

準解析的銀河形成モデルはどのように書き換えられるのか

長島雅裕(長崎大学教育学部)

…というお題をいただいたんですが…

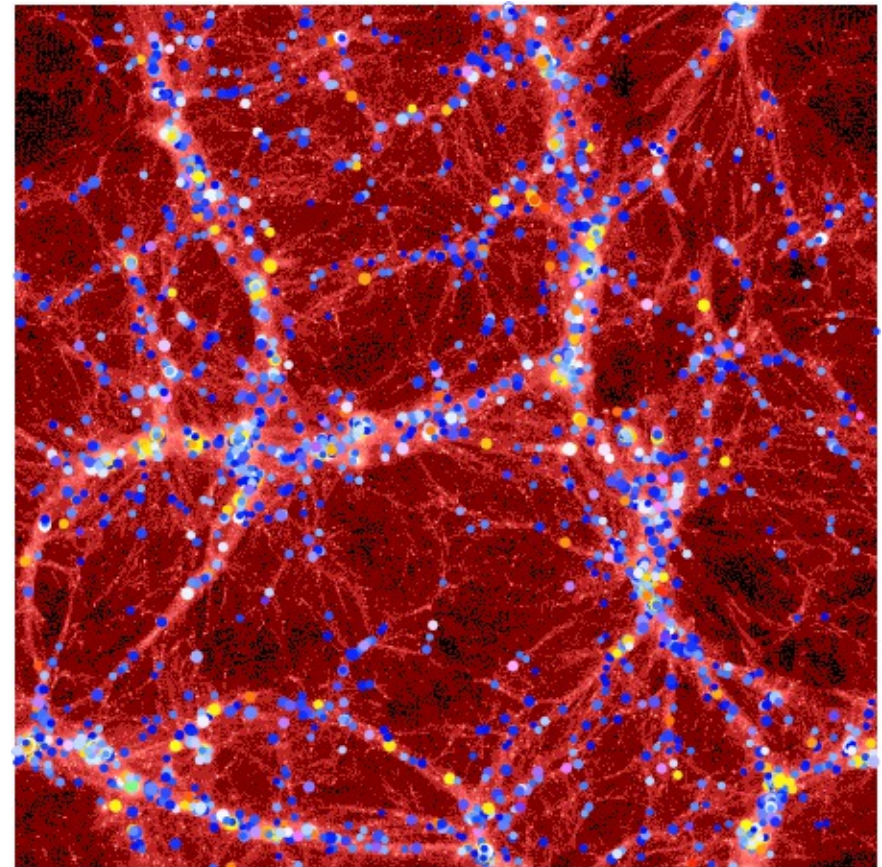
「というお題をいただいた」という話はしちやいけない、書いちやいけない(聴衆はそんなことに興味ないので)と

いうことは勿論承知していますが、

「書き換えられるか」という以前に、そういう「細かい話」まで到達していない、というのが本当のところ、なんで“cold stream”が「細かい話」なのかということと、

ソレが絡み得る、もっともっと重要な問題を提起します

(院生時代から言っではいるんですが)

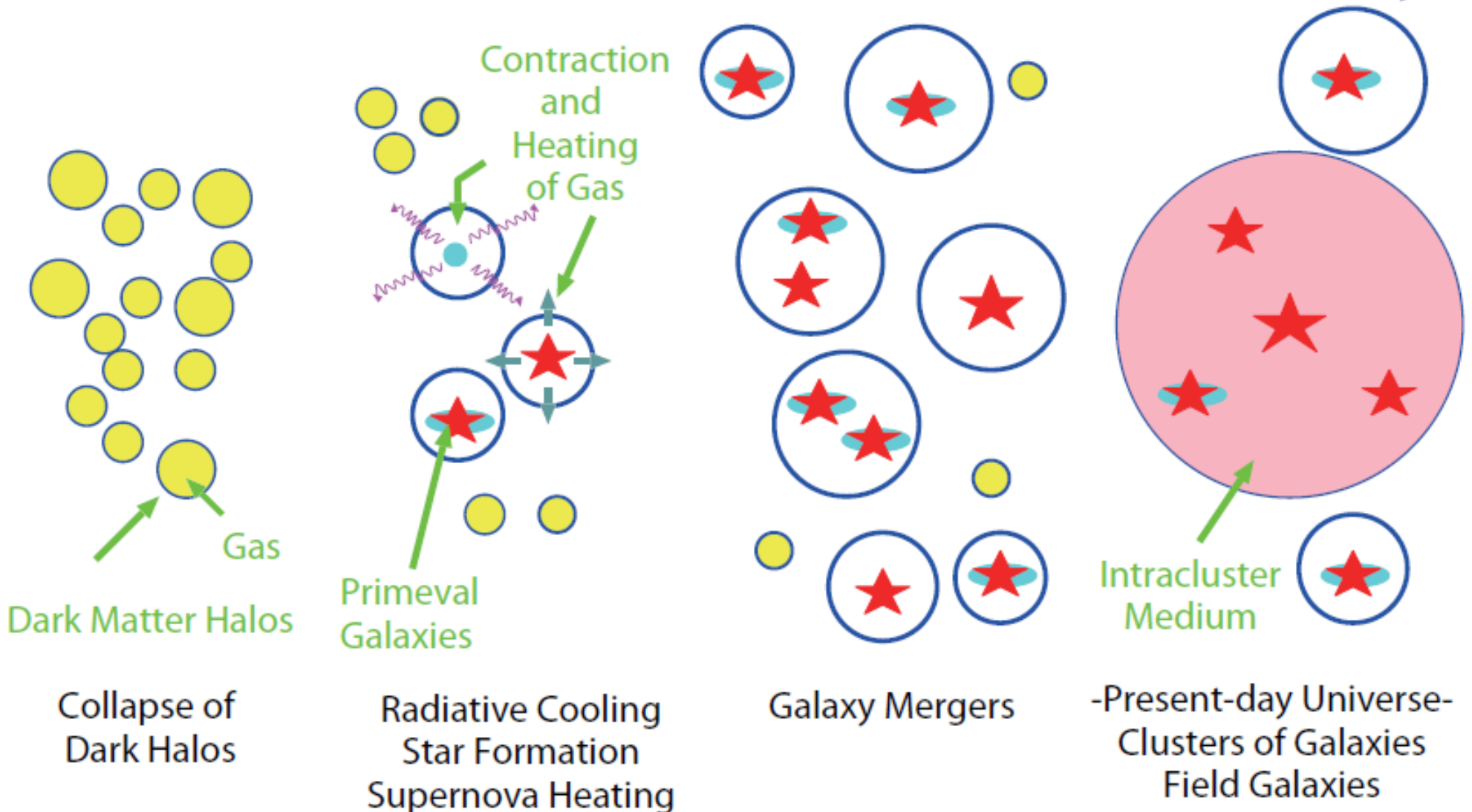


Numerical Galaxy Catalog
Nagashima et al.(2005)

