

# 種ブラックホールのガス降着成長： 非等方輻射とガスの角運動量が 降着率に及ぼす影響

Ref: KS, Hosokawa, Yajima, Omukai, MNRAS, 469, 62 (2017)

KS, Hosokawa, Yajima, Inayoshi, Omukai, in prep



TOHOKU  
UNIVERSITY

杉村 和幸（東北大）

共同研究者：細川隆史（京都大）  
矢島秀伸（東北大）  
稲吉恒平（コロンビア大）  
大向一行（東北大）



Theoretical Astrophysics  
Tohoku University



# Contents

## □ Introduction

超巨大BH形成シナリオ、BHへのガス降着率

## □ 研究1: 輻射の非等方性の影響 (KS+ 2017)

非等方輻射下でのガス降着シミュレーション

## □ 研究2: ガスの角運動量の影響 (KS+ in prep)

角運動量を持つガスの降着シミュレーション

## □ Conclusion



# INTRODUCTION

# 超巨大BHの起源



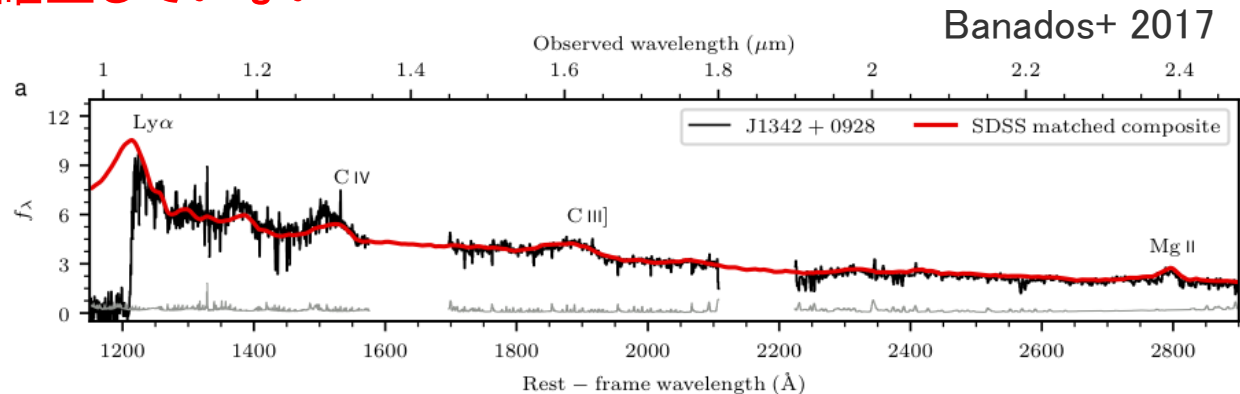
クエーサーのイメージ図  
(Credit: ESO/M. Kornmesser)

## supermassive BHs (SMBHs)

- ほぼ全ての銀河の中心に存在  $M_{\text{BH}} > 10^6 M_{\odot}$
- フィードバックにより銀河進化に大きく影響
- 標準形成シナリオは確立していない

## high-z SMBH

- $z > 6$  に100以上 ( $t_{\text{univ}} < 1 \text{ Gyr}$ )
- $z \sim 7$  にも数個、 $10^9 M_{\text{sol}}$  @  $z = 7.5$  も (Banados+ 2017, Nature)



大きな種BH質量 and/or 急速な成長 により  
短期間でSMBHを形成するシナリオを示唆

# 宇宙初期の超巨大BH 形成シナリオ

赤方偏移  
(宇宙年齢)

Pop III シナリオ

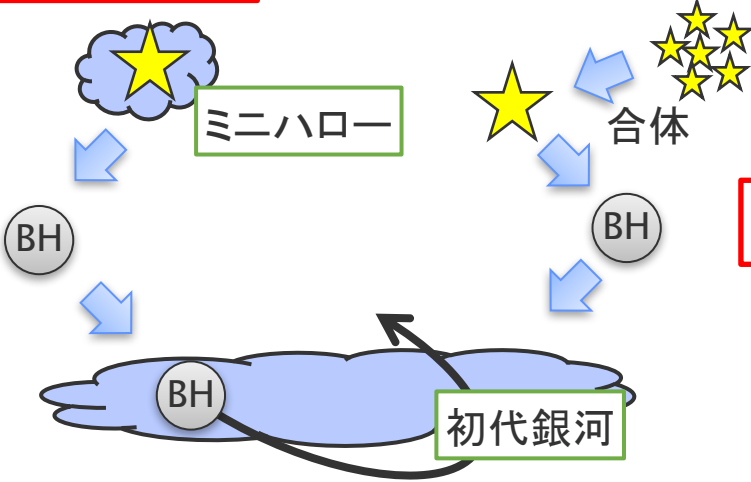
Dense cluster シナリオ

(cf. Volonteri 12)

$z \sim 20$  (0.2Gyr)

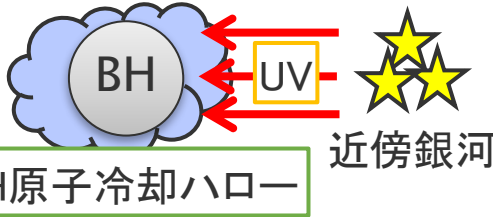
ハロー同士の合体に伴い初代銀河へ

ガス降着により成長



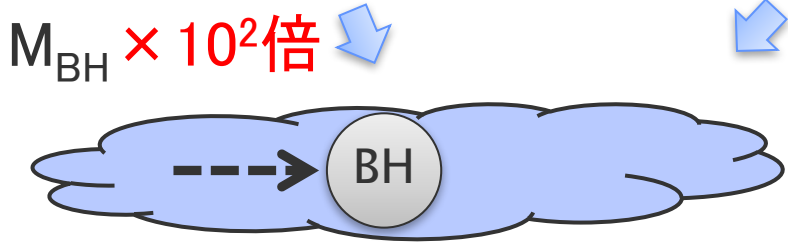
高密度星団 (櫻井くんトーク)

Direct collapse シナリオ



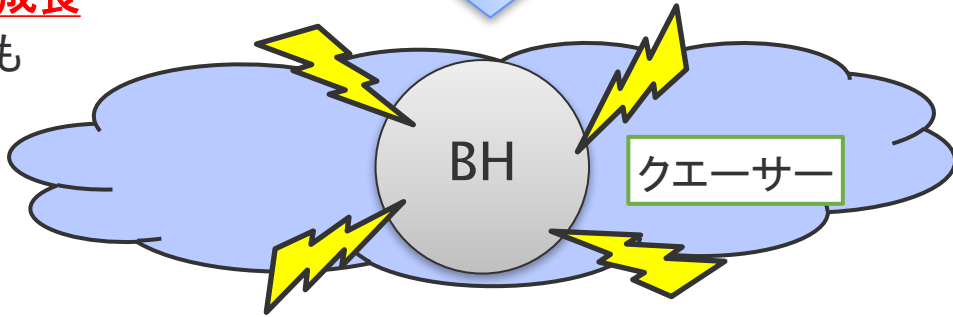
$z \sim 15$  (0.3Gyr)

力学的摩擦で中心に移動



ガス降着によってさらに成長  
SMBH同士の合体成長も

$M_{BH} \times 10^4$  倍



$z \sim 7$  (0.8Gyr)

BHの質量

BH	$10^3 M_{\odot}$
BH	$10^5 M_{\odot}$
BH	$10^9 M_{\odot}$

# 宇宙初期の超巨大BH 形成シナリオ

赤方偏移  
(宇宙年齢)

Pop III シナリオ

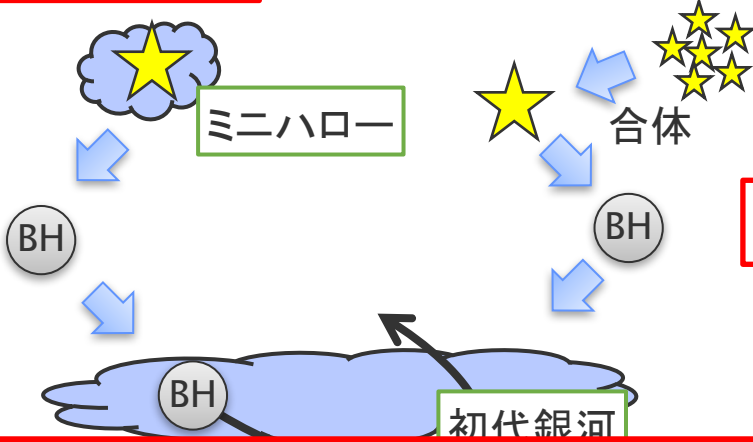
Dense cluster シナリオ (cf. Volonteri 12)

