

天の川銀河シミュレーション

馬場淳一

東京工業大学・理学研究流動機構 (地球惑星科学専攻)

HPCI戦略プログラム分野5 物質と宇宙の起源と構造

発表内容

1. 天の川銀河モデル
 - 古典バルジの質量への制限
 - Grand-design渦状腕とバルジ
2. MW-LMC相互作用
3. まとめ

天の川銀河モデル

◆我々は内部にいるため天の川銀河の全体像が不明.

-星のアstrometryは太陽近傍(<1kpc)のみ.

-星間ガスはアstrometryができない.

-運動学的距離は誤差が大きい (渦状腕の非円運動は無視できない).

◆0次近似モデル

= 「定常軸対称」モデル or 「定常非軸対称」モデル

(1) 定常軸対称系の質量分布モデル

e.g., Dehnen & Binney (1998); Widrow & Dubinski (2005);

Sofue et al. (2009); McMillan (2011).

(2) 定常軸対称系の動力学モデル (分布関数)

e.g., Binney (2010); Binney & McMillan (2011); Binney (2012)

(3) 棒状構造 + 定常密度波の定常モデル

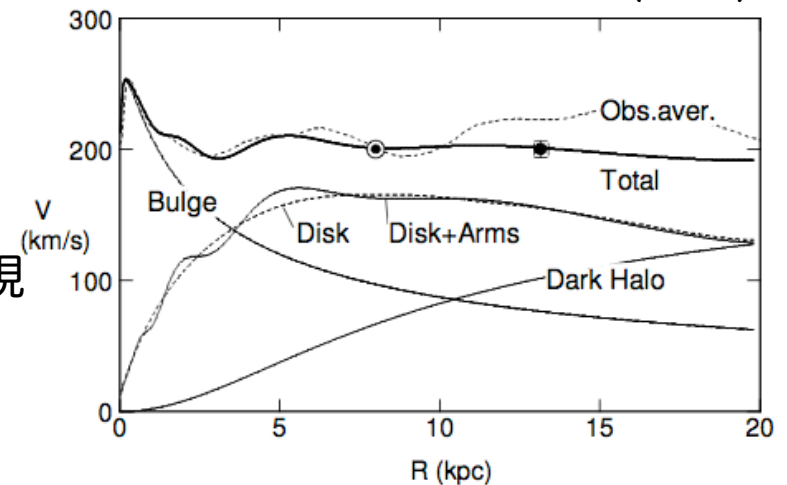
e.g. Vallee (2005,2008)

◆必要なモデル = 非定常非軸対称の動力学モデル

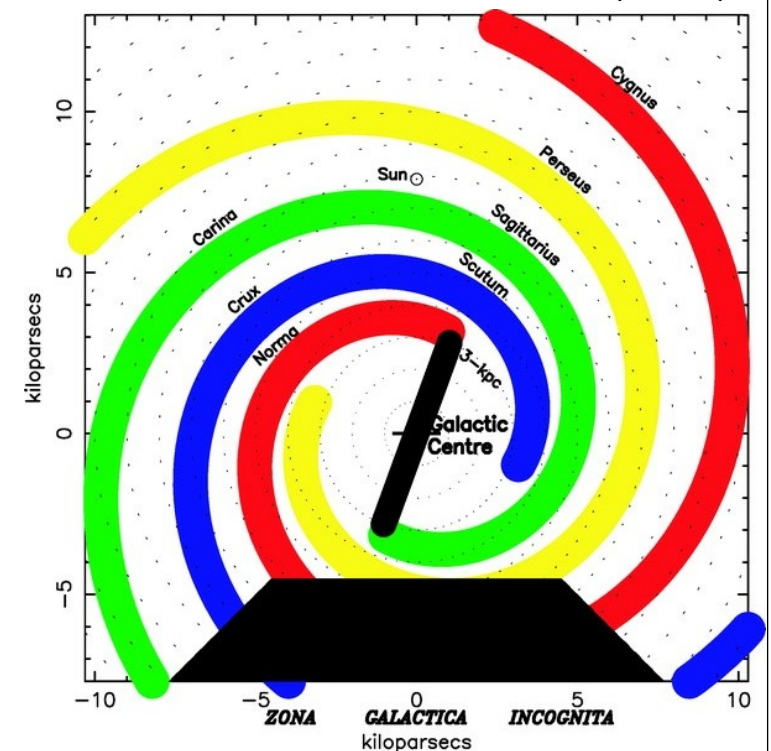
-天の川銀河は非定常, 非軸対称構造.

-非定常渦状腕 (e.g., Baba+2009; Fujii, Baba+2011; Baba+2013)

Sofue et al. (2009)



Vallee (2005)



