

Часть первая

*А АСТРОНОМИЧЕСКИЙ
АСПЕКТ
ПРОБЛЕМЫ*

И страшным, страшным креном
К другим каким-нибудь
Неведомым вселенным
Повернут Млечный Путь...

Б. Пастернак

1. Масштабы Вселенной и ее строение

Если бы астрономы-профессионалы постоянно и ощутимо представляли себе чудовищную величину космических расстояний и интервалов времени эволюции небесных светил, вряд ли они могли успешно развивать науку, которой посвятили свою жизнь. Привычные нам с детства пространственно-временные масштабы настолько ничтожны по сравнению с космическими, что когда это доходит до сознания, то буквально захватывает дух. Занимаясь какой-нибудь проблемой космоса, астроном либо решает некую математическую задачу (это чаще всего делают специалисты по небесной механике и астрофизики-теоретики), либо занимается усовершенствованием приборов и методов наблюдений, либо же строит в своем воображении, сознательно или бессознательно, некоторую небольшую модель исследуемой космической системы. При этом основное значение имеет правильное понимание относительных размеров изучаемой системы (например, отношение размеров деталей данной космической системы, отношение размеров этой системы и других, похожих или непохожих на нее, и т. д.) и интервалов времени (например, отношение скорости протекания данного процесса к скорости протекания какого-либо другого).

Автор этой книги довольно много занимался, например, солнечной короной и Галактикой. И всегда они представлялись ему неправильной формы сфероидальными телами примерно одинаковых размеров — что-нибудь около 10 см... Почему 10 см? Этот образ возник подсознательно, просто потому, что слишком часто, раздумывая над тем или иным вопросом солнечной или галактической физики, автор чертил в обыкновенной тетради (в клеточку) очертания предметов своих размышлений. Чертил, стараясь придерживаться масштабов явлений. По одному очень любопытному вопросу, например, можно было провести интересную аналогию между солнечной короной и Галактикой (вернее, так называемой «галактической короной»). Конечно, автор этой книги очень хорошо, так сказать, «умом» знал, что размеры галактической короны в сотни миллиардов раз больше, чем размеры солнечной. Но он спокойно забывал об этом. А если в ряде случаев большие размеры галактической короны приобретали некоторое принципиальное значение (бывало и так), это учитывалось формально-математически. И все равно зрительно обе «короны» представлялись одинаково маленькими...

Если бы автор в процессе этой работы предавался философским размышлениям о чудовищности размеров Галактики, о невообразимой разреженности газа, из которого состоит галактическая корона, о ничтожности нашей малютки-планеты и собственного бытия и о прочих других не менее правильных предметах, работа над проблемами солнечной и галактической корон прекратилась бы автоматически...

Пусть простит мне читатель это «лирическое отступление». Я не сомневаюсь, что и у других астрономов возникали такие же мысли, когда они работали над своими проблемами. Мне кажется, что иногда полезно поближе познакомиться с «кухней» научной работы...

Если мы хотим на страницах этой книги обсуждать волнующие вопросы о возможности разумной жизни во Вселенной, то прежде всего нужно будет составить правильное представление о ее пространственно-временных масштабах. Еще сравнительно недавно земной шар представлялся человеку огромным. Свыше трех лет потребовалось отважным сподвижникам Магеллана, чтобы 465 лет тому назад ценой невероятных лишений совершить первое кругосветное путешествие. Немногим более 100 лет прошло с того времени, когда находчивый герой фантастического романа Жюль Верна совершил, пользуясь последними достижениями техники того времени, путешествие вокруг света за 80 суток. И прошло

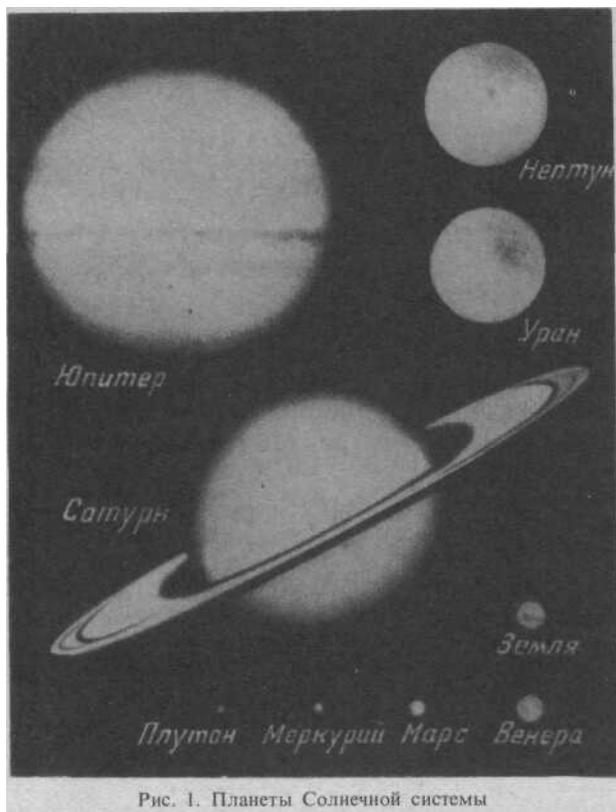


Рис. 1. Планеты Солнечной системы

всего лишь 26 лет с тех памятных для всего человечества дней, когда первый советский космонавт Гагарин облетел на легендарном космическом корабле «Восток» земной шар за 89 мин. И мысли людей невольно обратились к огромным пространствам космоса, в которых затерялась небольшая планета Земля...

Наша Земля — одна из планет Солнечной системы. По сравнению с другими планетами она расположена довольно близко к Солнцу, хотя и не является самой близкой. Среднее расстояние от Солнца до Плутона — самой далекой планеты Солнечной системы — в 40 раз больше среднего расстояния от Земли до Солнца. В настоящее время неизвестно, имеются ли в Солнечной системе планеты, еще более удаленные от Солнца, чем Плутон. Можно только утверждать, что если такие планеты и есть,

то они сравнительно невелики. Условно размеры Солнечной системы можно принять равными 50—100 астрономическим единицам*), или около 10 млрд км. По нашим земным масштабам это очень большая величина, примерно в 1 миллион раз превосходящая диаметр Земли.

Мы можем более наглядно представить относительные масштабы Солнечной системы следующим образом. Пусть Солнце изображается биллиардным шаром диаметром 7 см. Тогда ближайшая к Солнцу планета — Меркурий находится от него в этом масштабе на расстоянии 280 см, Земля — на расстоянии 760 см, гигантская планета Юпитер удалена на расстояние около 40 м, а самая дальняя планета — во многих отношениях пока еще загадочный Плутон — на расстояние около 300 м. Размеры земного шара в этом масштабе несколько больше 0,5 мм, лунный диаметр — немногим больше 0,1 мм, а орбита Луны имеет диаметр около 3 см.

Даже самая близкая к нам звезда — Проксима Центавра удалена от нас на такое большое расстояние, что по сравнению с ним межпланетные расстояния в пределах Солнечной системы кажутся сущими пустяками. Читатели, конечно, знают, что для измерения межзвездных расстояний такой единицей длины, как километр, почти никогда не пользуются**). Эта единица измерений (так же как сантиметр, дюйм и др.) возникла из потребностей практической деятельности человечества на

*) Астрономическая единица — среднее расстояние от Земли до Солнца, равное 149600 тыс. км.

**) Пожалуй, только скорости звезд и планет в астрономии выражаются в единицах «километр в секунду».

Земле. Она совершенно непригодна для оценки космических расстояний, слишком больших по сравнению с километром.

В популярной литературе, а иногда и в научной, для оценки межзвездных и межгалактических расстояний как единицу измерения употребляют «световой год». Это такое расстояние, которое свет, двигаясь со скоростью 300 тыс. км/с, проходит за год. Легко убедиться, что световой год равен $9,46 \cdot 10^{12}$ км, или около 10000 млрд км.

В научной литературе для измерения межзвездных и межгалактических расстояний обычно применяется особая единица, получившая название «парсек»; 1 парсек (пк) равен 3,26 светового года. Парсек определяется как такое расстояние, с которого радиус земной орбиты виден под углом в 1 сек. дуги. Это очень маленький угол. Достаточно сказать, что под таким углом монета в одну копейку видна с расстояния в 3 км.

Ни одна из звезд — ближайших соседей Солнечной системы — не находится к нам ближе, чем на 1 пк. Например, упомянутая Проксима Центавра удалена от нас на расстояние около 1,3 пк. В том масштабе, в котором мы изобразили

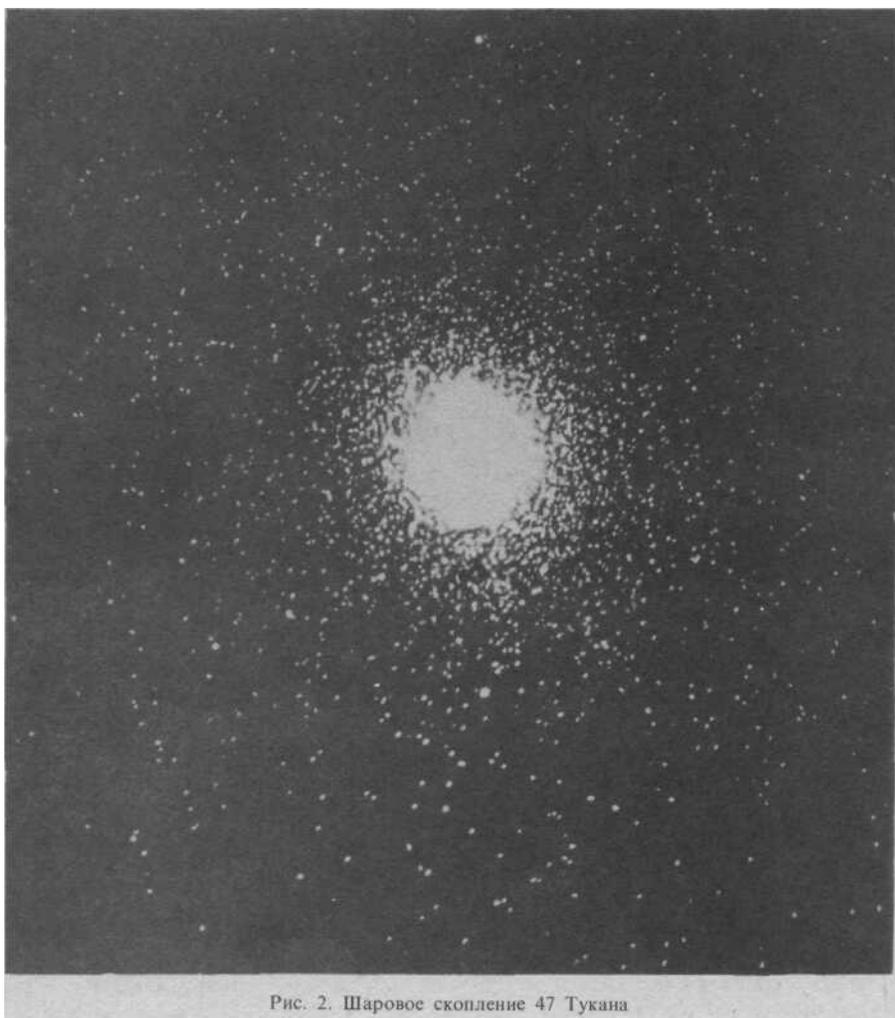


Рис. 2. Шаровое скопление 47 Тукана

Солнечную систему, это соответствует 2 тыс. км. Все это хорошо иллюстрирует большую изолированность нашей -Солнечной системы от окружающих звездных систем; некоторые из этих систем, возможно, имеют с ней много сходства.

Но окружающие Солнце звезды и само Солнце составляют лишь ничтожно малую часть гигантского коллектива звезд и туманностей, который называется «Галактикой». Это скопление звезд мы видим в ясные безлунные ночи как пересекающую небо полосу Млечного Пути. Галактика имеет довольно сложную структуру. В первом, самом грубом приближении мы можем считать, что звезды и туманности, из которых она состоит, заполняют объем, имеющий форму сильно сжатого эллипсоида вращения. Часто в популярной литературе форму Галактики сравнивают с двойковыпуклой линзой. На самом деле все обстоит значительно сложнее, и нарисованная картина является слишком грубой. В действительности оказывается, что разные типы звезд совершенно по-разному концентрируются к центру Галактики и к ее «экваториальной плоскости». Например, газовые туманности, а также очень горячие массивные звезды сильно концентрируются к экваториальной плоскости Галактики (на небе этой плоскости соответствует большой круг, проходящий через центральные части Млечного Пути). Вместе с тем они не обнаруживают значительной концентрации к галактическому центру. С другой стороны, некоторые типы звезд и звездных скоплений (так называемые «шаровые скопления», рис. 2) почти никакой концентрации к экваториальной плоскости Галактики не обнаруживают, но зато характеризуются огромной концентрацией по направлению к ее центру. Между этими двумя крайними типами пространственного распределения (которое астрономы называют «плоское» и «сферическое») находятся все промежуточные случаи. Все же оказывается, что основная часть звезд в Галактике находится в гигантском диске, диаметр которого около 100 тыс. световых лет, а толщина около 1500 световых лет. В этом диске насчитывается несколько больше 150 млрд звезд самых различных типов. Наше Солнце — одна из этих звезд, находящаяся на периферии Галактики вблизи от ее экваториальной плоскости (точнее, «всего лишь» на расстоянии около 30 световых лет — величина достаточно малая по сравнению с толщиной звездного диска).

Расстояние от Солнца до ядра Галактики (или ее центра) составляет около 30 тыс. световых лет. Звездная плотность в Галактике весьма неравномерна. Выше всего она в области галактического ядра, где, по последним данным, достигает 2 тыс. звезд на кубический парсек, что почти в 20 тыс. раз больше средней звездной плотности в окрестностях Солнца*). Кроме того, звезды имеют тенденцию образовывать отдельные группы или скопления. Хорошим примером такого скопления являются Плеяды, которые видны на нашем зимнем небе (рис. 3).

В Галактике имеются и структурные детали гораздо больших масштабов. Исследованиями последних лет доказано, что туманности, а также горячие массивные звезды распределены вдоль ветвей спирали. Особенно хорошо спиральная структура видна у других звездных систем — галактик (с маленькой буквы, в отличие от нашей звездной системы — Галактики). Одна из таких галактик изображена на рис. 4. Установить спиральную структуру Галактики, в которой мы сами находимся, оказалось в высшей степени трудно.

Звезды и туманности в пределах Галактики движутся довольно сложным образом. Прежде всего, они участвуют во вращении Галактики вокруг оси, перпендикулярной к ее экваториальной плоскости. Это вращение не такое, как у твердого тела: различные участки Галактики имеют различные периоды вращения. Так, Солнце и окружающие его в огромной области размерами в несколько сотен световых лет звезды совершают полный оборот за время около 200 млн лет. Так как

*) В самом центре галактического ядра в области поперечником в 1 пк находится, по-видимому, несколько миллионов звезд.

