

# Эволюция Звезд

**Джон Перси**

Международный Астрономический Союз, Университет Торонто (Канада)

## Аннотация

Эта статья содержит полезную информацию о звездах и их эволюции для учителей Физики в средней школе. Она также включает ссылки на типичную школьную учебную программу по естествознанию и предлагает некоторые соответствующие занятия для учащихся.

## Цели

- Понять звездную эволюцию и процессы ее определяющие.
- Понять Диаграмму Герцшпрунга-Рассела.
- Понять систему абсолютной и видимой величин.

## Введение

Звездная эволюция означает изменения, которые происходят в звездах, от их рождения, через их долгую жизнь, до их смерти. Гравитация "заставляет" звезды излучать энергию. Гравитация "заставляет" звезды излучать энергию. Чтобы уравновесить эту потерю энергии, звезды производят энергию путем термоядерного синтеза более легких элементов в более тяжелые. При этом медленно изменяется их химический состав, а следовательно, и другие свойства. В конце концов у них кончается ядерное топливо, и они умирают. Понимание природы и эволюции звезд помогает нам понимать и ценить природу и эволюцию нашего собственного Солнца - звезды, которая делает возможной жизнь на Земле. Оно помогает нам понять происхождение нашей Солнечной системы, а также атомов и молекул, из которых состоит все, включая жизнь. Оно помогает нам ответить на такие фундаментальные вопросы, как " производят ли достаточно энергии другие звезды, и живут ли оно достаточно долго, и остаются ли они достаточно стабильными, так что жизнь могла бы зародиться и развиваться на планетах вокруг них?" По этим и другим причинам звездная эволюция является интересной темой для студентов.

## Свойства Солнца и Звезд

Первый шаг к пониманию происхождения и эволюции Солнца и звезд - это понимание их свойств. Учащиеся должны понять, как определяются эти свойства. Солнце - ближайшая звезда. Солнце обсуждалось и в других лекциях этой серии. В этой статье мы рассмотрим Солнце, так как оно связано со звездной эволюцией. Студенты должны понимать свойства, структуру и источник энергии Солнца, потому что те же принципы позволяют астрономам определять структуру и эволюцию всех звезд.

## Солнце

Основные свойства Солнца относительно легко определить по сравнению со свойствами других звезд. Его среднее расстояние, равное  $1.495978715 \times 10^{11}$  м, мы называем *одной Астрономической Единицей*. Исходя из этого, его наблюдаемый угловой радиус (959,63 угловых сек.) может быть преобразован геометрией в линейный радиус:  $6.96265 \times 10^8$  м или 696,265 км. Наблюдаемый поток Солнечного излучения ( $1,370 \text{ Вт/м}^2$ ) на расстоянии Земли может быть преобразован в полную мощность:  $3.85 \times 10^{26}$  Вт.

Его массу можно определить по гравитационному притяжению планет, используя Ньютоновские законы движения и тяготения:  $1,9891 \times 10^{30}$  кг. Температура излучающей поверхности - слой, из которого исходит его свет - 5780 К. Его период вращения составляет примерно 25 дней, но изменяется в зависимости от широты на Солнце, и оно почти точно круглое. Оно состоит в основном из водорода и гелия. В занятии 2 учащиеся смогут наблюдать Солнце, нашу ближайшую звезду, чтобы увидеть, как выглядит звезда.

## Звезды

Наиболее очевидным наблюдаемым свойством звезды является ее видимая яркость. Она измеряется как *величина*, являющаяся логарифмической мерой потока энергии, который мы получаем.

Шкала магнитуд была разработана греческим астрономом Гиппархом (около 190-120 до н. э.). Он классифицировал звезды по величинам 1, 2, 3, 4 и 5. Вот почему более слабые звезды имеют более положительные величины. Позже было обнаружено, что, поскольку наши органы чувств логарифмически реагируют на раздражители, существует фиксированное *доля* яркости (2.512), соответствующая *разнице* в 1.0 по величине. Самая яркая звезда на ночном небе имеет магнитуду -1.44. Самая слабая звезда, видимая в самый большой телескоп, имеет магнитуду около 30.

Видимая яркость звезды  $V$  зависит от ее мощности  $P$  и расстояния  $D$  до нее. Согласно *закону обратных квадратов яркости*: яркость прямо пропорциональна мощности и обратно пропорциональна квадрату расстояния:  $V \cong P/D^2$ . Для ближайших звезд расстояние можно измерить с помощью *параллакса*. В Занятии 1 учащиеся могут сделать демонстрацию, чтобы продемонстрировать параллакс и показать, что параллакс обратно пропорционален расстоянию до наблюдаемого объекта. Мощность звезд затем может быть вычислена по измеренной яркости и закону обратных квадратов яркости.

Различные звезды имеют немного разный *цвет*; это легче всего увидеть, посмотрев на звезды Ригель (Бета Ориона) и Бетельгейзе (Альфа Ориона) в созвездии Ориона (рис. 1). В Занятии 3 учащиеся могут наблюдать звезды ночью и испытать чудо и красоту настоящего неба. Цвета звезд обусловлены различными температурами излучающих слоев звезд. Холодные звезды кажутся слегка красными; горячие звезды кажутся слегка голубыми. (Противоположно цветам, которые можно увидеть на краях горячей и холодной воды в вашей ванной комнате!) Из-за того, как наши глаза реагируют на цвет, красная звезда кажется красновато-белой, а голубая - голубовато-белой.

Цвет можно точно измерить с помощью фотометра с цветными фильтрами, а затем по цвету можно определить температуру.



Рис. 1: Созвездие Ориона. Бетельгейзе, верхняя левая звезда, холодная и поэтому выглядит красноватой. Денеб, нижняя правая звезда, горячая и поэтому выглядит голубоватой. Туманность Ориона видна под тремя звездами в середине созвездия.

