

巨大ブラックホール・銀河共進化 の理論的研究の最前線

川勝 望（国立天文台）

共同研究者

和田 桂一（国立天文台）、永井 洋（国立天文台）、紀 基樹（宇宙研）

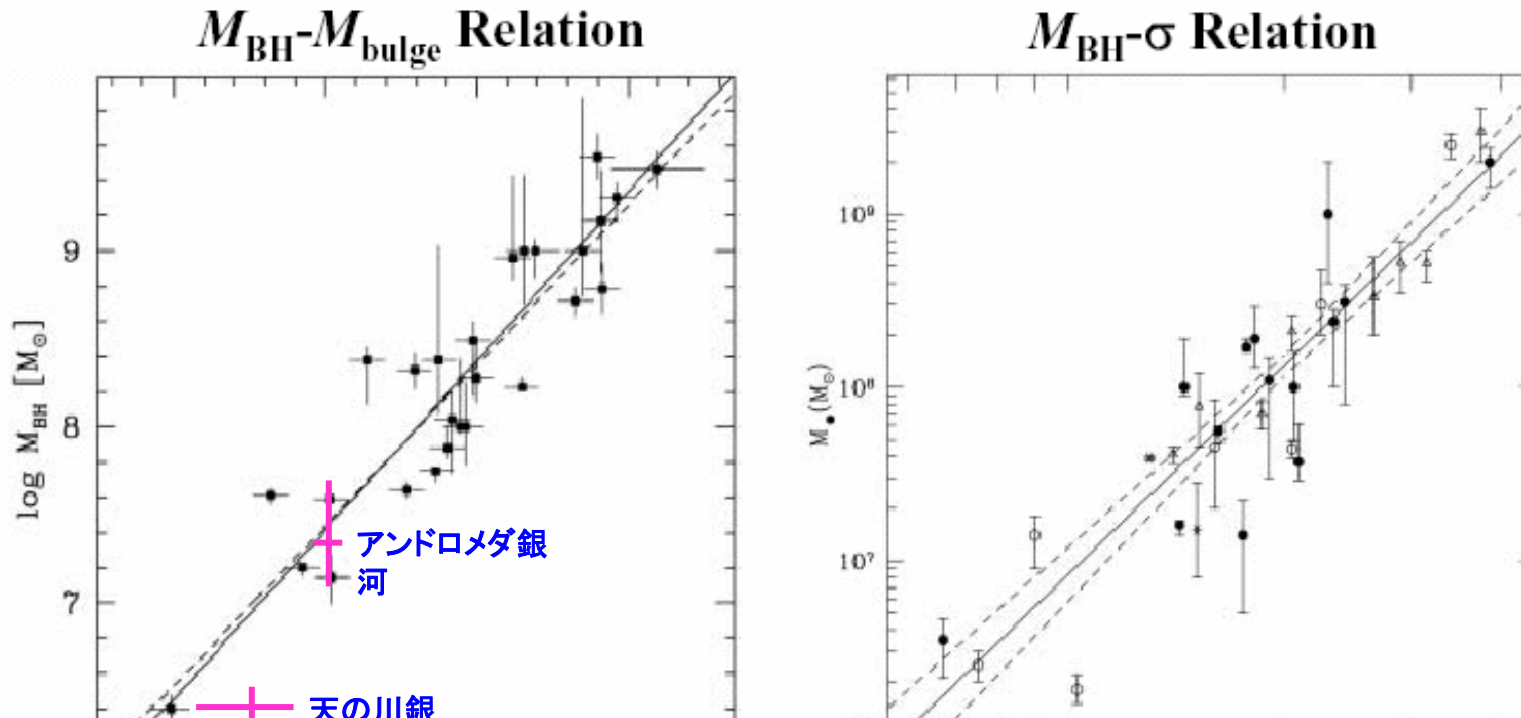
銀河形成研究の最前線：『自称』若手研究者のビジョン 2月13日－15日@国立天文台

内容

1. はじめに
2. 巨大ブラックホールー銀河バルジ関係解明に向けて
 - 2-1. AGNフィードバック機構
 - 2-2. 角運動量輸送機構
3. まとめ

巨大ブラックホールと銀河バルジ(星)の関係

～ 近傍宇宙 ～



この関係は近傍宇宙においてほぼ確立 !

巨大ブラックホール形成が銀河バルジ形成と密接に関連

IR-band

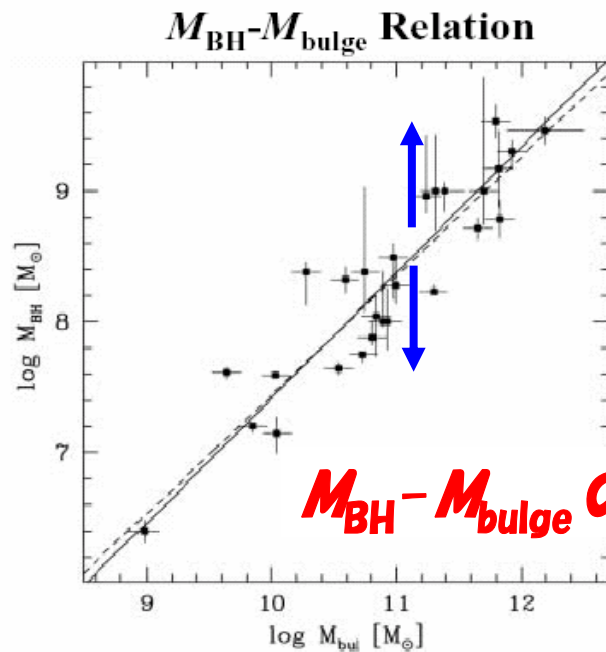
$$M_{\text{BH}}/M_{\text{bulge}} \approx 0.002$$

$$M_{\text{BH}} \propto \sigma_*^4$$

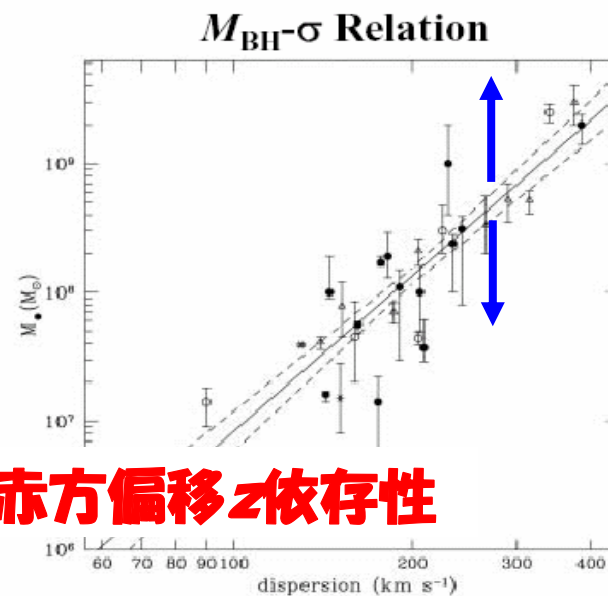
巨大ブラックホールと銀河バルジ(星)の関係

～ 遠方宇宙 ～

巨大ブラックホールの成長・形成が銀河バルジの形成・進化とどのように結びついているのか？



Marconi & Hunt 2003
IR-band



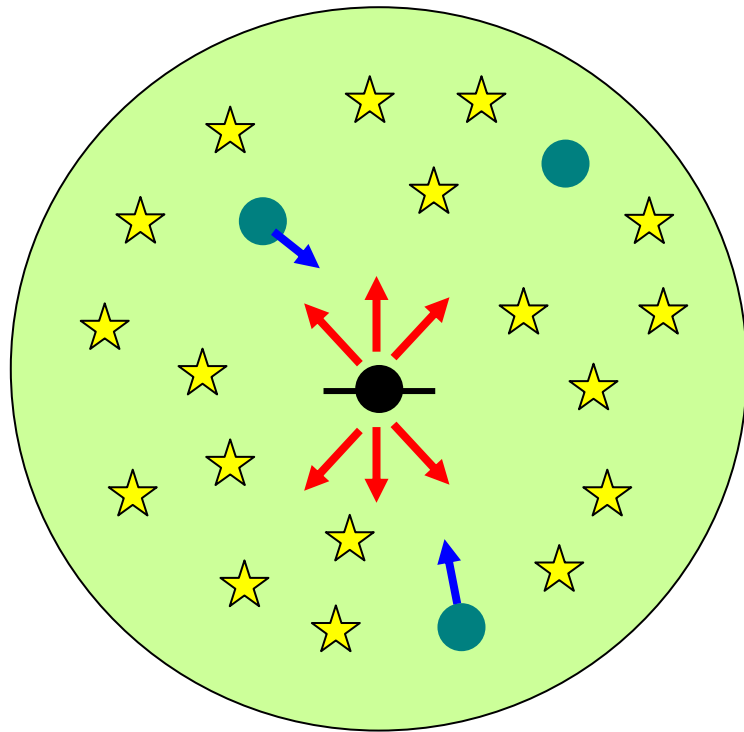
Tremaine et al. 2002

$M_{\text{BH}} - M_{\text{bulge}}$ の赤方偏移 z 依存性

理論: 準解析的アプローチで予言可能 (榎さんの講演)。

観測: 王道だがそう簡単ではない。

巨大ブラックホールー銀河バルジ関係の解明に向けて



銀河バルジ

○ AGNフィードバック機構

ブラックホールの成長やバルジの星形成と関係

○ 角運動量輸送機構

- ・巨大ブラックホール形成にとって必要不可欠
- ・銀河バルジ形成・進化と密接に関連する

シミュレーション・準解析的モデルではブラックボックス

AGNフィードバック機構



AGNフィードバックの重要性

Mass

$$M_{\text{BH}}/M_{\text{galaxy}} \leq 10^{-3} \quad \textit{Quite negligible !}$$

