

準解析的銀河形成モデルから BHへの質量降着機構に 与えられる制限

白方 光 (北海道大学 M2)

- 共同研究者 -

川勝 望 (呉高専), 和田 桂一 (鹿児島大), 榎 基宏 (東京経済大),
岡本 崇 (北海道大), 長島 雅裕 (文教大), 他 ν^2 GC グループメンバー

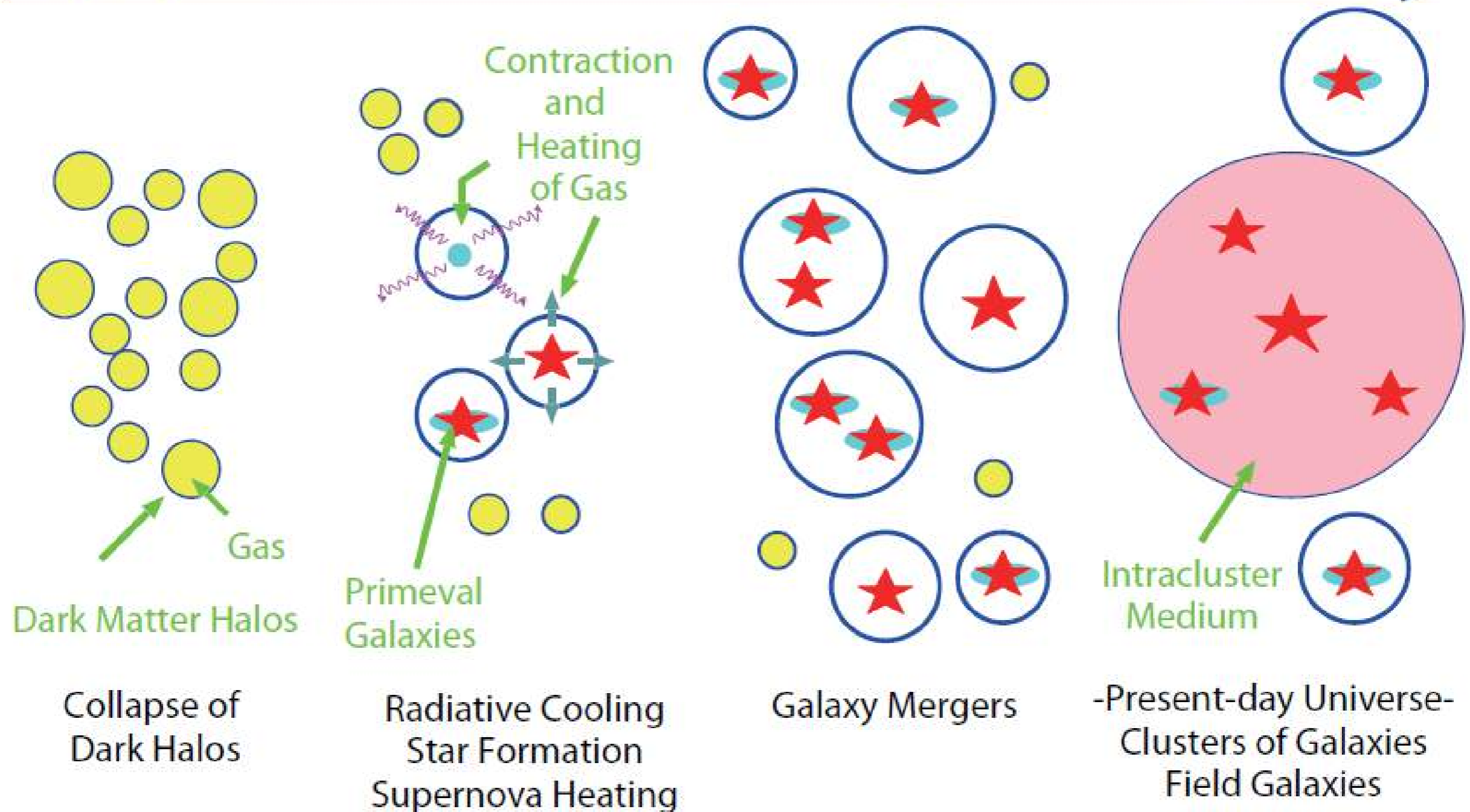
Semi Analytic (SA) galaxy formation model

- dark haloの形成・進化… N 体シミュレーションで与える
- 銀河形成・星形成・SMBH成長はモデル化
(解析解, シミュレーションや観測結果の応用)
- cosmological simulationより大きな計算体積,
少ない計算時間
- 個数密度の小さな天体の統計的研究には特に有用

