

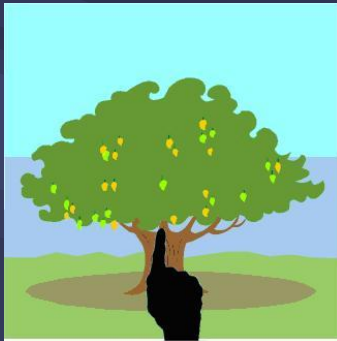
Звезды

Сергей Попов
(ГАИШ МГУ)

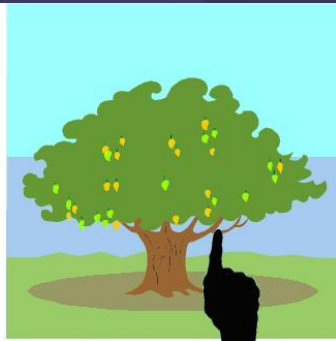
Звездные параллаксы

Звезды – далекие Солнца?

В течение веков некоторые ученые так думали, но были и серьезные основания для сомнений. Необходимо было обнаружить простой эффект.



Right eye open



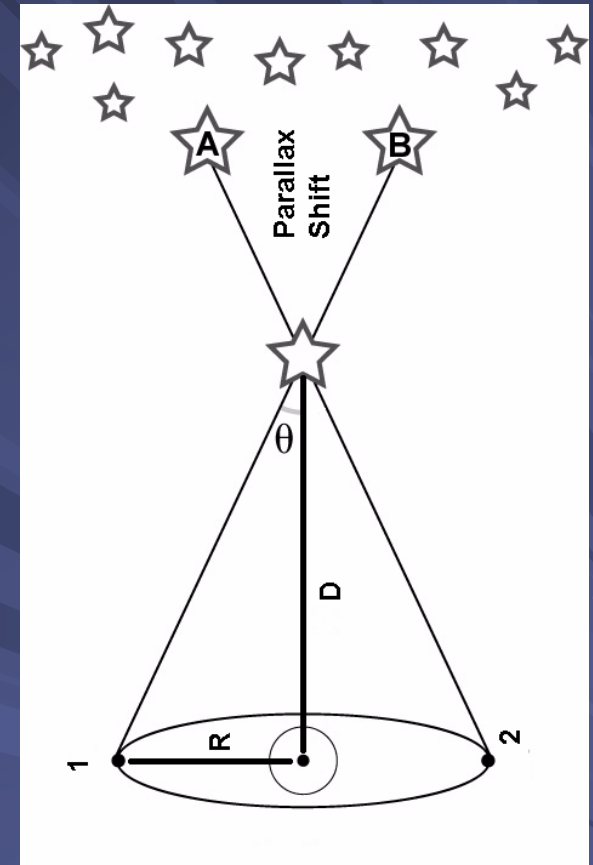
Left eye open



Тихо Браге

Если мы смотрим на некий предмет то одним, то другим глазом, то он сдвигается на фоне более далеких.

Так можно измерять расстояние до довольно далеких объектов.



Параллактический сдвиг из-за движения Земли вокруг Солнца.

Первые измерения параллаксов



В.Я. Струве.
Вега. 1837 г.



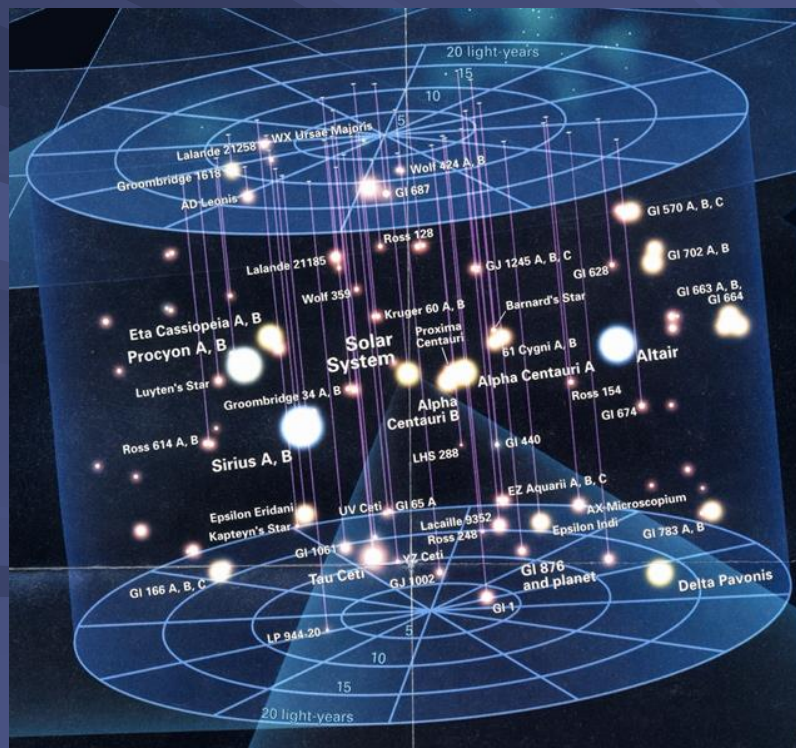
Ф. Бессель.
61 Лебедя 1838 г.



Томас Хендерсон
Альфа Центавра 1833

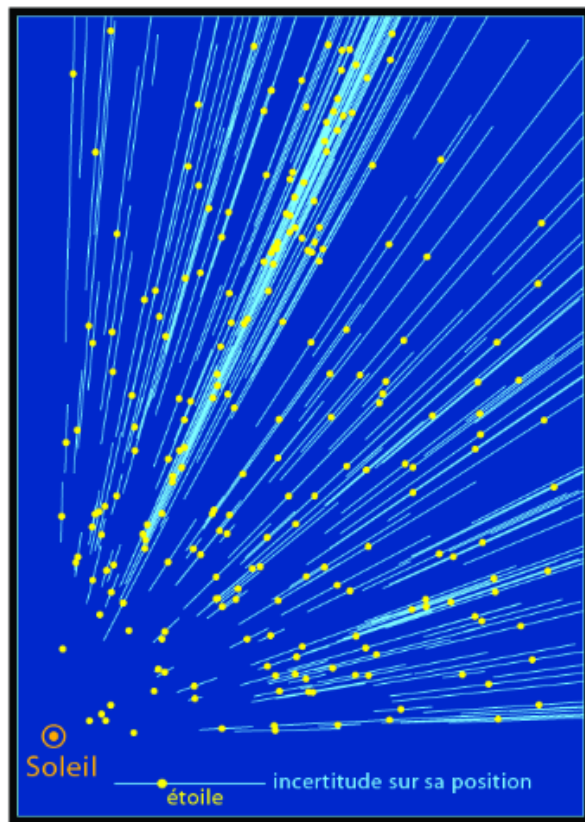
Измерения расстояний до звезд

Впервые надежно был задан масштаб межзвездных расстояний. Это дало основу для более уверенных рассуждений и о звездах, и о структуре Галактики.

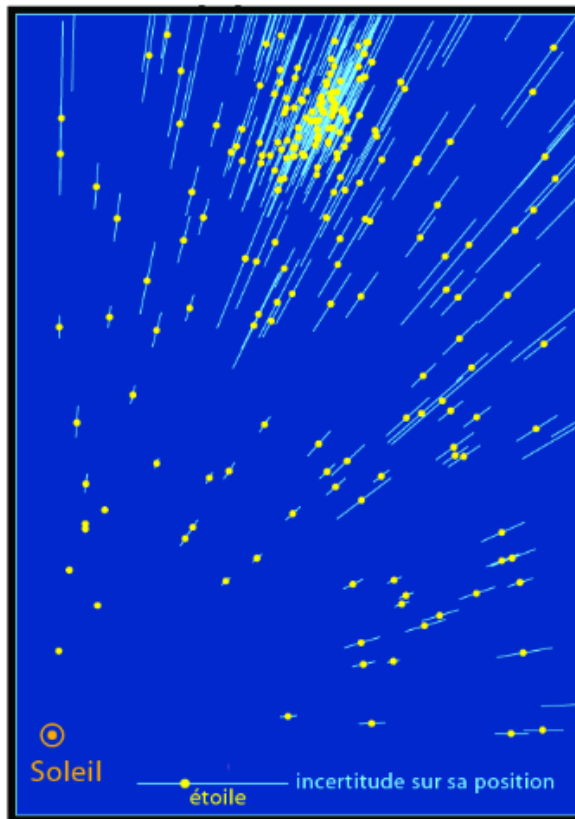


Пределы точного измерения расстояний

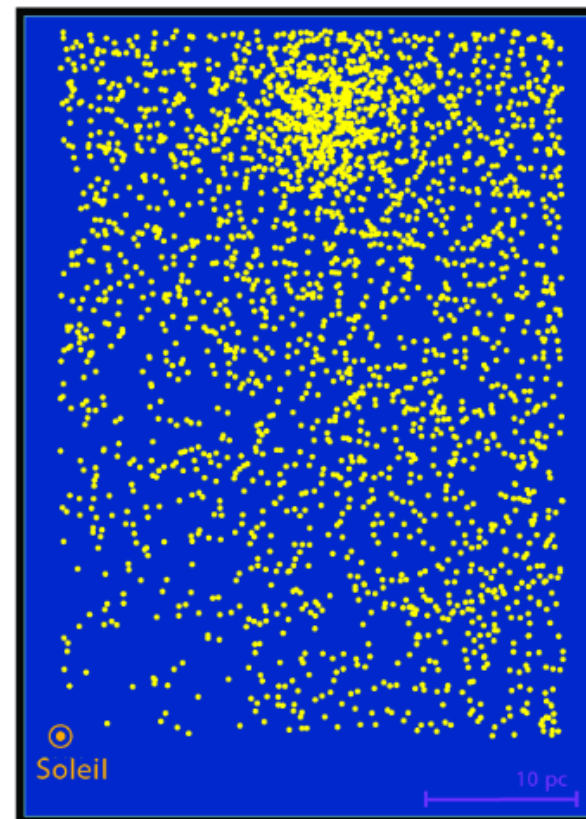
Sol



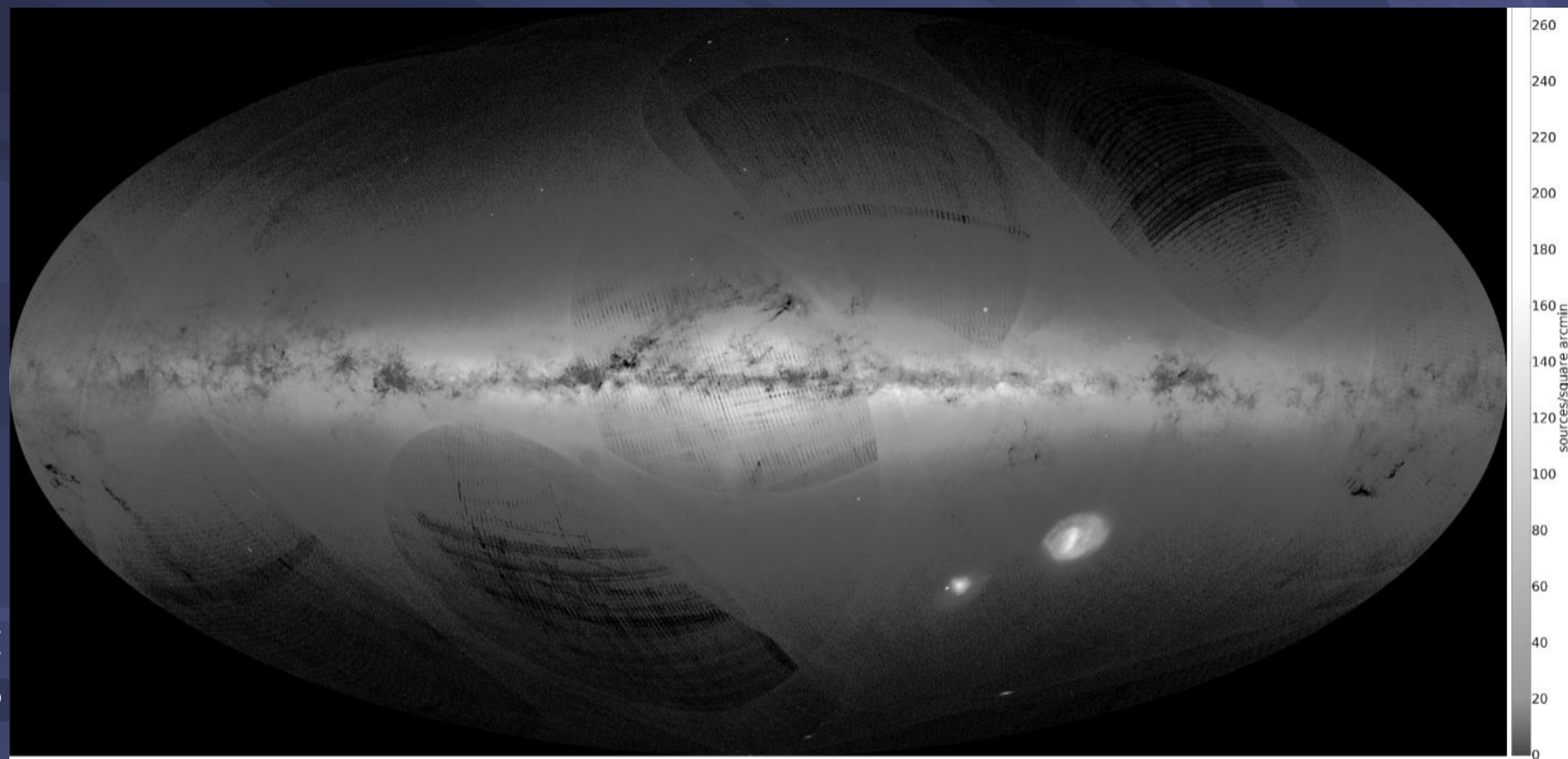
Hipparcos (1990)

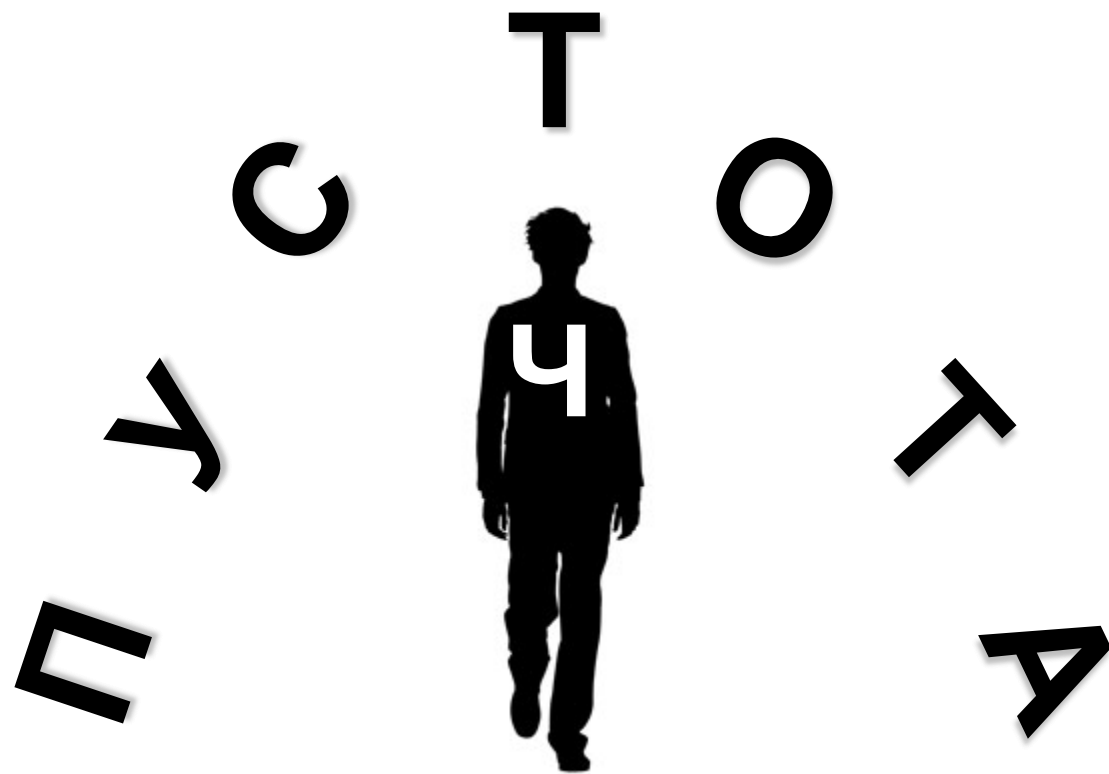


Gaia (2020)



