

Звезды

А.ДОЛГИНОВ

Межзвездная среда

Основной составляющей межзвездной среды, как и всей нашей Вселенной, является водород. Межзвездная среда очень неоднородна. Молекулы водорода сконцентрированы в гигантских молекулярных облаках диаметром около ста световых лет и массой около трех миллионов масс Солнца. Их температура в нашей Галактике составляет в среднем $-260\text{ }^\circ\text{C}$, причем в одном кубическом сантиметре содержится около тысячи молекул. Облака атомарного водорода с температурой $-150\text{ }^\circ\text{C}$ и концентрацией 20 см^{-3} окружены теплой межоблачной средой с температурой около десяти тысяч градусов и концентрацией $0,2\text{ см}^{-3}$. Горячие области сосредоточены в основном вблизи звезд, которые ионизируют газ своим ультрафиолетовым излучением. Самый горячий газ с температурой порядка 10^6 К остался от взрывов массивных звезд – сверхновых. Он очень разреженный, но заполняет почти половину Галактики.

Основные области межзвездного газа

Фаза	Температура, К	Плотность, см^{-3}	Доля объема в Галактике, %
Горячая	10^6	$3 \cdot 10^{-3}$	40 ± 25
Теплая	8000	0,25	50
Прохладная	80	40	3
Холодная	10	300	1

Межзвездная среда заполнена излучением, начиная от микроволнового и кончая гамма-излучением с высокой энергией. Не только звезды являются источником излучения, но и газ, и плазма межзвездной среды, а также есть излучение, которое сохранилось с самых ранних стадий развития нашей Вселенной. Наряду с атомами, молекулами и ионами водорода в межзвезд-

ной среде имеются сложные молекулы, причем как двухатомные, так и многоатомные. Концентрация таких молекул очень мала – всего одна десятимиллионная от количества водорода. Хотя этих молекул очень мало, их излучение иногда бывает вполне заметным. Сложный характер энергетических уровней таких молекул и широкий спектр длин волн излучений, распространяющихся в межзвездной среде, создают благоприятные условия для квантовых переходов того же типа, который лежит в основе лазеров. Такое излучение межзвездных молекул в микроволновом диапазоне длин волн называется мазерным излучением.

Еще одна составляющая межзвездной среды – это межзвездная пыль. Пылинки образуются в атмосферах холодных звезд, а также в результате химических реакций в межзвездной среде. Больше всего пылинок в сравнительно холодных облаках нейтрального газа. Пылинки имеют сложный состав. Они могут содержать силикаты, грязные льдинки, железо и т.д. По размеру пылинки не больше микрона, однако именно они ответственны за поглощение света звезд и, тем самым, за непрозрачность отдельных областей межзвездной среды. Есть целые участки неба, где поглощение не позволяет видеть удаленные звезды. Эти области носят название «угольных мешков». Такие «мешки» заслоняют от нас центральную область Галактики.

Расширяющиеся оболочки горячих звезд, которые ионизованы излучением этих звезд, образуют так называемые планетарные туманности. Скорость их расширения – порядка 20 км/с , размеры – около одной световой недели.

Для межзвездной среды характерны интенсивные турбулентные движения разных масштабов. В среднем скорость движения составляет $8 - 15\text{ км/с}$. Однако во многих случаях скорость оказывается сверхзвуковой, что ведет к появлению ударных волн различной протяженности. Энергия этих движений поступает в среду от взрывов сверхновых звезд, а также от сильных звездных ветров молодых и горячих звезд.

Наряду с более или менее регулярным магнитным полем Галактики в межзвездной среде существуют мелкомасштабные поля, которые сильно влияют на движение межзвездной плазмы. На магнитных полях, которые сжаты и усилены ударными волнами, происходит рассеяние и ускорение протонов и электронов окружающей плазмы.

Межзвездная среда имеет наибольшую среднюю плотность там же, где в основном сосредоточены звезды. Это, конечно, не случайно. Именно из межзвездной среды образуются звезды.

А еще межзвездную среду пронизывают космические лучи.

Эта статья – глава из книги известного советского и российского физика-теоретика Аркадия Захаровича Долгинова «Строение материи. От атомов до Вселенной». А.З.Долгинов является представителем старшего поколения ленинградской физической школы, он начинал свою научную жизнь еще под руководством Я.И.Френкеля и А.Ф.Иоффе, более четверти века заведовал отделом теоретической астрофизики в ФТИ им. А.Ф.Иоффе, является автором более двухсот работ и четырех монографий. Работая последние годы в США, А.З.Долгинов часть своего времени посвятил написанию упомянутой книги, в которой рассказал о любимой физике «просто о сложном», совсем без формул, чтобы любой любознательный и терпеливый читатель мог получить представление об этом грандиозном творении человеческого разума. Редакция предполагает опубликовать книгу целиком в одном из ближайших приложений к журналу.

Космические лучи

Даже вдали от медицинских рентгеновских аппаратов и радиоактивных веществ человек непрерывно облучается потоком быстрых частиц, идущих с неба. Это – космические лучи. Они состоят в основном из протонов с очень большой энергией, а также из небольшого количества электронов и быстрых ядер гелия, хотя встречаются и более тяжелые ядра. На каждый квадратный сантиметр земной атмосферы падает из космоса в среднем одна частица в секунду.

Космические лучи оказывают большое влияние на эволюцию живых существ. Пронизывая организм, они вызывают мутации, т.е. такие изменения, которые передаются потомкам.

