
CDM 宇宙に於ける銀河・銀河団の形成

長島雅裕(京大理)

masa@scphys.kyoto-u.ac.jp

Introduction

銀河や銀河団を理解するために必要なこと:

- 宇宙論的なタイムスケールで形成された
 - ある時刻での銀河の姿はその歴史に依る
 - 銀河団とは現在形成されつつある最大の天体
- ダークマターが作る構造形成の理解
 - 宇宙初期の密度揺らぎの成長
- ダークマターハロー内でのガス・星の物理の理解
 - バリオンのフェイズ間の進化
ホットガス $\longleftrightarrow$ コールドガス $\longleftrightarrow$ 星

何故銀河・銀河団形成が難しいか？

宇宙の進化と理論の枠組

0次: 平均密度の進化 → e.g. Freedman 方程式

→ H 、 Ω 、 λ 、 q 、 (p) : 解析解

1次: 線形密度揺らぎ → 線形化された揺らぎの進化

→ 理論的に明解

→ 揺らぎが小さい時代の成長を記述

→ CMB(宇宙背景輻射)

...



: **銀河団形成**

↑ (影響を与える)

高次: **銀河形成**



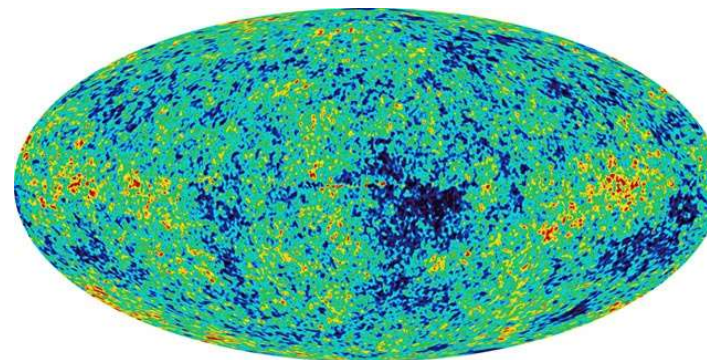
星形成、星間ガスの物理

Introduction 0次の宇宙

最近の高精度な宇宙観測が明らかにしたもの:

- 宇宙背景輻射、SNIa による膨張率の観測、など
- ・ 宇宙のエネルギー密度の7割はダークエネルギー
- ・ 3割弱は(冷たい)ダークマター → CDM
- ・ 4%程度がバリオン

→ 平均化された宇宙の
進化が(ほぼ)明らかに



WMAP による宇宙の温度揺らぎの観測
@ $z = 10^3$
<http://map.gsfc.nasa.gov/>

Introduction

今日の話:

1. ダークマターの構造形成
2. 銀河の形成過程において重要な物理過程を理解する。

これらを扱う有力な方法の一つである銀河形成の準解析的 (semi-analytic) モデル、及びそこから得られた結果について紹介します。

Dark matter – 密度揺らぎの成長

構造はどのようにして発展するか？

→ 宇宙初期に存在した微小な密度揺らぎが
自己重力により成長

– 重力は(第ゼロ近似)ダークマターが支配

→ ダークマターの構造形成の理解が不可欠

– “cold” dark matter → 空間的に小さい密度揺らぎが大

– 密度揺らぎの大きい場所から天体(ダークハロー)
を形成する

→ 小さい天体がまず形成され、
それらが合体して大きい天体を形成する

密度揺らぎの成長

線型領域:

ダークマターは冷たい→速度分散小

→ 流体近似が可能

→ 膨張する背景宇宙で流体の式を線型近似で解く

$\delta \propto a$ (スケールファクタ)

ただし $\Omega \neq 1$ ではずれてくる

非線型領域:

