

宇宙初期におけるブラックホールへの超臨界降着 円盤スペクトルの効果

竹尾英俊 (京都大学)

稲吉恒平(コロンビア大学), 大須賀健, 高橋博之(NAOJ), 嶺重慎(京都大学)

宇宙初期の超巨大ブラックホール(BH)形成

観測

- 宇宙初期 (宇宙年齢 ~ 0.8 Gyr, $z \sim 7$)
質量 $> 10^9 M_{\odot}$ 超巨大ブラックホール

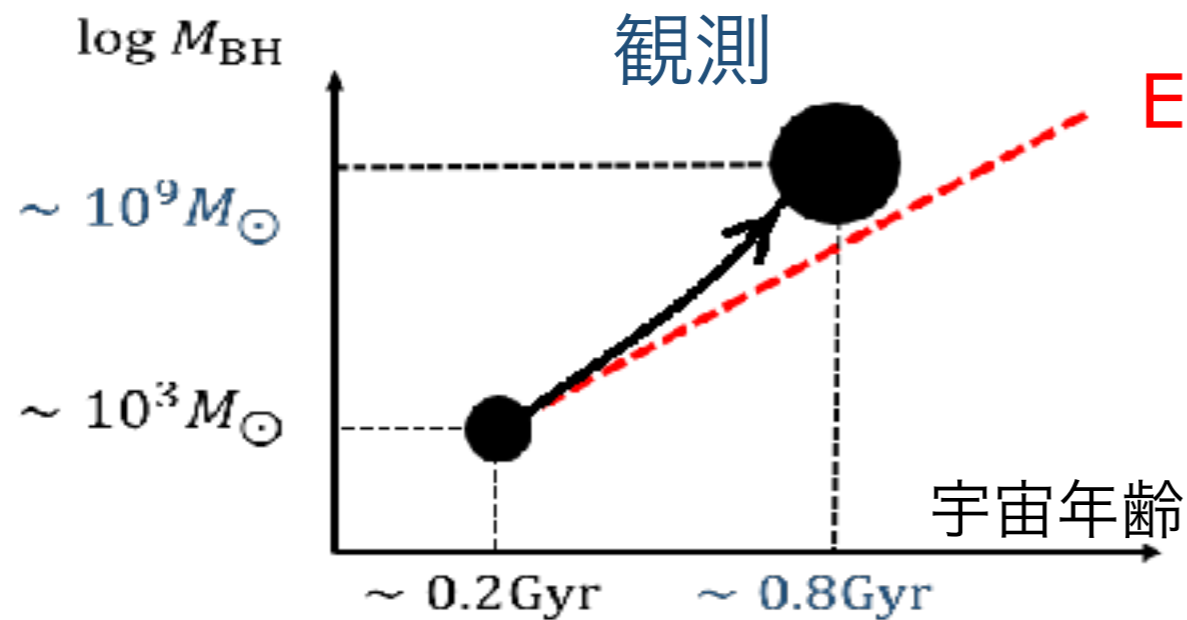
(Mortlock et al. 2011)

一つの仮説

種ブラックホール(初代星: 数十 $\sim 10^3 M_{\odot}$ など)
(宇宙年齢 ~ 0.2 Gyr, $z \sim 20$ ごろ)