Космические протоны обладают огромной кинетической энергией. В интервале энергий $10^{10} - 10^{14}$ эВ их интенсивность падает с увеличением энергии пропорционально энергии в степени 2,7. В интервале $10^{14} - 10^{15}$ эВ имеется небольшой избыток космических лучей, который, по-видимому, возник из-за вспышки сверхновой неподалеку (по астрономическим масштабам) от Солнечной системы. Затем интенсивность падает как энергия в третьей степени – вплоть до энергий $10^{18} - 10^{20}$ эВ. Основной вклад в состав космических лучей дают протоны с энергией от нескольких десятков миллионов до нескольких десятков миллиардов эВ. Число электронов с такой же энергией – не более одного процента от числа протонов.

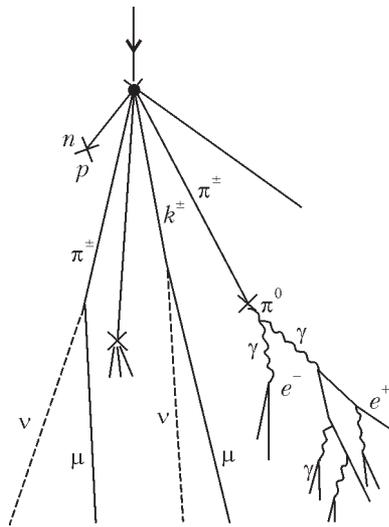


Рис.1. Схема возникновения ливня из различных частиц при столкновении протона космических лучей с молекулой воздуха

Космические лучи, проникая в атмосферу и сталкиваясь с молекулами воздуха, порождают ливни различных частиц. Магнитное поле Земли в значительной мере защищает нас от мягких космических лучей – они отклоняются этим полем и не попадают на поверхность Земли.

Ускорение протонов до скоростей, близких к скорости света, происходит в основном при рассеянии на магнитных полях ударных волн, которые возникают при взрывах сверхновых, а также на границах звездных ветров в межзвездном пространстве. Магнитное поле «вморожено» в плазму. Протоны не могут двигаться поперек поля и отражаются от неоднородностей магнитного поля на фронте ударной волны. При этом они получают энергию, подобно тому как получает энергию мячик при лобовом столкновении с мчащимся автомобилем. Те протоны, которые, отражаясь и многократно рассеиваясь в окружающей плазме, снова и снова возвращаются к удар-

ной волне, могут очень сильно увеличить свою энергию. Таких протонов, конечно, немного – всего одна миллиардная доля от общей концентрации протонов межзвездной плазмы, но их энергия может достигать очень большого значения. В среднем кинетическая энергия одного протона космических лучей составляет около 10^9 эВ. Скорость протона с такой энергией равна 0,88 скорости света.

Частицы могут ускоряться не только на магнитных полях ударных волн, но и на хаотических магнитных полях межзвездной среды. Картина похожа на ту, которую можно наблюдать в газе, состоящем из крупных и мелких частиц. Крупные частицы будут передавать свою энергию мелким частицам при столкновении с ними, пока средняя энергия всех частиц не станет одинаковой. Это означает, что скорость мелких частиц будет много больше, чем крупных. Магнитные поля, переносимые движениями плазмы, отклоняют заряженные частицы, передавая им при этом часть своей энергии. Наибольшая наблюдаемая энергия космической частицы достигает $10^{20} - 10^{21}$ эВ. Такую энергию имеет, например, свинцовая пуля массой 0,5 г, выпущенная из ружья со скоростью 800 м/с. Согласно одной из гипотез, такие энергии могут быть получены протонами в магнитных полях вблизи быстро вращающейся черной дыры.

Хотя концентрация частиц космических лучей в нашей Галактике всего 10^{-10} см⁻³, т.е. в миллиард раз меньше, чем средняя концентрация частиц межзвездной среды, общая энергия космических лучей велика, а их давление равно давлению газа и плазмы в Галактике.

Почему зажигаются звезды

При сжатии протозвездного облака, т.е. по сути при падении наружных слоев к центру, выделяется гравитационная энергия. Это приводит к первоначальному нагреву и образованию звезды. Если сжимающаяся масса достаточно велика для того, чтобы температура внутри достигла нескольких миллионов градусов, то начинаются термоядерные реакции. Для начала реакции надо, чтобы протоны приобрели достаточную энергию, смогли преодолеть взаимное электрическое отталкивание и сблизиться на малое расстояние (около 10^{-13} см), где ядерные силы становятся больше электрических, что позволяет протонам объединиться. Самой первой начинается реакция превращения водорода в гелий, когда при столкновении протонов (ядер водорода) образуется ядро гелия. Эта реакция происходит при температуре в семь миллионов градусов. При несколько более высокой температуре, в десять–пятнадцать миллионов градусов (все зависит от плотности вещества), начинается также углеродно-азотно-кислородный цикл. В этом цикле в результате столкновений с участием ядер углерода, азота и кислорода опять-таки исчезают четыре протона и появляется ядро гелия. Если температура еще выше, то более тяжелые ядра последовательно объединяются в еще более тяжелые с выделением энергии в виде гамма-квантов, а также в виде кинетической энергии образовавшихся ядер. Тер-

моядерные реакции полностью прекращаются, когда образуются ядра железа. Для образования ядер тяжелее железа пришлось бы затратить, а не получить энергию. Дело в том, что в тяжелых ядрах электрическое отталкивание почти уравнивает ядерные силы притяжения, и такие ядра могут самопроизвольно распасться, особенно при столкновениях. Все тяжелые ядра образуются в звездах и выбрасываются оттуда при взрывах звезд. Почти все элементы, из которых состоит человек, когда-то были образованы в звездах.

