

# 円盤星の金属量分布と 銀河系の形成史



豊内大輔(京都大学天体核研究室)

千葉 柁司(東北大学)

銀河進化研究会@大阪大学

2017/6/9

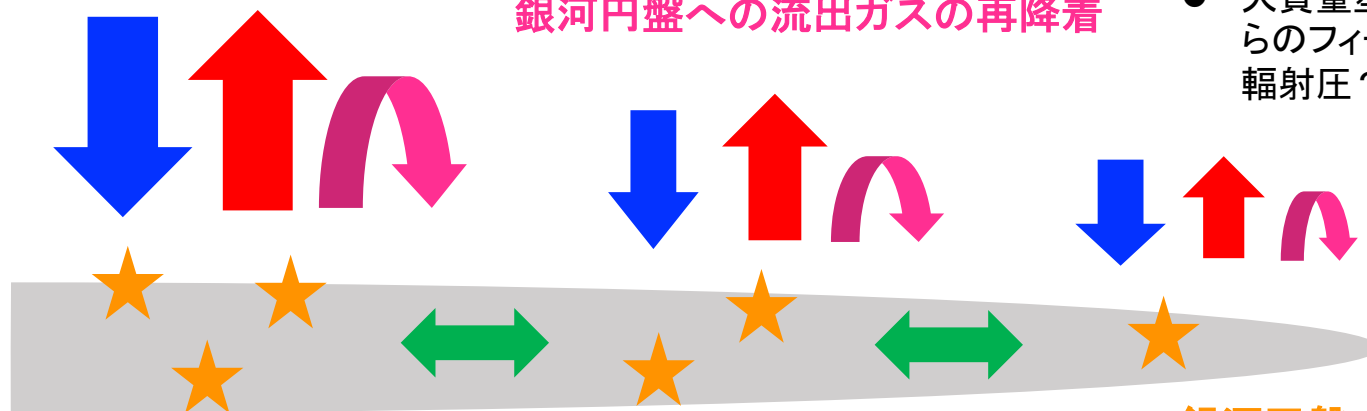


イントロダクション

# 円盤銀河の化学進化モデル

## 銀河円盤へのガス流入

- Hot & Cold mode
- ガス流入のタイムスケール
- 角運動量分布



銀河円盤への流出ガスの再降着

## 銀河円盤に沿った星の移動(radial migration)

- 内的要因(バー、スパイラル、巨大分子雲との重力相互作用)
- 外的要因(衛星銀河との合体)

## 銀河円盤からのガス流出

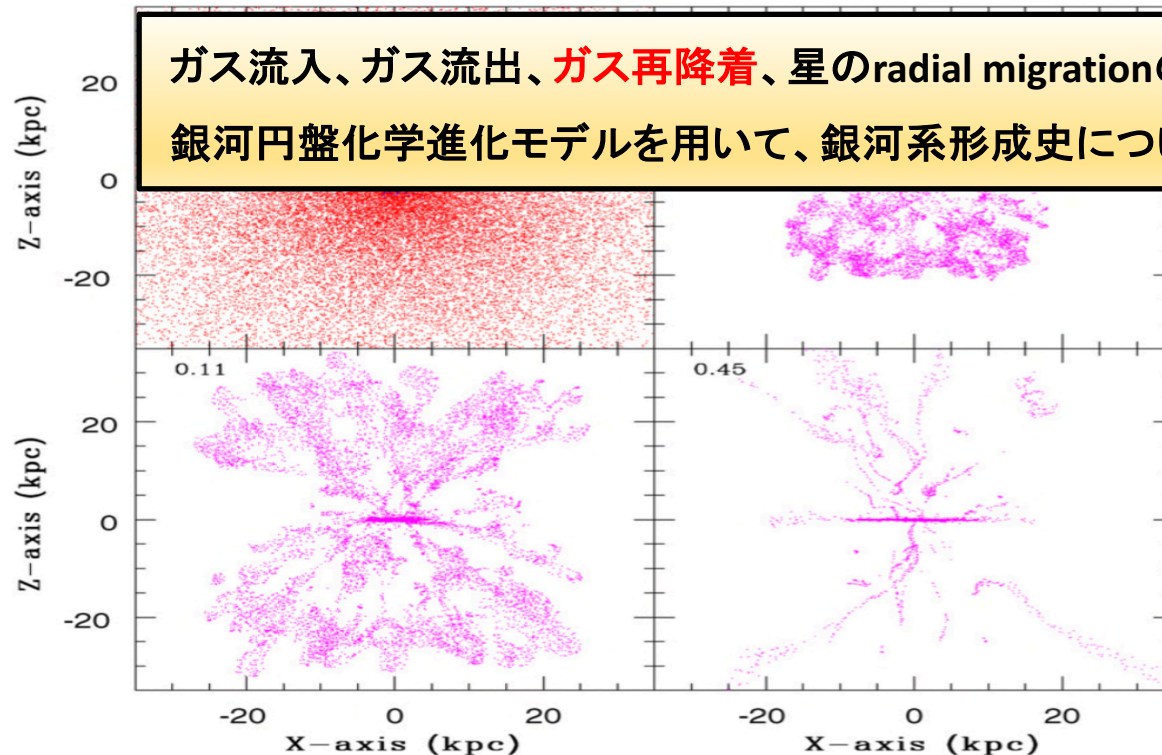
- $M_{\text{out}} \propto \text{SFR}$
- 大質量星 & 超新星爆発からのフィードバック(熱圧or 輻射圧?)

