

Эволюция звёзд: рождение, жизнь и смерть

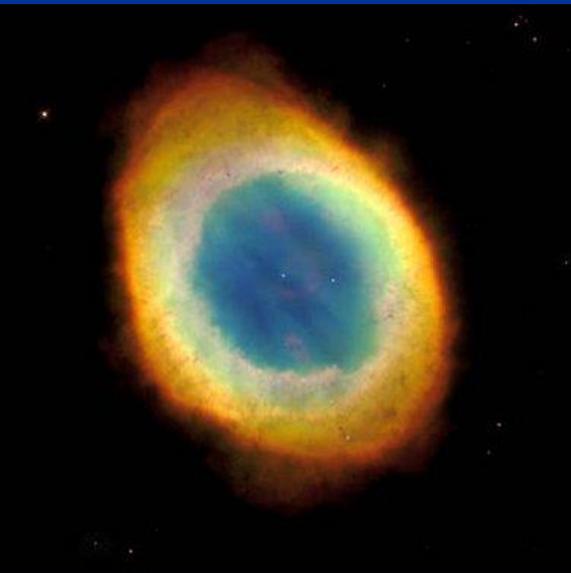
Джон Р. Перси

*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**

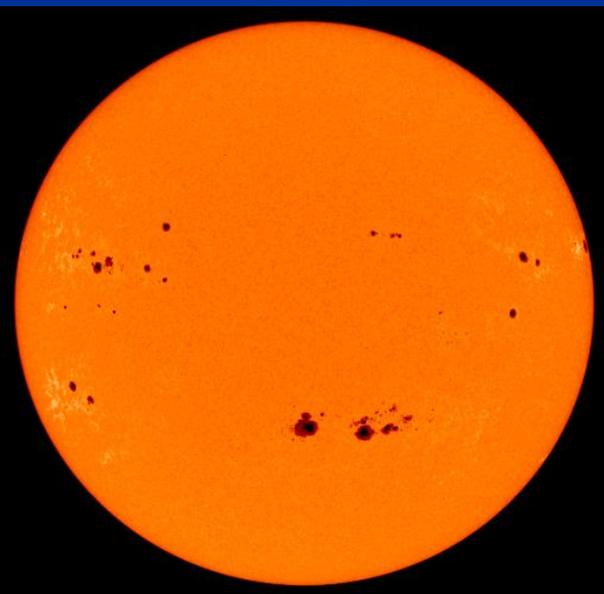
Вычислен через угловой размер и расстояние до Солнца

- **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.



