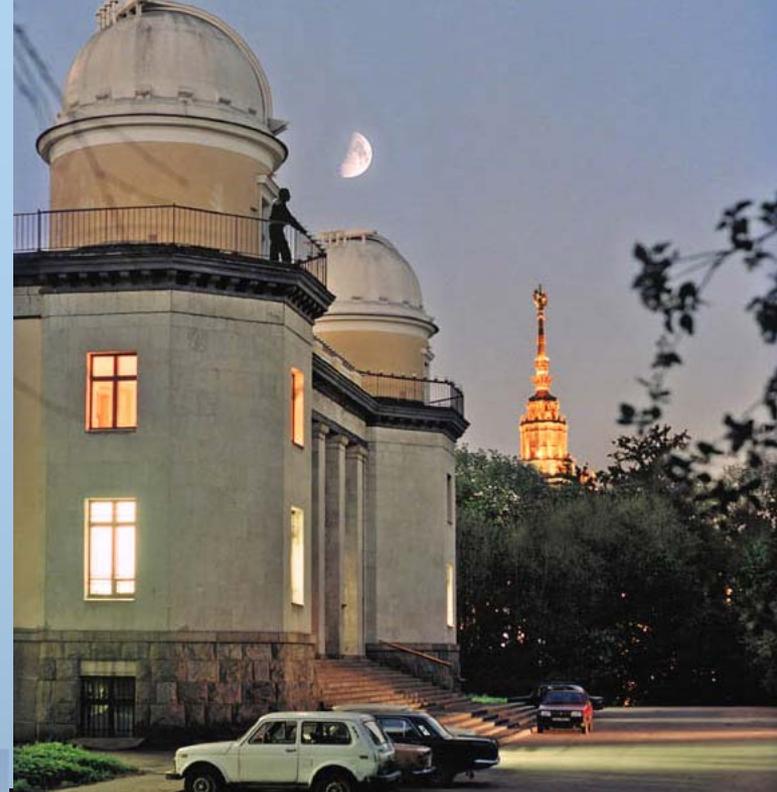


Звездные скопления

Расторгуев Алексей Сергеевич,

*д.ф.-м.н., зав. отделом ГАИШ МГУ и
проф. физического факультета МГУ им.
М.В.Ломоносова*

<http://lnfm1.sai.msu.ru/~rastor>



- Краткое содержание:
 - Что такое "скопление звёзд" ?
 - Жизнь звёзды
 - Возрасты и расстояния
 - Звёздные скопления - "летописцы"
Галактики
 - Разные типы скоплений
 - Звёздные "колыбели"
 - Рождение звёздных скоплений
 - Жизнь и смерть звёздных скоплений

- Единицы измерения расстояний:
- $1 \text{ а.е.} \approx 150 \text{ млн. км}$
- $1 \text{ пк} \approx 3 \cdot 10^{13} \text{ км} \approx 30000 \text{ млрд. км} \approx 3.26 \text{ св. года}$
- $1 \text{ кпк} = 1000 \text{ пк}$

- Единица измерения массы (Солн. масса):
- $1 M_{\text{Sun}} \approx 2 \cdot 10^{33} \text{ г}$

- Полная мощность излучения Солнца:
- $L_{\text{Sun}} \approx 4 \cdot 10^{33} \text{ эрг/с} \approx 4 \cdot 10^{20} \text{ ТВт}$

Что такое "звёздное скопление"?

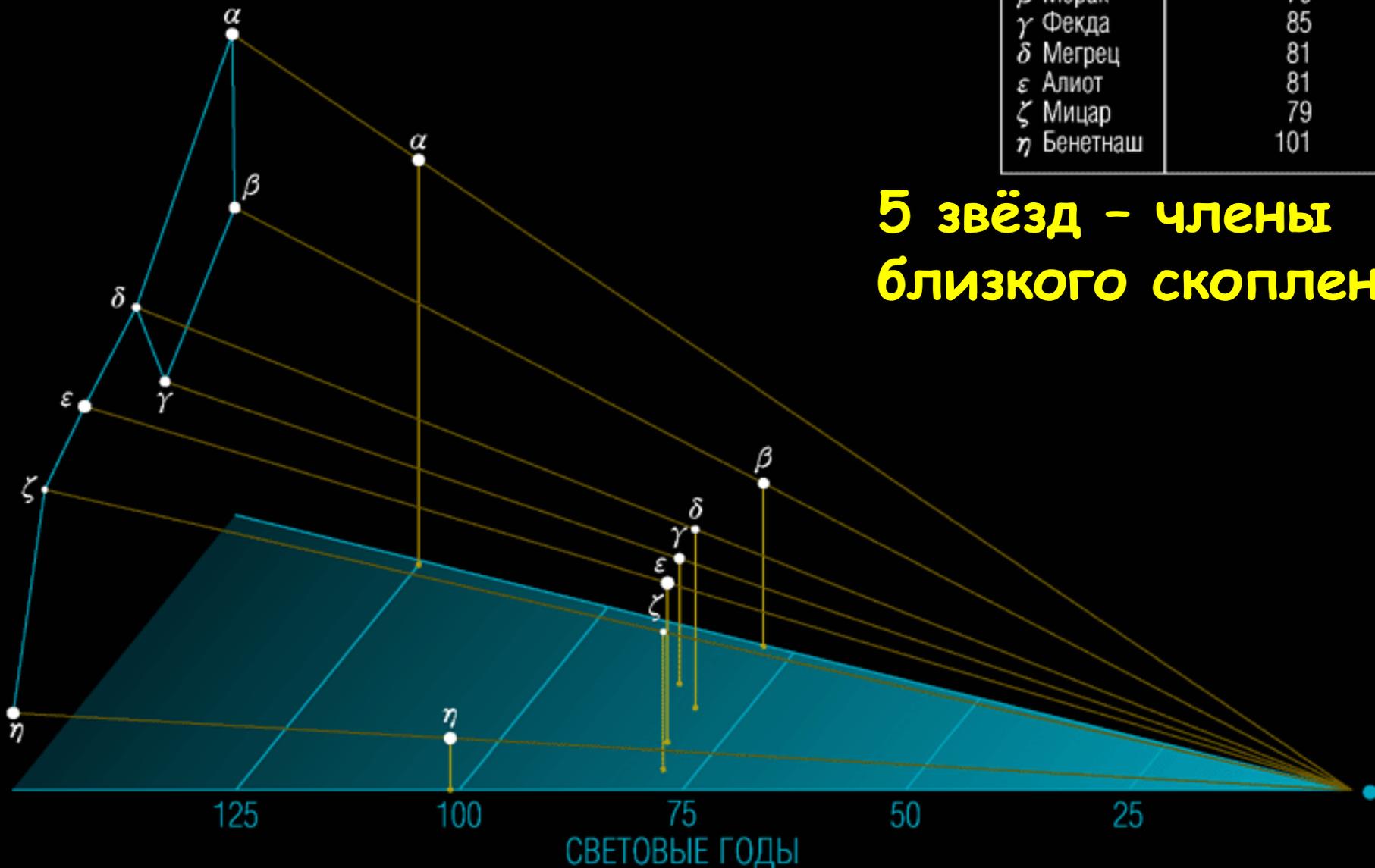
Чем скопление отличается от созвездия и звёздной ассоциации ?

- **Созвездия (asterism)** - в подавляющем большинстве случаев - случайные группировки не связанных между собой звёзд на небе (с разными расстояниями от Солнца)
- Глаз выделяет их по достаточно высокому **видимому** блеску звёзд

Созвездие Б.Медведицы

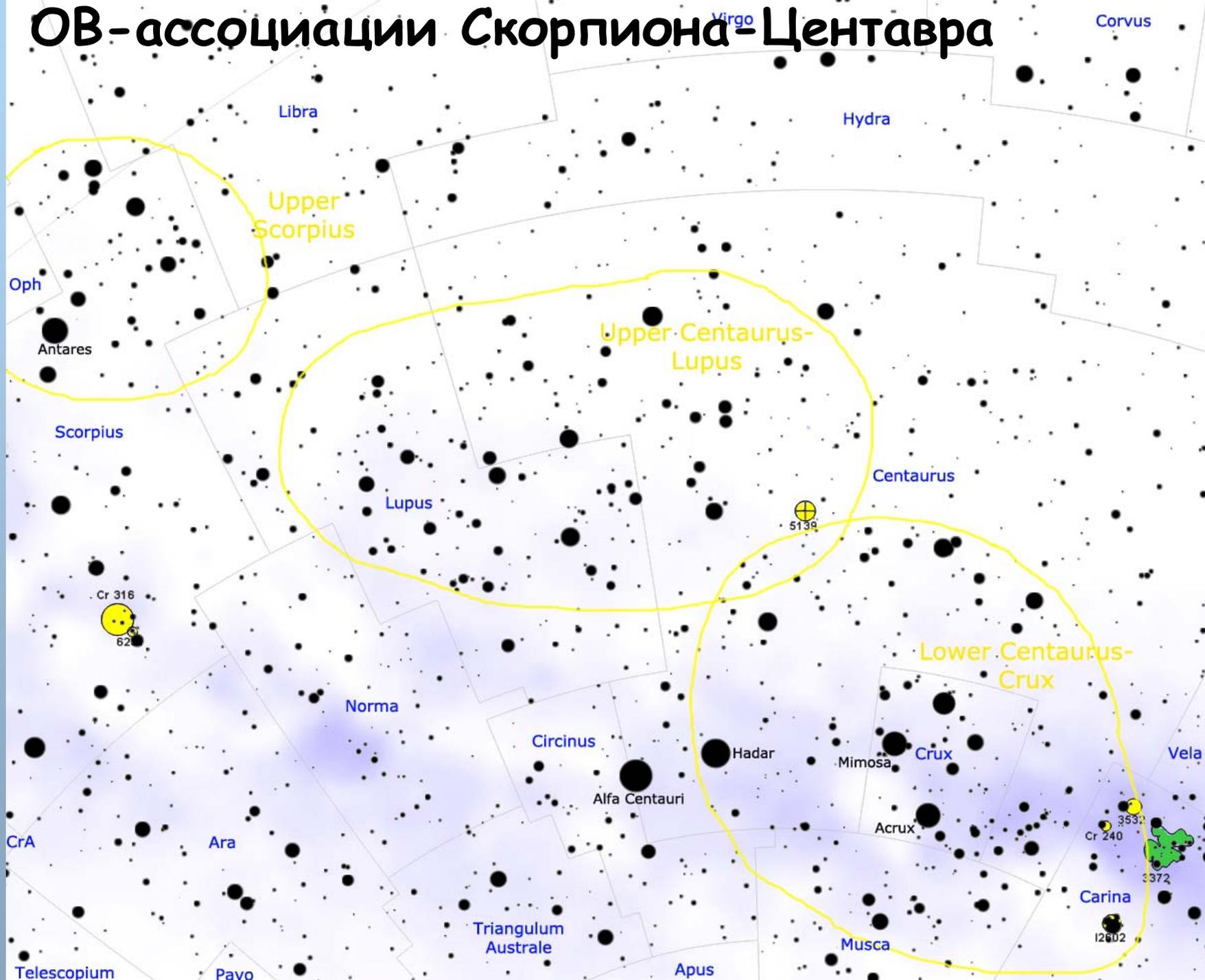
Звезда	Расстояние до Земли (световые годы)
α Дубхе	125
β Мерак	79
γ Фекда	85
δ Мегрец	81
ϵ Алиот	81
ζ Мицар	79
η Бенетнаш	101

**5 звёзд - члены
близкого скопления**



- **Звездные ассоциации** (OB, T) - обширные ($d \sim 100 - 300$ пк) неустойчивые группы крайне молодых OB-звезд или звёзд типа T Тельца, возникших из одного ГМО (гигантского молекулярного облака), но не связанных взаимной гравитацией. Со временем они разлетаются.
- Иногда в области ассоциации возникают и звёздные скопления

OB-ассоциации Скорпиона-Центавра



- **Звездные скопления** (рассеянные - РЗС, шаровые - ШЗС) - богатые ($N > 100 \dots 10000$) гравитационно-связанные, т.е. устойчивые, компактные группы звёзд ($d \sim 1 - 10$ пк).
- Основная роль принадлежит самогравитации скопления: звёзды движутся в создаваемом ими самими поле тяготения.
- Большинство ЗС хорошо выделяются на небе среди других звёзд и прекрасно подходят для любительских наблюдений

Пример: яркие молодые богатые РЗС χ и h Per



~ 20000 звёзд

Пример: Шаровое скопление M80 = NGC6093



Миллионы звёзд !

Открытие звездных скоплений

- Начало - XVII век, эра телескопов
- **Н.Лакайль** (южное небо)
- **Ш.Мессье** (искал кометы и нашел 57 ЗС)
- **В.Гершель** (открыл более 2500 туманностей и скоплений; за два года открыл столько ЗС, сколько было открыто за 174 года до него)
- **К началу XIX века было открыто 200 рассеянных и 71 шаровое скопление**
- **Сейчас в Млечном Пути известно ~160 шаровых и ~2300 рассеянных звёздных скоплений, и их продолжают открывать**

Природа звёздных скоплений

- **Митчел (1767)**: группа ярких звёзд Плеяд не может быть эффектом случайной проекции (очень малая вероятность случайного скучивания похожих звёзд)
- **Хаггенс (1865)**: спектры многих далёких не разделяемых на отдельные звёзды "скоплений" - типично звёздные

Почему звёздные скопления особенно важны для науки ?

- Звёзды скопления сформировались совместно (в результате гравитационной фрагментации - сжатия газа в прародительском гигантском молекулярном облаке)
- **У звёзд - членов скопления:**
 - Одинаковое расстояние от Солнца
 - Практически одинаковый возраст
 - Почти одинаковый химический состав
- Поэтому их видимые различия (по блеску и цвету) объясняются различием масс звёзд и стадий звёздной эволюции
- Возраст отдельной звезды редко определяется однозначно (химизм, расстояние, ...)
- Большинство физических характеристик скопления (расстояния, возрасты, поглощение света и т.д.) определяется *значительно точнее, чем для индивидуальных звёзд*

Dimensions: 82500. AU

Time: 73101. yr



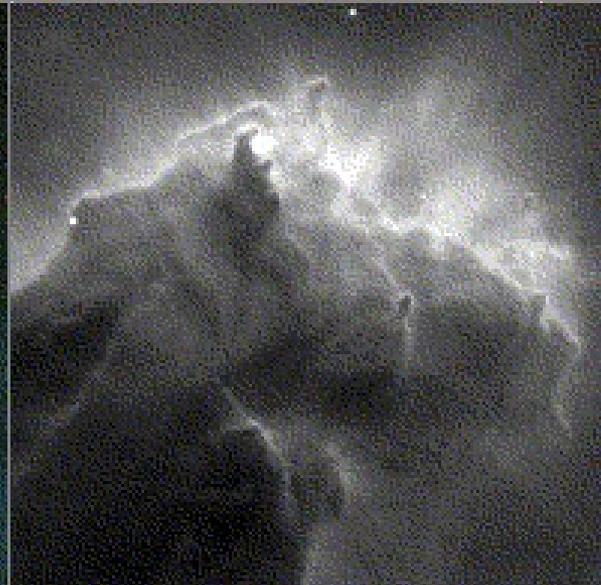
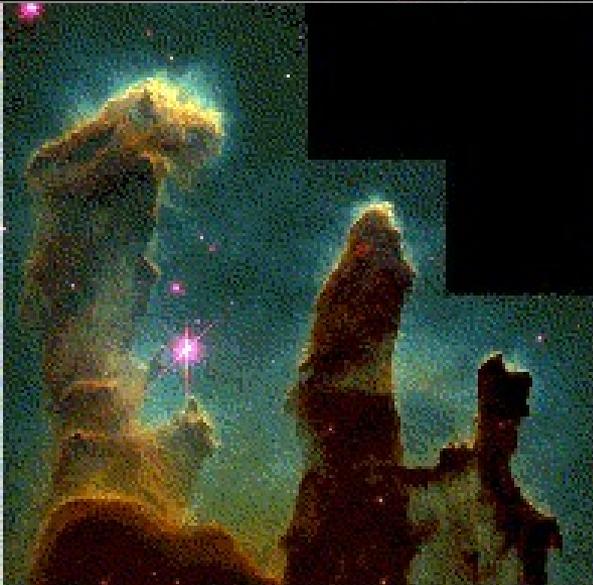
Модель коллапса
и фрагментации
молекулярного
облака

Масса $\sim 500 M_{\text{Sun}}$
Размер ~ 0.8 пк
Весь цикл
 ~ 240 тыс. лет

-1.4 -1.2 -1.0 -0.8 -0.6 -0.4 -0.2 0.0

Log Column Density [g/cm^2]

Matthew Bate



Наблюдаем рождение звёзд
в молекулярном газе (наблюдения
звёздных "коконов" в ИК и радио)

Скопление М 16
и молекулярный газ
в туманности
Орёл = IC 4703

NGC 6067

Возраст ~300 млн. лет

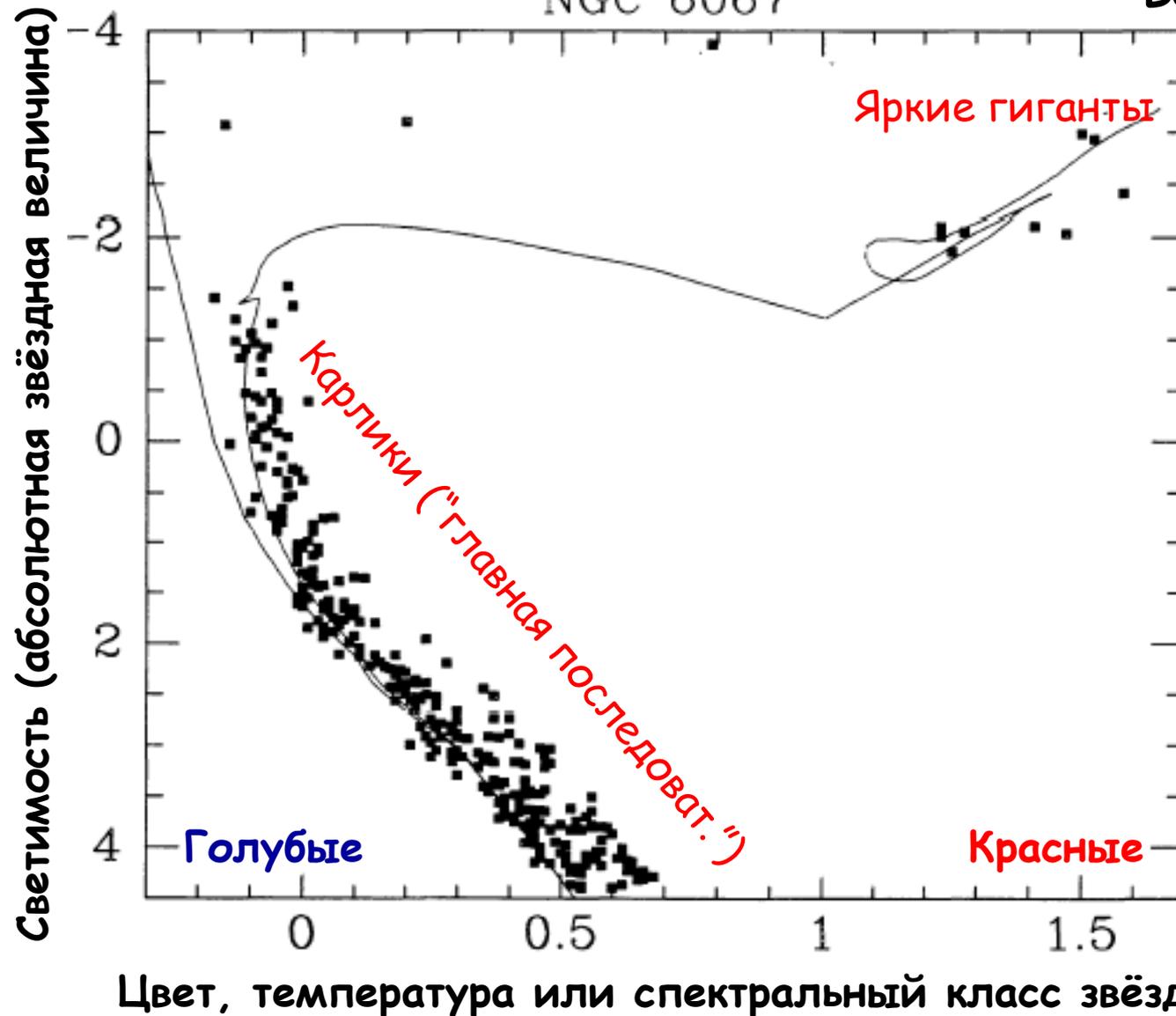
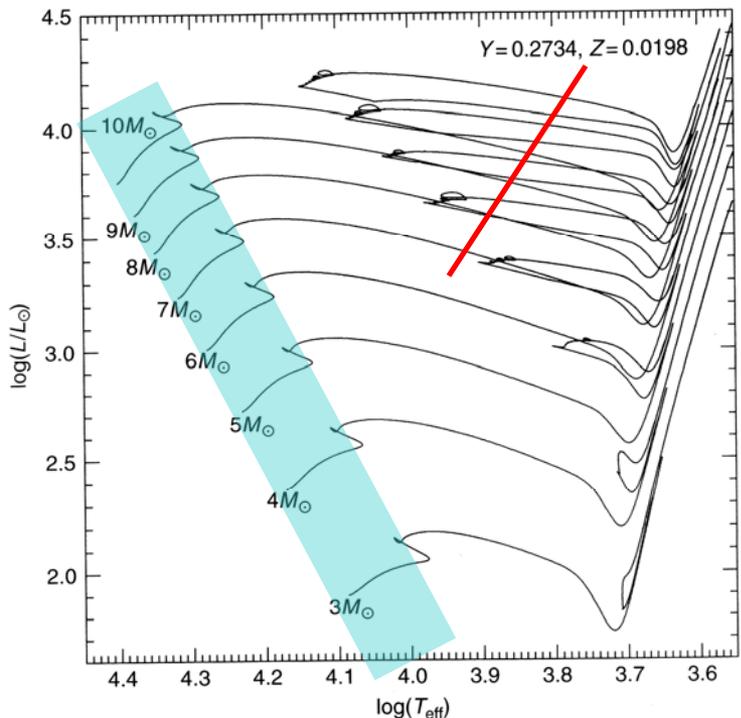


Диаграмма Герцшпрунга-Рассела (ГР): основной инструмент изучения звёздного населения Галактик и звёздных скоплений

Возраст и расстояние оцениваются по виду ГР методом наложения *теоретических изохрон*

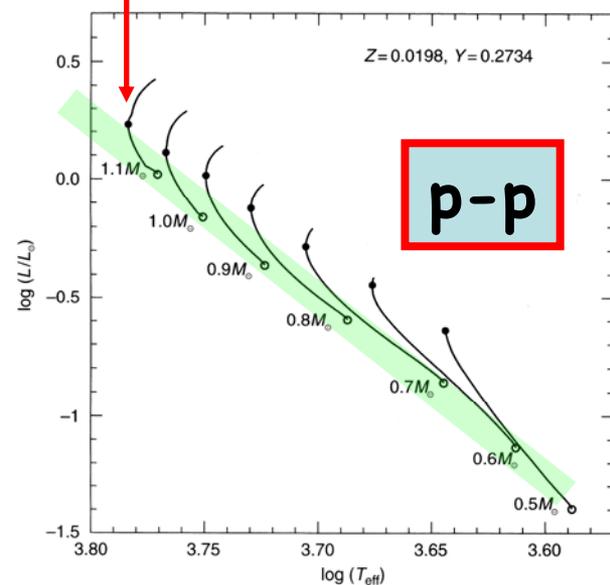
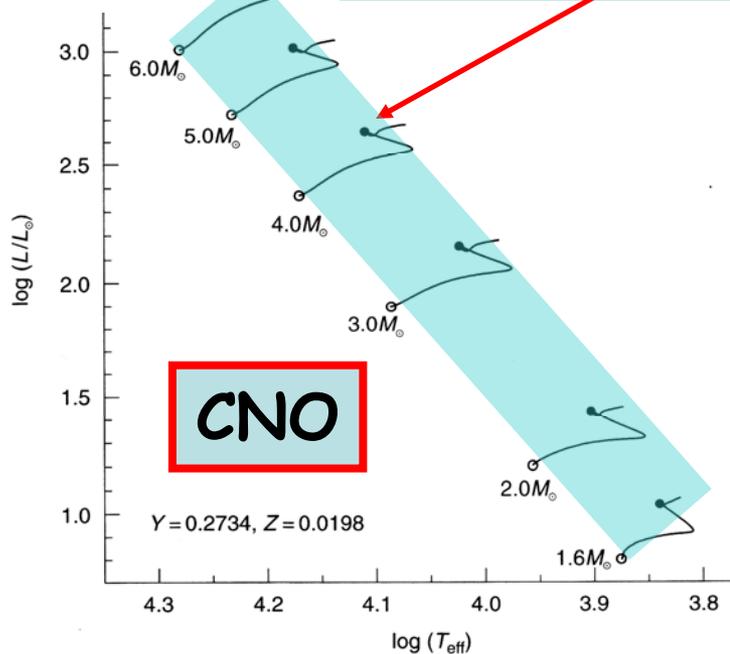
- Принципы оценки возраста звёздных скоплений по виду ГП опираются на простые физические соображения
- Основные идеи:
 - *Начальная* главная последовательность может быть исходно населена звёздами разных масс, от самых малых ($\sim 0.1 M_{\text{Sun}}$) до очень больших ($\sim 10-100 M_{\text{Sun}}$)
 - Полная мощность излучения звезды на ГП зависит от её массы
 - Источник энергии звезды на стадии ГП - термоядерное "горение" водорода, наиболее обильного элемента ($\sim 70\%$ массы)

