

種ブラックホールへのガス降着率に 対するガスの角運動量の影響

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



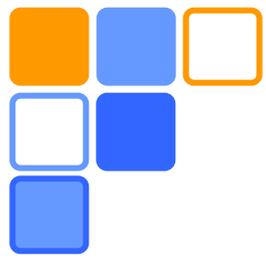
TOHOKU
UNIVERSITY

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、種BHへのガス降着率

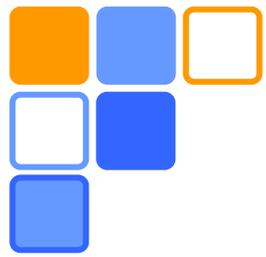
□ Methods

シミュレーションの設定

□ Results

ガスの角運動量による降着率低下、解析的理解

□ Conclusion



INTRODUCTION

超巨大BHの起源



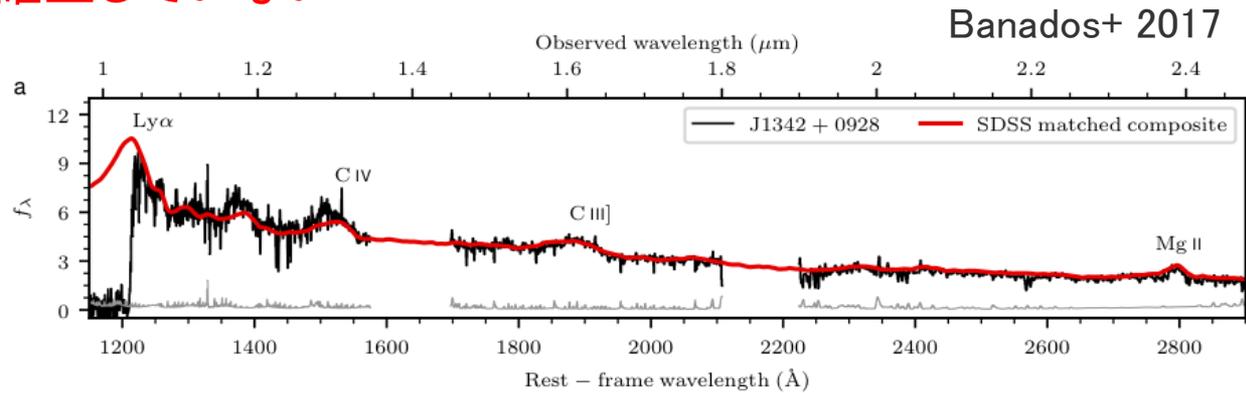
クエーサーのイメージ図
(Credit: ESO/M. Kornmesser)

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

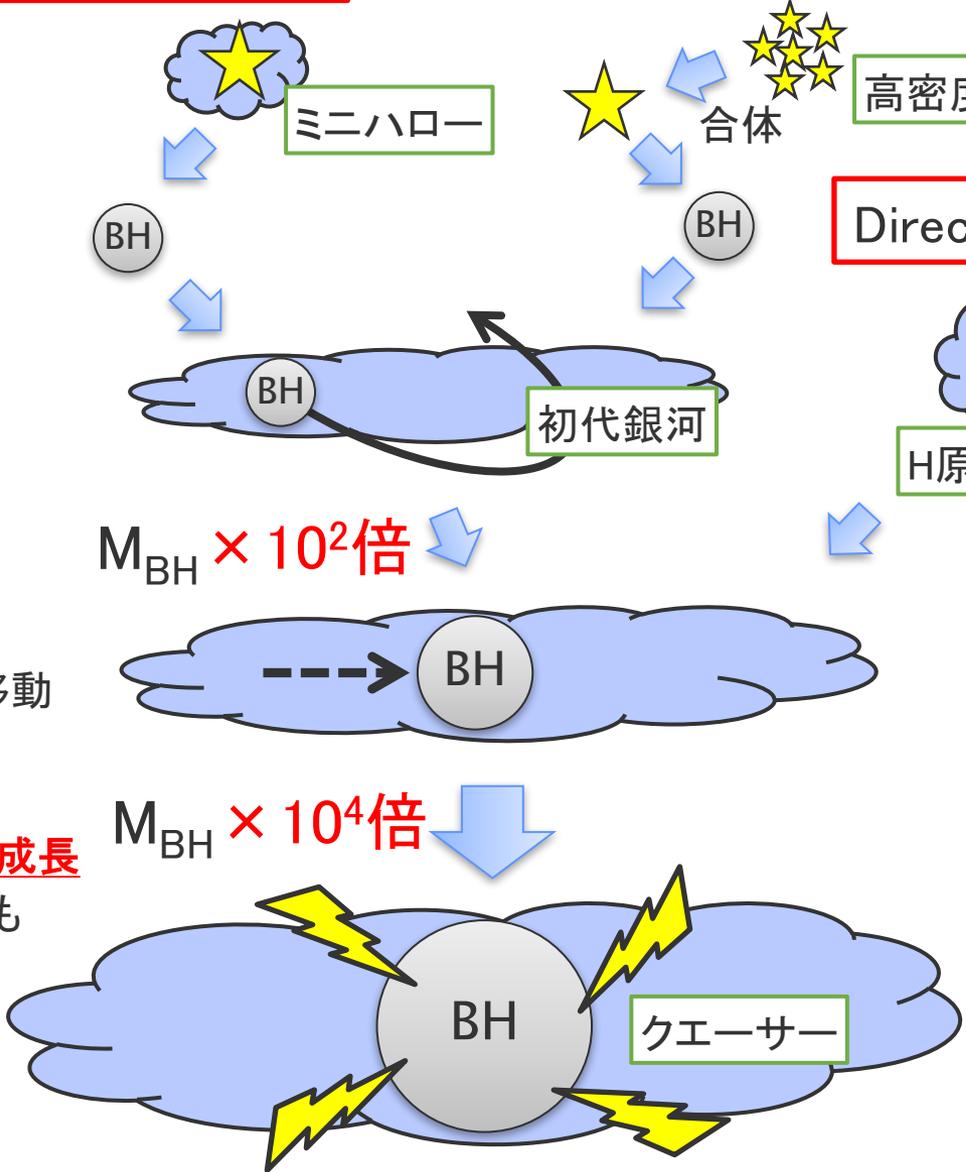
$z \sim 15$ (0.3Gyr)

力学的摩擦で中心に移動

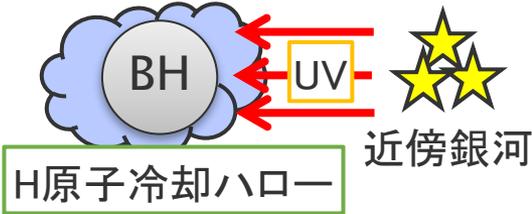
ガス降着によってさらに成長

SMBH同士の合体成長も

$z \sim 7$ (0.8Gyr)



Direct collapse シナリオ



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

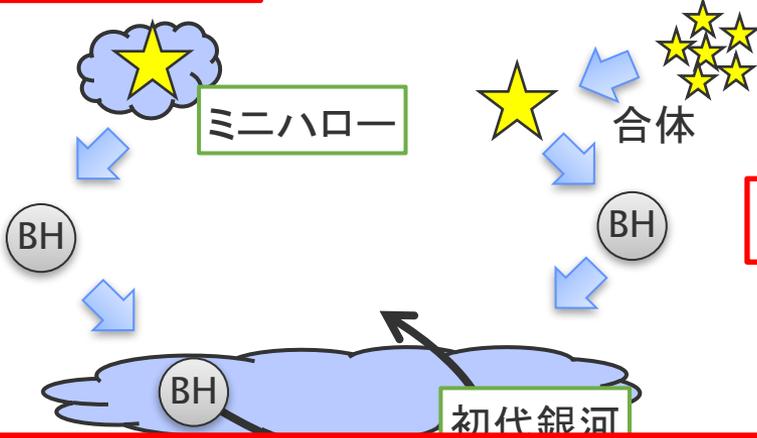
Dense cluster シナリオ (cf. Volonteri 12)

(cf. Volonteri 12)

$z \sim 20$ (0.2Gyr)

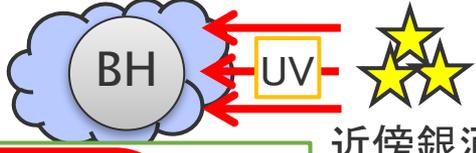
ハロー同士の合体に伴い初代銀河へ

ガス降着により成長



高密度星団

Direct collapse シナリオ



$z \sim 15$ (0.3Gyr)

