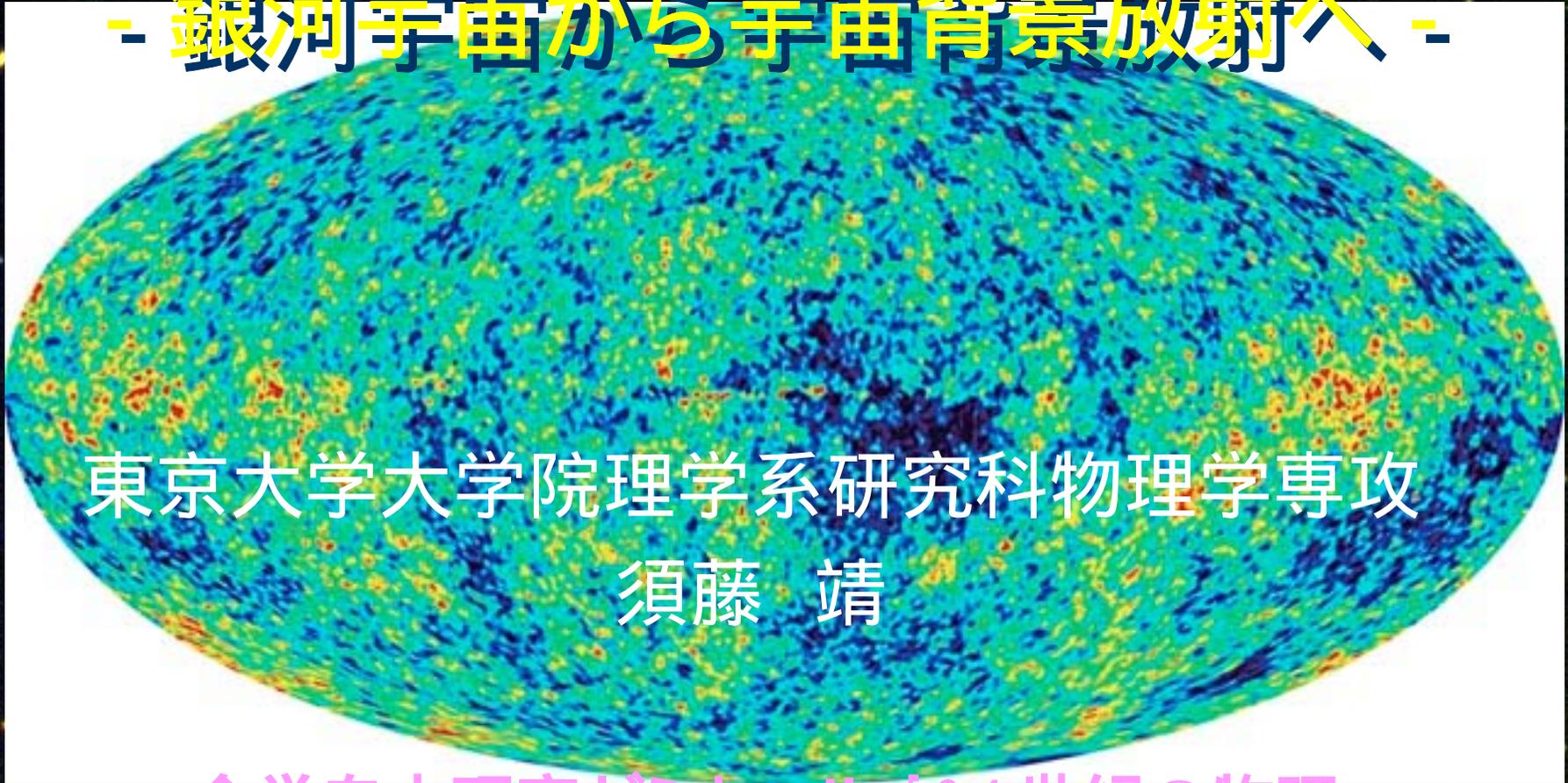


21世紀の物理 第8回

- 銀河宇宙から宇宙背景放射へ -



東京大学大学院理学系研究科物理学専攻

須藤 靖

全学自由研究ゼミナール「21世紀の物理」

2004年11月25日 16:20-17:50 @東大駒場1322教室

物理学と窮理学

- **物理学** = physics
 - もともとは「自然学」とでも呼ぶべき言葉
 - 自然学(広義のphysics)
 - = 自然法則の究明 (natural philosophy)
 - + 断片的な事実の集積 (狭義のphysics)
 - プリンキピア *Philosophiae naturalis principia mathematica*
- **窮理学** = natural philosophy
 - 17世紀頃英国で思弁的な哲学ではなく、多くの人々が教養として身につけるべき「実験的な自然の哲学」を意味するものとして誕生
 - 福沢諭吉等はこれを窮理学と訳した
 - 19世紀末頃から実用的な知識の重要性が認識され、natural philosophyがphysicsに置き換えられた

天文学と窮理学

- **天文学**: astronomy
 - astro (星、天体) + nemein (分布)
- **宇宙**=spacetime:
 - 「四方上下謂之**宇**、往古來今謂之**宙**」(淮南子、齊俗訓)のように「宇」を空間、「宙」を時間とする説や、「**宇**」を天、「**宙**」を地とする説などがある (三省堂、大辞林)
- **窮理学**:
 - 窮理学とは**天地**万物の性質を見てその働きを知る学問なり (福沢諭吉、学問のすゝめ)

天文学と物理学

■ 天文学からの物理学の発展

= 古典力学の形成

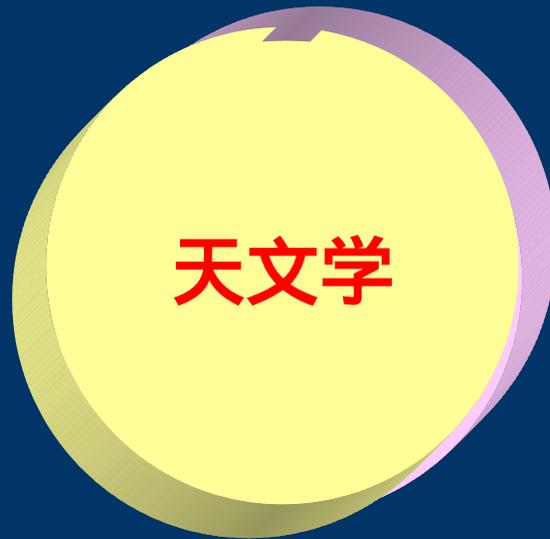
コペルニクス

ケプラー

ガリレイ

ニュートン

極限状況での理論の検証
新たな問題の提供



天文学

最新の技術・基礎理論の提供
現象の理解

- 一般相対論
- 原子核物理
- 素粒子論

我々の世界をもっとよく知りたい

■ 微視的世界：物質は何からできているのだろうか？

- ものをどんどん分けていくとどうなるか？
- 分子 原子 原子核(バリオン) 素粒子(クォーク・レプトン)
- もはやこれ以上は分けることのできない最小構成要素が存在
- これ以外の物質(素粒子)は存在しないのか？

■ 巨視的世界：宇宙の果てには何があるのだろうか？

- 地球 太陽系 星団 銀河 銀河団 宇宙の大構造
- 宇宙の大きさ(=年齢)はどのくらいだろう
- さらに遠く(=過去)の宇宙はどうなっているのだろう
- 宇宙を占めている物質は、我々がすでに知っている微視的世界の構成要素と同じなのだろうか

曜日の名前=物質・宇宙の起源

■ 古代ギリシャの4元説

- 空気、土、火、水 (+ エーテル)

日月火水木金土

■ 中国の五行説

- (木、火、土、金、水) × (陽、陰)
- 甲乙 丙丁 戊己 庚辛 壬癸



■ 昔の中国では惑星 (= 当時の宇宙) の名前は物質の起源にちなんでいる

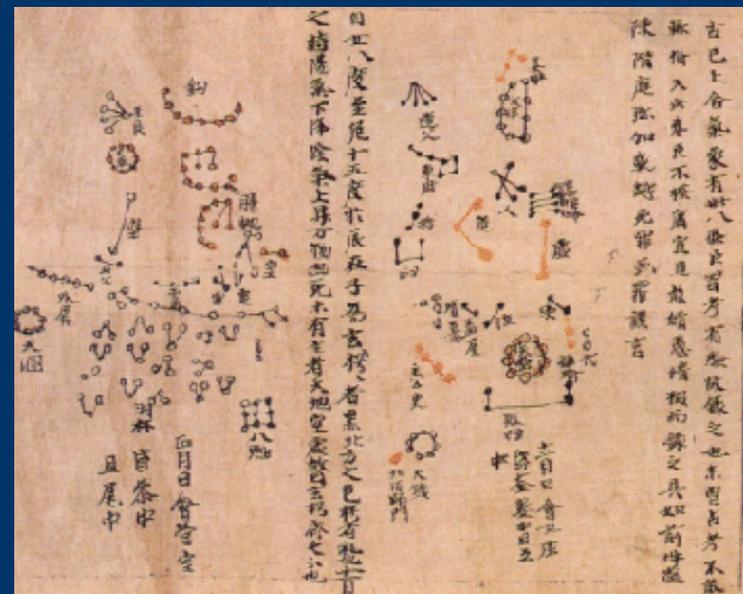
- 宇宙の起源 物質の起源 という考え方は、現在の素粒子的宇宙論におけるもっとも基本的な出発点

■ 我々は毎日この曜日の名前を用いている

- つまり、宇宙の起源 = 物質の起源という考え方は、曜日の名前を通じて知らないうちに日本人の日常に入り込んでいる

遠くの世界はどうなっているのだろうか？

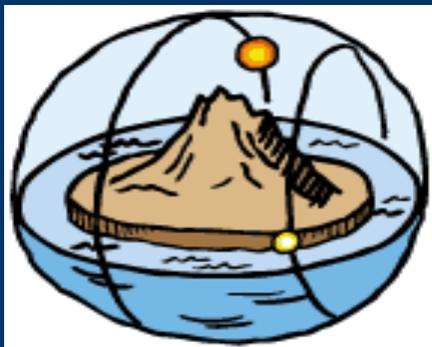
■ 宇宙の果てには何がある？



古代エジプトの宇宙像



古代中国の宇宙像



古代インドの宇宙像(象)



<http://www.isas.ac.jp/kids/firstlook/index.html>

■ 第二の地球はあるか？

- 我々人類は広い宇宙でひとりぼっちなのか？

我々の銀河系：天の川

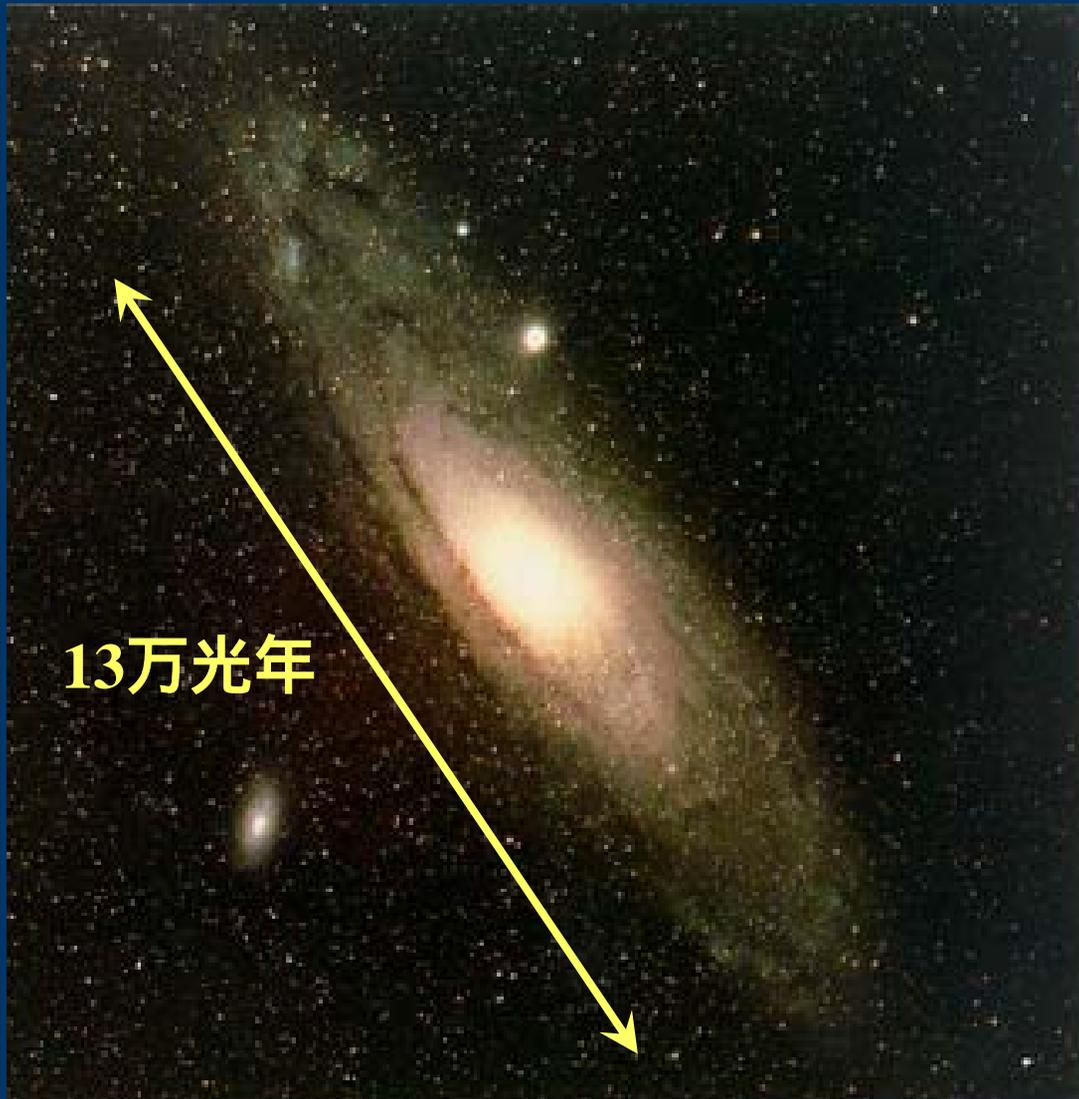
- 星とガスからなる渦巻き銀河。実は、その質量の9割以上は光では観測できない(正体不明の)暗黒物質。