Треки эволюции от НГПТ (Начальной Главной Последовательности) для звезд малых, умеренных и больших масс с солнечным химсоставом



Конец "горения" водорода

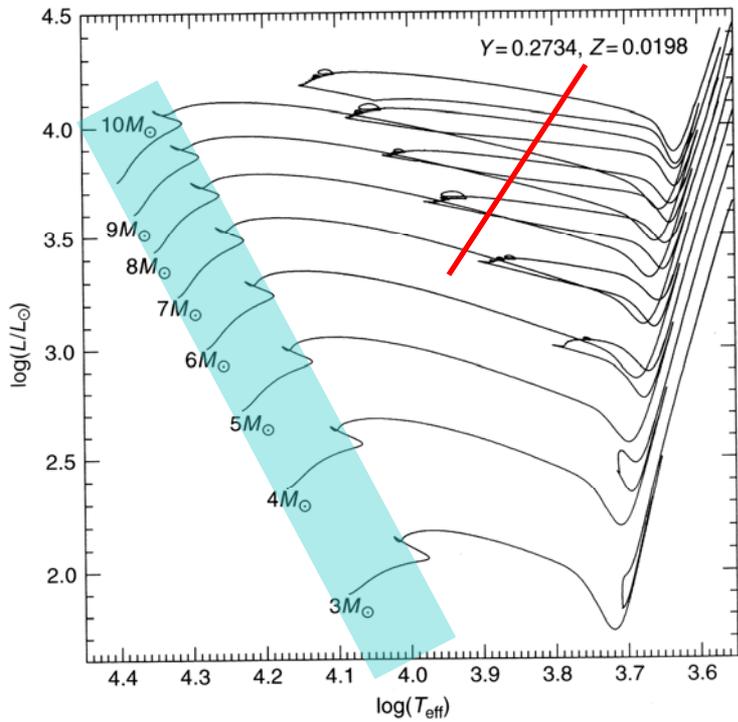
Начальные точки треков лежат на **начальной главной последовательности (НГПТ)**



Треки эволюции от НГПТ

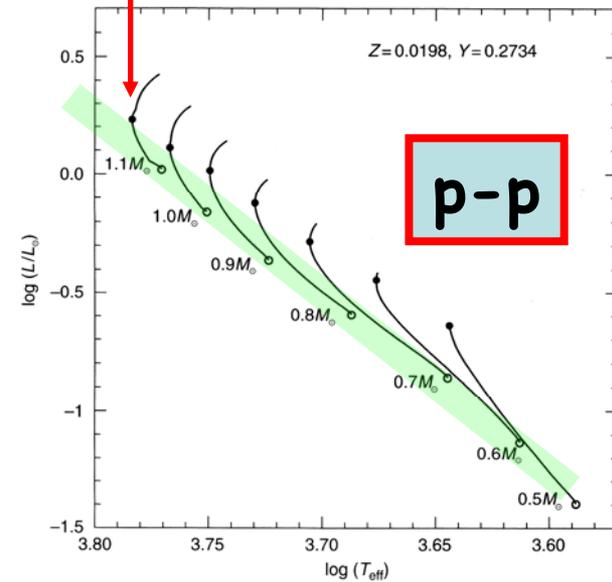
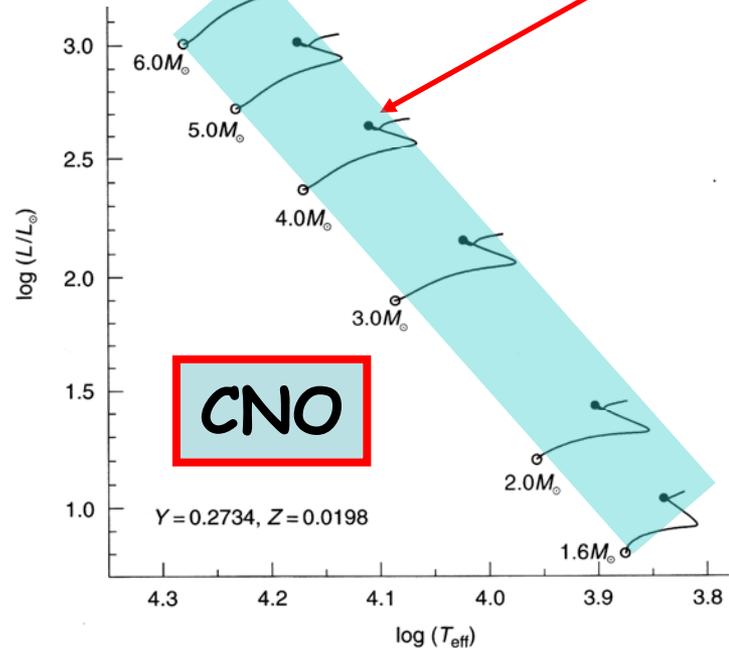
Затенённые области - звёзды, относимые к стадии эволюции на главной последовательности

ХИМСОСТАВОМ



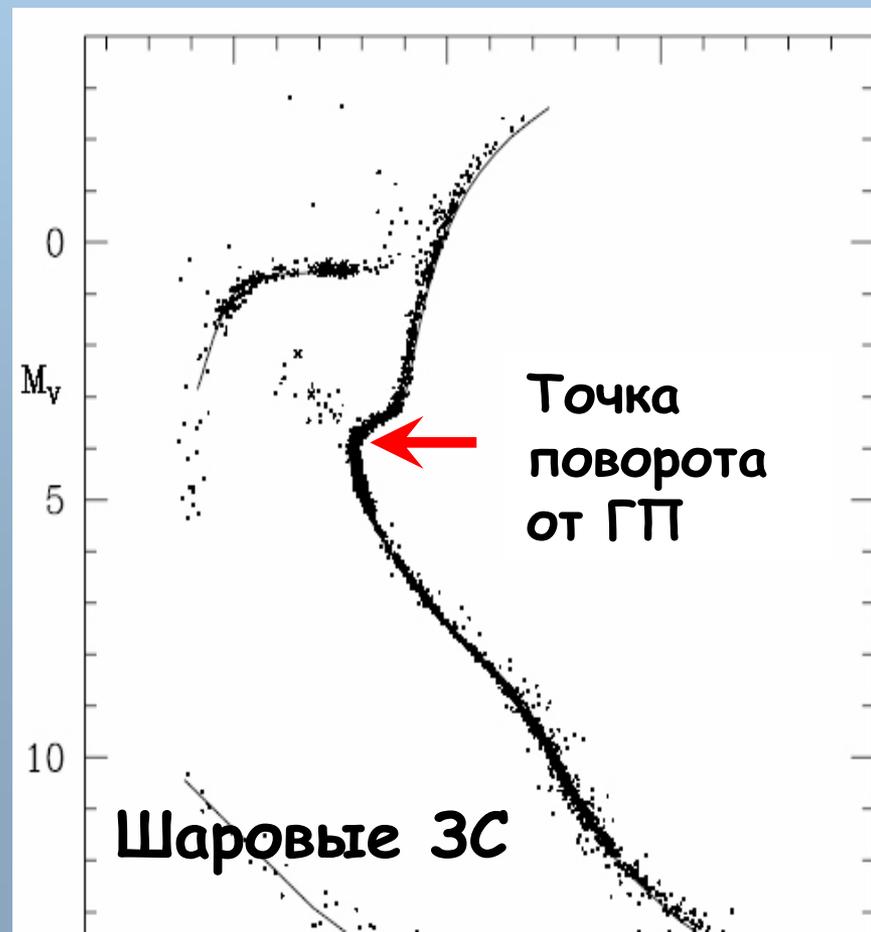
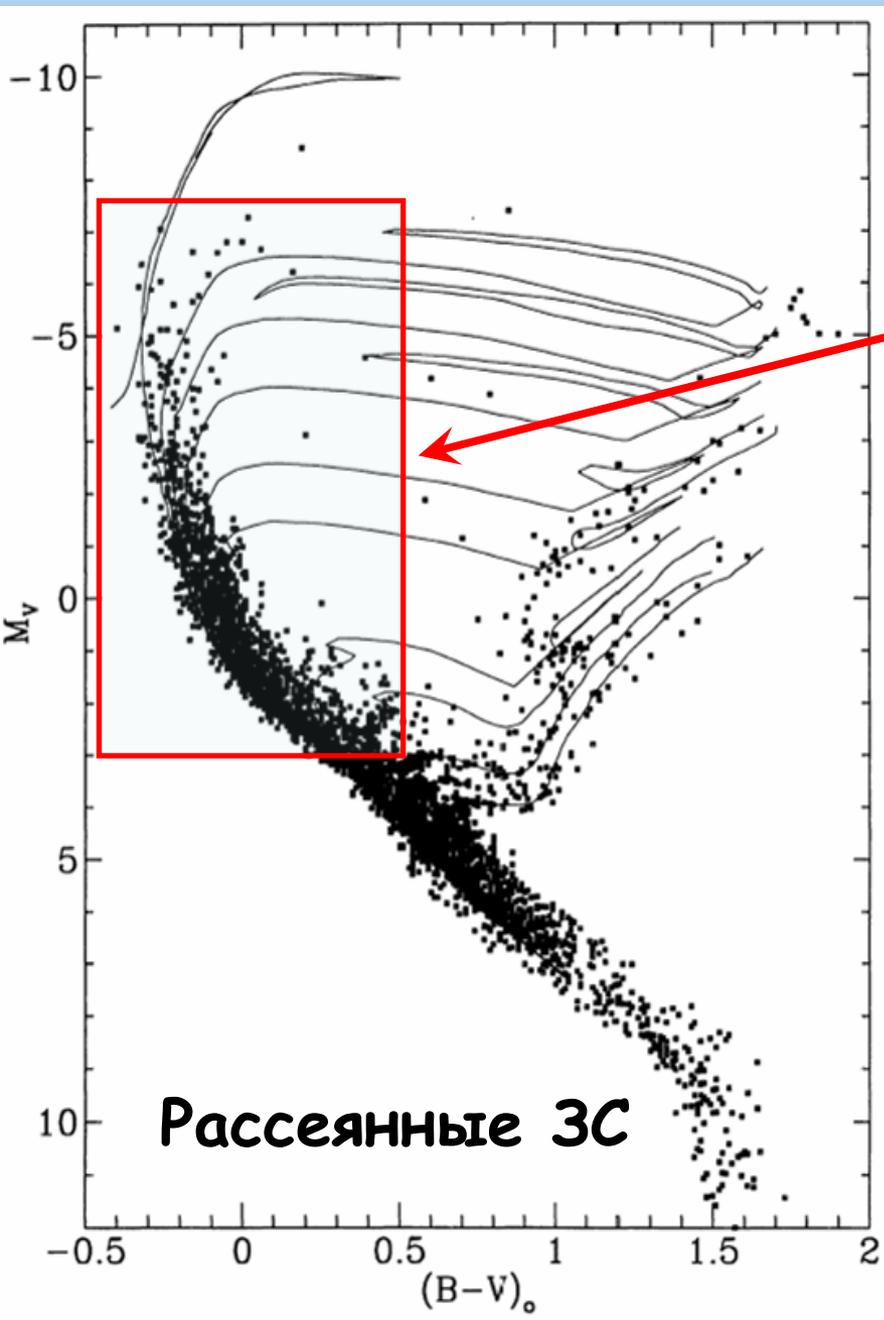
Конец "горения" водорода

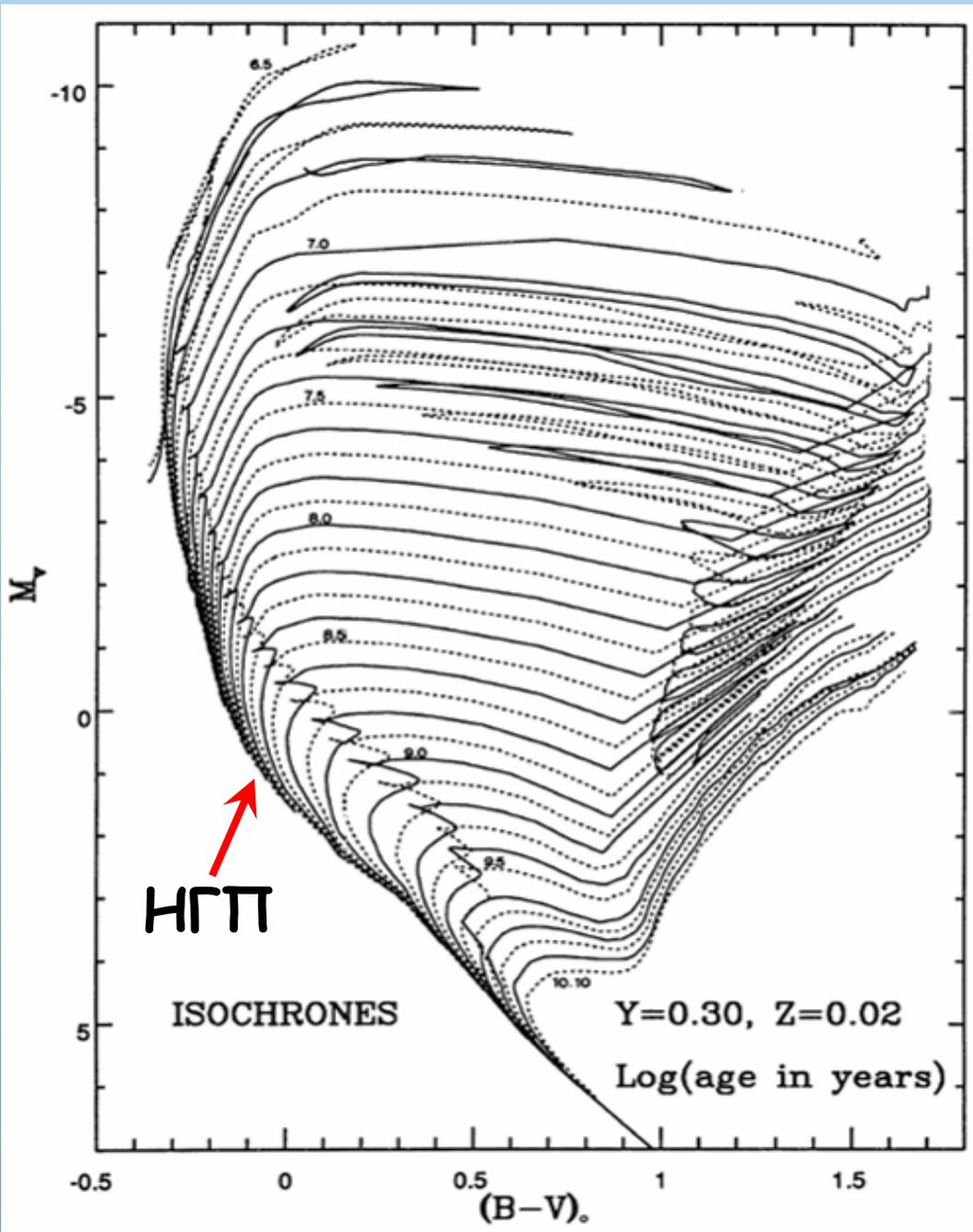
Начальные точки треков лежат на **начальной главной последовательности (НГПТ)**



- В течение "жизни" звезды на ГП в её ядре "сгорает" примерно 10% всей массы водорода, дефект массы реакции $\Delta M/M \approx 0.7\%$ и выделяется полная энергия $E_{\text{ГП}} = \Delta M \cdot c^2 \approx (M/M_{\text{Sun}}) \cdot 10^{51}$ эрг
 - Мощность излучения звезды на ГП $L_{\text{ГП}} \approx (M/M_{\text{Sun}})^3 \cdot 4 \cdot 10^{33}$ эрг/с
 - Значит, время жизни на ГП
 - $T_{\text{ГП}} \approx E_{\text{ГП}} / L_{\text{ГП}} \approx (M/M_{\text{Sun}})^{-2} \cdot 10^{10}$ лет
быстро уменьшается с ростом массы звезды (у Солнца $T_{\text{ГП}} \approx 10$ млрд. лет)
- Следующие стадии эволюции ещё короче

- Отсюда следует простой вывод: в старых (в т. ч. шаровых) звёздных скоплениях на ГП нет ярких голубых (горячих) звёзд





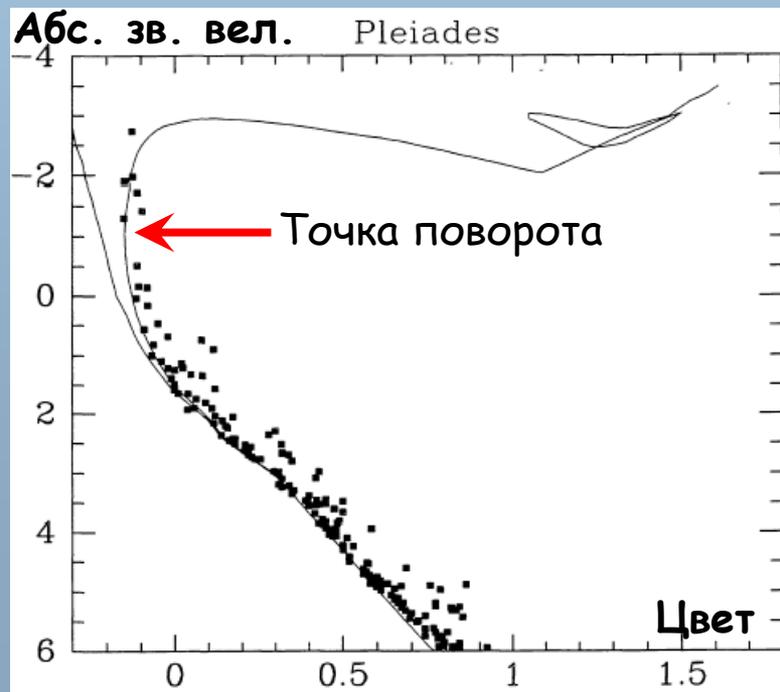
Изохроны на
 диаграмме ГР
 "цвет - светимость"

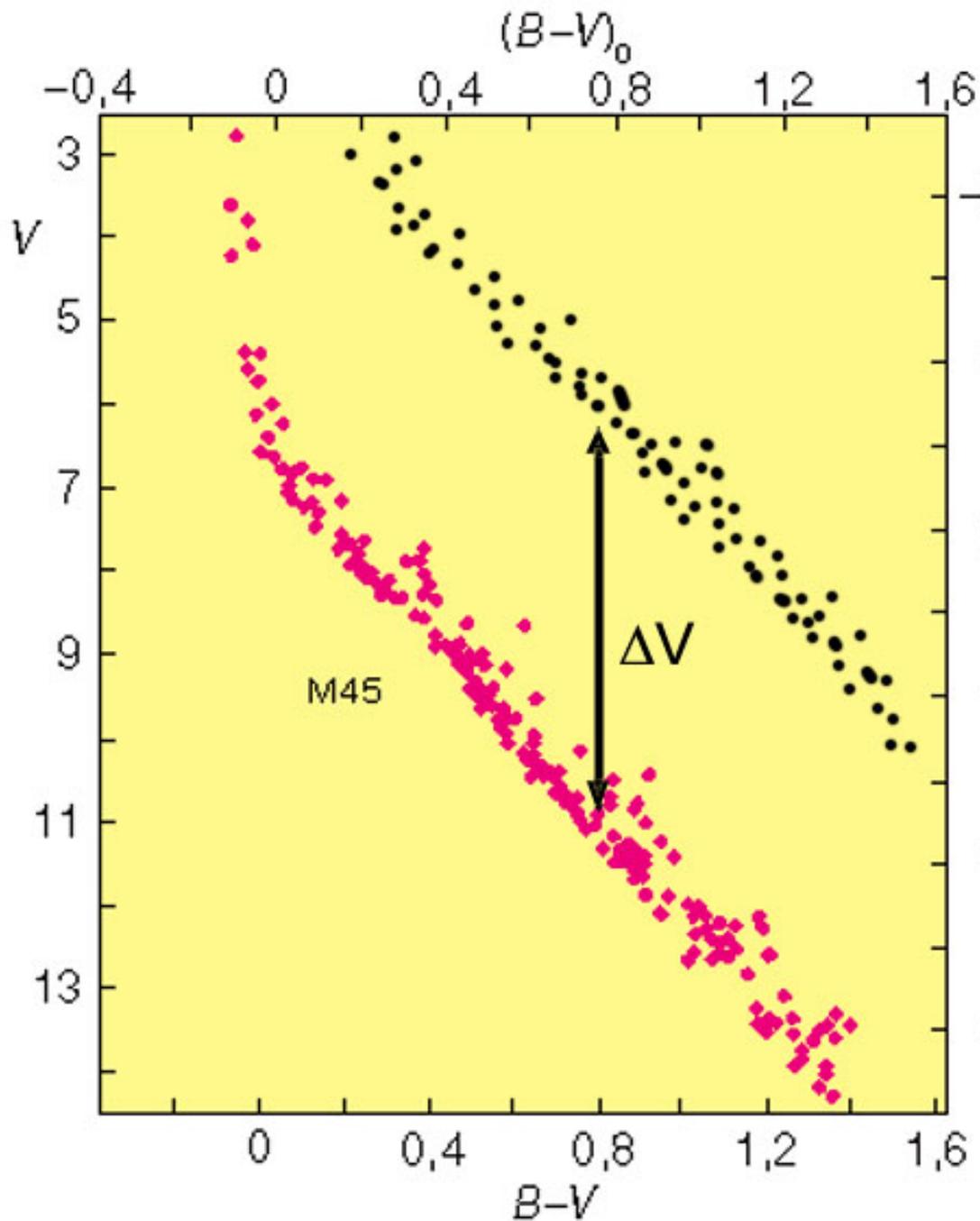
$$(B-V)_0 - M_V$$

НГП - нижняя
 огибающая

Очень важно для астрофизики:

- Звёздные скопления (РЗС, ШЗС) стали самой надёжной основой для проверки и "шлифовки" теории звёздной эволюции
- **Чем старше скопление, тем слабее и краснее звёзды вблизи точки поворота от ГП**
- Подбором подходящей теоретической изохроны возраст скопления может быть оценен весьма точно ($\pm 10\%$)



