

輻射流体計算で探る 活動銀河核トーラスの ダスト昇華半径付近の構造

行方大輔 (筑波大学 計算科学研究センター 神戸分室)

共同研究者

梅村雅之 (筑波大学 計算科学研究センター)

活動銀河核とトーラス

活動銀河核 (AGN)

AGNからの輻射や相対論的ジェットは、銀河形成に影響 (e.g., Benson et al. 2003).

→ AGNの活動性の詳細の理解は、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？

一部はradio-loud AGNやluminous QSOsの観測から制限

AGNトーラス

トーラスは降着円盤にとって重要なガス供給源.

→ AGNの活動性を理解するためには、
トーラスから降着円盤外側へのガス供
給過程を理解する必要がある.

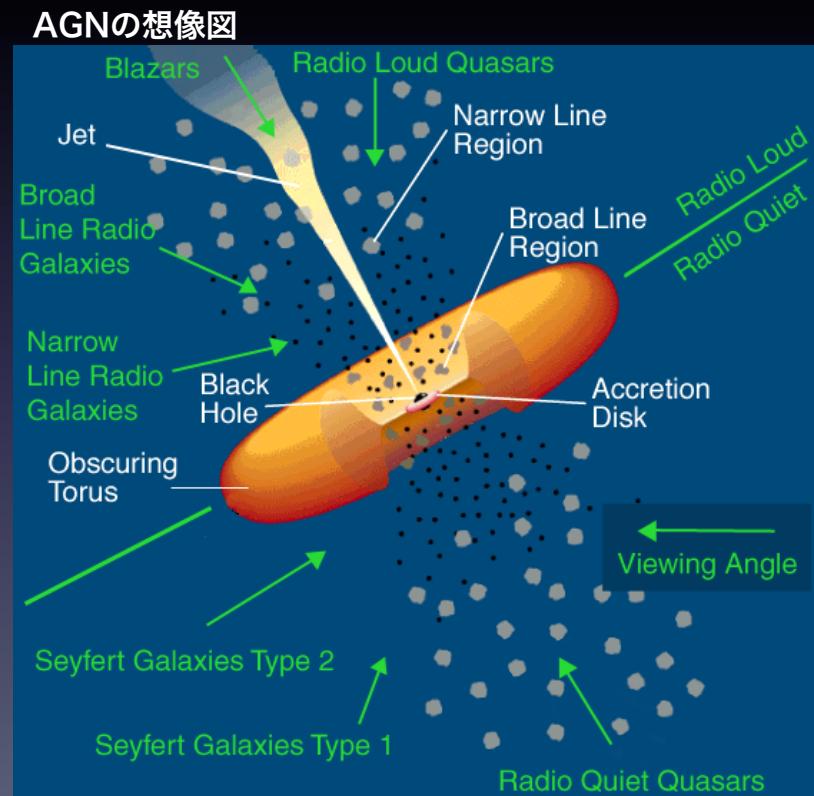
特に...

ダスト昇華半径付近のこと

- ① トーラス内縁部の密度・温度構造
- ② ガスフローとアウトフロー率

乱流トルク等
の測定が可能
になる.

は実際のガス供給率と深く関係.



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

関連研究

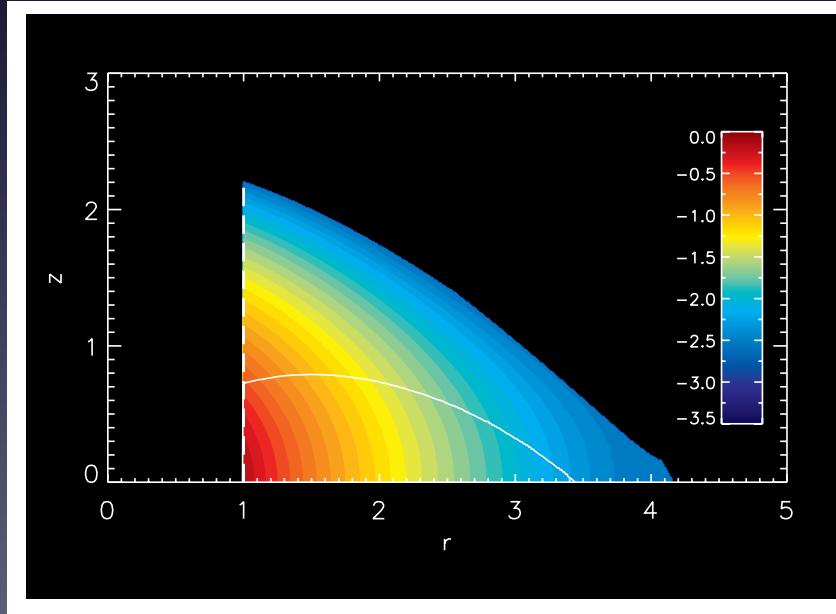
Krolik (2007), Shi & Krolik 2008)

- ダスト再放射による輻射圧を考慮して、大きなスケールハイトを持つ静水圧平衡解が存在しうることを示した研究.

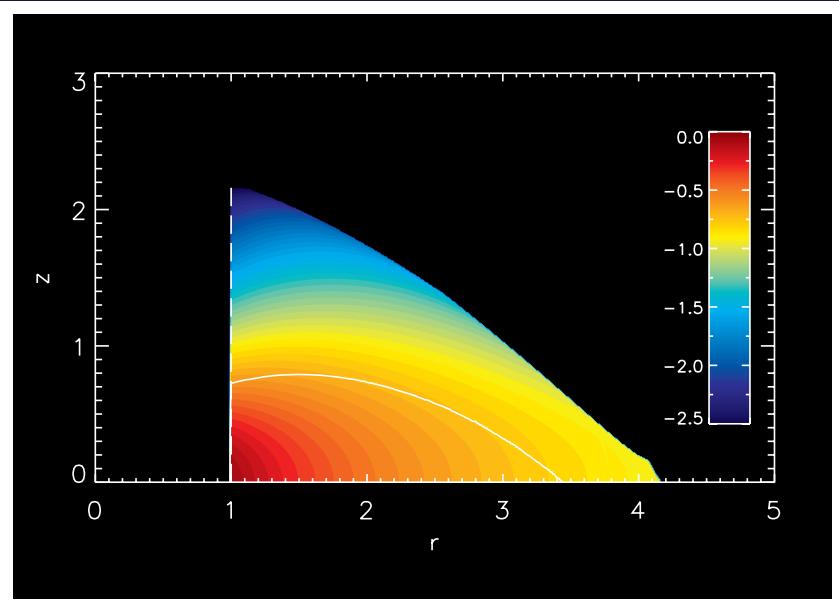
仮定

- ① AGNは全波長で等方放射すると仮定.
- ② AGN放射が内側境界半径ですべて赤外線に転換されると仮定.
- ③ 静水圧平衡解を作るため、速度場はsub-Kepler、密度場は r と共に減衰することを仮定.