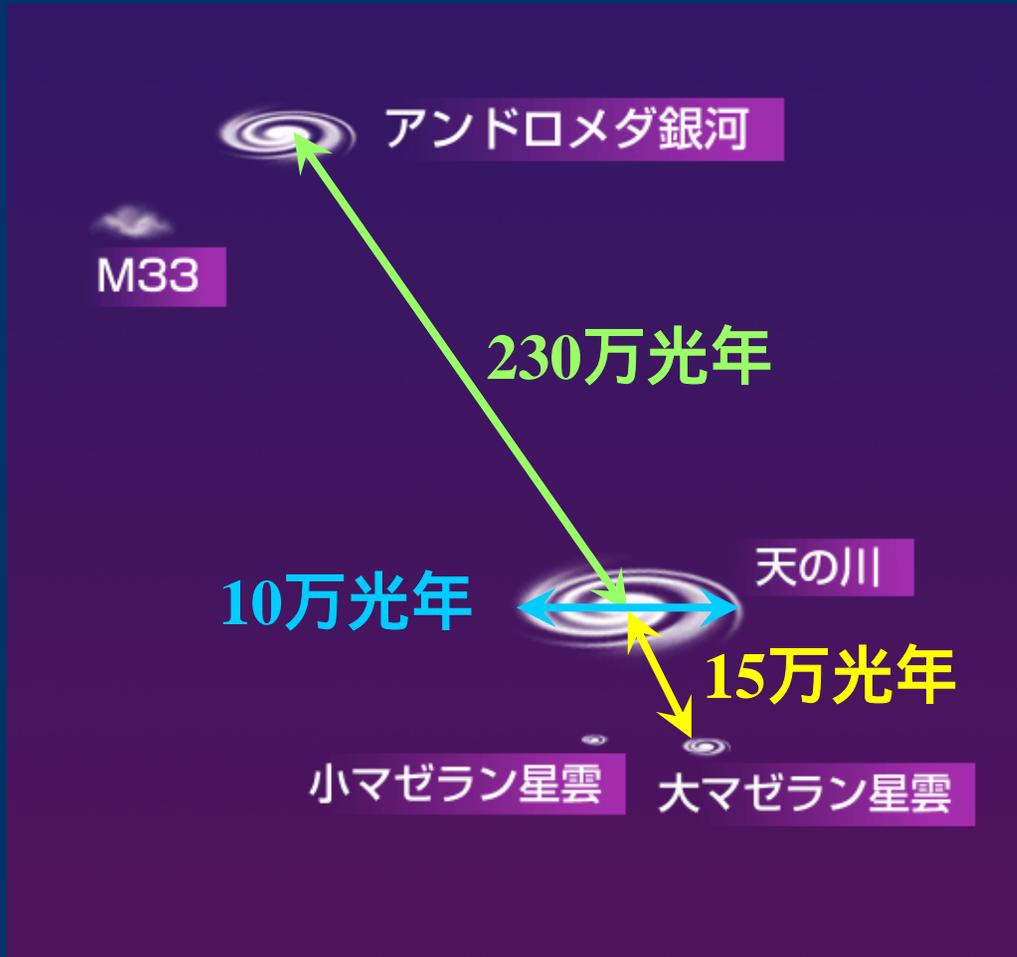
異なる波長 (可視光、赤外線、サブミリ波、電波) で見た天の川

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

アンドロメダ銀河 (M31) : 隣の銀河



局所銀河群： 我々のまわりの銀河集団



- 我々の銀河系、アンドロメダ銀河をはじめ30個程度のメンバー銀河からなる、直径600万光年程度重力的束縛系

銀河の形：ハッブル分類

Sa



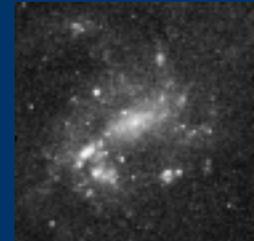
Sb



Sc



Sd



楕円銀河



E0



E6

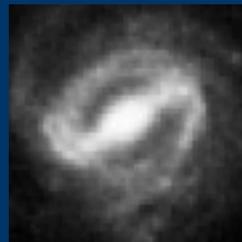


S0

レンズ状銀河

渦巻銀河

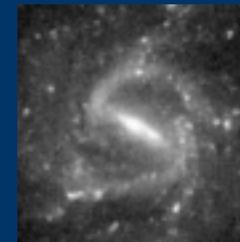
棒渦巻銀河



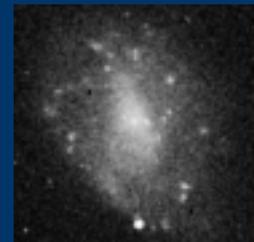
SBa



SBb



SBc



SBd

<http://skyserver.pha.jhu.edu/jp/>

銀河団： 宇宙で最大の自己重力系

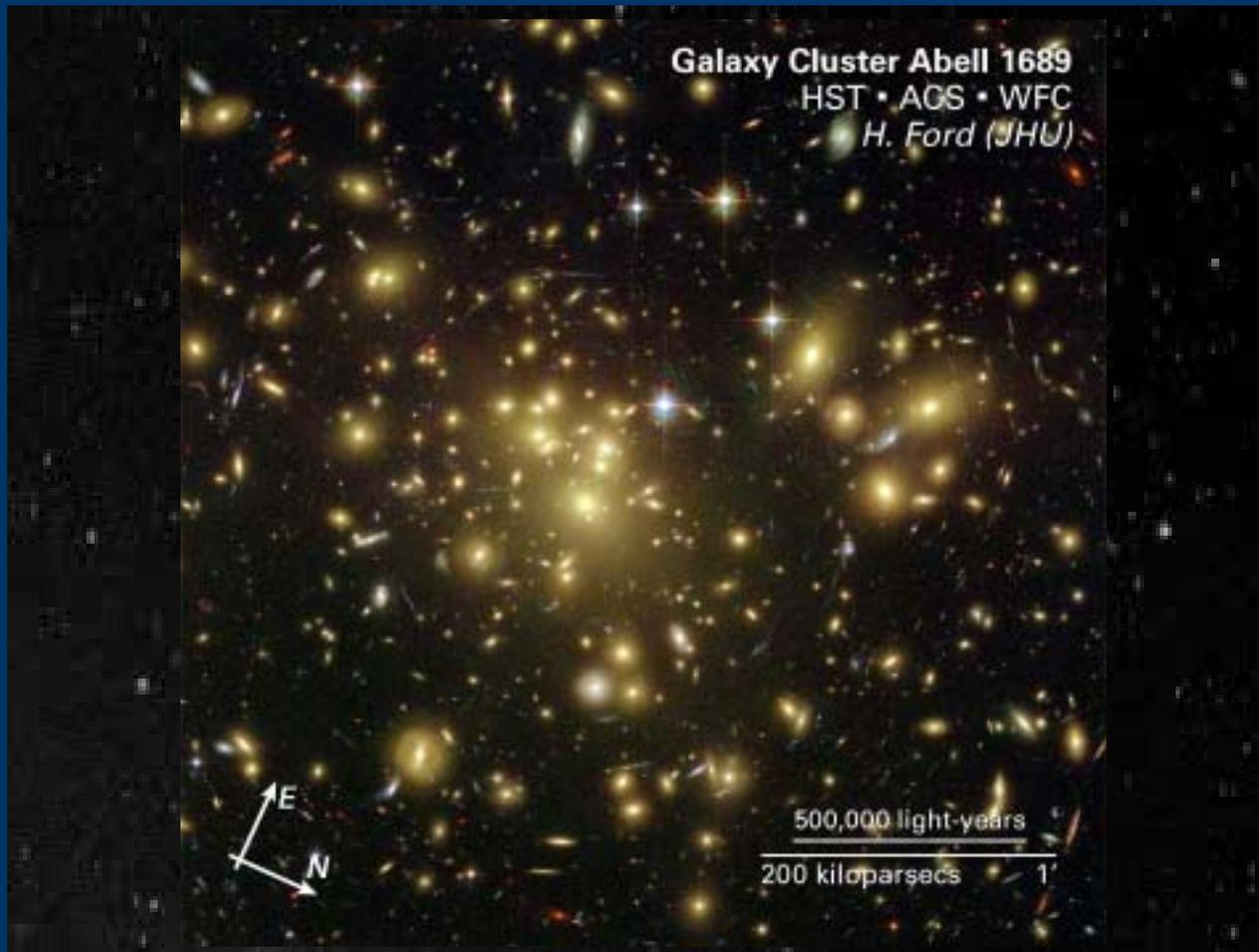


- およそ100～1000個の銀河が、直径1000万光年程度の領域に重力的に引き合い、集団化したもの

銀河団エイベル1689
(距離:22億光年)
ハッブル宇宙望遠鏡

<http://hubblesite.org/newscenter/archive/>

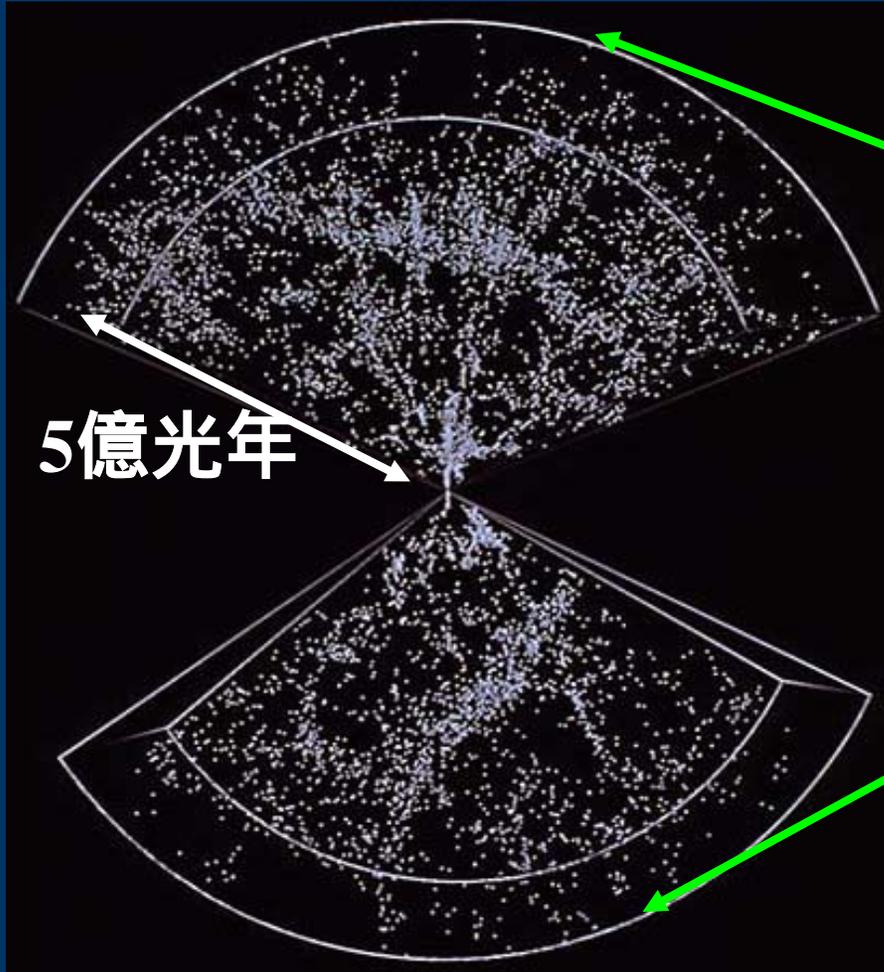
22億年前の銀河団を見る



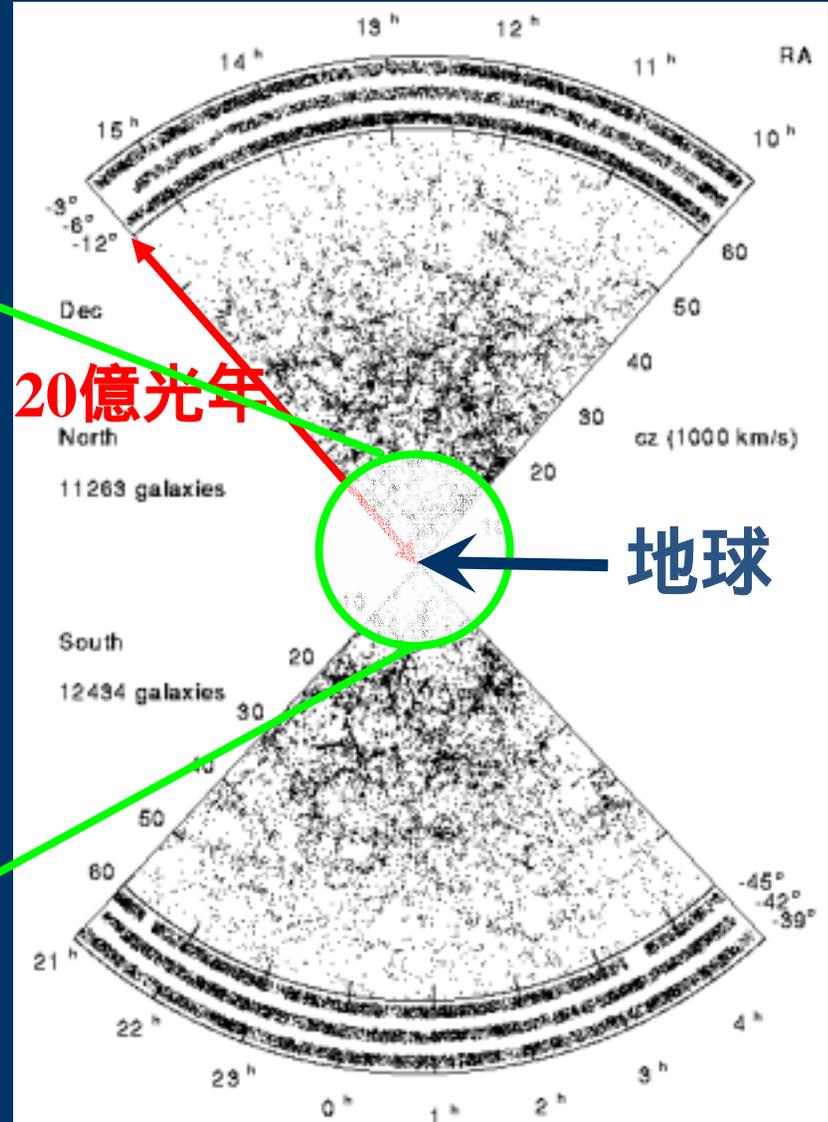
銀河団エイベル1689 ハッブル宇宙望遠鏡

<http://hubblesite.org/newscenter/archive/>

銀河の3次元分布地図

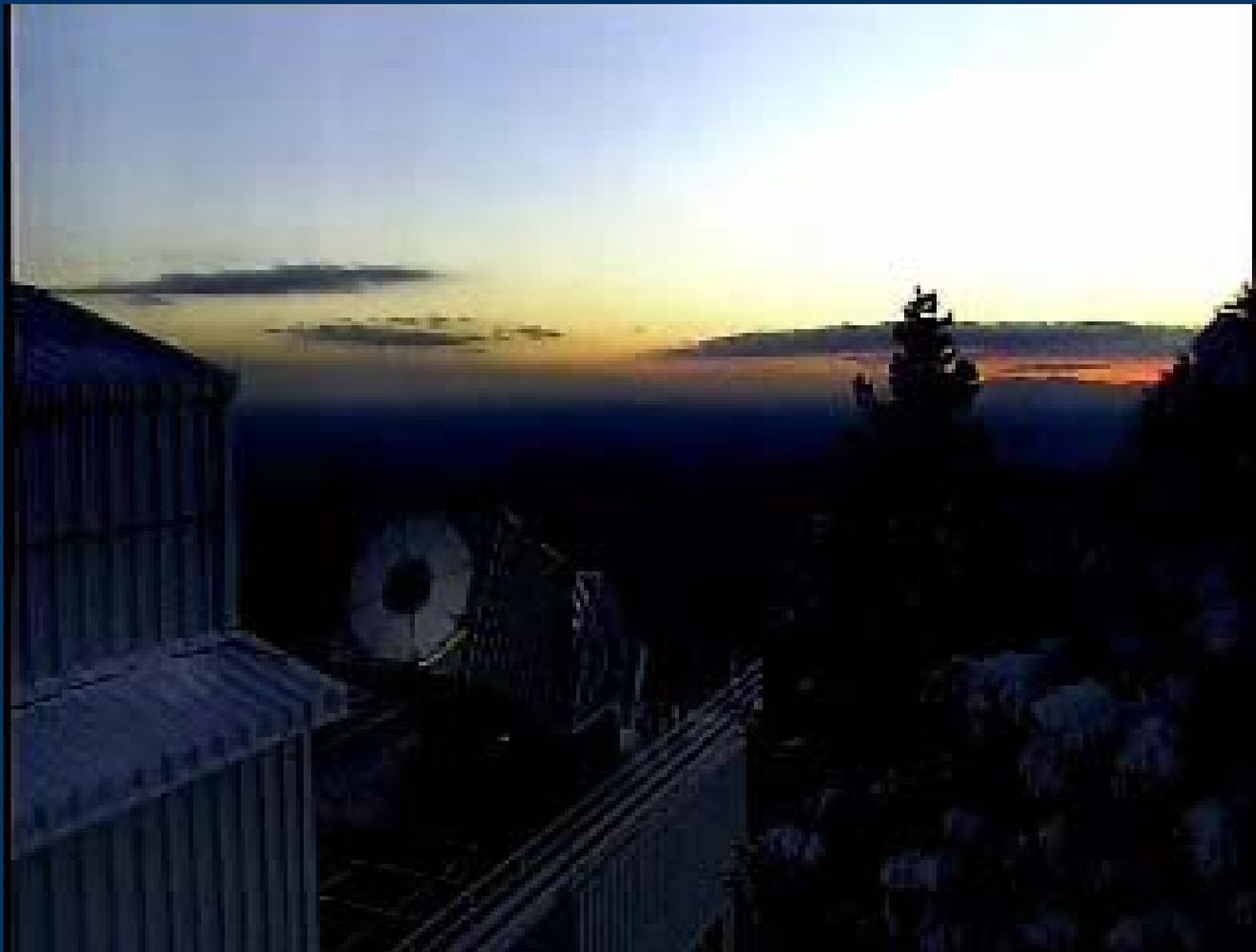


CfA galaxy redshift survey:
Geller, da Costa & Huchra (1992)