(cf. Volonteri 12)

$z \sim 20$  (0.2Gyr)

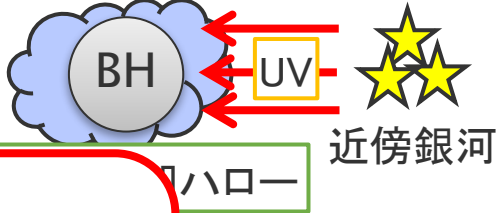
ハロー同士の合体に伴い初代銀河へ

ガス降着により成長



高密度星団 (櫻井くんトーク)

Direct collapse シナリオ



$z \sim 15$  (0.3Gyr)

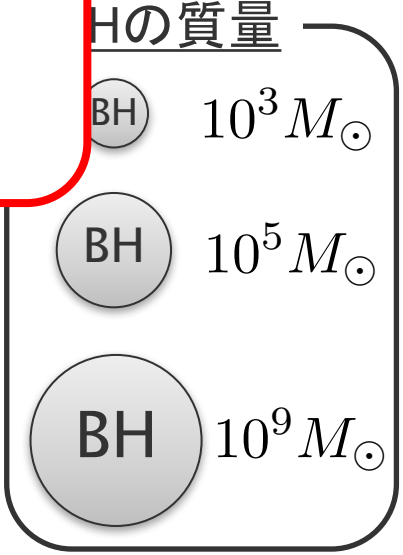
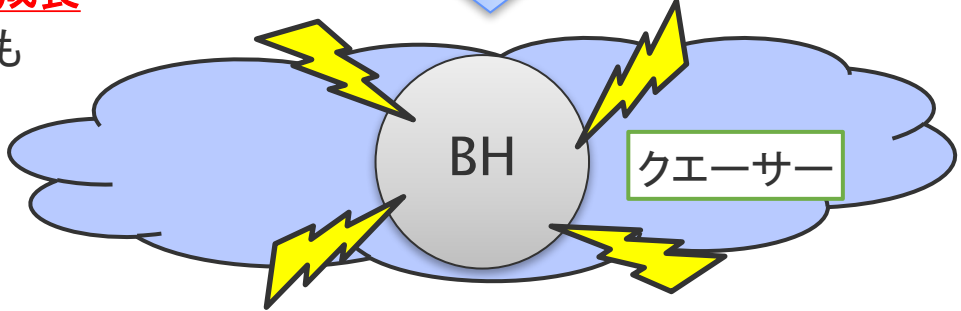
力学的摩擦で

BHへのガス降着率は、  
SMBHの形成過程の解明において  
非常に重要！！

$M_{BH} \times 10^4$ 倍

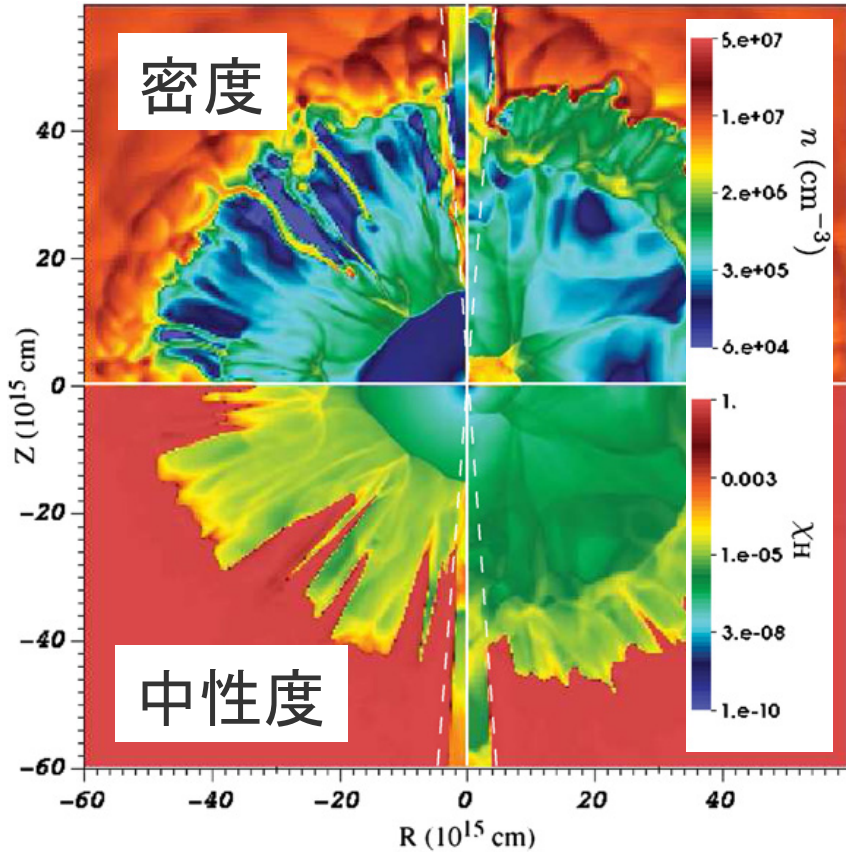
ガス降着によってさらに成長  
SMBH同士の合体成長も

$z \sim 7$  (0.8Gyr)

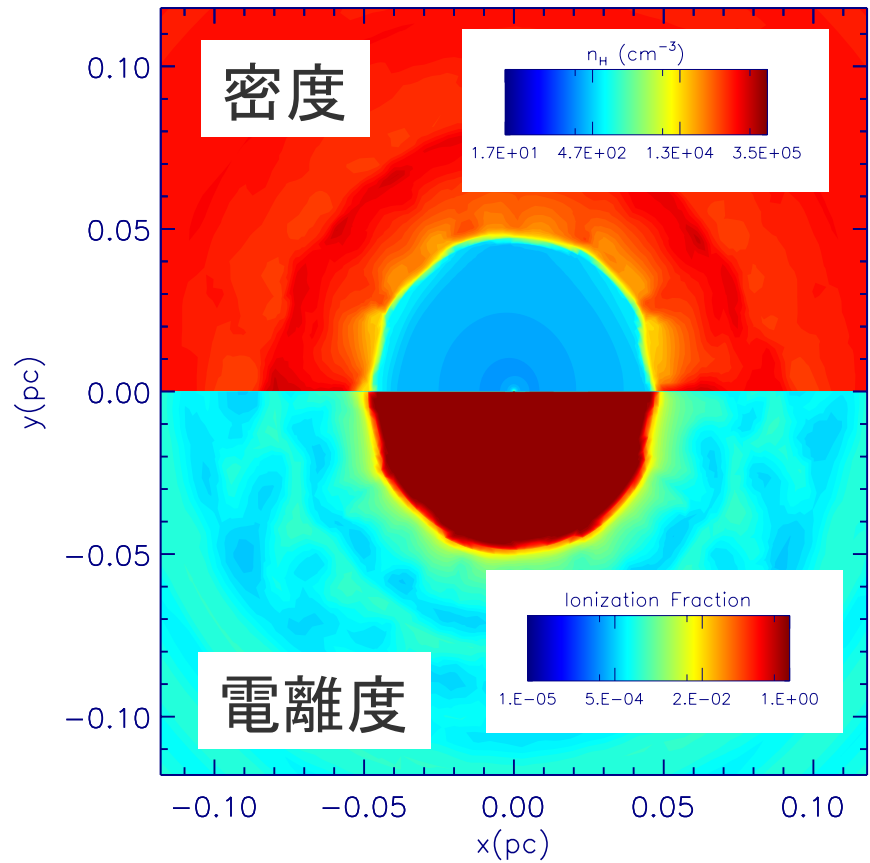


# 先行研究：種BHへのガス降着シミュレーション

Milosavljevic+ 09



Park&Ricotti 11



輻射フィードバックによりBHへの降着率が大きく低下

# 先行研究：種BHへのガス降着シミュレーション

Milosavljevic+ 09, Park&Ricotti 11

## 電離加熱による降着率の低下

- 中性ガスからの降着 (Bondi降着)