輻射エネルギー密度分布



密度分布



関連研究(続)

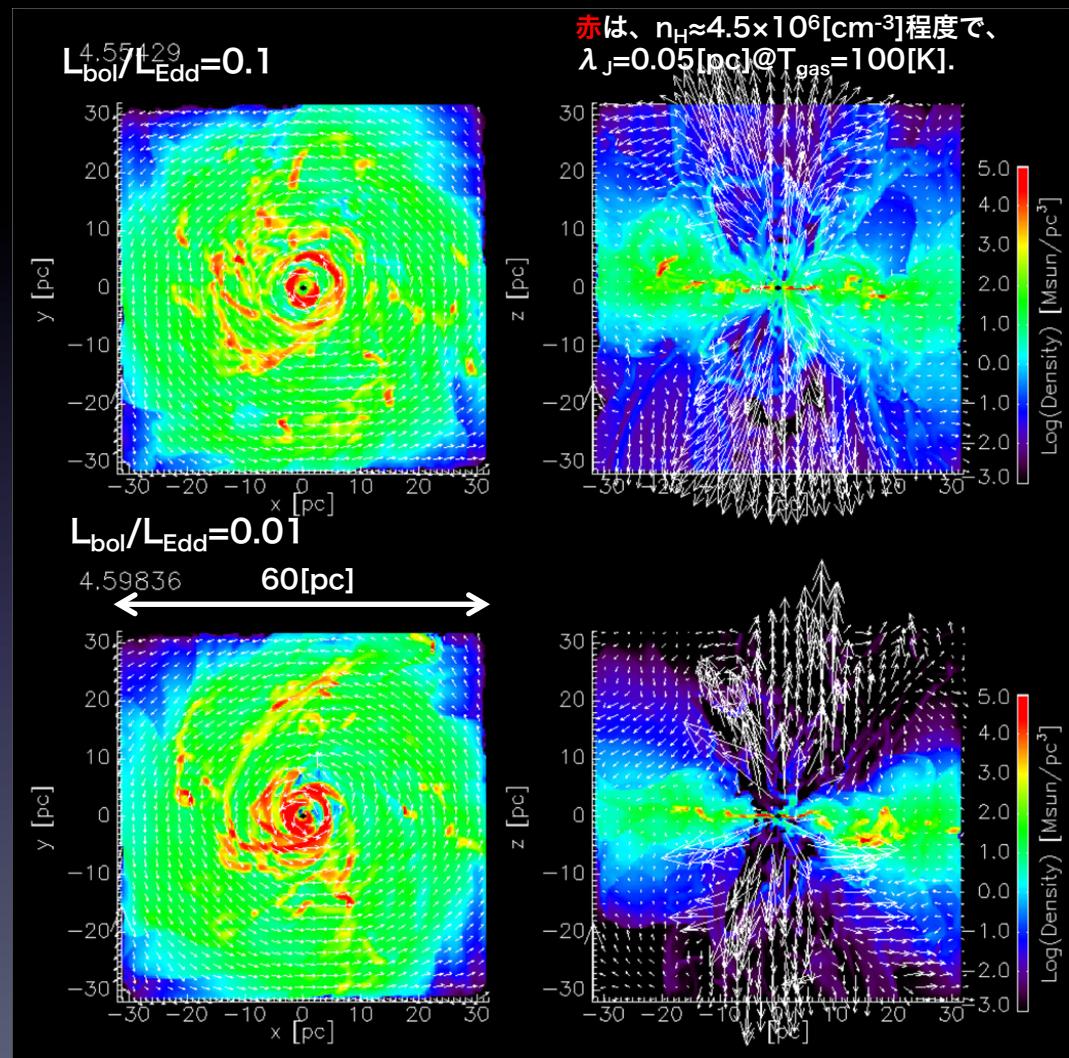
Wada (2012)

- 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.
- SED計算は(一部のfeatureを除いて)観測を再現 (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

- ① ダスト昇華半径付近は空間分解できない.
- ② 実際のダスト昇華半径付近はもっと高密度.

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



関連研究(続)と本研究

Dorodnitsyn & Kallman (2012)

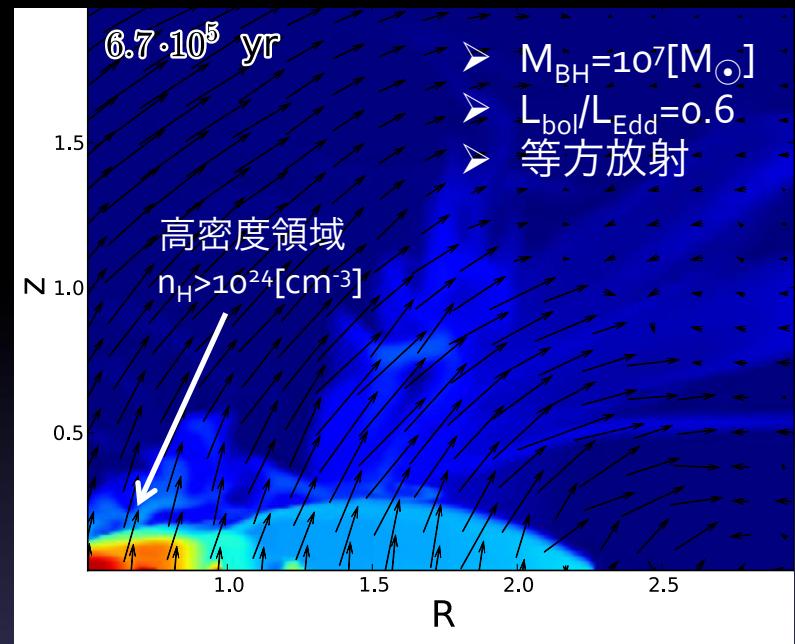
- pcスケールのガス円盤の軸対称輻射流体計算を $L_{\text{bol}}/L_{\text{Edd}}$ を変えて実施.
- 幾何学的に厚い構造は見られない.
- IR-driven windによる質量損失率は、failed windを含めて、 $0.1\text{-}1.5[M_{\odot}/\text{yr}]$.

問題点

- ① 仮定されている密度が大きすぎる($n_{\text{H}} > 10^{24}[\text{cm}^{-3}]$)
- ② 等方放射を仮定.
- ③ $z=0$ での境界条件が非物理的; 内側境界が存在.



より現実的な環境下でのガス構造やアウトフロー率を知りたい.