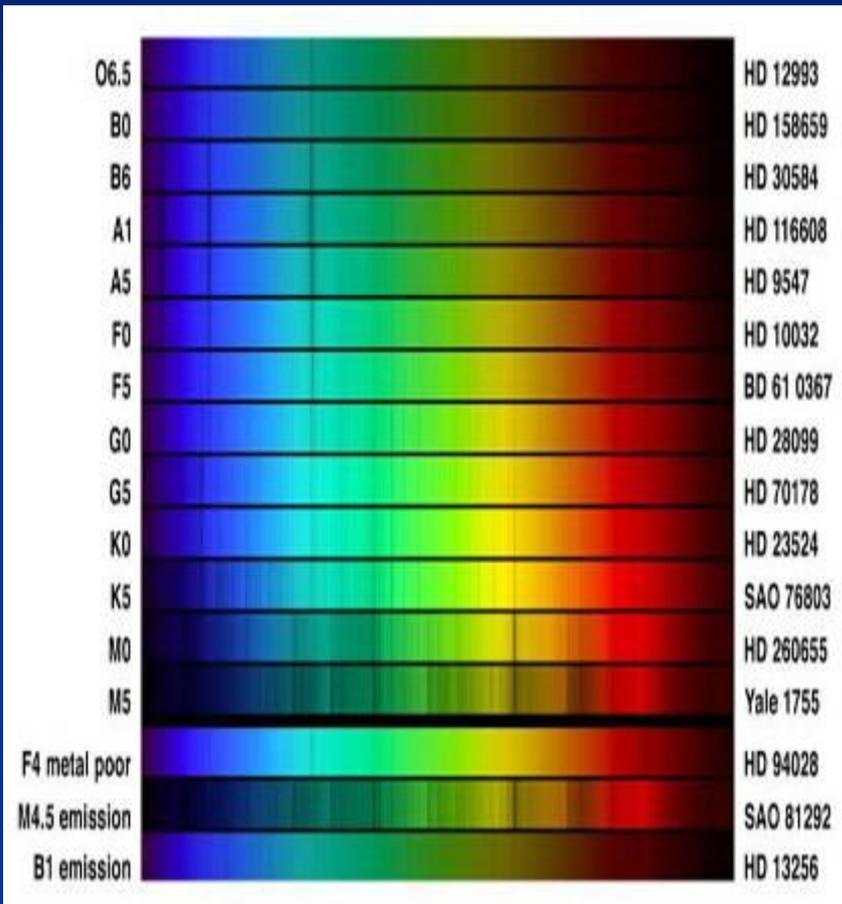
Созвездие Ориона

Источник: орбитальный телескоп Hubble



Спектр звёзд

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



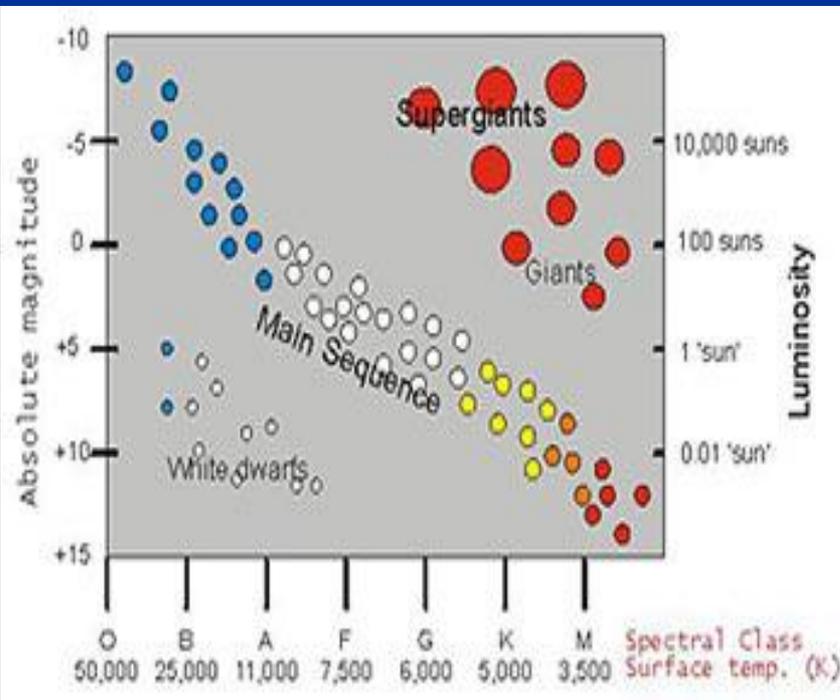
Спектры звёзд

Источник: Национальная обсерватория
оптической астрономии



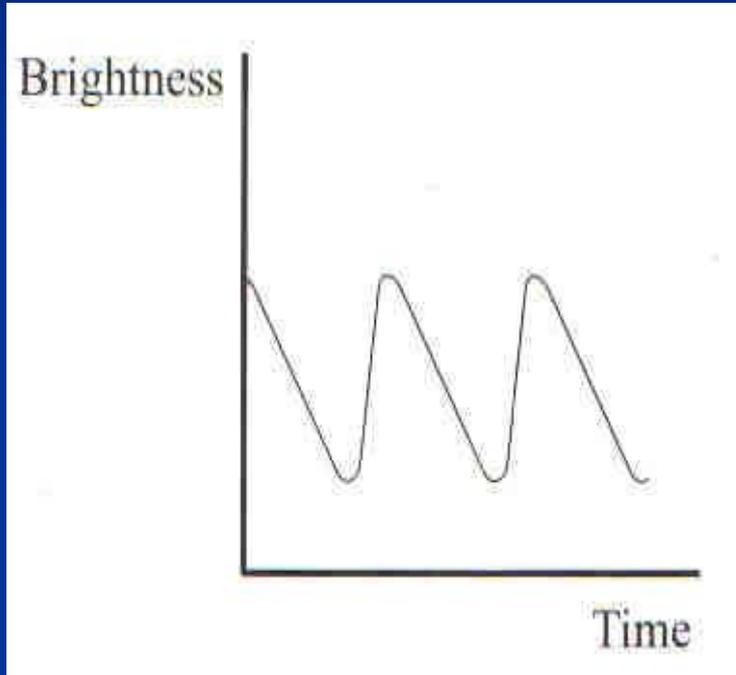
Диаграмма Герцшпрунга-Рассела (спектральный класс – светимость)

- 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.