Первый релиз данных Gaia



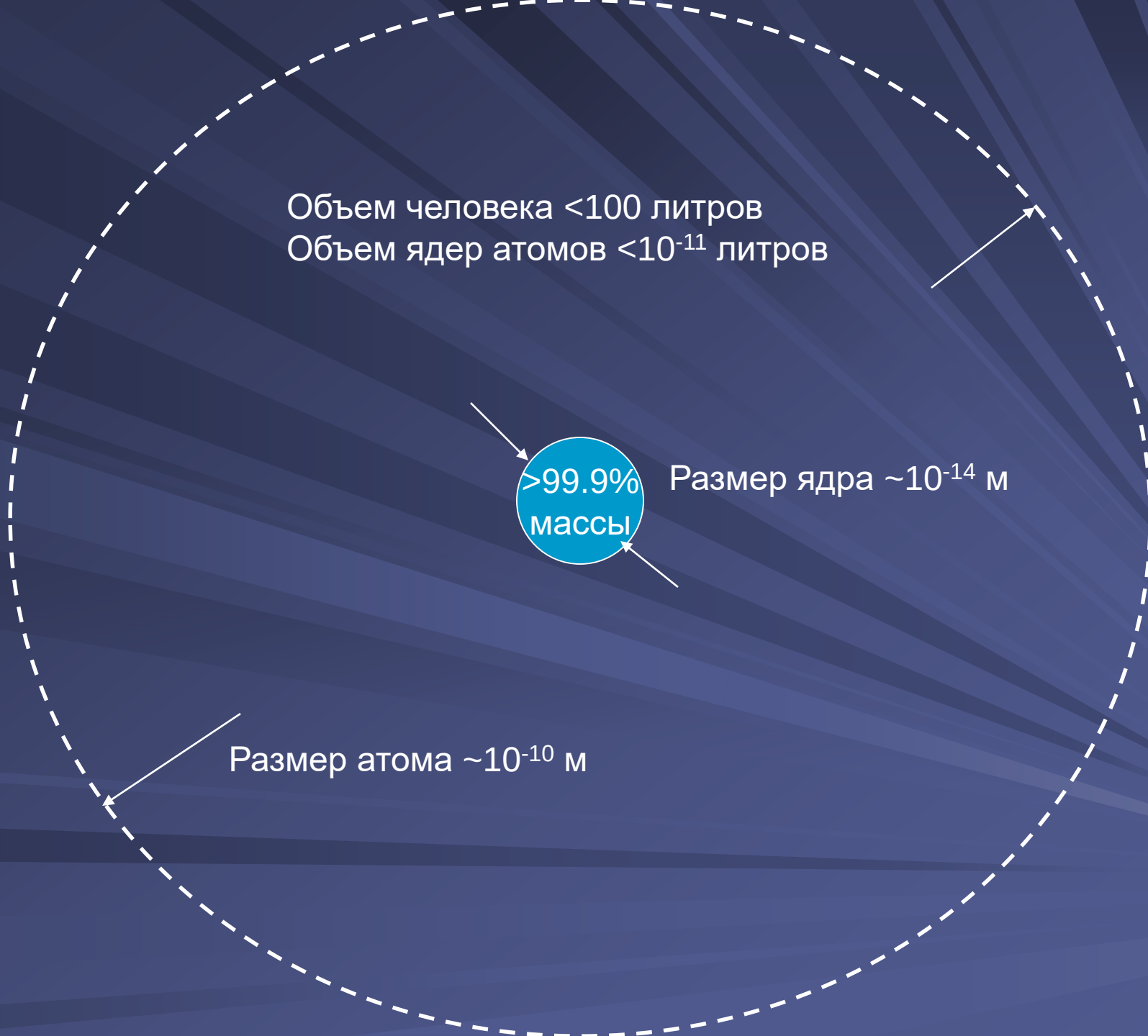


Объем человека < 100 литров
Объем ядер атомов $< 10^{-11}$ литров

$> 99.9\%$
массы

Размер ядра $\sim 10^{-14}$ м

Размер атома $\sim 10^{-10}$ м



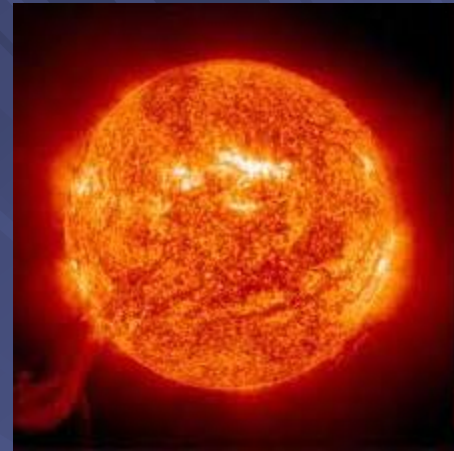


$V_{\text{звёзд}} < 10^{-30} V_{\text{вселенная}}$

Галактики и звёзды

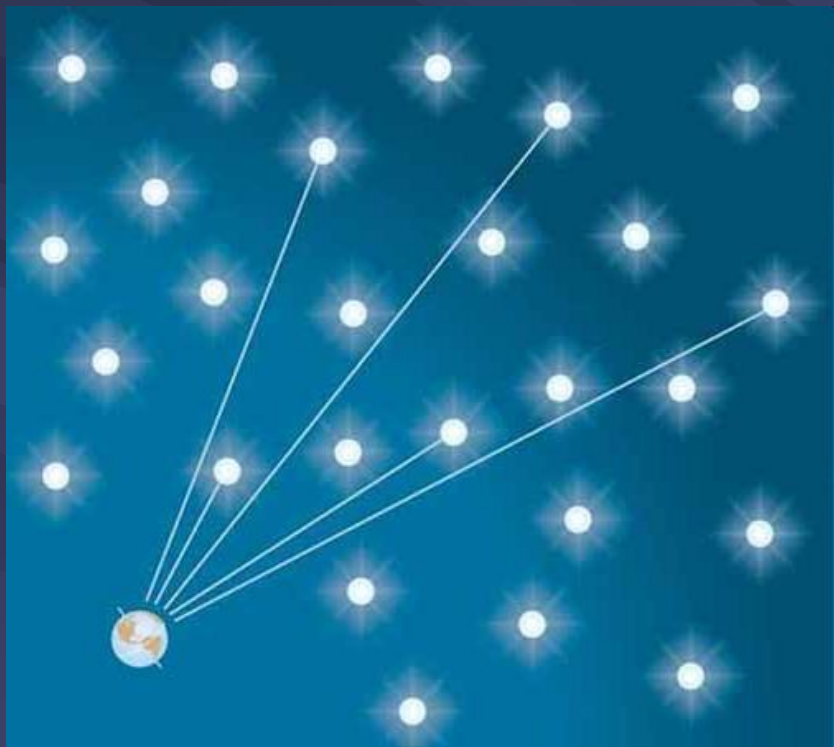


Свет звёзд



Мы видим мир, потому что есть свет звёзд

Парадокс Ольберса

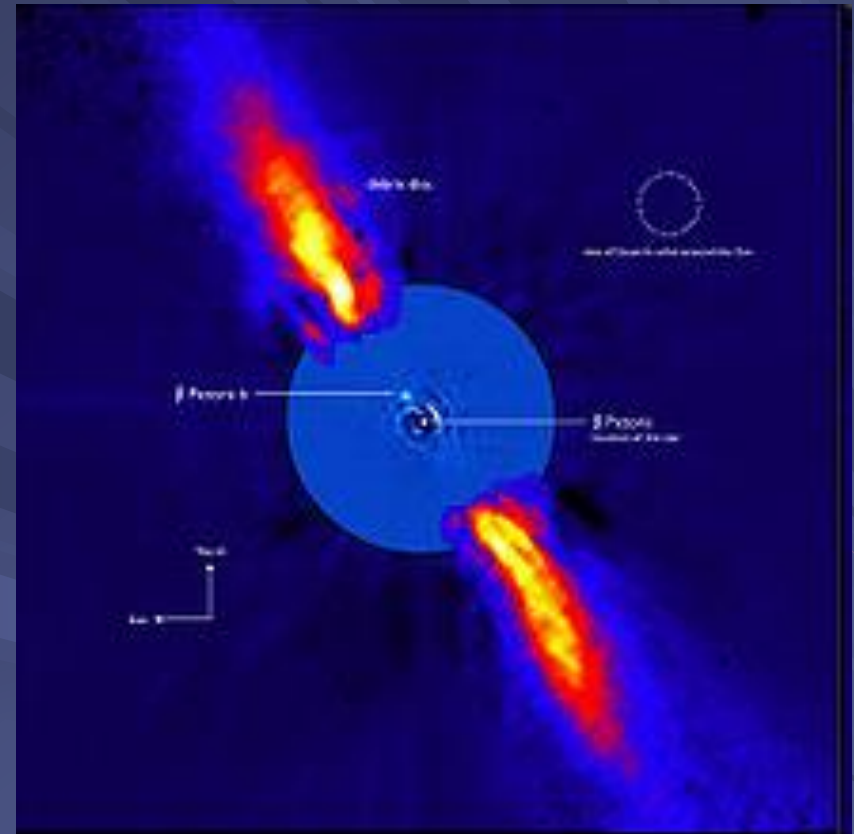


Значит, звёзды где-то «заканчиваются».

Мы смотрим в прошлое

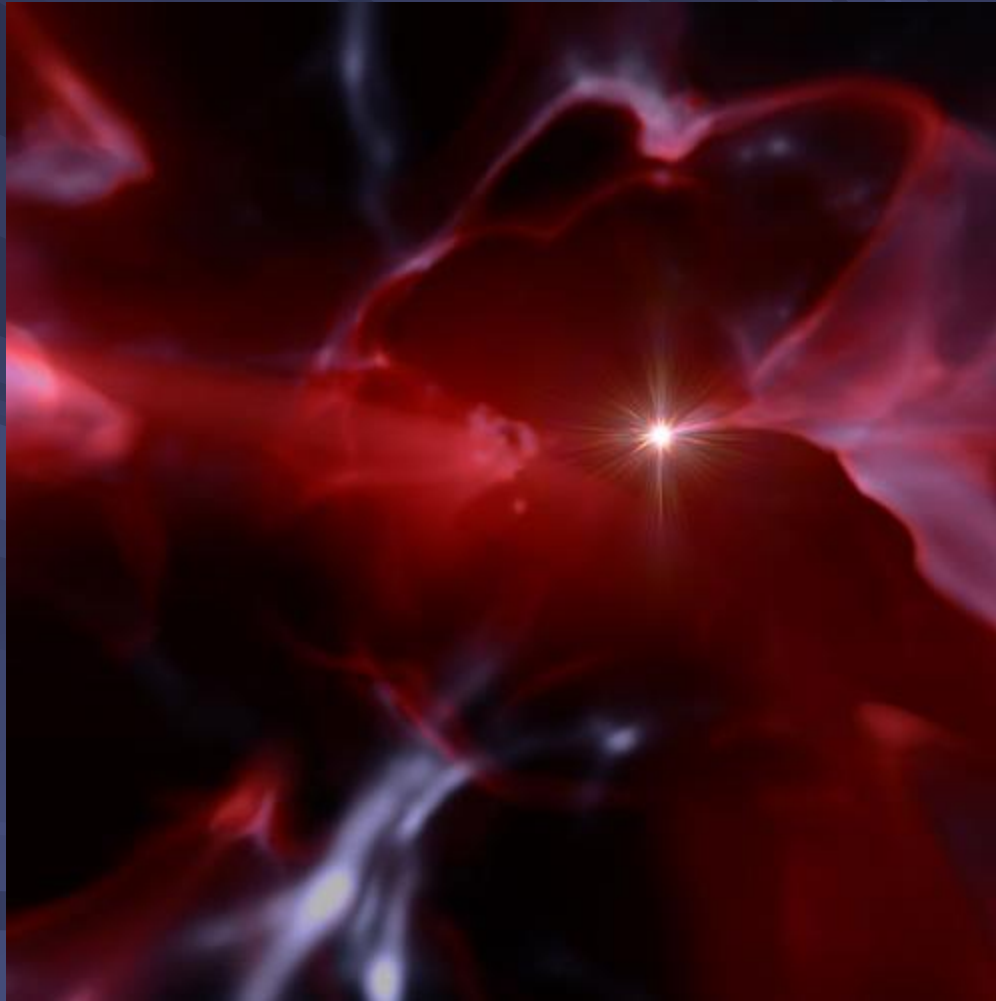
Звёзды когда-то возникли

Образование звёзд



Мы видим звёзды разных возрастов.
В том числе и молодые и только-только
образующиеся на наших глазах.

Первые звёзды



Звёзды образуются раньше галактик

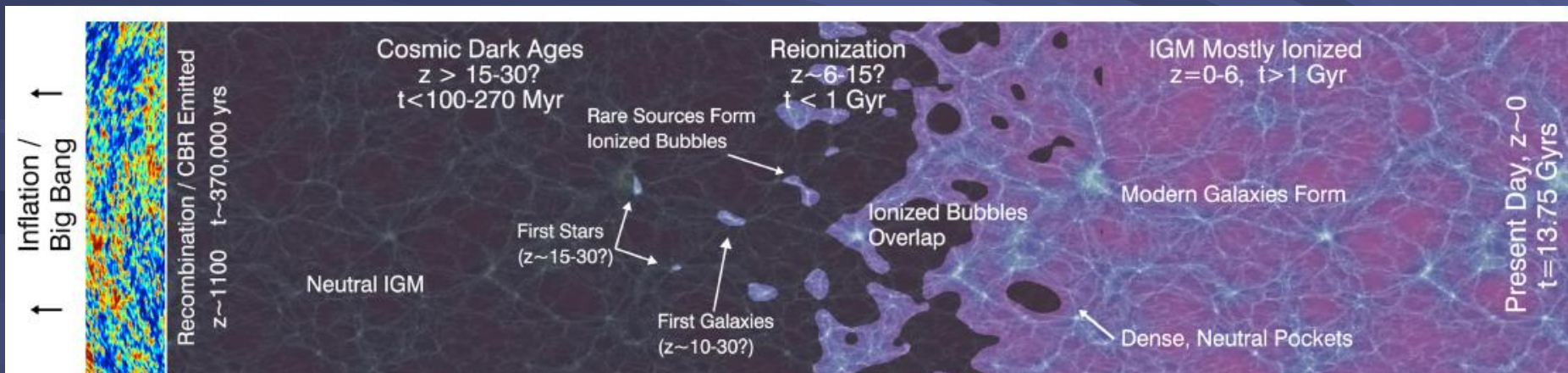
История вселенной

В начале вселенная была горячей. В течение сотен тысяч лет это были ионизованный водород и гелий.

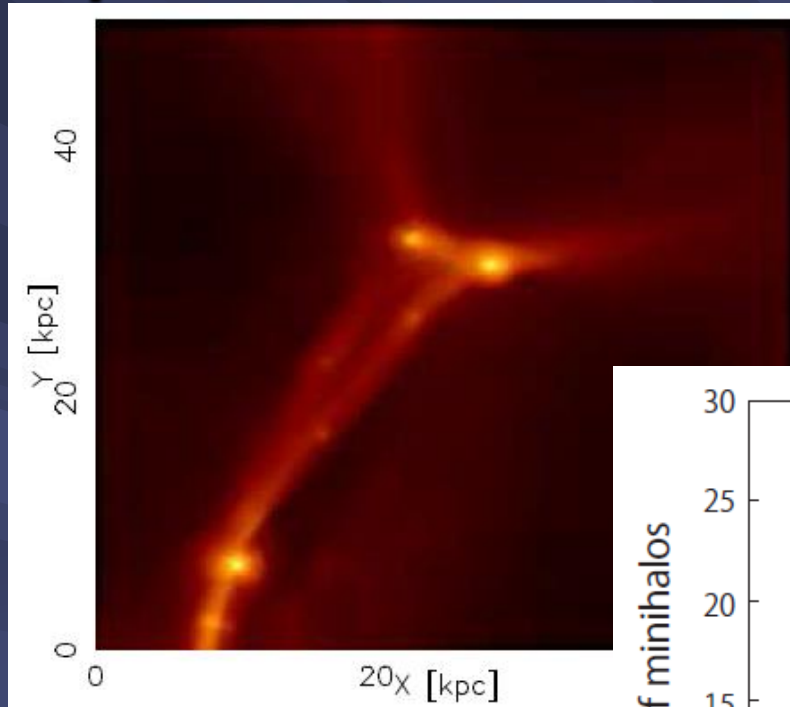
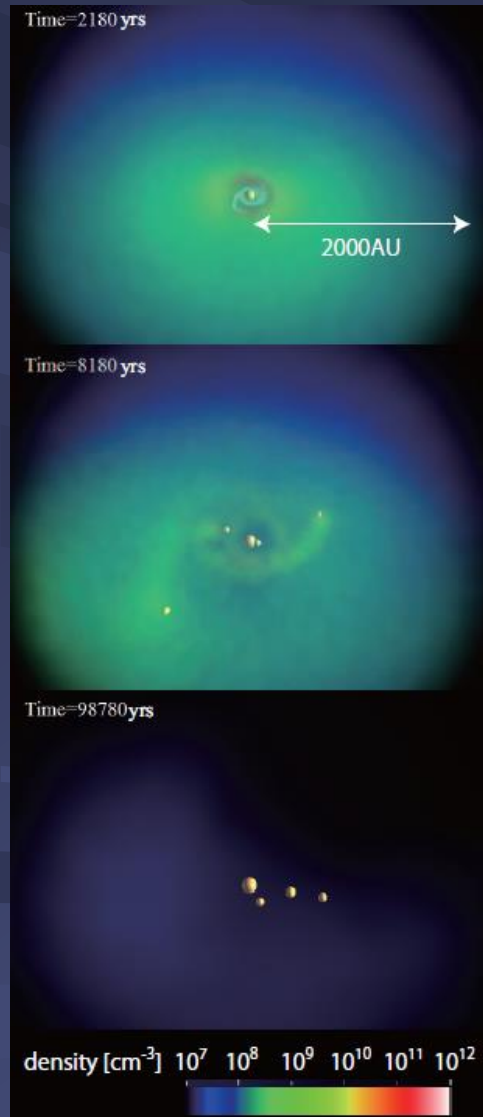
Спустя примерно 370 000 лет после начала расширения вещество рекомбинировало – стало нейтральным.

Наступили «темные времена».

Постепенно начали появляться первые звезды и квазары. Возникали галактики.