Galaxy Formation in the Hierarchical Clustering Scenario

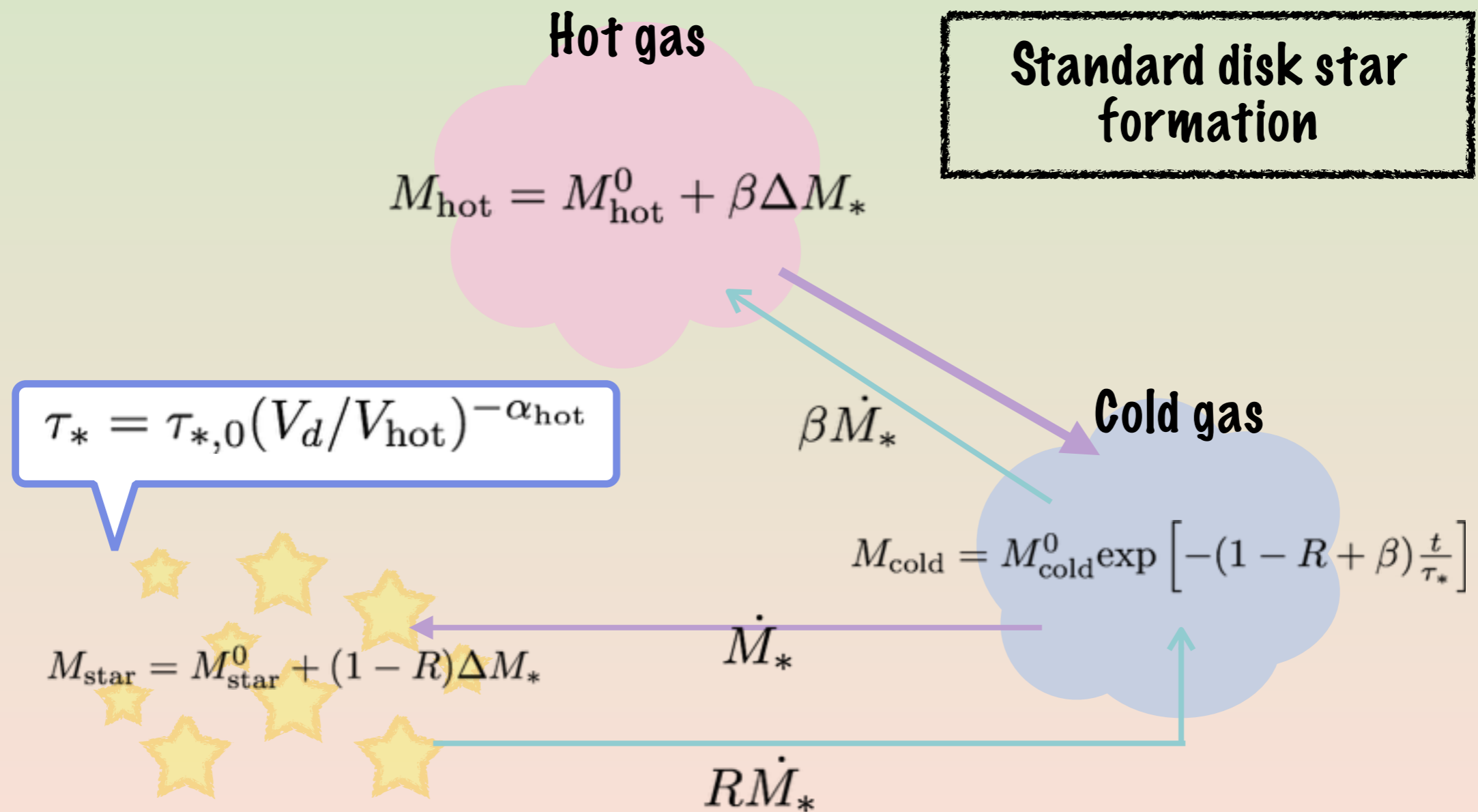
early Universe

present day

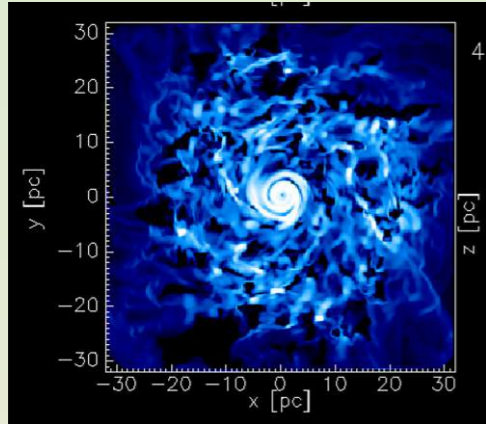


※ 長島 雅裕さん (文教大) のスライドより拝借

Semi Analytic (SA) galaxy formation model



Revealing AGN mechanism



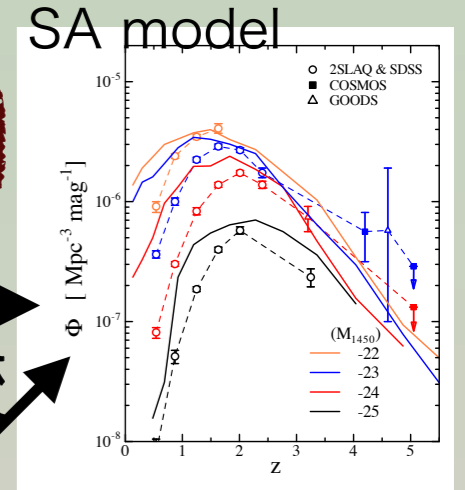
Wada+ 09, ApJ, 702, 63

Simulation + ALMA

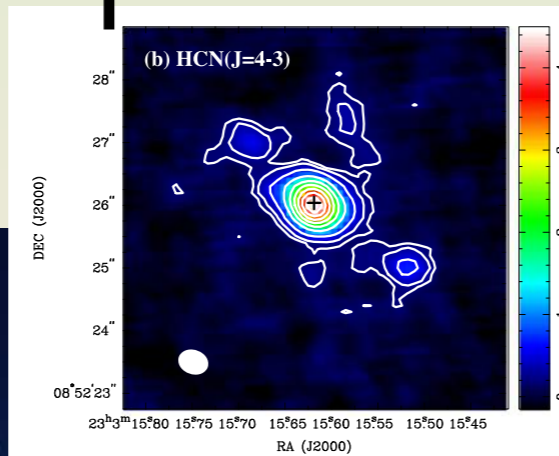
SA model + Subaru

制限

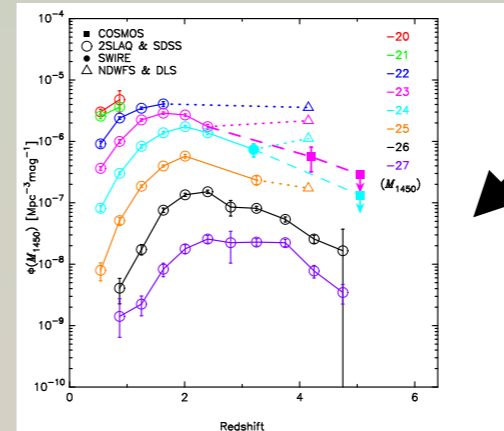
比較



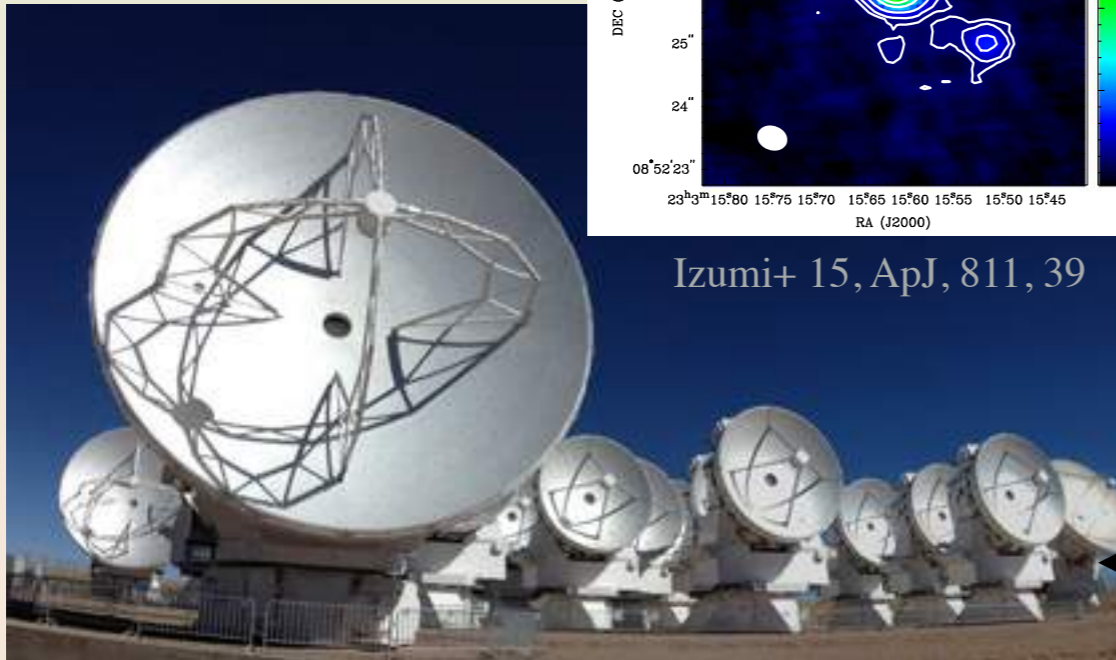
Enoki+ 14, ApJ, 794, 69



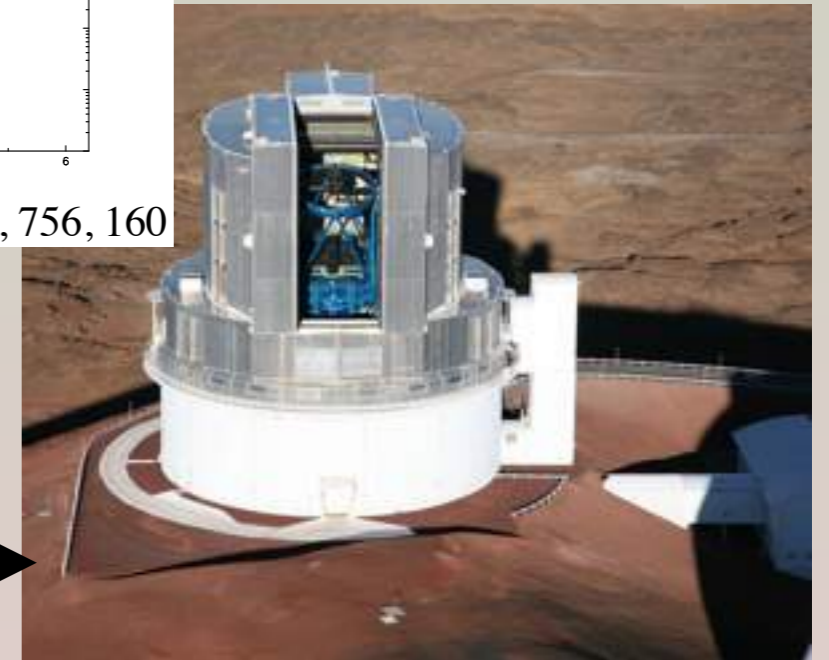
Izumi+ 15, ApJ, 811, 39



Ikeda+ 12, ApJ, 756, 160



相補的



AGN & SMBH model in SA models

- ・ SMBHへのガス降着トリガー
 - 銀河合体
 - 銀河disk 不安定・bar (optional)
 - haloのhot gasの直接降着 (optional)
- ・ $\sim\text{kpc} \rightarrow \sim 100\text{-}10\text{ pc}$ スケールへのガス降着
 - 特に何も考えない
(バルジのガスの一部が即時的にSMBHに降着する)
 - 簡単にモデル化されたgas reservoirを經由

AGN & SMBH model in SA models

