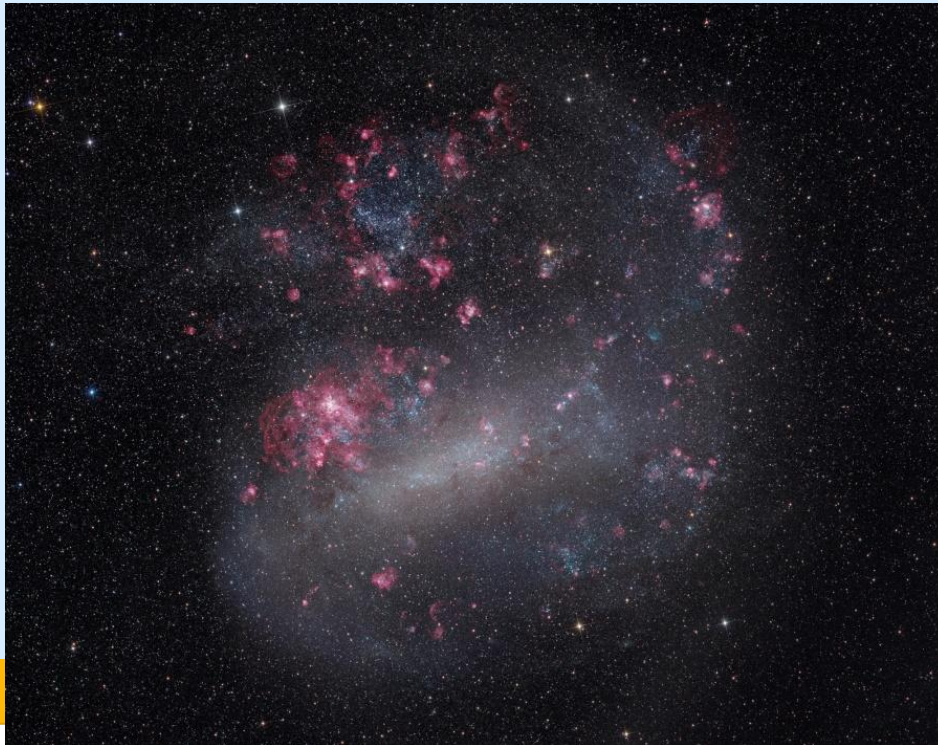


Chemical Evolution of the Large Magellanic Cloud



Kenji, Bekki & Takuji, Tsujimoto (2012)



← LMC の画像
(5 kpc × 5 kpc)

(<http://apod.nasa.gov/apod/ap110426.html>)

1. Introduction

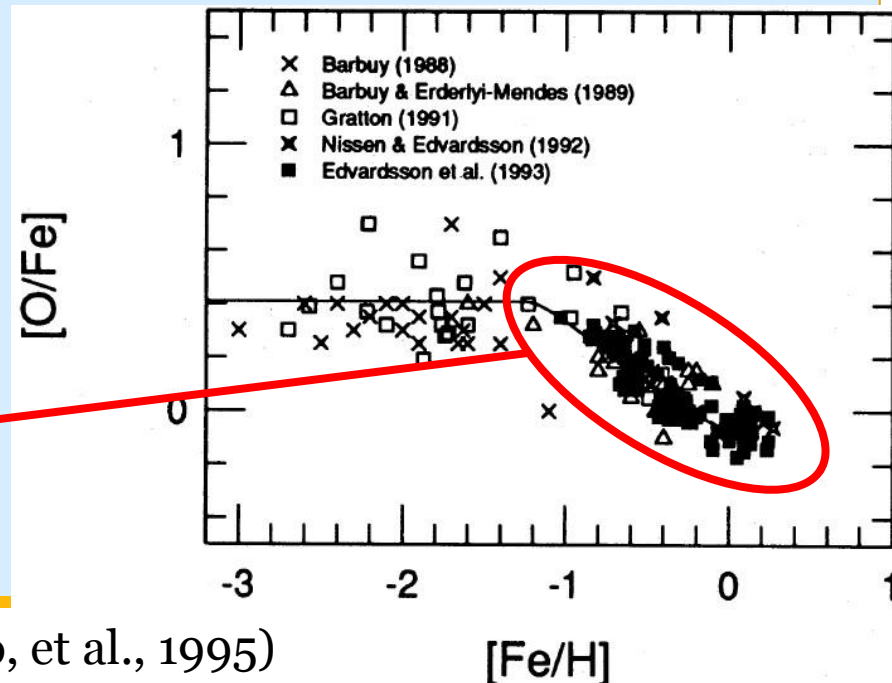


- LMC では、複数の研究から過去にスターバーストが起きたことが言われているが、その期間や星生成率について詳しいことは分かっていない。
- 測光観測から導かれた年齢-金属量関係(AMR)からは、2Gyr前と0.5Gyr前にスターバーストが起きた傾向が見られる。
(Harris & Zaritsky, 2009)
- そこでスターバーストを考慮した化学進化モデルを解くことで、観測される金属量を再現するにはどのような星生成史を仮定すればよいか議論する。

1. Introduction (α elements)

- O, Mg, Si, Ca, Ti などの元素は " α 元素" と呼ばれ、H, He の元素合成から生成されるため形成初期の銀河でも放出される元素である。
- 一方 Fe は超新星爆発で主に放出されるが、Ia型超新星の放出量が極めて大きいいため、Ia型超新星が起こり始めると下図のような変化が現れる。

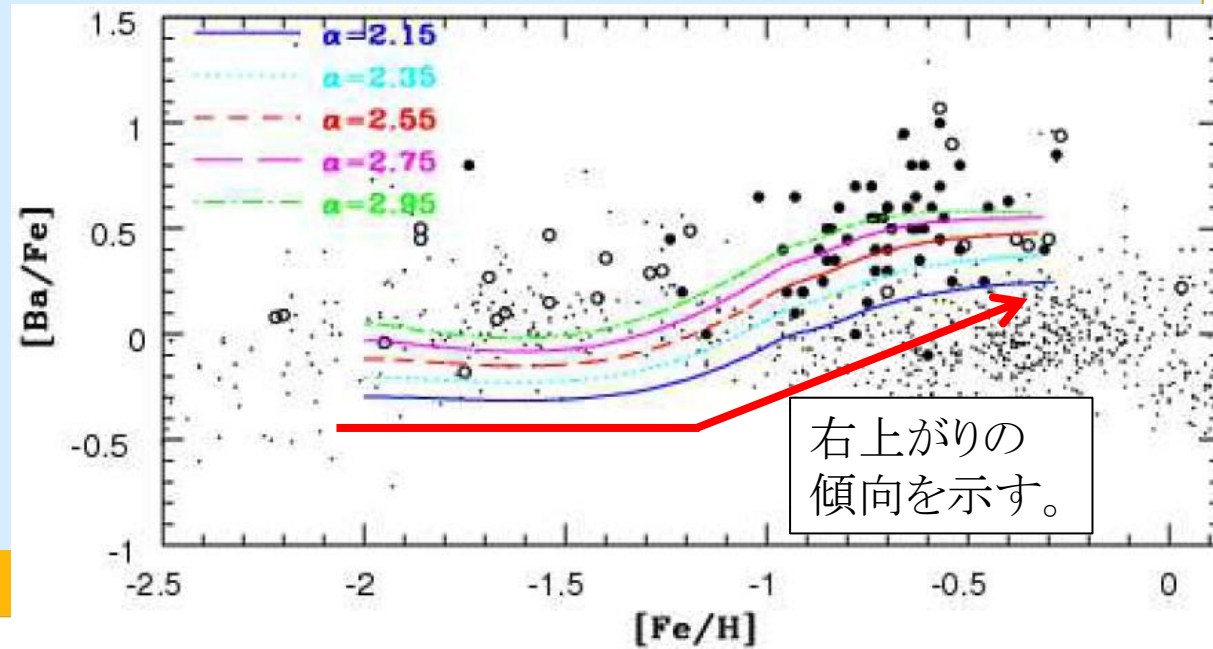
Ia型超新星の寄与により、鉄の割合が大きくなる。
折れ曲がる点($[\text{Fe}/\text{H}] \sim -1.0$)が、
Ia型超新星の起きるまでの時間の指標となる。