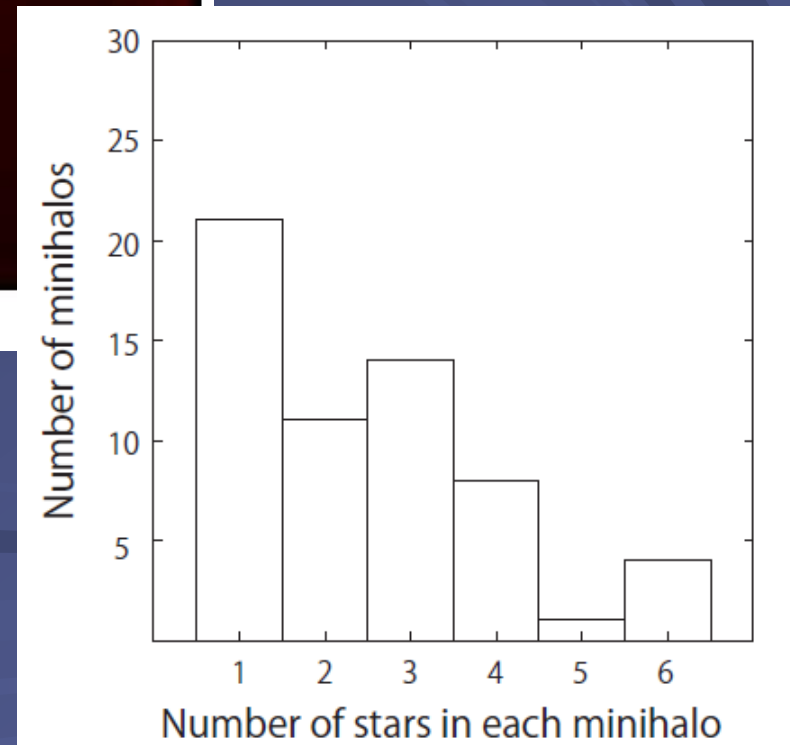


Моделирование первых звезд

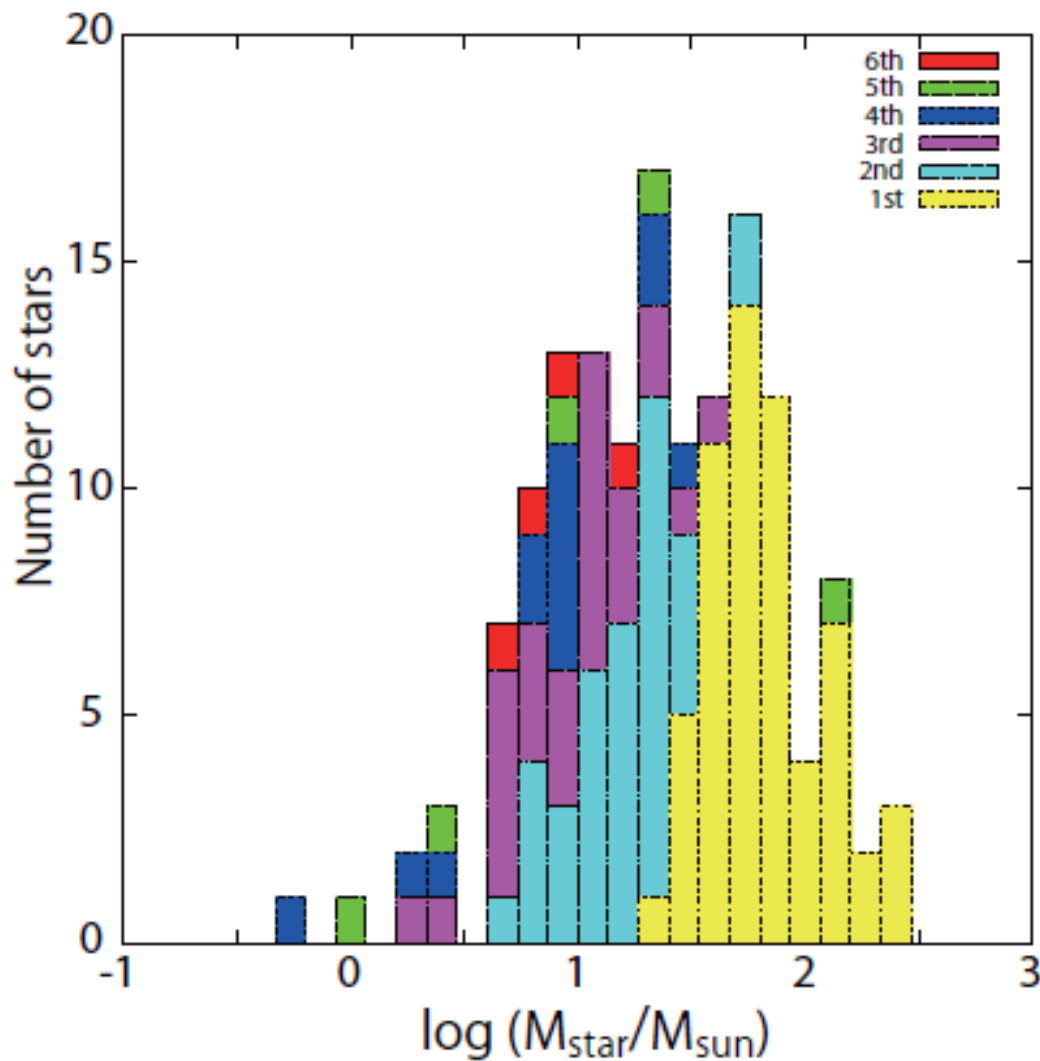


1407.1374

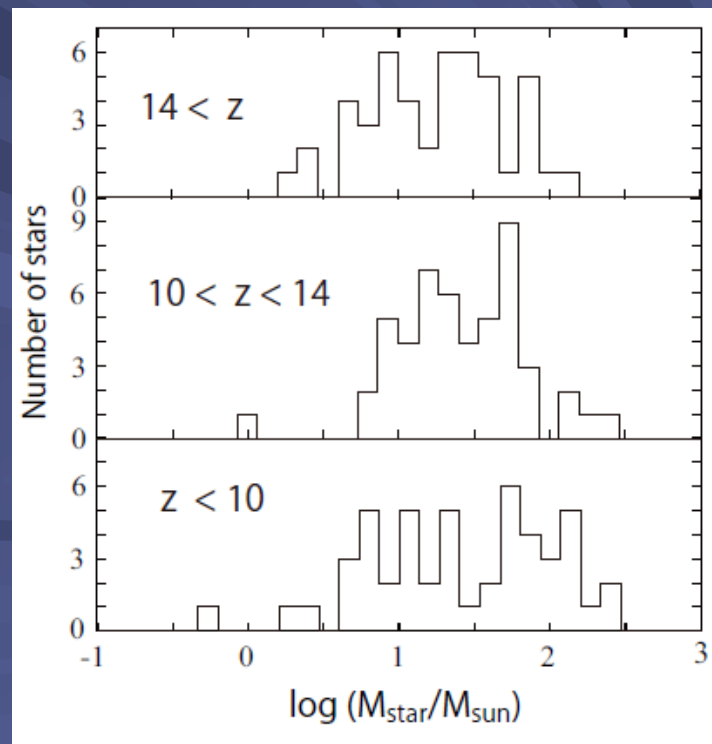
Часто в минигало
образуется более
чем одна звезда.
Поэтому звезды
могут быть не только
очень массивными.



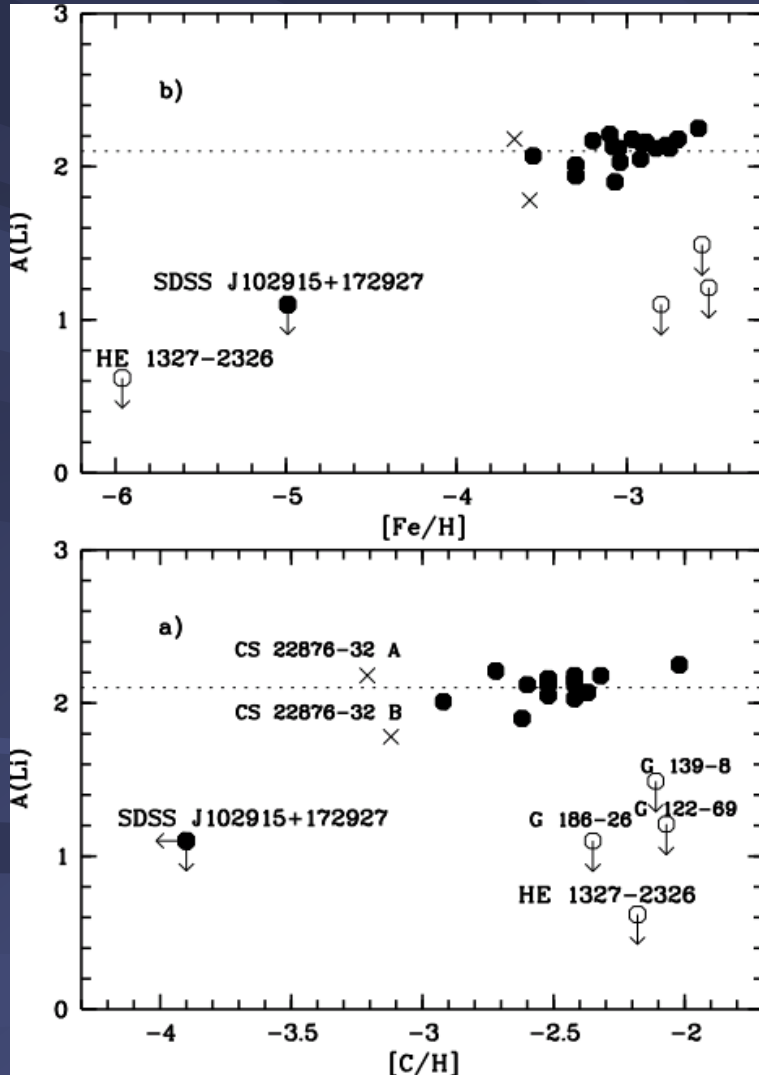
Спектр масс первых звезд



1407.1374



Очень малометаллическая звезда

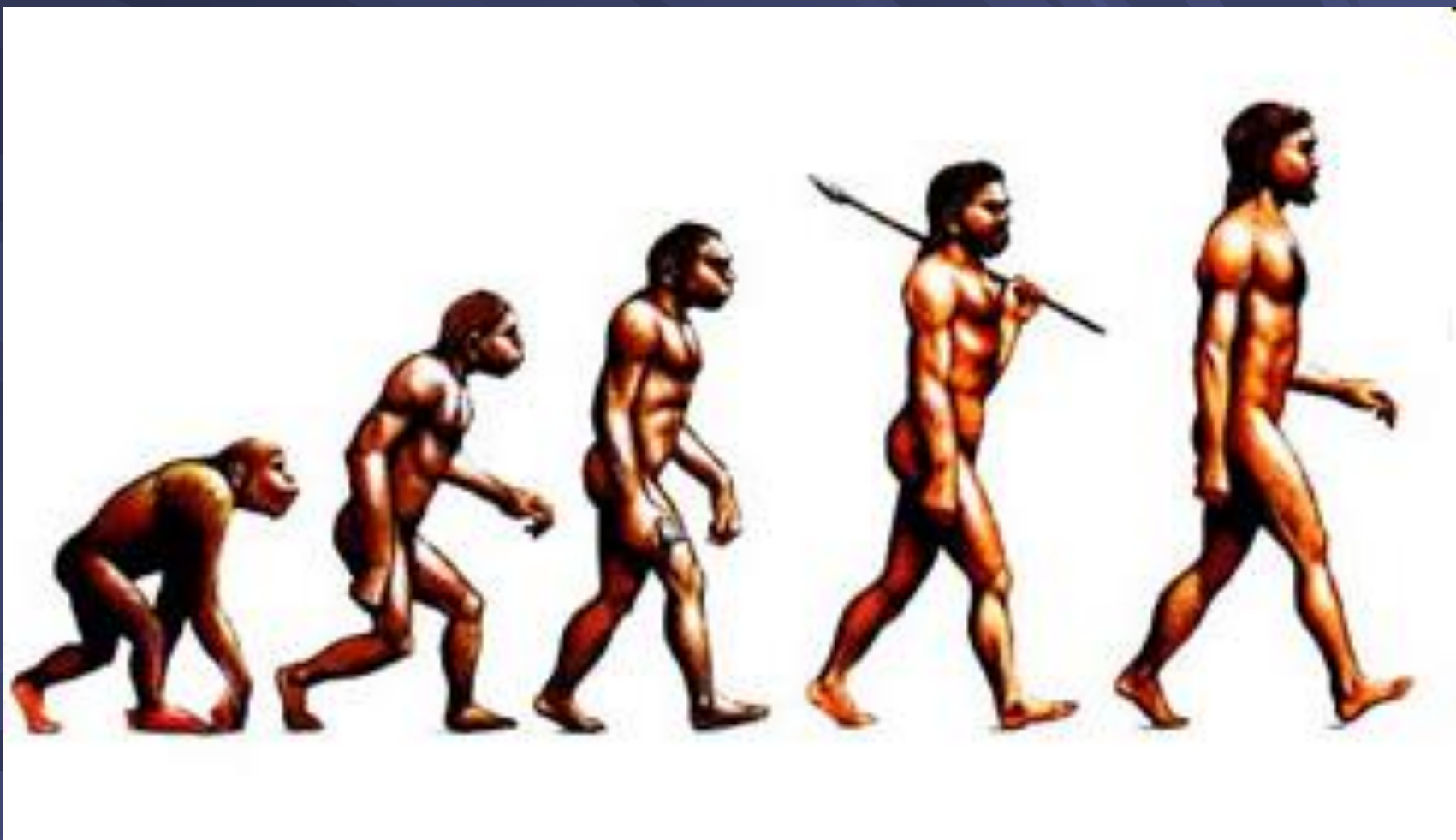


Самое низкое отношение C/H
Самая низкая металличность.

Если предел понизить еще в два раза,
то возникнут проблемы у моделей
образования самых первых звезд,
т.к. сейчас они говорят, что
маломассивные звезды не могли
образовываться из первичного вещества.

Наблюдения велись на VLT в Чили.

Эволюция



Эволюция звёзд



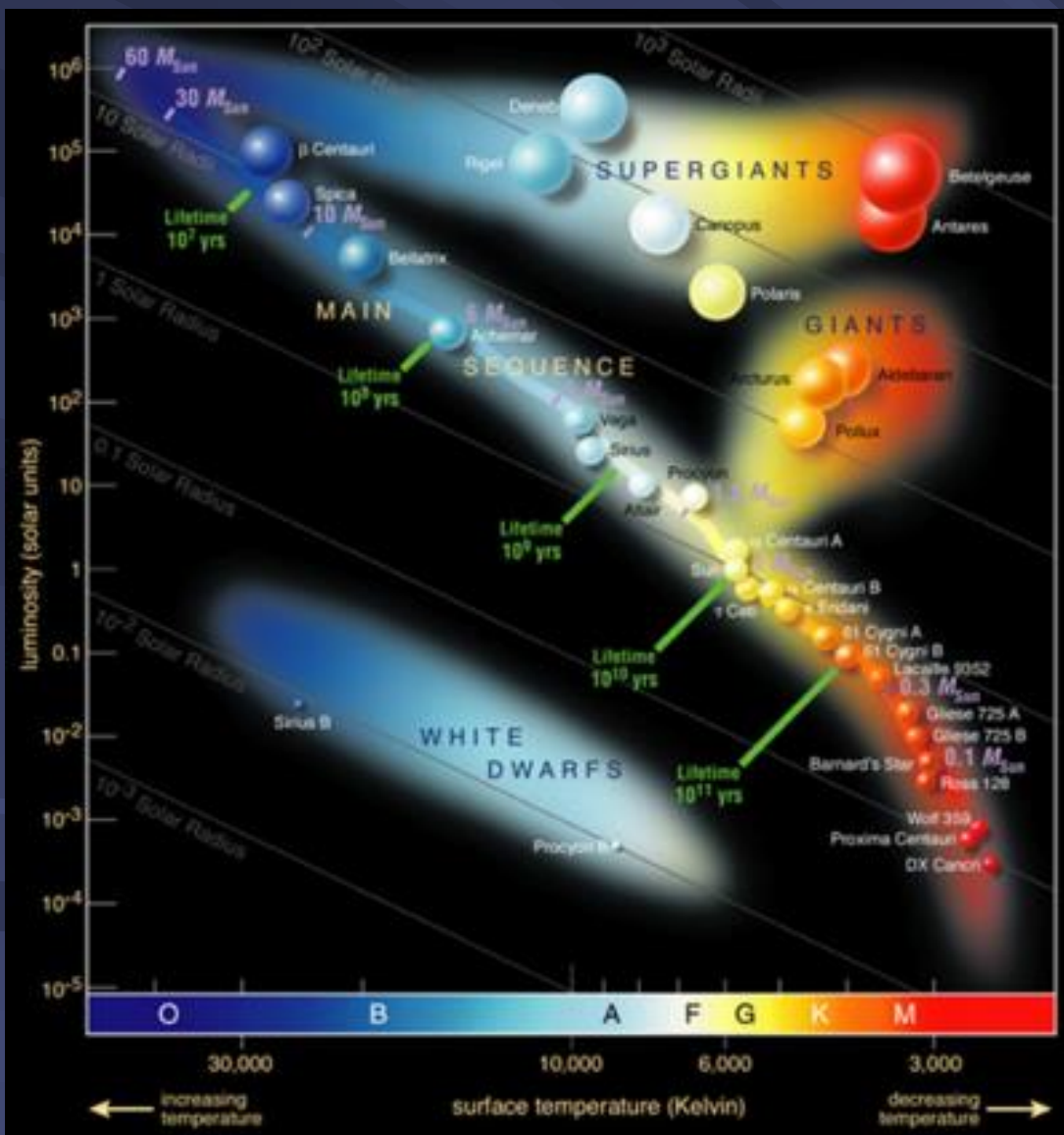
Популяция III – самые первые звёзды

Популяция II – старые звёзды в Галактике

Популяция I – «современные» звёзды (Солнце)

Меняется состав звёзд, меняются звёзды,
меняется их судьба

Диаграмма Герцшпрунга -Рассела



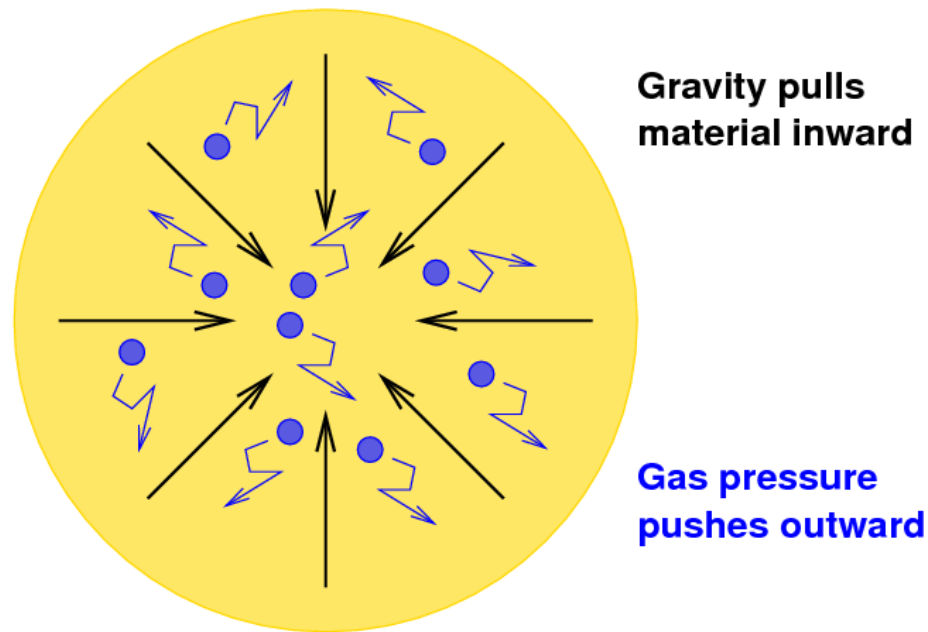
Самые легкие звезды имеют массу 0.08 солнечных.

Самые тяжелые из образующихся сейчас около 100-200.

С ростом массы резко растет светимость.

Время жизни тем больше, чем меньше масса звезды.