周囲のガスを取り込み、急成長した可能性あり



→ 観測を説明できない
降着による
超巨大ブラックホール成長は
超臨界降着が不可欠

等方輻射(球対称降着)+超臨界

- Low mass BH : 超臨界降着は困難

ガス降着 → 円盤形成 → 輻射



高温・電離領域が形成される輻射による降着抑制

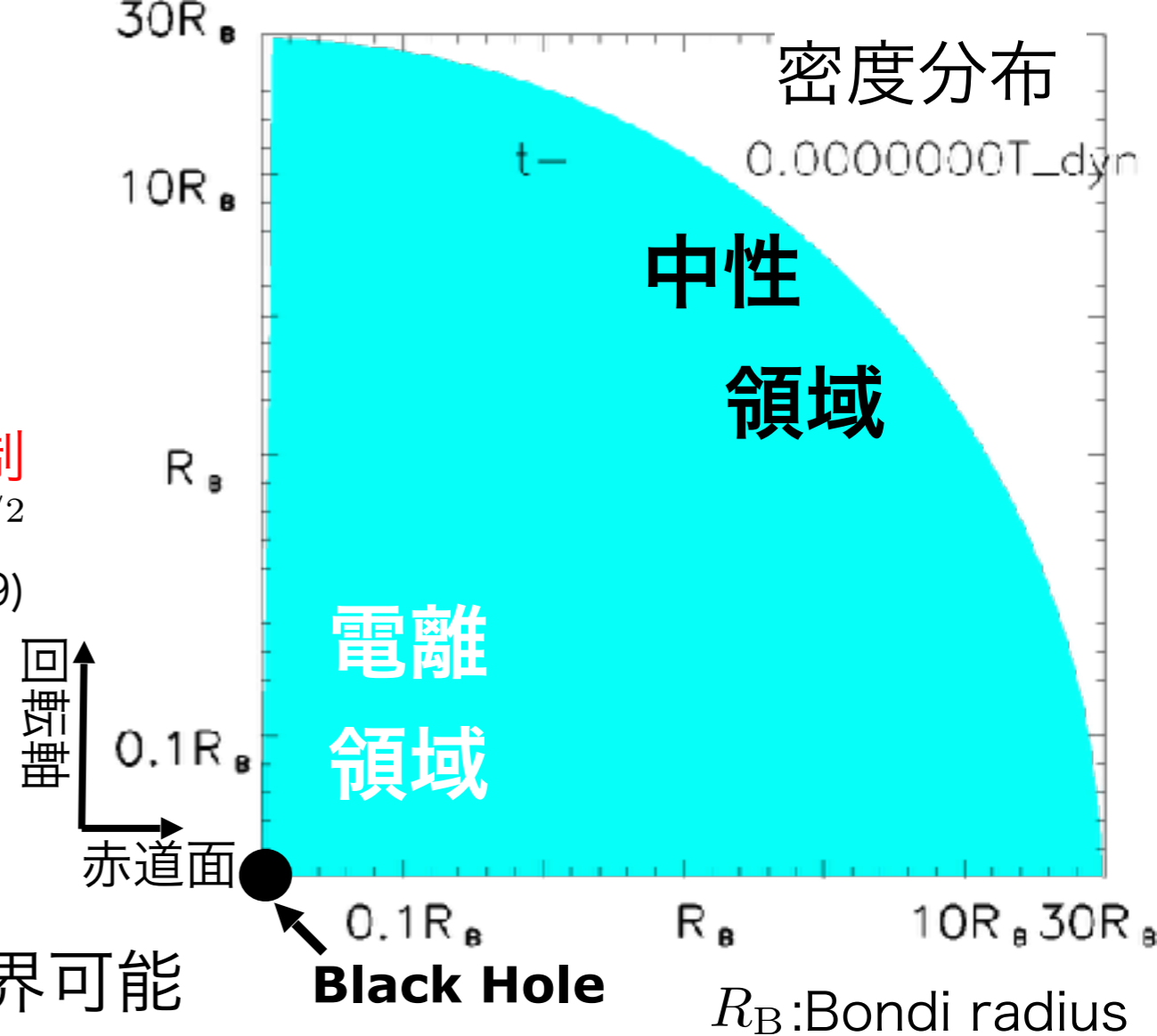
電離加熱 → 高温電離ガス $\dot{M} \propto M_{\text{BH}}^2 n_{\infty} T_{\infty}^{-3/2}$
(e.g., Milosavljevic et al. 2009)

Sub-Eddington accretion

$$\dot{M} = \min(1\% \dot{M}_{\text{B}}, \dot{M}_{\text{Edd}}) \quad (\dot{M}_{\text{Edd}} \equiv L_{\text{Edd}}/c^2)$$

(e.g., Park & Ricotti 2011)

- High mass BH $M_{\text{BH}} \gtrsim 10^4 M_{\odot}$ 超臨界可能



Bondi半径 $R_{\text{B}} = GM_{\text{BH}}/c_{\infty}^{3/2} >$ 電離半径 R_{HII}

$$M_{\text{BH}} \gtrsim 10^4 M_{\odot} \left(\frac{n_{\infty}}{10^5 \text{ cm}^{-3}} \right)^{-1} \left(\frac{T_{\infty}}{10^4 \text{ K}} \right)^{3/2}$$

Inayoshi et al. 2016

-> 電離領域が潰れる -> 超臨界降着実現(等温Bondi降着)

Bondi 半径 : $R_{\text{B}} \propto M_{\text{BH}}$ 、 電離半径 : $R_{\text{HII}} \propto M_{\text{BH}}^{1/3} n_{\infty}^{-2/3}$

-> $R_{\text{HII}}/R_{\text{B}} \propto (M_{\text{BH}} n_{\infty})^{-2/3}$

-> $M_{\text{BH}} \times n_{\infty} = \text{const.}$ で降着解がスケール

● 研究1：非等方輻射中でのガス降着
(Takeo+18, MNRAS accepted)

ブラックホールはガス雲に埋もれている

$$n_{\infty} = 10^5 \text{ cm}^{-3}, T_{\infty} = 10^4 \text{ K}$$

ブラックホール質量： $M_{\text{BH}} = 10^3 M_{\odot}$

計算領域： $r_{\text{min}} \leq r \leq r_{\text{max}}$

$$r_{\text{min}} \sim 10^{-2} R_{\text{B}}, r_{\text{max}} \sim 10 R_{\text{B}}$$

輻射フラックスの角度依存性@inner boundary

$$F(r = r_{\text{min}}, \theta) = \frac{(N + 1)L}{4\pi r_{\text{min}}^2} \cos^N \theta$$