Size

$$r_{\text{BH}} = \frac{GM_{\text{BH}}}{\sigma_*^2} \approx 15 \left(\frac{\sigma_*}{200 \text{ km/s}} \right)^{-2} \left(\frac{M_{\text{BH}}}{10^8 M_{\odot}} \right) \text{ pc}$$

ブラックホール重力圏

Much less than galactic scale (~ kpc)

Energy

$$\left. \begin{array}{l} E_{\text{bin}} \sim M_{\text{total}} \sigma^2 \\ E_{\text{AGN}} \sim \eta M_{\text{acc}} c^2 \end{array} \right\} \frac{E_{\text{bin}}}{E_{\text{AGN}}} \sim \eta^{-1} \left(\frac{\sigma}{c} \right)^2 \frac{M_{\text{total}}}{M_{\text{acc}}} \sim 10^{-5} \frac{M_{\text{gas}}}{M_{\text{acc}}}$$

($\eta = 0.1, \sigma/c = 10^{-3}$)

AGNから解放されるエネルギーは簡単にバルジの束縛エネルギーを上回る。

問題はどのようにエネルギー(運動量)を星間ガスに供給するのか。

AGNフィードバック・メカニズム

1. AGN jet: e.g., Silk & Rees 1998

AGN bubble (コクーン)の膨張により周辺のガスをはき集める。

2. Radiation pressure: e.g., Fabian 1999; Murray et al. 2005

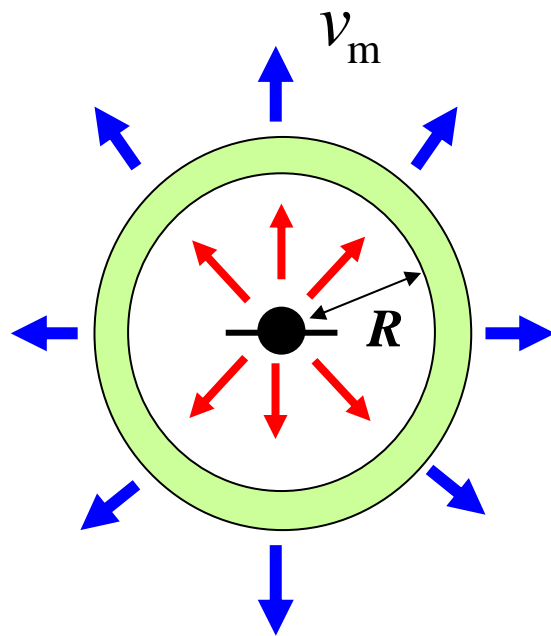
Obscured AGNで重要 ?

3. AGN wind : e.g., King 2003

BAL QSOsと関連?

AGN bubble model (Silk & Rees 1998)

シナリオ: AGN bubble によってはき集められたガスシエルの速度が脱出速度 (速度分散) 以下ならブラックホールは成長するが、脱出速度を超えるとガスが欠乏しブラックホール成長は止まる。



シエルの運動 *ガス降着メカニズムは考えない。

$$\frac{d}{dt} [M(R)\dot{R}] = \frac{L_j}{c} = \frac{L_{\text{Edd}}}{c} \quad \textcircled{1}$$

$$\rightarrow M(R)\dot{R} = \frac{2f_g \sigma^2 R}{G} \dot{R} = \frac{L_{\text{Edd}}}{c} t \quad (\because M(R) = \frac{2f_g \sigma^2 R}{G})$$

$$v_m^2 = (R/t)^2 = \frac{f_g \kappa M_{\text{BH}}}{2\pi G} \sigma^{-2} \quad (\because L_{\text{Edd}} = \frac{4\pi G M_{\text{BH}} c}{\kappa})$$

② 球対称膨張

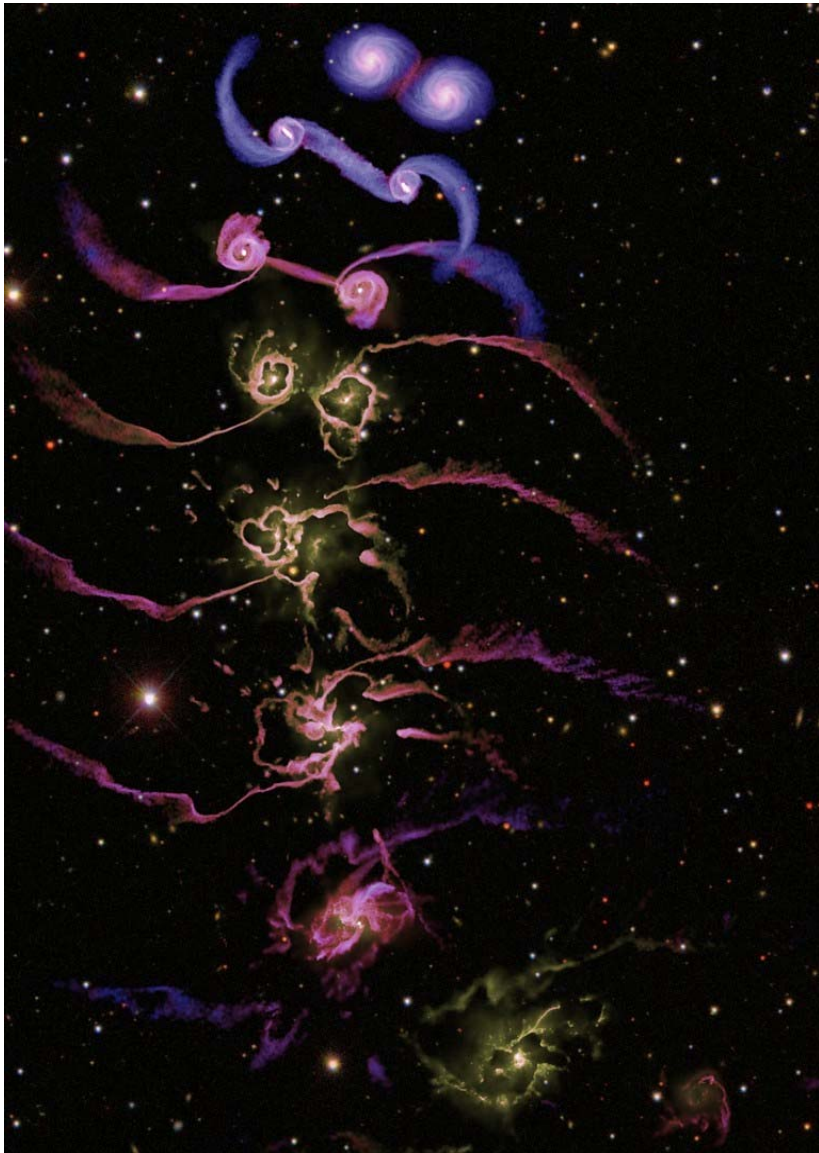
③ シエルの速度は一定 (singular isothermal 分布: $\rho \propto r^{-2}$)

$$v_m = \sigma \Rightarrow M_{\text{BH}} \approx 2 \times 10^8 f_{g,0.1} \sigma_{200}^4 M_{\odot}$$

これら3つの仮定はOKか？

観測と良く一致

Galaxy formation with AGN feedback (e.g., Di Matteo et al. 2005)