Горение водорода в звездах и альтернативные теории гравитации



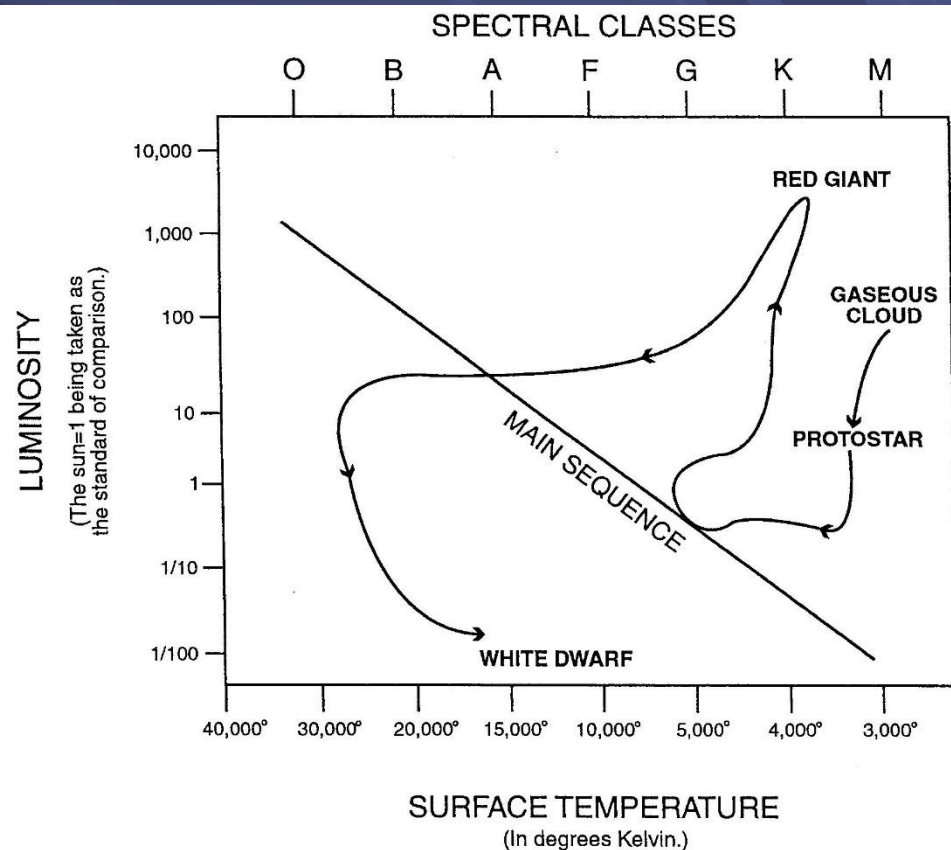
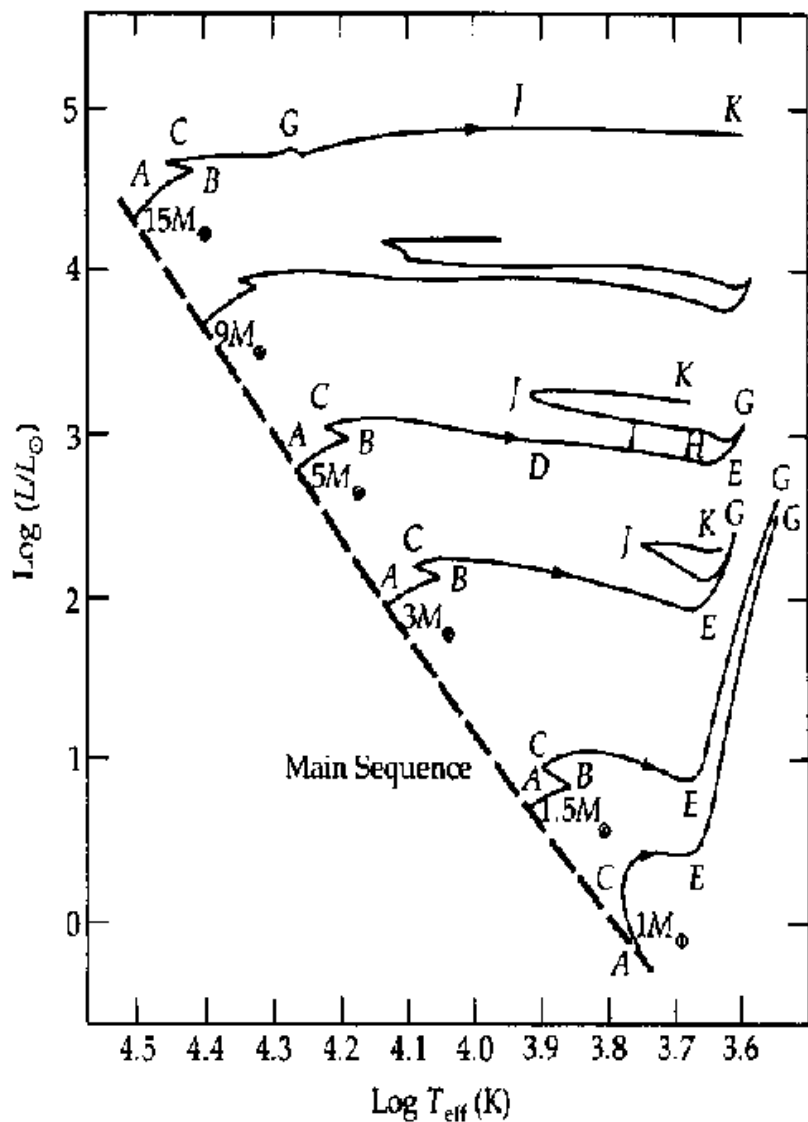
Автор статьи 1510.05964 показывает, что известный предел на минимальную массу звезд (т.е. на начало термоядерных реакций) позволяет дать важные ограничения на альтернативные модели гравитации.

Оказывается, что этот предел весьма чувствителен к параметрам модели. Настолько, что позволяет закрыть некоторый важный диапазон параметров.

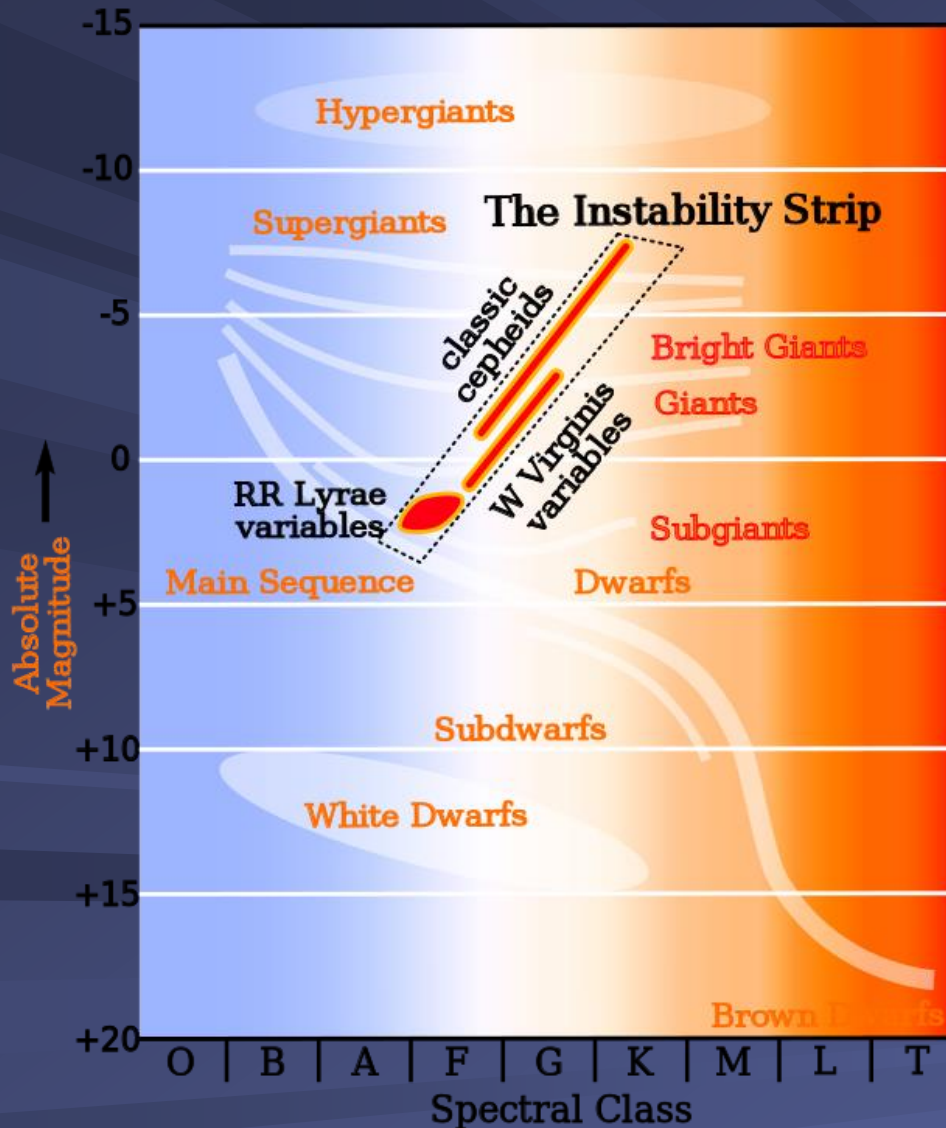
Т.о., если скалярно-тензорные теории и верны, то параметры должны быть таковы, что известные эффекты (здесь речь идет о космологической постоянной, кривых вращения галактик и т.д.) нельзя будет объяснить альтернативной гравитацией.

Эволюция на диаграмме Г-Р

Дольше всего звезды находятся на главной последовательности.



Область неустойчивости



В ходе своей эволюции массивные звезды попадают в область, где они становятся неустойчивыми. Начинаются пульсации.

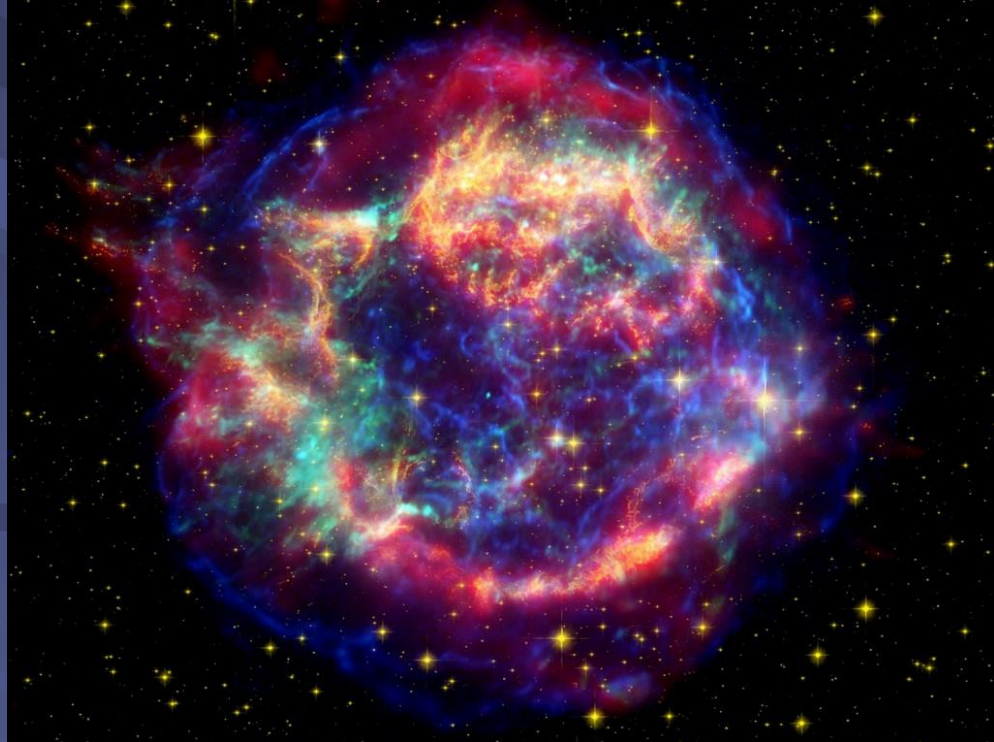
Известным классом пульсирующих звезд являются цефеиды.

Они характерны тем, что у них светимость коррелирует с периодом пульсаций.

Это позволяет использовать их для измерения расстояний.

Химическая эволюция и звезды

В течение своей жизни и по ее окончании звезды сбрасывают часть своего вещества, обогащенного синтезированными элементами, в межзвездное пространство. Так в наши дни изменяется химический состав вселенной.



Возникновение элементов во Вселенной

Большинство химических элементов, с которыми мы сталкиваемся в жизни (и из которых состоим), возникли в звездах в течение их жизни в результате термоядерных реакций, или на последних стадиях жизни массивных звезд – во взрывах сверхновых.

До образования звезд обычное вещество в основном существовало в виде водорода (самый распространенный элемент) и гелия.

H																	He
Li	Be											B	C	N	O	F	Ne
Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
Cs	Ba		Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
Fr	Ra																
			La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
			Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr

Big Bang

Supernovae

Large Stars

Small Stars

Cosmic Rays

S-процесс

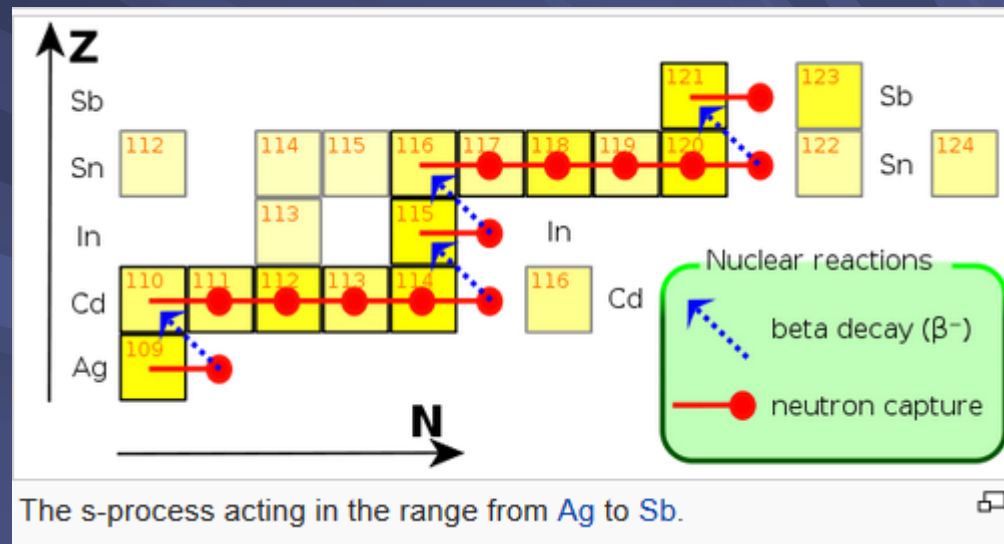


Этот процесс дает свободные нейтроны, которые легко проникают в ядра.

Идет в оболочках звезд-гигантов.

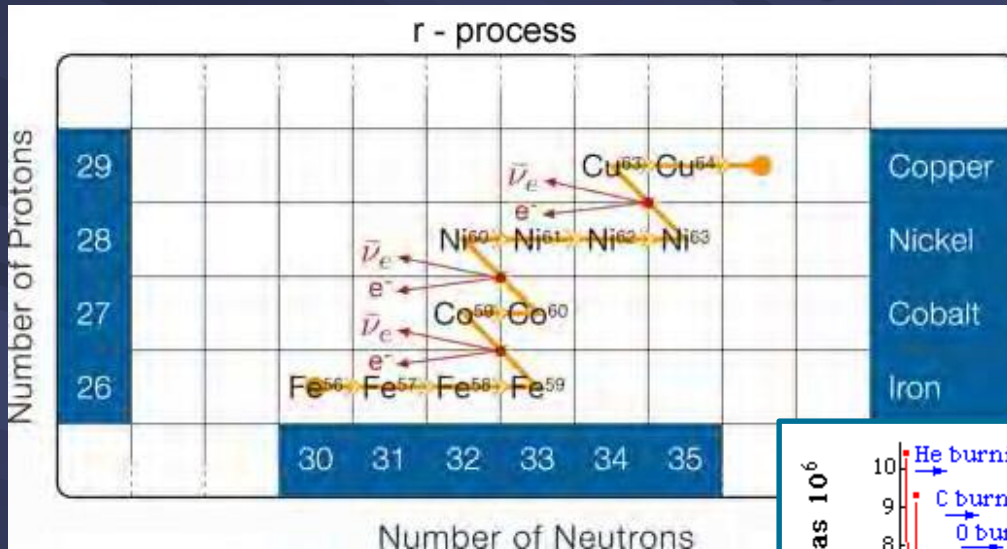
Медленный захват нейтронов.
Идет при относительно низкой плотности нейтронов.

Захваченный нейтрон испытывает в ядре бета-распад, превращаясь в протон.



Синтез элементов с массой до сотни и примерно от 138 до 208

R-процесс

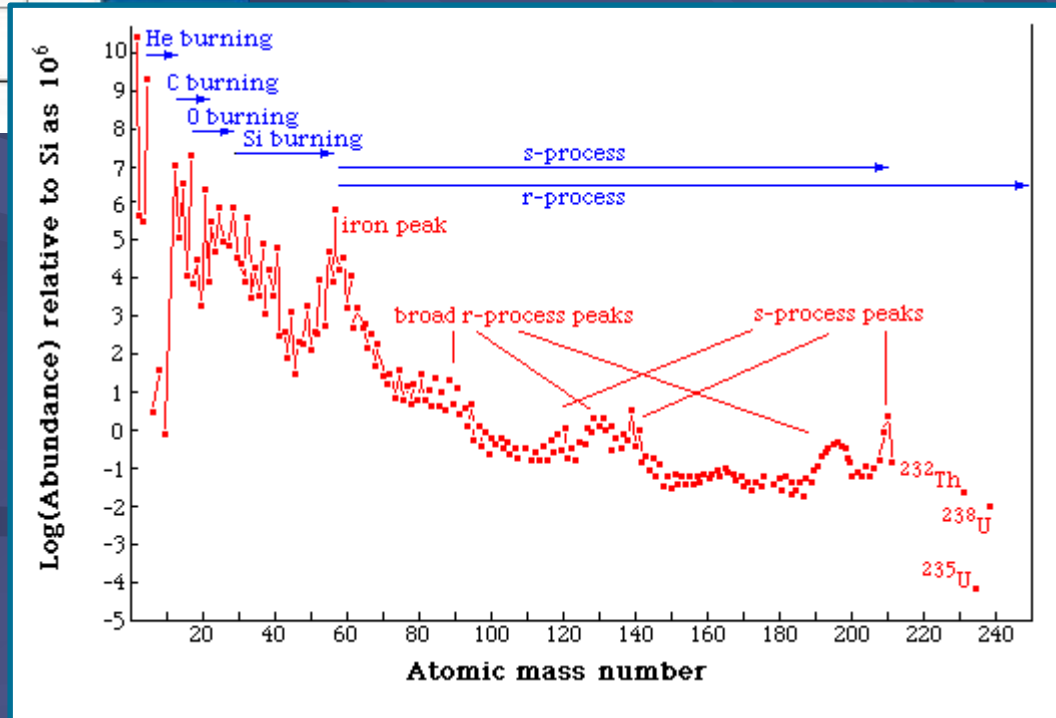


Идет во вспышках сверхновых и при слиянии нейтронных звезд.