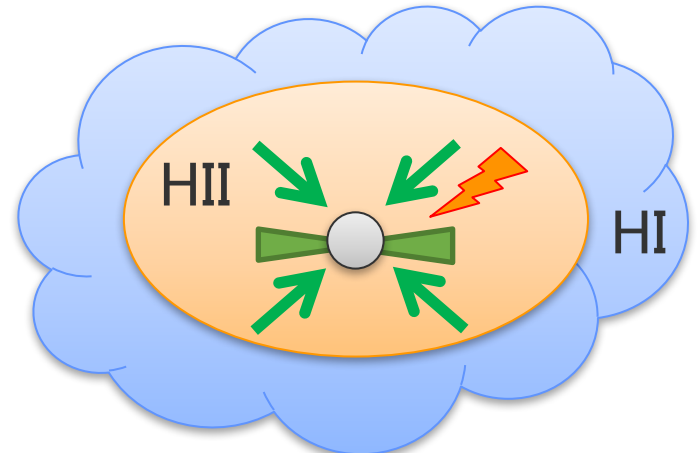
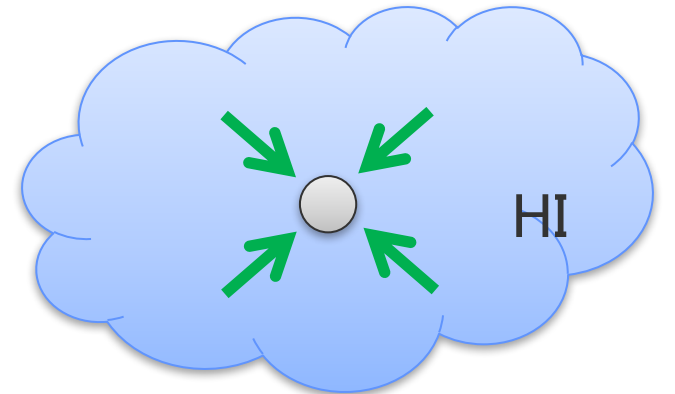
$$\dot{M}_{B,HI} = \frac{4\pi G^2 M_{BH}^2 \rho_{HI}}{c_{s,HI}^3}$$

- 電離バブルからの降着

$$\begin{cases} \rho_{HII} < \rho_{HI} \\ c_{s,HII} > c_{s,HI} \end{cases}$$

→  $\dot{M}_{B,HII} \sim O(10^{-3}) \times \dot{M}_{B,HI}$

→ PopIII起源BHが $z=7$ までに $10^9 M_{\text{sun}}$ まで成長するのは困難



先行研究の問題点: 輻射の非等方性、ガスの角運動量を無視



# 輻射の非等方性の効果

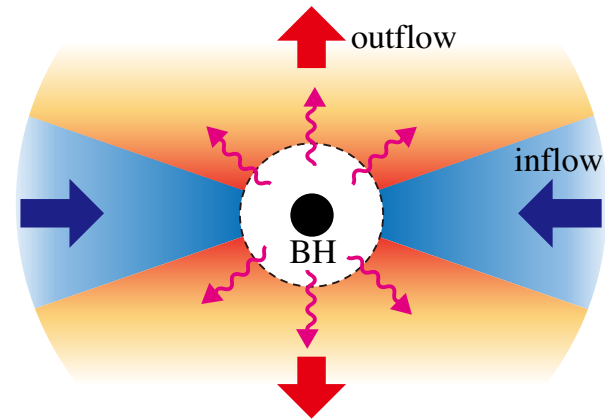
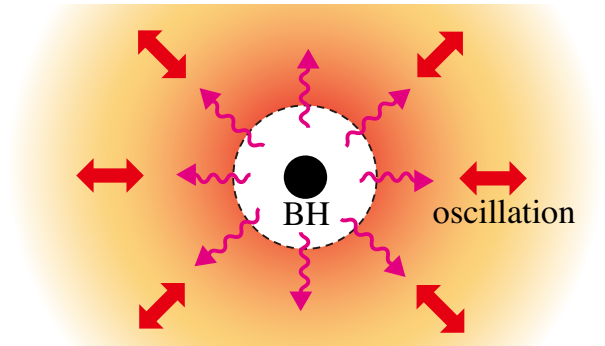
## □ 先行研究 (Park&Ricotti 11, Milosavljevic+ 09)

等方輻射の仮定により、フィードバックが全方向に効いて降着率が大きく低下

(但し、BH質量 $\times$ ガス密度が非常に大きい場合には例外的に高い降着率が実現; Inayoshi+16)

## □ 輻射の非等方性の影響

降着領域とフィードバック領域の棲み分けにより降着率が上がる可能性あり



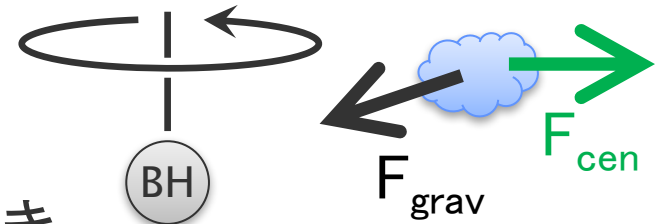
### 研究1の目的

輻射の非等方性によって高い降着率が実現するかを明らかにする

# ガスの角運動量の効果

## □ 先行研究 (Park&Ricotti 11, Milosavljevic+ 09)

ガスの角運動量は小さく、BH近傍を除き  
遠心力は無視できると仮定



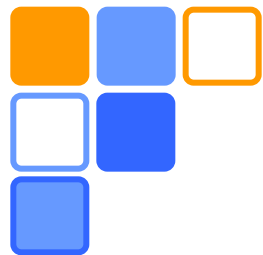
## □ 角運動量の影響

低光度活動銀河核においては、角運動量の影響で降着率  
が下がる場合あり

(Proga&Begelman 03, Li+ 13, Inayoshi+17)

### 研究2の目的

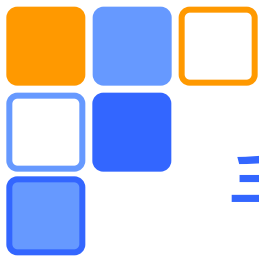
輻射フィードバック下での種BHへのガス降着  
における角運動量の影響を明らかにする



# 研究1: 輻射の非等方性の影響

KS, Hosokawa, Yajima, Omukai, MNRAS, 469, 62 (2017)

see also Takeo+ 17



# 手法・モデル

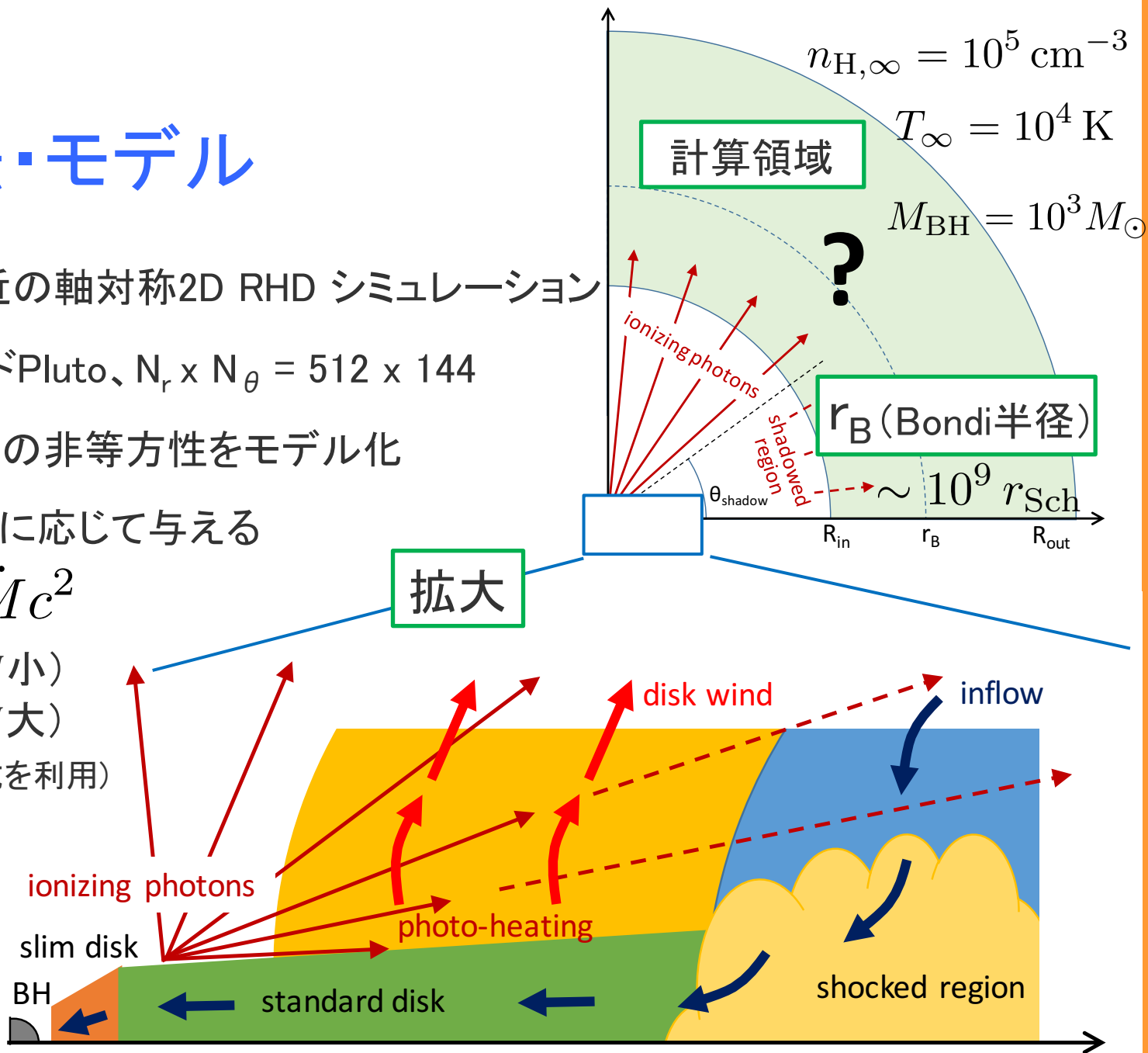
- Bondi半径付近の軸対称2D RHD シミュレーション
- 公開流体コードPluto、 $N_r \times N_\theta = 512 \times 144$
- BHからの輻射の非等方性をモデル化
- 光度は降着率に応じて与える