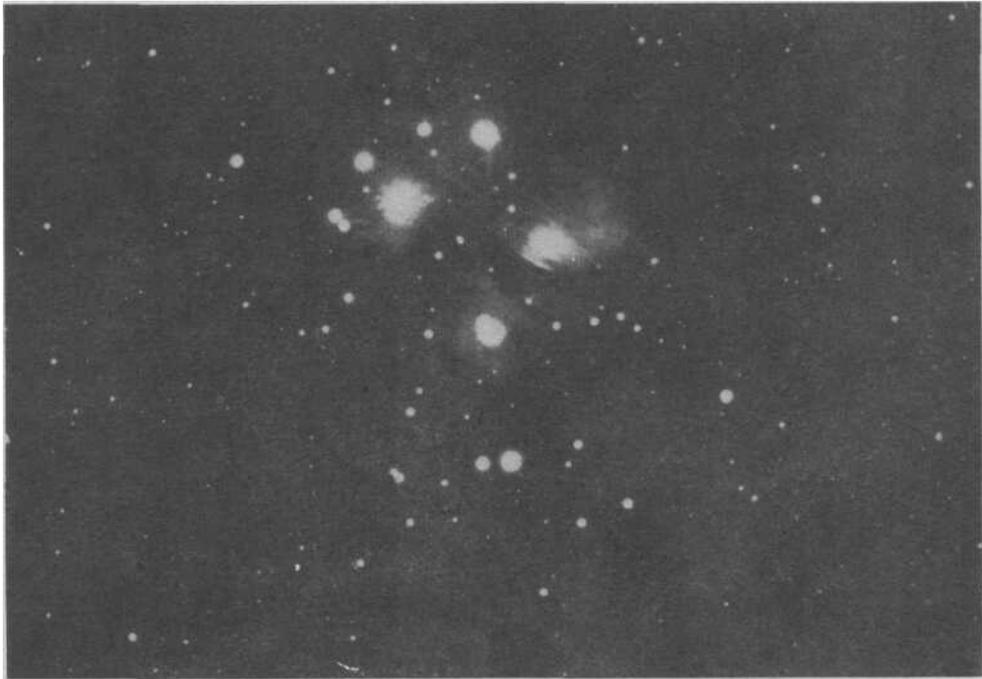


Рис. 3. Фотография звездного скопления Плеяд



Рис. 4. Спиральная галактика NGC 5364

Солнце вместе с семьей планет существует, по-видимому, около 5 млрд лет, то за время своей эволюции (от рождения из газовой туманности до нынешнего состояния) оно совершило примерно 25 оборотов вокруг оси вращения Галактики. Мы можем сказать, что возраст Солнца — всего лишь 25 «галактических лет», скажем прямо — возраст цветущий...

Скорость движения Солнца и соседних с ним звезд по их почти круговым галактическим орбитам достигает 250 км/с *). На это регулярное движение вокруг галактического ядра накладываются хаотические, беспорядочные движения звезд. Скорости таких движений значительно меньше — порядка 10—50 км/с, причем у объектов разных типов они различны. Меньше всего скорости у горячих массивных звезд (6—8 км/с), у звезд солнечного типа они около 20 км/с. Чем меньше эти скорости, тем более «плоским» является распределение данного типа звезд.

В том масштабе, которым мы пользовались для наглядного представления Солнечной системы, размеры Галактики будут составлять 60 млн км — величина, уже довольно близкая к расстоянию от Земли до Солнца. Отсюда ясно, что по мере проникновения во все более удаленные области Вселенной этот масштаб уже не годится, так как теряет наглядность. Поэтому мы примем другой масштаб. Мысленно уменьшим земную орбиту до размеров самой внутренней орбиты атома водорода в классической модели Бора. Напомним, что радиус этой орбиты равен $0,53 \cdot 10^{-8}$ см. Тогда ближайшая звезда будет находиться на расстоянии приблизительно 0,014 мм, центр Галактики — на расстоянии около 10 см, а размеры нашей звездной системы будут около 35 см. Диаметр Солнца будет иметь микроскопические размеры: 0,0046 А (ангстрем — единица длины, равная 10^{-8} см).

Мы уже подчеркивали, что звезды удалены друг от друга на огромные расстояния, и тем самым практически изолированы. В частности, это означает, что звезды почти никогда не сталкиваются друг с другом, хотя движение каждой из них определяется полем силы тяготения, создаваемым всеми звездами в Галактике. Если мы будем рассматривать Галактику как некоторую область, наполненную газом, причем роль газовых молекул и атомов играют звезды, то мы должны считать этот газ крайне разреженным. В окрестностях Солнца среднее расстояние между звездами примерно в 10 млн раз больше, чем средний диаметр звезд. Между тем при нормальных условиях в обычном воздухе среднее расстояние между молекулами всего лишь в несколько десятков раз больше размеров последних. Чтобы достигнуть такой же степени относительного разрежения, плотность воздуха следовало бы уменьшить по крайней мере в 10^{18} раз! Заметим, однако, что в центральной области Галактики, где звездная плотность относительно высока, столкновения между звездами время от времени будут происходить. Здесь следует ожидать приблизительно одно столкновение каждый миллион лет, в то время как в «нормальных» областях Галактики за всю историю эволюции нашей звездной системы, насчитывающую, по крайней мере, 10 млрд лет, столкновений между звездами практически не было (см. гл. 9).

Мы кратко обрисовали масштаб и самую общую структуру той звездной системы, к которой принадлежит наше Солнце. При этом совершенно не рассматривались те методы, при помощи которых в течение многих лет несколько поколений астрономов шаг за шагом воссоздавали величественную картину строения Галактики. Этой важной проблеме посвящены другие книги, к которым мы отсылаем интересующихся читателей (например, Б. А. Воронцов-Вельяминов «Очерки о Вселенной», Ю. Н. Ефремов «В глубины Вселенной»). Наша задача — дать только самую общую картину строения и развития отдельных объектов Вселенной. Такая картина совершенно необходима для понимания этой книги.

*) Полезно запомнить простое правило: скорость в 1 пк за 1 млн лет почти равна скорости в 1 км/с. Предоставляем читателю убедиться в этом.



Рис. 5. Туманность Андромеды со спутниками

Уже несколько десятилетий астрономы настойчиво изучают другие звездные системы, в той или иной степени сходные с нашей. Эта область исследований получила название «внегалактической астрономии». Она сейчас играет едва ли не ведущую роль в астрономии. В течение последних трех десятилетий внегалактическая астрономия добилась поразительных успехов. Понемногу стали вырисовываться

грандиозные контуры Метагалактики, в состав которой наша звездная система входит как малая частица. Мы еще далеко не все знаем о Метагалактике. Огромная удаленность объектов создает совершенно специфические трудности, которые разрешаются путем применения самых мощных средств наблюдения в сочетании с глубокими теоретическими исследованиями. Все же общая структура Метагалактики в последние годы в основном стала ясной.

Мы можем определить Метагалактику как совокупность звездных систем — галактик, движущихся в огромных пространствах наблюдаемой нами части Вселенной. Ближайшие к нашей звездной системе галактики — знаменитые Магеллановы Облака, хорошо видные на небе южного полушария как два больших пятна примерно такой же поверхностной яркости, как и Млечный Путь. Расстояние до Магеллановых Облаков «всего лишь» около 200 тыс. световых лет, что вполне сравнимо с общей протяженностью нашей Галактики. Другая «близкая» к нам галактика — это туманность в созвездии Андромеды. Она видна невооруженным глазом как слабое световое пятнышко 5-й звездной величины*). На самом деле это огромный звездный мир, по количеству звезд и полной массе раза в три превышающей нашу Галактику, которая в свою очередь является гигантом среди галактик. Расстояние до туманности Андромеды, или, как ее называют астрономы, М31 (это означает, что в известном каталоге туманностей Мессье она занесена под № 31), около 1800 тыс. световых лет, что примерно в 20 раз превышает размеры Галактики. Туманность М 31 имеет явно выраженную спиральную структуру и по многим своим характеристикам весьма напоминает нашу Галактику. Рядом с ней находятся ее небольшие спутники эллипсоидальной формы (рис. 5). На рис. 6 приведены фотографии нескольких сравнительно близких к нам галактик. Обращает на себя внимание большое разнообразие их форм. Наряду со спиральными системами (такие галактики обозначаются символами Sa, Sb и Sc в зависимости от характера развития спиральной структуры; при наличии проходящей через ядро «перемычки» (рис. 6а) после буквы S ставится буква B) встречаются сфероидальные и эллипсоидальные, лишенные всяких следов спиральной структуры, а также «неправильные» галактики, хорошим примером которых могут служить Магеллановы Облака.

В большие телескопы наблюдается огромное количество галактик. Если галактик ярче видимой 12-й величины насчитывается около 250, то ярче 16-й — уже около 50 тыс. Самые слабые объекты, которые на пределе может сфотографировать телескоп-рефлектор с диаметром зеркала 5 м, имеют 24,5-ю величину. Оказывается, что среди миллиардов таких слабейших объектов большинство составляют галактики. Многие из них удалены от нас на расстояния, которые свет проходит за миллиарды лет. Это означает, что свет, вызвавший почернение пластинки, был излучен такой удаленной галактикой еще задолго до архейского периода геологической истории Земли!

Иногда среди галактик попадаются удивительные объекты, например «радиогалактики». Это такие звездные системы, которые излучают огромное количество энергии в радиодиапазоне. У некоторых радиогалактик поток радиоизлучения в несколько раз превышает поток оптического излучения, хотя в оптическом диапазоне их светимость очень велика — в несколько раз превосходит полную светимость нашей Галактики. Напомним, что последняя складывается из излучения сотен миллиардов звезд, многие из которых в свою очередь излучают значительно сильнее Солнца. Классический пример такой радиогалактики — знаменитый объект Лебедь А. В оптическом диапазоне это два ничтожных световых пятнышка 17-й звездной величины (рис. 7). На самом деле их светимость очень велика, примерно в 10 раз

*) Поток излучения от звезд измеряется так называемыми «звездными величинами». По определению, поток от звезды $(t + 1)$ -й величины в 2,512 раза меньше, чем от звезды t -й величины. Звезды слабее 6-й величины невооруженным глазом не видны. Самые яркие звезды имеют отрицательную звездную величину (например, у Сириуса она равна -1,5).



Рис. 6а. Галактика типа «пересеченной спирали»

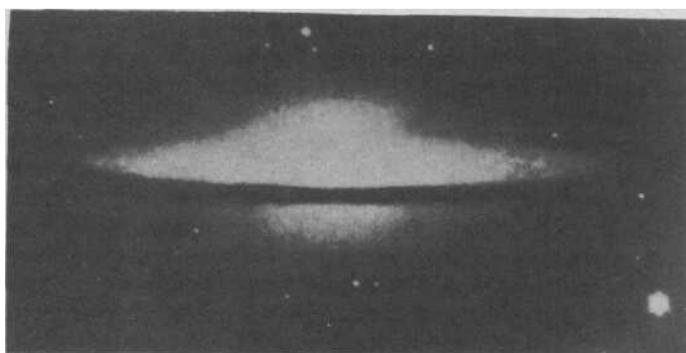


Рис. 6б. Галактика NGC 4594



Рис. 6в. Галактики Магеллановы Облака

больше, чем у нашей Галактики. Слабой эта система кажется потому, что она удалена от нас на огромное расстояние — 600 млн световых лет. Однако поток радиоизлучения от Лебедя А на метровых волнах настолько велик, что превышает даже поток радиоизлучения от Солнца (в периоды, когда на Солнце нет пятен). Но ведь Солнце очень близко — расстояние до него «всего лишь» 8 световых минут; 600 млн лет — и 8 мин! А ведь потоки излучения, как известно, обратно пропорциональны квадратам расстояний!

Спектры большинства галактик напоминают солнечный; в обоих случаях наблюдаются отдельные темные линии поглощения на довольно ярком фоне. В этом нет ничего неожиданного, так как излучение галактик — это излучение миллиардов входящих в их состав звезд, более или менее похожих на Солнце. Внимательное изучение спектров галактик много лет назад позволило сделать одно открытие фундаментальной важности. Дело в том, что по характеру смещения длины волны какой-либо спектральной линии по отношению к лабораторному стандарту можно определить скорость движения излучающего источника по лучу зрения. Иными словами, можно установить, с какой скоростью источник приближается или удаляется.

Если источник света приближается, спектральные линии смещаются в сторону более коротких волн, если удаляется — в сторону более длинных. Это явление называется «эффектом Доплера». Оказалось, что у галактик (за исключением немногих, самых близких к нам) спектральные линии всегда смещены в длинноволновую часть спектра («красное смещение» линий), причем величина этого смещения тем больше, чем более удалена от нас галактика.

Это означает, что все галактики удаляются от нас, причем скорость «разлета» по мере удаления галактик растет. Она достигает огромных значений. Так, например, найденная по красному смещению скорость удаления радиогалактики Лебедь А близка к 17 тыс. км/с. Еще двадцать пять лет назад рекорд принадлежал очень слабой (в оптических лучах 20-й величины) радиогалактике ЗС 295. В 1960 г. был получен ее спектр. Оказалось, что известная ультрафиолетовая спектральная линия, принадлежащая ионизованному кислороду, смещена в оранжевую область спектра! Отсюда легко найти, что скорость удаления этой удивительной звездной системы составляет 138 тыс. км/с, или почти половину скорости света! Радиогалактика ЗС 295 удалена от нас на расстояние, которое свет проходит за 5 млрд лет. Таким образом, астрономы исследовали свет, который был излучен тогда, когда образовывались Солнце и планеты, а может быть, даже «немного» раньше... С тех пор открыты еще более удаленные объекты (гл. 6).

Причины расширения системы, состоящей из огромного количества галактик, мы здесь касаться не будем. Этот сложный вопрос является предметом современ-

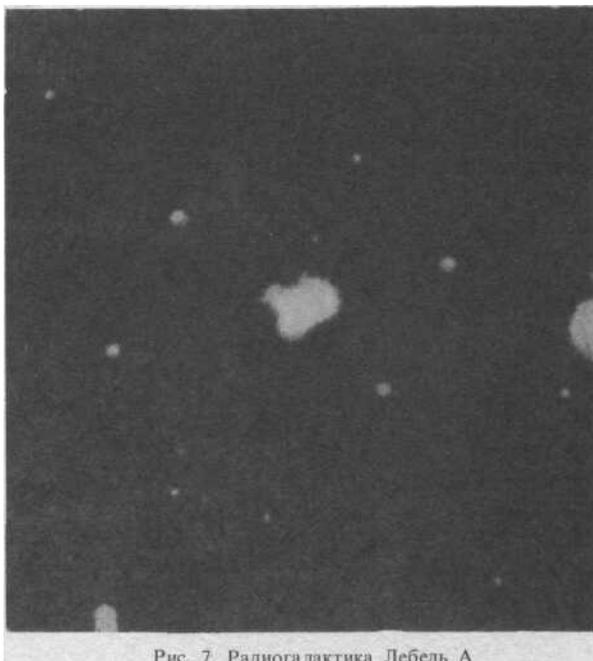


Рис. 7. Радиогалактика Лебедь А

ной космологии. Однако сам факт расширения Вселенной имеет большое значение для анализа развития жизни в ней (см. гл. 7).

На общее расширение системы галактик накладываются беспорядочные скорости отдельных галактик, обычно равные нескольким сотням километров в секунду. Именно поэтому ближайшие к нам галактики не обнаруживают систематического красного смещения. Ведь скорости беспорядочных (так называемых «пекулярных») движений для этих галактик больше регулярной скорости красного смещения. Последняя растет по мере удаления галактик приблизительно на 50 км/с, на каждый миллион парсек. Поэтому для галактик, расстояния до которых не превосходят нескольких миллионов парсек, беспорядочные скорости превышают скорость удаления, обусловленную красным смещением. Среди близких галактик наблюдаются и такие, которые приближаются к нам (например, туманность Андромеды М 31).

Галактики не распределены в метagalacticком пространстве равномерно, т. е. с постоянной плотностью. Они обнаруживают ярко выраженную тенденцию образовывать отдельные группы или скопления. В частности, группа из примерно 20 близких к нам галактик (включая нашу Галактику) образует так называемую «местную систему». В свою очередь местная система входит в большое скопление галактик, центр которого находится в той части неба, на которую проектируется созвездие Девы. Это скопление насчитывает несколько тысяч членов и принадлежит к числу самых больших. На рис. 8 приведена фотография известного скопления галактик в созвездии Северной Короны, насчитывающего сотни галактик. В пространстве между скоплениями плотность галактик в десятки раз меньше, чем внутри скоплений.