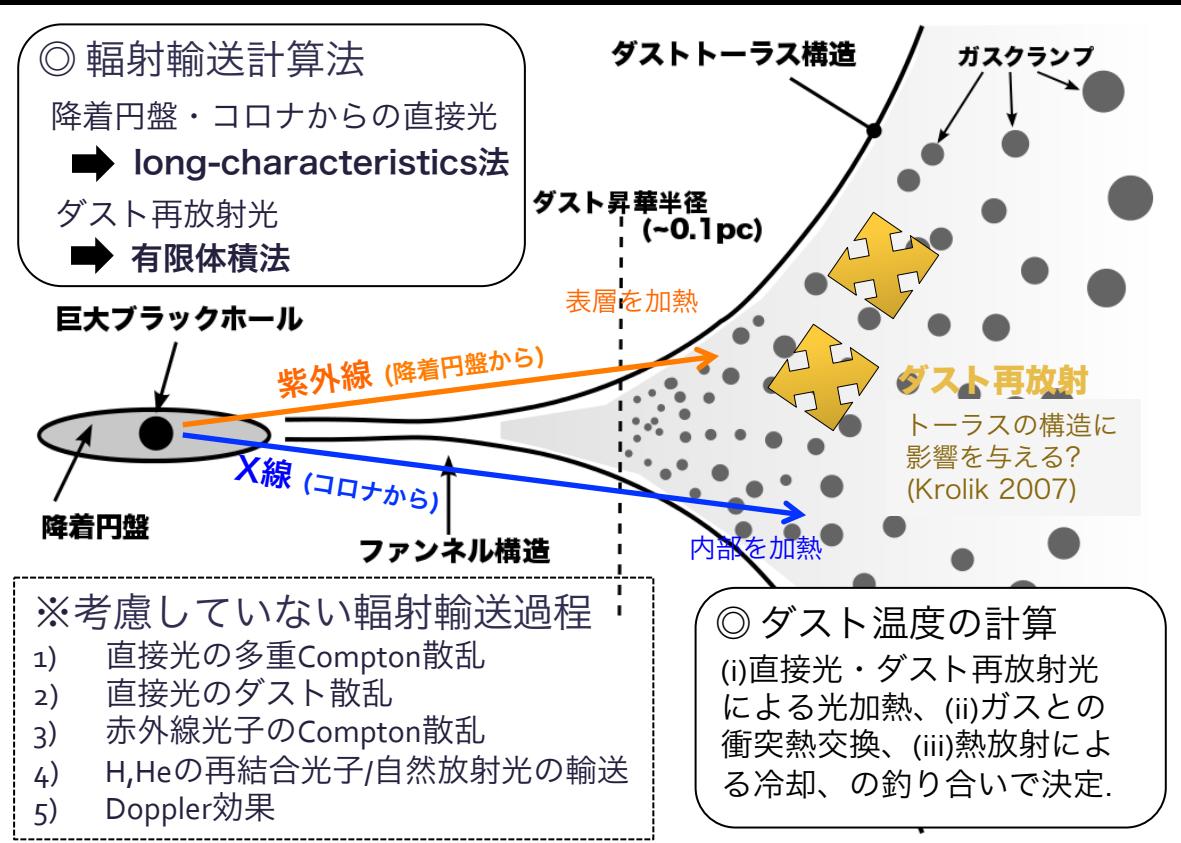


本研究

- ① トーラス内縁部を扱うのに重要な以下の過程を考慮した輻射流体計算コードを開発.
 - (1) ガスの自己重力
 - (2) ガスの光電離・光解離反応
 - (3) ダストからの赤外線再放射
 - (4) ガスとダストへの輻射圧
- ② より現実的な条件で、トーラス内縁部の密度・温度構造やアウトフロー率を調査.

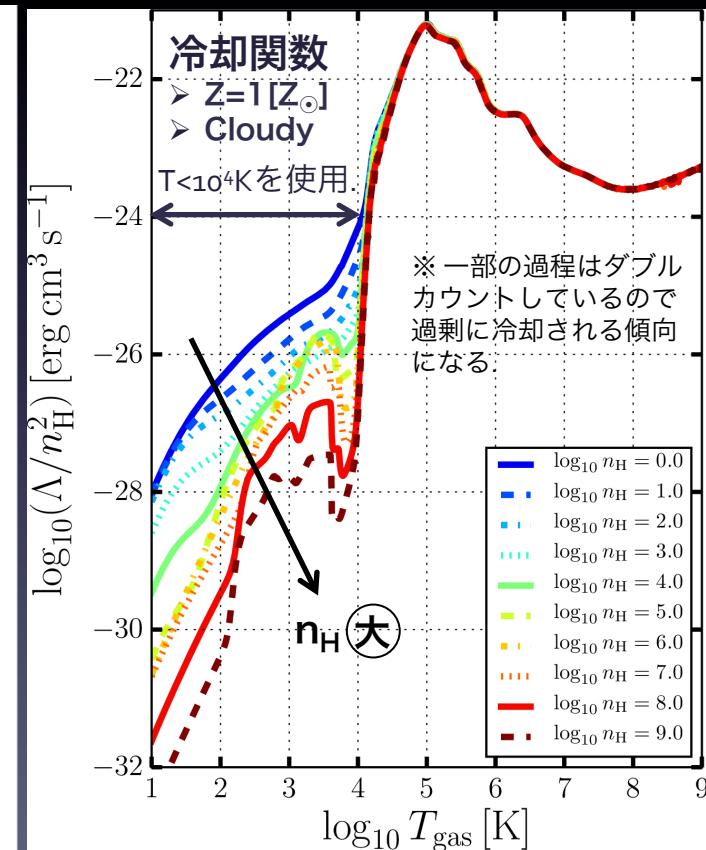
数値計算方法の概要

- 2.5次元軸対称
- 流体計算法: M-AUSMPW+/MLP5 (Kim & Kim 2005a,b)
- 自己重力計算: 軸対称版Tree法
- 辐射輸送計算: Hybrid法



ISMモデル

- (e^- , p^+ , H, H^- , H_2 , H_2^+ , He, He^+ , He^{++} , Dust) のネットワーク, 反応数: 43.
- 標準的な加熱・冷却過程を考慮.
- Metalの効果は、冷却関数で考慮.