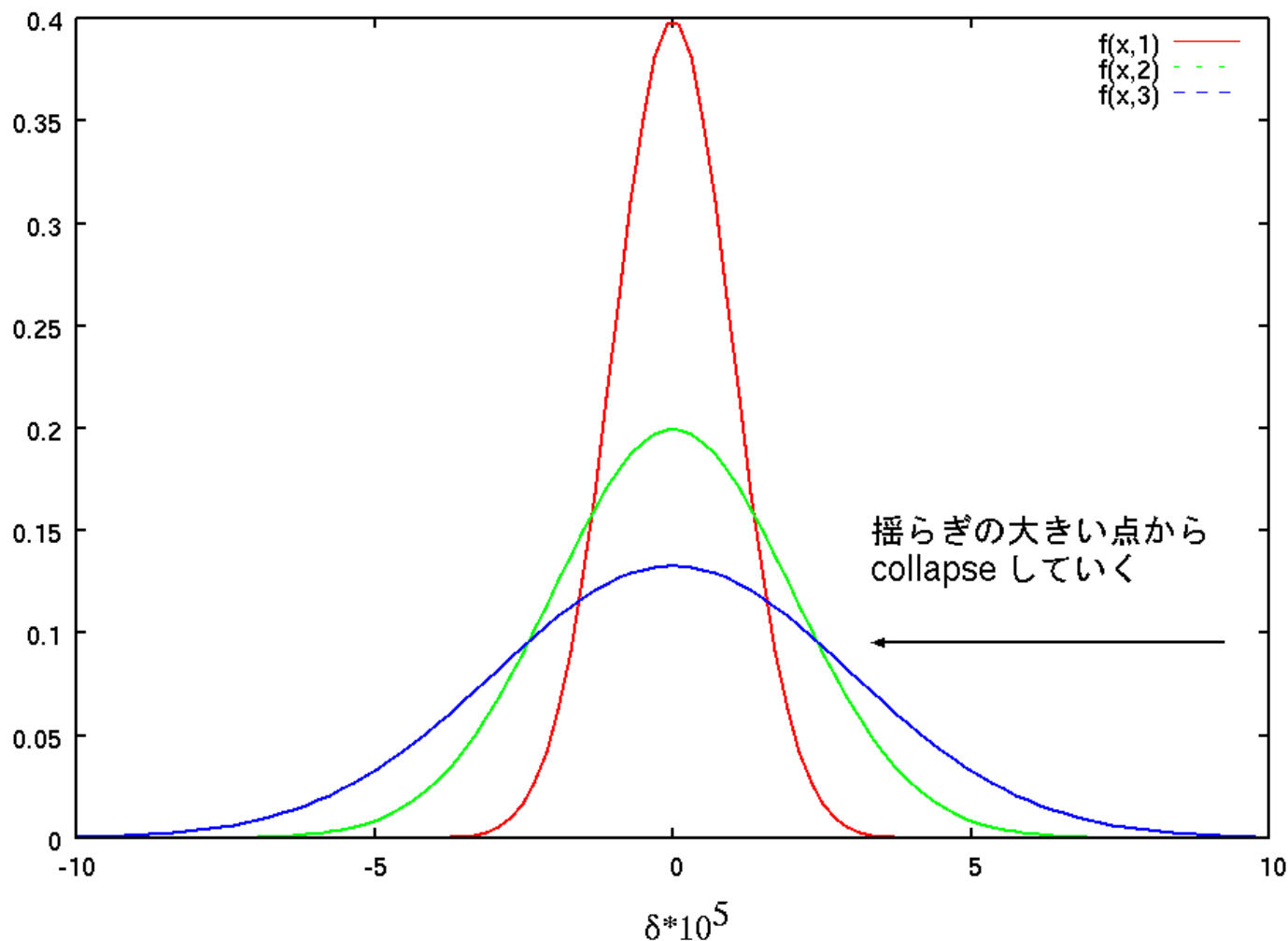
解くのは難しいので、球対称モデルを考える

$$d^2 R / d t^2 = -G M(< R) / R^2$$

これらの組合せで、初期の δ からいつその点が collapse するかがわかる

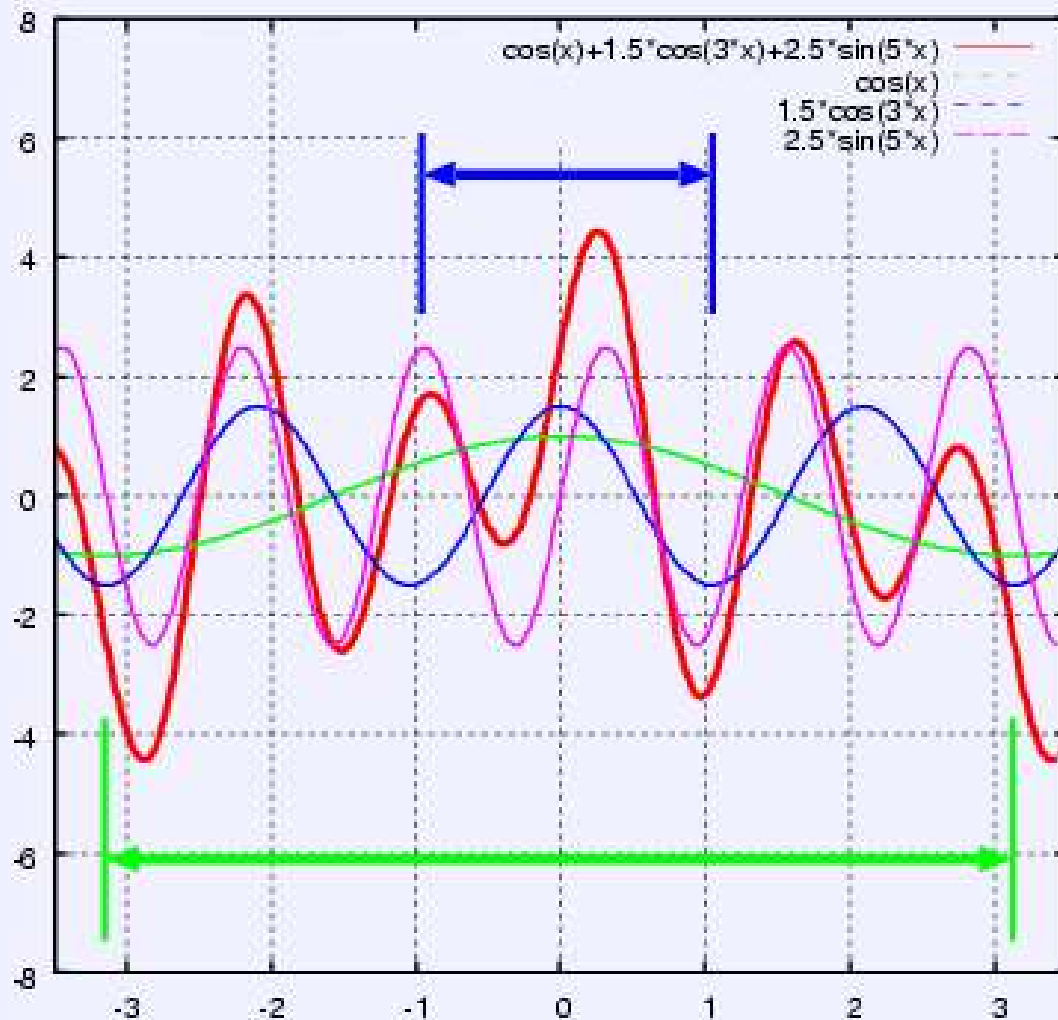
Gauss 分布

$$\delta(x, t) = [\rho(x, t) - \bar{\rho}(t)] / \bar{\rho}, \sigma^2 = \langle \delta^2 \rangle \leftarrow \text{分散は空間スケールによる (パワースペクトル)}$$
$$f(\delta) = \exp[-\delta^2 / 2\sigma^2] / \sqrt{2\pi\sigma^2}$$

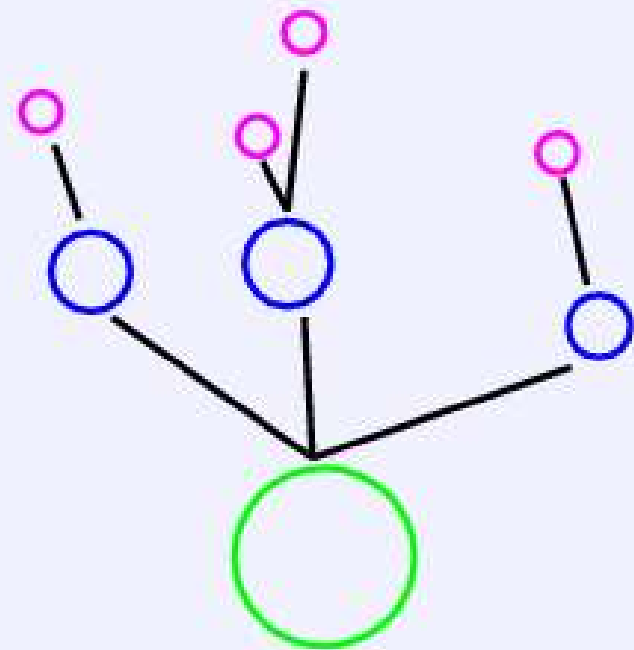


Dark matter

空間(=質量)的に小スケールの Fourier モードにパワーがある



揺らぎの高い点から
ハロー形成
→ biased formation

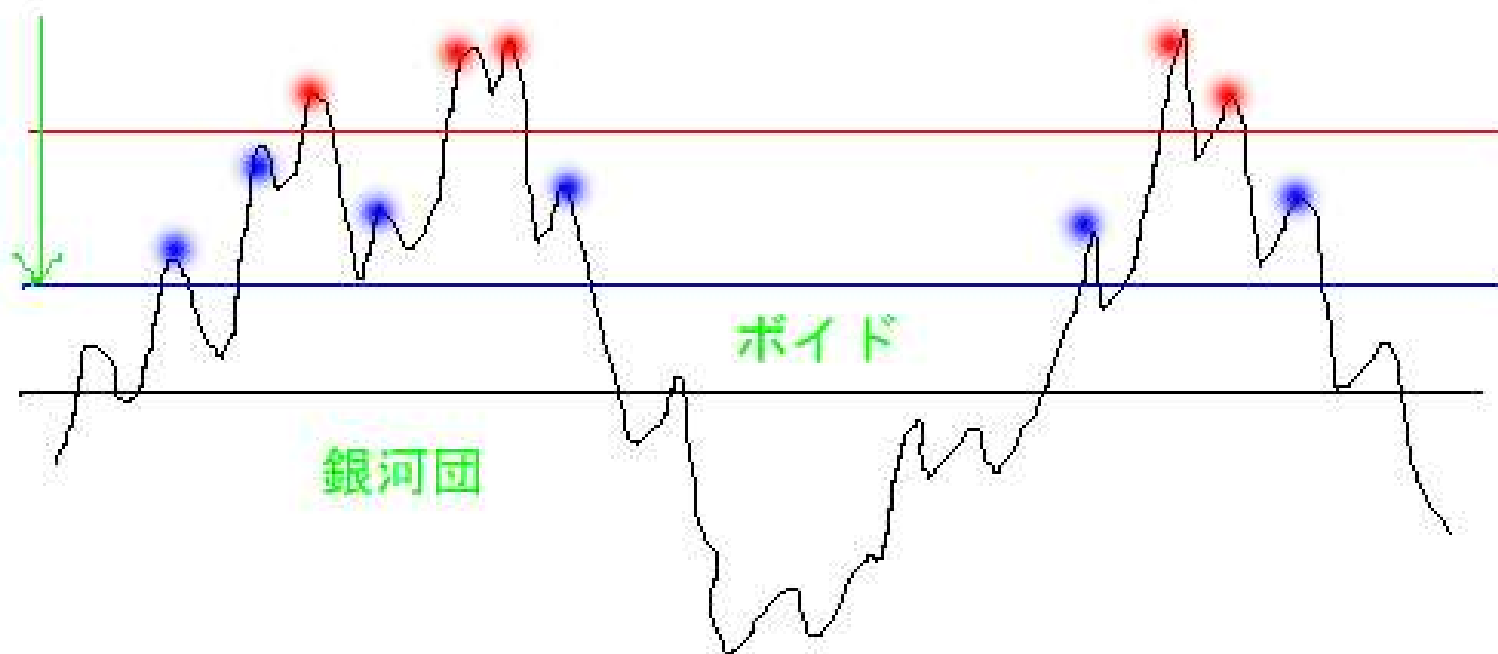


Hierarchical Clustering

バイアス

High- z では銀河(ハロー)の clustering が強い
→ダークマター分布に対する「バイアス」

徐々に低密度領域もcollapse



High- z ではハロー、銀河のクラスタリングが強い

準解析的手法

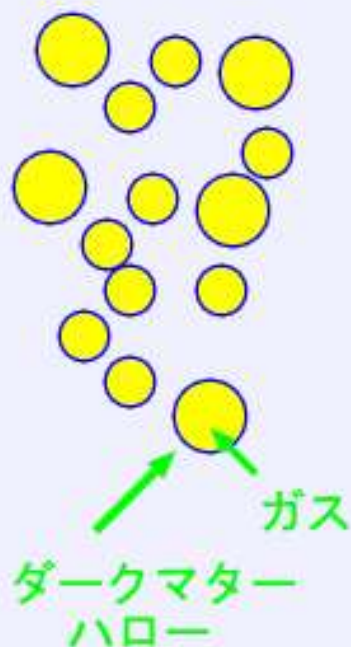
どのような方法で解析に臨むか？

- 数値流体シミュレーション
 - ・（きちんと解ければ）ダイナミクスを追える
 - ・空間構造を調べられる
 - ・分解能の制限から、統計を調べるのは難しい
- 準解析的手法
 - ・よくわかっているダークマター分布の進化は、解析モデルや N-body 計算にまかせる
 - ・どのような物理過程が重要かが見えやすい
 - ・観測と直接比較できる
 - ・統計量を調べるのに最適
 - ・近年の大規模サーベイの解析は、多くの場合準解析的モデルと比較している
 - 実用的

