

銀河形成の物理

岡本 崇 (計算科学研究センター・宇宙理論)

今回の内容

- 膨張宇宙での構造形成 (the basics)
- 銀河形成理論の発展
- 衛星銀河問題
- それに関する最近の研究
- まとめ
- お知らせ

膨張宇宙下の
構造形成

一様等方宇宙

- 宇宙は大きなスケールで見れば一様等方である

- 一様等方宇宙を記述する方程式

- Einstein Eq.

$$R_{\mu\nu} - \frac{R}{2}g_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4}T_{\mu\nu}$$

- Robertson-Walker metric

$$ds^2 = -c^2 dt^2 + a(t)^2 \left(\frac{dr^2}{\sqrt{1 - Kr^2}} + r^2 d\Omega^2 \right)$$

を用いて

一様等方宇宙 (2)

- Friedmann 方程式を得る

$$H^2 \equiv \left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = \frac{8\pi G}{3c^2}\rho - \frac{Kc^2}{a^2} + \frac{\Lambda c^2}{3}$$

$$\frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{4\pi G}{3c^2}(\rho + 3p) + \frac{\Lambda c^2}{3}$$

- ここで ρ はエネルギー密度 (物質密度は ρ/c^2)

宇宙論パラメータ

- $K = \Lambda = 0$ (Einstein-de Sitter) の宇宙の平均エネルギー密度は $\rho_c \equiv \frac{3c^2 H^2}{8\pi G}$
- 宇宙論パラメータを以下のように定義すると

$$\Omega \equiv \frac{\rho}{\rho_c}$$

$$\Omega_k \equiv \frac{c^2 K}{H^2 a^2}$$

$$\Omega_\lambda \equiv \frac{c^2 \Lambda}{3H^2}$$

- Friedmann 方程式は $\Omega - \Omega_k + \Omega_\lambda = 1$
- $\Omega + \Omega_\lambda = 1$ の場合、宇宙は平坦である

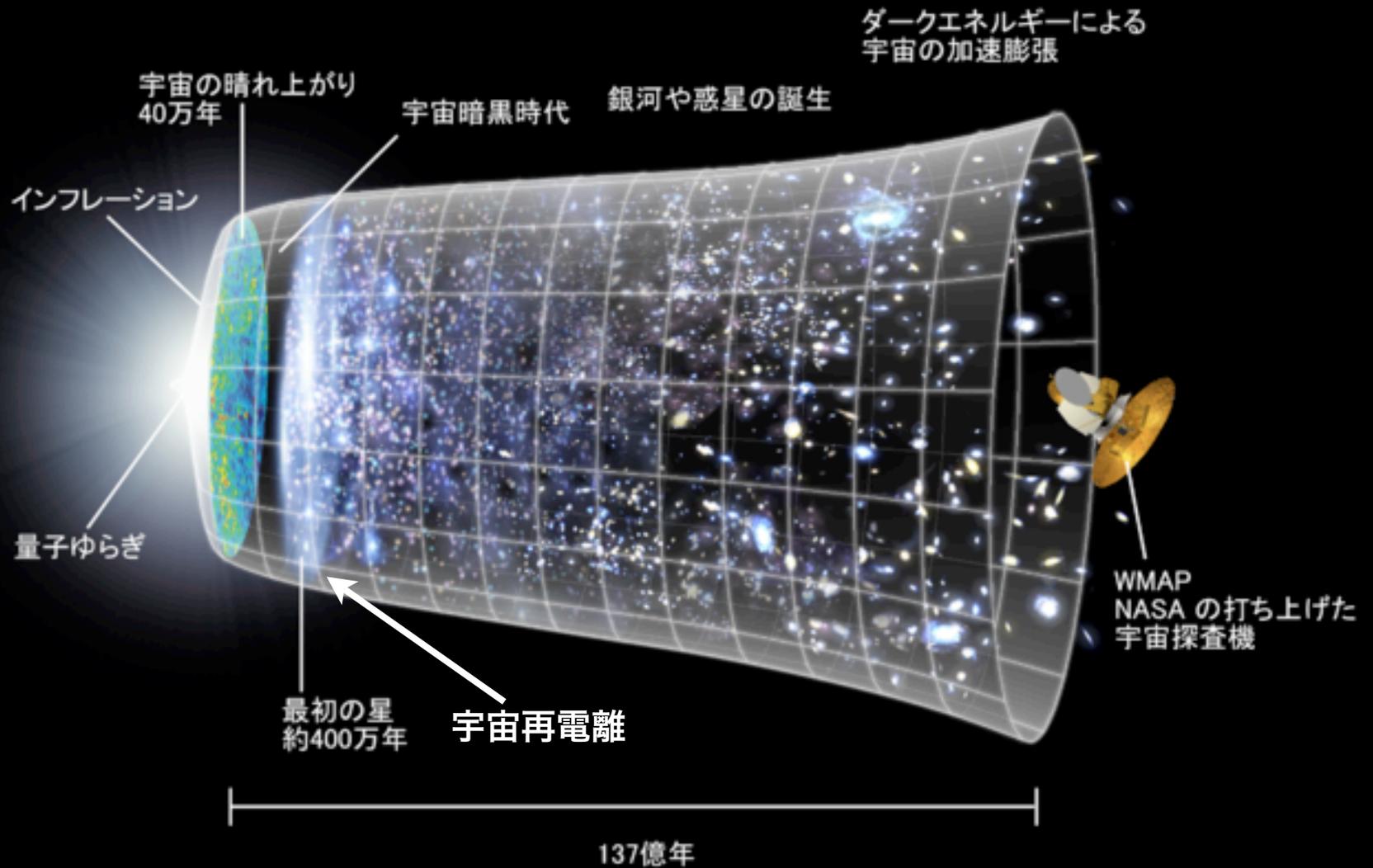
宇宙の膨張則

- エネルギー密度を $\rho = \rho_m + \rho_r$ と物質と輻射に分けて現在の値 (H_0 , $\Omega_{m,0}$, $\Omega_{r,0}$, $\Omega_{k,0}$, and $\Omega_{\Lambda,0}$) を用いて書き直すと $\rho_m \propto a^{-3}$, $\rho_r \propto a^{-4}$ より

$$\frac{H^2}{H_0^2} = \frac{\Omega_{m,0}}{a^3} + \frac{\Omega_{r,0}}{a^4} - \frac{\Omega_{k,0}}{a^2} + \Omega_{\Lambda,0}$$

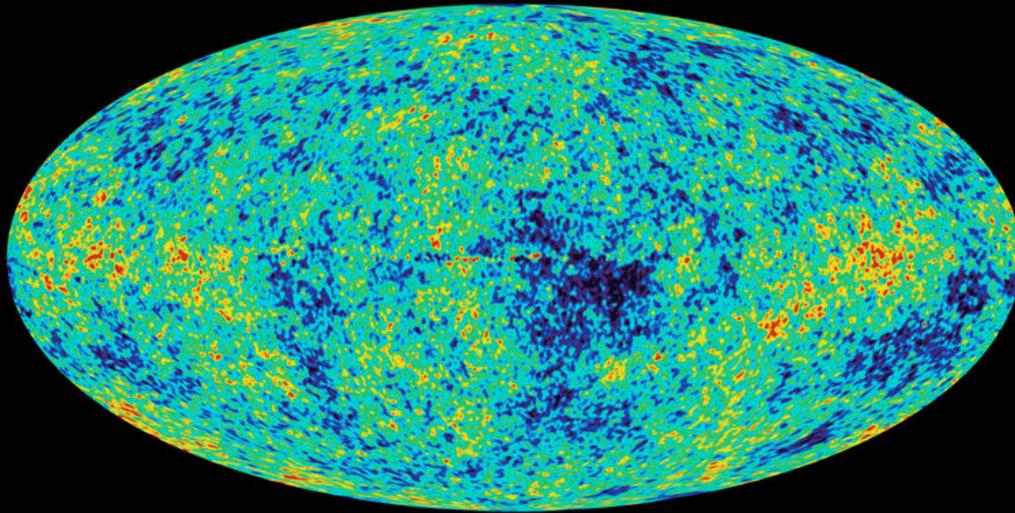
- 宇宙膨張は宇宙初期から順に「輻射」「物質」「曲率」「宇宙項」に支配されることがわかる

宇宙の進化

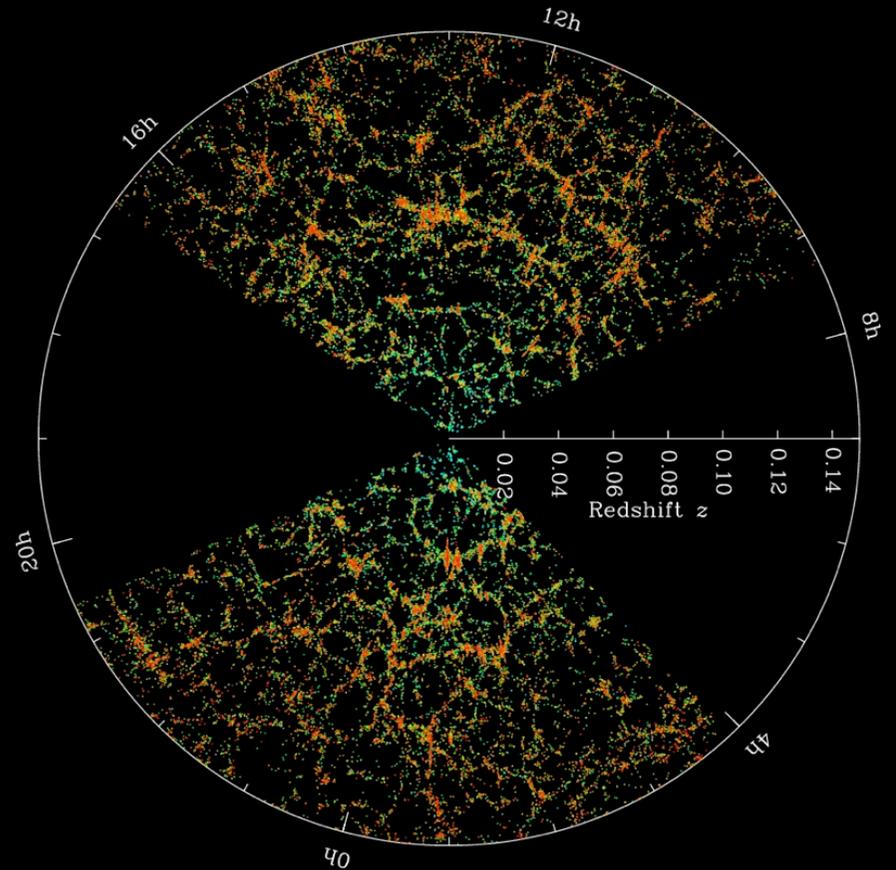


宇宙の構造形成

SDSS による銀河の大規模分布
現在の宇宙の構造



WMAP衛星による
宇宙マイクロ波背景放射
の温度揺らぎの観測
宇宙の構造の種



密度揺らぎの成長

- 球対称解
 - 一様密度球の時間進化を考える

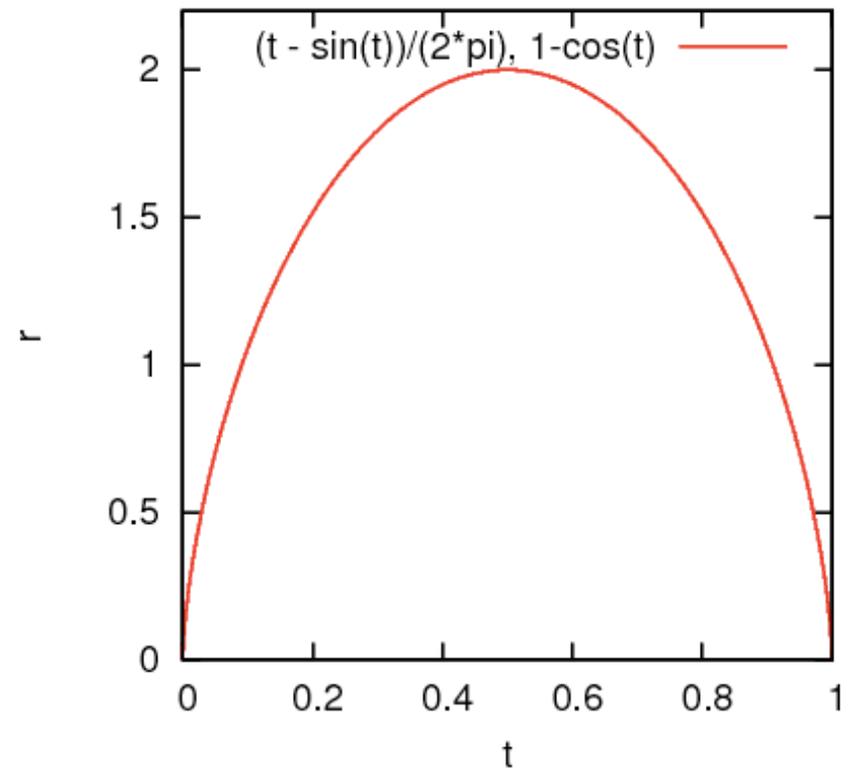
- 運動方程式: $\ddot{r} = -\frac{GM(< r)}{r^2}$

$$\frac{1}{2}\dot{r}^2 - \frac{GM(< r)}{r} = E = \text{const}$$

- $E < 0$ に対する解は cycloid 曲線で与えられる

$$r = A^2(1 - \cos \theta)$$

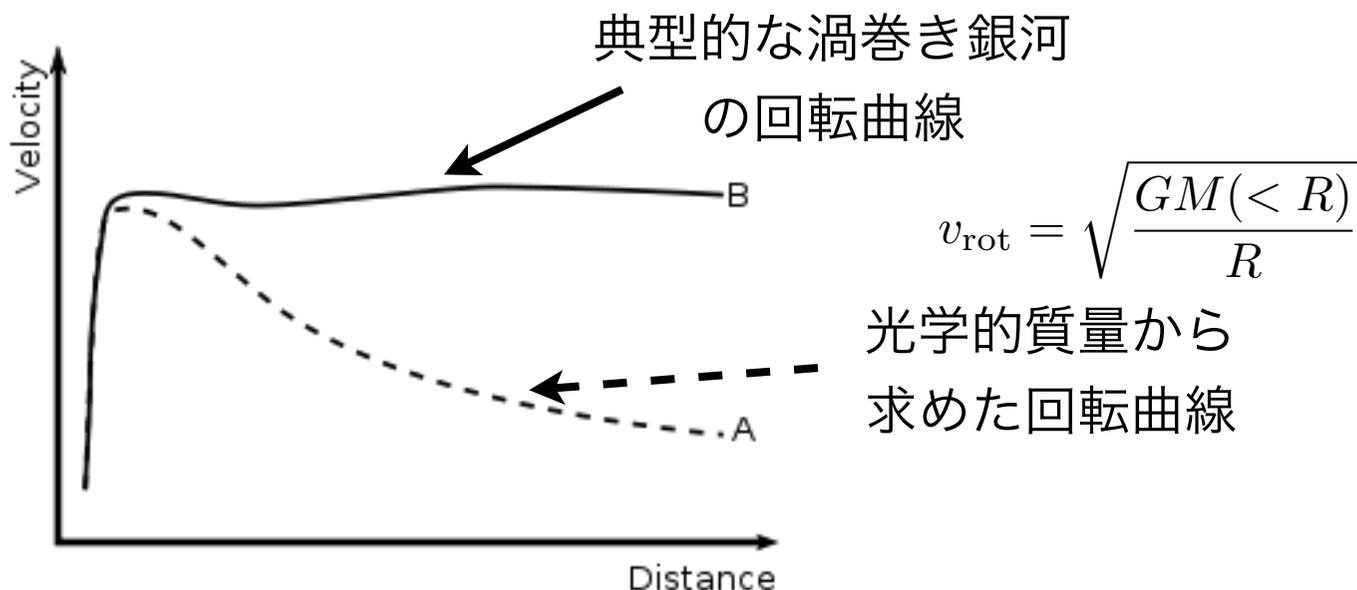
$$t = \frac{A^3}{\sqrt{GM}}(\theta - \sin \theta)$$



