



Н.Н. Самусь



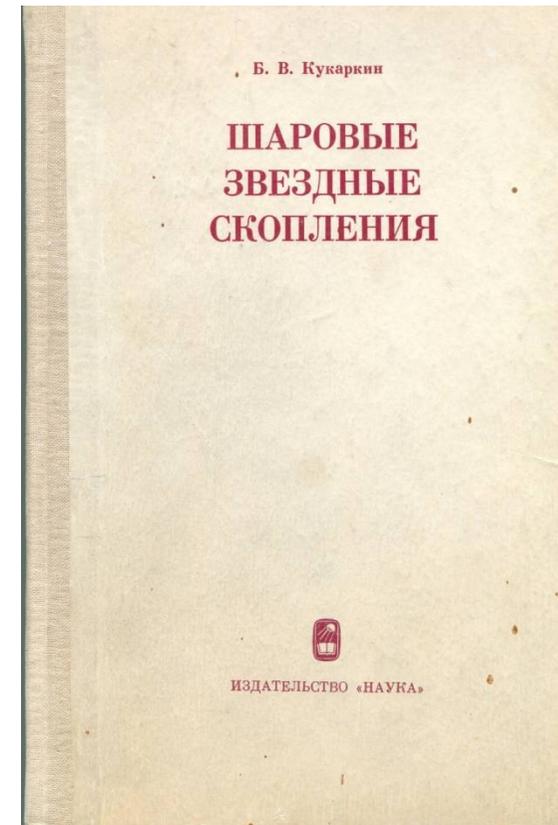
*Институт астрономии РАН,
ГАИШ МГУ
и Астрономическое Общество*

ШАРОВЫЕ СКОПЛЕНИЯ – СВИДЕТЕЛИ ЮНОСТИ ГАЛАКТИКИ

Москва, ГАИШ МГУ, 29 октября 2015 г.

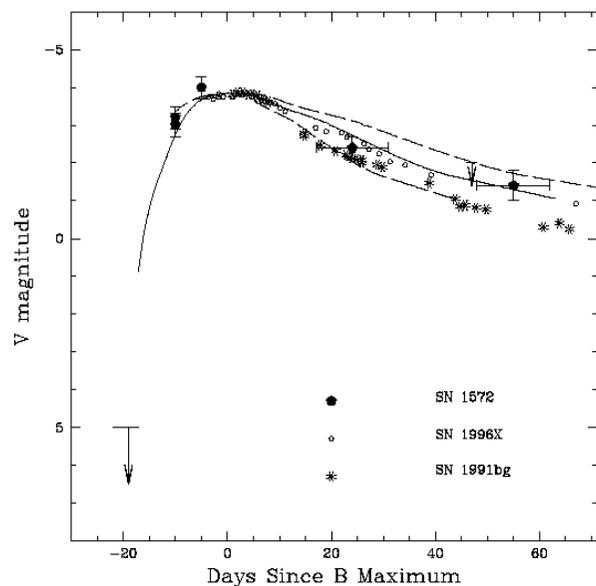


Б.В. Кукаркин (1909 – 1977)



Монография и каталог
1974 г.

ЗВЕЗДЫ-ГОСТЫ



Комета Хейла–Боппа
(1997)



Кривая блеска (по Руис-Лапуенте) и рентгеновский остаток Сверхновой Тихо Браге (1572)



Тихо Браге
(1546–1601)



Шарль Мессье
1730 – 1817

В 3-м издании каталога Мессье было 103 объекта, из них 29 – шаровые скопления. Каталог дополнен до 110 объектов, включая шаровое скопление M107 (NGC 6171). Чаще всего Мессье считал шаровые скопления туманностями (но не M4)

| DATE des OBSERVATIONS. | Nombres des Membres. | ASCENSION DROITE. | | DECLINATION. | | Distance en Lignes de mill. |
|------------------------------|----------------------------|-------------------|-------------|--------------|----------|--------------------------------|
| | | En Temps. | | En Degrés. | | |
| | | H. M. S. | D. M. S. | D. M. S. | D. M. S. | |
| 1758. Sept. 12 | 1. | 5. 20. 2 | 80. 0. 33 | 21. 45. 27 B | | |
| 1760. Sept. 11 | 2. | 21. 21. 8 | 320. 17. 0 | 1. 47. 0 A | 0. 4 | |
| 1764. Mai. 3 | 3. | 13. 31. 25 | 202. 51. 19 | 29. 32. 57 B | 0. 3 | |
| | 8 | 4. 16. 9. 8 | 242. 16. 56 | 25. 55. 40 A | 0. 2 | |
| | 23 | 5. 15. 6. 36 | 226. 39. 4 | 2. 57. 16 B | 0. 3 | |

| N. des Nébul. | Détails des Nébuleuses & des amas d'Étoiles. <i>Les positions sont rapportées ci-contre.</i> |
|---------------------|---|
| 1. | Nébuluse au dessus de la corne méridionale du Taureau, ne contient aucune étoile; c'est une lumière blancheâtre, alongée en forme de la lumière d'une bougie, découverte en observant la Comète de 1758. Voyez la Carte de cette Comète, <i>Mém. Acad. année 1759, page 188</i> ; observée par le Docteur Bëvis vers 1731. Elle est rapportée sur l' <i>Atlas céleste</i> anglais. |
| 2. | Nébuluse sans étoile dans la tête du Verseau, le centre en est brillant, & la lumière qui l'environne est ronde; elle ressemble à la belle Nébuluse qui se trouve entre la tête & l'arc du Sagittaire, elle se voit très-bien avec une lunette de deux pieds, placée sur le parallèle de α du Verseau. M. Messier a rapporté cette nébuluse sur la Carte de la route de la Comète observée en 1759. <i>Mém. Acad. année 1760, page 464</i> . M. Maraldi avoit vu cette nébuluse en 1746, en observant la Comète qui parut cette année. |
| 3. | Nébuluse découverte entre le Bouvier & un des Chiens de Chasse d'Hévélius, elle ne contient aucune étoile, le centre en est brillant & sa lumière se perd insensiblement, elle est ronde; par un beau ciel on peut la voir avec une lunette d'un pied: elle sera rapportée sur la Carte de la Comète observée en 1779. <i>Mémoires de l'Académie de la même année. Revue le 29 Mars 1781, toujours très-belle.</i> |
| 4. | Amas d'étoiles très-petites; avec une faible lunette on le voit sous la forme d'une nébuluse; cet amas d'étoiles est placé près d' <i>Antarès</i> & sur son parallèle. Observé par M. de la Caille, & rapporté dans son Catalogue. Revu le 30 Janvier & le 22 Mars 1781. |
| 5. | Belle Nébuluse découverte entre la Balance & le Serpent, près de l'étoile du Serpent, de sixième grandeur, la cinquième suivant le Catalogue de Flamsteed; elle ne contient aucune étoile; elle est ronde, & on la voit |

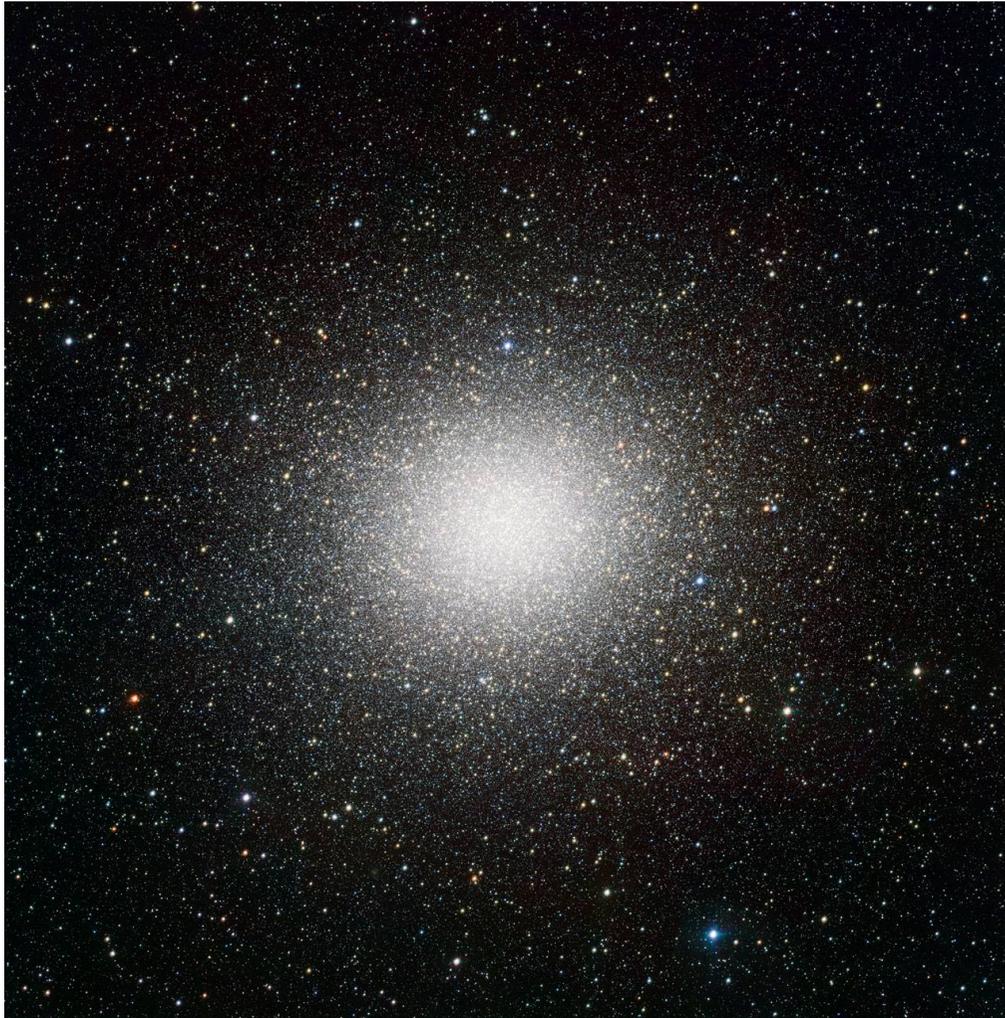
**М 80 = NGC6093.
В самом центре
этого скопления в
1860 году
вспыхнула Новая
звезда**





Рассеянное звездное скопление Плеяды (M45). Казалось бы, в чем разница между шаровым и рассеянным скоплением – понятно...

Каталог Мессье составлен только по наблюдениям из северного полушария. Среди ярких южных шаровых скоплений два названы «звездными» именами.



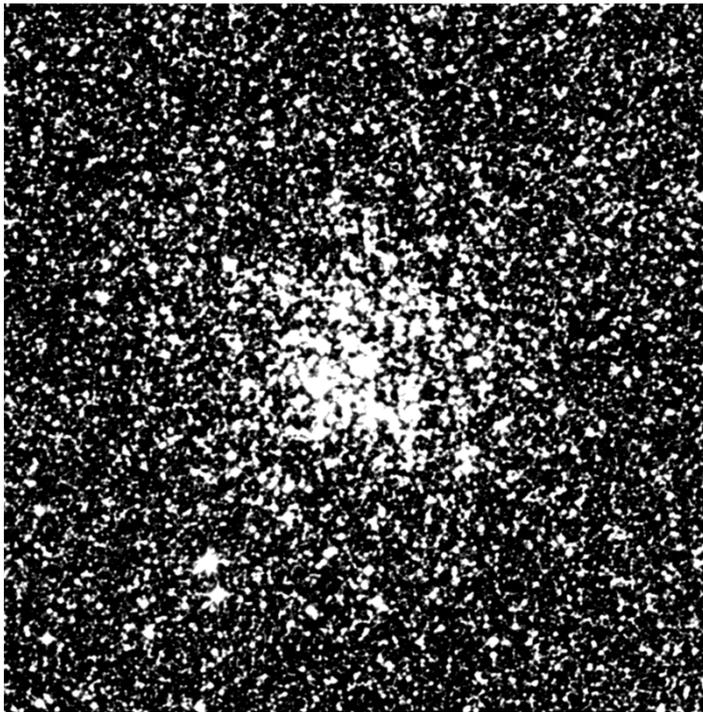
ω Центавра, шаровое скопление нашей Галактики с самой большой суммарной массой и светимостью звезд. Возможно, это «выжившая» центральная часть эллиптической галактики

NGC104=47 Тис, NGC362
и Малое Магелланово Облако

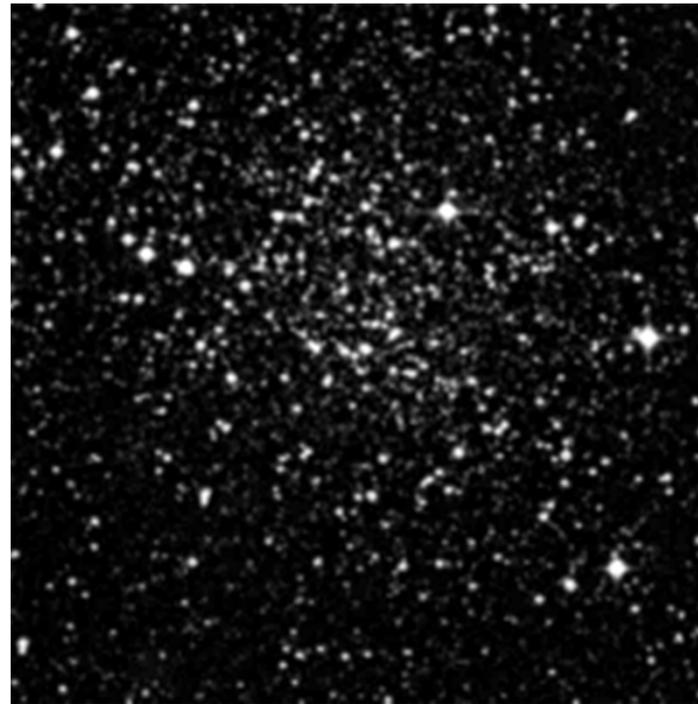


Главное различие между рассеянными и шаровыми скоплениями – не внешний вид, а звездный состав

