

高赤方偏移クェーサーから探る
超巨大ブラックホールの成長過程
~次世代観測への期待~

川勝 望 (学振PD・国立天文台)

2009年10月15-17日@愛媛県松山市道後姫塚 にぎたつ会館

研究会「超広域サーベイによる巨大ブラックホール進化の研究:観測と理論の連携」

Outline

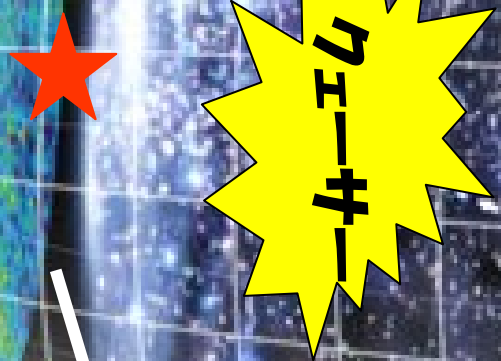
- イントロダクション
- 銀河核ガス円盤(AGN torus)と超巨大ブラックホールの進化
- 遠方($z > 6$)クエーサー形成・進化
 - (i) 形成条件
 - (ii) BH成長段階にあるクエーサーの観測的特徴
 - (iii) 将来観測への期待
- まとめ

最遠方クェーサー
 $z=6.43$

$$M_{\text{BH}} \approx 10^9 M_{\odot}$$

1Gyr 以内に超巨大ブラックホール
を作らなくてはならない!

< 1Gyr



初代ブラックホール
 $z \sim 30$ (梅田)

$$M_{\text{BH}} \approx 10^2 M_{\odot}$$

Big Bang Expansion

13.7 billion years

Inflation

Big Bang

ガス降着による超巨大ブラックホールの成長

Q. 星間ガスをどのようにブラックホール近傍まで運ぶのか？

銀河 (斎藤、松井)

- galaxy-galaxy interaction
- major/minor mergers
- single/double bars
- spiral shocks
- cloud-cloud collision
- radiation drag
- ...etc.

R ~ kpc - 10 kpc

特によく分かっていない領域

(川勝、行方)

銀河中心領域

銀河核ガス円盤

(AGN トーラス)

⇒ “星形成”

超新星爆発や輻射
の効果

(和田)

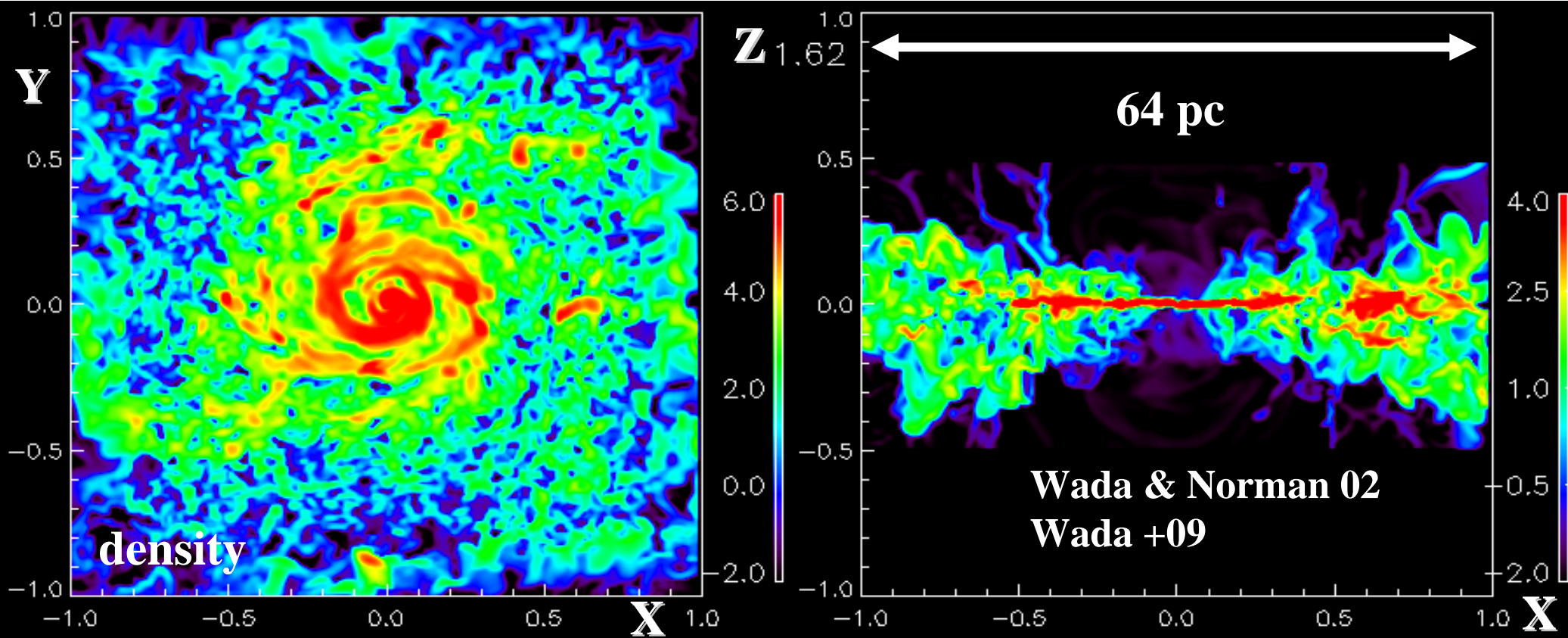
R ~ 10 -100 pc

SMBH

R << 1 pc

(大須賀)

