

1. イントロ

矮小銀河の性質

	Leo I	Carina	Fornax	Draco	U Mi	Leo II
星形成史	80%が宇宙後半 で形成	中間年齢星	中間年齢星	老齡星	老齡星	老齡星
質量	$2 \cdot 10^7$ Mo	$2 \cdot 10^7$ Mo	$7 \cdot 10^7$ Mo			
メタル量	低	低	高・分散大			

メタル量は総光度または質量に相関するが、SFHには依らないらしい。

Fornax

Sagittarius と並んで、RGB の幅 (Saviane et al 2000) から考えると、大量のメタルを銀河内にため込んできたらしい。

田村、平下、竹内 (2001) は Fornax は、天の川付随銀河の中では、アンドロメダ周囲のもっと大きい矮小銀河と似ている唯一の天体とした。

球状星団をもつ二つ (Fornax, Sagittarius) の一つ

CCD → 青い水平枝 (古い種族) + 発達した RC (中間年齢種族) + 明るい主系列 (数百万年)

若い星が見つかる中心部に HI ガスは発見されていない。

年齢とメタルの縮退を解かないと SFH、メタル-年齢関係が分からない。

→ 個々の星でメタルを知る必要がある。

2. 観測

UT1 (8. 2 m) + FORSI (17 天体) \* 7 フィールド

2. 1. 選択

$16.60 < I < 18.35$        $-3.24 (B-R) + 23.02 < I < -2.61 (B-R) + 23.52$       → 2534 天体