銀河形成理論の発展

ダークマターの存在

- Zwicky (1933): 銀河団銀河の速度分散から求めた銀河団の「力学的質量」が銀河の「光学的質量」の総和の数10~数100倍 ← スルーされる
- 1970年代以降: Rubin らによる銀河の回転曲線の観測



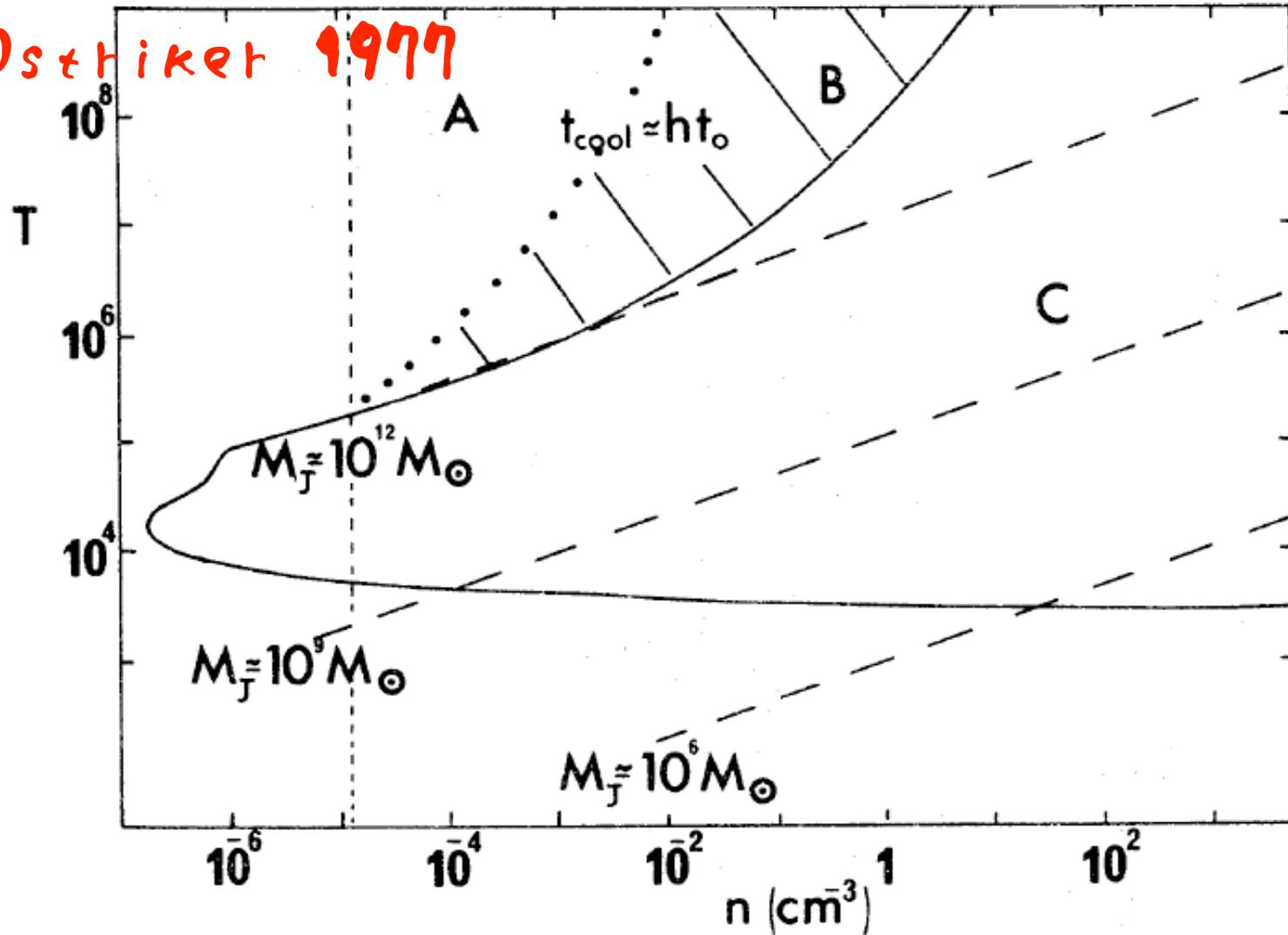
ダークマターの証拠

- 間接的証拠はたくさん
 - 銀河団ガスからのX線放射
 - 重力レンズ etc.
- 直接検出はまだ
- 我々の知っている重力理論が正しければ、宇宙にある物質の質量の80%以上はダークマターが担っている