非軸対称天の川銀河モデル

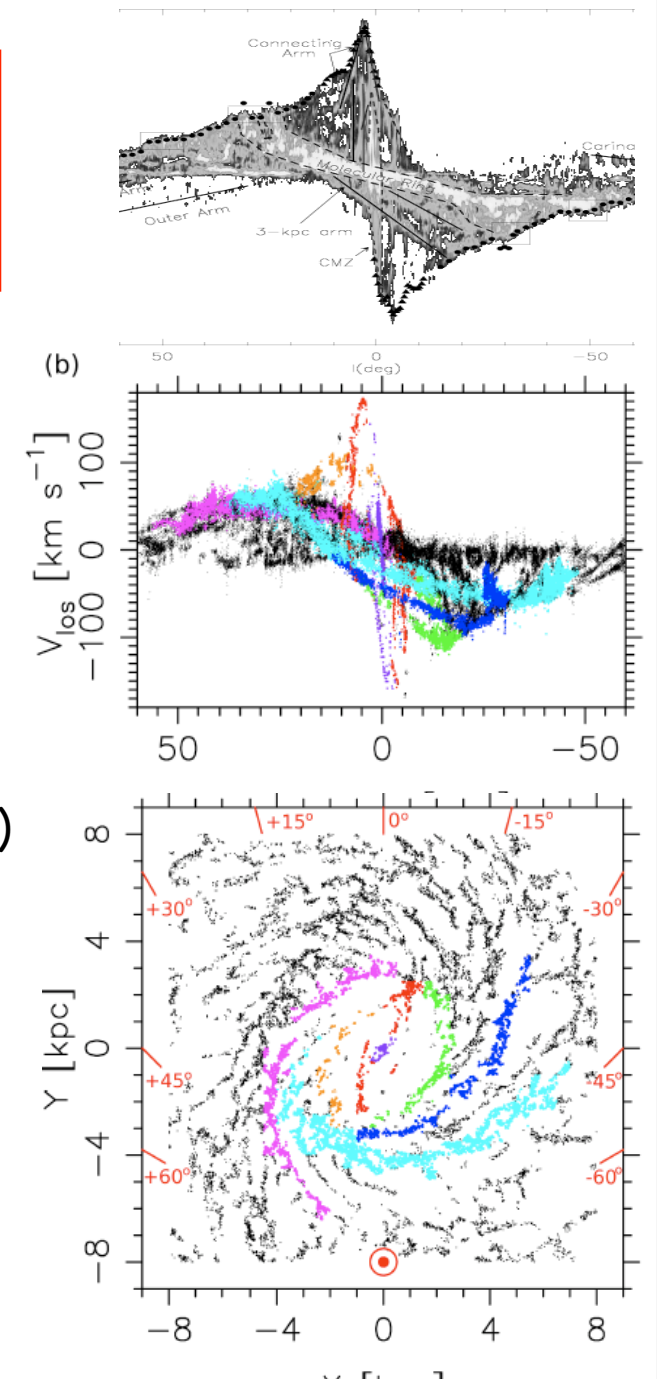
数値シミュレーション(N体/多相ガス計算)により, 観測の ℓ - v 図 (ガス) を再現し, 天の川銀河の構造との対応を推測する (Baba et al. 2010).

◆棒状銀河ポテンシャル中での等温ガス計算

- ガスの運動のみシミュレーション
- 銀河ポテンシャルは赤外線観測などから決めたもの.
- バー・スパイラルを「定常」と仮定.
- Wada et al. (1994); Englmaier & Gerhard (1999); Bissantz et al. (2003); Weiner & Sellwood (1999); Gomez (2006); Rodriguez-Fernandez & Combes (2008)
- 実際には(特に)スパイラルは非定常 (e.g. Baba+2009).

◆棒状渦巻銀河のN体/等温ガス計算

- ガスの運動と星の運動をシミュレーション
- Fux (1997,1999)
- 物理的に現実的なモデル



本研究

◆本研究：

-Baba+(2010)の重力多体/多相星間モデルを拡張し定量的モデルを作る.

◆天の川銀河モデル：

-Widrow & Dubinski (2005)の質量モデル (0次近似モデル) を基本にシミュレーション.

◆天の川銀河質量モデルの現状：

-ディスク，ハローはどの質量モデルでもだいたい同じ.

-(古典)バルジに関しては不定性が大きい.

Dehnen & Binney (1998) : $M_{cb} \sim 4 \times 10^9 M_{\odot}$ (COBE/DIRBE分布)

Widrow & Dubinski (2005) : $M_{cb} \sim 1 \times 10^{10} M_{\odot}$ (Hernquist分布)

Sofue et al. (2009) : $M_{cb} \sim 2 \times 10^{10} M_{\odot}$ (de Vaucouleurs則)

McMillan (2011) : $M_{cb} \sim 9 \times 10^9 M_{\odot}$ (COBE/DIRBE分布)

銀河円盤のダイナミクスに影響の大きい古典バルジ質量を
パラメータとしてシミュレーションを行う.

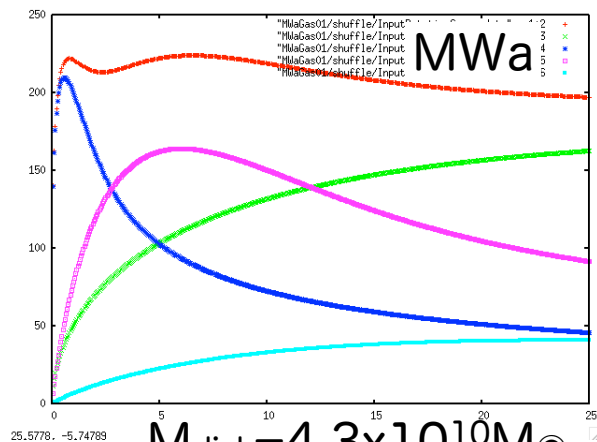
天の川銀河モデルの初期条件

◆天の川銀河モデル：

- Widrow & Dubinski (2005)を基準にバルジ質量をパラメータ.
- DMハロー：NFW分布，定常外場.
- 古典バルジ：Hernquist分布，無回転，N体
- 恒星系円盤：Exp分布，速度分散(Hernquist 1993法)，N体
- ガス円盤：Exp分布，円運動+10km/sの速度分散，SPH

◆数値シミュレーション法：N-body/SPH法

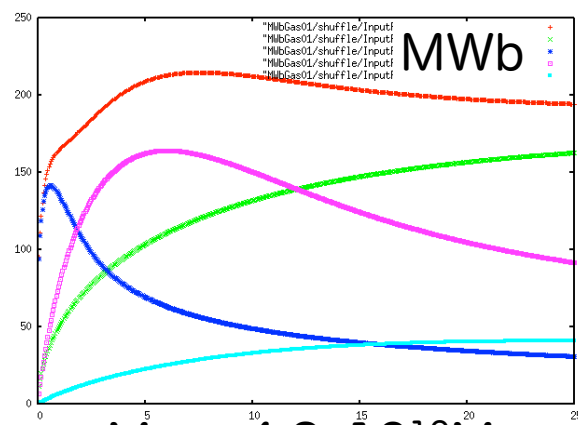
- ASURA ver.2 (Saitoh+2008; Saitoh & Makino 2009; Saitoh & Makino 2010)
- 自己重力・冷却 ($20\text{K} < T < 10^8\text{K}$)・FUV加熱・星形成 ($T < 100\text{K}$, $n > 100/\text{cc}$)・超新星加熱
- 分解能： $N_{\text{star}} \sim 700\text{万}$ ， $N_{\text{sph}} \sim 200\text{万}$ ，重力ソフトニング=20pc



