

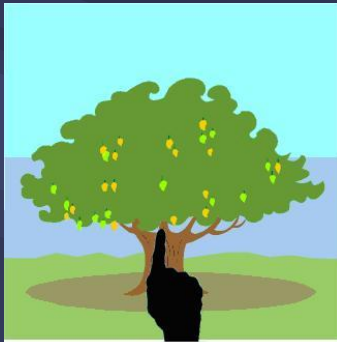
# Звезды

Сергей Попов  
(ГАИШ МГУ)

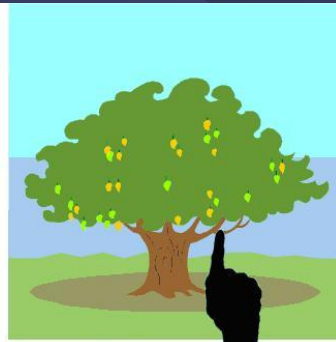
# Звездные параллаксы

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



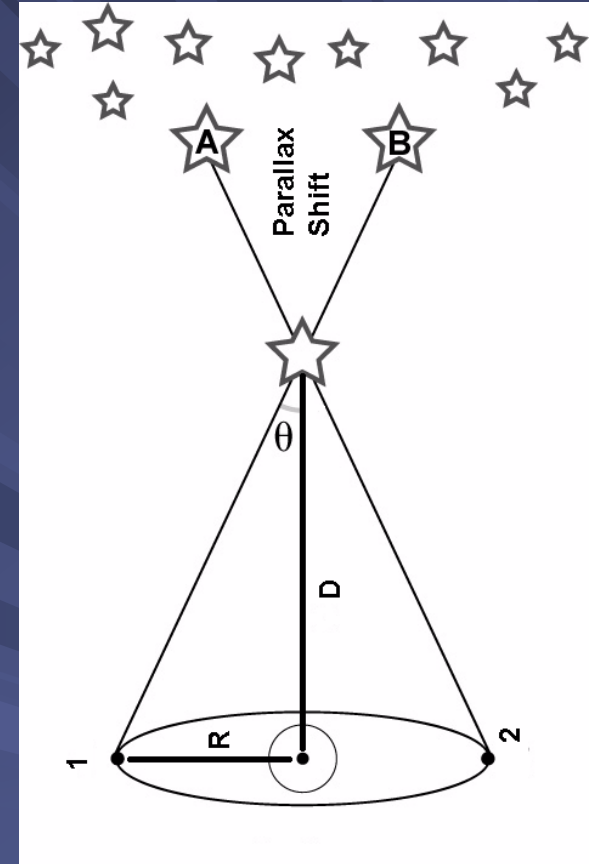
Left eye open



Тихо Браге

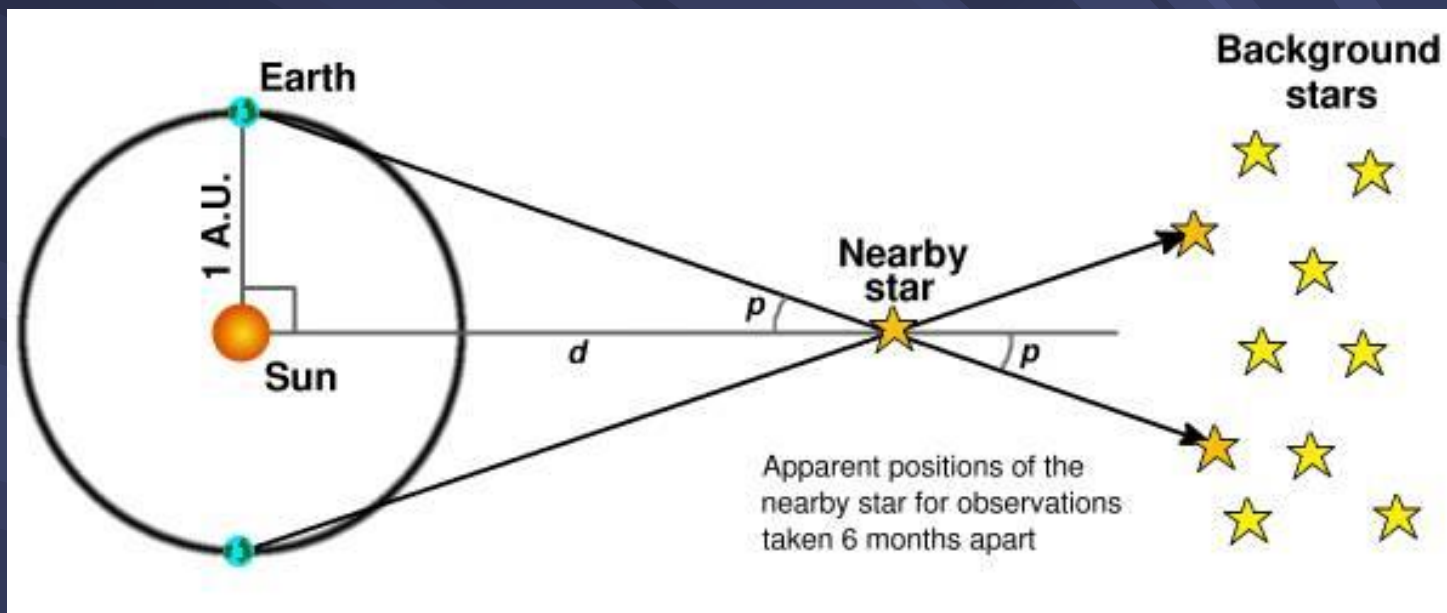
Если мы смотрим на некий предмет то одним, то другим глазом, то он сдвигается на фоне более далеких.

Так можно измерять расстояние до довольно далеких объектов.



Параллактический сдвиг из-за движения Земли вокруг Солнца.

# Параллакс



Угол мал! Поэтому  $\text{tg}(\text{параллакс}) \approx \sin(\text{параллакс}) \approx \text{параллакс}$  [рад]

Расстояние =  $1 \text{ а.е.} / \text{параллакс}$  [рад]

Расстояние [пк] =  $1 / \text{параллакс}$  [угл.сек.]

Парсек – расстояние, соответствующее параллаксу одна угловая секунда  
Парсек равен 206265 (число секунд в радиане) астрономических единиц.

$1 \text{ пк} = 3.1 \cdot 10^{18} \text{ см}$

# Первые измерения параллаксов



В.Я. Струве.  
Вега. 1837 г.



Ф. Бессель.  
61 Лебедя 1838 г.

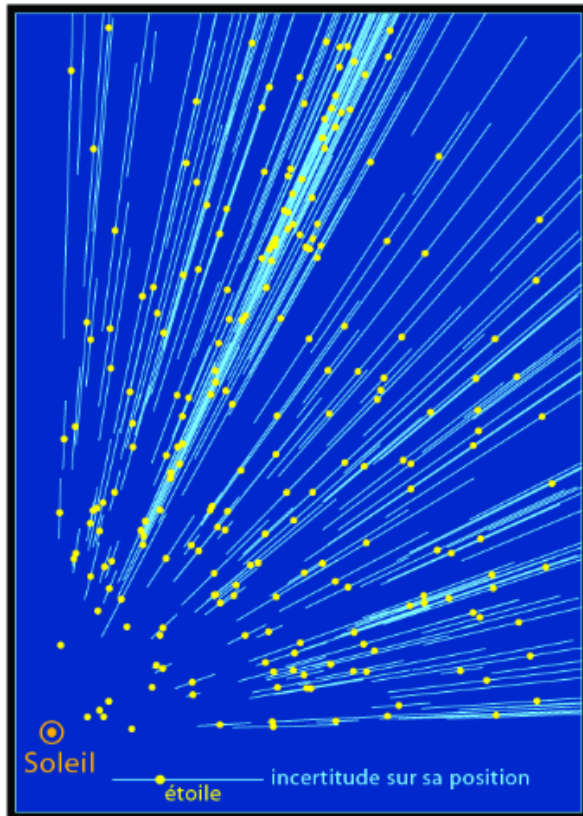


Томас Хендерсон  
Альфа Центавра 1833

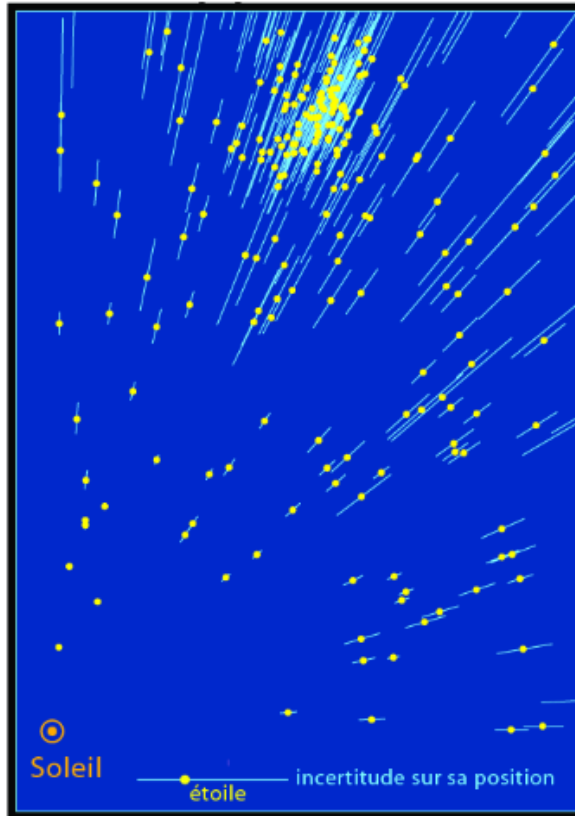


# Пределы точного измерения расстояний

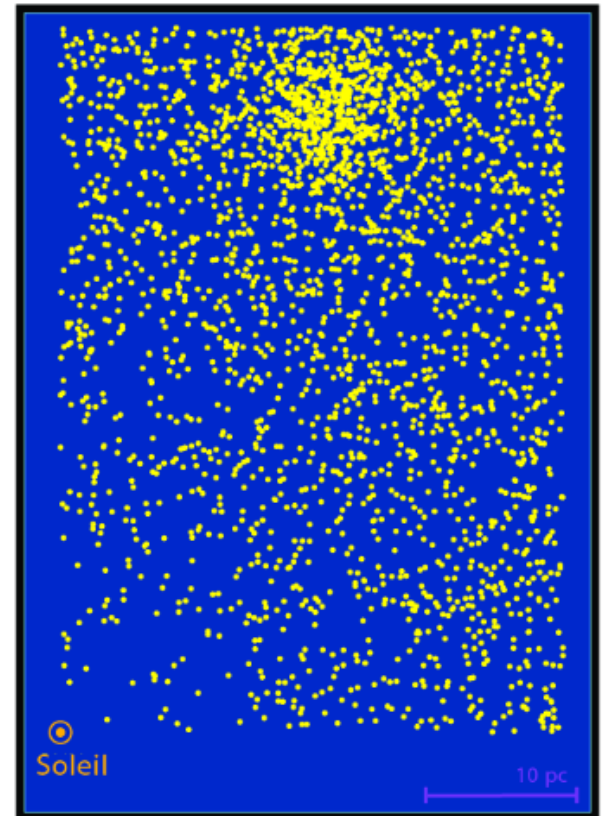
Sol



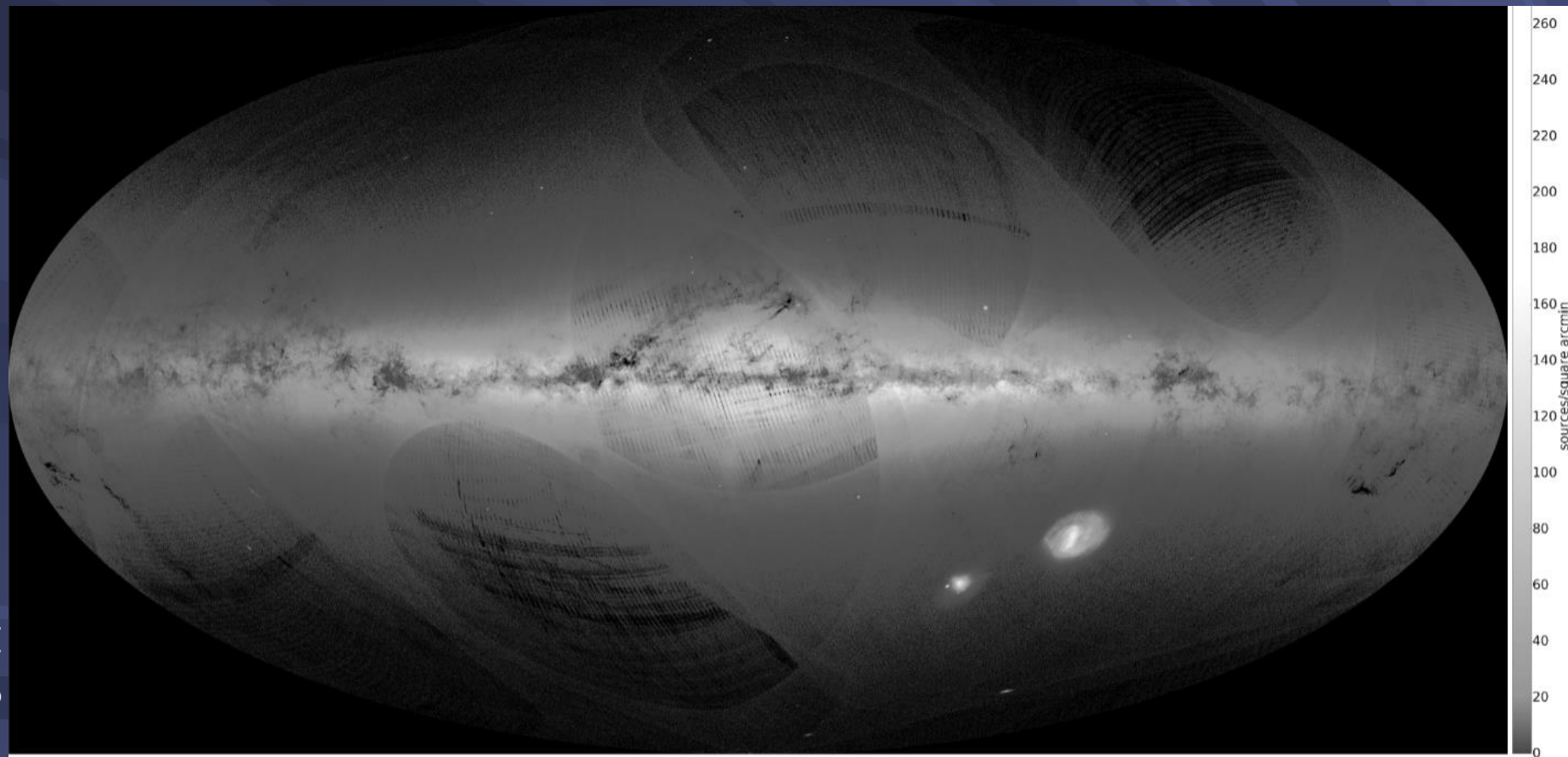
Hipparcos (1990)

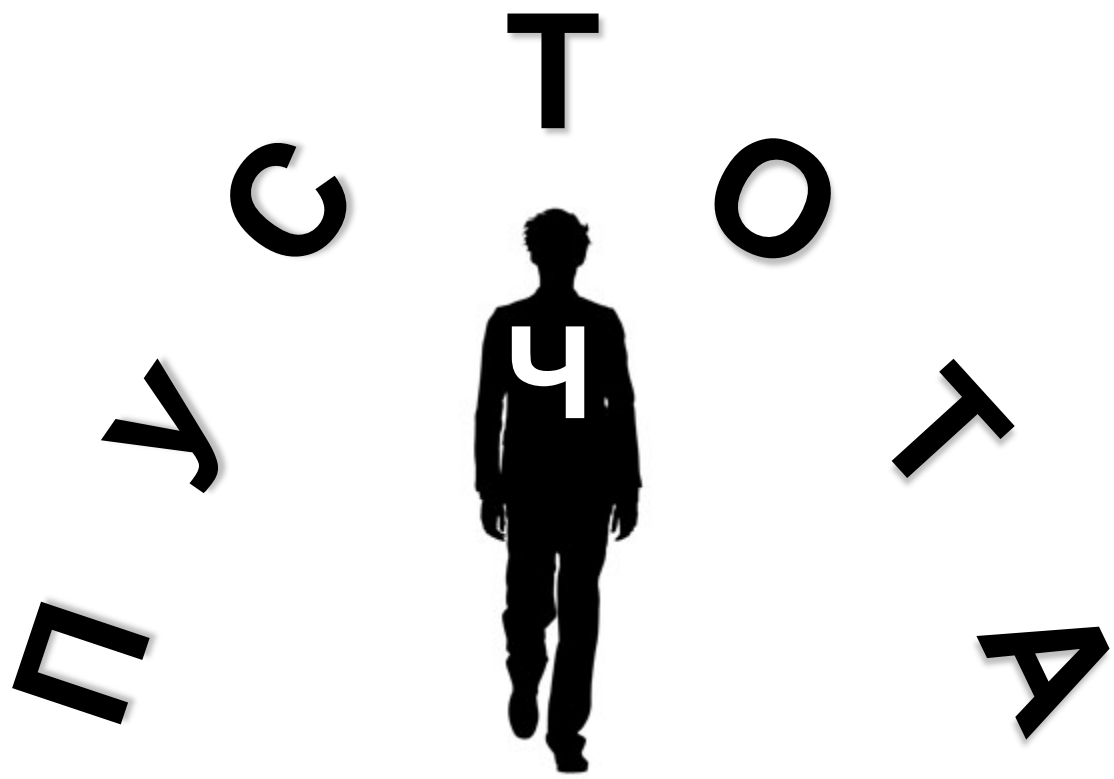


Gaia (2020)



# Первый релиз данных Gaia





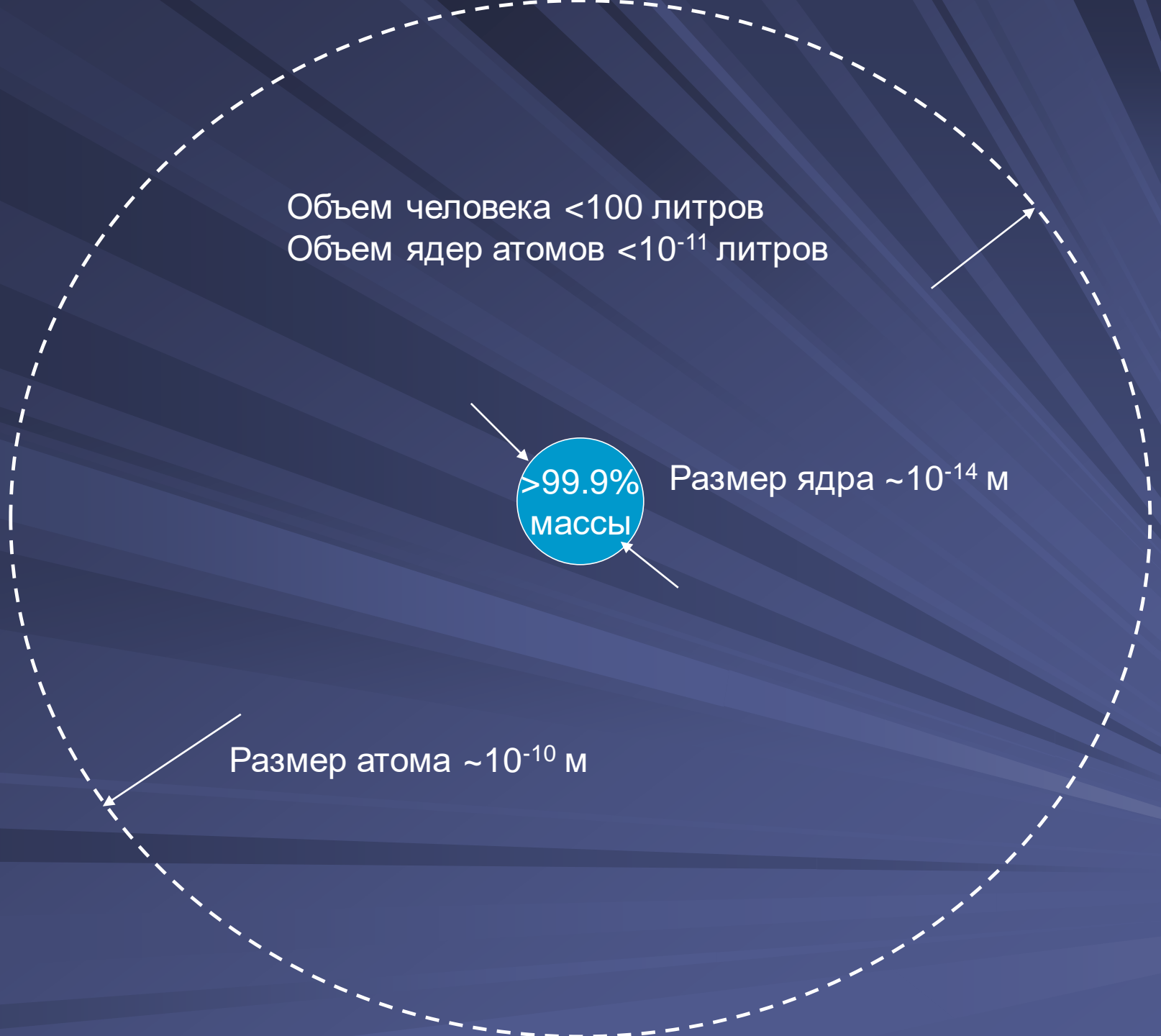


Объем человека <100 литров  
Объем ядер атомов <math>10^{-11}</math> литров

>99.9%  
массы

Размер ядра ~ $10^{-14}$  м

Размер атома ~ $10^{-10}$  м



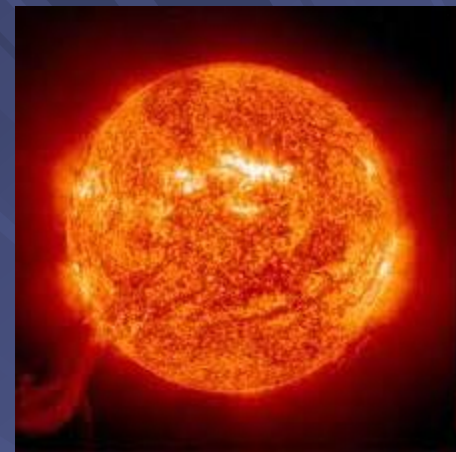


$V_{\text{звёзд}} < 10^{-30} V_{\text{вселенная}}$

# Галактики и звёзды



# Свет звёзд

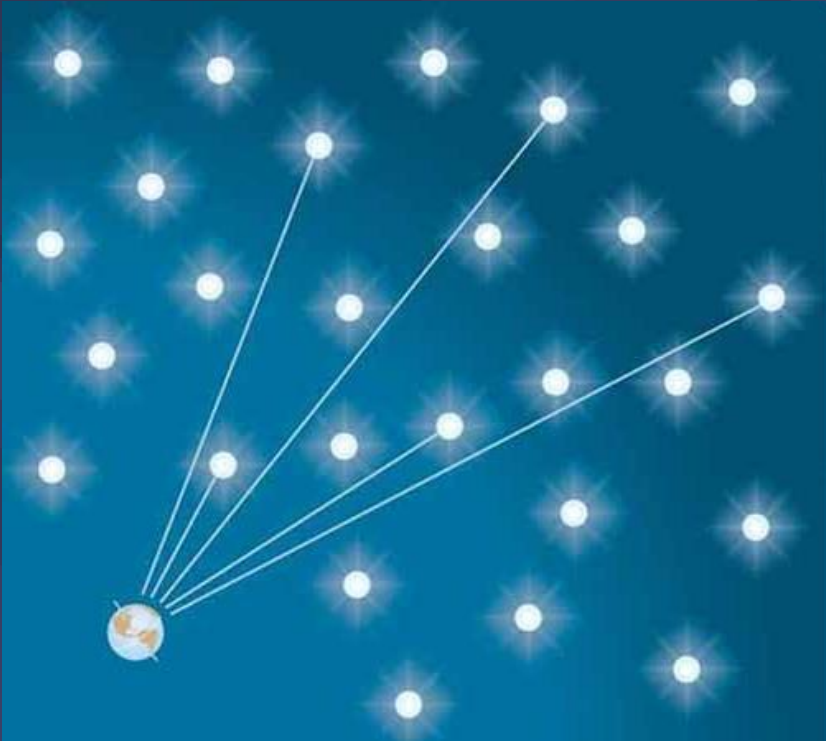


Мы видим мир, потому что есть свет звёзд

# Парадокс Ольберса

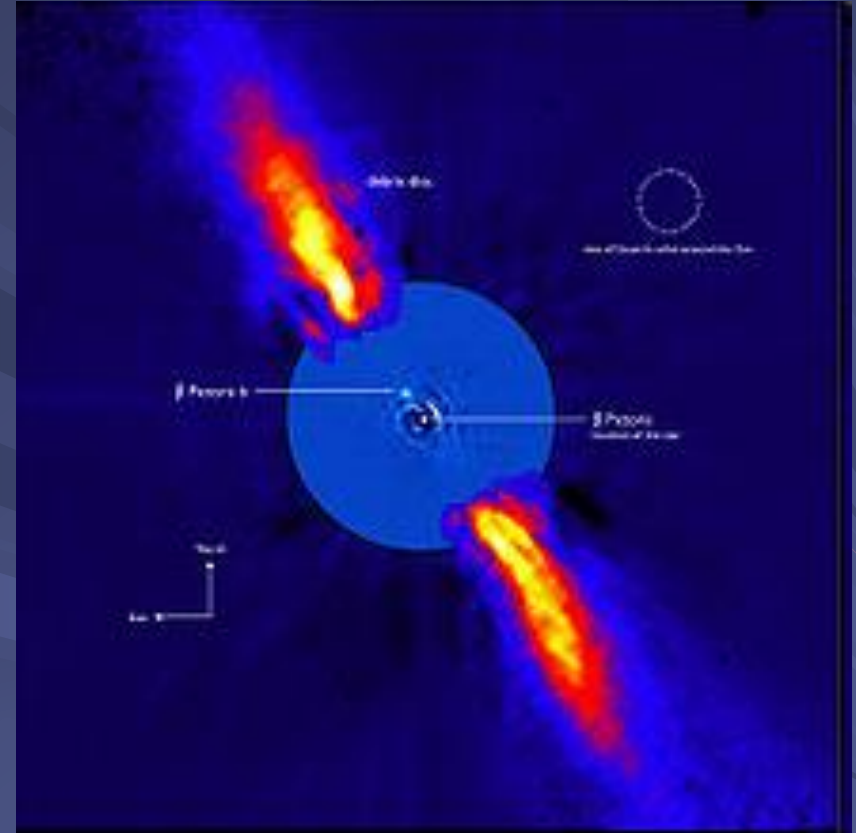
Значит, звёзды где-то «заканчиваются».

