



銀河形成シミュレーションにおける ガス・星形成・フィードバックの物理

矢島秀伸

東北大学 学際科学フロンティア研究所

第4回銀河進化研究会@大阪大学 2017/6/7-6/9

アウトライン

- イントロ
- 銀河形成における重要なガスの物理
 - 1: 星形成
 - 2: フィードバック
 - 3: 星間ガス
- まとめと今後

イントロ (より大きいダイナミックレンジへ)

これから

これまで

大規模構造

- ・宇宙再電離
- ・クラスタリング
- ・環境効果

銀河

- ・星形成率
- ・輻射特性
- ・銀河風

星間ガス

- ・多相構造
- ・重元素
- ・電離構造

星形成 BH

>10 Mpc

~kpc

1-100 pc

<1pc

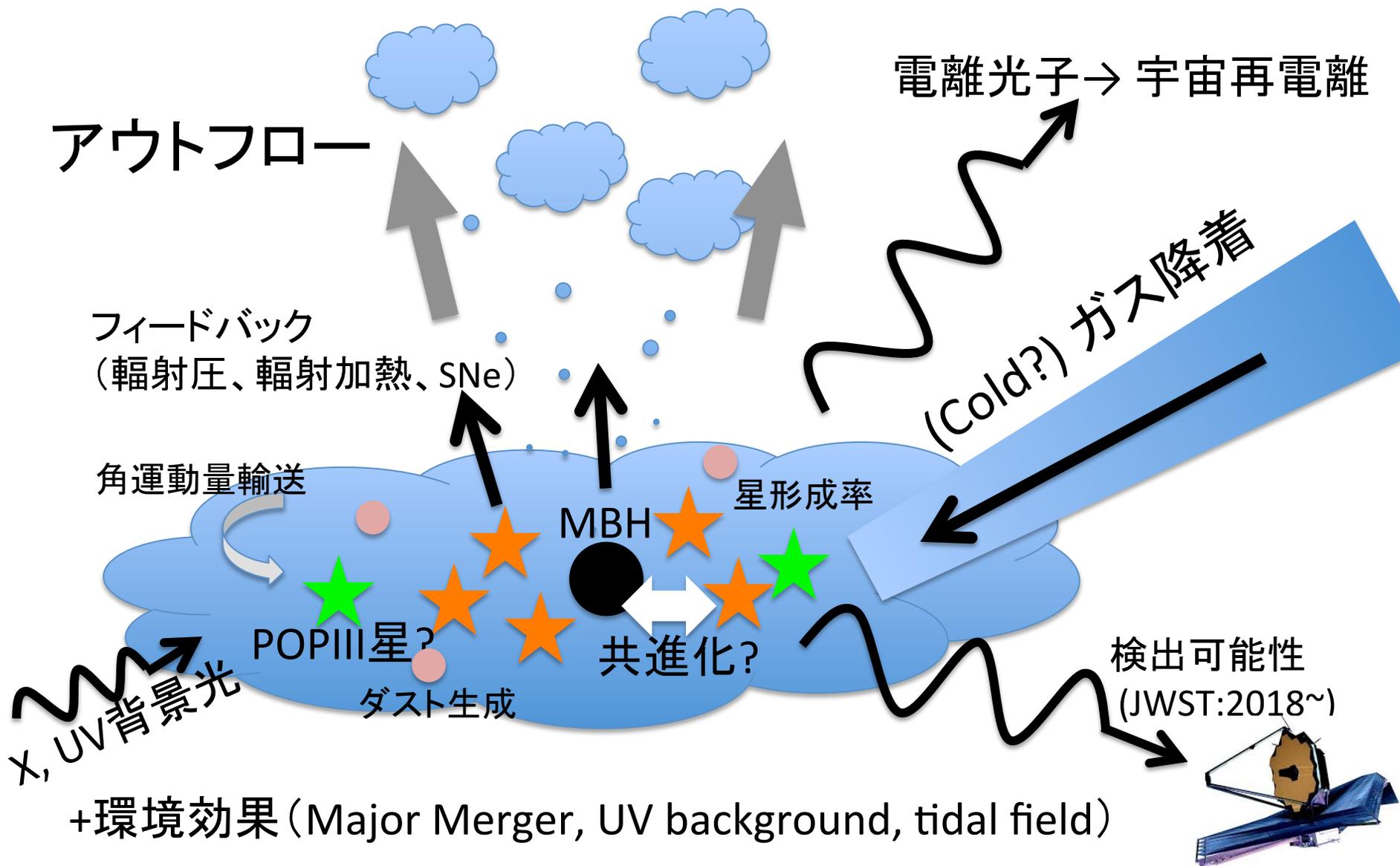
