



**Сколько подсистем  
толстого диска в  
нашей Галактике?**

*Марсаков В.А., Коваль В.В., Гожа М.Л.*

*ЮФУ, Ростов-на-Дону*

*«Современная звёздная астрономия-2019»*

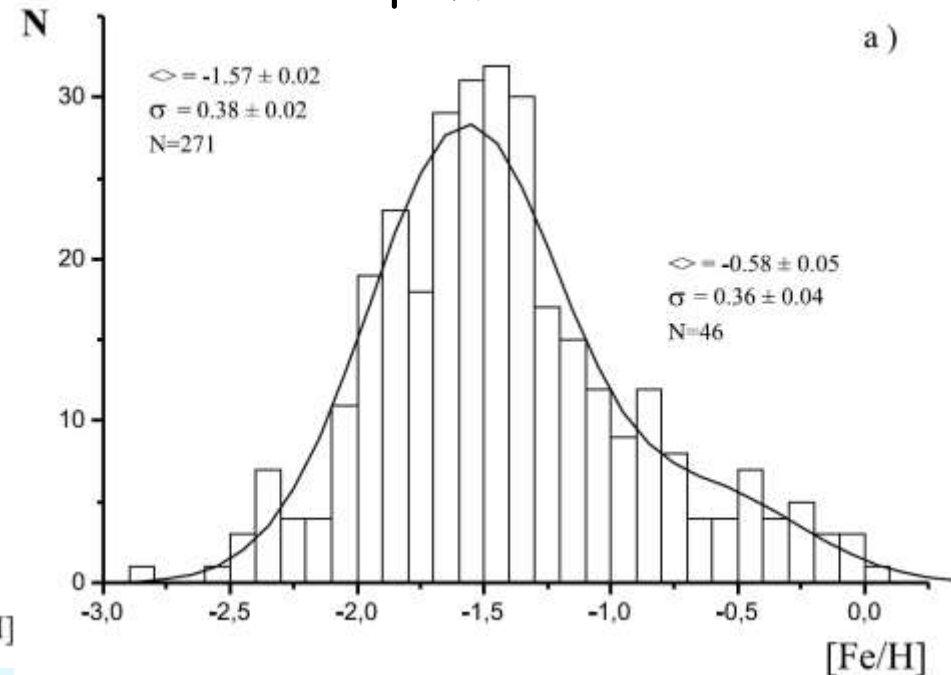
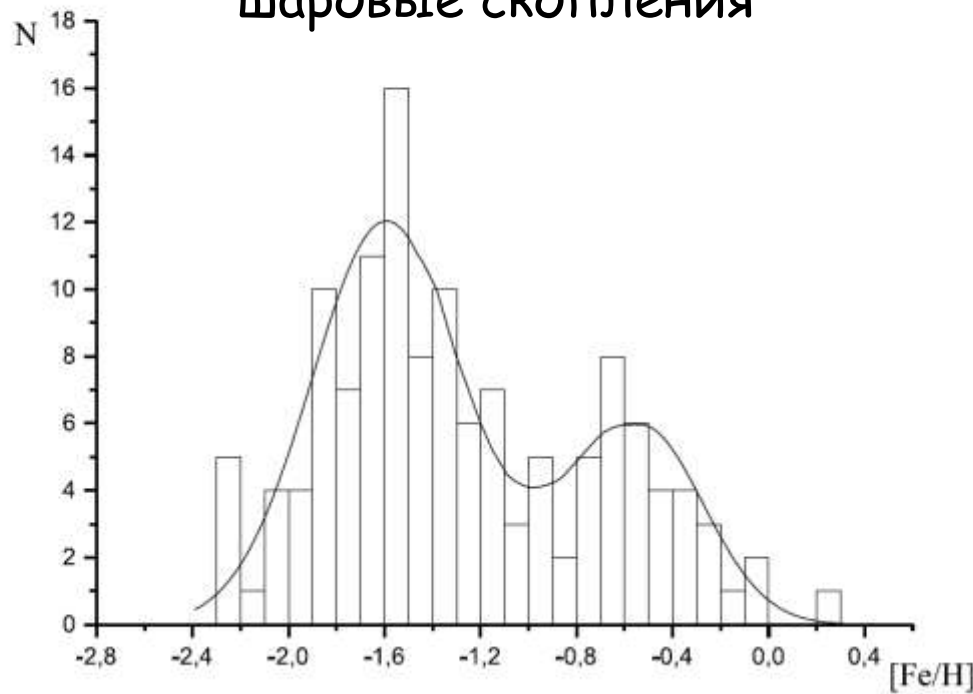
Распределения по металличности  
старых объектов Галактики  
демонстрируют в окрестности  $[Fe/H] \approx -1.0$  :

**провал**

**шаровые скопления**

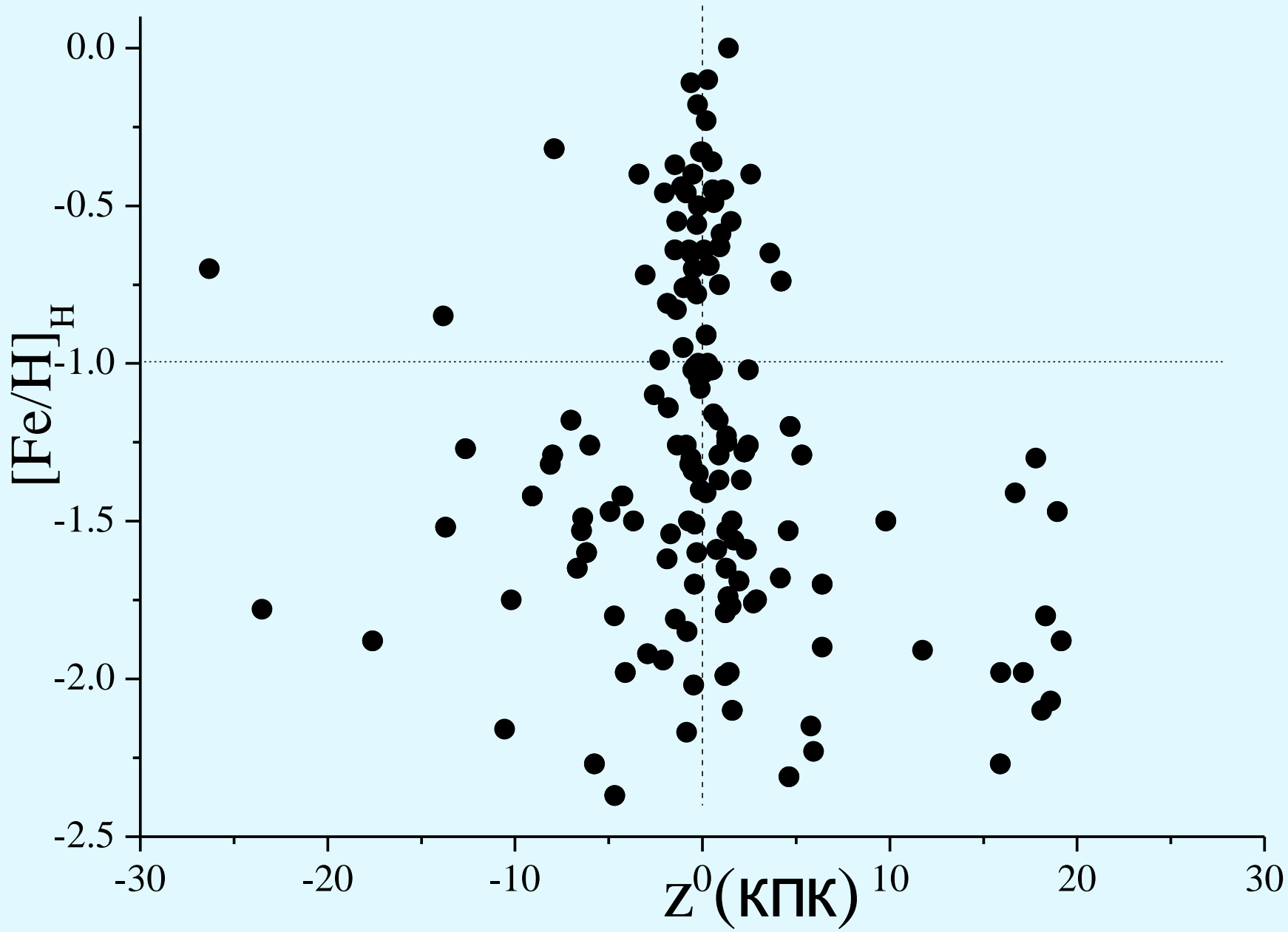
**излом**

**лириды поля**



Именно по металличности эти объекты обычно разделяют на  
**ТОЛСТЫЙ ДИСК** и **ГАЛО**