$$M_{\text{disk}} = 4.3 \times 10^{10} M_{\odot}$$

$$M_{\text{cb}} = 1.2 \times 10^{10} M_{\odot}$$

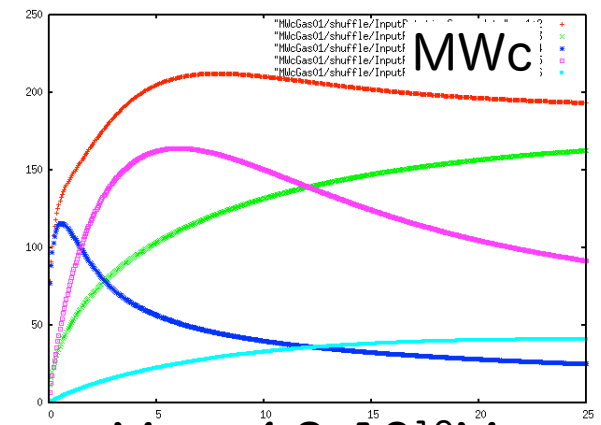
$$M_{\text{gas}} = 8.0 \times 10^9 M_{\odot}$$



$$M_{\text{disk}} = 4.3 \times 10^{10} M_{\odot}$$

$$M_{\text{cb}} = 5.6 \times 10^9 M_{\odot}$$

$$M_{\text{gas}} = 8.0 \times 10^9 M_{\odot}$$

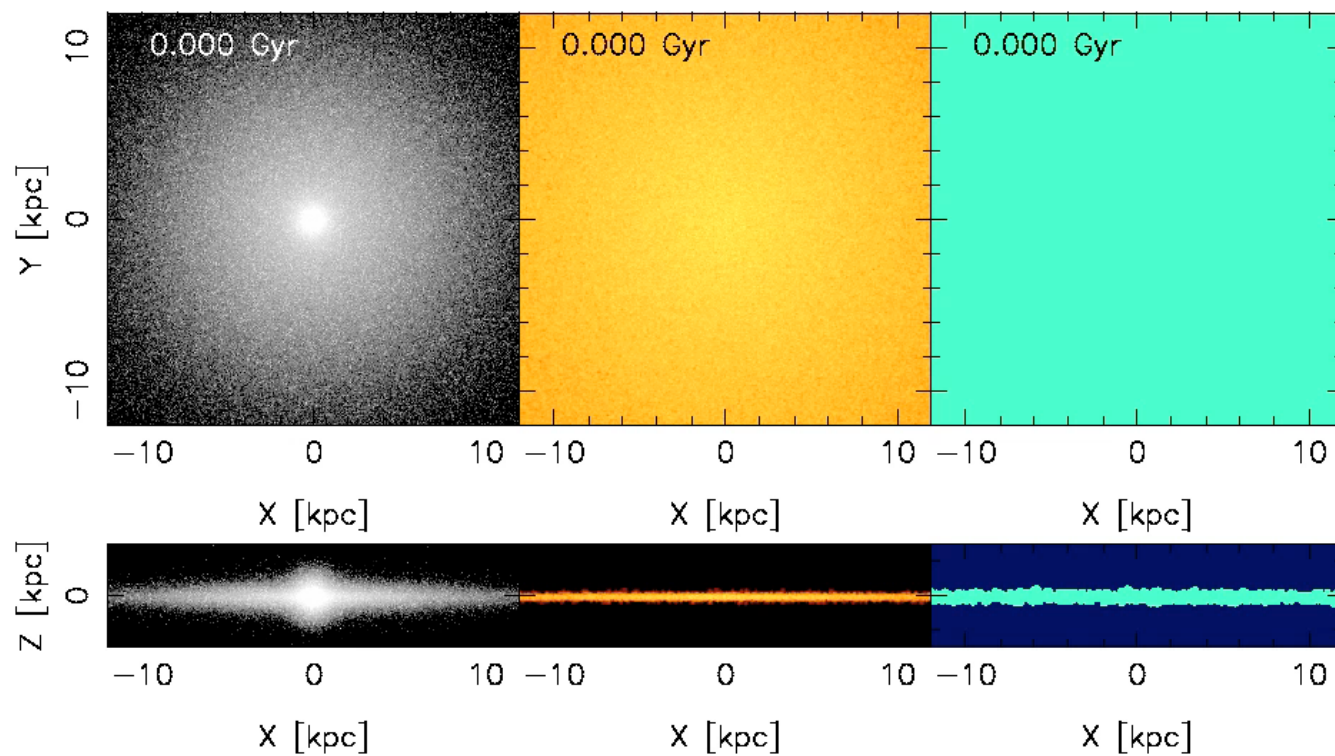
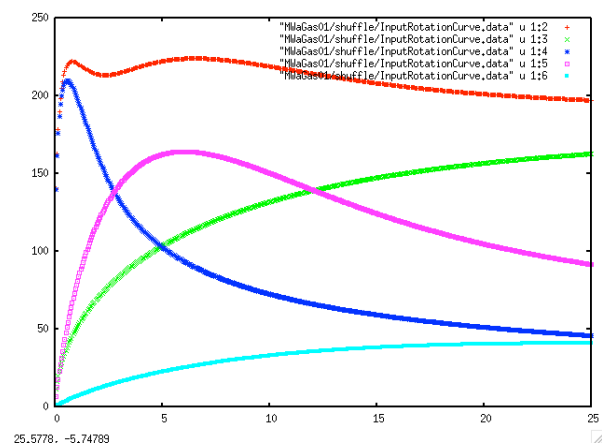