Температуру звезды можно также определить по ее спектру - распределению цветов или длин волн в свете звезды (рис. 2). Этот рисунок демонстрирует красоту цветов света от звезд. Этот свет прошел через внешнюю атмосферу звезды, и ионы, атомы и молекулы в атмосфере удаляют определенные длины волн из спектра. Это приводит к появлению темных линий или отсутствию цветов в спектре (рис. 2). В зависимости от температуры атмосферы атомы могут быть ионизованными, возбужденными или объединенными в молекулы. Таким образом, наблюдаемое состояние атомов в спектре дает информацию о температуре.

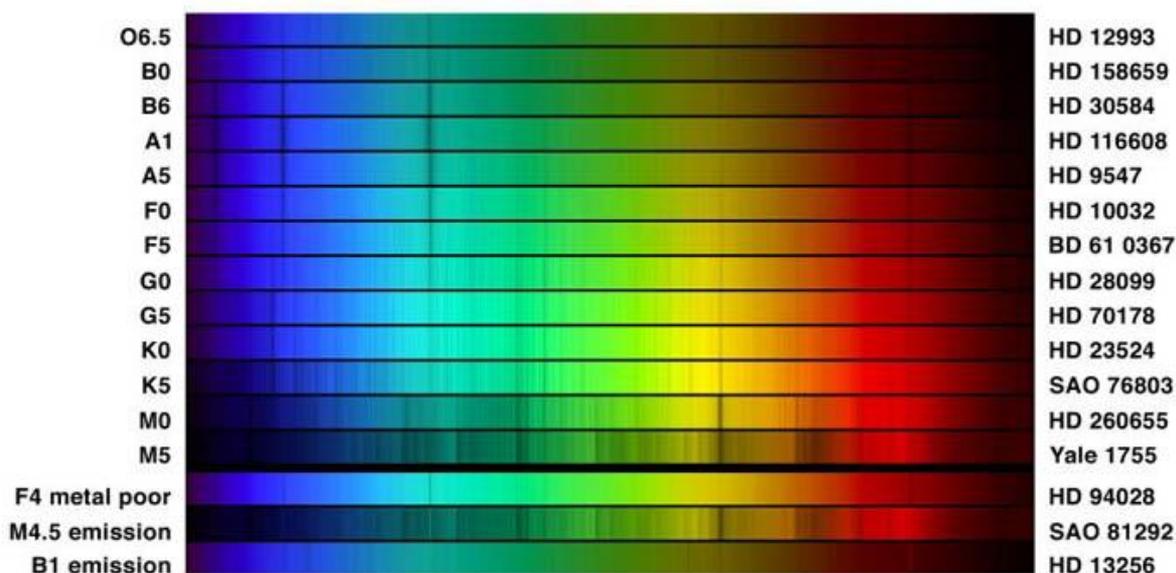


Рис. 2: Спектр многих звезд, от самых горячих (O6.5: верхняя) до самых холодных (M5: четвертая снизу). Спектры выглядят по-разному из-за разных температур звезд. Три нижних спектра принадлежат своеобразным в некотором роде звездам. Источник: Национальная Оптическая Астрономическая Обсерватория.

Столетие назад астрономы обнаружили важную связь между мощностью звезды и ее температурой: для большинства (но не для всех) звезд мощность больше для звезд с большей температурой. Позже выяснилось, что определяющим фактором была масса звезды: более массивные звезды более мощные и горячие. График зависимости мощности от температуры называется диаграммой Герцшпрунга-Рассела (рис. 3). Для учащихся очень важно научиться строить графики (Занятие 8) и интерпретировать их (рис. 3).

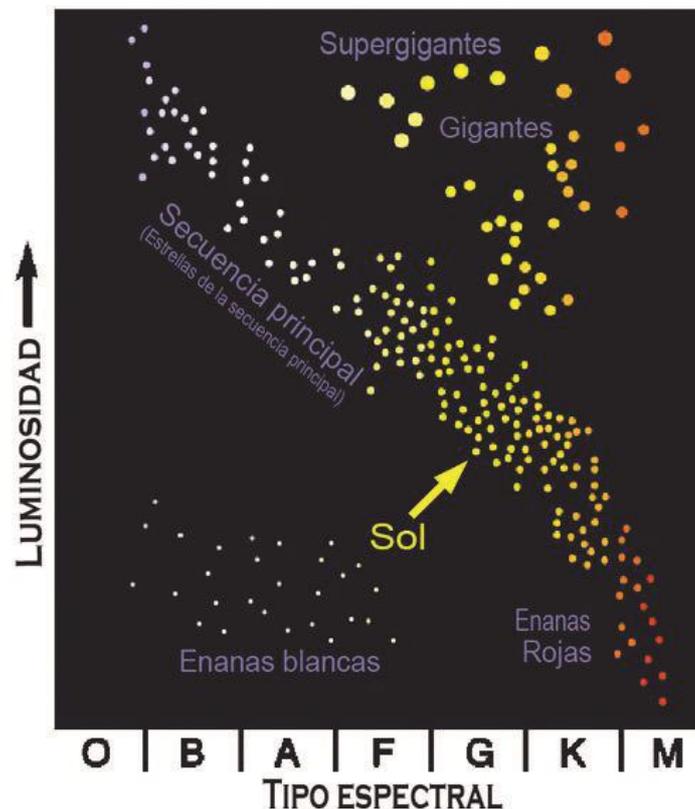


Рис. 3: Диаграмма Герцшпрунга-Рассела, график зависимости звездной величины или светимости от температуры звезд. По историческим причинам, температура возрастает влево. Буквы OBAFGKM – описательные спектральные типы связанные с температурой. Диагональные линии отражают радиус звезд; большие звезды (гиганты и сверхгиганты) находятся в верхнем правом углу, меньшие звезды (карлики) – в нижнем левом. Обратите внимание на главную последовательность идущую из нижнего правого угла в верхний левый. Большинство звезд находятся здесь. Массы звезд главной последовательности показаны. Расположения некоторых известных звезд также отмечены. Источник: Калифорнийский Университет в Беркли.

Одной из главных задач астрономии является определение мощностей звезд различных видов. Затем, если такая звезда наблюдается в другом месте во вселенной, астрономы могут использовать ее измеренную яркость  $B$  и предполагаемую мощность  $P$ , чтобы определить ее расстояние  $D$  по закону обратных квадратов яркости:  $B \cong P/D^2$ .