Шаровые скопления:  
связь металличности с удалением от галактической плоскости



# Вероятностный метод выделения звёзд разных подсистем Галактики

T. Bensby, S. Feldzing, I. Lungstrem,  
Astron. and Astrophys. **410**. 527 (2003)

$$f(U, V, W) = k \cdot \exp \left( -\frac{U_{\text{LSR}}^2}{2 \sigma_U^2} - \frac{(V_{\text{LSR}} - V_{\text{asym}})^2}{2 \sigma_V^2} - \frac{W_{\text{LSR}}^2}{2 \sigma_W^2} \right), \quad (1)$$

where

$$k = \frac{1}{(2\pi)^{3/2} \sigma_U \sigma_V \sigma_W} \quad (2)$$

Формулы вычисления вероятности принадлежности звезды поля толстому диску относительно тонкого диска и гало:

$$\text{TD/D} = \frac{X_{\text{TD}}}{X_{\text{D}}} \cdot \frac{f_{\text{TD}}}{f_{\text{D}}}, \quad \text{TD/H} = \frac{X_{\text{TD}}}{X_{\text{H}}} \cdot \frac{f_{\text{TD}}}{f_{\text{H}}}.$$

	x	$\sigma_U$	$\sigma_V$	$\sigma_W$	$V_{\text{asym}}$
<b>Тонкий диск (D)</b>	0,94	35	20	16	<b>-15</b>
<b>Толстый диск(TD)</b>	0,06	67	38	35	<b>-46</b>
<b>Гало(H)</b>	<b>0,0015</b>	<b>160</b>	<b>90</b>	<b>90</b>	<b>-220</b>

## Цель работы:

Сравнение химического состава выделенных по кинематическому критерию в подсистему толстого диска **шаровых звездных скоплений** и двух типов звезд поля - близких F-G-карликов и гигантов, и **звезд типа RR Lyrae**.

# Исходные данные

## Шаровые звездные скопления

Пространственные положения для **157 ШС** из *Harris (2010)*;  
Компоненты пространственных скоростей и элементы орбит **115 ШС** из (*Chemel et al., 2018*) получены на основе данных современных глубоких обзоров.

Спектроскопические определения относительных содержаний  
Mg, Si, Ca и Ti в звездах **69 ШС**, (*Марсаков и др., 2019*)  
взяты из 101 статьи, опубликованной с 1986 по 2018 годы.  
Внешняя сходимость -  $\langle \sigma[\text{el}/\text{Fe}] \rangle \leq 0.10 \pm 0.06$

## Переменные звезды типа RR Lyrae

Пространственные положения, собственные движения и лучевые скорости  
для **392 лирид** из каталога *Дамбиса и др. (2013)*,

**Спектроскопические** определения относительных содержаний  
Mg, Si, Ca, Ti в **100** лиридах взяты из 22 статей, опубликованных с 1995 по  
2016 годы. (*Марсаков и др., 2018*) Внешняя сходимость -  $\langle \sigma[\alpha/\text{Fe}] \rangle = 0.10$

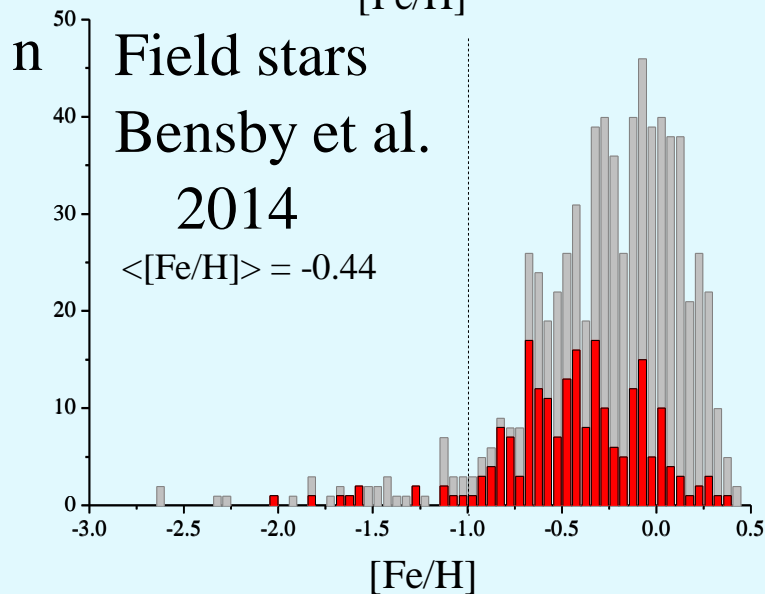
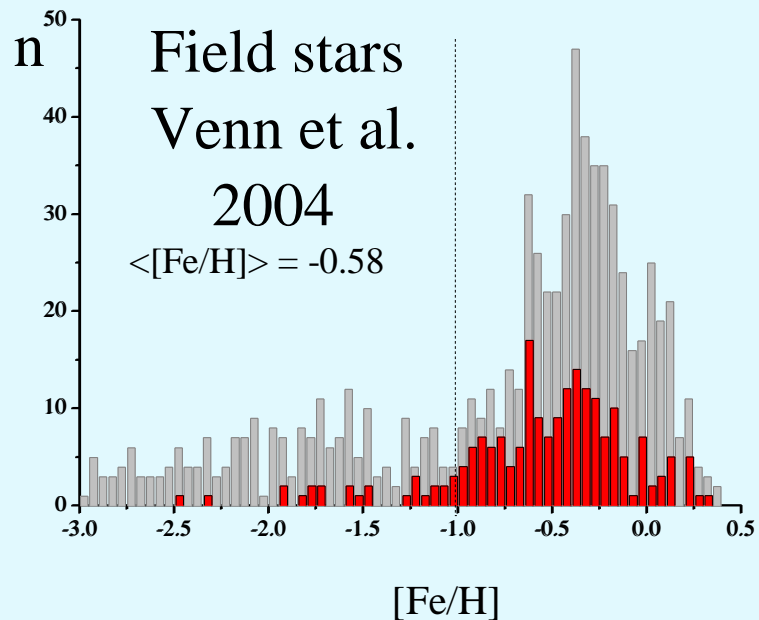
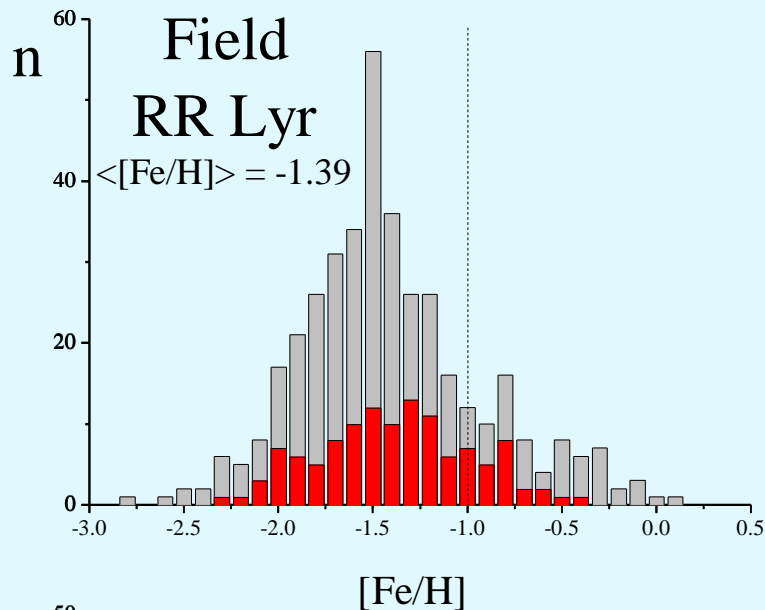
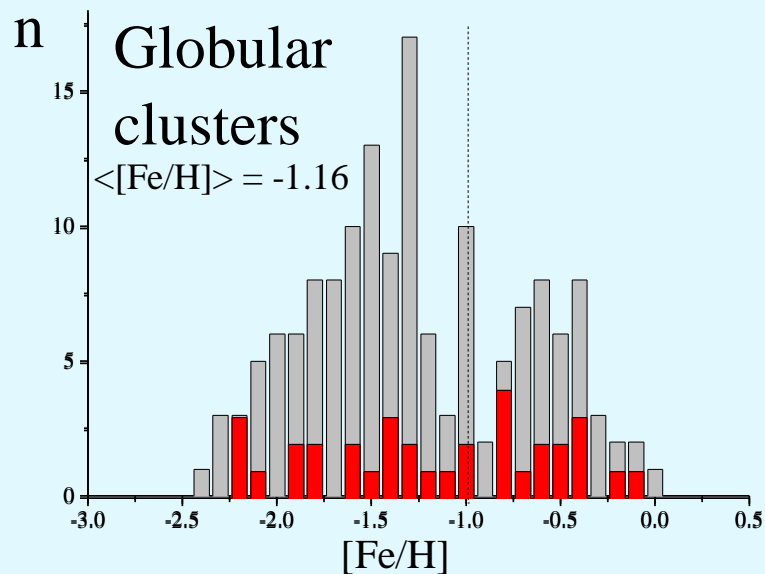
**Для сравнения звёзды поля из каталогов:**

