

金属量勾配進化に基づく銀河系円盤構造 形成過程への制限

銀河進化研究会 国立天文台 2014/6/4

豊内大輔（東北大学 D1）
千葉柾司（東北大学）

1. イントロダクション
2. 恒星データベースの解析から得られる銀河系の金属量勾配進化
 - i. サンプルと金属量勾配
 - ii. 解析結果
3. 議論 & モデル計算結果の紹介
4. まとめと今後の展望

1. イントロダクション

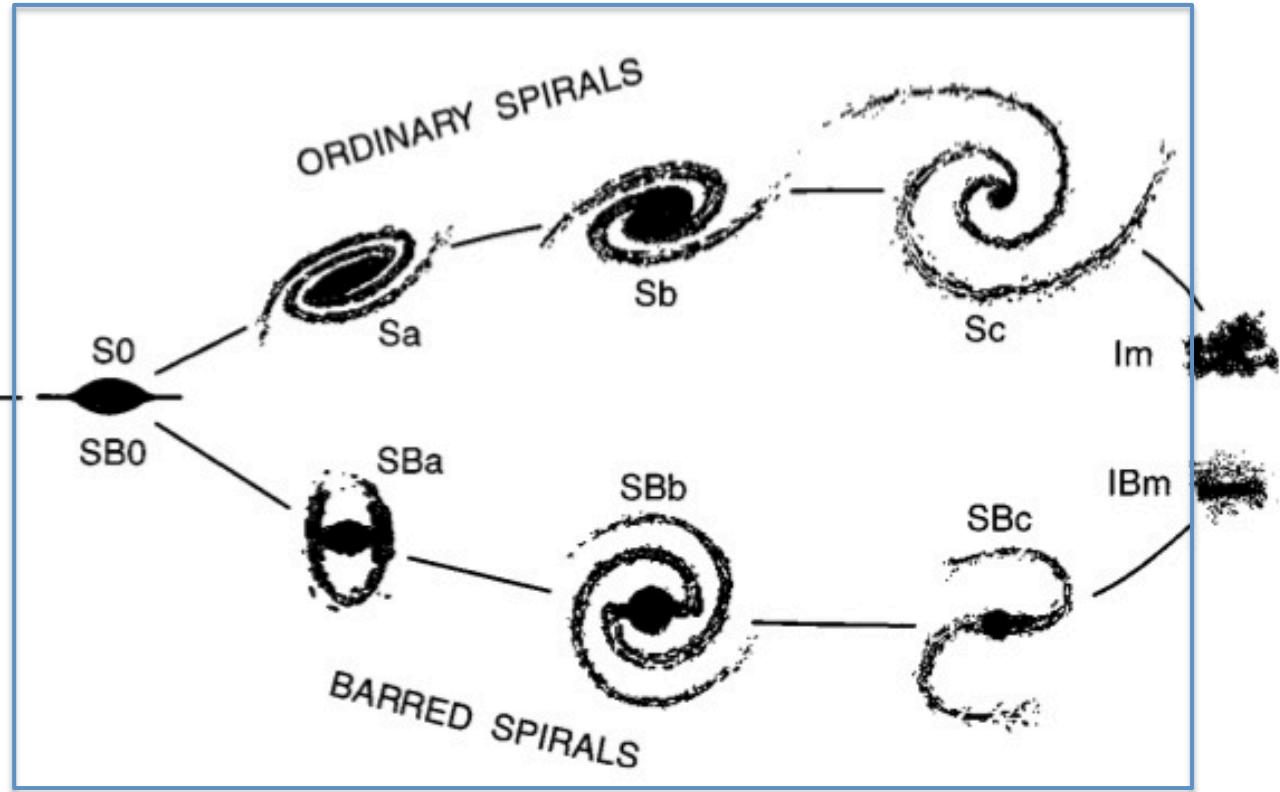
円盤銀河

ELLIPTICAL GALAXIES



E(b)4
Boxy

E(d)4
Disky



Kormendy & Bender 1996

Delgado-Serrano et al. 2010

- 近傍銀河の70%以上が円盤銀河 → 銀河形成史を学ぶ上で欠かせない存在

<円盤銀河形成における重要な要素>

1. ガス降着史

円盤上への原始ガスの供給(ガス降着)の歴史。いつ、どれだけのガス(→ホストハローの合体形成史)が円盤上のどこに(→降着するガスの角運動量分布)降り積もるか

2. radial flow

円盤面上で起きる動径方向のガスの流れ円盤の差動回転、クランプ、バー、スパイラルの存在によって発生する角運動量輸送(→実際に円盤構造の進化に影響力を持つか?)

3. 円盤形成前(ハロー形成後)に存在するガス(初期ガスハロー)の状態

4. outflow

星形成に伴う超新星爆発からのフィードバック。加熱されたガスが円盤の重力を振り切り脱出

理論モデルから制限がかけられる！？



円盤構造の形成史 $\Sigma_{\text{star}}(R,t)$ (スケールレンジス)

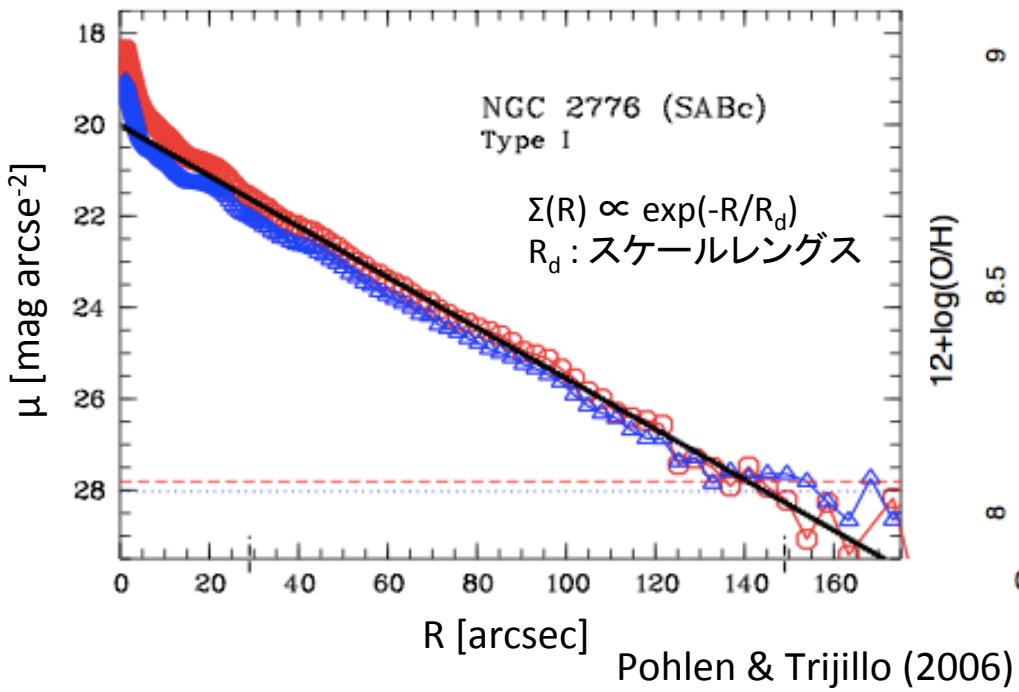
&

円盤構造の化学進化 $Z(R,t)$ (金属量勾配)