$$L = \epsilon \dot{M} c^2$$

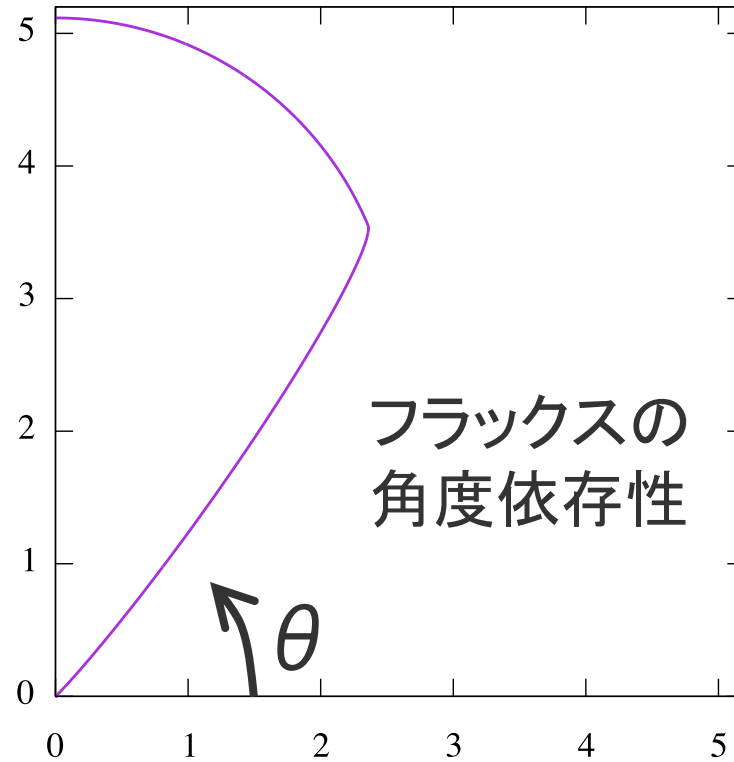
$$\epsilon = 0.1 \quad (\dot{M} \text{小})$$

$$< 0.1 \quad (\dot{M} \text{大})$$

(Watarai+00の表式を利用)



拡大

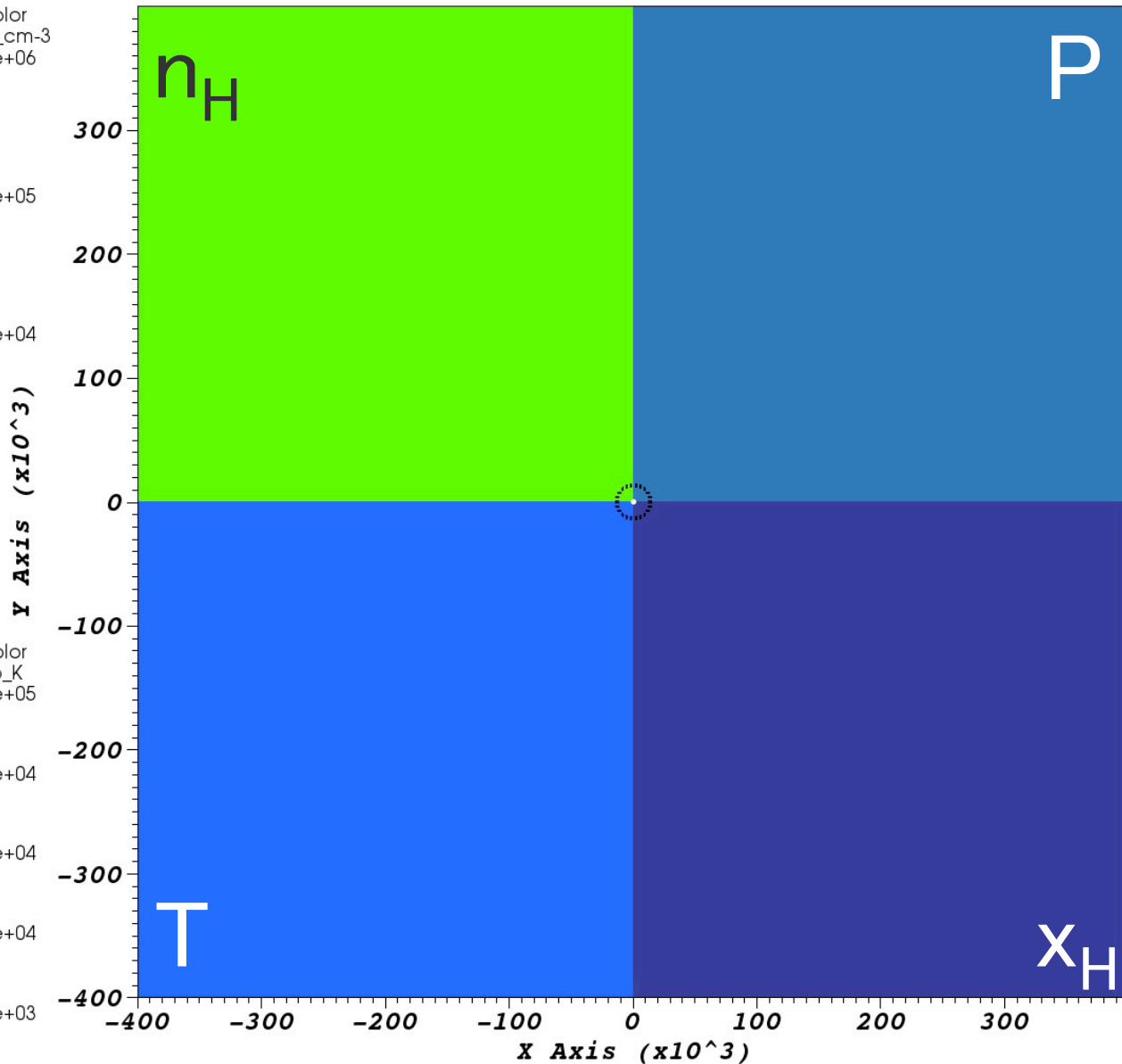
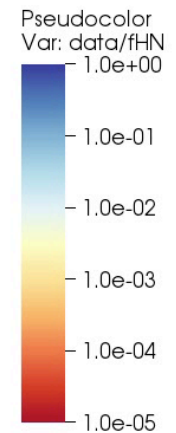
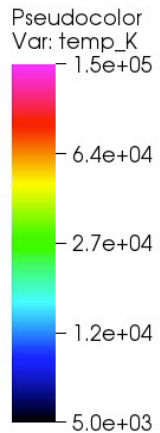
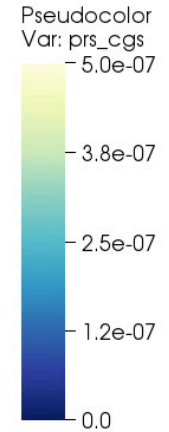
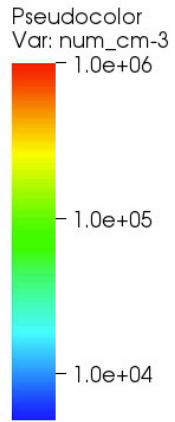
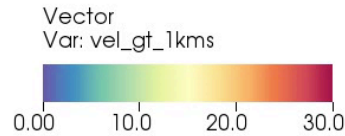


