

第7章 宇宙の階層構造と 星形成史

7-1 宇宙膨張と赤方偏移

一様・等方宇宙 アインシュタイン方程式 (一般相対論)

$$\left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 + \frac{kc^2}{a^2} - \frac{\Lambda}{3}c^2 = \frac{8\pi G}{3}\rho \quad (7.1)$$

$a = a(t)$ 宇宙のスケール因子

ρ 質量(及び放射)密度

Λ 宇宙定数

$k = -1, 0, 1$

時刻 t におけるハッブル定数

$$H(t) = \dot{a}(t)/a(t) \quad (7.2)$$

同時刻における 2点間の距離 d は (共動座標 ΔX)

$$d = a(t) \Delta X \quad (7.3)$$

$$\dot{d} = \dot{a} \Delta X = \frac{\dot{a}}{a} a \Delta X = \left(\frac{\dot{a}}{a}\right) d$$

2点間が互いに遠ざかる速さ $v = \dot{d}$ は d に比例
(7.2) より, $t = t_0$ (現在) $H(t) = H_0 = \frac{\dot{a}(t_0)}{a(t_0)}$ より

$$v = H_0 d \quad (7.4)$$

(ハッブルの法則)

赤方偏移

λ, ν 光源での波長・振動数

λ_0, ν_0 観測者
(現在)

$$1+z = \frac{\lambda_0}{\lambda} = \frac{\nu}{\nu_0} = \frac{a_0}{a(t)} \quad a_0 \equiv a(t_0) \quad (13.5)$$

z : (宇宙論的) 赤方偏移

$$\frac{dz}{dt} = -\frac{a_0}{a^2} \dot{a} = -(1+z)H \quad (13.6)$$

(13.1) は (13.2) より

$$\frac{8\pi G}{3H^2} \rho + \frac{\Lambda c^2}{3H^2} - \frac{kc^2}{H^2 a^2} = 1 \quad (13.7)$$

臨界密度 $\rho_c = \frac{3H^2}{8\pi G} \quad (13.8)$

密度パラメータ $\Omega \equiv \frac{\rho}{\rho_c} \quad (13.9)$

物質(バリオンとダークマター)優勢 $\Lambda \neq 0$ 宇宙を考える

$$\rho_m = \rho_{m0} (1+z)^3 \quad (13.10)$$

$\uparrow t=t_0$

$$\Omega_m = \rho_m \frac{8\pi G}{3H^2} = \frac{H_0^2}{H^2} \Omega_{m0} (1+z)^3 \quad (13.11a)$$

$$\Omega_{m0} \equiv \rho_{m0} \frac{8\pi G}{3H_0^2} \quad (13.11b)$$

現在の宇宙項パラメータ:

$$\Omega_{\Lambda 0} \equiv \Lambda c^2 / 3H_0^2 \quad (13.12)$$

(13.11b), (13.12) より 現在の宇宙で (13.7) は

$$\Omega_{m0} + \Omega_{\Lambda 0} = 1 + \frac{kc^2}{H_0^2 a_0^2} \quad (13.13)$$

また (13.11a), (13.12) より 過去の宇宙で (13.7) は

$$H^2 = H_0^2 [\Omega_{m0} (1+z)^3 + \Omega_{\Lambda 0}] - \frac{kc^2}{a_0^2} (1+z)^2$$

$$= H_0^2 [\Omega_{m0} (1+z)^3 - (\Omega_{m0} + \Omega_{\Lambda 0} - 1) (1+z)^2 + \Omega_{\Lambda 0}]$$

(13-92) p2 (13.14)

(13.6) (13.14) より

$$k=0.75 \text{ 程度}$$

$$\frac{dz}{dt} = -H_0(1+z) \left[\Omega_{m0}(1+z)^3 - (\Omega_{m0} + \Omega_{\Lambda 0} - 1)(1+z)^2 + \Omega_{\Lambda 0} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (13.15)$$

zが大きいとき、宇宙項 Λ は重要でない。

$1+z < (\Omega_{\Lambda 0} / \Omega_{m0})^{\frac{1}{3}}$ で Λ が優勢。

WMAP衛星 3年間の宇宙マイクロ波背景放射の観測

$$\Omega_{m0} = 0.24 \quad \Omega_{\Lambda 0} = 0.76, \quad H_0 = 73 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$$

