

Эволюция звёзд: рождение, жизнь и смерть

Джон Р. Перси

*Международный астрономический союз
Торонтский университет, Канада*



Эволюция звёзд

Эволюция звёзд – изменения, которые происходят в звездах, пока они излучают свет и тепло, начиная от их рождения и заканчивая смертью.



Туманность Кольцо
(гибнущая звезда)

Источник: NASA

Изучая звёздную эволюцию можно
понять:

- Настоящее и будущее Солнца;
- Происхождение Солнечной системы;
- Насколько Солнечная система отличается от других планетных систем;
- Может ли существовать жизнь у других звёзд;
- И многое другое...



Характеристики Солнца

- **Расстояние от Земли: $1,5 \times 10^{11}$ м**

Вычислено при помощи отражения радиоволн от Венеры и Меркурия

- **Масса: 2×10^{30} кг**

Вычислена по движению планет

- **Диаметр: $1,4 \times 10^9$ м**

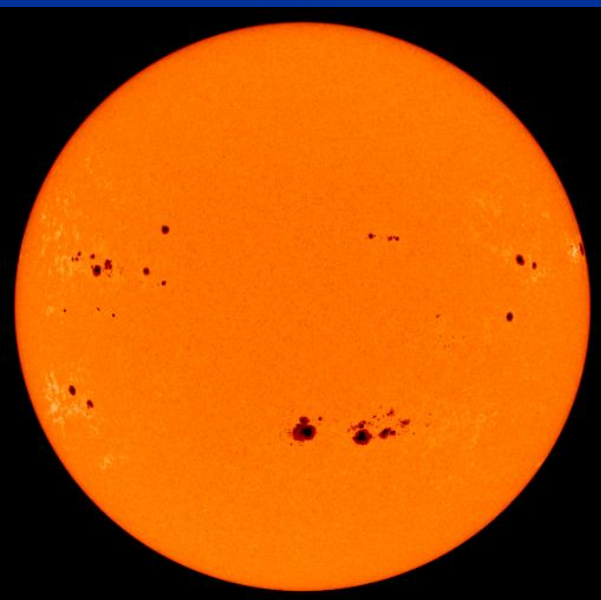
Вычислен через угловой размер и расстояние до Солнца

- **Светимость: 4×10^{26} Вт**

Вычислена через мощность излучения на орбите Земли и расстояние до Солнца

- **Химический состав: 98% H и He**

Определён спектральным анализом



Солнце

Источник: Космическая
обсерватория SOHO



Как астрономы измеряют характеристики далёких звёзд

- **Расстояние:** замеряя параллакс или по видимой звёздной величине (если известна светимость);
- **Светимость:** зная расстояние и видимую звёздную величину;
- **Температура поверхности:** по цвету и спектру звезды;
- **Масса:** наблюдая двойные звёзды;
- **Химический состав:** при помощи спектрального анализа.