## 非等方輻射モデルの結果

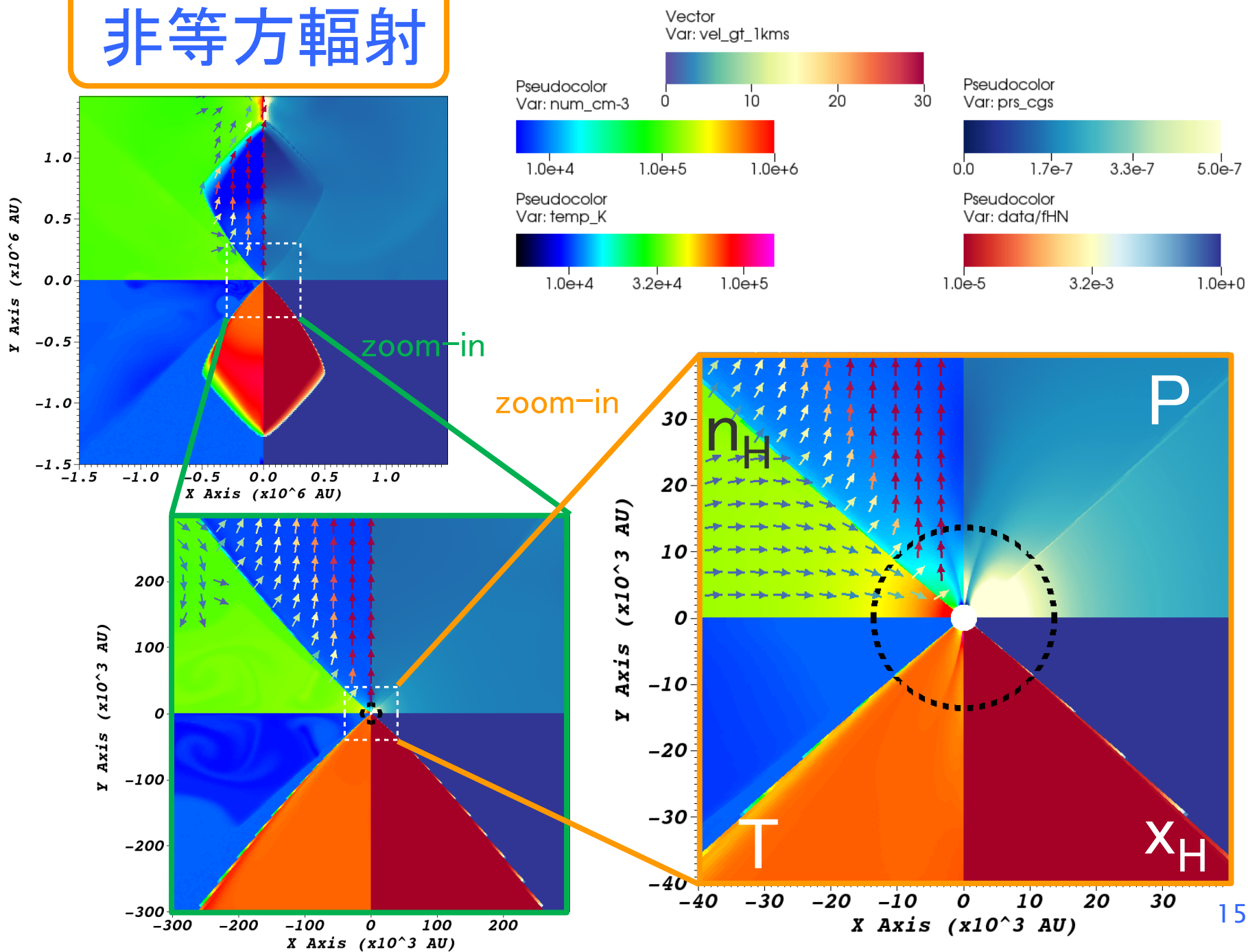
( $\Theta_{\text{SHADOW}} = 45^\circ$  の例)

# 非等方輻射

DB: Data  
Cycle: 0



# 非等方輻射

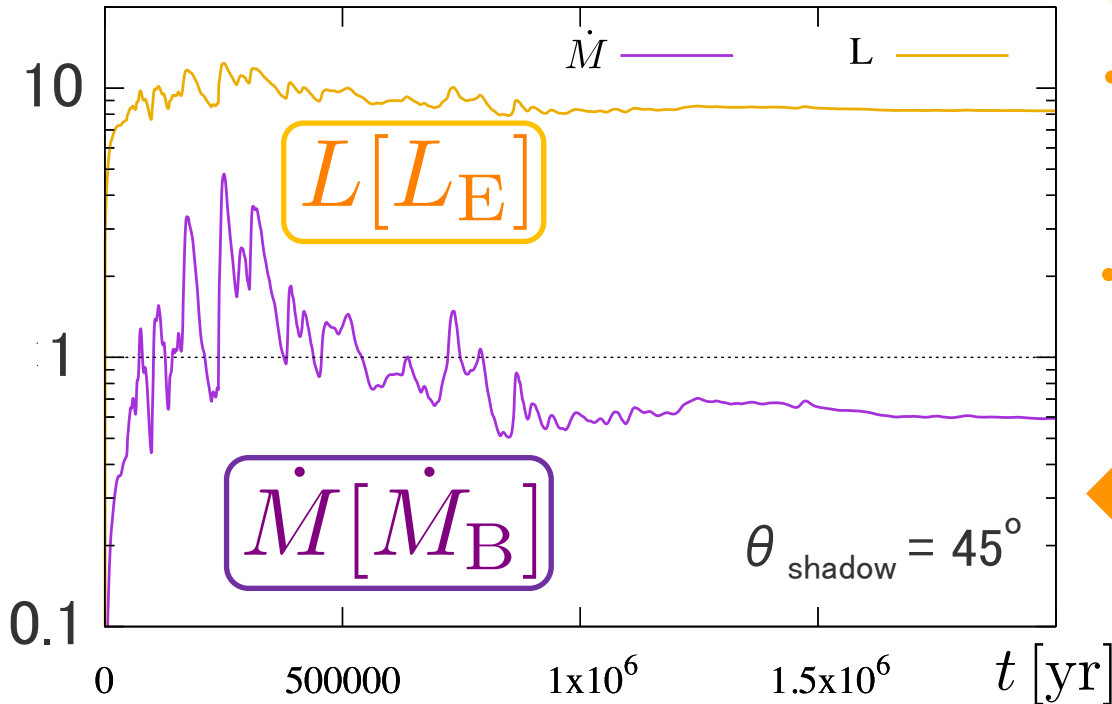




# 降着率・光度

KS+ 2017

$$\text{Eddington光度: } L_E = \frac{4\pi GM_{\text{BH}}c m_p}{\sigma_{\text{es}}}$$



◆  $\theta_{\text{shadow}} = 45^\circ$  の結果

• 超Eddington 光度

$$L > L_E$$

• 高い降着率

$$\dot{M} = O(\dot{M}_B)$$

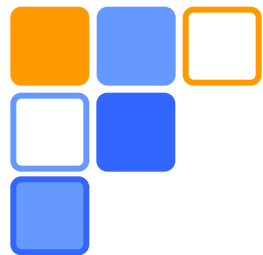
◆ 降着率の  $\theta_{\text{shadow}}$  依存性

陰領域からのBondi的降着と、  
電離/中性境界からの光蒸発  
でモデル化可能

輻射の非等方性が強ければ、  
高い(超臨界)降着率が実現する可能性あり!