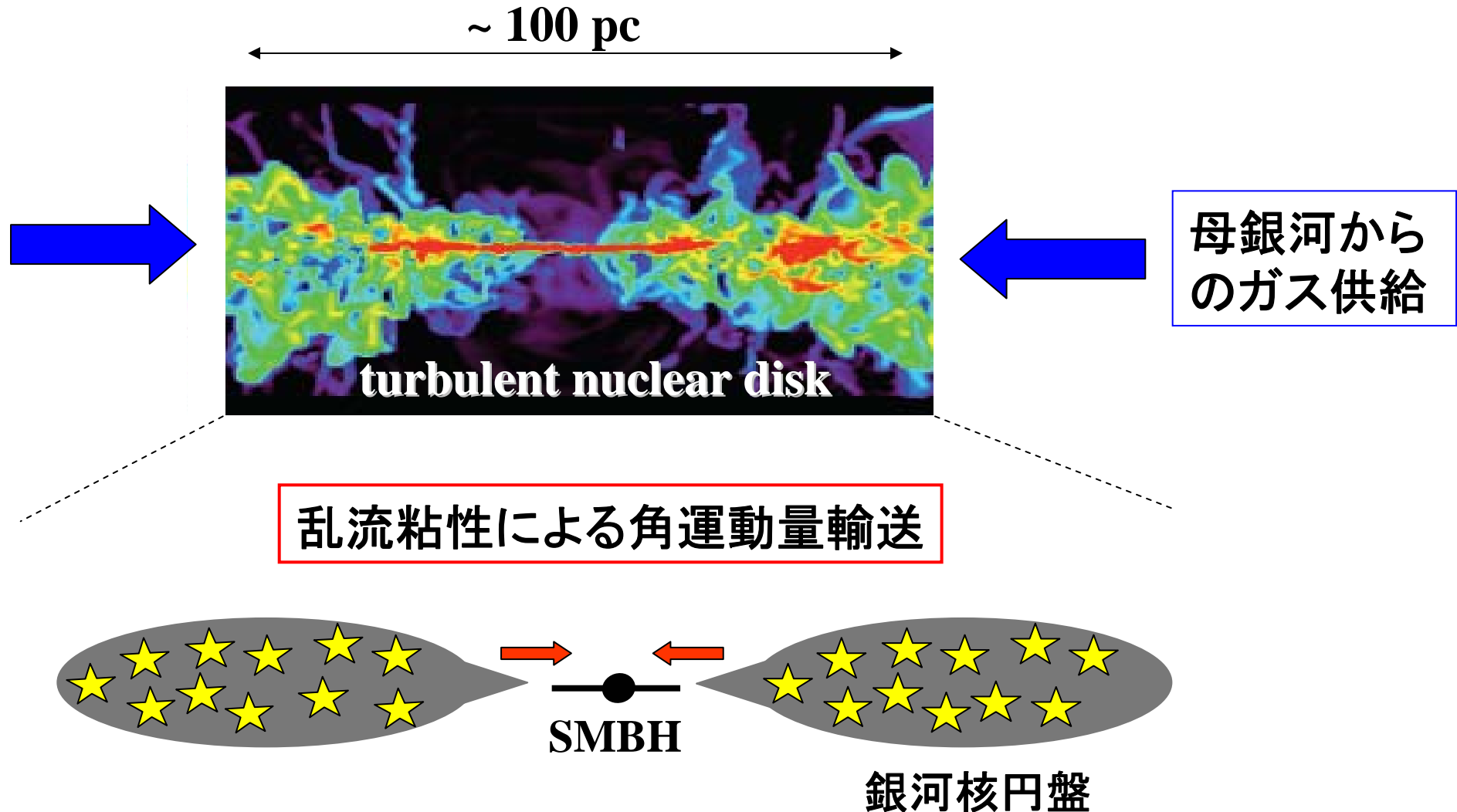
銀河核ガス円盤での超新星爆発(SN)の効果



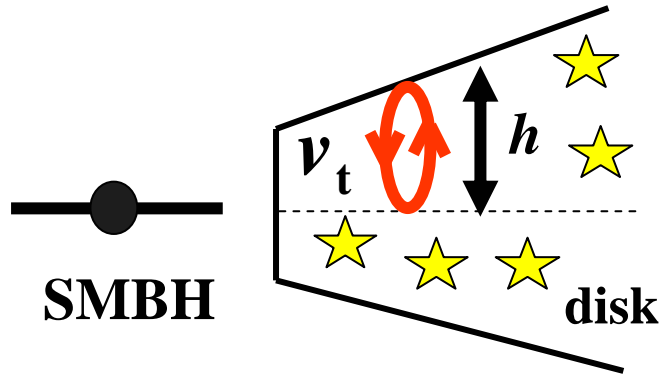
- ・内部構造は非常に複雑(非均質な密度分布)、速度場は乱流的である。
- ・大局的なガス円盤の構造は準定常状態で、エネルギーバランス(SNからのエネルギー供給=乱流エネルギーの散逸)で決まっている。
- ・乱流粘性による角運動量輸送が重要な過程である。

巨大ブラックホールの成長と銀河核ガス円盤の共進化

NK & Wada 2008, 2008, ApJ, 681, 73



モデル (1) : 乱流圧力で支えられた銀河核ガス円盤



(1)+(2) ⇒ 乱流速度とスケールハイト

(Wada & Norman 2002の数値計算の結果と一致)

(3) ⇒ 質量降着率 (\propto 星形成率)

$$\dot{M}(t) \propto \dot{M}_*(t)$$

静水圧平衡 (乱流圧力=重力(円盤に垂直方向))

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

v_t : 乱流速度 ρ_g : ガス密度

h : スケールハイト

エネルギーバランス(乱流エネルギーの散逸=SNからのエネルギー供給)

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

$$S_*(r) = C_*\rho_g(r): \text{星形成率}$$

η_{SN} : heating efficiency per unit mass

E_{SN} : 10^{51} erg

乱流粘性による角運動量輸送

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

$$v_t = \alpha_{\text{SN}} v_t \mathbf{h} : \text{粘性係数}$$

$\alpha_{\text{SN}} = 1$ (仮定)

$\Sigma_g = 2h\rho_g$: 表面密度

Ω : 角速度

モデル (2) : 超巨大BHの成長と銀河核円盤の進化

- 質量保存 (円盤からのアウトフローは考慮しない)

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

- BH成長率

(i) $M_{\text{BH}}(t) = M(r_{\text{in}}, t)$

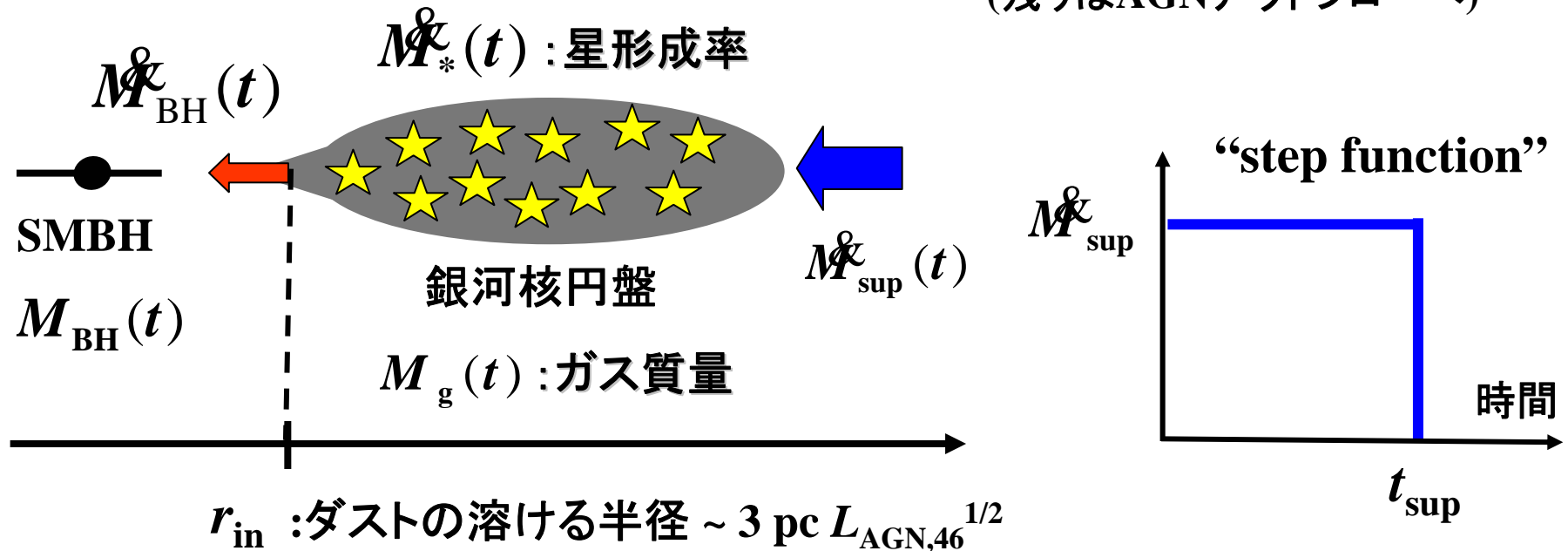
: Super-Eddington growth model

輻射流体計算 (e.g., Ohsuga +05, 07)

