



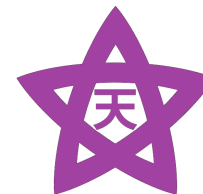
# 非等方輻射フィードバックの下での 初代星起源BHのガス降着進化

arXiv:1610.03482



TOHOKU  
UNIVERSITY

杉村 和幸 (東北大)



Theoretical Astrophysics  
Tohoku University

共同研究者: 細川隆史 (京都大)  
矢島秀伸 (東北大)  
大向一行 (東北大)



# INTRODUCTION

# high-z 超巨大BHの起源



quasar image  
(Credit: ESO/M. Kornmesser)

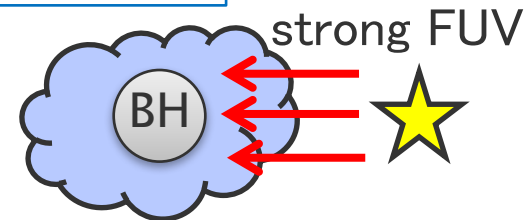
## high-z 超巨大BH

- $z \sim 7$  (ビッグバンから10億年後) に  $10^9 M_{\text{sol}}$  のBHが存在  
(e.g., Mortlock + 2011)
- 他にも100コほど  $\rightarrow$  数密度  $\sim 1$  コ/Gpc<sup>3</sup>  
(e.g., Fan + 2001)

## 形成シナリオ

- Direct collapse BH ( $M_{\text{seed}} \sim 10^5 M_{\text{sol}}$ )  
成長時間 ○ 数密度 △
- Pop III remnant BH ( $M_{\text{seed}} \sim 10^2 M_{\text{sol}}$ )  
成長時間 △ 数密度 ○

Direct collapse



atomic-cooling halo

Pop III formation



minihalo

Pop III remnant BHは急成長できるか？

# Pop III remnant BHの降着効率

## □ 中心輻射が等方的な場合

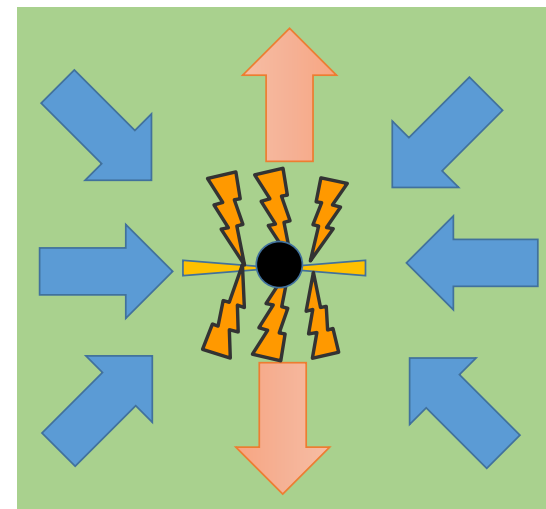
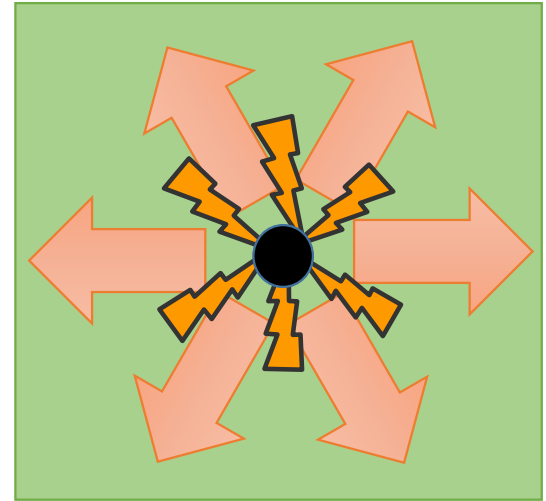
(Park&Ricotti 11, Milosavljevic+ 09)

- 輻射フィードバックが全方向に効く
- フィードバック無しの際の降着率 (Bondi降着率) の1/100 以下に
- 高密度ガス中で電離光子の遮蔽によりフィードバックが効かなくなる場合も

(Inayoshi+ 15)

## □ 中心輻射が非等方的な場合

- フィードバックが効く方向と降着が進む方向が分かれる？
- 降着率は上がる？





# METHOD

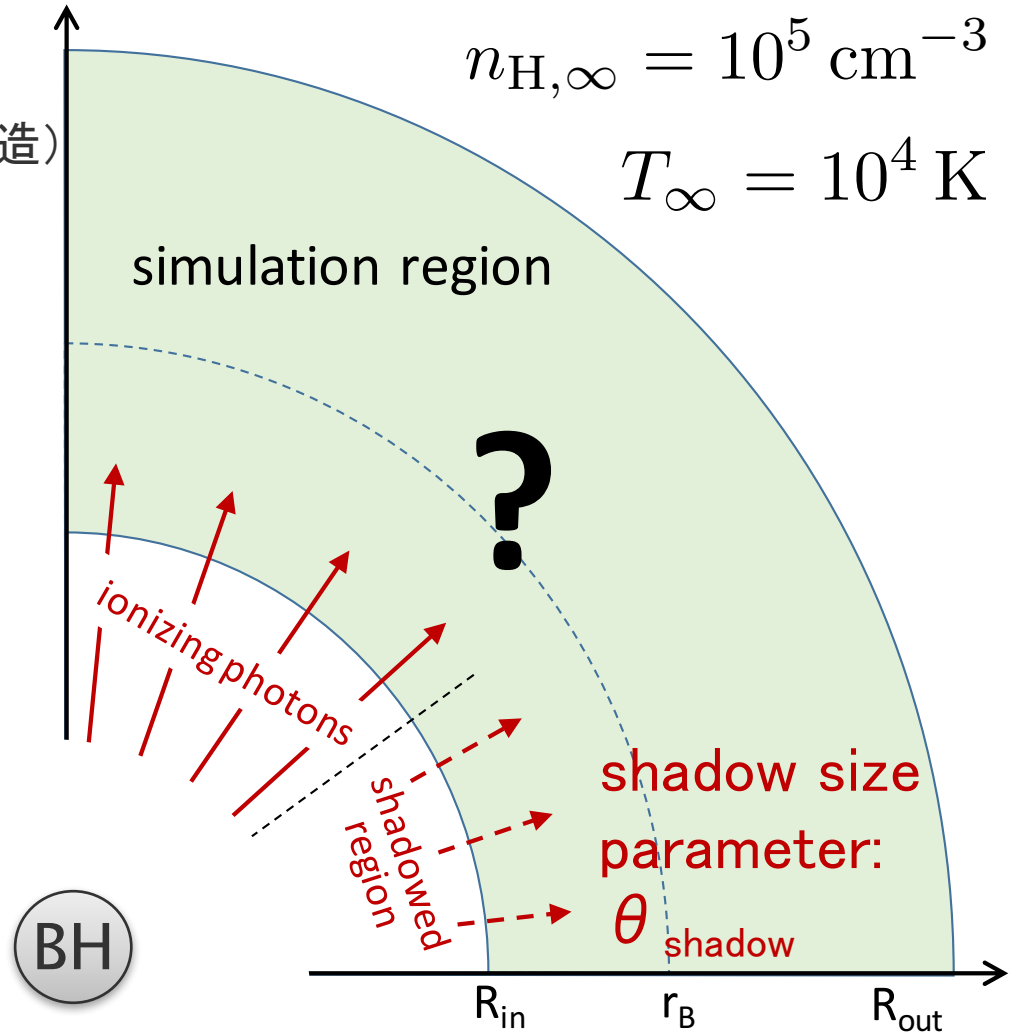
# 計算手法・設定

(Hosokawa+ 2015のコードを改造)

