

銀河形成のモデリング

長島雅裕（長崎大教育）

銀河形成を理解するとは
どういうことだろうか？

自己紹介

- 学部・院：阪大宇宙進化(1994.4入院、1999.3修了)
 - ▶ 指導教官：郷田さん(いまJASMINE)
- 阪大で教務補佐員(月給10万)(4ヶ月)
- 京大基研(湯川奨学生) (8ヶ月)
- 天文台理論部(教務補佐員5ヶ月、COE研究員11ヶ月、紳士協定の任期付助手1年8ヶ月、計3年間)
- Durham大でポスドク(1年)
- 京大天体核でPD学振(2年)
- 2006年4月より長崎大学教育学部

- ポスドク7年で卒業

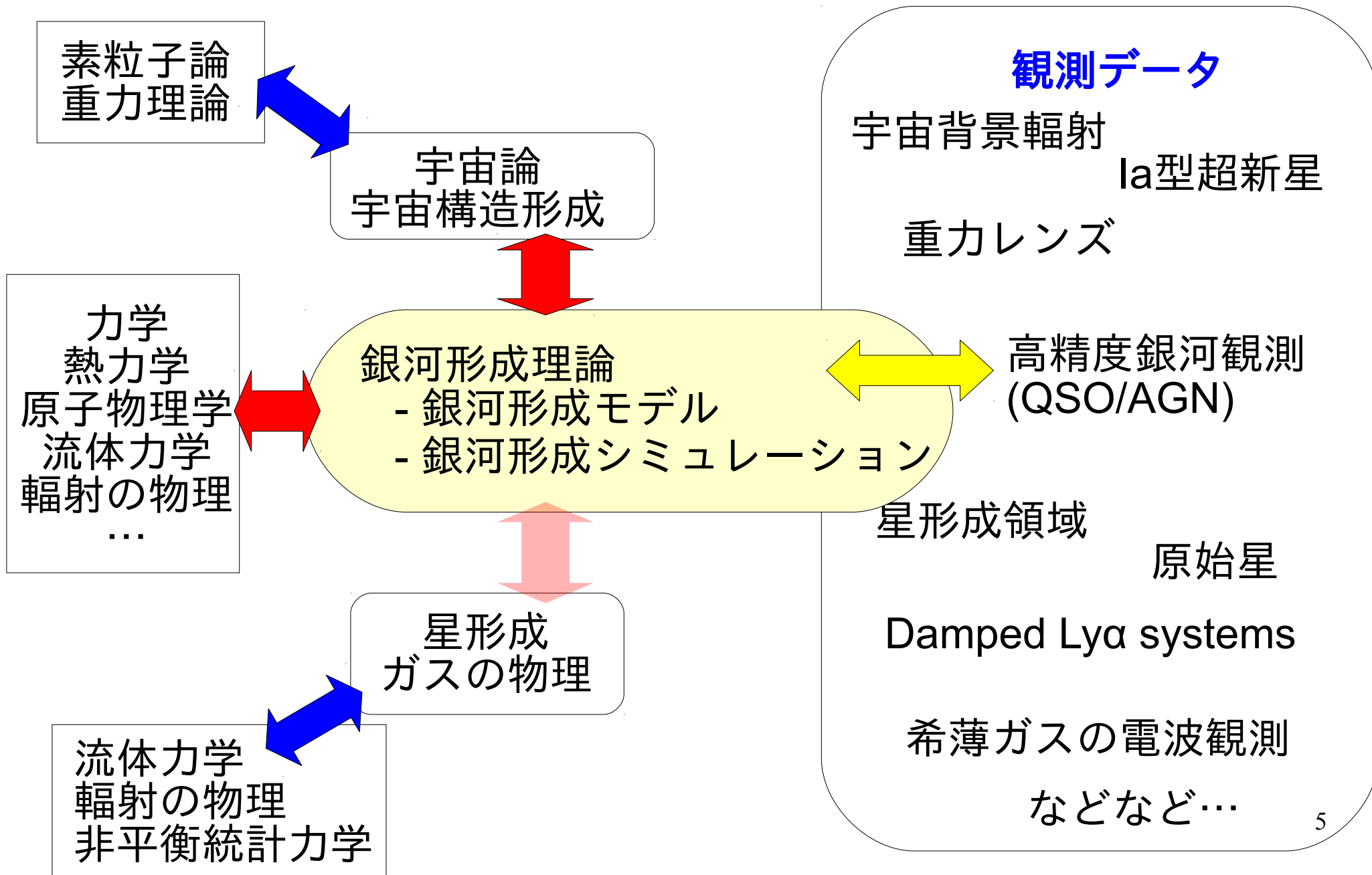
流動激しい研究室(当時)

- 大学院に入ったときの研究室スタッフ
 - ▶ 池内さん(1998に名古屋へ)
 - ▶ 郷田さん(1999に天文台へ)
 - ▶ 柴田さん(1998から海外学振、帰国時に駒場へ)
- D取った後の1999.4には一番の古株になっていた!
- 研究テーマ
 - ▶ 宇宙の大構造の進化(最初のテーマ)
 - ▶ 銀河形成
 - ▶ 星間ガスの物理(ポスドク以降)

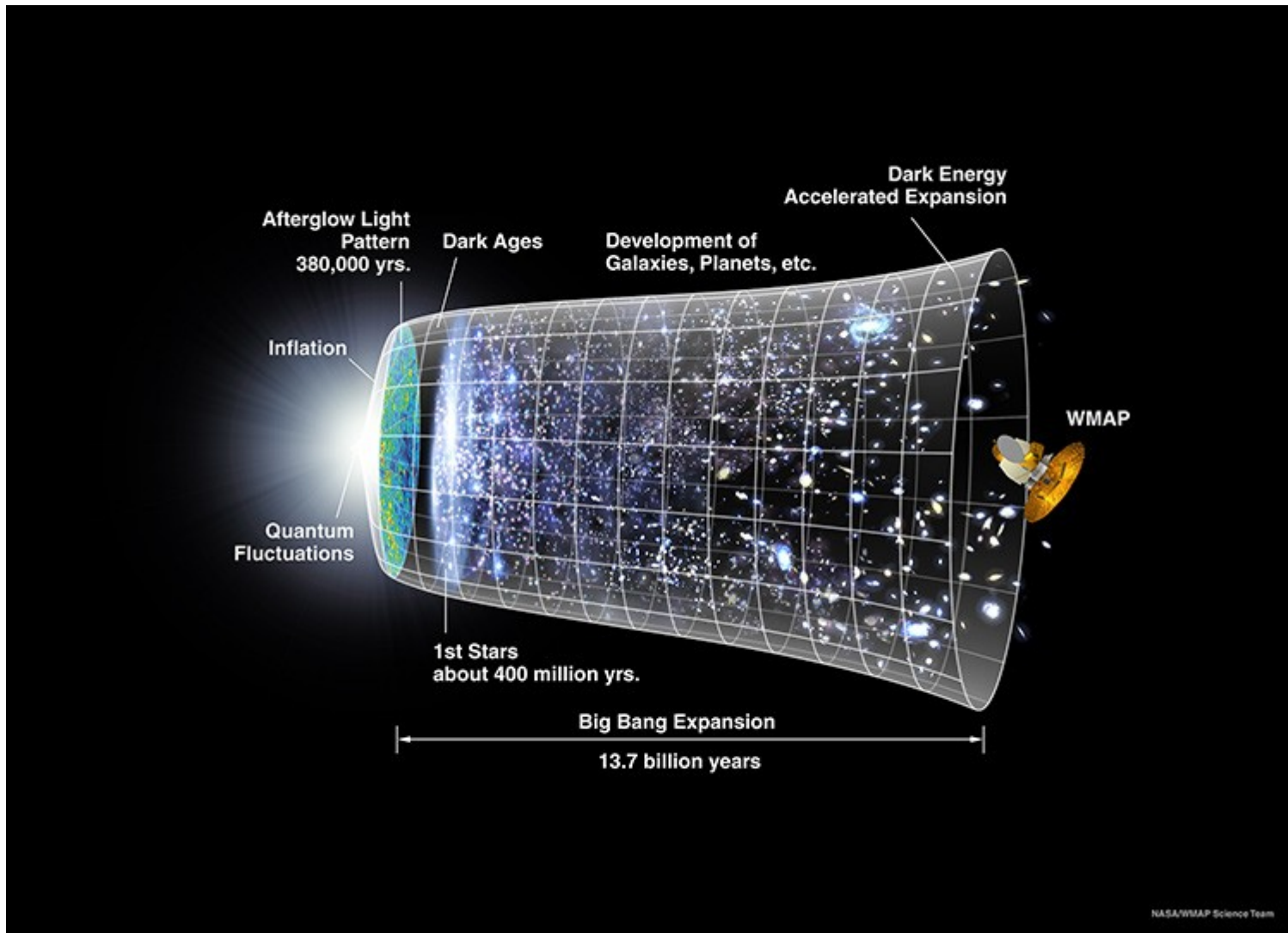
銀河の位置付け

- 銀河の典型的なスケール
 - ▶ 星($\sim\text{pc}$) \ll 銀河($\sim 10\text{kpc}$) \ll 宇宙($\sim\text{Gpc}$)
 - ▶ 星形成($\sim\text{Myr}$) \ll 銀河回転($\sim 100\text{Myr}$) \ll ハロー($\sim\text{Gyr}$)
- 宇宙における構成単位
- 星の集団
- 広汎なスケールの物理が複雑に絡む
- 第ゼロ近似でスケール分離可能
 - ▶ 古典的な銀河進化モデル…銀河スケールの雲で星形成率を仮定し、宇宙年齢の間にどれだけ進化するかを調べる
- 高精度宇宙観測が進んだいま、マルチスケールを意識した銀河形成の理解が必要
 - ▶ 銀河形成の本質的理解

銀河形成理論の位置付け

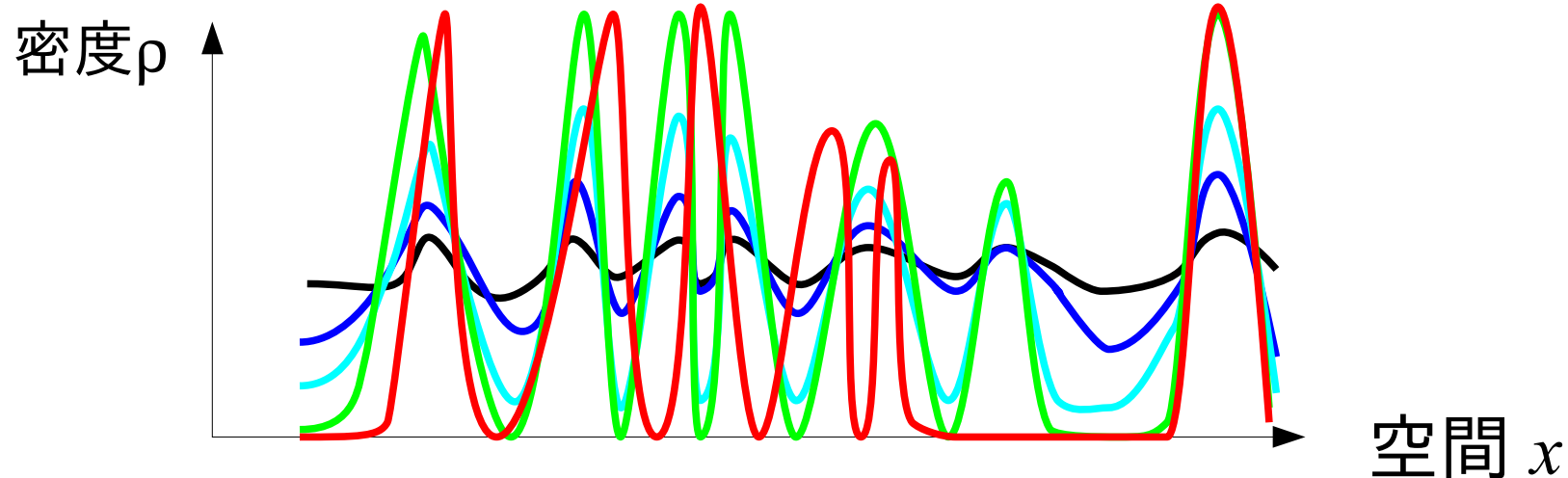


膨張する宇宙



宇宙の大構造形成：標準理論

- 宇宙初期(インフレーション期)に、量子揺らぎが引き伸ばされ、古典化。密度揺らぎが生成される。
- 重力不安定性により、密度揺らぎが成長する。
- 重力崩壊(collapse)し、力学平衡に達したダークマター天体を「ダークハロー」と呼ぶ。



宇宙の大構造形成：標準理論

- 宇宙論・構造形成論の理論・観測の進展

- ▶ Cold Dark Matter (CDM) model

- CDM model から導かれる構造形成過程

- ▶ hierarchical clustering 説

- ▶ 小さい天体から先に形成

- ▶ 大きい天体は小さい天体の合体により形成

- 揺らぎのパワースペクトル

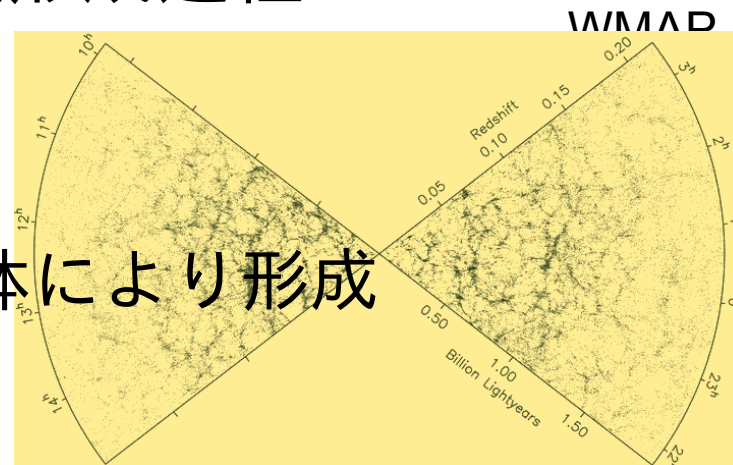
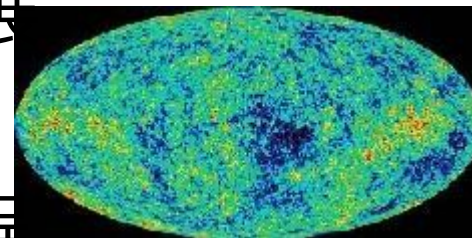
- ▶ 銀河形成も合体成長する