銀河の質量

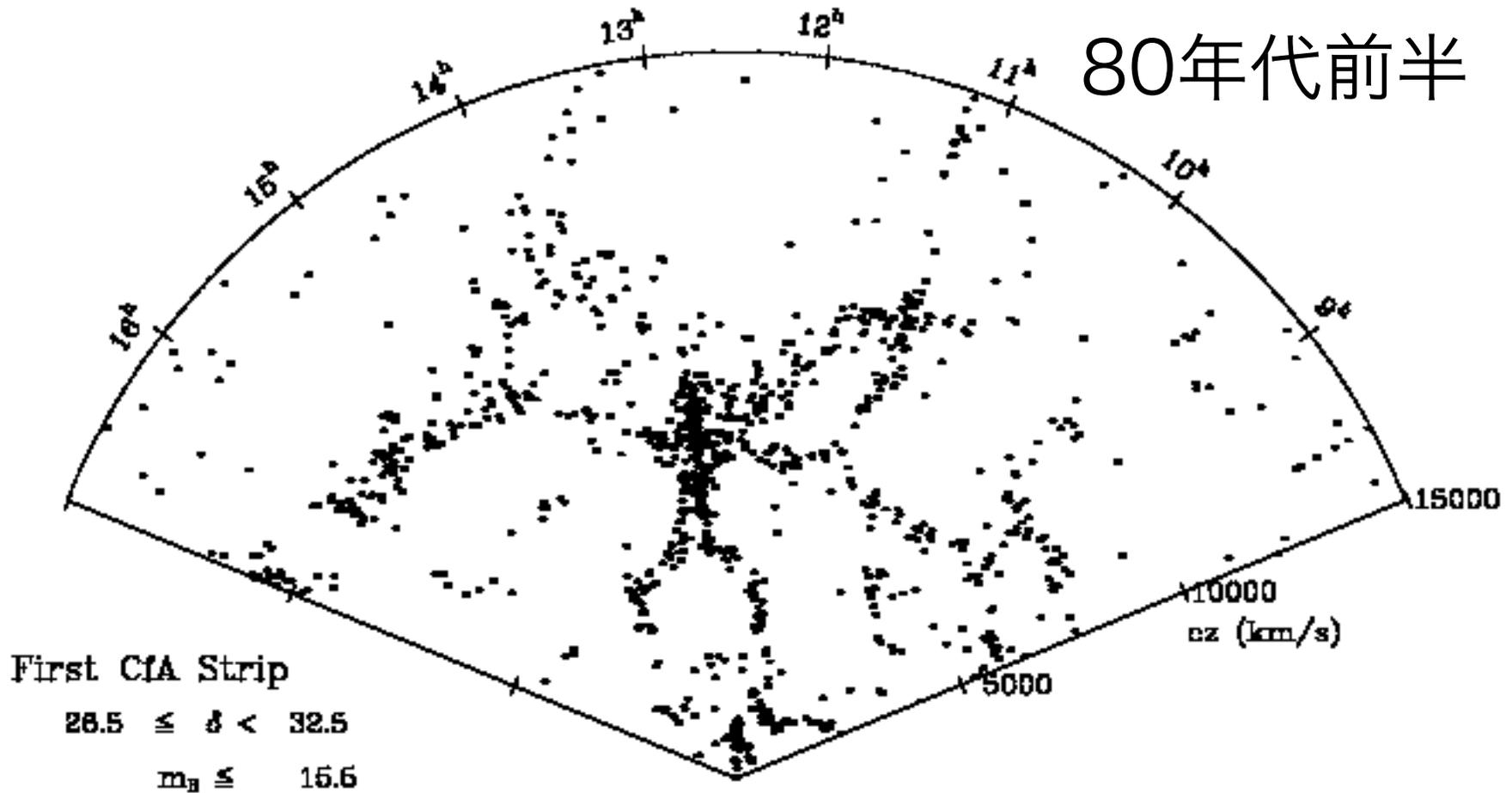
銀河団という星の系はない

Rees & Ostriker 1977



宇宙の大規模構造

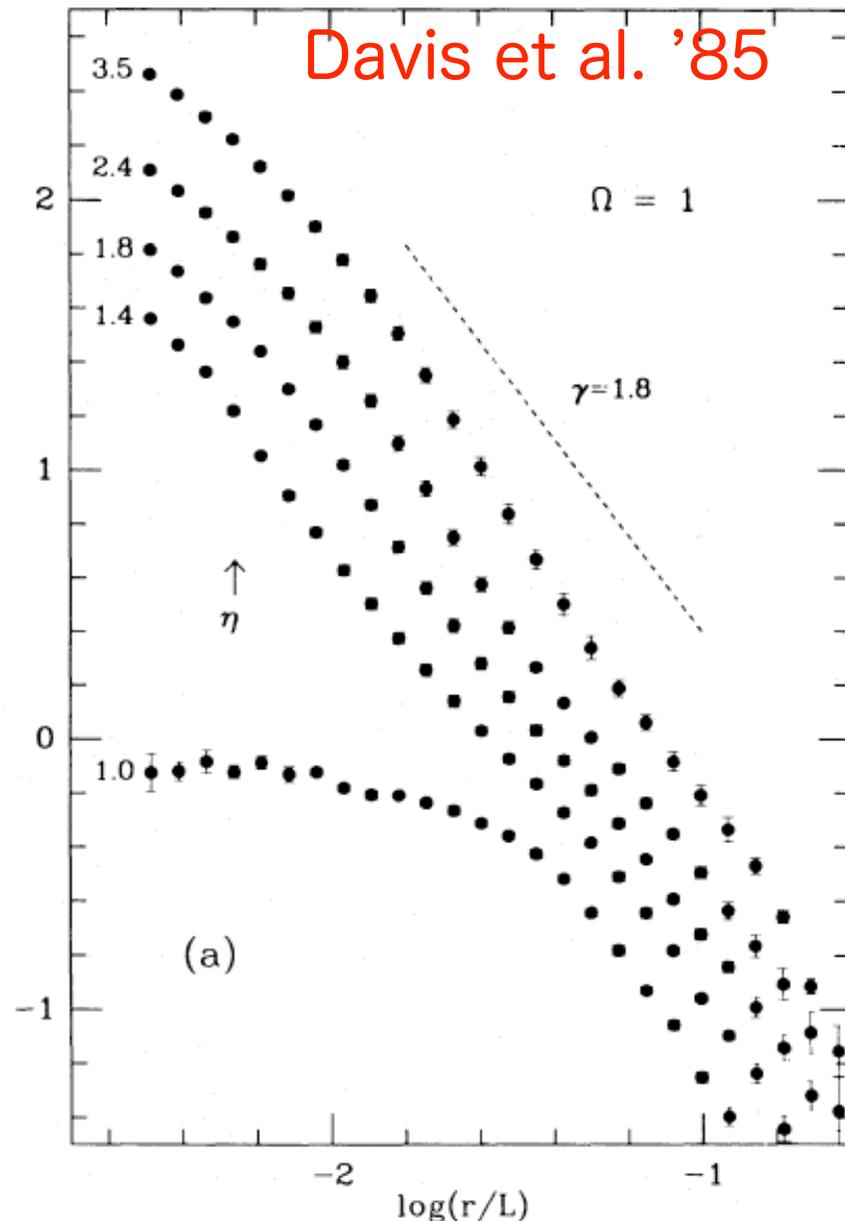
80年代前半



銀河形成と宇宙論の接点

→宇宙論的銀河形成シナリオへ

Cold Dark Matter model



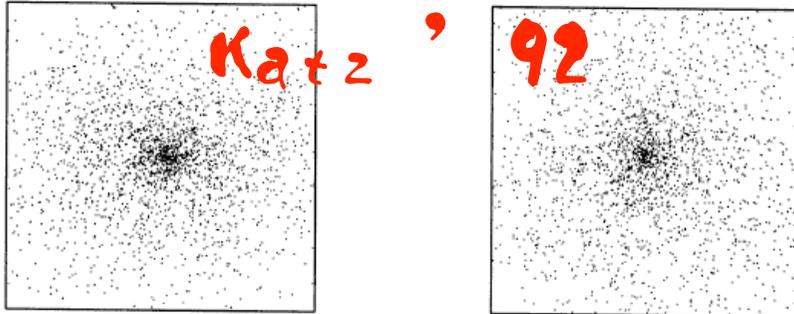
Biased galaxy formation

銀河とダークマターは同じように分布していない
銀河として見えているのは物質分布の氷山の一角

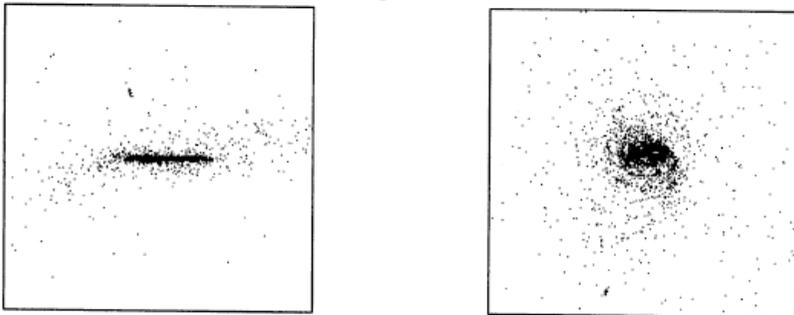
銀河形成

シミュレーション

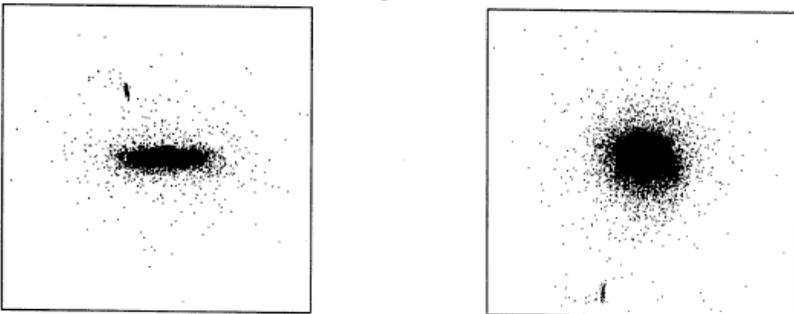
dark particles



gas particles



star particles

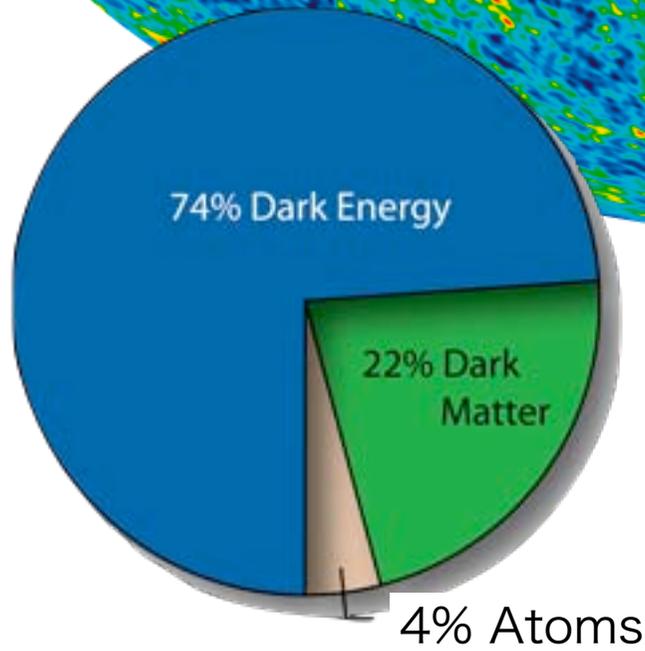


- CDM (っぽい) 初期条件から DM + Gas + 星形成 (のようなもの) を入れて、**銀河**っぽいものができるようになった
- 現在まで行われている銀河形成シミュレーションは基本的にこの亜流

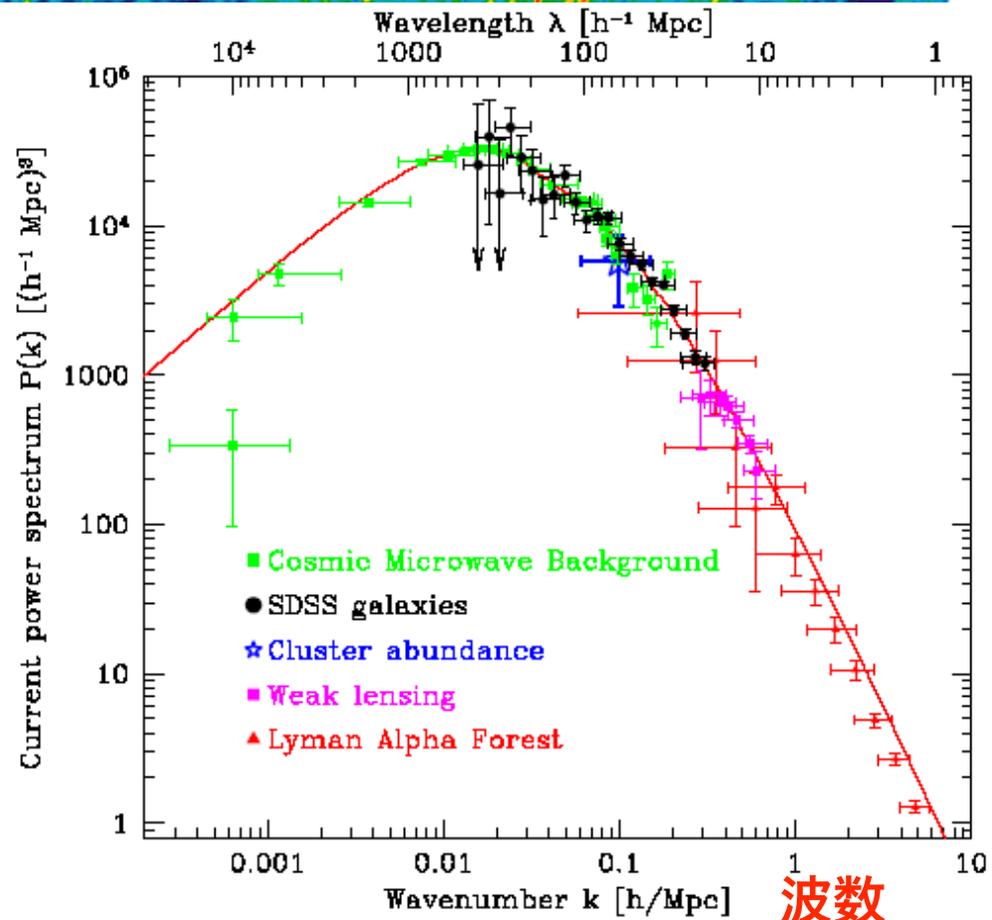
宇宙モデル →

構造形成の初期条件

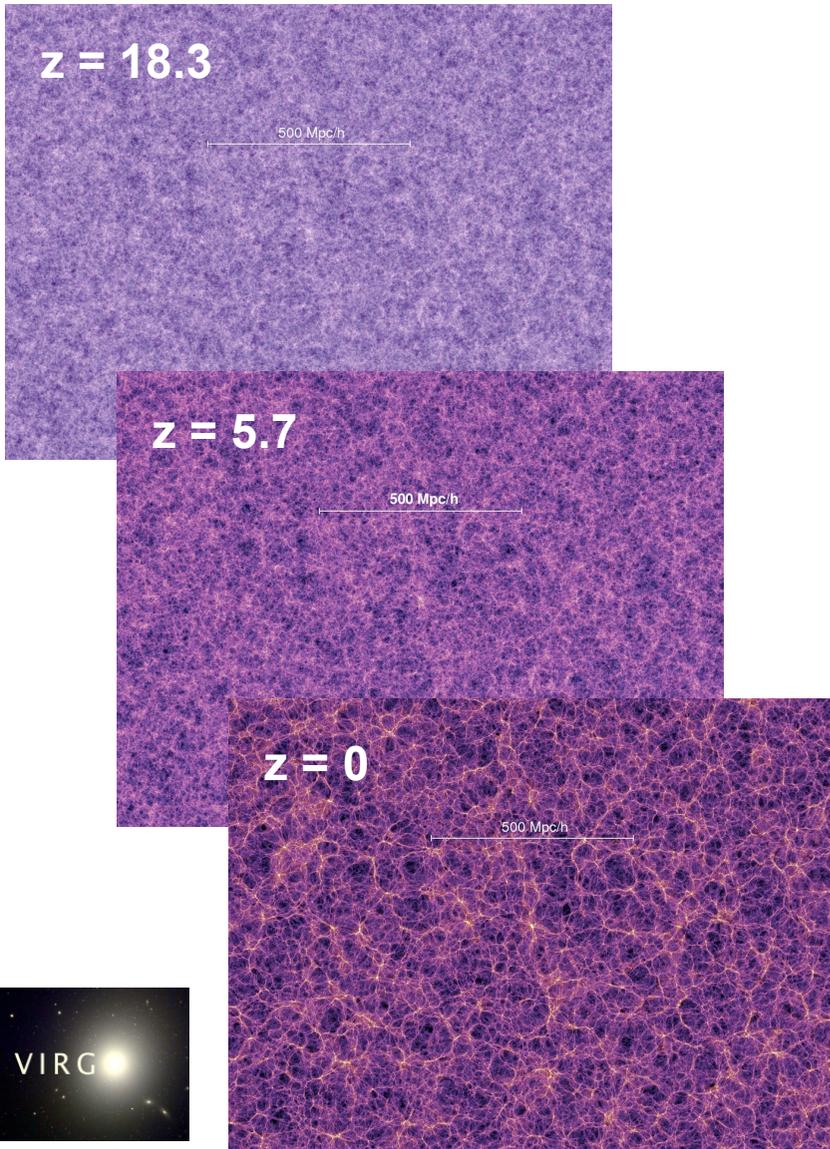
- 平坦, 低密度な宇宙: Λ CDMモデル, ランダムガウシアン密度揺らぎ, ダークマター + バリオン + 背景輻射



パワースペクトル



初期条件は決まりCDM 密度 揺らぎの成長は分かった



ダークハローの形成



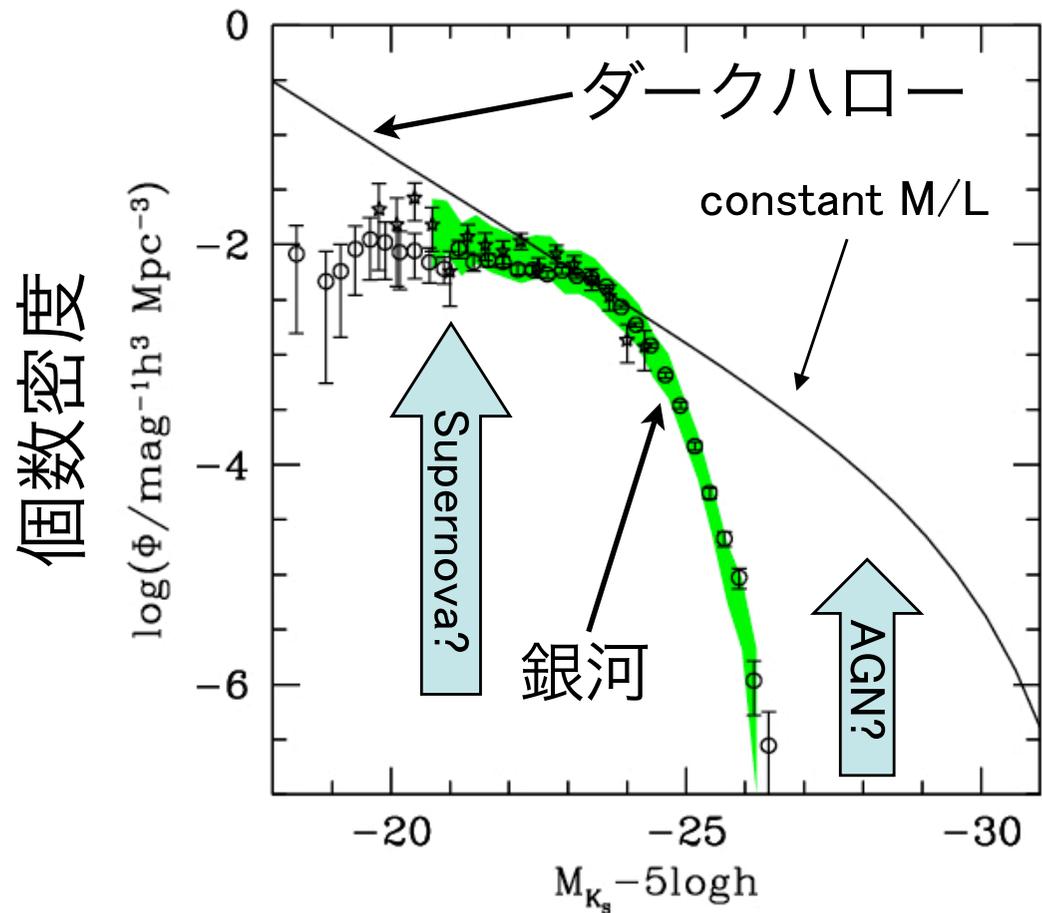
目に見える物質 (バリオン) は？

銀河の光度関数と
ダークハローの質量
関数は形が全く異
なる

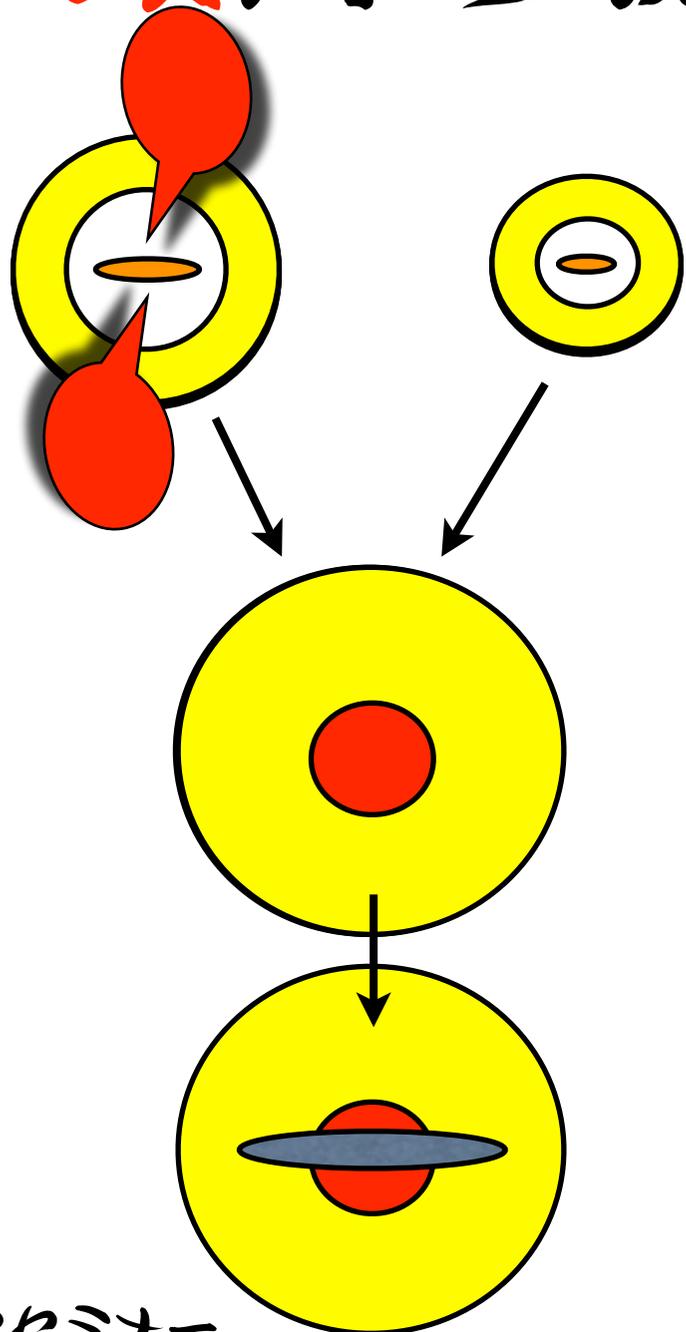


銀河の形成効率は
一定ではない

バリオンの物理が
重要



銀河形成の標準的描像



ダークハローの形成
衝撃波加熱でガスはビリアル温度
まで加熱される
放射冷却によりガス円盤が形成
星形成, そして超新星爆発
ハロー同士 of 合体
バルジ (楕円銀河) の形成

