

星生成史に従ってモデル計算した 矮小不規則銀河の化学進化

第2回銀河進化研究会 @名古屋大学
(2015/6/4)

本間 英智、村山 卓（東北大学）
小林 正和、谷口 義明（愛媛大学）

矮小銀河の進化過程

- 星質量 : $\lesssim 10^9 M_\odot$
- 近傍に分布するため、星に分解して詳細な観測が可能
→ 銀河進化研究の実験室



dIrr
(IC1613)

- 矮小不規則銀河 (dIrr) ;
ガスが豊富で、現在も星生成中
- 矮小橢円体銀河 (dSph) ;
ガスが無く、星生成活動も無い



dSph
(Leo I)

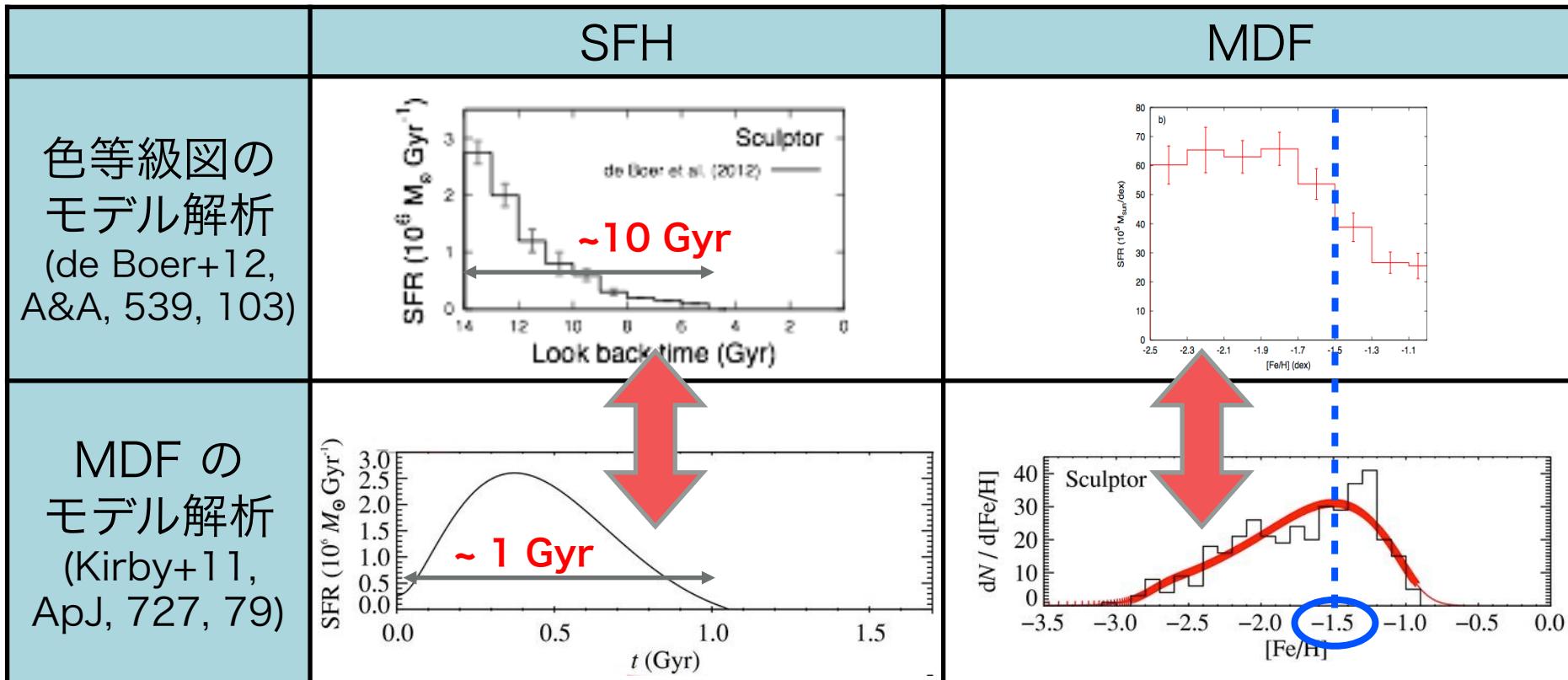
→ 両者の違いは何かから生じているのか？
星生成史と化学進化史から、進化の過程を明らかにしたい