空間スケール

SKA

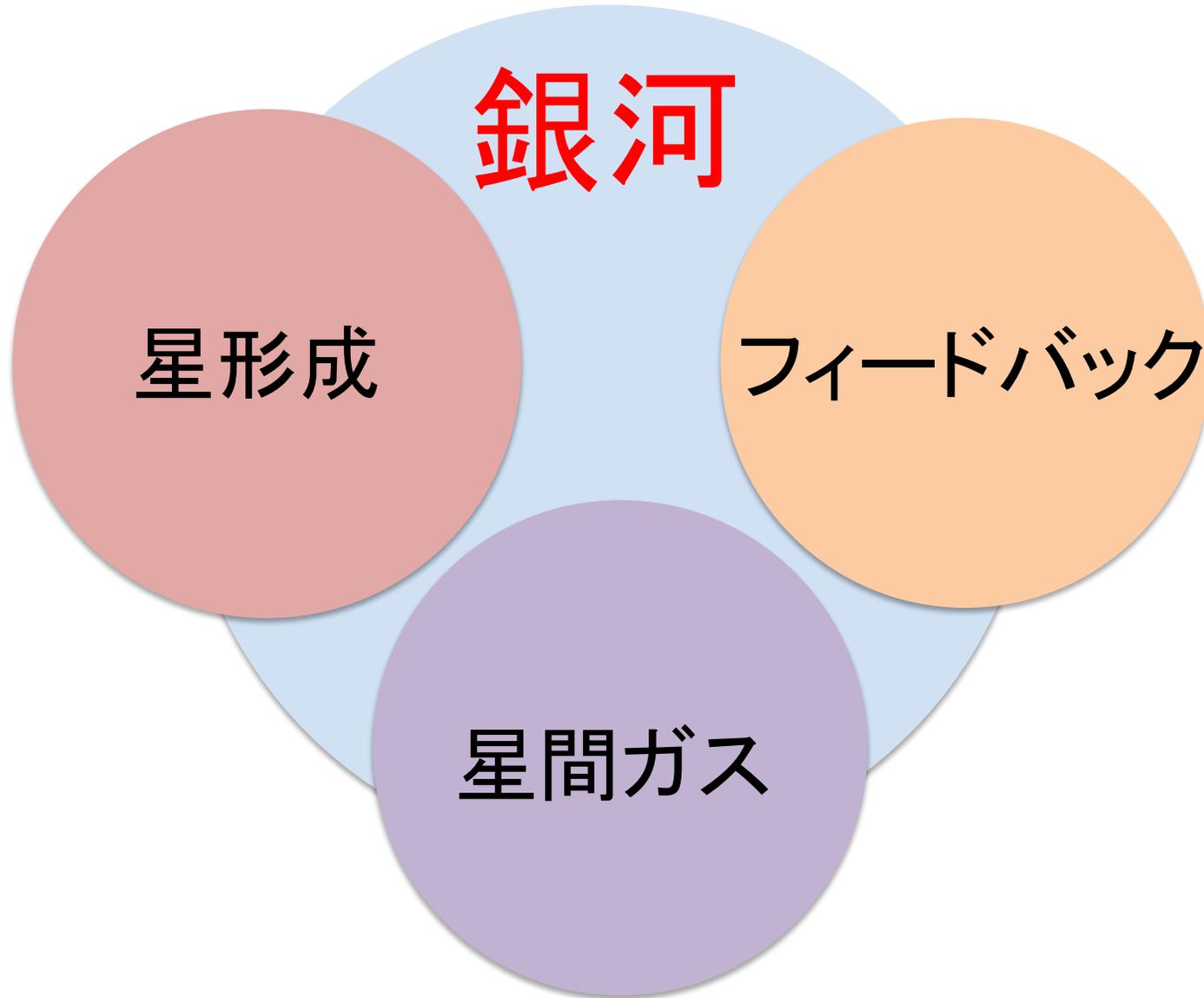
すばるHSC

ALMA
JWST, TMT

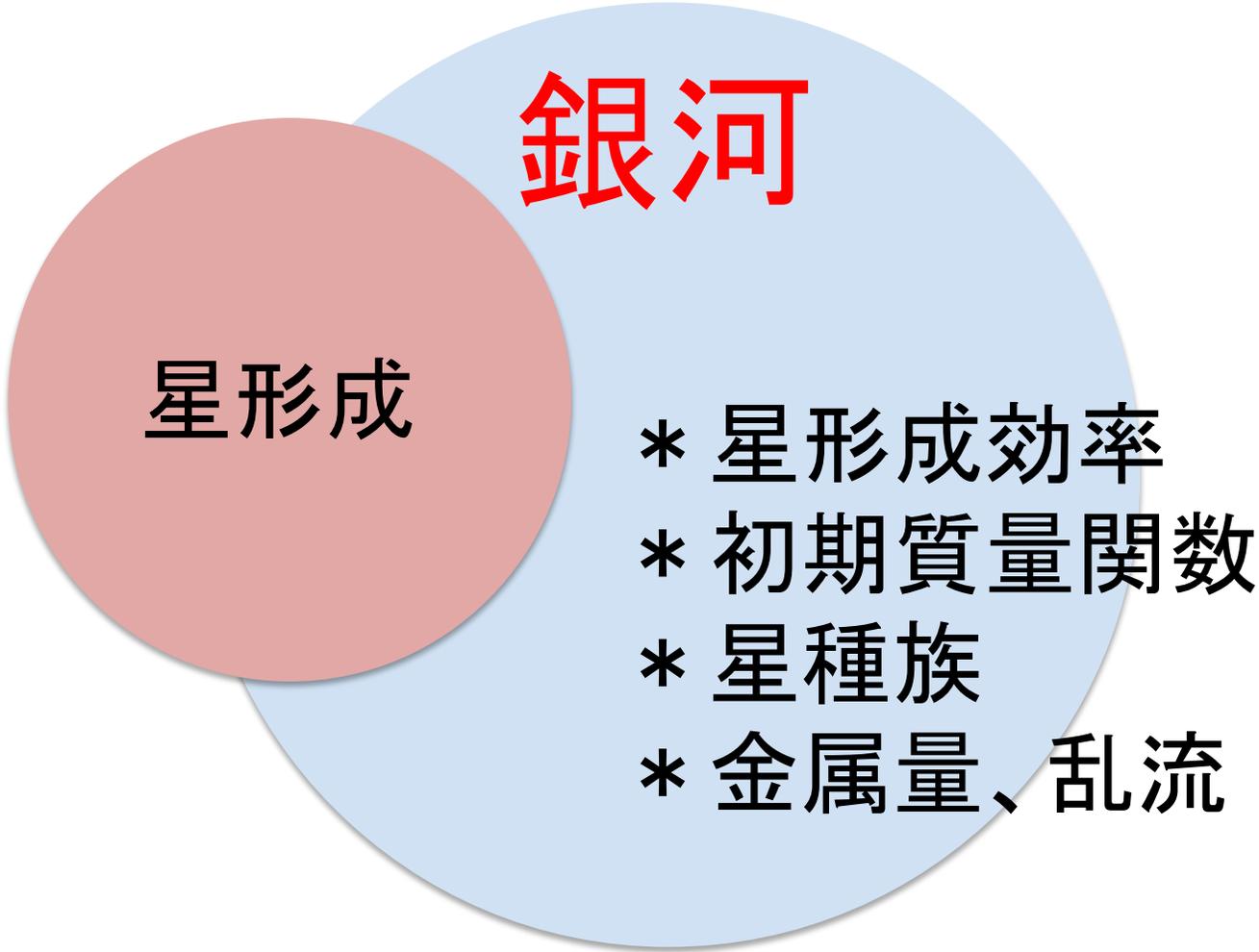
銀河形成におけるkey processes



銀河形成の重要なバリオン物理



銀河形成の重要なバリオン物理



銀河

星形成

- * 星形成効率
- * 初期質量関数
- * 星種族
- * 金属量、乱流

星形成効率

星形成効率

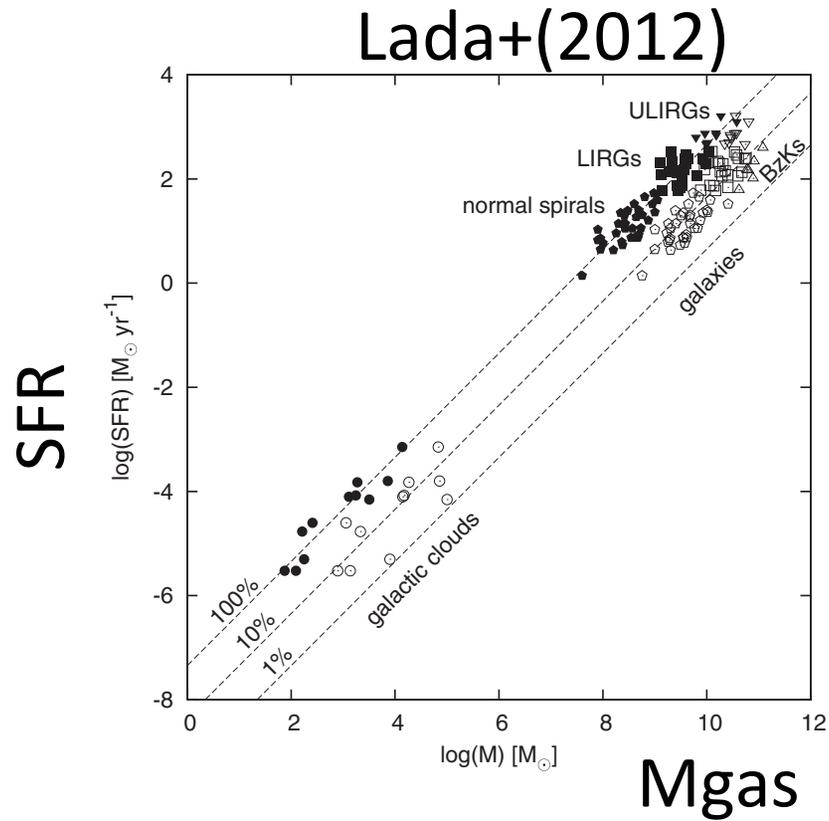
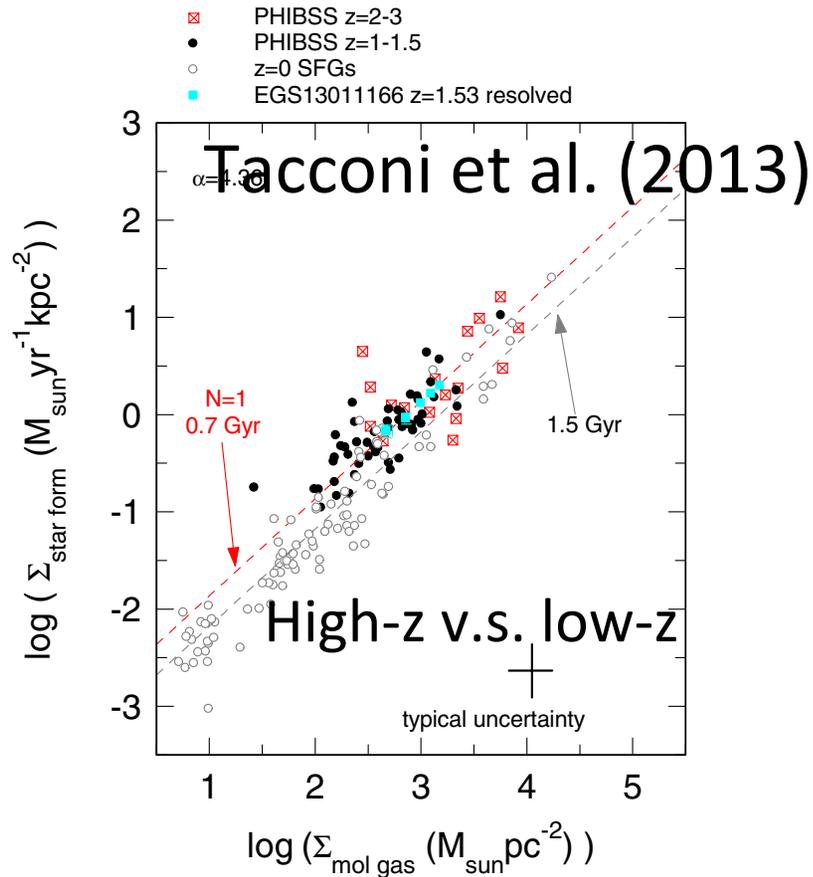
$$\epsilon \equiv \frac{M_{\text{star}}}{M_{\text{gas}}}$$