さらなるガス冷却による新たな円盤
の形成

銀河形成とCDM

- CDM モデルは $> \text{Mpc}$ スケールで観測を良く再現
- CDM に基づいたシミュレーションは銀河スケールでいくつかの重要な問題を報告している
 - **角運動量問題:** 天の川銀河のような円盤銀河が CDM モデルを仮定すると殆ど形成されない
 - **衛星銀河問題:** 銀河のダークハローは**サブハロー**と呼ばれる衛星銀河に対応する下部構造を持つが、サブハローの数は観測される衛星銀河のそれより一桁以上多い
 - **コア-カusp問題:** CDM はダークハローが中心部で cusp 構造を持つことを予言するが、矮小銀河の観測は core の存在を示唆

衛星銀河問題

用語の整理

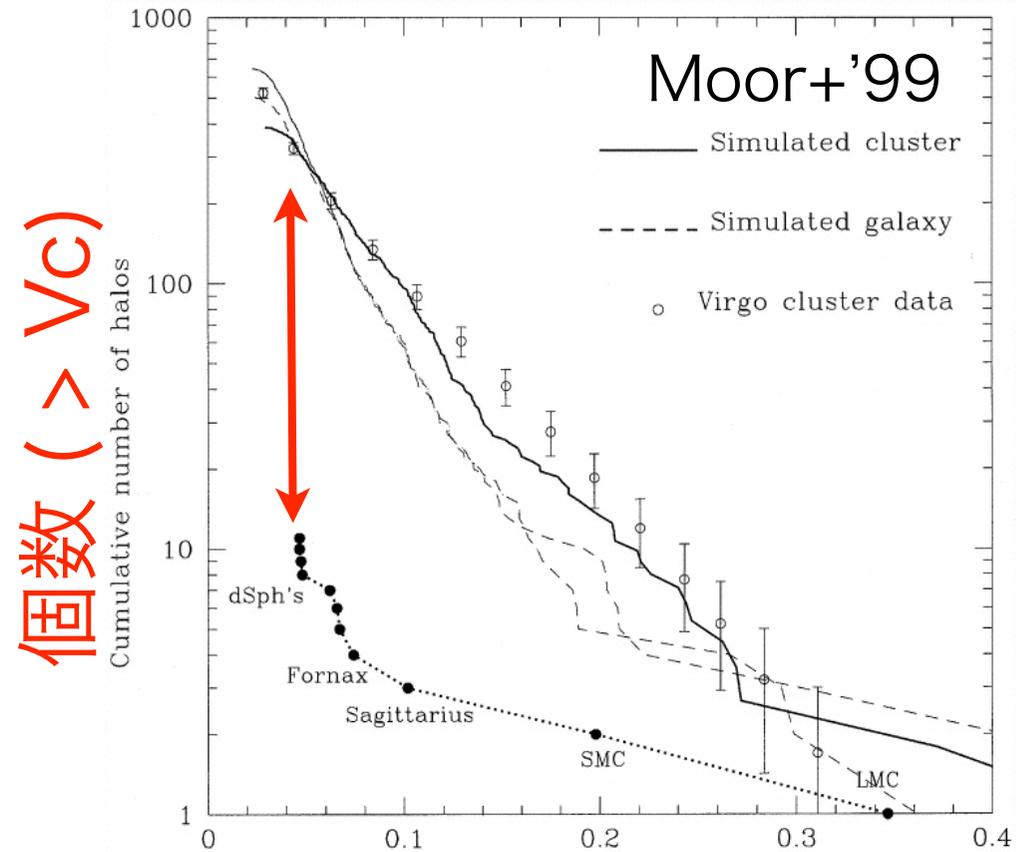
- **ダークハロー:** ダークマターの密度揺らぎが重力崩壊して形成された天体
- **階層的構造形成:** CDM 宇宙ではまず小さなダークハローが形成され, 重力で集合・合体を繰り返しながらより大きなダークハローへと成長
- **回転速度:** $v_c = \sqrt{\frac{GM(< R)}{R}}$ で定義される. 天体のポテンシャルの深さを特徴付ける量
- **ビリアル温度:** 重力的な平衡状態にあるガスの温度, $T_{\text{vir}} = \frac{\mu m_p}{k_b} v_c^2$. 物理的な意味は回転速度と同じ.

天の川銀河の衛星銀河

● 衛星銀河問題

CDM の予言する回転速度の関数としてのサブハローの数は、実際に観測される衛星銀河の数よりも一桁以上多い

回転速度はほぼダークハローの質量で決まるため
単純に暗くしても駄目



個数 ($> V_c$)

回転速度

$$v_c = \sqrt{\frac{GM(< R)}{R}}$$

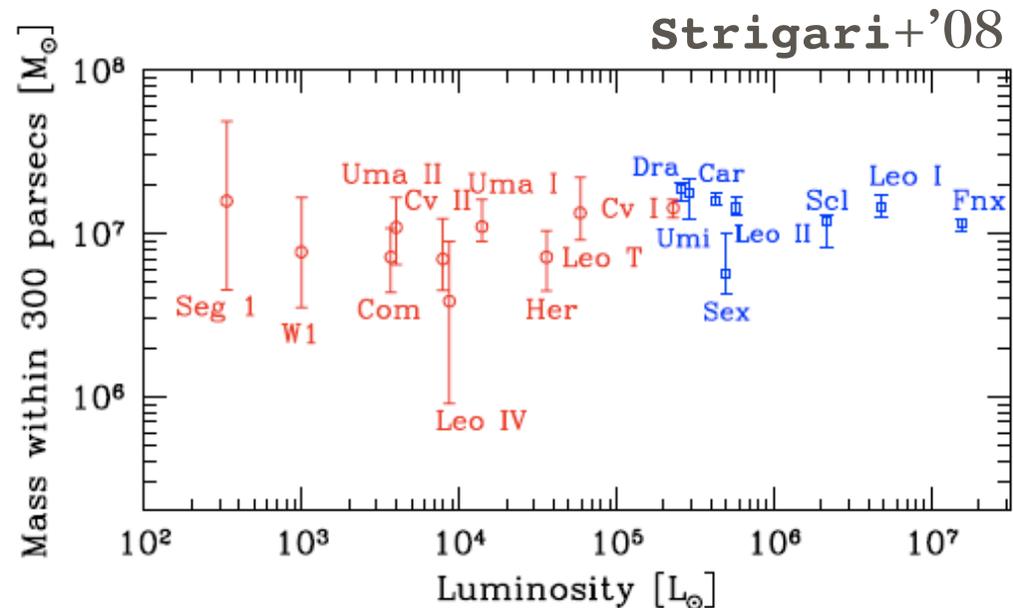
天の川銀河の衛星銀河(2)

- **ダークハローの最低質量？**

- 矮小衛星銀河 (最も dark matter dominated な天体) の半径 300 pc 内の質量が光度にして5桁に渡ってほぼ一定

- CDM にはこのようなスケールは存在しない → **warm dark matter?**

300 pc 内の力学的質量

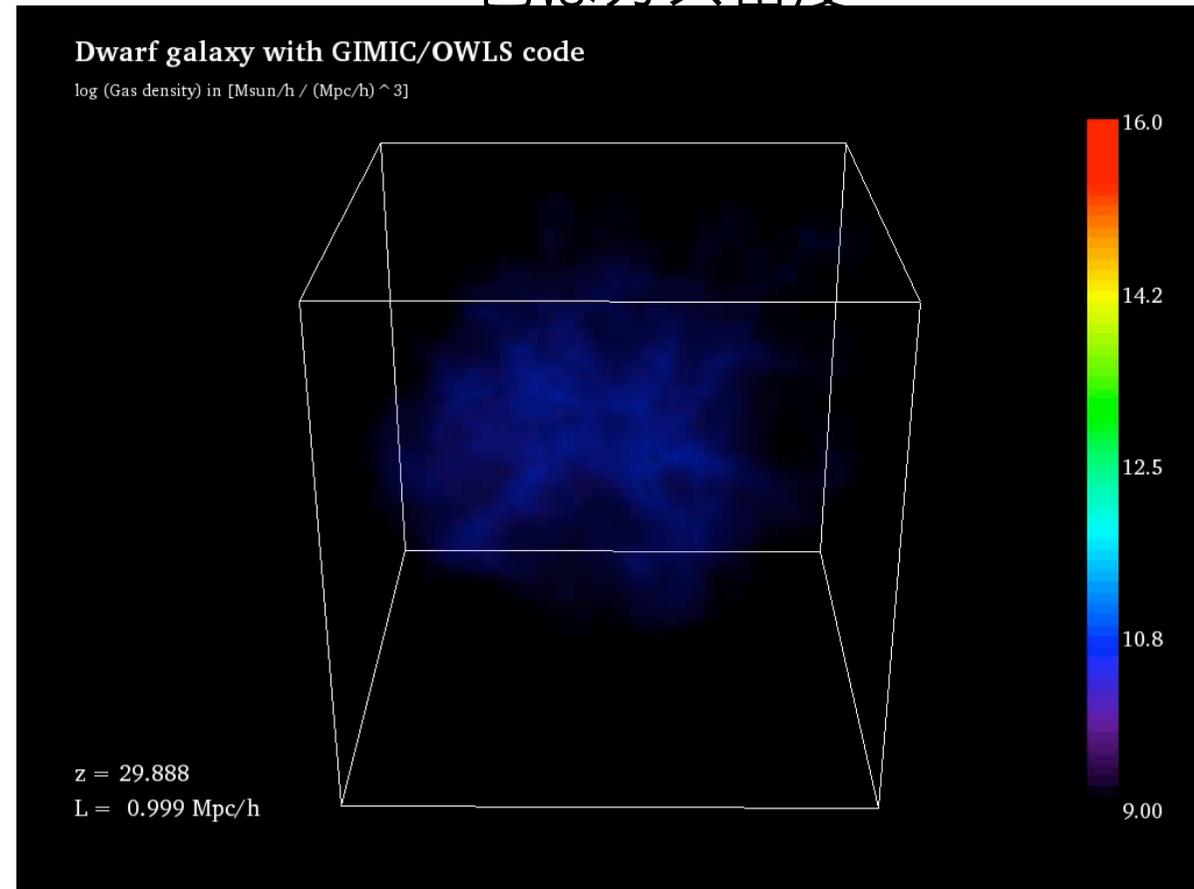


衛星銀河の明るさ

矮小銀河形成の抑制

- 初期天体からの紫外線によって銀河間ガスは再び電離される@ $z \sim 10$
→ ガスは1万度程度に加熱される
- 大質量星はその寿命の最後に超新星爆発として星間ガスにエネルギーを与える
- ポテンシャルの浅いハローからはガスが流出

矮小銀河形成のシミュレーション 色はガス密度

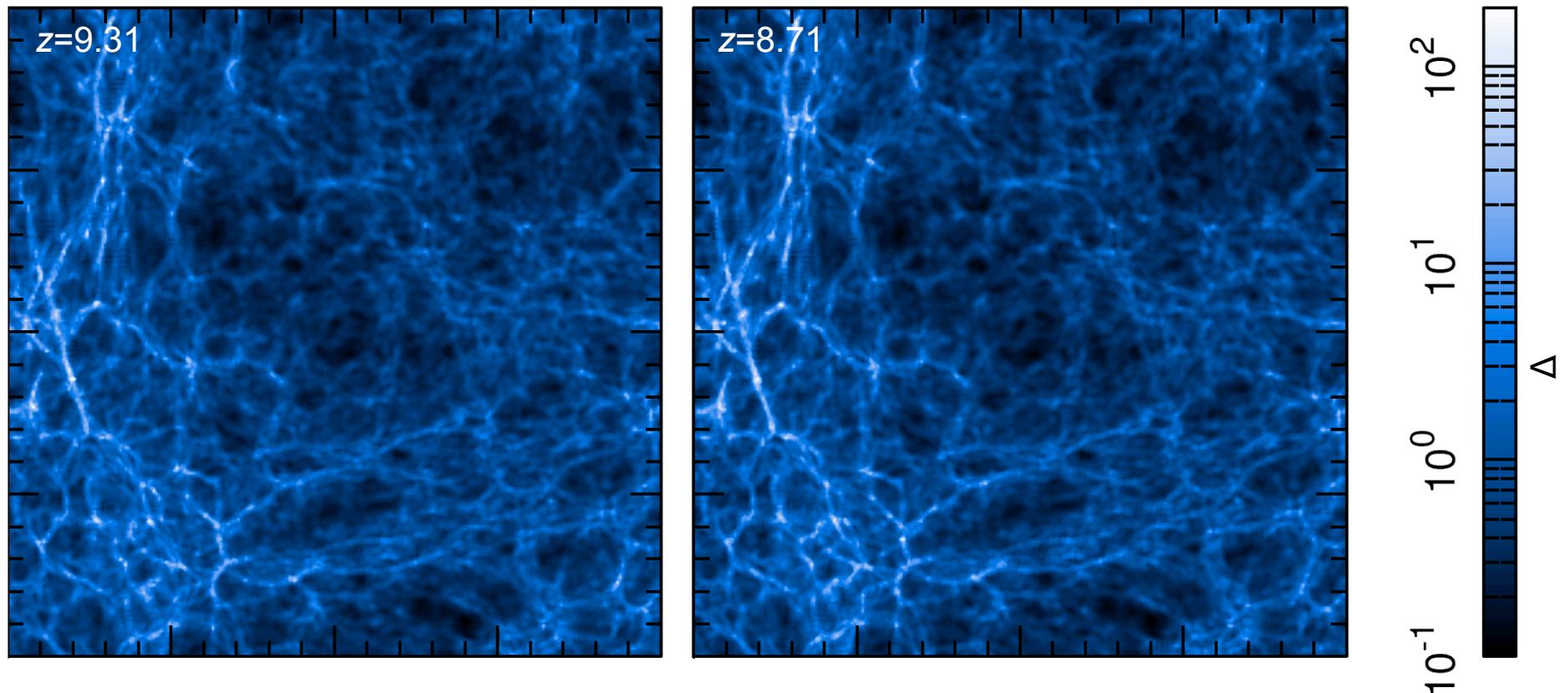


衛星銀河に関する
最近の研究

紫外背景輻射の影響

- 一様で時間発展する紫外背景輻射を入れた宇宙論的シミュレーションを行う
 - 宇宙再電離は $z = 9$ に起こったと仮定
 - 標準的な背景輻射のスペクトルと時間進化を仮定
- ダークハローからのバリオンの喪失に紫外背景輻射がどのような役割を果たすかを明らかにする