矮小銀河の星生成史と金属量分布

- 色等級図 → 星生成史 (SFH)
 - 分光観測 → 金属量分布 (MDF)
- } それぞれをモデル計算により説明する研究は多数ある

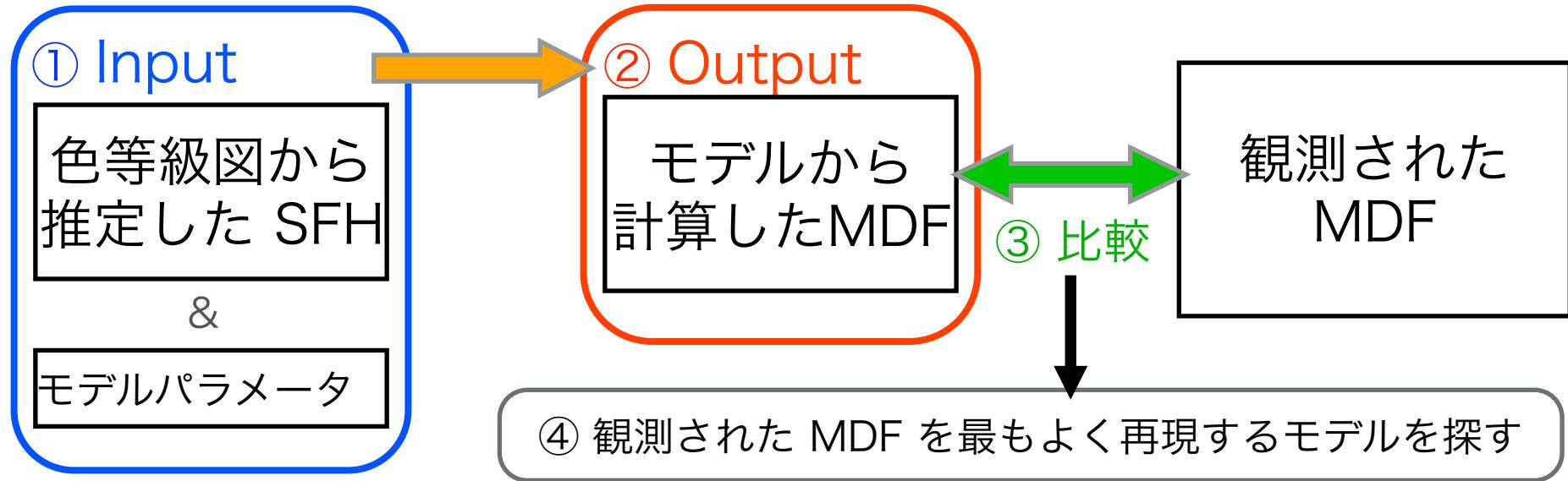
しかし、ほとんどのモデルでは

SFH と MDF を同時に説明してはいない

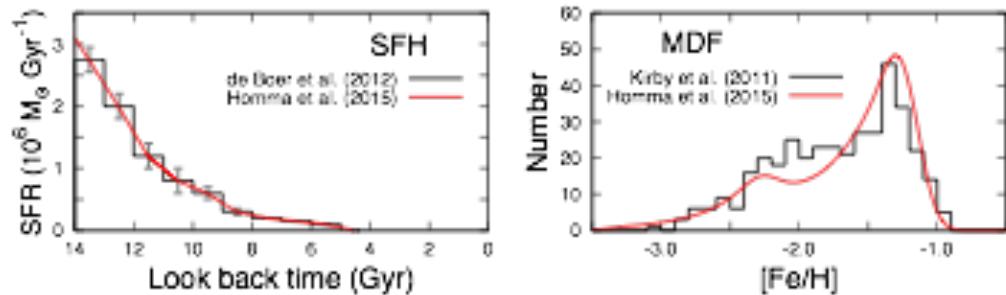


SFH と MDF を同時に説明する化学進化モデル

- Homma+15, ApJ, 799, 230 の化学進化モデル (2014年 銀河進化研究会)



例 : Sculptor dSph



→ 4 つの dSph の SFH と MDF を同時に説明できるモデルを提案

dlrr の化学進化を調べる意義

- dSph のモデル解析で得た結果：
 - 大量のガス流出と流入 (星生成率の 10 – 100 倍) が起きている
 - 銀河で合成された重元素の 90% 以上が流出