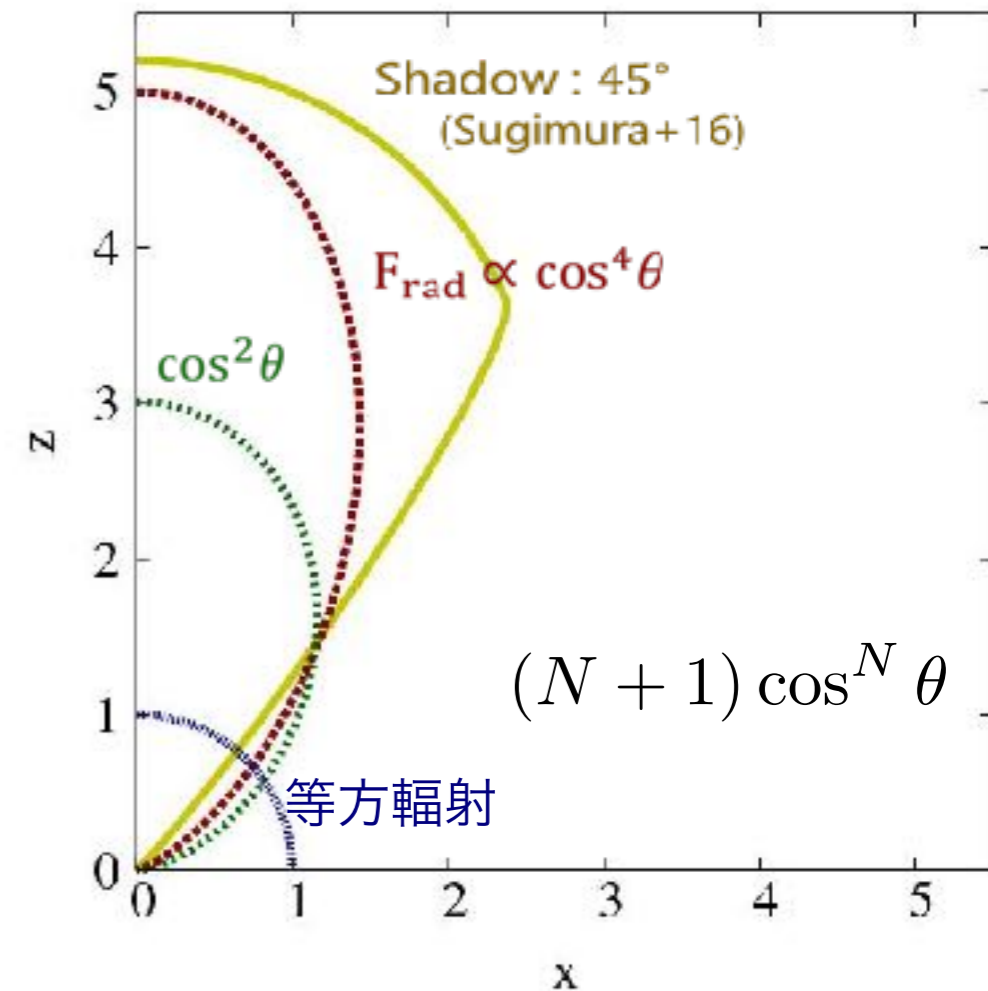
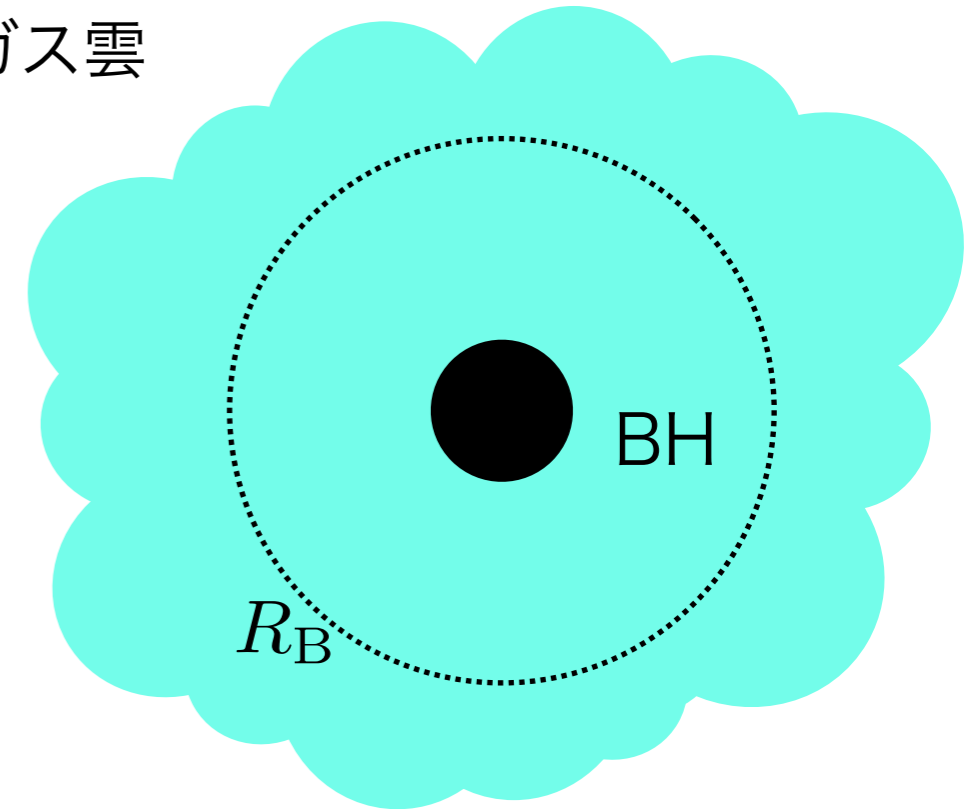
Shadowなし

輻射効率： slim disk model

(Watarai et al. 2000)

$$\frac{L}{L_{\text{Edd}}} = \begin{cases} 2 [1 + \ln(\dot{m}/20)] & \text{for } \dot{m} \geq 20, \\ \dot{m}/10 & \text{for } \dot{m} < 20, \end{cases}$$