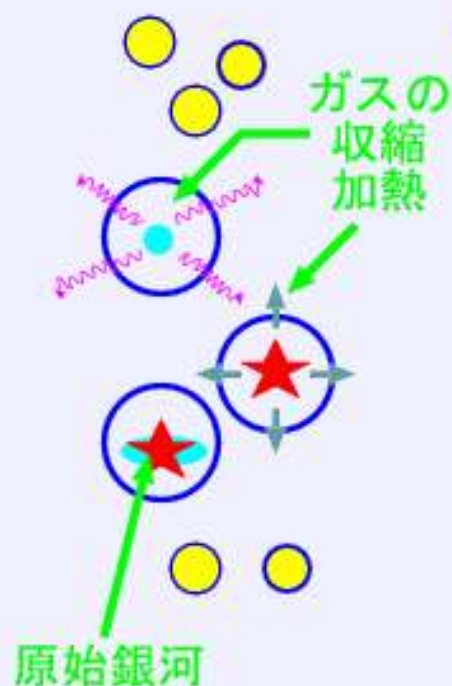
階層的構造形成説に基づく銀河形成シナリオ

宇宙初期

現在



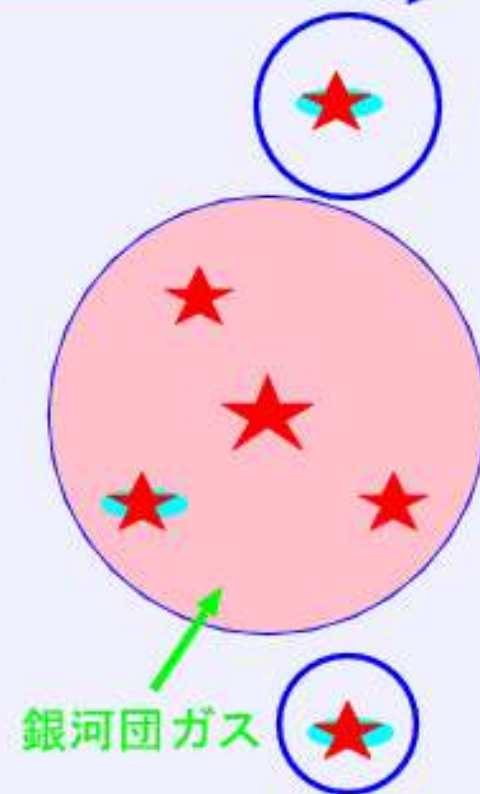
自己重力による
初期天体の形成



ガスの冷却による収縮,
星形成,
超新星爆発による
ガスの加熱



銀河同士の合体



-現在の宇宙-
銀河団の形成
我々の銀河の形成

ダークハローの形成史

ダークハローの合体形成史はほぼ理解された

← 解析的及び N-body 計算

→ Hierarchical Clustering: CDM からの自然な帰結

密度揺らぎの分布に基づき確率的に与えられるハローの形成史を、N-body 計算やモンテカルロ法により求める

→ 青丸のシーケンスを得る



バリオンの物理

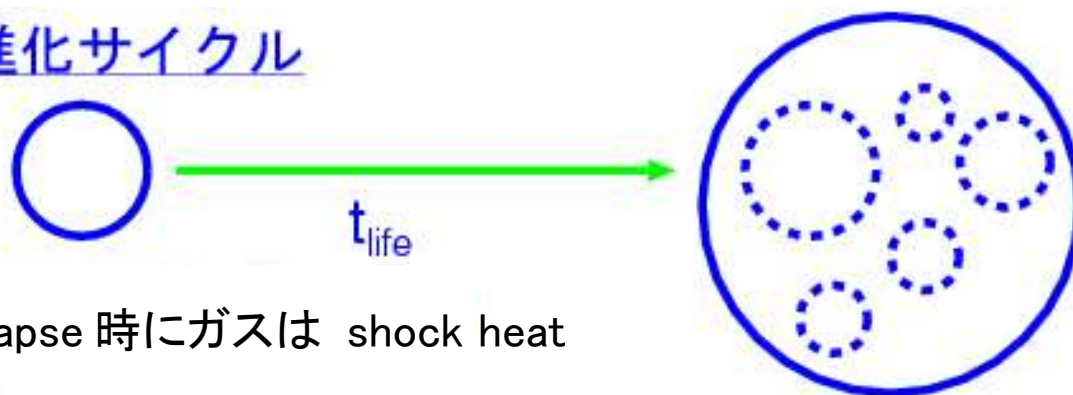
バリオンガス…ダークマターの重力により、
ハローに閉じ込められている

collapse したダークハロー（が作る重力ポテンシャル）
の中で、何が起きるか？

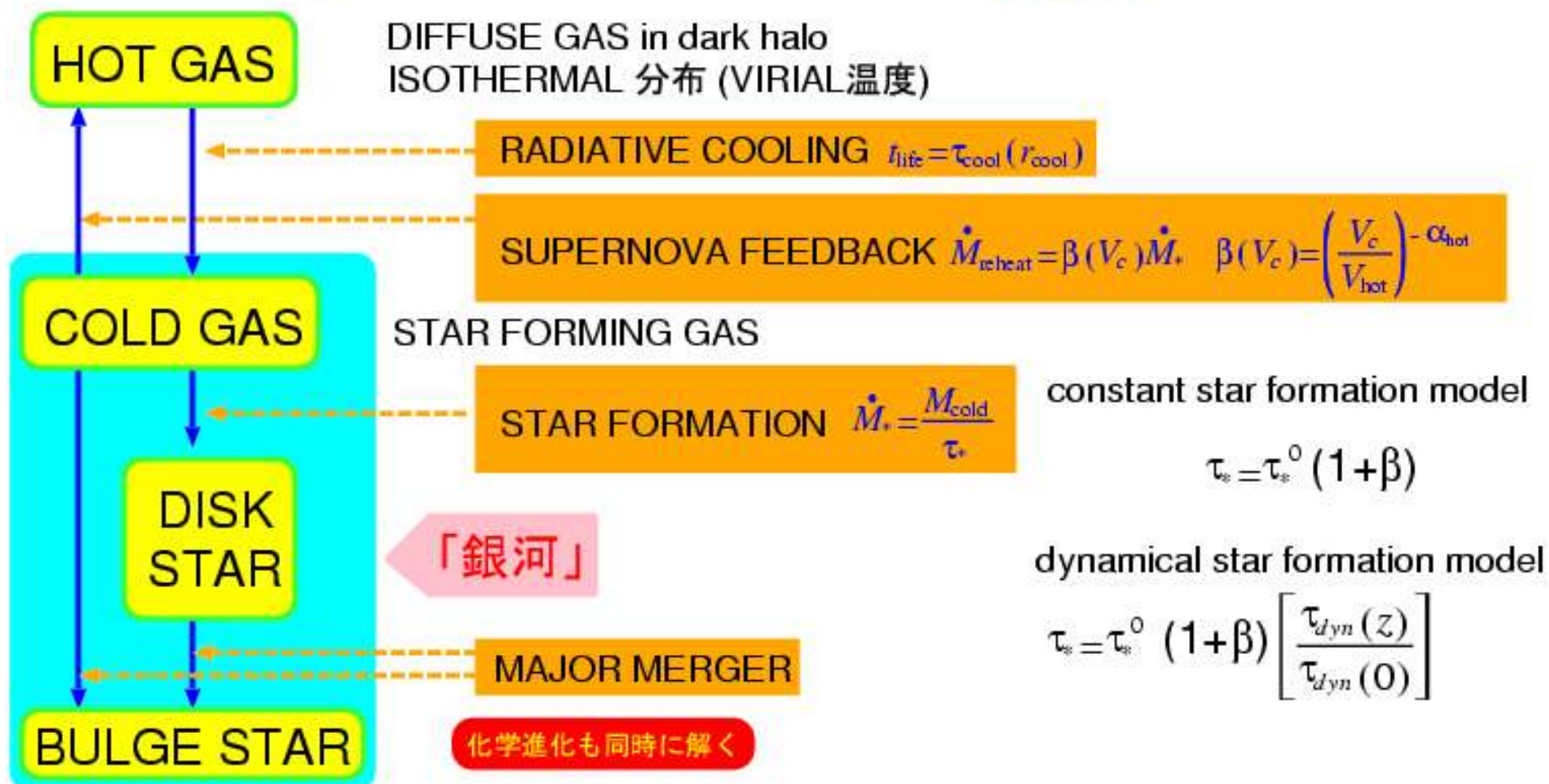
最低限考慮しなければいけない物理過程

- ・ハロー形成に伴う diffuse gas の shock heating
- ・ガスの冷却（銀河ガス／星間ガスの形成）
- ・冷えたガスからの星の形成
- ・超新星爆発によるガスの加熱
- ・銀河同士の合体
- ・種族合成（光度計算）、ダストによる減光
- ・爆発的星形成
- ・ガス放出に伴う力学的応答
- ・・・・

バリオンガスの進化サイクル



ハローの collapse 時にガスは shock heat

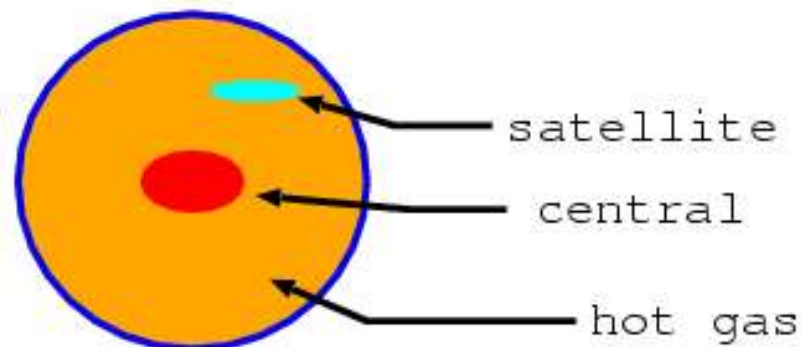


銀河同士の合体

ダークハローが合体した時：

- ・ホットガスはすぐに混ざる
- ・銀河を**中心銀河**、**サテライト銀河**に分ける

↑
最も大きいハローの中心銀河を
新しいハローの中心銀河とする



銀河が合体する条件：

$t_{\text{elapse}} > t_{\text{fric}}$ (dynamical friction time-scale)