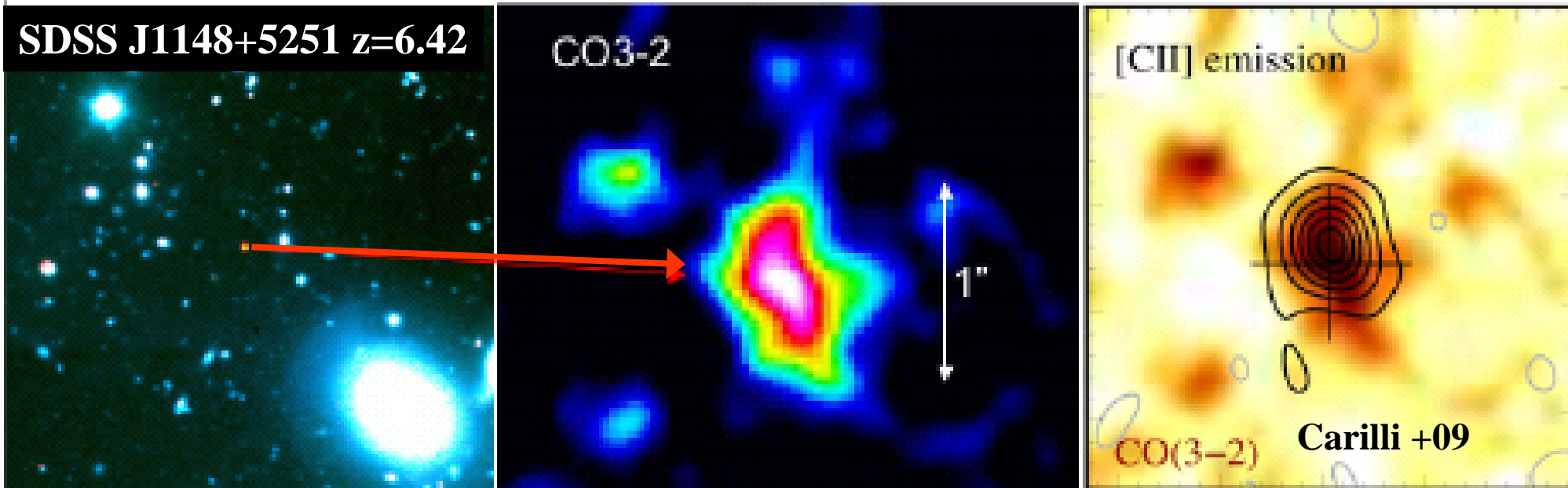
(ii) $M_{\text{BH}}(t) = \epsilon_{\text{BH}}^{-1} M_{\text{Edd}}(t)$ ($\epsilon_{\text{BH}} = 0.1$)

: Eddington-limited growth model

(残りはAGNアウトフローへ)



High- z ($z > 6$) QSO formation



- ガス降着によるHigh- z ($z > 6$) QSO形成の条件

- High- z ($z > 6$) QSOの進化

- 成長中のQSOの観測的特徴は？

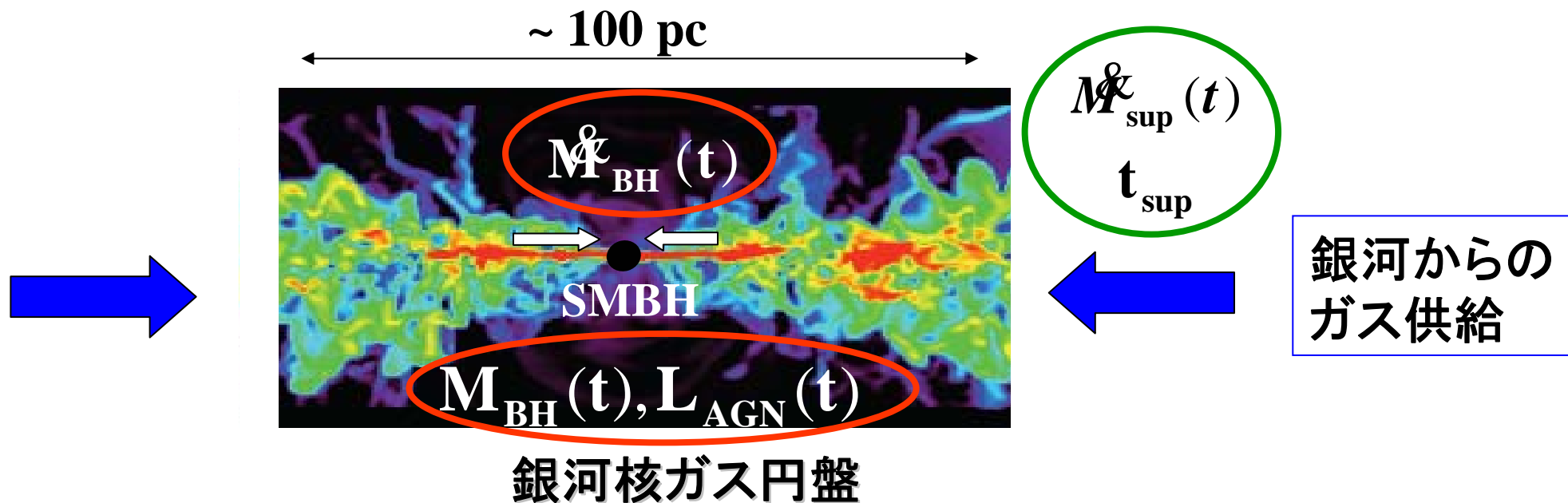
- 将来観測への期待

(NK & Wada 2009 accepted ApJ)

銀河スケールと降着円盤を結ぶAGN進化モデル

銀河中心領域のガス進化、星形成、BHへの降着を考慮したAGN共進化モデル

NK & Wada 2008



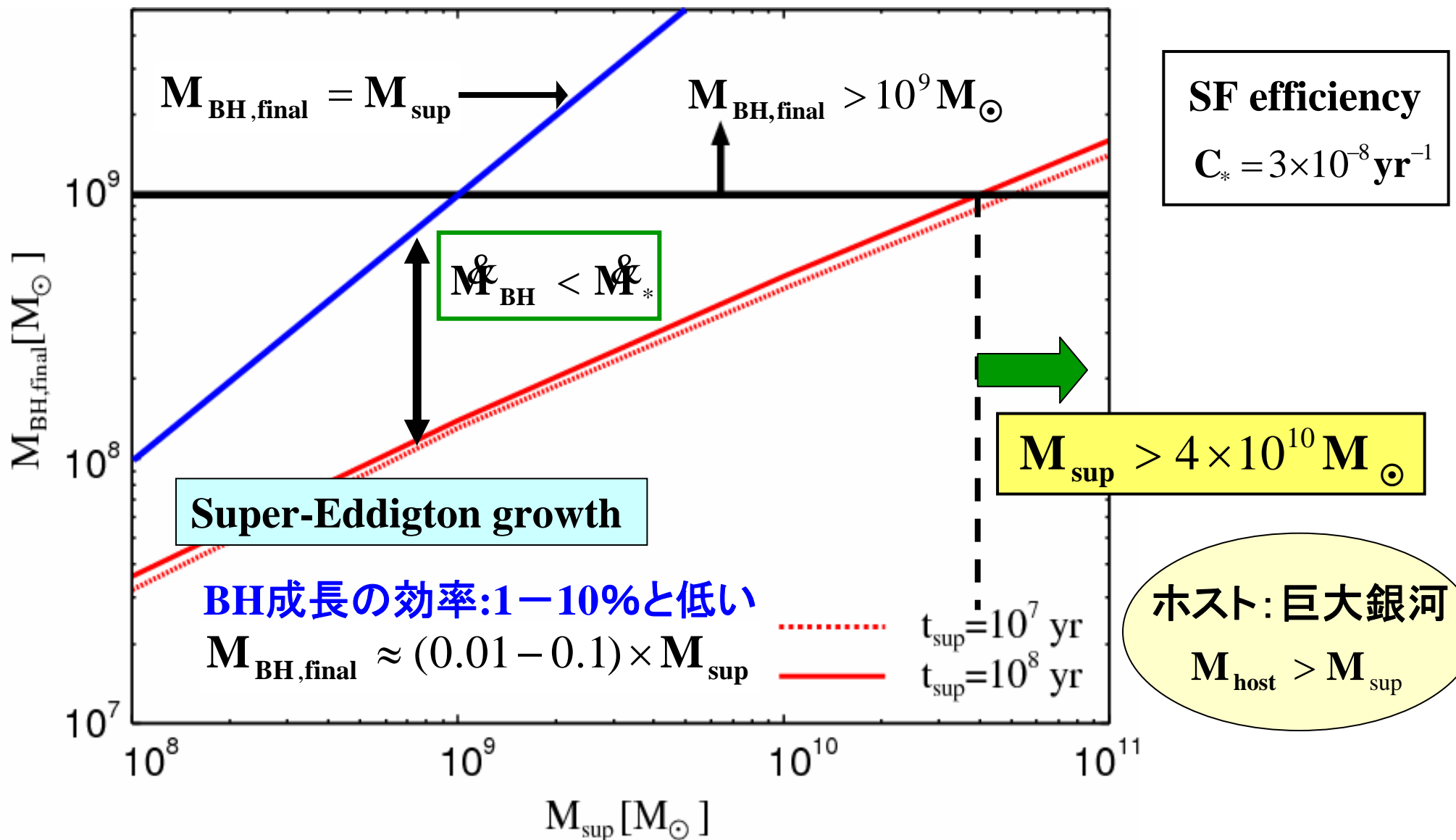
SN駆動の乱流圧で支えられた円盤

- ・静水圧平衡: 『乱流圧 = 重力 (z方向)』
- ・星形成率: $S_*(r) = C_* \rho_{\text{gas}}(r)$
- ・エネルギーバランス: 『SNからのエネルギー注入 = 乱流エネルギー散逸』
- ・乱流粘性による角運動量輸送