$$M_{\text{disk}} = 4.3 \times 10^{10} M_{\odot}$$

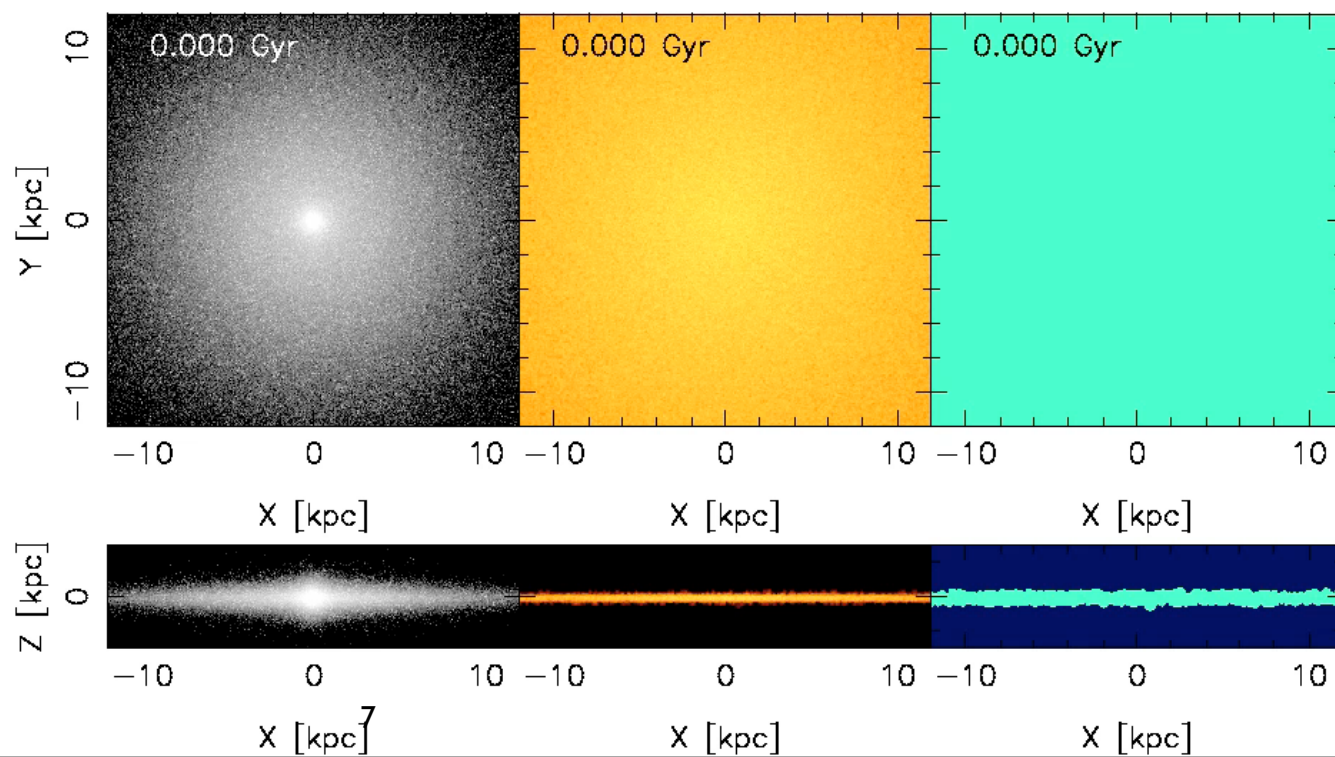
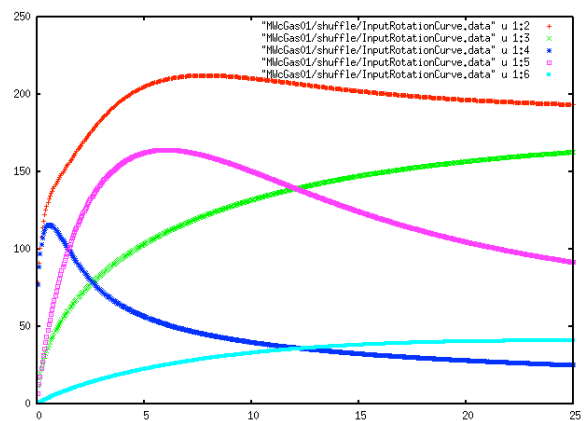
$$M_{\text{cb}} = 3.4 \times 10^9 M_{\odot}$$

$$M_{\text{gas}} = 8.0 \times 10^9 M_{\odot}$$

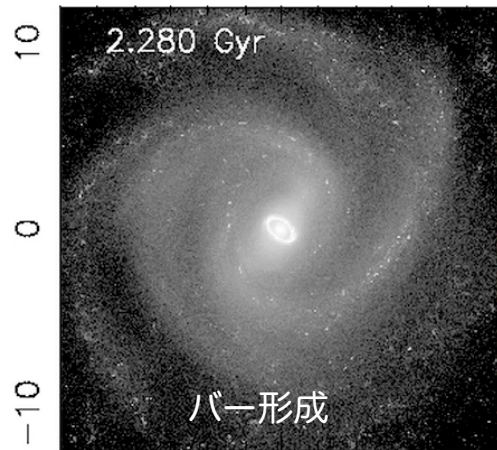
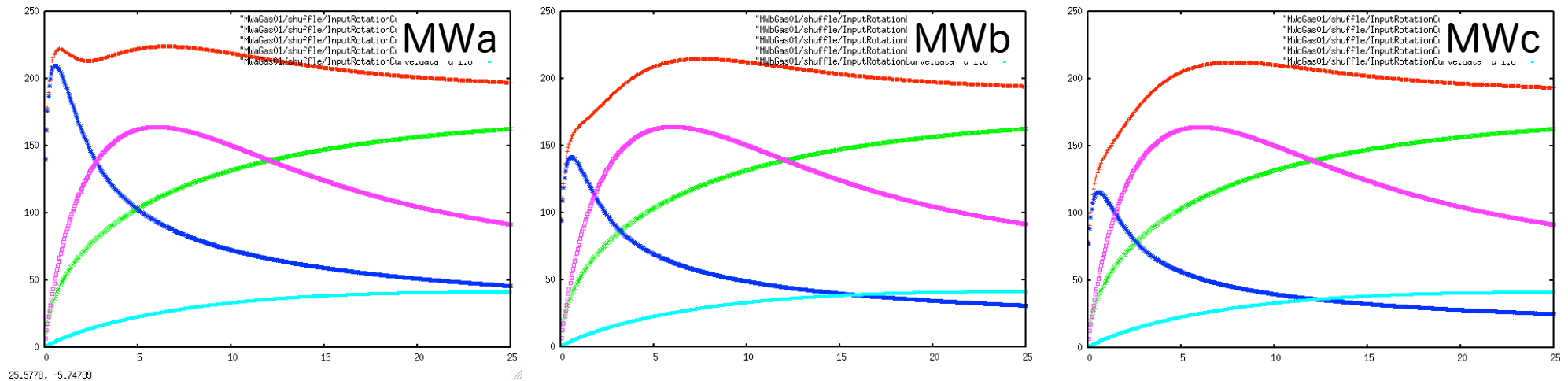
MWa