Galaxy Formation in the Hierarchical Clustering Scenario

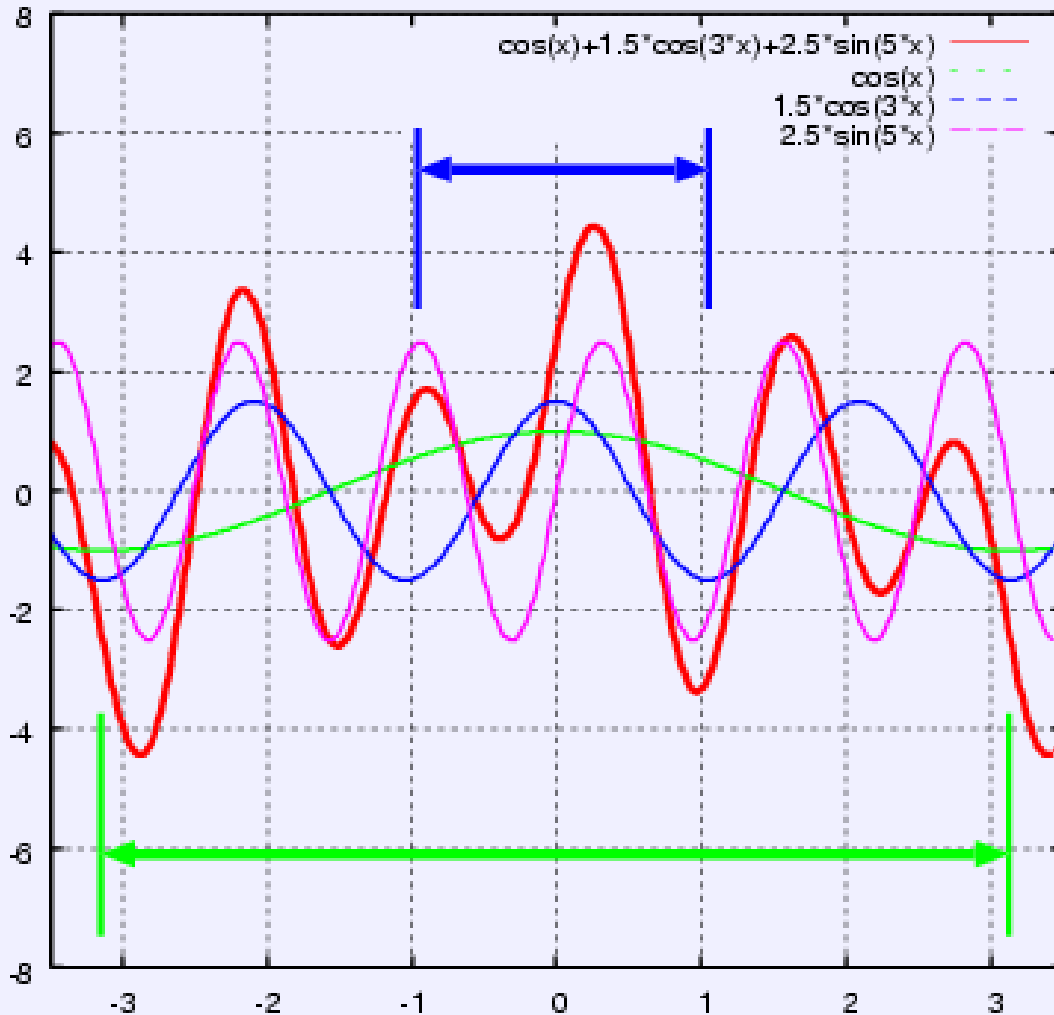
early Universe

present day

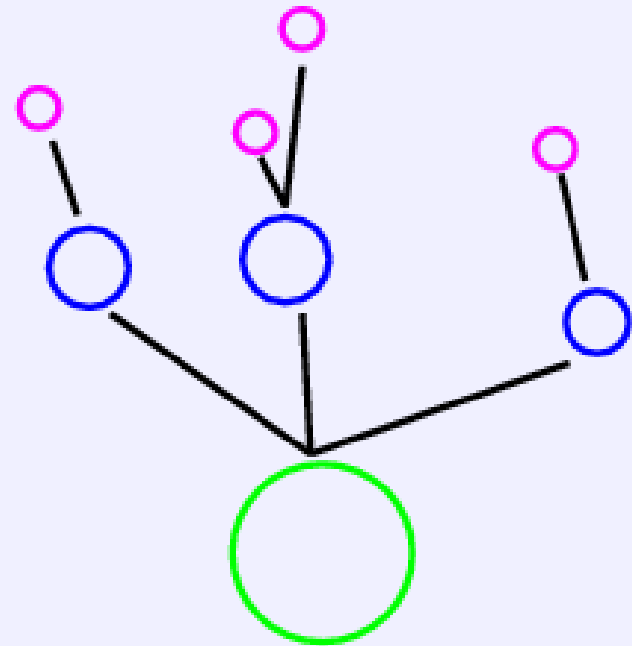


Hierarchical Clustering

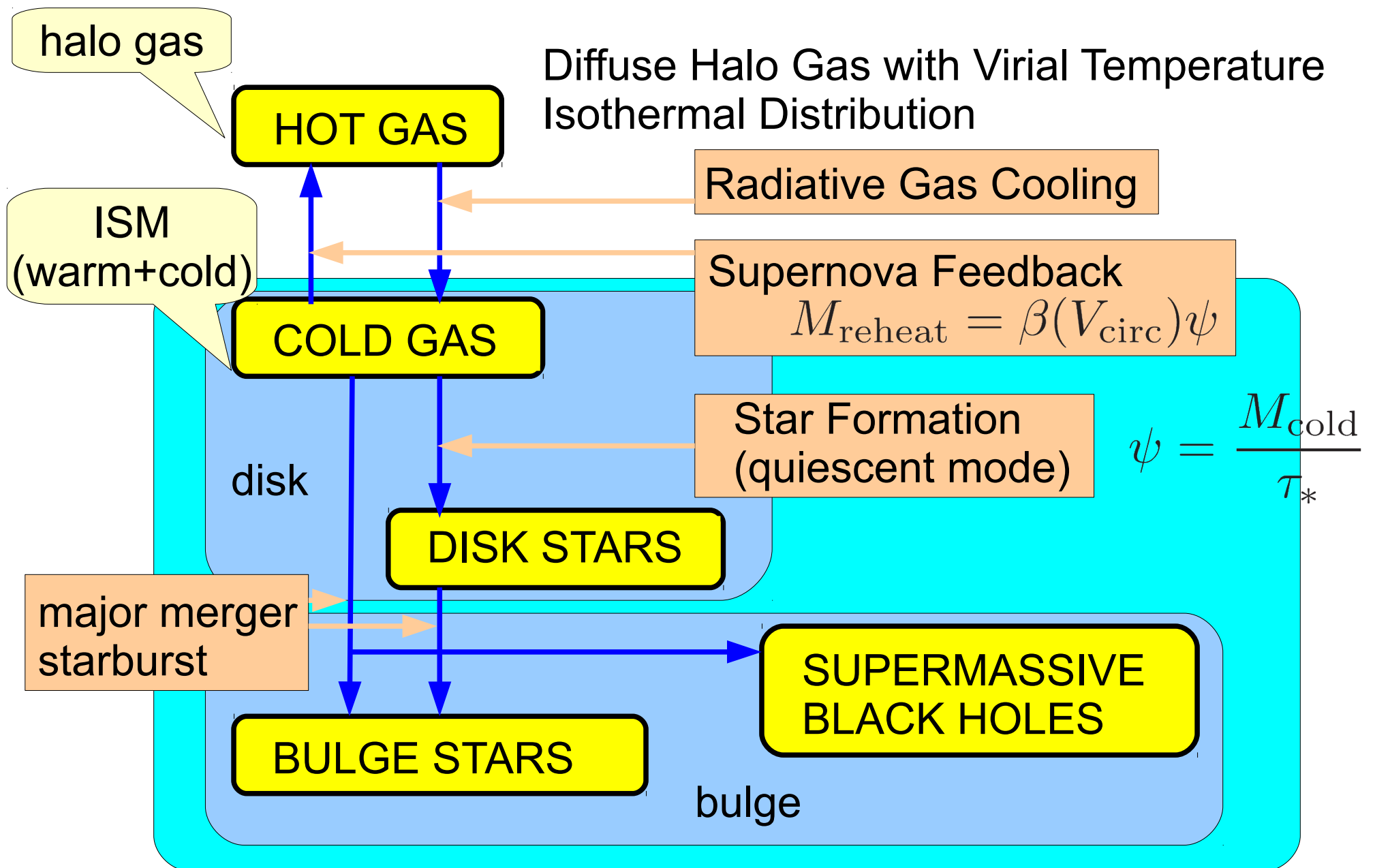
Fourier mode を考える



Higher density
fluctuations
collapse first

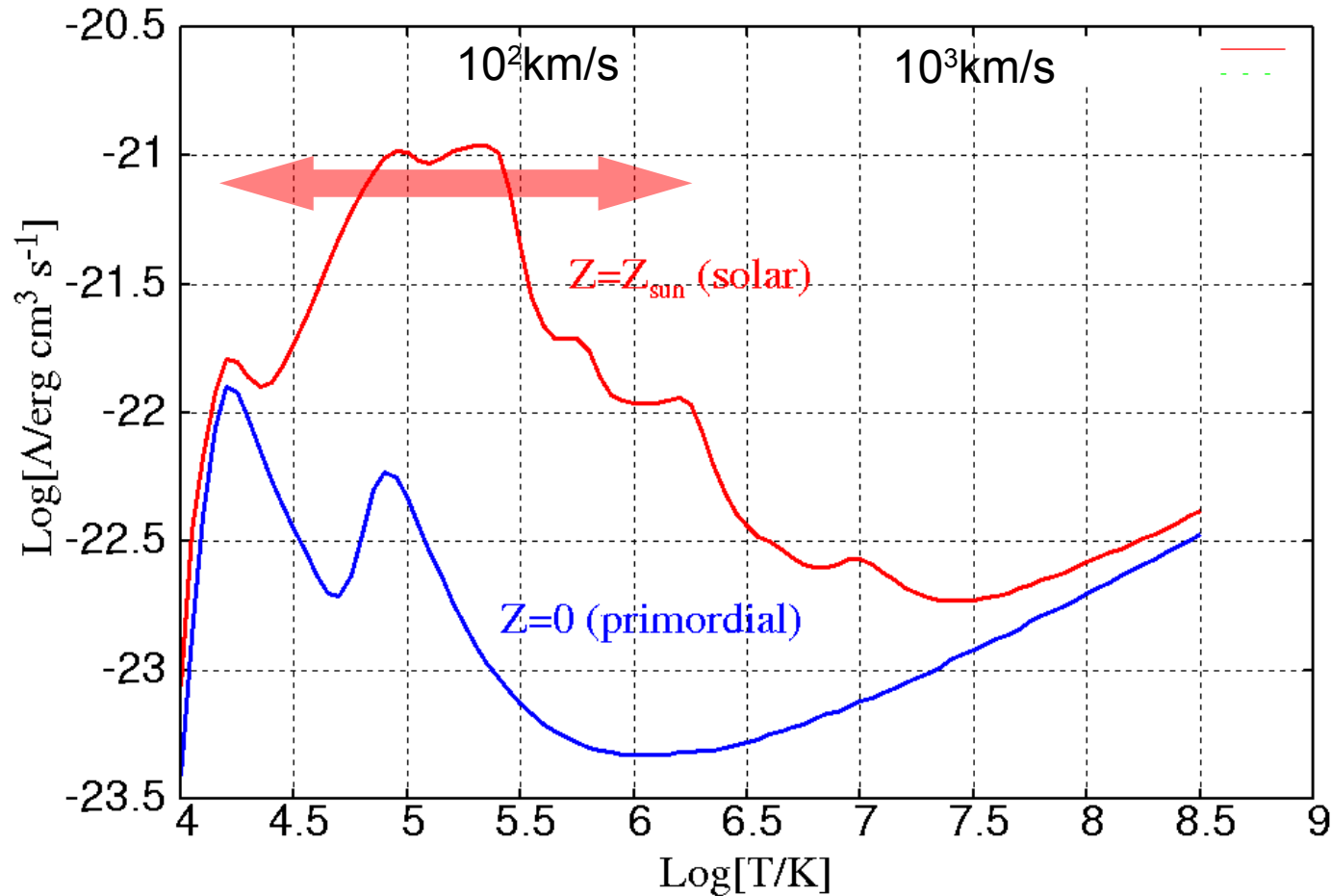


Evolutionary Cycle of Baryons



Gas Cooling

- 10^4 [K]まで冷えたらdiskに降り積もり、ISMになってあとは一部がもっと冷えると仮定する



$T=10^4\text{K}$
($V_{\text{circ}} \sim 17\text{km/s}$)