(Tsujiimoto, et al., 1995)

1. Introduction (n-captuer elements)

- Ba, Eu などの元素は中性子捕獲元素と呼ばれ、超新星爆発(r-過程)またはAGB星の対流層(s-過程)で合成される。
- Ba は s-過程で主に合成され、r-過程での合成量は少量であることから、化学進化を担う星が超新星からAGB星に移る時代の指標としてみることができる。



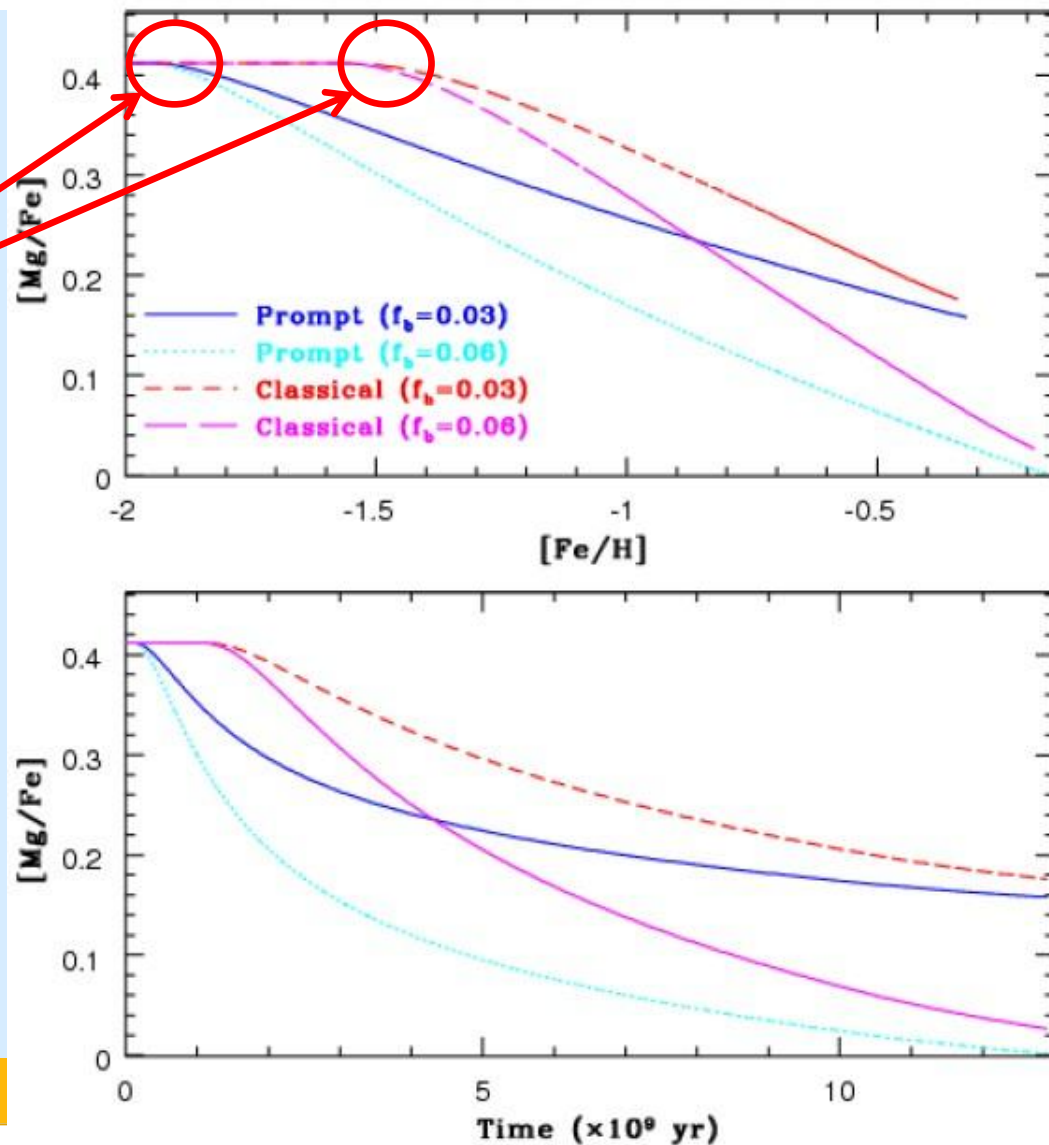
2. The Model



- 大きく3つのモデルを用意する。
- ガスの流出を仮定しない、“standard” model
- スターバーストを仮定した、“burst” model
- ガスの流出を仮定した、“wind” model
- 各モデルに共通したパラメータや仮定は以下。
- IMFのベキ“ α ”； $\text{IMF} \propto m^{(-\alpha)}$
- 星生成効率“ C_{sf} ”； $\text{SFR} = C_{\text{sf}} \times M_{\text{gas}}$
- 星の質量範囲は 0.1 - 50 Ms
- $[\text{Fe}/\text{H}] = -2$ の SN II-like なガスが、タイムスケール 0.3 Gyr で流入する。
- 8 - 10 Ms の星はII型超新星、3 Ms 以下の星はある年齢でAGB星となる。
- Ia型超新星の発生頻度は、0.1 Gyr 後から $t^{(-1)}$ に比例する。

2. The Model (SN Ia delay time)

Ia型超新星が起こり始めるまでの時間が早いか遅いかで、 $[\text{Mg}/\text{Fe}]$ の振る舞いに右図のような違いが現れる。



2. “Burst” Model



- 最大2度のスターバーストを仮定する。
- 1度目は約 **2 Gyr** 前、2度目は約 **0.2 Gyr** 前に起きるとし、それぞれ **0.1 Gyr** の間星生成を続ける。
- スターバースト時の星生成効率は、通常の **100-1,000** 倍になるとする。