シミュレーションにおける星形成効率(のようなもの)

$$\dot{\rho}_{\text{star}} \sim \epsilon \frac{\rho_{\text{gas}}}{t_{\text{dyn}}}$$

高赤方偏移銀河内はどのような値が適切だろうか？

異なる環境での星形成効率

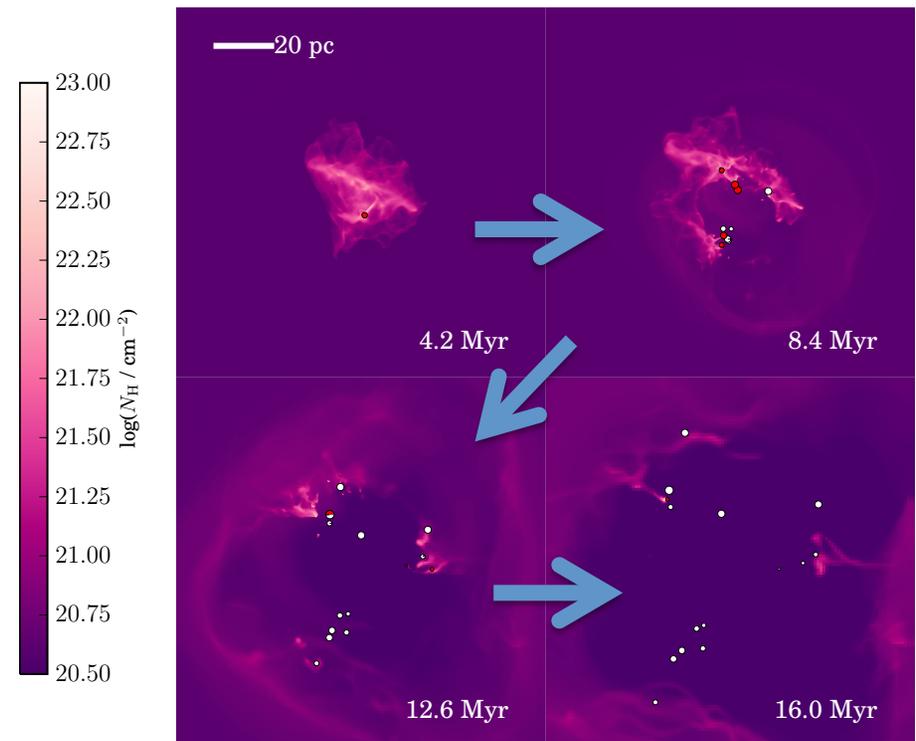
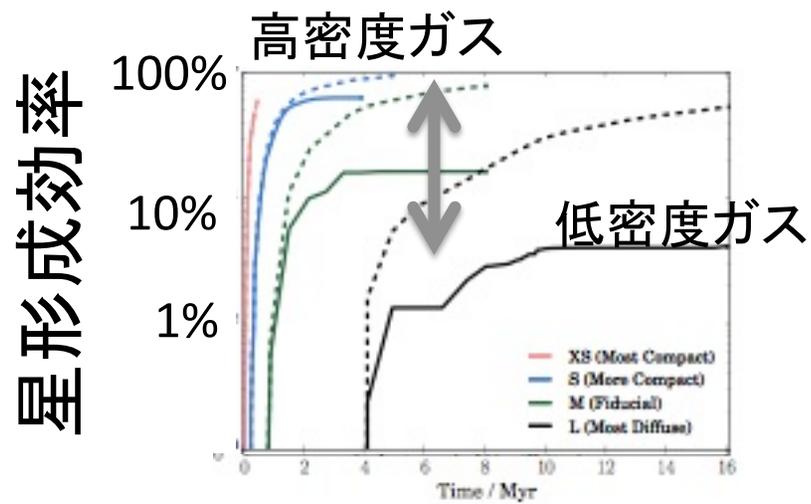


High-z, merging galaxiesは
効率良く星が作られている？

大質量星による分子雲の破壊

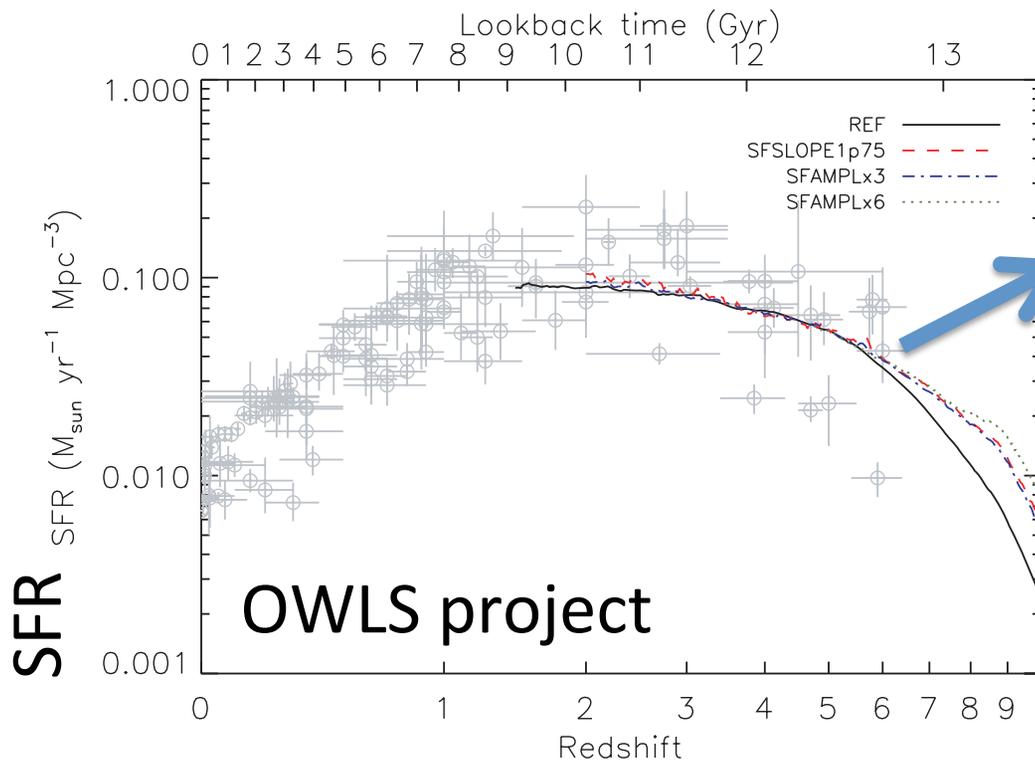
Geen et al. (2017)

3次元輻射流体計算により星団形成、
分子雲破壊の計算が行われつつある
星形成効率の直接計算



星形成効率と星形成率密度

Schaye et al. (2010)



