

ダスト再放射を考慮した 輻射流体計算コードの開発

行方 大輔 (筑波大学計算科学研究センター 神戸分室)

発表の流れ

1. 活動銀河核トーラスの数値計算の現状・動機
2. 輻射流体計算コードの開発状況、テスト計算
3. まとめと今後の課題

活動銀河核

活動銀河核 (AGN)

- AGNは宇宙で最も明るい天体の1つで、その光度は最大で $L_{bol} \approx 10^{47}$ [erg/s]に達する (e.g., Croom et al. 2002).
- AGNからの輻射や相対論的ジェットは、銀河形成に多大な影響 (e.g., Benson et al. 2003).

➡ AGNの活動性の理解は、銀河形成史を理解する上で重要。

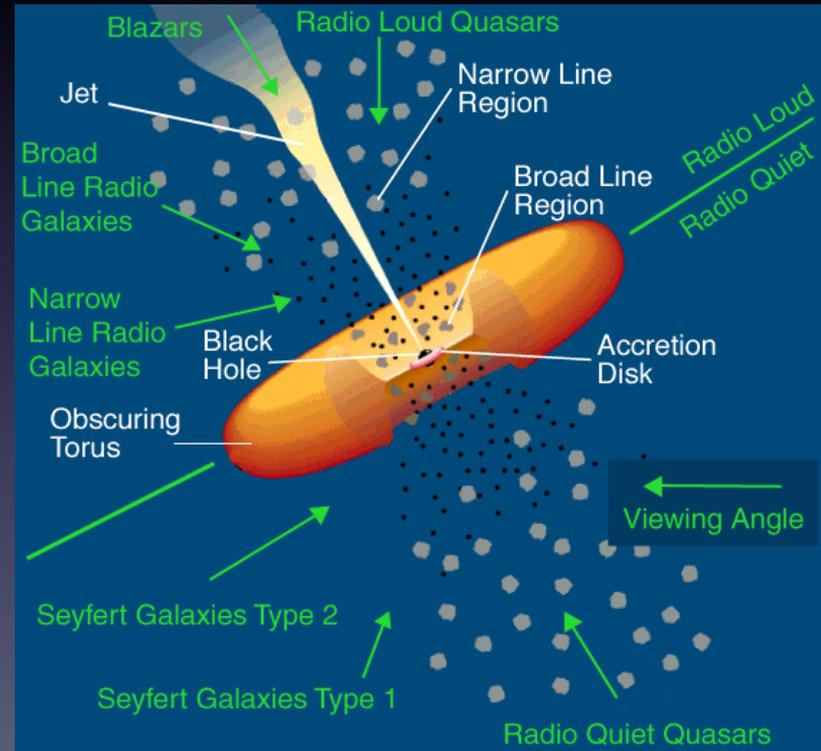
- ① AGN現象がいつ、どのように発現するか？
- ② AGNの型(QSO-mode/radio-mode)や強度がどのように決定されるか？
- ③ AGN現象はどれだけの期間持続するか？

AGNトーラスとトーラスモデル

- トーラスは降着円盤にとって重要なガス供給源。
- 直接観測が難しいため、トーラスの構造・ダイナミクスについては理解が進んでいない。

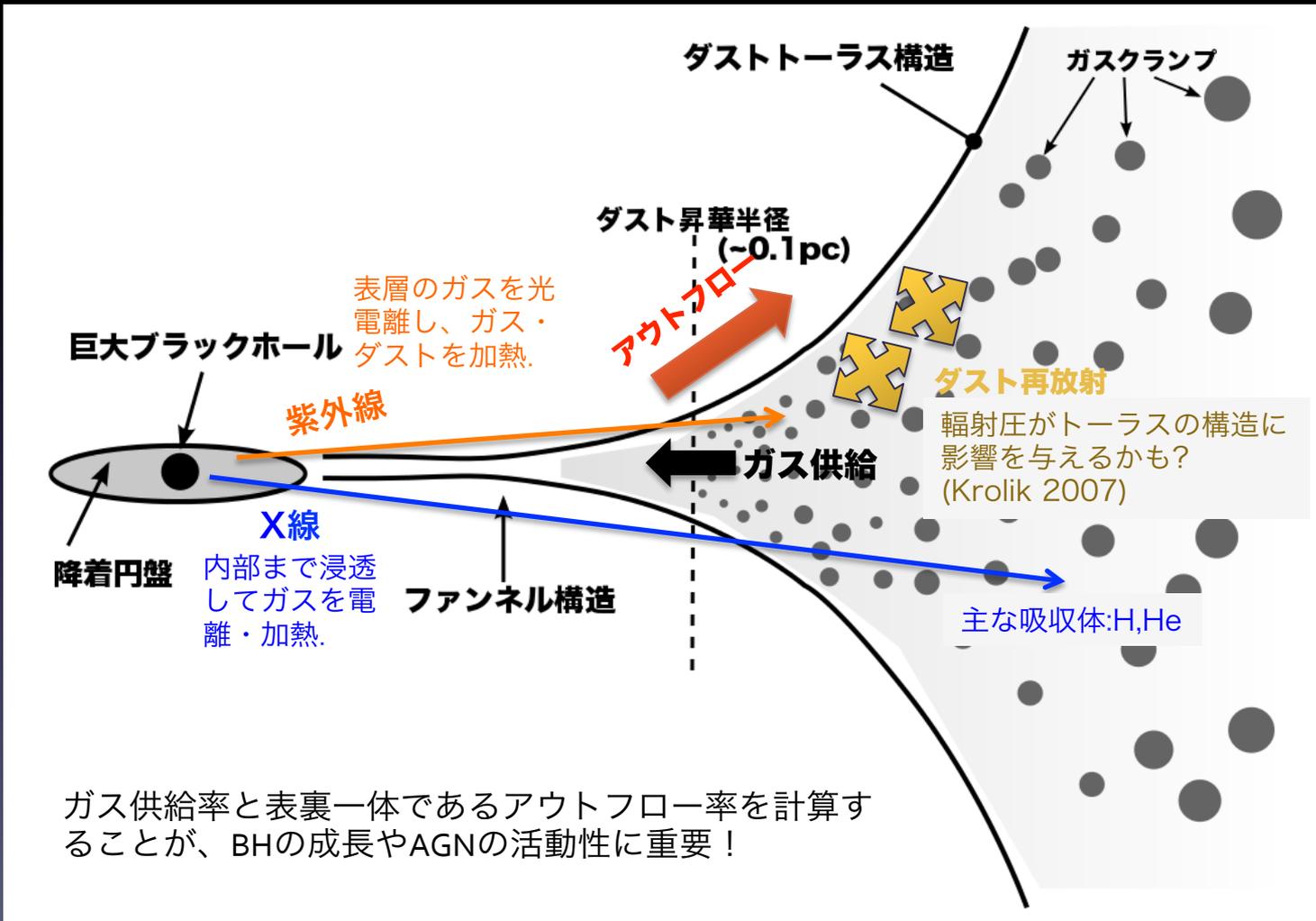
- 1) Warped disk モデル (Phinney 1989; Sandes et al. 1989)
- 2) 高速度分散のcloud/clump モデル (Krolik & Begelman 1988)
- 3) MHD wind モデル (e.g., Konigl & Kartje 1994)
- 4) 超新星爆発駆動乱流モデル (Wada & Norman 2002; Wada et al. 2009)
- 5) 輻射圧サポートモデル (Krolik 2007)
- 6) 輻射駆動 outflow/windモデル (Dorodnitsyn & Kallman 2012; Wada 2012)