- PLUTO3.0  
2D RHD (hllc)
- $N_r \times N_\theta = 512 \times 144$
- 始原ガスの化学・熱過程  
H, H+, He, He+, He++, e
- 輻射輸送  
r方向の ray tracing  
多波長計算 (128 bins)
- BH重力
- Subgrid radiation model  
輻射効率 (watarai+ 00)

**角度依存性**

(あとで説明)



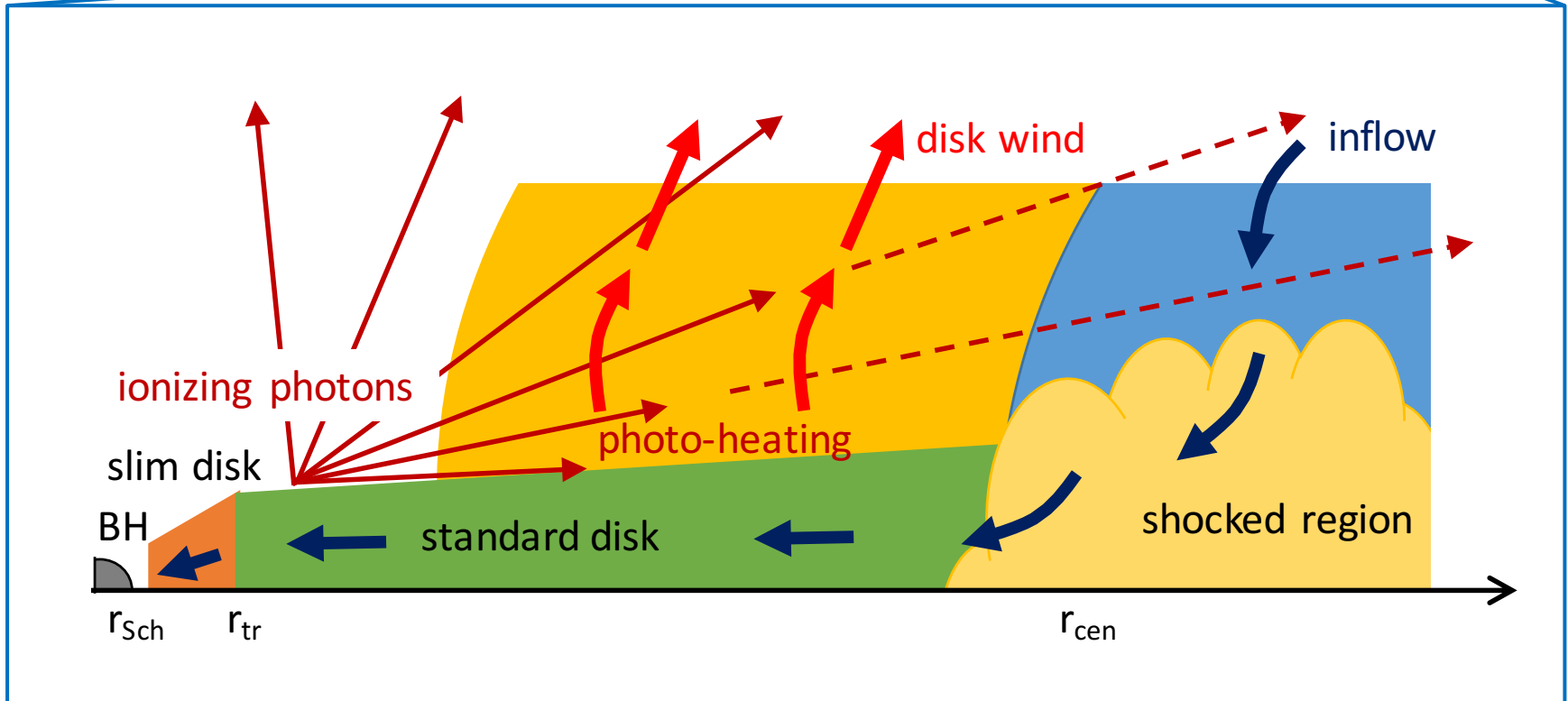
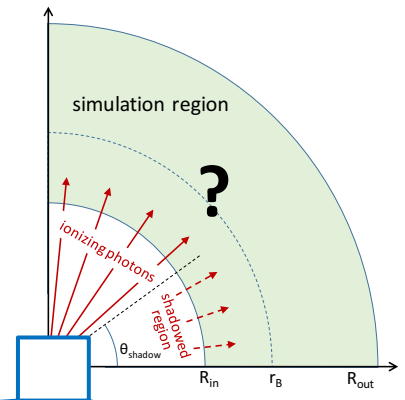
$$M_{\text{BH}} = 10^3 M_\odot$$

( $\sim$  Pop III IMFの最大質量; Hirano+ 15)

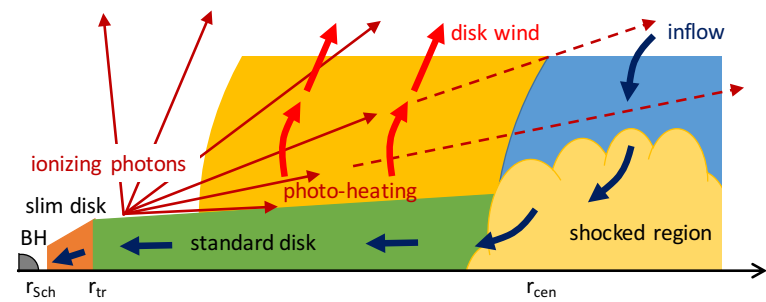
$\sim 10^9 r_{\text{Sch}}$

# 中心放射のイメージ図

- 高温な内側領域から電離光子が放出
- 外側で遮蔽されて陰を形成



# 中心輻射の角度依存性のモデル



- 内側境界でのフラックス

$$f = \frac{L}{4\pi R_{\text{in}}^2} \mathcal{F}(\theta)$$

- 角度依存性  
= (円盤輻射) × (陰の効果)

