

APOGEE Red-Clump star の解析 から明らかにになった 銀河系円盤の化学動力学進化

第3回銀河進化研究会

2016/6/1

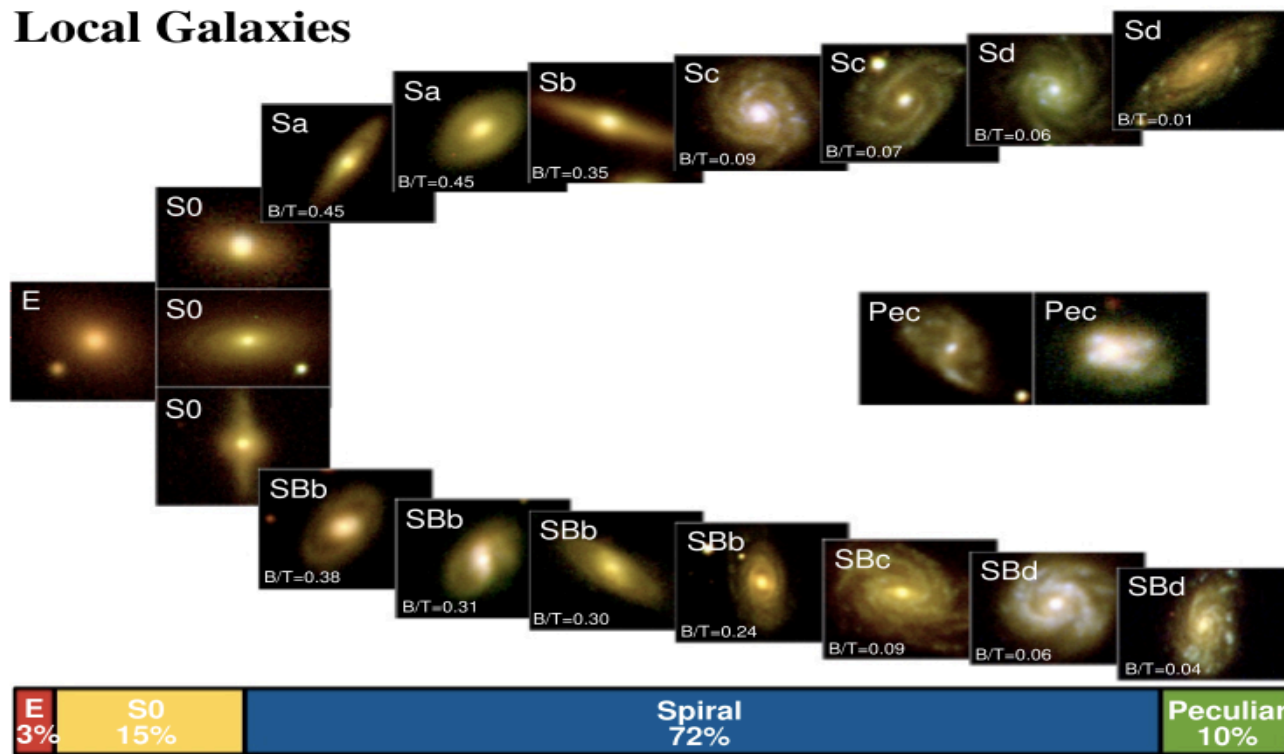
豊内大輔、千葉 柊司（東北大学）



TOHOKU
UNIVERSITY

イントロダクション

天の川銀河を研究する意義



Delgado-Serrano et al. (2010)

- 宇宙に存在する銀河の**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**
- 天の川銀河も立派な円盤銀河
 - 個々の円盤星について位置、運動、大気組成、年齢を観測出来る唯一の円盤銀河
 - **銀河形成理論を検証する最良の場**

これまでの銀河系内サーベイ

これまでの主要な銀河系内サーベイ

1990年代

- Edvardsson et al. (1993)、Hipparcos

2000年代

- Geneva-Copenhagen survey、SDSS/SEGUE、RAVE

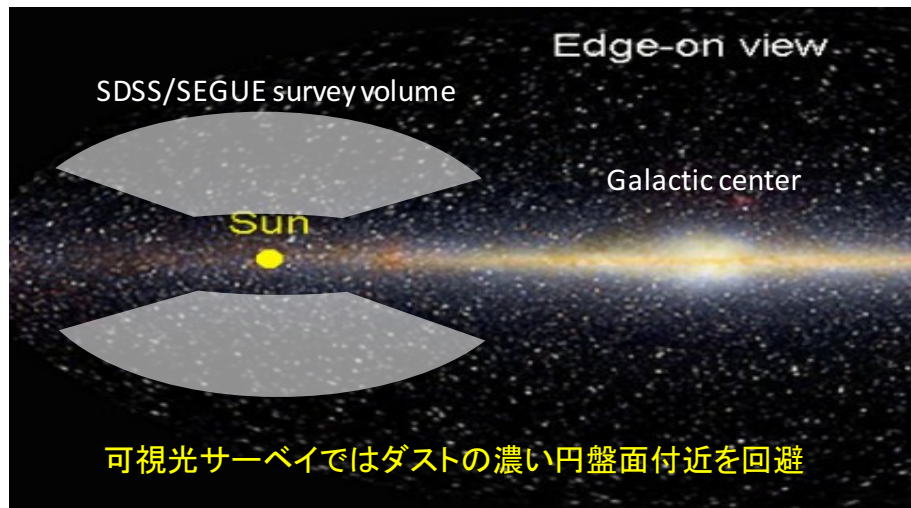
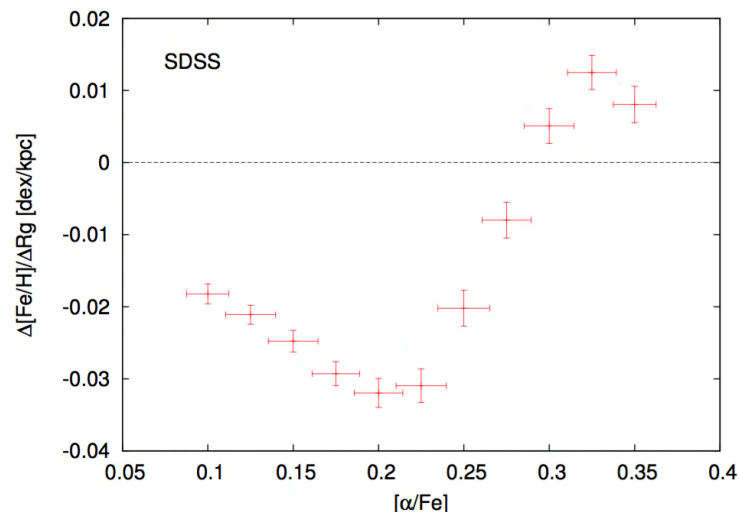
2010年代前半