フィードバックによる
Self-regulationのために星形成効率を大きくしても宇宙の星形成率密度は変わらない

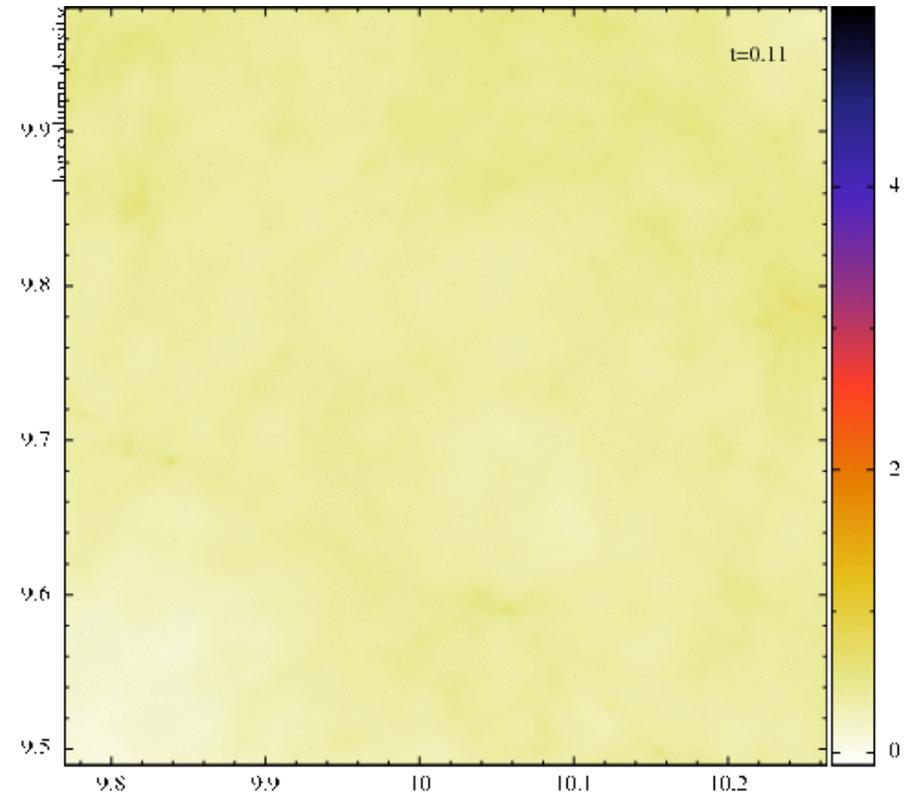
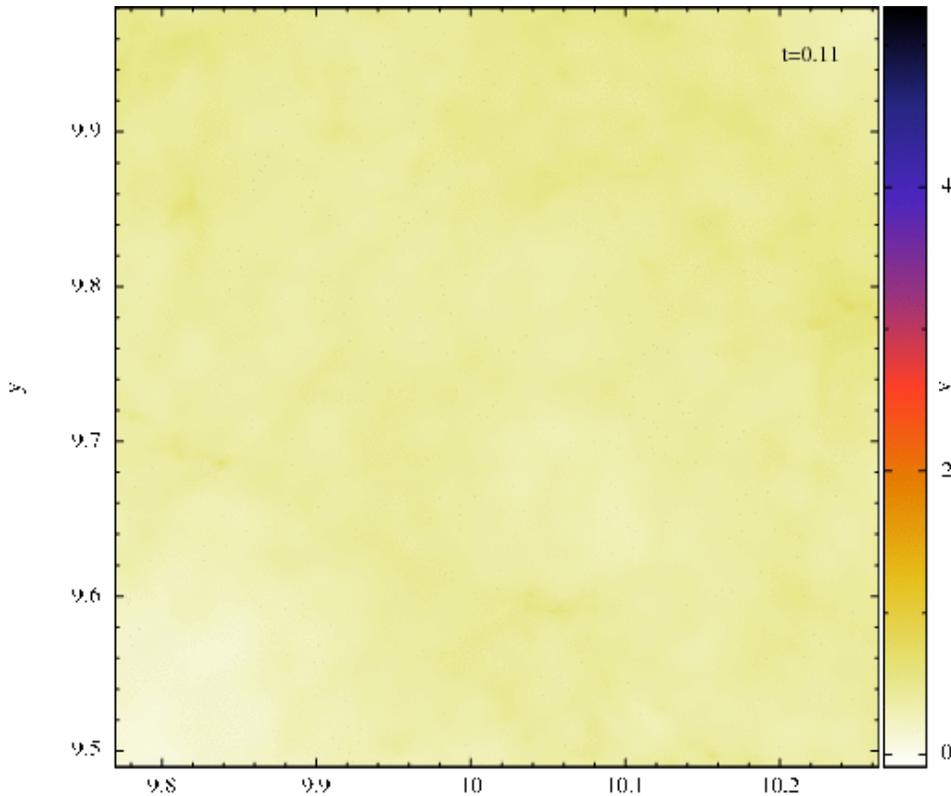
高精度ズームイン計算では?

高分解能シミュレーションでは？

Yajima, Nagamine et al. (2017)

高い星形成効率

低い星形成効率



←→
200kpc(comoving)

