Санкт-Петербургский государственный университет

Факультет свободных искусств и наук

Итоговая работа по курсу «Модели и реальность»

**Рождение, эволюция и смерть звезд**

Выполнил Студентка 2 курса

Харитонова М. А

Проверил Профессор

Куперин Ю. А

Санкт-Петербург

2012

**Введение**

Согласно источнику [1], 97% вещества в галактике Млечный путь сосредоточено в звездах. Более 99.9 % массы других галактик также составляет «звездная субстанция». Считается, что плотность разреженного межгалактического газа чрезвычайно мала, и поэтому основная часть вещества во Вселенной сосредоточена именно в галактиках, а значит, в звездах. Но существует мнение, что основная часть вещества в ядрах галактик представляет собой плотный, горячий газ. Однако, и это не изменяет вышеуказанного утверждения, так как массы галактических ядер по сравнению с массами самих галактик невелики. Таким образом, вещество на современном этапе эволюции Вселенной находится преимущественно в звездном состоянии. Это значит, что большая часть вещества во Вселенной находится в недрах звезд и имеет температуру приблизительно в десять миллионов градусов наряду с очень высокой плотностью и таких физических условиях, которые мало отличаются от термодинамического равновесия. Главная эволюция Вселенной происходила и продолжает происходить в звездных глубинах, и именно там находится «плавильный тигель», который обусловил химическую эволюцию вещества во Вселенной, обогатив его тяжелыми элементами» [1]. Также, именно у некоторых звезд на определенных этапах их эволюции может реализоваться состояние «черной дыры», которое для ученых по-прежнему остается загадкой. Кроме того, если оставить в стороне еще недостаточно исследованные области, можно сказать, что звезды, окружающие ядра галактик, в среднем занимают около объема Вселенной.

По мнению автора [1], исследование взаимосвязей между звездами и межзвездной средой имеет большое значение и включает в себя проблему непрерывного образования звезд из конденсирующейся межзвездной среды. «Наличие звезд подчеркивает необратимость процессов эволюции вещества во Вселенной. Ведь звезды в основном излучают за счет необратимого процесса превращения водорода в более тяжелые металлы, прежде всего в гелий» [1]. Также подчеркивают необратимый характер эволюции Вселенной белые карлики, нейтронные звезды и, вероятно, черные дыры, являющиеся конечными продуктами эволюции звезд.

Шкловский [1] также говорит о том, что встречается невероятное разнообразие явлений, которые проявляют себя на всех диапазонах длин волн, среди которых планетарные туманности, карликовые звезды, рентгеновские звезды, пульсары, цефеиды и обыкновенные звезды. Для того, чтобы понять, как устроена Вселенная и что она собой представляет, необходимо знать, что такое звезды и какова их эволюция.

**Рождение звезд**

*Основные характеристики звезд*

Согласно источнику [1], даже посредством самых больших телескопов звезда не может «явиться» астрономам в своем реальном виде, и наблюдается лишь как точечный источник излучения. Так, возможно измерять только потоки излучения от звезд в различных участках спектра. «Мерой величины потока является видимая звездная величина, определение которой предполагается известной» [1]. Зная расстояние до звезды *r*, которое астрономами обычно измеряется в парсеках[[1]](#footnote-1), возможно определить *светимость* звезды, или полную мощность ее излучения. Для этого используется следующая формула:

*L=4F*,

где F – величина потока. Итак, светимость, одна из главных звездных характеристик, определяется, если известно расстояние до звезды и ее видимая величина.

Изучение *спектра* звезд также чрезвычайно важно для астрономов. Ссылаясь на источник [1], необходимо сказать, что спектры большинства звезд делятся на классы. Последовательность таких спектральных классов обозначается как O, B, A, F, G, K, M. Существующая система классификации звездных спектров позволяет определить спектр с точностью до одной десятой класса, и тогда он может обозначаться как B0, B3, B9 и т.д. Важно, что температуры у звезд класса О составляют 40-50 тысяч кельвинов, в то время как температуры звезд класса М достигают 3000 кельвинов.

Как пишет автор источника [3], химический состав наружных слоев звезд характеризуется наличием водорода и гелия в пропорции приблизительно 3:1 по массе. Остальные, более тяжелые металлы (например, кислород, азот, углерод, железо) присутствуют в виде примеси, и составляют около 2% по массе. Тот же состав имеет большинство других звезд и межзвездный газ, который заполняет пространство между ними. Таким образом, наружные слои звезд представляют собой огромные плазмы, состоящие из водорода и гелия, с небольшой примесью более тяжелых элементов.

По мнению автора [1], важным индикатором температуры наружных слоев звезды является ее цвет. Горячие звезды спектральных классов О и В имеют голубой цвет, К и М – красный, а звезды, похожие на Солнце (класс G2), представляются желтыми. Знание спектрального класса, или цвета дает информацию о температуре поверхности звезды. Мощность, излучаемая единицей звездной поверхности, определяется из закона Стефана-Больцмана:

*πB=σ,*

где σ = 5,6 – постоянная Стефана. Тогда мощность излучения всей поверхности звезды, или ее светимость, будет равна

*L=4π,*

где R – радиус звезды.

Еще одной важной характеристикой звезды является ее масса. Легче она определяется, если звезды составляют двойную систему, более сложно определить массу отдельной звезды. В последнем случае астрономы принимают довод, что звезды с одинаковой светимостью и цветом обладают примерно одной и той же массой.

