

星生成史に従ってモデル計算した 矮小楕円体銀河の化学進化

本間 英智, 村山 卓 (東北大学), 小林 正和, 谷口 義明 (愛媛大学)

要旨

- ▶ 大型望遠鏡や多天体分光器を用いた観測によって、矮小楕円体銀河(dSph) の測光的・化学的性質が分かりつつある。
 - ▶ 化学進化モデルを用いた解析では、dSphの色等級図と金属量を同時に説明することができていない。
 - ▶ そこで測光的に求められた星生成史に従って化学進化を計算し、dSphの金属量の説明を試みた。
 - ✓ その結果、色等級図と金属量を同時に説明するためには、Ia型超新星が寄与するまでの時間を長くする必要があることが分かった。
 - ✓ またdSphでは9割以上の重元素が流出しており、星生成効率は先行研究で示された値よりも低いことが分かった。
-



目次

1. Introduction
2. 化学進化モデル
3. 矮小楕円体銀河の観測結果とモデルの比較
4. 矮小楕円体銀河の化学進化
5. まとめ



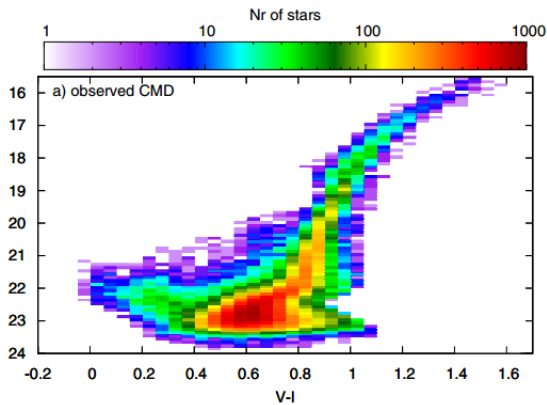
1. Introduction

矮小楕円体銀河の観測から分かった星生成史と化学的性質
および、化学進化モデルを用いた解析について

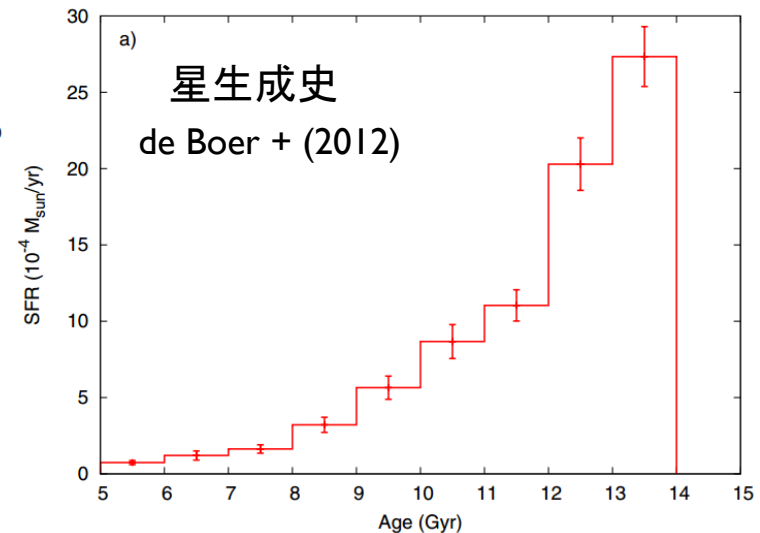
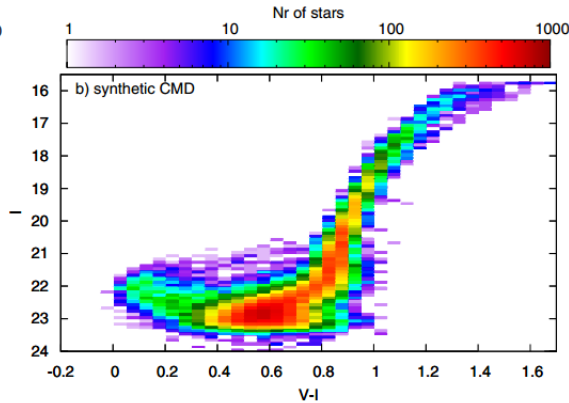
dSphの色等級図と星生成史

- ▶ 矮小銀河の測光観測によって、dSphの色等級図が得られてきている (Komiyama + 2007, Weisz + 2011)。
- ▶ 色等級図を種族合成モデルを用いて解析することで、dSphの星生成史の研究が行われている (Dolphin + 2002, de Boer + 2012, Weisz + 2014)。

観測された色等級図
(Sculptor dSph)