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.

# Масса Джинса

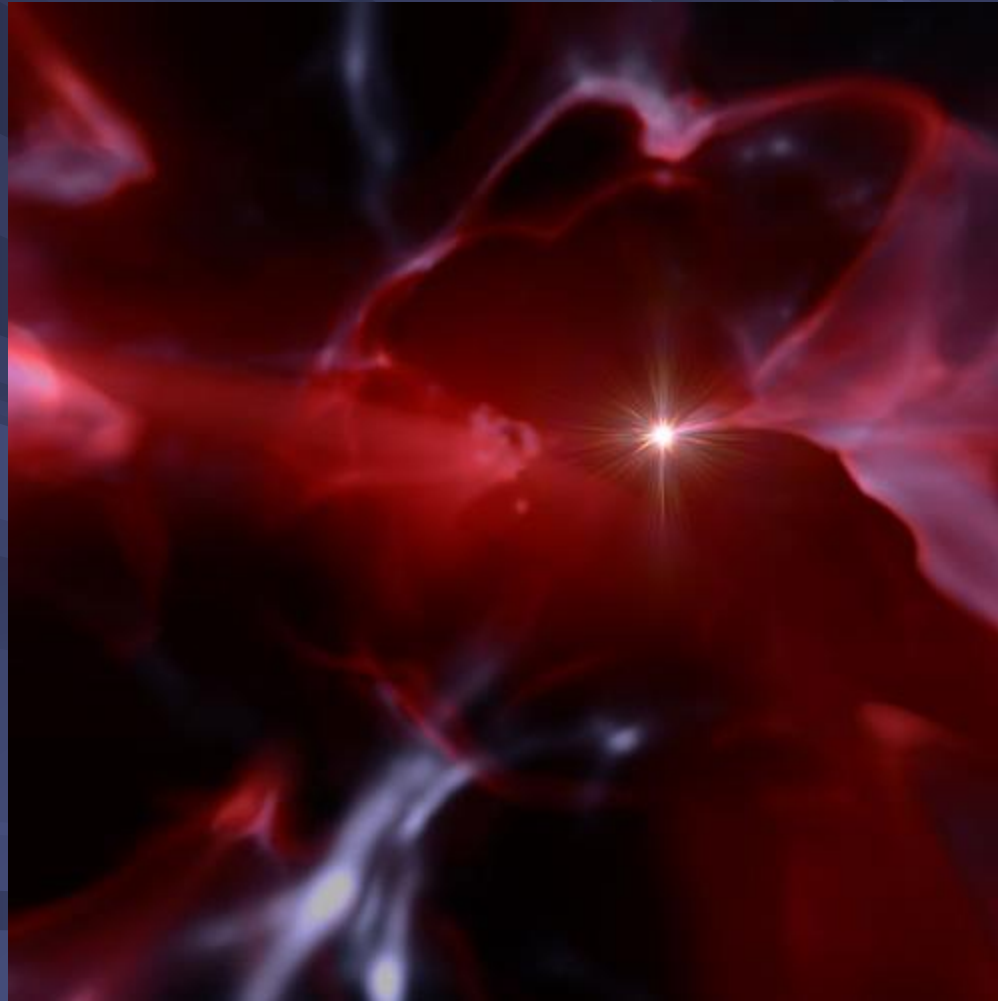
$$2K + U = 0 \left\{ \begin{array}{l} K = (N) \left( \frac{3}{2} kT \right) \\ U = -\frac{3}{5} \frac{GM^2}{R} \end{array} \right. \Rightarrow 2NkT = \frac{3}{5} \frac{GM^2}{R}$$

$$M_J = \left( \frac{5kT}{Gm} \right)^{3/2} \left( \frac{3}{4\pi\rho} \right)^{1/2}$$

if  $M_{\text{cloud}} > M_J \rightarrow \text{collapse!}$

$$R_J \simeq \left( \frac{15kT}{4\pi G \mu m_H \rho_0} \right)^{1/2}$$

# Первые звёзды



Звёзды образуются раньше галактик



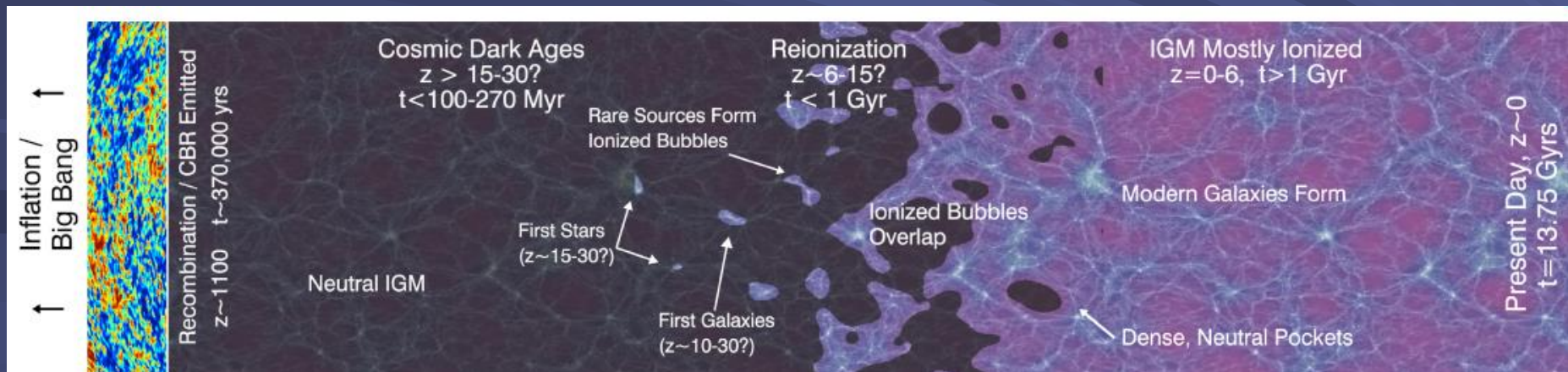
# История вселенной

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

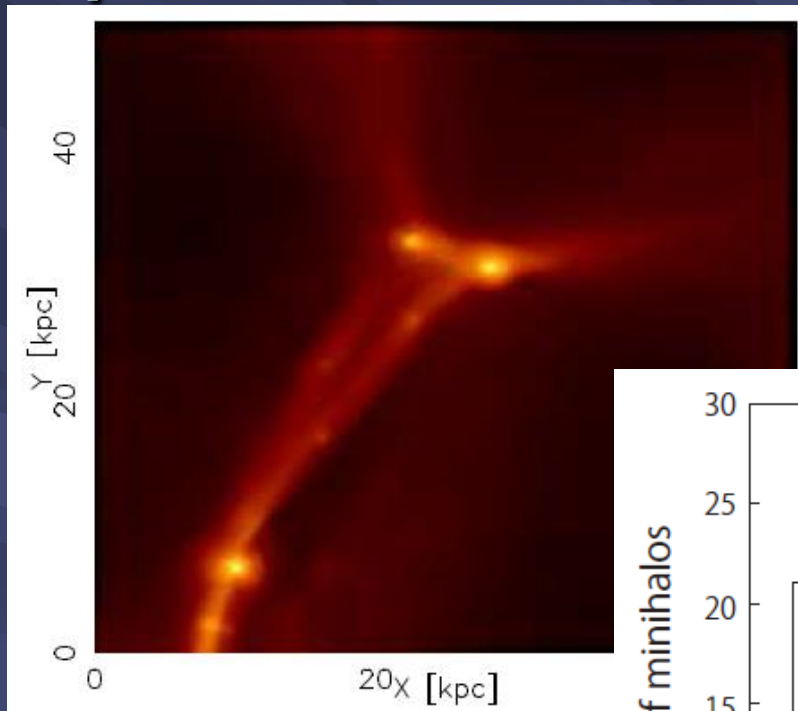
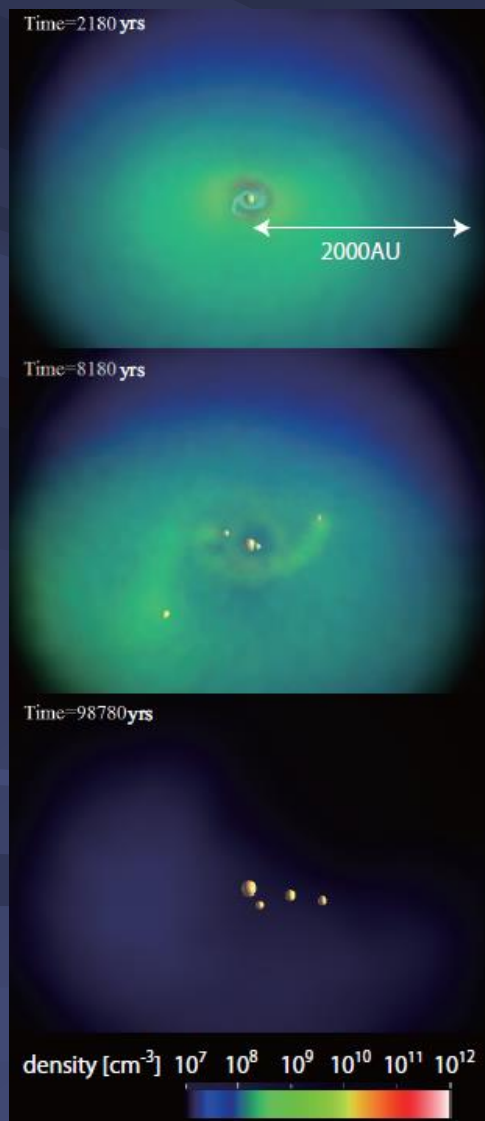
Спустя примерно 370 000 лет после начала расширения вещество рекомбинировало – стало нейтральным.

Наступили «темные времена».

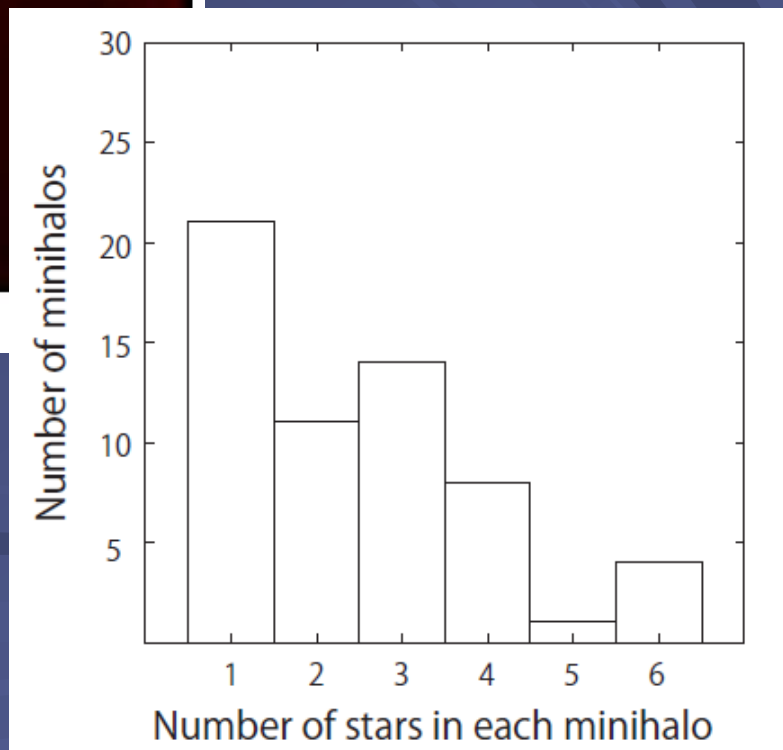
Постепенно начали появляться первые звезды и квазары. Возникали галактики.



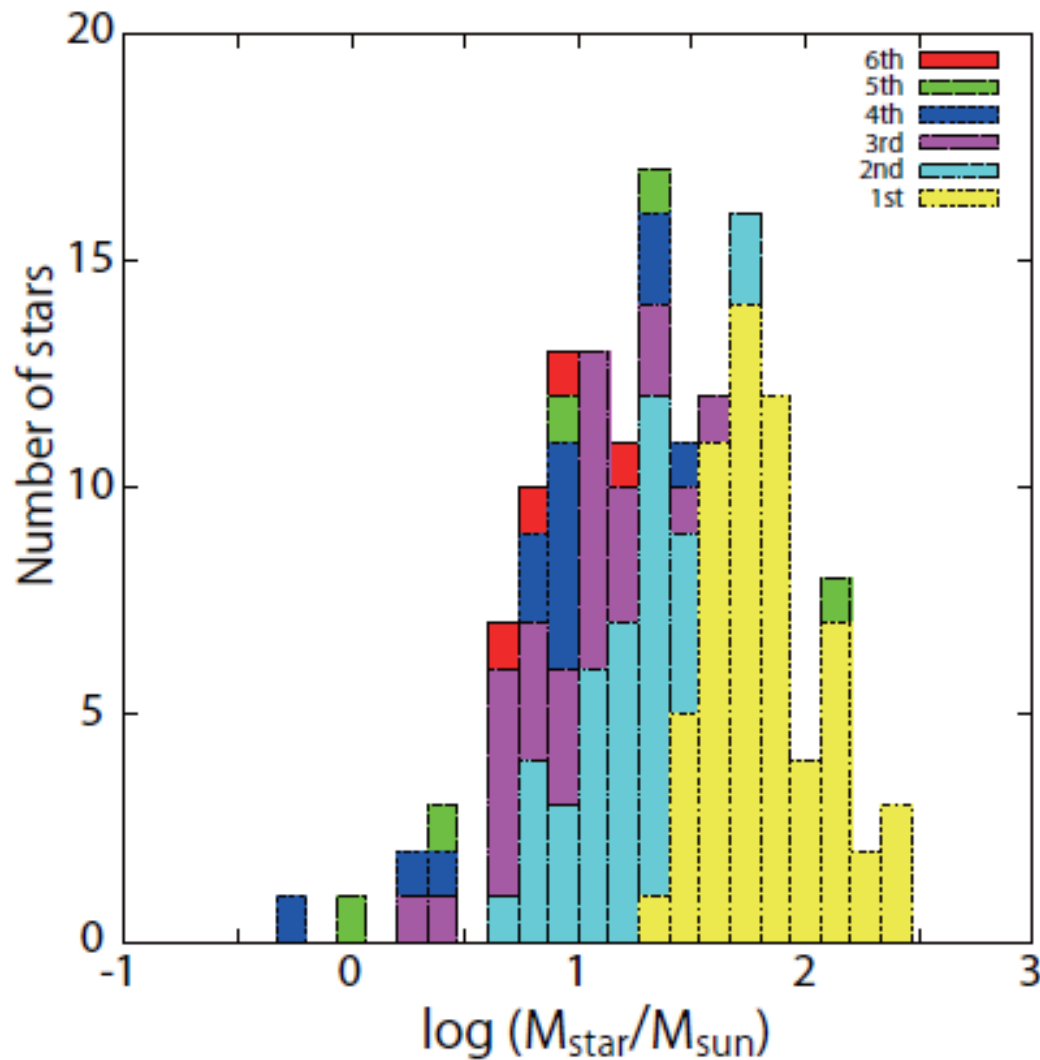
# Моделирование первых звезд



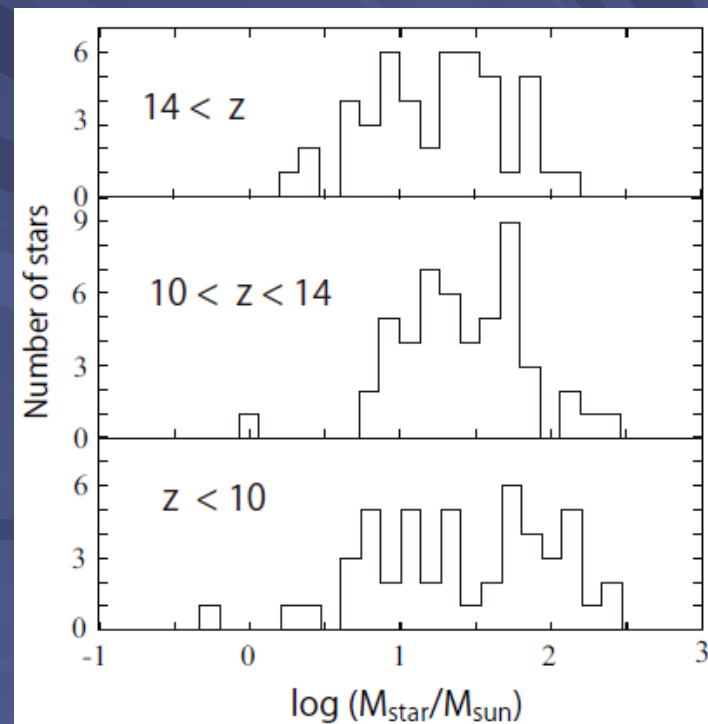
Часто в минигало  
образуется более  
чем одна звезда.  
Поэтому звезды  
могут быть не только  
очень массивными.



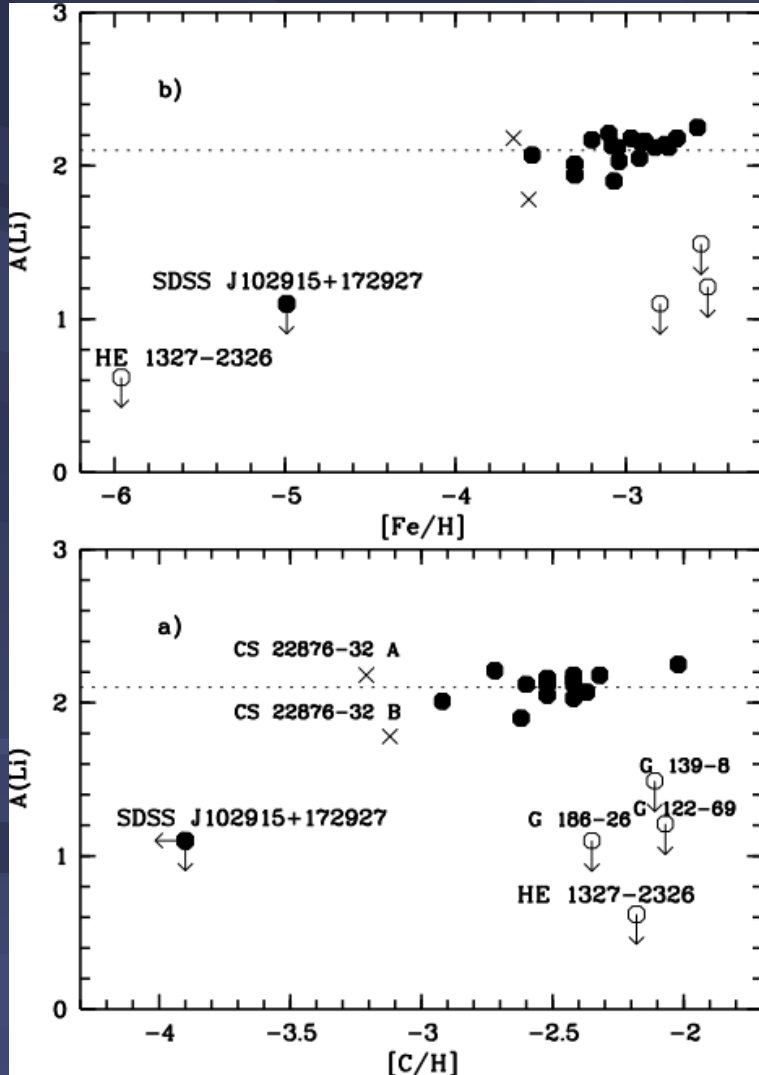
# Спектр масс первых звезд



1407.1374



# Очень малометаллическая звезда



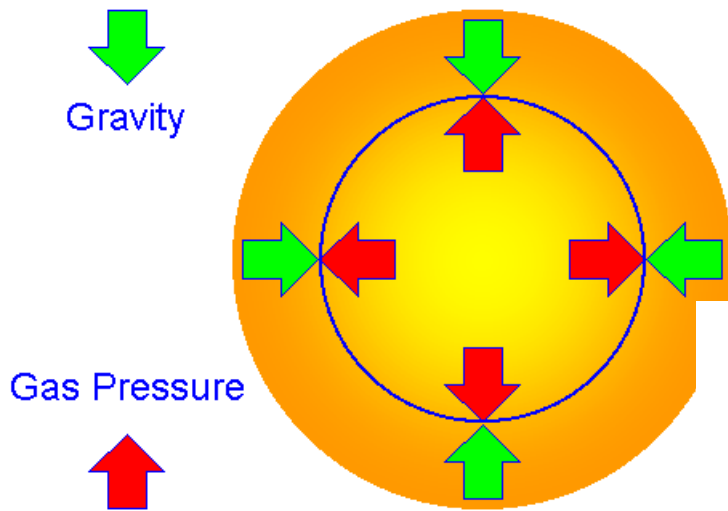
Самое низкое отношение C/H  
Самая низкая металличность.

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.

# Устойчивость звезды

## Hydrostatic Equilibrium



Сила тяжести уравновешена градиентом давления.

Для приближенных оценок можно использовать  $P/\rho \approx GM/R^2$

$$\rho \frac{d^2 r}{dt^2} = -G \frac{M_r \rho}{r^2} - \frac{dP}{dr}$$

Diagram illustrating the equation for hydrostatic equilibrium with handwritten annotations:

- $\rho$ : DENSITY
- $\frac{d^2 r}{dt^2}$ : ACCELERATION
- $G$ : GRAVITATIONAL CONSTANT
- $M_r \rho$ : MASS WITHIN A SPHERE OF RADIUS  $r$
- $\frac{dP}{dr}$ : PRESSURE GRADIENT

# «Отрицательная теплоемкость»

Для звезды можно записать теорему вириала.

Отвод тепловой энергии приводит к сжатию звезды (например, из-за падения темпа выделения энергии), что влечет за собой ее нагрев.

Наоборот, подвод избыточной энергии (например, из-за роста энерговыделения в ядре) приводит к расширению и остыванию.