AGNの想像図



(From http://www.auger.org/news/PRagn/about_AGN.html)

AGNトーラス内縁部



ガス供給率と表裏一体であるアウトフロー率を計算することが、BHの成長やAGNの活動性に重要!

先行研究

Wada (2012)

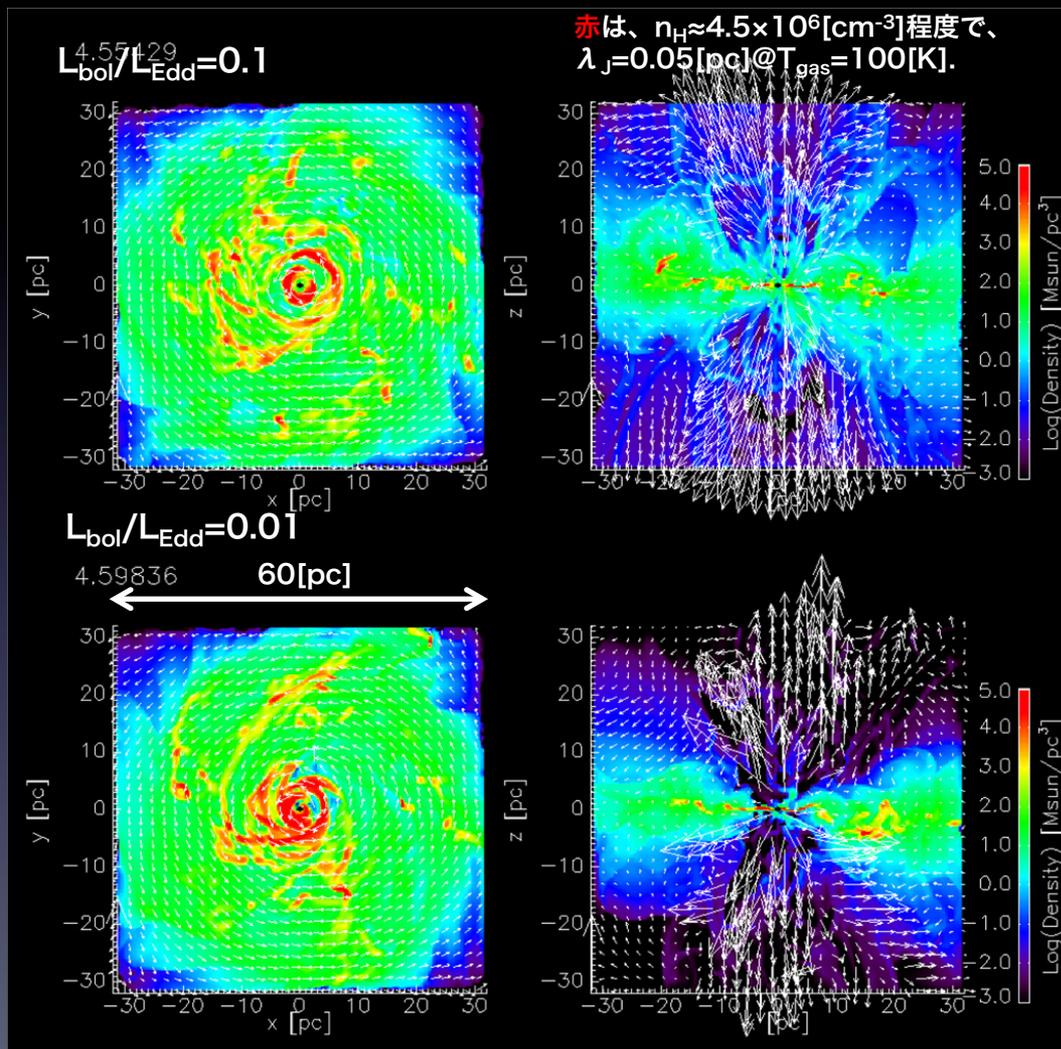
- 核周ガス円盤の3次元輻射流体計算。
 - ✓ 輻射は降着円盤からの直接光のみ
 - ✓ 降着円盤の放射の非等方性
 - ✓ X線加熱
 - ✓ 自己重力有り
- トーラス的な構造は、failed windの落下のエネルギーで駆動される乱流が維持。
- スナップショットに対して、SED計算すると、一部のspectral featureを除いて、観測とconsistent (Schartmann, Wada, et al. 2014)
- 中心1[pc]領域へのガス供給率は、 $2 \times 10^{-4} \sim 10^{-3} [M_{\odot}/\text{yr}]$.

