

## Лекция 1. ГАЛАКТИКА, СВЕРХНОВЫЕ, ГАЛАКТИЧЕСКИЕ КОСМИЧЕСКИЕ ЛУЧИ

В 1-ой лекции приводятся современные данные о нашей Галактике Млечный путь. О взрывах сверхновых как основном источнике галактических космических лучей.

### ГАЛАКТИКА

#### Млечный путь (*galaktikos* – молочный)

- Спиральная галактика,  $N = 10^{11}$  звезд, поперечник диска = 30 кпк, балдж = 8 кпк,
- $R_{\odot} = 10$  кпк (1 пк =  $L(1'') = 206\,265$  а.е.  $\approx 3 \cdot 10^{16}$  м).
- Плотность звезд в районе Солнца:  $n = 1$  звезда /  $V = 8$  пк<sup>3</sup>.
- Период вращения галактики в районе Солнца:  $T = 240$ – $250$  млн. лет – галактический год.
- В центре галактики – черная дыра  $M = 10^6 M_{\odot}$
- Первые 5 млрд. лет - звездообразование в центре галактики, затем - взрывы сверхновых, перерыв 5 млрд. лет - образование звезд в диске.
- Современное звездообразование - в кольце 4 – 8 кпк.

Солнечная система погружена в огромную звездную систему - Галактику, насчитывающую сотни миллиардов звезд самой разной светимости и цвета. Свойства разных типов звезд Галактики астрономам достаточно хорошо известны. Нашими соседями являются не просто типичные звезды и другие небесные объекты, а скорее представители наиболее многочисленных "племен" Галактики. В настоящее время в окрестностях Солнца исследованы все или почти все звезды, за исключением совсем карликовых, излучающих очень мало света. Большинство среди них составляют очень слабые красные карлики - их массы в 3-10 раз меньше, чем у Солнца. Звезды, похожие на Солнце, очень редки, их всего 6%. Многие наши соседи (72%) группируются в кратные системы, где компоненты связаны друг с другом силами гравитации. Какая же из сотни близких звезд может претендовать на титул ближайшей соседки Солнца? Сейчас ею считается компонент известной тройной системы Альфа Центавра - слабый красный карлик Проксима. Расстояние до проксимы 1,31 пк, свет от нее идет до нас 4,2 года. Статистика околосолнечного населения дает представление об эволюции галактического диска и Галактики в целом. Например, распределение по светимости звезд солнечного типа показывает, что возраст диска 10-13 млрд. лет.

В XVII столетии, после изобретения телескопа, ученые впервые осознали, насколько велико количество звезд в космическом пространстве. В 1755 г. немецкий философ и естествоиспытатель Иммануил Кант предположил, что звезды образуют в космосе группы, подобно тому, как планеты составляют Солнечную систему. Эти группы он назвал "звездными островами". По мнению Канта, одним из таких бесчисленных островов является Млечный Путь - грандиозное скопление звезд, видимое на небе как светлая туманная полоса. На древнегреческом языке слово "галактикос" означает "молочный", "млечный", поэтому Млечный Путь и похожие на него звездные системы называют галактиками.

Предположение Канта было подтверждено методом звездных подсчетов, который впервые применил в конце XVIII в. английский астроном Уильям Гершель. Сущность этого метода заключается в сравнении числа звезд, попадающих в одинаковые площадки на различных расстояниях от плоскости Млечного Пути. Такие подсчеты производились неоднократно и привели к следующим основным результатам: во-первых, число звезд резко убывает при удалении от Млечного Пути; во-вторых, общее количество звезд к югу от плоскости Млечного Пути несколько больше числа звезд к северу от него. Так было установлено, что размеры нашей звездной системы в направлении Млечного Пути значительно превышают ее размеры в перпендикулярном направлении, причем Солнце

находится чуть выше плоскости симметрии этой системы.

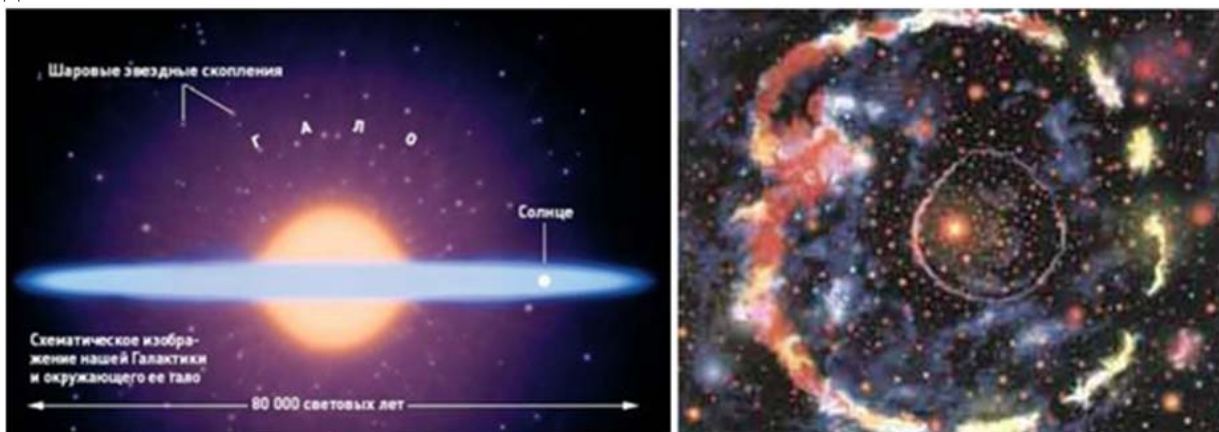
**Размеры и строение Галактики.** Основываясь на результатах своих подсчетов, Гершель предпринял попытку определить размеры Галактики. Он заключил, что наша звездная система имеет конечные размеры и образует своего рода толстый диск: в плоскости Млечного Пути она простирается на расстояние не более 850 единиц, а в перпендикулярном направлении - на 200 единиц, если принять за единицу расстояние до Сириуса. В современной шкале расстояний это соответствует 7300x1700 световых лет. Эта оценка в целом верно отражает структуру Млечного Пути, хотя она весьма неточна. Дело в том, что кроме звезд в состав диска Галактики входят также многочисленные газопылевые облака, которые ослабляют свет удаленных звезд. Первые исследователи Галактики не знали об этом поглощающем веществе и считали, что они видят все ее звезды.

Истинные размеры Галактики были установлены только в XX в. Оказалось, что она является значительно более плоским образованием, чем предполагали ранее. Диаметр галактического диска превышает 100 тыс. световых лет, а толщина - около 1000 световых лет. По внешнему виду Галактика напоминает чечевичное зерно с утолщением посередине.

Из-за того, что Солнечная система находится практически в плоскости Галактики, заполненной поглощающей материей, очень многие детали строения Млечного Пути скрыты от взгляда земного наблюдателя. Однако их можно изучать на примере других галактик, сходных с нашей. Так, в 40-е гг. нашего столетия, наблюдая галактику М 31, больше известную как туманность Андромеды, немецкий астроном Вальтер Бааде (в те годы он работал в США) заметил, что плоский линзообразный диск этой огромной галактики погружен в более разреженное звездное облако сферической формы - гало. Зная, что туманность Андромеды очень похожа на нашу Галактику, Бааде предположил, что подобная структура имеется и у Млечного Пути. Звезды галактического диска были названы населением I типа, а звезды гало (или сферической составляющей) - населением II типа.

Как показывают современные исследования, два вида звездного населения отличаются не только пространственным положением, но и характером движения и химическим составом. Эти особенности связаны в первую очередь с различным происхождением диска и сферической составляющей.

**Гало.** Границы нашей Галактики определяются размерами гало. Радиус гало значительно больше размеров диска и, по некоторым данным, достигает нескольких сотен тысяч световых лет. Центр симметрии гало Млечного Пути совпадает с центром галактического диска.



Состоит гало в основном из очень старых, неярких маломассивных звезд. Они встречаются как поодиночке, так и в виде шаровых скоплений, которые могут включать в себя более миллиона звезд. Возраст населения сферической составляющей Галактики

превышает 10 млрд. лет. Его обычно принимают за возраст самой Галактики. Характерной особенностью звезд гало является чрезвычайно малая доля в них тяжелых химических элементов. Звезды, образующие шаровые скопления, содержат металлов в сотни раз меньше, чем Солнце.

Звезды сферической составляющей концентрируются к центру Галактики. Центральная, наиболее плотная часть гало в пределах нескольких тысяч световых лет от центра Галактики называется балдж (в переводе с английского "утолщение"). Звезды и звездные скопления гало движутся вокруг центра Галактики по очень вытянутым орбитам. Из-за того что вращение отдельных звезд происходит почти беспорядочно (т. е. скорости соседних звезд могут иметь самые различные направления), само гало в целом вращается очень медленно.

**Диск.** По сравнению с гало диск вращается заметно быстрее. Скорость его вращения не одинакова на различных расстояниях от центра. Она быстро возрастает от нуля в центре до 200-240 км/с на расстоянии 2 тыс. световых лет от него, затем несколько уменьшается, снова возрастает примерно до того же значения и далее остается почти постоянной. Изучение особенностей вращения диска позволило оценить его массу. Оказалось, что она примерно в 150 млрд. раз больше массы Солнца.

Население диска очень сильно отличается от населения гало. Вблизи плоскости диска концентрируются молодые звезды и звездные скопления, возраст которых не превышает нескольких миллиардов лет. Они образуют так называемую плоскую составляющую. Среди них очень много ярких и горячих звезд.

Газ в диске Галактики также сосредоточен в основном вблизи его плоскости. Он распределен неравномерно, образуя многочисленные газовые облака - от гигантских неоднородных по структуре "сверхоблаков" протяженностью несколько тысяч световых лет до маленьких облачков размерами не больше парсека. Основным химическим элементом в нашей Галактике является водород. Приблизительно на 1/4 она состоит из гелия. По сравнению с этими двумя элементами остальные присутствуют только в очень небольших количествах. В среднем химический состав звезд и газа в диске почти такой же, как и у Солнца.

**Ядро.** Одной из самых интересных областей Галактики считается ее центр, или ядро, расположенное в направлении созвездия Стрельца. Видимое излучение центральных областей Галактики полностью скрыто от нас мощными слоями поглощающей материи. Поэтому его начали изучать только после создания приемников инфракрасного и радиоизлучения, которое поглощается в меньшей степени.