$\Delta t > t_{\text{coll}}$ (random collision)

satellite-central merger
satellite-satellite merger

合体のタイプ：

同程度の質量の
銀河同士の合体：

STARBURST + BULGE FORMATION
(MAJOR MERGER)

それ以外：

小さい銀河は大きい銀河のディスクになる
(MINOR MERGER)

最終的に、B-band B/D により形態を決定

bulge-dominated: Elliptical
intermediate: S0
disk-dominated: Spiral

銀河の見かけの明るさ

星の種族合成(intrinsic luminosity)
Kodama & Arimoto (1997)

表面輝度による選択効果(観測の検出限界に依る)
銀河のサイズ:

S...specific angular momentum 保存

E...virial radius of baryonic component
(mass loss による膨らみを考慮)

POPULATION
SYNTHESIS

SELECTION
EFFECT

INTERGALACTIC
HI CLOUDS

INTERNAL
DUST
ABSORPTION

銀河間中性水素雲による吸収
(Yoshii & Peterson 1994)

ダストによる内部吸収

$\tau \sim (1+z)^{-1} M_{\text{cold}} Z_{\text{cold}} / r_e^2$ に比例

Galactic extinction curve + screen model



準解析的モデルによる最近の結果

宇宙論モデル: $\Omega_0=0.3$, $\lambda=0.7$, $h=0.7$, $\sigma_8=0.9$, $\Omega_b=0.048$

不定性の大きい物理過程:

- ・超新星爆発による加熱効率 → 光度関数
- ・星形成のタイムスケール → 星間ガス質量
- ・銀河の合体のタイムスケール → 光度関数

その他必要に応じてモデルを導入

- ・冷えるガスの角運動量保存 → ディスクサイズ
- ・イールド → 重元素量、星の色
- ・メタルーダスト比 → 減光量
- ...

今日は、 ν GC(Numerical Galaxy Catalogue; 長島、矢作、榎、吉井、郷田)、GALFORM(長島、Lacey, Baugh, Frenk, Cole)の結果について示します。

光度関数

もっとも基本的な統計量

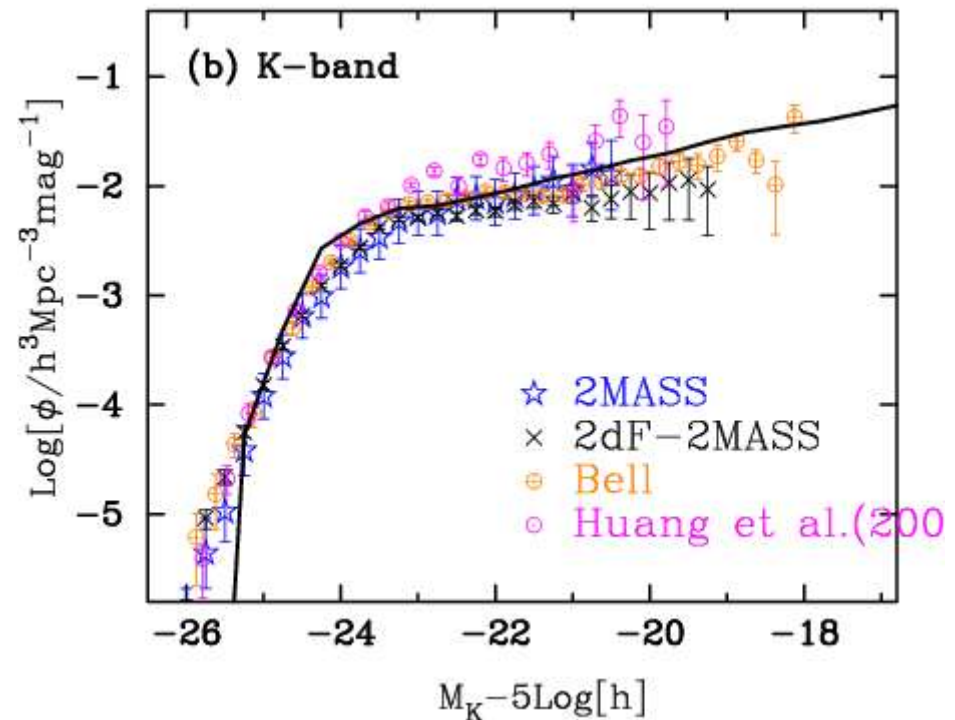
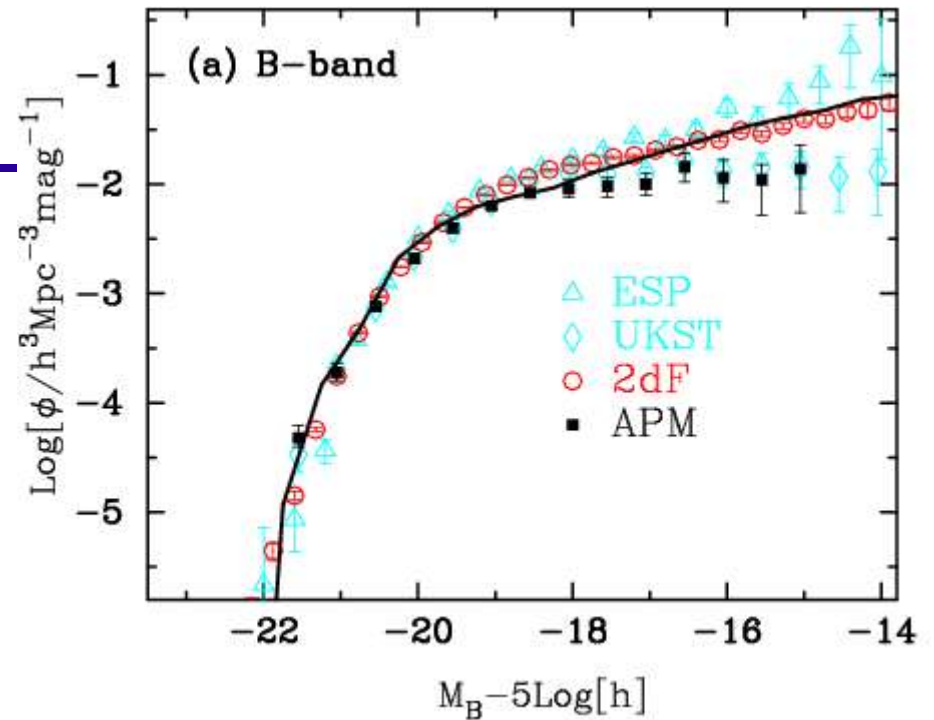
・光度ごとの銀河の個数密度

