

円盤銀河とフィードバック



岡本 崇（北海道大学）

今日する話

- 角運動量の獲得
- 角運動量問題とは何だったのか
- 円盤とバルジの形成
- まとめ



角運動量の獲得 (1)

1 つの halo へと collapse する Eulerian volume V

$$L(t) = \int_{a^3 V} d\mathbf{r} \rho \mathbf{r} \times \mathbf{v} = \bar{\rho} a^4 \int_V d\mathbf{x} (1 + \delta(\mathbf{x})) \mathbf{x} \times \mathbf{u}.$$

Lagrangian volume Γ に置き換える: $\mathbf{x}(t) = \mathbf{q} + \mathbf{S}(\mathbf{q}, t)$

$$L(t) = \bar{\rho} a^5 \int_{\Gamma} d\mathbf{q} (\mathbf{q} + \mathbf{S}) \times \dot{\mathbf{S}}.$$

Zel'dovich 近似: $\mathbf{S}(\mathbf{q}, t) \simeq D(t) \mathbf{s}(\mathbf{q}) = D(t) \nabla \phi(\mathbf{q})$

$$\begin{aligned} L(t) &\simeq \bar{\rho} a^5 \dot{D} \int_{\Gamma} d\mathbf{q} (\mathbf{q} + D \nabla \phi) \times \nabla \phi \\ &= \bar{\rho} a^5 \dot{D} \int_{\Gamma} d\mathbf{q} \mathbf{q} \times \nabla \phi. \end{aligned}$$

$$\therefore L(t) \propto a^2 \dot{D} \propto t$$

角運動量の獲得 (2)

$$\phi(\mathbf{q}) = \phi(0) + q_i \left. \frac{\partial \phi}{\partial q_i} \right|_{\mathbf{q}=0} + \frac{1}{2} q_i \left. \frac{\partial^2 \phi}{\partial q_i \partial q_j} \right|_{\mathbf{q}=0} q_j + \dots$$

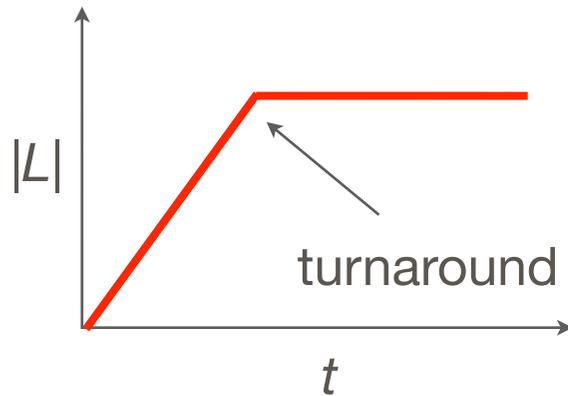
$$\begin{aligned} L_i(t) &\simeq \bar{\rho} a^5 \dot{D} \int_{\Gamma} d^3 q \epsilon_{ijk} q_j q_l \left. \frac{\partial^2 \phi}{\partial q_k \partial q_l} \right|_{\mathbf{q}=0} \\ &= a^2 \dot{D} \epsilon_{ijk} \mathcal{I}_{jl} \mathcal{D}_{kl}, \end{aligned}$$

$$\text{where } \mathcal{D}_{kl} \equiv \left. \frac{\partial^2 \phi}{\partial q_k \partial q_l} \right|_{\mathbf{q}=0} \text{ and } \mathcal{I}_{jl} \equiv \bar{\rho} a^3 \int_{\Gamma} d^3 q q_j q_l.$$

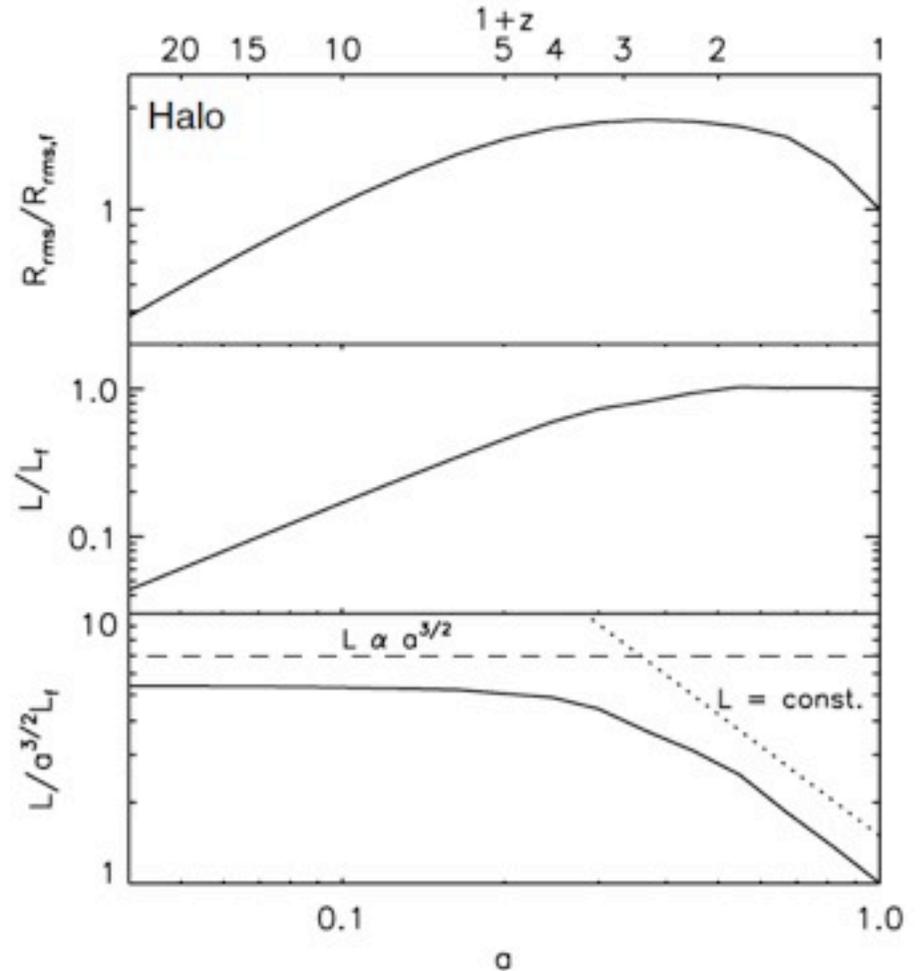
Γ の四重極モーメントと tidal field の
misalignment で角運動量を獲得

線形理論の予言

Λ CDM simulation



Turnaround まで角運動量を $|L| \propto a^{3/2} \propto t$ で獲得し, 収縮に転じると tidal field から切り離されて $|L| \sim \text{const.}$ となる.



Zavala, TO, Fenk'08

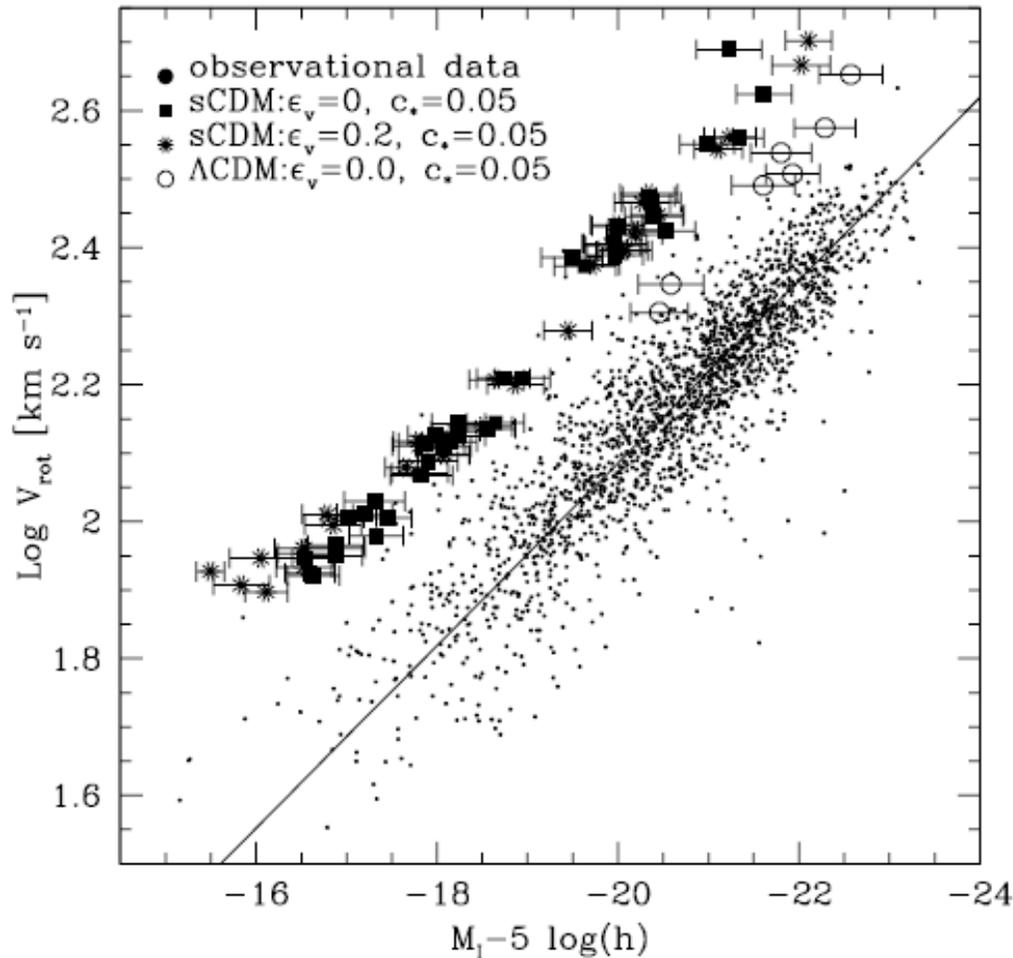
バリオンの角運動量

- ダークマターと同じプロセスで獲得
- turn around までに獲得終了
 - cold accretion とか hot accretion とかは関係ない (はず)
- 角運動量分布は初期条件で決まってる

