

АСТРОФИЗИКА

Лекция 7

Звезды

Сергей Попов
(ГАИШ МГУ)



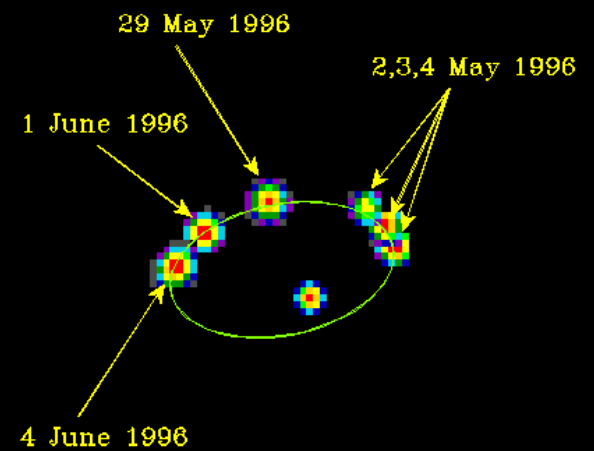
Двойные звезды

Zeta Ursae Majoris (Mizar)

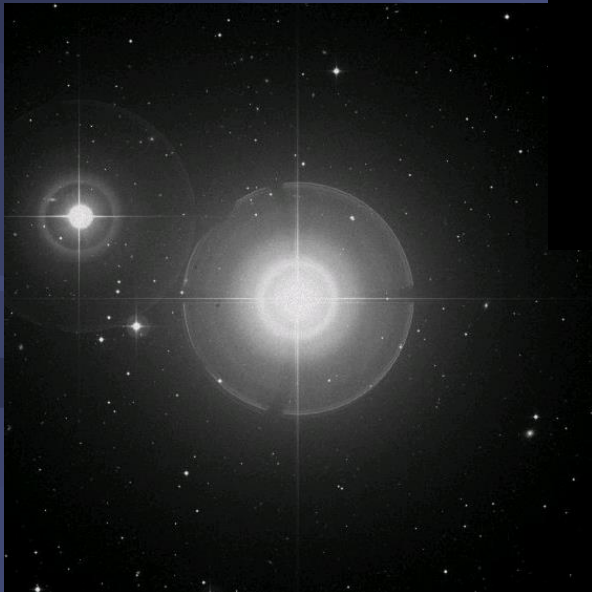


(C) D. Nash

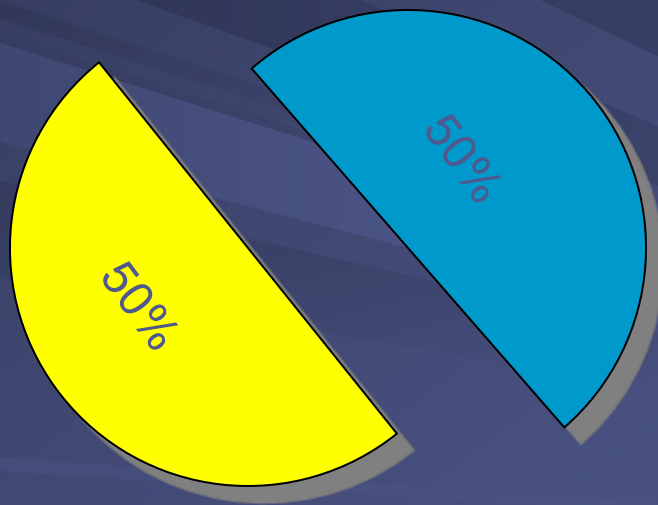
Мицар – пара из
двух двойных



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.

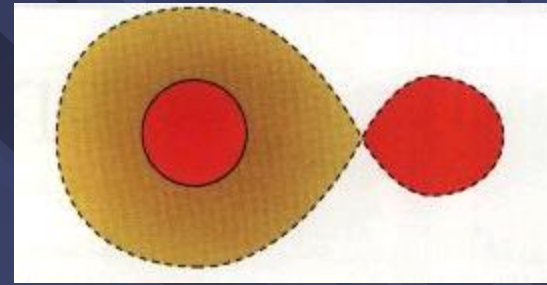
Обычно, это звезды с разными цветами.



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

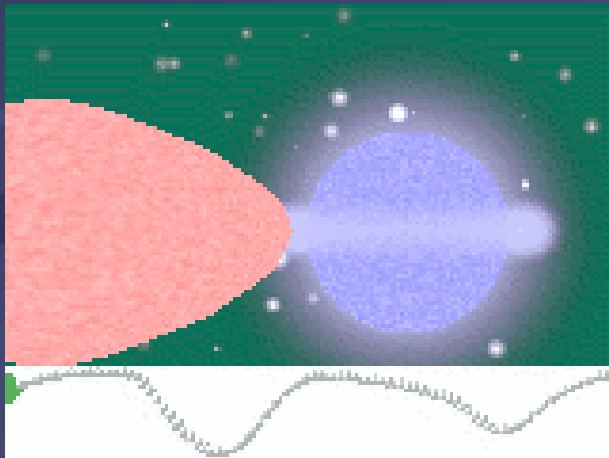


Альбиро

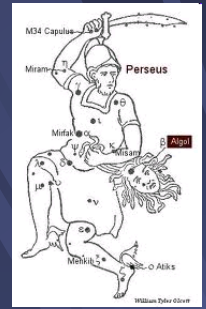


Обмен масс в двойной

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

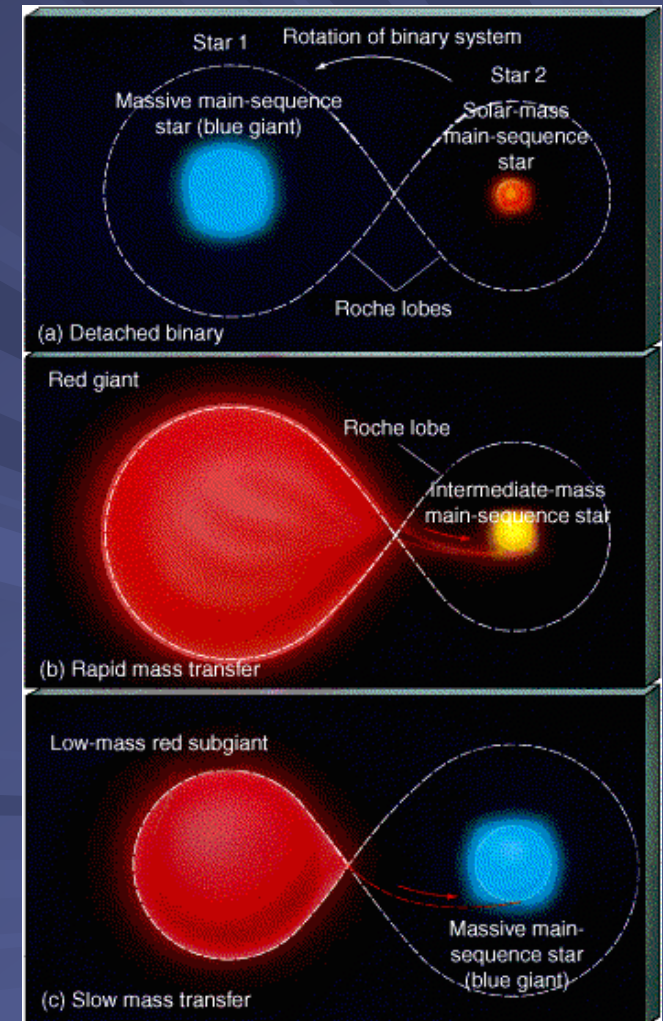


Парадокс Алголя

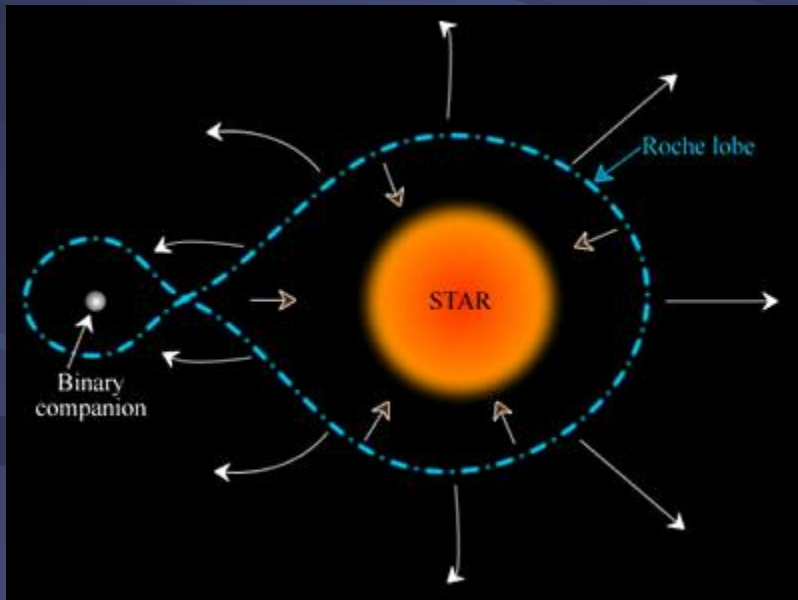


В середине XX века наблюдения показали, что в системе Алголя менее массивная звезда выглядит более проэволюционировавшей.

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?

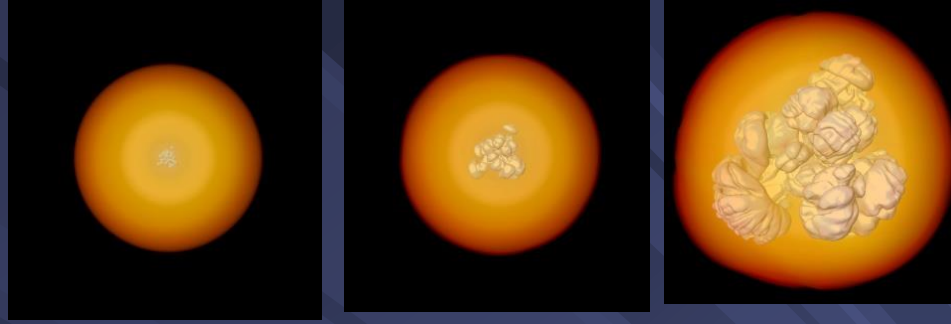
Сверхновые типа Ia

Существует предельная масса белого карлика



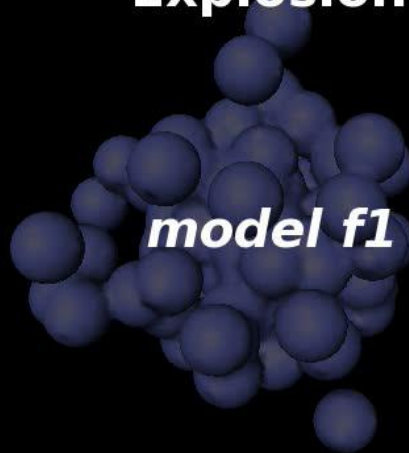
Взрываются не только умирающие массивные звезды.

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.

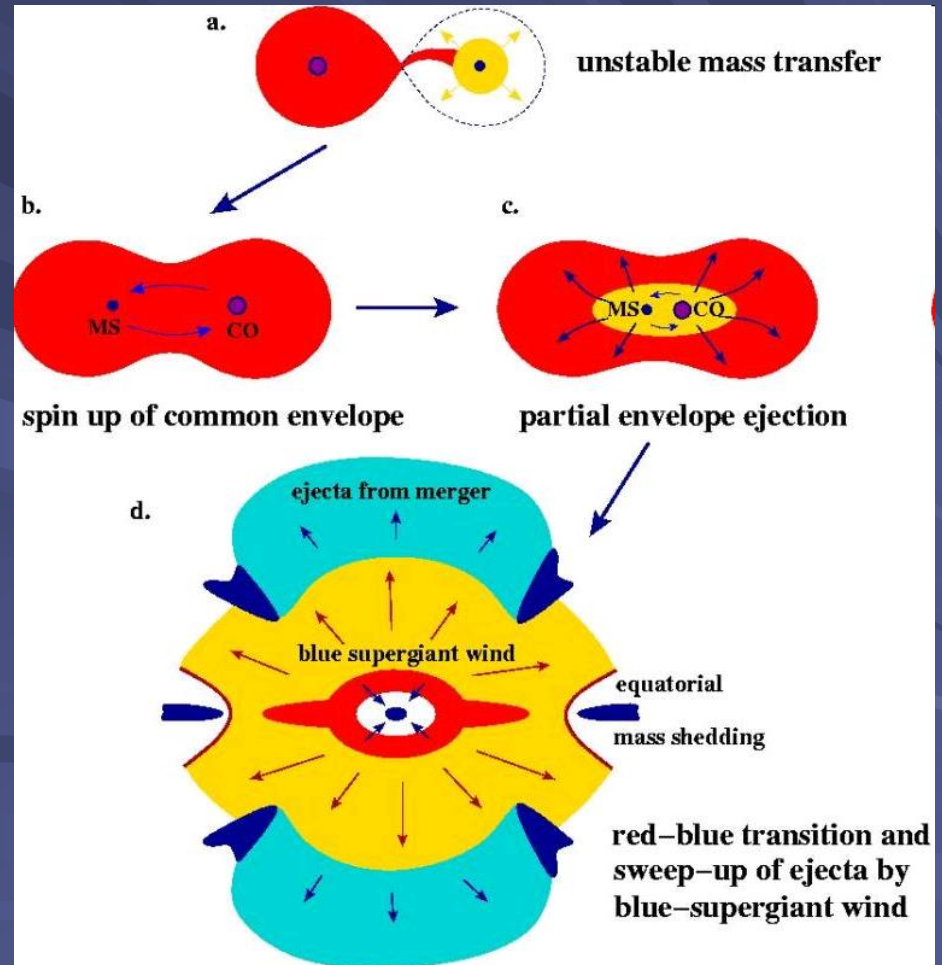
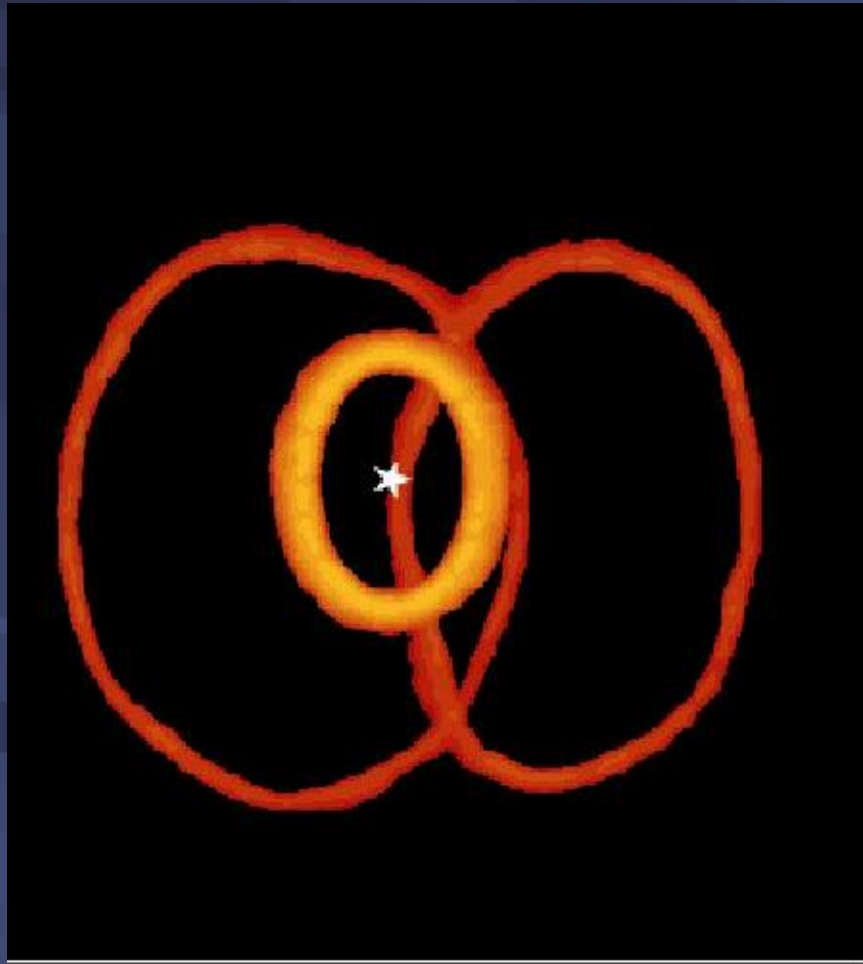