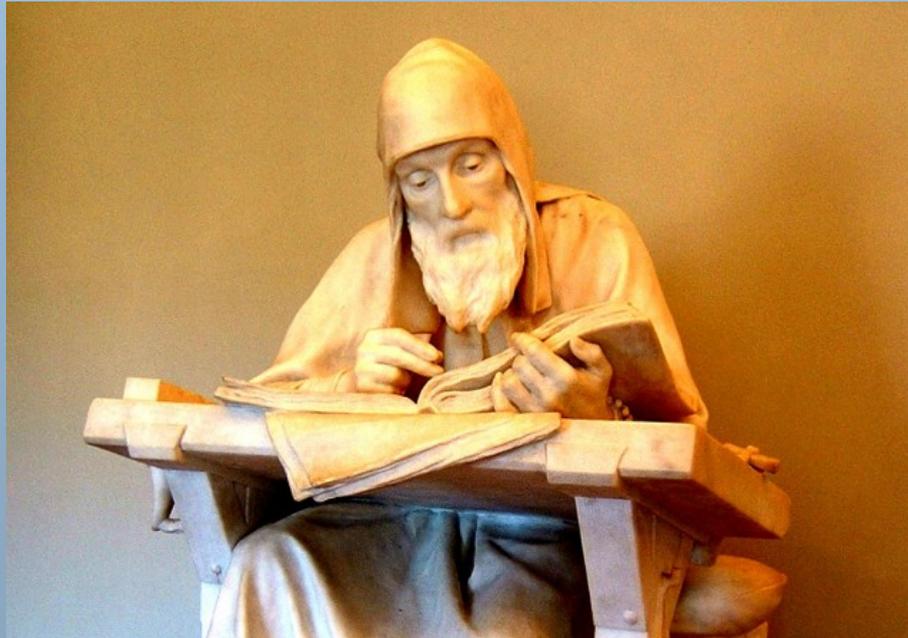


**Звёзды ГП -
"стандартные свечи"
(известен абс. блеск)**

Определение
относительных
расстояний рассеянных
скоплений методом
совмещения главных
последовательностей
на диаграммах ГР:

$$R \text{ (пк)} \approx 10^{0.2(\Delta V + 5)}$$

- Надёжные оценки возрастов и расстояний, спектроскопические данные о химическом составе звёзд и их скоростях, делают звёздные скопления прекрасным средством изучения строения Галактики и распределения массы в ней, её истории, а также свойств орбит различных объектов
- Звёздные скопления - "летописцы" Галактики



- Рассеянное скопление Плеяды (M45) и шаровое скопление M9
- Найдите по крайней мере 4 отличия 😊
(см. следующий кадр)



Фундаментальные различия между рассеянными и шаровыми скоплениями

- **ШЗС – скопления первых поколений:**
 - Возраст больше 8-10 млрд. лет
 - Населяют галактическое гало и в толстый диск
 - Большой дефицит (10-1000-кратный по сравнению с Солнцем) химических элементов тяжелее гелия
 - Как правило, богатые ($10^5 - 10^7 M_{\text{Sun}}$)
- **РЗС – скопления последующих поколений:**
 - Возраст от 100 тыс. лет до 8-10 млрд. лет
 - Это скопления диска Млечного Пути
 - Химический состав не сильно отличается от Солнечного (обилие элементов тяжелее гелия)
 - Как правило, небогатые ($< 10^3 - 10^4 M_{\text{Sun}}$)

Такие разные звёздные скопления

- **Известные:**

Плеяды = M45,
~100 млн. лет, ~120 пк



Гиады = NGC1647
~650 млн. лет, 46 пк



Ясли = Praesepere = NGC2632,
~300 млн. лет, 160 пк

X+h Per = NGC869/884,
~10 млн. лет, ~2.3 кпк



- **Молодые:**

Orion clusters (ближайшая к нам область звездообразования):

NGC2366

NGC6231

NGC6530



Лебедь: NGC6913 (M29)



- все с возрастом от ~2 до 10 млн. лет и, как правило, “погружены” в родительские облака газа



**Молодое
рассеянное
скопление
NGC 3603:
давлением
излучения
в газе
"выдувается"
полость**

• **Старые:**

NGC2682 (M67) 4 млрд. лет →

NGC2243 6 млрд. лет

Melotte 66 6 млрд. лет

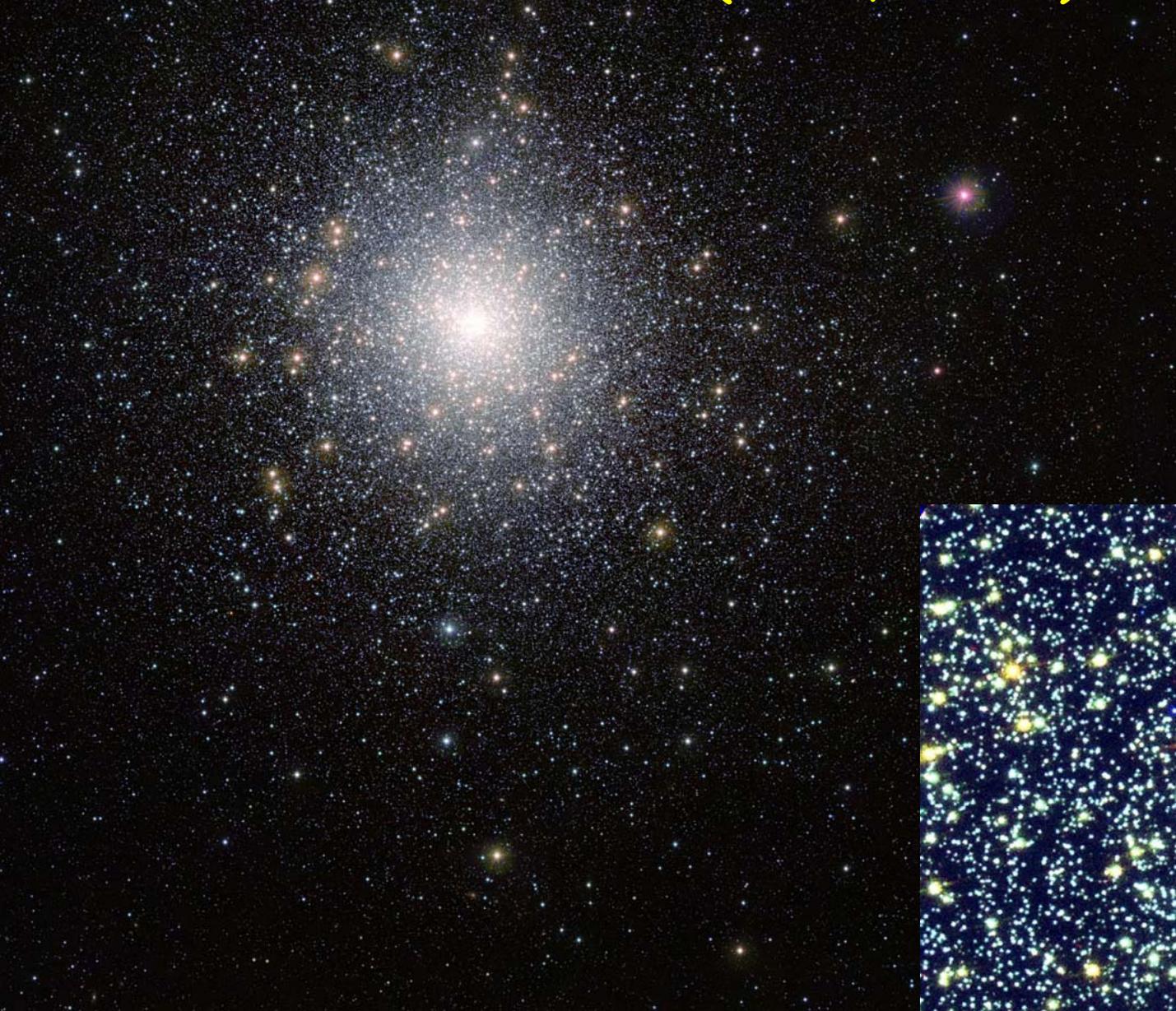
NGC2420 ~10 млрд. лет

NGC188 ~10 млрд. лет →

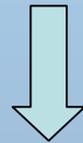
**Вплотную приближаются
к возрасту ШЗС !**



4.2 m телескоп VISTA (ESO, Чили)



Его
плотное
ядро
(HST)



NGC 104 = 47 Tuc

M 80



M 9



Изображения
с HST

M 53

A wide-field Hubble Space Telescope image of the globular cluster M 53. The cluster is densely packed with stars, showing a concentration towards the center. The stars exhibit a variety of colors, including bright white and yellow stars, as well as numerous blue stars scattered throughout the field. The background is dark, making the individual points of light stand out.

M 68

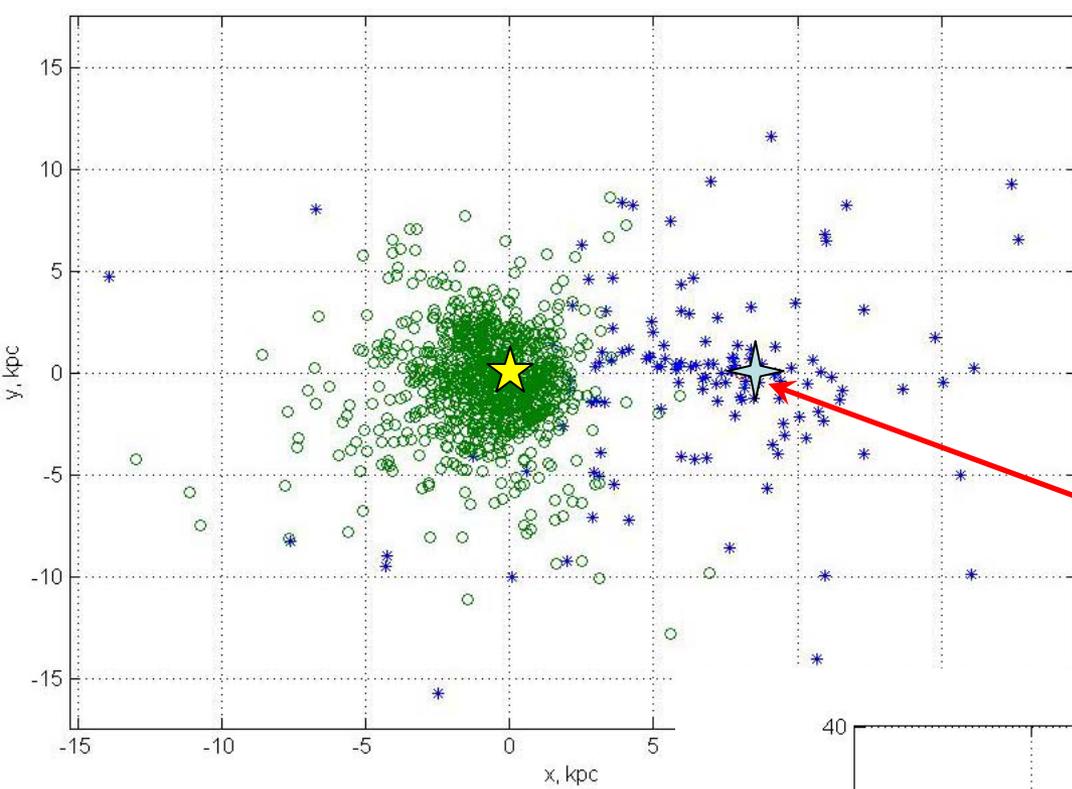
A wide-field Hubble Space Telescope image of the globular cluster M 68. Similar to M 53, it shows a dense concentration of stars. The color distribution is diverse, with many bright white and yellow stars and a significant number of blue stars. The overall appearance is that of a rich, multi-colored stellar population.

VISTA: недавно открытое шаровое скопление
вблизи центра Галактики



VISTA: шаровое скопление NGC 5139 = ω Cen
самое яркое и массивное скопление Млечного Пути
Ядро разрушенной карликовой галактики ?

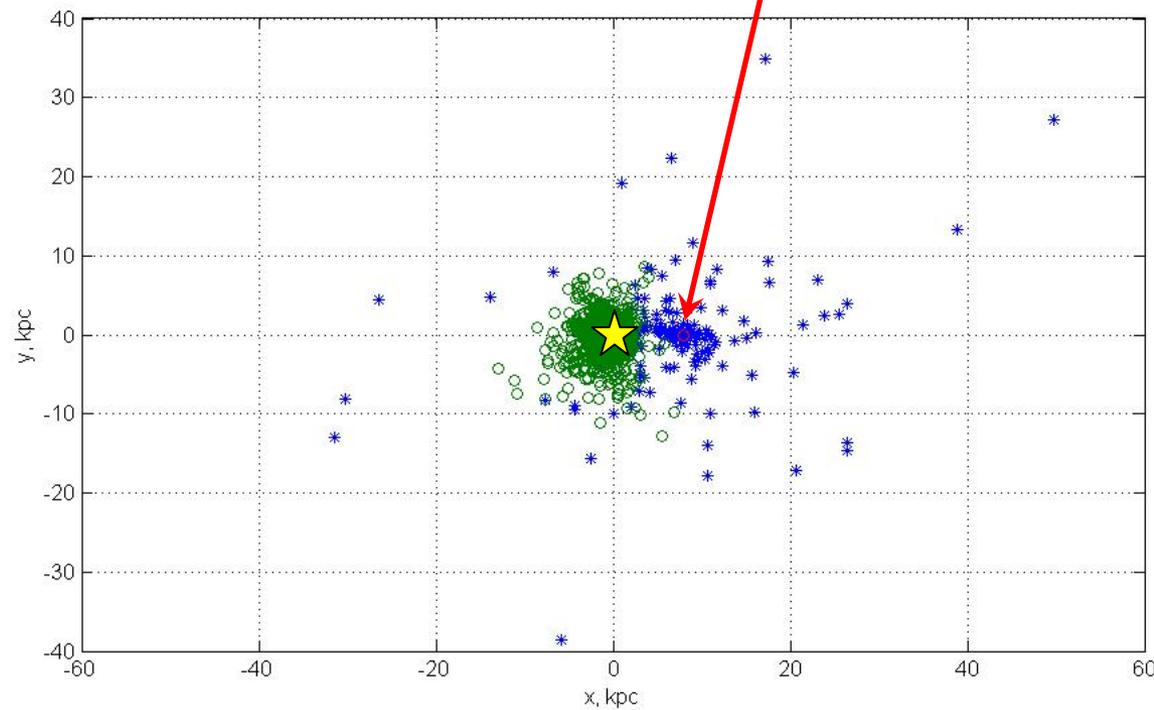


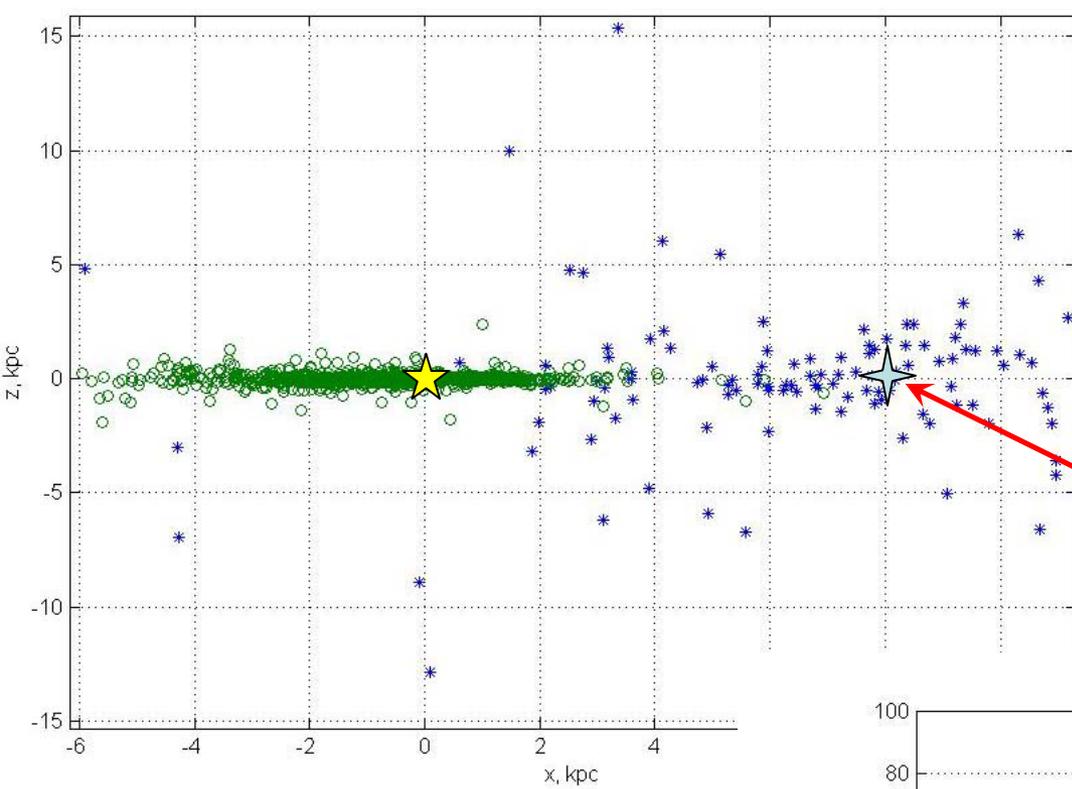


★ - Солнце

Центр Галактики

Распределение
известных
рассеянных
и шаровых
скоплений
в Галактике:
вид "сверху"

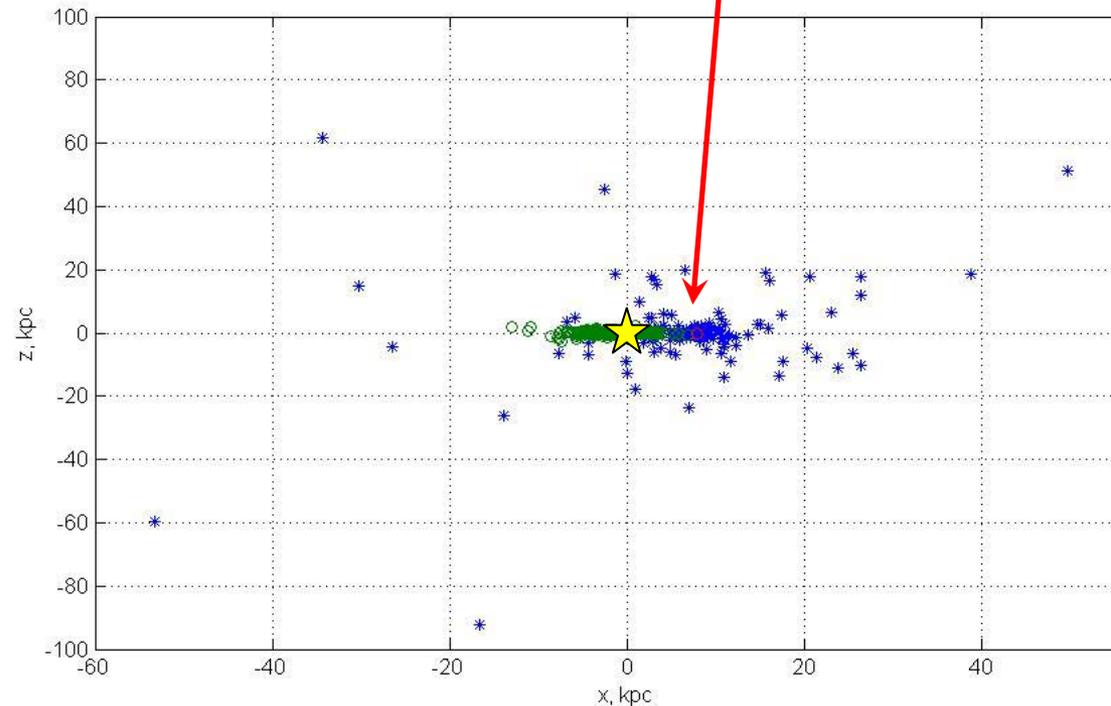




★ - Солнце

Центр Галактики

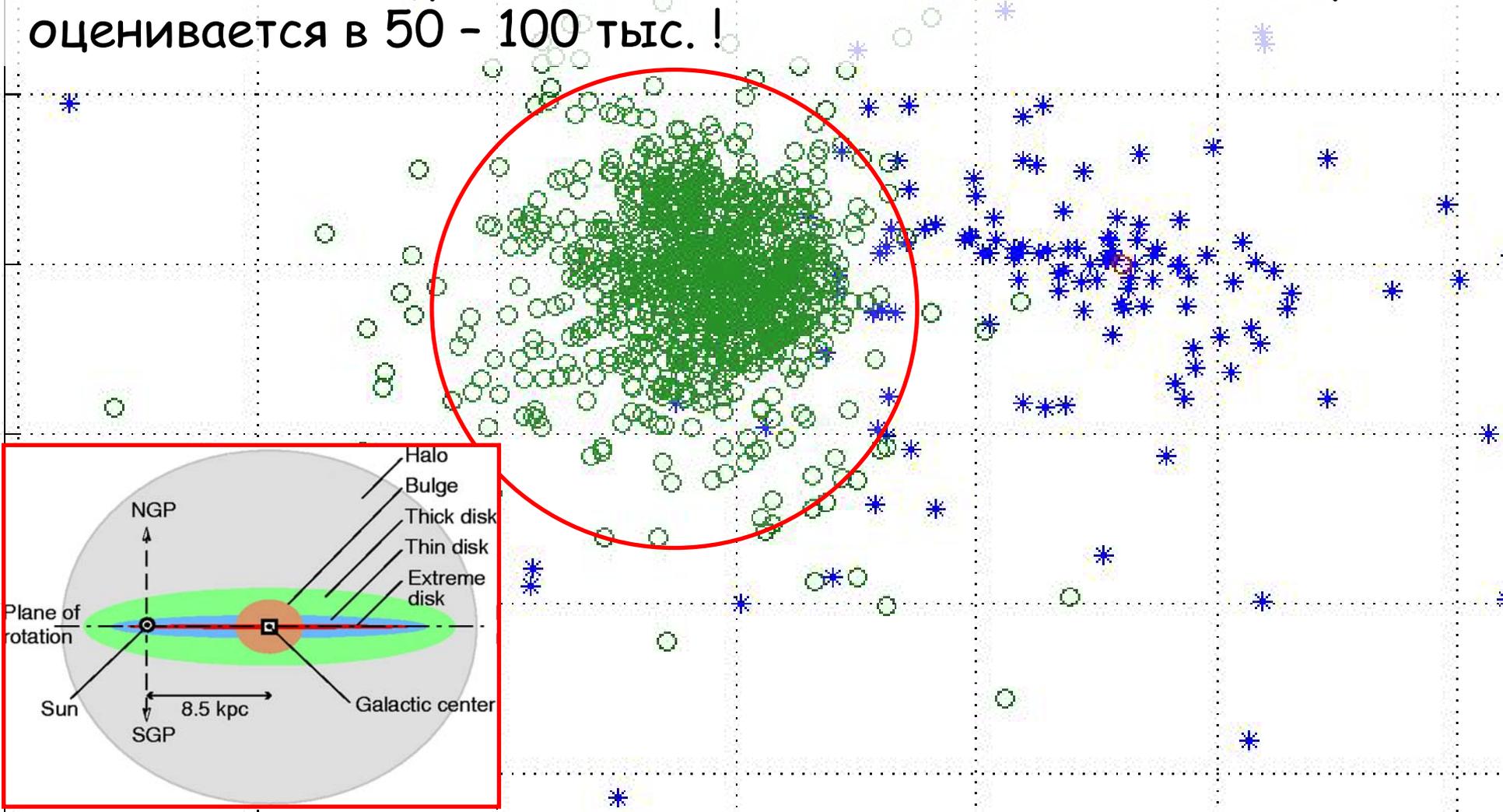
Распределение
известных
рассеянных
и шаровых
скоплений
в Галактике:
вид "сбоку"



Рассеянные скопления населяют диск Млечного Пути
толщиной около 1000 пк

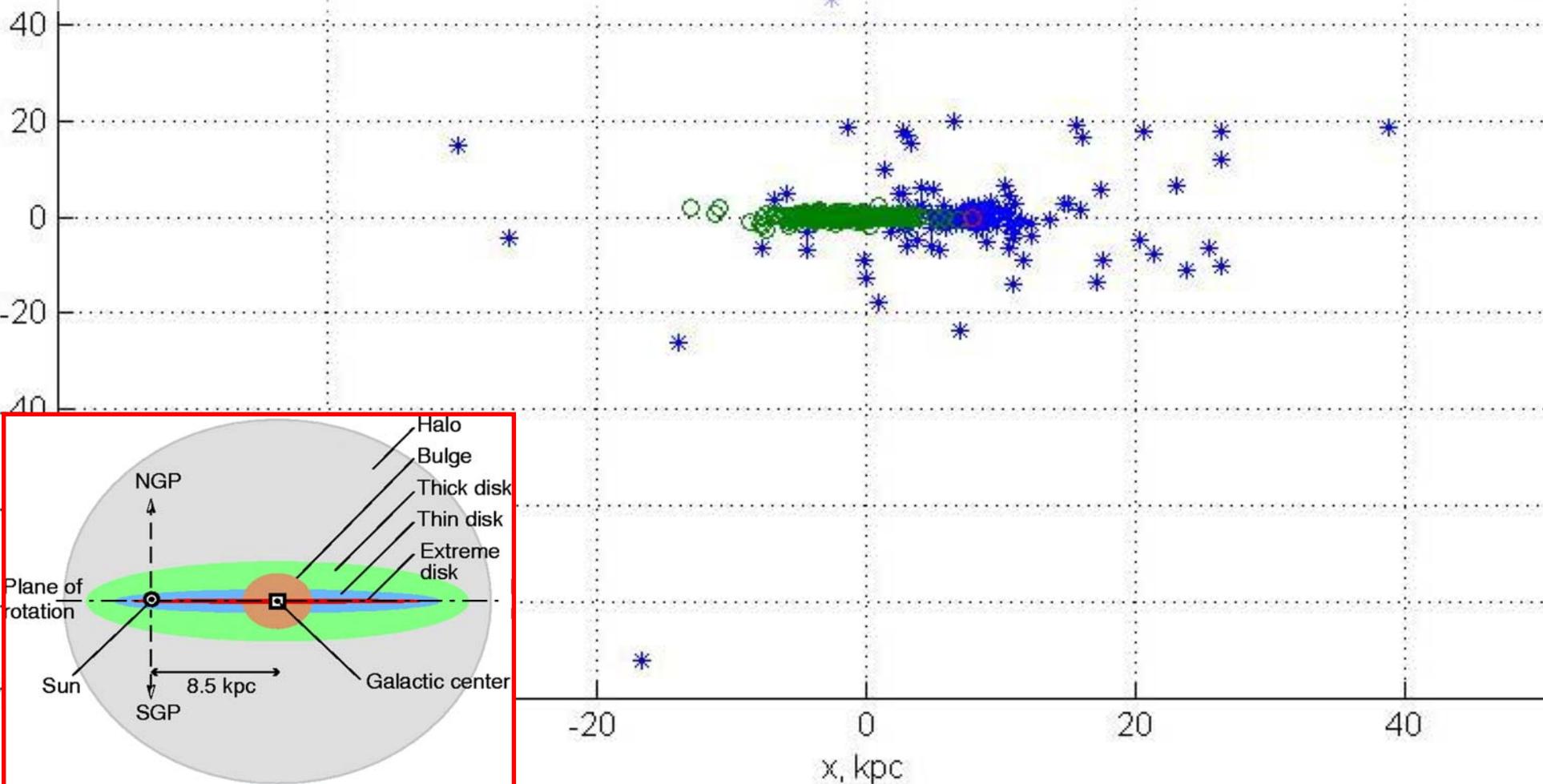
Из-за межзвёздной пыли нам известно всего около 2300
близких скоплений до расстояния около 5 кпк от Солнца

Полное число рассеянных скоплений в Млечном Пути
оценивается в 50 - 100 тыс. !