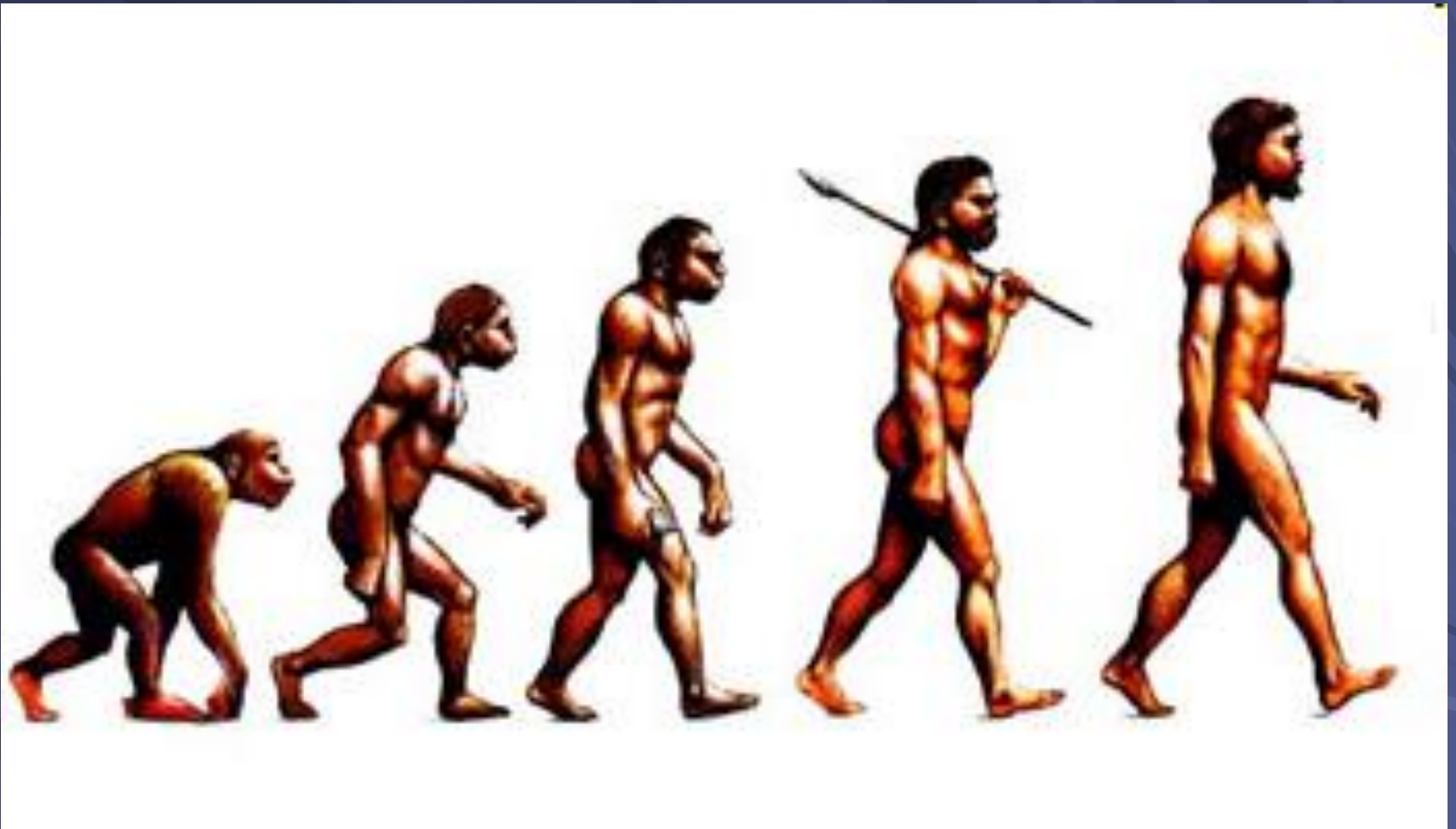


(рис. В. Липунова)

<http://www2.astro.psu.edu/users/rbc/a534/lec10.pdf>

<http://zuserver2.star.ucl.ac.uk/~jcr/3134/evol/virial.pdf>

# ЭВОЛЮЦИЯ



# Эволюция звёзд

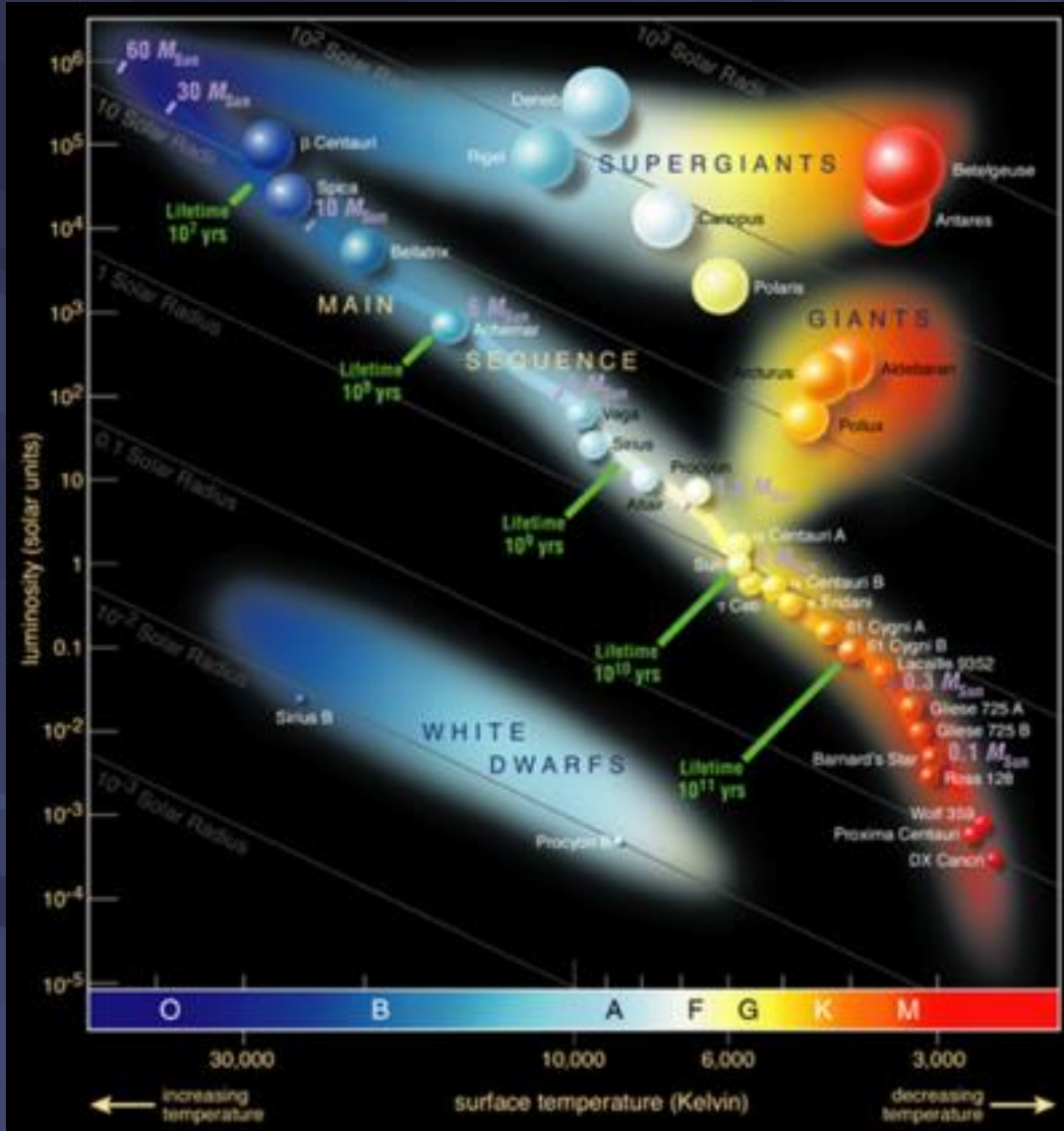


- Популяция III – самые первые звёзды
- Популяция II – старые звёзды в Галактике
- Популяция I – «современные» звёзды (Солнце)

Меняется состав звёзд, меняются звёзды,  
меняется их судьба



# Диаграмма Герцшпрунга -Рассела



Самые легкие звезды имеют массу 0.08 солнечных.

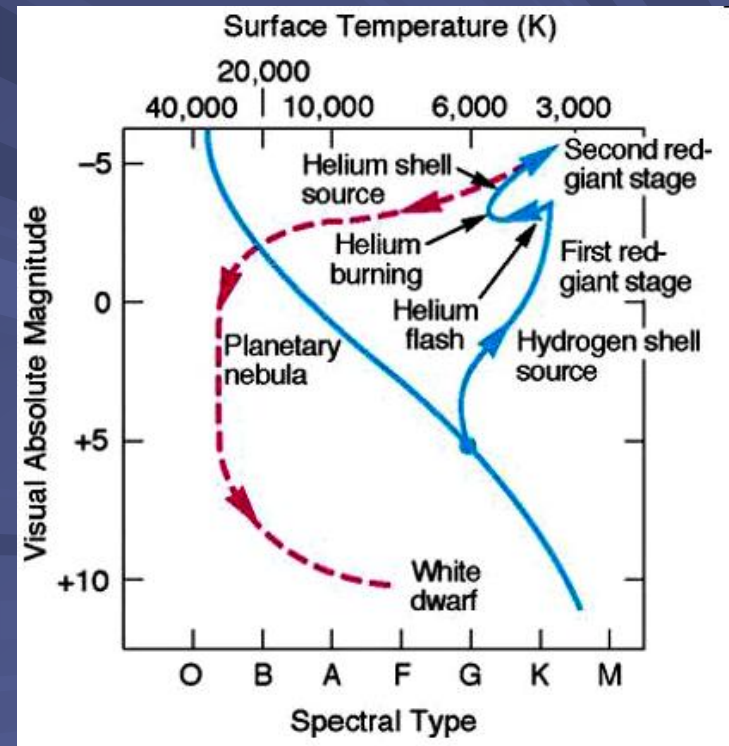
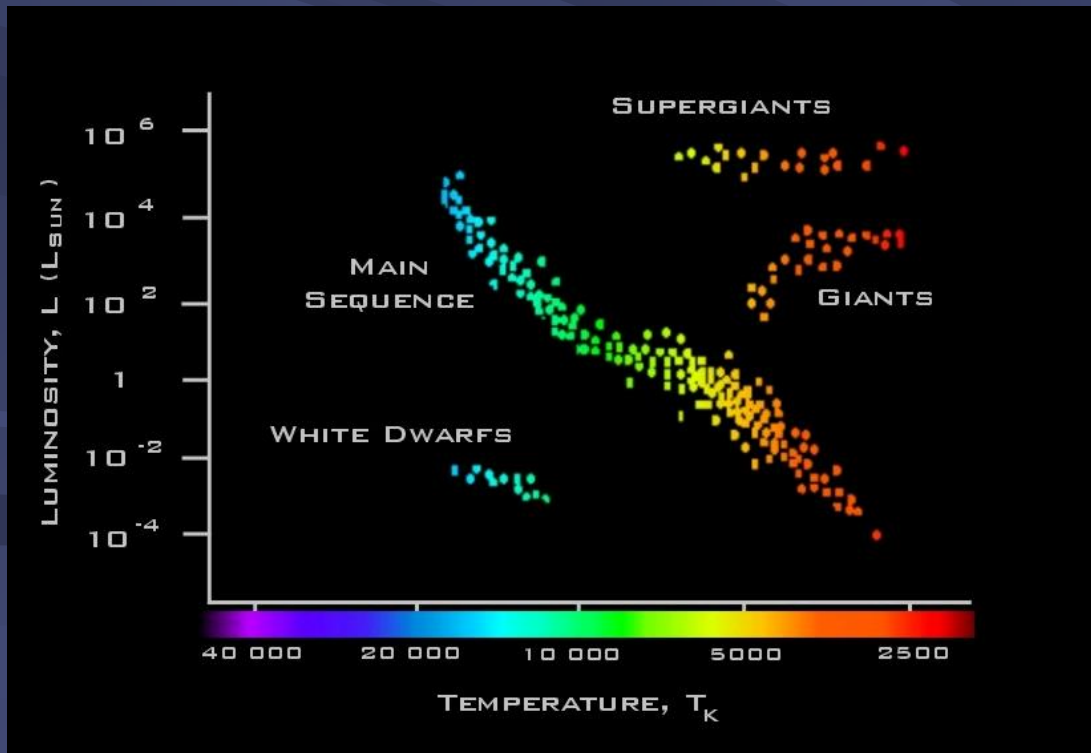
Самые тяжелые из образующихся сейчас около 100-200.

С ростом массы резко растет светимость.

Время жизни тем больше, чем меньше масса звезды.

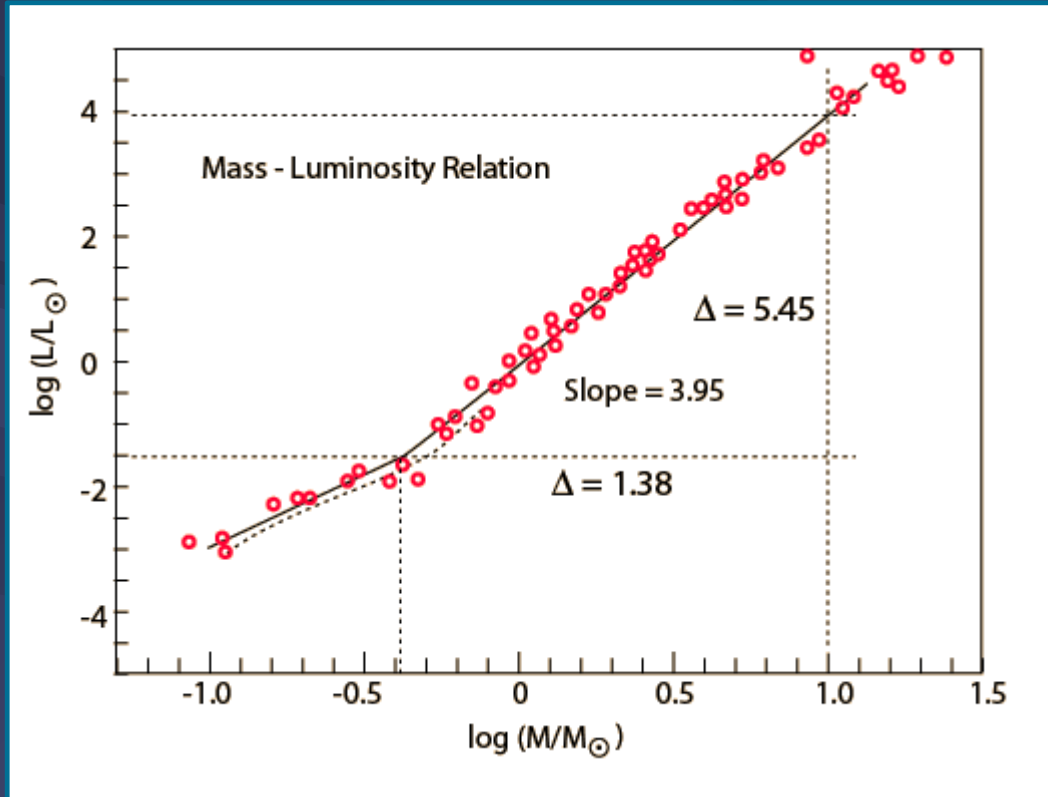
# Эволюция одиночной звезды

Эволюция звезды – это смена источников горения





# Соотношение масса-светимость



Для легких звезд  
(пока давление газовое)  
 $L \sim M^{3-4}$

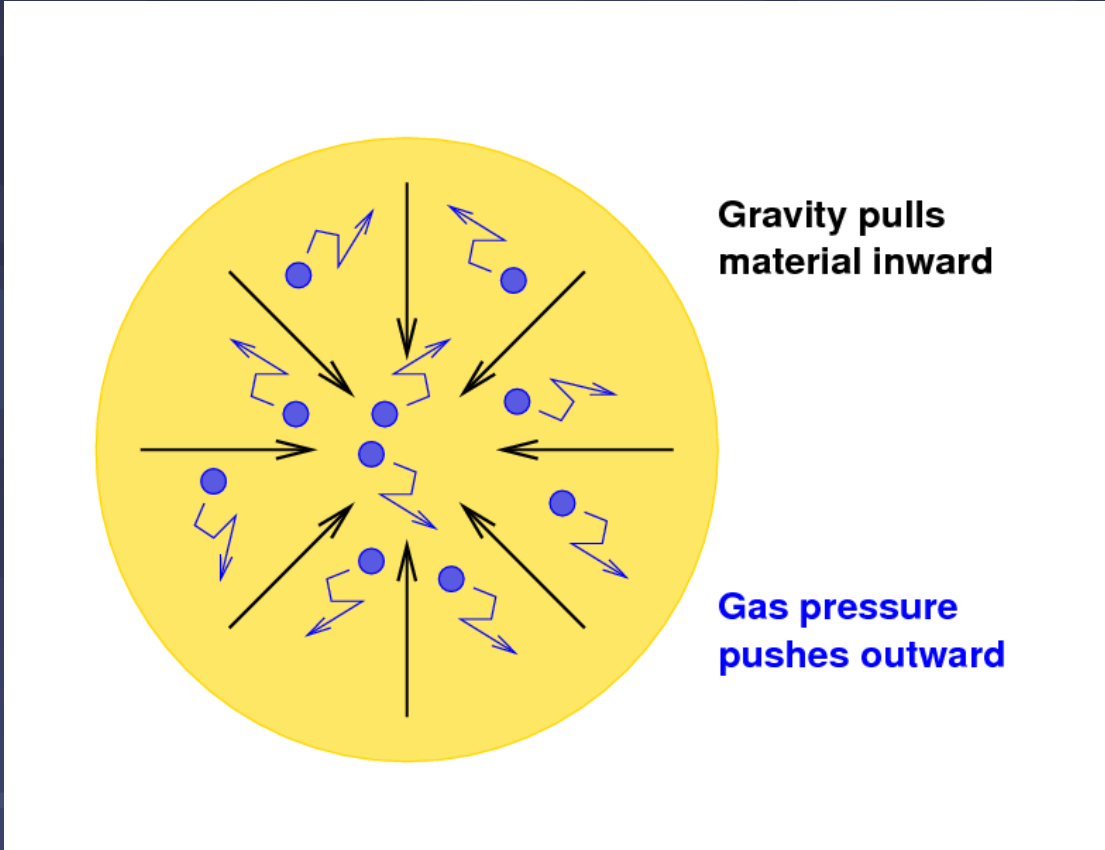
Для тяжелых звезд  
(когда давление излучения  
становится важнее)  
 $L \sim M$

# 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.

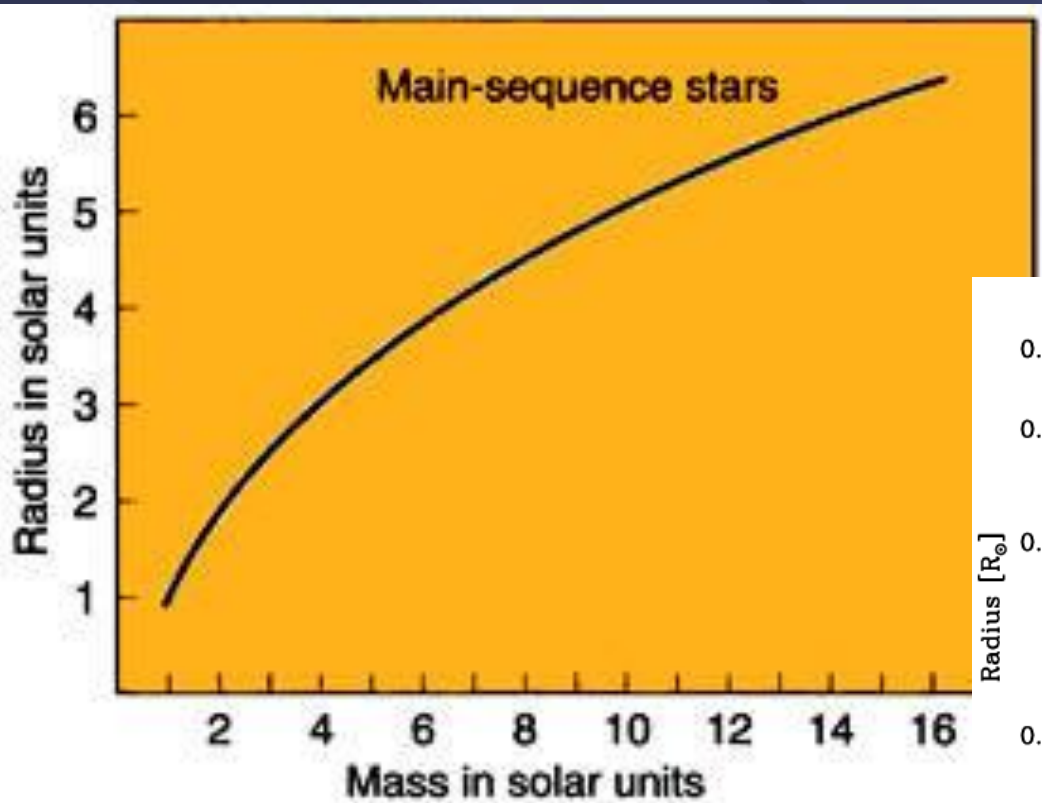
Оказывается, что этот предел весьма чувствителен к параметрам модели. Настолько, что позволяет закрыть некоторый важный диапазон параметров.

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.

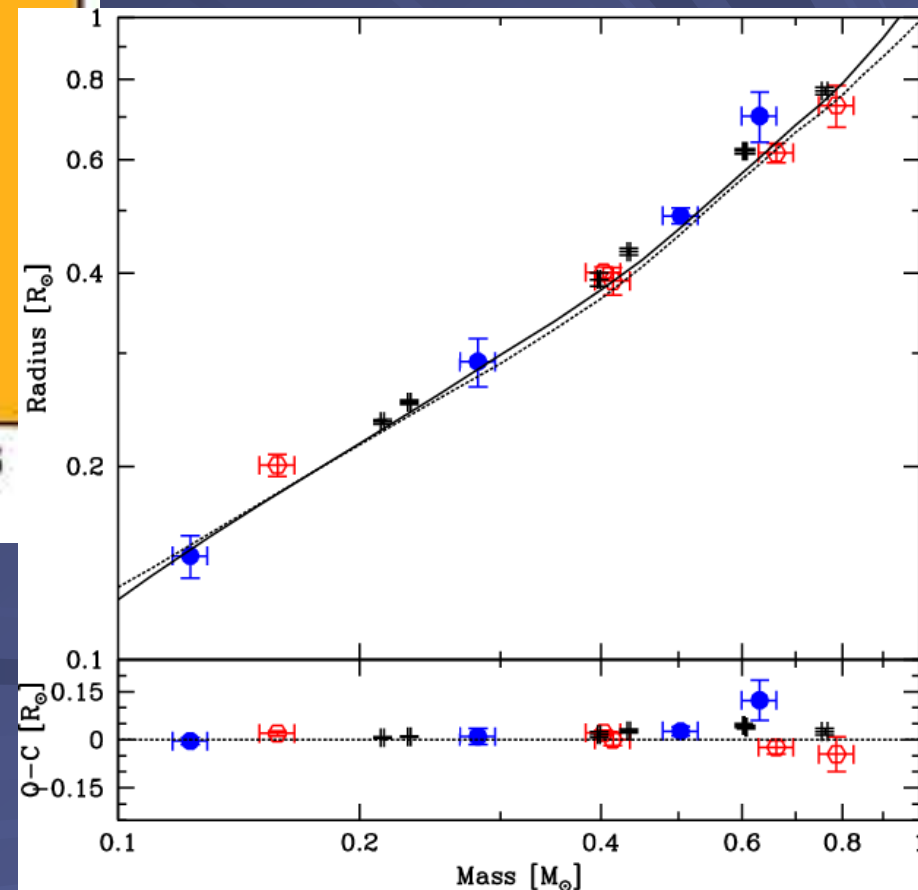


# Соотношение масса-радиус

Соотношение зависит от параметров конвективной оболочки.

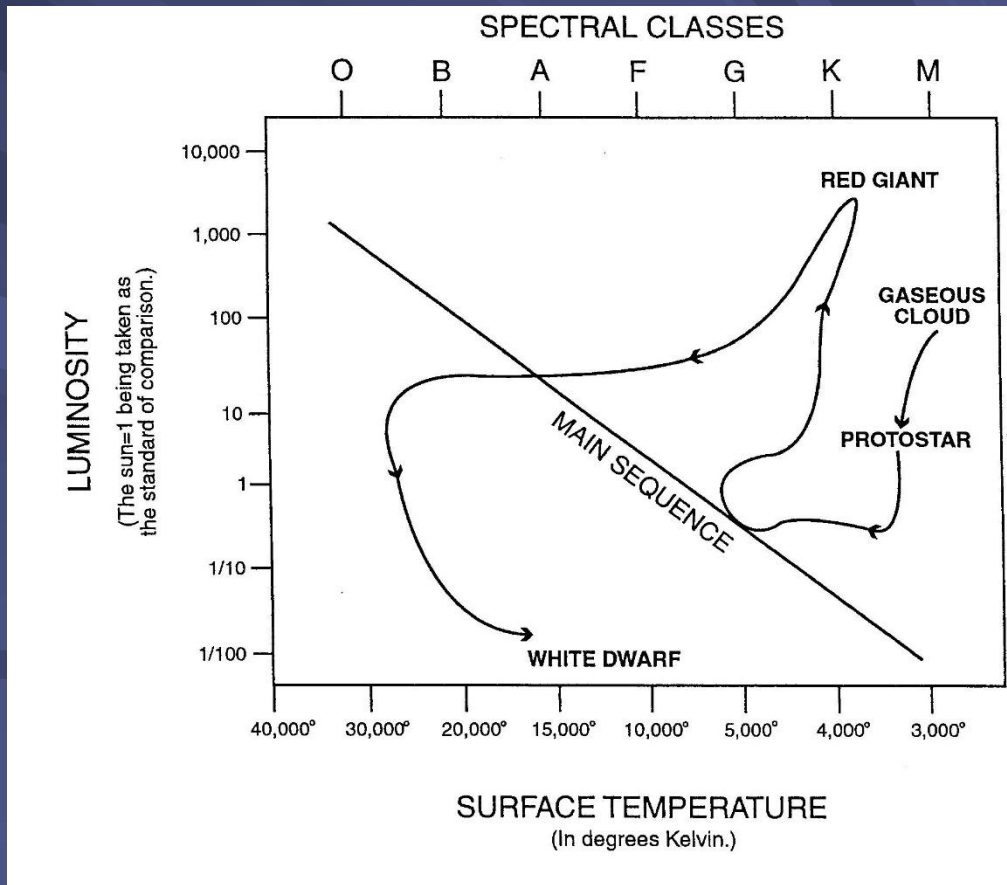
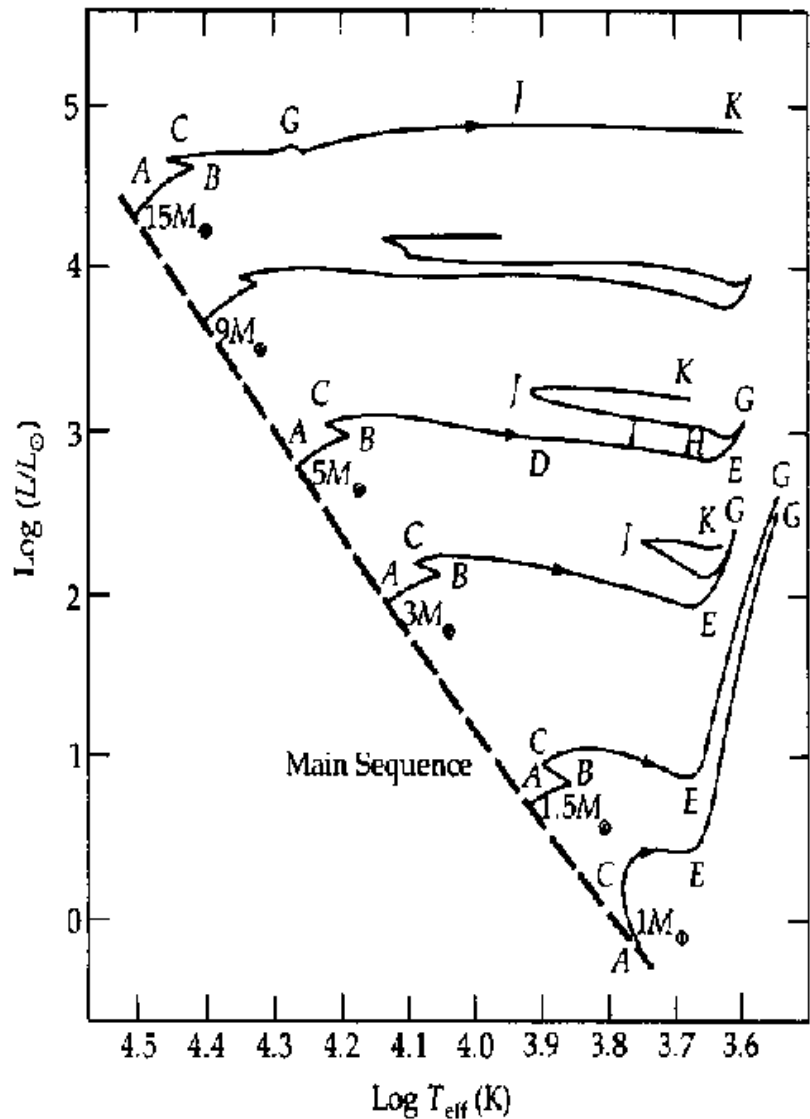


Для масс  $< 1$  солнечной показатель степени равен примерно 0.8-1.  
А для больших масс примерно – 0.6.