Таким образом, как пишет автор [1], существуют несколько основных звездных характеристик: светимость, химический состав, масса, радиус и цвет (температура поверхности). Имеется функциональная зависимость между радиусом звезды, ее светимостью и поверхностной температурой. Наряду с этим, существует также зависимость между светимостью звезд и их спектральным классом, или цветом. Эта зависимость отражается на диаграмме Герцшпрунга-Рассела (см. Приложение 1). Согласно источнику [2], на этой диаграмме по оси ординат отложена светимость звезды, а по оси абсцисс температура ее поверхности. Например, число 1000 означает, что на данном уровне расположены звезды, светимость которых в 1000 раз превышает светимость Солнца, которое размещено почти в середине диаграммы. Так, звезды, светимость которых больше солнечной, располагаются выше Солнца, а звезды с более низкой светимостью, соответственно, ниже. Так как холодные звезды излучают красный свет, а горячие белый или голубой, на диаграмме справа расположены красные звезды, а слева – белые или голубые. В верхней части диаграммы лежат звезды с высокой светимостью, в нижней – с малой. Таким образом, вверху справа на диаграмме Г – Р находятся большие звезды, называемые красными гигантами и сверхгигантами, а слева внизу располагаются горячие звезды с низкой светимостью – белые карлики. Следует уточнить, что «поскольку квадратный сантиметр поверхности горячего тела излучает много энергии, а звезды из левого нижнего угла диаграммы имеют низкую светимость, то мы должны прийти к выводу, что эти звезды невелики по размерам» [2]. Следовательно, верно и обратное.

Важно заметить, также, что, согласно источнику [2], человеческий глаз воспринимает только часть света, излучаемого звездами, в том числе Солнцем, так как атмосфера Земли пропускает не все излучение: до нас не доходит коротковолновый свет, лежащий в ультрафиолетовой области спектра. И при определении светимости звезд ученые учитывают лишь тот свет, который может восприниматься человеческим глазом. Поэтому на диаграмме Г – Р вместо истинной, или болометрической[[2]](#footnote-2) светимости указывают светимость в видимой области спектра, которую называют также *визуальной светимостью*. Причем, величины болометрической и визуальной светимости могут достаточно сильно различаться. Например, звезда, масса которой в 10 раз превышает солнечную, излучает примерно в 10 тысяч раз больше энергии, чем Солнце, однако в видимом диапазоне спектра она лишь в 1000 раз ярче Солнца. Следует добавить, что звезды, обладающие малой массой, расположены внизу диаграммы, а более тяжелые, соответственно, в ее верхней части.

*Газово-пылевые комплексы межзвездной среды*

Автор источника [1] пишет, что пространство между звездами заполнено газом, имеющим определенную, хотя и очень малую плотность. Межзвездный газ представляет собой непрерывную среду, в которой распространяются волны, и которая обладает высокой электропроводностью, поскольку она в разных зонах полностью или частично ионизована. Наряду с отдельными облаками как ионизованного, так и неионизованного газа в Галактике существуют значительные по своим размерам, массе и плотности скопления холодного межзвездного вещества, называемые «газово-пылевыми комплексами». В таких комплексах происходит важный процесс конденсации звезд из рассеянной (диффузной) межзвездной среды. В ней периодически происходят малые возмущения плотности, то есть отклонения от однородности. Сила всемирного тяготения таким образом влияет на эти малые возмущения, что последние начинают нарастать, а изначально однородная среда разбивается на несколько конденсаций. Под влиянием силы гравитации они будут продолжать сжиматься, при условии, что их масса превышает определенный предел. В итоге такие конденсации превращаются в звезды, и происходит это в несколько этапов. Сначала сжимается протяженный газово-пылевой комплекс с большой массой, к примеру, превышающий массу Солнца в 1000 раз. Затем, когда этот комплекс достаточно сожмется и увеличится его средняя плотность, отдельные части комплекса станут сжиматься независимо. Следовательно, газово-пылевой комплекс распадется на ряд менее массивных, более мелких конденсаций. Такой процесс вполне объясняет, почему звезды появляются, рождаются в виде скоплений, а не отдельно друг от друга, хотя иногда возможно появление и одиночных звезд. В процессе первой стадии превращения газово-пылевого облака в звезду, которая также называется «стадией свободного падения», выделяется определенное количество гравитационной энергии, равное приблизительно *G/* , где – радиус в конце стадии, когда облако является уже непрозрачным для собственного инфракрасного излучения. По окончании стадии свободного падения значительная часть освободившейся гравитационной энергии уйдет на нагревание газа в облаке, остальная же энергия покинет облако в виде инфракрасного излучения. Как только облако, продолжающее сжиматься, станет непрозрачным для своего инфракрасного излучения, его светимость резко снизится. В то же время, температура внутренних областей станет непрерывно повышаться, потому что, как уже было сказано, половина высвободившейся при сжатии энергии пойдет на нагревание облака, ставшее уже протозвездой. Таким образом, можно сказать, что существует закономерный и естественный процесс эволюции газово-пылевых комплексов межзвездной среде сначала в протозвезды, а затем в звезды.

*Эволюция протозвезд*

Согласно данным, изложенным в источнике [1], в 1961 году японский астрофизик Хаяши теоретически рассчитал дальнейшую эволюцию звезд, обратив внимание на то, что транспорт энергии в сжимающейся протозвезде происходит посредством конвекции. В наружных слоях протозвезды механическая энергия конвективных движений, которые охватывают весь объем протозвезды, трансформируется в уходящую в мировое пространство энергию излучения. Температура, при которой энергия конвективных излучений переходит в энергию излучения, определяется многими факторами, например, химическим составом. Причем, в поверхностных слоях протозвезды баланс, наблюдаемый между притоком механической энергии конвекции и излучением, устанавливает температуру, которая близка к температуре фотосфер, или самых наружных слоев, красных гигантов, что примерно равно 3500 К. Сделанные учеными расчеты выявили также зависимость температуры поверхности протозвезды от ее массы и светимости. Температура на поверхности протозвезды, охваченной конвективными движениями, на протяжении всей «стадии Хаяши» остается неизменной. Поскольку при этом радиус протозвезды будет постоянно уменьшаться по причине того, что она продолжает сжиматься под влиянием собственной гравитации, светимость звезды на данной стадии тоже будет уменьшаться. Максимальная светимость («вспышка») протозвезды наблюдается в течение достаточно короткого времени, когда во всем ее объеме установится конвекция, наступающая сравнительно быстро (то есть за время установления конвекции протозвезда не успевает заметно сжаться. Длительность вспышки возможно оценить, если разделить величину освободившейся при сжатии протозвезды гравитационной энергии GM/ на L (где L – светимость протозвезды во время вспышки, находимая по отдельной формуле). Таким образом, длительность вспышки оказывается порядка нескольких лет – действительно небольшой, по космическим меркам.