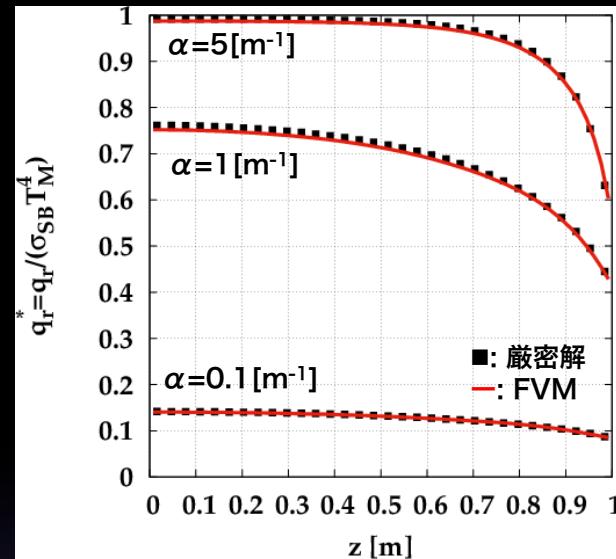
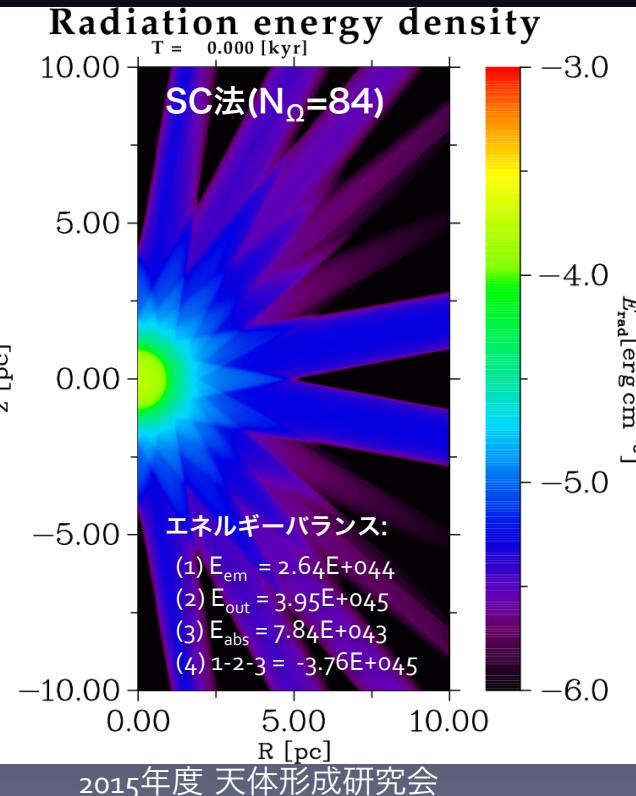
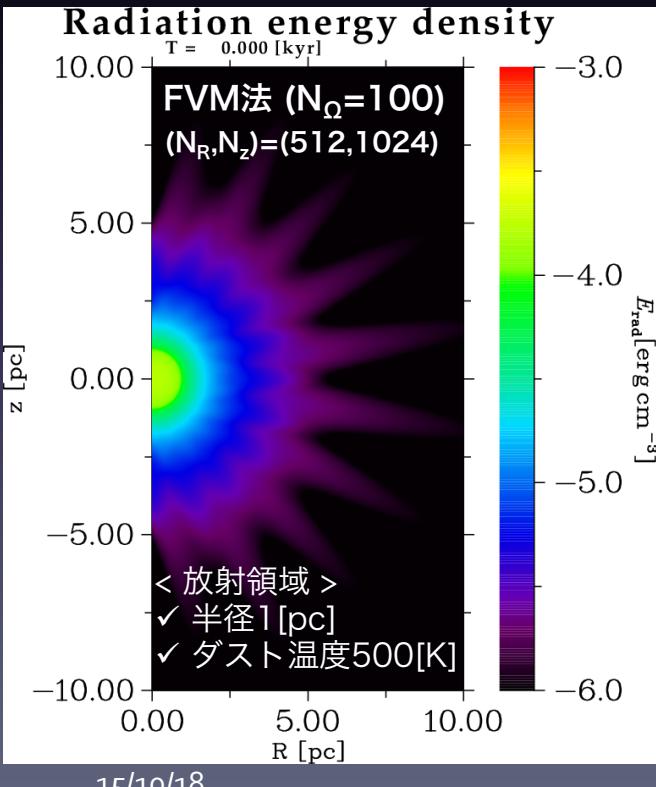
有限体積法

- 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.).
- Intensity方程式は保存形なので、直接有限体積法を適用する:

$$\frac{1}{c} \frac{\partial I_\nu}{\partial t} + \nabla \cdot (I_\nu \mathbf{n}) = -\chi_\nu I_\nu + j_\nu + S_\nu$$

立体角要素 $\Delta\Omega^{lm}$ 、体積要素 ΔV_j に
渡って積分し、ガウスの定理で、
差分方程式を導出。

- 天文で使用されるSC法と異なり、輻射エネルギーが保存する。



(↑) 基本テストの結果。
(詳細はKim(2008)等を参照)

(←) FVMとSC法の比較。

FVM:

角度分解能による非等方なfeatureが
生じてしまうが、輻射エネルギーが
保存し、輻射エネルギーも r とともに
減少する。

SC法:

輻射エネルギーが全く保存せず、輻
射エネルギー密度が r とともに減衰
しない。

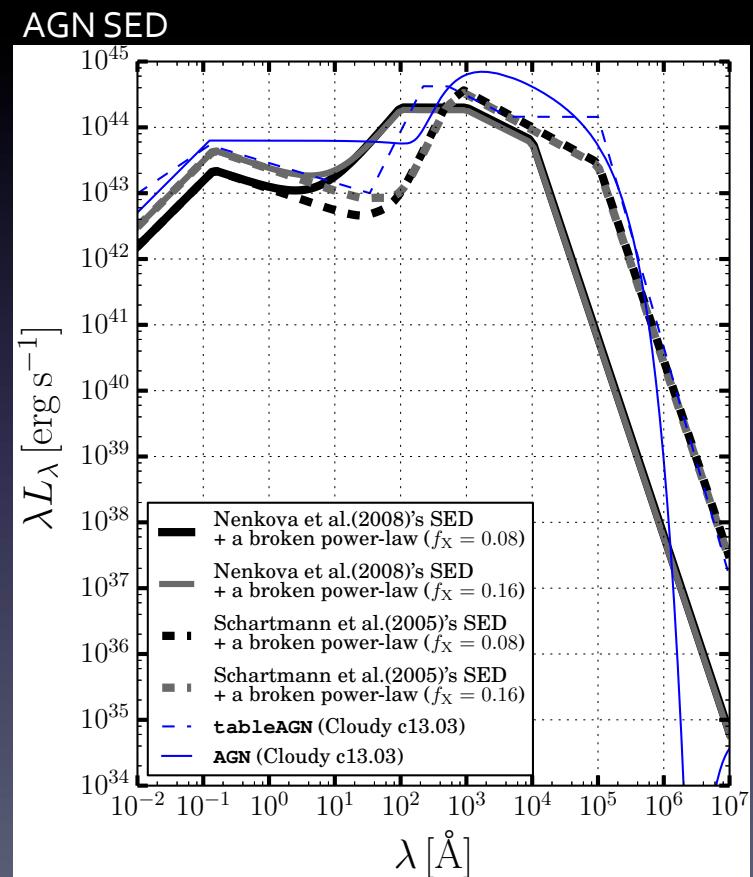
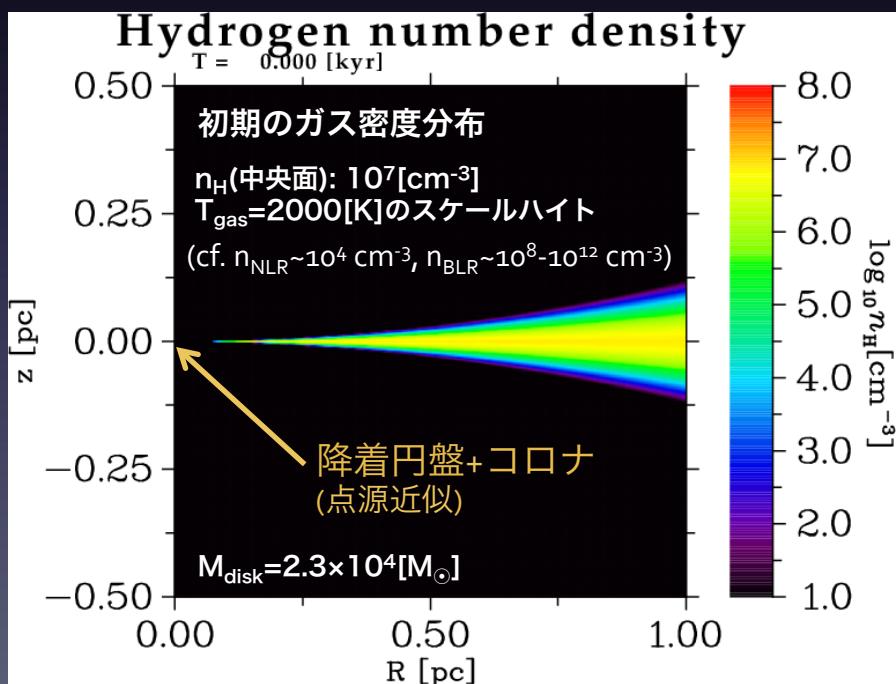
※ SC法はvan Noord et al.の解法を
使用。