2. “Wind” Model



- 超新星や恒星風の影響でガスの流出が起こるとする。
- 超新星によって超新星起源のガスが抜けるモデルを“selective wind model”、恒星風などでISMのガスが抜けるモデルを“non-selective wind model”と呼ぶ。
- “selective”なモデルでは少量のガスで金属量を抜くことができるが、“non-selective”なモデルでは同じ金属量を抜くのに大量のガスを必要とする。

2. Model Parameters



TABLE 1
MODEL PARAMETERS FOR ONE-ZONE CHEMICAL EVOLUTION

Model ^a	α ^b	C_q ^c	C_{sb1} ^d	$t_{sb1,s}$ ^e	$t_{sb1,e}$ ^f	C_{sb2} ^g	$t_{sb2,s}$ ^h	$t_{sb2,e}$ ⁱ	f_{ej} ^j	C_{ej} ^k
S1	2.35	0.006	-	-	-	-	-	-	-	-
S2	2.15	0.004	-	-	-	-	-	-	-	-
S3	2.55	0.01	-	-	-	-	-	-	-	-
S4	2.75	0.017	-	-	-	-	-	-	-	-
S5	2.95	0.02	-	-	-	-	-	-	-	-
B1	2.35	0.004	0.3	11.0	11.1	-	-	-	-	-
B2	2.55	0.004	0.8	11.0	11.1	-	-	-	-	-
B3	2.75	0.004	1.2	11.0	11.1	-	-	-	-	-
B4	2.55	0.006	0.5	11.0	11.1	-	-	-	-	-
B5	2.75	0.006	1.4	11.0	11.1	-	-	-	-	-
B6	2.35	0.004	0.03	11.0	12.0	-	-	-	-	-
B7	2.55	0.004	0.8	10.0	10.1	-	-	-	-	-
B8	2.55	0.004	0.8	8.0	8.1	-	-	-	-	-
B9	2.35	0.004	0.6	6.0	6.1	-	-	-	-	-
DB1	2.35	0.004	0.2	11.0	11.1	0.2	12.8	12.9	-	-
DB2	2.55	0.004	0.55	11.0	11.1	0.55	12.8	12.9	-	-
DB3	2.75	0.004	1.0	11.0	11.1	1.0	12.8	12.9	-	-
DB4	2.55	0.006	0.4	11.0	11.1	0.4	12.8	12.9	-	-
DB5	2.75	0.006	0.9	11.0	11.1	0.9	12.8	12.9	-	-
DB6	2.35	0.004	0.15	11.0	11.1	0.15	12.5	12.6	-	-
W1	2.35	0.01	-	-	-	-	-	-	0.4	-
W2	2.55	0.015	-	-	-	-	-	-	0.4	-
W3	2.35	0.008	-	-	-	-	-	-	0.2	-
W4	2.55	0.012	-	-	-	-	-	-	0.2	-
W5	2.35	0.012	-	-	-	-	-	-	0.2	300.0
W6	2.55	0.015	-	-	-	-	-	-	0.4	-

星生成
効率

Model Parameters

IMFの
ベキ

1度目の
スターバースト

2度目の
スターバースト

ガスの
流出率

Model ^a	α ^b	C_q ^c	C_{sb1} ^d	$t_{sb1,s}$ ^e	$t_{sb1,e}$ ^f	C_{sb2} ^g	$t_{sb2,s}$ ^h	$t_{sb2,e}$ ⁱ	f_{ej} ^j	C_{ej} ^k
S1	2.35	0.006	-	-	-	-	-	-	-	-
S2	2.15	0.004	-	-	-	-	-	-	-	-
S3	2.55	0.01	-	-	-	-	-	-	-	-
S4	2.75	0.017	-	-	-	-	-	-	-	-
S5	2.95	0.02	-	-	-	-	-	-	-	-
B1	2.35	0.004	0.3	11.0	11.1	-	-	-	-	-
B2	2.55	0.004	0.8	11.0	11.1	-	-	-	-	-
B3	2.75	0.004	1.2	11.0	11.1	-	-	-	-	-
B4	2.55	0.006	0.5	11.0	11.1	-	-	-	-	-
B5	2.75	0.006	1.4	11.0	11.1	-	-	-	-	-
B6	2.35	0.004	0.03	11.0	12.0	-	-	-	-	-
B7	2.55	0.004	0.8	10.0	10.1	-	-	-	-	-
B8	2.55	0.004	0.8	8.0	8.1	-	-	-	-	-
B9	2.35	0.004	0.6	6.0	6.1	-	-	-	-	-
DB1	2.35	0.004	0.2	11.0	11.1	0.2	12.8	12.9	-	-
DB2	2.55	0.004	0.55	11.0	11.1	0.55	12.8	12.9	-	-
DB3	2.75	0.004	1.0	11.0	11.1	1.0	12.8	12.9	-	-
DB4	2.55	0.006	0.4	11.0	11.1	0.4	12.8	12.9	-	-
DB5	2.75	0.006	0.9	11.0	11.1	0.9	12.8	12.9	-	-
DB6	2.35	0.004	0.15	11.0	11.1	0.15	12.5	12.6	-	-
W1	2.35	0.01	-	-	-	-	-	-	0.4	-
W2	2.55	0.015	-	-	-	-	-	-	0.4	-
W3	2.35	0.008	-	-	-	-	-	-	0.2	-
W4	2.55	0.012	-	-	-	-	-	-	0.2	-
W5	2.35	0.012	-	-	-	-	-	-	0.2	300.0
W6	2.55	0.015	-	-	-	-	-	-	0.4	-

“standard”

“one-burst”

“two-bursts”