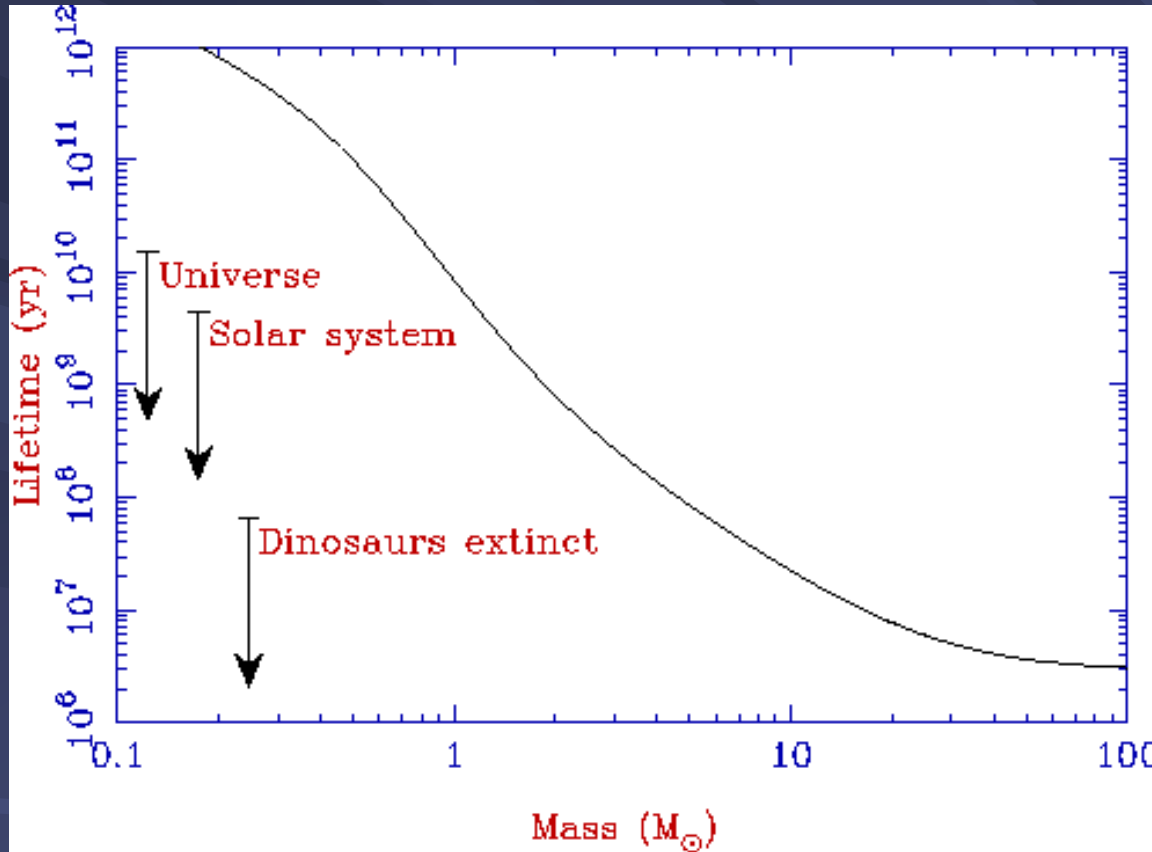
# Эволюция на диаграмме Г-Р

Дольше всего звезды находятся на главной последовательности.



# Время жизни звезды

<http://astronomy.nmsu.edu/tharriso/ast105/Exoplanets.html>



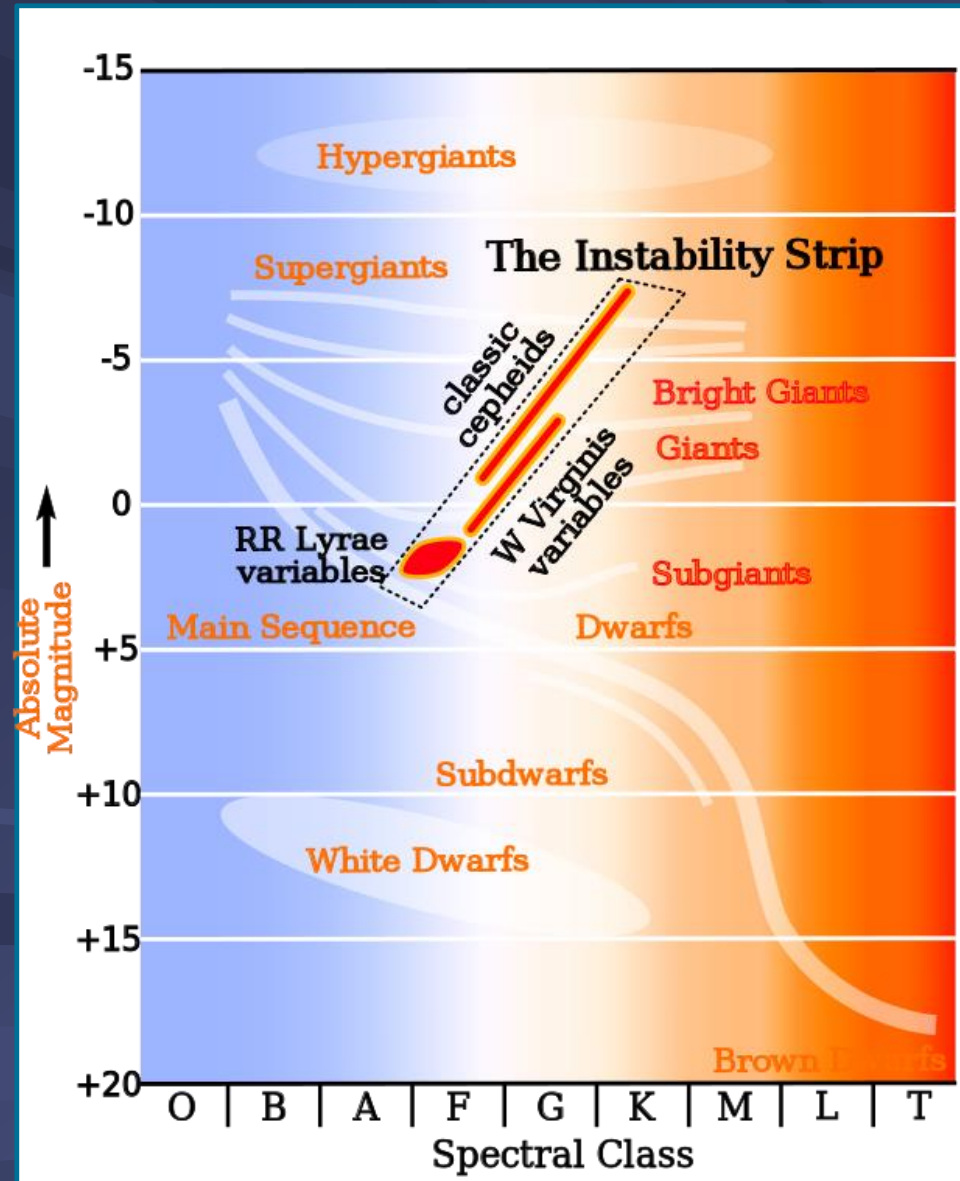
$T \sim M/L$

Для маломассивных  $T \sim M^{-2}$ ,

для массивных выходит на константу.



# 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.

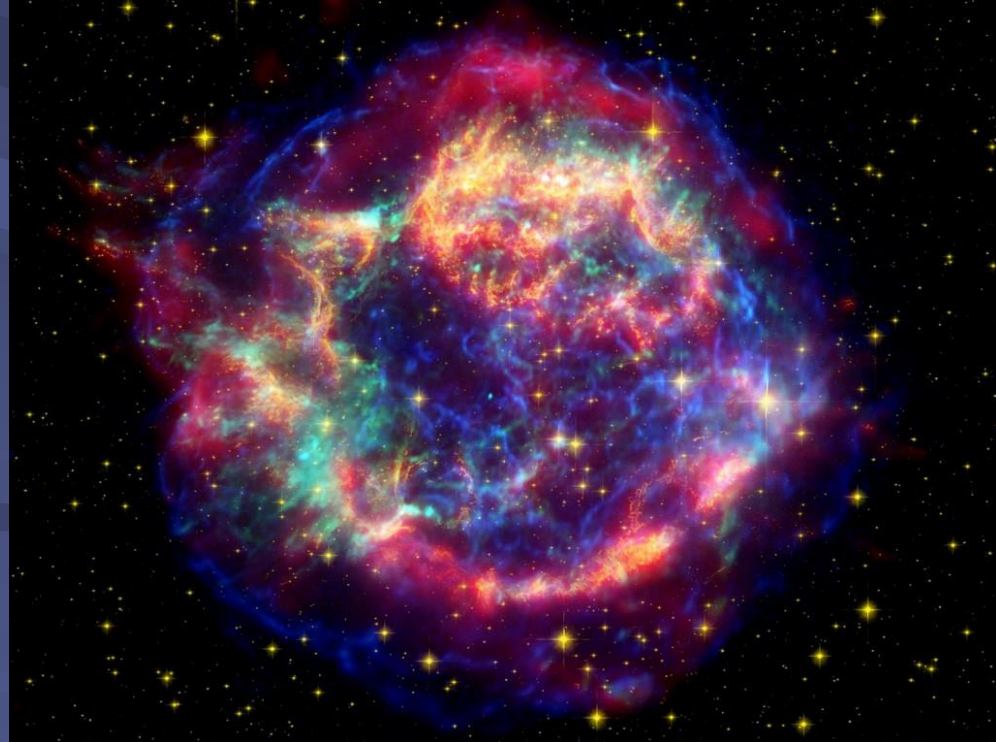
Это позволяет использовать их для измерения расстояний.

$$\text{Период} \sim (Gr)^{-1/2}$$

# 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.

Origin Legend																					
Big Bang						Supernovae						Small Stars									
Large Stars						Cosmic Rays															
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					

# S-процесс

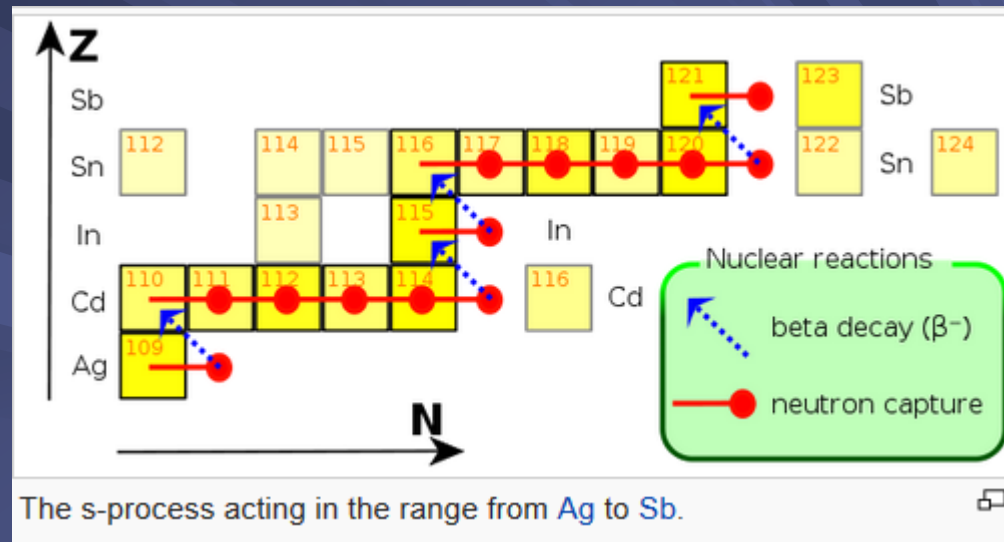


Этот процесс дает свободные нейтроны, которые легко проникают в ядра.

Идет в оболочках звезд-гигантов.

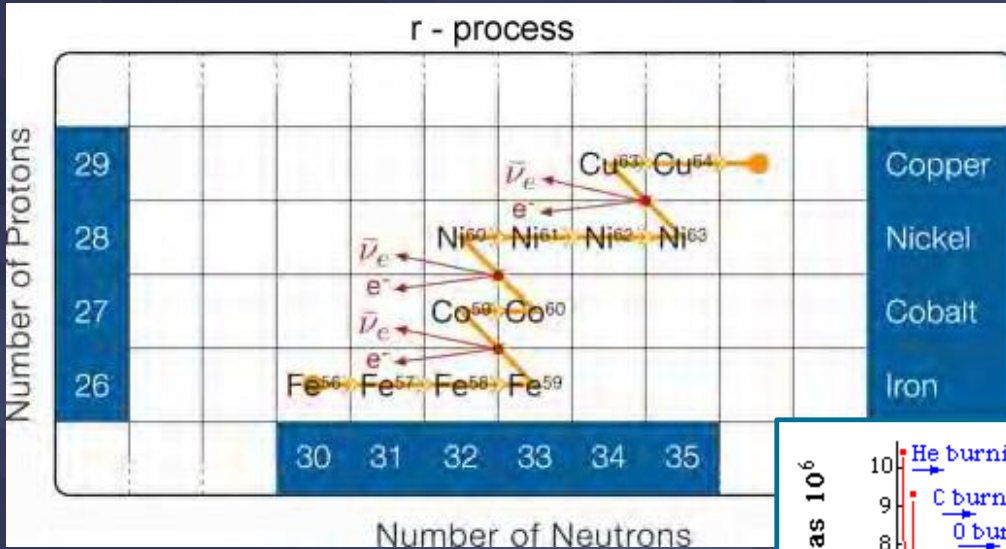
Медленный захват нейтронов.  
Идет при относительно низкой плотности нейтронов.

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



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

# R-процесс

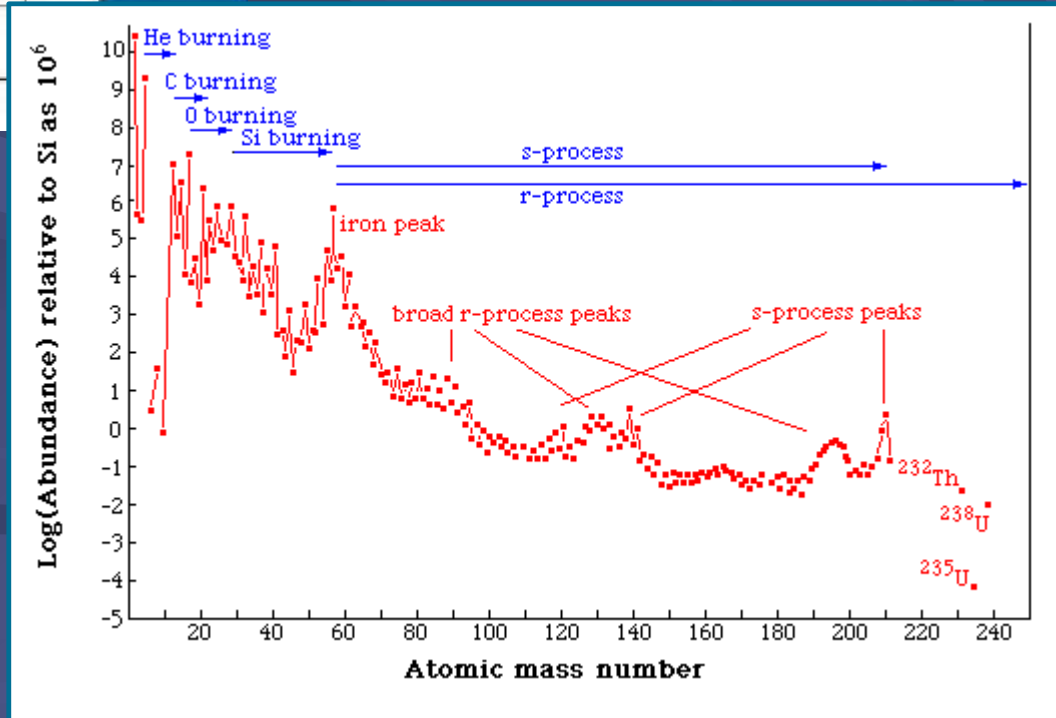


Идет во вспышках сверхновых и при слиянии нейтронных звезд.

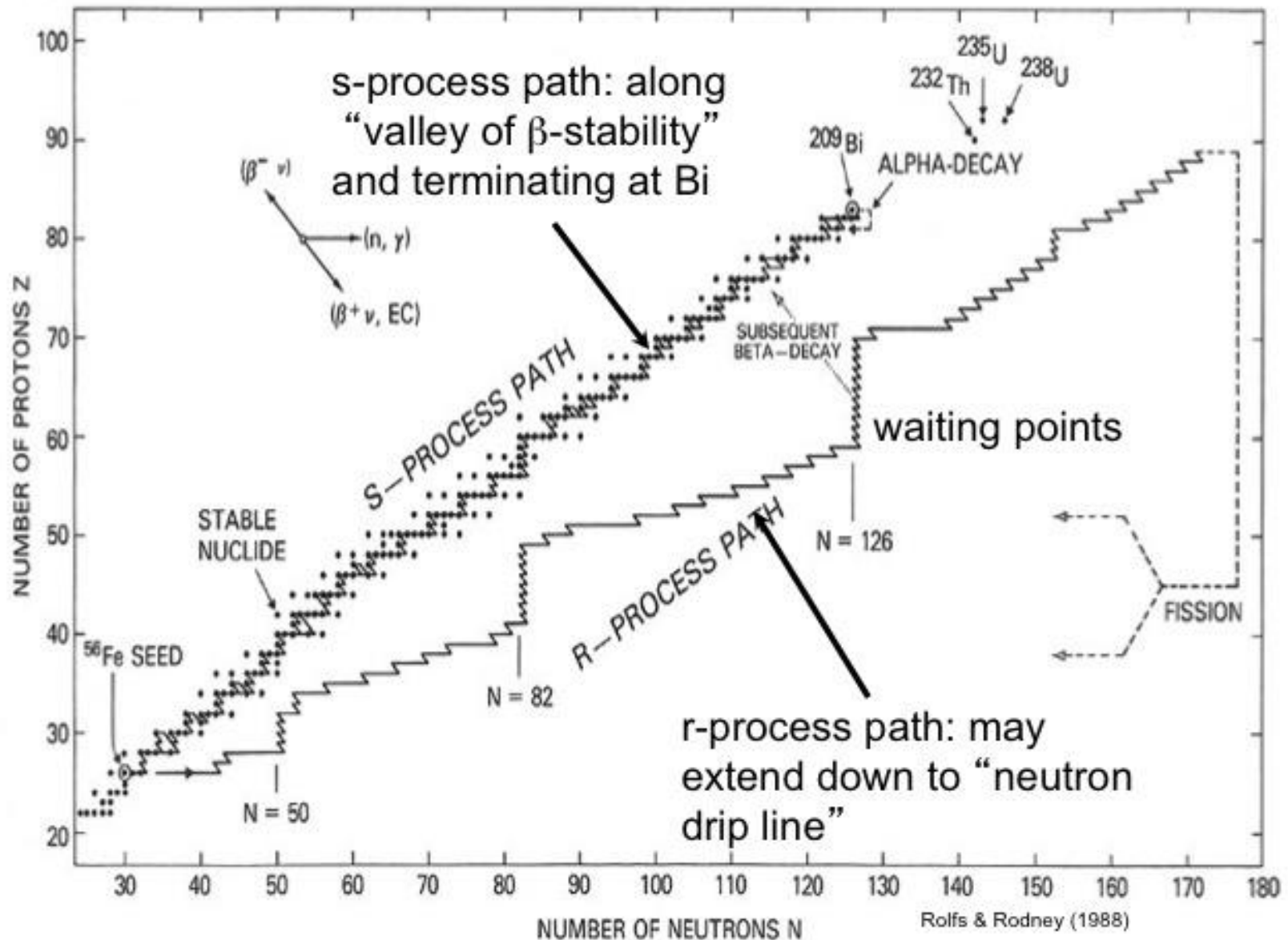
Важен для тяжелых элементов вплоть до урана.

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

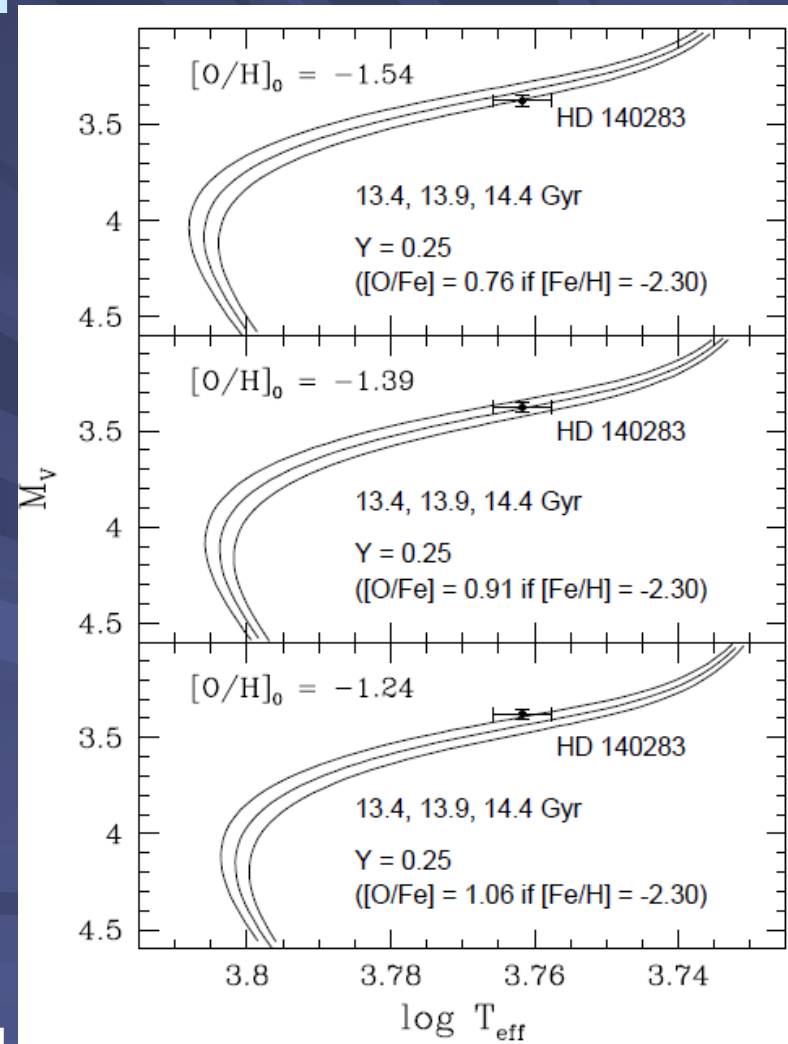
Расстояние  
<200 световых лет

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.