Для центральных областей Галактики характерна сильная концентрация звезд: в каждом кубическом парсеке вблизи центра их содержатся многие тысячи. Расстояния между звездами в десятки и сотни раз меньше, чем в окрестностях Солнца. Если бы мы жили на планете около звезды, находящейся вблизи ядра Галактики, то на небе были бы видны десятки звезд, по яркости сопоставимых с Луной, и многие тысячи - более ярких, чем самые яркие звезды нашего неба.

Помимо большого количества звезд в центральной области Галактики наблюдается околоядерный газовый диск, состоящий преимущественно из молекулярного водорода. Его радиус превышает 1000 световых лет. Ближе к центру отмечаются области ионизованного водорода и многочисленные источники инфракрасного излучения, свидетельствующие о происходящем звездообразовании. В самом центре Галактики предполагается существование массивного компактного объекта - черной дыры массой около миллиона масс Солнца. В центре Галактики находится также яркий радиоисточник Стрелец А, происхождение которого связывается с активностью ядра.

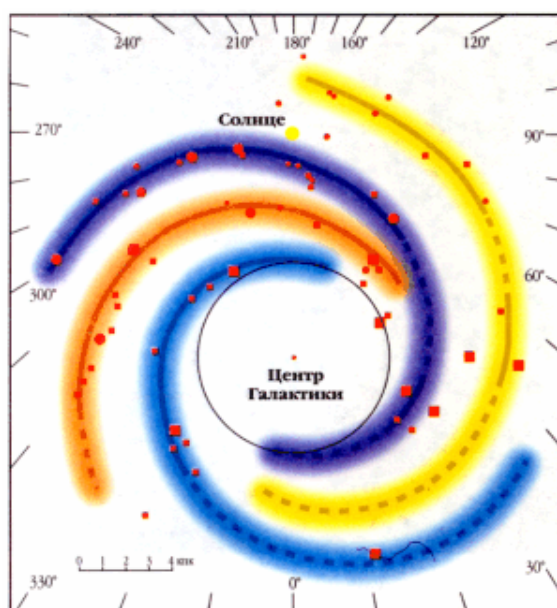
**Спиральные ветви.** Одним из наиболее заметных образований в дисках галактик,

подобных нашей, являются спиральные ветви (или рукава). Они и дали название этому типу объектов - спиральные галактики. Спиральная структура в нашей Галактике очень хорошо развита. Вдоль рукавов в основном сосредоточены самые молодые звезды, многие рассеянные звездные скопления и ассоциации, а также цепочки плотных облаков межзвездного газа, в которых продолжают образовываться звезды. В спиральных ветвях находится большое количество переменных и вспыхающих звезд, в них чаще всего наблюдаются взрывы некоторых типов сверхновых звезд. В отличие от гало, где какие-либо проявления звездной активности чрезвычайно редки, в ветвях продолжается бурная жизнь, связанная с непрерывным переходом вещества из межзвездного пространства в звезды и обратно. Галактическое магнитное поле, пронизывающее весь газовый диск, также сосредоточено главным образом в спиральных образованиях.

Спиральные рукава Млечного Пути в значительной степени скрыты от нас поглощающей материей. Подробное их исследование началось после появления радиотелескопов. Они позволили изучать структуру Галактики по наблюдениям радиоизлучения атомов межзвездного водорода, концентрирующегося вдоль длинных спиральных рукавов. По современным представлениям, спиральные рукава связаны с волнами сжатия, распространяющимися по диску галактики. Проходя через области сжатия, вещество диска уплотняется, а образование звезд из газа становится более интенсивным. Причины возникновения в дисках спиральных галактик такой своеобразной волновой структуры выясняются.

**Место Солнца в Галактике.** В окрестностях Солнца удастся проследить участки двух спиральных ветвей, удаленных от нас примерно на 3 тыс. световых лет. По созвездиям, где обнаруживаются эти участки, их называют рукавом Стрельца и рукавом Персея. Солнце находится почти посередине между этими спиральными ветвями. Правда, сравнительно близко (по галактическим меркам) от нас, в созвездии Ориона, проходит еще одна, не столь явно выраженная ветвь, считающаяся ответвлением одного из основных спиральных рукавов Галактики.

Расстояние от Солнца до центра Галактики составляет 23-28 тыс. световых лет, или 7-9 тыс. парсек. Это говорит о том, что Солнце расположено ближе к окраине диска, чем к его центру.



Вместе со всеми близкими звездами Солнце вращается вокруг центра Галактики со скоростью 220-240 км/с, совершая один оборот примерно за 200 млн. лет. Значит, за все время существования Земля облетела вокруг центра Галактики не больше 30 раз. Скорость вращения Солнца вокруг центра Галактики практически совпадает с той

скоростью, с которой в данном районе движется волна уплотнения, формирующая спиральный рукав. Такая ситуация в общем неординарна для Галактики: спиральные ветви вращаются с постоянной угловой скоростью, как спицы колеса, а движение звезд, как мы видели, подчиняется совершенно иной закономерности. Поэтому почти все звездное население диска то попадает внутрь спиральной ветви, то выходит из нее. Единственное место, где скорости звезд и спиральных ветвей совпадают, - это так называемая коротационная окружность, и именно на ней располагается Солнце!

Для Земли это обстоятельство крайне благоприятно. Ведь в спиральных ветвях происходят бурные процессы, порождающие мощное излучение, губительное для всего живого. И никакая атмосфера не могла бы от него защитить. Но наша планета существует в относительно спокойном месте Галактики и в течение сотен миллионов и миллиардов лет не испытывала влияния этих космических катаклизмов. Может быть, именно поэтому на Земле могла зародиться и сохраниться жизнь.

Долгое время положение Солнца среди звезд считалось самым заурядным. Сегодня мы знаем, что это не так: в известном смысле оно привилегированное. И это нужно учитывать, рассуждая о возможности существования жизни в других частях нашей Галактики.

### **МЛЕЧНЫЙ ПУТЬ - ДОРОГА С ОЛИМПА НА ЗЕМЛЮ.**

Ночью в незасвеченных местах можно видеть, что через чистое небо проходит молочная полоса. Эта необычная полоса диффузного света видна каждый месяц и из любого места. До открытия телескопа никто не знал, из чего состоит этот "млечный путь". Примерно 300 лет назад телескопы сделали изумительное открытие: Млечный Путь состоял из звезд.

Согласно одному из древних мифов, Млечный Путь – это дорога с Олимпа на Землю. Согласно другому – это пролитое Герой молоко. Только 70 лет назад более мощные телескопы сделали открытие, что Млечный Путь это одна галактика среди множества галактик. Современные космические телескопы дают еще более глубокое понимание. Сегодняшняя картинка была получена спутником для исследования космического фона. На ней изображена плоскость нашей Галактики в инфракрасном свете. Виден тонкий диск нашей спиральной галактики. На картинке звезды показаны белым цветом, межзвездная пыль - красным.

### **МНОГООБРАЗИЕ ГАЛАКТИК**

Метагалактика - часть Вселенной, доступная современным астрономическим методам исследований - содержит несколько миллиардов галактик - звездных систем, в которых звезды связаны друг с другом силами гравитации. Существуют галактики, включающие триллионы звезд. Наша Галактика - **Млечный Путь** - также достаточно велика: в ней более 200 млрд. звезд). Самые маленькие галактики содержат звезд в миллион раз меньше. Помимо обычных звезд галактики включают в себя межзвездный газ, пыль, а также различные экзотические объекты: белые карлики, нейтронные звезды, черные дыры.

#### **Скопления и ассоциации звезд:**

**Шаровые скопления.** Скопление - группа звезд, связанных общим происхождением, положением в пространстве и движением. Появилось разделение скоплений на шаровые и рассеянные, затем появился еще один тип звездных групп ассоциации. В небольшой телескоп шаровые скопления выглядят как очень тесные группы звезд. Все они имеют ярко выраженную сферическую или слегка сплюснутую форму, звезды в них сильно концентрируются к центру, сливаясь в одно световое пятно. Только наблюдения с очень

высоким угловым разрешением, например на Хаббловском космическом телескопе, позволяют рассмотреть отдельные звездочки вплоть до самого центра. Крупнейшие скопления содержат свыше миллиона звезд. Количество звезд в кубическом парсеке в центрах шаровых скоплений изменяется от нескольких сот до десятков тысяч. Заметим, что в окрестностях Солнца одна звезда приходится на объем более кубического парсека.

Диаметры шаровых скоплений составляют от 20 до 100 пк. Шаровые скопления - старейшие объекты нашей Галактики: они образовались одновременно с ней. Когда возраст скоплений был еще невелик, в них входили очень разные по массе звезды. Самые легкие были в несколько раз менее массивны, чем Солнце, а масса наиболее тяжелых превышала солнечную в десятки раз. В массивных звездах все процессы идут интенсивнее, чем в легких, они быстро растрачивают свой запас энергии и "умирают". Поэтому сейчас в шаровых скоплениях присутствуют лишь маломассивные звезды, да и из них большинство находится на поздних стадиях своей эволюции. Когда и они погаснут, в скоплениях останутся только самые маленькие звезды, которые живут очень долго. Зная, сколько в скоплении звезд с различной массой, можно определить, как давно оно возникло. Возраст шаровых скоплений, оцененный таким образом, превышает 12 млрд. лет.

Массивные звезды, бывшие когда-то членами этих систем, не пропали бесследно. После них остались белые карлики, нейтронные звезды и, возможно, черные дыры. Чаще всего они обнаруживают себя по гравитационному взаимодействию с другими членами скопления. Результат: вспышки новых звезд, пульсары. Старые звезды часто теряют устойчивость и начинают регулярно менять яркость - становятся переменными. Подобных звезд - цефеид - в шаровых скоплениях открыто очень много. Родившись одновременно с Галактикой, шаровые скопления практически сохранили химический состав того гигантского догалактического облака, из которого они сформировались. Низкое содержание тяжелых химических элементов. История образования шаровых скоплений отразилась на их пространственном распределении в Галактике. Все они располагаются сферически симметрично относительно центра Галактики.