M11 – рассеянное скопление

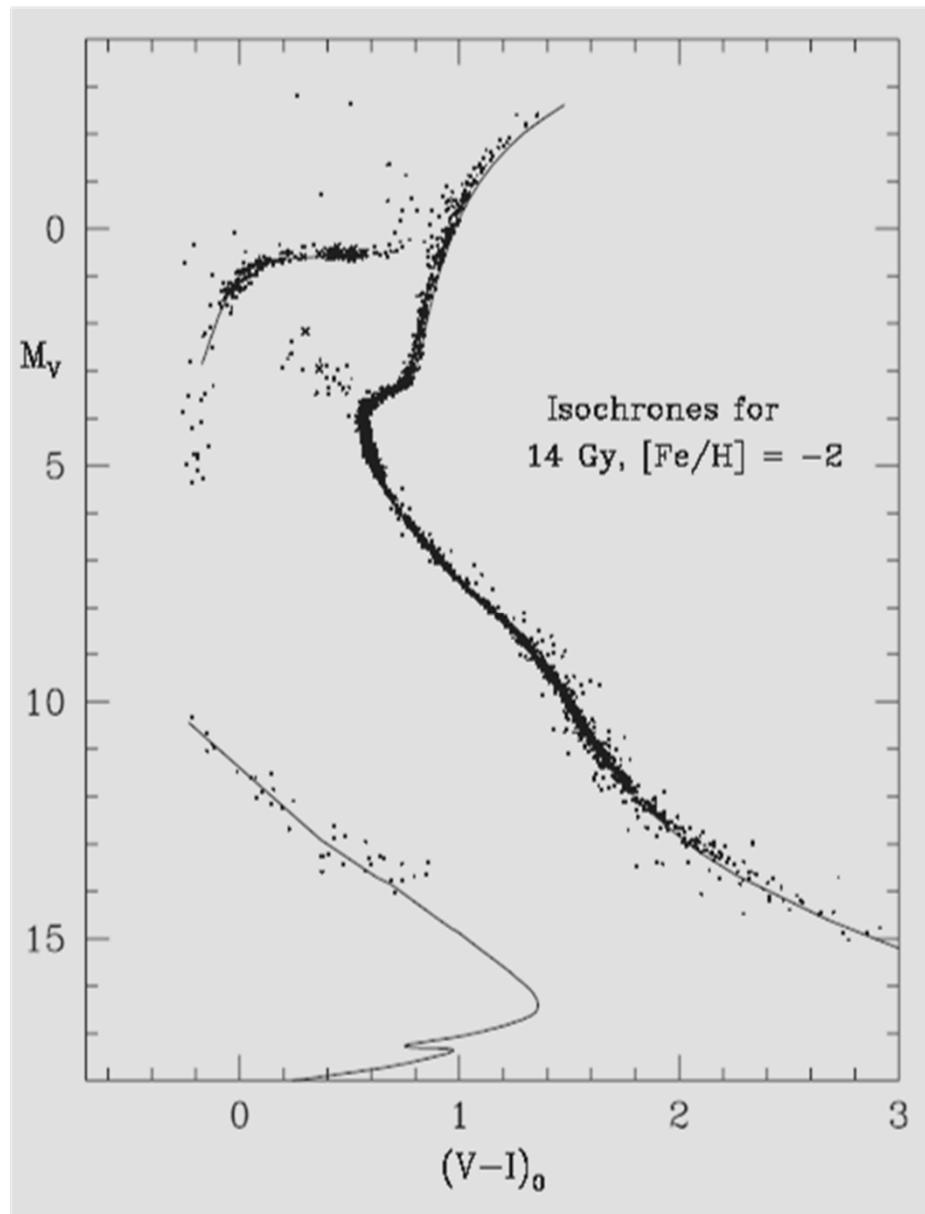


Terzan 3 – шаровое скопление



Молодое скопление NGC 3603





Сводная диаграмма Герцшпрунга–Рассела для скопления с содержанием «металлов» в 100 раз меньше солнечного

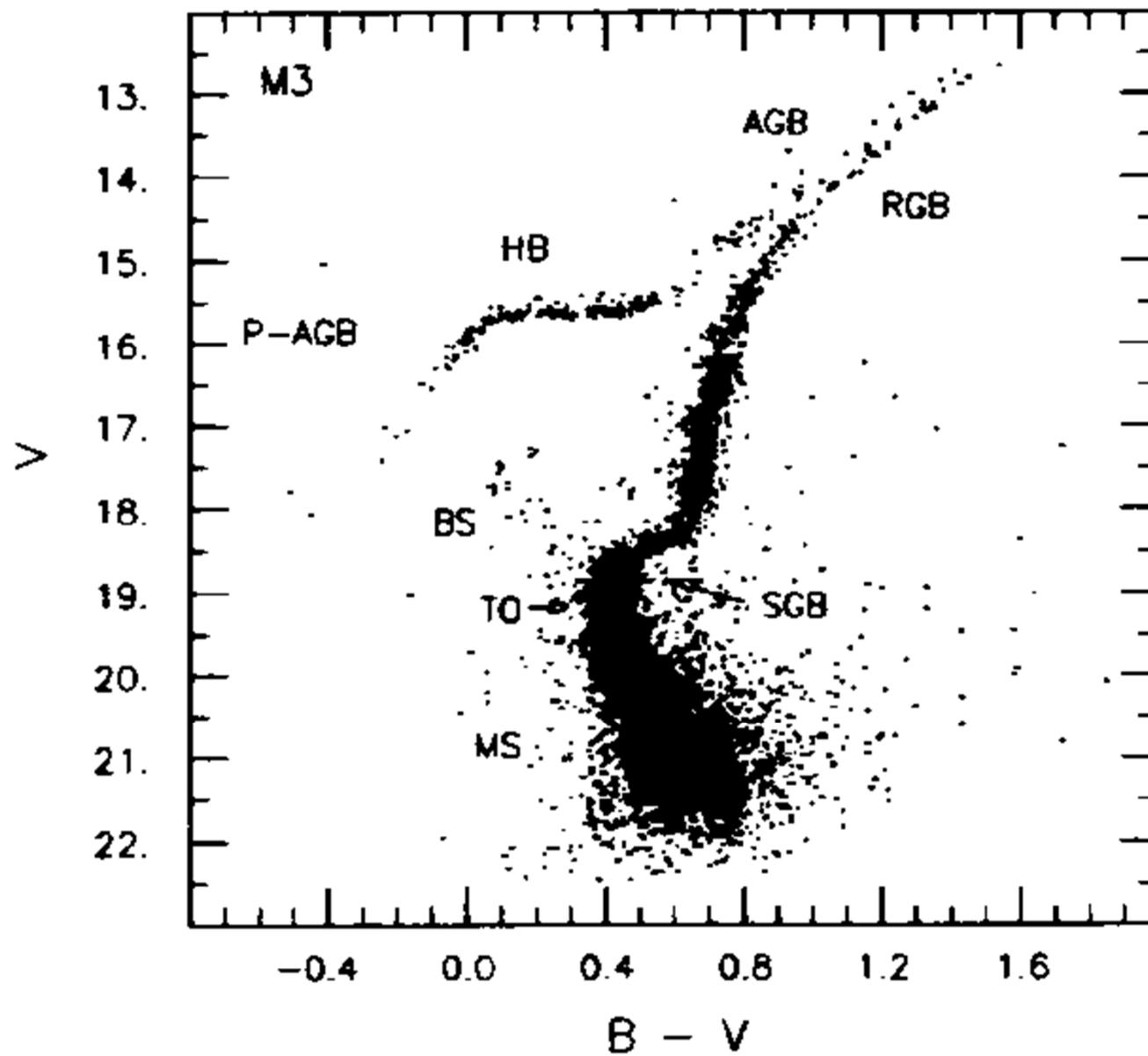


Диаграмма Г-Р скопления М3 с обозначенными последовательностями

Эволюция звезд малых масс на поздних стадиях

1. По мере сжатия на ветви субгигантов и гигантов скорость эволюции растет (показано время, оставшееся до гелиевой вспышки)
2. Обращаем внимание на большую ширину ГВ: ее можно объяснить только разбросом масс на ГВ.
Причина: сброс до 20% массы при “гелиевой вспышке”.
3. Понятно происхождение названия AGB
4. Переходу в WD предшествует стадия планетарной туманности (кроме звезд HB с массами менее $0.4-0.5 M_{\odot}$). Планетарные туманности в скоплениях известны (но мало)

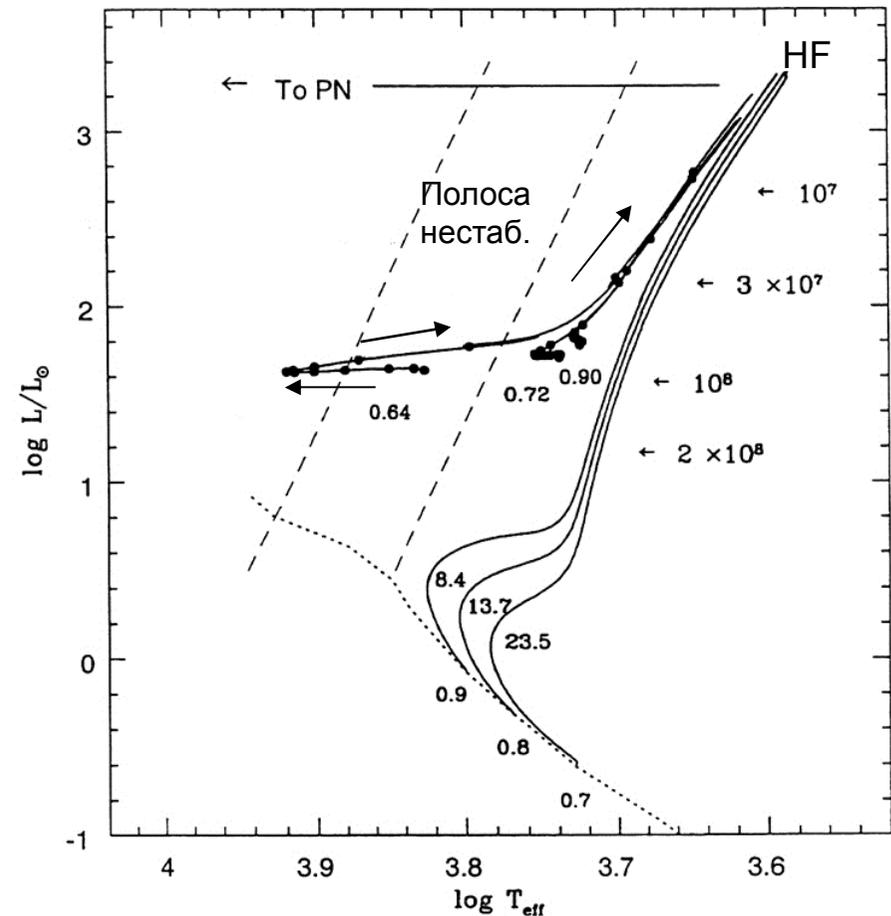
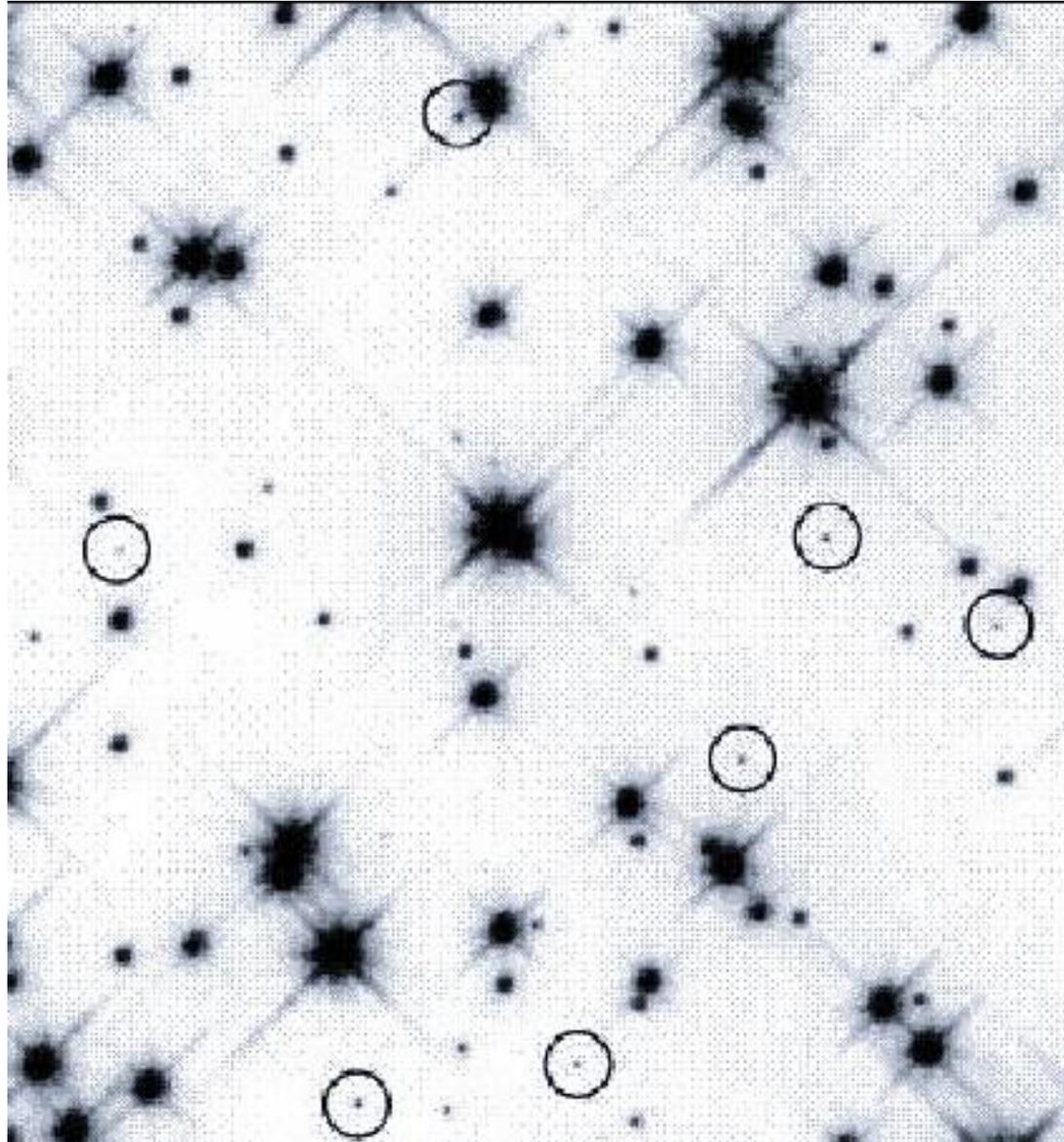
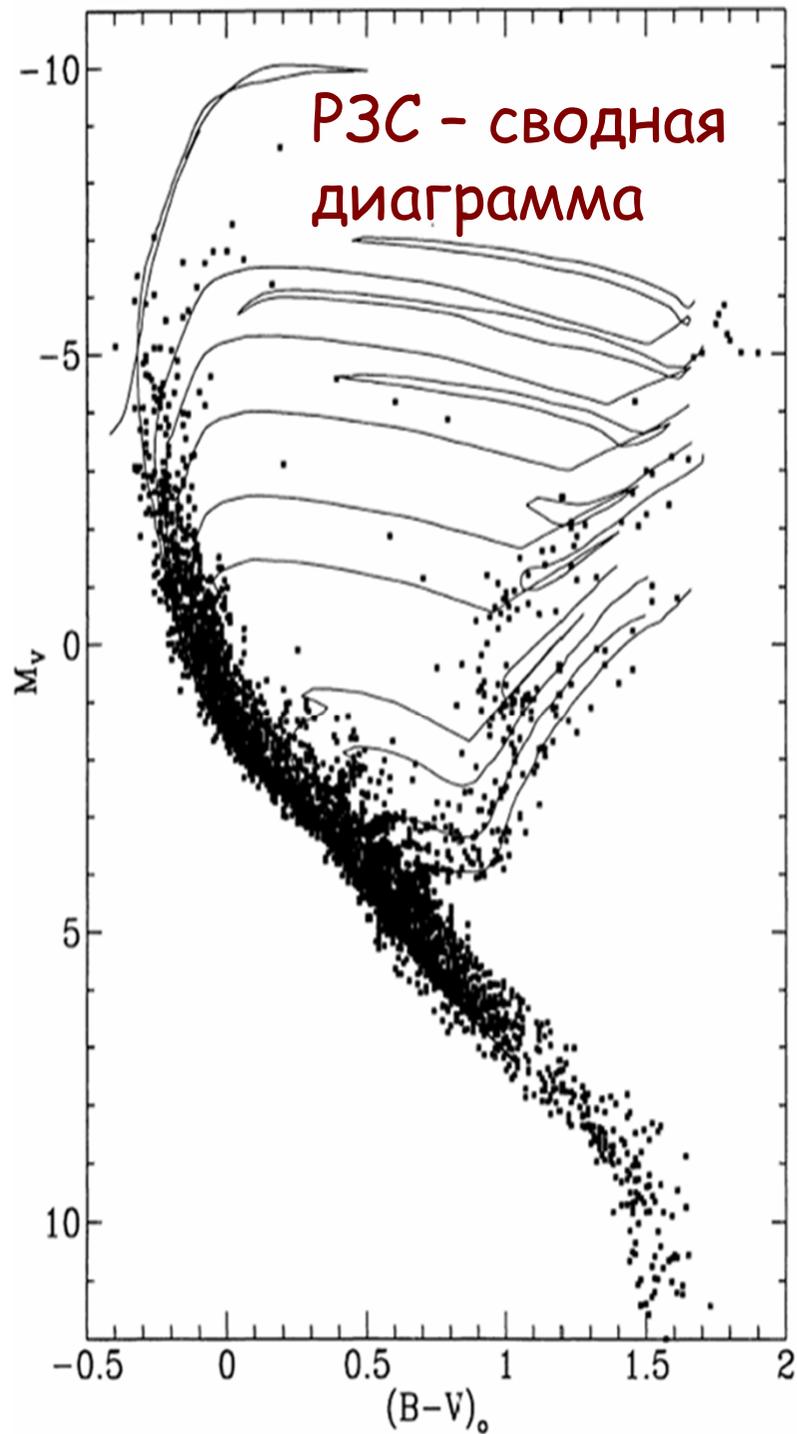