Шаровые скопления населяют обширное сфероидальное гало Млечного Пути, они есть даже на расстояниях порядка 100 кпк от Солнца

Их известно около 160, а полное число вряд ли больше 200



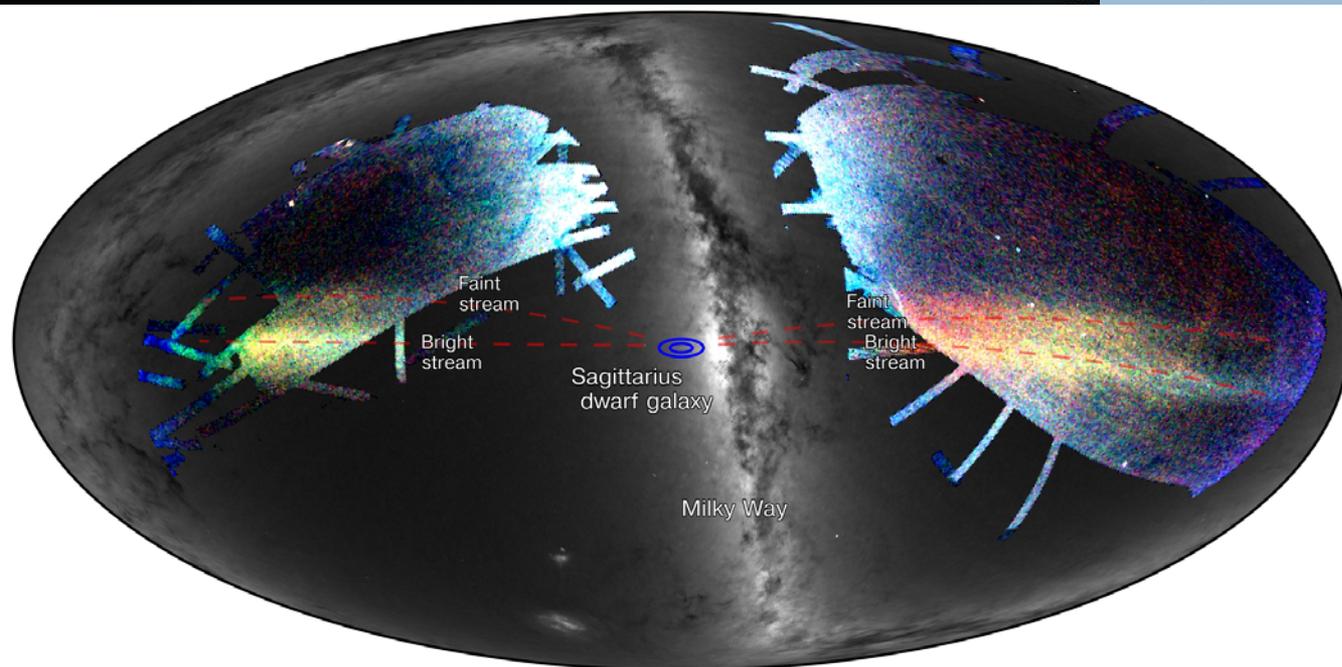
- **Различия в возрасте и обилии тяжёлых хим. элементов:**
- Шаровые скопления - объекты первого поколения
- Рассеянные скопления, звёзды диска - второе поколение, образовавшееся из газа, уже обогащённого тяжёлыми элементами, "выброшенными" при взрывах Сверхновых





Карликовые спутники Млечного Пути

- Примерно 25 - 30% всех шаровых скоплений родились не в Млечном Пути, а в его карликовых спутниках, разрушающихся под действием мощного гравитационного поля Млечного Пути



“Шлейфы”: следы распада карликовой галактики в Стрельце

Звёздные сверхскопления

- Это необычайно компактные и яркие скопления звёзд, обнаруженные как в других галактиках, так и в Млечном Пути
- R136, сверхскопление в туманности Тарантул (Большое Магелланово Облако); в этой туманности вспыхнула Сверхновая 1987

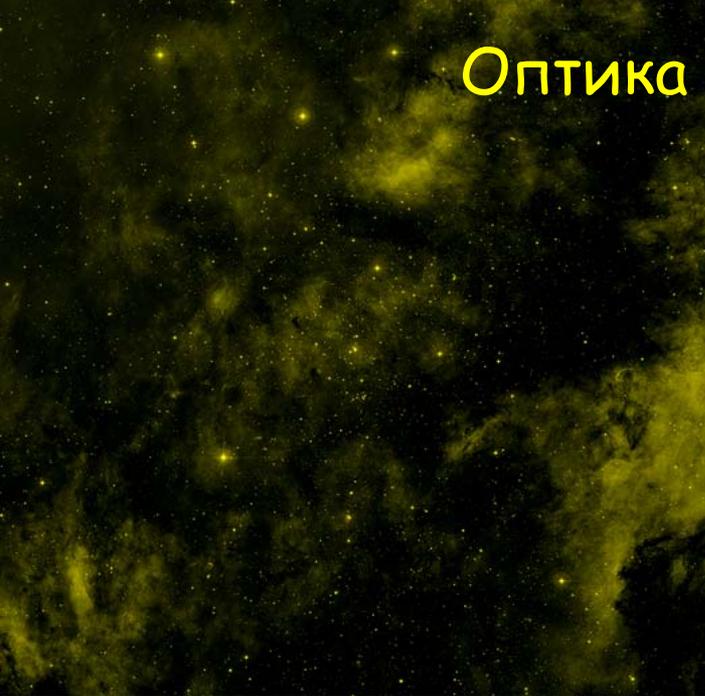




- **R136 во всей красе (HST)**
- Возраст 1-2 млн. лет
- Множество горячих голубых звёзд
- Ярчайшая звезда ярче Солнца в 9 млн. раз, а её масса $\sim 265 M_{\text{Sun}}$
- Считается, что R136 со временем превратится в типичное шаровое скопление

Большую массу звёзд объясняют их слиянием в тесных парах

Оптика

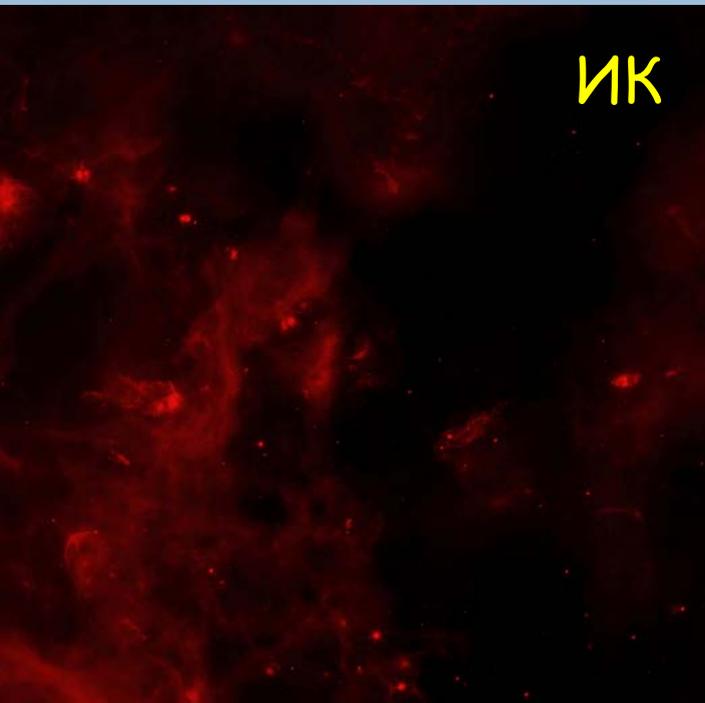


Звёздная
ассоциация
Лебедь OB1:
одно из
самых
массивных
молодых
скоплений
Млечного
Пути

Рентген



ИК

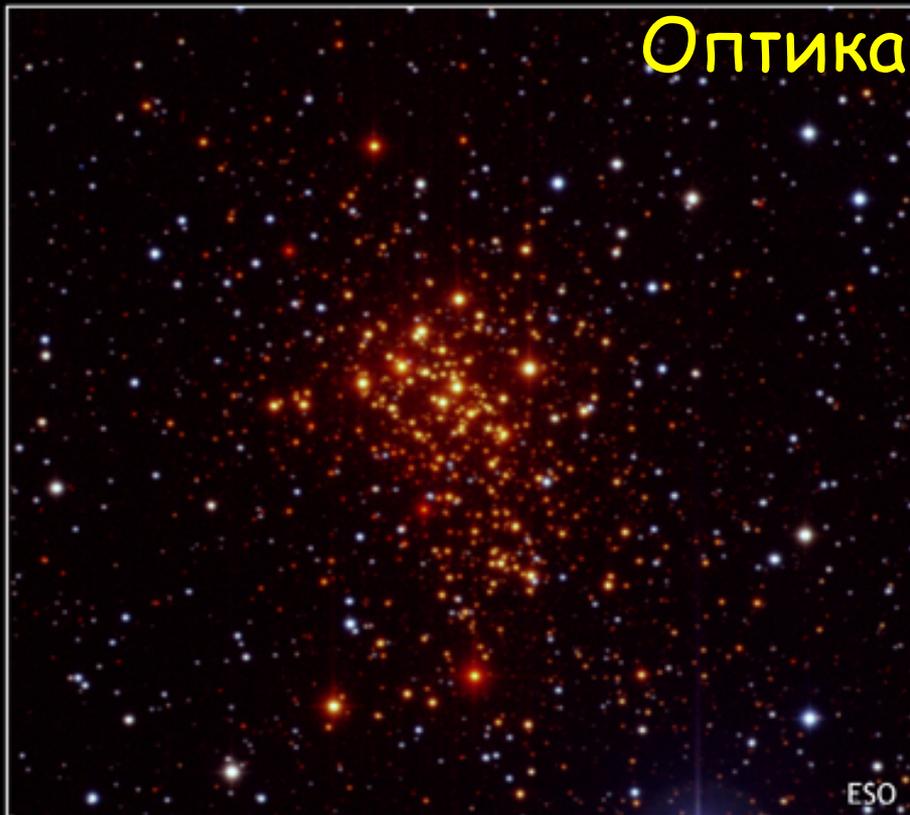


Огромное
поглощение
света пылью

Композиция

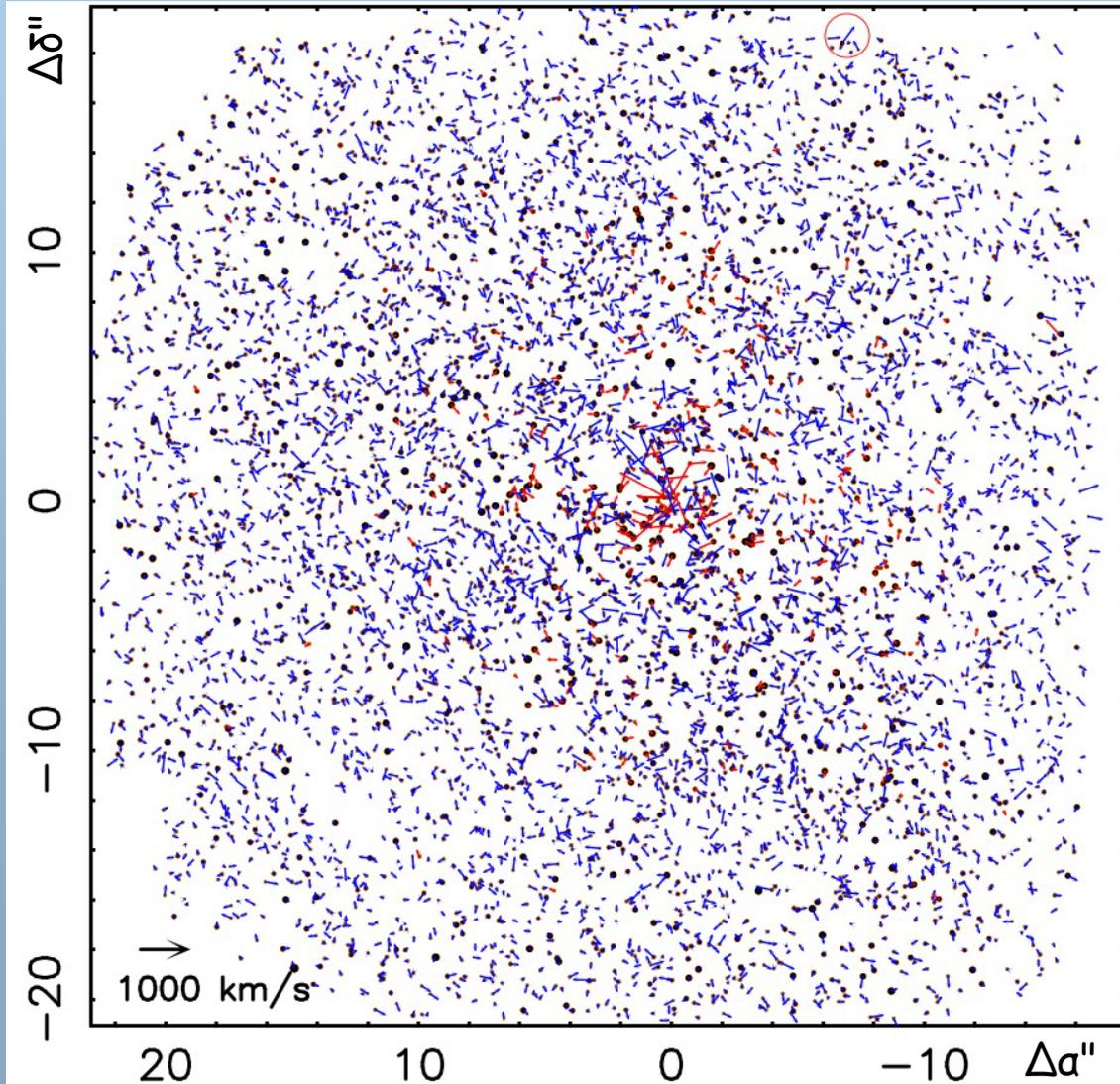


- Westerlund 1: первое открытое в Млечном Пути звёздное сверхскопление, самое массивное из известных
- Множество красных и голубых сверхгигантов, гипергигантов, звёзд Вольфа-Райе
- Будущее шаровое скопление ?



Ядерное звёздное скопление

- Массивное плотное скопление вокруг центра Млечного Пути
- Область 1.5×1.5 пк
- Скорости звёзд достигают 1500 км/с
- В центре - чёрная дыра с массой 4 млн. солнечных



Формирование звёздных скоплений

- Иерархическая фрагментация холодных ($\sim 10-50\text{K}$) молекулярных облаков
- Джинсовская масса (гравитационная неустойчивость)

$$M_J \approx \left(\frac{\gamma RT}{\mu G} \right)^{3/2} \rho^{-1/2} \approx 17 \frac{\gamma^{3/2}}{\mu^2} \left(\frac{T^3}{n} \right)^{1/2} M_{SUN}$$

- Для типичных условий ($\mu \sim 0.7-2.4$, $\gamma \sim 5/3-7/5$ (атомный вес одной частицы и показатель адиабаты) – от межоблачной среды до молекулярных облаков) получаются оценки массы и радиуса (с точностью до фактора 3-4):

$$M_J \approx 20 \left(\frac{T^3}{n} \right)^{1/2} M_{SUN}, R_J \approx 5 \left(\frac{T}{n} \right)^{1/2} \text{pc}$$

(T в K , n в cm^{-3})

Формирование рассеянных скоплений

- Для холодных и плотных межзвёздных облаков ($T \sim 20 \text{ K}$ и $n \sim 10 \text{ cm}^{-3}$)

Джинсовские масса и радиус будут соответственно по порядку величины равны

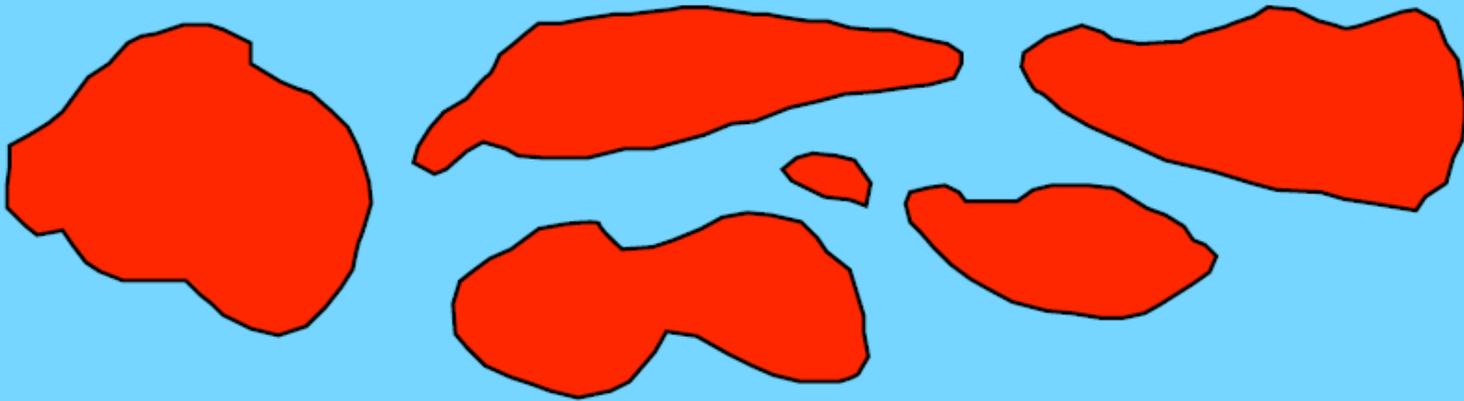
$$M_J \approx 600 M_{SUN}, R_J \approx 7 \text{ pc}$$

- это масса и размер типичного рассеянного скопления

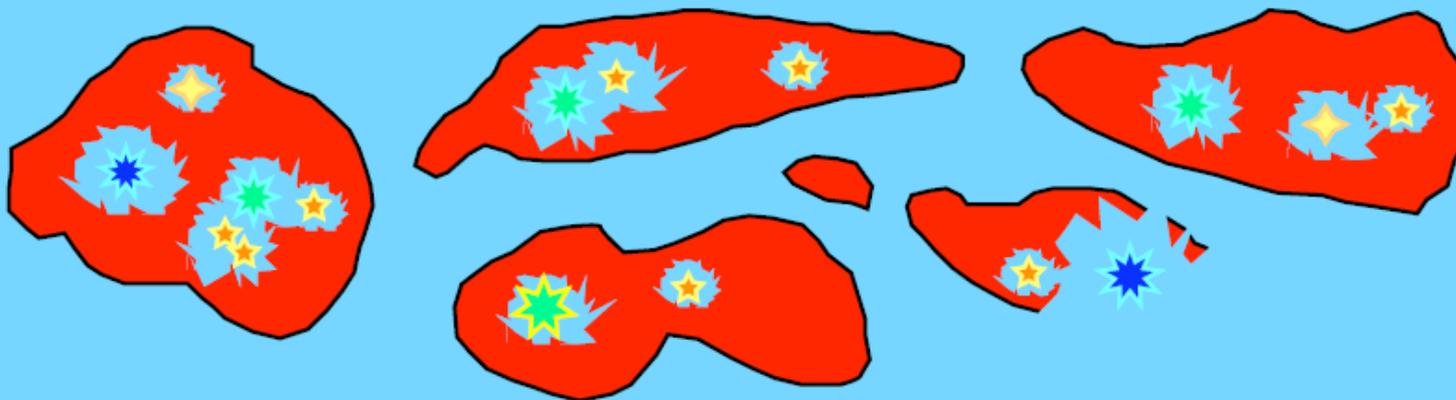
- Для дополнительного чтения о гравитационной неустойчивости, фрагментации, формировании звёзд и скоплений:
- Сурдин В.Г. "Рождение звёзд" (УРСС, Москва, 2001)

Рождение звёзд и звёздных скоплений

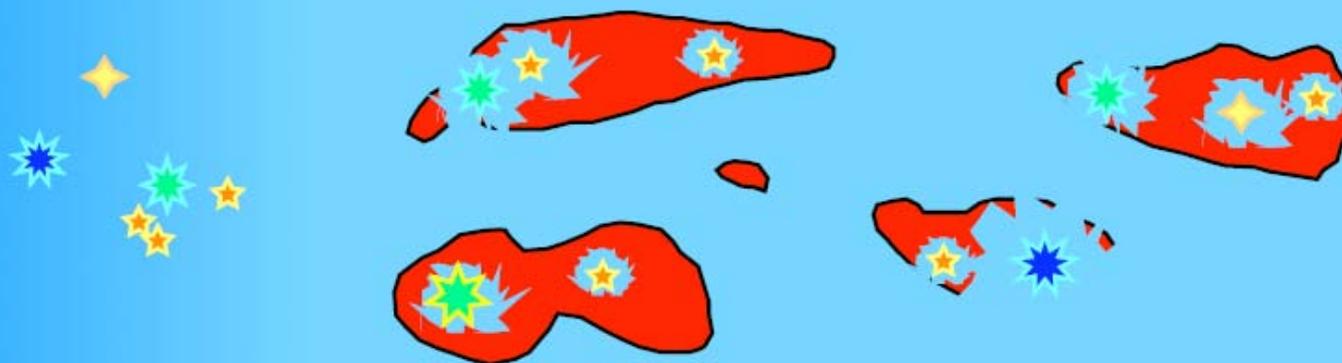
- Процессы звездообразования в молекулярном газе