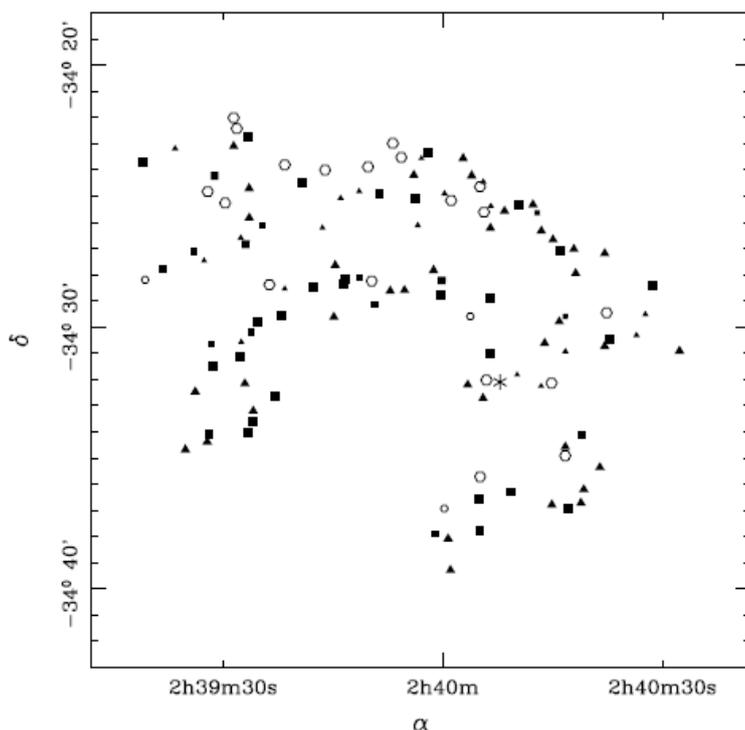


図1117天体の位置。  
 6角形 = 低メタル星 [Fe/H] < -1.3  
 ■ = 中間メタル  
 ▲ = 高メタル [Fe/H] > -0.7

2. 2. 分光リダクション

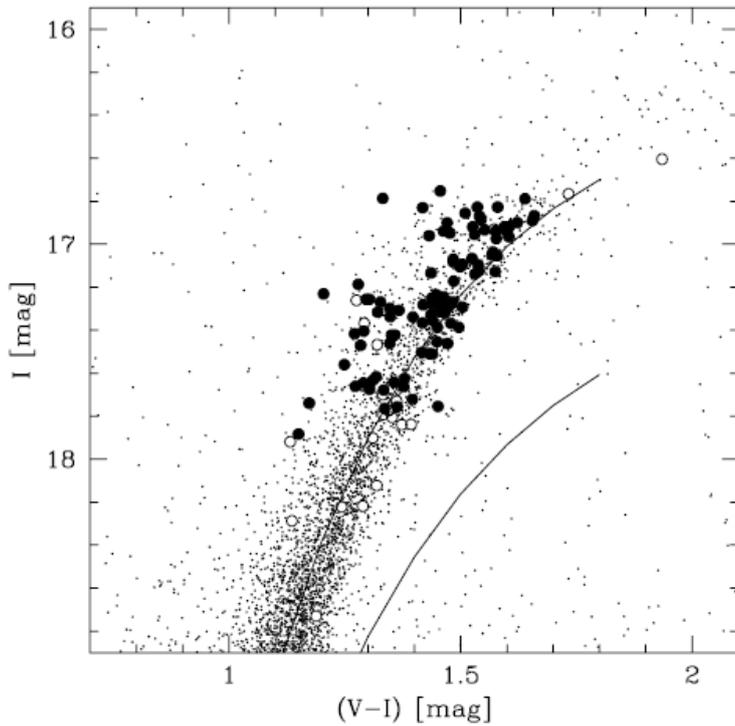


図2

●=メンバー

○=非メンバー

線=[Fe/H]= -1.1と-0.7の球状星団

## 2. 4. CaII 等値幅

RHS97=Rutledge, Hesser, Stetson 1997 MN 109, 907 に合わせるため

彼らの準等値幅  $\Sigma Ca$  を使用。  $\Sigma Ca = 0.5 * W1 + W2 + 0.6 * W3$

## 3. キャリブレーション

### 3. 1. CaII Triplet のメタル量キャリブレーション

球状星団のような老齢で低メタルの星に使えることはわかった。

高メタル、もっと若い星ではどうか？

——> メタルがほぼ等しい、M11 (t=0.25Gyr, [Fe/H]=0.10) と M67 (t=4Gyr, [Fe/H]=0.0) を用いてチェック

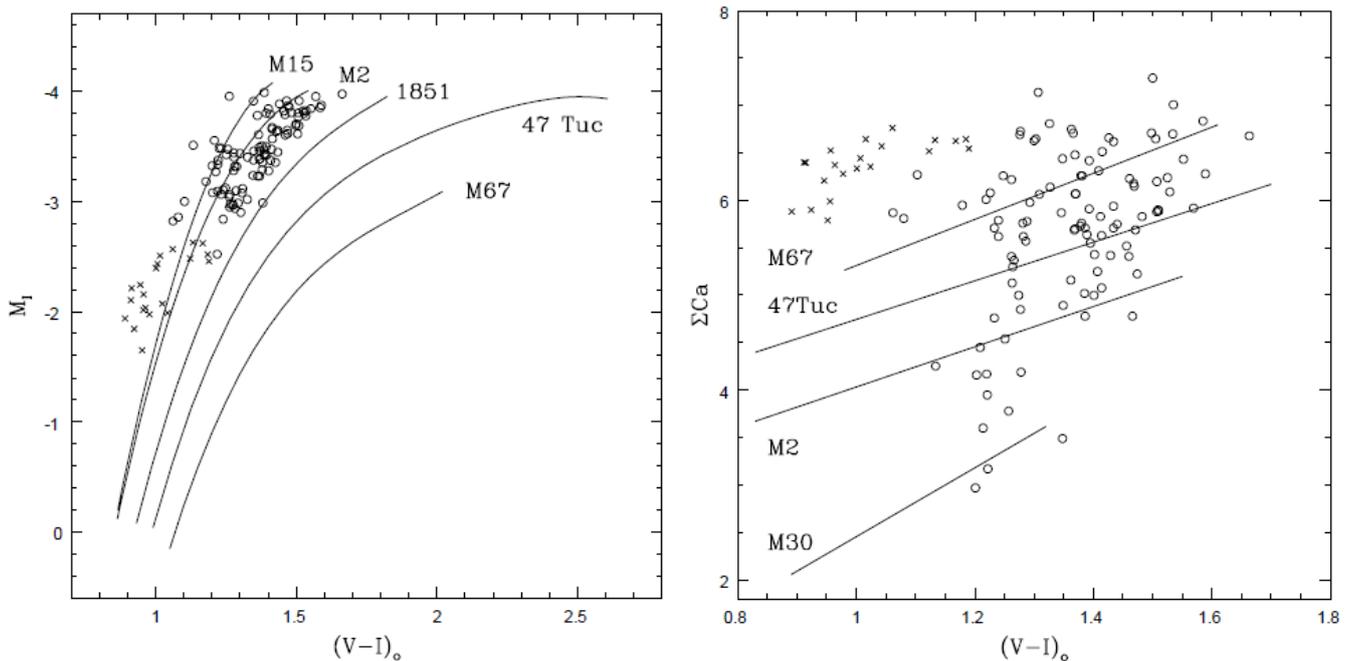


図5 M11 と M67 は2つの図で全く異なる場所。同じ温度 (V-I) でも重力が大きく異なるからである。