角運動量問題

- ありがちな表現
「CDMシミュレーションでできる銀河の円盤サイズが小さ過ぎる」
- 正しい理解
「CDMシミュレーションでできた銀河のバルジが重すぎる」

角運動量問題



Navarro & Steinmetz '00

- Tully-Fisher 関係

- 円盤銀河の回転速度

$$v_c = \sqrt{\frac{GM}{R}}$$

と絶対光度の間の観測的
関係

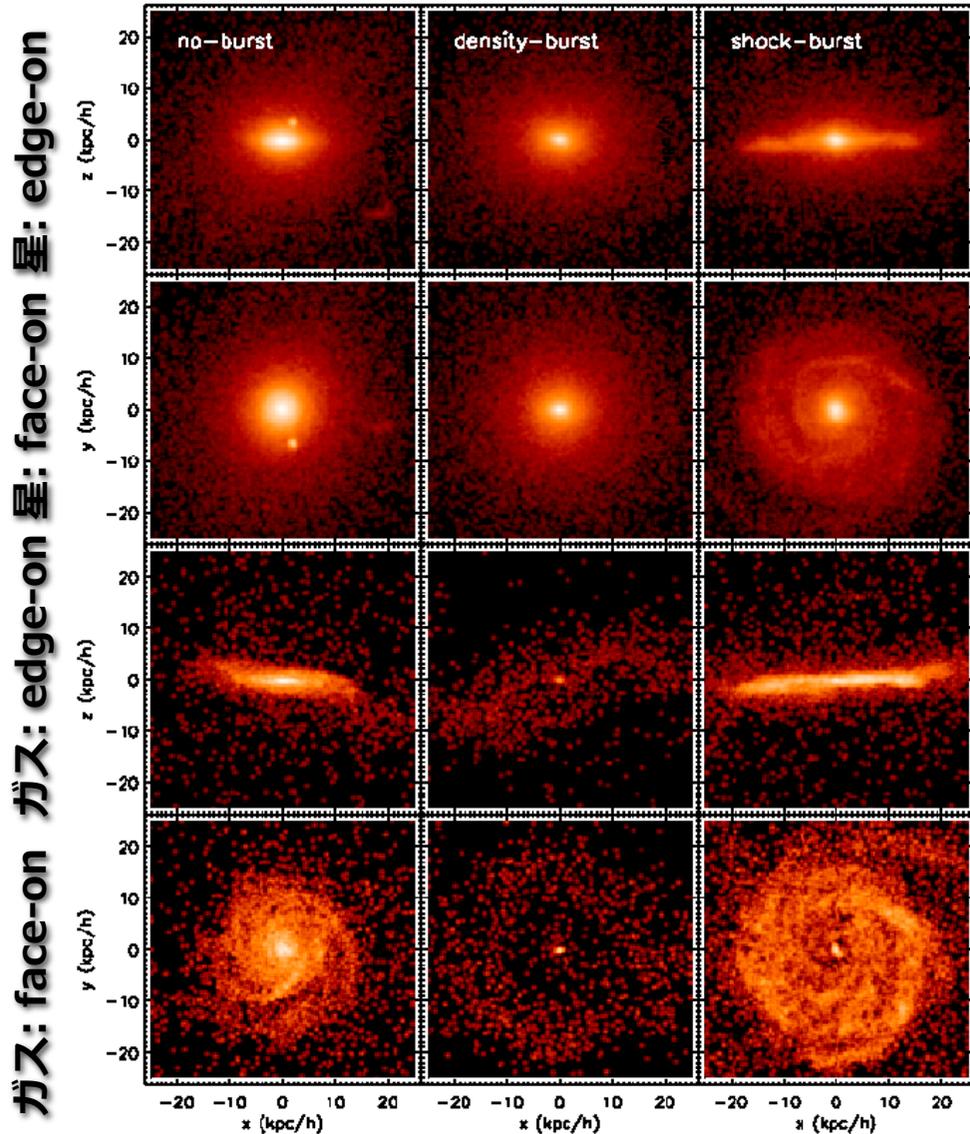
- シミュレーションの銀河
は光度に対して回転速度
が大きすぎる



- 質量が中心集中し過ぎ

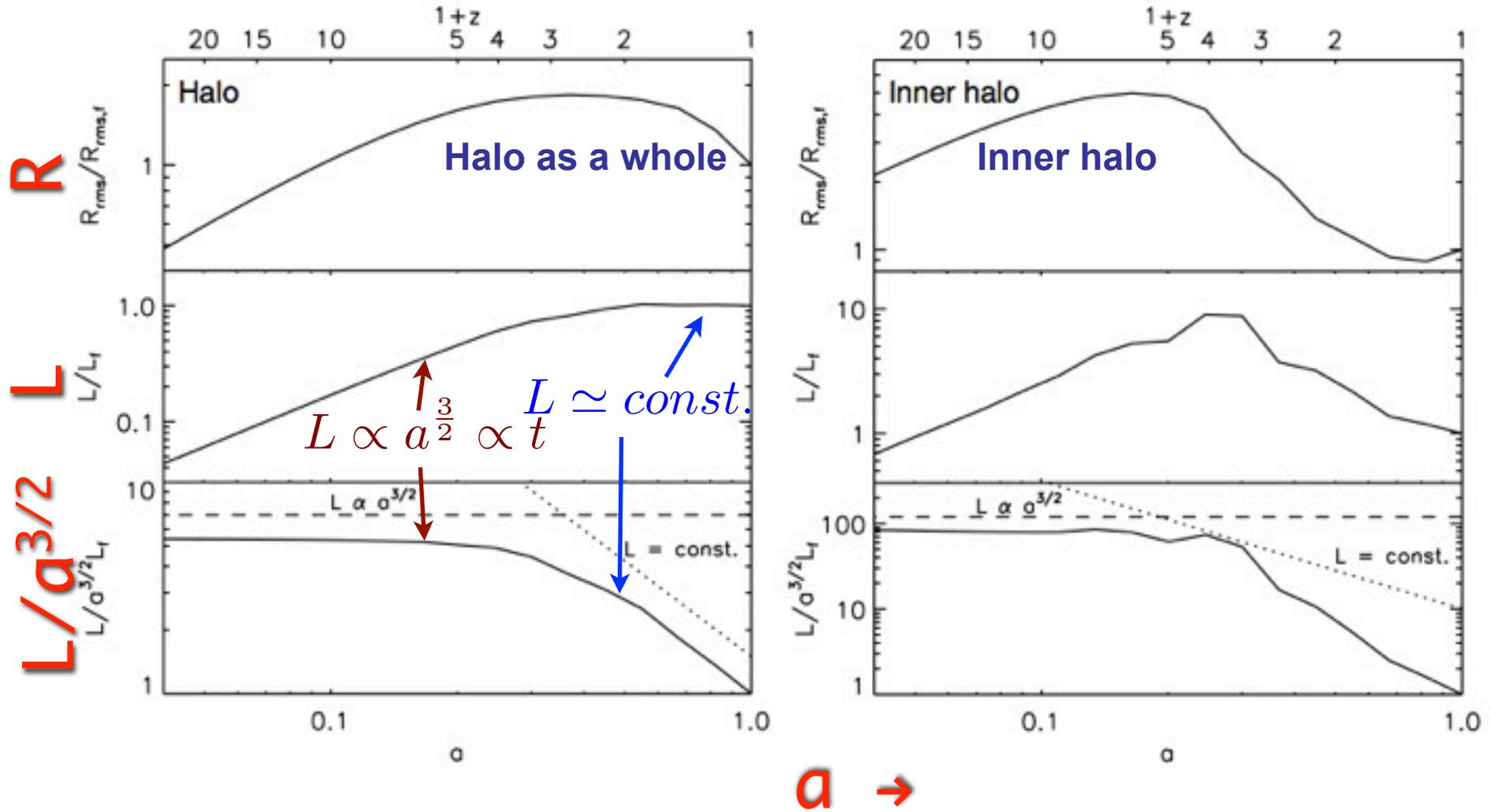
フィードバックの役割

Okamoto+'05



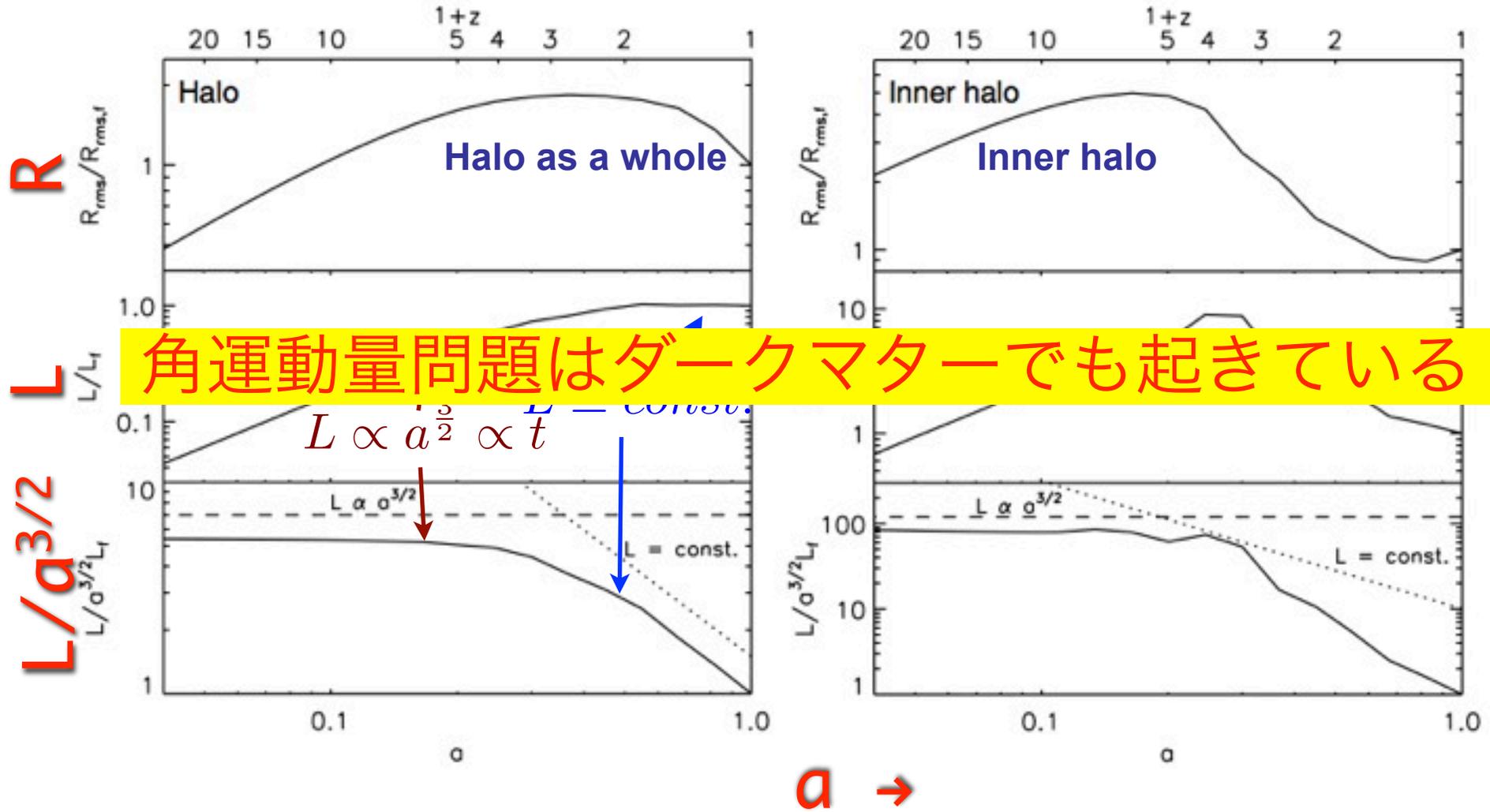
- $50 h^{-1}$ Mpc comoving box 内のある MW-sized halo に注目
- 同じ初期条件でフィードバック (FB) を変えて計算
- 左: 一般的な FB
- 中央: ガス密度の高い所 (銀河中心) に強い FB
- 右: 銀河の合体時に強い FB
- 「効く」強さで入れると FB は銀河の形態に強い影響を与える