問題点

AGN近傍で空間分解能が不足しており、星間ガス構造を十分に分解できていない可能性有り。

➡ ガス供給率やfailed windの \dot{M} に影響。

格子数 256^3 、 $\Delta x = 0.25 [\text{pc}] >$ ダスト昇華半径。



Dorodnitsyn & Kallman (2012)

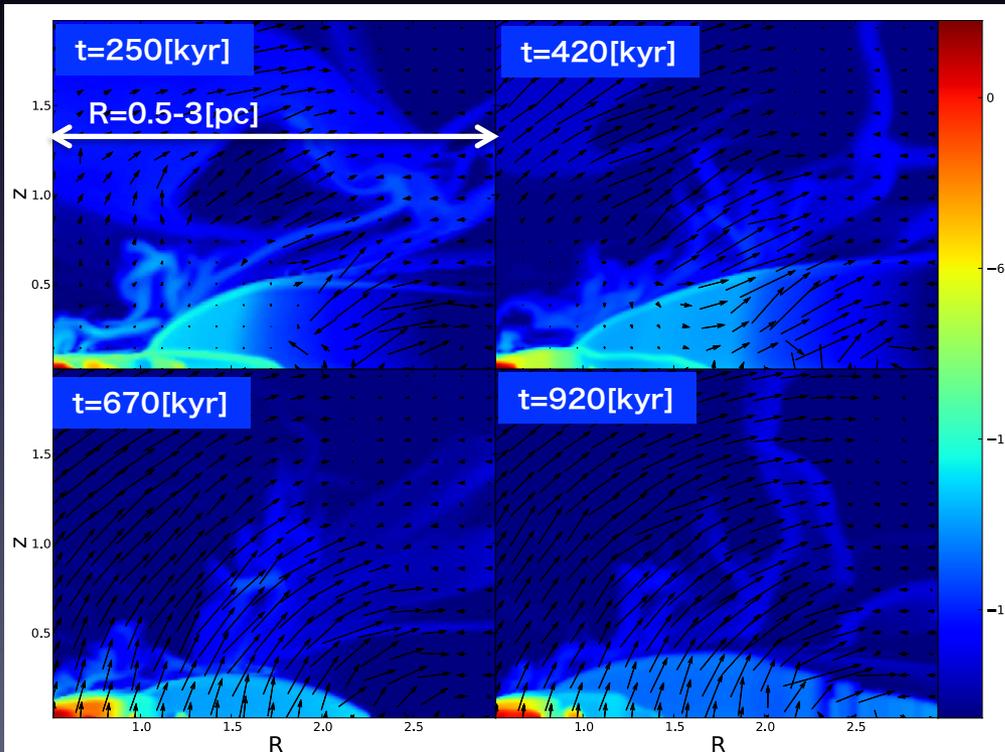
- $M_{\text{BH}}=10^7[M_{\odot}]$ の周りのAGNトーラスの軸対称輻射流体計算を $L_{\text{bol}}/L_{\text{Edd}}$ を変えて行い、トーラス構造のダイナミクスを調べた。
- IR-driven windによる質量損失率は、failed windを含めて、 $0.1-1.5[M_{\odot}/\text{yr}]$.

問題点

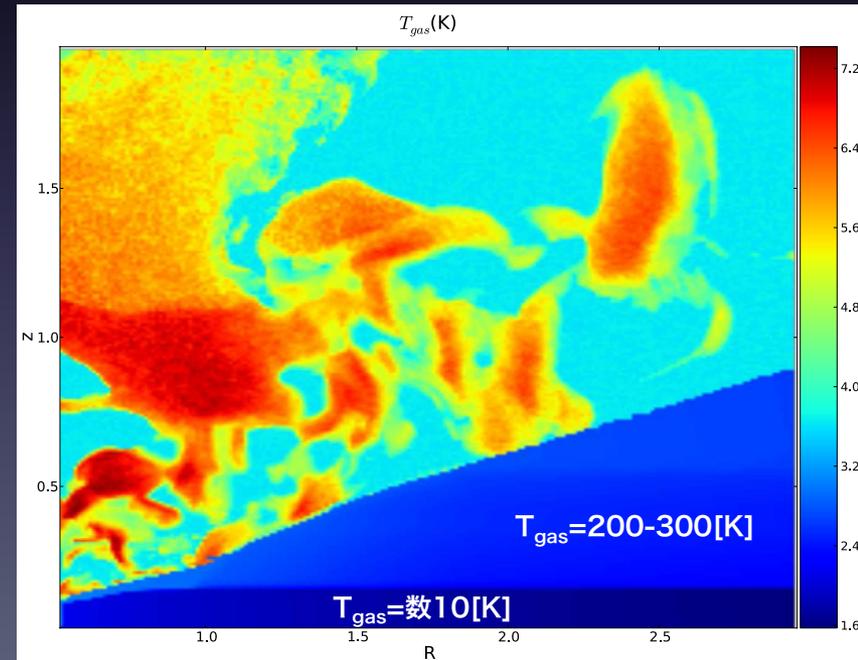
- ① 自己重力不安定な密度・温度にも関わらず、自己重力が考慮されていない。
- ② 仮定されている密度が大きすぎる。

→ トーラスの構造や質量損失率が変わる可能性有り

$L_{\text{bol}}/L_{\text{Edd}}=0.6$ の場合の密度分布の時間進化 (DK+12)



$L_{\text{bol}}/L_{\text{Edd}}=0.6$ の場合のガス温度の分布 ($t=420[\text{kyr}]$)