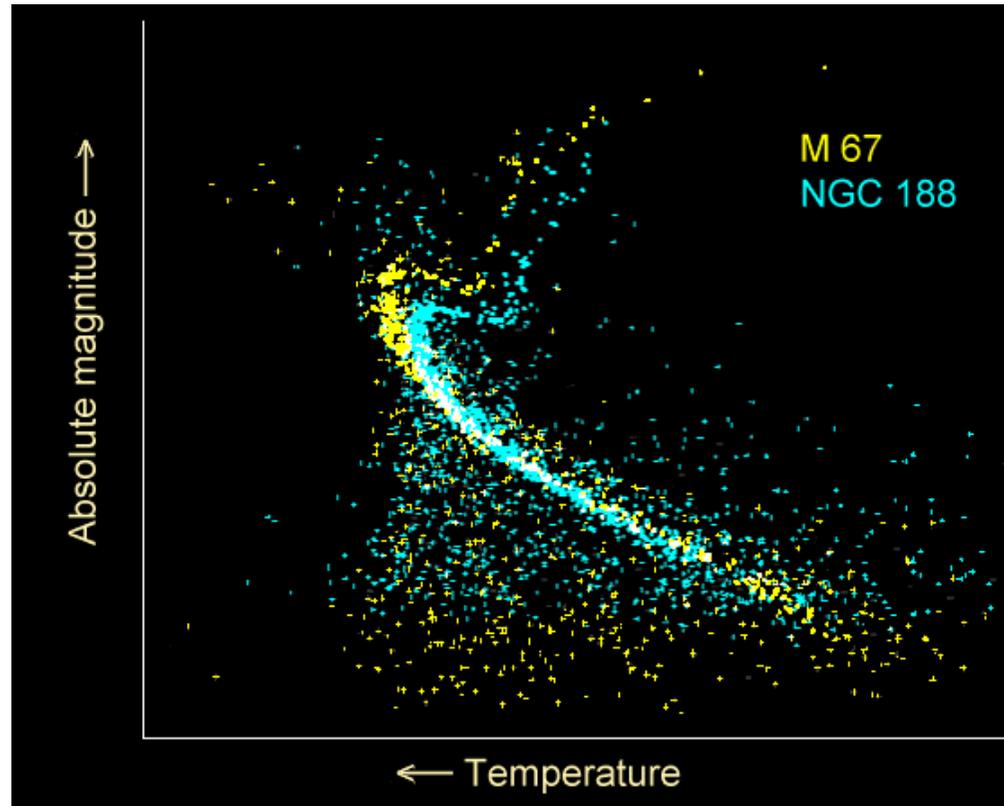
Fig. 1.3. Globular cluster stellar evolution. The dotted line is the zero-age main sequence. Turn-off ages in Gyrs are given for three main sequence masses. Time remaining to the He shell flash are given along the RGB. Zero-age HB masses are given, and each dot signifies 10^7 years of evolution. The dashed lines denote the approximate positions of the instability strip.

**Популяция белых карликов в
M4 = NGC6121 (HST), $V > 24^m$**





Сводная диаграмма Г–Р
рассеянных звездных скоплений
Галактики. Нанесенные изохроны
позволяют понять, как вид
диаграммы зависит от возраста
скопления

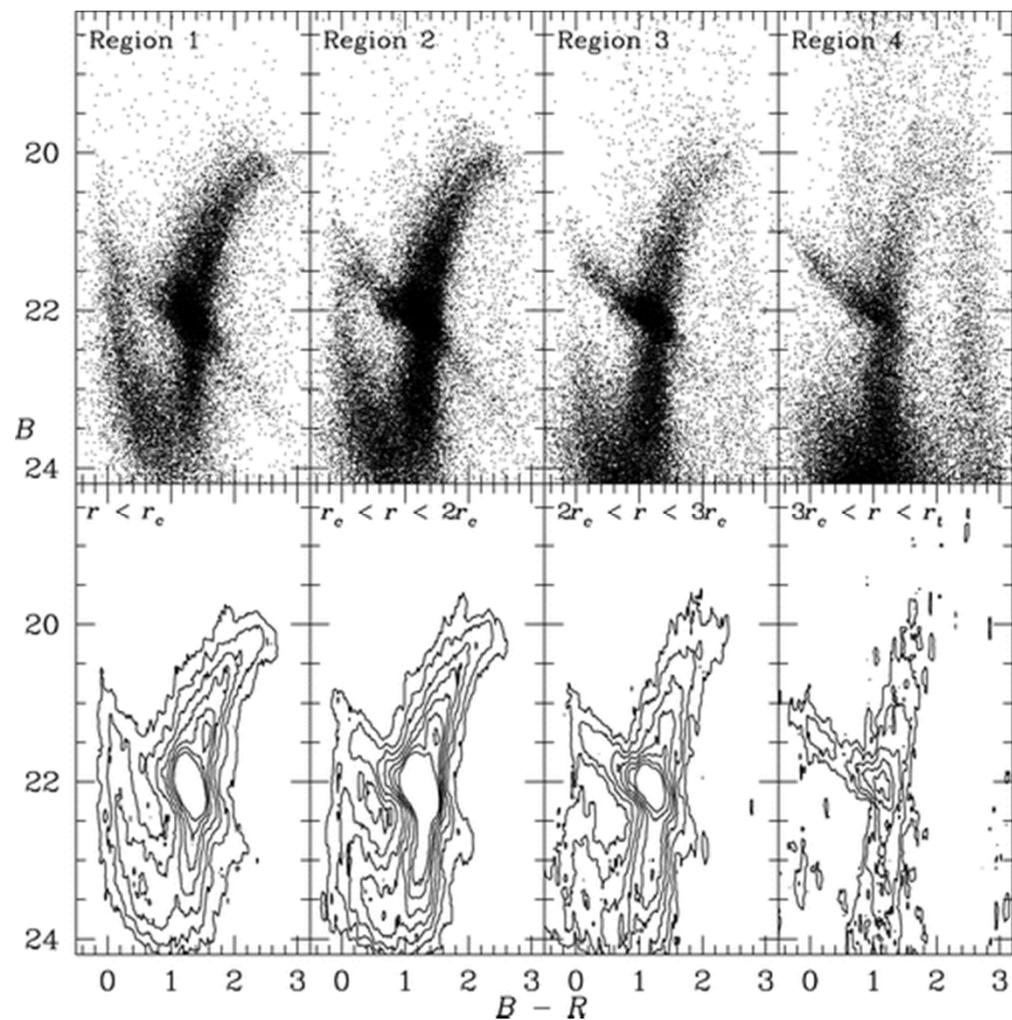


Диаграммы Герцшпрунга – Рассела двух рассеянных скоплений из числа самых старых. Развитая горизонтальная ветвь отсутствует, возраст по «точке поворота» порядка миллиарда лет

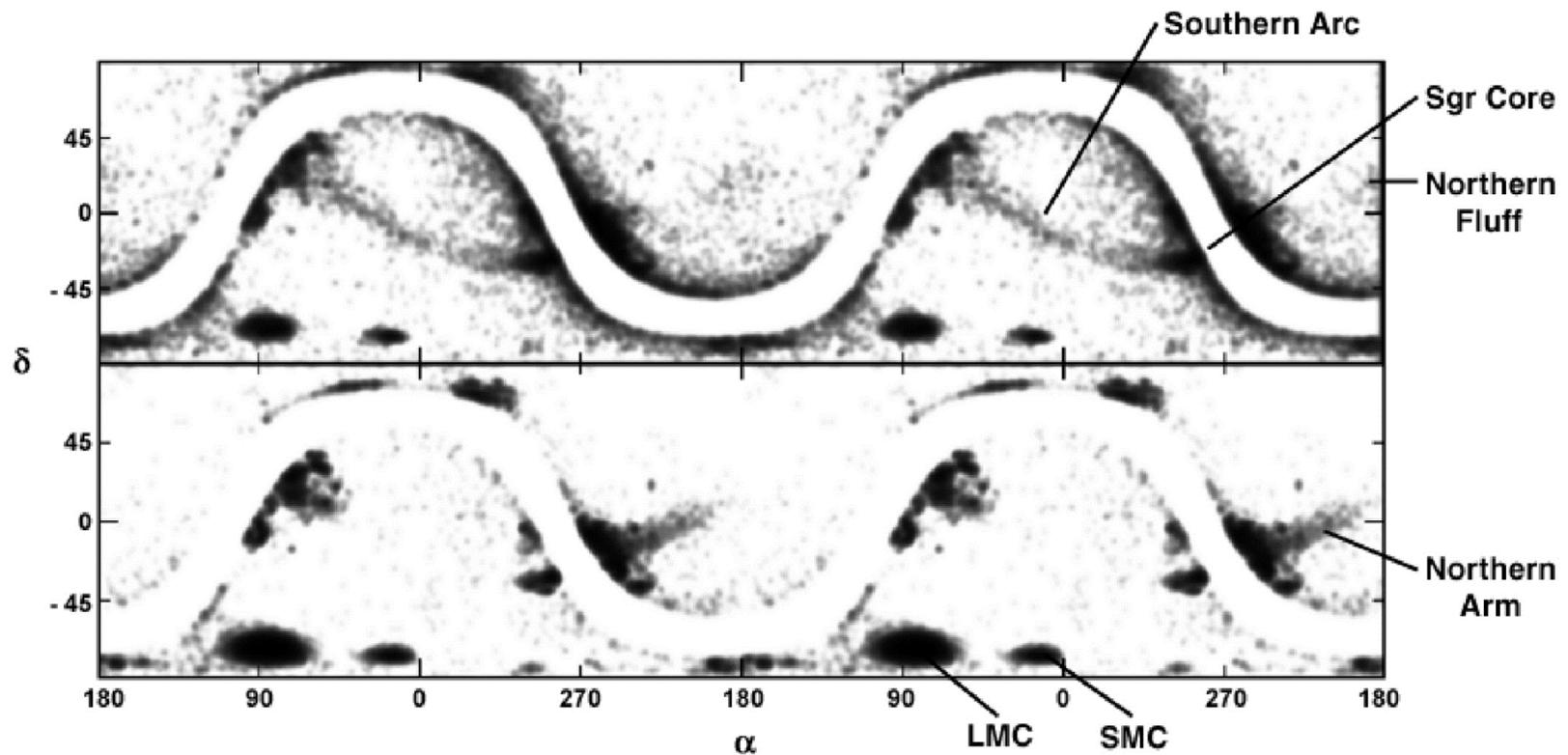
Table 1.3. Cluster Ages vs. $[\alpha/\text{Fe}]$. t_9 values are from Chaboyer *et al.* assuming $M_V(\text{RR}) = 0.15[\text{Fe}/\text{H}] + 0.725$. The Δt_9 values are from Bucal. (1998a).

| Cluster | [Fe/H] (Zinn) | $[\alpha/\text{Fe}]$ | $\sigma([\alpha/\text{Fe}])$ | t_9 | σ | Δt_9 | σ |
|------------|---------------|----------------------|------------------------------|-------|----------|--------------|----------|
| Old Halo | | | | | | | |
| NGC 2298 | -1.81 | 0.29 | 0.02 | 11.8 | +2.0 | 2.0 | |
| NGC 5904 | -1.40 | 0.25 | 0.02 | 11.0 | -0.1 | 1.6 | |
| NGC 6121 | -1.28 | 0.30 | 0.03 | 11.6 | +0.9 | 0.7 | |
| NGC 6205 | -1.65 | 0.29 | 0.02 | 12.1 | -0.7 | 2.0 | |
| NGC 6254 | -1.60 | 0.27 | 0.02 | 11.7 | +0.2 | 2.0 | |
| NGC 6397 | -1.91 | 0.24 | 0.02 | 11.7 | +1.4 | 2.0 | |
| NGC 6723 | -1.09 | 0.39 | 0.04 | 12.0 | | | |
| NGC 6752 | -1.54 | 0.28 | 0.02 | 11.8 | -0.2 | 2.0 | |
| NGC 7078 | -2.15 | 0.43 | 0.04 | 11.7 | +0.7 | 1.5 | |
| Young Halo | | | | | | | |
| NGC 3201 | -1.56 | 0.26 | 0.04 | 11.3 | -0.5 | 1.7 | |
| NGC 5272 | -1.66 | 0.27 | 0.03 | 10.8 | -0.7 | 1.6 | |
| NGC 7006 | -1.59 | 0.24 | 0.02 | 11.1 | | | |
| Disk | | | | | | | |
| NGC 104 | -0.71 | 0.18 | 0.03 | 11.0 | -0.3 | 1.6 | |
| NGC 6352 | -0.63 | 0.27 | 0.04 | 11.0 | +0.3 | 1.6 | |
| NGC 6838 | -0.58 | 0.31 | 0.02 | 10.8 | -0.4 | 1.8 | |
| Others | | | | | | | |
| Rup 106 | -1.61 | -0.05 | 0.02 | 10.8 | | | |
| Pal 12 | -1.13 | -0.02 | 0.02 | 11.4 | | | |