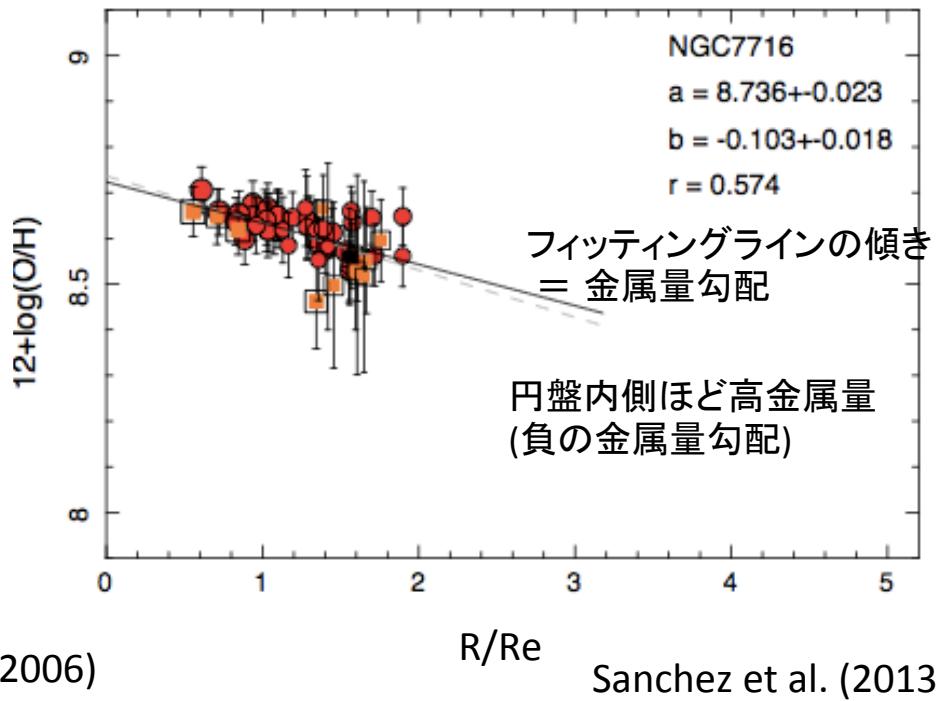
もし観測出来たなら…

系外銀河($z \sim 0$)の円盤構造と金属量勾配

円盤銀河の輝度プロファイル(星の分布)



金属量分布 (HII領域の観測)



系外銀河($z \sim 0$)の観測からは全世代の重ね合わせの密度プロファイルと
現在の金属量勾配しか分からず → 銀河の進化 ($\Sigma(R,t)$, $Z(R,t)$)を調べるには？

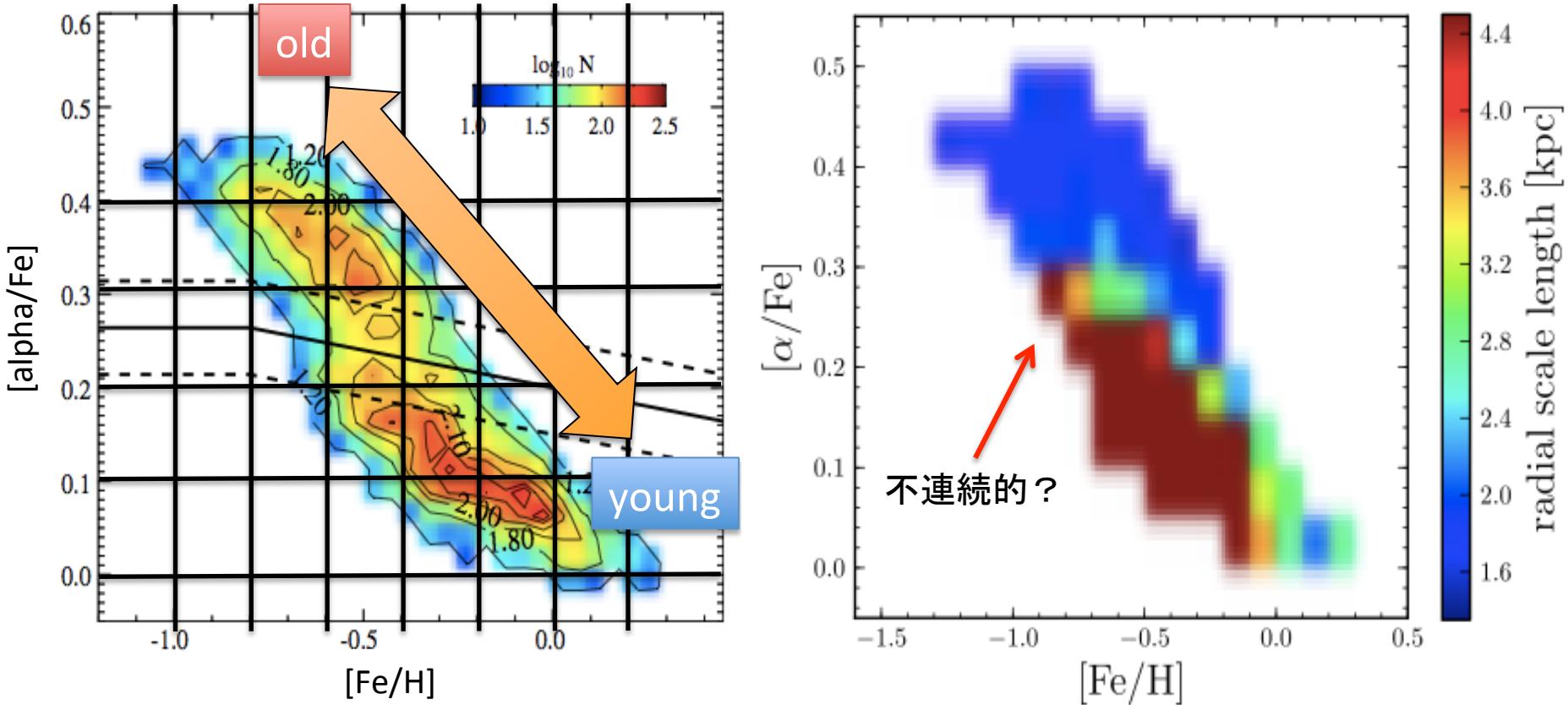
- 遠方の星形成銀河の観測。各時刻でスナップショットを比較。
- **銀河系を調べる！！** → 各世代のスケールレンジス、金属量勾配が分かる！！
→ ガス降着史やradial flowについて詳細に議論出来る！！

