

観測的宇宙論

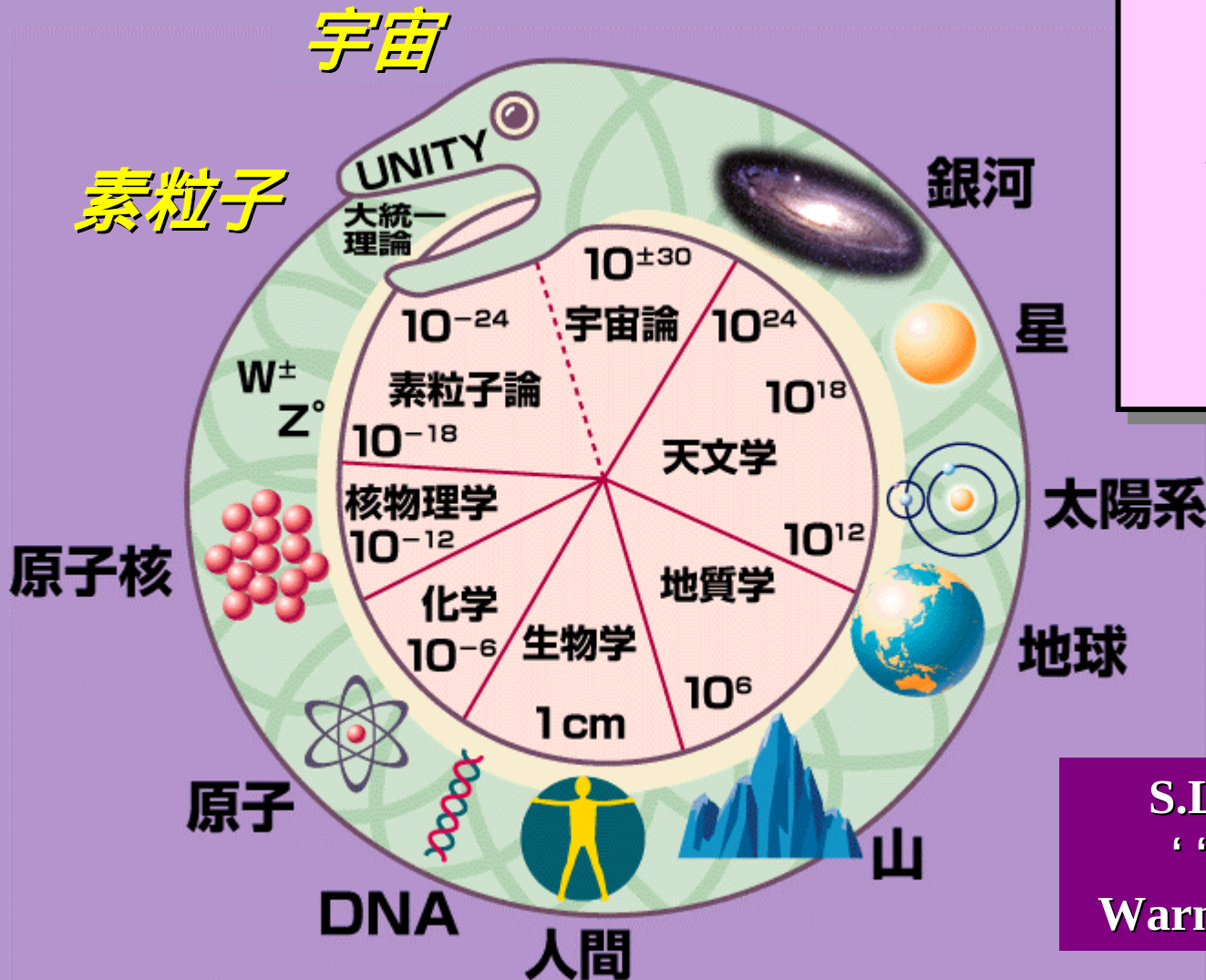
2. ビッグバン宇宙の進化 と宇宙の階層構造



2001年5月17日～19日
立教大学大学院 集中講義
須藤 靖

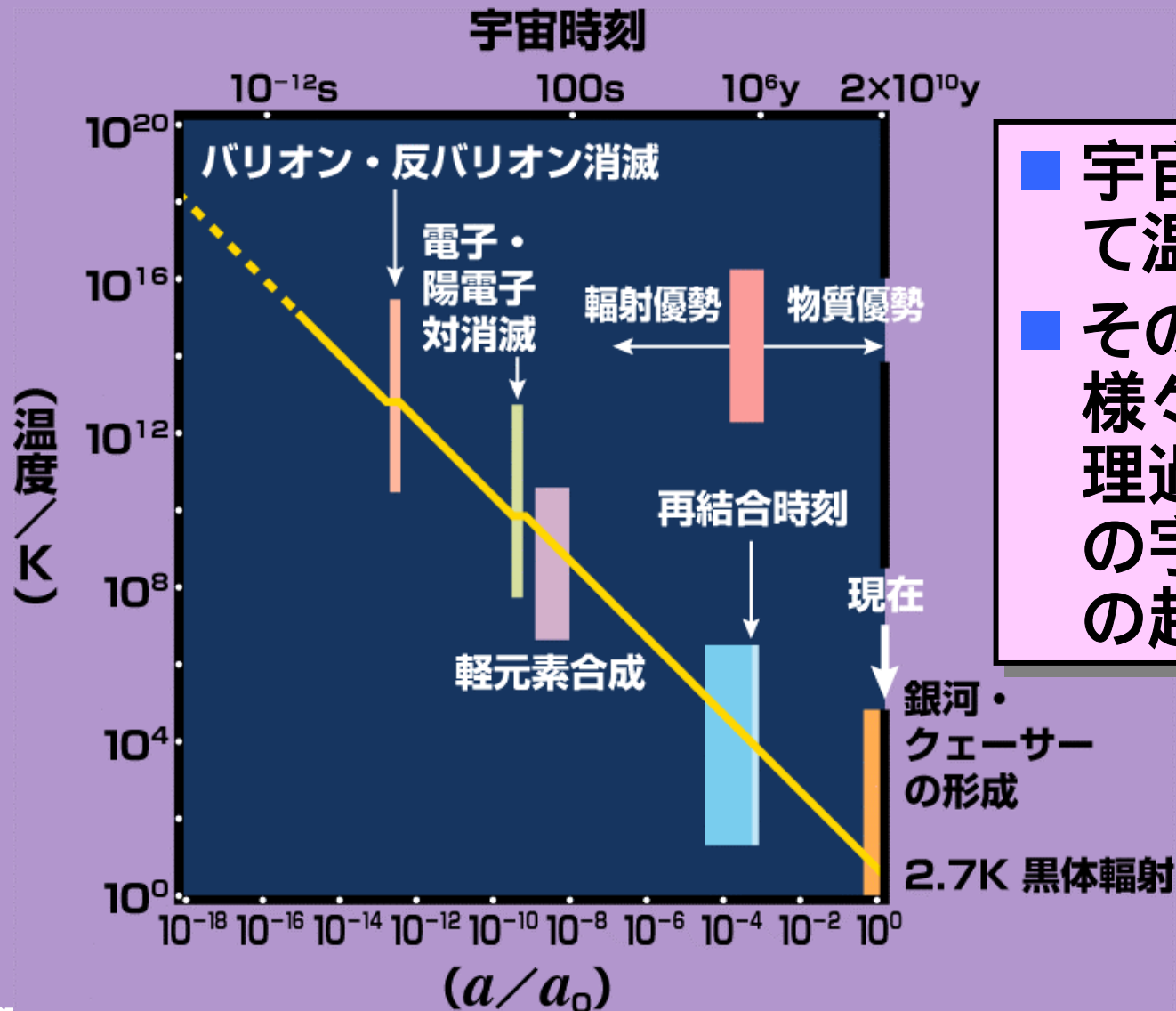