- ~kpc \rightarrow ~100-10 pc スケールへのガス降着
 - 特に何も考えない
 - 簡単にモデル化されたgas reservoirを經由

例えば…

母銀河 \rightarrow gas reservoirへのinflow rate: \dot{M}_{RS}^+

$$\dot{M}_{\text{RS}}^+ = f_{\text{BH}} \phi_{\text{B}} \left(\frac{\phi_{\text{B}}}{100 M_{\odot} \text{yr}^{-1}} \right)^{\alpha-1}, \quad (1) \quad \phi_{\text{B}}: \text{bulge SFR}$$

gas reservoir \rightarrow SMBHへのaccretion rate: \dot{M}_{RS}^-

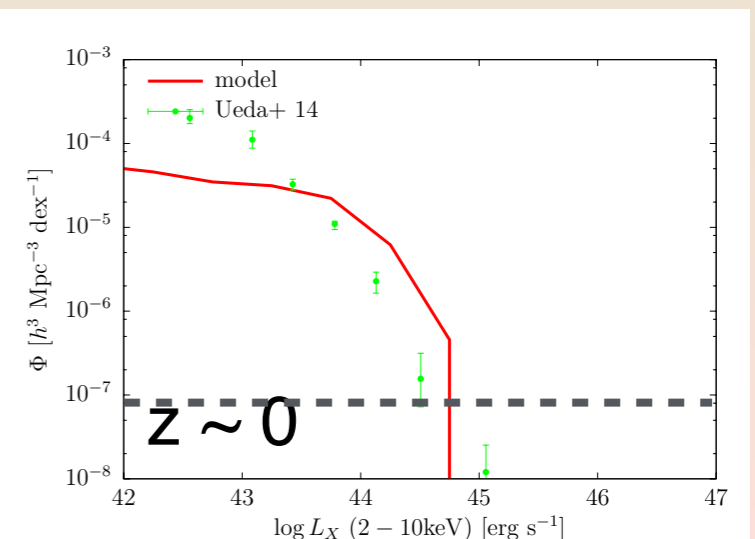
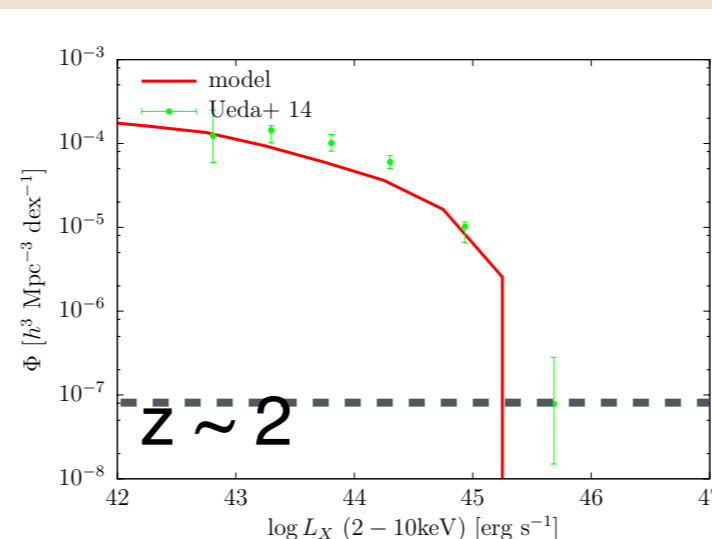
$$\dot{M}_{\text{RS}}^- = \dot{M}_{\text{BH}} = 0.001 \frac{\sigma_{\text{B}}^3}{G} \left(\frac{M_{\text{RS}}}{M_{\text{BH}}} \right)^{3/2} \left(1 + \frac{M_{\text{BH}}}{M_{\text{RS}}} \right)^{1/2} \quad (2) \quad \sigma_{\text{B}}: \text{bulge velocity dispersion}$$

(Fontanot et al., 2015, MNRAS, 453, 4112)

AGN & SMBH model in SA models

- なぜ gas reservoir を考える必要があるか?
 - BHに降着するまでに, ガスは持っていた角運動量の99.9999%を捨てないといけない
 - 近傍で明るいAGNがモデルの中で出来すぎ, SMBH成長史を正しくモデル化できない