- HARPS (視線速度法による系外惑星探査)

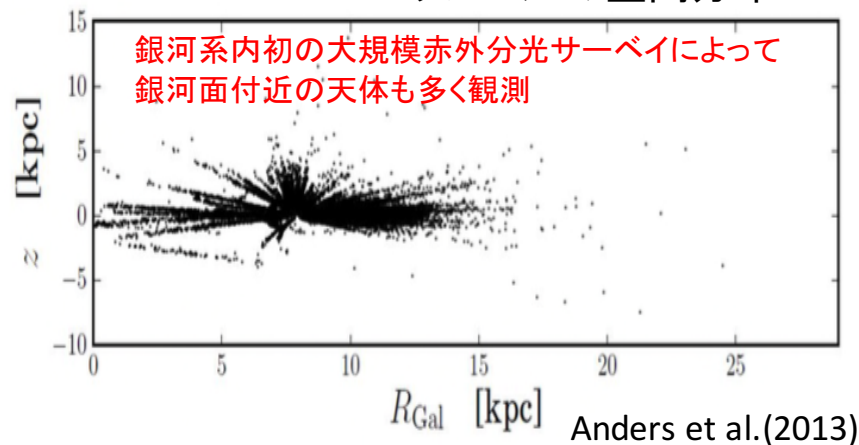
現在

- GAIA、GAIA-ESO、**APOGEE**

円盤星金属量勾配の時間進化
(SDSS/SEGUE, Toyouchi+2014)



APOGEE-1st DRサンプルの空間分布



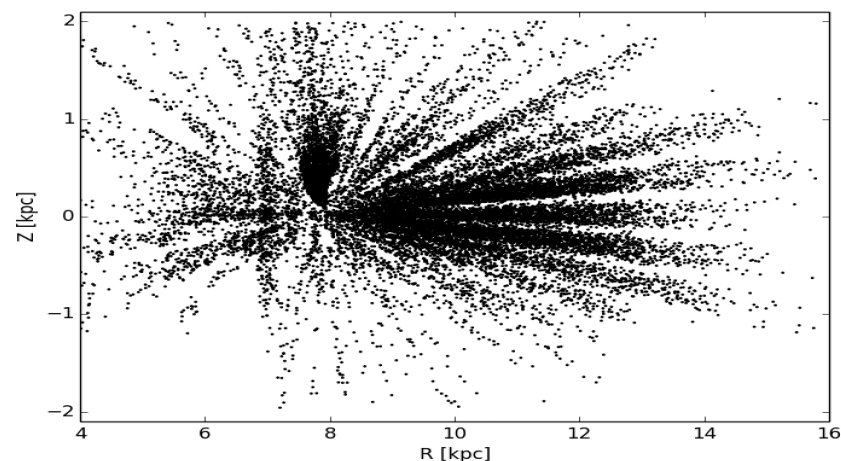
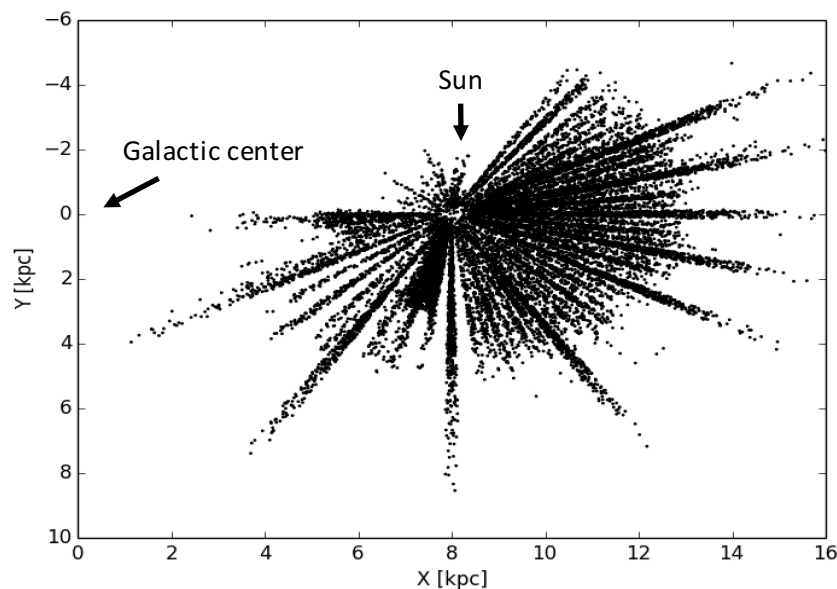
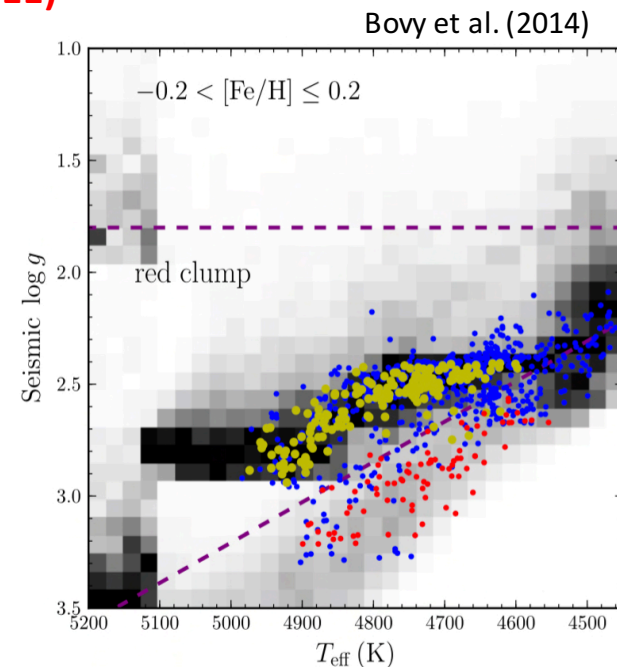
APOGEE Red-Clump (RC) star サンプル