По завершении «стадии свободного падения», как продолжает автор [1], у протозвезды происходит яркая кратковременная вспышка инфракрасного излучения, о котором было сказано выше, когда светимость протозвезды в тысячи раз превосходит болометрическую светимость Солнца. Вторая вспышка, сопутствующая окончанию установления конвекции, происходит в скором времени после первой, причем обе вспышки будут существенно отличаться по спектральному составу излучения. Во время первой вспышки излучение сосредотачивается в длинноволновой инфракрасной части спектра, в то время как во время второй оно падает в основном на ближнюю инфракрасную часть спектра.

После второй вспышки температура на поверхности протозвезды продолжает сохраняться примерно на одном уровне, однако, в ее недрах температура непрерывно повышается. Наконец, наступает момент, когда температура там поднимается до нескольких миллионов градусов, и тогда начинаю происходить термоядерные реакции на легких элементах, таких, как бериллий, бор, литий. При этом протозвезда продолжит сжиматься, потому как мощность термоядерной энергии еще недостаточна для того, чтобы нагреть недра будущей звезды до такой температуры, при которой давление газа уравновесит силу гравитации. Лишь после того как продолжающийся температурный рост в глубинах протозвезды обусловит возможность протон-протонной или углеродно-азотной реакции, давление газа сделает протозвезду стабильной, и она превратится уже в звезду.

Остается добавить, что стадия протозвезды в эволюции звезд достаточно быстротечна, и самые массивные звезды проходят ее за несколько сотен тысяч лет. Поэтому неудивительно, что число подобных звезд в Галактике невелико.

**Эволюция звезд**

Как считает автор [2], звездные атмосферы представляют собой ионизованный газ, нагретый до температуры в десятки тысяч градусов, или, другими словами, плазму. Анализ спектра дает возможность определить химический состав звездных атмосфер, который в большинстве случаев схож с солнечным. Но стоит заметить, что в наружных слоях звезд сосредоточена чрезвычайно малая доля массы всей звезды. И хотя из-за высокой непрозрачности звезд невозможно непосредственно наблюдать их недра оптическими методами, ученые все же утверждают, что и внутренние слои звезд также находятся в газообразном состоянии. Итак, звезды являются огромными газовыми шарами, причем на каждый элемент звезды действует сила гравитационного притяжения от остальных ее элементов. Именно эта сила препятствует разлету газовых частей, составляющих звезду, в окружающее пространство. Если бы данная сила отсутствовала, то образующий звезду газ вначале «расплылся» бы, образовав нечто наподобие туманности, а затем окончательно рассеялся бы в межзвездном пространстве.

Но важно и следующее. Согласно источнику [1], сила всемирного тяготения, действуя непрерывно, стремится сблизить между собой разные элементы звезды, причем неограниченно сблизить все ее частицы, чтобы «собрать звезду в одну точку» [1]. И, если бы на элементы звезды действовала только одна лишь сила гравитации, звезда начала бы катастрофически быстро сжиматься. Однако, силой, противодействующей силе гравитации, является давление газа. Именно оно постоянно стремится расширить звезду на как можно больший объем, действуя обратно гравитации. Из того факта, что звезды, не сжимаясь и не расширяясь, существуют по меньшей мере миллионы лет, следует, что «каждый элемент вещества звезды находится в равновесии под действием противоположно направленных сил гравитации и газового давления; такое равновесие называется «гидростатическим» [1].

Что касается величины газового давления в центральной части звезды, то, как считает автор [1], она достигает 10 миллиардов атмосфер, что является по-настоящему огромной величиной. Температура в центральных частях звезды также исключительно велика, порядка нескольких десятков миллионов кельвинов[[3]](#footnote-3), что примерно в тысячу раз больше температуры поверхности звезды. Интересно, однако, что температура массивных горячих звезд спектрального класса В на поверхности в 2-3 раза превышает температуру солнечных недр, в то время как у красных карликов температура в центральной части в 2-3 раза ниже солнечной. Важно, что температура порядка К характерна не только для звездных недр, но и для большого объема, окружающего центр звезд. Имея в виду, что плотность звезды возрастает по мере приближения к ее центру, можно сказать, что основная часть звездной массы имеет температуру, превышающую, по крайней мере, 5 миллионов кельвинов. Центральная температура звезды исчисляется по следующей формуле:

*( ),*

– температура центральных областей Солнца, а масса и радиус звезды выражены в долях солнечной массы и солнечного радиуса .

Как утверждают авторы [1] и [2], источниками энергии звезд, которые обеспечивают их светимость в течение огромных промежутков времени, исчисляемых для звезд не очень большой массы миллиардами лет, являются термоядерные реакции. Сопровождающиеся превращением ядер и выделением энергии, ядерные реакции происходят при столкновении частиц, которыми могут быть прежде всего сами ядра атомов. Помимо этого, ядерные реакции также могут происходить при столкновении ядер с нейтронами. Но не связанные в ядрах, то есть свободные нейтроны представляют собой неустойчивые частицы, и потому их количество в недрах звезд достаточно мало. С другой стороны, поскольку водород является самым распространенным элементом в звездных недрах и полностью ионизован, то особенно часто происходят столкновения ядер с протонами. Суть же ядерных реакций внутри звезд заключается в том, что через несколько промежуточных этапов четыре ядра водорода объединяются в одно ядро гелия (α-частицу), тогда как избыточная масса выделяется в виде энергии, которая нагревает среду, где происходят реакции. Существуют два пути превращения водорода в гелий в звездных недрах, которые отличаются различной последовательностью ядерных реакций: «протон-протонная реакция» и «углеродно-азотная реакция».