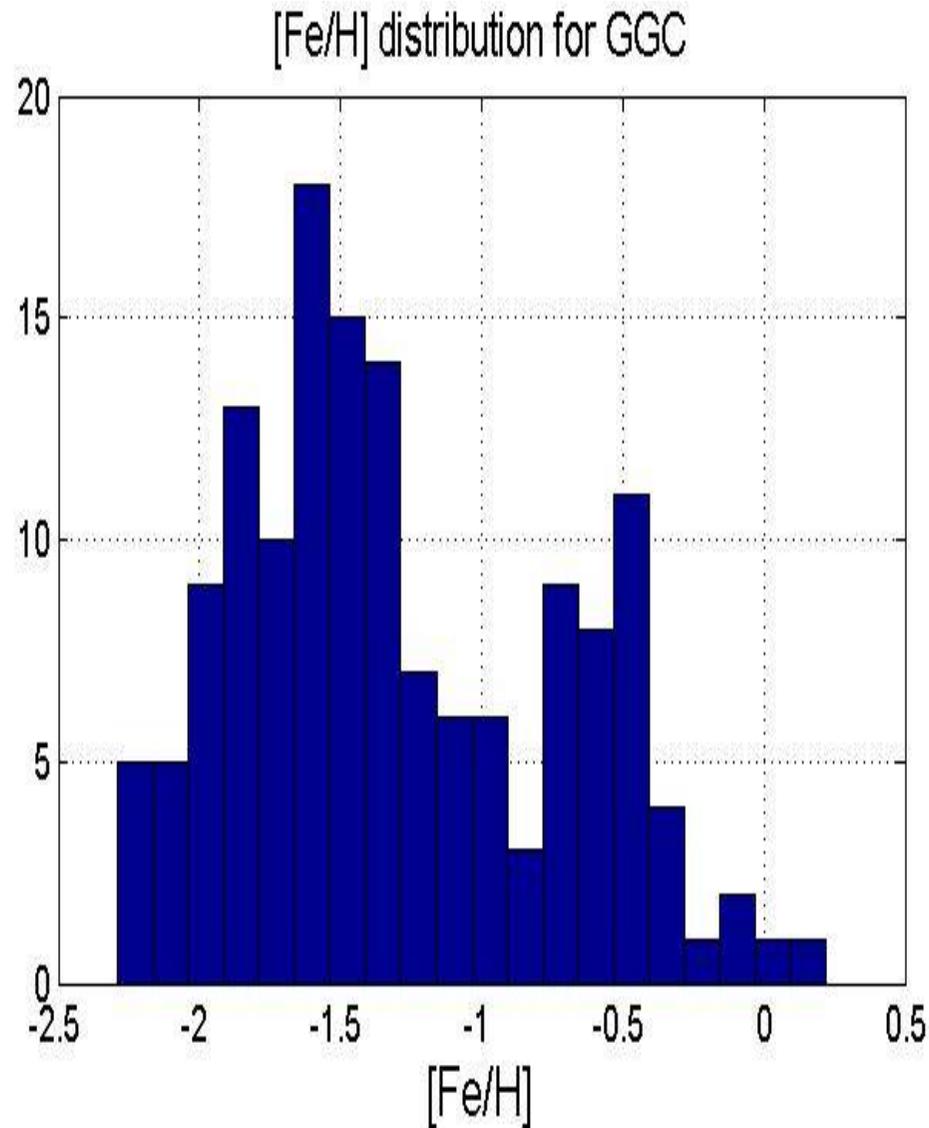
Попытки определить возрасты шаровых скоплений по точке поворота дают возрасты (желтый столбец, в миллиардах лет), формально иногда превышающие общепринятый возраст Вселенной. Если верить различиям возрастов не отдельных скоплений, а от группы к группе, всё вроде разумно. В целом же возраст большинства шаровых скоплений близок к возрасту Вселенной



Родственные шаровым скоплениям объекты – карликовые сфероидальные галактики. На рисунке – диаграммы для галактики Fornax (Coleman & de Jong, 2008)

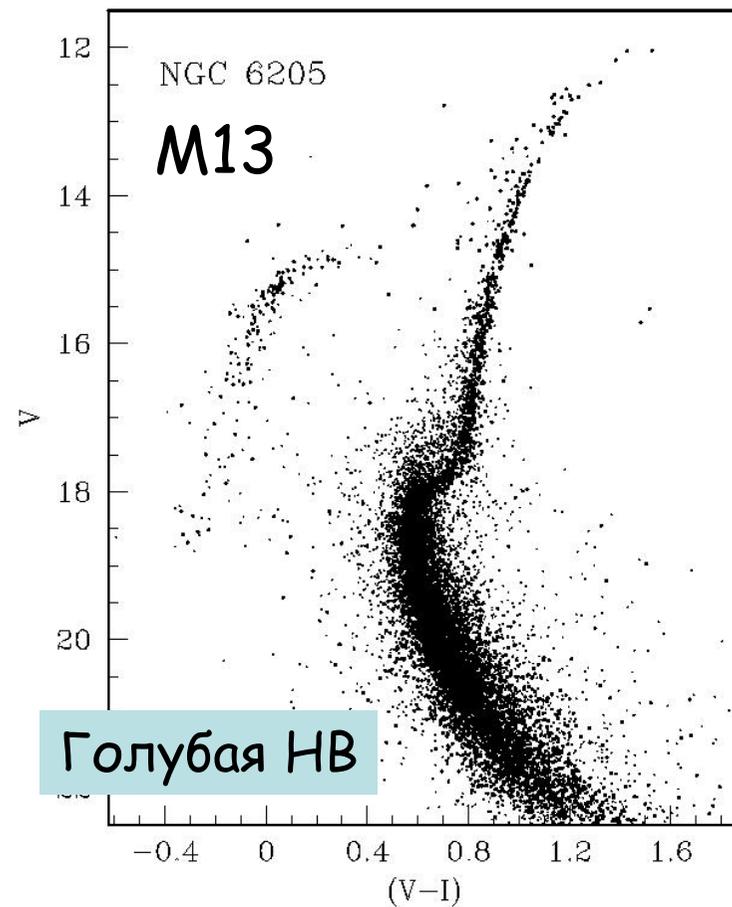
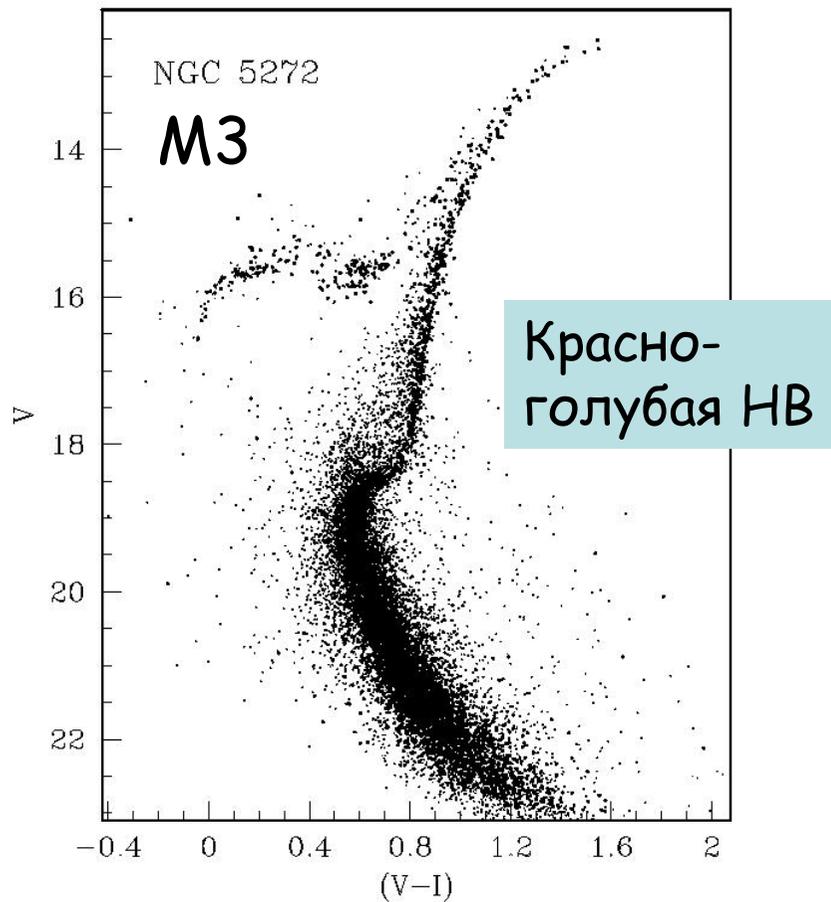


Распад карликовой галактики Sgr в приливном поле нашей Галактики (Majewski и др. 2005)



В атмосферах звезд разных шаровых скоплений Галактики
металличность может отличаться на 2 порядка

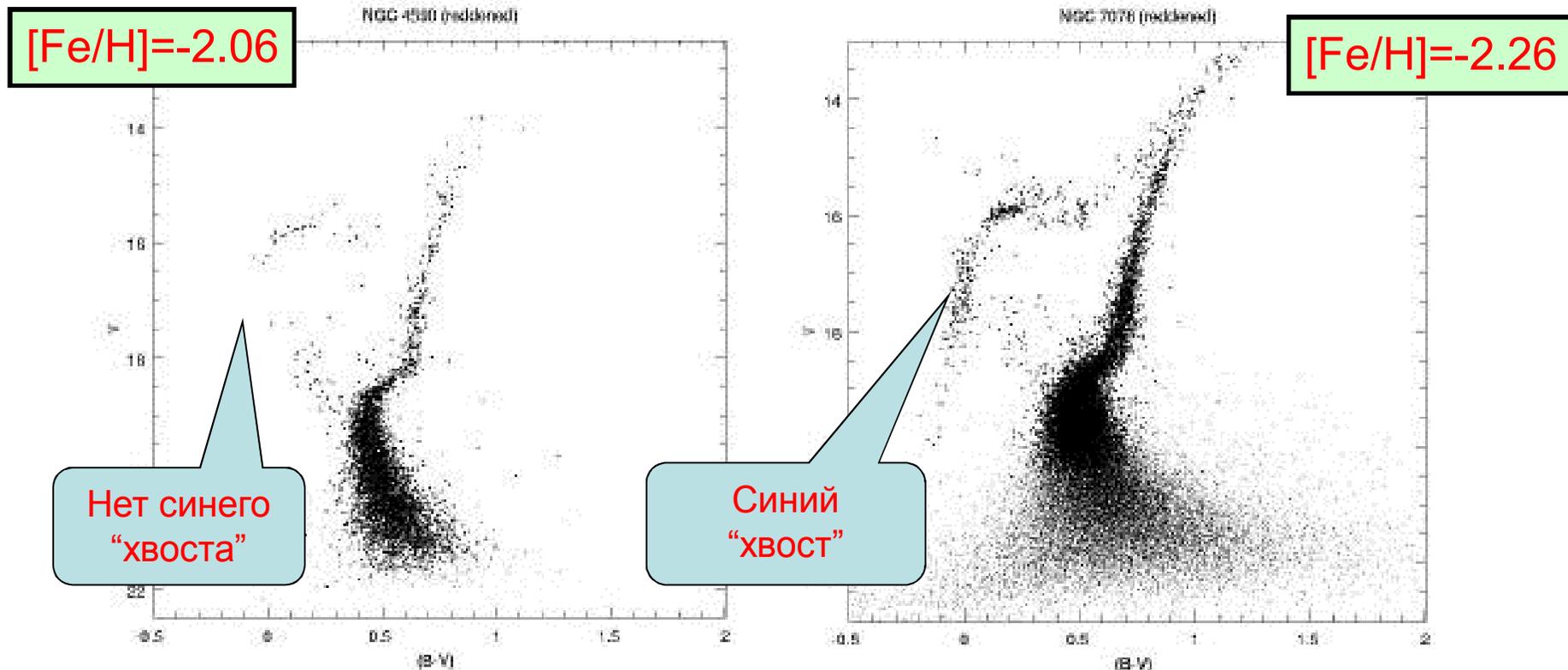
Первый параметр, определяющий различие диаграмм Г–Р у скоплений – содержание тяжелых элементов. В 1960-е гг. стало выясняться, что этого мало. Проблема второго параметра. У М3 и М13 содержание тяжелых элементов очень похоже, а диаграммы разные. Объяснение, нравящееся мне: М13 старше, чем М3, на 1,7 миллиарда лет.



Возможные "кандидаты" на звание "второй параметр":

- Возраст (+!?)
- Потеря массы (+?)
- Обилие гелия (-?)
- Обилие CNO (-?)
- Вращение звездного ядра (-?)
- Концентрация (??)

Не исключено, что есть и другие параметры!



Десятилетиями считалось, что:

- все звезды каждого шарового скопления возникли одновременно, при возникновении имели разную массу и одинаковый химический состав;**
- при эволюции химический состав недр меняется из-за термоядерных реакций, но наружу продукты реакций не выходят, и химический состав атмосферы соответствует исходному.**

Положение звезды скопления на диаграмме Герцшпрунга – Рассела зависит только от массы.

В целом все это верно, но есть очень интересные тонкости химического состава, намекающие на возможность присутствия в одном скоплении звезд разных поколений.

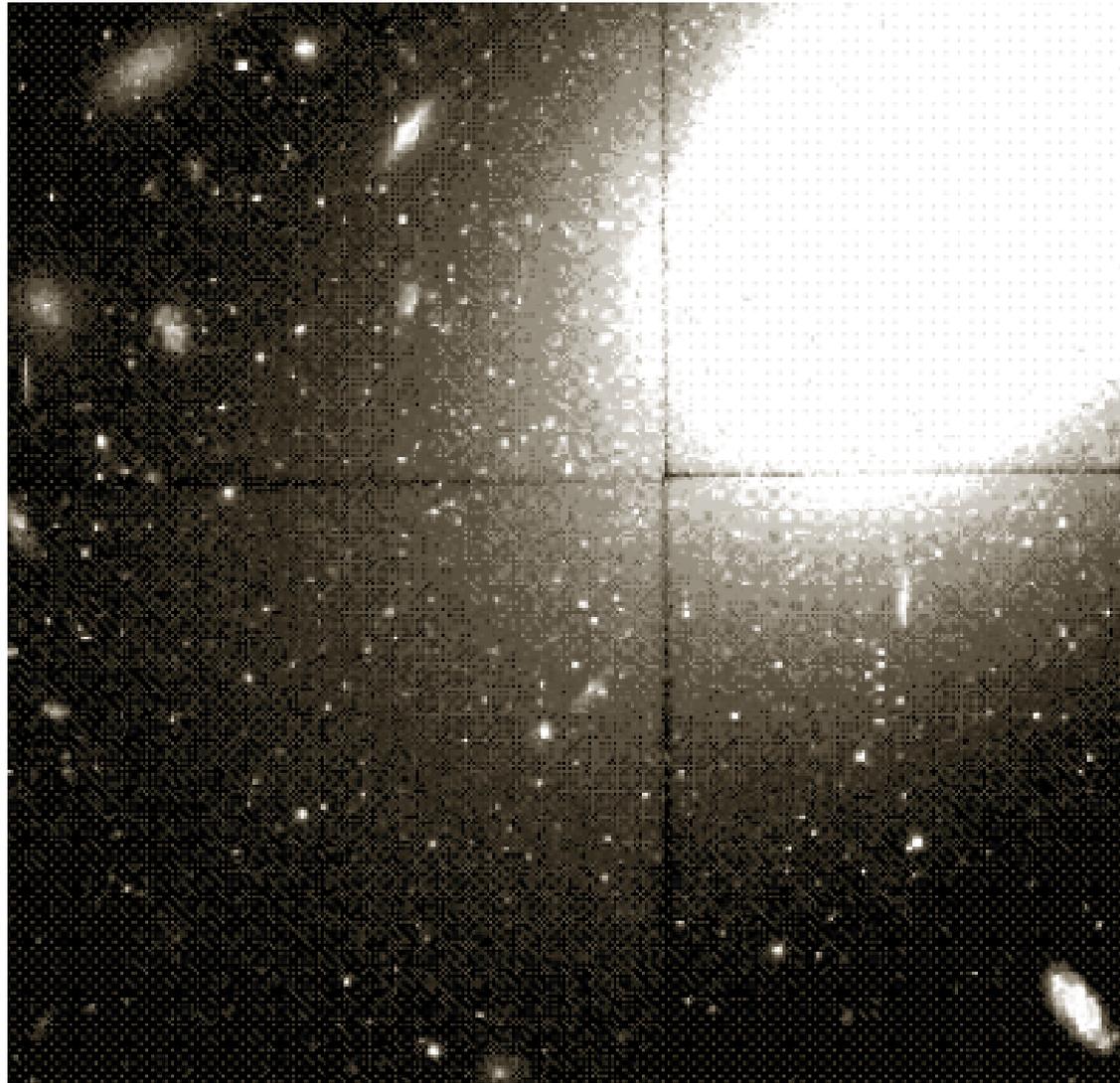


Гигантские эллиптические галактики, подобные M87 (скопление в Деве), особо богаты шаровыми скоплениями, их могут содержать тысячи. В самом полном каталоге шаровых скоплений Галактики (William Harris, версия 2010) 157 шаровых скоплений