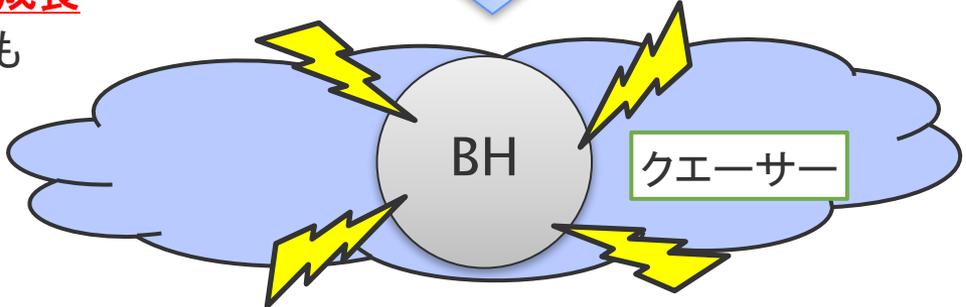
力学的摩擦で

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)



BHの質量

BH $10^3 M_{\odot}$

BH $10^5 M_{\odot}$

BH $10^9 M_{\odot}$

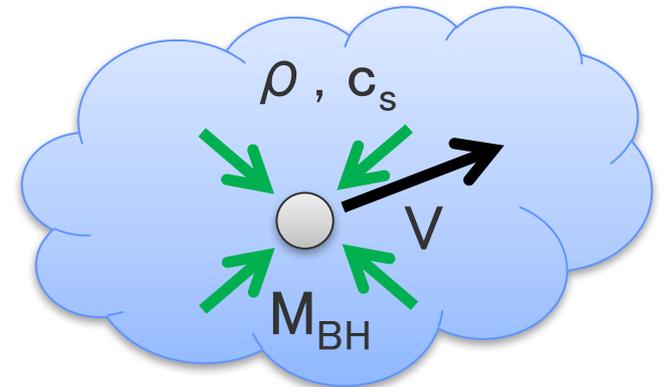
銀河シミュレーションなどでよく用いられる (単純過ぎる)降着率

- Eddington限界を課したBondi降着率

$$\dot{M} = \min(\dot{M}_B, \dot{M}_E)$$

- Bondi降着率 (一様ガスからの降着)

$$\dot{M}_B = \frac{4\pi G^2 M_{BH}^2 \rho}{(c_s^2 + V^2)^{3/2}}$$



- Eddington限界 (トムソン散乱輻射力= BH重力)

$$\dot{M}_E = \frac{4\pi G M_{BH} m_p}{\epsilon c \sigma_{es}}$$

$$L_E = \frac{4\pi G M_{BH} c m_p}{\sigma_{es}}$$

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

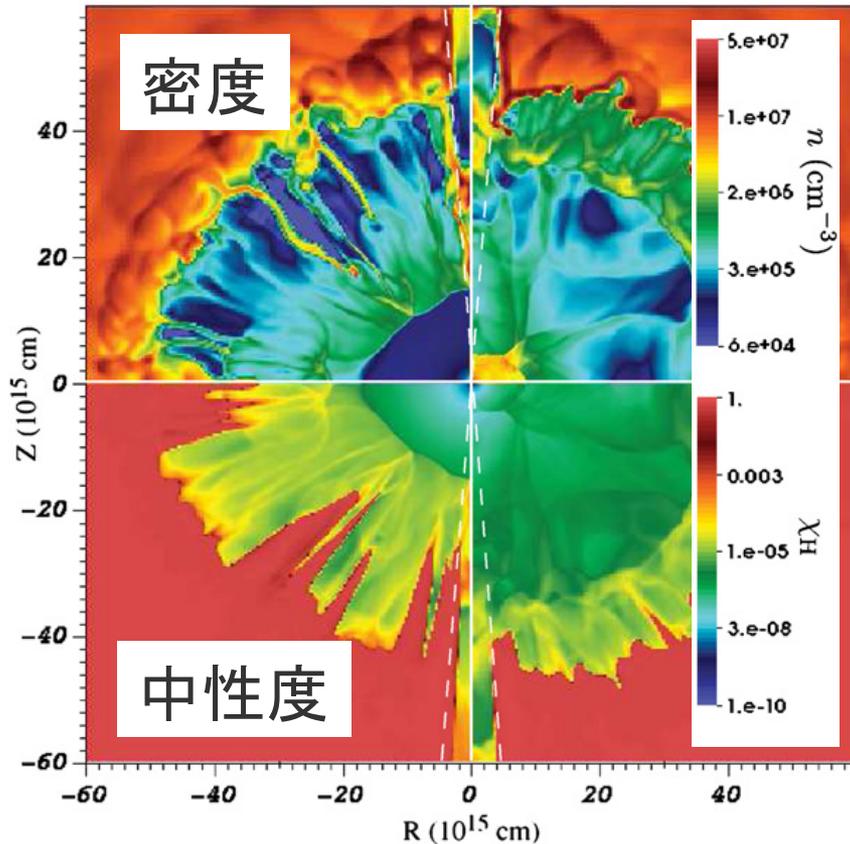
$$F_r = \frac{L \sigma_{es}}{4\pi r^2 c m_p}$$

$$F_g = \frac{G M_{BH}}{r^2}$$

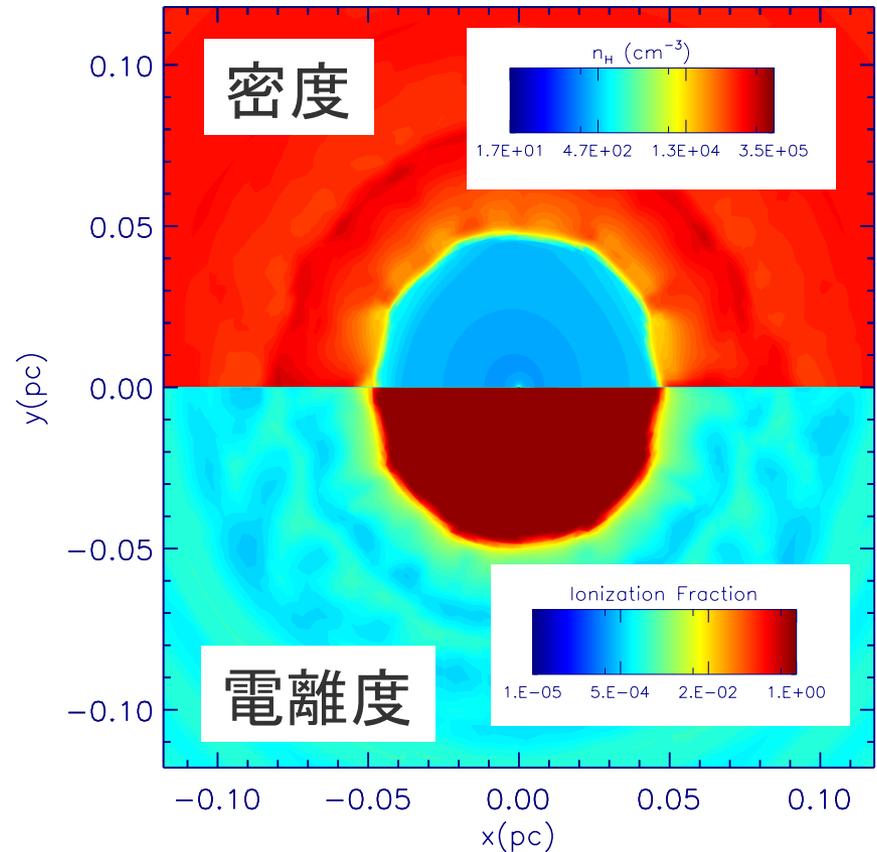
$$\epsilon \approx 0.1 \text{ (標準円盤)}$$

等方輻射下での種BHへのガス降着

Milosavljevic+ 09



Park&Ricotti 11

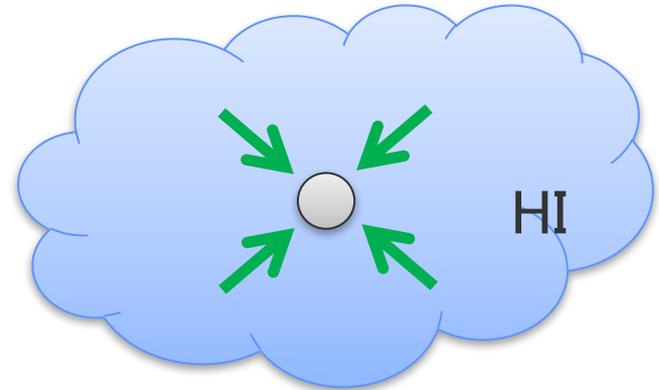


Eddington限界(トムソン散乱による輻射力)とは別の機構によりBHへの降着率が低下

電離加熱(高温ガスの圧力)による降着率低下

- 中性ガスからの降着 (Bondi降着)

