

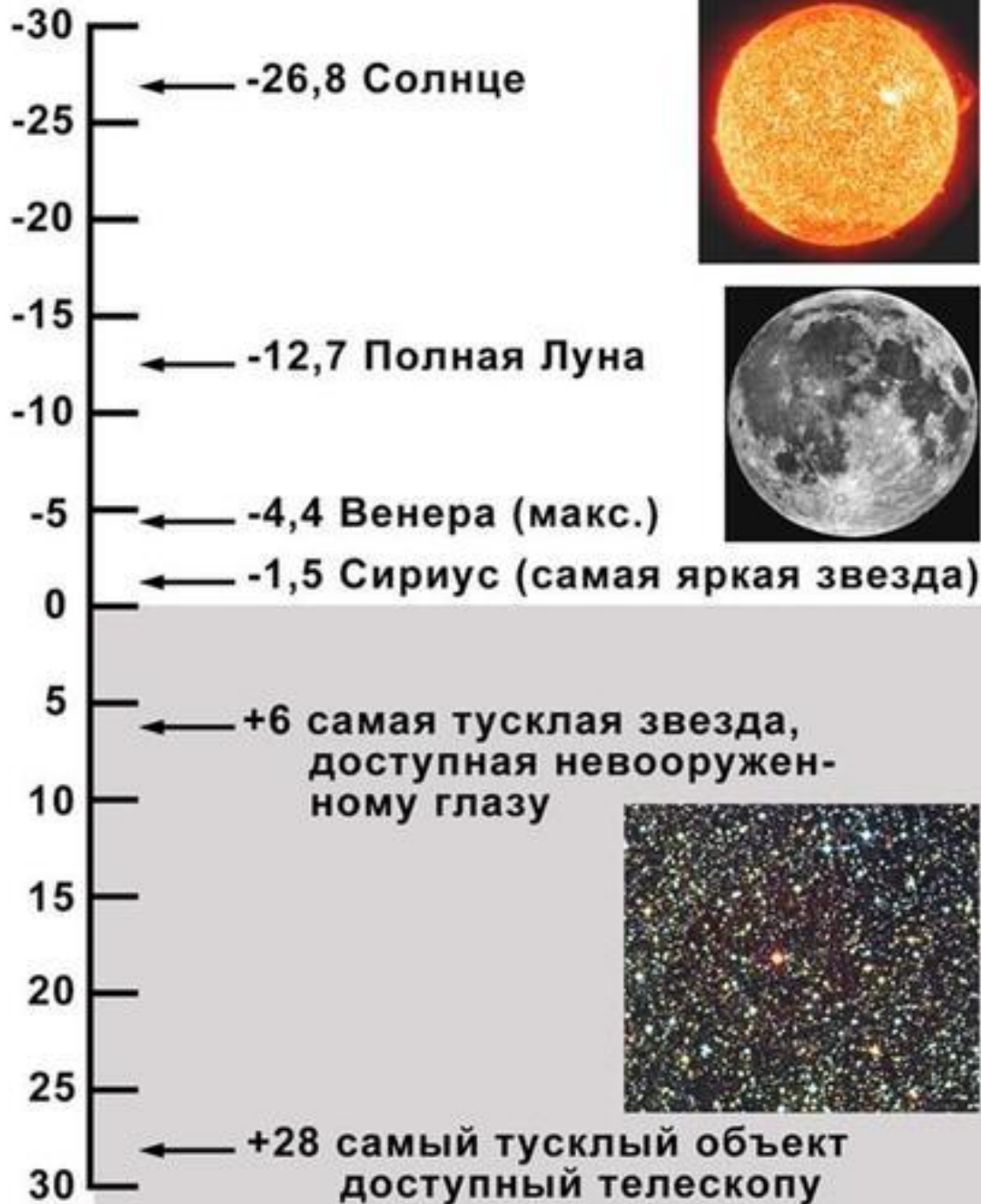
II Петербургский астрономический фестиваль

Шаровые звездные скопления



Семенец Николай 16.11.2019г, СПАГО, г.Санкт-Петербург

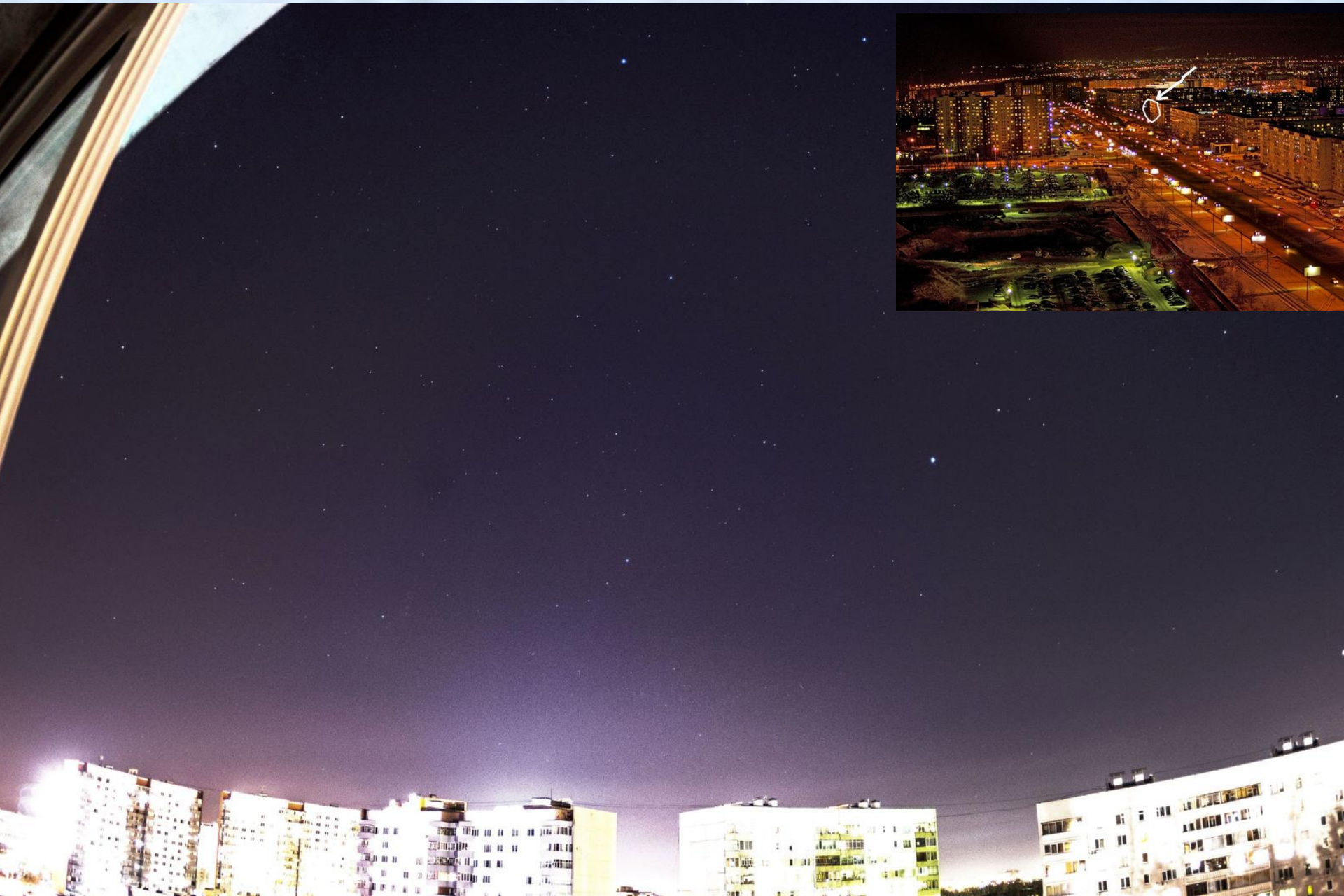
Звездные величины



Поверхностная яркость
ночного неба в зените
вдали от городов
 $22,5 - 23 \text{ м}^2/\text{кв.сек}$
 $13,5 - 14 \text{ м}^2/\text{кв.мин}$



Городское небо





Рева Михаил

ЛенОбласть, февраль 2015г

Canon 5d2 + samyang 24 f2,8 20s iso3200
панорама из 5 вертикальных кадров



Рева Михаил

на берегу Эльбрусского озера(высота 3300).

На поверхности воды отражаются яркие звезды и метеор Персеид.

Самый яркий объект на кадре - Марс (-2.6mag)

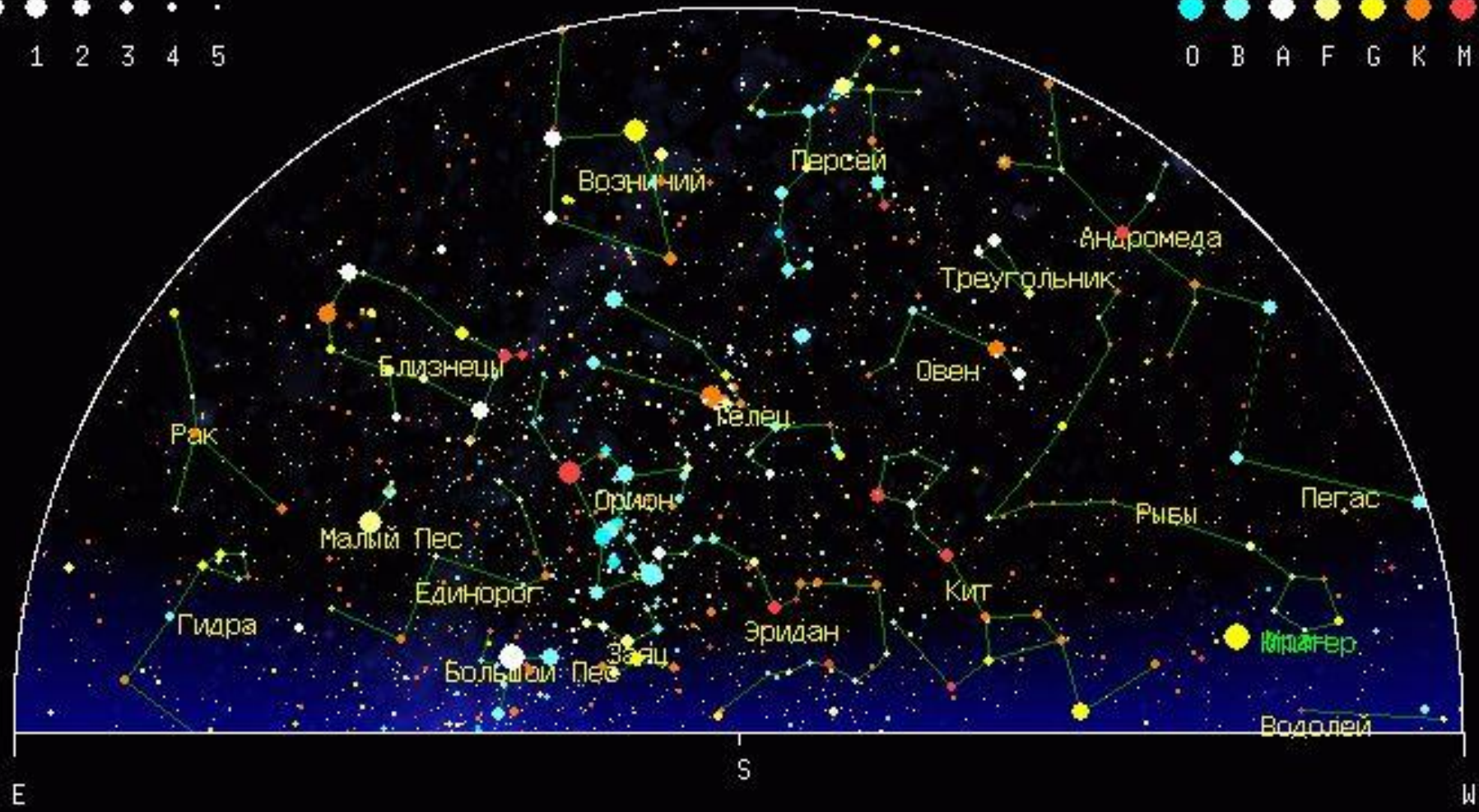
Canon6d + samyang 24mm f2,0 iso 5000 20s небо, f1.4 30s земля

Карта звездного неба

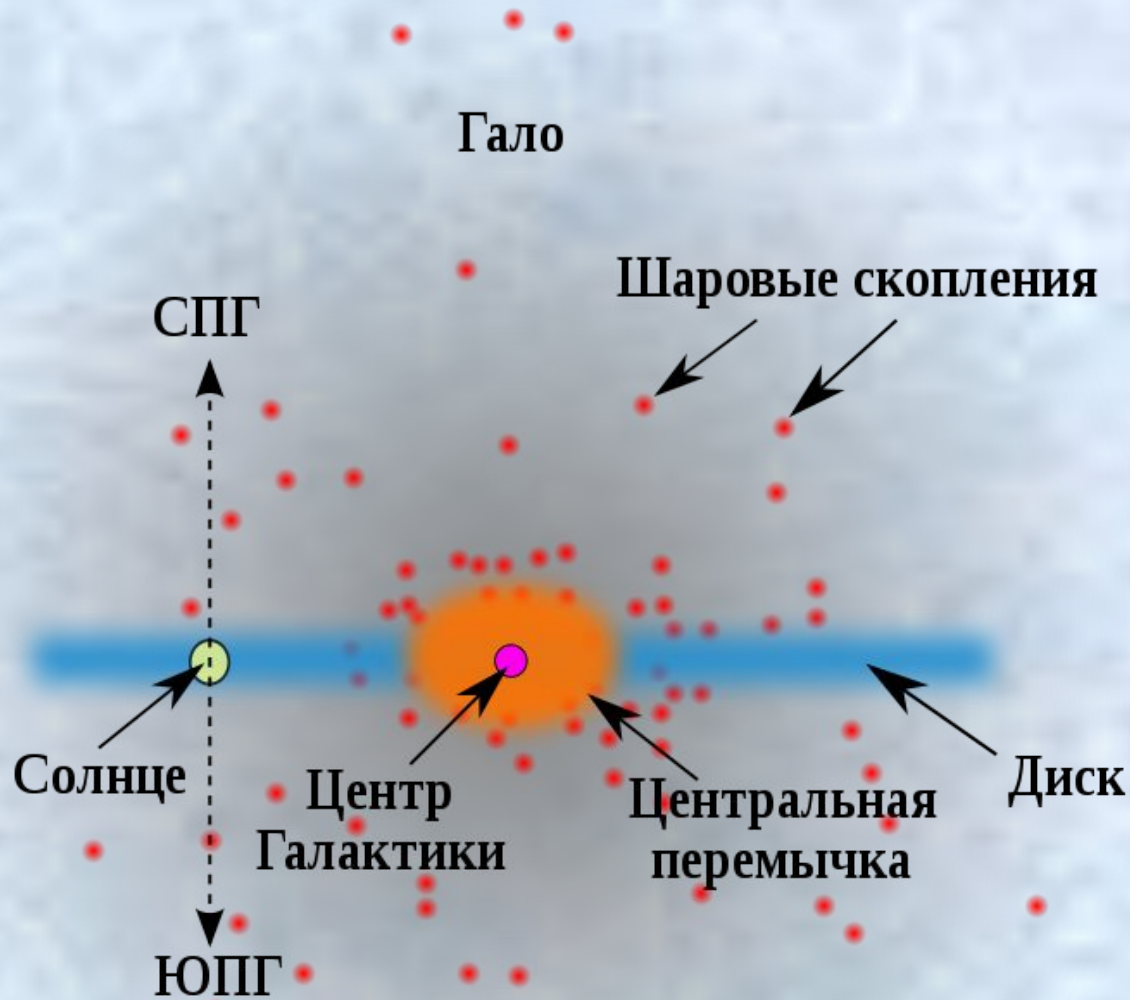
Звездные величины



Спектральные классы



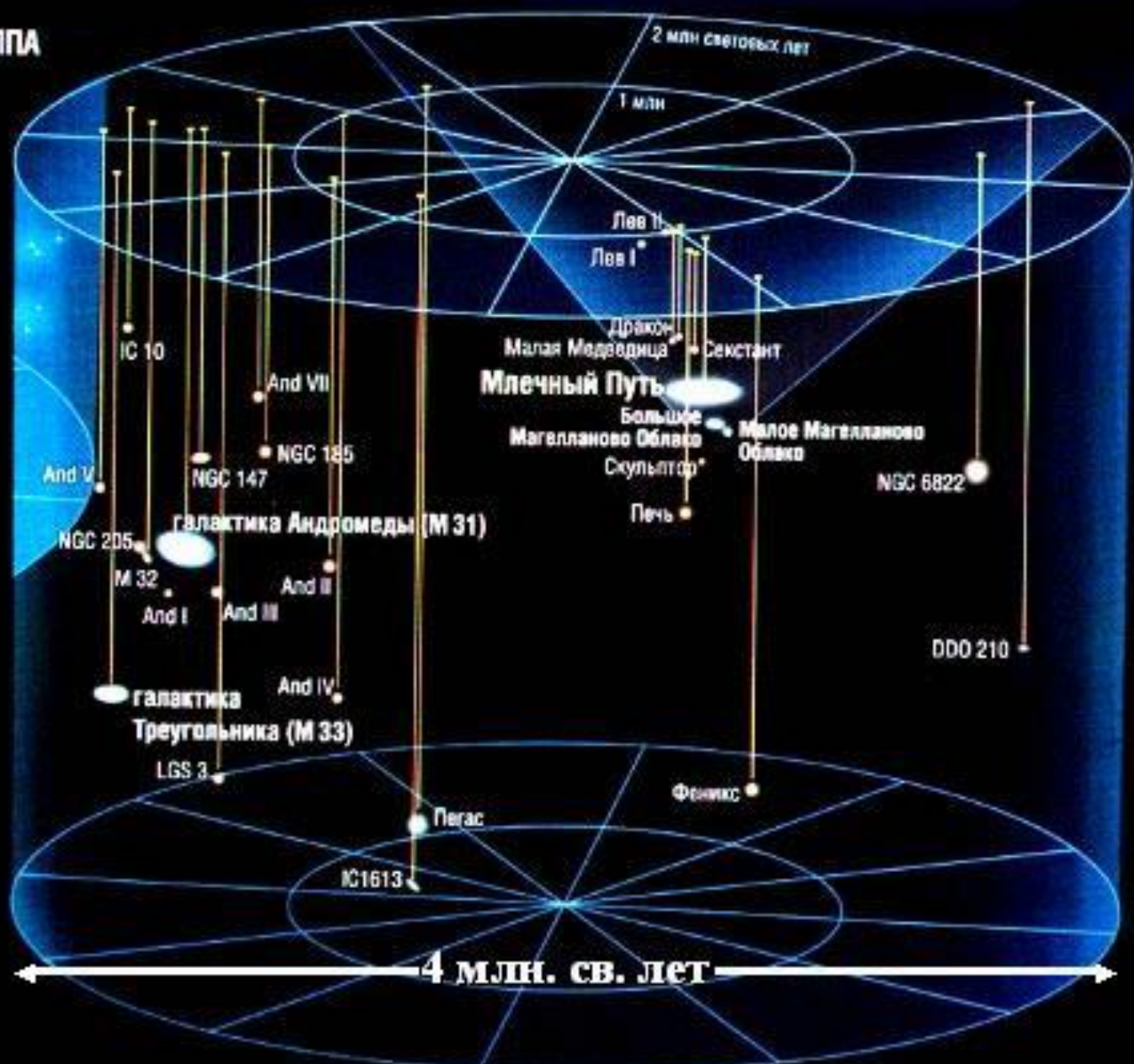


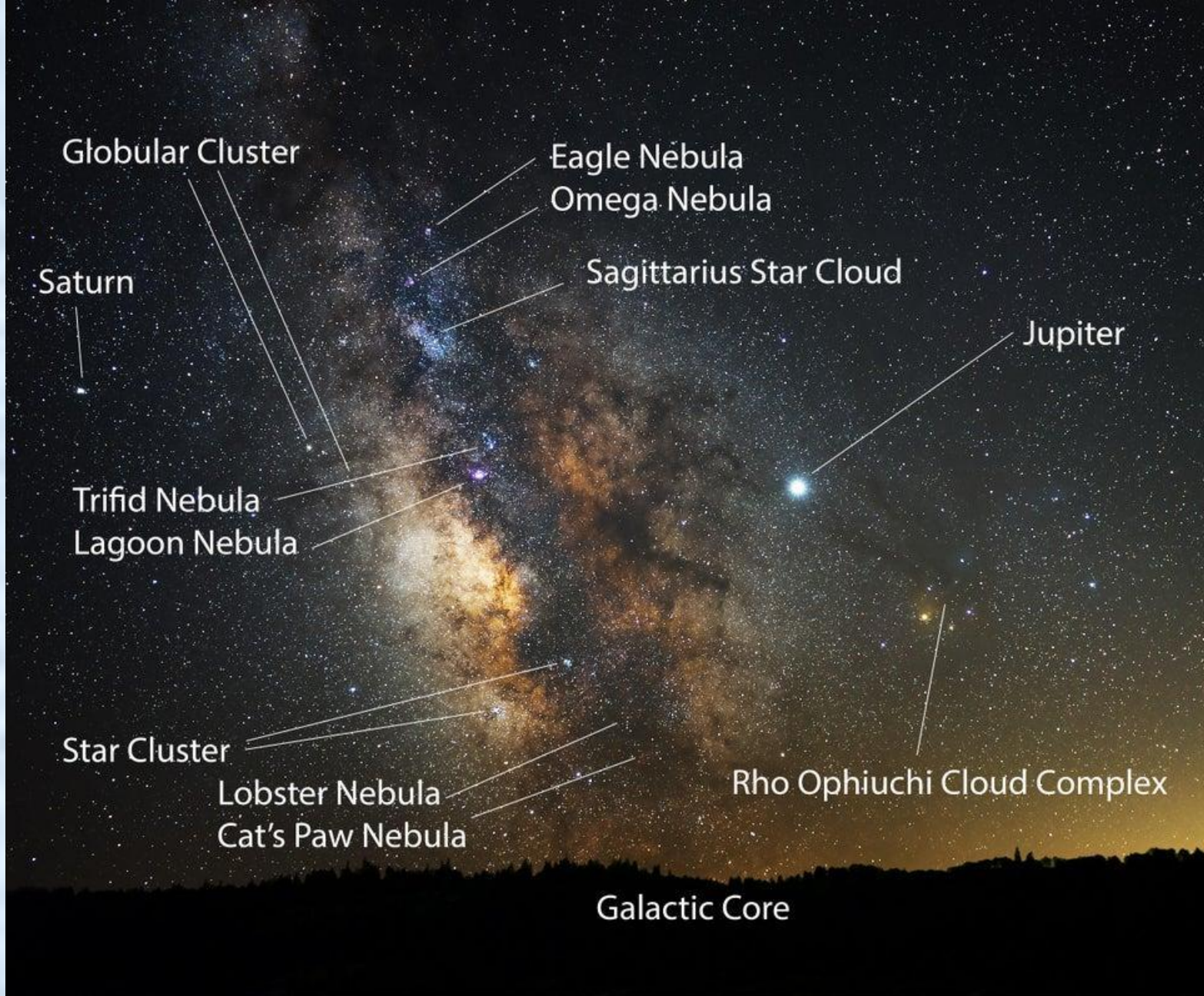


Профиль Млечного Пути.

СПГ — северный полюс Галактики. ЮПГ — южный полюс Галактики.