**Рассеянные скопления.** Рассеянных скоплений известно гораздо больше, чем шаровых, хотя открывать их значительно труднее. Из-за низкой звездной плотности их легко спутать со случайными звездами, наблюдаемыми в том же направлении. Выделить реальные группы звезд можно, исследовав их движение в пространстве и удаление от Солнца. Если звезды, находящиеся примерно на одинаковом расстоянии от нас, движутся в одном и том же направлении, скорее всего они действительно связаны в одну систему. Всего сейчас обнаружено более 1200 рассеянных скоплений. Самые известные среди них - Плеяды и Гиады. Как правило, рассеянное скопление состоит из нескольких сот или тысяч звезд, наиболее богатые содержат около 10 тыс. членов. Масса рассеянных скоплений невелика, и их гравитационное поле не в состоянии долго противодействовать разрушению скоплений. Просуществовав около миллиарда лет, они растворяются в океане Галактики. В самых молодых скоплениях звезды еще продолжают рождаться у нас на глазах. Вокруг многих звезд видны остатки тех газовых облаков, из которых они возникли. В рассеянных скоплениях много массивных, очень ярких звезд, переменных и вспыхивающих звезд различных видов, звезд с необычным химическим составом. В среднем содержание различных элементов в скоплениях близко к солнечному. Но оно может сильно отличаться у разных скоплений. Кроме того, наблюдения указывают на возможную зависимость химического состава рассеянных скоплений от расстояния до центра Галактики: чем ближе скопление к центру, тем больше в нем тяжелых элементов.

**Ассоциации** помимо рассеянных скоплений хорошо изучен еще один тип группировок молодых звезд, объединенных общим образованием. Это - звездные ассоциации. Они более разрежены, чем скопления, и превосходят последние по размерам: типична их

протяженность 200-300 световых лет. В ассоциации может содержаться от нескольких до нескольких десятков горячих голубых звезд высокой светимости, довольно редко встречающихся в природе из-за своей относительно короткой жизни. Некоторые звезды в ассоциациях настолько молоды, что еще не сформировались окончательно. Ассоциации, как правило, связаны с массивными облаками холодного молекулярного газа, из которого и возникают звезды. Образовавшиеся массивные звезды своим мощным излучением и потоками истекающего из них газа сообщают межзвездной среде большую энергию, нагревая окружающий газ и выметая его из ассоциации. В результате звездная группировка оказывается неустойчивой и, медленно расширяясь, теряется на фоне окружающих звезд.

**Галактические расстояния.** При изучении нашей Галактики астрономы сталкиваются с серьезной проблемой: Солнце находится почти точно в плоскости Млечного Пути, где сосредоточены межзвездный газ и пыль, поглощающие свет далеких звезд. Поэтому мы видим лишь часть галактического диска, не далее нескольких килопарсек от Солнца. Особенно сложно "пробиться" с помощью оптического телескопа к центру Галактики, чтобы изучить его строение и измерить расстояние до него. Для астрономов это очень важная величина, задающая масштаб всех прочих расстояний в Галактике. Без нее невозможно определить скорость вращения и массу Галактики, расстояния до далеких звезд, скоплений и туманностей.

Сначала астрономам даже неясно было, в каком направлении расположен центр Галактики. Впервые это направление "нащупал" в 1917 г. американский астроном Харлоу Шепли. Он предположил, что шаровые звездные скопления, населяющие гало Галактики и поэтому видимые на больших расстояниях, симметрично распределены вокруг галактического центра. Заметив, что шаровые скопления в основном видны в направлении созвездий Скорпиона, Змееносца и Стрельца, Шепли понял, что где-то там и находится центр Млечного Пути.

В 40-х гг. инфракрасные телескопы, значительно менее чувствительные к межзвездному поглощению, чем оптические, указали на большую концентрацию звезд в созвездии Стрельца. А позднее радиотелескопы, которым пыль вообще не помеха, зафиксировали в этом созвездии мощный радиоисточник Стрелец А. Он то и совпадает с центром Галактики

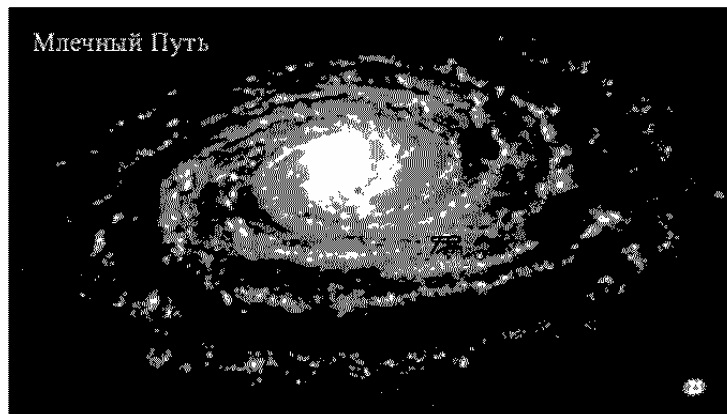
Теперь следовало определить расстояние до него. Шепли по распределению шаровых скоплений оценил его 12-16 кпк. При этом он полагал, что Солнце находится на краю галактического диска, диаметр которого, следовательно, около 30 кпк. Главным фактором неопределенности был учет межзвездного поглощения: по сей день расстояния до некоторых шаровых скоплений известны с ошибкой до 50%. Шли годы, и появлялись новые оценки расстояний до звезд и звездных скоплений. Расхождения в оценках были довольно существенные. Каждый исследователь, занимающийся этой проблемой, находил свое значение и предпочитал использовать именно его.

Но если у каждого астронома свой "мерный шест" в руках, то нет никакого взаимопонимания. Чтобы как-то исправить это положение, в 1963 г. астрономическое сообщество договорилось принять единые значения важнейших величин, характеризующих размеры Галактики ( $R_0$ ) и скорость ее вращения в районе орбиты Солнца ( $V_0$ ). Было решено придерживаться значений  $R_0=10$  кпк и  $V_0=250$  км/с. В 1985 г. Генеральная ассамблея Международного астрономического союза рекомендовала использовать новые значения:  $R_0 = 8,5$  кпк и  $V_0 = 220$  км/с. Однако, далеко не все астрономы согласны с тем, что они точнее старых. Каждый год публикуется три-четыре работы по измерению, и результаты колеблются от 7 до 11 кпк.

Разумеется, астрономы не всегда будут принимать условные значения важнейших величин, характеризующих Галактику. Грандиозные антенные системы - межконтинентальные радиоинтерферометры - уже сейчас позволяют получать очень

высокое разрешение - до 0,001". Что позволит более точно измерить  $R_0$ .

Итак, за последние 80 лет в результате работы астрономов Солнце почти вдвое "приблизилось" к центру Галактики. Казалось бы, и размер всей нашей звездной системы должен быть уменьшен вдвое. Но нет, за эти годы были открыты звезды, скопления и облака газа на расстоянии около 100 кпк от центра Галактики. Так что диаметр нашего звездного дома стал почти 200 кпк!



Схематическое изображение Галактики и окружающего её гало



Плоскость Галактики и плоскость Солнечной системы не совпадают, а находятся под углом друг к другу

### **ВСПЫШКИ СВЕРХНОВЫХ ЗВЕЗД.**

Мощное возмущение, вызванное взрывом, распространяется с огромной скоростью, а зона такого взрыва за несколько десятков тысяч лет покрывает гигантские области межзвездной среды. Физические условия таких областей резко отличаются от тех, что характеризуют "невозмущенную" среду: очень горячая (нагретая до нескольких миллионов градусов) плазма и значительно превышающие средние значения плотность космических лучей и напряженность магнитного поля. Выброшенное взорвавшейся звездой вещество, попадая в межзвездную среду, может участвовать в формировании новых звезд и планетных систем. Именно поэтому сверхновые звезды и их остатки являются одним из центральных объектов изучения для современной астрофизики, ведь здесь переплетаются такие важные проблемы, как эволюция нормальных звезд, рождение нейтронных звезд и других сколлапсировавших объектов, образование тяжелых элементов, космических лучей и многое другое.



Первоначально все звезды, блеск которых внезапно увеличивался более чем в 1 000 раз, называли новыми. Вспыхивая, такие звезды неожиданно появлялись на небе, нарушая привычную конфигурацию созвездия, и увеличивали свой блеск в максимуме, в несколько тысяч раз, затем их блеск начинал резко падать, а через несколько лет они становились такими же слабыми, какими были до вспышки. Повторяемость вспышек, при каждой из которых звезда с большой скоростью выбрасывает до одной тысячной своей массы, является для новых звезд характерной. И все же при всей грандиозности явления подобной вспышки оно не бывает связано ни с коренным изменением структуры звезды, ни с ее разрушением. За пять тысяч лет сохранились сведения о более чем 200 ярких вспышках звезд, если ограничиться такими, которые не превышали по блеску 3-ю звездную величину. Но когда была установлена внегалактическая природа туманностей, стало ясно, что вспыхивающие в них новые звезды по своим характеристикам превосходят обычные новые, так как их светимость часто оказывалась равной светимости всей галактики, в которой они вспыхивали. Необычность таких явлений привела астрономов к мысли, что такие события - нечто совсем не похожее на обычные новые звезды, а потому в 1934 году по предложению американских астрономов Фрица Цвикки и Вальтера Бааде те звезды, вспышки которых в максимуме блеска достигают светимостей нормальных галактик, были выделены в отдельный, самый яркий по светимости и редкий класс сверхновых звезд.

В отличие от вспышек обыкновенных новых звезд вспышки сверхновых в современном состоянии нашей Галактики - явление крайне редкое, происходящее не чаще чем раз в 100 лет. Наиболее яркими были вспышки в 1006 и 1054 годах, сведения о них содержатся в китайских и японских трактатах. В 1572 году вспышку такой звезды в созвездии Кассиопеи наблюдал выдающийся астроном Тихо Браге, последним же, кто следил за явлением сверхновой в созвездии Змееносца в 1604 году, был Иоганн Кеплер. За четыре столетия «телескопической» эры в астрономии подобных вспышек в нашей Галактике не наблюдалось. Положение Солнечной системы в ней таково, что нам оптически доступны наблюдения вспышек сверхновых примерно в половине объема, а в остальной ее части яркость вспышек приглушена межзвездным поглощением. В.И. Красовский и И.С. Шкловский подсчитали, что вспышки сверхновых звезд в нашей Галактике происходят в среднем раз в 100 лет. В других галактиках эти процессы происходят примерно с той же частотой, поэтому основные сведения о сверхновых в стадии оптической вспышки были получены по наблюдениям за ними в других галактиках.