Спектры звезд (и туманностей) также показывают, из чего состоят звезды: кривая космического содержания (рис. 4). Они состоят примерно на 3/4 из водорода, на 1/4 из гелия и на 2% из более тяжелых элементов, в основном углерода, азота и кислорода.

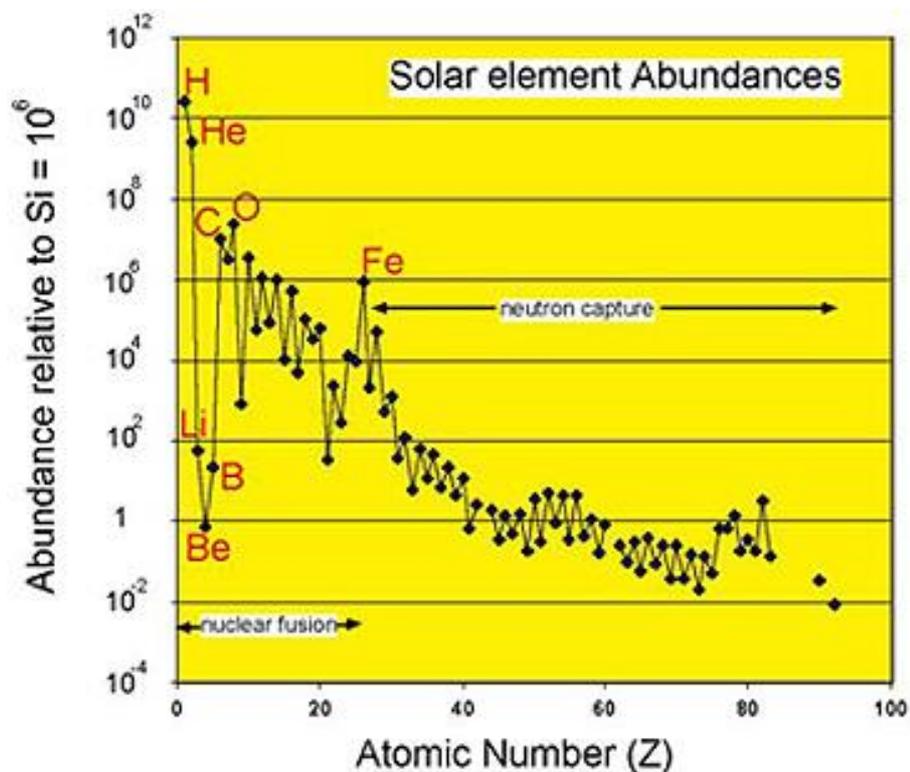


Рис. 4: Содержание элементов в Солнце и звездах. Водорода и Гелия наибольшее количество. Литий, бериллий, и бор имеют очень малое содержание. Углерода, азота, и кислорода много. Содержание других элементов сильно уменьшается с возрастанием атомного числа. Водород в  $10^{12}$  раз больше урана. Элементы с четным количеством протонов имеют более высокое содержание чем у элементов с нечетным количеством протонов. Элементы легче железа производятся за счет термоядерного синтеза в звездах. Элементы тяжелее железа производятся нейтронным захватом при взрывах сверхновых. Источник: НАСА.

Около половины звезд в окрестностях Солнца являются *двойными звездами* - две звезды движутся вокруг друг друга. Двойные звезды важны, потому что они позволяют астрономам измерять массы звезд. Массу одной звезды можно измерить, наблюдая за движением второй звезды, и наоборот. Сириус, Прокцион и Капелла являются примерами двойных звезд. Есть также *кратные звезды*: три или более звезд движущиеся друг вокруг друга. Альфа Центавра, ближайшая к Солнцу звезда, является тройной звездой. Эпсилон Лиры - это *четверная звезда*.

Как упоминалось выше, существует важное соотношение между мощностью звезды и ее массой: мощность пропорциональна примерно кубу массы. Это называется *зависимость масса — светимость*.

Массы звезд колеблются от 0.1 до 100 масс Солнца. Их мощности колеблются от 0.0001 до 1,000,000 мощностей Солнца. Самые горячие нормальные звезды около 50,000 К;

самые холодные - около 2,000 К. Когда астрономы исследуют звезды, они обнаруживают, что Солнце массивнее и мощнее, чем 95% всех остальных звезд в его окрестностях. Массивные, мощные звезды крайне редки. Солнце - это не средняя звезда. Оно выше среднего!

## Строение Солнца и Звезд

Строение Солнца и звезд определяется в первую очередь гравитацией. Гравитация заставляет текучее Солнце быть почти идеально сферическим. Глубоко в Солнце давление будет расти из-за веса слоев газа над ним. Согласно газовым законам, которые применимы к совершенному газу, плотность и температура также будут выше, если давление выше. Если более глубокие слои горячее, тепло будет течь наружу, потому что тепло всегда течет от горячего к менее горячему. Это может происходить за счет излучения или конвекции. Эти три принципа сводятся к зависимости масса — светимость.

Если тепло течет из Солнца, то более глубокие слои будут охлаждаться, и гравитация будет сжимать Солнце – если только не будет произведена энергия в центре Солнца. Оказывается так и есть, поскольку Солнце не сжимается, а удерживается радиационным давлением, создаваемым в процессе термоядерного синтеза, описанного ниже.