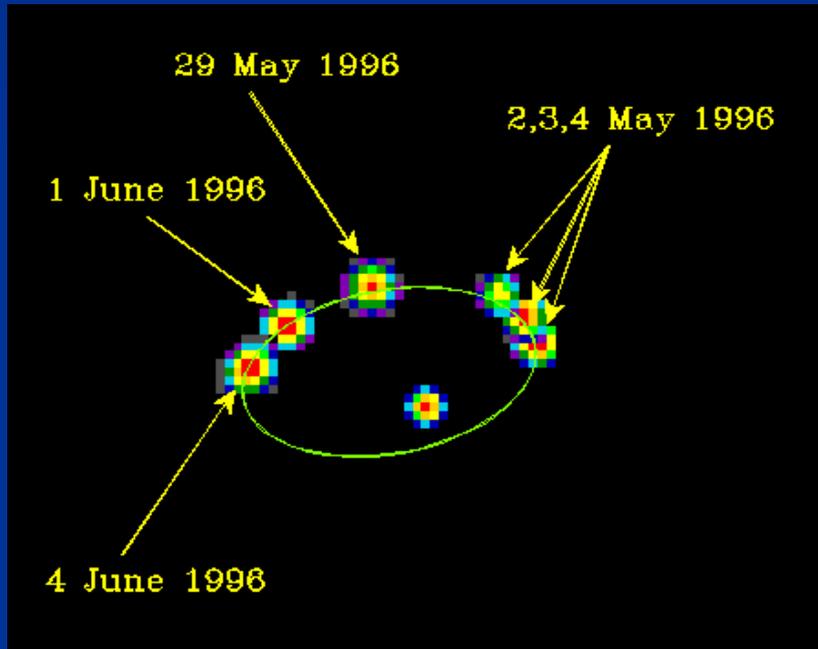
Переменные звёзды



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?



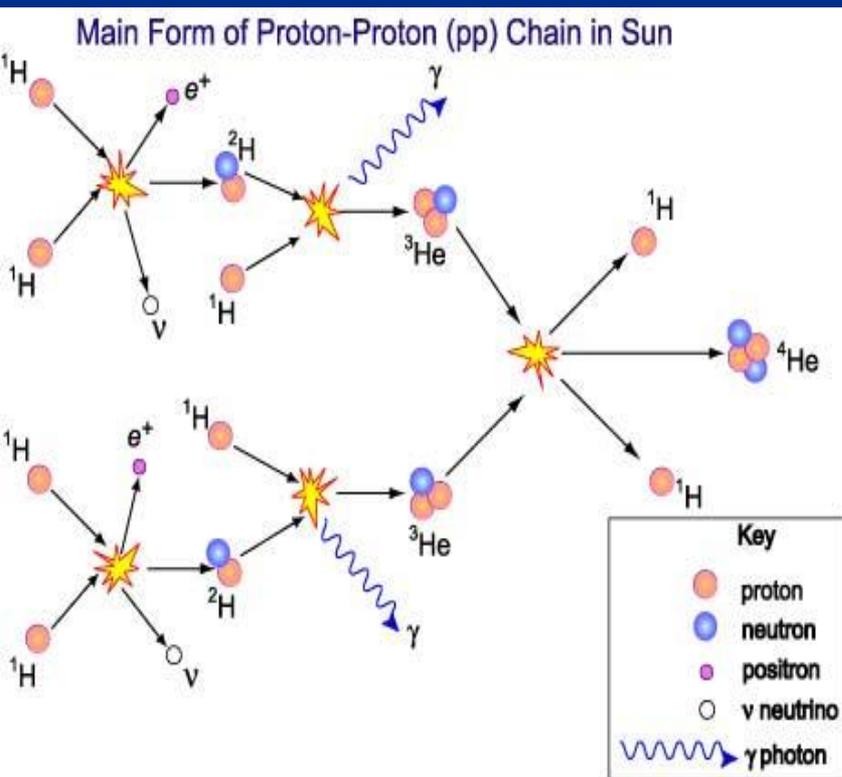
- Рассмотрим на примере воздушного шара;
- Атмосферное давление вдавливает шар внутрь, но он не сжимается из-за внутреннего давления;
- Гравитация стремится сжать Солнце, а внутреннее давление противостоит этому.