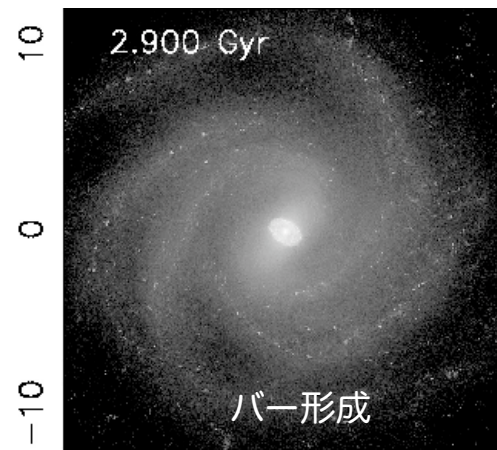
MWc



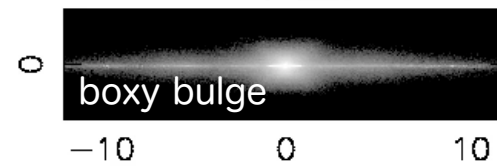
天の川銀河モデルの結果



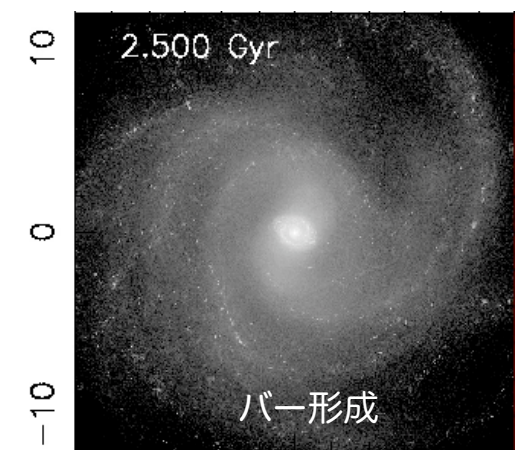
X [kpc]



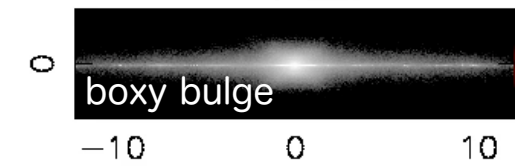
X [kpc]



X [kpc]

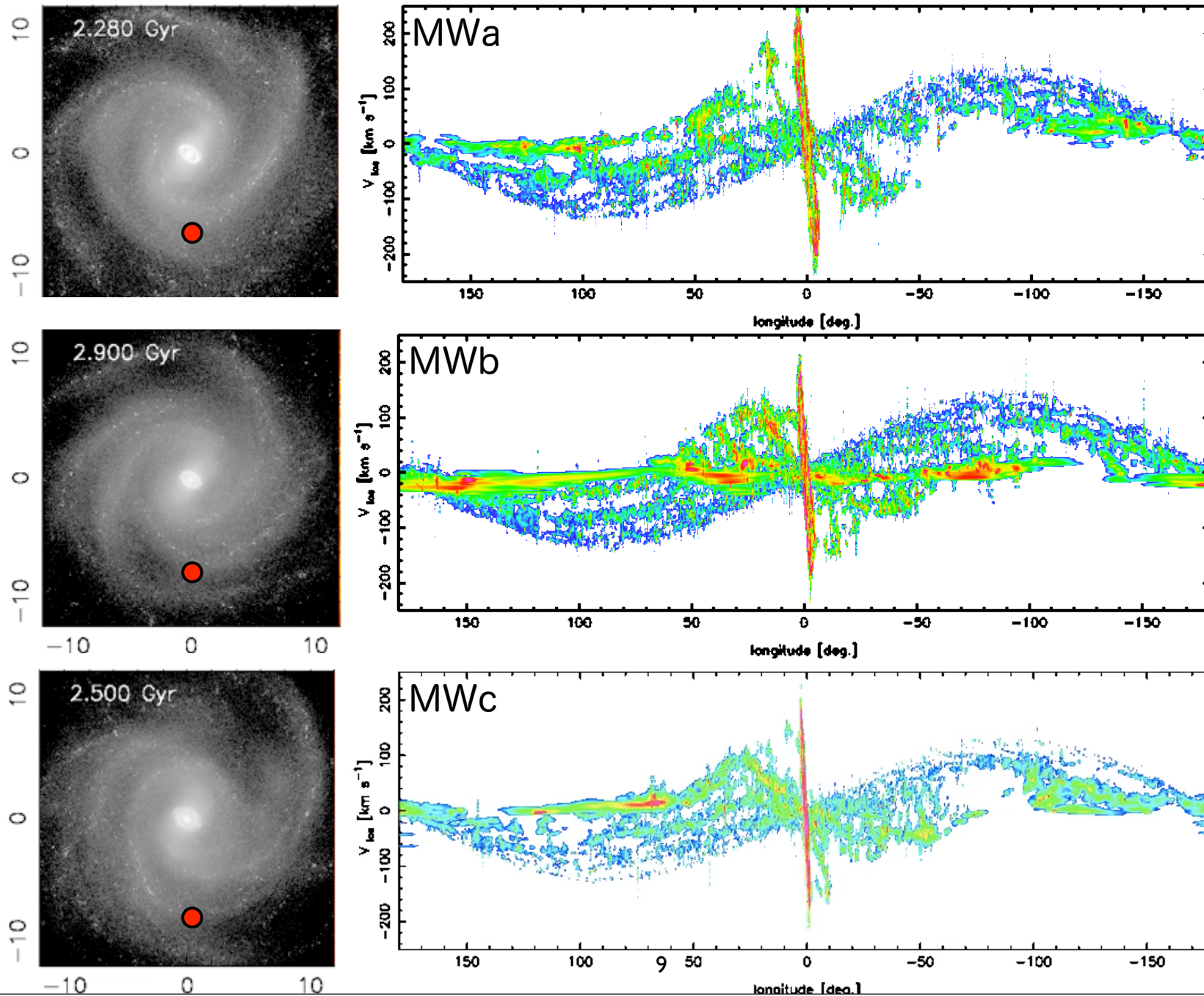


X [kpc]



