

母銀河からのガス供給のもとでの 銀河系中心ガス円盤の進化

行方 大輔 (北海道大学)

背景

AGN研究と銀河系中心領域の研究

- **AGN：宇宙物理にとって重要な対象**

1. 膨大なエネルギー放出が巨大ブラックホール(SMBH)から生じる
2. SMBHに対するガスの流入はどのように起こるか？
3. SMBHと銀河の共進化は？

- **銀河中心へのガス供給問題**

1. AGNの活動性やSMBHの成長と関係する重要な問題
2. 銀河中心領域での星形成過程と関連

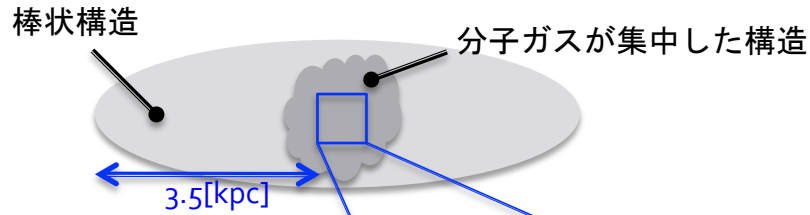
- **AGN研究と銀河系中心領域の研究の関係**

1. 銀河系中心領域は、最も近い“銀河中心”であり、多波長にわたる高品質の観測データが存在する。
2. 銀河系にはSMBH($3 \times 10^6 [M_{\odot}]$)が存在する。
3. 銀河系は、Nuclear star cluster/Super star clusterがあり、最近ガス供給が起きたと考えられる。

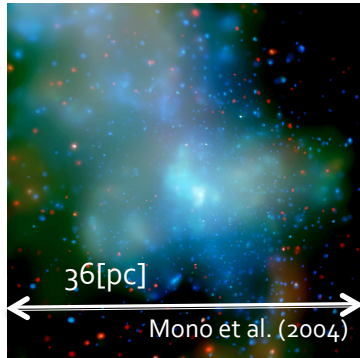
銀河系中心領域はガス供給過程について調べる良い対象

背景

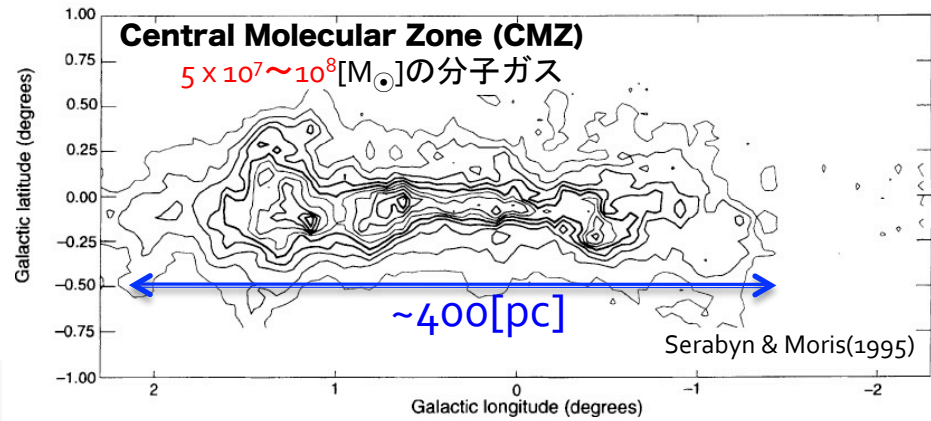
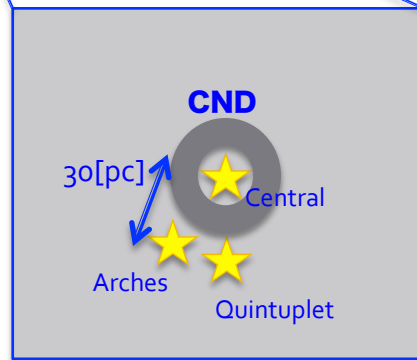
銀河系中心領域の特徴



X線を放射する高温ガス

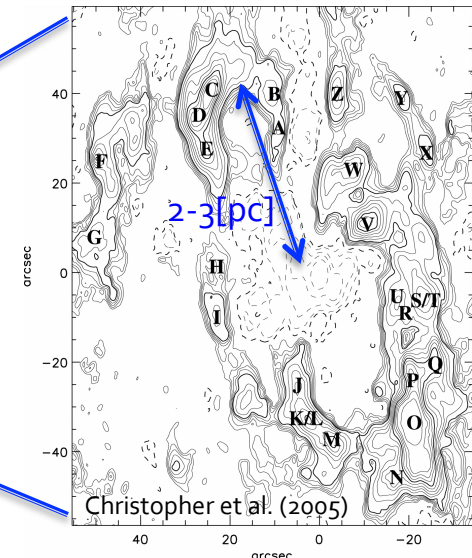
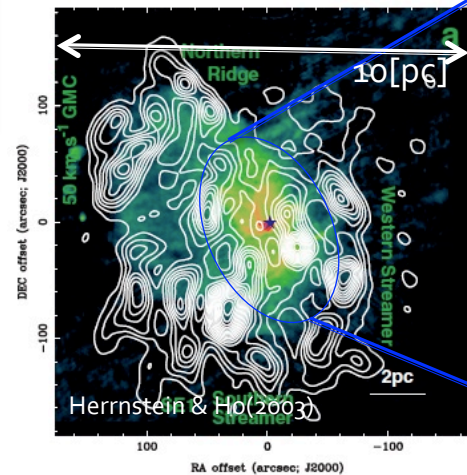


銀河系中心領域

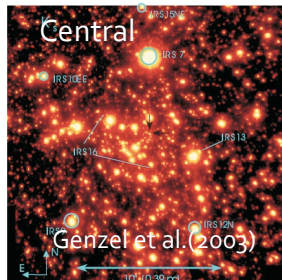
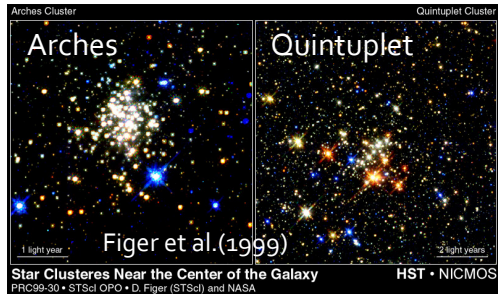