全ガスのうち、どれくらいが
星になるか？

→ フィードバックに強く依存

銀河同士の合体が激しいと、
小さい銀河が減り大きい銀河
が増える

→ 合体のタイムスケール

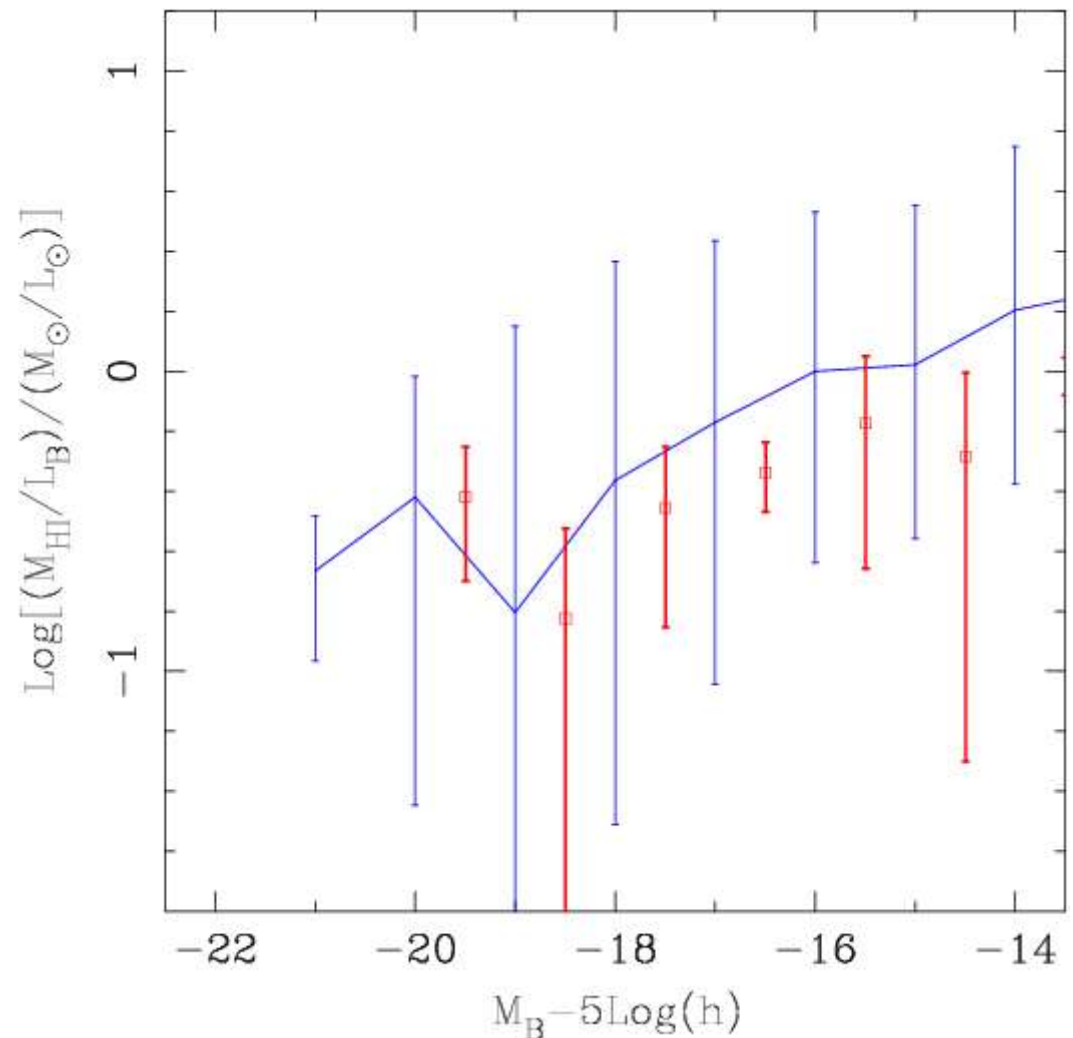


ガス質量－光度比

星形成タイムスケールへの
重要な制限

→ 速く星形成が起こると
ガスの消費大

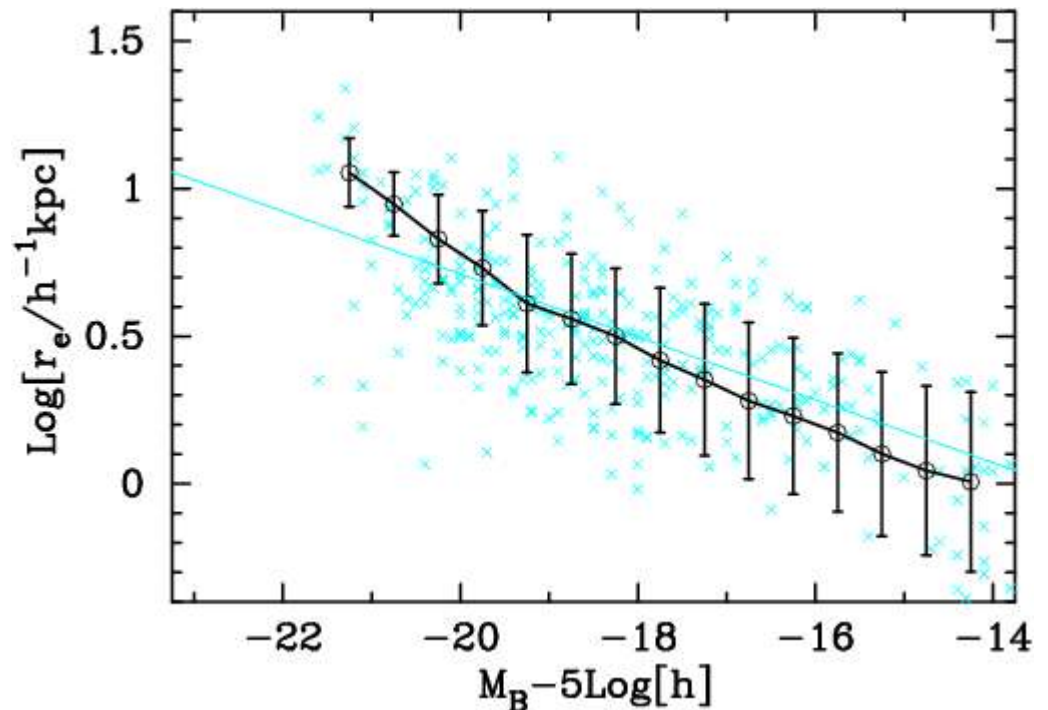
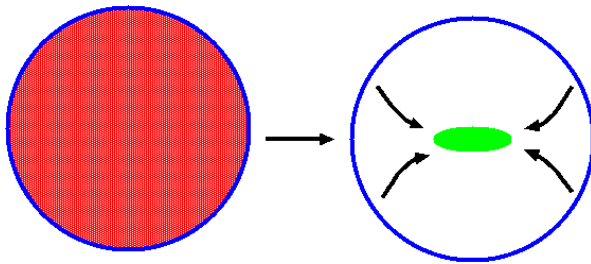
近傍渦巻き銀河の
ガス質量－光度比



