

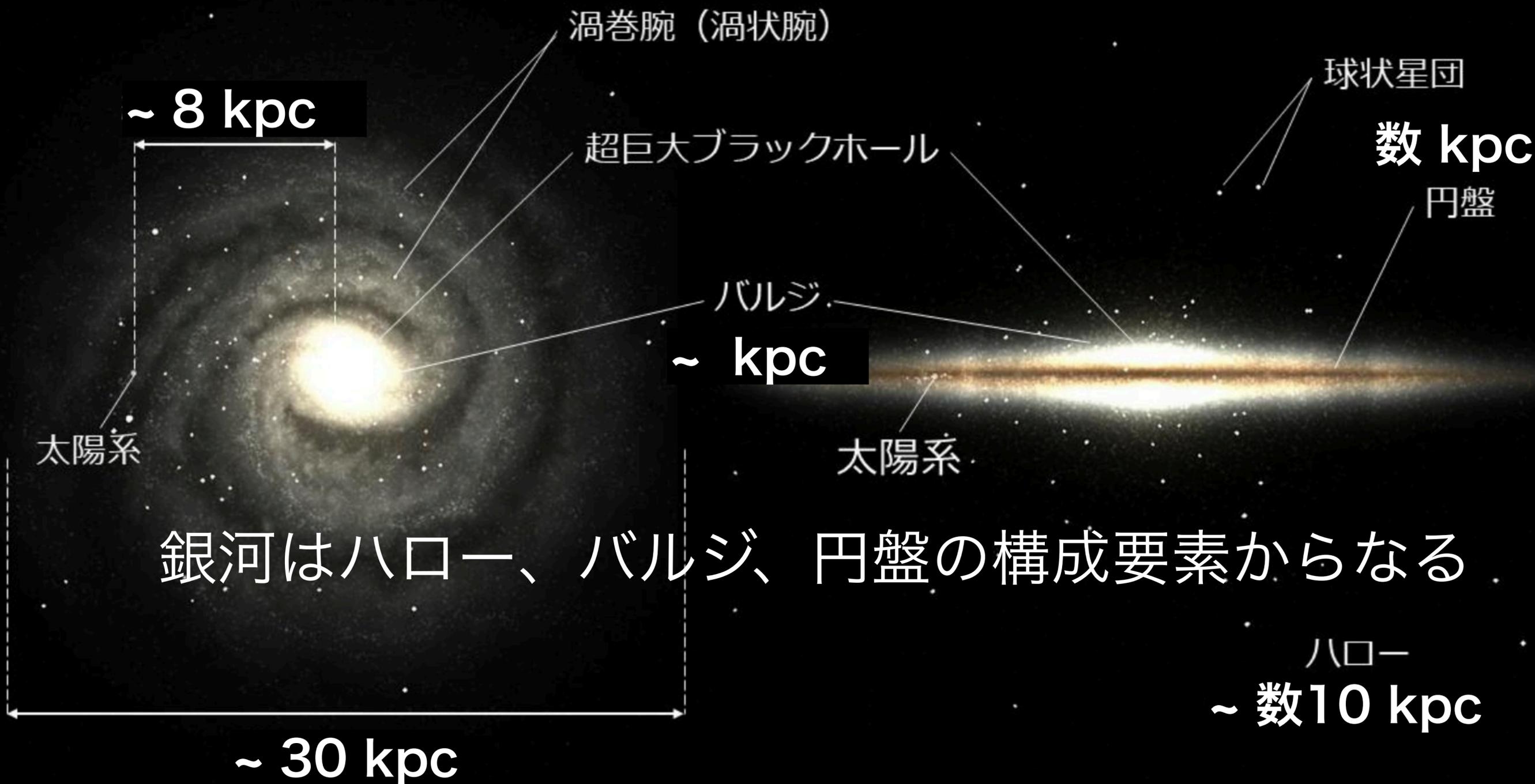
Dynamical Mechanism of Episodic Gas Accretion to the Central Region of Spiral Galaxies

研究の興味：銀河共進化
銀河形態と銀河中心への質量輸送機構の関係

油谷直道 神戸大学 (余り学振PD)
共同研究者：斎藤貴之、川勝望、和田桂一

天の川銀河を正面から見た姿

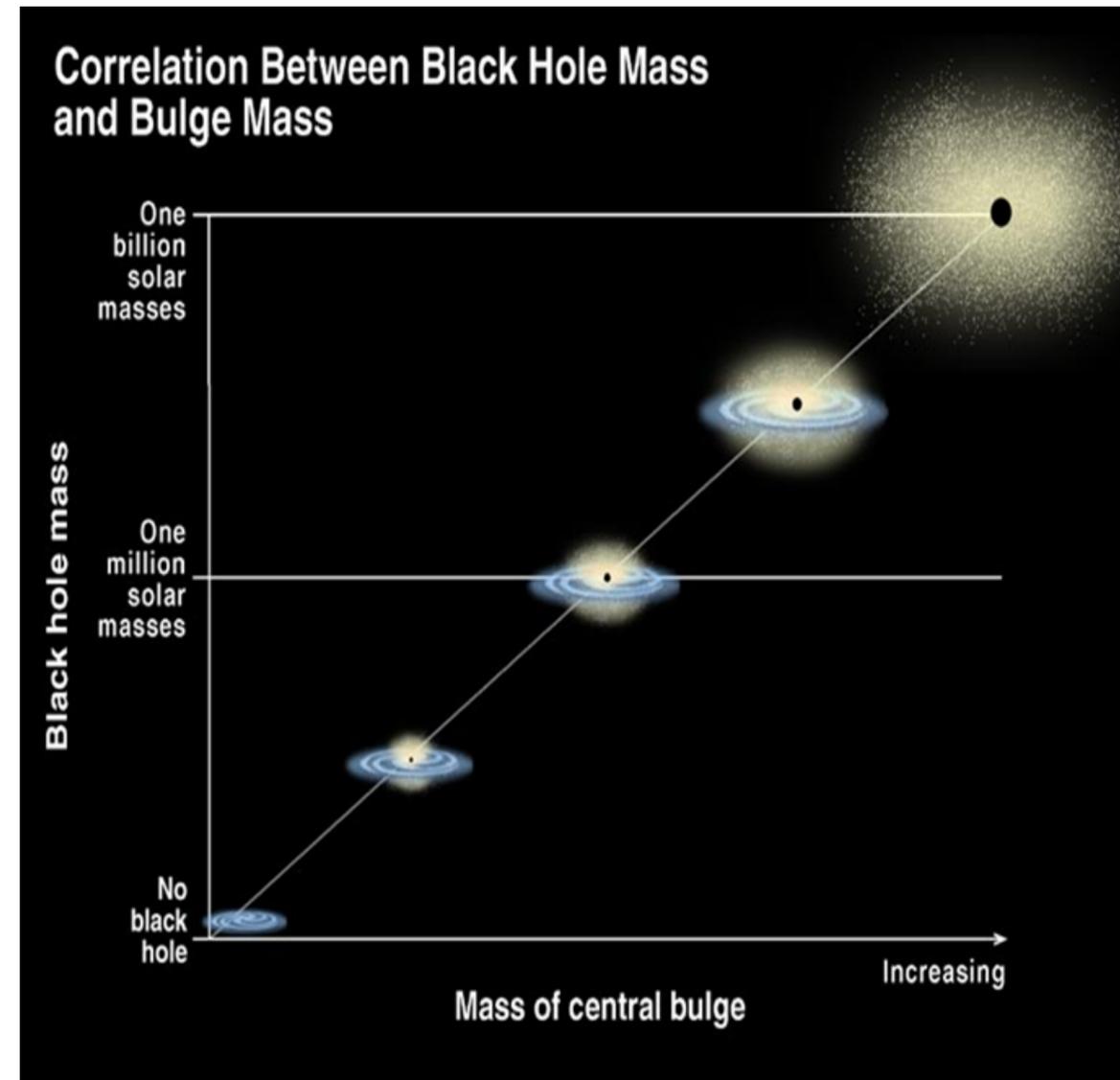
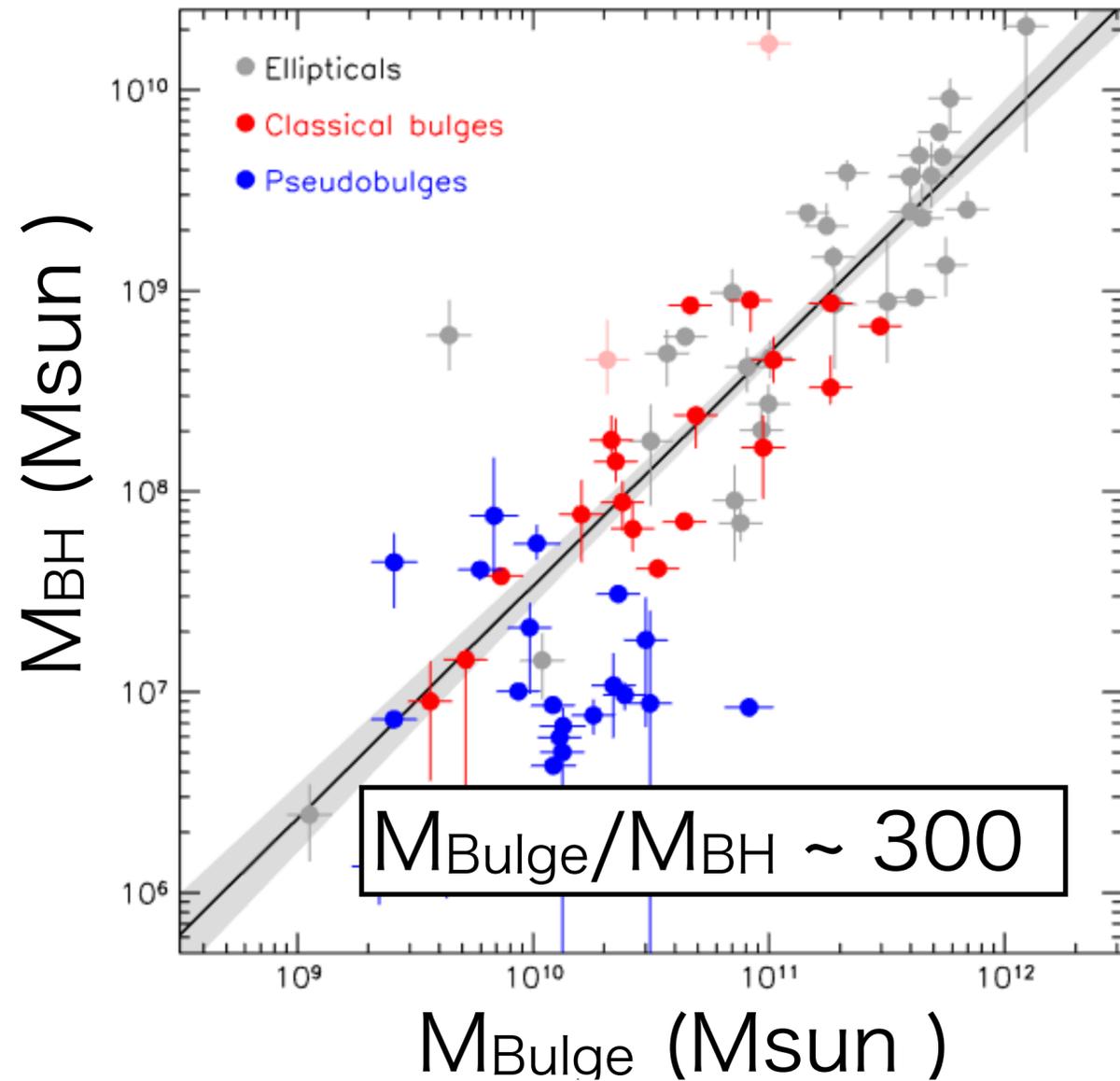
天の川銀河を横から見た姿



Credit: 加藤恒彦, 4D2U Project, NAOJ, ALMA (ESO/NAOJ/NARO)
<https://alma-telescope.jp/news/press/spiral-202105.html>