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.

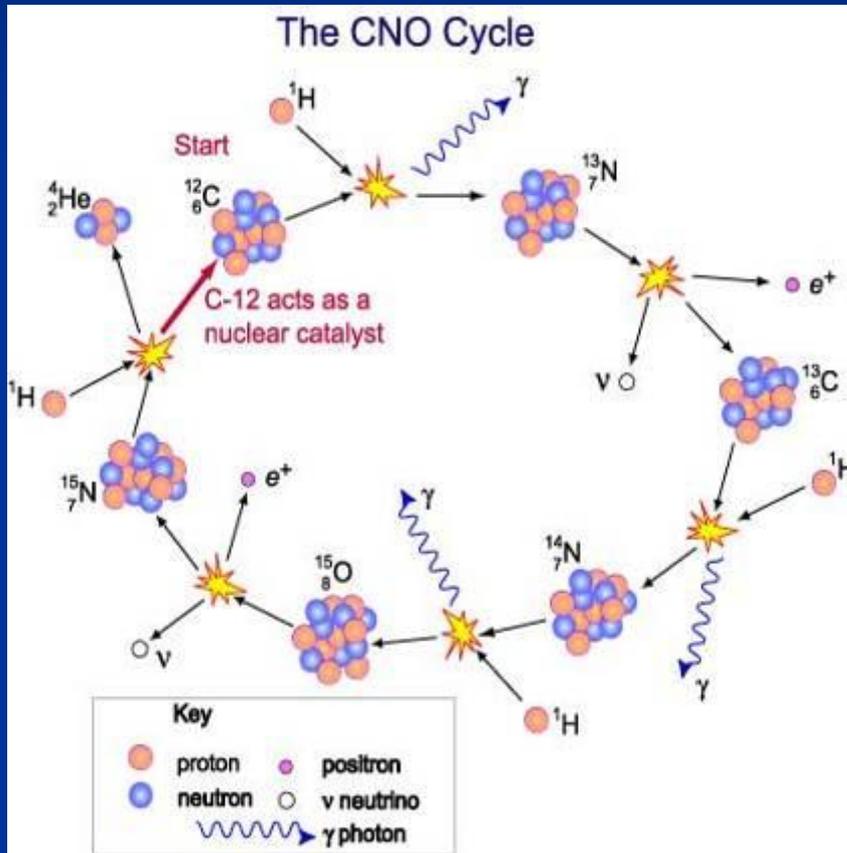
Протон-протонный цикл

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



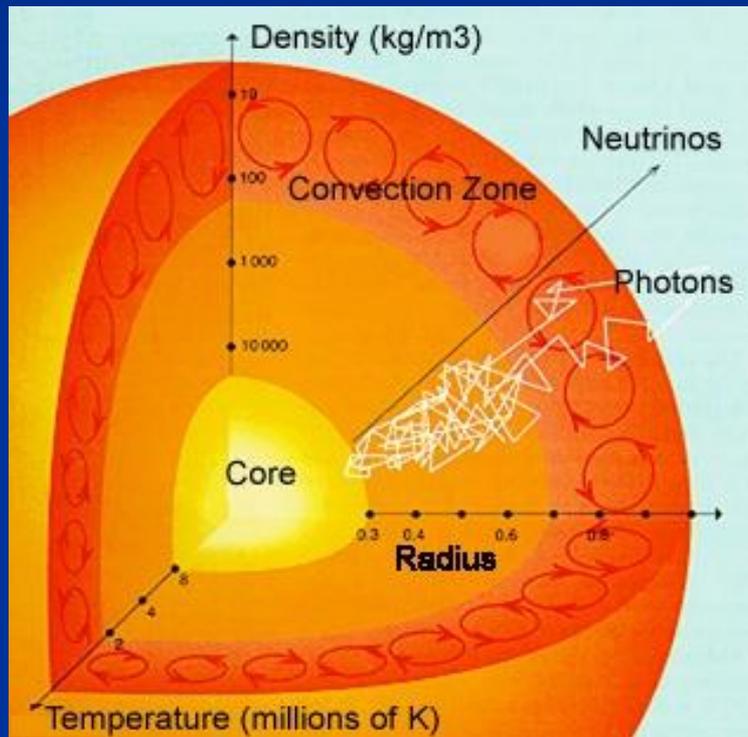
Создание моделей звёзд

- 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

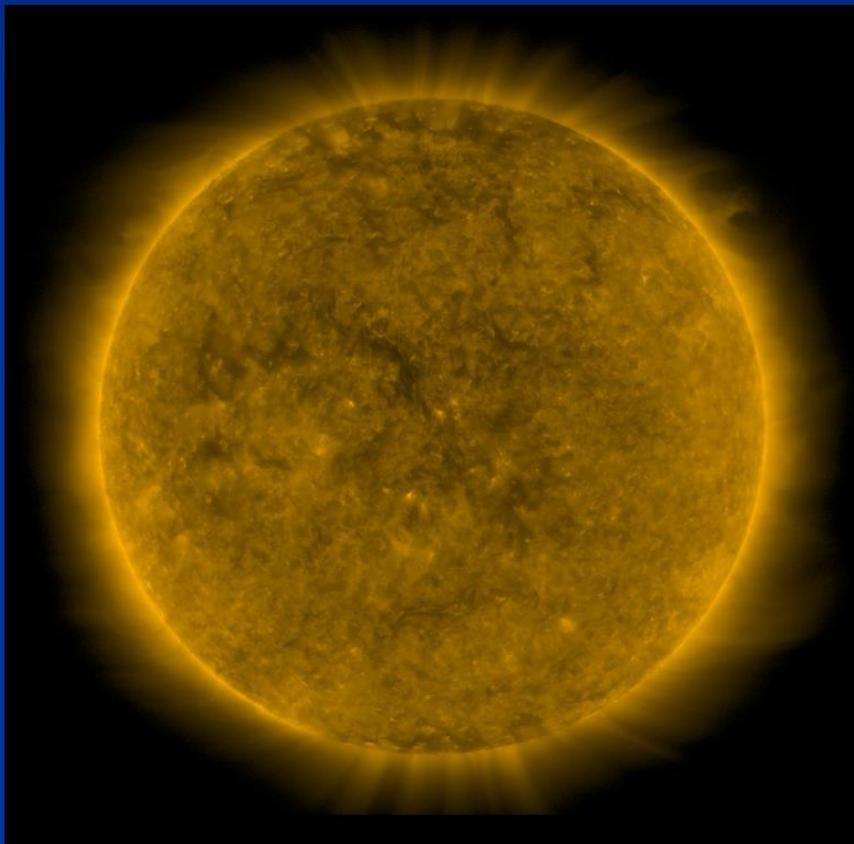


Модель Солнца