- $\Omega_{\text{CDM}} \gg \Omega_{\text{baryon}}$

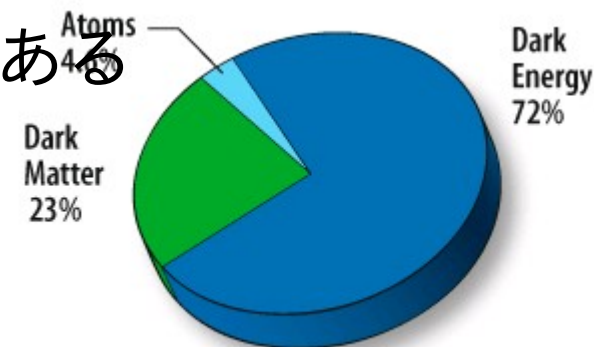
- ▶ ダークハローの形成史を考える必要がある

- CDM構造形成はよくわかっている

- ▶ それをベースに銀河形成を議論しよう



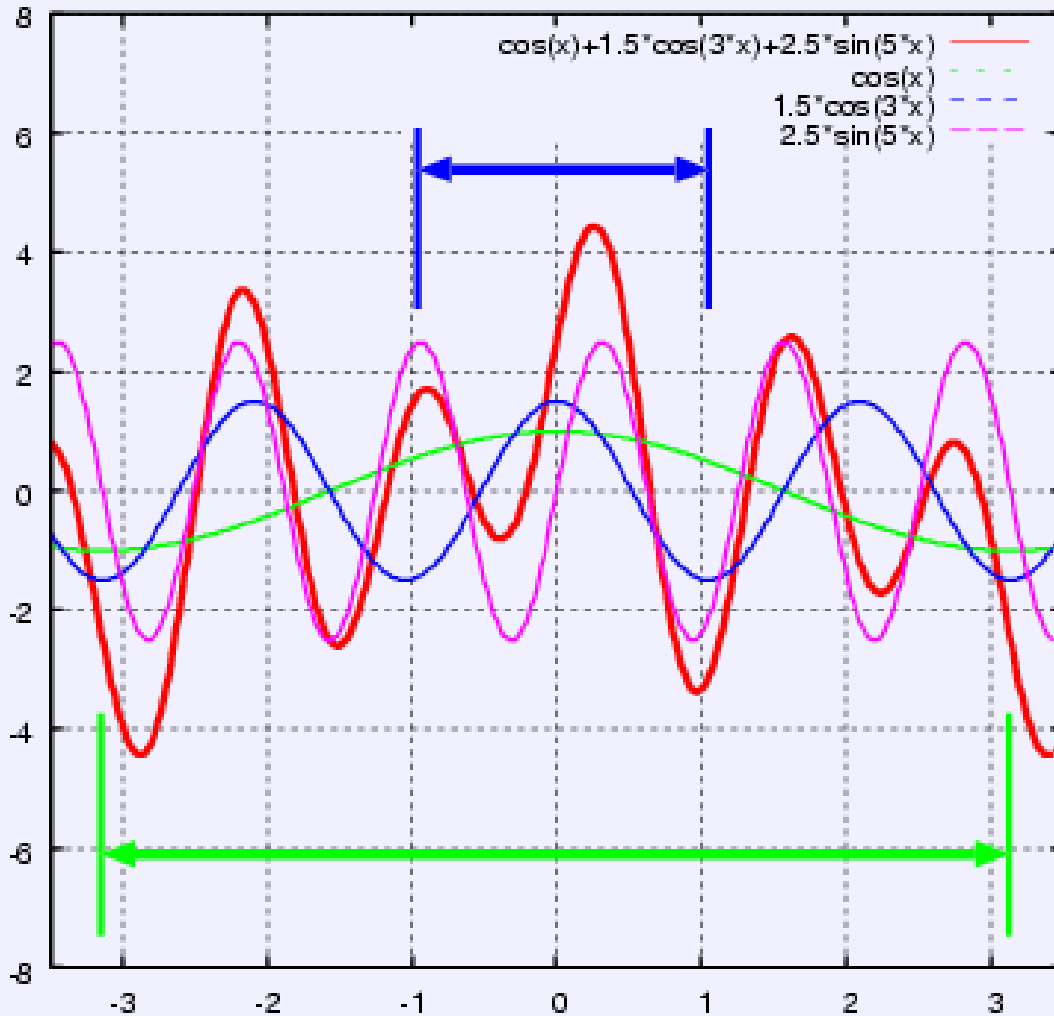
2dF



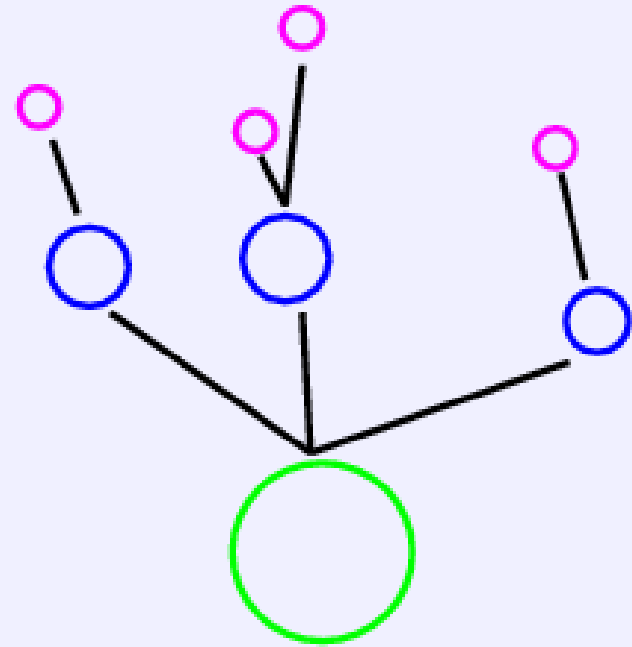
WMAP

Hierarchical Clustering

small scale の揺らぎの振幅が大



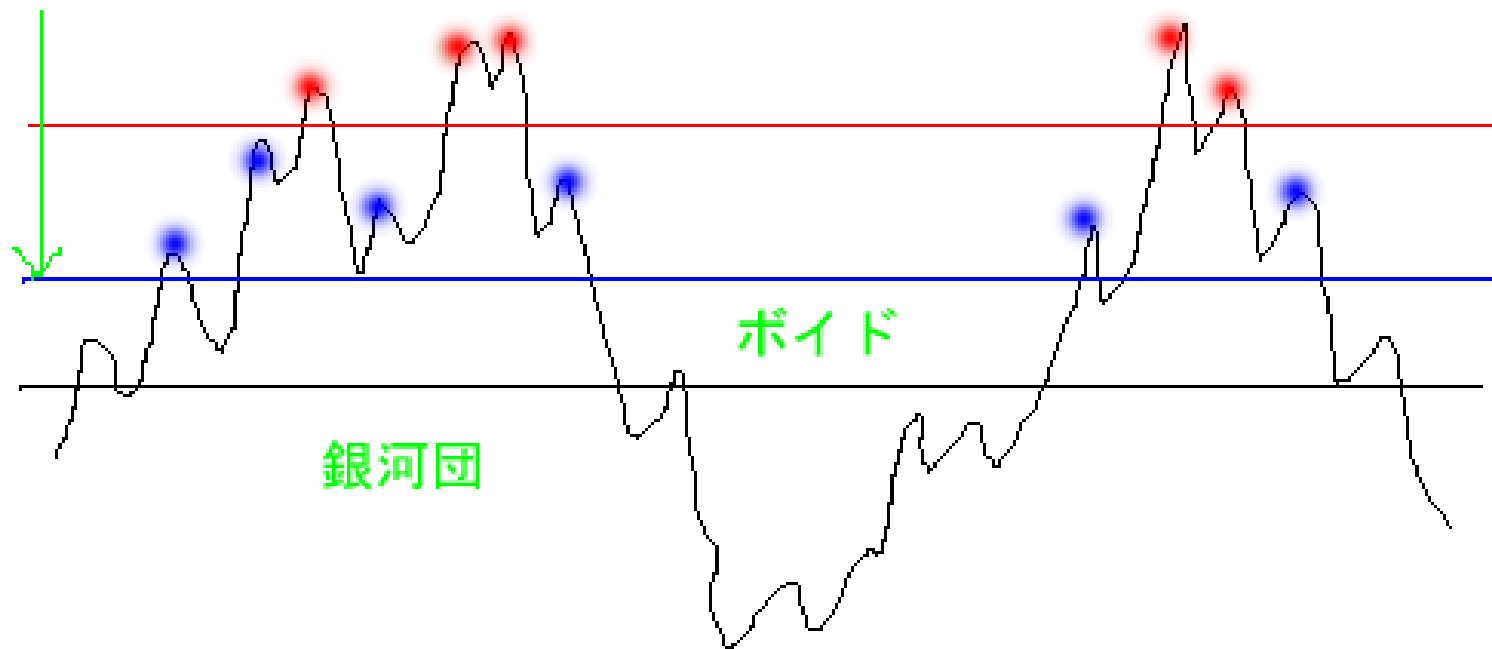
揺らぎの高い点から
ハロー形成
→biased formation



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

CDM宇宙における銀河形成

- baryon は dark matter の重力ポテンシャル
 - ▶ (ダークハロー)にほぼ閉じ込められている
 - 銀河は baryon の一形態(高密度)
 - ダークハローの合体形成史の中での銀河形成史を考えなければならない
- ⇒宇宙論からの要請

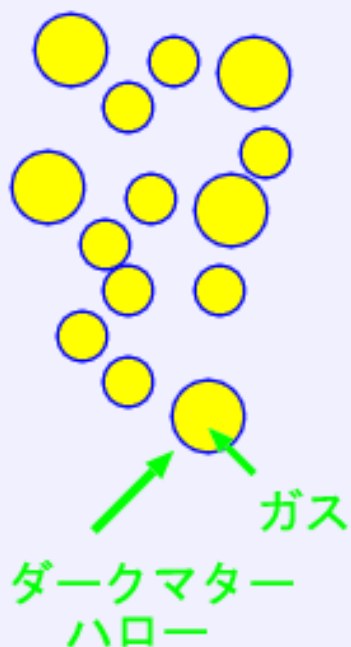
- 銀河は星(+ガス)からなる系
 - 星が出来なければ話にならない
- ⇒如何にして銀河における星形成が進むか?

- スケールの違う物理過程が複雑に絡む
- 銀河形成問題の難しさ
- ★まずは宇宙論的シナリオを確立する

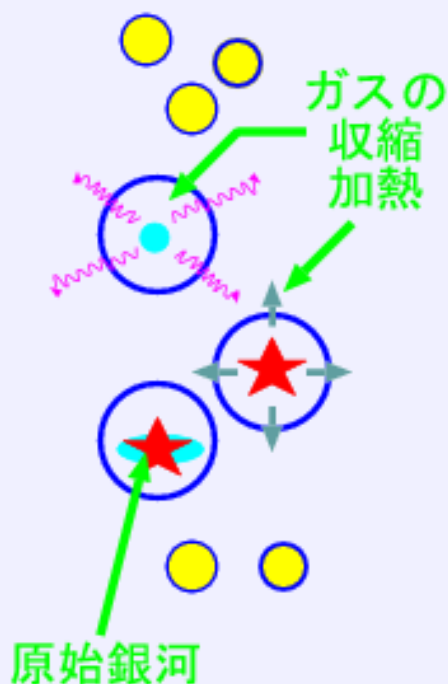
階層的構造形成説に基づく銀河形成シナリオ

宇宙初期

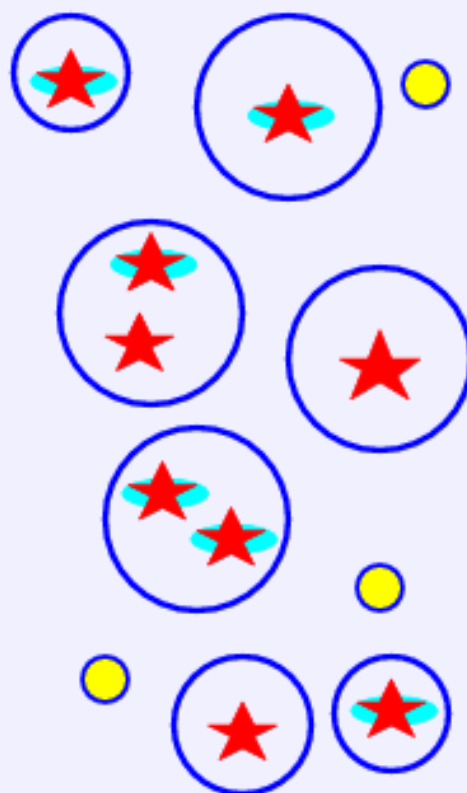
現在



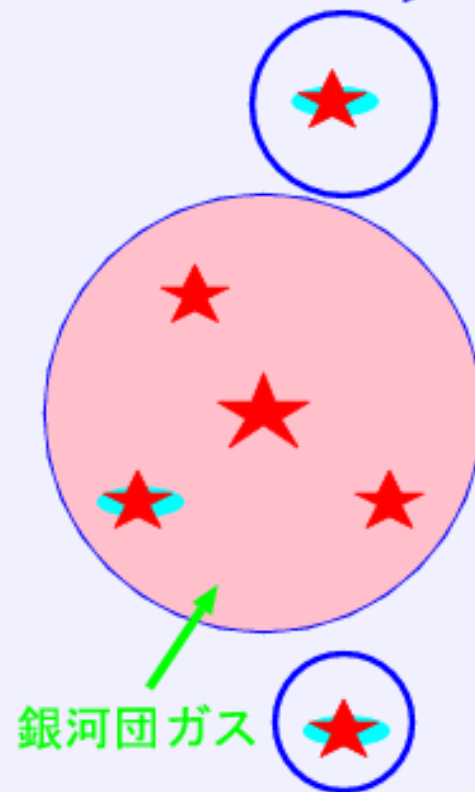
自己重力による
初期天体の形成



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

銀河形成への重要なアプローチ

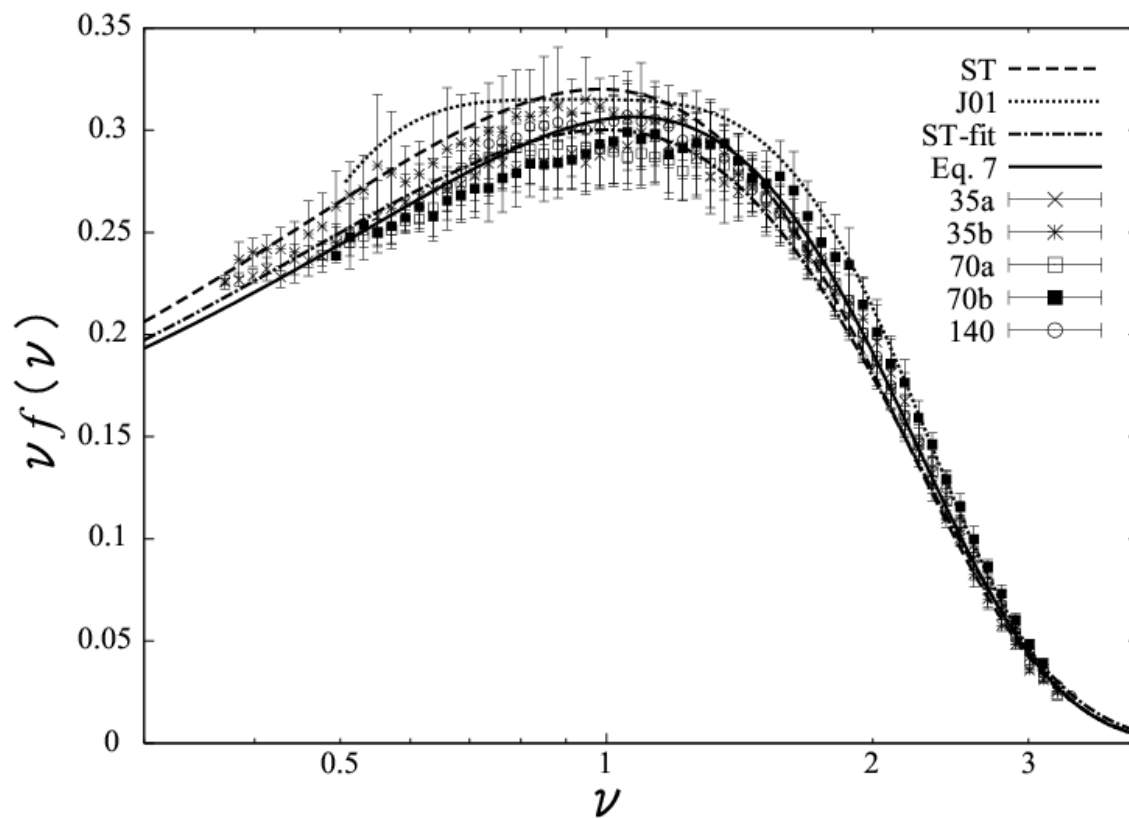
- 現象論(銀河風モデルなどによる)
 - ▶ 観測データを整理するのに重要(第一段階)
- 数値流体シミュレーション
 - ▶ ダイナミクスを解ける(と思われている)
 - ▶ しかし、resolution がまだ不十分
 - ▶ resolution稼ぐために小さいbox→長波長の密度揺らぎ無視(角運動量等)
 - ▶ 超新星爆発フィードバック(ガス加熱)等、不定性大
 - ▶ 時間がかかり、パラメータ空間の一部しか調べられない
- 準解析的モデル
 - ▶ ダークハローの形成史はちゃんと解く
 - ▶ ガス冷却、星形成、フィードバック等はモデルを入れる (実際のところ、粗い数値シミュレーションとそうは違わない)
 - ▶ 高速に解ける、サンプル稼げる

ダークハローの形成史の構築

- N-body シミュレーション
 - ▶ dark matter のみ
→ 不定性ほぼゼロ
- box size: $L = 70 h^{-1} \text{Mpc}$
- 粒子数: $N = 512^3$
- 最小ハロー質量(10粒子): $M = 3 \times 10^9 M_\odot$
- ハローの 1 dynamical time 程度の間隔でスナップショットを取り、ハローを同定
 - ▶ → 形成史の構築

Mass function

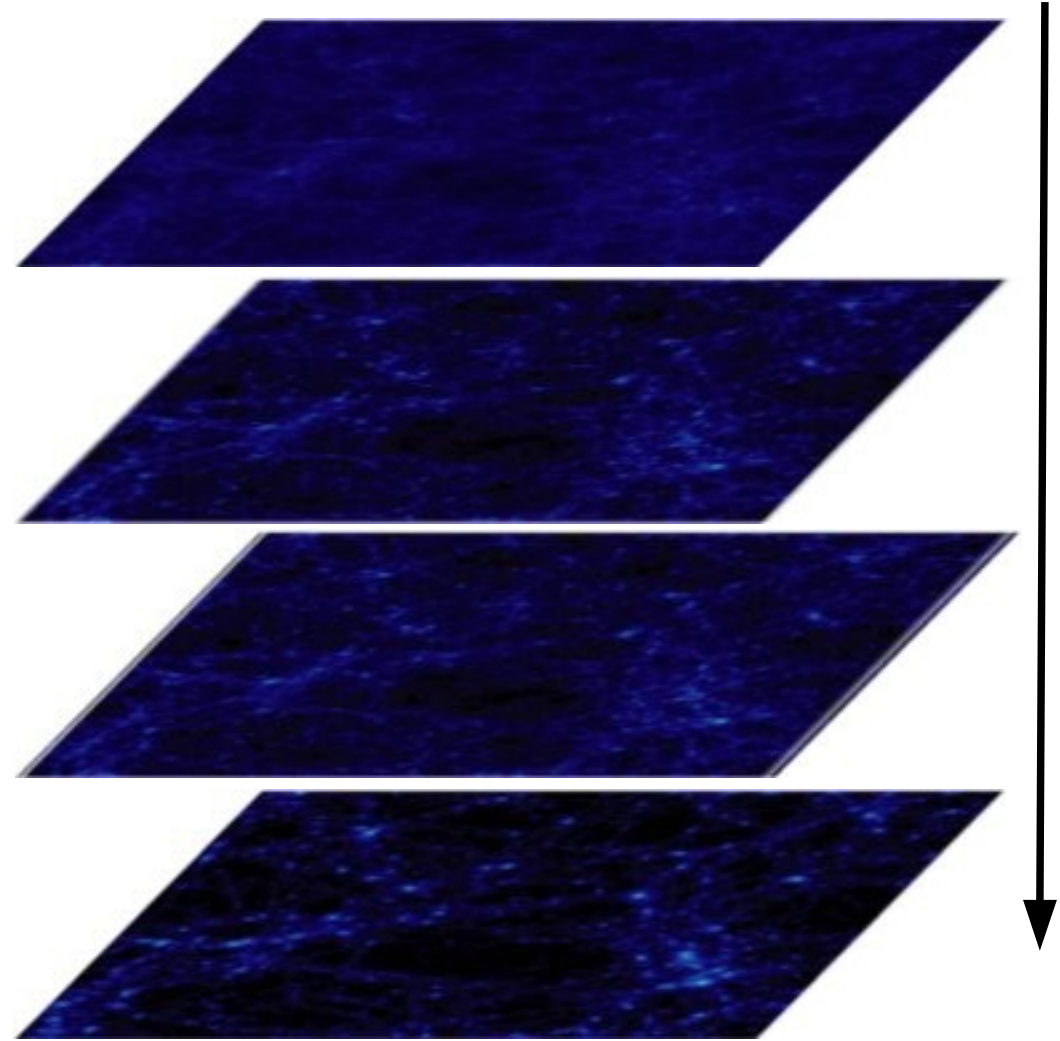
$z=0$ での質量関数(重み関数)は Yahagi, Nagashima & Yoshii (2004) による N-body sim. の fitting function を用いる