Понимая важность изучения столь мощных явлений, астрономы В. Бааде и Ф. Цвикки, работавшие на Паломарской обсерватории в США, в 1936 году начали планомерный систематический поиск сверхновых. В их распоряжении был телескоп системы Шмидта, позволявший фотографировать области в несколько десятков квадратных градусов и дававший очень четкие изображения даже слабых звезд и галактик. За три года в разных галактиках ими были обнаружены 12 вспышек сверхновых, которые затем исследовались с помощью фотометрии и спектроскопии. По мере совершенствования наблюдательной техники количество вновь обнаруженных сверхновых неуклонно возрастало, а последующее внедрение автоматизированного поиска привело к лавинообразному росту числа открытий (более 100 сверхновых в год при общем количестве - 1 500). В последние годы на крупных телескопах был начат также поиск очень далеких и слабых сверхновых, так как их исследования могут дать ответы на многие вопросы о строении и судьбе всей Вселенной. За одну ночь наблюдений на таких телескопах можно открыть более 10 далёких сверхновых.

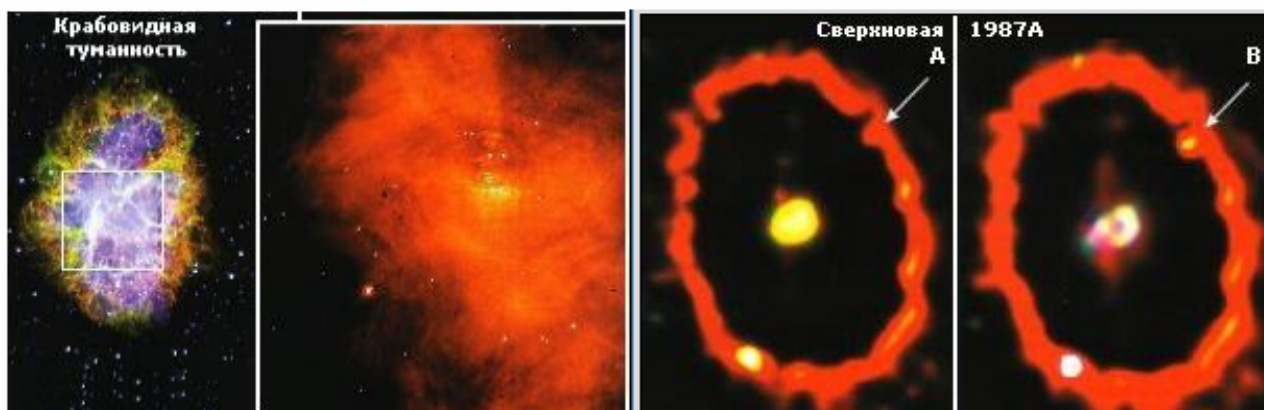
В результате взрыва звезды, который наблюдается как явление сверхновой, вокруг нее образуется туманность, расширяющаяся с огромной скоростью (порядка 10 000 км/с). Большая скорость расширения - главный признак, по которому остатки вспышек

сверхновых отличают от других туманностей. В остатках сверхновых все говорит о взрыве огромной мощности, разметавшем наружные слои звезды и сообщившем отдельным кускам выброшенной оболочки огромные скорости.

**Сверхновые.** Ни один космический объект не дал астрономам столько ценнейшей информации, как относительно небольшая Крабовидная туманность, наблюдаемая в созвездии Тельца и состоящая из газового диффузного вещества, разлетающегося с большой скоростью. Эта туманность, являющаяся остатком сверхновой, наблюдавшейся в 1054 году, стала первым галактическим объектом, с которым был отождествлен источник радиоизлучения. Оказалось, что характер радиоизлучения ничего общего с тепловым не имеет: его интенсивность систематически возрастает с длиной волны. Вскоре удалось объяснить и природу этого явления. В остатке сверхновой должно быть сильное магнитное поле, которое удерживает созданные ею космические лучи (электроны, позитроны, атомные ядра), имеющие скорости, близкие к скорости света. В магнитном поле они излучают электромагнитную энергию узким пучком в направлении движения. Обнаружение нетеплового радиоизлучения у Крабовидной туманности подтолкнуло астрономов к поиску остатков сверхновых именно по этому признаку.

Новая последовательность изображений остатка огромного звездного взрыва, полученная телескопом «Хаббл», дает астрономам глубже заглянуть в динамику связи между маленьким пульсаром «Краб» и огромной туманностью, которую он обеспечивает энергией. Фотография представляет собой полученное наземным телескопом изображение почти всей Крабовидной туманности, которая сформировалась после взрыва сверхновой более 900 лет назад. Туманность, размером 10 световых лет в поперечнике, расположена на расстоянии 7 000 световых лет в созвездии Тельца. Зеленые, желтые и красные волокна, сосредоточенные по краям туманности, являются остатком звезды, который был выброшен в пространство взрывом. В центре Крабовидной туманности лежит пульсар «Краб» - сколлапсировавшее ядро взорвавшейся звезды. Синее сияние во внутренней части туманности - это свет, который излучают энергетические электроны. Изображение справа получено космическим телескопом «Хаббл» и представляет собой внутренние области «Краба». Сам пульсар виден как левая - из пары звезд вблизи центра кадра. Пульсар окружен комплексом четких узлов и клочковатых образований. Это - одна из последовательностей изображений, которые получал "Хаббл" на протяжении нескольких месяцев. Она показывает, что внутренняя часть Крабовидной туманности более динамична, чем полагали ранее.

Особенно мощным источником радиоизлучения оказалась туманность, находящаяся в созвездии Кассиопеи, - на метровых волнах поток радиоизлучения от нее в 10 раз превышает поток от Крабовидной туманности, хотя она и значительно дальше последней. В оптических же лучах эта быстро расширяющаяся туманность очень слаба. Полагают, что туманность в Кассиопее - это остаток вспышки сверхновой, имевшей место около 300 лет назад.



Характерное для старых остатков сверхновых радиоизлучение показала и система волокнистых туманностей в созвездии Лебедя. Радиоастрономия помогла отыскать еще много других нетепловых радиоисточников, которые оказались остатками сверхновых разного возраста. Таким образом, был сделан вывод, что остатки вспышек сверхновых, случившихся даже десятки тысяч лет назад, выделяются среди других туманностей своим мощным нетепловым радиоизлучением.

Как уже говорилось, Крабовидная туманность стала первым объектом, у которого было обнаружено рентгеновское излучение. В 1964 году удалось обнаружить, что источник рентгеновского излучения, исходящего из нее, протяженный, хотя его угловые размеры в 5 раз меньше угловых размеров самой Крабовидной туманности. Из чего был получен вывод, что рентгеновское излучение испускает не звезда, некогда вспыхнувшая как сверхновая, а сама туманность.

Разноцветные струи, пересекающие небо на снимке, полученном космическим телескопом «Хаббла», созданы одним из самых больших «фейерверков», зарегистрированных в истории нашей галактики, - огромным взрывом массивной звезды. Свет от нее достиг Земли 320 лет назад. Клочковатые остатки мертвой звезды названы Кассиопея А, или, коротко, «Cas A». Этот самый молодой из известных остатков сверхновых в нашей Галактике Млечный Путь находится на расстоянии 10 000 световых лет в созвездии Кассиопеи. Свет от взрыва сверхновой достиг Земли в 1600 году, а сам взрыв произошел 10 000 годами раньше. Это фото показывает верхний край расширяющейся оболочки остатка сверхновой. Вверху изображения видны дюжины крошечных клочков материи. Каждый маленький комочек изначально был небольшим фрагментом звезды, в десятки раз большей, чем вся Солнечная система. Звезда, которая создала их, была огромна: в 15-25 раз массивнее нашего Солнца. Такие звезды обычно живут недолго, используя свой запас ядерного топлива за десятки миллионов лет (в 1 000 раз быстрее, чем наше Солнце). Этот потрясающий снимок Cas A позволяет астрономам подробно изучить остатки сверхновой, показывая впервые, что они состоят из маленьких остывающих клубков газа. Это вещество будет использовано для создания нового поколения звезд и планет. Возможно, наше Солнце и планеты Солнечной системы созданы из остатков сверхновой, которая взорвалась миллиарды лет назад.

Сверкающие звезды и клочья газа создают захватывающий дух фон для картины саморазрушения массивной звезды, названной сверхновой 1987А. Ее взрыв астрономы наблюдали в Южном полушарии 23 февраля 1987 года. Это изображение, полученное телескопом «Хаббл», показывает остатки сверхновой, окруженные внутренним и внешним кольцами вещества в диффузных облаках газа. Этот трехцветный снимок составлен из нескольких фотографий сверхновой и соседней с ней области, которые были сделаны в сентябре 1994, феврале 1996 и июле 1997 года. Многочисленные яркие голубые звезды вблизи сверхновой - это массивные звезды, каждая из которых возрастом около 12 млн. лет и в 6 раз тяжелее Солнца. Все они относятся к тому же поколению звезд, что и взорвавшаяся. Присутствие ярких газовых облаков - еще один признак молодости этой области, которая все еще является плодородной почвой для рождения новых звезд. «Хаббл» обнаружил кольца светящегося газа, опоясывающие место взрыва сверхновой 1987А. Возможно, два кольца могут быть «нарисованы» высокоэнергетическим излучением или частицами, аналогично тому, как световой лазерный луч чертит круги на экране. Источником излучения могут быть ранее неизвестные звездные остатки второго компонента звезды, взорвавшейся в 1987 году. На изображении, полученном «Хабблом», виден слабосветящийся объект на месте предполагаемого источника.

Кольцо на изображении [А] полученном телескопом «Хаббл» в 1994 году, показывает светящееся газовое кольцо вокруг сверхновой 1987А. Изображение [В] - недавние наблюдения 1997 года телескопа «Хаббл» показывают увеличение яркости узлов на верхней правой стороне кольца. Это место мощных столкновений между движущейся

наружу взрывной волной и внутренними частями околозвездного кольца. Столкновения нагревают газ и заставляют его светить ярче. Это, вероятно, первый сигнал драматических и сильных столкновений, которые будут иметь место в последующие несколько лет, омолаживая сверхновую как мощный источник рентгеновского и радиоизлучения. Белая серпообразная материя в центре - видимая часть рассеянной звезды, несущаяся со скоростью 3 000 км/с, которая нагревается радиоактивными элементами, возникшими при взрыве звезды.