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

SDSS (スローンデジタルスカイサーベイ) 米国ニューメキシコ州アパッチポイント天文台

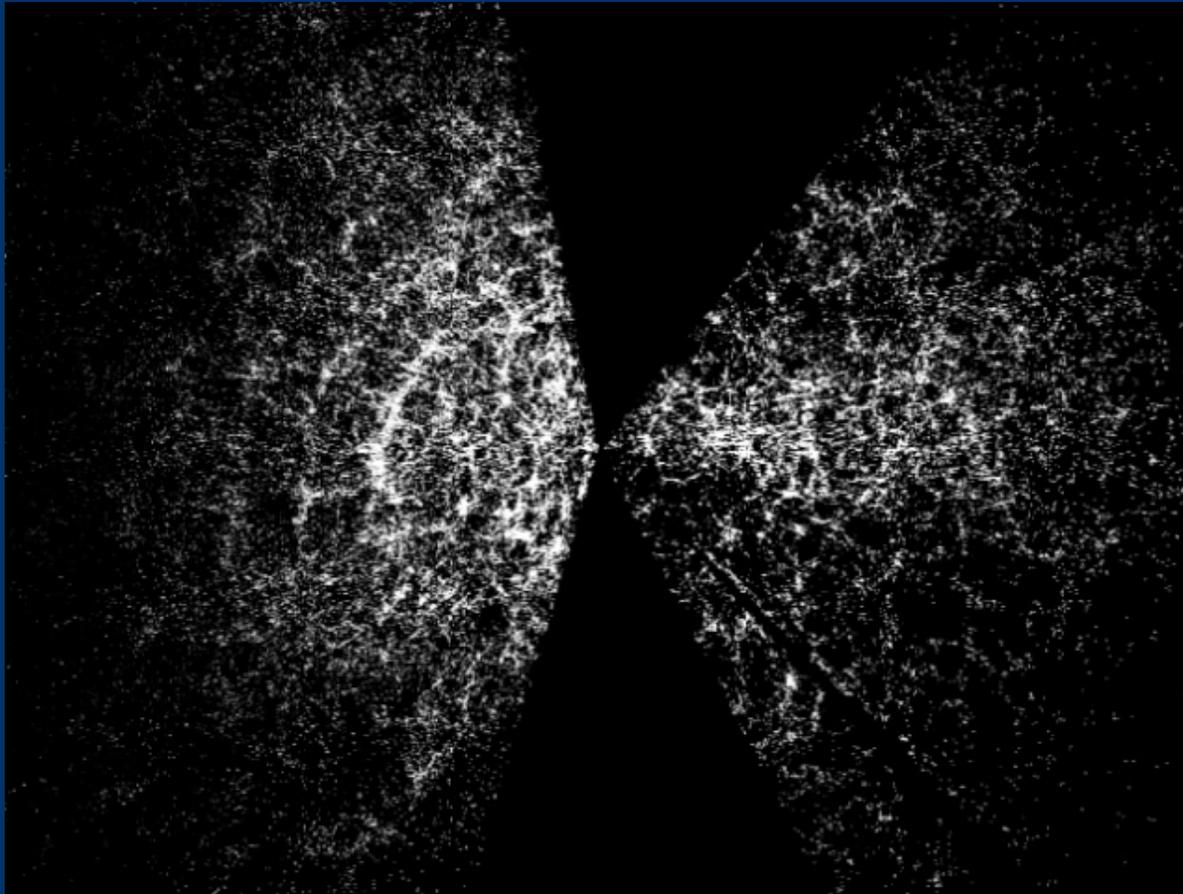


NHK教育TV “サイエンスゼロ” 2003年6月11日放映

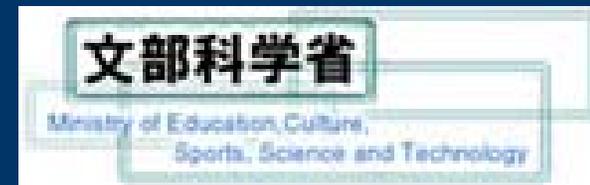


史上最大の銀河地図作りをめざして： 日米独共同スローンデジタルスカイサーベイ

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

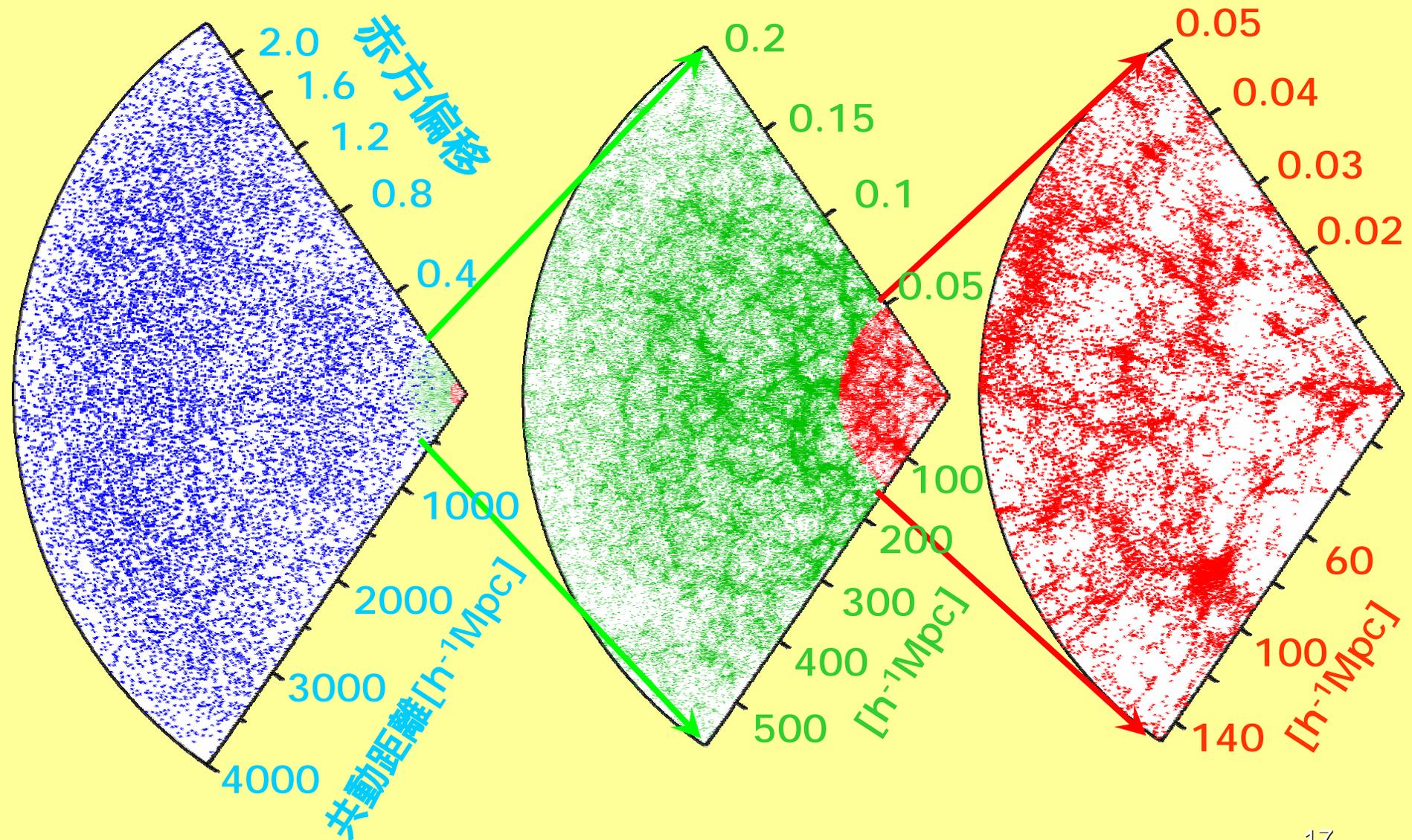


<http://www.sdss.org/dr1/>

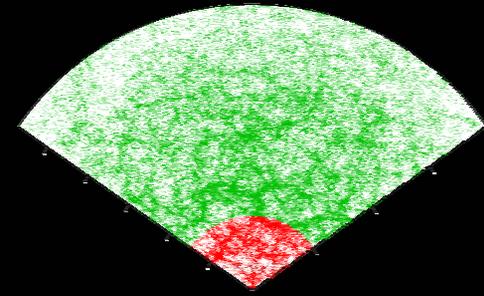
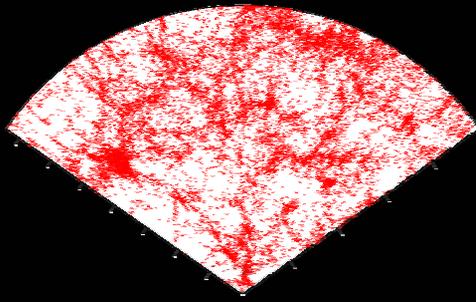


NHK教育 サイエンスZERO 2003年6月11日 0:00 放映

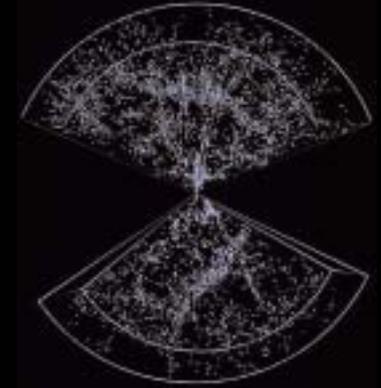
SDSSクエーサーと銀河の宇宙地図



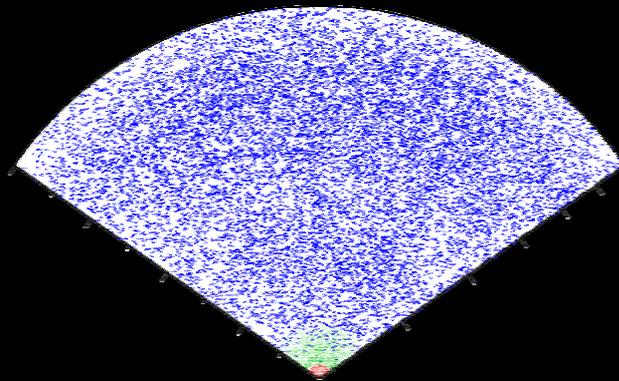
宇宙の階層構造



星 星団 銀河 銀河群 銀河団 宇宙の大構造

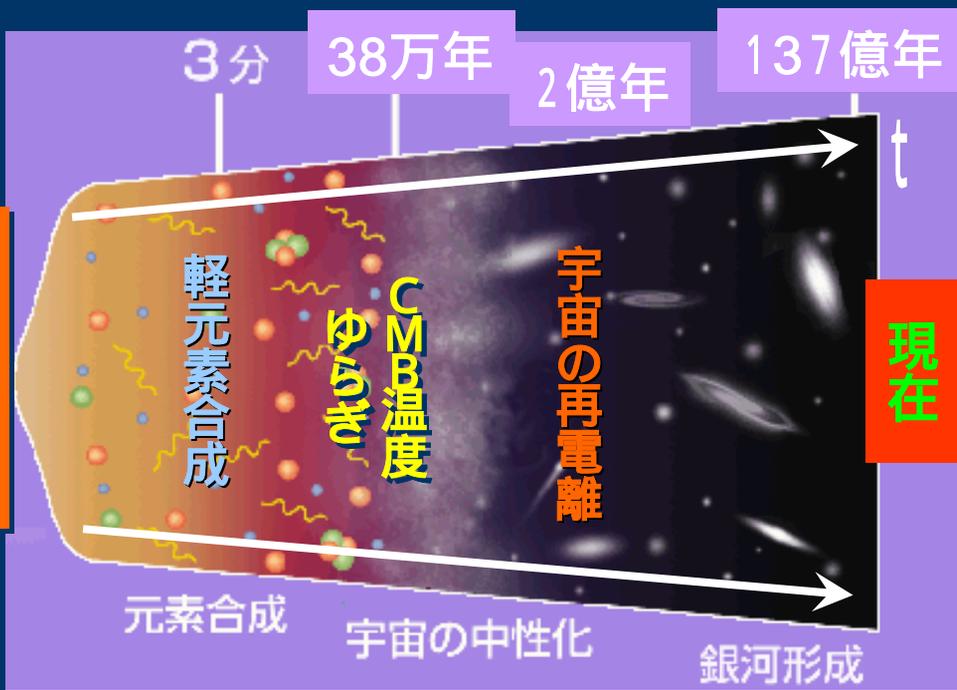


100万km 10光年 10万光年 100万光年 10億光年



典型的大きさ

宇宙の歴史



宇宙の誕生

軽元素合成

CMB温度
ゆらぎ

宇宙の再電離

現在

元素合成

宇宙の中性化

銀河形成

量子ゆらぎの生成

第一世代天体の誕生

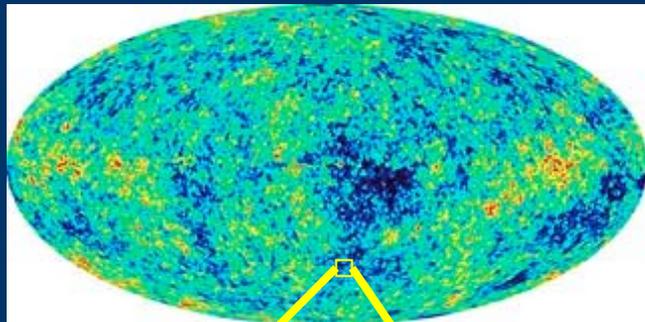
銀河の形成
銀河団の形成

宇宙の大構造

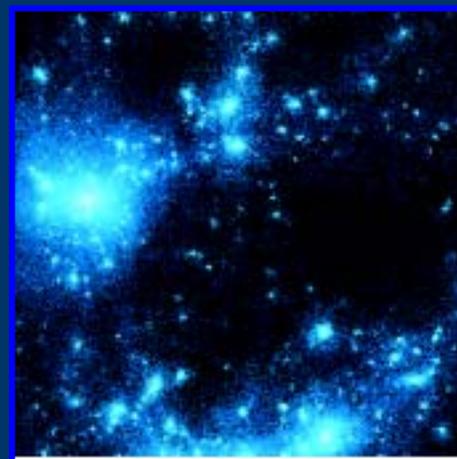
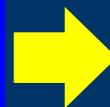
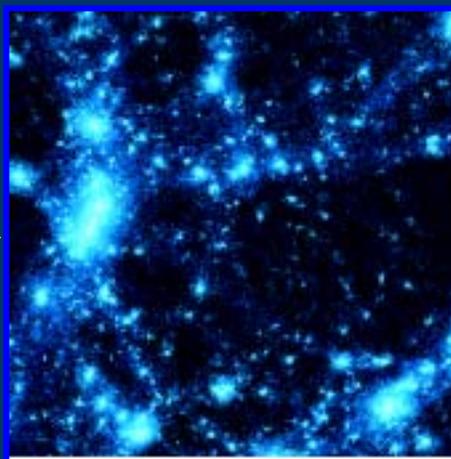
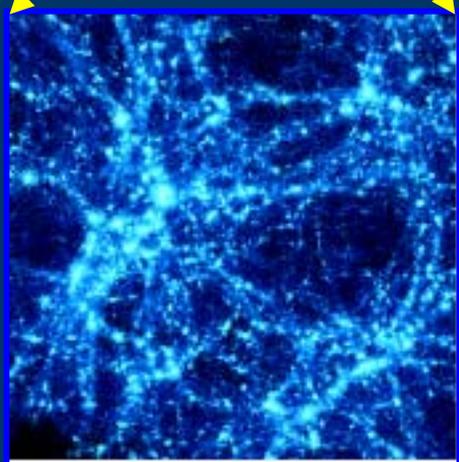
- $t \sim 10^{-40}$ 秒: インフレーション・量子ゆらぎの生成
- $t \sim 3$ 分: ヘリウム合成
- $t \sim 38$ 万年: 宇宙の中性化・宇宙の晴れ上がり
- $t \sim 2$ 億年: 第一世代天体の誕生
- $t \sim 8$ 億年: 宇宙の再電離ほぼ終了
- $t = 8$ 億年 ~ 137億年: 銀河形成、銀河団形成、宇宙の大構造
- $t \sim 137$ 億年: 現在

