

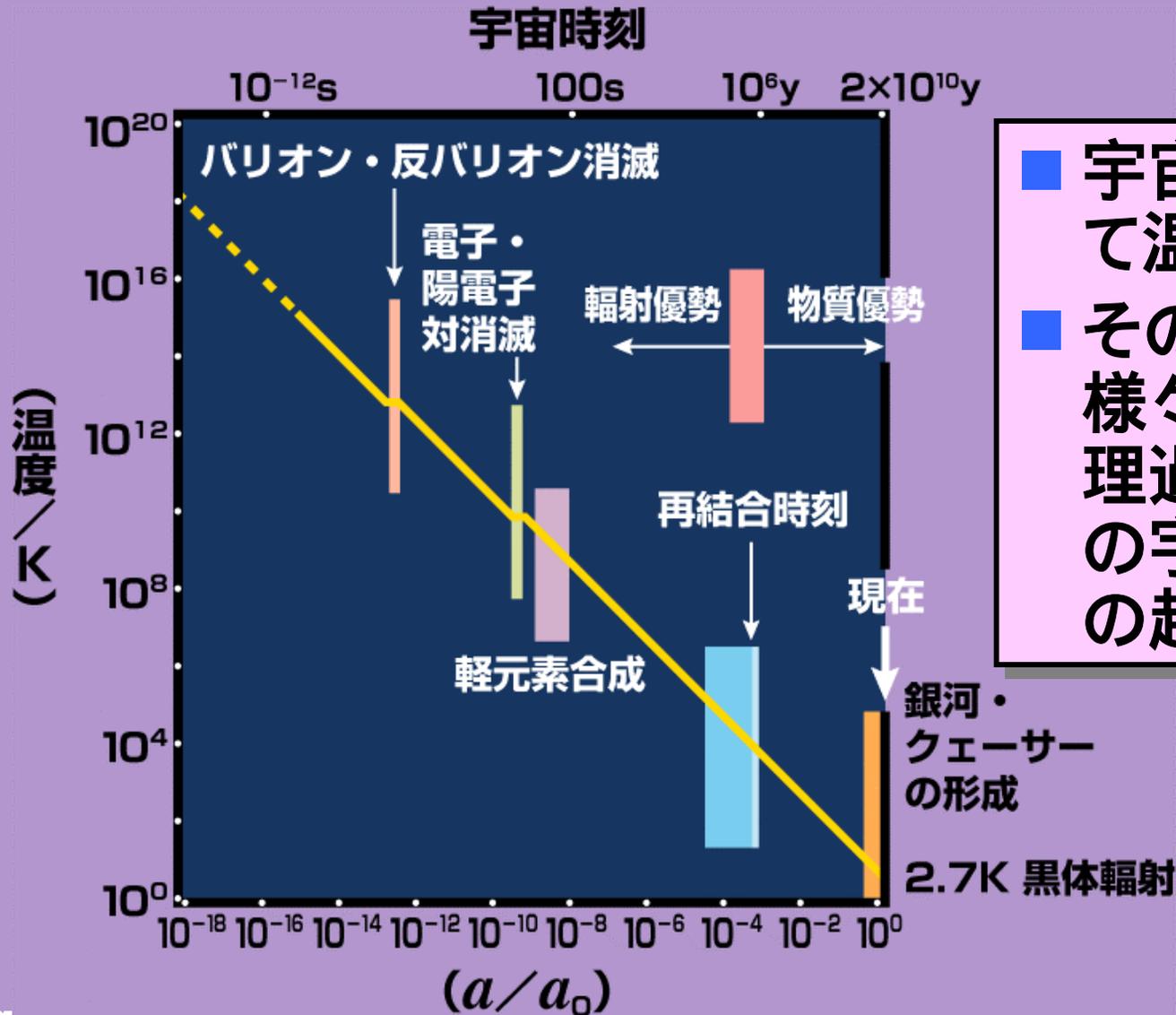
# 観測的宇宙論

## 3. 暗黒物質と宇宙の進化



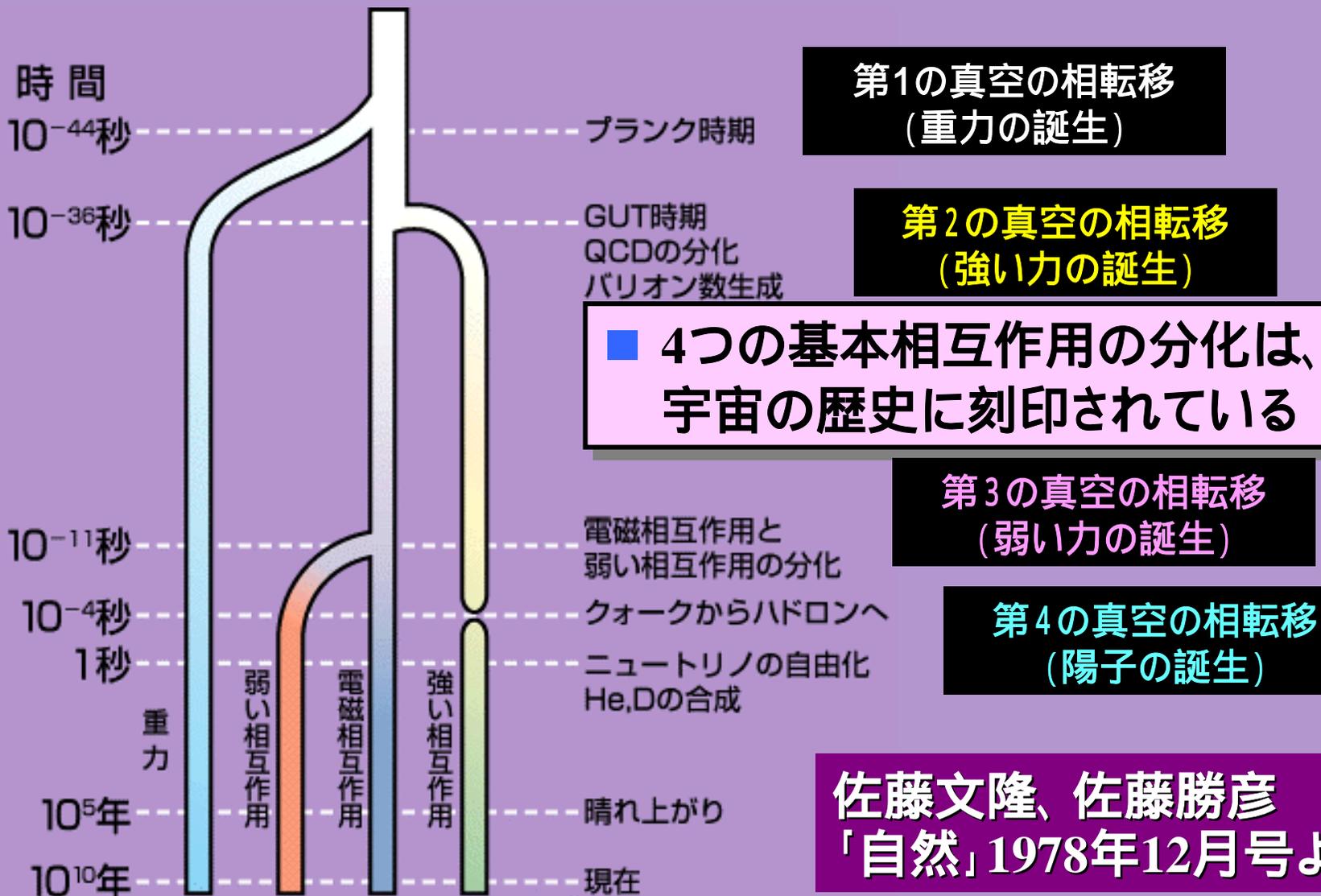
2001年6月28日～29日  
甲南大学大学院 特殊講義  
須藤 靖

# 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



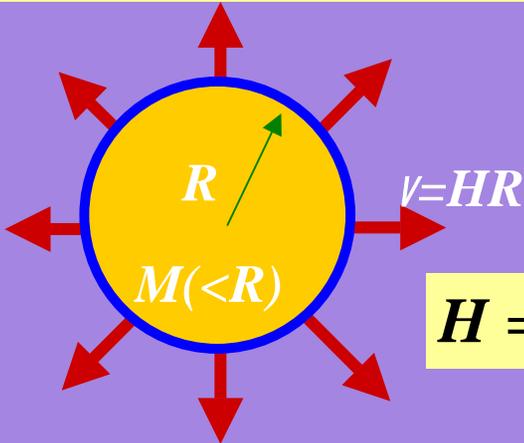