### **Влияние сверхновых.**

*Сверхновые.* 23 февраля 1987 года в соседней с нами галактике - Большом Магеллановом Облаке - вспыхнула сверхновая, ставшая чрезвычайно важной для астрономов, поскольку была первой, которую они, вооружившись современными астрономическими инструментами, могли изучить в деталях. И эта звезда дала подтверждение целой серии предсказаний. Одновременно с оптической вспышкой специальные детекторы, установленные на территории Японии и в штате Огайо (США), зарегистрировали поток нейтрино - элементарных частиц, рождающихся при очень высоких температурах процессе коллапса ядра звезды и легко проникающих сквозь ее оболочку. Эти наблюдения подтвердили ранее высказанное предположение о том, что около 10% массы коллапсирующего ядра звезды излучается в виде нейтрино в тот момент, когда само ядро сжимается в нейтронную звезду. У очень массивных звезд при вспышке сверхновой ядра сжимаются до еще больших плотностей и, вероятно, превращаются в черные дыры, но сброс внешних слоев звезды все же происходит. В последние годы появились указания на связь некоторых космических гамма-всплесков со сверхновыми. Возможно, и природа космических гамма-всплесков - связана с природой взрывов.

Вспышки сверхновых оказывают сильное и многообразное влияние на окружающую межзвездную среду. Сбрасываемая с огромной скоростью оболочка сверхновой сгребает и сжимает окружающий ее газ, что может дать толчок к образованию из облаков газа новых звезд. Группа астрономов во главе с доктором Джоном Хьюгесом (Rutgers University), используя наблюдения на орбитальной рентгеновской обсерватории «Чандра» (NASA), сделала важное открытие, проливающее свет на то, как при вспышках сверхновой звезды образуются кремний, железо и другие элементы. Рентгеновское изображение остатка сверхновой Cassiopeia A (Cas A) позволяет увидеть сгустки кремния, серы и железа, выброшенные при взрыве из внутренних областей звезды. Высокое качество, четкость и информативность получаемых обсерваторией «Чандра» изображений остатка сверхновой Cas A позволили астрономам не только определить химический состав многих узлов этого остатка, но и узнать, где именно эти узлы образовались. Например, самые компактные и яркие узлы состоят главным образом из кремния и серы с очень малым содержанием железа. Это указывает на то, что они образовались глубоко внутри звезды, где температура достигала трех миллиардов градусов во время коллапса, закончившегося взрывом сверхновой. В других узлах астрономы обнаружили очень большое содержание железа с примесями некоторого количества кремния и серы. Это вещество образовалось еще глубже - в тех частях, где температура во время взрыва достигала более высоких значений - от четырех до пяти миллиардов градусов. Сравнение расположений в остатке сверхновой Cas A богатых кремнием как ярких, так и более слабых узлов, обогащенных железом, позволило обнаружить, что «железные» детали, происходящие из самых глубоких слоев звезды, располагаются на внешних краях остатка. Это означает, что взрыв выбросил «железные» узлы дальше всех остальных. И даже сейчас они, по-видимому, удаляются от центра взрыва с большей скоростью. Изучение полученных «Чандрой» данных позволит остановиться на одном из нескольких предложенных теоретиками механизмов, объясняющих природу вспышки сверхновой, динамику процесса и происхождение новых элементов.

Исследования показали, что сверхновые не представляют собой однородной группы объектов - как спектры, так и кривые блеска (изменение блеска со временем) сверхновых существенно различались, спектральная классификация разделила их на два типа: SN I и SN II.

*Сверхновые SN I* имеют весьма сходные спектры (с отсутствием водородных линий) и формы кривых блеска, в то время как спектры SN II содержат яркие линии водорода и отличаются разнообразием как спектров, так и кривых блеска. В таком виде классификация сверхновых существовала до середины 80-х годов прошлого столетия. А с началом широкого применения ПЗС - приемников количество и качество наблюдательного материала существенно возросло, что позволило получать спектрограммы для недоступных прежде слабых объектов, с гораздо большей точностью определять интенсивность и ширину линий, а также регистрировать в спектрах более слабые линии. В результате казавшаяся установившейся двоичная классификация сверхновых стала быстро изменяться и усложняться. Различаются сверхновые и по типам галактик, в которых они вспыхивают. В спиральных галактиках вспыхивают сверхновые обоих типов, а вот в эллиптических, где почти нет межзвездной среды и процесс звездообразования закончился, наблюдаются только сверхновые типа SN I, очевидно, до взрыва - это очень старые звезды, массы которых близки к солнечной. А так как спектры и кривые блеска сверхновых этого типа очень похожи, то, значит, и в спиральных галактиках взрываются такие же звезды. Закономерный конец эволюционного пути звезд с массами, близкими к солнечной, - превращение в белого карлика с одновременным образованием планетарной туманности. В составе белого карлика почти нет водорода, поскольку он является конечным продуктом эволюции нормальной звезды.

Ежегодно в нашей Галактике образуется несколько планетарных туманностей, следовательно, большая часть звезд такой массы спокойно завершает свой жизненный путь, и только раз в сто лет происходит вспышка сверхновой SN I типа. Какие же причины определяют совершенно особый финал, не схожий с судьбой других таких же звезд? Знаменитый индийский астрофизик С. Чандрасекар показал, что в том случае, если белый карлик имеет массу, меньшую, чем примерно 1,4 массы Солнца, он будет спокойно "доживать" свой век. Но если он находится в достаточно тесной двойной системе, его мощная гравитация способна «стягивать» материю со звезды-компаньона, что приводит к постепенному увеличению массы, и когда она переходит допустимый предел - происходит мощный взрыв, приводящий к гибели звезды.

*Сверхновые SN II* явно связаны с молодыми, массивными звездами, в оболочках которых в большом количестве присутствует водород. Вспышки этого типа сверхновых считают конечной стадией эволюции звезд с начальной массой более 8-10 масс Солнца. Вообще же, эволюция таких звезд протекает достаточно быстро - за несколько миллионов лет они сжигают свой водород, затем - гелий, превращающийся в углерод, а затем и атомы углерода начинают преобразовываться в атомы с более высокими атомными номерами. В природе превращения элементов с большим выделением энергии заканчиваются на железе, ядра которого являются самыми стабильными, и выделения энергии при их слиянии не происходит. Таким образом, когда ядро звезды становится железным, выделение энергии в нем прекращается, сопротивляться гравитационным силам оно уже не может, а потому начинает быстро сжиматься, или коллапсировать. Процессы, происходящие при коллапсе, все еще далеки от полного понимания. Однако известно, что если все вещество ядра превращается в нейтроны, то оно может противостоять силам притяжения - ядро звезды превращается в «нейтронную звезду», и коллапс останавливается. При этом выделяется огромная энергия, поступающая в оболочку звезды и вызывающая расширение, которое мы и видим как вспышку сверхновой. Из этого

следовало ожидать генетическую связь между вспышками сверхновых и образованием нейтронных звезд и черных дыр. Если эволюция звезды до этого происходила «спокойно», то ее оболочка должна иметь радиус, в сотни раз превосходящий радиус Солнца, а также сохранить достаточное количество водорода для объяснения спектра сверхновых SN II.

**Пульсары.** О том, что после взрыва сверхновой кроме расширяющейся оболочки и различных типов излучений остаются и другие объекты, стало известно в 1968 году благодаря тому, что годом раньше радиоастрономы открыли пульсары - радиоисточники, излучение которых сосредоточено в отдельных импульсах, повторяющихся через строго определенный промежуток времени. Ученые были поражены строгой периодичностью импульсов и краткостью их периодов. Наибольшее же внимание вызвал пульсар, координаты которого были близки к координатам очень интересной для астрономов туманности, расположенной в южном созвездии Парусов, которая считается остатком вспышки сверхновой звезды - его период составлял всего лишь 0,089 секунды. А после открытия пульсара в центре Крабовидной туманности (его период составлял 1/30 секунды) стало ясно, что пульсары каким-то образом связаны с взрывами сверхновых. В январе 1969 года пульсар из Крабовидной туманности был отождествлен со слабой звездочкой 16-й величины, изменяющей свой блеск с таким же периодом, а в 1977 году удалось отождествить со звездой и пульсар в созвездии Парусов.

Периодичность излучения пульсаров связана с их быстрым вращением, но ни одна обычная звезда, даже белый карлик, не могла бы вращаться с периодом, характерным для пульсаров - она была бы немедленно разорвана центробежными силами, и только нейтронная звезда, очень, плотная и компактная, могла бы устоять перед ними. В результате анализа множества вариантов ученые пришли к заключению, что взрывы сверхновых сопровождаются образованием нейтронных звезд - качественно нового типа объектов, существование которых было предсказано теорией эволюции звезд большой массы.

**Черные дыры.** Первое доказательство прямой связи между взрывом сверхновой и образованием черной дыры удалось получить испанским астрономам. В результате исследования излучения, испускаемого звездой, вращающейся вокруг черной дыры и двойной системе Nova Sco<sup>pp</sup>i 1994, обнаружилось, что она содержит большое количество кислорода, магния, кремния и серы. Есть предположение, что эти элементы были захвачены ею, когда соседняя звезда, пережив взрыв сверхновой, превратилась в чёрную дыру. Сверхновые (в особенности же сверхновые типа Ia) являются одними из самых ярких звездообразных объектов во Вселенной, поэтому даже самые удаленные из них вполне можно исследовать с помощью имеющегося в настоящее время оборудования.

Многие сверхновые типа Ia были открыты в относительно близких галактиках. Достаточно точные оценки расстояний до этих галактик позволили определить светимость вспыхивающих в них сверхновых. Если считать, что далекие сверхновые имеют в среднем такую же светимость, то по наблюдаемой звёздной величине в максимуме блеска можно оценить и расстояние до них. Сопоставление же расстояния до сверхновой со скоростью удаления (красным смещением) галактики, в которой она вспыхнула, дает возможность определить основную величину, характеризующую расширение Вселенной - так называемую постоянную Хаббла.

Еще 10 лет назад для нее получали значения, различающиеся почти в два раза - от 53 по 100 км/с Мпк, на сегодняшний же момент точность удалось значительно увеличить, в результате чего принимается значение 72 км/с Мпк (с ошибкой около 10%). Для далеких сверхновых, красное смещение которых близко к 1, соотношение между расстоянием и красным смещением позволяет также определить величины, зависящие от плотности

вещества во Вселенной. Согласно общей теории относительности Эйнштейна именно плотность вещества определяет кривизну пространства, а следовательно, и дальнейшую судьбу Вселенной. А именно: будет ли она расширяться бесконечно или этот процесс когда-нибудь остановится и сменится сжатием. Последние исследования сверхновых показали, что скорее всего плотность вещества во Вселенной недостаточна, чтобы остановить расширение, и оно будет продолжаться. А для того чтобы подтвердить этот вывод, необходимы новые наблюдения сверхновых.