超大質量ブラックホール (SMBH) とバルジの共進化

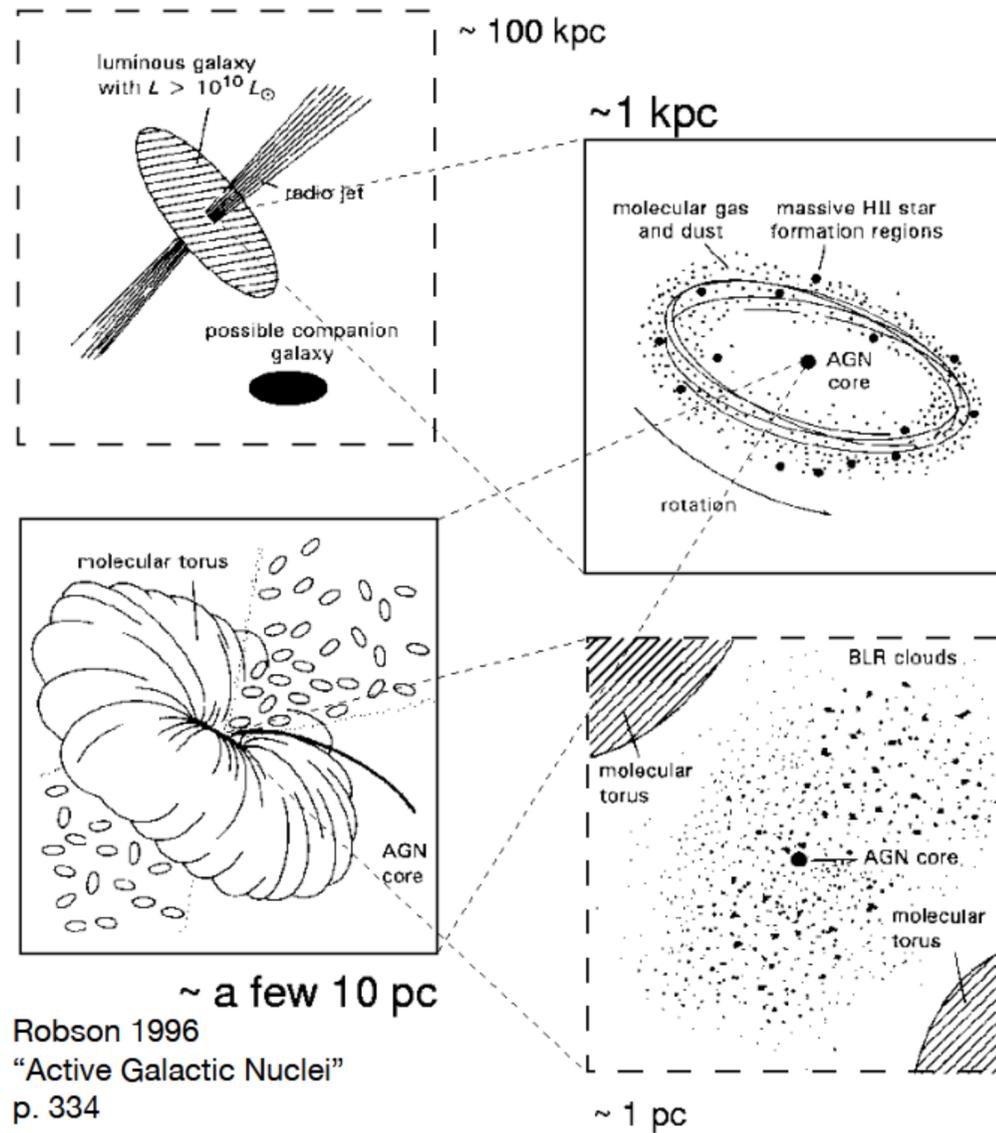
Kormendy & Ho 2013



SMBH形成がバルジ形成と密接に関係することを示唆

天文分野の最重要課題の一つであるSMBH形成過程の理解は母銀河の形態が鍵

活動銀河中心核



- ☑ 活動銀河中心核：銀河中心 (~ AU) 領域が銀河全体を凌駕する明るさで輝く天体
- ☑ SMBH (~ AU scale) にガスが落ちると輝く

$$U = \frac{GM_{BH}m_{gas}}{5r_s} = 0.1m_{gas}c^2.$$

$$10^{45} \text{ erg/s} \leftrightarrow 0.2 \text{ Msun/yr}$$

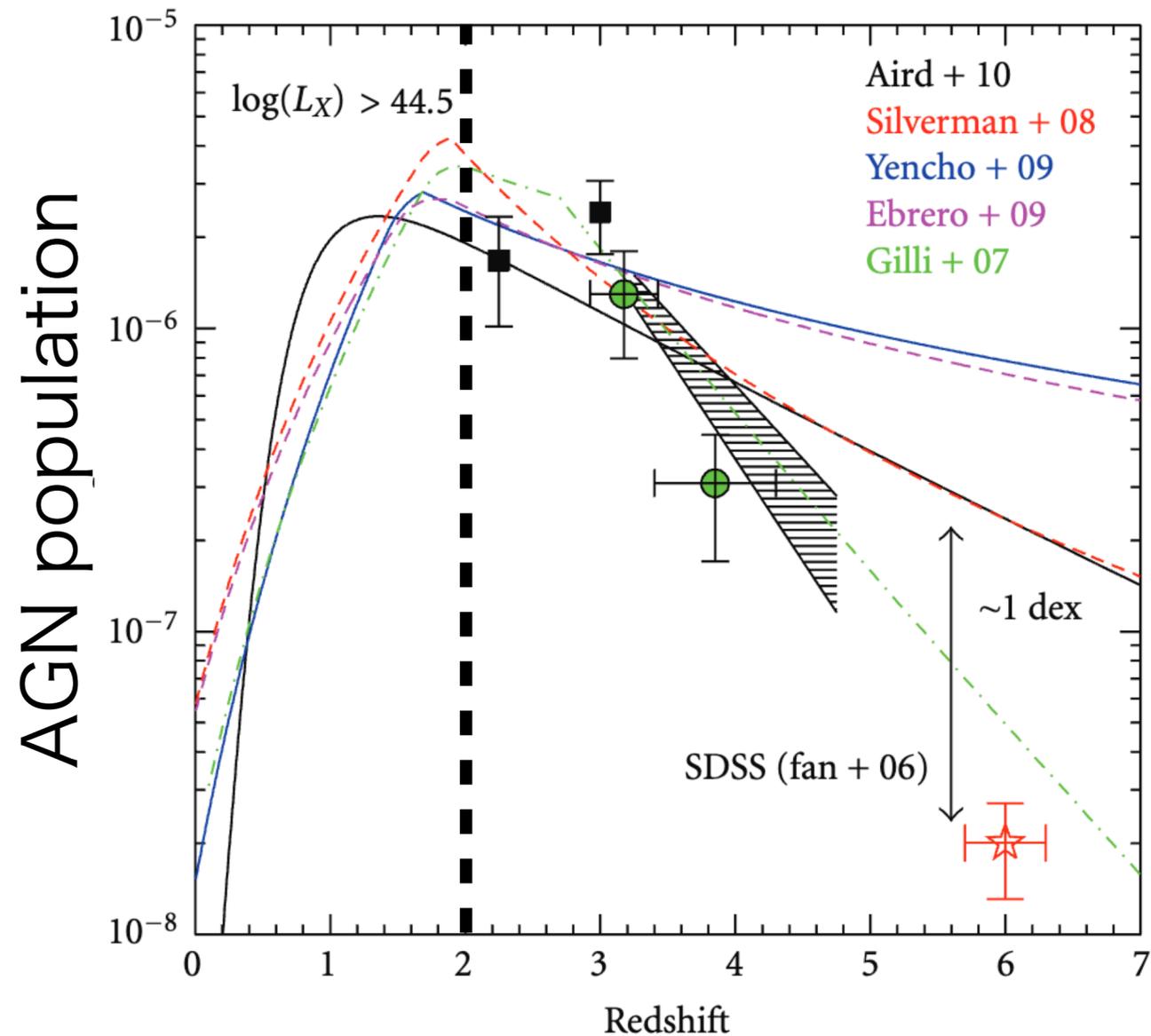
=> 銀河全体に匹敵する明るさ

明るい銀河中心核（活動銀河中心核：AGN）はSMBHが成長している証拠

=> AGNの発現過程（質量輸送過程）を調べることは共進化過程の解明につながる

AGN の赤方偏移分布

Treister et al. 2011

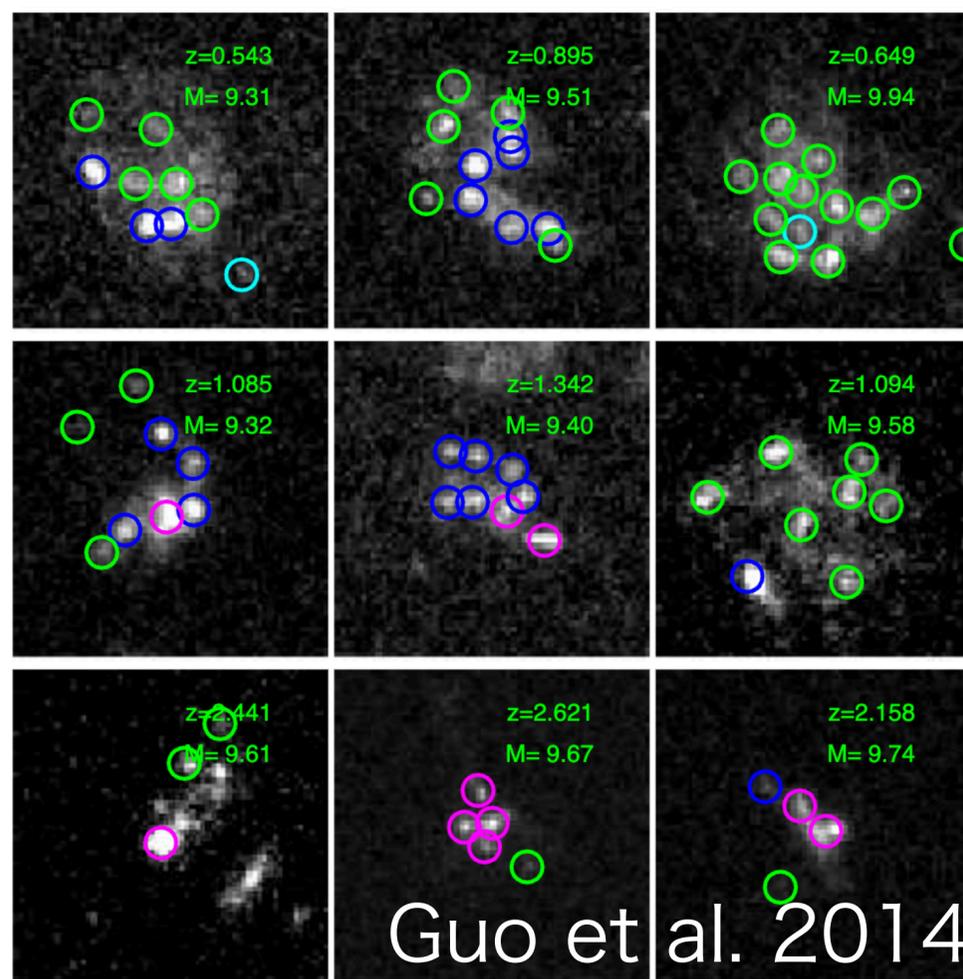


- ☑ 現在のSMBH質量は過去の質量降着量の積算
- ☑ AGN population は赤方偏移2にピークを持つ
=> SMBHは赤方偏移2で主に成長

つまり、赤方偏移2での質量輸送機構が重要！

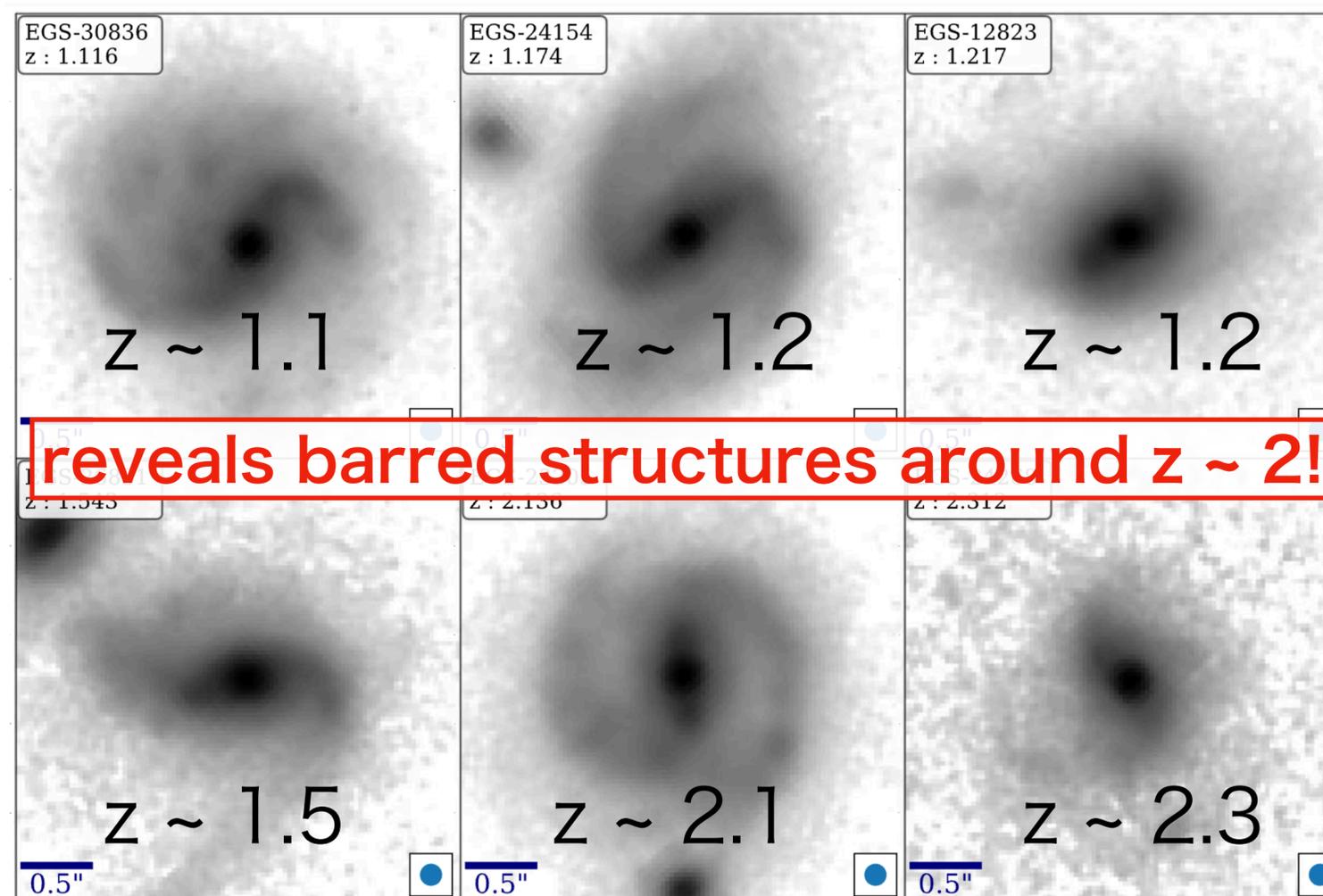
高赤方偏移の銀河形態

optical images



NIRCam images

Guo et al. 2023

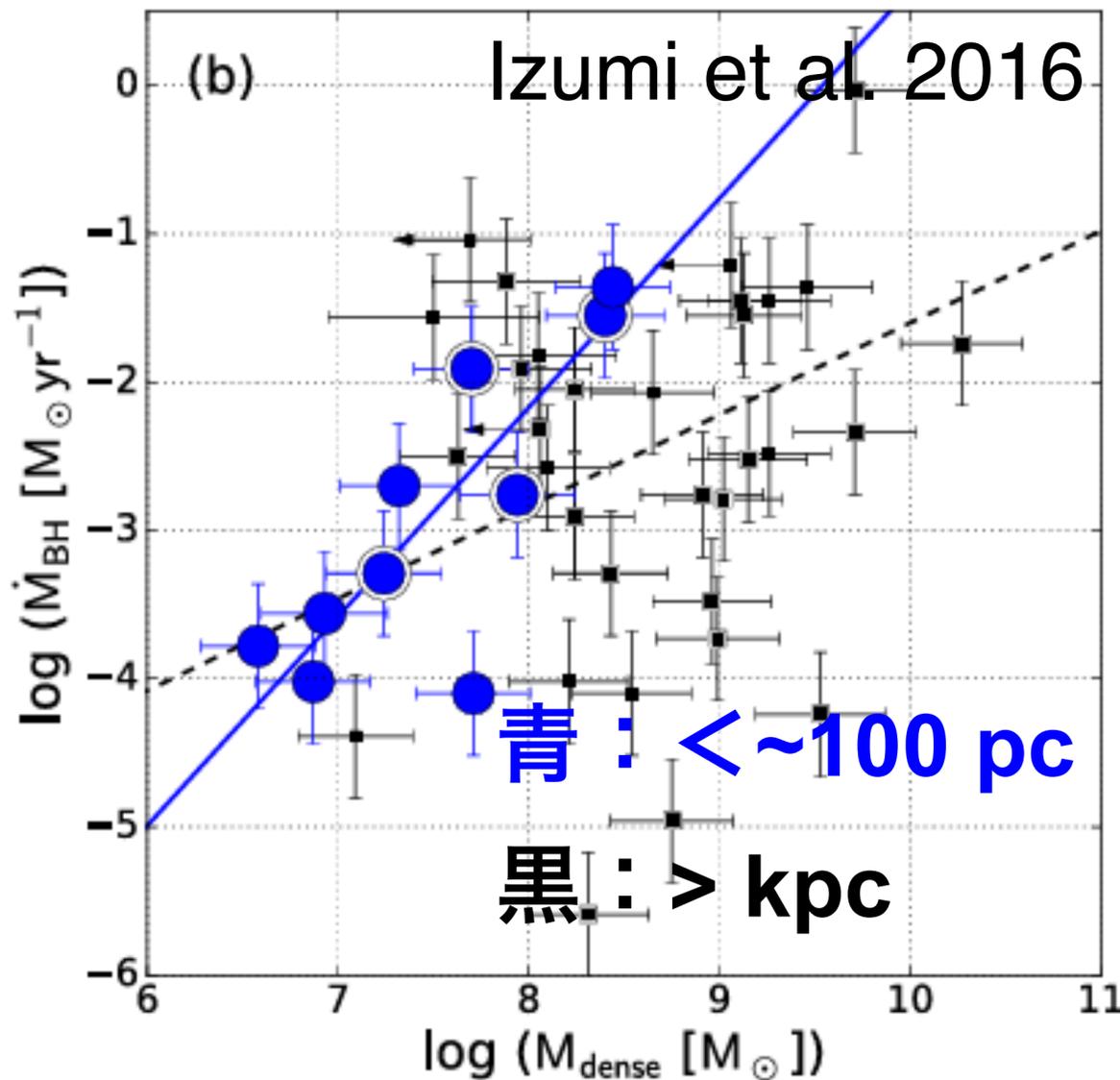


赤方偏移 2 での質量輸送機構を考える上で棒状ポテンシャルを介したガス塊が重要！？

しかし、棒状ポテンシャル中のガス塊降着は理解されていない

どのスケールまでの質量降着を考えると良いのか？

銀河スケールから AGN core (AU スケール) まで 10 桁のスケールギャップ。。。



☑ SMBHへの質量降着率 vs 高密度ガス量

- 銀河中心 100 pc 以内の高密度ガスと相関

- 母銀河スケールとは相関なし

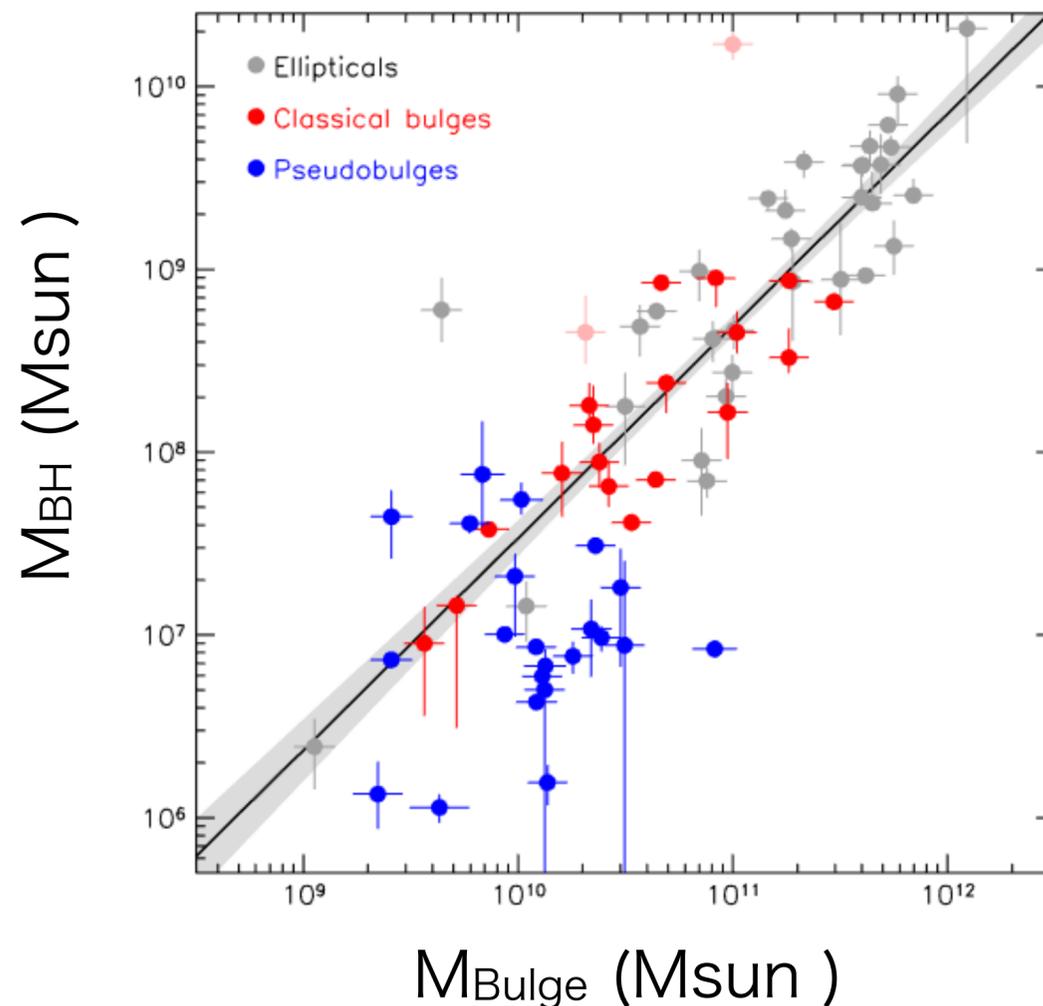
=> SMBH成長は 100 pc scale の高密度
ガスが支配

赤方偏移 2 近辺のガス豊富な渦巻銀河でどのよ
うに銀河中心 100 pc にガスを輸送できるか？

HCN (1-0)

研究目的

- ☑ ガス豊富な渦巻銀河の計算を行い、ガス塊の降着過程を明らかに
- ☑ それらガス塊降着と、バルジ質量との関連について



Kormendy & Ho 2013

Methods

天の川銀河を正面から見た姿

天の川銀河を横から見た姿



Credit: 加藤恒彦, 4D2U Project, NAOJ, ALMA (ESO/NAOJ/NARO)
<https://alma-telescope.jp/news/press/spiral-202105.html>

計算コードと基礎方程式

***N*-body/SPH code *ASURA* (Saitoh et al. 2008, 2013)**

粒子法は粒子を追跡可能なため、降着過程の調査に最適な手法

☑重力多体計算 (DM, Star, Gas)

$$\mathbf{g}_i = \sum_{j=1(\neq i)}^N \frac{Gm_j(\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i)}{(|\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i|^2 + \epsilon^2)^{3/2}}$$

☑流体計算

$$\frac{D\rho}{Dt} = -\rho\nabla \cdot \mathbf{v} - \dot{\rho}_*^{SF} + \dot{\rho}_*^{SW}$$

$$\frac{D\mathbf{v}}{Dt} = -\frac{1}{\rho}\nabla p + \mathbf{g} + \dot{\mathbf{v}}^{SNII}$$

$$\frac{Du}{Dt} = -\frac{p}{\rho}\nabla \cdot \mathbf{v} + \frac{\Gamma}{\rho} - \frac{\Lambda}{\rho}$$

$$p = nk_B T$$

重力多体計算から

Heating source

I. FUV heating

II. HII region model

Radiative Cooling

金属量依存

標準モデル

超巨大ブラックホール (SMBH)

Mass : $1e7 M_{\odot}$

Racc : 30 pc

DMハロー

Mass : $2.55e12 M_{\odot}$

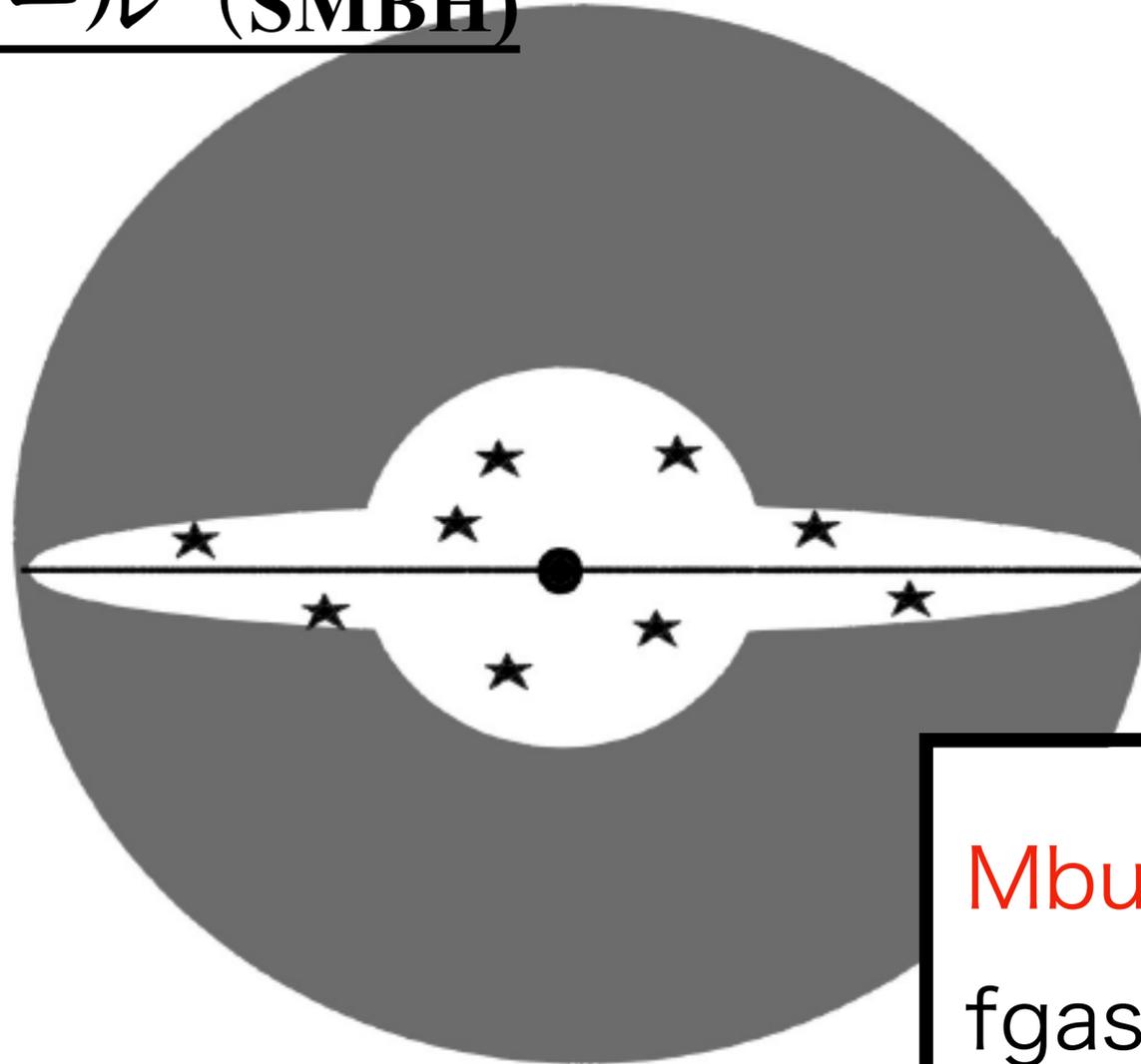
Ndm : $1e6$

銀河バルジ

Index : 4

Mass : $1e9 M_{\odot}$

Ngas : $1e5$



ガス円盤 (n = 1.2)