銀河系恒星円盤のスケールレンジス進化

■ Bovy et al. (2012) (SDSS sample)

星を $[\text{Fe}/\text{H}]$ - $[\alpha/\text{Fe}]$ 面上で格子状にグループ分け。各グループのスケールレンジスを推定。

※ $[\alpha/\text{Fe}]$: 金属汚染に対し Ia SNeからの寄与があるかに敏感 → 年齢の指標 ($[\alpha/\text{Fe}]$ 大きいほど古い)

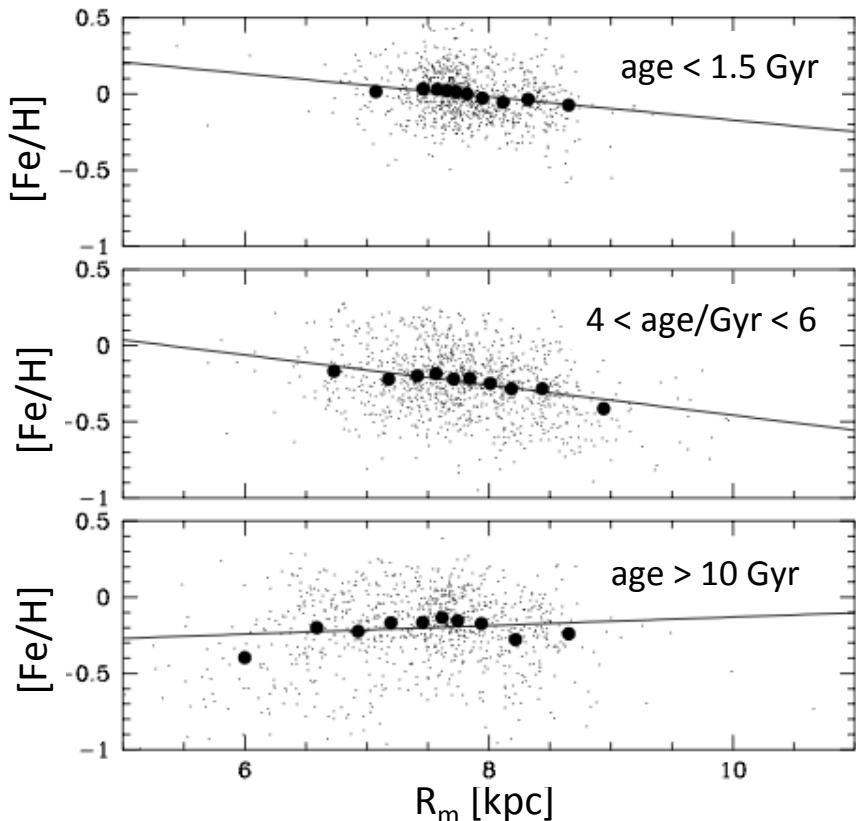


銀河系円盤のスケールレンジスは古い星ほど短く、若い星ほど長い (inside-out disk formation)

- thick disk ($[\alpha/\text{Fe}] > 0.2$) → $R_d \sim 1.8 \text{ kpc}$
- thin disk ($[\alpha/\text{Fe}] < 0.2$) → $R_d \sim 3.4 \text{ kpc}$ (Cheng et al. 2012)

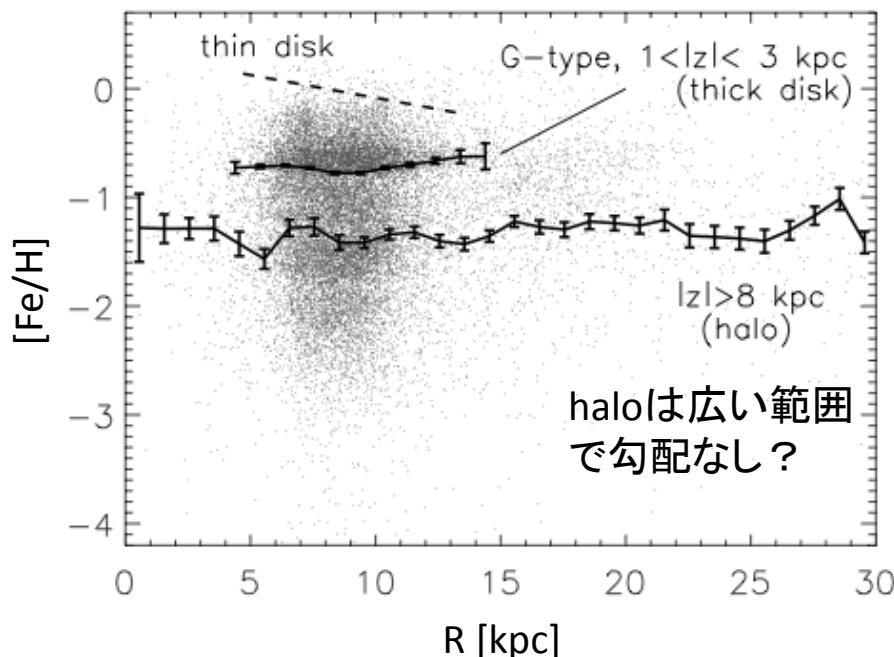
銀河系恒星円盤の金属量勾配進化

■ Nordstrom et al. (2004)



■ Allende Prieto et al. (2006)

銀河面からの高さ($|z|$)と金属量勾配の関係
($|z|$ が大きい所にいる星は古い可能性大)



銀河系円盤では

- 若い星(主にthin disk)は負の金属量勾配(円盤の内側ほど高金属量)
- 古い星(主にthick disk)は金属量勾配がない or 正の金属量勾配

…くらいまでは分かっている

本研究の目的

1. 銀河系円盤の金属量勾配を年齢、 $[\alpha/\text{Fe}]$ の関数として先行研究より詳しく調べる。
2. 銀河円盤化学進化モデルを用いて観測の金属量勾配進化を検証する。
(スケールレンジスの進化についての制限も考慮)
→ 銀河系のガス降着史や円盤内で起きるガスの再配置過程等への示唆を与える。