Circumnuclear disk (CND)

- 非常にClumpyな構造
- 内部が乱流的な運動状態



コンパクトで若い大質量星団



研究目的

■ これまでの我々の研究

これまでの我々の研究(Namekata et al. 2009)から、銀河系の多重棒状構造による銀河中心領域へのガス供給と半径15[pc]スケールのガス円盤の形成が示された。このガス円盤の進化で銀河中心へのガス供給や星団形成が起こる可能性を調べる。

■ 本研究の目的

1. 銀河中心のSMBHへのガス供給の解明

- ◆ 銀河系中心を対象に、銀河中心へのガス供給過程を明らかにする

2. Nuclear star clusterやSuper star clusterの形成過程の解明

- ◆ 銀河系の特徴である星団形成がガス供給過程で形成される条件を調べる。

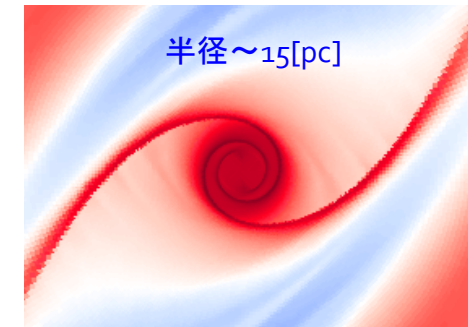
■ 銀河中心のガス円盤の進化

銀河中心のガス円盤+星系の物理状態・進化は、

- 1) 母銀河からのガス供給率、
 - 2) ガス円盤での星形成によるガス消費率、
 - 3) 形成された星からのfeedback、
 - 4) 形成された星々の運動、
- ← 競合する過程

で決まると考えられ、これらを統合的に扱う必要がある (e.g. Kawakatu & Wada 2008)。

本講演では、母銀河からのガス供給率、星形成、星の運動を考慮して、銀河系中心領域におけるガス円盤の進化を調べた結果を報告する。



銀河中心ガス円盤の形成過程の様子
(Namekata et al. 2009)

数値計算方法と計算モデル

初期条件

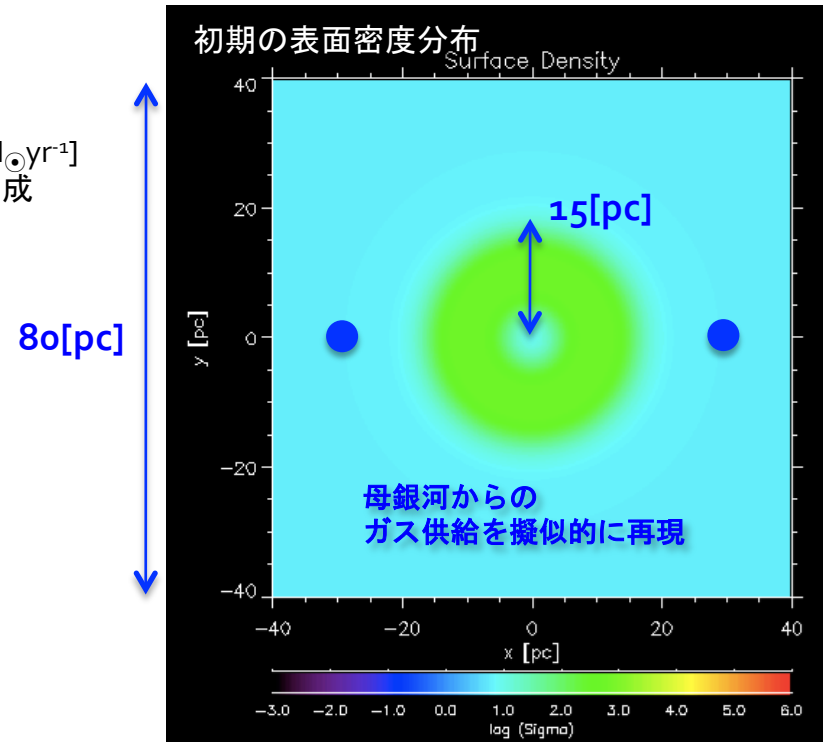
- 内径5[pc]、外径15[pc]のガスリング
- 表面密度：625 [$M_{\odot} \text{pc}^{-2}$] (自己重力的に安定)
- 母銀河からのガス供給率は、0.1 [$M_{\odot} \text{yr}^{-1}$]、0.05 [$M_{\odot} \text{yr}^{-1}$]、0.01 [$M_{\odot} \text{yr}^{-1}$]
- 重力ポテンシャルは、銀河系中心500[pc]以内の質量分布から作成 (Launhardt et al. 2002)

数値計算方法

- 数値流束計算：M-AUSMPW+/MLP₅ (Kim & Kim 2005a,b)
- 等間隔デカルト座標格子
- 計算領域：80[pc] x 80[pc]
- 空間解像度：0.128[pc] (625^2)
- 重力計算：FFT (Hockney & Eastwood 1988)
- 輻射冷却関数はWada & Norman(2001)
- 境界条件：Fix Boundary
- 流体/N体の時間積分方法：2次精度TVD Runge-Kutta (Shu 1984)

モデル

- 星形成を考慮しないで、母銀河からのガス供給率を変えた場合
- 星形成を考慮し、母銀河からのガス供給率を0.1 [$M_{\odot} \text{yr}^{-1}$]とした場合 (星形成の取り扱いは後で説明)
- 星形成を考慮しないで、SMBHの質量を、 $10^8 [M_{\odot}]$ とした場合