МЕСТНАЯ ГРУППА





Globular Cluster

Eagle Nebula

Omega Nebula

Saturn

Sagittarius Star Cloud

Jupiter

Trifid Nebula

Lagoon Nebula

Star Cluster

Lobster Nebula

Cat's Paw Nebula

Rho Ophiuchi Cloud Complex

Galactic Core

Звездные скопления



Большинство звезд находятся в скоплениях; Есть два основных типа

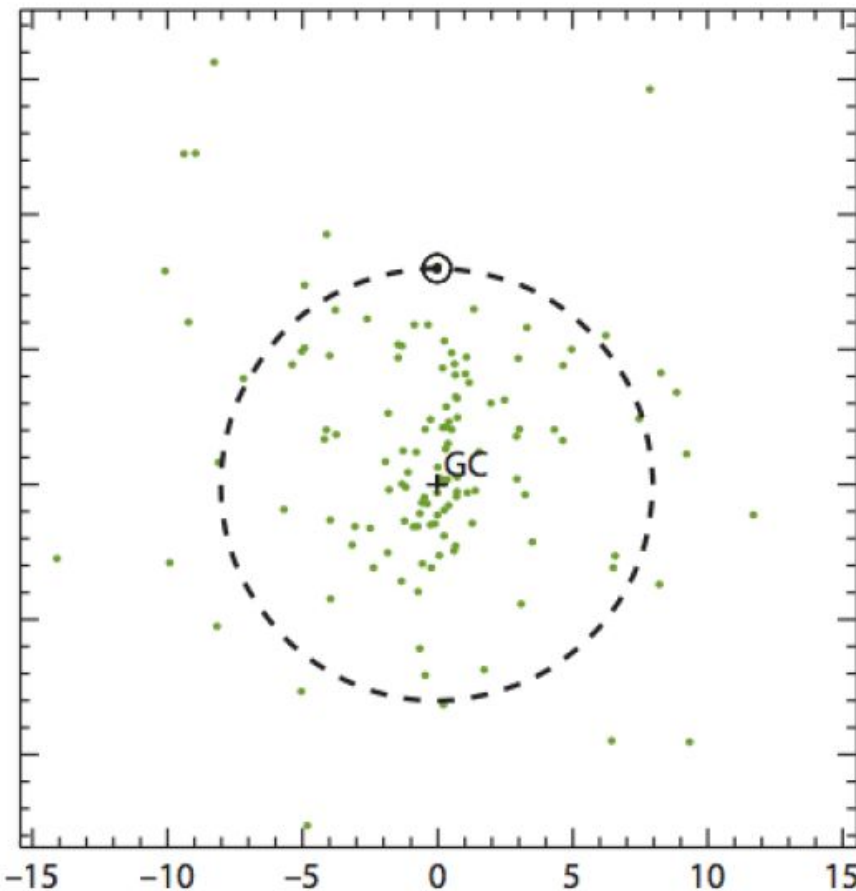
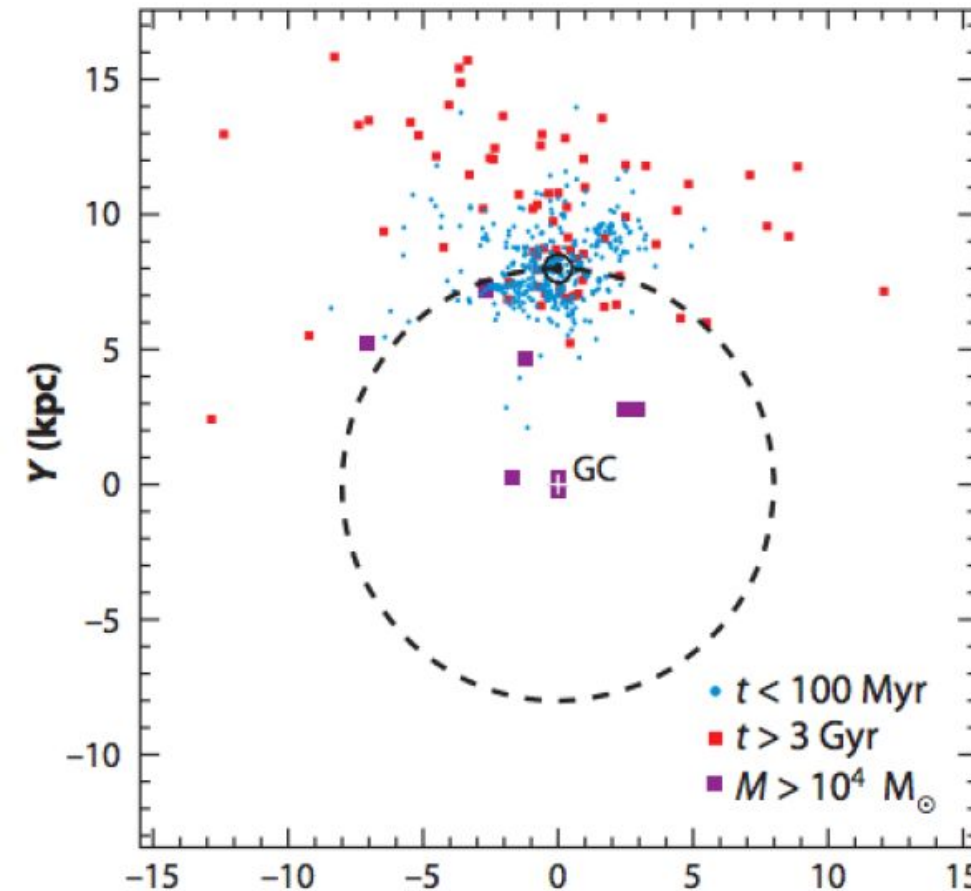
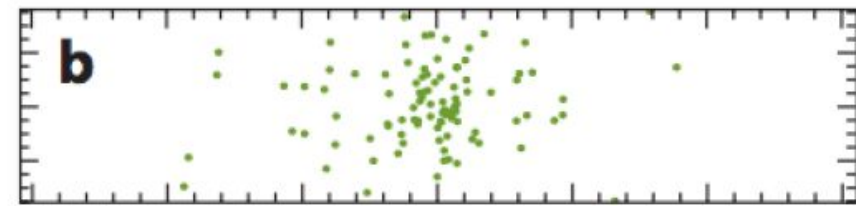
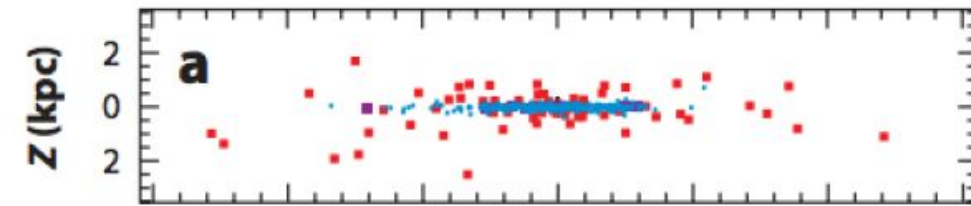
Рассеянные скопления состоят из нескольких тысяч звезд и являются молодыми (1-10 миллионов лет)

Шаровые скопления - более плотные (в 10-100раз) коллекции тысяч звезд и древние (10-14 миллиардов лет).

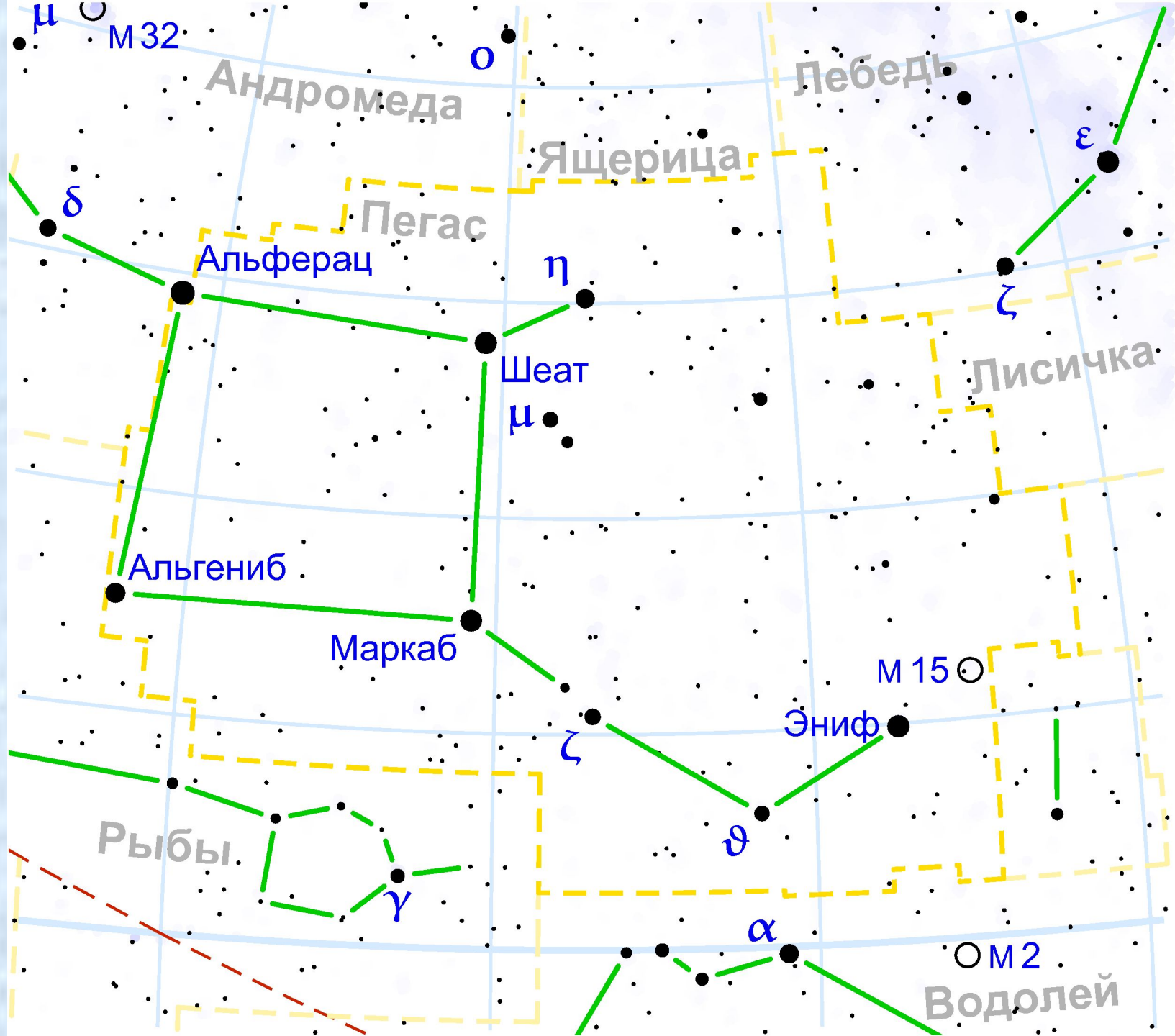
Распределение рассеянных и шаровых скоплений в Галактике

Open clusters

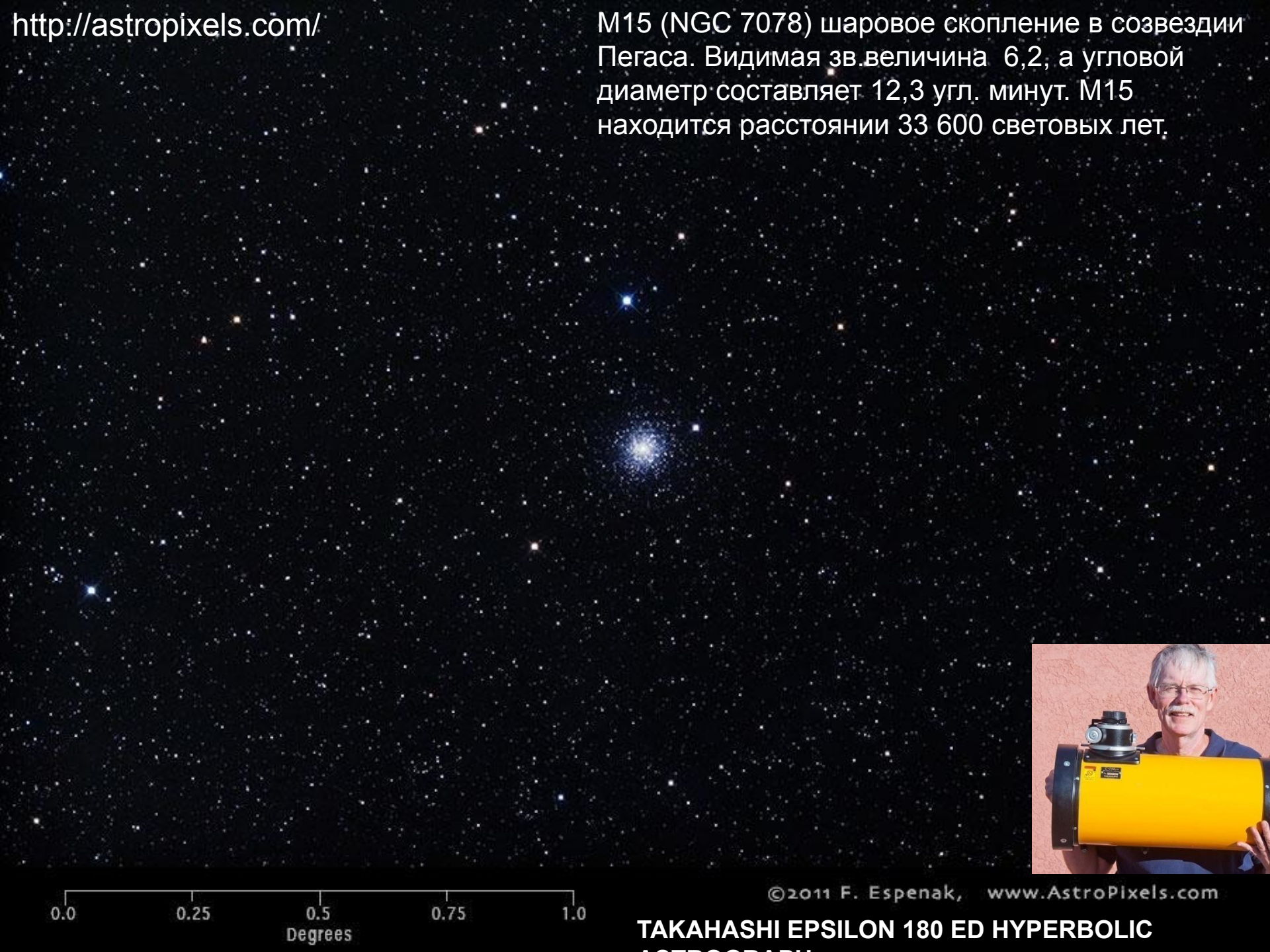
Globular clusters



X (кpc)



М15 (NGC 7078) шаровое скопление в созвездии Пегаса. Видимая зв. величина 6,2, а угловой диаметр составляет 12,3 угл. минут. М15 находится на расстоянии 33 600 световых лет.



NGC5139
(55')

M13
(20')

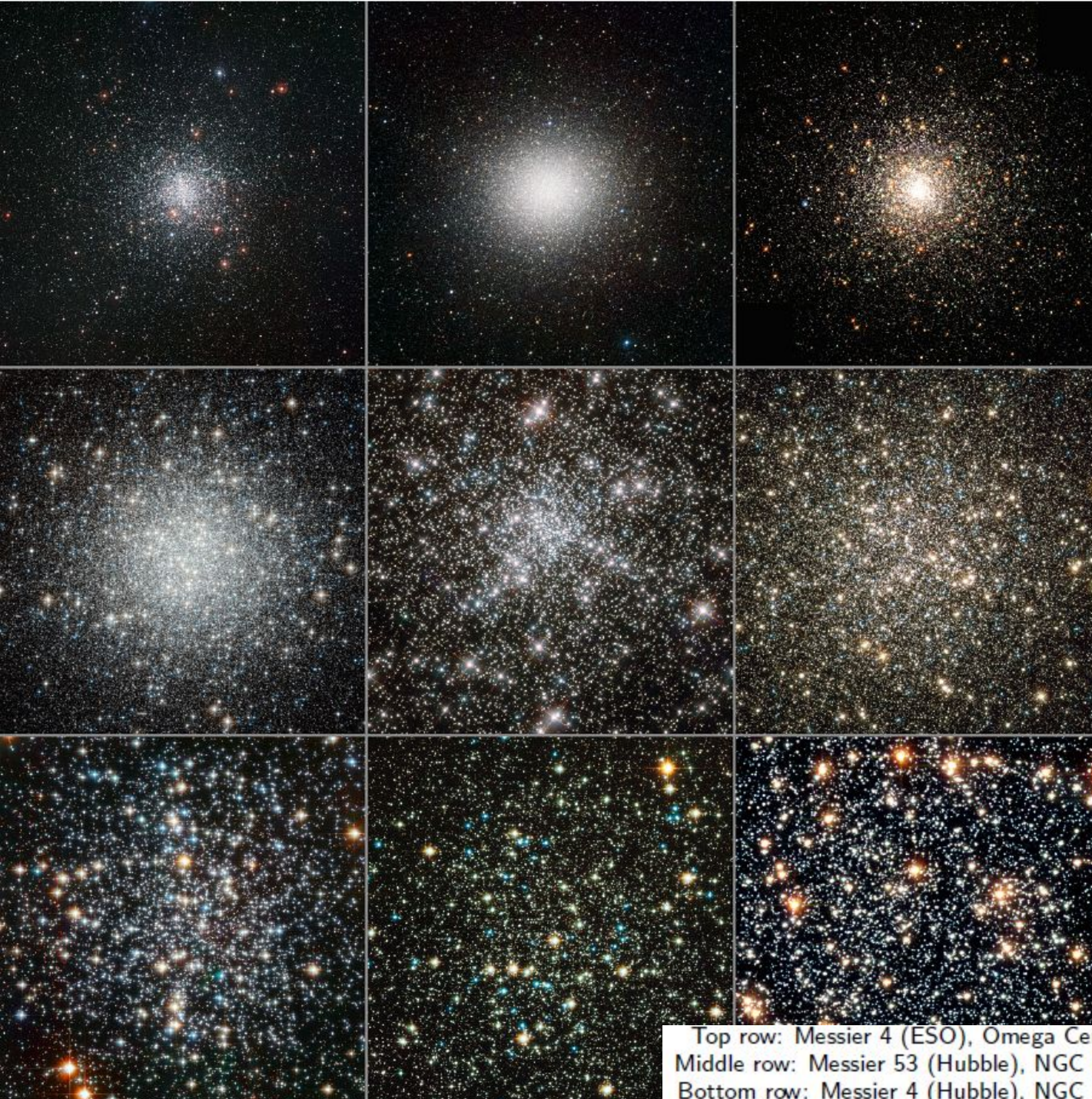
M92
(14')

NGC1851
(12')

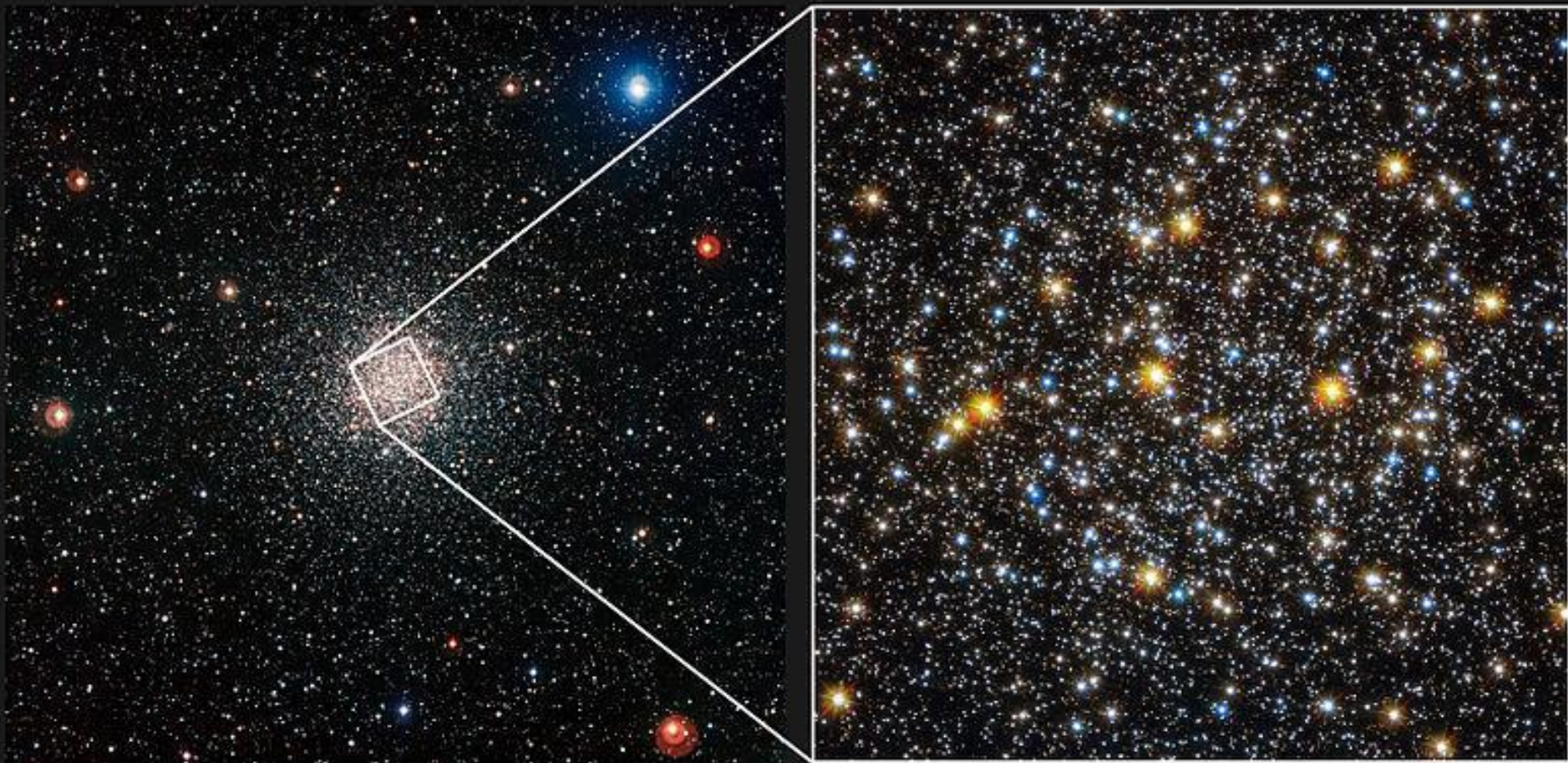
Сравнение размеров
шаровых звездных
скоплений

NGC5139 (Omega Centauri), в Центавре- 55 уг.сек M13, в Геркулесе- 20 угл.сек.

M92, в Геркулесе - 14 уг.сек NGC1851, в Голубе – 12уг.сек



Top row: Messier 4 (ESO), Omega Centauri (ESO), Messier 80 (Hubble)
Middle row: Messier 53 (Hubble), NGC 6752 (Hubble), Messier 13 (Hubble)
Bottom row: Messier 4 (Hubble), NGC 288 (Hubble), 47 Tucanae (Hubble)



Сравнение видов шарового звездного скопления NGC 6362 (созвездие Жервентник) от WFI (камера на 2,2м телеск.вЧили) иHubble.

<https://www.youtube.com/watch?v=DYz3MNdfBwo>

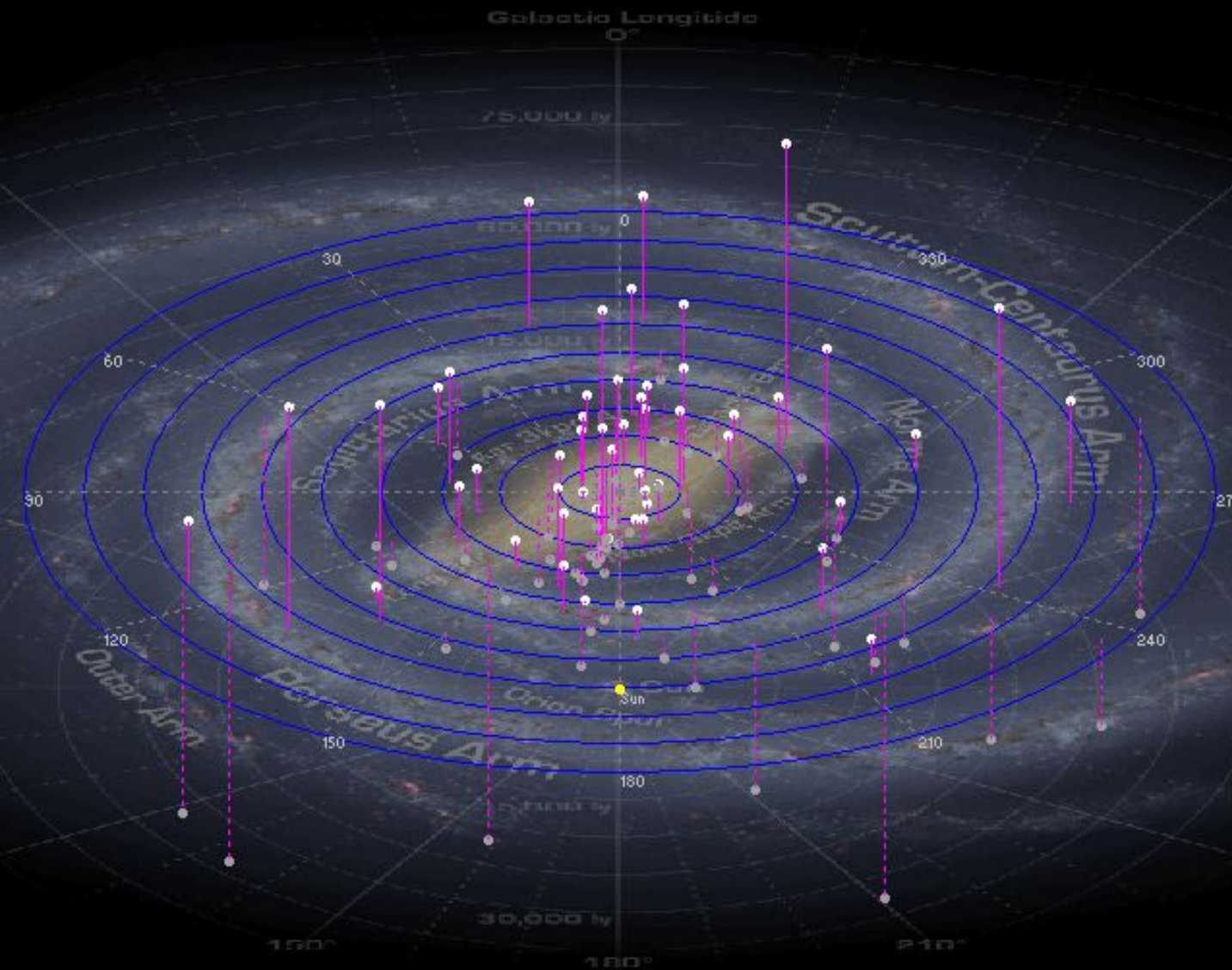
Пространственные концентрации звёзд в центральных областях шаровых скоплений составляют 100—1000 звёзд на кубический парсек , расстояние между звёздами составляют 3—4,6 трлн км (0,3—0,5 светового года); В окрестностях Солнца звёздная плотность в 700—7000 раз меньше.