佐藤文隆、佐藤勝彦  
「自然」1978年12月号より

# ニュートン力学的宇宙モデル

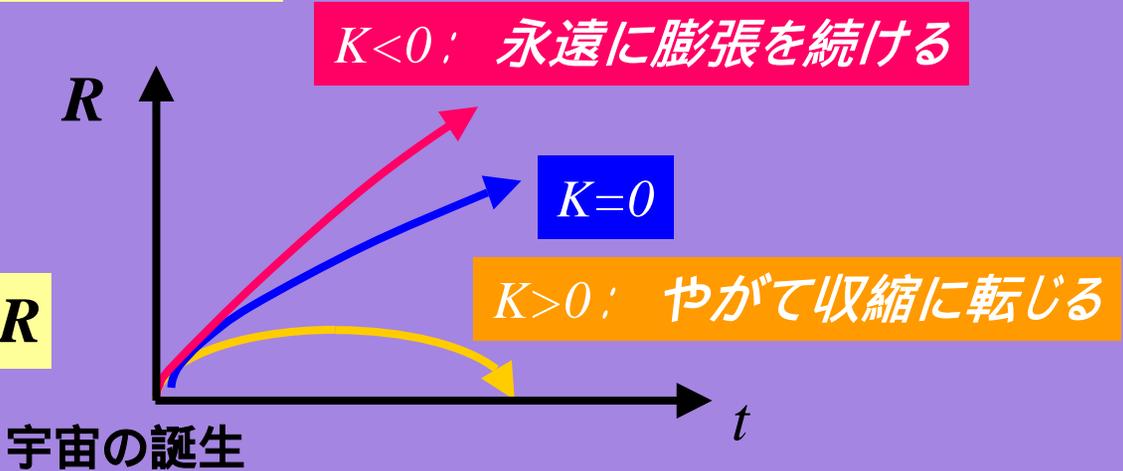
## ■ 一様密度球の「半径」の時間変化

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

$G$ : 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)  
; 半径 $R$ 内の球の平均質量密度