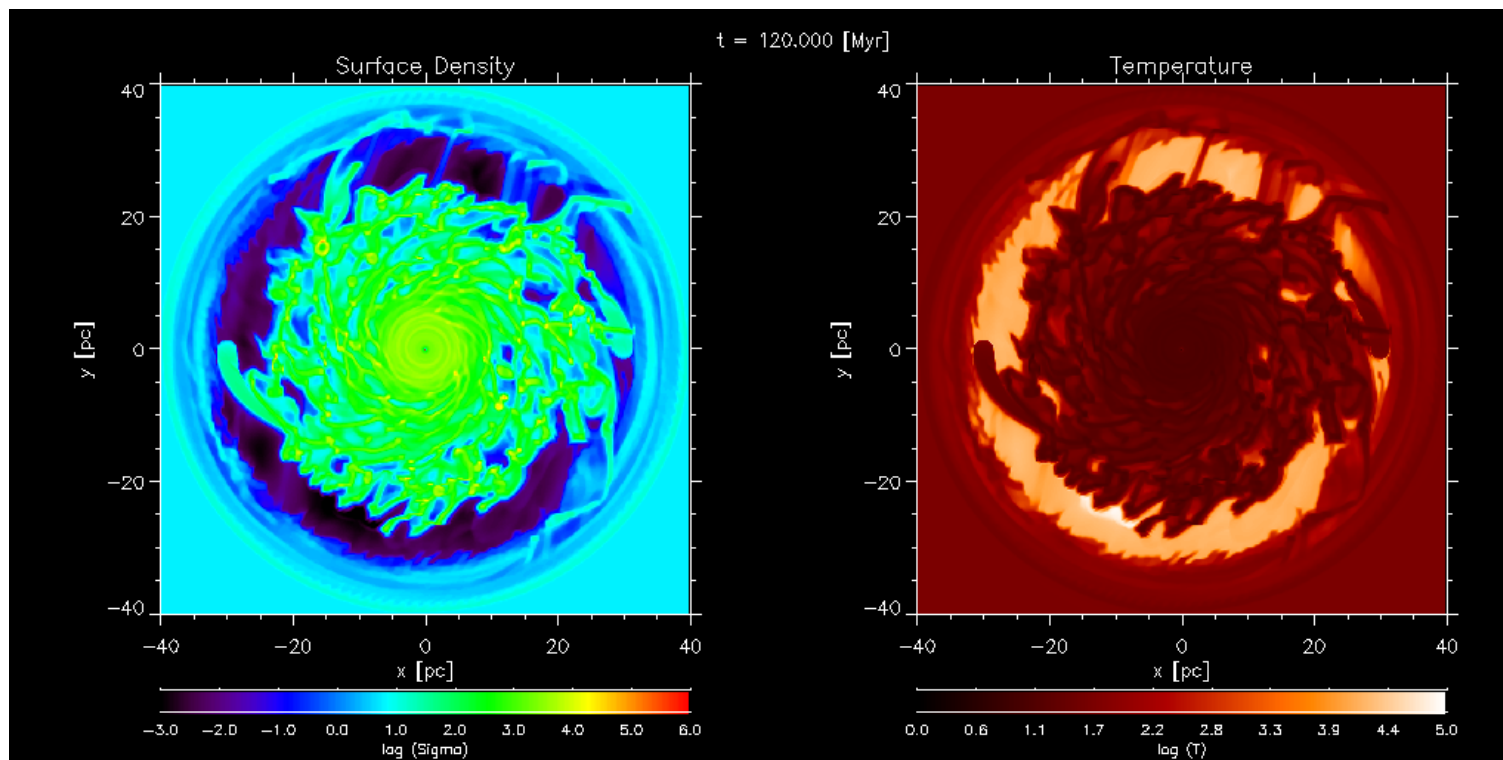


計算結果

①母銀河からのガス供給率 $0.01 [M_{\odot}/\text{yr}]$

進化の特徴

- ガス円盤は平衡状態に近い表面密度プロファイルを保って進化し、それほど乱流的にはならない。

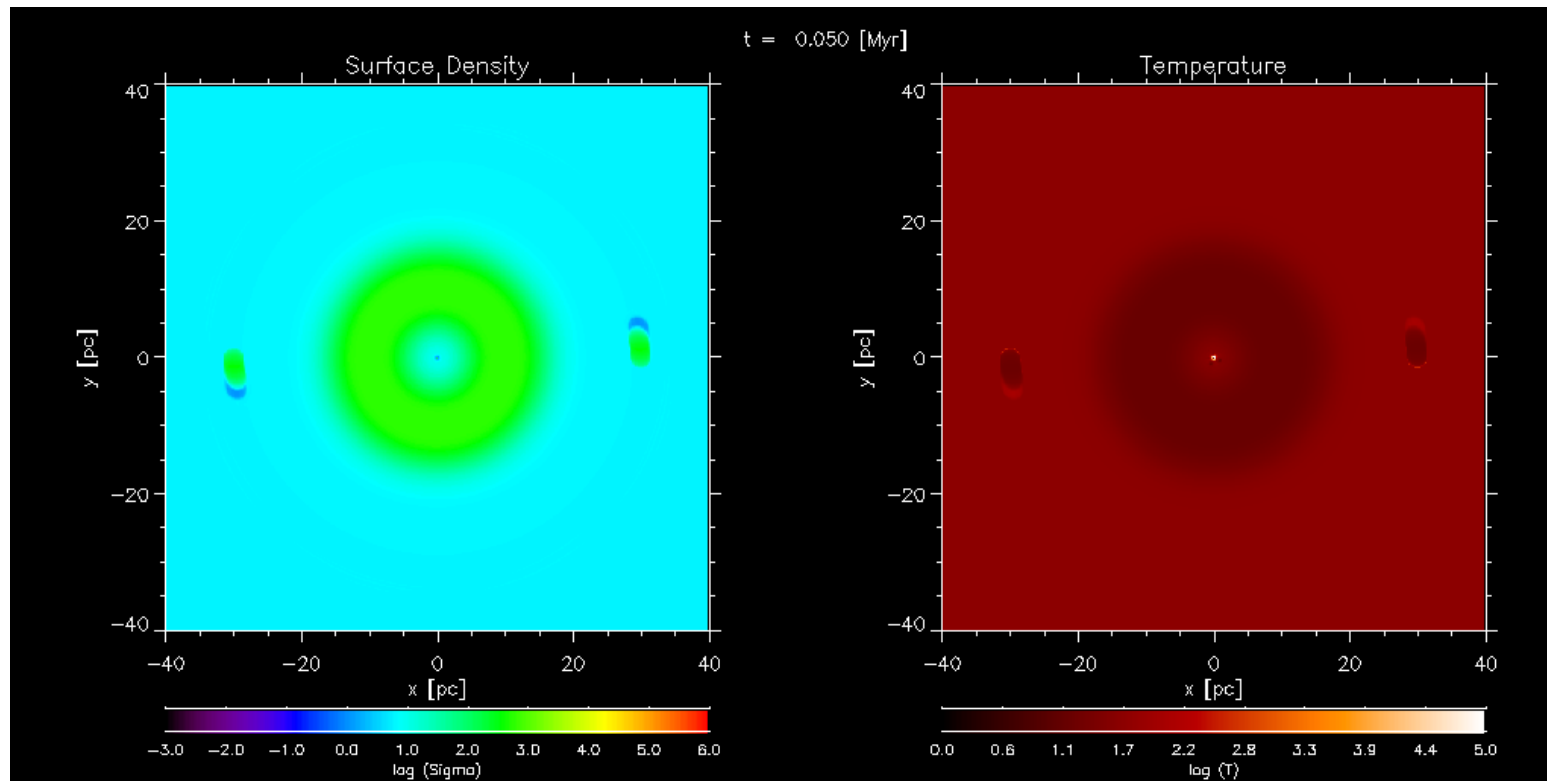


計算結果

②母銀河からのガス供給率 $0.1 [M_{\odot}/\text{yr}]$

進化の特徴

- ガス円盤外縁部でガスクランプの形成が活発に起こり、ガス円盤全体が乱流的になる。
- ガスクランプ同士の相互作用によって、一部のガスクランプが小さい半径へ移動することで、ガス供給が起こる。