ガス雲



非等方輻射中の超臨界降着

- 小質量ブラックホール

$$M_{\text{BH}} = 10^3 M_{\odot} + \text{非等方輻射}$$

cf. Sugimura+2017

- 赤道面方向から、
中性ガスが流入

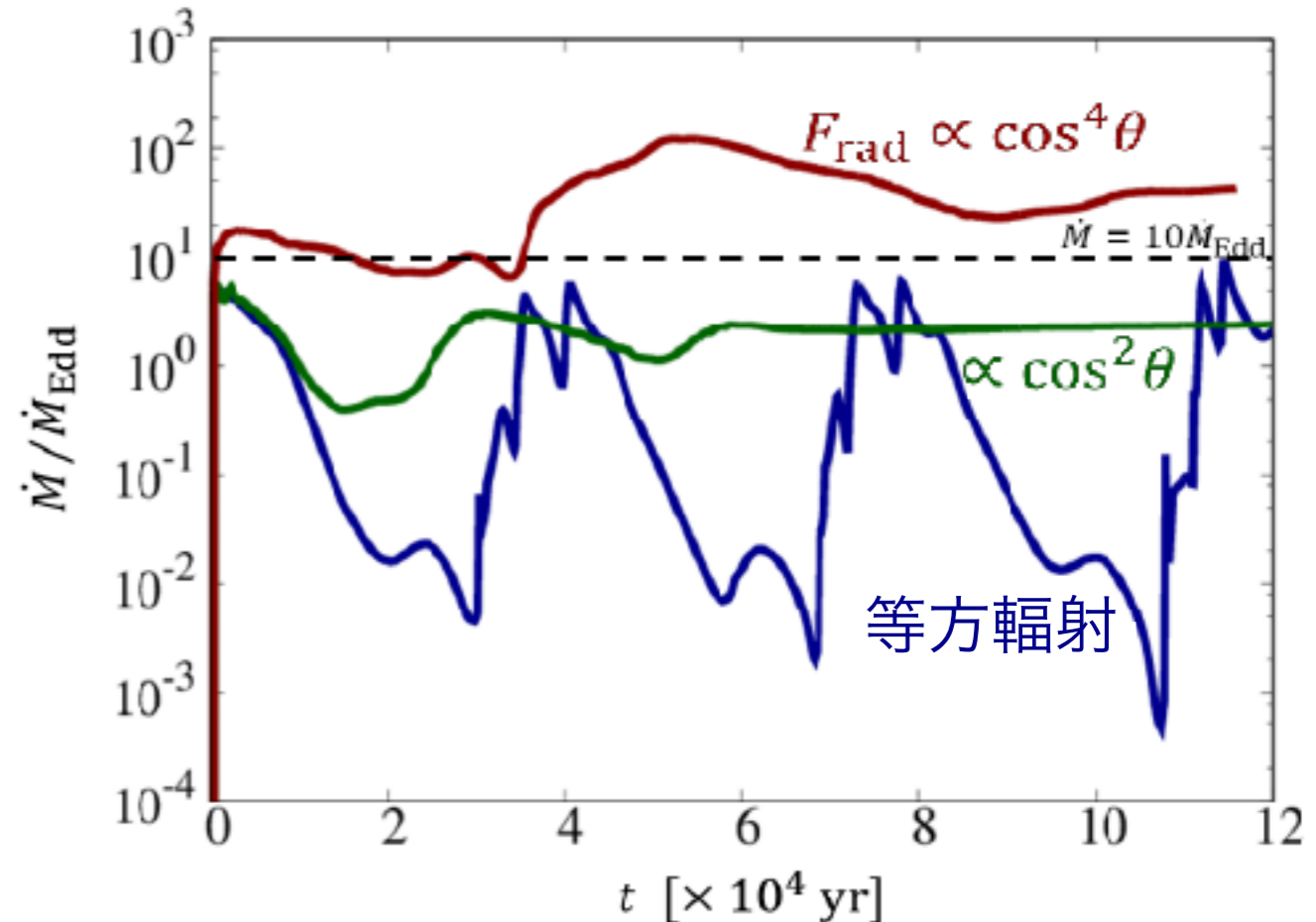
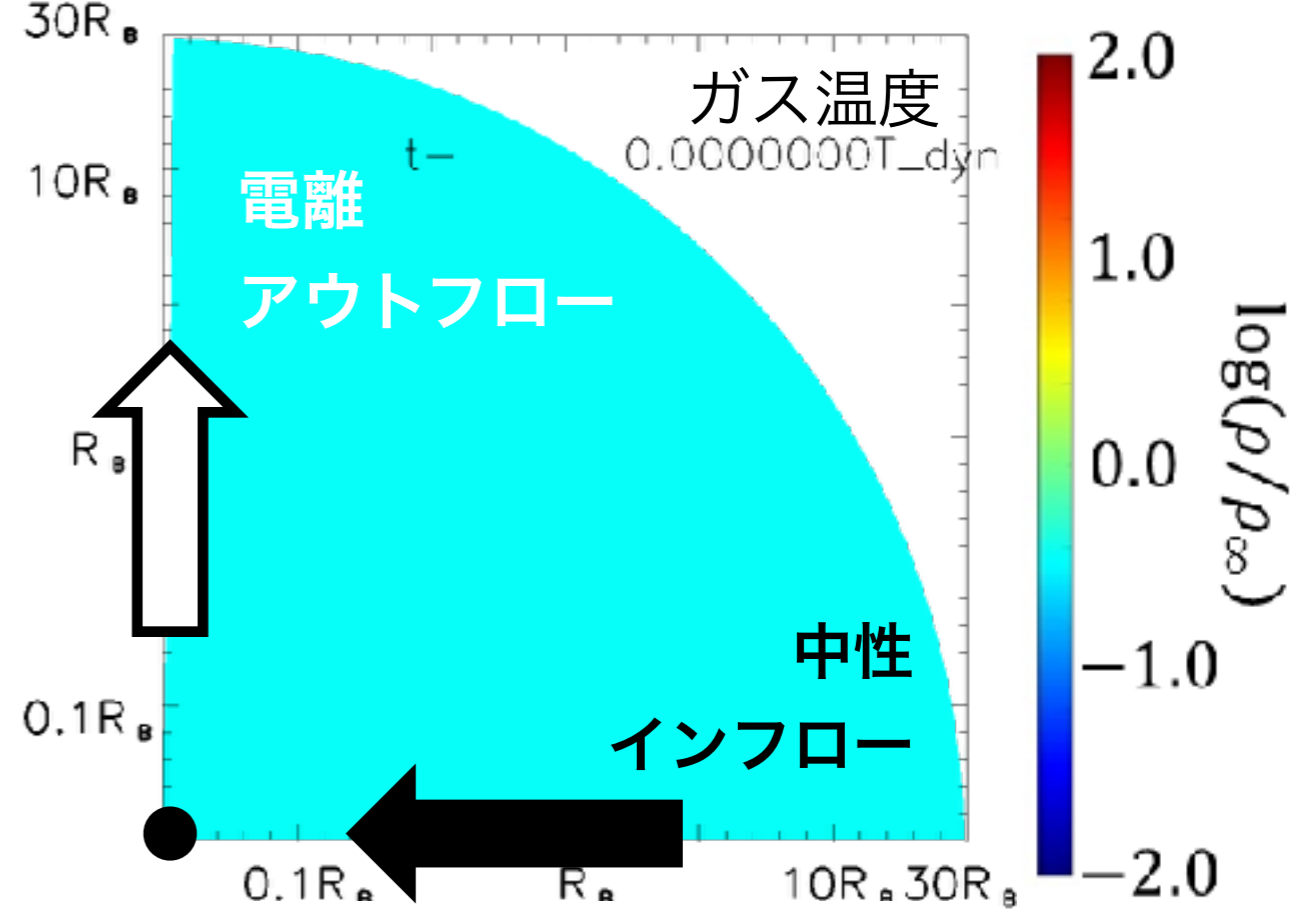
$$\dot{M}_{\text{inflow}} \sim \dot{M}_{\text{B}} \times (\Omega_{\text{HI}}/4\pi)$$