Уильям Харрис

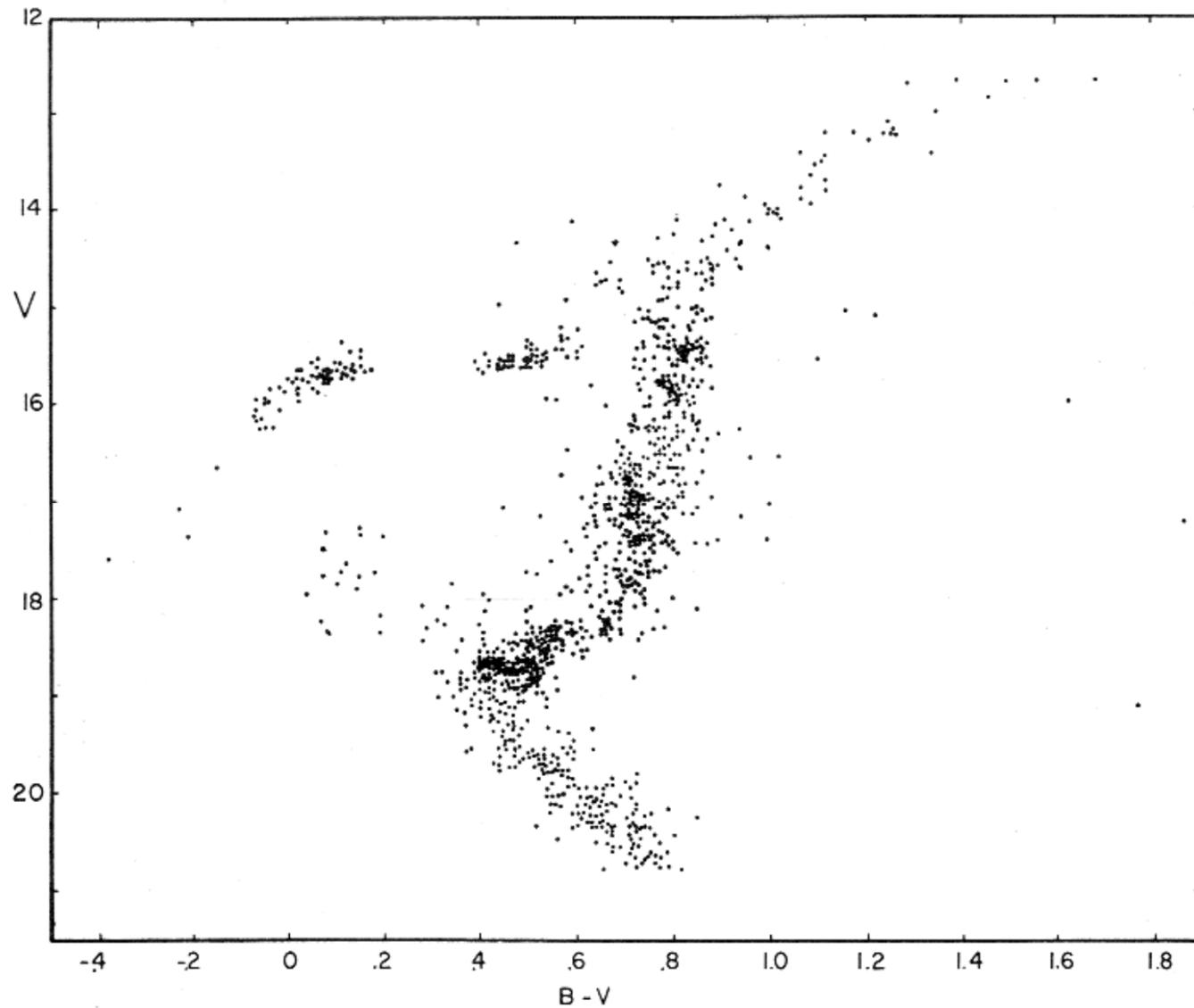
ШЗС в гигантской эллиптической галактике
IC4051 (скопление галактик Coma) видны как
звездообразные объекты



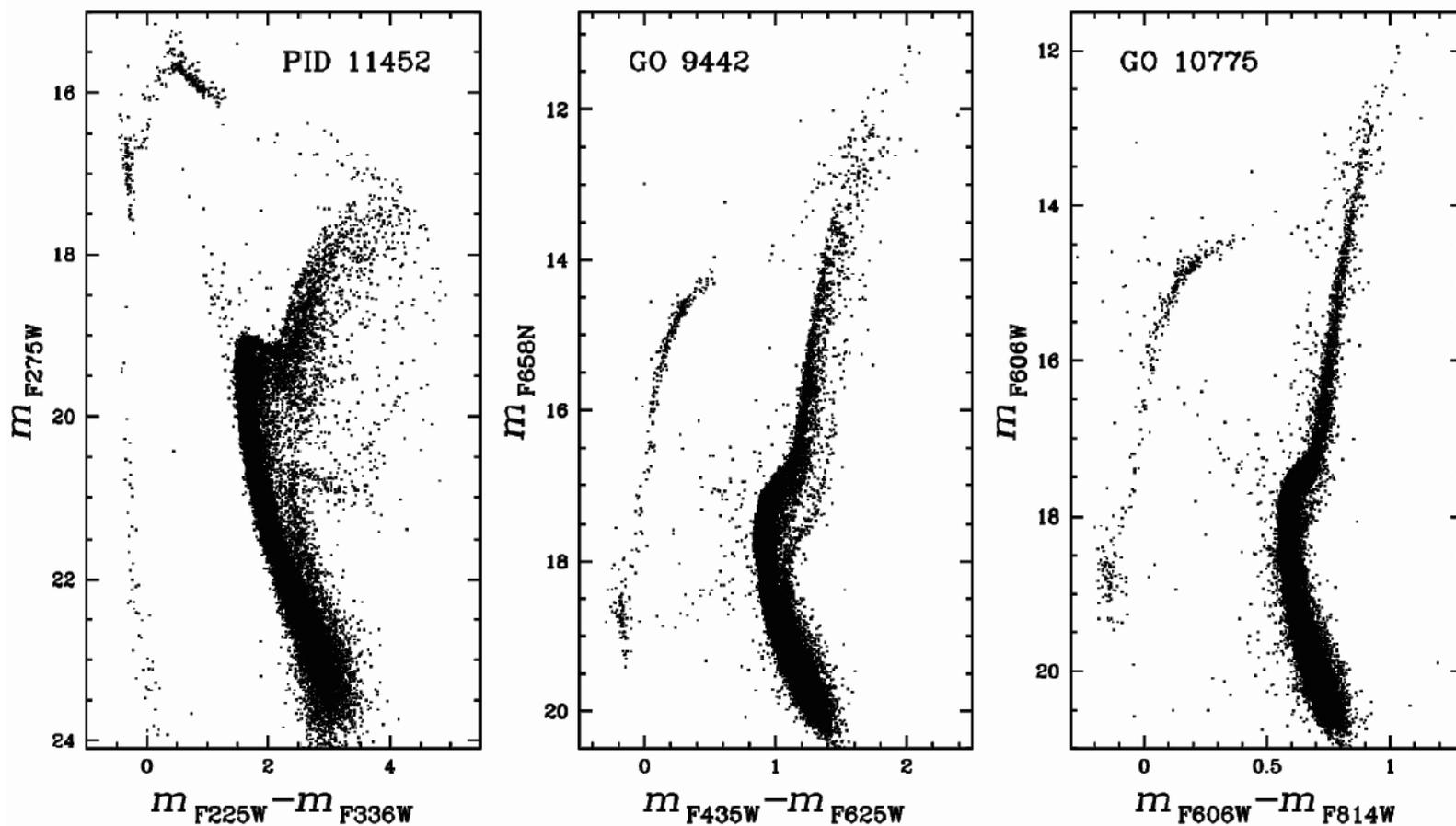
Центральная область 47 Тис (Телескоп им. Хаббла)



Плотность в ядре около 10000 – 100000 звёзд в кубическом парсеке, средние расстояния между звездами порядка тысячи астрономических единиц, раз в 500 меньше, чем в окрестности Солнца

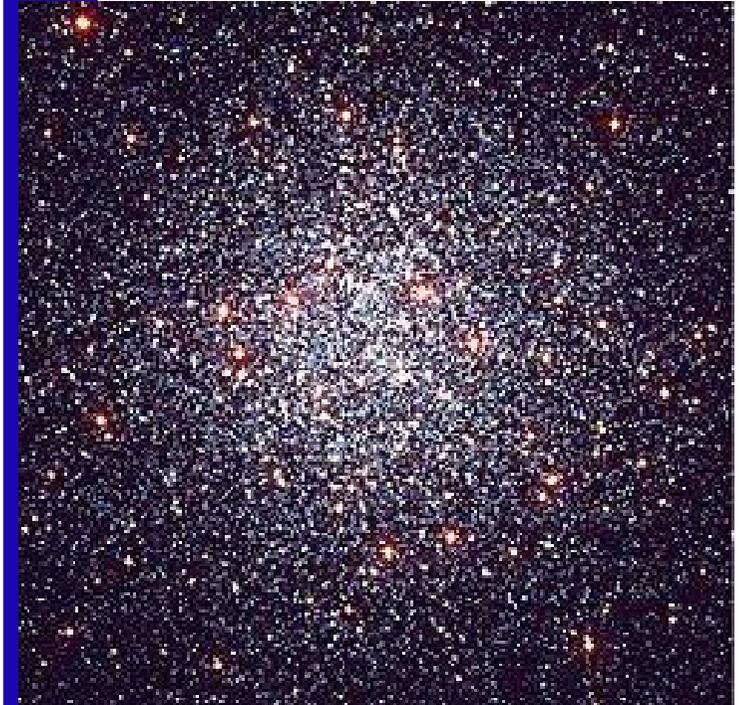
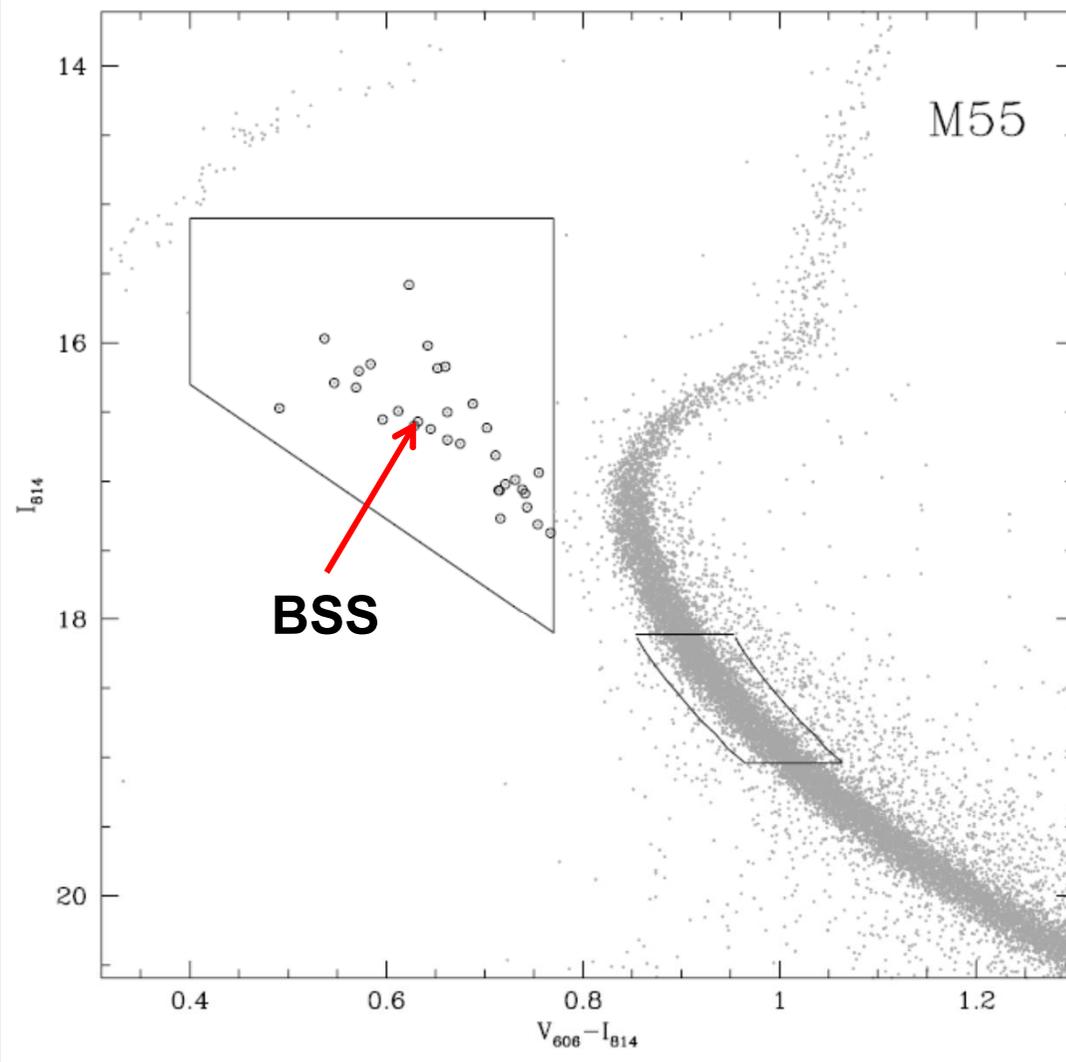


Историческая диаграмма Г–Р скопления М3. Пробел М. Шварцшильда.
Обратите также внимание на blue stragglers. Открыты в М3, более 300
известно в М80



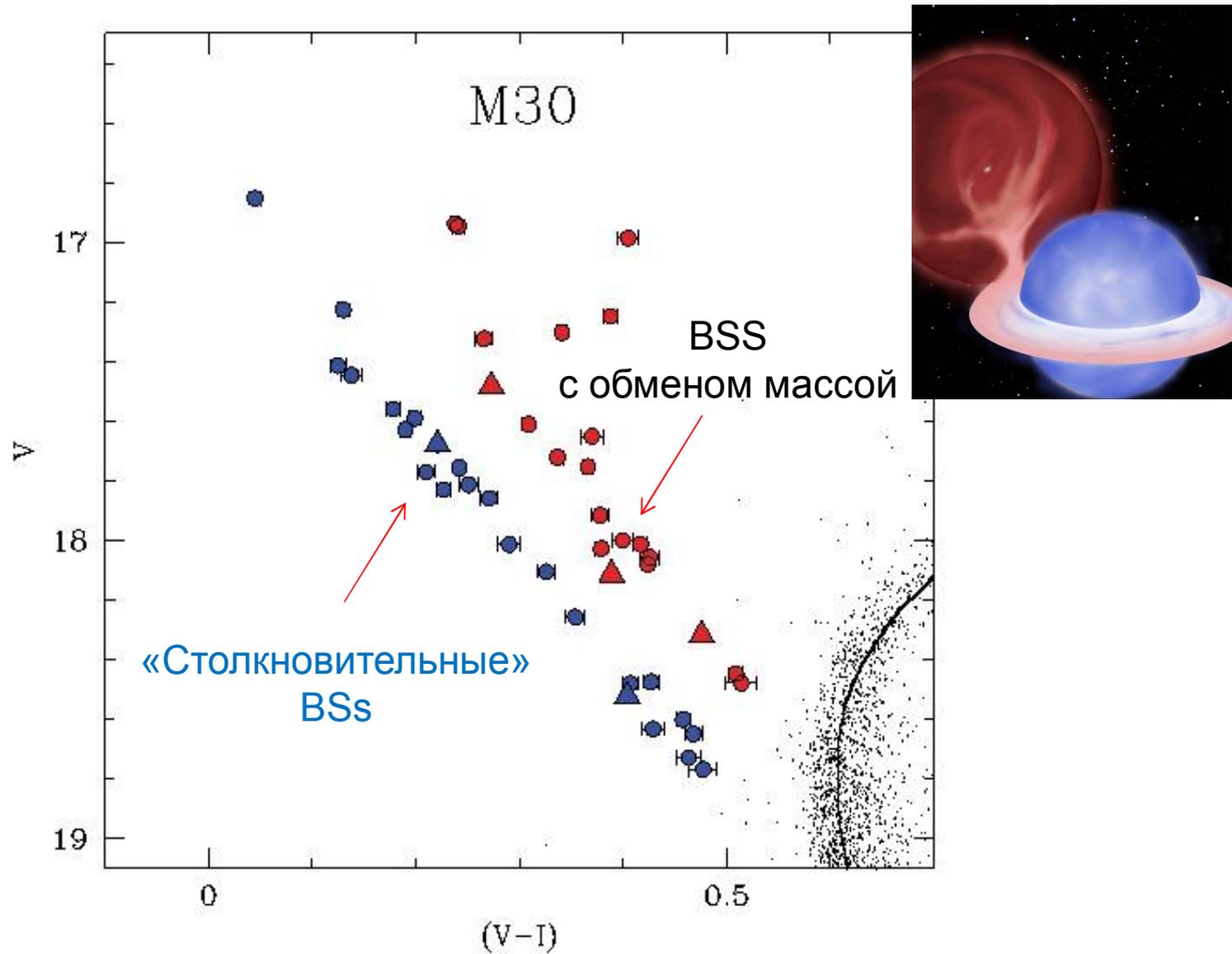
Шаровое скопление Омега Центавра с телескопом Хаббла:
 Множественность точек поворота (уникальное свойство!), большое население blue stragglers, эффектное продолжение горизонтальной ветви. Омега Центавра – скорее галактика, чем обычное шаровое скопление.