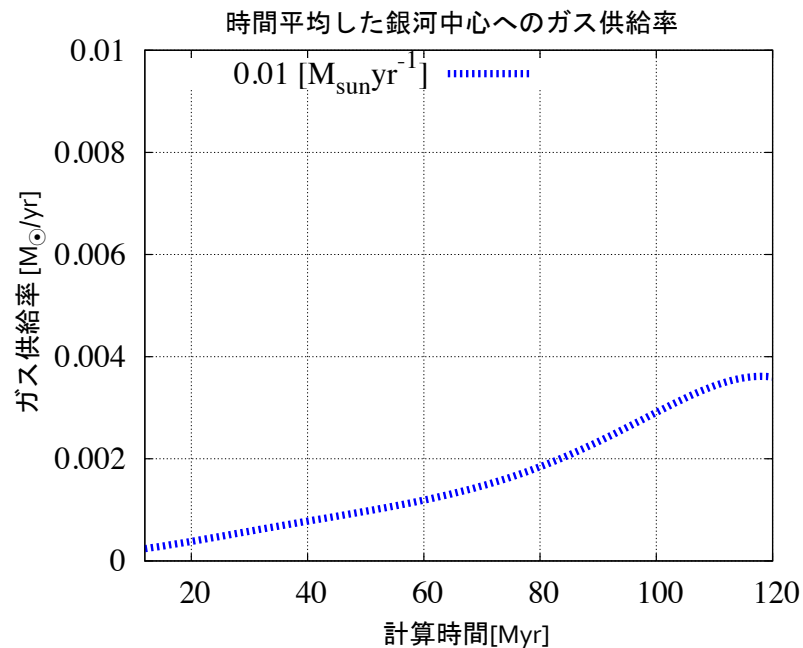
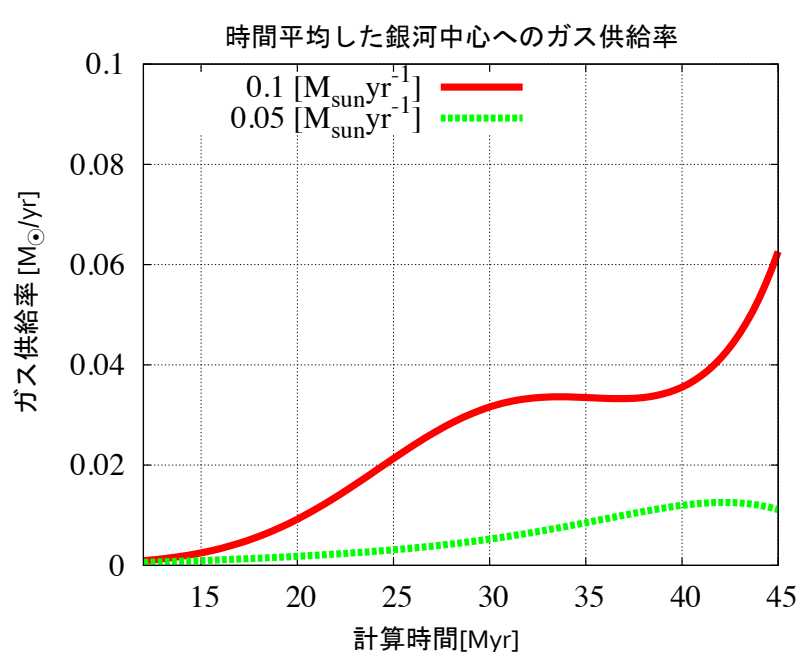


解析

① 銀河中心へのガス供給率

銀河中心へのガス供給率

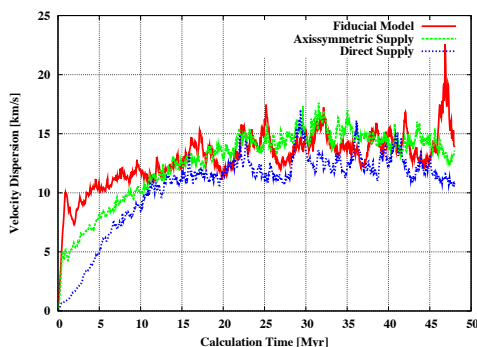
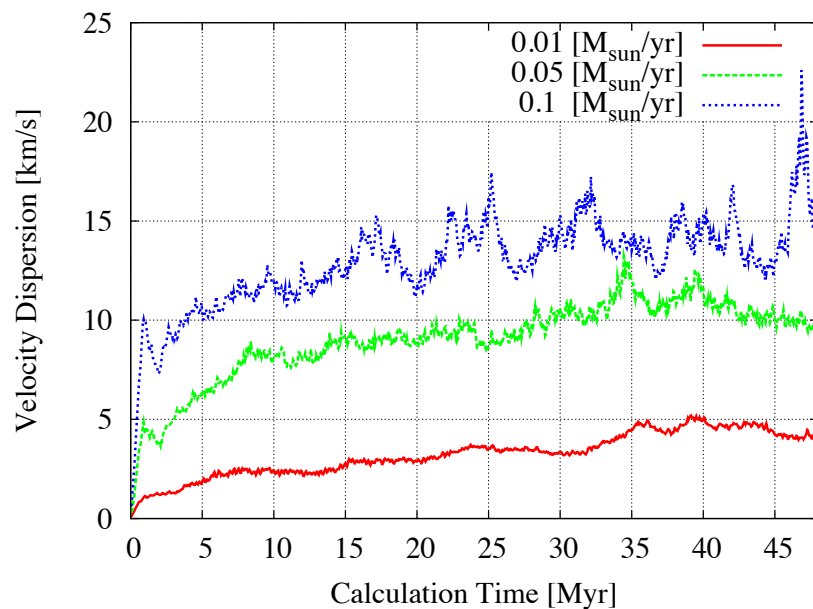
- 母銀河からガス供給率が高いほど、銀河中心へのガス供給率も大きい。
- ガス円盤全体が自己重力不安定になった後、銀河中心へのガス供給率は、母銀河からのガス供給率の**30%**以上まで増加する。
- 母銀河からのガス供給率が大きなモデルでは、銀河中心へのガス供給はガスクランプ単位で起こり、供給率は短期的に激しく振動する。