Какие бывают звезды

В нашей Галактике имеется около миллиона миллионов звезд. Несмотря на то, что массы звезд отличаются друг от друга не более чем в тысячу раз, их светимости, температуры и размеры могут различаться во много тысяч раз. Наиболее массивные звезды лишь в 50–100 раз больше Солнца по массе, но ярче его в 10000 раз и крупнее в 100 раз. Самая яркая звезда LBV 1806-20 в 50 миллионов раз ярче Солнца. Есть одиночные звезды, подобные нашему Солнцу, но не менее половины всех звезд входят в состав двойных или даже кратных систем. Двойные звезды – это системы из двух отдельных звезд, которые связаны полем тяготения и обращаются вокруг общего центра масс. Эти звезды порой сильно влияют друг на друга своими гравитационными полями, вызывая огромные приливы, изменяя собственное вращение и орбитальное движение. Кроме того, во многих случаях вещество с поверхности одной из звезд может перетекать на другую.

В настоящее время удалось наблюдать планеты, принадлежащие звездам различного типа. Наличие планет возле звезд, по-видимому, является скорее правилом, чем исключением. Планеты отличаются от звезд своей массой, которая слишком мала для начала ядерной реакции. Планеты возникают из того же протозвездного облака, из которого образовалась звезда.

Свойства и развитие одиночных звезд во многом отличаются от звезд в двойных системах. Начнем с рассмотрения звезд-одиночек.

Все звезды возникают при гравитационном сжатии межзвездного вещества. Как и в случае Солнца, небольшие случайные сгущения начинают расти под действием сил тяготения, пока не исчерпается вещество в ближайшем окружении или пока данное сгущение не будет разорвано притяжением соседних сгущений. В нашей Га-

лактике в год появляются примерно десять новорожденных звезд. Кроме сил гравитации, в межзвездной среде действуют и магнитные силы. Принимая, что магнитное поле уже имеется, можно, во-первых, сказать, что оно будет способствовать образованию протозвездного сгущения, так как в области случайного изгиба магнитных линий будут концентрироваться ионы, т.е. будет возникать локальное увеличение массы. Во-вторых, магнитное поле может передать часть углового момента соседним областям межзвездной среды, уменьшив, тем самым, скорость вращения внутренней области. С увеличением плотности протозвездного облака степень его ионизации уменьшается, электропроводность падает, и магнитная связь с окружающей средой прекращается. В процессе сжатия центральной