## 銀河円盤内の星形成

- 分子雲(フィラメント・コア) 形成メカニズム
- $\Sigma_{\text{SFR}} \propto \Sigma_{\text{mol}}$

# 流出ガスの再降着

- 円盤から流出したガスの一部(あるいはほとんど)が円盤上に再降着する。
- 再降着ガスは元々放出された場所より外側に降着しやすい(e.g., Bekki et al. 2009)
- 再降着ガスには重元素が含まれているため、ガスの再降着は円盤外縁部の化学進化に影響をあたえる(e.g., Tsujimoto et al. 2010; Bresolin et al. 2012)



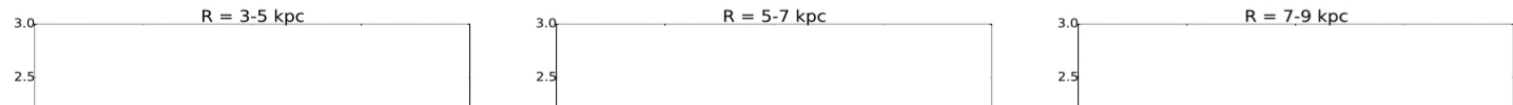
銀河中心部から放出されたガスの円盤外縁部への再降着  
(Bekki et al. 2009)

# 円盤星の金属量分布 (Metallicity Distribution Function: MDF)

$$\frac{dN_{*}}{d[\text{Fe}/\text{H}]} = \frac{dN_{*}/dt}{d[\text{Fe}/\text{H}]/dt}$$

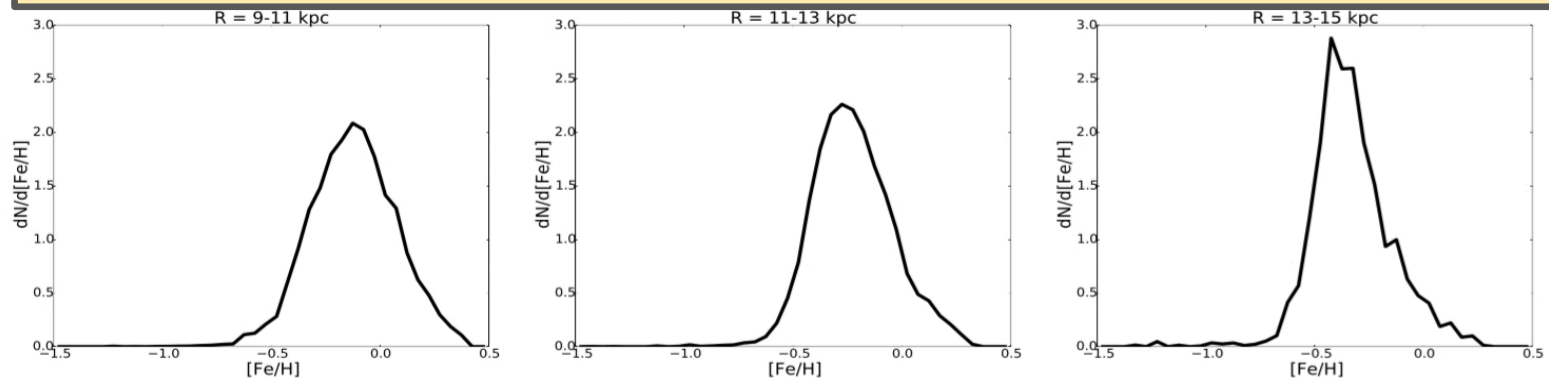
Star formation history  
Chemical evolution

SDSS-III/APOGEE red-giant sample (Hayden et al. 2015)



最新の銀河系内サーベイで観測されたMDFのradial dependenceは円盤全体での星形成、化学進化、そして星のradial migrationの歴史を反映。

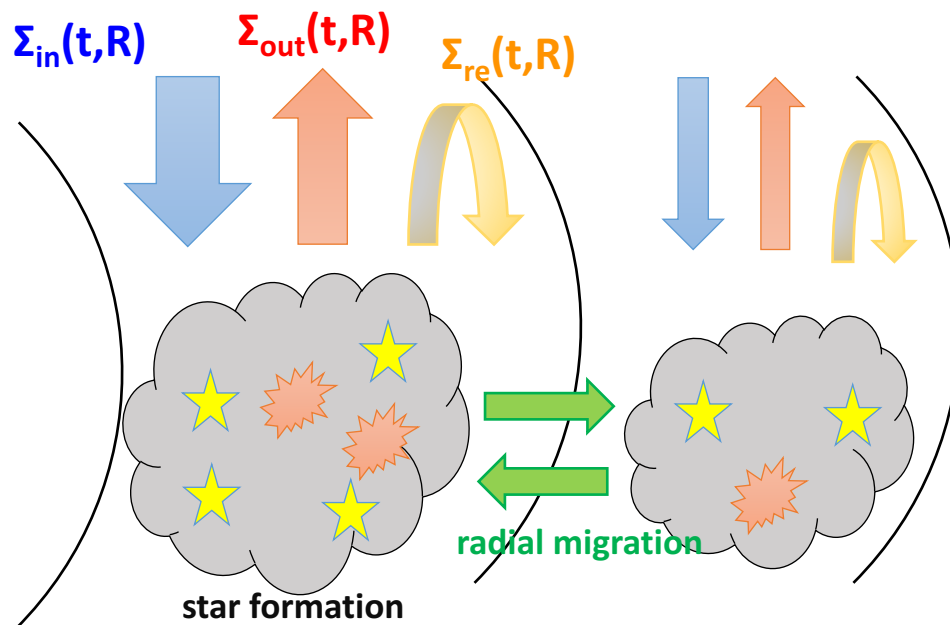
➤ 銀河円盤化学進化モデルで観測を再現、銀河系円盤形成過程に制限をかける。



# 銀河円盤化学進化モデル

# モデル概要

- 星形成率 :  $\Sigma_{\text{SFR}}(t, R)$
- ガス流入率 :  $\Sigma_{\text{in}}(t, R)$
- ガス流出率 :  $\Sigma_{\text{out}}(t, R)$
- ガスの再降着率 :  $\Sigma_{\text{re}}(t, R)$
- Radial migration