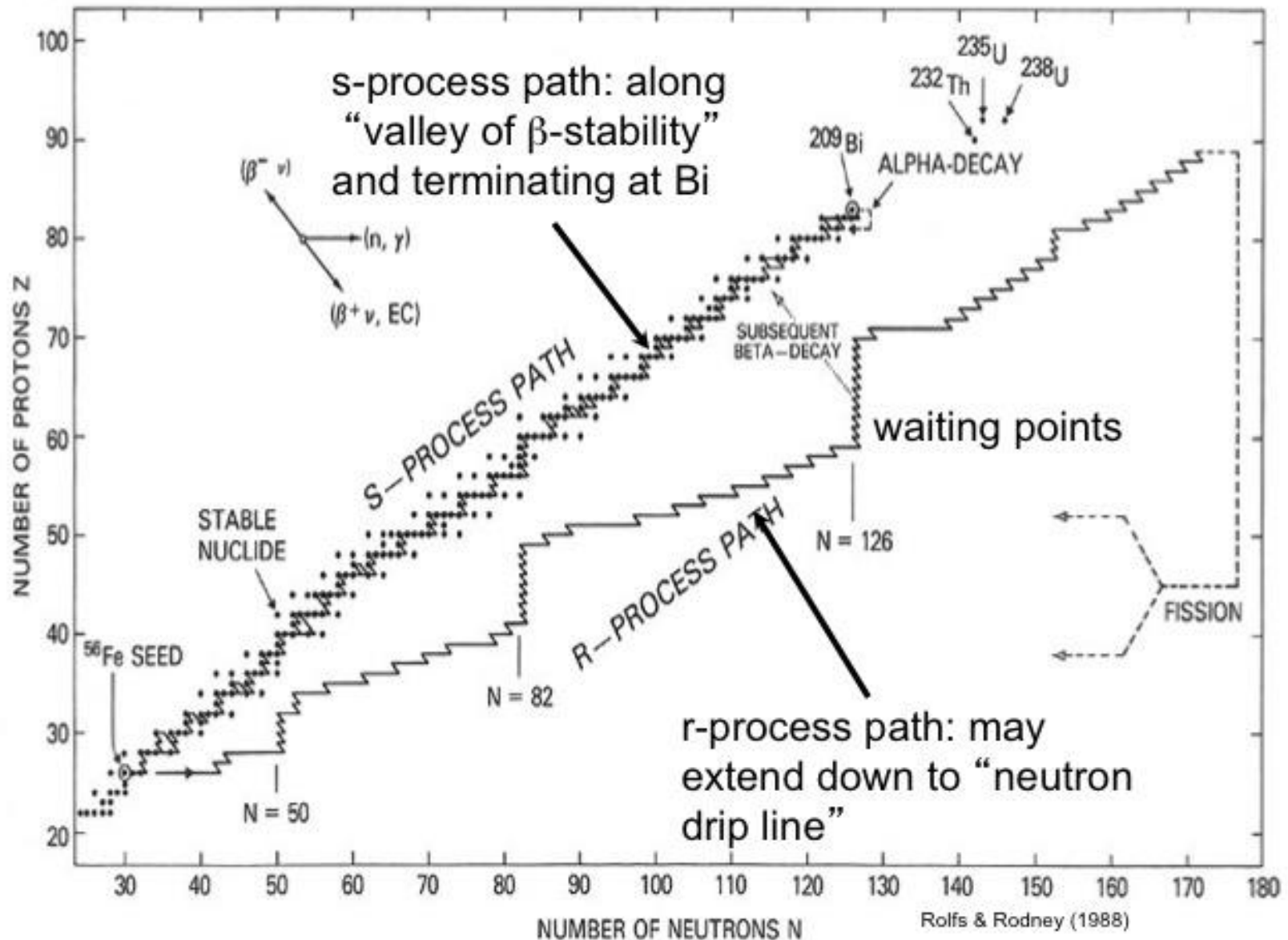
Важен для тяжелых элементов вплоть до урана.

Протекает при очень высокой плотности нейтронов. Например, при нейтронизации вещества в сверхновых.

Возникают насыщенные нейтронами ядра.



r- and *s*-process synthesis paths



Мафусаил: очень старая звезда в солнечной окрестности

HD 140283
субгигант
из гало Галактики

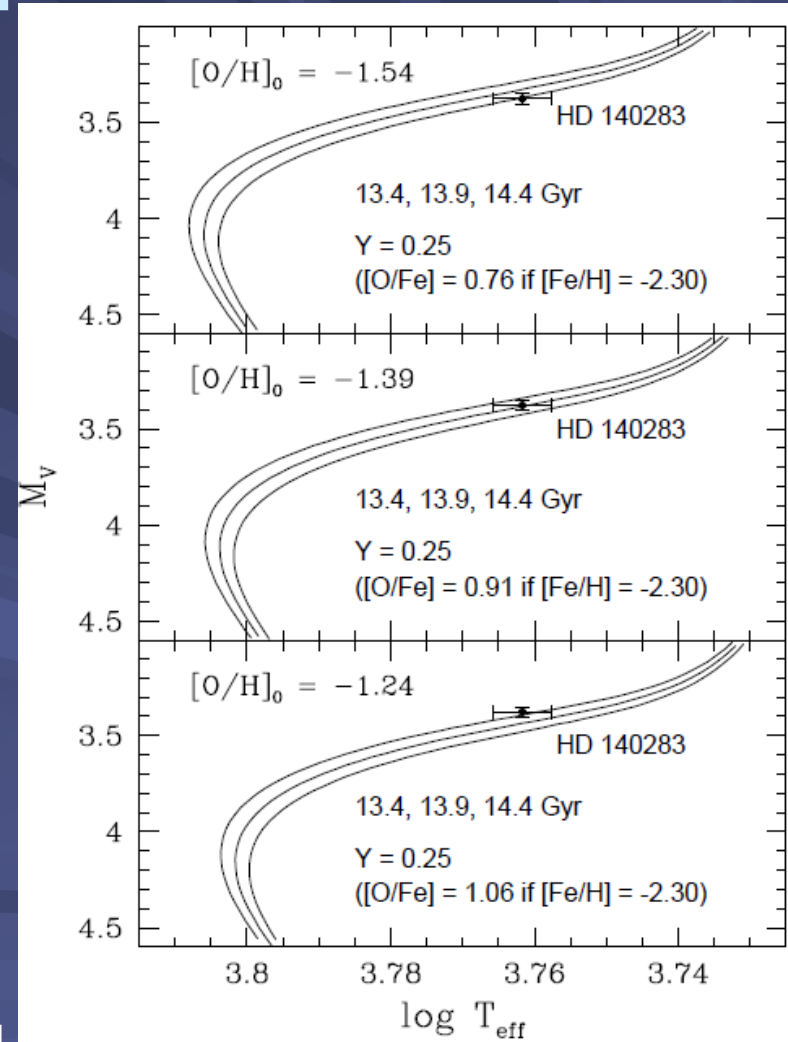
Расстояние
<200 световых лет

Возраст
>13.4 млрд. лет

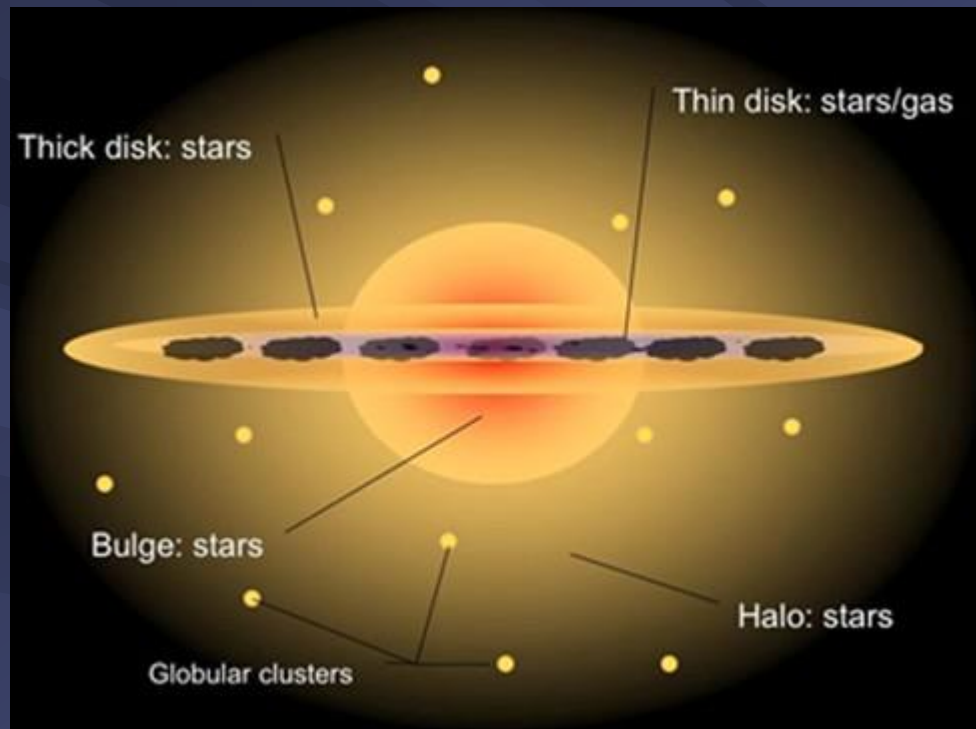
Эволюционная стадия
звезды позволяет
довольно точно
оценить ее возраст,
зная светимость



Самая старая звезда,
но «металличность»
все-таки не нулевая,
т.е. это не звезда из
самого первого поколения.

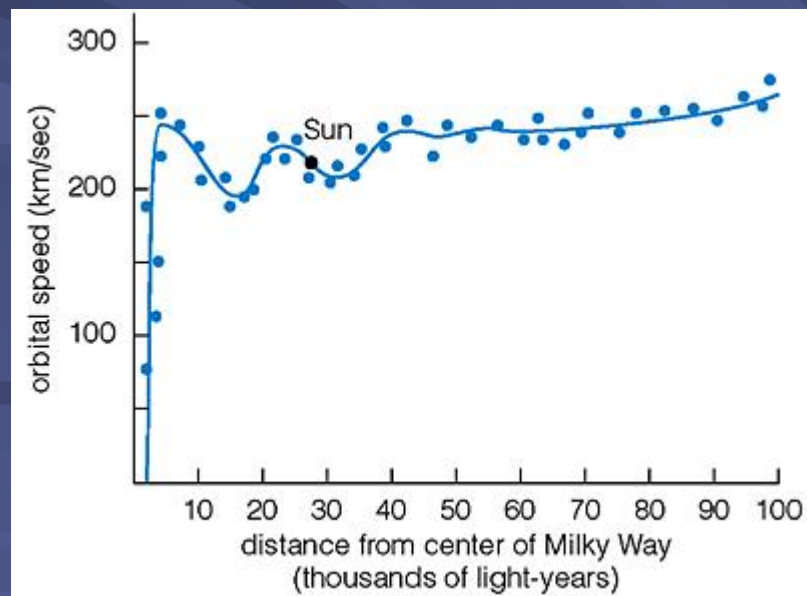


Скорости звезд в Галактике



Однако звезды диска двигаются друг относительно друга с небольшими скоростями: порядка 30 км/с.

Круговые скорости звезд в Галактике довольно велики - >200 км/с. Это позволяет оценить скорость убегания. С учетом гало она оказывается ~ 500 км/с, и зависит от расстояния от центра.



Убегающие звезды



Динамическое взаимодействие



Распад двойной системы

Оба варианта приводят к появлению массивных одиночных звезд со скоростями в 2-3 раза выше, чем в среднем.

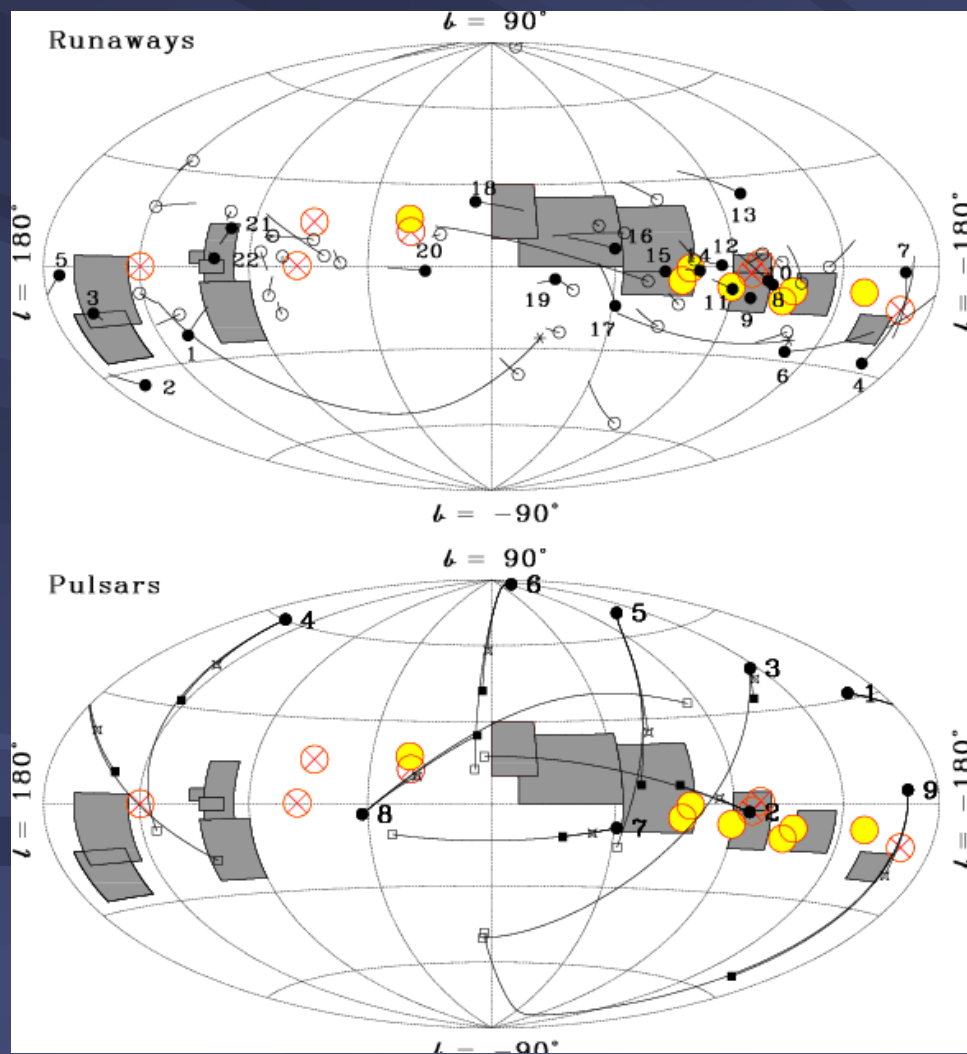
Типичные скорости 50-70 км в сек.

Открыты в 1947 г.

Известно много десятков таких объектов.

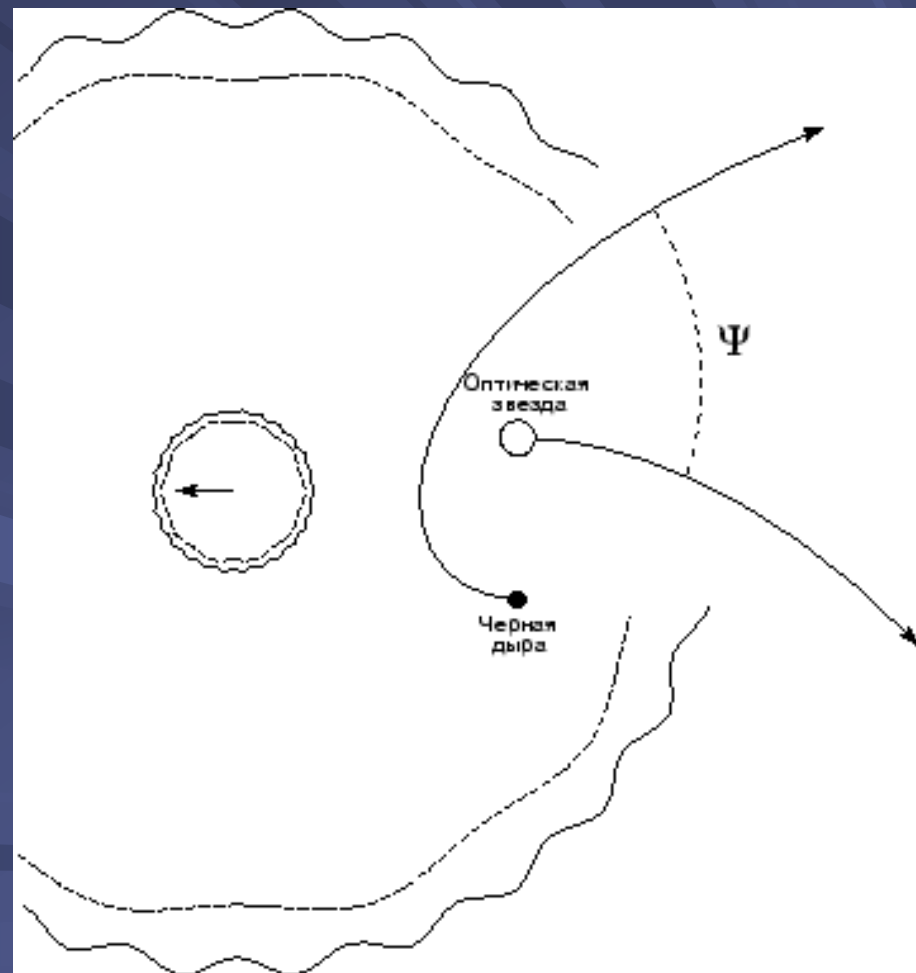
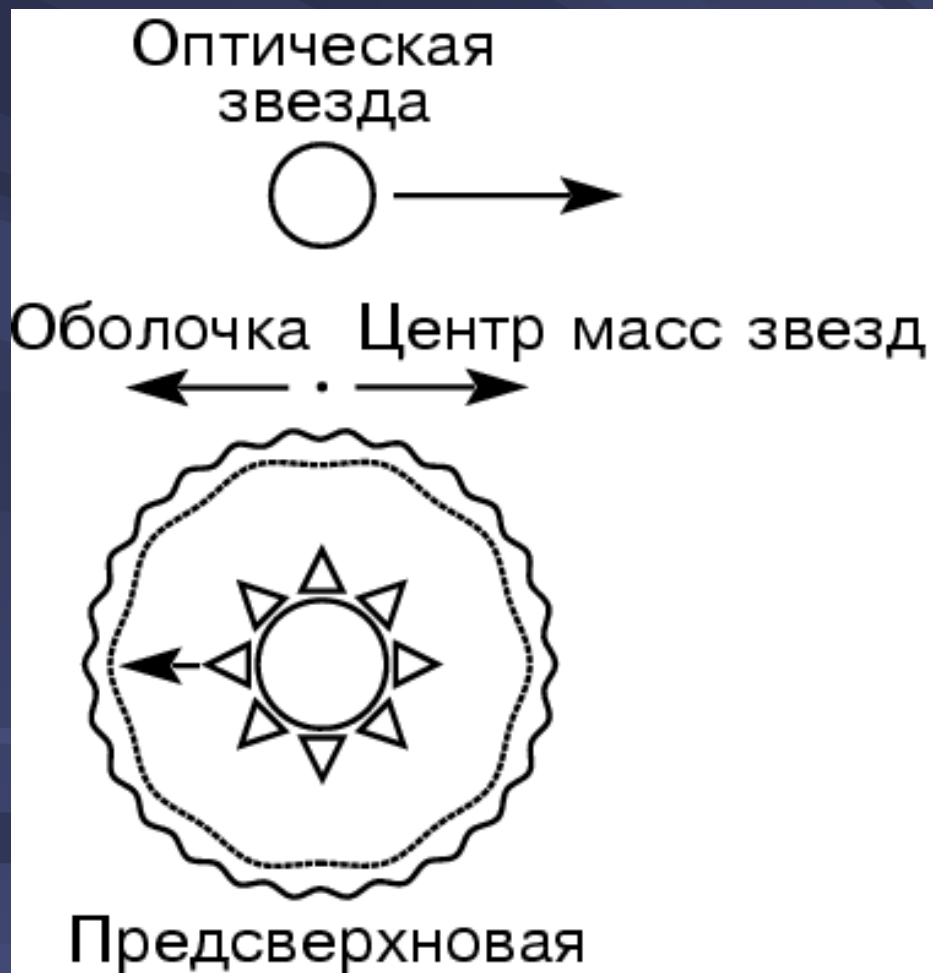
В окрестности Солнца 10-30% звезд класса О и 5-10% звезд класса В относятся к убегающим.