See Wada & Norman 2002

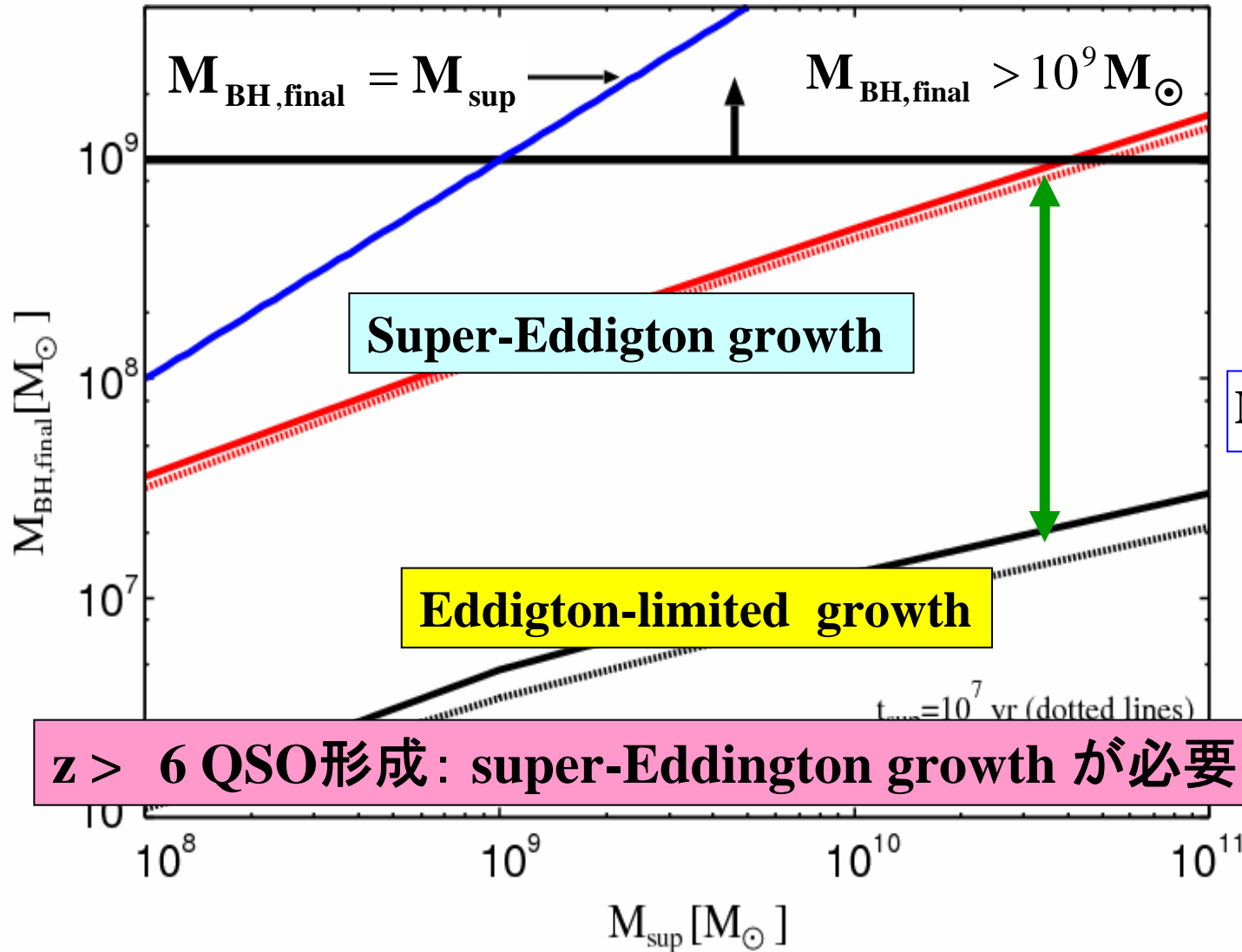
BH質量($M_{\text{BH, final}}$) vs. 供給されるガス質量(M_{sup}) 関係(1)

“Super-Eddington growth model”



BH質量($M_{\text{BH, final}}$) vs. 供給されるガス質量(M_{sup}) 関係(2)

“Eddington-limited growth model”