Как пишет автор источника [1], протон-протонная реакция заключается в столкновении между протонами, в результате которого образовывается ядро дейтерия – тяжелого водорода. Ядра дейтерия поглощают некоторый близкий протон и превращаются, таким образом, в изотоп гелия He. Далее, в большинстве случаев[[4]](#footnote-4) изотоп гелия будет взаимодействовать с подобным себе ядром, в результате этого получится ядро обычного гелия и два протона. Причем часть энергии, освободившейся в результате такой реакции, уносится образовавшимися частицами нейтрино.

Согласно источнику [2], процесс второго, углеродно-азотного, цикла также довольно сложен, поскольку для его протекания необходимо присутствие в звездах других элементов, помимо водорода, например, углерода. Ядра атомов углерода в таком случае служат катализаторами процесса. Последний начинается с того, что ядро атома водорода сталкивается с ядром углерода и превращается затем в радиоактивный изотоп азота. В результате данной реакции испускается гамма-квант. Изотоп азота претерпевает β-распад с испусканием позитрона и нейтрино и становится изотопом углерода, который, в свою очередь, сталкивается с протоном и превращается в обычное ядро азота . Последним звеном этой достаточно сложной цепи является восстановление первоначального ядра углерода и образование нового ядра гелия. Так, никакого изменения в числе ядер углерода в веществе, в котором происходит данная реакция, не наблюдается.

Ссылаясь на источник [1], можно сказать, что скорость термоядерных реакций существенным образом является зависимой от температуры, так как даже небольшие изменения температуры резко влияют на концентрацию необходимых для реакции протонов. Также следует заметить, что основным источником энергии Солнца является протон-протонная реакция, в то время как для более массивных звезд характерна углеродно-азотная реакция. Непрерывно происходящие ядерные реакции в центральных областях звезд постепенно меняют химический состав звездных недр. Основная закономерность такой химической эволюции – превращение водорода в гелий. Кроме этого, во время углеродно-азотной реакции меняется концентрация разных изотопов углерода и азота до установления определенного равновесия. При таком равновесии количество реакций, приводящих к образованию какого-либо изотопа за единицу времени, равно количеству реакций, в результате которых происходит разрушение этого изотопа.

Таким образом, ядерные процессы играют фундаментальную роль в длительной эволюции звезд, находящихся на главной последовательности[[5]](#footnote-5). Более того, эта роль является определяющей при процессах взрывного характера, которые становятся поворотными этапами в эволюции звезд.

Как считает автор [1], в эволюционном процессе химический состав звезды неизбежно изменяется, поскольку из-за термоядерных реакций, поддерживающих светимость звезды, содержание водорода со временем уменьшается. Химический состав также перестанет быть однородным: в центральной части процентное содержание водорода уменьшится, в то время как в наружных слоях оно будет оставаться почти неизменным. Поэтому, по мере эволюции звезды, связанной с выгоранием ядерного горючего, поменяется сама модель звезды, ее структура. Изменятся параметры светимости, радиуса, температуры поверхности. В результате этого звезда постепенно станет менять свое место на диаграмме Герцшпрунга-Рассела и, скорее всего, переместится на позицию справа вверху от главной последовательности, заняв, таким образом, место красных гигантов.

*Красные гиганты, планетарные туманности и белые карлики*

Как утверждается автор [1], красные гиганты прекращают свое существование как звезды из-за потери богатых водородом наружных оболочек, а не по причине выгорания ядерного горючего. Наружные слои красных гигантов, утратившие связь с внутренними горячими областями, в которых сосредоточена основная часть звездной массы, называются *планетарными туманностями.* «Сверхмолодые туманности», отделившиеся неким образом от собственных центральных звезд, крайне малы по размерам и довольно плотны. Кроме того, наружные слои этих туманностей – сравнительно холодный неионизованный газ. Светимость сверхмолодых туманностей достигает значения, которое в тысячу раз превышает светимость Солнца. Горячие ядра планетарных туманностей являются «обнажившимися» недрами красных гигантов после отделения от них оболочек. Средняя масса планетарной туманности составляет примерно 0.2 солнечной массы. Красный гигант без своих наружных слоев представляет собой довольно малый объект с весьма высокой температурой и плотностью, в сотню раз выше, чем в фотосфере (излучающем слое атмосферы) Солнца. Одновременно с отделением наружных слоев красного гиганта происходит также достаточно быстрое сжатие внутренних областей до размеров лишь в несколько раз больших, чем размеры Земли. Нужно заметить, что отделение оболочек происходит с довольно медленной скоростью и не имеет взрывного характера, как в случае, например, сверхновых звезд. Объектами же, в которые эволюционируют ядра планетарных туманностей, становятся белые карлики. Их размеры лишь немного превышают размеры земного шара, но имеют массу Солнца, и поэтому их плотность достигает нескольких сотен тысяч граммов на кубический сантиметр, кроме того, их ядро является вырожденным. Обнаружена также следующая особенность, что чем больше возраст планетарных туманностей, тем более их ядра становятся похожи на белых карликов. Таким образом, автор [1] делает вывод о том, что существует генетическая связь между планетарными туманностями, красными гигантами и белыми карликами. Одновременно в Галактике существуют несколько десятков тысяч планетарных туманностей, причем среднее время их жизни составляет около нескольких десятков тысяч лет. Отсюда следует вывод, что каждый год из некоего источника возникает приблизительно одна планетарная туманность и примерно такое же количество белых карликов, являющихся конечным продуктом эволюции ядер данных туманностей.

*Двойные звездные системы*

Интересна эволюция звезд, образующих двойную систему. Любопытно, что, по мнению автора [2], именно в двойных системах наблюдаются наиболее необычные звезды, такие как сверхновые звезды или рентгеновские звезды. Важно также, что примерно половина звезд главной последовательности входит в состав двойных или кратных систем.