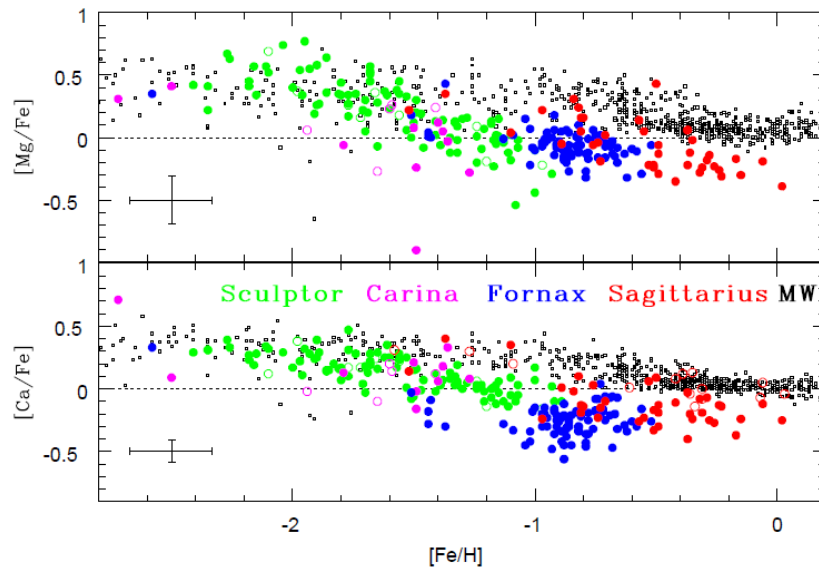
モデル



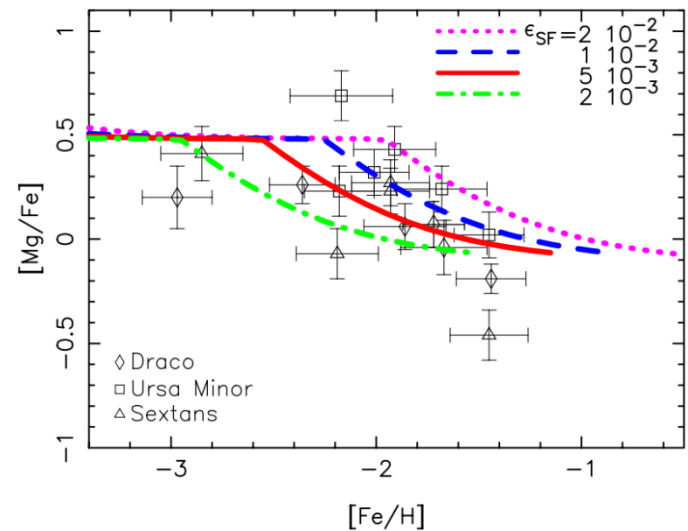
- ▶ 多くのdSphが、10 Gyr 程度の長い星生成の期間を示している。

dSphの化学的性質の研究

- ▶ dSphの星の分光観測から、dSphの元素組成比や金属量分布が得られてきている (Aoki + 2009, Kirby + 2010)。
- ▶ それら化学的性質を、化学進化モデルを用いて解析することで、dSphの化学進化の研究が行われている (Ikuta & Arimoto 2002, Kirby + 2011)。



Tolstoy + (2009)

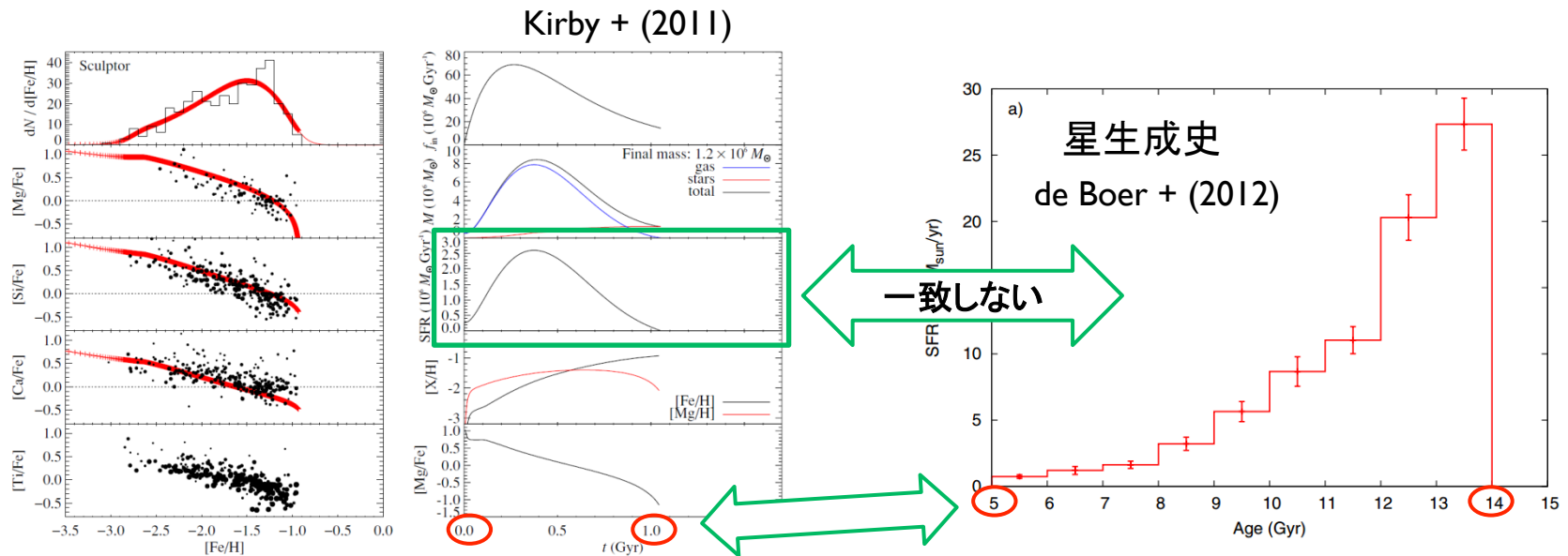


Ikuta & Arimoto (2002)

- ▶ dSphでは星生成効率が低い、またはガスの流出率が大きいと考えられる。

dSphの化学進化研究の問題点

- ▶ Kirby + (2010) では8つのdSphに含まれる約3,000個の星を分光観測し、大量のサンプルを得た。これを用いてKirby + (2011) は個々のdSphについて、化学進化モデルを用いて金属量分布と元素組成比の解析を行った。
- ▶ 結果として得られた星生成史は、色等級図から導かれるものより期間が短いものとなった。