2. 恒星データベースの解析から得られる銀河系の金属量勾配進化

- i. サンプルと金属量勾配
- ii. 解析の結果と議論

銀河系円盤星のサンプル

ディスク星のサンプルは3つのカタログから抽出

- Sloan Digital Sky Survey (SDSS) sample (測光 + 分光)
- Geneva-Copenhagen Survey (GCS) sample(測光のみ)
- High-Accuracy Radial velocity Planetary Searcher (HARPS) sample(測光 + 分光)

	サンプル数	空間分布	age	[alpha/Fe]	σ_{age}	$\sigma_{[\text{alpha}/\text{Fe}]}$
SDSS	17405	$ z > 300 \text{ pc}$	×	○	×	< 0.1 dex
GCS	3718	$ z < 300 \text{ pc}$	○	△	< 50 %	?
HARPS	1047	$ z < 100 \text{ pc}$	×	○	×	< 0.03 dex

異なる3つのサンプルを用いることによって観測的バイアスや測定誤差に左右されない銀河系円盤における普遍的な性質を見つけ出すことが目標

金属量勾配の定義

銀河系内の研究で用いられる金属量勾配は主に2種類

1. 観測された半径 R_{obs} に対する勾配 → $\Delta[\text{Fe}/\text{H}]/\Delta R_{\text{obs}}$
2. 軌道半径 R_g (guiding radius)に対する勾配 → $\Delta[\text{Fe}/\text{H}]/\Delta R_g$

金属量勾配の定義

銀河系内の研究で用いられる金属量勾配は主に2種類

1. 観測された半径 R_{obs} に対する勾配 → $\Delta[\text{Fe}/\text{H}]/\Delta R_{\text{obs}}$
2. 軌道半径 R_g (guiding radius)に対する勾配 → $\Delta[\text{Fe}/\text{H}]/\Delta R_g$

金属量勾配の定義

R_g : ある角運動量 L_z で円軌道するとき銀河中心に対する重力と軌道運動による遠心力が釣り合う半径

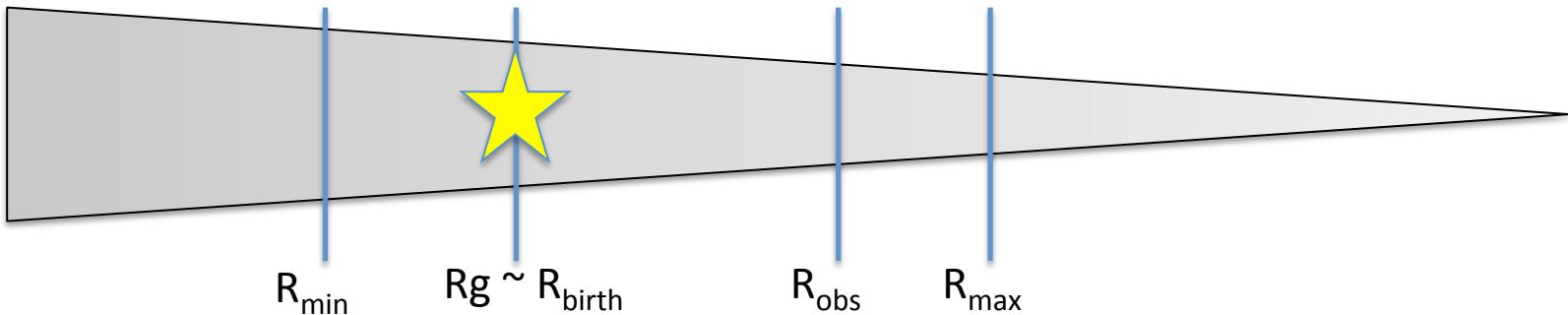
$$\left(\frac{\partial \phi}{\partial R} \right)_{R=R_g, |z|=0} = \frac{V_{\text{circ}}^2}{R_g} = \frac{L_z^2}{R_g^3}$$

V_{circ} : ポテンシャル、 R_g で決まり、ほぼ一定の値を示す ($\sim 220 \text{ km/s}$: MW)