自然界の階層

- 長さにして約60桁も異なる巨視的世界(宇宙論)と微視的世界(素粒子論)とは宇宙の進化を通じて結びついている



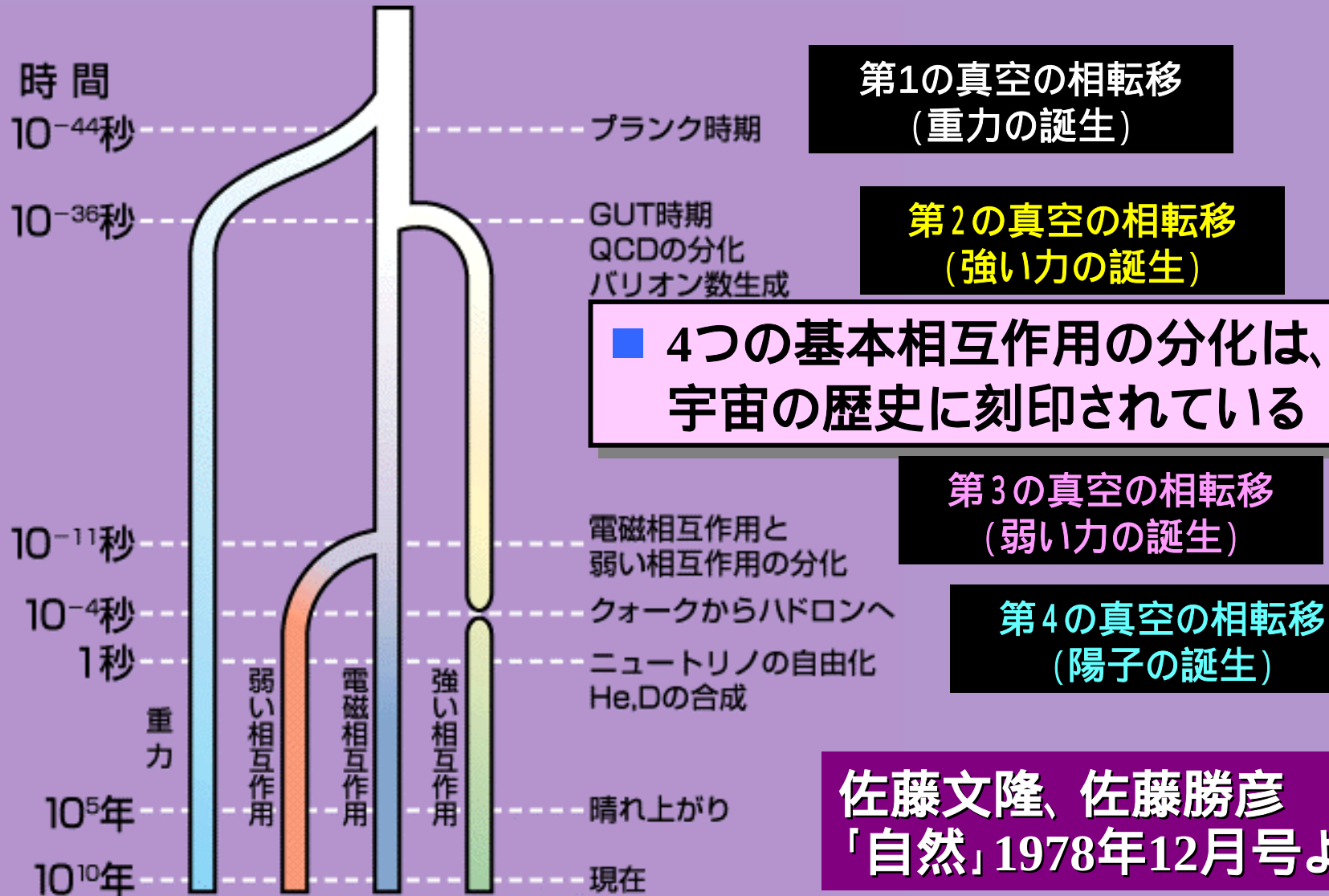
S.L.Glashow 著:
“Interaction”
Warner Books 社より