“Blue stragglers” (BSS) в шаровом скоплении М 55

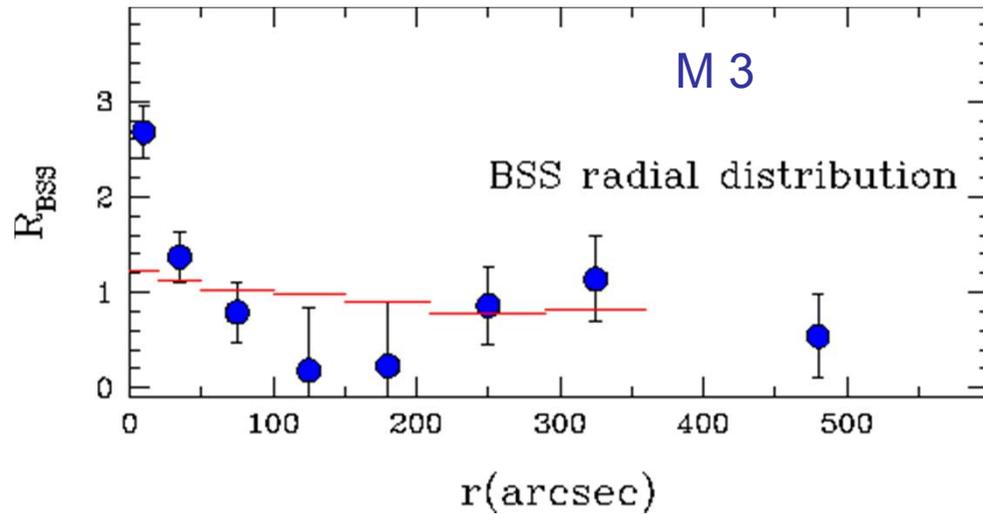


*В шаровом скоплении
М 80 обнаружено > 300
BSS,
а всего сейчас найдено
свыше 3000 BSS.*

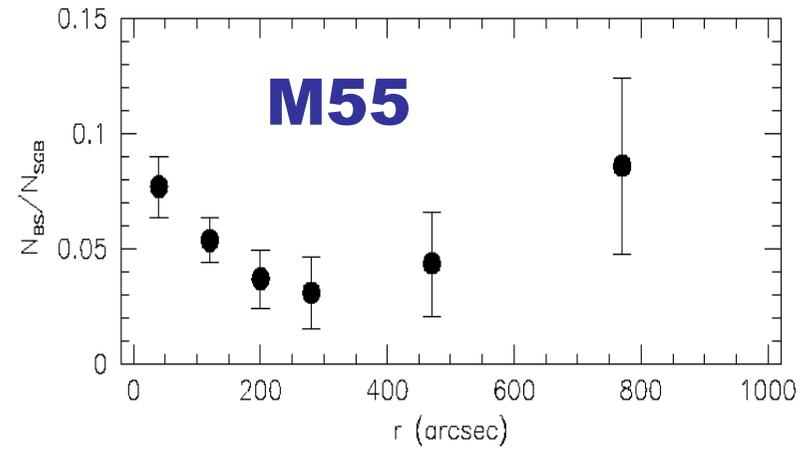
Две последовательности BSS в плотном шаровом скоплении M30



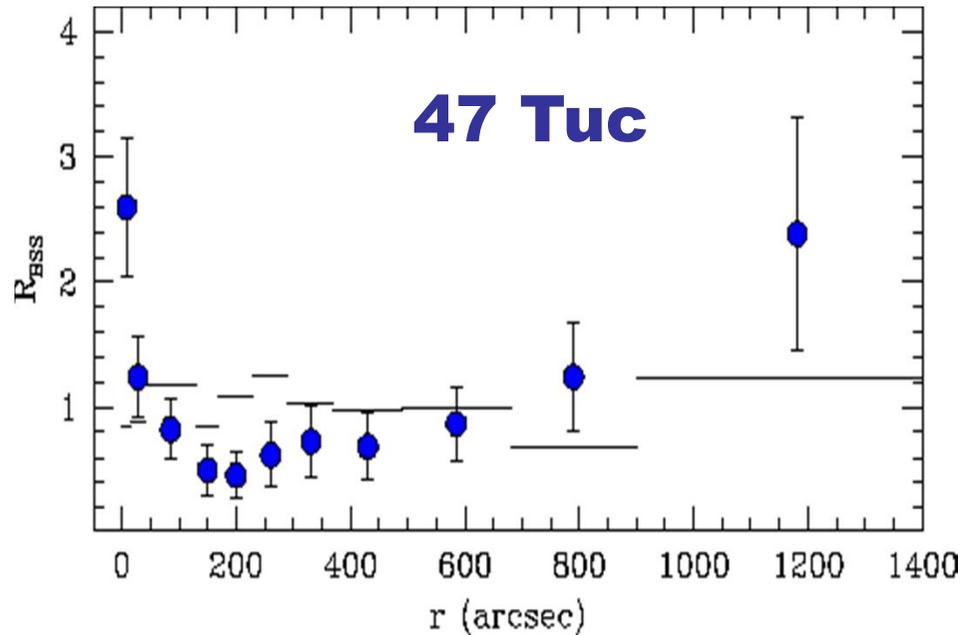
Радиальное распределение BSS



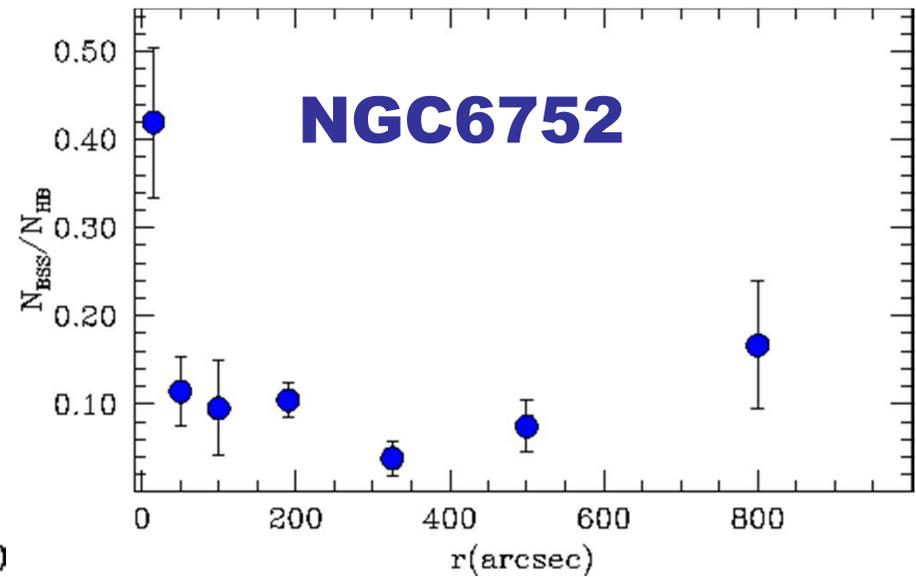
Ferraro et al. (1993,1997)



Zaggia et al. (1997)



Ferraro et al. (2004)

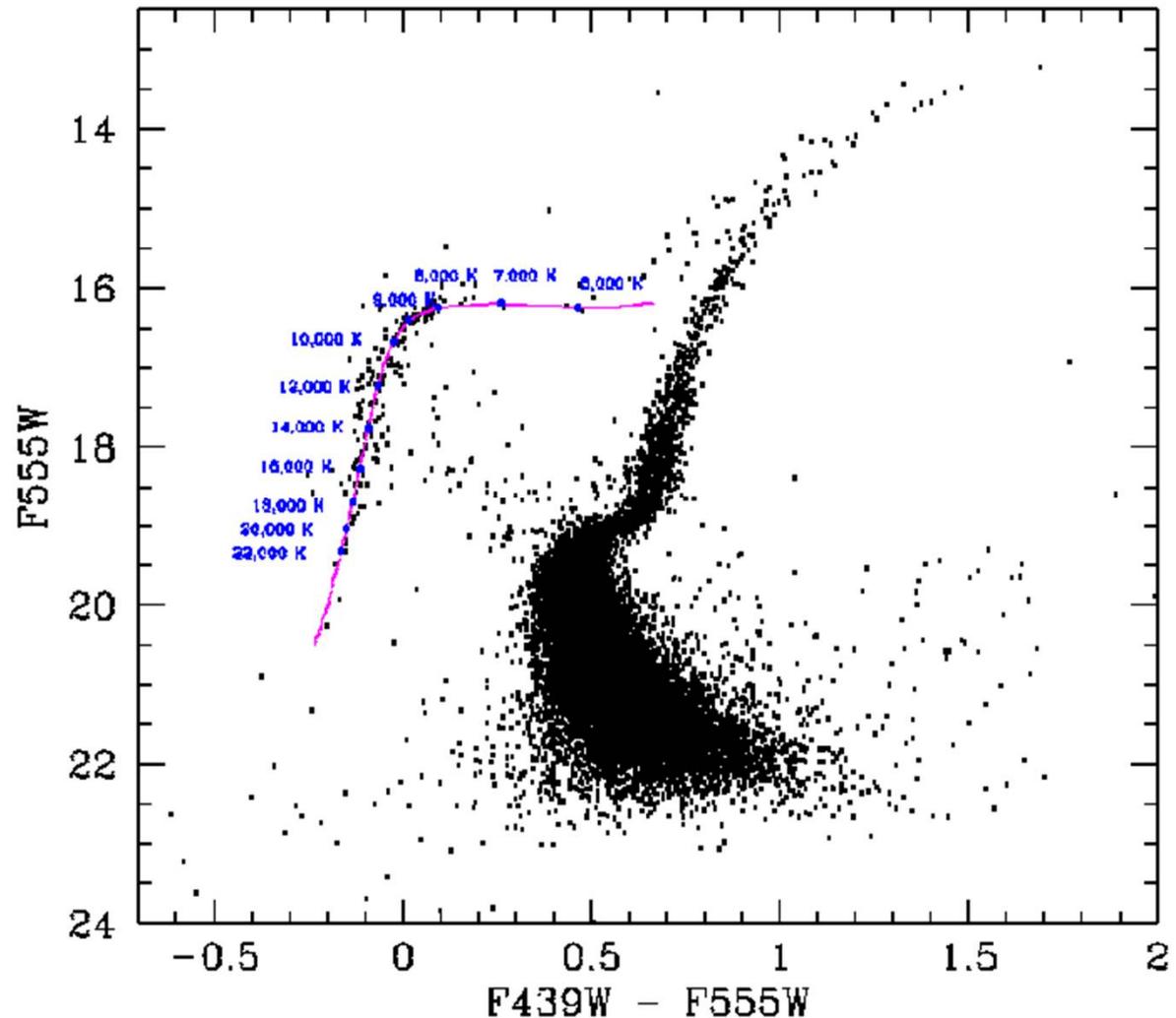


Sabbi et al. (2004)

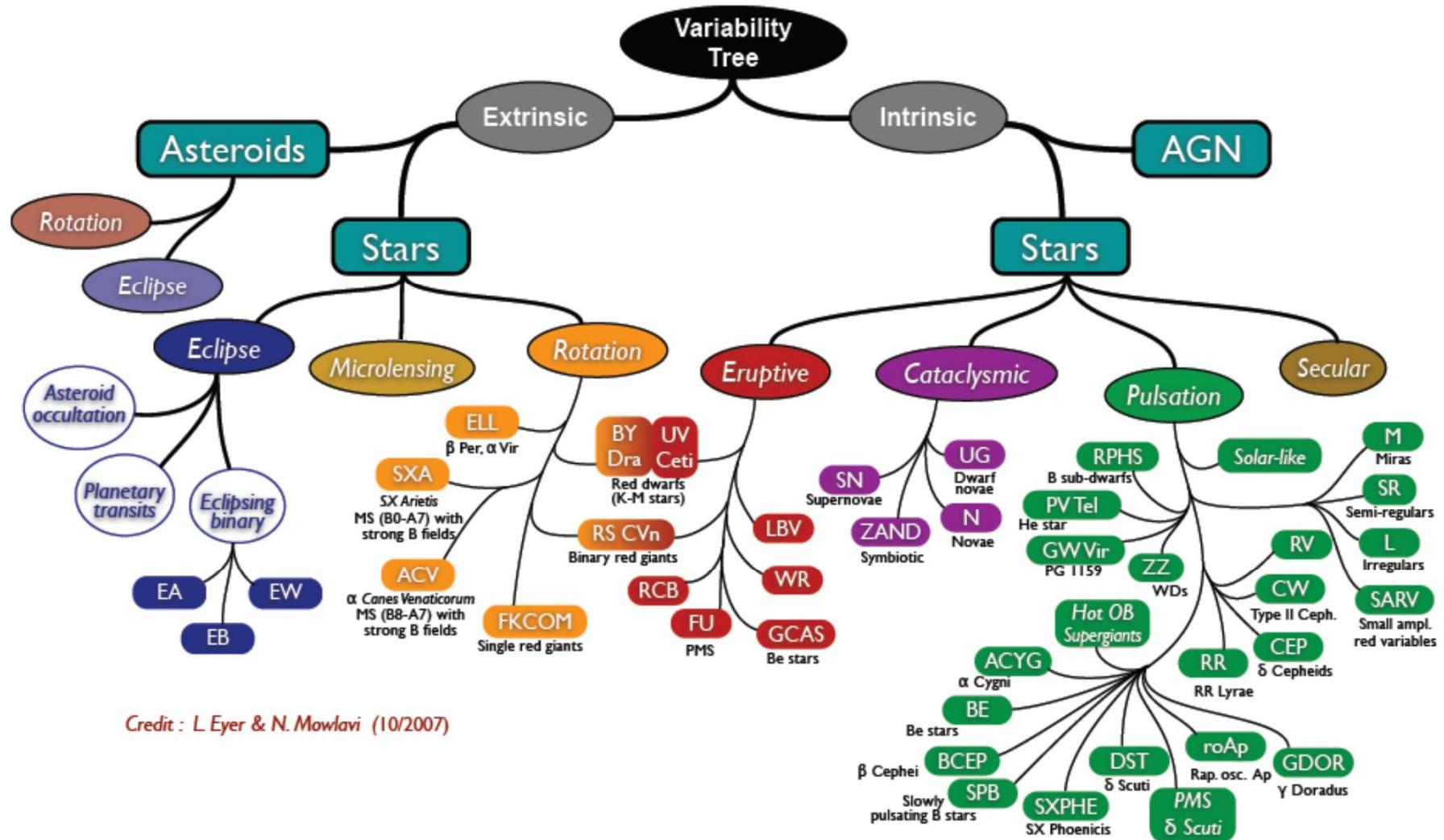
| Cluster | $T_{e_{max}}$ |
|----------|---------------|
| NGC 1904 | 22000 K |
| NGC 2808 | 37000 K |
| NGC 4833 | 22000 K |
| NGC 5824 | 42000 K |
| NGC 5946 | 20000 K |
| NGC 5986 | 37000 K |
| NGC 6093 | 35000 K |
| NGC 6205 | 35000 K |
| NGC 6218 | 19000 K |
| NGC 6229 | 20000 K |
| NGC 6266 | 37000 K |
| NGC 6273 | 40000 K |
| NGC 6284 | 19000 K |
| NGC 6325 | 40000 K |
| NGC 6388 | 45000 K |
| NGC 6402 | 35000 K |
| NGC 6441 | 37000 K |
| NGC 6453 | 27000 K |
| NGC 6522 | 25000 K |
| NGC 6681 | 25000 K |
| NGC 7078 | 39000 K |
| NGC 7089 | 40000 K |