→ 個々の星について L_z が観測から分かればポテンシャルを仮定することで計算出来る

- 生まれた直後の星は全てほぼ円軌道 $\rightarrow R_{\text{birth}} \sim R_g$

➤ 少しずつランダムエネルギーを獲得すると R_g を基準として動径方向に振動するようになる



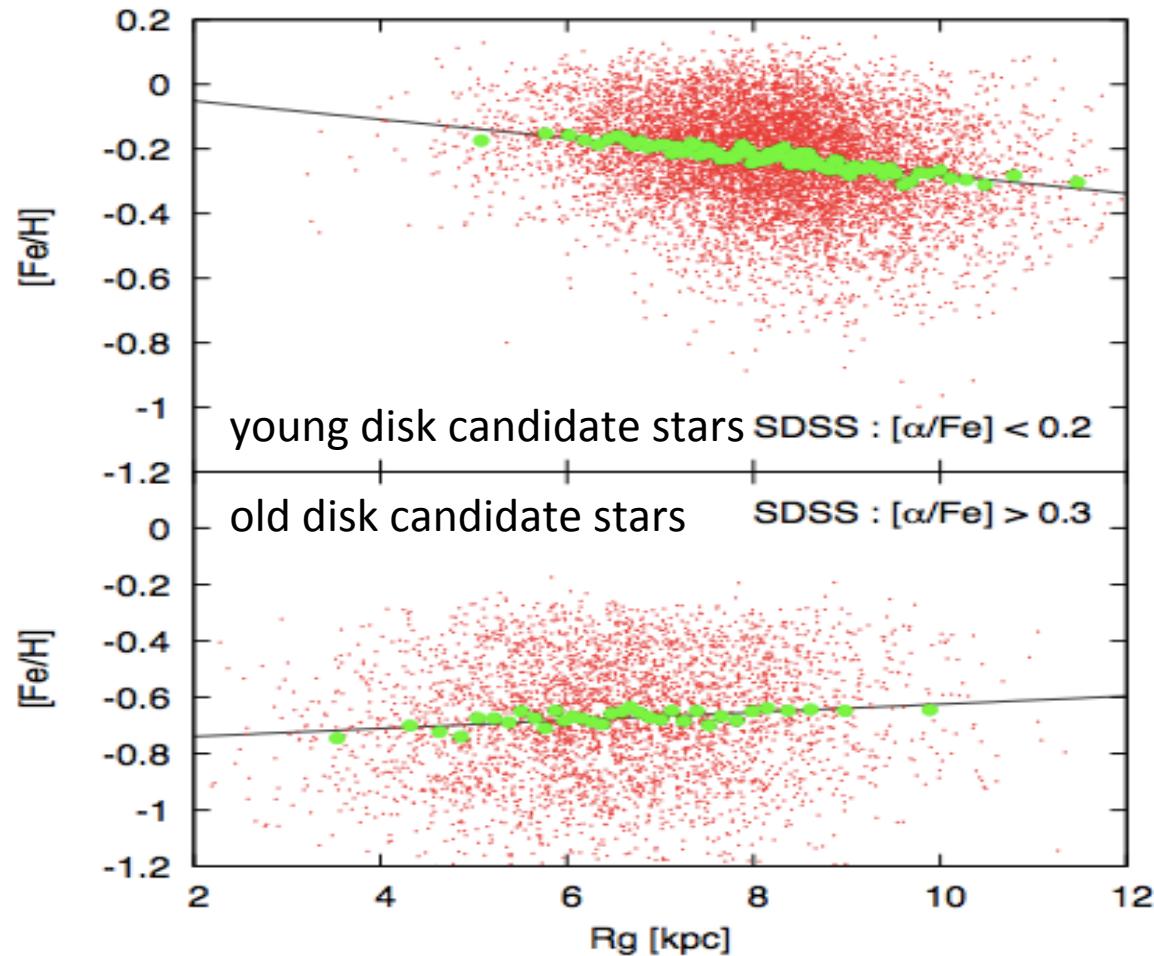
- 軸対称系で L_z は保存量 $\rightarrow R_g$ も保存

➤ R_{obs} より R_g の方が R_{birth} の指標になり得る $\rightarrow \Delta[\text{Fe}/\text{H}]/\Delta R_{\text{obs}}$ より $\Delta[\text{Fe}/\text{H}]/\Delta R_g$ の方が重要

2. 恒星データベースの解析から得られる銀河系の金属量勾配進化

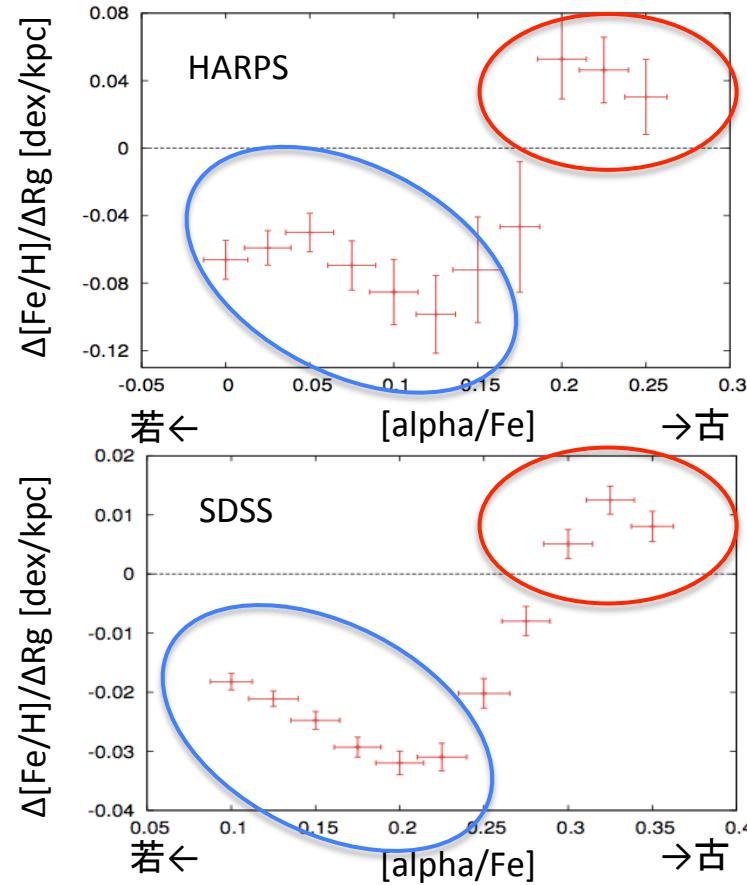
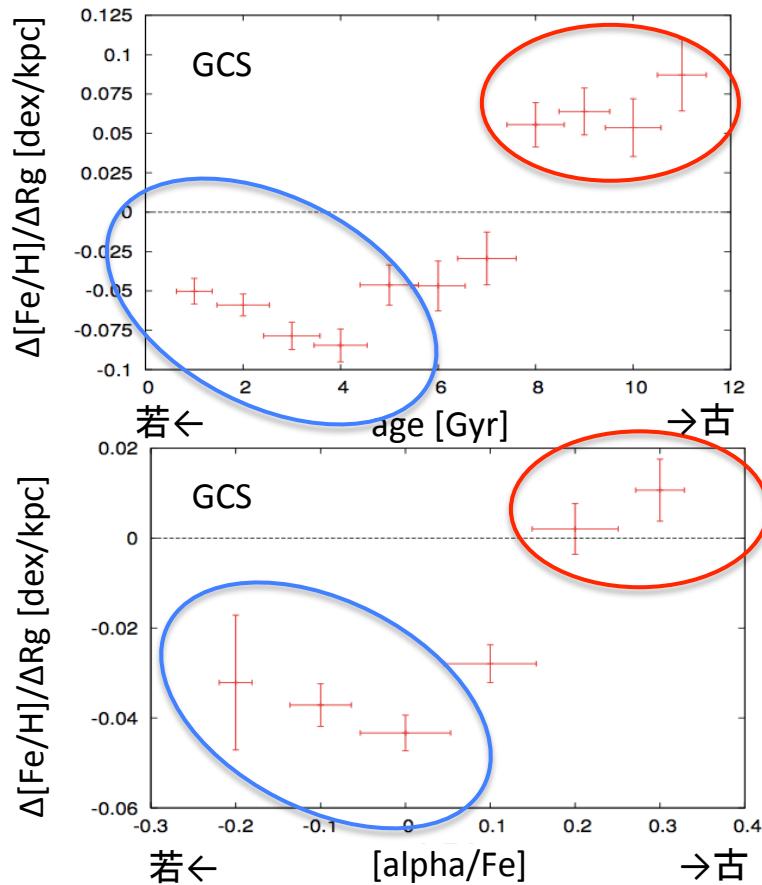
- i. サンプルと金属量勾配
- ii. 解析結果

Old diskとYoung disk star(SDSSサンプル)の $\Delta[\text{Fe}/\text{H}]/\Delta R_g$



Thin disk (young star) : $\Delta[\text{Fe}/\text{H}]/\Delta R_g < 0$
Thick disk (old star) : $\Delta[\text{Fe}/\text{H}]/\Delta R_g > 0$