解析

②ガス円盤の速度分散

母銀河からのガス供給率と速度分散の関係



左図は、 $\dot{M}=0.1[M_{\odot}/\text{yr}]$ のモデル(赤)と、ガス供給方法を軸対称にした場合(緑)、ガス円盤外縁部に直接供給した場合(青)の比較。

ほとんど一致していることがわかる。

ガス円盤の速度分散

$$\sigma_v \equiv \frac{\sum_{i,j} \delta v_{i,j} \rho_{i,j}}{\sum_{i,j} \rho_{i,j}}$$

ここで、

$$(\delta v_{i,j})^2 \equiv (v_{x,i,j} - v_{x0,i,j})^2 + (v_{y,i,j} - v_{y0,i,j})^2$$

$v_{x0,i,j}$: 時刻tにおける平均の円運動速度のx成分

$v_{y0,i,j}$: 時刻tにおける平均の円運動速度のy成分

- 母銀河からのガス供給率が高いほど、速度分散も大きく、以下のようにスケールしている:

$$\sigma_v \propto \dot{M}_{\text{host}}^{1/2}$$

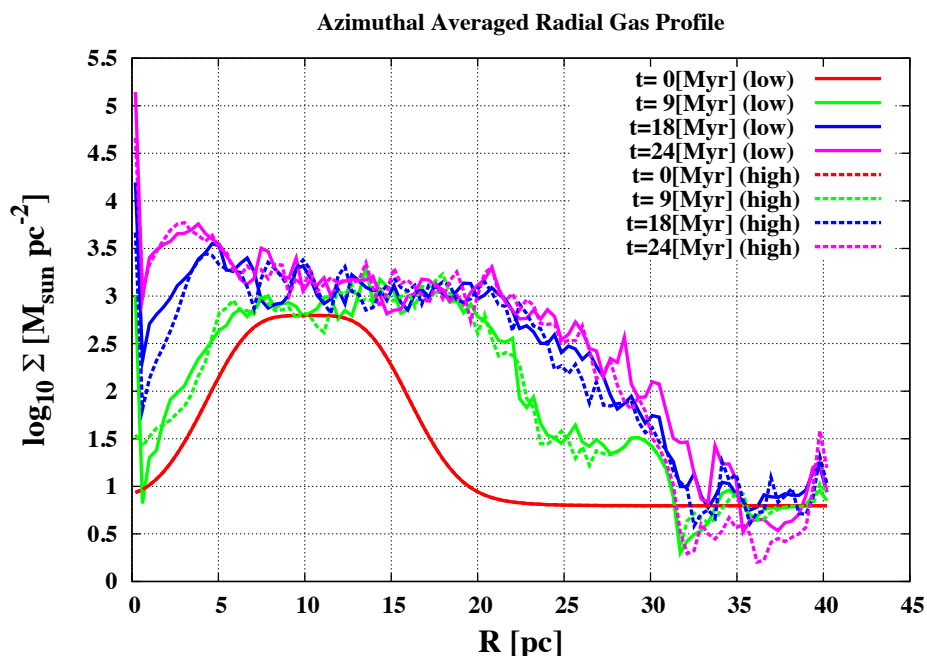
これは新しく供給されたガスの自己重力エネルギーの解放によって、乱流運動がexciteされていると解釈できる。

- ガス円盤でのガスクラump同士の相互作用が粘性のように働いていると定性的に矛盾しない。

解析

③異なる解像度の比較

方位角平均した表面密度プロファイルの時間変化

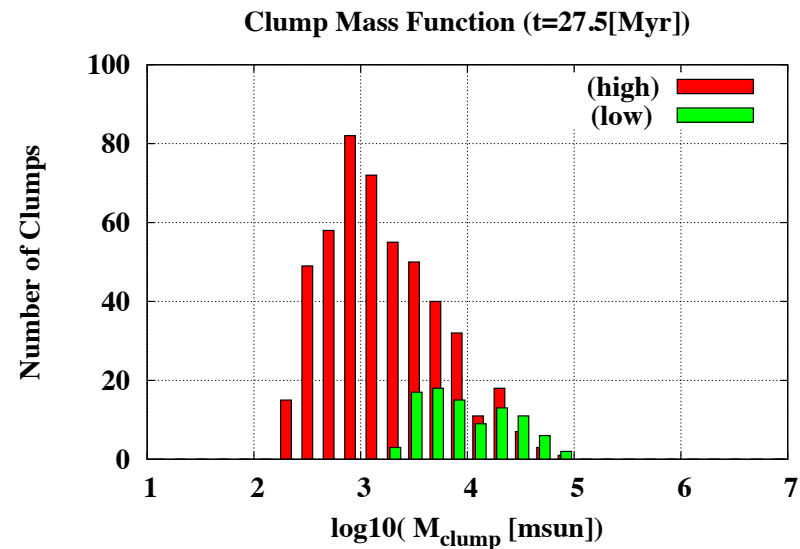


- 表面密度プロファイルの時間進化は非常に良い一致を見せている。



1. 角運動量輸送は数値粘性のせいではない。
2. 現在の解像度で角運動量輸送は解けている。

クランプ質量関数



- 高解像度モデルでは、クランプ質量関数のピークの位置が数百 $\sim 10^3[M_{\odot}]$ 。これはToomre不安定から予想される最も成長率の速い波長に対応している。
- $M > 10^4[M_{\odot}]$ のクランプ質量関数は計算時間を通して、概ね一致している。