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

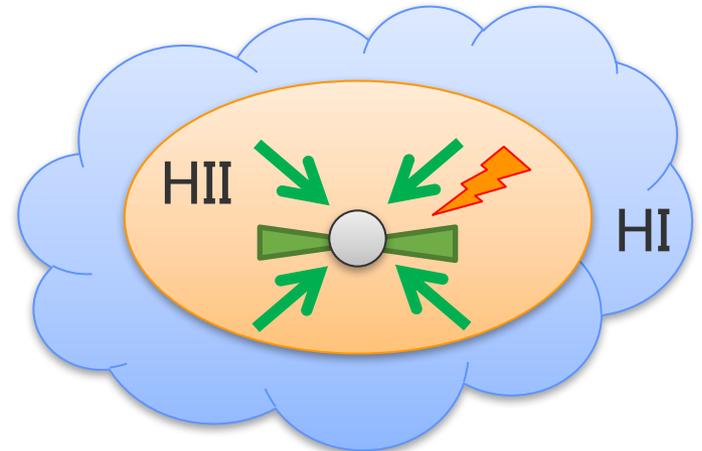


- 電離バブルからの降着

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

- 降着率が大きく低下

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

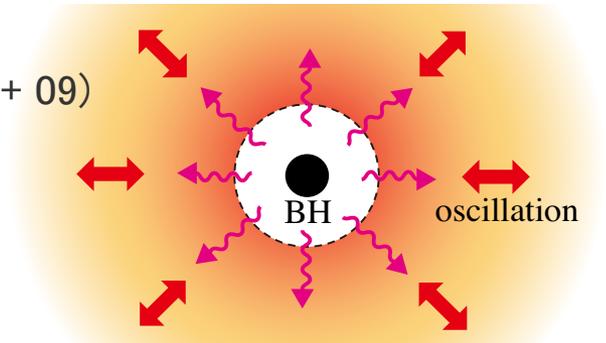


これでは、PopIII起源BHでは成長が間に合わない

非等方な輻射下での降着率 (KS+ 17, Takeo+ 17)

□ 等方輻射の場合 (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

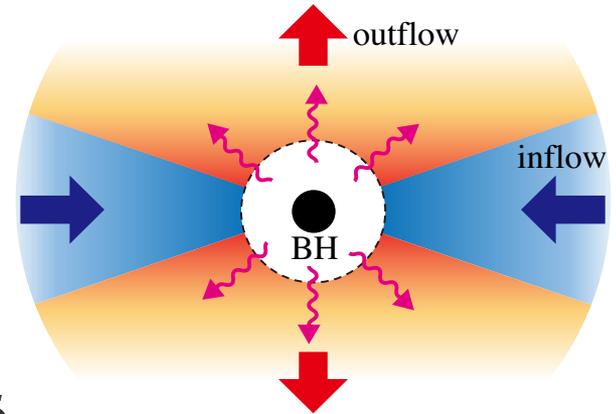


(但し、BH質量xガス密度が非常に大きい場合には例外的に高い降着率が実現; Inayoshi+16)

□ 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

$$\dot{M} = O(\dot{M}_B) \gg \dot{M}_E \text{ も可能}$$



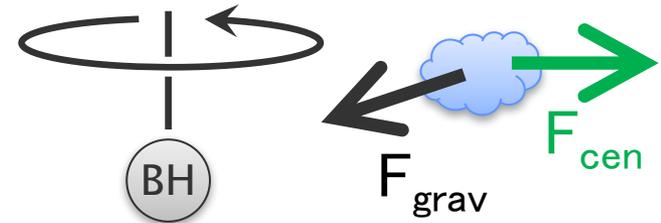
これならPopIII起源BHでも成長間に合う

問題点: ガスの角運動量の効果が考慮されていない

ガスの角運動量の効果

種BHへのガス降着の先行研究

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



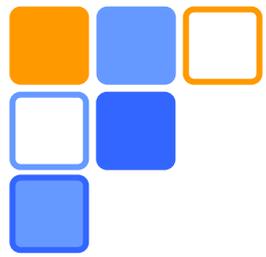
角運動量の影響

低光度活動銀河核(輻射フィードバック効かない)においては、角運動量の影響で降着率が下がる報告あり

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

研究の目的

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



METHODS

手法・モデル

- 公開流体コードPluto (Mignone+07) を改造
- 軸対称2D RHD シミュレーション
- 中心輻射のサブグリッドモデル
 - パラメータ化された非等方性
 - 降着率に応じた光度

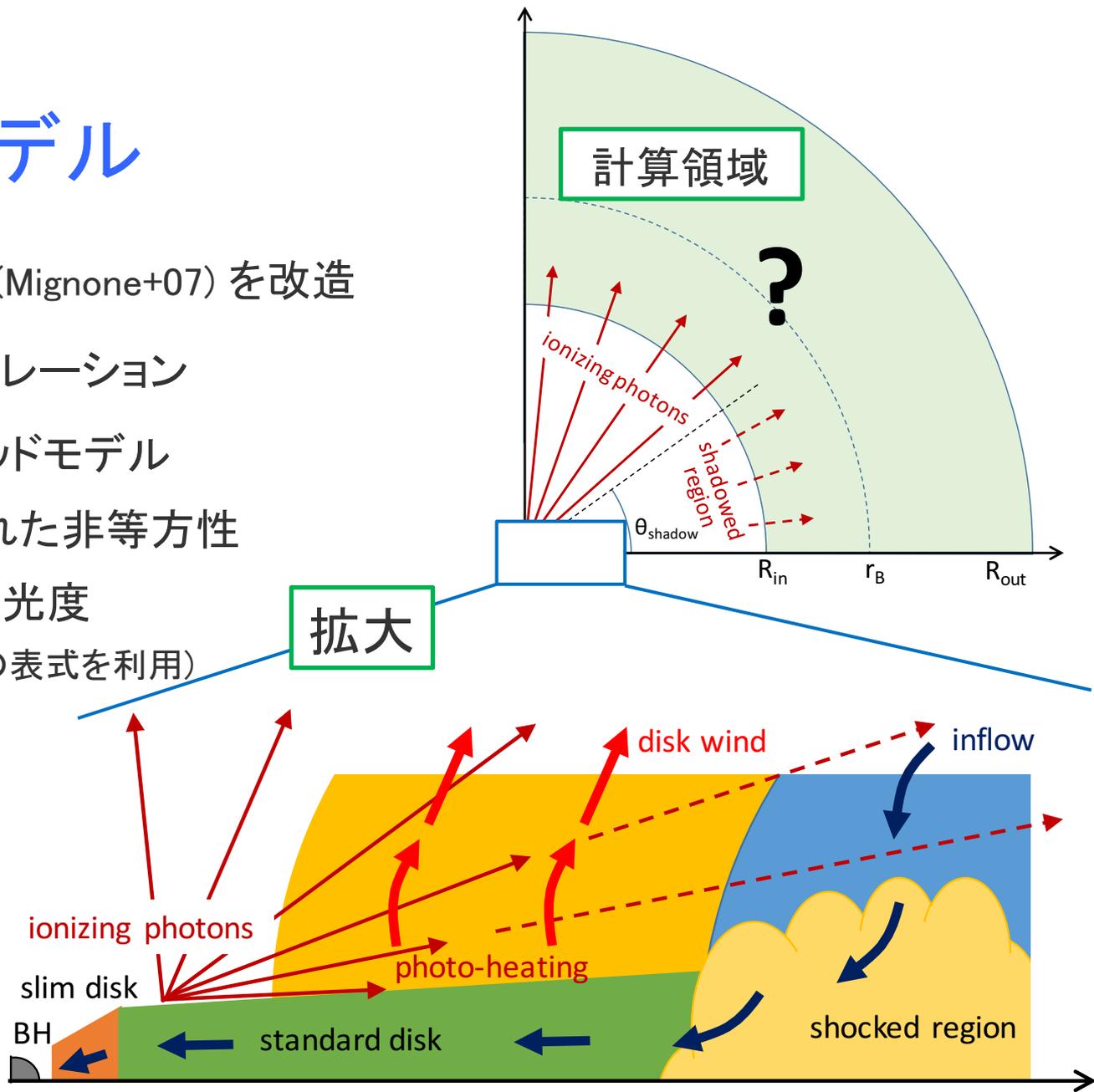
(Watarai+00の表式を利用)

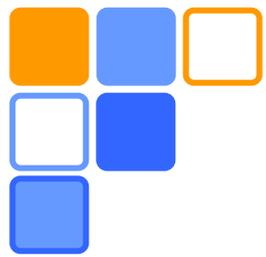
$$L = \epsilon \dot{M} c^2$$

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

$$< 0.1 \quad (\dot{M} \text{大})$$

- 円盤内で α 粘性を仮定 ($\alpha = 0.01$)