ダークマターの角運動量進化



Zavala, Okamoto, Frenk'08

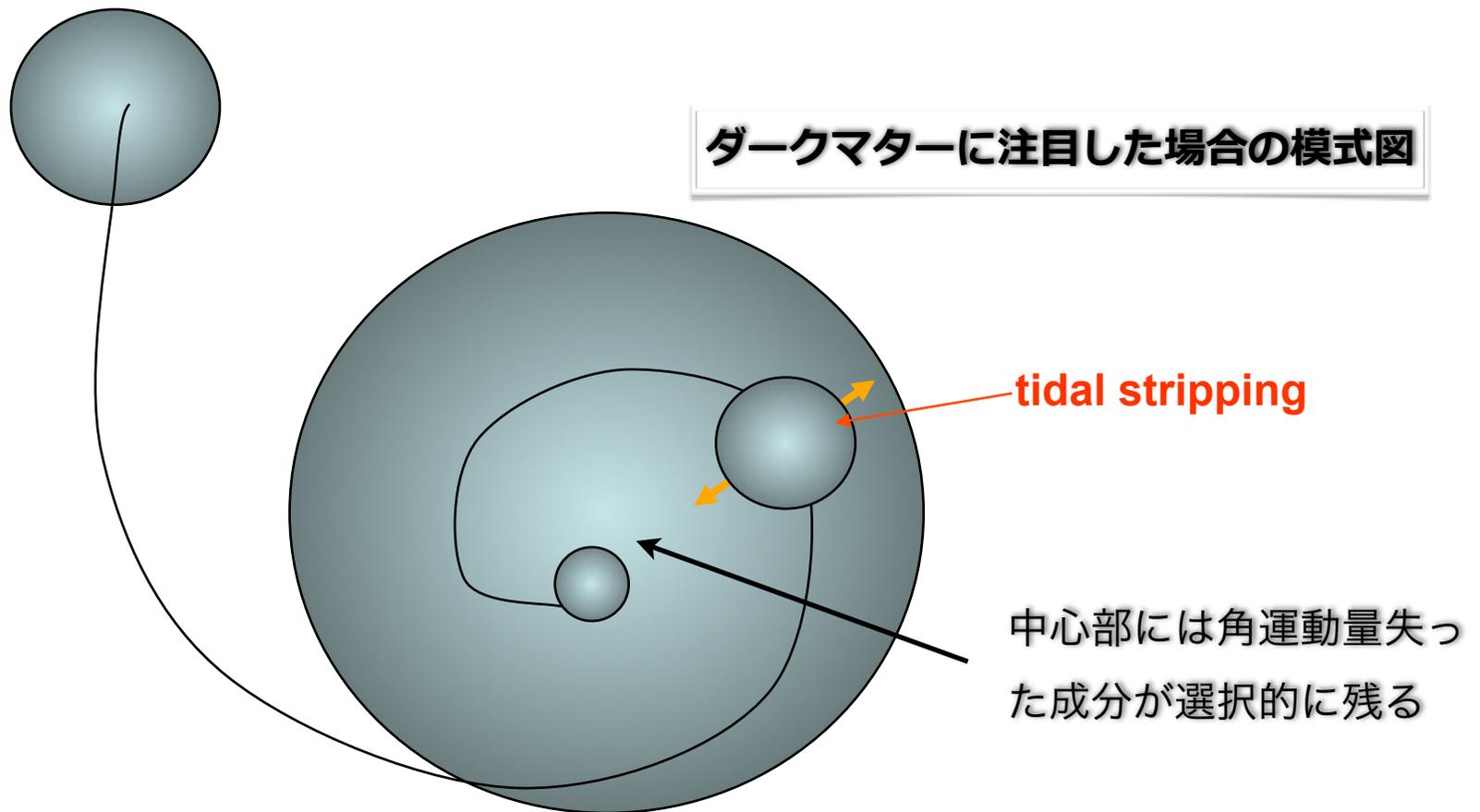
ダークマターの角運動量進化



Zavala, Okamoto, Frenk'08

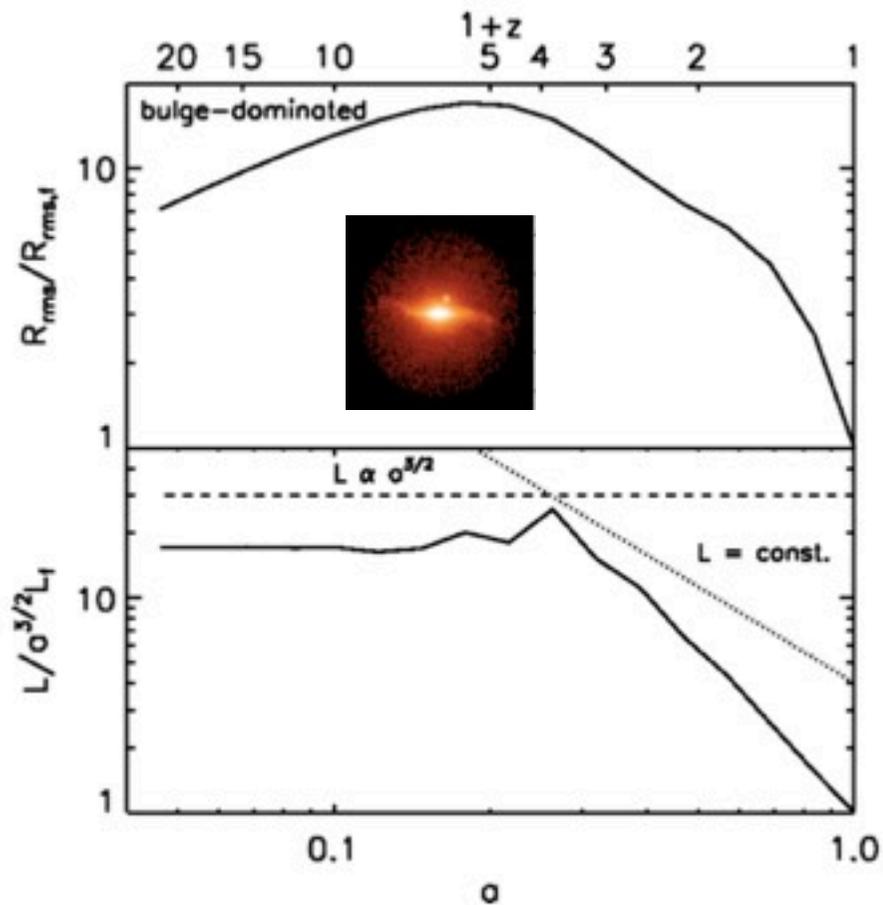
階層的構造形成による 角運動量輸送

- 合体してきたサブハローは力学的摩擦によりエネルギーと軌道角運動量を失いながら中心部へと運ばれる

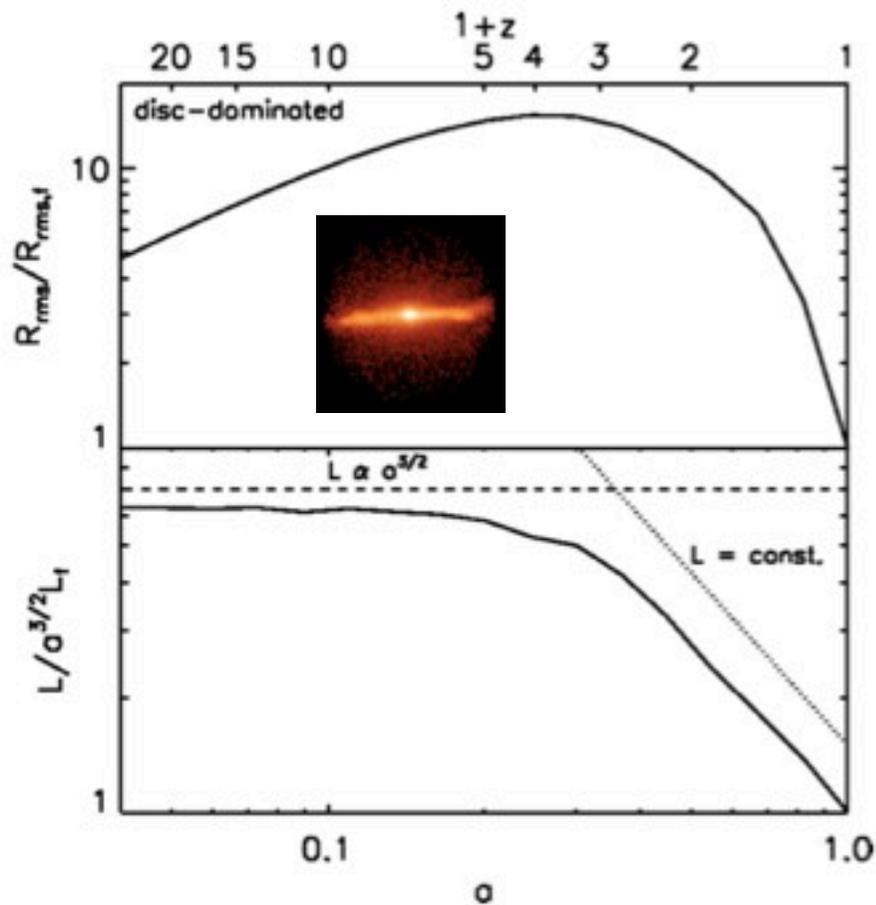


バリオンの角運動量進化

R
 $L/a^{3/2}$

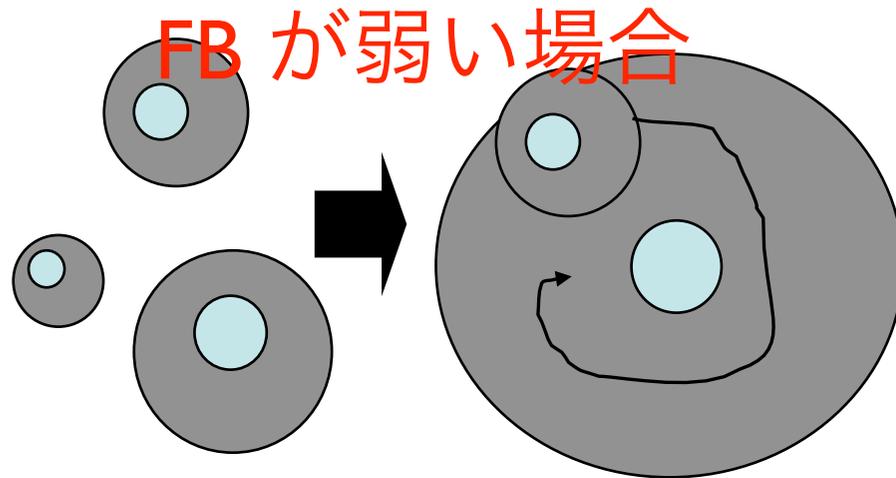


$a \rightarrow$

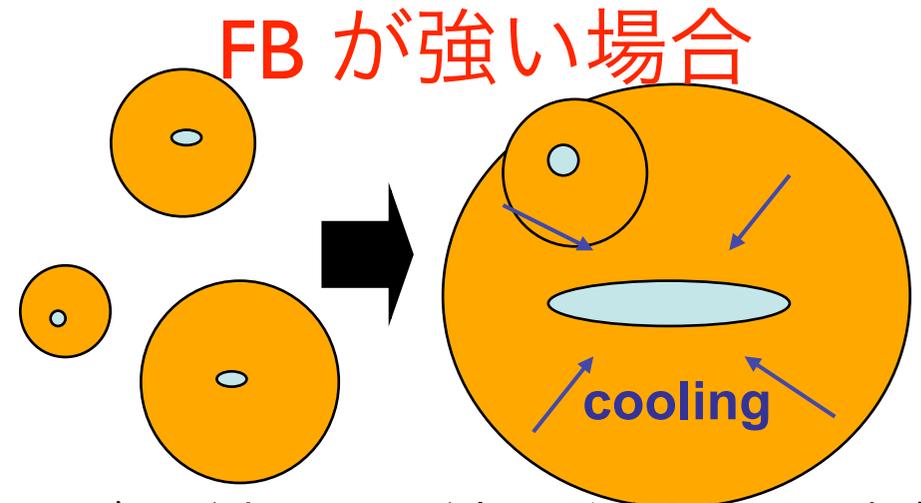


Zavala, Okamoto, Frenk'08

角運動量輸送: バリオンの場合



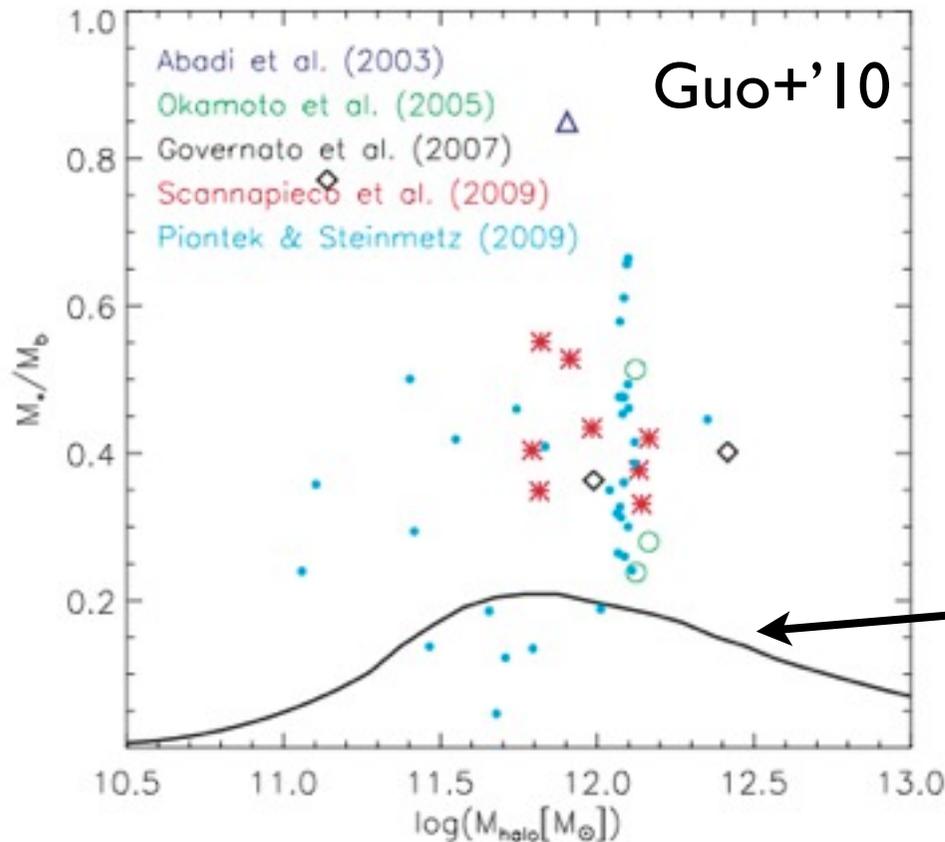
- high- z ではハローの密度が高く, ガスはすぐに冷えて中心部に集まる
- サブハローが力学的摩擦で中心部へ沈むとき, サブハロー中心部のバリオンも軌道角運動量を失い親ハロー中心部へ



- ガスが冷えて星が少し形成されると, 超新星爆発からの FB で中心に集まったガスは再び広がった分布へ
- サブハロー内の hot gas は親 halo の hot gas と混ざり, 軌道角運動量も親ハローの hot gas に与えられる
- 角運動量を保存しながらガスが冷え, 円盤形成

過去のシミュレーション

- 星を作りすぎ
(FB が弱すぎる)

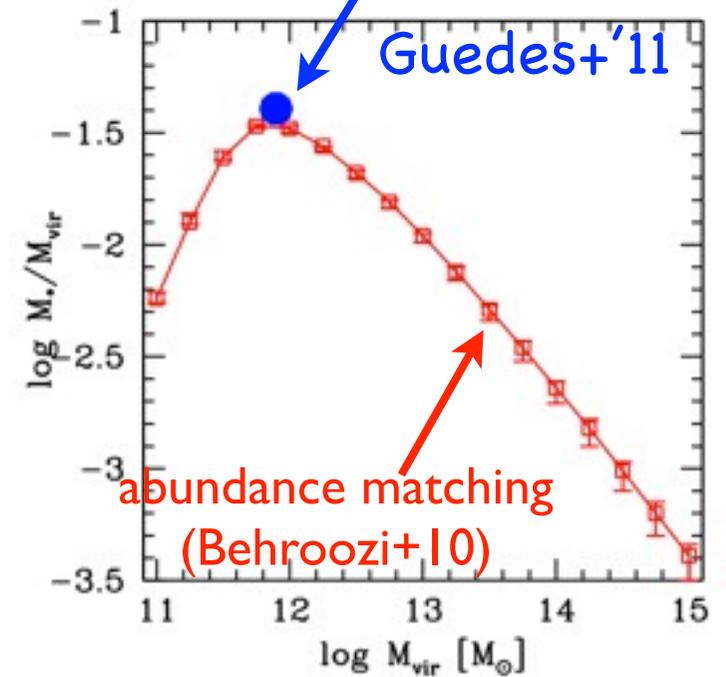
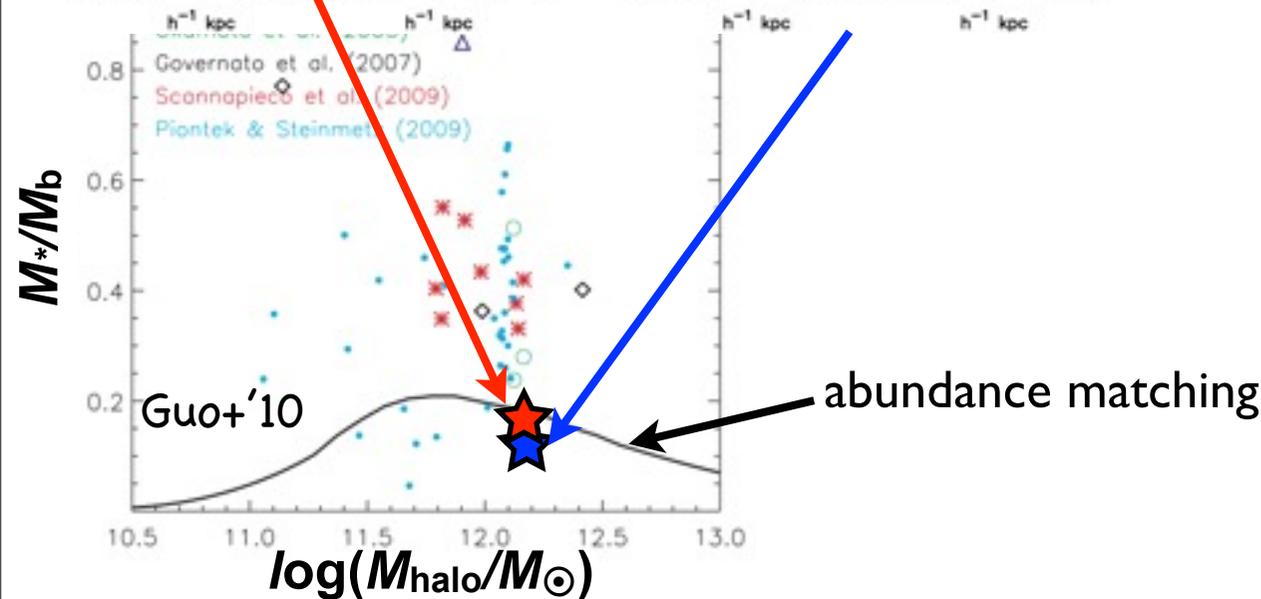
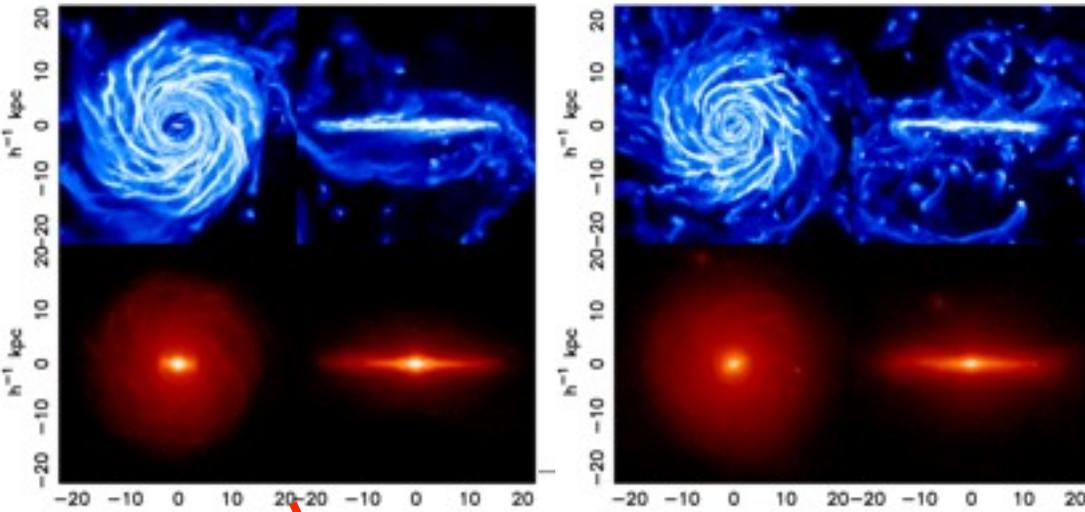