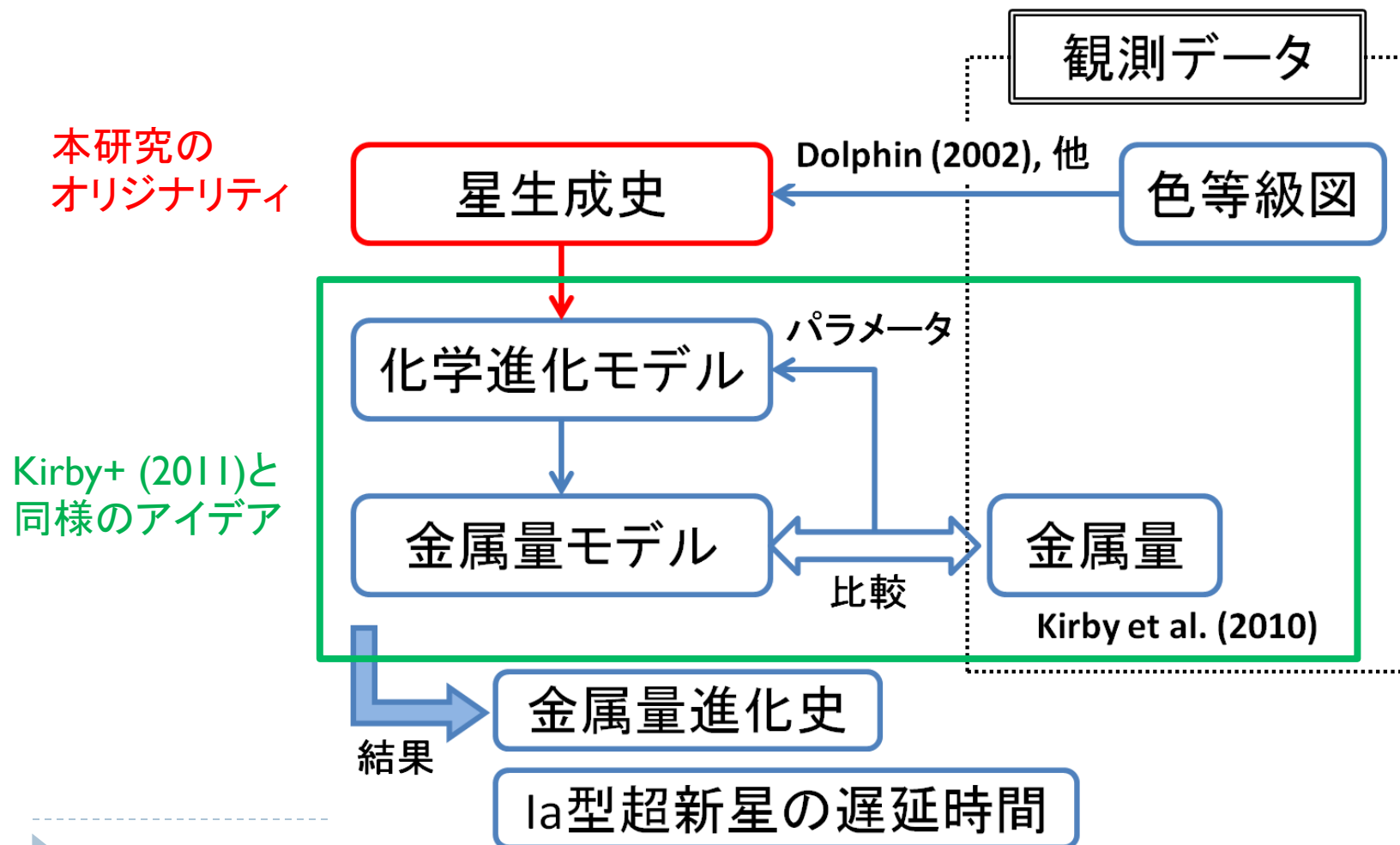
- ▶ 色等級図と化学的性質の両方を説明できる化学進化はどのようなものか。

2. 化学進化モデル

本研究で作成した化学進化モデルの特徴
および、観測結果とモデルの比較方法について

化学進化モデルの概念図

- ▶ Kirby + (2011) で採用されたモデルを基に作成した。



モデルで用いた仮定、および計算式 (1)

