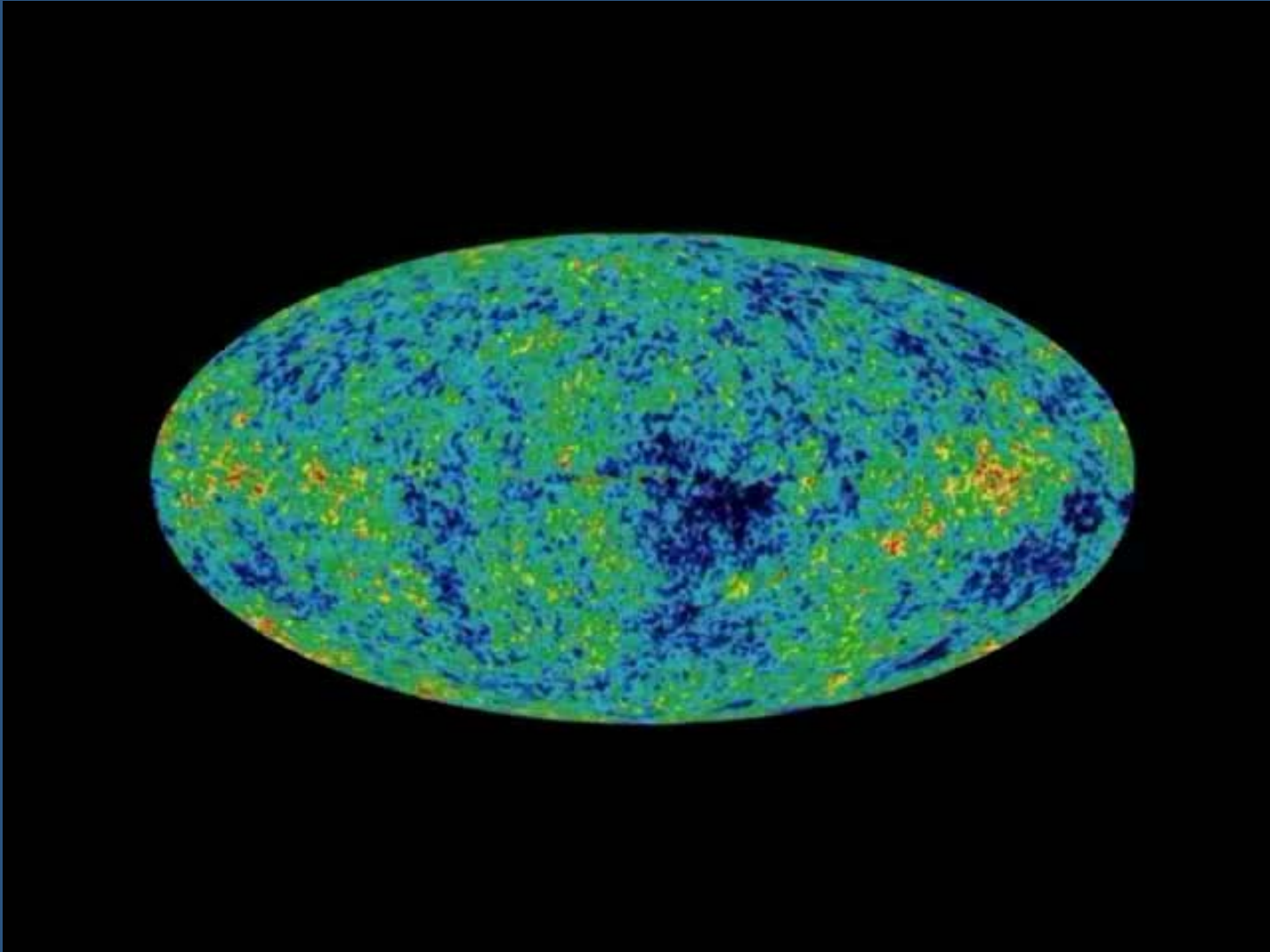
<http://lambda.gsfc.nasa.gov>



NASAWMAP Science Team

(2003年2月12日発表)