宇宙の構造形成標準理論

宇宙初期の空間ゆらぎ

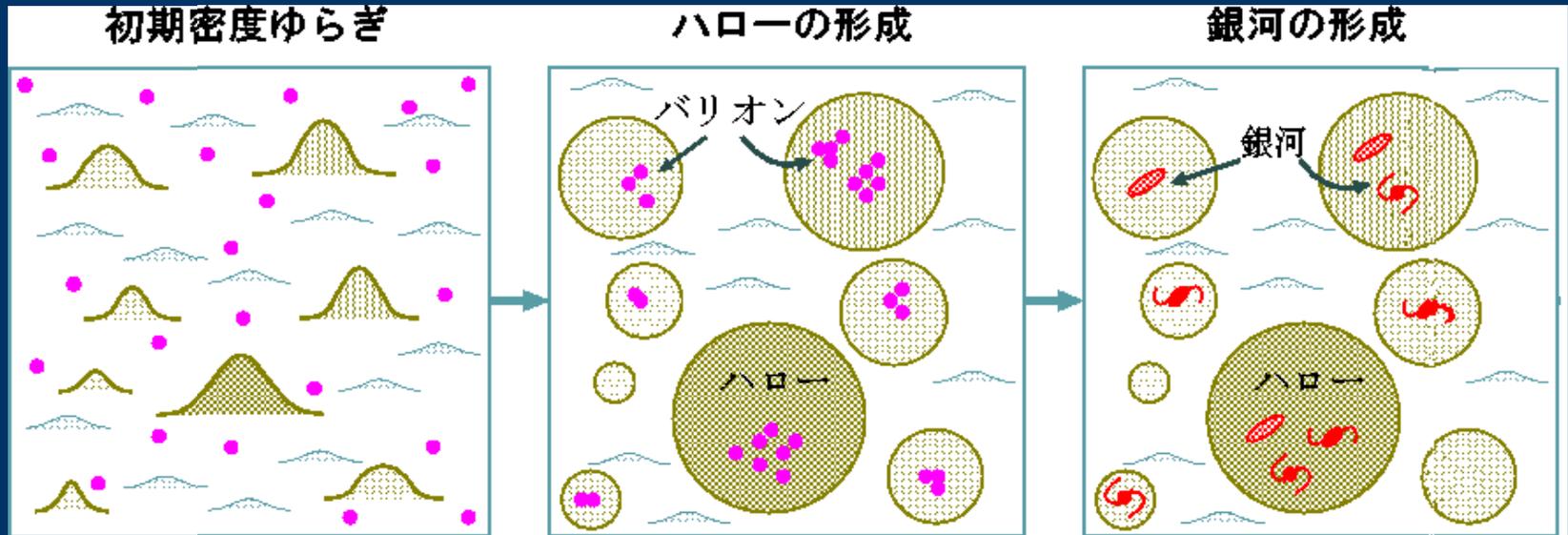


- 小さなスケールの構造ほど初期に形成される
- いったんできた構造が重力的に合体あるいは集団化することで、より大きなスケールの構造へと進化する



万有引力(重力)によってでこぼこ度合いがどんどん成長する

重力不安定による構造形成パラダイム



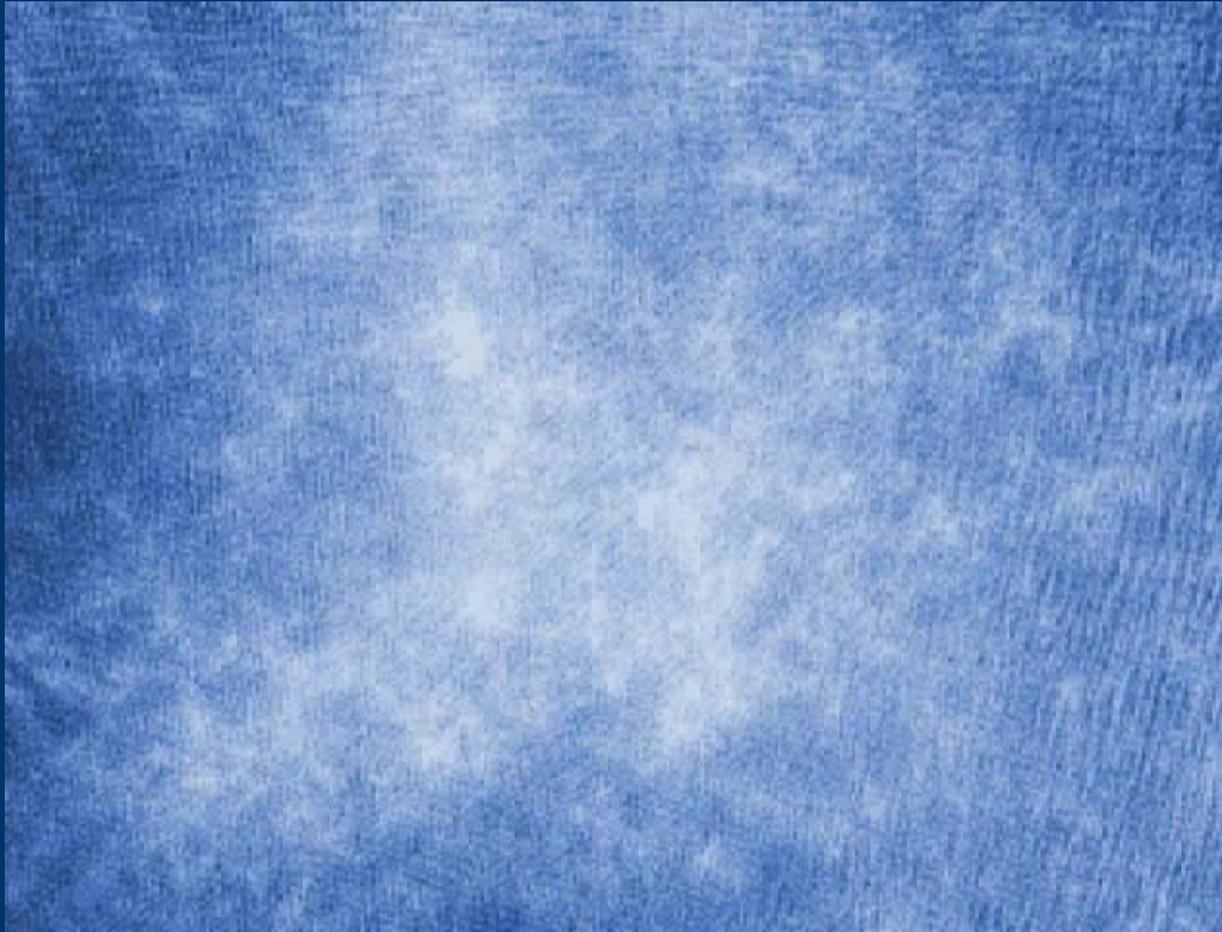
重力進化

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



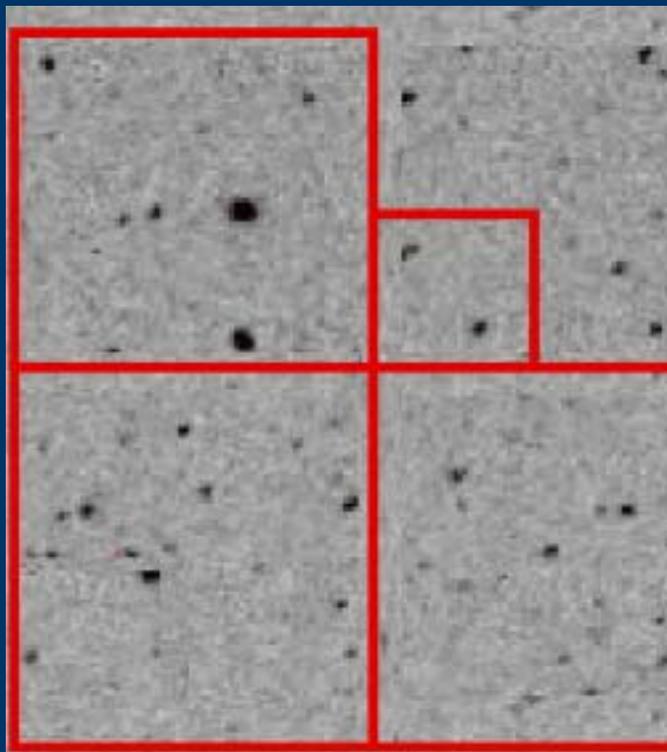
吉川 耕司、
樽家 篤史、
景 益鵬、
須藤 靖
(2001)