ディスクのサイズ

冷えるガスが角運動量を保存
→ rotation support になるまで収縮する
→ ディスクのサイズ

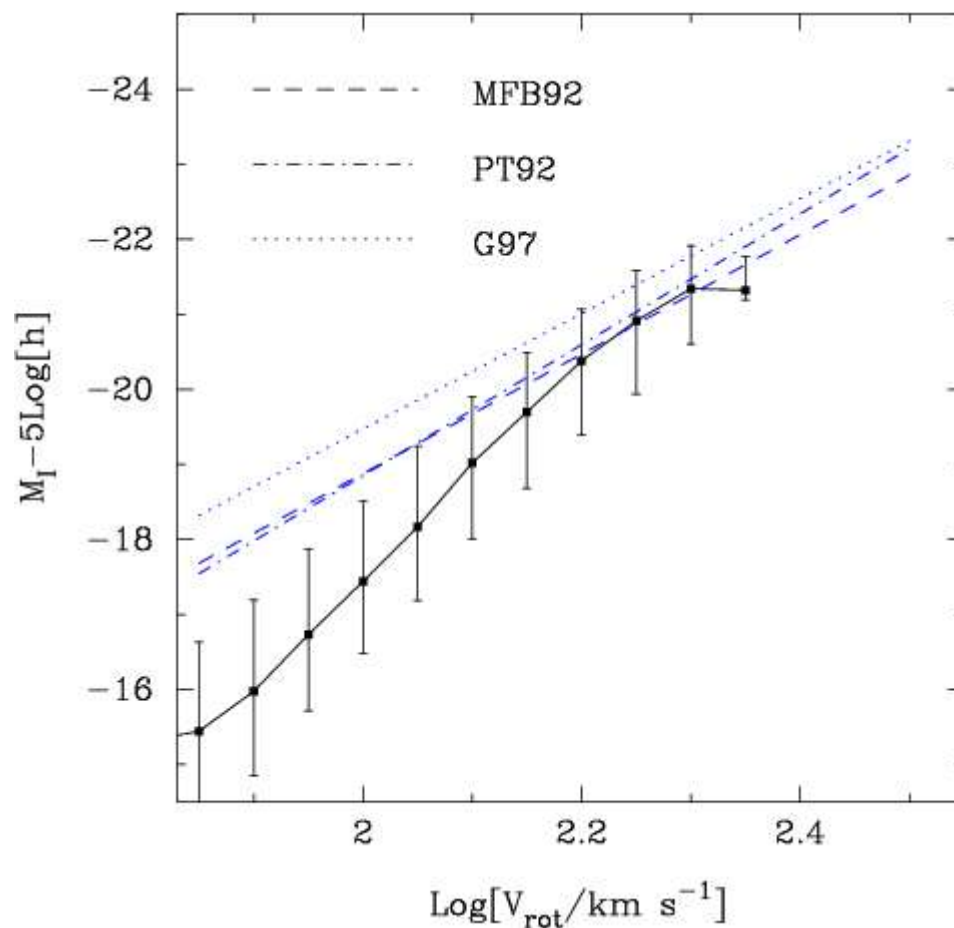
初期角運動量は、密度揺らぎが作る潮汐力と与えられる



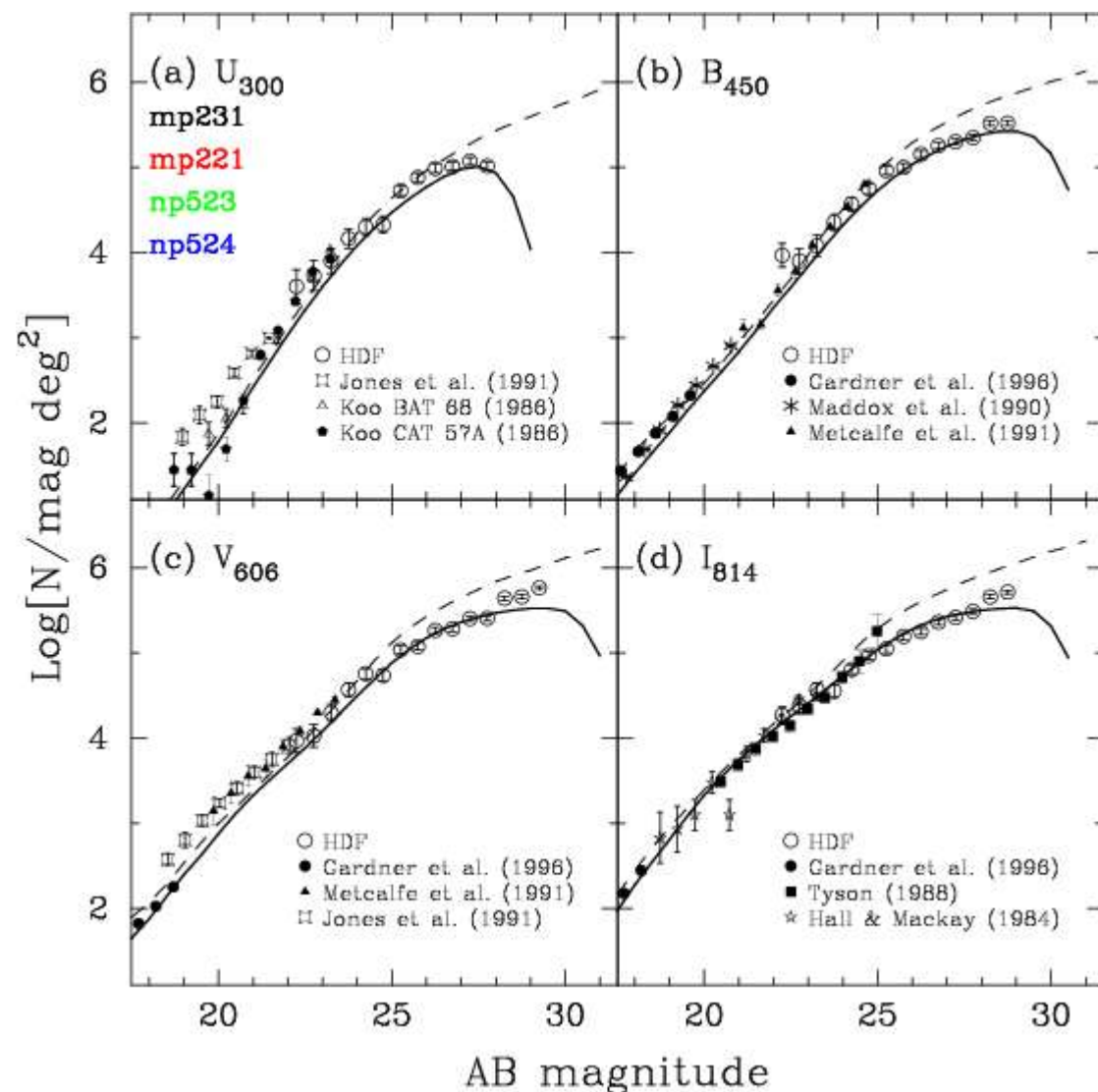
Tully-Fisher 関係

明るい銀河については
観測を良く再現する

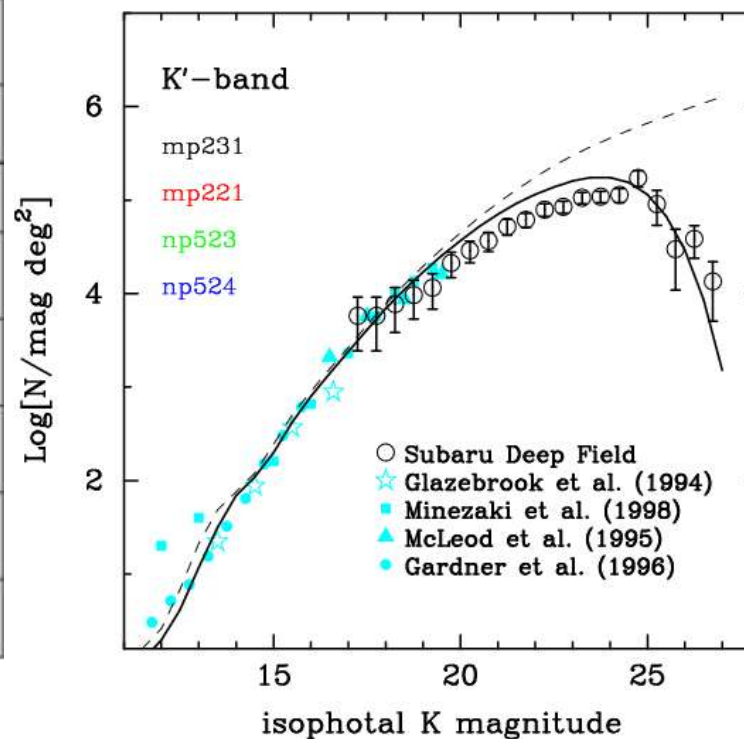
ベキはフィードバックで
決まる



銀河計数 (HDF, SDF)