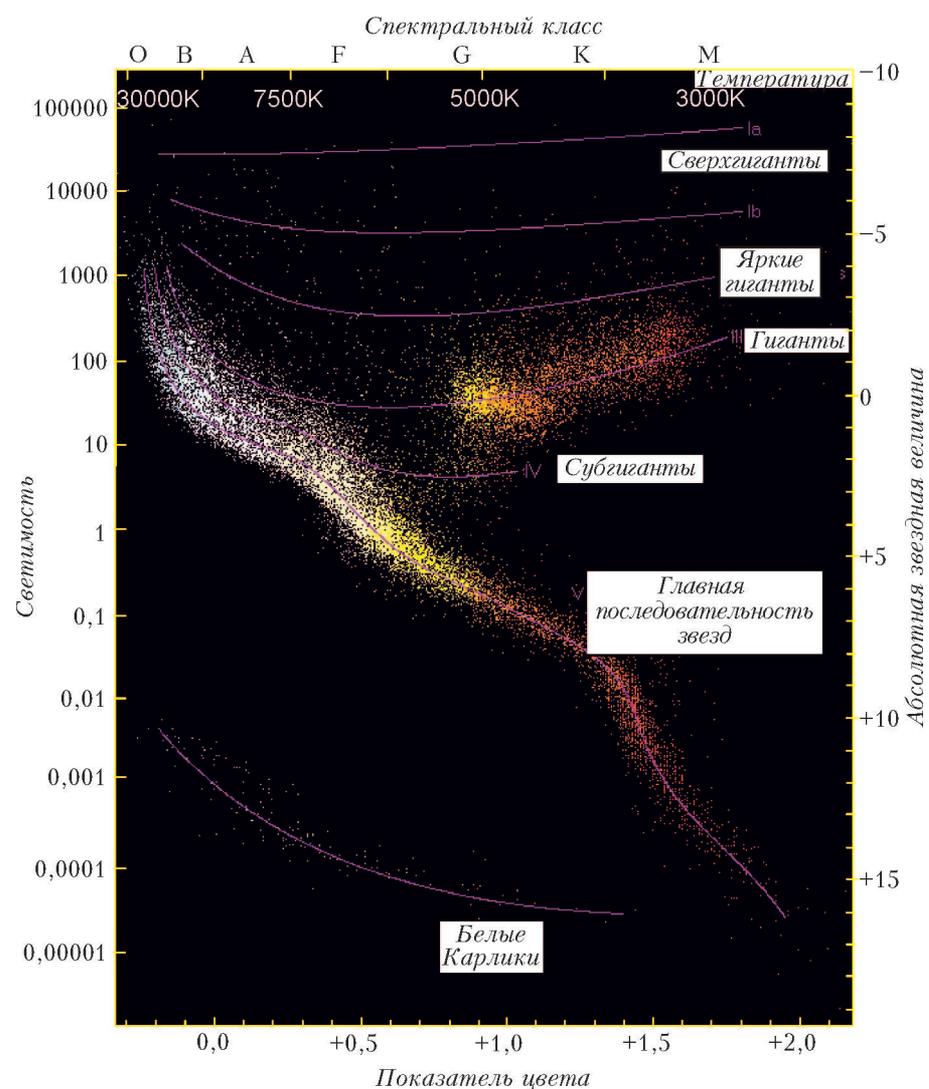


Рис.2. Диаграмма Герцшпрунга–Рассела – зависимость абсолютной звездной величины (светимости) от температуры (показателя цвета) звезд. Температура дана в кельвинах. Солнце находится среди желтых звезд (спектральный класс G, светимость 1). Слева вверху расположены самые массивные и горячие звезды, а справа – красные гиганты. Слева внизу лежат белые карлики. Коричневые карлики – самые тусклые и холодные. Разница в одну абсолютную звездную величину означает разницу в 2,512 раз в яркости звезды. Для удобства классификации звезд их обычно объединяют в спектральные классы – в зависимости от температуры. Самые яркие относят к классу O, затем идут классы B, A, F, G, K и M. В отдельную группу относят белые карлики (WD) и нейтронные звезды (NS)

ЗВЕЗДЫ

части протозвездного облака она разогревается все больше и больше и, наконец, превращается в звезду. Дальнейшая судьба звезды зависит от ее массы. Следует сразу отметить, что зависимость эволюции звезды от ее массы все же приближительная. Она определяется составом звезды и влиянием соседних звезд. В процессе эволюции данная звезда может сбросить или приобрести какую-то массу. Рассмотрим несколько отдельных случаев.

1) Если масса звезды в несколько раз меньше, чем у Солнца, то температура даже в самом центре не достигнет величины, необходимой для начала ядерных реакций с участием самого распространенного легкого изотопа водорода. В этом случае возникающая звезда будет излучать свет в основном в красной и инфракрасной областях спектра, постепенно остывать, превращаясь в так называемый коричневый карлик с массой в среднем около 50 масс Юпитера, пока, через несколько миллиардов лет, не погаснет совсем. Коричневый карлик светит за счет гравитационной энергии, которая переходит в тепловую энергию при сжатии звезды в процессе ее образования из протозвездного облака.

2) Если масса звезды раза в три меньше, чем у Солнца, то в центре звезды температура достигнет девяти миллионов градусов, что достаточно для начала термоядерной реакции синтеза гелия из водорода. Такая звезда будет красным карликом. В центральной области этого карлика перенос энергии осуществляется излучением, а в наружных областях – конвекцией. В звездах с массой меньше, чем одна треть солнечной массы, лучистое ядро вообще не возникает.

3) Если масса звезды близка к массе Солнца, а таких звезд в нашей Галактике несколько миллиардов, то температура в центре достигает пятнадцати миллионов градусов, и там возможны реакции превращения водорода в гелий как при непосредственном взаимодействии протонов, так и в углеродно-азотном цикле. Цвет звезды будет желтым. Когда водород почти весь выгорит, центральная часть начнет сжиматься, и температура ее будет увеличиваться, достигая сорока миллионов градусов. Но этого еще недостаточно для начала так называемой тройной гелиевой реакции. Сжатие остановится, когда все электроны во внутренней части звезды займут все доступные для них уровни энергии и дальнейшее сжатие станет невозможным. Наружные же области звезды, нагретые горячим ядром, начнут расширяться, но температура их будет падать, и звезда станет красным гигантом. Этот гигант поглотит ближайшие планеты, если такие имеются. По сути дела, красный гигант – это белый карлик, окруженный обширной конвективной оболочкой, на внутренней границе которой возможны термоядерные реакции. В конце концов наружные части уйдут и рассеются в пространстве, и останется только ядро звезды – белый карлик. Именно такой будет судьба нашего Солнца через несколько миллиардов лет.

4) Если звезда в десять раз массивнее Солнца, то ее радиус будет в три с половиной больше, чем у Солнца. Температура в центре составит двадцать семь милли-

онов градусов, на поверхности – двадцать пять тысяч градусов, а светимость будет в три тысячи раз больше, чем у Солнца. Основным источником энергии будет углеродно-азотный цикл. В центральной части такой звезды излучение не справляется с переносом энергии, и перенос энергии осуществляется конвекцией. Звезды с массой от одной до десяти масс Солнца в конце концов превращаются в белые карлики.

5) Внутри еще более массивных звезд вступают в термоядерную реакцию более тяжелые элементы, пока не образуется железо, которое является наиболее устойчивым элементом. Эти звезды относятся к классу голубых гигантов. Типичная температура на поверхности равна 25–75 тысяч градусов. Голубые гиганты быстро расходуют свое горючее, и время их жизни, по звездным масштабам, сравнительно невелико. Такая

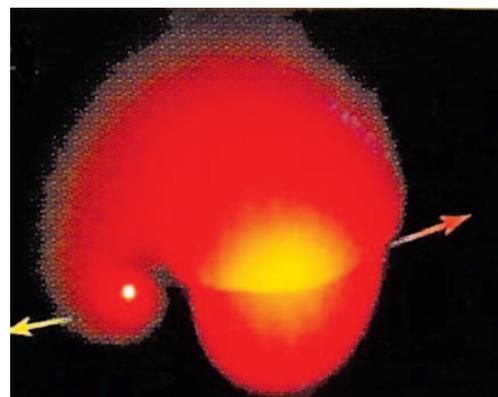


Рис.3. Схема столкновения белого карлика и красного гиганта – белый карлик проходит через тело красного гиганта, разрушая его

звезда взрывается как сверхновая, а остаток превращается в нейтронную звезду или в черную дыру.