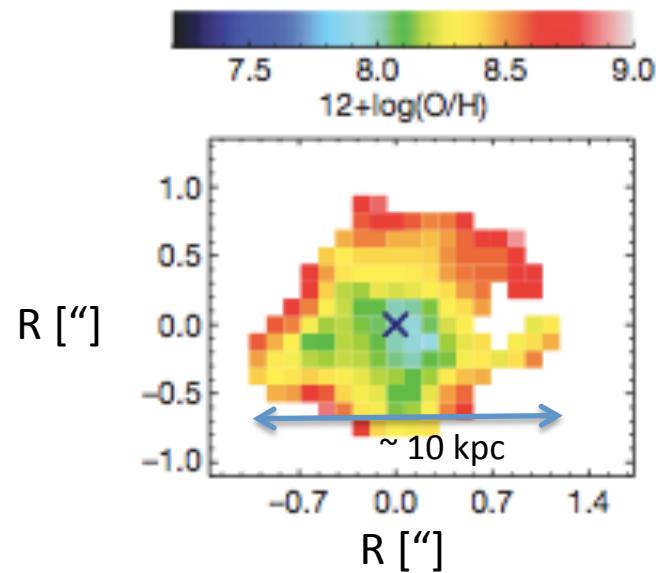
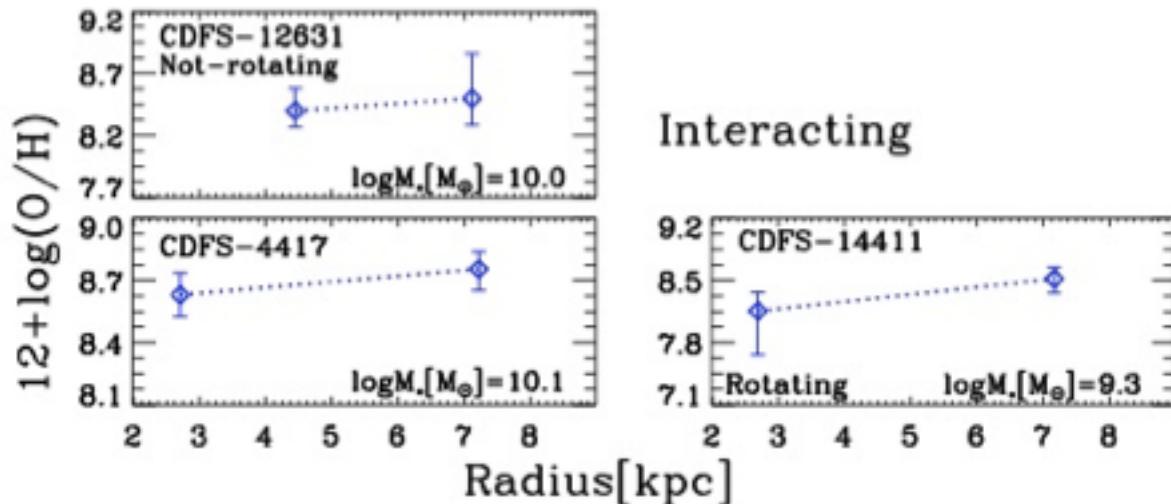
解析結果 : $\Delta[\text{Fe}/\text{H}]/\Delta Rg$ の age & [alpha/Fe] 依存性



1. 円盤形成初期($\text{age} > 8 \text{Gyr}$)の金属量勾配がpositive(円盤中心部の方が低金属量)。
2. 円盤形成後期($\text{age} < 8 \text{Gyr}$)はある時刻($\text{age} \sim 4 \text{Gyr}$)でもっとも強い負の勾配を示した後、時間とともに徐々にフラットになる。

円盤形成初期の $\Delta[\text{Fe}/\text{H}]/\Delta R_g > 0$ は現実的か？

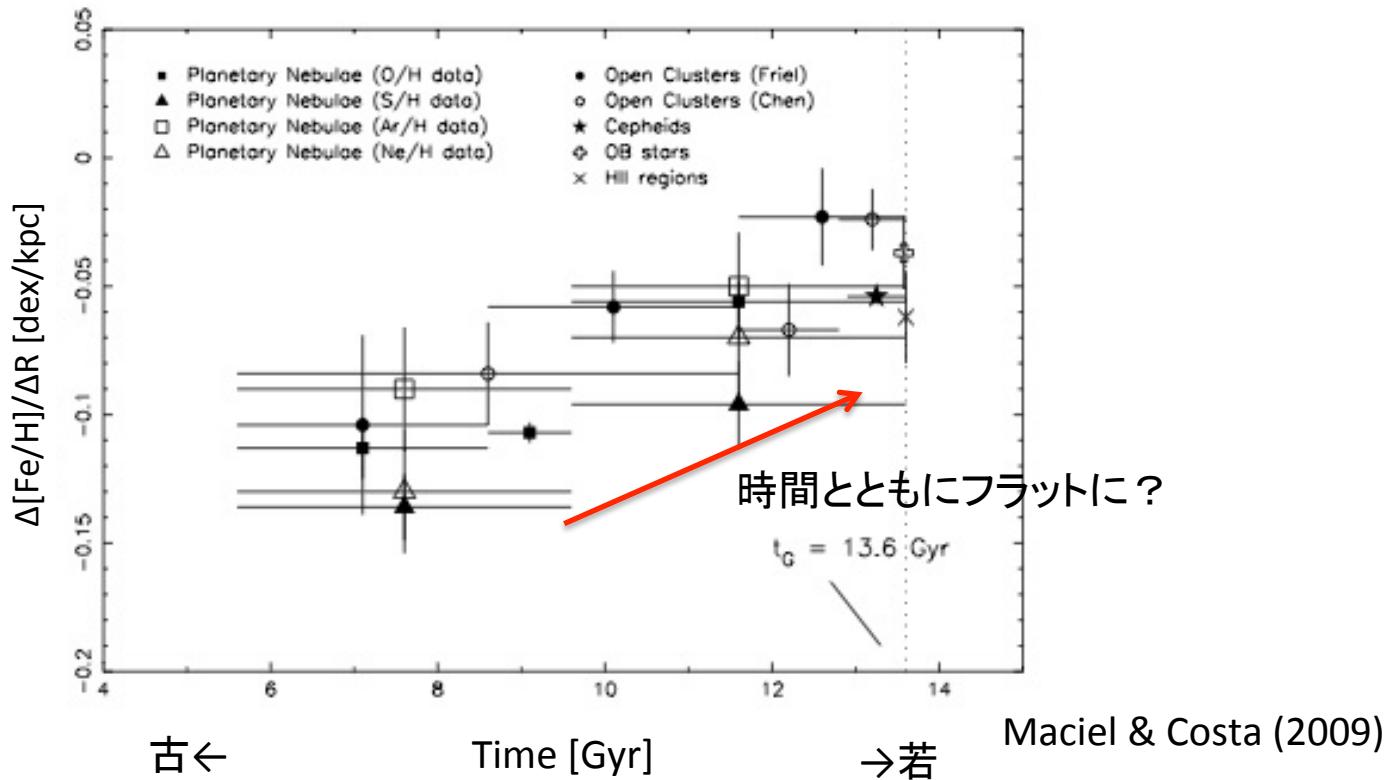
- Cresci et al. (2010) & Troncoso et al. (2013)
 - $z \sim 3$ (銀河系のThick diskの出来始め?)に存在する
10個の星形成銀河の金属量勾配は全てpositive。