Ω_{HI} : 中性領域の立体角

$$\sim 60 \dot{M}_{\text{Edd}} \quad (F_{\text{rad}} \propto \cos^4 \theta)$$

-> 超臨界降着の実現

- 非等方性が大きいほど、
降着率は増大。

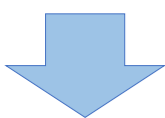


● High mass BH ($M_{\text{BH}} = 5 \times 10^5 M_{\odot}$)

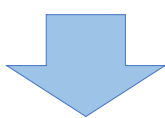
Transition to wholly neutral phase

Early stage

中性インフロー
& 電離アウトフロー



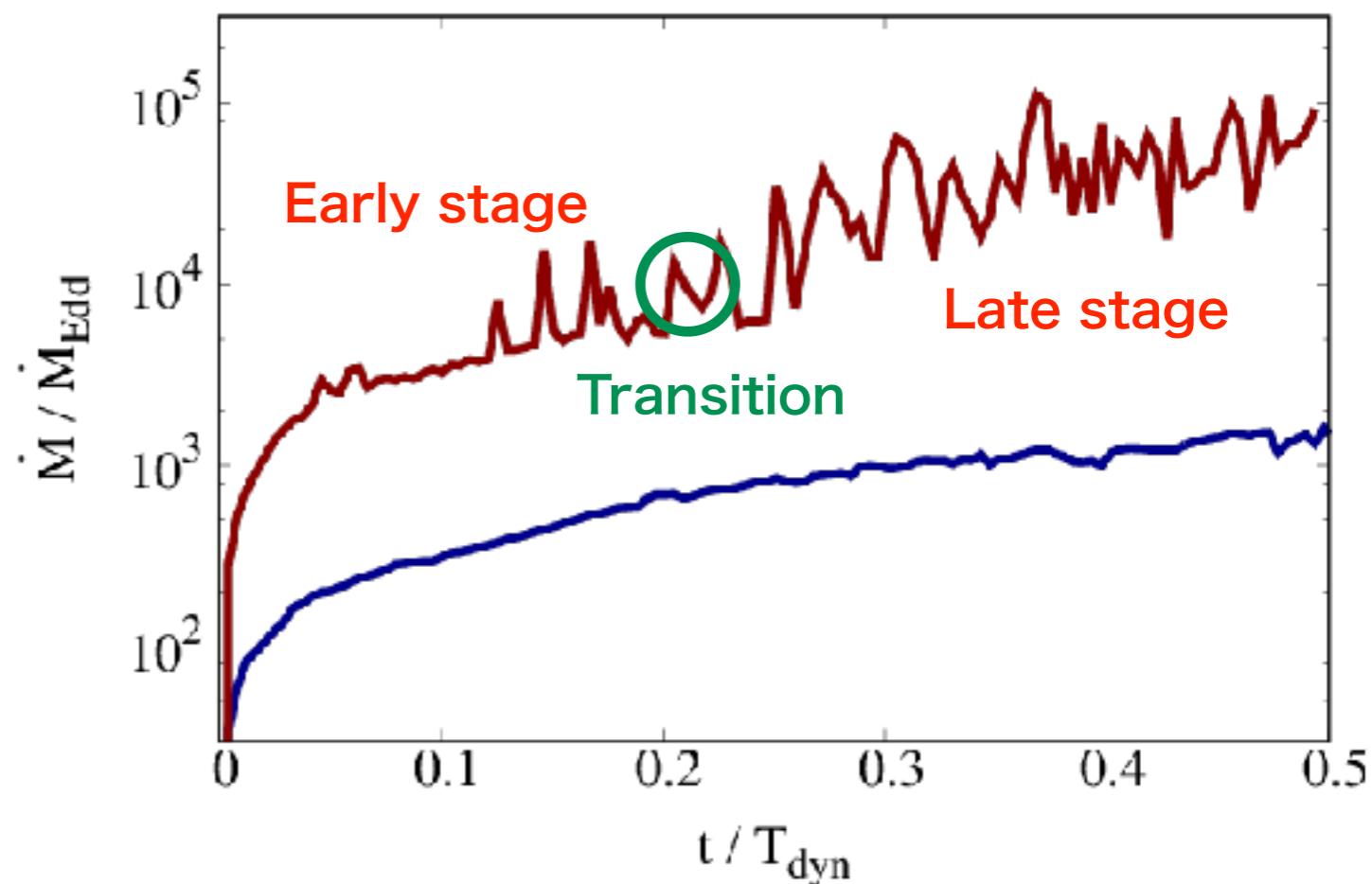
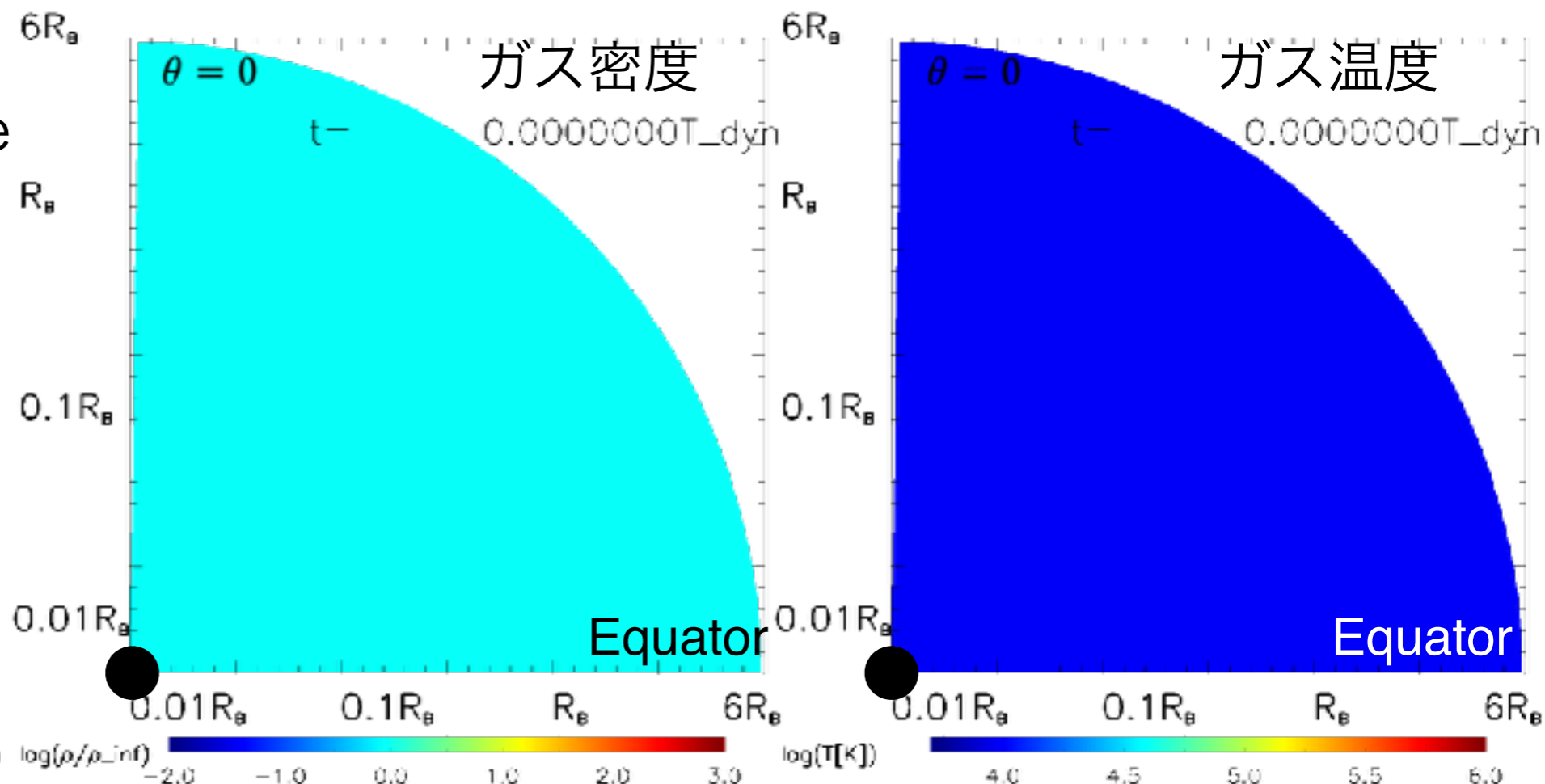
中性ガスが
輻射源を覆う