Обращает на себя внимание разница между скоплениями звезд, образующими галактики, и скоплениями галактик. В первом случае расстояния между членами скопления огромны по сравнению с размерами звезд, в то время как средние расстояния между галактиками в скоплениях галактик всего лишь в несколько раз

больше, чем размеры галактик. С другой стороны, число галактик в скоплениях не идет ни в какое сравнение с числом звезд в галактиках. Если рассматривать совокупность галактик как некоторый газ, где роль молекул играют отдельные галактики, то мы должны считать эту среду чрезвычайно вязкой.

Как же выглядит Метагалактика в нашей модели, где земная орбита уменьшена до размеров первой орбиты атома Бора? В этом масштабе расстояние до туманности Андромеды будет несколько больше 6 м, расстояние до центральной части скопления галактик в Деве, куда входит и наша местная система галактик, будет порядка 120 м, причем такого же порядка будет размер самого скопления. Радиогалактика Лебедь А будет теперь удалена уже на вполне «приличное»



Рис. 8. Скопление галактик в созвездии Северной Короны

Таблица 1

Большой Взрыв	1 января 0ч 0м 0с
Образование галактик (z~10)	10 января
Образование Солнечной системы	9 сентября
Образование Земли	14 сентября
Возникновение жизни на Земле	25 сентября
Образование древнейших скал на Земле	2 октября
Появление бактерий и сине-зеленых водорослей	9 октября
Возникновение фотосинтеза	12 ноября
Первые клетки с ядром	15 ноября

Декабрь

Воскресенье	Понедельник	Вторник	Среда	Четверг	Пятница	Суббота
	1 Возникновение кислородной атмосферы на Земле	2	3	4	5 Мощная вулканическая деятельность на Марсе	6
7	8	9	10	11	12	13
14	15	16 Первые черви	17	18 Океанский планктон Трилобиты	19 Ордовик Первые рыбы	20 Силур Растения колонизируют сушу
21 Мел Первые цветы	22 Первые амфибии и крылатые насекомые	23 Карбон Первые деревья Первые рептилии	24 Пермь Первые динозавры	25 Начало мезозоя	26 Триас Первые млекопитающиеся	27 Юра Первые птицы
28 Девон Первые насекомые Животные колонизируют сушу	29 Третичный период Первые приматы	30 Первые гоминиды	31 Четвертичный период Первые люди (~22 ^н 30 ^м)			

расстояние — 2,5 км, а расстояние до радиогалактики 3С 295 достигнет 25 км...

Мы познакомились в самом общем виде с основными структурными особенностями и с масштабами Вселенной. Это как бы застывший кадр ее развития. Не всегда она была такой, какой мы теперь ее наблюдаем. Все во Вселенной меняется: появляются, развиваются и «умирают» звезды и туманности, развивается закономерным образом Галактика, меняются сама структура и масштабы Метагалактики (хотя бы по причине красного смещения). Поэтому нарисованную статическую картину Вселенной необходимо дополнить динамической картиной эволюции отдельных космических объектов, из которых она образована, и всей Вселенной как целого.

Что касается эволюции отдельных звезд и туманностей, образующих галактики, то об этом речь будет в гл. 4. Здесь мы только скажем, что звезды рождаются из межзвездной газопылевой среды, некоторое время (в зависимости от массы) спокойно излучают, после чего более или менее драматическим образом «умирают».

Открытие в 1965 г. «реликтового» излучения (см. гл. 7) со всей наглядностью показало, что на самых ранних этапах эволюции Вселенная качественно отличалась от своего современного состояния. Главное — это то, что тогда не было ни звезд, ни галактик, ни тяжелых элементов. И, конечно, не было жизни. Мы наблюдаем грандиозный процесс эволюции Вселенной от простого к сложному. Такое же направление эволюции имеет и развитие жизни на Земле. Во Вселенной скорость эволюции вначале была значительно выше, чем в современную эпоху. Похоже, однако, что в развитии жизни на Земле наблюдается обратная картина. Это наглядно видно из модели «космической хронологии», представленной в таблице 1, предложенной американским планетологом Саганом. Выше мы довольно подробно развили пространственную модель Вселенной, основывающуюся на выборе того или иного линейного масштаба. В сущности говоря, тот же метод используется в табл. 1. Все время существования Вселенной (которое для определенности принимается равным 15 миллиардам реальных «земных» годов, причем здесь возможна ошибка в несколько десятков процентов) моделируется некоторым воображаемым «космическим годом». Нетрудно убедиться, что одна секунда «космического» года равна 500 вполне реальным годам. При таком масштабе каждой эпохе развития Вселенной ставится в соответствие определенная дата (и время «судок») «космического» года.

Легко видеть, что эта таблица в своей основной части сугубо «антропоцентрична»: даты и моменты космического календаря после «сентября» и, особенно, всего специально выделенного «декабря», отражают определенные этапы развития жизни на Земле. Этот календарь совершенно иначе выглядел бы для обитателей какой-нибудь планеты, обращающейся вокруг «своей» звезды в какой-нибудь удаленной галактике. Тем не менее само сопоставление темпа космической и земной эволюции в высшей степени впечатляюще.

2. Основные характеристики звезд

В результате огромной работы, проделанной астрономами ряда стран в течение последних десятилетий, мы многое узнали о различных характеристиках звезд, природе их излучения и даже эволюции. Как это ни покажется парадоксальным, сейчас мы гораздо лучше представляем образование и эволюцию многих типов звезд, чем собственной планетной системы. В какой-то степени это понятно: астрономы наблюдают огромное множество звезд, находящихся на различных стадиях эволюции, в то время как непосредственно наблюдать другие планетные системы мы пока не можем.

Мы упомянули о «характеристиках» звезд. Под этим понимаются такие их основные свойства, как масса, полное количество энергии, излучаемой звездой в единицу времени (эта величина называется «светимостью» и обычно обозначается буквой L), радиус и температура поверхностных слоев. Температура определяет цвет звезды и ее спектр. Так, например, если температура поверхностных слоев звезды 3—4 тыс. К, то ее цвет красноватый, 6—7 тыс. К — желтоватый. Очень горячие звезды с температурой свыше 10—12 тыс. К имеют белый и голубоватый цвет. В астрономии существуют вполне объективные методы измерения цвета звезд. Последний определяется так называемым «показателем цвета», равным разности фотографической и визуальной звездной величины*). Каждому значению показателя цвета соответствует определенный тип спектра. У холодных красных звезд спектры характеризуются линиями поглощения нейтральных атомов металлов и полосами некоторых простейших соединений (например, CN, CH, H₂O и др.). По мере увеличения температуры поверхности в спектрах звезд исчезают молекулярные полосы, слабеют многие линии нейтральных атомов, появляются линии ионизованных атомов, а также линии нейтрального гелия. Сам вид спектра радикально меняется. Например, у горячих звезд с температурой поверхностных слоев, превышающей 20 тыс. К, наблюдаются преимущественно линии нейтрального и ионизованного гелия, а непрерывный спектр очень интенсивен в ультрафиолетовой части. У звезд с температурой поверхностных слоев около 10 тыс. К наиболее интенсивны линии водорода, в то время как у звезд с температурой около 6 тыс. К — линии ионизованного кальция, расположенные на границе видимой и ультрафиолетовой частей спектра. Заметим, что такой вид имеет спектр нашего Солнца.

Последовательность спектров звезд, получающихся при непрерывном изменении температуры их поверхностных слоев, обозначается следующими буквами: O, B, A, F, G, K, M, от самых горячих к очень холодным. Каждая такая буква описывает спектральный класс. Спектры звезд настолько чувствительны к изменению температуры их поверхностных слоев, что оказалось целесообразным ввести в пределах каждого класса 10 подклассов. Например, если говорят, что звезда имеет спектр B9, то это означает, что он ближе к спектру A2, чем, например, к спектру B1.

Светимость звезды L часто выражается в единицах светимости Солнца. Последняя равна $4 \cdot 10^{33}$ эрг/с. По своей светимости звезды различаются в очень широких пределах. Есть звезды (их, правда, сравнительно немного), светимости которых превосходят светимость Солнца в десятки и даже сотни тысяч раз. Огромное большинство звезд составляют «карлики», светимости которых значительно меньше солнечной, зачастую в тысячи раз. Характеристикой светимости является так называемая «абсолютная величина» звезды. Видимая звездная величина

*) Так как обычная несенсибилизированная фотографическая пластинка чувствительна к синему свету, а глаз — к желтому и зеленому, то фотографические и визуальные величины неодинаковы. Например, для красных звезд показатель цвета может достигать 1,5 звездной величины и даже больше, в то время как для голубоватых он бывает, отрицательным.

на зависит, с одной стороны, от ее светимости и цвета, с другой — от расстояния до нее. Если отнести какую-либо звезду на условное стандартное расстояние 10 пк, то ее величина будет называться «абсолютной». Поясним это примером. Если видимая звездная величина Солнца (определяемая потоком излучения от него) равна — 26,8, то на расстоянии 10 пк (которое приблизительно в 2 млн раз больше истинного расстояния от Земли до Солнца) его звездная величина будет около + 5. На таком расстоянии наше дневное светило казалось бы звездочкой, едва видимой невооруженным глазом (напомним, что самые слабые звезды, видимые невооруженным глазом, имеют величину +6). Звезды высокой светимости имеют отрицательные абсолютные величины, например -7, -5. Звезды низкой светимости характеризуются большими положительными значениями абсолютных величин, например + 10, +12 и т. д.

Важной характеристикой звезды является ее масса. В отличие от светимости массы звезд меняются в сравнительно узких пределах. Очень мало звезд, массы которых больше или меньше солнечной в 10 раз. Масса Солнца равна $2 \cdot 10^{33}$ г, что превышает массу Земли в 330 тыс. раз.

Еще одна существенная характеристика звезды — ее радиус. Радиусы звезд меняются в очень широких пределах. Есть звезды, по своим размерам не превышающие земной шар (так называемые «белые карлики»), есть огромные «пузыри», внутри которых могла бы свободно поместиться орбита Марса. Мы не случайно назвали такие гигантские звезды «пузырями». Из того факта, что по своим массам звезды отличаются сравнительно незначительно, следует, что при очень большом радиусе средняя плотность вещества должна быть ничтожно малой. Если средняя плотность солнечного вещества равна $1,4 \text{ г/см}^3$, то у таких «пузырей» он может быть в миллионы раз меньше, чем у воздуха. В то же время белые карлики имеют огромную среднюю плотность, достигающую десятков и даже сотен тысяч граммов на кубический сантиметр.

Большое значение имеет исследование химического состава звезд путем тщательного анализа их спектров. При этом необходимо учитывать температуру и давление в поверхностных слоях звезд, которые также получают из спектров. Вообще спектрографические наблюдения дают наиболее полную информацию об условиях, господствующих в звездных атмосферах.

По химическому составу звезды, как правило, представляют собой водородные и гелиевые плазмы*). Остальные элементы присутствуют в виде сравнительно незначительных «загрязнений». Средний химический состав наружных слоев звезды выглядит примерно следующим образом. На 10 тыс. атомов водорода приходится 1000 атомов гелия, 5 атомов кислорода, 2 атома азота, один атом углерода, 0,3 атома железа. Относительное содержание других элементов еще меньше. Хотя по числу атомов так называемые «тяжелые элементы» (т. е. элементы с атомной массой, большей, чем у гелия) занимают во Вселенной весьма скромное место, их роль очень велика. Прежде всего они в значительной степени определяют характер эволюции звезд, так как непрозрачность звездных недр для излучения существенно зависит от содержания тяжелых элементов. В то же время светимость звезды, как оказывается, тоже зависит от ее непрозрачности. Мы здесь на этих вопросах не имеем возможности остановиться. Об этом подробно написано в нашей книге «Звезды: их рождение, жизнь и смерть», к которой мы и отсылаем читателей.

Наличие во Вселенной (в частности, в звездах) тяжелых элементов имеет решающее значение для проблемы, которой посвящена эта книга. Совершенно очевидно, что живая субстанция может быть построена только при наличии тяжелых элементов и их соединений. Общеизвестна роль углерода в структуре живой мате-

*) Плазмой называется ионизованный газ, в каждом элементе объема которого находится одинаковое количество электронов и положительных ионов.

рии. Не менее важны и другие элементы, например железо, фосфор. Царство живого — это сложнейшие сцепления тяжелых элементов. Мы можем поэтому со всей определенностью сформулировать следующее положение: если бы не было тяжелых элементов, не было бы и жизни. Поэтому проблема химического состава космических объектов (звезд, туманностей, планет) имеет первостепенное значение для анализа условий возникновения жизни в тех или иных областях Вселенной. Всегда ли во Вселенной были тяжелые элементы? Ниже мы будем обсуждать этот важный вопрос. Оказывается, что в далеком прошлом во Вселенной тяжелых элементов было значительно меньше, чем сейчас. Может быть, их совсем не было. Поэтому крупнейшей научной проблемой является происхождение тяжелых элементов. Эта проблема столь же важна, как проблемы происхождения звезд, планет и даже жизни.

Спектроскопические исследования показали, что имеются удивительные различия в химическом составе звезд. Так, например, горячие массивные звезды, концентрирующиеся к галактической плоскости, сравнительно богаты тяжелыми элементами, между тем как у звезд, входящих в состав шаровых скоплений (см. рис. 2), относительное содержание тяжелых элементов в десятки раз меньше. Этот важный факт находит обоснование в современных теориях эволюции звезд и звездных систем, о которых речь будет идти ниже.

Исследования последних десятилетий позволили сделать вывод, что звезды вращаются вокруг своих осей. Выяснилось, что звезды различных спектральных классов вращаются с разной скоростью. Этому очень важному для космогонии вопросу будет посвящена гл. 10.

Наконец, стоит сказать несколько слов о магнетизме звезд. Тем же спектроскопическим методом было обнаружено наличие мощных магнитных полей в атмосферах некоторых звезд. Напряженность этих полей в отдельных случаях доходит до 10 тыс. Э (эрстед), т. е. в 20 тыс. раз больше, чем магнитное поле Земли. Заметим, что в солнечных пятнах напряженность магнитных полей доходит до 3—4 тыс. Э. Вообще магнитные явления, как выяснилось в последние годы, играют значительную роль в физических процессах, происходящих в солнечной атмосфере. Имеются все основания полагать, что то же самое справедливо и для звездных атмосфер. Казалось бы, к проблеме происхождения и развития жизни во Вселенной звездный магнетизм совершенно не имеет отношения. Но это только так кажется. В действительности причинная цепь явлений, приводящих в итоге к возникновению жизни на какой-нибудь планете, заброшенной в просторах Вселенной, необыкновенно сложна. В частности, существенным звеном в этой цепи должно быть само возникновение планет. И вот оказывается, что магнитные эффекты при образовании планетных систем могут иметь решающее значение. Об этом речь будет идти в гл. 10.

Мы перечислили основные характеристики звезд. Возникает вопрос: существует ли между этими характеристиками какая-нибудь связь? Такая связь, оказывается, существует. Она была обнаружена свыше 70 лет назад.