SF efficiency

$$C_* = 3 \times 10^{-8} \text{ yr}^{-1}$$

$$M_{\text{BH, final}} \approx (10^{-4} - 10^{-2}) M_{\text{sup}}$$

$$\ominus t_{\text{sup}} \leq t_{\text{Edd}} \approx 10^8 \text{ yr}$$

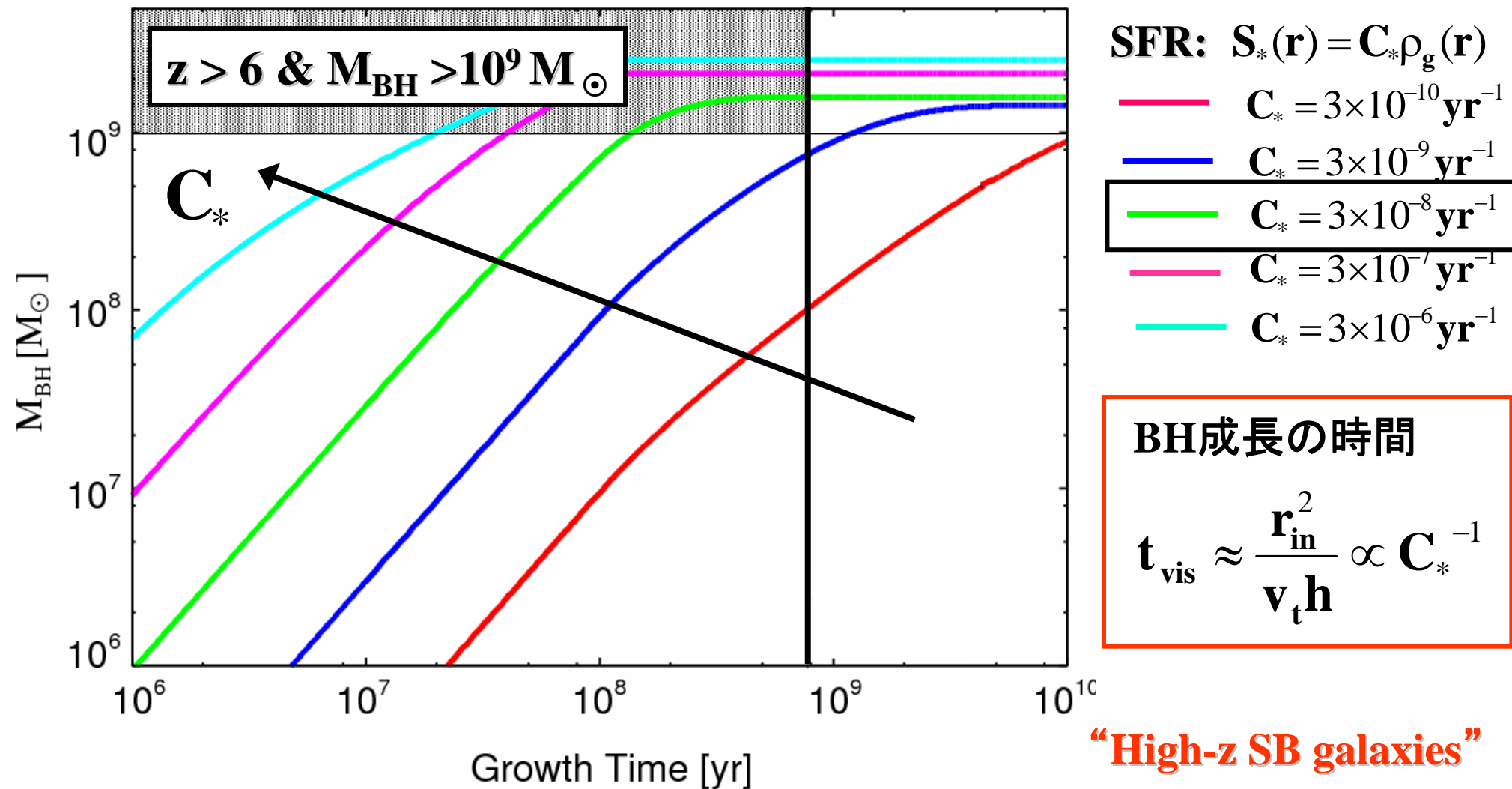
t_{Edd} : Eddington timescale

$$t_{\text{QSO}} \approx 10 t_{\text{Edd}} \quad (\epsilon_{\text{BH}} = 0.1)$$

$z > 6$ QSO形成: super-Eddington growth が必要!

ブラックホール成長の時間スケール

$$M_{\text{sup}} = 10^{11} M_{\odot} \quad \& \quad t_{\text{sup}} = 10^8 \text{ yr}$$

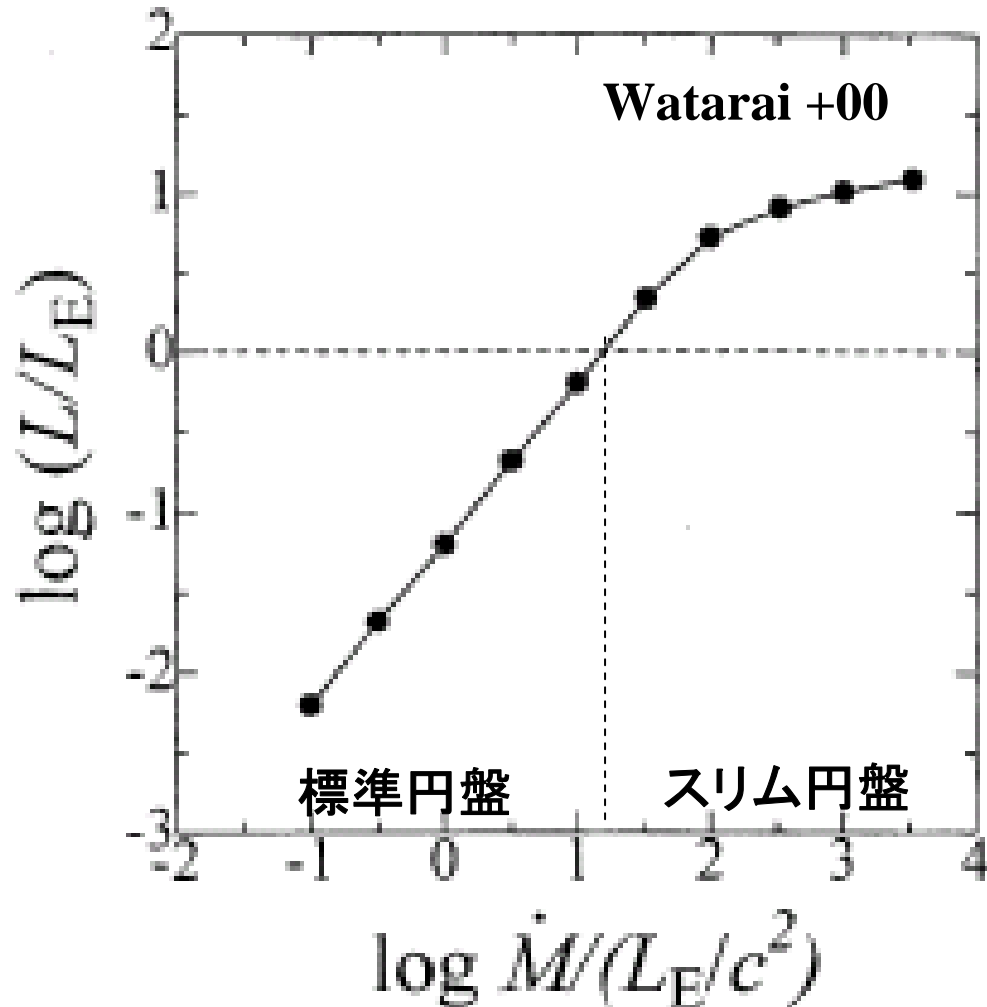


Conditions ($z > 6$ & $M_{\text{BH}} > 10^9 M_{\odot}$): $3 \times 10^{-8} \text{ yr}^{-1} \leq C_* \leq 3 \times 10^{-6} \text{ yr}^{-1}$

Evolution of high- z QSOs at $z > 6$

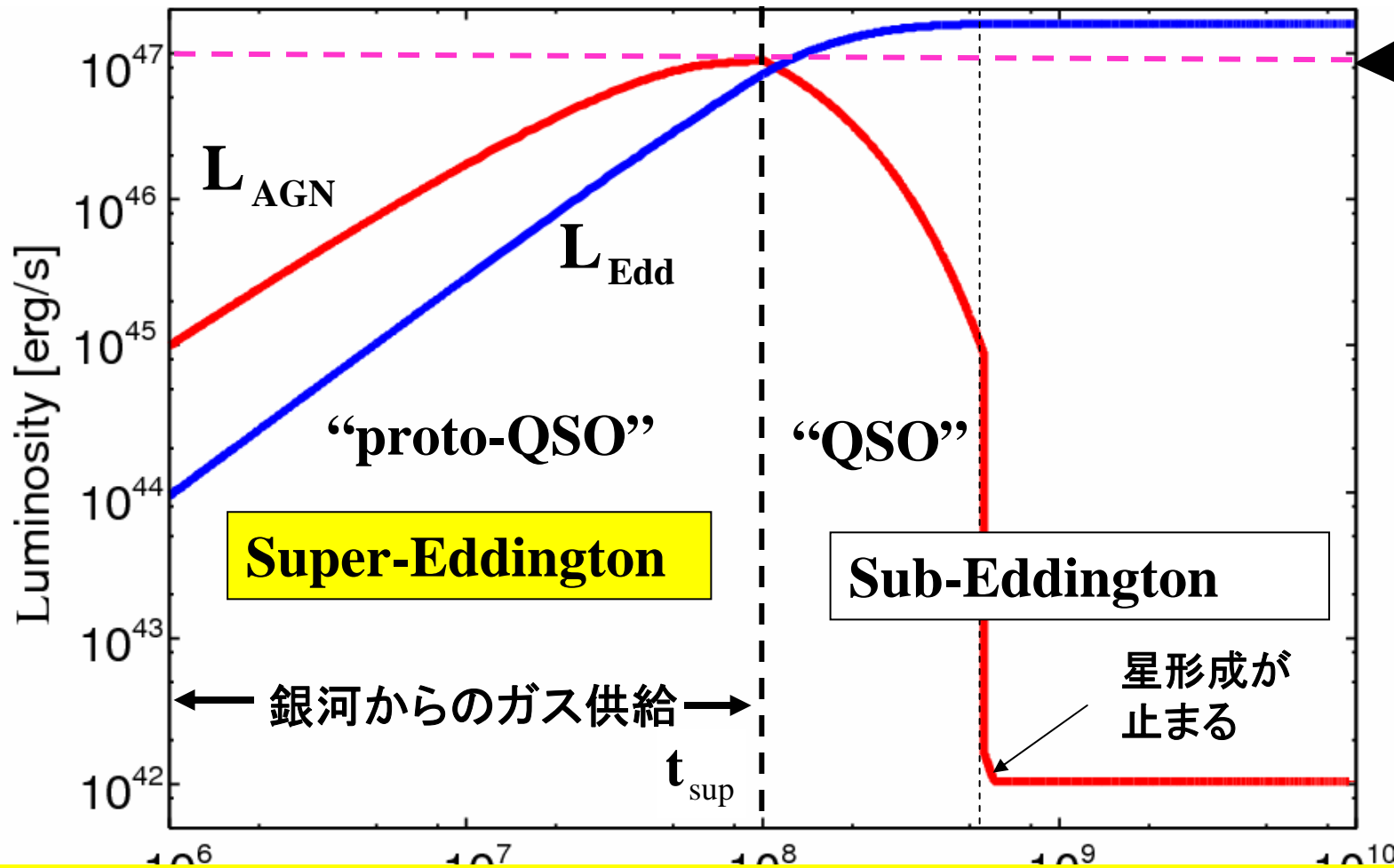
AGN光度: $L_{\text{AGN}} = f(\dot{M}_{\text{BH}}, \dot{M}_{\text{Edd}})$ *Our model*