- AGN放射を吸収されている. しか

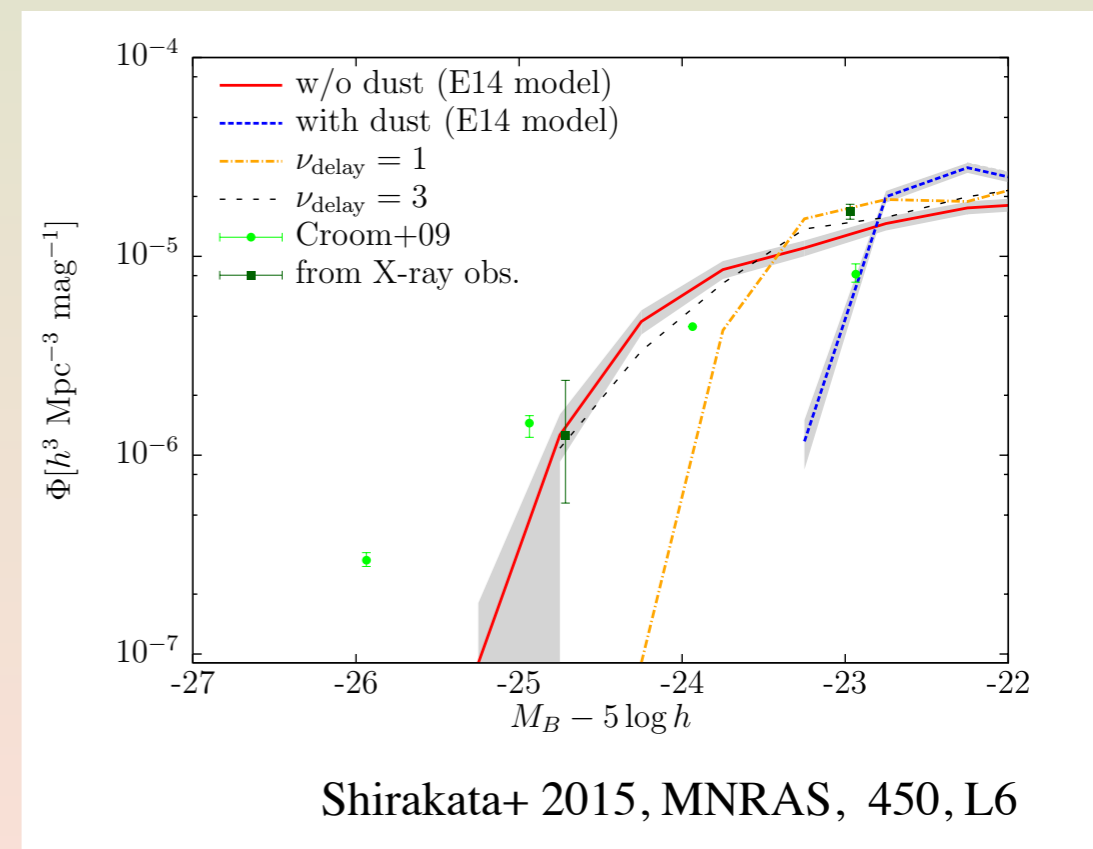


AGN & SMBH model in SA models

これまでの ν GC

母銀河に存在するダストによる減光だけで、
AGNLFのbright end は ~ 2 等暗くなる

→ 銀河合体からSMBHに
ガス降着が始まるまでに
数dynamical time以上の
遅れがあれば CND導入によって実現!?
観測と矛盾しなくなる



This work

- ・ 最小限のフリーパラメータで, SMBH周辺の構造 (= gas reservoir) をモデル化したい
- ・ gas reservoirのシミュレーションモデルはたくさんあるが, 銀河形成の枠組みの中でモデルの現実性を議論するのは難しい
- ・ SAを使って, gas reservoirが銀河形成の枠組みの中で果たす役割を調べる

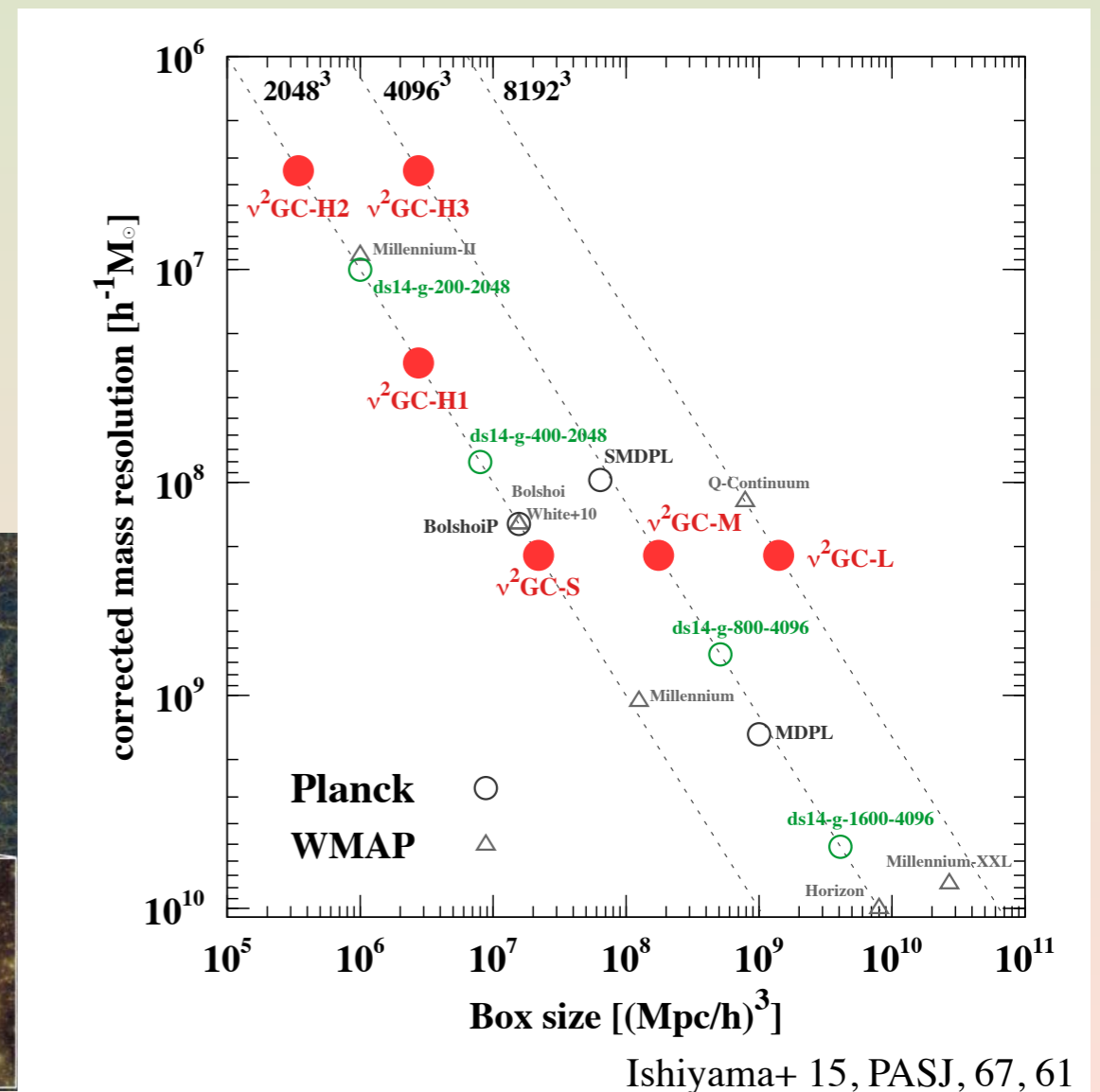
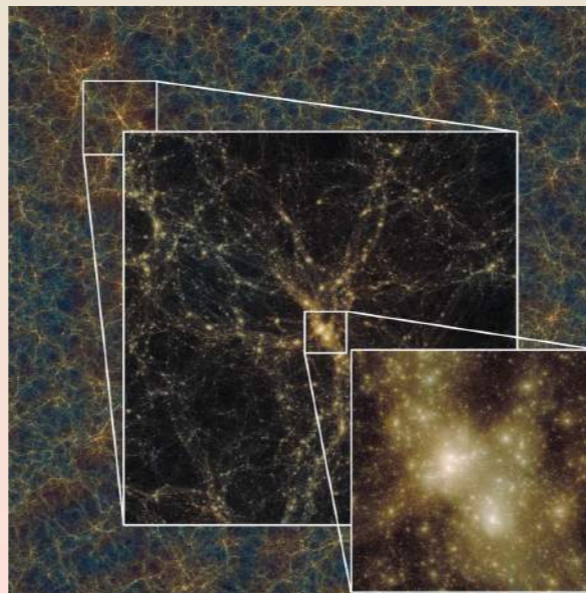
今回はKawakatu & Wada (2008), ApJ, 681, 73 をベースに用いた.