銀河衝突・合体

→ 爆発的な星形成と銀河中心への質量降着

→ AGN フィードバックにより星間ガスが吹き飛ばされる。 $(\dot{E}_{\text{feed}} = 0.05L_{\text{AGN}})$

→ 銀河の星形成 & ブラックホール成長が止まる

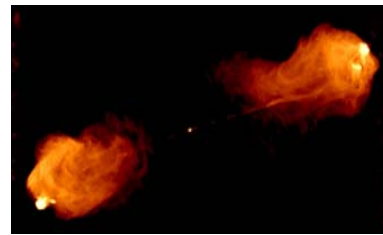
BHへの質量降着 & アウトフロー

空間分解できない ⇒ **sub-grid physics**

よく分かっていない！

AGN jetとISMとの相互作用を真面目に考えたい。

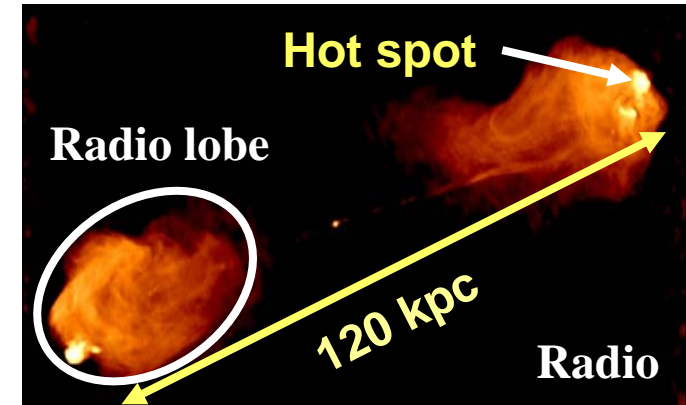
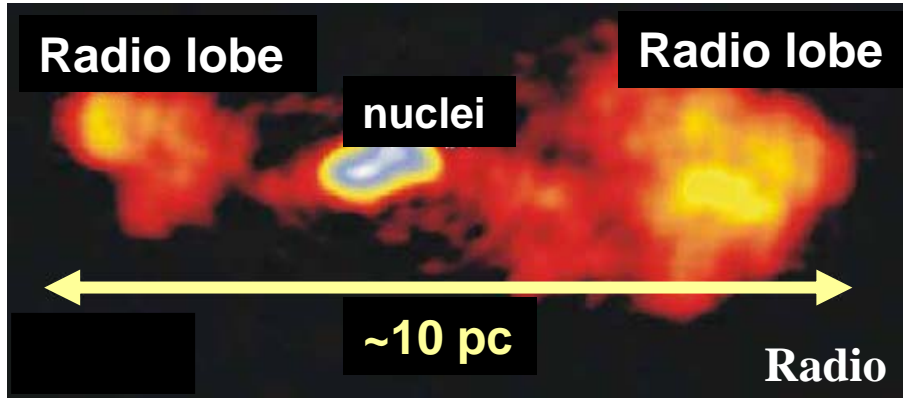
ミニジェットダイナミクスに注目！



< ~ kpc

Compact symmetric objects (CSOs)

■ コンパクトジェット (< 1 kpc)



Compact symmetric objects (CSOs)

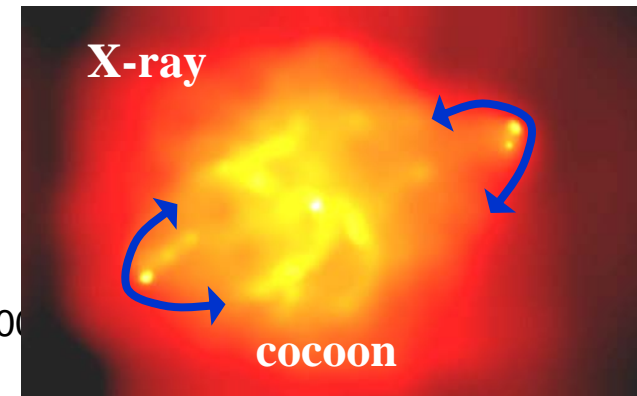
FRII radio galaxies

Similar morphology!

■ 若いジェット

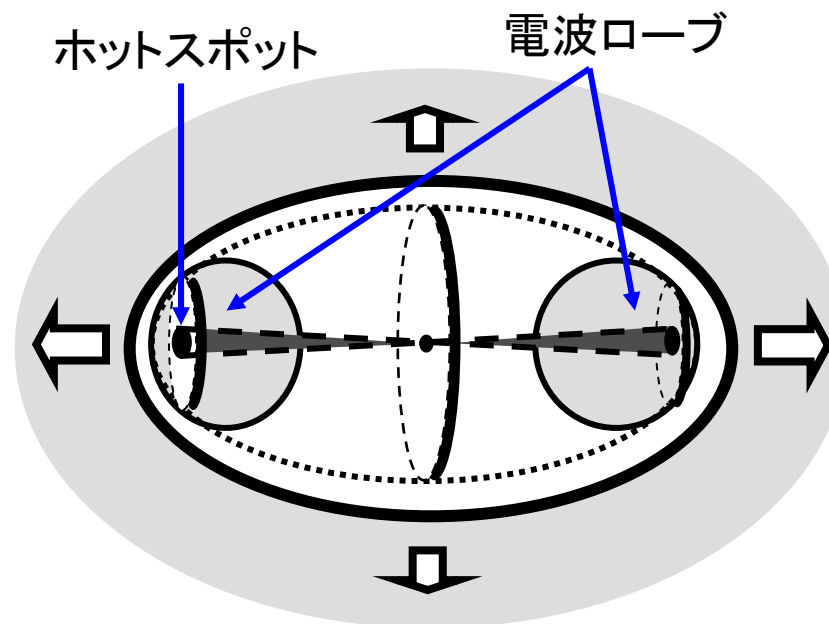
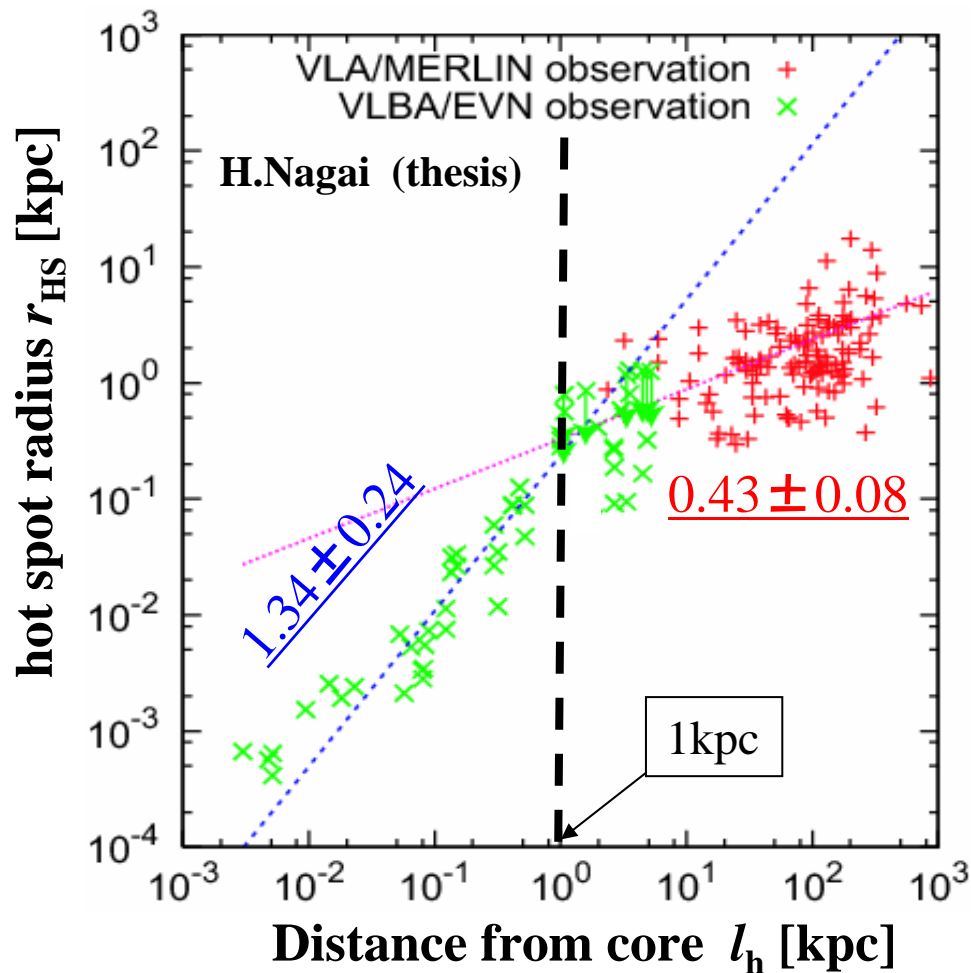
$t_{\text{age}} \sim 10^3 \text{ yr}$ (cf. $\sim 10^7 \text{ yr}$ for FRIIs)

(e.g., Owsianik & Conway 1998; Taylor et al. 2000; Polatidis et al. 2001)



Q. ミニジェットは途中で死ぬのか？ FRIIへ進化するのか？

How CSOs evolve into FRILs ?