CMBから現在の宇宙へ

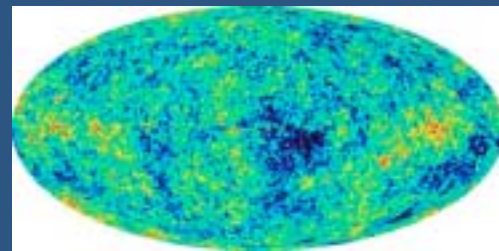


**NASA/WMAP
Science Team**

古文書の解読方法

ここからしばらく難しくなるので以下の概略だけでもおさえてください

- 暗号化された状態の古文書
 - 宇宙マイクロ波全天温度地図



- 暗号を解く鍵

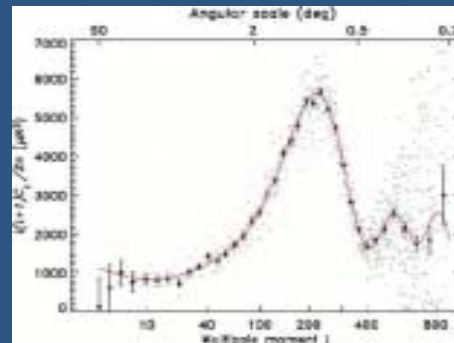
$$\frac{\delta T}{T}(\theta, \varphi) = \sum_{l,m} a_{lm} Y_{lm}(\theta, \varphi)$$

- 球面調和関数展開という数学

- 解読された古文書内容

- 温度ゆらぎスペクトル

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



- この古文書の意味を理解するための文法

- 冷たい暗黒物質モデルの理論予言

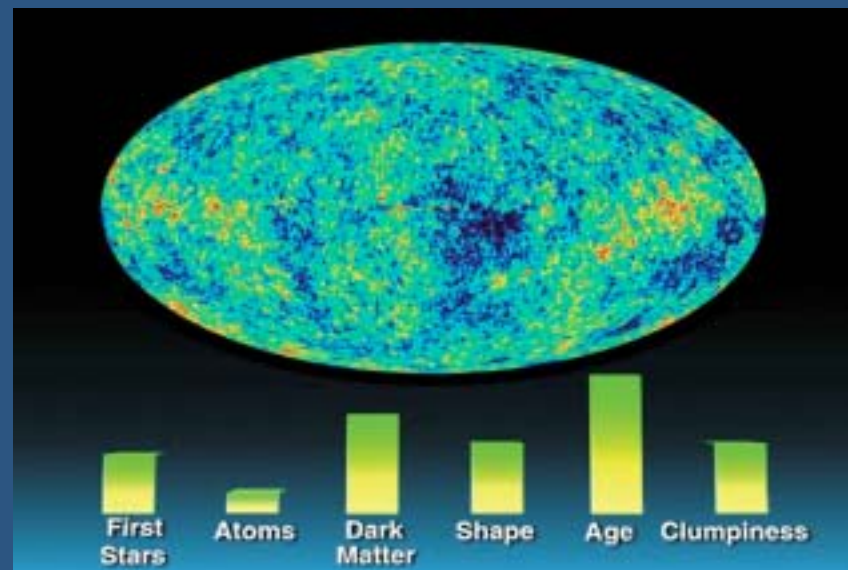
- 隠されている情報

- 宇宙の年齢、宇宙の幾何学的性質、宇宙の組成、、、

宇宙の古文書が教えてくれること

- 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

NASA/WMAP
Science Team



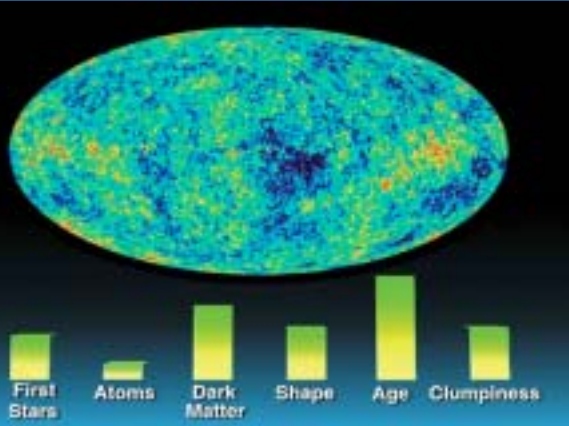
<http://lambda.gsfc.nasa.gov>

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_{DM}	質量密度パラメータ	宇宙の重力エネルギー、暗黒物質
Ω_Λ	宇宙定数	真空のエネルギー密度
Ω_K	宇宙の曲率	$= \Omega_b + \Omega_{DM} + \Omega_\Lambda - 1$ (アインシュタイン方程式、あるいはエネルギー保存式に対応)
t_0	現在の宇宙年齢	ビッグバン以後の宇宙の経過時間