dSph では、これらを観測的に調べることができない

→ dlrr では、現在起きている星生成や化学進化が見える

→ dlrr についても、SFH に従った化学進化を調べる

	dSph	dlrr
ガスの有無	現在は無い	現在もある
星生成活動	現在は無い	現在もある

星と星間ガスの
金属量を測定できる

星生成が星間ガスに
及ぼす影響が見える

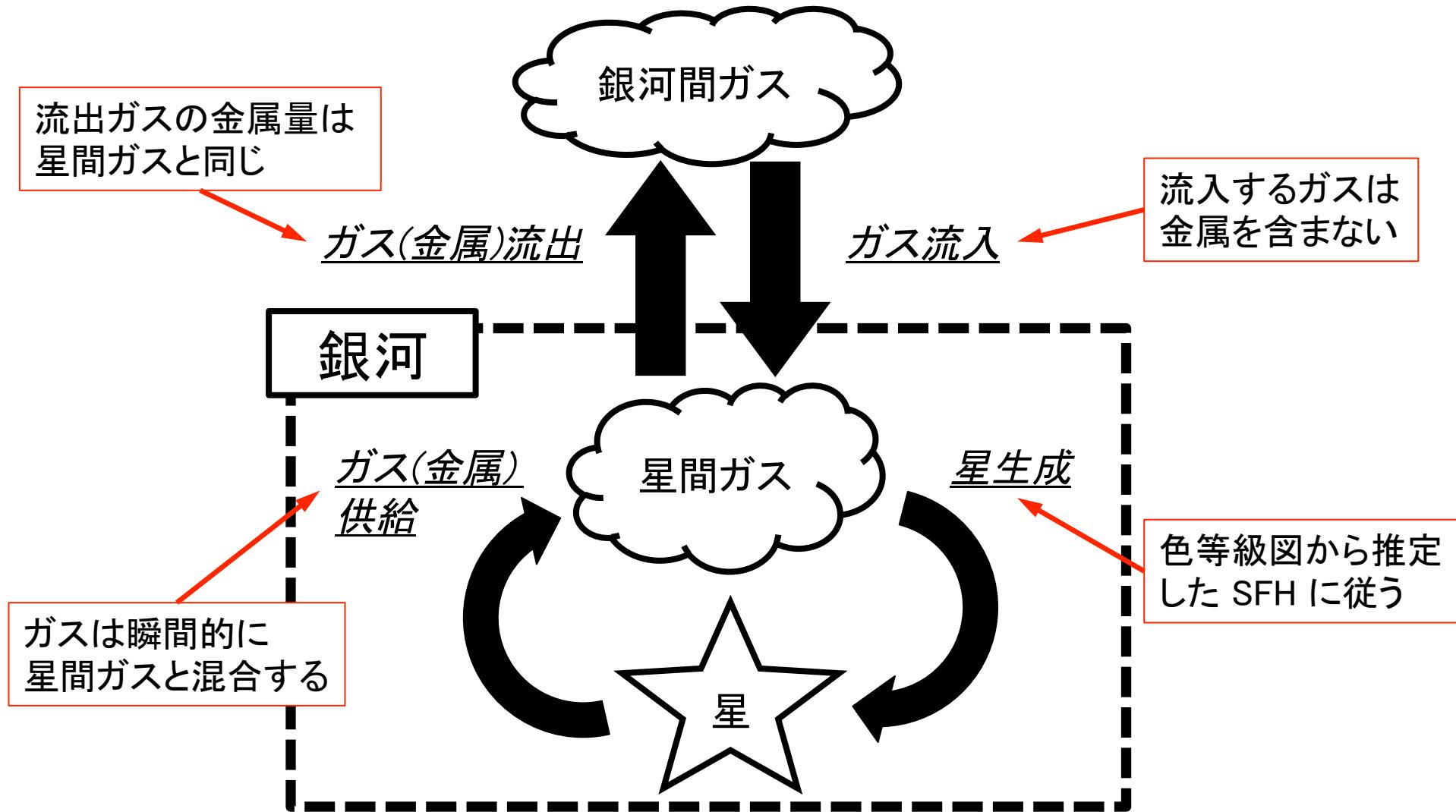
サンプル dlrr

- dSph と同じ化学進化モデルで、dlrr を調べる
→ 観測から SFH と MDF が得られている dlrr が対象
- 化学進化を評価した dlrr

dlrr	SFH	MDF
IC 1613	Skillman+14, ApJ, 786, 44	Kirby+13, ApJ, 779, 102
NGC 6822	McQuinn+10, ApJ, 721, 297	Kirby+13, ApJ, 779, 102
Pegasus	Aparicio 99, IAUS, 192, 304	Kirby+13, ApJ, 779, 102

化学進化モデル

- 矮小銀河における化学進化は、図のように考える



モデルで用いた仮定

- 星生成率は、ガス質量に比例する

$$\frac{\Psi(t)}{10^6 M_{\odot} \text{ Gyr}^{-1}} = A_* \times \left(\frac{M_{\text{gas}}(t)}{10^6 M_{\odot}} \right)^{\alpha} \quad (\alpha=1)$$

- ガス流出率は、超新星の数に比例する

$$\dot{M}_{\text{out}}(t) = A_{\text{out}} \left(\dot{N}_{\text{II}}(t) + \dot{N}_{\text{Ia}}(t) \right)$$