ホットスポットサイズの変化：
ジェットのダイナミクスと密接に関係

この観測結果を理解することは、

ミニジェット進化 (AGN フィードバック) を明らかにするために重要！

A model of “hot spot” evolution

NK & Kino 2006, MNRAS, 370,1513

Eq. of motion (jet axis): $\frac{L_j}{c} = \rho_a(l_h)v_h^2(t)A_h(t)$

Eq. of motion (sideways): $P_c(t) = \rho_a(l_c)v_c^2(t)$

Energy eq. : $\frac{d}{dt} \left(\frac{P_c(t)V_c(t)}{\gamma_c - 1} \right) + P_c(t) \frac{dV_c(t)}{dt} = 2L_j$

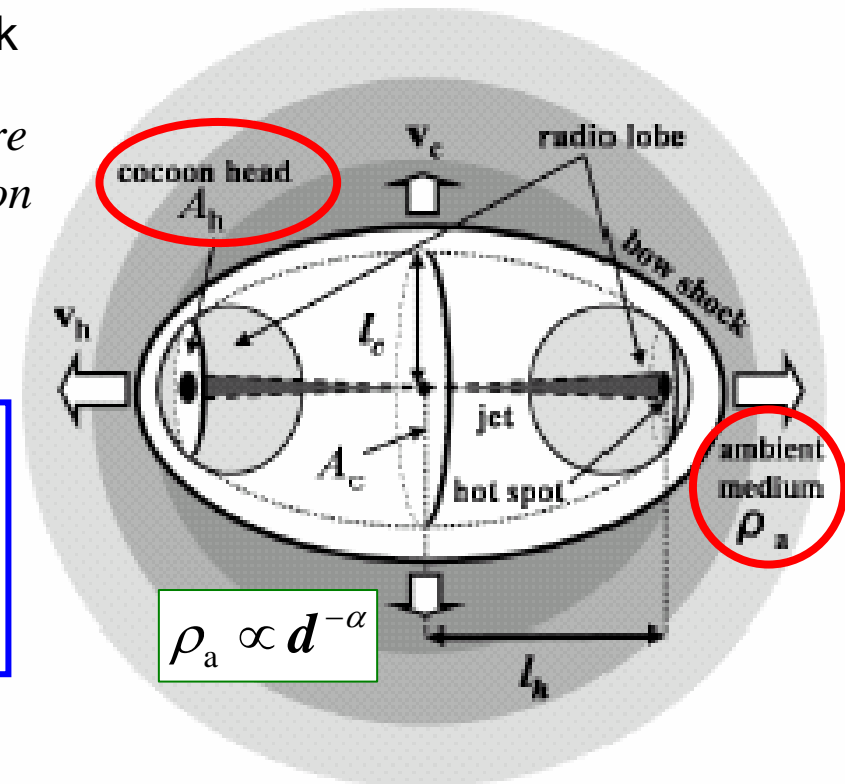
内部エネルギー + PdV work

$V_c = 4A_c l_h / 3$: cocoon volume P_c : cocoon pressure
 $\gamma_c = 4/3$: specific heat ratio of plasma inside cocoon

* 球対称膨張は仮定していない。

ホットスポットの物理量(大きさや速度)の進化が分かる。

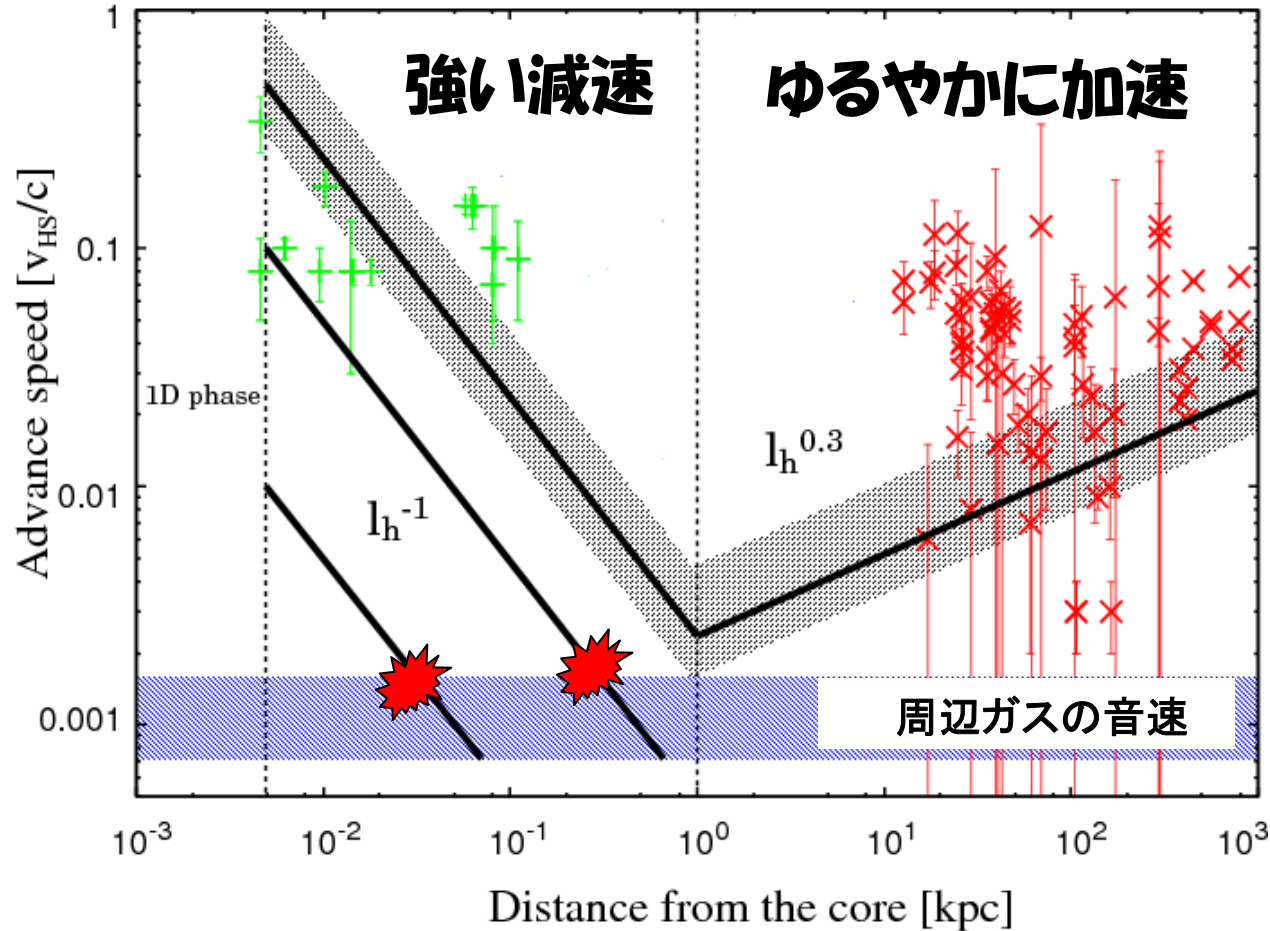
⇔ 観測結果との比較が可能



ホットスポット速度の進化

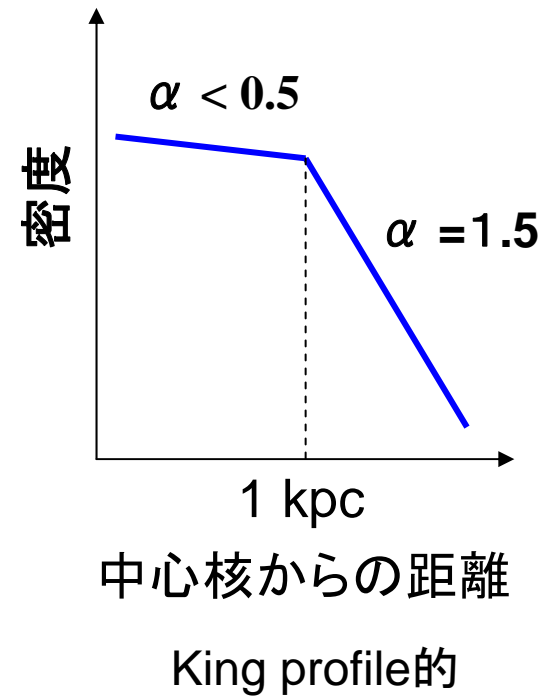
$$v_{\text{HS}}^2 \propto (\rho_a A_h)^{-1}$$