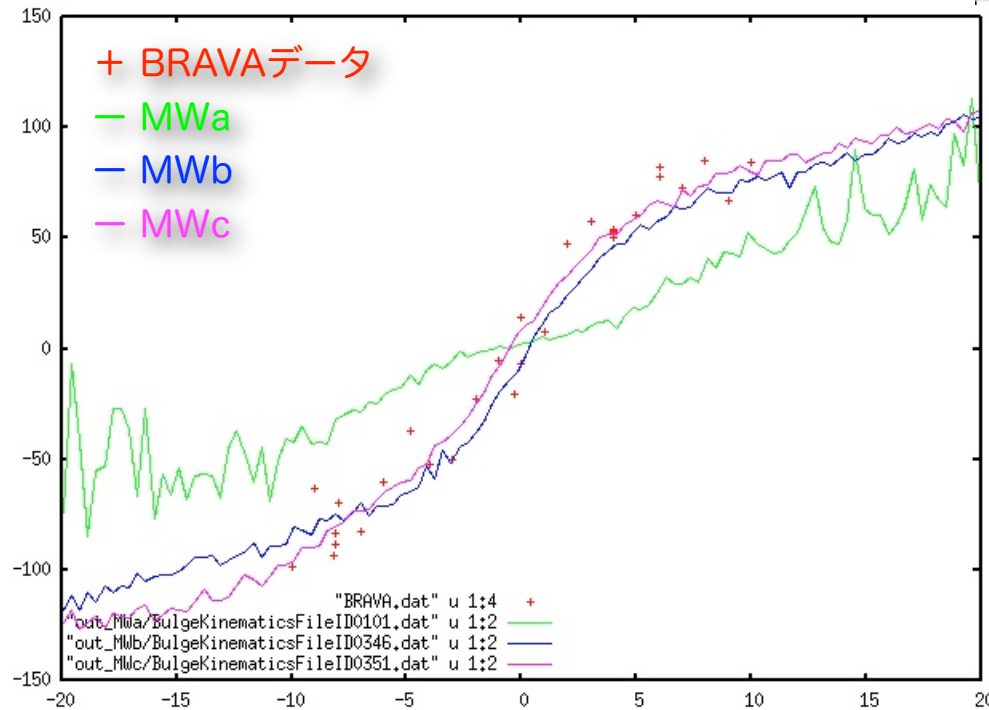
X [kpc]

Massive Classic Bulgeの有無に依らず中心領域の高速成分(CMZ=Nuclear Bulgeのガス)が出ている。



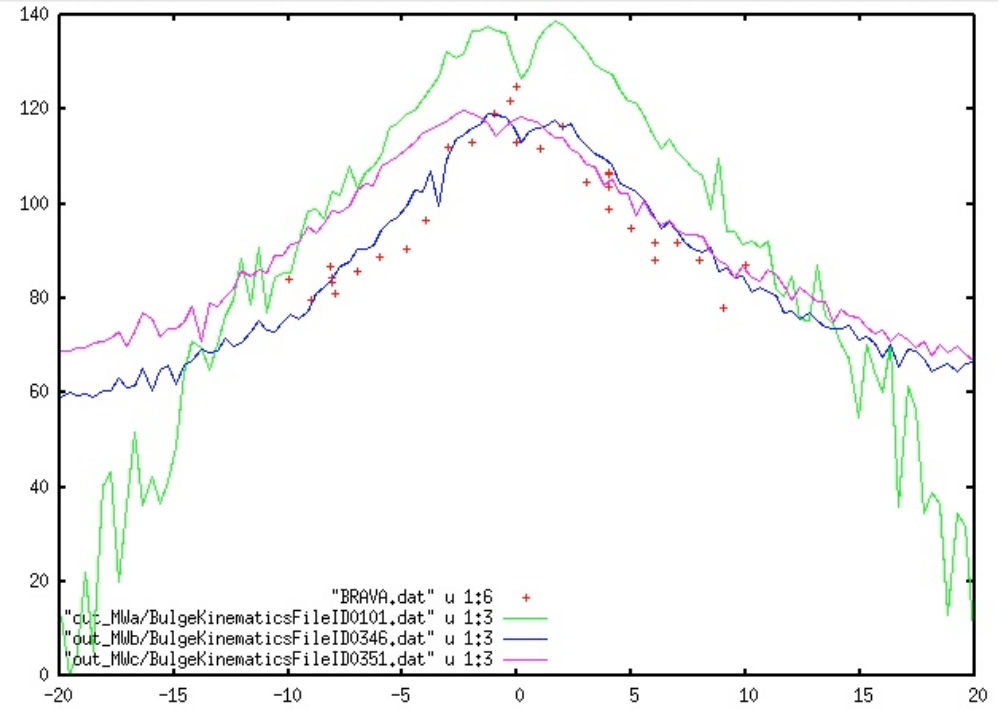
バルジ領域の星の運動 (<5 kpc)

バルジ星の視線速度 [km/s]



銀経 ℓ [deg.]

バルジ星の視線速度分散 [km/s]



銀経 ℓ [deg.]

銀河中心領域で無回転バルジ(古典バルジ)が卓越するようなモデルではBRAVAデータ(Kunder+2012)に合わない.

$M_{cb}/M_{disk} < 10\%$ が好ましい (Shen+2010と同様).

まとめ

◆天の川銀河モデルと古典バルジ質量：

- Widrow & Dubinski (2005)の質量モデルを基準.
- 古典バルジ質量をパラメータとしてシミュレーション.
- ℓ -v図再現性 → 古典バルジ質量のあまりよい制限にはならない (Koda & Wada 2002)
- boxy bulge, バルジ星運動学 → 小質量古典バルジがよい (Shen+2010)
→ $M_{cb}/M_{disk} < 10\%$ がよい.