WMAPが観測した温度ゆらぎパワースペクトル

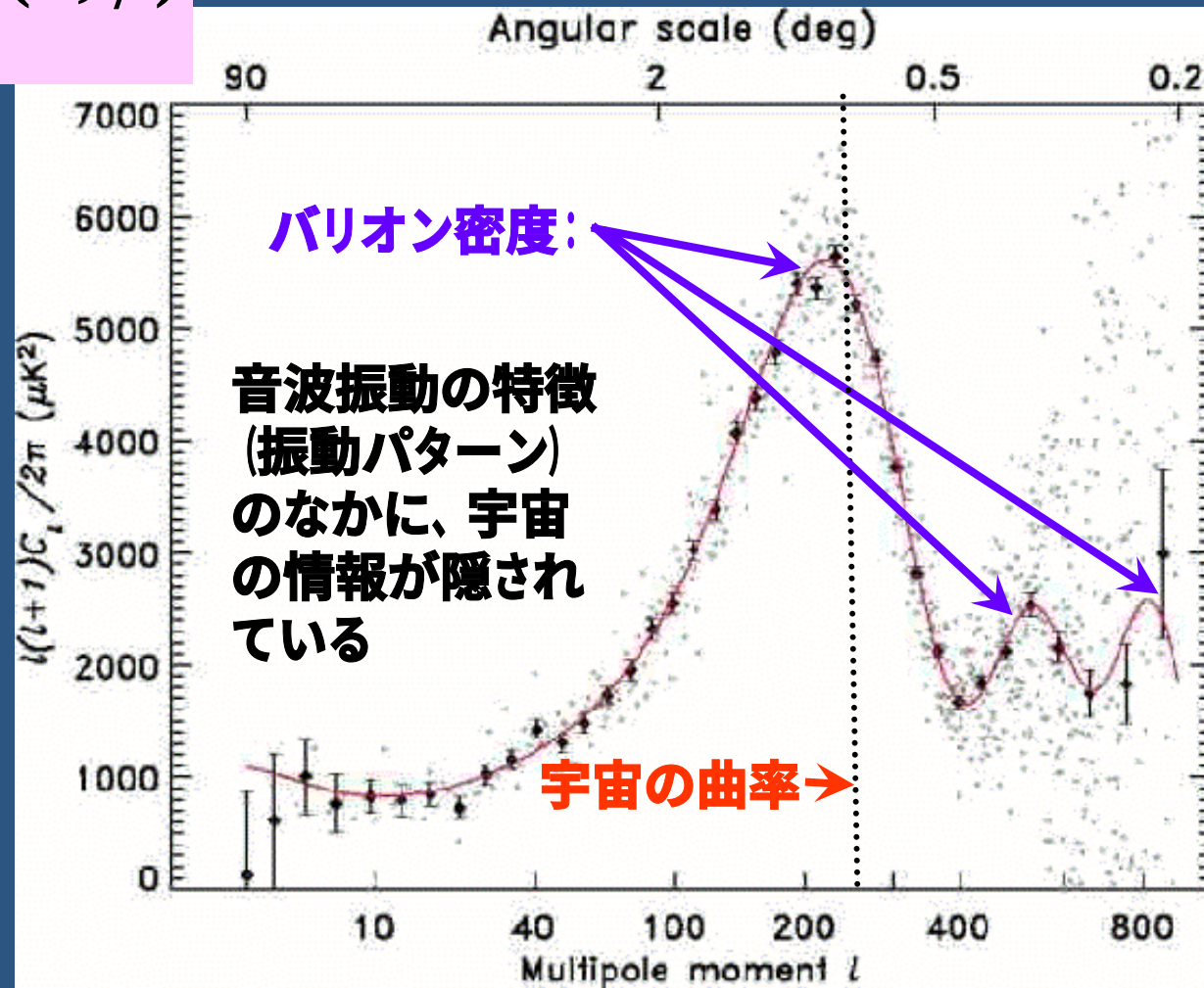
$$\frac{\delta T}{T}(\theta, \varphi) = \sum_{l,m} a_{lm} Y_{lm}(\theta, \varphi)$$