セットアップ

- $M_{\text{BH}}=10^7[M_{\odot}]$ 、 $L_{\text{bol}}=10^{45}[\text{erg/s}]$ のAGNの周りのガス円盤($R=1[\text{pc}]$)の進化を計算.
- 降着円盤放射は非等方、コロナ放射は等方を仮定:

$$F_{\nu}^{\text{AD}}(\theta) = \frac{6}{7} \frac{L_{\nu}^{\text{AD}} \exp(-\tau_{\nu})}{4\pi r^2} \cos \theta (1 + 2 \cos \theta)$$

$$F_{\nu}^{\text{corona}} = \frac{L_{\nu}^{\text{corona}} \exp(-\tau_{\nu})}{4\pi r^2}$$

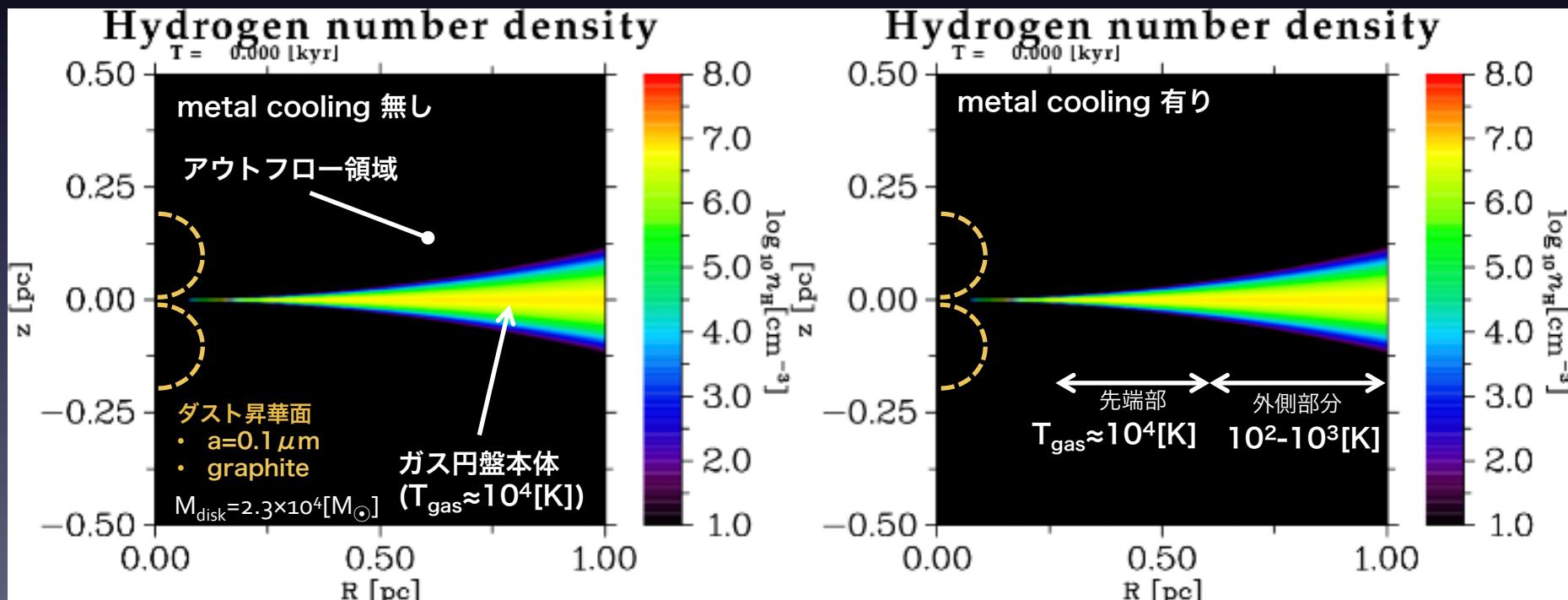
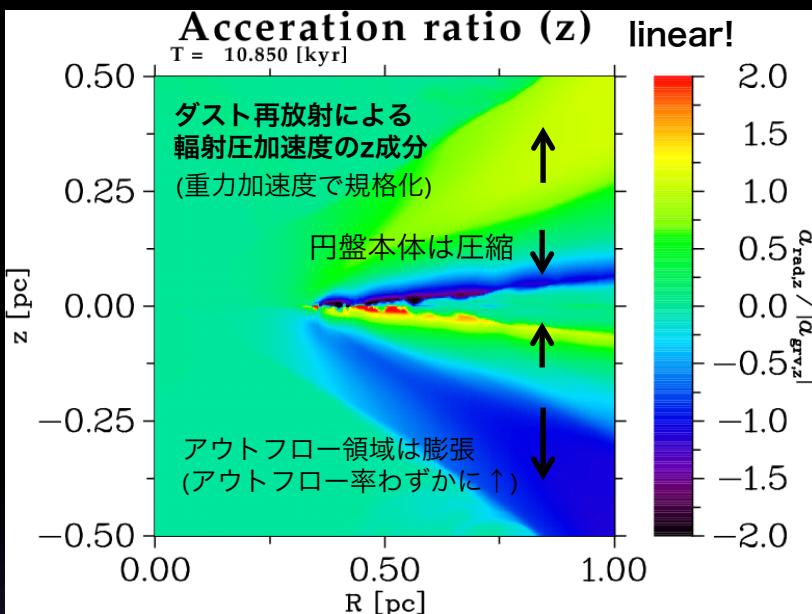