The 111 globular clusters within 37,153 LY of the galactic centre

Galactic centric (galactic longitude and latitude)

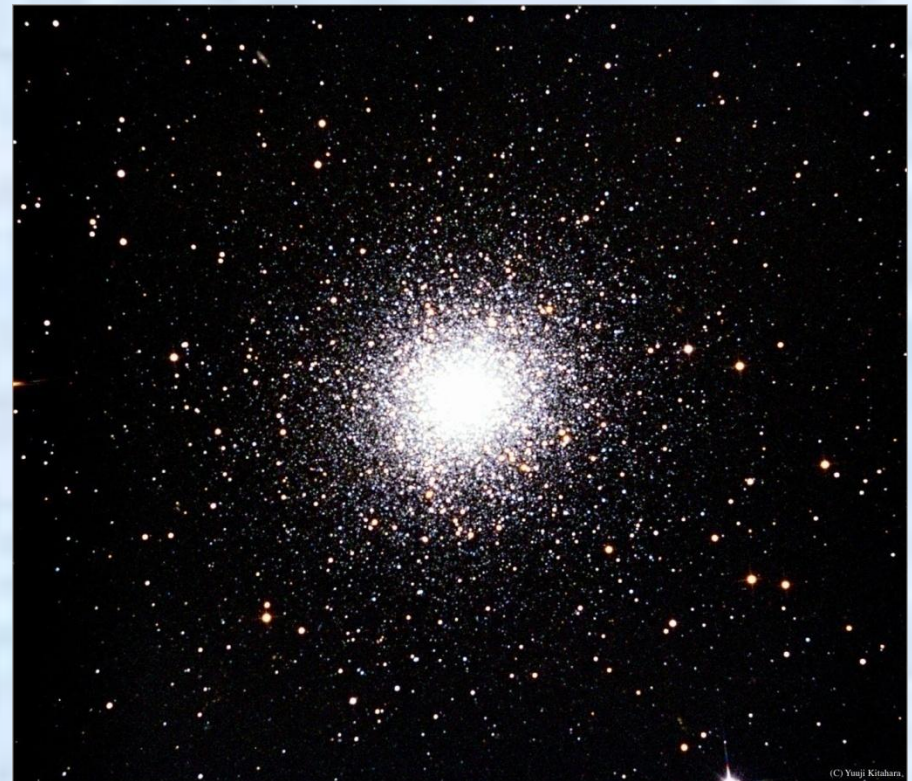
3,715 LY



Что собой представляют шаровые скопления?

М 13

- SSPs – единый возраст
- и металличность
- $10^5 - 10^6 M_{\text{солн}}$
- Все галактики $M_V < -15$ имеют минимум 1 шт ШЗС
- ~150 в MW
- ~400 в М31
- > 10,000 в некоторых эллиптич.галактиках



- $S_N \equiv N_{GC} \times 10^{0.4(M_V + 15)}$, 2 – 3 × в гигант.Е-галактиках

**Количество звёзд в шаровых скоплениях составляет $\approx 10^4 - 10^6$.
Диаметры шаровых скоплений составляют 20—60 пк,
массы — $10^4 - 10^6$ солнечных.**

Жизненный цикл солнца

Часть молекулярного облака

Планетарная туманность

Протозвезда

Красный гигант

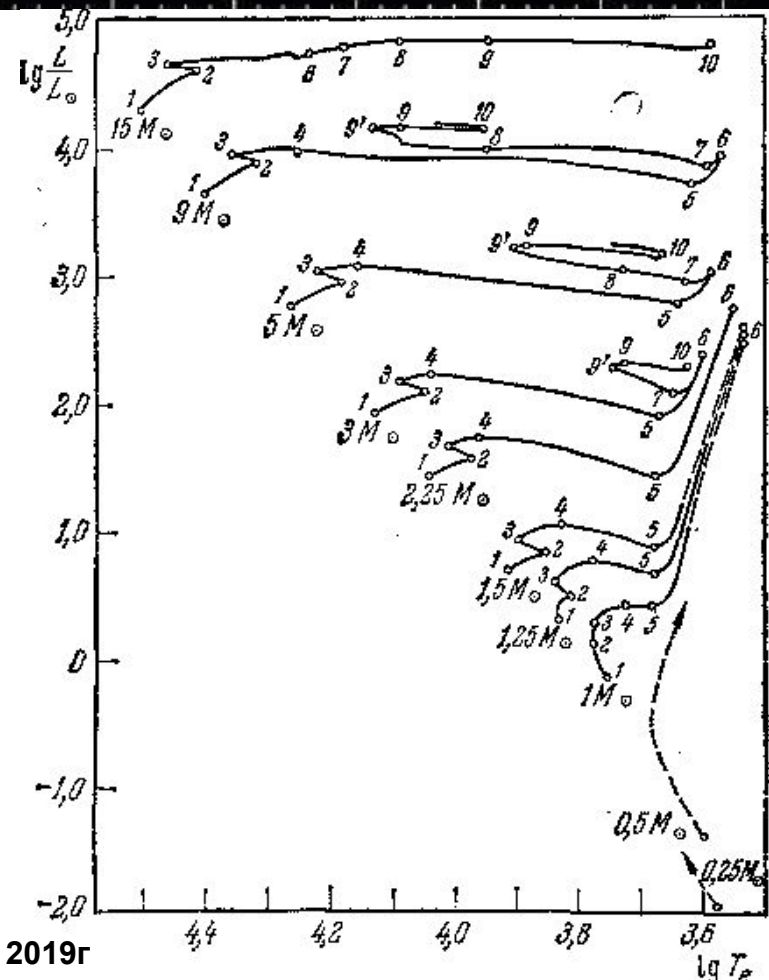
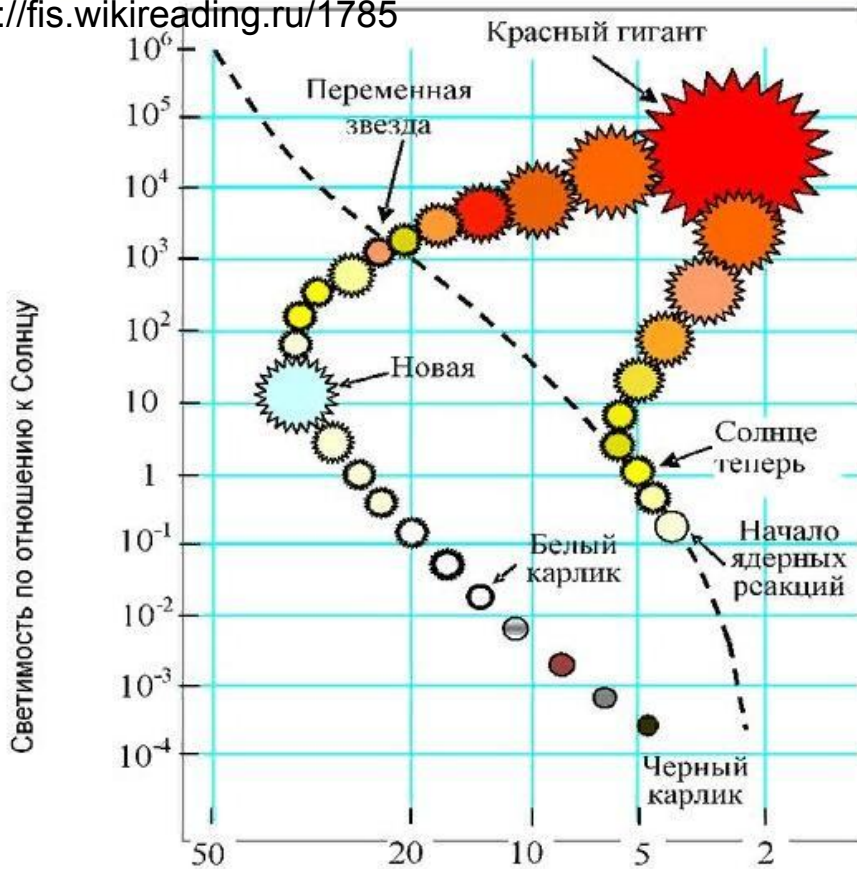
Белый карлик

Начало термоядерной реакции

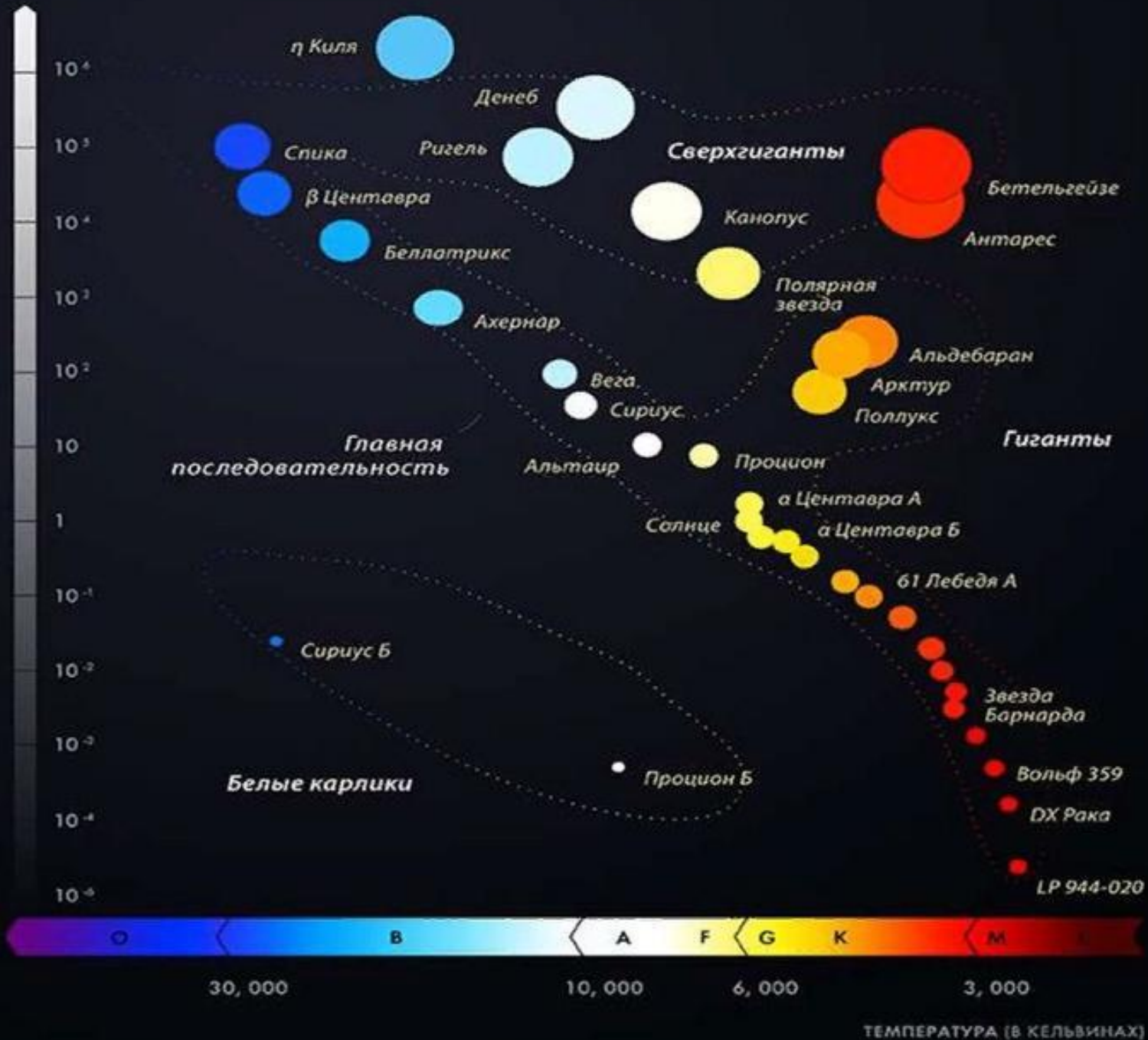
4,57 млрд лет (сейчас)



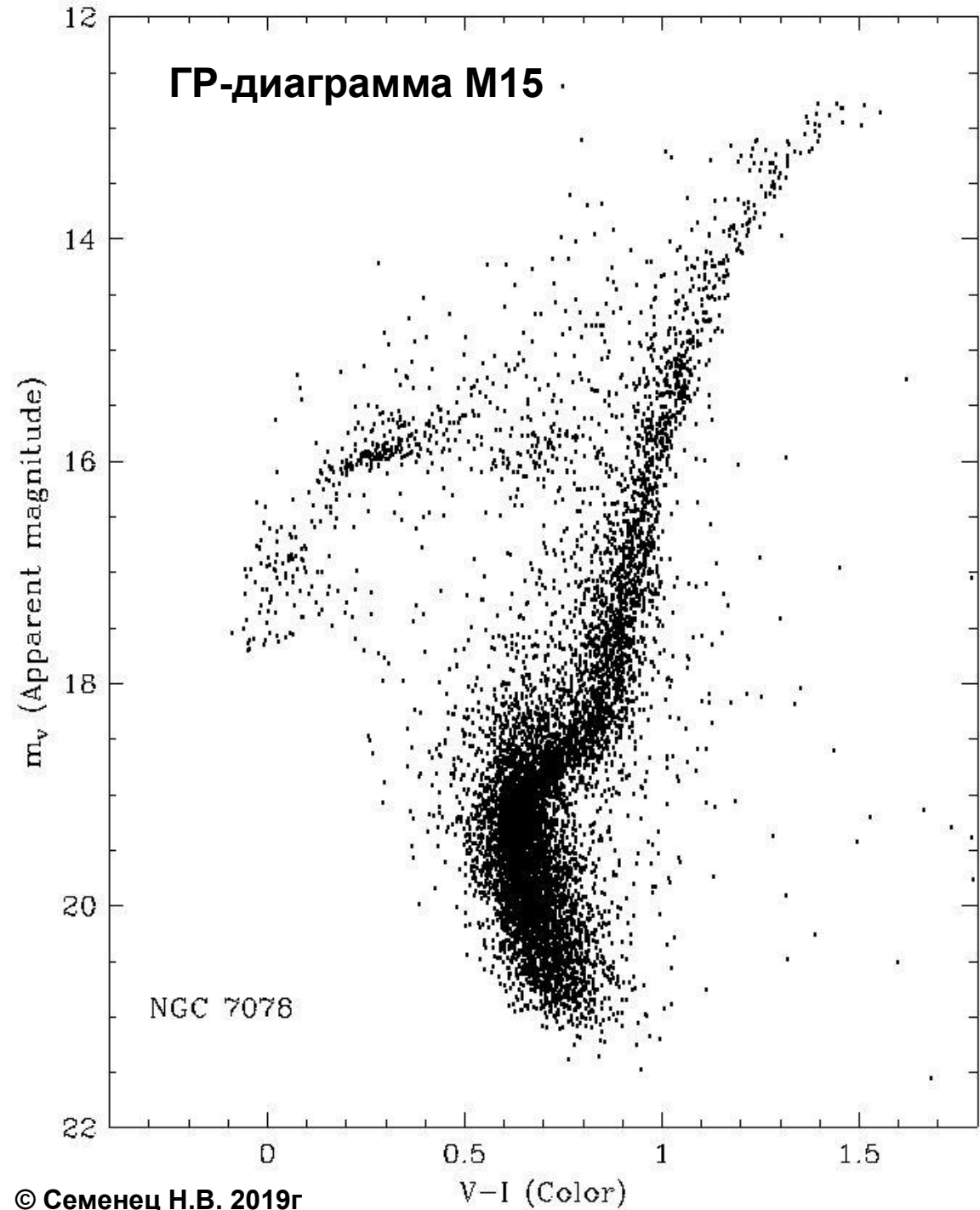
<https://fis.wikireading.ru/1785>



СВЕТИМОСТЬ (В СОЛНЕЧНЫХ ЕДИНИЦАХ)

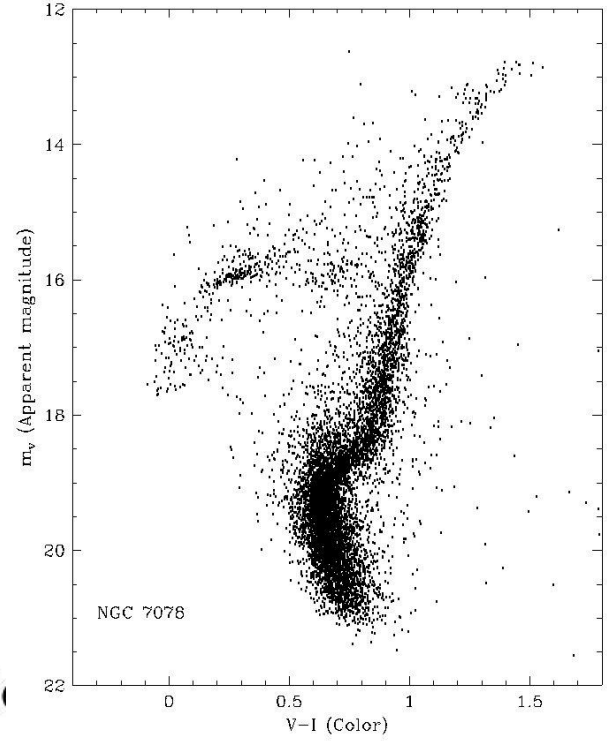
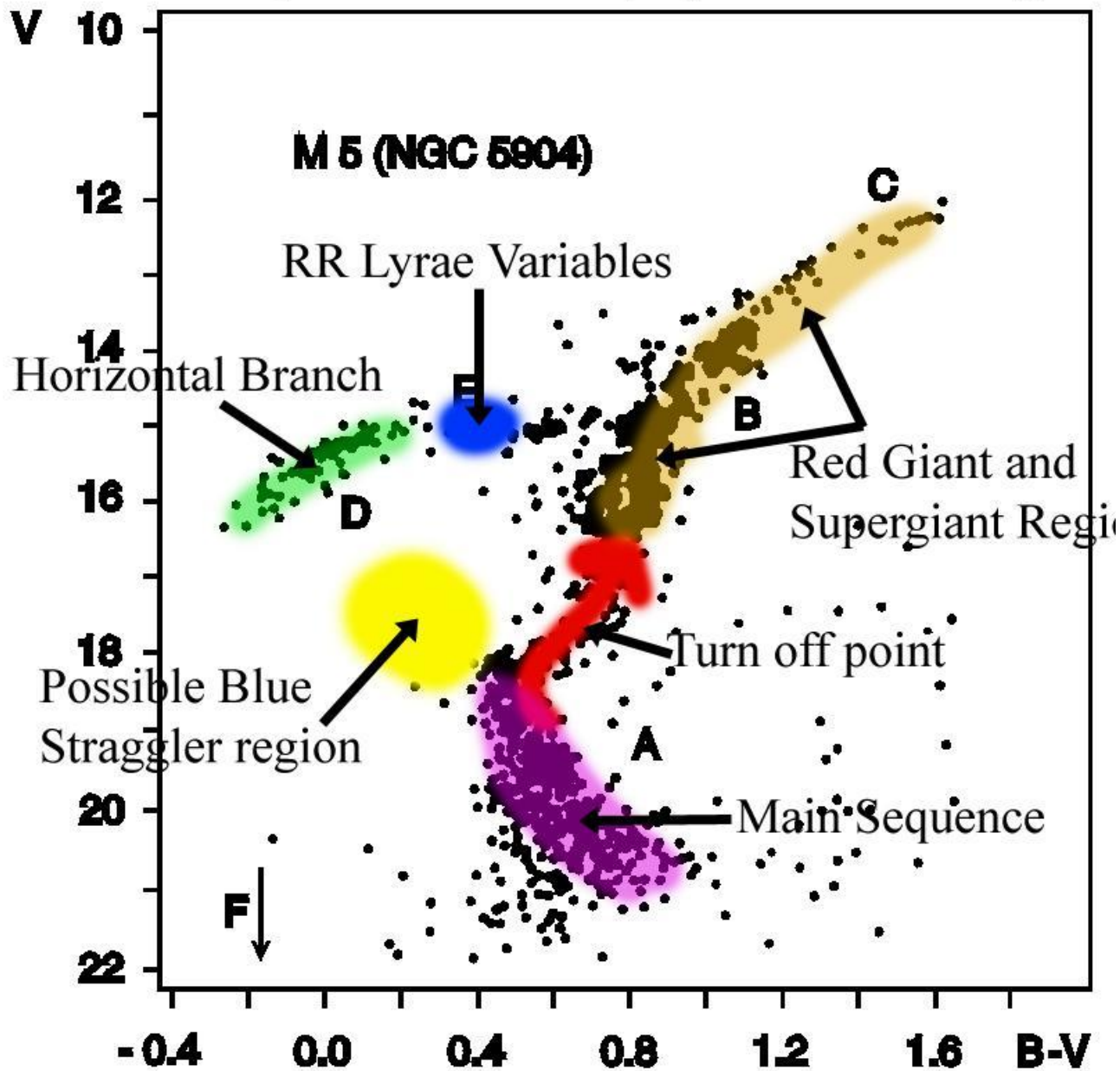


“Портрет” шарового скопления



M 15 (NGC 7078) w gwiazdozbiornie Pegaza

Adapted from SEDS (<http://www.seds.org>)

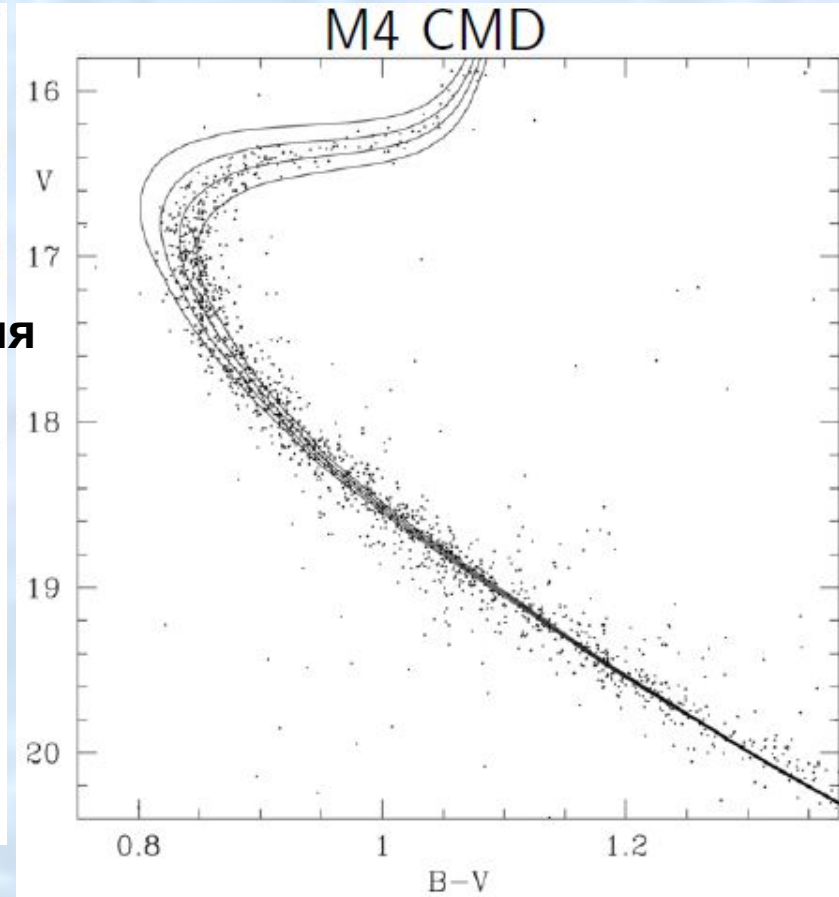
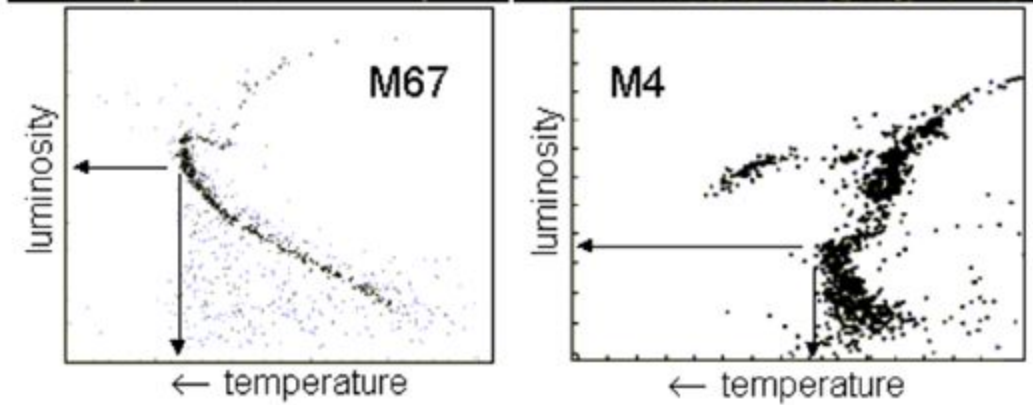
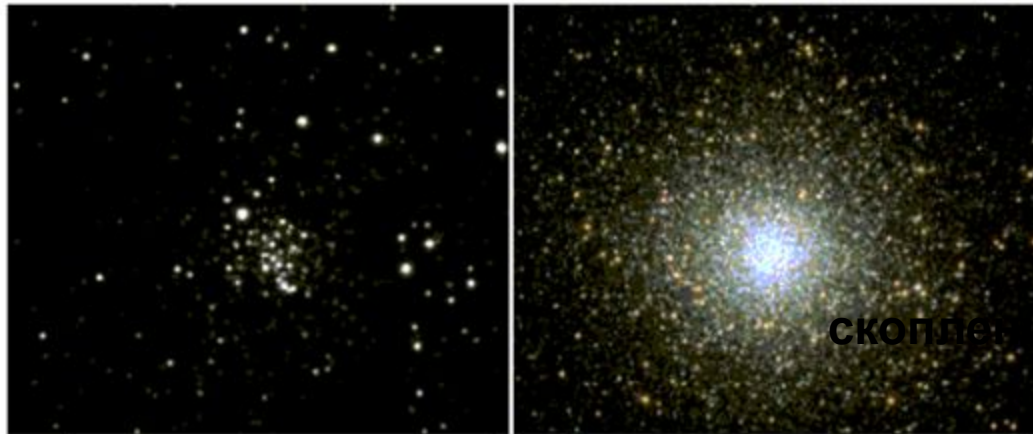