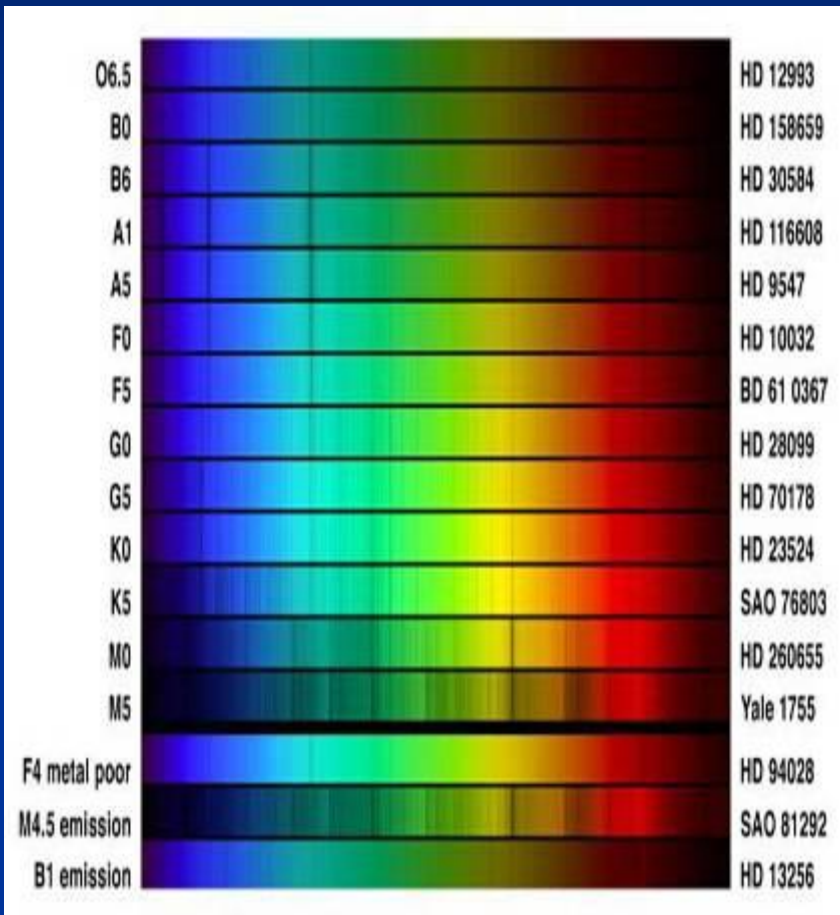


Созвездие Ориона

Источник: орбитальный телескоп Hubble



Спектр звёзд

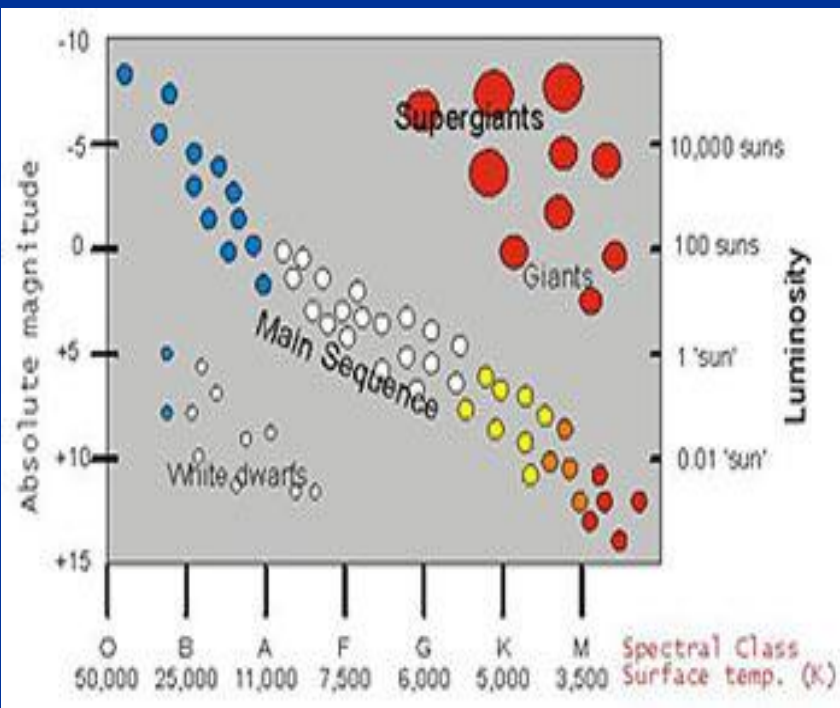


Спектры звёзд

- Астрономы узнают многое о звёздах, изучая их электромагнитное излучение
- При помощи спектра можно узнать химический состав, температуру и другие характеристики звёзд

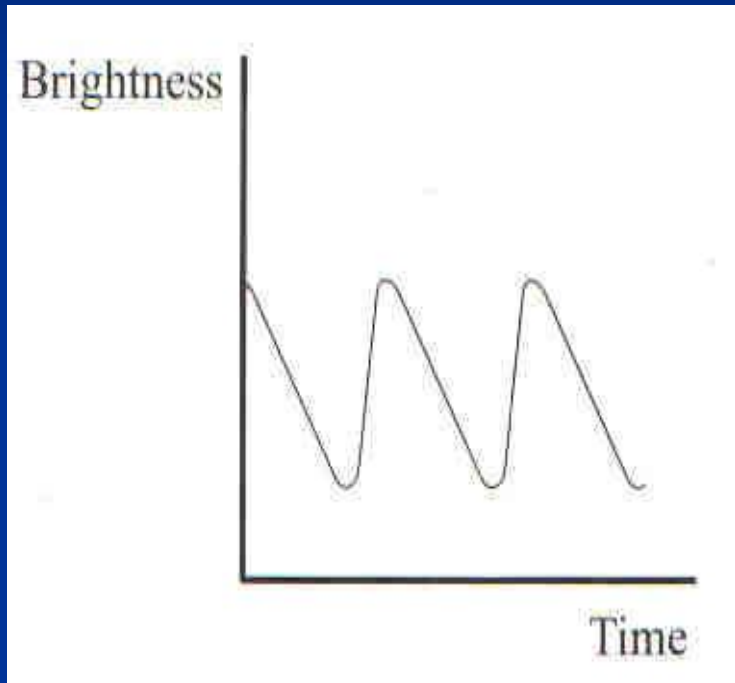
Диаграмма Герцшпрунга-Рассела (спектральный класс – светимость)

- Диаграмма Герцшпрунга-Рассела показывает зависимость между абсолютной звёздной величиной и температурой звезды.



- Большинство звёзд находятся на главной последовательности: массивные и горячие выше, а маленькие и холодные ниже.
- Гиганты находятся в верхнем правом углу, а белые карлики в нижнем левом.

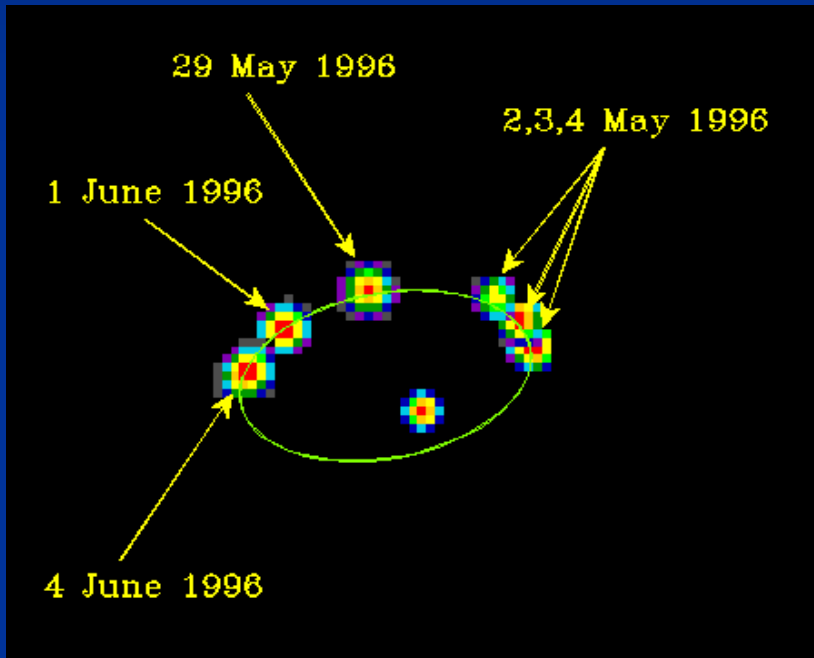
Переменные звёзды



Кривая освещённости

- Переменные звёзды со временем меняют свой блеск;
- Большинство звёзд являются переменными из-за затмения звездной-компаньоном, планетой, звездной активностью и другим причинам
- Благодаря переменным звёздам можно уточнить модели строения звёзд и звездной эволюции