宇宙の熱史



- 宇宙膨張に伴って温度が下がる
- その結果起こる様々な非平衡物理過程が、現在の宇宙の多様性の起源

自然界の4つの相互作用と相転移

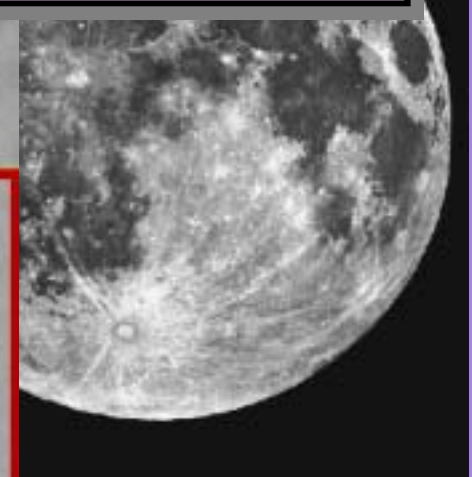


佐藤文隆、佐藤勝彦
「自然」1978年12月号より

深宇宙: Hubble Deep Field

■ 遠方宇宙

過去の宇宙
宇宙の起源



Hubble Deep Field
ST ScI ORG January 15, 1996 N. Williams and the HDF Team (ST ScI and NASA)

HST WFPC2

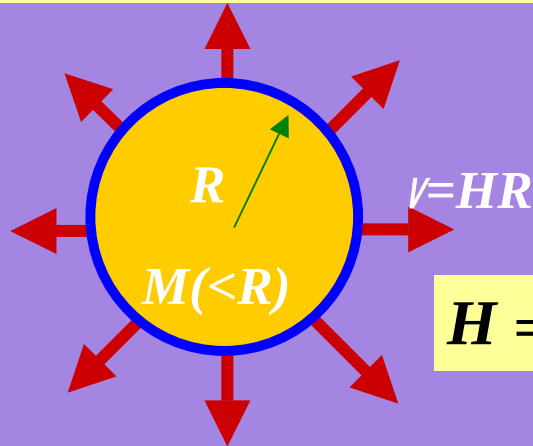
<http://opposite.stsci.edu/pubinfo/PR/96/01.html>

ニュートン力学的宇宙モデル

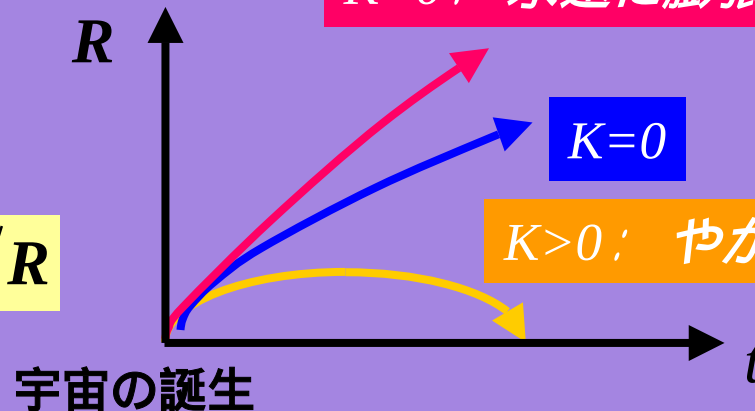
■ 一様密度球の‘半径’の時間変化

$$\frac{\dot{R}^2}{2} - \frac{GM}{R} \equiv -\frac{K}{2}, \quad M = \frac{4\pi}{3} \rho R^3$$
$$\Rightarrow \dot{R}^2 + K = \frac{8\pi G}{3} \rho R^2$$

G : ニュートンの重力定数
 M : 半径 R 内の球の質量
 K : 系の全エネルギー(定数)
 ρ : 半径 R 内の球の平均質量密度



$$H = \dot{R}/R$$



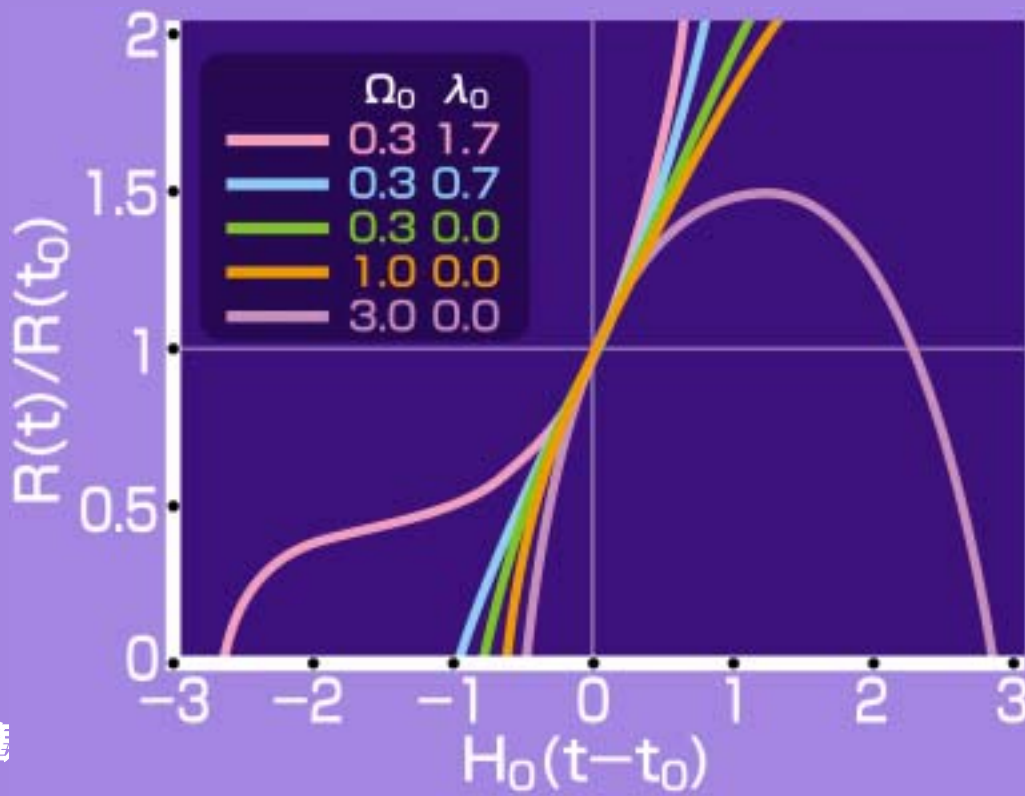
$K < 0$: 永遠に膨張を続ける

$K = 0$

$K > 0$: やがて収縮に転じる

宇宙論パラメータ

- ハッブル定数に加えて、暗黒物質と宇宙定数の値が宇宙膨張を支配する
- 宇宙の構造とその進化の観測を通じてこれらの値が決定できる (**観測的宇宙論**)