Late stage

電離光子は全て中性ガスに吸収される。

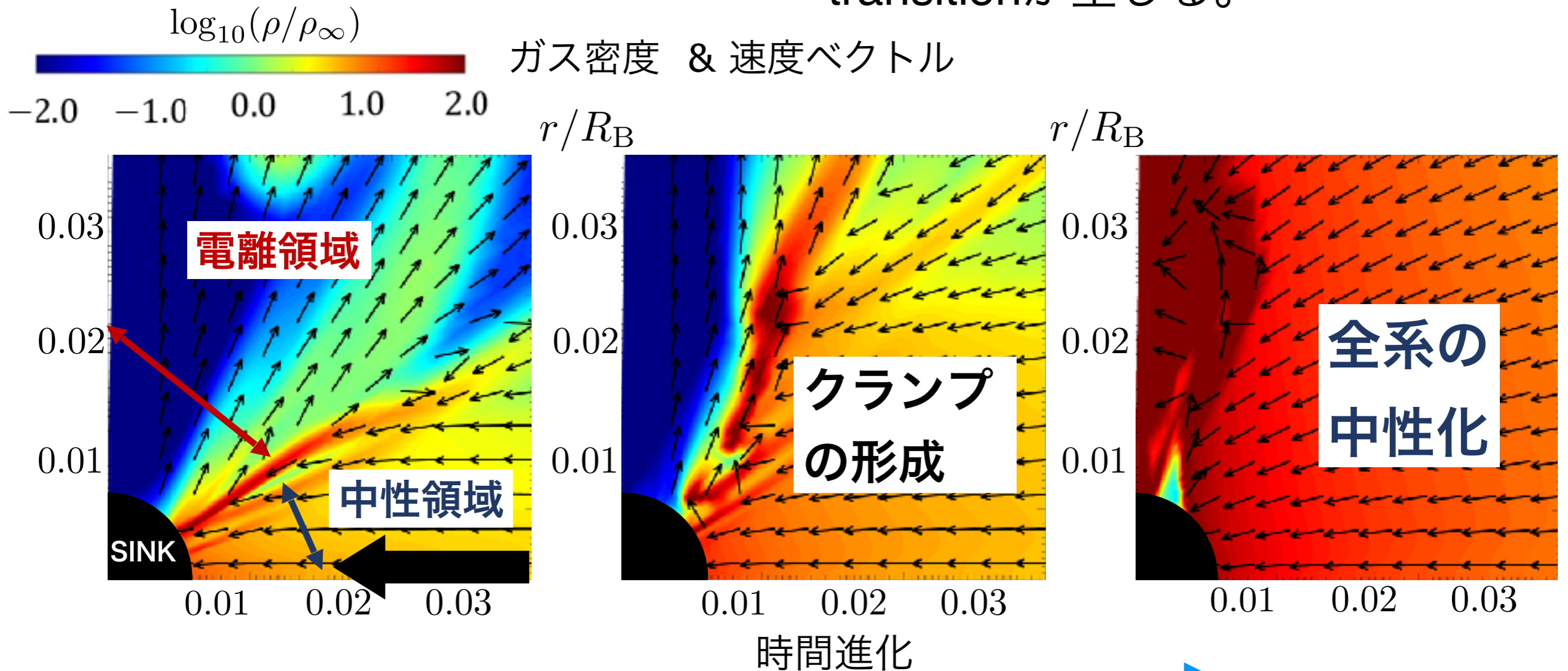
-> 全系の中性化



Transition に至る過程

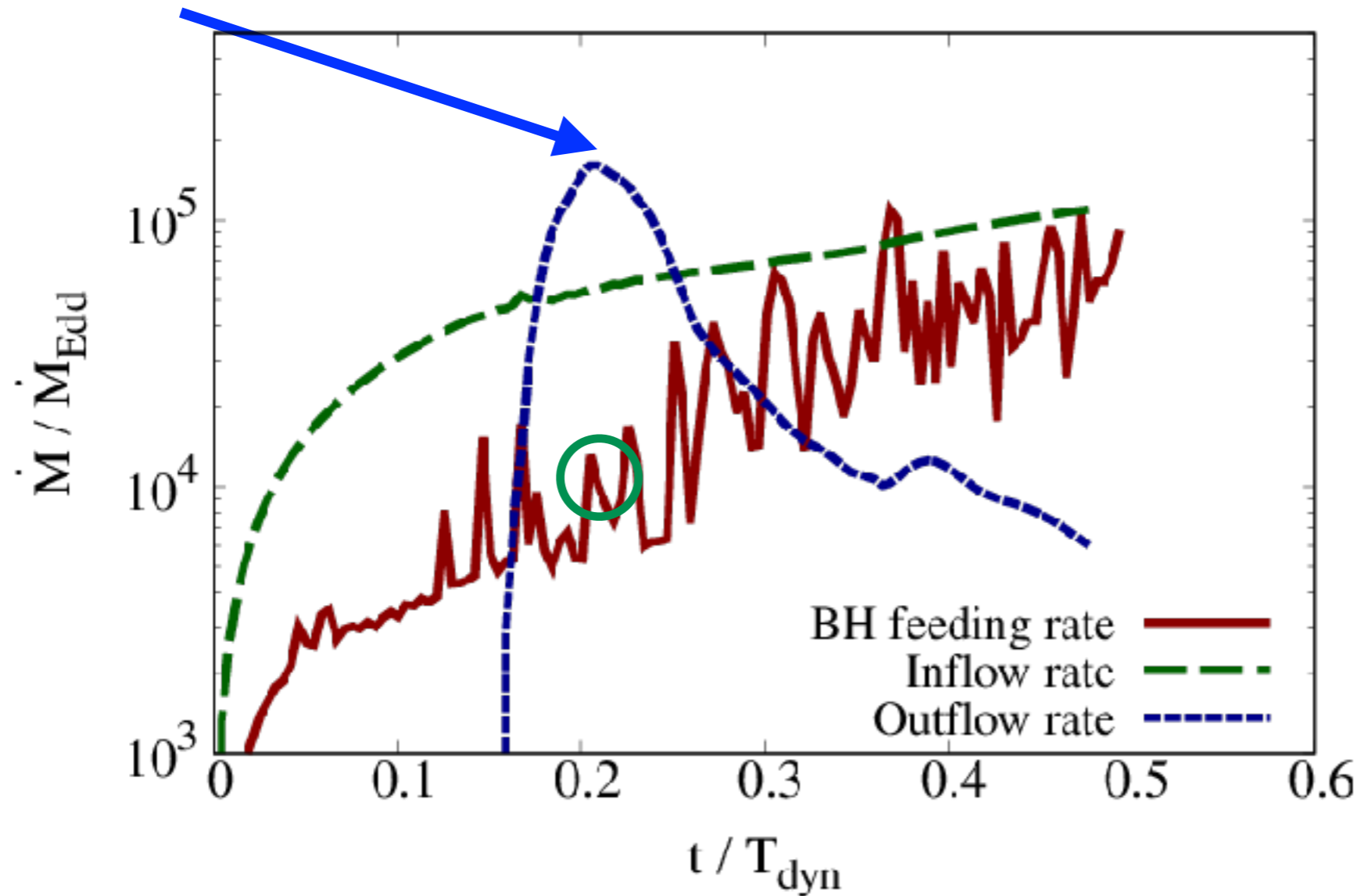
中性領域におけるnon-radial方向のガス運動により

transitionが生じる。



- ① 中性インフローが電離領域との境界に衝突
- ② 中性ガスがクランプを形成
-> 中心に落下
- ③ 中性ガスが輻射源を覆う。
電離光子は吸収

中性アウトフローの発生 $\dot{M}_{\text{outflow}} \sim 10\% \dot{M}_{\text{inflow}} \sim 10 M_{\odot} \text{yr}^{-1}$



BH feeding rate,
インフロー・
アウトフローレート
(@Bondi半径)
の時間進化

中性アウトフローの持続性

- inflowラム圧と輻射圧の比較から、inflowは次のとき持続
 $L/L_{\text{Edd}} \lesssim 116 (M_{\text{BH}} / (5 \times 10^5 M_{\odot}))^{3/2} (n_{\infty} / 10^5 \text{ cm}^{-3}) (r_{\star} / 10^{18} \text{ cm})^{-1/2}$

一方、最も輻射の強い回転軸方向 $L/L_{\text{Edd}} \approx 106$

(Sakurai et al. 2016)

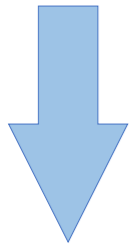
→dynamical time 程度で、アウトフローは消滅する可能性。