Mass : $1.25e10 M_{\odot}$

Scale radius : 3 kpc

星円盤

Mass : $5e10 M_{\odot}$

Scale radius : 2 kpc

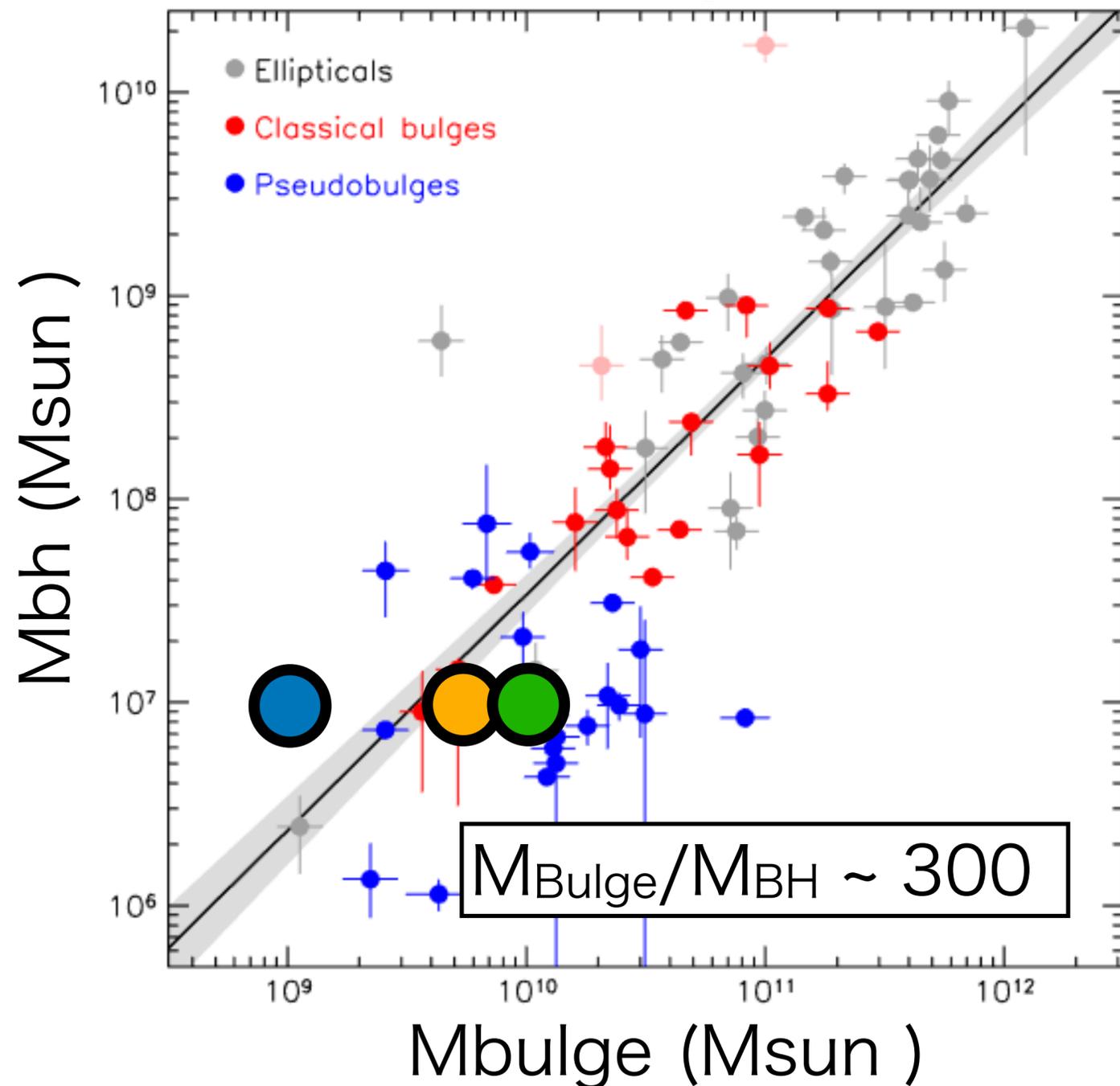
$M_{\text{bulge}}/M_{\text{bh}} = 100$ (bulgeless)

$f_{\text{gas(disk)}} = 20\%$

We used *AGAMA* for initial setup (Vasiliev et al. 2018)

バルジ質量を変化させたモデル

Kormendy & Ho 2013



☑ $M_{bulge} / M_{bh} \sim 300$ を元にモデルを選択

1. $M_{bulge} / M_{bh} = 100$

2. $M_{bulge} / M_{bh} = 500$

3. $M_{bulge} / M_{bh} = 1000$

☑ 円盤に対するバルジ質量に変換すると

1. $M_{bulge} / M_{disk} = 0.02$ (massive disk)

2. $M_{bulge} / M_{disk} = 0.1$

3. $M_{bulge} / M_{disk} = 0.2$ (massive bulge)

円盤の自己重力不安定の指標として重要

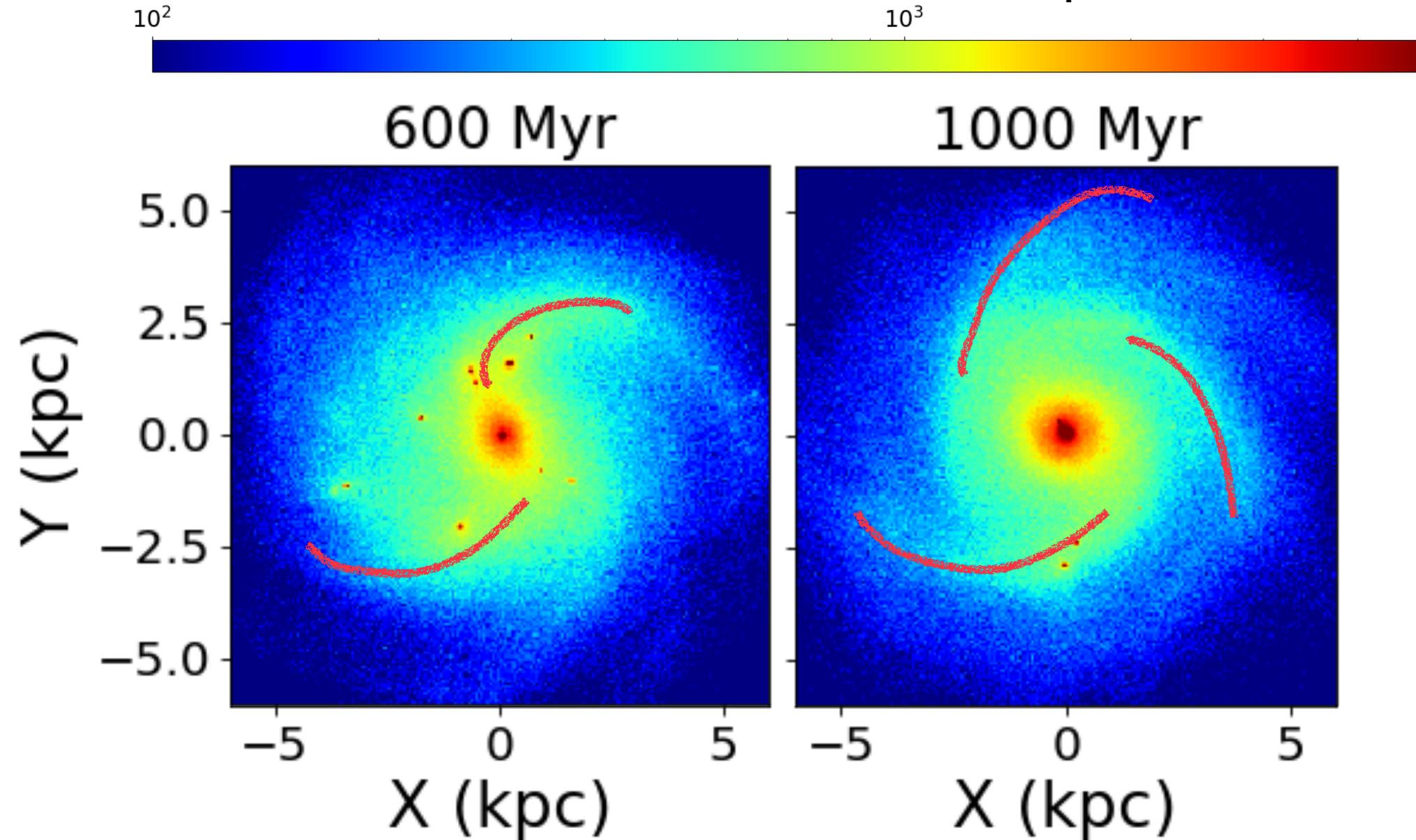
Results

1. 円盤の進化 ◀
2. 渦状腕による質量降着
3. ガス塊による質量降着
4. バルジポテンシャルと降着過程

星円盤の腕形成

$$M_{\text{Bluge}}/M_{\text{Disk}} = 2\%$$

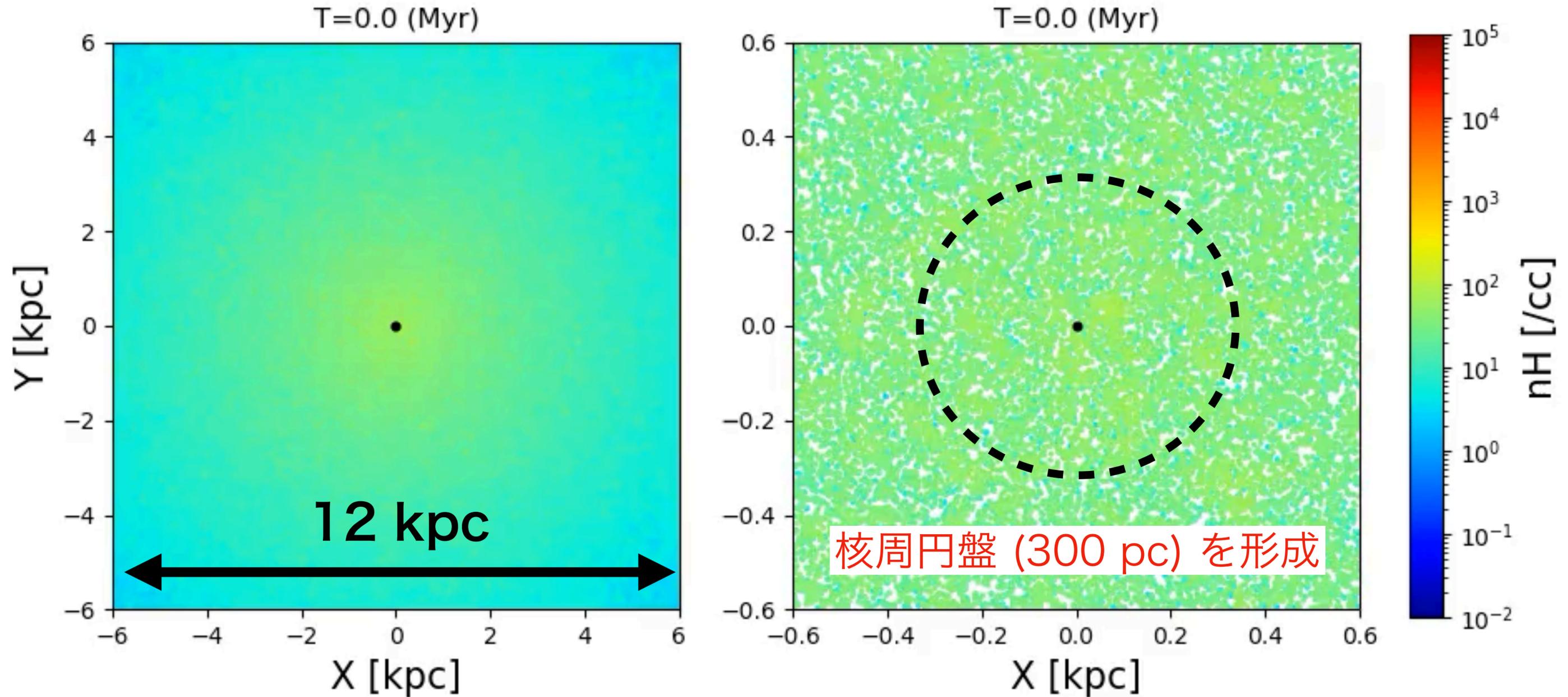
星円盤面密度分布 ($M_{\text{sun}} \text{ pc}^{-2}$)



円盤の自己重力不安定性によって2～3本の腕や星団が形成される
この非軸対称ポテンシャル内でのガスの運動を考える

ガス円盤形成とガス塊降着

$M_{\text{Bluge}}/M_{\text{Disk}} = 2\%$



星の円盤の自己重力不安定によってガスの腕が形成されガス塊降着が生じる

1. 円盤の進化

2. 渦状腕による質量降着 ◀

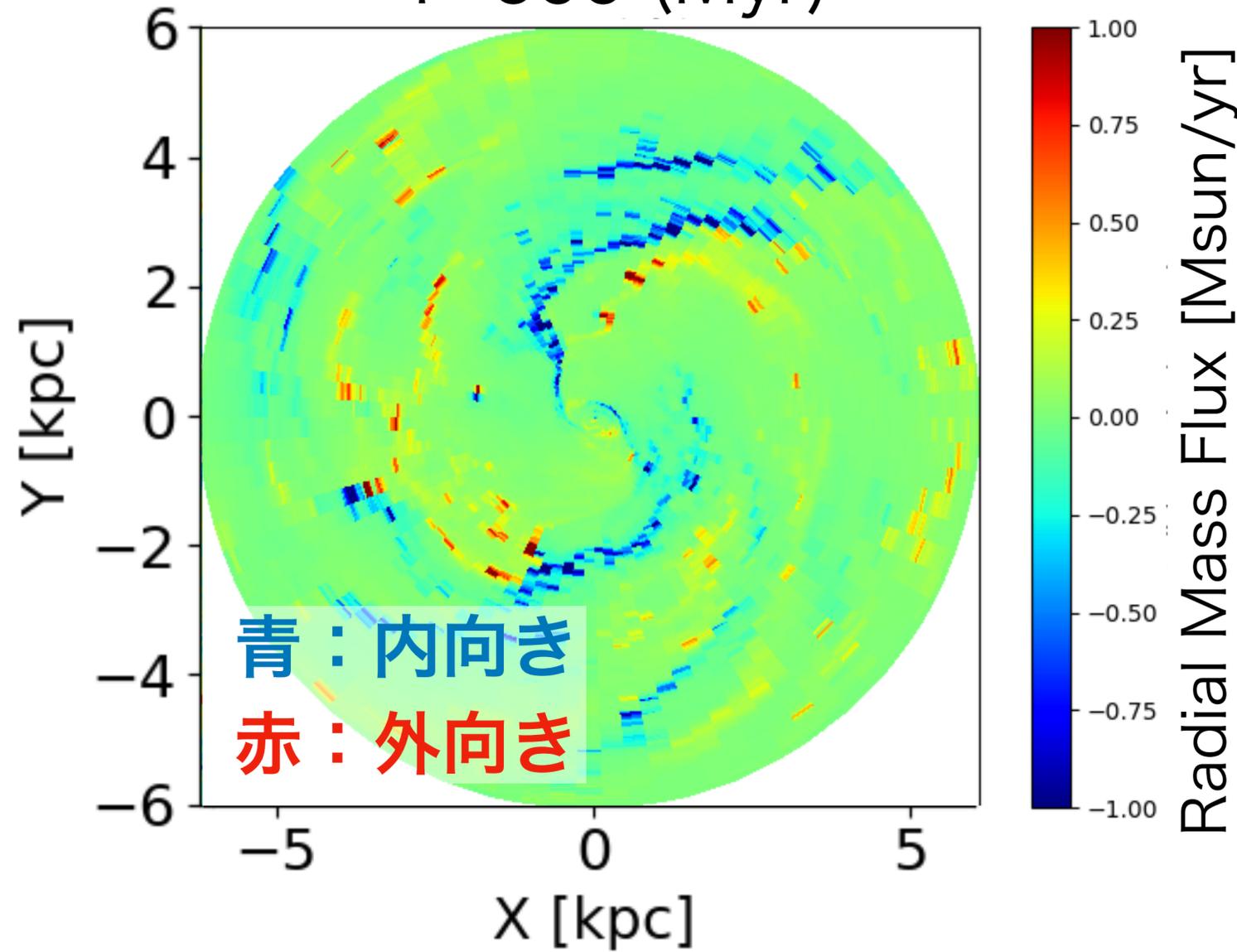
3. ガス塊による質量降着

4. バルジポテンシャルと降着過程

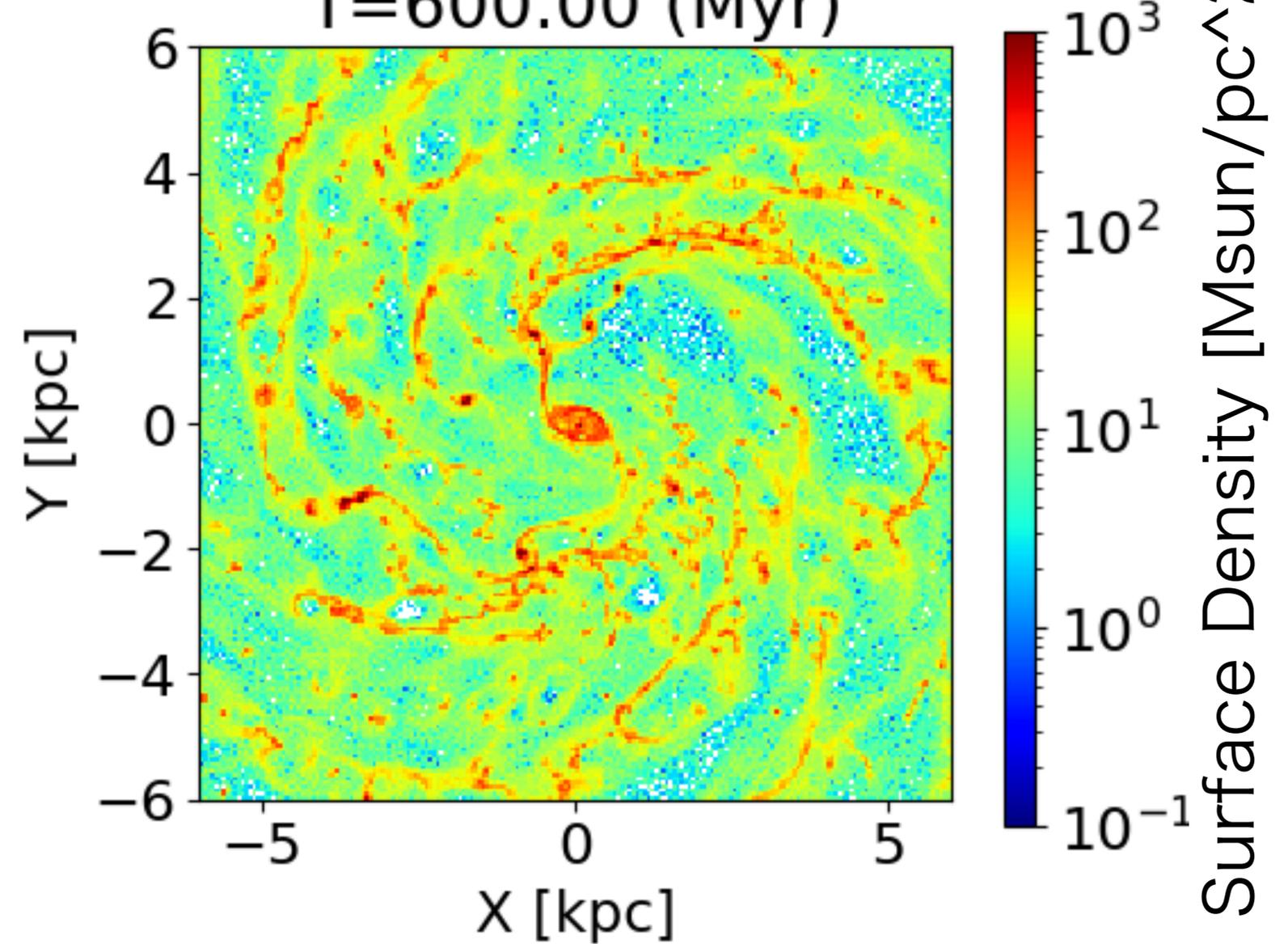
MBluge/MDisk = 2%

半径方向の質量輸送

T=600 (Myr)



T=600.00 (Myr)



ガスの腕に沿った質量降着がある

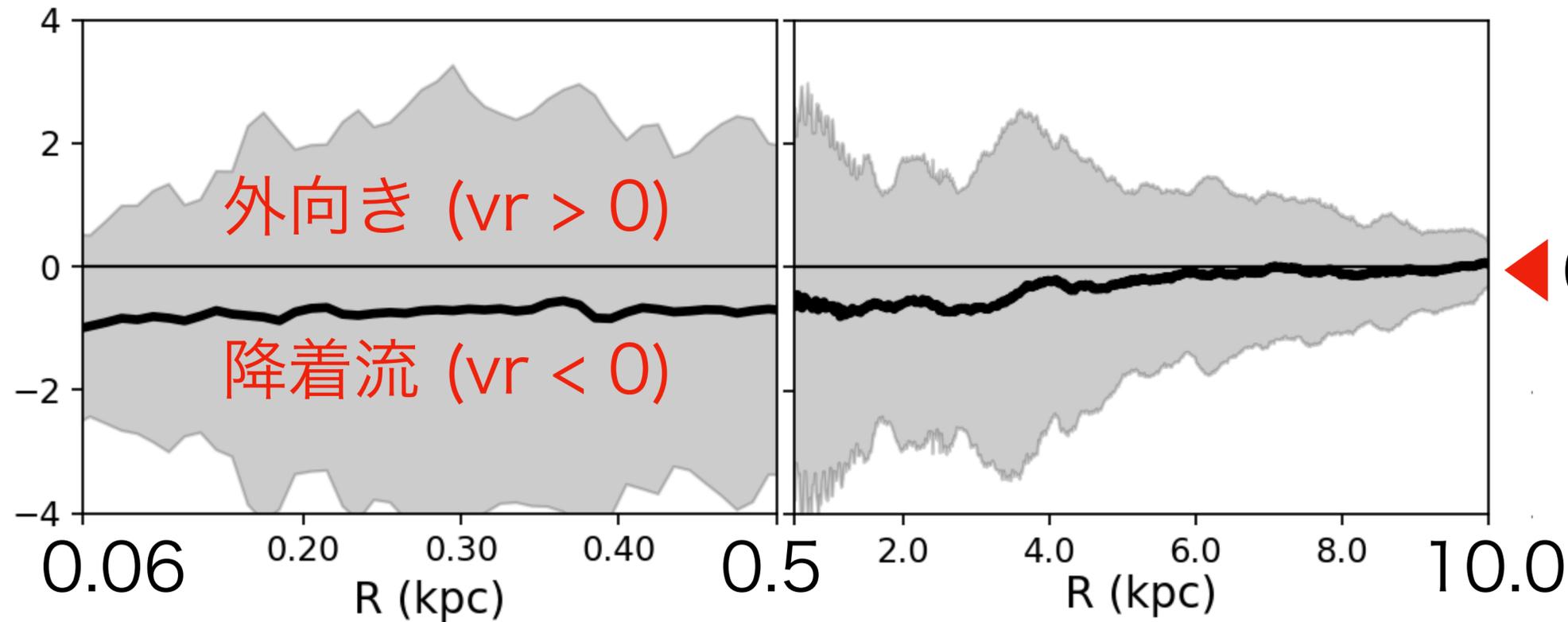
実際、どれくらいの質量輸送があるのだろうか？

時間平均した質量輸送

MBluge/MDisk = 2%

Radial Gas Mass Flow Rate (Msun/yr)