×=M11      ○=Fornax

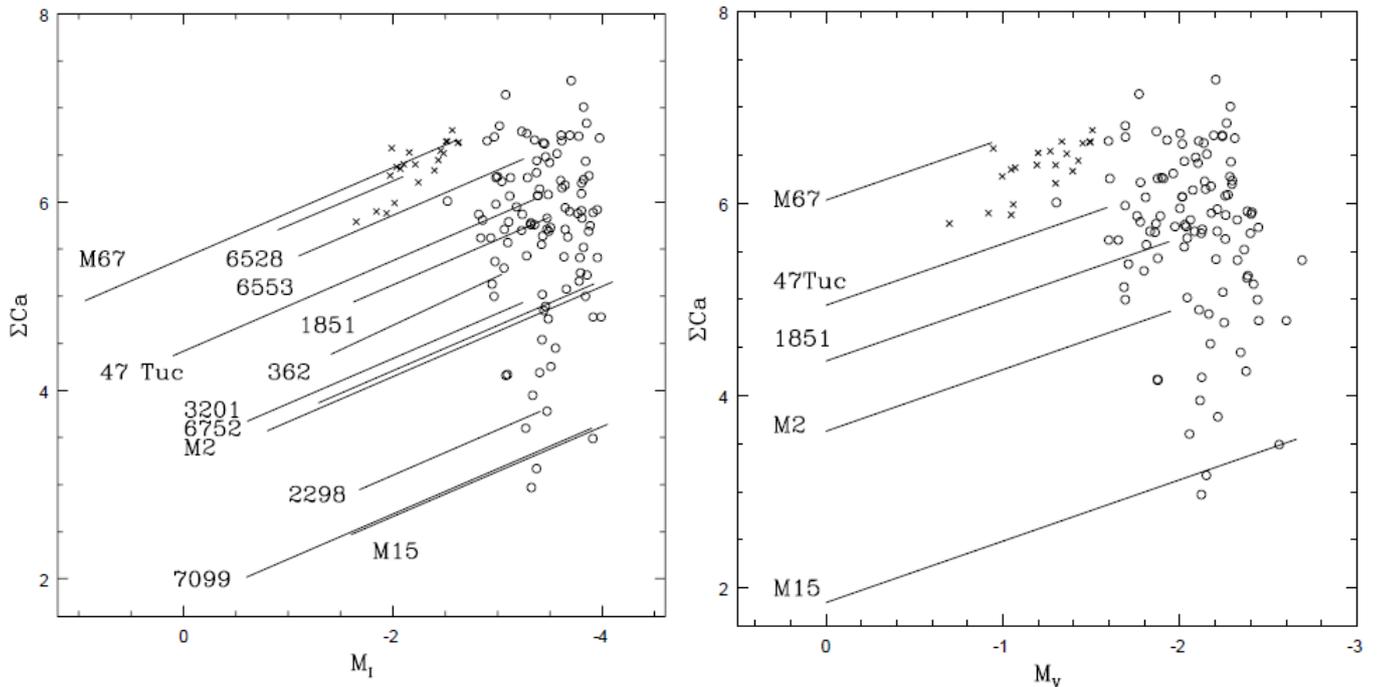


図5 M11とM67の位置を見ると、CaII Tripletのメタル量キャリブレーションは $M_I$ を使うと $M_V$ より年齢効果に鈍感であることが分かる。 $M_I$ がメタル量決定法に適當である。

調整 $W_0$ (CaT at  $M_I=0$ )に Carretta/Gratton スケールを適用すると M11に対して $[Fe/H]=0.02$ を与える。高精度分光による $[Fe/H]=0.10$ と比べると誤差の程度が分かる。 $M_V$ で同様に求めると $[Fe/H]=-0.21$ になる。  
 ——>  $M_I$ を使って、球状星団(老齡)のキャリブレーションでFornaxのもっと若い星のメタル量を求める。Fornaxは球状星団より若く、M67より青く、M11より明るいのでM11のチェックでは不十分であることは注意する必要がある。

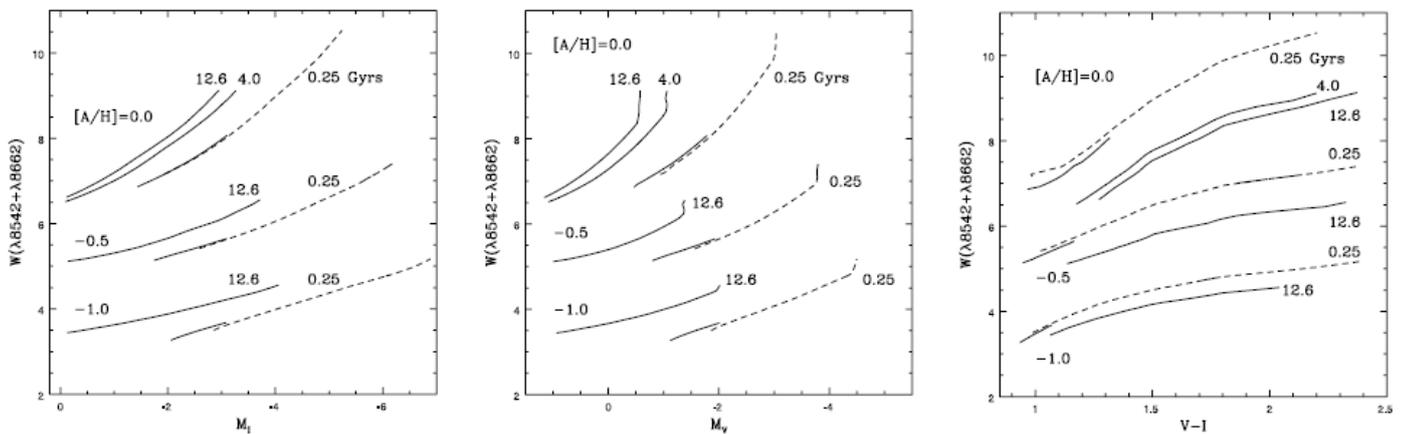


図16 モデルに基づくCaII強度。

特に、上のモデル計算に見るように、高メタルで明るい星では、等メタル線が直線から反り返る危険がある。この反り返りが本当にあると、Fornaxの高メタル分布に影響を及ぼす。今回は無視する。