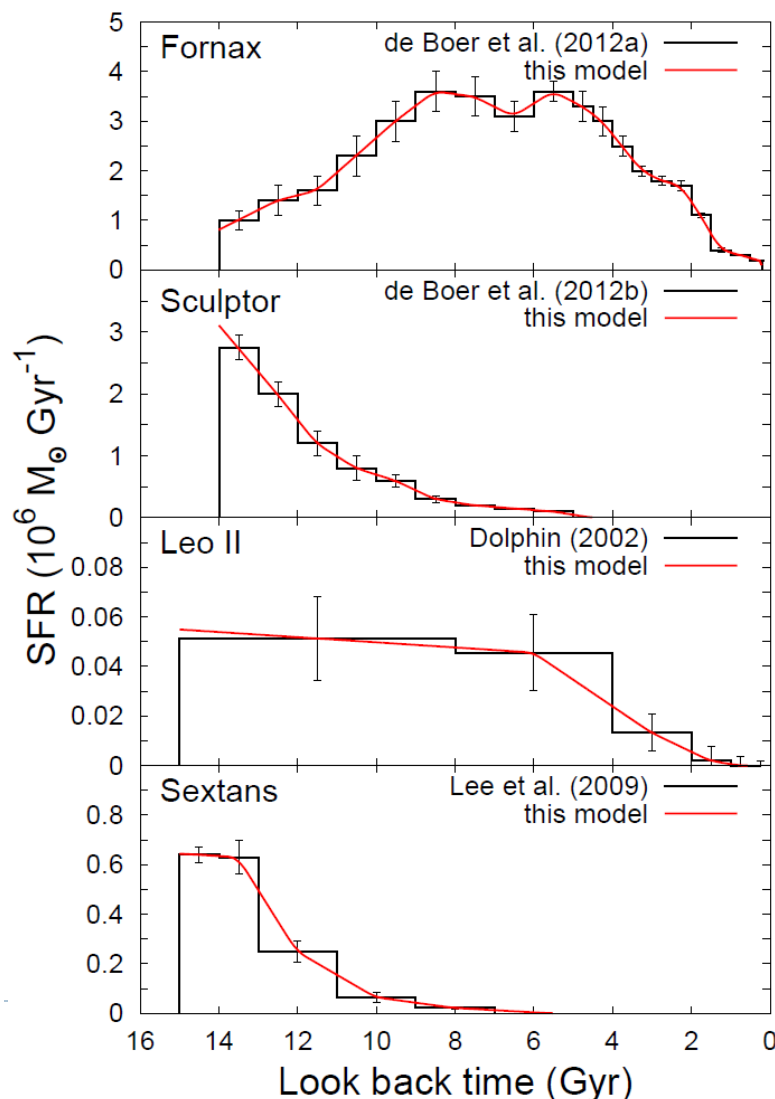
▶ 以下の仮定はKirby + (2011) のモデルと同様

- ▶ one-zone
- ▶ 瞬間的混合近似
- ▶ Kroupa IMF (0.08-100 M_{\odot})
- ▶ 各星のイールド

- ▶ 星生成率はガス質量に比例するとする。
(今回は星生成史が与えられているため、
それに基づいて各時刻のガス質量が決まる)

$$\Psi_{(t)} = A_* \times (G_{(t)})^{\alpha}$$

A_* : 星生成効率, $G_{(t)}$: ガス質量, $\alpha = 1$



▶ : Kirby+ (2011) と異なる点

モデルで用いた仮定、および計算式 (2)

- ▶ Ia型超新星は遅延時間分布に従って起こる (Maoz + 2010)。

$$\Psi_{\text{SNIa}} = 10^{-3} \times (t_{\text{delay}})^{-1.1} \quad (/ \text{Gyr}/M_{\odot}) \quad \text{for } t_{\text{delay}} > \tau_{\text{Ia},0} \text{ (Gyr)}$$

- ▶ ガスの流出率は超新星の発生頻度に比例する。

$$\dot{G}_{\text{out}}(t) = A_{\text{out}} \times (N_{\text{SNII}}(t) + N_{\text{SNIa}}(t)) \quad A_{\text{out}}: \text{ガス流出係数}$$

- ▶ ガスの流入率は、系のガス収支の式から導かれる。

$$\begin{aligned} \dot{G}(t) &= -\Psi(t) + R(t) - \dot{G}_{\text{out}}(t) + \dot{G}_{\text{in}}(t) \quad R: \text{星からのガス還元率} \\ \Rightarrow \dot{G}_{\text{in}}(t) &= \dot{G}(t) + \Psi(t) - R(t) + \dot{G}_{\text{out}}(t) \end{aligned}$$

⇒ 超新星によるフィードバックで系からガスが流出しても、同時にガスが流入するため、星生成は色等級図を満たすように継続する。

- ▶ : Kirby+ (2011) と異なる点

観測結果とモデルの比較方法

- 各dSphの金属量分布とモデルを比較し、モデルのlikelihoodを計算する。

$$L = \prod_{i=0}^N \int_0^t \left[\underbrace{\prod_j \frac{1}{\sqrt{2\pi}\Delta[\text{Fe}/\text{H}]_j} \exp \left(\frac{- \left([\text{Fe}/\text{H}]_j - \overbrace{[\text{Fe}/\text{H}](t)}^{\text{モデル計算された各時刻の金属量}} \right)^2}{2(\Delta[\text{Fe}/\text{H}]_j)^2} \right)}_{\text{観測データがとる正規分布}} \right] \underbrace{\left[\frac{\dot{M}_*(t)}{M_*} dt \right]}_{\text{金属量分布による重み付け}$$

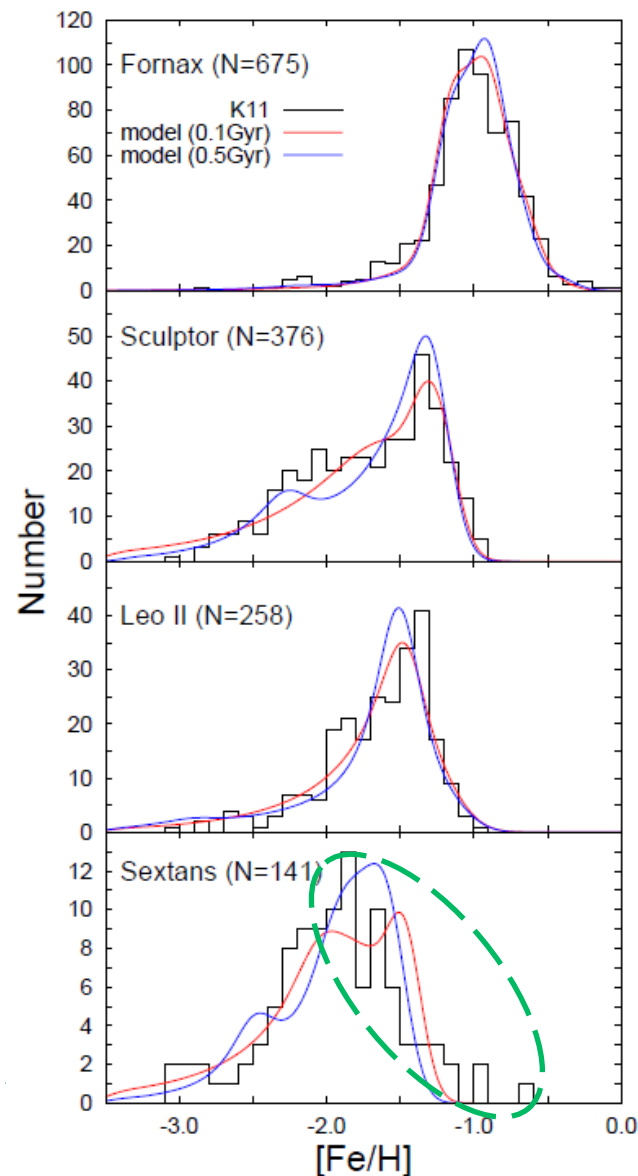
- Likelihoodの値が最も小さいモデルを、最適解とする。
- モデルのパラメータの範囲は、
 - 星生成効率 (A_*): $10^{-3} \sim 10$ (/Gyr)
 - ガス流出係数 (A_{out}): $10^2 \sim 10^5$ (M_{\odot} /SN)
 - Ia型超新星の最小遅延時間 ($\tau_{\text{Ia},0}$): 0.1, 0.5 (Gyr)
- 対数スケールで格子状に、計240,000通りについて計算した。