В конце концов все звезды перестают излучать, когда все виды горючего, доступного для звезд данной



Рис.4. Плотная газо-пылевая оболочка звезды Эта Кийля, которая является гигантом и одним из самых ярких звездных объектов. Возможно, что это двойная звездная система. Наблюдался ряд вспышек этой звезды. Размер ее оболочки вдвое превышает размер Солнечной системы

массы, уже исчерпаны и исчерпано также тепло, запасенное в активный период жизни звезды.

Звезды разделены огромными расстояниями, поэтому столкновения звезд очень редки. При лобовых столкновениях обычных звезд они либо разрушаются и превращаются в туманность (при большой скорости столкновения), либо сливаются и объединяются в единую звезду. Если столкновение не лобовое, то звезды могут образовать двойную систему. При столкновениях белого карлика с красным гигантом разрушается красный гигант, а белый карлик уходит. Наиболее грандиозная вспышка происходит, когда черная дыра разрывает, а затем поглощает звезду.

Изменение массы звезды может изменить характер протекающих там ядерных реакций. Реакции могут возникнуть не только внутри, но и на поверхности горячей звезды, если туда попадет достаточное количество водорода от соседней звезды. Именно это происходит при вспышках так называемых новых звезд.

Колебания звезд

Имеется целый ряд звезд, яркость которых периодически изменяется. Среди них наиболее интересны так называемые цефеиды. Причина колебаний яркости цефеид следующая. Температура всех звезд падает по направлению к поверхности, и степень ионизации атомов уменьшается. В частности, в цефеидах меняется степень ионизации гелия, температура ионизации которого 40000 К. Началом процесса может служить небольшое увеличение потока энергии из недр звезды, что ведет к дополнительному нагреванию верхних слоев звезды. Эти слои расширяются, плотность их уменьшается, и уменьшается поглощение энергии, которая идет из глубины. Ионы гелия захватывают электроны, превращаясь в атомы гелия. Газ становится прозрачным, а выделяющаяся энергия в виде излучения уходит наружу. Вещество охлаждается, давление уменьшается, и под действием тяготения верхние слои звезды сжимаются. Это снова ведет к нагреву, ионизации гелия и увеличению числа свободных электронов и ионов. Газ (точнее – плазма) становится менее прозрачным и активно поглощает идущее снизу излучение, давление увеличивается, оболочка звезды снова расширяется, и процесс повторя-

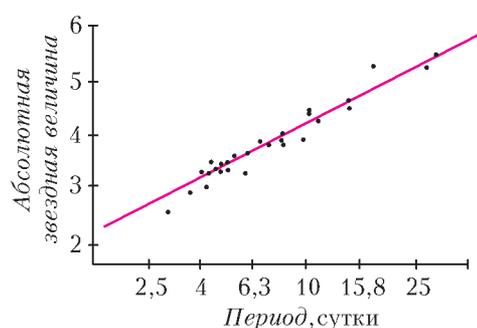


Рис.5. Зависимость абсолютной звездной величины цефеид от периода колебаний блеска. Точками обозначены данные наблюдений для ряда звезд

ется. Теперь можно забыть о первоначальном толчке. Процесс будет сам себя поддерживать. Конечно, такой режим возможен далеко не всегда. Для этого надо, чтобы периоды изменения скорости ионизации были близки к периодам, которые необходимы для нагрева и изменения плотности вещества звезды. Именно такие условия существуют у цефеид.

Период колебаний зависит от массы звезды и, тем самым, от ее истинной яркости (т.е. светимости). Чем дальше от нас звезда, тем меньше ее наблюдаемая яркость. Сравнивая яркость, которая должна быть у звезды с данным периодом, с наблюдаемой яркостью, можно определить расстояние до звезды.

Пятнистые звезды

Среди молодых горячих звезд есть звезды, поверхность которых химически неоднородна. Это звезды класса Ар. На поверхности этих звезд имеются обширные пятна, где обилие разных химических элементов, в частности гелия, сильно отличается от обилия этих же элементов в соседних областях звезды. Кроме того, такие звезды обладают сильным магнитным полем, которое много сильнее, чем поле подобных звезд (класса А), но не имеющих пятен. Надо сказать, что до сих пор нет ясного понимания, в чем здесь дело. Хотя магнитное поле препятствует перемещению вещества и у поверхности этих звезд нет заметной конвекции, все же непонятно, как пятна возникли и почему они долго существуют. Следует все же отметить, что такие химические неоднородности могут работать подобно электрической батарейке, создавая электрический ток и связанное с ним локальное магнитное поле.

Белые карлики

Белые карлики – это конечная стадия эволюции многих звезд. Размер их мал – радиус в сто раз меньше, чем радиус Солнца, но плотность огромна: объем величиной в коробок спичек имеет массу в несколько тонн. Плотность белых карликов столь велика, что электроны внутри звезды занимают все нижние разрешенные уровни энергии. Напомним, что импульс, а значит, и энергия электронов увеличиваются при уменьшении объема, который они занимают. Это препятствует сжатию белого карлика. Только в том случае, если масса очень велика, сжатие может продолжиться путем поглощения электронов протонами, что приводит к возникновению нейтронной звезды. Типичные магнитные поля белых карликов находятся в интервале от 10^3 до 10^7 гауссов.