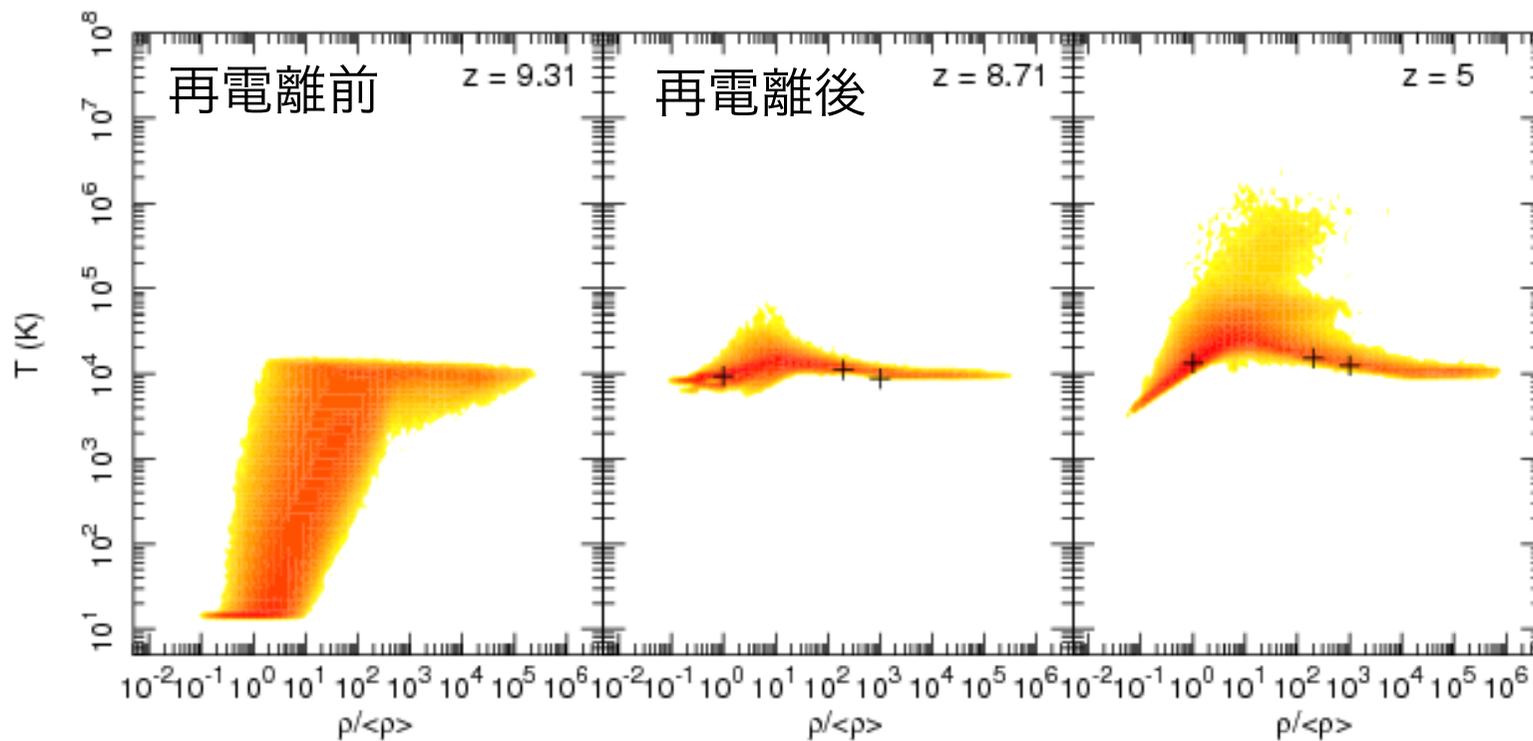
ガスの分布



ガスの overdensity ($\Delta = \rho / \langle \rho \rangle$). 左が再電離直前, 右が直後. 右の方がフィラメント状の構造が蒸発して消えてるはず (私にはわかりませんが).

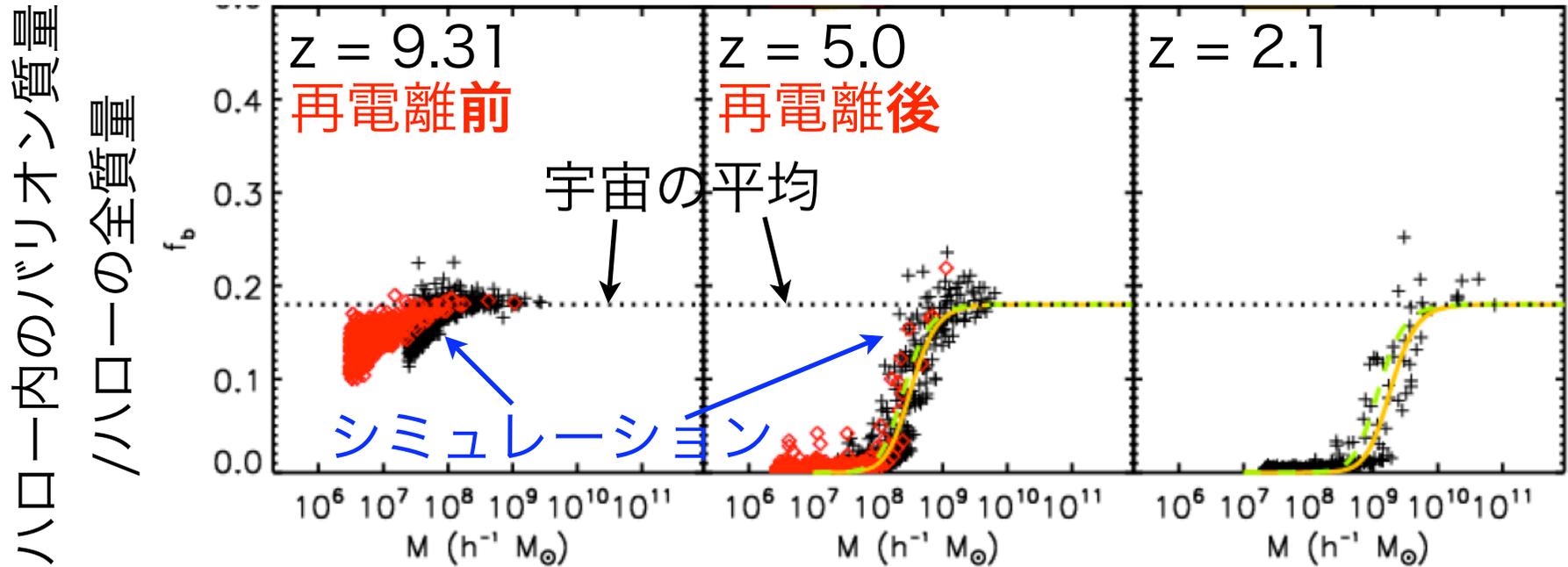
ガスの温度の進化

ρ - T 平面上でのガスの分布: +は $\Delta = \rho / \langle \rho \rangle = 1, 200, 1000$ での平衡温度。殆どのガスは平衡温度を持つことがわかる



紫外背景輻射を指定すればガスの温度は密度の関数として与えられる

ハロー内のバリオンの割合



ハロー内の全質量

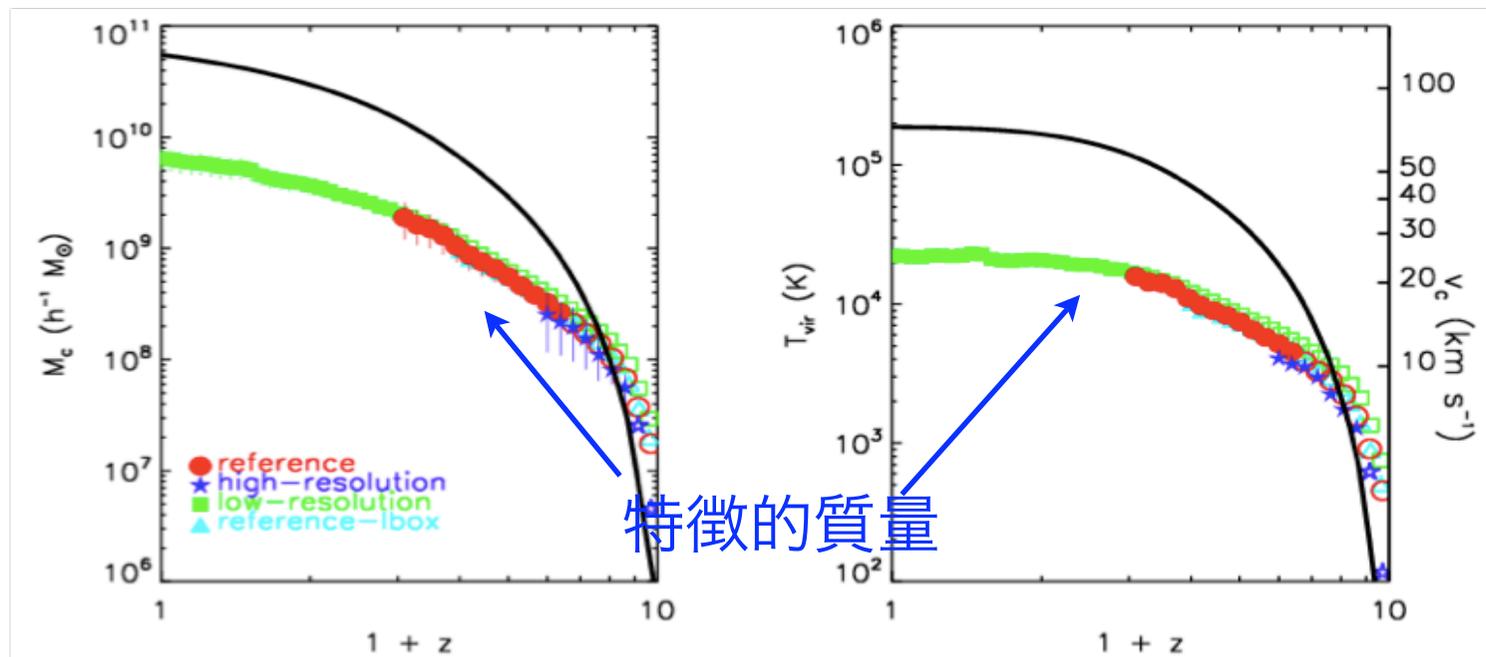
- 宇宙再電離前は、全てのハローが宇宙平均と同じ割合のバリオンを含んでいる
- 再電離後は、宇宙平均と同じだけ含むハローとほとんどバリオンを持たないハローを分ける特徴的質量が存在

特徴的質量

- フィッティング関数

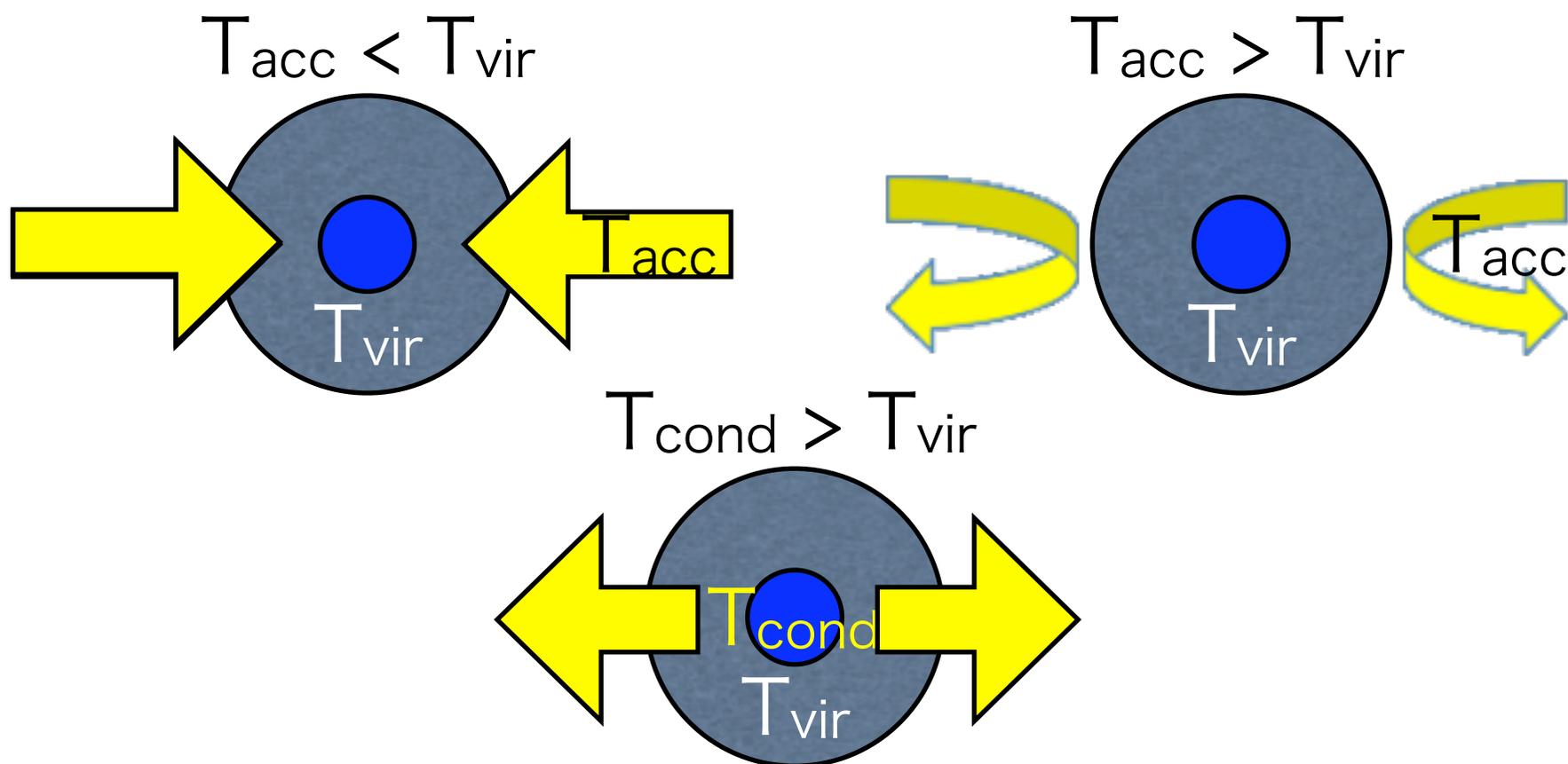
$$f_b = \langle f_b \rangle \left[1 + (2^{\frac{\alpha}{3}} - 1) \left(\frac{M_c}{M_{tot}} \right)^\alpha \right]^{-\frac{3}{\alpha}}$$