The Apache Point Observatory Galactic Evolution Experiment (APOGEE)

- 近赤外域 ($\lambda = 1.51\text{--}1.69\ \mu\text{m}$) & 高分解能 ($R \sim 22,500$) の分光サーベイ
- $R = 2\text{--}16\ \text{kpc}$ にわたっておよそ10万個の赤色巨星を観測
- $\sigma_{\log g} \sim 0.2\ \text{dex}$ 、 $\sigma_{T_{\text{eff}}} \sim 50\text{K}$ 、 $\sigma_{[\text{Fe}/\text{H}]} \sim 0.05\ \text{dex}$ 、 $\sigma_{v_{\text{los}}} < 1\ \text{km/s}$ (SDSS/SEGUEの数 $\sim$ 十倍の精度)

Red-Clump star サンプル (Bovy et al. 2014)

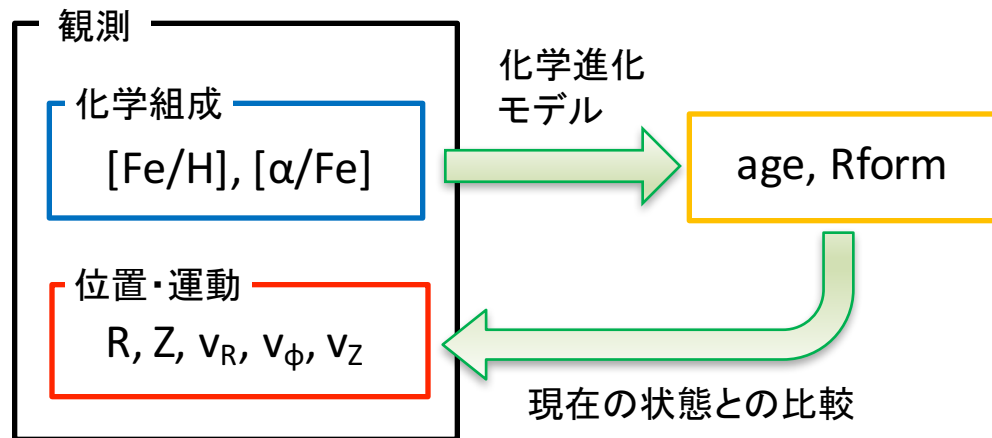
- $\sigma_{\text{distance}/\text{distance}} \sim 5\text{--}10\%$
- 恒星進化モデルに基づき $\log g$, T_{eff} , $[\text{Fe}/\text{H}]$ を使って約2万RCsを抽出