典型的な進化

- ガス円盤はX線で内部まで加熱され、基本的にはガス圧サポート。
 - ダスト再放射は円盤のサポートにはほとんど効かない。
 - アウトフロー率はわずかに上昇。
- アウトフローの発生はX線加熱による光蒸発が原因。加速は主に直接光・間接光のダスト吸収。

$$\dot{M} \approx 0.05 - 0.1 [M_{\odot}/\text{yr}]$$

$$v = 200 \sim 3000 [\text{km s}^{-1}] \quad (\text{円盤直上} \rightarrow \text{円盤上空})$$



光学的厚みの効果

- 光学的厚みの効果を調べるために、**局所ダスト吸収近似**を導入して、数値計算を実行。

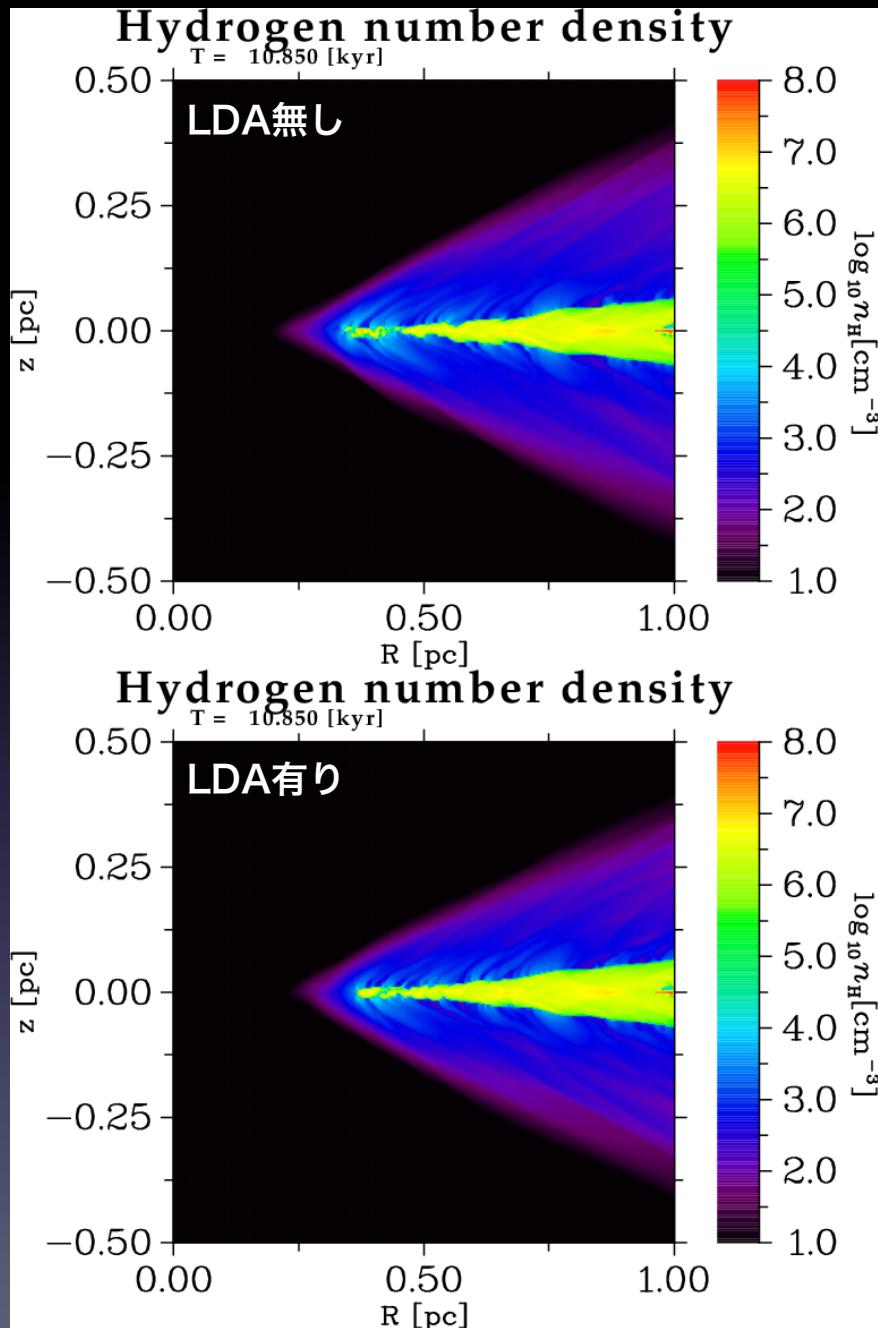
◎ 局所ダスト吸収近似 (LDA近似)

ガスの冷却過程で生じたphotonsがすべてローカルのダストに吸収されると仮定する。cooling photonsはIR photonsとなって輸送される。

- 十分にガス円盤の垂直方向が分解できているmetal cooling 無しのモデルに対して、LDA近似の効果を調査。
 - 但し、LDA近似を適用するのを高密度・低温ガスに限定: $n_{\text{H}} < 10^5 [\text{cm}^{-3}]$, $T_{\text{gas}} < 30000 [\text{K}]$.
- 違いは見られない。