暗黒物質と宇宙定数の量
を表す無次元パラメータ

密度パラメータ

$$\Omega_0 \equiv \frac{\rho_0}{\rho_c}$$

宇宙定数

$$\lambda_0 \equiv \frac{\rho_\Lambda}{\rho_c}$$

臨界密度 :

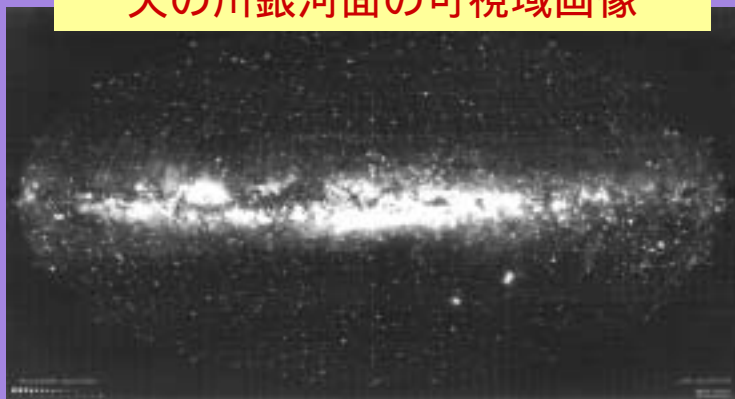
$$\rho_c \equiv \frac{3H_0^2}{8\pi G} \approx 2 \times 10^{-29} h^2 \text{g/cm}^3$$

$$\Omega_0 \approx 0.3, \lambda_0 \approx 0.7(?)$$

我々の銀河系

- 我々の銀河系(天の川)は、星とガス(および暗黒物質)からなる渦巻き銀河で、その円盤部の直径はおよそ30kpc

天の川銀河面の可視域画像



COBE衛星による近赤外線域画像



様々な波長帯で観測した天の川銀河



<http://adc.gsfc.nasa.gov/mw/>

宇宙の階層構造：銀河・局所銀河群

<http://adc.gsfc.nasa.gov/mw/>



30 kpc

50 kpc

小マゼラン星雲

大マゼラン星雲

りをもつ局所銀河群を形成している

宇宙の階層構造：銀河団

- 100個から1000個程度の銀河が、数Mpcの領域の中に重力的に集団化したものが銀河団
- 宇宙の初期条件を反映しており、宇宙論研究の観測的検証のために重要な階層

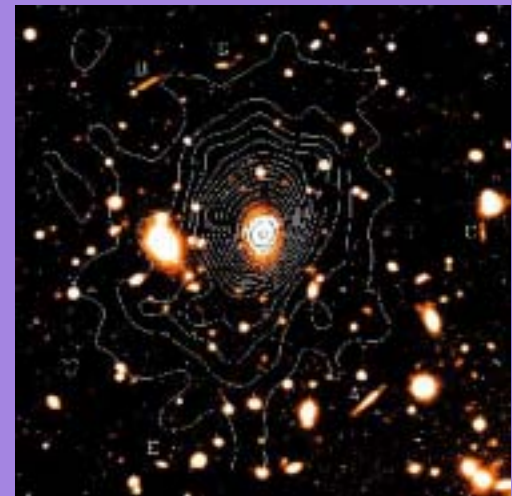
おとめ座銀河団
($z=0.0039$)



髪の毛座銀河団
($z=0.0232$)