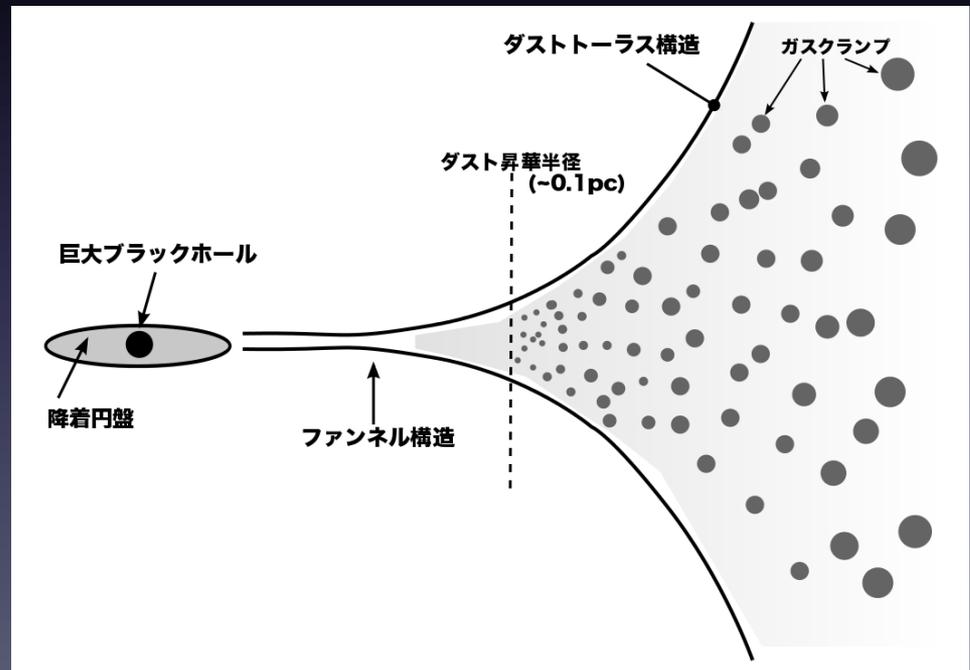
本研究

ダスト再放射を考慮した輻射流体計算によって、降着円盤へのガス供給にとって重要なAGNトーラス内縁部の構造・ダイナミクスを明らかにする。特に、以下の点に焦点を当てる:

- ① ダスト再放射に伴う輻射圧や自己重力不安定によって形成されるであるclumpが、トーラス全体の構造やダスト風による質量損失率にどのような影響を与えるか?
- ② AGNシステムのパラメータ(M_{BH} 、 M_{torus} 、 $L_{\text{bol}}/L_{\text{Edd}}$)依存性を明らかにする。



ダスト再放射と自己重力を考慮した2.5次元軸対称輻射流体計算の開発。
(最終的には3次元計算が必須)



数値計算方法の開発状況

各パートの計算方法

- 流体計算：近似リーマン解法 (HLL-CPS-Zroe法; Mandal & Panwar 2012)
- 自己重力計算: 軸対称版Tree法 ($\theta=0.35$)
- 輻射流体計算: Hybrid法
 - 1) 降着円盤・コロナからの直接光: Long-characteristics法
 - 2) ダスト再放射: 有限体積法
- 非平衡化学反応計算:
 - α -QSS法 (Mott et al. 2000)
 - 輻射輸送計算とカップルさせてiterativeに解く.

実装完了

ISMモデル

- 化学反応ネットワーク
- 放射過程・熱過程

現在

$(e^-, p^+, H, H_2, Dust)$ のネットワーク
反応数: 10



拡張作業中

$(e^-, p^+, H, H^-, H_2, H_2^+, He, He^+, He^{++}, Dust)$
のネットワーク
反応数: 約40

- (1) HのCase B 再結合放射
- (2) (p, e^-) の制動放射
- (3) HIとH₂の衝突電離/衝突励起冷却
- (4) H₂の潜熱
- (5) ガスとダストの衝突熱交換

現在



拡張作業中

$H^-, H_2^+, He, He^+, He^{++}$ に関連する放射過程

有限体積法

- 有限体積法に基づいて、輻射輸送方程式を解く方法で、主に工学応用の研究分野で開発された (Chui et al. 1992; Tian & Chui 2005; Kim 2008, etc.).
- 輻射エネルギーを保存させることができる。

I_ν が、立体角 $\Delta\Omega^{lm}$ ・体積 ΔV で一定と仮定し、保存形の輻射輸送方程式

$$\frac{\partial I_\nu}{\partial t} + \nabla \cdot (I_\nu \mathbf{n}) = -\chi_\nu I_\nu + j_\nu + S_\nu$$

を立体角 $\Delta\Omega^{lm}$ 、体積 ΔV で積分し、ガウスの定理を使って積分形に変換し、それを解く。

例えば、風上スキーム(STEPスキーム)では、 $\mu^l > 0$ 、 $\pi/2 < \phi^m < \pi$ のrayに対して、以下の方程式が得られる:

(i) $\phi = \pi$ に隣接する ϕ^m ビンの場合 ($m = N_\phi$ の場合)

$$\left[\frac{D_z^{lm}}{\Delta z_j} + \frac{R_{i+\frac{1}{2}}}{R_i \Delta R_i} C_+^{lm} - \frac{R_{i-\frac{1}{2}}}{R_i \Delta R_i} (K_0^{lm} + C_+^{lm}) + \chi \Delta\Omega^{lm} + \frac{\Delta\Omega^{lm}}{c\Delta t} \right] I_{ij}^{lm}$$

$$= j_{\text{eff}} \Delta\Omega^{lm} + \frac{D_z^{lm}}{\Delta z_j} I_{i,j-1}^{lm} - \frac{R_{i+\frac{1}{2}}}{R_i \Delta R_i} K_0^{lm} I_{i+1,j}^{lm} + \frac{\Delta\Omega^{lm}}{c\Delta t} I_{0,ij}^{lm}$$

m に関する漸化式の形になる ($m = N_\phi \rightarrow 1$ の順序で計算)。

(ii) それ以外の場合 ($N_\phi/2 + 1 \leq m < N_\phi$ の場合)

$$\left[\frac{D_z^{lm}}{\Delta z_j} + \frac{R_{i+\frac{1}{2}}}{R_i \Delta R_i} C_+^{lm} - \frac{R_{i-\frac{1}{2}}}{R_i \Delta R_i} (K_0^{lm} + C_+^{lm}) + \chi \Delta\Omega^{lm} + \frac{\Delta\Omega^{lm}}{c\Delta t} \right] I_{ij}^{lm}$$