high- z の観測によれば $\Delta[\text{Fe}/\text{H}]/\Delta R_g > 0$ は一般的

円盤形成後期の $\Delta[\text{Fe}/\text{H}]/\Delta R$ は時間とともにフラットに？

- Open Clusters (Friel+2002 & Chen+2003)やPlanetary Nebulae (e.g. Maciel+2003)の観測から得られた金属量勾配の年齢依存性



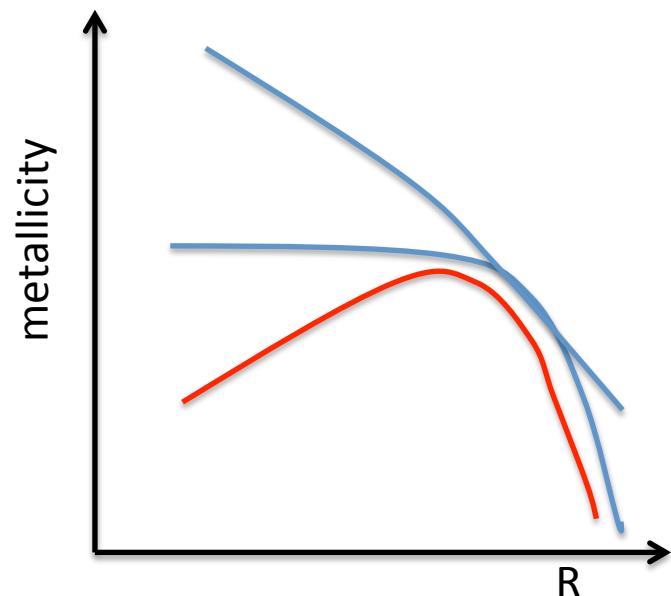
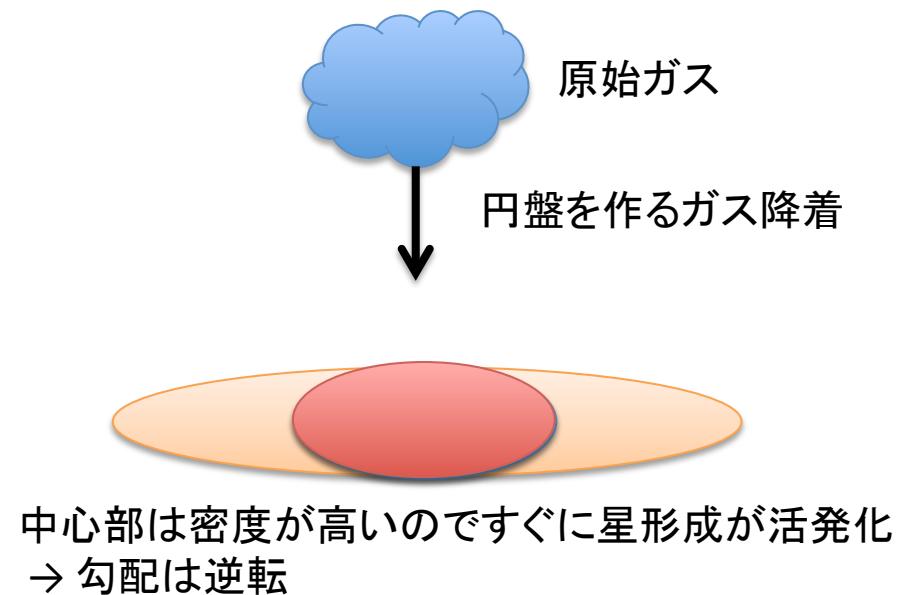
他のトレイサーを用いた結果とは一致。

※ただし上図の結果はサンプル数が少なく、個々の天体の年齢の決定精度も悪いので注意

3. 議論 & モデル計算結果の紹介

円盤形成初期における $\Delta[\text{Fe}/\text{H}]/\Delta R_g > 0$ の起源

- いくつかの銀河円盤化学進化モデルでは $\Delta[\text{Fe}/\text{H}]/\Delta R_g > 0$ が得られている (e.g. Chiappini et al. 2001)。
 - 円盤を形成するガス降着の前にハロー形成の後で残ったガスハローが存在。
 - 円盤を形成するガス降着はガスハローより中心集中度が大きく、一時的に円盤内縁部の金属量を薄める。



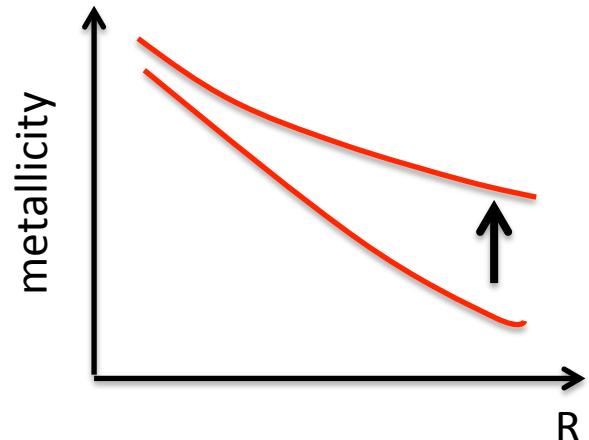
円盤形成後期の $\Delta[\text{Fe}/\text{H}]/\Delta R_g$ の時間進化の起源

円盤内外での金属量差が時間とともに減少 → “Inside-out”な円盤進化

➤ ガス降着のスケールレンジス(角運動量分布)の時間変化

- 円盤形成初期の円盤の外側にはガスはあまり降着しない
→ Thick disk形成期に対応
- 円盤形成後期になると外側にも多くのガスが降着するようになる
→ Thin disk形成期に対応