clusters of galaxies

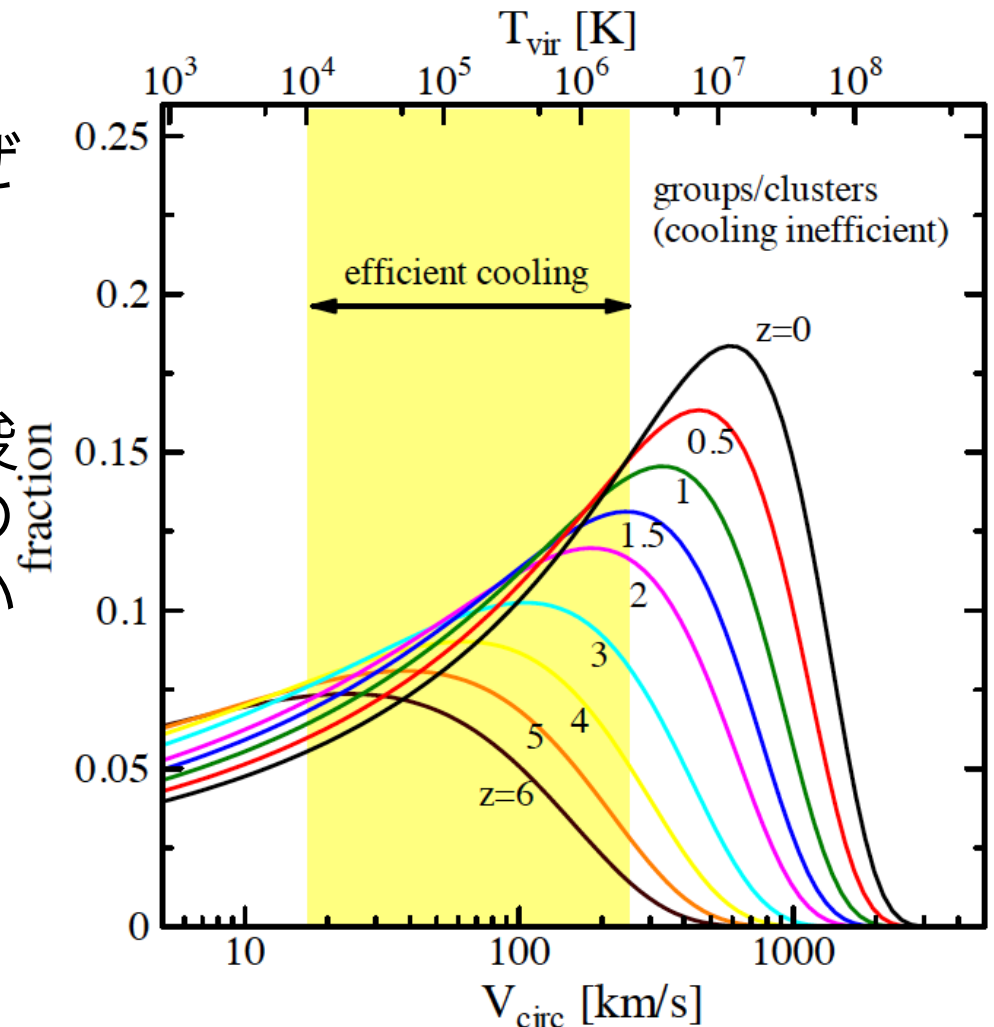
Sutherland & Dopita (1993)

ガスが効率的に冷えられるハロー

- ビリアル温度が $T > 10^4 \text{K}$ のハローでないと冷えにくい
 - ▶ 無論 first stars はもっと小さいハローでできるが
- ICM (Intracluster Medium) は中心部でも冷えていない

- ▶ クーリングフローはなぜ起きていないか(謎)
- ▶ 中心部の観測の T, ρ は十分冷えられることを示唆しているのに、中心部の温度があまり下がっていない

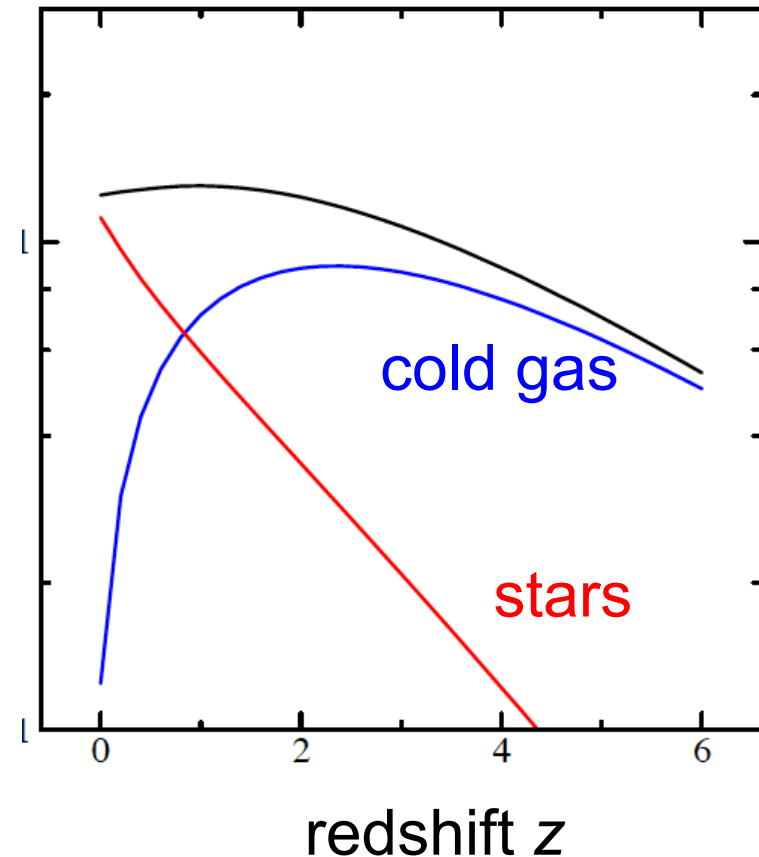
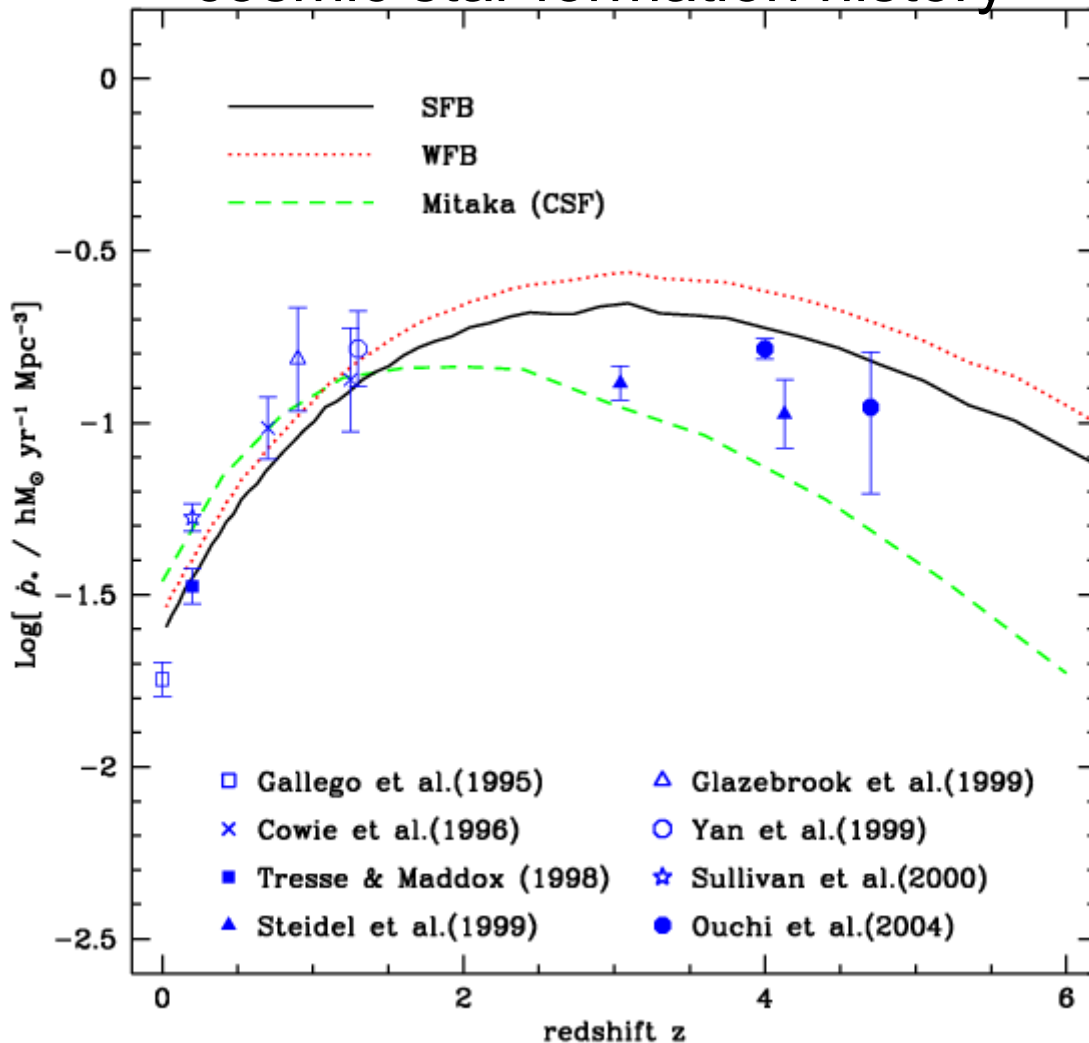
- 何が加熱している?
 - ▶ AGN? non-thermal particles? or...