円盤を  $R_{\text{out}} = 16 \text{ kpc}$  まで幅  $\Delta R = 1 \text{ kpc}$  の円環に分け各円環内の星・ガス・重元素量の進化を追う

ガス密度進化

net gas consumption rate w/ the effect of radial migration

$$\frac{\partial \Sigma_{\text{gas}}}{\partial t} = -\Sigma_{\text{SFR,net}} + \underbrace{\Sigma_{\text{in}}}_{\text{inflow}} - \underbrace{\Sigma_{\text{out}}}_{\text{outflow}} + \underbrace{\Sigma_{\text{re}}}_{\text{re-accretion}}$$

重元素量進化

SNe II, Ia stellar yields      常にISMの金属量と等しいと仮定

$$\frac{\partial (Z_i \Sigma_{\text{gas}})}{\partial t} = -P_{\text{net},i} + (Y_{\text{II},i} + Y_{\text{Ia},i}) \Sigma_{\text{SFR}} + \underbrace{Z_{\text{in},i} \Sigma_{\text{in}}}_{\text{inflow}} - \underbrace{Z_{\text{out},i} \Sigma_{\text{out}}}_{\text{outflow}} + \underbrace{Z_{\text{re},i} \Sigma_{\text{re}}}_{\text{re-accretion}}$$



# Description of Galactic Evolution

**Gas inflow rate**

$$\Sigma_{\text{in}}(t, R) \propto \begin{cases} t \exp\left(-\frac{R}{h_{\text{R,in1}}} - \frac{t}{\tau_{\text{in}}}\right) & (R \leq R_b) \\ t \exp\left(-\frac{R - R_b}{h_{\text{R,in2}}} - \frac{R_b}{h_{\text{R,in1}}} - \frac{t}{\tau_{\text{in}}}\right) & (R > R_b) , \end{cases}$$

**Time scale of gas inflow**

$$\tau_{\text{in}}(R) = \tau_{\text{in},0} + (\tau_{\text{in},8} - \tau_{\text{in},0}) \left(\frac{R}{8 \text{ kpc}}\right)^{\alpha}$$

---

**Star formation rate**

$$\Sigma_{\text{SFR}} = 1.6 \frac{R_{\text{mol}}}{R_{\text{mol}} + 1} \left(\frac{\Sigma_{\text{gas}}}{M_{\odot} \text{pc}^{-2}}\right) [M_{\odot} \text{pc}^{-2} \text{Gyr}^{-1}] .$$

(Bigiel et al. 2008)

**Mass ratio of H2 to HI gas**

$$R_{\text{mol}} = 0.23 \left[ \left(\frac{\Sigma_{\text{gas}}}{10 M_{\odot} \text{pc}^{-2}}\right) \left(\frac{\Sigma_{\text{star}}}{35 M_{\odot} \text{pc}^{-2}}\right)^{0.5} \right]^{0.92}$$

(Blitz & Rosolowsky 2006)

---

**Gas outflow rate**

$$\Sigma_{\text{out}}(t, R) = \Lambda(R) \Sigma_{\text{SFR}}(t, R) ,$$

**Mass loading factor**

$$\Lambda(R) = \Lambda_0 + (\Lambda_8 - \Lambda_0) \left(\frac{R}{8 \text{ kpc}}\right)^{\beta} ,$$

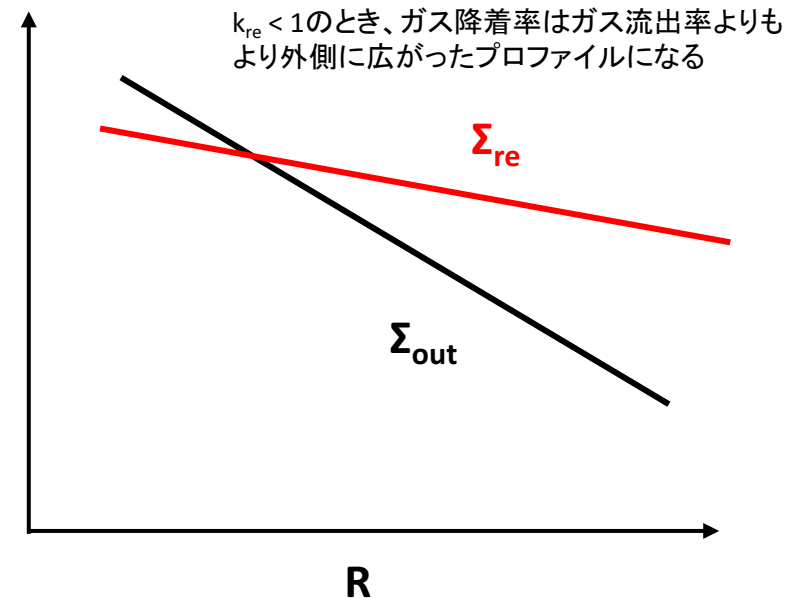
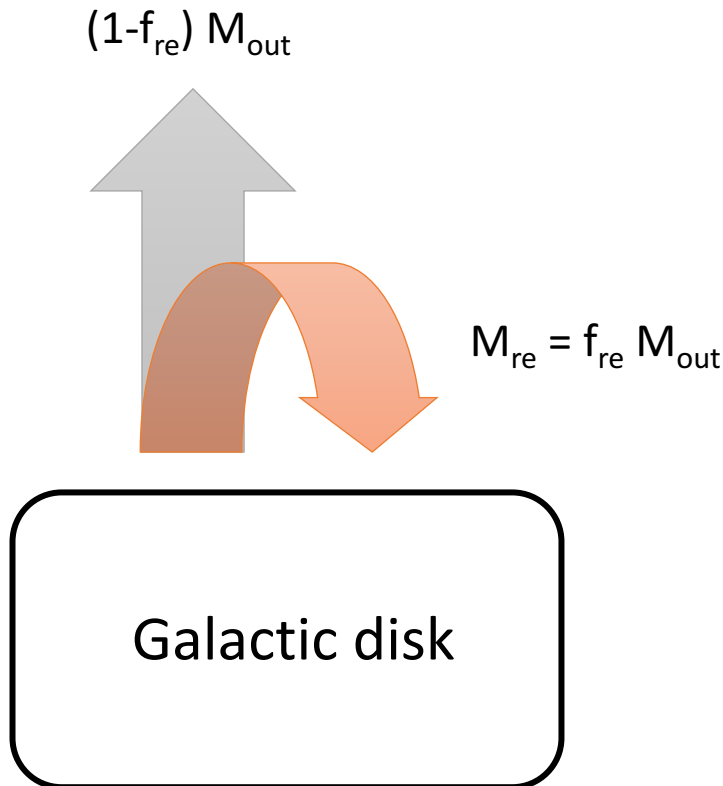