v^2 GC: an SA model

- 元々のモデル: Nagashima+ 05, ApJ, 634, 26 &
Enoki+ 03, PASJ, 55, 133
“Numerical Galaxy Catalogue (v GC)”
- アップデート: Makiya+ Submitted to PASJ
“**New** Numerical Galaxy Catalogue (v^2 GC)”
銀河モデルのアップデート
- SMBH・AGN モデルアップデート: HS+ in prep.

v^2 GC N -body

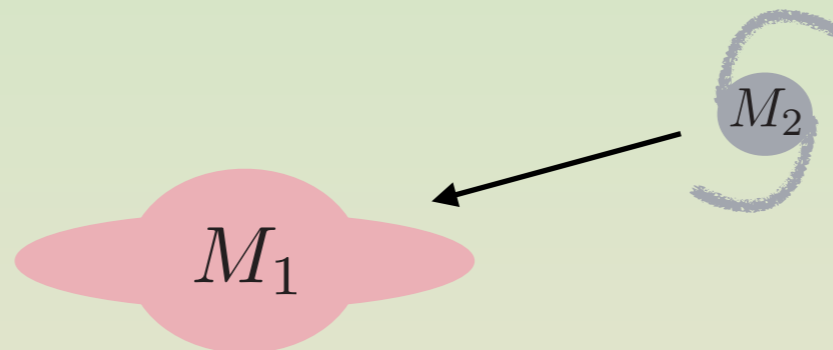
- N 体シミュレーション: Ishiyama+ 15, PASJ, 67, 61



v^2GC AGN model

- gas reservoirスケールへのガス降着トリガーは銀河合体のみを考える.
- Hopkins+ 2009, MNRAS, 691, 1168 をベースにして, 銀河合体でbulgeに分配される星・ガス量を計算

v^2 GC AGN model



$$M_{0,\text{bulge}} = M_{1,\text{bulge}} + f_{\text{VR}} M_{1,\text{disk}} + M_2$$

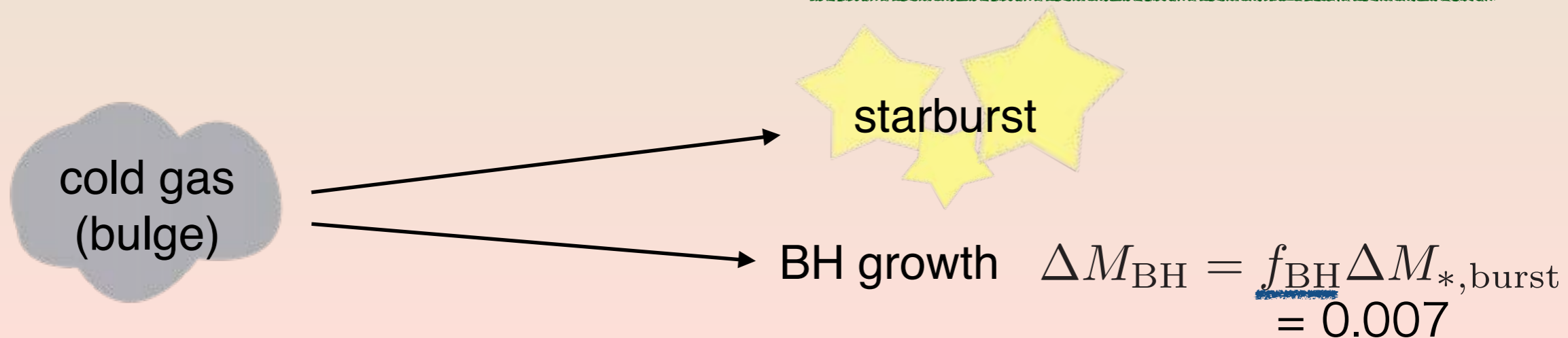
$$M_{0,\text{disk}} = (1.0 - f_{\text{VR}}) M_{1,\text{disk}}$$

$$f_{\text{VR}} = \frac{\text{MIN}(M_{1,\text{disk}}, M_2)}{M_{1,\text{disk}}}$$

$M_2/M_1 > 0.1$ の場合に有効.

大きい方の銀河円盤のうち

~ M_2 の質量がviolent relaxationを受けてbulgeへ.



v^2 GIC AGN model

- gas reservoir = CircumNuclear Disk (CND) モデル

銀河から降着したガスが ~ 100 pc スケールに溜まる (CND形成)

