

Лекция №9. ЗВЕЗДЫ И ЗВЕЗДНЫЕ СИСТЕМЫ

Что такое звезда? Вот выдержки из разных словарей:

- Звезда – Небесное тело, светящееся собственным светом, представляющееся взору человека светящейся точкой на небесном своде.
- Звезда – раскаленный газовый (плазменный) шар, структурная составляющая галактик.
- Звезда – гравитационно-связанная и пространственно-обособленная масса вещества во Вселенной, в которой на некотором интервале времени происходят термоядерные реакции синтеза химических элементов.
- Звезда представляет собой самосветящийся плазменный шар.

Классификация звезд основывается на таких характеристиках как масса, светимость (полное количество энергии, излучаемое звездой в единицу времени), радиус и температура поверхностных слоев.

Температура звезды определяет цвет звезды, то есть ее спектральные характеристики. Температуру нагретого тела можно оценить по закону Вина:

$\lambda_{\max} \sim \frac{1}{T}$. Если температура поверхностных слоев звезды 3000 – 4000К, то ее цвет красноватый; 6000 – 7000К – желтоватый; 10000 – 12000К – голубоватый (очень горячие звезды). Подавляющее большинство звезд имеют температуру около 3500К.

Светимость звезды определяют с использованием так называемой “величины” звезды. По определению, две звезды, отличающиеся по наблюдаемой светимости (блеску) в 100 раз, будут отличаться друг от друга на 5 видимых звездных величин. Следовательно, блеск звезды нулевой и 20-й звездной величин будут отличаться в 100 млн. раз.

Звездная величина Полярной звезды +2. Звезда, имеющая звездную величину +3, слабее Полярной в 2,512 раза, а звездную величину +1 – ярче Полярной в 2,512 раза. Невооруженным глазом видны звезды, имеющие звездную величину +6 и меньше. Шкала видимых звездных величин, доступных для наблюдения современными оптическими приборами, заключена от – 26,7 для Солнца (самой яркой звезды нашего неба) до +24 для самой слабой из видимых звезд.

Солнце гораздо ярче других звезд. Однако это совсем не значит, что его светимость самая большая. Оно просто близко. Для корректного сравнения светимостей необходимо исключить фактор расстояния. В связи с этим введено понятие **абсолютной звездной величины** как видимой звездной величины, которую звезда имела бы, находясь на расстоянии 10пс (парсек) от Солнца. Именно эта характеристика и будет определять светимость звезды. Абсолютная звездная величина Солнца +5. Так как расстояние до Солнца и Проксимы Центавра меньше 10пс, то их абсолютные звездные величины больше видимых звездных величин.

Возникает вопрос: почему так важно уметь сопоставлять характеристики звезд, учитывать поправки на расстояние и другие причины (например, межзвездное поглощение), о которых мы не говорим? Только в этом случае мы можем получать объективную информацию о звезде и имеем возможность сопоставления поведения разных звезд на разных этапах эволюции. Измерив расстояние до звезды и видимую звездную величину, мы получаем абсолютную звездную величину звезды, являющуюся мерой ее светимости. По измерениям зависимости интенсивности излучения звезды от длины волны можно установить ее температуру. Известно, что энергия, излучаемая единицей площади поверхности нагретого тела, пропорциональна четвертой степени температуры T тела (закон Стефана–Больцмана): $Q = \sigma T^4$ ($\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$ Дж/(м²К⁴с²)). Полная энергия, испускаемая звездой (светимость), будет определяться радиусом звезды R : $L = 4\pi \sigma R^2 T^4$. Отсюда мы можем оценить **радиус звезды**, абсолютная звездная величина и температура которой известны. Для этого надо использовать Q и L для Солнца (абсолютная звездная величина +5, радиус 700000км, температура 6000К) и составить пропорцию. Радиусы звезд меняются в очень широких пределах. Есть звезды, по своим размерам не превышающие Землю (“белые карлики”). Нейтронные звезды имеют радиусы в несколько десятков километров. Существуют огромные “пузыри” (“красные гиганты”) – сверхгиганты, внутри которых может поместиться орбита Марса (тысячи радиусов Солнца).