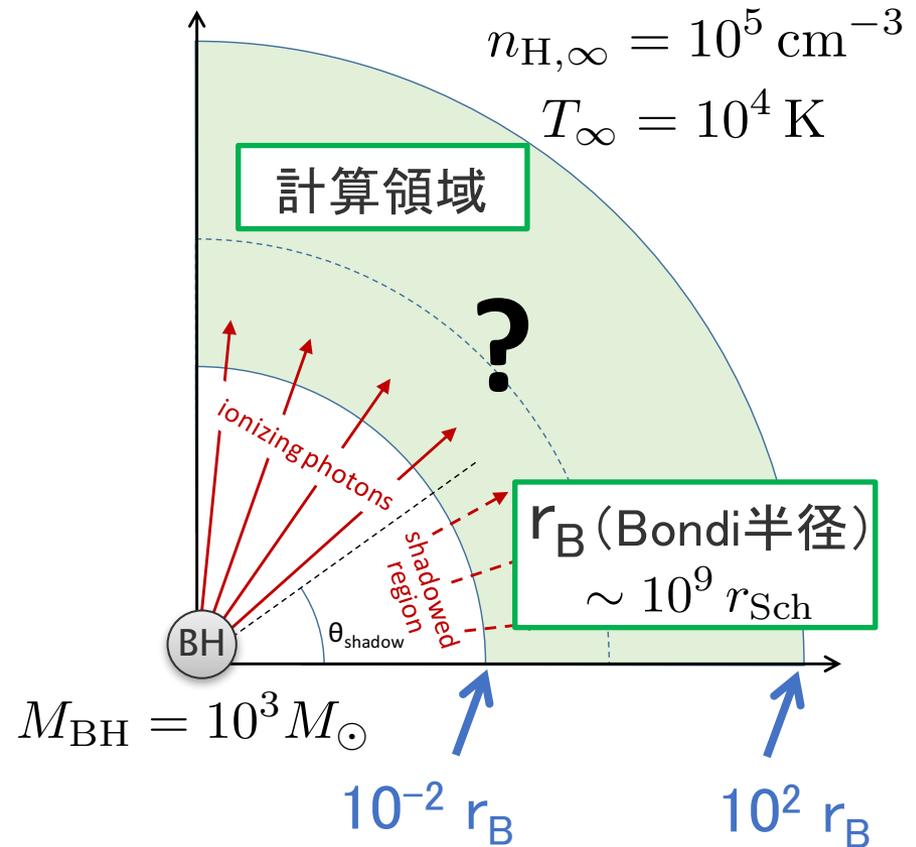




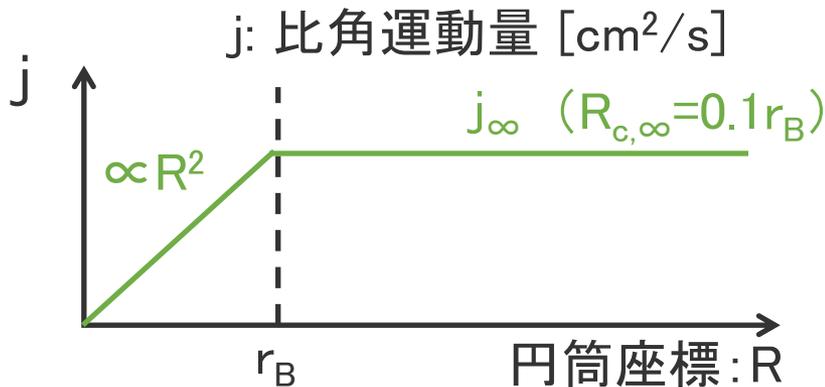
計算設定

□ BH質量、ガスの密度・温度

- 一様な始原ガス中にBHを配置
- グリッド数: $N_r \times N_\theta = 512 \times 144$



□ 初期比角運動量分布

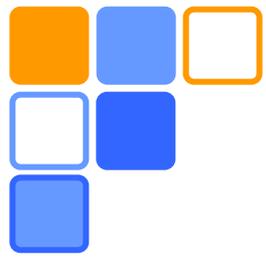


- $F_c = j^2/R^3$: 遠心力

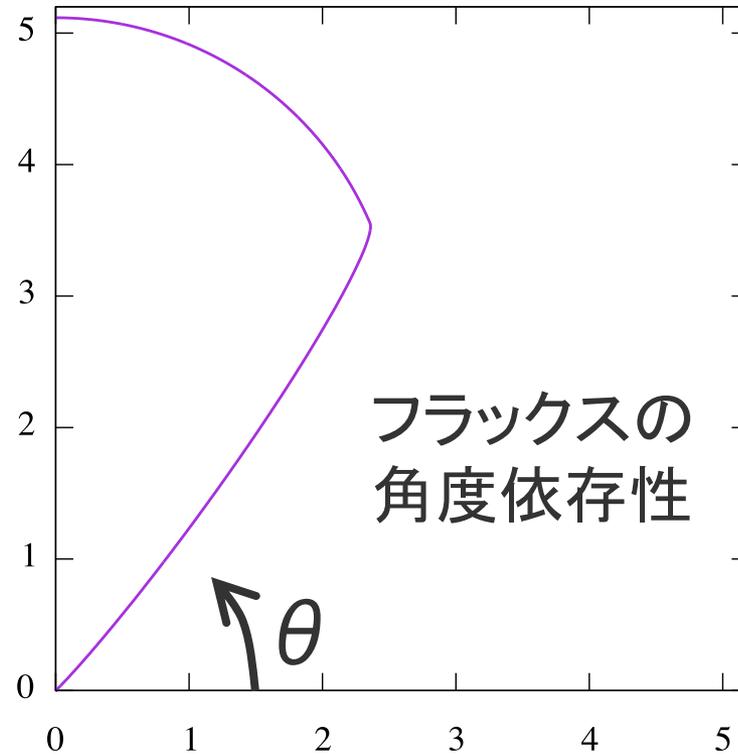
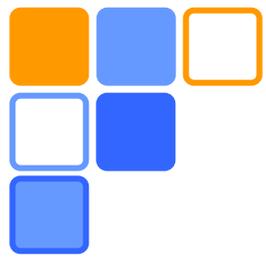
- $F_g = GM/R^2$: 重力

↓ 重力 = 遠心力

$R_c = j^2/GM$: 遠心力半径



RESULTS

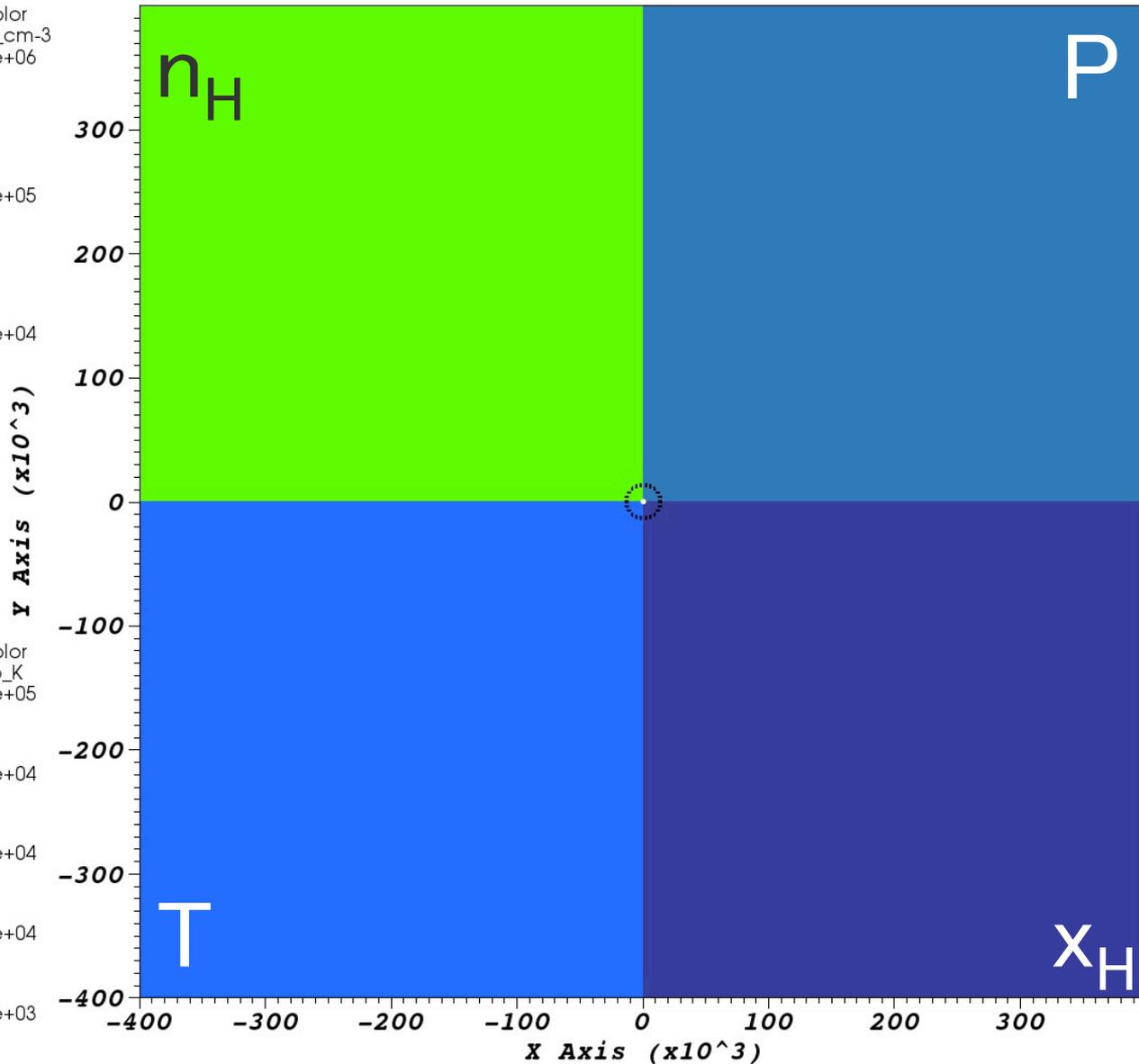
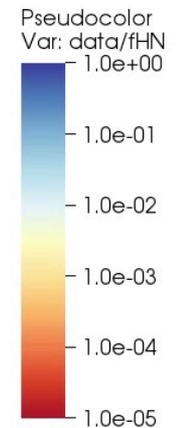
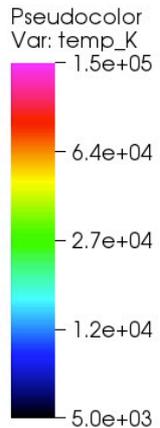
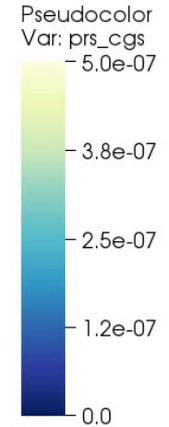
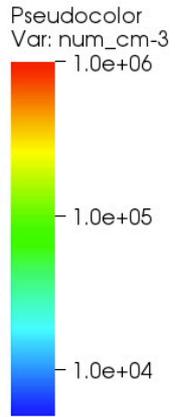
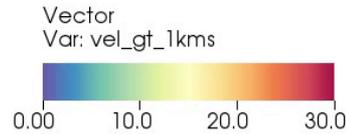