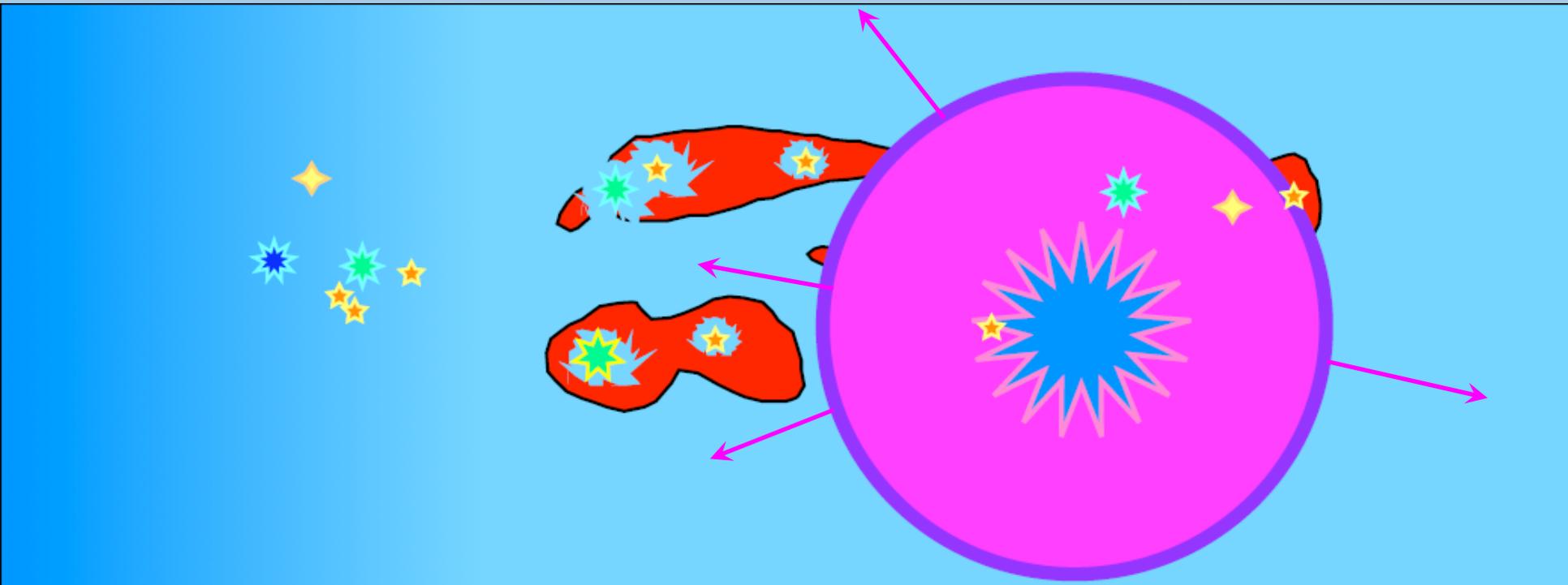
При большой плотности в результате охлаждения молекулярный газ разбивается на отдельные облака (фрагментация: Джинсовская неустойчивость)



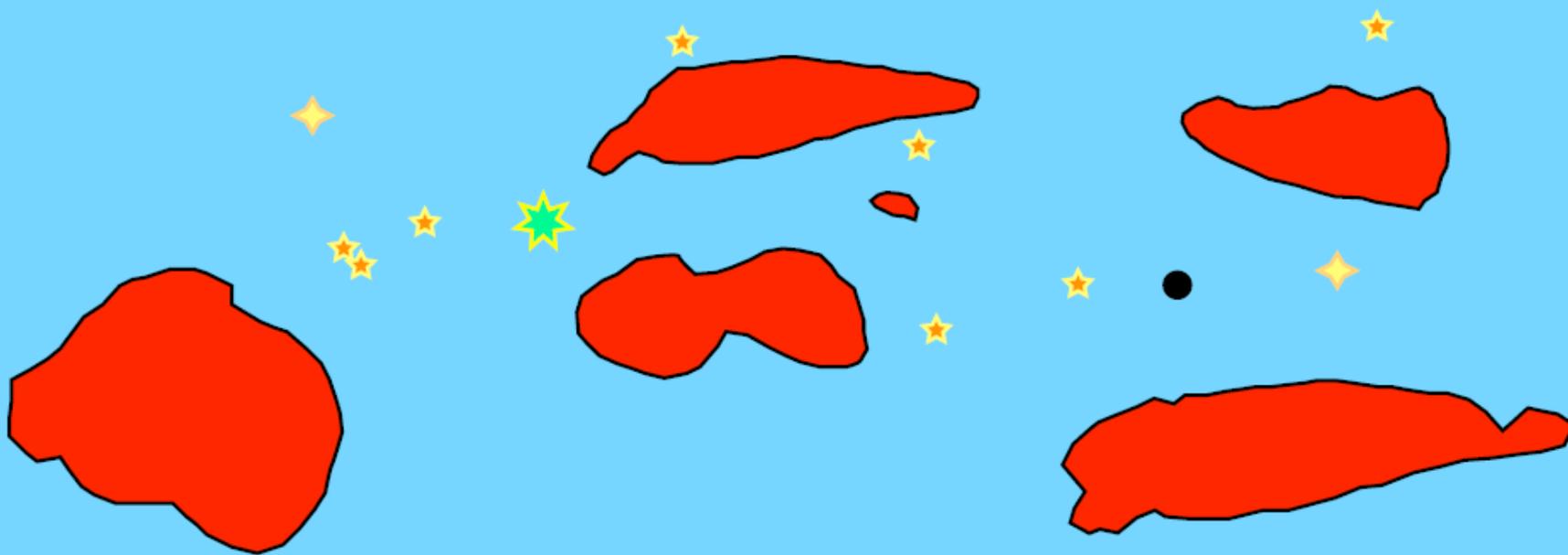
Формируются первые звезды, интенсивность излучения растет. Ультрафиолетовые кванты частично разрушают молекулы (диссоциация)



Излучение подавляет звездообразование в облаках с малой плотностью. В некоторых облаках весь молекулярный газ диссоциирует, эффективность охлаждения падает и газ нагревается. Даже при малом характерном времени охлаждения звездообразование практически прекращается.

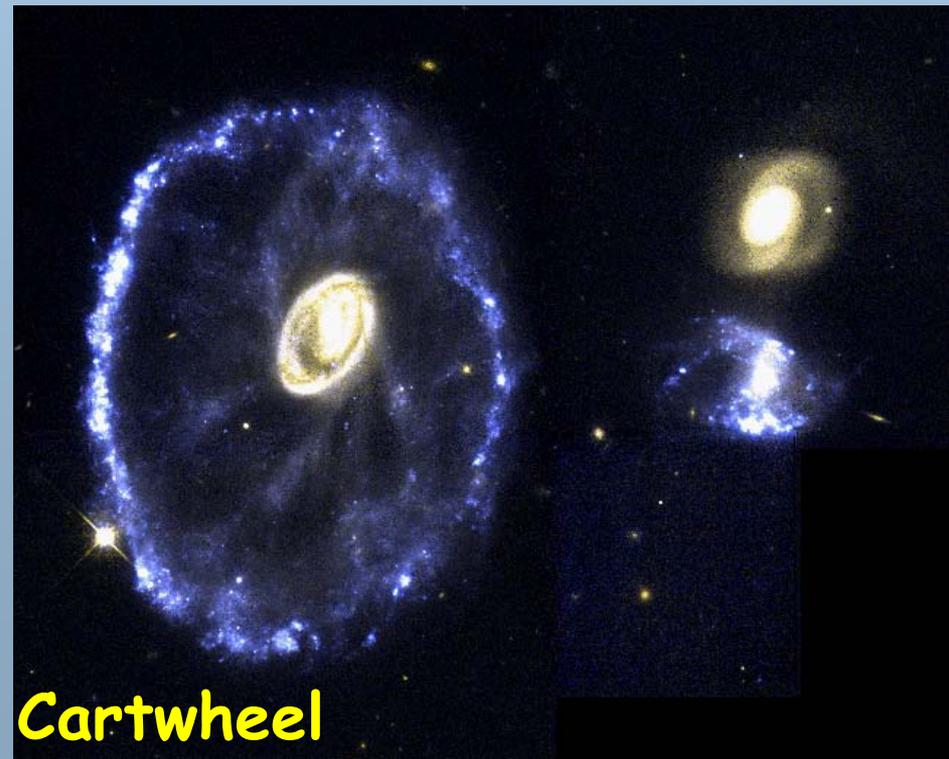


Взрывы массивных Сверхновых (SN II, Ib/c) могут ударными волнами оболочек снова уплотнять газ и стимулировать продолжение звездообразования.



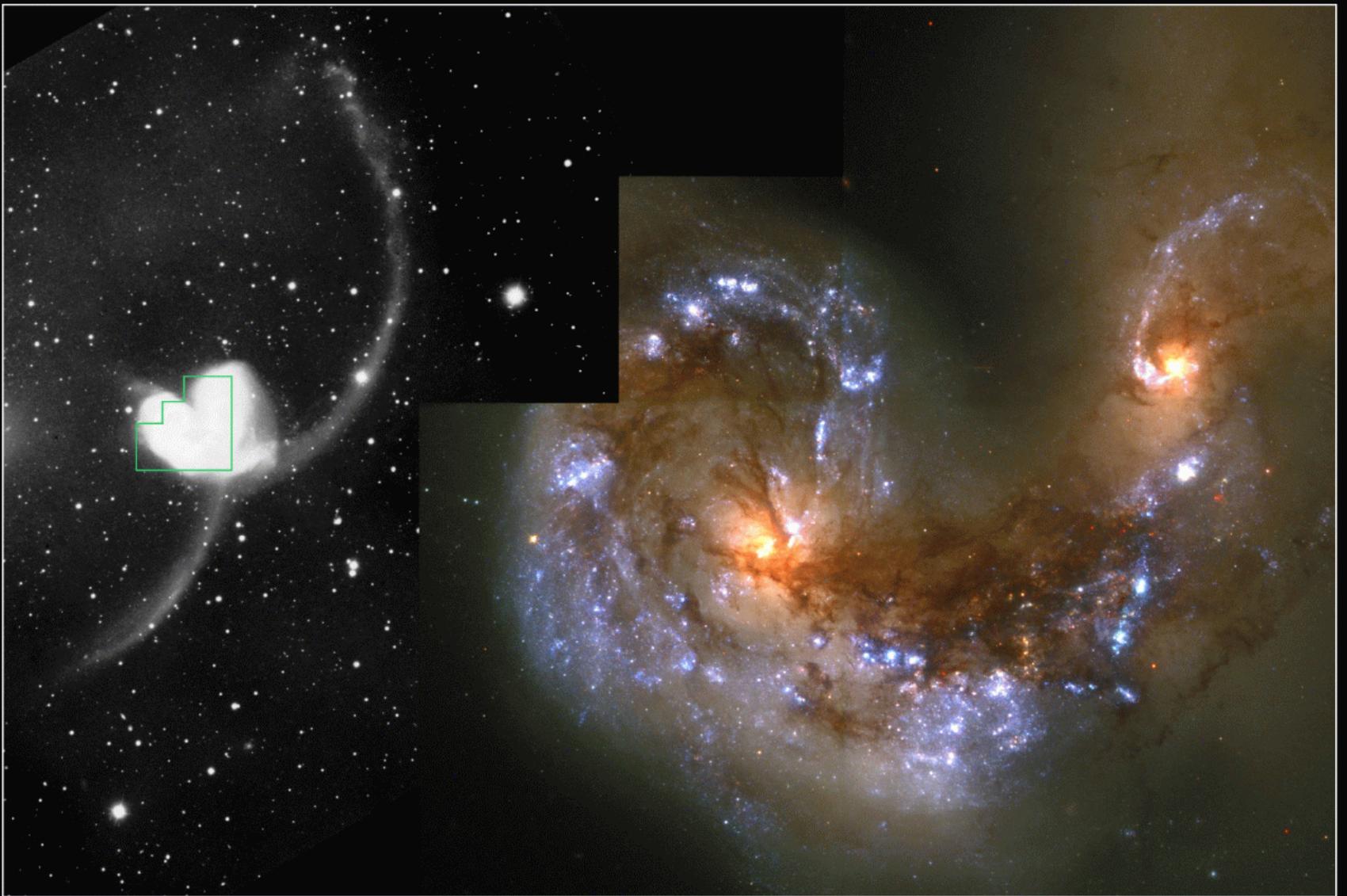
По мере угасания молодых горячих звезд молекулярные облака частично восстанавливаются, давая начало новому витку звездообразования .

- В современную эпоху массивные (шаровые) скопления рождаются там, где высока эффективность звездообразования, например, есть сильные волны сжатия в газе - во взаимодействующих галактиках или в дисковых галактиках с падением на диск высокоскоростных облаков газа



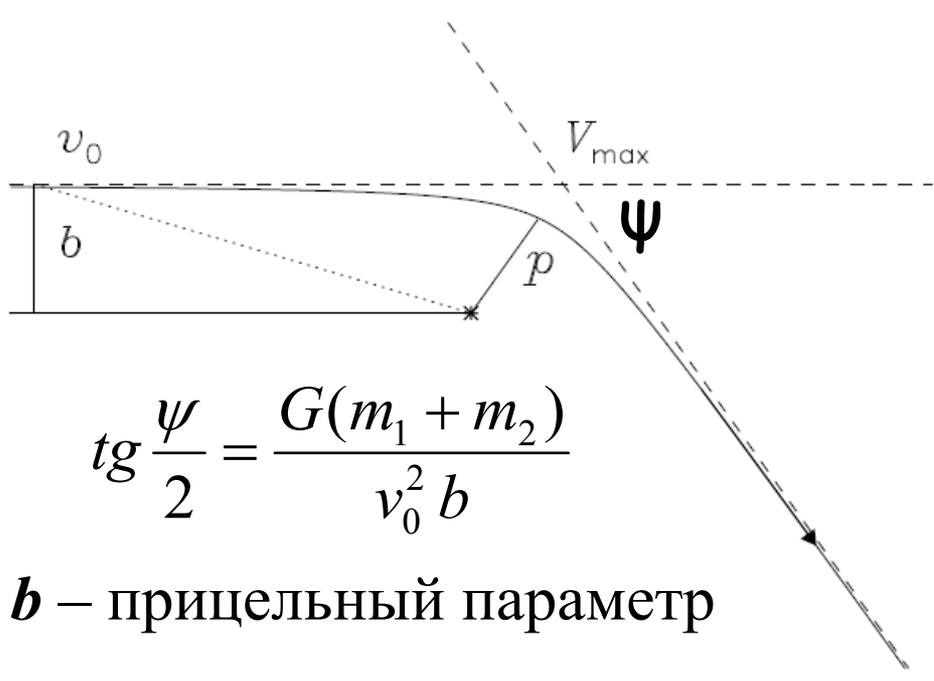
“Каннибализм” (слияния галактик)





Colliding Galaxies NGC 4038 and NGC 4039
Hubble Space Telescope • Wide Field Planetary Camera 2

Жизнь и смерть звёздных скоплений



- **Звёздные сближения:**
- Относительное движение звёзд по гиперболической орбите

$$\operatorname{tg} \frac{\psi}{2} = \frac{G(m_1 + m_2)}{v_0^2 b}$$

b – прицельный параметр

- **Следствия:** изменение скорости и энергии звезды
- Это “двигатель” динамической эволюции скоплений с характерным временем порядка

$$\tau_{relax} \approx \frac{V^3}{100 G^2 m^2 n}$$

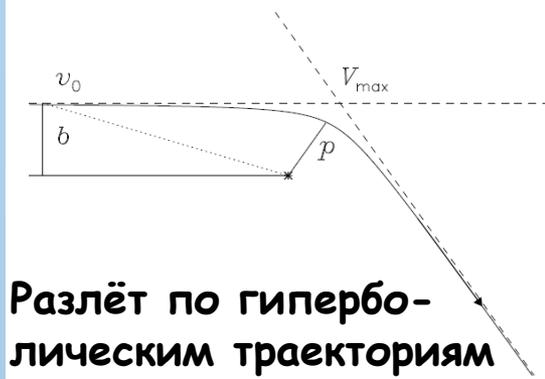
$$\tau \sim 10^6 - 10^7 \text{ лет для РЗС}$$

$$\tau \sim 10^9 - 10^{10} \text{ лет для ШЗС}$$

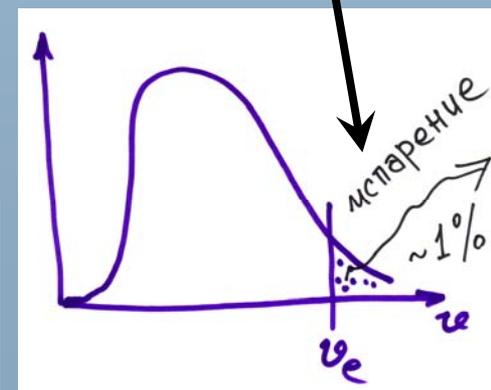
Время жизни скопления в 20 – 40 раз больше

Обмен энергией при парных сближениях звёзд:

- увеличение скорости некоторых звёзд выше критической (аналога второй космической для скопления)
- **звёзды вылетают, уменьшая массу скопления**
- изменение структуры скопления: **ядро скопления сжимается и скопление ускоренно распадается, за время релаксации теряя около 1% звёзд**



Эти звёзды покидают скопление



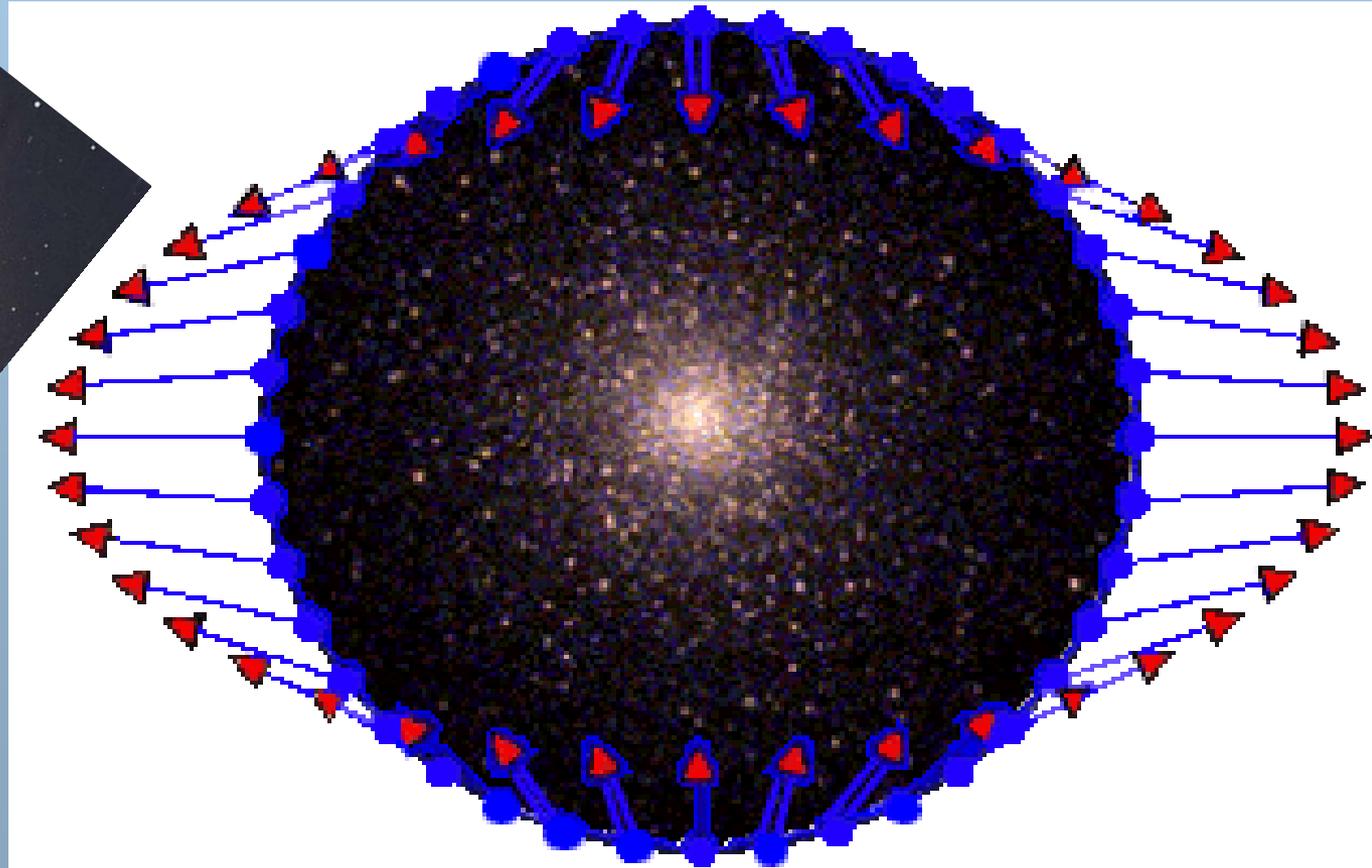
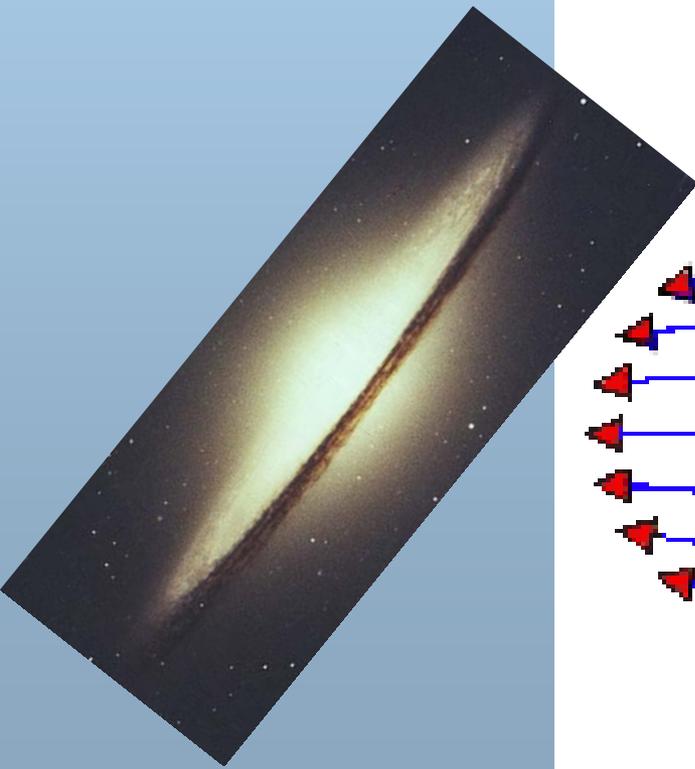
$$\tau_{relax} \approx \frac{V^3}{100 G^2 m^2 n} \quad \frac{10^6 - 10^7 \text{ лет} - \text{РЗС}}{10^9 - 10^{10} \text{ лет} - \text{ШЗС}}$$

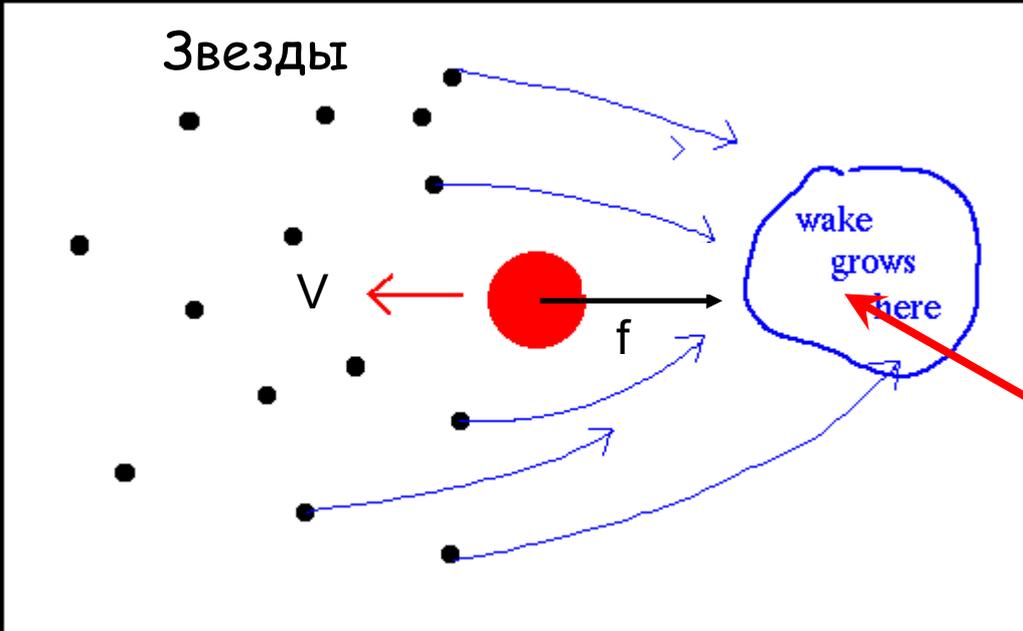
Приливные силы

- Вызываются внешними по отношению к скоплению массами (галактикой, массивными молекулярными облаками, другими скоплениями и т.п.)
- Полная аналогия с лунно-солнечными приливами в земных океанах