- Ia型超新星は、遅延時間分布に従って発生する

(Maoz+10, ApJ, 722, 1879)

$$DTD(t_{\text{delay}}) = \begin{cases} (1 \times 10^{-3}) \times \left(\frac{t_{\text{delay}}}{1 \text{Gyr}} \right)^{-1.1} & (\text{SN Gyr}^{-1} M_{\odot}^{-1}) \quad \text{for } t_{\text{delay}} \geq 0.1 \text{ Gyr} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

- ガス流入率は、消費したガスを補い、SFH を満たすように与える

$$\begin{aligned} \dot{M}_{\text{gas}}(t) &= -\Psi(t) + E(t) + \dot{M}_{\text{in}}(t) - \dot{M}_{\text{out}}(t) \\ \Rightarrow \dot{M}_{\text{in}}(t) &= \dot{M}_{\text{gas}}(t) + \Psi(t) - E(t) + \dot{M}_{\text{out}}(t) \end{aligned}$$

観測データとの比較方法

- 星の金属量とモデルとの likelihood を計算する

$$L = \prod_j \int_0^{t_{\text{fin}}} \frac{1}{\sqrt{2\pi} \Delta[\text{Fe/H}]_j} \exp \left[-\frac{([{\text{Fe}}/{\text{H}}]_j - [{\text{Fe}}/{\text{H}}](t))^2}{2(\Delta[\text{Fe/H}]_j)^2} \right] \times \frac{\dot{M}_*(t)}{M_*} dt$$

観測データがとる正規分布

モデルの金属量

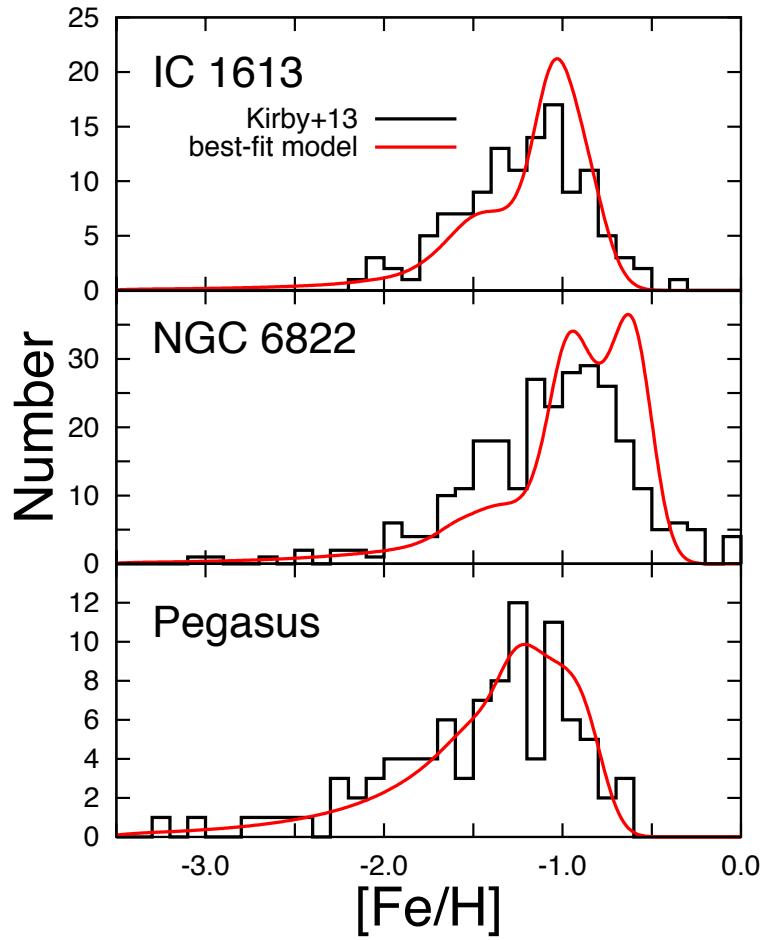
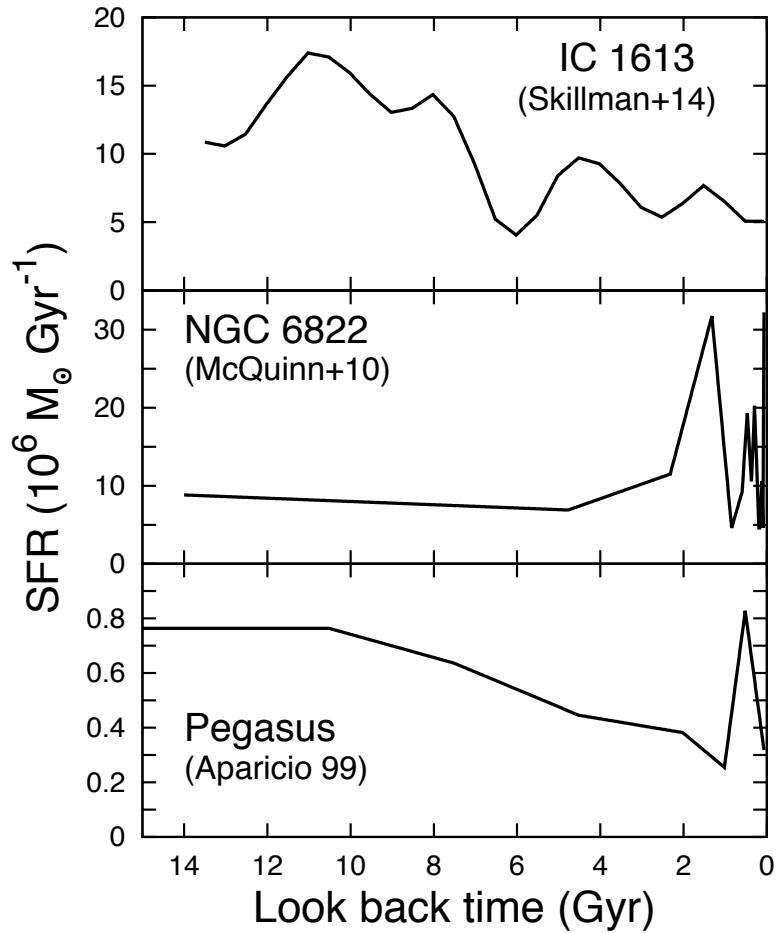
MDF の重み付け