● 研究2：円盤スペクトルの効果

先行研究：

single-power-law spectrum

$$L_\nu \propto \nu^{-1.5}$$



円盤スペクトル

標準円盤 : $L_\nu \propto \nu^{1/3}$

スリム円盤 : $L_\nu \propto \nu^{-1}$

何が変わるか？

-> 輻射feedbackの強さ

-> 水素のbound-free断面積 $\sigma_{\text{H,bf}} \propto \nu^{-3}$

-> スペクトルがhardになるとfeedbackが効きにくい。

円盤温度 : $T_{\text{eff}} \propto M_{\text{BH}}^{-1/4} (r/r_g)^{-1/2}$

-> small BH seedほど、スペクトルがhardで、feedbackを受けにくい。

まとめ

主題

ブラックホールへの超臨界降着

球対称： $M_{\text{BH}} \gtrsim 10^4 M_{\odot}$ 、超臨界降着(電離領域は消滅、全方位でインフロー)

with $n_{\infty} = 10^5 \text{ cm}^{-3}$, $T_{\infty} = 10^4 \text{ K}$

結果

- 研究1：非等方輻射の効果

$M_{\text{BH}} = 10^3 M_{\odot}$ でも超臨界降着が実現

大質量ブラックホール($M_{\text{BH}} = 5 \times 10^5 M_{\odot}$)における電離領域の消滅

Warm neutral outflowの発生 $\dot{M}_{\text{outflow}} \sim 10\% \dot{M}_{\text{inflow}}$

- 研究2