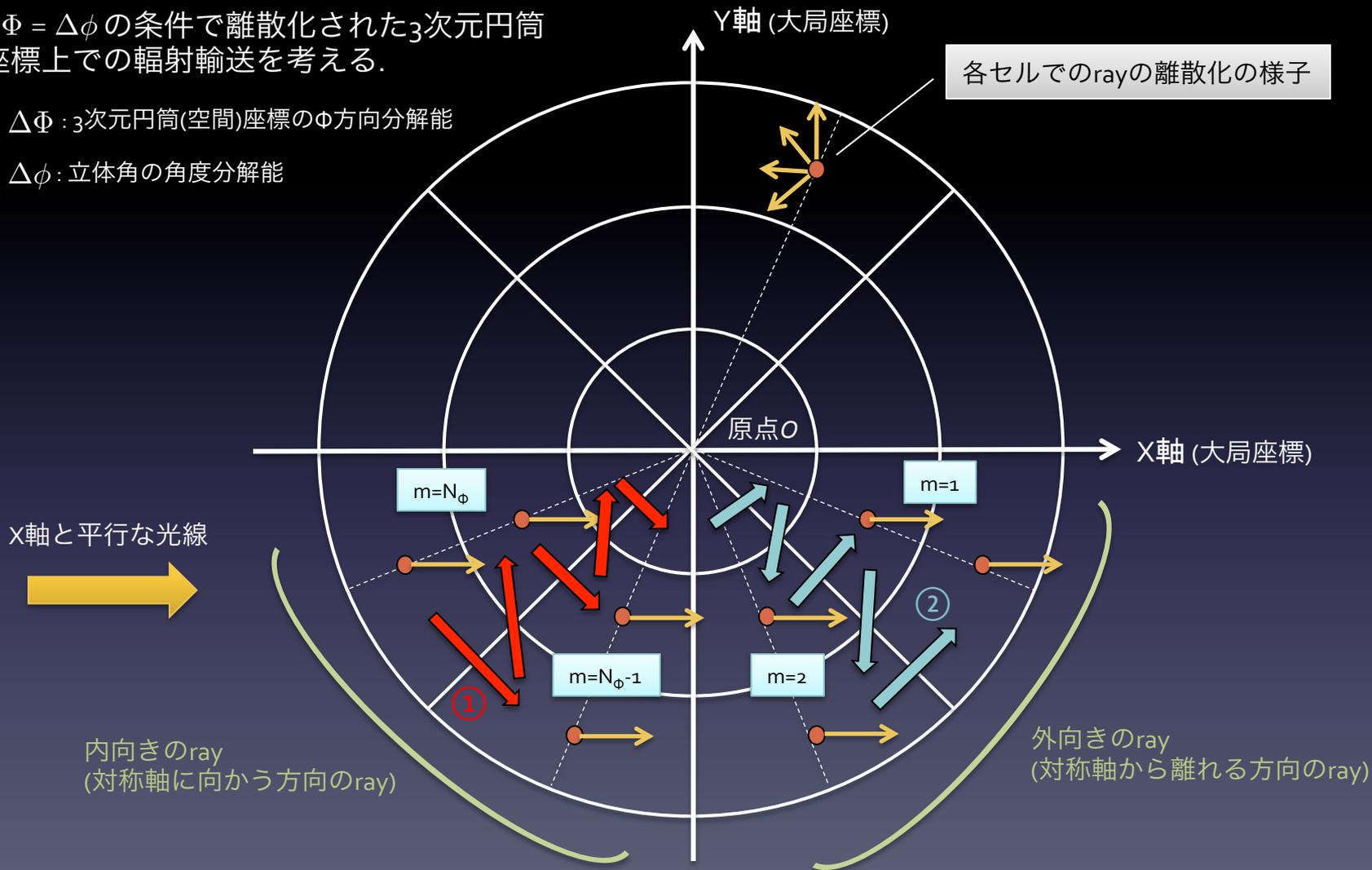
$$= j_{\text{eff}} \Delta\Omega^{lm} + \frac{D_z^{lm}}{\Delta z_j} I_{i,j-1}^{lm} - \frac{R_{i+\frac{1}{2}}}{R_i \Delta R_i} (K_0^{lm} I_{i+1,j}^{lm} + C_-^{lm} I_{ij}^{l,m+1}) + \frac{R_{i-\frac{1}{2}}}{R_i \Delta R_i} C_-^{lm} I_{ij}^{l,m+1} + \frac{\Delta\Omega^{lm}}{c\Delta t} I_{0,ij}^{lm}$$

(i)から求まる

有限体積法 (続き)

$\Delta\Phi = \Delta\phi$ の条件で離散化された3次元円筒座標上での輻射輸送を考える。

- $\Delta\Phi$: 3次元円筒(空間)座標の ϕ 方向分解能
- $\Delta\phi$: 立体角の角度分解能

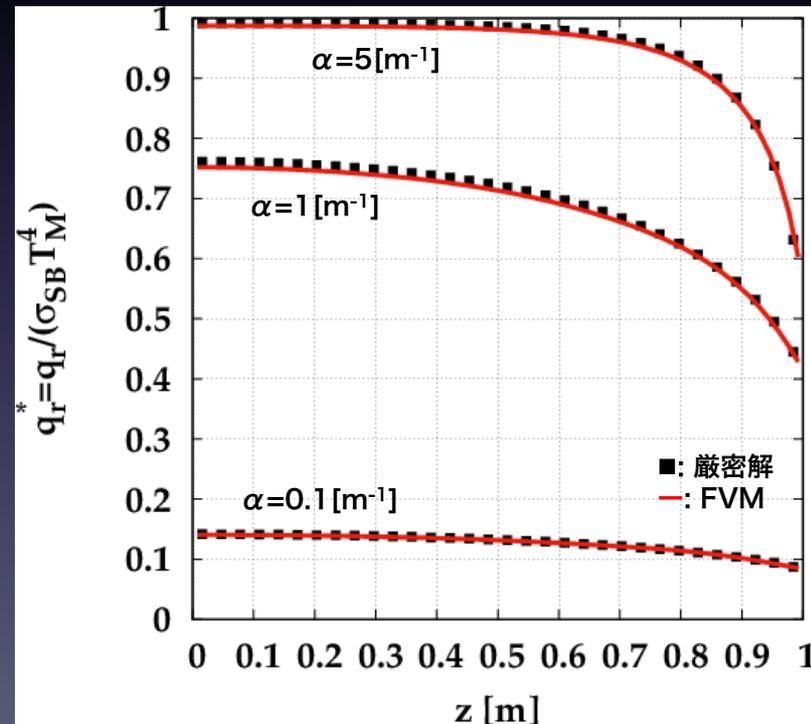
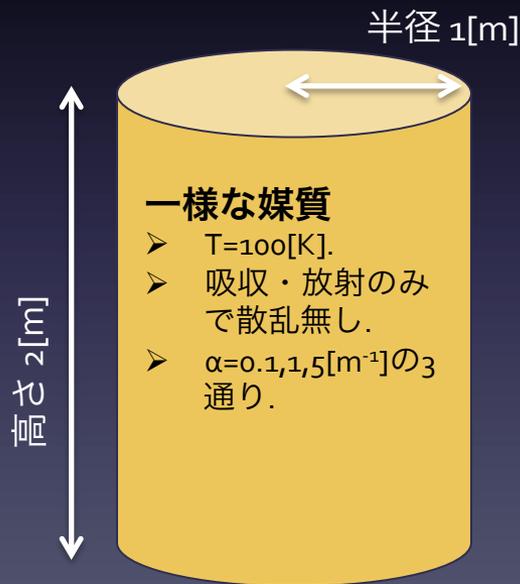