Двойные звёзды



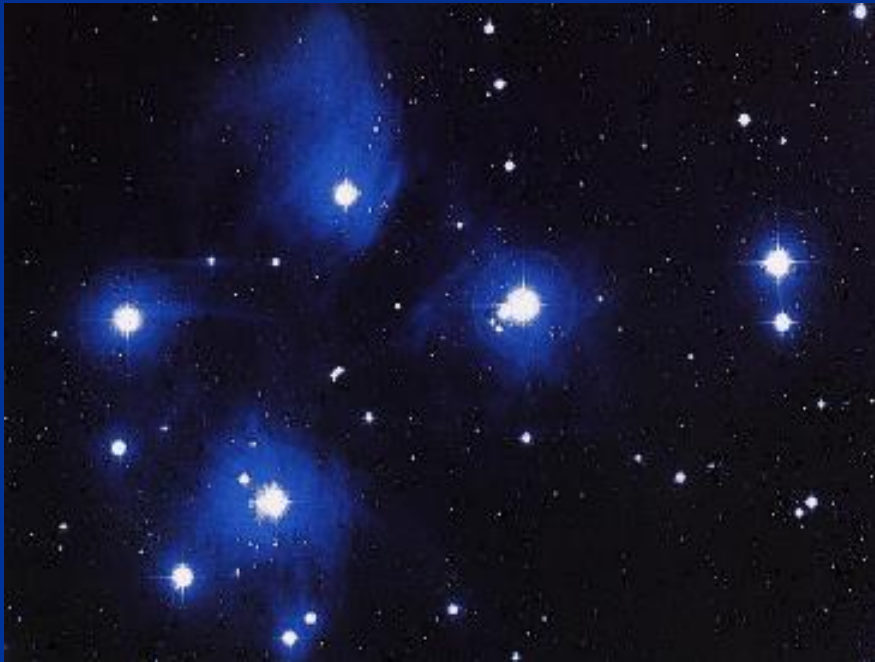
Орбитальное движение
Мицара (Большая Медведица).
Источник: NPOI Group, USNO, NRL

- Двойные звёзды – это пара звёзд, которая находится близко друг к другу и вращается вокруг общего центра масс. Их можно обнаружить напрямую или по спектру;
- В системах двойных звёзд можно измерять массу отдельных звёзд;
- Встречаются также системы из трёх и более звёзд.



Звёздные скопления

- Звёздные скопления – группы гравитационно связанных звёзд, находящие относительно близко друг к другу;
- Они образовались в одно и тоже время и из одного и того же исходного вещества;
- В скопления встречаются звёзды разной массы, но всегда одного возраста.



Плеяды

Источник: Mount Wilson Observatory



Из чего состоит Солнце и звёзды?



Химический состав


Вселенной: H (90%), He (8%),
C, N, O и другие элементы
(2%).

- При помощи спектрального анализа астрономы могут узнать из чего состоят звёзды;
- Наиболее распространённые элементы во Вселенной – водород и гелий;
- Более тяжёлые элементы встречаются в миллионы раз реже. Они образовались внутри звёзд, как результат термоядерной реакции.

1 H																	2 He				
3 Li	4 Be															5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
11 Na	12 Mg															13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr				
37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe				
55 Cs	56 Ba			72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn			
87 Fr	88 Ra			104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Cn	113 Uut	114 Fl	115 UUp	116 Lv	117 Uus	118 Uuo			
		57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu					
		89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr					

 Элементы, созданные при Большом Взрыве

 Элементы, созданные в ядерных реакциях внутри звёзд

 Элементы, созданные сверхновыми звездами



Принципы строения звёзд

- Чем ближе в центре звезды, тем выше давления из-за верхних слоёв;
- С увеличением давления растут температура и плотность;
- Энергия передаётся от более горячей (внутренней) части к более холодной (внешней);
- Поскольку звезда не остывает, то внутри её находится источник энергии.



Почему Солнце в равновесии?



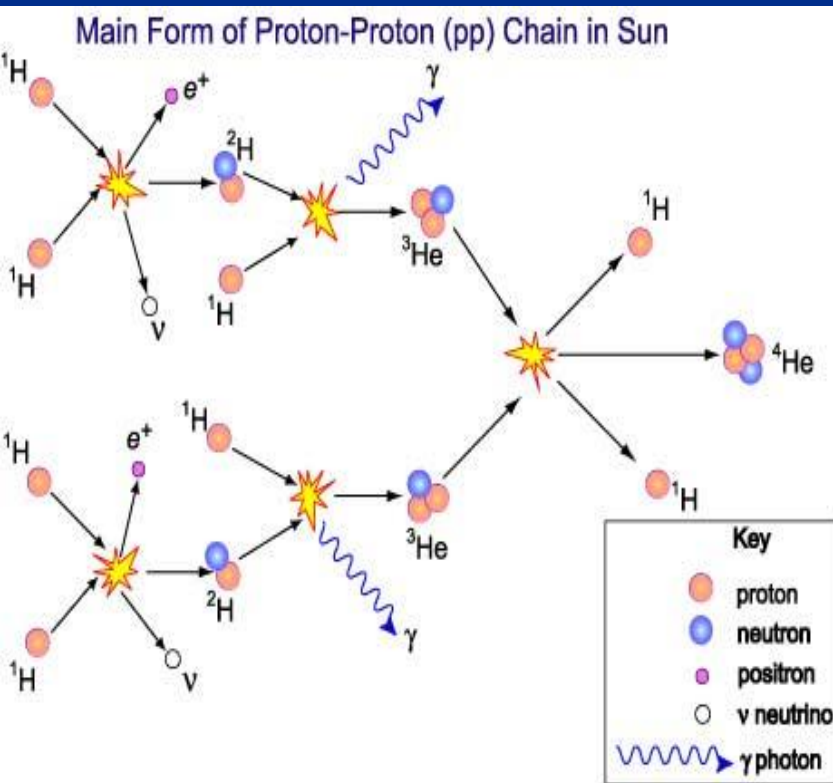
- Рассмотрим на примере воздушного шара;
- Атмосферное давление вдавливает шар внутрь, но он не сжимается из-за внутреннего давления;
- Гравитация стремится сжать Солнце, а внутреннее давление противостоит этому.