Будем изображать звезды точками на диаграмме Герцшпрунга — Рессела, где по оси абсцисс отложены спектральные классы (или соответствующие им показатели цвета), а по оси ординат — абсолютные величины, являющиеся мерой светимости соответствующих звезд (рис. 9). Из рисунка видно, что звезды лежат на этой диаграмме не беспорядочно, а образуют явно выраженные последовательности. Большинство звезд находится в пределах сравнительно узкой полосы, идущей от левого верхнего угла диаграммы к правому нижнему. Это так называемая «главная последовательность» звезд. В верхнем правом углу группируются звезды в виде довольно беспорядочной кучи. Их спектральные классы — G, K и M, а абсолютные величины находятся в пределах (+2) -- (—6). Они называются «красными гигантами», хотя среди них есть и желтые звезды. Наконец, в нижней левой части диаграммы мы видим небольшое количество звезд. Их абсолютные величины слабее

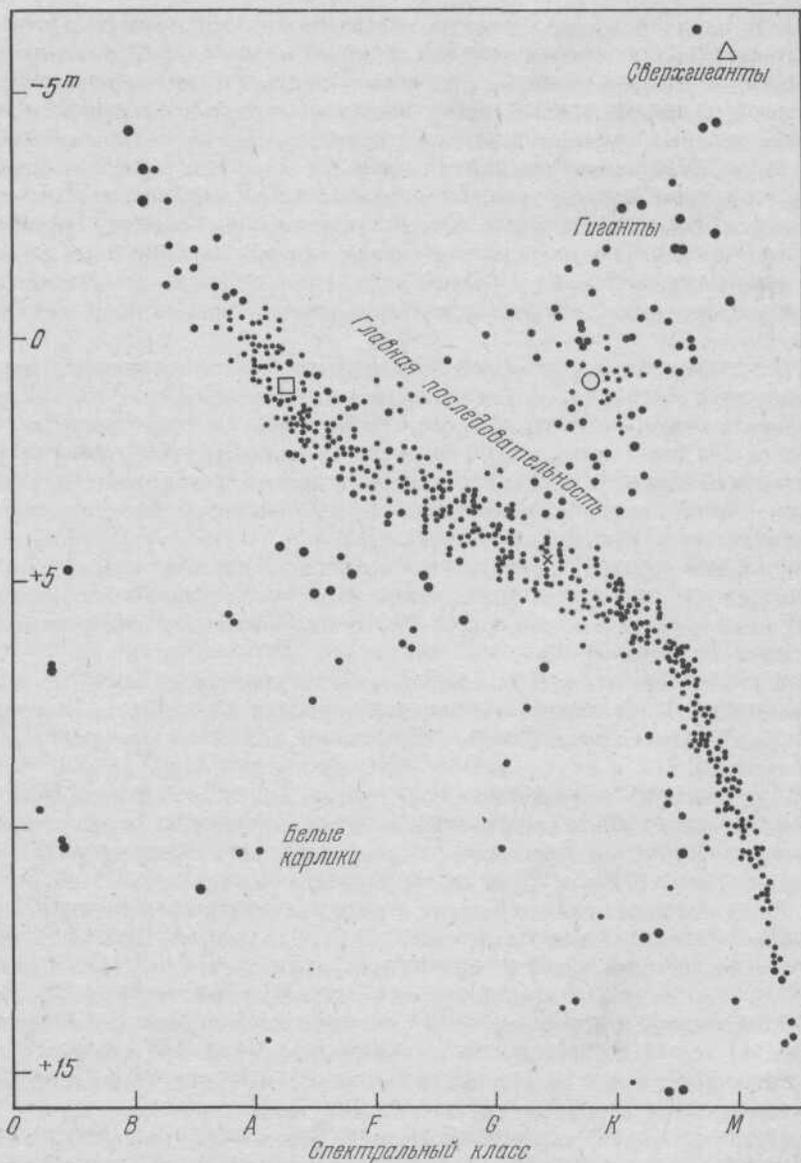


Рис. 9. Диаграмма Герцшпрунга – Рассела. По вертикальной оси – абсолютная звездная величина

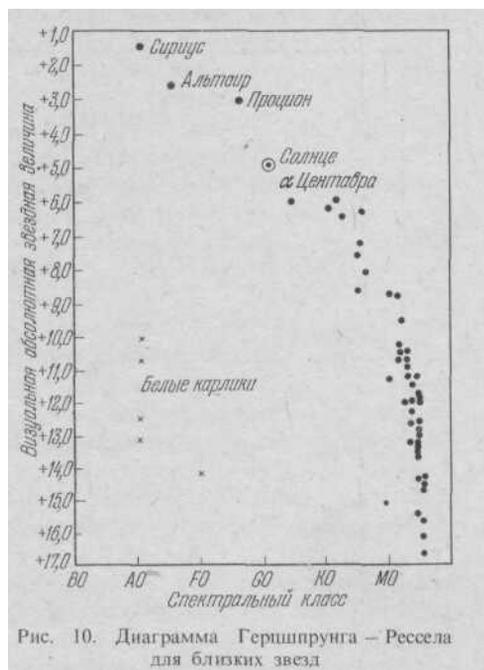
+ 10, а спектральные классы лежат в пределах от В до F. Следовательно, это очень горячие звезды с низкой светимостью. Но низкая светимость при высокой поверхностной температуре может быть, очевидно, только тогда, когда радиусы звезд достаточно малы. Таким образом, в этой части диаграммы «спектр – светимость» находятся очень маленькие горячие звезды. Такие звезды называются «белыми карликами». Именно о них речь шла в начале этой главы.

Количество точек на диаграмме «спектр – светимость», приведенной на рис. 9, не дает правильного представления об относительном количестве звезд различных классов в Галактике. Так, например, звезд-гигантов с высокой светимостью на этой

диаграмме непропорционально много по сравнению с «карликами» низкой светимости. Это объясняется условиями наблюдений: благодаря высокой светимости гиганты видны с очень больших расстояний, между тем как значительно более многочисленные карлики на таких расстояниях очень трудно наблюдать (если говорить о спектральных наблюдениях).

Некоторое представление об относительном количестве звезд разных последовательностей можно получить, если откладывать на диаграмме «спектр — светимость» все без исключения звезды, находящиеся от Солнца на расстоянии, не превышающем 5 пк (16,3 светового года). Такая диаграмма приведена на рис. 10.

Обращает на себя внимание отсутствие хотя бы одного гиганта. Зато нижняя правая часть главной последовательности очень отчетливо выражена. Мы видим, что в этом сферическом объеме радиусом 5 пк, (довольно типичном для Галактики) подавляющее большинство звезд слабее и холоднее Солнца. Это так называемые «красные карлики», лежащие на нижней правой части главной последовательности. На этой же диаграмме нанесено наше Солнце. Только три звезды (из примерно 50, находящихся в этом объеме) излучают сильнее Солнца. Это Сириус — самая яркая из звезд, видимых на небе, Альтаир и Прокцион. Зато на рис. 10 мы видим пять белых карликов. Из того простого факта, что в малом объеме радиусом 5 пк наблюдается столь заметное число белых карликов, следует, что число их во всей Галактике очень велико. Подсчеты показывают, что число белых карликов в нашей звездной системе по крайней мере равно нескольким миллиардам, а может быть, даже больше 10 млрд (напомним, что полное количество звезд всех типов во всей Галактике около 150 млрд). Число белых карликов в десятки тысяч раз больше, чем гигантов высокой светимости, столь обильно представленных на диаграмме, изображенной на рис. 9. Этот пример убедительно показывает, какую заметную роль в астрономии (так же как и в других науках о природе) играет наблюдательная селекция.



На диаграмме «спектр — светимость» (или «цвет — светимость»), кроме отмеченных главной последовательности и группировок красных гигантов и белых карликов, существуют и некоторые другие последовательности. Уже на рис. 9 намечается последовательность звезд, расположенная несколько ниже главной. Это так называемые «субкарлики». Хотя в окрестностях Солнца эти звезды сравнительно малочисленны, в центральных областях Галактики, а также в шаровых скоплениях количество их огромно. Субкарлики довольно слабо концентрируются к галактической плоскости, но зато очень сильно — к центру нашей звездной системы. По-видимому, они — самый многочисленный тип звезд в Галактике. Субкарлики отличаются от звезд главной последовательности сравнительно низким содержанием тяжелых элементов. Разница в химическом составе является причиной различия в светимостях при одинаковой температуре поверхностных слоев*).

*) Радиусы звезд главной последовательности и последовательности субкарликов с одинаковой поверхностной температурой неодинаковы.

То, что диаграмма «спектр — светимость» теснейшим образом связана с проблемой эволюции звезд, интуитивно чувствовалось астрономами сразу же после открытия этой диаграммы. Сначала считалось, что звезды в основном эволюционируют вдоль главной последовательности. По этим наивным представлениям первоначально образовавшаяся звезда представляет собой красный гигант, который, сжимаясь, увеличивает температуру, пока не превратится в «голубой гигант», находящийся в верхнем левом углу диаграммы «спектр — светимость». Эволюционируя вдоль главной последовательности, она становится «холоднее» и излучает меньше. Отголоском этих представлений является существующая и поныне у астрономов терминология: спектральные классы O, B, A и частично F называются «ранними», а G, K, M — «поздними». Если

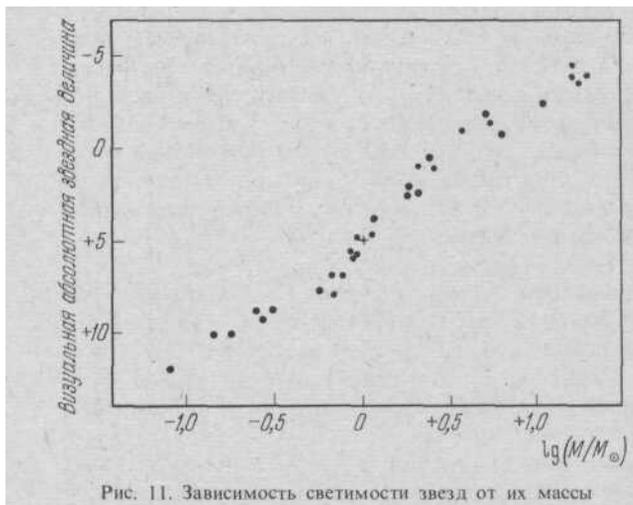


Рис. 11. Зависимость светимости звезд от их массы

идти вдоль главной последовательности от спектральных классов O—B до K—M, то массы звезд непрерывно уменьшаются. Например, у звезд класса O массы достигают нескольких десятков солнечной, у звезд B — около 10.

Солнце имеет спектральный класс G2 (см. рис. 10). У звезд более поздних классов, чем Солнце, массы меньше солнечной. У карликов спектрального класса M массы примерно в 10 раз меньше, чем у Солнца. Так как вдоль главной последовательности и масса и светимость непрерывно меняются,

между ними существует эмпирическое соотношение. На рис. 11 приведена зависимость между массой и светимостью для звезд главной последовательности.

Если считать, что звезды каким-то образом эволюционируют вдоль главной последовательности, то необходимо сделать вывод, что они непрерывно теряют значительную часть своей первоначальной массы. Такие представления сталкиваются с непреодолимыми трудностями. Хотя делались попытки построить теорию эволюции звезд вдоль главной последовательности на основе представлений о непрерывной потере ими массы, они оказались совершенно неудачными*). Правильная теория звездной эволюции, основанная на современных представлениях об источниках звездной энергии и на богатом наблюдательном материале, была развита в пятидесятых годах. Эта теория, успешно объяснившая диаграмму «спектр — светимость», будет обсуждаться в гл. 4.

*) Разумеется, в отдельных случаях наблюдается выбрасывание вещества из поверхностных слоев звезд (например, при вспышках новых и сверхновых, а также в виде спокойного истечения, так называемого «звездного ветра»). Речь идет о невозможности объяснения эволюции звезд вдоль главной последовательности таким способом.

3. Межзвездная среда

Согласно современным представлениям, звезды образуются путем конденсации весьма разреженной межзвездной газопылевой среды. Поэтому, прежде чем рассказать о путях эволюции звезд, нам придется остановиться на свойствах межзвездной среды. Этот вопрос имеет также самостоятельное значение для интересующей нас проблемы. В частности, решение вопроса об установлении различных типов связи между цивилизациями, находящимися на различных планетных системах, зависит от свойств среды, заполняющей межзвездное пространство, разделяющее эти цивилизации.

Межзвездный газ был обнаружен в самом начале текущего столетия благодаря поглощению в линиях ионизованного кальция, которое он производит в спектрах удаленных горячих звезд*). С тех пор методы изучения межзвездного газа непрерывно улучшались и достигли высокой степени совершенства. В итоге большой многолетней работы, проделанной астрономами, сейчас свойства межзвездного газа можно считать достаточно хорошо известными. Плотность межзвездной газовой среды ничтожна. В среднем в областях межзвездного пространства, расположенных недалеко от галактической плоскости, в 1 см^3 находится примерно 1 атом.

Напомним, что в таком же объеме воздуха находится $2,7 \cdot 10^{19}$ молекул. Даже в самых совершенных вакуумных камерах концентрация атомов не меньше чем 10^3 см^{-3} . И все же межзвездную среду нельзя рассматривать как вакуум! Дело в том, что вакуумом, как известно, называется такая система, в которой длина свободного пробега атомов или молекул превышает характерные размеры этой системы. Однако в межзвездном пространстве средняя длина свободного пробега атомов в сотни раз меньше, чем расстояния между звездами. Поэтому мы вправе рассматривать межзвездный газ как сплошную, сжимаемую среду и применять к этой среде законы газовой динамики. •

Химический состав межзвездного газа довольно хорошо исследован. Он сходен с химическим составом наружных слоев звезд главной последовательности. Преобладают атомы водорода и гелия, атомов металлов сравнительно немного. В довольно заметных количествах присутствуют простейшие молекулярные соединения (например, CO, CN). Возможно, что значительная часть межзвездного газа находится в форме молекулярного водорода. Развитие внеатмосферной астрономии открыло возможность наблюдения линий молекулярного водорода в далекой ультрафиолетовой части спектра.

Физические свойства межзвездного газа существенно зависят от того, находится ли он в сравнительной близости от горячих звезд или, напротив, достаточно удален от них. Дело в том, что ультрафиолетовое излучение горячих звезд, полностью ионизует водород на огромных расстояниях. Так, звезда класса O5 ионизует вокруг себя водород в гигантской области радиусом около 100 пк.

Температура межзвездного газа в таких областях (определяемая как характеристика беспорядочных тепловых движений частиц) достигает 10 тыс. К. При этих условиях межзвездная среда излучает отдельные линии в видимой части спектра, в частности красную водородную линию. Эти области межзвездной среды носят название «зоны HII». Однако большая часть межзвездной среды достаточно удалена от горячих звезд. Водород там не ионизован. Температура газа низкая, около 100 К или ниже. Именно здесь имеется значительное количество молекул водорода.

*) Собственные линии поглощения ионизованного кальция у таких звезд отсутствуют, так как температуры их поверхностных слоев слишком высоки.

Кроме газа, в состав межзвездной среды входит космическая пыль. Размеры таких пылинок составляют $10^{-4} - 10^{-5}$ см. Они являются причиной поглощения света в межзвездном пространстве, из-за которого мы не можем наблюдать объекты, находящиеся в галактической плоскости на расстояниях, больших 2—3 тыс. пк. К счастью, космическая пыль, так же как и связанный с ней межзвездный газ, сильно концентрируется к галактической плоскости. Толщина газопылевого слоя составляет всего лишь около 250 пк. Поэтому излучение от космических объектов, направленные на которые составляют значительные углы с галактической плоскостью, поглощается незначительно.

Межзвездные газ и пыль перемешаны. Отношение средних плотностей газа и пыли в межзвездном пространстве равно приблизительно 100 : 1. Наблюдения показывают, что пространственная плотность газопылевой межзвездной среды меняется весьма нерегулярно. Для этой среды характерно резко выраженное «клочковатое» распределение. Она существует в виде облаков (в которых плотность раз в 10 больше средней), разделенных областями, где плотность ничтожно мала. Эти газопылевые облака сосредоточены преимущественно в спиральных ветвях Галактики и участвуют в галактическом вращении. Отдельные облака имеют скорости в 6—8 км/с, о чем уже говорилось. Наиболее плотные из таких облаков наблюдаются как темные или светлые туманности.