ダークマター分布の進化

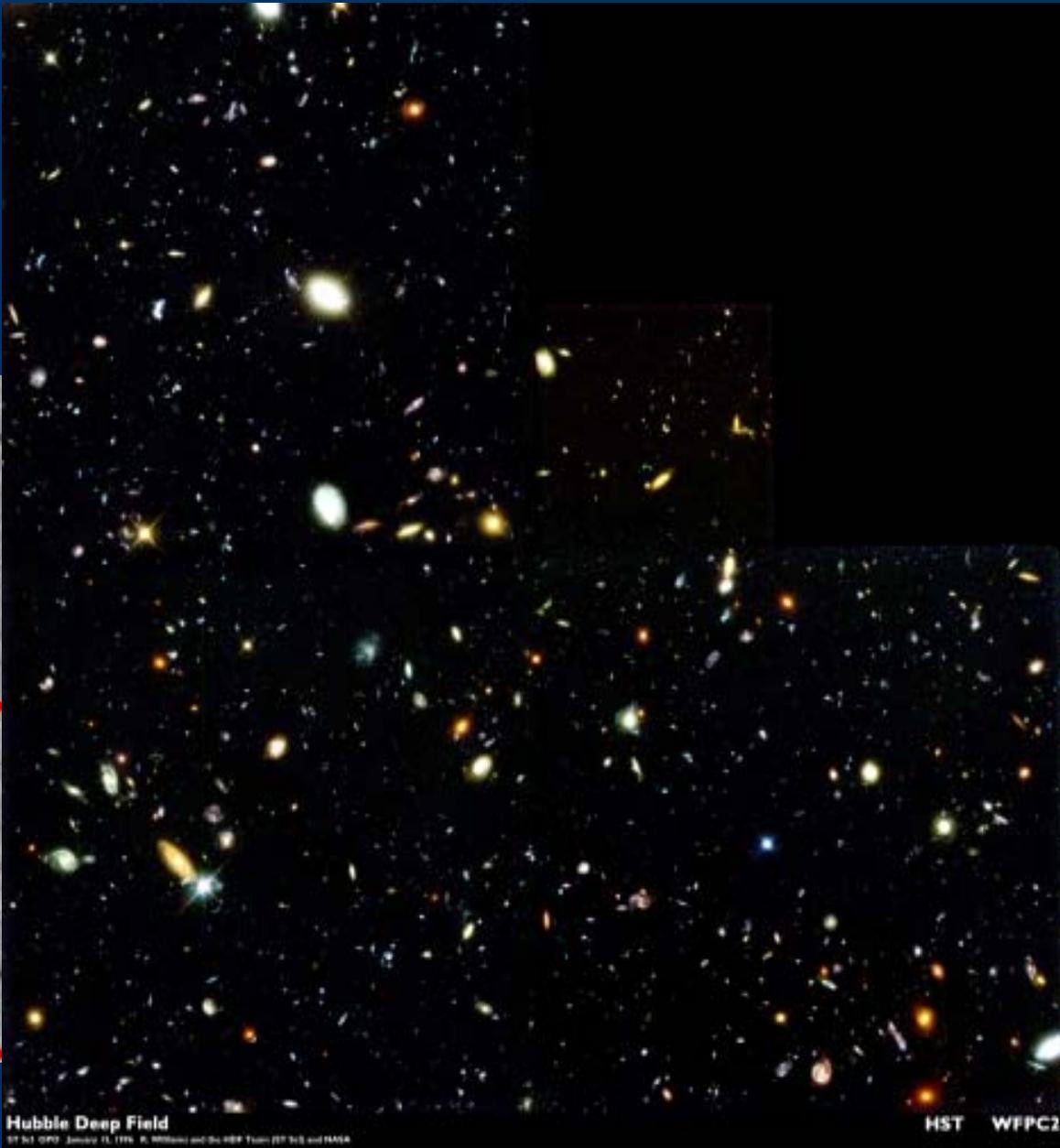
X線で見える現在の高温ガス分布

可視光で見える現在の宇宙の銀河分布

宇宙を見る “目”の進歩



地上4m望遠鏡 + CCD
100 × 写真乾板



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/>

すばるが見た最大のクエーサー重力レンズ

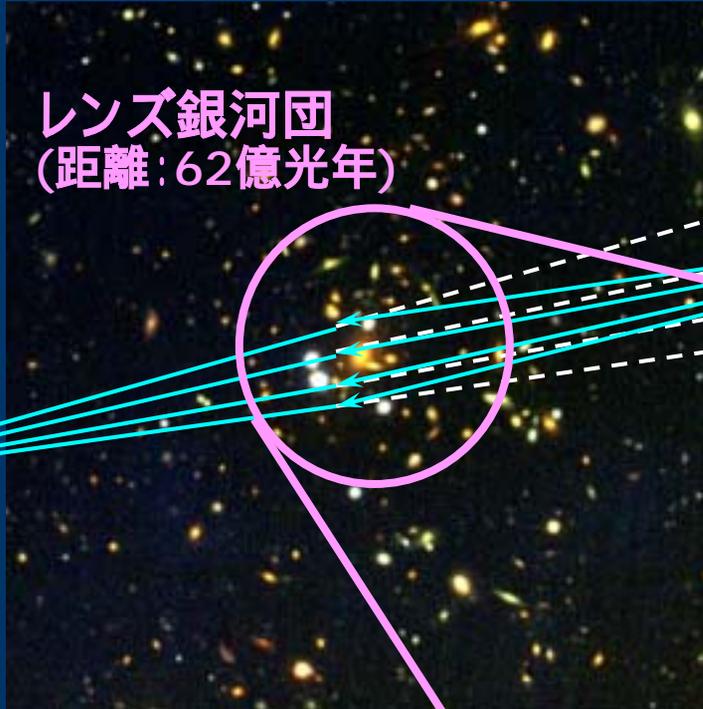
稲田、大栗ほかSDSSグループ

Nature 426 (2003) 810

すばる 8.2m
望遠鏡



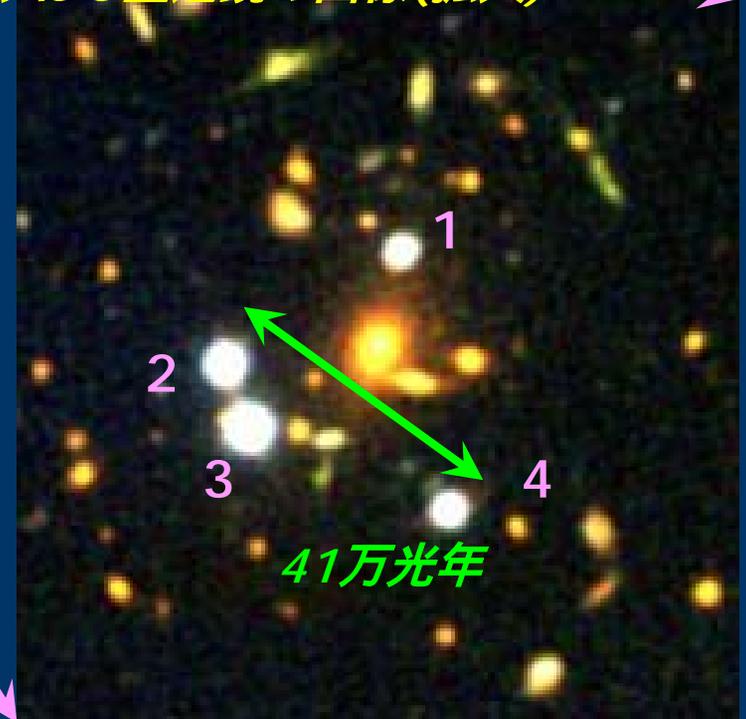
すばる望遠鏡の画像



レンズ銀河団
(距離: 62億光年)

クエーサー
SDSS J1004
(98億光年)

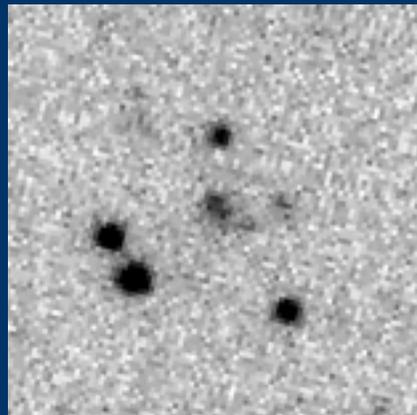
すばる望遠鏡の画像(拡大)



41万光年

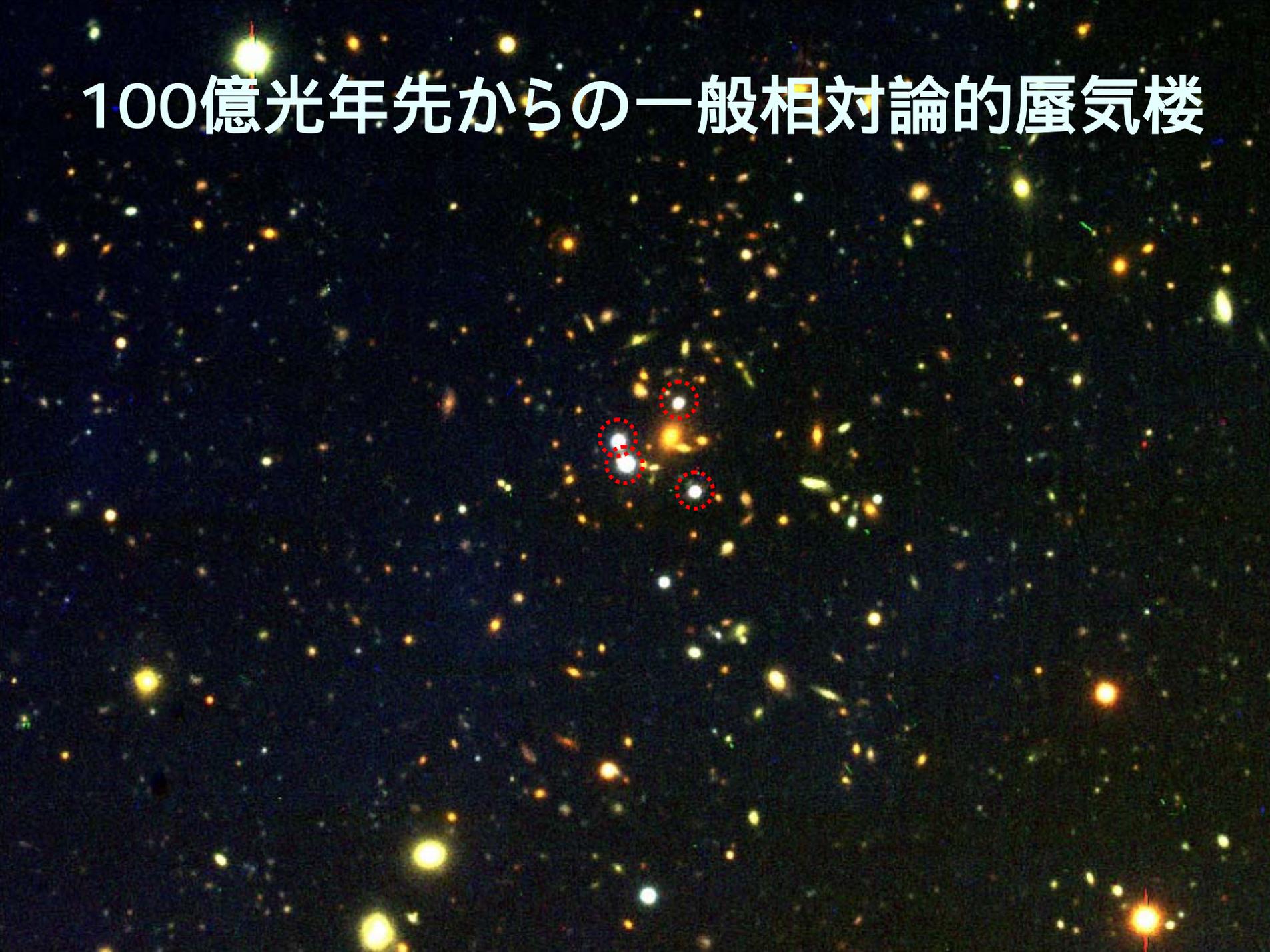


SDSS専用
2.5m望遠鏡

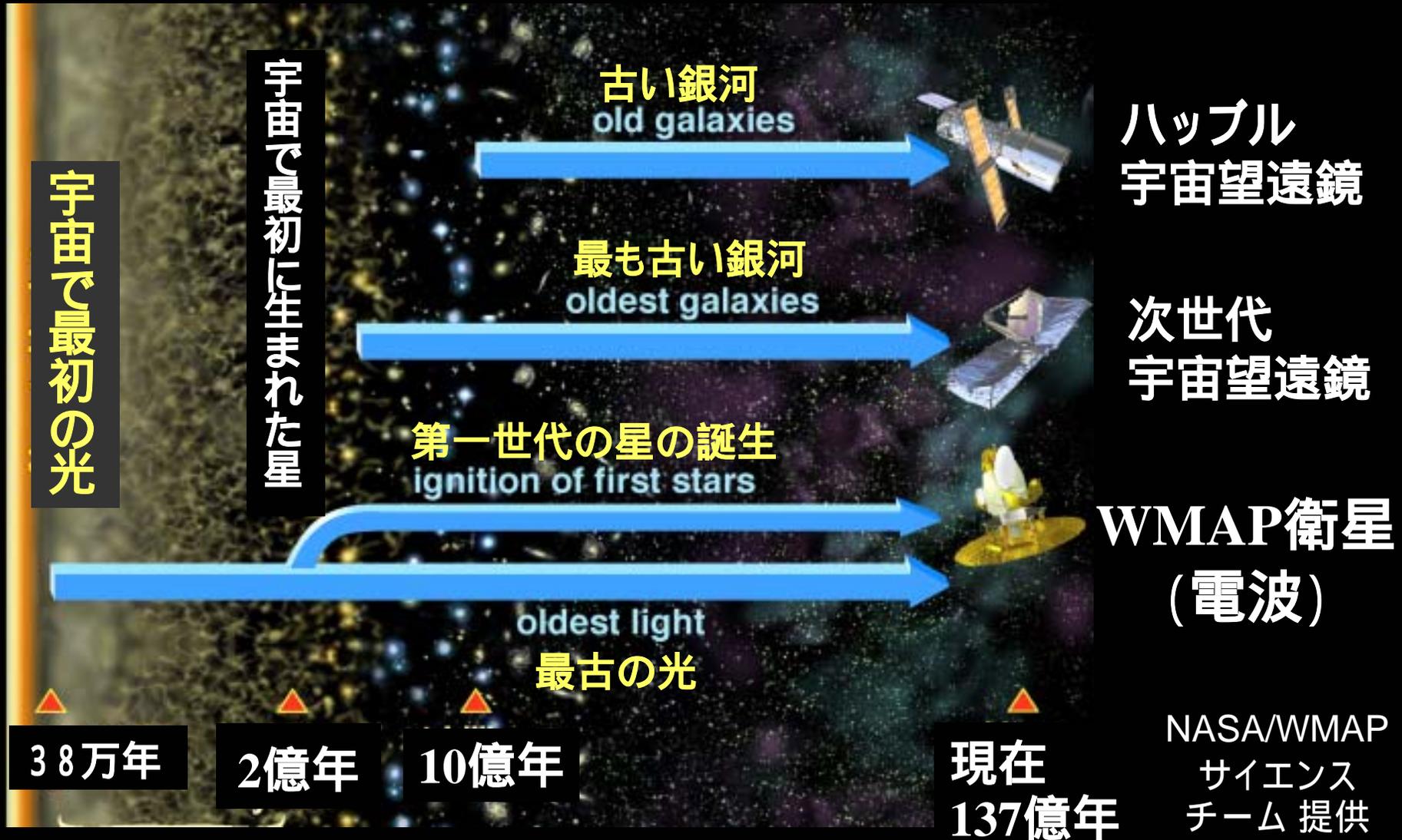


SDSSの画像

100億光年先からの一般相対論的塵気楼



衛星によってさらなる宇宙の果てを見る

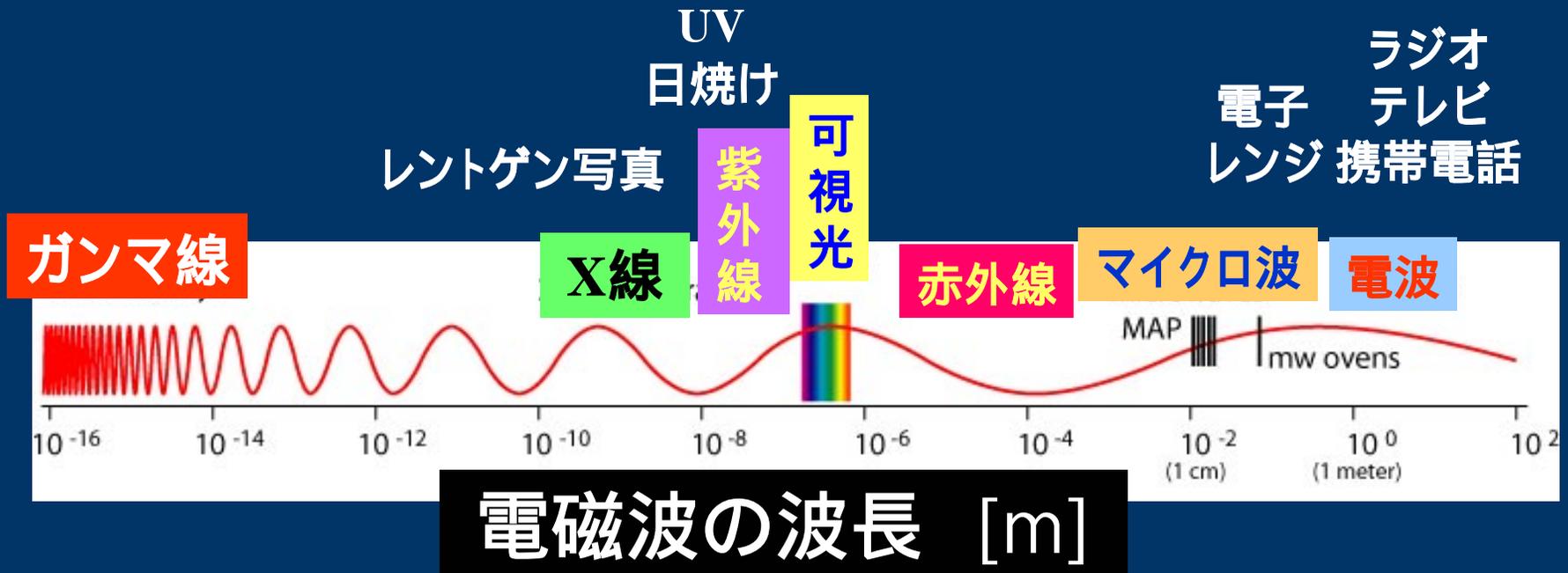


<http://lambda.gsfc.nasa.gov>

マイクロ波とは？：電磁波の名前と波長

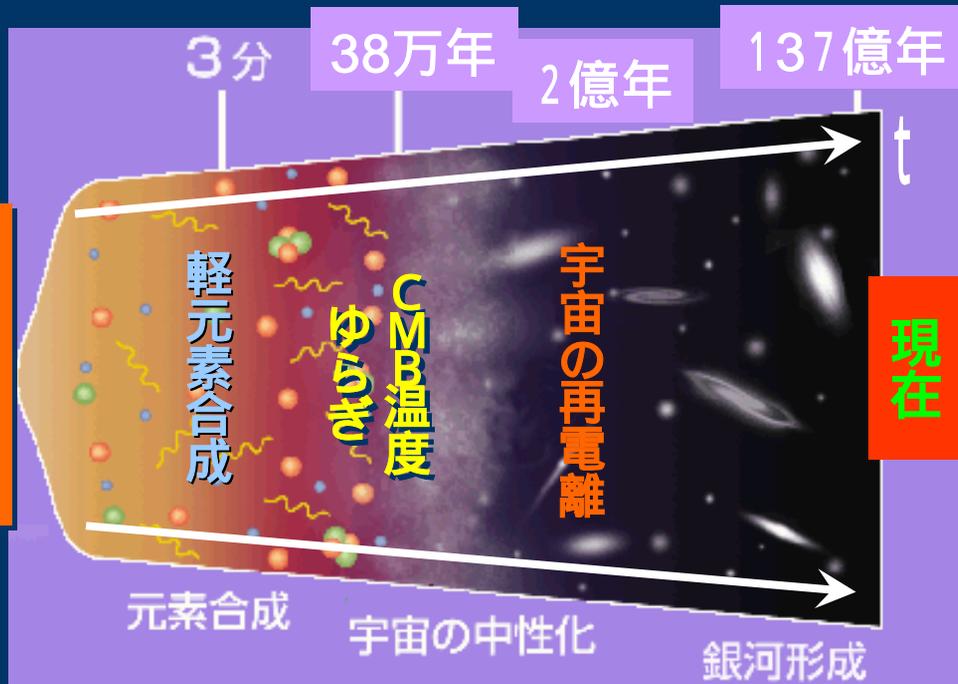
通常、「光」と呼ばれているものは、電磁波と呼ばれる波の一種である。これらは波長に応じて異なる名前をもつ。現代の天文学ではこれらすべての波長を駆使した観測を行っている。