cooling可能なハローの質量比

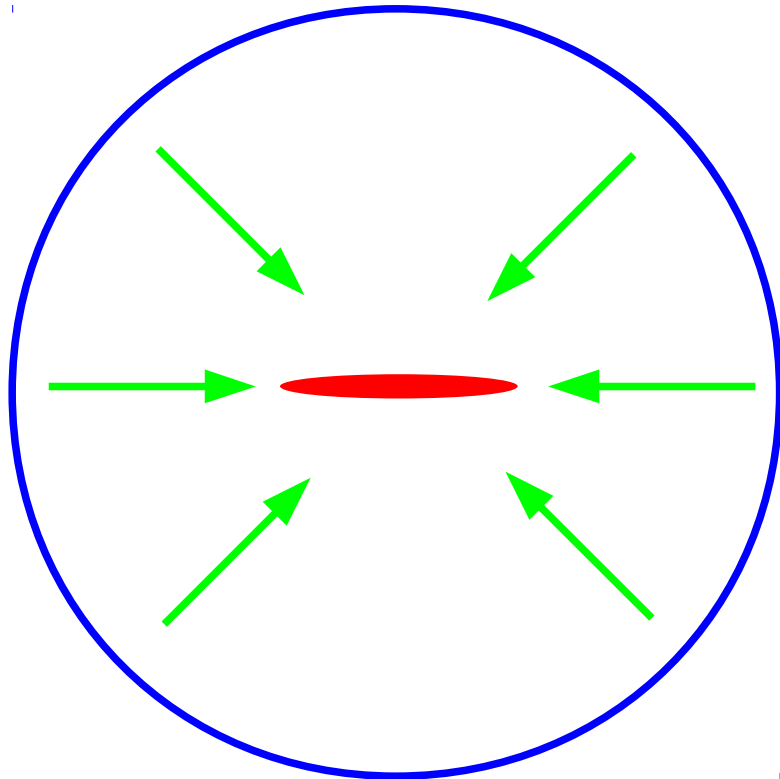
- 0th approximation to cosmic star formation rate
 - ▶ $\psi \propto M_{\text{cold}}$

cosmic star formation history



ディスクサイズのモデル

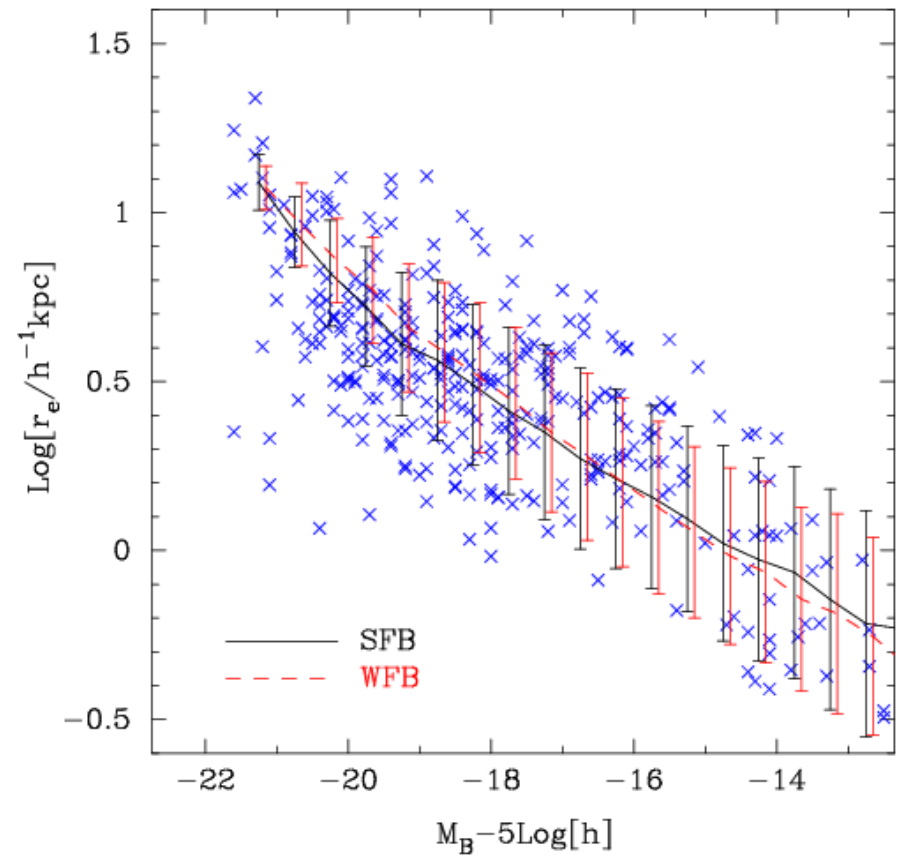
ホットガスの冷却により
ディスク形成



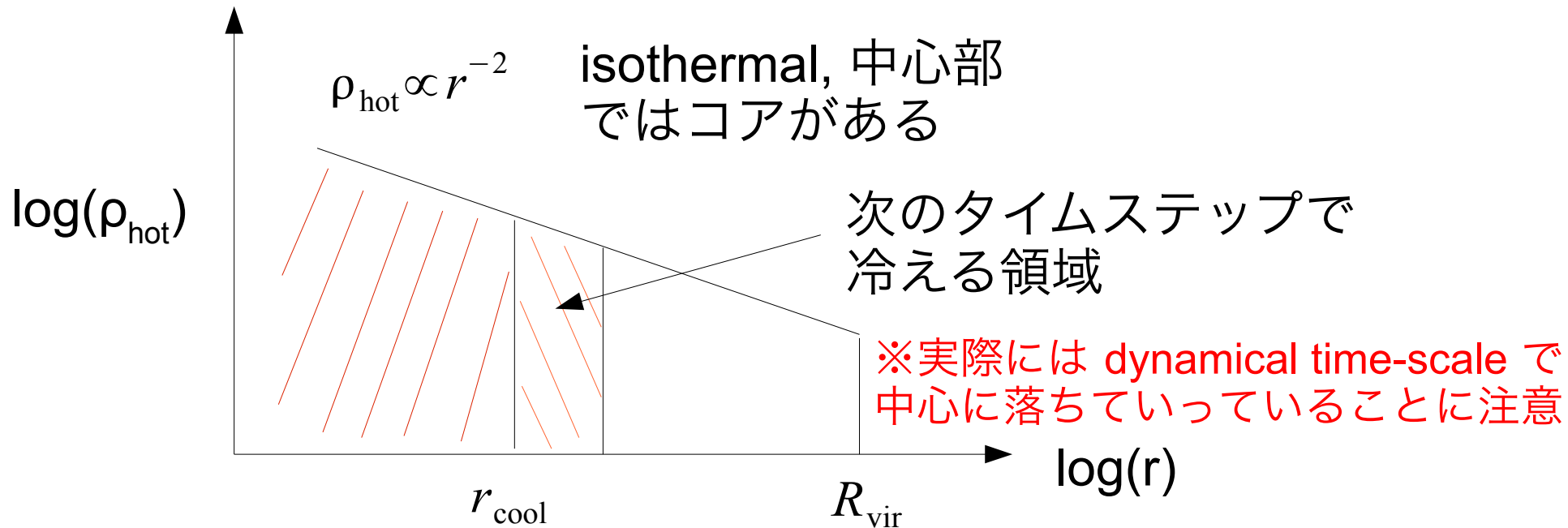
rotation support
になるところまで収縮

$$r_{\text{disk}} \sim \lambda R_{\text{vir}}$$

(スピンパラメタ×ビリアル半径)



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

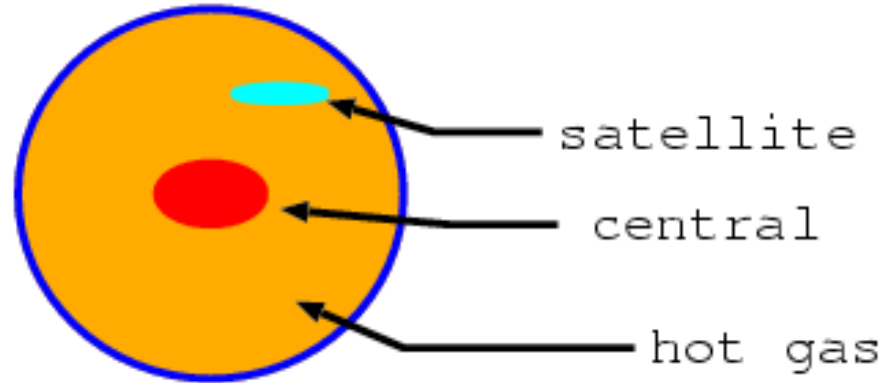
$$t_{\text{cool}}(r) = \frac{3}{2} \frac{\rho_{\text{hot}}(r)}{\mu m_{\text{p}}} \frac{k_{\text{B}} T_{\text{vir}}}{n_{\text{e}}^2(r) \Lambda(T_{\text{vir}}, Z_{\text{hot}})} \sim \frac{k_{\text{B}} T_{\text{vir}}}{n \Lambda}$$

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 **バルジ** 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