角運動量輸送は、massiveなガスクランプが担っている

星形成の取り扱い

- 銀河中心領域での星形成条件が明らかでないため、Kennicutt-Schmidt則に従うと仮定する(Kennicutt 1998)。

$$\Sigma_{\text{SFR}} = (2.5 \pm 0.7) \times 10^{-4} \left(\frac{\Sigma_{\text{gas}}}{1 M_{\odot} \text{pc}^{-2}} \right)^{1.4 \pm 0.15} M_{\odot} \text{yr}^{-1} \text{kpc}^{-2}$$

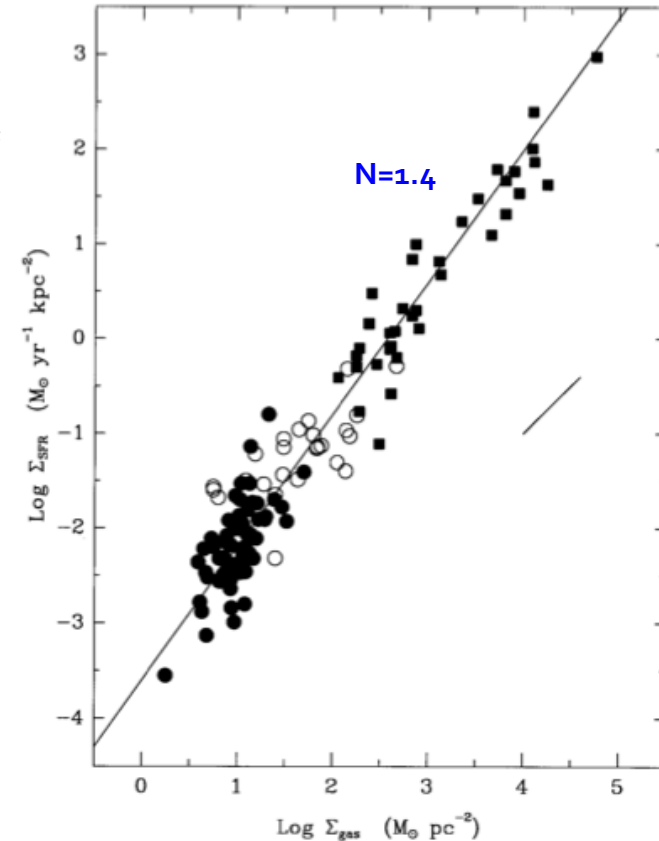
- 星形成効率を0.1に固定して、KS則を再現するように星形成タイムスケール $t_{\text{SF}}(\Sigma)$ を決め、星形成条件を満たしたセルでは、以下の確率 p にしたがって星形成を起こす：

$$p = \frac{\Delta t}{t_{\text{SF}}(\Sigma)}$$

星形成閾値は、

- $\Sigma > 10^3 [M_{\odot}/\text{pc}^2]$
- $T < 25 [\text{K}]$

- 星のIMFは、Salpeter's IMF($m_l=0.1[M_{\odot}]$ 、 $m_u=100[M_{\odot}]$)を仮定。
- 星粒子の質量は $1[M_{\odot}]$ で固定するが、Salpeter's IMFに従って、大質量星($M > 8M_{\odot}$)の個数を再現するような確率で、星粒子に大質量星フラグを立てる。大質量星の寿命は、典型的な値として7.3[Myr]を用いた。
- 星形成フィードバックは考慮しない(→3次元計算で考慮する予定)。



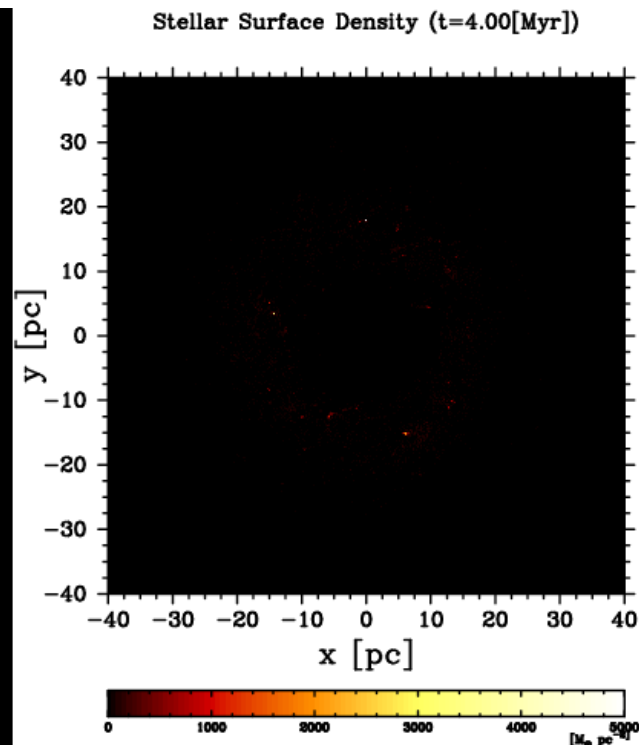
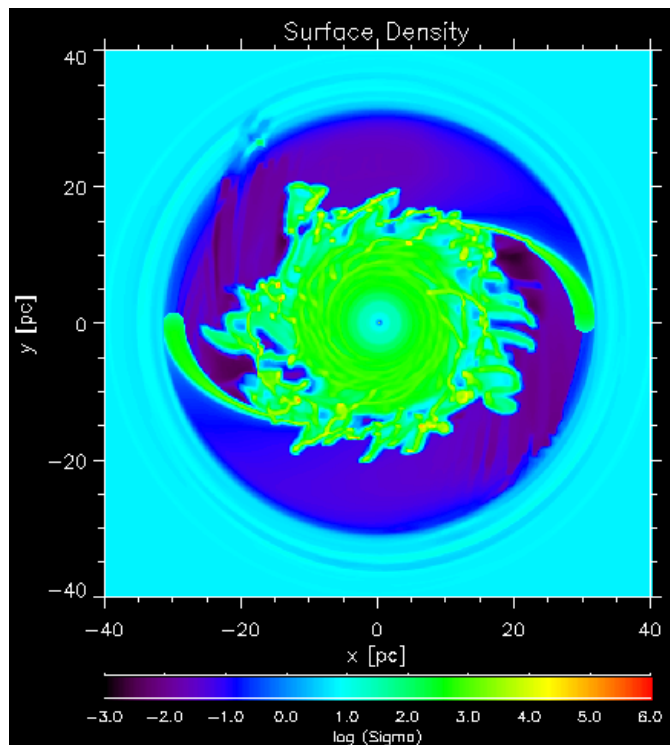
ガス表面密度と星形成率の経験則。●は normal disks、■はstarbursts、○はnormal disksの中心領域(Kennicutt 1998)