Источник: Institute of Theoretical Physics,
University of Oslo



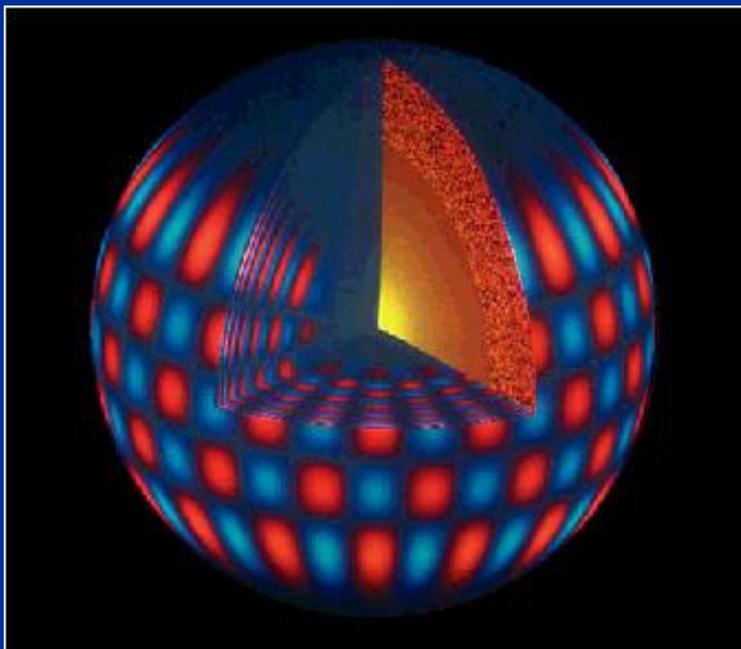
Фотография Солнца



- 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

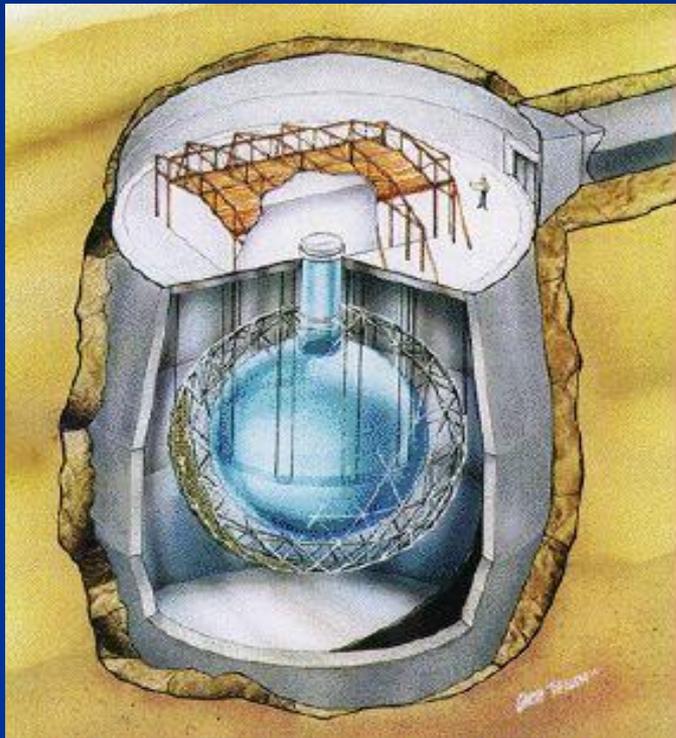
- Солнце мягко вибрирует тысячами способов (узоров). Один из них показан на изображении слева;