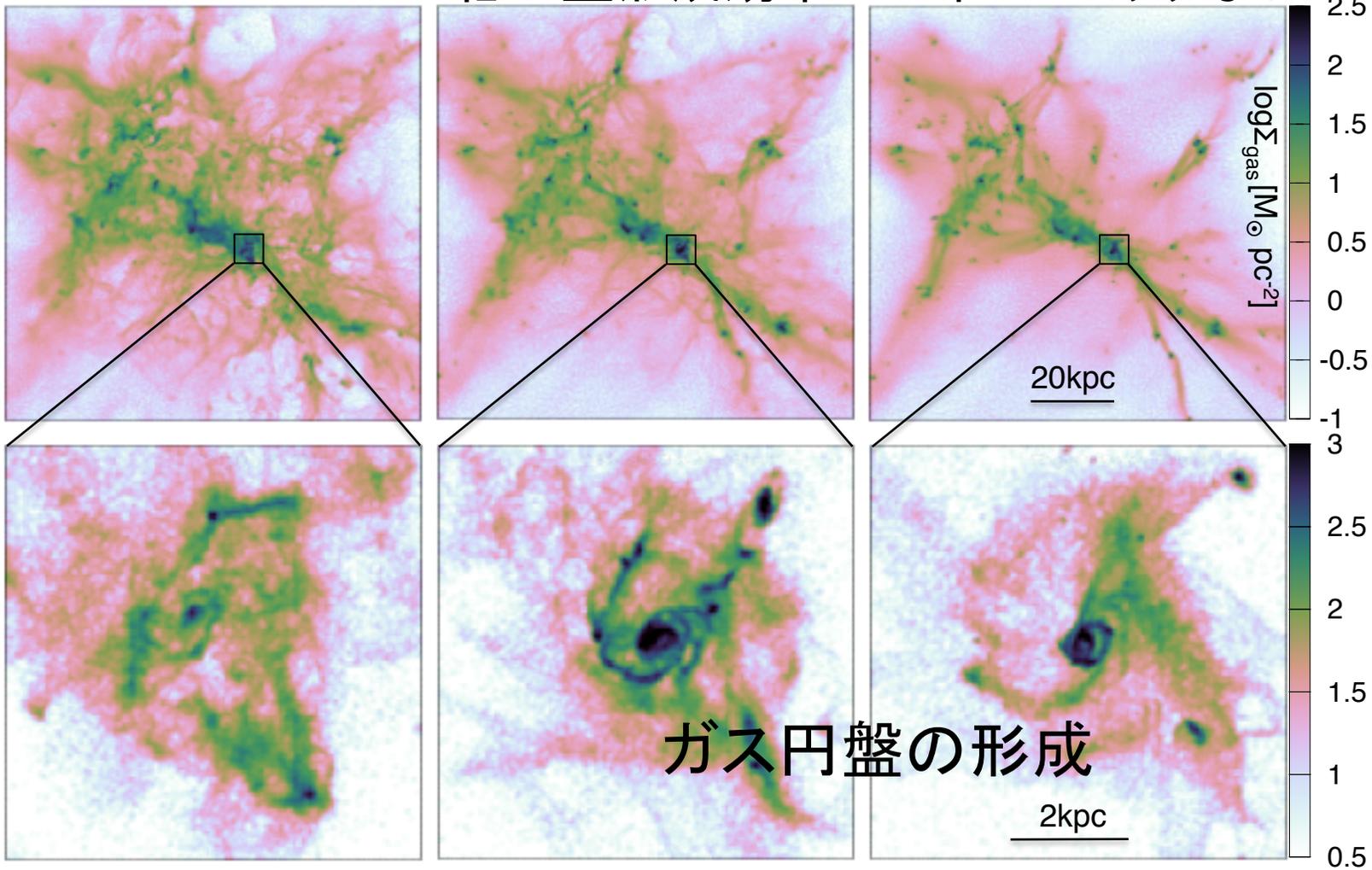
ガスの柱密度

銀河円盤形成

高い星形成効率

低い星形成効率

フィードバックなし

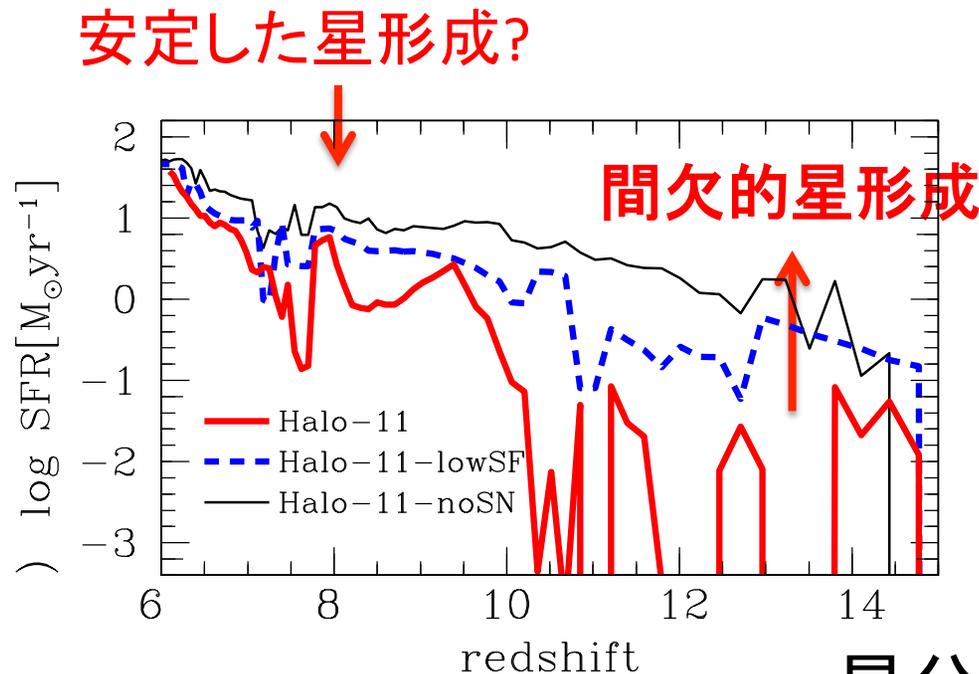


ガス円盤の形成

星形成史

Yajima, Nagamine et al. (2017)

— Halo-11
- - - 低星形成効率
— フィードバックなし



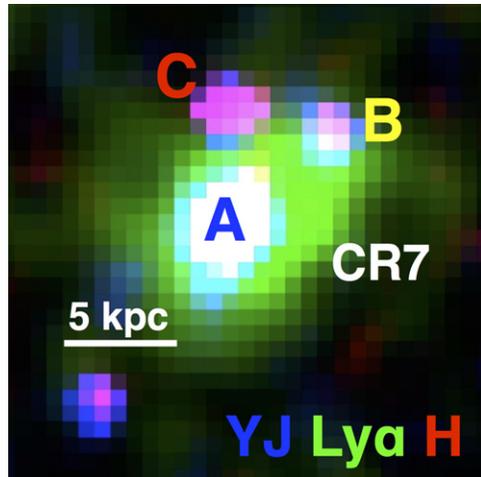
低星形成効率モデルの方が結果的にSFRが大きい
フィードバック効率が小さくなるため

星分布のコンパクトネスにも影響

“Cloud内”の星形成効率は銀河の星形成史、
形態には大きな影響

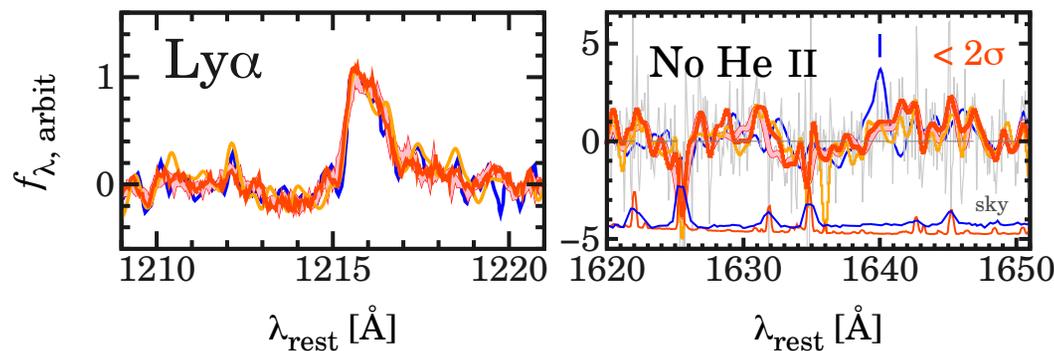
高赤方偏移銀河内の冷たいガス雲の状態(e.g.密度)が鍵?

星種族：初代星銀河は存在するか？



Sobral et al. (2015)
He II 輝線を放射する明るい LAE の発見
PO III 星を大量に含む 銀河？

しかし、再解析・追観測はどれも否定的



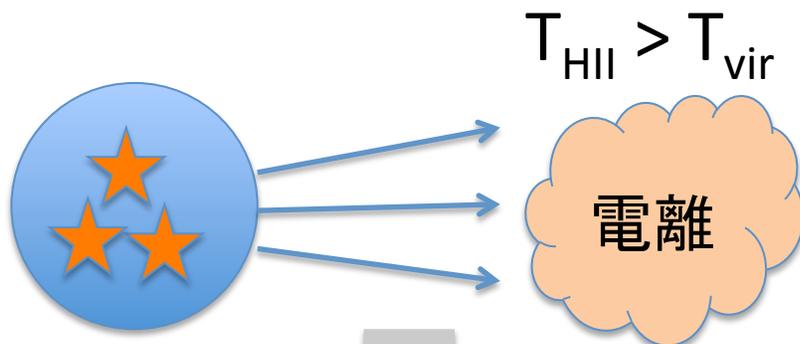
Shibuya et al. (2017)

(see also Bowler et al.)

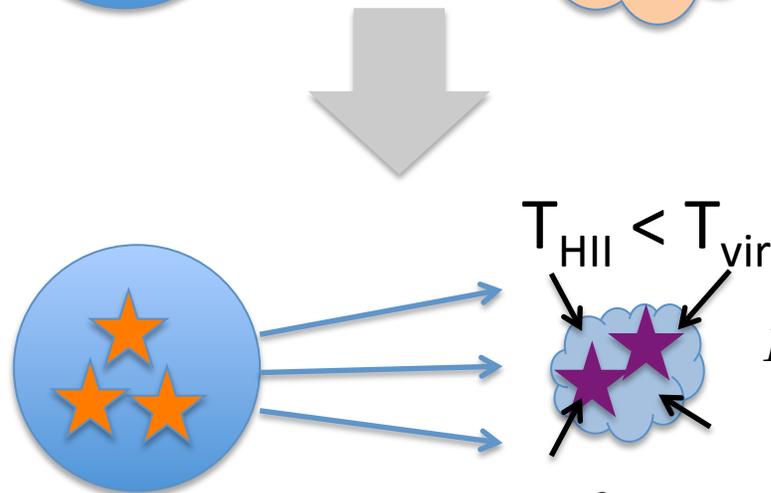
初代星銀河は存在しないのか？

初代星銀河は形成可能か？

e.g., Visbal et al. (2016, 2017), Yajima&Khochfar (2017)