(13.15) を $z=\infty \sim 0$ で積分して宇宙年齢 (13.16)

「 Λ -CDM モデル」

$$t_0 = 137 \text{ 億年}$$

7-2. 宇宙の階層構造と今の形成

宇宙の階層構造

星	質量 ($M_\odot$)	大きさ	密度
星	~ 1	$\sim 10^6 \text{ km}$	$\sim 1 \text{ g/cm}^3$
銀河	$\sim 10^{11}$	$\sim 10 \text{ kpc}$	$\sim 10^{-25}$
銀河団	$10^{13} - 14$	$\sim 5 \text{ Mpc}$	$\sim 10^{-28}$
超銀河団	$10^{15} - 16$	$\sim 100 \text{ Mpc}$	$\sim 10^{-30}$
宇宙全体	$10^{21} \sim 23$	$\sim 3000 \text{ Mpc}$	$\sim 10^{-30}$

$$1 \text{ pc} (1^{\circ} \sim 7) = 3.086 \times 10^{16} \text{ m}$$

$$1 M_\odot = 2 \times 10^{30} \text{ kg}$$

(13-p3)

(p3)

Cold Dark Matter (CDM)

宇宙の物質の大部分

バリオン $\Omega_{b0} = 0.04 \leftrightarrow \Omega_{m0} = 0.24$

光を出さない。万有引力をもっている(だけ?)。正体不明

我々の銀河系にもある (← 回転曲線)

大きなスケールになるほど顕著:

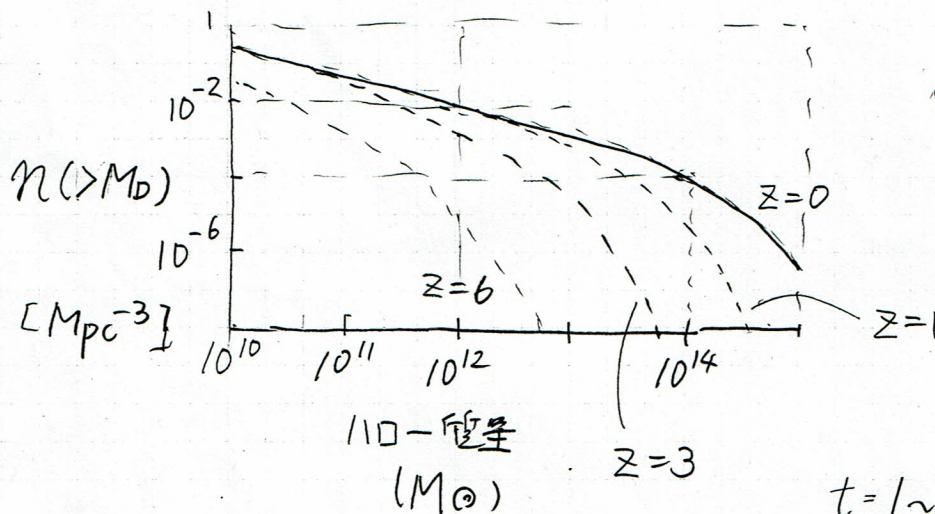
太陽近傍: バリオンの2~3倍

我々の銀河系: 10倍

銀河団: 30~100倍 (← X線ホットガス)