Материнские скопления убегающих звезд

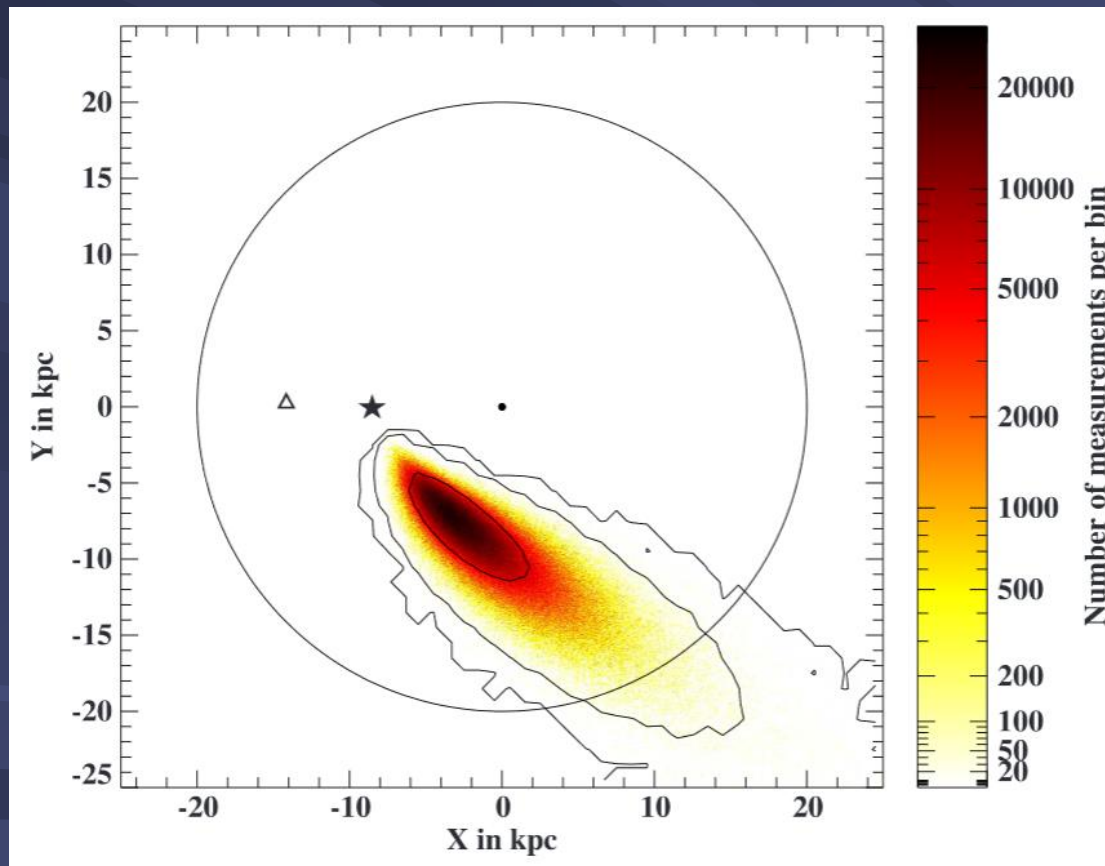


Можно определить, в каких скоплениях родились убегающие звезды. Также можно найти нейтронные звезды, с которыми связаны убегающие.

Распад двойной системы



Самая быстрая в Галактике

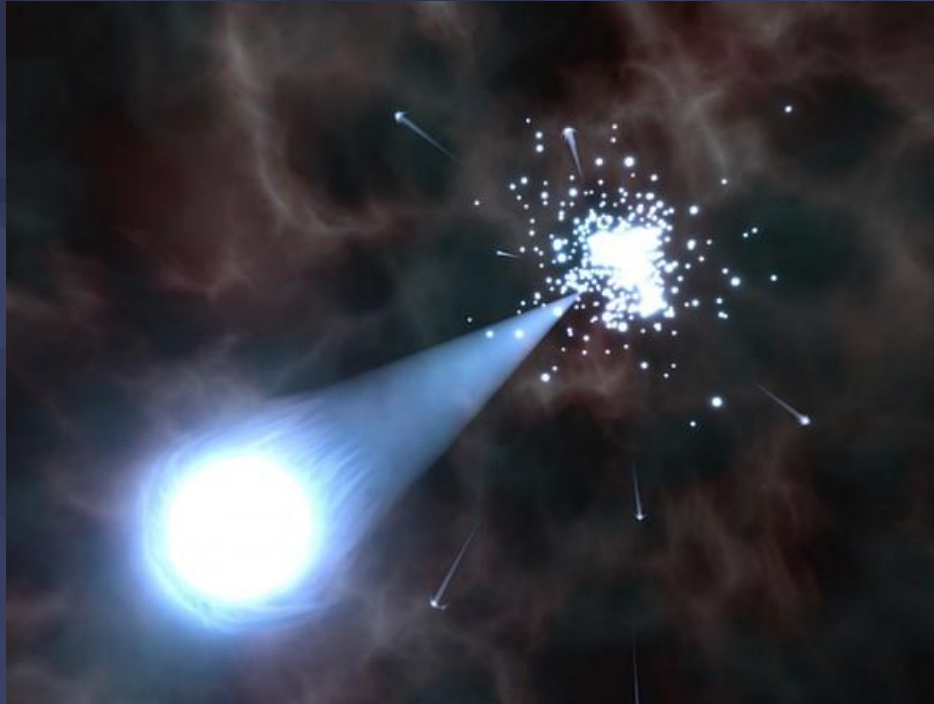


US 708
1200 км/с

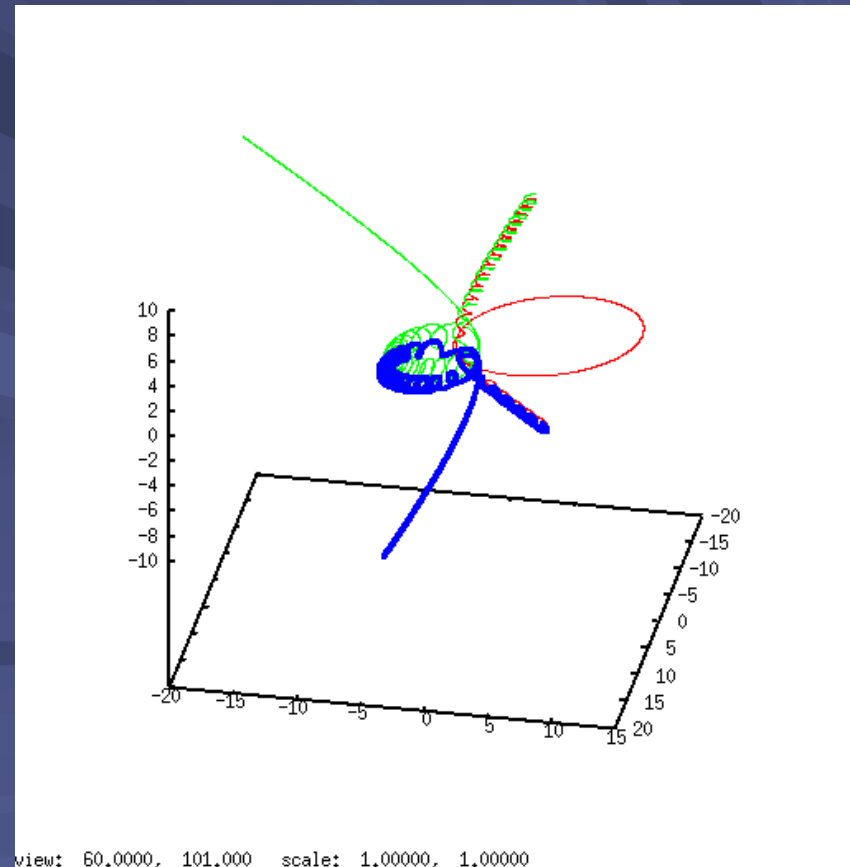
Летит не из центра Галактики.
Наиболее вероятно,
что она родилась в двойной
системе, разрушенной
взрывом сверхновой.
Причем, сверхновой Ia!

Динамическое взаимодействие

Взаимодействие трех или четырех звезд в скоплении может привести к вылету одной из звезд с большой скоростью.

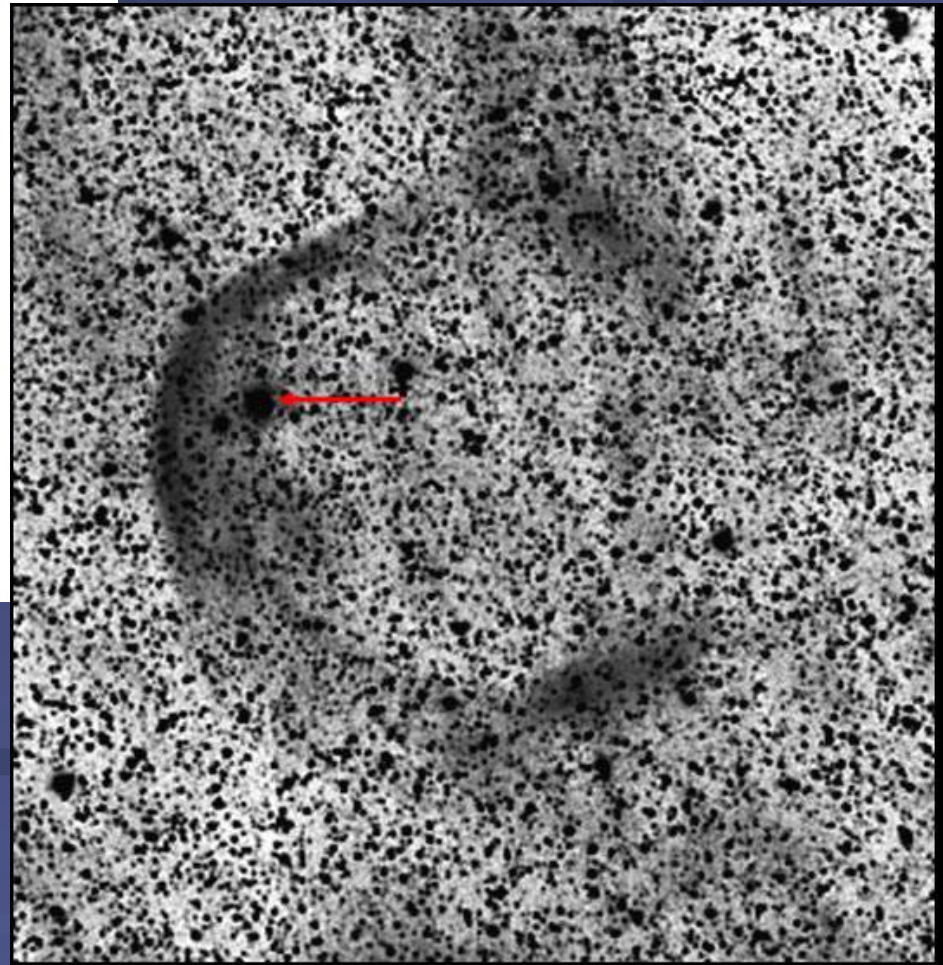
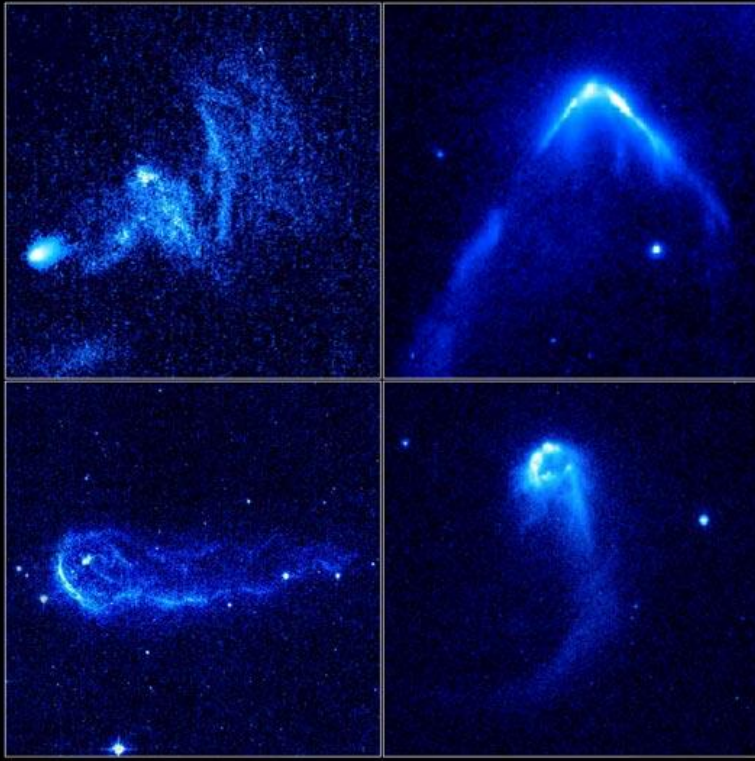


Типичная «добавка» к скорости – десятки км в сек. Но может быть и намного больше:
 $v_{\max} = (2GM/R)^{1/2}$, где M и R – параметры наиболее массивной звезды, участвующей во взаимодействии.



Взаимодействие с газом среды

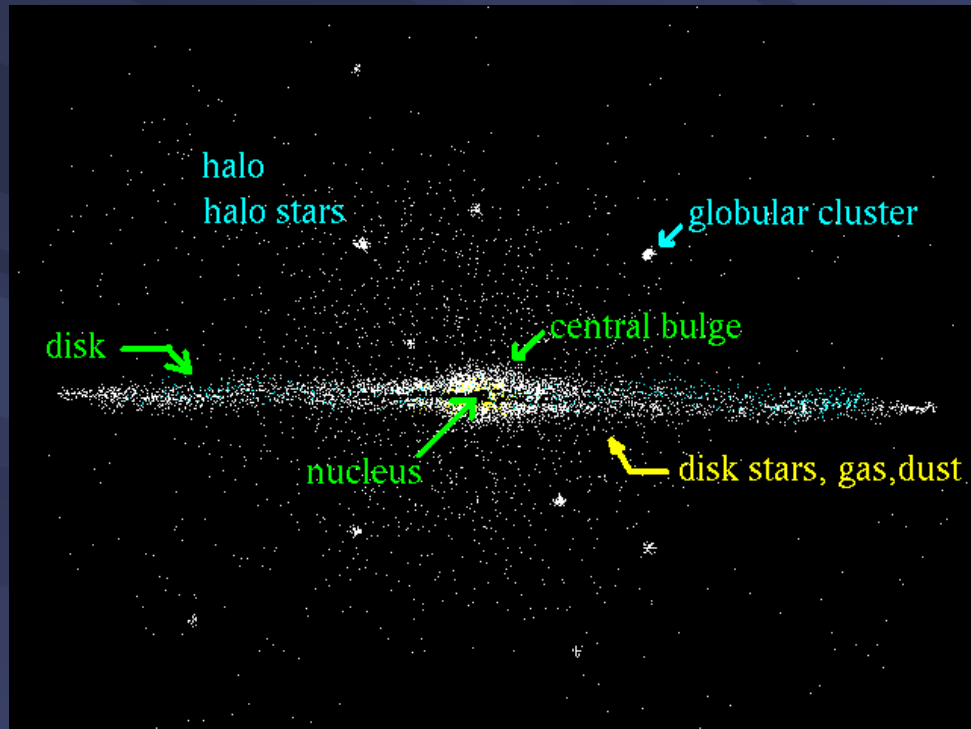
Быстродвигающиеся звезды
приводят к образованию
ударных волн



Скорость звука
в МЗС -
10 км в сек



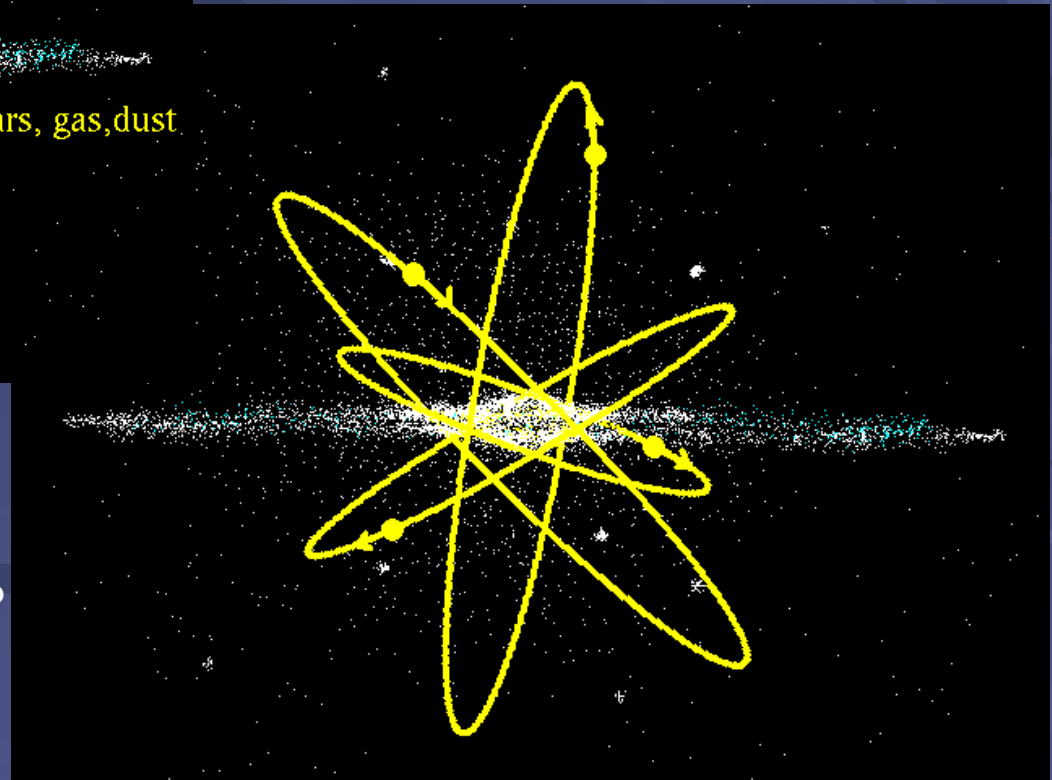
Звезды гало



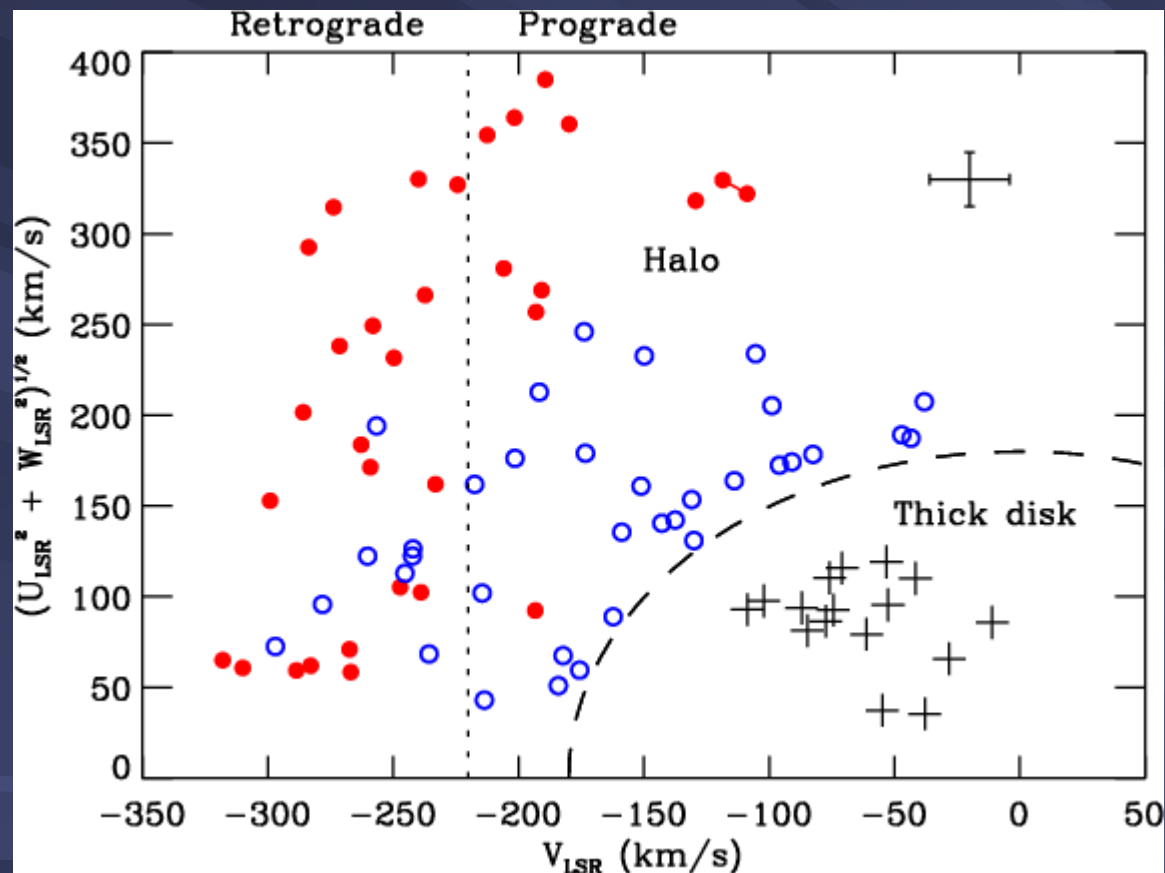
Круговая скорость на орбите Солнца более 200 км в сек.