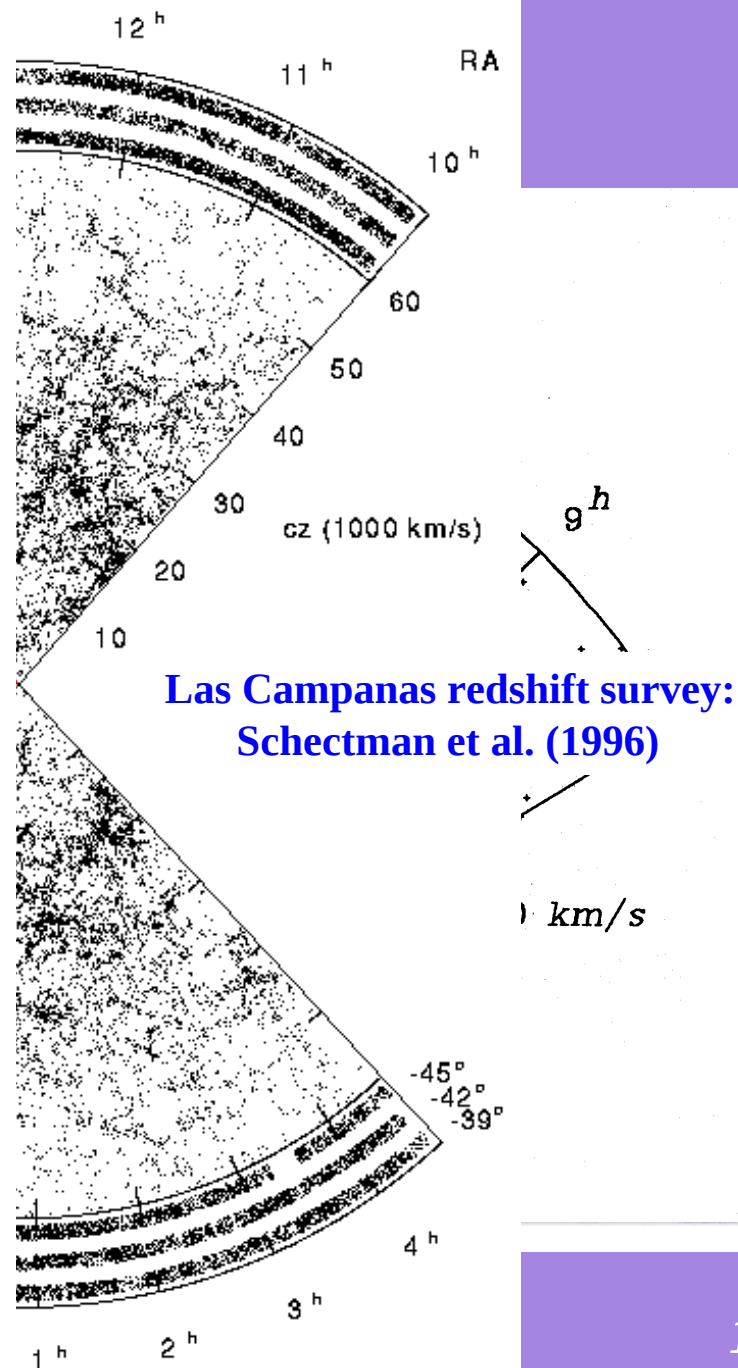
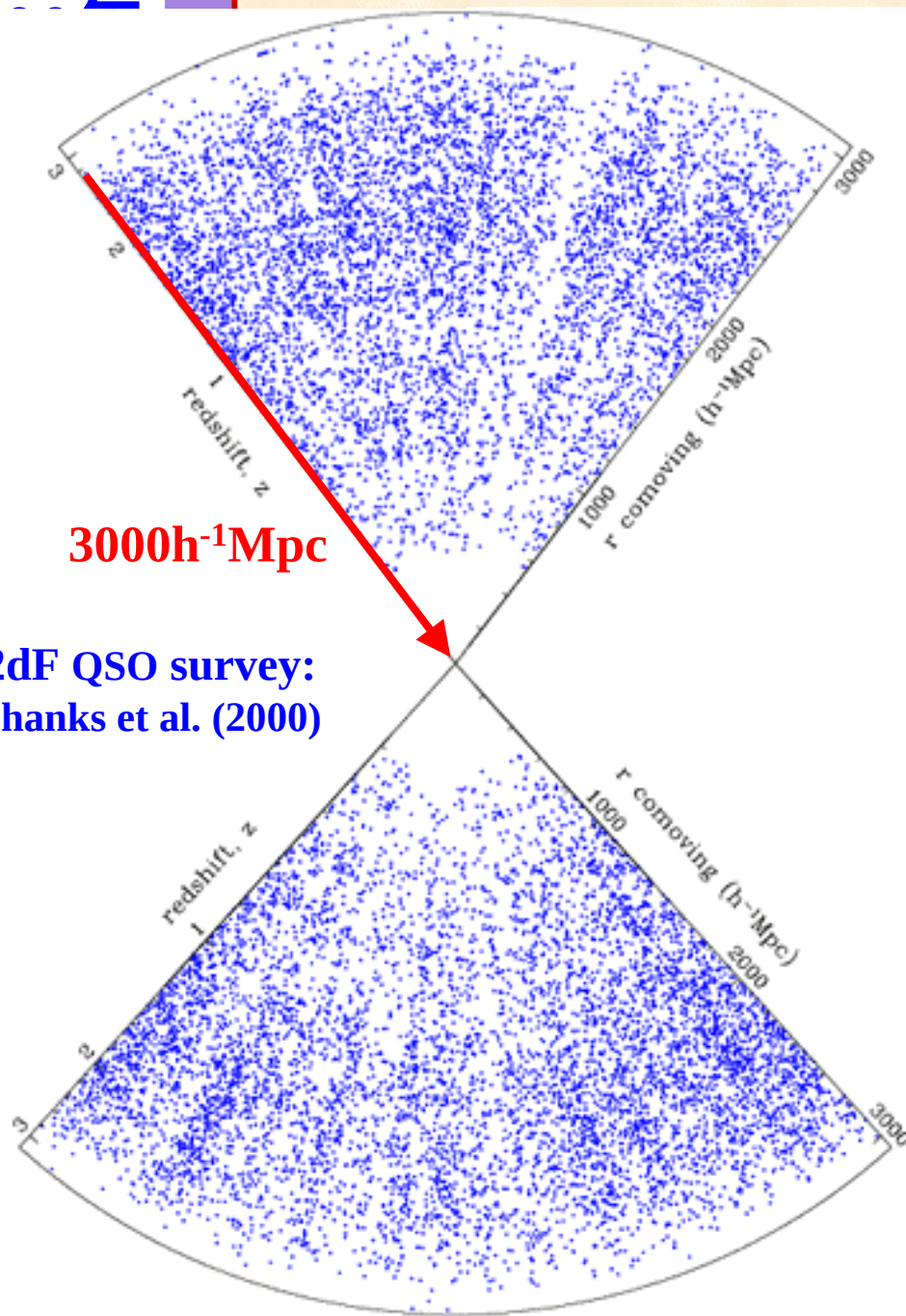
RXJ 1347-1145
($z=0.45$)



17^h

2dF QSO survey:
Shanks et al. (2000)

3000h⁻¹Mpc



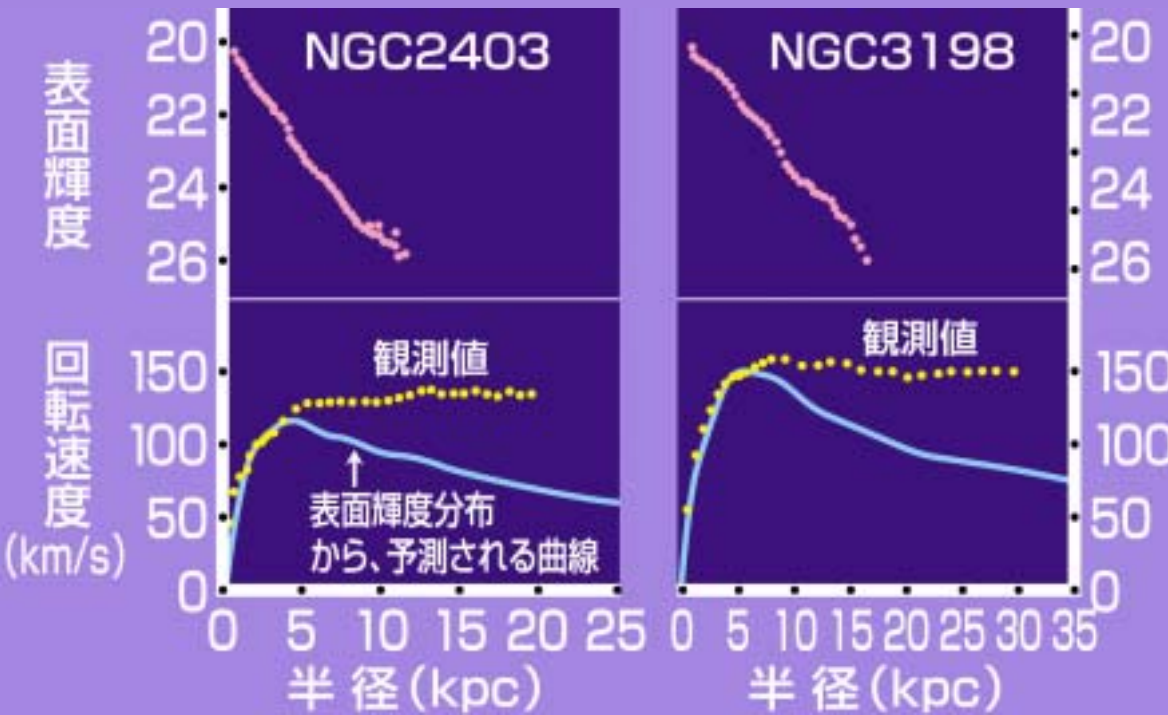
Las Campanas redshift survey:
Schechter et al. (1996)