Массы звезд изменяются в сравнительно узких пределах. Очень мало звёзд, массы которых меньше или больше 10 масс Солнца. Типичные значения масс звезд лежат в диапазоне 0,03 – 60 масс Солнца ($2 \cdot 10^{30}$ кг). Плотность Солнца 1,4 г/см³, плотность “пузырей” – в миллион раз меньше. Плотность “белых карликов” и нейтронных звёзд до 10^{12} г/см³.

Спектральная классификация – классификация звёзд по спектру излучения, в первую очередь, по температуре фотосферы. По спектрам все звезды делятся на 10 классов (слайд). В 1900 г. американский астроном Эдуард Чарлз Пикеринг предложил более подробную классификацию, которая содержит 7 классов, обозначенных буквами O, B, A, F, G, K, M – от самых горячих к самым холодным. (*Мнемонические правила: Один Великий Англичанин Финики Жевал Как Морковь; O, Be A Fine Girl, Kiss Me*). Каждый класс разбивается на 10 подклассов – B0, B1, B2... B9. Согласно этой классификации наше Солнце – звезда желтый карлик класса G2. Эта классификация лежит в основе современной (гарвардской) спектральной классификации звезд.

Внешние оболочки звёзд, как правило, представляют собой сильно ионизированный водород (H) и гелий (He), плазму с одинаковым числом положительно и отрицательно заряженных частиц. Тяжёлые элементы, также в ионизированном состоянии, присутствуют в виде незначительных “добавок”. Заметим, что возможна ситуация, когда атомы полностью потеряют электроны (высокотемпературная плазма). В этом случае отдельно существуют ядра и электроны, понятие химического элемента исчезает.

Химический состав звезды определяют по ее спектру. Средний химический состав наружных слоев звезды выглядит примерно следующим образом. На 10^4 атомов Н (водорода) приходится 10^3 атомов С (углерода), 5 атомов О (кислорода), 2 атома N (азота), 0,3 атома Fe (железа). Содержание других элементов еще ниже. В то же время следует отметить, что тяжелые элементы, занимая во Вселенной весьма скромное место, определяют характер эволюции звезд. Кроме того, вопрос возникновения жизни на Земле, существования жизни во Вселенной прямо связан с эволюцией химических элементов, их происхождением.

Класс А включает так называемые водородные звезды со спектрами излучения, характерными для водорода. Типичная звезда этой группы – Сириус. Класс F включает звезды, в спектрах которых особо выделяются спектры линий Са (кальция) и Н (водорода). К классу G относятся звезды, в спектрах которых, кроме спектральных линий Са и Н, видны спектральные линии многих металлов, особенно Fe. Солнце принадлежит к этой группе, поэтому звезды такого типа часто называют звездами солнечного типа. Звезды класса K имеют в спектрах интенсивные линии Са и линии, указывающие на присутствие других металлов. В класс M входят звезды, спектры которых содержат полосы, характерные для окислов металлов, особенно окиси титана. Максимум излучения сдвинут в красную область спектра. Типичный представитель – звезда Бетельгейзе (созвездие Ориона).

Важную роль в поведении звезд играют **магнитные поля**. В пятнах на Солнце магнитное поле достигает 318400 А/м. Это поле, которое можно получить на Земле с помощью относительно сильного электромагнита. Напряженность магнитных полей отдельных звезд достигает $79,6 \cdot 10^4$ А/м.