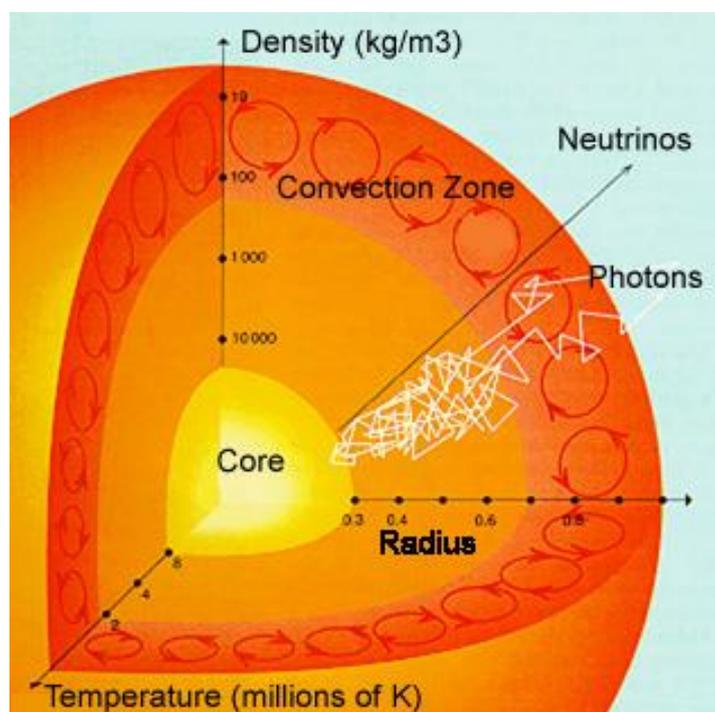


Рис. 5: Поперечное сечение Солнца, определенное из физических моделей. Во внешней конвективной зоне энергия передается конвекцией; под ней передается излучением. Энергия производится в ядре. Источник: Институт Теоретической Физики, Университет Осло.

Эти четыре простых принципа применимы ко всем звездам. Они могут быть выражены в виде уравнений и решены на компьютере. Это дает модель Солнца или любой звезды:

давление, плотность, и поток энергии на любом расстоянии от центра звезды. Это основной метод, с помощью которого астрономы изучают строение и эволюцию звезд. Модель строится для конкретной предполагаемой массы и состава звезды; и по ней астрономы могут предсказать радиус звезды, мощность и другие наблюдаемые свойства. (рис. 5).

Астрономы недавно разработали очень мощный метод проверки своих моделей строения Солнца и звезд - *гелиосейсмологию* или, для других звезд, *астеросейсмологию*. Солнце и звезды тихонько вибрируют в тысячах различных паттернах или режимах. Их можно пронаблюдать с помощью чувствительных инструментов и сравнить со свойствами вибраций, которые были бы предсказаны в моделях.

## Источник Энергии Солнца и Звезд

На протяжении многих веков ученые задавались вопросом об источнике энергии Солнца и звезд. Наиболее очевидным источником является химическое сжигание топлива, такого как нефть или природный газ, но из-за очень высокой мощности Солнца ( $4 \times 10^{26}$  Вт) этот источник длился бы всего несколько тысяч лет. Но еще несколько столетий назад люди думали, что возраст Земли и Вселенной составляет всего несколько тысяч лет, потому что именно так, казалось, говорит Библия!

После работы Исаака Ньютона, который разработал Закон Всемирного Тяготения, ученые поняли, что Солнце и звезды могут генерировать энергию путем медленного сжатия. Гравитационная (потенциальная) энергия будет преобразована в тепло и излучение. Этого источника энергии хватило бы на несколько десятков миллионов лет. Геологические данные, однако, предполагали, что Земля, а следовательно, и Солнце, были намного старше этого.

В конце 19-го века ученые обнаружили радиоактивность, или атомный распад. Радиоактивные элементы, однако, очень редки в Солнце и звездах, и не могли обеспечить их энергией в течение миллиардов лет.

Наконец, в 20-м веке ученые поняли, что легкие элементы могут сливаться в более тяжелые элементы, процесс, называемый ядерным синтезом. Если температура и плотность были бы достаточно высокими, то произвелось бы большое количество энергии - более чем достаточно, чтобы питать Солнце и звезды. Элемент с наибольшей потенциальной энергией слияния был водородом, а водород является самым распространенным элементом в Солнце и звездах.

В маломассивных звездах, таких как Солнце, синтез водорода происходит в серии реакций, называемых pp-циклом. Протоны сливаются, образуя дейтерий. Другой протон сливается с дейтерием, образуя гелий-3. Ядра гелия-3 сливаются с образованием гелия-4, нормального изотопа гелия (рис. 6).

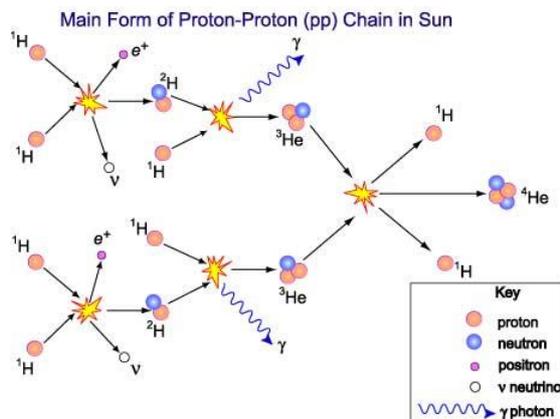


Рис. 6: Протон-протонный цикл, в ходе которого водород превращается в гелий в Солнце и других звездах низкой массы. На этом и следующем рисунке, заметьте что нейтрино ( $\nu$ ) выделяются в некоторых реакциях. Энергия выделяется в форме гамма лучей ( $\gamma$ -лучи) и кинетической энергии ядра. Источник: Австралийский Национальный Телескоп.

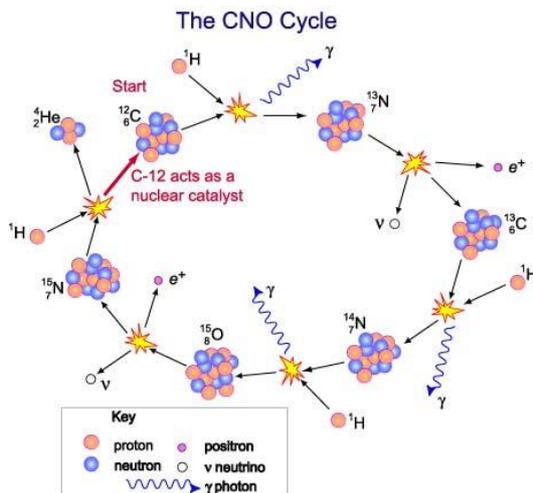


Рис. 7: CNO-цикл, в ходе которого водород превращается в гелий в звездах с массой больше Солнечной. Углерод-12 ("начало") действует как катализатор; участвует в процессе, не будучи израсходованным сам по себе. Источник: Австралийский Национальный Телескоп.