# Re-accretion of Outflowing Gas

- ✓ ある時刻に銀河円盤から流出したガスのうち、ある割合 ( $f_{\text{re}}$ ) が500Myr後に銀河円盤へ再降着。残り( $1-f_{\text{re}}$ ) は銀河から脱出。
- ✓ ガス再降着率のradial profileはガス流出率のradial profileを使って以下のようにあたえる。

$$\Sigma_{\text{re}}(t, R) \propto \Sigma_{\text{out}}(t - t_{\text{re}}, R)^{k_{\text{re}}}$$

- ✓  $f_{\text{re}}$ ,  $k_{\text{re}}$  がガス再降着の性質を決めるパラメータ。



# Model Parameters

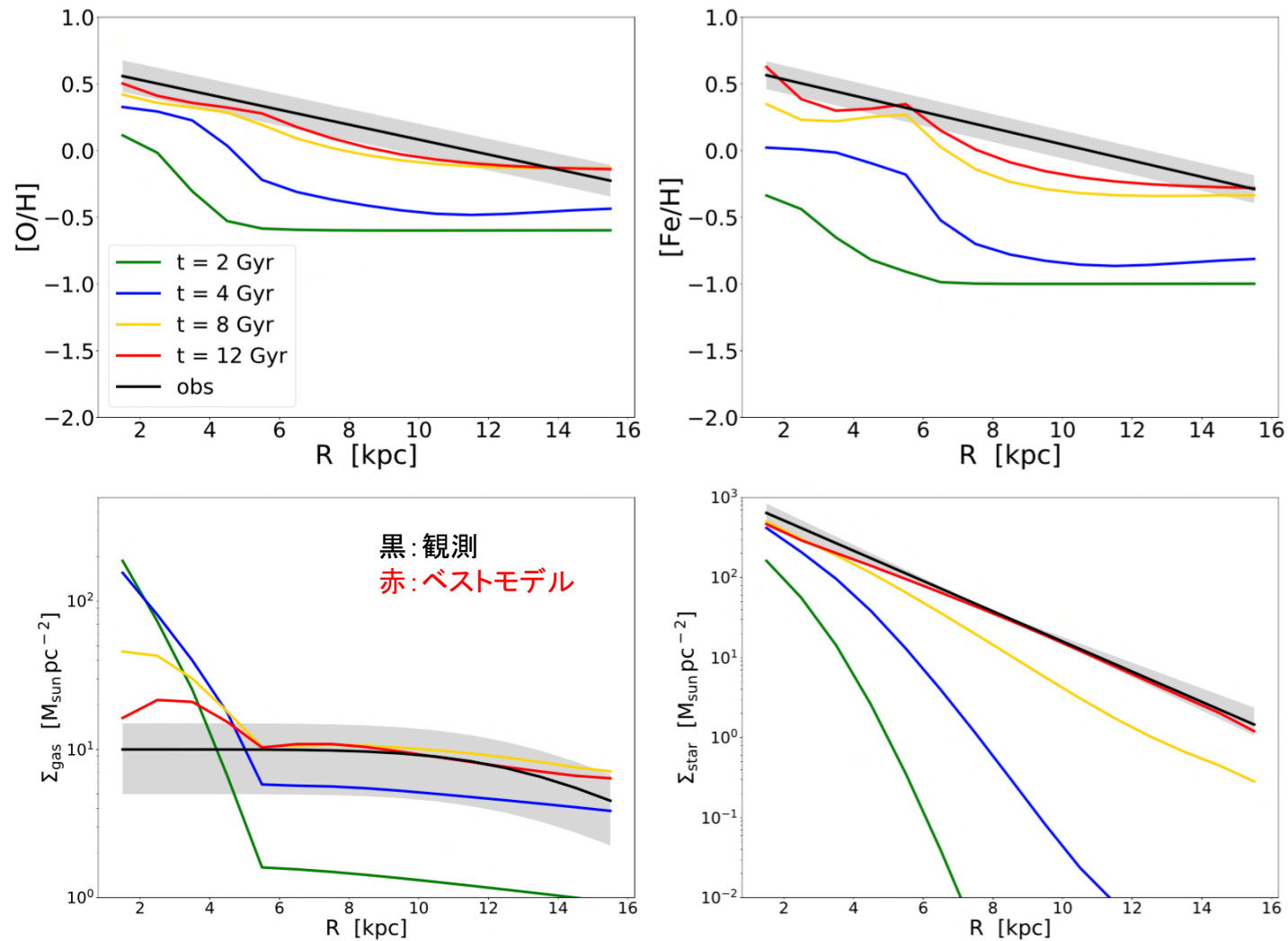
以下の17個のパラメータによって円盤銀河の進化を記述する。これらのパラメータはMCMC法を用いて星質量、ガス質量、ISMの[O/H]、[Fe/H]、円盤星の金属量分布のR依存性を再現するように決定。