Картина приливных сил, действующих на звёздное скопление в галактике

- Скопление вытягивается в плоскости орбиты и "поджимается" у полюсов → искажение формы скопления, облегчение "ухода" звёзд



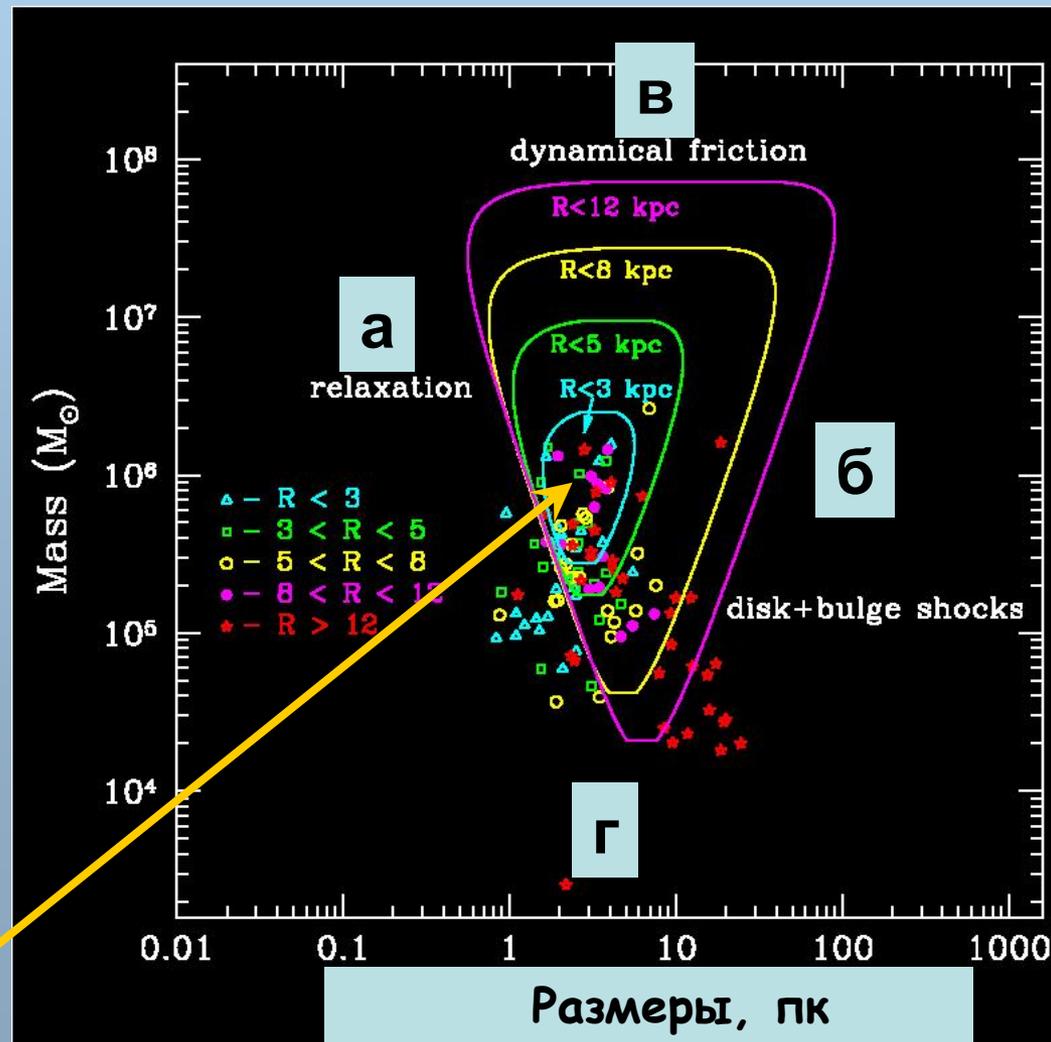


$$f_{dyn} \propto \frac{G^2 M^2 \rho}{V_M^2}$$

- **Динамическое трение:** гравитационная "фокусировка" звёзд позади движущегося массивного объекта (скопления) → избыток плотности тормозит скопление. Сила трения *быстрее растёт с массой*, чем для обычного гравитационного взаимодействия.

Область "выживания" шаровых скоплений под действием различных факторов за 10 млрд. лет

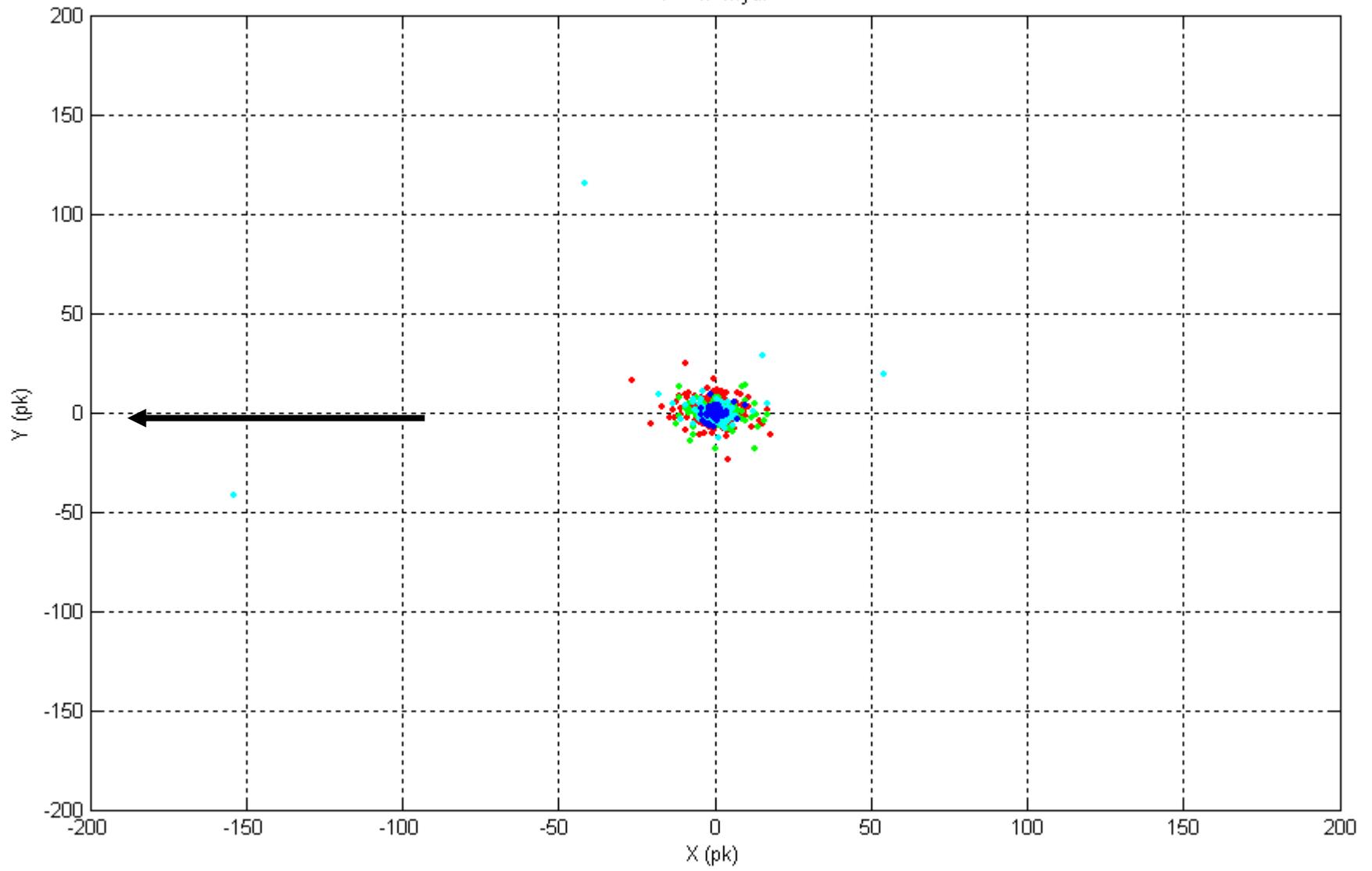
- а, г) Релаксация
 - компактные или маломассивные
 - б) Приливы и гравитационные удары
 - "рыхлые"
 - в) Динамическое трение
 - массивные
- "Выжившие" скопления



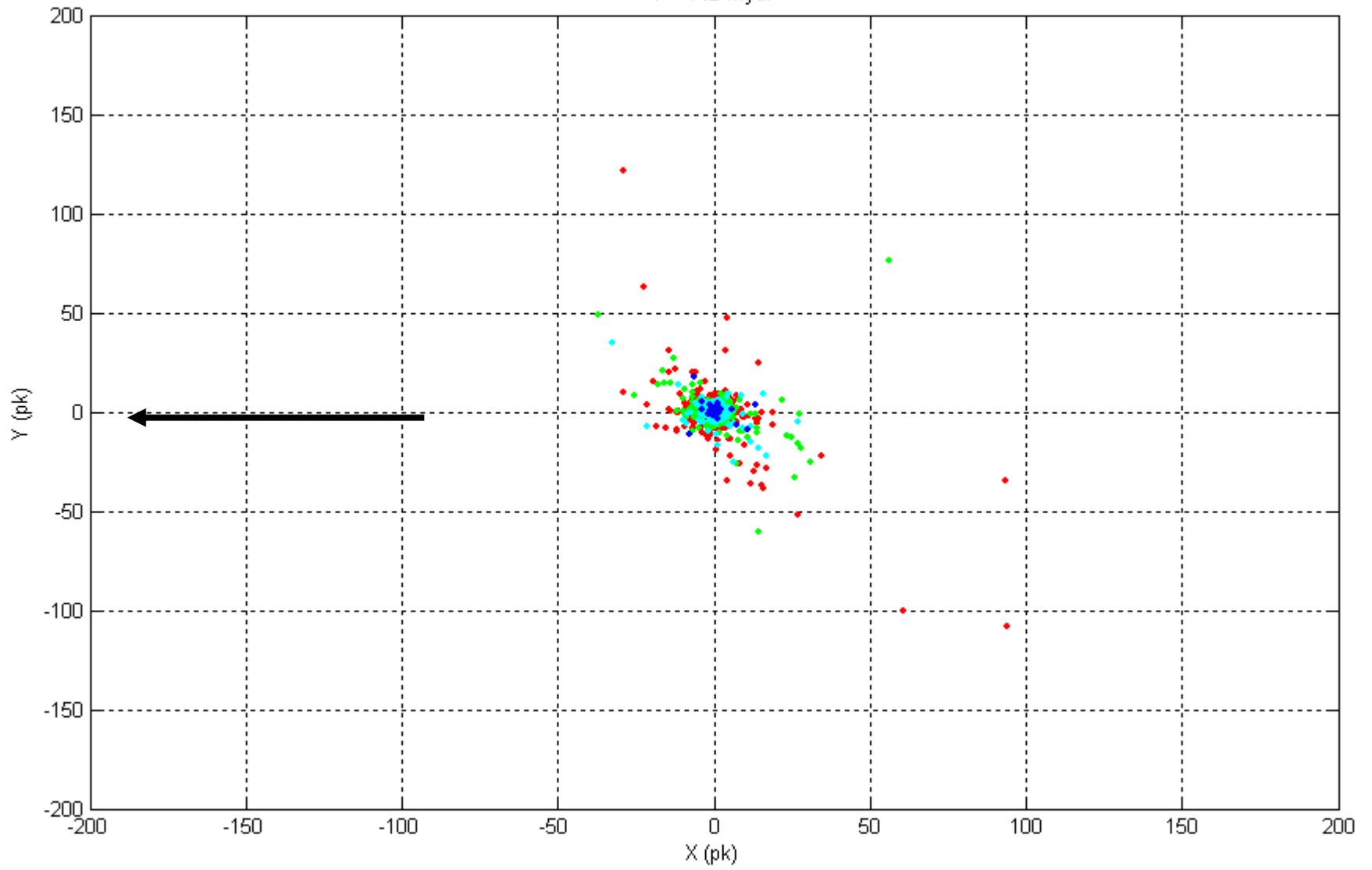
**Эволюция и образование приливного "шлейфа"
массивного (1500 звезд) рассеянного скопления в
приливном поле двухкомпонентной Галактики
на протяжении 1.5 млрд. лет
(наблюдатель движется вместе со скоплением по
круговой орбите)**

- Центр Галактики - слева
- Скопление движется вверх
- **Синие точки - звезды большой массы**
- **Красные точки - звезды малой массы,**
легче покидающие скопление
(преимущественно приобретающие
энергию при звёздных сближениях)