Белые карлики светятся ярко, но не за счет ядерных реакций внутри, а за счет тепла, запасенного в недрах, хотя в отдельных случаях термоядерные реакции продолжают в тонком слое и на небольшой глубине. Тепла, запасенного в недрах, достаточно, чтобы светить миллиарды лет. Типичные температуры поверхности – от 15000 до 50000 градусов. Цвет белых карликов вовсе не всегда белый. Они могут быть красными, желтыми или белыми – в зависимости от температуры поверхности.

«Новые» звезды – вовсе не новые

Явление, которое астрономы называют «новой» звездой, это яркая вспышка обычно слабой, но уже известной звезды. Дело в том, что все эти звезды входят в состав системы из двух звезд. Одна из этих звезд – белый карлик, а другая – красный гигант. Вещество из оболочки гиганта под действием притяжения горячего белого карлика перетекает на этот карлик, и при достижении некоторой критической массы на поверхности карлика начинается термоядерная реакция превращения водорода в гелий. При этом очень быстро возрастает температура, происходит термоядерная вспышка, вещество выбрасывается, и мы видим яркую «новую» звезду. Такой процесс может повторяться неоднократно.

Сверхновые звезды

В 1054 году китайские ученые, которые тогда были далеко впереди европейцев, отметили появление очень яркой звезды – теперь ее называют сверхновой. К настоящему моменту подобные вспышки наблюдались неоднократно как в нашей, так и в соседних галактиках. Эти вспышки во много раз ярче вспышек «новых» звезд и имеют совсем другую природу.

По-видимому, сверхновые возникают при эволюции красных гигантов. Мы уже отмечали, что при достаточно большой массе звезды термоядерные реакции приводят к образованию тяжелых элементов, вплоть до железа. При прекращении этих реакций ослабевает и тепловое движение, которое уже не может противостоять тяготению. Внутренность звезды начинает сжиматься, причем под тяжестью наружных слоев это сжатие происходит почти со скоростью свободного падения. Внутри возникает газ вырожденных электронов, но даже они не в силах удержать эту тяжесть. Гравитационная энергия падения наружных слоев увеличивает температуру и плотность ядра. Когда темпе-



Рис.б. Крабовидная туманность – остаток взрыва сверхновой звезды 1054 года. Размер – 6 световых лет. В центре туманности расположена нейтронная звезда

ратура достигнет $5 \cdot 10^9$ градусов, а плотность возрастает до 10^{10} г/см³, протоны начнут поглощать электроны и, испуская нейтрино, превращаться в нейтроны. Нейтроны будут занимать все доступные для них нижние энергетические уровни, и ядро звезды станет подобным гигантскому атомному ядру, состоящему в основном из нейтронов. Падение внешних слоев уже не может сжать такое ядро. Энергия падения очень велика, и, натолкнувшись на почти непреодолимое препятствие, эти слои отразятся и отскочат, как мячик, в окружающее пространство. Это будет выглядеть как колоссальный взрыв и появление сверхновой звезды. При этом выделится около 10^{51} эрг энергии. В максимуме блеска сверхновая звезда излучает, как миллиард Солнц, т.е. как некрупная галактика.

Излучение взрыва сверхновой покрывает весь диапазон от радио- до гамма-лучей. Так называемые гамма-всплески, по-видимому, тоже возникают при этих взрывах. Остатки выброшенной оболочки образуют небольшую туманность, которая расширяется со скоростью в несколько тысяч километров в секунду, образуя ударную волну на фронте. В конце концов туманность рассеивается в пространстве и исчезает, а оставшееся ядро становится нейтронной звездой.

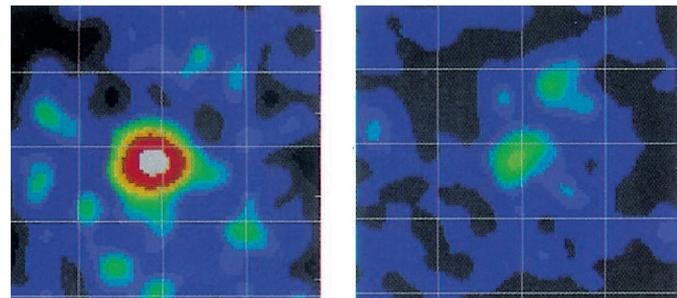


Рис.7. Снимок гамма-всплеска, полученный спутником ВерроСАХ в феврале 1997 года. Слева – через восемь часов, а справа – через три дня после максимума вспышки

Появление сверхновых в крупной галактике наблюдается в среднем каждые 30–50 лет. Существуют два основных типа сверхновых: SN I и SN II. По-видимому, их отличие связано в первую очередь с отличием в составе этих звезд. В частности, в спектрах SN II наблюдается водород, которого нет в SN I.

Нейтронные звезды

Радиус нейтронной звезды всего около десяти километров, а масса лишь вдвое меньше массы Солнца. Плотность вещества в центре звезды достигает тысячи миллионов миллиардов граммов в кубическом сантиметре (10^{15} г/см³). Звезда, сжимаясь, должна сохранять свой момент импульса, т.е. должна вращаться все быстрее и быстрее. Нейтронная звезда, возникшая в процессе сжатия центральных областей при взрыве сверхновой звезды, должна вращаться исключительно быстро. И действительно, периоды вращений нейтронных звезд лежат в интервале от нескольких секунд до тысячных долей секунды. Хотя возможность существования нейтронных звезд была давно предсказана советским ученым Л.Ландау, они были открыты современ-