メタルキャリブレーション  $\Sigma Ca$  対  $M_I$  面で行う。 11球状星団+M67 使用  
 星団毎に、 $\Sigma Ca = -0.48 * M_I + const$  が良く成立。傾きが共通なことに注意。

——> 基底(reduced) $W_0 = \Sigma Ca + 0.48 * M_I$  を星団毎に決めて、最小二乗法でフィットして、  
 $[Fe/H] = -2.286 + 0.057W_0 + 0.071W_0^2$  (1)

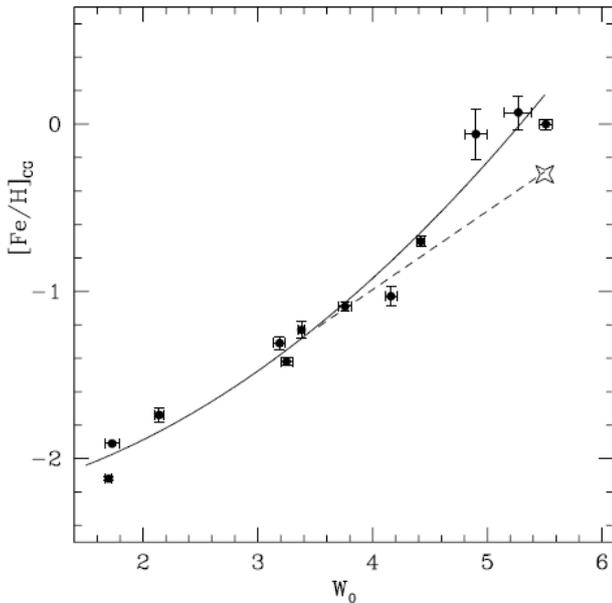


図7 球状星団データを用いた[Fe/H]のキャリブレーション

実線=(1)式

点線=(2)式は  
 $W_0=5.5$ で  
 $[Fe/H]=-0.3$   
 とし、高メタル球状星団データを捨てた結果。

図5を見ると、 $[Fe/H] < -1.2$ ではFornax星に適用しても安全であるが、その上ではFornax星がはみ出ている。そこでは、Fornaxほど明るく、青く、 $\Sigma Ca$ が大きい星団サンプルがない。

M11は青くて $\Sigma Ca$ も大きい、明るいサンプルがない。

——> 高光度、高メタル部分の精度は $\Sigma Ca - W_0$ 関係の線形性に依存している。

LMCサンプル Cole, Smecker-Hane, Gallagher 2000 球状星団サンプルより高メタル、高光度  
 $CaT$ 以外の手法でメタル決定の星が多い  
 若い種族で典型的に $[Fe/H] = -0.3$

——>  $W_0=5.5A$ で $[Fe/H] = -0.3$ と定める。FornaxのCMDが球状星団からずれる。 $[Fe/H] = -1.2$ で離れる。