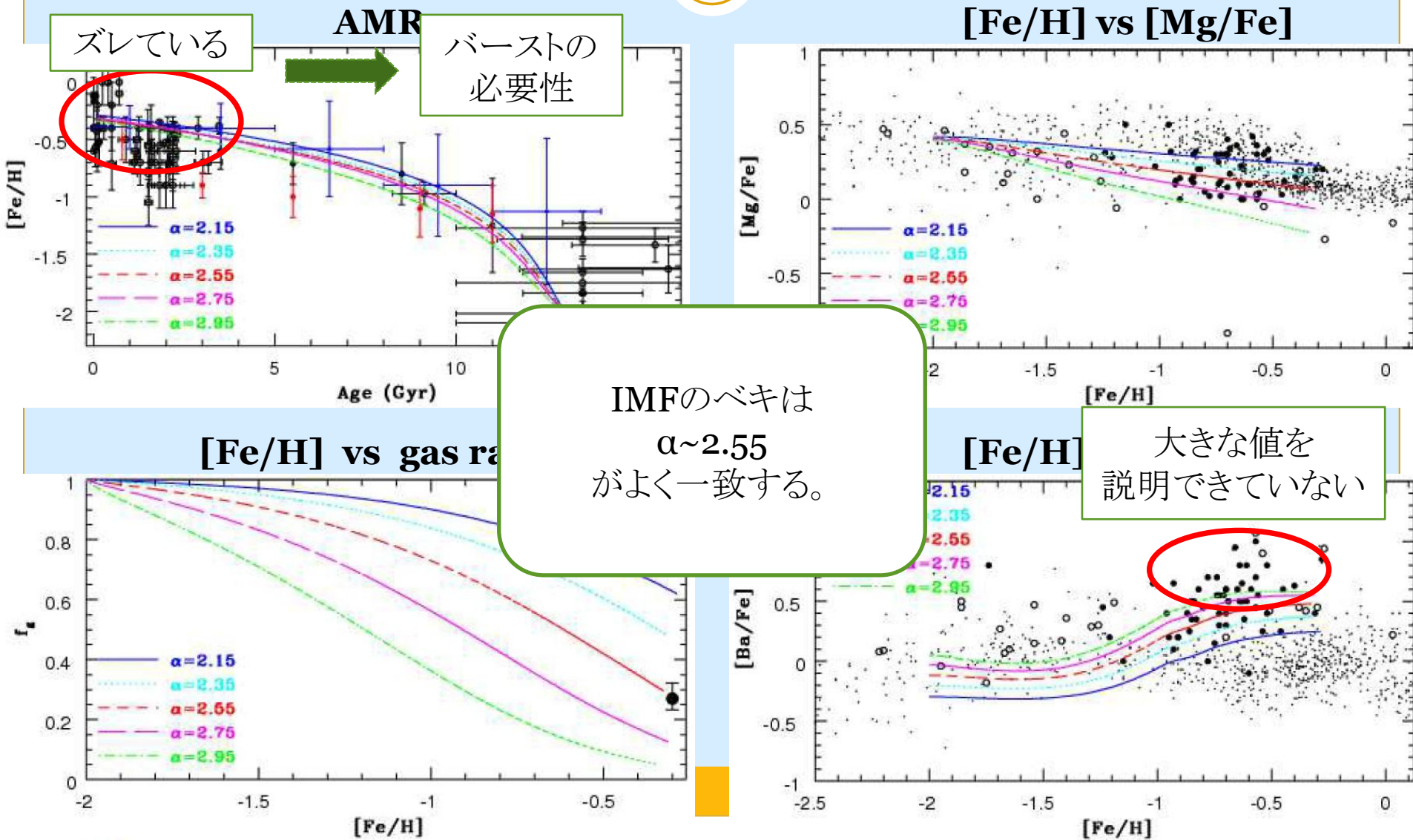
“wind”

3. Results



- IMFのベキや星生成率を変えたことで結果にどのような変化が現れるか、観測と比較しながらLMCの化学進化について議論する。
- AMR ;
各時代の金属量の推移が分かる。
- $[\text{Fe}/\text{H}]$ vs $[\text{Mg}/\text{Fe}]$;
Ia型超新星の寄与が現れ始めた時代が分かる。
- $[\text{Fe}/\text{H}]$ vs $[\text{Ba}/\text{Fe}]$;
AGB星(低質量星)の寄与が現れ始めた時代が分かる。
- $[\text{Fe}/\text{H}]$ vs gas ratio ;
現在の金属量とガス比を説明できるか見る。