Реальное изображение



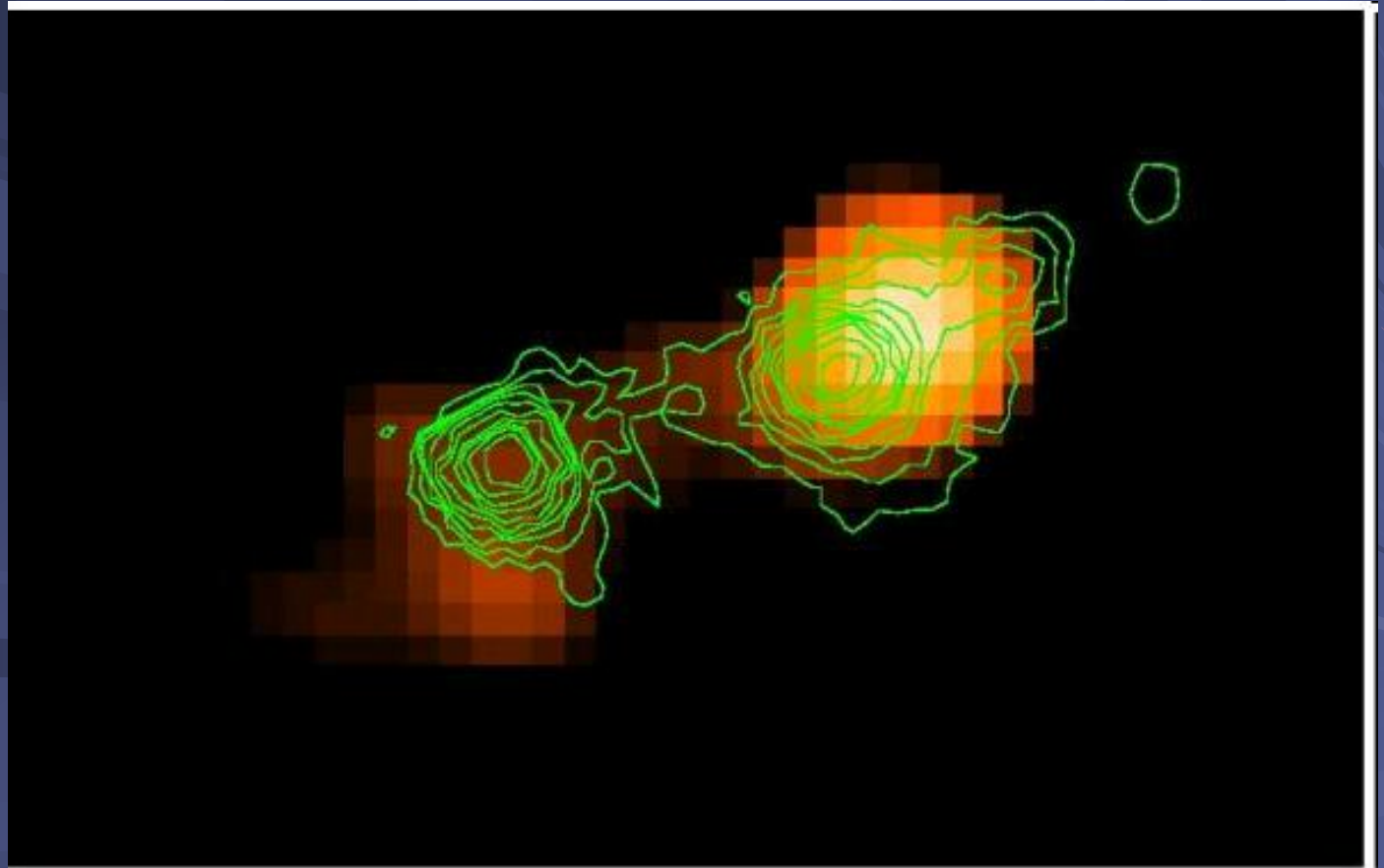
Теоретическая модель

Модель сверхновой 1987А



Изображения двойных звезд

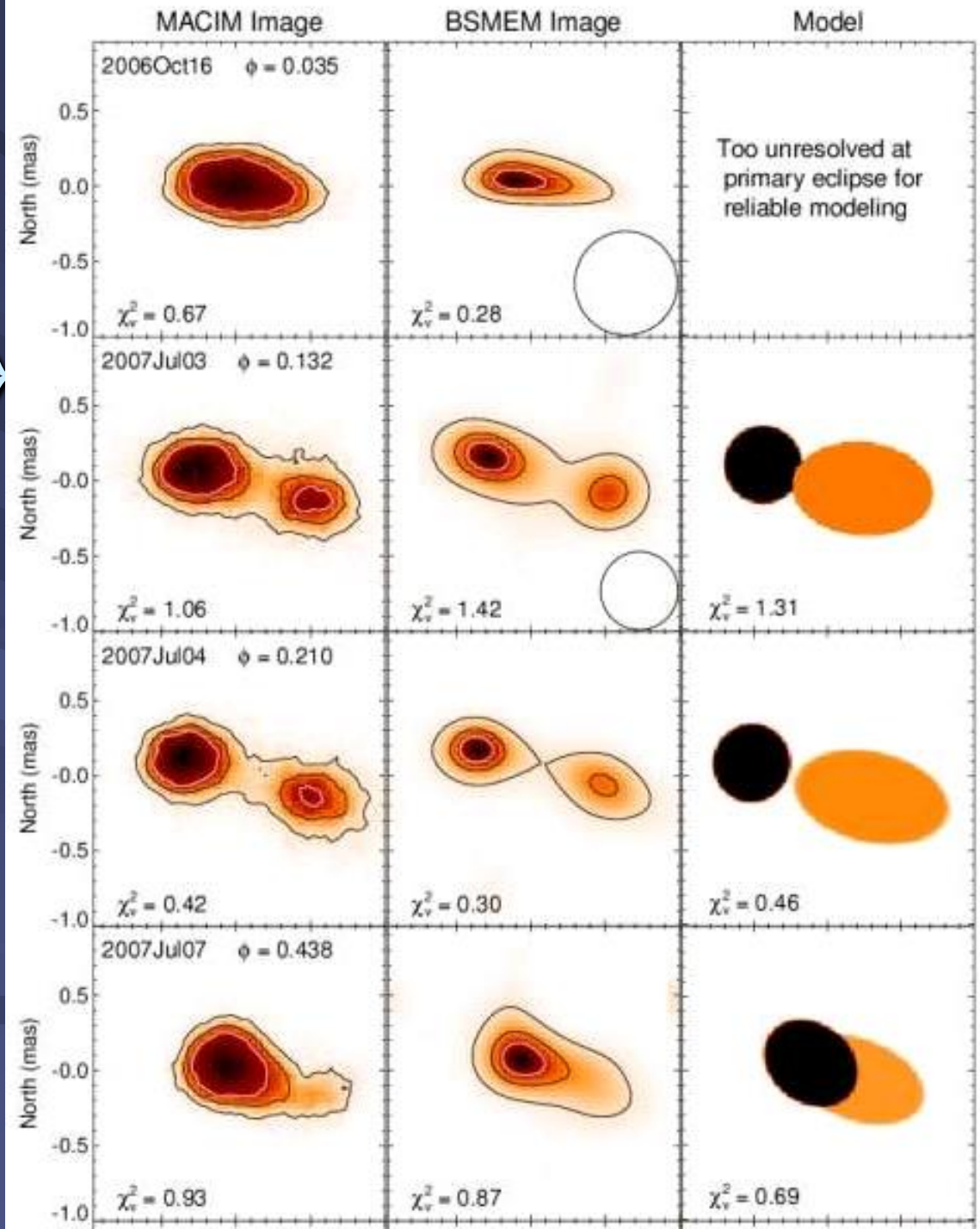
Мира
(омикрон Кита)
в рентгене и оптике:
белый карлик и
красный гигант



Изображ



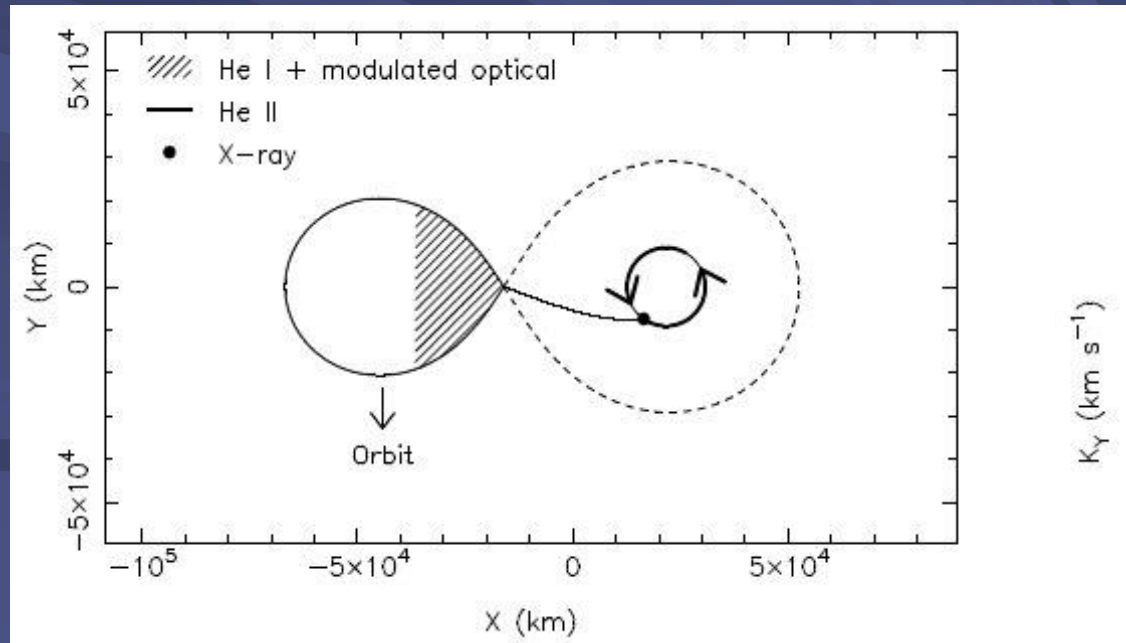
Интерферометр
CHARA

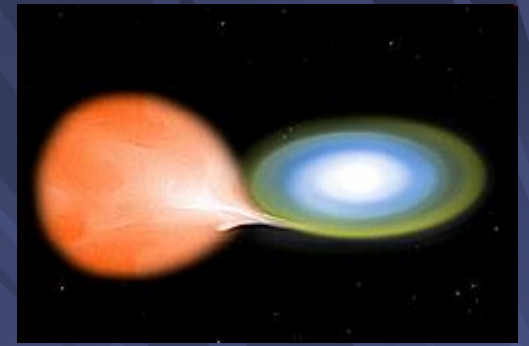


Самая тесная двойная

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

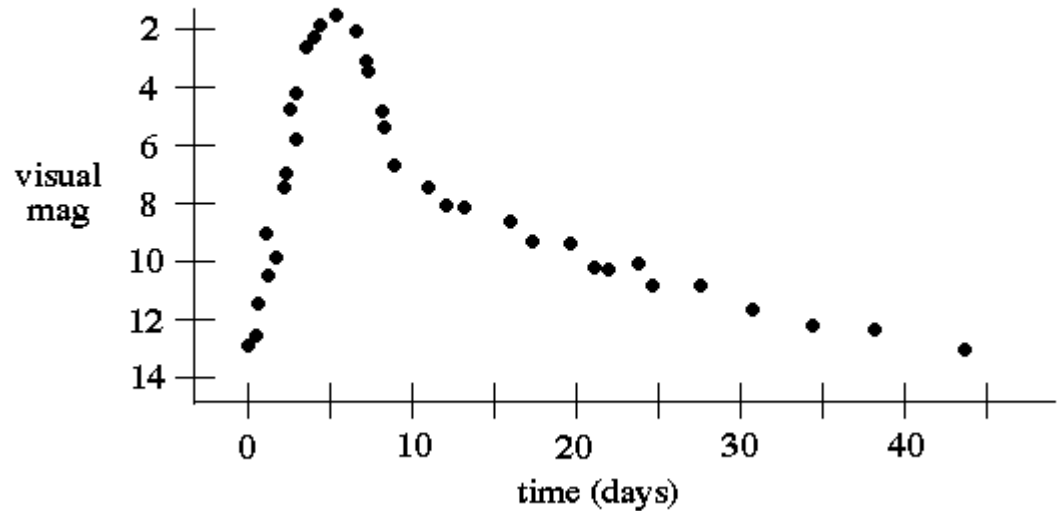




Новые звезды

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.

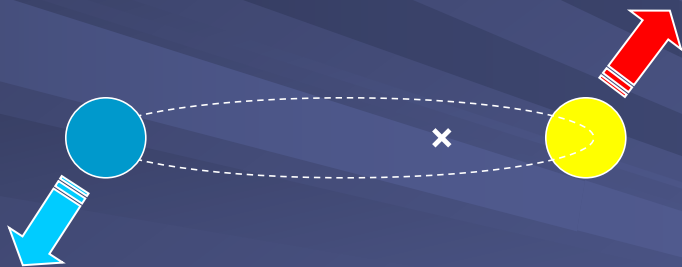
Биполярная структура может возникать из-за последствий взаимодействия звезд.

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

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

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

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

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

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

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

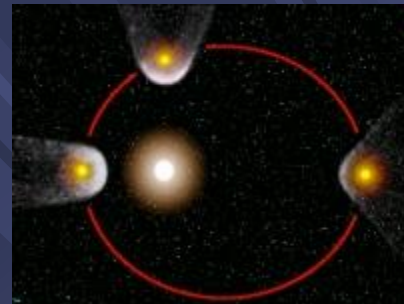
$$\frac{P v_1^3}{2\pi G} = \frac{m_2^3 \sin^3 i}{(m_1 + m_2)^2}$$

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

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

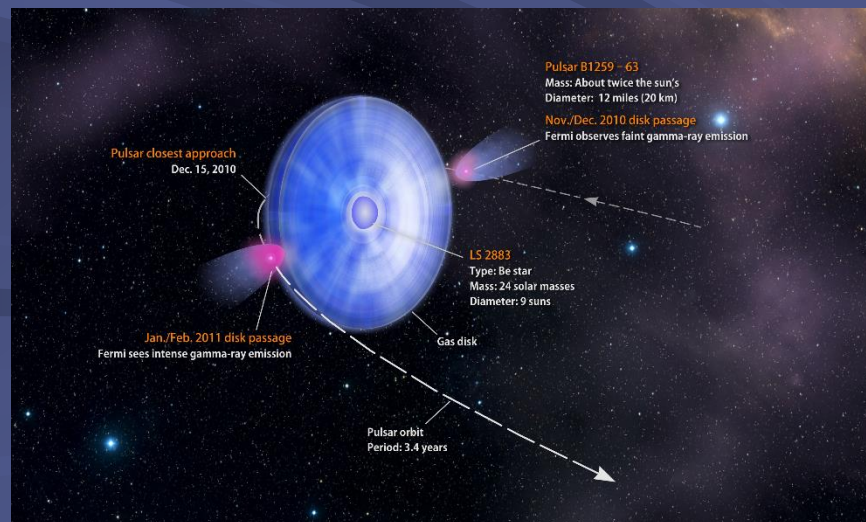
$$\text{Тогда } m_2 = f(m) (1+q)^2 / (\sin i)^3$$

Функция масс – нижний предел на m_2



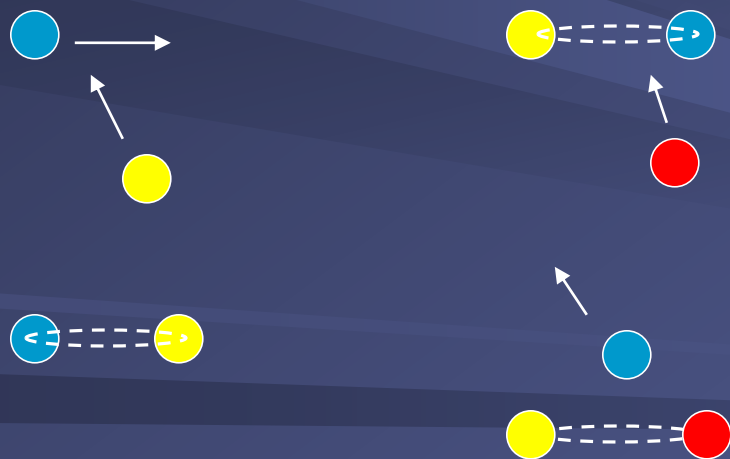
Столкновение ветров

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

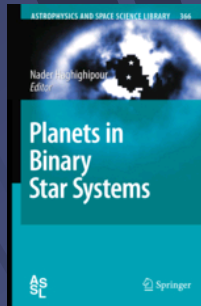


Родные или сводные

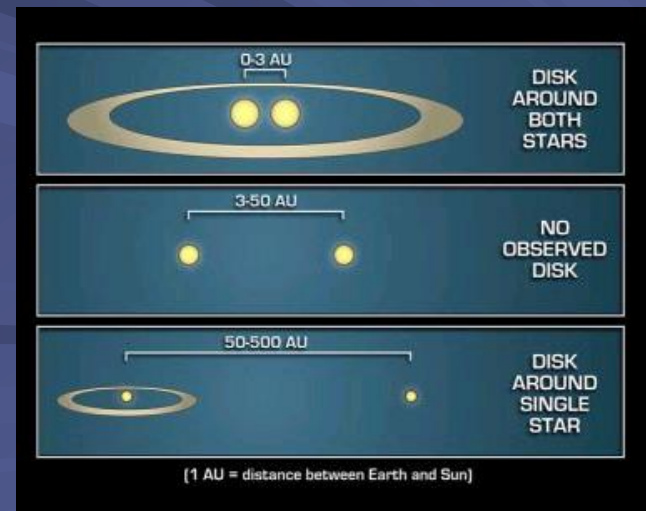
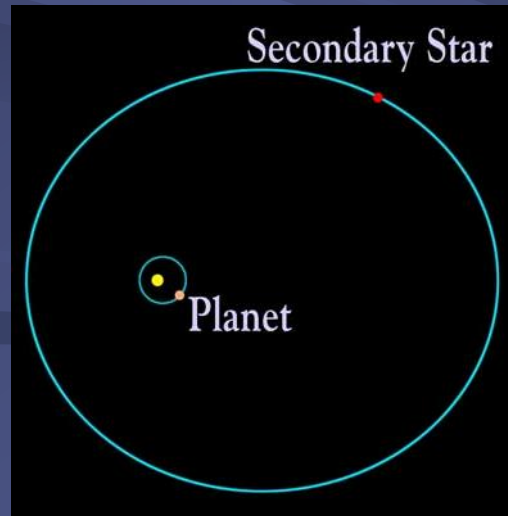
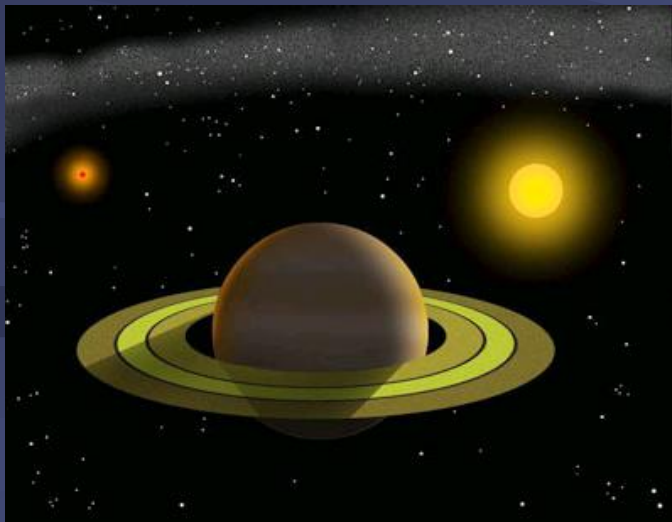
Двойная система может образоваться в результате захвата