$A[Fe/H] = -2.87 + 0.47 * W_0$  (2) (1)式は  $M_i > -2$ 、(2)式は  $M_i < -2$  で使う。

Fornaxへの応用

$E(V-I) = 0.07$  Buonanno et al 1998 Fornax内の4球状星団観測から。

$V(HB) = 21.28$

$M_v(HB) = 0.47$  Demarque et al モデル 2000

——>  $(m-M)_v = 20.47$

結果は表3と図6、図9

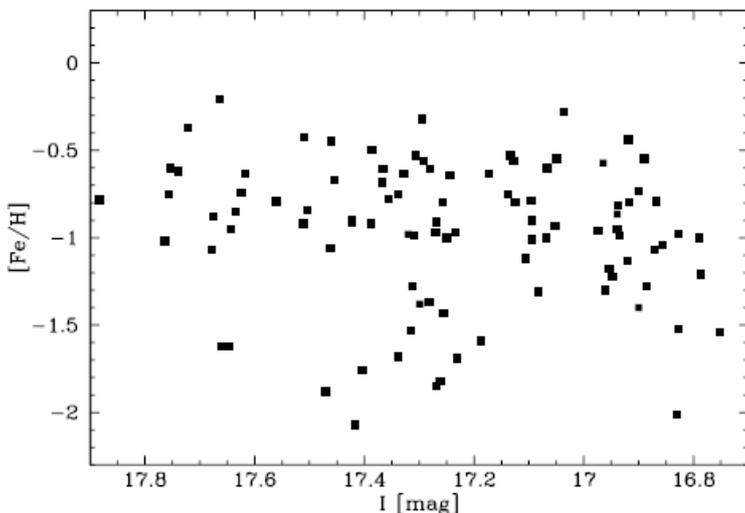


図6 Fornaxのメタル量とI

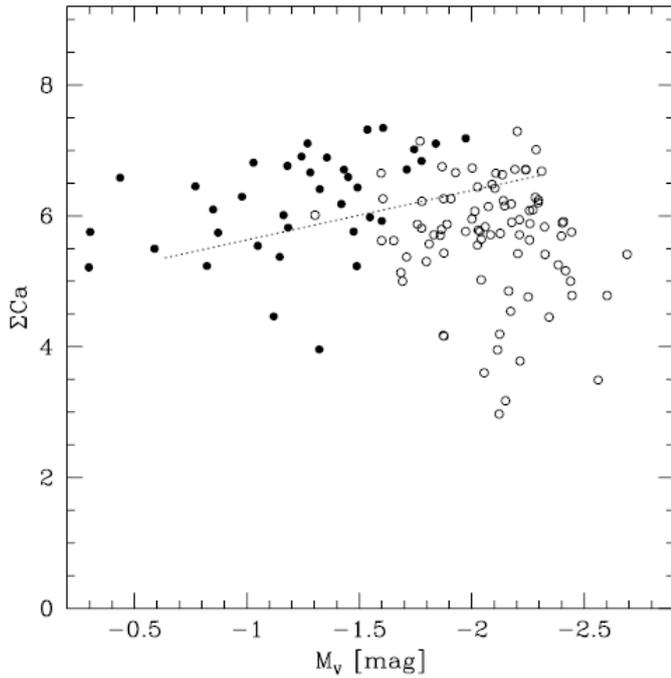


図8 ●=LMC (Cole et al)、 ○=Fornax  
点線は等メタ線の勾配を示す。

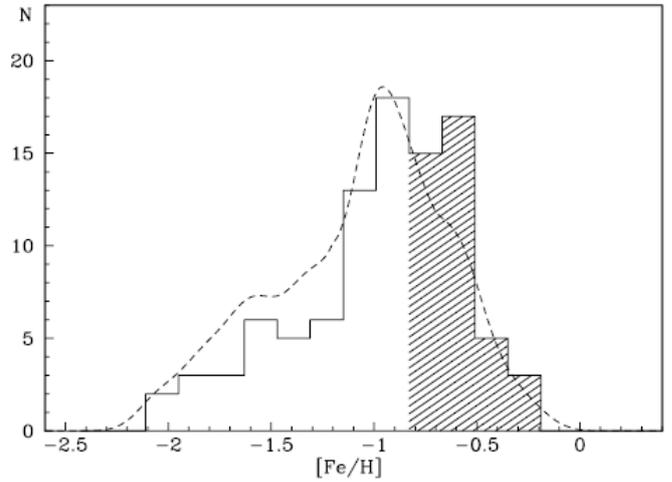


図9 Fornax 巨星のメタル分布。斜線部の精度はやや怪しい。点線は背後（全体の意？）の分布

メタル分布は Tolstoy et al 2001 と大体一致している。大部分は  $-1.5 < [Fe/H] < -0.7$

Tolstoy et al では、ピークが  $[Fe/H] = -1.2$  で  $-1 < [Fe/H]$  に 57% サンプル RGB チップの 1-3 等下  
今回は、 ピークが  $[Fe/H] = -0.9$  で  $-1 < [Fe/H]$  に 67% サンプル RGB チップから 1 等以内

### 3. 2. 推測される背後の種族全体のメタル量分布

### 3. 3. 誤差の要因

### 4. 星形成史

#### 4. 1. メタル量増加

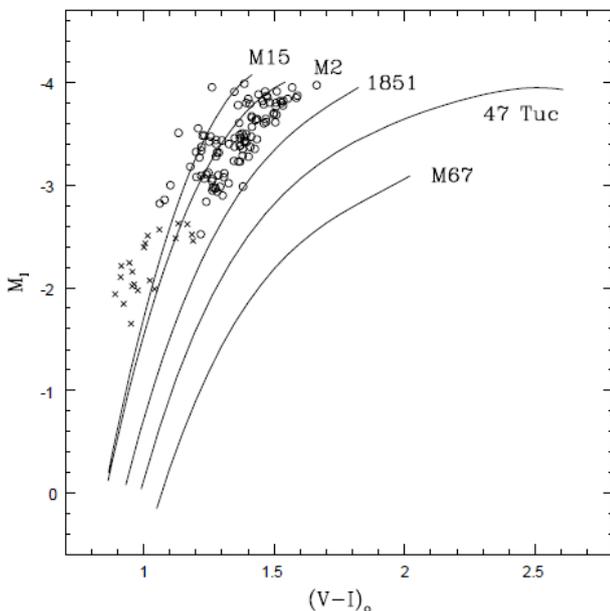


図5(左)を見ると、Fornax データが M15 と N1851 の間に存在することが分かる。もし Fornax の星の年齢が球状星団と同じだったら、 $-1.1 < [Fe/H] < -2$  で、 $\Sigma Ca$  も球状星団の2本の線の間に入るだろう。しかし、