**Venn et al. (2004)**, 785 звезд поля

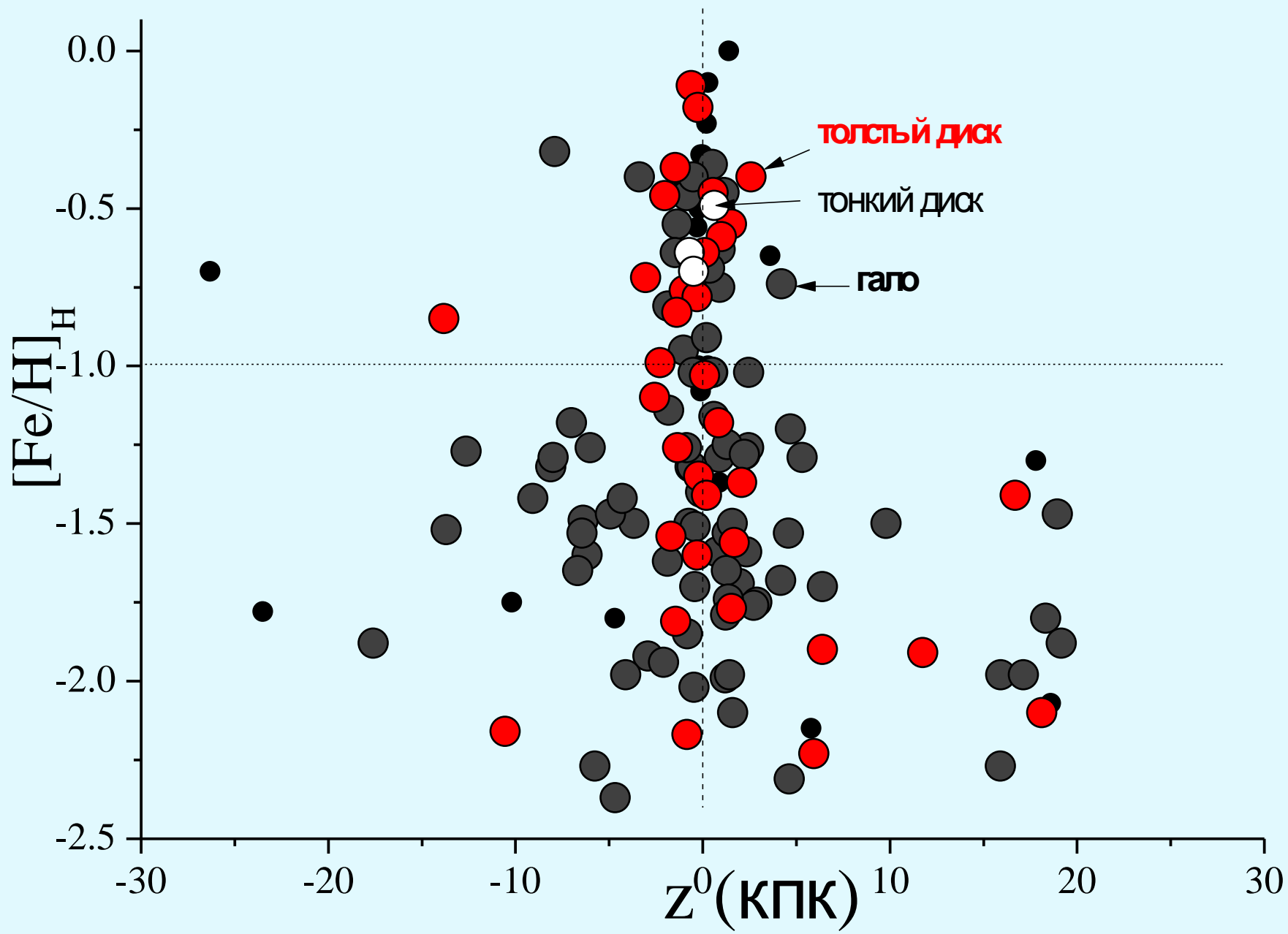
во всем интересующем нас диапазоне металличности;