**В скоплении звезды
ГП имеют массу
0,2..0,8Мсолн**



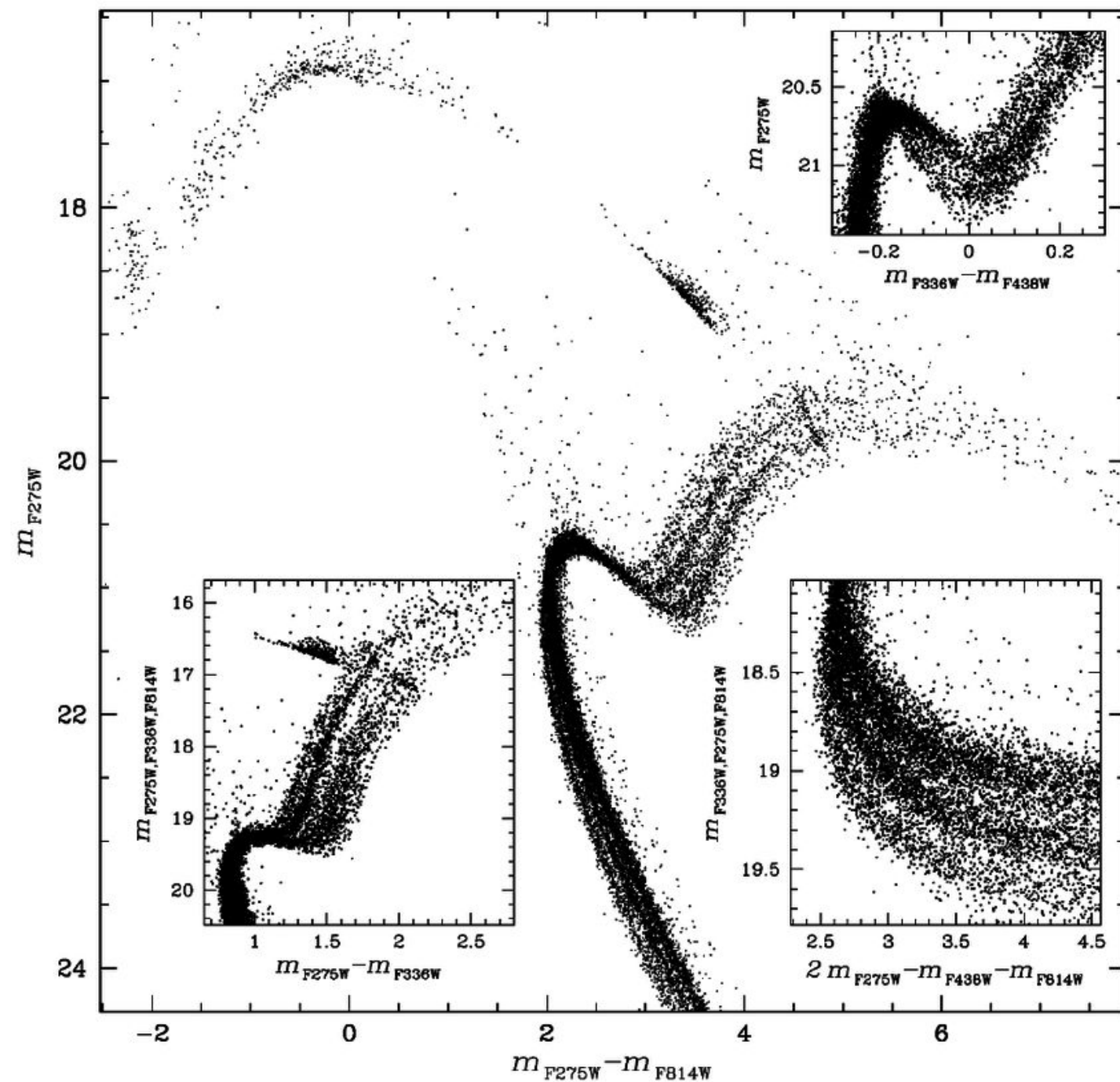
Возраст скоплений

Рассеянные и шаровые скопления, возраст



ГР-диаграмма
NGC 2808
(данные
телескопа
Хаббла)

3 группы звезд
различного
возраста и хим.
состава



Количество шаровых скоплениях в галактиках

- Milky Way: $100 < N < 200$
- Andromeda: $200 < N < 500$
- M 87: $N > 1000$



M87 © Anglo-Australian Observatory
Photo by David Malin



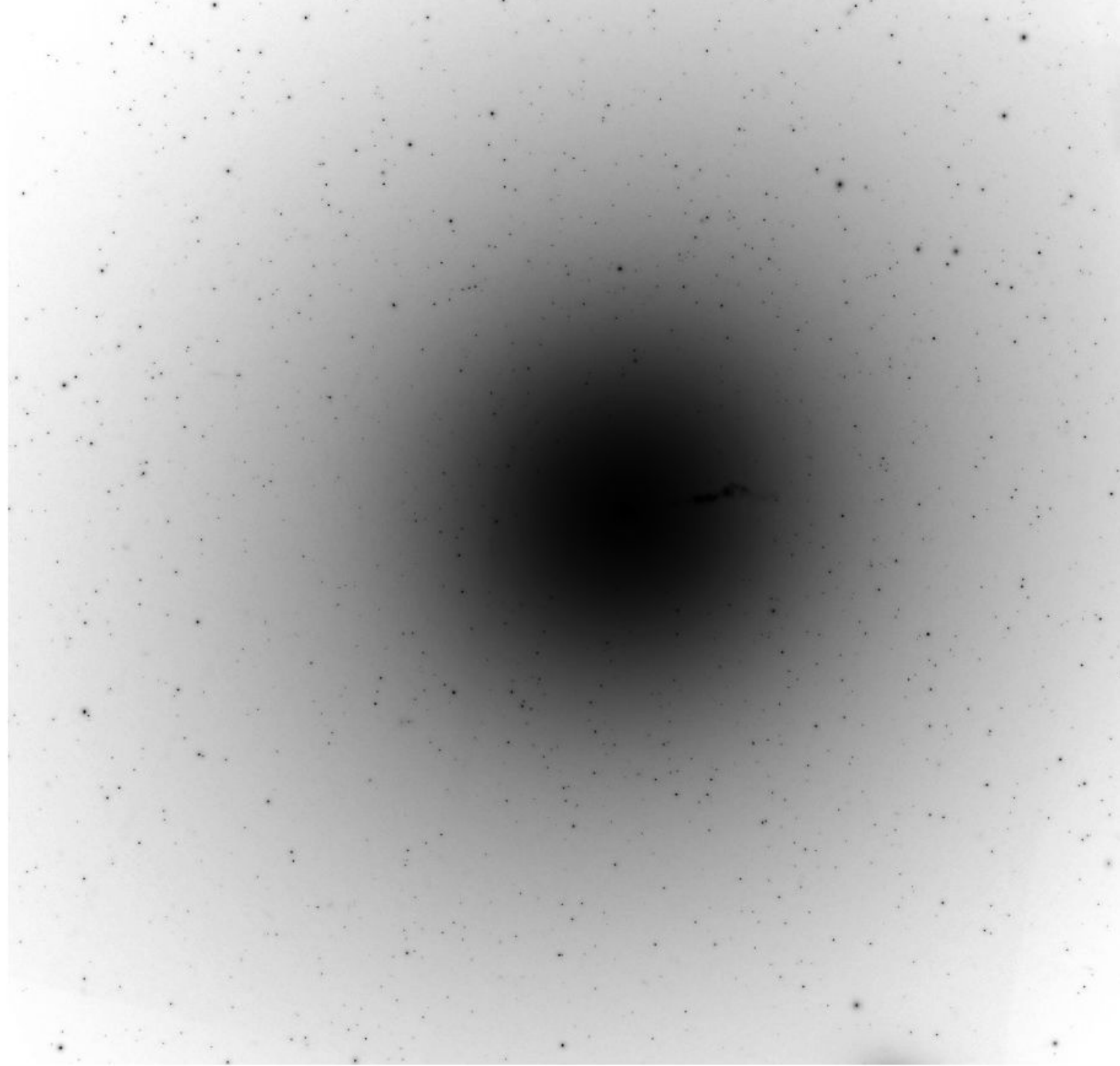
M31, Черенков А., 2018г



© Семенец Н.В. 2019г



Шаровые скопления в гигантской эллиптической галактике M87



Шаровое скопление G1 в галактике M31

Космический телескоп Хаббла, 2.4м рефлектор, фокусн.рас-ние 57.6м



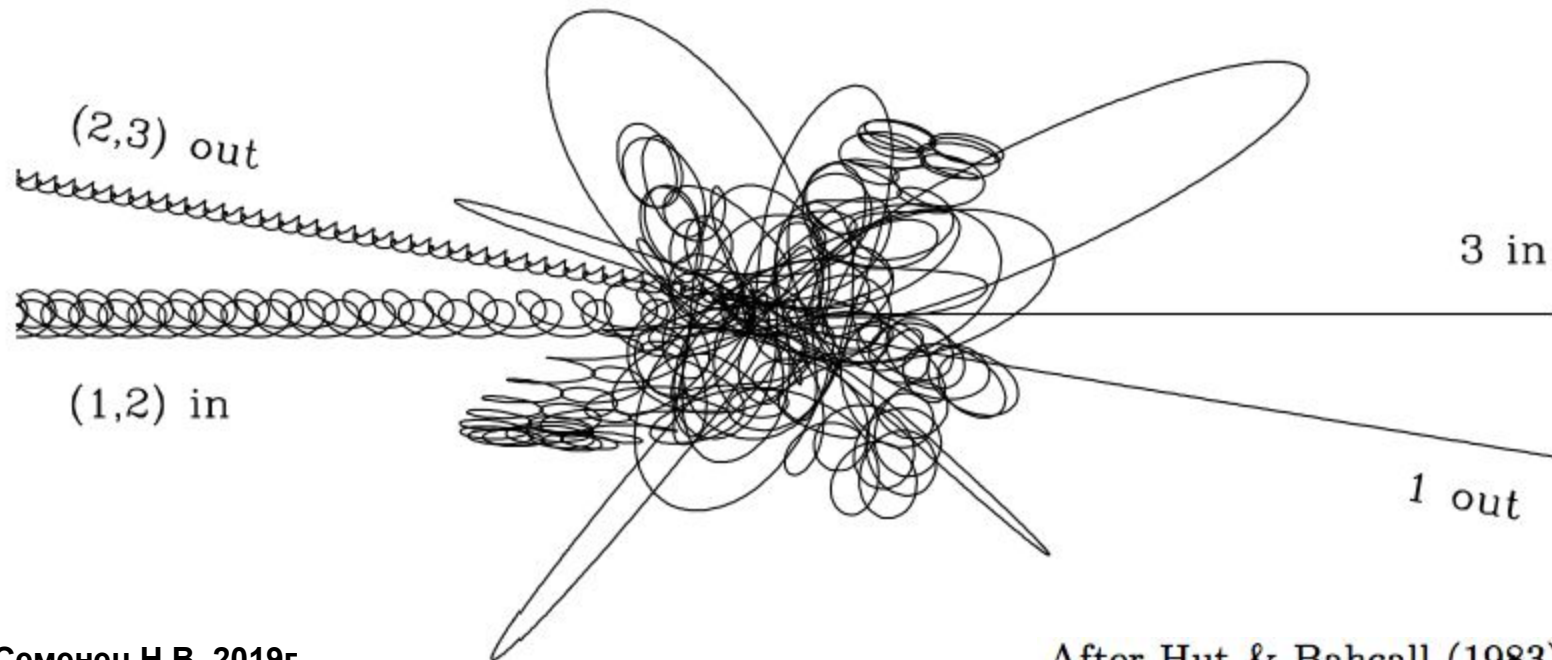
Визуализация движения звезд шарового скопления, состоящего из 6,144 звезд. Ширина рамки составляет более ста триллионов миль. Поскольку фильм разворачивается, эволюция скопления показана в этом замедленном фильме, в котором каждая секунда представляет собой проходящие тысячи лет!

https://www.youtube.com/watch?v=_mr9y4F6ME4

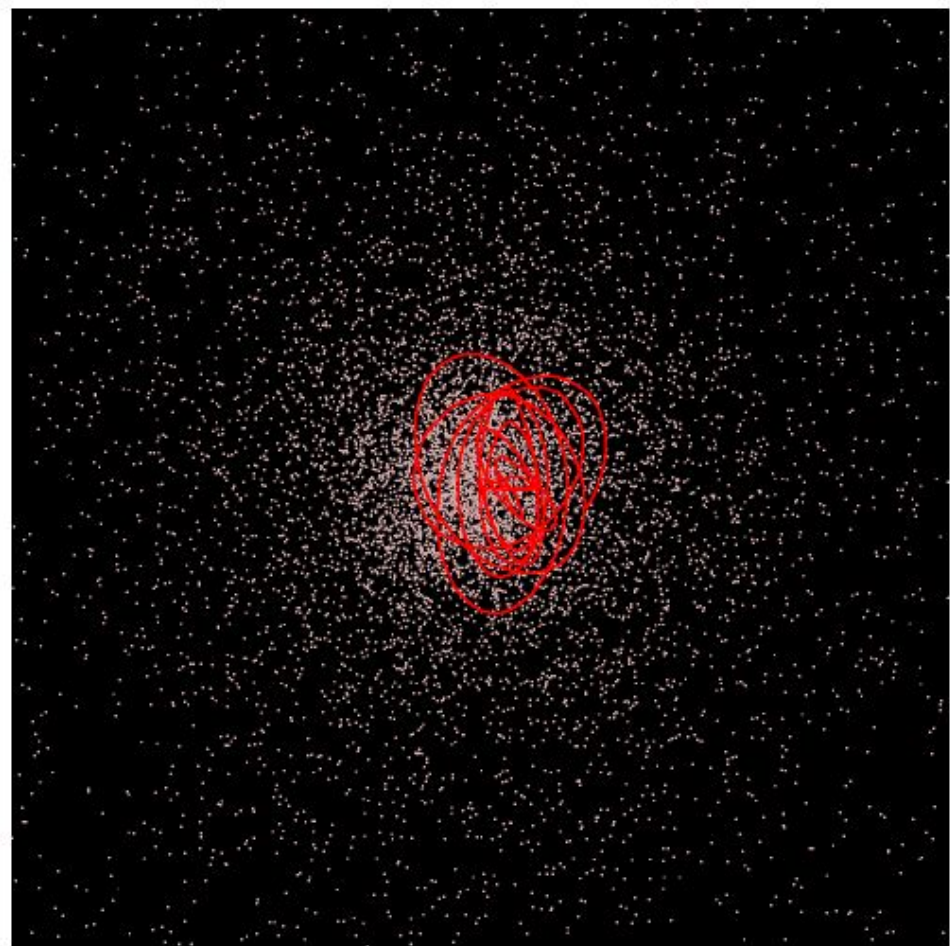
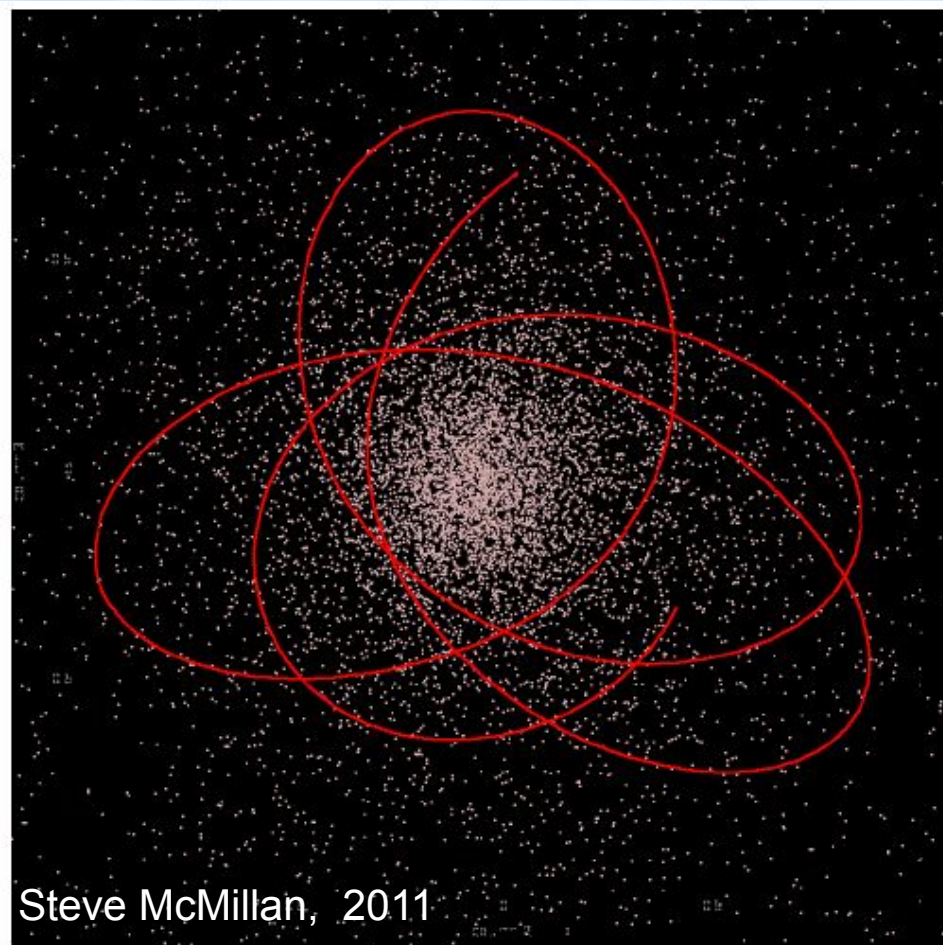
Видео и симуляция Simon Portegies Zwart (University of Amsterdam), Frank Summers (STScI)



Обменное взаимодействие между тесной двойной и одиночной звездой

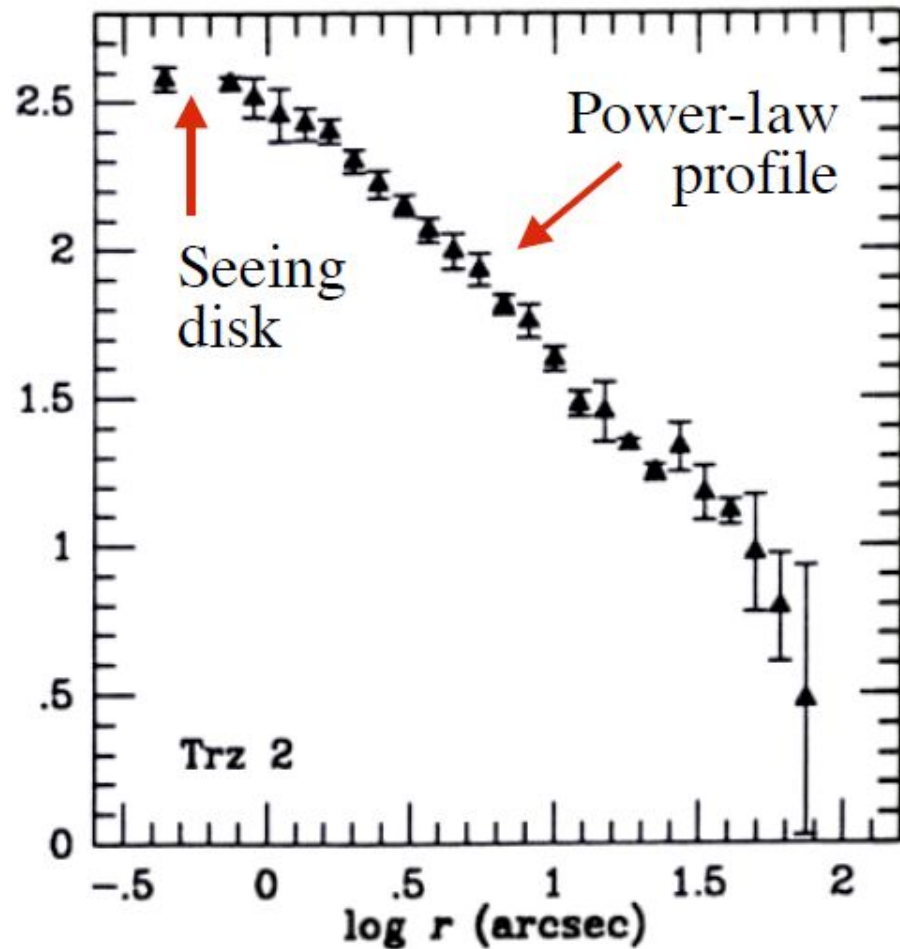
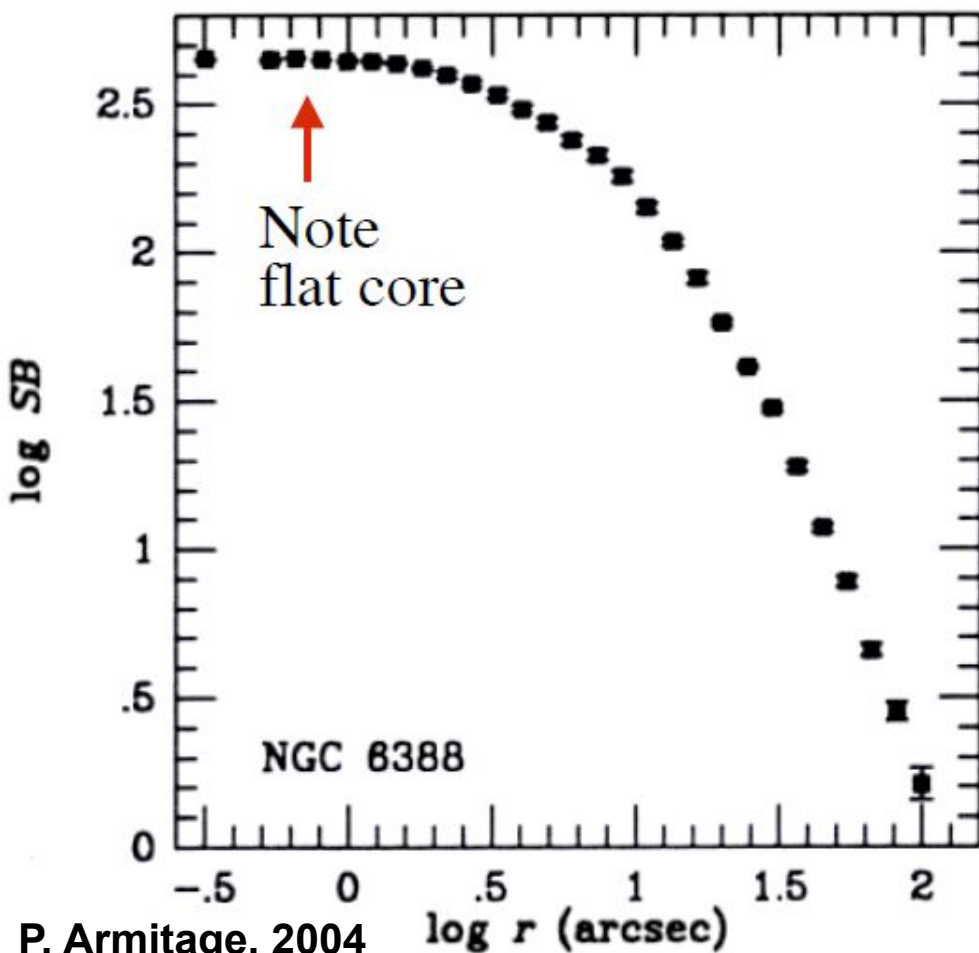


Орбиты 2х звезд в системе из 10000 звезд



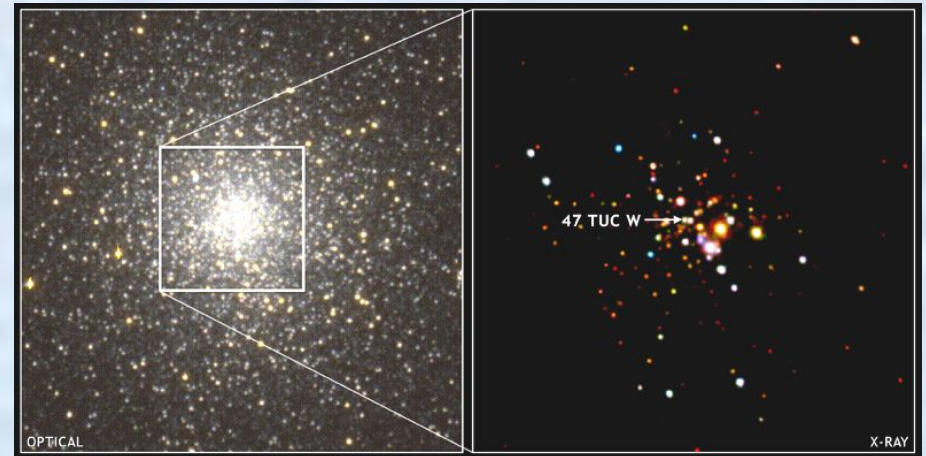
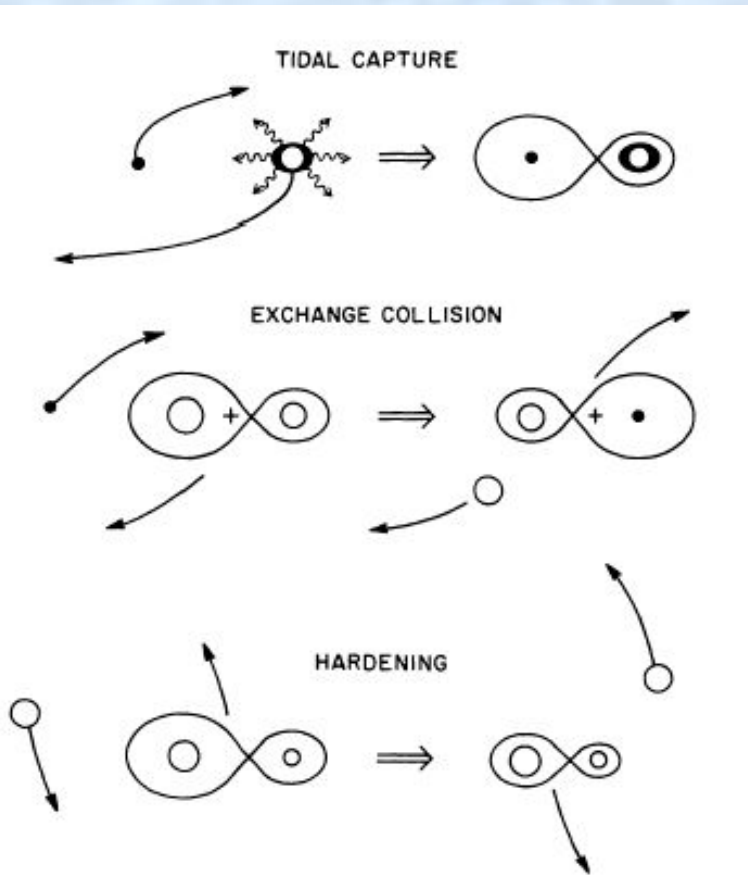
Профиль поверхностной яркости шаровых скоплений Мл.Пути