Как считает автор [1], известно, что чем больше масса звезды, тем скорее она проходит этапы своей эволюции: быстрое выгорание водорода приводит к тому, что звезда переходит в стадию красного гиганта. Но ситуация в двойных системах довольна необычна. В них более массивная компонента находится на главной последовательности, в то время звезда с меньшей массой является субгигантом[[6]](#footnote-6), обладая избыточной светимостью. И вот почему это происходит. Звезда высокой светимости обладала вначале большой массой, но, исчерпав значительную часть собственных ядерных ресурсов, начала расширяться. При этом существенная часть ее массы перешла к соседней компоненте, почему масса последней и стала превышать массу первой, эволюционирующей более быстро. Таким образом, важнейшим процессом в эволюции двойных звездных систем является обмен массами. Но как именно он осуществляется?

В книге [1] говорится, что для каждой компоненты есть такие поверхности, за пределами которых частицы вещества более не сдерживаемы гравитационным притяжением звезды. Это может быть объяснено действием на данные частицы гравитационного притяжения второй звезды и центробежной силы, которую обусловливает общее вращение системы. Если частицы находятся на таких поверхностях, то достаточно придать им самую малую скорость, направленную от поверхности, «наружу», чтобы эти частицы покинули сферу притяжения звезды. Так. Покидая первую звезду, частицы будет захвачены притяжением второй. «Поверхность, обладающая такими свойствами, называется «критической поверхностью Роша [см. Приложение 2], а точка , через которую вещество может перетекать из одной звезды в другую, – «внутренней лагранжевой точкой» [1].

Эволюция в двойной системе, согласно источнику [1], происходит в три этапа. Первая стадия связана с выгоранием водорода и медленным увеличением радиуса звезды. Стоит пояснить. В течение времени нахождения компонент системы на главной последовательности их радиусы были меньше соответствующих им полостей Роша (см. Приложение 2). По мере исчерпания водородного горючего в центре звезды ее радиус начинает увеличиваться; в это время радиус второй звезды остается прежним. Таким образом, более массивная звезда системы станет расширяться до тех пор, пока не заполнит свою полость Роша, после чего ее расширение прекратится, поскольку массы этой звезды, выходящая за пределы полости, начнет переходить в соседнюю звезду, масса которой начнет расти. Существенно, что наименьшее расстояние между компонентами звездной системы наблюдается тогда, в процессе перехода массы от одной звезды к другой их массы станут равны.

Вторая стадия характеризуется быстрым расширением оболочки звезды, которое связано непосредственно со сжатием ядра после выгорания в нем водорода. К концу этой фазы масса первой компоненты (проэволюционировавшей) становится в 5-10 раз меньше массы второй компоненты, вобравшей в себя значительную часть массы соседней звезды. Вторичная звезда продолжит оставаться на главной последовательности, причем ее светимость станет превосходить светимость первой компоненты вследствие увеличения массы. На заключительном, третьем, этапе, когда в первой звезде останется очень малое количество массы, радиус ее начнет уменьшаться, и вероятно, она превратится в белого карлика.

*Взрывы сверхновых звезд*

Конечный этап звездной эволюции может быть также представлен вспышками сверхновых звезд. Прежде чем охарактеризовать особенности сверхновых, стоит пояснить причины их взрывов.

Согласно источнику [1], хотя довольно естественно предположить, что гигантское количество энергии, высвобождаемой при взрыве сверхновой звезды, связано с наличием ядерного топлива в ее недрах, однако, далеко не всякое ядерное горючее может быть ответственно за взрыв звезды. Выделение энергии при полном превращении водорода в гелий очень велико, но происходит оно довольно медленно, что исключает возможность взрыва. Однако, при очень высоких температурах в результате определенных реакций может возникать большое количество легких ядер углерода, неона и кислорода. Ядра таких элементов при температурных условиях около ста миллионов кельвинов способны вступать в реакции с протонами, последовательно присоединяя 3-4 протона. При этом происходит быстрое и значительное выделение энергии. Таким образом, можно утверждать, что возможным ядерным горючим, отвечающим за звездные взрывы, может стать вещество, достаточно обогащенное легкими элементами. Но, кроме этого, есть еще одна возможная причина подобных взрывов, а именно освобождение гравитационной энергии при катастрофическом сжатии звездного ядра. Это происходит, когда температура в центральной части звезды чрезвычайно велика и достигает нескольких миллиардов кельвинов. При этом условии и водород, и гелий должны выгореть. Ядро, в котором преобладают уже элементы группы железа, начнет катастрофически сжиматься (характерное время подобного сжатия составляет приблизительно 1с.). Вследствие этого нарушается равновесие остальной части звезды, то есть вес наружных слоев более не уравновешивается давлением газа внутри, и тогда они станут падать по направлению к центру звезды. Кинетическая энергия оболочки превратится в тепловую, тем самым повышение температуры создаст условия для ядерного взрыва.

Вспышки сверхновых звезд, по данным источника [3], происходят в Галактике один раз примерно в сто лет. Однако, согласно автору источника [1], ежегодно вспыхивает несколько десятков сверхновых, но лишь малая их часть доступна для наблюдений, учитывая их значительную удаленность. В своем максимуме их светимость может в сотни тысяч, а в некоторых случаях и в миллиарды раз превышать солнечную, и поэтому, как сообщается в источнике [3], «сверхновые служат для определения таких космологических расстояний, на которых «обычные» звезды уже не видны даже в самые крупные современные телескопы». За время вспышки сверхновая может излучать энергии до эрг, причем она освобождается за несколько месяцев, в то время как Солнцу на это потребовалось бы миллиард лет.

Впервые вспышка сверхновой была зафиксирована в 1885 году астрономом Гартвигом, как пишет автор источника [2], причем находилась она достаточно близко от ядра Андромеды. Светимость этой звезды была всего примерно в 6 раз меньше светимости самой туманность, и вспышка могла быть увидена человеческим глазом без помощи оптических приспособлений. Это тем более поразительно, если учесть, что туманность Андромеды находится на расстоянии в 2 миллиона световых лет от Земли.