○ 実線は時間平均、灰色の領域は時間方向の分散 (1σ)



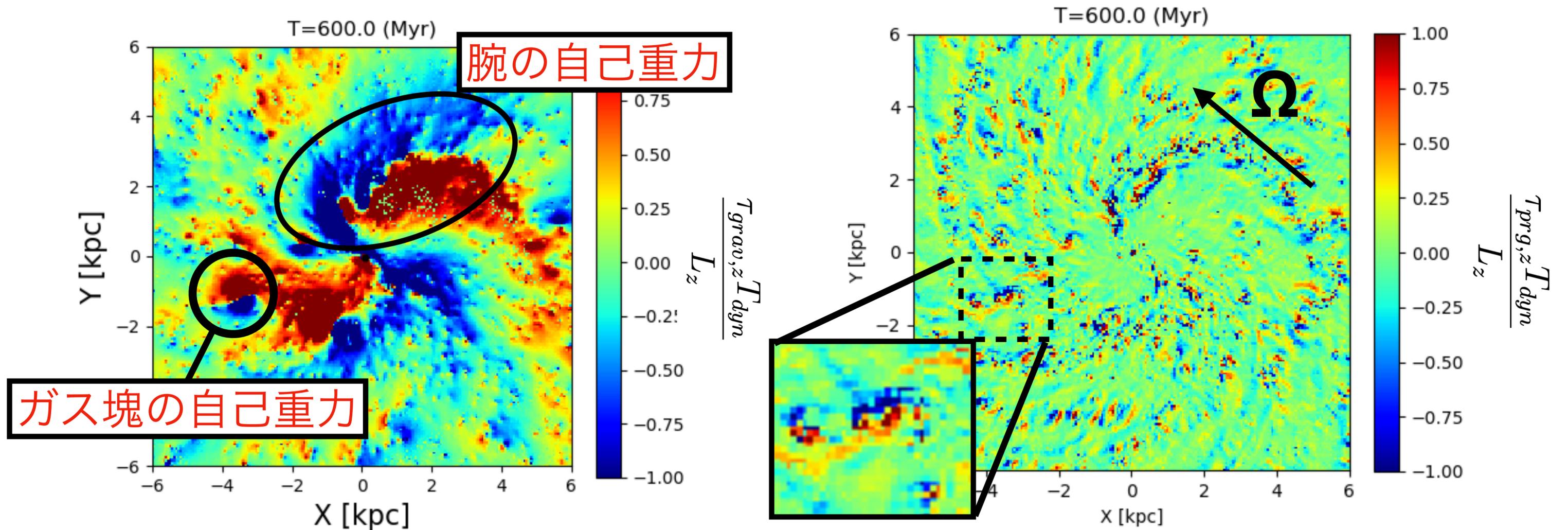
◀ 600 Myr - 1 Gyr で時間平均

☑ **Several kpc ~ 60 pc まで ~ 1 Msun/yr の質量降着がある！**

この質量降着率の10%が降着すると $L_{\text{agn}} \sim 10^{45} \text{ erg/s}$ に匹敵
なぜこのような質量 (角運動量) 輸送が生じるのか？

二次元トルクマップ

$$\tau_{prg,z} = r \times \nabla P|_z$$

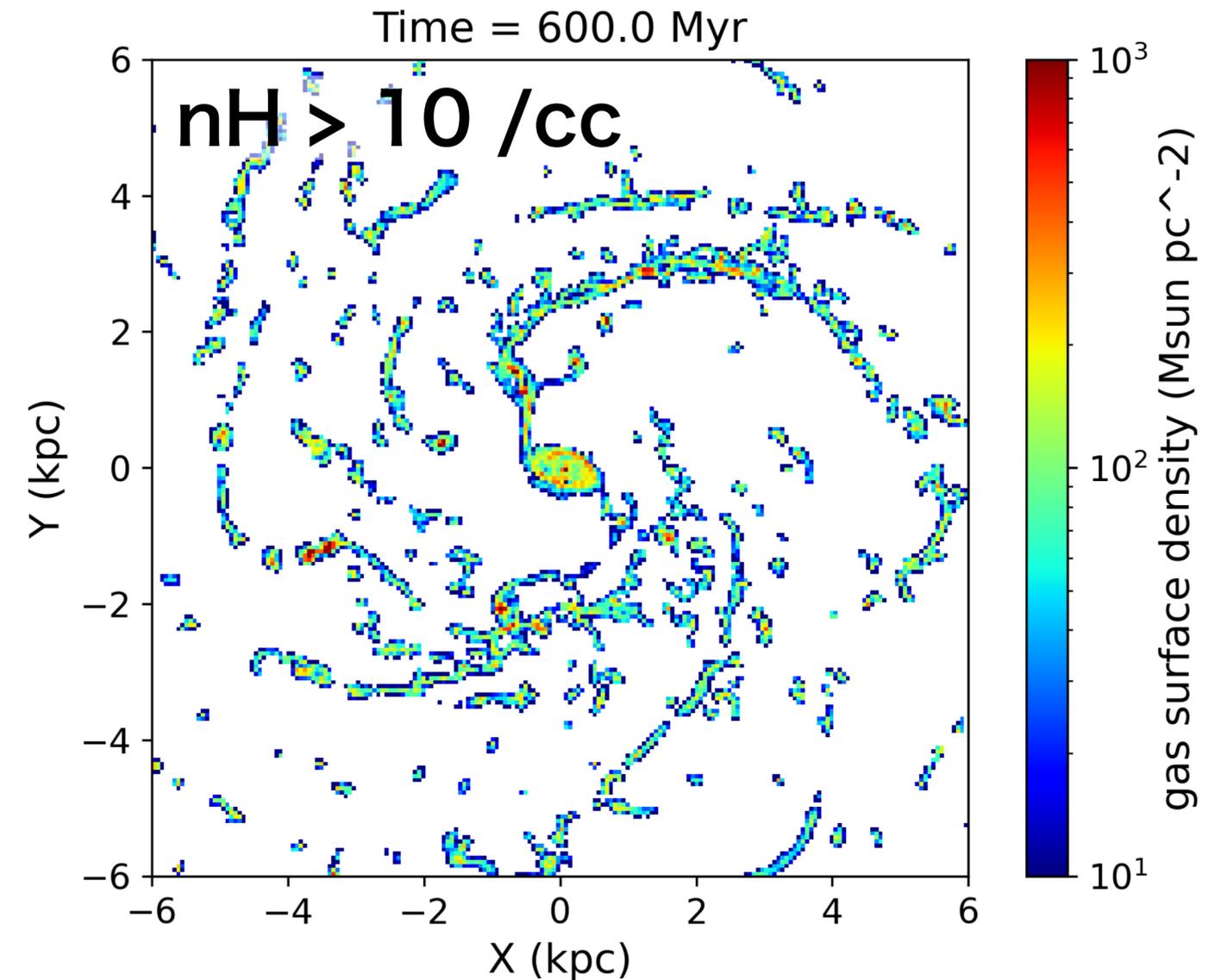
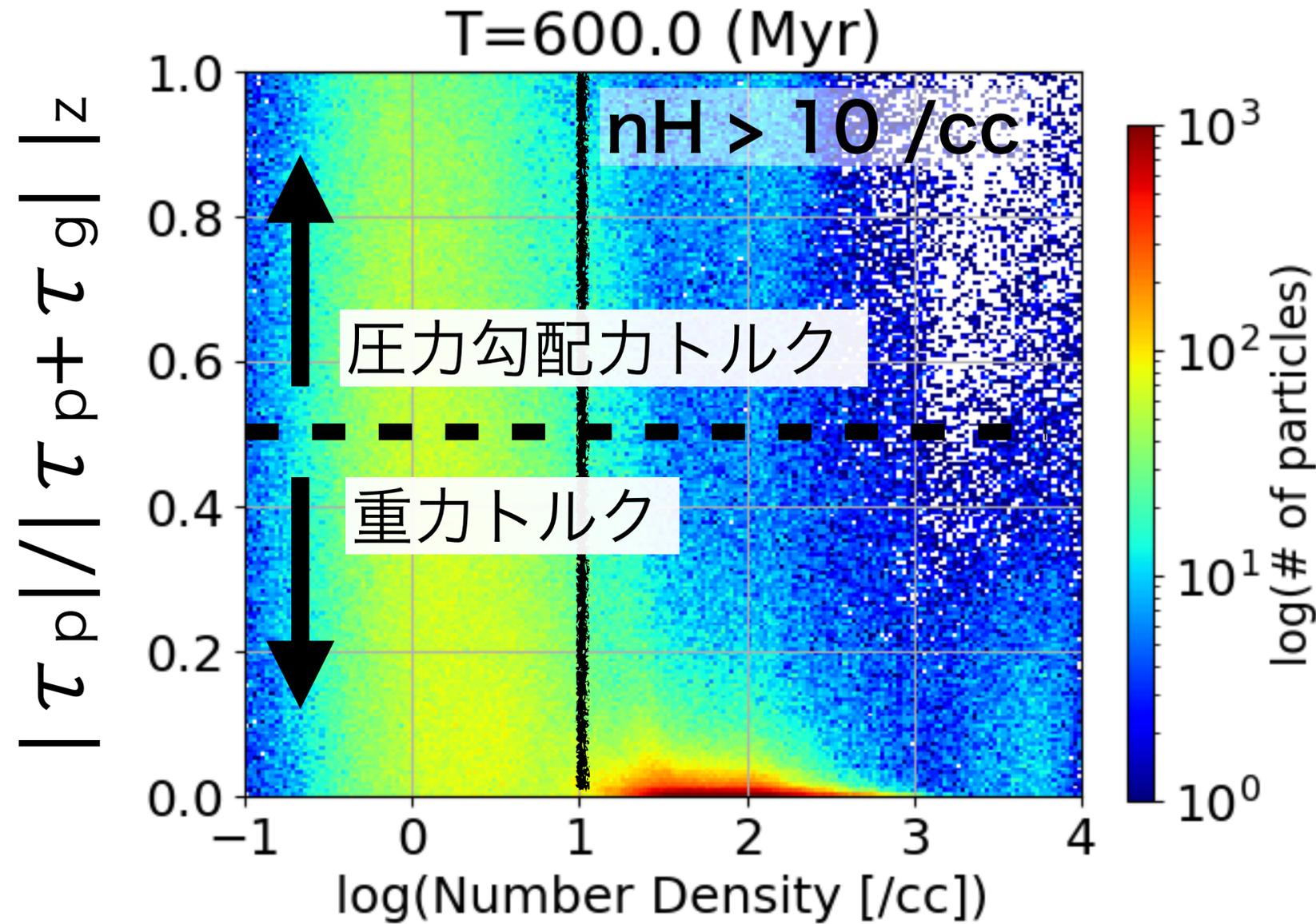


- ☑ 重力トルク：腕やガス塊の前面に負のトルクが働く
- ☑ 圧力勾配力トルク：高密度領域の後面のガスに負のトルク (膨張)

どちらが質量輸送に効いているのか？

重力トルクと圧力勾配力トルク

MBluge/MDisk = 2%



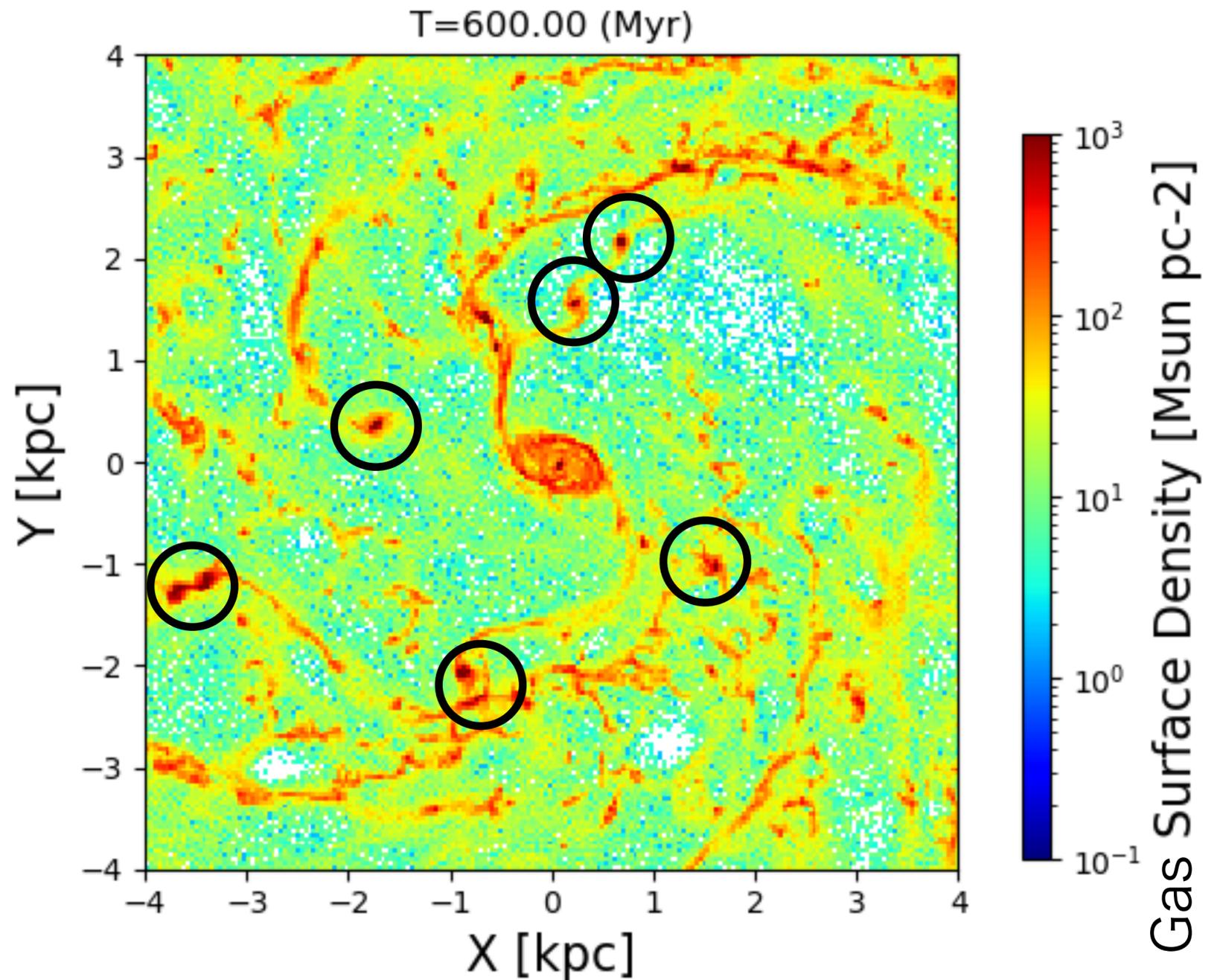
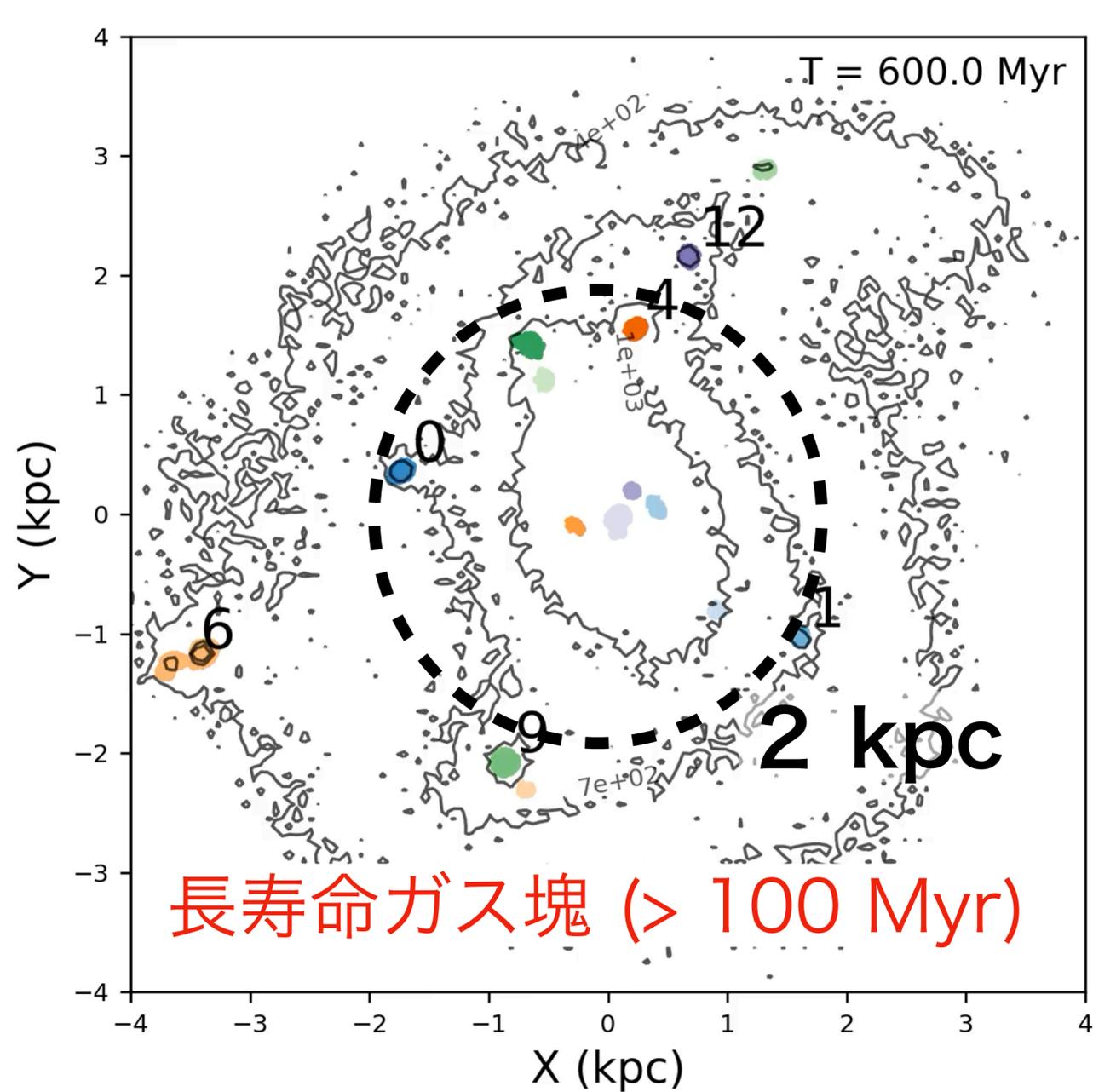
腕の中 ($nH > 10$ /cc) では重力トルクが支配的
腕に沿った質量降着は、腕からの重力トルクで落ちている