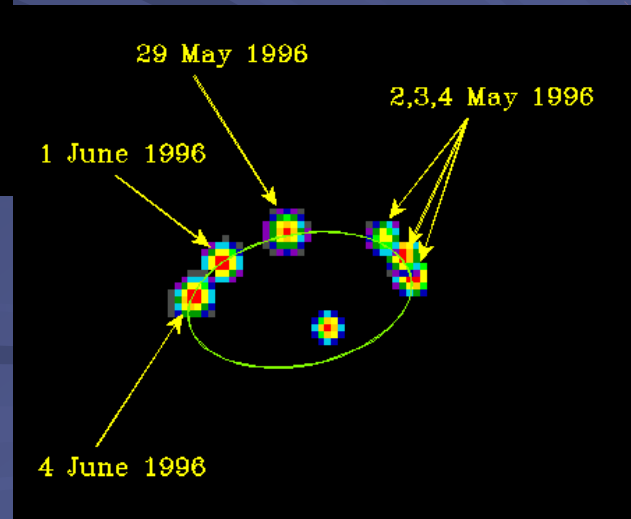
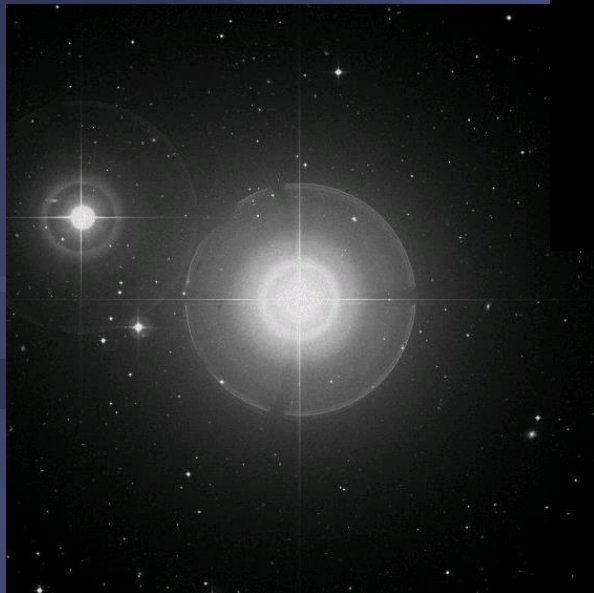
# ДВОЙНЫЕ ЗВЕЗДЫ

Zeta Ursae Majoris (Mizar)



(C) D. Nash

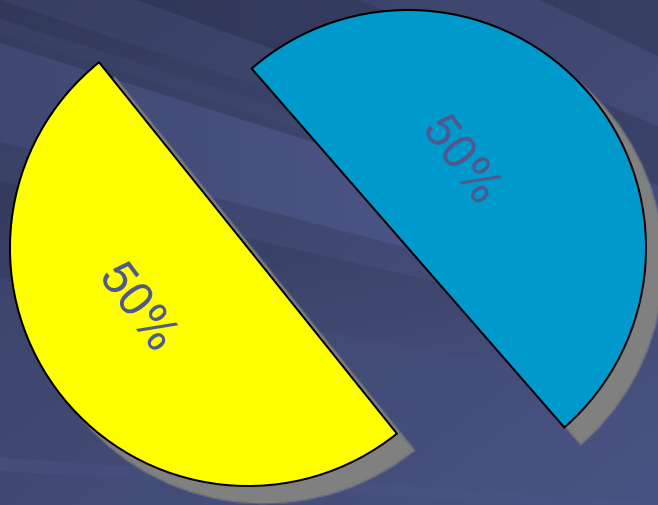
Мицар – пара из  
двух двойных



Мицар А



# Доля двойных звезд



Примерно половина звезд  
входит в двойные и кратные.

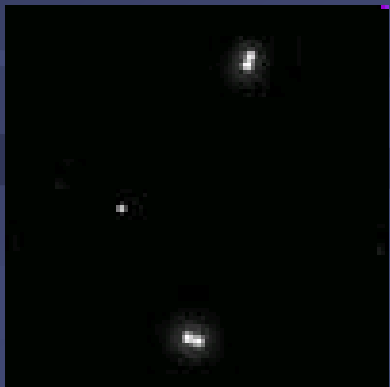
Среди массивных –  
эта доля выше.

Среди маломассивных – меньше.

# Красивые двойные звезды

Есть немало красивых двойных,  
видимых уже в небольшой телескоп.

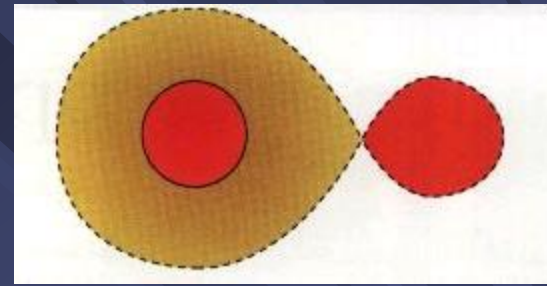
Обычно, это звезды с разными цветами.



... или вот такая  
экзотика, как четверная  
эпсилон Лиры.

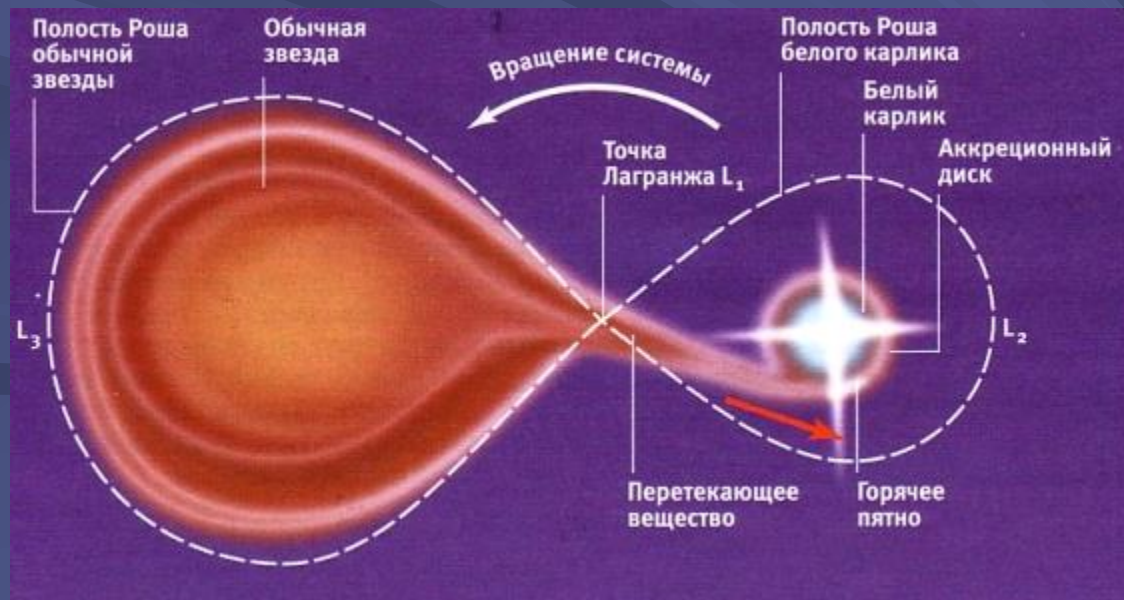
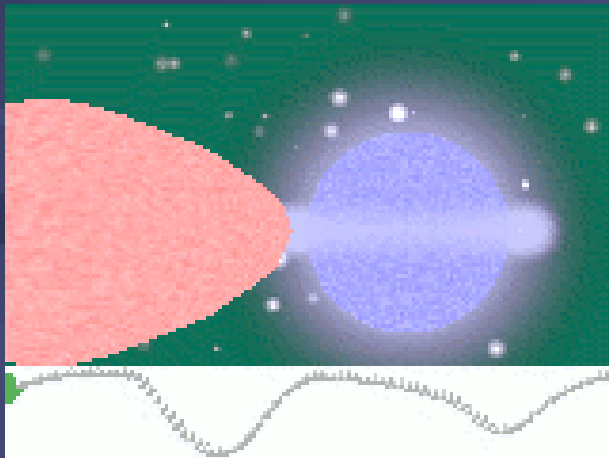


Альбирео

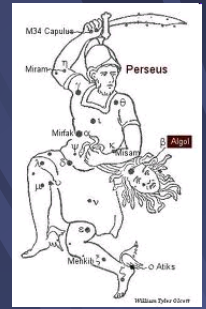


# Обмен масс в двойной

В двойной системе звезды могут обмениваться веществом, т.е. меняется масса звезд.

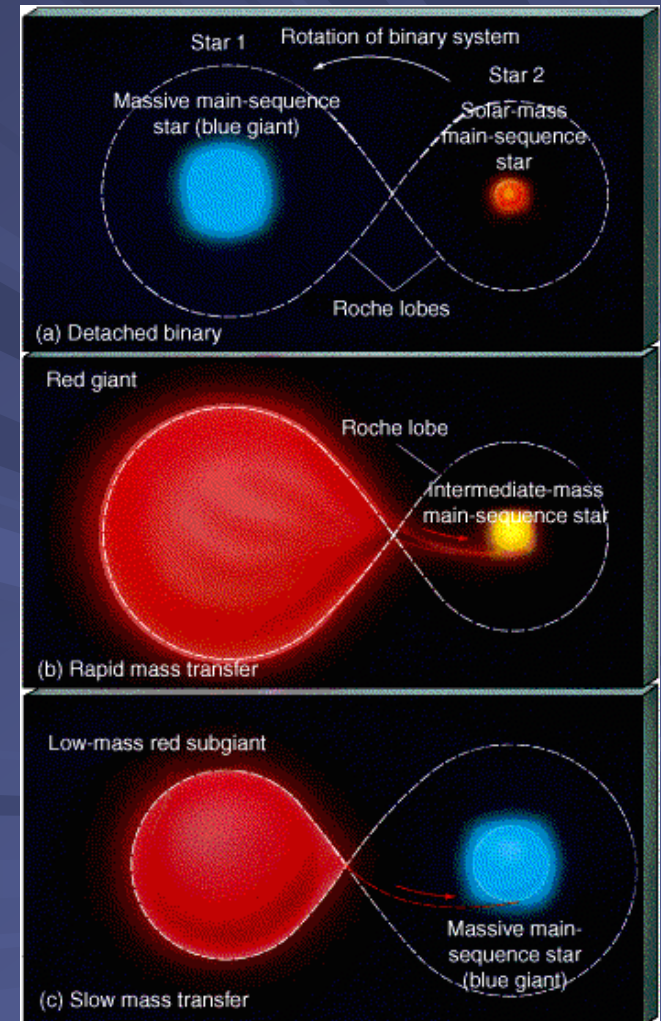


# Парадокс Алголя

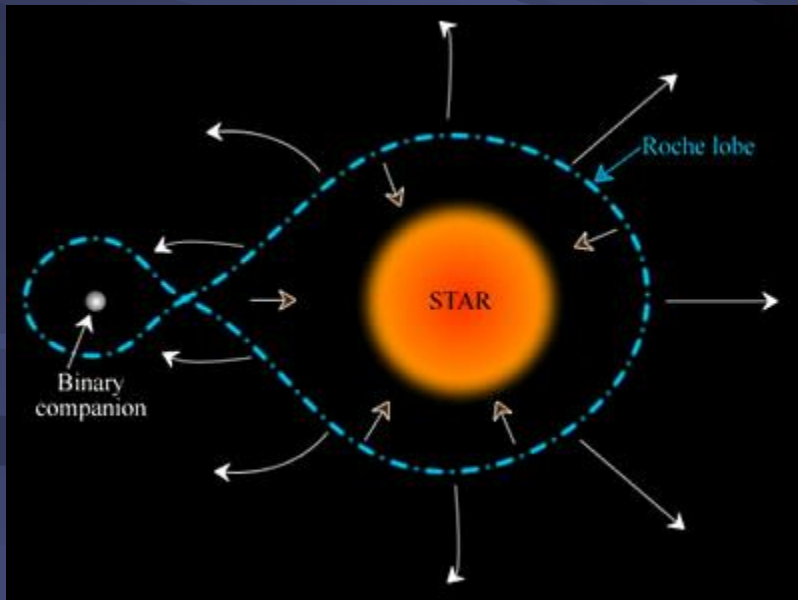


В середине XX века наблюдения показали, что в системе Алголя менее массивная звезда выглядит более проэволюционировавшей.

Объяснить это удалось только с привлечение обмена масс.



# Гелиевые белые карлики



Белые карлики образуются из ядер звезд. Но только достаточно массивные звезды успели проэволюционировать. Такие звезды дают углеродно-кислородные белые карлики. Но мы видим и гелиевые.

Как же они образовались?

# Сверхновые типа Ia

Существует предельная масса белого карлика



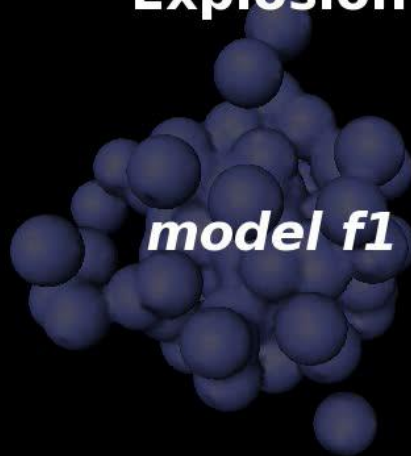
Взрываются не только умирающие массивные звезды.

Если на белый карлик в двойной системе натечет слишком много вещества, то произойдет взрыв.



# Взрыв белого карлика

**Thermonuclear Supernova  
Explosion**



(c) Friedrich Röpke, MPA, 2004

# Сверхновая 1987А

Удивительная структура оболочек сверхновой 1987А может быть связана с двойственностью звезды-прародителя.



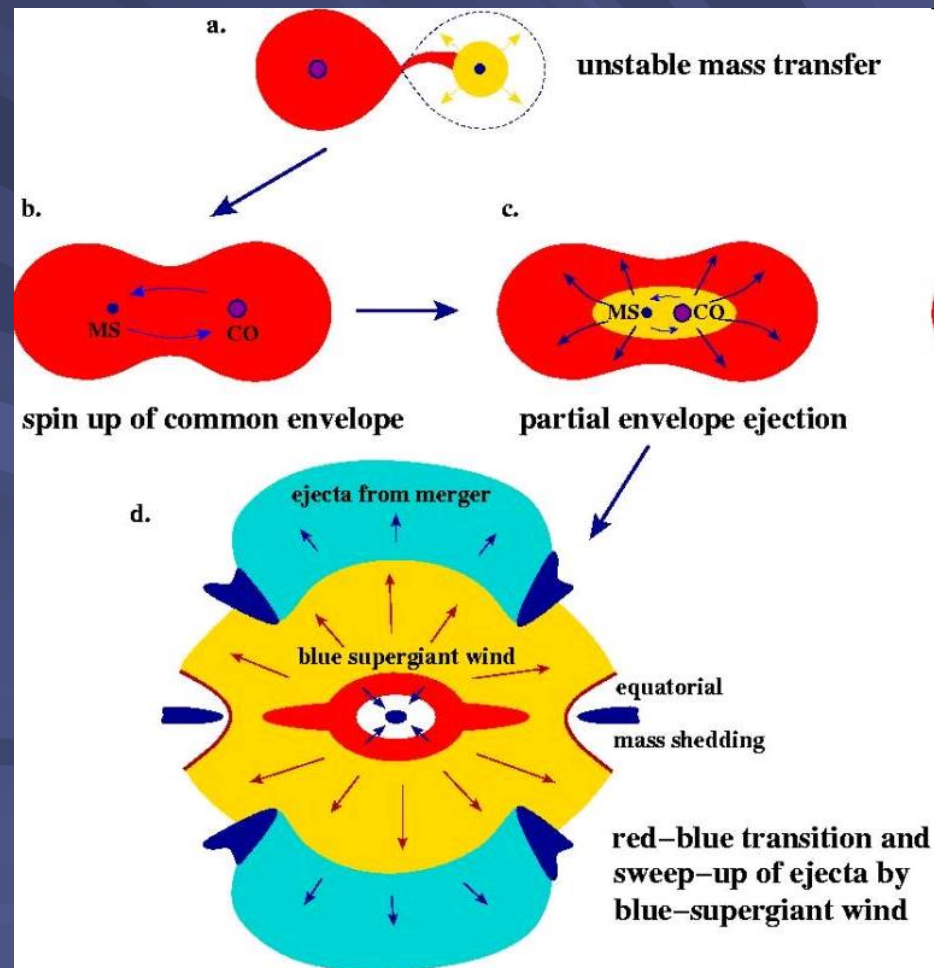
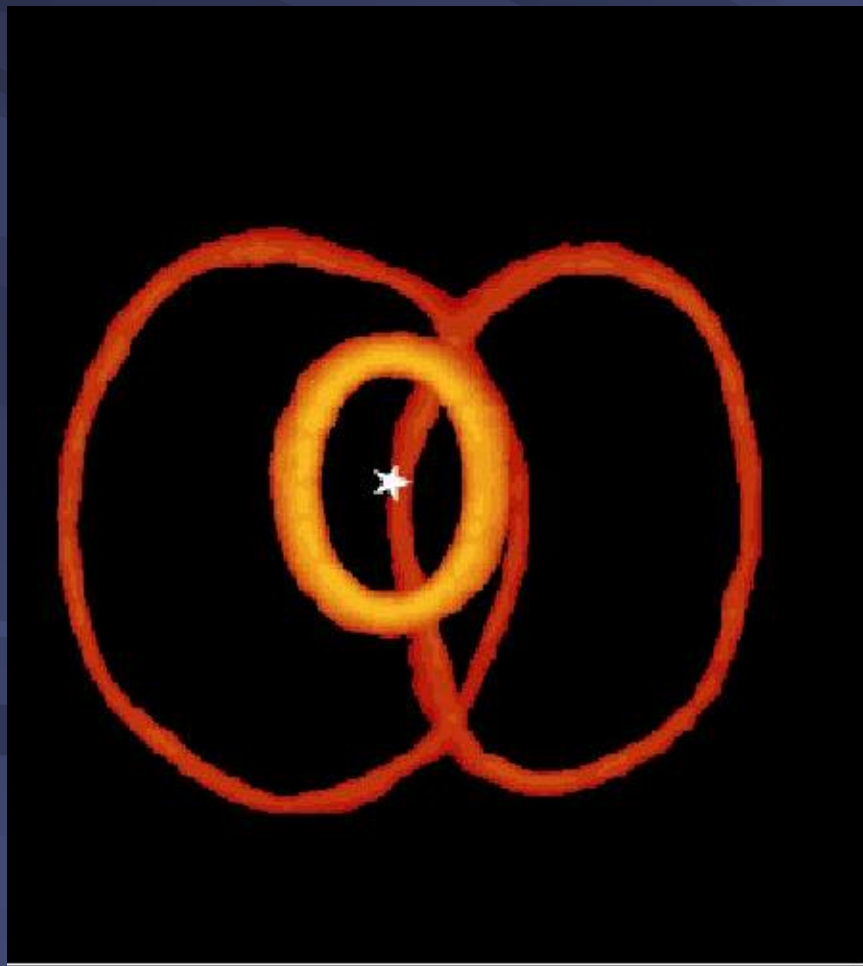
Реальное изображение



Теоретическая модель

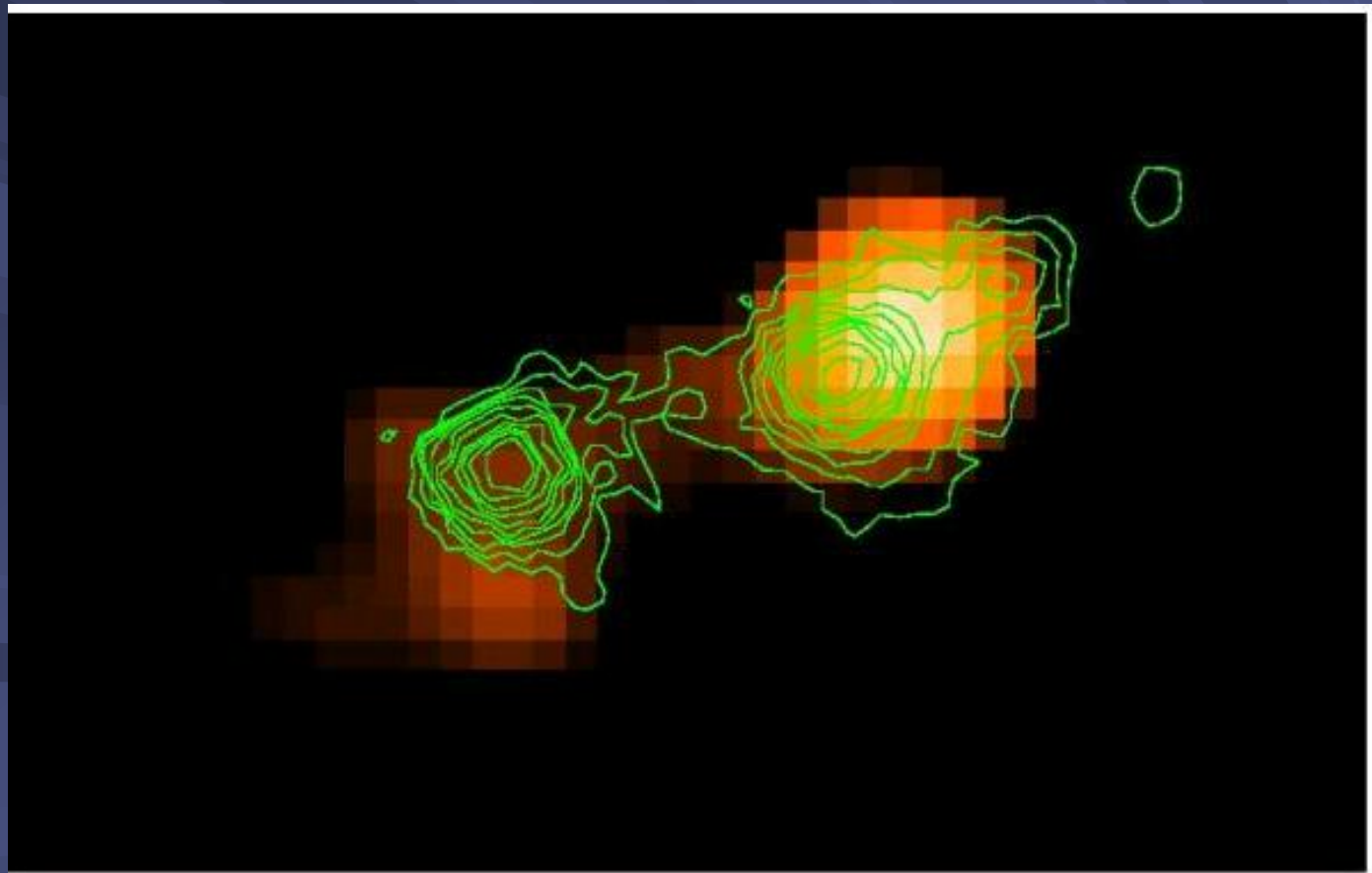


# Модель сверхновой 1987А



# Изображения двойных звезд

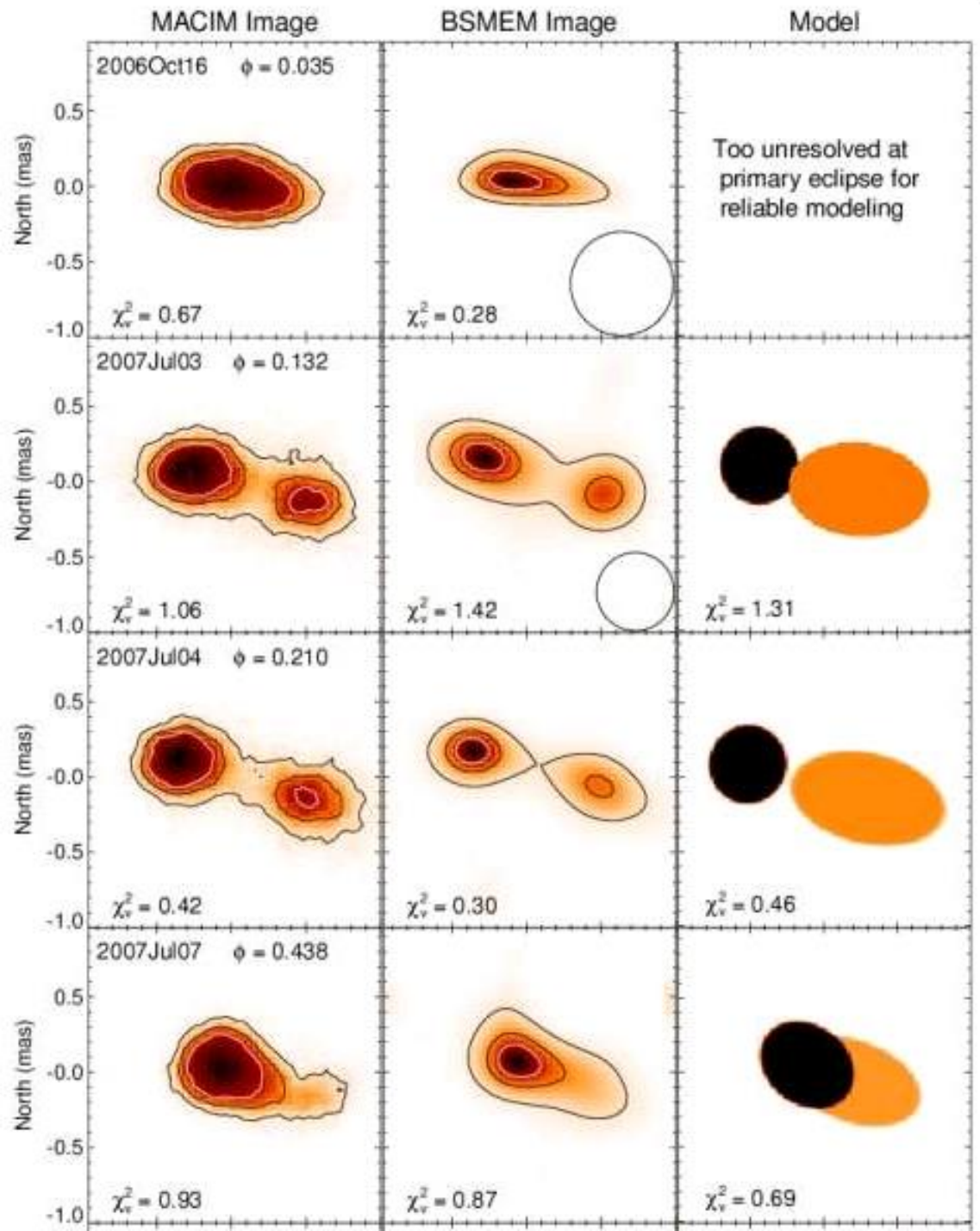
Мира  
(омикрон Кита)  
в рентгене и оптике:  
белый карлик и  
красный гигант



# Изображ



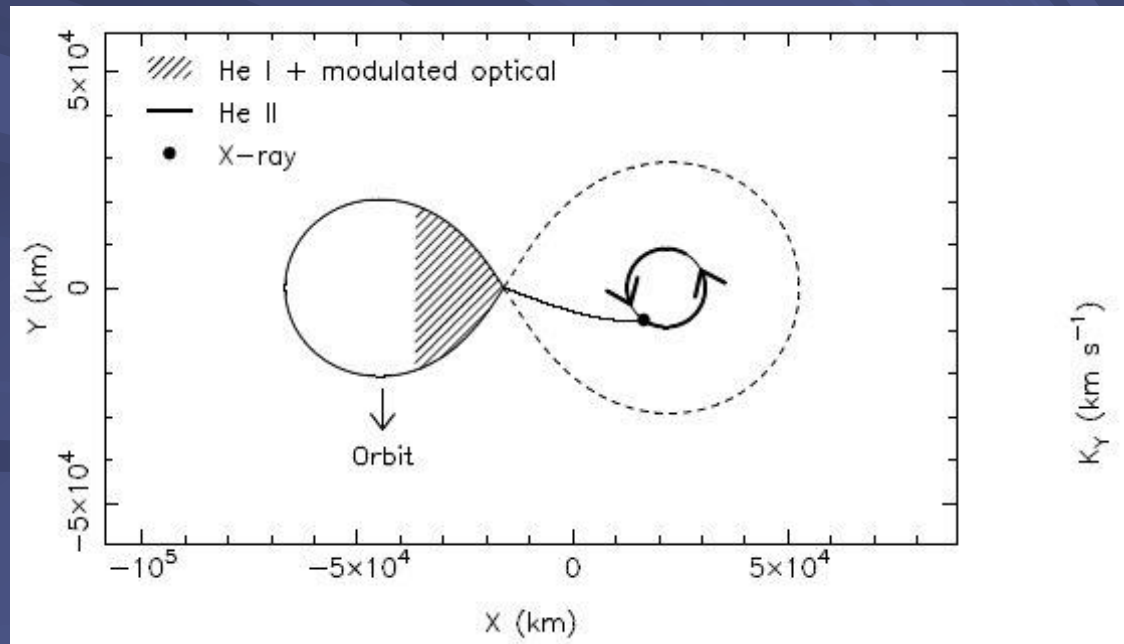
Интерферометр  
CHARA

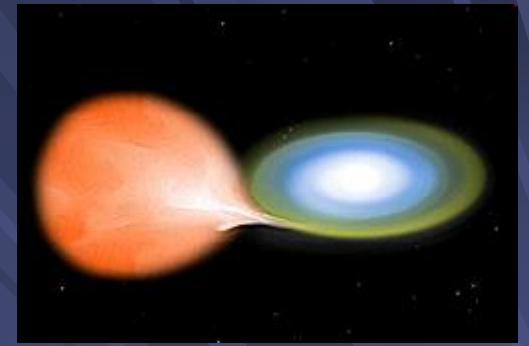


# Самая тесная двойная

Двойная система из двух белых карликов.  
Период системы всего лишь 321 секунда!  
Расстояние между звездами: менее 100 тыс. км.  
Орбитальная скорость более миллиона км/час!  
Массы 0.27 и 0.55 солнечных.  
Излучение гравитационных волн .