Характерной особенностью сверхновых, по мнению автора [1], является *кривая блеска* (см. Приложение 3), то есть зависимость величины звезды от времени. На примере звезды Гартвига можно сказать, что за две недели до достижения максимальной светимости ее блеск соответствовал девятой звездной величине, в то время как за год до этого он был равен примерно 15-й величине, то есть на месте сверхновой ничего нельзя было обнаружить. В следующем 1886 году также невозможно было наблюдать звезду даже с помощью самых больших телескопов.

По наблюдательным характеристикам сверхновые делятся на два типа. Как пишет автор источника [1], у сверхновых I типа после стремительного подъема яркость остается почти постоянной в течение длительного времени, затем ее блеск падает, после чего увеличивается ее видимая величина, а светимость уменьшается. II тип сверхновых показывает иную кривую блеска. Их максимумы светимости занимают значительно меньше времени, на заключительной стадии кривая становится несколько круче, чем у звезд I типа. Также, иногда наблюдаются и вторичные максимумы. Кроме того, можно сказать, что сверхновые I типа – это старые звезды, прошедшие стадию красных гигантов и превратившиеся в белых карликов либо в другие мертвые объекты. Масса этих звезд если и превышает солнечную массу, то только на 10-20%. В отличие от них, звезды II типа представляют собой молодые, очень массивные объекты (их масса превосходит массу Солнца до 10 раз) и находятся в спиральных рукавах Галактики, где рождаются звезды из газово-пылевой среды. Возраст звезд, вспыхивающих как сверхновые, не превышает обычно нескольких десятков миллионов лет.

Согласно источнику [1], в результате взрыва сверхновой звезды вокруг нее образуется туманность, скорость расширения которой огромна – порядка 10 000. Такая скорость есть главная особенность, отличающая остатки вспышек сверхновых от других туманностей, которые расширяются довольно умеренно, со скоростью нескольких десятков . Спустя сотни и тысячи лет облака газа, выброшенные при взрыве, начнут тормозиться окружающей средой, и их скорости снизятся впоследствии до сотен и даже десятков . Но уже задолго до этого не останется никаких следов взорвавшейся звезды, наблюдаемых в видимом диапазоне. Однако, туманность, образовавшаяся в результате подобной космической катастрофы, просуществует еще десятки тысяч лет. А по прошествии сотен тысяч лет лишь пульсары[[7]](#footnote-7), в которые превращается часть звезд, будут излучать радиоволны в течение многих миллионов лет.

Очевидно, по утверждению автора источника [1], что взрывы сверхновых провоцируют значительные возмущения межзвездной среды, которая не является однородной. Это ведет к тому, что уплотнения, находящиеся в этой среде, будут охвачены ударной волной, идущей от взрыва. Вследствие этого образуются плотные газовые сгустки нитевидной, вытянутой формы. Высокая плотность газа в таких нитях обусловит их скорое охлаждение до нескольких десятков тысяч градусов, так что станут доступны методам наблюдения оптической астрономии. Так, можно сделать вывод, что область взрыва будет окружена системой тонковолокнистых туманностей.

В источнике [2] указано, что в 1970 году на месте волокнистых туманностей в созвездии Лебедя был обнаружен источник мягкого рентгеновского излучения, причем размеры этого источника были близки размерам самой системы туманностей. Анализ рентгеновского спектра показал, температура излучающего газа приближена к нескольким миллионам кельвинов. При такой температуре и химическом составе, сходным с химическим составом межзвездной среды, линии излучения плазмы находятся в мягкой рентгеновской области спектра. Таким образом, был сделан вывод, что остатки вспышек сверхновых звезд являются источниками рентгеновского излучения в космосе. Но еще ранее также было обнаружено, подобные остатки являются мощными источниками и радиоизлучения. Как сообщает автор книги [1], в 1948 году английскими астрономами Райлом и Смитом был обнаружен необычайно яркий источник радиоизлучения в созвездии Кассиопеи, который был назван «Кассиопея А». Поток радиоизлучения, идущий от Кассиопеи, приближается к потоку радиоизлучения, идущего от Солнца в те периоды, когда на нем не наблюдается пятен, вспышек и других проявлений активности. Таким образом, достаточно удаленный от Земли космический объект посылает поток радиоизлучения, приблизительно равный тому, что идет от близкого к ней объекта, что является весьма удивительным фактом.

**Смерть звезд**

Согласно источнику [1], существуют три вида продуктов финального этапа звездной эволюции:

* Белые карлики
* Нейтронные звезды
* Черные дыры

О белых карликах уже было сказано выше. Что же представляют собой нейтронные звезды и черные дыры?

*Нейтронные звезды*

По данным источника [8], при взрыве сверхновой звезды массой около 25 солнечных остается плотное нейтронное ядро, или нейтронная звезда, имеющая массу примерно 1.6 солнечной массы. В звездах с массой менее 1.4 солнечной, которые не смогли достичь стадии сверхновой, давление вырожденного газа также не способно будет уравновесить гравитационные силы, так что звезда сожмется до состояния ядра. При этом механизм такого гравитационного коллапса будет тем же, что происходит при взрыве сверхновой звезды. Только что образовавшаяся нейтронная звезда должна будет иметь чрезвычайно высокую температуру, доходящую до нескольких миллиардов кельвинов. Кроме того, нейтронная звезда станет излучать огромную мощность в рентгеновском диапазоне, близкую к эрг. Как пишет автор источника [1], состоящая из миллиардов различных звезд Галактика излучает только

Далее, как говорится в источнике [8], в результате реакции с участием протонов и электронов образуются нейтроны, занимающие гораздо меньший объем, чем электроны. Появившаяся нейтронная звезда имеет плотность 1014- 1015г/см3 , а ее размер равен 10-15 км. Нейтрино, образующиеся в большом количестве в результате реакции, будут свободно выходить из нейтронной звезды, унося большое количество энергии, что повлечет быстрое остывание звезды. Ее температура в результате упадет с до К за время, равное приблизительно 100 с.