角運動量なし・非等方輻射の結果

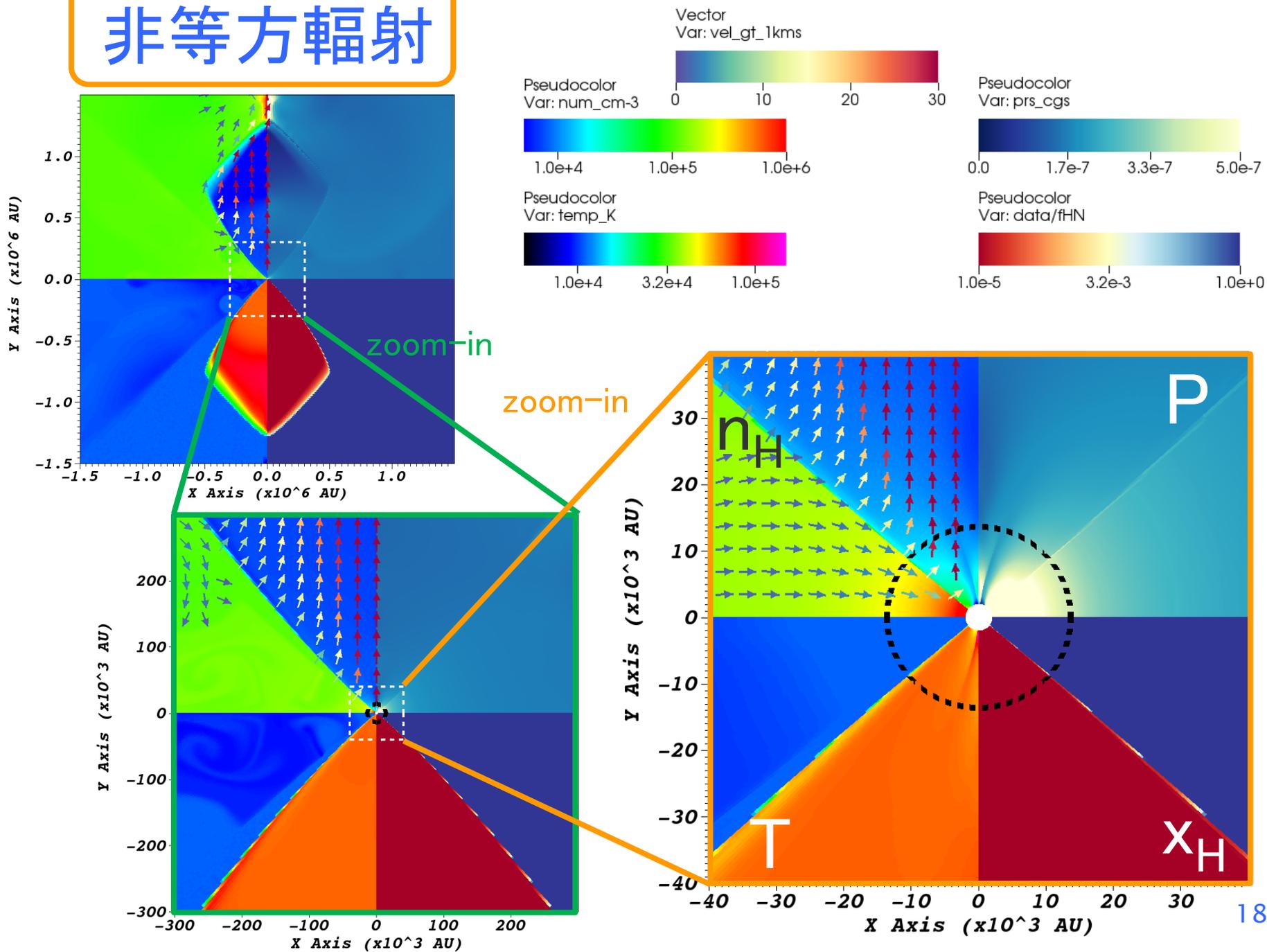
降着率が高くなる $\theta_{\text{shadow}} = 45$ 度の例 (KS+17)