3. dSphの観測結果とモデルを 比較した結果

dSphで観測された金属量分布と元素組成比のモデル再現性
および、最適解のパラメータの値について

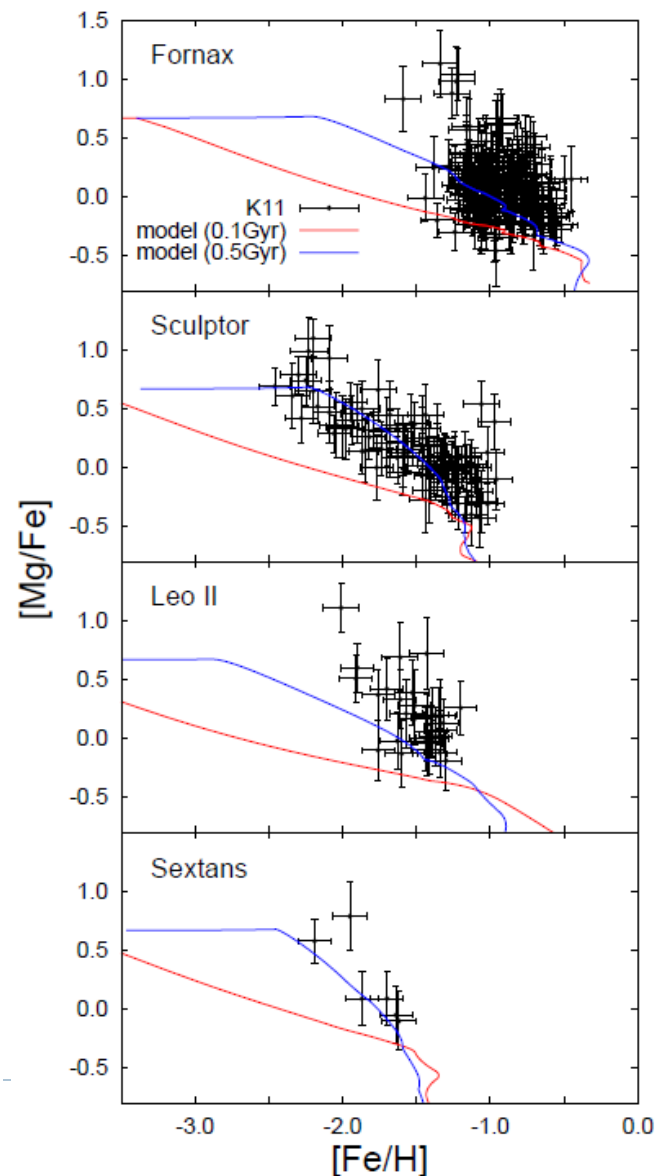
各dSphの金属量分布とモデルの結果

- ▶ 星生成史と金属量分布が得られている矮小銀河のうち、Fornax, Sculptor, Leo II, Sextansの4つのdSphについて化学進化を計算した。
- ▶ Fornaxの平均金属量が最も大きく、Sextansが最も小さい。
 - ✓ Sextansではmetal-rich側での推定がずれている。
- ▶ dSphの金属量分布は、Ia型超新星の最小遅延時間に依らず説明することができる。



各dSphの元素組成比とモデルの結果

- ▶ Ia型超新星の最小遅延時間 ($\tau_{\text{Ia},0}$) が **0.1 Gyr** の場合は、観測値を下回ってしまう。
- ▶ より長い最小遅延時間 (**0.5 Gyr**) をとったモデルの方が、観測値を説明できる。
- ▶ 色等級図と化学的性質を同時に説明するためには、最小遅延時間が 0.1 Gyr よりも長い必要がある。