M11 の位置は、若くて高メタルの星団が年取って低メタルの星団と重なることを示している。

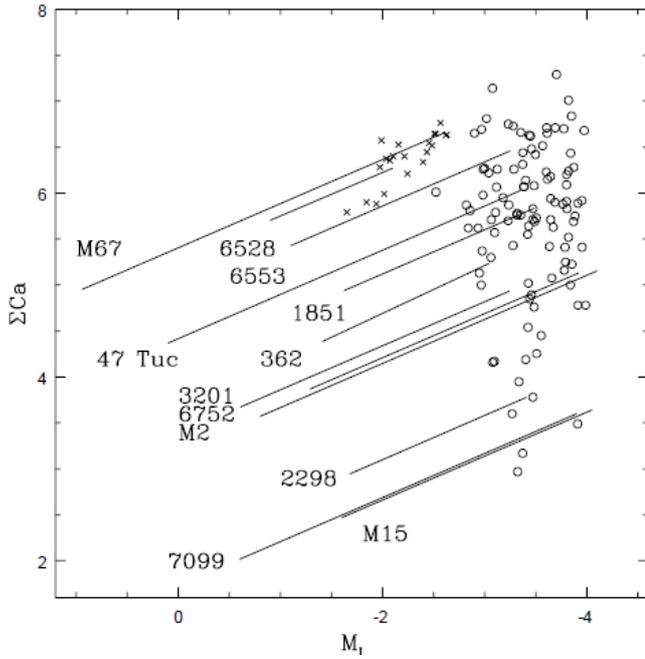


図5右上 Fornax は N1851より上にあり、メタルがN1851より高いことを示唆している。同じ星が前の CMD では N1851 より青かったということは、Fornax の星が N1851 よりかなり若いことを意味する。これは M11 の場合と同じである。

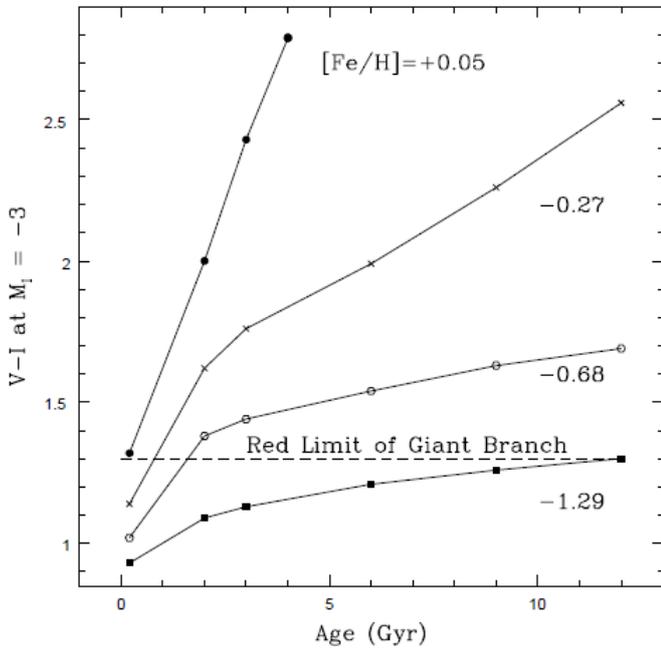


図10  $M_I = -3$ における(V-I)の年齢変化。

点線=Fornax RGBの赤い方のリミット

例えば、CaT から推定される Fornax メタル量として普通の $[Fe/H] = -0.68$ だと、年齢 $< 2\text{Gyr}$ つまり、CaTの結果は予想外に高いメタル量と非常に若い年齢の双方を意味する。

——>

(1) AMRはタイト。さもないと分散の結果、高齢で47Tucくらい赤い星が出てくるはずだが実際にはない。

(2) CMDの位置から、

[Fe/H]	年齢
-1	$< 5\text{Gyr}$
-0.6	$< 2\text{Gyr}$

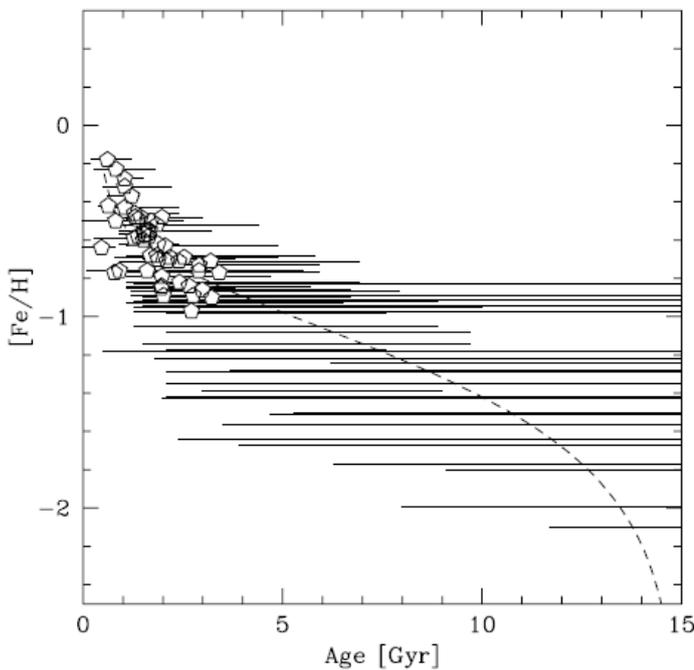


図11 FornaxのAMR

年齢は Girardi et al 2000 モデルから。バーは95%確実範囲。バー $< 5\text{Gyr}$ の時は最も確かな年齢を五角形で示す。点線はSFR一定の閉じた箱モデル。