1. 円盤の進化
2. 渦状腕による質量降着
3. ガス塊による質量降着 ◀
4. バルジポテンシャルと降着過程

渦状腕起源のガス塊検出

MBluge/MDisk = 2%

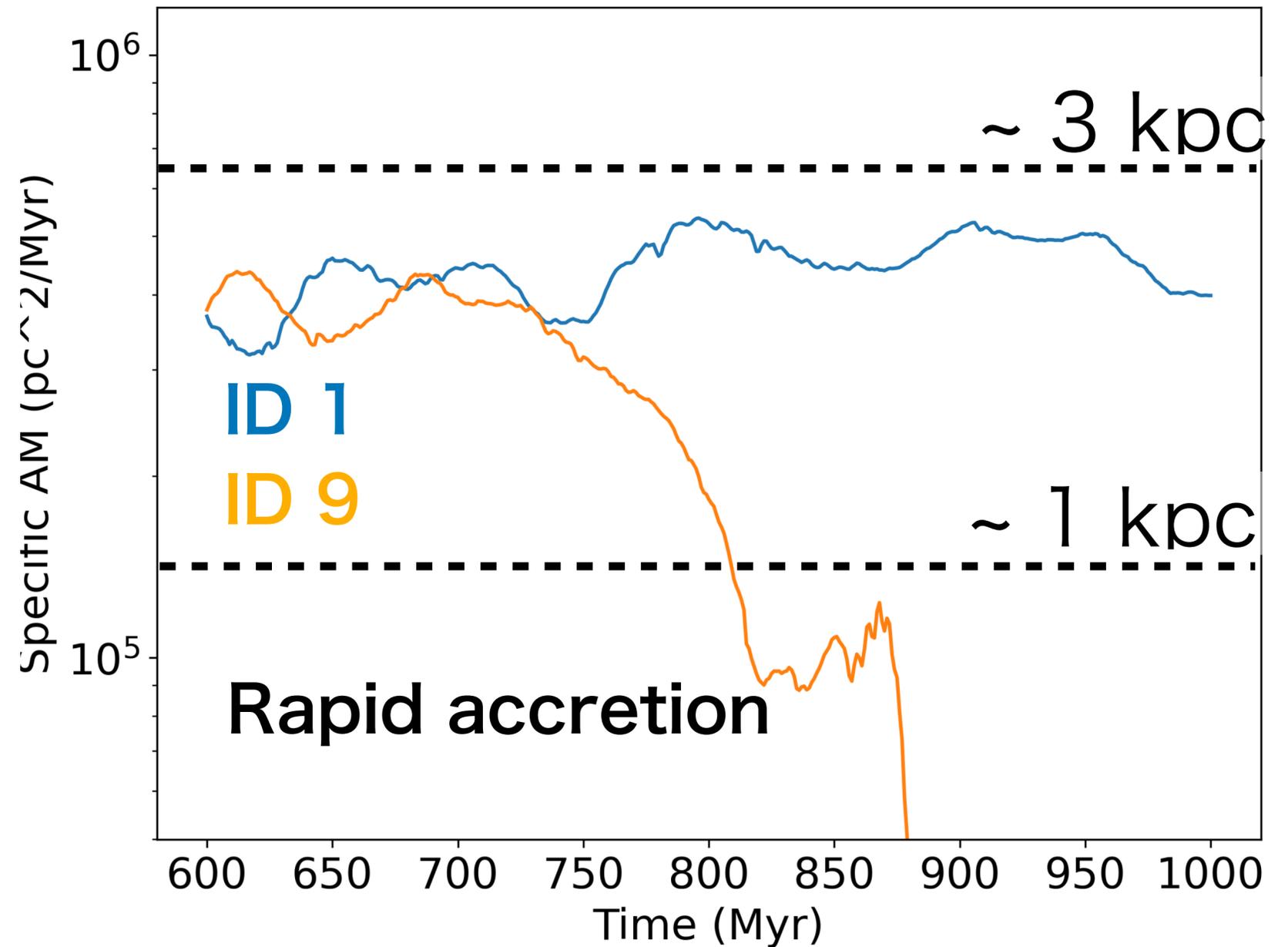
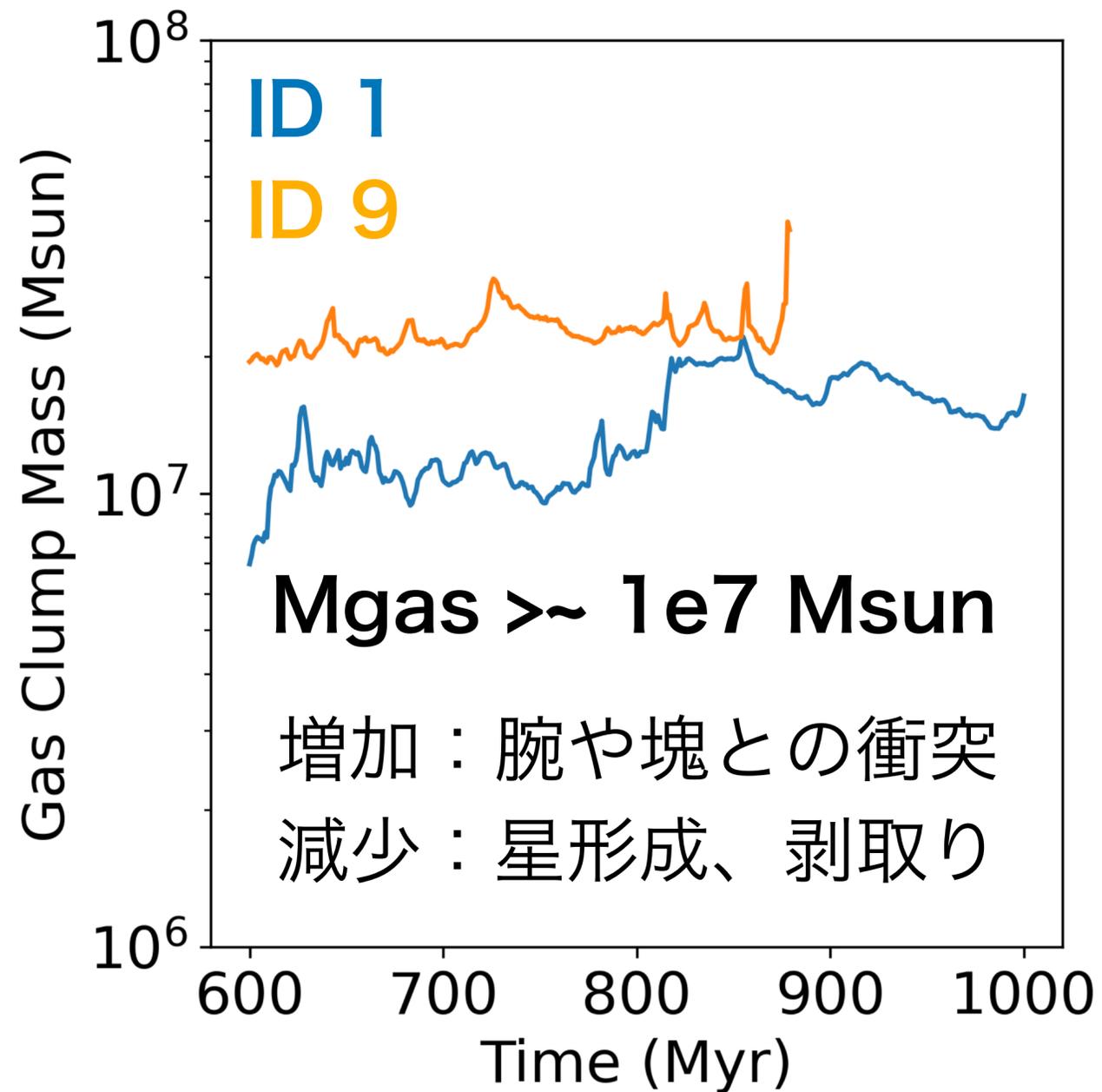
Friends of Friends を用いて高密度ガス塊を検出した



100 Myr に一回 100 pc スケールまで落ちてくる

ガス塊の質量と角運動量進化

MBluge/MDisk = 2%

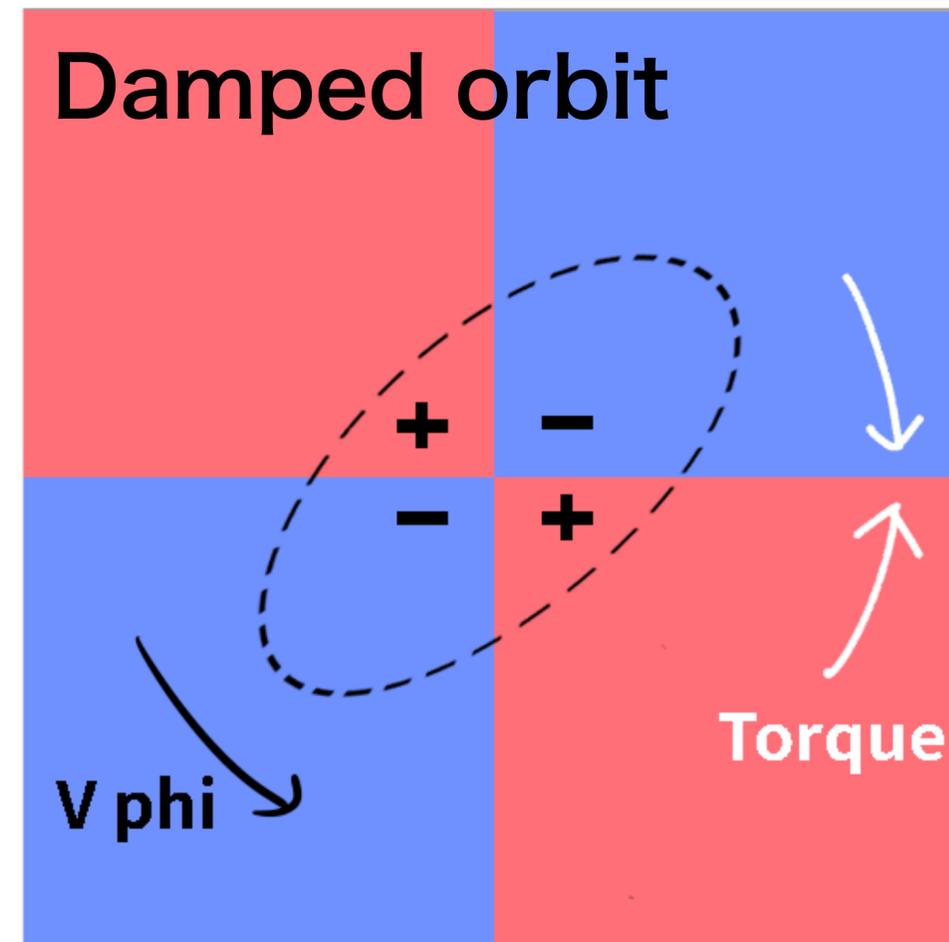
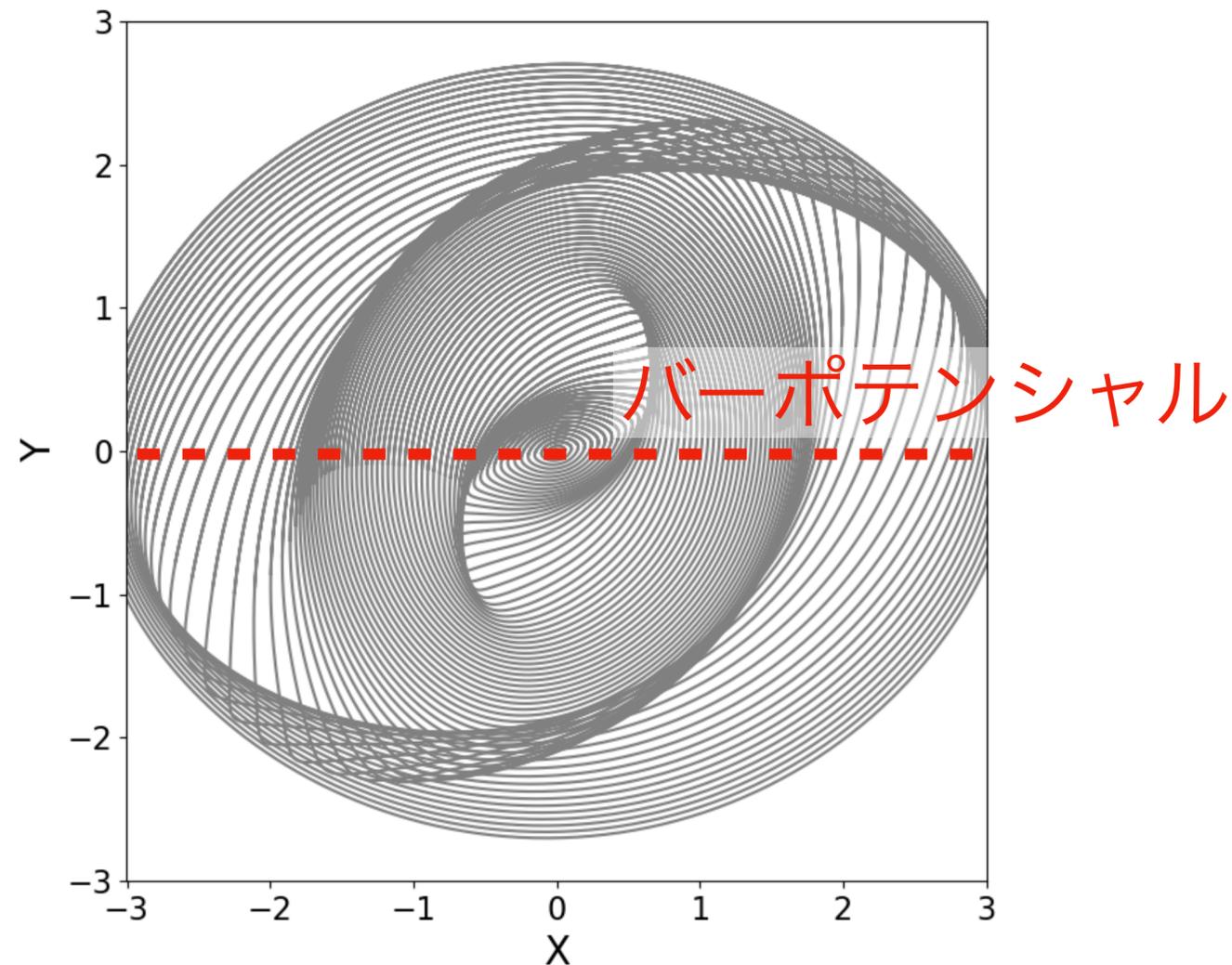


R < 1 kpc で Gas Clump の質量降着率は瞬間的に ~ 1 Msun/yr に届く

バーポテンシャル（非軸対称構造）による減衰軌道

☑バーポテンシャル中のガスの運動は強制減衰振動 (Wada et al. 1994)