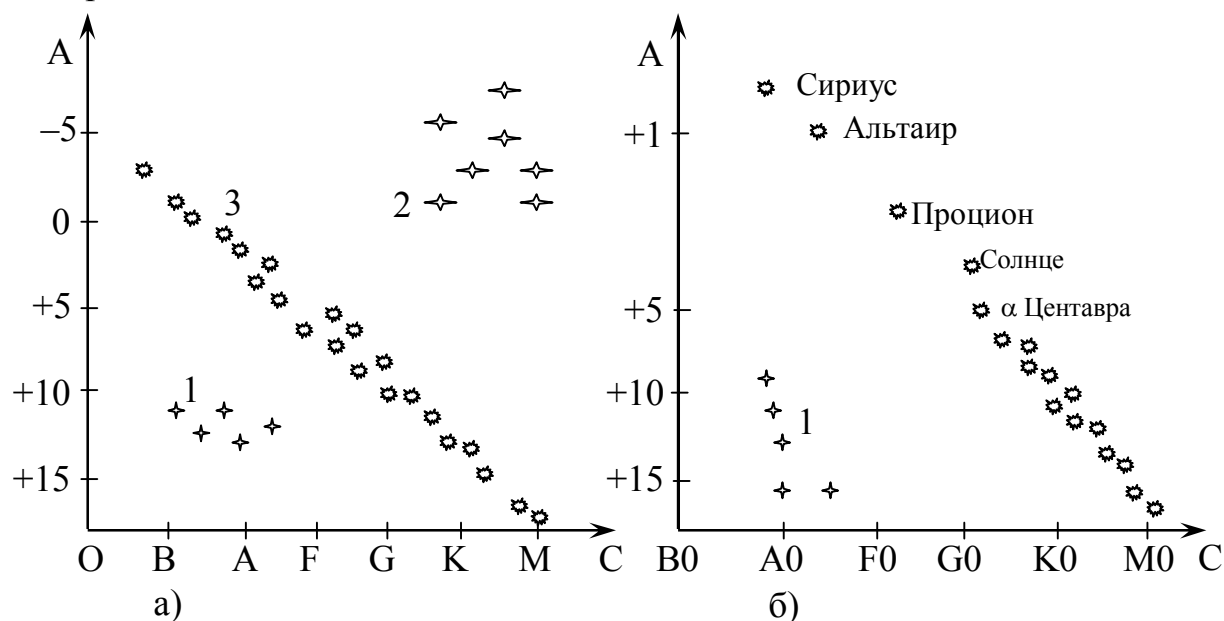


Рис. 1. Диаграммы зависимости абсолютной звездной величин (A) от спектрального класса (C): а – для нашей Галактики, б – для ближайших к солнцу звезд. 1 – Белые карлики, 2 – Красные гиганты, 3 – гиганты

В 1905 г. Эйна́р Герцшпру́нг и Генри Рессел независимо друг от друга заметили, что голубые (горячие) звезды малой светимости встречаются очень редко, а красные звезды образуют две группы. В 1911г. Герцшпрунг, а в 1913г. Рессел начали строить диаграммы, связывающие светимость звезд со спектральным классом (рис. 1).

Звезды лежат на этой диаграмме не случайным образом, а образуют явно выраженные последовательности (рис. 1, а). Большинство звезд находятся в пределах сравнительно узкой полосы, идущей от левого верхнего угла диаграммы к правому нижнему. Это так показываемая “главная последовательность”. В верхнем правом углу – довольно беспорядочная группировка звезд. Их спектральные классы – G, K, M. Это яркие звезды с абсолютными звездными величинами от +2 до –6 – “красные гиганты”. В левой нижней части диаграммы – небольшое количество звезд. Их абсолютные величины +10 и больше, а спектральные классы от В до F. То есть это горячие звезды с низкой светимостью. Но низкая светимость при высокой поверхностной температуре может быть только тогда, когда радиус звезды мал. В этой части диаграммы находятся маленькие горячие звезды – “белые карлики”.

Для того чтобы получить представления об относительном количестве звезд разных последовательностей, можно построить диаграмму Гершпрунга – Рессела для близких окрестностей Солнца (рис. 1, б). В объеме радиусом 5 пс подавляющее количество звезд слабее и холоднее Солнца. Это – “красные карлики”. Только три звезды излучают сильнее Солнца – Сириус, Альтаир и Прокцион. Зато на рисунке пять “белых карликов”. Это являются свидетельством того, что во Вселенной их количество достаточно велико.