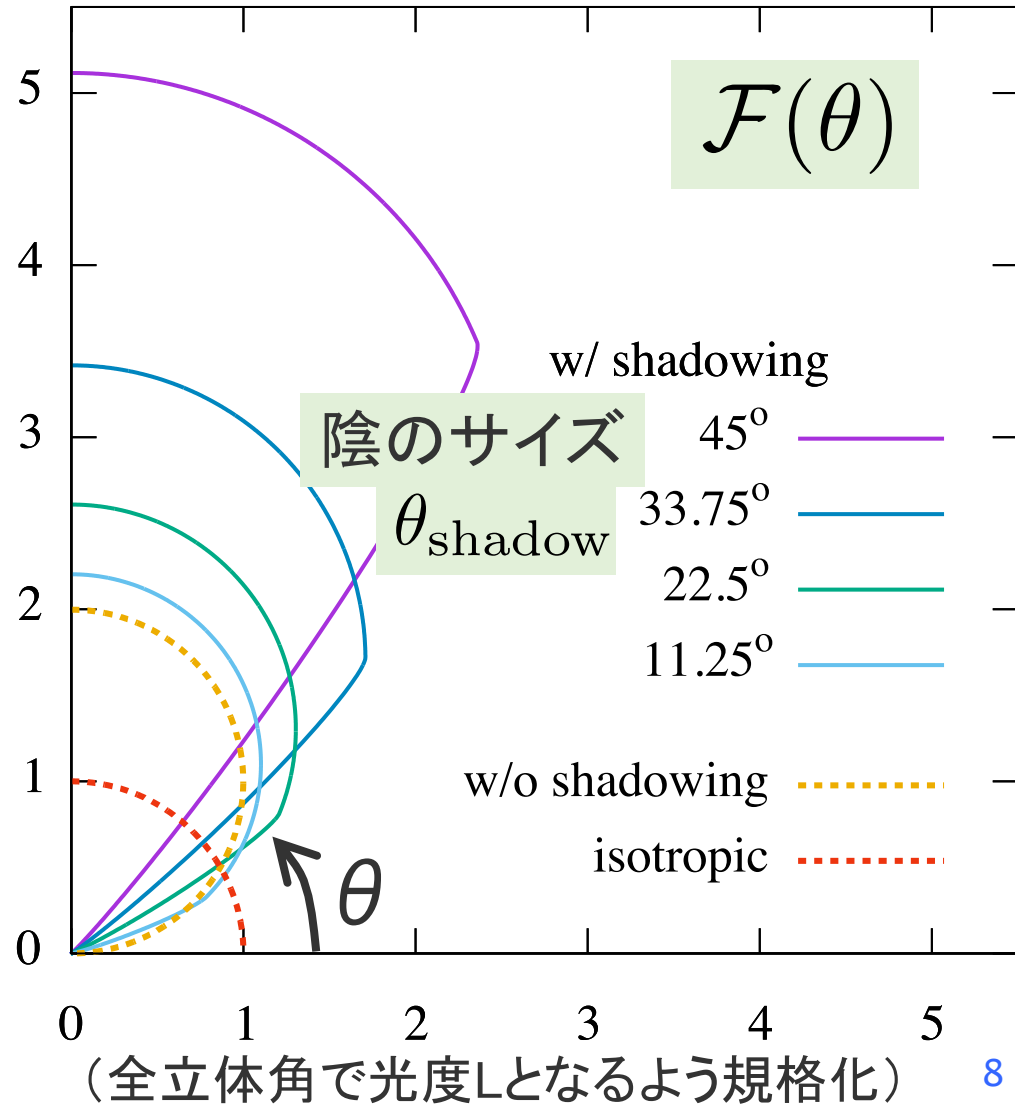
$$\mathcal{F}(\theta) = f_{\text{disk}}(\theta) f_{\text{shadow}}(\theta)$$

- 薄い円盤からの輻射

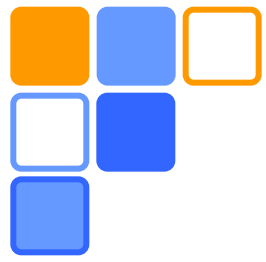
$$f_{\text{disk}}(\theta) = \sin \theta$$

- 陰の効果

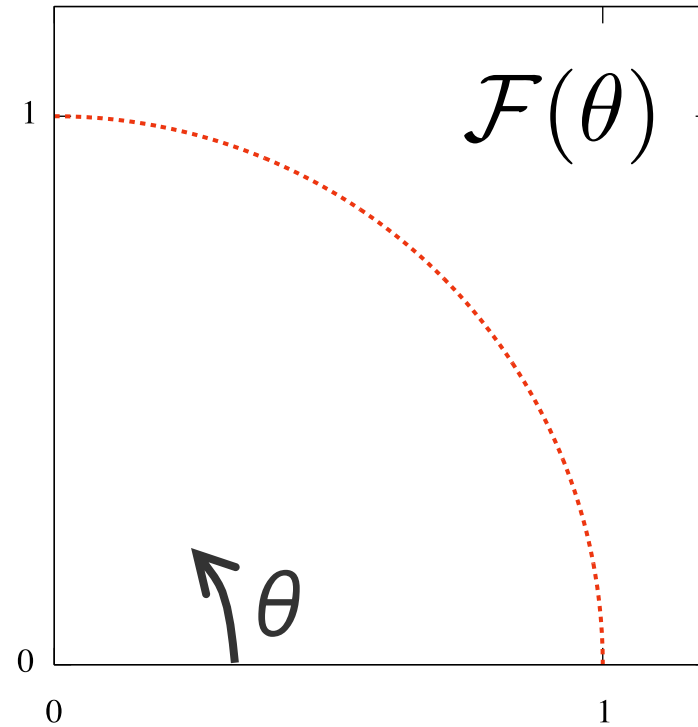
$$f_{\text{shadow}}(\theta) \text{ (右図参照)}$$







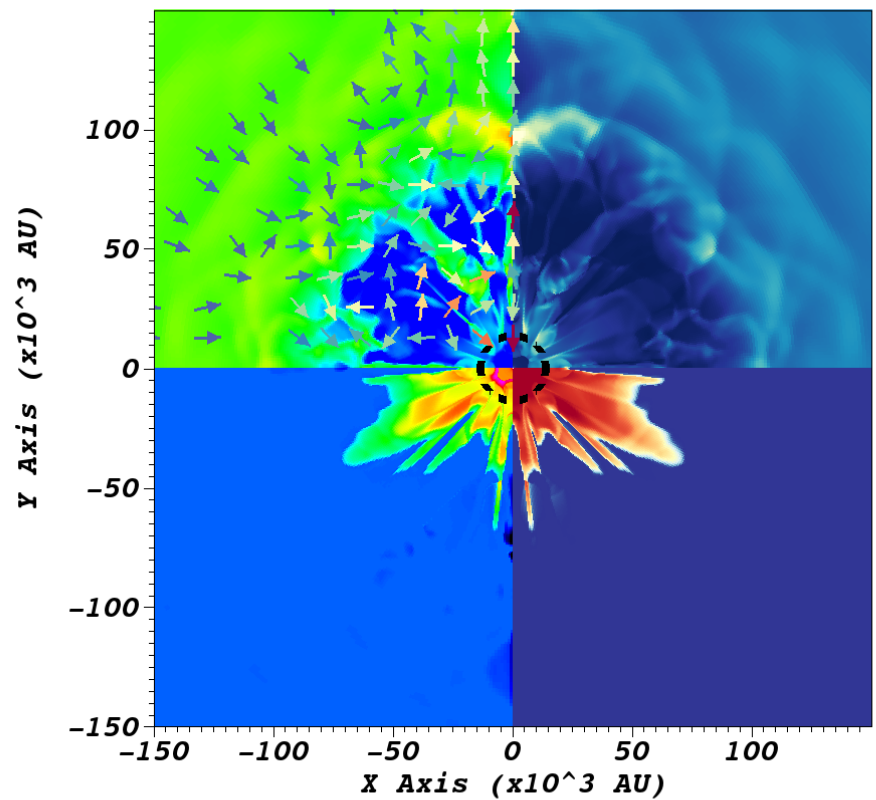
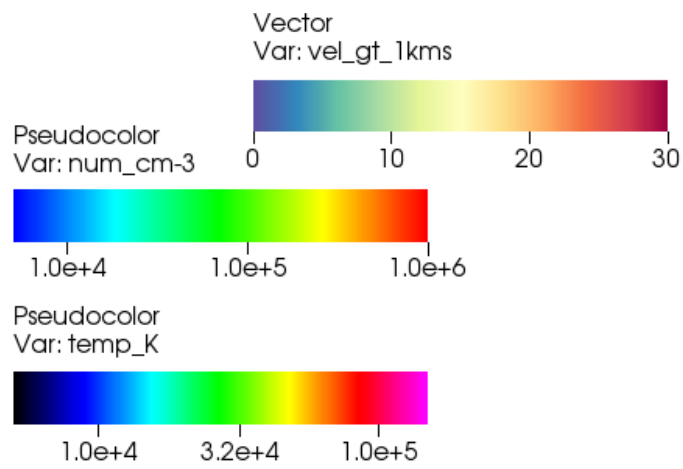
# RESULTS