各dSphの最適解（１）

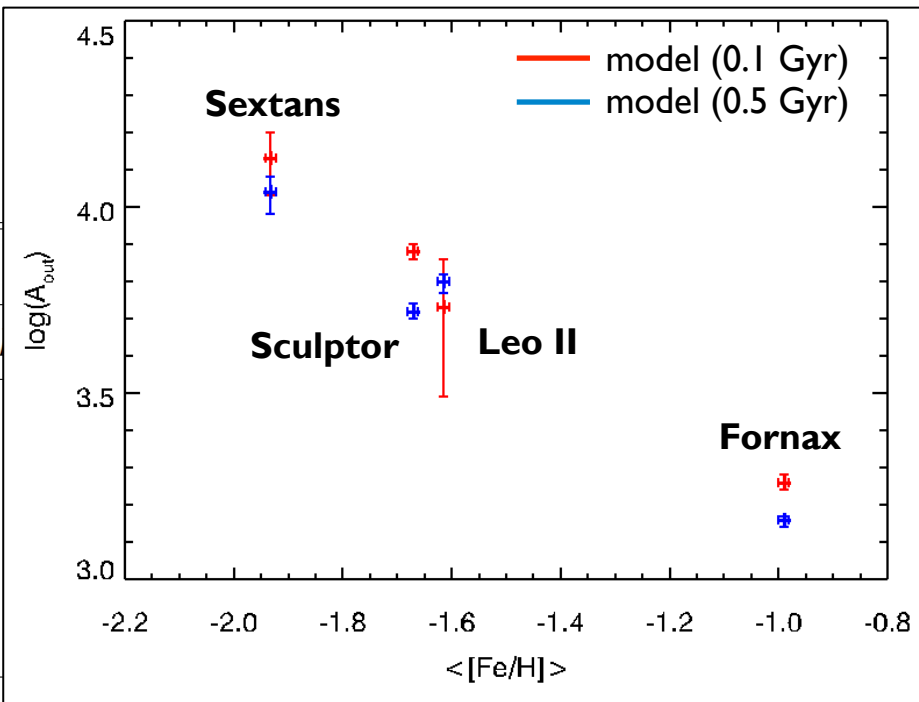
dSph	$\tau_{\text{Ia},0} = 0.1 \text{ Gyr}$			$\tau_{\text{Ia},0} = 0.5 \text{ Gyr}$		
	$\log[A_* \text{ (Gyr}^{-1})]$	$\log[A_{\text{out}} \text{ (} M_{\odot} \text{ SN}^{-1})]$	$-\log[L]$	$\log[A_* \text{ (Gyr}^{-1})]$	$\log[A_{\text{out}} \text{ (} M_{\odot} \text{ SN}^{-1})]$	$-\log[L]$
Fornax	$-1.49^{+0.04}_{-0.04}$	$3.26^{+0.02}_{-0.02}$	175	$-1.02^{+0.05}_{-0.05}$	$3.16^{+0.01}_{-0.02}$	170
Sculptor	$-1.91^{+0.07}_{-0.06}$	$3.88^{+0.02}_{-0.02}$	252	$-1.01^{+0.11}_{-0.11}$	$3.72^{+0.02}_{-0.02}$	244
Leo II	$-2.42^{+0.17}_{-0.12}$	$3.73^{+0.13}_{-0.24}$	110	$-1.75^{+0.12}_{-0.12}$	$3.80^{+0.02}_{-0.03}$	113
Sextans	$-2.05^{+0.13}_{-0.16}$	$4.13^{+0.07}_{-0.07}$	110	$-1.10^{+0.30}_{-0.25}$	$4.04^{+0.04}_{-0.06}$	108

- ▶ いずれのdSphでも、超新星１個あたりに $10^3 \sim 10^4 M_{\odot}$ のガスが流出している。
- ▶ 金属量の低いdSphほどガス流出係数は大きく、その程度はIa型超新星の最小遅延時間に依らない。
- ▶ 流出したガスの総量は、現在のdSphの星質量に対して10~100倍の大きさになる。

各dSphの最適解（１）

$$\tau_{\text{Ia},0} = 0.1 \text{ Gyr}$$

dSph	$\log[A_* \text{ (Gyr}^{-1})]$	$\log[A_{\text{out}} \text{ (} M_{\odot} \text{ SN}^{-1})]$	$-\log[A_{\text{out}}]$
Fornax	$-1.49^{+0.04}_{-0.04}$	$3.26^{+0.02}_{-0.02}$	175
Sculptor	$-1.91^{+0.07}_{-0.06}$	$3.88^{+0.02}_{-0.02}$	252
Leo II	$-2.42^{+0.17}_{-0.12}$	$3.73^{+0.13}_{-0.24}$	110
Sextans	$-2.05^{+0.13}_{-0.16}$	$4.13^{+0.07}_{-0.07}$	110



- ▶ いずれのdSphでも、超新星1個あたりに $10^3 \sim 10^4 M_{\odot}$ のガスが流出している。
- ▶ 金属量の低いdSphほどガス流出係数は大きく、その程度はIa型超新星の最小遅延時間に依らない。
- ▶ 流出したガスの総量は、現在のdSphの星質量に対して10~100倍の大きさになる。

各dSphの最適解（2）

dSph	$\tau_{\text{Ia},0} = 0.1 \text{ Gyr}$			$\tau_{\text{Ia},0} = 0.5 \text{ Gyr}$		
	$\log[A_* \text{ (Gyr}^{-1}\text{)}]$	$\log[A_{\text{out}} \text{ (} M_{\odot} \text{ SN}^{-1}\text{)}]$	$-\log[L]$	$\log[A_* \text{ (Gyr}^{-1}\text{)}]$	$\log[A_{\text{out}} \text{ (} M_{\odot} \text{ SN}^{-1}\text{)}]$	$-\log[L]$
Fornax	$-1.49^{+0.04}_{-0.04}$	$3.26^{+0.02}_{-0.02}$	175	$-1.02^{+0.05}_{-0.05}$	$3.16^{+0.01}_{-0.02}$	170
Sculptor	$-1.91^{+0.07}_{-0.06}$	$3.88^{+0.02}_{-0.02}$	252	$-1.01^{+0.11}_{-0.11}$	$3.72^{+0.02}_{-0.02}$	244
Leo II	$-2.42^{+0.17}_{-0.12}$	$3.73^{+0.13}_{-0.24}$	110	$-1.75^{+0.12}_{-0.12}$	$3.80^{+0.02}_{-0.03}$	113
Sextans	$-2.05^{+0.13}_{-0.16}$	$4.13^{+0.07}_{-0.07}$	110	$-1.10^{+0.30}_{-0.25}$	$4.04^{+0.04}_{-0.06}$	108