準解析的モデル(ν GC)

- フルの数値シミュレーションでは、大量の銀河を同時に計算することは不可能。相補的なアプローチを考える。
- 高精度のN体シミュレーション(ダークマターのみ)を実行し、スナップショットを集める。
- 各時刻でハローを同定し、異なる時刻間での関係を調べる。
- ハローの合体形成史を読み込んで、ガスの進化や星の形成を解く。

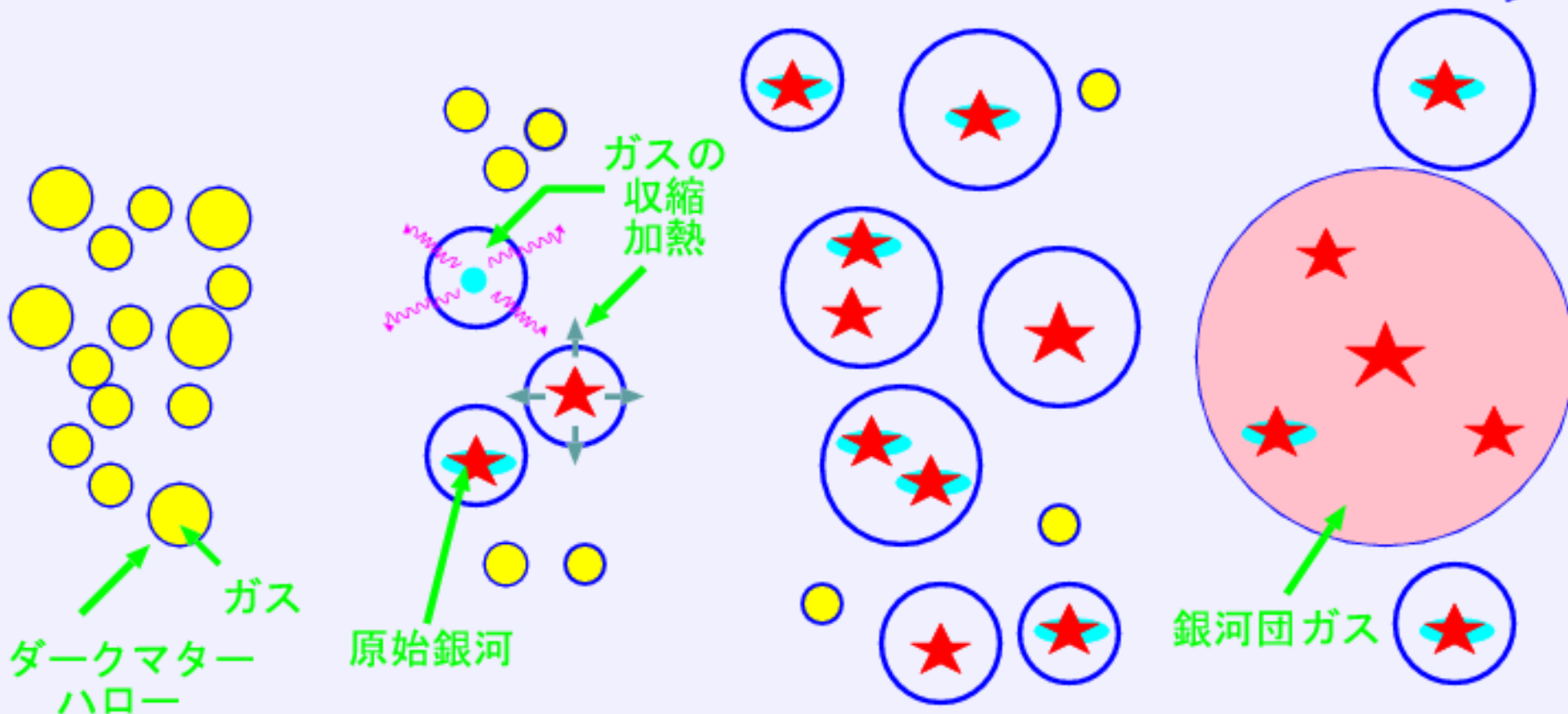
N-body snapshots



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

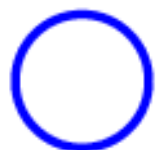
銀河同士の合体

-現在の宇宙-
銀河団の形成
我々の銀河の形成

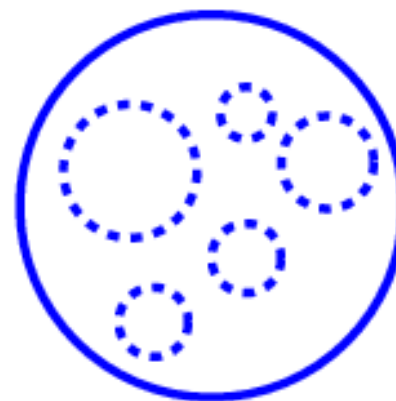
★青丸が得られた

バリオンガスの進化サイクル

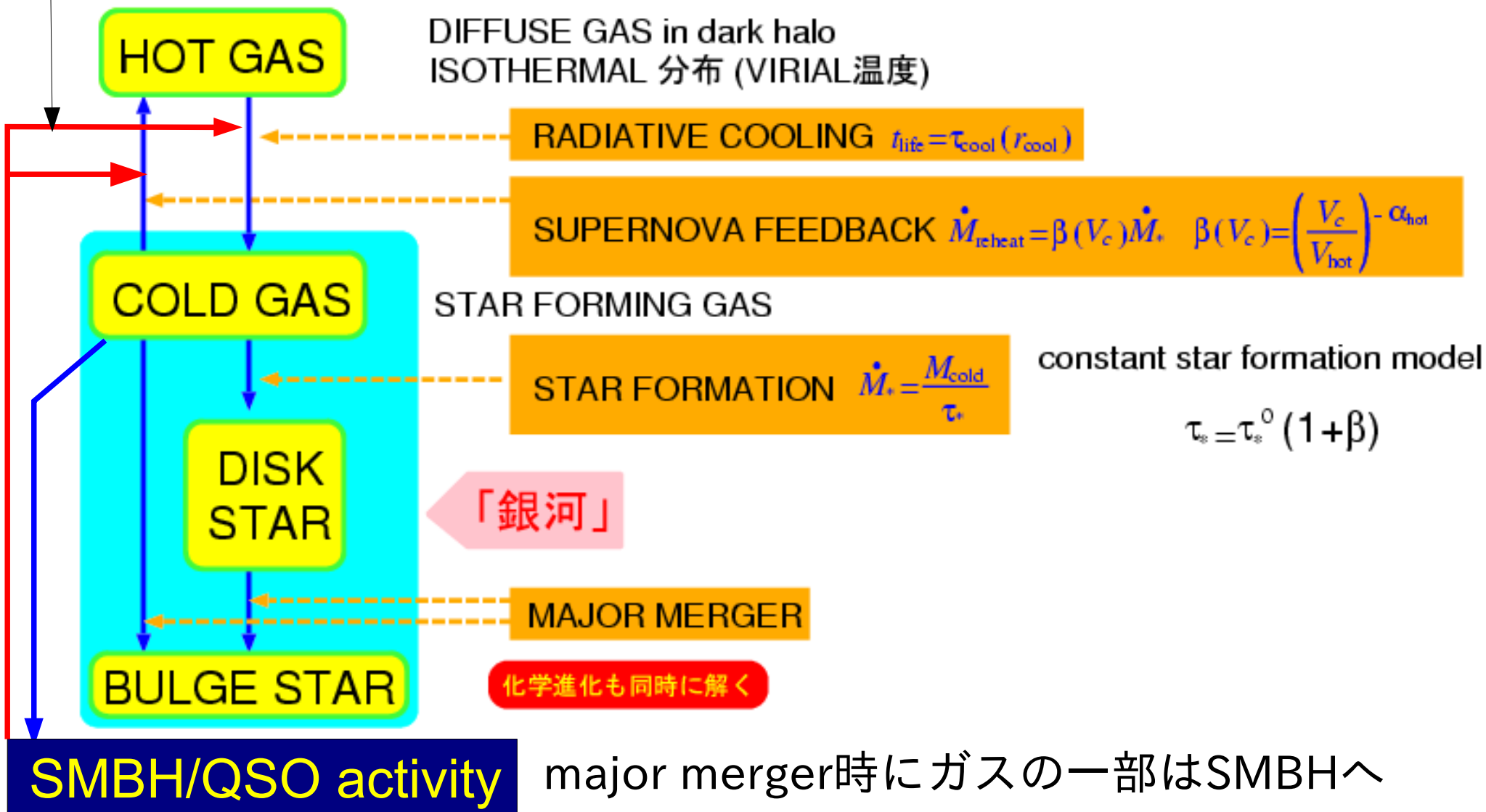
本当はここもやりたい
(AGN feedback)



t_{life}



Extended Press-Schechter Formalism
を用いて progenitors を生成

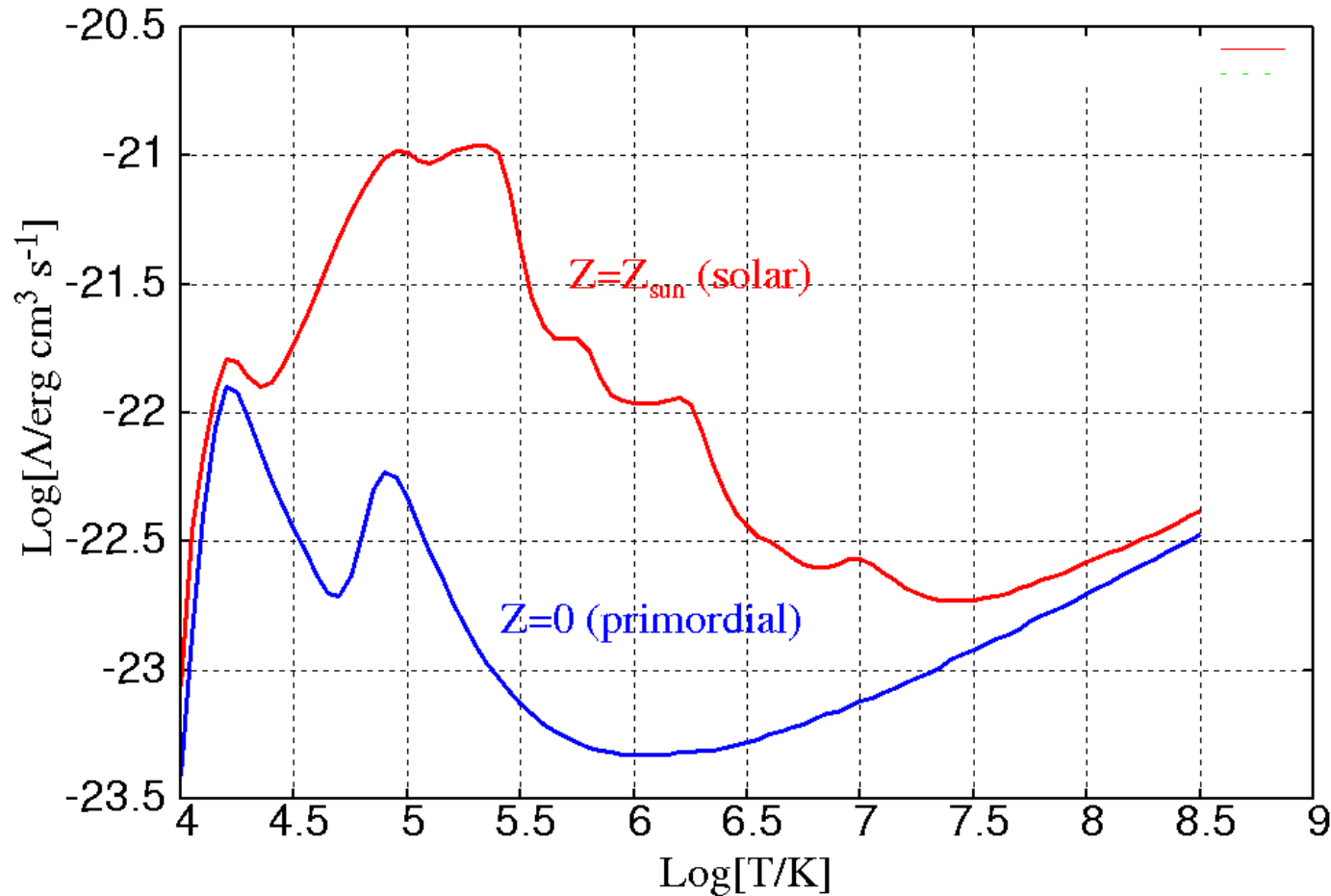


major merger時にガスの一部はSMBHへ

Cooling functions

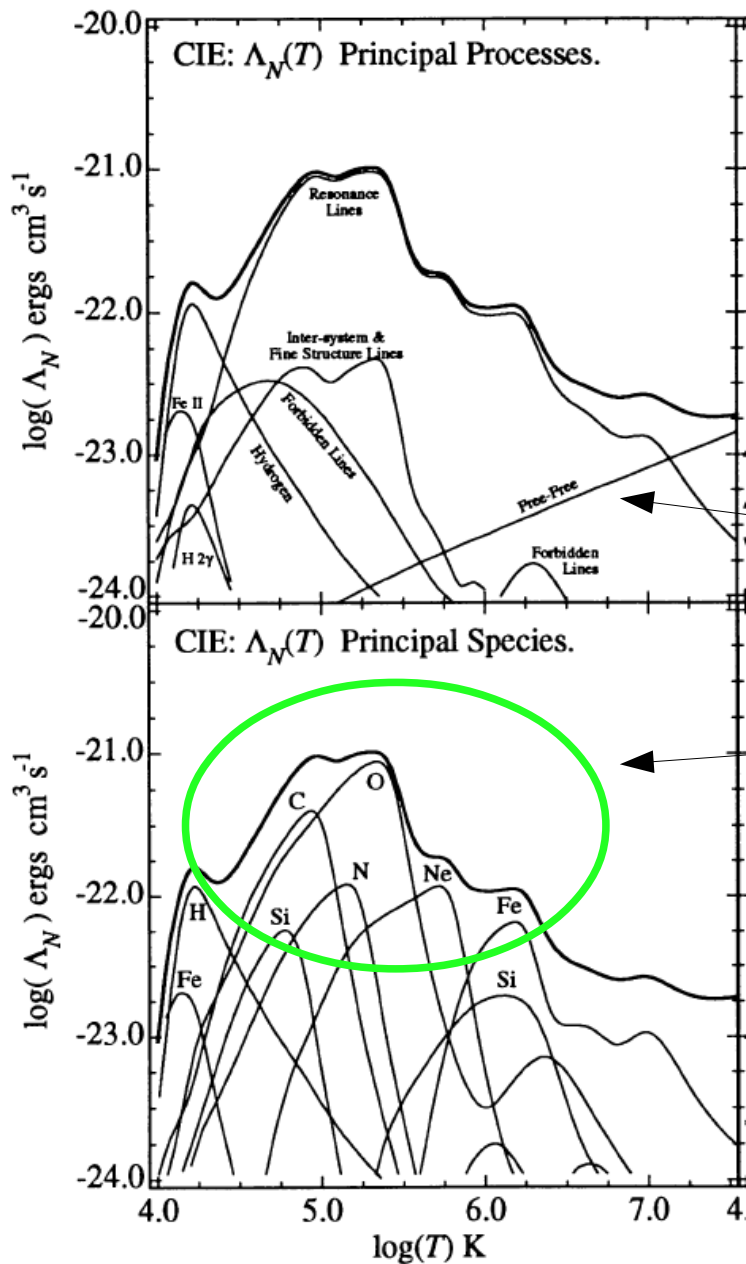
化学進化も解いている

→ hot gas の metallicity も計算されている



1万度まで冷えたら cold gas とする Sutherland & Dopita (1993)
それ以下は、星形成のタイムスケールに繰り返されていると解釈

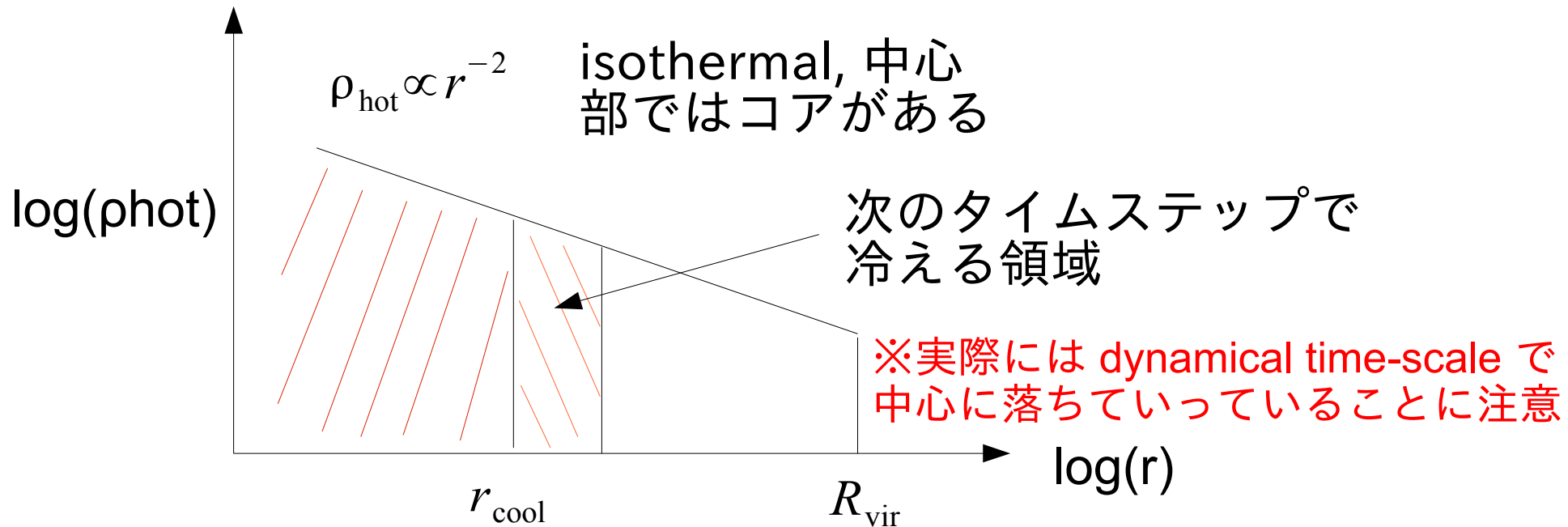
Cooling functions



thermal brems
metalにほぼ無関係

metalの量に依存

Cooling radius



$\tau_{\text{cool}}(r_{\text{cool}}) = t_{\text{life}}$ そのタイムステップの間に冷えられる半径

$$t_{\text{cool}}(r) = \frac{3}{2} \frac{\rho_{\text{hot}}(r)}{\mu m_{\text{p}}} \frac{k_{\text{B}} T_{\text{vir}}}{n_{\text{e}}^2(r) \Lambda(T_{\text{vir}}, Z_{\text{hot}})}$$