Оценки показывают, что “белых карликов” в нашей звездной системе (Галактике) по крайней мере несколько миллиардов (полное количество звезд в нашей Галактике около 150 млрд.). Совершенно ясно, что наблюдать звезды-гиганты с высокой светимостью проще – их видно с больших расстояний.

Существование главной последовательности, на которую попадает, по крайней мере, 95% всех звезд (в том числе и Солнце), является аргументом в пользу предположения, что большинство звезд подчиняется одним и тем же законам, имеет близкий химический состав, проходит одинаковые этапы в своем развитии.

Рассмотрим модель эволюции звезды. Если при этом опираться на модель Большого Взрыва (Гамов), 10 ÷ 20 млрд. лет назад началось образование расширяющейся Вселенной из какого-то начального, неизвестного нам, “сингулярного” состояния бесконечной или очень большой плотности. Скорее всего, вещество после “Большого взрыва” разлетается во все стороны. Это хорошо подтверждается наблюдениями: вещество “разбегается” от нашей Галактики со скоростью, монотонно возрастающей при увеличении расстояния, а реликтовое излучение имеет одну и ту же энергию (температуру) – 3К в любой точке небесной сферы.

Но если бы расширение Вселенной происходило абсолютно однородно в пространстве, то вещество не могло бы конденсироваться (слипаться) под действием гравитационных сил и Вселенная представляла бы собой газ из атомов и элементарных частиц, становящийся всё более и более разреженным в процессе расширения Вселенной. Не было бы ни звезд, ни Галактик, ни планет. Вспомним, что средняя плотность вещества Вселенной 10^{-21} г/см³. Единственными силами, приводящими к образованию неоднородностей в распределении вещества во Вселенной, являются гравитационные силы.

Таким образом, мы вынуждены признать, что современная структура Вселенной связана с неоднородностями, возникшими на ранних стадиях расширения. Уже тогда были слабые разрежения и сжатия вещества, разбросанные по пространству. Изменение средней плотности должно быть заметным, но не слишком большим. В современных моделях Вселенной показано, что “выжили” лишь те флуктуации плотности, массы которых достигали 10^{16} массы Солнца.

Итак, причиной формирования скоплений газа во Вселенной являются *случайности (флуктуации* – случайные колебания, отклонения физ. величины от их среднего значения) в распределении газа и действия сил взаимного гравитационного притяжения между отдельными молекулами газа.

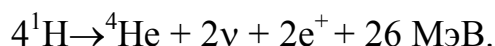
Вероятная картина Эволюции звезды такова. Вследствие случайного возрастания плотности из рассеянного во Вселенной вещества формируется богатое водородом газопылевое облако. Под влиянием сил гравитационного взаимодействия это облако уплотняется, образуя газовый шар. Заметим, что шар имеет наименьшую площадь поверхности при данном объеме. Поэтому образование шара из облака неопределенной формы энергетически выгодно. За счет гравитационных сил шар сжимается, плотность возрастает. Вещество теряет прозрачность, но остается газом. Но растет и давление внутри шара, противодействующее силам гравитации. При однообразном сжатии (отсутствует возможность обмена энергией с внешней средой; это тот же процесс, вследствие которого нагревается ручной насос при быстрой подкачке шины) температура шара (это уже *протозвезда*) увеличивается, часть энергии излучается в пространство. В дальнейшем протозвезда под действием гравитационных сил продолжает сжиматься. Ее размеры уменьшаются, поверхностная температура растет. В этот период температура и плотность недр звезды становятся достаточными для начала термоядерной реакции. Давление и температура внутри звезды возрастают, гравитационные силы и силы внутреннего давления становятся равными, газовый шар перестает сжиматься. Протозвезда становится звездой.