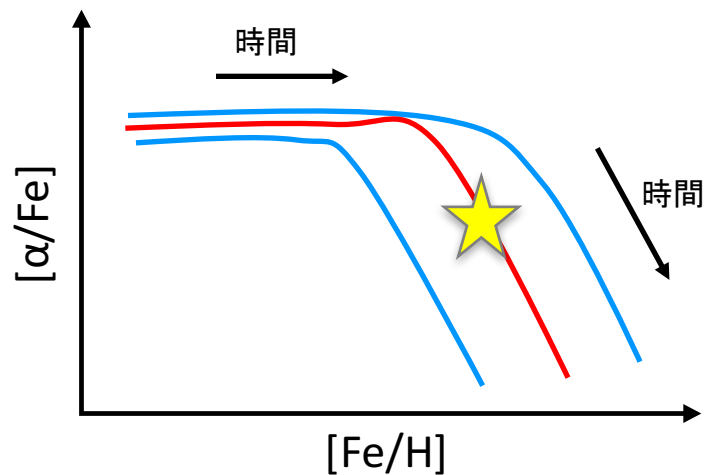
研究手法

研究目的・手法

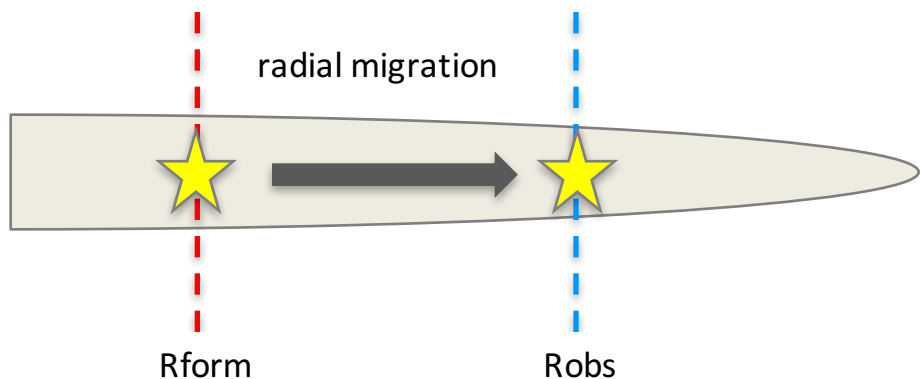
ひとつひとつの星がいつどこで生まれたのか？



➤ radial migration & 力学進化を議論する



- 半径ごとに星形成史 & 化学進化は異なる
- 化学組成は生まれてから変化しない



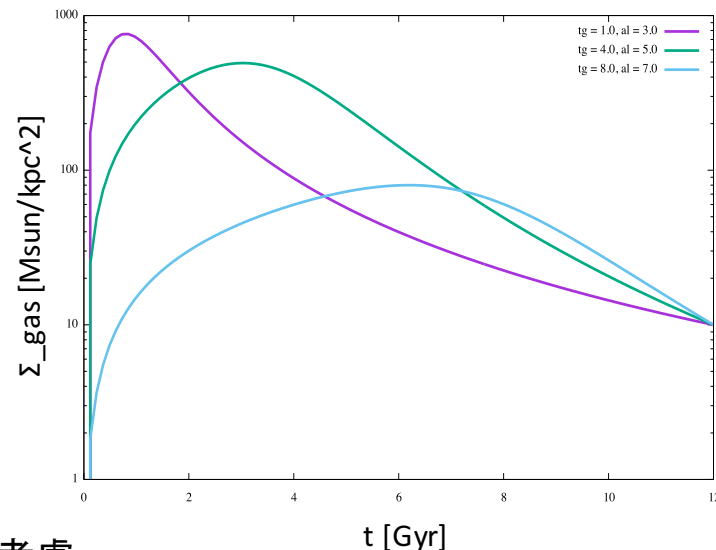
位置・運動は生まれてから大きく変化するかもしれない

化学進化モデル

銀河系の現在の星、ガス、[O/H]、[Fe/H]の空間分布を正しく再現することができる化学進化モデルを用意する

- 円盤を2-14 kpcまで幅 $\Delta R = 1$ 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
- i 番目の円環のガス密度の時間進化を以下の関数型で与える
 - $t_{g,i}$, α_i の組み合わせによって様々なガス密度の時間変化を表しながら、 $t = t_p$ で必ず現在観測されるガス密度になる

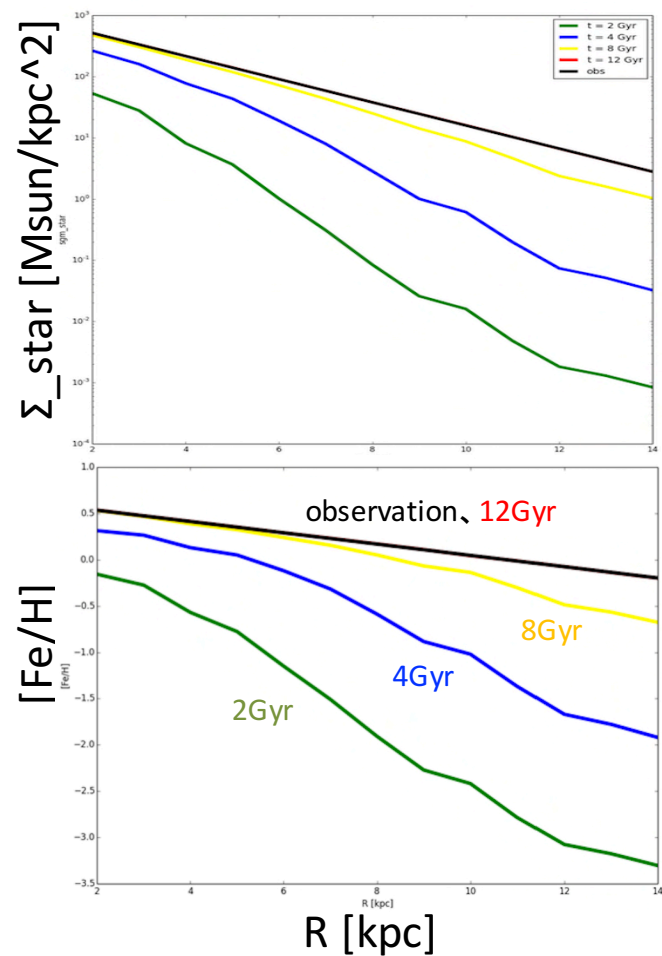
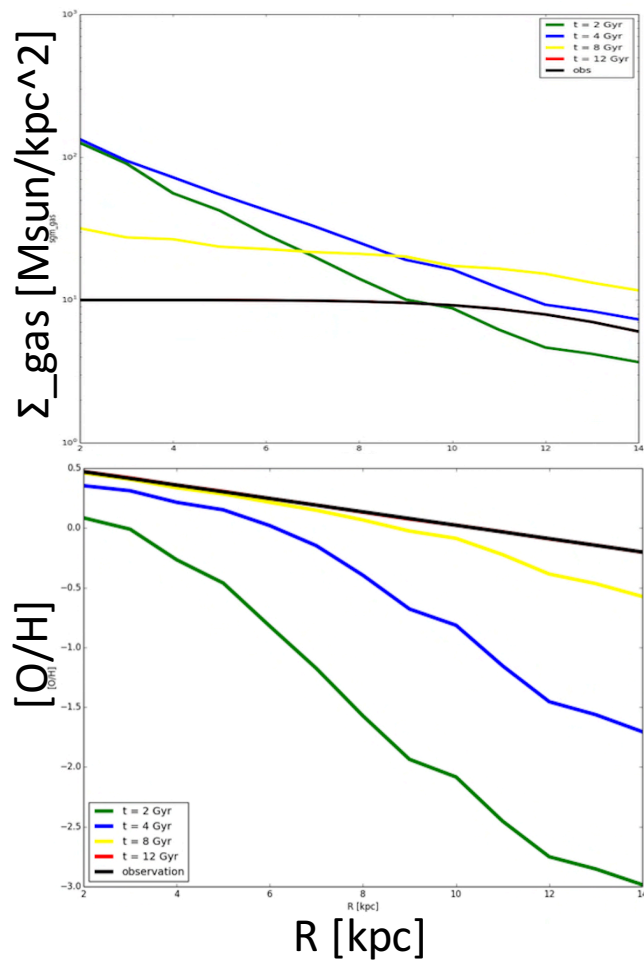
$$\Sigma_g(t, R_i) = \Sigma_{g,obs}(R_i) \left(\frac{t}{t_p} \right)^{\frac{1 + (t_p/t_{g,i})^{\alpha_i}}{1 + (t/t_{g,i})^{\alpha_i}}}$$