В массивных звездах водород превращается в гелий через другую серию реакций, называемую CNO-циклом, в котором углерод-12 используется в качестве катализатора (рис. 7). В конечном результате в каждом случае четыре ядра водорода сливаются, образуя одно ядро гелия. Небольшая часть массы ядер водорода преобразуется в энергию; см. Занятие 9. Так как ядра обычно отталкиваются друг от друга из-за их положительных зарядов, слияние происходит только в том случае, если ядра сталкиваются энергично (высокая температура) и часто (высокая плотность).

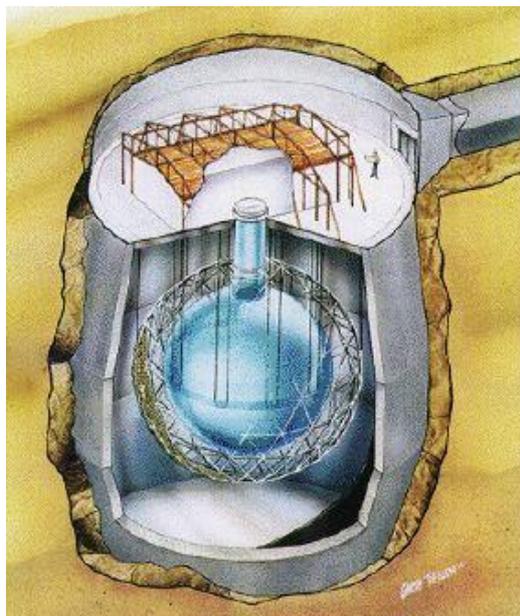


Рис. 8: Детектор SNO, где ученые подтвердили модели термоядерного синтеза в Солнце наблюдая предсказанный поток нейтрино. Сердцем обсерватории является большой резервуар с тяжелой водой. Ядро дейтерия (см. текст) периодически взаимодействует с нейтрино и производит наблюдаемую вспышку света. Источник: Нейтринная Обсерватория в Садбери.

Если ядерный синтез питает Солнце, тогда термоядерные реакции должны производить большое количество субатомных частиц, называемых нейтрино. Они обычно проходят сквозь материю, не взаимодействуя с ней. Каждую секунду через наши тела проходят миллиарды нейтрино. Специальные "нейтринные обсерватории" могут обнаружить несколько таких нейтрино. Первые нейтринные обсерватории обнаружили лишь треть от предсказанного числа нейтрино. Эта "проблема Солнечных нейтрино" продолжалась более 20 лет, но в конечном итоге была решена Нейтринной Обсерваторией в Садбери (SNO) в Канаде (рис. 8). Сердцем обсерватории был большой резервуар с тяжелой водой - водой, в которой некоторые ядра водорода являются дейтерием. Эти ядра случайно поглощают нейтрино и испускают вспышку света. Существует три типа нейтрино. Две трети Солнечных нейтрино превращались в другие типы. SNO чувствителен ко всем трем типам нейтрино и обнаружил полное число нейтрино, предсказанное теорией.

## Жизни Солнца и Звезд:

Поскольку "научный метод" является такой фундаментальной концепцией в преподавании науки, мы должны начать с объяснения того, как астрономы понимают эволюцию звезд:

- с помощью компьютерного моделирования, основанного на законах физики, как описано выше;
- наблюдая за звездами на небе, которые находятся на различных стадиях эволюции, и помещая их в логическую "эволюционную последовательность";
- наблюдая звездные скопления: группы звезд, которые сформировались из одного облака газа и пыли в одно время, но с разными массами. В нашей галактике есть тысячи звездных скоплений, в том числе около 150 *шаровых скоплений*, которые являются одними из самых старых объектов в нашей галактике. Гиады, Плеяды и

большинство звезд Большой Медведицы - это скопления, которые можно увидеть невооруженным глазом. Скопления - это "эксперименты природы": группы звезд, образованные из одного материала в одном месте в одно время. Их звезды отличаются только массой. Поскольку разные скопления имеют разный возраст, мы можем видеть, как совокупность звезд разной массы появляется в разном возрасте после их рождения.

- путем непосредственного наблюдения быстрых стадий эволюции; это будет очень редко, потому что они делятся лишь очень малую часть жизни звезд;
- путем изучения изменений периодов пульсирующих переменных звезд. Эти изменения малы, но заметны. Периоды этих звезд зависят от радиуса звезды. Поскольку радиус изменяется из-за эволюции, период также будет меняться. Изменение периода может быть измерено с помощью систематических, длительных наблюдений звезд.

Первый метод, использование компьютерного моделирования, был тем же самым методом, который использовался для определения *строения* звезды. Как только строение звезды известно, мы знаем температуру и плотность в каждой точке звезды, и мы можем вычислить, как химический состав будет меняться происходящими термоядерными процессами. Эти изменения в составе могут быть затем включены в следующую модель в эволюционной последовательности.

Самые известные пульсирующие переменные звезды называются Цефеидами, в честь звезды Дельта Цефея, которая является ярким примером. Существует зависимость между периодом изменения Цефеиды и ее мощностью. Измеряя период, астрономы могут определить мощность, а следовательно, и расстояние, используя закон обратных квадратов яркости. Цефеиды являются важным инструментом для определения размерных и возрастных масштабов Вселенной.

В Занятии 5 учащиеся могут наблюдать переменные звезды с помощью таких проектов, как Citizen Sky. Это позволит им развить различные научные и математические навыки, занимаясь настоящей наукой и, возможно, даже внести свой вклад в астрономические знания.