厳密解との比較

- 工学系論文で基本テスト計算として実施されるテストを行う。
- シリンダーのR方向境界面の各zにおいて、FVM法で計算したradiation fluxとその厳密解を比較。厳密解は、以下の式を数値的に立体角積分して求める：

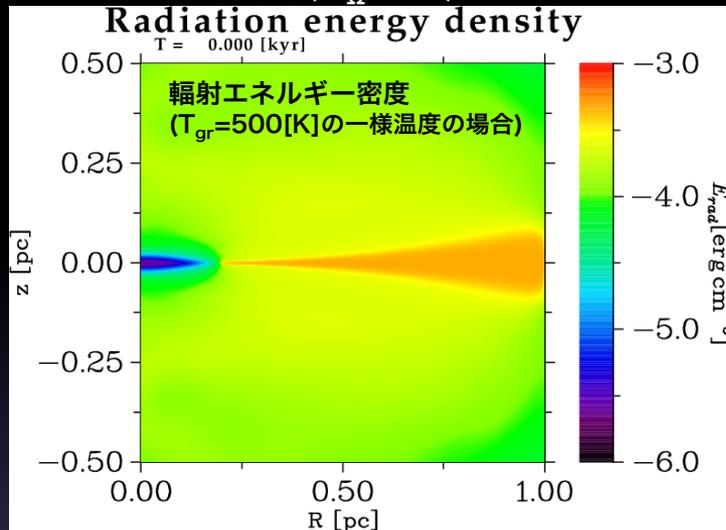
$$q_r = \int I(s)(s \cdot e_R) d\Omega \quad \text{ここで、} I(\tau) = B(T)[1 - e^{-\tau}]$$

(立体角積分は (ϕ, θ) の範囲 $[0, \pi/2] \times [0, \pi]$ を $64 * 128$ に分割して行った)

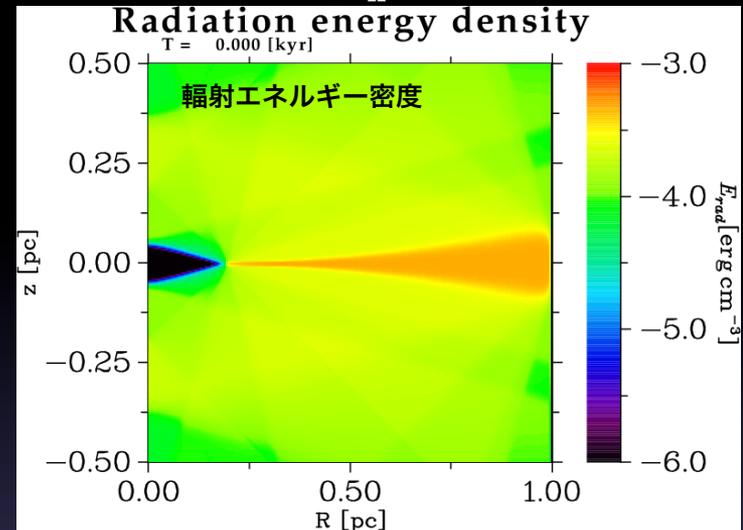


FVM法とSC法の比較 ①

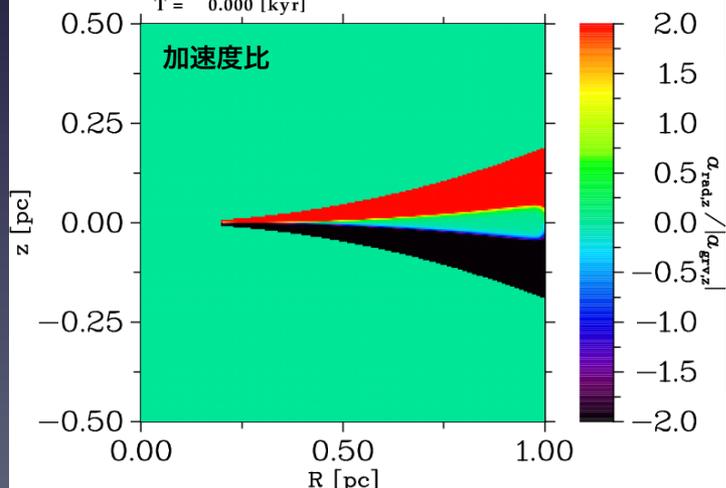
FVM法 ($N_{\Omega}=64$)