from abundance matching

Figure 5. Galaxy formation efficiency as a function of halo mass. The black curve indicates the values required if a Λ CDM universe is to fit the observed SDSS/DR7 stellar mass function. Coloured symbols show the values found for a large number of recent simulations of the formation of individual galaxies from Λ CDM initial conditions. Different colours correspond to simulations by different authors as noted. The simulation results vary widely, but the great majority lock too many baryons into stars to be viable models for the bulk of the real galaxy population.

最近のシミュレーション

TO 2013



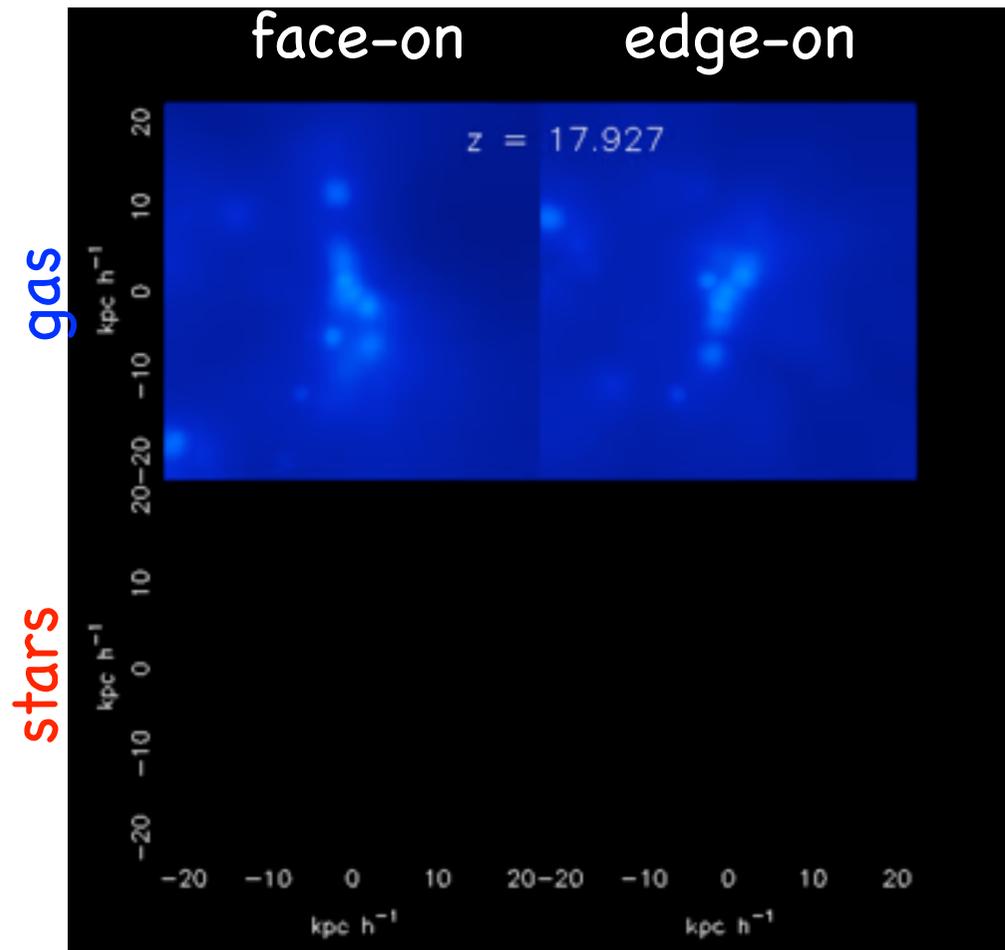
Aq-C

gas

stars

- $z < 4$ では顕著な合体なし
- $z = 2$ あたりから円盤形成
- $z < 1$ ではバーが見える
- 円盤の向きは一定ではない

Aq-C



- $z < 4$ では顕著な合体なし
- $z = 2$ あたりから円盤形成
- $z < 1$ ではバーが見える
- 円盤の向きは一定ではない

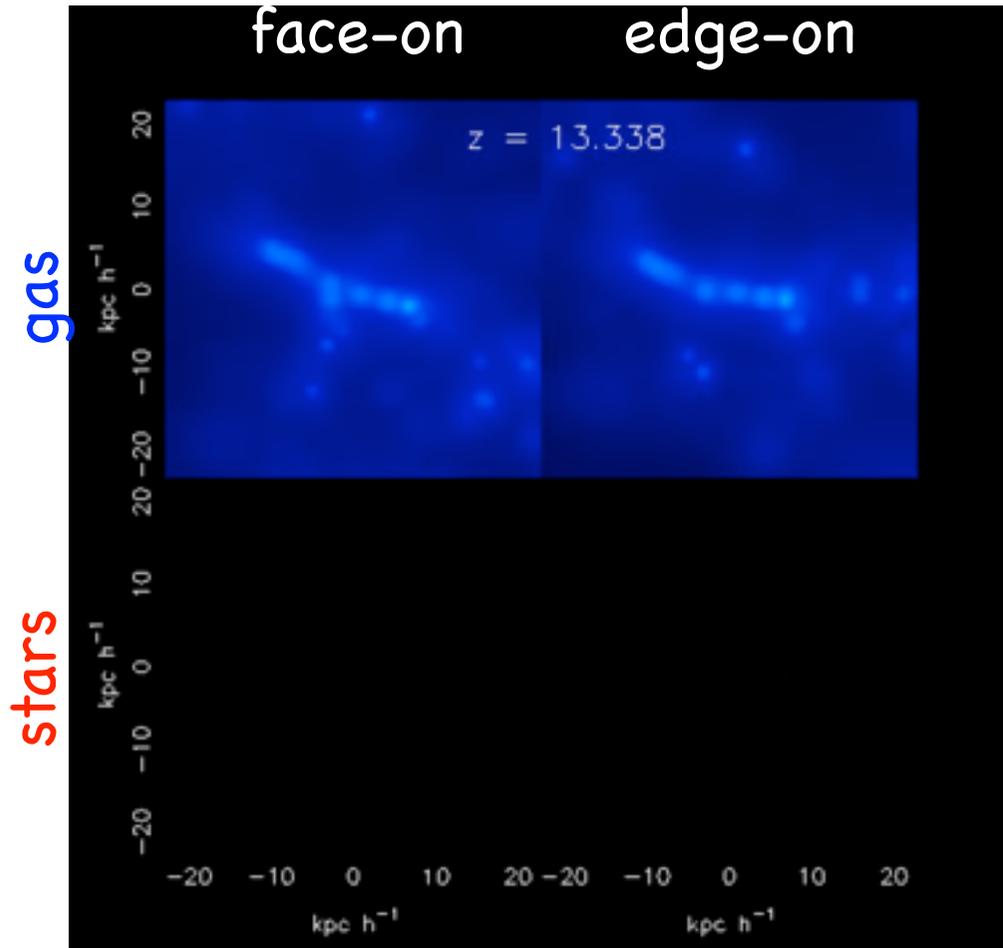
Aq-D

gas

stars

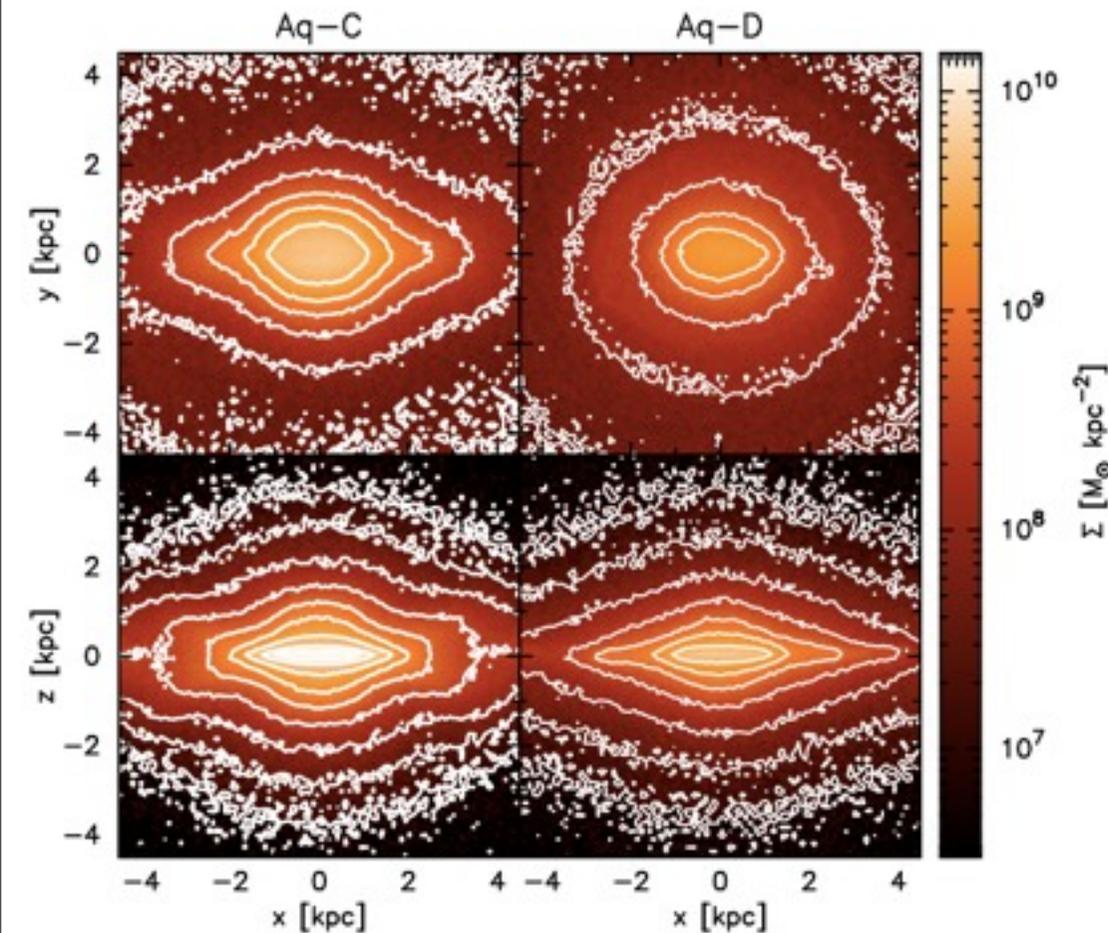
- $z < 4$ では顕著な合体なし
- 円盤形成は $z = 2$ あたりに開始
- 円盤の向きは時間とともに変わる
- Aq-C ほど目立つ bar はない
- $z < 1$ で gas clump 及び星団の存在が Aq-C より目立つ