これならPopIII起源BHも $z=7$ までに $10^9 M_{\text{sun}}$ まで成長可能





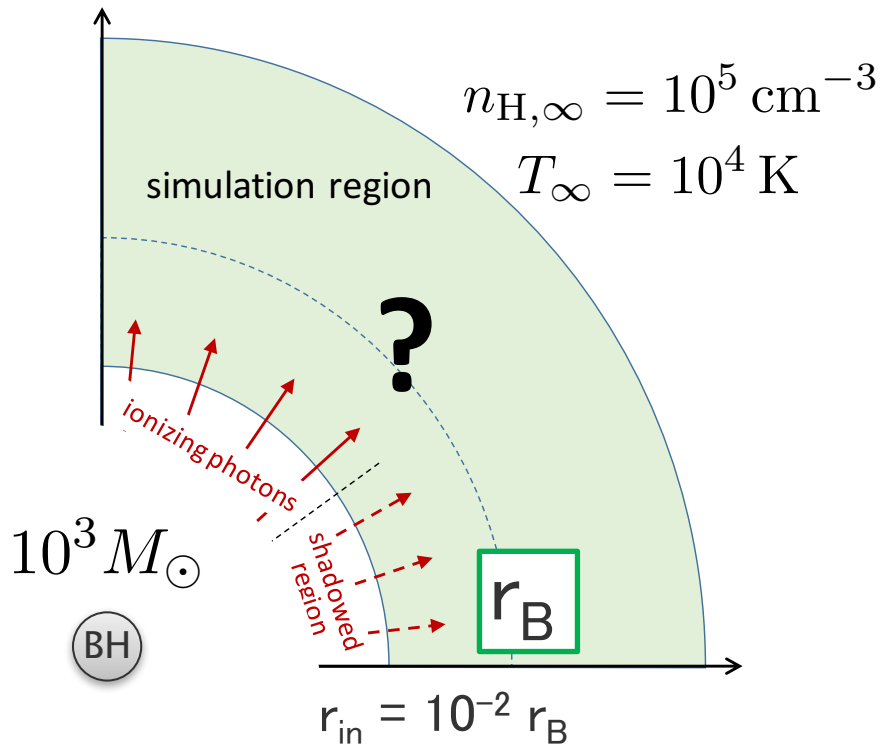
## 研究2: ガスの角運動量の影響

KS, Hosokawa, Yajima, Inayoshi, Omukai, in prep

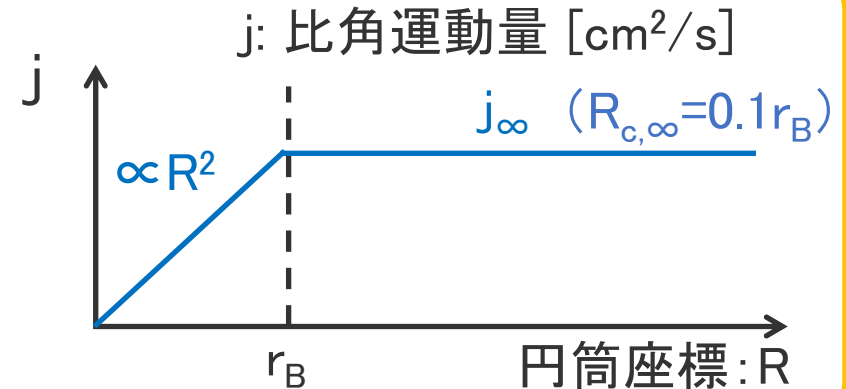
# 手法・モデル

KS+ in prep

- 研究1とほぼ同様の設定
- 初期に一様な比角運動量を与える(軸付近を除く)
- 円盤内で $\alpha$ 粘性を仮定( $\alpha=0.01$ )
- 輻射は途中からONにする