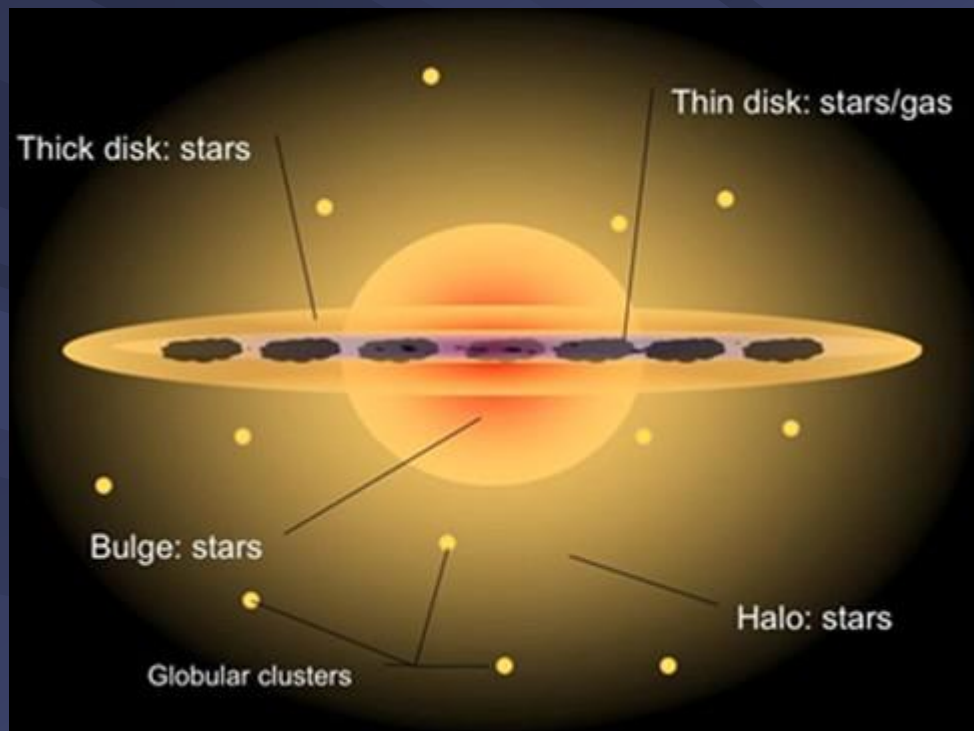
Планеты в двойных



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

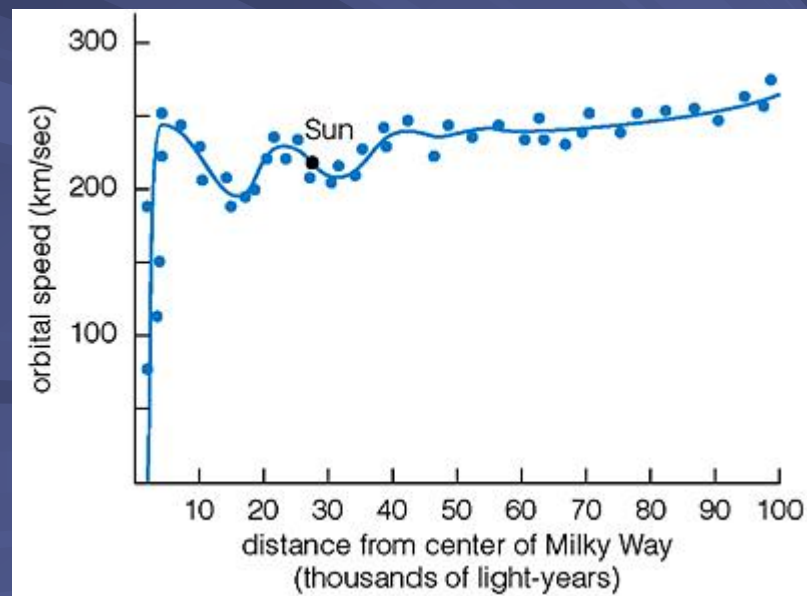


Скорости звезд в Галактике



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

Крутовые 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.

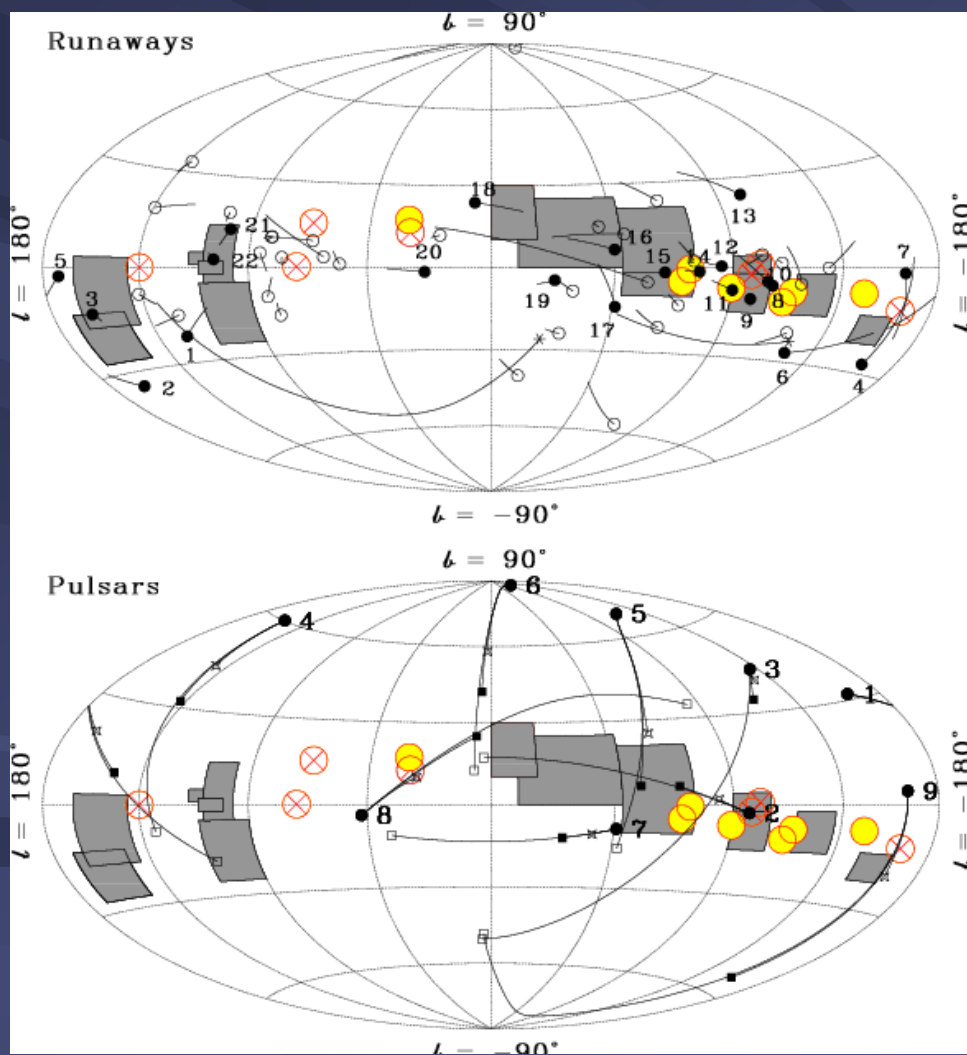
Типичные скорости 50-70 км в сек.

Открыты в 1947 г.

Известно много десятков таких объектов.

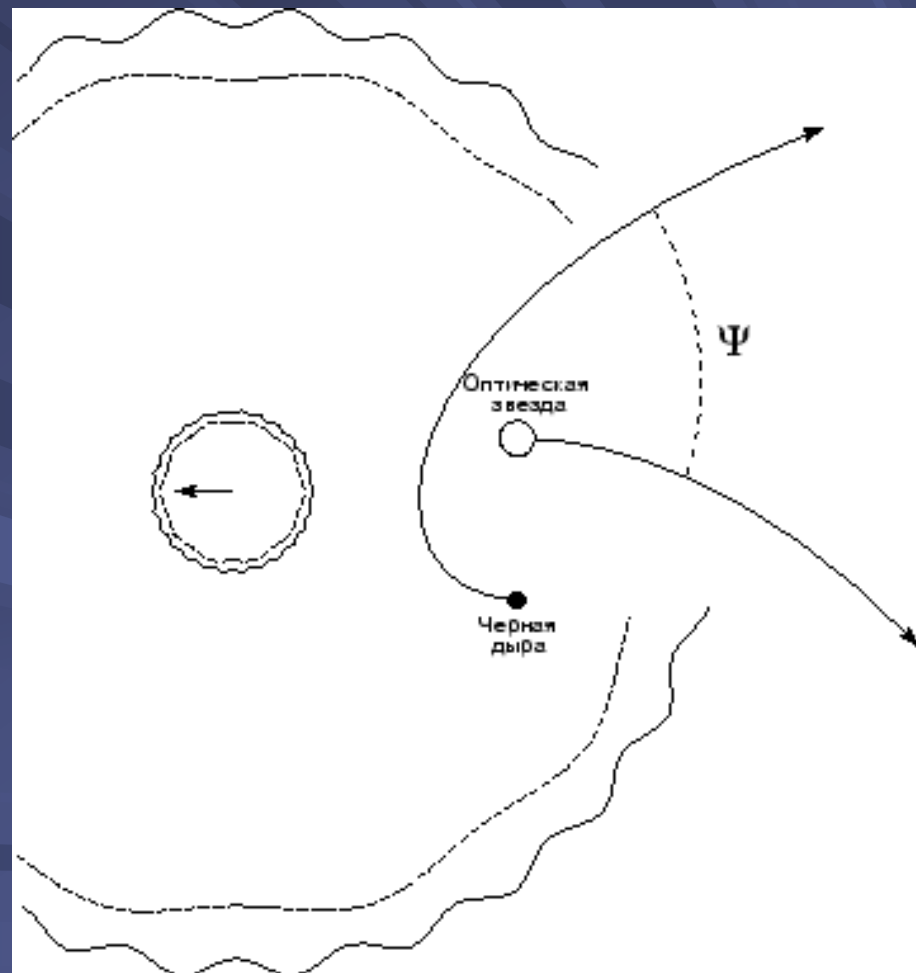
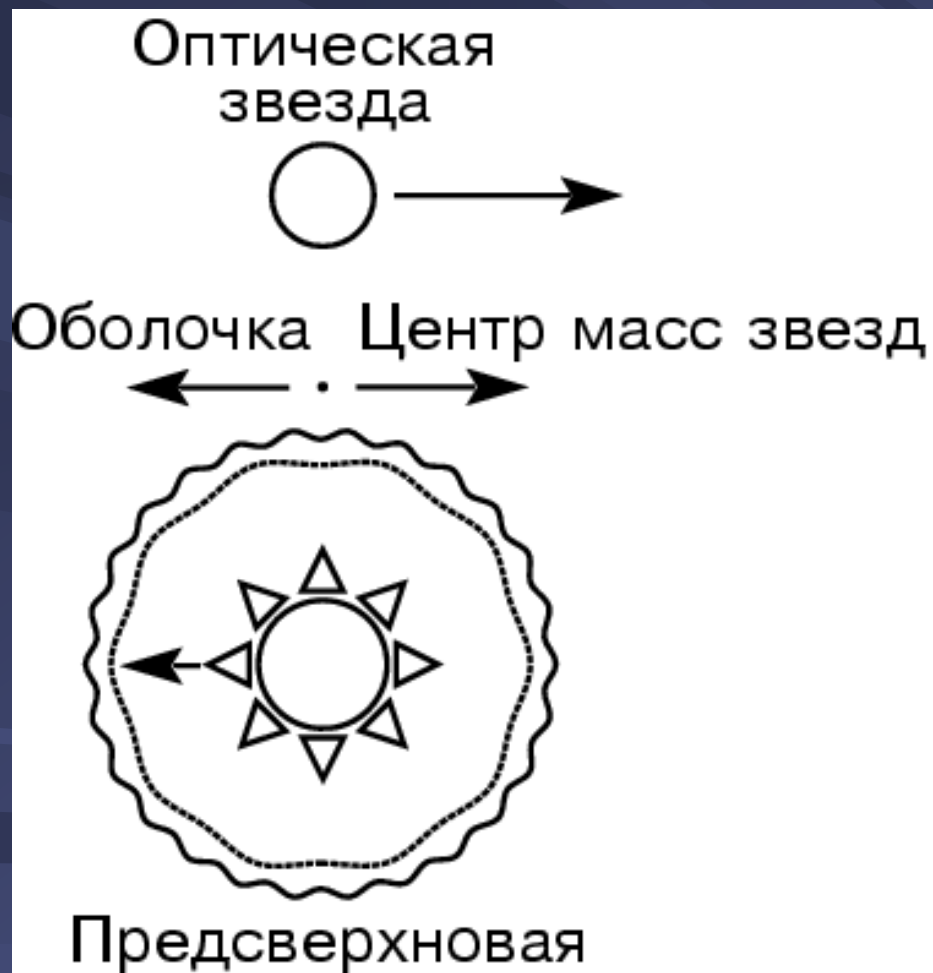
В окрестности Солнца 10-30% звезд класса О и 5-10% звезд класса В относятся к убегающим.

Материнские скопления убегающих звезд



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

Распад двойной системы



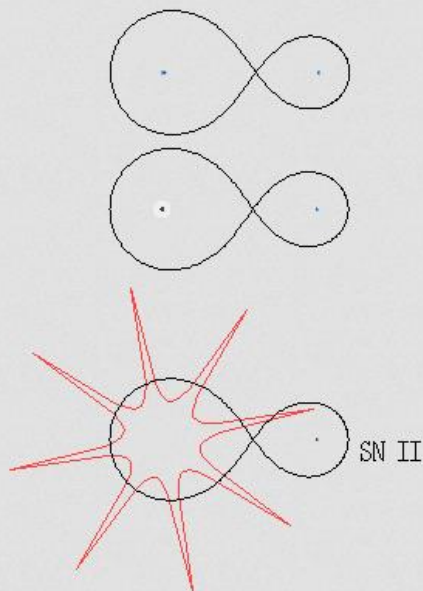
Сброс более половины массы
приводит к распаду двойной.
Также система может распасться,
если после взрыва сверхновой
компактный объект получит кик.