NK, Nagai & Kino 2008 in preparation



密度プロファイル

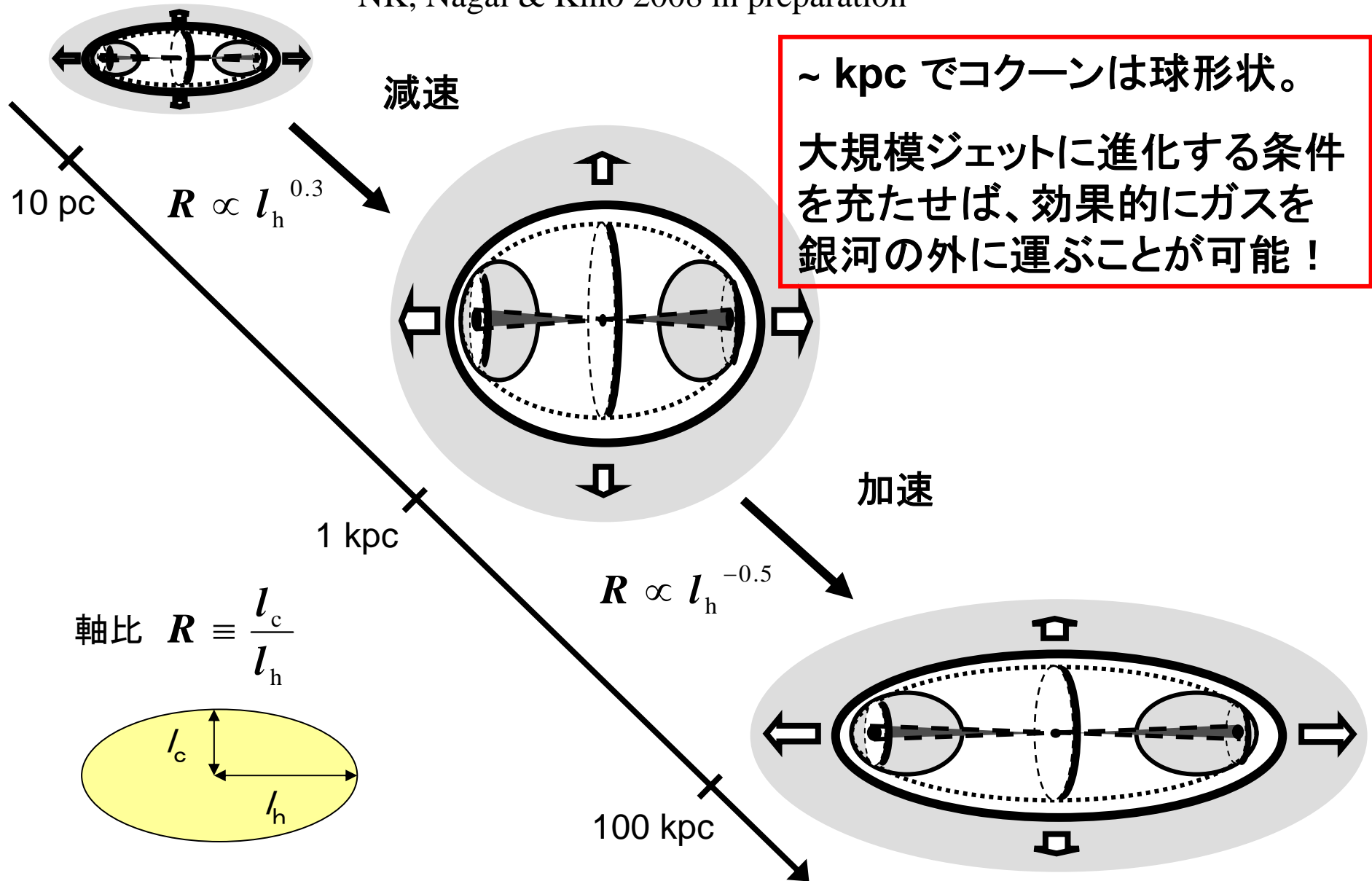
$$\rho_a(d) = \rho_{a0} (d/d_0)^{-\alpha}$$



初期速度が大きい ($> 0.1 c$) ミニジェットのみ大規模ジェットへ進化できる。

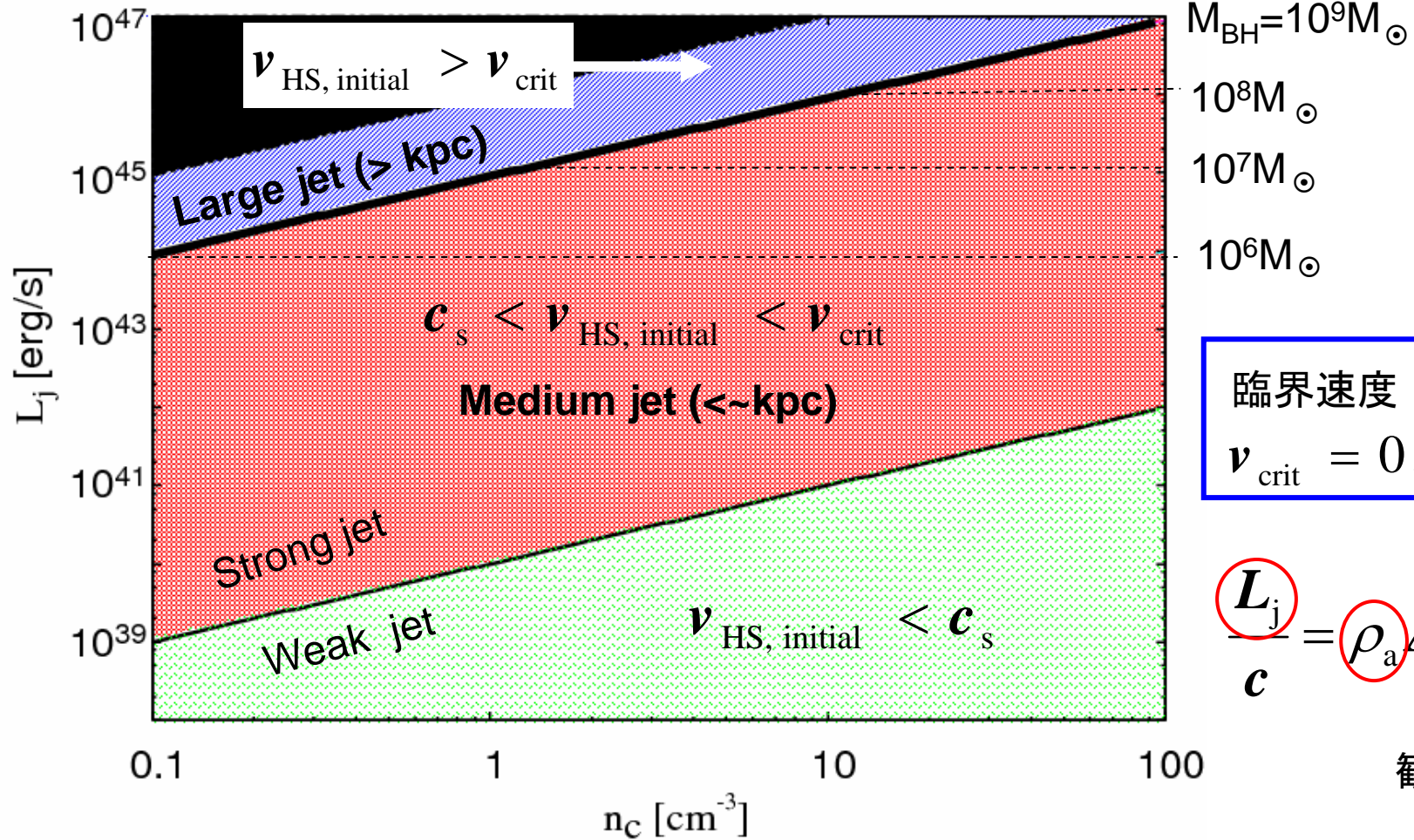
AGNバブル(コクーン)の形態進化

NK, Nagai & Kino 2008 in preparation



ジェットパワーとISMの密度

NK, Nagai & Kino 2008 in preparation



ミニジェットの約10%が大規模ジェットへ、大半は<~ kpc 規模のジェットどまり

小まとめ: AGNフィードバック(AGNジェット)

ミニジェット(CSOs)のダイナミクス(観測 vs. 理論モデル)

■ 銀河内(< kpc)でジェットは減速する。

■ ミニジェットのみ(~10%)が銀河団スケールへ進化できる。

運命は**ジェットパワー&周辺密度**に依存する。

* ~kpcジェット: 熱的なフィードバックとして重要かもしれない。

■ AGNバブルの形態は銀河スケール(~kpc)で球形状に近くなるので、効率よくISMを銀河団スケールへ運べる。

~ 観測で調べて欲しいこと ~

ミニジェットとISMとの相互作用(Dynamical effect & Thermal Effect)

特にAGNバブルの横膨張とISMの相互作用

角運動量輸送機構

～巨大ブラックホール成長～

角運動量輸送過程に要求される条件

～ 銀河バルジの進化・形成と密接に関係する ～

(i) 銀河合体による潮汐トルクによる角運動量輸送

(e.g., Mihos & Hernquist 1994, 1996; Saitoh & Wada 2004)