↓

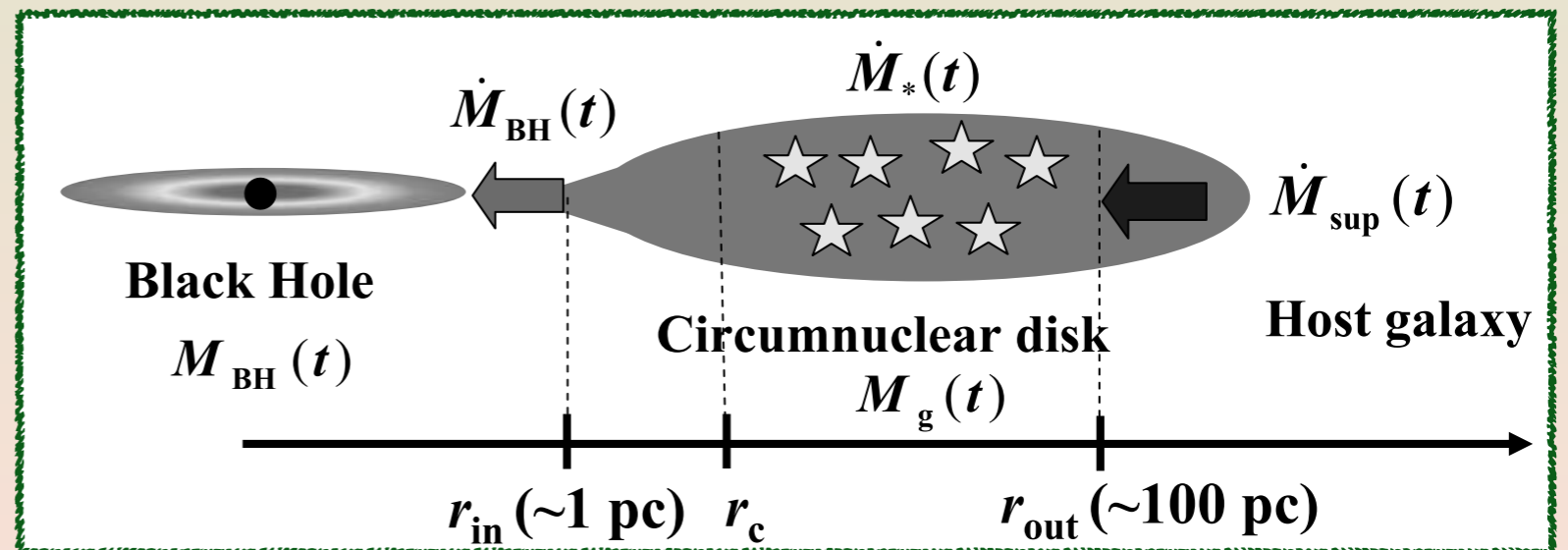
CND内で星形成

↓

超新星爆発が作る
乱流でガスの
角運動量を抜く

↓

SMBHへ降着



Kawakatu & Wada (2008) Fig. 1

v^2 GIC AGN model

1. 銀河からCNDへのガス供給

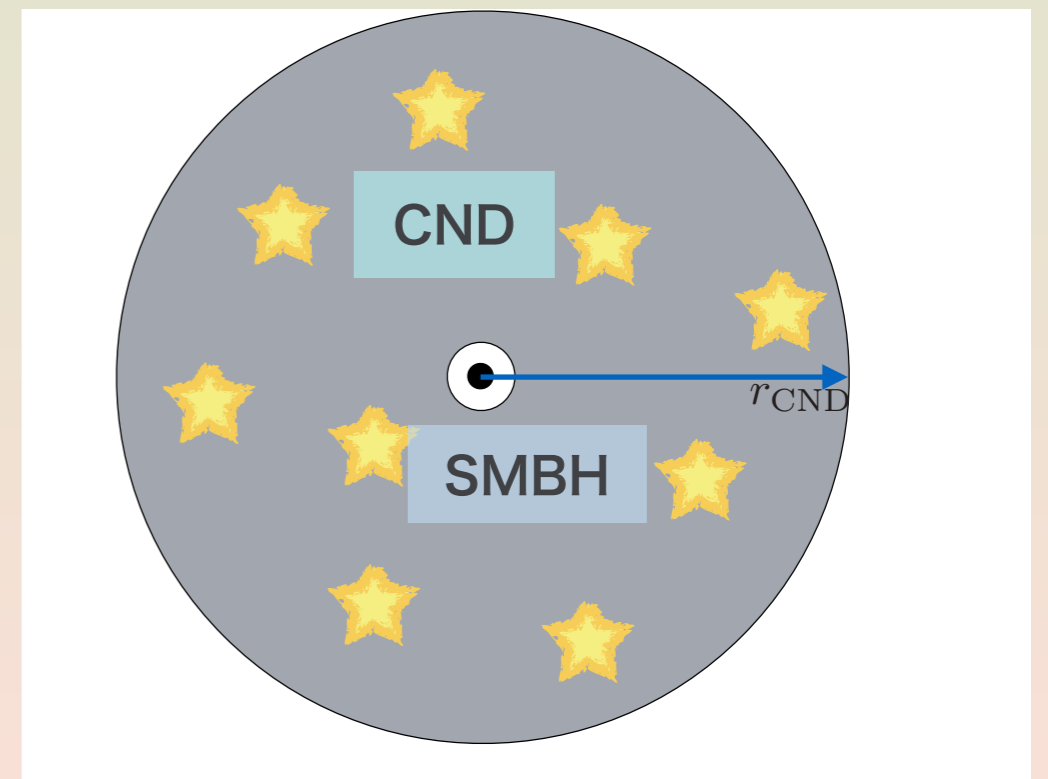
from host galaxy

2. CNDが不安定状態ならSMBHへ
ガス降着を起こす

$$M_{\text{sup}} = f_{\text{BH}} \Delta M_{*, \text{burst}}$$

mode(i) CND全体が不安定
(降着率が高い)

mode(ii) 一部不安定 (外側)
(降着率が低め)



v^2GC AGN model

$$\Sigma_{\text{CND,gas}} = M_{\text{CND,gas}} / \pi r_{\text{CND}}^2$$

from host galaxy

$$\Sigma_{\text{crit}}(r) = \frac{c_s}{\pi} G^{-1/2} r^{-3/2} (M_{\text{BH}} + 3M_{\text{CND,gas}})$$

$$M_{\text{sup}} = f_{\text{BH}} \Delta M_{*,\text{burst}}$$

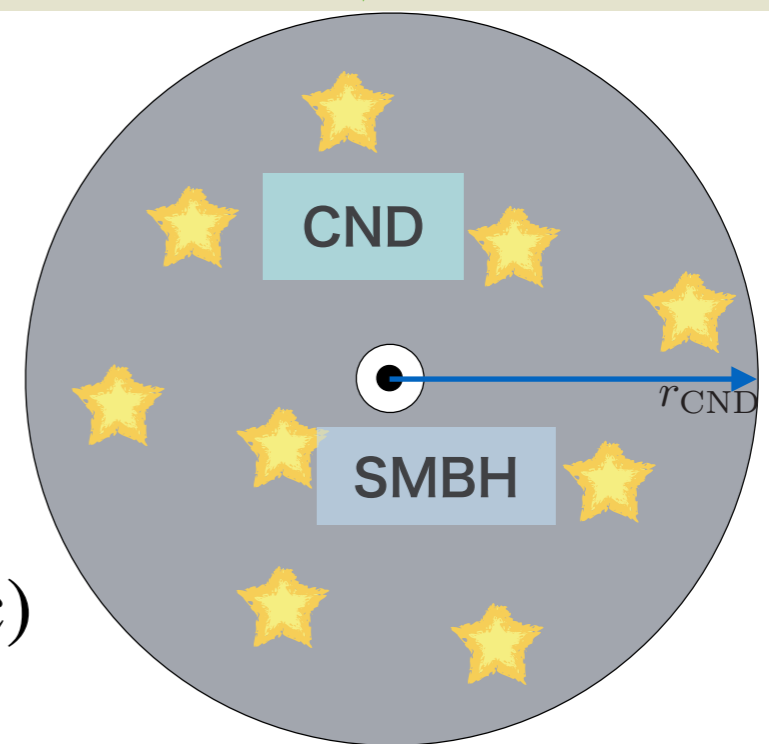
$\Sigma_{\text{crit}}(r_{\text{CND}}) < \Sigma_{\text{CND,gas}}$ のときCND不安定.

$$\Sigma_{\text{crit}}(r_{\text{in}}) < \Sigma_{\text{CND,gas}} \quad \text{mode (i)}$$

$$\Sigma_{\text{crit}}(r_{\text{in}}) \geq \Sigma_{\text{CND,gas}} \quad \text{mode (ii)}$$

$$r_{\text{CND}} = \alpha r_{\text{bulge}} \quad r_{\text{in}}: \text{resolution limit (0.1pc)}$$

$$\alpha = 0.01$$



v^2GC AGN model

- mode(i)

$$\dot{M}_{\text{BH}} = 3\pi\alpha_{\text{SN}}\eta E_{\text{SN}} C_* \Sigma_{\text{gas,CND}}(r_{\text{CND}}) \frac{r_{\text{CND}}^3}{GM_{\text{BH}}}$$

$$C_* = \Sigma_{\text{SFR}} / \Sigma_{\text{gas,CND}}$$

$$\log \Sigma_{\text{SFR}} / [M_{\odot} \text{yr}^{-1} \text{kpc}^{-2}] = 1.42 \times \log \Sigma_{\text{CND,gas}} / [M_{\odot} \text{pc}^{-2}] - 3.83 + 0.9$$

(Daddi+ 10, ApJL, 714, L118)