→ Likelihood の値が最も大きいモデルを、最適解とする

- モデルパラメータの範囲

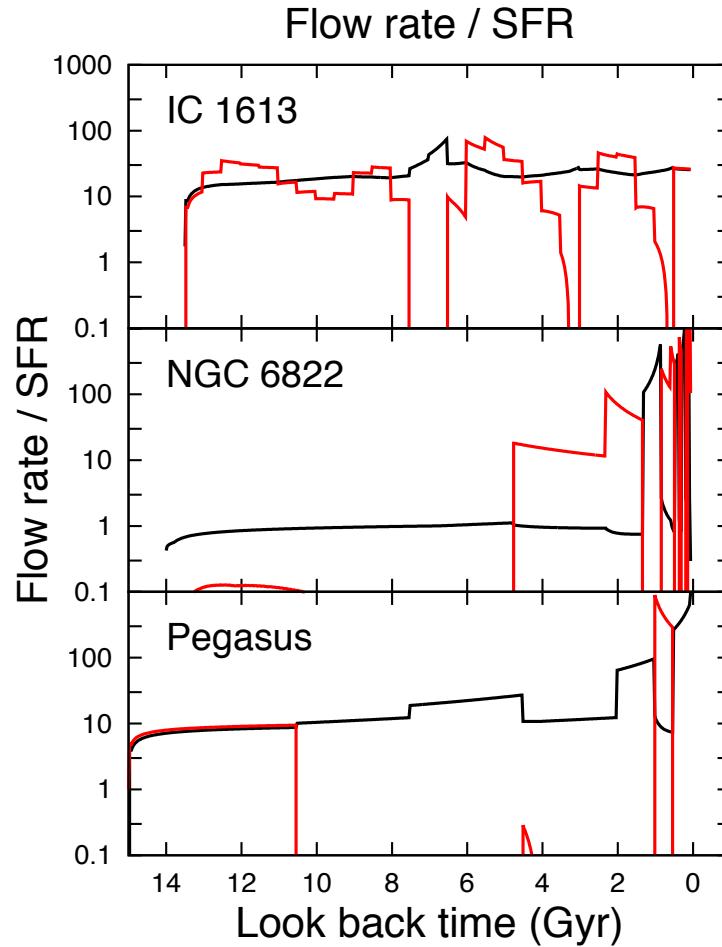
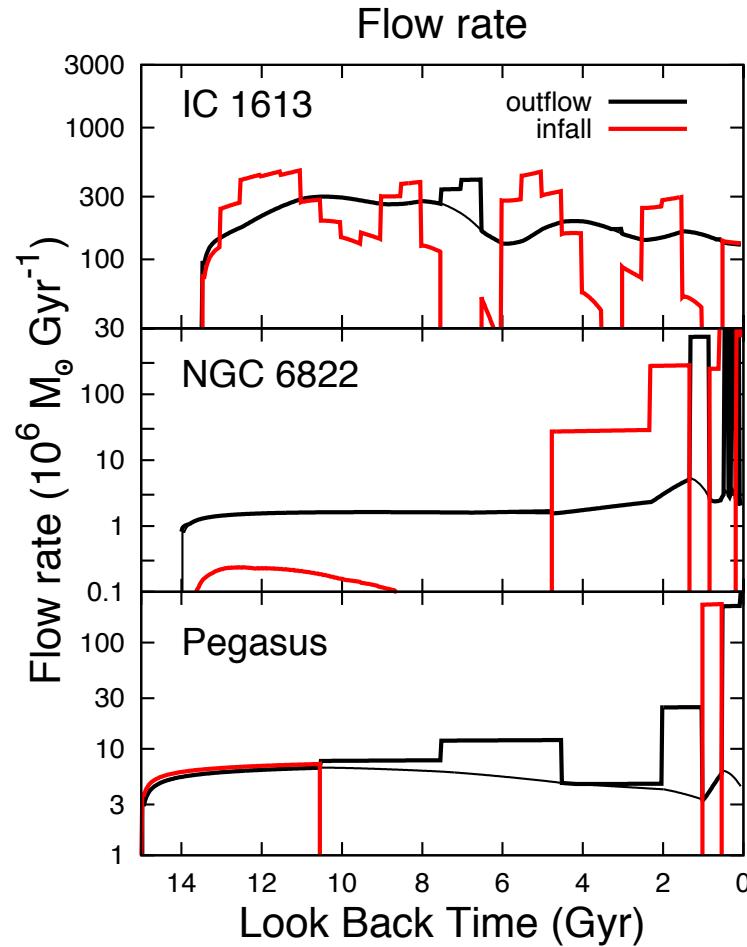
- 星生成効率 (A_*) : $10^{-3} - 10$ (/ Gyr)
- ガス流出係数 (A_{out}) : $10^2 - 10^5$ (M_\odot / SN)