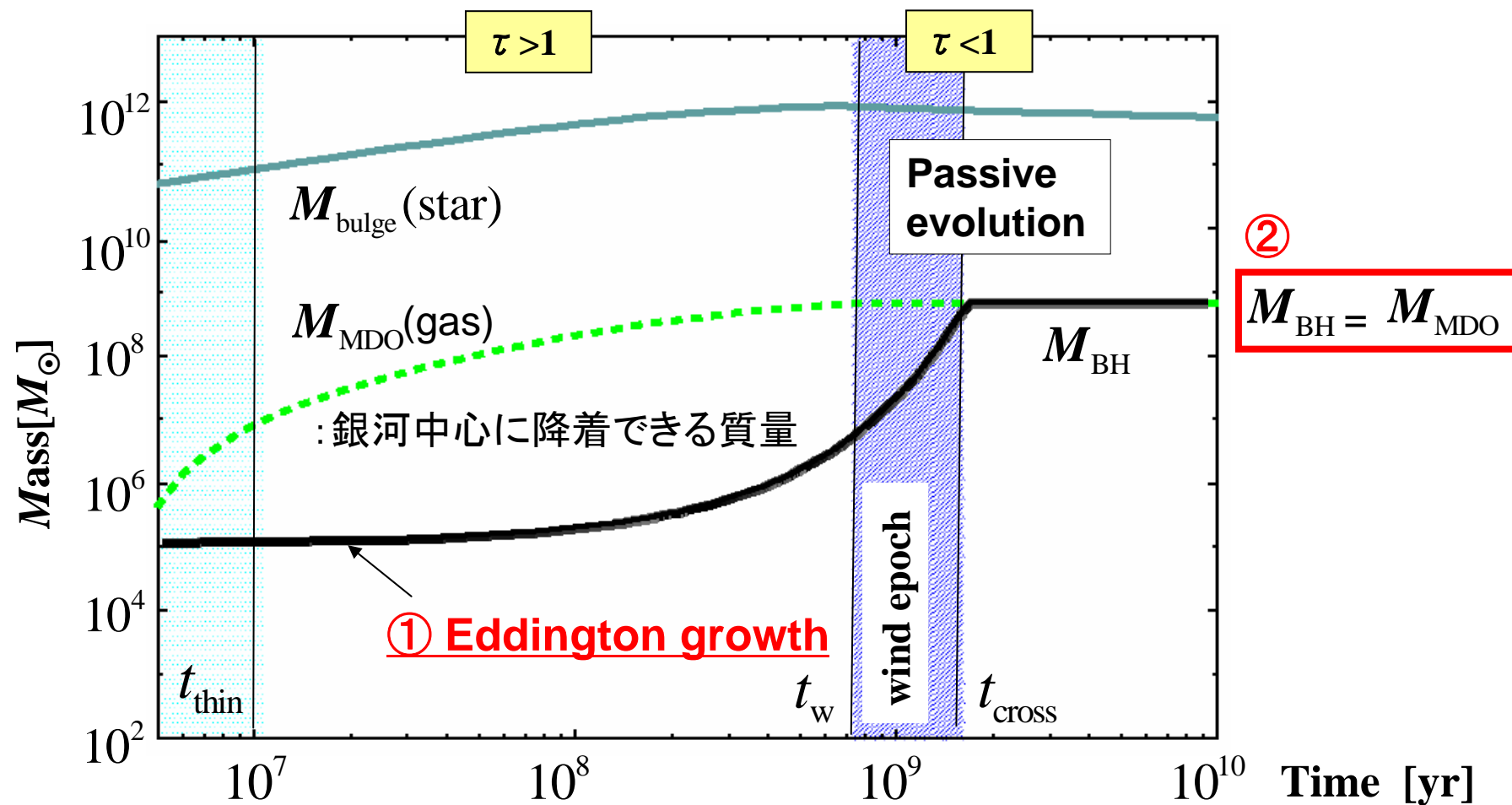
(ii) 銀河バルジでの星形成と関連する角運動量輸送

(e.g., 輻射抵抗: Umemura 2001; NK & Umemura 2002)

巨大ブラックホールー銀河バルジ(星)関係の進化

(NK, Umemura & Mori 2003)

輻射抵抗モデル: $\dot{M}_{\text{drag}} \approx 10^{-3} \dot{M}_{\text{bulge}} (1 - e^{-\tau})$



仮定①&② は良いのか？ (輻射抵抗モデルに関わらず)

Eddington limit growthについて

観測事実

- ・「質量降着率 \propto ブラックホール質量」が成り立たない。
- ・super-Eddington accretionを示唆する天体あり。

(e.g., Kawaguchi 2003; NK, Imanishi & Nagao 2006)

- ・高赤方偏移クエーサー (e.g., Haiman 2004)