宇宙の構造形成史

CDMは重力のみ → 小さいスケールのゆらぎほどはやく成長



CDMのかたまりを「ハロー」と呼ぶ

↑ LMC ↑ MW ↔ 銀河団

$t = 1 \sim 2$ 億年

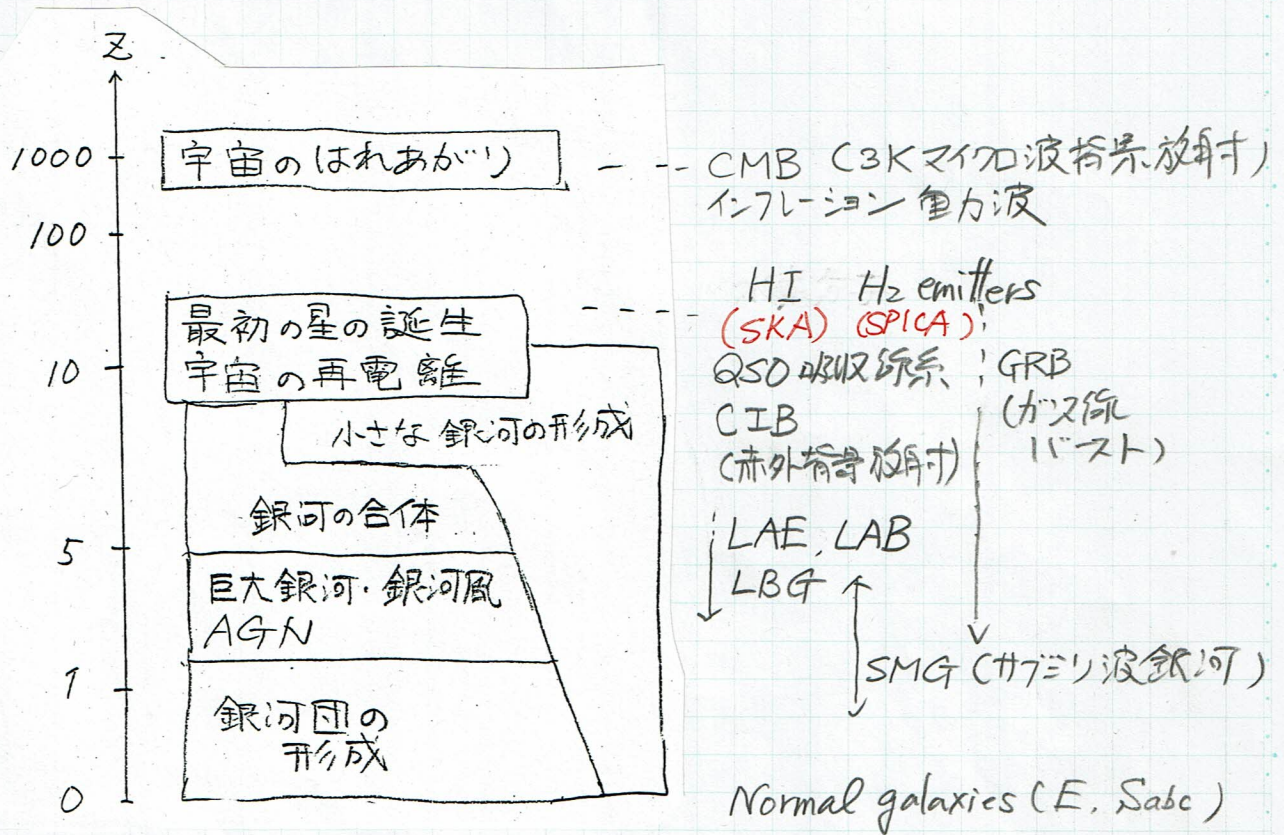
$10^8 \sim 10^9 M_{\odot}$ のハローが出現

$t = 5 \sim 10$ 億年: $10^{11} \sim 10^{12} M_{\odot}$ のハローが出現

$t = 10 \sim 30$ 億年 銀河団規模の团まりがはやく出現

(13-14) (14)

7-3 宇宙の物質進化の概観



宇宙の星形成史: $z=1-3$ でピーク

星質量、金属元素の大部分が形成
"ダウンスizing"

7-4 宇宙初期の形成途上銀河
~~13-3 宇宙の星形成史~~

バリオンとしての銀河進化 = ガスから星への
転換史
「星形成史」

星形成 $\rightarrow$ 銀河の光度が進化
化学進化
星質量の増加

宇宙初期の形成途上銀河の例

ライマン α 輝線銀河 : $\text{Ly}\alpha$ ($\lambda = 121.566 \text{ nm}$)

が赤方偏移して可視・近赤外域に
(地上大口径望遠鏡による広視野探査)
 $z \sim 7$ まで発見

$$\text{SFR} = 9.1 \times 10^{-43} \left(\frac{L(\text{Ly}\alpha)}{\text{erg s}^{-1}} \right) \text{ Mo yr}^{-1}$$

(Kennicutt 1998) (13.17)
7

$$\text{SFR} = 10 \sim 30 \text{ Mo yr}^{-1}$$

サブミリ波銀河

サブミリ波 (地上望遠鏡, ハーシェル)
による探査

赤方偏移した塵からの放射

原始楕円銀河候補

$$\text{SFR} = 300 - 10^3 \text{ Mo yr}^{-1}$$