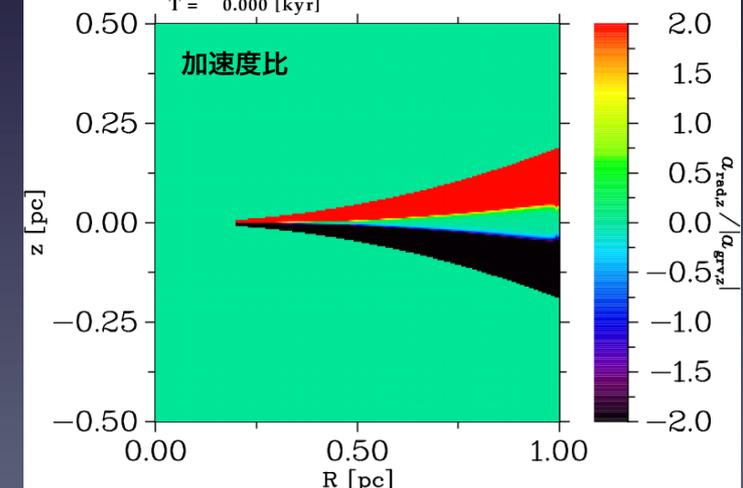
SC法 ($N_{\Omega}=42$)



Acceration ratio (z)

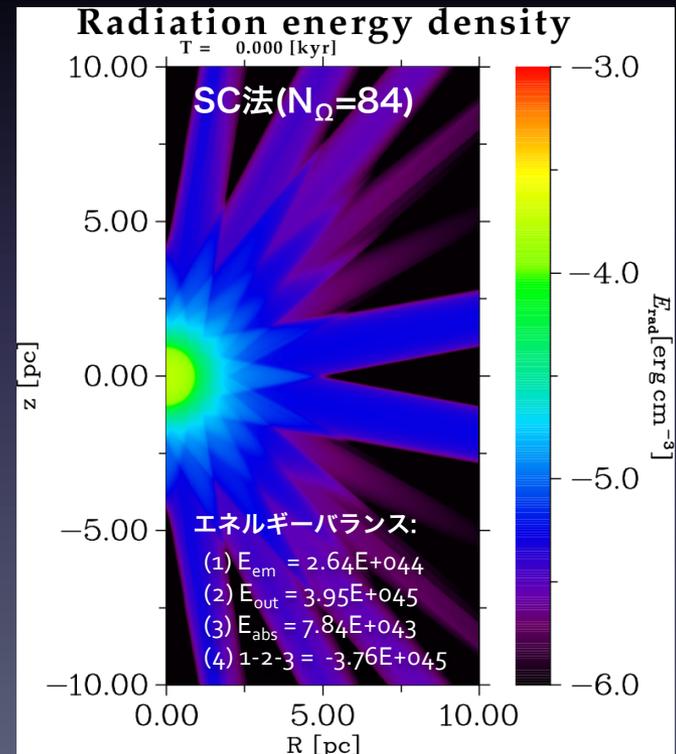
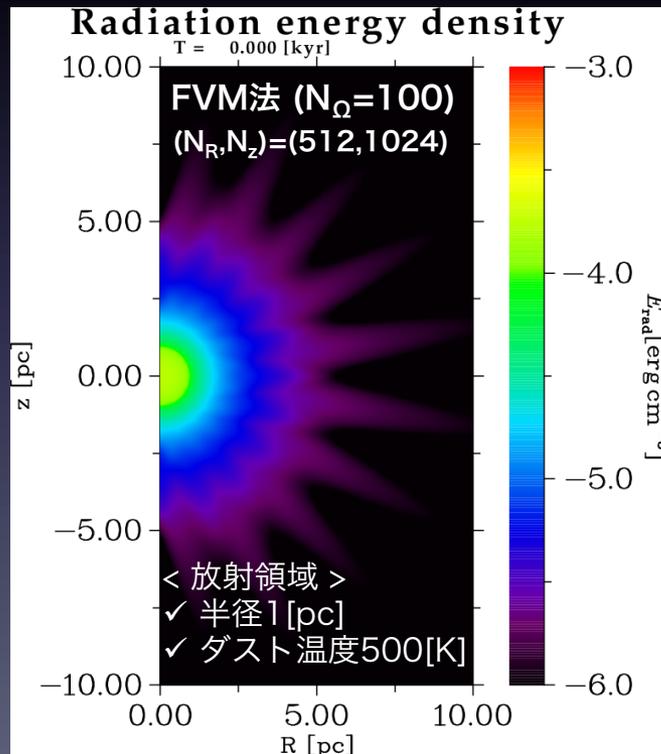


Acceration ratio (z)



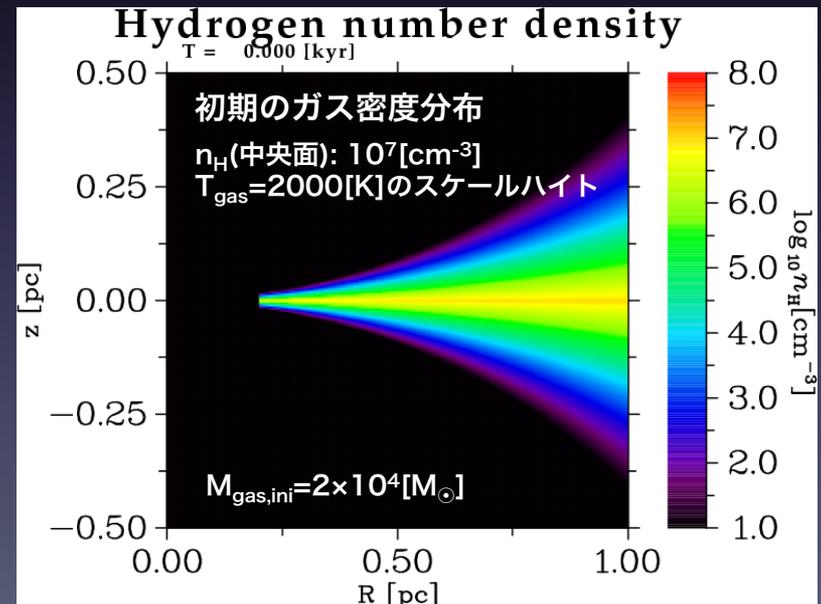
FVM法とSC法の比較 ②

- 原点を中心とする有限サイズ($r=1[\text{pc}]$)の球対称放射領域が作る放射エネルギー密度分布を比較。
 - 期待される解は、十分遠くで放射エネルギー密度が $\propto r^{-2}$ となる放射場。
- SC法は放射エネルギー密度が一定になってしまい、系全体の放射エネルギーは保存しない。
- 一方、FVM法は相対誤差 $O(1E-11)$ のレベルで系全体の放射エネルギー密度が保存。また、半径 r とともに放射エネルギー密度は減少し、intensityはすべての方向で正となっている。