Как пишет автор [1],в 1967 г. в Кембриджском университете ученые Хьюиш и Белл открыли пульсары, являющиеся космическими источниками периодического электромагнитного излучения. Периоды повторения импульсов у большинства пульсаров находятся в интервале от 3.3·10-2до 4.3 с. Ученые считают, что пульсары - это вращающиеся нейтронные звезды, имеющие массу 1 - 3Mhttp://nuclphys.sinp.msu.ru/nuclsynt/images/target.gifи диаметр 10 - 20 км. Необходимо заметить, что только компактные объекты, имеющие свойства нейтронных звезд, могут сохранять свою форму, не разрушаясь при таких скоростях вращения.

В книге [2] находим, что с нейтронной звездой может произойти следующее. Поскольку сила тяжести в нейтронной звезде будет возрастать (и, как следствие, масса станет увеличиваться, а радиус уменьшаться), давление вскоре перестанет играть существенную роль. Итогом этого станет сокращение нейтронной звезды до ничтожно малых размеров. Гравитация вокруг малого объекта с огромной массой исключительно велика, и потому здесь будет проявляться эффект искривления световых лучей. Вначале нейтронная звезда будет находиться в равновесии, но на ее поверхности уже будет наблюдаться искривление световых лучей, так как сила тяжести имеет огромную величину. Исходящий с поверхности звезды луч света станет двигаться по искривленной траектории, пока не уйдет от поверхности на такое расстояние, на котором действие гравитации уже не будет столь сильным. Но при начинающемся коллапсе, когда масса нейтронной звезды все более увеличивается, гравитационное поле у поверхности также возрастает еще больше, соответственно, искривление световых лучей становится настолько сильным, что луч отклоняется в горизонтальном направлении и огибает звезду несколько раз, прежде чем уйти в пространство. В процессе коллапса нейтронная звезда, имеющая уже массу, равную трем солнечным, достигнет диаметра около 9 км, и свет уже не будет способен уйти от нее в пространство. Световой луч так искривится в поле силы тяжести, что вернется обратно на поверхность звезды, следовательно, больше никакое излучение, например, фотонное или нейтринное, от нейтронной звезды не сможет выйти вовне. Подобный объект назван черной дырой.

*Черные дыры*

Автор [1] пишет, что в стадии черной дыры «единственное, что остается от звезды для внешнего мира, – ее гравитационное поле, определяемое массой». Причем даже учет того, что звезда могла вращаться (пульсары), качественно не влияет на ситуацию, потому что никакое вращение не способно предотвратить коллапс достаточно массивных объектов после исчерпания запасов ядерного топлива.

Ученые, исследовавшие возможности столкновения черных дыр с другими звездами и между собой, пришли, согласно источнику [1], к следующему выводу. Оказалось, что после подобных столкновений могут образовываться новые черные дыры. Более того, в течение короткого времени они будут пребывать в сильно возмущенном состоянии, которое охарактеризуется мощным гравитационным излучением, после чего вернутся к спокойному состоянию. В общих чертах были сформулированы важные математические теоремы. Две из них таковы:

1. Образовавшаяся черная дыра никогда не может быть разрушена.
2. Одна черная дыра не может разделиться на две черные дыры, в то время как обратный процесс возможен.

Однако, английский ученый Хоукинг показал, что первая теорема не совсем верна, потому что с течением времени образовавшиеся каким-либо способом черные дыры очень малой массы способны исчезать, «испаряться».

 Хоукинг показал, что черные дыры могут испускать некоторые частицы. Источником этих частиц является процесс образования виртуальных частиц и античастиц в вакууме, которыми он заполнен. При отсутствии каких-либо внешних воздействий, полей, эти виртуальные частицы не могут материализоваться. Однако в довольно сильных или переменных полях, как, например, электрическое или гравитационное, виртуальные частицы способны превратиться в материальные, которые вполне могут быть наблюдаемы. На границе черной дыры действуют мощные приливные силы. Под действием этих сил некоторые из виртуальных частиц или античастиц могут вылететь за пределы черной дыры. Таким образом, черная дыра должна становиться источником излучения. Энергия, излучаемая в пространство черной дырой, поступает из её недр, и поэтому в процессе такого испускания частиц масса и размеры черной дыры постепенно уменьшаются. Таков механизм “испарения” черной дыры. Оценки, сделанные учеными, показывают, что темп “испарения” является очень медленным. Черная дыра массой в 10 солнечных масс испарится за 1069лет. Время испарения сверхмассивных (миллиарды масс Солнца) черных дыр, которые могут находиться в центре больших галактик, способно составлять 1096лет.

Необходимо заметить, что, согласно источнику [8], черная дыра может быть обнаружена только по косвенным признакам, к примеру, если она входит в состав двойной звездной системы с видимой звездой. В данном случае черная дыра будет затягивать, поглощать газ этой звезды. В свою очередь, газ начнет нагреваться, становясь источником интенсивного рентгеновского излучения, которое уже может быть зарегистрировано.  
В настоящее время ученые не располагают прямыми экспериментальными подтверждениями существования черных дыр. Но существует ряд космических объектов, поведение которых представляется возможным объяснить присутствием черных дыр. Так, например, наблюдается космический объект Лебедь XI, представляющий собой двойную систему с периодом вращения 5.6 суток. В состав данной системы входят голубой гигант с массой 22 солнечных и невидимый источник пульсирующего рентгеновского излучения, который, вероятно, является черной дырой так как масса данного объекта не позволяет ему быть нейтронной звездой).

Автор источника [3] также добавляет, что, наряду с черными дырами, которые образовались при коллапсе звезд, во Вселенной также могут существовать черные дыры, возникшие задолго до появления первых звезд по причине неоднородности Большого Взрыва. Появившиеся при этом сгустки вещества могли сжиматься до состояния черных дыр, в то время как остальная часть вещества расширялась. Черные дыры, образовавшиеся на самом раннем этапе Вселенной, называют реликтовыми. Астрономы предполагают, что размер некоторых из них может быть значительно меньше размера протона.