光電離によりミニハロー時代の星形成を停める。
その後、初代銀河クラスになった後コラプスさせてスターバーストを起こせばよい



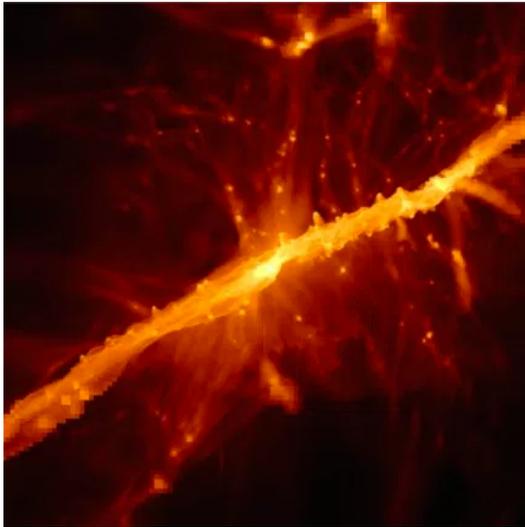
コラプス、
POPIII星形成

$$D_{\text{crit}} < 73 \text{ kpc} \left(\frac{f_{\text{esc}}}{0.1} \right) \left(\frac{\text{SFR}}{10 \text{ M}_{\odot} \text{ yr}^{-1}} \right) \times \left(\frac{M_{\text{h}}}{10^9 \text{ M}_{\odot}} \right)^{-\frac{1}{3}} \left(\frac{1+z}{8} \right)^{-5}$$

(鄭さんトーク)

初代星銀河の形成環境

Smidt et al. (2016)



POPIII gal.?
(Dual emitter)



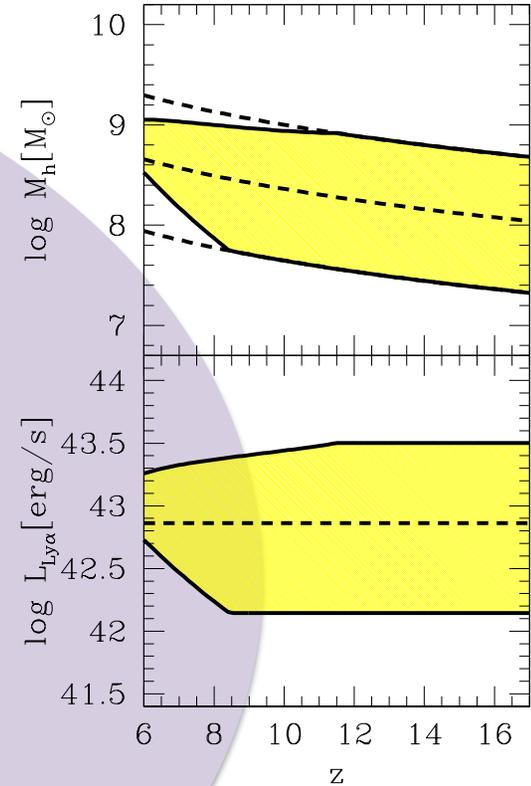
Bright LBG/LAE/QSO

HII

HI

21 cm signal

Yajima&Khochfar (2017)



Bright LBGs付近の”**そこそこ**”
明るいhigh-EW LAEsを探す
ただし、HeIIは暗い、、

銀河形成の重要なバリオン物理

銀河

フィードバック

- * 超新星爆発
 - * AGN
 - * ダストへの輻射圧
 - * 光電離加熱
- (* ライマンアルファ輻射圧)

フィードバック

(藤田さんトーク)

熱圧

超新星爆発
星によるUV電離加熱
AGNによるX線電離加熱

運動量輸送

超新星爆発
ダストへの輻射圧
ライマンアルファ輻射圧
BH disk wind
AGN jet

Supernova feedback

熱エネルギーを注入

(coolingを一定時間止める)

Stinson et al. (2006)

(余計な事はしない)

EAGLE project (Schaye+)

Dalla Vecchia et al. (2012)

Yajima et al. (2017)

運動量を注入

(現象論的)

Springel et al. (2005)

illustris project

(Vogelsberger+)

(点源爆発の結果を導入)

FIRE project (Hopkins+)

Kimm et al. (2014)

熱圧駆動 vs. 輻射冷却

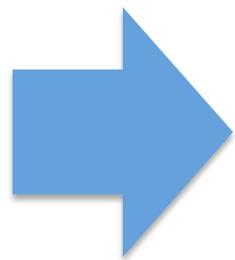
熱エネルギー注入モデル(e.g., Dalla Vecchia & Schaye 2012)

1 : Sound crossing time

$$t_s = \frac{h}{c_s} = \left(\frac{\mu m_H}{\gamma k_B} \right)^{1/2} \frac{h}{T^{1/2}}$$
$$= 1.15 \times 10^5 \text{ yr} \left(\frac{\mu}{0.6} \right)^{1/2} \left(\frac{T}{10^{7.5} \text{ K}} \right)^{-1/2} \left(\frac{h}{100 \text{ pc}} \right)$$

2 : Cooling time (free-free)

$$t_c \simeq 3.26 \times 10^7 \text{ yr} \left(\frac{n_H}{1 \text{ cm}^{-3}} \right)^{-1} \left(\frac{T}{10^{7.5} \text{ K}} \right)^{1/2}$$
$$\times \left(\frac{\mu}{0.6} \right)^{1/2} \left(\frac{f(X_H)}{0.13} \right),$$

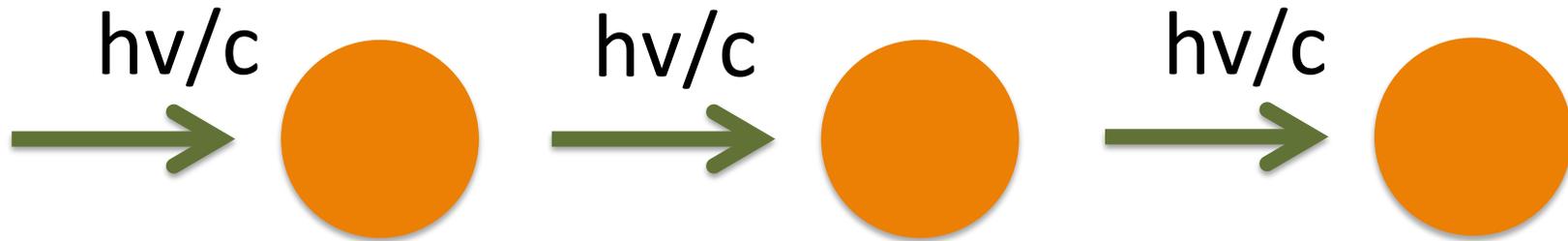


臨界密度

$$n_H \sim 100 \text{ cm}^{-3} \left(\frac{T}{10^{7.5} \text{ K}} \right) \left(\frac{m_g}{10^4 M_\odot} \right)^{-1/2}$$

輻射圧 (ダスト、ライマンアルファ)

(一色さんトーク)



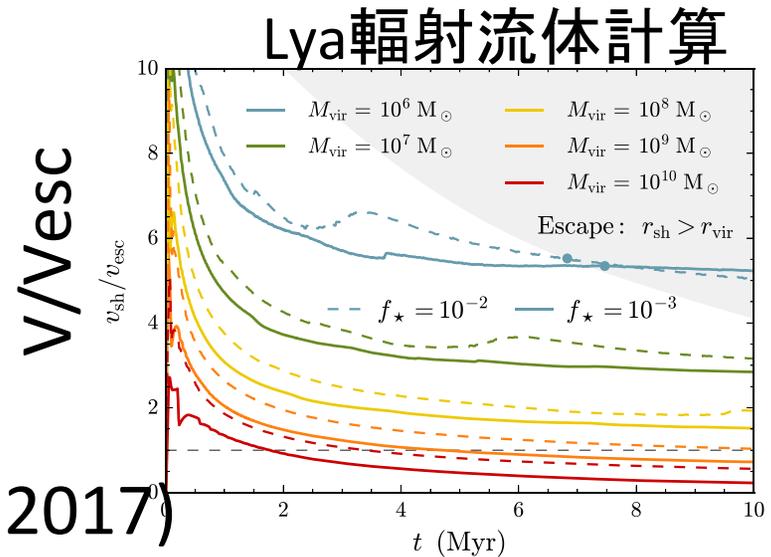
多重散乱、再吸収により光子の運動量を効率良くガスに輸送する (柱密度が大きい方が良い)

$$F_{\text{rad}} = \eta \frac{L}{c}$$

輻射力

?