Star Formation & SN Feedback

$$\text{SFR } \psi = M_{\text{cold}} / \tau_*$$

$$\text{SF time-scale } \tau_* = \tau_*^0 \left(\frac{V_d}{V_{\text{hot}}} \right)^{\alpha_*}$$

$$\dot{M}_* = \alpha \psi,$$

$$\dot{M}_{\text{cold}} = -(\alpha + \beta) \psi,$$

$$\dot{M}_{\text{hot}} = \beta \psi,$$

$$(M_{\text{cold}} Z_{\text{cold}}) \dot{=} [p - (\alpha + \beta) Z_{\text{cold}}] \psi,$$

$$(M_{\text{hot}} Z_{\text{hot}}) \dot{=} \beta Z_{\text{cold}} \psi,$$

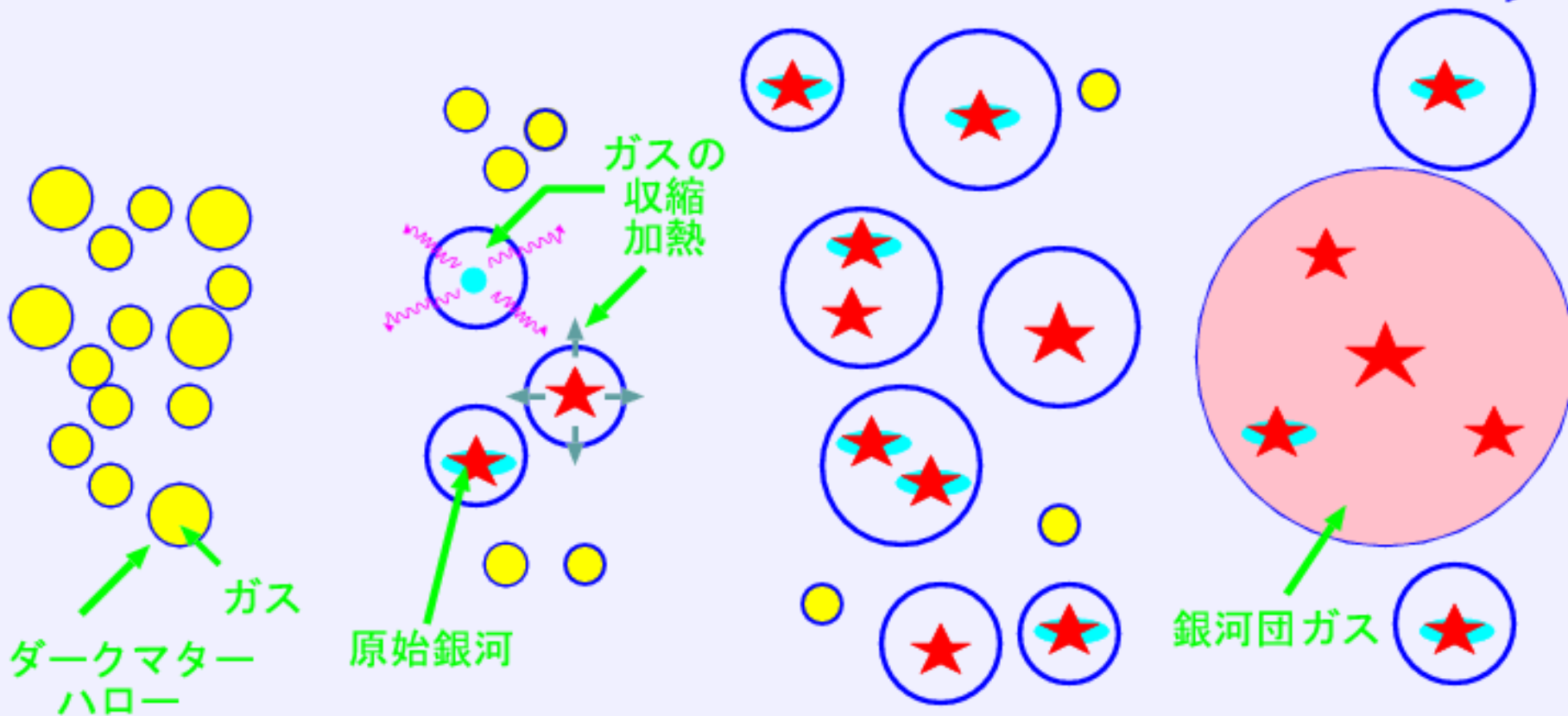
$$\beta(V_d) \equiv \left(\frac{V_d}{V_{\text{hot}}} \right)^{-\alpha_{\text{hot}}}$$

$$\square\square\square \text{ は } \dot{M}_{\text{reheat}} V_c^2 \simeq \epsilon \eta_{\text{SN}} E_{51} \Psi$$

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

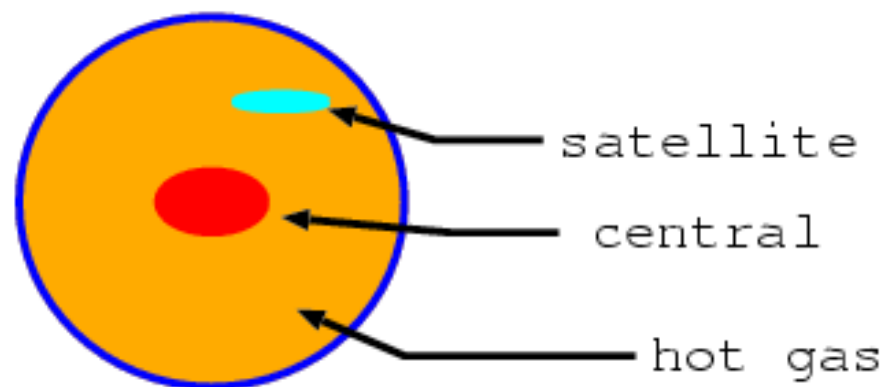
★原始銀河の形成

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

merger rate

dynamical friction (Binney & Tremain 1987)

$$\tau_{\text{fric}} = \frac{1.17 R_h^2 V_{\text{circ}}}{\ln \Lambda_C GM_{\text{sub}}},$$

個々の satellite 銀河について評価し、
time-step より短ければ**中心銀河と合体**

collision rate (1/time-scale)

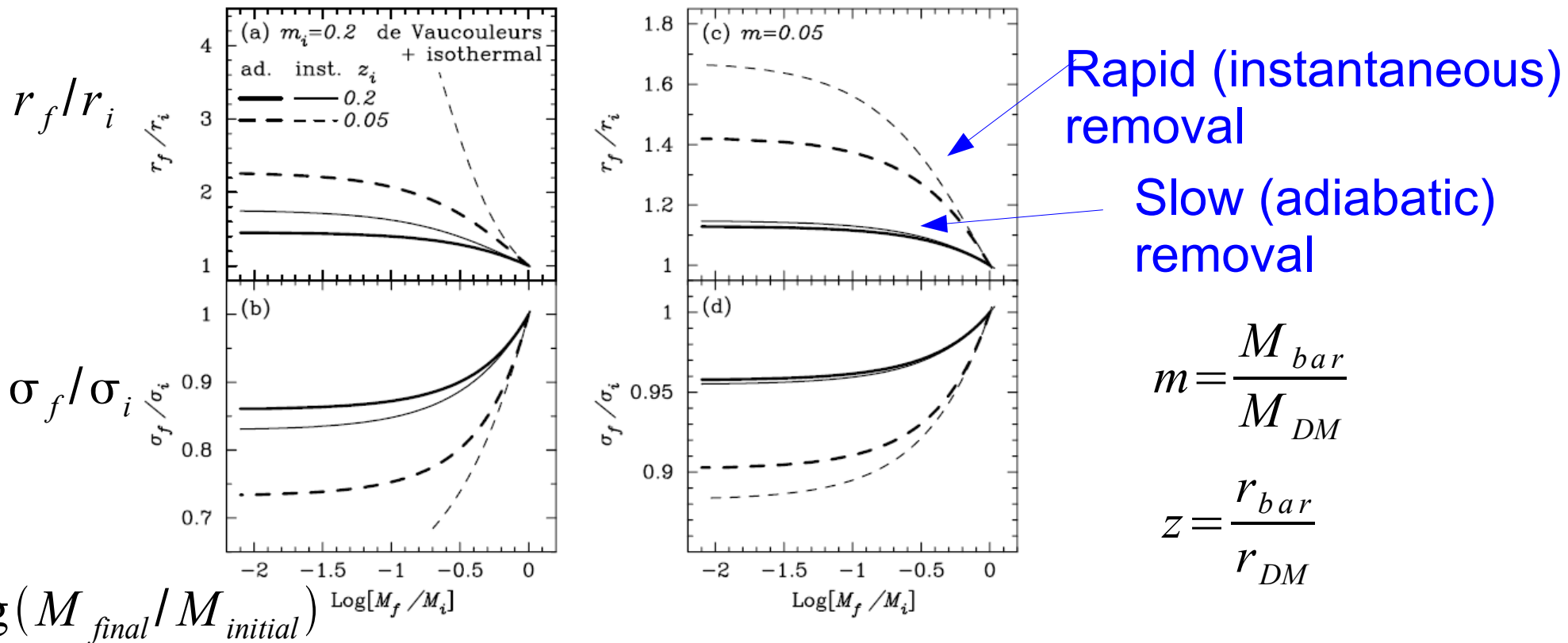
V_{circ} 程度で飛び回っている、 r_g, v_g の銀河の衝突確率

$$k \sim n\sigma V_{\text{circ}} \propto \frac{N}{R_h^3} \frac{r_g^2 v_g^4}{V_{\text{circ}}^3},$$

個々の satellite 銀河について評価し、
このrateでランダムに**他の satellite 銀河と合体**
(等質量でない場合もやってみたが、LFについては変わりなし)

dynamical response

starburst の際には、単にガスが抜けるだけでなく、
 ガス放出に伴う重力ポテンシャルの変動への
 サイズ・速度分散の応答を考慮→dwarf E 形成で重要



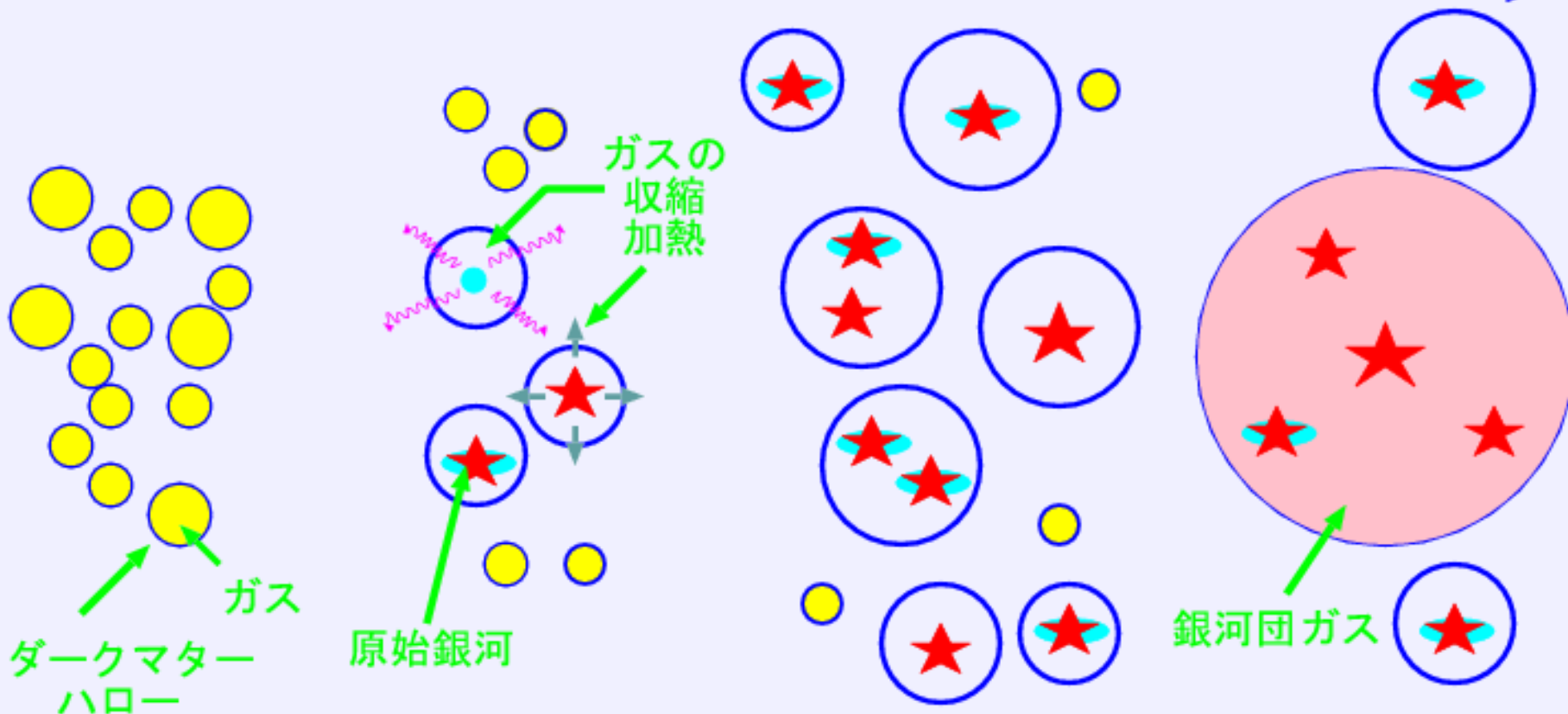
$\log(M_{final}/M_{initial})$

Figure 1. Dynamical response of the baryonic component of deprojected de Vaucouleurs profile embedded in an isothermal halo, for various values of initial mass $m_i \equiv M_i/M_d$ and size $z_i \equiv r_i/r_d$. The horizontal axis is the ratio of final to initial baryon masses. Upper and lower panels indicate the changes of size and velocity dispersion, respectively, for $m_i = 0.2$ (left panel) and 0.05 (right panel). The thick solid and thick dashed lines in each panel show the results of $z_i = 0.2$ and 0.05 , respectively, for adiabatic gas removal. The thin solid and thin dashed lines show those results for instantaneous gas removal. Note that the scales of vertical axes of left and right panels are different.