Разрушение двойной

M1
Solar masses

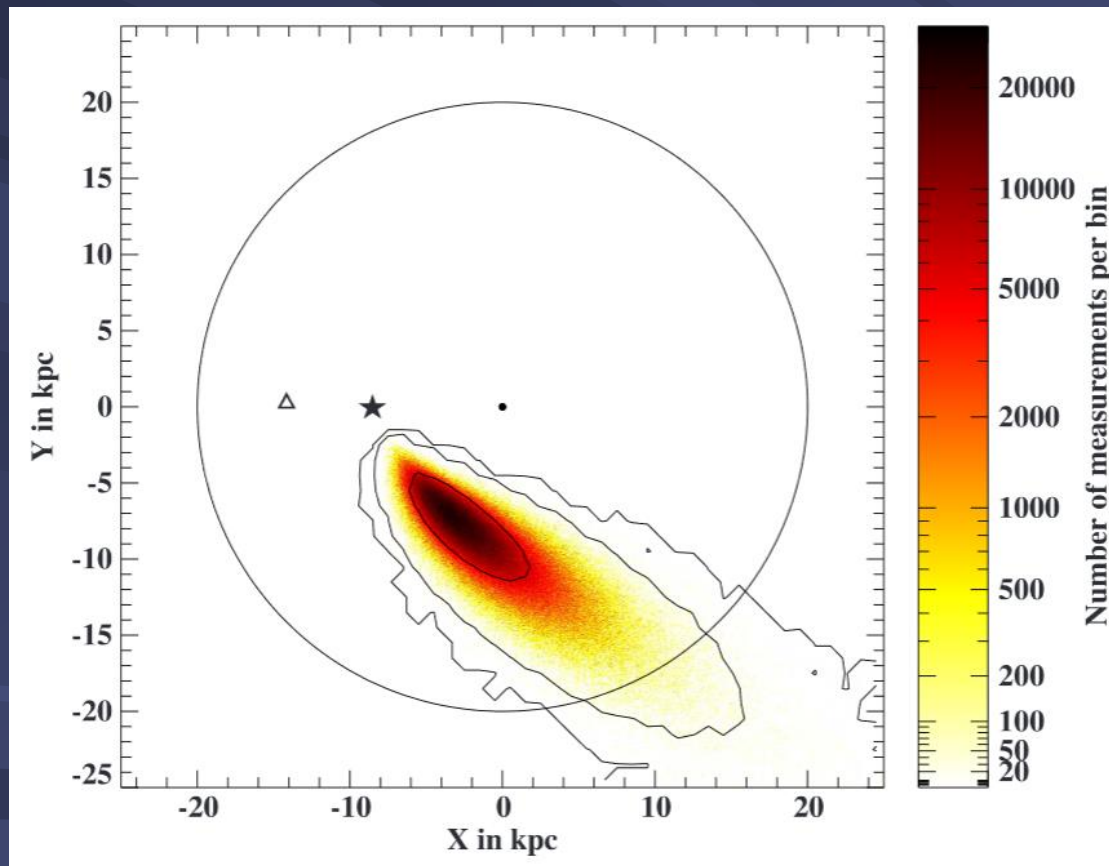
19.00

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

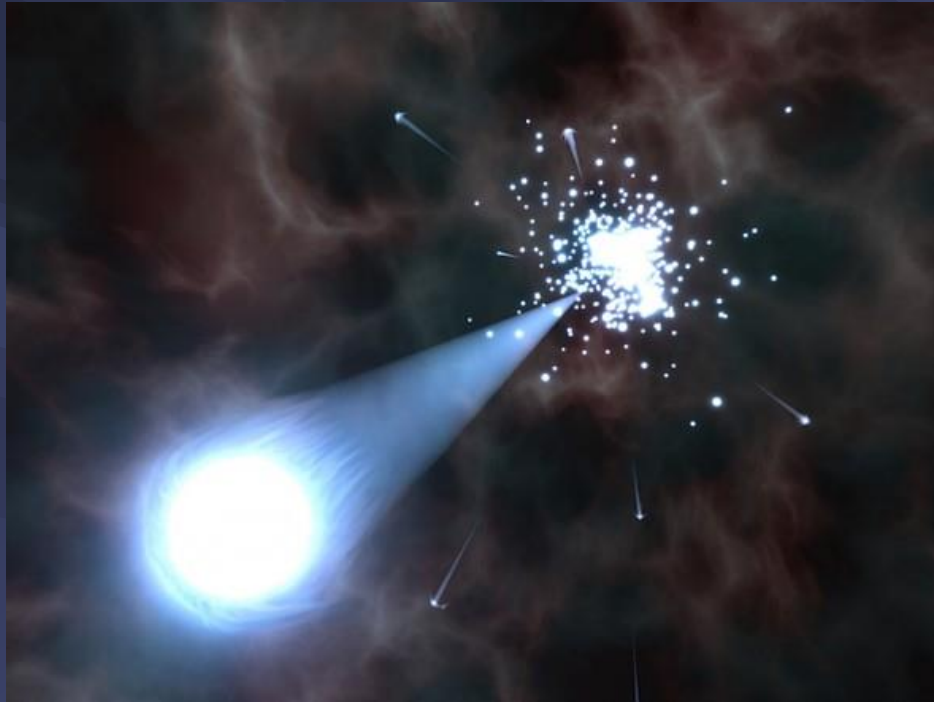


US 708
1200 км/с

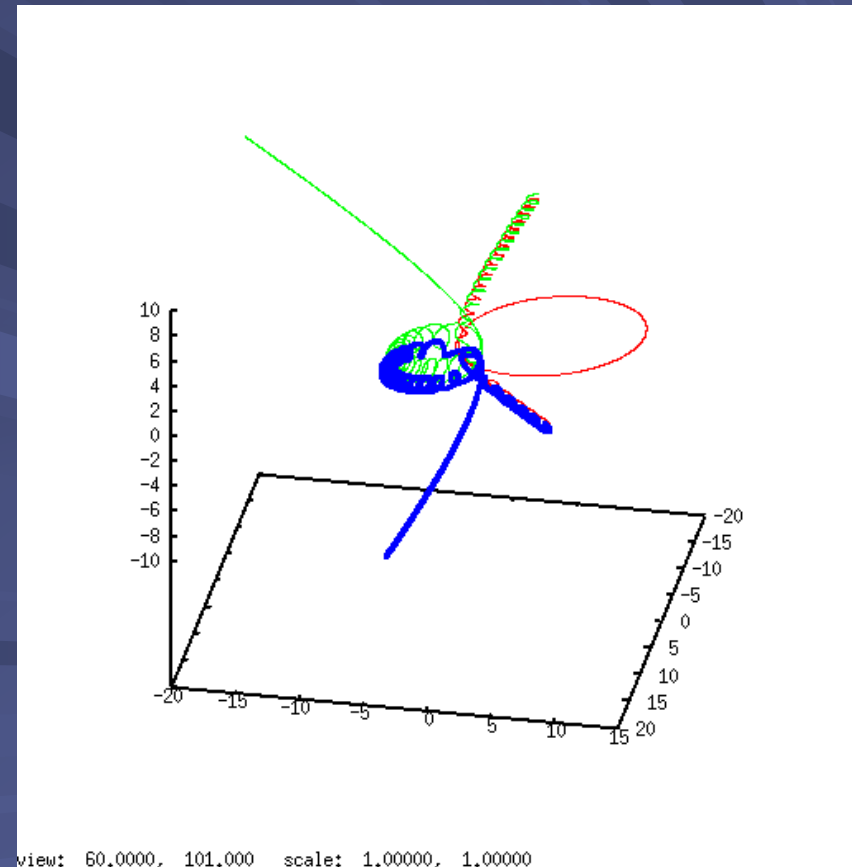
Летит не из центра Галактики.
Наиболее вероятно,
что она родилась в двойной
системе, разрушенной
взрывом сверхновой.
Причем, сверхновой Ia!

Динамическое взаимодействие

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

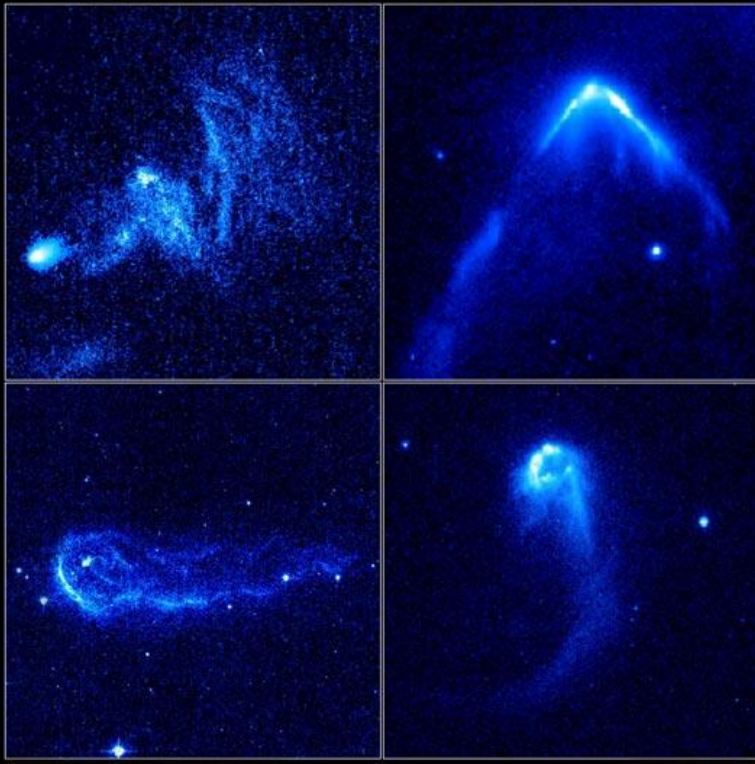


Типичная «добавка» к скорости – десятки км в сек. Но может быть и намного больше:
$$v_{\max} = (2GM/R)^{1/2},$$
 где M и R – параметры наиболее массивной звезды, участвующей во взаимодействии.

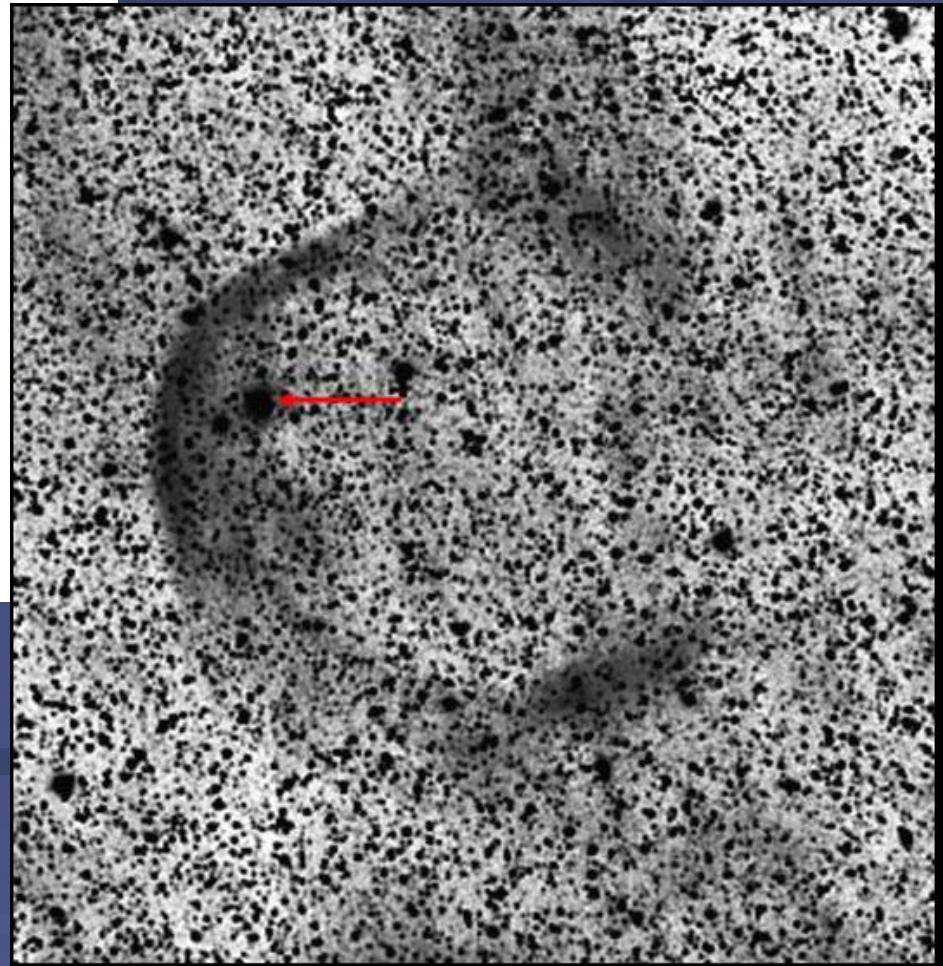


Взаимодействие с газом среды

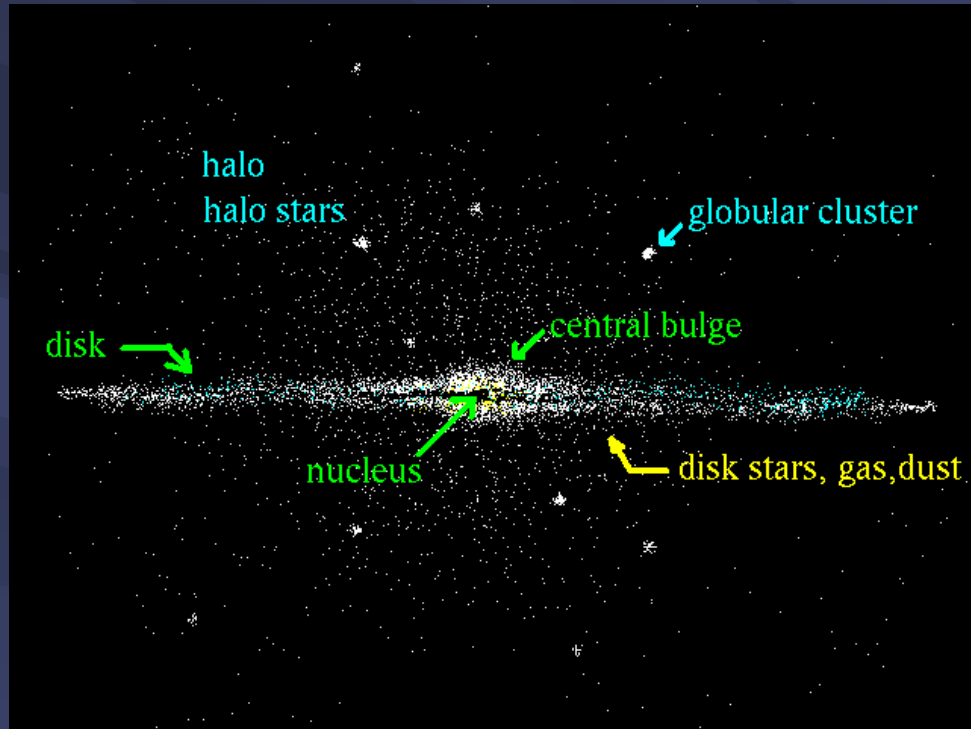
Быстродвигающиеся звезды
приводят к образованию
ударных волн



Скорость звука
в МЗС -
10 км в сек



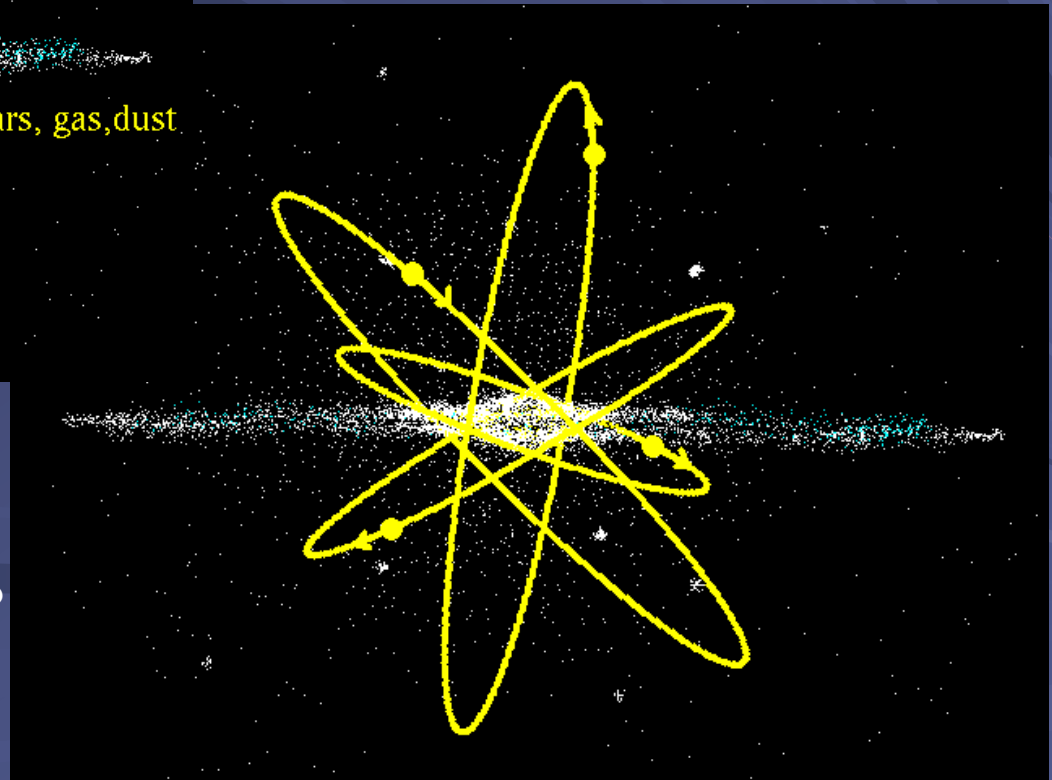
Звезды гало



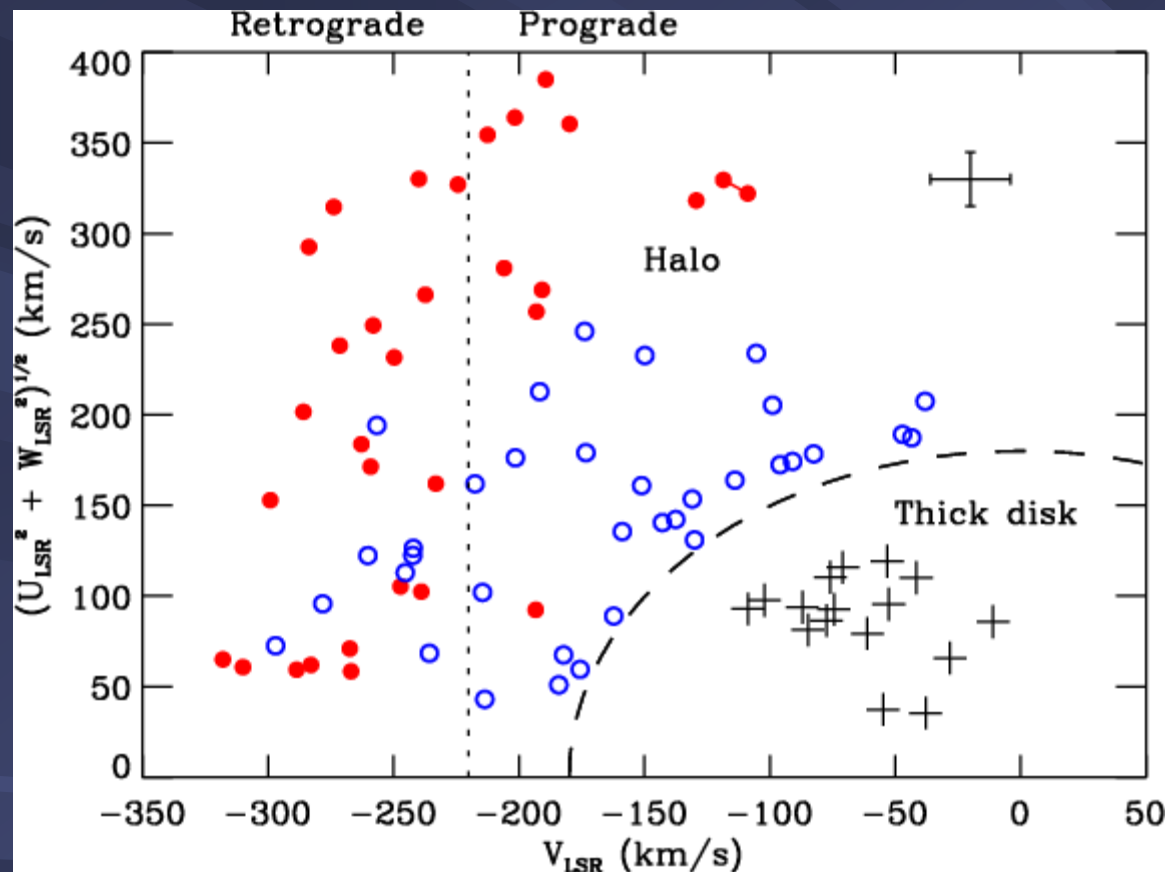
Круговая скорость на орбите Солнца более 200 км в сек.

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.