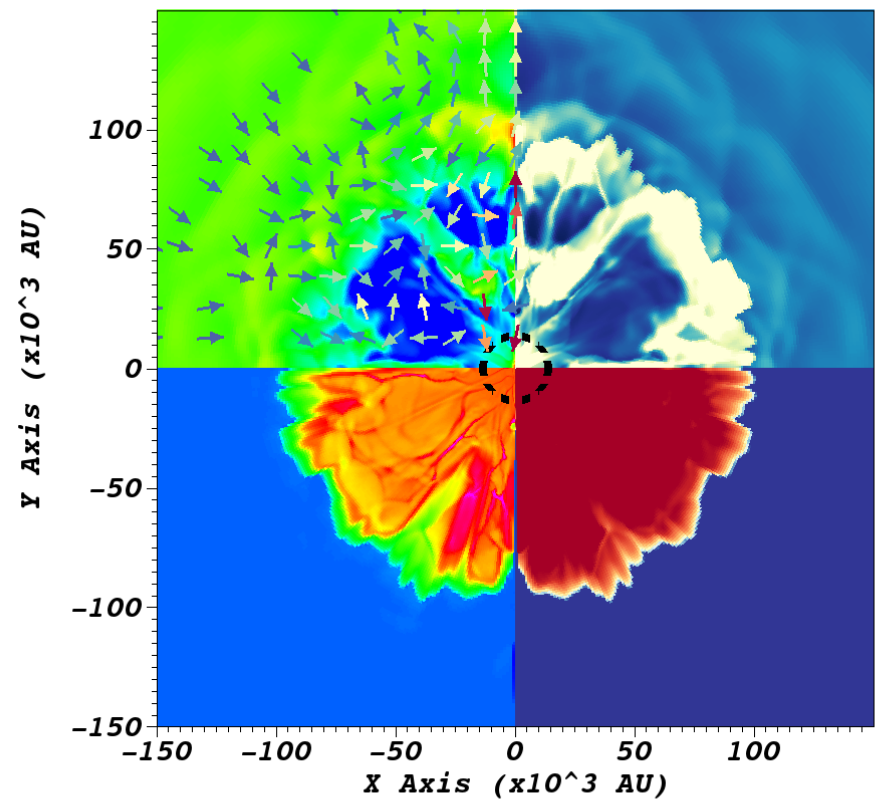
# 等方輻射モデルの結果



# 等方輻射



バースト前

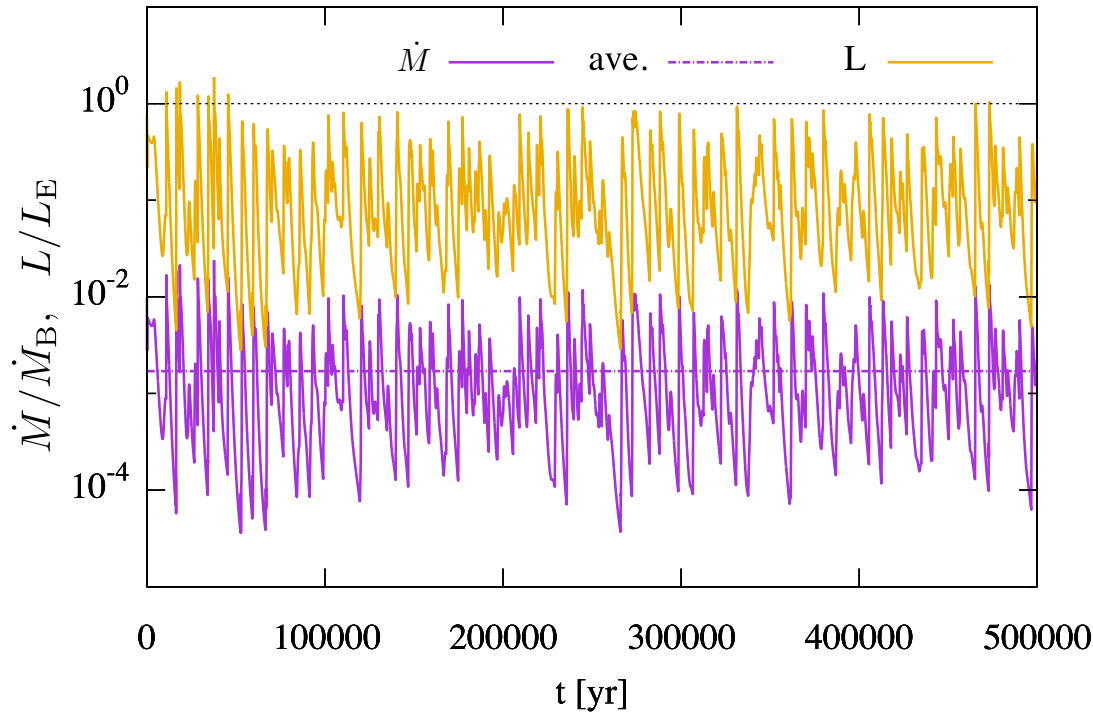


バースト後

# 降着率(等方輻射)

フィードバックなしのとき

Bondi降着率:  $\dot{M}_B$



- 先行研究の結果を再現  
(Park&Ricotti 11, Milosavljevic+ 09)