という説明を普段
はすすめるわけだが、
当然ながら文字通
り受け取っては

イケナイ

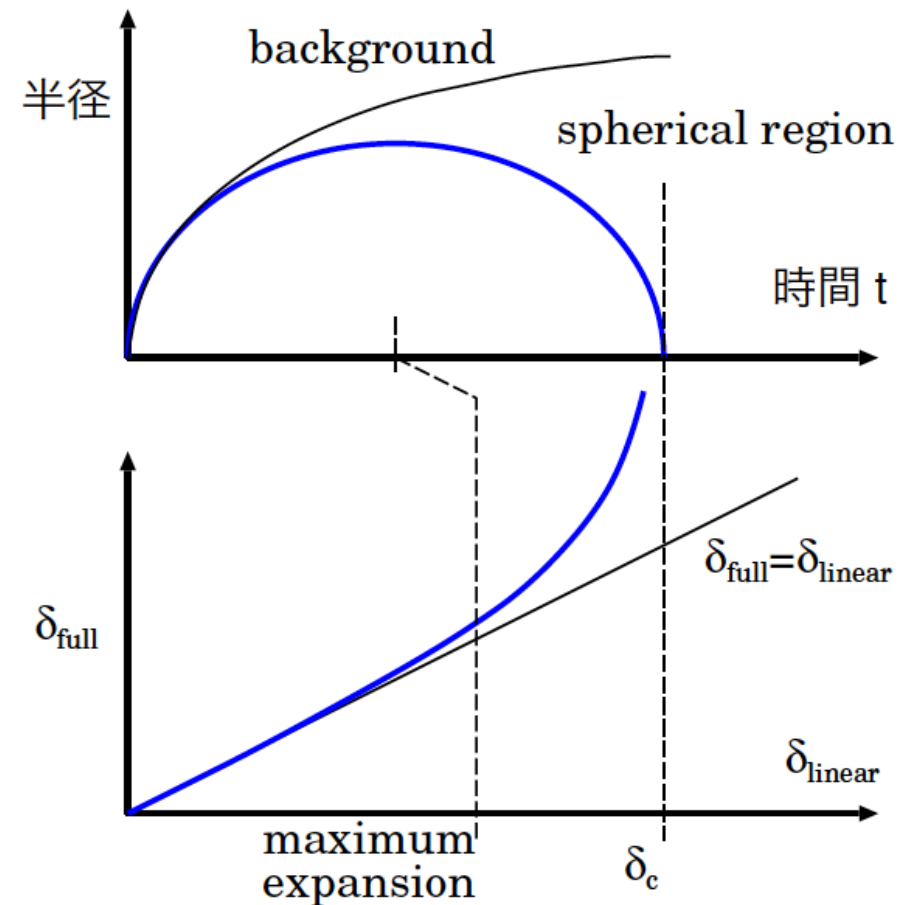
ハコ一形成

- 便宜上、「球対称崩壊」モデルを用いる
 - ▶ 線型揺らぎとの対応をつけるのが簡単

$$\ddot{r} = -\frac{GM(\leq r)}{r^2} \left(+\frac{\Lambda r}{3} \right)$$

$$\begin{aligned} \rho &= \bar{\rho}(1 + \delta_{\text{full}}) \\ &= \bar{\rho}(1 + \delta_{\text{linear}} + \dots) \end{aligned}$$

- 実際はもちろん非球対称



非球対称崩壊

- Zel'dovich近似を用いると

$$\mathbf{r} = a(\mathbf{q} + D\nabla\varphi) \quad \mathbf{r} : \text{物理座標、} \mathbf{q} : \text{Lagrange座標、} \\ a: \text{scale factor, } D: \text{growth rate}$$

- 質量保存より

$$\rho d^3x = \bar{\rho} d^3q \quad (r = ax)$$

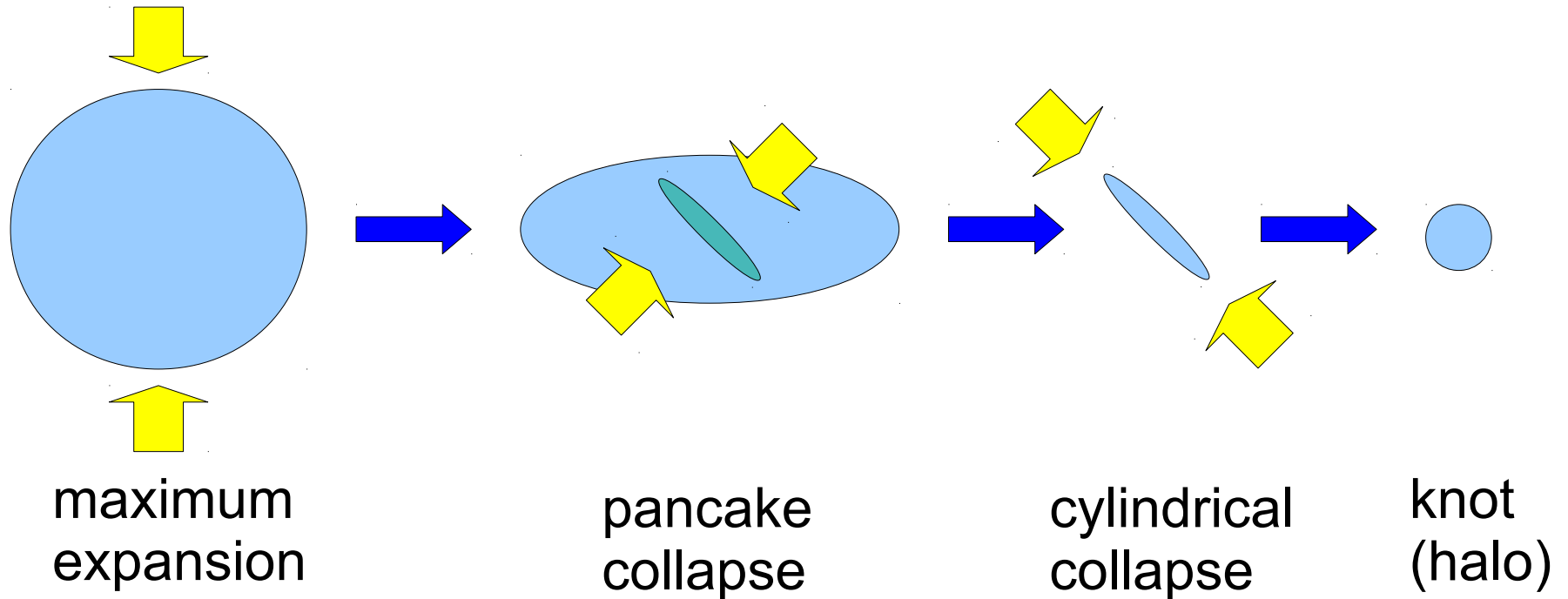
- 密度の発展は (J : Jacobian, λ_i :固有値)

$$\rho = \left| \frac{d^3x}{d^3q} \right|^{-1} \quad \bar{\rho} \equiv J^{-1} \bar{\rho} \quad J = \prod_{i=1}^3 (1 - D\lambda_i)$$

- つまり、 $D = 1/\lambda_i$ を満たす3つの D (に相当する時刻)で密度が発散する→3方向それぞれで collapse

非球対称崩壊

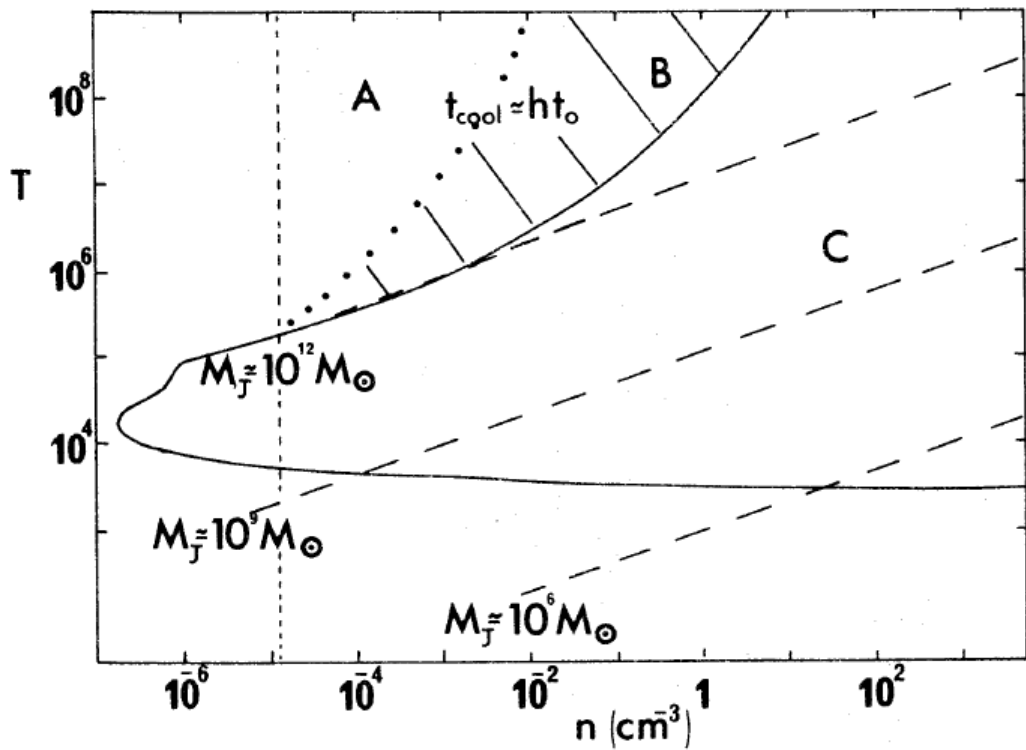
- 重力は非等方性を加速する



- ダークマターはすり抜けるが、ガスはそれぞれで shock を起こす
- cooling timescale が短ければ?
 - ▶ いわゆる isothermal shock
 - ▶ 低温を維持するので球にならない