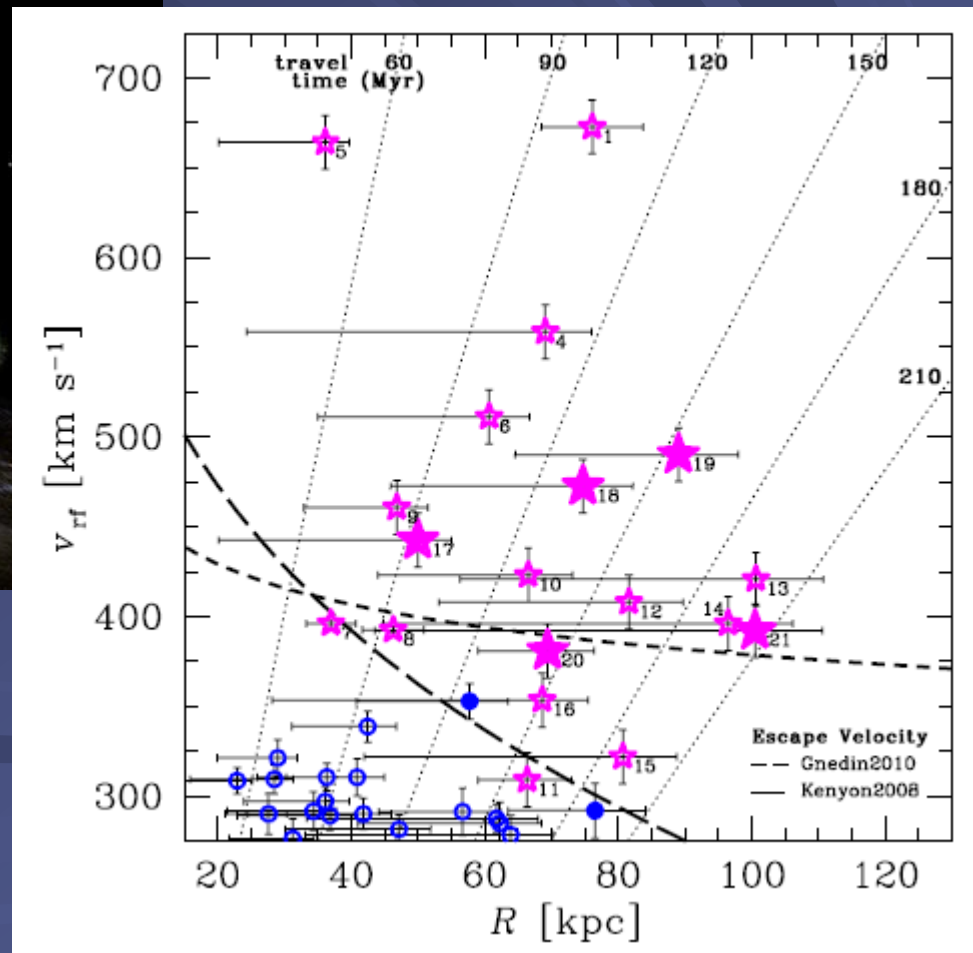
Свойства звезд гало



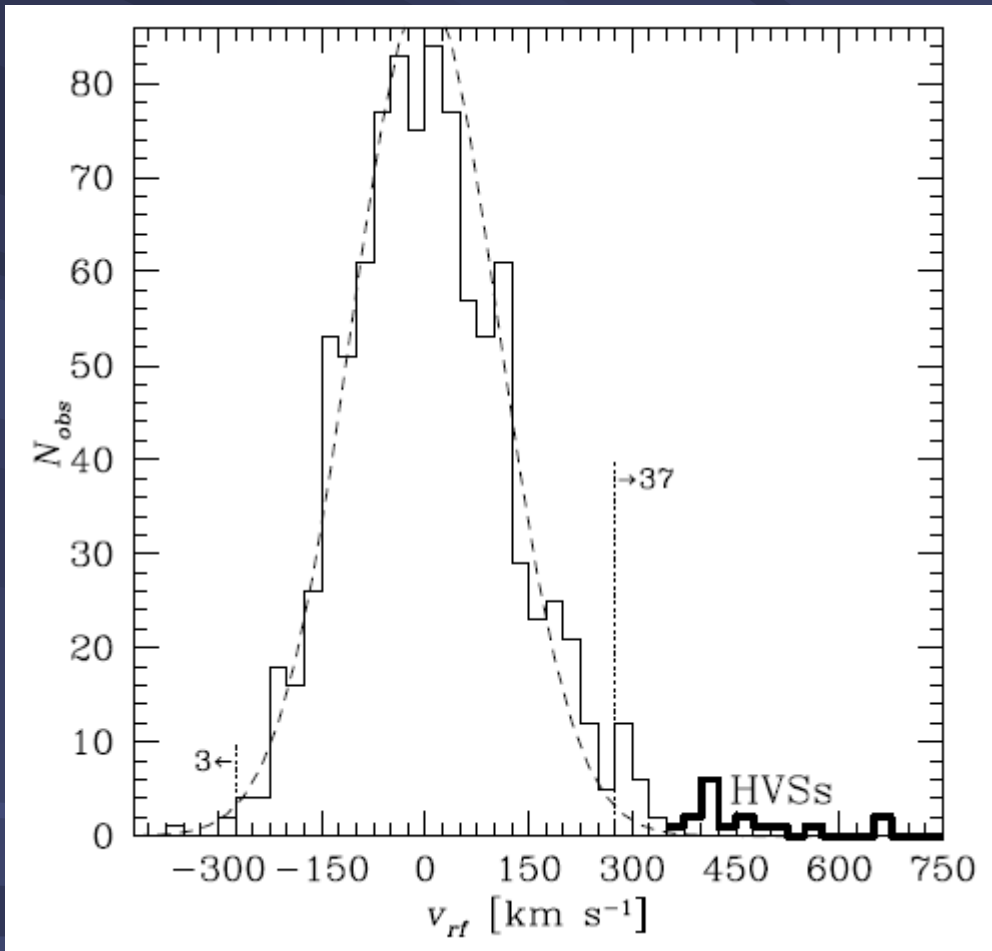
- Старые
- Маломассивные
- Малометаллические

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!»

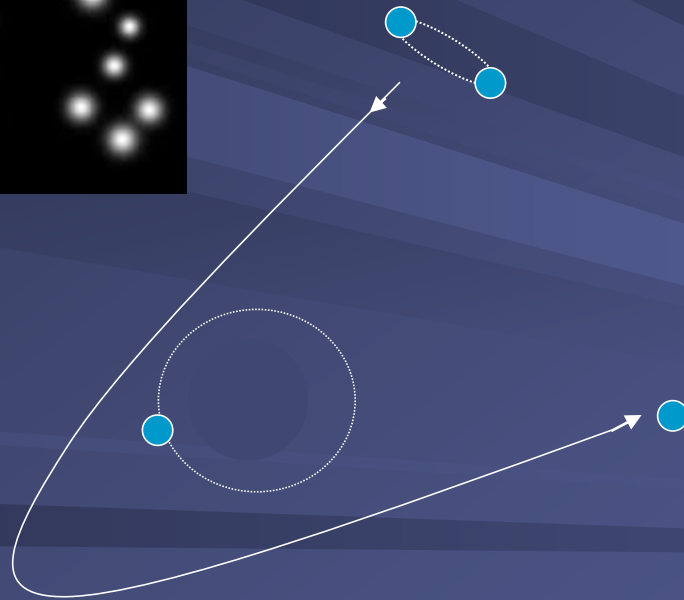
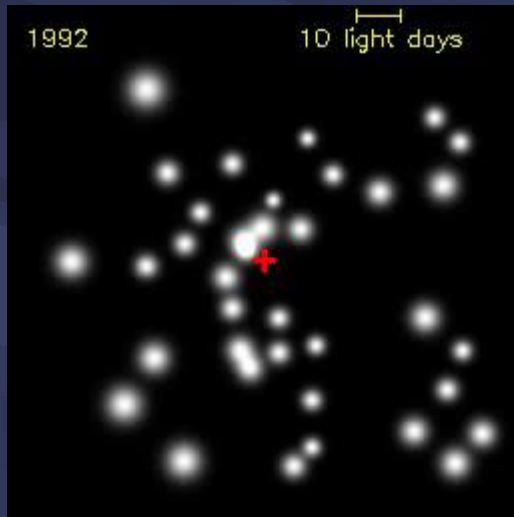


Гиперскоростные звезды.
Скорости порядка 700 км в сек

Уже гравитационно не связаны с
нашей Галактикой.

Черная дыра как «ускоритель»

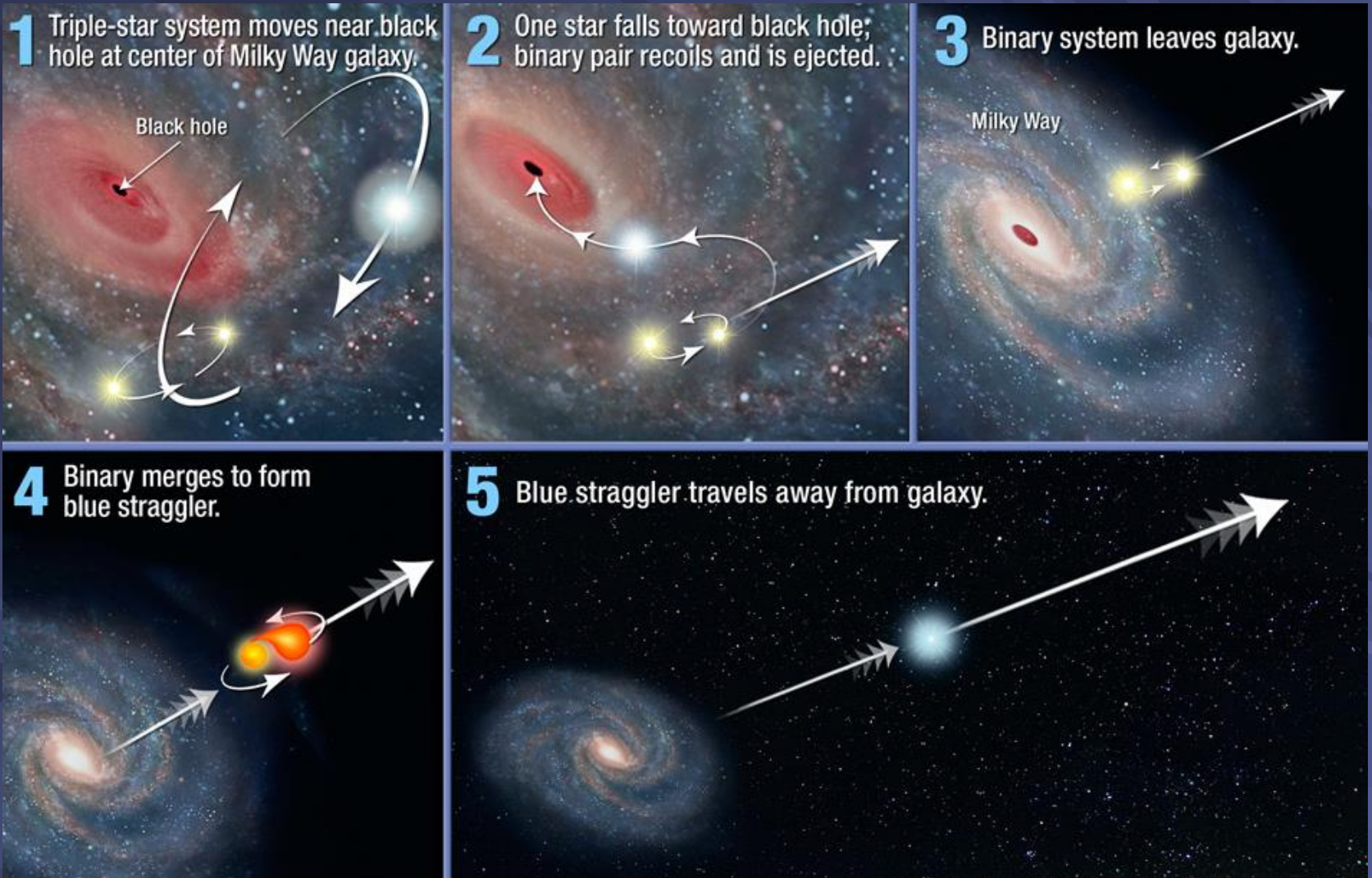
Взаимодействие трех тел



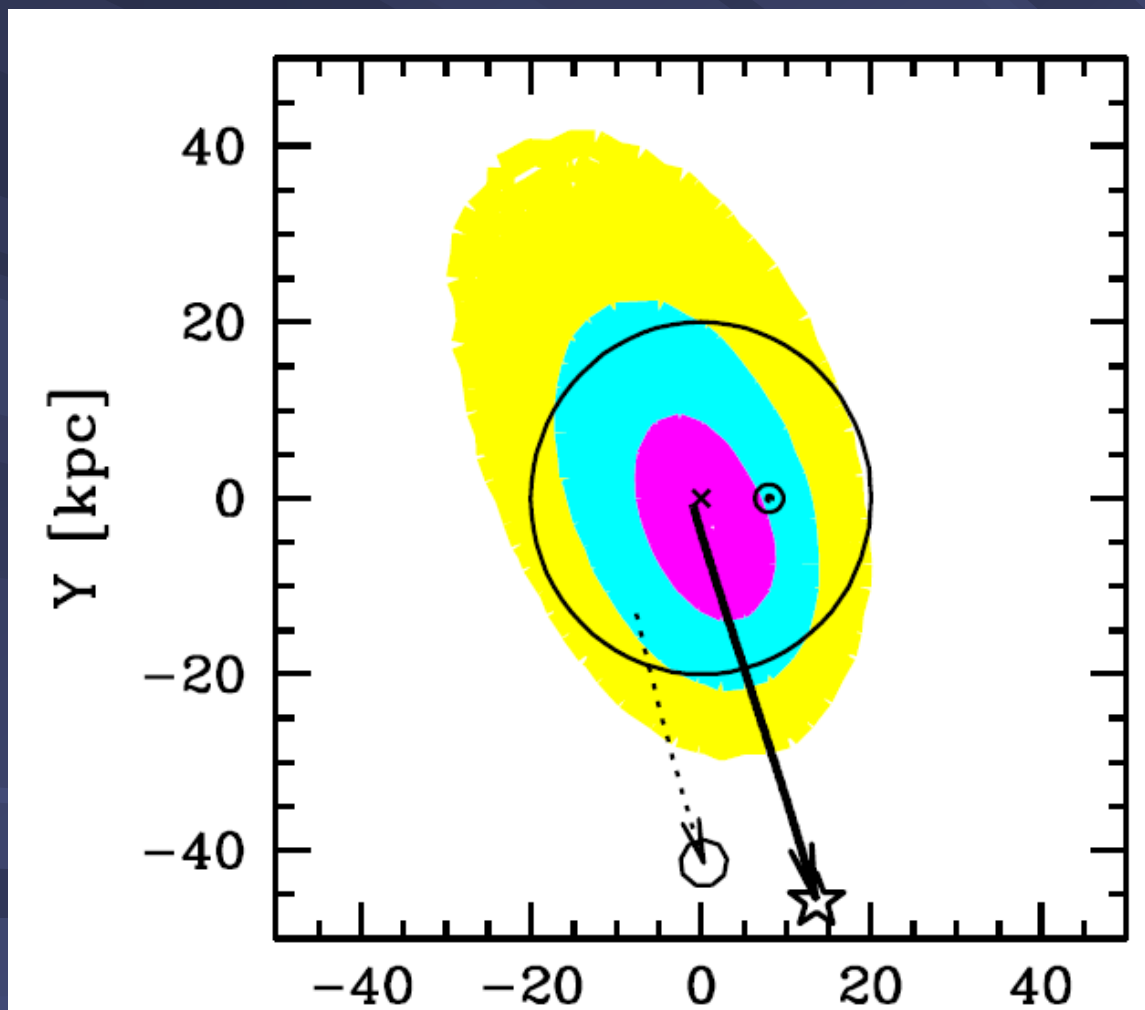
Распад двойной в поле дыры

Странные путешественники

Голубая звезда вдали от плоскости Галактики



Полетим в другую галактику?

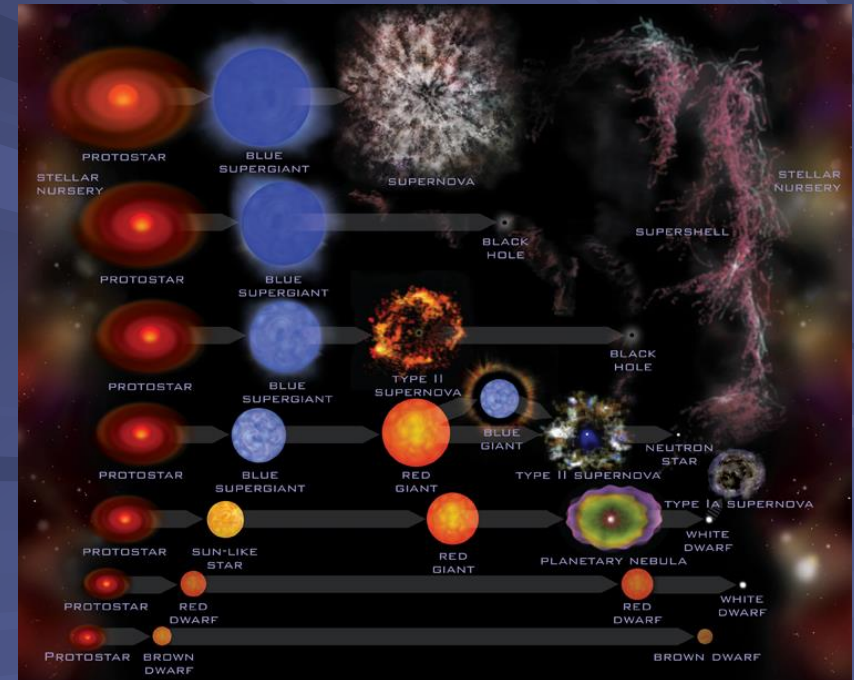
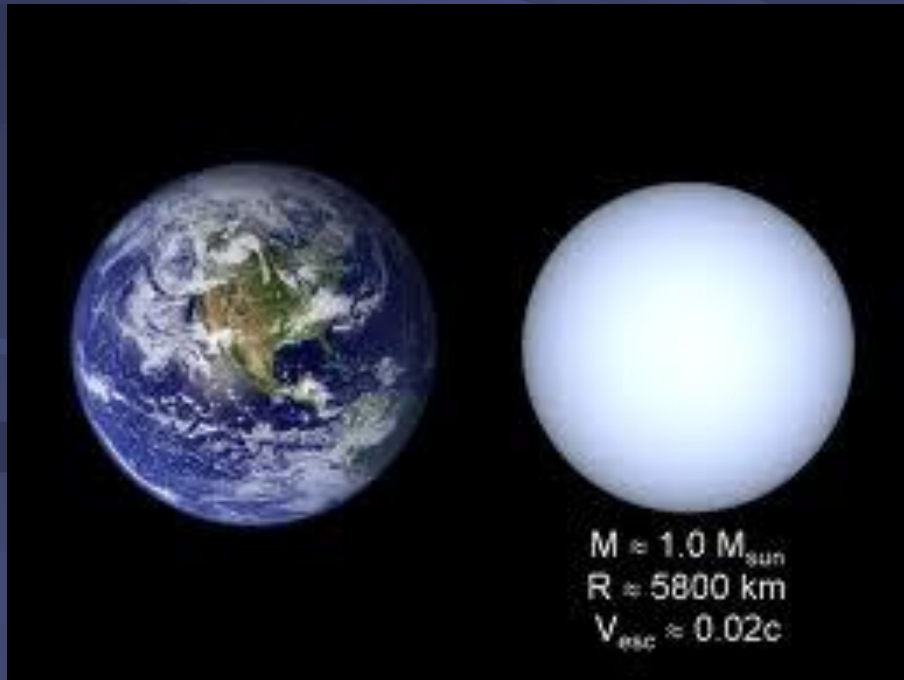