Голубые "хвосты" - ЕНВ
у 25-30% ШЗС найдены голубые
"хвосты", где температуры звезд
превышают $T_{eff} \sim 20000K$

Cluster : n1904



“Родословное дерево” переменных звёзд (Eyer L., Mowlavi N., 2010)

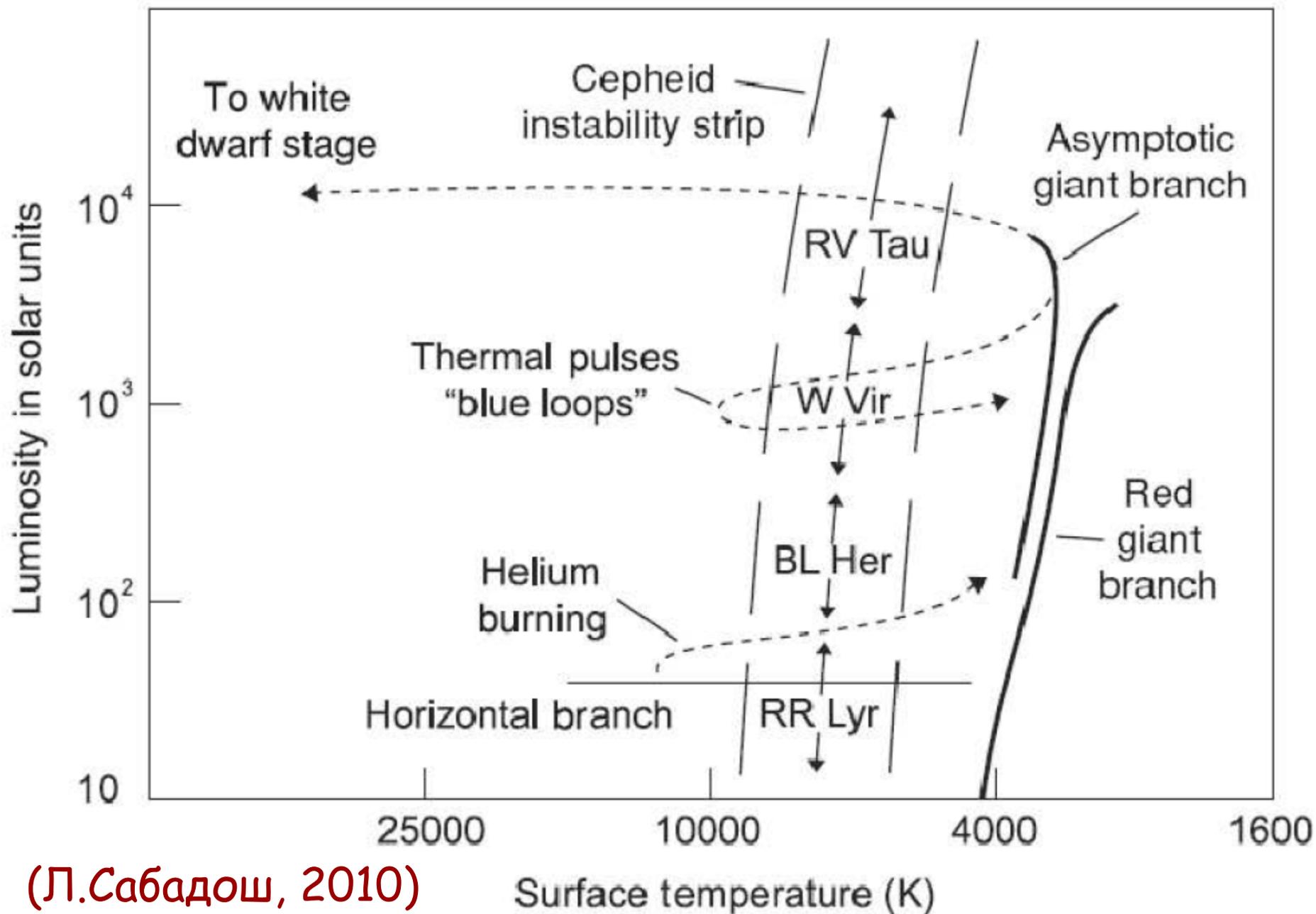


Credit : L. Eyer & N. Mowlavi (10/2007)



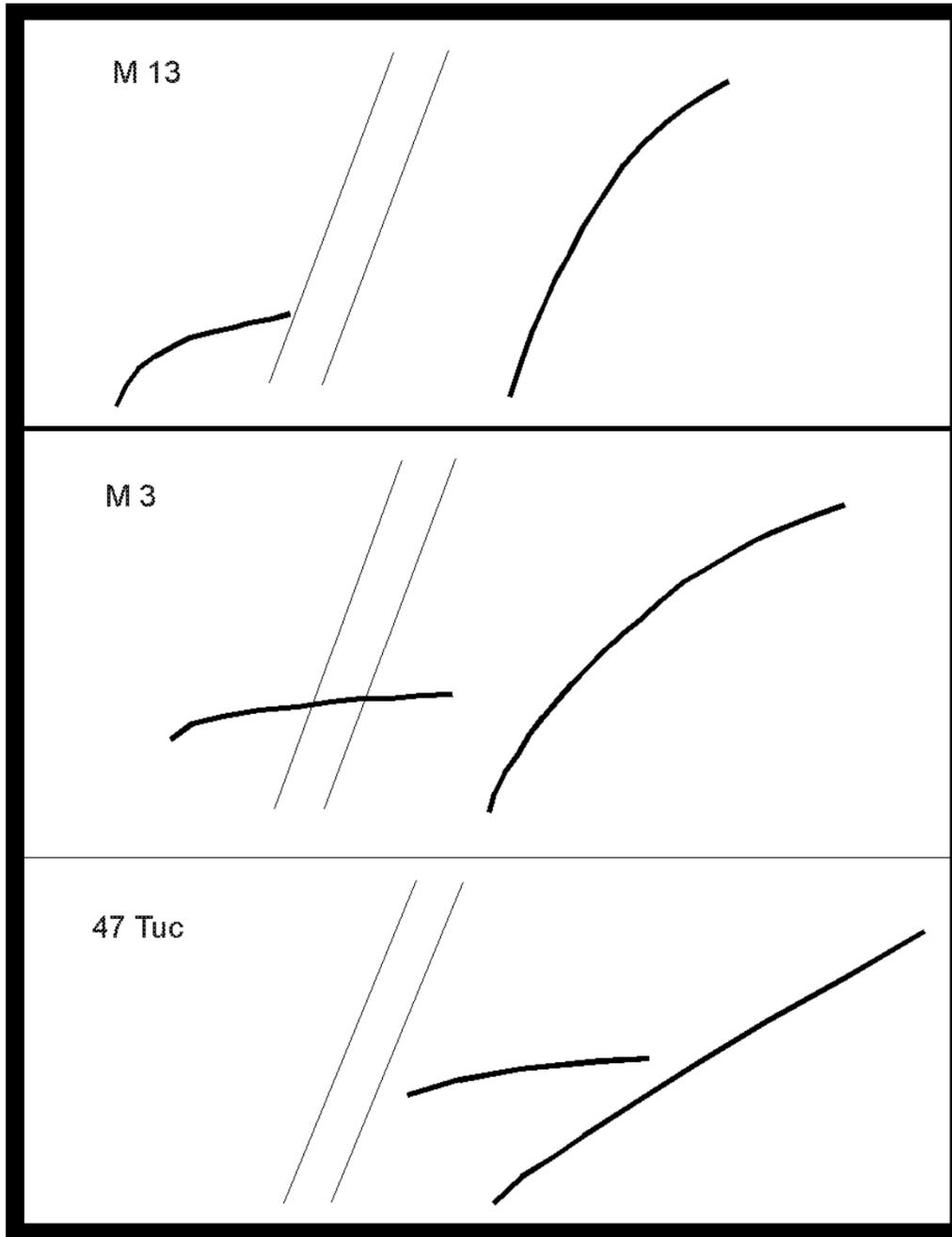
Пульсации звезд типа RR Лир в шаровом звездном скоплении М 3. В некоторых скоплениях таких звезд сотни, в других – нет совсем

Переменные звёзды шаровых скоплений и гало



(Л.Сабдош, 2010)

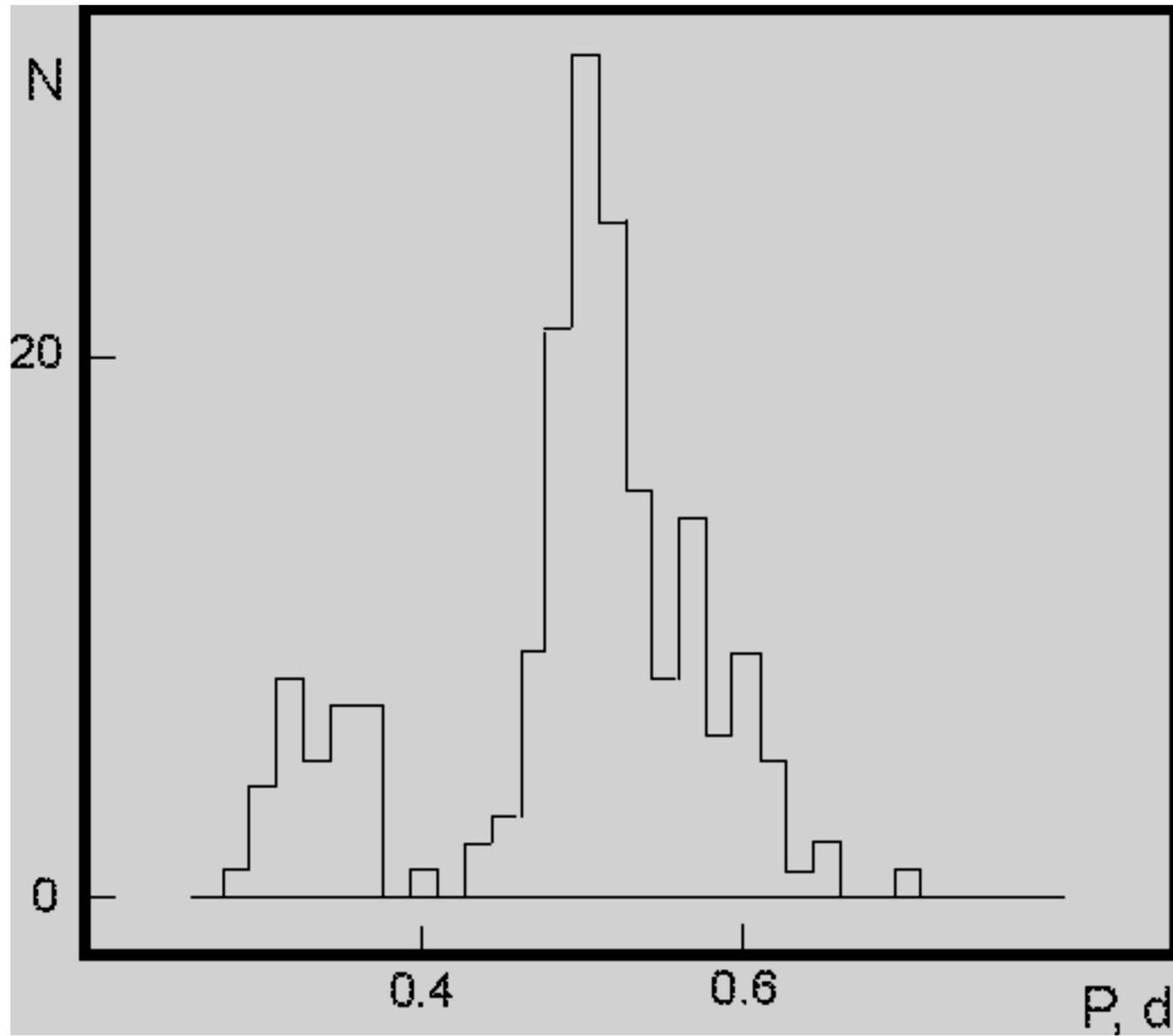
V



Типы морфологии
горизонтальной
ветви шаровых
скоплений.

Численность
переменных типа RR
Лиры в скоплении –
это количество звезд
горизонтальной
ветви, попавших в
пробел
Шварцшильда.