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



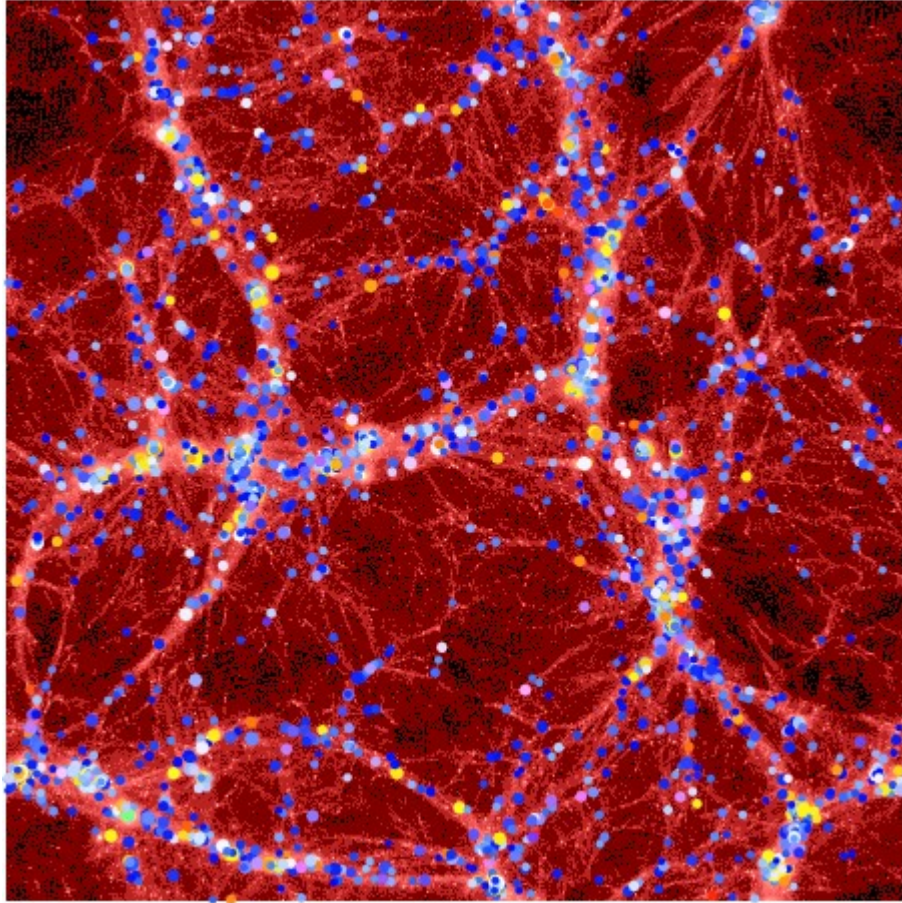
自己重力による
初期天体の形成

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

★星形成史が確定

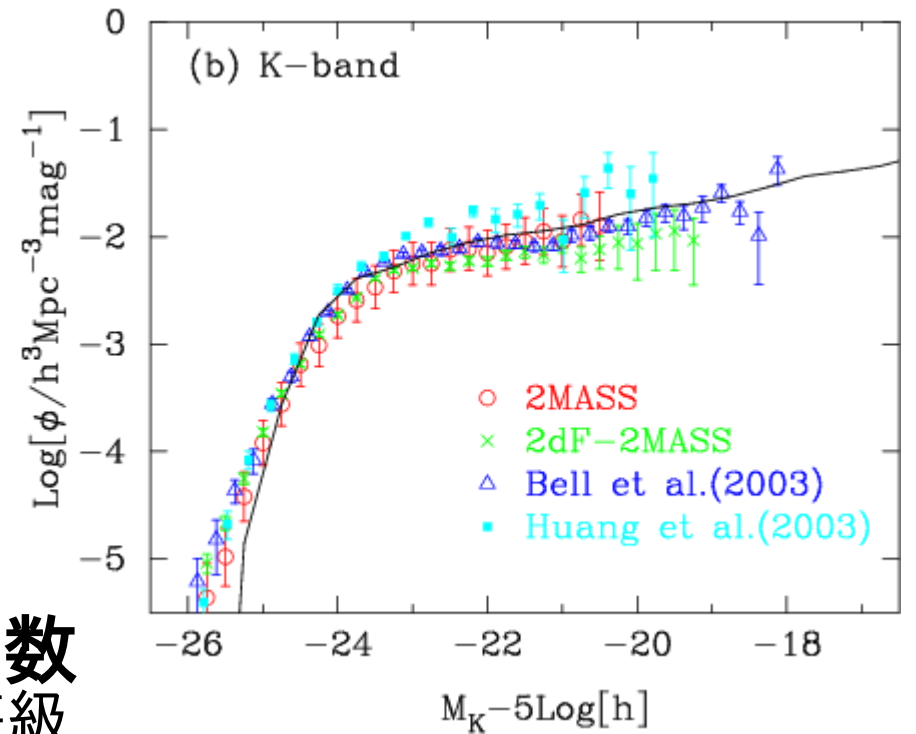
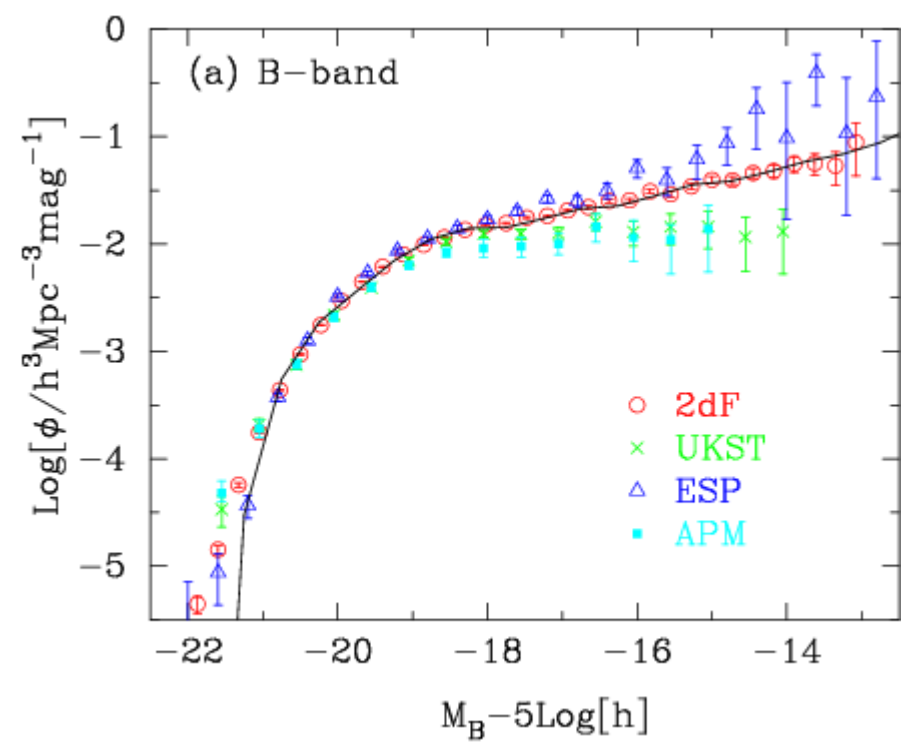


理論モデルにより得られた分布

赤の濃淡：ダークマター密度
色つき丸：銀河

光度関数

横軸：銀河の等級
縦軸：個数密度

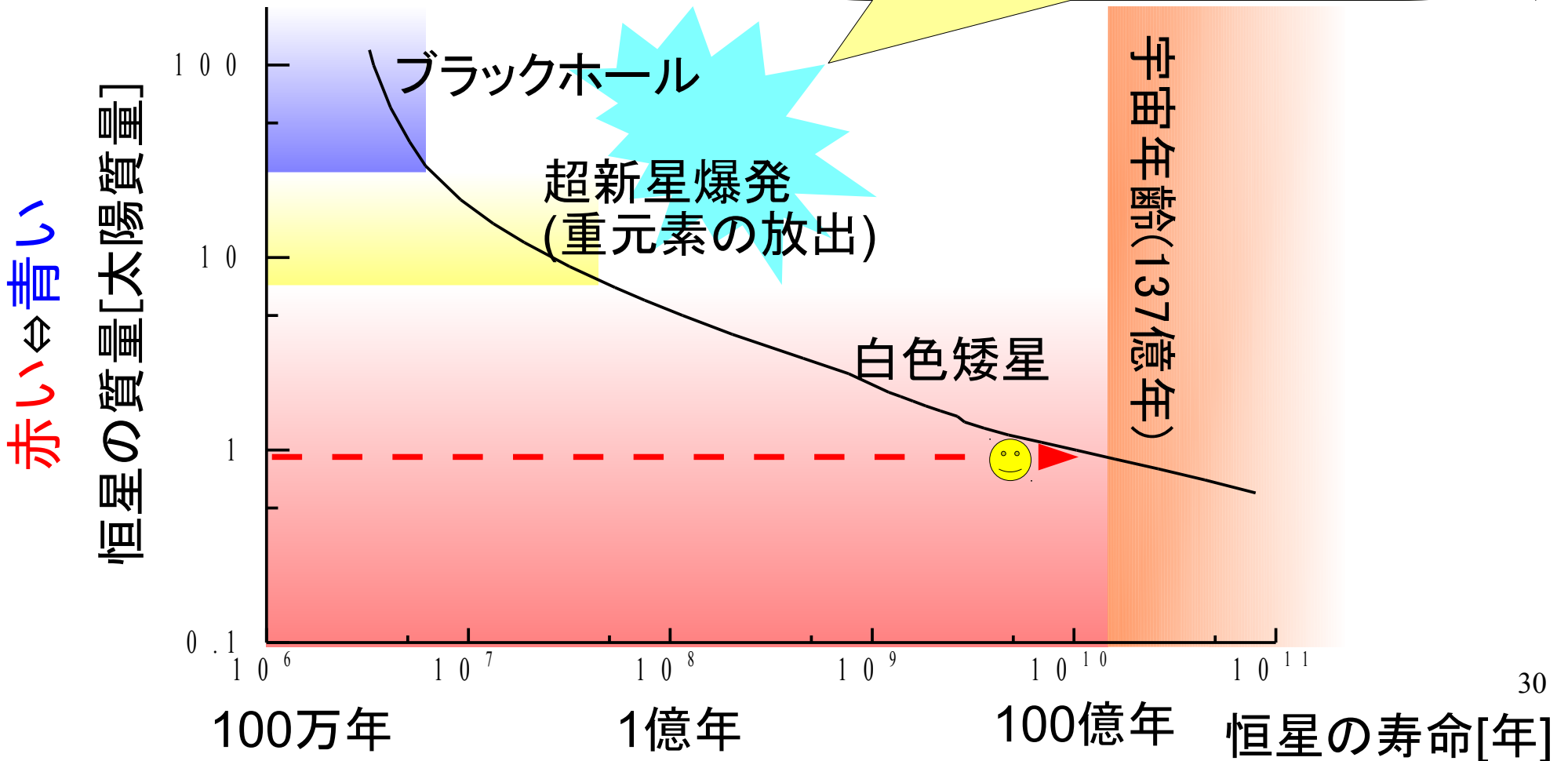


Nagashima et al.(2005)

まずは星から：恒星の寿命

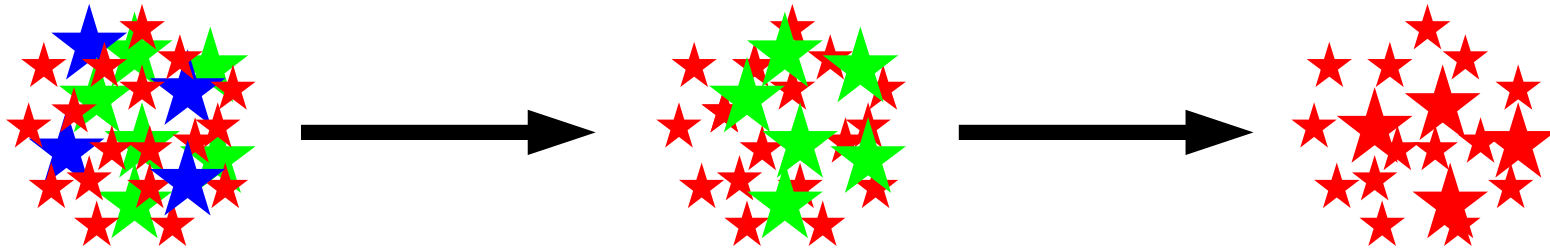
- 大質量星は数千万年(ほぼ「一瞬」)で爆発→重元素汚染
- 小質量星は寿命が長い

大半はガスに戻る
一部はブラックホール・中性子星・
白色矮星に固定



同時に誕生した星の集団の進化

- 新たに星が作られなければ、星団は青→赤に変化していく
 - ▶ 球状星団はこれそのもの。楕円銀河も？



- 明るいが少ない、青い大質量星
- 暗いが多い、赤い小質量星

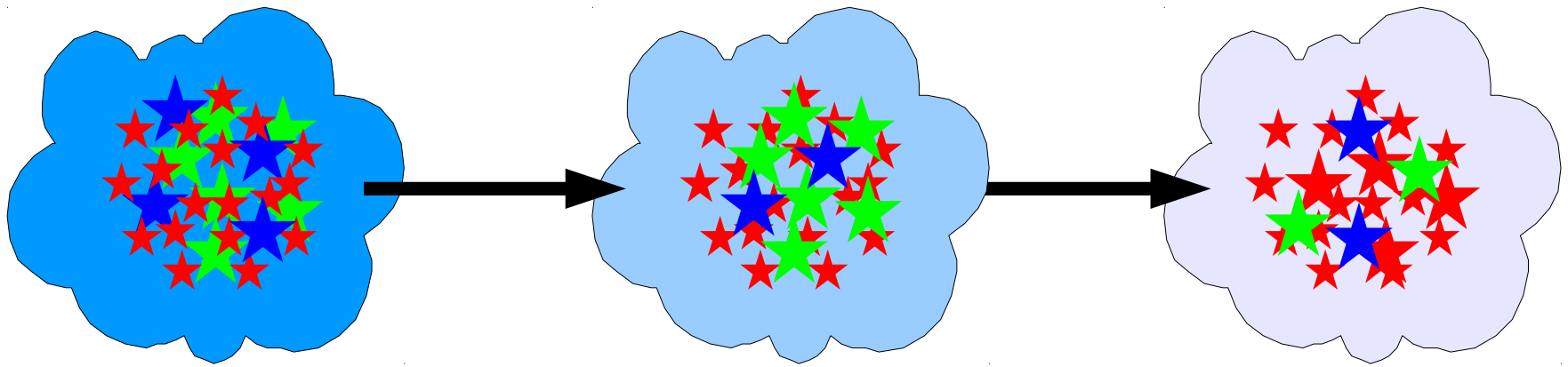
- 大質量星が死ぬ
- 徐々に赤くなる

- 赤い小質量星ばかり
- 一部は赤色巨星に

- 銀河進化を理解する上での大問題：
 - 大質量星と小質量星、どっちがどれくらい多いのか？
 - 「初期質量関数(IMF)」…質量と個数の関係
- 理論的にはほぼまったくわかっていない
- 仕方ないので、太陽近傍から推測する
- というわけで、この問題はとりあえず放置!

ガスがある場合

- ガスから絶えず星が作られる。
- 新たにできる星の集団には、明るく青い大質量の星が含まれるので、全体も青く見える。
 - ▶ 渦巻銀河がこれに相当する
- ガスは外部から供給されなければ、徐々に減っていく



- $M_{\text{gas}} \sim 10^{10} M_{\odot}$, $\psi \simeq 6 - 10 M_{\odot}/\text{yr} \rightarrow$ 約1-2Gyrで使い果たす \rightarrow 供給が必要 (無論どんどん減っているphaseかもしれないですが)

ここまでで言えること

- **観測事実**：楕円銀河は赤く、渦巻銀河は青い
- **観測事実**：楕円銀河はガスがなく、渦巻銀河は大量にある
- 楕円銀河ではずっと以前に星形成が止まった
 - ▶ 古い星が多い
- 渦巻銀河ではいまでも星を作り続けている
 - ▶ (II型)超新星爆発の有無などからも言える

⇒星がどのように生まれてきたか(**星形成史**)が重要

⇒渦巻銀河のガスはどのように供給されているのか？

⇒楕円銀河にはなぜガスがないのか？

⇒ガスのある/なしと、「かたち」に関係があるのはなぜ？

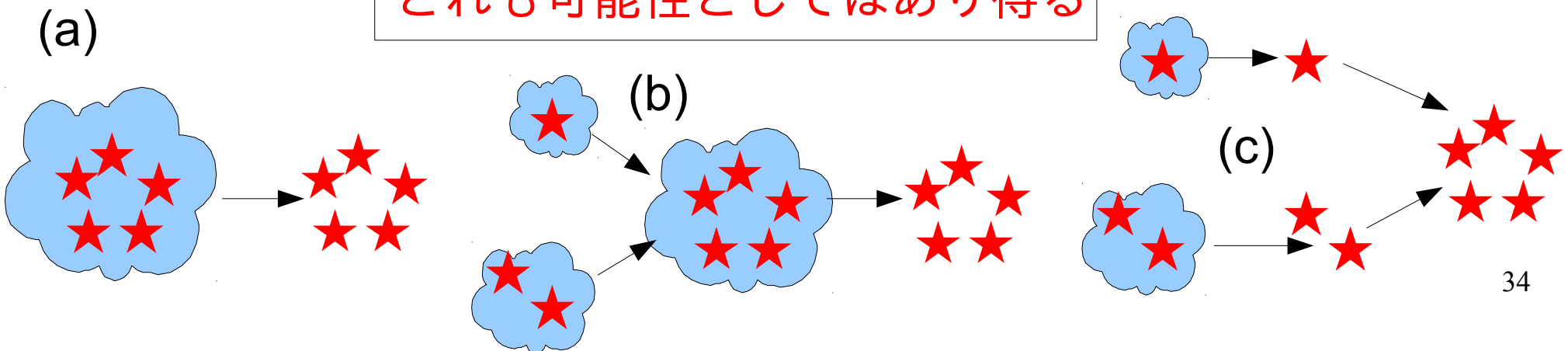
楕円銀河

- 古い星が多い⇔新しい星がない
- ガスがない

⇒早い段階で、ガスを使い果たし、新たなガスの供給がなかった、と考えられる

- 宇宙の初期に、爆発的に星を作ったフェイズがあった？
 - ▶ 爆発的星生成/スターバースト
- はじめから一つの楕円だったのか？それとも、複数の銀河が合体して現在の姿になったのか？