2種類の降着円盤(標準円盤 & スリム円盤)



クェーサー光度の時間進化

$$M_{\text{sup}} = 10^{11} M_{\odot} \quad \& \quad t_{\text{sup}} = 10^8 \text{ yr} \quad \& \quad C_* = 3 \times 10^{-8} \text{ yr}^{-1}$$

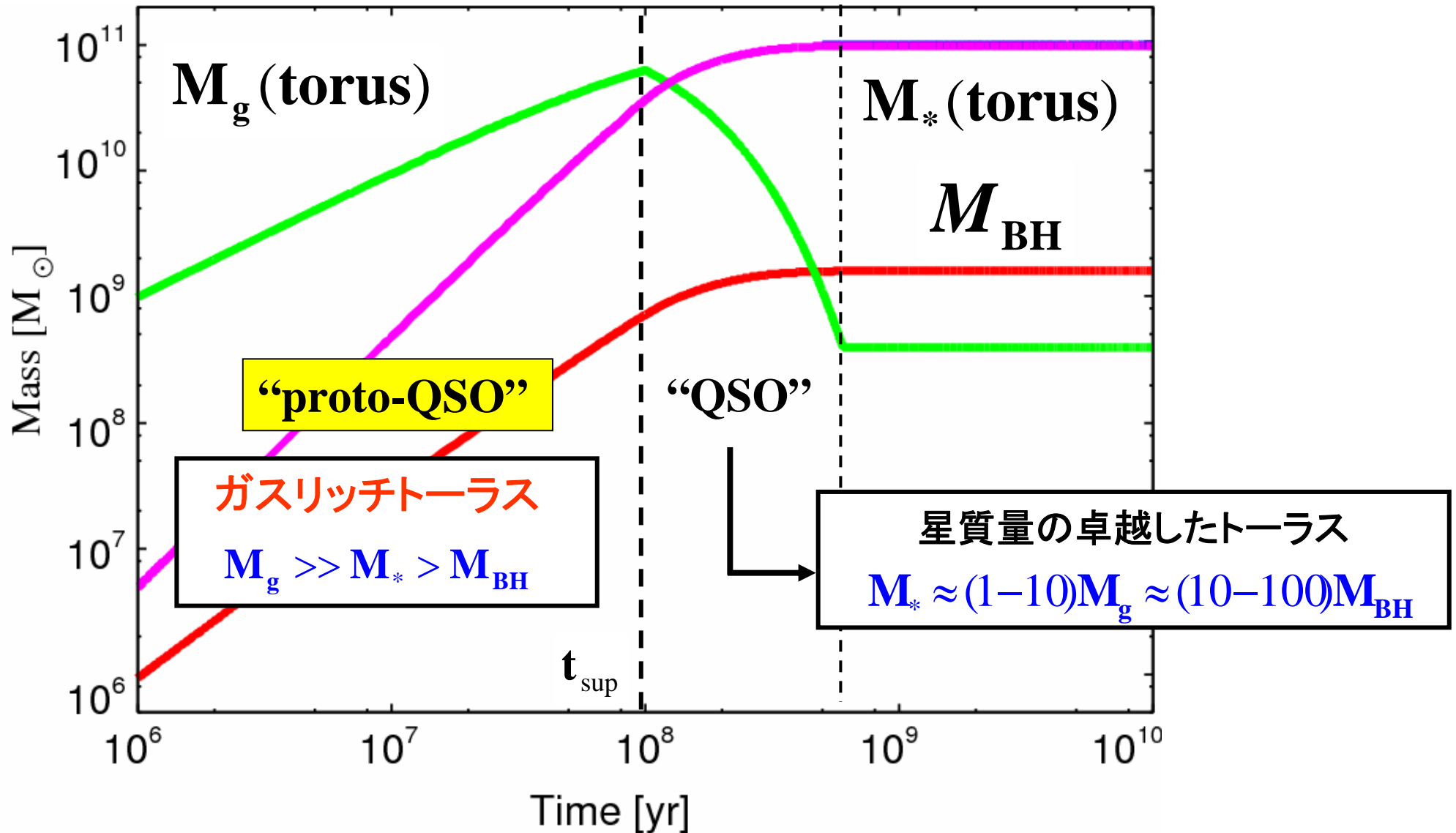


SDSS J1148(z=6.4)
 $L_{\text{AGN}} \approx 10^{14} L_{\odot}$
 (Fan et al. 2003)

暗いQSO探査:異なる進化段階 “特にBH成長段階”を調べることが可能!