FornaxのSFH

3Gyr前に $[Fe/H] = -1$ まで達した。その後も増加し、最近では $[Fe/H] = -0.5$

TABLE 5  
INFERRED AGE DISTRIBUTION AND STAR FORMATION RATE

Age Interval (Gyr)	Stars in Sample	Corrected to Total Population	Corresponding SFR (mean = 1)
0-2.....	35	26	2.4
2-4.....	31	23	2.1
>4.....	27	34	0.6

SFHを表5にまとめた。最近4GyrはSFRが大きい。

4. 2. SFHはCMDと合うのか? —> AMR+SFH+進化モデル=合成CMD

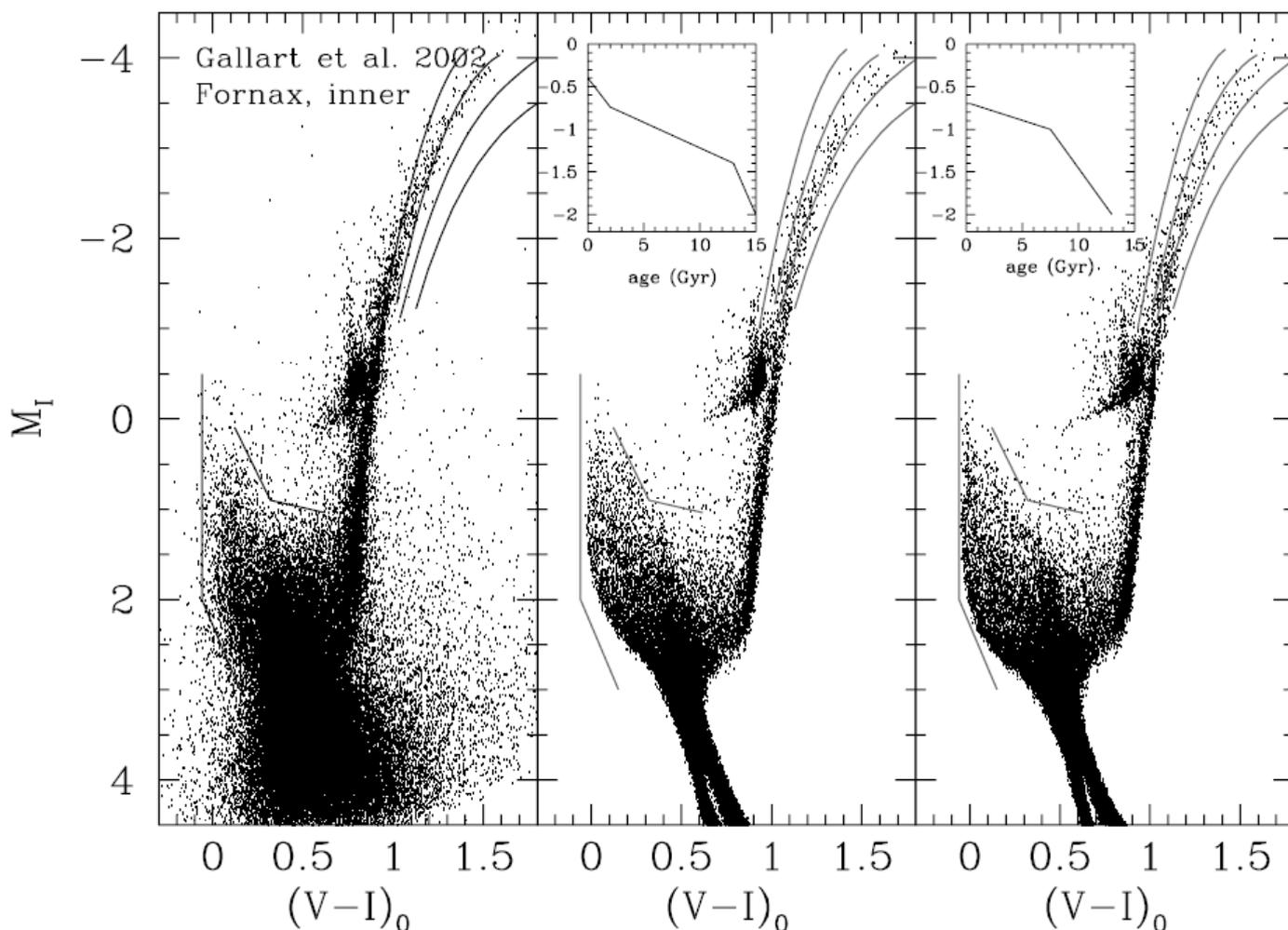


図12 左: 中心6.7' x 6.7'の観測CMD 線=主系列、M15, M2, NGC1851, 47Tuc  
 中: t=0.5-12GyrでSFR=一定 AMR=図11で合成CMD  
 右: SFR中と同じ。AMR=Saviane et al2000の合成CMD