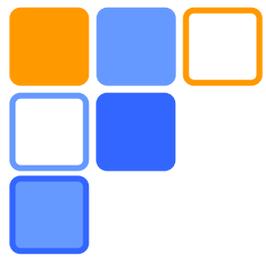
非等方輻射

DB: Data
Cycle: 0



非等方輻射

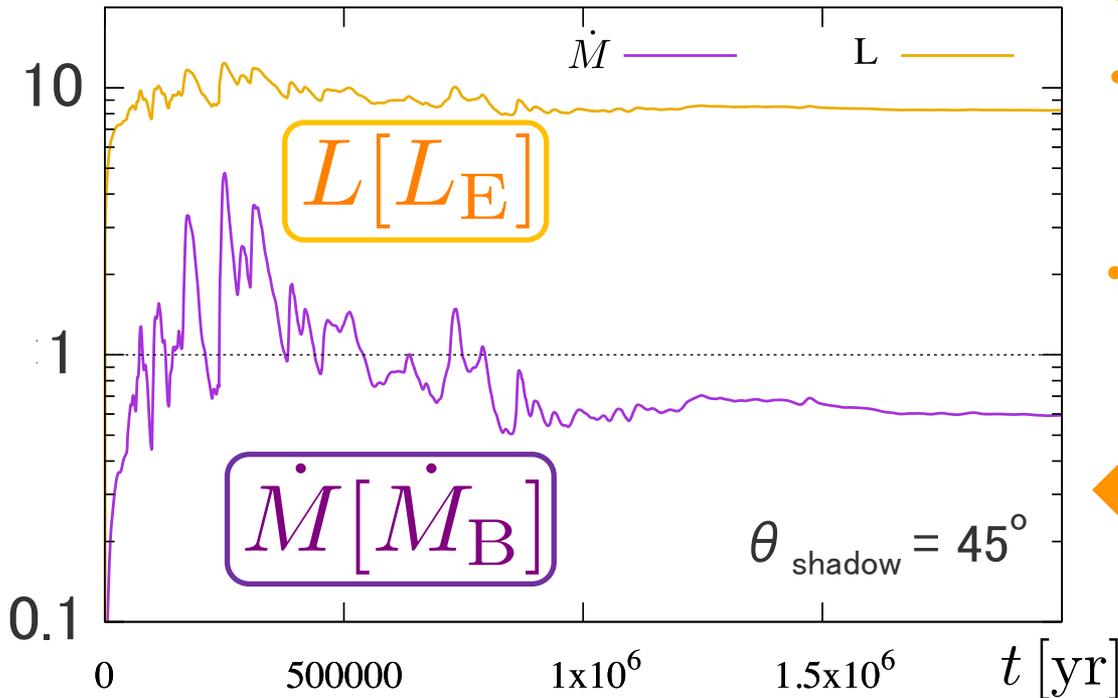




降着率・光度

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

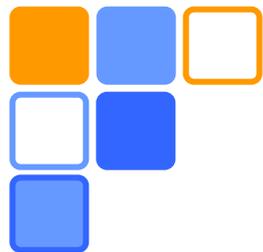
$$\dot{M} = O(\dot{M}_B)$$

◆ 降着率の θ_{shadow} 依存性

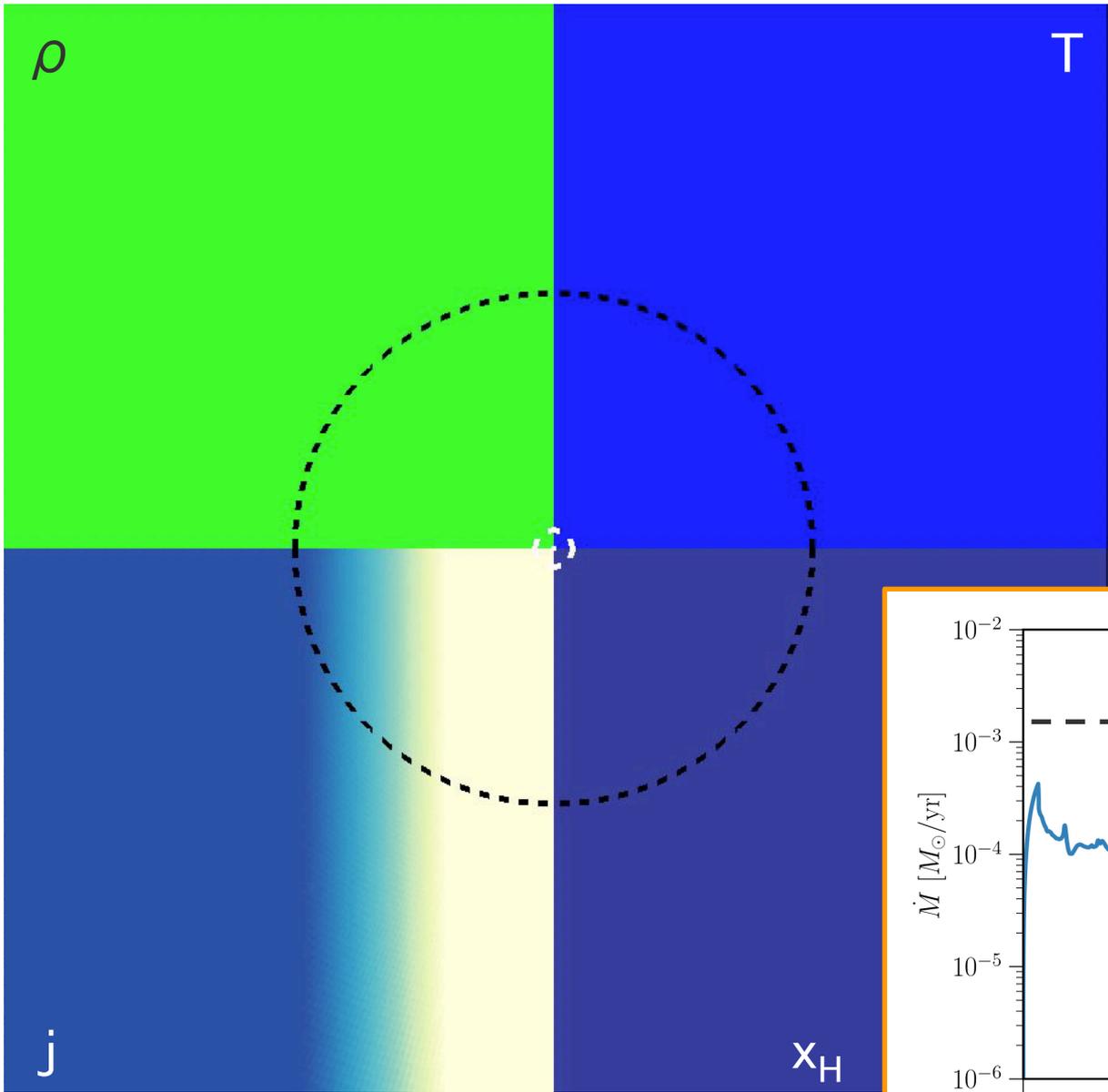
陰領域からのBondi的降着と、
電離/中性境界からの光蒸発
でモデル化可能

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！

しかし、角運動量の効果がまだ考慮されていない



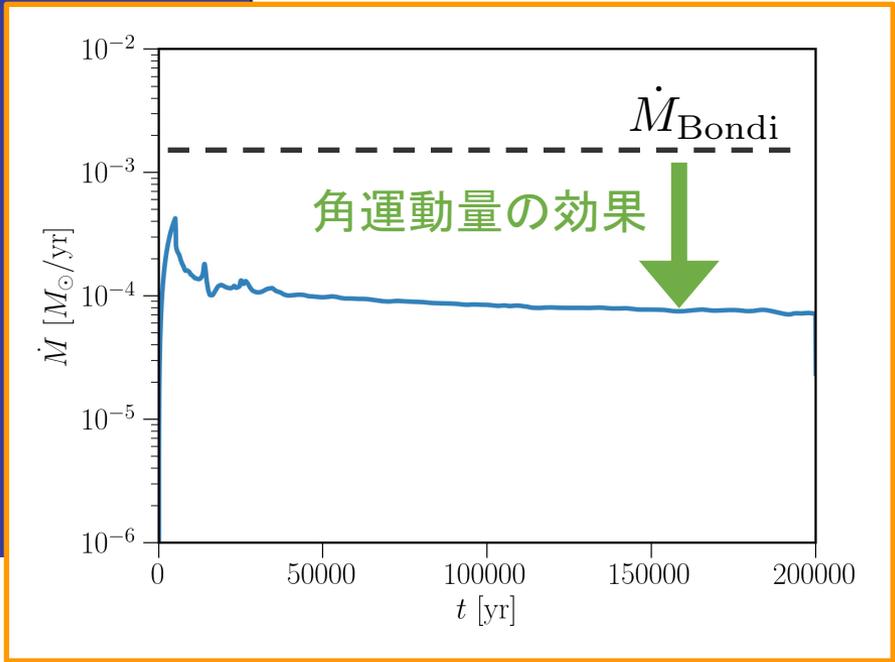
角運動量あり・輻射無しの結果

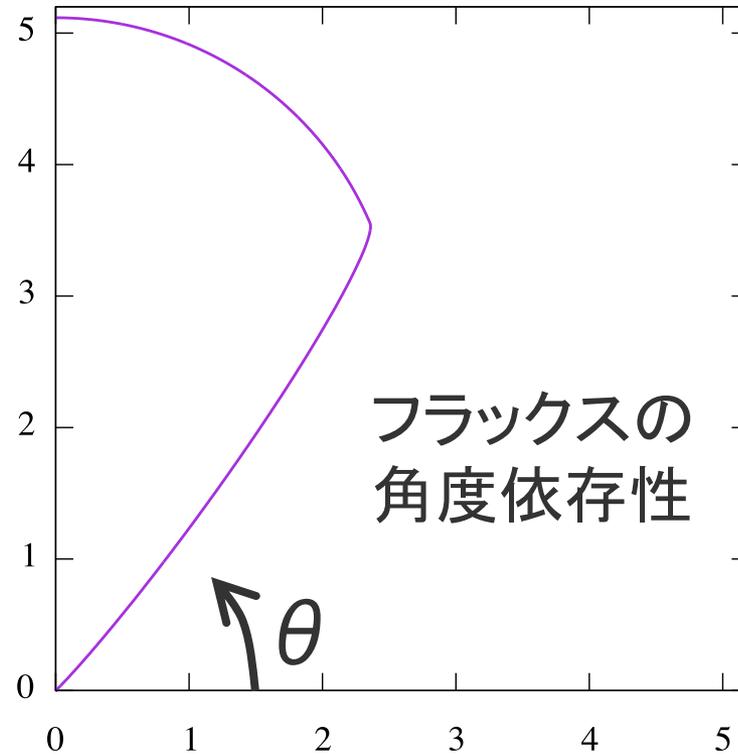
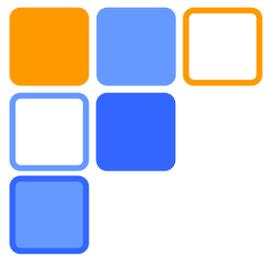