➤ virial massの増加に伴うcold accretion modeからhot accretion modeへの
転換がきっかけ？



モデル計算結果の紹介

以上の議論に基づいたモデル計算を行うと…

<ガス降着>

$$I(t, R) \propto \exp\left(-\frac{R}{h_R} - \frac{t}{\tau}\right)$$

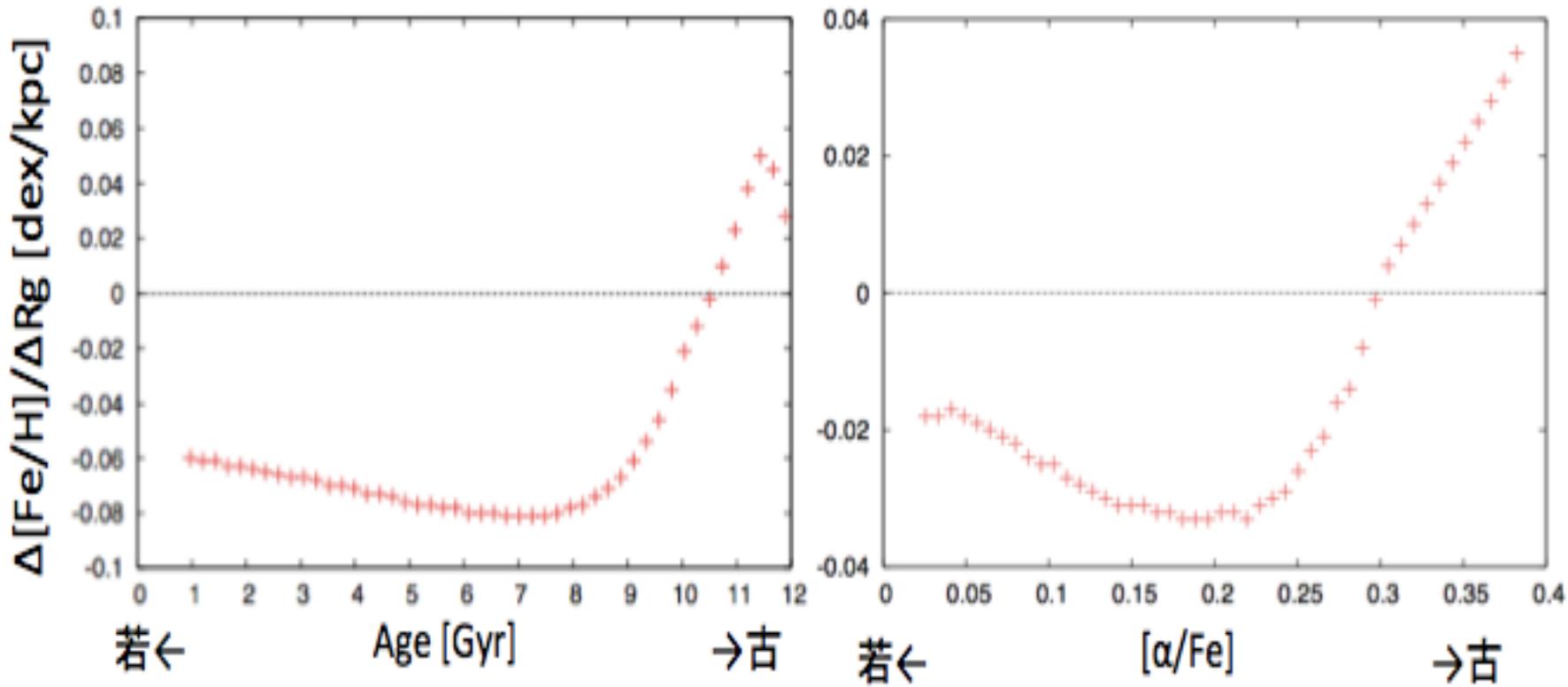
<初期状態: メタルプアーガスハロー>

- 密度分布は truncated isothermal sphere
- 化学組成は銀河系の中でもメタルリッチなハロー星から $[Fe/H] = -1.0$ 、 $[O/Fe] = 0.4$ とし、金属量勾配はないと仮定 (Allende Prieto et al. 2006)

h_R : ガス降着のスケール長

τ : ガス降着のタイムスケール

このモデルでは最初の2Gyrは $h_R = 1.5\text{kpc}$ 、以後は 4kpc で降着させた場合を考えた。



…観測を概ね再現可能

4. まとめと今後の展望

まとめ

- 円盤形成初期($\text{age} > 8 \text{ Gyr}$ 、 $[\text{alpha}/\text{Fe}] > 0.2$) $\rightarrow \Delta[\text{Fe}/\text{H}]/\Delta R_g > 0$
 - high-zの観測によれば不自然ではない
 - 円盤を形成するガス降着前に恒星ハローを形成後に残ったガスハローがあれば説明可能
- 円盤形成後期($\text{age} < 8 \text{ Gyr}$ 、 $[\text{alpha}/\text{Fe}] < 0.2$) $\rightarrow \Delta[\text{Fe}/\text{H}]/\Delta R_g < 0$
- 円盤形成後期は時間が経つ($[\text{alpha}/\text{Fe}]$ が下がる)につれ金属量勾配はフラットになる
 - inside-out的な構造形成
 - virial massの増加に伴うcold accretion modeからhot accretion modeへの転換がきっかけで起こる降着するガスの角運動量分布の時間変化が要因？

今後の展望

2020年代はM31に注目！！

- 現在観測が行われているGAIA(10kpc以内の三角視差 & 50kpc以内の固有運動)、GAIA-ESO(可視高分散分光)、APOGEE(赤外高分散分光)により約10万個の銀河系円盤星に関する位置・速度+化学組成が得られ銀河系円盤に関する研究はある程度一区切り…
- M31はinclination ~ 77°で視線速度がほぼ軌道回転速度に対応。よって各円盤星のRg($\sim R_{\text{obs}} * V_{\text{los}} / V_{\text{circ}}$)が算出可能で、分光して[Fe/H]、[alpha/Fe]が分かれれば銀河系同様に金属量勾配の時間進化が議論出来る。(ただしM31の星は巨星でも $V > 22 \text{ mag}$)
→ 普遍的な円盤銀河形成史に関する議論を行う。
- TMT(2023?~)の第一期装置であるWFOS/MOBIEによる観測
 - ✓ 広視野、可視、多天体分光器
 - ✓ 視野: $8.3 \times 3 \text{ arcmin}^2$
 - ✓ $R \sim 1000-8000$