23 млн лет назад
звезда пролетела
в 13 кпк от БМО

1E 0437-5439

Эволюция звезд

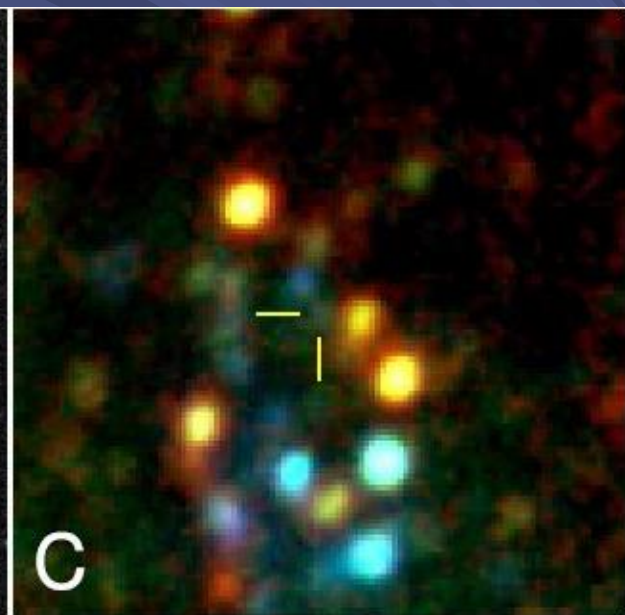
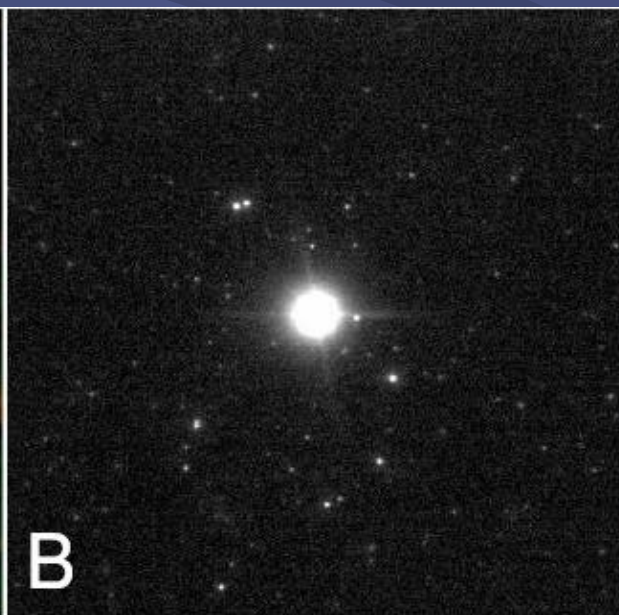
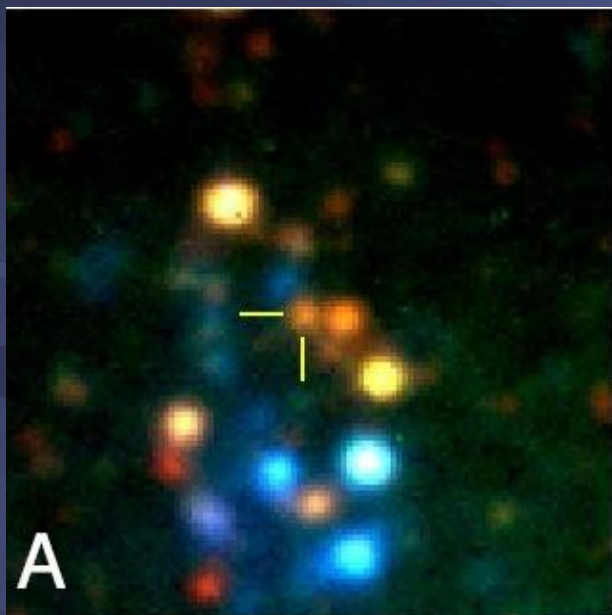
Солнце эволюционирует. Его возраст менее 5 миллиардов лет. Примерно через 5 миллиардов лет закончится водород в его ядре. Солнце превратится в красного гиганта, а затем - в белый карлик. Массивные звезды в конце жизни взрываются, оставляя нейтронную звезду или черную дыру.



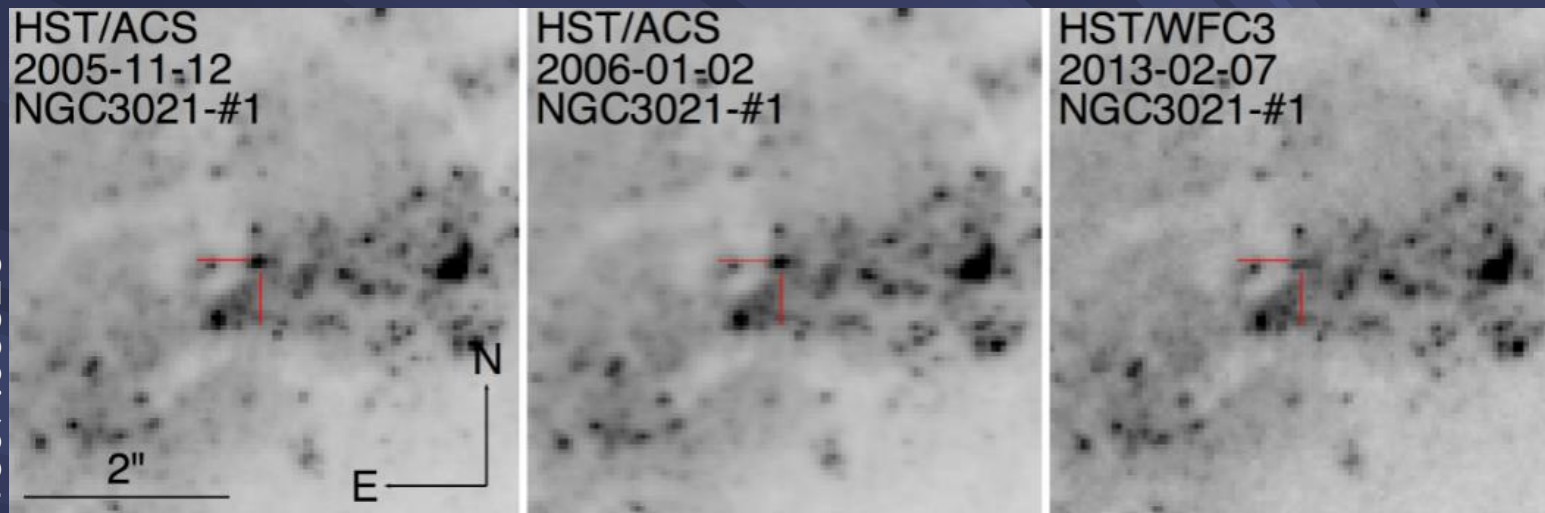
Сверхновые

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.

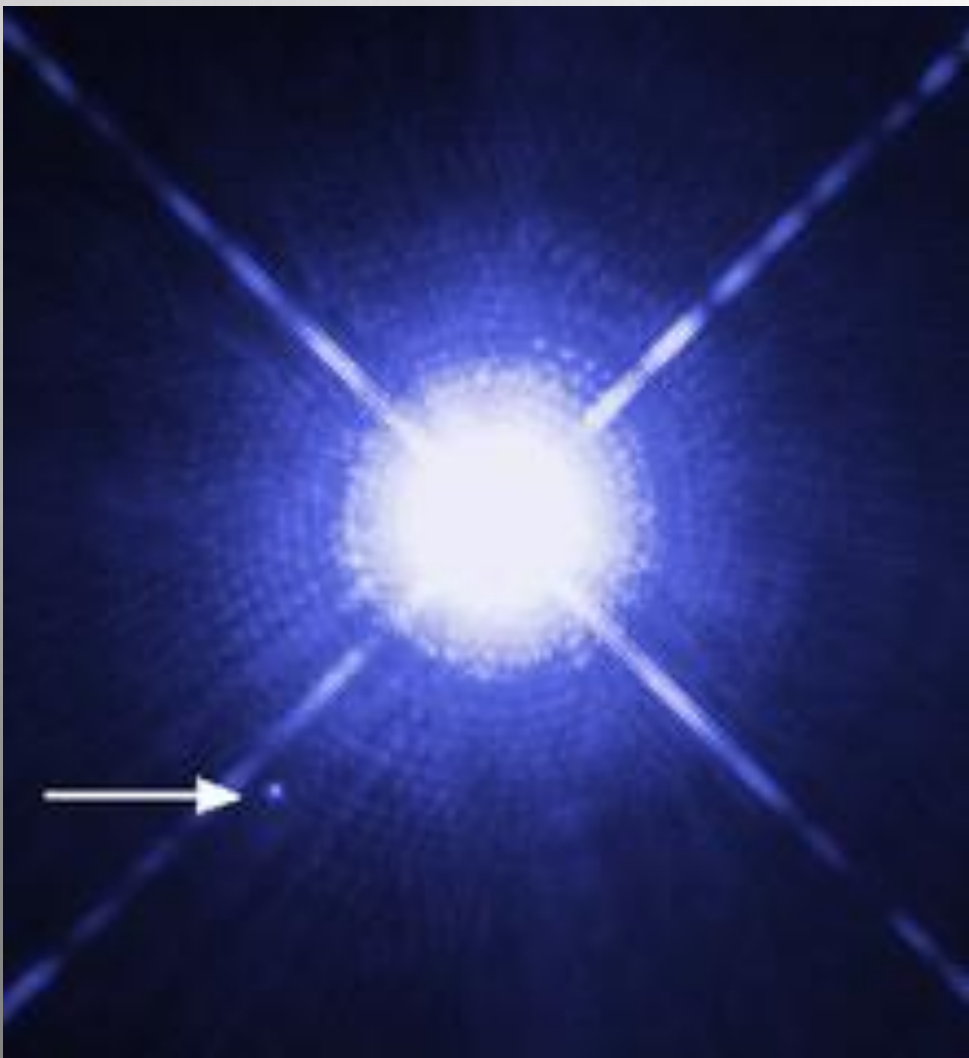
Есть много
таких
случаев.

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.

БЕЛЫЕ КАРЛИКИ,
СВЕРХНОВЫЕ,
НЕЙТРОННЫЕ
ЗВЕЗДЫ И
ЧЕРНЫЕ ДЫРЫ

СЕРГЕЙ ПОПОВ
(ГАИШ МГУ)

НЕОБЫЧНЫЕ КОМПАКТНЫЕ ЗВЕЗДЫ



Измерения температур, масс и радиусов для источников в двойных системах позволило надежно доказать существование массивных компактных объектов с относительно высокой температурой.

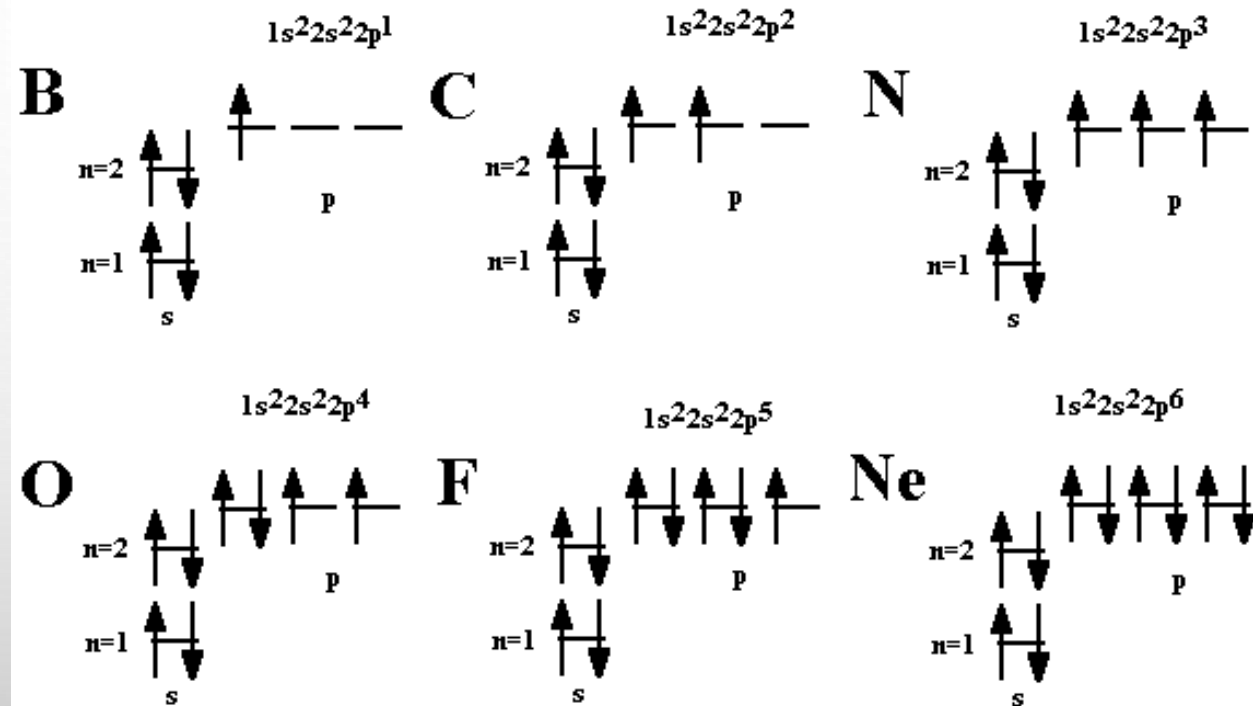
При массе порядка солнечной они имеют массу порядка земной.

Для объяснения природы этих объектов понадобилась квантовая механика.

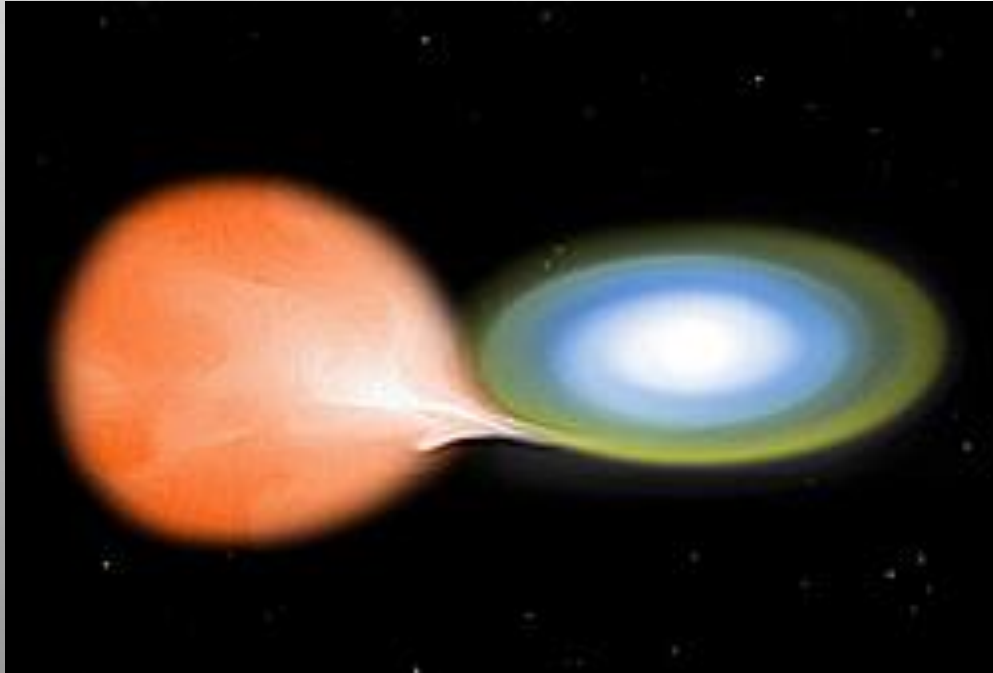
ЗАПРЕТ ПАУЛИ

Два фермиона не могут иметь одинаковые волновые функции (не могут находиться в одном квантовом состоянии).