## Жизнь и Смерть Солнца и Звезд

Синтез водорода - очень эффективный процесс. Он поддерживает светимость звезд на протяжении всех их долгих жизней. Термоядерные реакции протекают быстрее всего в центре звезды, где температура и плотность наиболее высокие. Таким образом, звезда развивает ядро из гелия, которое постепенно расширяется от центра. Когда это происходит, ядро звезды должно стать более горячим, сжавшись, так что водород вокруг ядра гелия будет достаточно горячим, чтобы слиться. Это приводит к тому, что внешние слои звезды расширяются - сначала медленно, но затем все быстрее. Она становится красным гигантом, в сотни раз больше Солнца. Наконец, центр гелиевого ядра становится достаточно горячим, чтобы гелий превращался в углерод. Этот синтез уравнивает внутреннее толчок гравитации, но ненадолго, потому что синтез гелия не так эффективен, как синтез водорода. Теперь углеродное ядро сжимается, чтобы стать более горячим, а внешние слои звезды расширяются, чтобы стать еще большим красным

гигантом. Самые массивные звезды расширяются до еще больших размеров; они становятся *красными сверхгигантами*.

Звезда умирает, когда у нее кончается топливо. Больше нет источника энергии, который поддерживал бы внутреннюю часть звезды горячей и создавал бы достаточное давление газа, чтобы остановить гравитацию от сжатия звезды. Тип смерти зависит от массы звезды.

Продолжительность жизни звезды также зависит от ее массы: маломассивные звезды имеют низкие светимости и очень длинные времена жизни - десятки миллиардов лет. Звезды с большой массой имеют очень высокие светимости и очень короткие времена жизни - миллионы лет. Большинство звезд имеют очень маломассивны, и их времена жизни превышают нынешний возраст Вселенной.

Прежде чем звезда умирает, она теряет массу. Когда она использует остатки своего водородного топлива, а затем гелиевого топлива, она раздувается в красного гиганта, более чем в сто раз большую по радиусу и более чем в миллиард раз большую по объему, чем Солнце. В Занятии 4 учащиеся могут сделать масштабную модель, чтобы визуализировать огромные изменения в размере звезды по мере ее эволюции. Гравитация во внешних слоях красного гиганта очень низкая. Также она становится неустойчивой к пульсации, ритмичному расширению и сжатию. Из-за большого размера красного гиганта на каждый цикл пульсации уходят месяцы, а то и годы. Это вытесняет внешние слои звезды в пространство, образуя красивую, медленно расширяющуюся *планетарную туманность* вокруг умирающей звезды (рис. 9). Газы в планетарной туманности возбуждаются до флуоресценции ультрафиолетовым светом от горячего ядра звезды. В конце концов, они будут удаляться от звезды и соединяться с другими газами и пылью, образуя новые туманности, из которых будут рождаться новые звезды.



Рис. 9: Туманность Улитка, планетарная туманность. Газы в туманности были выброшены звездой во время ее фазы эволюции как красный гигант. Ядром звезды является горячий белый карлик. Его можно увидеть, слабо, в центре туманности.. Источник: НАСА.

Жизни массивных звезд немного отличаются от жизней маломассивных звезд. В маломассивных звездах энергия переносится наружу из ядра излучением. В ядре массивных звезд энергия переносится конвекцией, поэтому ядро звезды полностью перемешано. По мере того как в ядре расходуется последний бит водорода, звезда очень быстро превращается в красного гиганта. В случае маломассивных звезд переход более плавный.

Масса звезд должна быть больше 0.08 масс Солнца. В противном случае они не будут достаточно горячими и плотными в своих центрах, чтобы водород мог синтезировать. Самые массивные звезды имеют массу, равную примерно ста массам Солнца. Более массивные звезды были бы настолько мощными, что их собственное излучение не позволило бы им образоваться и оставаться стабильными.

### Обычные, Маломассивные Звезды

В звездах с начальной массой меньше примерно восьми масс Солнца, потеря массы оставляет ядро меньше 1.4 масс Солнца. В этом ядре нет термоядерного топлива. Внутренний толчок гравитации уравнивается внешним давлением электронов. Они сопротивляются любому дальнейшему сжатию из-за принципа Паули - закона квантовой теории, который утверждает, что существует предел числа электронов, которые могут существовать в данном объеме. Это ядро называется *белым карликом*. Массы белых карликов меньше 1.44 масс Солнца. Это называется *пределом Чандрасекара*, потому что Индо-Американский астроном и нобелевский лауреат Субраманьян Чандрасекар показал, что белый карлик, более массивный, чем этот, разрушится под собственным весом.

Белые карлики - это нормальные конечные пункты звездной эволюции. Они очень распространены в нашей галактике. Но их трудно увидеть: они не больше Земли, поэтому, хотя они горячие, у них очень мало излучающей площади. Их мощности в тысячи раз меньше, чем у Солнца. Они излучают только потому, что они горячие объекты, медленно охлаждающиеся по мере того, как они излучают свою энергию. Вокруг ярких звезд Сириуса и Прокциона вращаются белые карлики. Эти белые карлики не имеют никакого источника энергии, кроме накопленного ими тепла. Они подобны тлеющим углям, остывающим в камине. Через миллиарды лет они полностью остынут и станут холодными и темными.

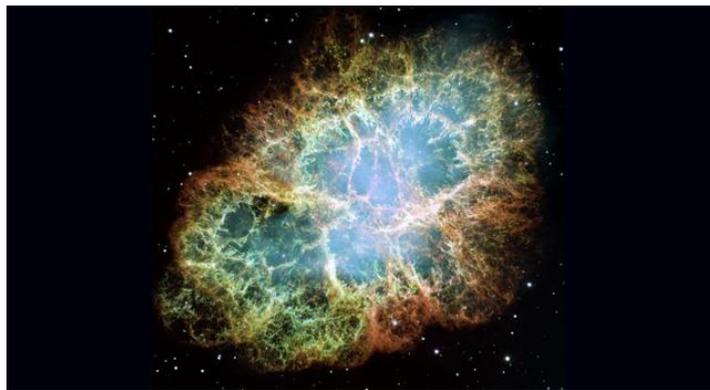


Рис. 10: Крабоподобная Туманность, остатки взрыва сверхновой, который был зафиксирован астрономами в Азии в 1054 н.э. Ядро взорвавшейся звезды теперь быстро-вращающаяся нейтронная звезда, или пульсар, внутри туманности. Малая часть ее вращательной энергии передается туманности, заставляя ее светиться. Источник: НАСА.