計算結果

③星形成モデル

進化の特徴

- 星形成のタイムスケールよりも、ガスクランプの成長のタイムスケール/母銀河からのガス供給率の方が速いため、massiveなガスクランプの形成が可能。
- ガス円盤部でmassiveなガスクランプが形成されると、そこから密度の高い星団が形成される。
- massiveなガスクランプの一部は、星形成を起こしながら、銀河中心に落下し、中心付近で星形成を起こす。

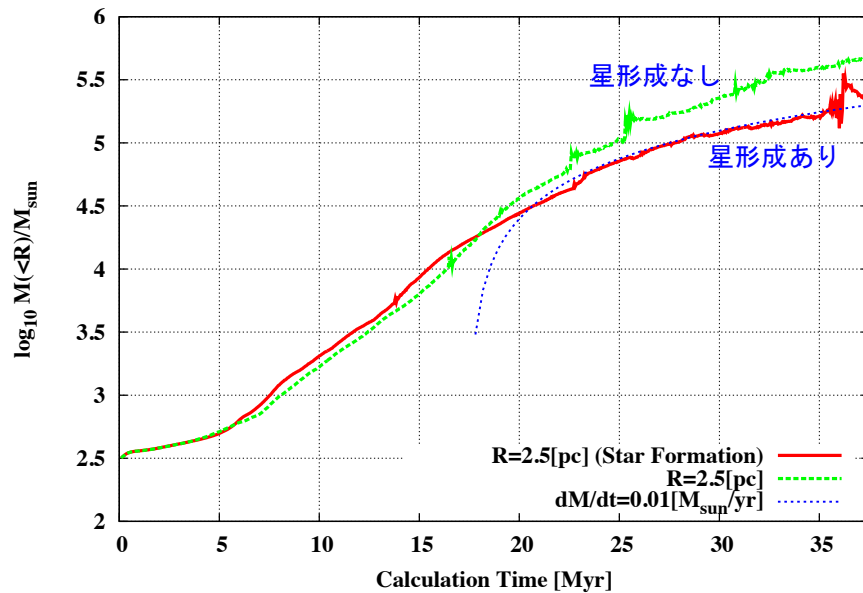


解析

③星形成モデル：銀河中心へのガス供給率への影響、星形成率

銀河系中心へのガス供給率への影響

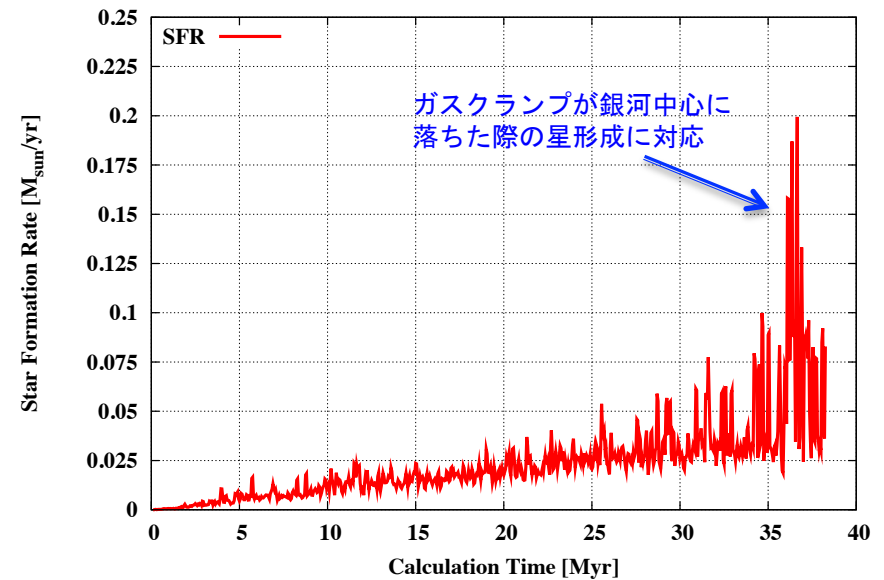
time evolution of $M(<R)$



星形成によって、銀河中心へのガス供給率は、母銀河のガス供給率の10%まで減少した。

星形成率の時間変化

Star Formation Rate

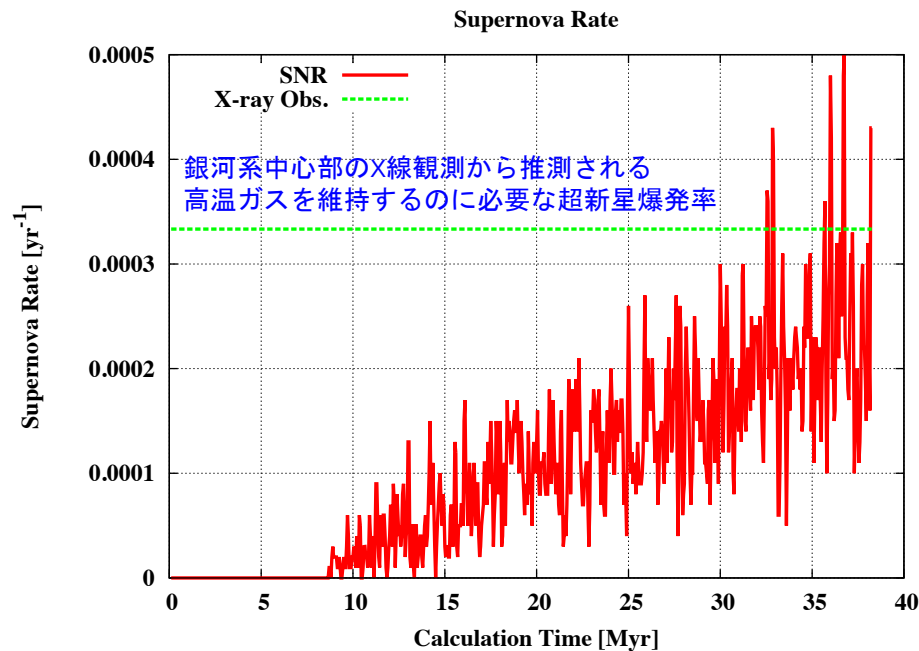


星形成率は短期的に激しく振動しながら、時間とともに増加している。

解析

④星形成モデル：超新星爆発率

超新星爆発率の時間変化



- 超新星爆発率は短期的に激しく振動しながら、時間とともに増加している。
- 銀河系中心領域の高温ガスを維持するのに必要な超新星爆発率とfactor 2で一致。

星形成モデルのまとめ

- 銀河中心へのガス供給率は、星形成によって、母銀河の10%まで減少した。
- 星形成条件としてKennicutt-Schmidt則を仮定すると、
 1. 銀河系中心部の星団の分布
 2. CND
 3. 高温ガスを維持するために必要な超新星爆発率

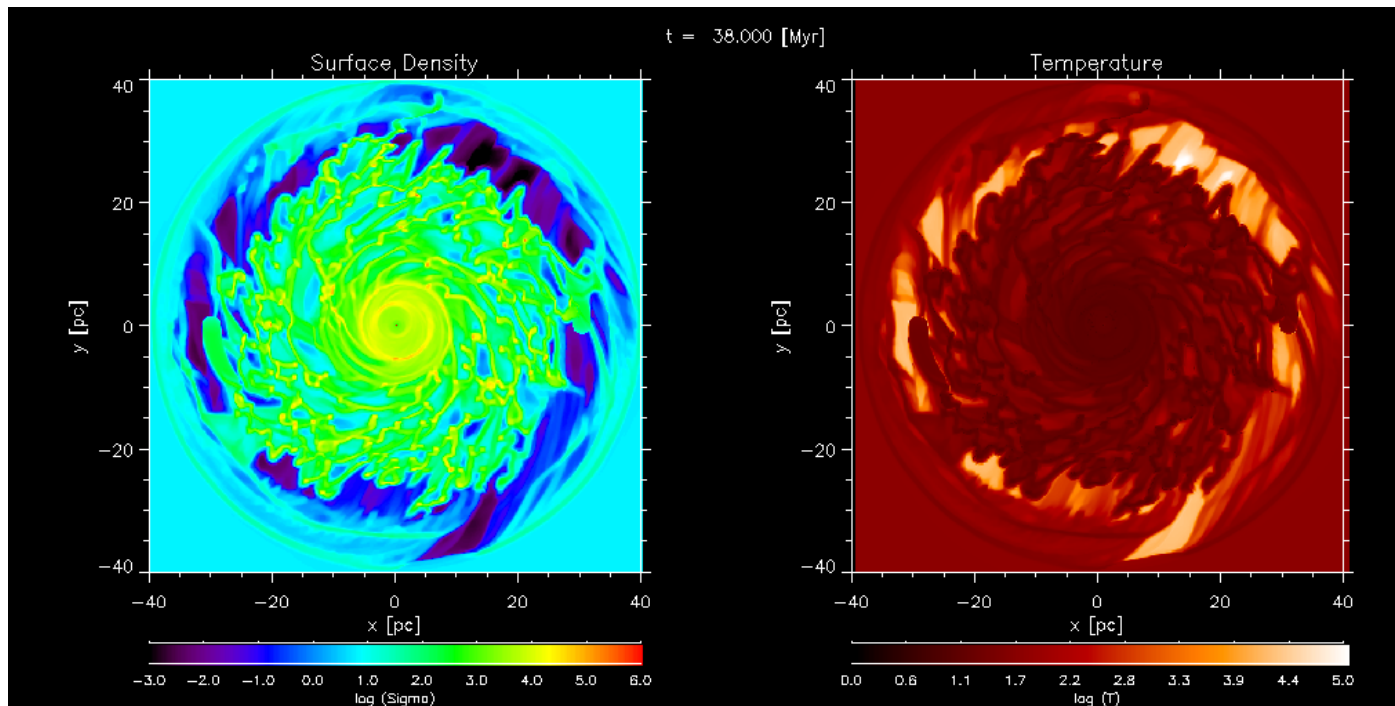