Но, двигаясь по вытянутым орбитам, звезды гало, пересекая диск, могут иметь скорости даже несколько выше.

В солнечной окрестности звезды гало можно выделить по высокой скорости относительно близких звезд (нас) и по траектории движения.



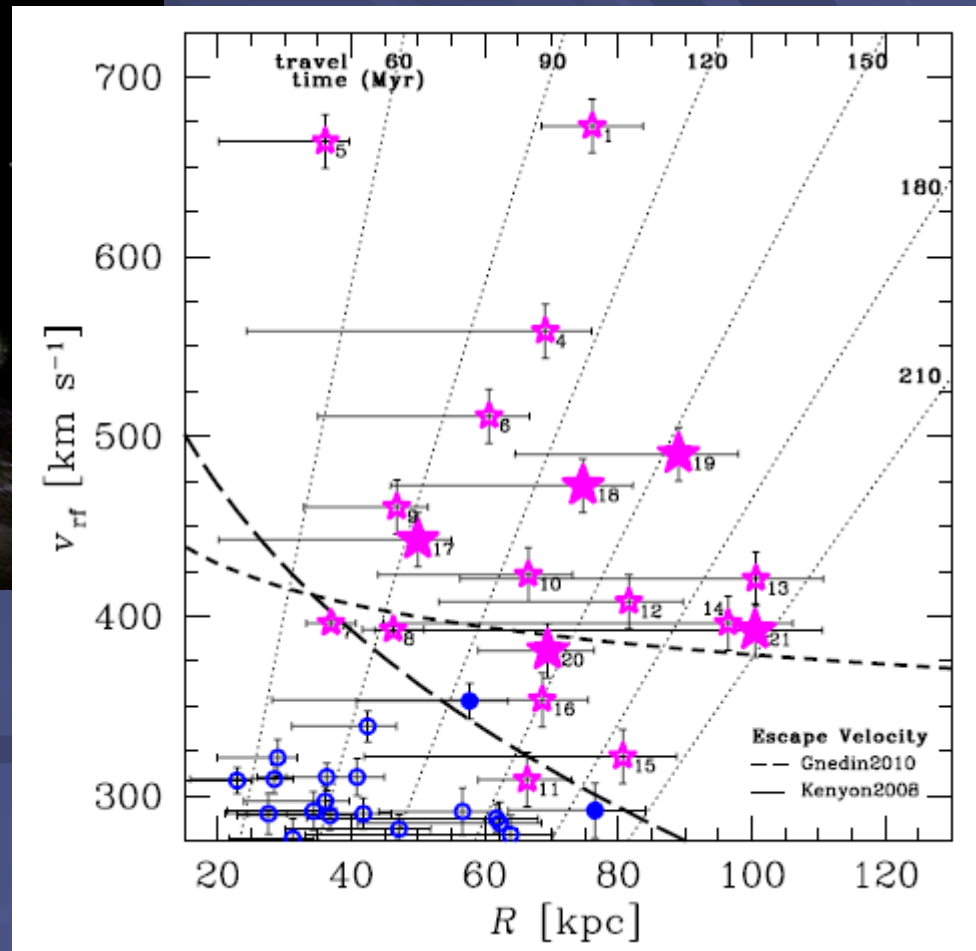
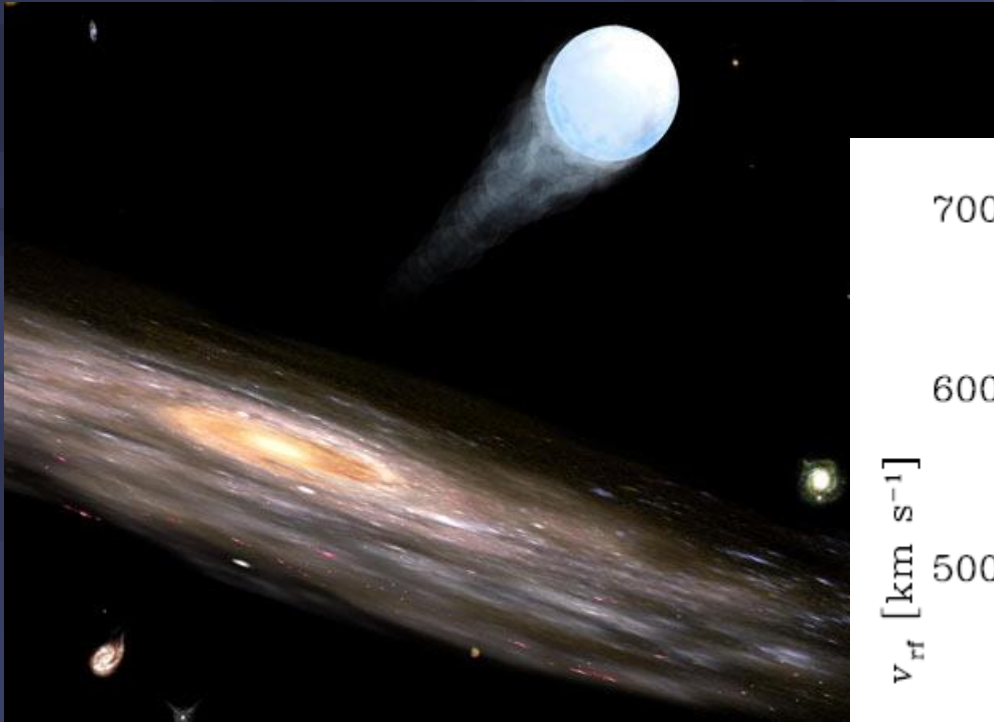
Свойства звезд гало



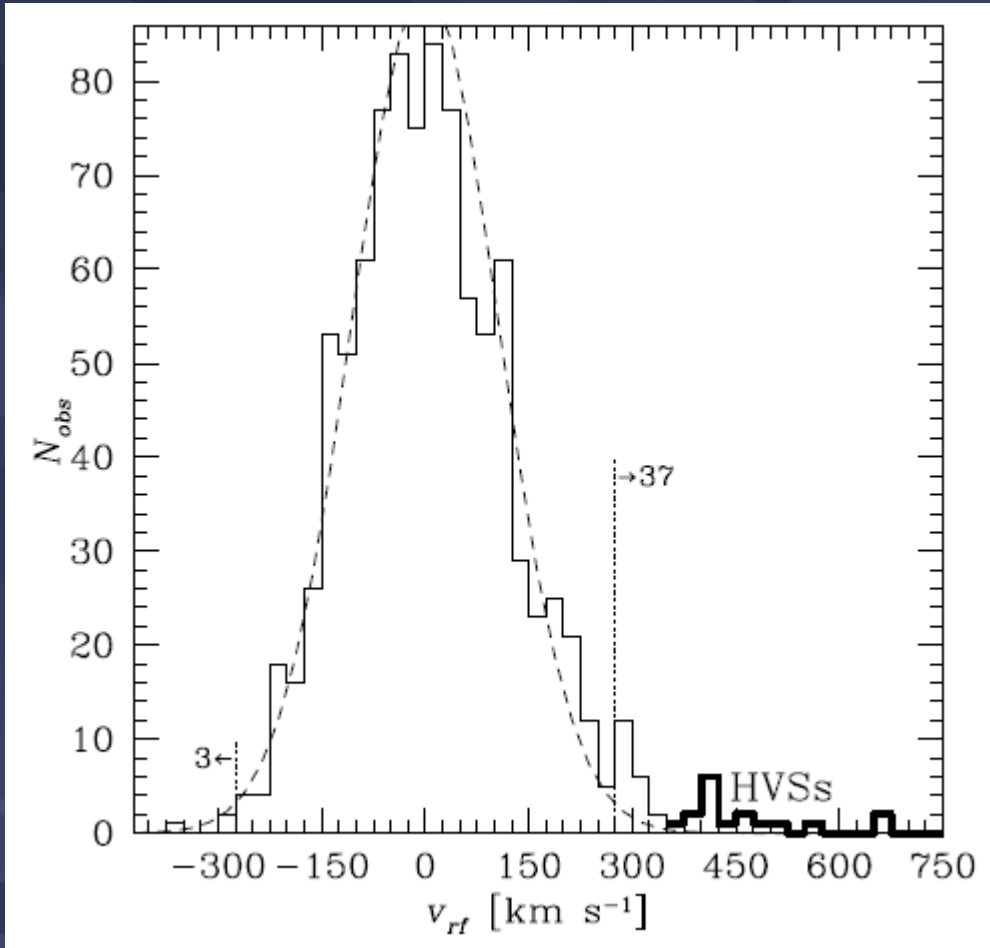
- Старые
- Маломассивные
- Малометаллические

Звезды гало имеют высокие скорости относительно Солнца, т.к. движутся по орбитам другого типа и пересекают галактическую плоскость под большими углами.

Самые быстрые звезды



«Включить гиперджеты!»

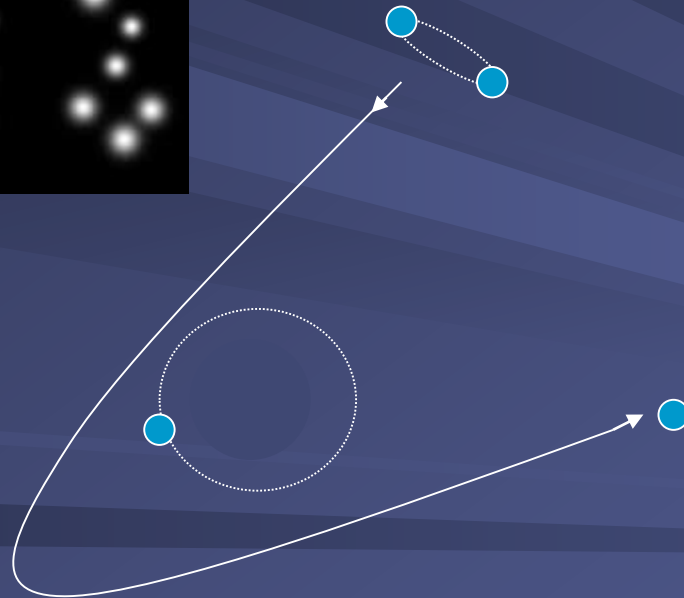
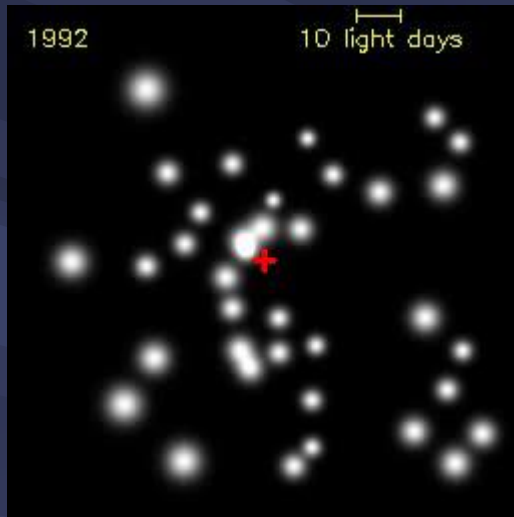


Гиперскоростные звезды.
Скорости порядка 700 км в сек

Уже гравитационно не связаны с
нашей Галактикой.

Черная дыра как «ускоритель»

Взаимодействие трех тел

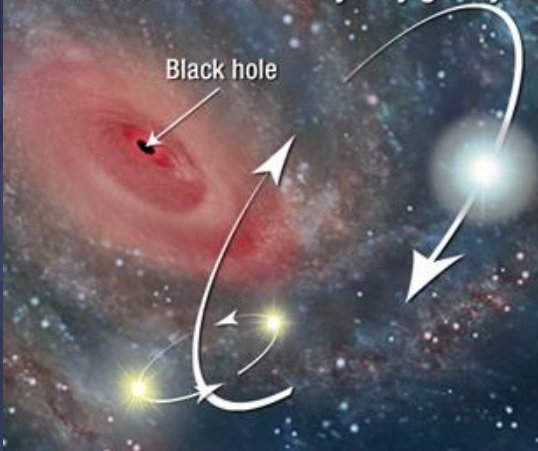


Распад двойной в поле дыры

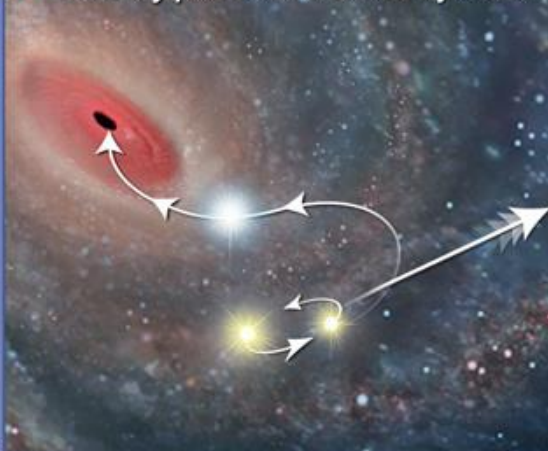
Странные путешественники

Голубая звезда вдали от плоскости Галактики

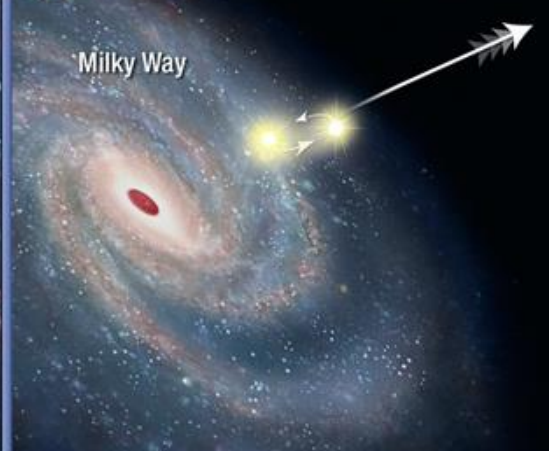
1 Triple-star system moves near black hole at center of Milky Way galaxy.



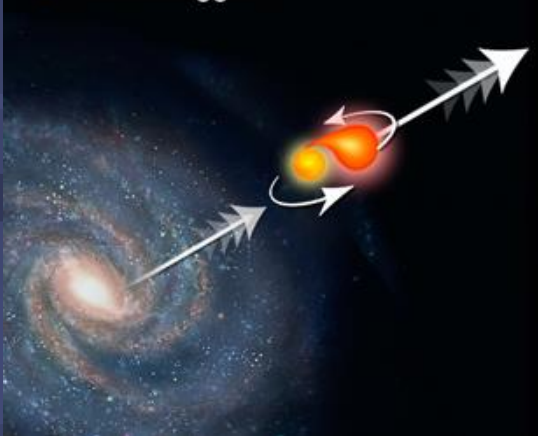
2 One star falls toward black hole; binary pair recoils and is ejected.



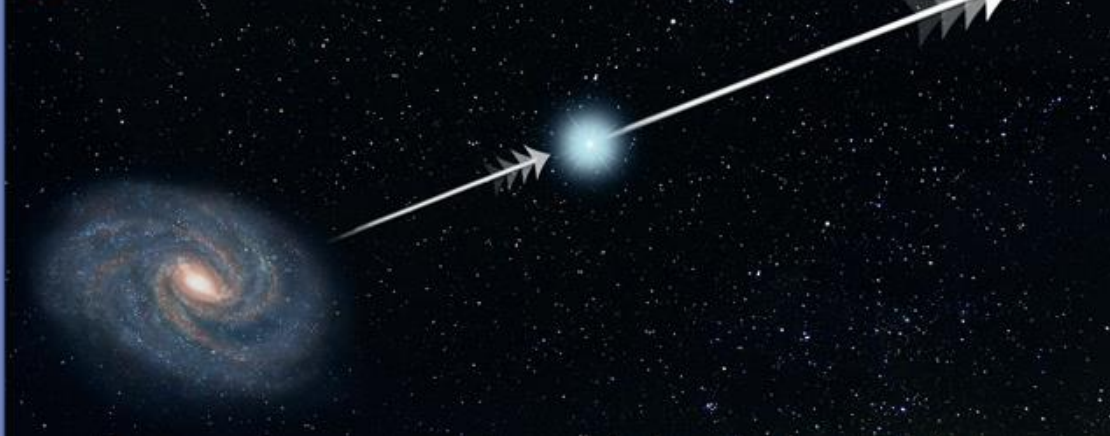
3 Binary system leaves galaxy.