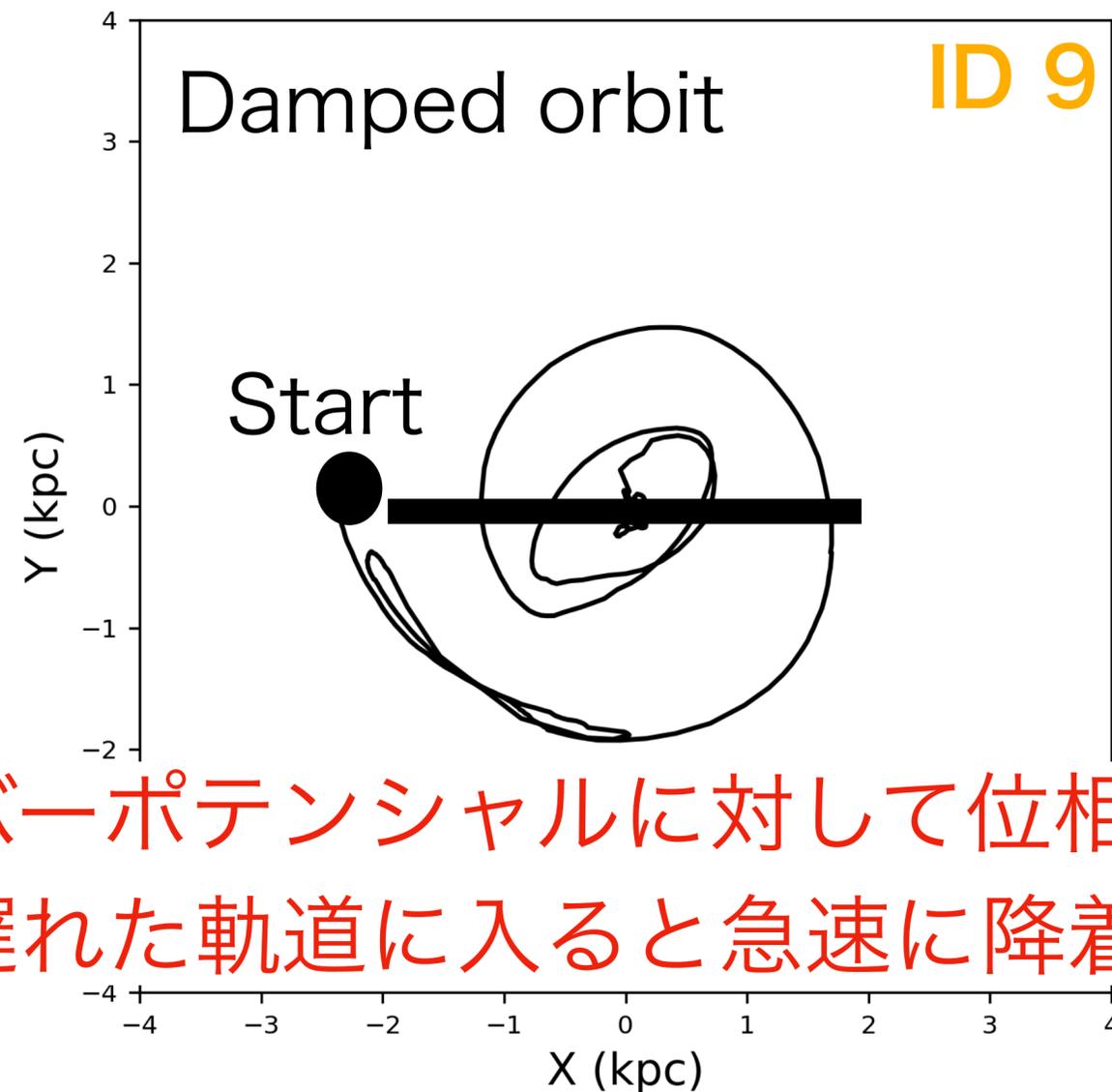
バーよりもガスの回転が速い時、楕円軌道の位相がバーに対して遅れる。



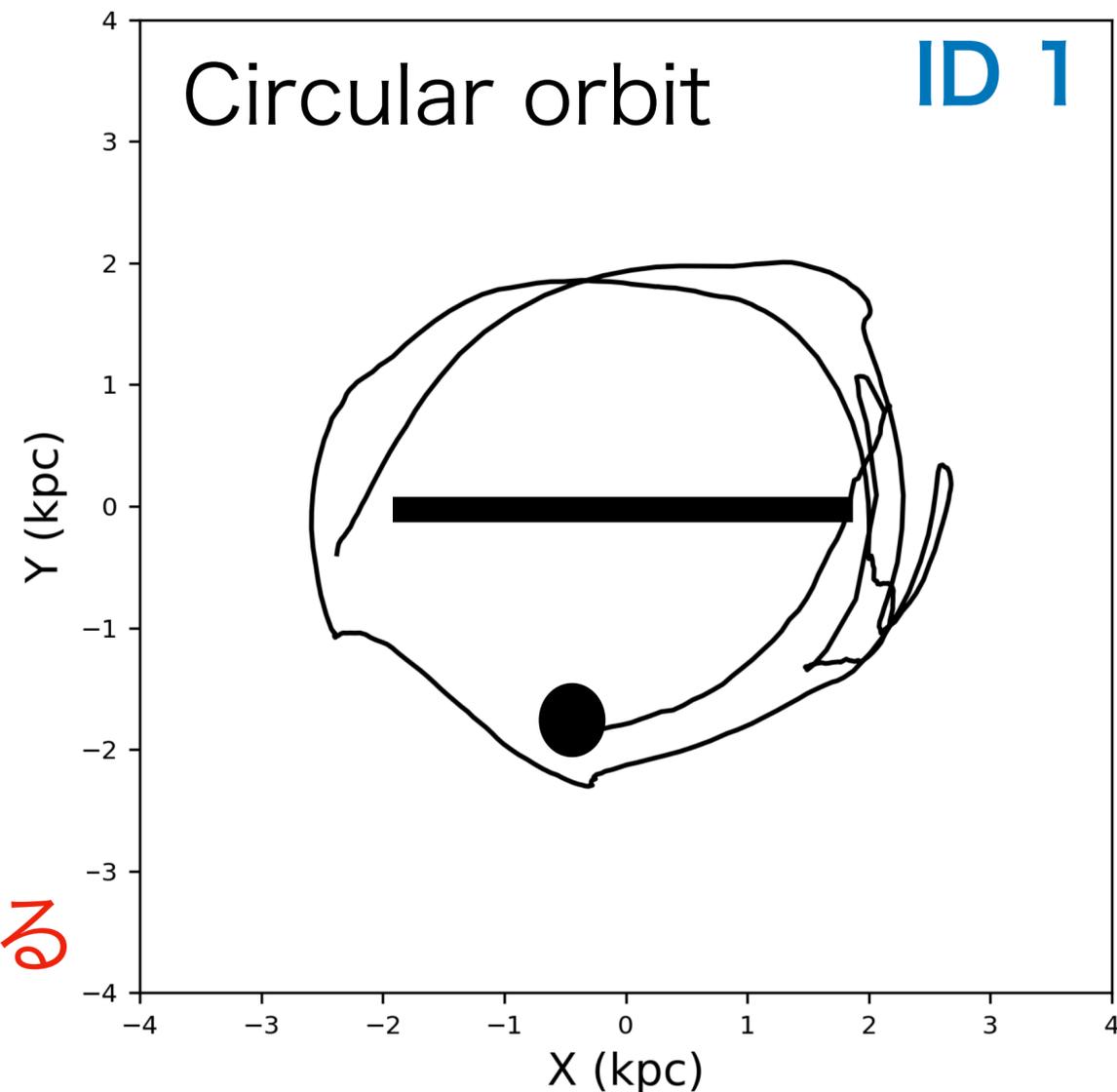
1周での正味のトルクが負になる

バーポテンシャルに対するガス塊軌道

- ☑ バーポテンシャル静止系での軌道を得た



バーポテンシャルに対して位相が遅れた軌道に入ると急速に降着する



支配的な質量輸送機構まとめ

核周円盤への質量供給を支配しているのは？

- 600 Myr - 1 Gyr で平均した質量輸送率
- 実線は時間平均、分散は時間方向の分散 (1σ)
- ガス密度でガス塊の質量輸送率だけ抽出

☑ 100 Myr の時間スケールでは

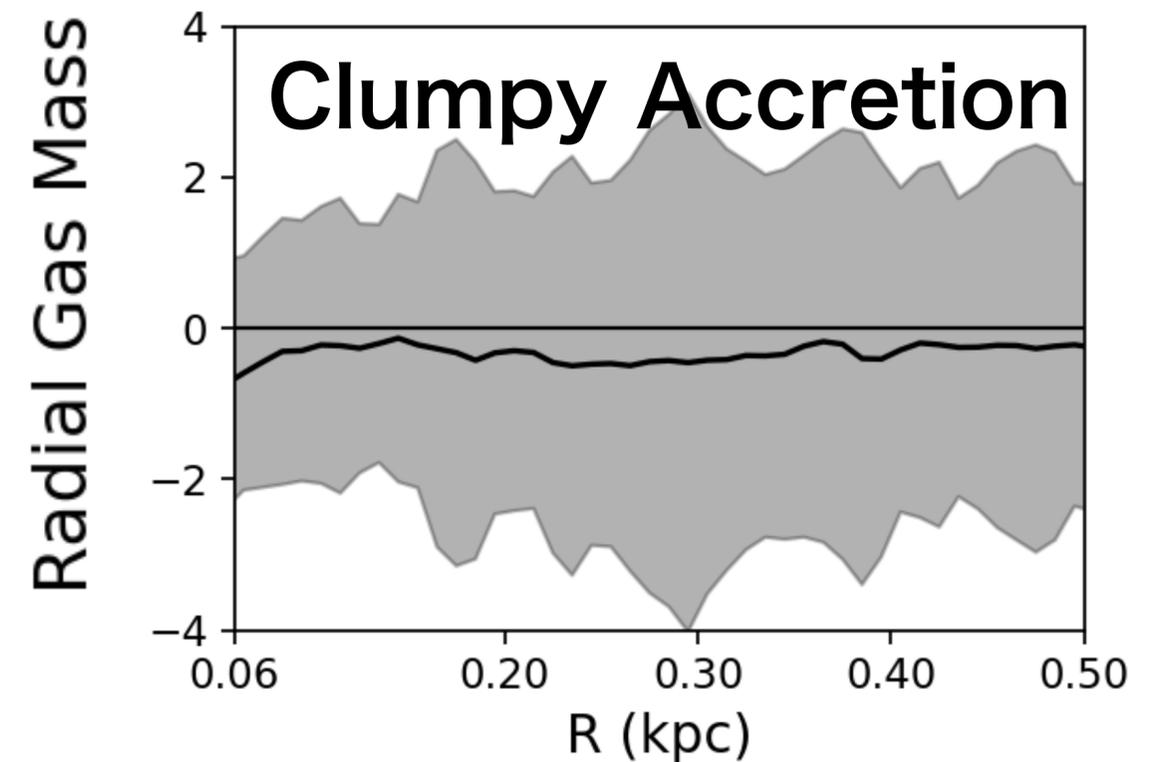
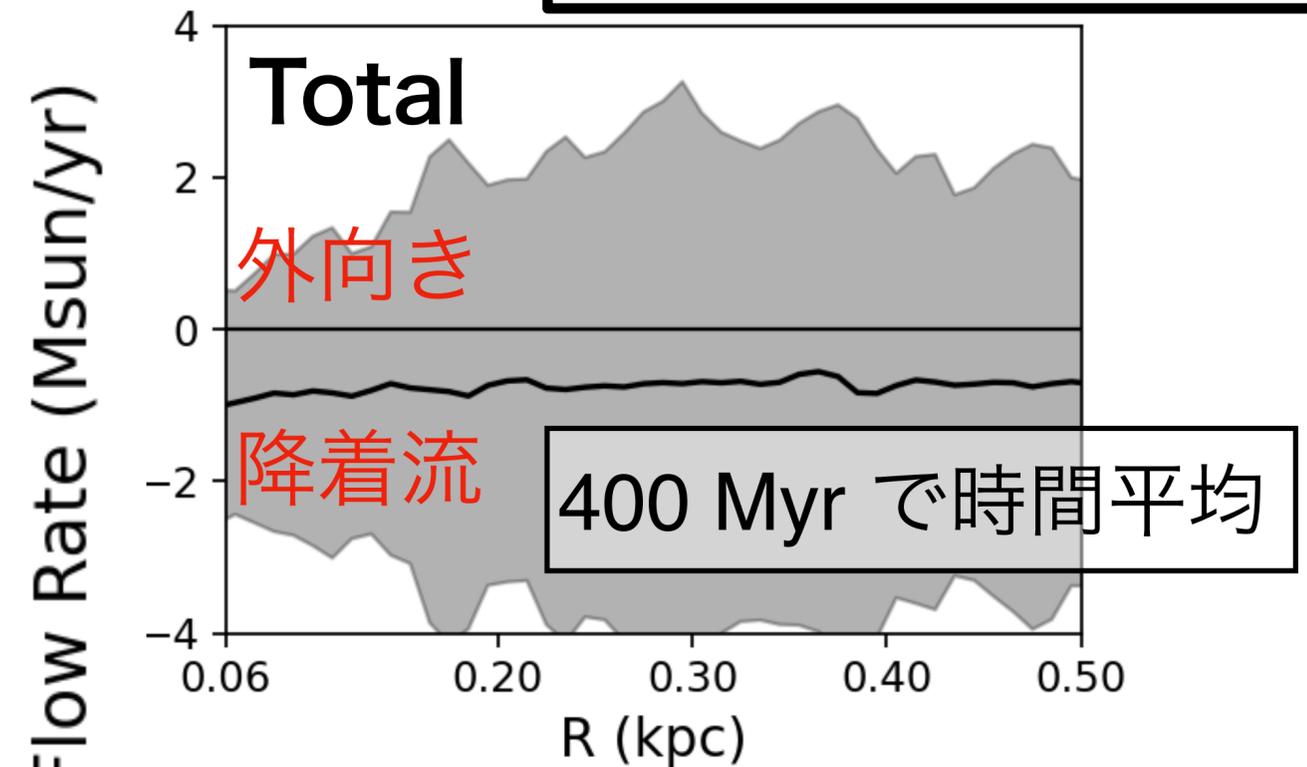
Total \gg Clumpy Accretion (右図)

Spiral による質量降着が支配 \Rightarrow 核周円盤形成

☑ 10 Myr の時間スケールでは

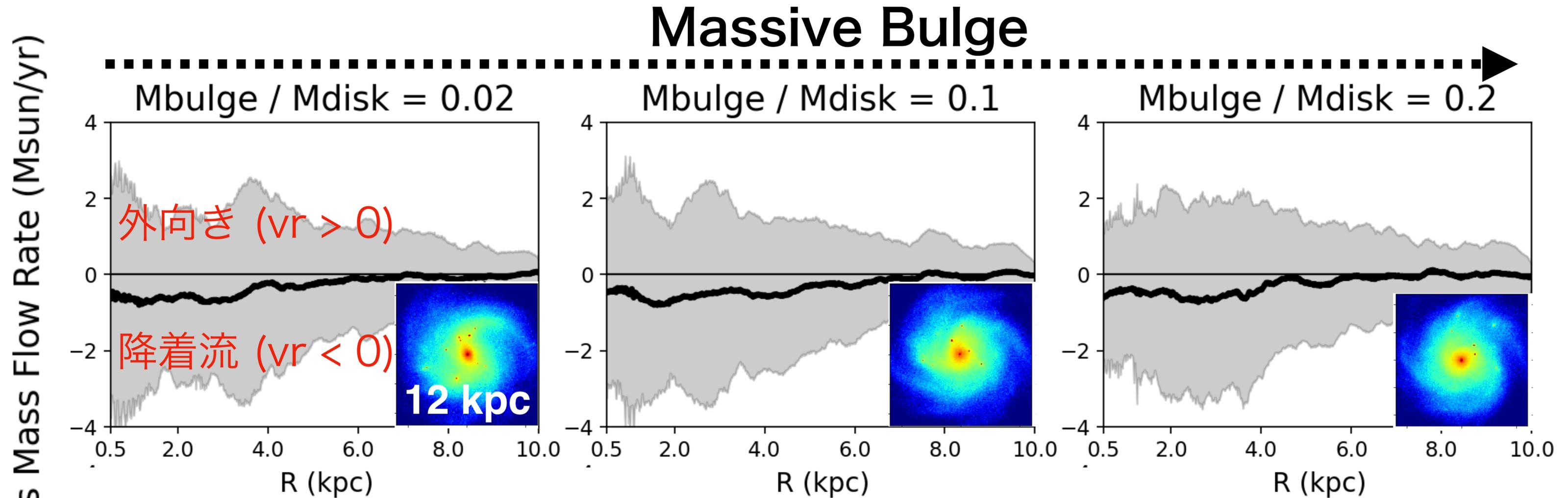
Rapid Clumpy Acc. ~ 1 Msun/yr

BlugeDisk 2%



1. 円盤の進化
2. 渦状腕による質量降着
3. ガス塊による質量降着
4. バルジポテンシャルと降着過程 ◀

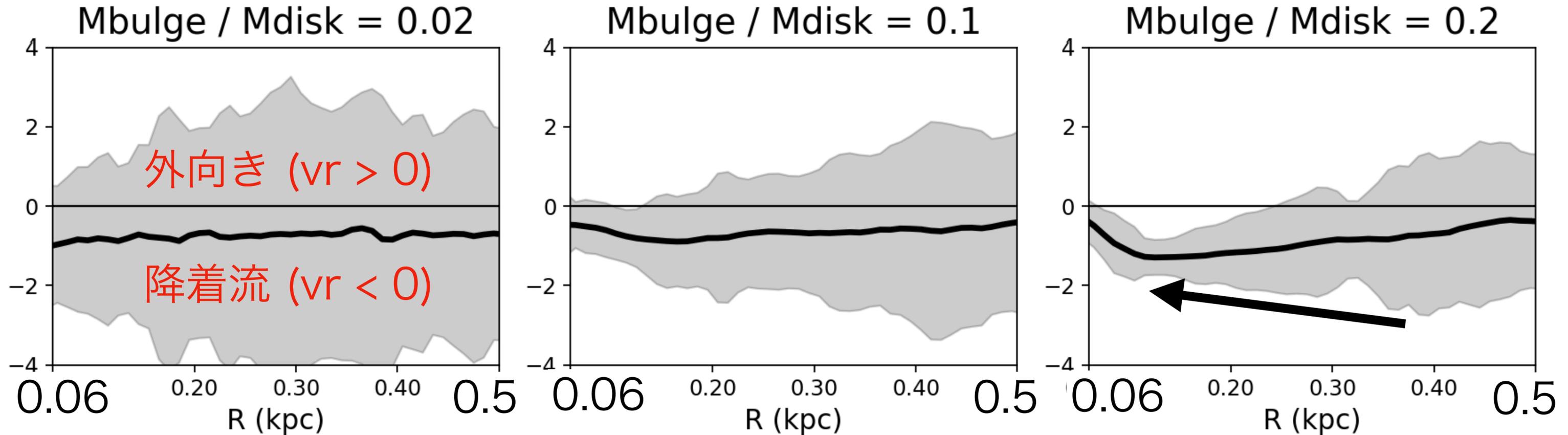
Bulge potential に対する質量輸送依存性 (> 500 pc)



☑ どのモデルでも渦状腕による銀河中心 500 pc への質量降着がある！

Bulge potential に対する質量輸送依存性 (< 500 pc)

Radial Gas Mass Flow Rate (Msun/yr)

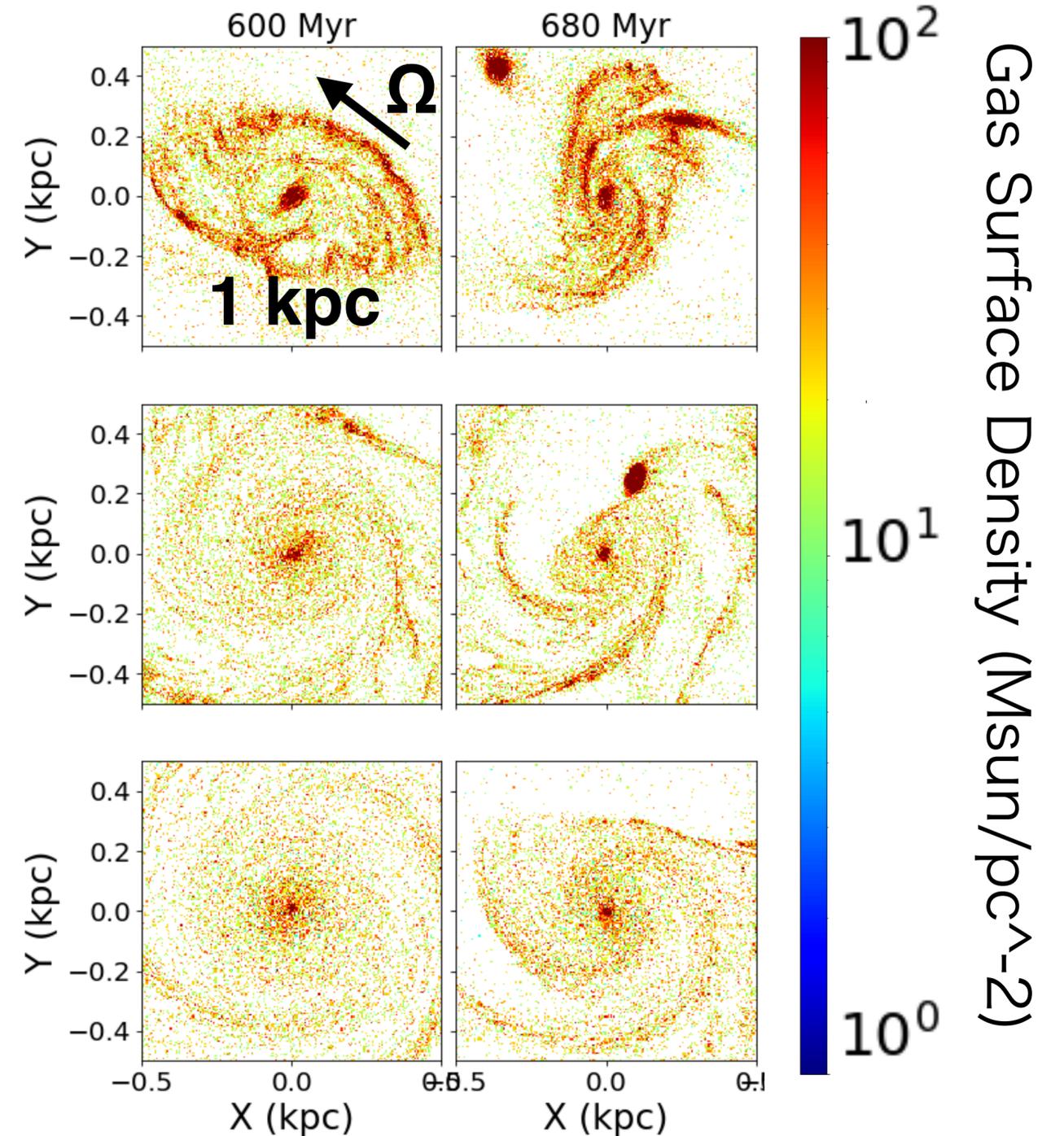


☑ バルジが重たいモデルでは中心 (< 400 pc) で分散が急激に減少 (円軌道)

Gas Surface Density ($M_{\text{sun}}/\text{pc}^2$) < 2 kpc

自己重力不安定的
構造が卓越

BulgeDisk 2%



安定した円盤
&
ガス塊

BulgeDisk 10%

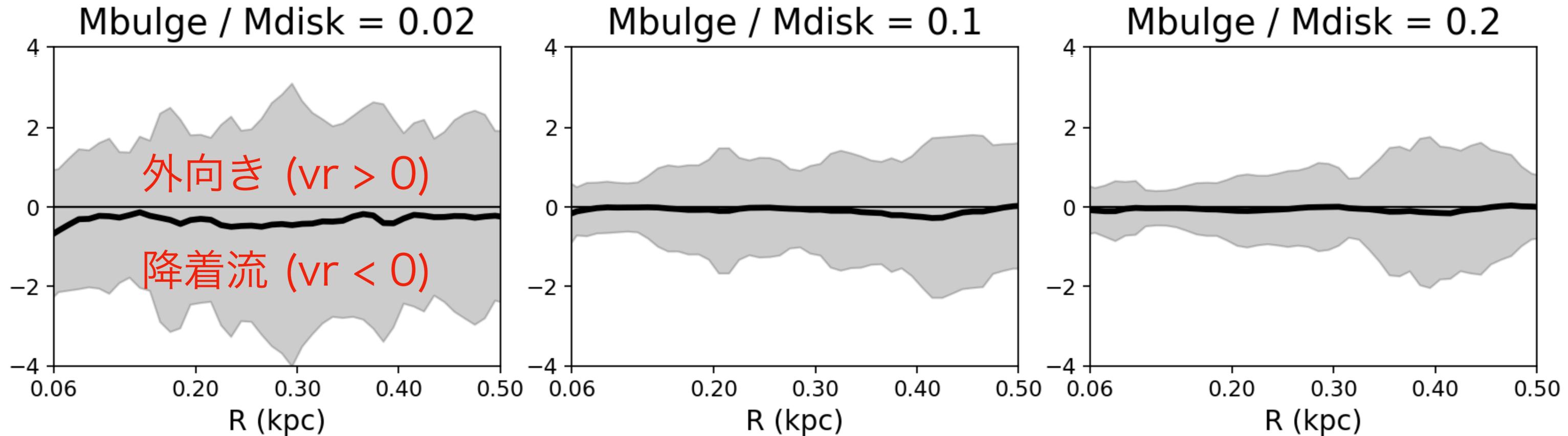
BulgeDisk 20%

バルジポテンシャルが支配的になると軸対称構造が発達

Bulge potential に対するガス塊降着の依存性

○ ガス塊 ($nH > 700 / \text{cc}$) による降着率を評価

Radial Gas Mass Flow Rate (M_{sun}/yr)