HM Cancri

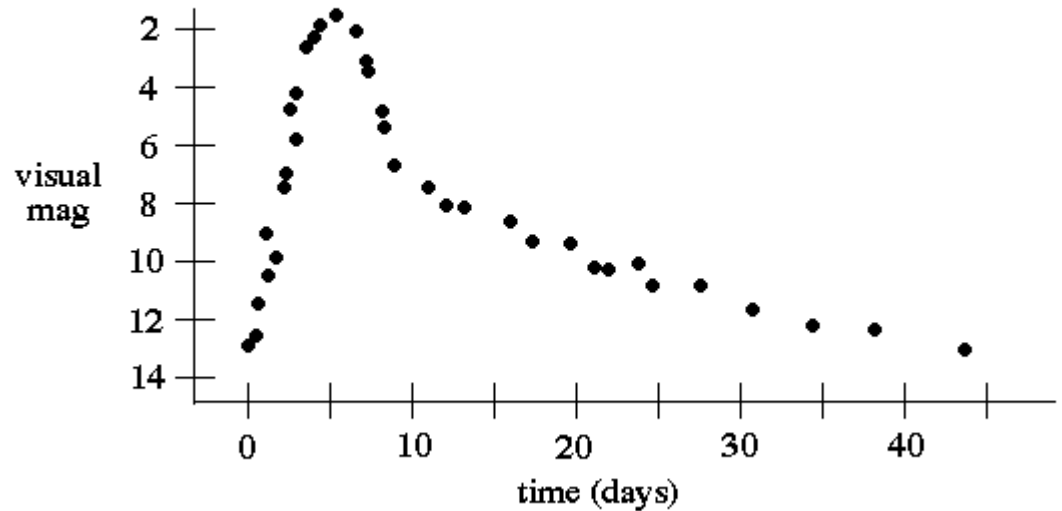




# Новые звезды

Водород, перетекая на белый карлик с обычной звезды, накапливается, пока не начинаются термоядерные реакции.

Nova Light Curve





# Планетарные туманности



Формы некоторых планетарных туманностей могут определяться двойственностью центральных звезд.

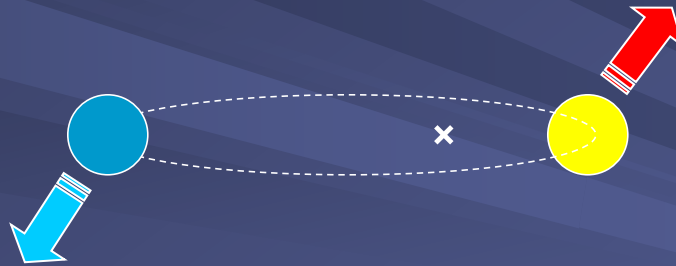
Биполярная структура может возникать из-за последствий взаимодействия звезд.

# Измерение масс

Измеряем:

- период вращения
- скорости звезд

Тогда можем найти массы, если знаем наклон орбиты



Непосредственное измерение масс звезд возможно только в двойных системах.

# Функция масс

$$v_2 = \frac{v_1 m_1}{m_2}$$

$$v_1 + v_2 = v_1 \left( 1 + \frac{v_2}{v_1} \right)$$

$$v_1 + v_2 = v_1 \left( 1 + \frac{m_1}{m_2} \right)$$

$$v_1 + v_2 = \frac{v_1}{m_2} (m_1 + m_2)$$

$$m_1 + m_2 = \frac{P (v_1 + v_2)^3}{2\pi G \sin^3 i}$$

$$m_1 + m_2 = \frac{P}{2\pi G \sin^3 i} \left[ \frac{v_{1r} (m_1 + m_2)}{m_2} \right]^3$$

$$\frac{P v_{1r}^3}{2\pi G} = \frac{m_2^3 \sin^3 i}{(m_1 + m_2)^2}$$

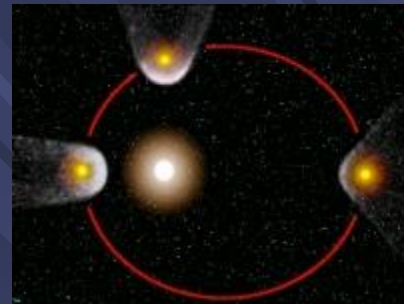
$$\frac{P v_{1r}^3}{2\pi G} = \frac{m_2^3 (\sin i)^3}{m_2^2 (1+q)^2} \quad \text{где } q = m_1/m_2$$

$$\text{Обозначим } f(m) = \frac{P v_{1r}^3}{2\pi G}$$

Тогда  $m_2 = f(m) (1+q)^2 / (\sin i)^3$

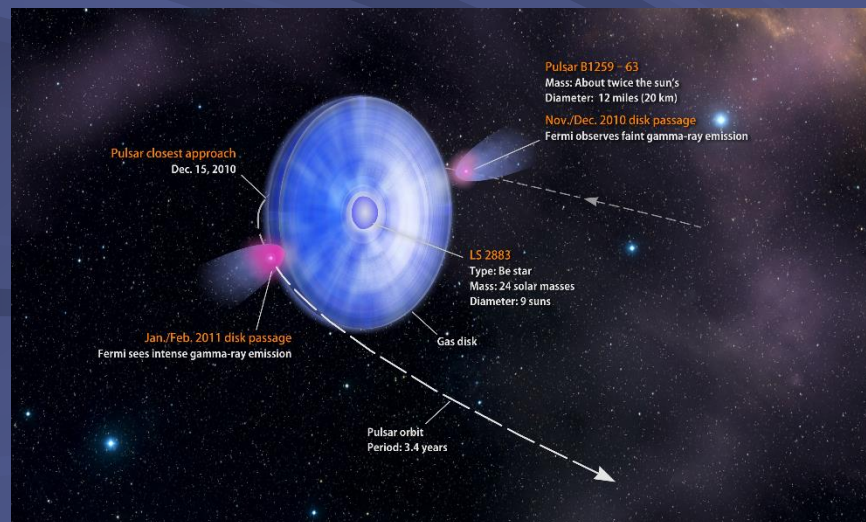
Функция масс – нижний предел на  $m_2$





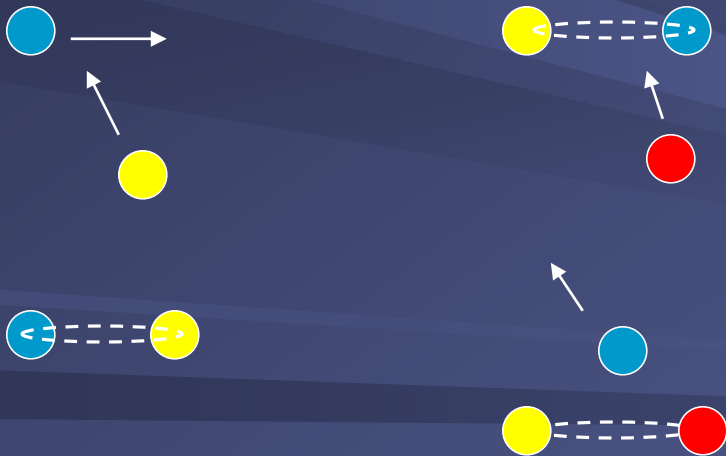
# Столкновение ветров

Столкновение звездных ветров от двух массивных звезд, или от звезды и пульсара, приводит к появлению яркого источника жесткого излучения.

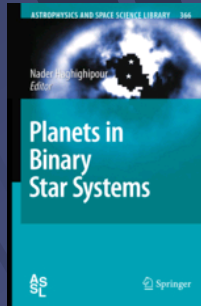


# Родные или сводные

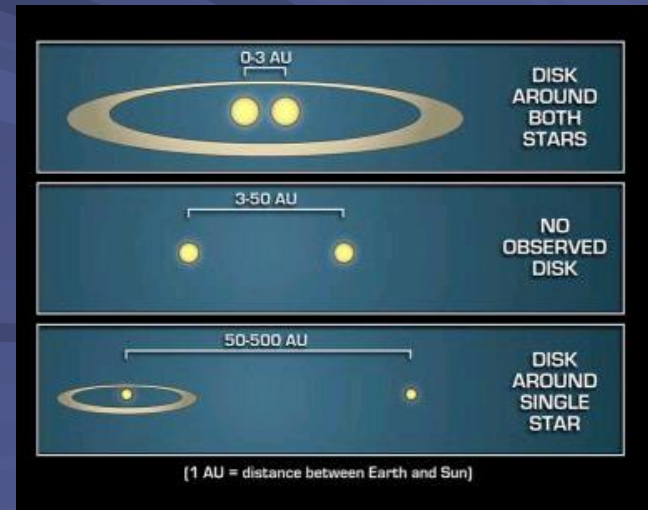
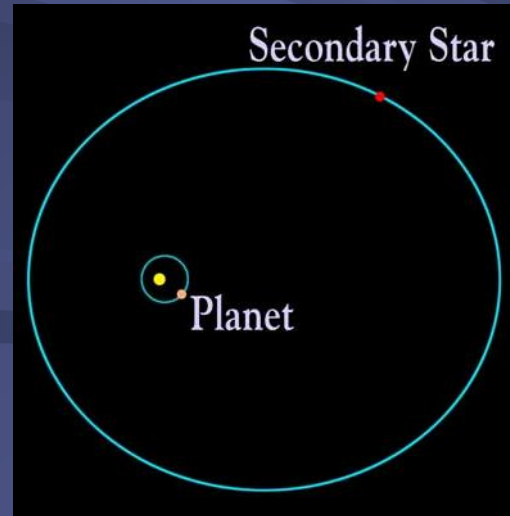
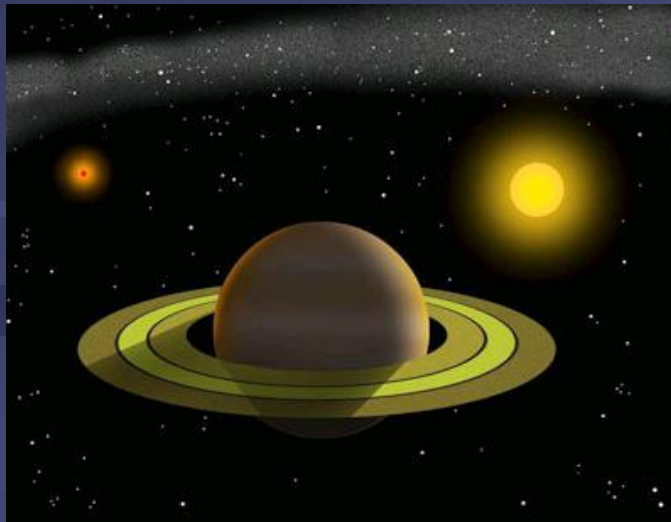
Двойная система может образоваться в результате захвата



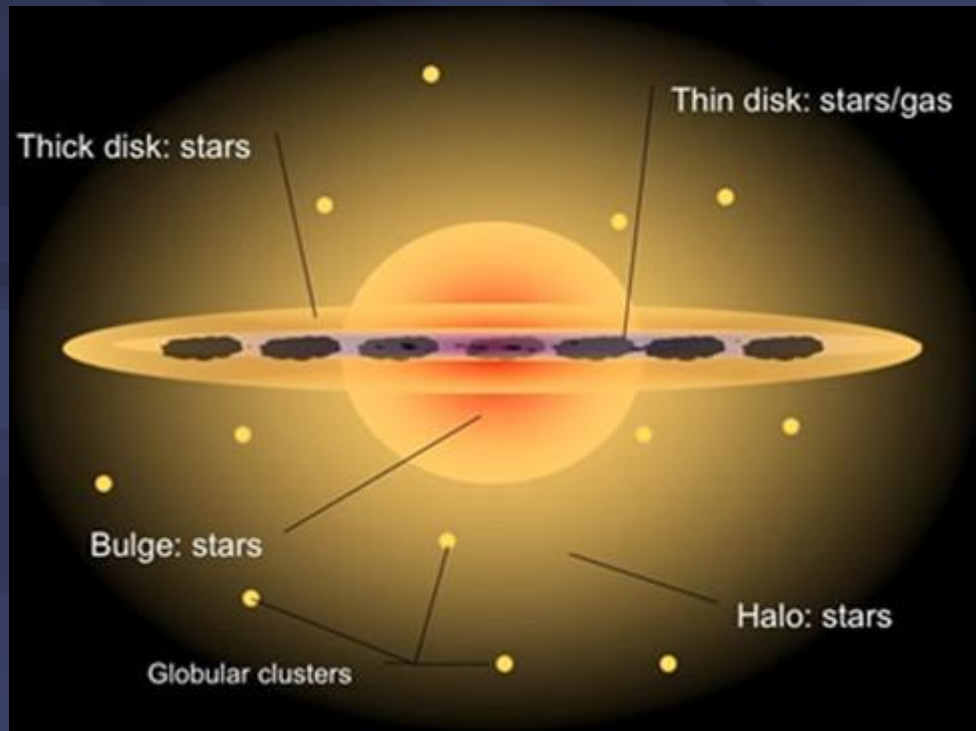
# Планеты в двойных



Уже известны планеты в двойных системах. Обычно расстояние от звезды до планеты намного меньше расстояния между звездами

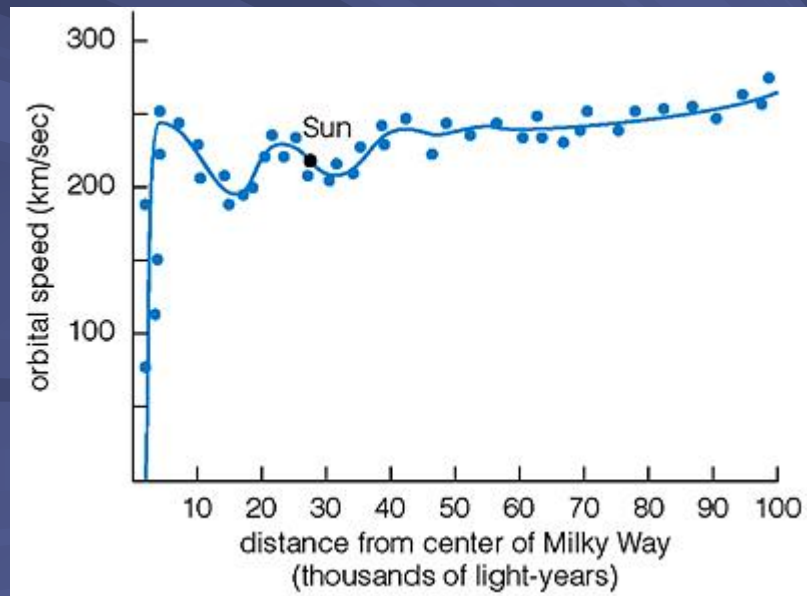


# Скорости звезд в Галактике



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  $\sim 500$  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.

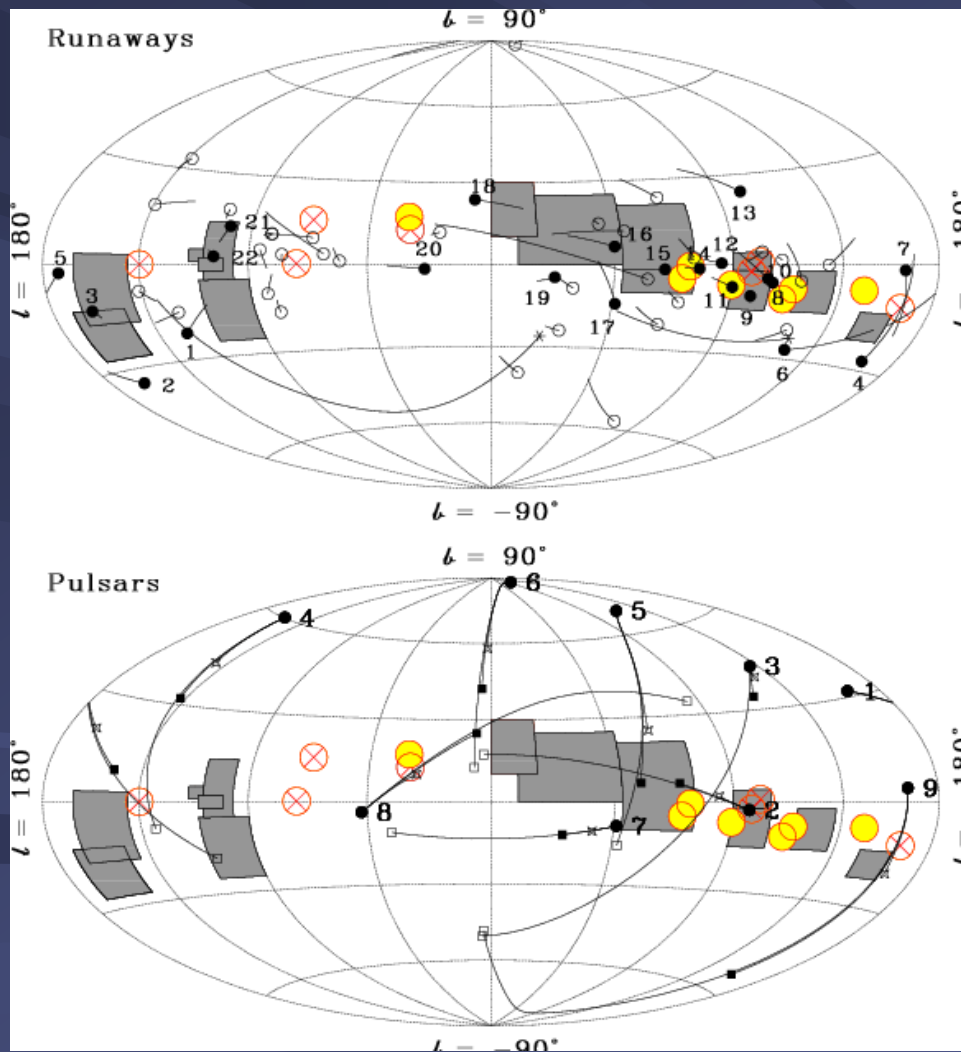
Типичные скорости 50-70 км в сек.

Открыты в 1947 г.

Известно много десятков таких объектов.

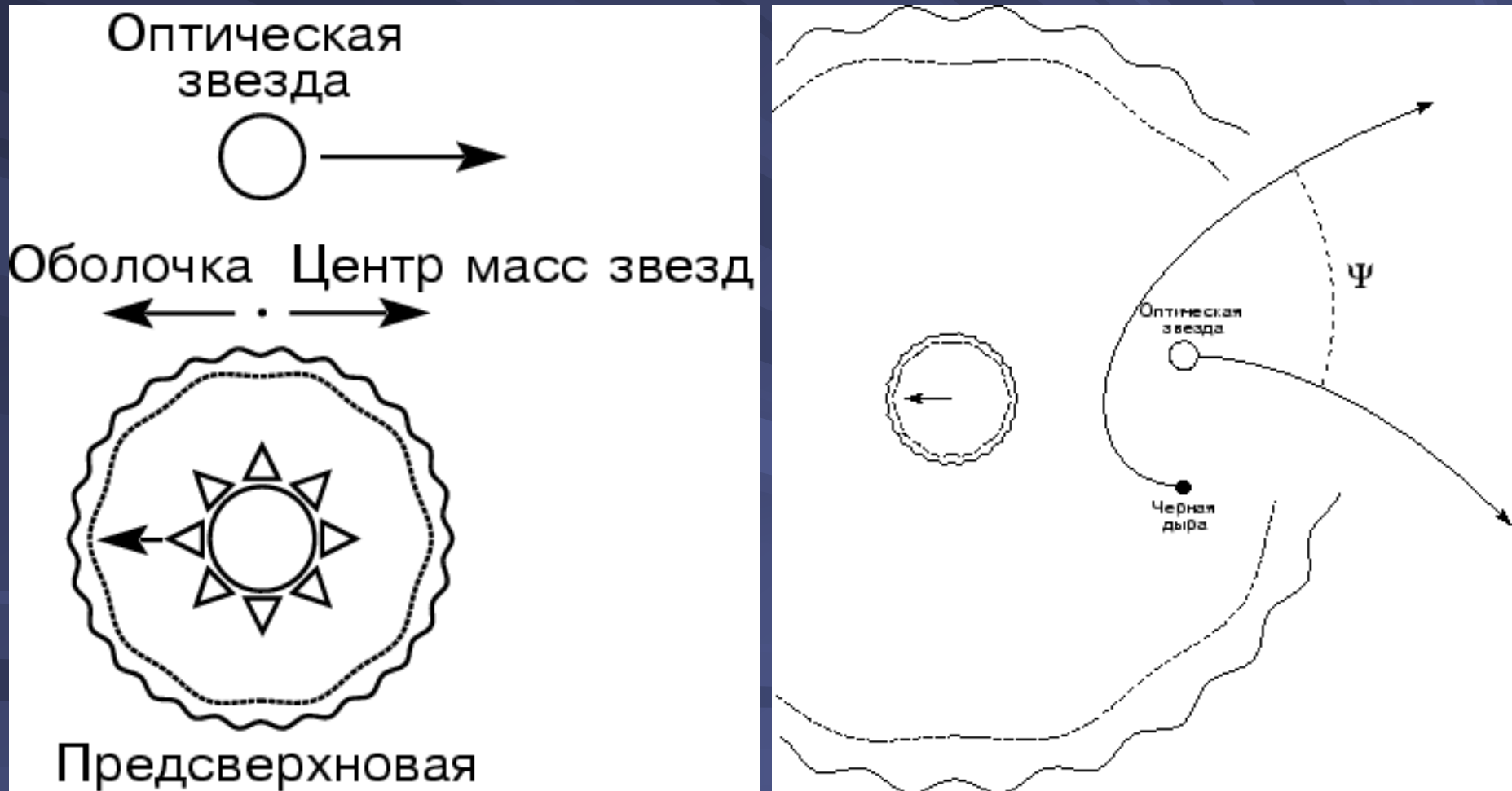
В окрестности Солнца 10-30% звезд класса O и 5-10% звезд класса B относятся к убегающим.

# Материнские скопления убегающих звезд



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

# Распад двойной системы



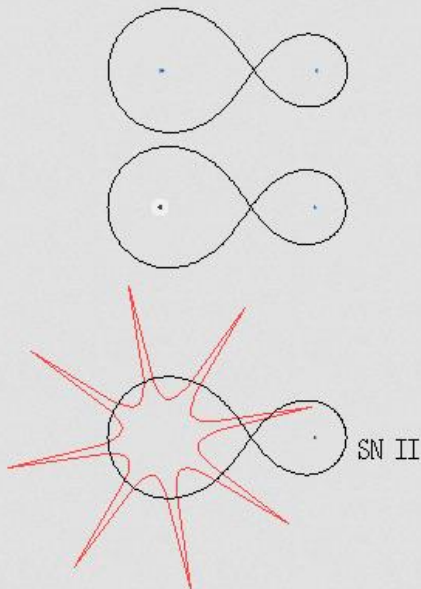
Сброс более половины массы приводит к распаду двойной.  
 Также система может распасться, если после взрыва сверхновой компактный объект получит кик.