ULIRG等のKS relationがCNDに適用できると仮定

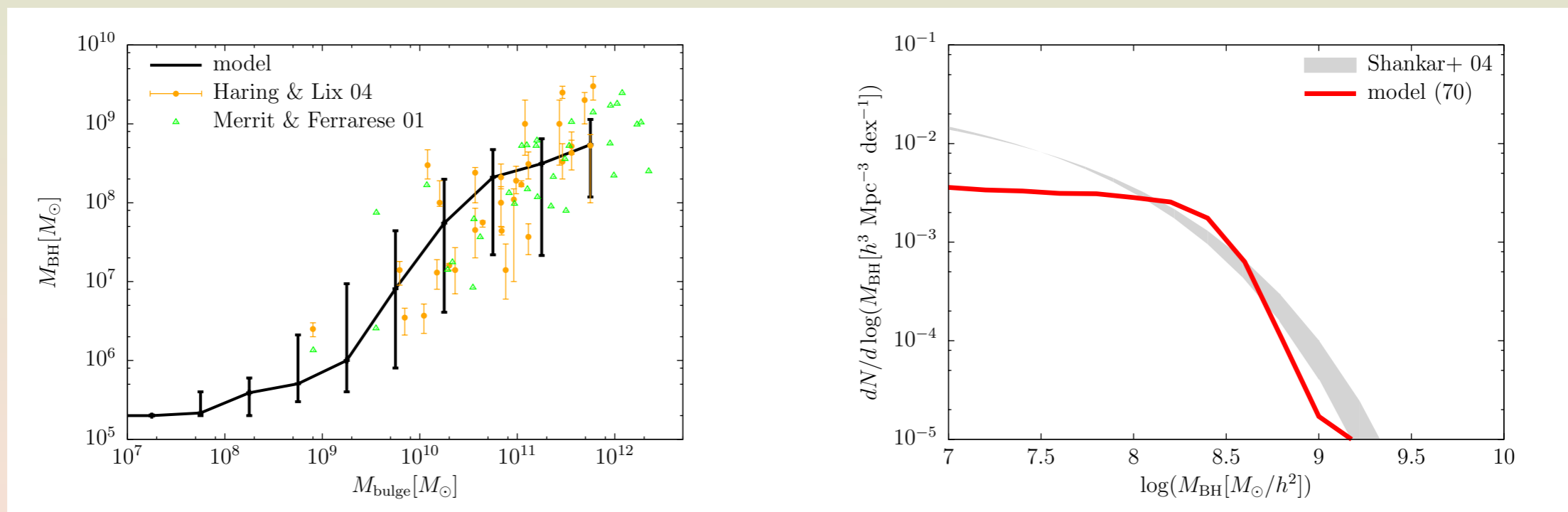
- mode (ii)

$$\dot{M}_{\text{BH}} = 21 \left(\frac{r_{\text{CND}}}{h(r_{\text{CND}})} \right) \left(\frac{M_{\text{CND,gas}}}{M_{\text{BH}}} \right)$$