**Bensby et al. (2014)**, 714 F-G-карликов поля тонкого диска  
содержания Fe, Mg, Si, Ca, Ti и компоненты скоростей.

# Шаровые скопления и звезды поля с кинематикой толстого диска

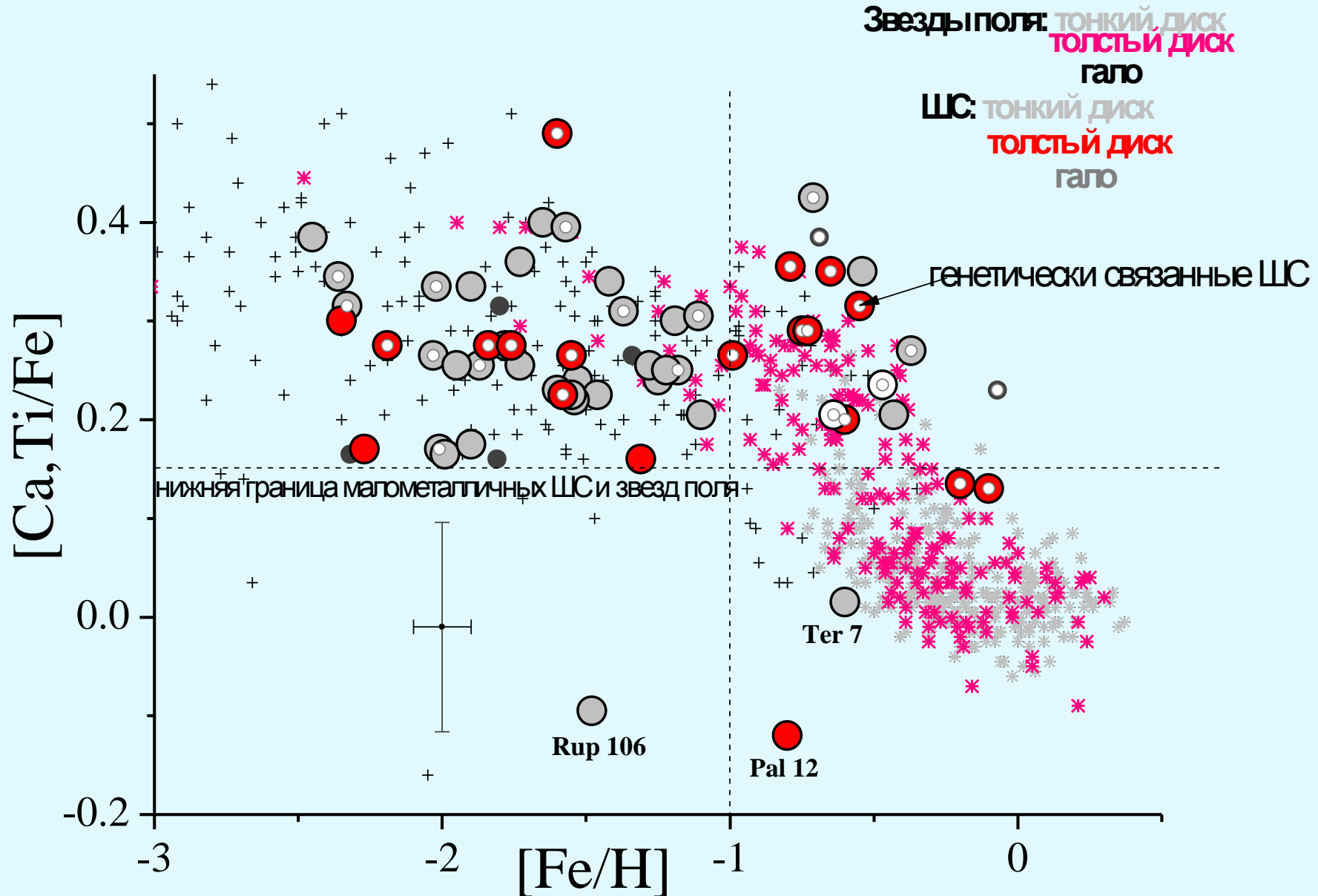


Распределения по удалению от галактической плоскости скоплений,  
принадлежащих по кинематике разным подсистемам Галактики