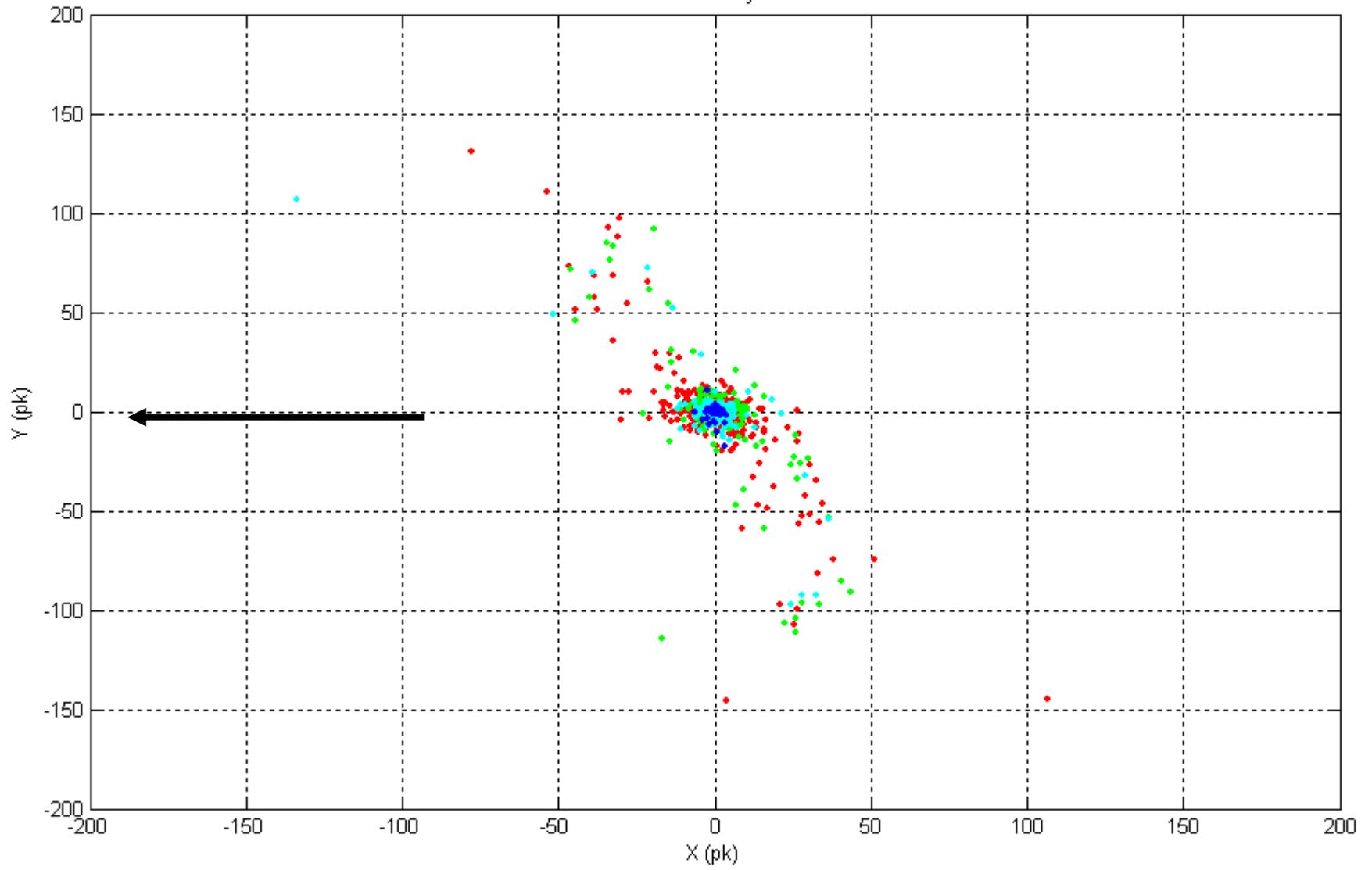
T = 47 Myar



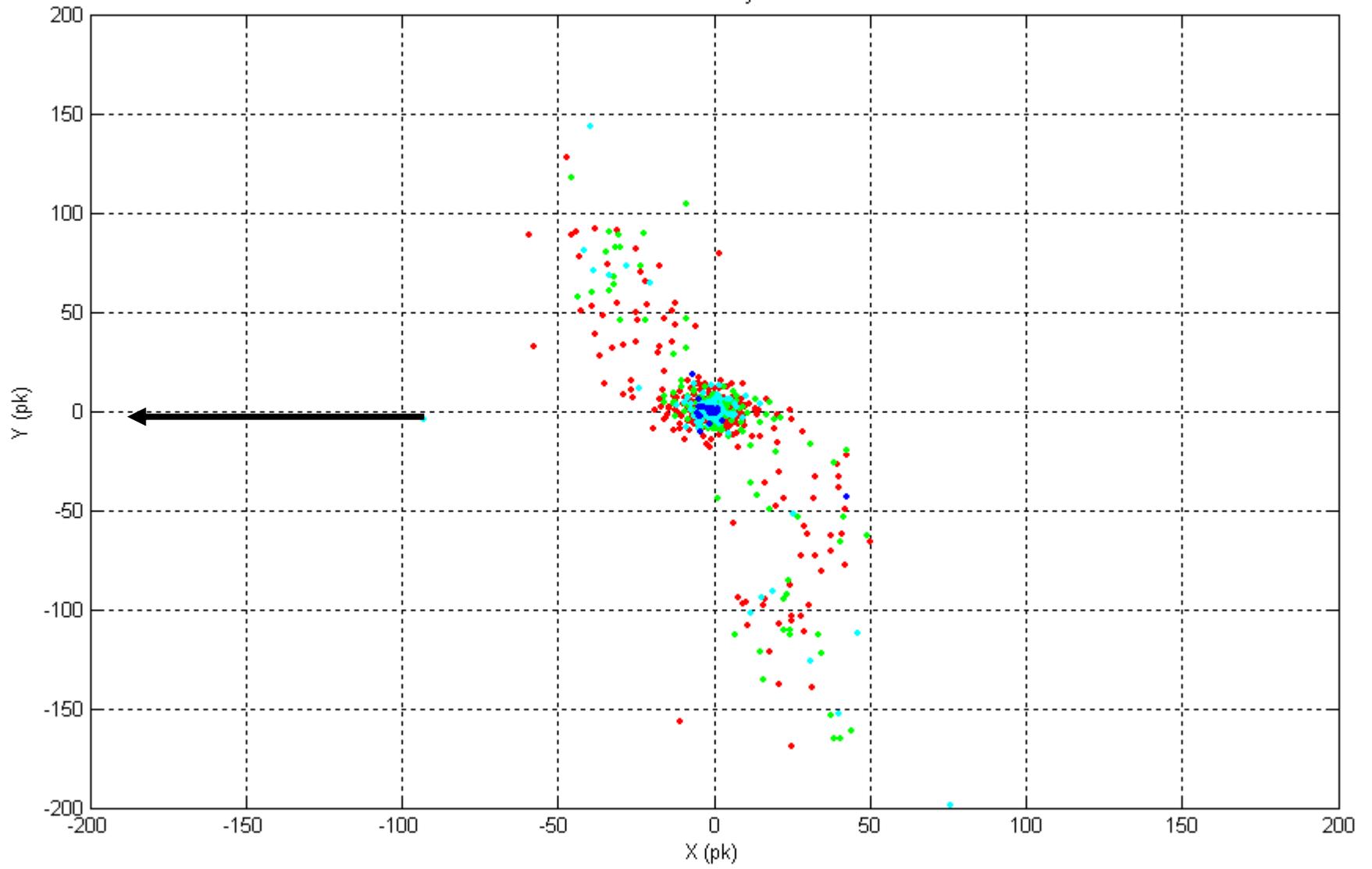
T = 142 Myar



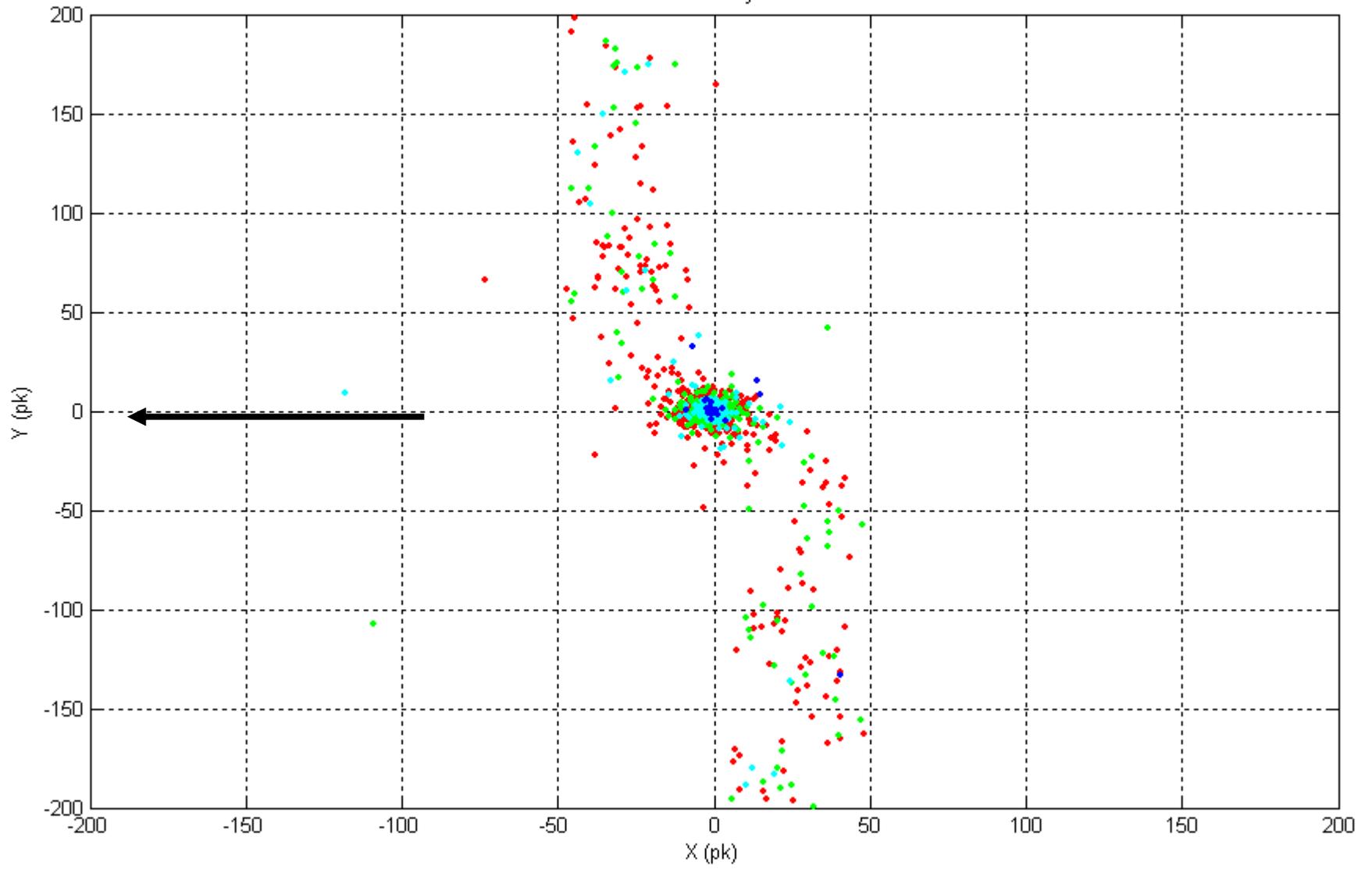
T = 237 Myar



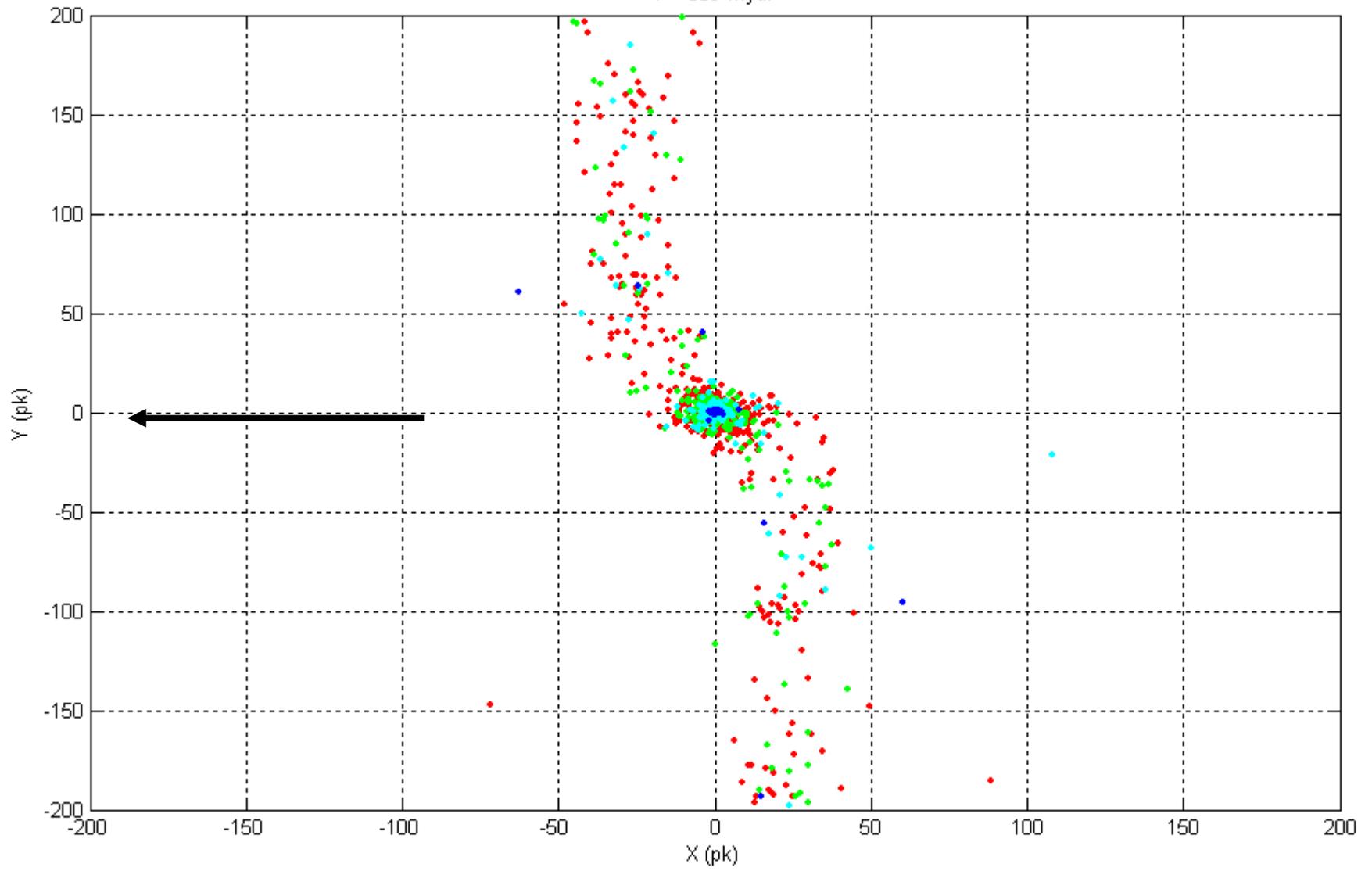
T = 332 Myar



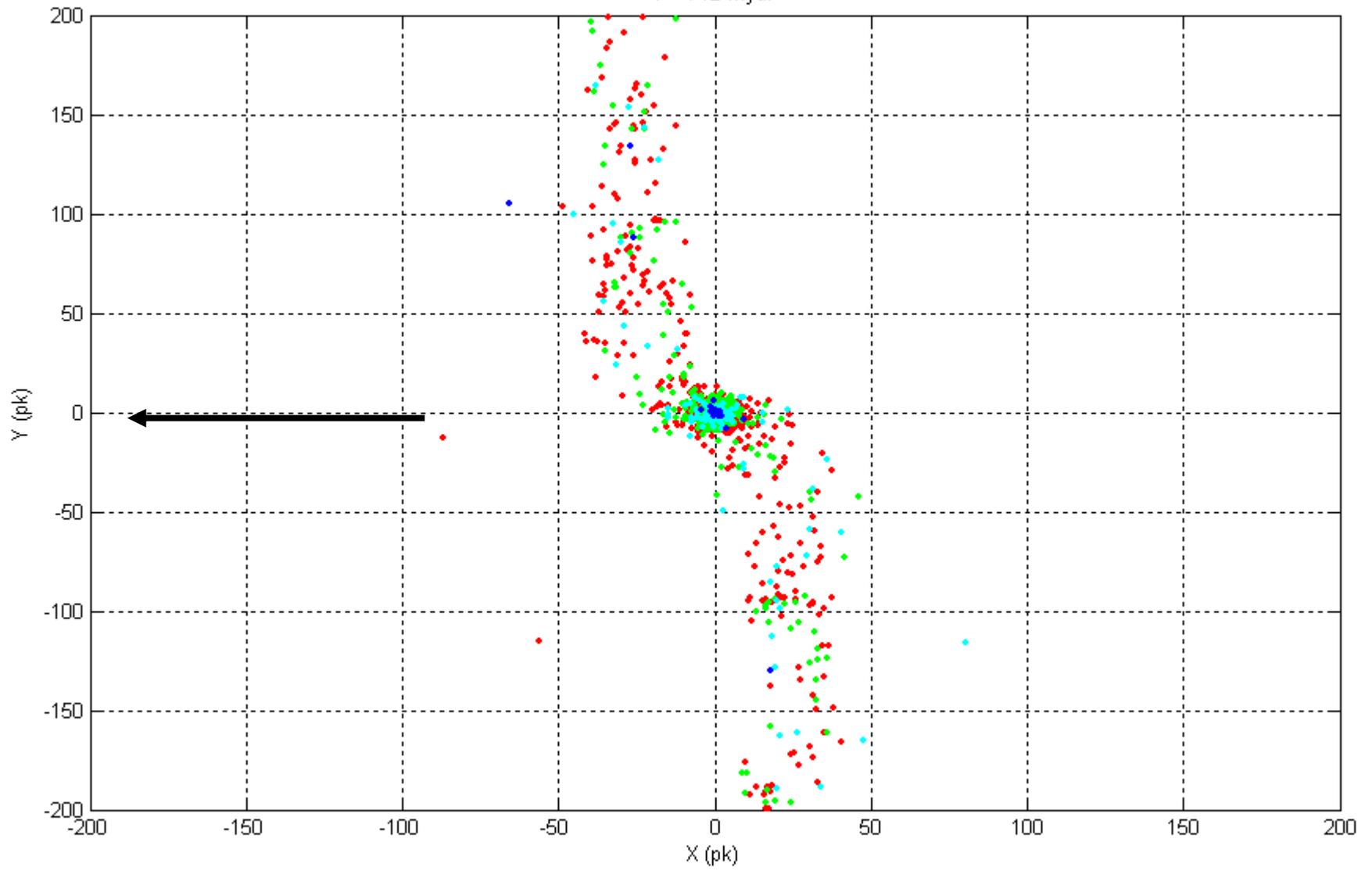
T = 474 Myar



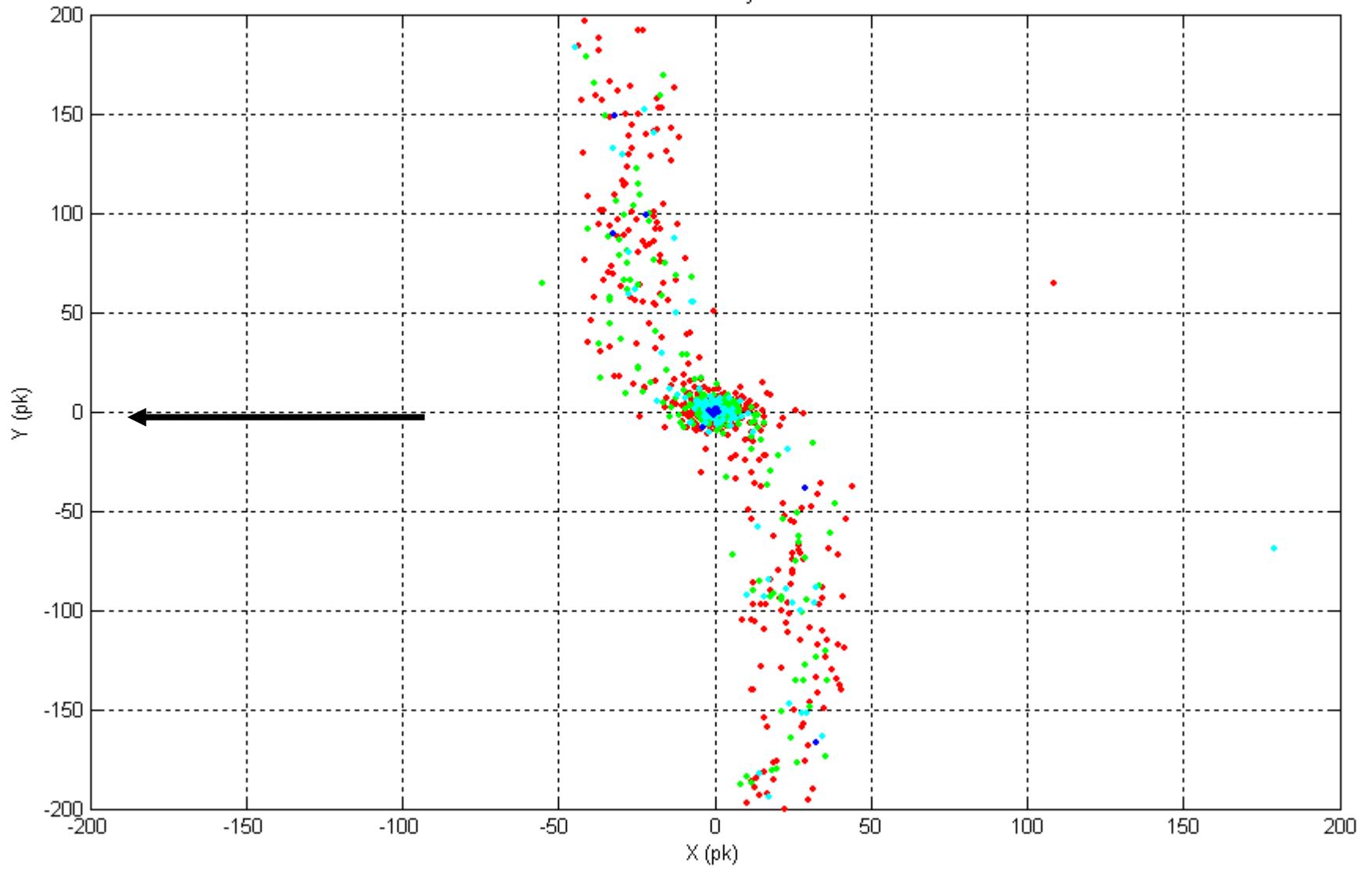
T = 569 Myar



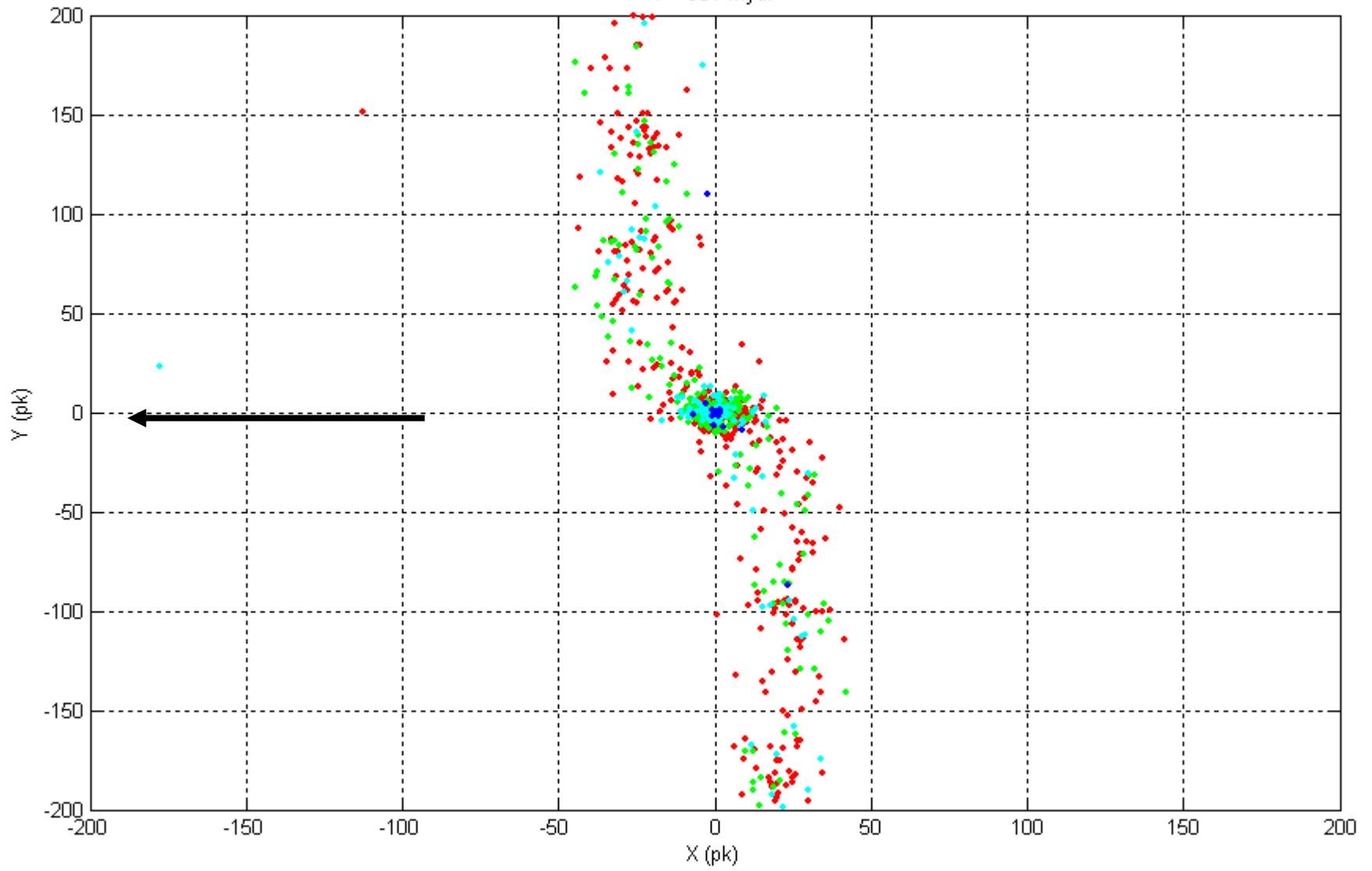
T = 712 Myar



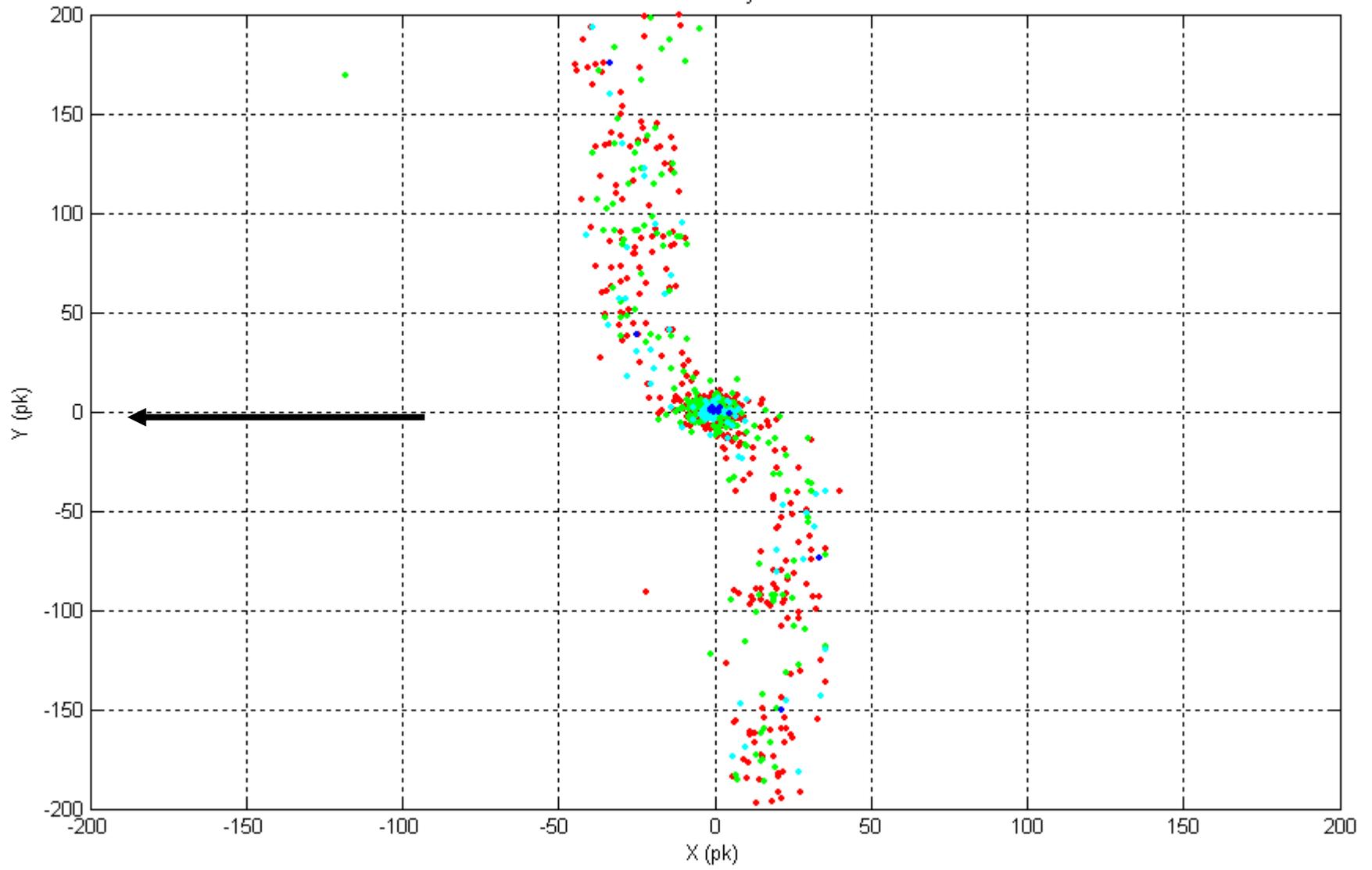
T = 807 Myar



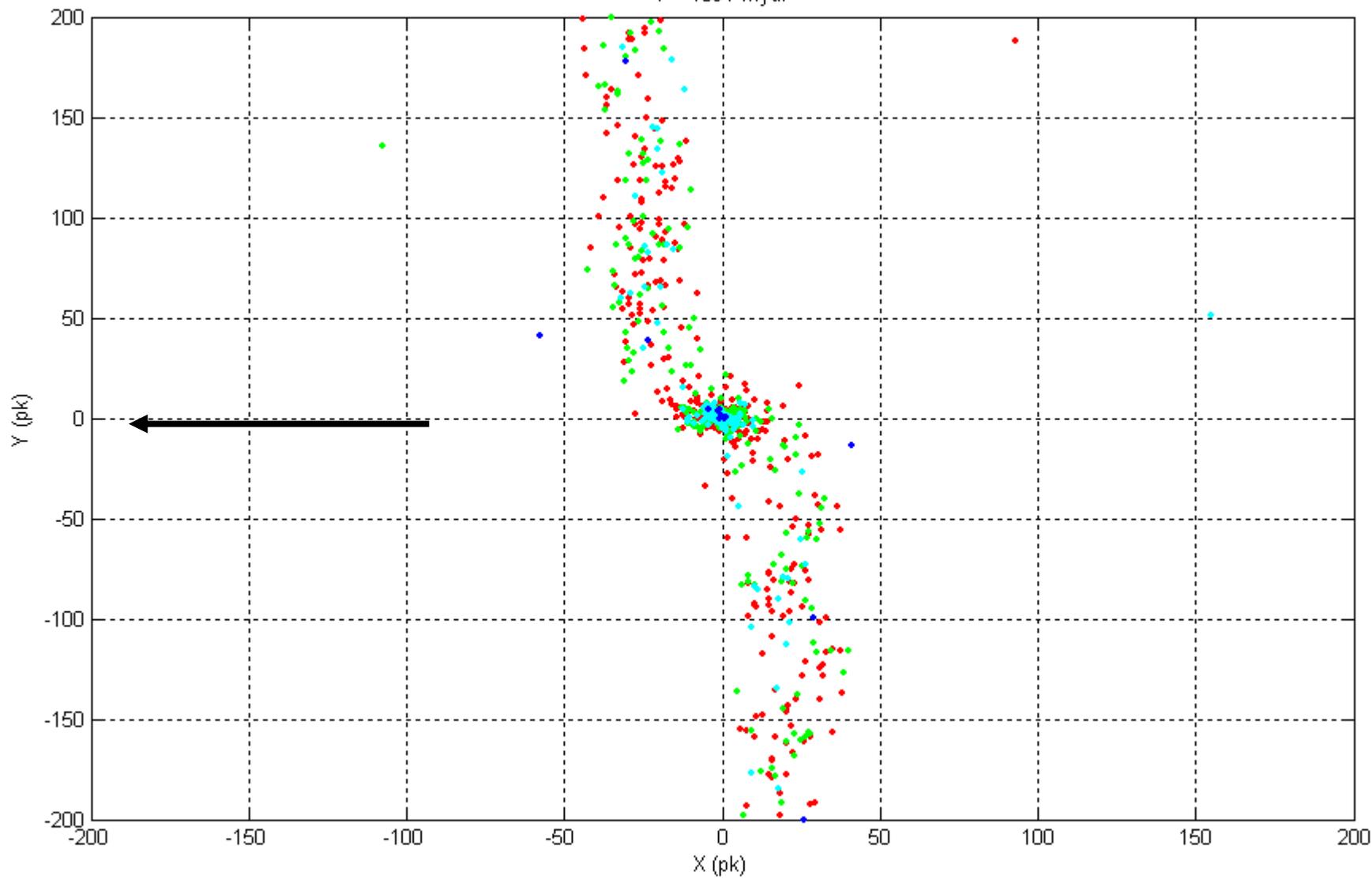
T = 901 Myar



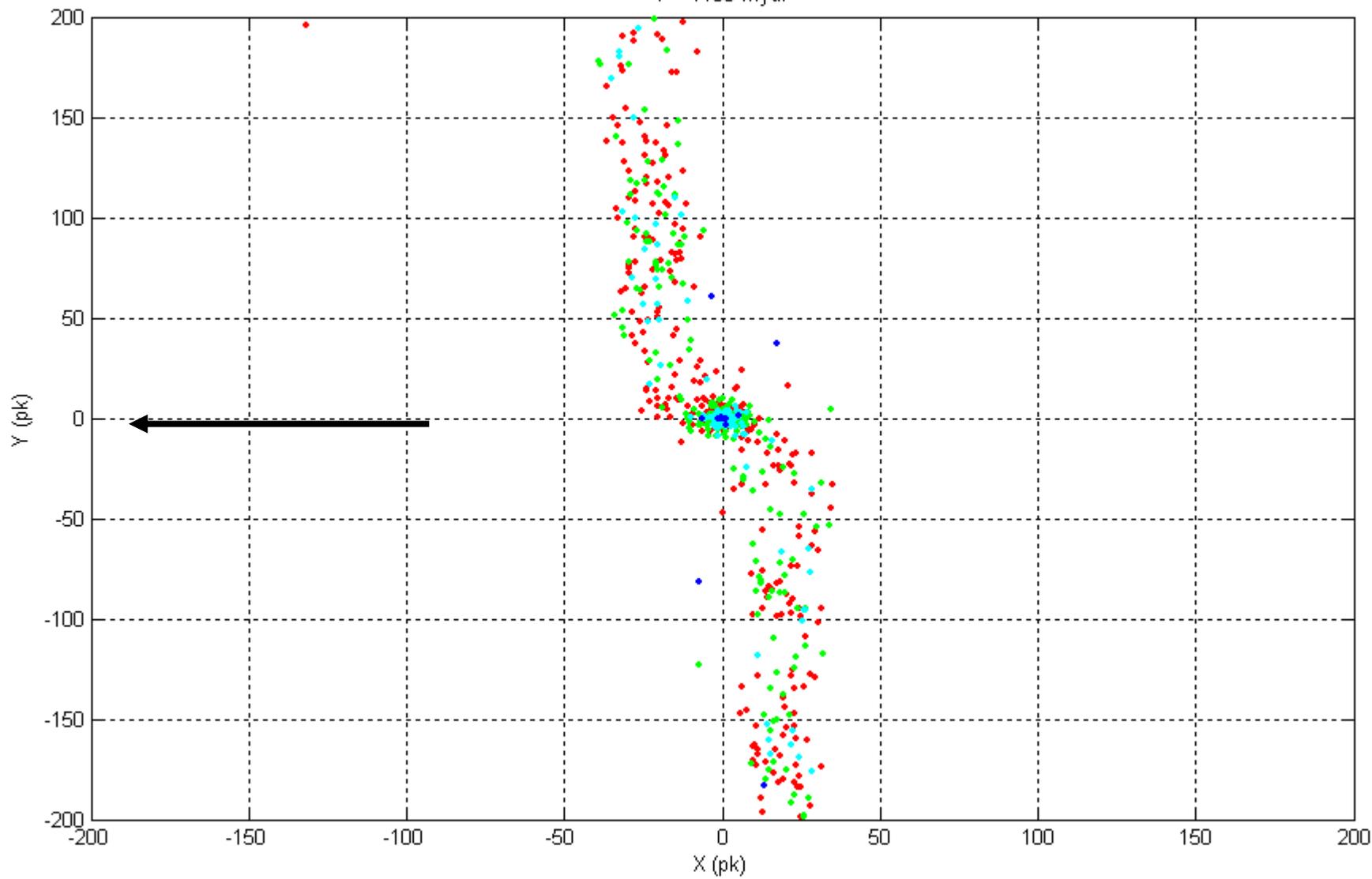
T = 996 Myar



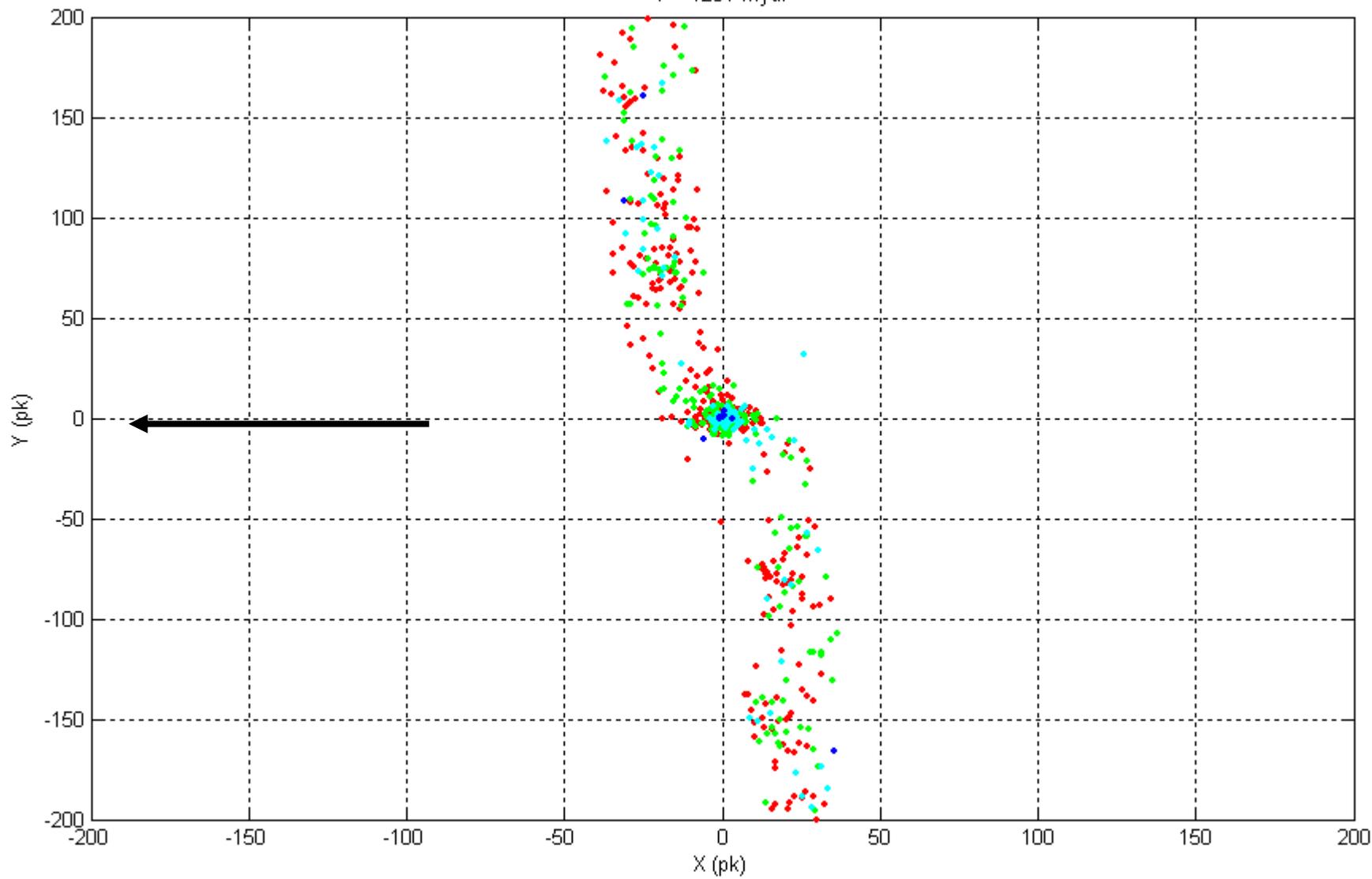
T = 1091 Myar



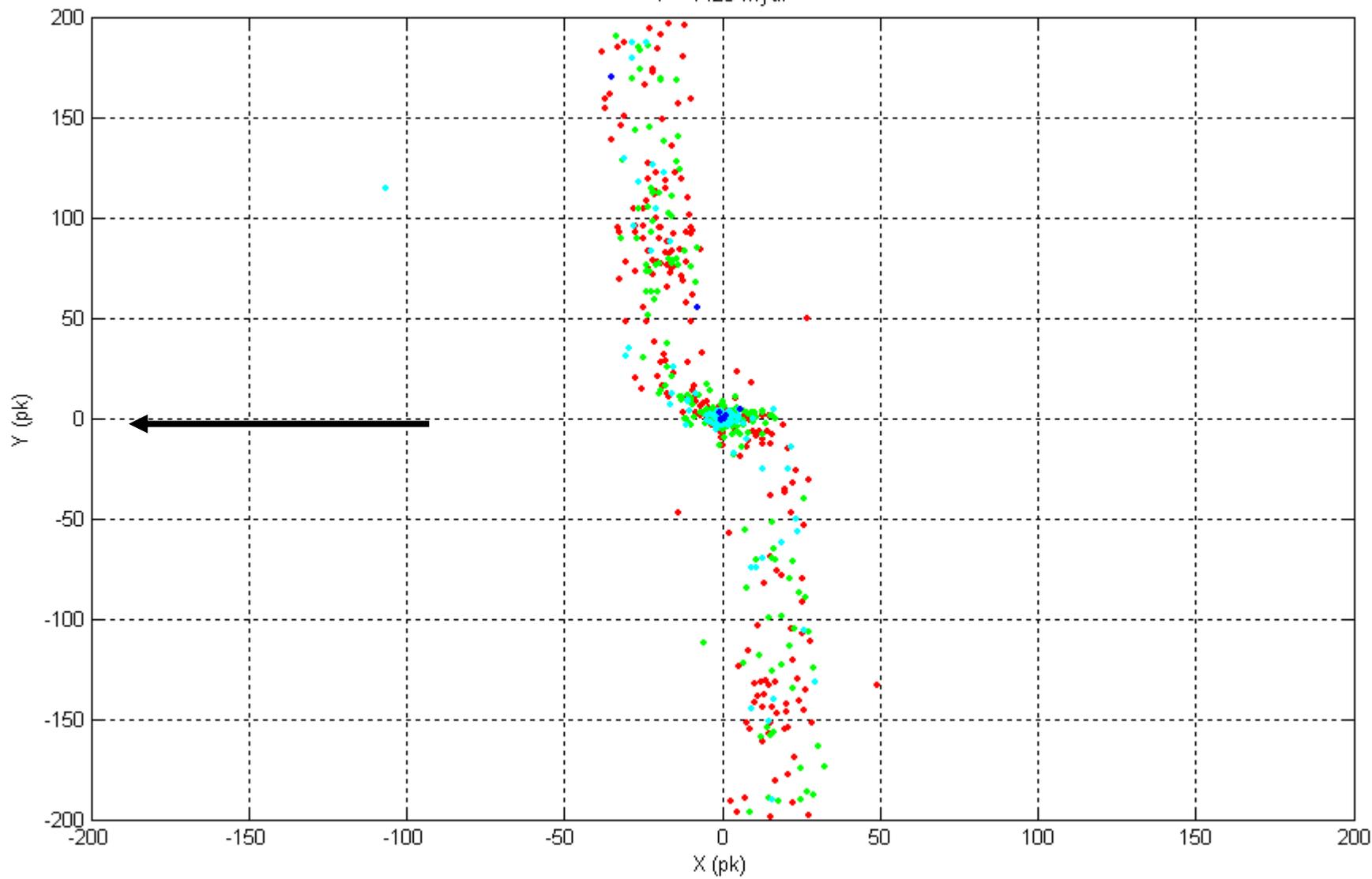
T = 1186 Myar



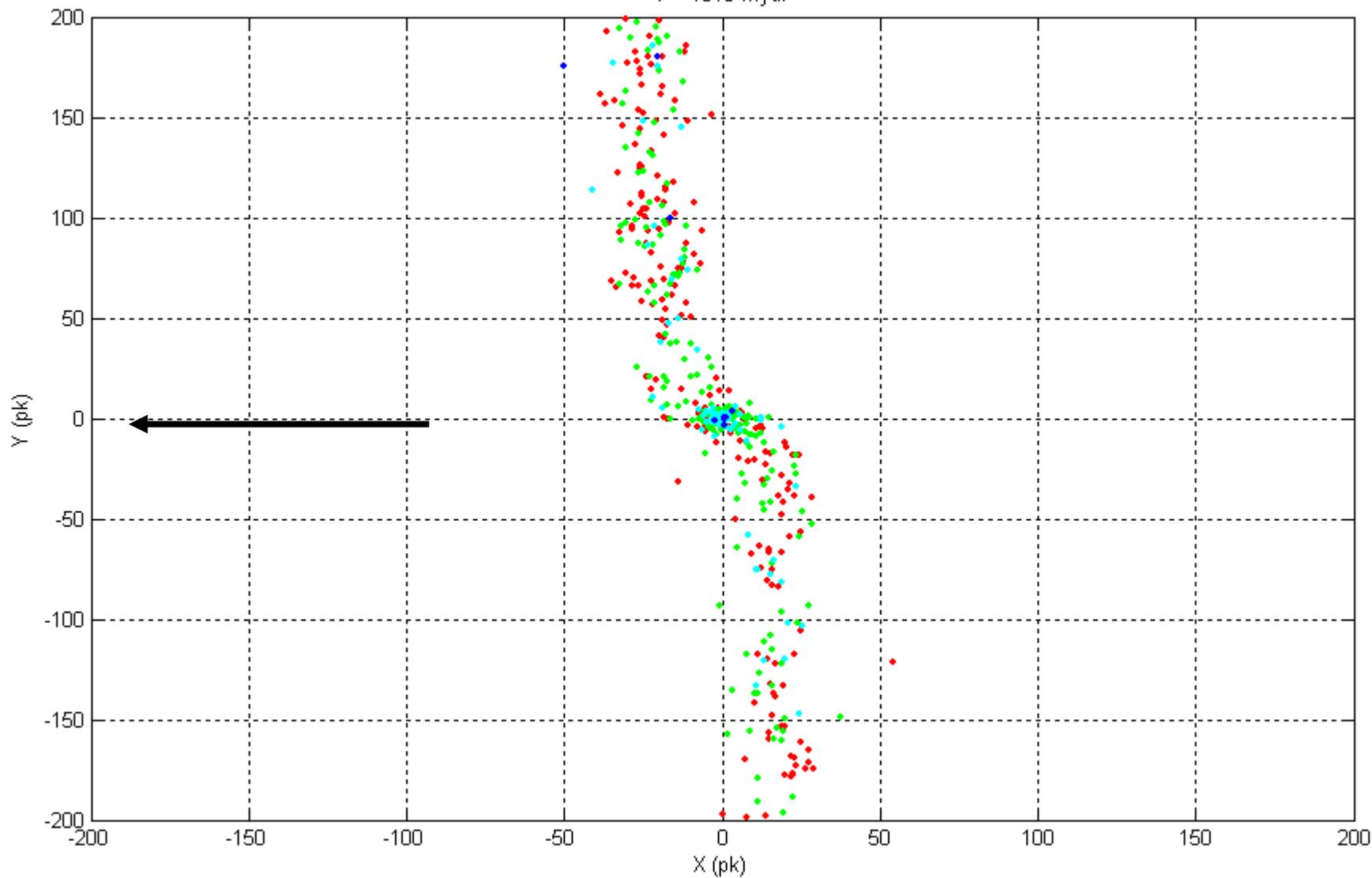
T = 1281 Myar



T = 1423 Myar



T = 1518 Myar



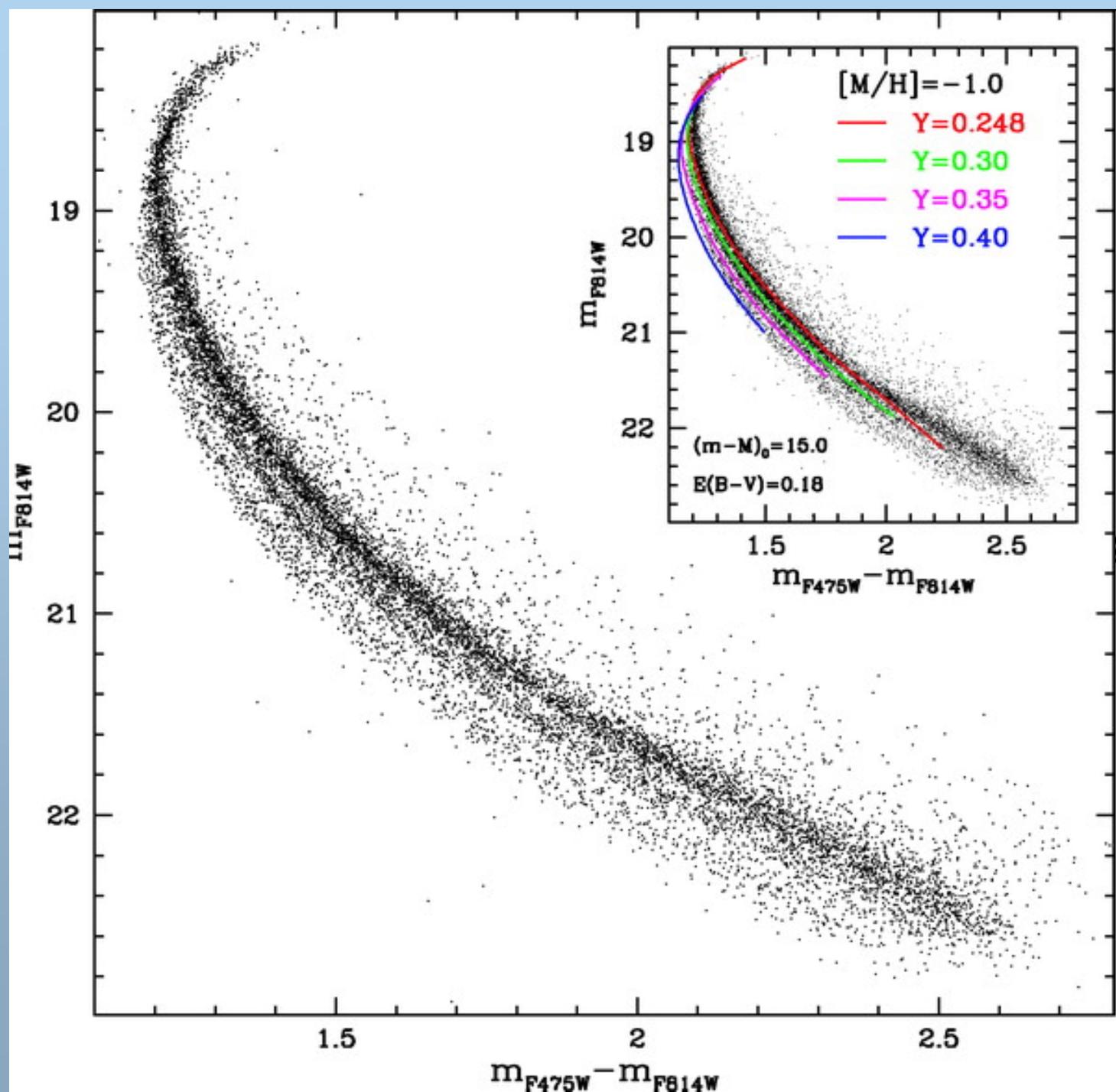
THE END

- Время жизни типичного рассеянного скопления $\sim 200\text{-}300$ млн. лет (галактический "год" - время оборота Солнца вокруг центра Млечного Пути)
- Диск Млечного Пути населён "выходцами" из распавшихся скоплений
- Время жизни типичного шарового скопления $> 50\text{-}100$ млрд. лет (намного больше возраста Вселенной, 13.4 млрд. лет)

Звёздные скопления как “простые типы звёздных населений”

- Единый химический состав, одинаковый возраст, набор звёзд разной массы - звёздные скопления рассматриваются как элементарные блоки (“кирпичики”), из которых сделаны галактики