を概ね再現できることがわかった。

銀河中心部でもKennicutt-Schmidt則がよく成り立っている可能性がある。

結果

SMBH質量の影響

- SMBHの質量による進化の違いを調べるため、artificialに銀河系の M_{SMBH} を $10^8[M_{\odot}]$ として計算。
 - ただし、0.25[pc]のsofteningを導入した。
- ガス円盤外側でガスクランプの形成が活発に起こるが、SMBHの潮汐力が強いため、ガスクランプは小さい半径で破壊される。
- コンパクトなガス円盤が中心に形成される。ここでは、one-arm instabilityが起こる。この役割が興味深い。



まとめ

- 本研究では、銀河系中心部のガス供給過程を調べるため、母銀河からのガス供給率と星形成過程を考慮して、2次元の数値流体/N体計算を行った。
- 星形成を考慮しない場合、銀河系中心へのガス供給率は、母銀河からのガス供給率に比例し、母銀河からのガス供給率の**30%以上**に達する。
- 銀河系中心部のガス円盤の速度分散 σ は、母銀河からのガス供給率のほぼ $1/2$ 乗に比例することを示した。これはガス円盤の乱流状態が供給されたガスの自己重力エネルギーの解放で維持されていると理解できる。
- 高解像度モデルとの比較から、ガス円盤での角運動量輸送は、massiveなガスクランプが担うことがわかった。
- Kennicutt-Schmidt則に基づく星形成で、銀河系中心領域の特徴が再現できることを示した。このときの銀河中心へのガス供給率は、母銀河からのガス供給率の**約10%**である。
- SMBHの質量が大きな場合には、ガス円盤外側で形成されたガスクランプは半径 $10[\text{pc}]$ 以下では破壊され、結果として、コンパクトなガス円盤が形成される。そこでは、one-arm instabilityが起きる。