どれも可能性としてはあり得る



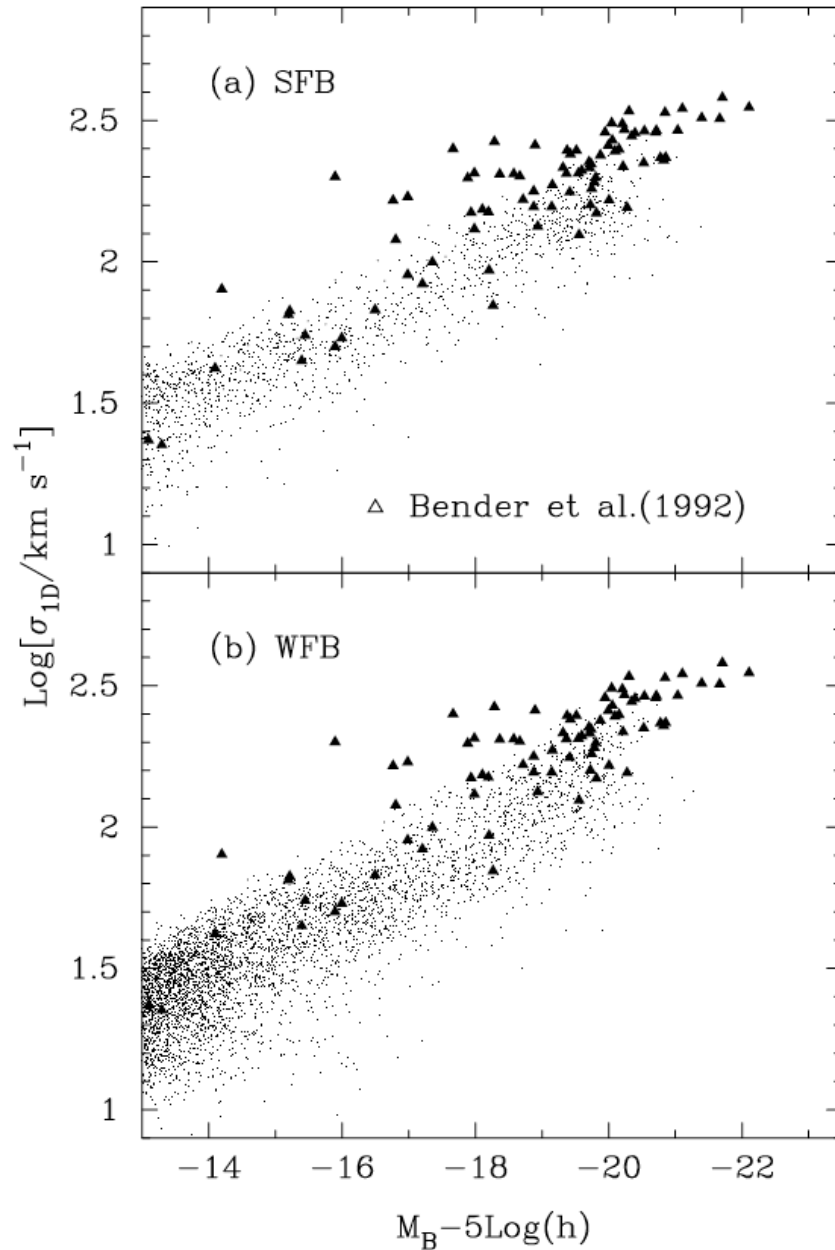
楕円銀河

- 始めから、いまと同じガス雲からできたとしたら：
 - ▶ なぜ「そのような」雲ができていたのか？
 - ▶ なぜ楕円になったのか？
- 合体で大きくなってきたとしたら？
 - ▶ 合体のときには簡単に楕円になれる(シミュレーションより)
 - ▶ 本当に、そんなに合体できるのか？
- CDM宇宙では、合体が自然に起こることがわかっている[前頁(b),(c)]
- 合体しつつある銀河も大量に発見されている

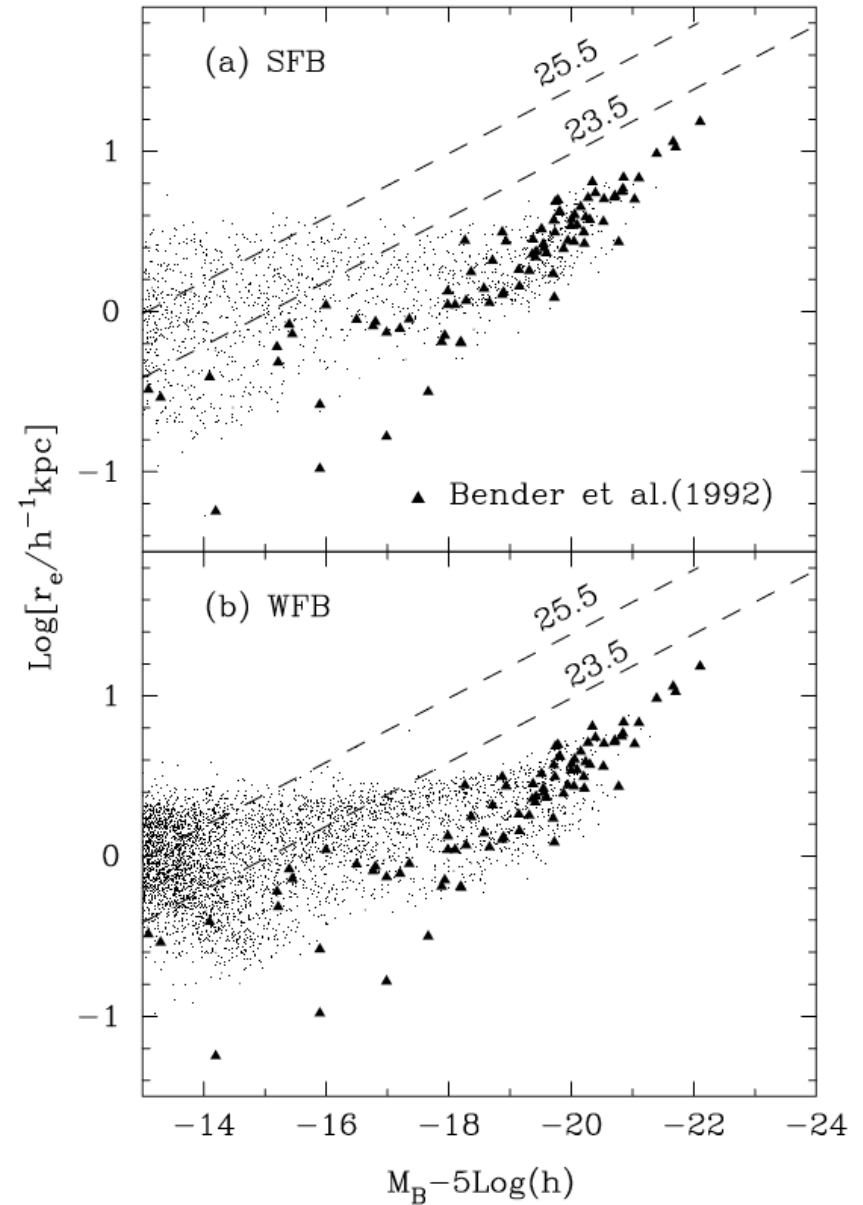
楕円銀河は合体でできたようである

ν GC より

Faber-Jackson



size-mag.



Mitaka modelより

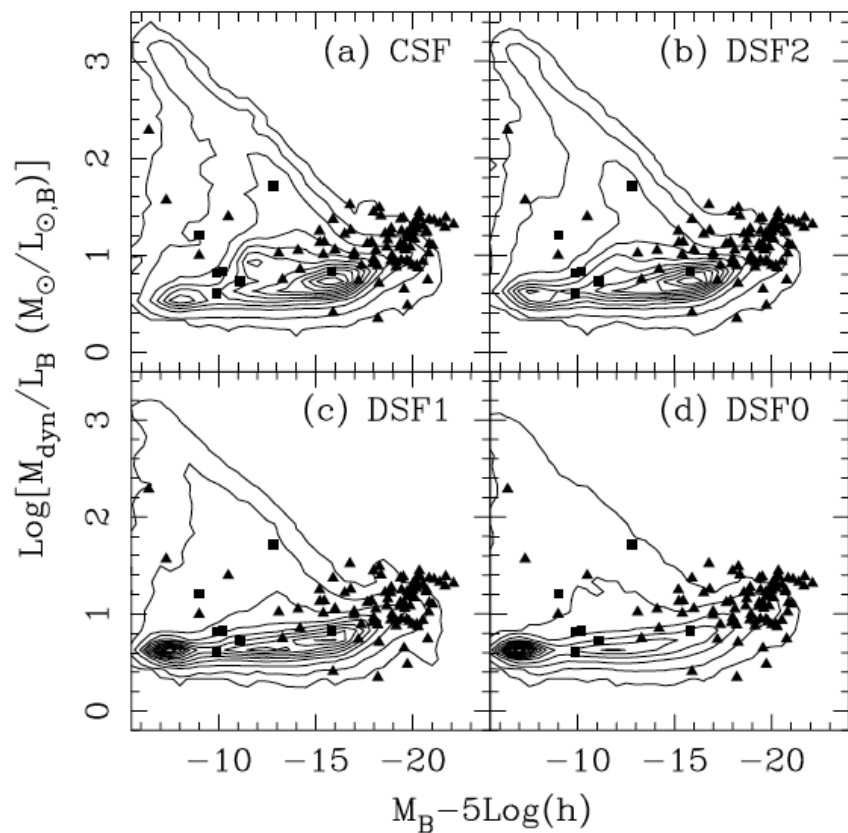
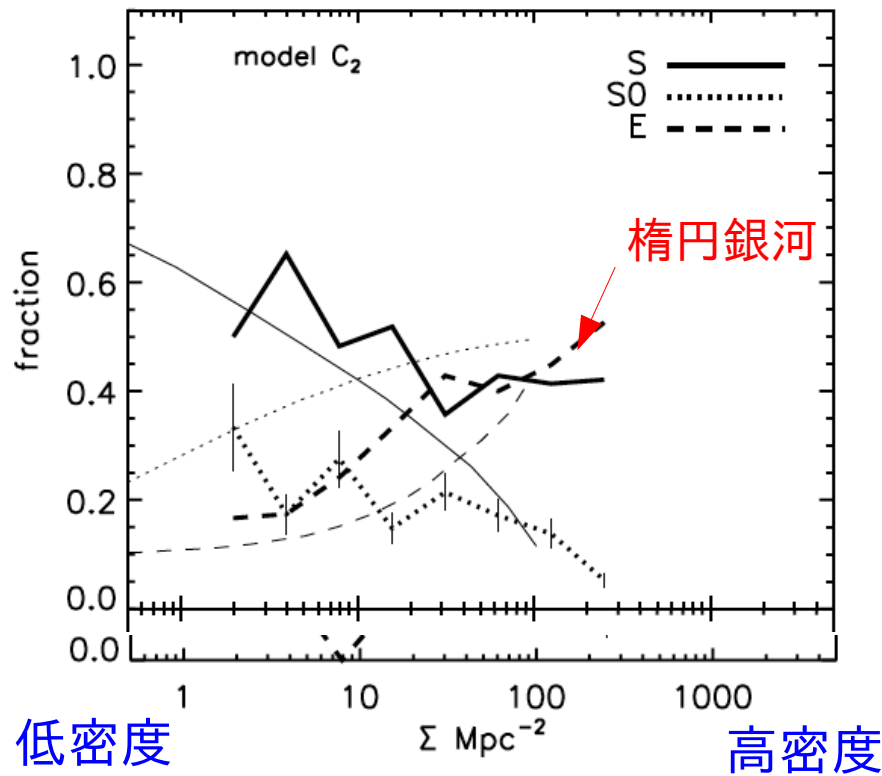


FIG. 17.—Distribution of B -band mass-to-light ratio for elliptical galaxies. Same as Fig. 15, but only for galaxies of high surface brightness with $\mu_{e,B} \leq 26.5$ in the models as well as the data.

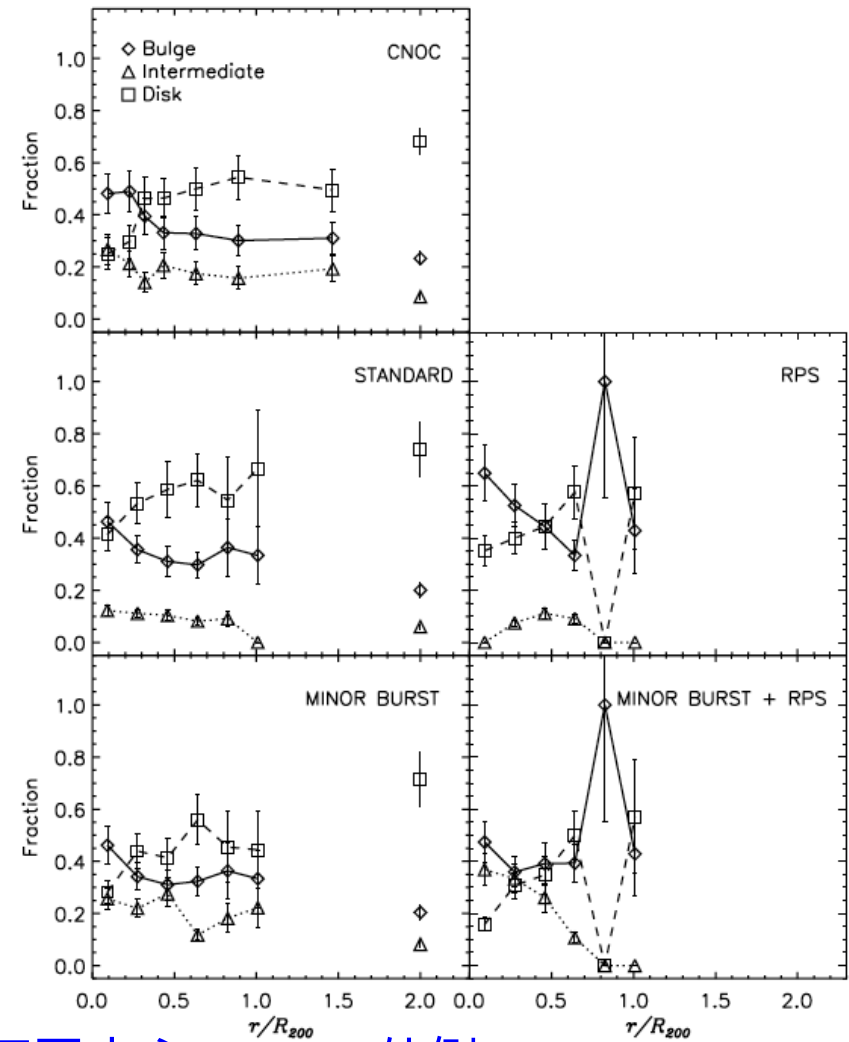
M/L
M/L \sim 1のものも、
M/L \sim 100のものも
同時に作れる
(Nagashima & Yoshii 2004)

形態-密度(半径)関係



Okamoto & Nagashima (2001)

楕円銀河の分布の特徴を
良く再現している
(S0は ram-pressure stripping
などが必要?)



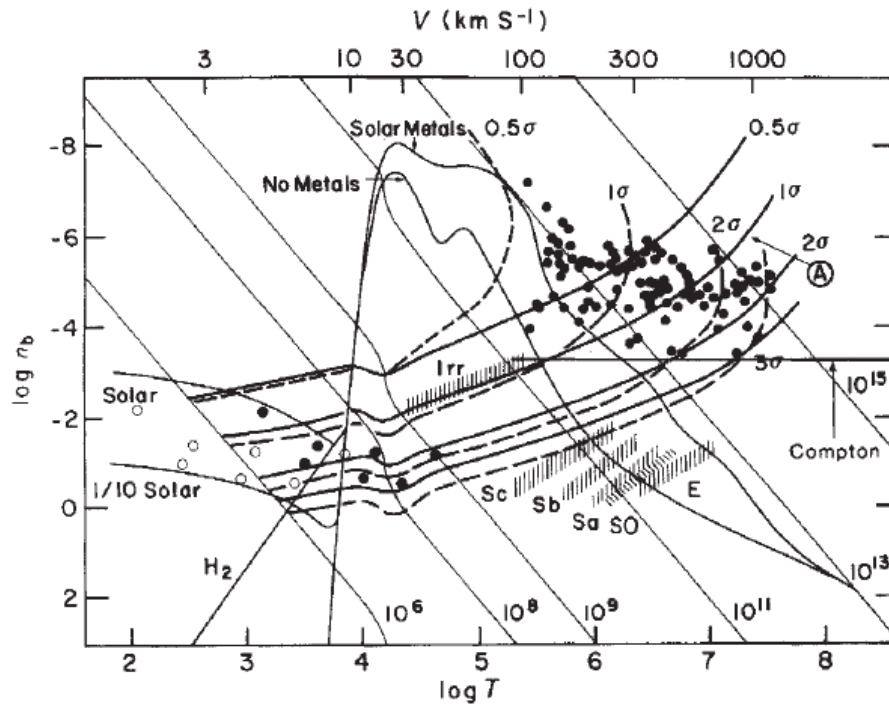
銀河団中心

外側

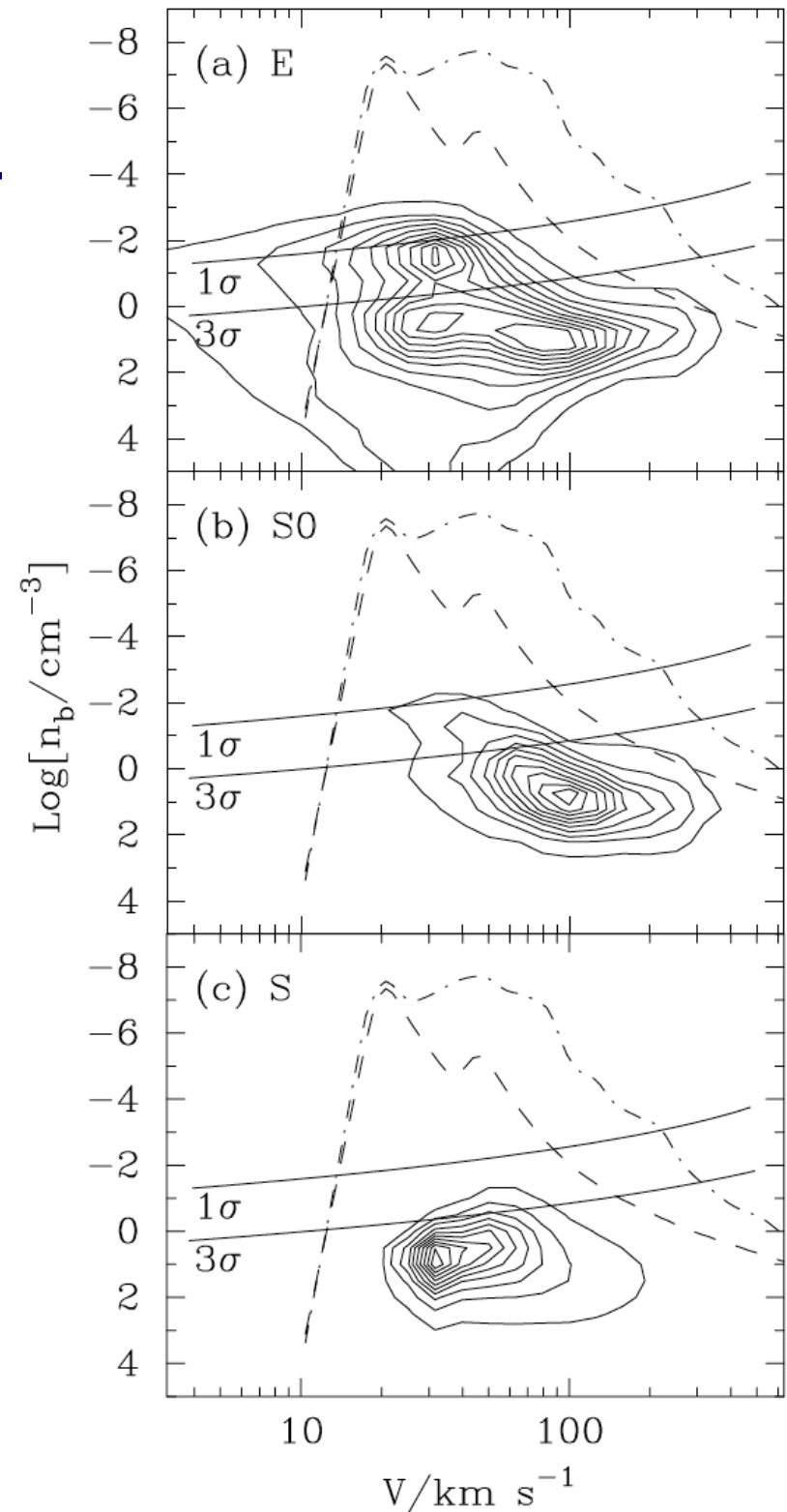
Okamoto & Nagashima (2003)