но случайно. Наблюдения над слабой звездочкой, которая находилась на месте остатка взрыва сверхновой, показало, что излучение этой звездочки периодически изменяется, причем период сохраняется с высочайшей точностью. Наблюдатели даже сначала подумали, что это сигналы внеземной цивилизации и опубликовали свои результаты только тогда, когда обнаружили еще несколько подобных звезд. Вопрос окончательно прояснился, когда было измерено магнитное поле этих объектов. Оно оказалось безумно большим, а именно – тысячи миллиардов гауссов. Магнитное поле такой звезды вытягивает в нитку электронные оболочки атомов. Это поле имеет дипольный характер. Напомним, что самое сильное поле, которое удалось получить на Земле, – всего несколько тысяч гауссов. У большинства нейтронных звезд поле не превышает 10^{12} гауссов. Максимальное же поле, которое наблюдалось, достигало 10^{15} гауссов. Такие звезды называются магнитарами. Их поле столь сильно, что приводит к поляризации вакуума вокруг звезды.

Вращающийся магнит излучает электромагнитные волны. Электроны при движении в магнитном поле также излучают электромагнитные волны и дают свой вклад в общее излучение звезды. Излучение нейтронной звезды идет в основном из областей у полюсов магнитного диполя. Направление оси магнитного диполя далеко не всегда совпадает с осью вращения. Излучение можно обнаружить только в то время, когда при вращении нейтронной звезды ось диполя направлена в сторону Земли. Поэтому наблюдаемое излучение, подобно маяку, пульсирует с периодом, равным периоду вращения нейтронной звезды. Такие нейтронные звез-

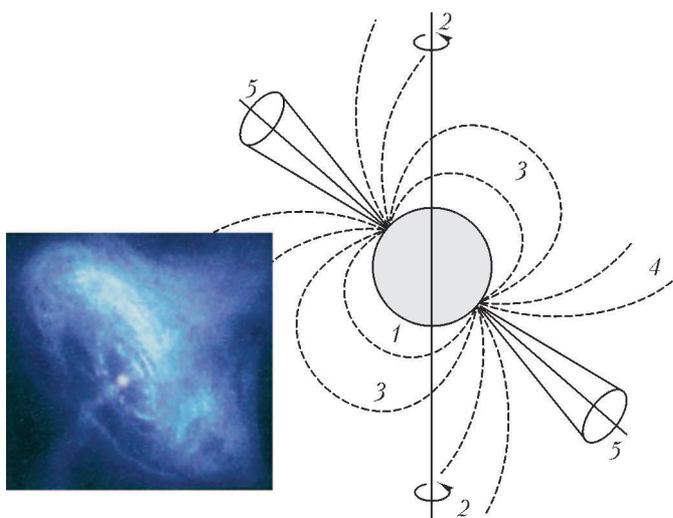


Рис.8. Схема пульсара (справа): 1 – нейтронная звезда, 2 – ось вращения, 3 – линии магнитного поля, образующие ловушку для электронов и ионов, 4 – линии, связанные с околосредными полями, 5 – области вокруг магнитной оси, откуда выходит излучение. Слева дан снимок Крабовидной туманности, полученный в рентгеновских лучах из космоса рентгеновской обсерваторией «Чандра». В центре снимка виден пульсар, вращающийся со скоростью 30 оборотов в секунду, и видна струя, идущая из центра. Пульсар окружен вихрем вещества, уходящего из области пульсара со скоростью, равной почти половине скорости света

ды называют пульсарами. Конечно, не во всех случаях ось магнитного поля совпадает с лучом зрения. Поэтому пульсары обнаружены только в некоторых остатках сверхновых. Потеря энергии при интенсивном излучении замедляет вращение нейтронной звезды. Более старые нейтронные звезды вращаются медленнее, чем молодые.

Если какое-либо вещество падает на поверхность нейтронной звезды, то скорость падения оказывается близкой к скорости света. Нейтронные звезды входят в состав двойных систем столь же часто, как и все остальные звезды, поэтому вещество, перетекающее на нейтронную звезду в тесной двойной системе, выделяет огромную энергию. Излучение различных нейтронных звезд простирается от радио-диапазона до рентгеновского – в зависимости от того, каков возраст звезды и входит ли она в двойную систему.



Рис.9. Схема перетекания вещества от обычной маломассивной звезды на нейтронную звезду (пульсар SAX J 608.4-3658) в двойной звездной системе. Пульсар окружен диском из вещества, текущего от соседней звезды

Под самой поверхностью нейтронной звезды, где плотность еще не слишком велика, существует обычная плазма из ионов и электронов. В более глубоких слоях плазма становится твердой, образуя кристалл. Высокая плотность приводит к вырождению электронов. При еще большей плотности протоны поглощают электроны, превращаясь в нейтроны. Эти нейтроны также становятся вырожденными. В нейтронной среде появляются нейтронные пары, подобные парам электронов в сверхпроводнике, и среда становится сверхпроводящей. Электроны при этом не объединяются в пары. Вращение нейтронной звезды приводит к образованию нитевидных вихрей в сверхтекучей жидкости, внутри которых условия сверхтекучести и сверхпроводимости нарушаются. Это создает небольшую вязкость и сопротивление электрическому току. В самом центре звезды, где температура достигает миллиарда градусов, а плотность составляет 10^{15} г/см³, вещество, возможно, состоит из кварков, глюонов и пи-мезонов.