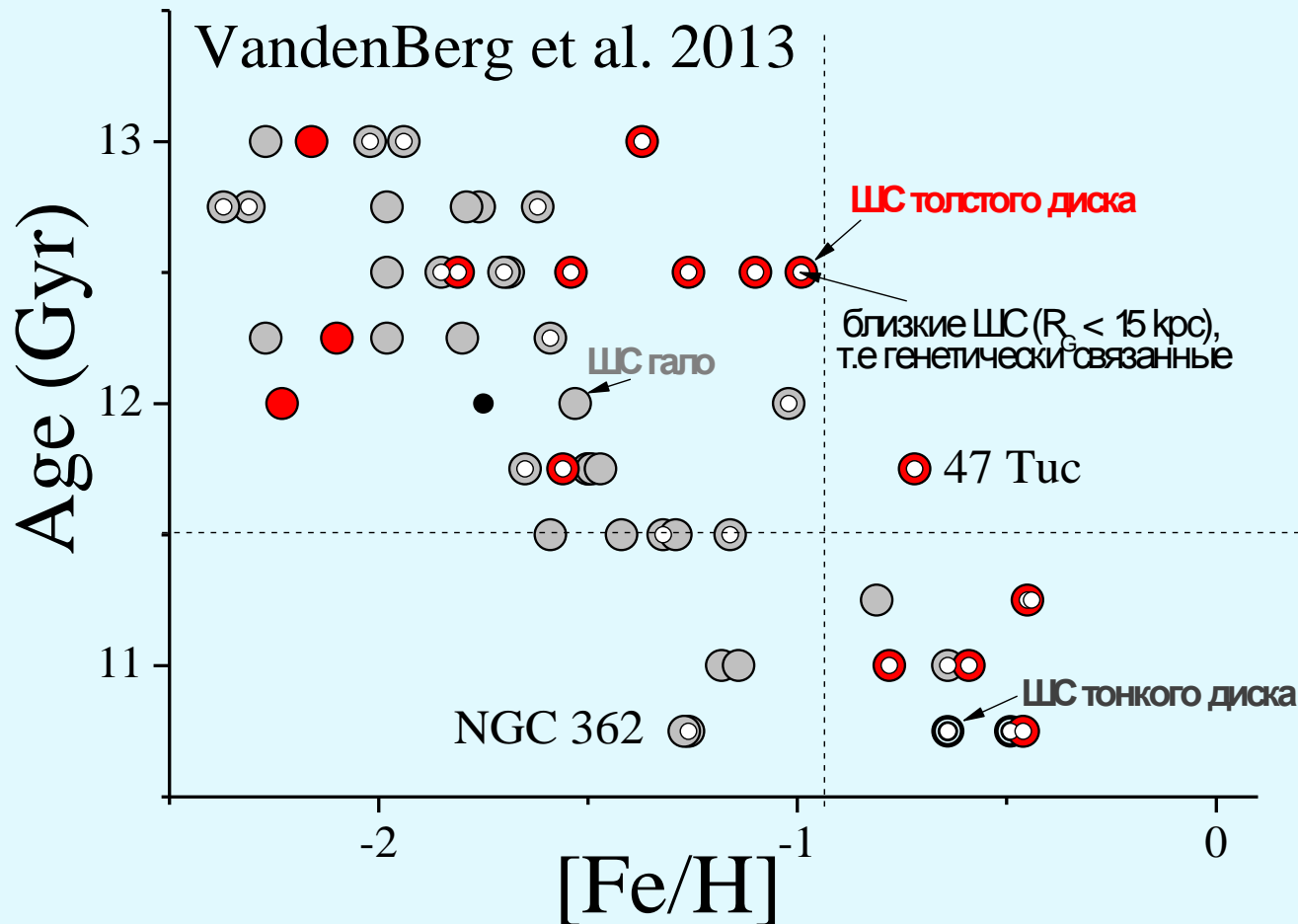


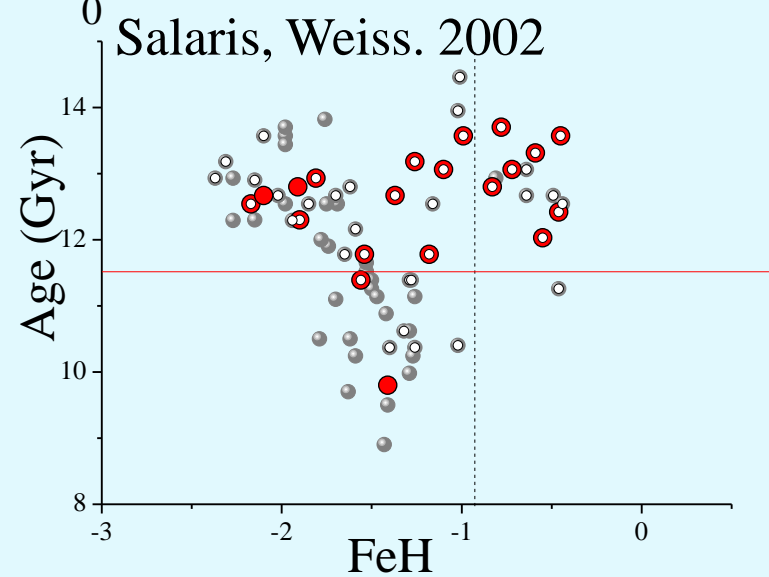
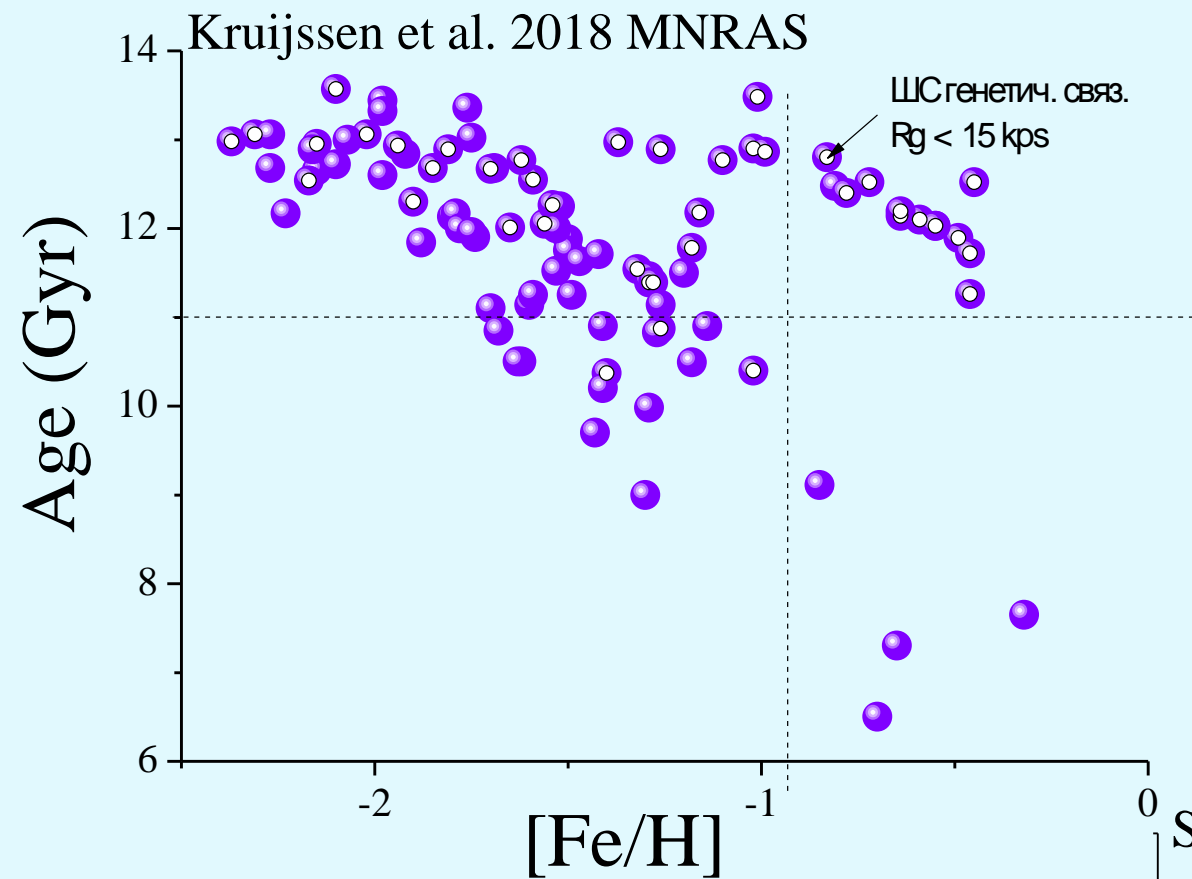
# Зависимость относительных содержаний $\alpha$ -элементов от металличности для звезд поля и шаровых скоплений



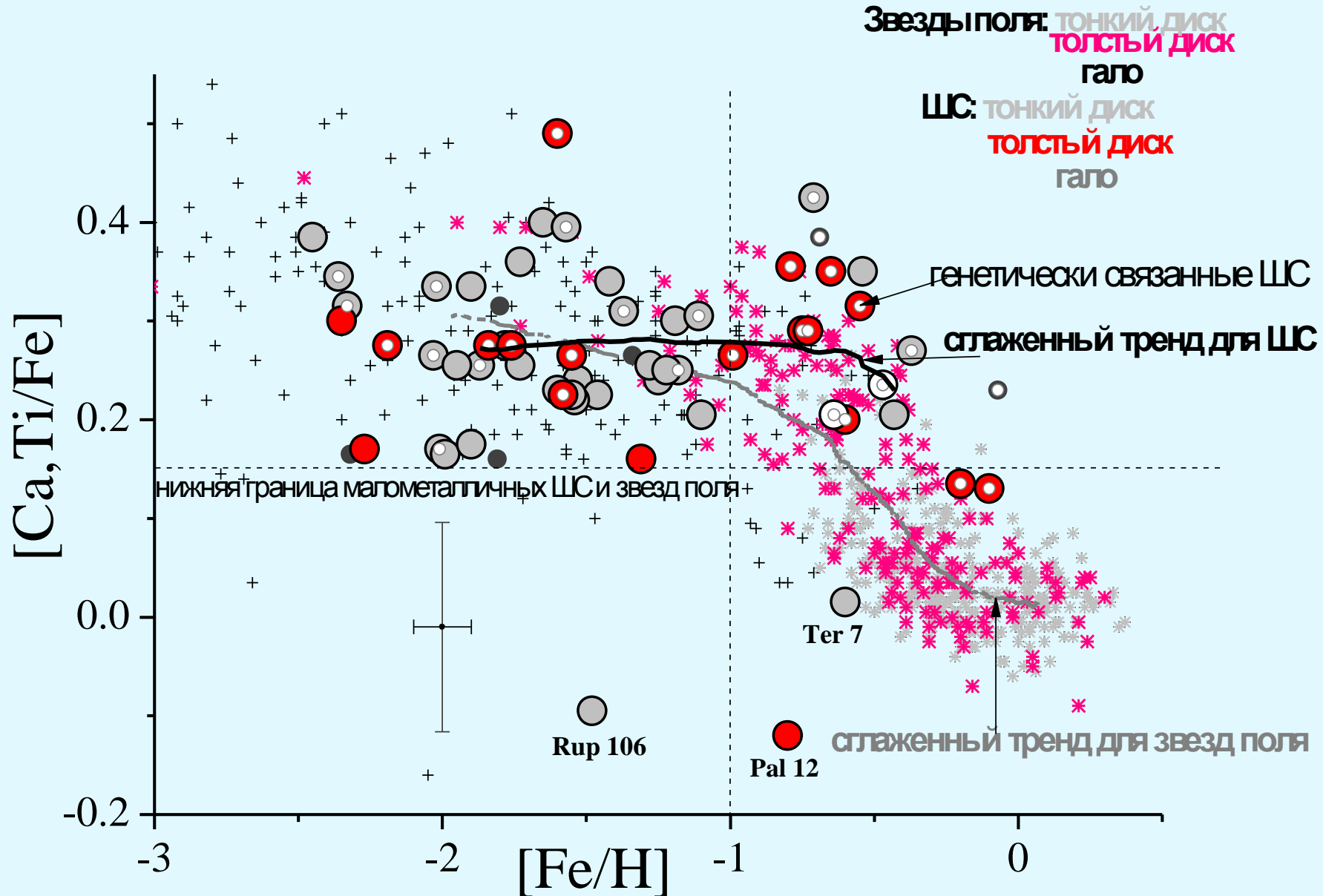
# Диаграмма "металличность - возраст" для всех шаровых скоплений

Вертикальная штриховая линия примерно соответствует провалу на функции металличности, а горизонтальная - значению возраста 11.5 млрд. лет