Aq-D



- $z < 4$ では顕著な合体なし
- 円盤形成は $z = 2$ あたりを開始
- 円盤の向きは時間とともに変わる
- Aq-C ほど目立つ bar はない
- $z < 1$ で gas clump 及び星団の存在が Aq-C より目立つ

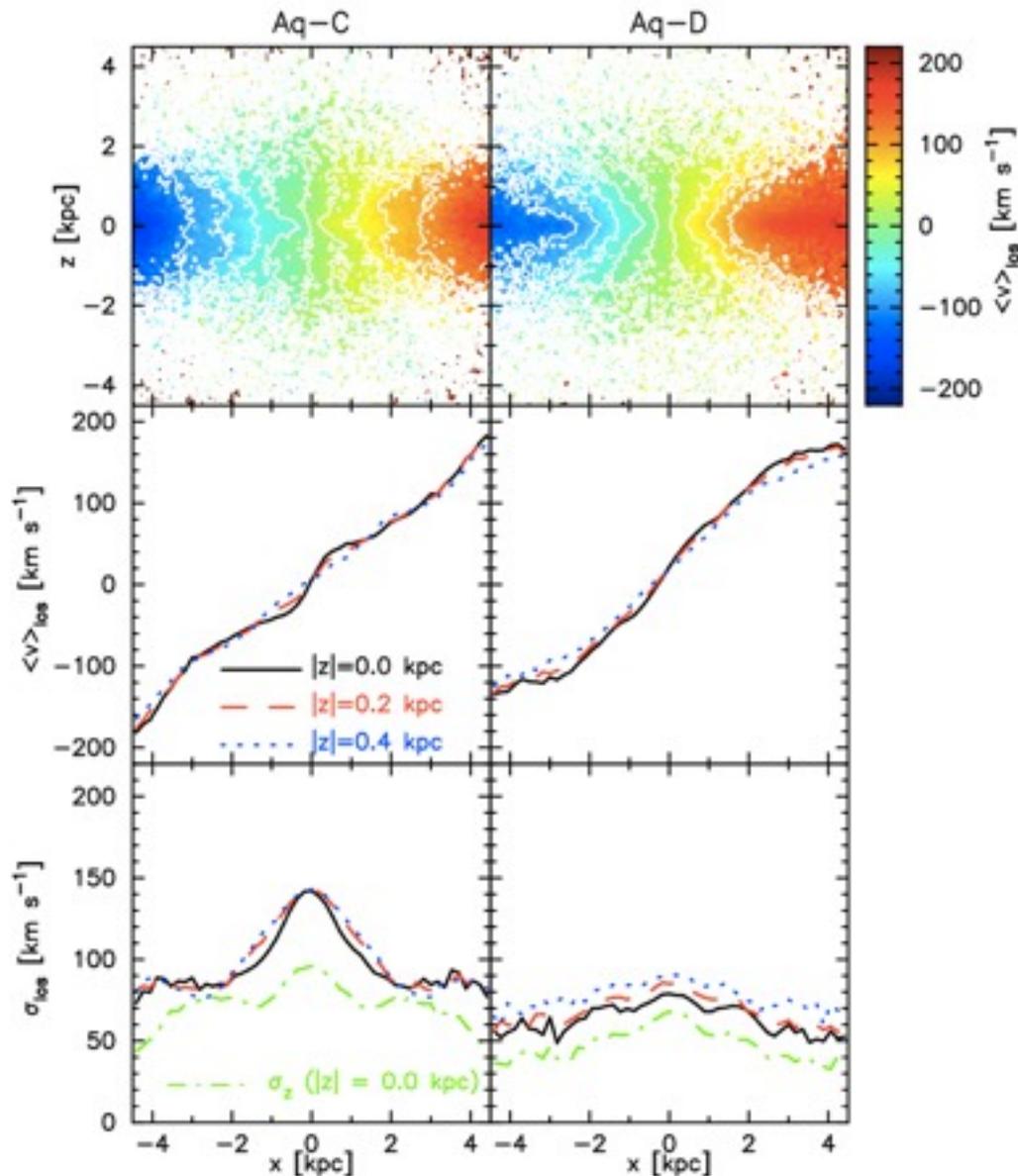
バルジの形



- Aq-C には bar Aq-D には目立つ bar はない
- Edge-on で見た contour の形はどちらも disky.
- Aq-C には boxy bulge の気配
- bar の影響
- Aq-D のダイヤモンド型の contour は disk-like bulge の典型

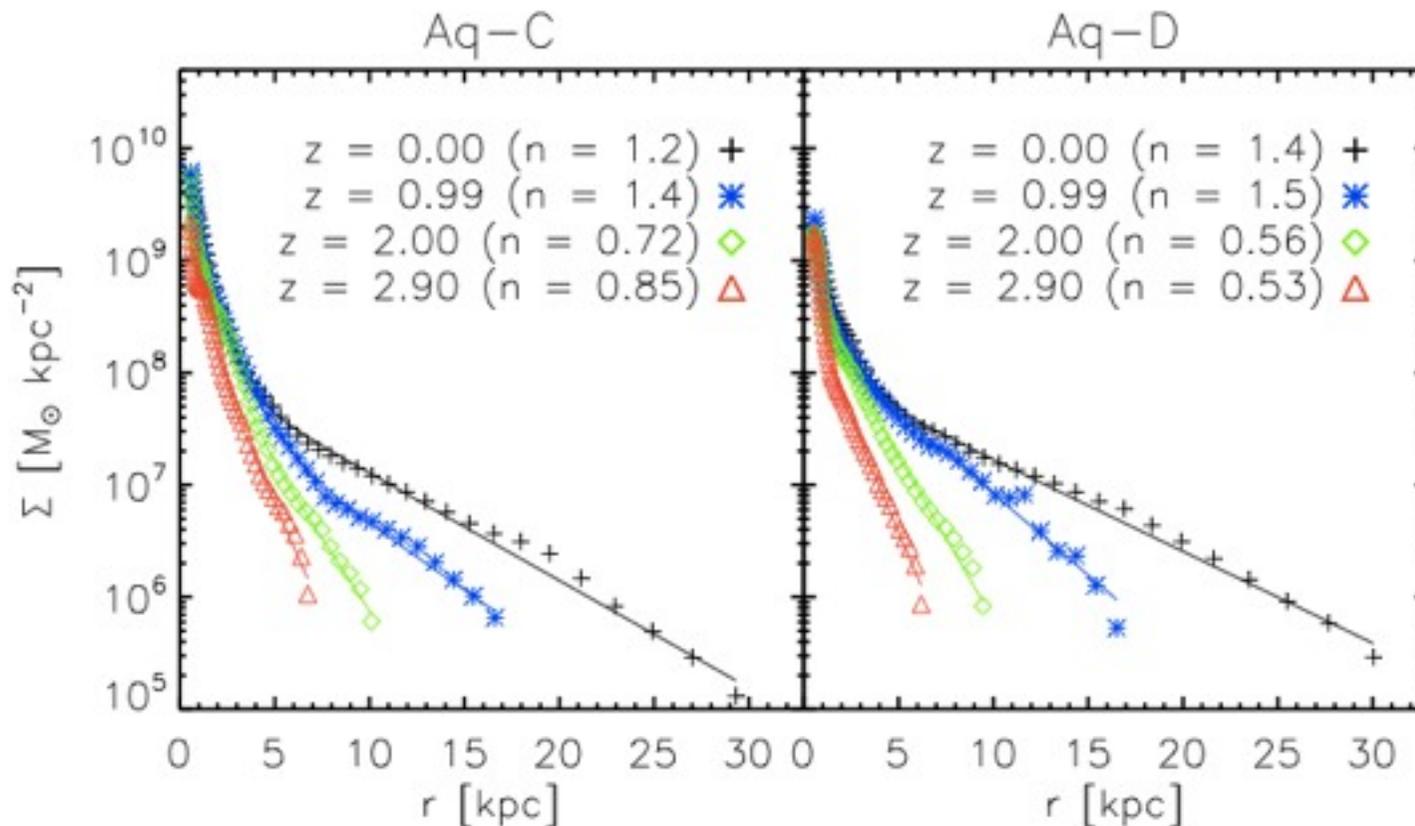
両者とも pseudobulge

バルジの速度構造



- Aq-C には cylindrical rotation の気配
- bar の影響
- Aq-D の方が回転でサポートされている
- Aq-C は速度分散が大きい
が, non-circular orbits が oblate 内に閉じ込められてる感じ (z 方向の速度分散が小さい)

表面密度プロファイルの進化

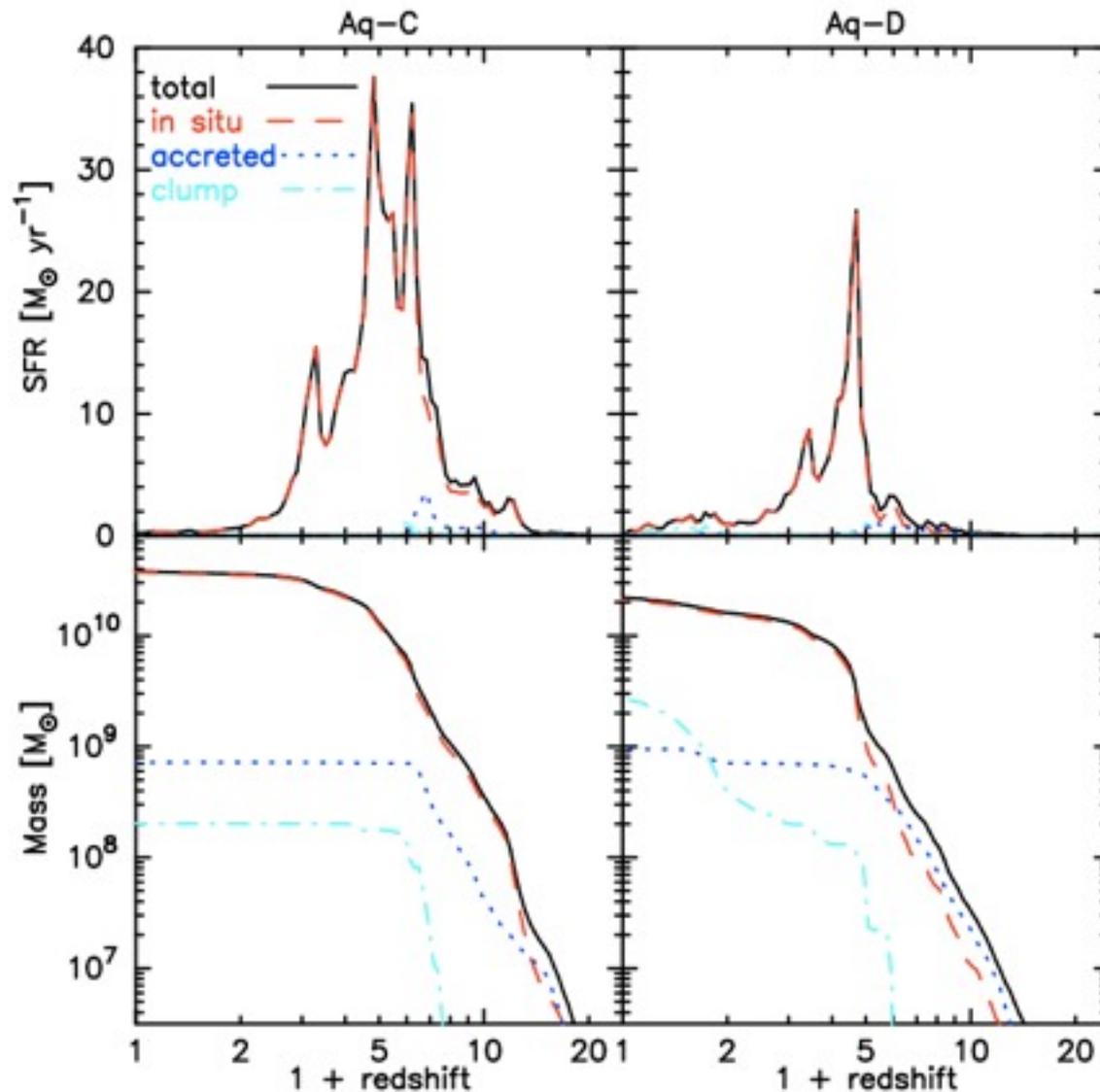


Okamoto'13

- $z = 3 \sim 2$ にはバルジは scale length の小さい disk な component として形成されている
- $z = 2$ からその周囲に大きな scale length もつ円盤が成長
- $z = 2$ の時点でバルジ質量は $z = 0$ の 70% (Aq-C) と 87%(Aq-D)