1000 km/s

銀河に付随した暗黒物質

- 銀河の平坦な回転曲線は暗黒物質の存在を強く示唆

van Albada & Sancisi (1986)



銀河の中心から r の距離を円運動する質量 m の星の運動方程式

$$m \frac{v^2(r)}{r} = \frac{GmM(<r)}{r^2}$$

$$\Rightarrow v(r) = \sqrt{\frac{GM(<r)}{r}}$$

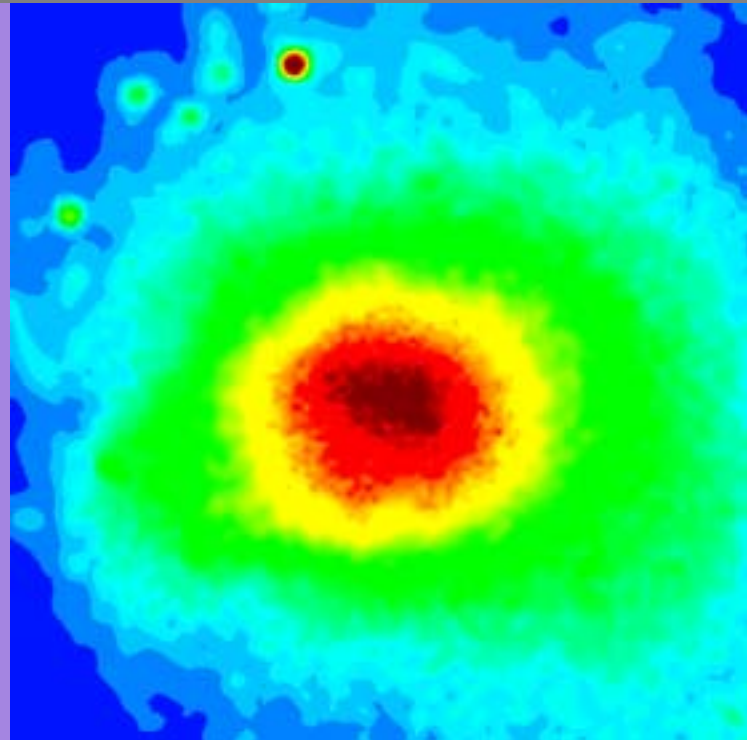
$$v(r) = \text{const.} \rightarrow M(<r) \propto r$$

渦巻き銀河では、円盤半径の2倍以上の領域まで(見えない)質量が広がって分布している

**暗黒物質ハロー
(ダークハロー)**

銀河団に付随した暗黒物質

- 銀河団は、銀河、高温ガス、暗黒物質の3成分からなる
- 可視光、X線、電波、サブミリ波など、多波長観測が可能
- 銀河団の暗黒物質は、星と高温ガスの総質量の約10倍程度



$1h^{-1}\text{Mpc}$

NASA/GSFC S.L.Snowden氏提供

暗黒物質の候補

■ 天文学的暗黒物質

- 重力レンズの観測により銀河系ハローの暗黒物質の一部は小質量天体であることがわかっている
- 宇宙の暗黒物質のすべてを説明することはできない(ビッグバン元素合成からの制限)