Table 1: The list of free parameters in our chemical evolution model

Gas inflow	$M_{\text{tot,in}}$	Total mass of infalling gas
	$R_b$	Break radius in the radial profile of gas infall
	$h_{R,\text{in}1}$	Scale length of infalling gas at the inside of $R_b$
	$h_{R,\text{in}2}$	Scale length of infalling gas at the outside of $R_b$
	$\tau_{\text{in},0}$	Time scale of gas infall at $R = 0$ kpc
	$\tau_{\text{in},8}$	Time scale of gas infall at $R = 8$ kpc
	$\alpha$	Power-law index characterizing the radial dependence of the time scale of gas infall
Gas outflow	$\Lambda_0$	Mass loading factor at $R = 0$ kpc
	$\Lambda_8$	Mass loading factor at $R = 8$ kpc
	$\beta$	Power-law index characterizing the radial dependence of mass loading factor
Radial migration	$\tau_\Lambda$	Time scale of the decrease of $\Lambda$
	$a_{\text{rm}}$	Radial gradient of diffusion length of disk stars by radial migration
	$b_{\text{rm}}$	Diffusion length of disk stars by radial migration at $R = 0$ kpc
	$\gamma$	Power-law index characterizing the dependence of radial diffusion length on stellar age
Gas re-accretion	$f_{\text{re}}$	Mass fraction of re-accreting gas to the total outflowing gas
	$k_{\text{re}}$	Parameter controlling the radial profile of gas re-accretion
	$f_{\text{Ia}}$	Parameter controlling the rate of Type Ia supernova

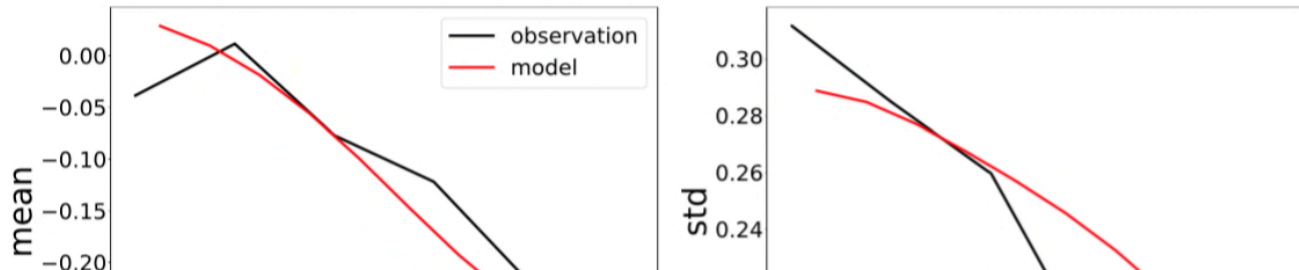
# フィッティング結果

# Radial profiles of star, gas, [O/H] and [Fe/H] of ISM



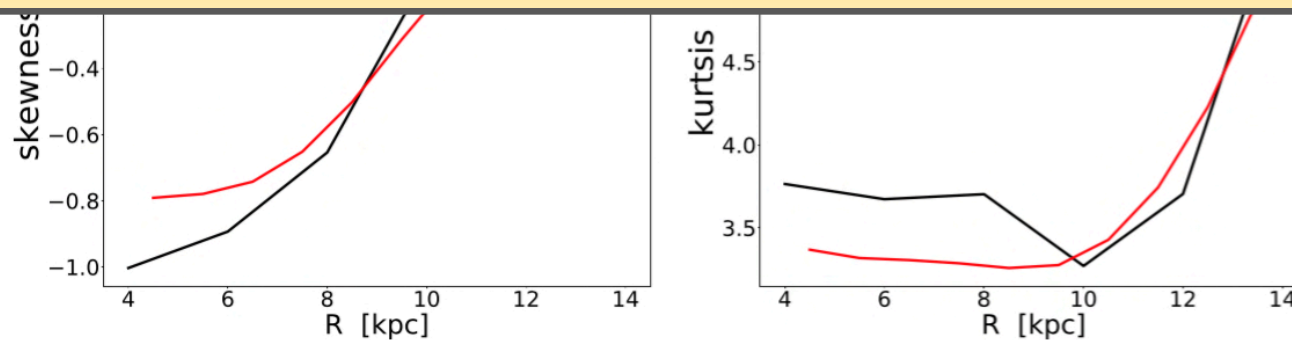
ベストフィットモデルによって観測がよく再現できている

# Radial dependence of MDF



MCMC法の結果、銀河系恒星円盤の観測(星質量分布、ガス質量分布、ISMの[O/H]&[Fe/H]、星の金属量分布)を再現するモデルを得ることに成功

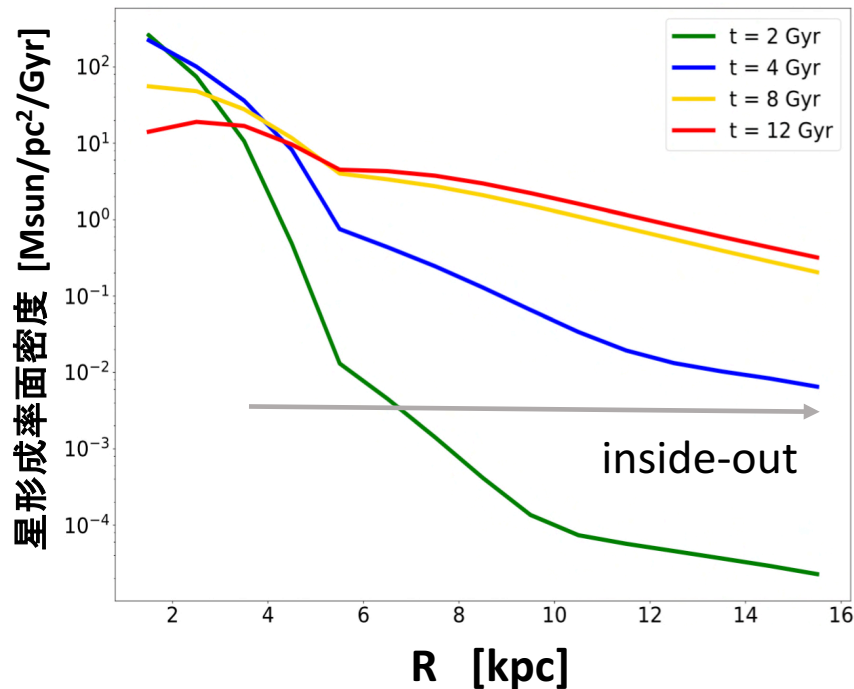
➤ このモデルから示唆される銀河系形成史(今回はガスの再降着についてのみ)を議論する