この結果は、ガスのcooling photonsを考慮しても、ガス円盤をダスト再放射で膨張させるのは無理であることを示している。



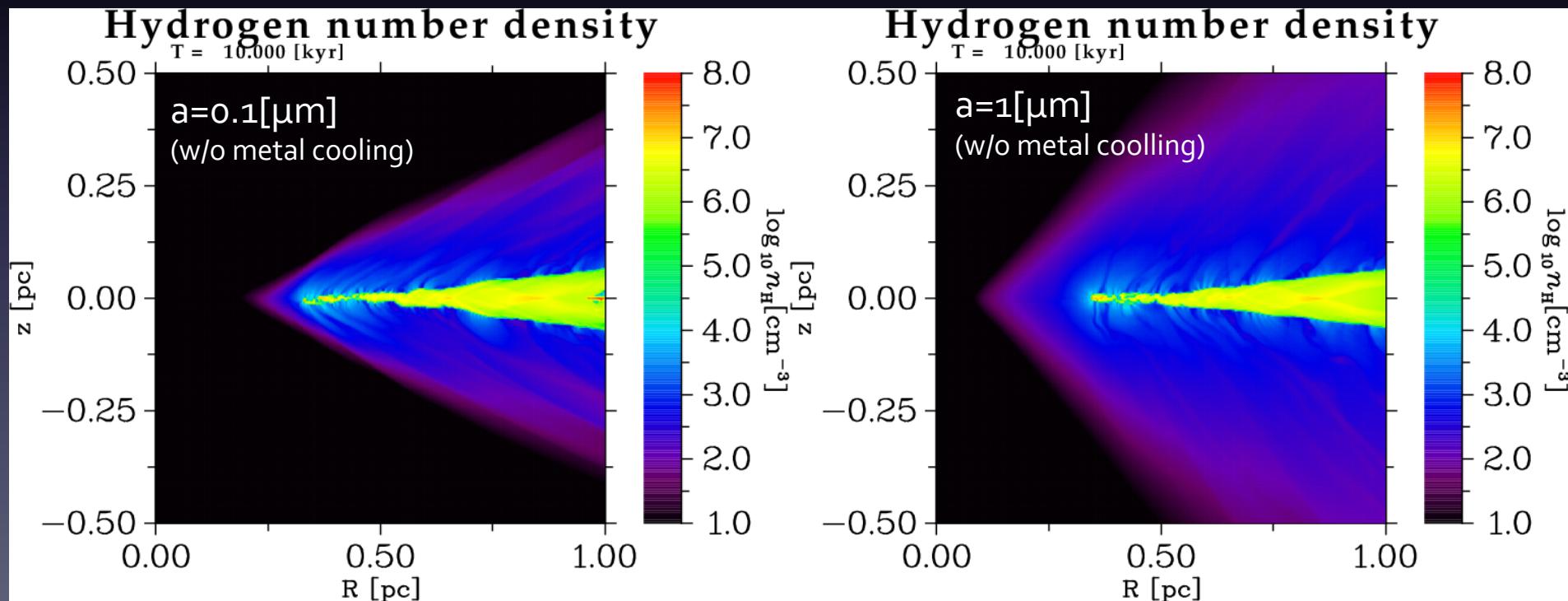
ダストサイズの効果

- ダストの吸収係数は、大雑把にサイズに反比例する：

$$\alpha_\nu = n_{\text{gr}} \sigma_{\text{abs}}^{\text{gr}}(\nu) = \frac{\rho Y_{\text{gr}}}{\frac{4}{3}\pi a^3 \rho_{\text{gr}}} \times Q_{\text{abs}}(\nu, a) \pi a^2 \propto a^{-1} \quad \left[\begin{array}{l} Y_{\text{gr}}: \text{ダストのガスに対するmass fraction}, \\ \rho_{\text{gr}}: \text{ダスト粒子の質量密度}, \\ a: \text{ダスト粒子の半径}, \\ Q_{\text{abs}}(\nu, a): \text{吸収効率} \end{array} \right]$$

→ ダストサイズが大きいほど、ダストに働く輻射圧加速度が小さい。

- ダストサイズが大きなモデルでは、光蒸発流はより大きな $|z|$ に達することが可能になるが、ガス円盤本体の厚みは変わらない。



円盤を膨張させうる残りの可能性

① アウトフロー領域のガス・ダストによる散乱/再放射光で円盤本体のダストを加熱

内容	光度 [erg/s]
① ガスの冷却光度(系全体)	2.684E+42
② ガスの冷却光度(希薄ガス)	1.46E+38
③ ダストの加熱光度(系全体)	6.037E+43
(内訳) 直接光	1.615E+43
(内訳) 間接光	4.422E+43
④ ダストの加熱光度(希薄ガス)	1.57E+43

円盤本体のダストの加熱光度

$$(③-④) \sim 4 \times 10^{43} [\text{erg/s}]$$

アウトフロー"ガス"からの再放射光は無視できる。

ダストはUV/opticalで $\sigma_{\text{abs}} \sim \sigma_{\text{sca}}$ なので、アウトフロー領域の"ダスト"による散乱・再放射光は精々 $3 \times 10^{43} [\text{erg/s}]$ で、(③-④)と同程度でしかない。

表: REdd1.0/gra01_wo_sca_LDA1.0の各種光度.

② 銀河バルジの星からの輻射

- <仮定>
- a) 半径1pc以内の星質量が M_{BH} の10倍.
 - b) すべての星は $1[M_{\odot}]$.

→ $L_{\star} = 3.85 \times 10^{41} [\text{erg/s}] \ll L_{\text{bol, AGN}} = 10^{45} [\text{erg/s}]$.

星の輻射による加熱はほとんど効かない。

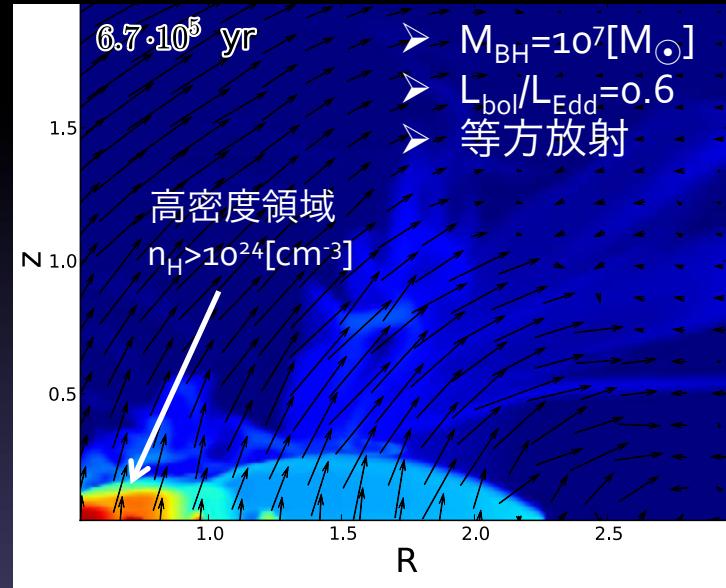
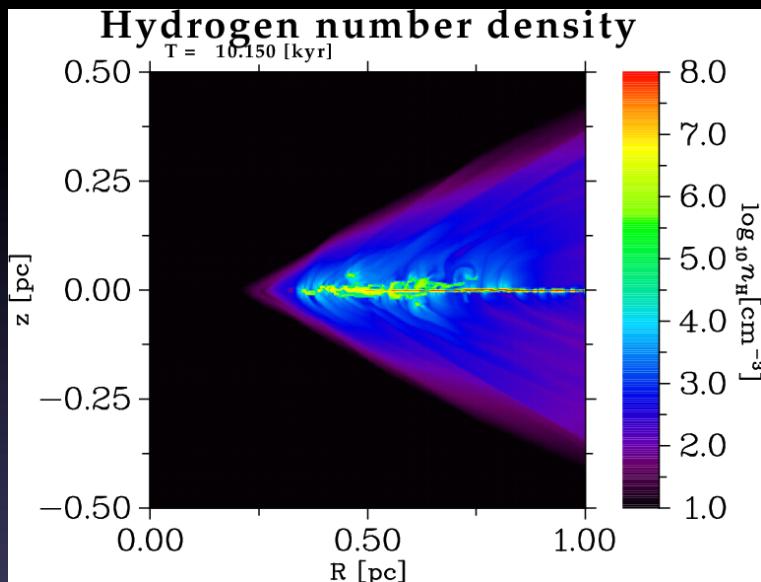
③ サブパーセクで活発な星形成) (詳細な検討はまだ)