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の名残り
(今から137億年前の宇宙の光の化石)



CMB:

Cosmic Microwave Background

■ 宇宙の晴れ上がり

- 誕生後約38万年で温度が3000度程度に下がった宇宙で、電子と陽子が結合して水素原子となる
- この宇宙の中性化により、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

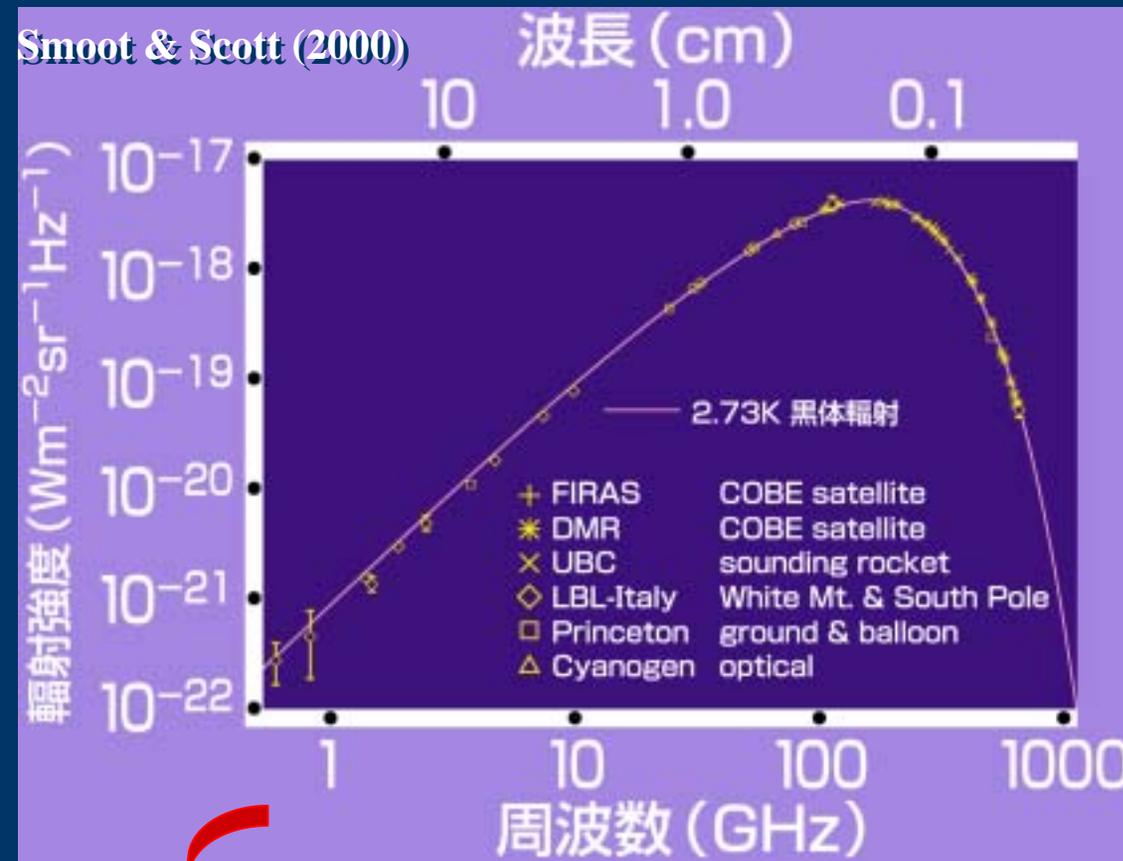
銀河の形成

銀河団の形成

宇宙の大構造

CMB: 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

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

: 周波数、 c : 光速
 h : プランク定数
 k : ボルツマン定数

温度 T だけがパラメータ!

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

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

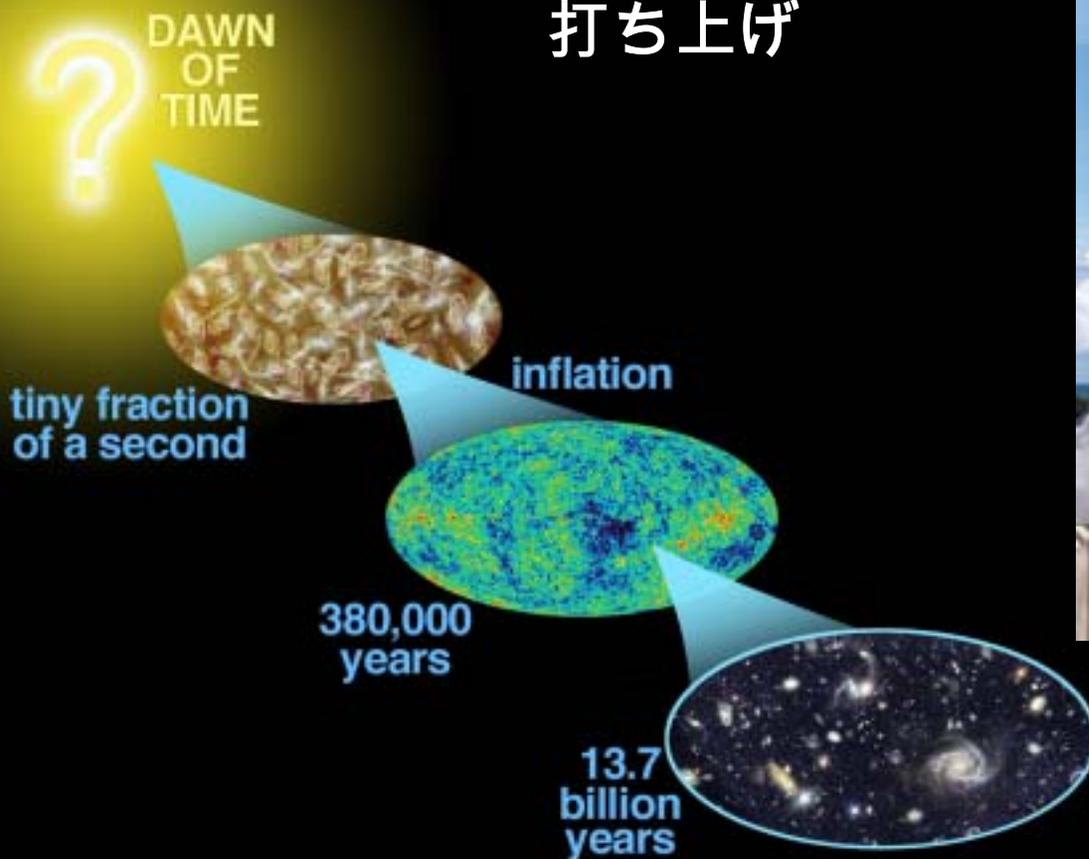
WMAP (ウィルキンソンマイクロ波非等方性探査衛星)

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

2001年6月30日 15:46:46

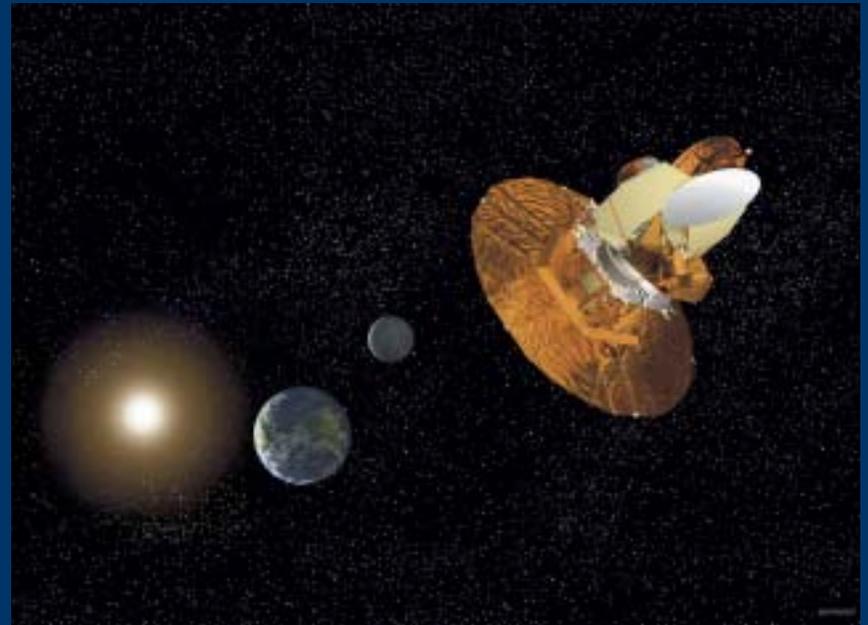
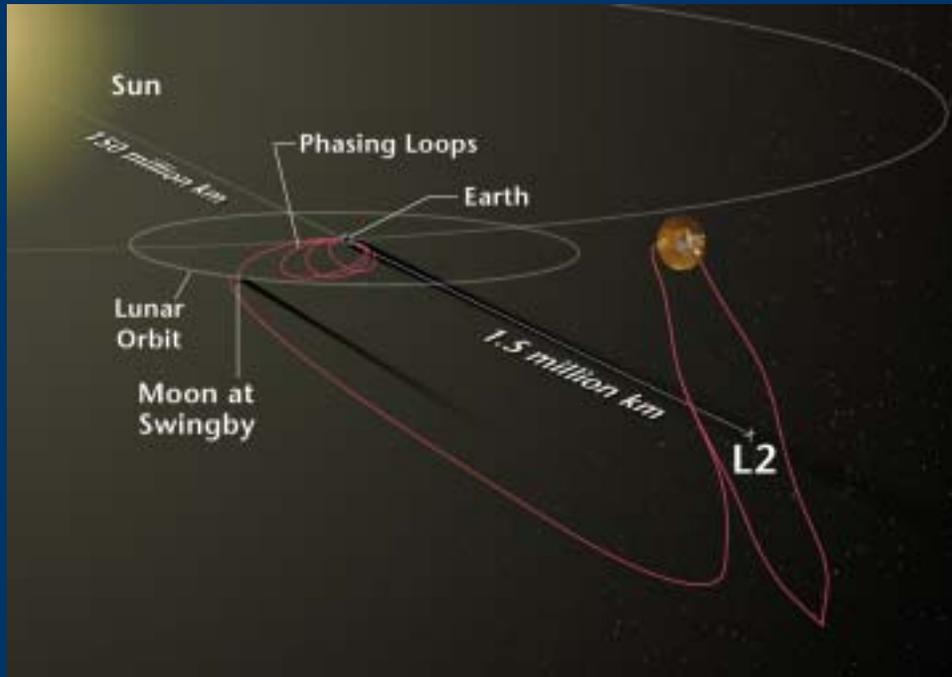
米国東海岸標準時間

打ち上げ

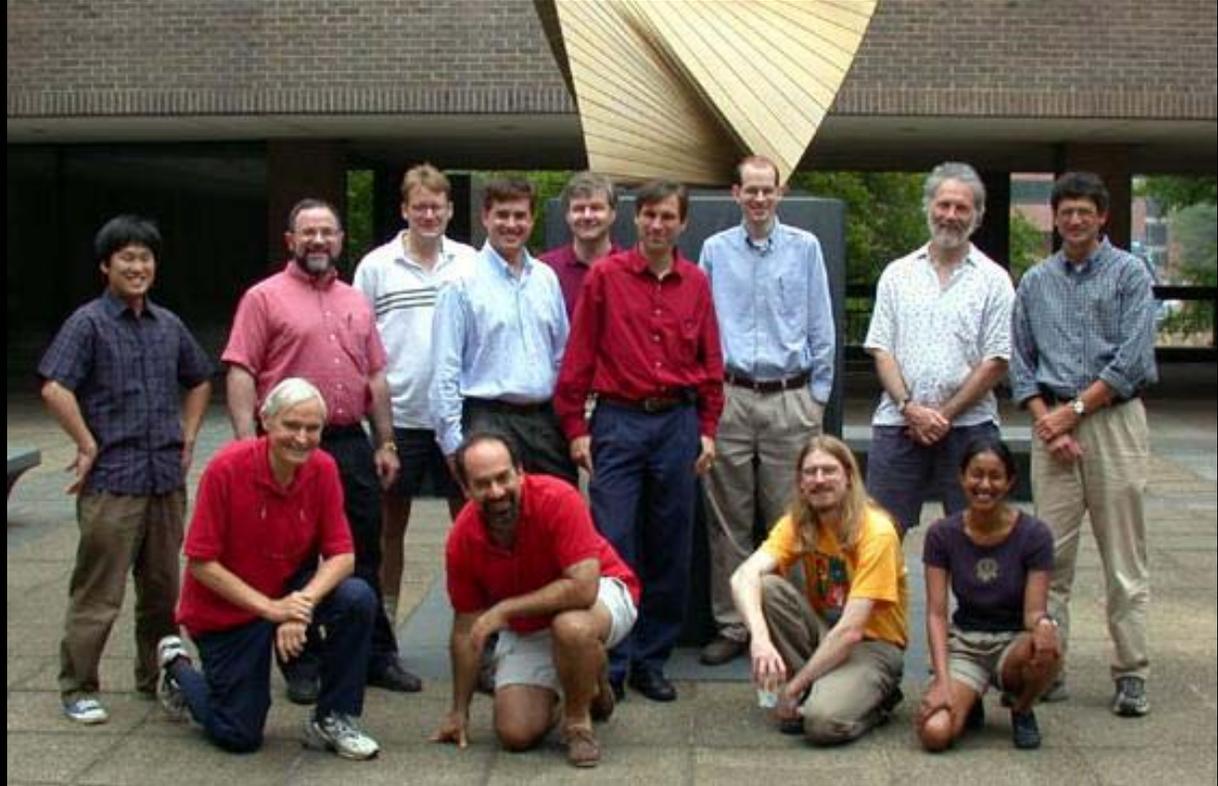
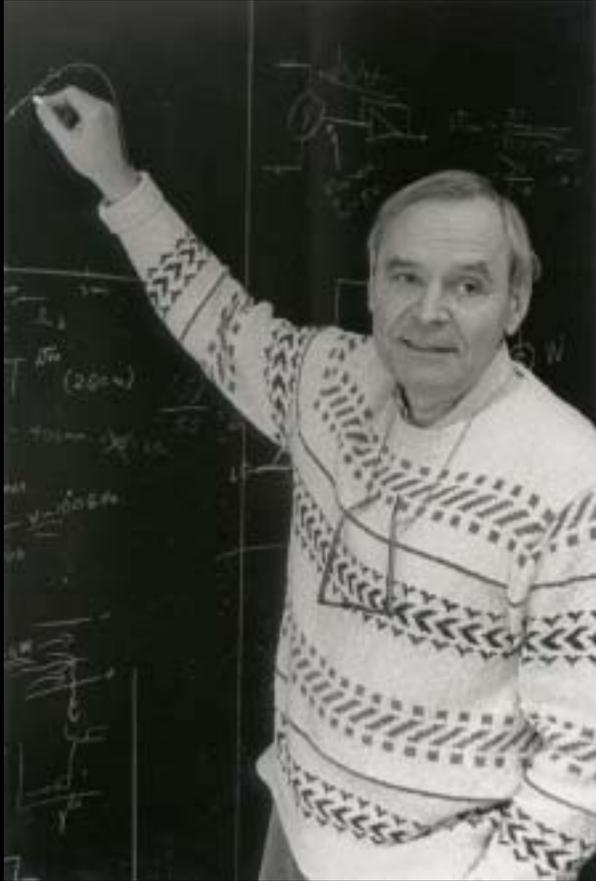