Источник энергии Солнца и звёзд

- Исторически рассматривалось несколько претендентов на роль источника энергии Солнца: уголь, нефть, газ, но ни один из них не мог объяснить почему Солнце светило так долго;
- Медленное гравитационно сжатие?
Этого хватило бы на миллионы лет, но Солнцу 5 миллиардов.
- Радиоактивный распад?
Радиоактивных изотопов почти не существует внутри Солнца и звёзд;
- Термоядерный синтез элементов? **Да! Это единственное подходящее объяснение.**



Протон-протонный цикл



- При высокой температуре и давлении протоны преодолевают кулоновское отталкивание и превращаются в дейтерий ${}^2\text{H}$, нейтрино (ν) и позитрон;
- Затем ещё один протон сталкивается с дейтерием и превращается в изотоп гелия ${}^3\text{He}$
- Взаимодействия ${}^3\text{He}$ превращаются в гелий ${}^4\text{He}$, выделяю 2 протона;
- Цикл начинается вновь.

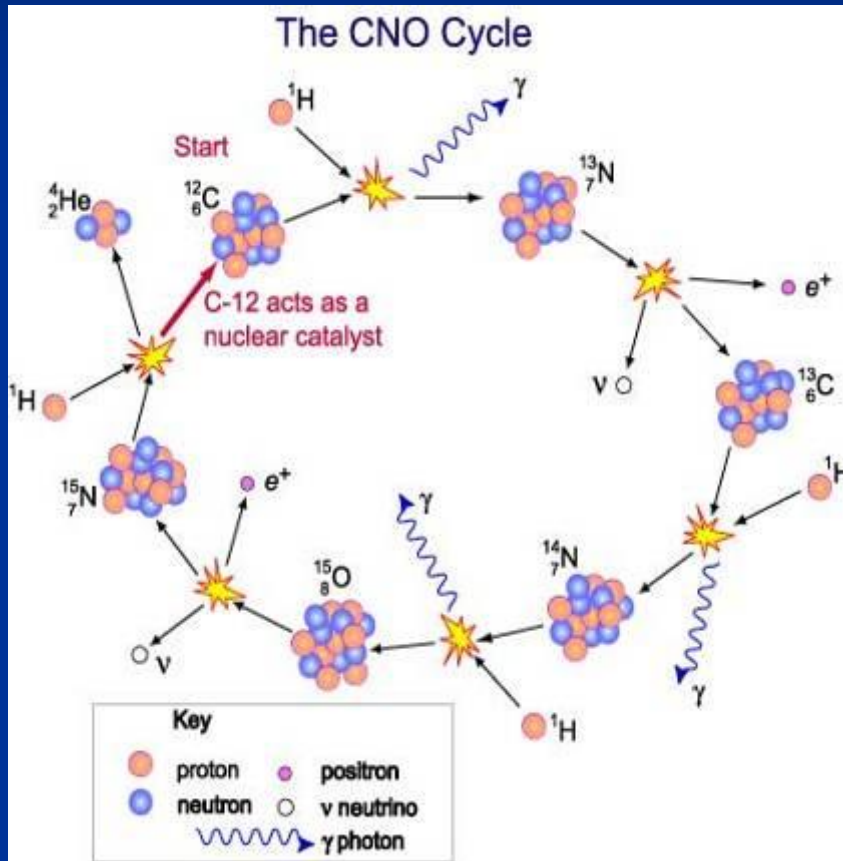
Протон-протонный цикл

Источник: Australia National Telescope Facility



CNO-ЦИКЛ

- В массивных звездах с очень горячим ядром протоны могут сталкиваться с ядром ^{12}C (углерода);
- Это запускает циклическую реакцию, в которой четыре протона сливаются в ядро гелия;
- Ядро ^{12}C восстанавливается в конце цикла и выступает катализатором для следующего цикла.



CNO-цикл

Источник: Australia National Telescope Facility



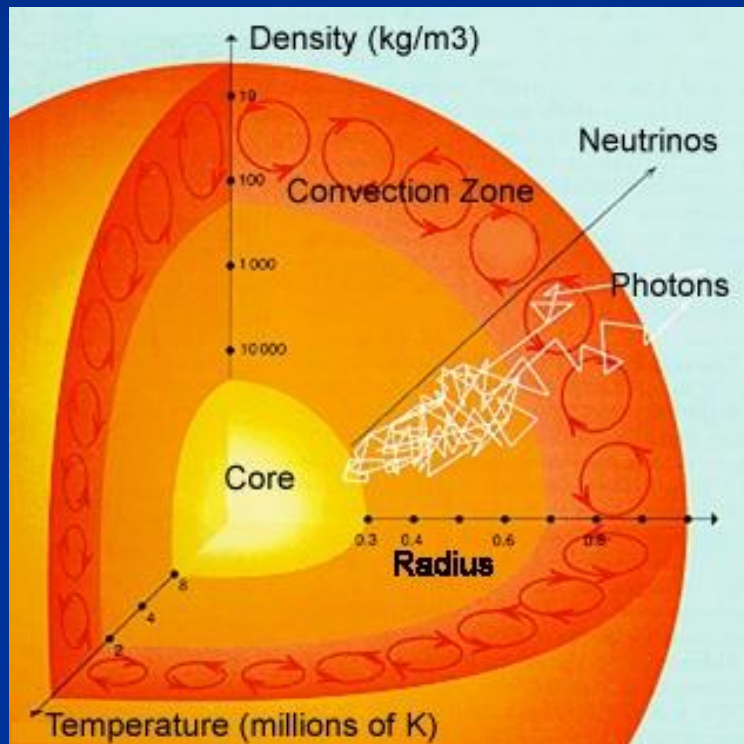
Создание моделей звёзд

- С помощью компьютера и законов физики можно создать модель звезды;
- Компьютер определит температуру, плотность, давление и мощность для любой точки звезды;
- Согласно расчётам в центре Солнца плотность в 150 раз выше плотности воды, а температура примерно 15 000 000 К.