BH成長中の若いクェーサー=super-Eddington天体

SMBH成長中の若いクェーサーの特徴



クェーサー周辺 (<100 pc) のガスや星質量を調べることが重要！

将来観測への期待

超巨大BH成長のモードが、ガス降着 or BH合体どちらが支配的か明らかにしたい。

(我々の)ガス降着シナリオなら、Super-Eddington成長が必要！

つまり、Super-Eddington天体はどこかにいるはず。

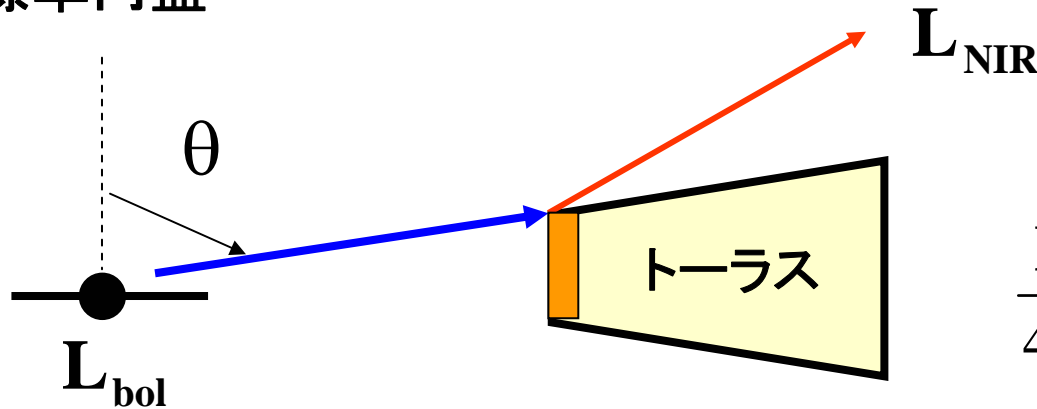
Q. どうやってsuper-Eddington天体を見つけるのか？

降着円盤のSED(X線)⇒とくに遠方($z > 2$)では難しい？

他にないか？

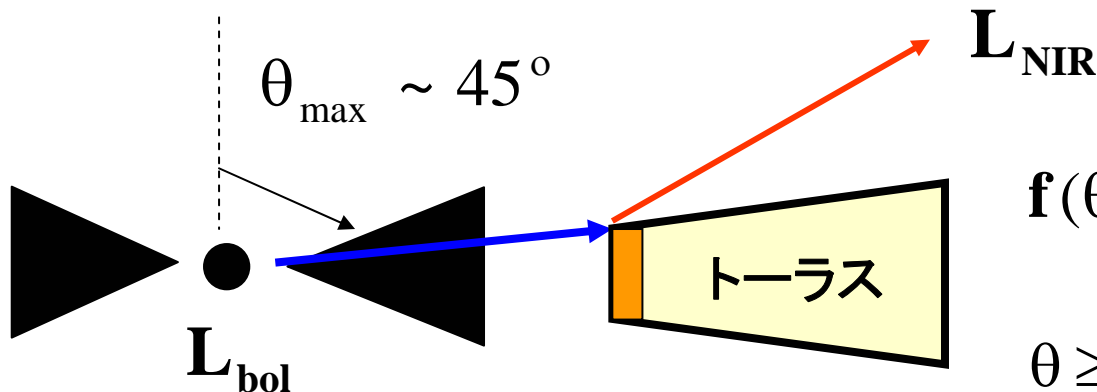
標準円盤とスリム円盤で何が違うのか？

(i) 標準円盤



$$\frac{L_{\text{bol}}}{4\pi r^2} f(\theta) : f(\theta) = \cos(\theta)$$

(ii) スリム円盤

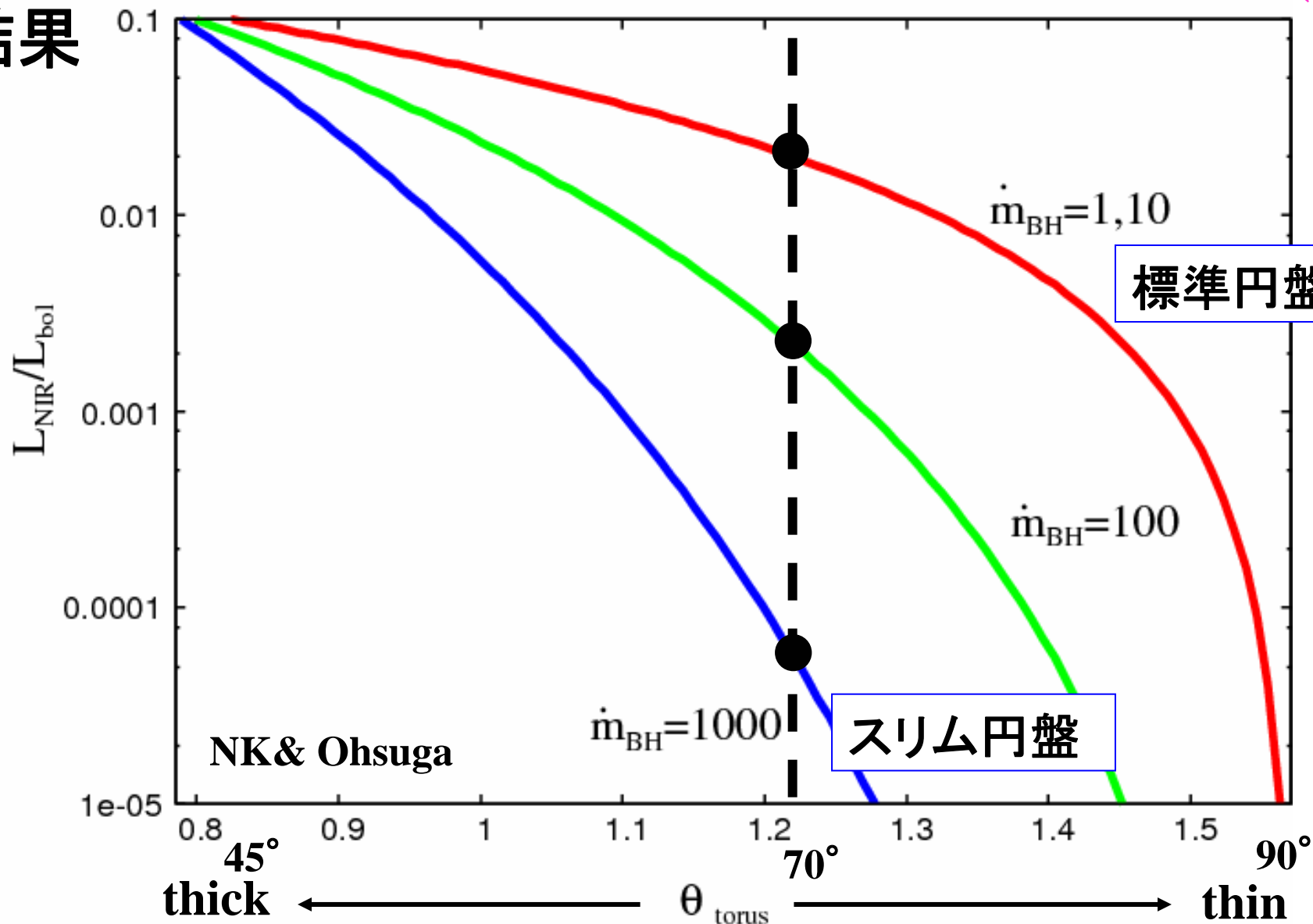


$f(\theta) = \cos(\theta)$ よりも強い角度依存性！
(Watarai+05)

$\theta \geq 45^\circ$: 内縁に届くフラックスは激減

$L_{\text{NIR}} / L_{\text{bol}}$ に大きな違いが生じるのでは？

結果



スリム円盤の場合、近赤外線光度が非常に暗くなる (given L_{bol})

Super-Eddington天体を発見するには？

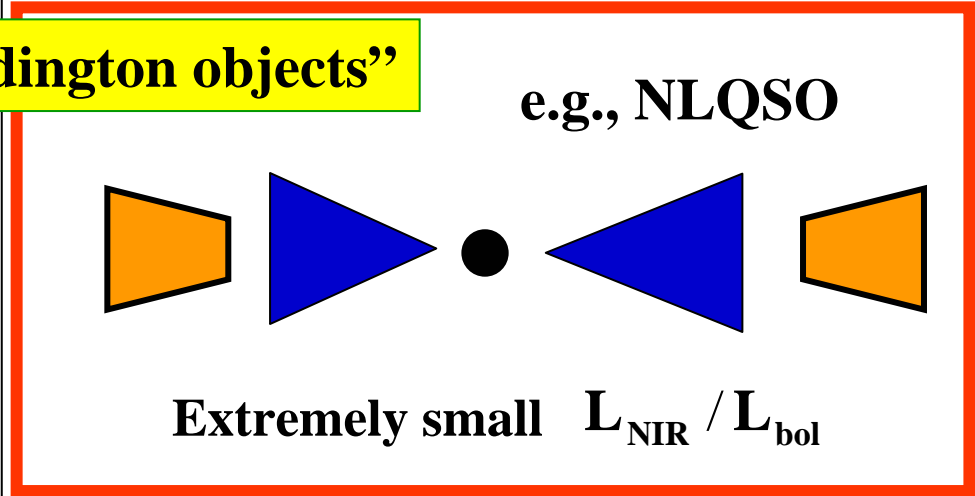
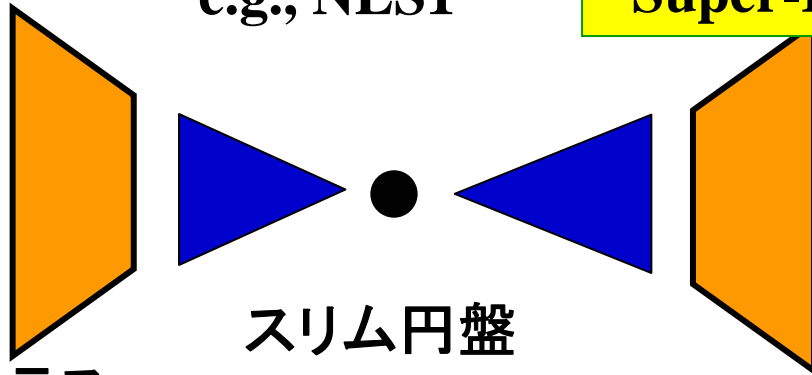
Small BH