実際のcollapse

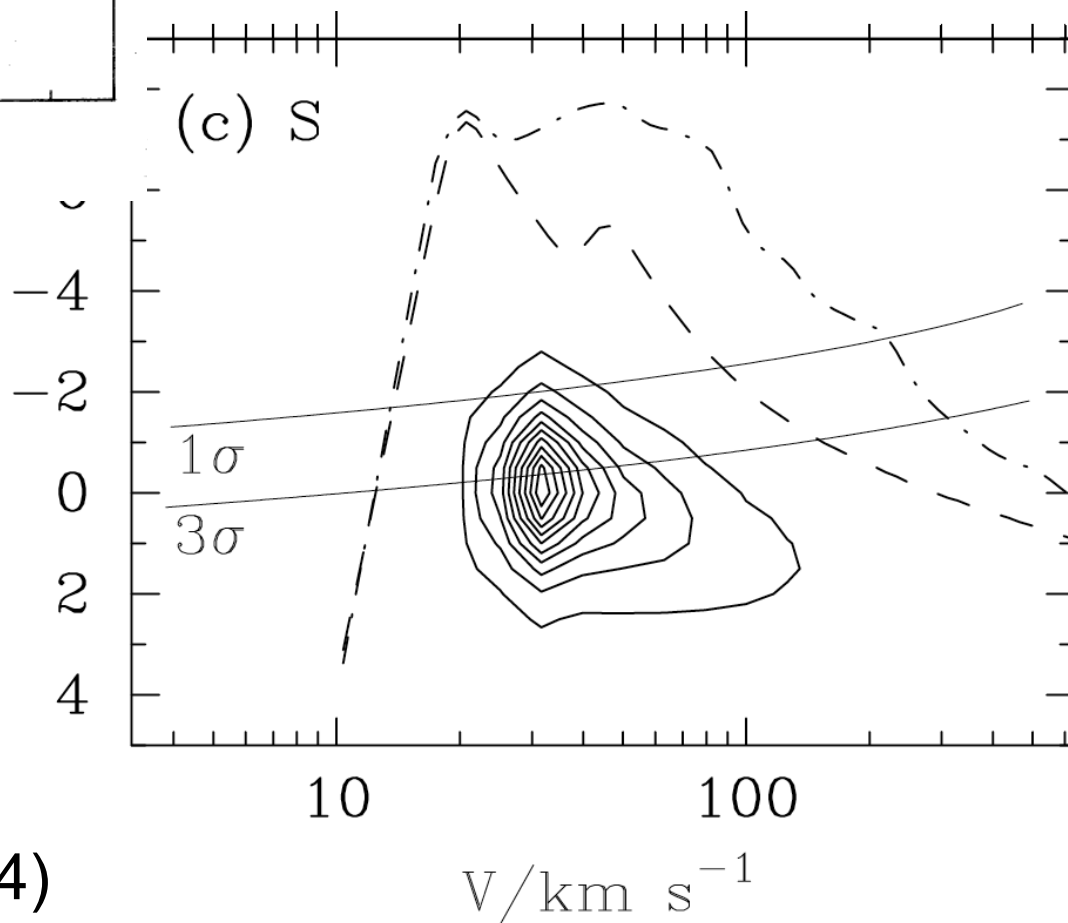
- 前頁はlocalな揺らぎの話なので、non-zeroでは当然周囲の状況が効いてくる
 - ▶ pancake の後の filament は、large-scale structure の filament と関連している
- $t_{\text{cool}} \ll t_{\text{sc}}$ (sound crossing time) の状況では、ガスはほぼ 10^4K を保ったまま shock \rightarrow shock 後に virial 温度で球対称のホットガスになる、ということはない
 - ▶ pancake \rightarrow filament、そして stream となって銀河に降ってくるはず
- じゃあなんで cooling radius とか使って計算しているのか？
 - ▶ 銀河スケールではどうせ全部冷えて降ってくるんだから、どう降ってこようが細かい話
- **これが重要になるのはどういうところか？**



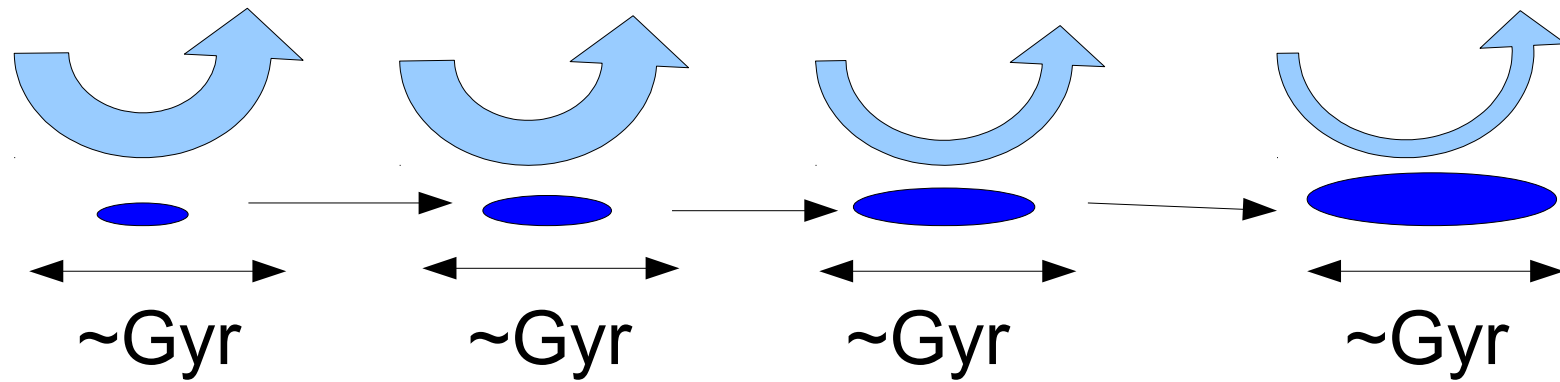
Rees & Ostriker (1977)

Log [n_b / cm^{-3}]

Nagashima & Yoshii (2004)