3. “Standard” Model

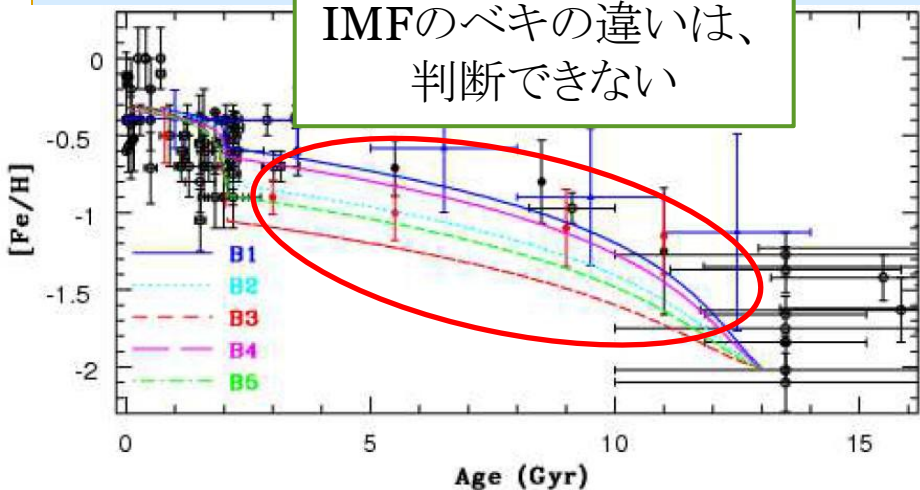


3. “One-Burst” Model

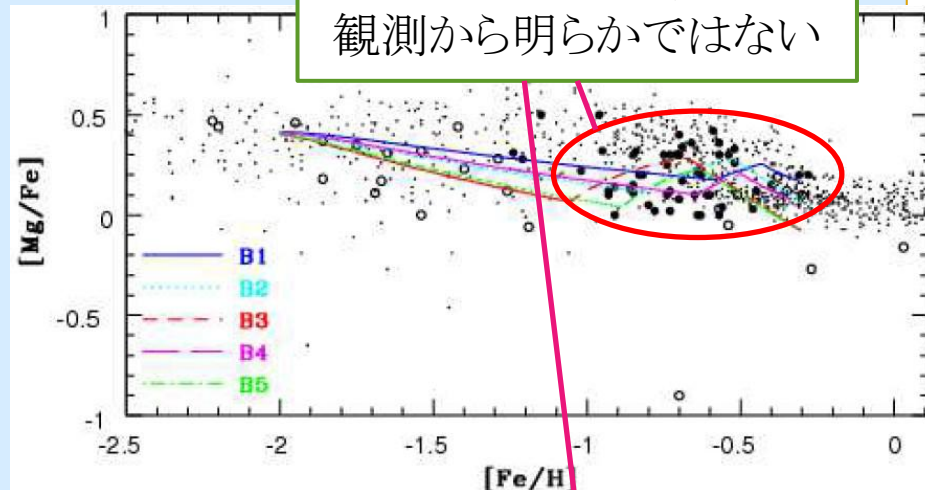


AMP

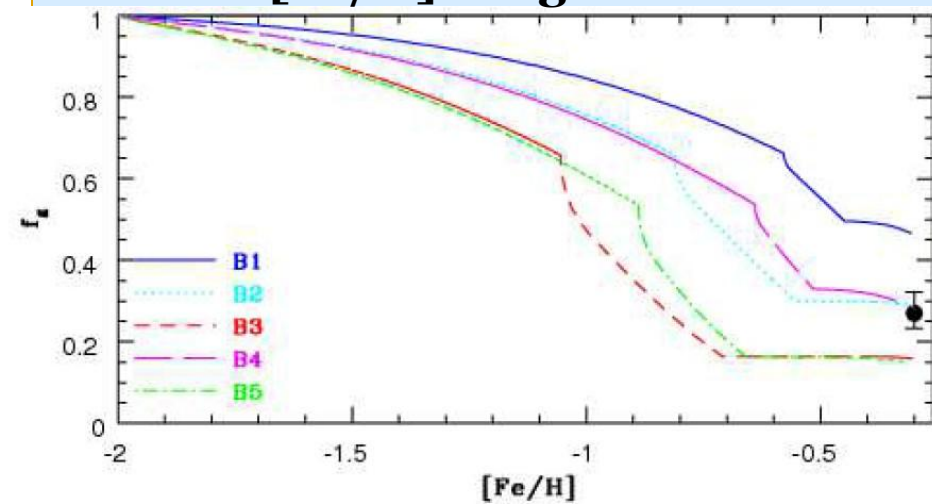
IMFのベキの違いは、
判断できない



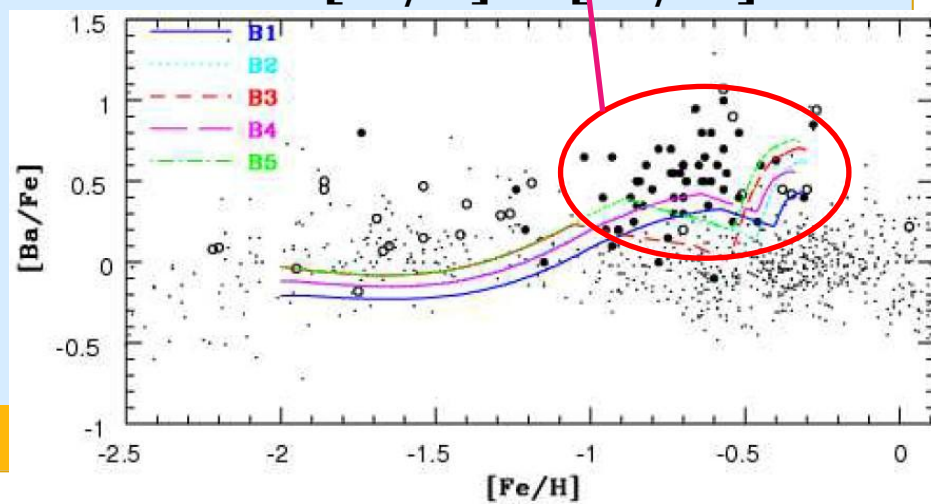
burstによる値の増加は、
観測から明らかではない



[Fe/H] vs gas ratio

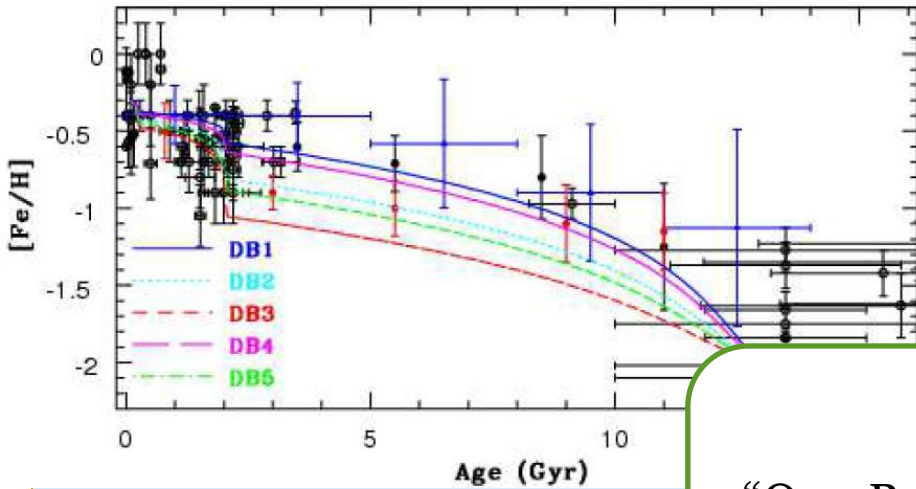


[Fe/H] vs [Ba/Fe]