## ГАЛАКТИЧЕСКИЕ КОСМИЧЕСКИЕ ЛУЧИ.

(Н.Н. Калмыков, Г.В. Куликов, Т.М. Роганова, НИИЯФ МГУ).

Под космическими лучами (КЛ) обыкновенно понимаются потоки заряженных релятивистских частиц, начиная от протонов и ядер гелия и кончая ядрами более тяжёлых элементов вплоть до урана, рождённых и ускоренных до высоких и предельно высоких (вплоть до  $10^{20}$  эВ) энергий вне пределов Земли. При этом в потоке частиц с энергией до  $10^9$  эВ доминирует вклад Солнца, а частицы более высоких энергий имеют галактическое (и, возможно, при самых высоких энергиях экстрагалактическое) происхождение. Естественно, что протоны и ядра не исчерпывают всего многообразия излучений, приходящих на Землю из космического пространства. Однако вопросы, связанные с исследованием других компонент, входящих в состав космического излучения: электронов, позитронов, антипротонов, нейтрино, гамма-квантов, а также различных электромагнитных излучений, здесь не освещаются.

В составе галактических космических лучей (ГКЛ) преобладают протоны, на долю остальных ядер приходится менее 10%. Протоны остаются доминирующей компонентой, по крайней мере, до энергий  $\sim 1$  ТэВ, хотя доля ядер возрастает с увеличением энергии частиц. На рисунке 1 относительная распространённость ядер в КЛ сравнивается с представленностью элементов в солнечной системе (Simpson, 1997). В целом наблюдается подобие, за двумя исключениями: группа Li, Be, B и элементы от Cl до Mn.

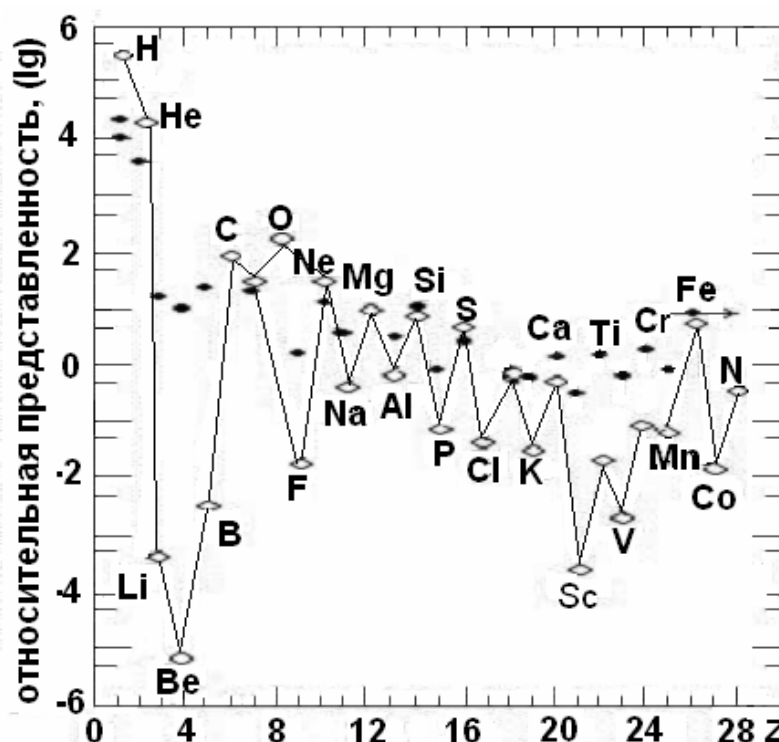


Рис. 1. Химические элементы. Тёмные точки – КЛ, светлые – Солнечная система.

Как видно из рисунка, в составе ГКЛ содержание лёгких ядер (с зарядом  $Z$  от 3 до 5) на несколько порядков превосходит их содержание в звёздах. Кроме того, ГКЛ характеризуются значительно большим присутствием тяжёлых ядер ( $Z > 20$ ) по сравнению с их естественной распространённостью. Аномально высокая представленность этих элементов связана с дополнительным вкладом от расщепления более тяжёлых элементов в межзвёздной среде. Оба эти фактора весьма существенны для выяснения вопроса о происхождении ГКЛ.

Солнце также является источником КЛ, и потоки солнечных космических лучей (СКЛ), особенно во время солнечных вспышек, могут достигать очень больших значений, однако характерная величина их энергии, как правило, не превосходит  $10^9$  эВ, тогда как ГКЛ распределены в очень широком диапазоне энергий от  $10^9$  до  $10^{20}$  эВ. Поэтому разделение КЛ на галактические и солнечные отражает существо дела, поскольку как характеристики, так и источники СКЛ и ГКЛ совершенно различны. При энергиях ниже 10 ГэВ/нуклон интенсивность ГКЛ, измеряемая вблизи Земли, зависит от уровня солнечной активности (точнее, от меняющегося в течение солнечных циклов магнитного поля).

В области более высоких энергий интенсивность ГКЛ постоянна во времени. Согласно существующим представлениям, собственно ГКЛ заканчиваются в области энергий между  $10^{17}$  и  $10^{18}$  эВ. Поэтому при энергиях выше  $10^{18}$  эВ более правильно использовать обозначение просто КЛ, поскольку происхождение космических лучей предельно высоких энергий, скорее всего, с Галактикой не связано. Наблюдаемый дифференциальный энергетический спектр КЛ (Cronin, 1999) показан на Рис.2. Спектр описывается степенным законом в очень широком диапазоне энергий от  $10^{11}$  до  $10^{20}$  эВ с небольшим изменением наклона около  $3 \cdot 10^{15}$  эВ (излом, иногда называемый коленом, knee) и около  $10^{19}$  эВ (ankle, лодыжка). Интегральный поток КЛ выше лодыжки равен приблизительно 1 частице на  $\text{км}^2$  в год.

Степенной характер энергетического спектра КЛ свидетельствует о нетепловом происхождении их энергии, а это, в свою очередь, налагает определённые требования на источники КЛ, которые должны обеспечить формирование степенного энергетического спектра. Максимальная энергия частиц КЛ, которая была зарегистрирована по наблюдениям широких атмосферных ливней, составляет  $3 \cdot 10^{20}$  эВ и существует более 10 событий, энергия которых  $> 10^{20}$  эВ. Такие энергии вряд ли могут быть обеспечены источниками, находящимися в нашей Галактике. В то же время взаимодействие КЛ предельно высоких энергий с реликтовым излучением с температурой  $2.75^\circ \text{K}$  ограничивает диапазон расстояний, с которого могли бы приходить частицы с такими энергиями, областью местного сверхскопления галактик, а в нём, как и в нашей Галактике, также нет объектов, могущих обеспечить ускорение до столь высоких энергий. Эта проблема привлекает пристальное внимание исследователей, и для её решения создаются установки, обладающие огромными чувствительными площадями, поскольку интенсивность частиц предельно высоких энергий крайне мала (см. Рис. 2).

Плотность энергии, несомой космическими лучами, составляет  $\sim 1 \text{ эВ} / \text{см}^3$ , наибольший вклад в эту величину из-за круто падающего спектра вносят частицы сравнительно малых энергий. Между тем существенно, что величина плотности энергии ГКЛ оказывается сравнимой с плотностью энергии теплового движения межзвёздного газа и его турбулентных движений, с плотностью суммарного электромагнитного излучения звёзд нашей Галактики и с плотностью энергии, заключённой в магнитном поле Галактики. Это означает, что роль ГКЛ в энергетическом балансе протекающих во Вселенной процессов достаточно велика, и это обстоятельство должно быть учтено теорией происхождения космических лучей (Астрофизика КЛ, 1990).



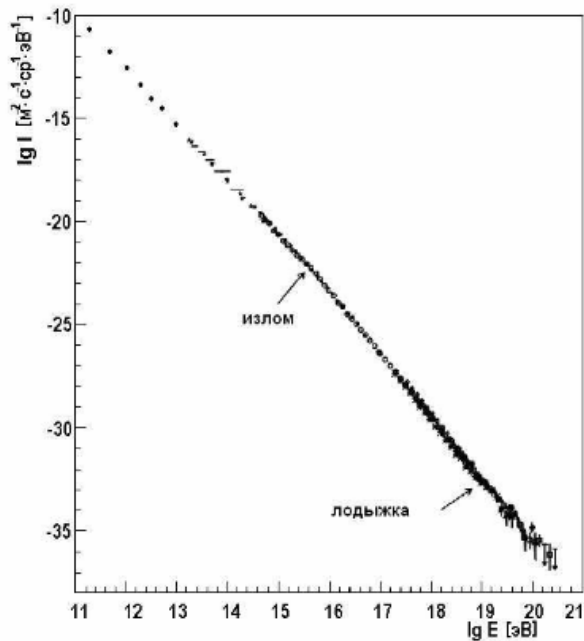


Рис. 2. Энергетический спектр космических лучей.

Поток ГКЛ характеризуется высокой степенью изотропии. Значения коэффициента анизотропии вплоть до  $10^{14}$  эВ не превосходят 0.1%, при дальнейшем увеличении энергии коэффициент анизотропии КЛ возрастает и достигает нескольких десятков процентов при энергиях  $>10^{19}$  эВ, однако статистическая значимость экспериментальных результатов в области сверхвысоких и предельно высоких энергий ( $10^{15}$ – $10^{20}$  эВ), как правило, невелика.