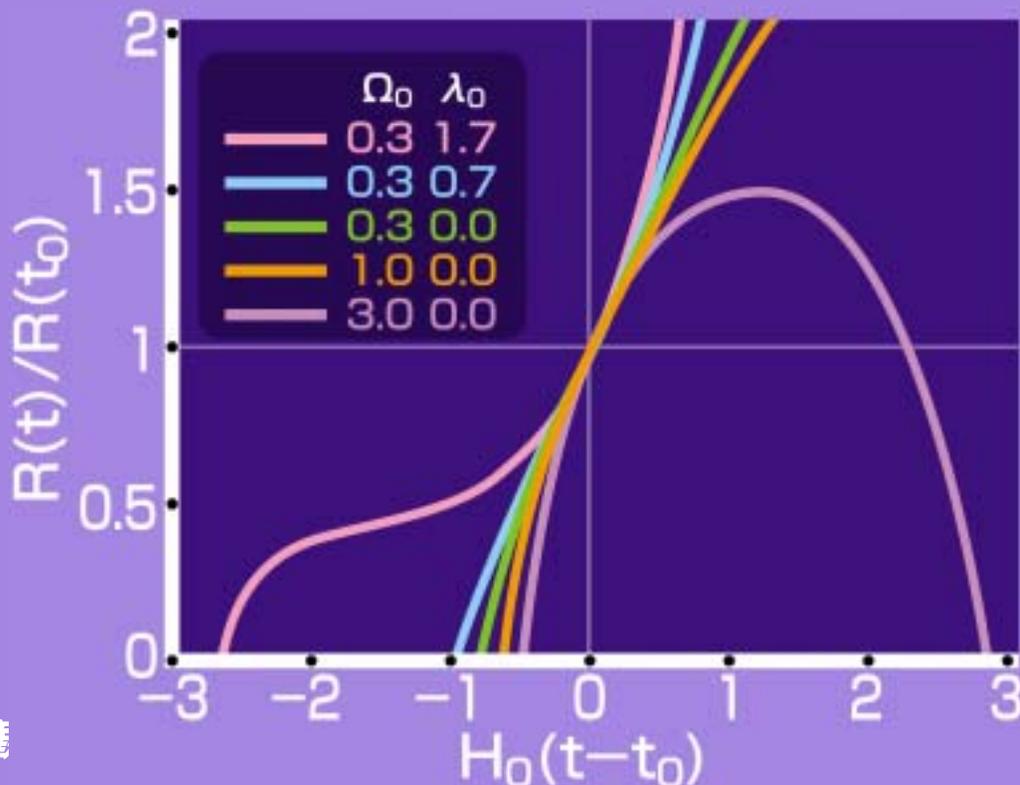


$$H = \dot{R}/R$$



# 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 :

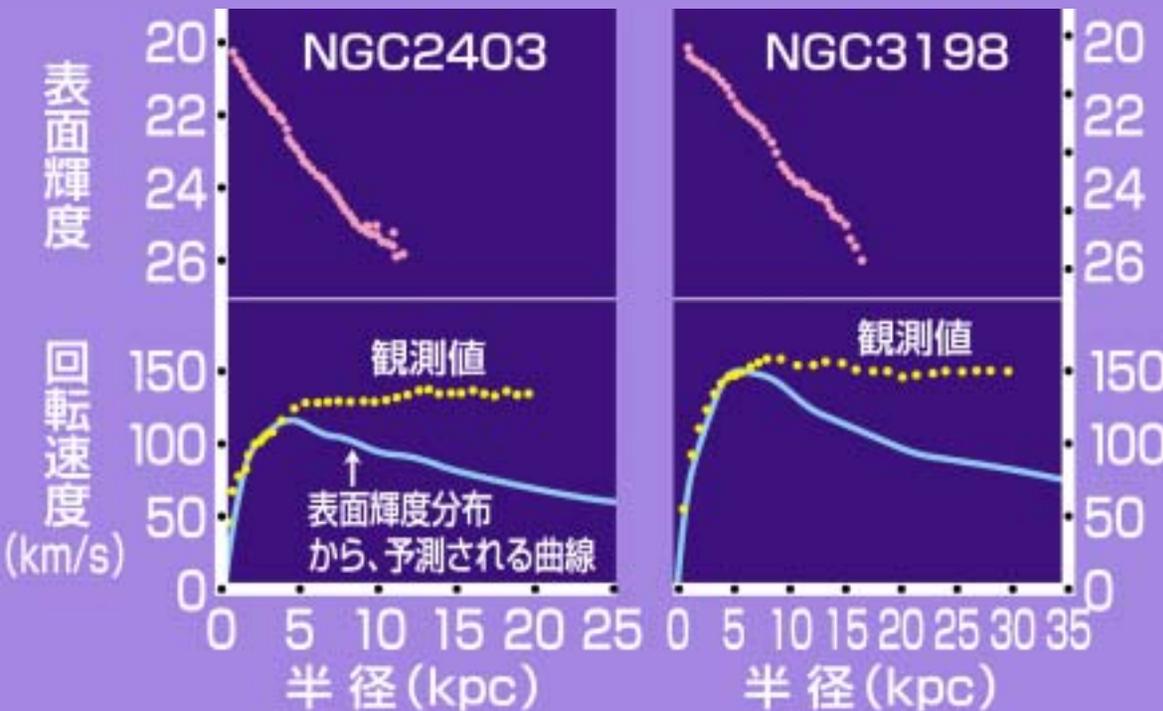
$$\rho_c \equiv \frac{3H_0^2}{8\pi G} \approx 2 \times 10^{-29} h^2 \text{g/cm}^3$$

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