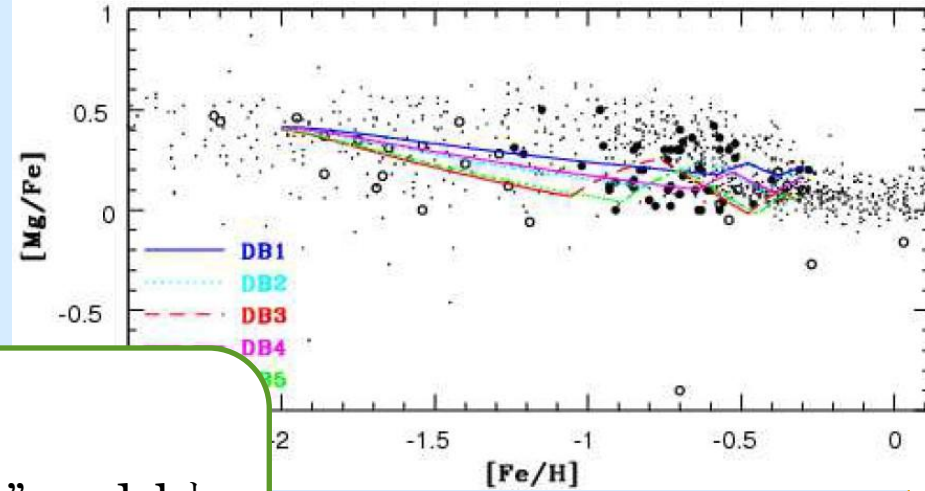


3. “Two-Bursts” Model

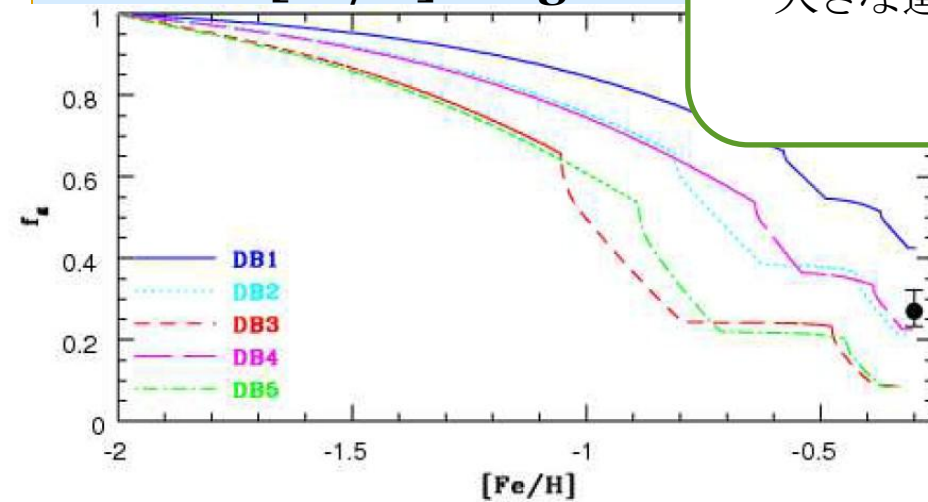
AMR



$[\text{Fe}/\text{H}]$ vs $[\text{Mg}/\text{Fe}]$

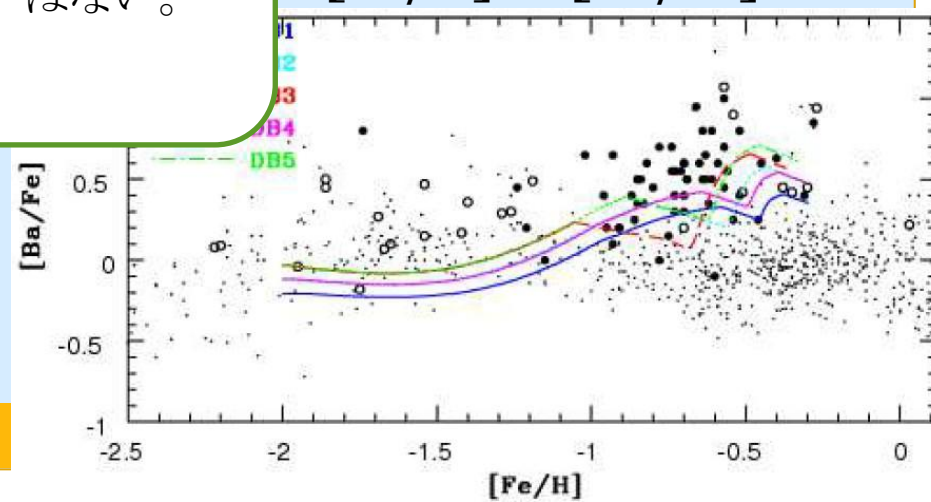


$[\text{Fe}/\text{H}]$ vs gas ra



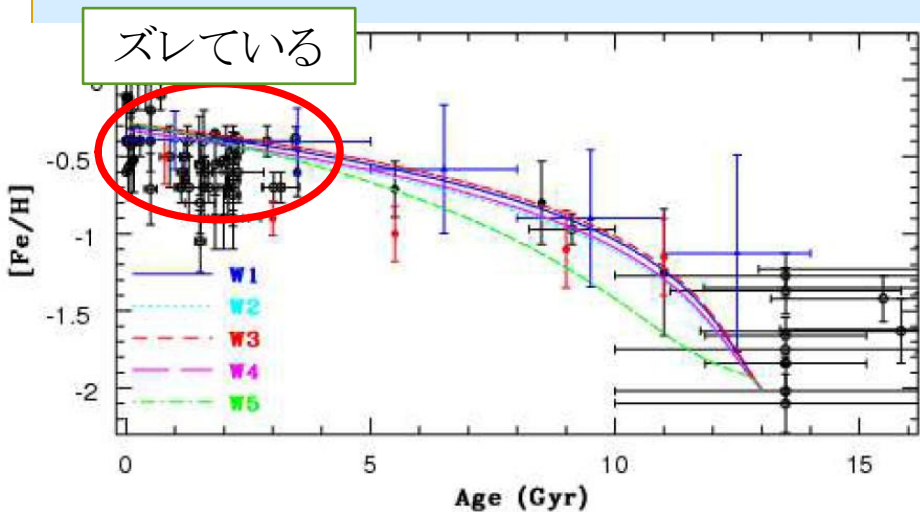
“One-Burst” model と
大きな違いはない。

$[\text{Fe}/\text{H}]$ vs $[\text{Ba}/\text{Fe}]$