◆渦状腕起源におけるバルジの効果：

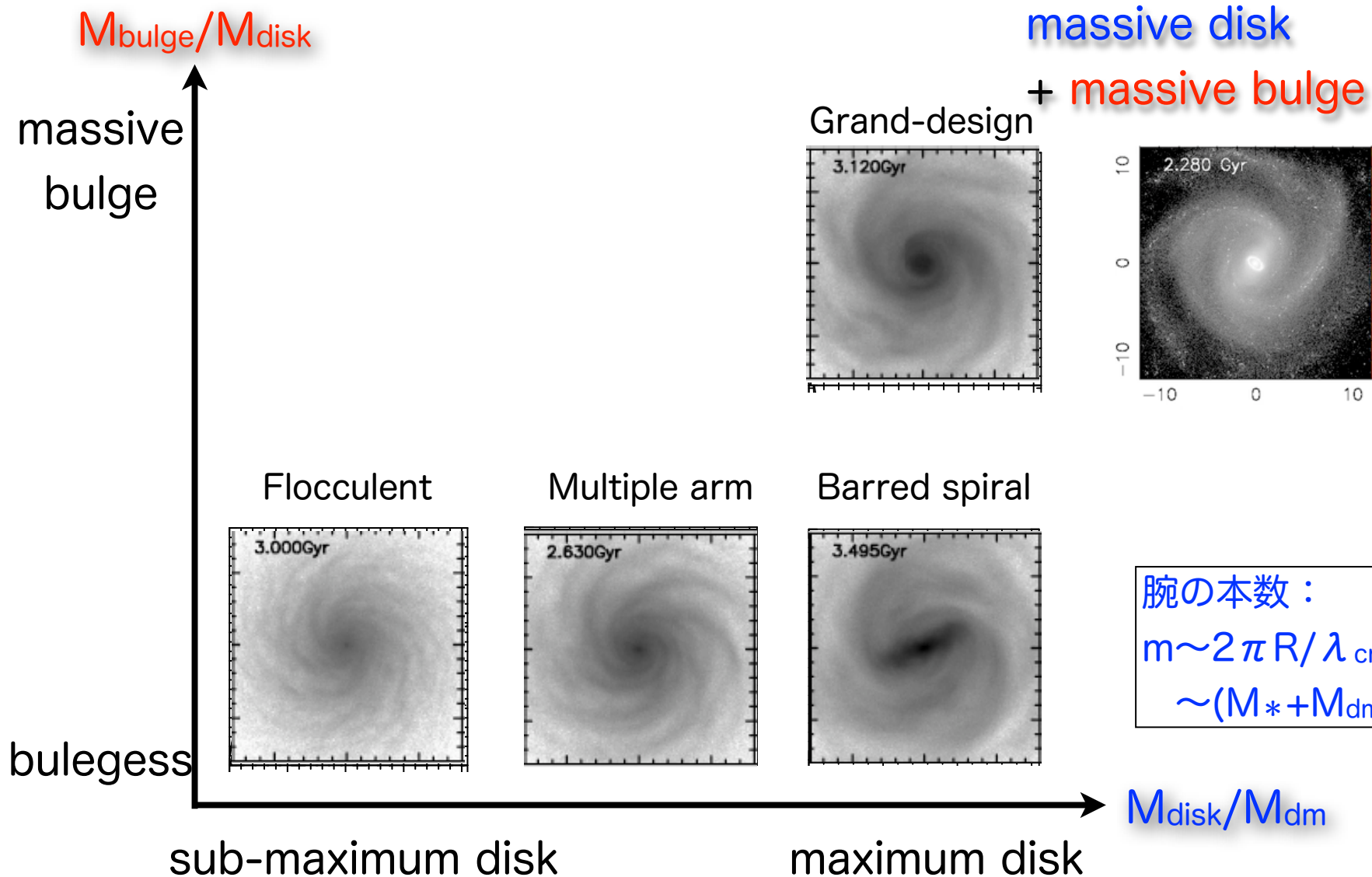
- $M_{cb}/M_{disk} \sim 30\%$ のバルジがあるとバー形成を抑制しGrand-design.
- これは線形理論のQバリア効果か(Thomasson+1990; Sellwood & Evans 2002).
- しかし, バルジを外場ではなくN体で考慮するとバー形成を伴う.
- Bulge-Spiralの非線形相互作用 (e.g., Dubinski+2009; Saha+2012).
→ バルジをN体で考慮することが必須.

◆天の川銀河-大マゼラン雲相互作用：

- LMCの近点通過によりMWディスクにlopsidedモードが生じる.
- 本年度中にガス/SF/SNを考慮した計算を実行.