# 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

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

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

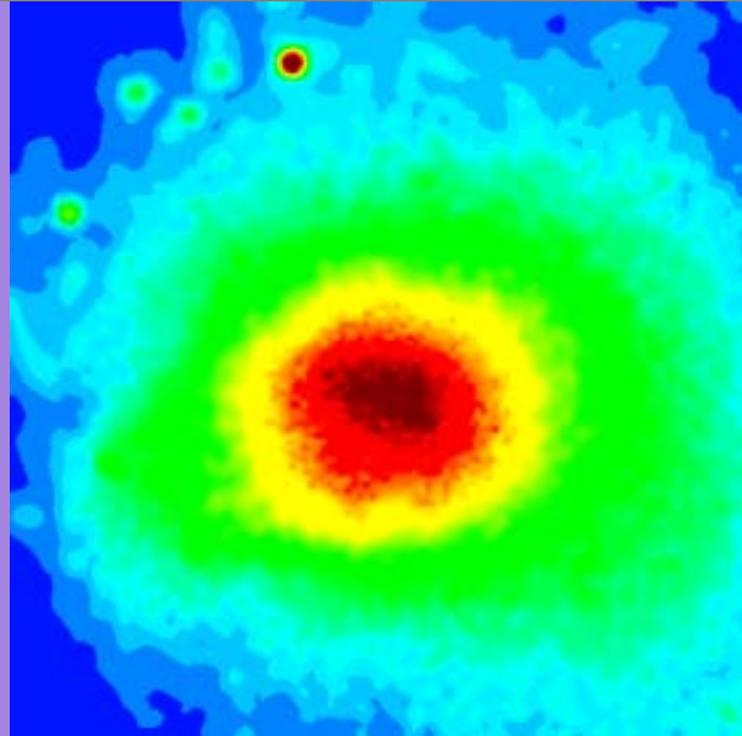
$$v(r) = \text{const.} \rightarrow M(<r) \propto r$$