Внутреннее строение Солнца

- Внутри горячего ядра ядерные реакции производят энергию путем слияния водорода в гелий
- В радиационной зоне, над ядром, энергия течет наружу через механизм излучения
- В конвективной зоне, между радиационной областью и поверхностью, энергия течет наружу конвекцией
- Фотосфера, на поверхности, является слоем, где звезда становится прозрачной

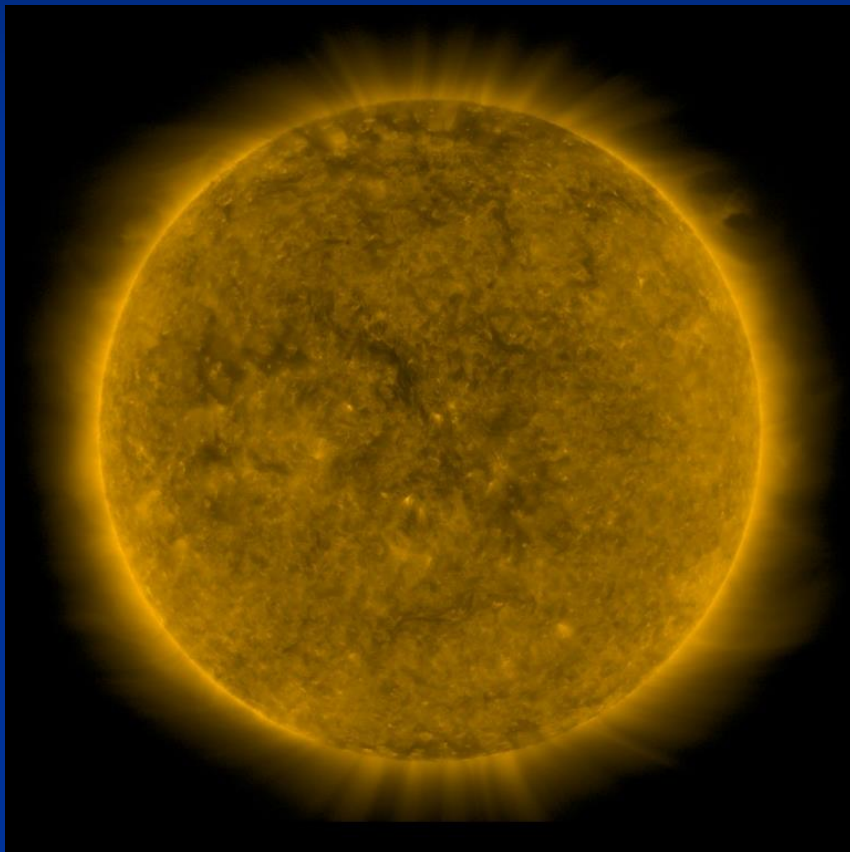


Модель Солнца

Источник: Institute of Theoretical Physics,
University of Oslo



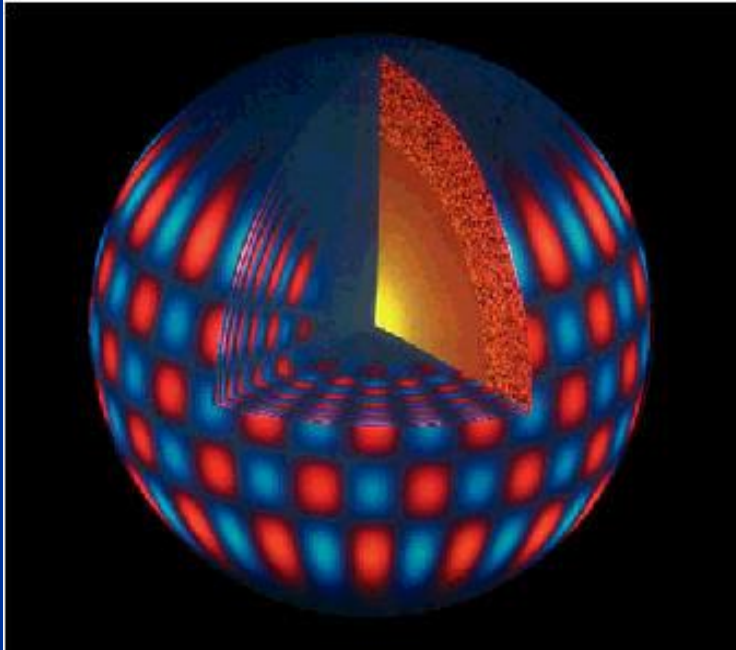
Фотография Солнца



- Фотография короны Солнца получена 26.08.2019 в 05:41 в линии железа FeIX 171 Å инструментом AIA на борту спутника SDO
- Найти другие фотографии Солнца можно на сайте tesis.lebedev.ru в разделе «Космическая погода».

Модель гелиосейсмологии

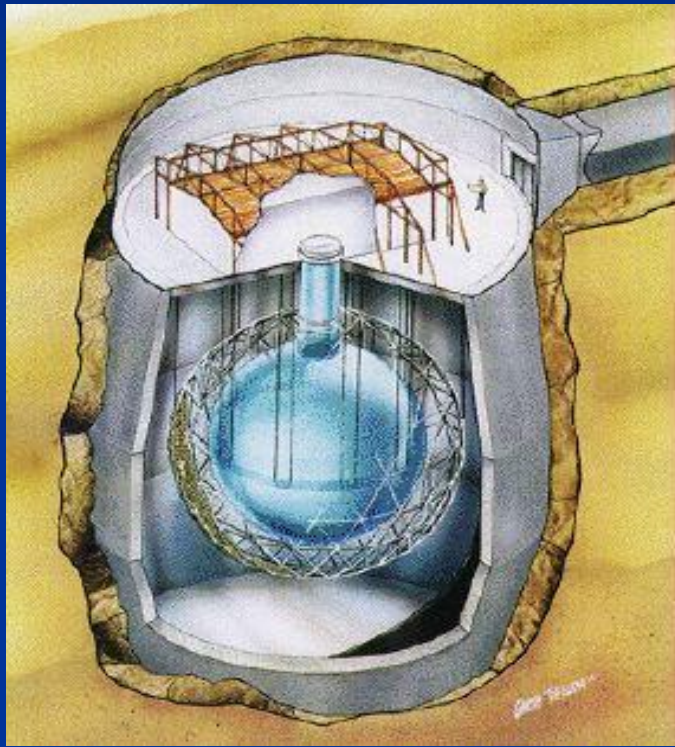
- Солнце мягко вибрирует тысячами способов (узоров). Один из них показан на изображении слева;
- Эти вибрации можно наблюдать, и мы можем использовать их для вывода внутренней структуры Солнца, проверяя, таким образом, существующие модели структуры Солнца. Этот процесс известен как гелиосейсмология;
- Подобные колебания можно наблюдать и в других звездах: астеросейсмология.