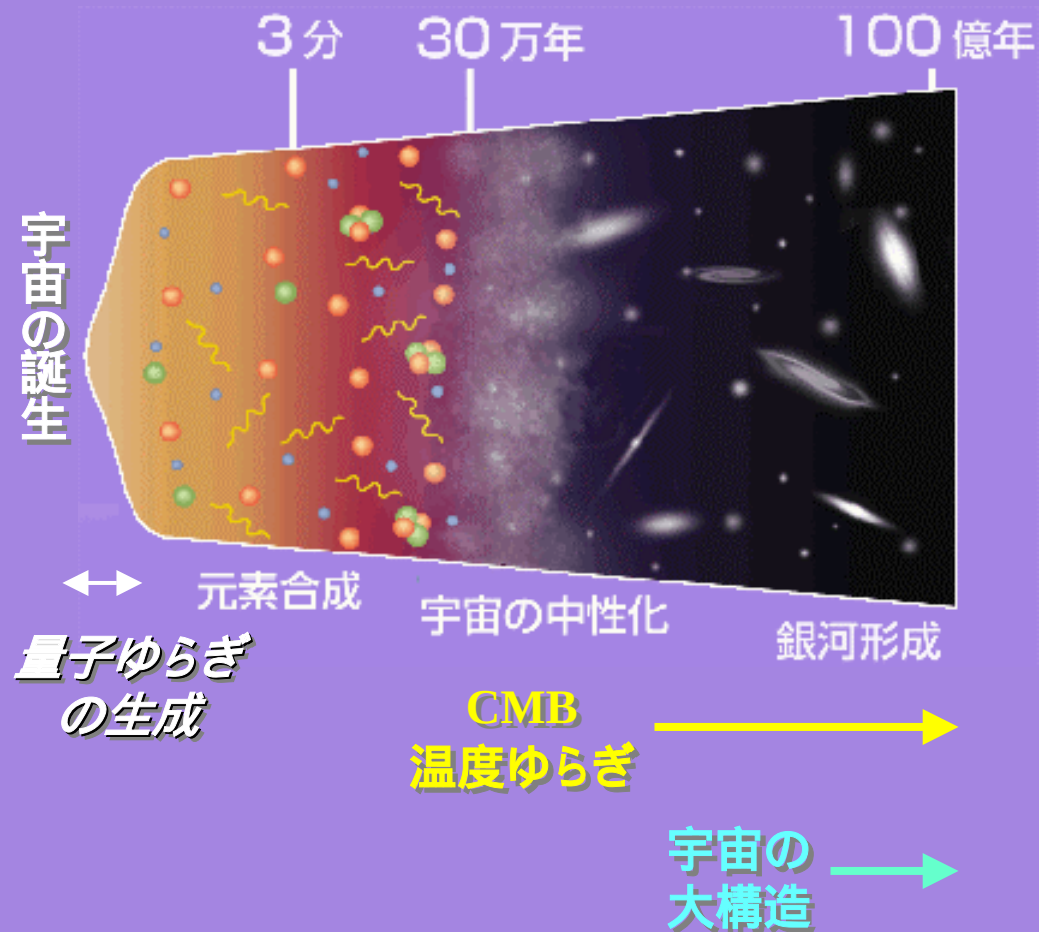
■ 素粒子論的暗黒物質

- ニュートリノ以外の暗黒物質粒子(冷たい暗黒物質: **Cold Dark Matter**)が必要
- 理論モデルは数多く提案されているが直接的な実験・観測からの裏づけはない

構造形成：重力不安定理論

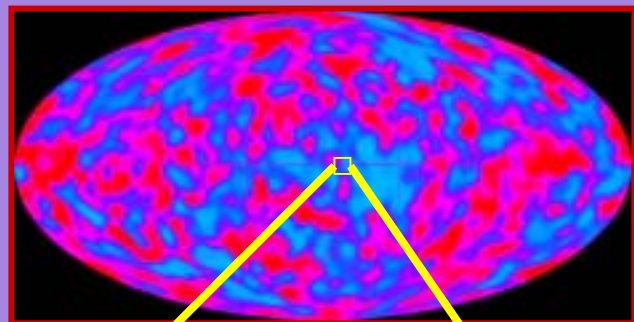
- 宇宙の階層構造形成には、暗黒物質が不可欠
- 宇宙初期の微小な密度の空間的非一様性(密度ゆらぎ)が宇宙膨張に伴って重力的に成長
- 暗黒物質の形成した重力ポテンシャルの中にガスが落ち込み、さらにエネルギーを失いながら、第一世代の天体が誕生
- それらが合体を繰り返して階層構造を形成
- 理論的に予想される密度ゆらぎスペクトルは、CMBの温度ゆらぎの観測データと良い一致

宇宙の初期条件：密度ゆらぎの起源

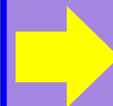
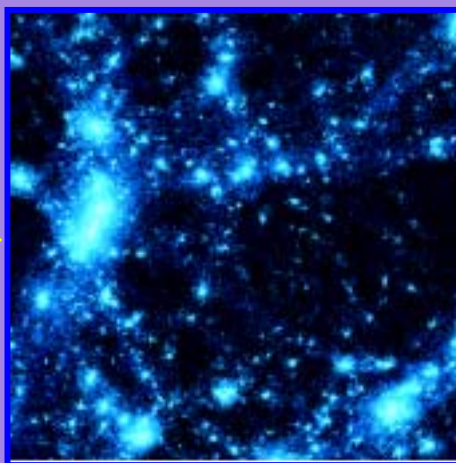
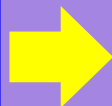
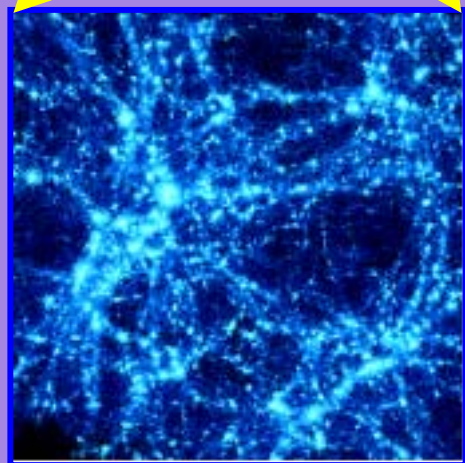


- 誕生直後 (10^{-40} 秒程度) の宇宙での量子的なゆらぎが、密度の空間的非一様性を生み出した
- インフレーション理論と呼ばれる初期宇宙のモデルを用いて、この密度ゆらぎの性質が预言できる
- この理論预言は、CMBの温度ゆらぎの観測を通じて検証可能で、実際良い一致を示している