Smith et al. (2017)



フィードバック



星形成領域、星間ガスの密度 (or 柱密度) を知ることが重要
(高分解能シミュレーション or 高分解能面分光)

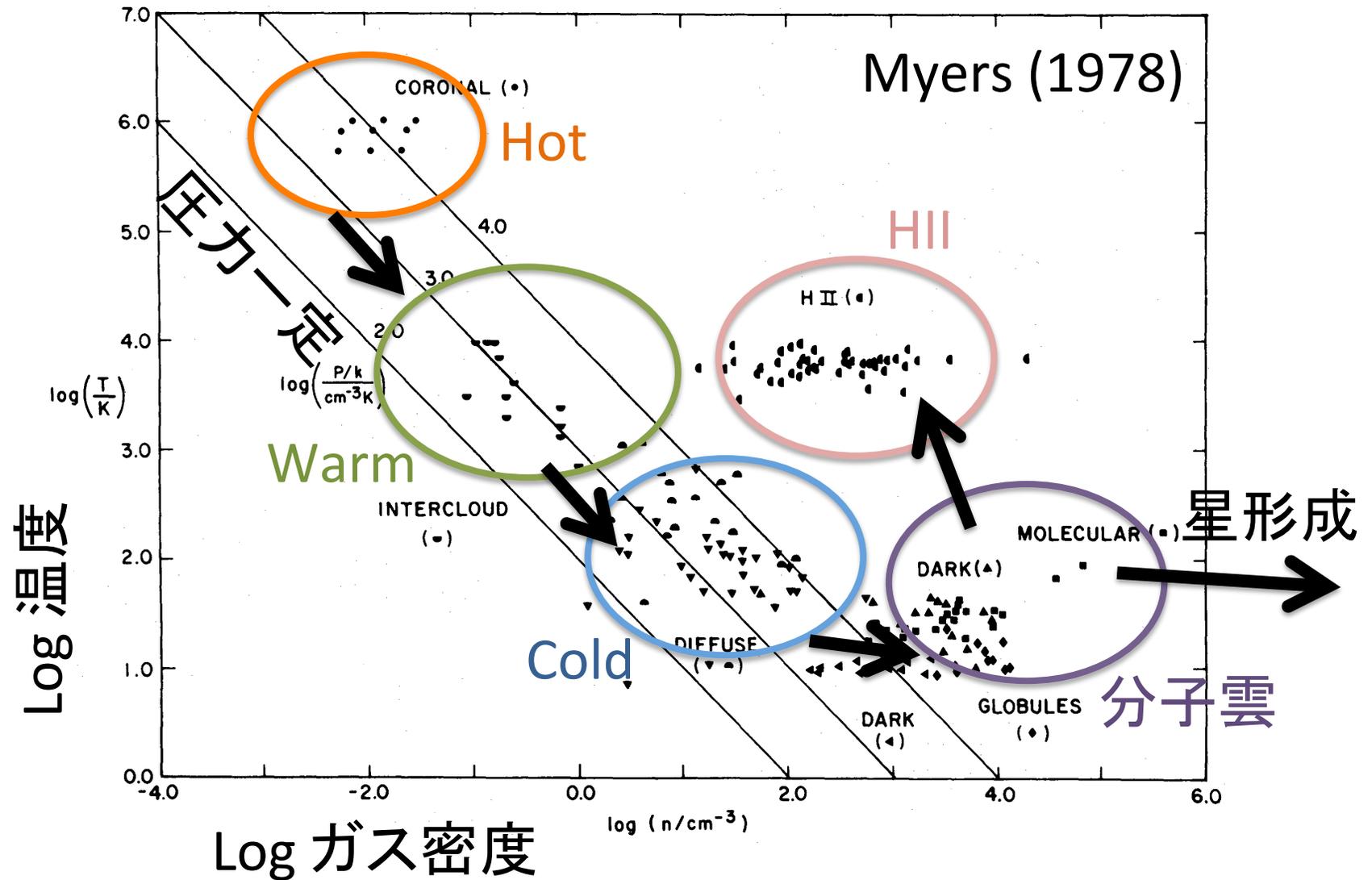
銀河形成の重要なバリオン物理

銀河

- * 電離度
- * 多相構造
- * 乱流場
- * 冷たいガス流入

星間ガス

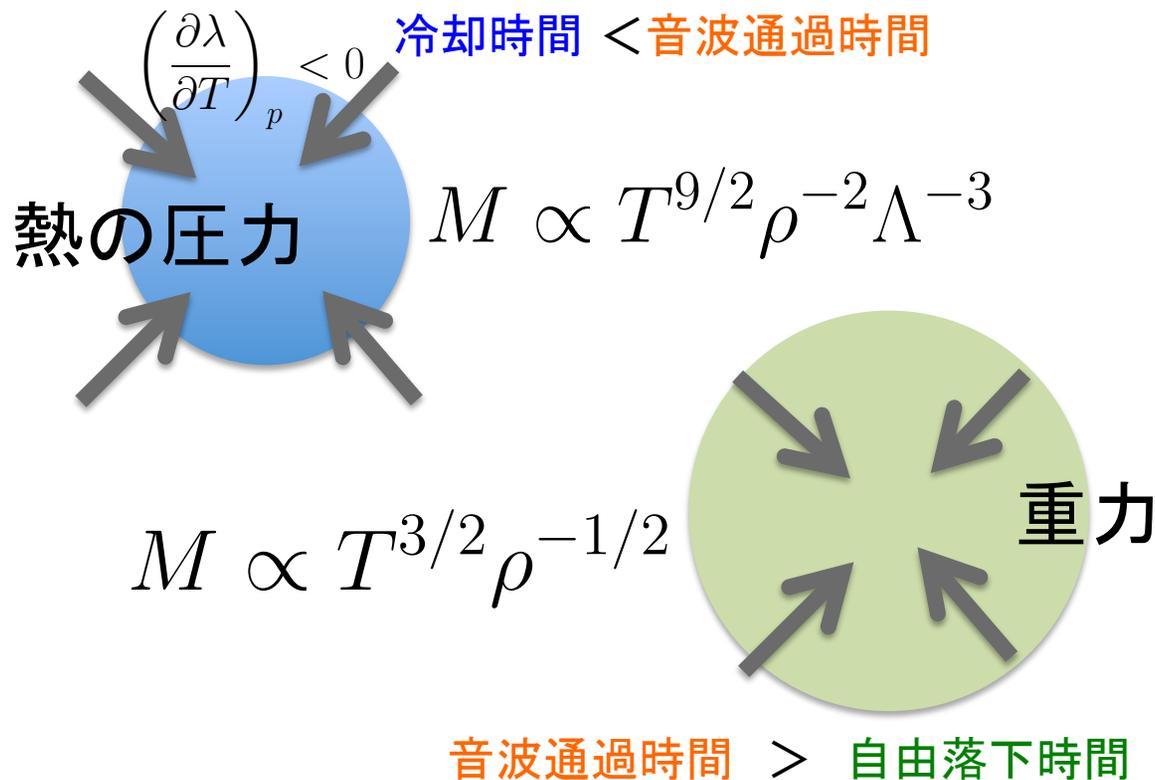
星間ガス多相構造



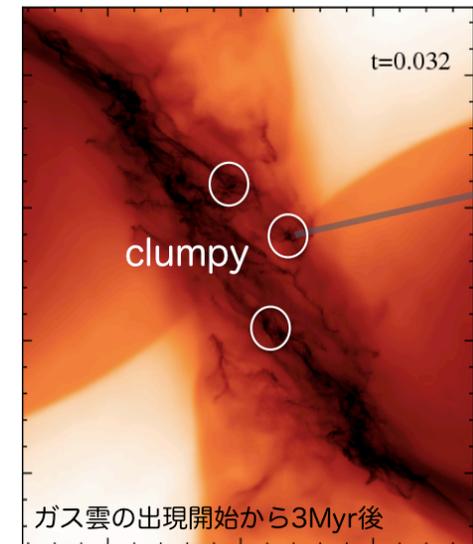
熱的・重力不安定性

銀河のダイナミクスと共にこれら不安定がどのように起きるか？

冷却時間 v.s. 音波通過時間 v.s. 自由落下時間



銀河+多相構造計算



荒田さんトーク!