Визуализация солнечной вибрации
Источник: US National Optical Astronomy
Observatory



Модель солнечного нейтрино



- Ядерные реакции синтеза производят нейтрино;
- Они имеют очень малую массу и редко взаимодействуют с веществом;
- Их масса была обнаружена и измерена благодаря специальным обсерваториям. Полученные результаты согласуются с прогнозами, полученными в моделях.

Обсерватория нейтрино Садбери
Источник: Sudbury Neutrino Observatory



Продолжительность существования звёзд

- Продолжительность жизни звезды зависит от того, сколько ядерного топлива она имеет, и как быстро потребляет его;
- Звезды менее массивные, чем наше Солнце, являются наиболее распространенными. У них меньше топлива, но они потребляют его медленнее, поэтому живут дольше;
- Звезды более массивные, чем Солнце, встречаются реже. У них больше топлива, но быстрее идёт его потребление, поэтому они живут мало.



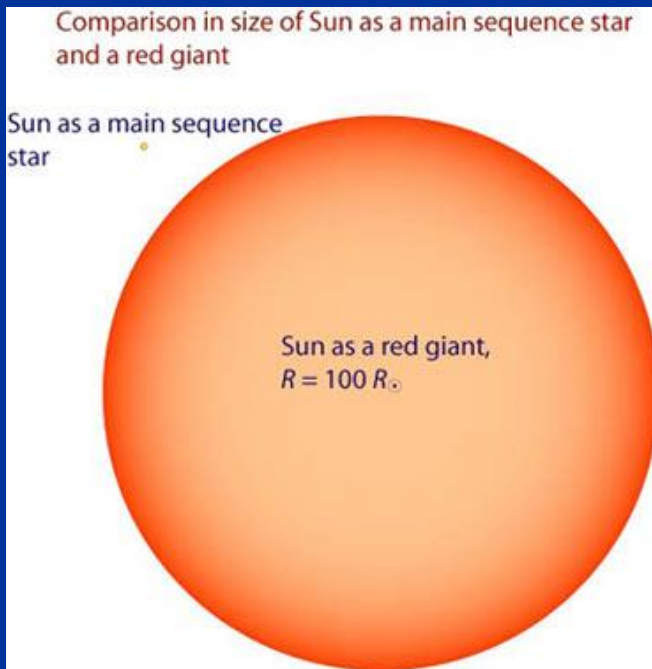
Откуда астрономы это знают?

- Наблюдая за звездами на различных этапах их жизни, и помещая их в последовательность логической эволюции.
- Создание моделей с помощью компьютеров, используя законы физики, и учет изменений в составе звезд, которые происходят из-за ядерного синтеза.
- Изучение звездных скоплений и/или групп звезд с разными массами, но с одинаковым возрастом.
- Посредством изучения переменных пульсирующих звезд, измерения медленных изменений периода пульсации, вызванных их эволюцией.



ЭВОЛЮЦИИ СОЛНЕПОДОБНЫХ ЗВЕЗД

- Солнцеподобные звезда почти не меняются в течение первых $\sim 90\%$ своей жизни, поскольку у нее достаточно топлива (водорода) для продолжения термоядерных реакций.



Сравнение размеров:
Солнце и красный гигант

- Когда водород истощается звезда расширяется в красного гиганта;
- Внутри ядра температура может увеличиться достаточно, чтобы начать производить энергию путем слияния гелия в углерод;
- Когда гелий заканчивается, звезда снова разбухает в еще больший красный гигант, в сотни раз больше Солнца.



Смерть солнцеподобных звёзд

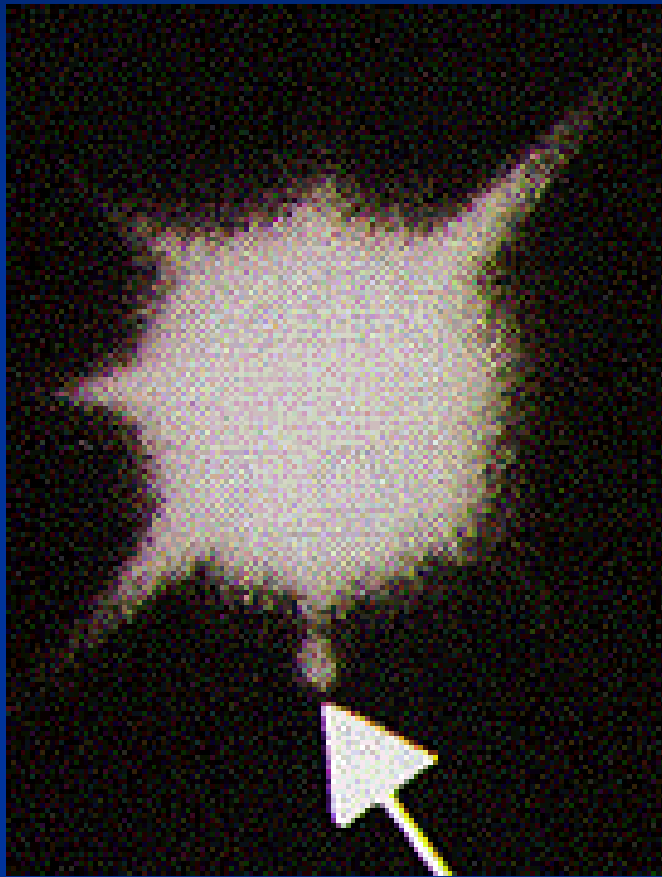


Планетарная туманность Улитка.
Источник: NASA

- Когда звезда становится красным гигантом, она начинает пульсировать (вибрировать).
- Пульсация вызывает разделение внешних слоев звезды, образуя красивую планетарную туманность
- Ядро звезды-карлик: белый, маленький и без топлива.