	1	2	3	4	5	6	7	8
5								
4								
3								
2								
1								

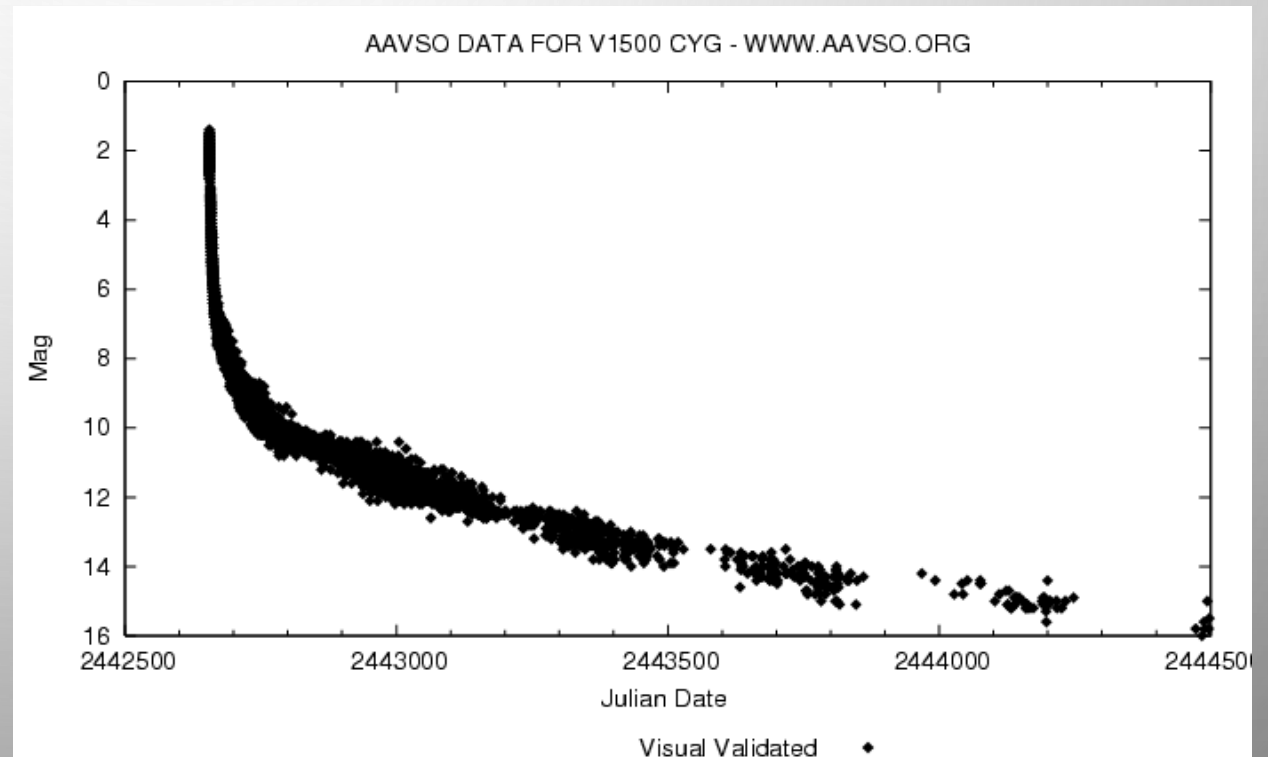


НОВЫЕ ЗВЕЗДЫ

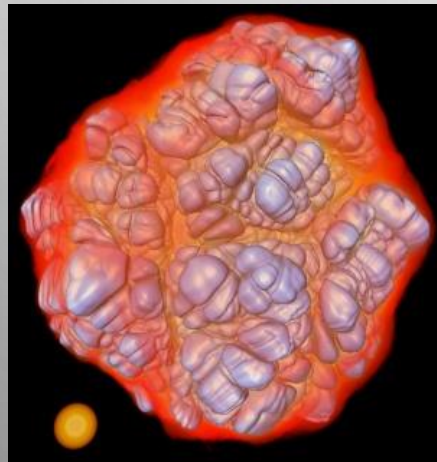
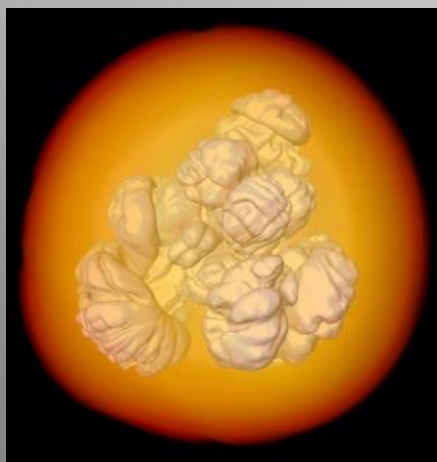
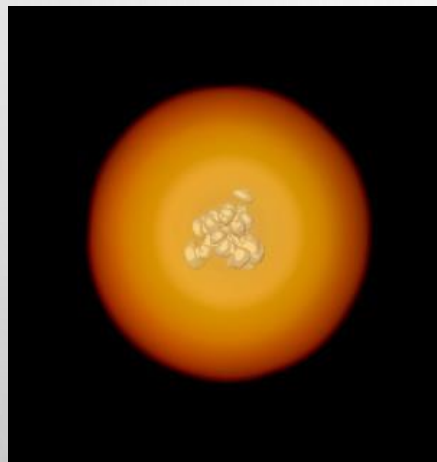
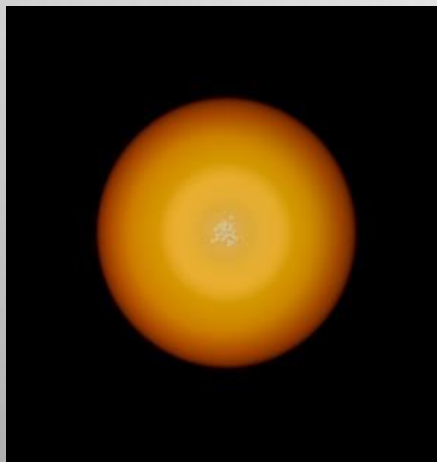


Перетекающее вещество накапливается на поверхности белого карлика, пока не происходит взрыв.

Термоядерное взрывное горение водорода



ВЗРЫВ SN IA



Достигнув критической массы, белые карлики взрываются.

Это термоядерный взрыв, полностью разрушающий объект.

Наблюдения именно таких сверхновых привели к открытию темной энергии.

Они также очень важны для синтеза многих тяжелых элементов.

ВЗРЫВ СВЕРХНОВОЙ ТИПА IA

Thermonuclear Supernova Explosion

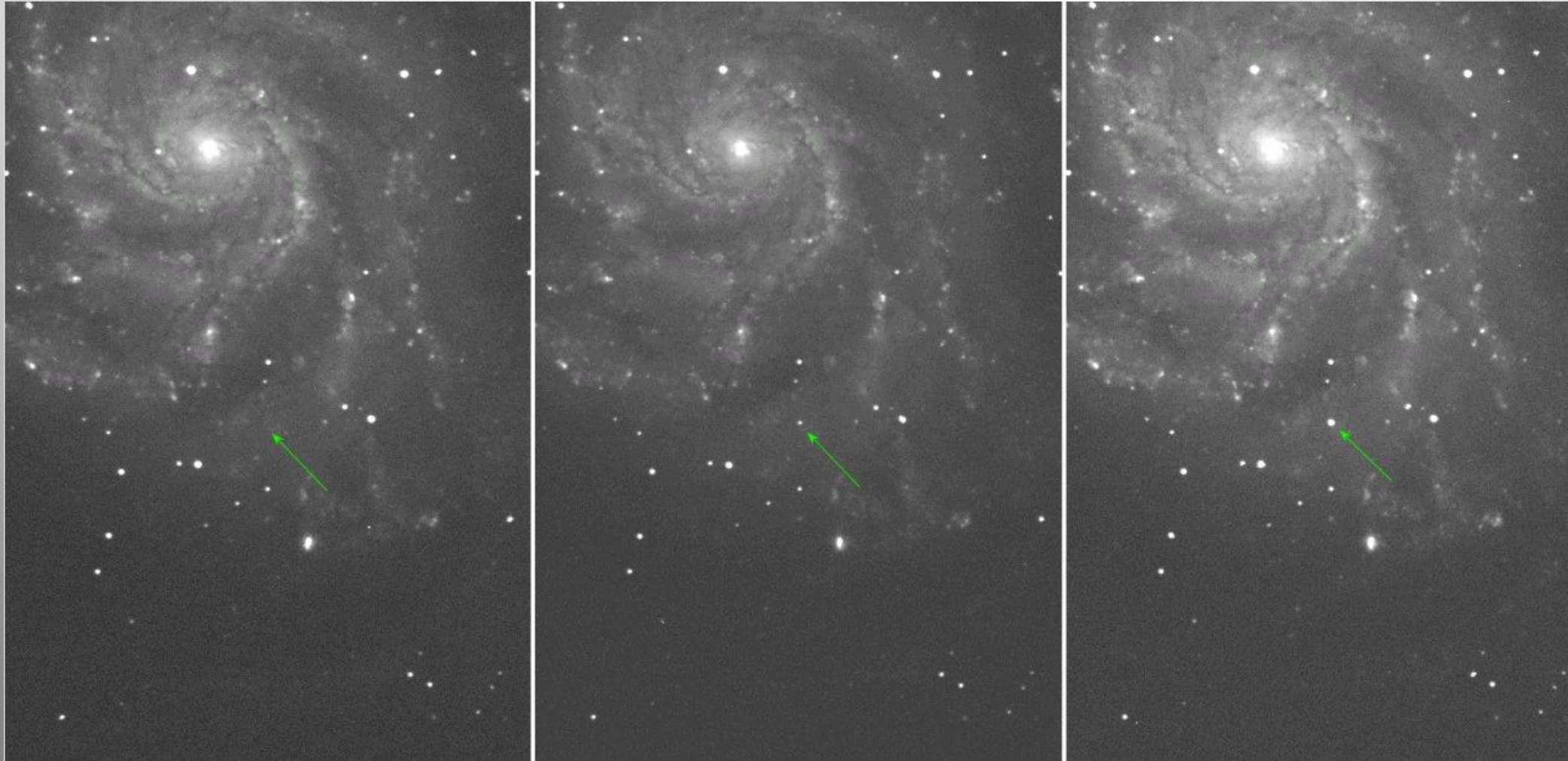


(c) Friedrich Röpke, MPA, 2004

Взрыв происходит, если в белом карлике начинается неустойчивое термоядерное горение углерода.

Масса белого карлика может достичь предела или в результате аккреции, или в результате слияния двух карликов.

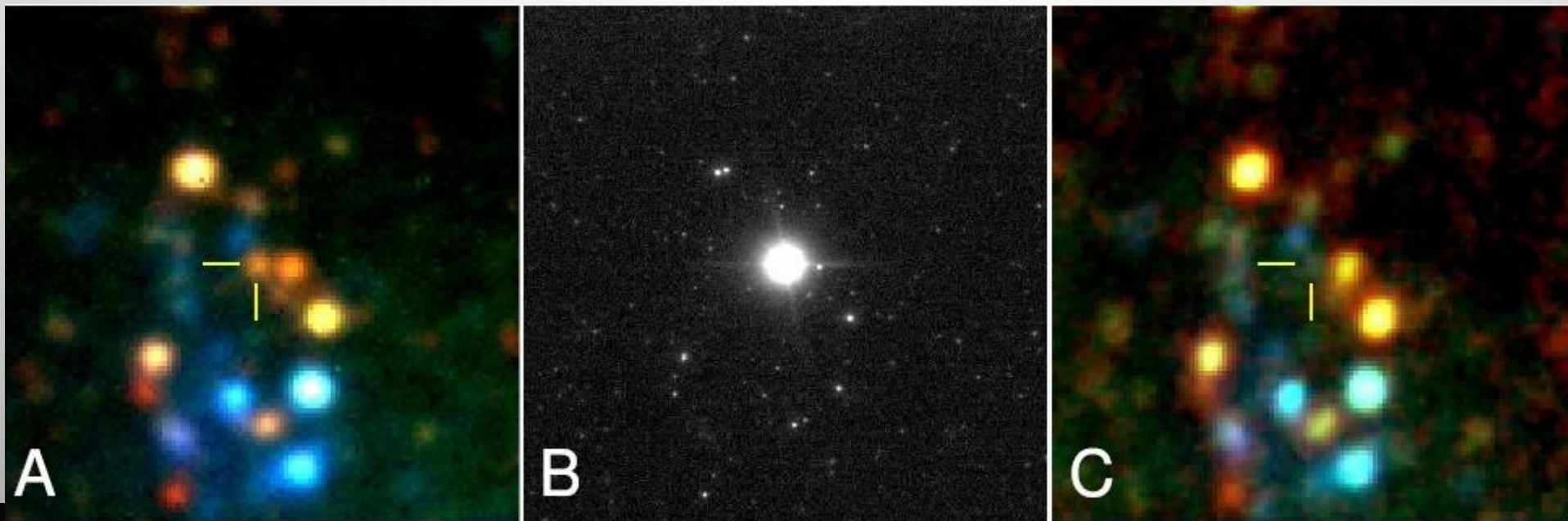
СВЕРХНОВАЯ Ia В БЛИЗКОЙ ГАЛАКТИКЕ



1110.6201

Галактика M101. 6.4 Мпк. Самая близкая сверхновая Ia за последние 25 лет.

СВЕРХНОВЫЕ



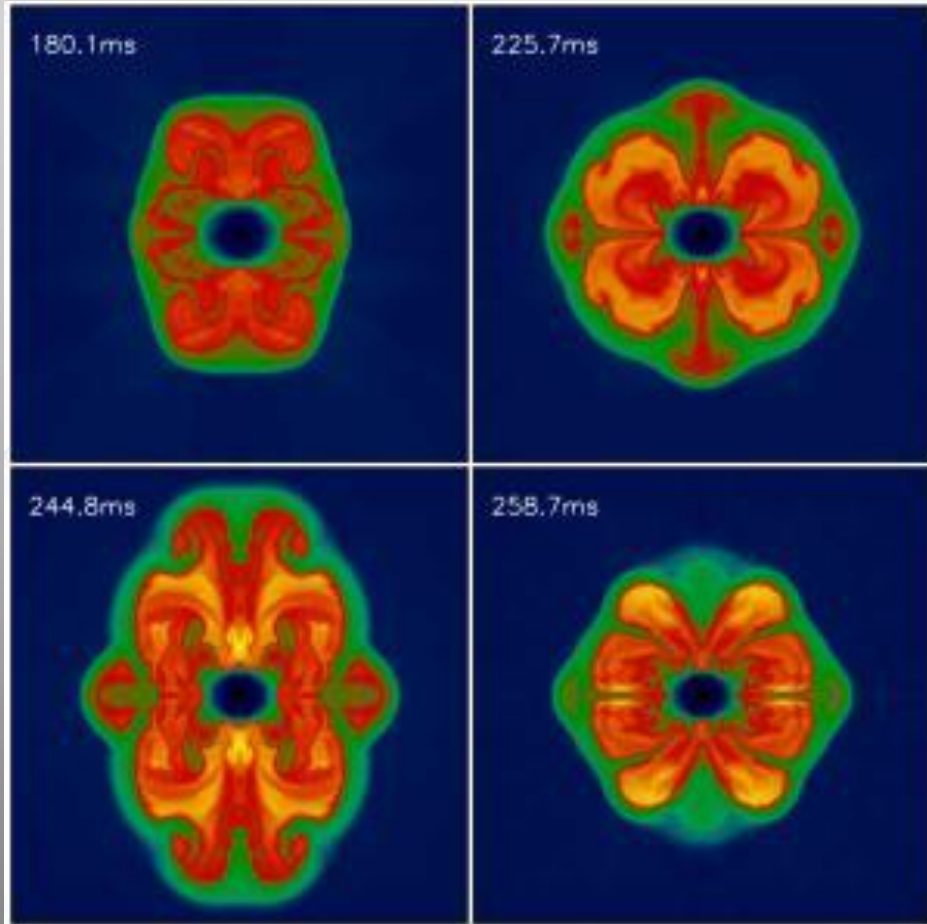
Жизнь массивной звезды заканчивается колоссальным взрывом – сверхновой. Также взрываться могут белые карлики, если они стали слишком тяжелыми.

На короткое время звезда становится ярче целой галактики!

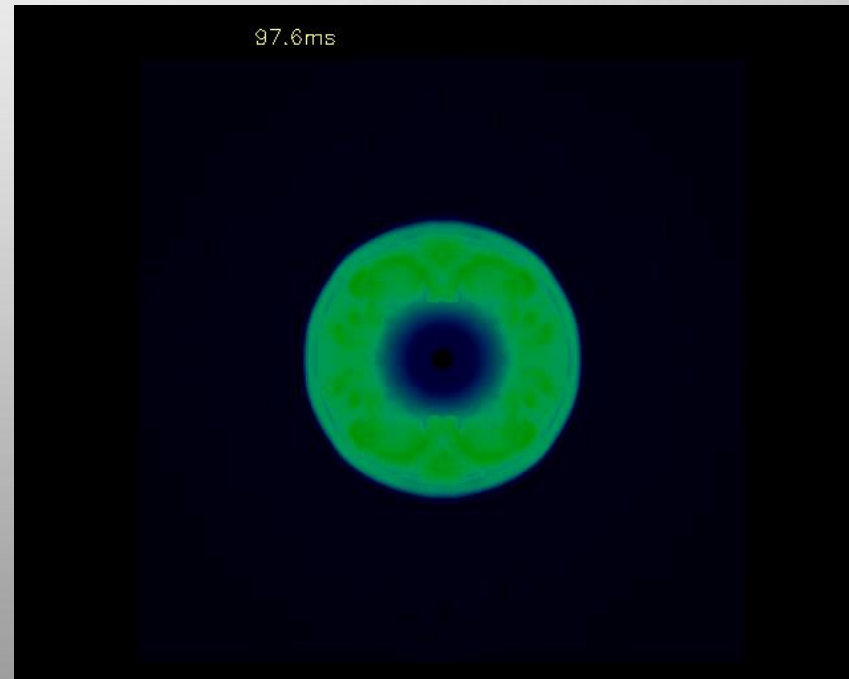
ВЗРЫВ СВЕРХНОВОЙ

Расчеты взрывов сверхновых можно смело отнести к числу самых сложных задач

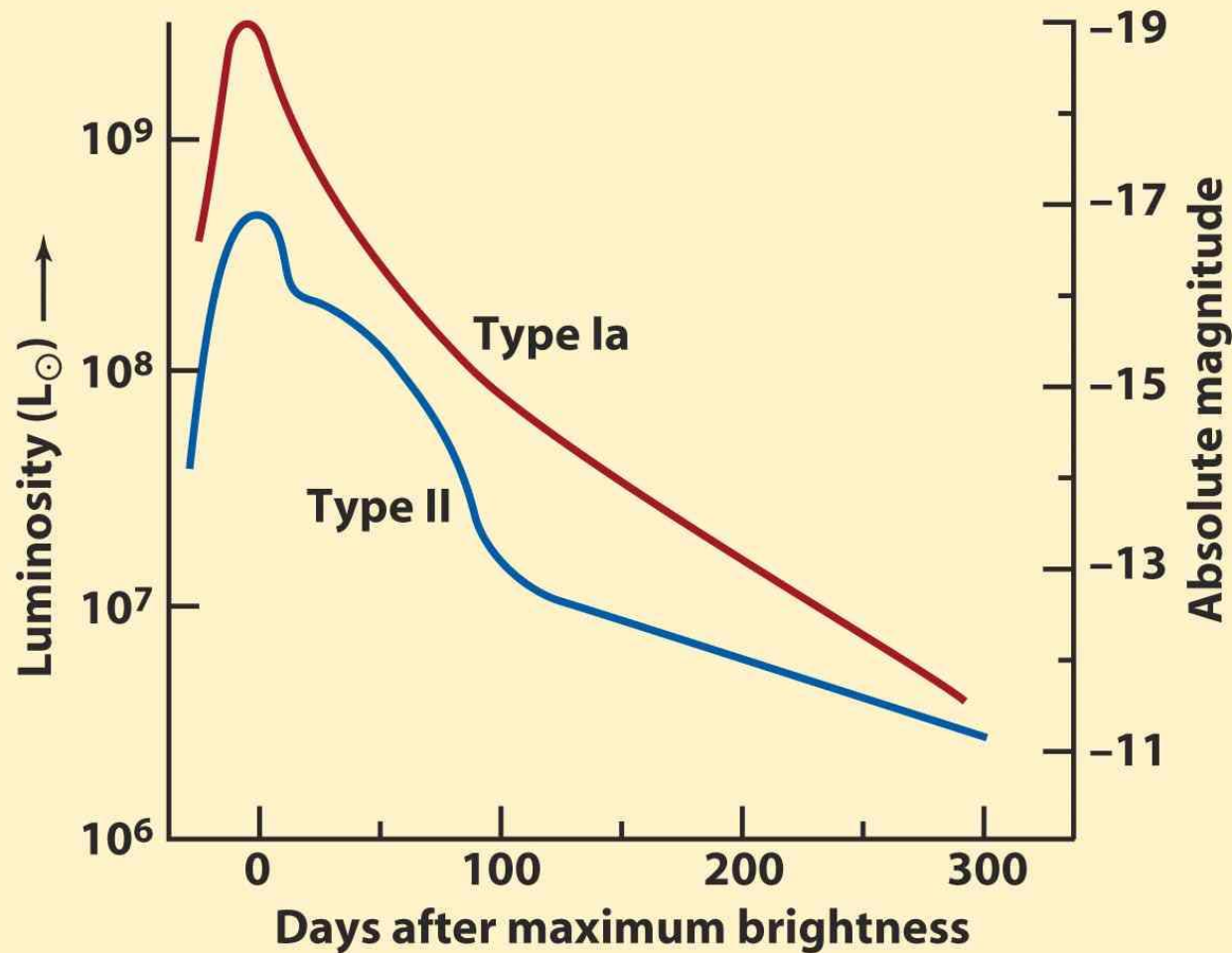
- термоядерные реакции
- магнитные поля
- гидродинамика
- нейтрино
- эффекты теории относит.