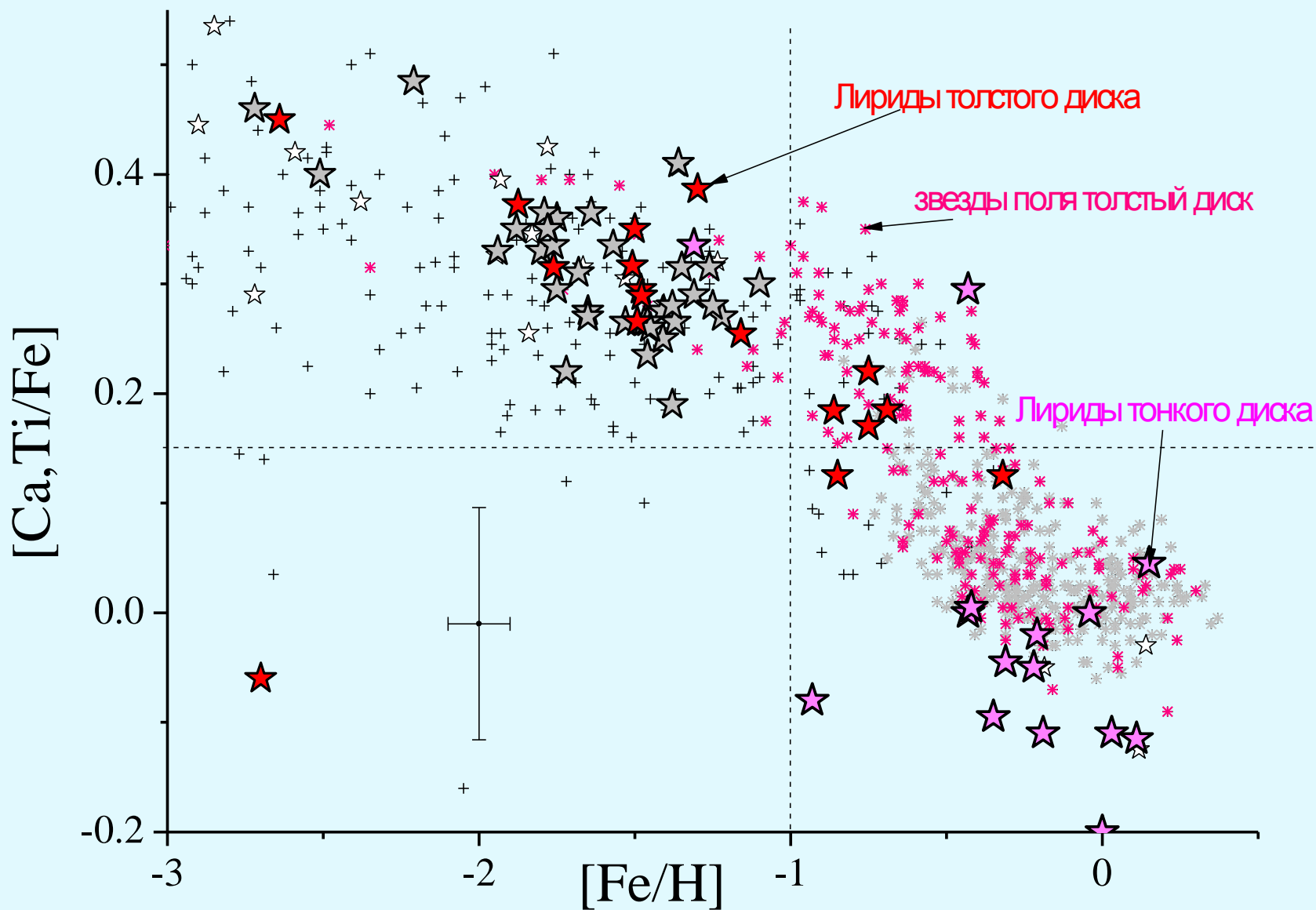




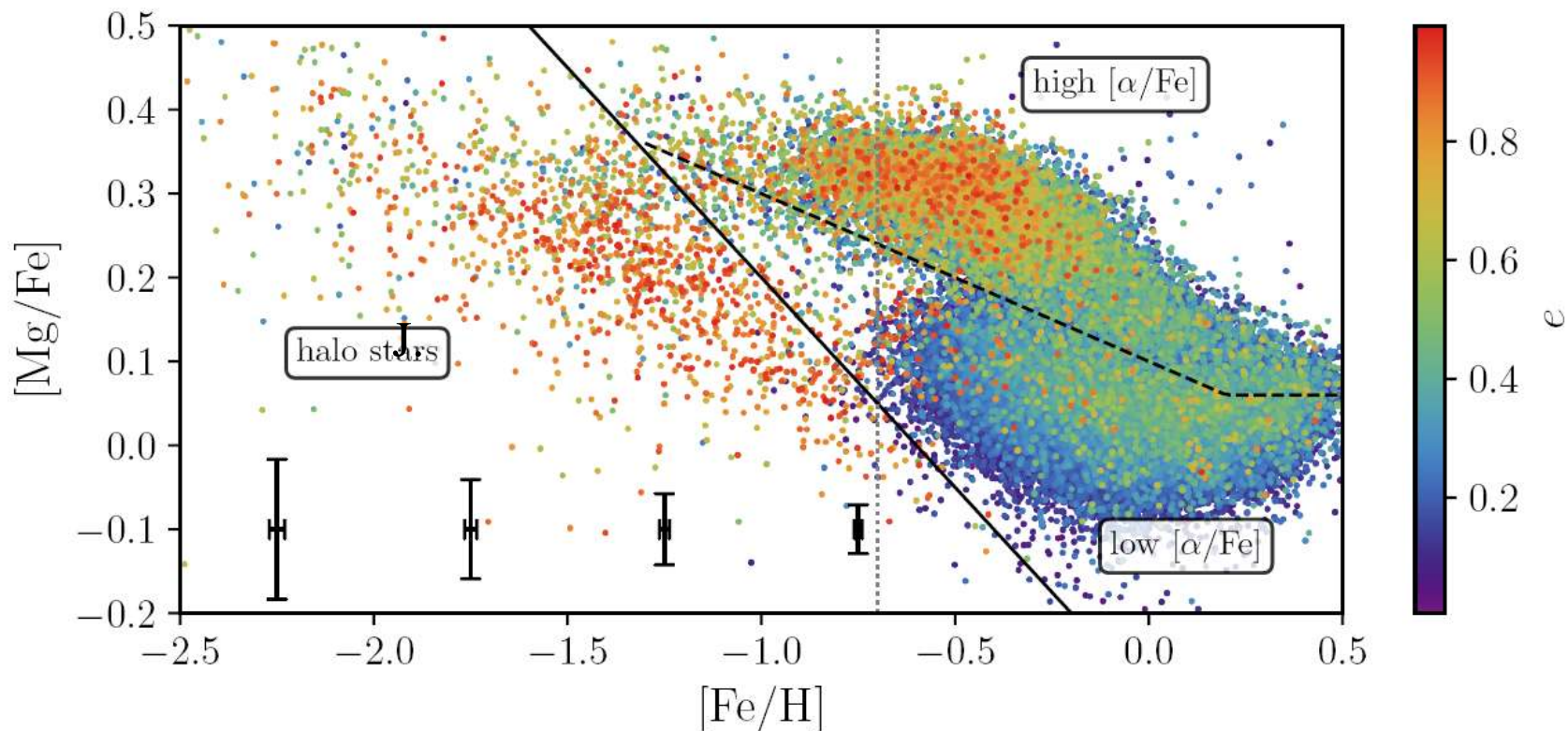
# Зависимость относительных содержаний $\alpha$ -элементов от металличности для звезд поля и шаровых скоплений



# Зависимость относительных содержаний $\alpha$ -элементов от металличности для звезд типа RR Lyrae поля



Относительные содержания  $\alpha$ -элементов и скоростей у нескольких десятков тысяч звезд в пределах 15 кпк от Солнца в выборке, составленной путем кросс-идентификации между каталогами SDSS-APOGEE DR14 и Gaia DR2  
сделан вывод о захвате на ранних этапах эволюции нашей Галактики массивной ( $\sim 10^9 M_{\odot}$ ) галактики-спутника