h: scale height

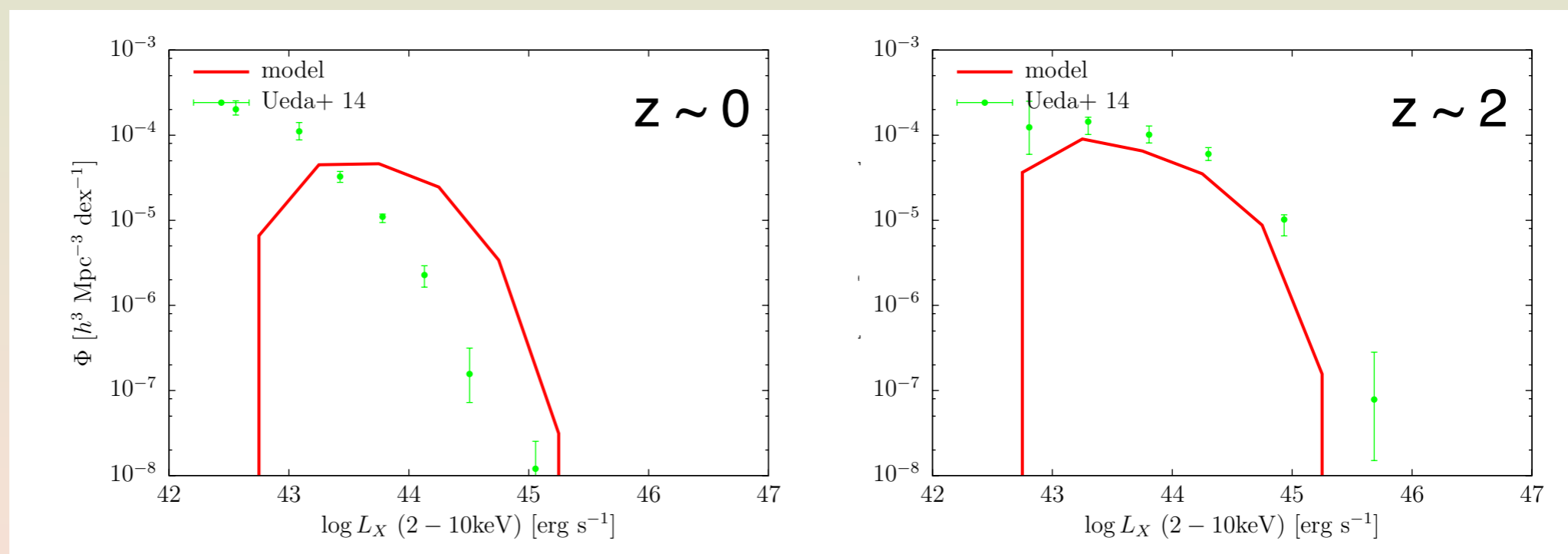
Results

- $M_{\text{BH}} - M_{\text{bulge}}$ relation と $z \sim 0$ の SMBH mass function



Results

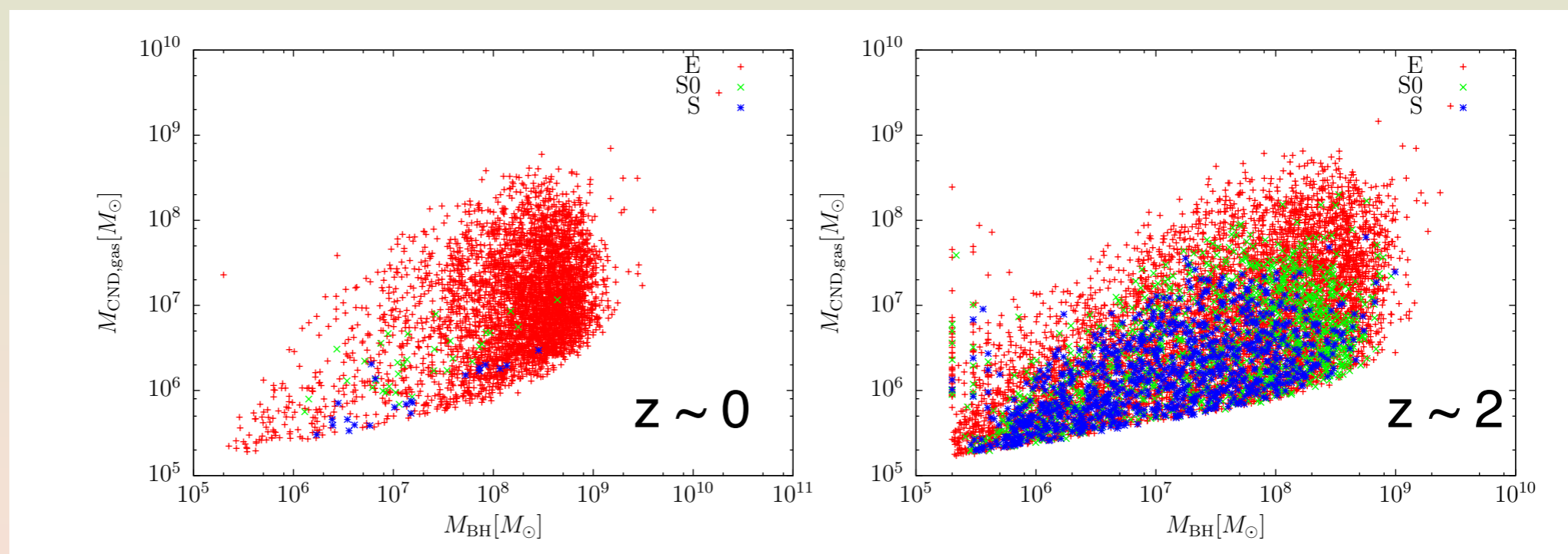
- AGN luminosity functions



Results

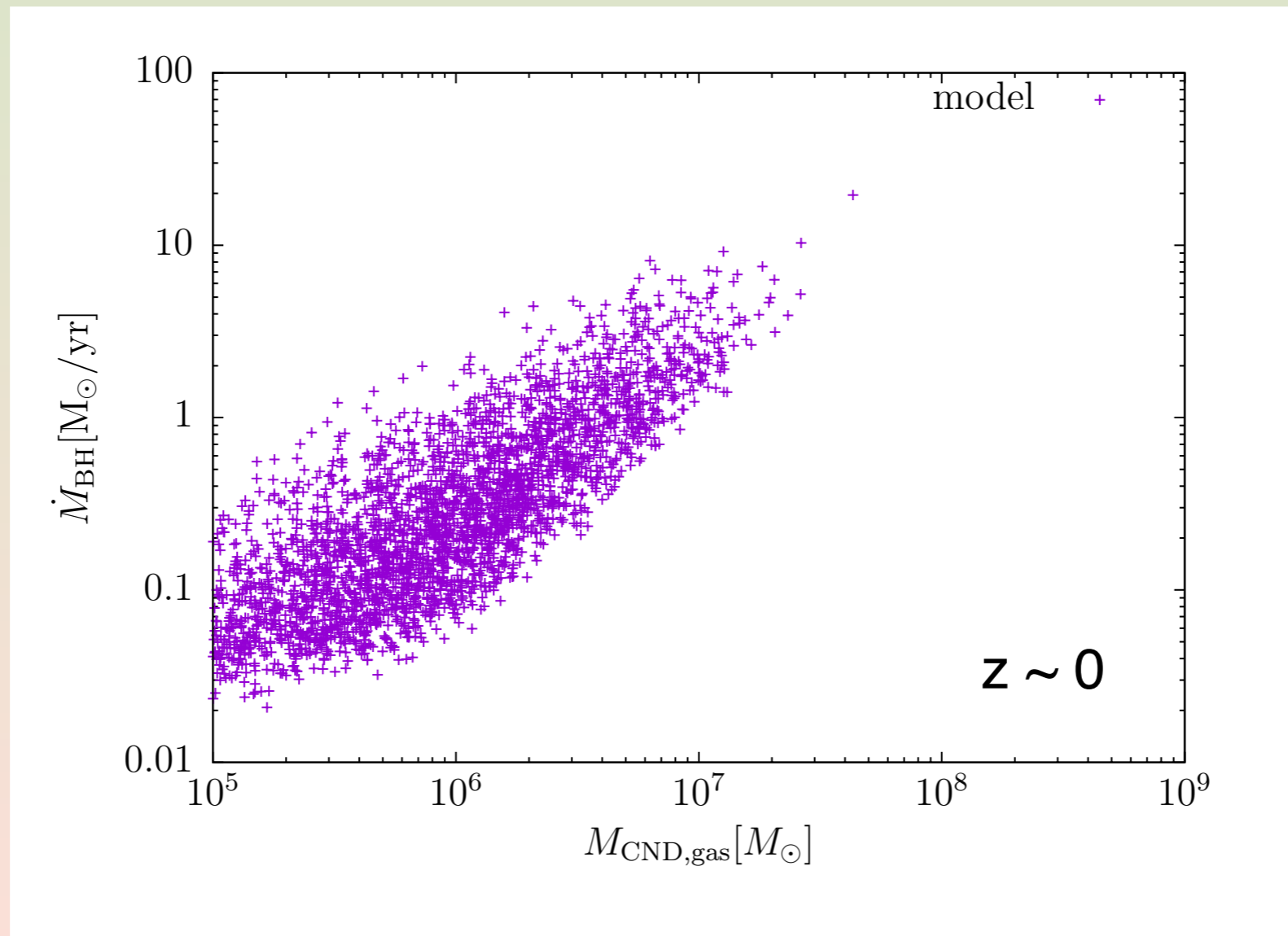
- $M_{\text{BH}} - M_{\text{CND,gas}}$ relation

mode(i)は全く起こらず, 全てmode (ii)で成長.



Results

- $M_{\text{CND,gas}}$ - mass accretion rate relation



Problems & Discussion

- ・ モデルの問題

1. CNDで星形成が起きない

- > 星形成を起こす条件がCND内縁半径に依存

- > BHがactiveでない時の”内縁半径”とは何?

2. AGN光度関数の観測との不一致

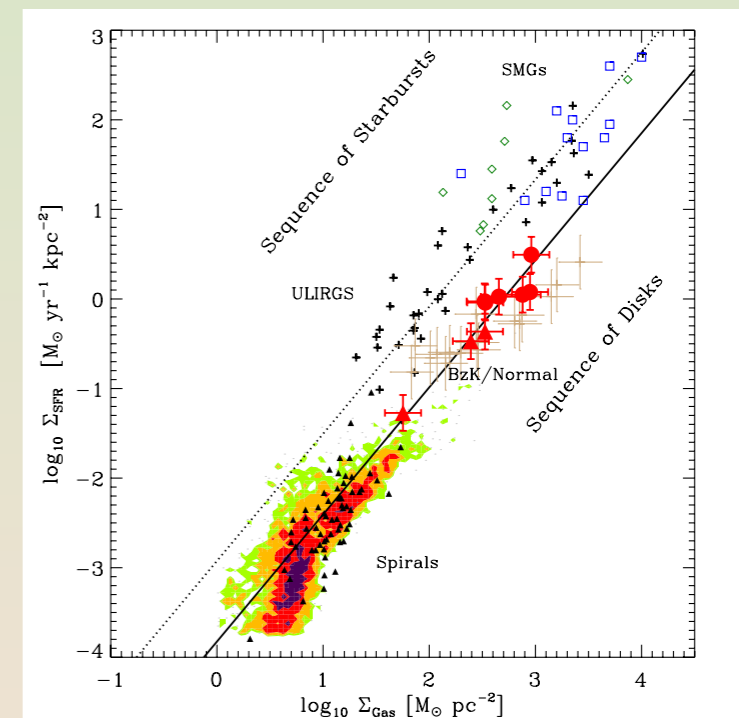
Problems & Discussion

- ・ 準解析的銀河形成モデルのために欲しい情報

1. CND版 KS relation

2. CND スケール

3. 母銀河からCNDへの
ガス供給タイムスケール



(Daddi+ 10, ApJL, 714, L118)

Summary

- ・ SAモデル, ν^2 GCにKawakatu & Wada 08のCNDモデルを導入している
- ・ 局所的シミュレーションや観測から示唆される物理メカニズムが銀河形成の枠組みの中でどう機能するかを調べる必要がある
- ・ (今回の結果には多くの問題があるが) 今後シミュレーション・SAモデルの連携はより重要になるだろう