を用いて特徴的質量 M_c を決定する. $M_{tot} = M_c$ のハロー内のバリオンの割合は宇宙平均の半分となる



赤方偏移 + 1

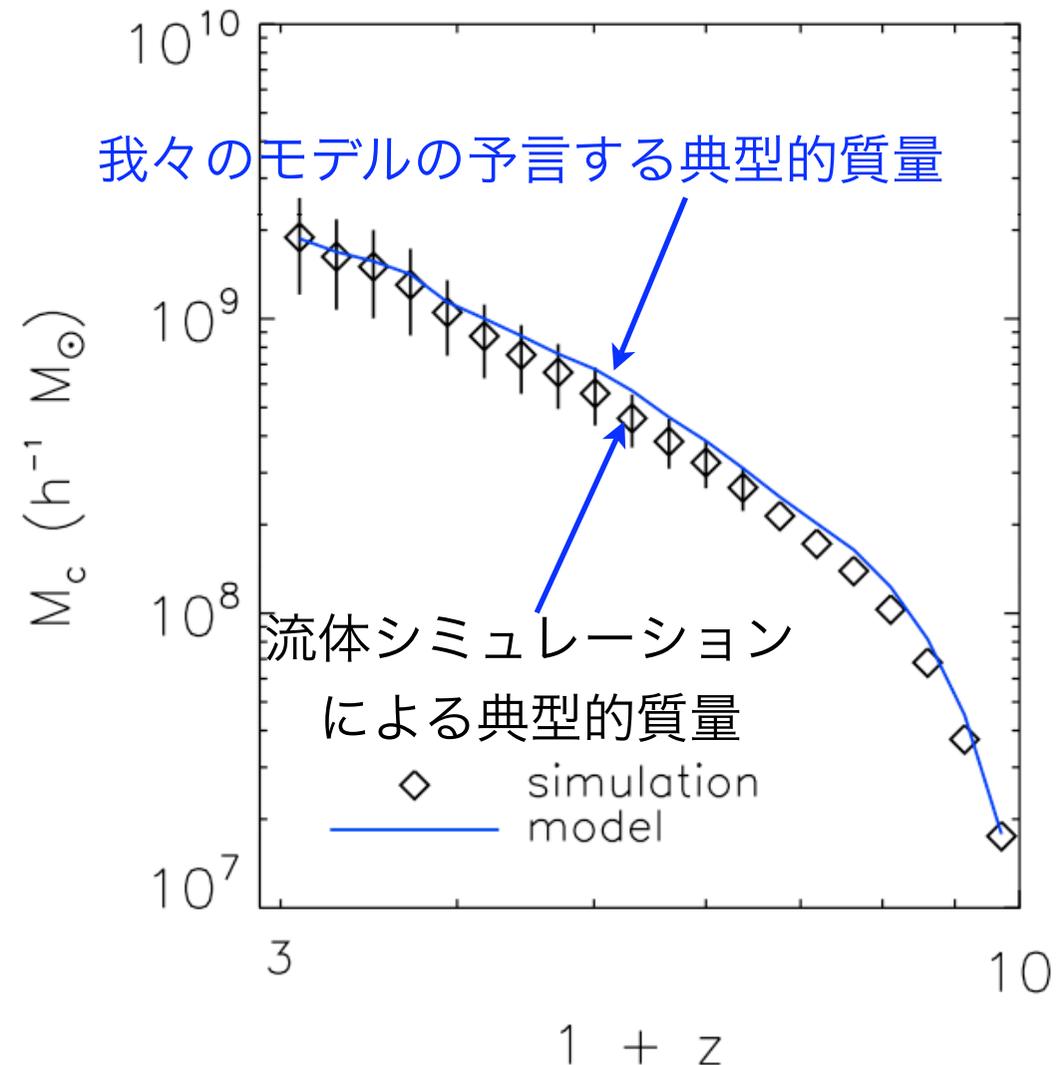
特徴的質量を決める物理



- ハローの縁の密度は $\Delta \sim \Delta_{\text{vir}}/3$ で近似できるので $T_{\text{acc}} \sim T_{\text{eq}}(\Delta_{\text{vir}}/3)$ と思って良い

ダークハローの合体 形成史を考慮

- シミュレーションからハローの合体形成史を作成し、先ほどのモデルを適用
- モデルの予言は流体入りの計算をほぼ完全に再現
- ガスのハローへの降着・蒸発はビリアル温度とガスの温度で決まる



衛星銀河の性質と 銀河風の影響

- 次に銀河風 (超新星爆発) による効果を考える
- 銀河風の駆動メカニズムは未だに詳しく理解されていないので、現象論的なモデルを用いる

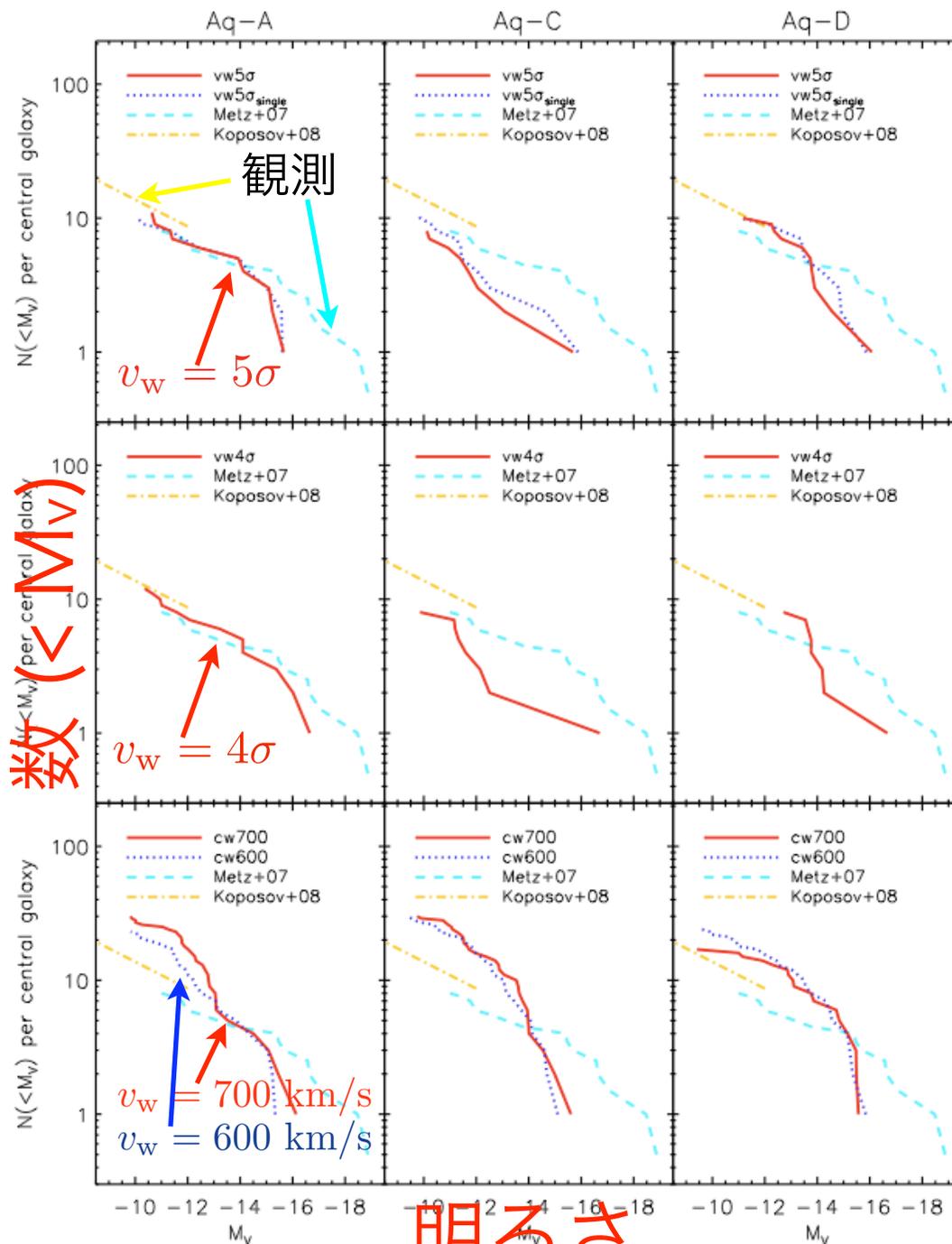
銀河風モデル

- 超新星爆発のエネルギーは全て、銀河風の運動エネルギーに使えると仮定する
- 銀河風は、その速度 v_w と単位星形成当たりの銀河風発生率 η_w で特徴付けられる $\dot{M}_w = \eta_w \dot{M}_*$
- constant wind model: $v_w = \text{const.}$ and $\eta_w = \text{const.}$
銀河形成シミュレーションでよく使われている
- variable wind model: $v_w \propto \sigma$ and $\eta_w \propto \sigma^{-2}$
 σ は一次元のダークマターの速度分散
 - 脱出速度に対する銀河風の速度は銀河によらず一定
 - **小さな銀河でより多くの銀河風が発生**

シミュレーション

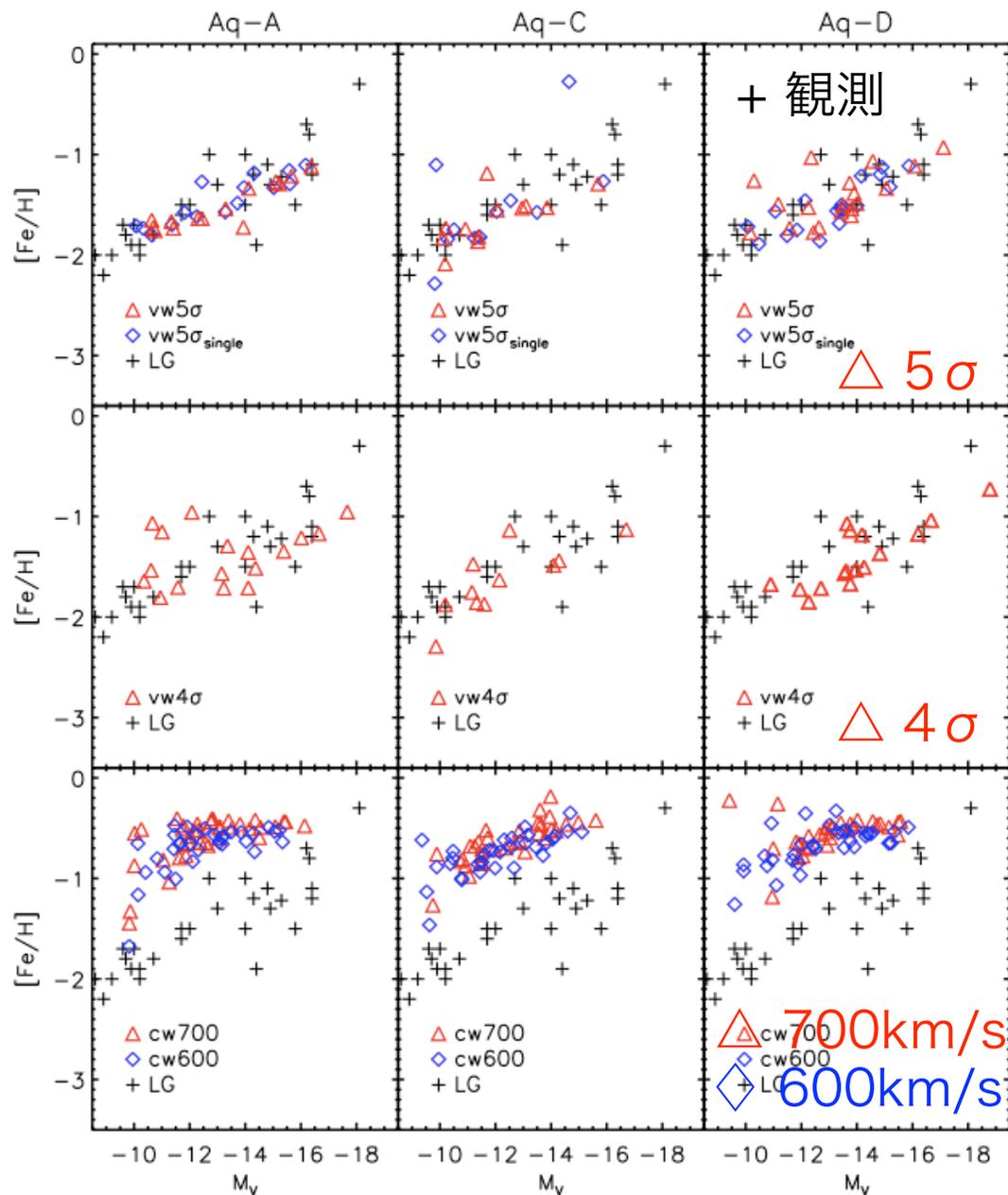
- 天の川銀河のホストになりそうなハローを3つ $100 h^{-1} \text{ Mpc box}$ から探してきて, 高解像度で re-simulation
- さっきと同じ紫外背景輻射を仮定 ($z_{\text{re}} = 9$)
- 金属量に依存する冷却/加熱関数

衛星銀河光度関数



- 同じモデル, 同じようなハローでも光度関数は様々
- $v_w \propto \sigma$ のモデルは faint end を上手く再現
- $v_w = \text{const.}$ のモデルは矮小衛星銀河を作り過ぎる