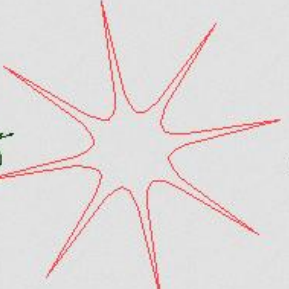








# Разрушение двойной

M1  
 Solar masses

19.00

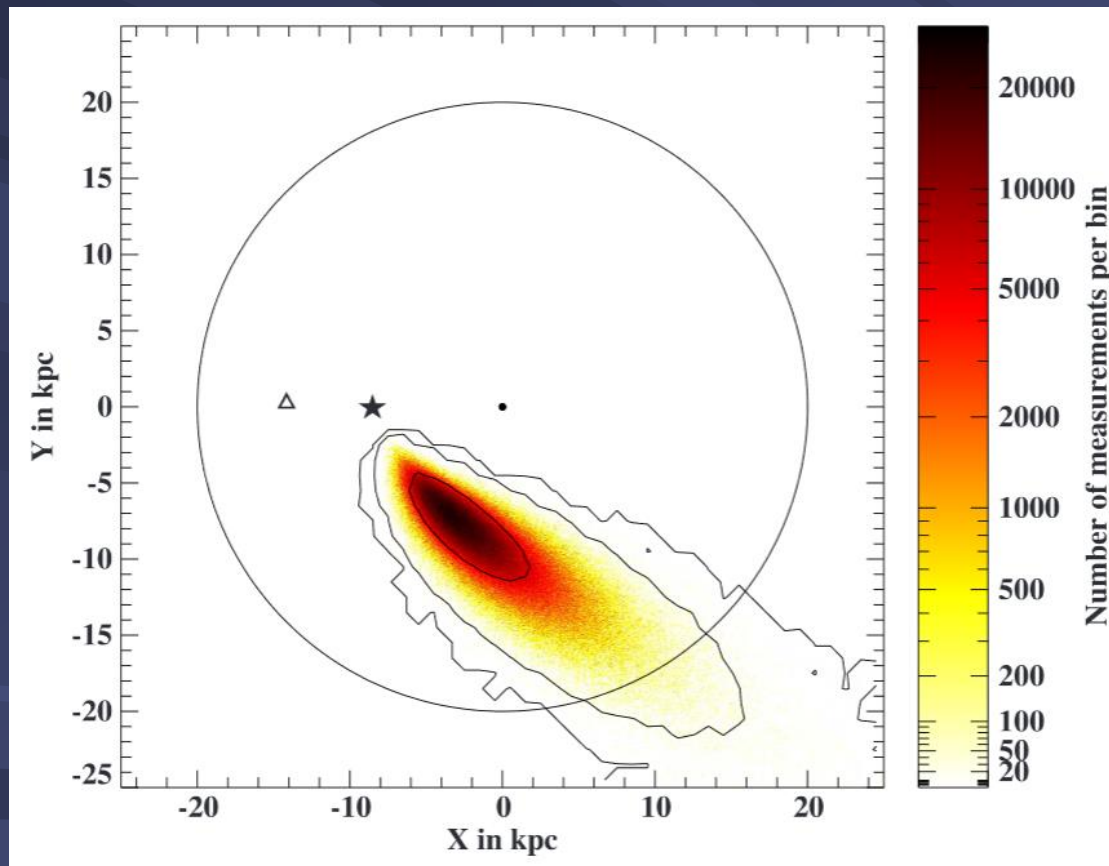
17.88



1.40	NS "E"			9.89	9.09
1.40	NS "E"			9.72	22.46
	NS "E"			SN II	22.46
1.40	NS "E"			NS "E" 1.40	24.70
1.40	NS "E"			NS "P" 1.40	7193.00
1.40	NS "E"			NS "A" 1.40	9775.00
1.40	NS "P"			NS "A" 1.40	11440.00



# Самая быстрая в Галактике

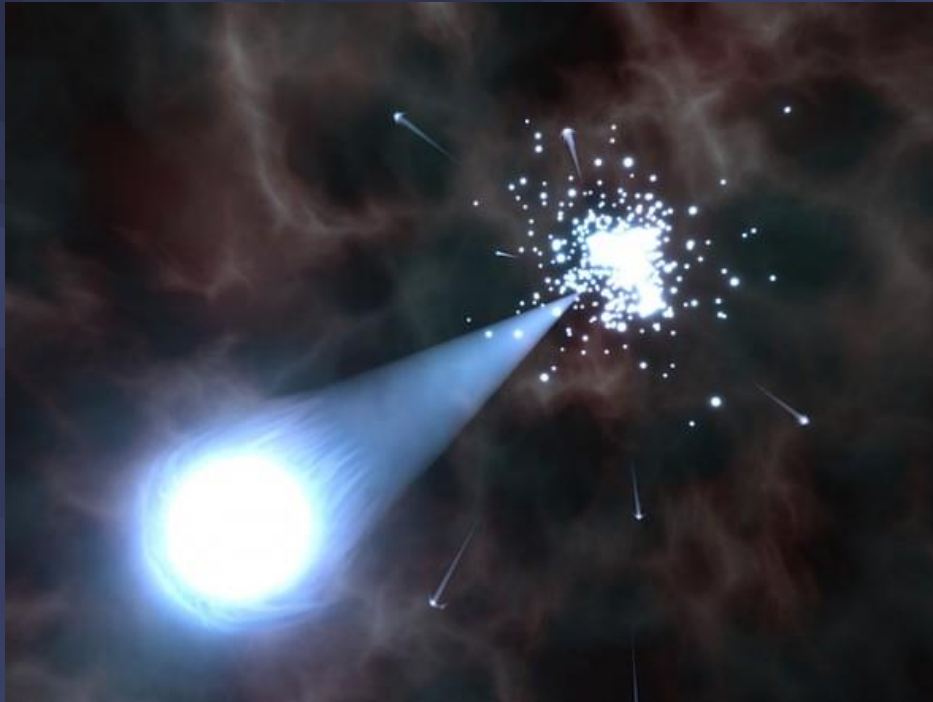


US 708  
1200 км/с

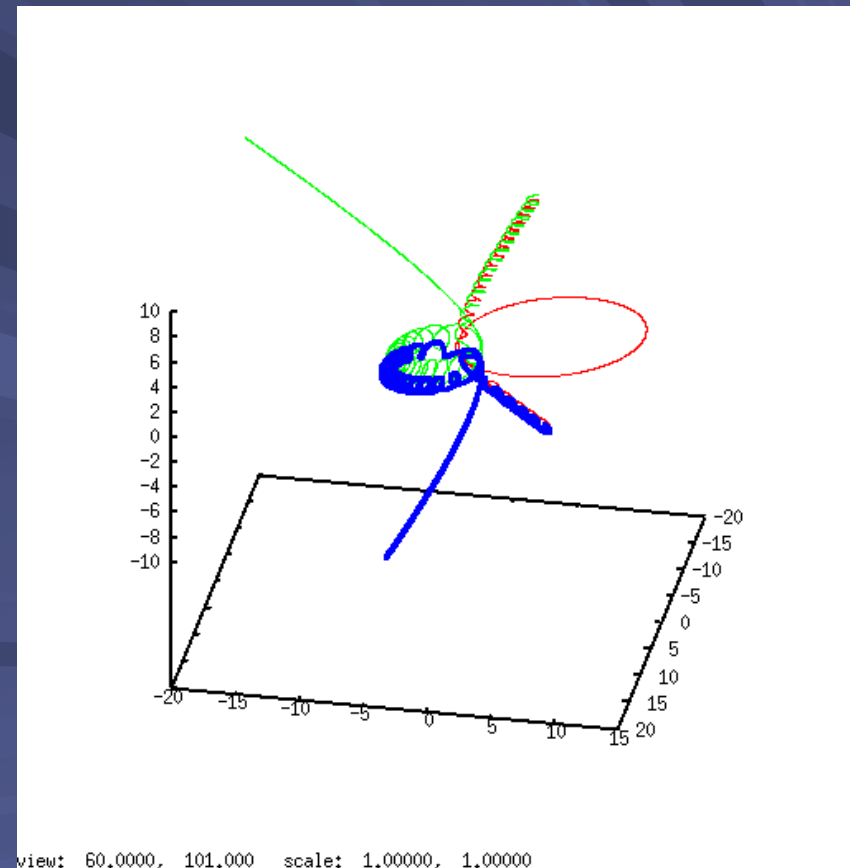
Летит не из центра Галактики.  
Наиболее вероятно,  
что она родилась в двойной  
системе, разрушенной  
взрывом сверхновой.  
Причем, сверхновой Ia!

# Динамическое взаимодействие

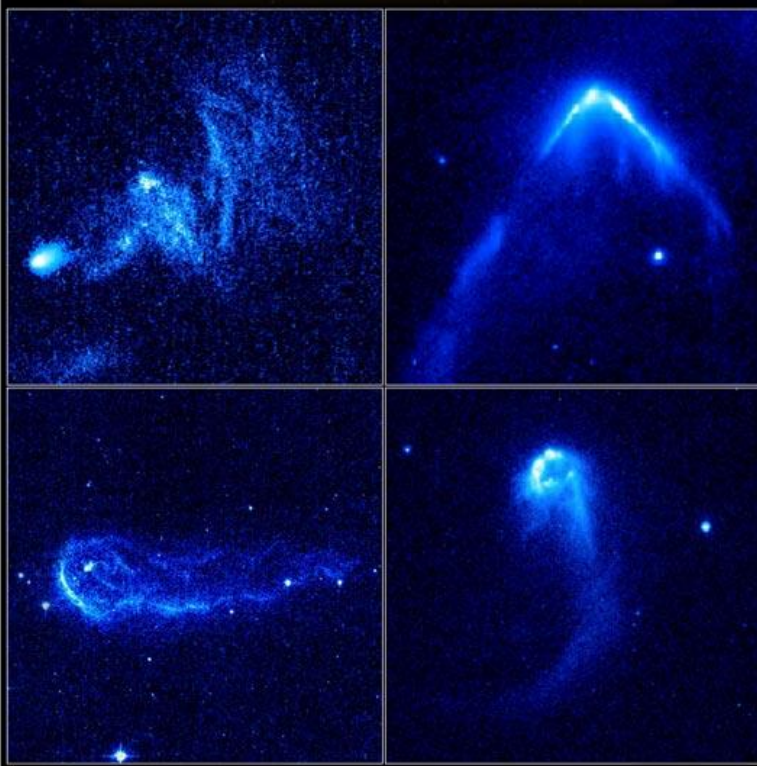
Взаимодействие трех или четырех звезд в скоплении может привести к вылету одной из звезд с большой скоростью.



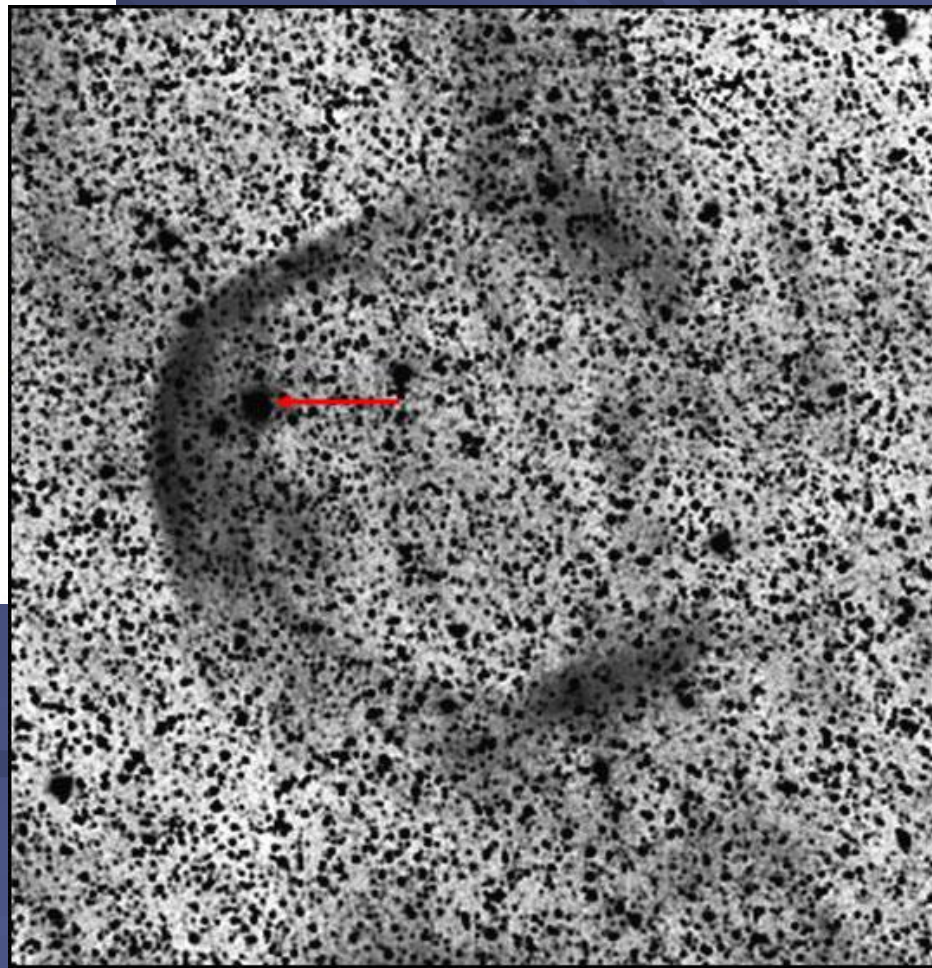
Типичная «добавка» к скорости – десятки км в сек. Но может быть и намного больше:  
 $v_{\max} = (2GM/R)^{1/2}$ , где  $M$  и  $R$  – параметры наиболее массивной звезды, участвующей во взаимодействии.



# Взаимодействие с газом среды



Быстродвигающиеся звезды  
приводят к образованию  
ударных волн



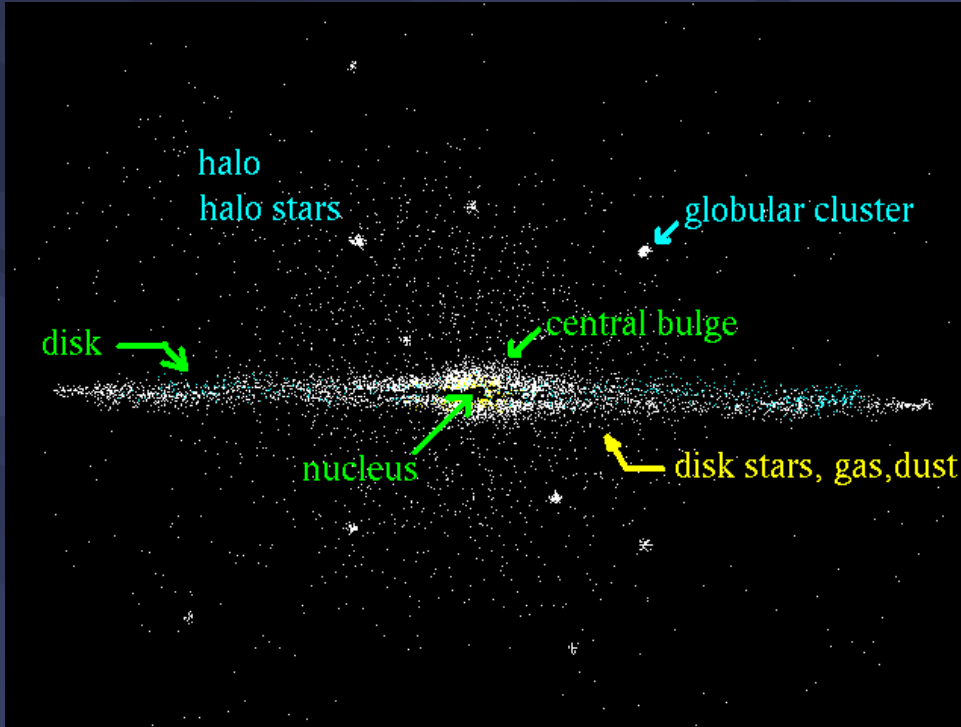
Скорость звука  
в МЗС -  
10 км в сек



**NASA Spots Runaway Star**

Jan 26, 2011 12:32 PM CST

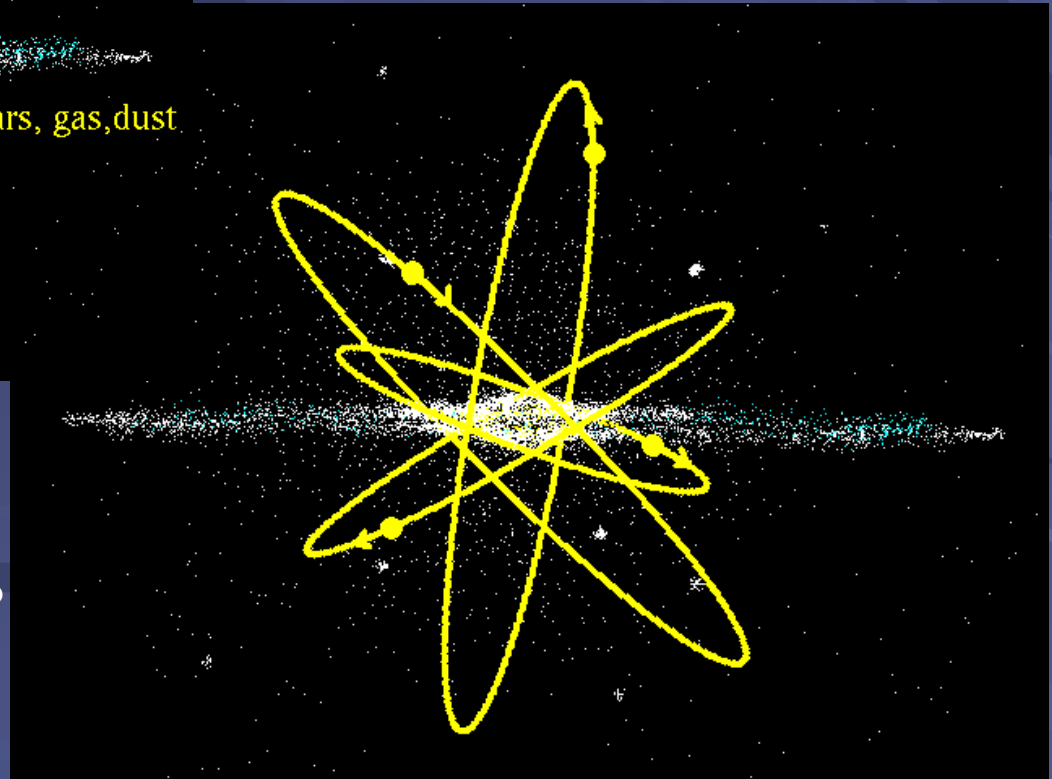
# Звезды гало



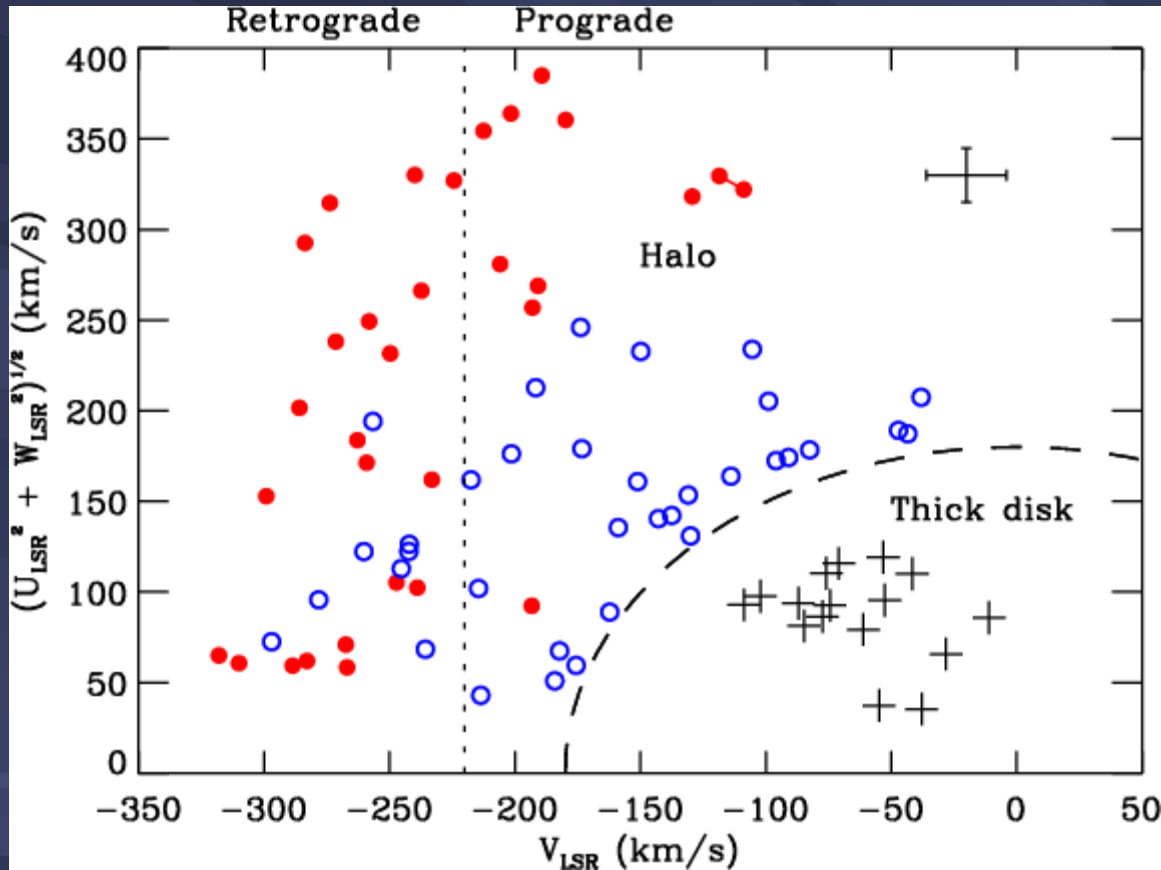
Круговая скорость на орбите Солнца более 200 км в сек.

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.