Указание на коллапс ядра



~20% ШЗС Мл.Пути имеют ядра с плоским профилем поверхностной яркости

Двойные в шаровых скоплениях



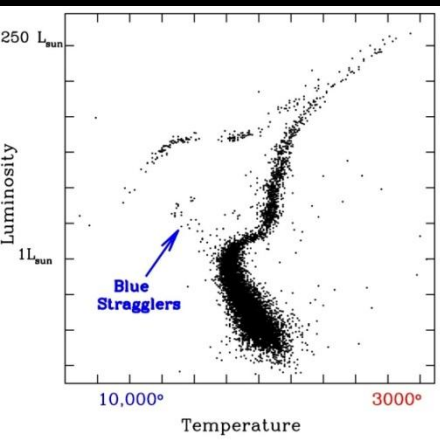
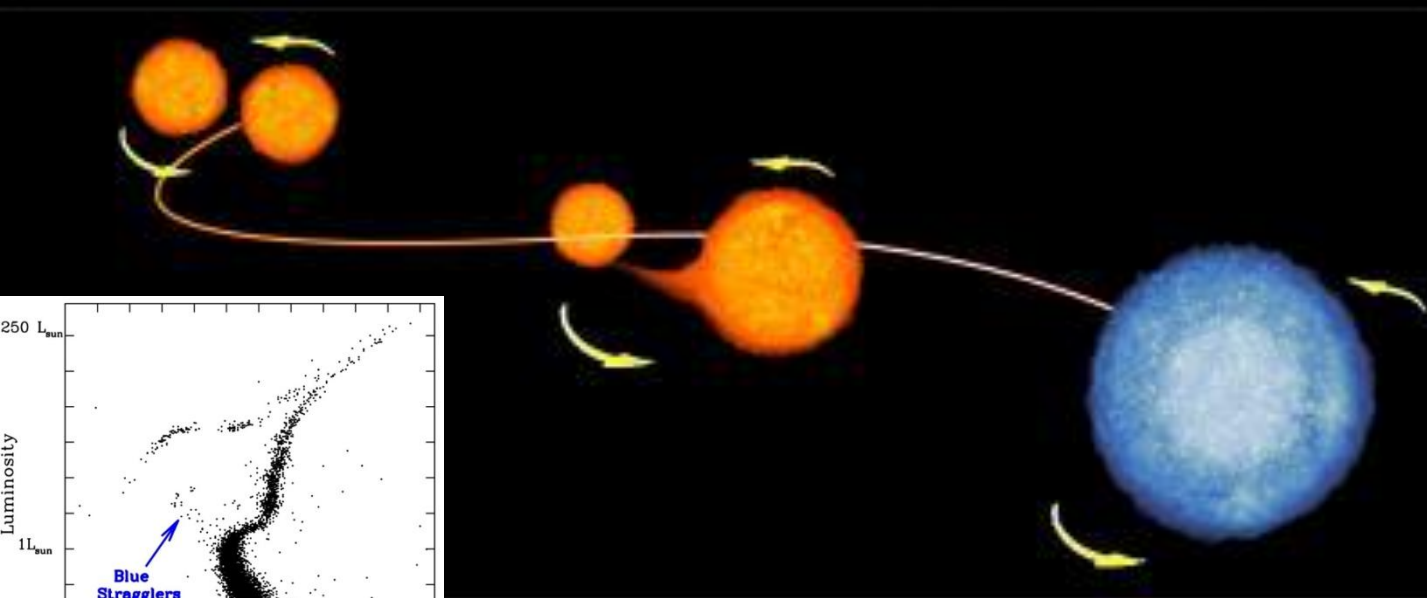
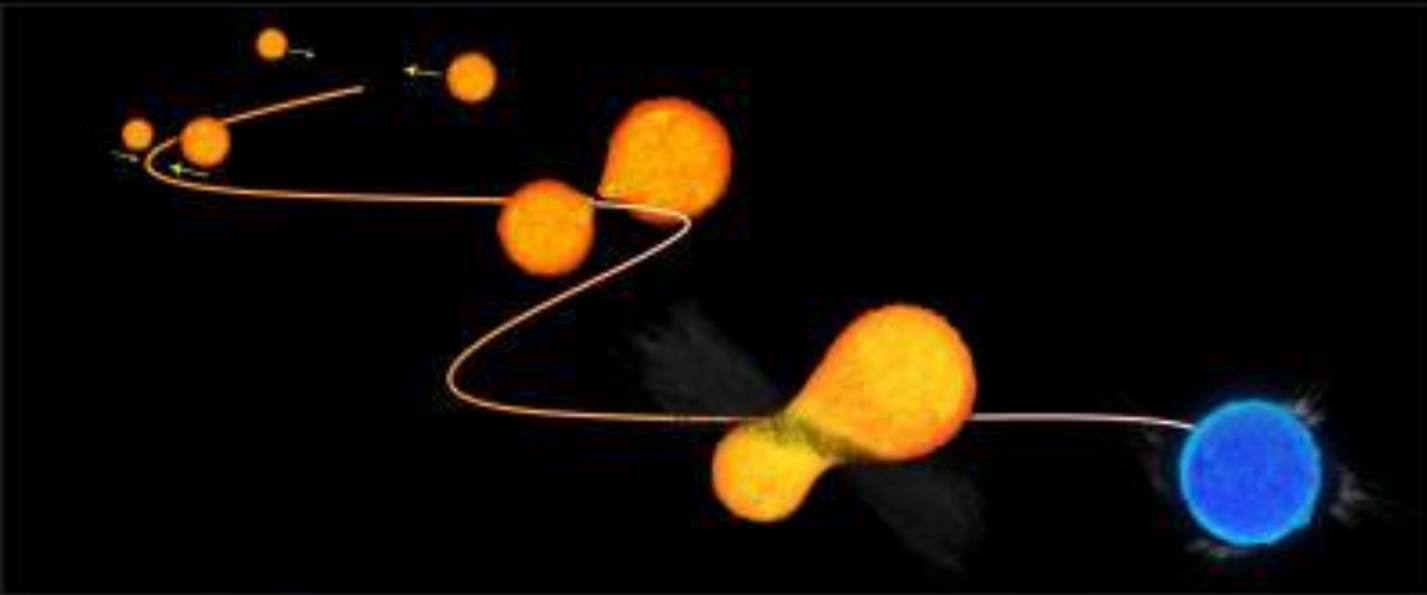
Сотни тесных рентгеновских двойных звезд и миллисекундных пульсаров обнаружены в шаровых скоплениях

Формирование тесных маломассивных двойных согласуется с различными динамическими процессами между звездами

Изображение космического телескопа Хаббла NGC 6397, с ярко-синими “странными” звездами

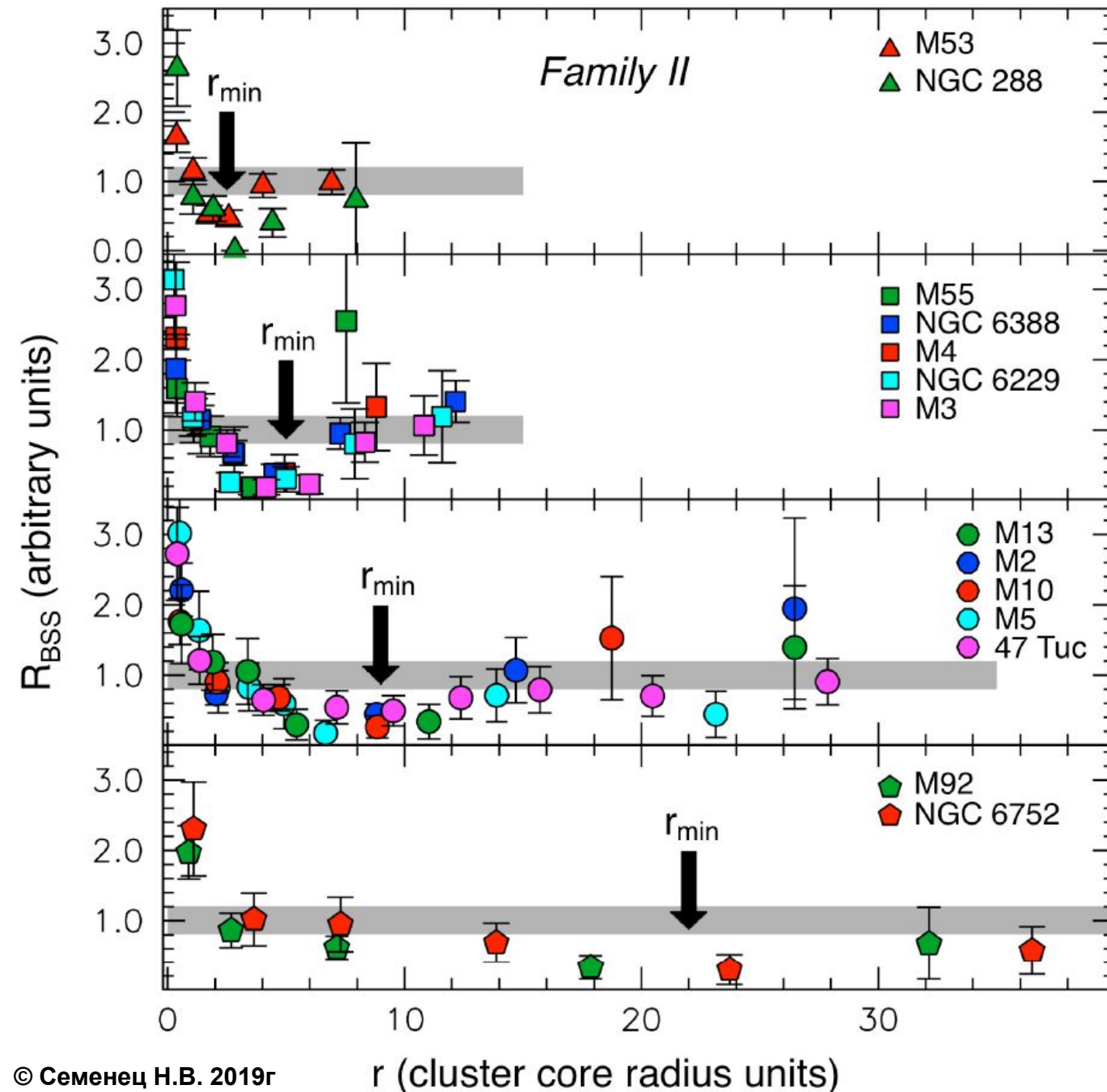


Голубые “странные” звезды



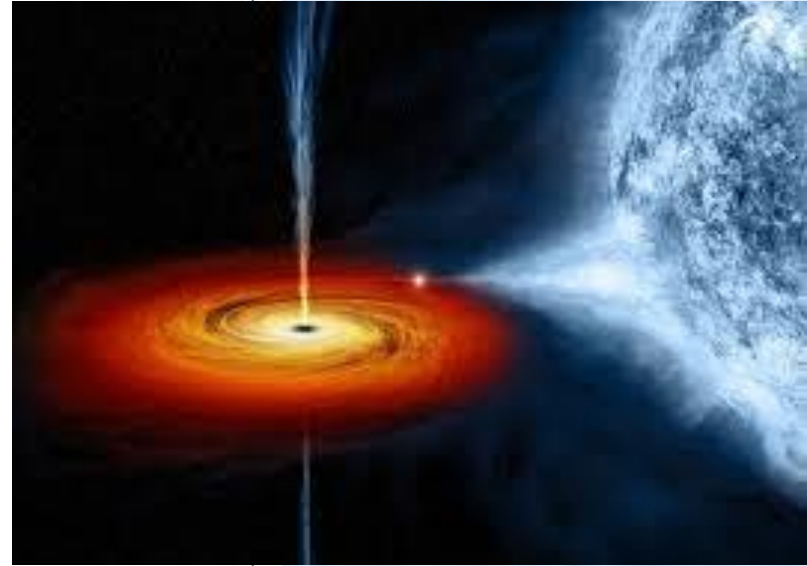
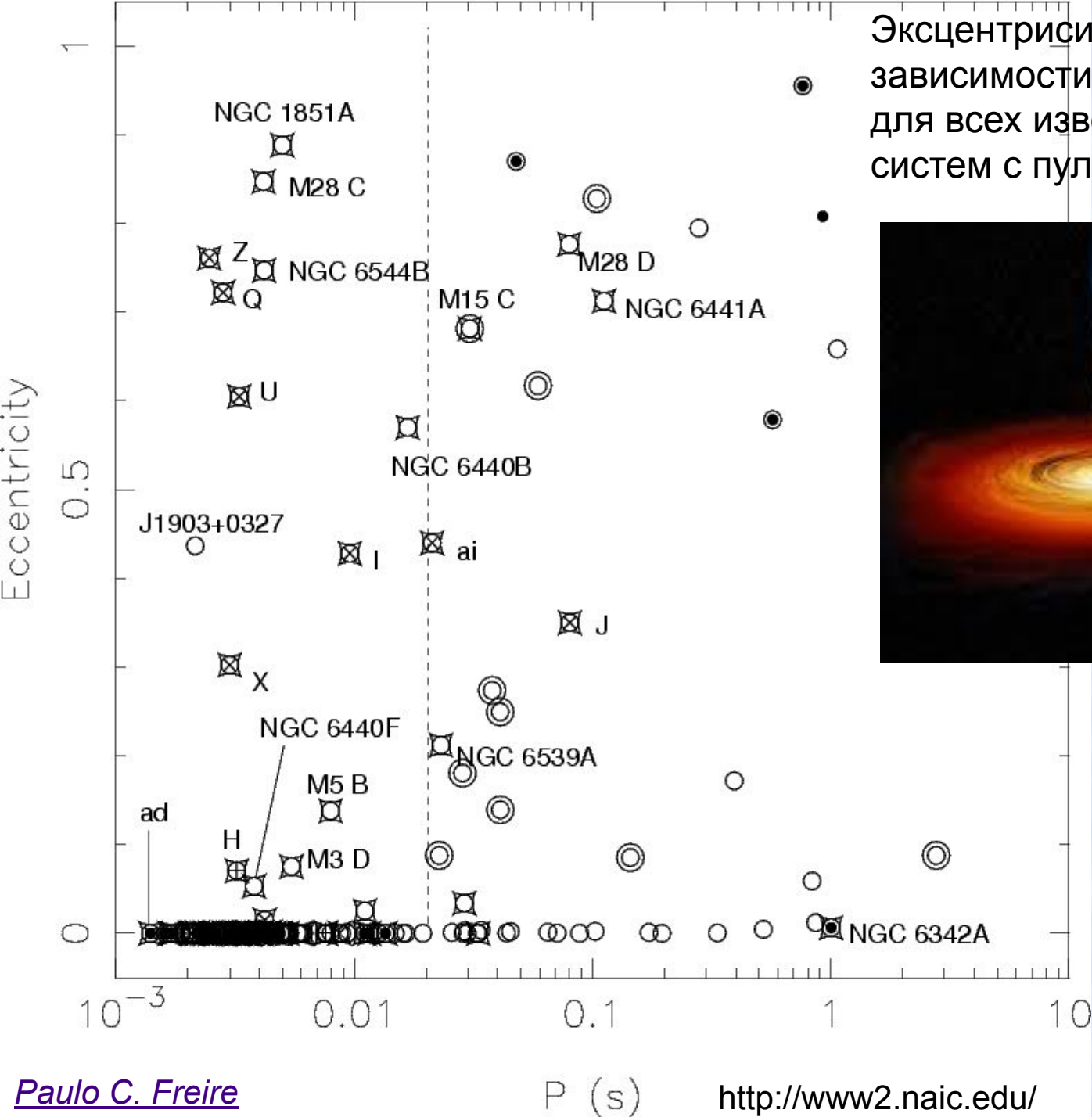
Радиальное распределение “голубых странников” BSS в ШЗС

Большинство BSS “мигрировали” к центру скопления



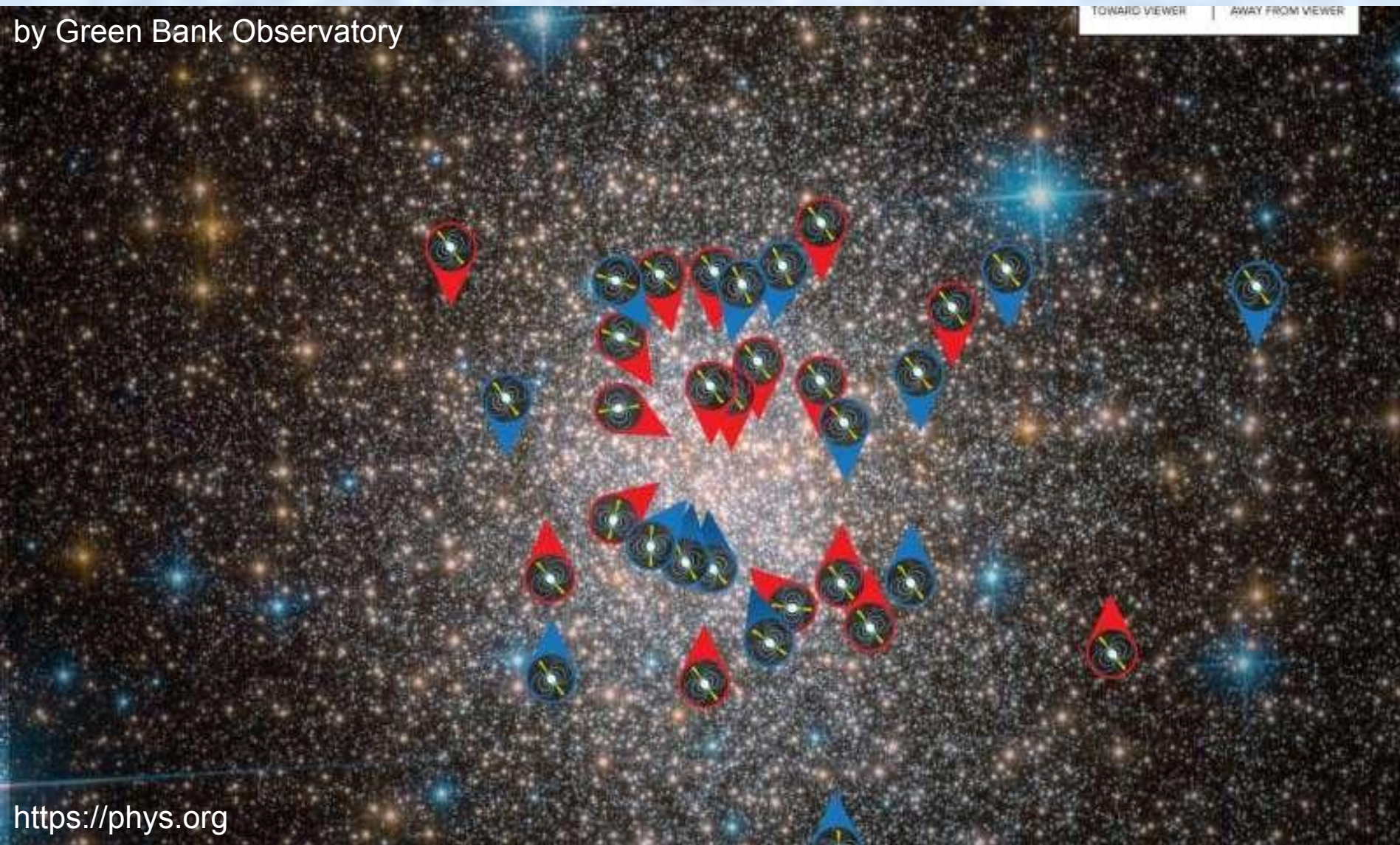
1212.5071
Ferraro F. и др

Эксцентриситет орбиты в зависимости от периода вращения для всех известных двойных систем с пульсарами в ШЗС.



Миллисекундные пульсары в скоплении Terzan 5

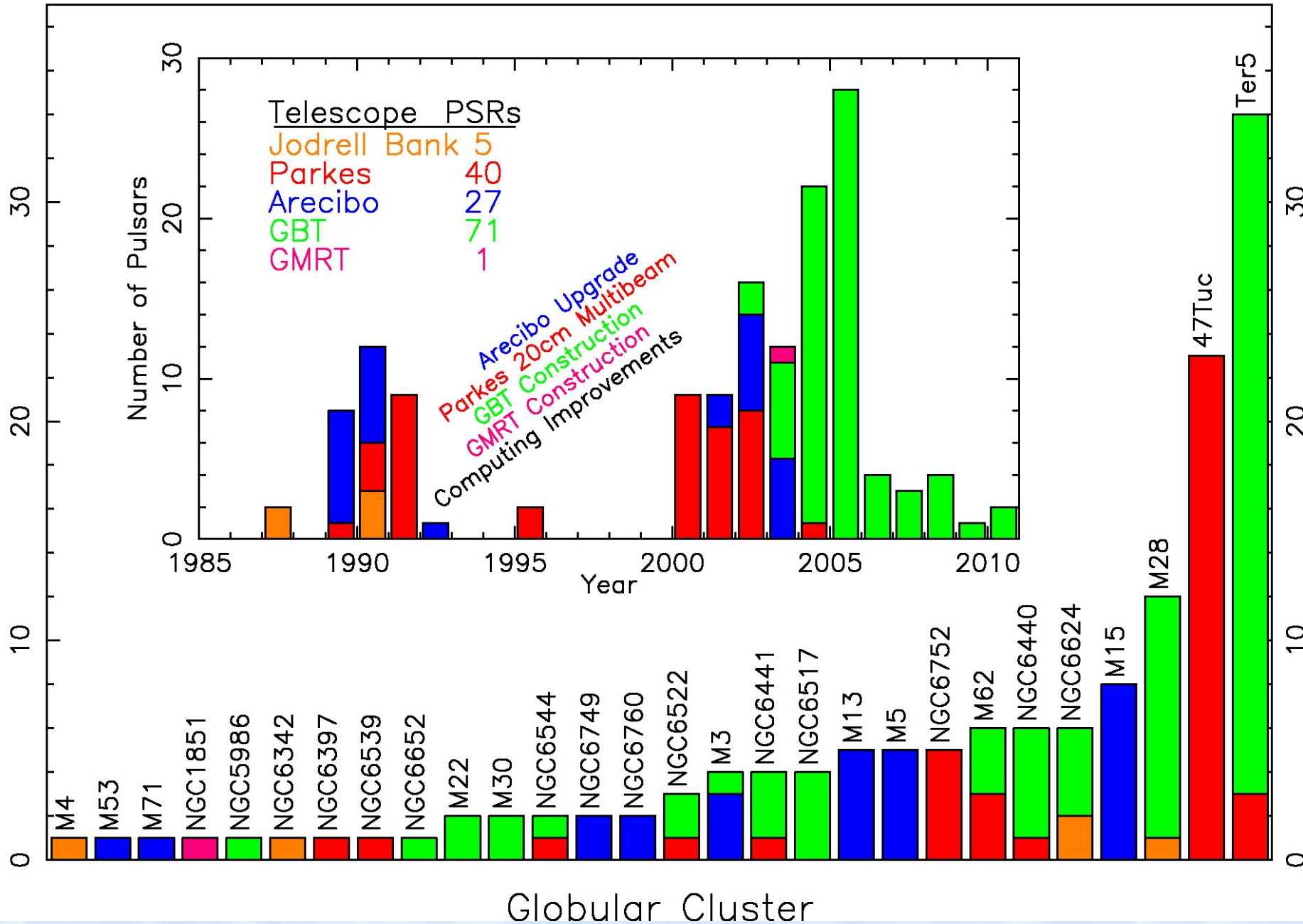
by Green Bank Observatory



<https://phys.org>

144 pulsars in 28 clusters

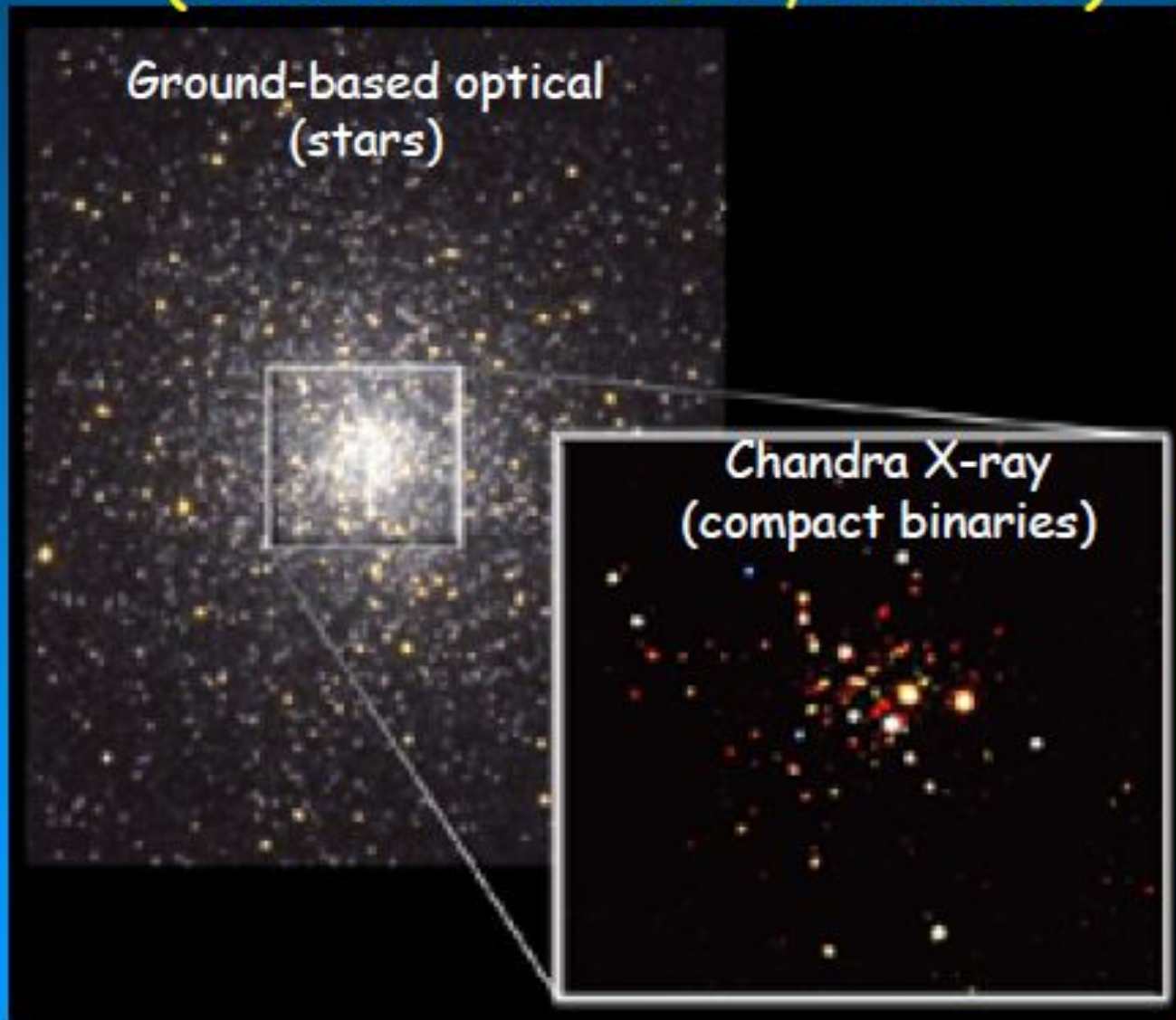
Number of Pulsars



First deep look a Globular with Chandra:

47Tuc, March 16-17, 2000

(Chandra ACIS-I, 70ksec)



Ground-based optical
(stars)

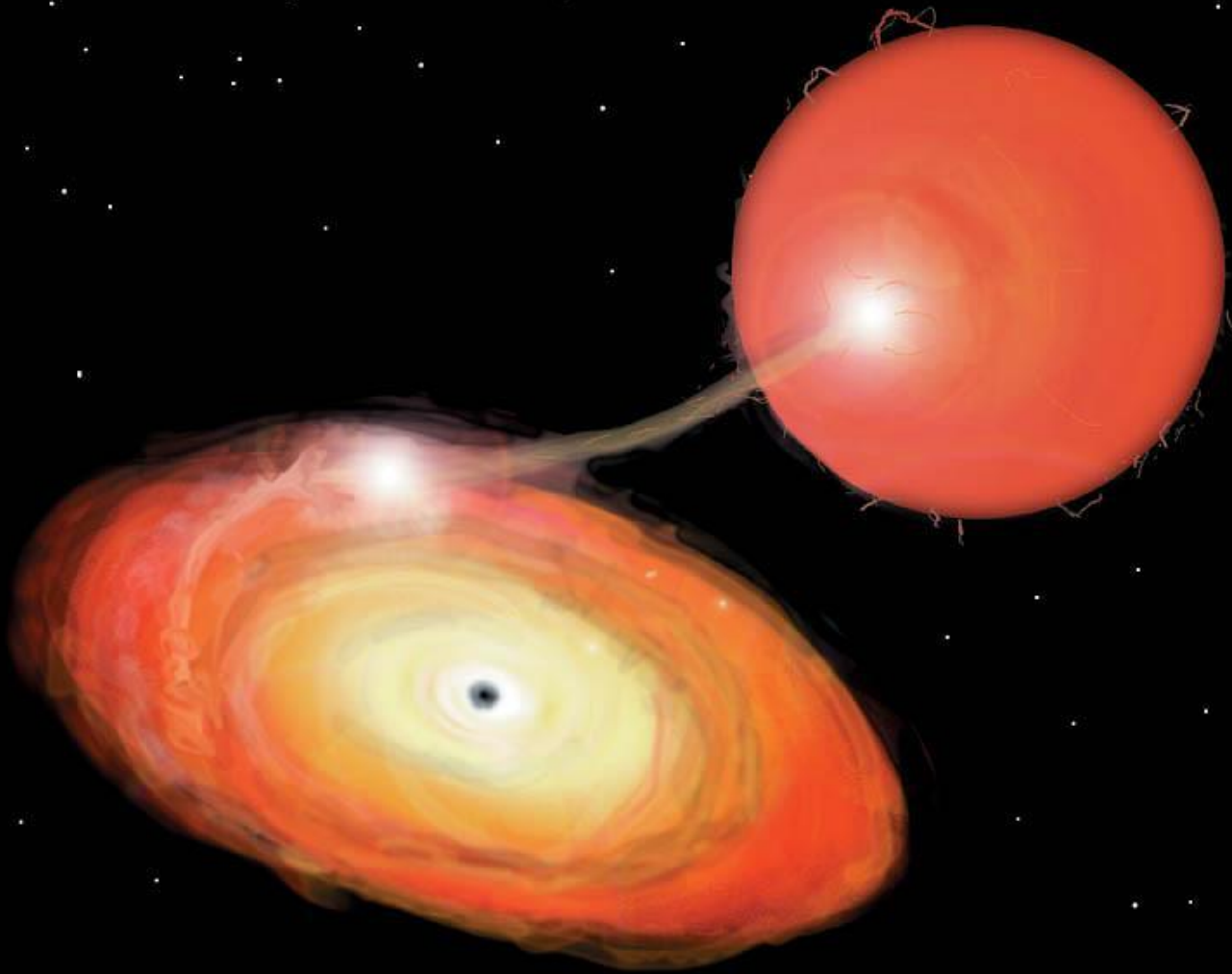
Chandra X-ray
(compact binaries)

ACIS-I image
2 x 2.5 arcmin

0.5-1.2 keV

1.2-2.0 keV

2.0-6.0 keV



Маломассивная рентгеновская двойная система LMXB

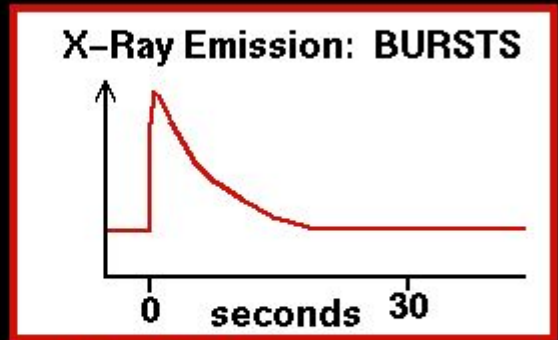
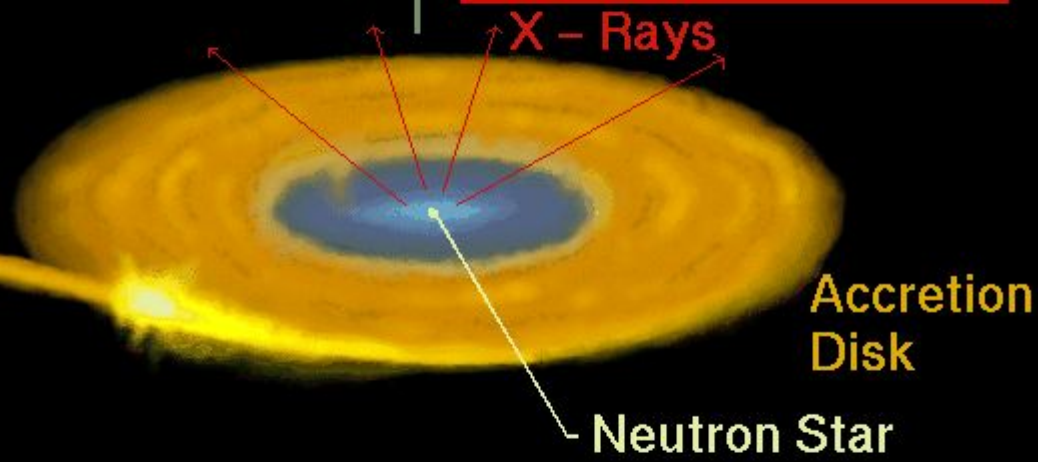
A Low Mass X-Ray Binary: 4U 1820-30



130,000 km

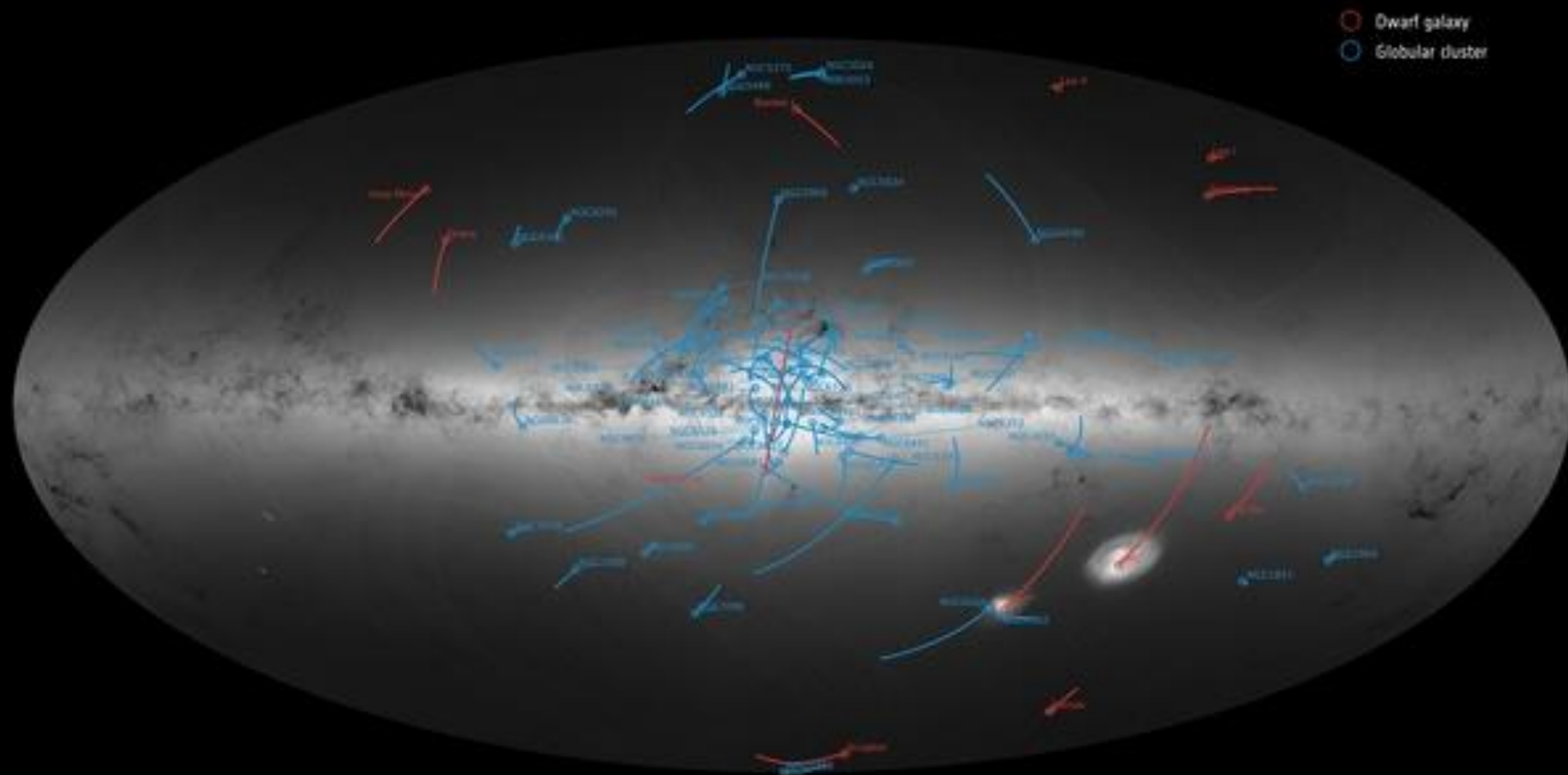
White Dwarf

1,200 km/sec

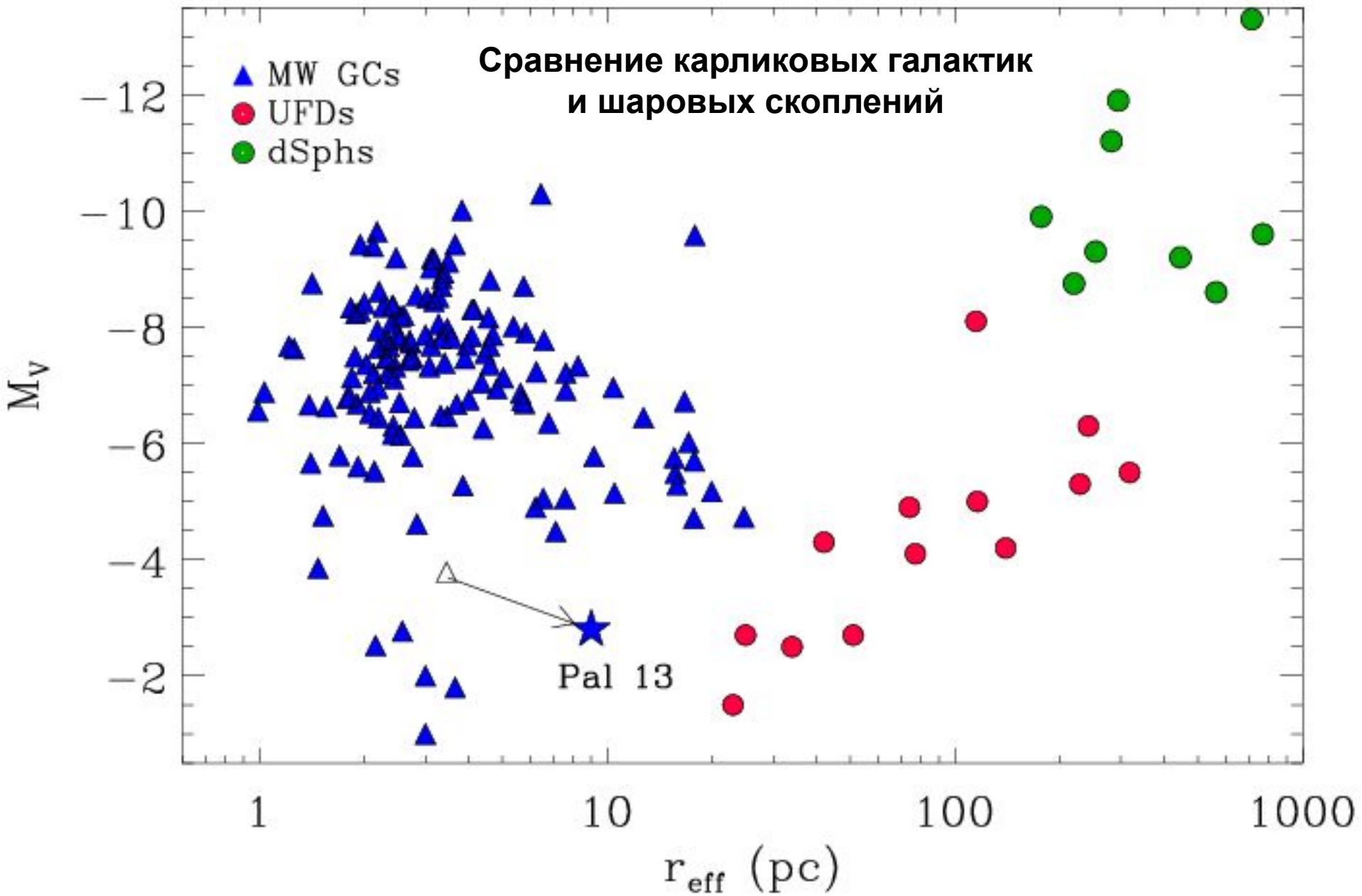


SUN

→ GAIA'S GLOBULAR CLUSTERS AND DWARF GALAXIES



**Собственные движения 75 ШЗС Мл.Пути и ближайших карликовых галактик
По данным к/ап Gaia, 2019г**

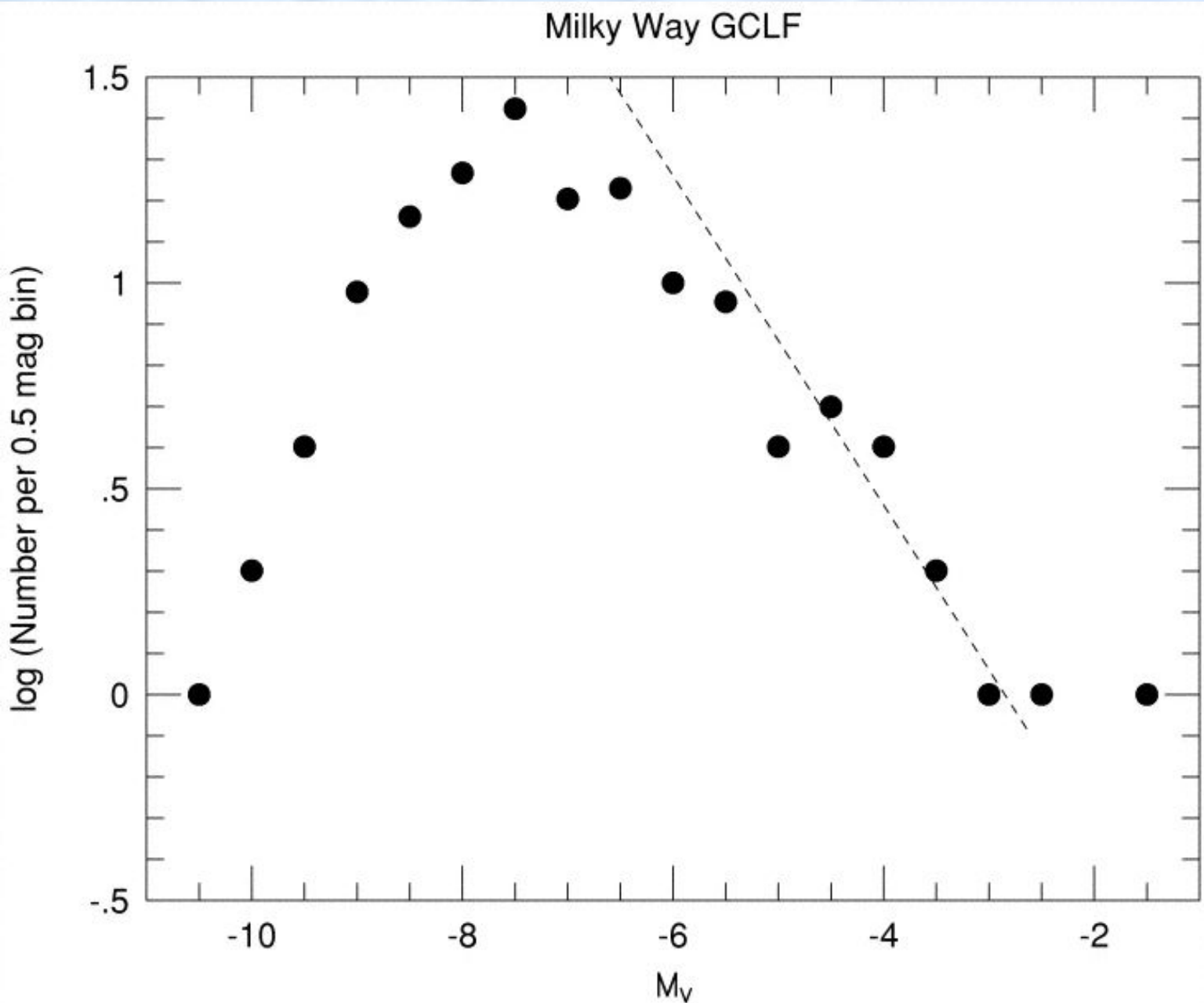


красные – ультра слабые галактики

© Семенец Н.В. 2019г

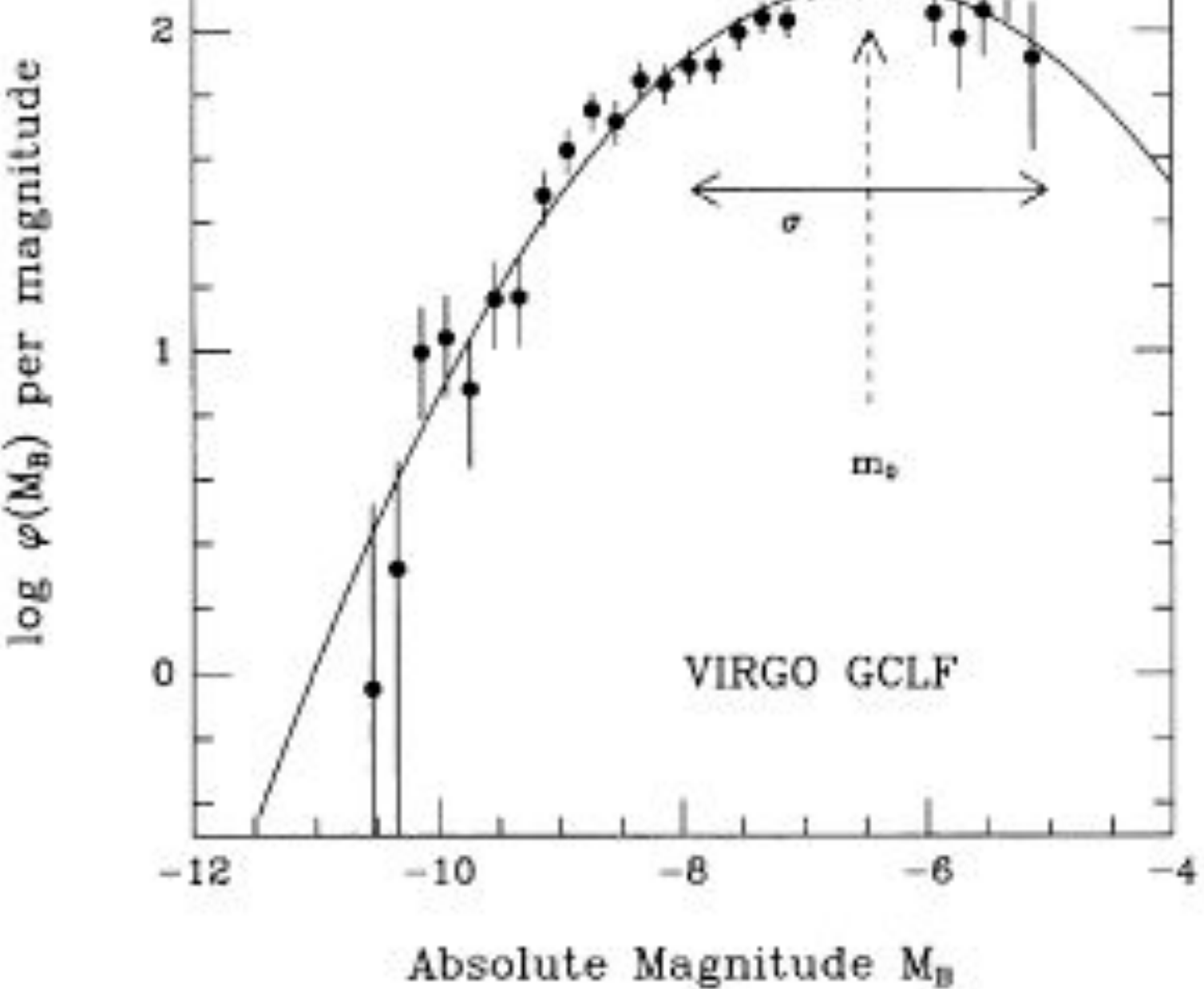
зеленые – карликовые сфероидальные галактики

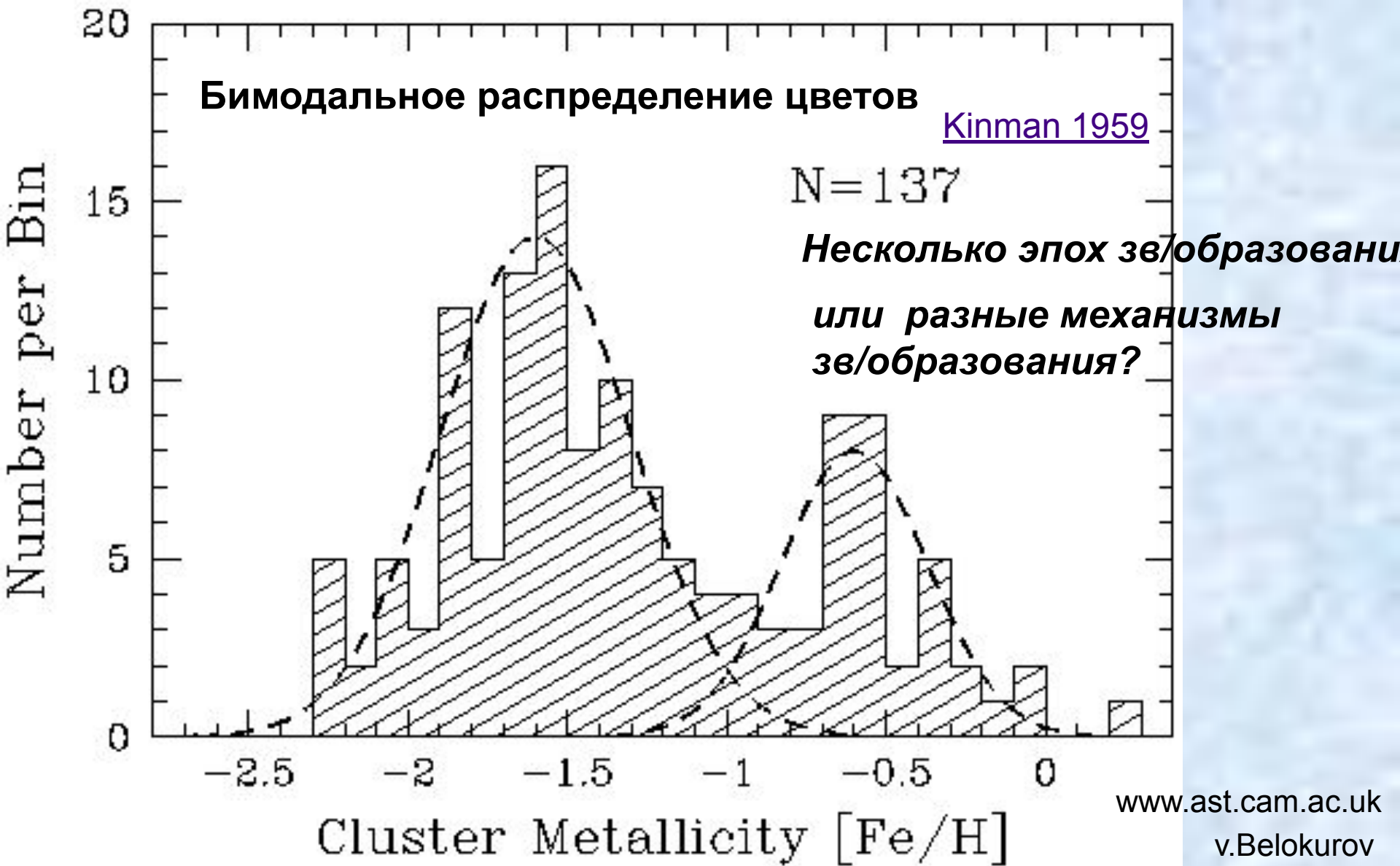
Функция светимости шаровых скоплений Мл.Пути