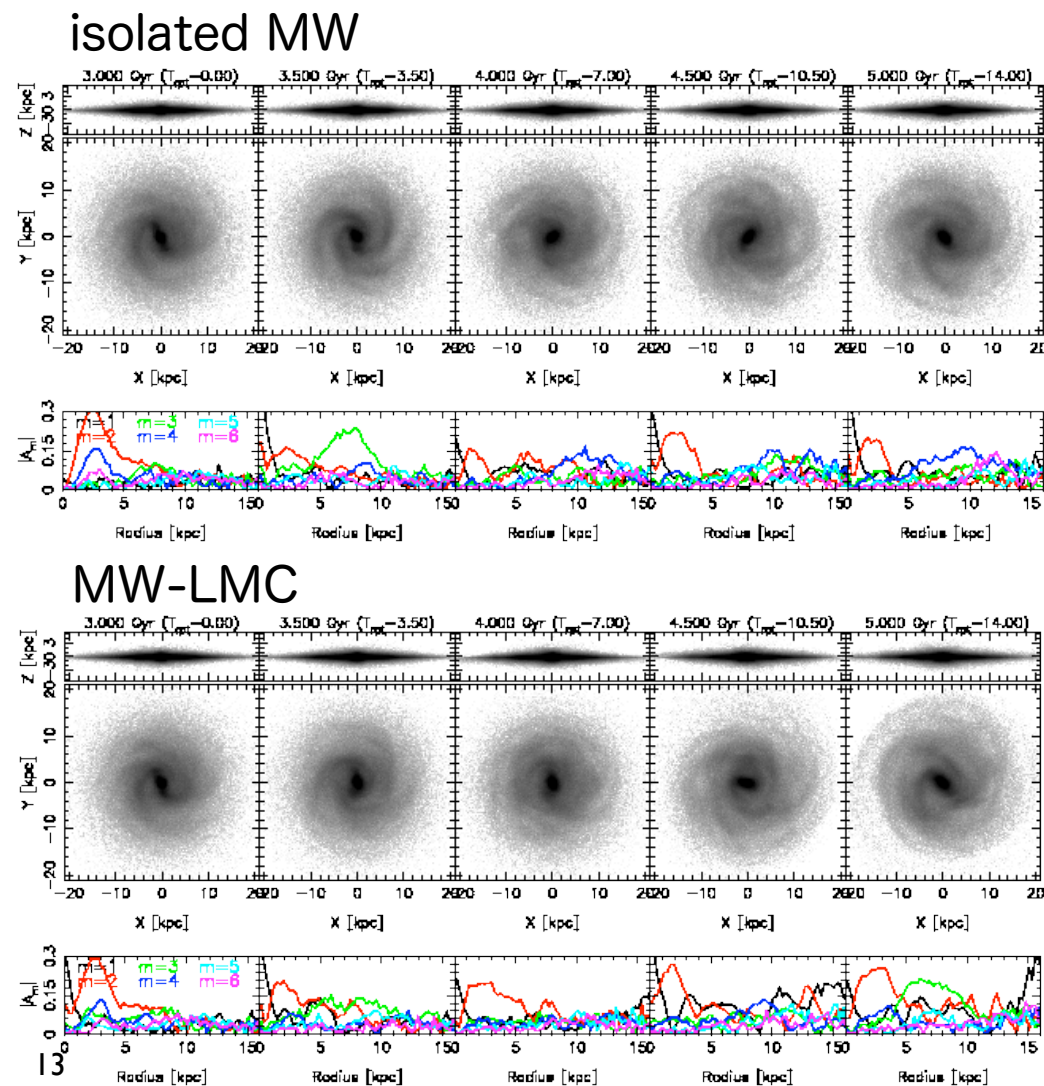
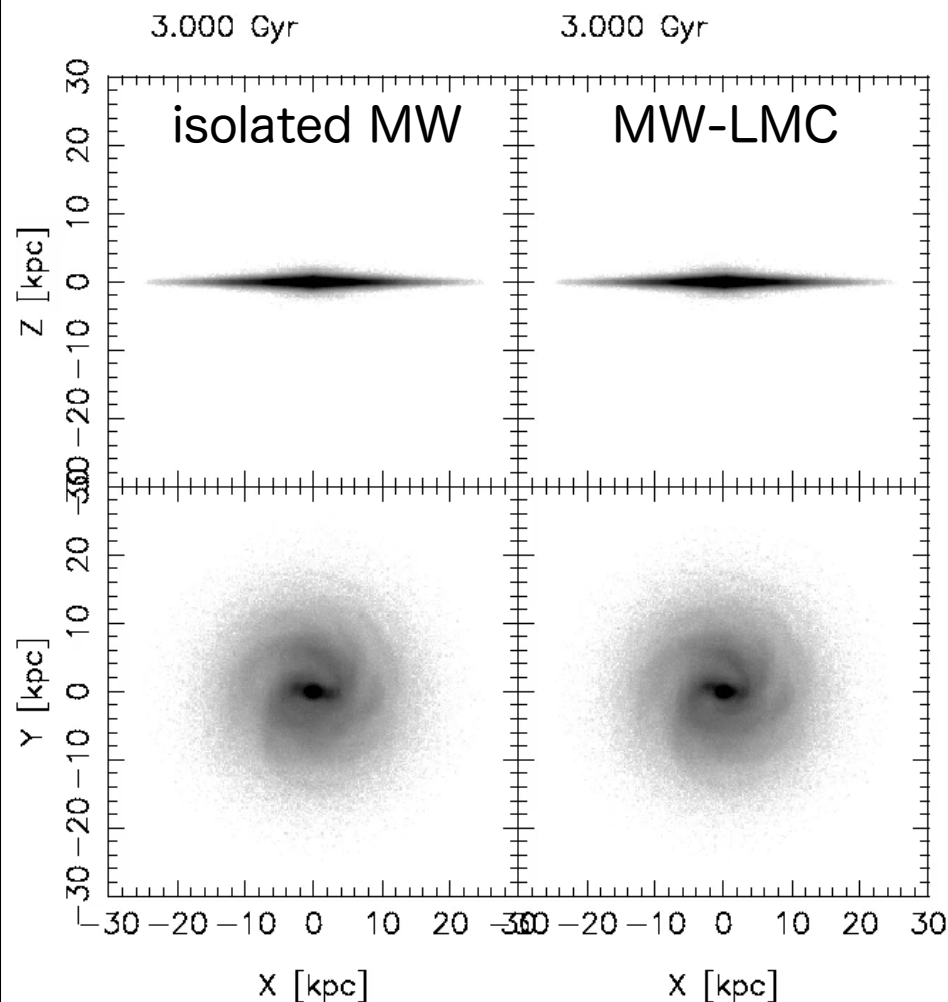
Grand-Designとバルジ

孤立銀河の (重力不安定起源) 渦状腕多様性



MW-LMC相互作用：N体計算

- N体のみのMW-LMC相互作用計算 (2012年度の残りでガス入り計算)
- LMCの近銀点通過時にMWはlopsidedモードが励起されるが、その他の非軸対称モードが顕著に強くなっているわけではない。



まとめと今後

◆天の川銀河モデルと古典バルジ質量：

- Widrow & Dubinski (2005)の質量モデルを基準.
- 古典バルジ質量をパラメータとしてシミュレーション.
- ℓ -v図再現性 → 古典バルジ質量のあまりよい制限にはならない (Koda & Wada 2002)
- boxy bulge, バルジ星運動学 → 小質量古典バルジを支持 (Shen+2010)
→ $M_{cb}/M_{disk} < 10\%$ がよい.

◆渦状腕起源におけるバルジの効果：

- $M_{cb}/M_{disk} \sim 30\%$ のバルジがあるとバー形成を抑制しGrand-design.
- これは線形理論のQバリア効果か(Thomasson+1990; Sellwood & Evans 2002).
- しかし, バルジを外場ではなくN体で考慮するとバー形成を伴う.
- Bulge-Spiralの非線形相互作用 (e.g., Dubinski+2009; Saha+2012).
→ バルジをN体で考慮することが必須.

◆天の川銀河-大マゼラン雲相互作用：

- LMCの近点通過によりMWディスクにlopsidedモードが生じる.
- 本年度中にガス/SF/SNを考慮した計算を実行.