(Buras, Janka et al.)

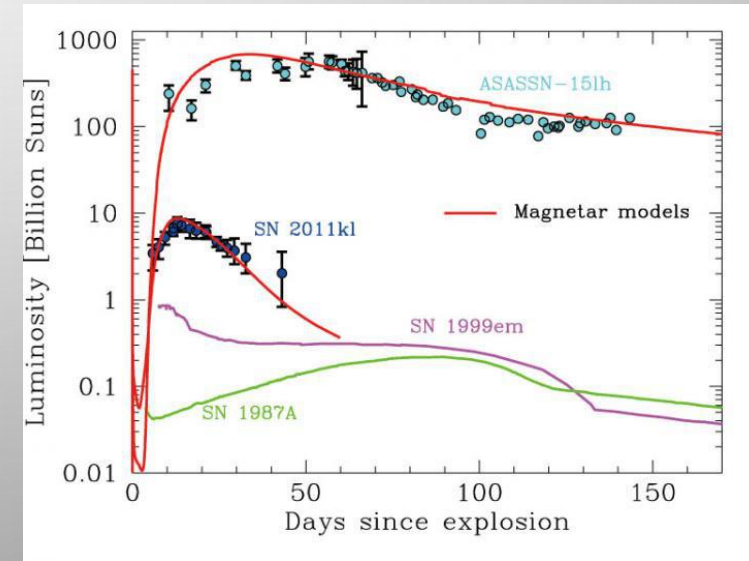


КРИВАЯ БЛЕСКА СВЕРХНОВОЙ



В течение сотен дней после коллапса сверхновая видна в основном за счет распада радиоактивных элементов.

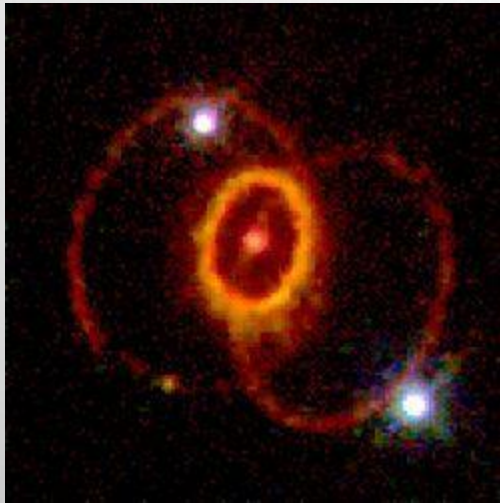
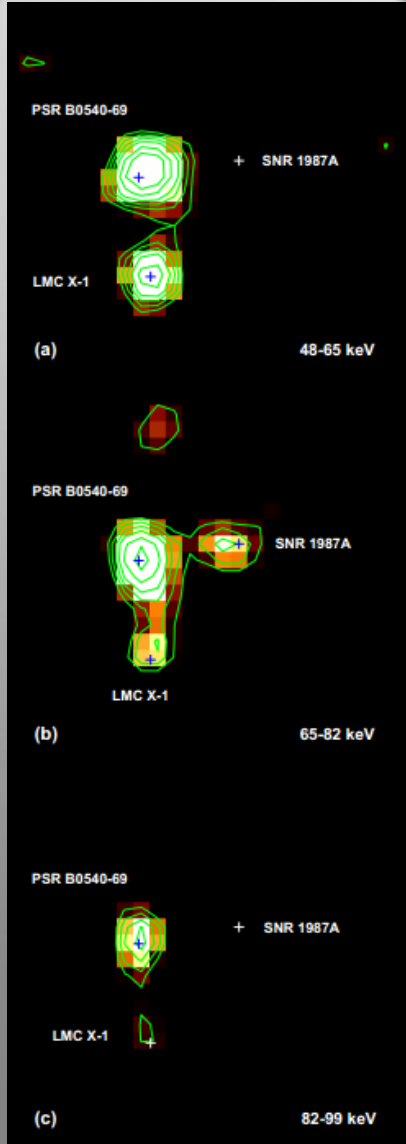
На ранних стадиях также могут быть дополнительные источники энергии.



Bersten et al.

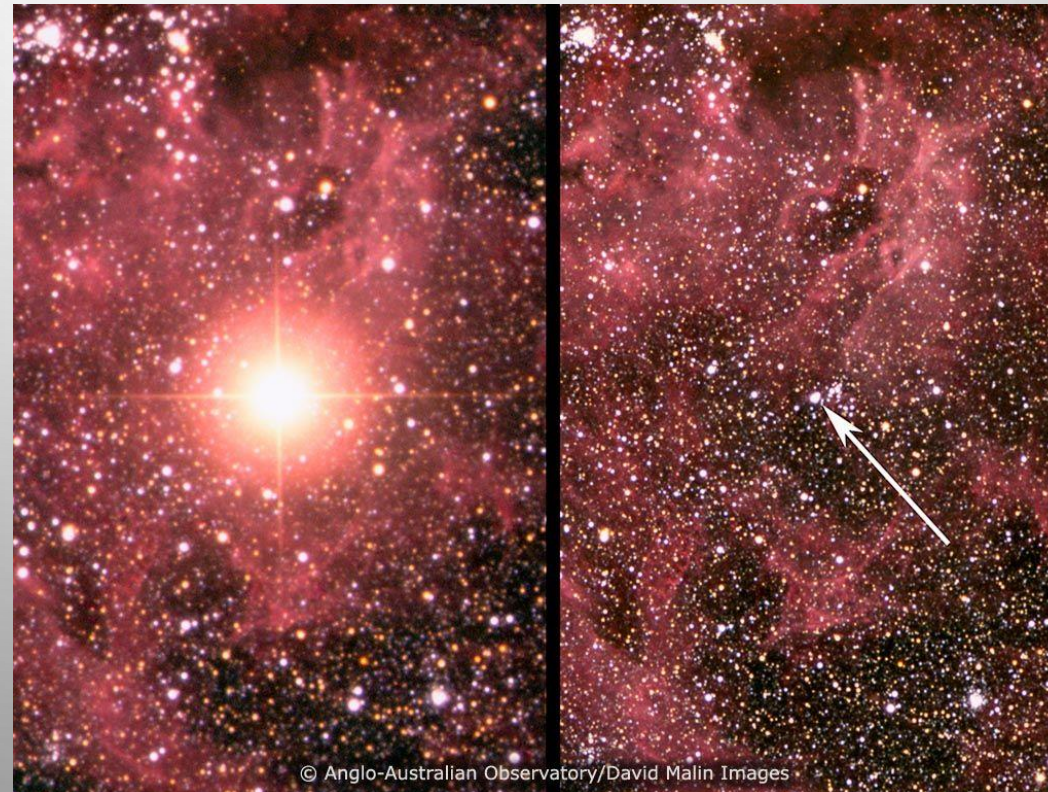
ТИТАН В СВЕРХНОВОЙ 1987А

Наблюдения на спутнике INTEGRAL позволили обнаружить излучение от распада титана-44 в остатке сверхновой 1987А.

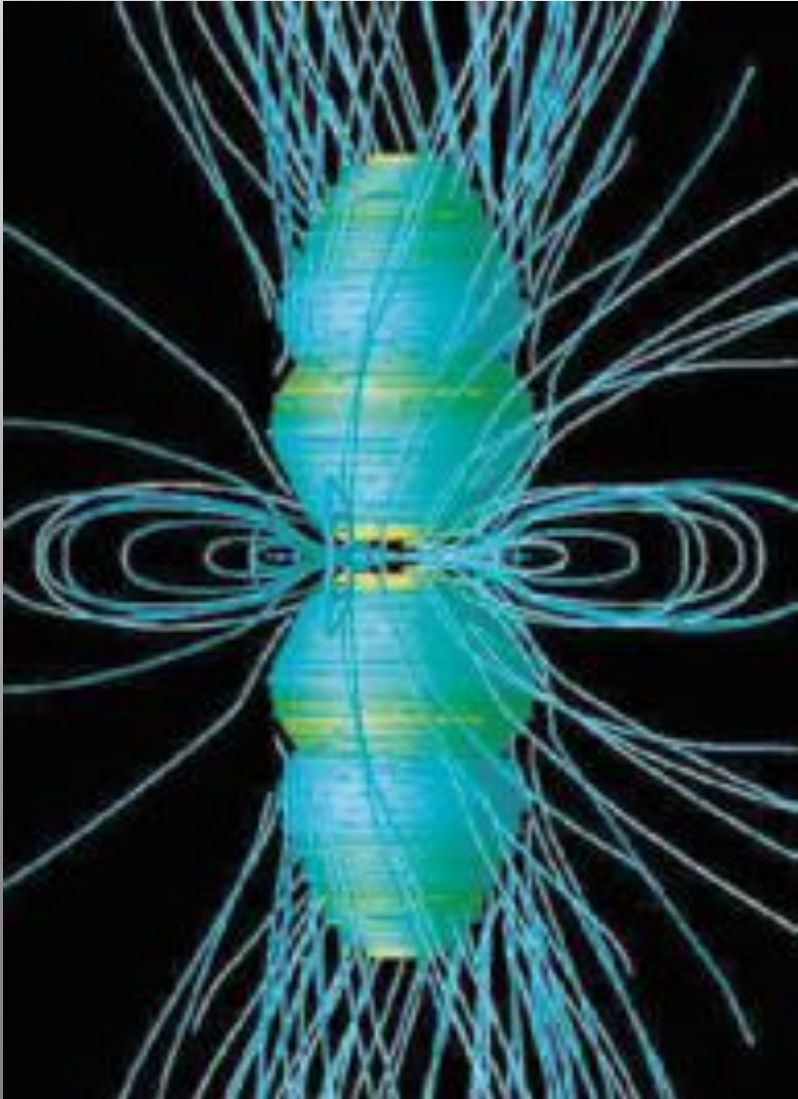


Именно распад титана-44 отвечает за свечение остатка на определенном этапе эволюции.

1211.2656



ПРОГРЕСС В ИЗУЧЕНИИ СВЕРХНОВЫХ



Теория

- Более мощные компьютеры позволят считать в деталях
- Учет многих эффектов сразу



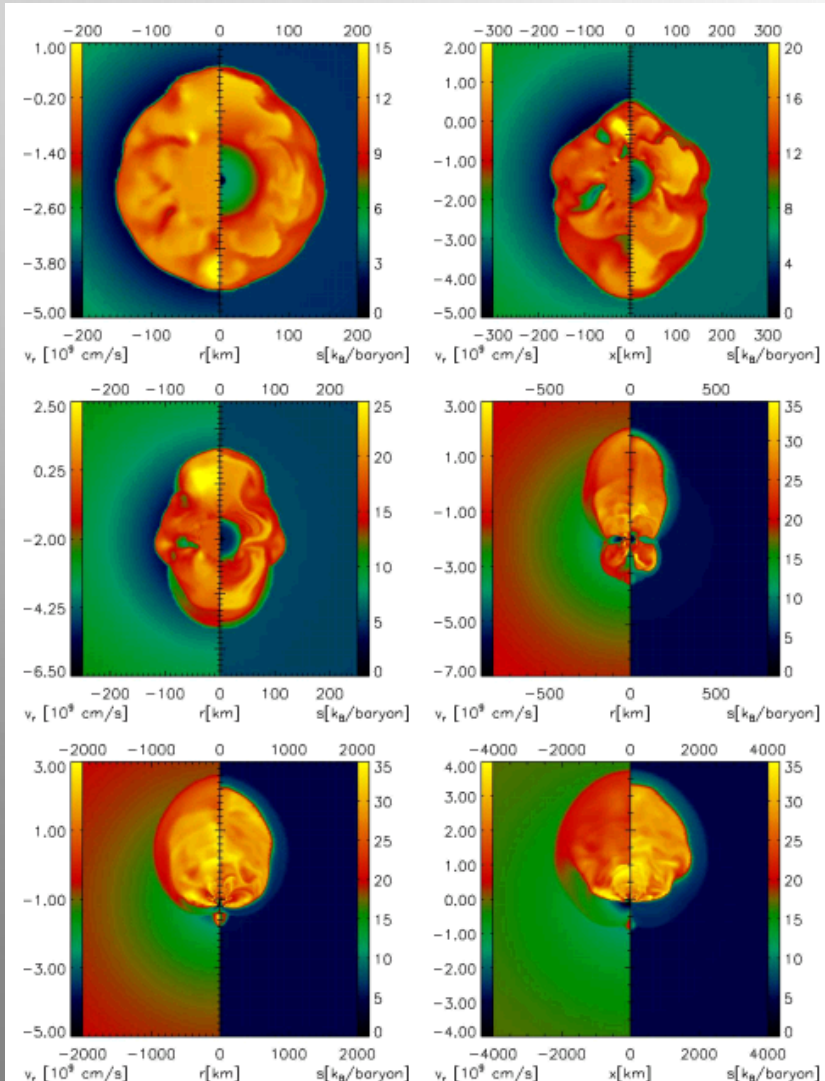
Наблюдения

- Наблюдения нейтрино
- Наблюдения очень ранних стадий вспышки сразу в нескольких диапазонах спектра

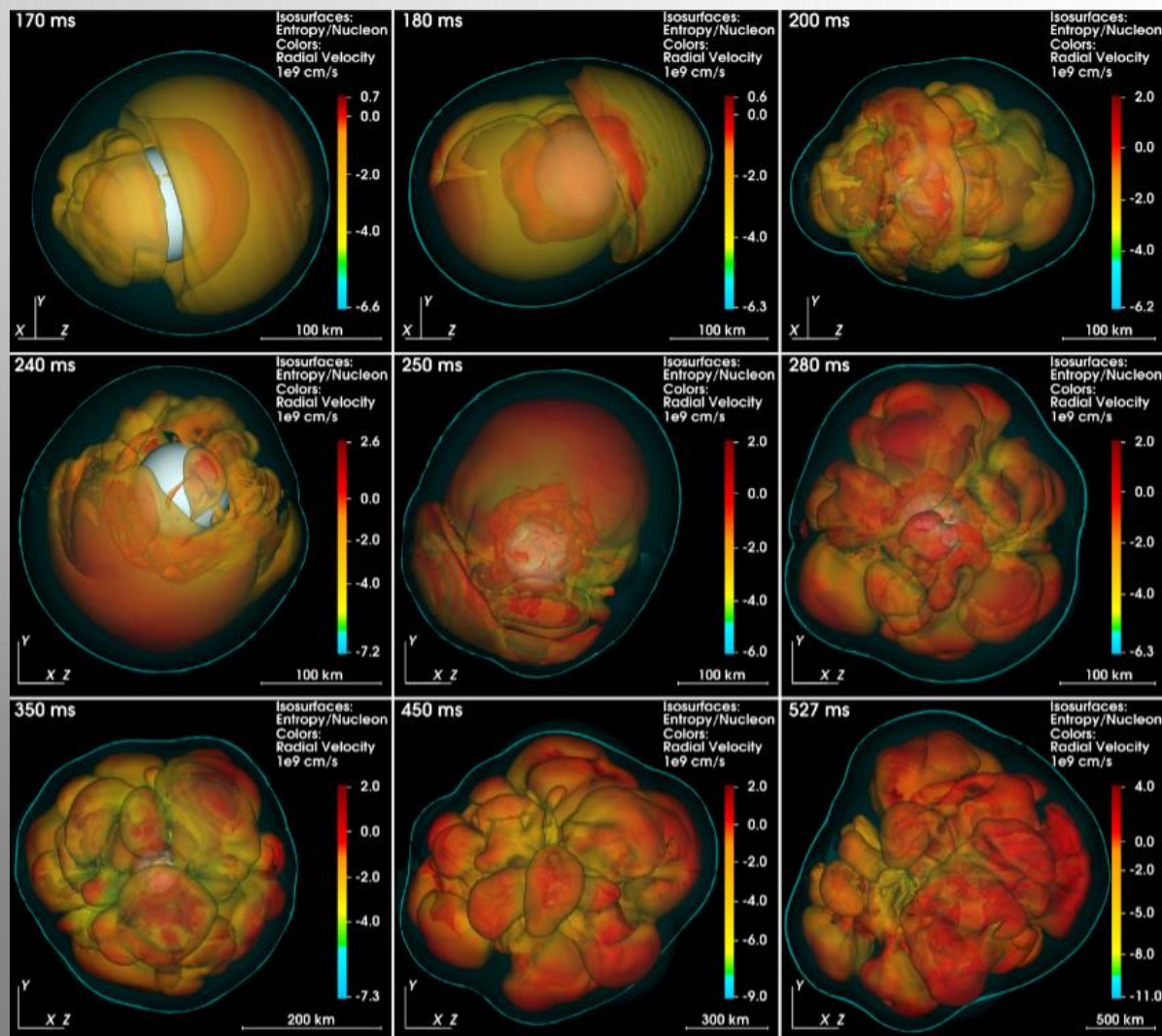
НАКОНЕЦ-ТО СВЕРХНОВАЯ ВЗОРВАЛАСЬ В КОМПЬЮТЕРЕ!

Учет эффектов ОТО позволил
получить взрыв сверхновой
в рамках новых двумерных расчетов.

Но в трехмерных расчетах
не все так хорошо.



СТРАННЫЕ КВАРКИ И СВЕРХНОВЫЕ



Авторы добавили в расчеты процессы с участием странных кварков.

Это помогло взорвать звезду с массой 20 солнечных в трехмерном (!) расчете.

МАССЫ НЕЙТРОННЫХ ЗВЕЗД И БЕЛЫХ КАРЛИКОВ