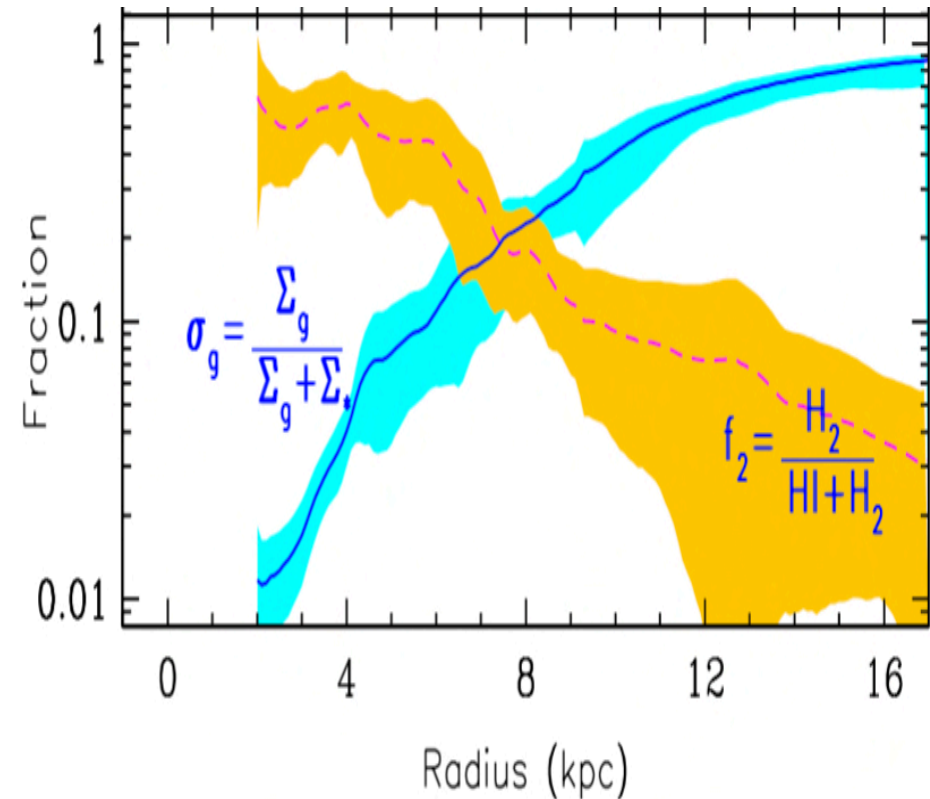
こっちもベストフィットモデルで観測がよく再現できている

# Star Formation History

Kubryk et al. (2015)