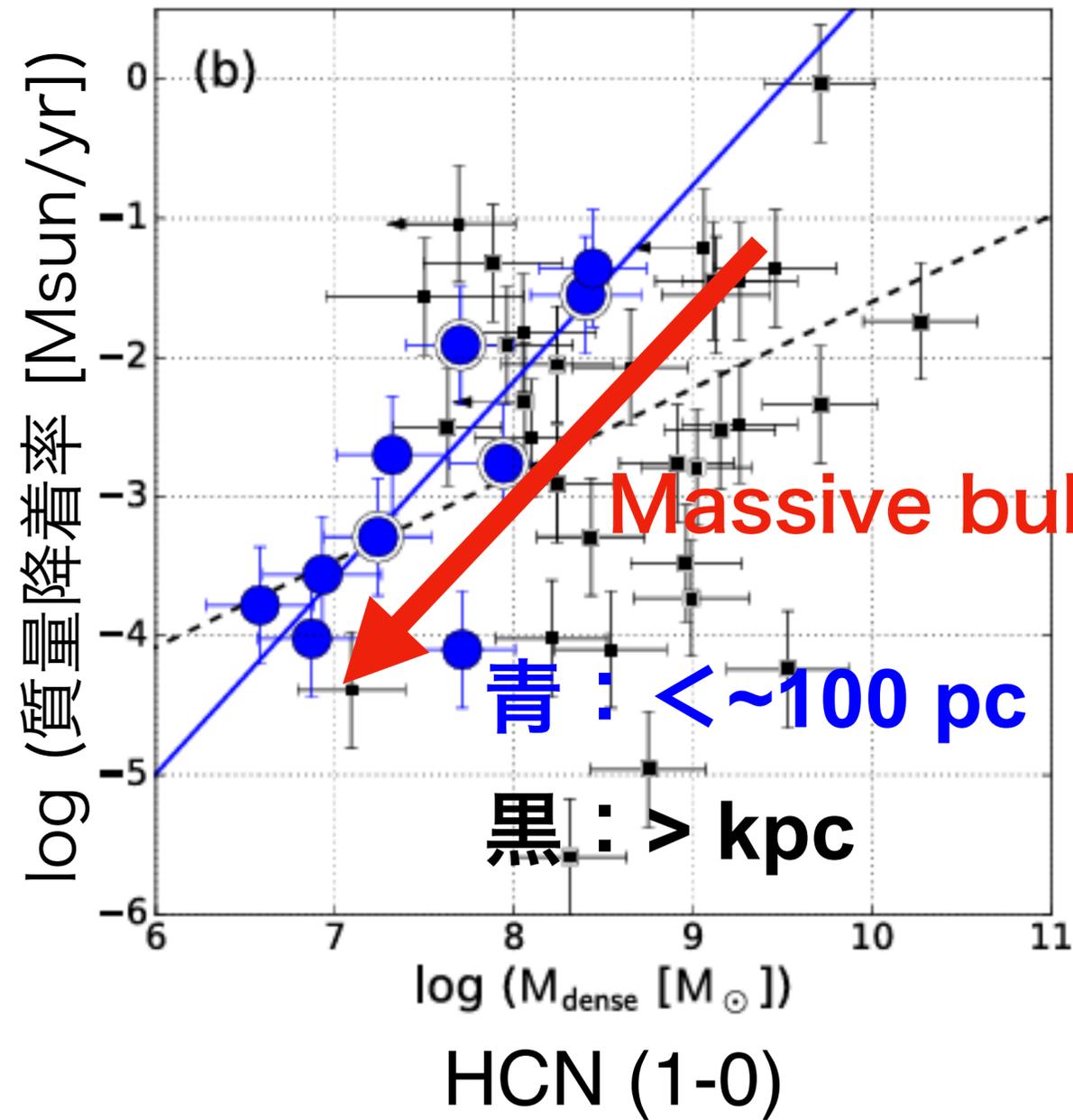


☑ バルジが重たいモデルでは、ガス塊の軌道は円軌道である
つまり、Damped Orbit を介した質量輸送は生じていない

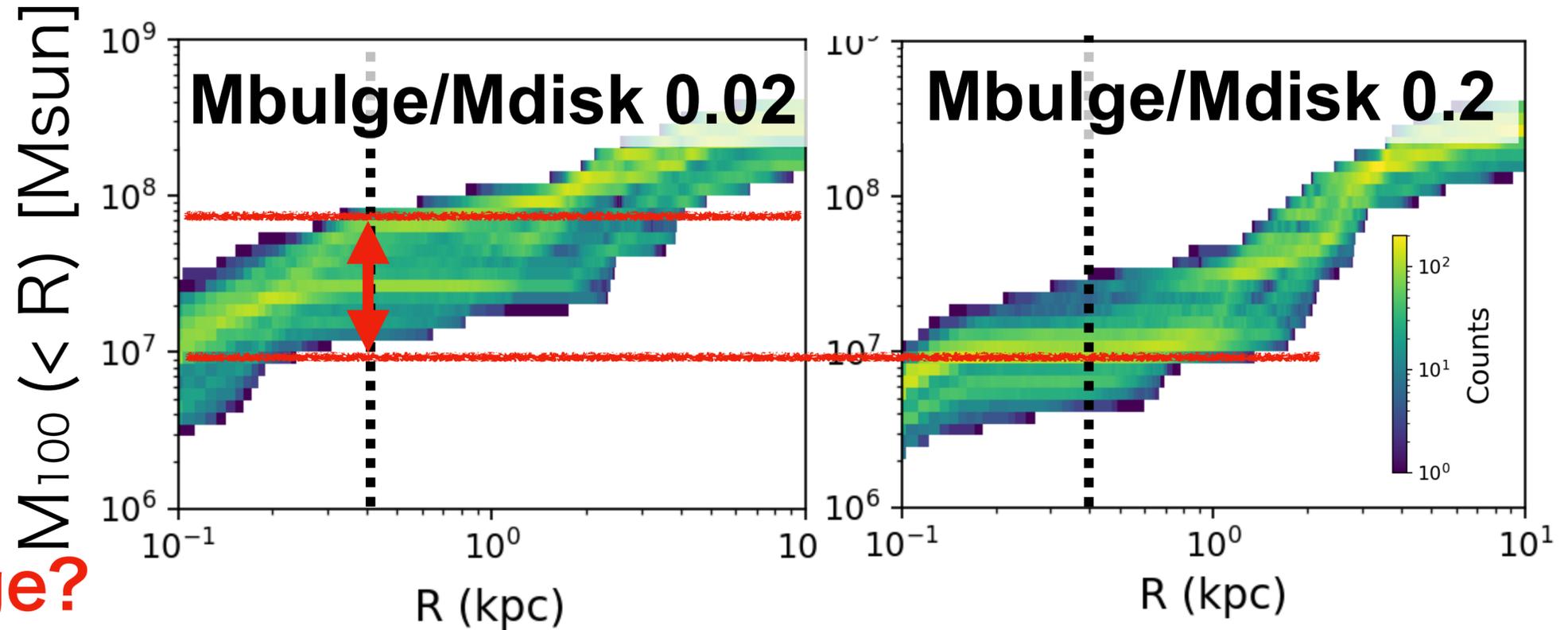
Discussion

銀河中心の分子ガス

観測研究 Izumi et al. 2016



半径 R 内の高密度ガス ($nH > 1e2 / \text{cc}$) 質量



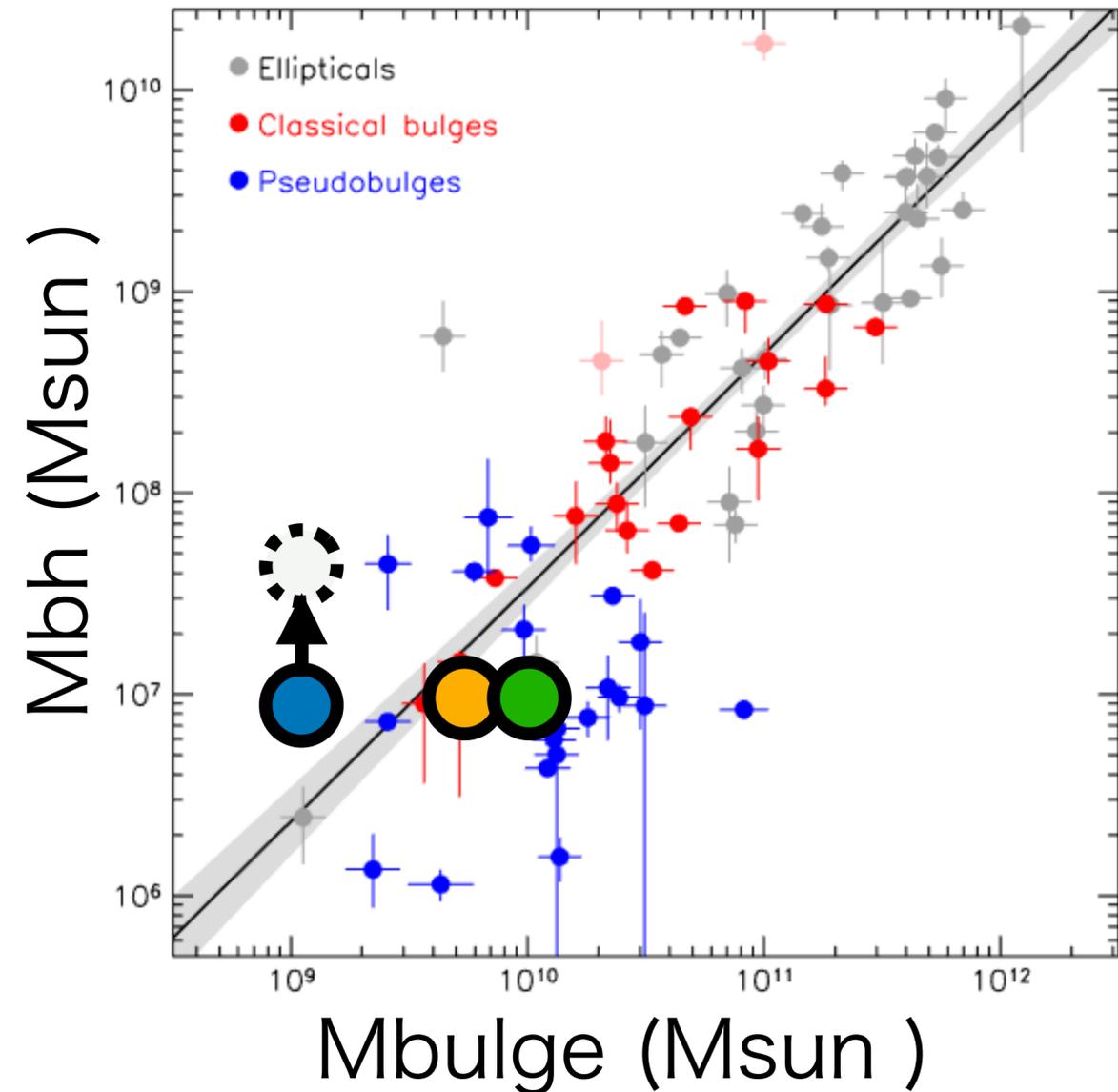
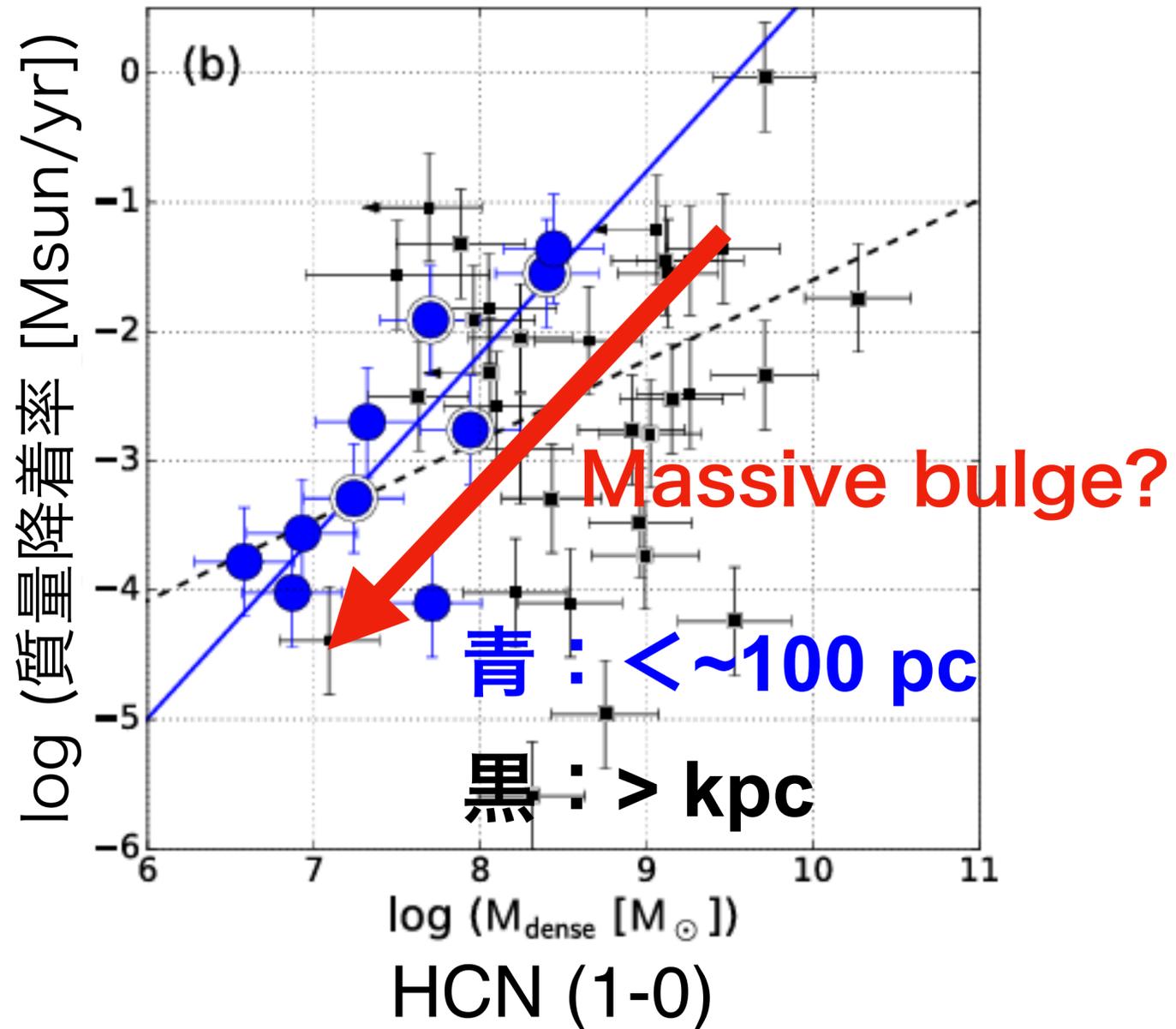
◀ SMBH降着率は核周円盤の分子ガス量が重要

☑ 本研究からの示唆

バルジ質量が重たいほど分子ガス量と降着率が減少
(Hopkins et al. 2010 と整合的な結果)

共進化シナリオ (経年進化)

Kormendy & Ho 2013

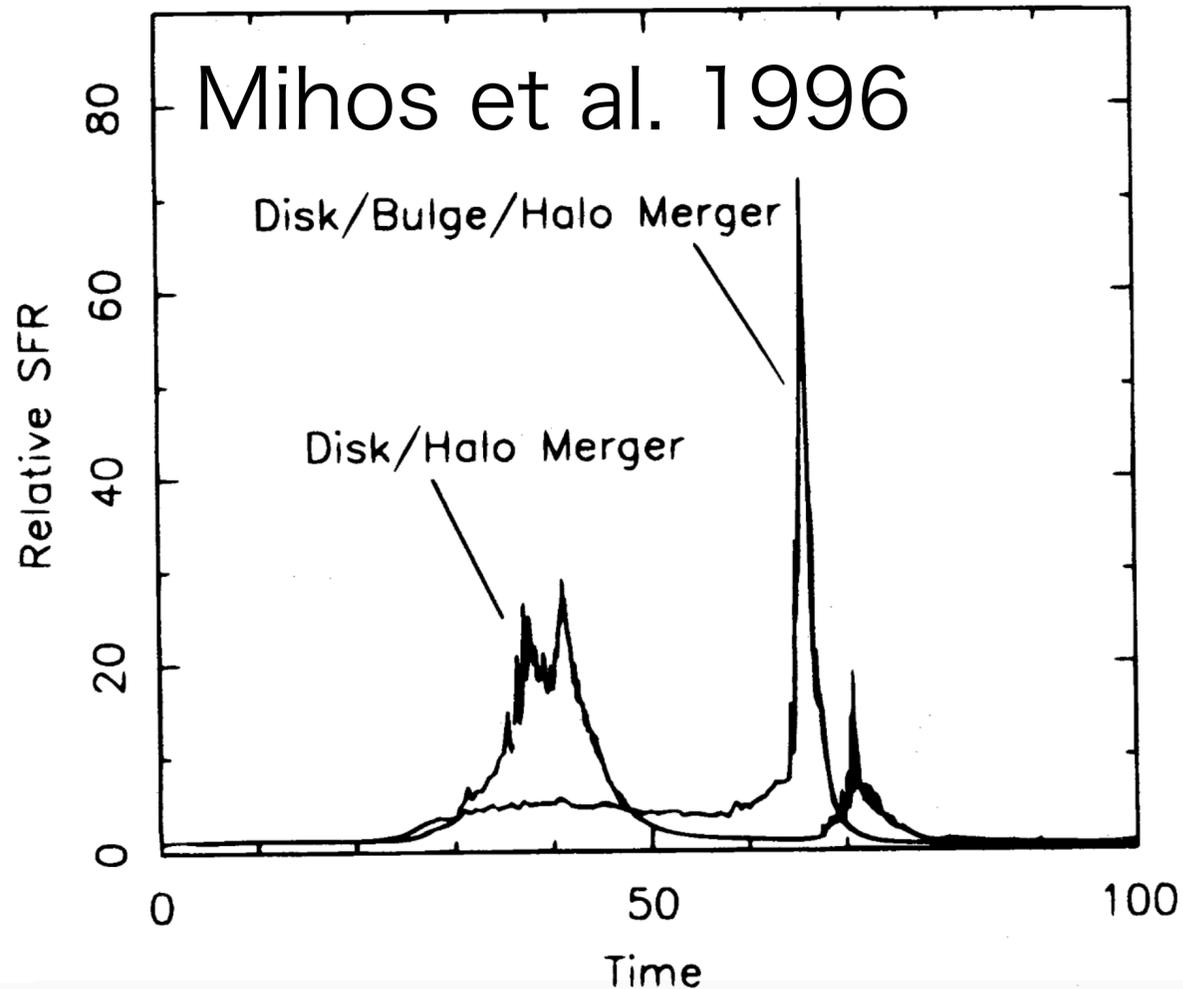


Bulgeless の方が円盤不安定性が発達しSMBH成長を促進する
 円盤不安定性では共進化は説明できない -> 銀河衝突が必要

共進化シナリオ (銀河衝突)

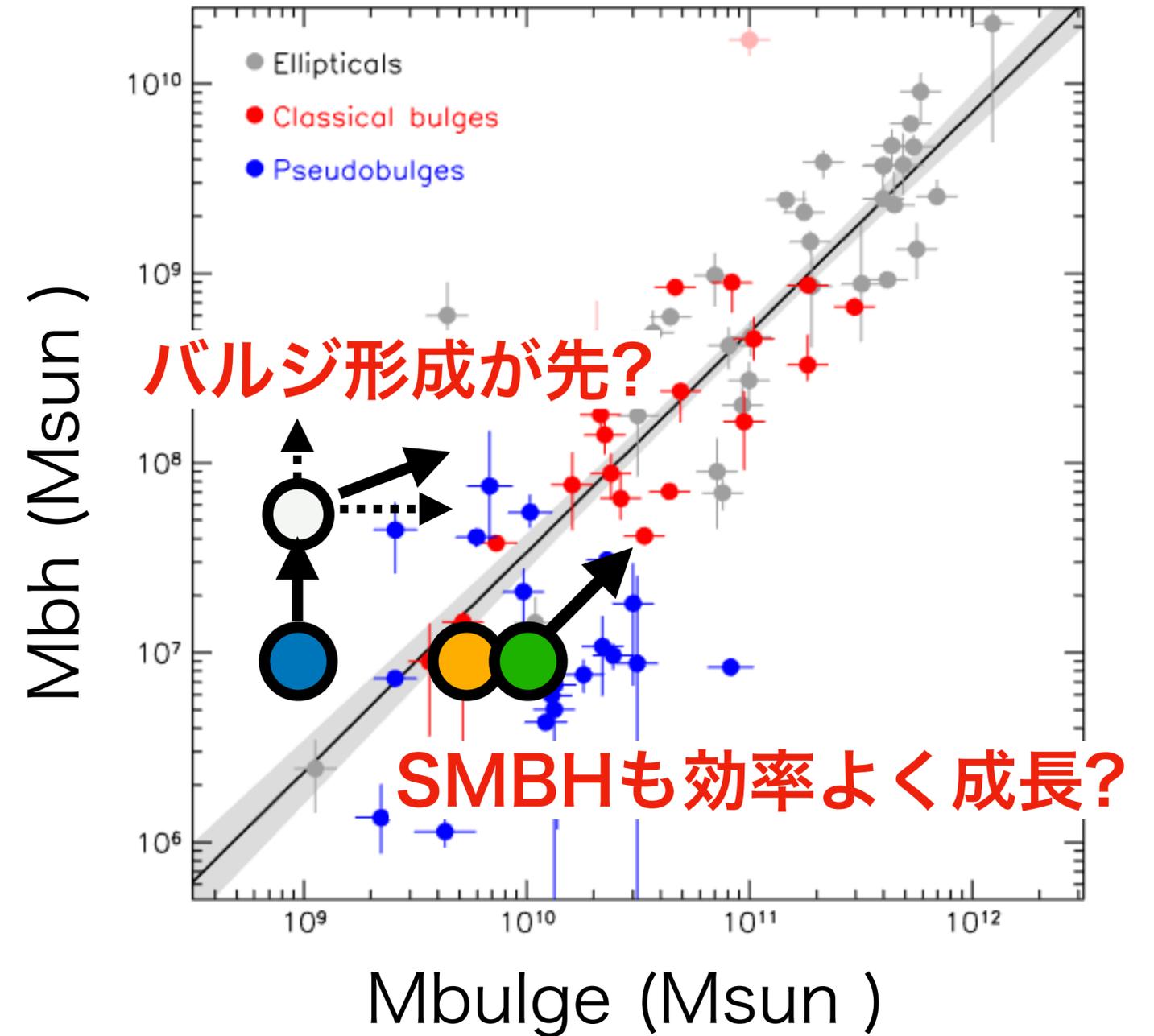
☑ 銀河衝突後期段階でのSMBH成長

銀河衝突後期段階に銀河中心のガスを保持しておく必要がある



バルジはガスの保持に役立つ

Kormendy & Ho 2013



銀河衝突計算を行なって
進化を確かめる!