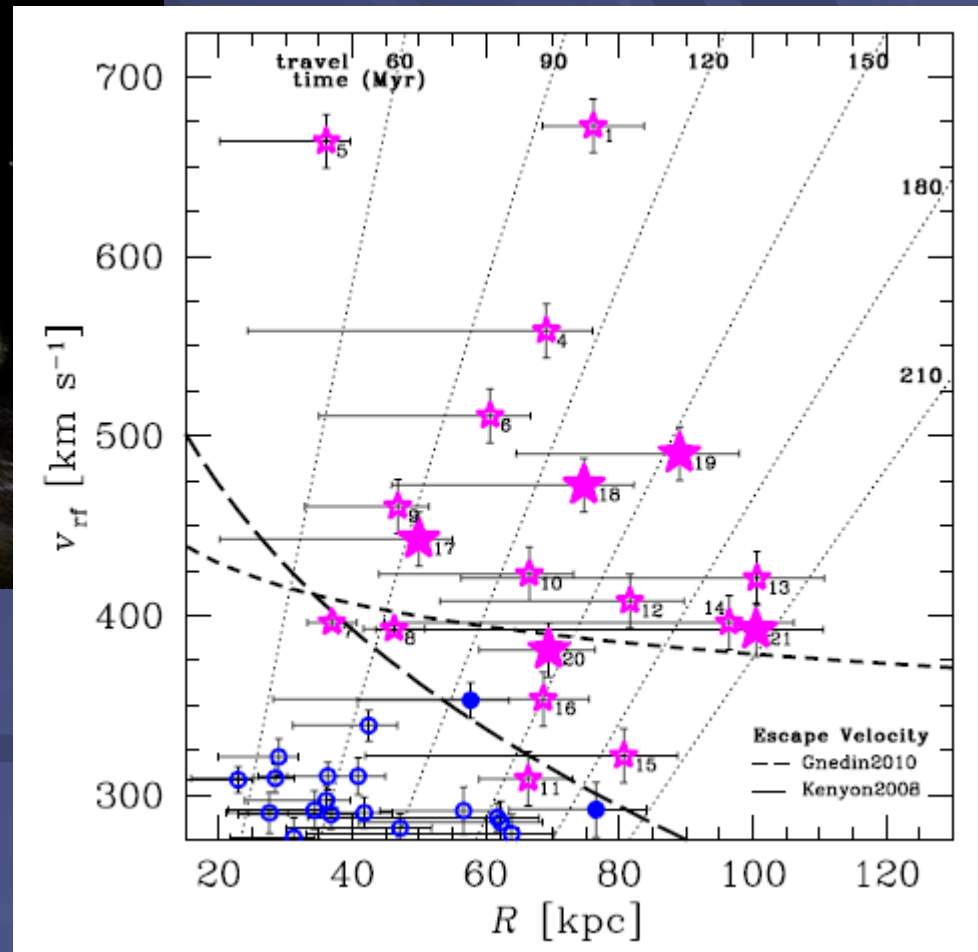
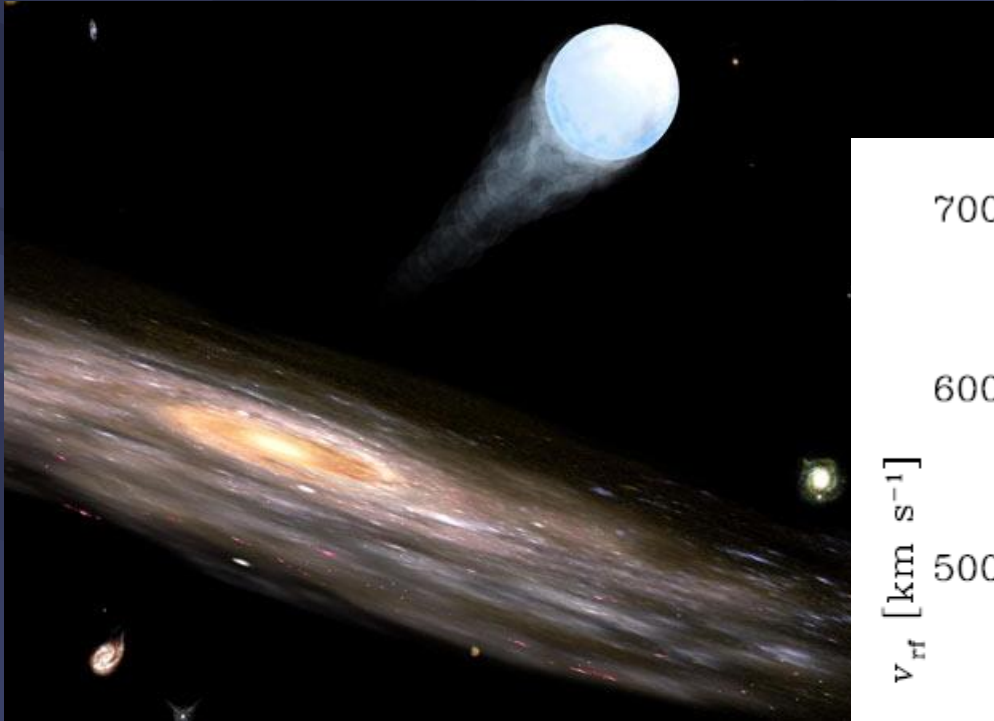
# Свойства звезд гало



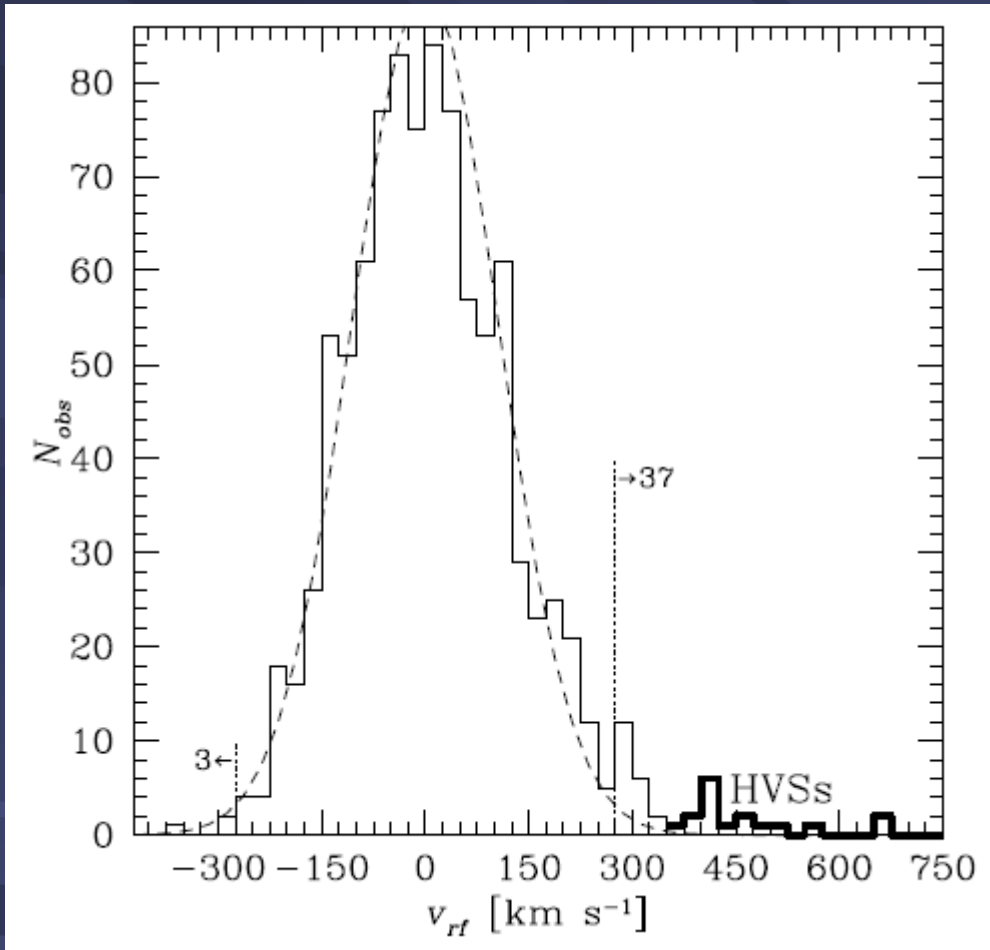
- Старые
- Маломассивные
- Малометаллические

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!»

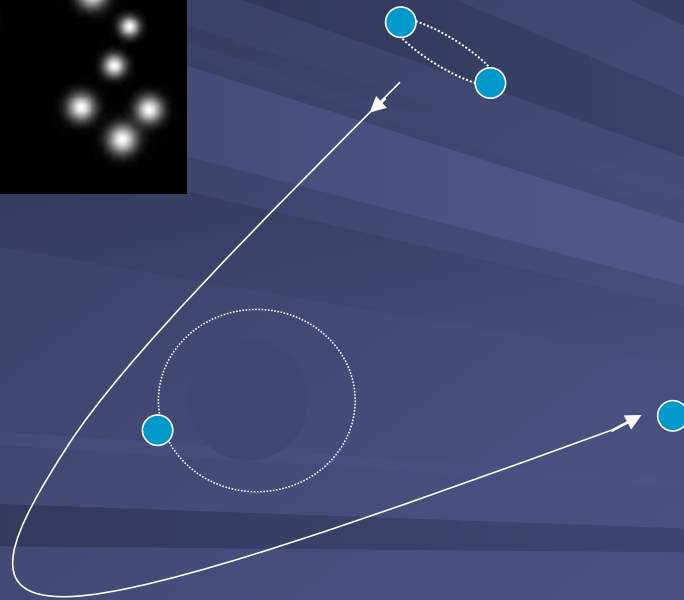
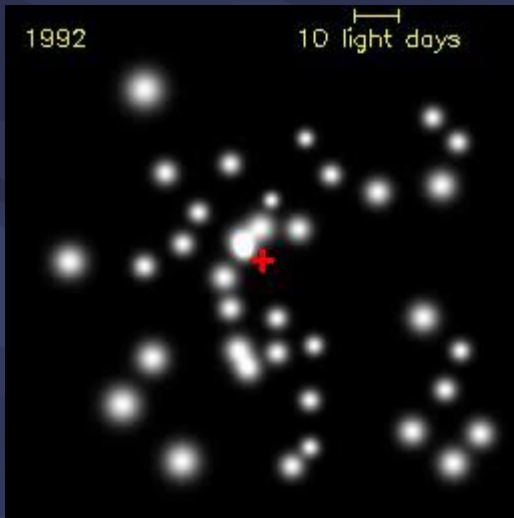


Гиперскоростные звезды.  
Скорости порядка 700 км в сек

Уже гравитационно не связаны с  
нашей Галактикой.

# Черная дыра как «ускоритель»

Взаимодействие трех тел

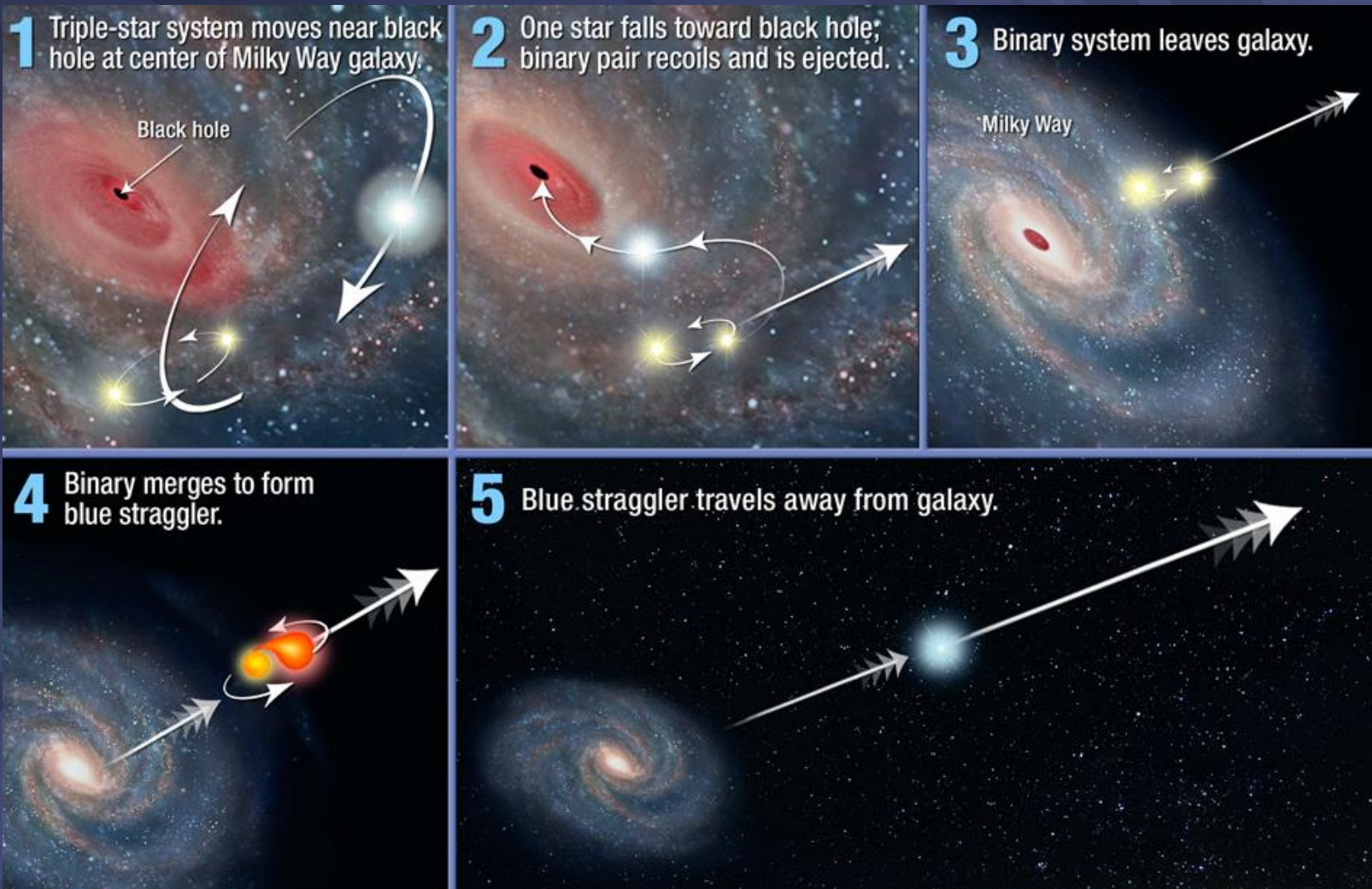


Распад двойной в поле дыры

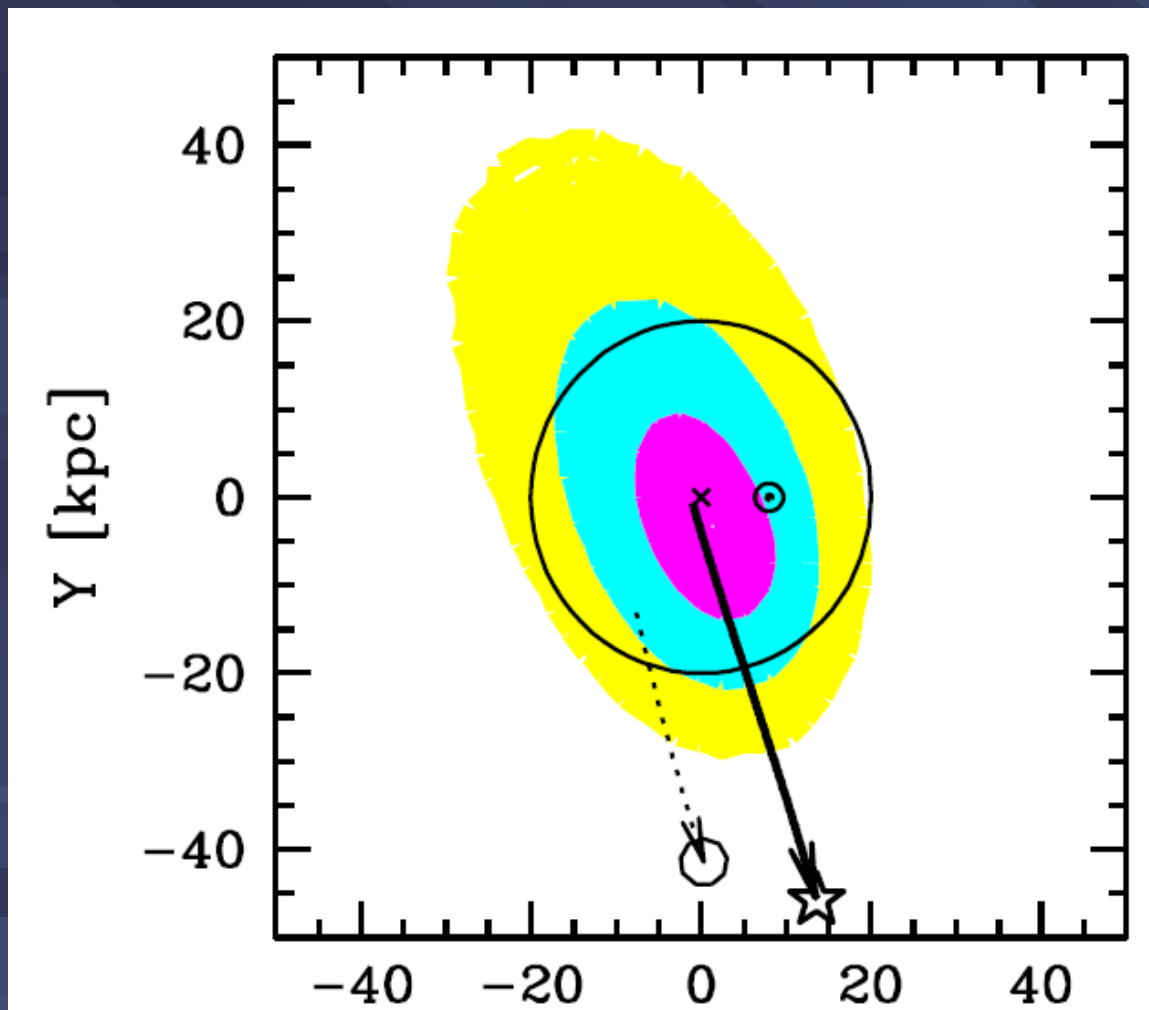


# Странные путешественники

Голубая звезда вдали от плоскости Галактики



# Полетим в другую галактику?

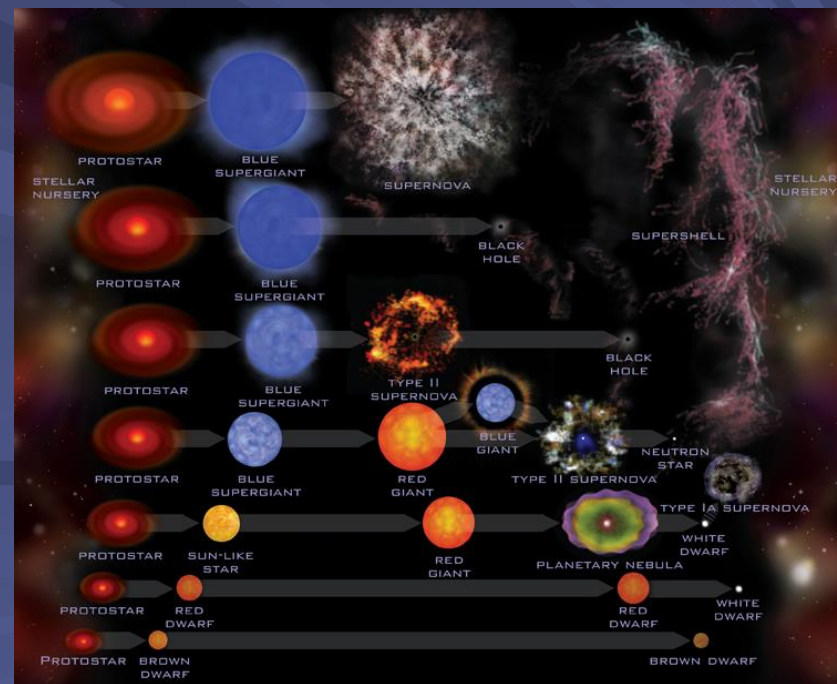
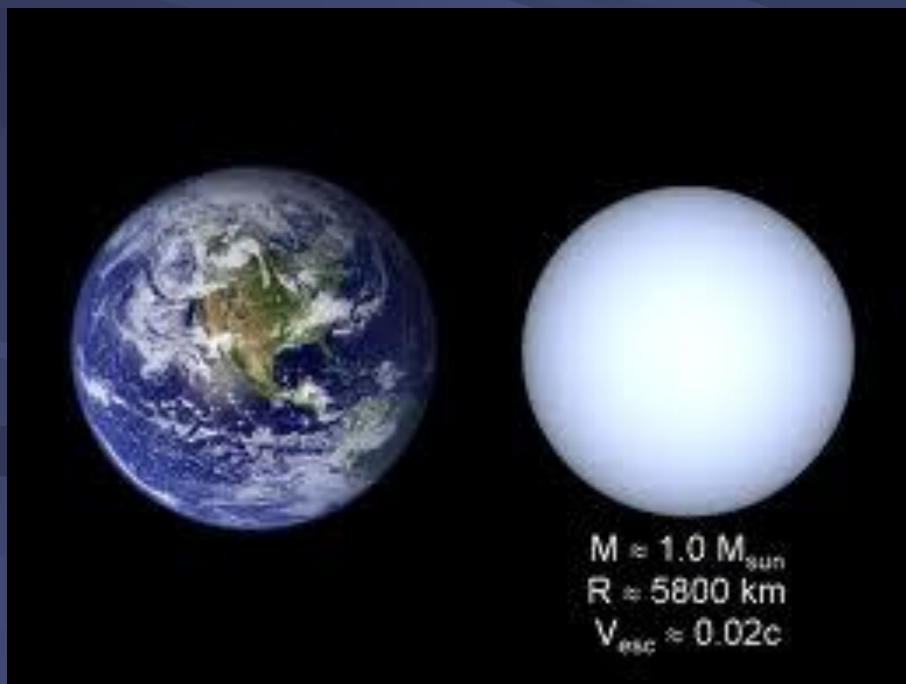


23 млн лет назад  
звезда пролетела  
в 13 кпк от БМО

HE 0437-5439

# Эволюция звезд

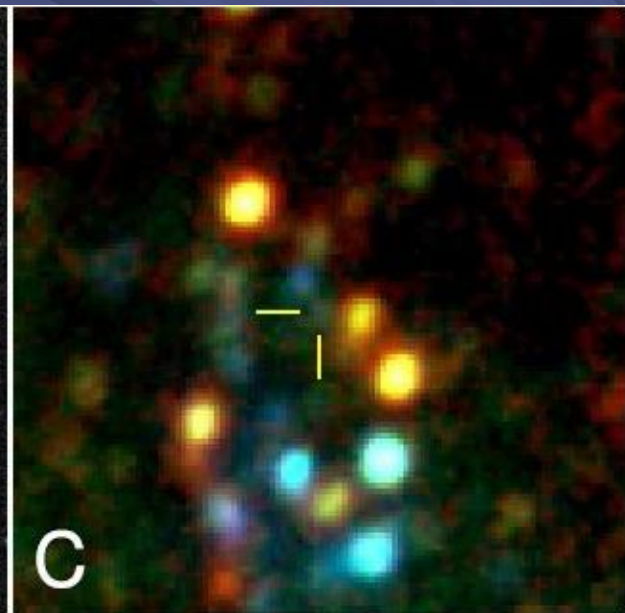
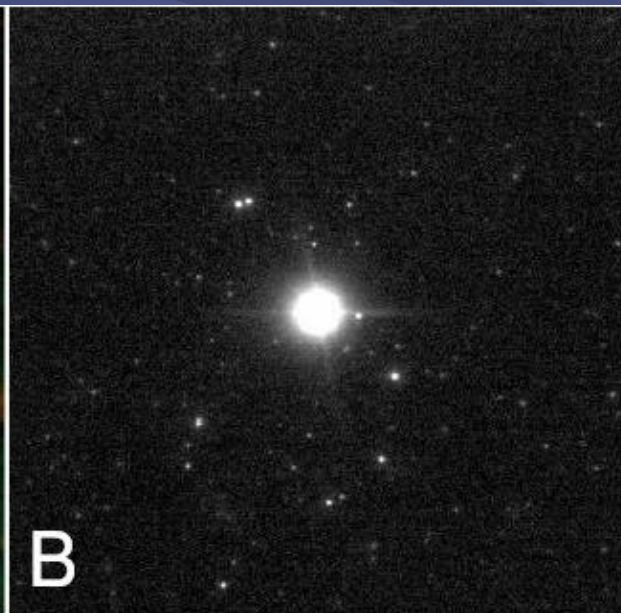
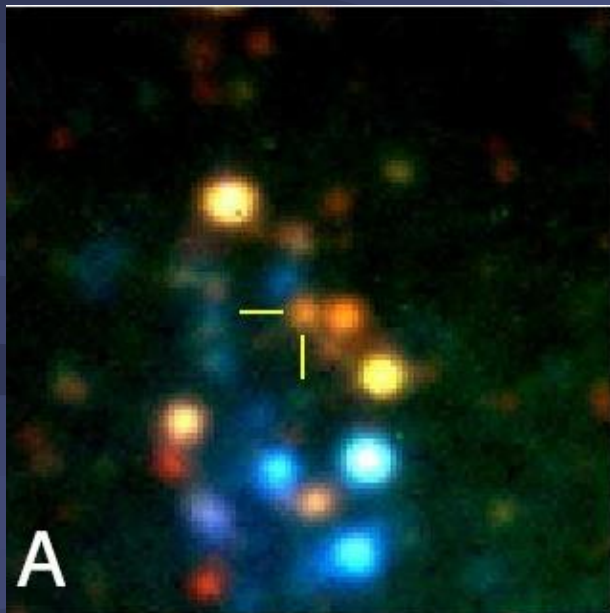
Солнце эволюционирует. Его возраст менее 5 миллиардов лет. Примерно через 5 миллиардов лет закончится водород в его ядре. Солнце превратится в красного гиганта, а затем - в белый карлик. Массивные звезды в конце жизни взрываются, оставляя нейтронную звезду или черную дыру.



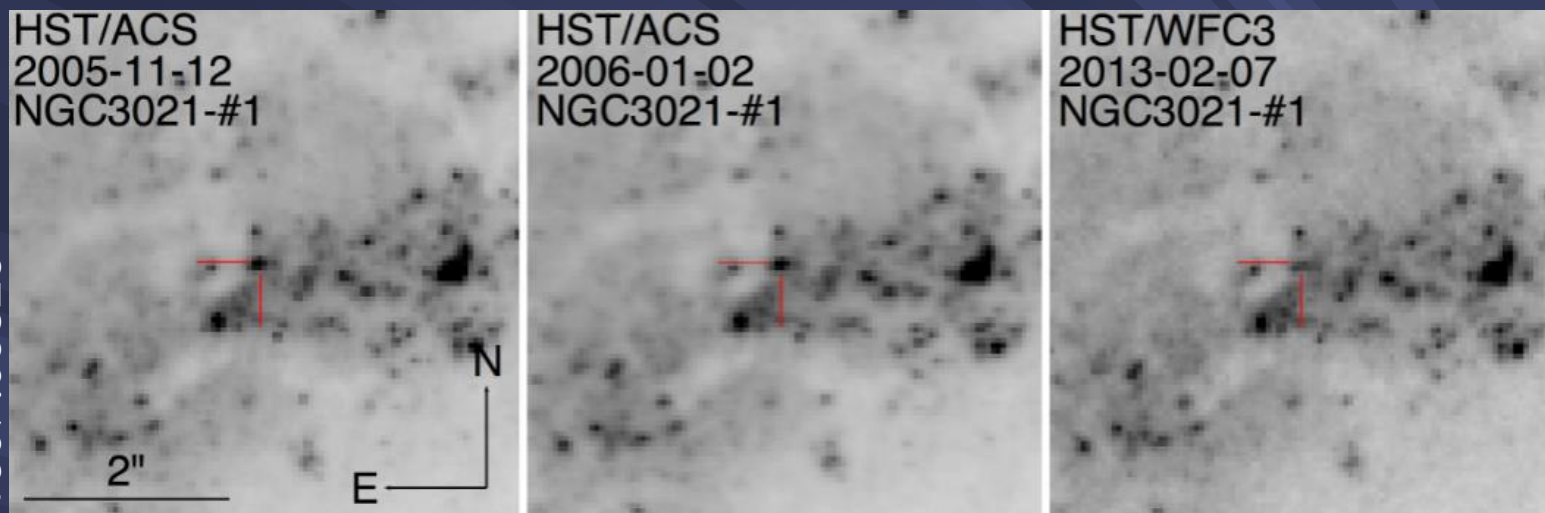
# Сверхновые

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.