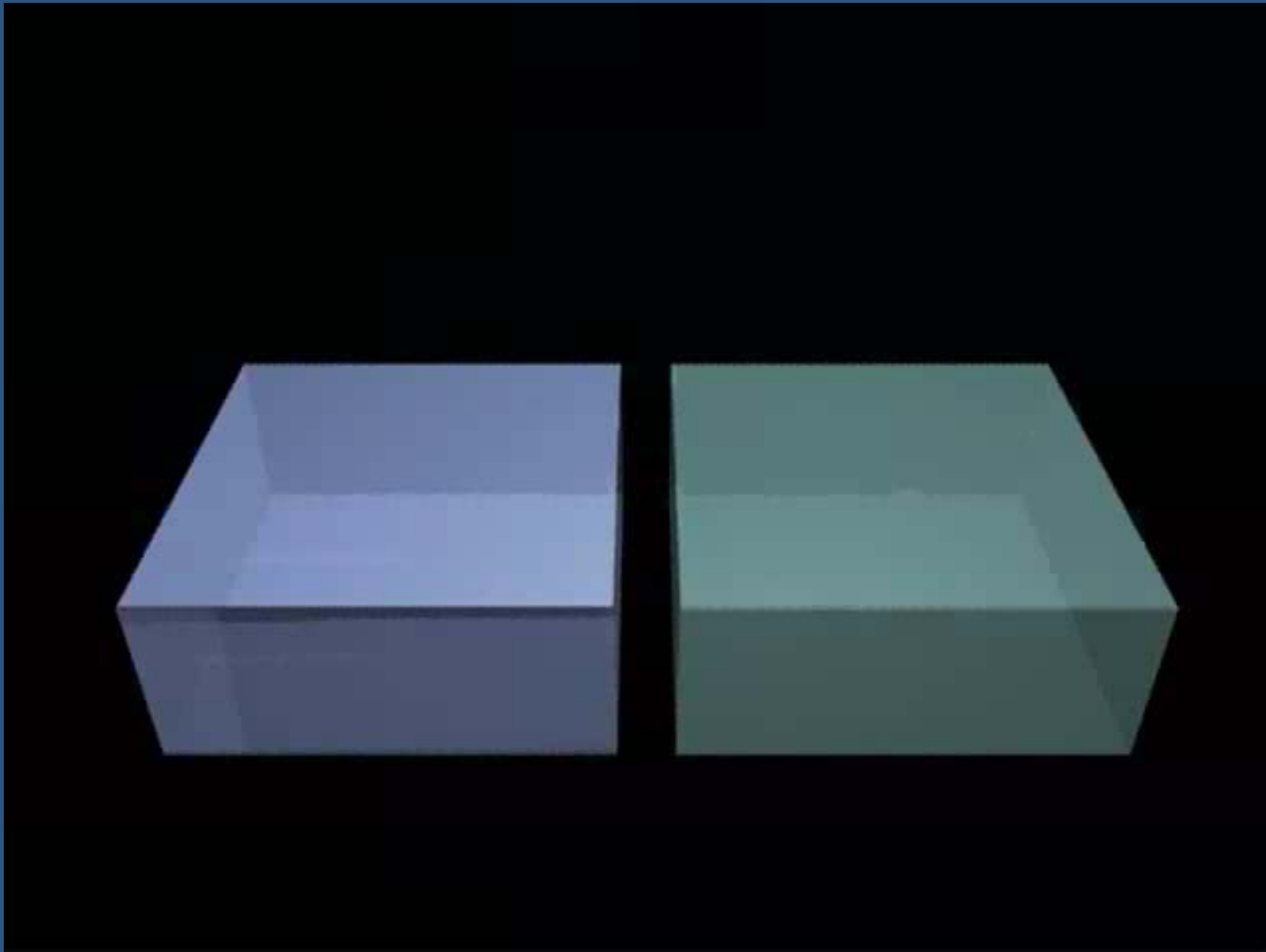
$$C_l = \langle a_{lm} a_{lm}^* \rangle$$