- Эти вибрации можно наблюдать, и мы можем использовать их для вывода внутренней структуры Солнца, проверяя, таким образом, существующие модели структуры Солнца. Этот процесс известен как гелиосейсмология;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



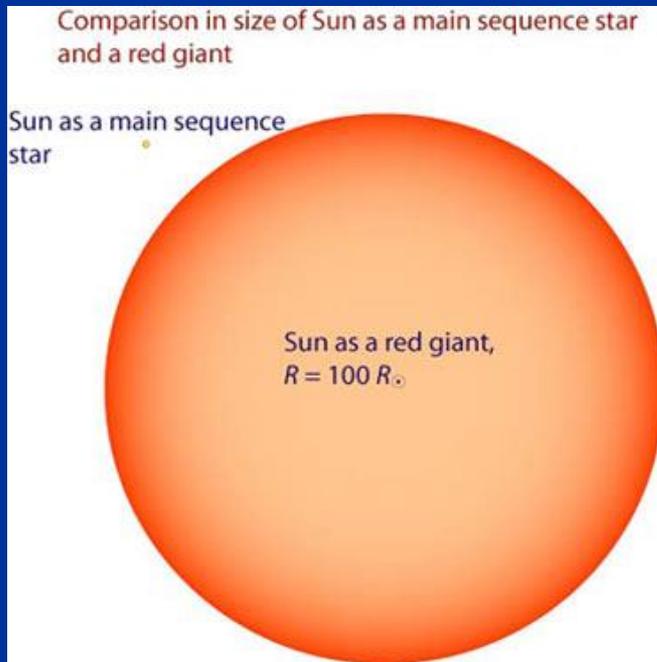
Откуда астрономы это знают?

- 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.