- $SFR \propto \Sigma_{H_2} (\Sigma_{star}, \Sigma_{gas})$ (Blitz & Rosolowsky 2006)
- outflow rate = Λ_i SFR
- inflowは自動的に考慮される
- モデルではO, Feの進化だけ考え、元素合成はSN Ia, IIのみ考慮
- **$t_{g,i}$, α_i , Λ_i** の3つのパラメータで i 番目の円環内の星・ガス・重元素量の進化を記述する
 - 観測される $R = R_i$ での星質量密度、[O/H]、[Fe/H]を最もよく再現できる3つのパラメータの組を最尤法で探す

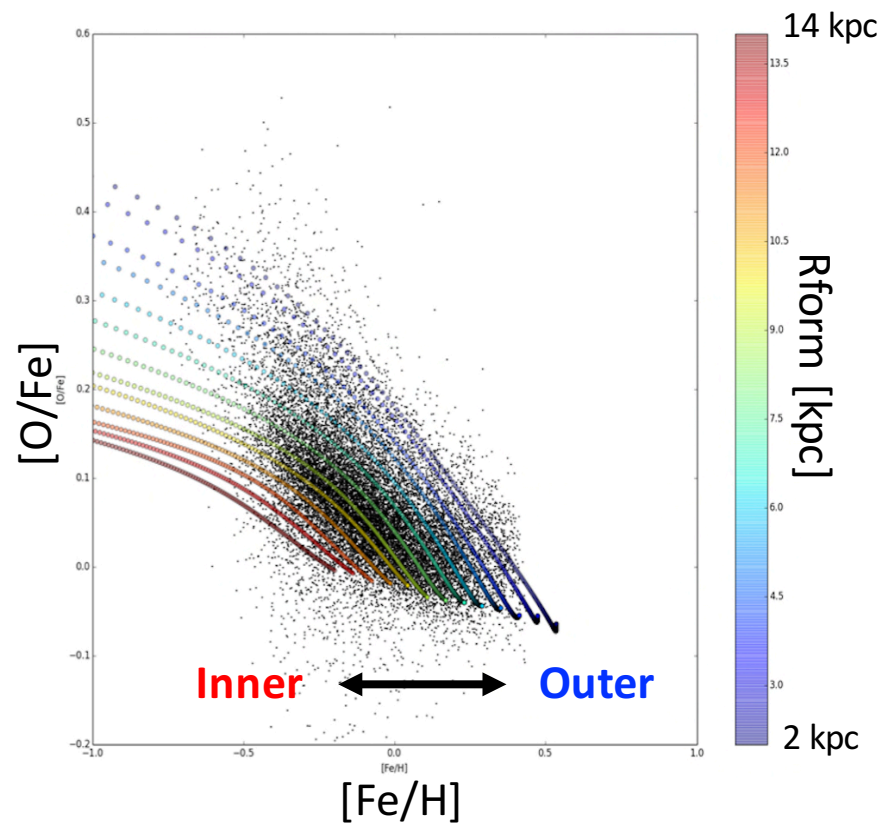
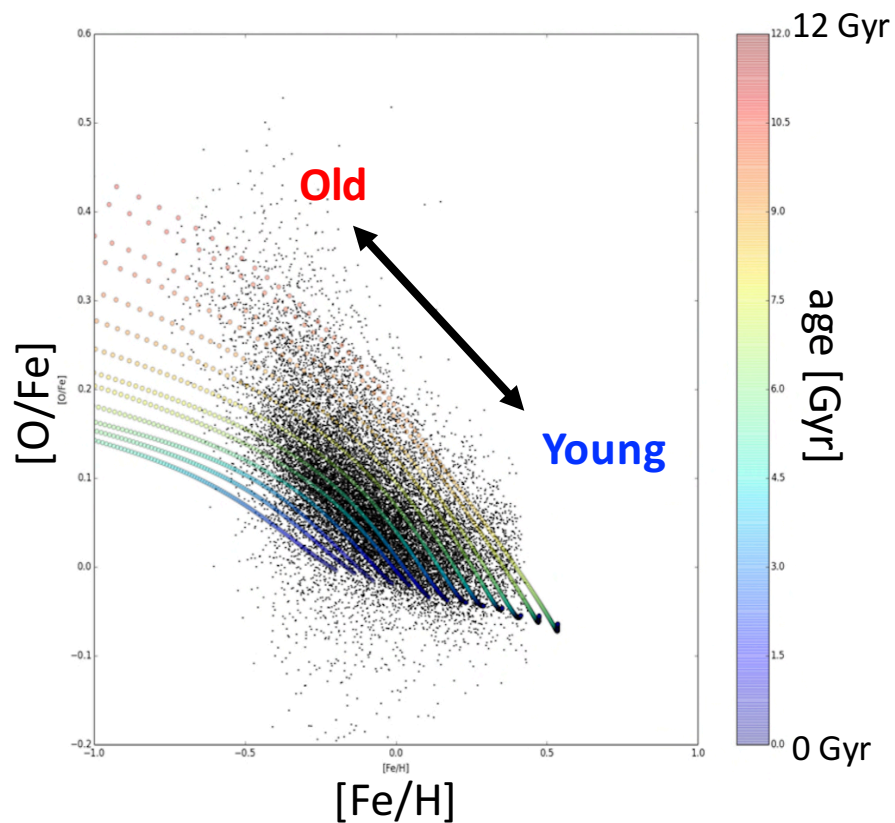
化学進化モデル