Чтобы пройти эту самую раннюю стадию эволюции, протозвездам необходимо сравнительно немного времени. Все зависит от начальной массы. Если масса протозвезды больше массы Солнца, для этого нужно всего лишь несколько миллионов лет, если меньше несколько сотен миллионов лет. Перестав сжиматься, звезда в течение значительного времени излучает.

Ее излучение поддерживают термоядерные реакции в центральных областях, а размер – противодействие гравитационных сил и сил внутреннего давления. Таким образом, главная последовательность представляет собой такую область на диаграмме “спектр – светимость”, где звезда может длительно и устойчиво излучать благодаря термоядерным реакциям.

Масса звезды определяет место и время пребывания звезды на главной последовательности. Если масса велика, излучение звезды имеет огромную мощность и она достаточно быстро расходует запасы водорода. Горячие голубые звезды ($M > 10M_{\text{Солнца}}$) находятся на главной последовательности всего лишь несколько миллионов лет. Если масса звезды $M \cong M_{\text{Солнца}}$, то время пребывания возрастает в тысячу раз (несколько миллиардов лет).

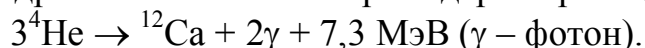
“Выгорание” водорода в гелий в центральных областях звезды идет по реакции:



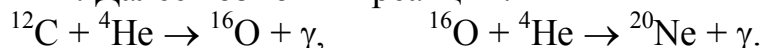
При такой термоядерной реакции из 4 ядер водорода образуется одно ядро гелия, два нейтрино, два позитрона и выделяется 26 млн. электрон-вольт. Среднее время реакции при $T \cong 13 \cdot 10^6 \text{ К}$ и плотность водорода 100 г/см^3 около 10^{10} лет (в центре Солнца). В наружных областях звезды водород не “выгорает” (низкие температуры). Что же произойдет со звездой, когда весь водород в ее центральных областях “выгорит”? температура и давление ионизированного газа уменьшится, из-за гравитационных сил звезда сжимается, температура и давление в центральных областях увеличивается.

Значит, звезда представляет собой саморегулирующуюся систему. При этом в центральной области звезды будет уже не только водород, но и гелий (в него превращается водород при термоядерной реакции). При этом размеры звезды и ее светимость начнут расти. Звезда сходит с главной последовательности и переходит в область “красных гигантов”: при сжатии ядра ее оболочка раздувается, и, несмотря на рост температуры, светимость звезды падает. ***Солнце перейдет в разряд “красных гигантов” ≈ через 5 млрд. лет. Его орбита расширится до орбиты Земли. Земля станет безжизненной сухой планетой.***

После того как вследствие термоядерной реакции температура ядра “красного гиганта” достигает $100 \div 150$ млн. К, а его плотность будет достаточно велика, в ядре начнется новая термоядерная реакция:



После начала этой ядерной реакции звезда перемещается влево по диаграмме “спектр-светимость”, растет ее температура, размер остается примерно постоянным. Далее возможны реакции:



В этом состоит механизм нуклеосинтеза, образования тяжелых элементов из легких. ***Предпосылка формирования всех форм жизни!***

Что произойдет, когда реакция “гелий–углерод” исчерпает себя, выгорит весь гелий, а так же прекратится ядерная реакция “водород–гелий” в тонкой оболочке ядра?

Оказывается, что на этом этапе эволюции звезды с массами до $1,4 M_{\odot}$ “сбрасывают” наружную разряженную оболочку. Через несколько десятков тысяч лет – мгновение в космических масштабах – оболочка рассеивается и остается небольшая очень горячая и плотная звезда. Медленно остывая, она превращается в “белого карлика” (“белый”, т.е. очень горячий).