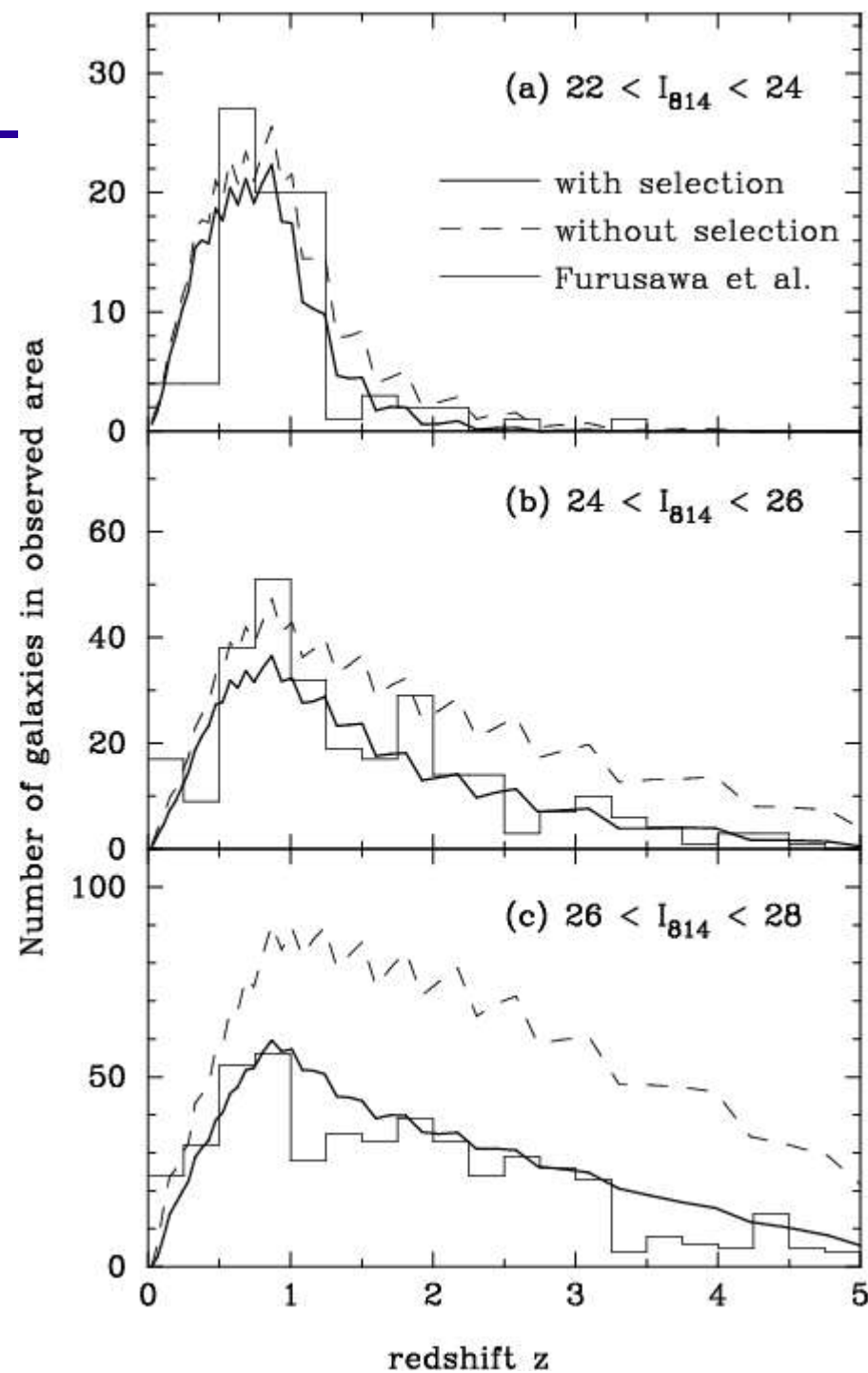


単位立体角あたりの銀河の個数
光度関数の z 方向の積分



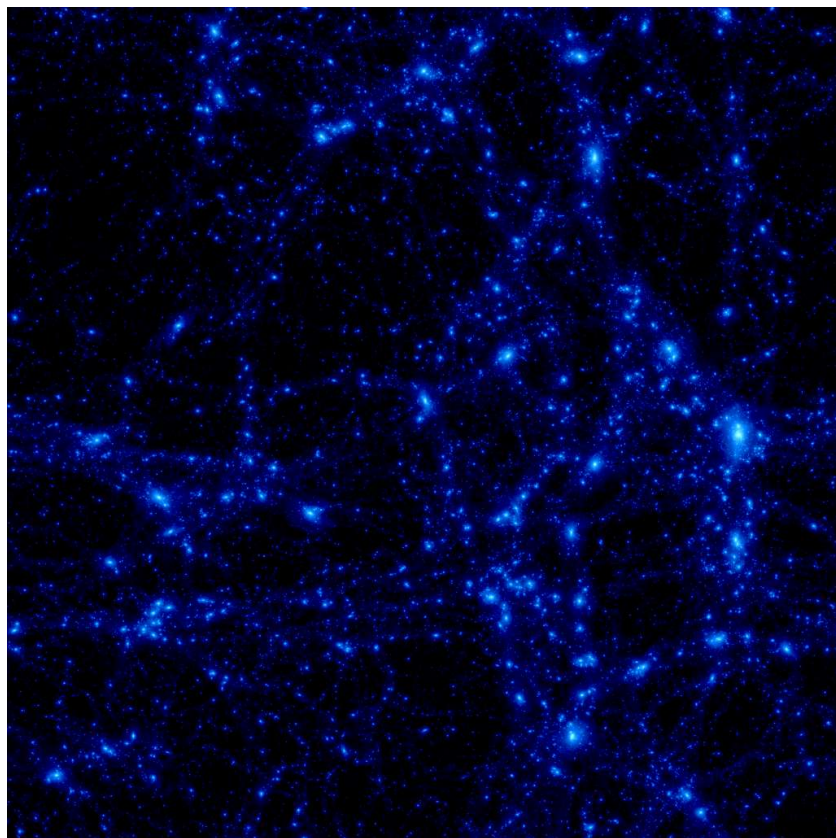
赤方偏移分布

HDF I-band の
photo-z distribution

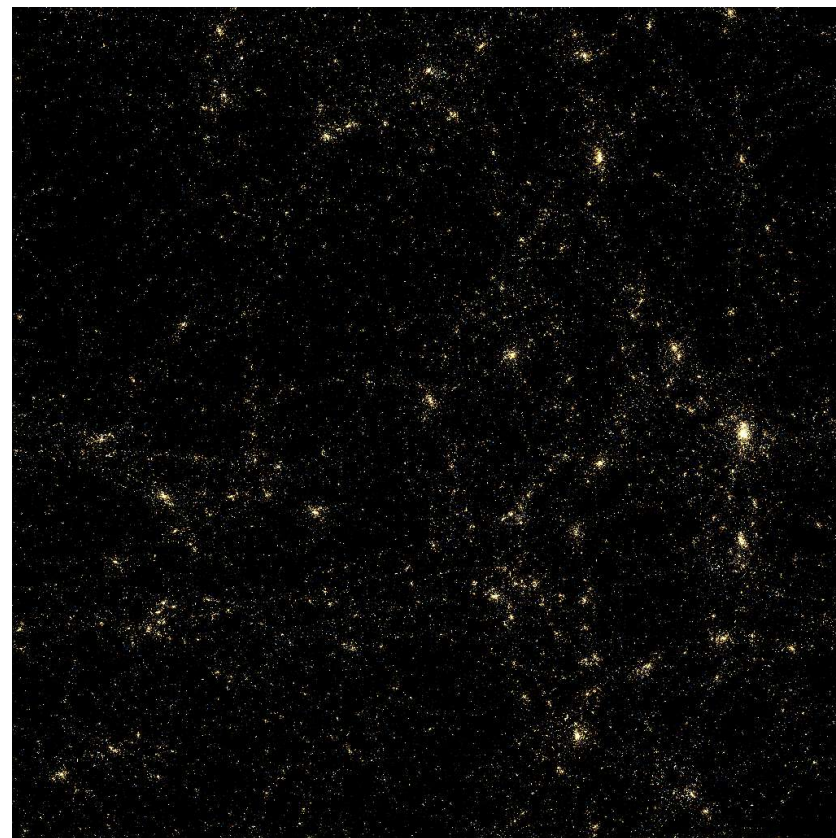


空間分布

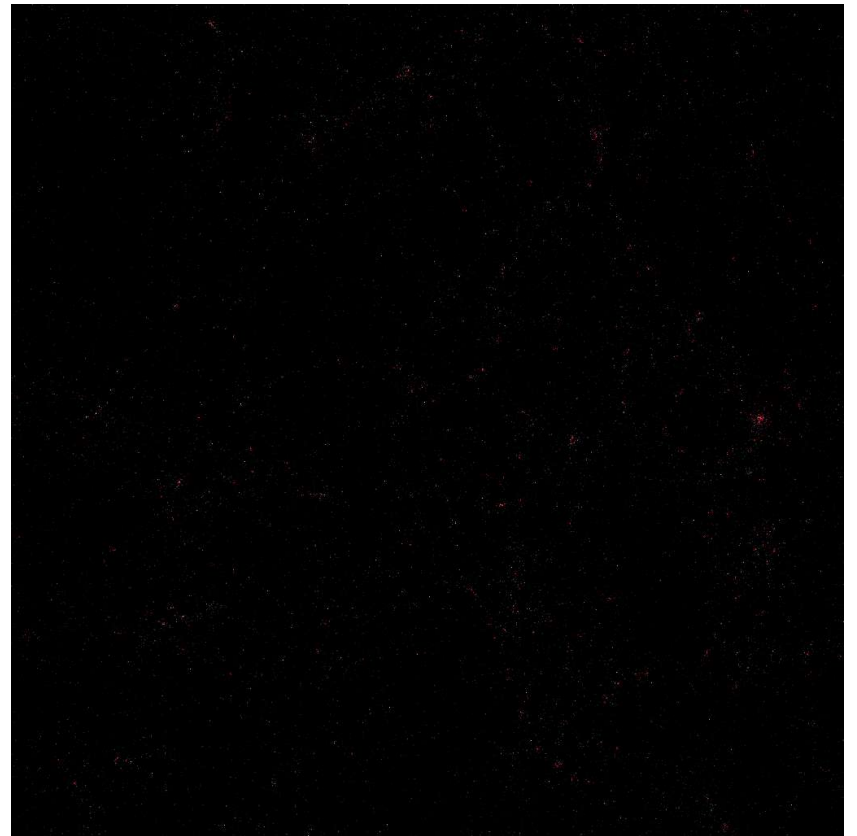
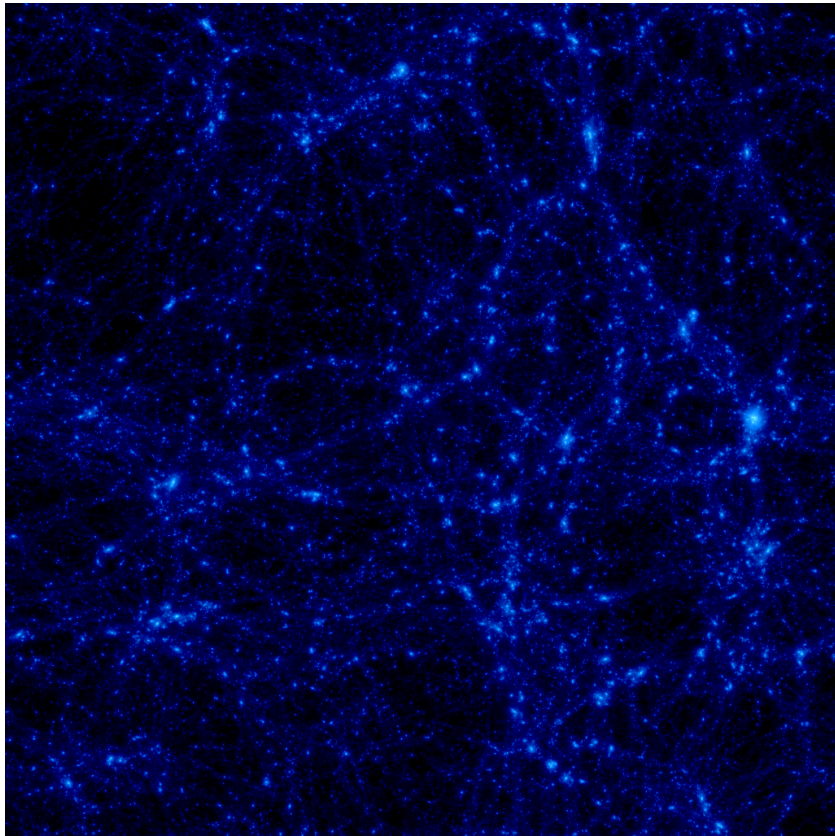
ダークマター