モデル計算結果



化学進化モデル

モデル計算結果



黒点はAPOGEE-RCサンプル

[O/H] & [Fe/H] $\Leftrightarrow$ age & Rform

化学進化モデルの結果は離散的 ($\Delta R = 1$ kpc、 $\Delta t = 50$ Myr) なので扱いやすくするため、モデル計算で得られた [O/H]、[Fe/H] を以下のように age, Rform の多項式でフィット

$$[O/H](age, R_{\text{form}}) = \sum_{i=0}^N a_i(age) R_{\text{form}}^i.$$

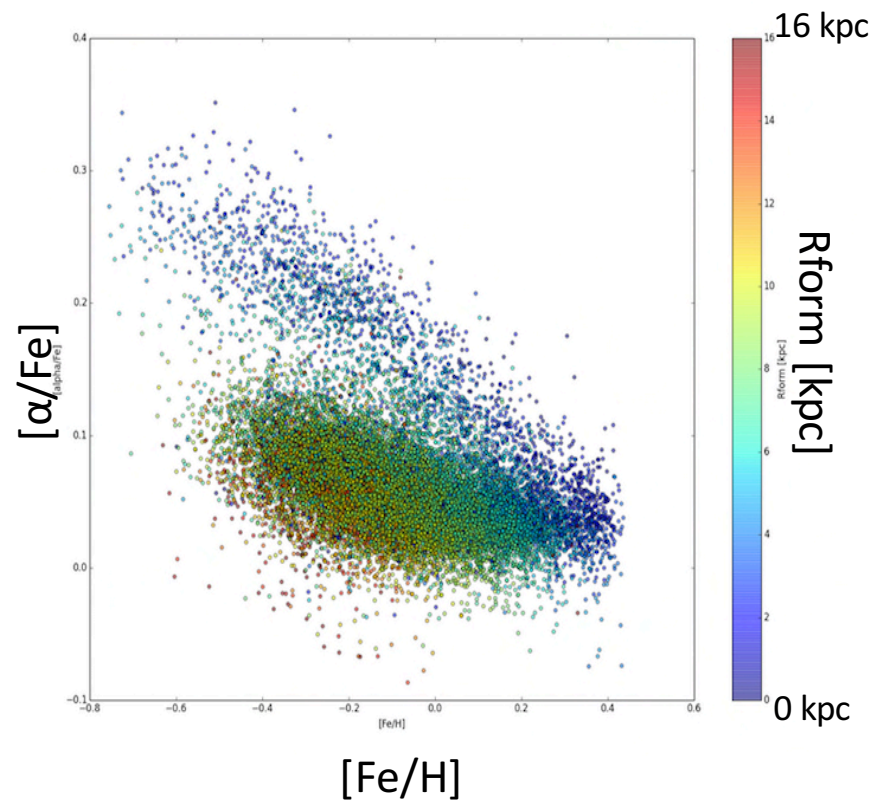
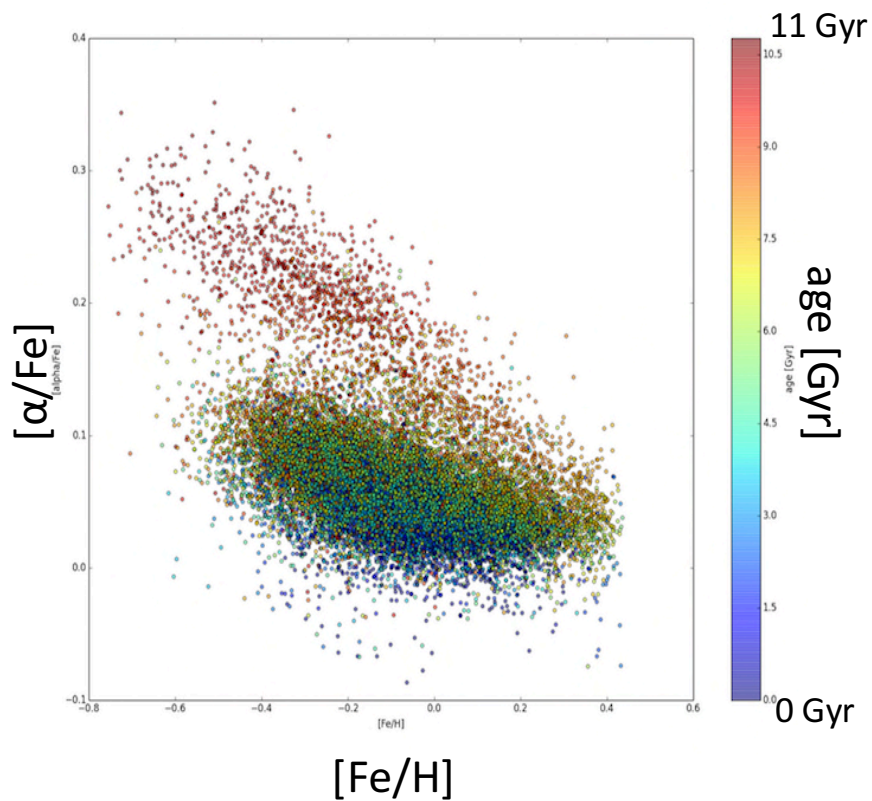
$$a_i(age) = \sum_{j=0}^N b_j age^j.$$