“Белые карлики” как бы “вызревают” в недрах “красных гигантов”. “Белые карлики”, в которых весь водород выгорел и ядерные реакции прекратились, представляют собой, видимо, последний этап эволюции звезды. Постепенно остывая, они излучают все меньше и меньше энергии, светимость падает, гравитационные силы сжимают вещество. Белые карлики постепенно переходят в разряд “черных карликов” – холодных звезд огромной плотности и небольшого размера (порядка земного при массе порядка солнечной). Этот процесс длится сотни миллионов лет.

Так прекращает свое существование большинство звезд. Однако финал жизни звезд, массы которых больше M_{\odot} , может быть иным. Некоторые звезды на определенном этапе своей эволюции взрываются. В этих случаях говорят о вспышке “сверхновой”. От “сверхновых” следует отличать обычные “новые” звезды. Вспыхивают новые звезды достаточно часто – в Галактике до 100 в год. Новые звезды – это тесные двойные системы, и присутствие соседки мешает нормальной эволюции звезды, в частности – переходу ее в стадию “красного гиганта”. Возникающая неустойчивость ведет к периодическим вспышкам. Светимость в этот период резко возрастает, но она в тысячи раз меньше, чем у сверхновых.

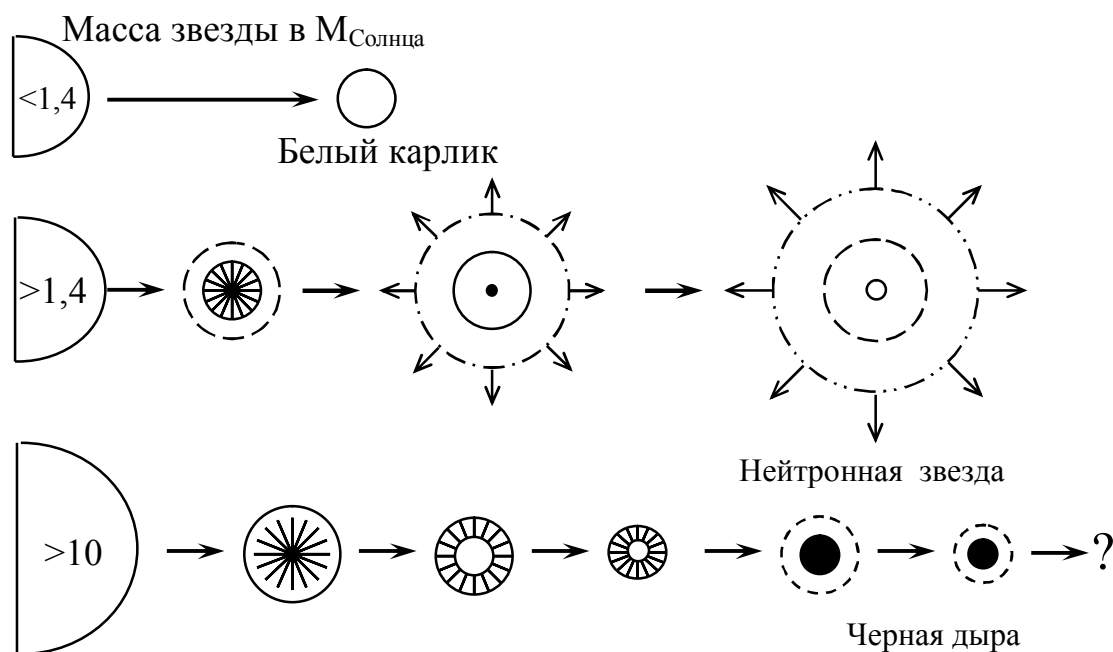


Рис.2. Иллюстрация эволюции звезды в зависимости от ее начальной массы

В отличие от вспышек новых звезд, вспышка сверхновой – весьма редкое явление. В больших звездных системах, подобных нашей Галактике, вспышки сверхновых происходят в среднем раз в сто лет. Известны описания вспышек сверхновых в Галактике. Так, по китайским хроникам, в июле 1054г. на небе появилась звезда, видимая даже днем. При этом по своему блеску она превосходила Венеру. Но через несколько месяцев исчезла. Уже в наше время выяснилось, что на месте этой звезды находится Крабовидная туманность. В конце февраля 1987 г. в одном из ближайших спутников Галактики – Большом Мегеллановом Облаке вспыхнула сверхновая. Обнаруженная вспышка произошла всего за 180000 лет до момента наблюдения. Впервые удалось не только зафиксировать явление взрыва, но и получить информацию о состоянии звезды до взрыва.