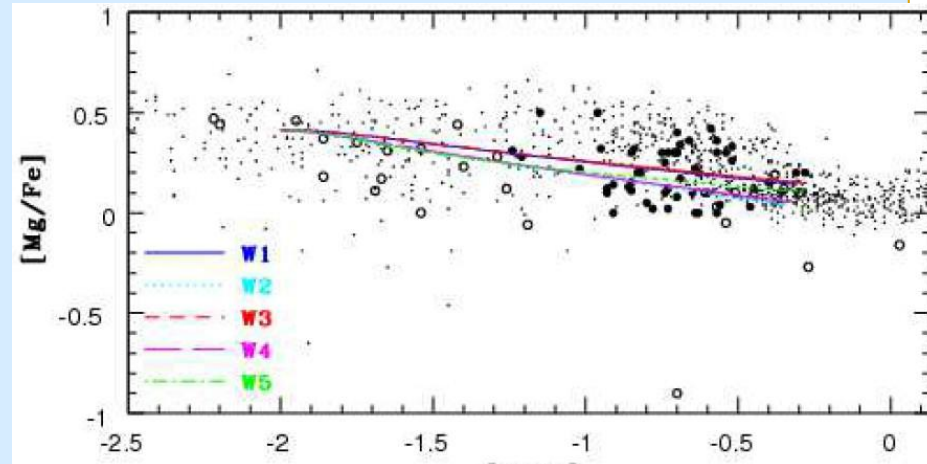


3. “Wind” Model

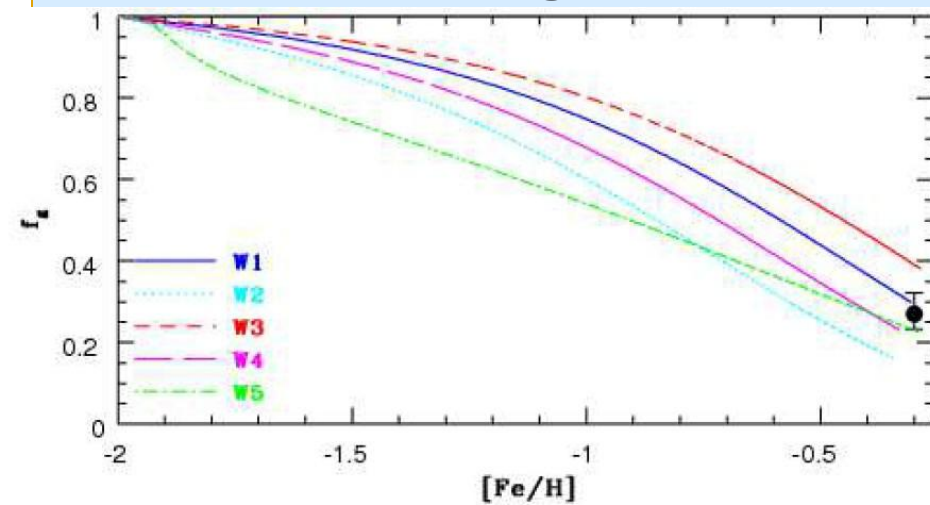
AMR



$[\text{Fe}/\text{H}]$ vs $[\text{Mg}/\text{Fe}]$

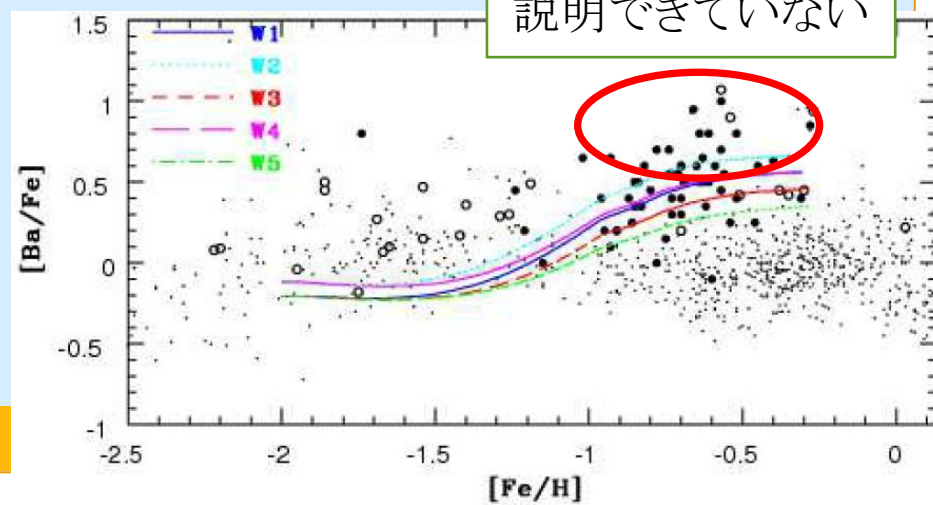


$[\text{Fe}/\text{H}]$ vs gas ratio



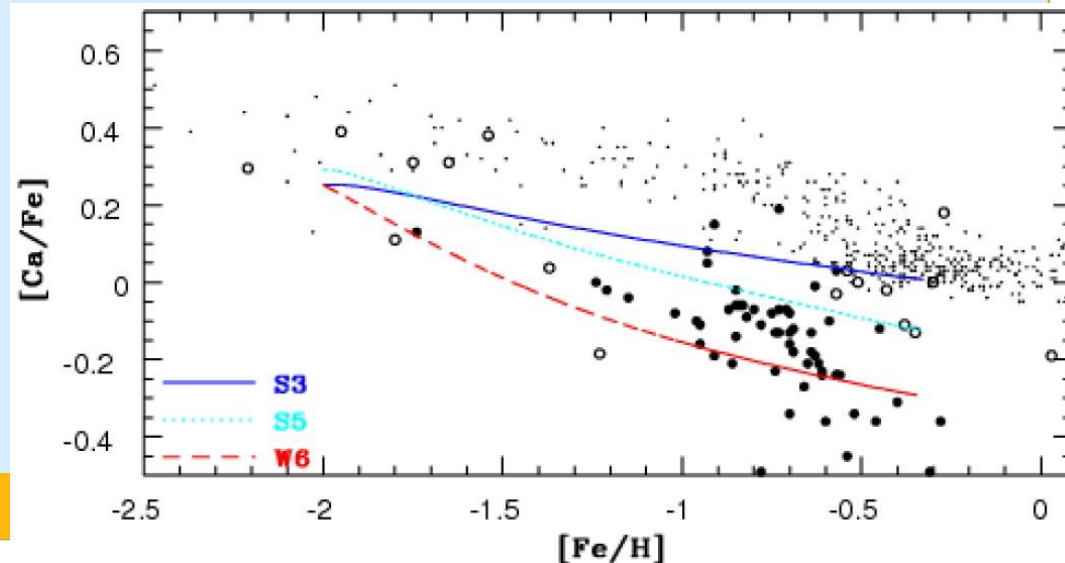
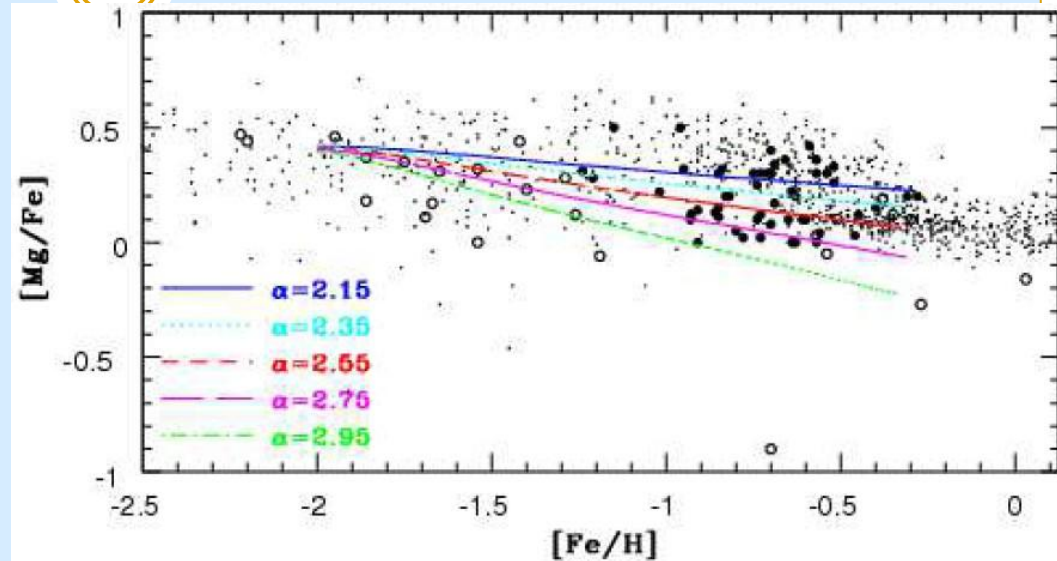
$[\text{Fe}/\text{H}]$