ガス円盤の光蒸発計算: ①セットアップ

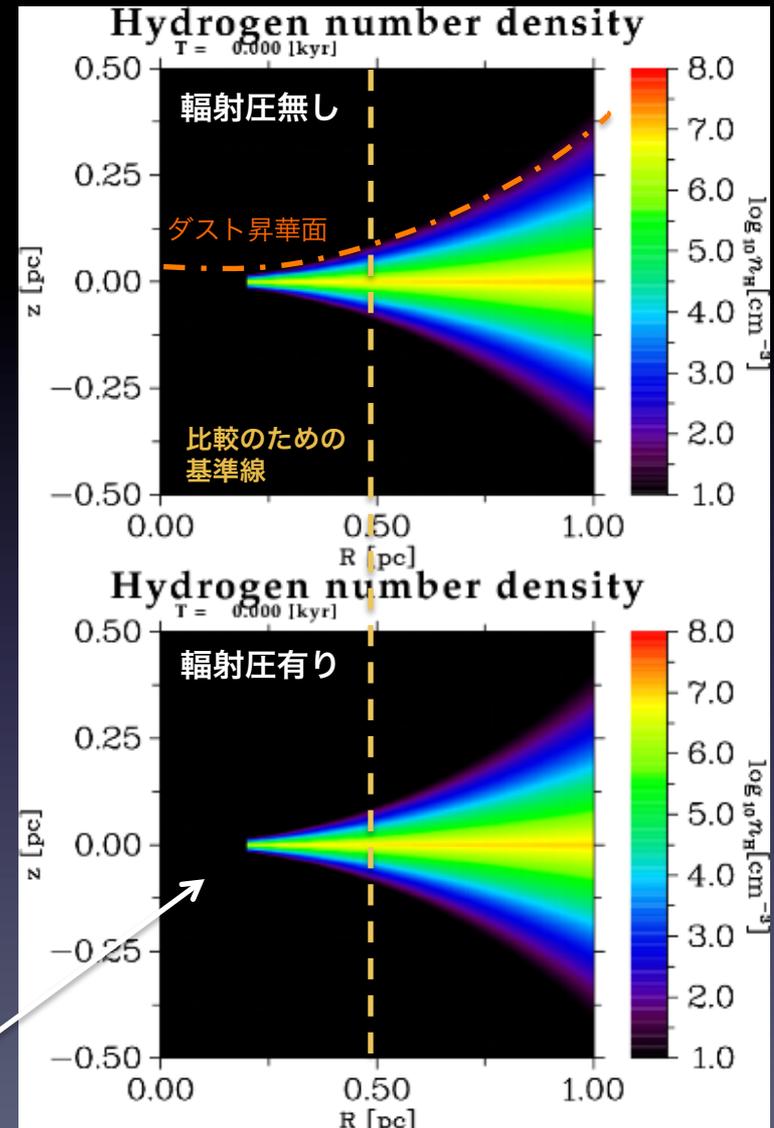
- ダスト再放射による輻射圧の効果を見るため、ガス円盤の光蒸発のテスト計算を行い、アウトフロー率の違いを調べる。
- 外部重力場は以下の3成分を仮定:
 - 1) $M_{\text{BH}}=10^7[M_{\odot}]$ のSMBH
 - 2) $M_{\text{NSC}}=10^8[M_{\odot}]$ のNuclear star cluster
 - 3) $M_{\text{NSD}}=10^9[M_{\odot}]$ のNuclear stellar disk
- AGNからの放射は、降着円盤成分(非等方放射: thin disc+limb darkening)とコロナ成分(等方放射)から成ると仮定し、 $L_{\text{bol}}=10^{45}[\text{erg/s}] (\approx L_{\text{Edd}})$ を仮定。
- 自己重力と H_2 形成はオフ。
 - 後者は、すべての H_2 破壊過程を入れていないため。
- 円盤部のガス温度を制御する主な過程:
 - ① **加熱**: UV/X線によるHIの光電離(光加熱)
 - ② **冷却**: (i)HIの衝突電離/励起冷却、(ii)HIの再結合冷却、(iii)ダスト冷却



ガス円盤の光蒸発計算: ②計算結果

- 基本的な進化:
 - ① 円盤表層部のガスが光電離.
 - ② 光電離したガスは急激に膨張.
 - ③ ダスト昇華面より内側に入ったガスは、Thomson散乱で相対的に緩やかに加速.
 - ④ ダスト昇華面より外側のガスは、ダスト吸収で強い加速を受ける.
- ダスト再放射による輻射圧は、円盤の先端部分の厚みを増加させる. この結果、直接光を受ける面積が増加し、アウトフロー率が増加.
- 今回のモデルだと、アウトフロー率は輻射圧の効果で約30%程度上昇.
 - 輻射圧無し: $0.13[M_{\odot}/\text{yr}]$
 - 輻射圧有り: $0.17[M_{\odot}/\text{yr}]$
 - Eddington降着率(効率0.1): $0.1667[M_{\odot}/\text{yr}]$
- 円盤先端部のガス密度がより高い場合には、ガスとダストの熱的結合がtightになるため、差が大きくなる可能性がある.

小さい半径に変なfeatureが残ってしまう.
R方向の運動量方程式が保存形で書けないため?
(現在調査中)



まとめと今後の方針

- 自己重力とダスト再放射を考慮した2.5次元軸対称輻射流体計算コードの開発は(ほぼ)完了.

- 今後の作業予定:
 - I. 物理過程の拡張作業と検証作業
 - ① X線の効果をより正確に考慮するため、化学反応と関連する放射過程の追加.
 - ② H,He等の再結合光子やH₂の回転振動遷移線によるダストの加熱/ダストに及ぼす輻射圧の影響の評価.
 - II. 計算コードの最適化
 - III. プロダクトランの実施