$$[Fe/H](age, R_{\text{form}}) = \sum_{i=0}^N c_i(age) R_{\text{form}}^i.$$

$$c_i(age) = \sum_{j=0}^N d_j age^j.$$

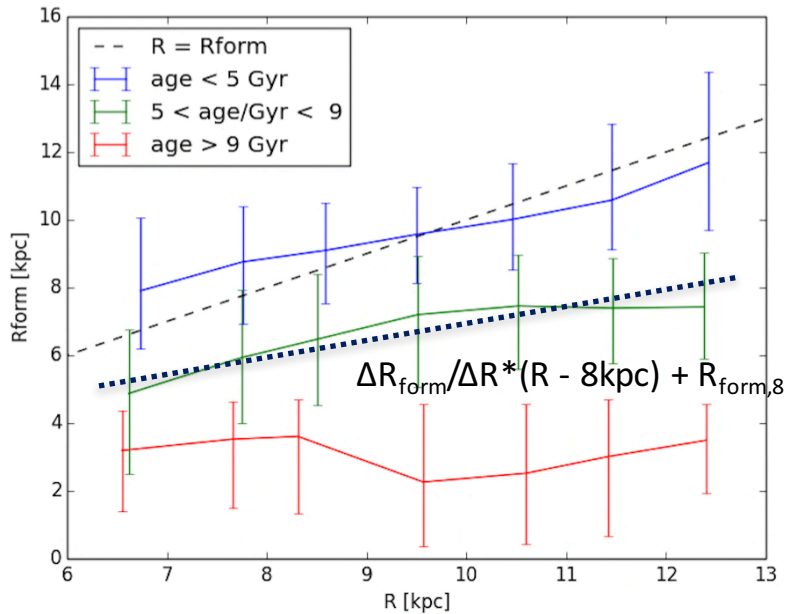
各APOGEE-RC星について [O/H]、[Fe/H] を上式に代入することで、age、Rform を割り当てる

$[\text{O}/\text{H}]$ & $[\text{Fe}/\text{H}] \Leftrightarrow \text{age} \ \& \ R_{\text{form}}$

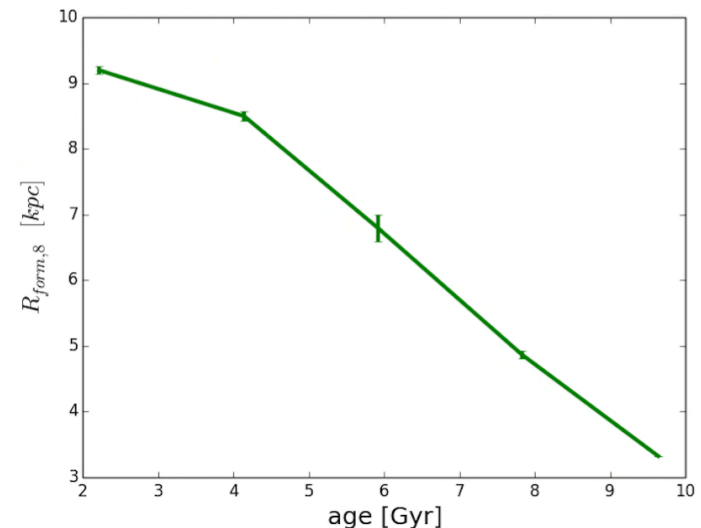
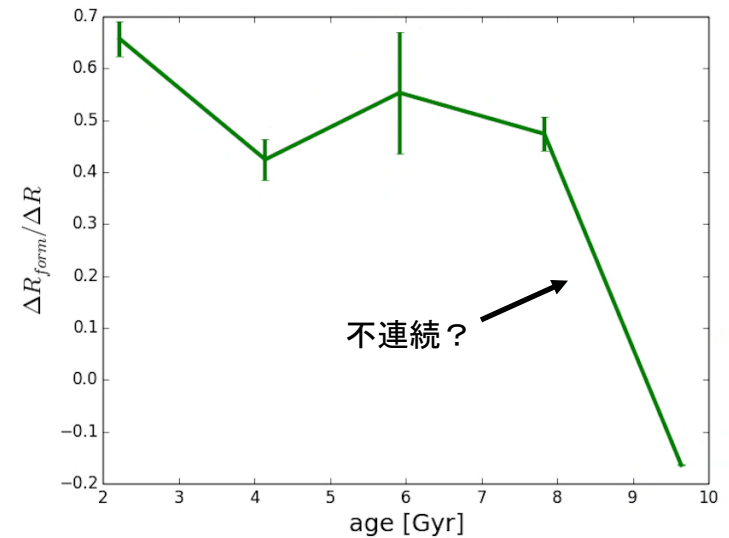


解析結果

Rform vs R and age



- 若い星は生まれた半径と現在の半径が概ね一致するが、古い星ほどより内側で生まれ外側に移動してきている。
- $\Delta R_{\text{form}} / \Delta R$ が $\text{age} \sim 9$ Gyr で不連続
 - $\text{age} \sim 9$ Gyr 付近で radial migration の性質が大きく変化している



視線速度分布を用いた力学推定

現在、個々のAPOGEE-RCサンプルについて正確な運動情報は得られていない。
しかし、視線速度分布を解析することで恒星系としての平均速度、速度分散は推定できる。

円盤星の3次元速度分布を3軸ガウシアン分布で仮定

$$f(v_R, v_\phi, v_z; R, z) = \frac{1}{(2\pi)^{3/2} \sigma_R \sigma_\phi \sigma_z} \exp \left[-\frac{(v_R - \overline{v_R})^2}{2\sigma_R^2} - \frac{(v_\phi - \overline{v_\phi})^2}{2\sigma_\phi^2} - \frac{(v_z - \overline{v_z})^2}{2\sigma_z^2} \right].$$