Черные дыры

Масса звезды может быть столь велика, что даже давление вырожденной нейтронной среды не спасает ее от дальнейшего сжатия. В конце концов она сжимается до такого объема, что тяготение не позволяет даже

З В Е З Д Ы

свету покинуть ее поверхность. Луч света пойдет по криволинейной траектории, огибая звезду, но не покидая ее. Хотя никакое излучение не может покинуть поверхность черной дыры (этим и определяется размер дыры), не следует думать, что дыра на самом деле невидима. Если какая-либо звезда окажется вблизи дыры, она будет разорвана тяготением, прежде чем поглотится дырой, и можно будет увидеть свет от такого события. Газовые потоки, которые втягиваются в дыру, сталкиваются друг с другом, что также ведет к излучению на разных частотах. Конечно, во всех случаях мы можем увидеть не саму дыру, а только ее окрестность.

Черные дыры разрушают все, что приближается к ним. Недавно удалось наблюдать вспышку, которая возникла, когда черная дыра всего за несколько часов разорвала звезду, приблизившуюся к ней под действием гравитационного поля этой дыры и поля соседних звезд. Хотя плохая репутация черных дыр вполне ими заслужена, они иногда приносят пользу – привлекая своим полем вещество даже из далекой окрестности, способствуют образованию звезд.

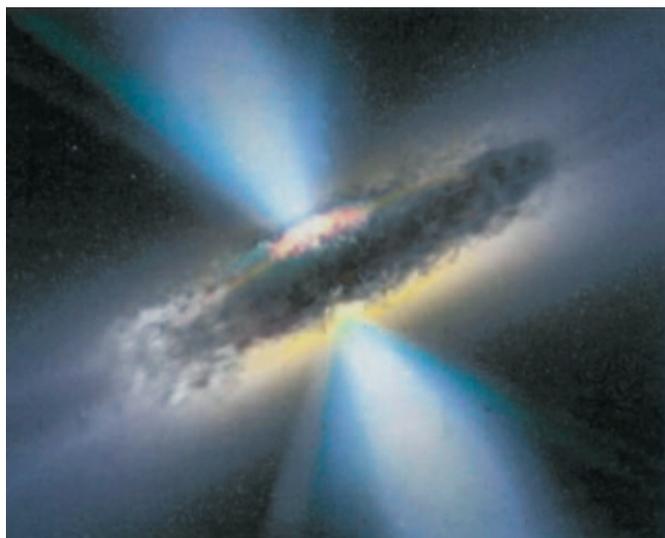


Рис.10. Черная дыра в галактике NGC 4388, окруженная массивным раскаленным до ста миллионов градусов вращающимся газовым облаком в виде тора, который, в свою очередь, окружен тороидальной туманностью. Из полюсов исходит быстро вращающаяся струя вещества

В сильном гравитационном поле вблизи дыры время течет медленно, поэтому длина волны излучения будет тем больше, чем ближе к дыре оно возникает. Если какой-то объект, падая на дыру, станет подавать сигналы, это не поможет нам увидеть, как он достигнет дыры. Интервал между сигналами будет становиться все длиннее, и последних сигналов мы никогда не увидим. Вот почему никакие наблюдения внутренности дыры невозможны. Вещество, приближаясь к дыре, будет разрываться на все более мелкие части, вплоть до элементарных частиц. Внутри дыры почти совершенно пустая, так как все вещество сосредоточено в центре. Граница черной дыры – это поверхность, где тяготение,

создаваемое ее центром, столь велико, что даже свет не может ее пересечь.

Дыра не будет совсем невидима даже в том случае, если на нее вовсе не падает вещество. Чтобы понять, в чем здесь дело, обратимся к некоторым результатам квантовой теории. Гравитационное поле у поверхности дыры очень сильное. Плотность энергии этого поля достаточно велика, чтобы породить пару электрон-позитрон (закон сохранения заряда требует обязательного рождения пары). Пара электрон-позитрон может сама по себе появиться в вакууме на время не больше чем $\Delta t = \hbar / (2mc^2)$. За это время частицы не могут удалиться друг от друга на расстояние больше чем $2 \cdot 10^{-11}$ см. Тем не менее, даже на столь малом расстоянии разница сил тяготения вблизи дыры достаточно велика, чтобы вырвать частицы из вакуума и превратить в реальные частицы.

Энергия, которая необходима для рождения пары, берется из энергии дыры. Возможно, что обе частицы упадут на дыру, и тем самым ее энергия не изменится. Но может случиться, что только одна из частиц будет падать к дыре, а импульс второй будет достаточен, чтобы преодолеть тяготение и покинуть окрестность дыры. Энергия этой частицы отнимет какую-то долю энергии дыры, т.е. дыра будет «испаряться». Количественный расчет показывает, что дыра излучает энергию, как нагретое черное тело. Масса дыры будет расти, пока поблизости есть вещество, которое может быть захвачено дырой. В то же время дыра будет терять энергию, а значит, и массу в виде частиц, рождаемых у поверхности и покидающих окрестность дыры. Расчет показывает, что уменьшение массы дыры происходит исключительно медленно и за время жизни Вселенной только самые мелкие дыры могли уже испариться.

Увеличение гравитационного поля по мере сжатия вещества влияет на состояние вакуума. Это может привести к тому, что при определенных темпах сжатия дыра вовсе не образуется, а возникнет так называемая черная звезда, которая почти не излучает.

Частицы, поглощаемые дырой, обладают целым набором различных свойств, иными словами – содержат большой объем информации. Исчезают ли все следы этих свойств, когда частица поглощается дырой? Проявляются ли опять эти свойства, когда дыра испаряется и исчезает? На эти вопросы пока ответа нет.