Существует несколько гипотез о причине взрыва звезд, наблюдаемых как сверхновые. Единой точки зрения нет. Возможный вариант – катастрофически быстрое выделение потенциальной энергии гравитационных сил при резком сокращении размеров ядра.

Если звезды с массой меньше $M_{\text{Солнца}}$ могут преодолеть этап эволюции от протозвезды к “красному гиганту” и “белому карлику”, то звезды, у которых $M \cong 1,4 \div 2,5 M_{\text{Солнца}}$ не могут перейти в устойчивое состояния белого карлика. После сброса оболочки они катастрофически быстро сжимаются до размеров порядка 10 км. При этом скорость вращения должна резко возрастать (вспомните фигуриста, прижимающего руки к телу во время вращения!). теоретические расчеты показывают, что такие звезды состоят из вещества плотностью до 10^{15} г/см³. Это уже “плотно упакованные” нейтроны, образующие нейтронные звезды.

Первоначальная температура поверхности нейтронной звезды – сотни млн. К (до млрд.). Однако звезда быстро остывает. Даже в случае высокой температуры поверхности нейтронная звезда является очень сложным объектом для наблюдения из-за малых размеров, и пытаться обнаружить нейтронные звезды по тепловому и электромагнитному излучению бесполезно.

В 1967г. на небе был обнаружен объект, излучающий кратковременные радиоимпульсы с периодом 1,33с. позже было обнаружено еще несколько таких источников. Это сразу привело к мысли о внеземных цивилизациях, данные о наблюдениях были засекречены, в течение полугода об этих наблюдениях никто не знал. Но достаточно быстро нашлось объяснение наблюдаемому явлению – мощное импульсивное радиоизлучение связано с быстрым вращением звездообразных объектов. Эти объекты получили название *пульсара*. Известен пульсар с периодом 0,033с. так быстро вращаться может только очень маленький объект. Оказалось, что пульсар – не что иное, как нейтронная звезда. При тщательном наблюдении был обнаружен и еще один факт. Оказалось, что период вращения возрастает, то есть скорость пульсара уменьшается.

Если в ядре звезды “выгорел” весь водород, то давление газа в ядре не может уравновесить гравитационные силы при $M \cong 2,5 \div 10 M_{\text{С}}$. Что может

произойти с такой звездой? Она начнет сжиматься с огромной скоростью, плотность вещества начнет резко расти. Через весьма короткое время (секунды!) звезда может превратиться в сверхновую точку, будет раздавлена своей собственной массой – гравитационный коллапс. Возможно ли такое сжатие звезды? Вспомним о так называемой второй космической скорости. Это скорость, которое должно иметь тело, чтобы покинуть поверхность планеты или звезды и выйти на параболическую траекторию. Для Земли $v_2 = 11,18$ км/с. для Солнца – 700 км/с. если наше Солнце сожмется до радиуса 3 км, то $v_2 = 300000$ км/с ($v_2 = C$). Тут вступают в силу законы общей теории относительности. Замедляется течение времени, из такого объекта не может выйти никаких излучений и частиц, то есть этот объект для внешнего мира будет заметен только по очень сильному гравитационному полю. Такой объект называют **“гравитационной могилой”** или **“черной дырой”**.

Именно с черными дырами связаны гипотетические модели многосвязных Вселенных, гипотезы о том, что черные дыры – входы в другие миры. Возможно, что ядро нашей Галактики – черная дыра.