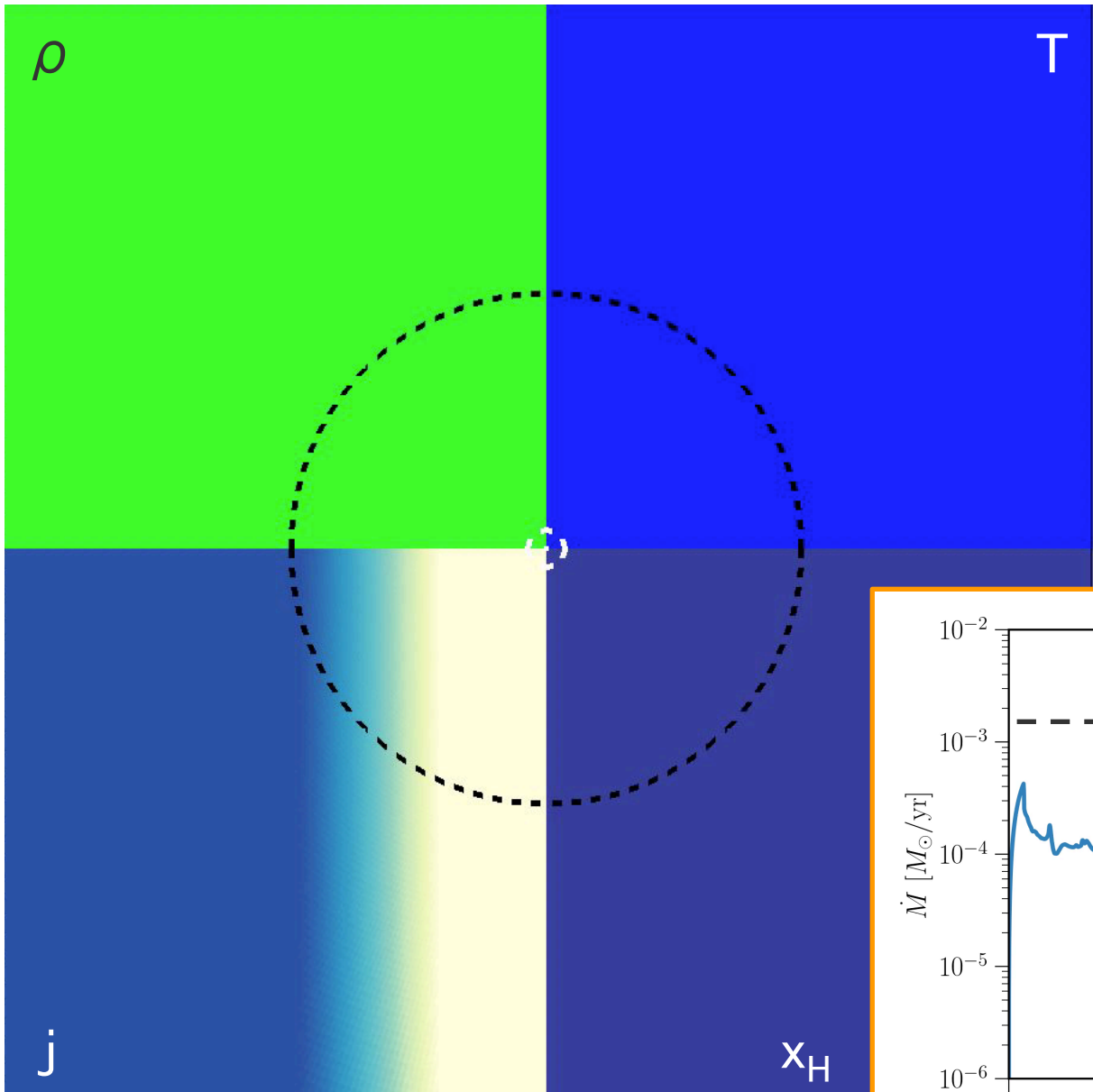


## 初期角運動量分布



$$F_c = j^2/R^3: \text{遠心力}$$

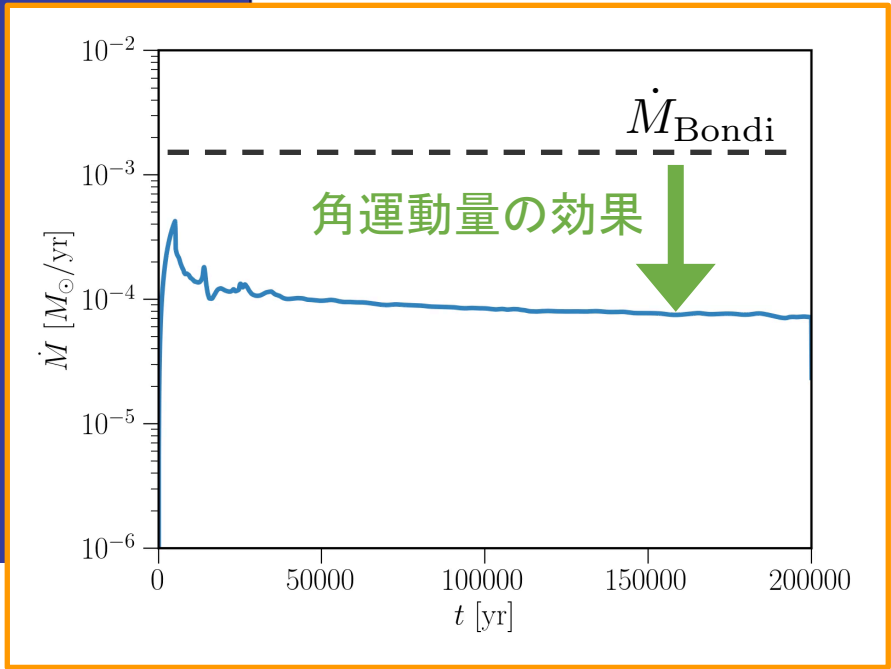
$$R_c = j^2/GM: \text{遠心力半径}$$



# 輻射OFF

- 赤道面に円盤が形成
- 軸付近の低角運動量ガスの降着が支配的
- 降着率が大きく低下

$$\dot{M} \sim 0.1 \dot{M}_B$$

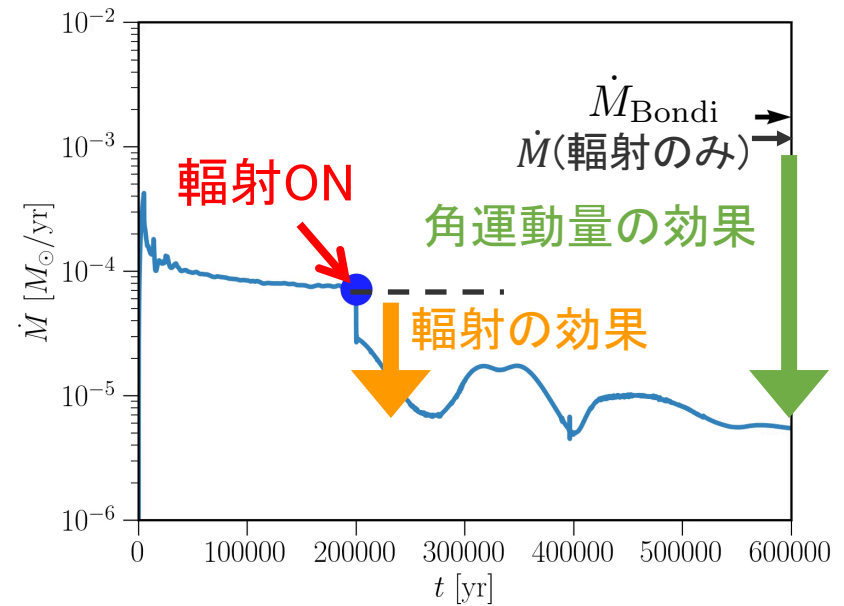
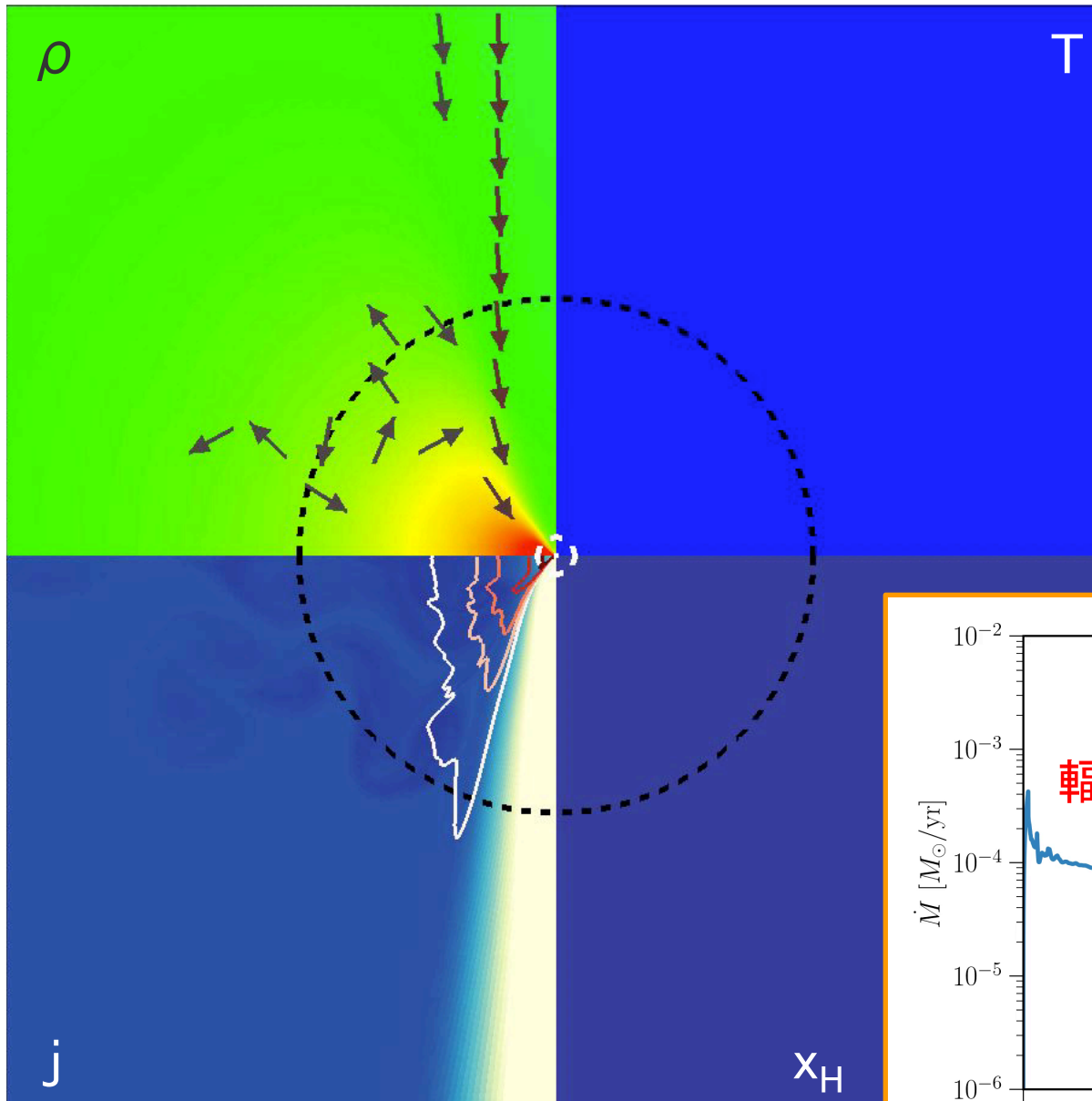


# 輻射ON

(非等方輻射;  $\theta_{\text{shadow}} = 45^\circ$ )

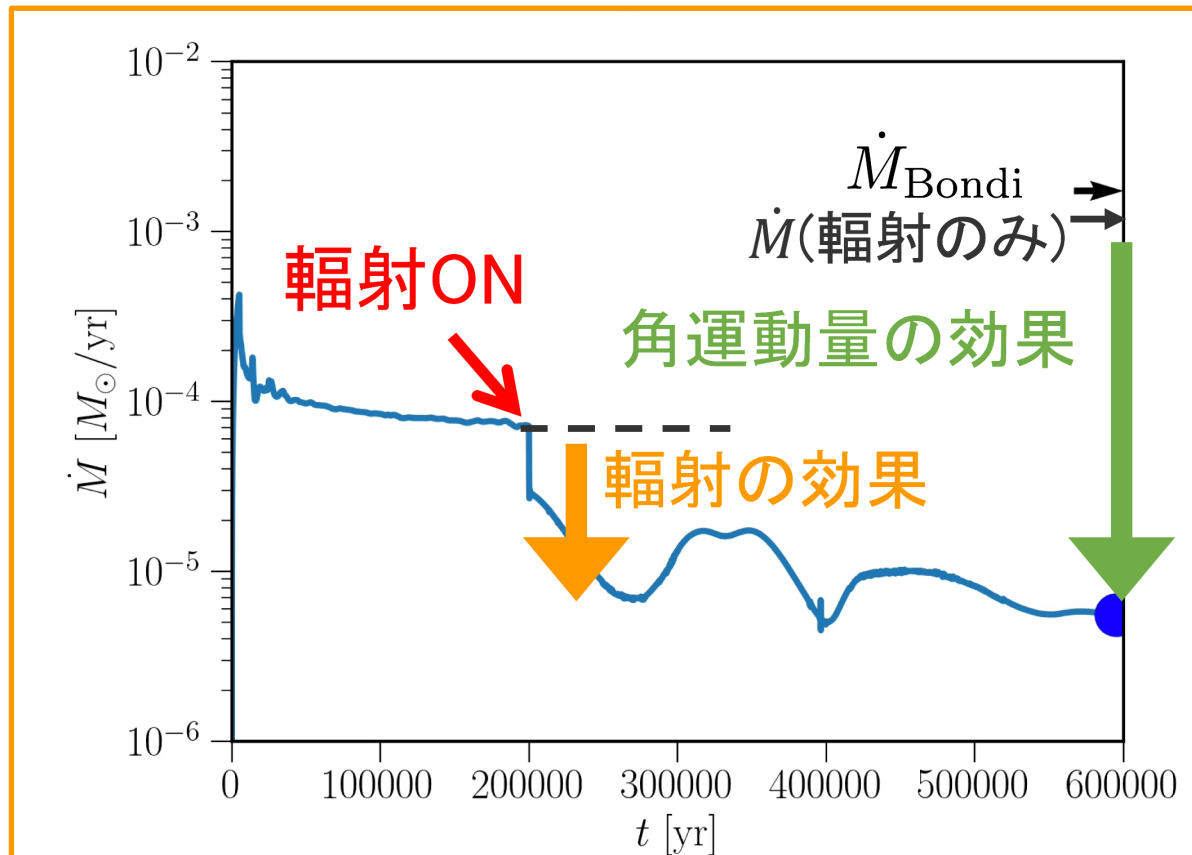
- 軸方向に光蒸発アウトフローが発生し、円盤からのガス降着が支配的に
- 降着率がさらに低下