Spergel et al.
astro-ph/0302209

星空のむこう側



温度地図のゆらぎパターン=宇宙の音波振動



NASA/WMAP
Science Team

古文書解読手順 その1

本当はかなり複雑なパラメータフィットを行っており、厳密に言えば以下のように単純ではなく互いに絡み合っている。それでも近似的には解読原理は次のように要約できる。

1. 宇宙晴れ上がりの時期 z_{dec} を推定する

- a. 理論モデルを用いて観測されているCMB温度地図の宇宙時刻 (宇宙が中性化・晴れ上がった時) を計算
- b. これは、赤方偏移パラメータにして $z_{\text{dec}} = 1089 \pm 1$
- c. 宇宙の大きさが現在の $1/(1+z_{\text{dec}}) \sim 1/1089$ の時期に対応。(宇宙モデルを仮定して) 時刻に換算すれば $t_{\text{dec}} = 37.2 \pm 1.4$ 万年

2. この時期までにゆらぎの振動が伝わる距離 r を計算する

- a. 空間的な重力的密度のゆらぎは、その時期の宇宙の媒質中を音波として伝わる
- b. この音波振動が、CMB温度ゆらぎスペクトルの山や谷をつくる
- c. 主として放射からなる媒質の場合、音速は光速の $1/3^{1/2}$
- d. これらを総合すると、距離は (現在の宇宙での値に換算して)
 $r = 147 \text{ Mpc}$

古文書解読手順 その2

3. 理論モデルとの比較から宇宙の曲率がわかる

- a. この長さを現在の宇宙から見込む角度がCMB温度ゆらぎスペクトルの最初のピーク的位置に対応 (さらに右のピークはその高調波)
- b. WMAPの観測結果より、 $l \sim 220$ 、これは角度に換算して $\theta \sim \pi/l \sim 0.8^\circ$
- c. 実はこの値はほとんど宇宙の曲率 (幾何学、空間の曲がり具合) だけで決まる
- d. 上の結果より、宇宙の曲率はほとんど0、つまり、我々の宇宙はピタゴラスの定理が成り立つようなユークリッド空間 (平坦な宇宙) に極めて近いことが示された: 曲率 $= 0.02 \pm 0.02$

4. 空間の曲率は宇宙に存在する物質の総量と結びついている

- a. アインシュタインの一般相対論
- b. 時空のゆがみはその中に存在する物質の量 (= 重力の強さ) で決まる
- c. 無次元化した物質の総量 $\Omega_{\text{tot}} = \text{曲率} + 1 = 1.02 \pm 0.02$

5. r の値が、遠方のものさしの目盛りの役割をする

- a. CMB温度地図の宇宙時刻 (宇宙の晴れ上がり) から現在までの距離は、 $d = r / \theta \sim 14 \text{Gpc}$

古文書解読手順 その3

6. 現在の宇宙年齢の推定

- a. 宇宙の晴れ上がりから現在までの距離 d が決まったので(宇宙の曲率がほとんど0であることを利用すれば)、その時点から現在までの経過時間が精度よくわかる
- b. 宇宙の晴れ上がりでの時刻は $t_{\text{dec}} = 37.2 \pm 1.4$ 万年だったから、上で得られた時間は現在の宇宙年齢そのもの
- c. $t_0 = 137 \pm 2$ 億年

7. バリオン存在量の推定

- a. CMB温度ゆらぎスペクトルの奇数番目のピーク (振動の圧縮モードに対応) と偶数番目のピークとの振幅の比が、バリオン密度 (と放射密度の比) に依存して変化することを利用
- b. 結果は、 $\Omega_b h^2 = 0.0224 \pm 0.0009$

8. 暗黒物質存在量の推定

- a. バリオンと暗黒物質の総量 (通常の重力を及ぼす) と放射エネルギー量との比の値によって、第1番目のピークの高さが変化する
- b. これより、 $(\Omega_{\text{DM}} + \Omega_b) h^2 = 0.135 \pm 0.009$