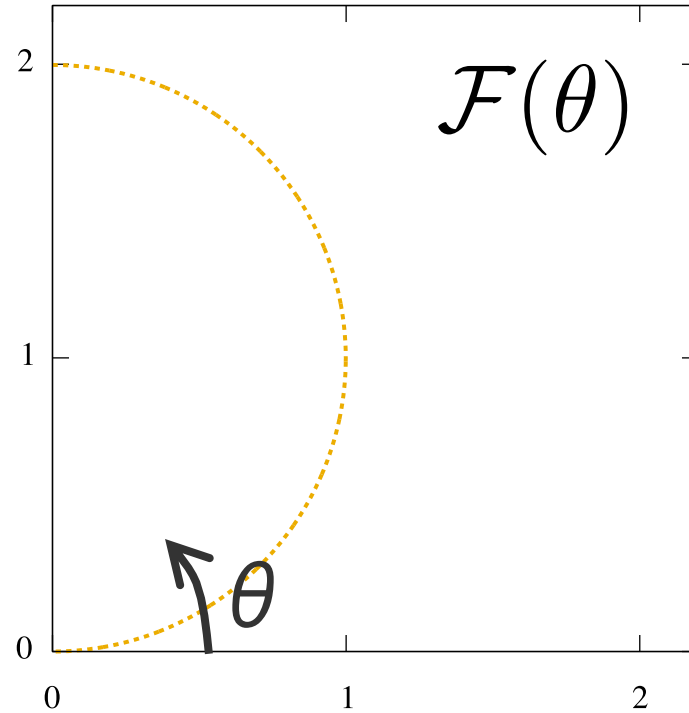
- 降着率が振動

- 平均降着率が大きく低下

$$\dot{M} \sim 0.17\% \dot{M}_B$$

(フィードバック無しの1/500倍)

これではPop III remnant BHは成長できない

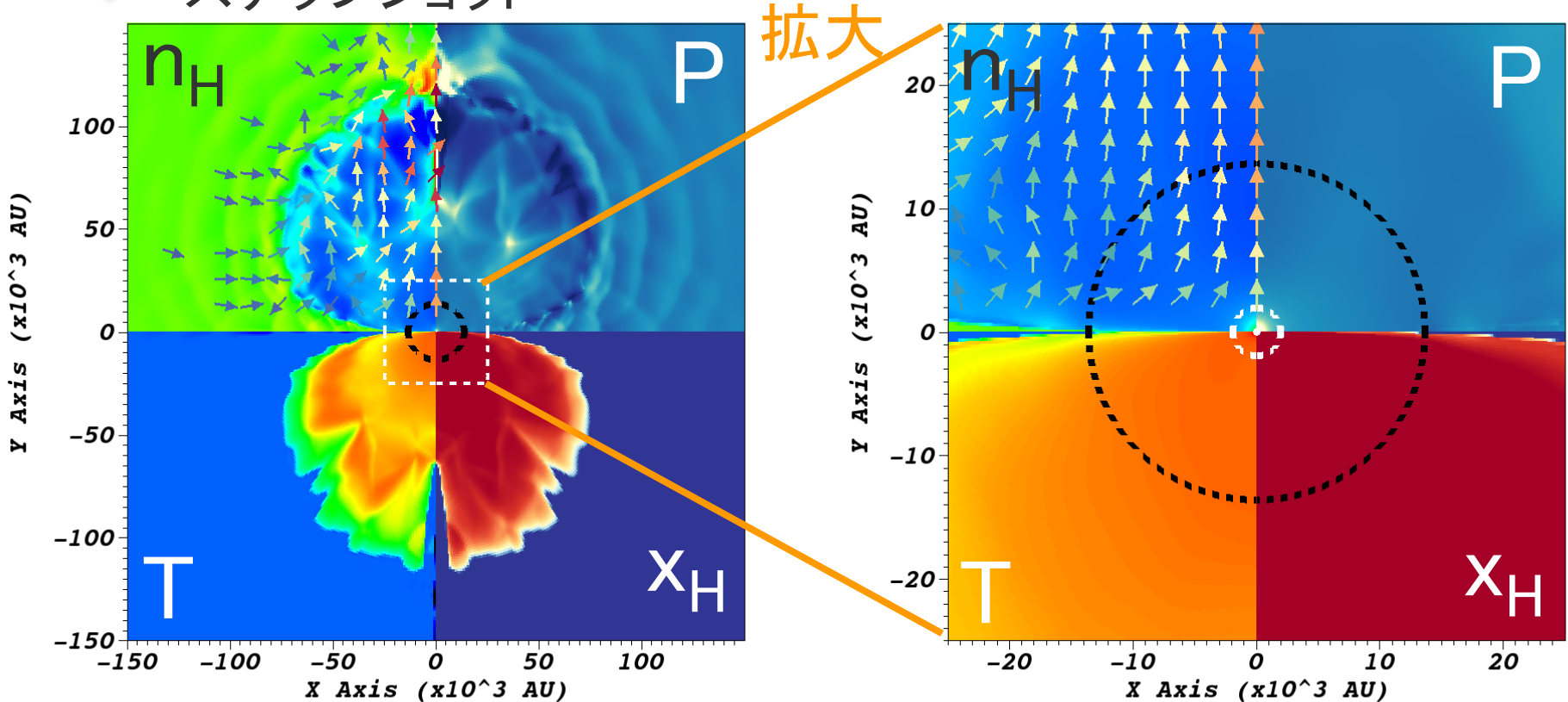
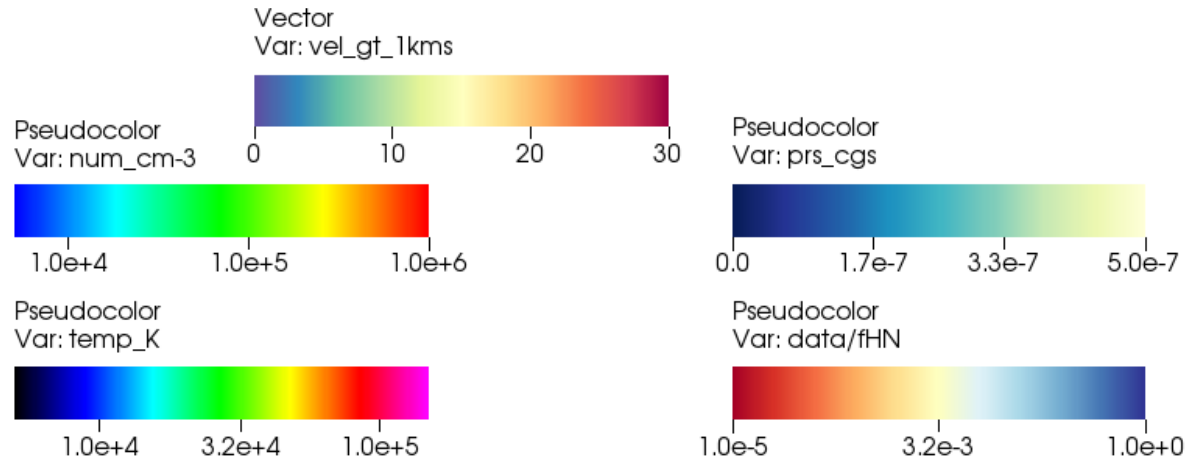