### Редкие, Массивные Звезды

Массивные звезды — горячие и мощные, но очень редкие. У них короткий срок жизни - несколько миллионов лет. Их ядра горячие и достаточно плотные, чтобы плавить элементы до железа. У железного ядра нет достаточной энергии для синтеза или деления. Нет источника энергии, чтобы поддерживать ядро в горячем состоянии и противостоять

силе тяжести. Гравитация коллапсирует ядро звезды за секунду, превращая его в шар нейтронов (или даже более странную материю) и высвобождая огромное количество гравитационной энергии. Это заставляет внешние слои звезды взрываться как сверхновая (рис. 10). Эти внешние слои выбрасываются со скоростью до 10 000 км / сек.

Сверхновая при максимальной яркости может быть такой же яркой, как целая галактика из сотен миллиардов звезд. Тихо Браге, и Иоганн Кеплер наблюдали и изучали яркие сверхновые звезды в 1572 и 1604 годах соответственно. Согласно Аристотелю, звезды были идеальными и не менялись; Тихо Браге и Иоганн Кеплер доказали обратное. В нашей галактике (Млечный Путь) сверхновые не наблюдались в течение 400 лет. Сверхновая, видимая невооруженным глазом, наблюдалась в 1987 году в Большом Магеллановом Облаке, небольшой галактике-спутнике Млечного Пути.

Масса ядра сверхновой звезды превышает предел Чандрасекара. Протоны и электроны в разрушающейся активной зоне сливаются, чтобы произвести нейтроны и нейтрино. Вспышку нейтрино удалось зарегистрировать с помощью нейтринной обсерватории. Пока масса ядра примерно в три раза меньше массы Солнца, оно будет стабильным. Внутренняя сила тяжести уравнивается квантовым давлением нейтронов наружу. Объект называется нейтронной звездой. Его диаметр около 10 км. Его плотность более чем в  $10^{14}$  раз больше плотности воды. Его можно увидеть в рентгеновский телескоп, если он все еще очень горячий, но нейтронные звезды были обнаружены очень неожиданным образом - как источники импульсов радиоволн, называемых пульсарами. Период их пульса составляет около секунды, иногда намного меньше. Импульсы производятся сильным магнитным полем нейтронной звезды, которое разбрасывается почти со скоростью света из-за быстрого вращения звезды.

Существует второй вид сверхновых, которые возникают в двойных звездных системах, в которых одна звезда умерла и стала белым карликом. Когда вторая звезда начинает расширяться, она может пролить газ на своего белого карлика-компаньона. Если масса белого карлика становится больше, чем предел Чандрасекара, белый карлик «сгорает»; его материал почти мгновенно превращается в углерод, высвобождая достаточно энергии, чтобы разрушить звезду.

При взрыве сверхновой все химические элементы, образовавшиеся в результате термоядерных реакций, выбрасываются в космос. При взрыве, хотя и в небольших количествах, образуются элементы тяжелее железа, поскольку нейтроны облучают более легкие ядра, которые выбрасываются.

### **Очень редкие, Очень Массивные Звезды**

Очень массивные звезды очень редки - одна звезда на миллиард. Их сила в миллион раз больше, чем у Солнца, и их жизнь очень коротка. Они настолько массивны, что когда у них заканчивается энергия и их ядро разрушается, его масса более чем в три раза превышает массу Солнца. Гравитация преодолевает даже квантовое давление нейтронов. Ядро продолжает схлопываться до тех пор, пока оно не станет настолько плотным, что его гравитационная сила не позволит чему-либо вырваться из него, даже свету. Это становится черной дырой. Черные дыры не излучают излучения, но, если у них есть спутник в виде нормальной звезды, они заставляют его двигаться по орбите. Наблюдаемое движение спутника позволяет астрономам обнаружить черную дыру и измерить ее массу. Более того: небольшое количество газа от нормальной звезды может

быть притянутым к черной дыре и нагрето до тех пор, пока оно не засветится в рентгеновских лучах, прежде чем упасть в черную дыру (рисунок 11). Таким образом, черные дыры являются сильными источниками рентгеновского излучения, и их обнаруживают с помощью рентгеновских телескопов.

В самом центре многих галактик, в том числе нашей галактики Млечный Путь, астрономы обнаружили сверхмассивные черные дыры, в миллионы или миллиарды раз массивнее Солнца. Их масса измеряется по их влиянию на видимые звезды около центров галактик. Сверхмассивные черные дыры, похоже, образовались в процессе зарождения галактики, но неясно, как это произошло. Одна из целей астрономии 21 века - понять, как образовались первые звезды и галактики, а также сверхмассивные черные дыры вскоре после рождения Вселенной.

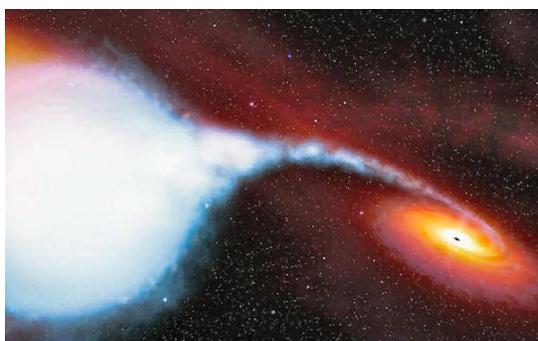


Рис. 11: Художественное представление двойной звезды Лебедь X-1, источника рентгеновского излучения. Она состоит из массивной звезды обычной плотности (слева), и черной дыры (справа), примерно в 15 масс Солнца, на общей орбите. Часть вещества звезды обычной плотности падает на аккреционный диск вокруг черной дыры и в конечном итоге в саму черную дыру. Газы нагреваются до очень высоких температур, излучая тем самым рентгеновские лучи. Источник: НАСА.