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

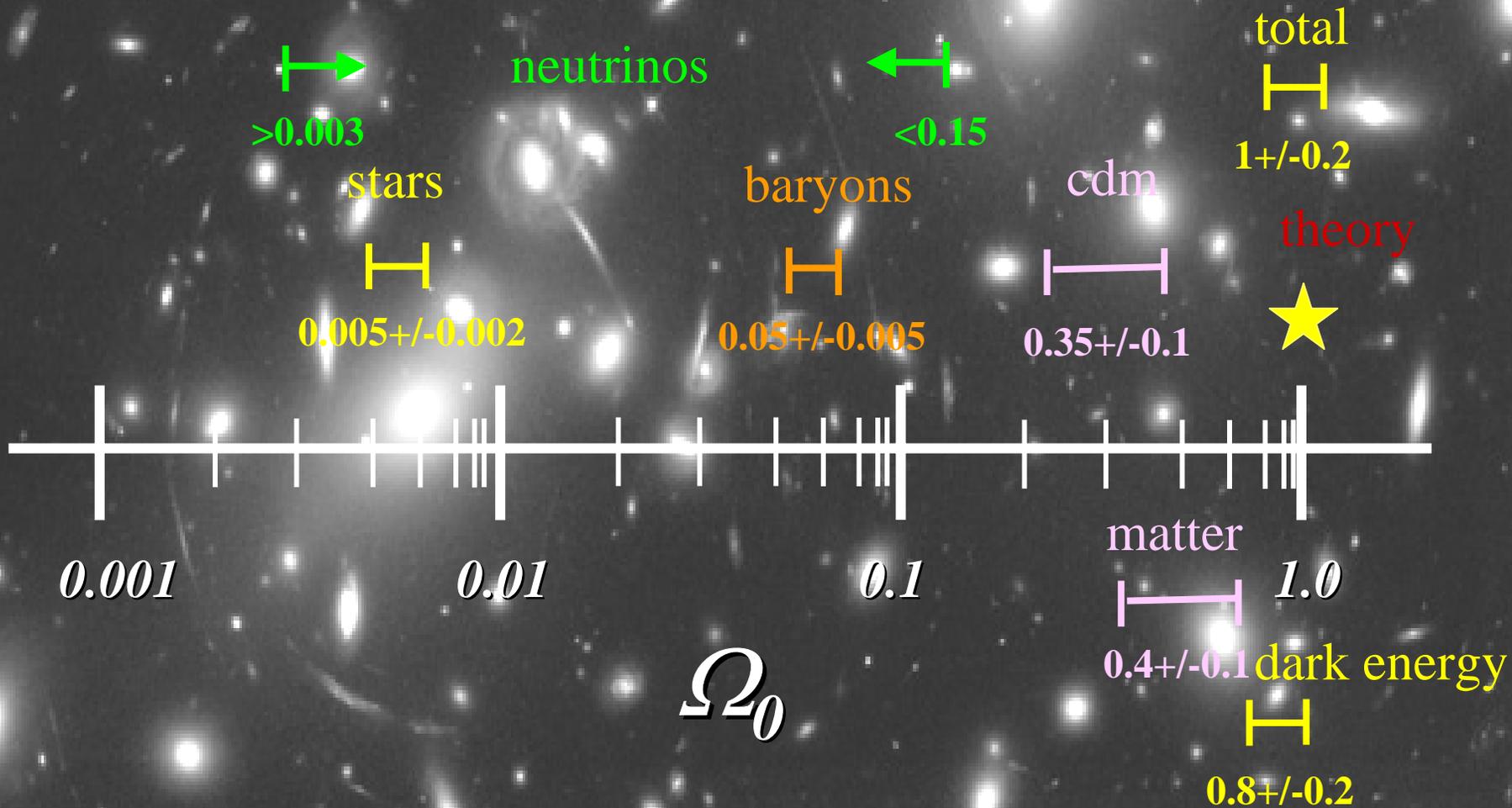
## ■ 天文学的暗黒物質

- 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

# 宇宙の質量の内訳

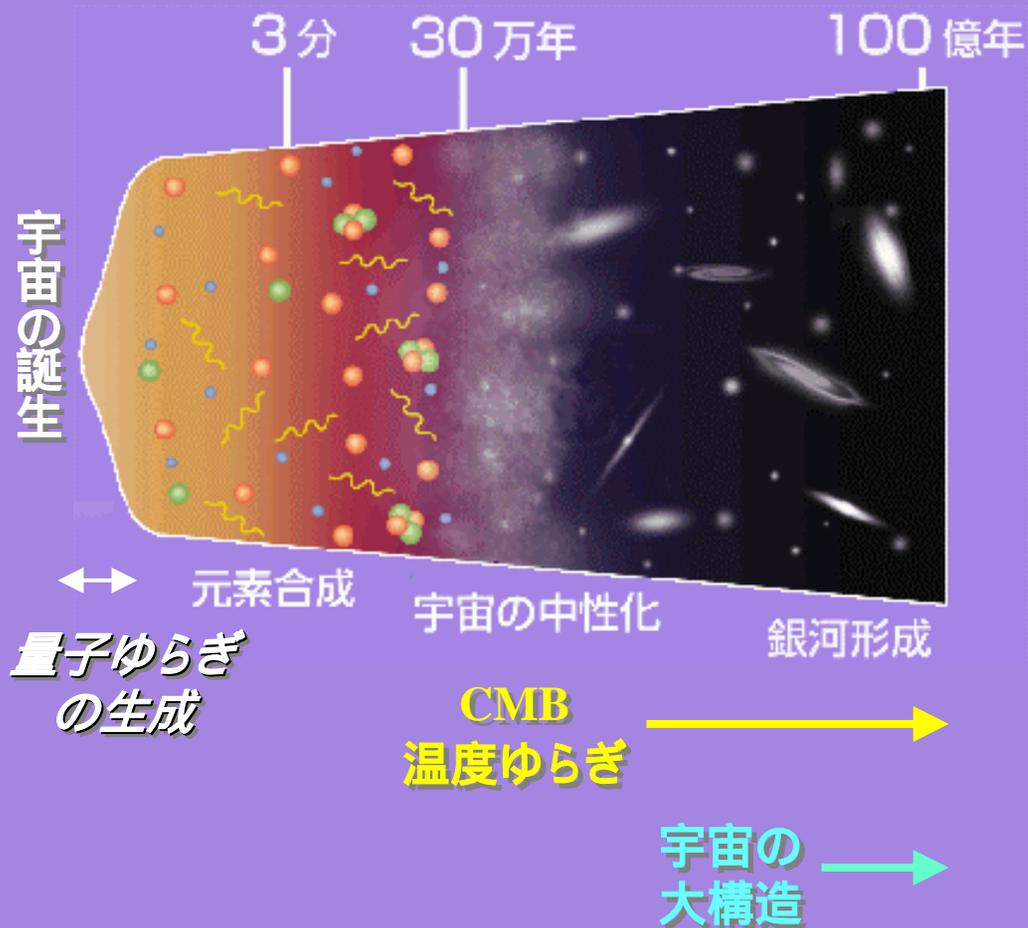


Galaxy Cluster Abell 2218

# 構造形成：重力不安定理論

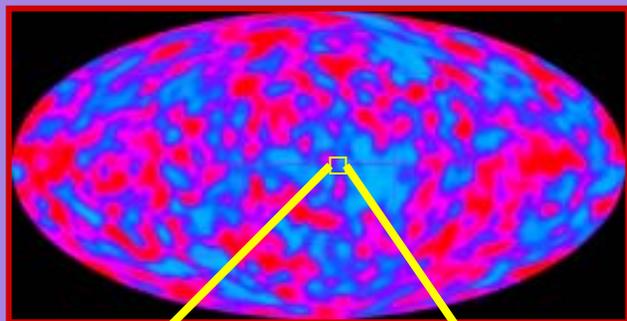
- 宇宙の階層構造形成には、暗黒物質が不可欠
- 宇宙初期の微小な密度の空間的非一様性(密度ゆらぎ)が宇宙膨張に伴って重力的に成長
- 暗黒物質の形成した重力ポテンシャルの中にガスが落ち込み、さらにエネルギーを失いながら、第一世代の天体が誕生
- それらが合体を繰り返して階層構造を形成
- 理論的に予想される密度ゆらぎスペクトルは、CMBの温度ゆらぎの観測データと良い一致