古文書解読手順 その4

9. ハッブル定数の推定

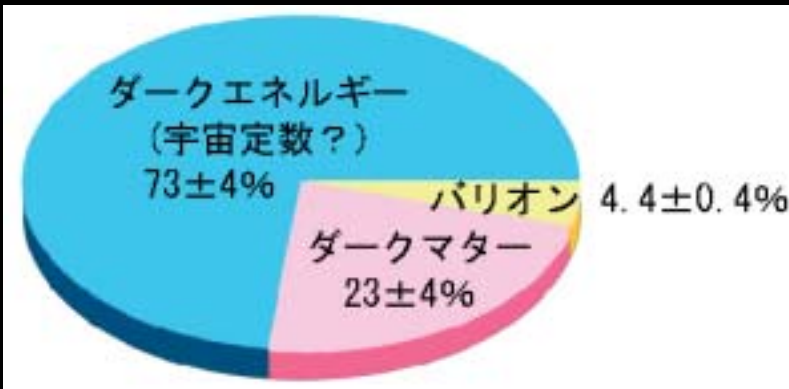
- a. 宇宙の晴れ上がりから現在までの距離 d と、ピークの高さの値と異なるピークの高さの比とを組み合わせる
- b. $h=0.71\pm0.04$

10. ダークエネルギー存在量の推定

- a. 物質の総量から引き算する
- b. 総量: $\Omega_{\text{tot}}=1.02\pm0.02$
- c. バリオン+ 暗黒物質 : $\Omega_b=0.29\pm0.04$
- d. 残り: 0.73 ± 0.04
- e. この正体不明のエネルギーは、ダークエネルギーと呼ばれているが、1917年にアインシュタインが導入した宇宙定数というパラメータと同じものなのではないかと考えられている

お疲れ様でした。ここまでくるとかなり難しいので、古文書解読手順その1からその4の部分は、全くわからなくとも仕方ない (というかそのほうが当たり前) と思います。すいません。

現在の宇宙の組成



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

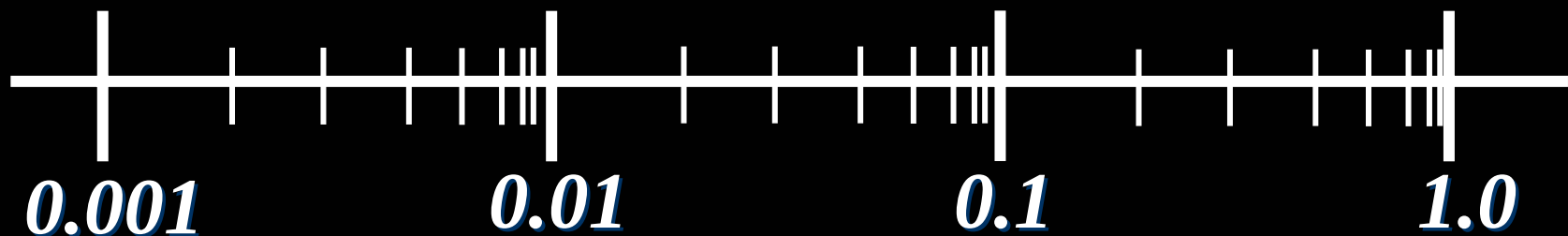
0.005 ± 0.002

バリオン

0.044 ± 0.004

CDM 理論予言

0.23 ± 0.04



宇宙の全質量 (密度) に占める割合

Expanding the *expanding* universe (膨張宇宙研究の展開)

0th order	一様等方宇宙モデル	宇宙論パラメータ
1st order	密度揺らぎの線形摂動論	宇宙の大構造 マイクロ波背景輻射
2nd order	非線型重力進化	ダークマターの構造形成
3rd order	バリオンガスの進化	第一世代天体と元素の起源
4th order	銀河、星、惑星の形成進化	光り輝く銀河宇宙の誕生
...		
L-th order	生命の起源・進化	宇宙論的生物発生学
M-th order	知的生命体への進化	宇宙論的生物進化学
N-th order	文化・文明・宗教	宇宙論的社会学
...		

値から理解へ：

本当の宇宙論研究はいよいよこれから！

最後に

星空をずっと眺め続けることで、我々の宇宙の現在から過去の姿がここまでしっかり見えてくるとはやはりすばらしいとしかいいようがないですね。たまには夜空でも眺めながら、それらについてじっくり思いをはせてみて下さい。

ちなみに、本日の講演録はPDFファイルとして

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

以下に置いてあります。 2次使用は固くお断りしますが、今回の内容をもう一度復習したい方はどうぞご覧ください。