Harris ([1999](#))

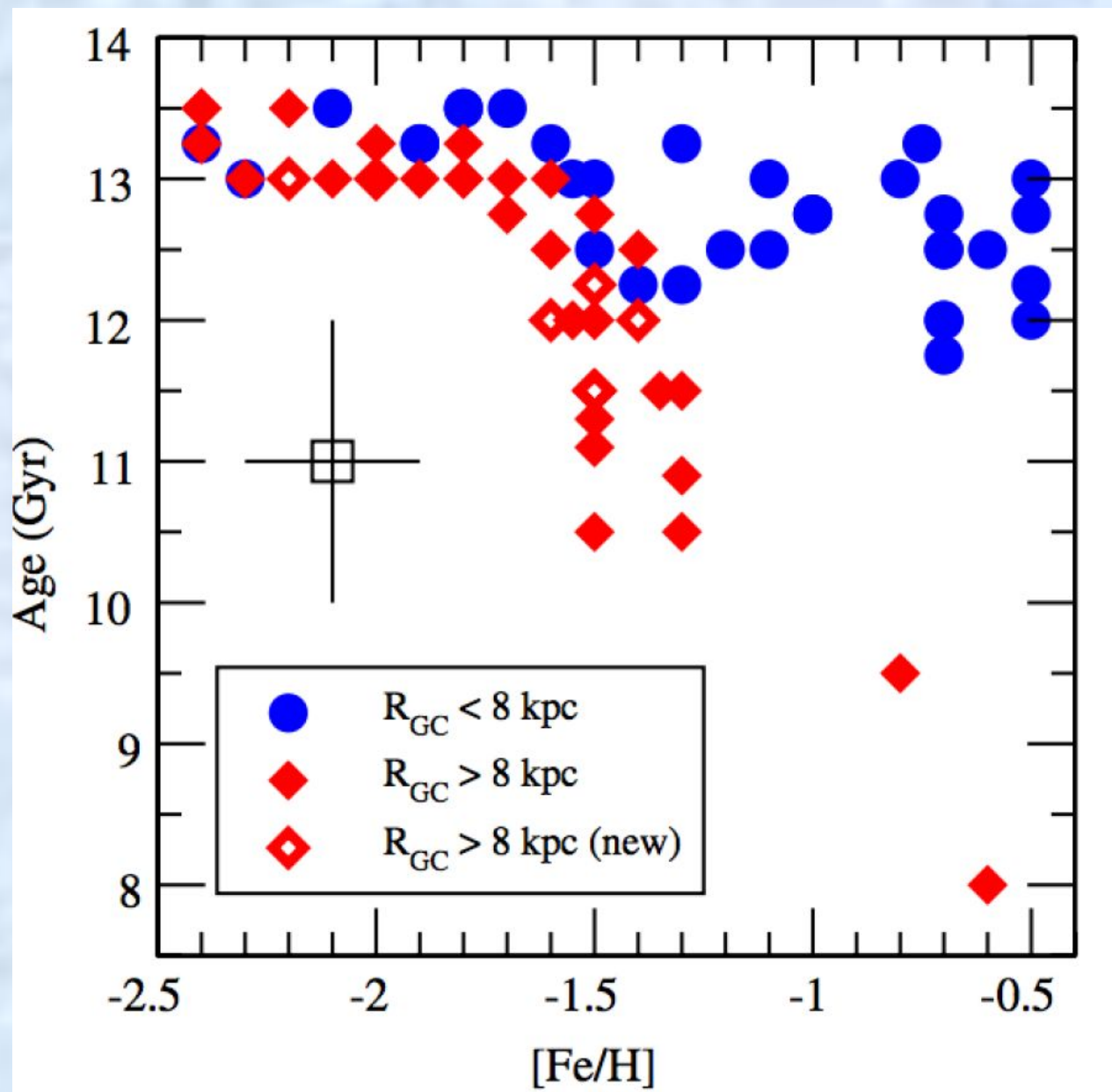
График зависимости абсолютной величины от частоты для шаровых скоплений.

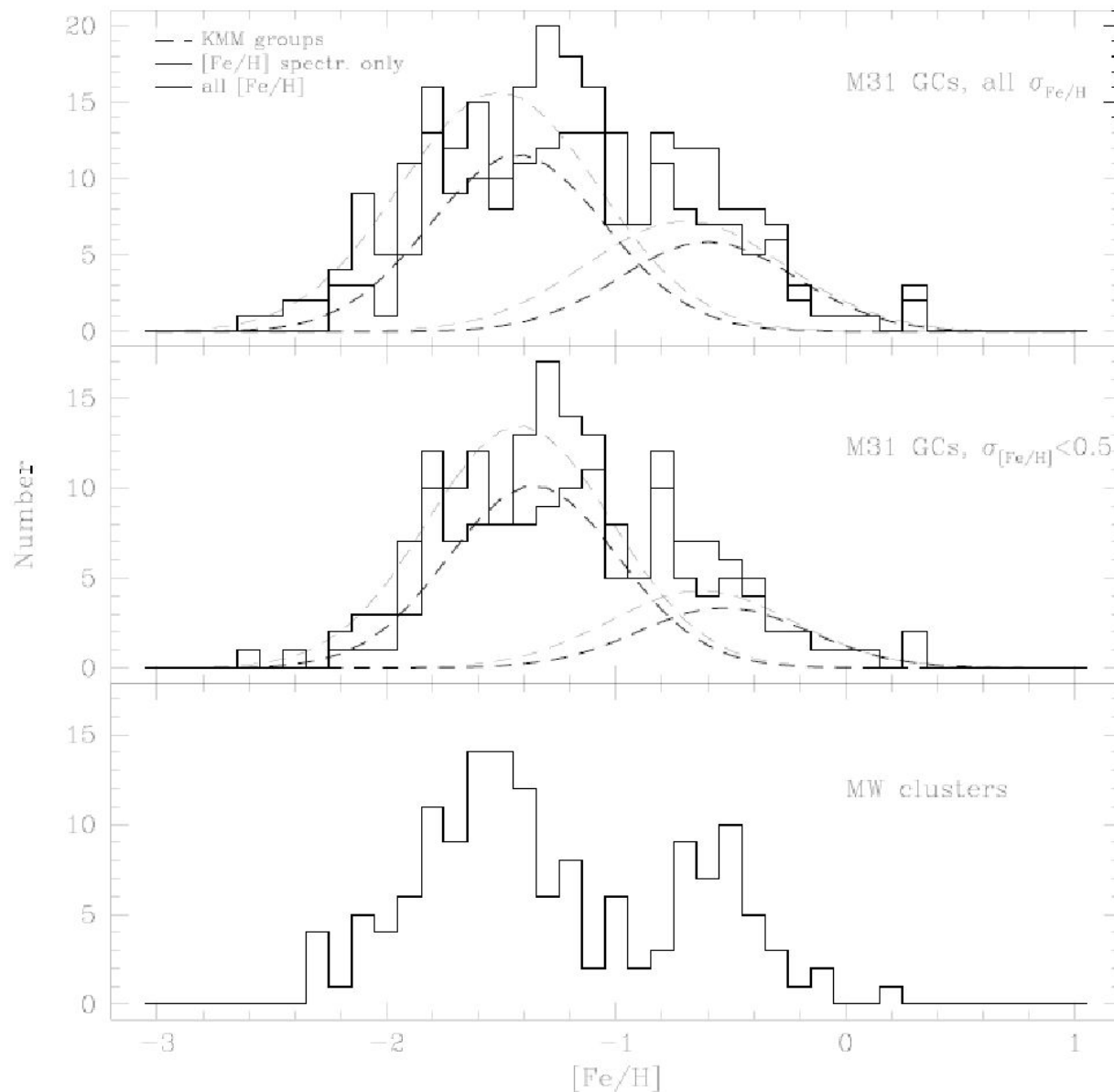




Функция распределения металличности для шаровых скоплений в Млечном Пути. Две гауссовых кривых имеют среднее значение и стандартные отклонения $(-1,6, 0,30)$ и $(-0,6, 0,23)$ и определяют компоненты с низким содержанием металлов и обогащенные металлами .

Зависимость возраст/металличность ШЗС в Мл.Пути



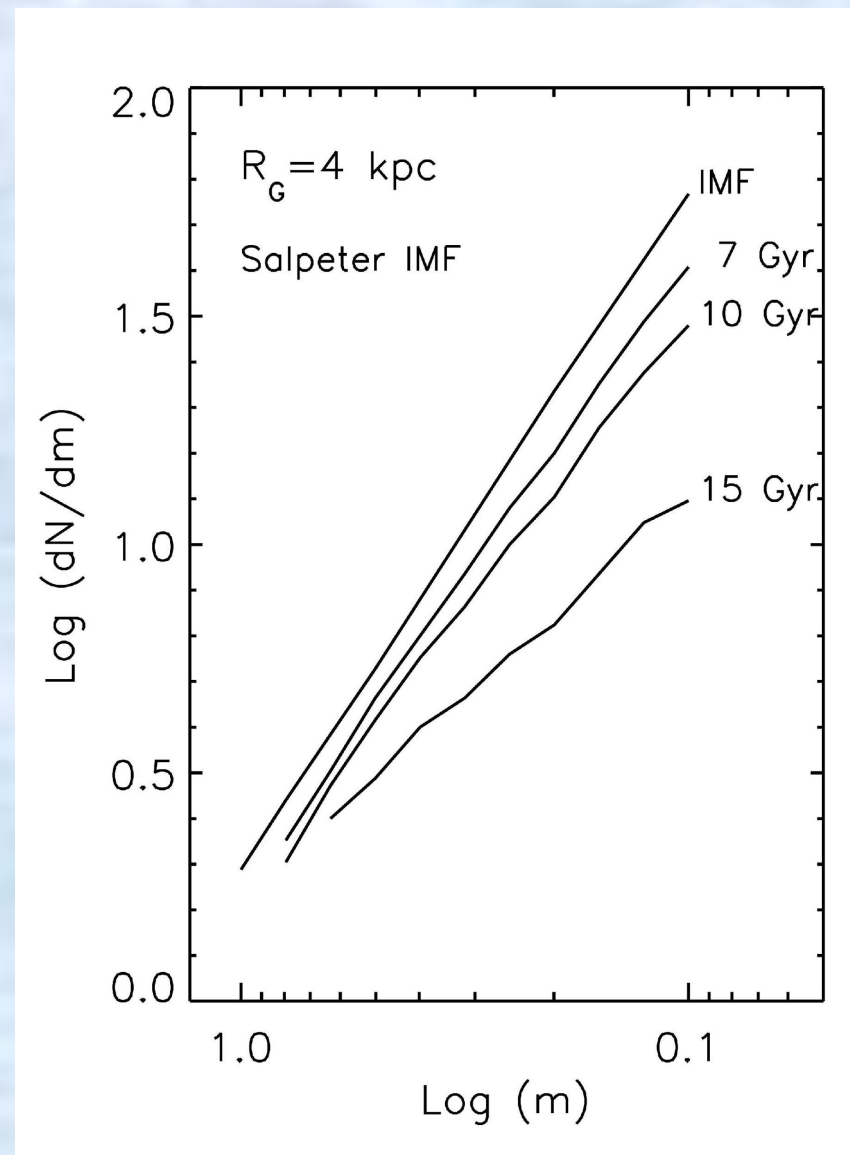


Каталог содержит новые оптические и ближние инфракрасные фотометрические данные для большинства из 435 шаровых скоплений и кандидатов в скопления. Радиальное распределение и кинематика двух групп металличности М31 подразумевают, что они являются аналогами подсистем шаровых скоплений Мл.Пути "гало" и "диск/балдж"

Fig. 19.— $[Fe/H]$ distribution for M31 GCs, subdivided by metallicity source and uncertainty, and Galactic GCs.

Взаимодействие шаровых скоплений с галактикой

- Испарение (релаксация)
- Ударное влияние диска галактики (сжатие)
- Обдирание балджем
- (Приливные хвосты)
- Потеря звезд из-за вытянутых орбит, сегрегация по массам: массивные “спускаются” в центр
- Движение по орбите со временем меняет массы, меняя начальную функцию масс



(Vesperini & Heggie 1997)

Модели формирования ШЗС/галактик

1. Формирование эллиптич.гал/ШЗС

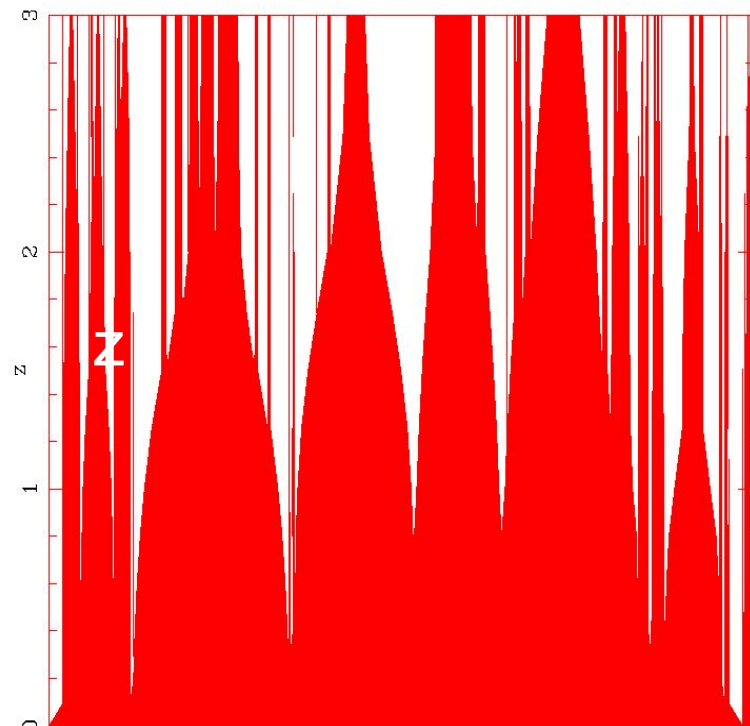
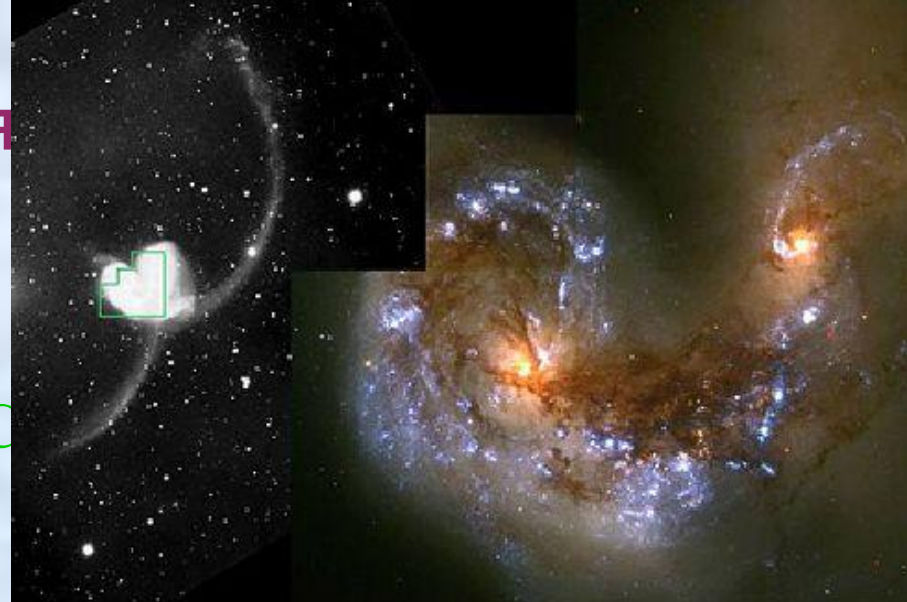
в слияниях (Schweizer 1987,
Ashman & Zepf 1992)

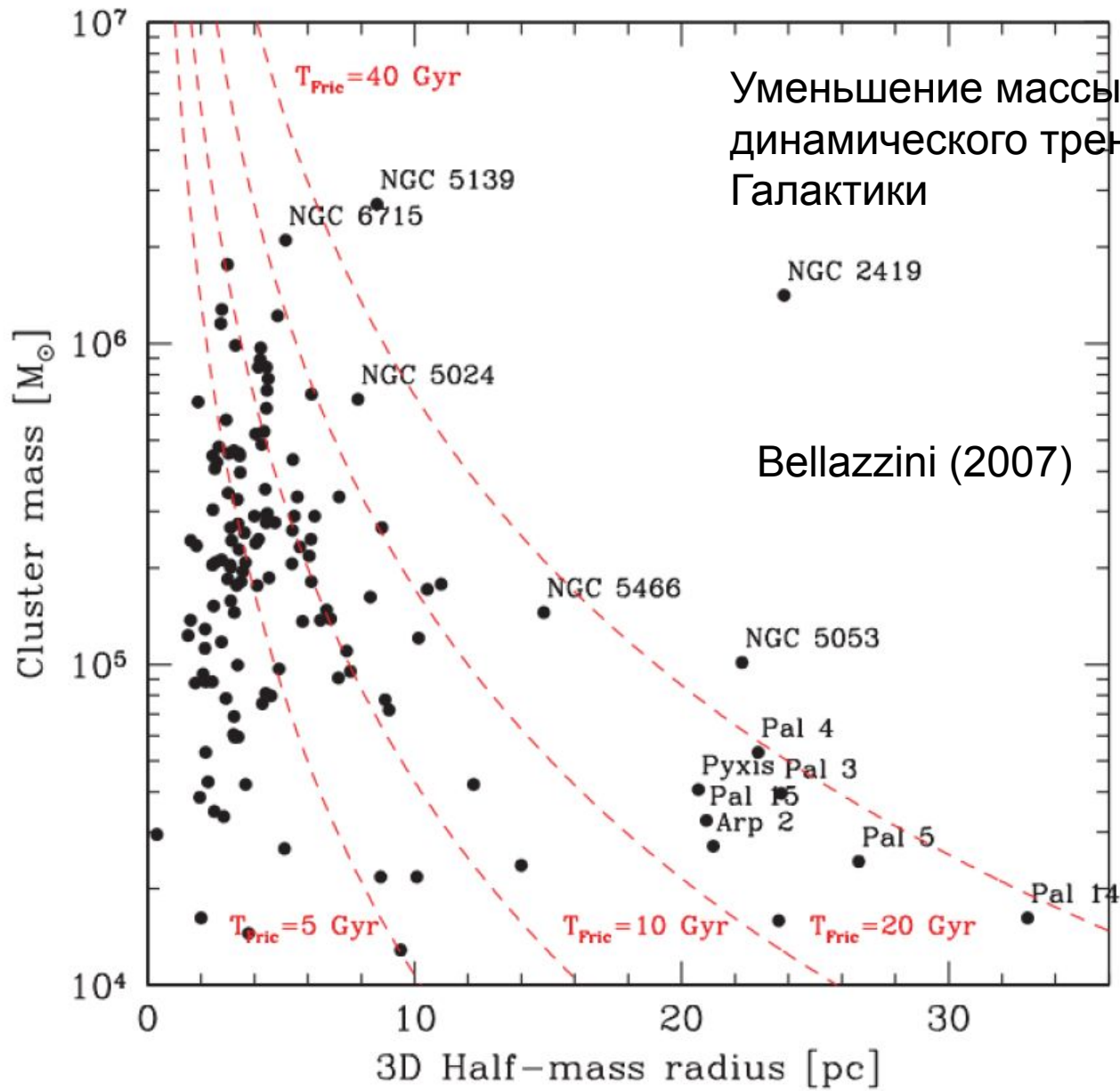
2. Местный коллапс в несколько фаз (Forbes, Brodie & Grillmair 1997)

3. Аккреция/обдирание (Cote' et al. 1998)

4. Иерархические слияния (Beasley et al. 2002)

2 и 4 требуют уменьшения темпа
образования ШЗС на больших
красных смещениях





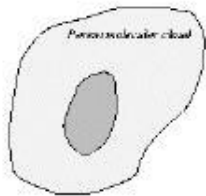
Уменьшение массы ШЗС из-за динамического трения с диском Галактики

Bellazzini (2007)

T_{fric} (красный цвет) – время динамического трения для ШЗС Мл.Пути
 У большинства ШЗС T_{fric} меньше хаббловского, значит ниже содержание темной материи.

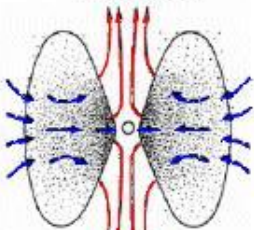
Low- Mass Stars

(after Lada 1987, Andre, Ward-Tompson & Barsony, 1993)
Prestellar Core



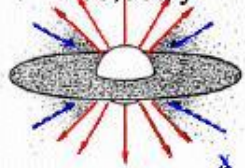
Submillimeter Protostar

Class 0



Infrared Protostar
 100,000 yr

Class I



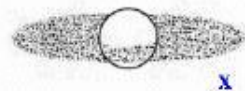
T Tauri star
 1,000,000 yr

Class II



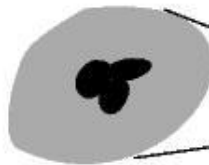
Evolved T Tauri
 10,000,000 yr

Class III

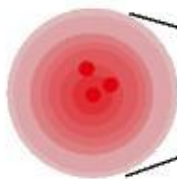


Massive Stars

Prestellar Core(s?)



Hot Multi-Cores?



Ultra-Compact HII Region (UCHII)
 few x100,000 yr



OB Star
 (w/accretion remnants?)
 <1 Myr

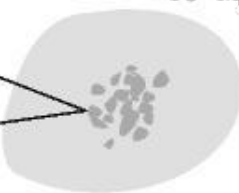


OB star

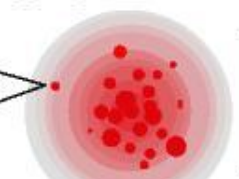


Massive Clusters

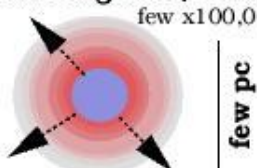
Massive Molecular Aggregates ?
 $>10^6 M_{\odot}$



Massive Submillimeter Aggregates ?