輻射OFF

- 赤道面に円盤が形成
- 軸付近の低角運動量ガスの流れ込みあり
- 降着率が大きく低下

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





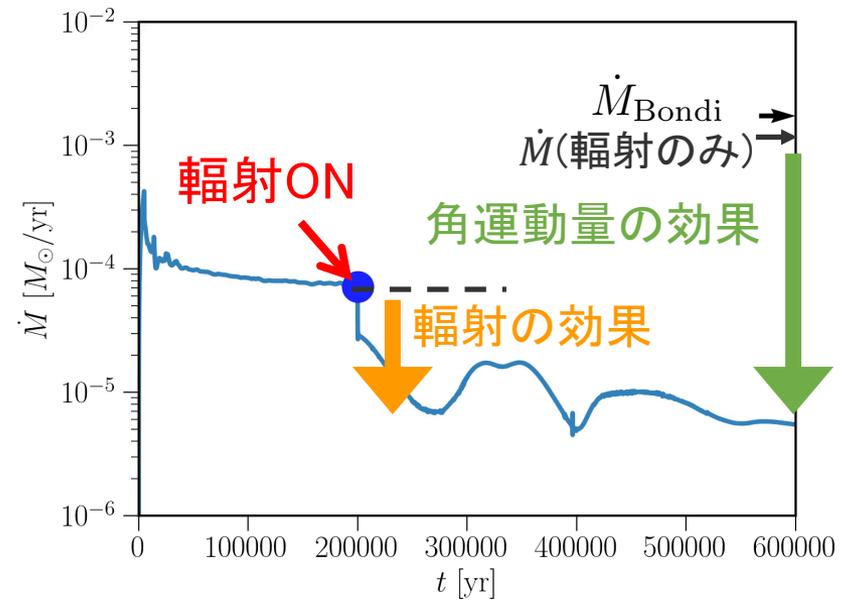
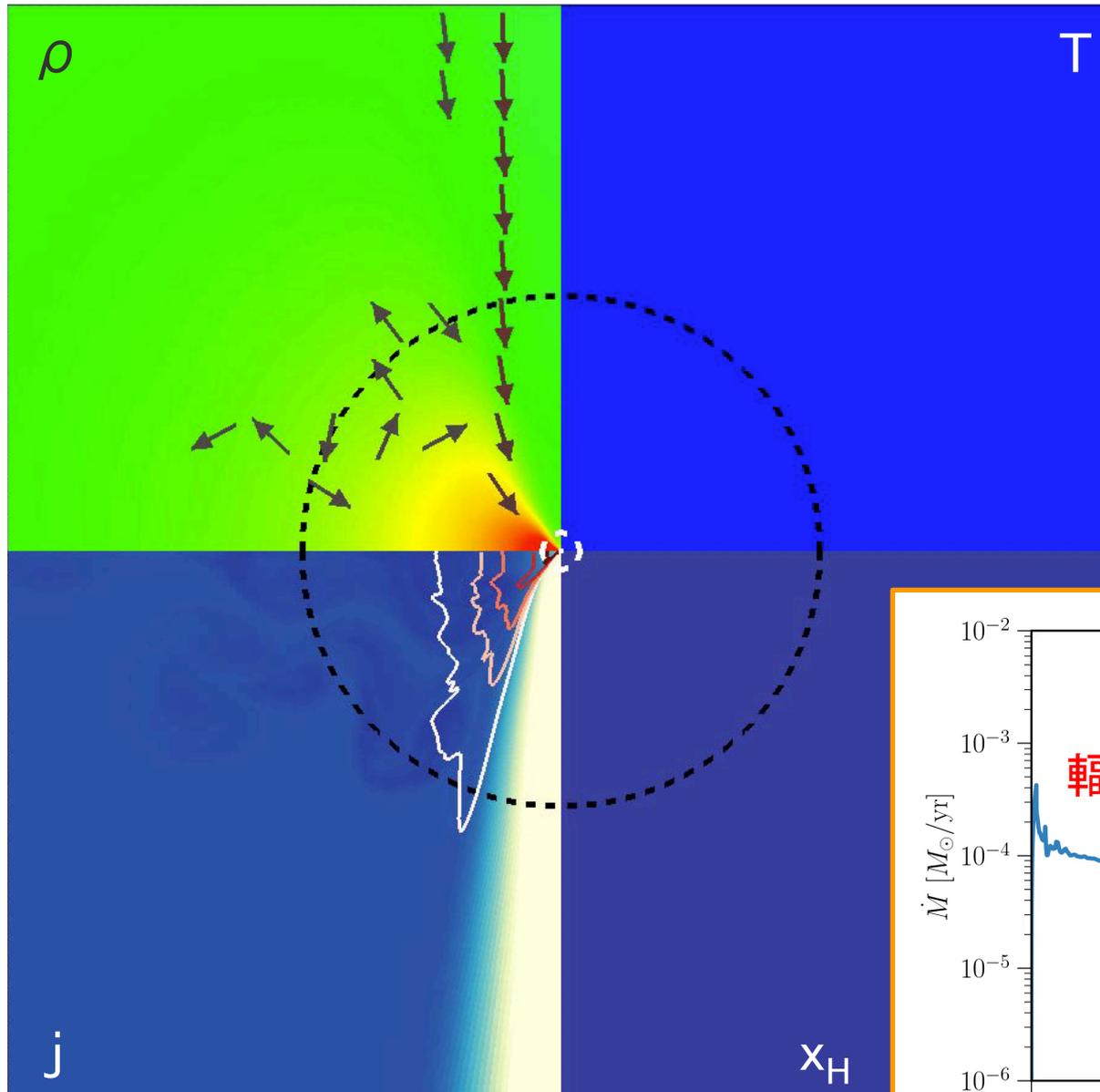
角運動量あり・非等方輻射の結果

輻射ON

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

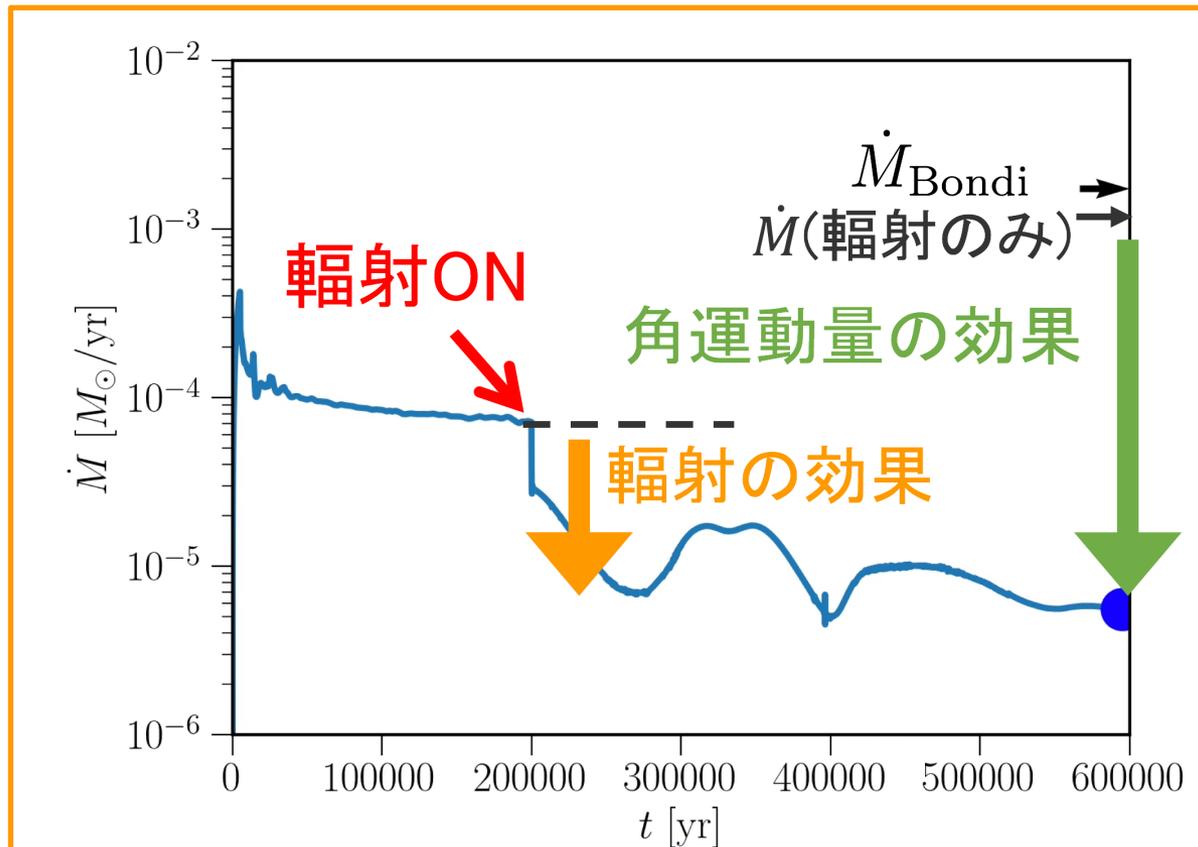
- 軸方向に光蒸発アウトフローが発生し、ガス降着は円盤を通じてのみ進む
- 降着率がさらに低下