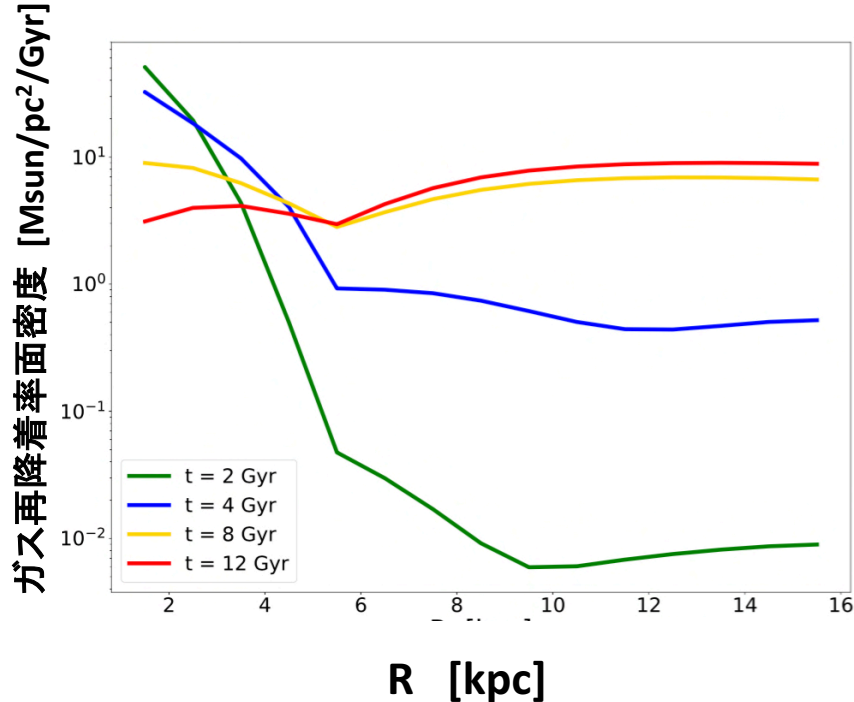


- ✓ MCMCフィッティングの結果、inside-out的な星形成史が得られる



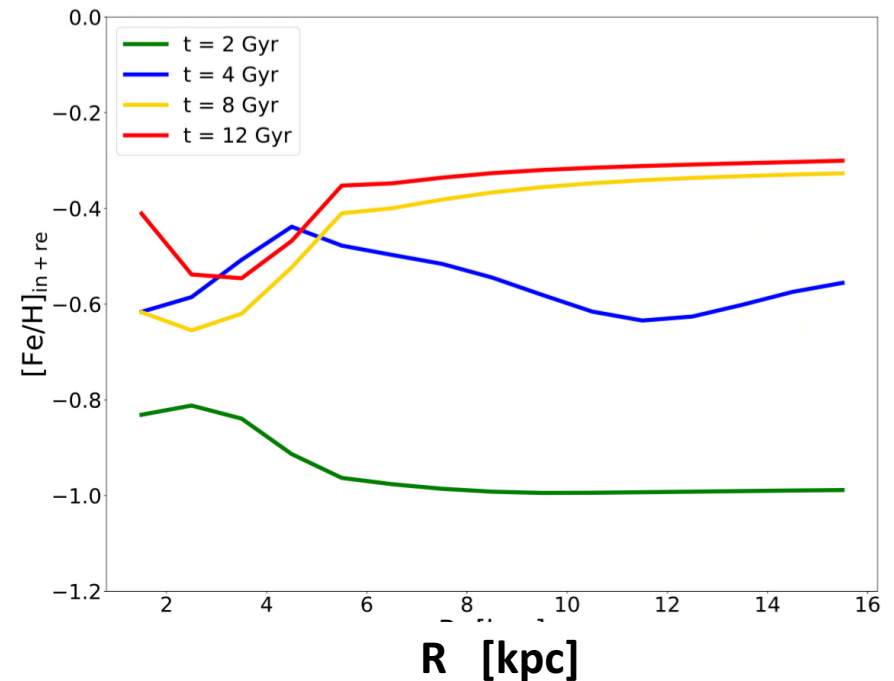
- ✓ 銀河系では内側ほどガスの割合が小さい。これを説明するためにinside-out的な星形成史が必要。

# Importance of Re-accretion of Outflowing Gas



- ✓ 星形成に伴いアウトフローが発生
- ✓ アウトフローガスのおよそ70%が円盤上に再降着

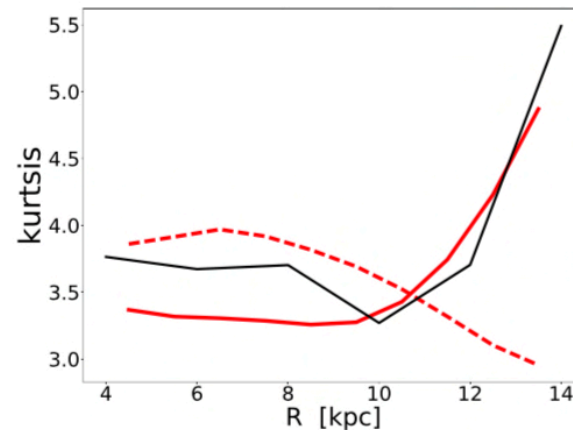
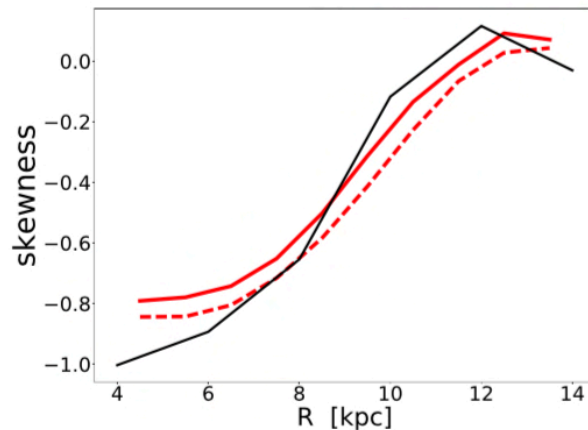
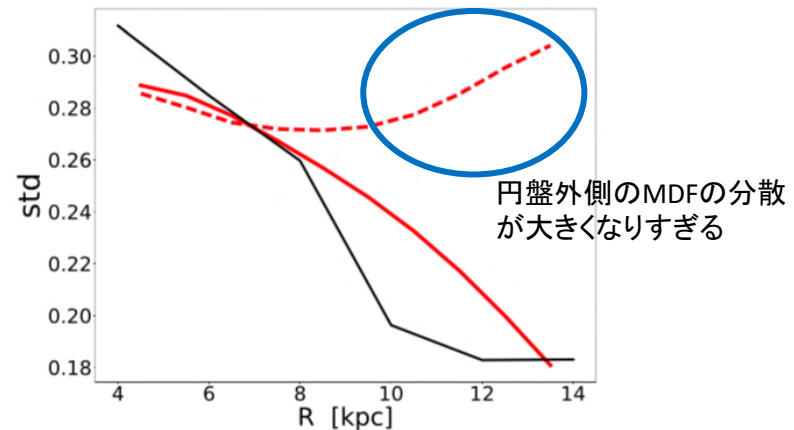
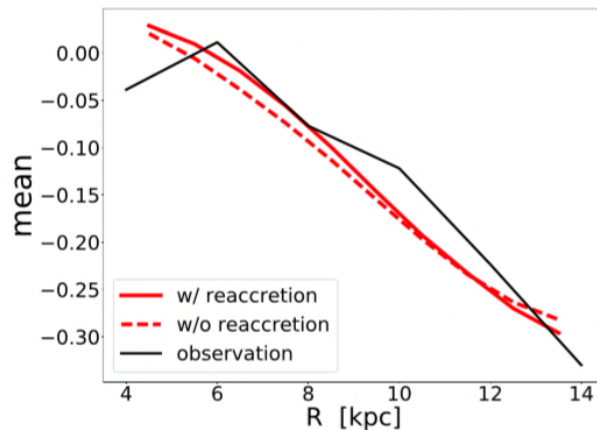
銀河外から流入するガスと再降着するガスの平均金属量