- ▶ 星生成効率は、最小遅延時間が長いほど大きい値を示している（金属量分布への影響が縮退している）。
- ▶ Kirby + (2011)の結果よりも低い値を示したが、これは星生成史を与えたことで化学進化のタイムスケールが10倍程度長くなったことに因る。

4. 矮小楕円体銀河の化学進化

dSphの化学的性質と測光的性質を説明するために必要な
化学進化の特徴について

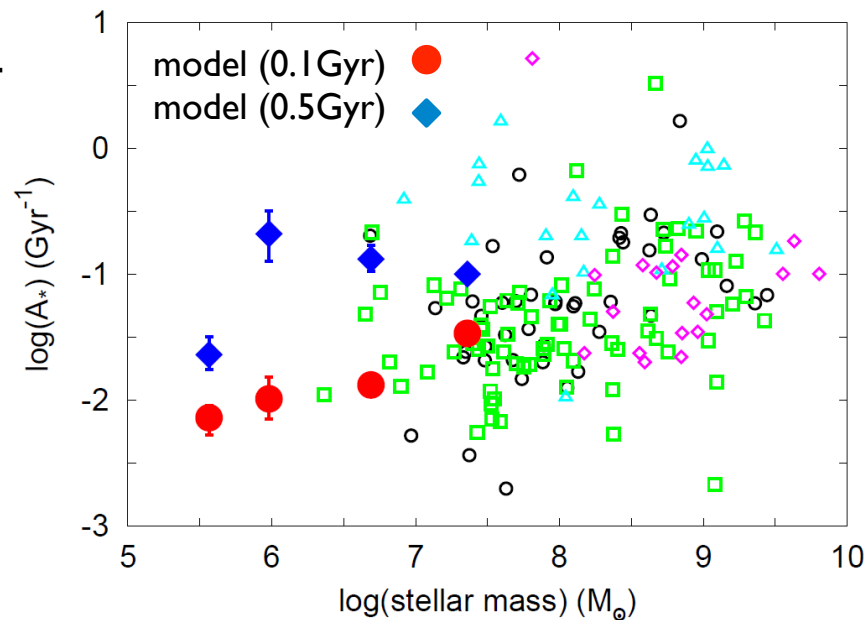
大量の重元素流出

- ▶ 今回のモデルでは、dSphが低金属量である原因はガスの流出にあることを示しており、その総量は現在の星質量の10-100倍である。
 - ▶ これは過去に合成された重元素のうち、**約95%が系外に流出**したことを示している。
 - ▶ しかし超新星ガスが直接流出するような、流出するガスの金属量が大きい場合は、流出するガスの総量は少なくなる (selective wind model)。
 - ▶ Revaz & Jablonka (2012) による流体シミュレーションでは、dSphの金属量を説明するために必要な超新星フィードバックの効率率は、3-5% である。
 - ▶ 超新星ガスの 95% が系内で混合せずに流出する場合、流出するガスの総量は現在の星質量の 0.1% 程度になる。
 - ✓ モデルパラメータの取り方でガス流出量は大きく変化するため総量は分からないが、少なくともdSphで合成された重元素の9割以上が系外に流出したと考えられる。
-



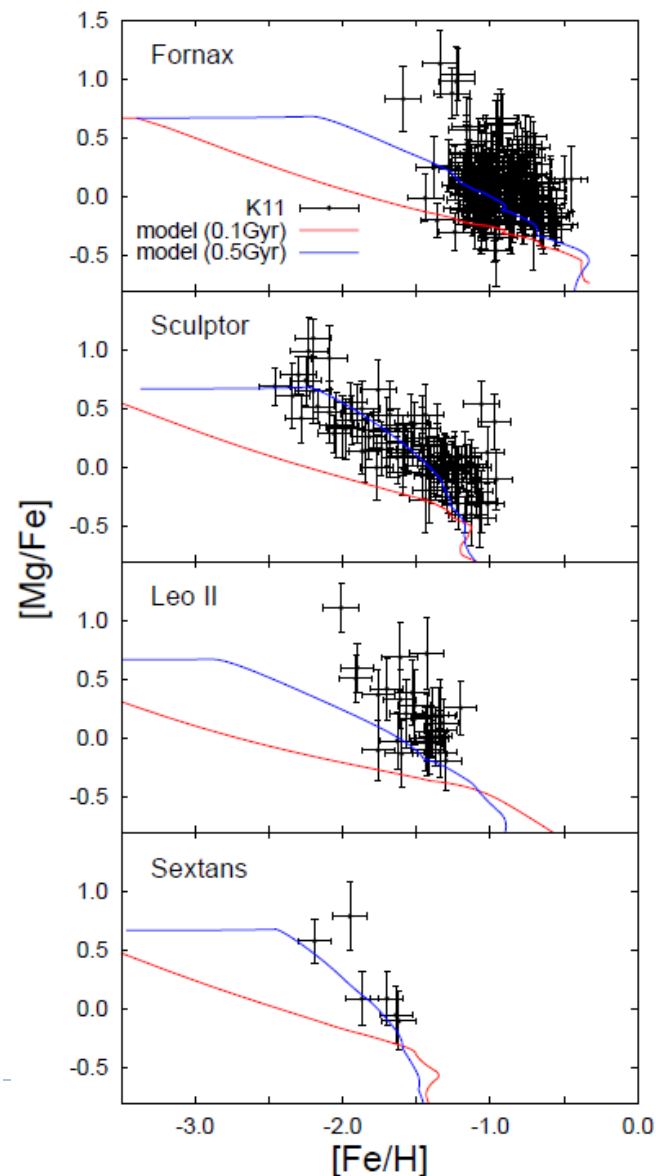
dSphの星生成効率

- ▶ dSphの色等級図と金属量分布を同時に説明するためには、星生成効率を低くする必要がある。
 - 星生成を長い期間行いつつ、金属量の低い星をある程度生成するため。
- ▶ 得られた星生成効率は、現在も星生成している矮小銀河で観測される値と同程度である。