SDSS QSO ($z=6.4$) $M_{\text{BH}} \sim 10^9 M_{\odot}$

$$t_{\text{growth}} = 7 \times 10^8 \eta_{0.1} \text{ yr}$$

$$t_{\text{H}} \approx 9 \times 10^8 \text{ yr}$$

⇒ Eddington limit を超える高い質量降着率が必要！

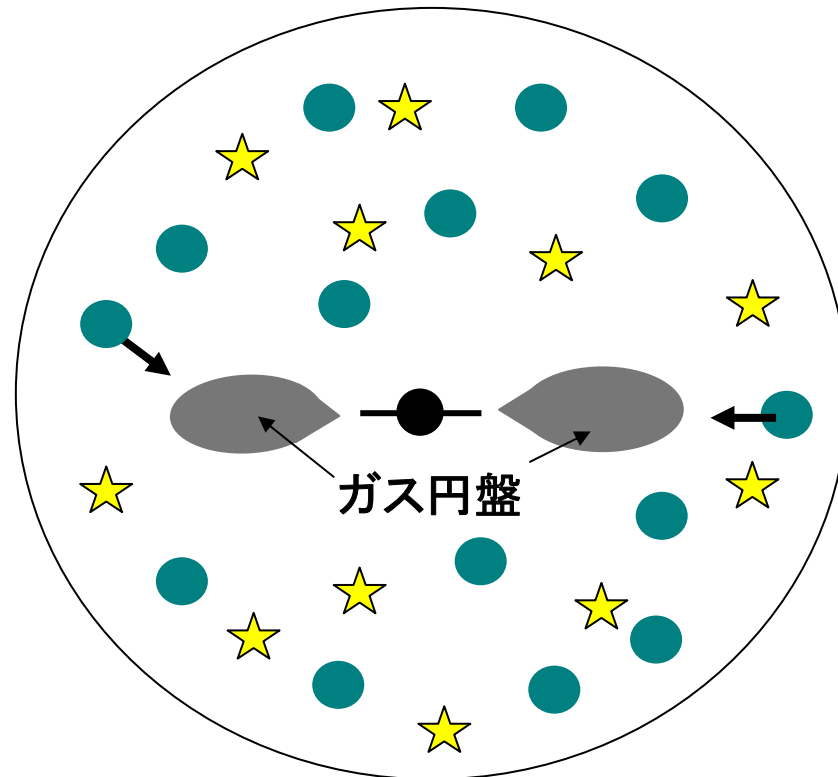
銀河スケールで角運動量を失ったガスの運命は？

○降着円盤スケール($\ll 1\text{pc}$)まで落ちていけるか？

もともと持っていた角運動量を6-7桁減らすのは困難。

○では、どうなるのか？

ガス円盤を形成する(少なからず角運動量を持つので)。

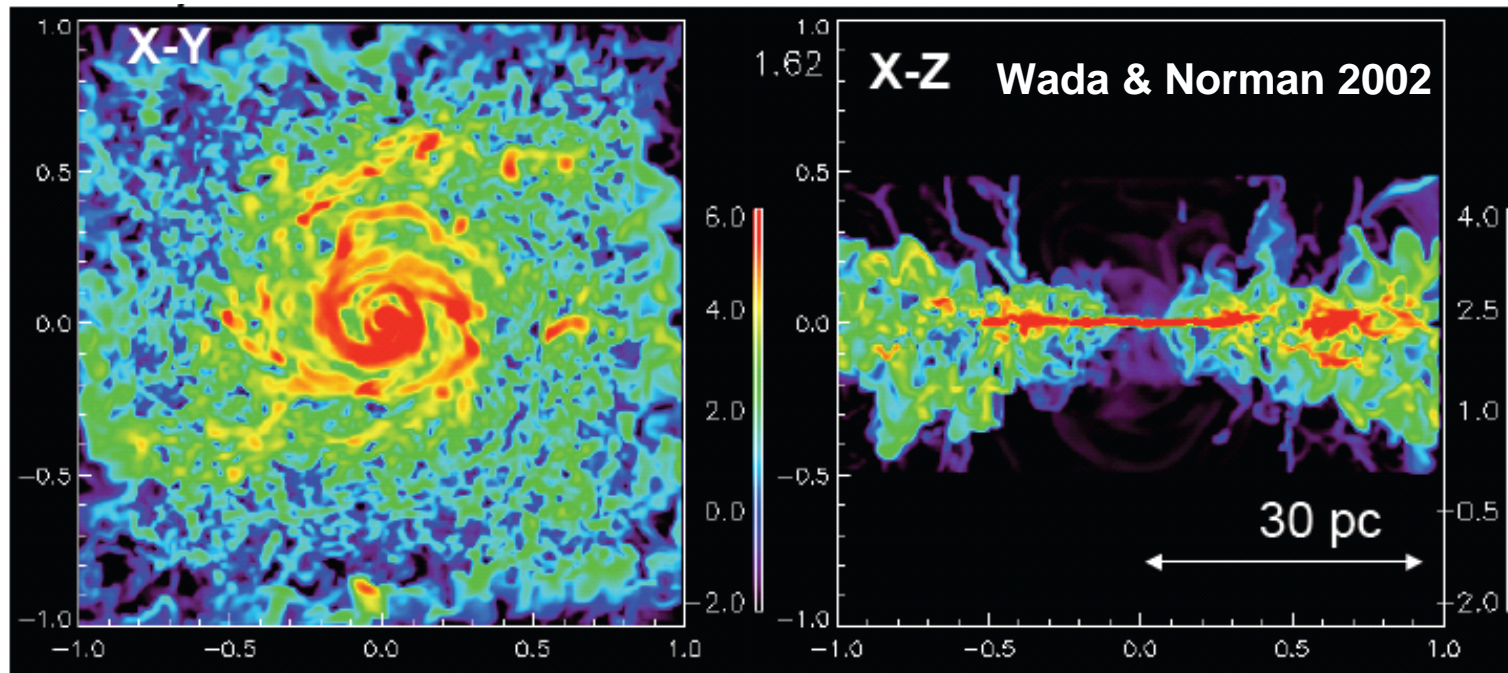


どのようなガス円盤が形成されるか？

宇宙論的銀河形成シミュレーションでガス円盤(10–100 pc)形成まで調べた研究はほとんどない (but see Levine +07; Mayer +07)。

Starburst driven circumnuclear disk

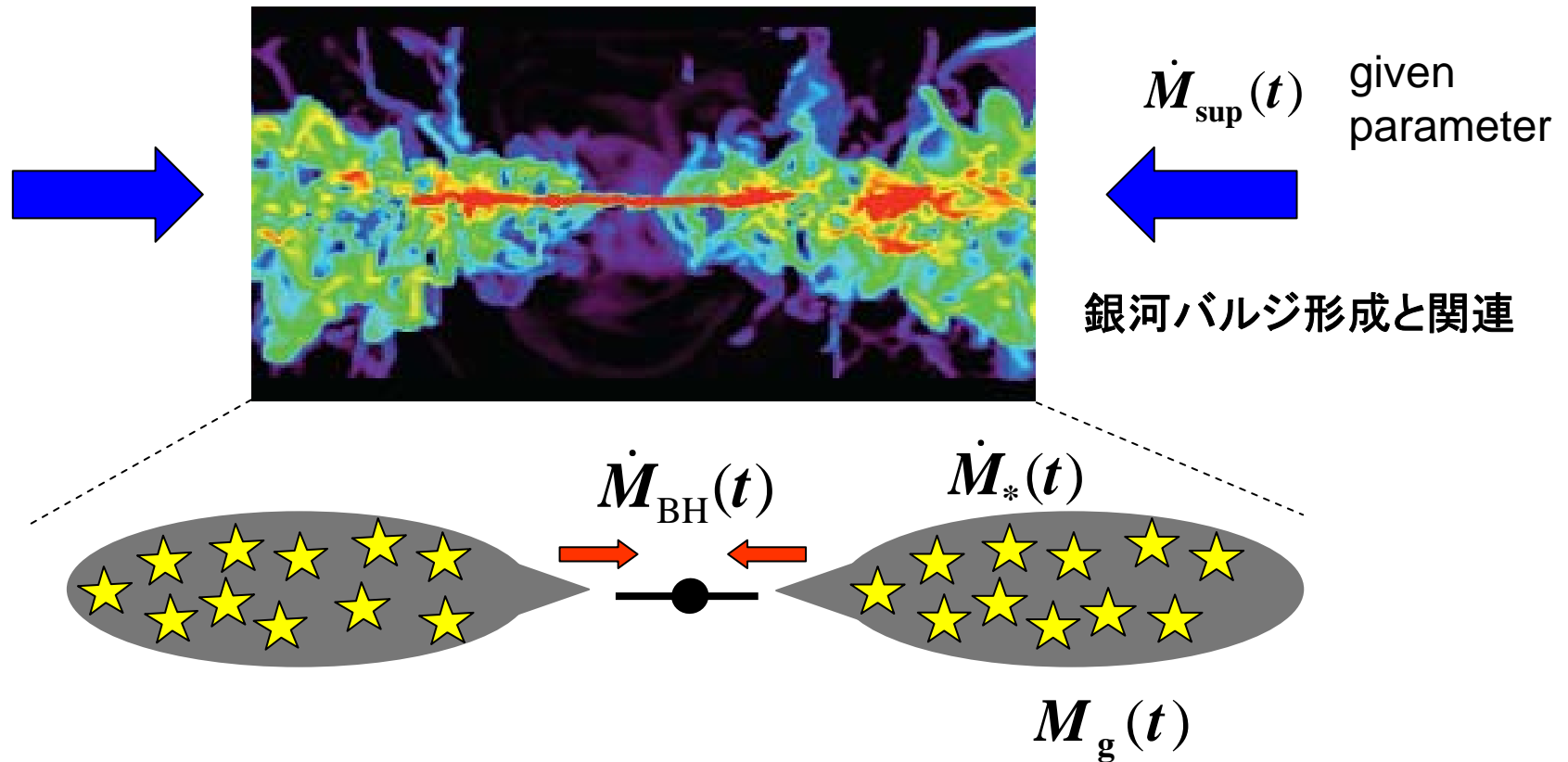
観測的にもサポート (e.g, Imanishi & Wada 2004; Davies et al. 2007)



大局的なガス円盤の構造: 超新星爆発による乱流でサポート
乱流粘性による角運動量輸送

巨大ブラックホールの成長とガス円盤の共進化

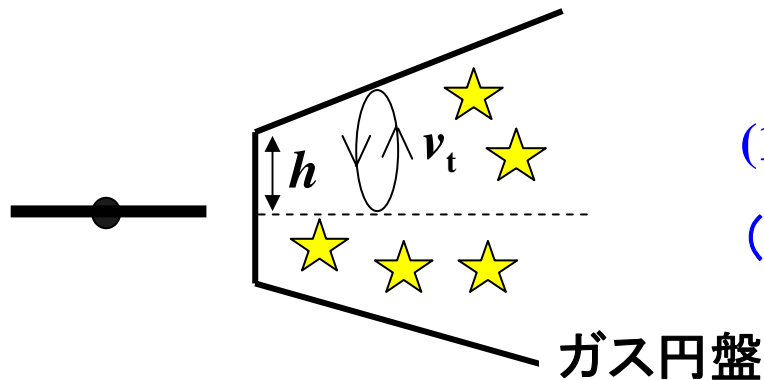
(NK & Wada 2008)



$$M_g(t) = \int_0^t [\dot{M}_{\text{sup}}(t') - \dot{M}_*(t') - \dot{M}_{\text{BH}}(t')] dt'$$

$$M_{\text{BH}}(t) = M_{\text{BH,seed}} + \int_0^t \dot{M}_{\text{BH}}(t') dt' ; M_{\text{BH,seed}} = 10^3 M_{\odot}$$

Starburst driven circumnuclear disk



(1)+(2) ⇒ 乱流速度とスケール高が決まる
(Wada & Norman 2002の結果と一致)