Значительное количество сведений о природе межзвездного газа было получено за последние три десятилетия благодаря весьма эффективному применению радиоастрономических методов. Особенно плодотворными были исследования межзвездного газа на волне 21 см. Что это за волна? Еще в сороковых годах теоретически было предсказано, что нейтральные атомы водорода в условиях межзвездного пространства должны излучать спектральную линию с длиной волны 21 см. Дело в том, что основное, самое «глубокое» квантовое состояние атома водорода состоит из двух очень близких уровней. Эти уровни различаются ориентациями магнитных моментов ядра атома водорода (протона) и вращающегося вокруг него электрона. Если моменты ориентированы параллельно, получается один уровень, если антипараллельно — другой. Энергия одного из этих уровней несколько больше другого (на величину, равную удвоенному значению энергии взаимодействия магнитных моментов электрона и протона). Согласно законам квантовой физики, время от времени должны самопроизвольно происходить переходы с уровня большей энергии на уровень меньшей энергии. При этом будет излучаться квант с частотой, пропорциональной разности энергий уровней. Так как последняя в нашем случае очень мала, то и частота излучения будет низкой. Соответствующая длина волны будет равна 21 см.

Расчеты показывают, что такие переходы между уровнями атома водорода происходят чрезвычайно редко: в среднем для одного атома имеет место один переход в 11 млн лет! Чтобы почувствовать ничтожную величину вероятности таких процессов, достаточно сказать, что при излучении спектральных линий в оптическом диапазоне переходы происходят каждую стомиллионную долю секунды. И все же оказывается, что эта линия, излучаемая межзвездными атомами, имеет вполне наблюдаемую интенсивность.

Так как межзвездные атомы имеют различные скорости по лучу зрения, то из-за эффекта Доплера излучение в линии 21 см будет «размазано» в некоторой полосе частот около 1420 МГц (эта частота соответствует длине волны 21 см). По распределению интенсивности в этой полосе (так называемому «профилю линии») можно изучить все движения, в которых участвуют межзвездные атомы водорода. Таким путем удалось исследовать особенности галактического вращения межзвездного газа, беспорядочные движения отдельных его облаков, а также его температуру. Кроме того, из этих наблюдений определяется количество атомов водорода в межзвездном пространстве. Мы видим, таким образом, что радиоастрономиче-

ские исследования на волне 21 см являются мощнейшим методом изучения межзвездной среды и динамики Галактики. В последние годы этим методом изучаются другие галактики, например туманность Андромеды. По мере увеличения размеров радиотелескопов будут открываться все новые возможности изучения более удаленных галактик при помощи радиолинии водорода.

В конце 1963 г. была обнаружена еще одна межзвездная радиолиния, принадлежащая молекулам гидроксила OH, с длиной волны 18 см. Существование этой линии было теоретически предсказано автором этой книги еще в 1949 г. В направлении на галактический центр интенсивность этой линии (которая наблюдается в поглощении) оказалась очень высокой*). Это подтверждает сделанный выше вывод, что в отдельных областях межзвездного пространства газ находится преимущественно в молекулярном состоянии.

В 1967 г. была открыта радиолиния воды H₂O с длиной волны 1,35 см. Исследования газовых туманностей в линиях OH и H₂O привели к открытию космических мазеров (см. следующую главу).

За последние 20 лет, протекавшие после открытия межзвездной радиолинии OH, было открыто много других радиолиний межзвездного происхождения, принадлежащих различным молекулам. Полное число обнаруженных таким образом молекул уже превышает 50. Среди них особенно большое значение имеет молекула CO, радиолиния которой с длиной волны 2,64 мм наблюдается почти во всех областях межзвездной среды. Есть молекулы, радиолинии от которых наблюдаются исключительно в плотных, холодных облаках межзвездной среды. Довольно неожиданным было обнаружение в таких облаках радиолиний весьма сложных многоатомных молекул, например, CH₃CHO, CH₃CN и др. Это открытие, возможно, имеет отношение к волнующей нас проблеме происхождения жизни во Вселенной. Если открытия будут и дальше делаться в таком темпе, кто знает, не будут ли обнаружены нашими приборами межзвездные молекулы ДНК и РНК? (см. гл. 12).

Весьма полезным является то обстоятельство, что соответствующие радиолинии, принадлежащие различным изотопам одной и той же молекулы, имеют довольно заметно различающиеся длины волн. Это позволяет исследовать изотопный состав межзвездной среды, что имеет большое значение для изучения проблемы эволюции вещества во Вселенной. В частности, раздельно наблюдаются такие изотопные комбинации окиси углерода: ¹²C¹⁶O, ¹³C¹⁶O и ¹²C¹⁸O.

Области межзвездной среды, окружающей горячие звезды, где водород полностью ионизован («зоны НП»), весьма успешно исследуются при помощи так называемых «рекомбинационных» радиолиний, существование которых было теоретически предсказано еще до их открытия советским астрономом Н. С. Кардашевым, много занимавшимся также проблемой связи с внеземными цивилизациями (см. гл. 26). «Рекомбинационные» линии возникают при переходах между весьма высоко возбужденными атомами (например, между 108 и 107 уровнями атома водорода). Столь «высокие» уровни могут существовать в межзвездной среде только по причине ее чрезвычайно низкой плотности. Заметим, например, что в солнечной атмосфере могут существовать только первые 28 уровней атома водорода; более высокие уровни разрушаются благодаря взаимодействию с частицами окружающей плазмы.

Уже сравнительно давно астрономы получили ряд косвенных доказательств наличия межзвездных магнитных полей. Эти магнитные поля связаны с облаками межзвездного газа и движутся вместе с ними. Напряженность таких полей около

*) Линия OH состоит из четырех близких по частотам компонент (1612, 1665, 1667 и 1720 МГц).

10^{-5} Э, т. е. в 100 тыс. раз меньше напряженности земного магнитного поля на поверхности нашей планеты. Общее направление магнитных силовых линий совпадает с направлением ветвей спиральной структуры Галактики. Можно сказать, что сами спиральные ветви представляют собой гигантских размеров магнитные силовые трубки.

В конце 1962 г. факт существования межзвездных магнитных полей был установлен английскими радиоастрономами путем прямых наблюдений. С этой целью исследовались весьма тонкие поляризационные эффекты в радиолинии 21 см, наблюдаемой в поглощении в спектре мощного источника радиоизлучения — Крабовидной туманности (об этом источнике см. гл. 5)*). Если межзвездный газ находится в магнитном поле, можно ожидать расщепления линии 21 см на несколько компонент, отличающихся поляризацией. Так как величина магнитного поля очень мала, это расщепление будет совершенно ничтожным. Кроме того, ширина линии поглощения 21 см довольно значительна. Единственное, что можно ожидать в такой ситуации, — это небольшие систематические различия поляризации в пределах профиля линий поглощения. Поэтому уверенное обнаружение этого тонкого эффекта — замечательное достижение современной науки. Измеренное значение межзвездного магнитного поля оказалось в полном соответствии с теоретически ожидаемым согласно косвенным данным.

Для исследований межзвездных магнитных полей применяется и радиоастрономический метод, основанный на изучении вращения плоскости поляризации радиоизлучения внегалактических источников**) при его прохождении через «намагниченную» межзвездную среду («явление Фарадея»). Этим методом уже сейчас удалось получить ряд важных данных о структуре межзвездных магнитных полей. В последние годы в качестве источников поляризованного излучения для измерения межзвездного магнитного поля таким методом используются пульсары (см. гл. 5).

Межзвездные магнитные поля играют решающую роль при образовании плотных холодных газопылевых облаков межзвездной среды, из которых конденсируются звезды (см. гл. 4).

С межзвездными магнитными полями тесно связаны первичные космические лучи, заполняющие межзвездное пространство. Это частицы (протоны, ядра более тяжелых элементов, а также электроны), энергии которых превышают сотни миллионов электронвольт, доходя до 10^{20} — 10^{21} эВ. Они движутся вдоль силовых линий магнитных полей по винтовым траекториям. Электроны первичных космических лучей, двигаясь в межзвездных магнитных полях, излучают радиоволны. Это излучение наблюдается нами как радиоизлучение Галактики (так называемое «синхротронное излучение»). Таким образом, радиоастрономия открыла возможность изучать космические лучи в глубинах Галактики и даже далеко за ее пределами. Она впервые поставила проблему происхождения космических лучей на прочный научный фундамент.

Исследователи, работавшие над проблемой происхождения жизни, до недавнего времени оставляли без внимания вопрос о первичных космических лучах. Между тем уровень жесткой радиации, вызывающей мутации, является, на наш взгляд, весьма существенным эволюционным фактором. Имеются все основания полагать, что ход эволюции жизни был бы совсем другим, если бы уровень жесткой радиации (который сейчас в значительной степени обусловлен первичными космическими

*) Линия поглощения 21 см, обусловленная межзвездным водородом, образуется в радиоспектре какого-либо источника совершенно таким же образом, как линии межзвездного кальция в спектрах удаленных горячих звезд.

**) Радиоизлучение от метагалактических источников линейно поляризовано, причем степень поляризации обычно порядка нескольких процентов. Поляризация этого радиоизлучения объясняется его синхротронной природой (см. ниже).

лучами) был бы в десятки раз выше современного значения. Отсюда возникает важный вопрос: остается ли постоянным уровень космической радиации на какой-нибудь планете, на которой развивается жизнь? Речь идет о сроках, исчисляемых многими сотнями миллионов лет. Мы увидим в следующих главах этой книги, как современная астрофизика и радиоастрономия отвечают на этот вопрос.

Масса межзвездного газа в нашей Галактике близка к миллиарду солнечных масс, что составляет немногим больше 1 % от полной массы Галактики, обусловленной в основном звездами. В других звездных системах относительное содержание межзвездного газа меняется в довольно широких пределах. У эллиптических галактик оно очень мало, около 10^{-4} и даже меньше, в то время как у неправильных звездных систем (типа Магеллановых Облаков) содержание межзвездного газа доходит до 20 и даже 50%. Это обстоятельство тесно связано с вопросом об эволюции звездных систем, о чем речь будет идти в гл. 6.

4. Эволюция звезд

Современная астрономия располагает большим количеством аргументов в пользу утверждения, что звезды образуются путем конденсации облаков газопылевой межзвездной среды. Процесс образования звезд из этой среды продолжается и в настоящее время. Выяснение этого обстоятельства является одним из крупнейших достижений современной астрономии. Еще сравнительно недавно считали, что все звезды образовались почти одновременно много миллиардов лет назад. Крушению этих метафизических представлений способствовал, прежде всего, прогресс наблюдательной астрономии и развитие теории строения и эволюции звезд. В результате стало ясно, что многие наблюдаемые звезды являются сравнительно молодыми объектами, а некоторые из них возникли тогда, когда на Земле уже был человек.

Важным аргументом в пользу вывода о том, что звезды образуются из межзвездной газопылевой среды, служит расположение групп заведомо молодых звезд (так называемых «ассоциаций») в спиральных ветвях Галактики. Дело в том, что согласно радиоастрономическим наблюдениям межзвездный газ, концентрируется преимущественно в спиральных рукавах галактик. В частности, это имеет место и в нашей Галактике. Более того, из детальных «радиоизображений» некоторых близких к нам галактик следует, что наибольшая плотность межзвездного газа наблюдается на внутренних (по отношению к центру соответствующей галактики) краях спирали, что находит естественное объяснение, на деталях которого мы здесь останавливаться не можем. Но именно в этих частях спиралей наблюдаются методами оптической астрономии «зоны НП», т. е. облака ионизованного межзвездного газа. В гл. 3 уже говорилось, что причиной ионизации таких облаков может быть только ультрафиолетовое излучение массивных горячих звезд — объектов заведомо молодых (см. ниже).

Центральным в проблеме эволюции звезд является вопрос об источниках их энергии. В самом деле, откуда, например, берется огромное количество энергии, необходимой для поддержания излучения Солнца примерно на наблюдаемом уровне в течение нескольких миллиардов лет? Ежесекундно Солнце излучает $4 \cdot 10^{33}$ эрг, а за 3 млрд лет оно излучило $4 \cdot 10^{50}$ эрг. Несомненно, что возраст Солнца около 5 млрд лет. Это следует хотя бы из современных оценок возраста Земли различными радиоактивными методами. Вряд ли Солнце «моложе» Земли.

В прошлом веке и в начале этого века предлагались различные гипотезы о природе источников энергии Солнца и звезд. Некоторые ученые, например, считали, что источником солнечной энергии является непрерывное выпадение на его поверхность метеорных тел, другие искали источник в непрерывном сжатии Солнца. Освобождающаяся при таком процессе потенциальная энергия могла бы, при некоторых условиях, перейти в излучение. Как мы увидим ниже, этот источник на раннем этапе эволюции звезды может быть довольно эффективным, но он никак не может обеспечить излучение Солнца в течение требуемого времени.

Успехи ядерной физики позволили решить проблему источников звездной энергии еще в конце тридцатых годов нашего столетия. Таким источником являются термоядерные реакции синтеза, происходящие в недрах звезд при господствующей там очень высокой температуре (порядка десяти миллионов Кельвинов).

В результате этих реакций, скорость которых сильно зависит от температуры, протоны превращаются в ядра гелия, а освобождающаяся энергия медленно «просачивается» сквозь недра звезд и в конце концов, значительно трансформированная, излучается в мировое пространство. Это исключительно мощный источник. Если предположить, что первоначально Солнце состояло только из водорода, который в результате термоядерных реакций целиком превратился в гелий, то выде-



Рис. 12. Глобулы в диффузной туманности

лившееся количество энергии составит примерно 10^{52} эрг. Таким образом, для поддержания излучения на наблюдаемом уровне в течение миллиардов лет достаточно, чтобы Солнце «израсходовало» не свыше 10% своего первоначального запаса водорода.

Теперь мы можем представить картину эволюции какой-нибудь звезды следующим образом. По некоторым причинам (их можно указать несколько) начало

конденсироваться облако межзвездной газопылевой среды. Довольно скоро (разумеется, по астрономическим масштабам!) под влиянием сил всемирного тяготения из этого облака образуется сравнительно плотный непрозрачный газовый шар. Строго говоря, этот шар еще нельзя назвать звездой, так как в его центральных областях температура недостаточна для того, чтобы начались термоядерные реакции. Давление газа внутри шара не в состоянии пока уравновесить силы притяжения отдельных его частей, поэтому он будет непрерывно сжиматься. Некоторые астрономы раньше считали, что такие «протозвезды» наблюдаются в отдельных туманностях в виде очень темных компактных образований, так называемых глобул (рис. 12). Успехи радиоастрономии, однако, заставили отказаться от такой довольно наивной точки зрения (см. ниже). Обычно одновременно образуется не одна протозвезда, а более или менее многочисленная группа их. В дальнейшем эти группы становятся звездными ассоциациями и скоплениями, хорошо известными астрономам. Весьма вероятно, что на этом самом раннем этапе эволюции звезды вокруг нее образуются сгустки с меньшей массой, которые затем постепенно превращаются в планеты (см. гл. 9).

При сжатии протозвезды температура ее повышается и значительная часть освобождающейся потенциальной энергии излучается в окружающее пространство. Так как размеры сжимающегося газового шара очень велики, то излучение с единицы его поверхности будет незначительным. Коль скоро поток излучения с единицы поверхности пропорционален четвертой степени температуры (закон Стефана — Больцмана), температура поверхностных слоев звезды сравнительно низка, между тем как ее светимость почти такая же, как у обычной звезды с той же массой. Поэтому на диаграмме «спектр — светимость» такие звезды расположатся вправо от главной последовательности, т. е. попадут в область красных гигантов или красных карликов, в зависимости от значений их первоначальных масс.