# 陰無し非等方輻射モデルの結果

# 陰無し 非等方輻射

降着率の振動弱い

➡ 計算終了時の  
スナップショット

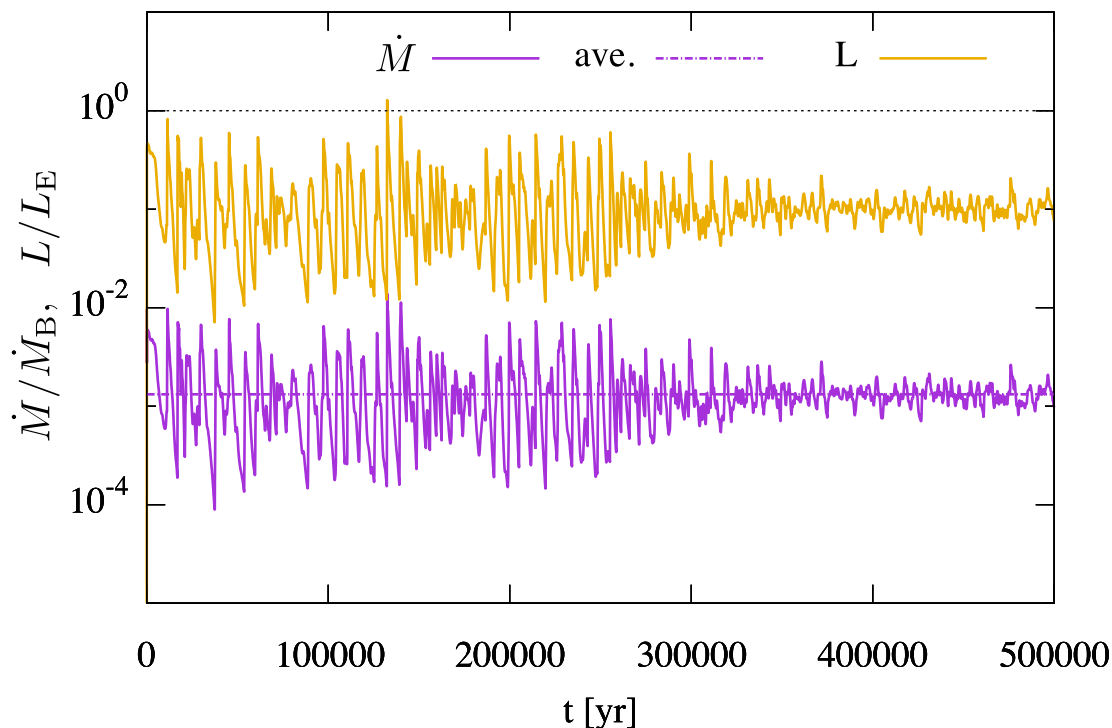




# 降着率 (陰無し非等方輻射)

フィードバックなしのとき

Bondi降着率:  $\dot{M}_B$

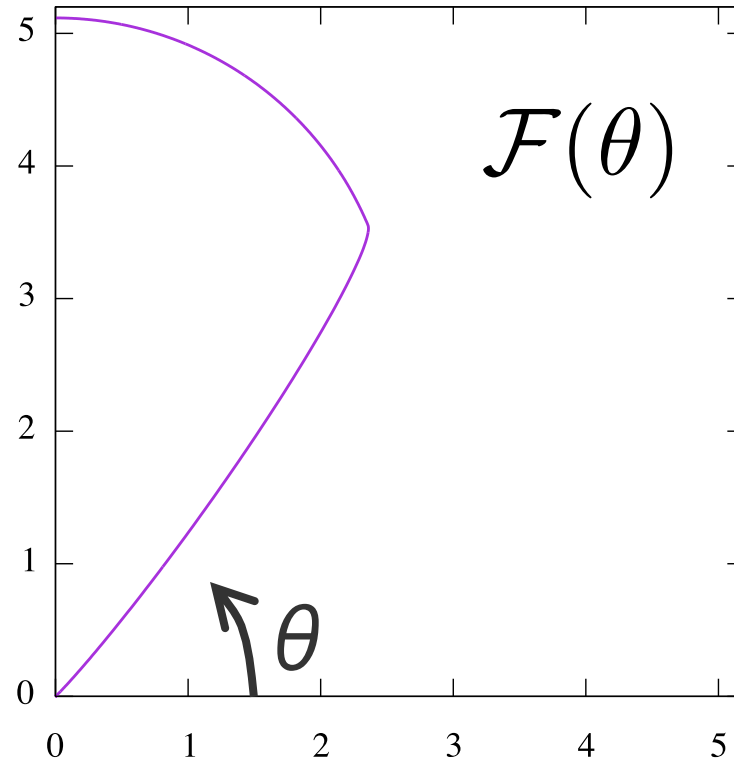


- 降着率の振動弱まる
- 平均降着率は低い

$$\dot{M} \sim 0.13\% \dot{M}_B$$

(等方輻射の場合とほぼ同様)

これでもPop III remnant BHは成長できない



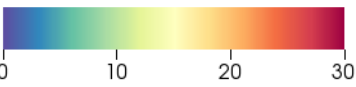
# 陰あり非等方輻射モデルの結果

( $\Theta_{\text{SHADOW}} = 45$ 度の場合)