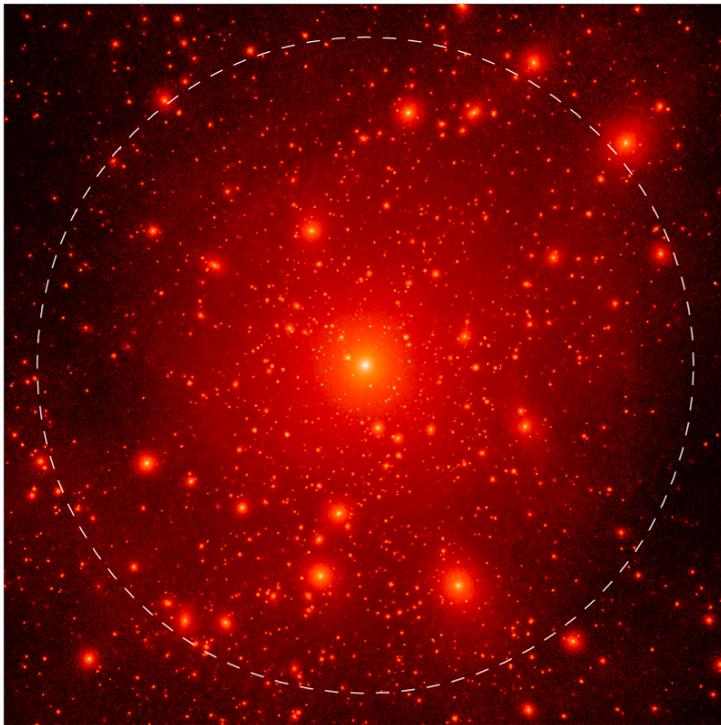
光度-金属量関係



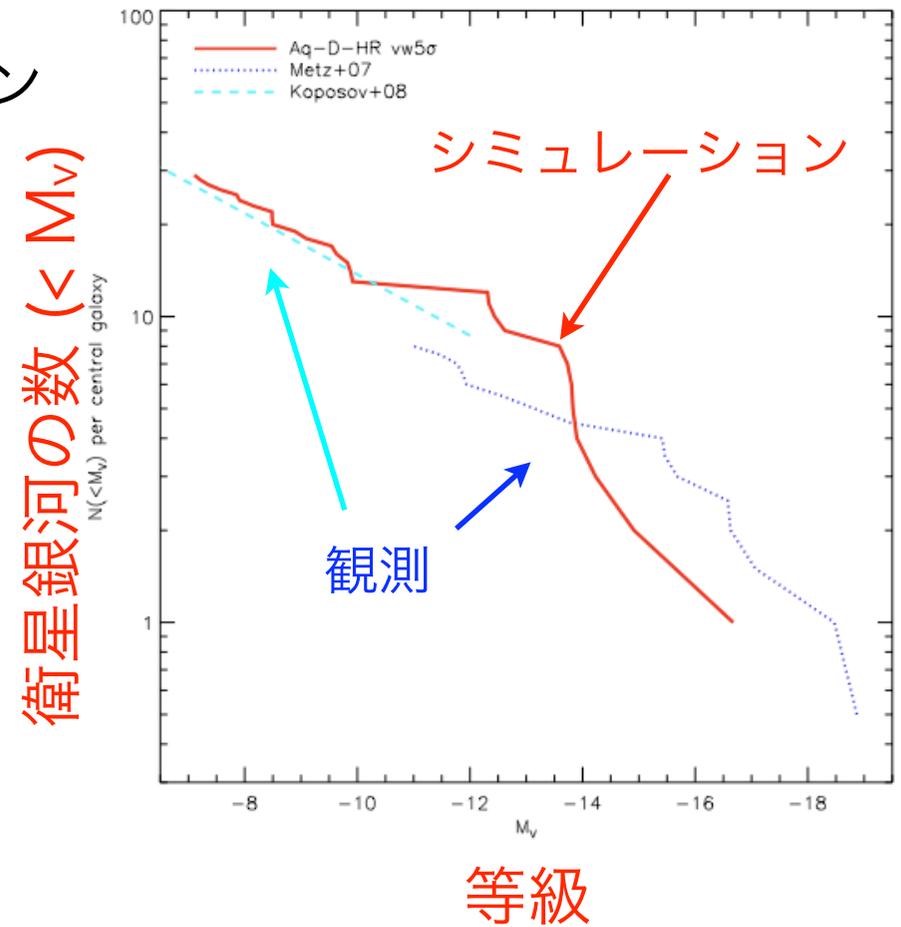
- $V_w \propto \sigma$ (銀河風の初期速度が銀河の速度分散に比例) を仮定すると衛星銀河の光度-金属量関係を再現出来る
- $V_w = \text{const.}$ (銀河によらず一定) だと暗い衛星銀河の金属量が大きくなりすぎる

高解像度シミュレーション

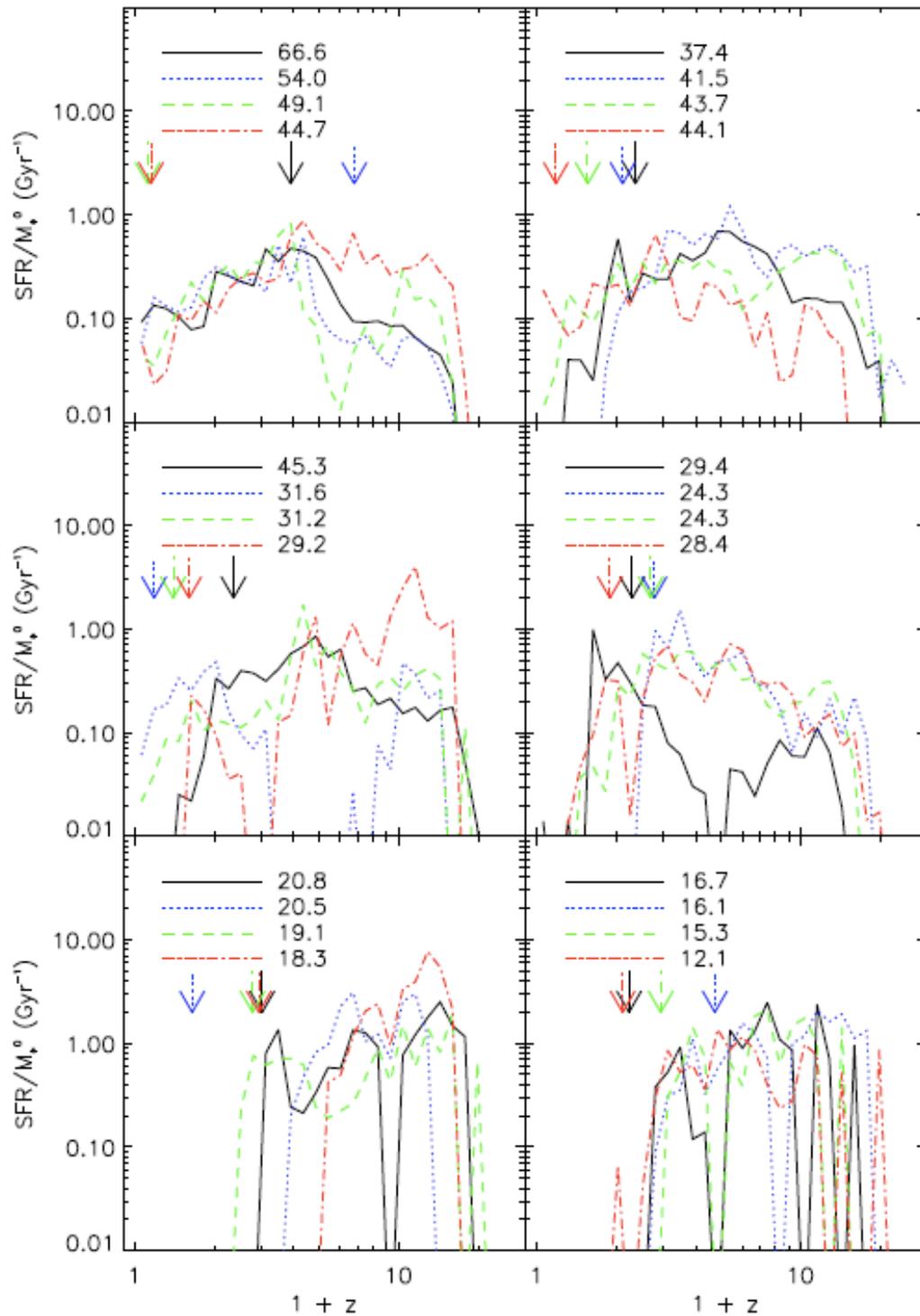
- 同じダークハロー (Aq-D) を質量解像度を一桁上げてシミュレーション
- 世界最高分解能のシミュレーション
- 光度関数は $M_V \sim -7$ まで観測と一致



ダークマターの分布

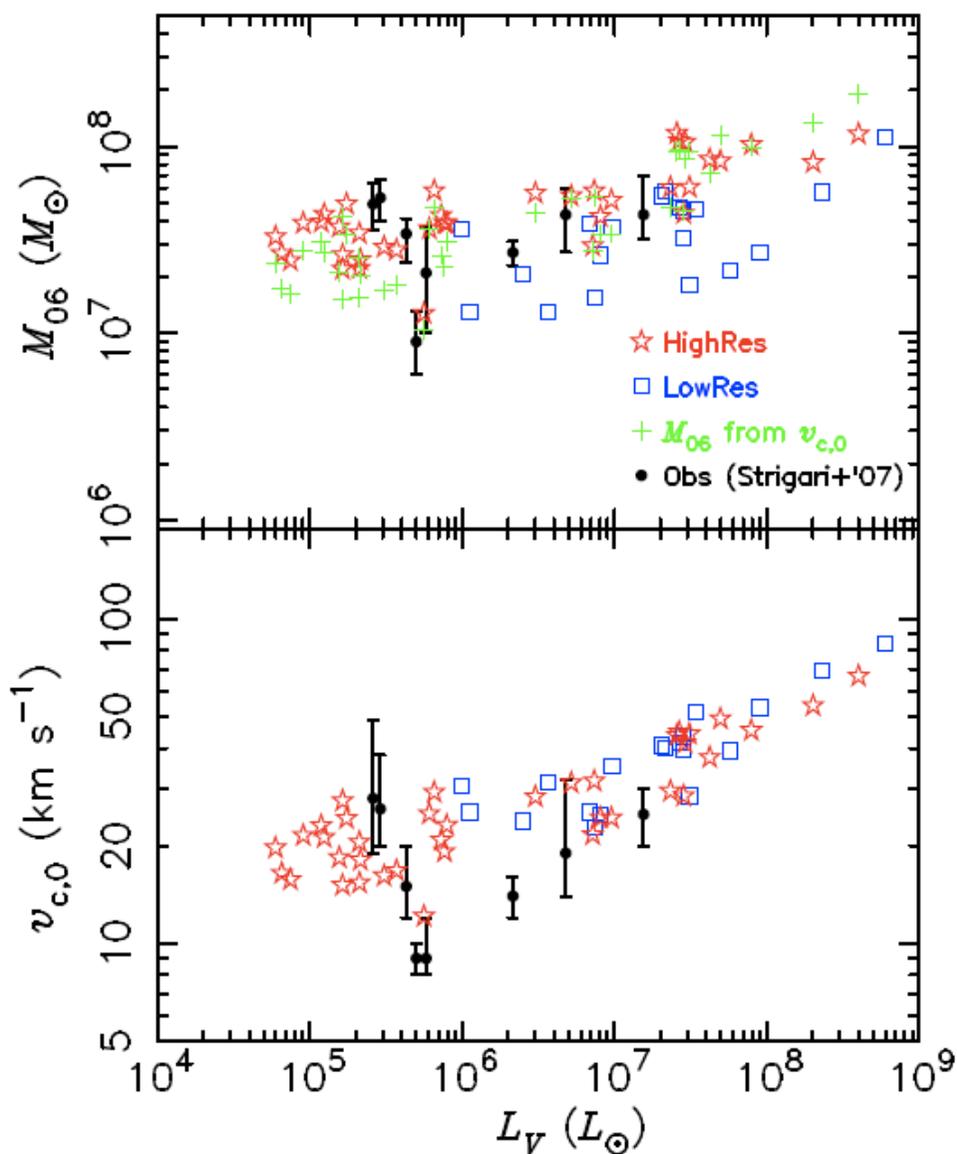


衛星銀河の 星形成史



- 星形成率がギザギザ (sporadic)
- 小さいハローでは衛星銀河になることで星形成が止まっている
- 宇宙再電離 ($1+z=10$) の影響は見えない