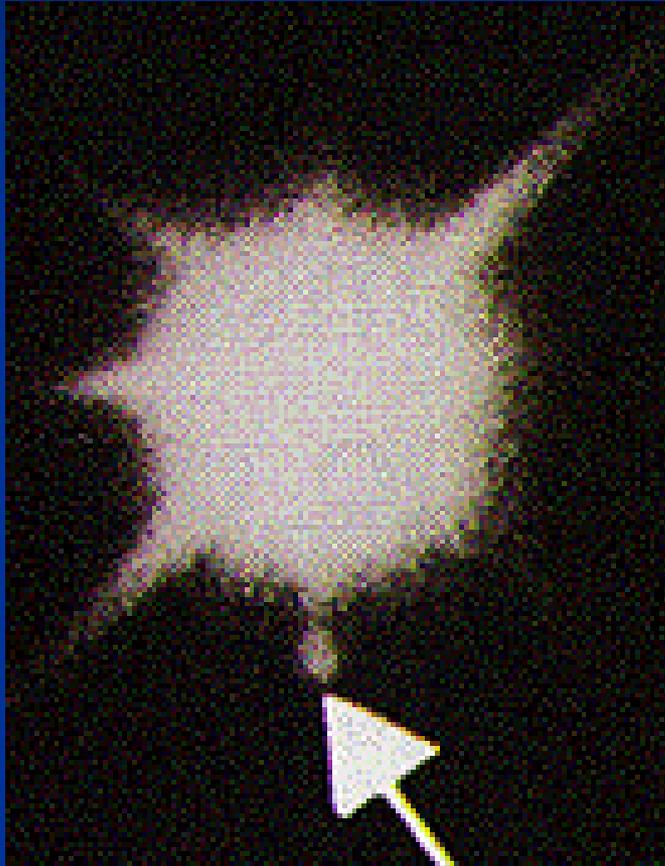
Смерть солнцеподобных звёзд



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

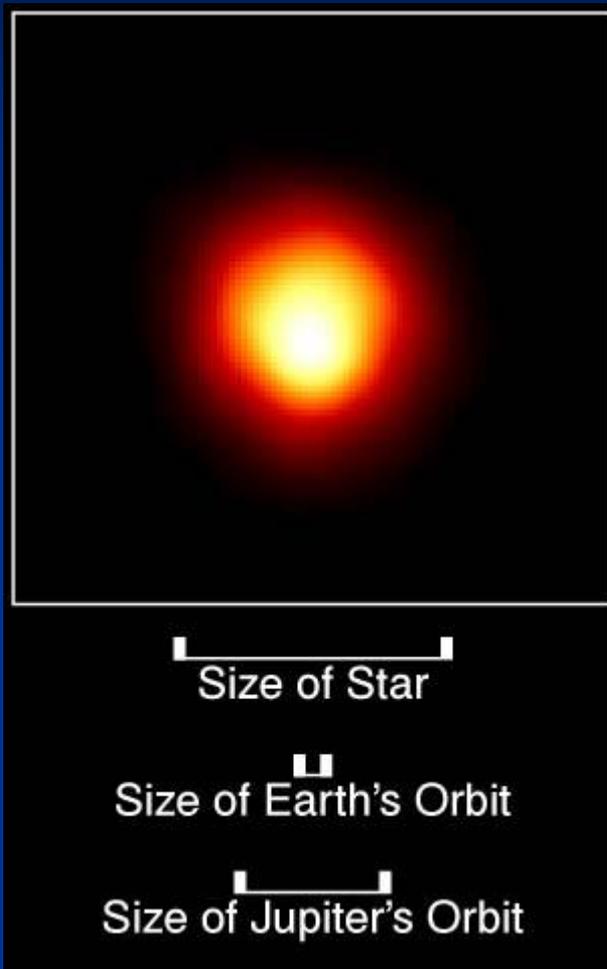


- Белый карлик представляет собой мертвое ядро солнцеподобной звезды с массой, подобной Солнцу, и объёмом, подобным Земле. В результате его плотность в миллион раз больше, чем у воды.
- В белом карлике центростремительная гравитационная сила уравновешивается внешним квантовым давлением электронов внутри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