大きな値を
説明できていない



3. $[\text{Ca}/\text{Fe}]$ vs $[\text{Fe}/\text{H}]$

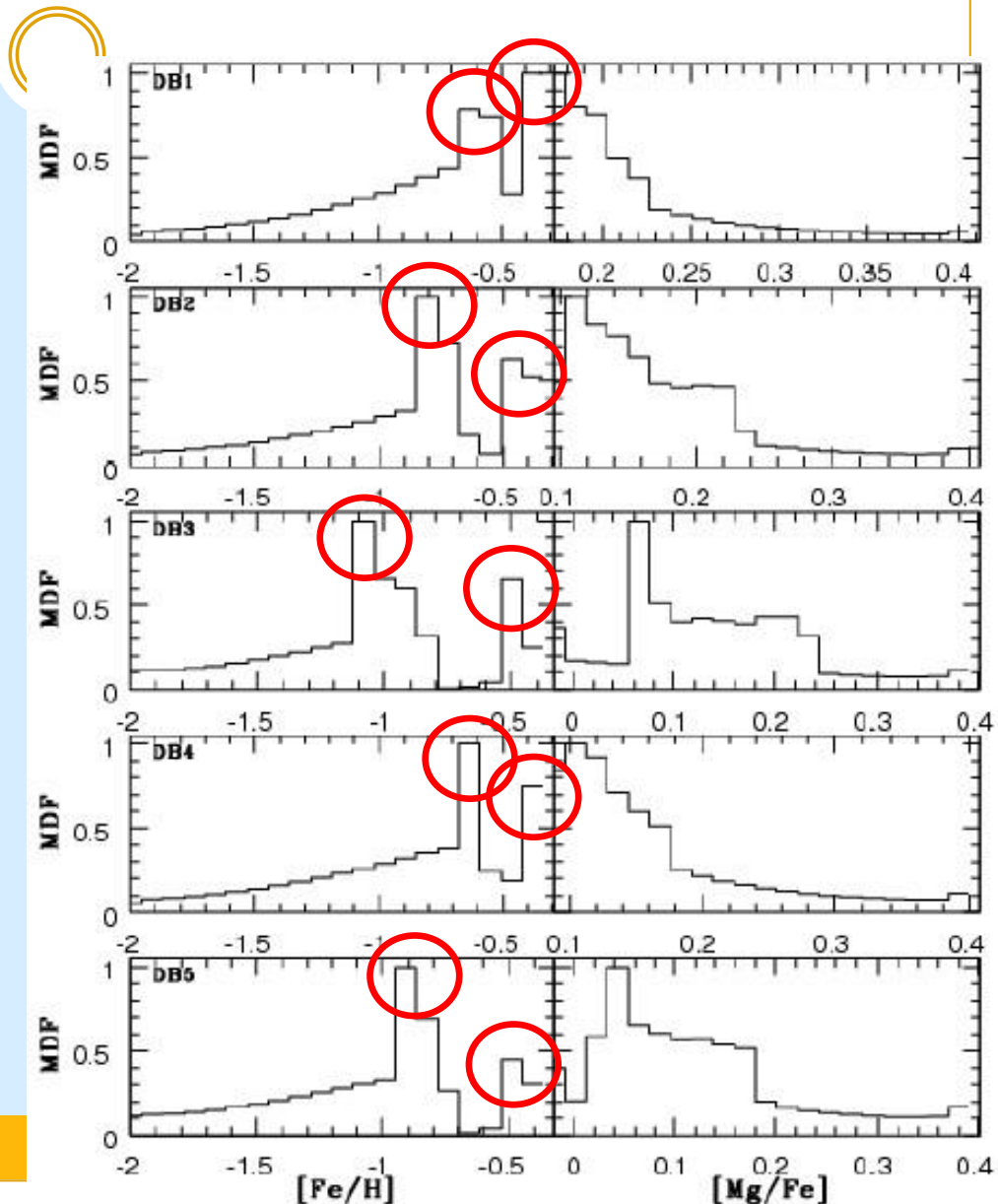
天の川銀河の星(黒点)と比べて、 $[\text{Ca}/\text{Fe}]$ の方が $[\text{Mg}/\text{Fe}]$ より差が大きい。
このことから、LMCではCaが余計に流出していることが考えられる。



3. Metallicity Distribution Function

2度のスターバーストが起きた場合、MDFには右図左側のような2つのピークが現れると予測される。

実際にはこのような特徴は観測されていないことから、2度目のスターバーストは規模が小さかったことが推定される。



3. Results



- IMF のべきは $\alpha \geq 2.55$ とする方が観測を説明しやすく、Salpeter IMF よりも重い星が少なかったと予測される。
- 今回示したモデルでは、 $[\text{Ba}/\text{Fe}] > 0.9$ という高い値を説明することはできなかった。
- この高い値を説明するためには、AGB星由来のガスから直接星生成を行うか、超新星由来のガスの半分が抜けてしまう状況を考える必要がある。

4. Discussion



- 観測された LMC の星の $[\text{Mg}/\text{Fe}]$, $[\text{Ba}/\text{Fe}]$ の分散が大きいいため、スターバーストの痕跡は読み取ることはできなかった。
- IMF のベキは、 $\alpha \sim 2.55$ のモデルがよく観測と一致するが、Salpeter IMF を否定するほどの判断は今回の比較からは行えない。
- AMR で 1.5 Gyr 前付近に見られる ”へこみ” は、実際にある性質なのであろうか。
- $[\text{Ba}/\text{Fe}] > 0.9$ という高い値はどのモデルでも説明できなかったが、どのような状況が必要であるのか。

4. Discussion (AMRでの“へこみ”)



- AMR での“へこみ”を説明するためには、低金属量のガスが大量に流入する必要がある。
- $[\text{Fe}/\text{H}] = -1.6$ のガスが流入する場合、 $10^{(9)} \text{ Ms}$ のガスが必要であり、major merger に近い現象が 1.5 Gyr 前に起きたことになる。
- major merger が起きたのであれば、LMC のディスクも影響を受けているはずである。
- AMR の“へこみ”が実際に存在するかどうか、今後の観測で確認する必要がある。

4. Discussion ($[\text{Ba}/\text{Fe}] > 0.9$ の説明)



- 今回のモデルで $[\text{Ba}/\text{Fe}]$ の大まかな振る舞いは説明できたが、 $[\text{Ba}/\text{Fe}] > 0.9$ という値は説明できなかった。
- これは、AGB星から放出されたガスがISMと十分に混合されていないためと考えられる。
- 可能性のあるシナリオとして、AGB星から放出されたガスが HI hole (超新星爆発でISMが吹き飛ばされた空間) にとどまり、そこで星生成が行われたというものである。
- 今後の観測で $[\text{Ba}/\text{Fe}]$ が高い星の空間分布を確認する必要がある。

5. Conclusions



- 現在のガス比と金属量を説明するには、IMFのベキが $\alpha \geq 2.55$ である方がよい。
- ただし超新星のガスが選択的に抜ける場合は、Salpeter IMF でもよい。
- [Ca/Fe] の振る舞いからは、Ia型超新星の寄与は早かった(0.1 Gyr)ことが予測されるが、[Mg/Fe] の振る舞いには顕著に現れていない。
- [Mg/Fe] や [Ba/Fe] にはスターバーストによる影響が顕著に現れてはいない。
- AMR に見られる 1.5 Gyr 前の ”へこみ” からは、ガスが大量に流入したことが示唆される。そのため、SMC から LMC にガスが移動したか、LMC は gas-rich merger を起こしたことが推測される。
- [Ca/Fe] の値が比較的低いことから、LMC では何らかの理由で Ca が余計に抜けていることが考えられる。