温故知新

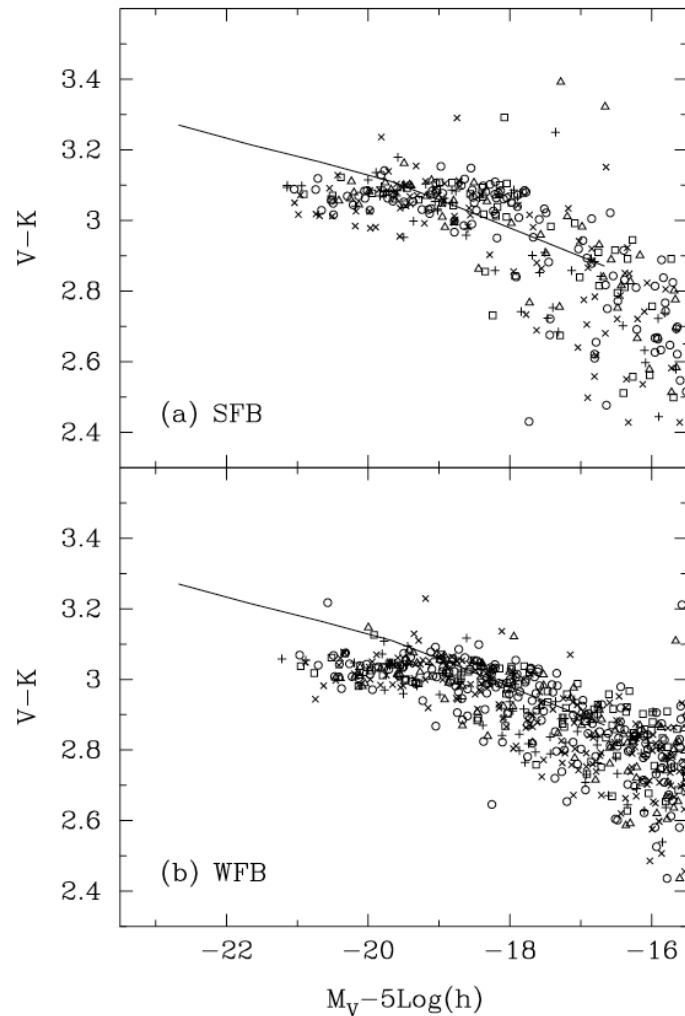
- 1 σ のゆらぎ、とかで銀河形成を論じるのはあんまり意味がない
 - ▶ hierarchical でも作れる



Blumenthal et al.(1984)



color-magnitude relation



- うまくいってない
 - 明るいやつが赤くなりきらない
- top-heavy IMFが必要?

Monolithic model による解析

CDM確立前の現象論的モデル

→ Monolithic cloud collapse model

Traditional Galaxy Evolution Models

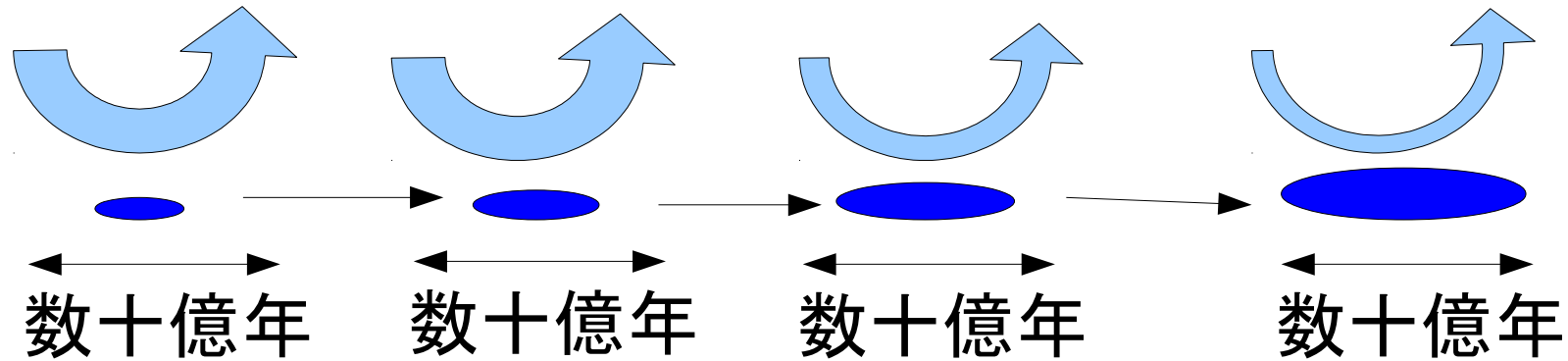
→ Monolithic Cloud Collapse Scenario



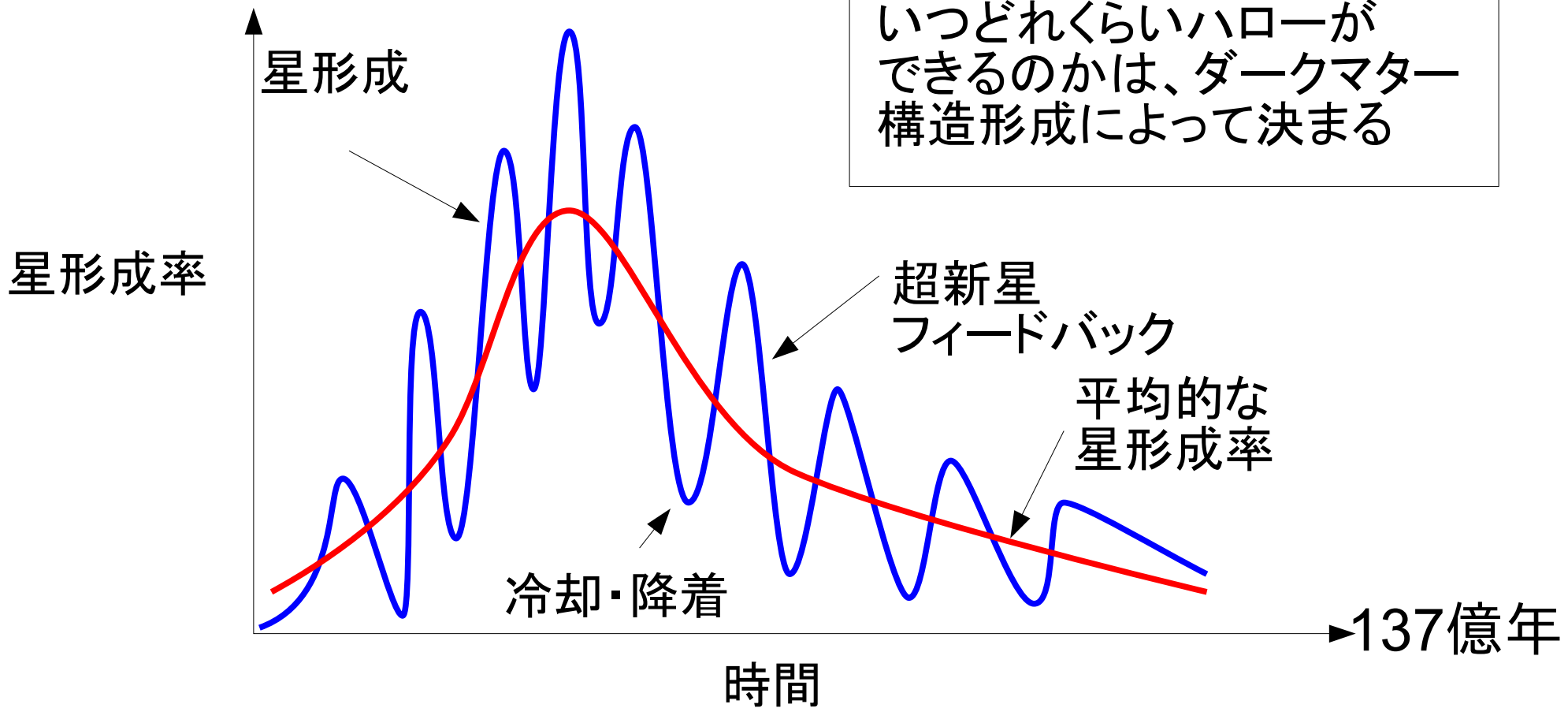
ひとこえ
10Gyr

These are only *phenomenological*, but still strong tools *at low redshift*..
At high redshift? → ***Hierarchical Clustering becomes important!!***

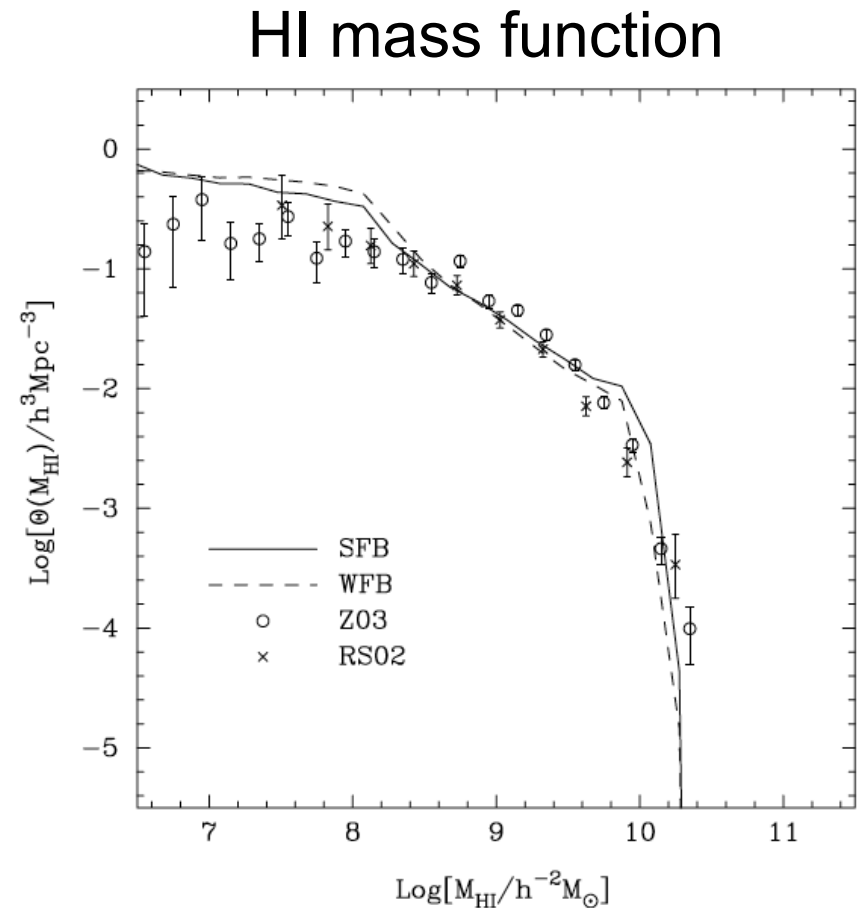
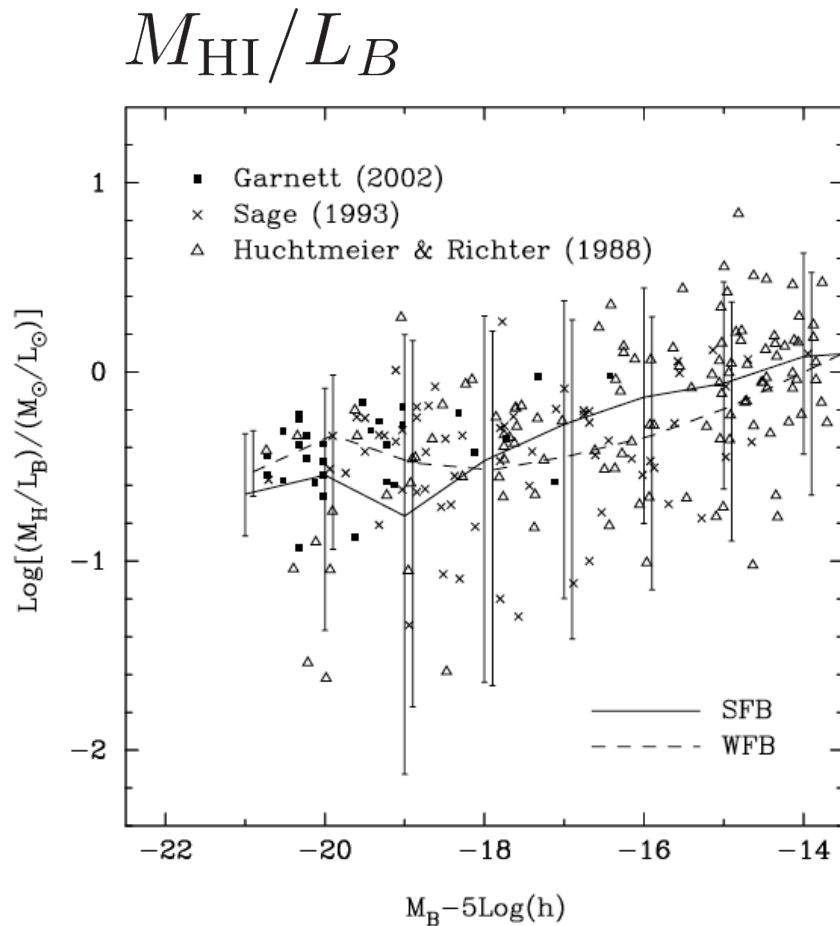
見かけ上、宇宙年齢かけて「ゆっくり」進化する



どこかでバルジができるような合体？



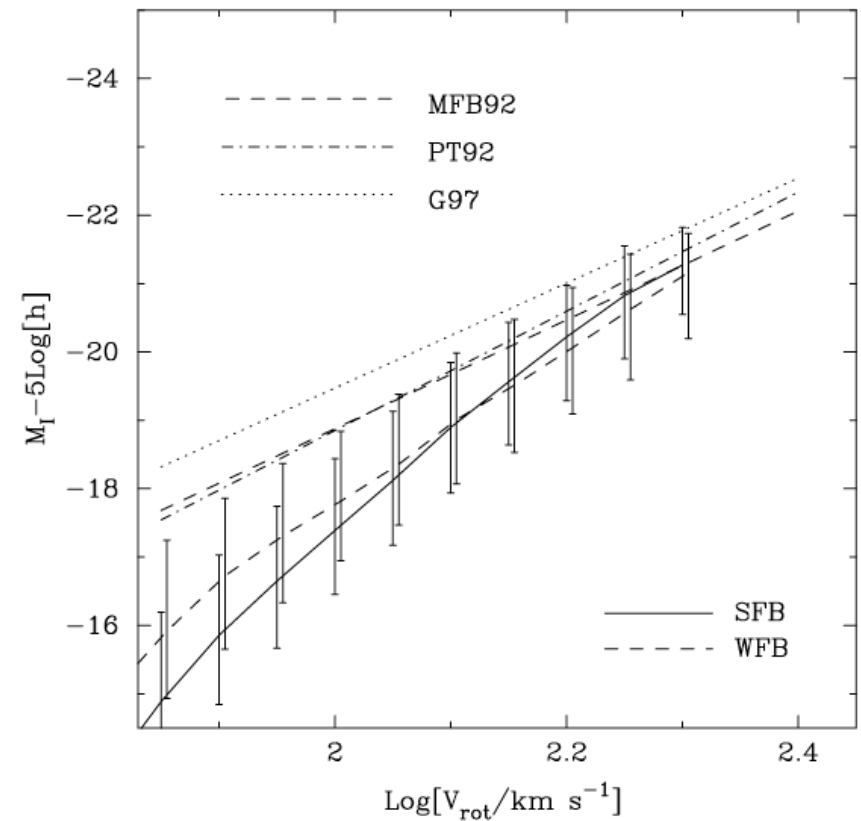
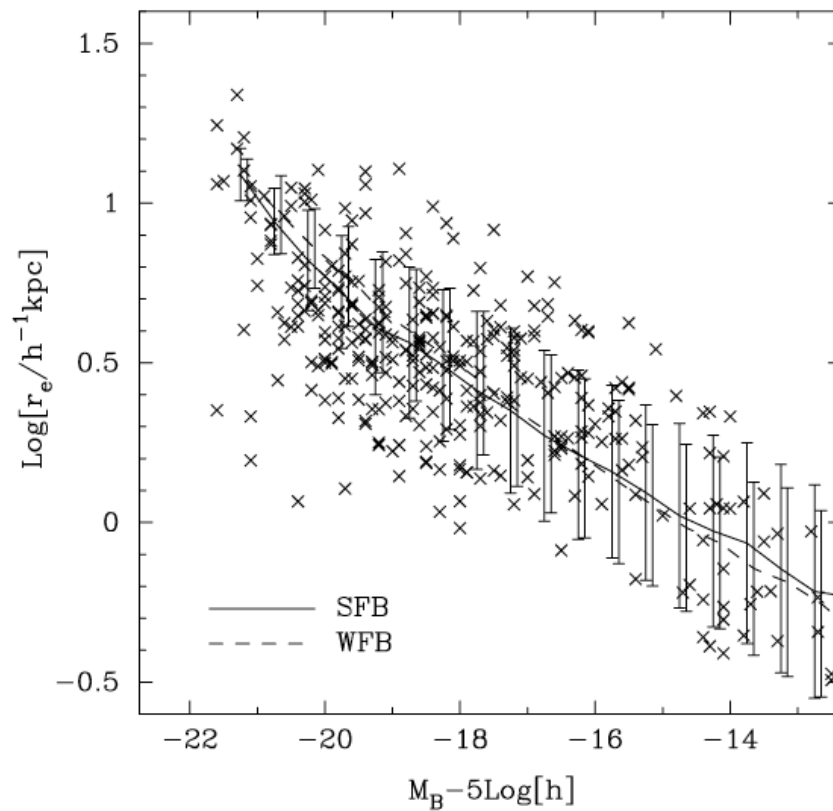
disk gas