モデルの計算結果：SFH、MDF



- IC 1613、Pegasus : SFH と MDF を同時に説明できた
- NGC 6822 : 金属量の大きい星を過大評価している

モデルの計算結果：ガスの流入出率



- 大量のガスが流出し、同程度のガスが流入している
- ガスの流出率は、星生成率の約 10 倍である (右図)

考察：矮小銀河のガスの流出

- SFH と MDF を同時に説明する化学進化モデルを作成
→ 4つの dSph と、3つの dIrr の化学進化を評価
→ dSph、dIrr とともに、大量のガスの流出を予想
(星生成率の約 10 - 100 倍)
 - 大量のガス流出は、超新星フィードバックで説明可能
 - 流出するガスのエネルギーが、超新星のエネルギーに等しいと仮定
 - 矮小銀河の脱出速度： $\sim 30 \text{ km/s}$
- 星生成率あたりのガス流出率；

$$f = \frac{\dot{M}_{\text{out}}}{\Psi} = \left(\frac{E_{\text{SN}} \times \dot{N}_{\text{SNII}}}{v_{\text{esc}}^2 / 2} \right) / \Psi$$
$$\sim 160 \times \left(\frac{E_{\text{SN}}}{10^{51} \text{ erg}} \right) \times \left(\frac{v_{\text{esc}}}{30 \text{ km/s}} \right)^{-2}$$

dlrr の outflow の観測

- サンプル dlrr の X 線、H α 、HI の観測
 - 顕著な outflow は報告されていない
- outflow が見られるスターバースト dlrr での観測
 - ガス流出率は、星生成率と同程度
(NGC 1569 ; Martin+02, ApJ, 574, 663)
- 実際の矮小銀河では、大量にガスが流出してはいない
- ✓ なぜ化学進化モデルでは、大量のガス流出を予言するのか
 - モデルの結果は、矮小銀河の金属量によって決まる
 - ガスの流出とともに、矮小銀河から重元素が流出する
- モデルの結果は、ガスではなく重元素の流出が本質的

重元素の流出

- 化学進化モデルで捨てた、重元素の割合

	矮小銀河	合成量 (M_{\odot})	喪失量 (M_{\odot})
dSph	Fornax	6.39×10^5	6.03×10^5 (94%)
	Sculptor	1.71×10^5	1.69×10^5 (99%)
	Leo II	1.17×10^4	1.15×10^4 (99%)
	Sextans	4.30×10^4	4.27×10^4 (99%)
	IC 1613	2.82×10^6	2.42×10^6 (86%)
	NGC 6822	5.69×10^5	5.15×10^5 (90%)
	Pegasus	1.87×10^5	1.53×10^5 (82%)