NASA/WMAP
サイエンスチーム提供

WMAP 衛星打ち上げ



David Wilkinson (1935 ~ 2002)



(W)MAP サイエンスチーム
ミーティング時の集合写真
プリンストン大学, 2002年7月
(小松英一郎氏提供)

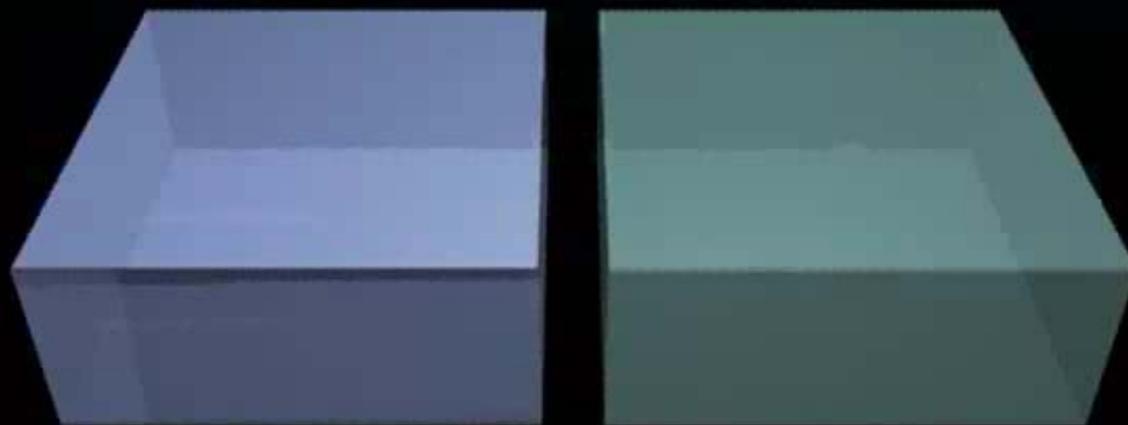
WMAP衛星：地球から宇宙の果てへの旅



NASA/WMAP サイエンスチーム提供

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

温度地図のゆらぎパターン=宇宙の音波振動



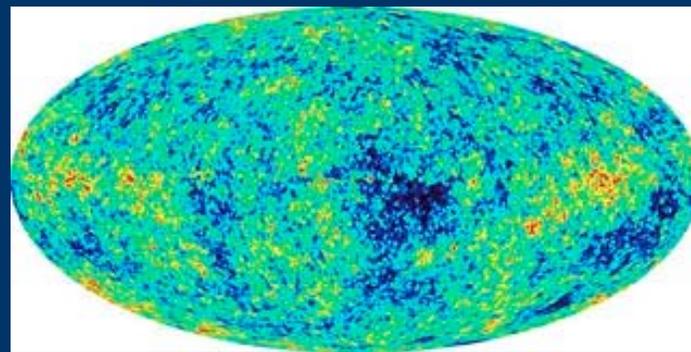
NASA/WMAP
Science Team

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

137億年前の古文書の解読方法

- 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

- 球面調和関数展開

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

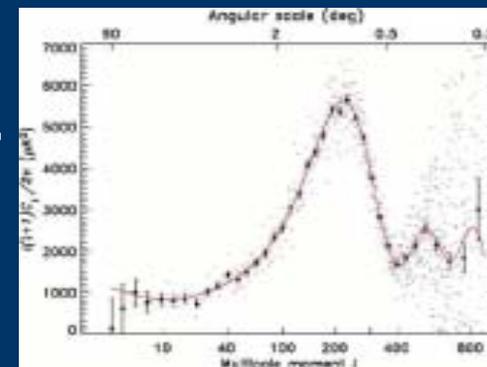
- 解読された古文書内容

- 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

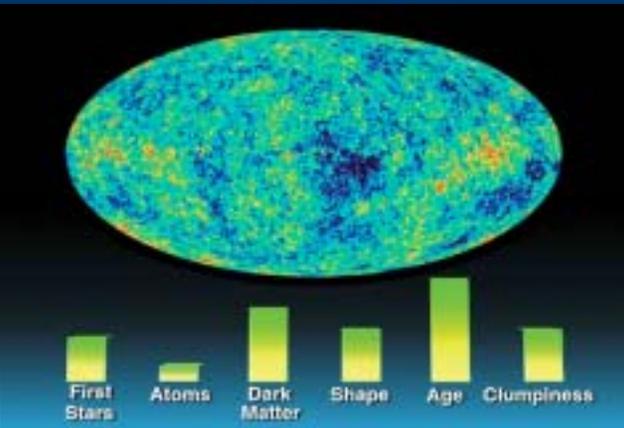


- 隠されている情報

- 宇宙の年齢、宇宙の幾何学的性質、宇宙の組成、、、

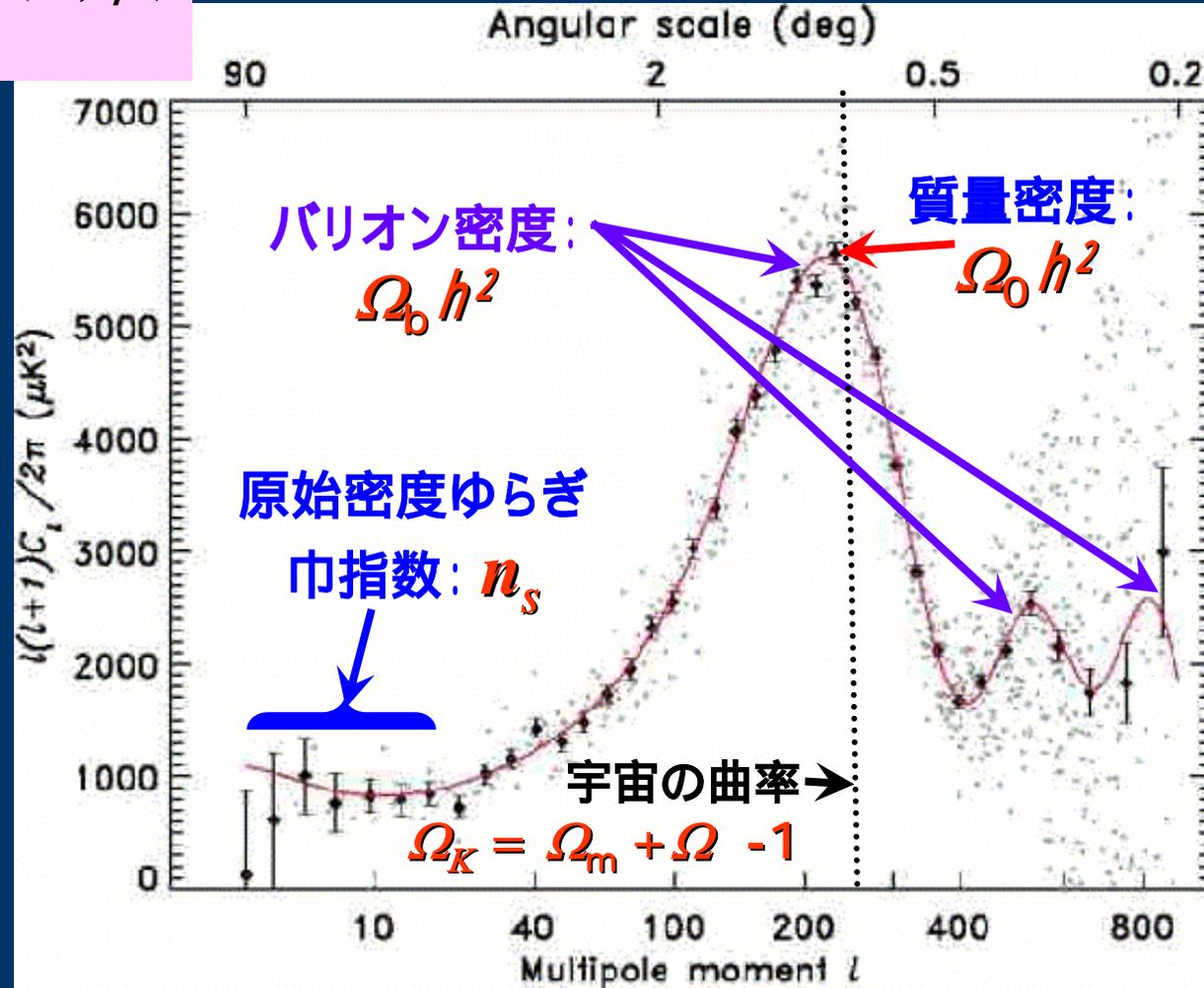
WMAPの観測した温度ゆらぎパワースペクトル

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

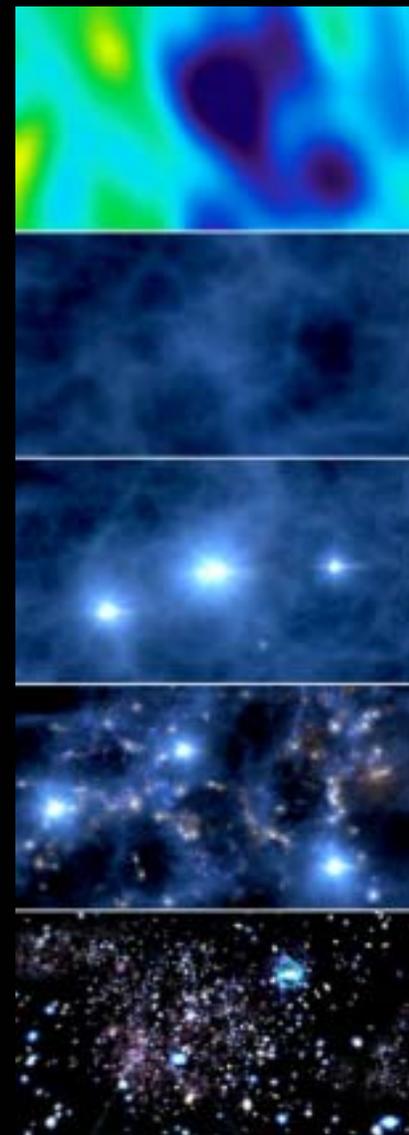
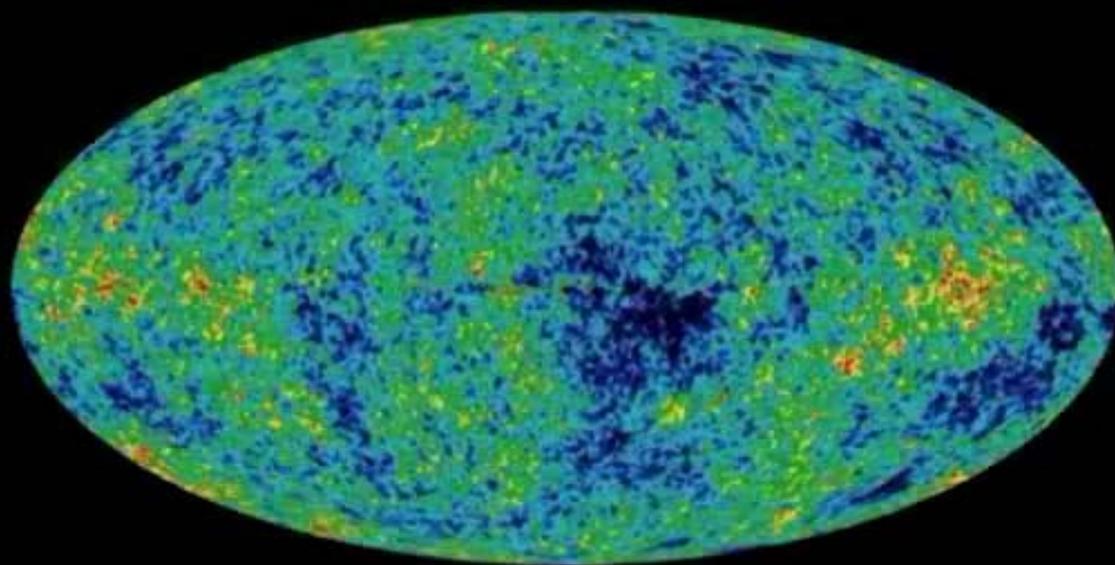


$$C_l = \langle a_{lm} a_{lm}^* \rangle$$

Spergel et al.
ApJS 148(2003)175



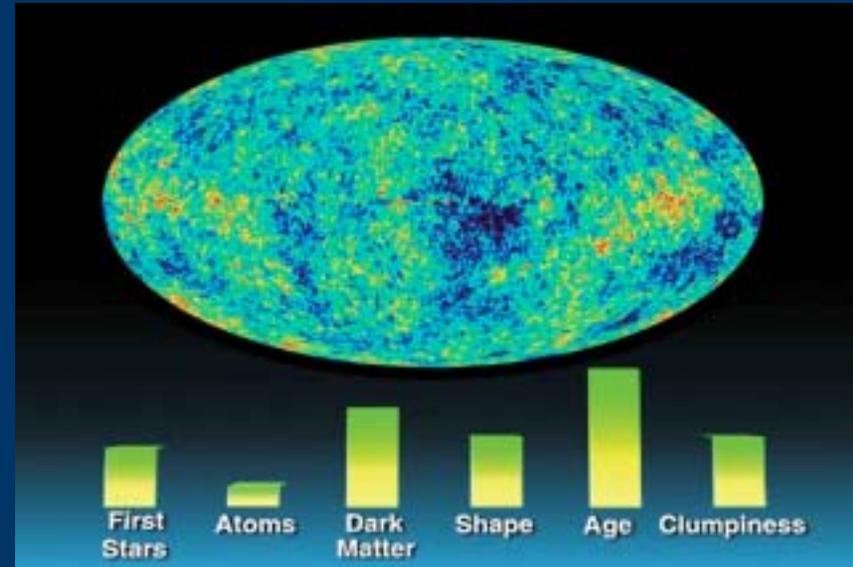
38万歳の宇宙から137億歳の現在へ



NASA/WMAP サイエンスチーム提供

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

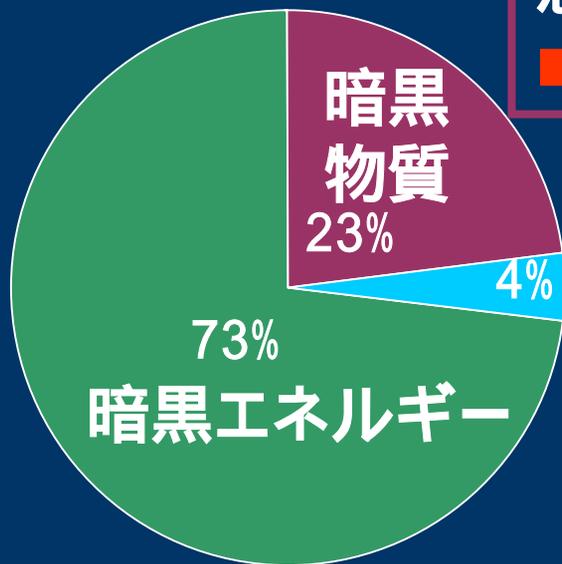
宇宙の古文書が 教えてくれたこと



- 宇宙の年齢は137億年
- 宇宙は曲率が0 (平坦:ユークリッド幾何)
- 「最初の星」が宇宙が生まれて2億年後に誕生
- 宇宙の「物質」のほとんどは「暗黒物質」
- 実はさらに、「暗黒エネルギー」が宇宙を支配