アウトフロー領域からの再放射光・散乱光によるダスト加熱ではガス円盤は膨張させないと考えられる。

Krolik(2007)等で提唱されるダスト放射で支えられる静水圧平衡に近いトーラス構造を(輻射が最も強い)サブpcスケールに作るのは困難で、おそらくthin diskになる。

先行研究との比較

- ダスト再放射で幾何学的に厚い構造を作れないという結果は、Dorodnitsyn & Kallman (2012)の結果と一致するが、より薄くなると期待される：



- Dorodnitsyn & Kallman (2012)のモデルでは輻射圧サポートになっているが、実際はガス圧サポート。
- ダスト再放射で幾何学的に厚い構造が作れないのは、以下の理由のためと思われる：
 - ① 降着円盤放射の非等方性。
 - ② 直接光による輻射圧、及び、アウトフローガスの圧力がガス円盤本体をconfine。
 - ③ アウトフローガスが輻射をかなり吸収するため、円盤本体のダストが加熱されない。

トーラスモデルへの示唆

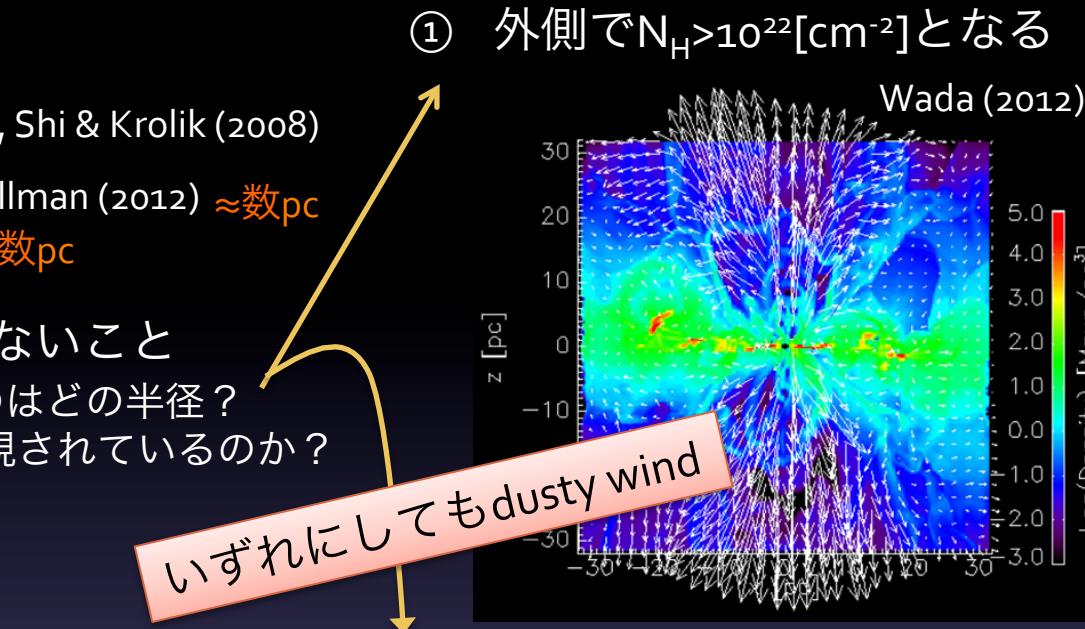
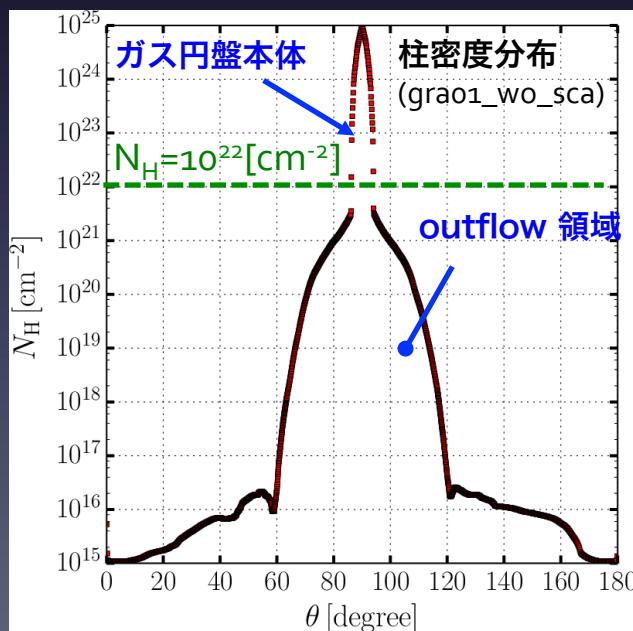
◎ 輻射流体的なトーラスモデル

輻射圧サポートモデル: Krolik (2007), Shi & Krolik (2008)

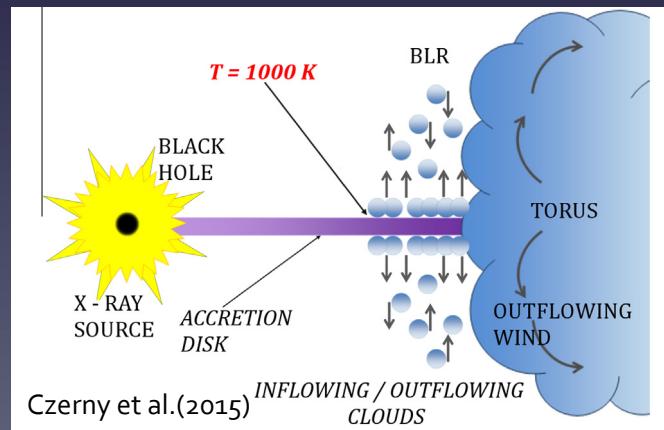
輻射駆動風モデル: Dorodnitsyn & Kallman (2012) \approx 数pc
Wada (2012) \approx 十数pc

◎ トーラスについてわかっていないこと

- 結局、 $N_H > 10^{22} [\text{cm}^{-2}]$ が実現するのはどの半径？
- トーラスの構造はどのように実現されているのか？
(静水圧平衡解？ dusty wind？)



② もっと内側からdenseなdusty windが吹いている



▶ 降着円盤温度がダスト昇華温度を下回ったところからdusty windがlaunch？

▶ 降着円盤風が途中でダスト形成？

まとめ

- トーラス内縁部で期待されるガス構造・ガスフローを調べるため、ダスト再放射を考慮した軸対称輻射流体計算コードを開発し、AGNトーラス内縁部を模した 1pc サイズのガス円盤の輻射流体計算を実施した。
- この結果、AGNによる照射とダスト再放射だけでは、Krolik (2007)等が提唱する幾何学的に厚い"静水圧平衡な"トーラス構造をサブパーセクスケールに作るのは難しく、薄いdiskになることがわかった。
- アウトフロー率はX線光度の割合等に依存して $0.05\text{-}0.1[\text{M}_\odot/\text{yr}]$ 、速度は数百 $[\text{km/s}] \sim 3000[\text{km/s}]$ 程度。