Теория происхождения ГКЛ, которую можно было бы назвать вполне завершённой, в настоящее время отсутствует, в особенности, если иметь в виду происхождение ГКЛ сверхвысоких энергий ( $>10^{15}$  эВ), хотя в течение последних 10–15 лет в понимании общего характера процессов, в которых появляются и ускоряются космические лучи, и был достигнут существенный прогресс. Законченная теория происхождения ГКЛ должна объяснить основные характеристики ГКЛ: степенную форму энергетического спектра, величину плотности энергии, массовый (химический) состав первичных КЛ, включая данные о потоках антипротонов, электронов, позитронов, гамма-квантов, практическое постоянство во времени интенсивности ГКЛ и очень слабую их анизотропию. Ещё в конце 1950-х годов энергетические соображения (Гинзбург и Сыроватский, 1963) привели к заключению, что источником ГКЛ (по крайней мере, основной их массы) следует считать взрывы сверхновых в нашей Галактике. Количественная теория преобразования энергии взрыва сверхновой в энергетический спектр космических лучей путём ускорения заряженных частиц ударными волнами в расширяющихся оболочках сверхновых начала развиваться в конце 1970-х годов (Крымский, 1977) и к настоящему времени стала общепринятой, хотя и не получила ещё окончательного экспериментального подтверждения. Эта теория позволяет описать формирование степенного спектра ГКЛ вплоть до энергий  $\sim 10^{15} \cdot Z$  эВ, где  $Z$  – заряд ускоряемого иона, и даже до  $\sim 10^{17} \cdot Z$  эВ (Ptuskin and Zirakashvili, 2005) при учёте большой магнитогидродинамической турбулентности, возникающей из-за неустойчивости потока КЛ на ранней стадии эволюции сверхновой, но нужны дополнительные усилия, чтобы понять, каким образом происходит ускорение частиц вплоть до энергий  $10^{20}$  эВ

Энергетический спектр ГКЛ и их массовый состав, наблюдаемые вблизи Земли, образуются в результате трансформации за время прохождения от источников, распределённых, в основном, в пределах центральной части галактического диска, до солнечной системы, расположенной на периферии Галактики. Поскольку в Галактике существуют как регулярные, так и случайные магнитные поля, характерное значение напряжённости которых составляет  $\sim 3 \cdot 10^{-6}$  Гс, частицы ГКЛ распространяются по весьма

запутанным траекториям, и их движение может быть в хорошем приближении описано как диффузия. Основные аргументы в пользу наличия диффузии связаны с почти полной изотропией потока ГКЛ и наличием в потоке ГКЛ лёгких ядер (Li, Be, B) в количествах, в сотни тысяч раз превышающих их распространённость в Галактике. Время жизни ГКЛ, т.е., время их пребывания в Галактике, равно  $\sim 3 \cdot 10^7$  лет, что на 4 порядка превышает время, необходимое для пересечения Галактики при движении по прямой. За это время пробег ядер средних элементов (C, N, O) составит  $5 - 10 \text{ г/см}^2$  в межзвёздном газе, что достаточно для образования лёгких ядер. Время жизни ГКЛ и количество проходимого ими вещества уменьшаются с ростом энергии частицы; частицы предельно высоких энергий диффузии практически уже не испытывают.

Энергетический спектр и массовый состав ГКЛ могут быть измерены либо непосредственно, т.е., в результате прямой регистрации частиц ГКЛ в экспериментах, осуществляемых на баллонах и спутниках, либо с использованием косвенных методов, основывающихся на исследовании характеристик широких атмосферных ливней (ШАЛ), возникающих в результате развития каскадного процесса в атмосфере. Преимущество метода ШАЛ состоит в том, что некоторые компоненты ливня могут быть зарегистрированы на очень больших расстояниях от траектории первичной частицы, генерировавшей ШАЛ (вплоть до десятков километров при регистрации флуоресценции, создаваемой заряженными частицами ливня в атмосфере), чем достигается огромное увеличение эффективной площади регистрации события. Это позволяет преодолеть неизбежную ограниченность статистики, присущую прямым экспериментам и не позволяющую использовать их для изучения ГКЛ выше определённого энергетического порога, зависящего от геометрического фактора детектора. В настоящее время рекордной является величина энергии, достигнутой в экспериментах на спутниках серии «Протон» (1968) и составляющей  $\sim 2 \cdot 10^{15}$  эВ. Для большинства прямых экспериментов этот порог пока существенно ниже, так что граница между прямыми и косвенными экспериментами проходит между энергиями  $10^{14} - 10^{15}$  эВ. Однако платой за использование преимуществ косвенных методов является необходимость определять энергию и массовое число первичной частицы по результатам развития каскада в атмосфере, что связано со значительной неопределённостью даже в том случае, если точно известно, каким образом происходит элементарный акт взаимодействия. Между тем наши сведения относительно адрон-нуклонных взаимодействий ограничены энергией  $2 \cdot 10^{15}$  эВ (эквивалентная энергия Тэватрона в лабораторной системе). Одновременно следует подчеркнуть, что та же неопределённость была бы присуща и экспериментам, осуществляемым с использованием ионизационных калориметров на спутниках и баллонах, если бы эти эксперименты были нацелены на область энергий, для которой отсутствуют экспериментальные данные относительно адрон-нуклонных взаимодействий.

## ПРОИСХОЖДЕНИЕ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ

**Взрывы сверхновых как основной источник галактических КЛ.** Требования к энергетической мощности источников, генерирующих космические лучи, весьма высоки, так что обычные звёзды Галактики не могут им удовлетворять (мощность ГКЛ порядка  $3 \cdot 10^{40}$  эрг/сек). Однако такая мощность может быть получена от взрывов сверхновых (эта идея была высказана около 50 лет назад (Гинзбург и Сыроватский, 1963)). Если во время взрыва выделяется энергия  $\sim 10^{51}$  эрг, а взрывы происходят с частотой 1 раз в 30–100 лет, то мощность, генерируемая при взрывах сверхновых, составляет  $\sim 10^{42}$  эрг/сек и для обеспечения необходимой мощности космических лучей достаточно лишь нескольких процентов энергии вспышки.

Вопрос о формировании наблюдаемого экспериментально энергетического спектра ГКЛ далеко не тривиален. Необходимо передать макроскопическую энергию намагниченной плазмы (расширяющейся оболочки взорвавшейся сверхновой) индивидуальным заряженным частицам, обеспечив при этом такое распределение

энергии, которое существенным образом отличается от теплового.

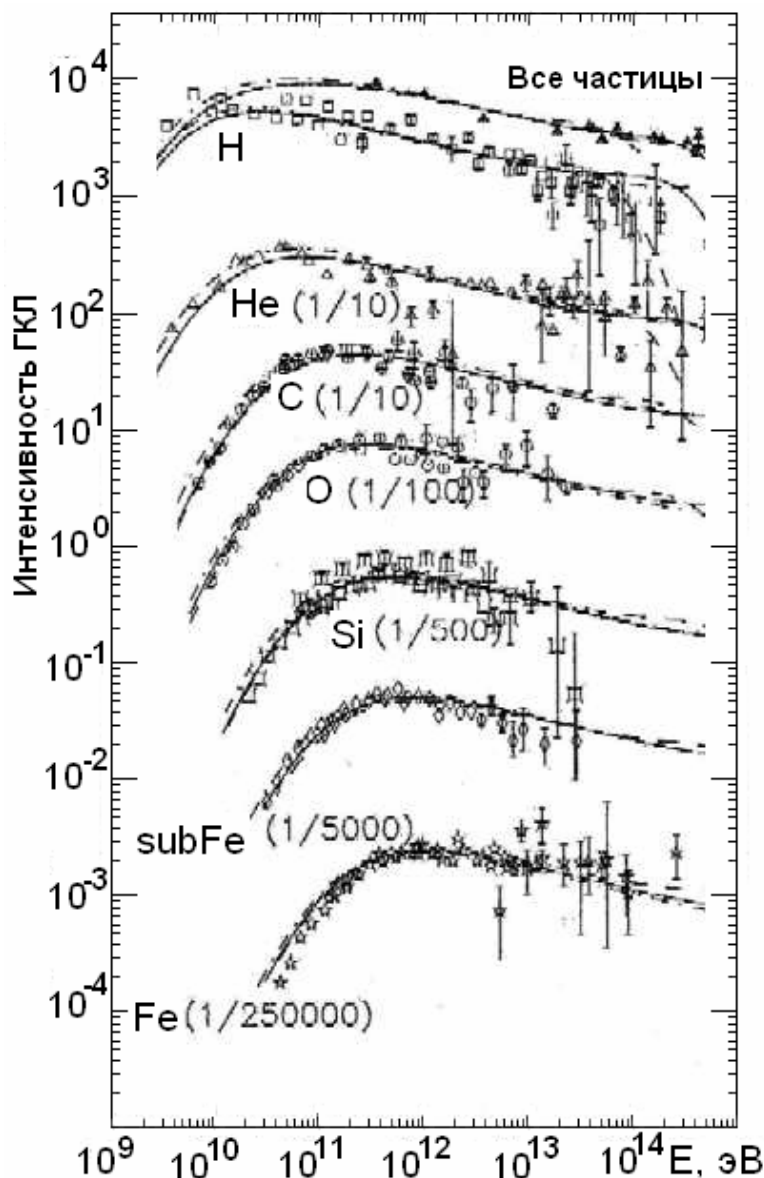


Рис. 3. Интенсивность ГКЛ вблизи Земли как функция кинетической энергии. Кривые – расчёт, точки – экспериментальные данные.

**Стандартная модель ускорения КЛ ударными волнами.** Наиболее вероятным механизмом ускорения ГКЛ до энергии  $\sim 10^{15}$  эВ, а, возможно, и выше, представляется следующий. Движение сброшенной при взрыве оболочки порождает в окружающей межзвёздной среде ударную волну. Диффузионное распространение заряженных частиц, захваченных в процесс ускорения, позволяет им многократно пересекать фронт ударной волны (Крымский, 1977). Каждая пара последовательных пересечений увеличивает энергию частицы пропорционально уже достигнутой энергии (механизм, предложенный Ферми), что и приводит к ускорению ГКЛ. По мере увеличения числа пересечений фронта ударной волны растёт и вероятность покинуть область ускорения, так что количество частиц падает по мере роста энергии примерно степенным образом. Ускорение оказывается весьма эффективным, а спектр ускоренных частиц жёстким:  $\sim E^{-2}$  вплоть до  $\sim E_{\text{max}}$  – максимально достижимой энергии ускоренных частиц.