Large BH

e.g., NLS1

“Super-Eddington objects”

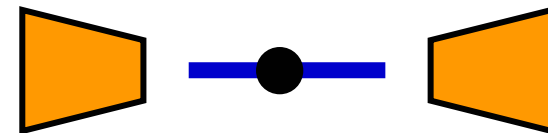
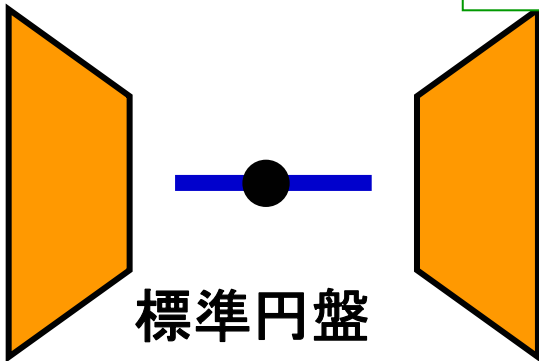
e.g., NLQSO



e.g., BLS1

“Sub-Eddington objects”

e.g., BLQSO

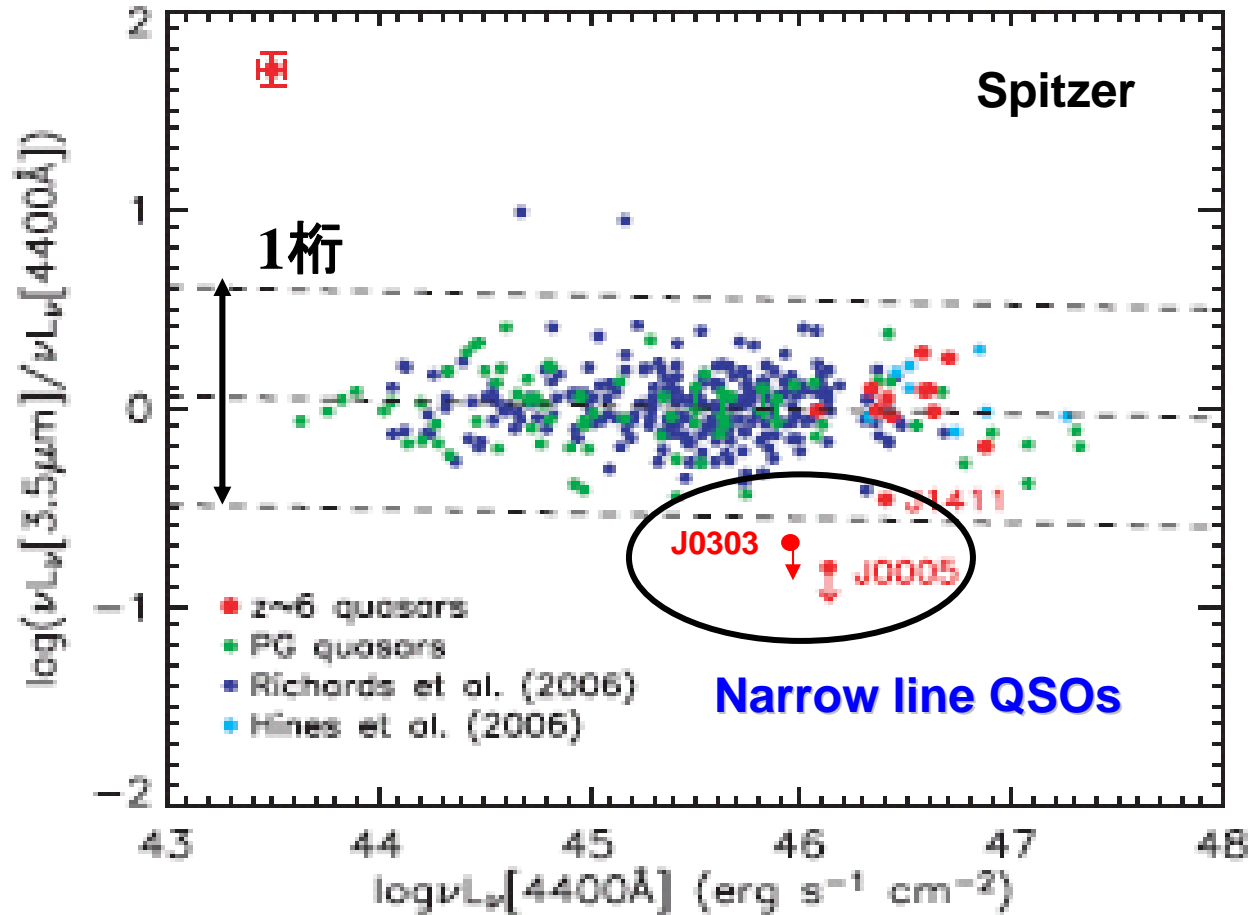


$$h/r \propto M_{\text{BH}}^{-1/8}$$

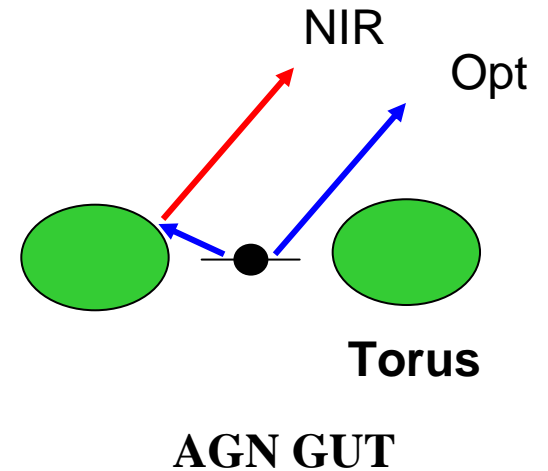
Key parameter: Eddington光度比と近赤外線光度の割合

NIR week high-z ($z \sim 6$) faint QSO

Hot dust contribution



田村さんの講演



Jiang et al. 2006, 2008

NIR fluxが非常に弱い + 1.4GHz 250GHzでも未検出(Wang +08)

この原因はよく分かっていない。But, Super-Eddington 天体の証拠では？

NK & Ohsuga in preparation

まとめ

我々は、銀河からのガス供給とそれにもなう銀河核ガス円盤の進化を考慮した「**超巨大BHと銀河核ガス円盤の共進化モデル**」を構築した。

このモデルを用いて、高赤方偏移クェーサーの形成・進化について以下のことを明らかにした。

- 超巨大BH質量は銀河から供給されるガスの総質量の**1-10%**と小さい。これは、**銀河から降着するガスの大半が星形成**に使われるためである。
⇒ **巨大な銀河に存在するべし!**
- Eddington-limited 成長では、 $z > 6$ クェーサーの形成を説明するのは困難。
⇒ **Super-Eddington成長が必要!** (ガス降着シナリオの場合)
- BH成長段階にあるクェーサーの特徴:
『**super-Eddington成長 + ガスリッチ円盤を持つ**』
- BH成長段階の天体の探査:**Eddington光度と近赤外線光度比が重要!**

HSC survey: 候補天体、(W)FMOS: Eddington 光度、JWST(SPICA): NIR 光度

ALMA: ガストーラス (<100 pc) 質量、SFR