В дальнейшем протозвезда продолжает сжиматься. Ее размеры становятся меньше, а поверхностная температура растет, вследствие чего спектр становится все более «ранним». Таким образом, двигаясь по диаграмме «спектр — светимость», протозвезда довольно быстро «сядет» на главную последовательность. В этот период температура звездных недр уже оказывается достаточной для того, чтобы там начались термоядерные реакции. При этом давление газа внутри будущей звезды уравновешивает притяжение и газовый шар перестает сжиматься. Протозвезда становится звездой.

Чтобы пройти эту самую раннюю стадию своей эволюции, протозвездам нужно сравнительно немного времени. Если, например, масса протозвезды больше солнечной, нужно всего лишь несколько миллионов лет, если меньше — несколько сот миллионов лет. Так как время эволюции протозвезд сравнительно невелико, эту самую раннюю фазу развития звезды обнаружить трудно. Все же звезды в такой стадии, по-видимому, наблюдаются. Мы имеем в виду очень интересные звезды типа Т Тельца, обычно погруженные в темные туманности.

В 1966 г. совершенно неожиданно выявилась возможность наблюдать протозвезды на ранних стадиях их эволюции. Мы уже упоминали в третьей главе этой книги об открытии методом радиоастрономии ряда молекул в межзвездной среде, прежде всего гидроксила OH и паров воды H₂O. Велико же было удивление радиоастрономов, когда при обзоре неба на волне 18 см, соответствующей радиолинии OH, были обнаружены яркие, чрезвычайно компактные (т. е. имеющие малые угловые размеры) источники. Это было настолько неожиданно, что первое время отказывались даже верить, что столь яркие радиолинии могут принадлежать молекуле гидроксила. Была высказана гипотеза, что эти линии принадлежат какой-то неизвестной субстанции, которой сразу же дали «подходящее» имя «мистериум». Однако «мистериум» очень скоро разделил судьбу своих оптических «братьев» — «небулия» и «корония». Дело в том, что многие десятилетия яркие линии туманно-

стей и солнечной короны не поддавались отождествлению с какими бы то ни было известными спектральными линиями. Поэтому их приписывали неким, неизвестным на земле, гипотетическим элементам — «небулию» и «коронию». Не будем снисходительно улыбаться над невежеством астрономов начала нашего века: ведь теории атома тогда еще не было! Развитие физики не оставило в периодической системе Менделеева места для экзотических «небожителей»: в 1927 г. был развенчан «небулий», линии которого с полной надежностью были отождествлены с «запрещенными» линиями ионизованных кислорода и азота, а в 1939—1941 гг. было убедительно показано, что загадочные линии «корония» принадлежат многократно ионизованному атому железа, никеля и кальция.

Если для «развенчания» «небулия» и «корония» потребовались десятилетия, то уже через несколько недель после открытия стало ясно, что линии «мистериума» принадлежат обыкновенному гидроксилу, но только находящемуся в необыкновенных условиях.

Дальнейшие наблюдения, прежде всего, выявили, что источники «мистериума» имеют исключительно малые угловые размеры. Это было показано с помощью тогда еще нового, весьма эффективного метода исследований, получившего название «радиоинтерферометрия на сверхдлинных базах». Суть метода сводится к одновременным наблюдениям источников на двух радиотелескопах, удаленных друг от друга на расстояние в несколько тысяч км. Как оказывается, угловое разрешение при этом определяется отношением длины волны к расстоянию между радиотелескопами. В нашем случае эта величина может быть $\sim 3 \cdot 10^{-8}$ рад или несколько тысячных секунды дуги! Заметим, что в оптической астрономии такое угловое разрешение пока совершенно недостижимо.

Такие наблюдения показали, что существуют по крайней мере три класса источников «мистериума». Нас здесь будут интересовать источники 1 класса. Все они находятся внутри газовых ионизованных туманностей, например в знаменитой туманности Ориона. Как уже говорилось, их размеры чрезвычайно малы, во много тысяч раз меньше размеров туманности. Всего интереснее, что они обладают сложной пространственной структурой. Рассмотрим, например, источник, находящийся в туманности, получившей название W3.

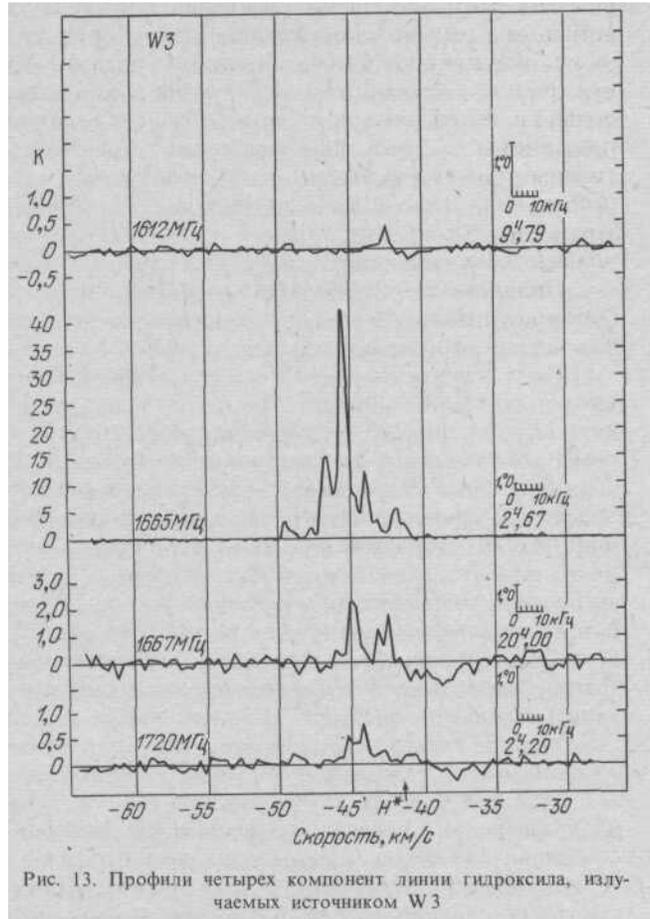


Рис. 13. Профили четырех компонент линии гидроксила, излучаемых источником W3

На рис. 13 приведен профиль линии ОН, излучаемый этим источником. Как видим, он состоит из большого количества узких ярких линий. Каждой линии соответствует определенная скорость движения по лучу зрения излучающего эту линию облака. Величина этой скорости определяется эффектом Доплера. Различие скоростей (по лучу зрения) между различными облаками достигает ~ 10 км/с. Упомянутые выше интерферометрические наблюдения показали, что облака, излучающие каждую линию, пространственно не совпадают. Картина получается такая: внутри области размером приблизительно 1,5 секунды дуги движутся с разными скоростями около 10 компактных облаков. Каждое облако излучает одну определенную (по частоте) линию. Угловые размеры облаков очень малы, порядка нескольких тысячных секунды дуги. Так как расстояние до туманности W3 известно (около 2000 пк), то угловые размеры легко могут быть переведены в линейные. Оказывается, что линейные размеры области, в которой движутся облака, порядка 10^{-2} пк, а размеры каждого облака всего лишь на порядок величины больше расстояния от Земли до Солнца.

Возникают вопросы: что это за облака и почему они так сильно излучают в радиолиниях гидроксила? На второй вопрос ответ был получен довольно скоро. Оказалось, что механизм излучения вполне подобен тому, который наблюдался в лабораторных мазерах и лазерах.

Итак, источники «мистериума» — это гигантские, природные космические мазеры, работающие на волне линии гидроксила, длина которой 18 см. Именно в мазерах (а на оптических и инфракрасных частотах — в лазерах) достигается огромная яркость в линии, причем спектральная ширина ее мала. Как известно, усиление излучения в линиях благодаря такому эффекту возможно тогда, когда среда, в которой распространяется излучение, каким-либо способом «активирована». Это означает, что некоторый «сторонний» источник энергии (так называемая «накачка») делает концентрацию атомов или молекул на исходном (верхнем) уровне аномально высокой. Без постоянно действующей «накачки» мазер или лазер невозможны. Вопрос о природе механизма «накачки» космических мазеров пока еще окончательно не решен. Однако скорее всего «накачкой» служит достаточно мощное инфракрасное излучение. Другим возможным механизмом «накачки» могут быть некоторые химические реакции.

Стоит прервать наш рассказ о космических мазерах для того, чтобы подумать, с какими удивительными явлениями сталкиваются астрономы в космосе. Одно из величайших технических изобретений нашего бурного века, играющее немалую роль в переживаемой нами теперь научно-технической революции, запросто реализуется в естественных условиях и притом — в громадном масштабе!

Поток радиоизлучения от некоторых космических мазеров настолько велик, что мог бы быть обнаружен даже при техническом уровне радиоастрономии лет 35 тому назад, т.е. еще до изобретения мазеров и лазеров! Для-этого надо было «только» знать точную длину волны радиолинии ОН и заинтересоваться проблемой. Кстати, это не первый случай, когда в естественных условиях реализуются важнейшие научно-технические проблемы, стоящие перед человечеством. Термоядерные реакции, поддерживающие излучение Солнца и звезд (см. ниже), стимулировали разработку и осуществление проектов получения на Земле ядерного «горючего», которое в будущем должно решить все наши энергетические проблемы. Увы, мы пока еще далеки от решения этой важнейшей задачи, которую природа решила «запросто». Полтора века тому назад основатель волновой теории света Френель заметил (по другому поводу, конечно): «Природа смеется над нашими трудностями». Как видим, замечание Френеля еще более справедливо в наши дни.

Вернемся, однако, к космическим мазерам. Хотя механизм «накачки» этих мазеров пока еще не совсем ясен, все же можно составить себе грубое представление о физических условиях в облаках, излучающих мазерным механизмом линию

18 см. Прежде всего, оказывается, что эти облака довольно плотны: в кубическом сантиметре там имеется по крайней мере 10^8 – 10^9 частиц, причем существенная (а может быть и большая) часть их — молекулы. Температура вряд ли превышает две тысячи кельвинов, скорее всего она порядка 1000 Кельвинов. Эти свойства резко отличны от свойств даже самых плотных облаков межзвездного газа. Учитывая еще сравнительно небольшие размеры облаков, мы невольно приходим к выводу, что они скорее напоминают протяженные, довольно холодные атмосферы звезд — сверхгигантов. Очень похоже, что эти облака есть не что иное, как ранняя стадия развития протозвезд, следующая сразу за их конденсацией из межзвездной среды. В пользу этого утверждения (которое автор этой книги высказал еще в 1966 г.) говорят и другие факты. В туманностях, где наблюдаются космические мазеры, видны молодые горячие звезды (см. ниже). Следовательно, там недавно закончился и, скорее всего, продолжается и в настоящее время, процесс звездообразования. Пожалуй, самое любопытное это то, что, как показывают радиоастрономические наблюдения, космические мазеры этого типа как бы «погружены» в небольшие, очень плотные облака ионизованного водорода. В этих облаках имеется много космической пыли, что делает их ненаблюдаемыми в оптическом диапазоне. Такие «коконы» ионизируются молодой, горячей звездой, находящейся внутри них. При исследовании процессов звездообразования весьма полезной оказалась инфракрасная астрономия. Ведь для инфракрасных лучей межзвездное поглощение света не так существенно.

Мы можем теперь представить следующую картину: из облака межзвездной среды, путем его конденсации, образуется несколько сгустков разной массы, эволюционирующих в протозвезды. Скорость эволюции различна: для более массивных сгустков она будет больше (см. дальше табл. 2). Поэтому раньше всего превратится в горячую звезду наиболее массивной сгусток, между тем как остальные будут более или менее долго задерживаться на стадии протозвезды. Их-то мы и наблюдаем как источники мазерного излучения в непосредственной близости от «новорожденной» горячей звезды, ионизирующей не сконденсировавшийся в сгустки водород «кокона». Разумеется, эта грубая схема будет в дальнейшем уточняться, причем, конечно, в нее будут внесены существенные изменения. Но факт остается фактом: неожиданно оказалось, что некоторое время (скорее всего — сравнительно короткое) новорожденные протозвезды, образно выражаясь, «кричат» о своем появлении на свет, пользуясь новейшими методами квантовой радиофизики (т. е. мазерами)...

Спустя 2 года после открытия космических мазеров на гидроксиле (линия 18 см)-было установлено, что те же источники одновременно излучают (также мазерным механизмом) линию водяных паров, длина волны которой 1,35 см. Интенсивность «водяного» мазера даже больше, чем «гидроксильного». Облака, излучающие линию H_2O , хотя и находятся в том же малом объеме, что и «гидроксильные» облака, движутся с другими скоростями и значительно более компактны. Нельзя исключать, что в близком будущем будут обнаружены и другие мазерные линии*). Таким образом, совершенно неожиданно радиоастрономия превратила классическую проблему звездообразования в ветвь наблюдательной астрономии**).

Оказавшись на главной последовательности и перестав сжиматься, звезда длительно излучает практически не меняя своего положения на диаграмме «спектр — светимость». Ее излучение поддерживается термоядерными реакциями, идущими в центральных областях. Таким образом, главная последовательность представляет

*) Недавно были обнаружены мазерные линии молекулы SiH.

**) Более подробно о звездообразовании см. книгу автора: «Звезды: их рождение, жизнь и смерть» (М.: Наука, 1984).

собой как бы геометрическое место точек на диаграмме «спектр — светимость», где звезда (в зависимости от ее массы) может длительно и устойчиво излучать благодаря термоядерным реакциям. Место звезды на главной последовательности определяется ее массой. Следует заметить, что имеется еще один параметр, определяющий положение равновесной излучающей звезды на диаграмме «спектр — светимость». Таким параметром является первоначальный химический состав звезды. Если относительное содержание тяжелых элементов уменьшится, звезда «ляжет» на диаграмме ниже. Именно этим обстоятельством объясняется наличие последовательности субкарликов. Как уже говорилось выше, относительное содержание тяжелых элементов у этих звезд в десятки раз меньше, чем у звезд главной последовательности.

Время пребывания звезды на главной последовательности определяется ее первоначальной массой. Если масса велика, излучение звезды имеет огромную мощность и она довольно быстро расходует запасы своего водородного «горючего». Так, например, звезды главной последовательности с массой, превышающей солнечную в несколько десятков раз (это горячие голубые гиганты спектрального класса O), могут устойчиво излучать, находясь на этой последовательности всего лишь несколько миллионов лет, в то время как звезды с массой, близкой к солнечной, находятся на главной последовательности 10—15 млрд лет. Ниже приводится табл. 2, дающая вычисленную продолжительность гравитационного сжатия и пребывания на главной последовательности для звезд разных спектральных классов. В этой же таблице приведены значения масс, радиусов и светимостей звезд в солнечных единицах.

Т а б л и ц а 2

Спектральный класс	Масса	Радиус	Светимость	Время лет	
				гравитационного сжатия	пребывания на главной последовательности
B0	17,0	9,0	30000	$1,2 \cdot 10^5$	$8 \cdot 10^6$
B5	6,3	4,2	1000	$1,1 \cdot 10^6$	$8 \cdot 10^7$
A0	3,2	2,8	100	$4,1 \cdot 10^7$	$4 \cdot 10^8$
A5	1,9	,5	12	$2,2 \cdot 10^7$	$2 \cdot 10^8$
F0	1,5	,25	4,8	$4,2 \cdot 10^7$	$4 \cdot 10^8$
F5	1,3	,24	2,7	$5,6 \cdot 10^7$	$6 \cdot 10^8$
G0	1,02	,02	1,2	$9,4 \cdot 10^7$	$11 \cdot 10^8$
G2 (Солнце)	1,00	,00	1,0	$1,1 \cdot 10^8$	$13 \cdot 10^8$
G5	0,91	0,92	0,72	$1,1 \cdot 10^8$	$17 \cdot 10^8$
K0	0,74	0,74	0,32	$2,3 \cdot 10^8$	$28 \cdot 10^8$
K5	0,54	0,54	0,10	$6,0 \cdot 10^8$	$70 \cdot 10^8$

Из таблицы следует, что время пребывания на главной последовательности звезд, более «поздних», чем K0, значительно больше возраста Галактики, который по существующим оценкам близок к 15—20 млрд лет.