このとき視線速度分布は以下のような1軸ガウシアン分布で記述される

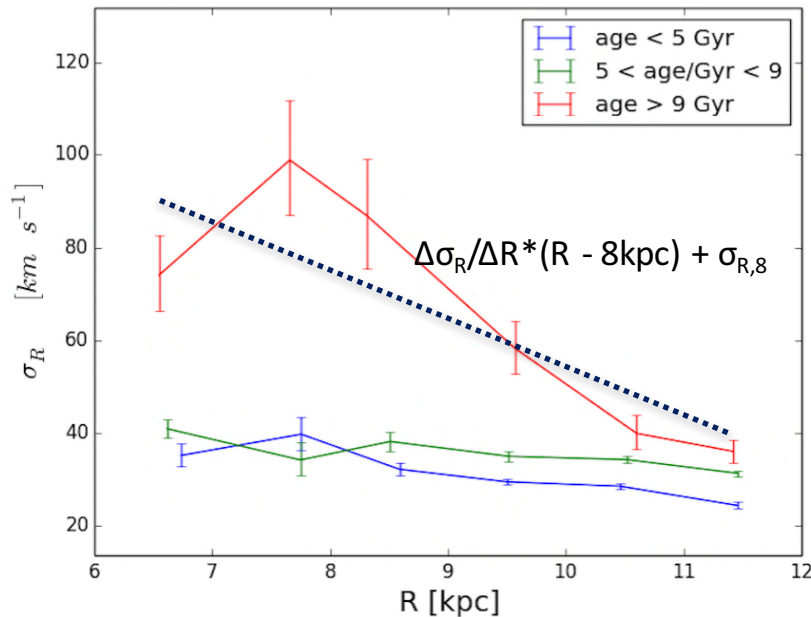
$$f(v_{\text{los}}; l, b, \phi) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_{\text{los}}} \exp \left[-\frac{(v_{\text{los}} - \overline{v_{\text{los}}})^2}{2\sigma_{\text{los}}^2} \right]$$

$$\overline{v_{\text{los}}} = -\overline{v_R} \cos b \cos(l + \phi) + \overline{v_\phi} \cos b \sin(l + \phi) + \overline{v_z} \sin b.$$

$$\sigma_{\text{los}}^2 = \sigma_R^2 \cos^2 b \cos^2(l + \phi) + \sigma_\phi^2 \cos^2 b \sin^2(l + \phi) + \sigma_z^2 \sin^2 b.$$

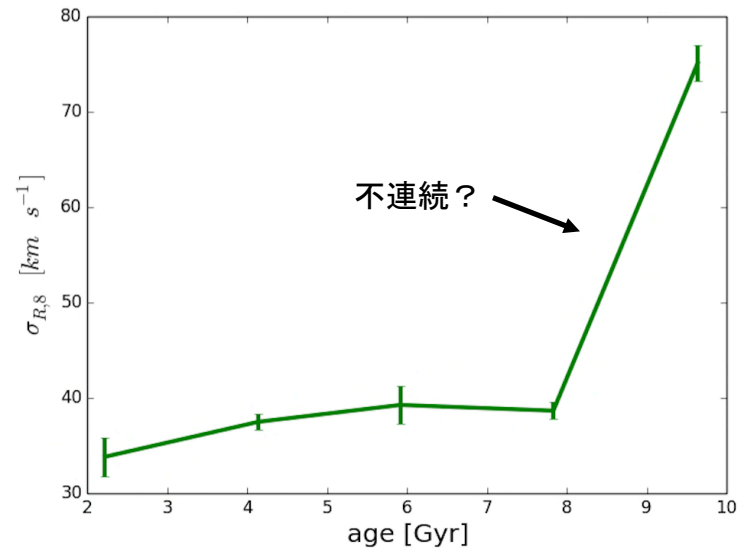
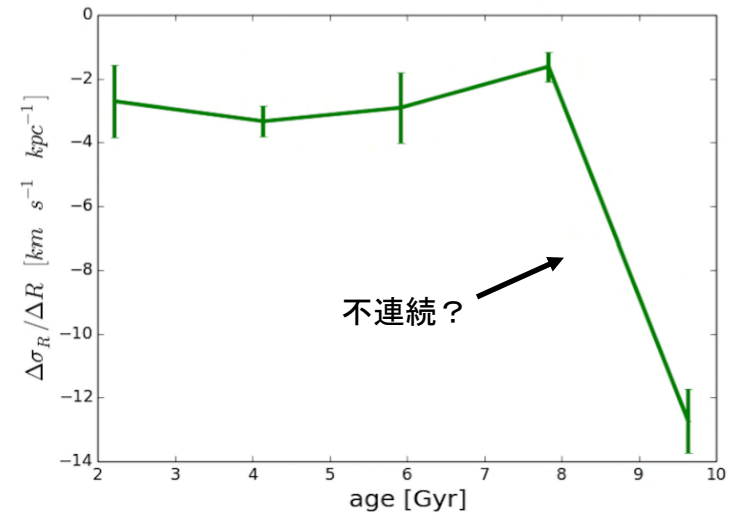
このモデルを使って APOGEE-RC サンプルについてMCMCベイズ推定を行い、
平均速度や速度分散を推定

σ_R vs R and age



- 古い星ほど速度分散が大きく、R依存性も強い。
- $\Delta\sigma_R/\Delta R$ 、 $\sigma_{R,8}$ とともに age $\sim$ 9 Gyr で不連続
 - age $\sim$ 9 Gyr 付近で力学的性質も大きく変化している

z=1 前後で不連続な dynamical heating があったのかもしれない (minor merger heating?、bar/spiral 構造の急激な成長?)



まとめ

- 最新の銀河系内サーベイAPOGEEのデータを解析。化学進化モデルを用いて個々の星にageとRformを割り当て、化学動力学進化を調べた。
- radial migrationは基本的に内側から外側に向かって起こり、古い円盤星ほど移動距離は大きい。
 - bar/spiral構造によって引き起こされるradial migrationの数値シミュレーション結果と概ね一致
- age $\sim$ 9 Gyr でradial migrationの性質、運動状態ともに大きく変化している。
 - $z=1$ 前後で不連続な dynamical heating があったのかもしれない (minor merger heating ? 、 bar/spiral構造の急激な成長 ?)