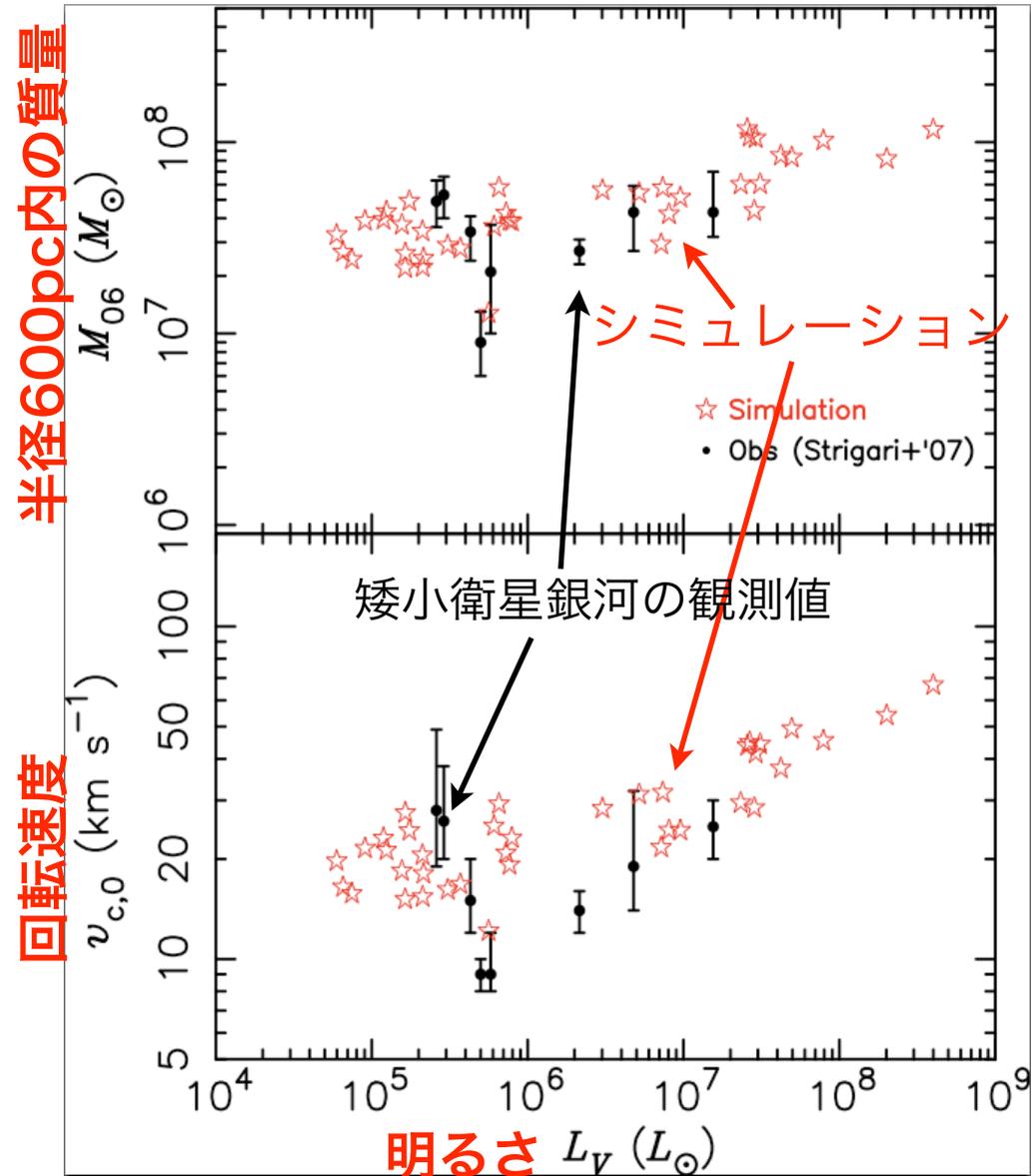
最低ハロ質量



- さっきの高解像度シミュレーションを用いて600pc 内の質量をプロット
- 星形成の特徴的なスケールを見てるに過ぎない
- 最低回転速度も存在する

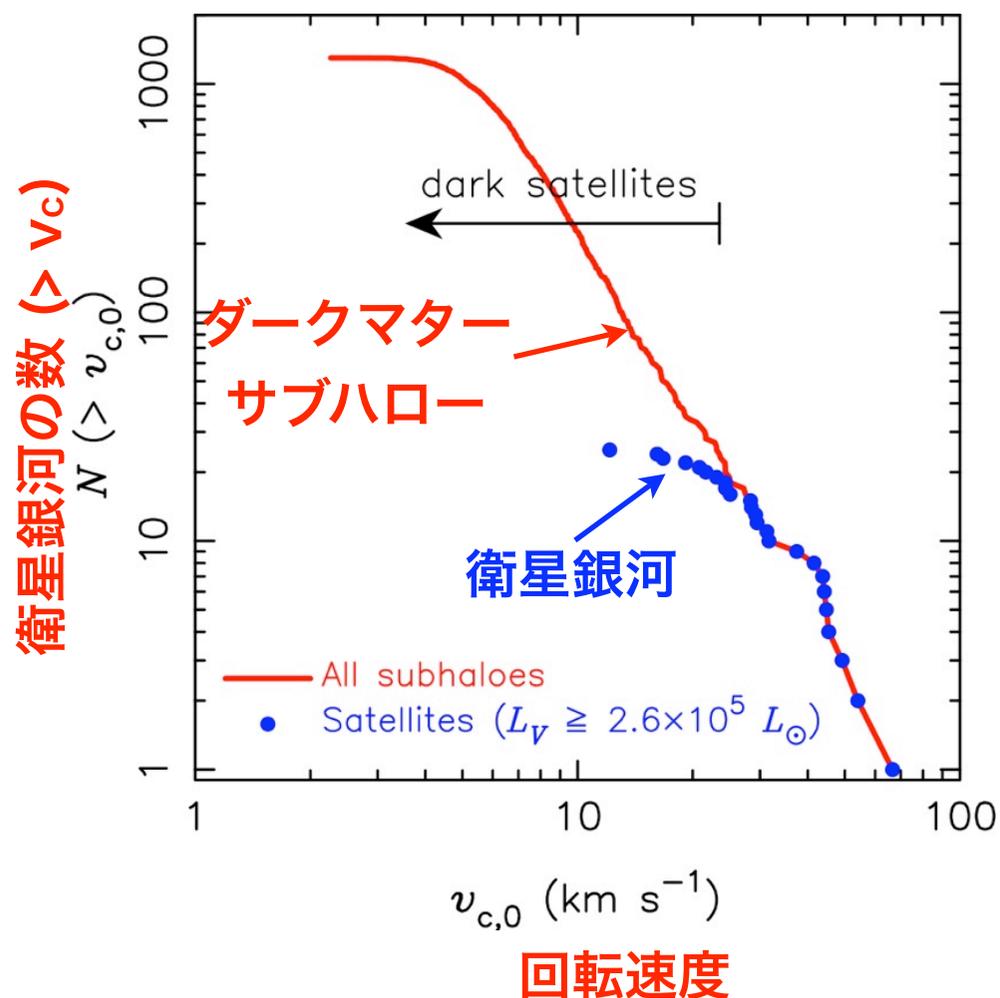
衛星銀河の最低ハロー質量

- シミュレーションは衛星銀河 (dwarf spheroidals) の600 pc 内の質量 ($\sim 2 \times 10^7 M_{\odot}$) を自然に再現
- 回転速度にも下限値 (~ 20 km/s)
- ダークハローの質量そのものに下限値があるのではなく、銀河を形成できるダークハローの質量に下限値がある



衛星銀河の速度関数

- 回転速度 ~ 25 km/s 以上のサブハローは全て目に見える衛星銀河を保持
- $v_c < 25$ km/s 以下には明るい衛星銀河を持つものと持たないものがある
- $v_c < 23.5$ km/s 以下には明るい衛星銀河を持つものと、全く星を持たないサブハロー（ダークサテライト）が存在

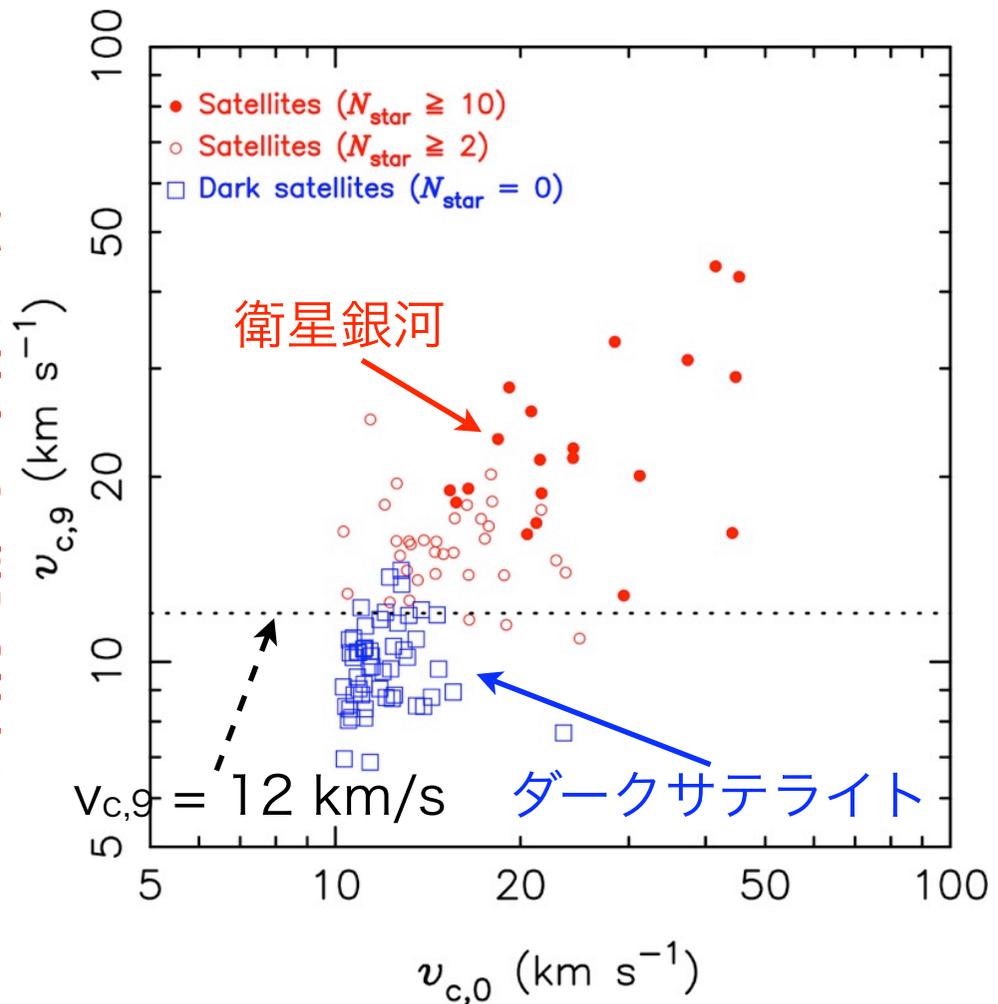


ダークサテライトの起源

- 現在 ($z = 0$) の衛星銀河とダークサテライトの回転速度をそれらの祖先の宇宙再電離時 ($z = 9$) の回転速度と比較
- 衛星銀河を形成できるハローとできないハローを分ける回転速度が宇宙再電離時に存在

$$\underline{v_{c,9} \sim 12 \text{ km/s}}$$

宇宙再電離時の回転速度



現在の回転速度

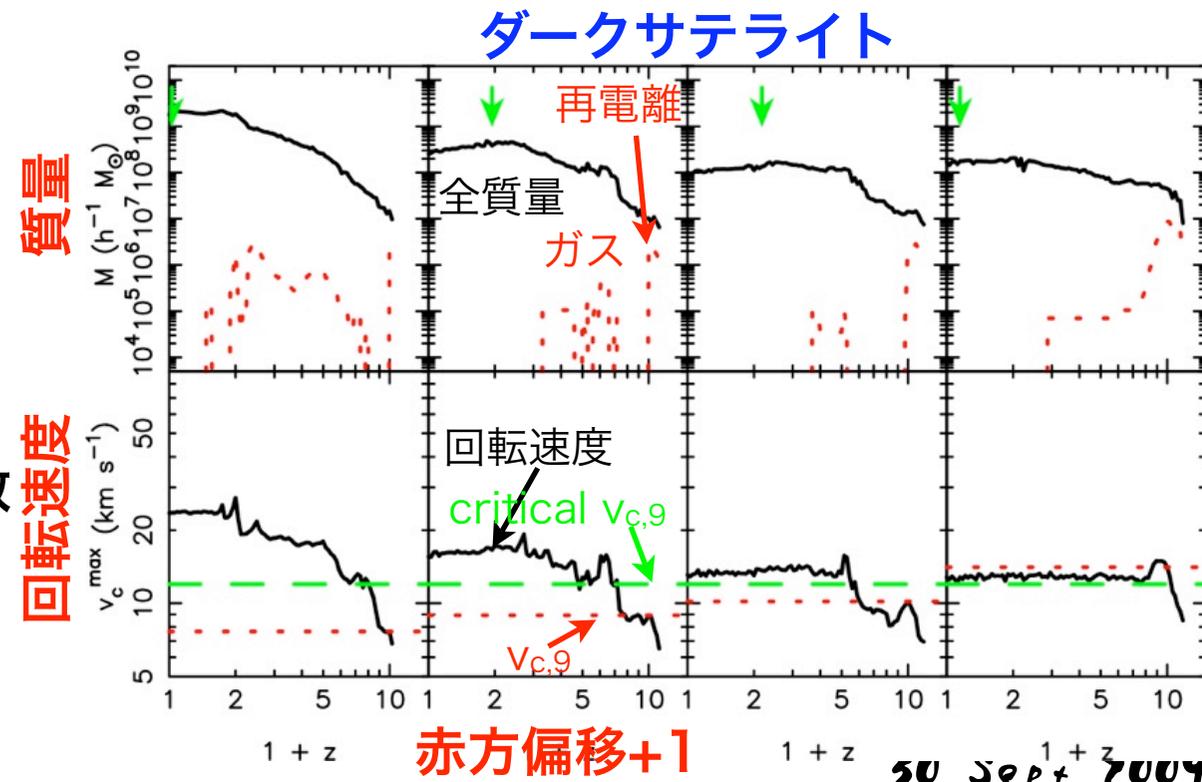
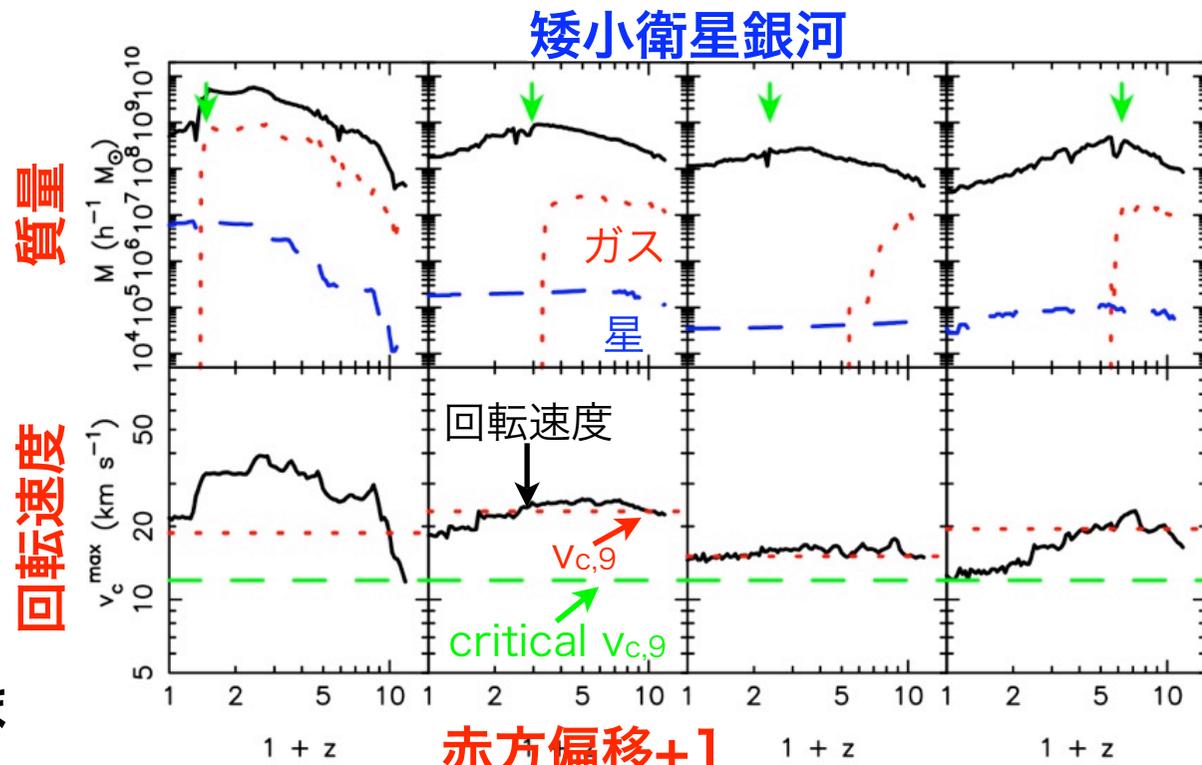
形成史

矮小衛星銀河

- 再電離時に $v_c > 12$ km/s
- 再電離の影響が見えない
- より大きなハローに飲み込まれる際にガスを失う

ダークサテライト

- 再電離時に $v_c < 12$ km/s
- 再電離でガスが蒸発する
- その後も星を作れない
- 天の川銀河の周りには多数のダークサテライトが存在



まとめ(志)

- 衛星銀河問題についてはCDMでおそらく問題ない (角運動量問題も大丈夫).
- 銀河風の駆動メカニズムはまだよく理解されていない
- これからはバリオンの物理を理解することが大事

ましめ (式)

- 初期条件は決まった
 - これからいよいよ, ALMA, JWST, 30m級望遠鏡で銀河の形成期の姿が見えてくる
 - 観測で得られるのはあくまでスナップショット
 - スナップショットを繋げるには理論が不可欠
- 
- これから一番面白くなる

連絡事項 (巻)

- このスライドを
<http://www.ccs.tsukuba.ac.jp/Astro/Members/takashi/lectures/index.html>
からダウンロード可能にしておきます.
- 同じページにある “formation of cosmic structure” というリンクに前半部の構造形成のより詳しい解説あり

連絡事項 (弐)

- レポートの提出について
 - 単位が必要な人は第4~6回のセミナーに関してレポートを提出すること
 - 提出期限: 平成21年10月21日 (水) 16:00
 - 場所: D棟3階 物理学専攻事務室前のレポート提出用ボックス
 - レポート課題
 - 第4~6回の物理学セミナーの一つを選択し, その内容を, A4 レポート用紙一枚程度にまとめる
 - **必修です!** (担当教員名を必ず記入すること)