# 宇宙の初期条件：密度ゆらぎの起源

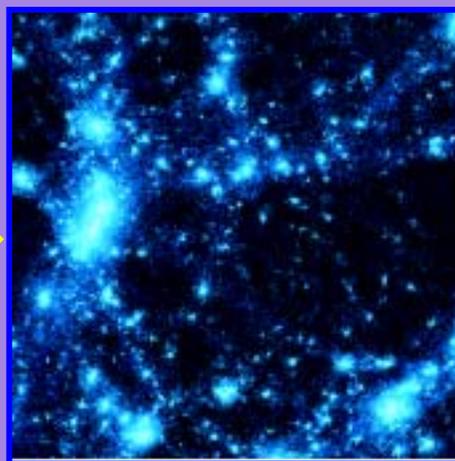
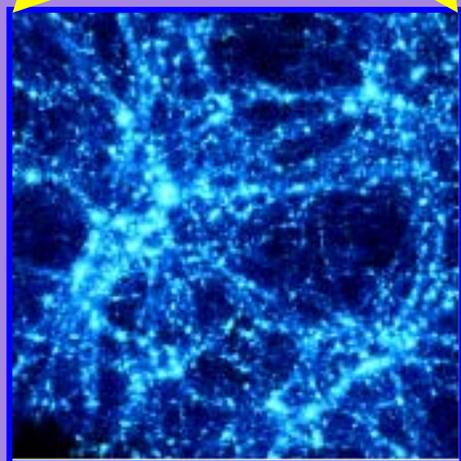


- 誕生直後 ( $10^{-40}$ 秒程度) の宇宙での量子的なゆらぎが、密度の空間的非一様性を生み出した
- インフレーション理論と呼ばれる初期宇宙のモデルを用いて、この密度ゆらぎの性質が予言できる
- この理論予言は、CMBの温度ゆらぎの観測を通じて検証可能で、実際良い一致を示している