Поэтому необходимо учитывать обратное воздействие космических лучей (наиболее

существенна роль протонов, поскольку более тяжёлые ядра можно рассматривать как малые примеси) на среду, приводящее к модификации ударной волны и к возникновению, помимо обычного теплового фронта, плавного протяжённого участка, так называемого предфронта. Такая модификация, в свою очередь, влияет на спектр космических лучей. Таким образом, в общем случае нельзя пользоваться приближением, когда обратное влияние космических лучей на среду не учитывается, и необходимо пользоваться самосогласованным решением, процесс которого ещё окончательно не отработан (в том смысле, что, возможно, пока ещё не учтены полностью все необходимые факторы). Отражением этого обстоятельства является наблюдающийся в течение последних 10 лет почти непрерывный рост теоретической оценки максимально достижимой энергии. Так, в работе (Бережко и Ксенофонов, 1999) приводится следующая оценка для максимально достижимой энергии  $E_{\max}$ :

$$E_{\max} = 5 \cdot 10^{14} Z (E_{\text{SN}}/10^{51} \text{ эрг})^{1/2} (M_{\text{ej}}/1.4 M_{\odot})^{-1/6} (N_{\text{H}}/3 \cdot 10^{23} \text{ см}^{-2})^{1/3} (B_0/3 \text{ мкГс}), \text{ эВ},$$

где  $Z$  – заряд ускоряемой частицы,  $E_{\text{SN}}$  – энергия вспышки,  $M_{\text{ej}}$  – масса сброшенной оболочки,  $N_{\text{H}}$  – концентрация атомов водорода,  $B_0$  – напряжённость магнитного поля. Согласие результатов расчётов (Berezhko, 2001) с экспериментальными спектрами (Shibata, 1995), как видно из рисунка, достаточно хорошее.

Приведенная формула предполагает использование Бомовского предела для коэффициента диффузии  $D_{\text{B}} = (1/3)R_{\text{L}}c$ , где  $R_{\text{L}}$  – ларморовский радиус частицы. Правомерность этого традиционного приближения, вообще говоря, не очевидна и может быть подвергнута сомнению. Заметим, что в приближении, не учитывающем обратное влияние космических лучей на ударную волну, оценка  $E_{\max}$  получается приблизительно на порядок ниже. Время ускорения достигает  $\sim 10^4$  лет, но эффективность его (понимаемая как возможность генерации частиц с энергией, близкой к  $E_{\max}$ ) падает со временем, так что время, в течение которого могут ускоряться частицы с наибольшими энергиями, составляет  $\sim 10^3$  лет.

Из формулы следует также, что, меняя характеристики вспышки (например, энергия, высвобождающаяся при вспышках так называемых Гиперновых, может значительно превысить  $10^{51}$  эрг) и учитывая распределение вспышек по ESN, можно существенно повысить предел  $E_{\max}$ . Кроме того, ударная волна может распространяться не в усреднённой межзвёздной среде, а в среде, модулированной испущенным ранее звёздным ветром и характеризующейся значительно большим значением напряжённости магнитного поля (как в звёздах Вольфа-Райе). Наконец, учёт того, что потоковая неустойчивость ускоряемых частиц в предфронте ударной волны приводит к появлению сильной магнитодинамической турбулентности, что также увеличивает максимальную энергию ускоренных частиц. В итоге, нельзя исключить, что оценка может быть доведена до  $E_{\max} \sim 10^{17} Z$  эВ.

Не вполне определённой выглядит сейчас ситуация с экспериментальным обнаружением ускорения ударными волнами. В частности, анализ данных гамма-астрономии показывает, что не всегда от близких остатков сверхновых наблюдаются гамма-вспышки высоких ( $\sim 1$  ТэВ) энергий и, наоборот, существуют источники гамма-квантов высоких энергий, которые не видны ни в оптическом, ни в рентгеновском диапазонах. Поэтому, возможно, что происхождение ГКЛ не обусловлено исключительно вспышками сверхновых.

Нельзя не отметить, что расчётный спектр космических лучей вплоть до максимально достижимой энергии получается весьма жёстким ( $E^{-2}$ ), так что для компенсации различия между теоретическим (-2) и экспериментальным (-2.7) показателями спектра требуется значительное смягчение энергетического спектра в процессе распространения космических лучей от источников. Такое смягчение может быть достигнуто, если коэффициент диффузии  $D \sim E^{0.7}$ , но это предположение ведёт к чрезмерно сильной

анизотропии ГКЛ при энергии меньше  $10^{14}$  эВ, что противоречит экспериментальным данным. Поэтому более естественной представляется зависимость типа  $D \sim E^{0.3}$  (что, примерно, соответствует колмогоровскому спектру турбулентностей) и учёт доускорения частиц в процессе распространения.

Можно констатировать, что при надлежащем выборе параметров инжекции (строгая теория инжекции пока не создана), определяющих количество инжектируемых частиц и их скорость, и учёте укрупнения спектра ГКЛ по сравнению со спектром в источниках за счёт зависимости коэффициента диффузии от энергии, теория ускорения ГКЛ на ударных волнах позволяет хорошо описать энергетические спектры протонов и ядер вплоть до энергии, соответствующей излому в спектре.

Как отмечалось выше, взрывы сверхновых могут происходить в ассоциациях O-, B-звёзд, причём в этом случае взрывы оказываются коррелированными во времени и пространстве (время жизни ассоциаций  $\sim 10^7$  лет, число их достигает нескольких тысяч и частота взрывов оценивается как  $10^{-5}$ – $10^{-6}$  в год). Результатом является образование каверны (superbubble) с горячей плазмой низкой плотности и размерами, достигающими сотен парсек. В этой каверне могут генерироваться случайные магнитные поля с масштабами  $L$  до нескольких парсек и амплитудами  $B$  в десятки микрогаусс. При энергиях, не превышающих  $E_{\text{max}}$ , ускорение осуществляется на отдельных ударных волнах, а при энергиях, превышающих  $E_{\text{max}}$ , ускорение осуществляется ансамблем ударных волн и магнитных полей, существующим в каверне (Быков и Топтыгин, 1995). Модель ускорения в ассоциациях сверхновых позволяет качественно объяснить спектр ГКЛ в диапазоне энергий  $10^{15}$ – $10^{18}$  эВ. В данном подходе излом в энергетическом спектре ГКЛ интерпретируется как смена режима ускорения.

**Другие механизмы ускорения.** Обсуждая взрывы сверхновых, следует отметить, что ускорение ГКЛ может иметь место не только в их расширяющихся оболочках, но и при эволюции остатков взорвавшихся звёзд. Источником энергии при этом является энергия вращения нейтронной звезды, достигающая (для массы  $1.4 M_{\odot}$  и радиуса  $10^6$  см) величины  $2 \cdot 10^{50}$  эрг/ $(T_{10})^2$ , где  $T_{10}$  – период вращения в единицах 10 миллисек. Поскольку магнитное поле на поверхности звезды достигает  $10^{12}$  Гс, нейтронная звезда должна интенсивно терять энергию на магнитное дипольное излучение. Однако, так как собственная частота плазмы в окрестности звезды много больше частоты вращения диполя, распространения электромагнитной волны не будет, и процесс ускорения будет осуществляться стоячей ударной волной. Оценка максимальной энергии оказывается  $\sim (10^{17} - 10^{18}) Z$  эВ, а время эффективного ускорения оценивается примерно как  $\sim 10$  лет (Gaisser, 1990).

Если нейтронная звезда является частью бинарной системы, то ускорение может также происходить за счёт процесса аккреции – перетекания материи на поверхность нейтронной звезды; в этом случае ускорение космических лучей обеспечивается гравитационной энергией.

В связи с тем, что в потоке КЛ имеются частицы с энергией, превосходящей  $10^{20}$  эВ, следует рассмотреть имеющиеся возможности для ускорения до таких энергий. Источником частиц таких энергий, например, как отмечено в (Ptuskin, 1995), может быть процесс Ферми первого порядка, но происходящий при столкновении галактик. Такое событие может осуществляться с частотой примерно 1 раз за  $5 \cdot 10^8$  лет. Максимально достижимая энергия оценивается как  $3 \cdot 10^{19} Z$  эВ. К аналогичной оценке приводит и процесс ускорения ударными волнами в струях, генерируемых активными ядрами галактик. Примерно столько же дают оценки в моделях, связанных с рассмотрением ускорения ударными волнами, вызванными аккрецией в галактических кластерах. Наибольшие оценки можно получить в рамках модели космологического происхождения гамма-всплесков. В этой модели в результате слияния нейтронных звезд или черных дыр генерируются ультрарелятивистские ударные волны, распространяющиеся в окружающей

среде с лоренц-фактором  $\Gamma \sim 10^3$ . Энергия протона, покоившегося в лабораторной системе, в результате отражения от фронта ударной волны возрастёт до значения  $\Gamma^2 m c^2$ . Таким образом, всего за один цикл энергия может возрасти в  $10^6$  раз, а после двух циклов достичь  $10^{21}$  эВ.

Следует, однако, признать, что все оценки такого рода остаются пока на полукачественном уровне, и вопросы получения необходимой интенсивности и формы энергетического спектра КЛ сверхвысоких энергий еще ожидают своего решения.

Вскоре после обнаружения реликтового излучения Greisen (1966) в США и Зацепин и Кузьмин (1966) одновременно пришли к выводу, что наличие реликтового излучения самым серьезным образом должно сказаться на форме энергетического спектра КЛ предельно высоких энергий, а именно: должно иметь место так называемое реликтовое (или чернотельное) обрезание спектра в области предельно высоких энергий, называемое также GZK-эффектом. Обсуждая проблему источников частиц с энергиями  $\geq 5 \cdot 10^{19}$  эВ, превышающими порог GZK-эффекта, необходимо иметь в виду, что расстояния, с которых частицы таких энергий могут достигать Земли, ограничены, по-видимому, пределами местного Сверхскопления галактик.

Между тем, в нём нет галактик, имеющих какие-либо преимущества по сравнению с нашей Галактикой с точки зрения возможностей для ускорения космических лучей. Но и с учётом ограничения расстояний до источников остаётся достаточно много кандидатов на роль источников частиц предельно высоких энергий.

Источники частиц предельно высоких энергий могут формироваться в рамках двух принципиально различных групп сценариев (Nagano and Watson, 2000). Первая группа (bottom-up) характеризуется наличием ускорения; при этом для преодоления ограничения расстояний до источников иногда рассматриваются новые частицы, возникающие от обычных, но не испытывающие потерь, приводящих к появлению GZK-предела. К этой же группе следует отнести и модели, в которых существование значимых потоков частиц с энергиями выше порога GZK-эффекта связывается с гипотетическим нарушением лоренц-инвариантности. Вторую группу (top-down) составляют сценарии, не требующие ускорения, поскольку в них КЛ возникают в результате распадов или аннигиляции так называемых топологических дефектов (космические струны, монополи и т.д.), возникших в первые мгновения расширения Вселенной в связи с фазовыми переходами, соответствующими отделению сильного взаимодействия от электрослабого (при температуре  $10^{15}$ – $10^{16}$  ГэВ) и затем отделению электромагнитного взаимодействия от слабого (при температуре  $\sim 10^2$  ГэВ).