Massive Ultra-Dense HII Regions (UDHII)
 few x100,000 yr



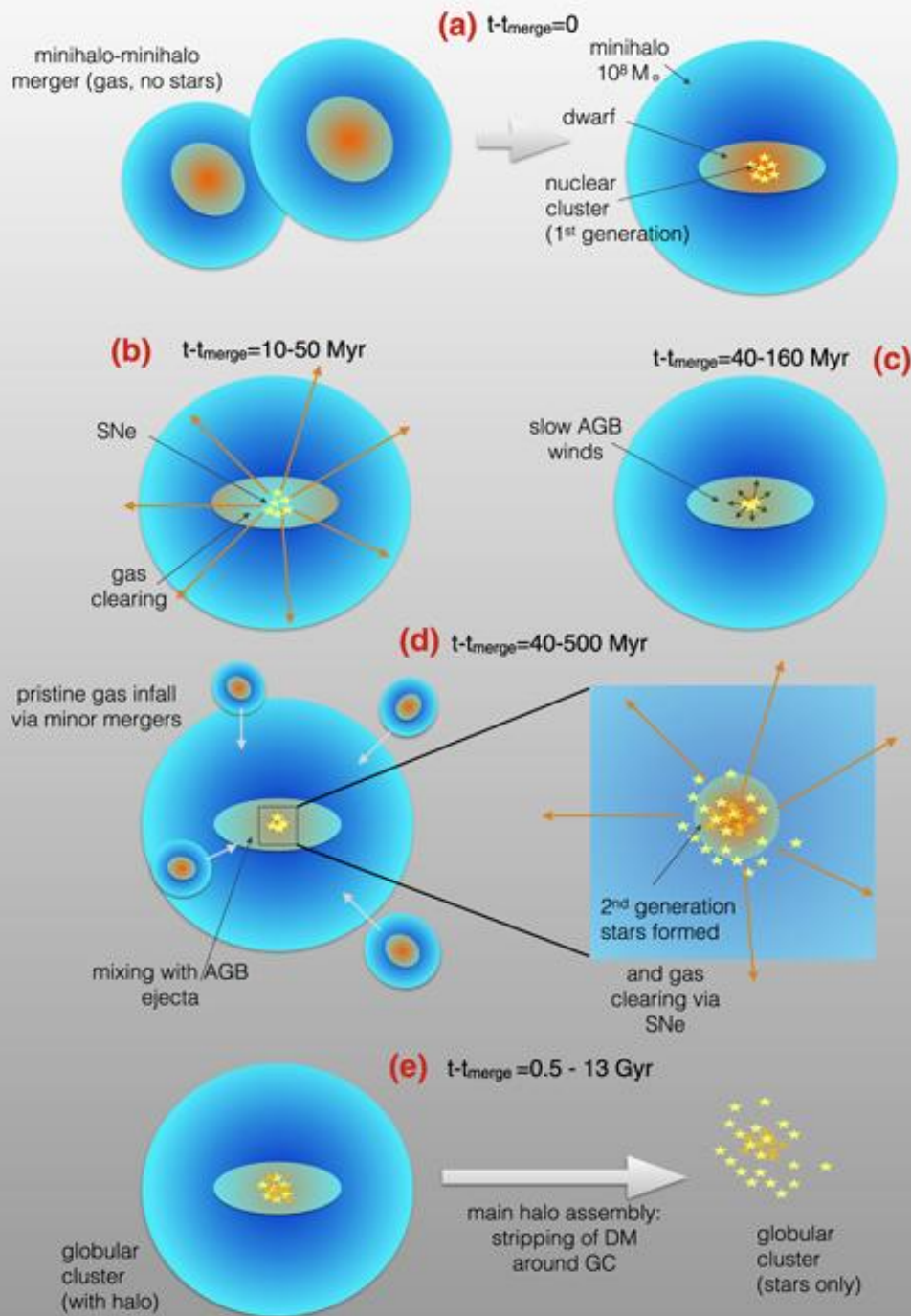
Young Super Starcluster
 1-3 Myr



Super Starclusters
 -> Globular Clusters?
 3 Myr - 13 Gyr



Эволюция звезд и скоплений

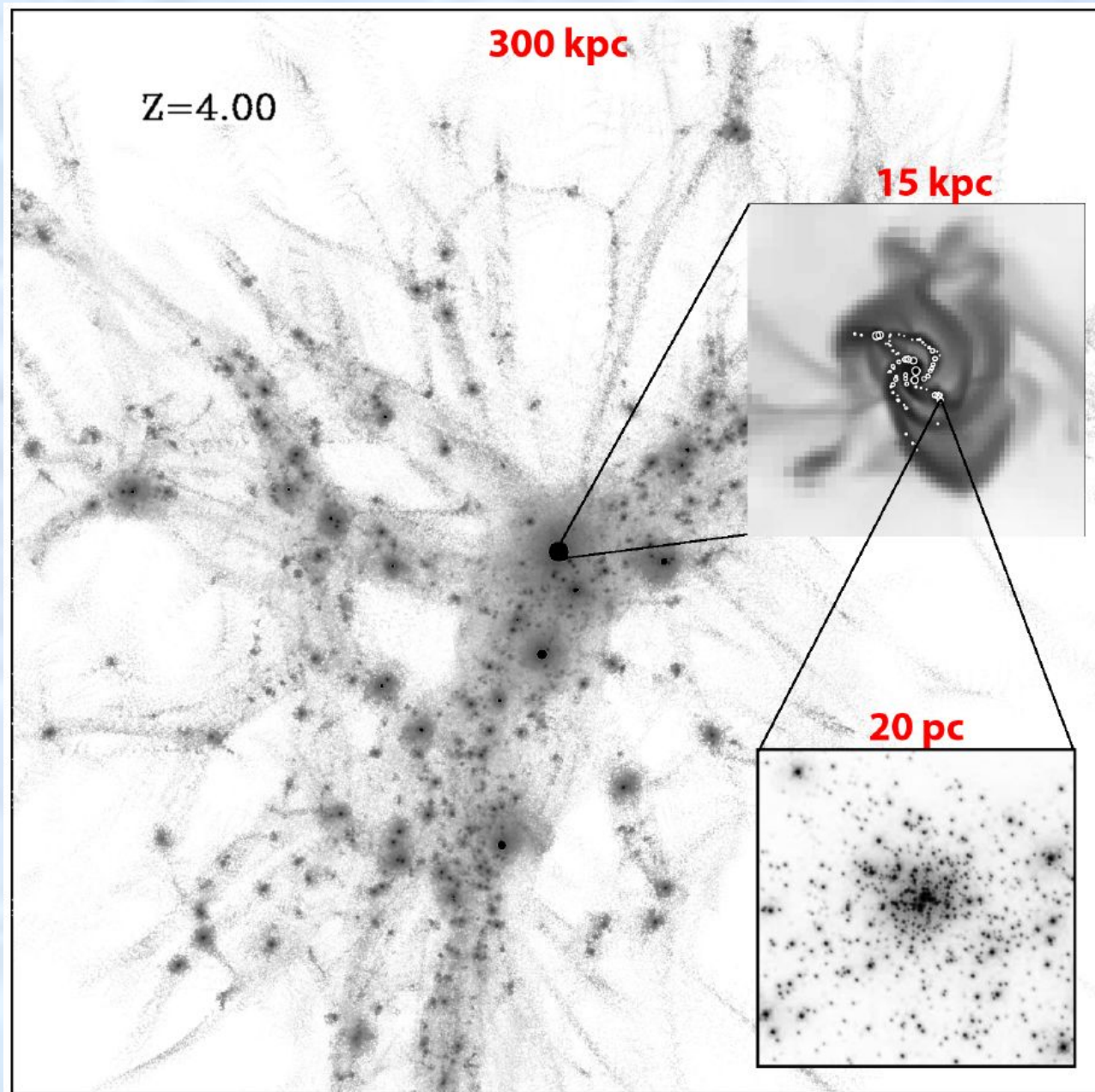


Модель формирования шаровых скоплений

Michele Trenti, Paolo Padoan, and Raul Jimenez

2015. The American Astronomical Society

Численное моделирование формирования шаровых скоплений

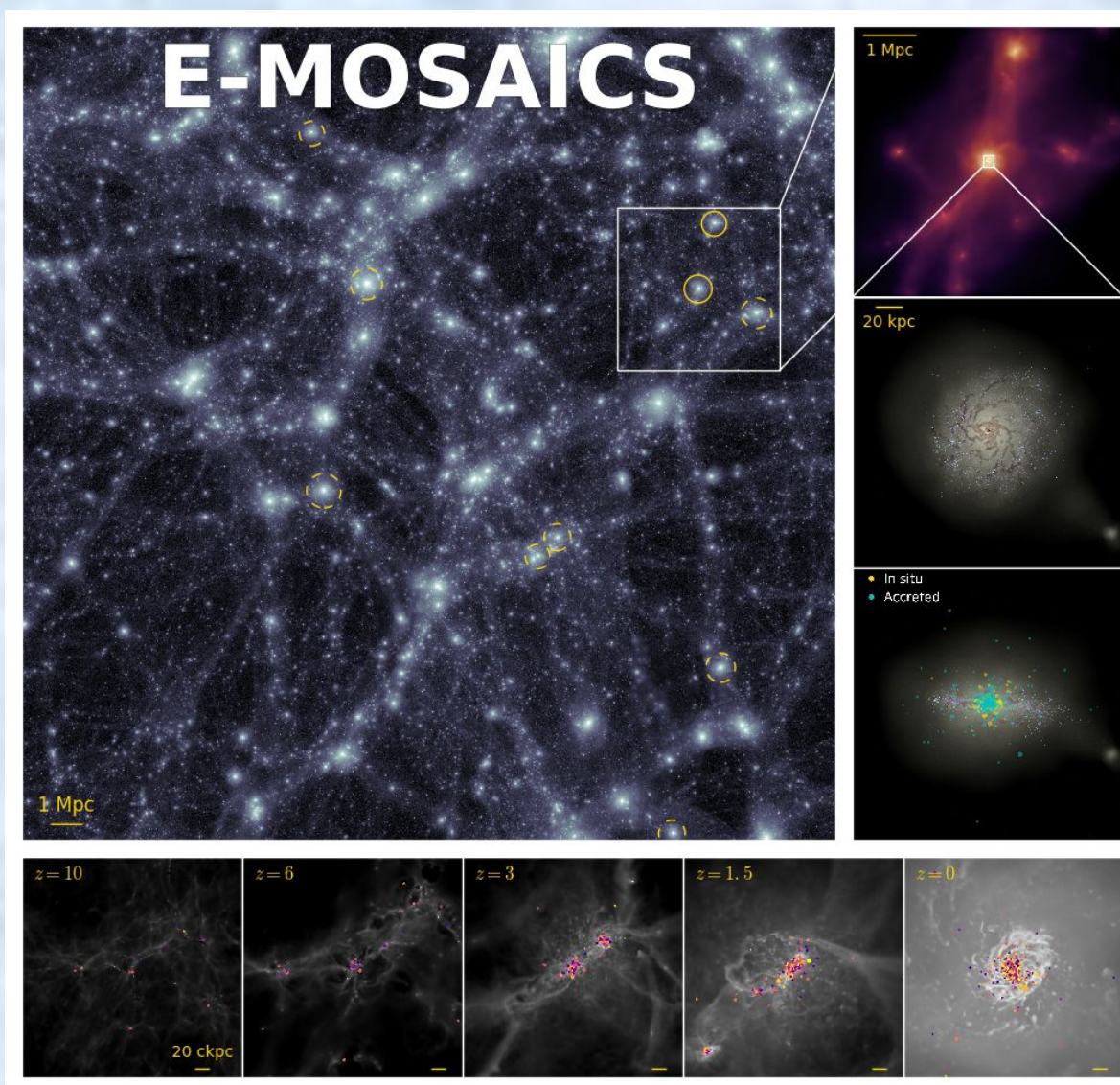


O. Gnedin, A. Kravtsov

© Семенов Н.В. 2019г

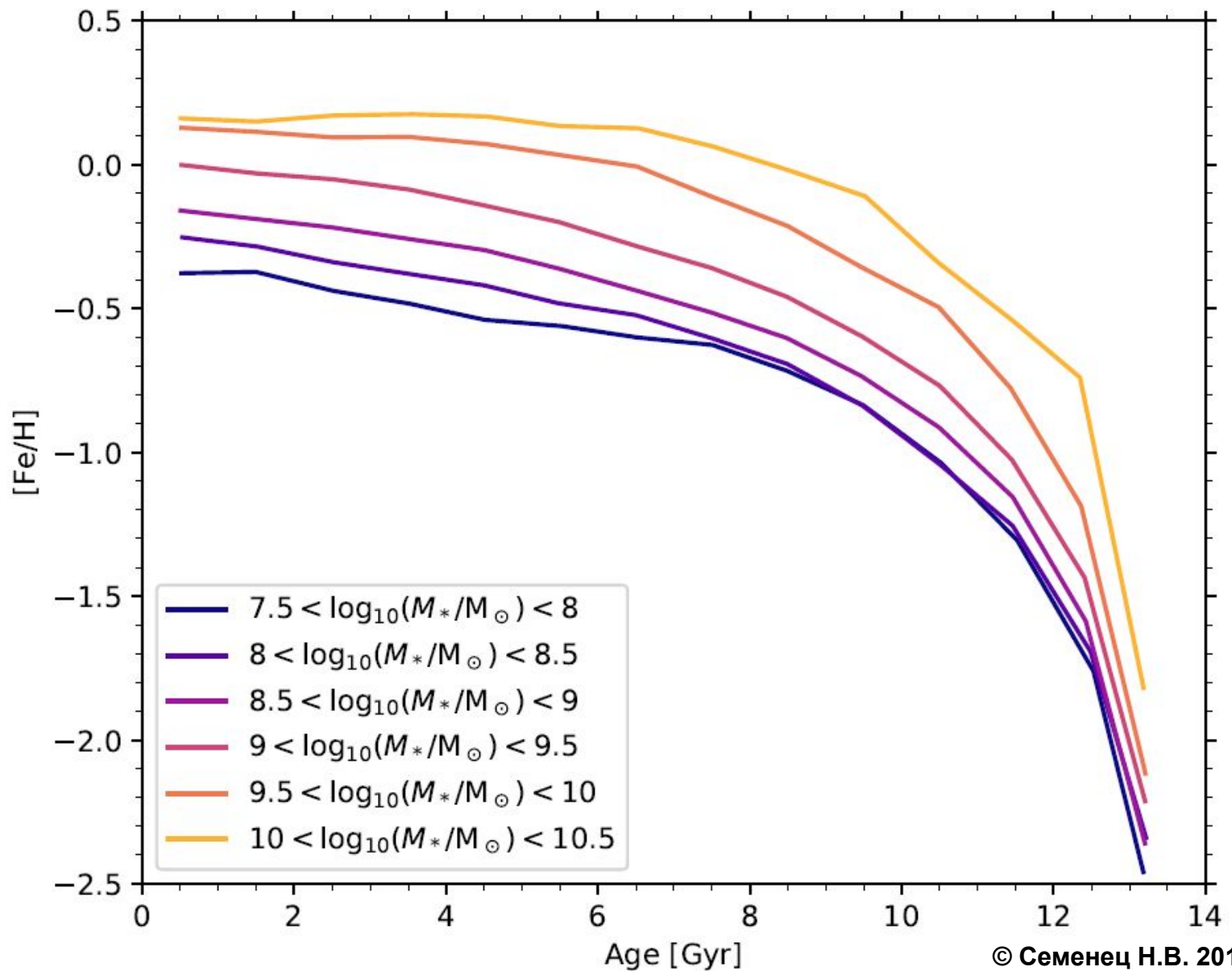
E-MOSAICS: формирование галактики и сборка шаровых скоплений

Численное моделирование



История изменения хим.состава в галактиках в зависимости от массы галактик

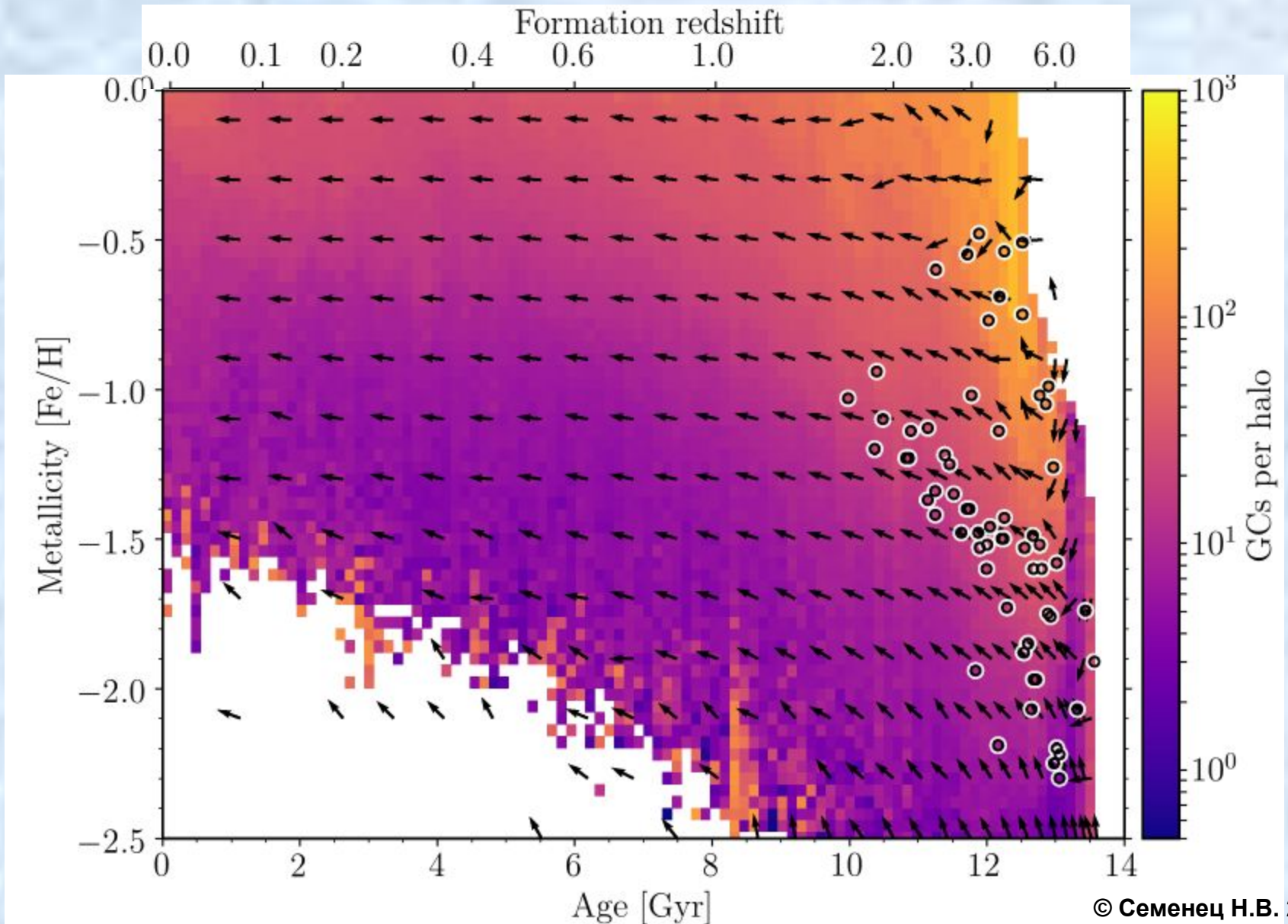
(e.g. Forbes & Bridges 10; Leaman+ 13)



Изменение количества шаровых скоплений в Млечном Пути за 13,7 млрд лет

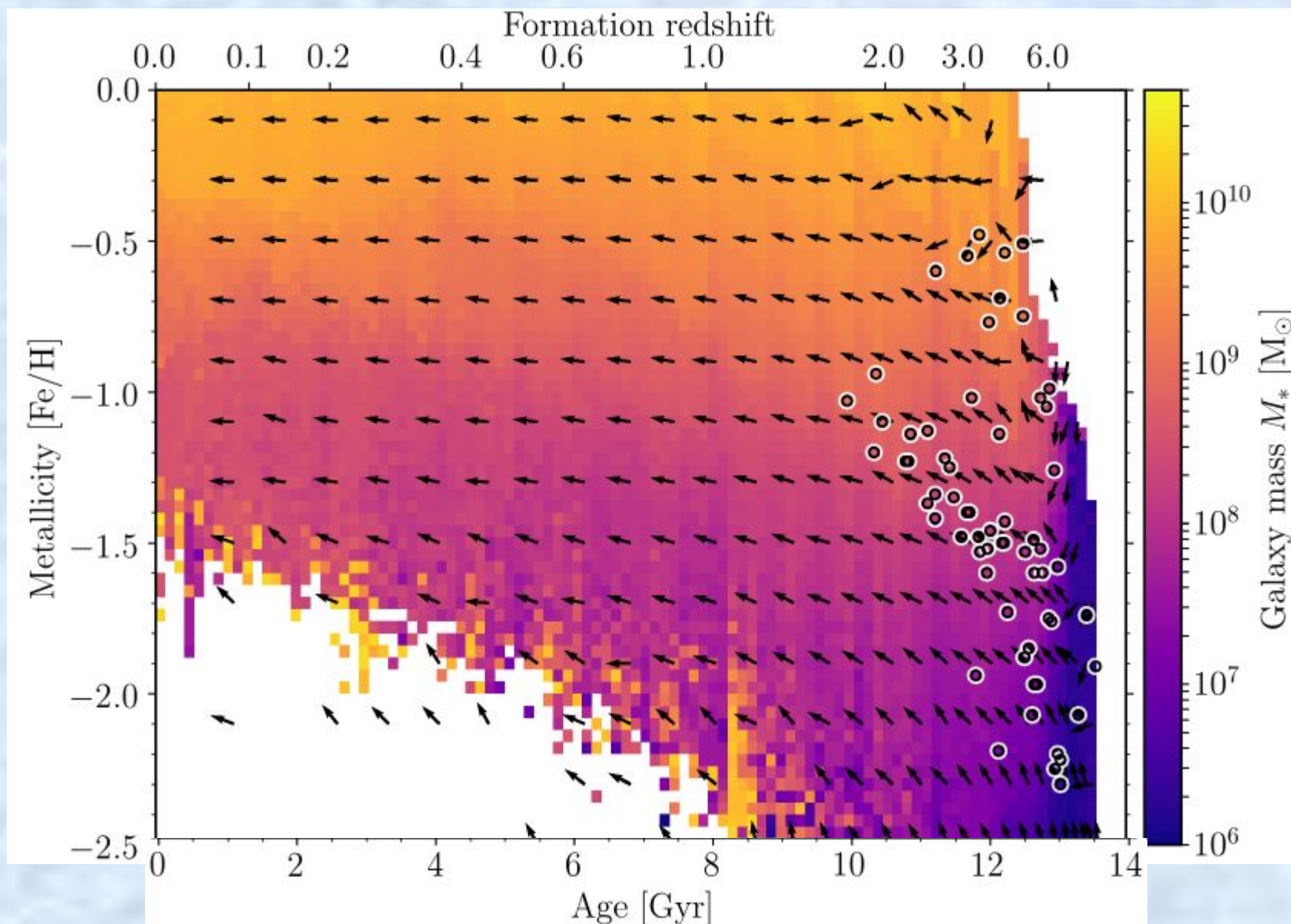
(Kruijssen, Pfeffer+ 2018,
MNRAS, arXiv:1806.05680)

Мл.Путь аккрецировал 2 галактики $\sim 10^9 M_{\odot}$ с ~ 20 ШЗС и $\sim 10^8 M_{\odot}$ с ~ 8 ШЗС



Зависимость возраст/металличность ШЗС является индикатором истории эволюции массы Мл.Пути

(Kruijssen, Pfeffer+ 2018, MNRAS, arXiv:1806.05680)



<http://astropixels.com/globularclusters/M15-01.html>

[https://ru.wikipedia.org/wiki/M_15_\(%D1%88%D0%B0%D1%80%D0%BE%D0%B2%D0%BE%D0%B5_%D1%81%D0%BA%D0%BE%D0%BF%D0%BB%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D0%B5\)](https://ru.wikipedia.org/wiki/M_15_(%D1%88%D0%B0%D1%80%D0%BE%D0%B2%D0%BE%D0%B5_%D1%81%D0%BA%D0%BE%D0%BF%D0%BB%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D0%B5))

https://pikabu.ru/story/pochemu_ne_vidno_zvezd_12_5897486

[https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9C%D0%BB%D0%B5%D1%87%D0%BD%D1%8B%D0%B9_%D0%9F%D1%83%D1%82%D1%8C#/media/Файл:Milky_way_profile-ru.svg](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9C%D0%BB%D0%B5%D1%87%D0%BD%D1%8B%D0%B9_%D0%9F%D1%83%D1%82%D1%8C#/media/%D0%9C%D0%BB%D0%B5%D1%87%D0%BD%D1%8B%D0%B9_%D0%9F%D1%83%D1%82%D1%8C#/media/%D0%9C%D0%BB%D0%B5%D1%87%D0%BD%D1%8B%D0%B9_%D0%9F%D1%83%D1%82%D1%8C#/media/%D0%9C%D0%BB%D0%B5%D1%87%D0%BD%D1%8B%D0%B9_%D0%9F%D1%83%D1%82%D1%8C#/media/%D0%9C%D0%BB%D0%B5%D1%87%D0%BD%D1%8B%D0%B9_%D0%9F%D1%83%D1%82%D1%8C#/media/Файл:Milky_way_profile-ru.svg)

https://www.reddit.com/r/space/comments/cadmap/i_annotated_a_shot_of_the_milky_way_so_you_can/

<https://www.cloudynights.com/topic/79566-light-gathering-vs-magnitude/>

<http://www.astro-pat.com/StarClusters/GlobComparison-040409.htm>

<https://sci.esa.int/web/gaia/-/60211-gaia-s-globular-clusters-and-dwarf-galaxies-with-orbits>

<https://calgary.rasc.ca/globulars.htm>

<https://fis.wikireading.ru/1785>

https://www.researchgate.net/figure/m-F275W-vs-m-F275W-m-F814W-CMD-of-NGC-2808-The-m-F275W-F336W-F814W-against_fig1_277145075

arXiv:1505.05934v1

<https://phys.org/news/2009-12-vampires-collisions-rejuvenate-stars.html>

http://www2.naic.edu/~pfreire/GCpsr_121008.html

<https://iopscience.iop.org/article/10.1086/312356/fulltext/995465.fg1.html>

<https://www.slideserve.com/dolan/ne-utron-capture-elements-in-m15>

arXiv:1110.0484 [Structure and Dynamics of the Globular Cluster Palomar 13](#)

<https://ned.ipac.caltech.edu/level5/Harris2/Harris1.html>

<https://postnauka.ru/faq/6482>

Work in collaboration with [F. Paresce \(INAF\)](#) and [L. Pulone \(Obs. Rome\)](#)

Constraints on Secular Evolution from Star Clusters in Spirals and Lenticulars

[Jean P. Brodie](#) UCO/Lick Observatory University of California Santa Cruz

<https://www.icrar.org/globularclusterformation/>

<https://arxiv.org/abs/1801.05818>

<http://www.mpia.de/homes/stein/EPoS/2012/2012obje.php>

https://www.ast.cam.ac.uk/~vasily/Lectures/SDSG/sdsg_7_clusters.pdf

Stellar Dynamics and Structure of Galaxies 2016r Vasily Belokurov

<https://phys.org/news/2017-09-pulsar-jackpot-reveals-globular-cluster.html>

1212.5071 Dynamical age differences among coeval star clusters as revealed by blue stragglers

2004r Star Clusters and Stellar Dynamics

2011r School of Astrophysics \Francesco Lucchin« Dynamical Evolution of Globular Clusters

<http://www.astro.ljmu.ac.uk/~astjpfef/e-mosaics/downloads>

Спасибо за внимание!



Семенец Николай 16.11.2019г, СПАГО, г.Санкт-Петербург