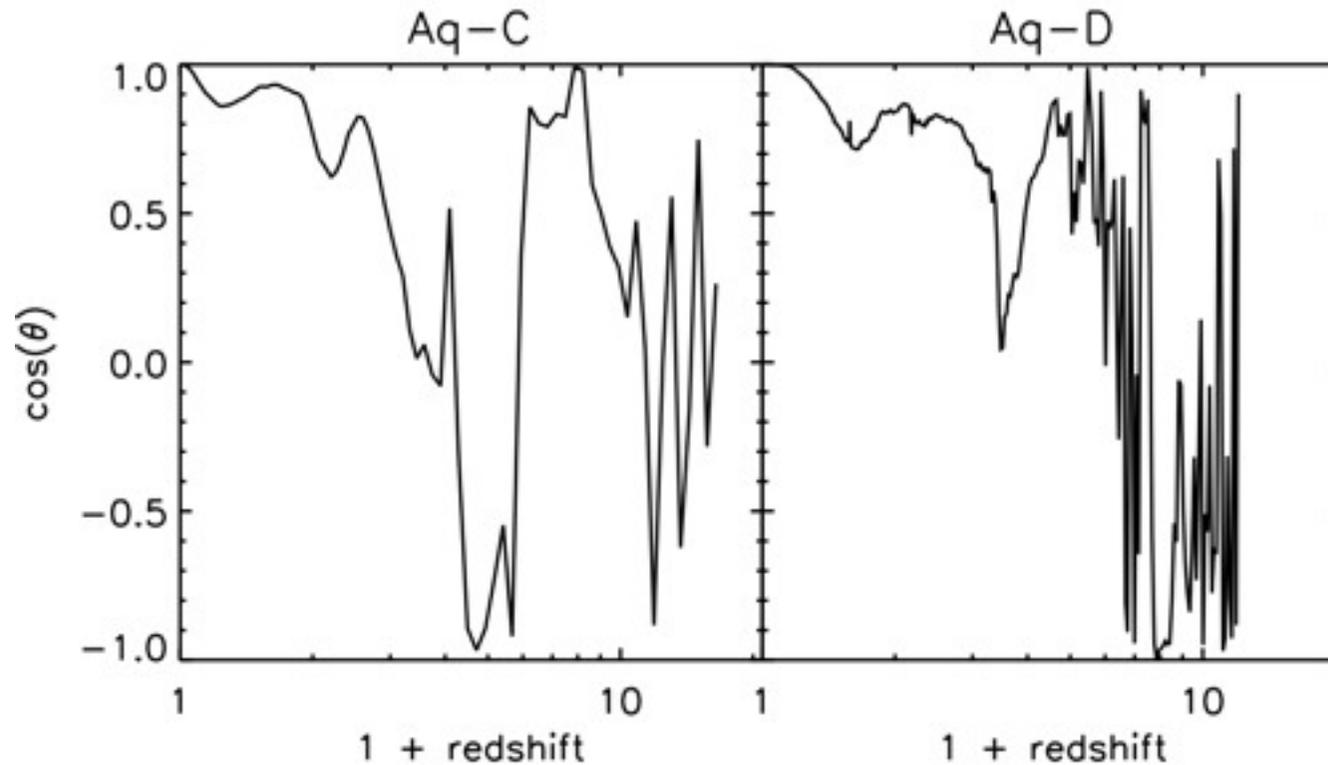
pseudobulge の主要な形成過程は円盤の永年進化ではない

バルジの星形成史



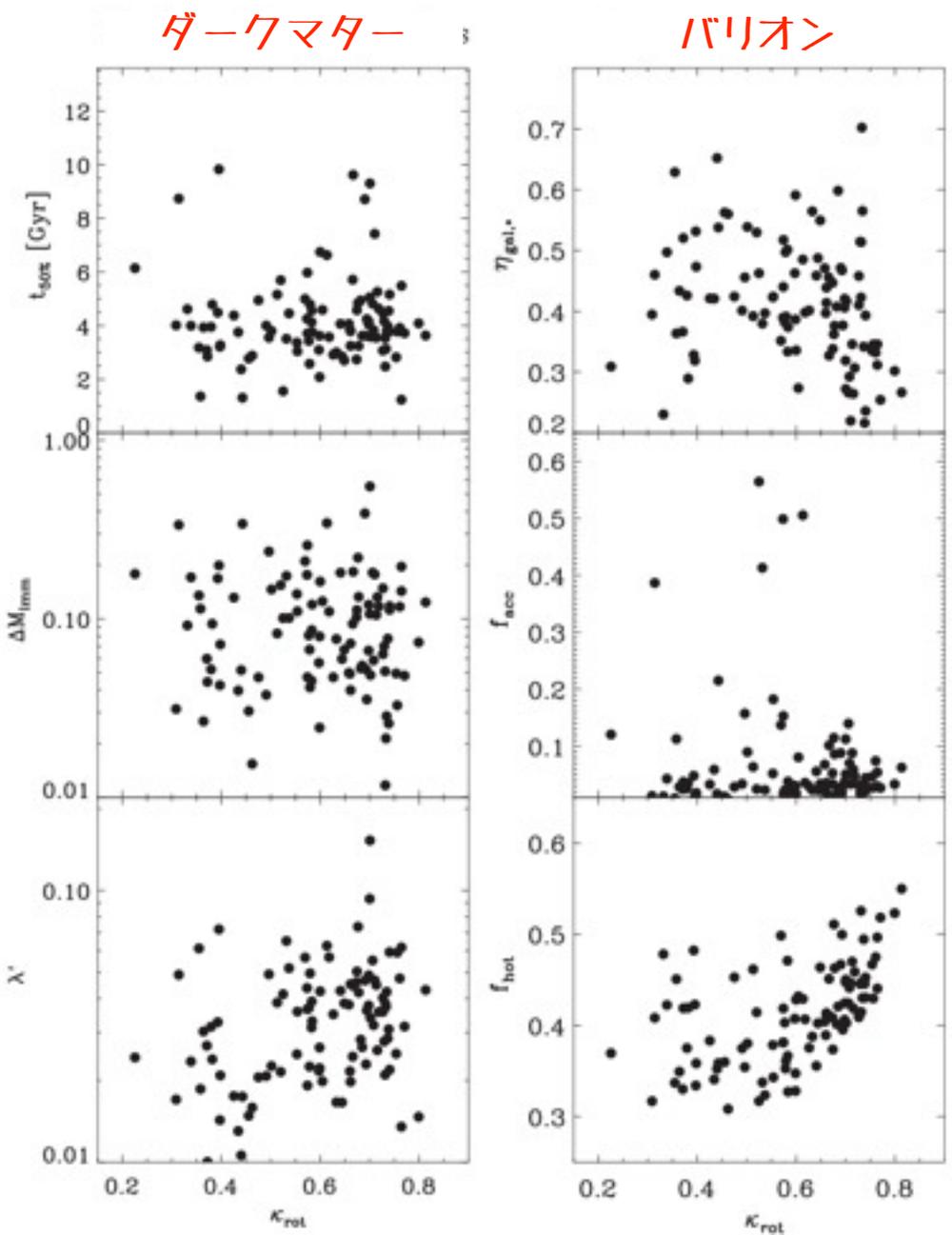
- バルジは高赤方偏移 ($z > 2$) の爆発的星形成で形成されている
- ほとんどの星が *in situ* (合体によって外から持ち込まれたわけではない)

銀河の向きの変化



- high- z では銀河の向きが激しく変化
- 円盤が破壊される
- $z < 2$ で落ち着く

バルジとディスクを分けるもの (1)

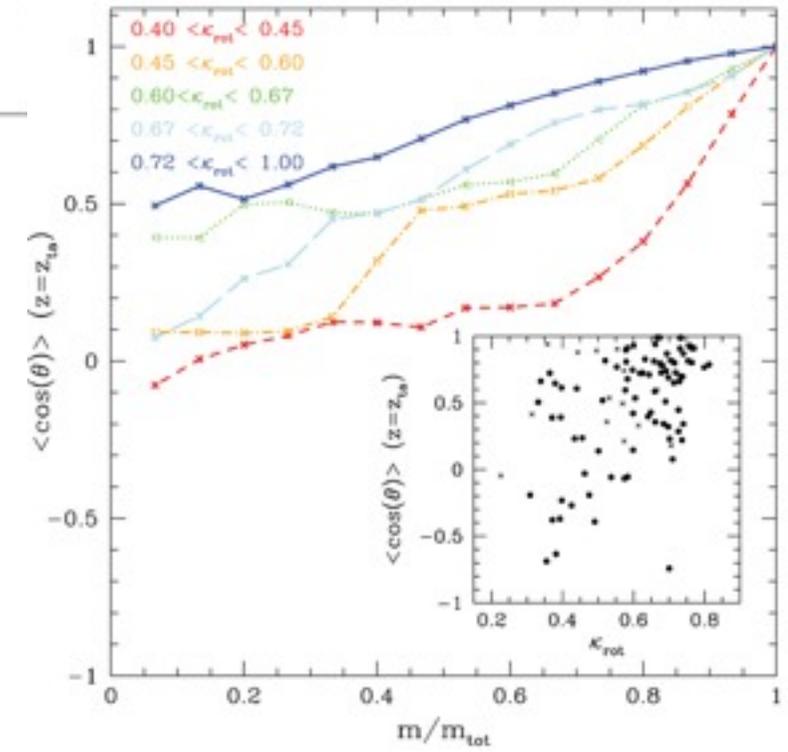
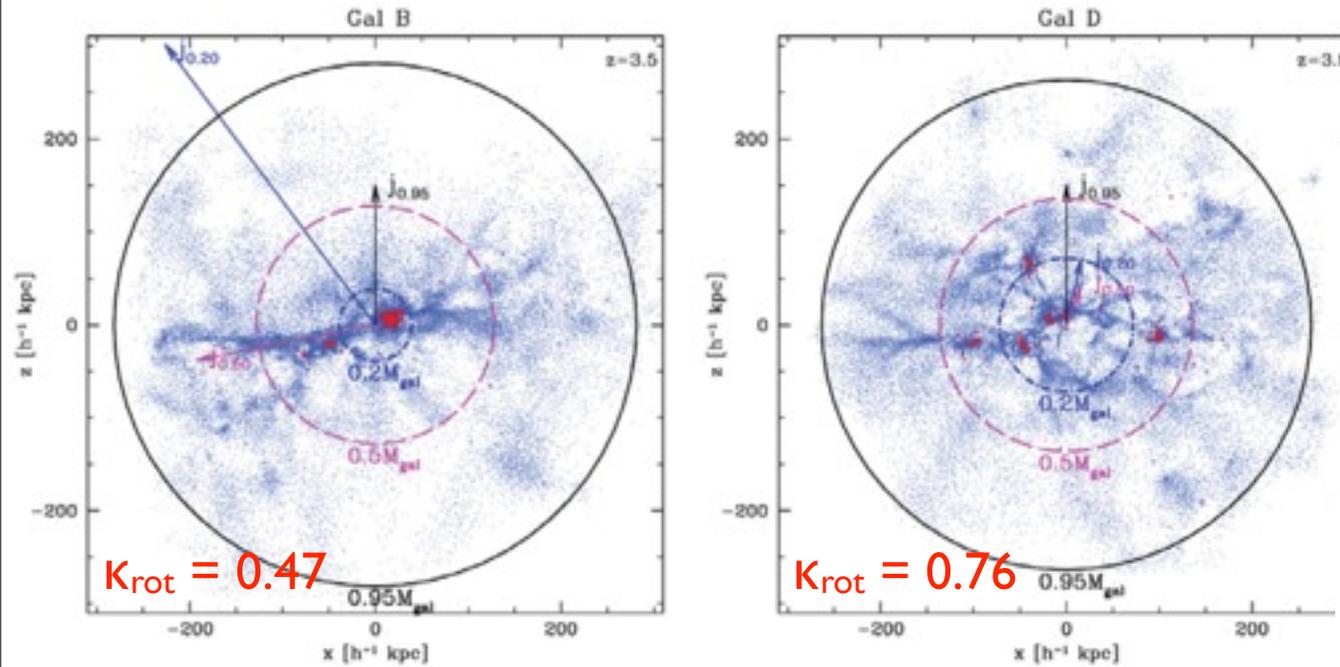


$$\kappa_{rot} = \frac{K_{rot}}{K} = \frac{1}{K} \sum \frac{1}{2} m \left(\frac{j_z}{R} \right)^2$$

- **ダークハローの性質** (形成時期・last major merger の mass fraction・スピンの) と **morphology** は相関が弱い
- 全バリオンのうち星になった割合 ($\eta_{gal,*}$) と hot phase を経験したガスから生まれた星の割合 (f_{hot}) は morphology と相関あり
- merger は関係ない @ MW mass

バルジとディスクを分けるもの (2)