Есть ли способ обнаружения черной дыры? Ведь ее невозможно увидеть. Зато возможно, наблюдая за движением звезд, выявить (по “смещению” спектра излучения) направления и величины скоростей. Сегодня известно несколько точек во Вселенной, к которым сходятся векторы скоростей окружающих звезд. Возможно, в этих точках находятся черные дыры.

Стивен Уильям Хокинг (1942, Оксфорд, Великобритания) — один из наиболее влиятельных и известных широкой общественности физиков-теоретиков нашего времени. В 1962 году он закончил Оксфордский университет и начал занятия теоретической физикой. Тогда же у Хокинга стали проявляться признаки бокового амиотрофического склероза, которые привели к параличу. После операции на горле в 1985 году он потерял способность говорить. Друзья подарили ему синтезатор речи, который был установлен на его кресле-коляске. Некоторую подвижность сохранил лишь указательный палец на правой руке Хокинга. С его помощью физик управляет компьютером, с помощью которого может общаться с окружающими. Стивен Хокинг изучает фундаментальные законы, которые управляют Вселенной.

Его главные достижения:

- применение термодинамики к описанию чёрных дыр;
- разработка в 1975 г. теории о том, что чёрные дыры «испаряются» за счёт явления, получившего название излучение Хокинга.

21 июля 2004 года Хокинг представил доклад, в котором он изложил свою точку зрения на разрешение парадокса исчезновения информации в чёрной дыре.

Отметим, что одиночная звезда не может накопить массу больше 100 M_{\odot} . При таких массах звезды радиационное давление изнутри звезды приведет к взрыву. Непосредственными наблюдениями звезды с $M > 75 M_{\odot}$ не обнаружены. Звезды с $M > 25 M_{\odot}$ неустойчивы и теряют газ под действием радиационного давления или при взрывных процессах.

В 1963г. были обнаружены объекты еще одного типа, **“квazarы”** (квази, лат. quasi, как будто, мнимый, quasar, квазизвездный источник радиоизлучения). Эти объекты имеют звездообразный вид, являются источниками мощного радиоизлучения и удаляются от нашей Галактики со скоростями до 200 тыс. км/с. они находятся на периферии Вселенной, дальше самых удаленных Галактики. И то, что мы их видим, говорит о том, что их

светимости превосходят светимости не просто звезд, а целых галактик. В то же время размеры квазаров в млн. раз меньше размеров галактик. И если происхождение пульсаров было достаточно быстро понято, то природа квазаров до сегодняшнего дня неясна. Изучение квазаров и ядер галактик показало, что и те и другие по своей природе в корне отличаются от звёзд, планет и межзвёздной пыли или газа. Существует гипотеза, что квазары – это крупные куски материи, выброшенные из ядра Галактики во время происшедшего в нем взрыва.

Подчеркнем, что средняя интенсивность тепловыделения в типовых звездных термоядерных реакциях по земным масштабам ничтожна. Так, для Солнца на один грамм массы в секунду выделяется $2 \cdot 10^{-7}$ Дж, что гораздо меньше энерговыделения в живом организме в процессе обмена веществ. Однако этот поток энергии поддерживающийся в течении 5 млрд. лет, то есть общее энерговыделение в млн. раз больше, чем при любом известном химическом процессе. Кроме того, вследствие огромной массы Солнца полная излучаемая им энергия чрезвычайно велика (она соответствует ежесекундному уменьшению $M_{\odot} \approx$ на 4 млн. тонн).

Возраст Солнца около 5 млрд. лет. Ежесекундно оно излучает энергию более 10^{26} Дж. Тогда за это время оно потеряло посредством излучения более 10^{43} Дж. Пусть первоначально Солнце состояло только из водорода, полностью превращающегося в результате термоядерной реакции в гелий. Тогда выделившееся количество энергии составит около 10^{45} Дж. Это в сто раз больше энергии, испущенной Солнцем за время своего существования. То есть для поддержания излучения на наблюдаемом уровне Солнце “израсходовало” не более 10% своей массы.