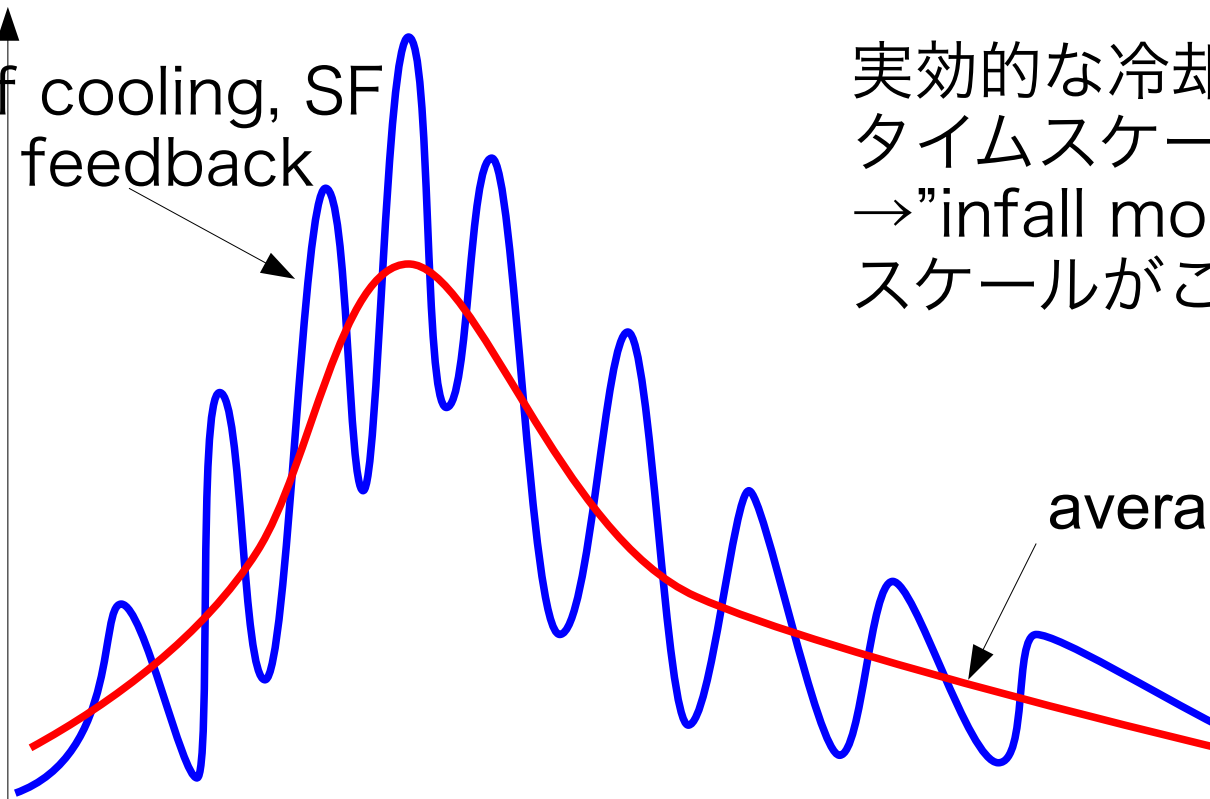


Disk Formation



cycle of cooling, SF
and SN feedback

SFR



実効的な冷却・降着の
タイムスケール ~10Gyr
→ "infall model" のタイム
スケールがここから得られる

average SFR

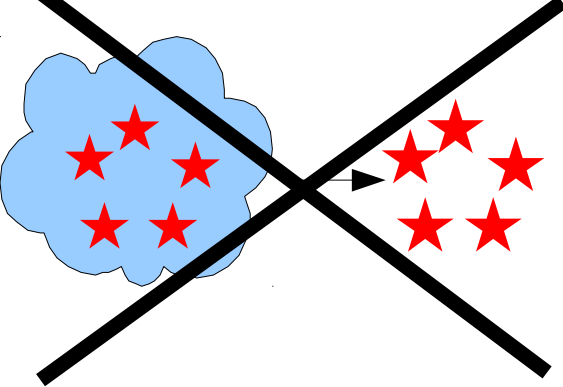
time

→13.7Gyr

Spheroid Formation

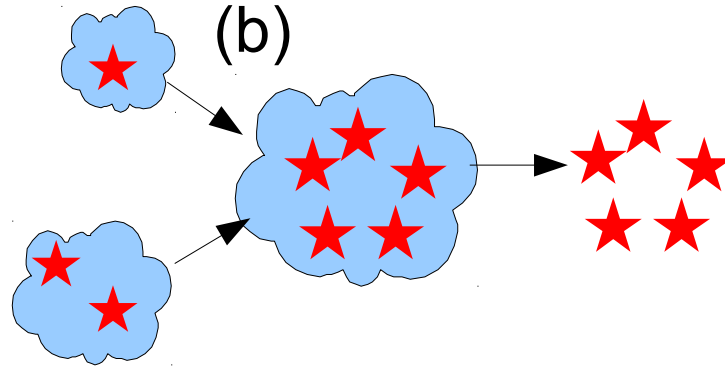
Elliptical Galaxies

(a)



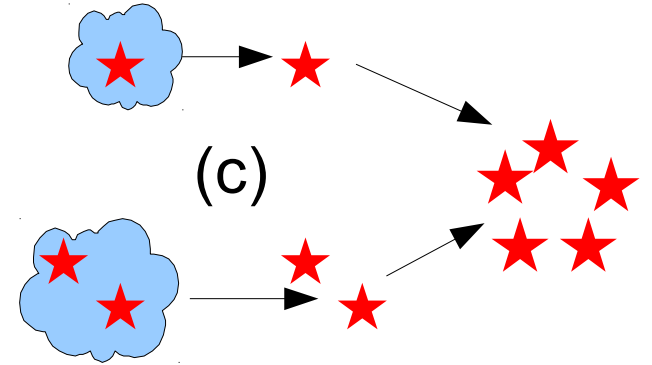
monolithic collapse
high-zで巨大雲形成困難

(b)

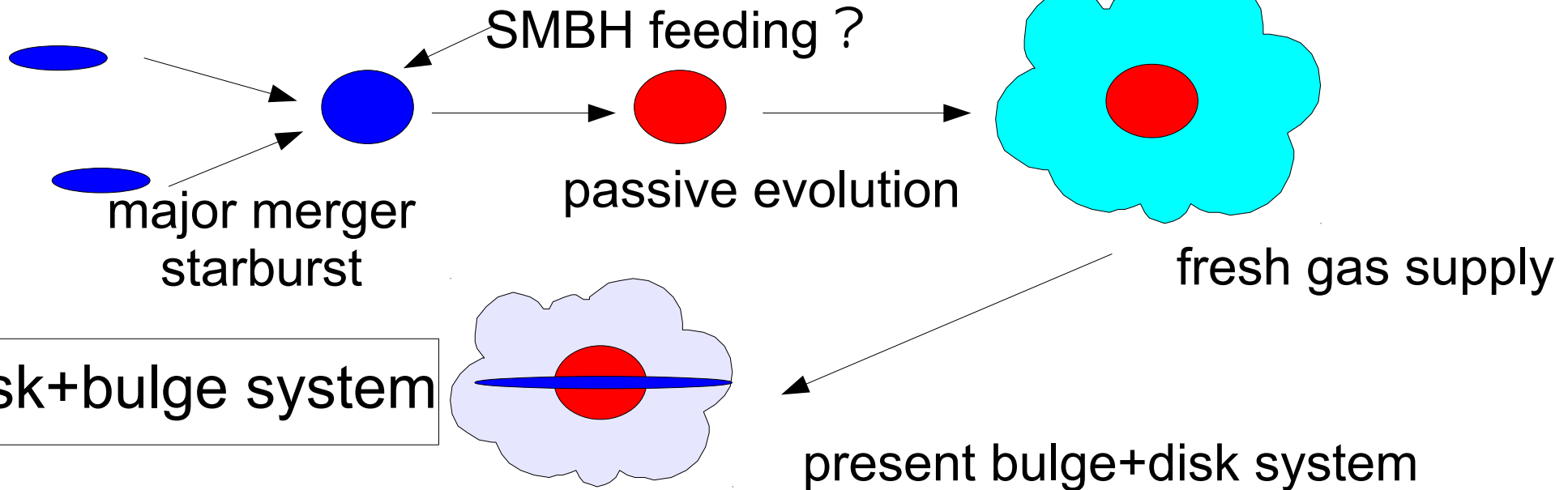


gas-rich ("wet") merger

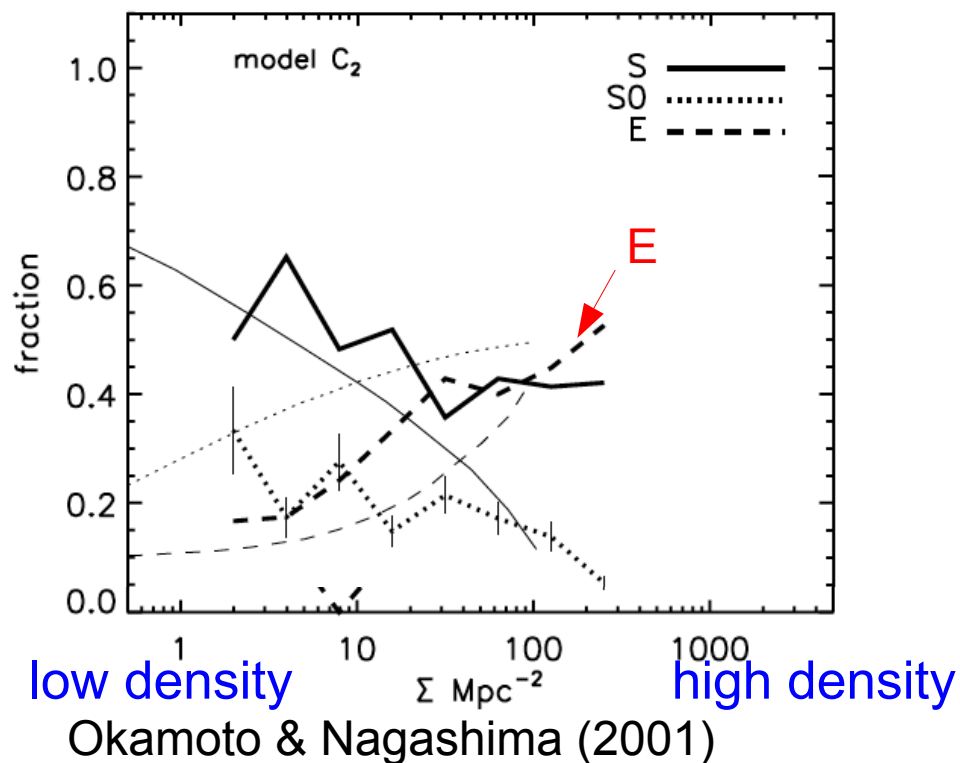
(c)



dissipationless
("dry") merger

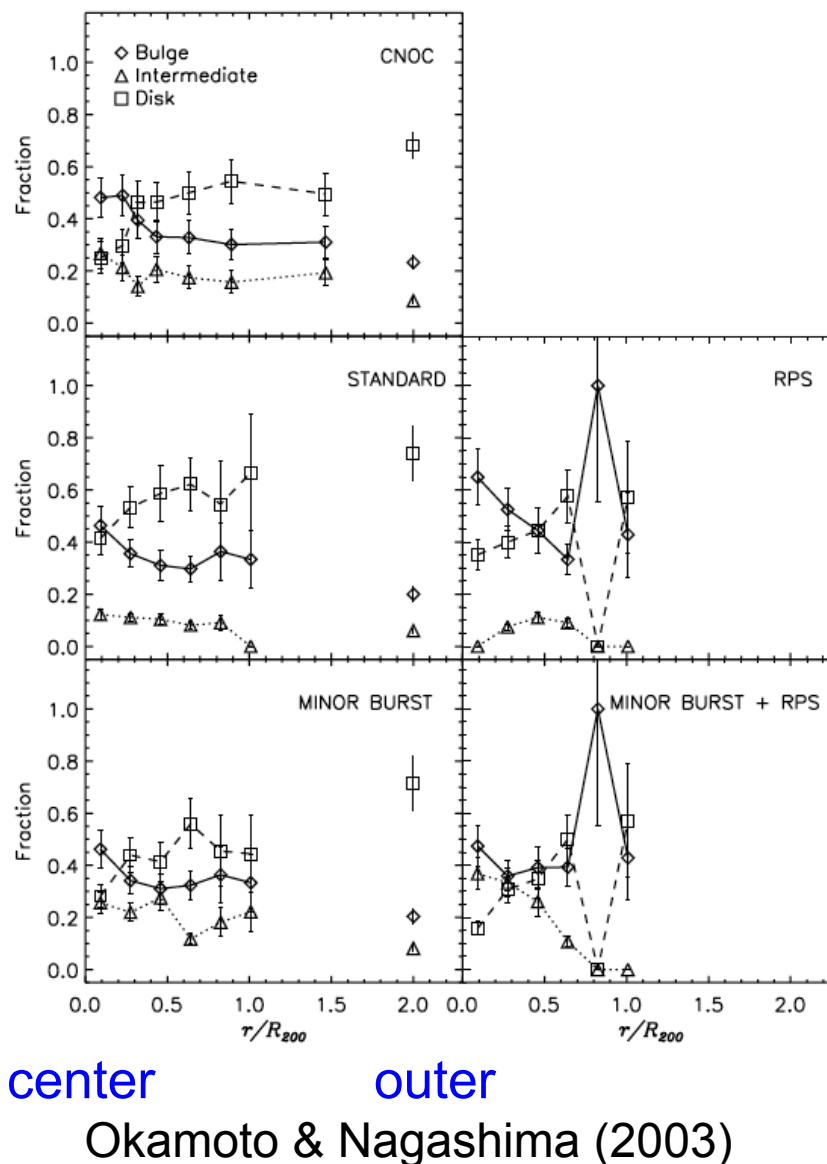


Morphology-Density Relation



楕円銀河は銀河団中心で増加
→ 合体仮説で十分説明可能

(S0については ram-pressure stripping とか minor merger burst とかゴチャゴチャやらないとダメ)