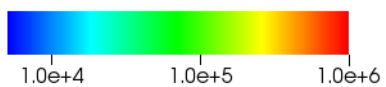


# 陰あり非等方輻射 (中心部を拡大)

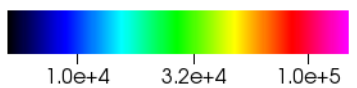
Vector  
Var: vel\_gt\_1kms



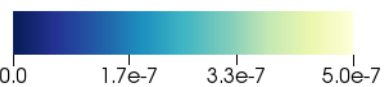
Pseudocolor  
Var: num\_cm-3



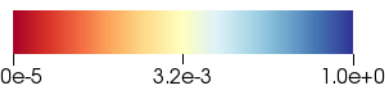
Pseudocolor  
Var: temp\_K



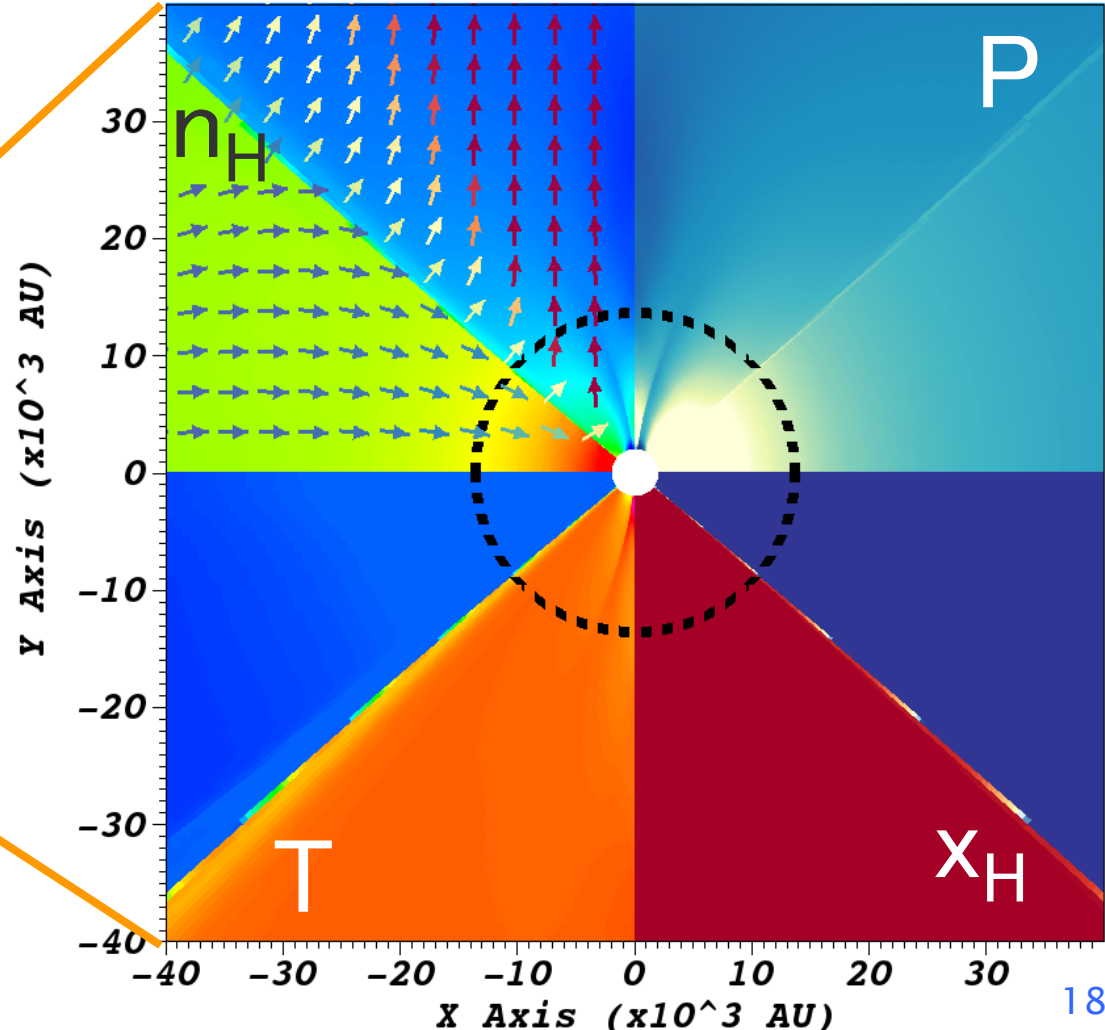
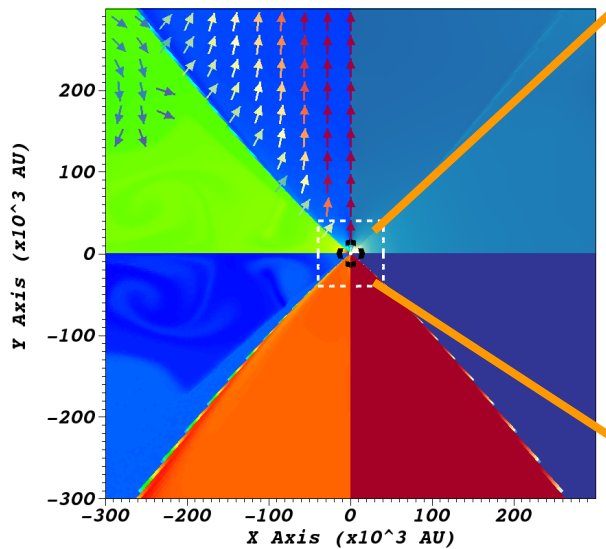
Pseudocolor  
Var: prs\_cgs