Sales+'12

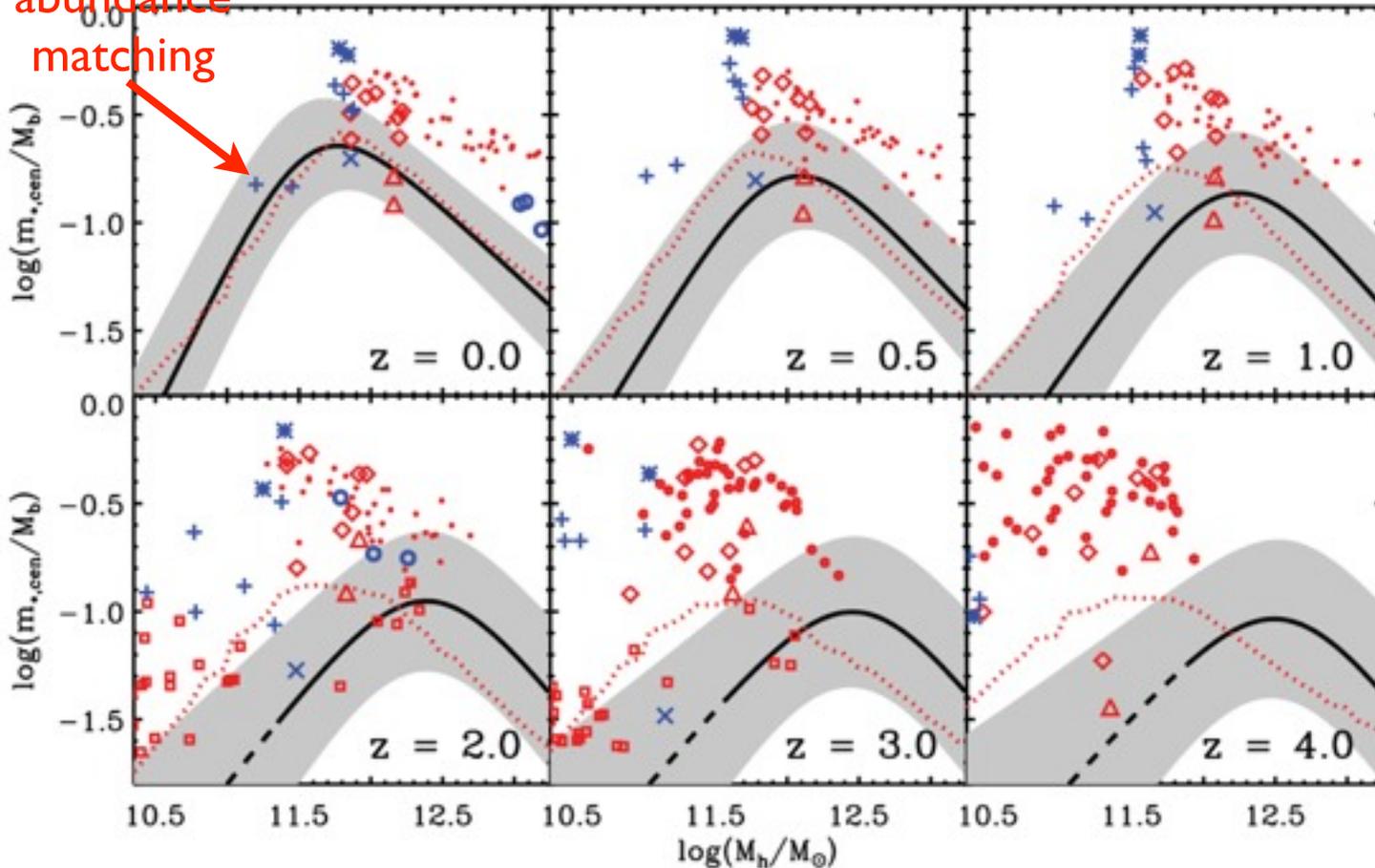


- Disky な銀河ほど turnaround 時に mass shell ごとの角運動量の向きが揃っている
- Cold accretion で gas が供給されても円盤が破壊されない

Early stellar feedback

Moster+'13

abundance
matching

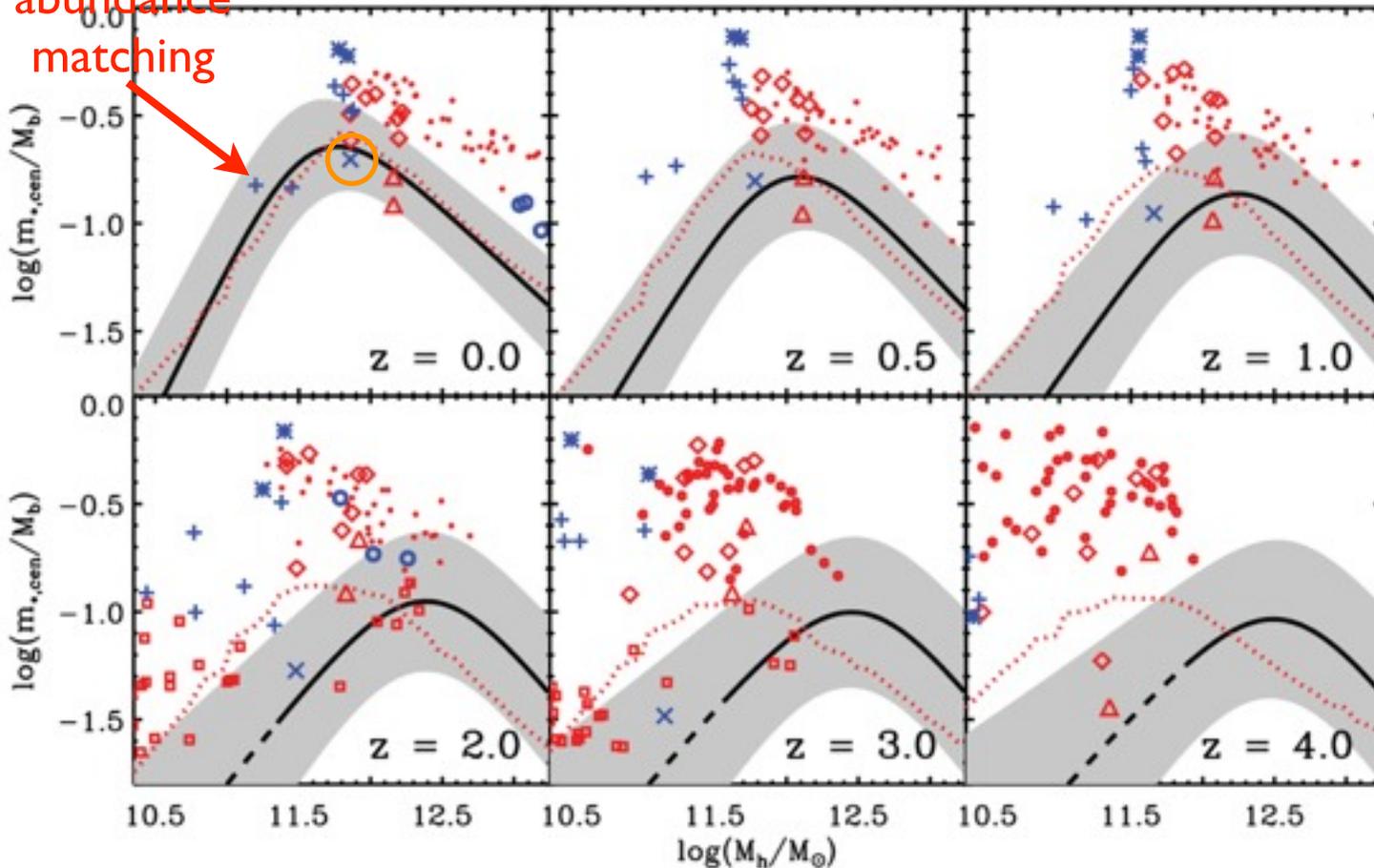


- SN FB しか考えてないものは high- z で星を作り過ぎる
- 星形成が起こった瞬間から星形成を抑制する必要
- 恒星風・輻射が cloud を壊す (Stinson+'12)

Early stellar feedback

Moster+'13

abundance
matching

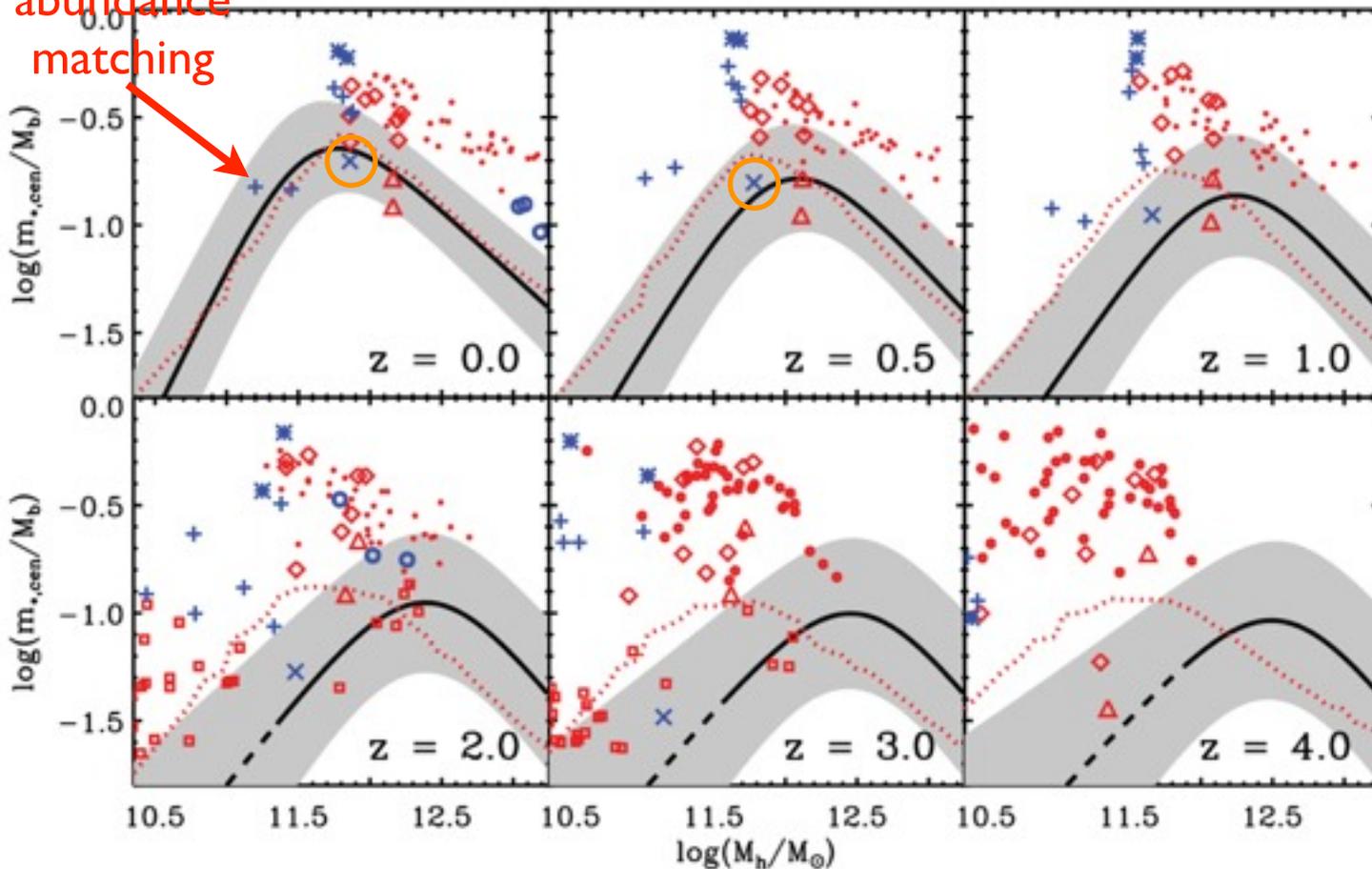


- SN FB しか考えてないものは high- z で星を作り過ぎる
- 星形成が起こった瞬間から星形成を抑制する必要
- 恒星風・輻射が cloud を壊す (Stinson+'12)

Early stellar feedback

Moster+'13

abundance
matching

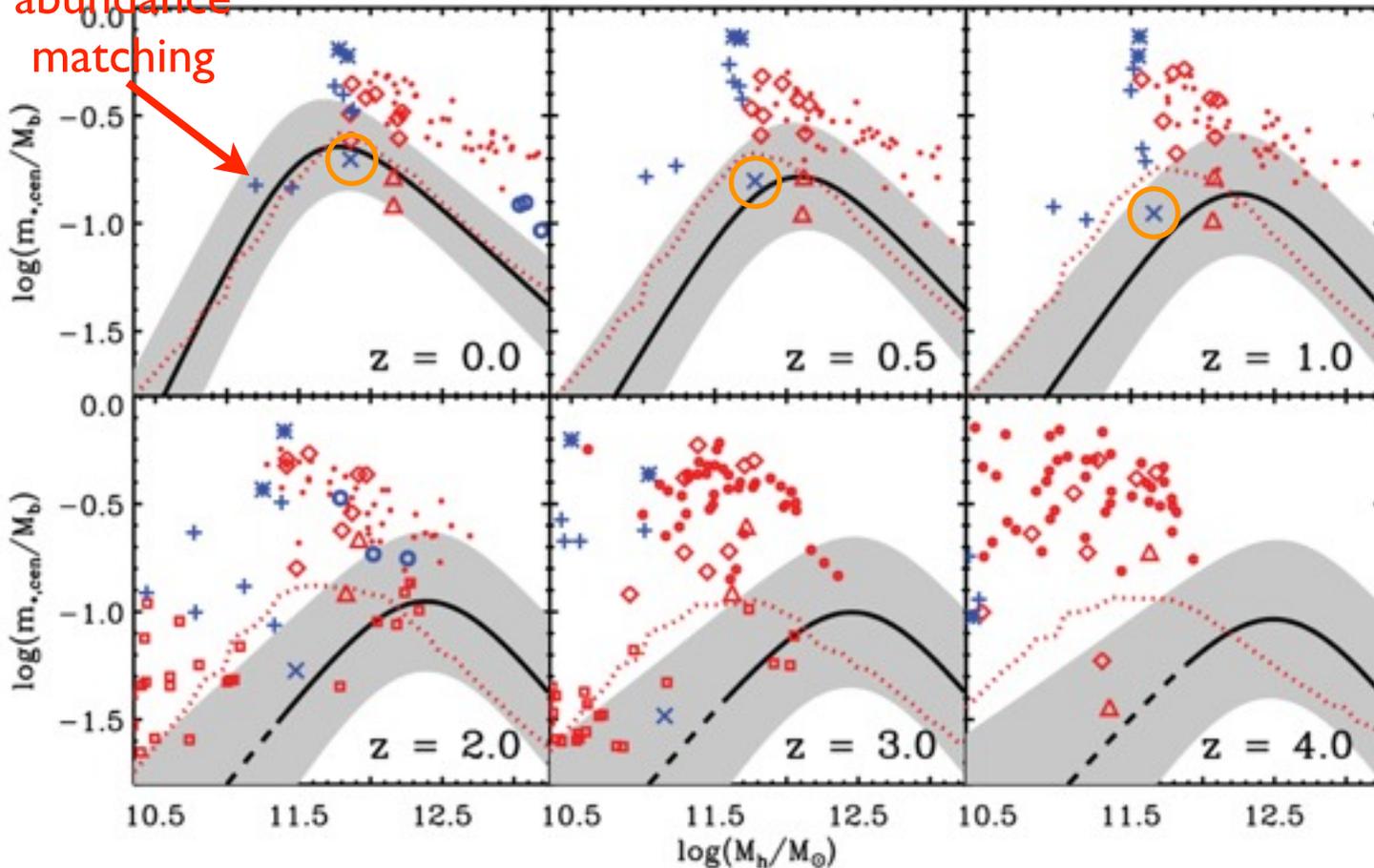


- SN FB しか考えてないものは high- z で星を作り過ぎる
- 星形成が起こった瞬間から星形成を抑制する必要
- 恒星風・輻射が cloud を壊す (Stinson+'12)