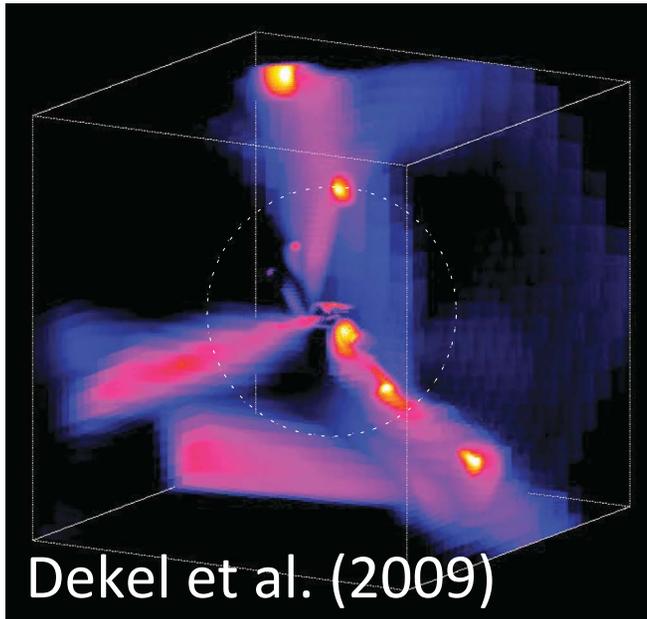
冷たい($\sim 10^4$ K)ガス降着

(中村さんトーク)

冷たいガス降着の条件
(Birnboim&Dekel 2003)

$$\frac{\rho_0 r_s \Lambda(T_1)}{|u_0|^3} < 0.0126.$$

ハロー質量、赤方偏移
に依存する

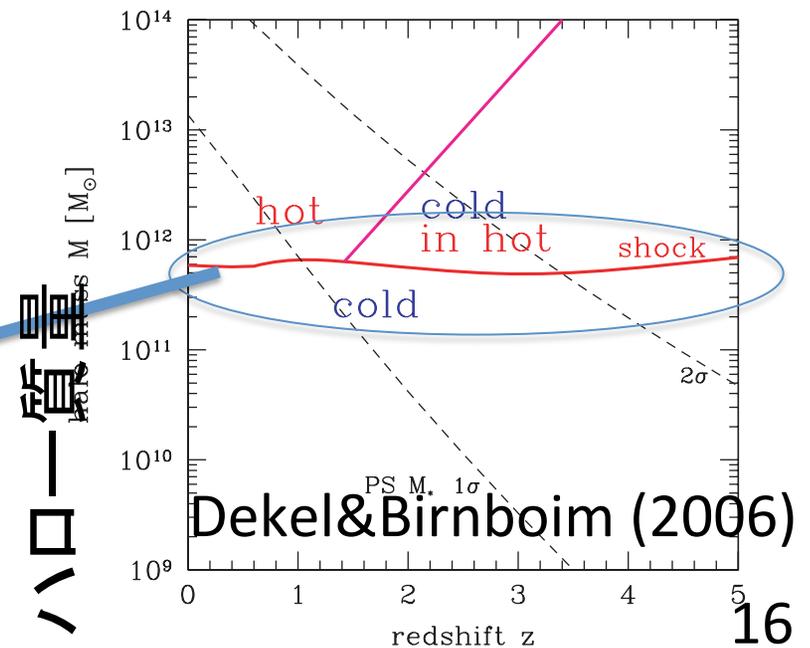


Dekel et al. (2009)

ビリアルショック後面の輻射冷却が
効くか効かないか

LAEsやLBGsのハロー質量
(ビリアル温度が $\sim 10^6$ K)

LAEsやLBGsはちょうどモード
遷移のあたり?



冷たいガス降着は重要？

Maybe yes, because..

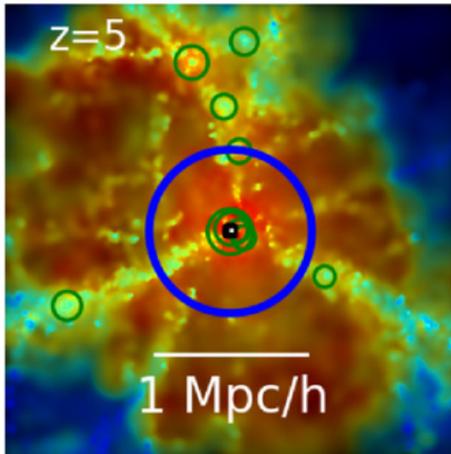
*スターバースト

*クランピーディスク銀河

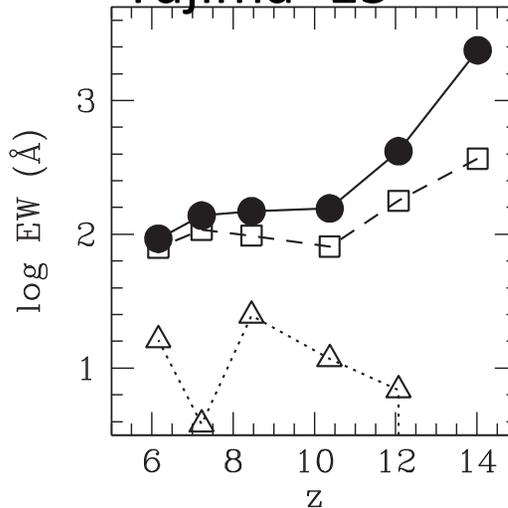
*高輝線幅LAE

*クエーサー形成

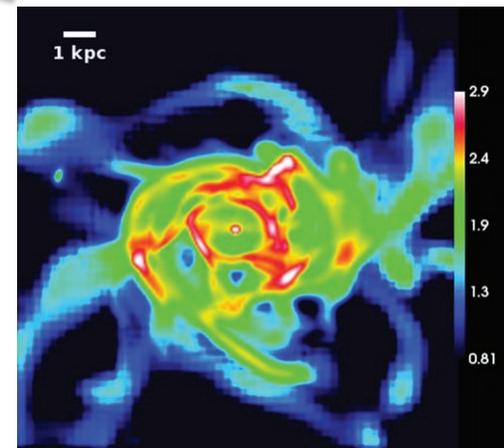
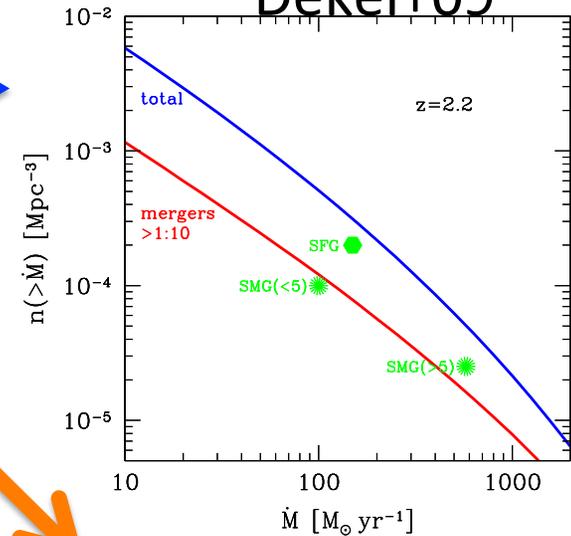
Di Matteo+12



Yajima+15



Dekel+09



Ceverino+10

観測的な証明は？ 冷却光(Lya)、吸収線系(HI)?

まとめと今後

- 星形成

高赤方偏移銀河内の星形成は近傍銀河とは大きく異なる可能性がある
高分解能シミュレーションor観測で分子雲の物理状態、
星形成効率を理解する事が重要

- フィードバック

フィードバックは星形成領域のガスの状態(密度、温度、金属量)に依存
これらを理解し、どのようなフィードバックがいつごろ支配的か、そして星形
成史、銀河風への影響を解明する

- 星間ガス

高赤方偏移銀河内の星間ガス多相構造はまだ不明な点が多い。すばる、
ALMA、高精度シミュレーションを駆使して解明する事が望まれる
冷たいガス降着流は銀河進化に大きな影響を与える可能性がある。
しかし、定量的な調査はこれから

End