→ 矮小銀河の SFH と MDF を同時に説明するためには、合成した重元素のうち 80% 以上を捨てる必要がある

重元素の流出の仕方

- NGC 1569 での outflow の観測；
 - 流出するガスの金属量は、星間ガスの金属量より大きい

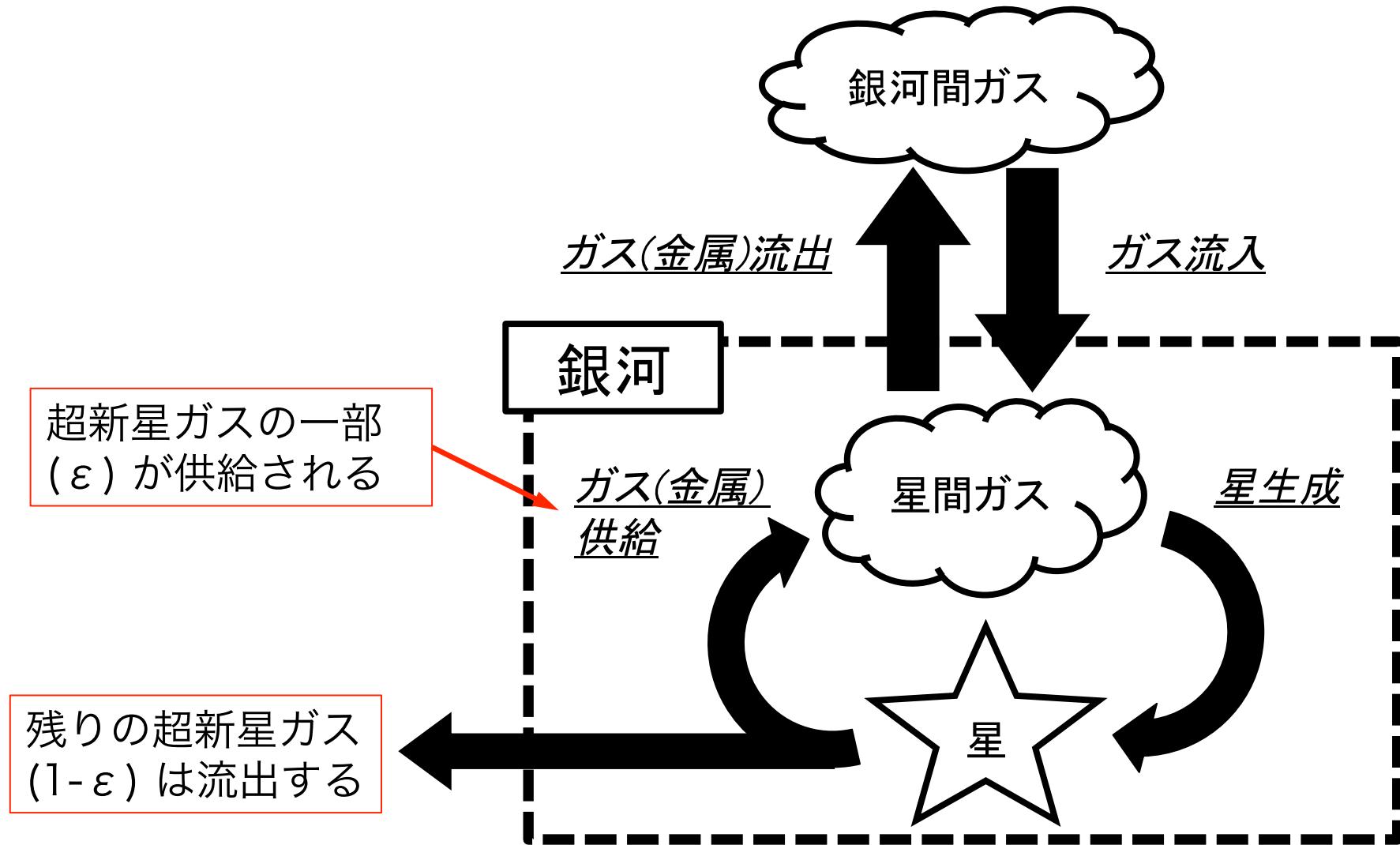
→重元素は、選択的に流出している

- 矮小銀河の流体シミュレーション；
 - 超新星ガスの 20% 程度しか、星生成領域に留まらない
(Marcolini+06, MNRAS, 371, 643)
 - 超新星エネルギーのうち、3 – 5% しか星間ガスに渡らない
(Revaz & Jablonka 12, A&A, 538, 82)