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



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

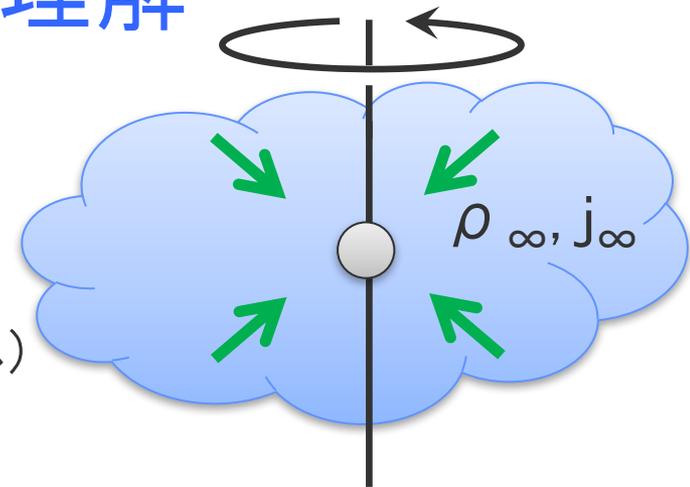
遠心力半径で二つの解を接続

外側: 力学平衡分布解

遠心力半径での面密度

内側: α 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

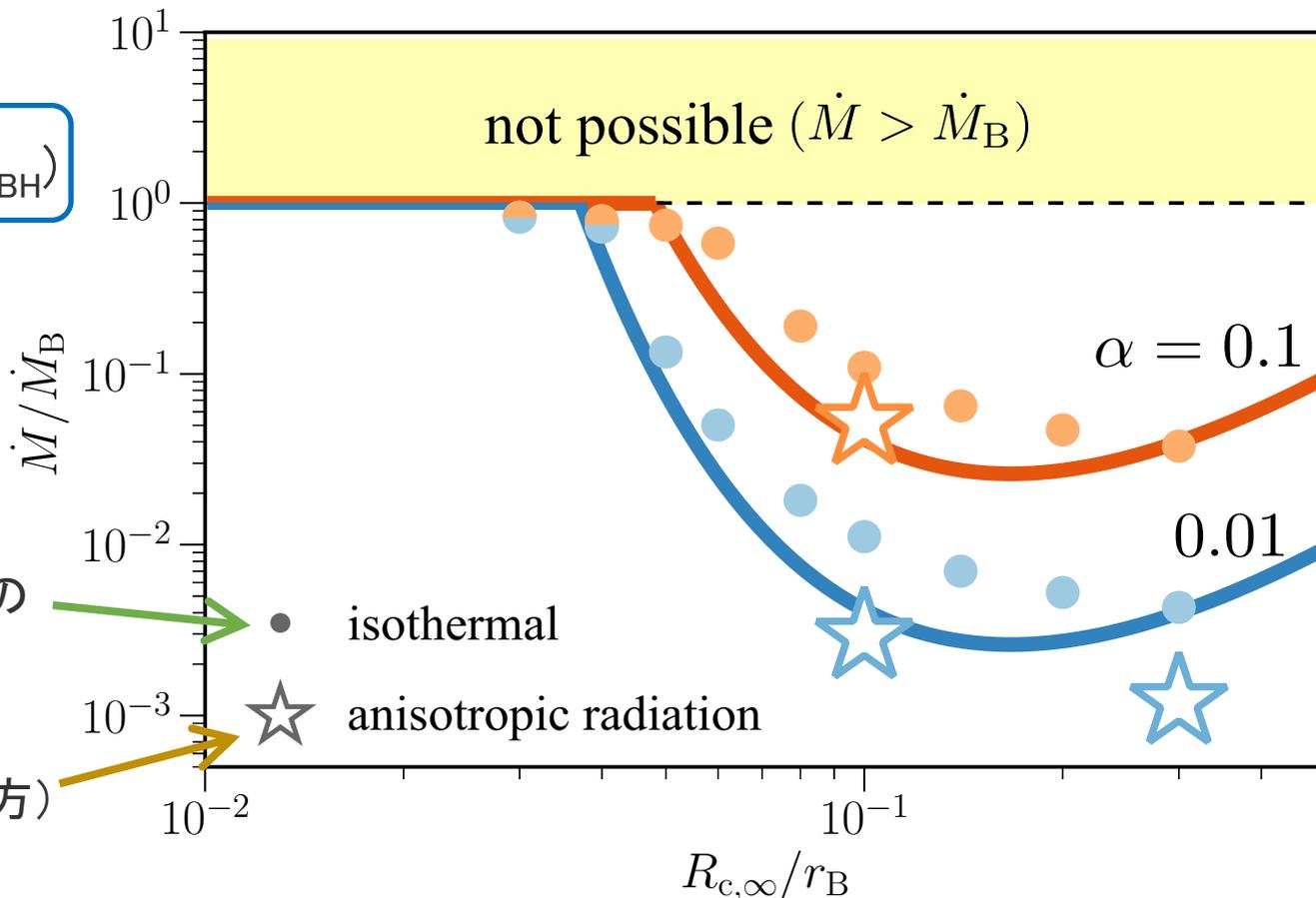
降着率の解析的表式

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

遠心力半径

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

not possible ($\dot{M} > \dot{M}_B$)



j一定媒質からの
等温ガス降着

輻射あり(非等方)

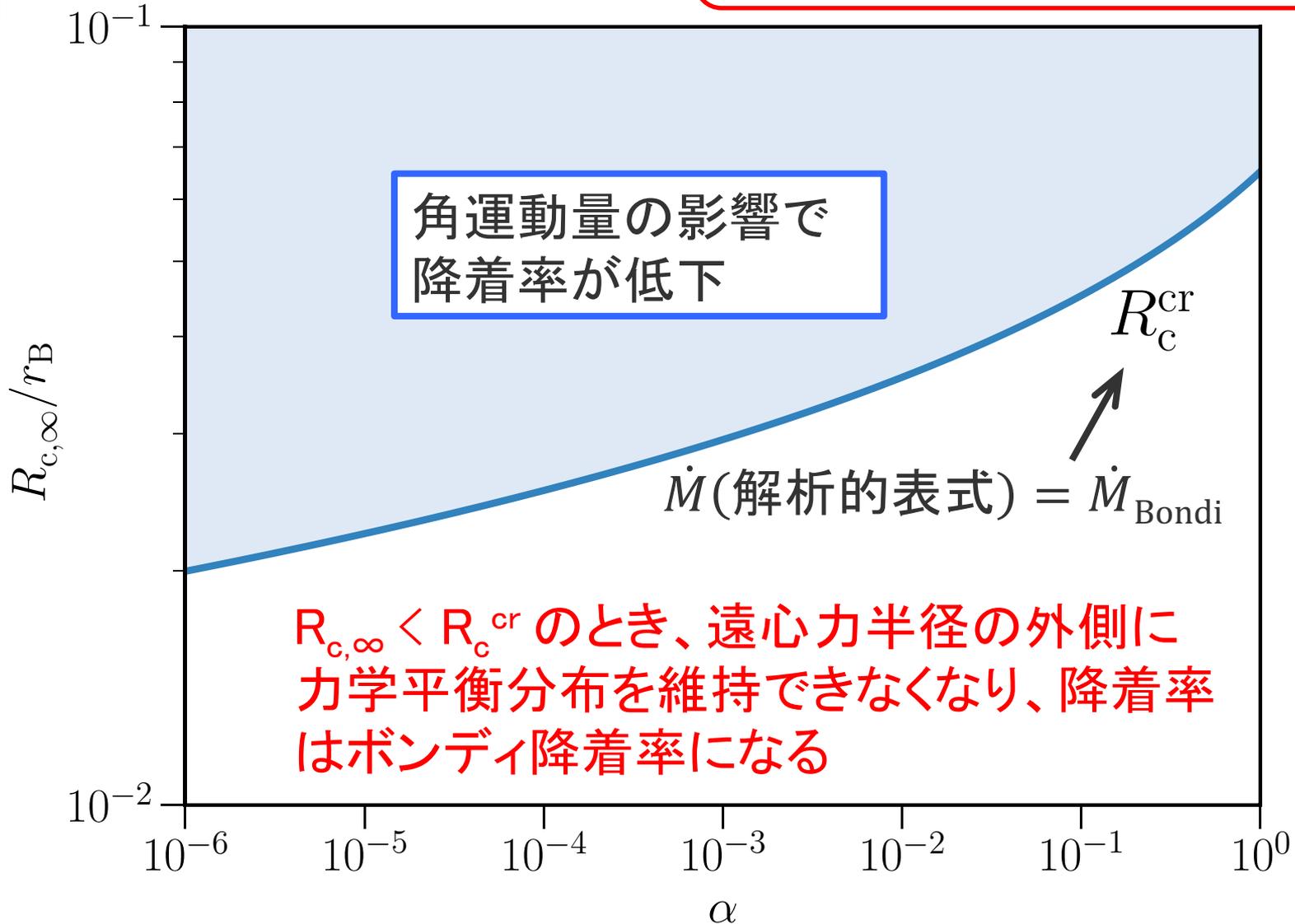
遠心力半径 $> 0.03 \times$ (Bondi半径) の時、降着率は大幅に低下！

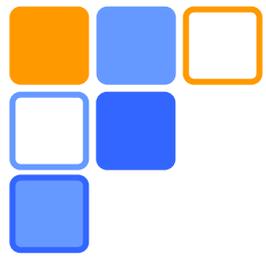
角運動量による降着率低下を解析的に理解

臨界角運動量

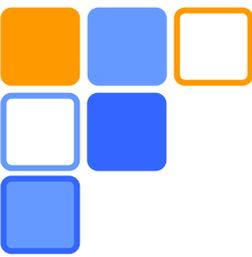
降着率の解析的表式

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





DISCUSSION & 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に可能となった高い(超臨界)降着率は、ガスの角運動量がある程度大きいとその影響で大幅に低下してしまうことがわかった
- 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、種BHが成長する環境(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