解読結果：我々の宇宙は何からできている？

宇宙の組成



- 銀河・銀河団は星の総和から予想される値の10倍以上の質量をもつ
- 未知の素粒子が正体？

通常物質 (バリオン)

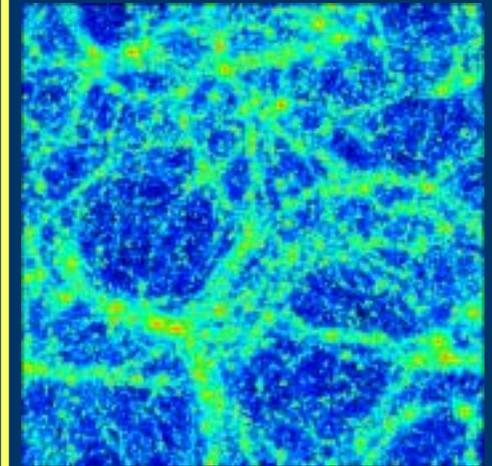
- 元素をつくっているもの (主に、陽子と中性子)
- 現時点で知られている物質 (の質量) は実質的にはすべてバリオン

- 宇宙空間を一様に満たしているエネルギーが宇宙の主成分！
- 万有斥力 (負の圧力)
- アインシュタインの宇宙定数？

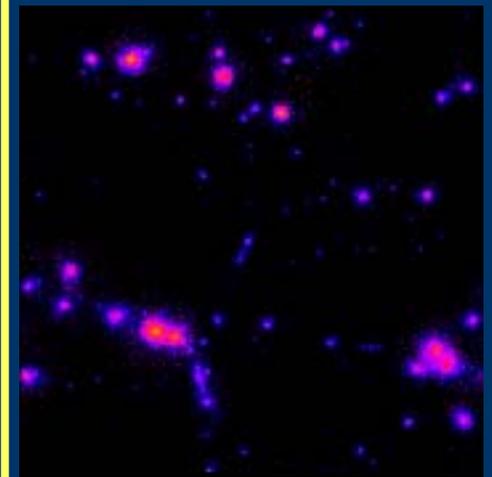
宇宙の暗黒物質

- 独立な数多くの宇宙観測データがその存在を支持
 - WMAP衛星、銀河の質量密度プロファイル、銀河団からのX線放射強度、銀河の3次元分布、など
- 宇宙の重力(質量)の大半を支配する
 - 宇宙の構造の起源は暗黒物質の重力
- すでに知られている物質(バリオン)がただ光っていないだけでは説明できない
 - その正体はまだわかっていない
 - 暗黒物質の直接検出実験は21世紀物理学に残された大きな課題
- 暗黒物質は、まだ知られていない新しい物理学を開拓する鍵となる

数値シミュレーションによる暗黒物質分布と明るいバリオンガス分布の比較例



暗黒物質



明るいバリオンガス

宇宙の暗黒エネルギー

- 暗黒物質とは異なり、ある特定の場所に集中して存在しているようなものではない
 - 例えば、本来何もないはずの真空自体が持っているエネルギーのように、宇宙全体を一様にみだしている
- その重力は、実効的に「万有斥力」
 - 1917年にアインシュタインが(全く異なる理由から)導入した宇宙定数に対応
 - 暗黒物質以上にその正体は不明
- 暗黒エネルギーもまた、我々がいまだ理解していない新たな物理学を探る重要な道しるべ

宇宙定数 (暗黒エネルギー) の歴史

- 1916年：一般相対論
- 1917年：アインシュタインの静的宇宙モデル
- 1980年代以降：真空のエネルギー密度

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}Rg_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = 8\pi G T_{\mu\nu}$$

宇宙定数 (時空の幾何学量)
移項
物質場 (真空のエネルギー密度?)

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}Rg_{\mu\nu} = 8\pi G \left(T_{\mu\nu} - \frac{\Lambda}{8\pi G} g_{\mu\nu} \right)$$

- 宇宙定数の自然な大きさ：プランク密度

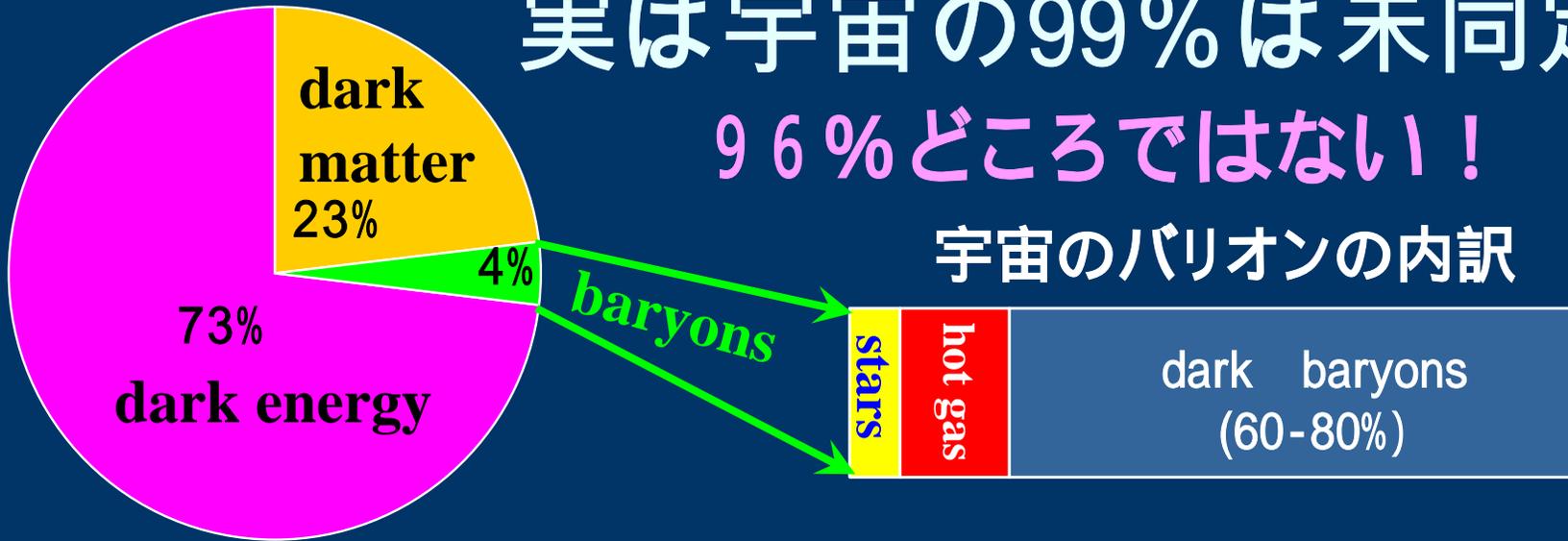
$$\Lambda = \frac{c^5}{\hbar G} \approx 5.2 \times 10^{93} \text{ g/cm}^3 \quad \Leftrightarrow \quad \Omega_{\Lambda} \equiv \frac{\Lambda}{3H_0^2} \approx 10^{121}$$

- 観測的制限： $\Omega_{\Lambda} \approx 0.7$ 物理学史上最大の理論と観測の不一致！

実は宇宙の99%は未同定

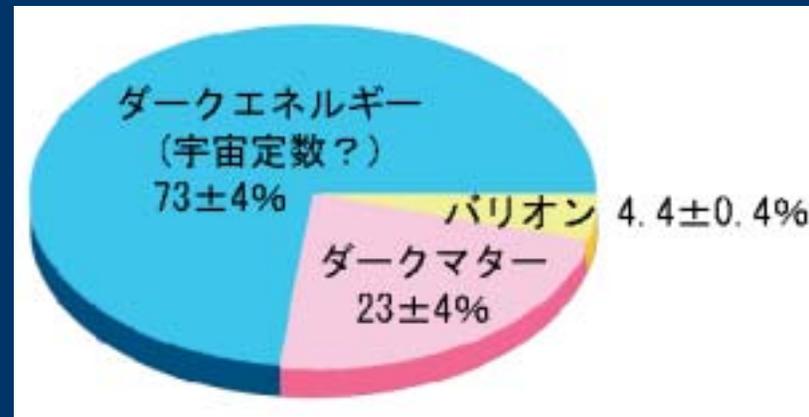
96%どころではない！

宇宙のバリオンの内訳



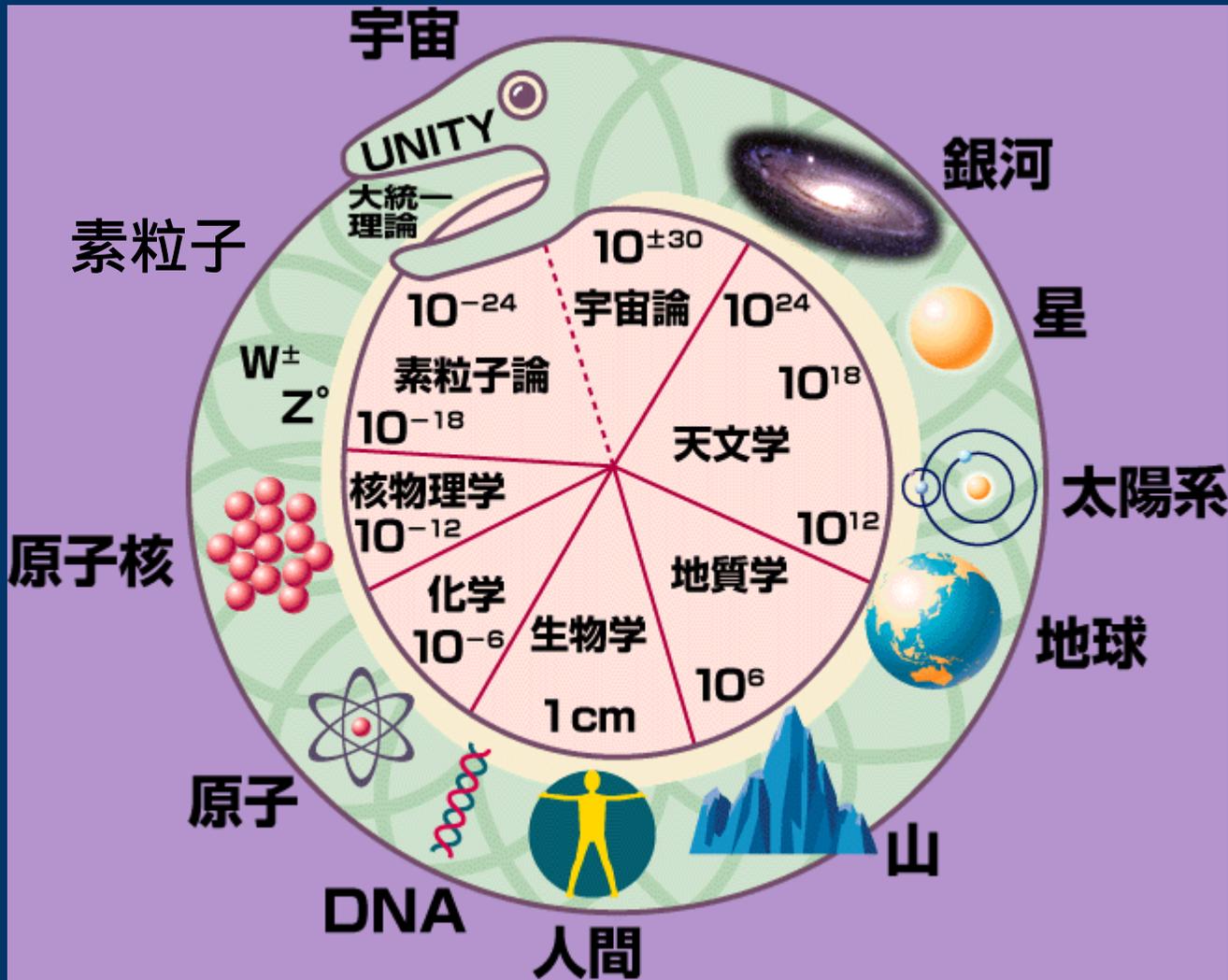
| Component | Central | Maximum | Minimum | Grade ^a |
|--|------------------------|------------------------|------------------------|--------------------|
| Cosmic Baryon Budget: Fukugita, Hogan & Peebles: ApJ 503 (1998) 518 | | | | |
| 1. Stars in spheroids | 0.0026 h_{70}^{-1} | 0.0043 h_{70}^{-1} | 0.0014 h_{70}^{-1} | A |
| 2. Stars in disks | 0.00086 h_{70}^{-1} | 0.00129 h_{70}^{-1} | 0.00051 h_{70}^{-1} | A- |
| 3. Stars in irregulars | 0.000069 h_{70}^{-1} | 0.000116 h_{70}^{-1} | 0.000033 h_{70}^{-1} | B |
| 4. Neutral atomic gas | 0.00033 h_{70}^{-1} | 0.00041 h_{70}^{-1} | 0.00025 h_{70}^{-1} | A |
| 5. Molecular gas | 0.00030 h_{70}^{-1} | 0.00037 h_{70}^{-1} | 0.00023 h_{70}^{-1} | A- |
| 6. Plasma in clusters | 0.0026 $h_{70}^{-1.5}$ | 0.0044 $h_{70}^{-1.5}$ | 0.0014 $h_{70}^{-1.5}$ | A |
| 7a. Warm plasma in groups | 0.0056 $h_{70}^{-1.5}$ | 0.0115 $h_{70}^{-1.5}$ | 0.0029 $h_{70}^{-1.5}$ | B |
| 7b. Cool plasma | 0.002 h_{70}^{-1} | 0.003 h_{70}^{-1} | 0.0007 h_{70}^{-1} | C |
| 7'. Plasma in groups | 0.014 h_{70}^{-1} | 0.030 h_{70}^{-1} | 0.0072 h_{70}^{-1} | B |
| 8. Sum (at $h = 70$ and $z \simeq 0$)..... | 0.021 | 0.041 | 0.007 | ... |

まとめ： 研究の進展 によって、ますます謎 が深まってしまった



- 20世紀物理学の飛躍的進展は、「通常物質」の構成要素については極めて深い理解をもたらした
- 一方、21世紀最後の数年間の宇宙観測によって、この「通常物質」は、宇宙全体のわずか4%でしかないことが判明
 - **宇宙の果てを見ることで微視的世界の新しい階層が明らかとなった**
 - 宇宙全体の約23%は暗黒物質、約73%は暗黒エネルギー
- **我々は宇宙の96%の部分を全く理解していなかった**
- 暗黒物質の直接検出、暗黒エネルギーの正体の理解は、21世紀科学の単なる一課題にとどまらず、新しい自然法則を探り当てる上での本質的な鍵

自然界の階層：マイクロとマクロをつなぐ



- 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 10^{-24} cm以下
- この約50桁も離れた巨視的世界と微視的世界とが宇宙の研究を通じてより深く理解されつつある

シエルドン グラシヨウ 著 ‘Interaction’ のなかの図をもとに作成