超巨大ブラックホール (SMBH)

Mass : $1e8 M_{\odot}$

DMハロー

Mass : $5e12 M_{\odot}$

R_s : 50 kpc

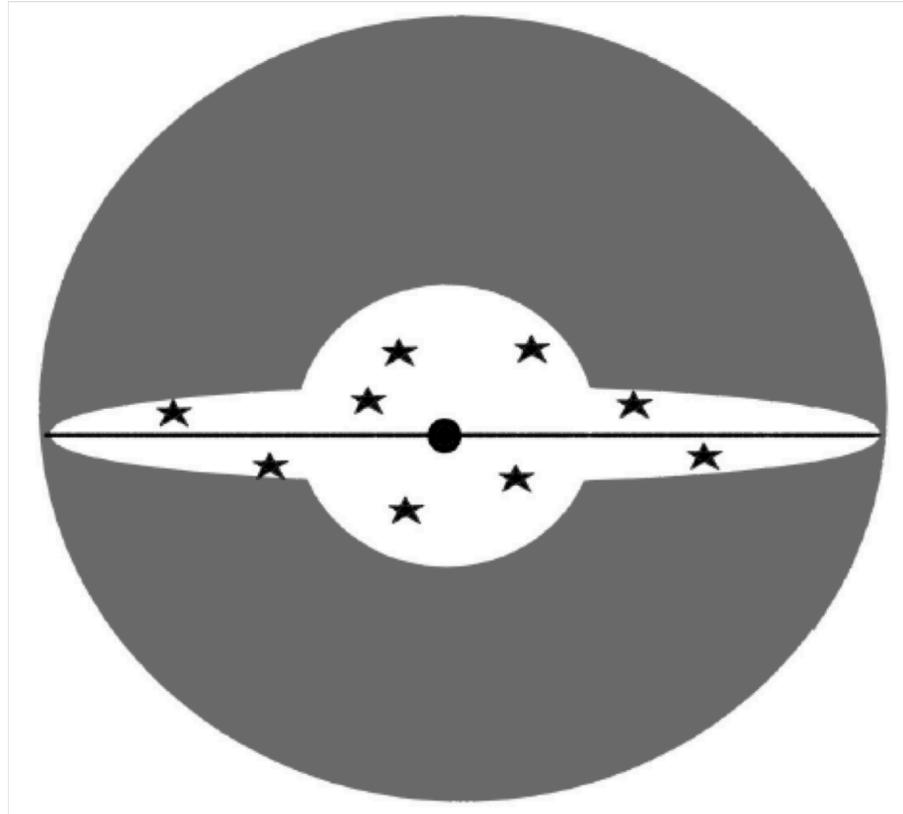
R_{200} : 173 kpc

銀河バルジ

Sersic Index : 4

$R_e \sim 4 * (M^*/M_{12})^{**} 0.3$ kpc

Mass : $1e10, 1e11 M_{\odot}$



ガス円盤 (n = 1)

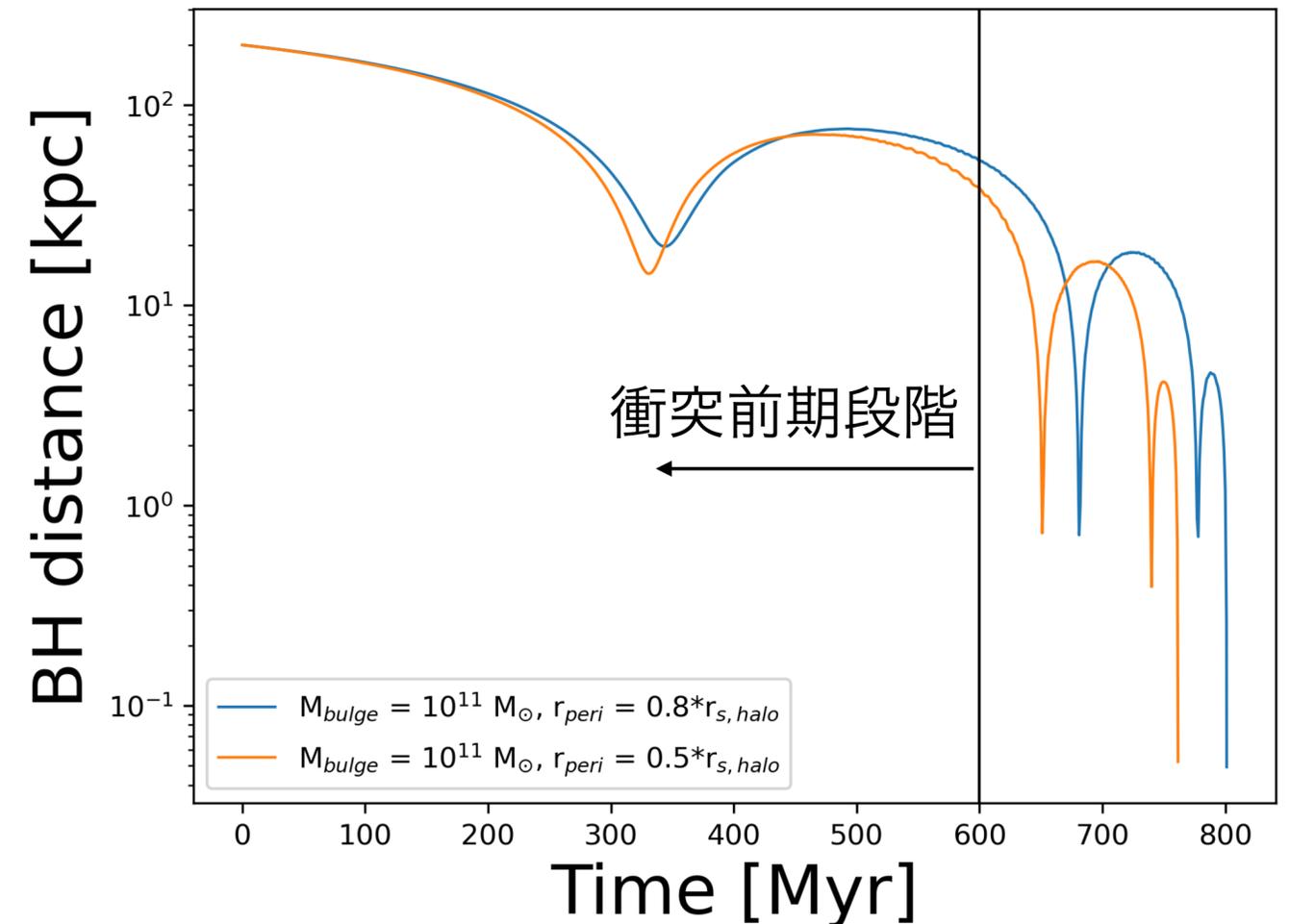
Scale radius : 3 kpc

$M_{\text{gas}} = 3e10 M_{\text{sun}}$

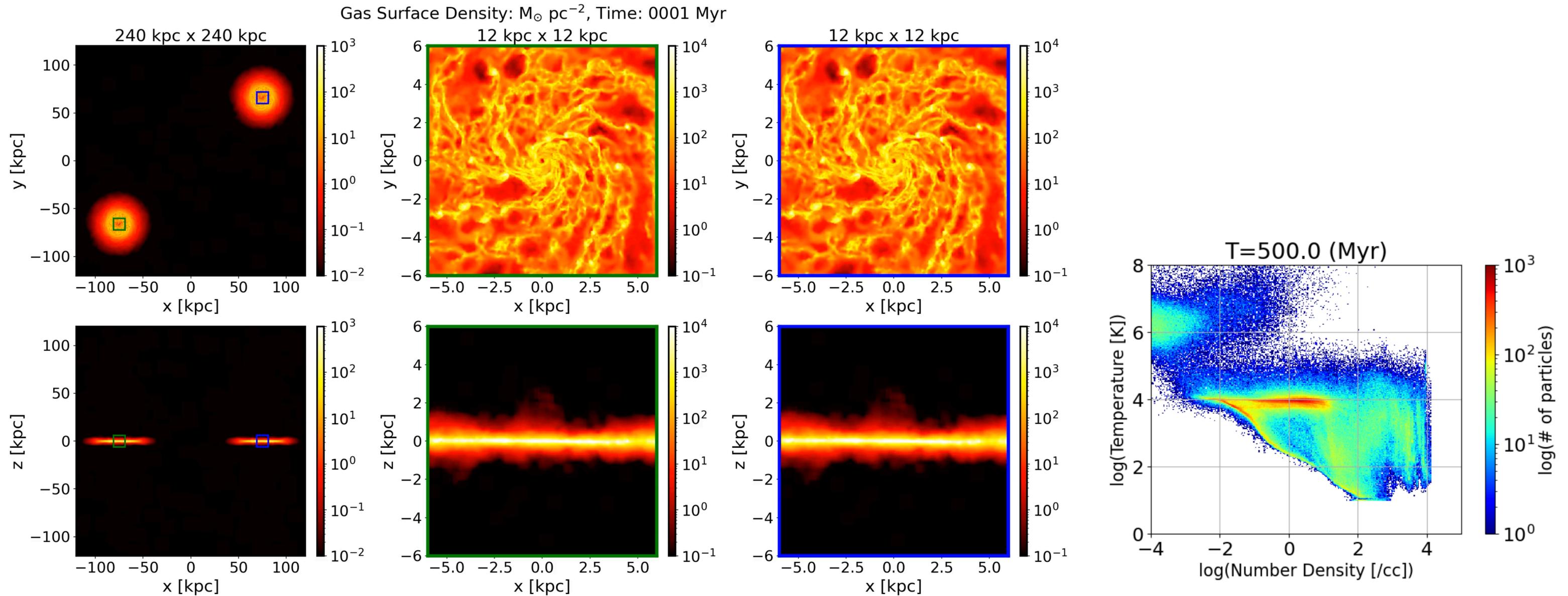
星円盤 (n = 1)

Mass : $1e11 M_{\odot}$

Scale radius : 3 kpc

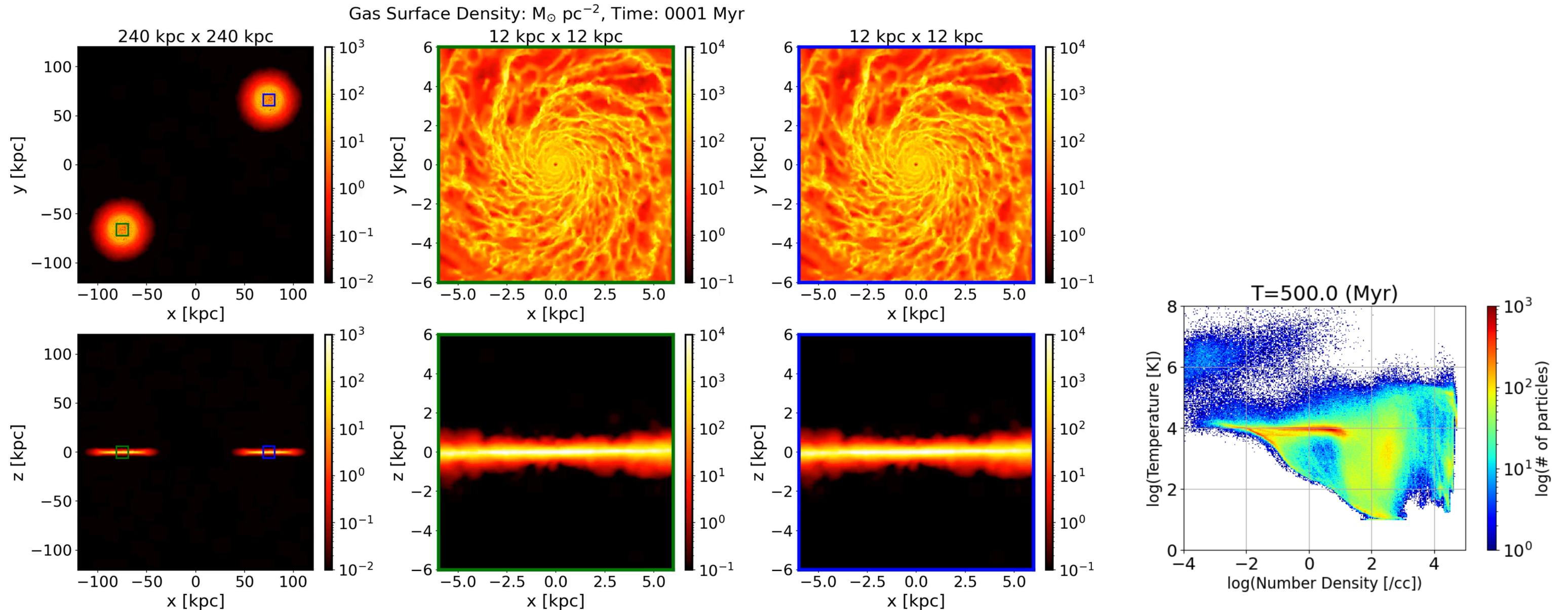


Mbulge/Mbh 100



銀河衝突前期段階に銀河中心のガスが失われ、dry galactic nuclei merger に

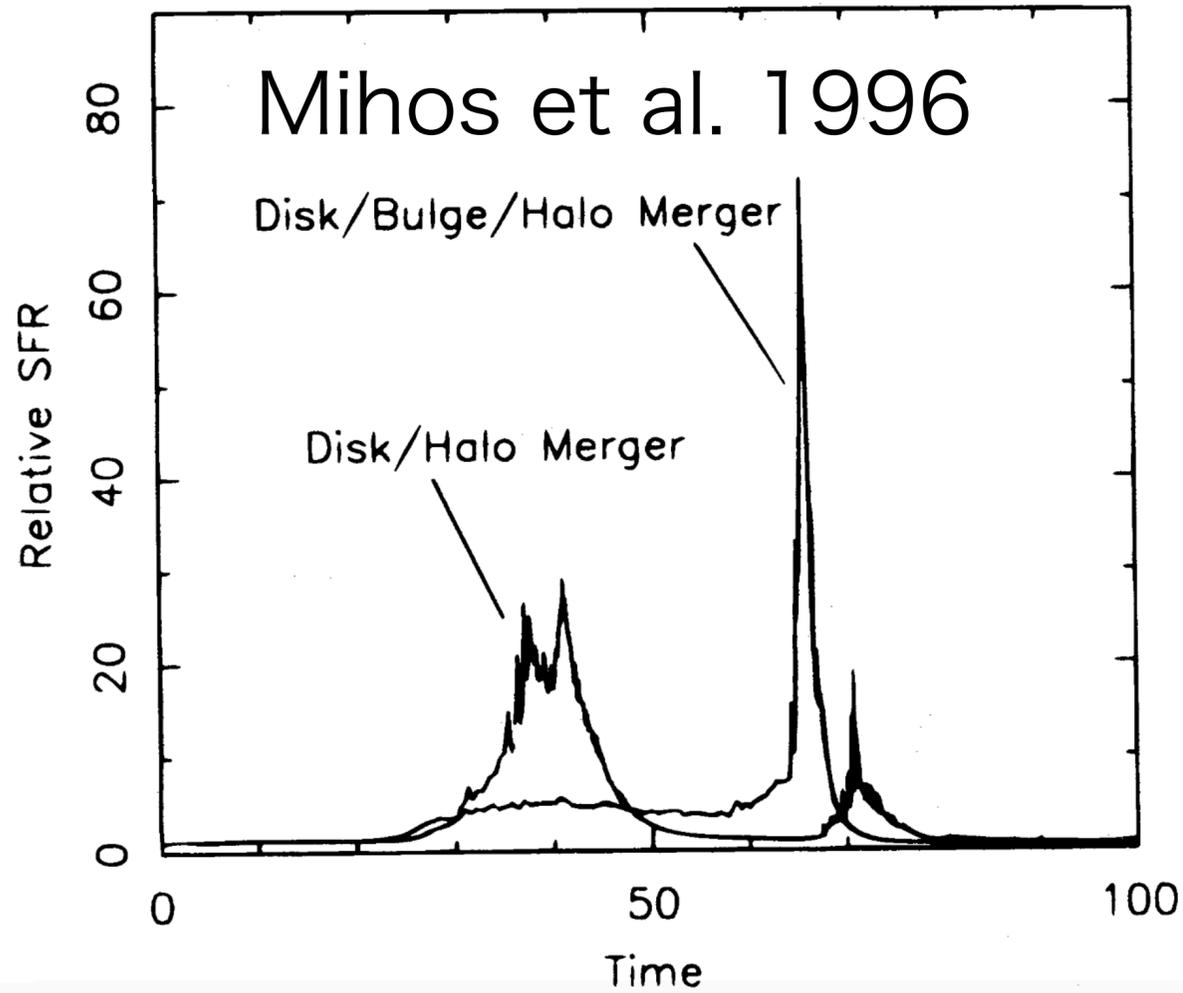
Mbulge/Mbh 1000



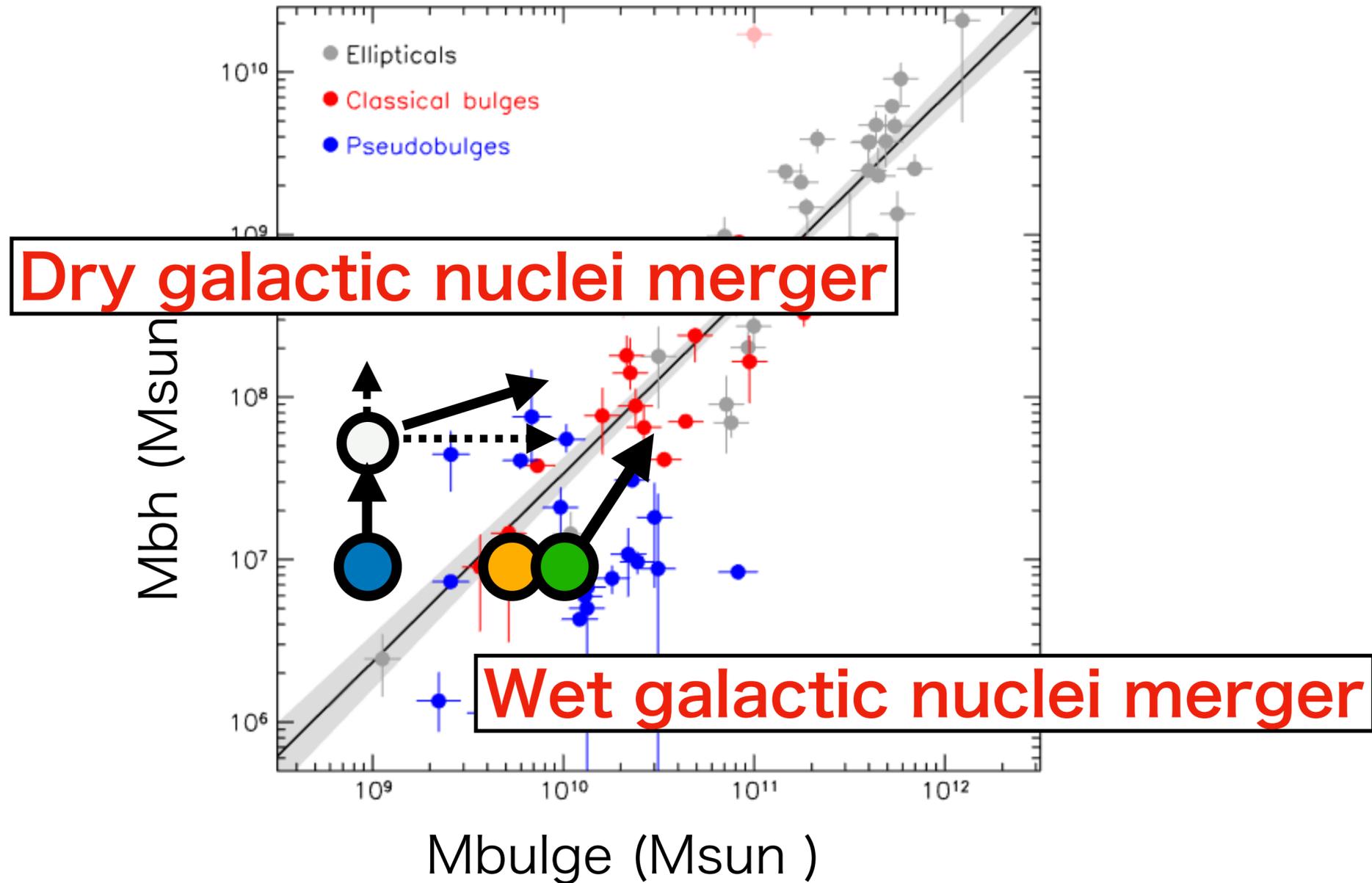
1回目の散乱後も銀河中心に多量のガスが残り、それらが後期段階に 100 pc scale へ

共進化シナリオ (経年進化 + 銀河衝突)

Kormendv & Ho 2013



バルジはガスの保持に役立つ
=> AGN + SN-feedback に耐えられる



円盤不安定性で共進化関係から外れても銀河衝突で収束
=> より詳しい話は別の機会に！

まとめ

ガス豊富な渦巻銀河計算を行い、以下の点を明らかにした

☑️ ガス塊の降着過程

- Dumped orbit を介した Clumpy Acc. が生じる (* 新たに発見した CND への降着過程)

☑️ ガス塊降着による銀河中心への影響

- タイムスケールによって銀河中心に影響する降着過程が変化する

1. 100 Myr 以上では、渦状腕起源の定常的な質量輸送が支配的

2. 10 Myr のタイムスケールでは、Rapid Clumpy Acc. ($\sim 1 \text{ Msun/yr}$) が生じる

突発的な降着現象は孤立銀河円盤に付随するAGNの発現過程を説明できる？

☑️ バルジ質量と質量輸送機構の関係

- バルジ質量によらず 500 pc への渦状腕による定常的な質量降着は生じる

- バルジ質量が大きいと中心では軸対称構造が発達し Damped Orbit が生じない