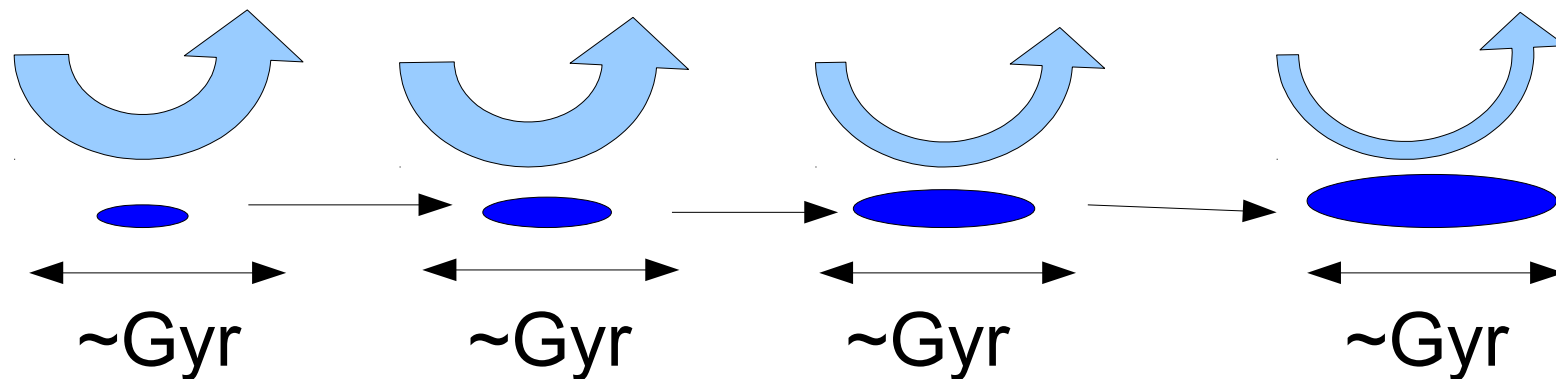


bulge形成のシナリオ修正の可能性

- 現状では、バルジは「ミニ楕円銀河」。あとから gas accretion があると、disk を作って bulge-disk system になる。
 - ▶ S0の問題を除けば、大体説明できている
- しかし、pseudo-bulge の問題(楕円銀河とは違って回転支持とか扁平とか)があり、単純にこれで良いとは行かない雰囲気になってきた
- major merger ではなくて、角運動量の少ないガスが大量に落ちてきて(cold stream的?)、一気にバルジを作ったのかもしれない(initial starburstを彷彿…)
- バルジ形成のシナリオ(モデル)は今後書き換えられなければならない可能性は大きい
- 詳細は次の岡本さんの講演で。

diskの角運動量とfeedback

- infall model的「ゆっくり(~ 10 Gyr)降着」では、ハローと同様に角運動量を獲得したバリオンが冷えて落ちて回転支持になってできると仮定
- しかしdiskは単純な infall model 的「ゆっくり降着」でできるのではない
 - ▶ ゆっくり落とすメカニズムがない
- 素早い冷却、dynamical time での降着、SN feedback による放出を繰り返し、effective には「ゆっくり」した降着のように見えている

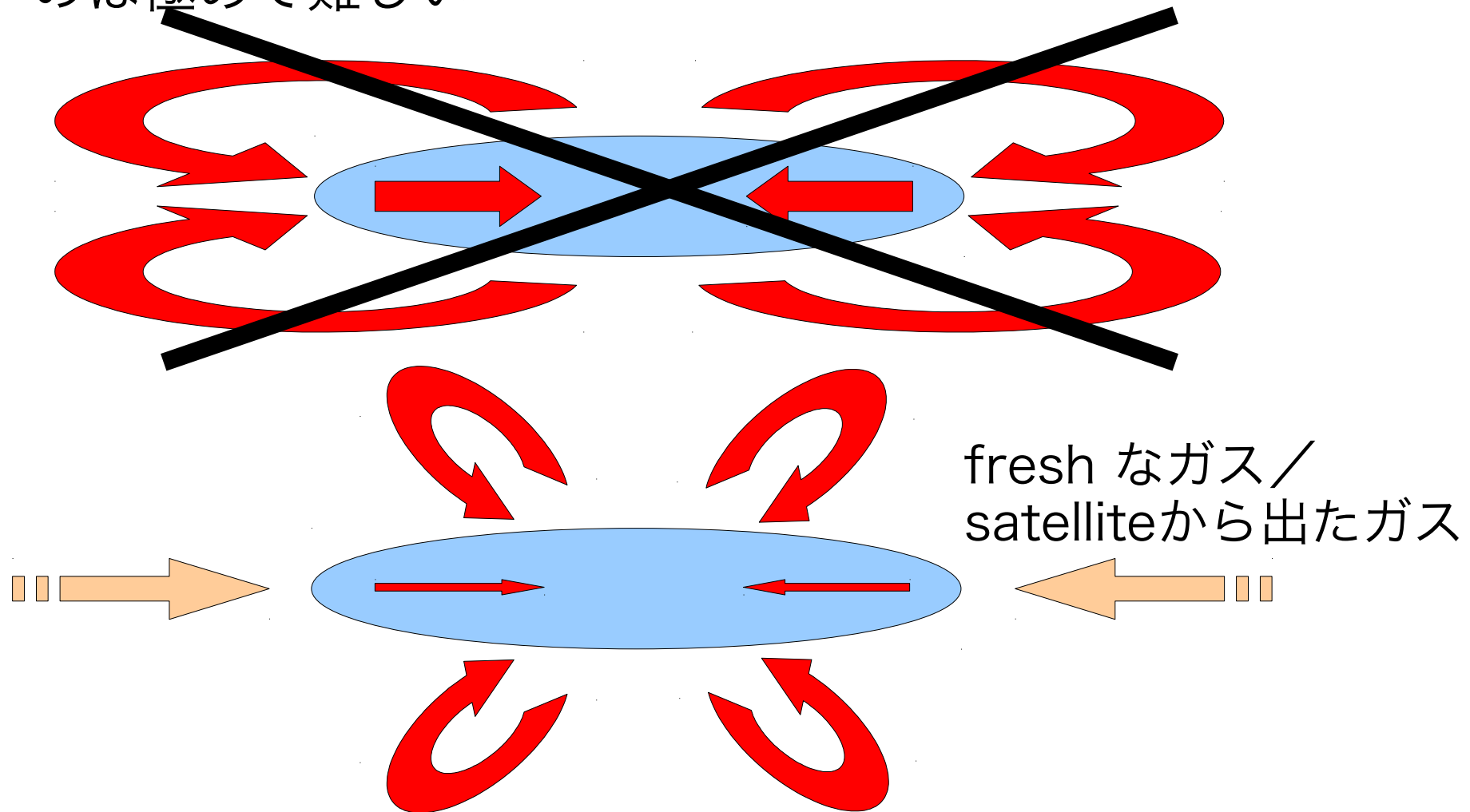


diskの角運動量とfeedback

- SN feedback は星形成率に比例…星形成率の高い円盤内側からのガス放出の寄与が大きいであろう
- 円盤内側は角運動量小さい(←flat rotation)
- 角運動量小さいガスが、内部からのfeedbackで放出されたらハローに行っても角運動量小さいまま
- それが冷えたら当然円盤外側ではなく内側に落ちてくるはず
 - ▶ enrichされたガスは、降着によって円盤内側にしか落ちてこない
- satelliteから放出されたガスなら軌道角運動量を持っているが、あまりenrichはされない
- 結局、メインの円盤銀河が成長とともにハローの角運動量の「方向」がどう変化するかが影響しそうである

diskの角運動量とfeedback

- 結局、ガスがどう循環するのか、シミュレーションで丹念に調べるしかない
 - ▶ ハローの角運動量ベクトルの時間進化を解析的に扱うのは極めて難しい



まとめ

- 現状の準解析的モデルの範囲では、cold stream 云々は細かい話にすぎない
 - ▶ 銀河スケールではどうせ全部冷えて降ってくる
- より精密な話をすると、(cold streamを含め)様々な細かいことを考えないといけなくなる
 - ▶ 銀河円盤での、ホットガスとの行き来を含めた角運動量の再配分
 - diskの構造の理解、metallicity gradient, …
 - 円盤での metal enrichment はどうなっているのか
 - ▶ バルジ形成
 - major merger に依らない?
 - pseudo-bulge
 - ▶ 銀河の角運動量ベクトルの進化(実は重大問題)