合成CMDのRGB位置は観測と合わない。これは進化モデルで合成CMD作成時の共通の問題点。

MSの位置はもっと信頼できる。どちらのモデルもあっているが、右は少し青すぎる。これは若い星のメタル量が低すぎるため。

というわけで、

若くて高メタル種族は、分光観測だけでなく、CMDのMS部分のマッチのためにも必要であることが示された。

## 5. 討論：局所群銀河としての Fornax

Fornax のメタル分布と AMR はこの銀河が他の dSph よりも LMC や MW に近いことを示した。

3 者に共通なのは、

- (1) 主成分はかなり高メタルで低メタル高齢のテールを引いている。
- (2) AMR=初期の急速なメタル増加、ゆるい時期、最近のメタル増加の加速

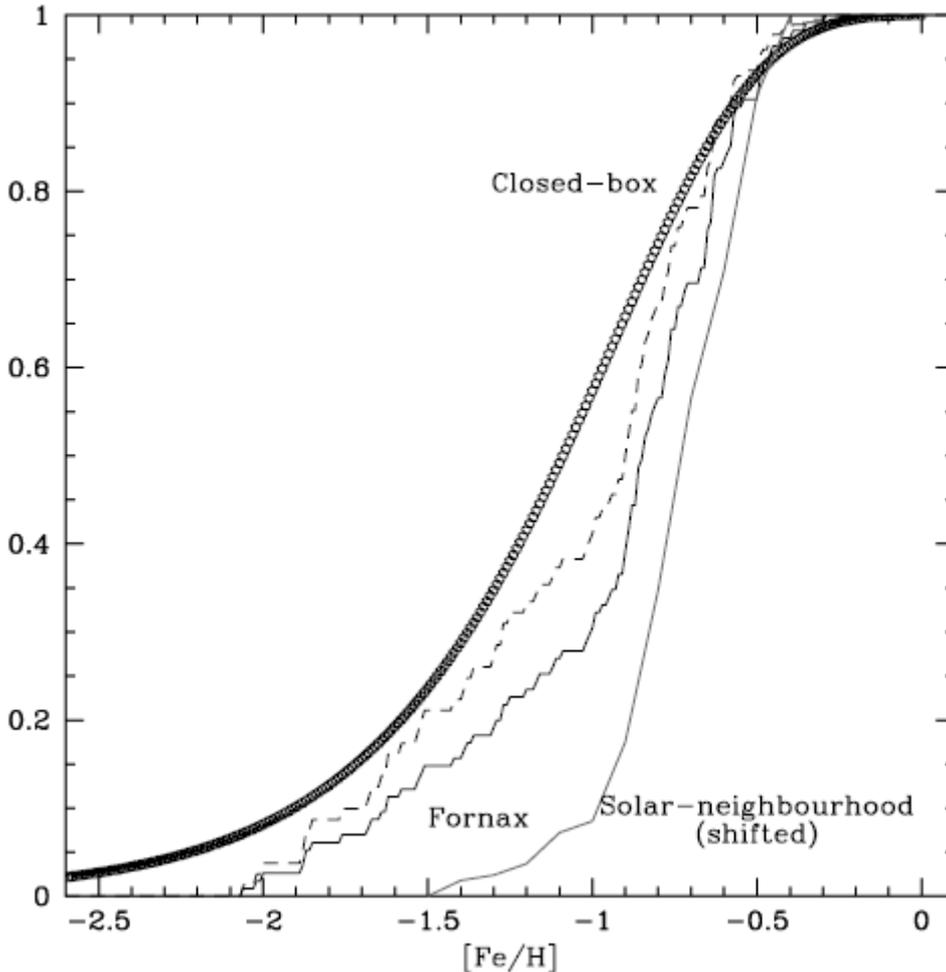


図 13 累積メタル分布。点線＝観測から類推したバックのメタル分布

上の図を見ると、Fornax は銀河系より閉じた箱モデルにずっと合う。周辺部まで観測に入れるとさらによく合うだろう。

### 5. 1. ガスはどこ？

ガスが吹き飛んだ最後の SF 直後？

近くにはまだガスがある？

銀河系に近づき過ぎてはぎとられた？

### 5. 2. 矮小銀河の進化モデルとの比較

Mac Low/Ferrara 1999, Ferrara/Tolstoy 2000 銀河進化モデル

Fornax は LF99 モデルのパラメター空間のどこに位置するのか？

ダークマター+バリオン= $7 \times 10^7 M_{\odot}$  (Mateo 1998)

$(M/I) \nu = 4.4 + (M/L) \text{baryon} = 1 (0.5-12 \text{Gyr 一定 SFR}) \Rightarrow M_{\text{baryon}} = 1.6 \times 10^7 M_{\odot}$

よって、 $\text{SFR} = 1400 M_{\odot}/\text{Myr} \rightarrow \text{SFR}(10-100 M_{\odot} \text{ for SNeII}) = 170 M_{\odot}/\text{Myr}$

$\langle \text{SNe} \rangle = 20 M_{\odot}$  として、 $8.5 \text{ SNe}/\text{Myr}$

このレートだと MF99 モデルではマス放出効率=0.01. すべてのメタルは放出される。

これは、Fornax がかなりのメタルを保持している事実に反する。

#### 6. まとめ

GaT から若く (2 Gyr) 高メタル星 ( $[\text{Fe}/\text{H}] = -0.7$  から  $-0.4$ ) の存在を明らかにした。

GMD のカラーからは分からなかった。

メタルと GMD の比較から AMR を出した。

SFH は最近 2 – 4 Gyr は過去の倍に増加。