- ✓ 形成中期以降( $t > 4$  Gyr)において重元素を含んだガス( $[\text{Fe}/\text{H}] > -0.5$ )が円盤全体に降着する



# Importance of Re-accretion of Outflowing Gas



- ✓ ガスの再降着がない場合、円盤外側でのMDFのlow-metallicity tailが全く再現できない
  - (Re-accretion of metal-enriched gas) x (Inside-out disk formation) がMDF再現の鍵
  - 円盤内側はlow-metalなガスから一気に作られ、円盤外側はgalactic windの再降着起源のhigh-metalなガスからゆっくり作られる。結果的に外側で狭いMDFが観測される。

# フィードバックの役割は？

## モデル結果

(ガス流出量)  $\sim 1.7 \times 10^{10} M_{\text{sun}}$

- 現在の円盤質量 ( $4 \times 10^{10} M_{\text{sun}}$ ) より少ない

(これまでに銀河系内で生成されたはずの重元素量)

～ (現在銀河系内に星、ガスとして残っている重元素量)

- 銀河系進化において大規模なガス流出はない
- 昨日の小麦さんの話と似てる？

(ガス流入量)  $\sim 6 \times 10^{10} M_{\text{sun}}$

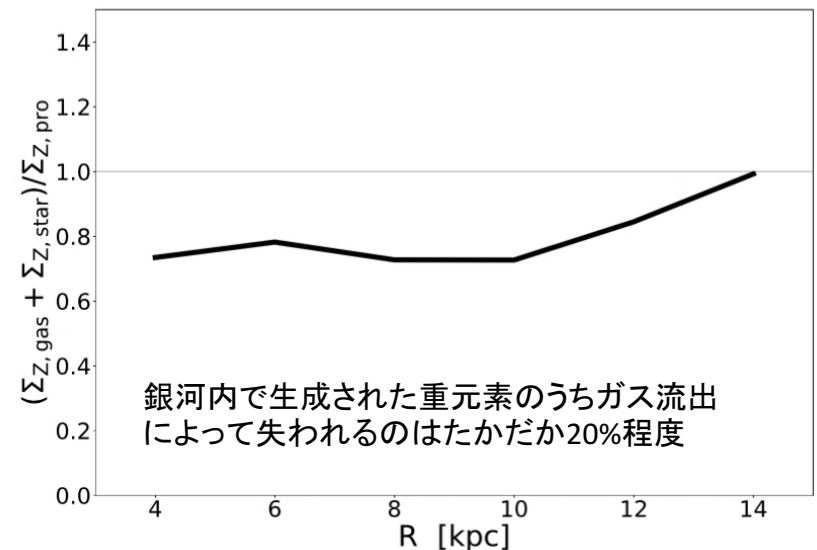
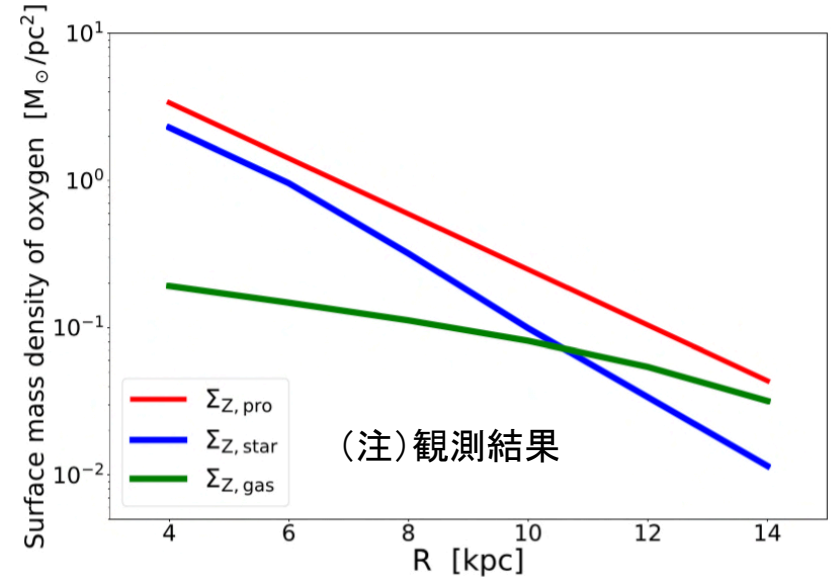
- ガス流出がほとんどないとすると(ガス流入量)  $\sim$  (現在の円盤質量) になるべき
- しかしこれは、 $f_b M_{\text{vir}} \sim 2 \times 10^{11} M_{\text{sun}}$  (理論的に流入可能な最大質量) よりかなり少ない
- そもそもガスが円盤領域まで落ちてこれない物理が必要

フィードバック過程は銀河からガスを抜いて星形成を止めるというよりは、銀河内ガスの円盤上への降着を阻害して星形成を抑制している？

(星形成によって生成された酸素量) = (イールド  $\times$  星質量)

(星として残っている酸素量) = (星の平均金属量  $\times$  星質量)

(ガスとして残っている酸素量) = (ガスの金属量  $\times$  ガス質量)



まとめ

# まとめ

- ✓ ガスの再降着過程を考慮した銀河円盤化学動力学進化モデルを用いて銀河系で観測される星、ガス、ISMのアバundance、そして円盤星の金属量分布の空間依存性の再現を行った。
- ✓ もっともよく観測を再現できるモデルを使って銀河系形成史とその背景にある物理について議論。
  1. (Re-accretion of metal-enriched gas) x (Inside-out disk formation) がMDF再現の鍵。円盤内側はmetal poorなガスから一気に作り、円盤外側はmetal richなガス(円盤内側から放出したガスの再降着を含む)からゆっくり作られる。
  2. フィードバック過程は銀河内ガスの円盤上への降着を阻害して星形成を抑制している？