静水圧平衡

$$\rho_g(r)v_t(r)^2 = \rho_g(r)g(r)h(r) \quad (1)$$

v_t : 乱流速度 ρ_g : ガス密度
 h : スケール高

エネルギーバランス

$$\frac{\rho_g(r)v_t(r)^2}{t_{dis}} = \eta S_*(r)E_{SN} \quad (2)$$

$S_*(r) = C_* \rho_g(r)$: 星形成率

η : heating efficiency per unit mass

E_{SN} : 10^{51} erg

乱流粘性による角運動量輸送

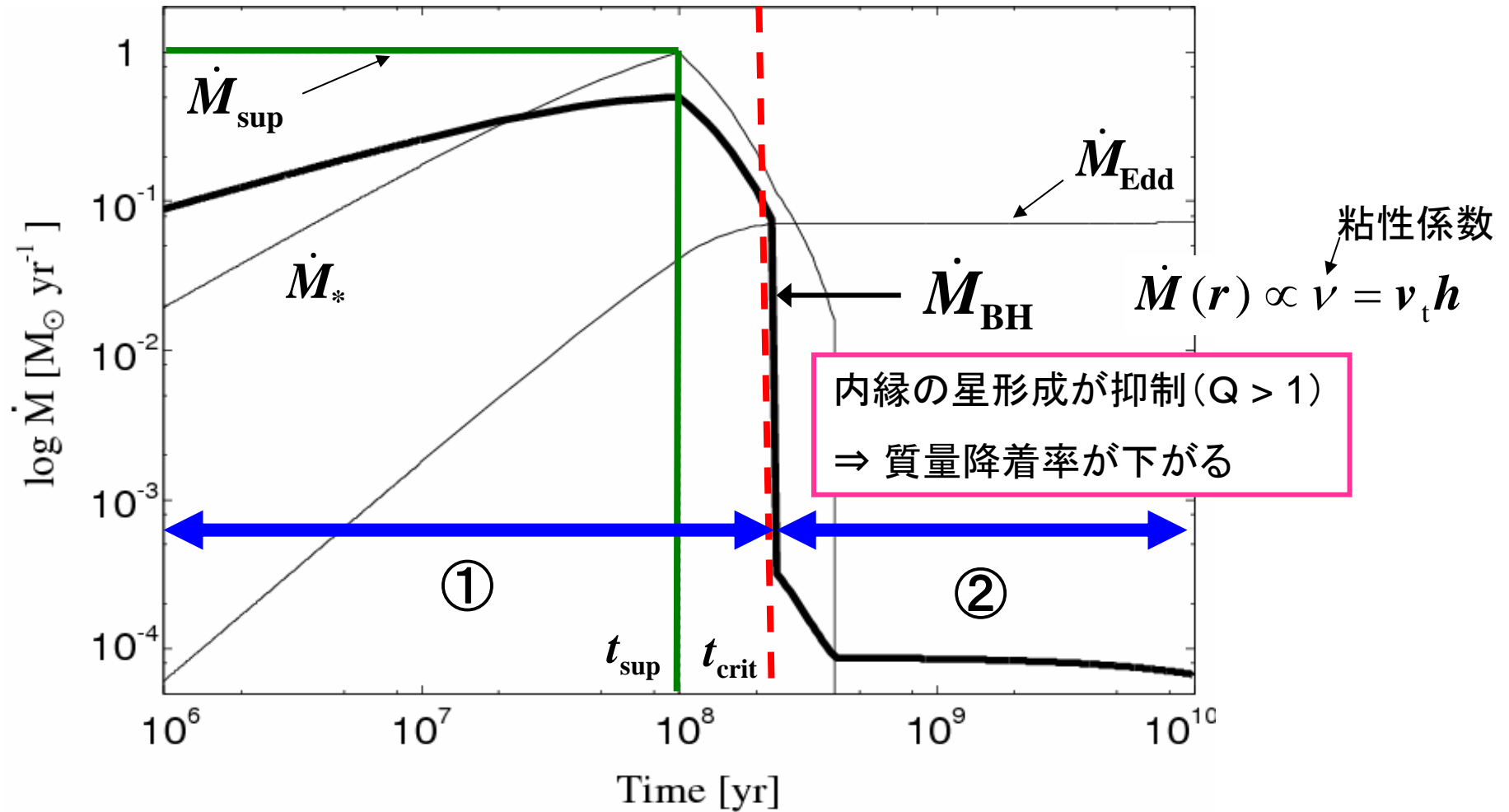
$$\dot{M}(r) = 2\pi\nu\Sigma_g(r)\left|\frac{d \ln \Omega(r)}{d \ln r}\right| \quad (3)$$

$\nu = v_t h$: 粘性係数

$\Sigma_g = 2h\rho_g$: 表面密度

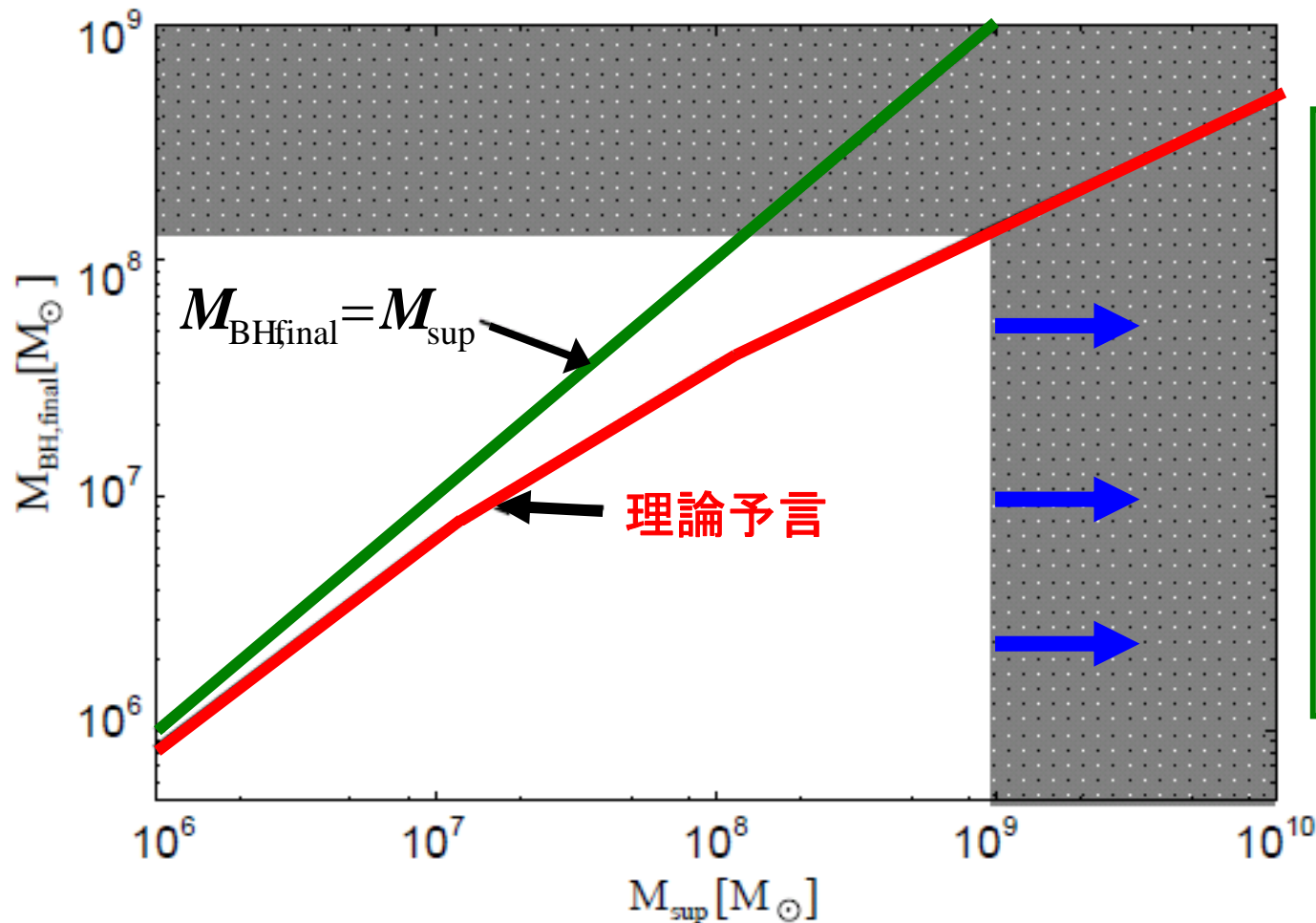
Ω : 角速度

巨大ブラックホール成長



- BH成長: ① high accretion phase $\dot{M}_{\text{BH}} > \dot{M}_{\text{Edd}}$
 ② low accretion phase $\dot{M}_{\text{BH}} \approx 10^{-3} \dot{M}_{\text{Edd}}$

$M_{\text{BH, final}}$ VS. M_{sup} 関係



輻射抵抗モデル

$$M_{\text{bulge}} \approx 10^{12} M_{\odot}$$

$$\dot{M}_{\text{sup}} \approx 1 M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$$

$$t_{\text{sup}} = 10^9 \text{ yr}$$

$$M_{\text{sup, max}} \approx 10^9 M_{\odot}$$

- 母銀河から供給されたガス質量が大きくなるほど、大半のガスが星になる。
- $\sim 10^9 M_{\odot}$ 巨大ブラックホールの形成は難しいことを示唆。

小まとめ: 角運動量輸送機構: ブラックホール成長

■ ブラックホールの成長: ガス円盤での星形成史と密接に関連

■ ガス降着のみで $10^9 M_{\odot}$ という巨大ブラックホールを形成するのは難しいかもしれない(ガス円盤での星形成を考慮すると)。

* High- z QSO ($z > 6$) の形成問題はよいシビアに(成長時間 + ガス降着量) ほんとうに $10^9 M_{\odot}$ もあるのか? 観測的に検証が必要!

高精度銀河形成シミュレーション(吉田さん、斎藤さん)

- どのようなガス円盤が出来るのか?
- 安定に存在できるのか?

まとめと今後

巨大ブラックホールー銀河バルジ関係の解明に向けて

AGNフィードバック機構:

- ・これまでのシミュレーション・セミアナ・観測で重要性は分かってきた。
- ・AGNフィードバックが有効に働く条件を明かにする段階にきている。
- ・BH成長段階ではAGNからの輻射の効果が重要になる。

(輻射輸送計算が重要になってくる。) *巨大銀河の晴れ上がりの時期*

角運動量輸送機構:

- ・巨大ブラックホール形成解明の鍵: **ガス円盤(トラス)の形成・進化**
- ・高精度銀河形成シミュレーションとのリンクが重要