宇宙の構造形成シナリオ

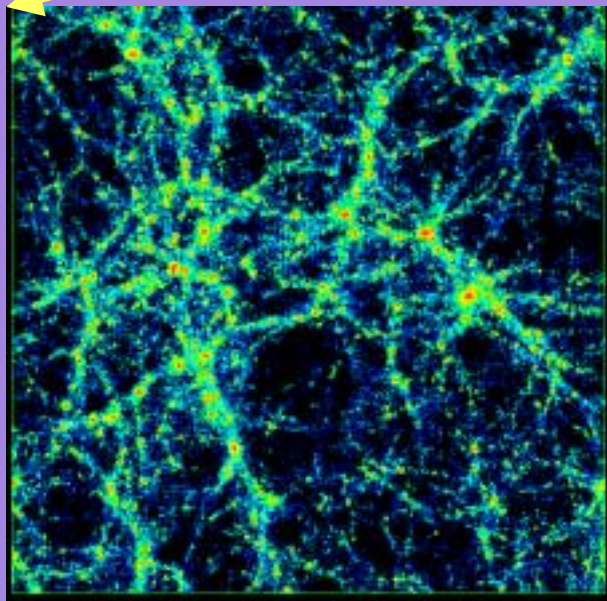


- 小さなスケールの構造ほど初期に形成される
- いったんできた構造が重力的に合体あるいは集団化することで、より大きなスケールの構造へと進化する



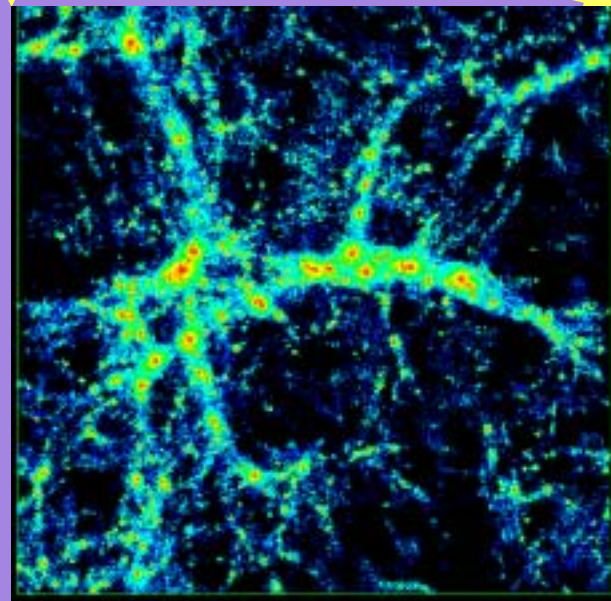
暗黒物質と大構造の進化

- 宇宙の大構造のパターンは、暗黒物質の性質と存在量によって大きく変わる



$75h^{-1} \text{ Mpc}$

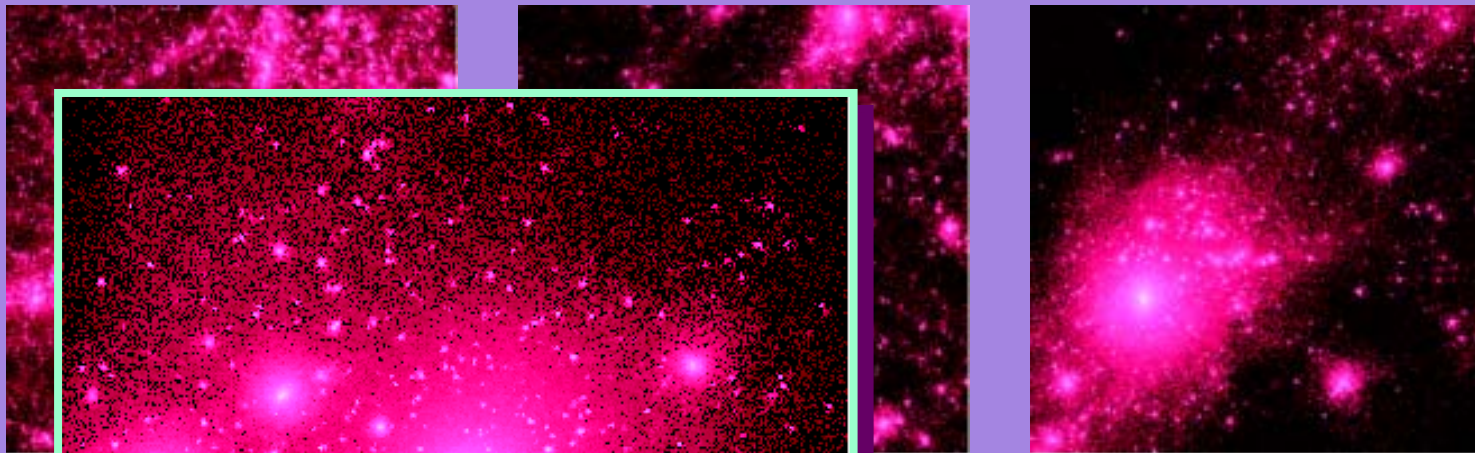
$z=0$



$75h^{-1} \text{ Mpc}$

数値シミュレーション:銀河

■ 冷たい暗黒物質モデルにおける、銀河の形成



現在
($z=0$)

$z=1$

$$\Omega_0 = 0.3, \lambda_0 = 0.7, h = 0.7$$

$$M = 5 \times 10^{12} h^{-1} M_{\text{太陽}}$$

(Jing & Suto 2000)

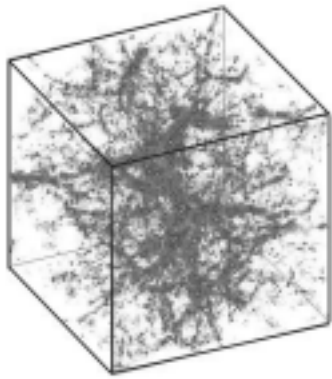
数値シミュレーション: X線銀河団の進化

- 冷たい暗黒物質モデルにおける、宇宙論的高温ガスの進化とX線銀河団の形成数値シミュレーション

(Yoshikawa, Jing & Suto 2000)

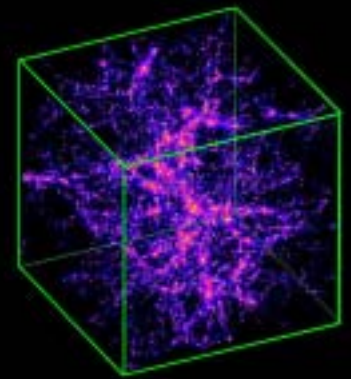
計算機: 国立天文台、東京大学初期宇宙研究センター
画像データ作成: 吉川耕司、本田元就、森 英之

1. 計算領域: 一辺 $75 h^{-1}\text{Mpc}$ の立方体
2. 暗黒物質: 200万個の質点 (重力)
3. ガス: 200万個の流体粒子 (重力、圧力、冷却)
4. パラメータ: $\Omega_0=0.3$, $\lambda_0=0.7$, $h=0.7$, $\sigma_8=1.0$
5. 時間発展: $z=9$ ($t=5$ 億年) から $z=0$ ($t=130$ 億年) まで



暗黒物質の分布

ビッグバン宇宙の進化 と宇宙の階層構造 まとめ



高温ガスの分布

- 星・銀河・銀河団・超銀河団・宇宙の大構造
- 銀河や銀河団には光る物質の約10倍程度の暗黒物質が付随している
- 宇宙の質量の大半は、暗黒物質によって占められているが、その具体的な正体はわかっていない
- 現在の階層構造は、宇宙初期の空間的な密度の非一様性が重力成長することで形成され、暗黒物質の性質や質量密度など宇宙そのものに関する多くの情報をもつ