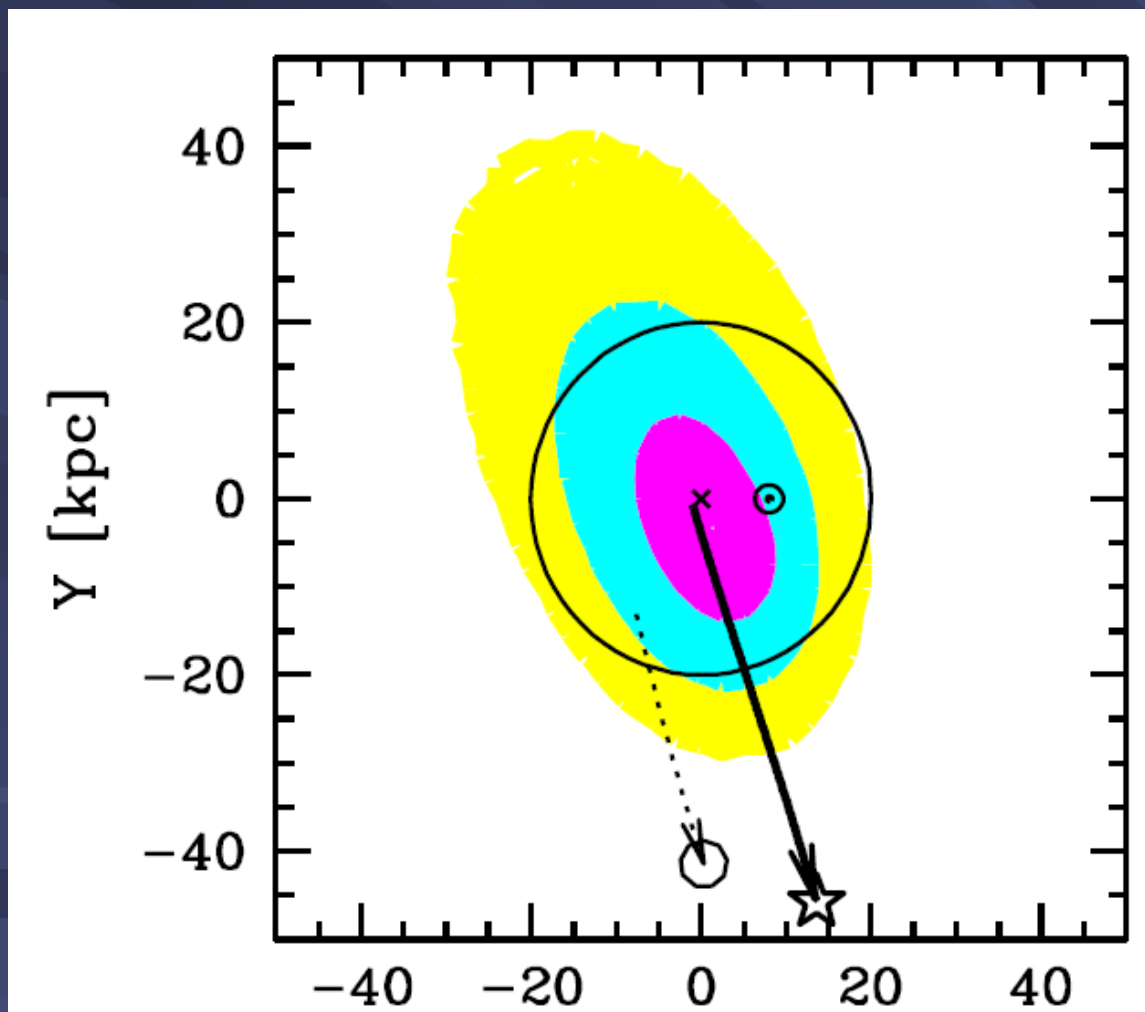
4 Binary merges to form blue straggler.



5 Blue straggler travels away from galaxy.



Полетим в другую галактику?

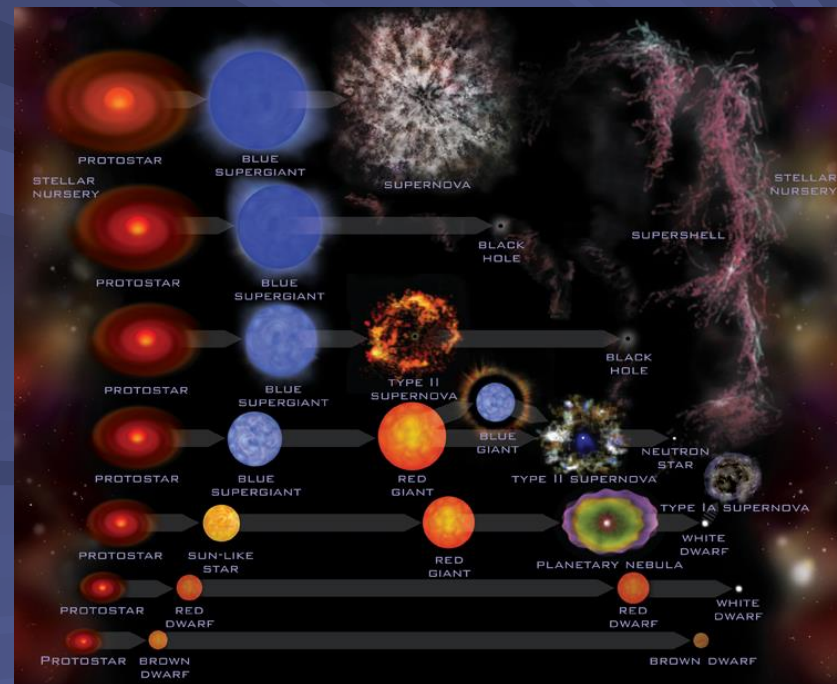
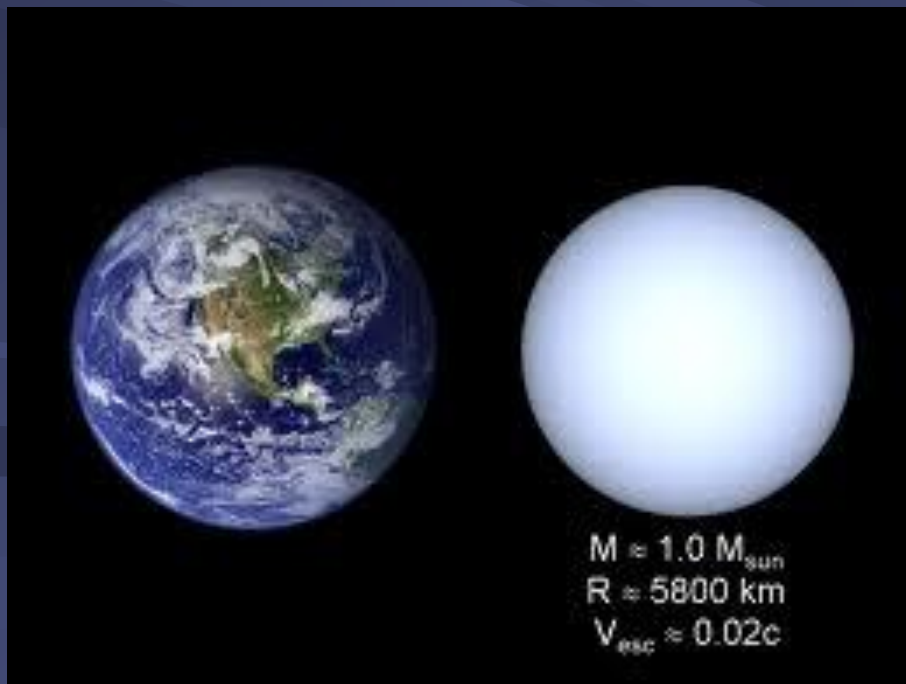


23 млн лет назад
звезда пролетела
в 13 кпк от БМО

HE 0437-5439

Эволюция звезд

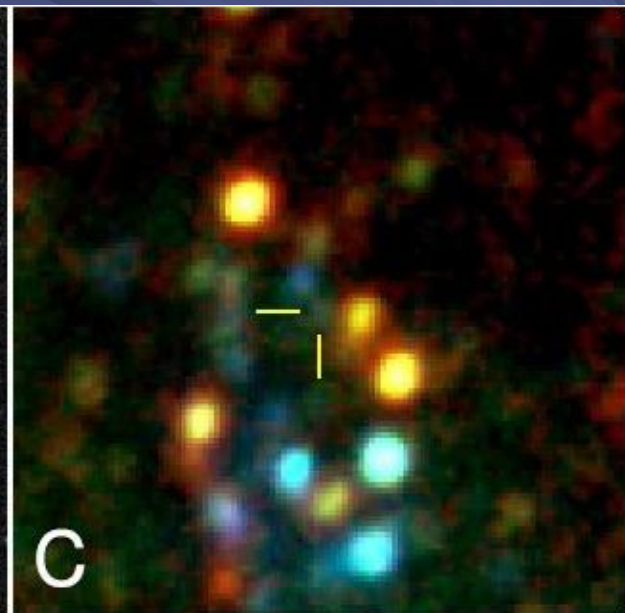
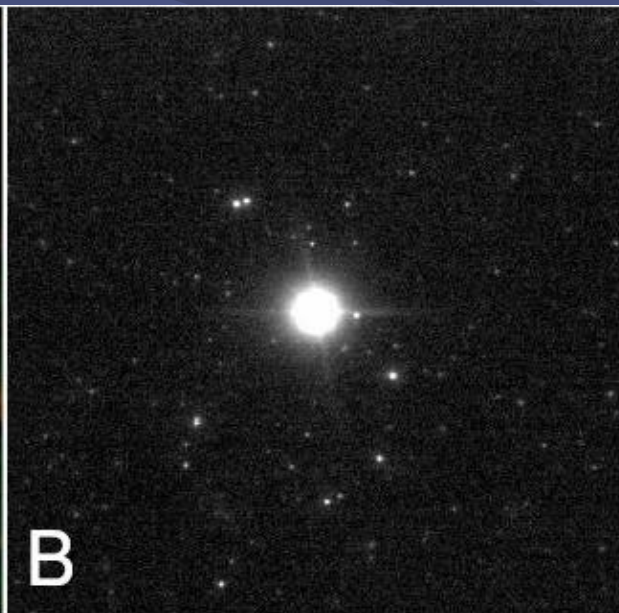
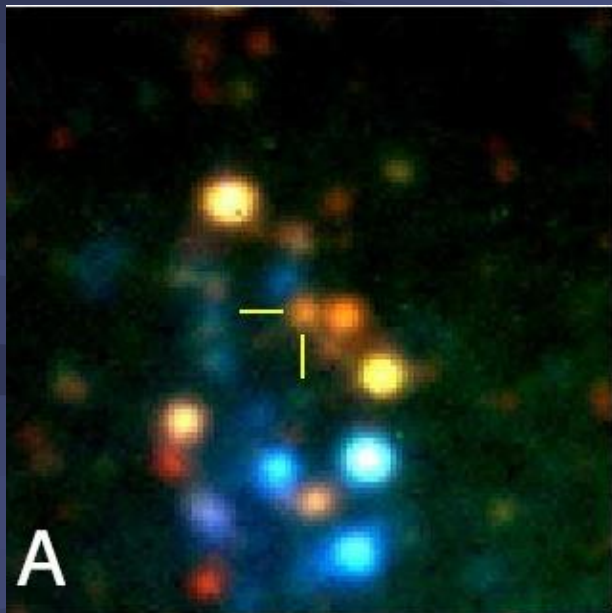
Солнце эволюционирует. Его возраст менее 5 миллиардов лет. Примерно через 5 миллиардов лет закончится водород в его ядре. Солнце превратится в красного гиганта, а затем - в белый карлик. Массивные звезды в конце жизни взрываются, оставляя нейтронную звезду или черную дыру.



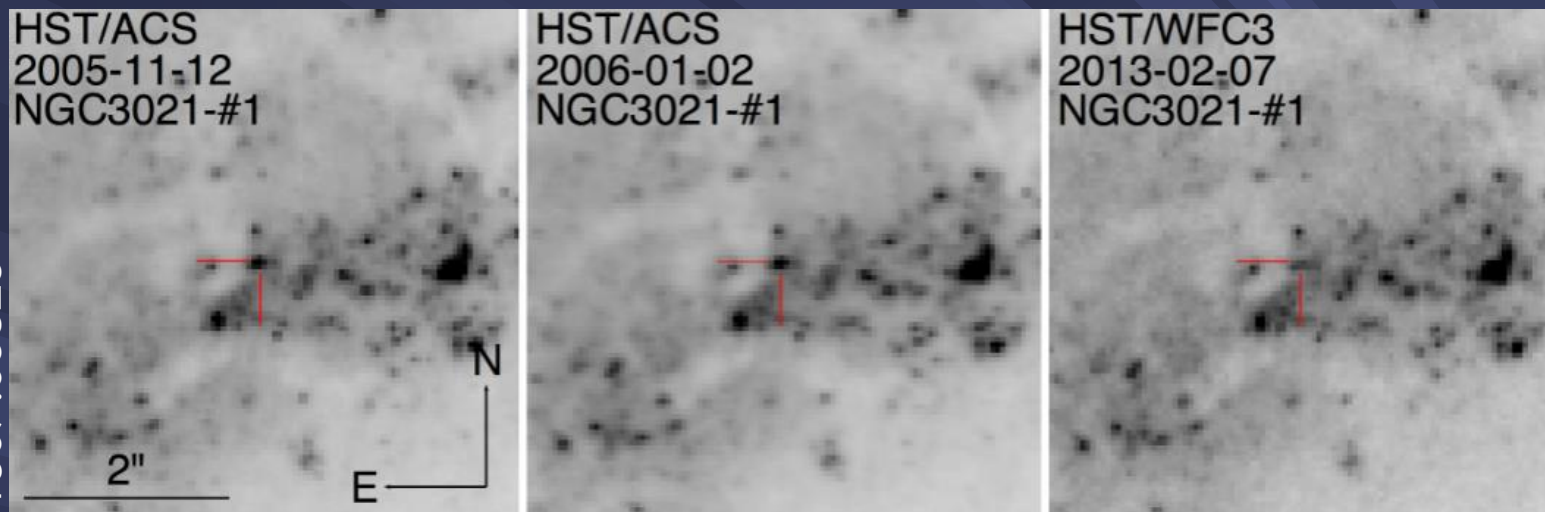
Сверхновые

Жизнь массивной звезды заканчивается колоссальным взрывом – сверхновой. Также взрываться могут белые карлики, если они стали слишком тяжелыми.

На короткое время звезда становится ярче целой галактики!



Ушедшие без шума

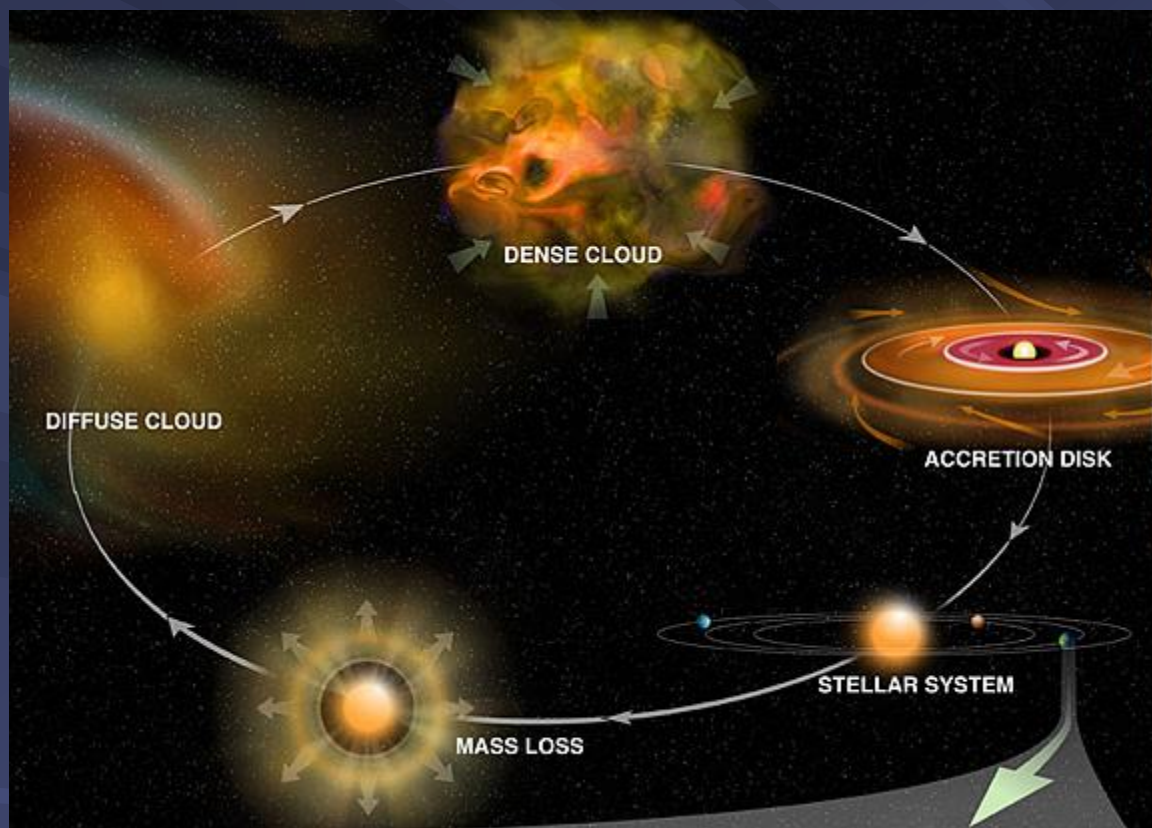


Звезда
исчезла
без взрыва
сверхновой.

Есть много
таких
случаев.

Авторы искали и нашли случай, когда массивная звезда исчезла, а никакой сверхновой не было видно. Они используют архивные данные Хаббловского телескопа для поиска исчезнувших (без взрыва) массивных звезд. Исследовано 15 галактик. Выделено несколько кандидатов. Детальный анализ показал, что одно событие действительно очень похоже на исчезновение желтого сверхгиганта (масса около 25-30 масс Солнца) без взрыва. Это примерно то, что и ожидалось, т.е., пусть и на очень низкой статистике, но подтверждает идею о "тихом коллапсе" некоторых массивных звезд. Хотя в статье приведен лишь один хороший кандидат, доля таких событий может быть довольно большой.

Крошки на пиру гигантов



Химическая эволюция приводит к тому, что тяжелых элементов становится все больше.

Поэтому у новых поколений звёзд другой состав.

Из «остатков» вещества при образовании звёзд могут образовываться планеты, а на планетах ...

Мы все из звёздного вещества

Звёзды? Звёзды. Звёзды! Звёзды. Звёзды?

Факт 1. Мы видим мир, потому что есть свет звёзд

Факт 2. Звёзды когда-то возникли

Факт 3. Звёзды образуются раньше галактик

Факт 4. Меняется состав звёзд, меняются звёзды, меняется их судьба

Факт 5. Мы все из звёздного вещества