White dwarf

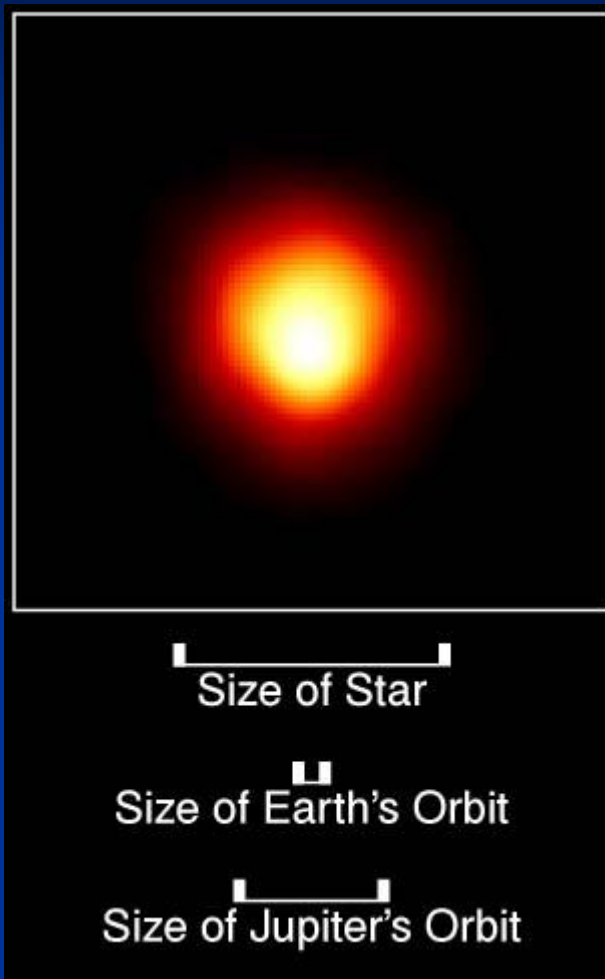


- Белый карлик представляет собой мертвое ядро солнцеподобной звезды с массой, подобной Солнцу, и объёмом, подобным Земле. В результате его плотность в миллион раз больше, чем у воды.
- В белом карлике центростремительная гравитационная сила уравновешивается внешним квантовым давлением электронов внутри него.

Белый карлик, как компонент
двойной звезды Сириус.
Источник: NASA



Эволюция массивных звёзд



- Массивные звезды живут несколько миллионов лет.
- Когда они израсходуют свое топливо, то разбухнут и станут красными сверхгигантами;
- Температура их ядра достаточно для производства тяжелых элементов, таких как железо.
- Бетельгейзе (слева), в созвездии Ориона, является ярко-красным сверхгигантом. Она намного больше, чем орбита Земли.

Бетельгейзе.

Источник: NASA/ESA/HST



Смерть массивных звёзд

- Когда ядро массивной звезды становится в основном железным, у него больше нет ядерного топлива для продолжения синтеза и оно больше не может оставаться горячим.
- Гравитация сжимает ядро, высвобождая огромное количество энергии и приводя звезду к взрыву сверхновой (слева).
- Сверхновые производят элементы тяжелее железа из которых позже образуются планеты и даже жизнь.



Крабовидная туманность — остатки взрыва сверхновой в 1054 году

Источник: NASA



Нейтронные звезды

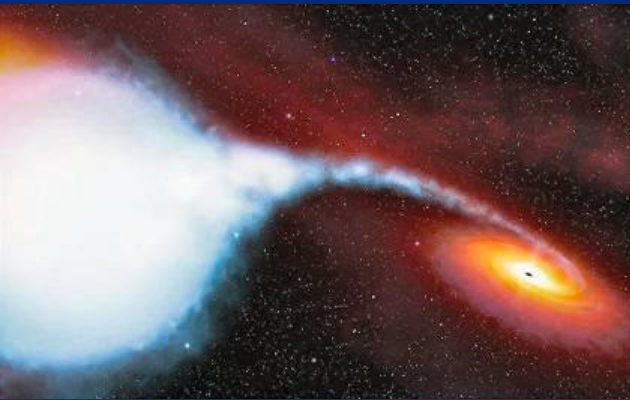


Нейтронная звезда (пульсар) в центре
Крабовидной туманности
Источник: Космический телескоп Хаббл

- Рождается в результате коллапса звезды от 1,5 до 3 раз больше массы Солнца коллапс.
- Диаметр около 10 км, плотность в триллионы раз больше, чем вода.
- Они состоят из нейтронов и более экзотических частиц.
- Молодые нейтронные звезды быстро вращаются и излучают в радиодиапазоне. Они также известны как пульсары.



Чёрные дыры



Лебедь X-1 в представлении художника:
видимая звезда (слева) с черной дырой (справа) в центре аккреционного диска.
Источник: NASA.

- Черная дыра-это астрономический объект, гравитация которого настолько сильна, что ничто не может вырваться из него, даже свет.
- Ядра необычайно массивных звезд (>30 масс Солнца) становятся черными дырами, когда их топливо заканчивается.
- Один из способов обнаружения черных дыр: когда видимая звезда вращается вокруг них (слева).

Частные случаи



Пара нормальных звезд (слева) и белый карлик с аккреционным диском крадет газ у компаньона (справа).
Источник: NASA

- Большинство погибших звёзд - белые карлики, черные дыры или нейтронные звезды – входят в двойную систему, второй компонент которой ещё "жив".
- Если газ из нормальной звезды попадает на погибшую звезду, вокруг неё может образоваться аккреционный диск (слева).
- Когда газ падает на звездный остаток, он может взорваться, что будет выглядеть как переменная звезда.