銀河



空間分布@ $z=1$



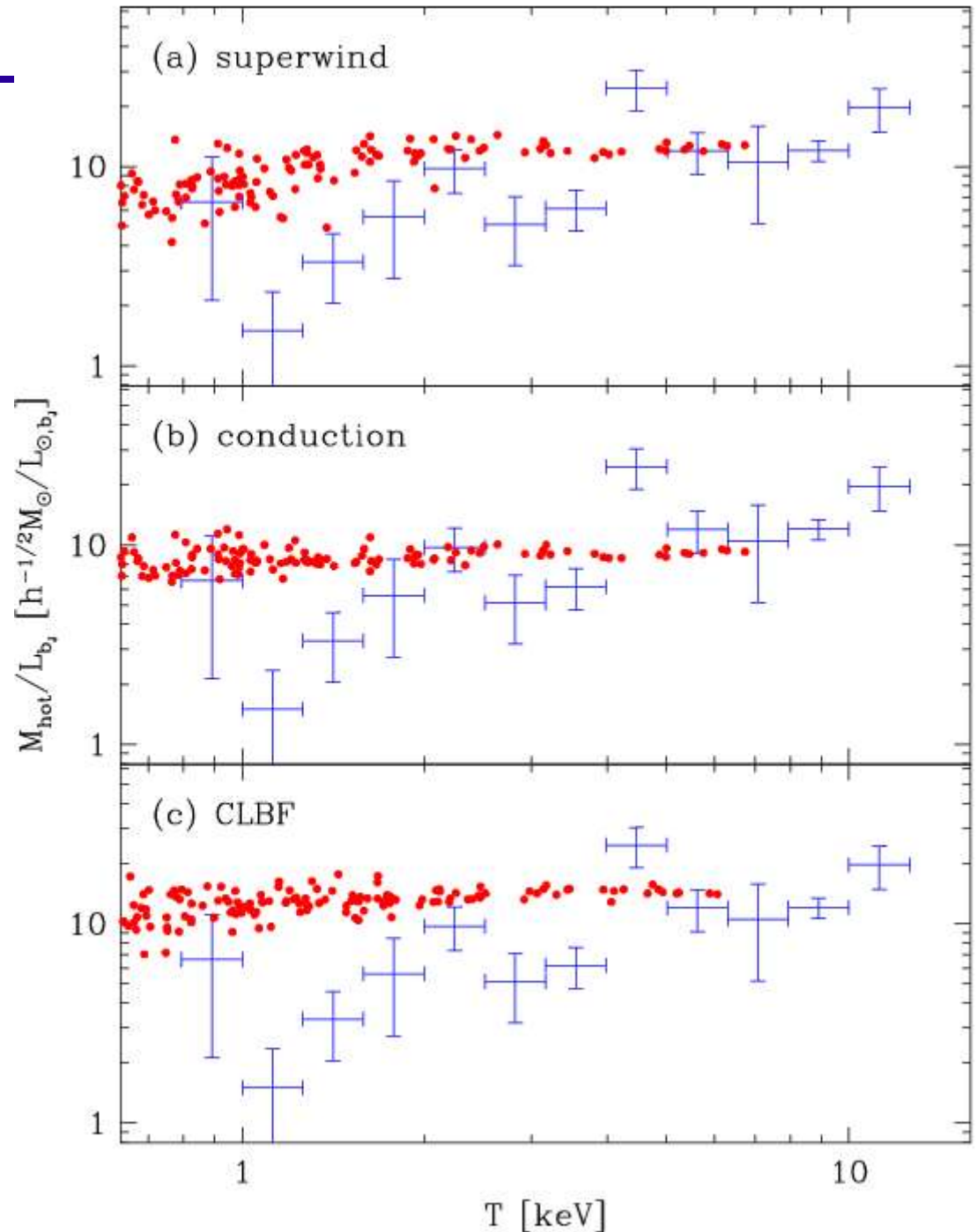
銀河団ガス

ハロー内のホットガス
→ICM

(intracluster medium)

銀河が星を主に見ている
のに対し、相補的

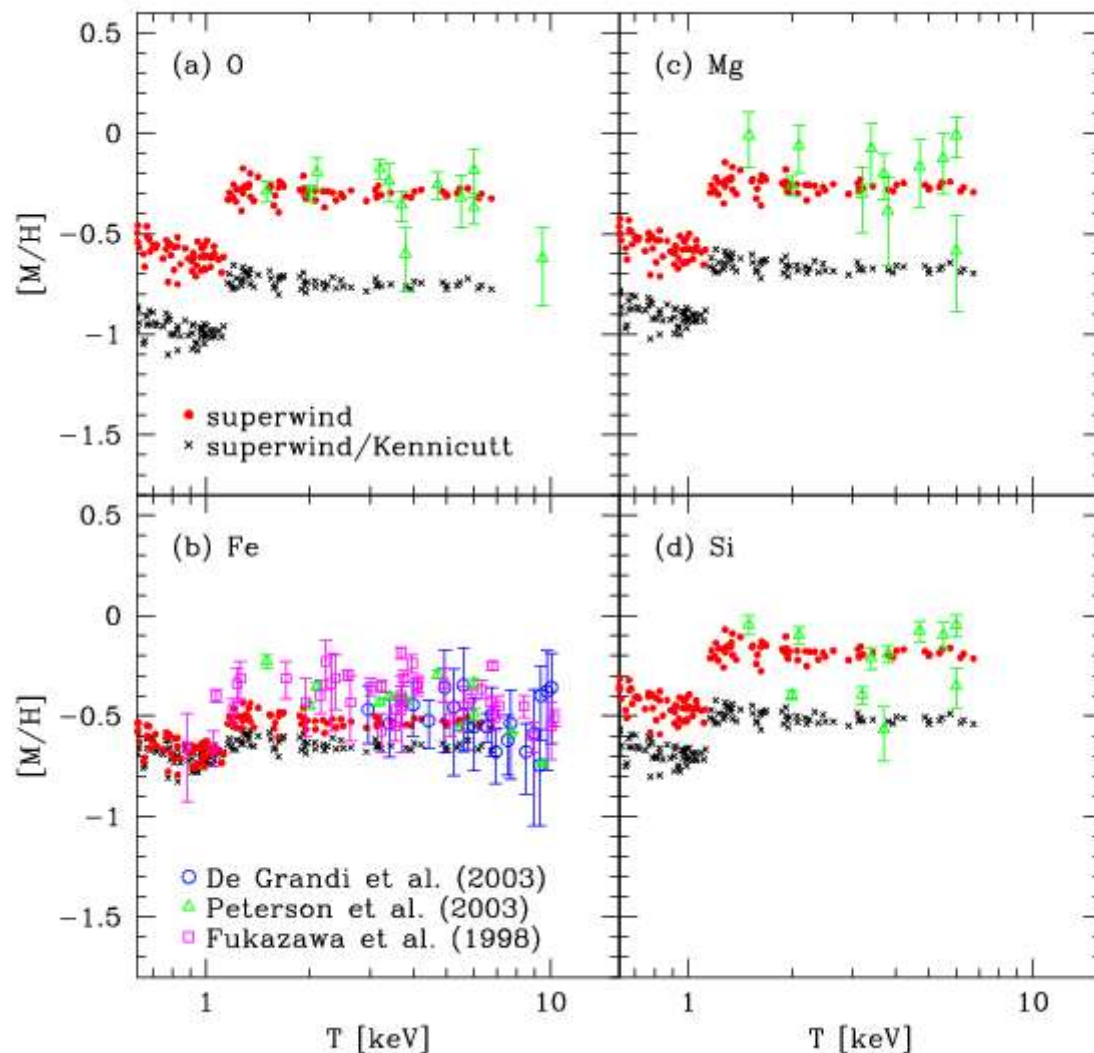
銀河団ガス質量と
銀河団に含まれる銀河の
光度の比



銀河団ガスの重元素量

観測 ($\sim 0.3Z_{\text{sun}}$) を
再現するためには、
高めの yield が必要

starburst で top-heavy
IMF を仮定すると
うまくいく



まとめ

- WMAP 等の観測により、CDM モデルがほぼ確立した
- CDM モデルが予言する構造形成過程は、Hierarchical Clustering (bottom-up) シナリオである
- 理論や数値実験 (N-body 計算) の進歩によって、
ダークマターの構造形成過程はほぼ理解された
- 一方、ガスや星が絡む物理はまだ不定性が高い
→ 星形成、超新星爆発による加熱 (フィードバック)
- シンプルにモデル化することで、問題の本質を明らかにし、観測と比較することでモデルへの制限を加えられる
- 現状では、だいたい consistent に観測を再現するモデルを構築することが可能である
- より多くの観測結果と比較し、CDM の枠組で銀河や銀河団の形成・進化を捉えていくことが大切である

今後の課題

理論的課題

- 星形成、超新星爆発によるフィードバックの理論
- 銀河団ガスの物理 $\Leftrightarrow$ cooling flow, AGN, ...
- 銀河の合体の物理

他分野との結合

- QSO 形成、巨大ブラックホール形成
- 高エネルギー宇宙物理
 - 銀河団ガス、AGN/QSO、非熱的輻射 (γ 線など)

観測から

- 近傍矮小銀河
- 銀河群の系統的探査
- 遠方銀河団 (銀河、ガス)
- 深宇宙での多波長広視野サーベイ
- バルジの詳細観測

References (今回取り上げたもの、関連するもの)

準解析的モデル(三鷹モデル)

Nagashima M., Yoshii Y., 2004, ApJ, 610, 23

Numerical Galaxy Catalogue (nGC) 銀河部分

Nagashima M., Yahagi H., Enoki M., Yoshii Y., Gouda N., in preparation

Numerical Galaxy Catalogue (nGC) 空間分布

Yahagi H., Nagashima M., Enoki M., Gouda N., Yoshii Y., in preparation

Numerical Galaxy Catalogue (nGC) ダークハロー質量関数

Yahagi H., Nagashima M., Yoshii Y., 2004, ApJ, 605, 709

銀河団ガスの重元素量

Nagashima M., Lacey C.G., Baugh C.M., Frenk C.F., Cole S., astro-ph/0408529

我々の銀河系の重元素量

Nagashima M., Okamoto T., astro-ph/0408486