**Заключение**

Таким образом, учеными наблюдается чрезвычайно разнообразная и сложная эволюция звезд, начиная от стадии их образования вплоть до завершения их длительного «жизненного» пути в качестве черных дыр. Подробное исследование звездной эволюции, надо полагать, обладает отнюдь не локальным значением. Учитывая, что, как уже было сказано, звездное вещество занимает исключительно большую часть пространства Вселенной, понимание тончайших закономерностей звездной эволюции, вероятно, должно привести к более глубокому пониманию структуры и эволюции Вселенной в целом.

**Литература**

1. Шкловский И. С. Звезды: их рождение, жизнь и смерть. М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1984.
2. Киппенхан Р. Сто миллиардов Солнц. Рождение, жизнь и смерть звезд. М.: Мир, 1990.
3. Чернин А. Космология: большой взрыв. Фрязино, «Век 2», 2005.
4. <http://ru.wikipedia.org/wiki/Диаграмма_Герцшпрунга_—_Рассела>
5. <http://crydee.sai.msu.ru/~mir/Star_Life.site/Evolution/HR_diagram/ms.htm>
6. <http://ru.wikipedia.org/wiki/Файл:RocheLobesDetailed.PNG>
7. <http://www.astronet.ru/db/msg/1201870/07.html>
8. http://nuclphys.sinp.msu.ru/nuclsynt/n10a.htm

**Приложения**

Приложение 1

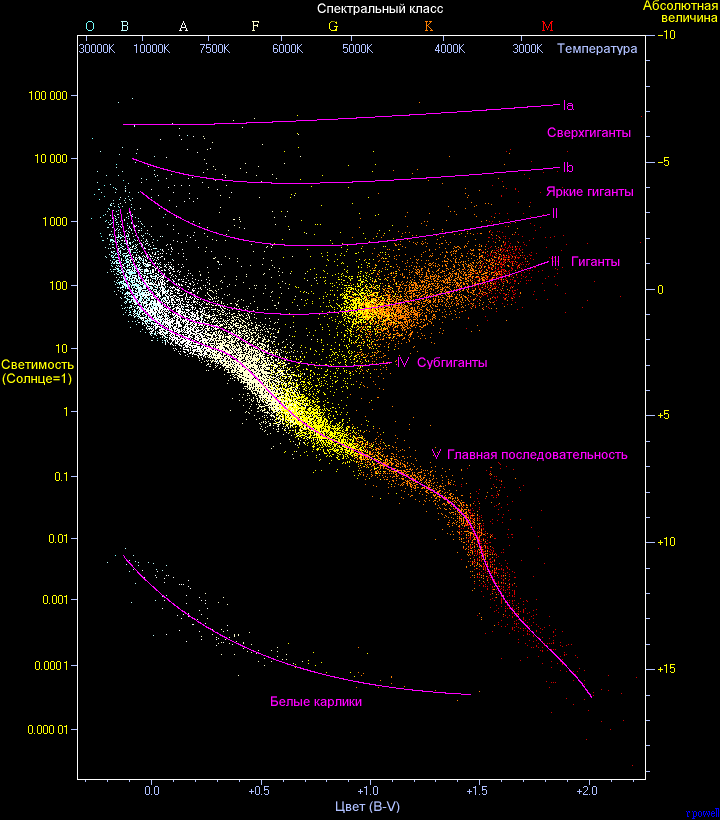
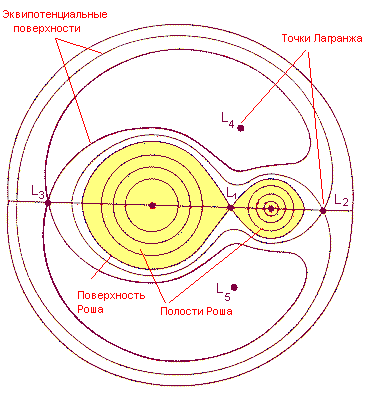
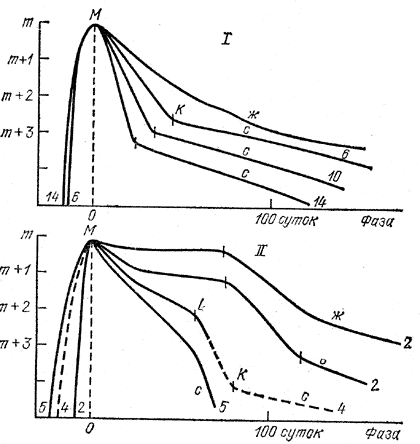


Диаграмма Герцшпрунга-Рассела [4].

Приложение 2

Схема поверхности Роша [6].

Приложение 3



Кривые блеска сверхновых звезд [7].

1. «Парсек – расстояние, с которого диаметр земной орбиты виден под углом в одну секунду. Численно один парсек близок трем световым годам» [3]. [↑](#footnote-ref-1)
2. Болометрическая светимость – это «мощность излучения во всем диапазоне электромагнитных волн, включая ультрафиолетовые и инфракрасные волны» [1]. [↑](#footnote-ref-2)
3. В источнике [2] указано число в 40 миллионов кельвинов. [↑](#footnote-ref-3)
4. По мнению автора [1], затем возможны три пути ядерных реакций. [↑](#footnote-ref-4)
5. «Главная последовательность (ГП) - наиболее населенная область на диаграмме Гецшпрунга – Рессела (до 90% всех звезд лежат на ней). Основная масса звезд на диаграмме ГР расположена вдоль диагонали на полосе, идущей от правого нижнего угла диаграммы в левый верхний угол. Эта полоса и называется главной последовательностью» [5]. [↑](#footnote-ref-5)
6. Субгиганты – это звезды, успевшие продвинуться в своей эволюции настолько, что они покинули главную последовательность. В их ядре иссякло водородное топливо и началось горение гелия (*тройная гелиевая реакция)* [1]. [↑](#footnote-ref-6)
7. «Пульсары – это такие радиоисточники, излучение которых сосредоточено в отдельных импульсах, повторяющихся через строго определенный промежуток времени» [1]. [↑](#footnote-ref-7)