Early stellar feedback

Moster+'13

abundance
matching

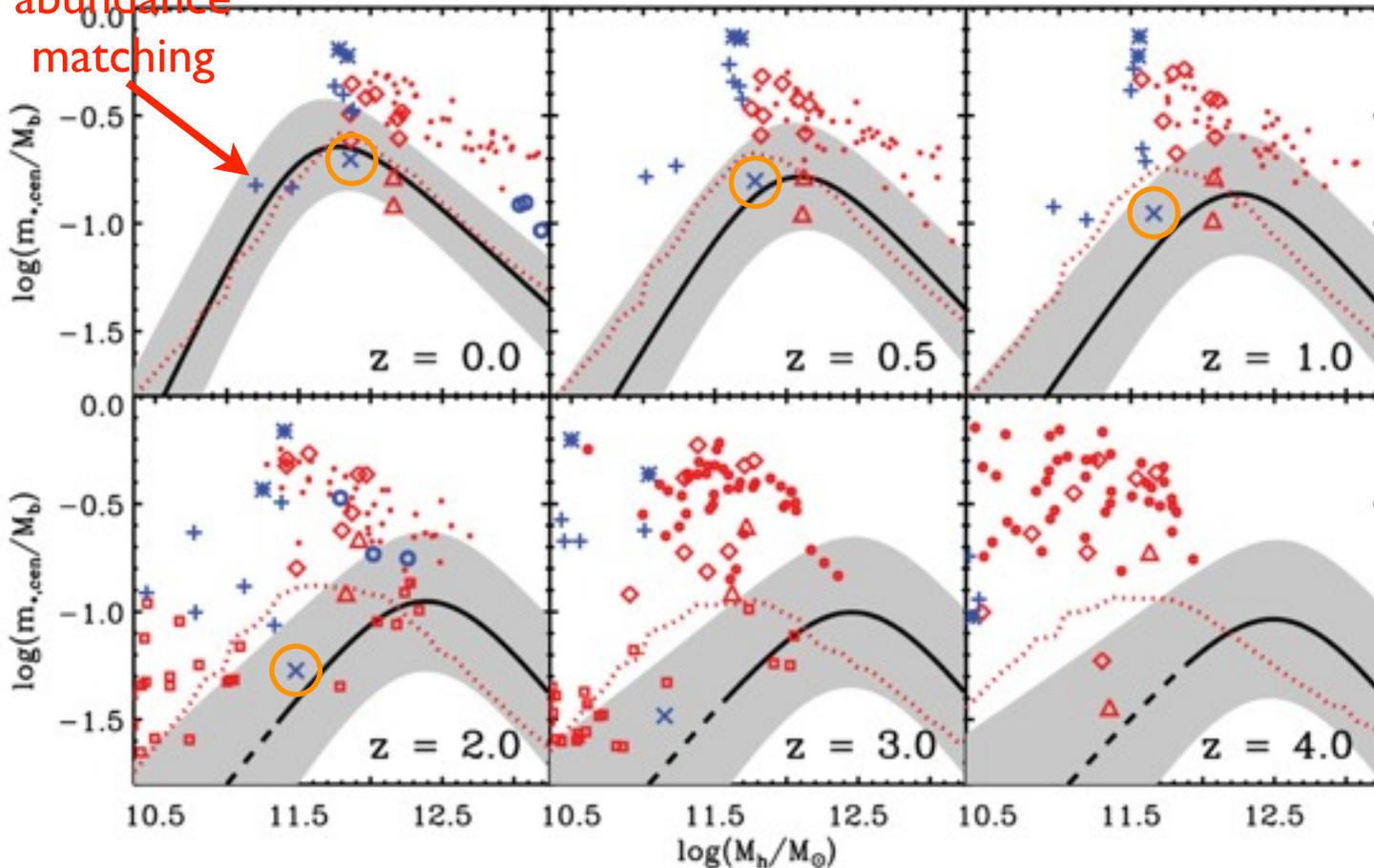


- SN FB しか考えてないものは high- z で星を作り過ぎる
- 星形成が起こった瞬間から星形成を抑制する必要
- 恒星風・輻射が cloud を壊す (Stinson+'12)

Early stellar feedback

Moster+'13

abundance
matching

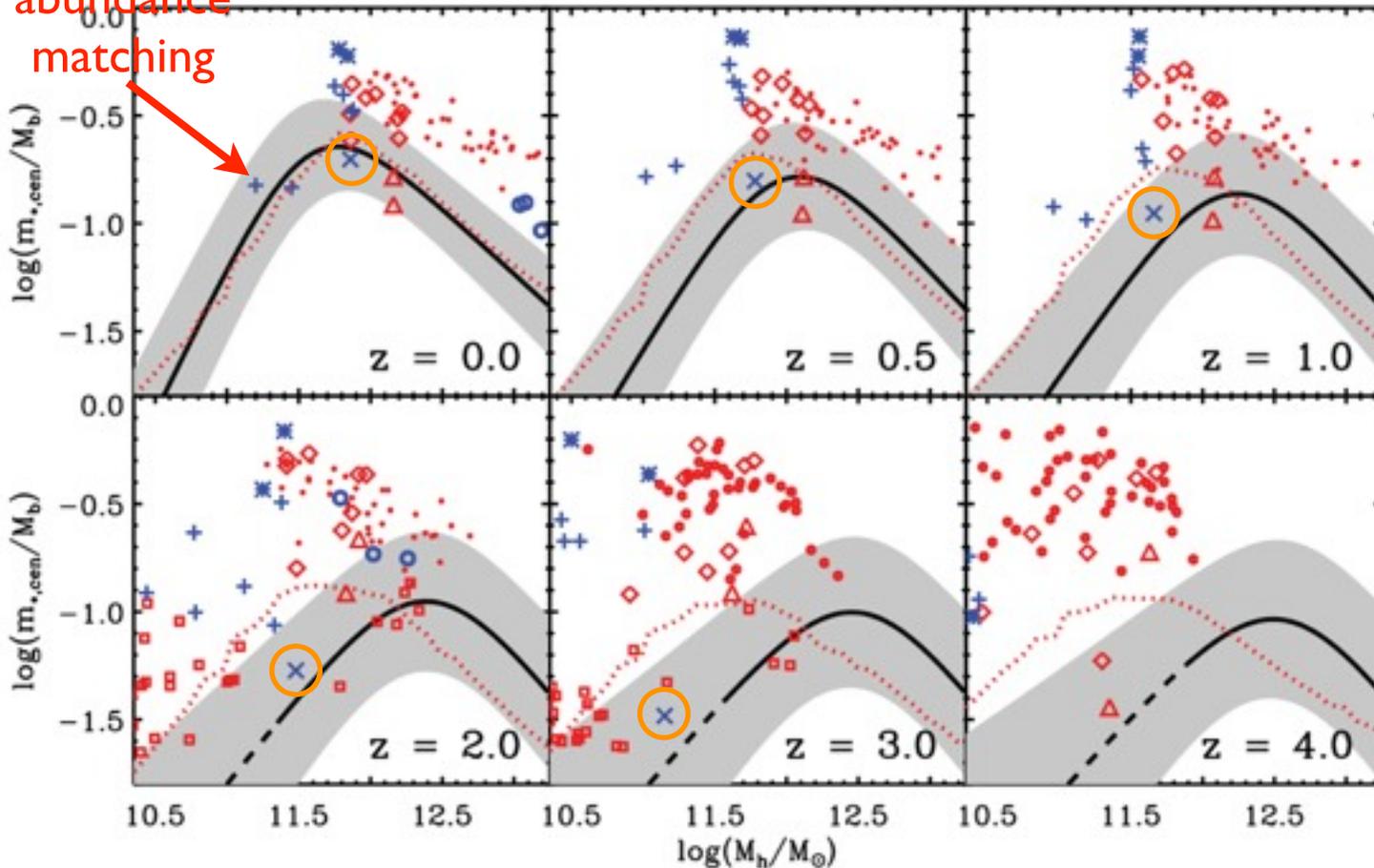


- SN FB しか考えてないものは high-z で星を作り過ぎる
- 星形成が起こった瞬間から星形成を抑制する必要
- 恒星風・輻射が cloud を壊す (Stinson+'12)

Early stellar feedback

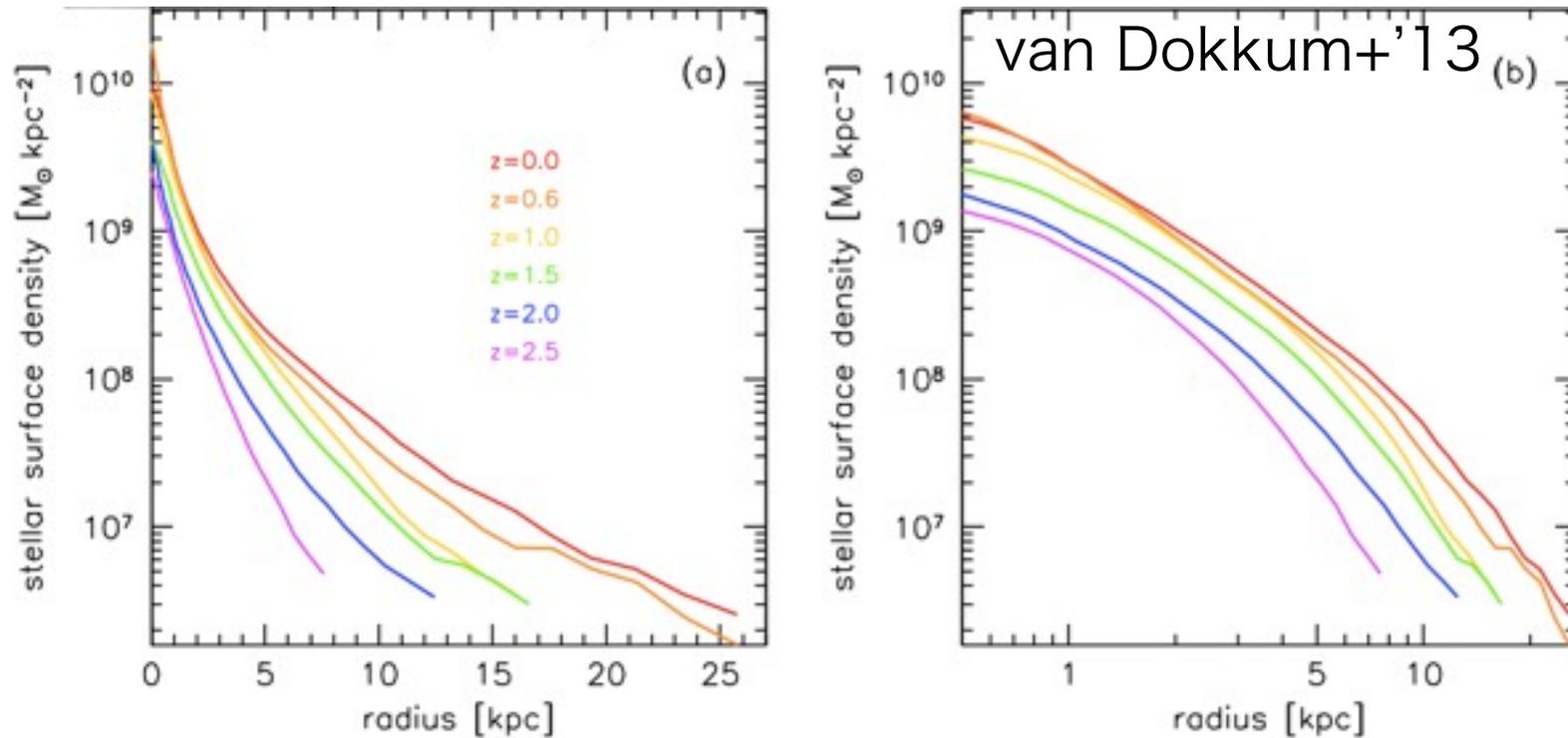
Moster+'13

abundance
matching



- SN FB しか考えてないものは high-z で星を作り過ぎる
- 星形成が起こった瞬間から星形成を抑制する必要
- 恒星風・輻射が cloud を壊す (Stinson+'12)

Non inside-out galaxy formation?



- The stellar surface density evolution of the “progenitors” of the MW-mass galaxies
- the central and outer parts built up at the same rate between $z = 2.5$ and 1.

まとめ

- $z = 0$ に円盤を作るためには high- z でガスが cold, dense phase になるのを防ぐ必要あり
- フィードバックはギンギン (by Noguchi) に効かす必要がある
- cold accretion と hot accretion の違いは角運動量が混ざるかどうか
- 角運動量の向きが揃っていた場合のみ, cold stream で形成された円盤が生き残る. 揃っていない場合は pseudo-bulge に
- フィードバックには cold phase を hot phase に戻してあげて angular momentum を揃える役割も
- 北大 MI の小竹くん high- z 銀河形成を enzo を使ってやってもらうので結果に期待