$$\dot{M} \sim 10^{-2} \dot{M}_B$$



# 角運動量による降着率の低下

(非等方輻射;  $\theta_{\text{shadow}} = 45^\circ$ )



輻射の非等方性が強くても、角運動量が効くと  
降着率は大幅に低下してしまう！！

# 降着率低下の解析的理解

## 問題設定

- $j$  一定媒質からの等温ガス降着  
(極方向からの流れ込み無し)

## 解析的モデルの仮定

- 外: 遠心力半径に向かってガスが蓄積
- 内: 粘性による角運動量輸送が降着を誘起

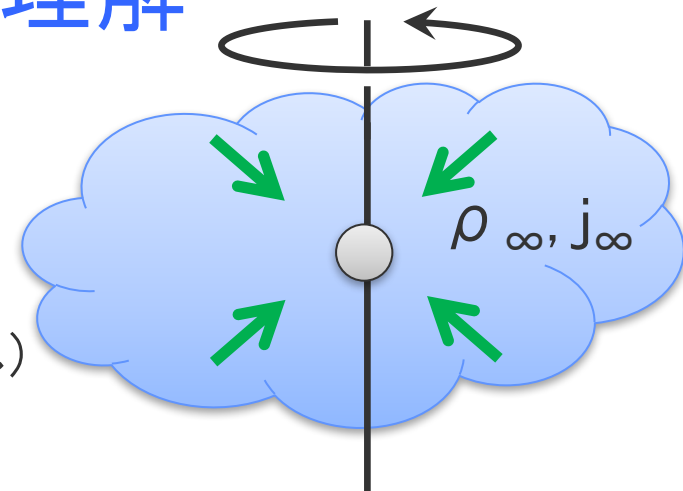
## 遠心力半径で二つの解を接続

外側: 力学平衡分布解

遠心力半径での面密度

内側:  $\alpha$  粘性降着円盤解

面密度と降着率の関係



降着率の解析的表式

$$\dot{M} = \frac{\sqrt{18\pi^3} \alpha c_s R_{c,\infty}^3}{r_B} \rho_{\infty} \exp\left[\frac{r_B}{2R_{c,\infty}}\right]$$

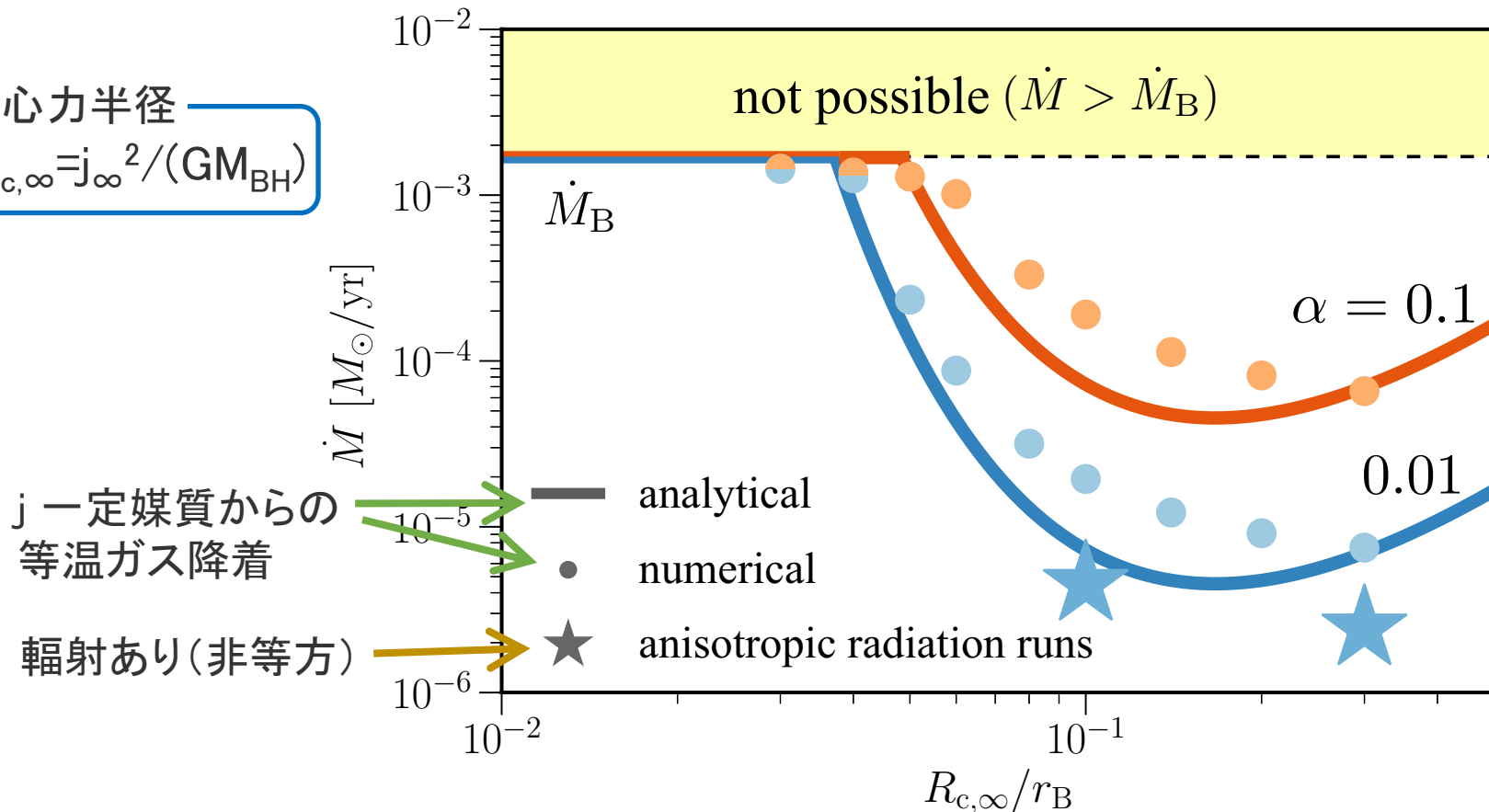
# 媒質の角運動量と降着率の関係

降着率の解析的表式

$$\dot{M} = \frac{\sqrt{18\pi^3} \alpha c_s R_{c,\infty}^3}{r_B} \rho_\infty \exp\left[\frac{r_B}{2R_{c,\infty}}\right]$$

遠心力半径

$$R_{c,\infty} = j_\infty^2 / (GM_{\text{BH}})$$



角運動量による降着率低下を解析的に理解！

遠心力半径が  $\sim 0.03 \times$  (Bondi半径) 以下のとき、降着率低下は起きない



# CONCLUSION





## まとめ

- 超巨大BHの形成において重要な種BHへのガス降着率について、軸対称2D RHDシミュレーションにより調べた
- 先行研究で無視されていた、BH降着円盤からの輻射の非等方性や降着するガスの角運動量を考慮した
- 非等方性が強いとき高い(超臨界)降着率が可能となるが、ガスの角運動量が効くと降着率は大幅に低下することがわかった
- 種BHのガス降着による成長過程の解明に向けて、今後、円盤風などによる輻射の遮蔽メカニズムや、銀河中でのBH周辺環境(ガス密度・角運動量など)などを明らかにしていく必要がある