Рождение звёзд

- Звезды образуют молекулярные облака (туманности), состоящие из холодного газа и пыли.
- Межзвездная пыль и газ составляют около 10% материи в нашей Галактике.
- Наиболее близким и наглядным примером области звездообразования является туманность Ориона (слева), находящаяся на расстоянии около 1500 световых лет от нас.



Туманность Ориона
Источник: NASA



Межзвёздный газ



- Межзвездный газ (атомы или молекулы) может быть "подсвечен" ультрафиолетовым светом, идущим от соседней звезды, производя эмиссионную туманность (слева).
- Холодный газ между звездами, производит радиоволны, которые могут быть обнаружены с помощью радиотелескопов.
- 98% межзвездного газа состоит из водорода и гелия.

Туманность Ориона.
Источник: NASA



Межзвёздная пыль



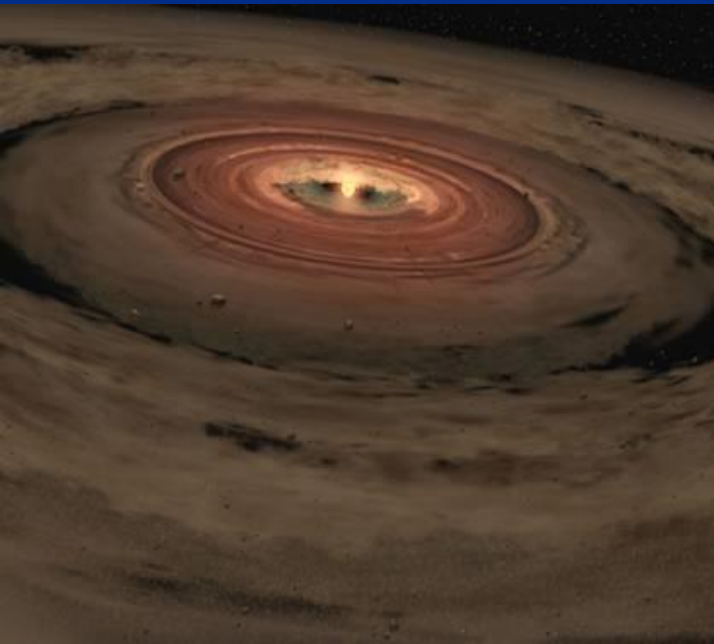
- Межзвездная пыль вблизи ярких звезд может быть обнаружена в видимой части спектра.
- Пыль может блокировать свет от звезд и газа позади (слева). В этих облаках образуются звезды.
- Частицы пыли имеют размер в несколько сотен нанометров.

M16

Источник: NASA/ESA/HST



Звёздообразование



Художественная концепция планетной системы в процессе формирования.
Источник: NASA

- Звезды образуются внутри туманности.
- Гравитация отвечает за притяжение ядер.
- Сохранение углового момента увеличивает вращение ядер, которые становятся сплюснутыми и в конечном итоге превращаются в диски.
- Звезды образуются в центре дисков. Планеты формируются в других частях диска.



Протопланетный диск



Протопланетный диск

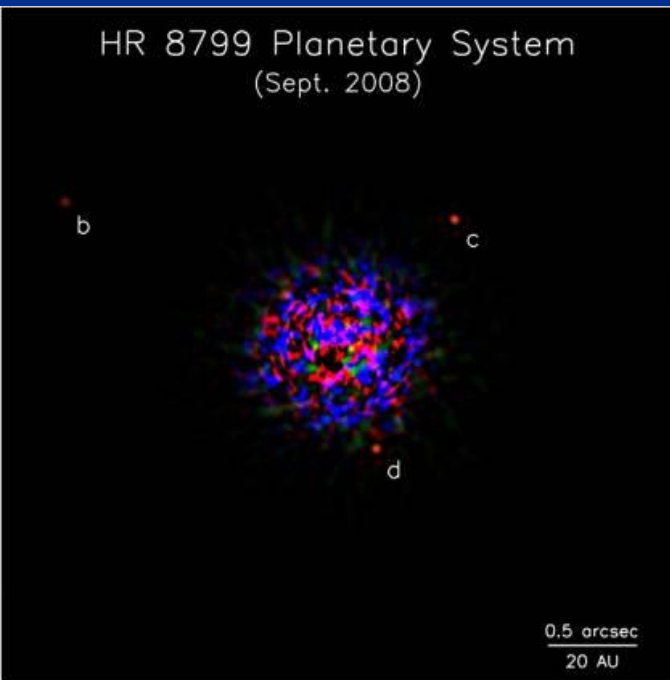
Источник: Космический телескоп Хаббл

- Протопланетные диски наблюдались в Туманности Ориона (слева)
- Звезда едва видна в центре диска.
- Диск пыли заблокировал свет, который находится позади.
- Эти и другие наблюдения дают прямое свидетельство формирования планетных систем.



Экзопланеты

- Экзопланеты обычно обнаруживаются и изучаются через гравитационное воздействие, которое они оказывают на звезду, или через затемнение света ее звезды, если происходит транзит.
- Очень немногие были обнаружены напрямую (слева).
- В отличие от планет нашей Солнечной системы, многие экзопланеты огромны и очень близки к своей звезде. Это позволяет астрономам проверять свои теории о том, как формируются планетные системы.



Экзопланета в системе HR 8799
Источник: С. Marois et al., NRC Canada



Подведём итоги

- "Гравитация управляет образованием, жизнью и смертью звезд" [профессор Р. Л. Бишоп]
- Процесс рождения звёзд объясняет происхождение нашей Солнечной системы и других планетных систем.
- Жизнь звезды объясняет источник энергии, благодаря которому жизнь на Земле стала возможной.
- Жизнь и смерть звезд производят химические элементы тяжелее водорода, из которых состоят звезды, планеты и жизнь.
- Во время смерти звезды гравитация производит самые загадочные объекты во Вселенной: белые карлики, нейтронные звезды и черные дыры.



**Спасибо вам
большое за ваше
внимание!**