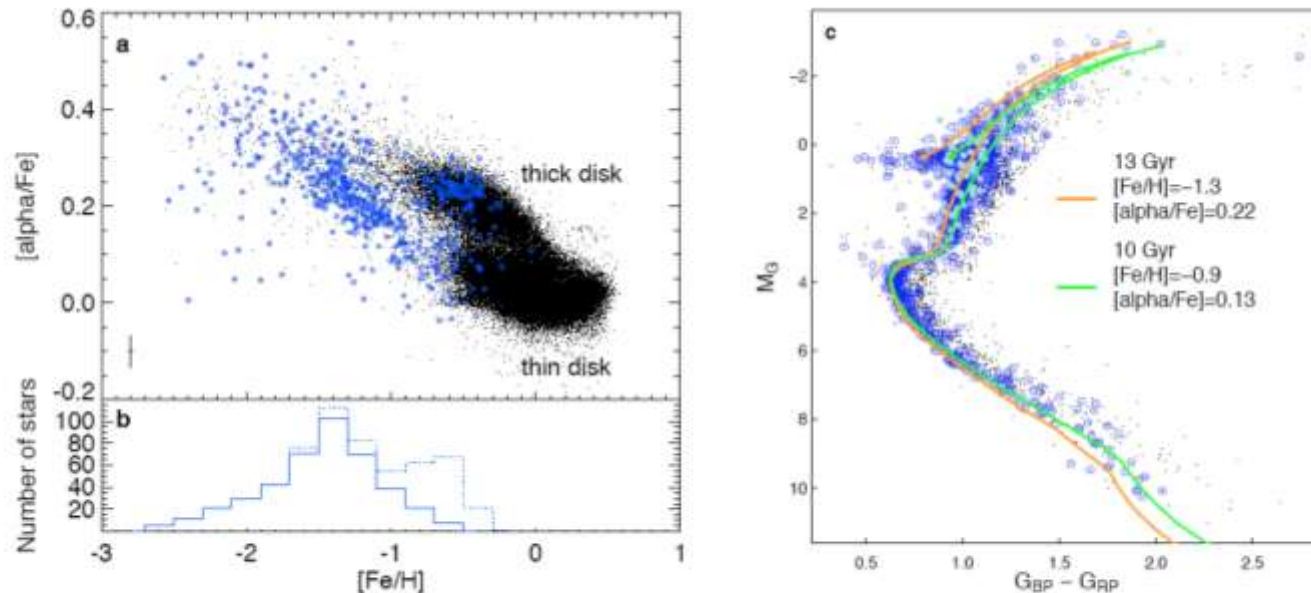


Mackereth, et al., MNRAS (2018)

**Figure 1.** The  $[\text{Mg}/\text{Fe}]$ - $[\text{Fe}/\text{H}]$  plane in APOGEE DR14, coloured by orbital eccentricity  $e$ , as estimated using the method of Mackereth & Bovy (2018). The points are plotted with the highest  $e$  stars overlaying the points at lower  $e$ , such that the highest  $e$  populations stand out. Plotted also are the mean error bars within  $[\text{Fe}/\text{H}]$  bins of width 0.5 dex between -2.5 and -0.5 dex. It is clear that a population extends from  $([\text{Fe}/\text{H}], [\text{Mg}/\text{Fe}]) \sim (-2.0, 0.3)$  to  $\sim (-1.0, 0.1)$  that appears to consist mainly of stars on highly eccentric orbits, with a distinct element abundance pattern to that of the Galactic disc (at  $[\text{Fe}/\text{H}] > -0.7$ ). The dotted grey line reflects the cut in  $[\text{Fe}/\text{H}]$  which is imposed to perform the  $k$ -means analysis.

# The merger that led to the formation of the Milky Way's inner stellar halo and thick disk (Helmi et al. 2018 *Natur.* 563.85)

«Среди исследованных звездных объектов **сотни лирид** и более дюжины шаровых скоплений образовались в галактике Гая-Энцелад. Причем слияние привело к динамическому "разогреву" предшественника толстого диска Галактики примерно 10 млрд. лет назад.»



## Gaia-Enceladus

Fig. 2.— Astrophysical properties of stars in Gaia-Enceladus. Panel a) shows the chemical abundances for a sample of stars located within 5 kpc from the Sun resulting from the cross-match between *Gaia* and APOGEE. The blue circles correspond to 590 stars that have  $-1500 < L_z < 150$  km/s kpc and  $E > -1.8 \times 10^5$  km<sup>2</sup>/s<sup>2</sup> (as in Fig. 1a, but now for a larger volume to increase the sample size, see Methods). Note the clear separation between the thick disk and the sequence defined by the majority of the stars in the retrograde structure, except for a small amount of contamination (17%) by thick disk stars (i.e. on the  $\alpha$ -rich sequence) that share a similar phase-

*Myeong et al. 2019 MNRAS*

## Evidence for Two Early Accretion Events That Built the Milky Way Stellar Halo

We cross-match the positions of stars between Gaia DR2 and DECaPS.

The **Gaia Sausage** is the major accretion event that built the stellar halo of the Milky Way galaxy ( $5 \times 10^{10} M_{\odot}$ ).

We provide dynamical and chemical evidence for a second substantial accretion episode, distinct from the Gaia Sausage.

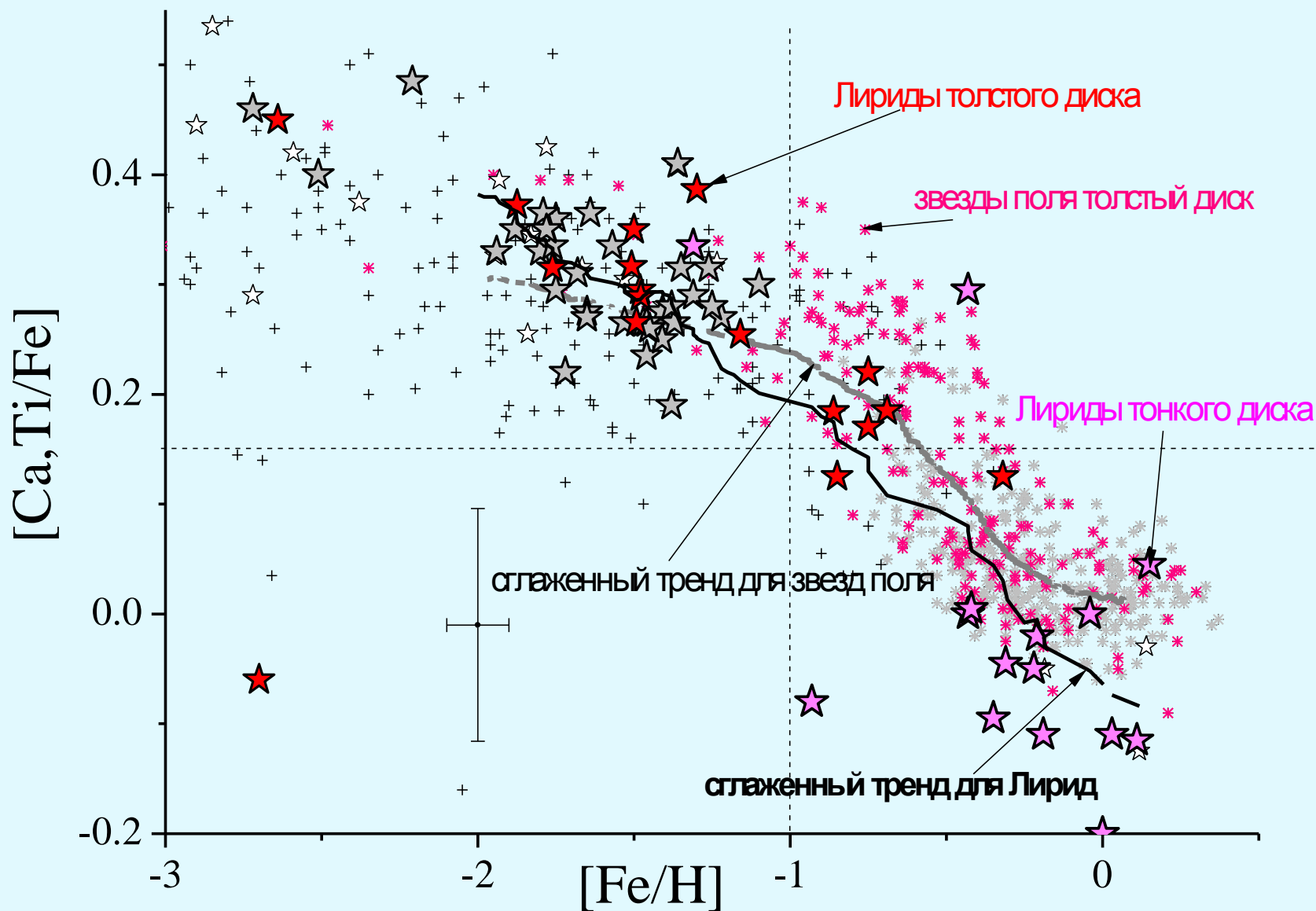
The **Sequoia** Event provided the bulk of the high energy retrograde stars in the stellar halo. The total mass the Sequoia galaxy is  $\sim 10^{10} M_{\odot}$ .