B - V



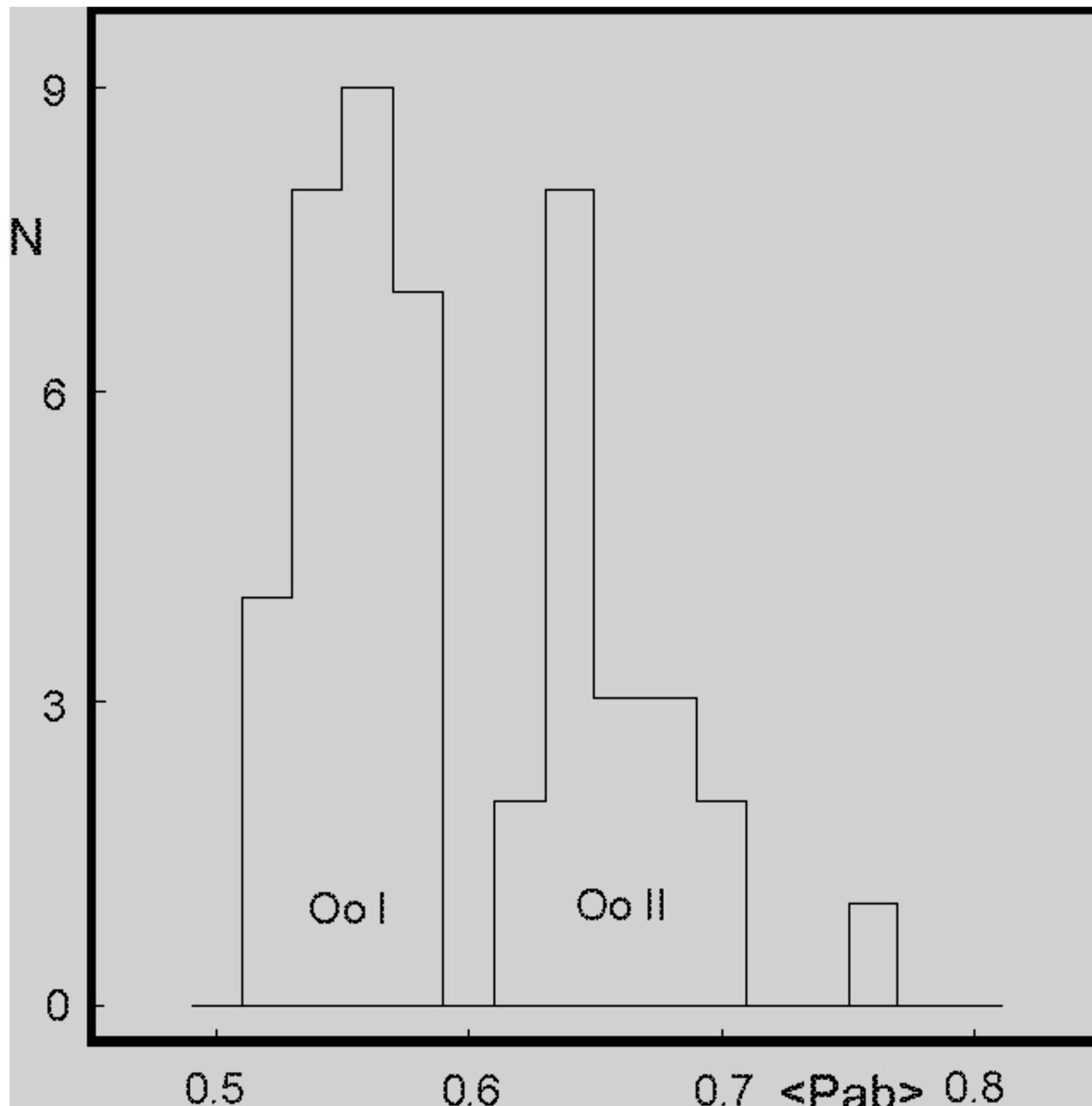
Распределение звезд типа RR Lyg в М 3 по периодам (по каталогу Куттс Клеман).

ЭФФЕКТ ООСТЕРХОФА (P. Oosterhoff, 1939)

Две группы шаровых скоплений Галактики, со средними значениями периодов звезд типа RRAB в скоплении близ двух выделенных значений, практически без промежуточных случаев. Первый класс (OoI, прототип M 3 = NGC 5272): $\langle P_{ab} \rangle \sim 0^{\text{d}}.55$. Второй класс (OoII, прототип M 15 = NGC 7078): $\langle P_{ab} \rangle \sim 0^{\text{d}}.65$.

В других галактиках эффекта Оостерхофа может не быть.

В шаровых скоплениях практически отсутствуют звезды типа RR Лиры с периодами около 0.43 суток, а в поле Галактики они есть.



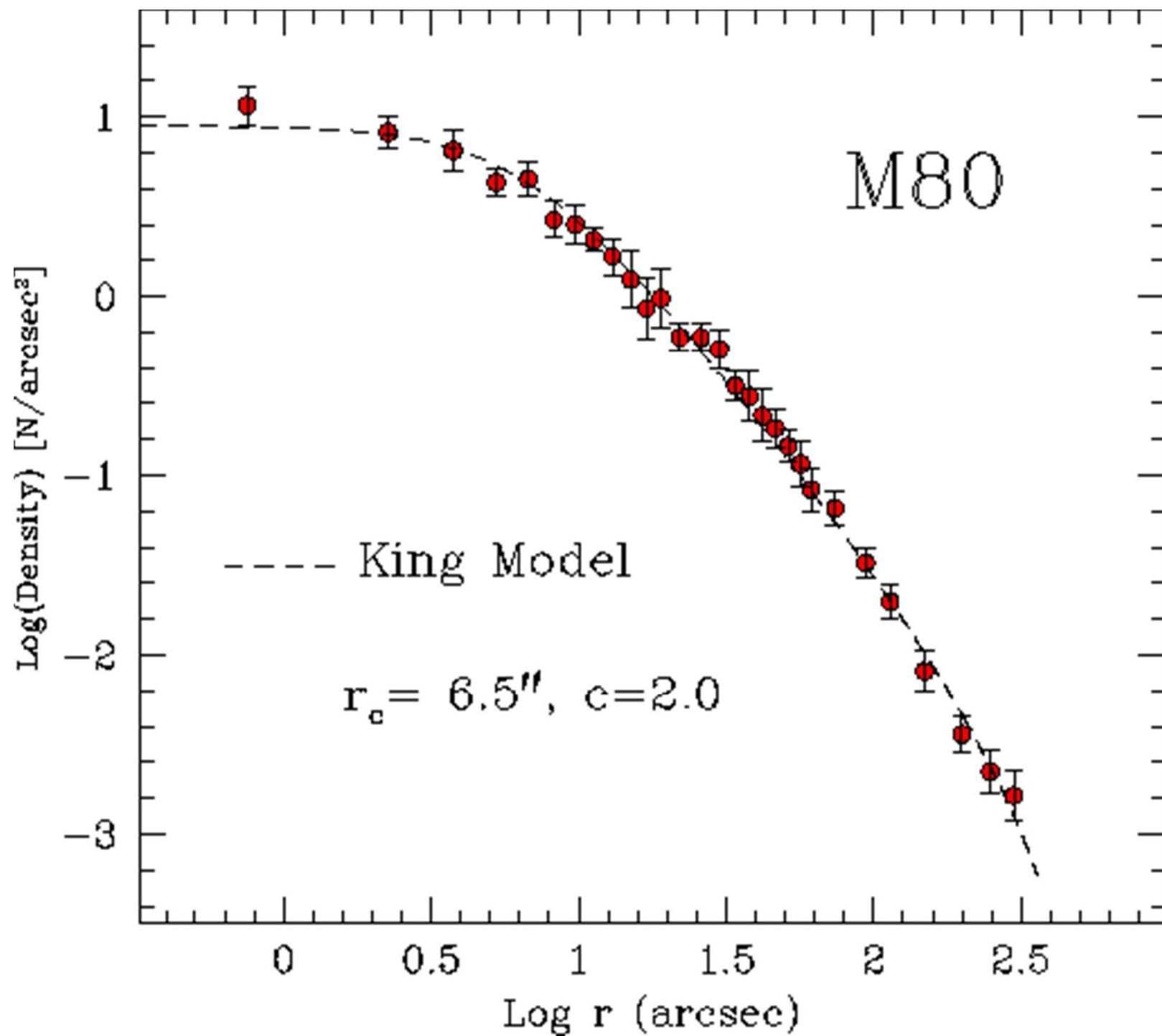
Четкая двоичность
эффекта
Оостерхофа (по
каталогу Куттс
Клеман, версия
2002). Учтены
скопления с не
менее чем 5
звездами типа
RRAB.

В шаровых скоплениях заведомо есть:

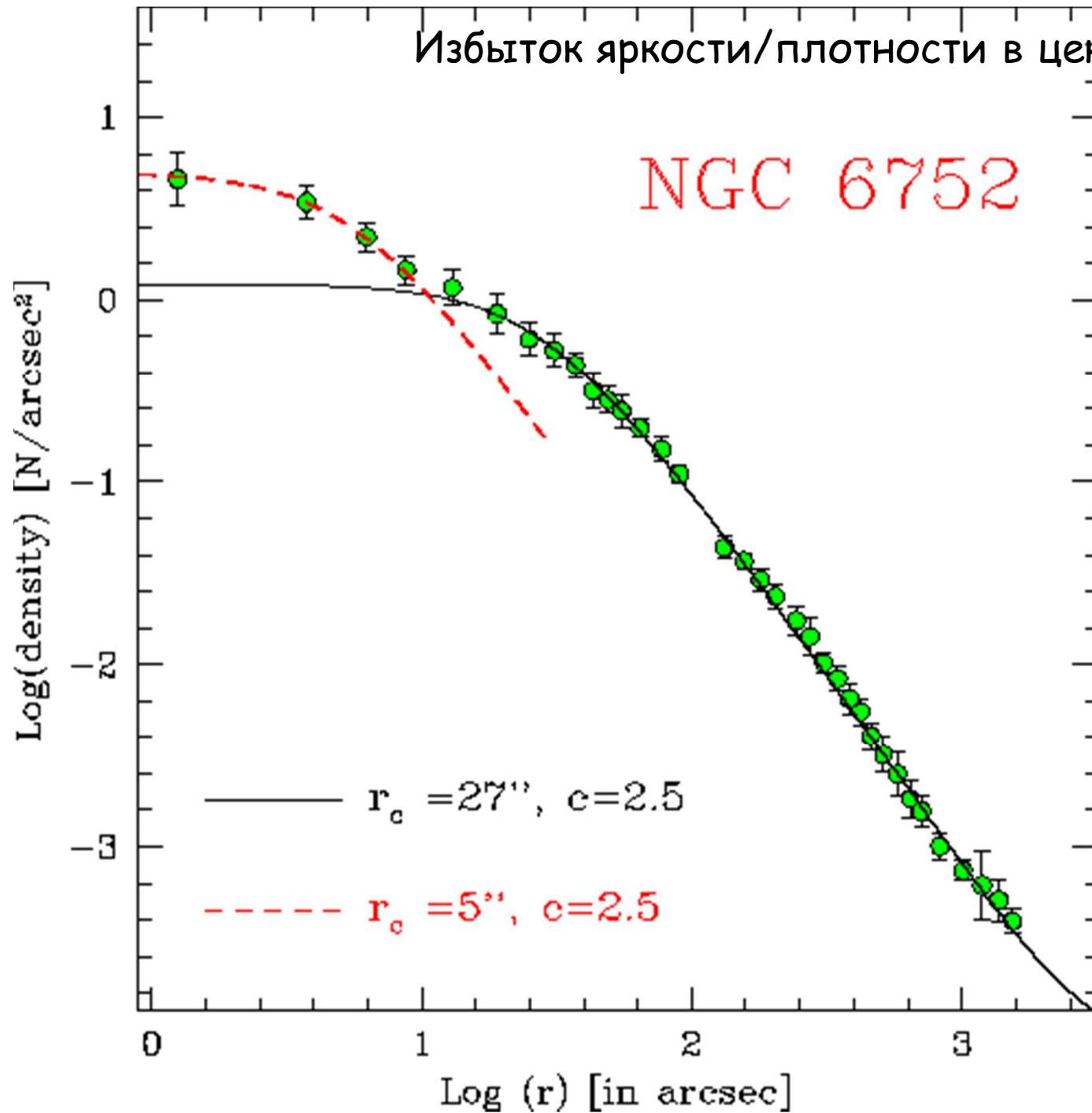
- звезды типа RR Лиры (от нуля до сотен);
- цефеиды (CW) короткопериодической и долгопериодической групп (от нуля до всего нескольких штук);
- аномальные цефеиды (BL Boo, NGC 5466);
- Новые звезды (уверенно – только одна, в M80);
- звезды типа SX Феникса;
- мириды, преимущественно в скоплениях высокой металличности, и прочие красные переменные звезды ветви гигантов и асимптотической ветви.

Вероятно, есть:

- затменные переменные (относительно мало);
- карликовые новые (есть кандидаты);
- пульсирующие белые карлики;
- и, может быть, звезды других типов.



Избыток яркости/плотности в центре



Пространственное распределение ШЗС разной металличности

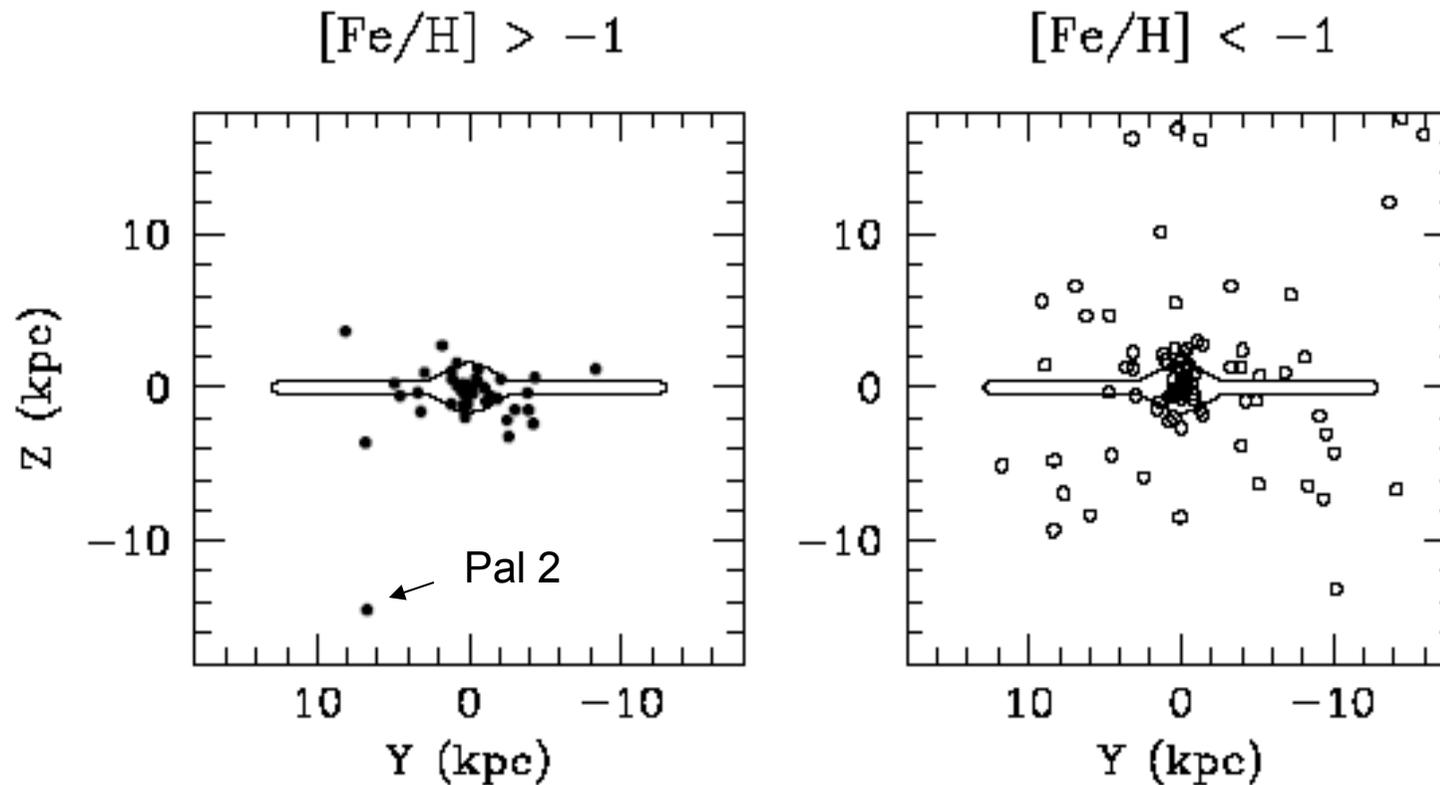


Fig. 1.10. Spatial distribution projected on the $Y Z$ plane for the metal-rich clusters (left panel) with $[\text{Fe}/\text{H}] > -0.95$, and the metal-poor clusters (right panel) with $[\text{Fe}/\text{H}] < -0.95$. In the left panel, the most extreme outlying point is Palomar 12, a “transition” object between halo and disk

СПАСИБО!