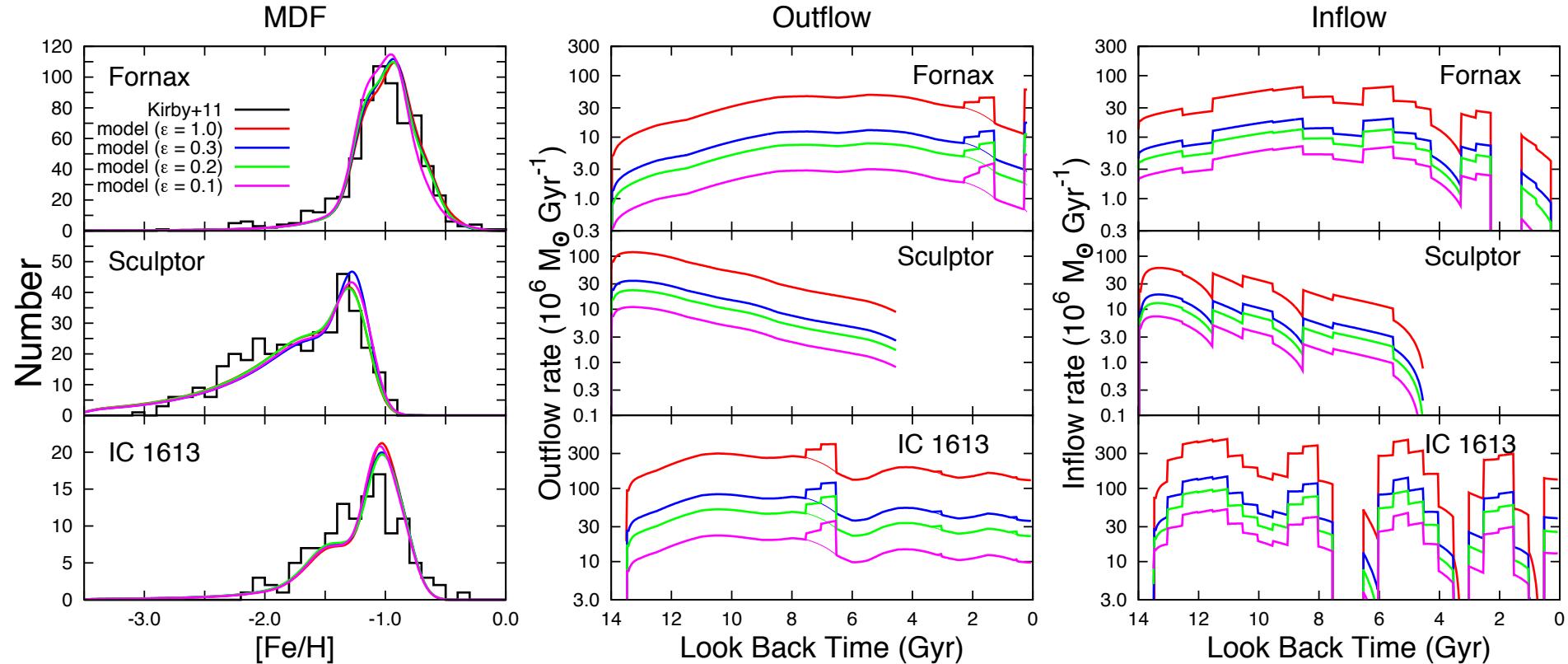
→超新星ガスの一部しか、星間ガスと混合しない

化学進化モデルでの重元素の流出

- 星間ガスと混合する超新星ガスの割合を、 ε とする



選択的な重元素の流出



- 超新星ガスの混合率 (ε) を、1.0 (赤線) より小さい値で計算
- このとき MDF を説明しつつ、ガス流入出率を抑えることができる
- 重元素の選択的な流出が、SFH、MDF、ガス流出率の説明には必要

まとめ

- 矮小銀河で観測された SFH と MDF を同時に説明するために、SFH を基にした化学進化モデルを作成した
- 
- 3つの dIrr に対し、化学進化モデルで解析を行った
- 
- 2つの dIrr について、SFH と MDF を同時に説明した
 - (dSph と同様に) dIrr でも、合成した重元素の大部分が流出
- 
- dIrr で観測される SFH、MDF、ガス流出率を同時に説明するためには、重元素の選択的な流出が必要である

今後の研究

- 重元素の流出過程を調べる研究
 - 矮小銀河では重力ポテンシャルが浅いため、超新星フィードバックの影響が銀河進化に顕著に現れる。矮小銀河での重元素の流出過程を調べ、超新星が星間ガスと金属量に、どのように寄与するか調べる。
 1. 化学進化モデルによるアプローチ；
 - 観測されるガス流出率と、超新星ガスの混合率との関係を調べる
 2. 矮小銀河の観測によるアプローチ；
 - dlrr での outflow の金属量や元素組成を測定することで、超新星から出たガスが outflow にどれだけ含まれているか調べる
 - 重元素が dlrr の周囲に広がっていることが期待されるため、背景 QSO を用いて dlrr 周囲の金属量（と元素組成）を測定する