«Выгорание» водорода (т. е. превращение его в гелий при термоядерных реакциях) происходит только в центральных областях звезды. Это объясняется тем, что звездное вещество перемешивается лишь в центральных областях звезды, где идут ядерные реакции, в то время как наружные слои сохраняют относительное содержание водорода неизменным. Так как количество водорода в центральных областях звезды ограничено, рано или поздно (в зависимости от массы звезды) он там практически весь «выгорит». Расчеты показывают, что масса и радиус центральной ее области, в которой идут ядерные реакции, постепенно уменьшаются, при этом звезда медленно перемещается, на диаграмме «спектр - светимость» вправо. Этот

процесс происходит значительно быстрее у сравнительно массивных звезд. Если представить себе группу одновременно образовавшихся эволюционирующих звезд, то с течением времени главная последовательность на диаграмме «спектр — светимость», построенная для этой группы, будет как бы загибаться вправо.

Что же произойдет со звездой, когда весь (или почти весь) водород в ее ядре «выгорит»? Так как выделение энергии в центральных областях звезды прекращается, температура и давление не могут поддерживаться там на уровне, необходимом для противодействия силе тяготения, сжимающей звезду. Ядро звезды начнет сжиматься, а температура его будет повышаться. Образуется очень плотная горячая область, состоящая из гелия (в который превратился водород) с небольшой примесью более тяжелых элементов. Газ в таком состоянии носит название «вырожденного». Он обладает рядом интересных свойств, на которых мы здесь останавливаться не можем. В этой плотной горячей области ядерные реакции происходить не будут, но они будут довольно интенсивно протекать на периферии ядра, в сравнительно тонком слое. Вычисления показывают, что светимость звезды и ее размеры начнут расти. Звезда как бы «разбухает», и начнет «сходить» с главной последовательности, переходя в области красных гигантов. Далее, оказывается, что звезды-гиганты с меньшим содержанием тяжелых элементов будут иметь при одинаковых размерах более высокую светимость.

На рис. 14 приведены теоретически рассчитанные эволюционные треки на диаграмме «светимость — температура поверхности» для звезд разной массы. При переходе звезды в стадию красного гиганта скорость ее эволюции значительно увеличивается.

Для проверки теории большое значение имеет построение диаграммы «спектр — светимость» для отдельных звездных скоплений. Дело в том, что звезды одного и того же скопления (например, Плеяды) имеют, очевидно, одинаковый возраст. Сравнивая диаграммы «спектр — светимость» для разных скоплений — «старых» и «молодых», можно выяснить, как эволюционируют звезды. На рис. 15 и 16 приведены диаграммы «показатель цвета — светимость» для двух различных звездных скоплений. Скопление NGC 2254 - сравнительно молодое образование.

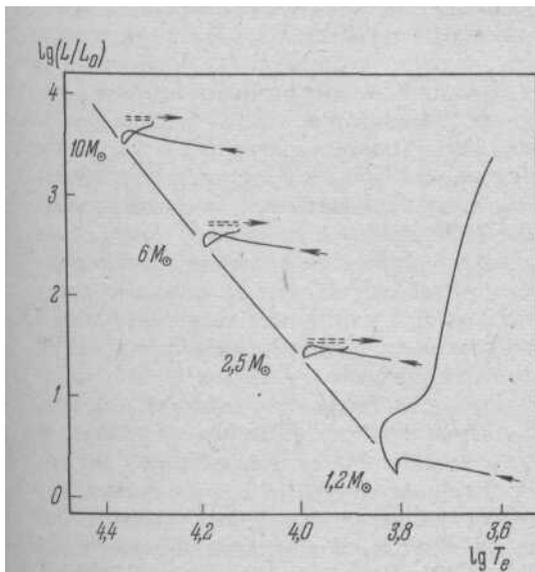


Рис. 14. Эволюционные треки для звезд разной массы на диаграмме «светимость — температура»

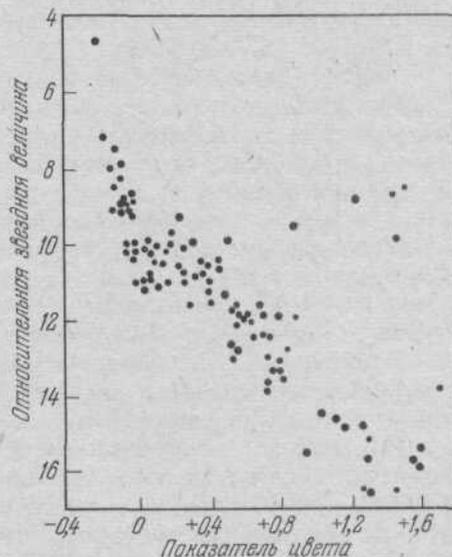


Рис. 15. Диаграмма Герцшпрунга — Рассела для звездного скопления NGC 2254

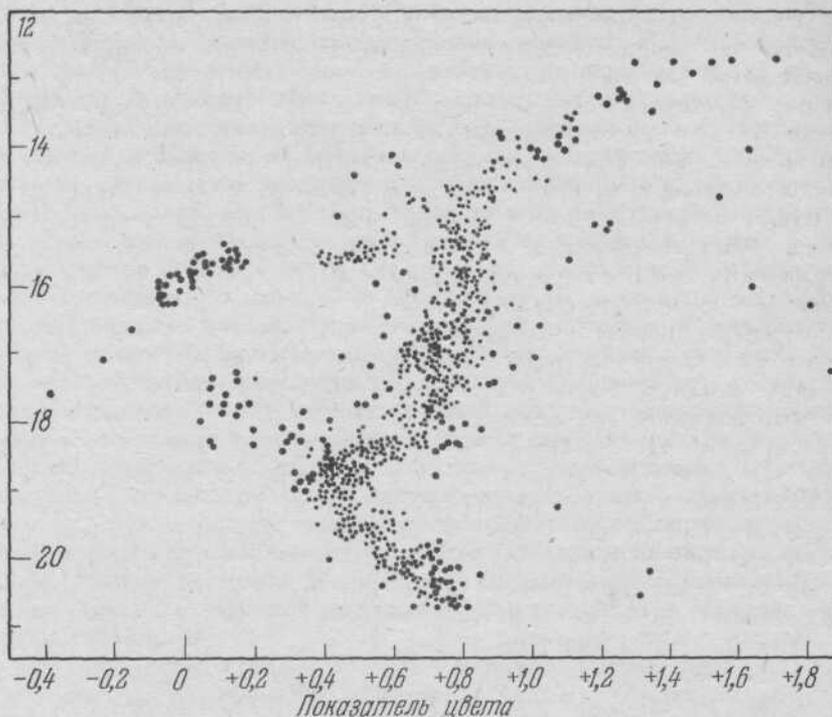


Рис. 16. Диаграмма Герцшпрунга — Рессела для шарового скопления М3. По вертикальной оси — относительная звездная величина

На соответствующей диаграмме отчетливо видна вся главная последовательность, в том числе ее верхняя левая часть, где расположены горячие массивные звезды (показателю цвета — 0,2 соответствует температура 20 тыс. К, т. е. спектр класса В).

Шаровое скопление М 3 — «старый» объект. Ясно видно, что в верхней части главной последовательности диаграммы, построенной для этого скопления, звезд почти нет. Зато ветвь красных гигантов у М 3 представлена весьма богато, в то время как у NGC 2254 красных гигантов очень мало. Это и понятно: у старого скопления М 3 большое число звезд уже успело «сойти» с главной последовательности, в то время как у молодого скопления NGC 2254 это произошло только с небольшим числом сравнительно массивных, быстро эволюционирующих звезд. Обращает на себя внимание, что ветвь гигантов для М 3 идет довольно круто вверх, а у NGC 2254 она почти горизонтальна. С точки зрения теории это можно объяснить значительно более низким содержанием тяжелых элементов у М 3. И действительно, у звезд шаровых скоплений (так же как и у других звезд, концентрирующихся не столько к галактической плоскости, сколько к галактическому центру) относительное содержание тяжелых элементов незначительно.

На диаграмме «показатель цвета — светимость» для М 3 видна еще одна почти горизонтальная ветвь. Аналогичной ветви на диаграмме, построенной для NGC 2254, нет. Теория объясняет появление этой ветви следующим образом. После того как температура сжимающегося плотного гелиевого ядра звезды — красного гиганта — достигнет 100 — 150 млн К, там начнет идти новая ядерная реакция. Эта реакция состоит в образовании ядра углерода из трех ядер гелия. Как только начнется эта реакция, сжатие ядра прекратится. В дальнейшем поверхностные слои

звезды увеличивают свою температуру и звезда на диаграмме «спектр — светимость» будет перемещаться влево. Именно из таких звезд образуется третья горизонтальная ветвь диаграммы для М 3.

На рис. 17 схематически приведена сводная диаграмма «цвет — светимость» для 11 скоплений, из которых два (М 3 и М 92) шаровые. Ясно видно, как «загибаются» вправо и вверх главные последовательности у разных скоплений в полном согласии с теоретическими представлениями, о которых уже шла речь. Из рис. 17 можно сразу определить, какие скопления являются молодыми и какие старыми. Например, «двойное» скопление К, и h Персея молодое. Оно «сохранило» значительную часть главной последовательности. Скопление М 41 старше, еще старше скопление Гиады и совсем старым является скопление М 67, диаграмма «цвет — светимость» для которого очень похожа на аналогичную диаграмму для шаровых скоплений М 3 и М 92. Только ветвь гигантов у шаровых скоплений находится выше в согласии с различиями в химическом составе, о которых говорилось раньше.

Таким образом, данные наблюдений полностью подтверждают и обосновывают выводы теории. Казалось бы, трудно ожидать наблюдательной проверки теории процессов в звездных недрах, которые закрыты от нас огромной толщей звездного вещества. И все же теория и здесь постоянно контролируется практикой астрономических наблюдений. Нужно отметить, что составление большого количества диаграмм «цвет — светимость» потребовало огромного труда астрономов-наблюдателей и коренного усовершенствования методов наблюдений. С другой стороны, успехи теории внутреннего строения и эволюции звезд были бы невозможны без современной вычислительной техники, основанной на применении быстродействующих электронных счетных машин. Неоценимую услугу теории оказали также исследования в области ядерной физики, позволившие получить количественные характеристики тех ядерных реакций, которые протекают в звездных недрах. Без преувеличения можно сказать, что разработка теории строения и эволюции звезд является одним из крупнейших достижений астрономии второй половины XX столетия.

Развитие современной физики открывает возможность прямой наблюдательной проверки теории внутреннего строения звезд, и в частности Солнца. Речь идет о возможности обнаружения мощного потока нейтрино, который должно испускать Солнце, если в его недрах имеют место ядерные реакции. Хорошо известно, что нейтрино чрезвычайно слабо взаимодействует с другими элементарными частицами. Так, например, нейтрино может почти без поглощения пролететь через всю толщу Солнца, в то время как рентгеновское излучение может пройти без поглощения только через несколько миллиметров вещества солнечных недр. Если представить себе, что через Солнце проходит мощный пучок нейтрино с энергией каждой частицы в 10 млн эВ, то из нескольких десятков миллионов нейтрино поглотится только одно. Отсюда ясно, что обнаружить поток солнечных нейтрино

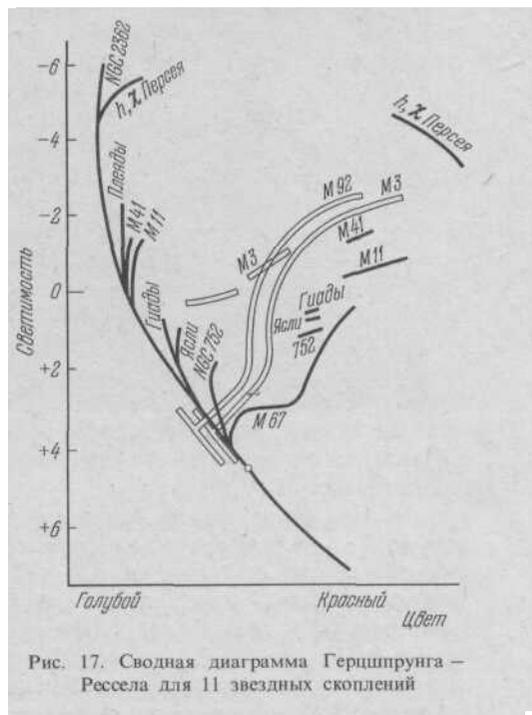


Рис. 17. Сводная диаграмма Герцшпрунга — Рассела для 11 звездных скоплений

чрезвычайно трудно. Вместе с тем это представляется весьма заманчивым, так как обнаруженные каким-либо способом солнечные нейтрино приходят к нам непосредственно из его глубин. Следовательно, изучая эти нейтрино, можно получить достаточно подробную информацию о физических условиях в центральных областях Солнца.

Каков же ожидаемый поток нейтрино от Солнца? Если, например, в его недрах идет углеродно-азотная реакция, то, как оказывается при превращении четырех ядер водорода в одно ядро гелия образуются два нейтрино. При «протон-протонной» реакции выход нейтрино будет другой. Энергетический спектр солнечных нейтрино сильно зависит от температуры центральных областей Солнца. Ожидаемая величина потока энергии от Солнца в форме нейтрино составляет несколько процентов от всего потока солнечного излучения. Это очень много.

Как же обнаружить поток солнечных нейтрино? Идею такого эксперимента впервые предложил много лет тому назад академик Б. М. Понтекорво. Солнечное нейтрино, взаимодействуя с ядром изотопа хлора ^{37}Cl , захватывается последним. При этом изотоп хлора превращается в радиоактивный изотоп аргона ^{37}Ar и испускается электрон. По причине исключительно слабого взаимодействия нейтрино с веществом такие процессы будут происходить чрезвычайно редко. Поэтому установка для обнаружения солнечных нейтрино выглядит весьма необычно. Представьте себе большое количество специальных цистерн, наполненных прозрачной жидкостью перхлорэтиленом (C_2Cl_4). Количества этой жидкости достаточно, чтобы, например, заполнить большой бассейн для плавания. В таком гигантском количестве перхлорэтилена можно ожидать образования около десятка изотопов аргона ежедневно из-за захвата солнечных нейтрино ядрами ^{37}Cl , входящими в состав жидкости. Оказывается, что средства современной экспериментальной физики позволяют обнаружить это ничтожно малое количество вновь образовавшихся изотопов аргона.

Эту установку можно рассматривать как своеобразный гигантский термометр для измерения температуры центральных областей Солнца, ибо количество вновь образовавшихся изотопов аргона сильно зависит от энергетического спектра солнечных нейтрино, который, как уже упоминалось выше, чувствительно зависит от температуры солнечных недр. Приходится только удивляться возможностям человеческого разума. Такой эксперимент был выполнен в США. Оказывается, что солнечных нейтрино раз в десять меньше, чем можно было ожидать. Возможно, это объясняется несовершенством существующих моделей солнечных недр, хотя причины могут быть и более глубокими (см. книгу автора «Звезды...»).