Possible infall times between 9 and 11 Gyr.

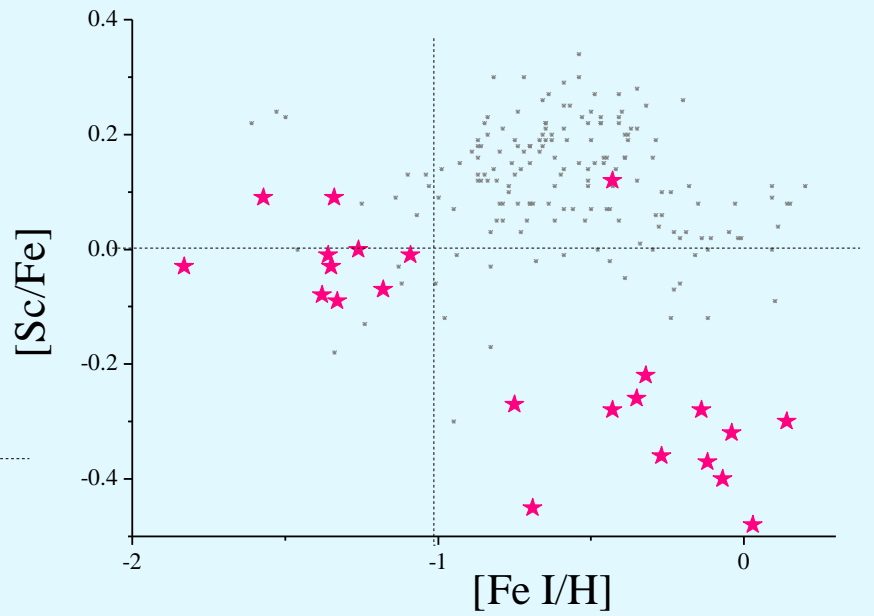
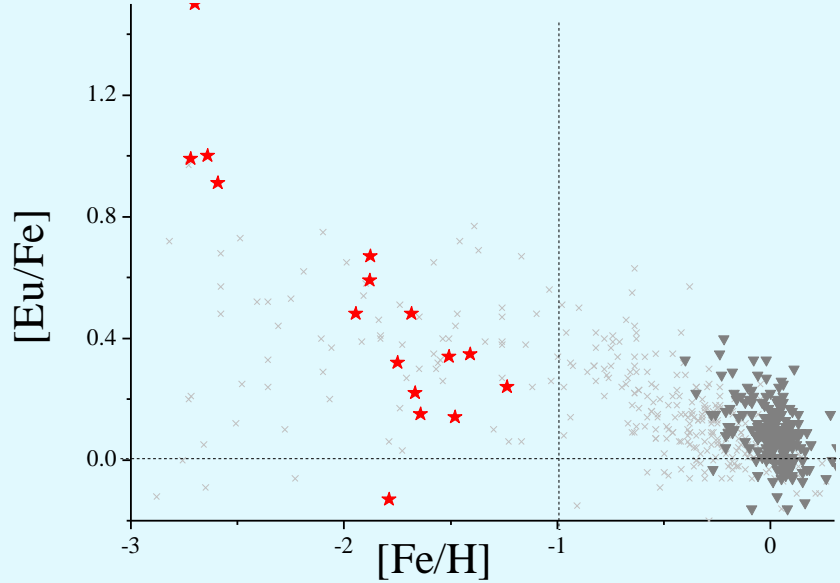
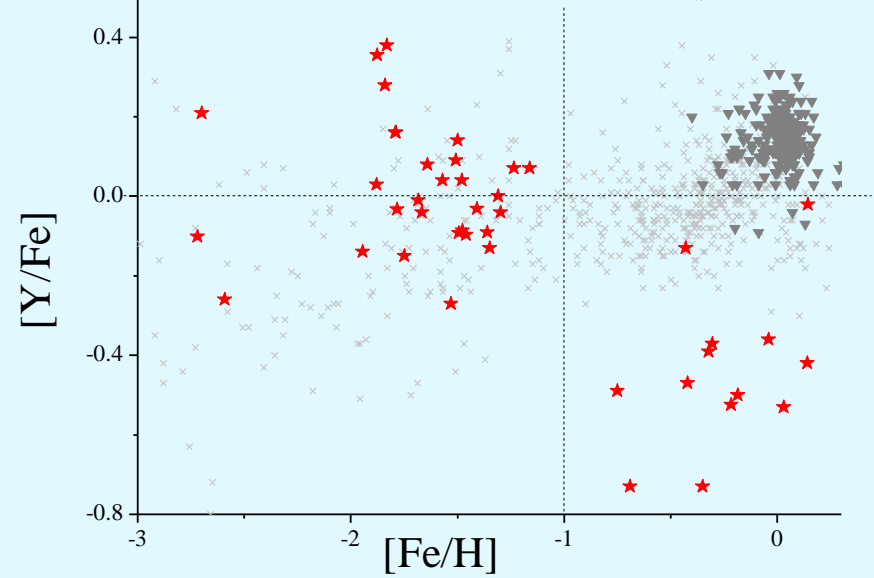
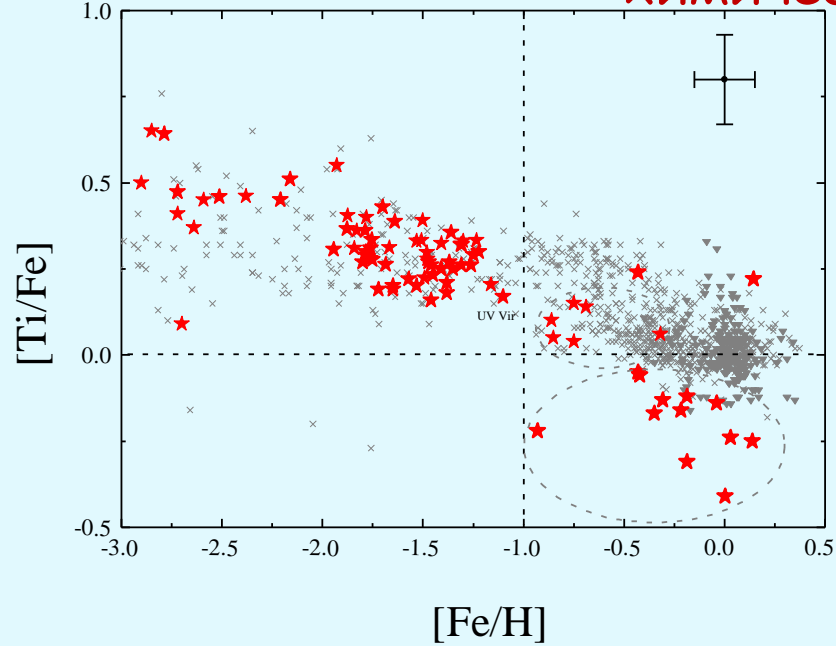
There is a possibility that the Sausage and the Sequoia galaxies were accreted at a comparable epoch.



# Зависимости относительных содержаний $\alpha$ -элементов от металличности для звезд поля и звезд типа RR Lyrae поля



# Необычность химического состава богатых металлами лирид поля; аномально низкие относительные содержания некоторых химических элементов



## Выводы:

Подсистема толстого диска в Галактике оказывается составной и внутри нее существуют независимо по крайней мере три составляющие:

- Самая старая - это металлические шаровые скопления, которые образовались из единого протогалактического облака вскоре после начала вспышек в нем сверхновых типа Ia.
- Затем образовалась подсистема звезд поля толстого диска в результате "разогрева" звезд уже образовавшегося в Галактике тонкого диска упавшей на нее довольно массивной карликовой галактики-спутника.
- И, наконец, подсистема звезд поля с кинематикой не только толстого, но даже и тонкого диска, выпавших на Галактику из этой захваченной галактики-спутника.

С удовольствием  
отвечу  
на все ваши  
вопросы!