Pseudocolor  
Var: data/fHN



拡大

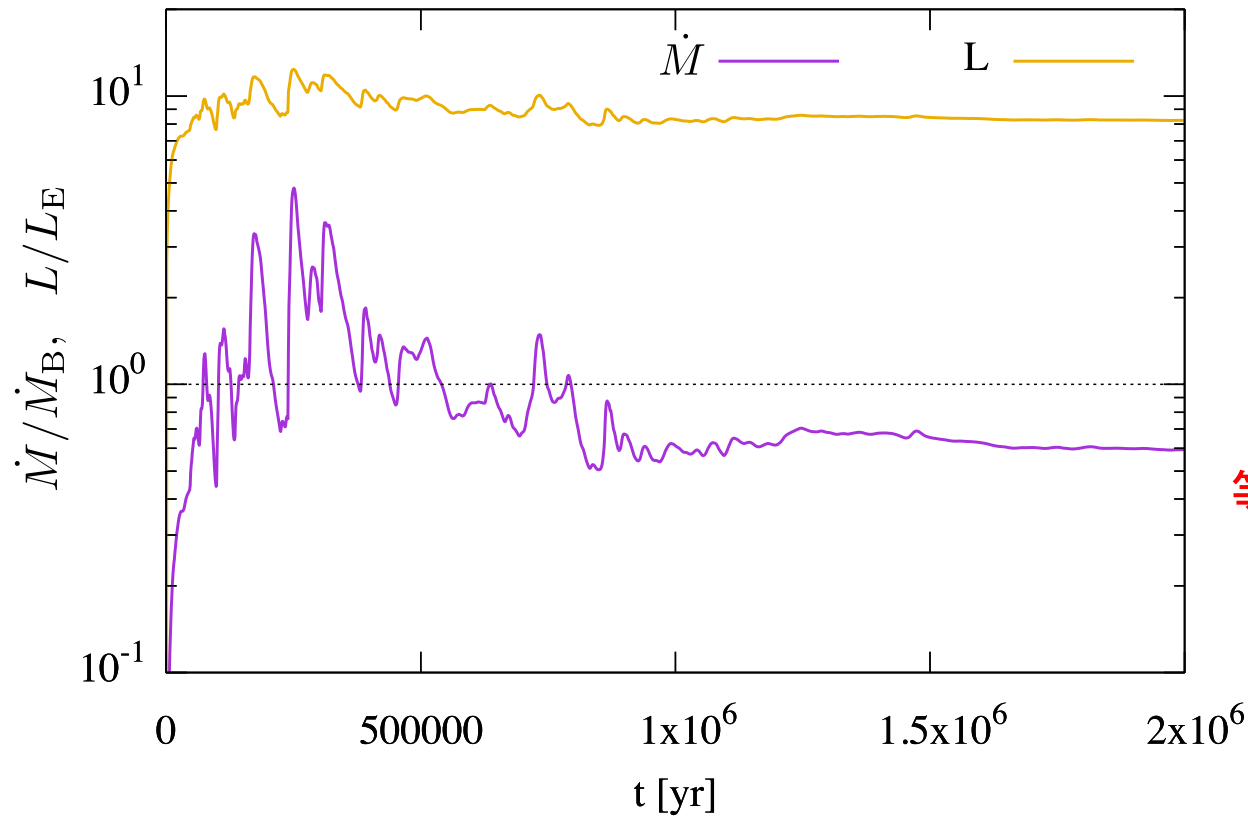




フィードバックなしのとき

# 降着率 (陰あり非等方輻射)

Bondi降着率:  $\dot{M}_B$

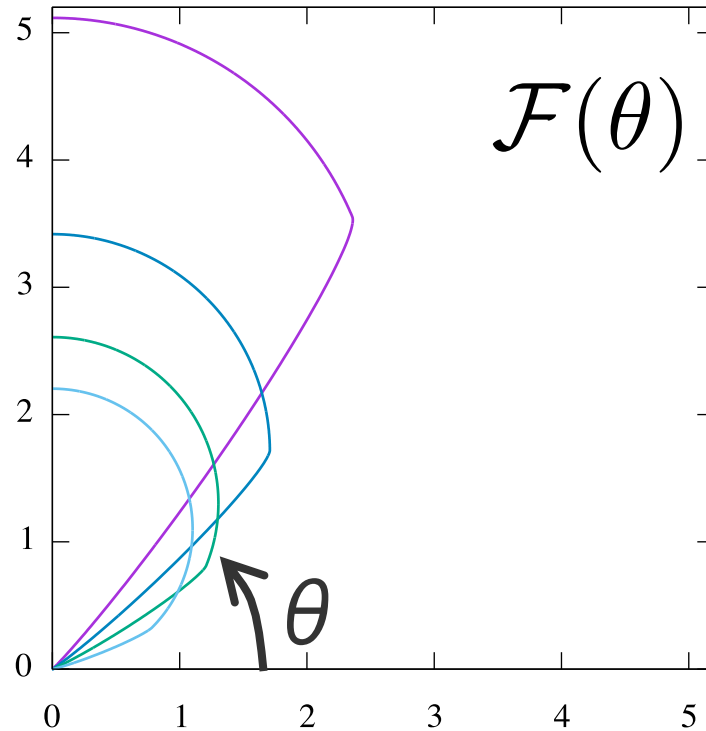


- 降着率は一定に近づく
- 高い降着率

$$\dot{M} \sim 60\% \dot{M}_B$$

等方輻射の場合の約300倍！

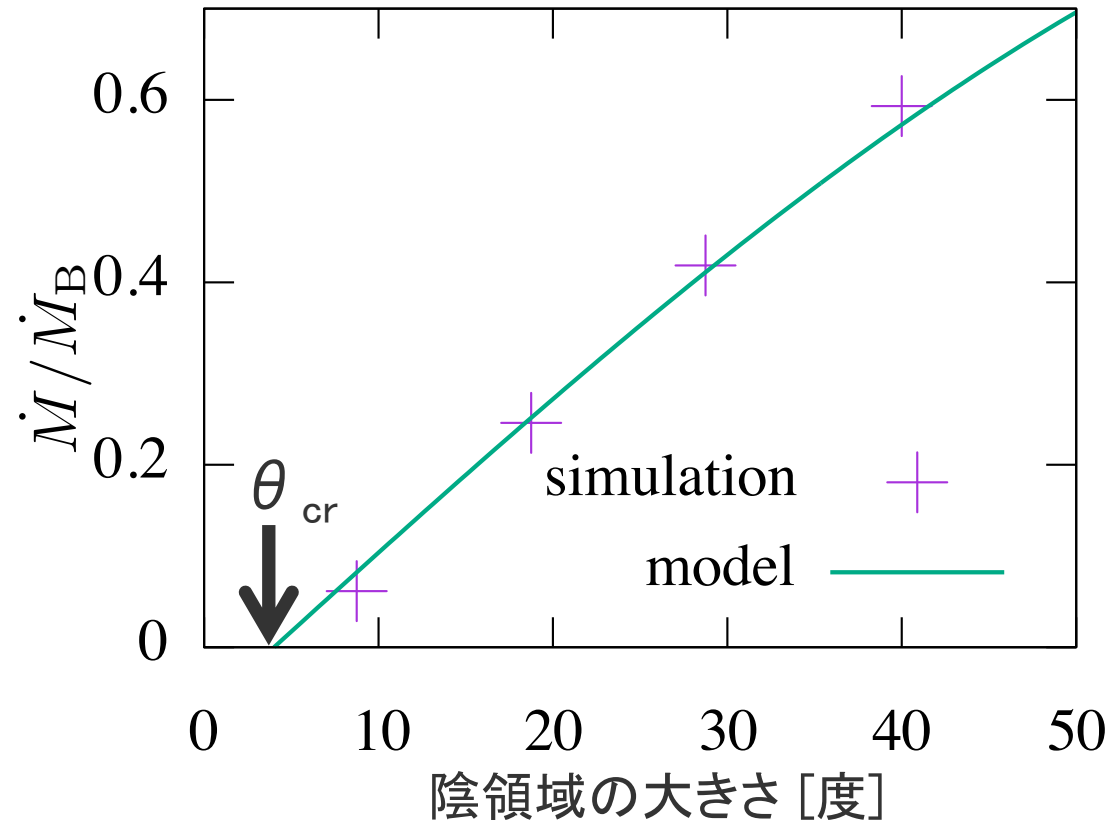
これならPop III remnant BHは成長できる



# 陰有り非等方輻射モデルの結果

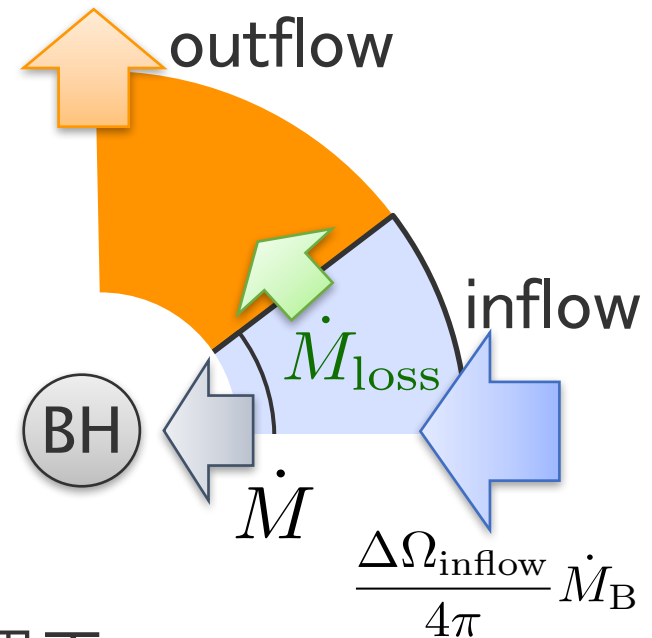
( $\Theta_{\text{SHADOW}}$  に対する依存性)

# 陰領域の大きさと降着率



- 降着率のモデル

$$\dot{M} = \frac{\Delta\Omega_{\text{inflow}}}{4\pi} \dot{M}_B - \dot{M}_{\text{loss}}$$



- 降着率は陰領域でのBondi的降着と境界面からのガス流失(～光蒸発)で決まる
- 陰からの降着に必要な臨界角度( $\theta_{\text{cr}} \sim 5$ 度)が存在



# CONCLUSION



## まとめと議論

- 本研究では、2D RHDシミュレーションを用いて非等方輻射フィードバックの下でのBH降着率を調べた
- 赤道面付近に陰の存在を仮定した場合に、等方的な場合と比べて非常に高い降着率が実現することがわかった
- 降着率は陰領域からのBondi的降着と陰領域表面からのガス流失の競合で決まり、陰領域からの降着が効果的になるのに最低限必要な陰の大きさ( $\sim 5$ 度)がある
- (周囲のガス密度には依るが)陰からの効率的な降着が実際に起これば、Pop III remnant BHは $z \sim 6$ までに超巨大BHに進化することが可能



# Future work

- 今回考慮しなかった物理過程のうち、結果に影響する可能性があるものを取り入れた計算をおこなう
  - 自己重力、回転、3次元性、水素分子、光子拡散など
- 本研究で内側からの輻射の非等方性の重要性が明らかになったので、今後、内側の物理的状況を調べるのが重要
  - 円盤風や遠心力半径での降着ショックは実際現れるのか？
  - これらの構造は陰を作るのか？陰はどのくらいの大きさか？
- もっと大きなスケールとの関係性も明らかにする必要がある
  - どのような環境でBHは成長するのか？
  - 初代銀河シミュレーションなどと組み合わせてみる？