「合っている」というか、星形成のタイムスケールを
観測に合うように決めることができる

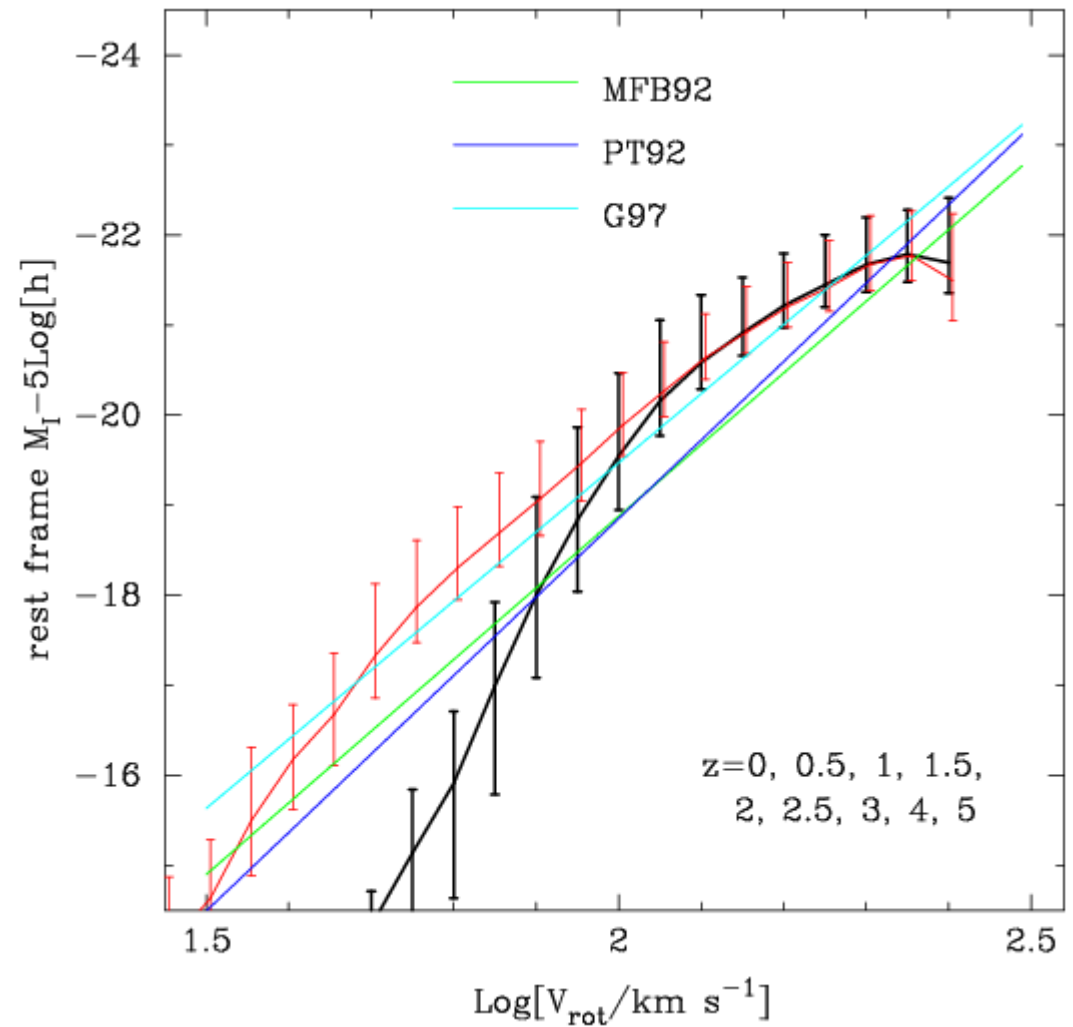
size & Tully-Fisher

TF relation は low- V_c で
合っていないように見える
のだけど...

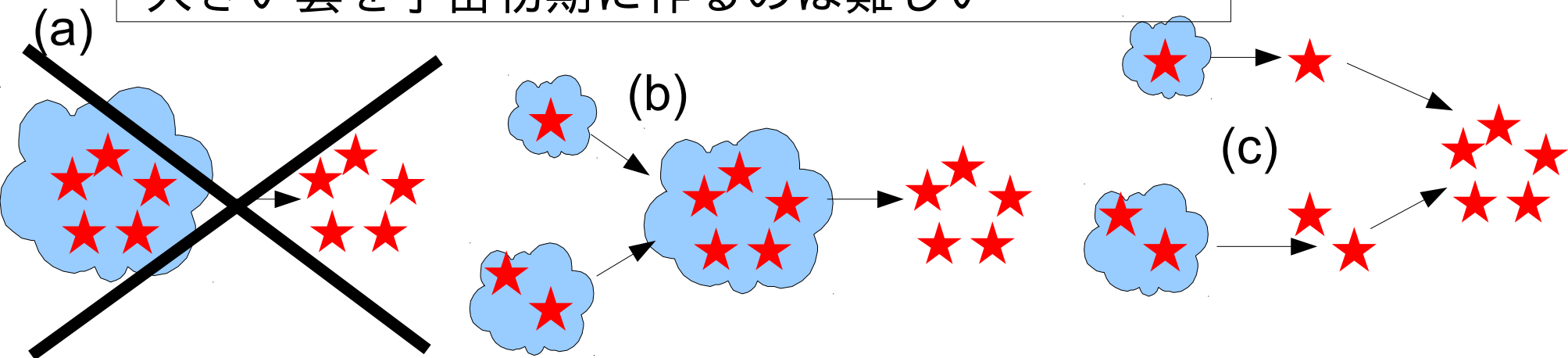


dynamical response

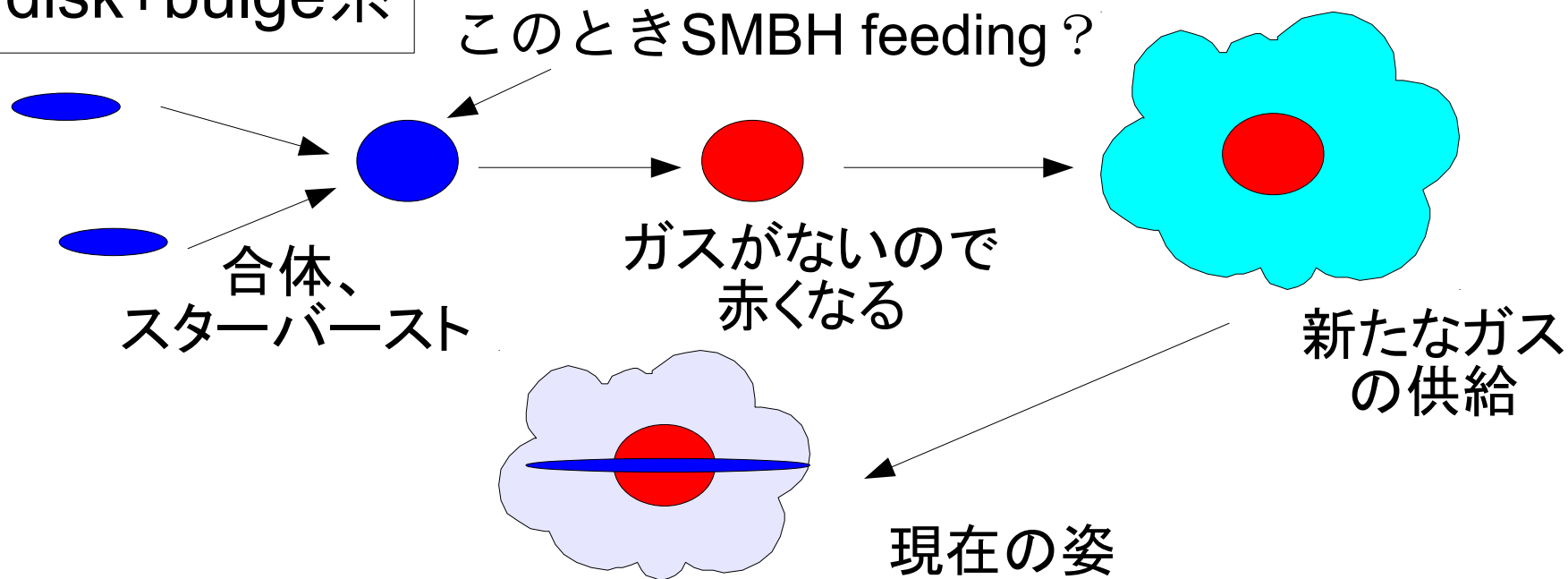
- SN feedback による mass-loss により、disk は拡がり回転速度は落ちる
- low- V_c 銀河で顕著



どれも可能性としてはあり得るが、(a)のような大きい雲を宇宙初期に作るのは難しい



disk+bulge系

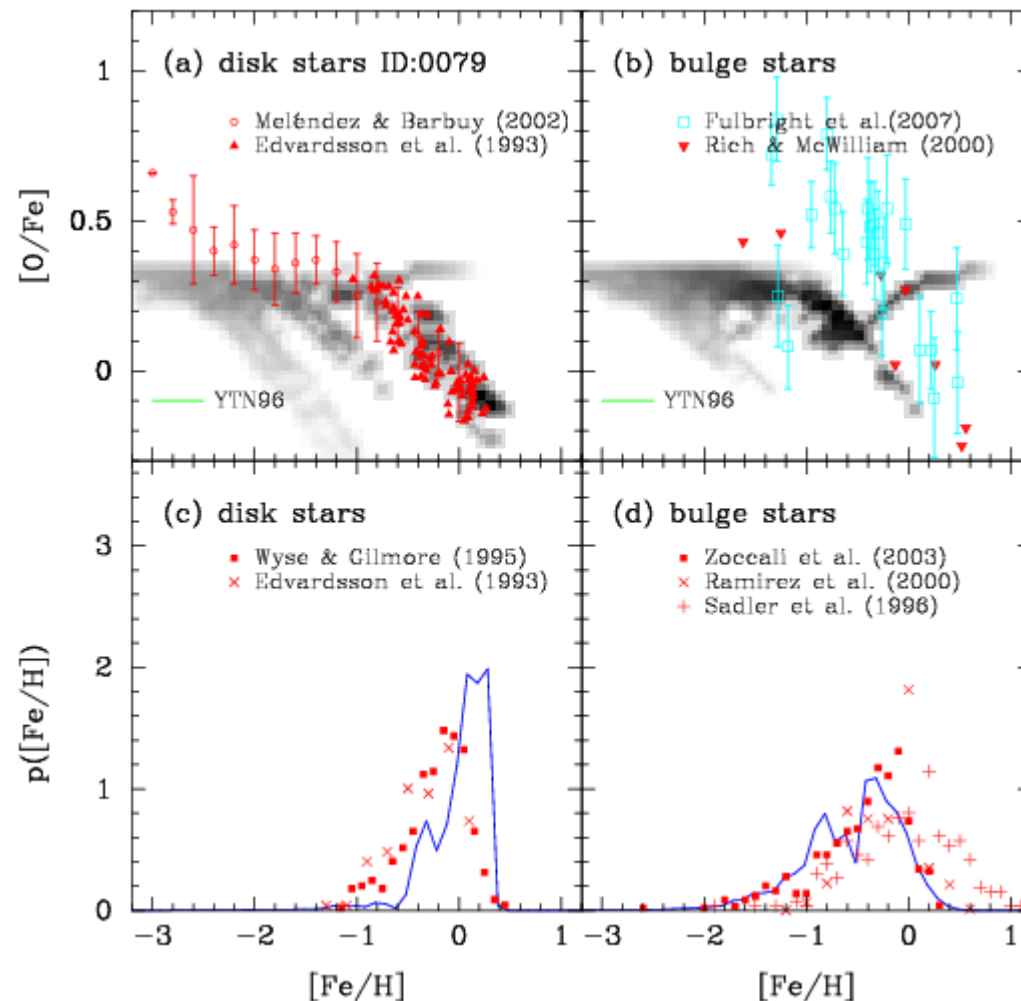


これからの課題(自分的に)

- AGN feedback(あまりにもテキトーなモデルが横行)
 - ▶ AGN/QSOとの関連
 - ▶ monster銀河形成の抑制
 - ▶ cooling flow抑止機構との関係
- IMF
 - ▶ top-heavy IMFはどこまで本当か?
 - ▶ disk IMF とは違うのは(ほぼ)明らか
 - ICMは α 過剰: top-heavy で説明可能
 - 楕円銀河(銀河団に多い)は赤い: top-heavyで説明可能
 - high-z massive 銀河が説明できるか?
 - ▶ metal enrichment をちゃんと解かないといけない
 - ▶ down-sizing問題を解決できるか?
 - 観測データの解釈も変わる

One MW-like galaxy

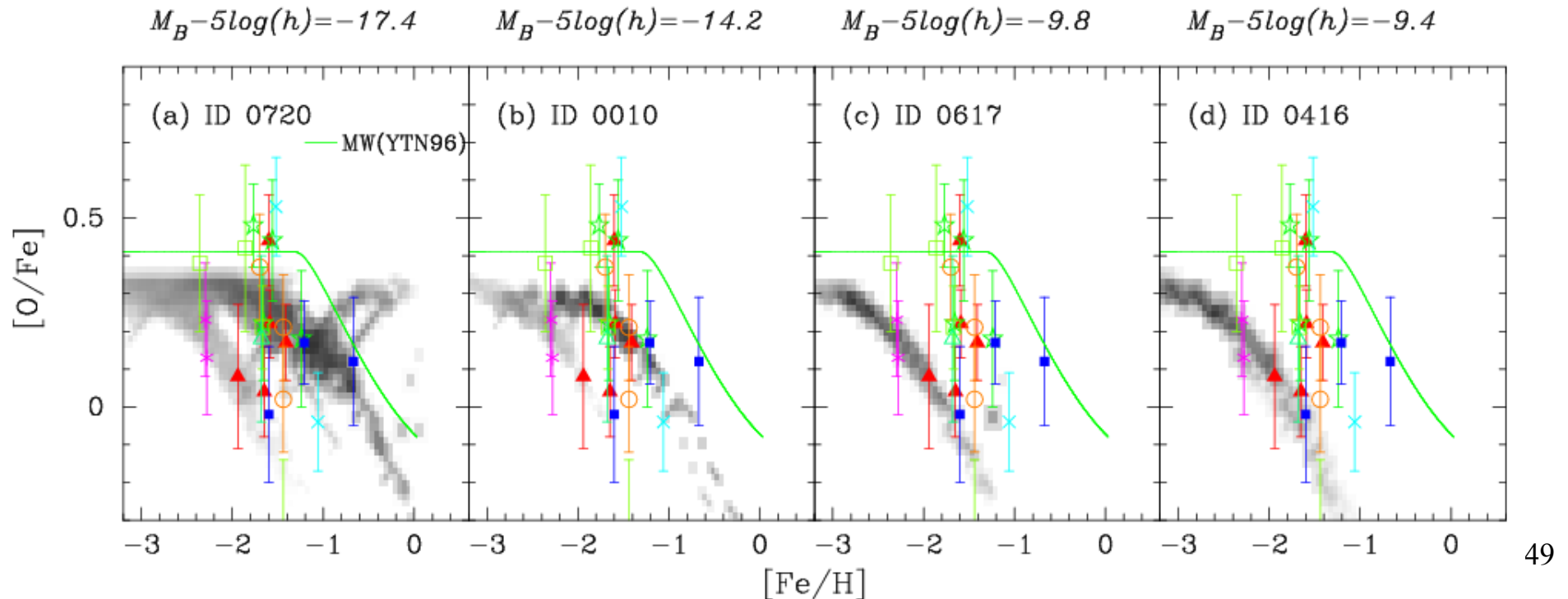
- 一個のMW的銀河（平均ではなく）
- コイツの周囲の衛星銀河を調べる



dwarf spheroidals

- dSph'sをピックアップする
- 観測と似たような重元素分布
- 超新星フィードバックが $[\text{Fe}/\text{H}]$ を低くとどめ、そのままSNIaが効きだすため

Nagashima & Okamoto (in prep.)



これからの課題

- 星形成のタイムスケールは何で決まっているか？
 - ▶ diskでの星形成の理解へ
 - ▶ 分子雲の寿命は短いよう (armとの強いassociation→寿命 \ll 回転のタイムスケール)
 - ▶ 分子雲内での星形成はほぼdynamical
 - ▶ 分子雲形成のタイムスケールと効率がわかると、銀河スケールでの星形成が見えてくる(であろう)
- もちろんhigh-z銀河も重要だが、そこから銀河の形成過程について、どのような知見が得られるのか、という意識を常に持つておくことが重要であろう