Ia型超新星の最小遅延時間のズレ

- ▶ Ia型超新星の最小遅延時間($\tau_{\text{Ia},0}$)が **0.1 Gyr** の場合は、観測値を下回ってしまう。
- ▶ より長い最小遅延時間 (**0.5 Gyr**) をとったモデルの方が、観測値を説明できる。
- ▶ 色等級図と化学的性質を同時に説明するためには、最小遅延時間が 0.1 Gyr よりも長い必要がある。



Ia型超新星の最小遅延時間

- Ia型超新星の観測(Totani + 2008, Maoz + 2010)では、Ia型超新星は星生成から 0.1 Gyr 程度で発生し始めることが言われている。

- 最小遅延時間が合わない原因として

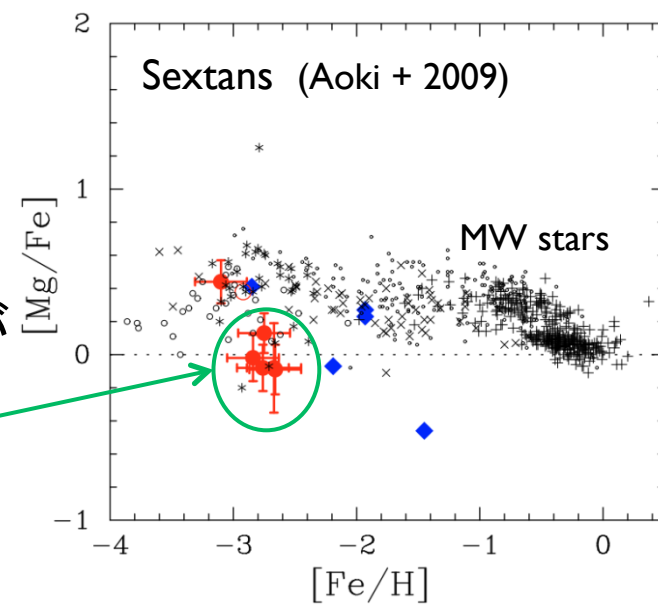
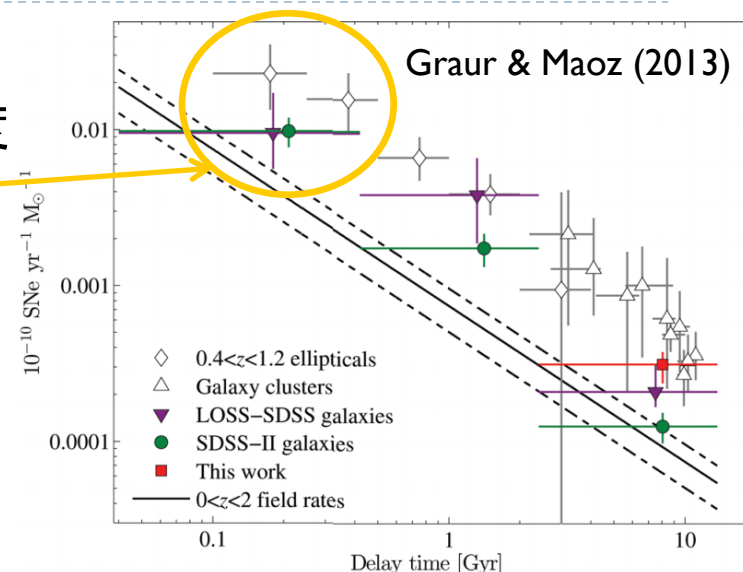
- 化学進化モデルの瞬間的混合近似が不適切
- 低金属量な環境では、Ia型超新星が発生しないなどが考えられる。

- 1.の場合は、星から放出されたガス全般について、混合にかかる時間スケールを考慮する必要がある。

- 2.の場合は、dSphに依らずある金属量より低い星の元素組成比には、Ia型超新星の影響が見られないことが予想される。

⇒ Sextans (Aoki + 2009) に存在する。

(Ia型超新星由来ではない? ; Kobayashi + 2014)



まとめ

- ▶ dSphで観測された色等級図と化学的性質を無矛盾に説明する化学進化モデルを作成した。
- ▶ 4つのdSphのうち3天体について、色等級図から推定された星生成史に従いつつ、観測された金属量分布を説明することに成功した。
- ▶ 主に得られた結果として
 1. Ia型超新星の最小遅延時間は 0.1 Gyr では観測された $[\text{Mg}/\text{Fe}]$ を説明できず、超新星から放出されたガスから星ができるまでに、より長い時間が必要である。
 2. dSphの金属量が低いのは、合成された重元素の9割以上が流出したためと考えられる。
 3. dSphにおける星生成効率は、金属量分布上でIa型超新星の最小遅延時間と効果が縮退しているため正確に評価できないが、dIrrで観測される現在の星生成効率と同程度になった。
- ▶ 観測された星生成史に従って化学進化を計算したことで、dSphで見られる化学的性質の時間依存性を詳しく調べることが可能になった。