# 宇宙の構造形成シナリオ

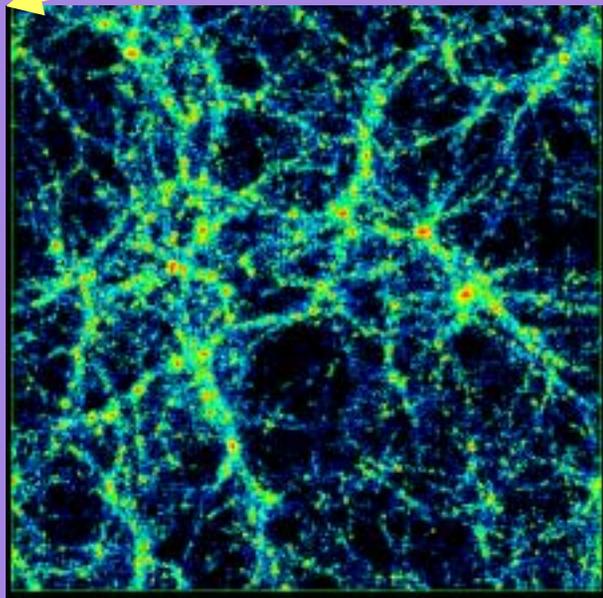


- 小さなスケールの構造ほど初期に形成される
- いったんできた構造が重力的に合体あるいは集団化することで、より大きなスケールの構造へと進化する



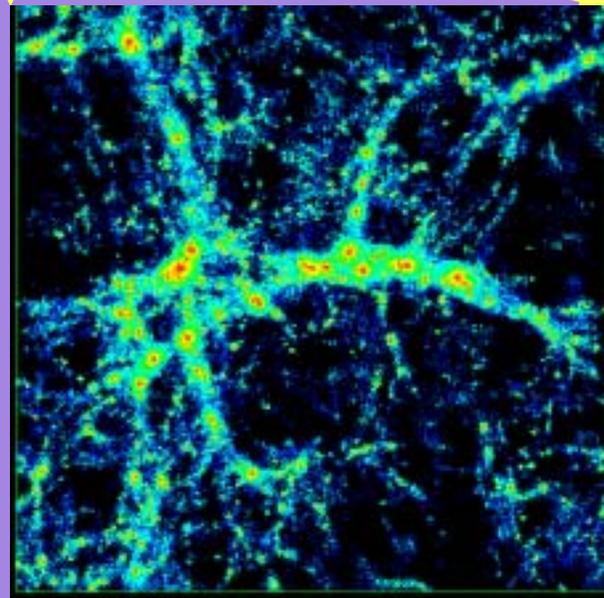
# 暗黒物質と大構造の進化

- 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



$75h^{-1}$  Mpc

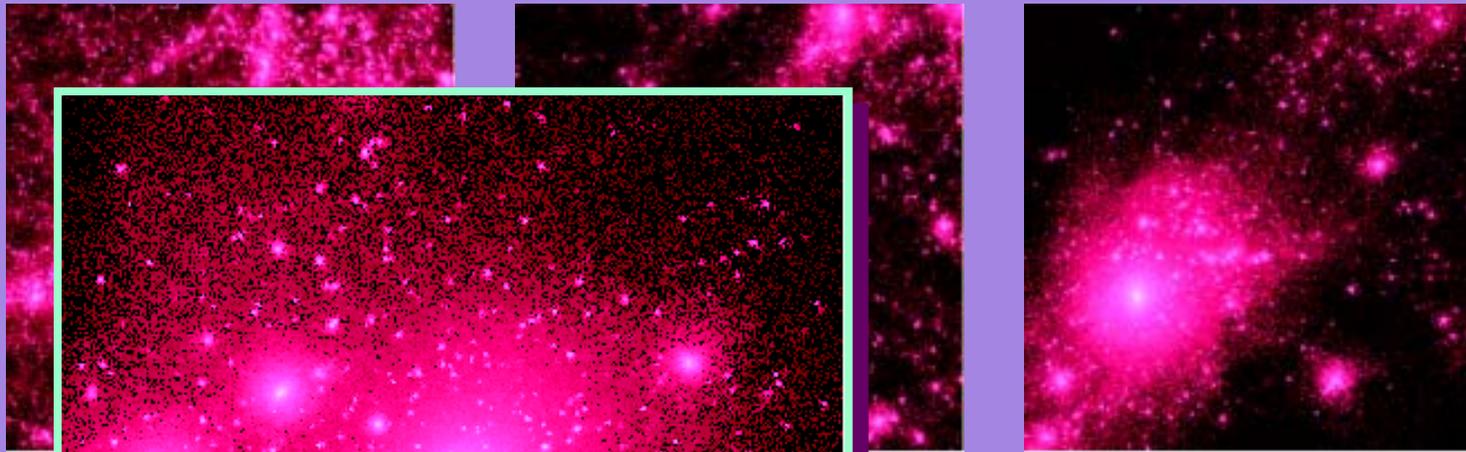
$z=0$



$75h^{-1}$  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



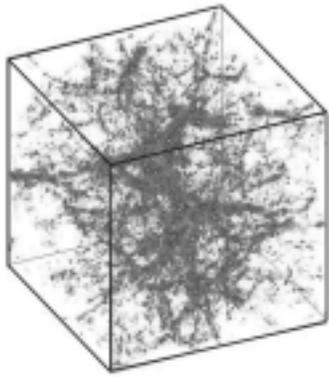
現在  
( $z=0$ )

$z=1$

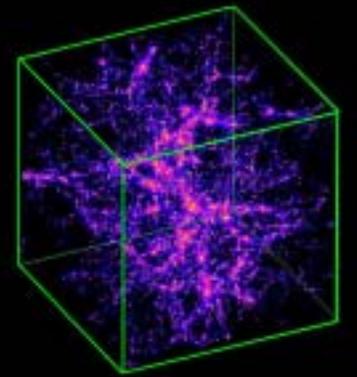
$$\Omega_0 = 0.3, \lambda_0 = 0.7, h = 0.7$$

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

(Jing & Suto 2000)



## 暗黒物質と宇宙の進化 まとめ



暗黒物質の分布

高温ガスの分布

- 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