## Катастрофические Переменные

Около половины всех звезд - двойные звезды, две или более звезды на взаимной орбите. Часто орбиты очень большие, и две звезды не мешают эволюции друг друга. Но если орбита мала, две звезды могут взаимодействовать, особенно когда одна превращается в красного гиганта. И если одна звезда умирает, чтобы стать белым карликом, нейтронной звездой или черной дырой, эволюция нормальной звезды может пролить материал на мертвую звезду, и может произойти много интересного (рис. 12). Двойная звездная система различается по яркости по разным причинам и называется катаклизмической переменной звездой. Как отмечалось выше, белый карлик-компаньон может взорваться как сверхновая, если ему будет передана достаточная масса. Если бы нормальная звезда пролила материал, богатый водородом, на белый карлик, этот материал мог бы взорваться в результате синтеза водорода как новая звезда. Материал, падающий на белый карлик, нейтронную звезду или черную дыру, мог просто стать очень горячим, так как его гравитационная потенциальная энергия преобразовывалась в тепло и производило излучение высокой энергии, такое как рентгеновские лучи.

В представлении художника о черной дыре (рис. 11) вы можете увидеть аккреционный диск газа вокруг черной дыры и поток газа от нормальной звезды, текущий к ней.

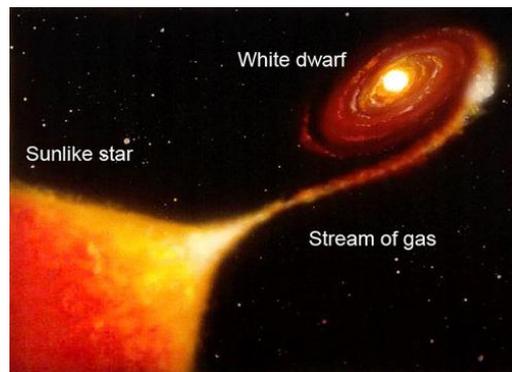


Рис. 12: Катастрофическая переменная. Вещество звезды обычной плотности (слева) падает на белый карлик (справа). Оно попадает в аккреционный диск вокруг белого карлика, что вызывает мерцание яркости. Вещество в конечном итоге падает на белый карлик, где оно может вспыхнуть или взорваться. Источник: НАСА.

## Рождение Солнца и Звезд

Звезды рождаются сейчас! Поскольку время жизни самых массивных звезд составляет всего несколько миллионов лет, а возраст Вселенной превышает десять миллиардов лет, отсюда следует, что эти массивные звезды должны были родиться совсем недавно. Их местоположение дает подсказку: они находятся в больших облаках газа и пыли, называемых туманностями, и рядом с ними. Газ состоит из ионов, атомов и молекул, в основном водорода, небольшого количества гелия и очень небольшого количества более тяжелых элементов. Пыль состоит из зерен силиката и графита размером менее микрометра. Пыли гораздо меньше, чем газа, но она играет важную роль в туманности. Он позволяет молекулам образовываться, защищая их от интенсивного излучения близлежащих звезд. Его поверхность может служить катализатором образования молекул. Ближайшая большая яркая туманность - туманность Ориона (рис. 13). Горячие звезды в туманности заставляют атомы газа светиться флуоресценцией. Пыль теплая и излучает инфракрасное излучение. Он также блокирует свет от звезд и газа позади него, вызывая темные пятна в туманности.

Гравитация - это сила притяжения, поэтому неудивительно, что некоторые части туманности будут медленно сокращаться. Это произойдет, если гравитационная сила больше, чем давление турбулентности этой части облака. На первых стадиях сжатия может помочь ударная волна от ближайшей сверхновой или радиационное давление от соседней массивной звезды. Как только начинается гравитационное сжатие, оно продолжается. Около половины энергии, выделяемой в результате гравитационного сжатия, нагревает звезду. Другая половина излучается. Когда температура в центре звезды достигает примерно 1000000К, начинается термоядерный синтез дейтерия; когда температура немного выше, начинается термоядерный синтез нормального водорода. Когда производимая энергия равна излучаемой, звезда «официально» рождается.



Рис. 13: Туманность Ориона, большое облако газа и пыли в котором формируются звезды (и их планеты). Газ светится за счет флуоресценции. Пыль образует темные вкрапления поглощения которые можно заметить, особенно вверху слева. Источник: НАСА.

Когда начинается гравитационное сжатие, материал имеет очень малое вращение (угловой момент) из-за турбулентности в облаке. По мере того как сжатие продолжается, «сохранение углового момента» приводит к увеличению вращения. Этот эффект обычно наблюдается в фигурном катании; когда фигурист хочет перейти в быстрое вращение, он подтягивает руки как можно ближе к своей оси вращения (своему телу), и скорость вращения увеличивается. По мере того как вращение сжимающейся звезды продолжается, «центробежная сила» (как это привычно, но неправильно называется) заставляет материал вокруг звезды превращаться в диск. Звездочка образуется в плотном центре диска. В самом диске образуются планеты - скалистые планеты, близкие к звезде, и газообразные и ледяные планеты в холодном внешнем диске.

В туманностях, таких как туманность Ориона, астрономы наблюдали звезды на всех стадиях формирования. Они наблюдали протопланетные диски, в которых формируются планеты, подобные нашей. А начиная с 1995 года астрономы открыли экзопланеты или внесолнечные планеты - планеты вокруг других звезд, подобных Солнцу. Это убедительное доказательство того, что планеты действительно образуются как нормальный побочный продукт звездообразования. Во Вселенной может быть много планет, таких как Земля!

## Список Литературы

- Bennett, Jeffrey et al, *The Essential Cosmic Perspective*, Addison-Wesley; one of the best of the many available textbooks in introductory astronomy, 2005.
- Kaler, James B, *The Cambridge Encyclopaedia of Stars*, Cambridge Univ. Press, 2006.
- Percy, J.R, *Understanding Variable Star*, Cambridge University Press, 2007.

## Интернет-Источники

- American Association of Variable Star Observers. <http://www.aavso.org>. Education project: <http://www.aavso.org/vsa>
- Chandra X-Ray Satellite webpage. [http://chandra.harvard.edu/edu/formal/stellar\\_ev/](http://chandra.harvard.edu/edu/formal/stellar_ev/)
- Kaler's "stellar" website. <http://stars.astro.illinois.edu/sow/sowlist.html>
- Stellar Evolution on Wikipedia: [http://en.wikipedia.org/wiki/Stellar\\_evolution](http://en.wikipedia.org/wiki/Stellar_evolution)