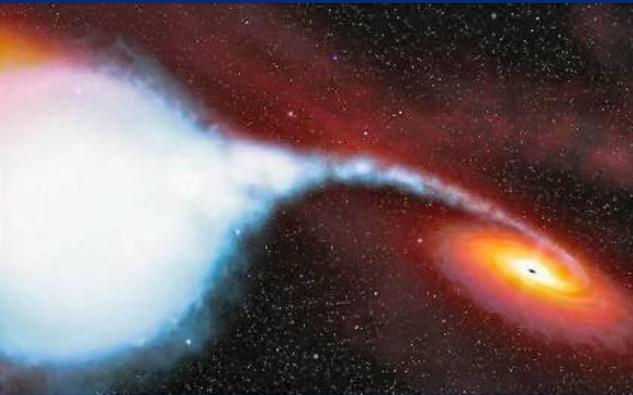


- Рождается в результате коллапса звезды от 1,5 до 3 раз больше массы Солнца коллапс.
- Диаметр около 10 км, плотность в триллионы раз больше, чем вода.
- Они состоят из нейтронов и более экзотических частиц.
- Молодые нейтронные звезды быстро вращаются и излучают в радиодиапазоне. Они также известны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

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



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



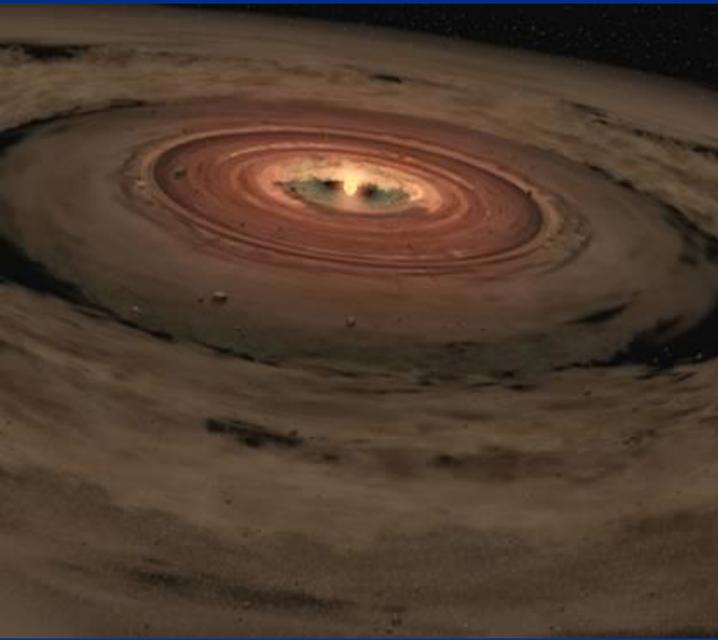
- Межзвездная пыль вблизи ярких звезд может быть обнаружена в видимой части спектра.
- Пыль может блокировать свет от звезд и газа позади (слева). В этих облаках образуются звезды.
- Частицы пыли имеют размер в несколько сотен нанометров.

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

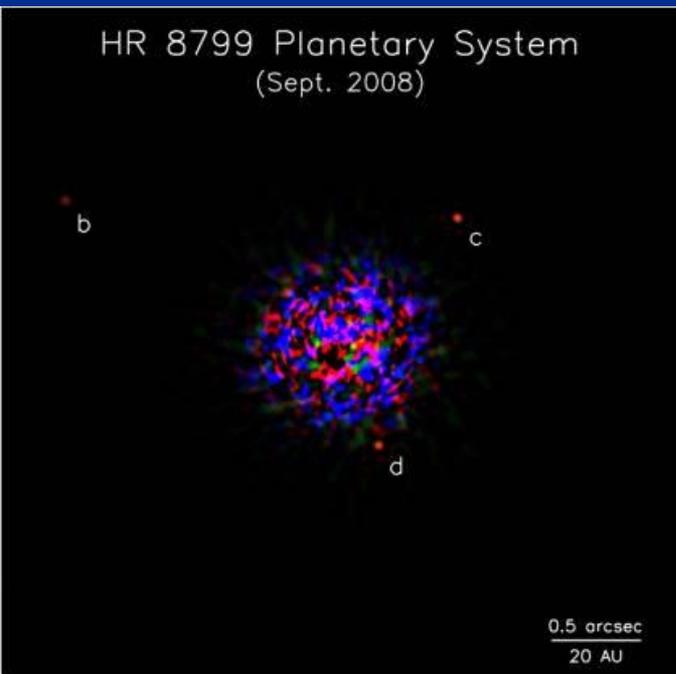
Источник: Космический телескоп Хаббл

- 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!**