- Если так, то многие свойства галактик удаётся понять, “разлагая” галактику на составные части вроде звёздных скоплений разного возраста, различающихся химическим составом
- В астрономии такой подход называется “популяционным синтезом”, т.е. синтезом звёздных населений

NGC 2808 -
пример
скопления, в
котором
наблюдается
несколько
поколений
звёзд
Различия в
содержании
гелия ?



То же среди
"нормальных"
шаровых
скоплений

M4: 2 популяции
звезд с разным
химсоставом
(содержание
[Na/Fe])

Marino et al.
A&A V.490, P.625,
2008)

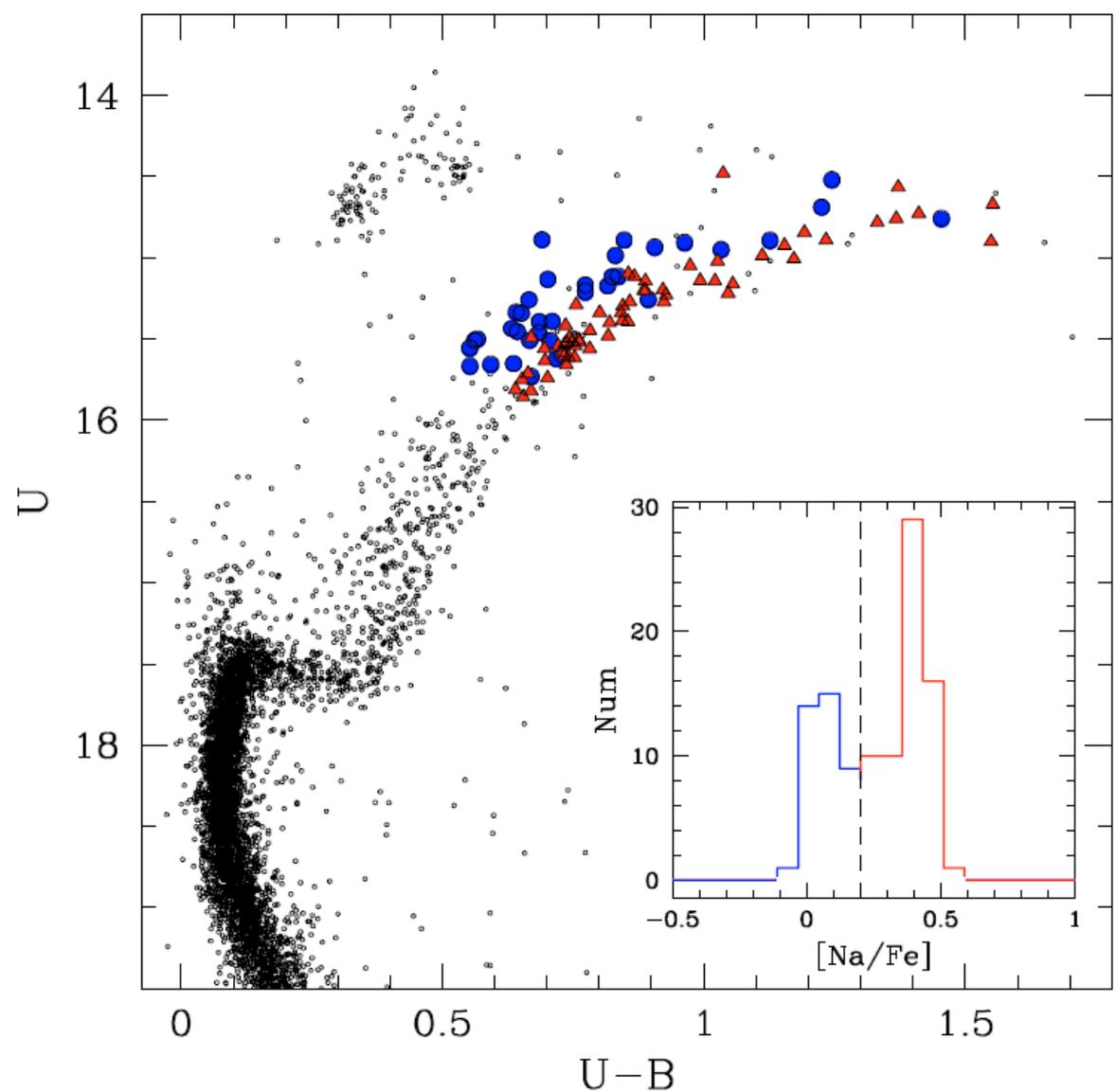


Fig. 11. U vs. $(U - B)$ CMD from WFI photometry. The distribution of the Na content for the UVES stars is shown in the inset. The stars belonging to the two different Na groups are represented in two different colors: the red triangles represent the stars with $[Na/Fe] \geq 0.2$ dex, and the blue circles the stars with $[Na/Fe] < 0.2$ dex.

Как стать астрономом ?

- Астрономическое Отделение физического факультета МГУ
- Научная база АО - ГАИШ МГУ (www.sai.msu.ru)
- Форма и срок обучения: Специалитет, 6 лет
- Астрономические дисциплины - с 1 курса
- Бюджетный приём - 20 студентов
- ЕГЭ (русский язык, математика, физика) + дополнительный экзамен по физике
- Льготы для призёров астрономических олимпиад

- Контакты:
- А.С. Расторгуев rastor@sai.msu.ru
- В.Е. Жаров zharov@sai.msu.ru