Вернемся, однако, к вопросу о дальнейшей эволюции звезд. Что с ними произойдет, когда реакция «гелий — углерод» в центральных областях исчерпает себя, так же как и водородная реакция в тонком слое, окружающем горячее плотное ядро? Какая стадия эволюции наступит вслед за стадией красного гиганта? Совокупность данных наблюдений, а также ряд теоретических соображений говорят о том, что на этом этапе эволюции звезды, масса которых меньше, чем 1,2 массы Солнца, существенную часть своей массы, образующую их наружную оболочку, «сбрасывают». Такой процесс мы наблюдаем, по-видимому, как образование так называемых «планетарных туманностей» (рис. 18). После того как от звезды отделится со сравнительно небольшой скоростью наружная оболочка, «обнажатся» ее внутренние, очень горячие слои. При этом отделившаяся оболочка будет расширяться, все дальше и дальше отходя от звезды.

Мощное ультрафиолетовое излучение звезды — ядра планетарной туманности — будет ионизовать атомы в оболочке, возбуждая их свечение. Через несколько десятков тысяч лет оболочка рассеется и останется только небольшая очень горячая плотная звезда. Постепенно, довольно медленно остывая, она превратится в белый карлик.



Рис. 18. Планетарная туманность NGC 7293

Таким образом, белые карлики как бы «вызревают» внутри звезд — красных гигантов — и «появляются на свет» после отделения наружных слоев гигантских звезд. В других случаях сбрасывание наружных слоев может происходить не путем образования планетарных туманностей, а путем постепенного истечения атомов. Так или иначе белые карлики, в которых весь водород «выгорел» и ядерные реакции прекратились, по-видимому, представляют собой заключительный этап эволюции большинства звезд. Логическим выводом отсюда является признание генетической связи между самыми поздними этапами эволюции звезд и белыми карликами. Постепенно остывая, они все меньше и меньше излучают, переходя в невидимые «черные» карлики. Это мертвые, холодные звезды очень большой плотности, в миллионы раз плотнее воды. Их размеры меньше размеров земного шара, хотя массы сравнимы с солнечной. Процесс остывания белых карликов длится много сотен миллионов лет. Так кончает свое существование большинство звезд. Однако финал жизни сравнительно массивных звезд может быть значительно более драматическим. Об этом будет идти речь в главе 5.

Мы неоднократно подчеркивали, что скорость эволюции звезд определяется их первоначальной массой. Так как по ряду признаков со времени образования нашей звездной системы — Галактики — прошло около 15—20 млрд лет, то за это конечное (хотя и огромное) время весь описанный эволюционный путь прошли только те звезды, массы которых превышают некоторую величину. По-видимому, эта «критическая» масса всего лишь на 10—12% превышает массу Солнца. С другой стороны, как уже подчеркивалось, процесс образования звезд из межзвездной газопылевой среды происходил в нашей Галактике непрерывно. Он происходит и сейчас. Именно поэтому мы наблюдаем горячие массивные звезды в верхней левой части главной последовательности. Но даже звезды, образовавшиеся в самом начале формирования Галактики, если масса их меньше чем 1,2 солнечной, еще не успели

сойти с главной последовательности. Заметим, кстати, что темп звездообразования в настоящее время значительно ниже, чем много миллиардов лет назад. Солнце образовалось около 5 млрд лет назад, когда Галактика уже давно сформировалась и в основных чертах была сходна с «современной». Вот уже по крайней мере 4,5 млрд лет оно «сидит» на главной последовательности, устойчиво излучая благодаря ядерным реакциям превращения водорода в гелий, протекающим в его центральных областях. Сколько еще времени это будет продолжаться? Расчеты показывают, что наше Солнце станет красным гигантом через 8 млрд лет. При этом его светимость увеличится в сотни раз, а радиус — в десятки. Эта стадия эволюции нашего светила займет несколько сот миллионов лет*). Наконец, тем или иным способом разбухшее Солнце сбросит свою оболочку и превратится в белый карлик. Вообще говоря, нам, конечно, безразлична судьба Солнца, так как с нею тесно связано развитие жизни на Земле.

*) Удивительно, что такую эволюцию Солнца предсказал Уэллс задолго до возникновения теоретической астрофизики. Его путешественник по времени, как, может быть, помнит читатель, увидел в далеком будущем над пустынным океаном огромное красное Солнце... Правда, Уэллс не учел, что температура Земли при этом была бы очень высокой, порядка 300—500°С. Ведь светимость такого Солнца — красного гиганта, очень велика... Но не будем мелочно придирается к великому провидцу...

5. Сверхновые звезды, пульсары и черные дыры

В предыдущей главе была набросана картина эволюции «нормальной» звезды от момента ее зарождения в виде сгустка сжимающейся газопылевой туманности до глубокой «старости» — сверхплотного холодного «черного» карлика. Однако не все звезды проходят такой «спокойный» путь развития. Некоторые на заключительном этапе своей эволюции взрываются, вспыхивая могучим космическим фейерверком. В таких случаях говорят о вспышке «сверхновой» звезды. От «сверхновых» звезд следует отличать «обычные» новые звезды. Мощность вспышки у этих звезд в тысячи раз меньше, чем у сверхновых. Вспыхивают новые звезды сравнительно часто (в нашей Галактике — около ста вспышек в год). Для новых звезд характерна повторяемость вспышек. При каждой такой вспышке звезда выбрасывает с большой скоростью 10^{-3} — 10^{-5} своей массы. Доказано, что все новые звезды являются очень тесными двойными системами (см. гл. 8). Вспышки новых не приводят к существенному изменению структуры звезд. Напротив, вспышка сверхновой — это радикальное изменение, и даже частичное разрушение структуры звезды.

Пока нам еще не известны катастрофы, по своим масштабам более грандиозные, чем вспышки сверхновых*). За какие-нибудь несколько суток вспыхнувшая звезда увеличивает свою светимость иногда в сотни миллионов раз. Бывает так, что в течение короткого времени одна звезда излучает света больше, чем миллиарды звезд той галактики, в которой произошла вспышка.

В отличие от вспышек «обыкновенных» новых звезд, это явление принадлежит к числу весьма редких. В больших звездных системах, подобных нашей Галактике, вспышки сверхновых происходят в среднем раз в столетие или несколько чаще. Поэтому такие вспышки изредка наблюдаются в других галактиках (рис. 19). Если держать систематически «под наблюдением» несколько сот галактик, то можно с большой вероятностью утверждать, что в течение одного года хотя бы в одной из таких галактик вспыхнет сверхновая звезда. Во всяком случае, такой способ наблюдений гораздо более целесообразен, чем ожидание в собственной Галактике вспышки в течение нескольких столетий... Сейчас ежегодно открывают около 20 внегалактических сверхновых. Полное их число достигает почти 600.

Тем не менее история сохранила довольно значительное число хроник и даже научных трактатов, содержащих описание вспышек сверхновых в нашей Галактике. Так, например, сохранился ряд китайских хроник, в которых рассказывается о появлении на небе в июле 1054 г. «звезды-гостя». Эта звезда была настолько ярка, что ее видели даже днем; по своему блеску она превосходила Венеру, — самое яркое светило неба после Солнца и Луны. Несколько месяцев звезда была видна невооруженным глазом, а потом постепенно погасла.

Через семь с половиной веков французский астроном Шарль Мессье, составляя знаменитый каталог туманностей, под № 1 поместил объект необычайной формы. Впоследствии этот объект получил название «Крабовидная туманность». Фотография этой туманности в красных лучах приведена на рис. 20 (вверху). Дальнейшие наблюдения показали, что Крабовидная туманность медленно расширяется, как бы «расползаясь» по небу. Так как расстояние до этой туманности равно 2000 пк, то заметное, хотя и медленное, увеличение ее размеров на небе означает, что скорость разлета образующих ее газов огромна. Эта скорость достигает 1500 км/с, т. е. больше, чем в сто раз превосходит скорости искусственных спутников Земли.

*) В последнее время, по-видимому, обнаружены удивительные объекты — взрывающиеся ядра галактик, явление несравненно более грандиозное, чем вспышка сверхновых (см. гл. 6).



Рис. 19. Вспышка сверхновой в далекой галактике. На правой фотографии, полученной в 1940 г., сверхновая видна, на левой, полученной в 1931 г., — нет

Между тем скорость движения обычных газовых туманностей в Галактике редко превышает 20 — 30 км/с. Только гигантских масштабов взрыв мог сообщить такой большой массе газа столь высокую скорость.

Из наблюдаемой скорости расплывания Крабовидной туманности следует, что приблизительно 900 лет назад вся туманность была сосредоточена в очень малом объеме. В сочетании с тем, что Крабовидная туманность находится как раз в той области неба, где некогда вспыхнула удивительная «звезда-гостья», наблюдаемая скорость расширения доказывает, что эта туманность не что иное, как остаток грандиозной космической катастрофы — вспышки сверхновой, которая произошла в 1054 г.

В истории астрофизики последних двух десятилетий Крабовидная туманность сыграла особенно важную роль. И это не случайно. Ведь эта туманность — один из ближайших и поэтому лучше других исследовавшихся остатков взрыва звезды. Тут и там по небу разбросаны удивительные, характерной формы туманности — остатки некогда вспыхивавших в нашей звездной системе сверхновых. Две такие туманности приведены на рис. 21 и 22. Все они (за немногими исключениями) «старше» Крабовидной. Так, возраст туманностей на рис. 21 и 22 исчисляется несколькими десятками тысячелетий. Казалось бы, очень легко спутать такие объекты с обыкновенными газовыми, так называемыми «диффузными» туманностями, подобными приведенной на рис. 23. Есть, однако, два обстоятельства, которые безошибочно позволяют отличить туманности — остатки вспышек сверхновых звезд — от обыкновенных туманностей.

В 1949 г. было обнаружено, что Крабовидная туманность является мощным источником радиоизлучения. Вскоре удалось объяснить природу этого явления: излучают сверхэнергичные электроны, движущиеся в магнитных полях, находящихся в этой туманности. Раньше мы уже упоминали, что та же причина объясняет общее радиоизлучение Галактики. Таким образом, при вспышке сверхновой звезды каким-то способом (пока еще до конца не понятным) образуется огромное количество частиц сверхвысоких энергий — космических лучей. Применяя теорию «синхротронного» излучения релятивистских электронов, по измеренному потоку

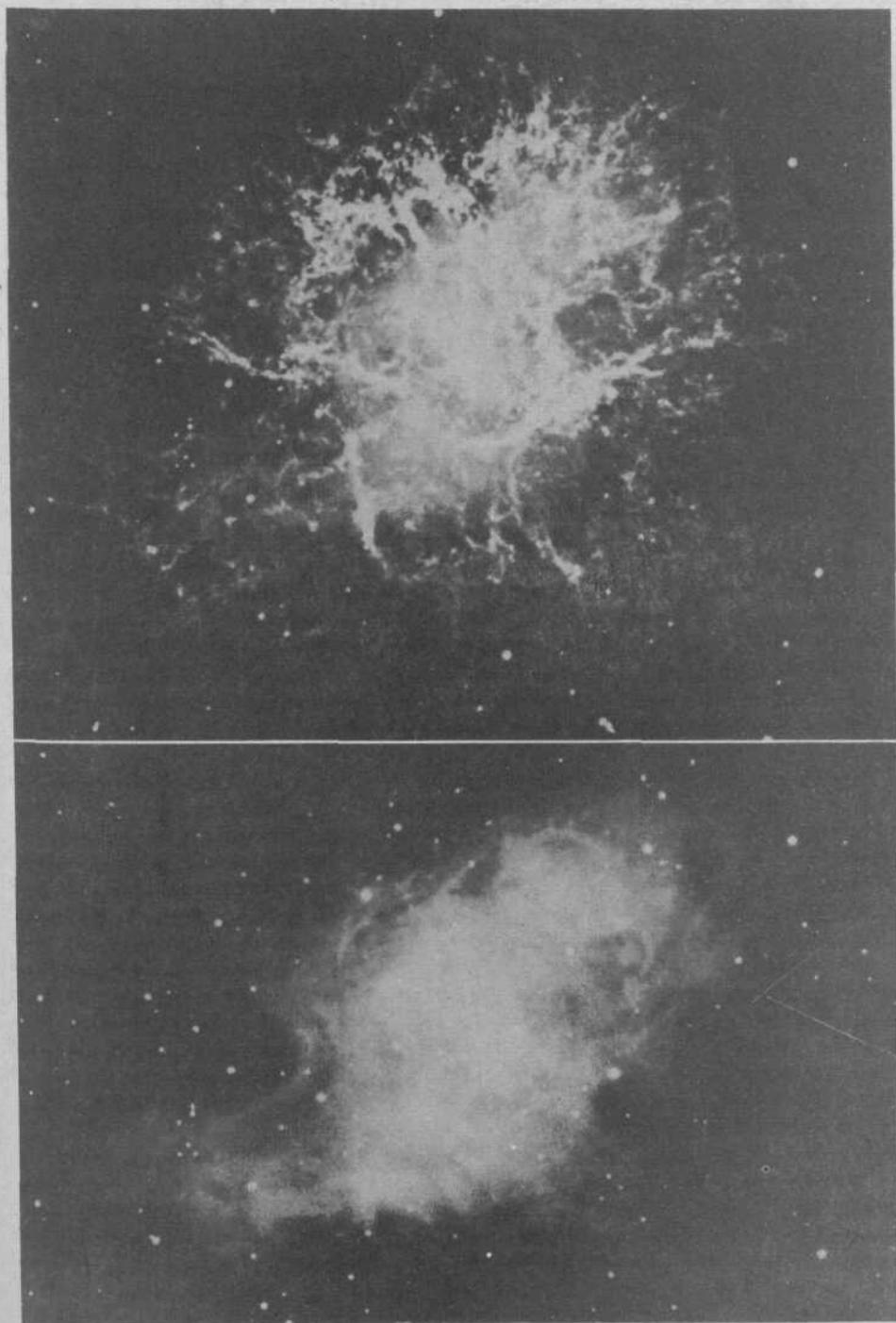


Рис. 20. Крабовидная туманность

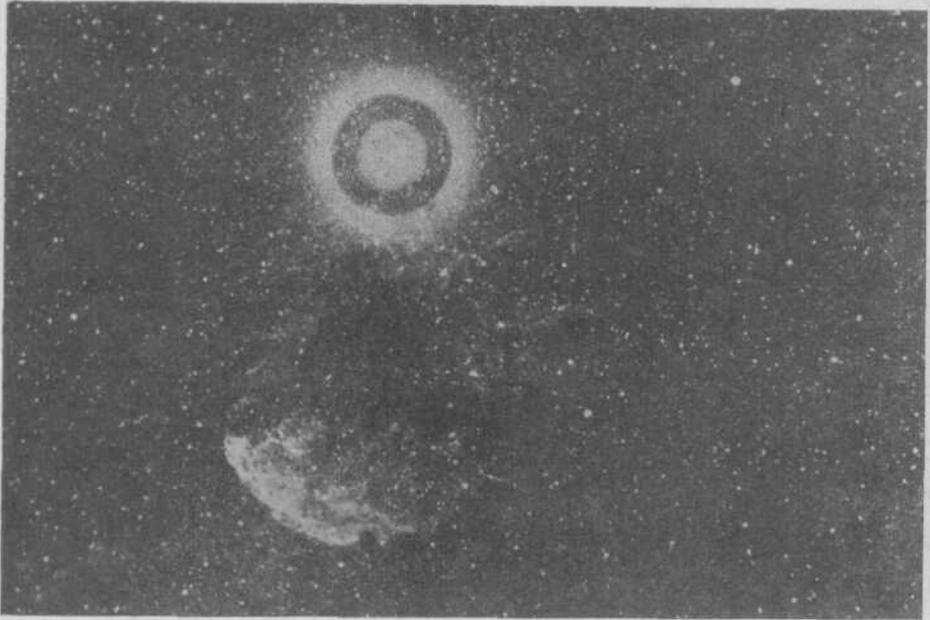


Рис. 21. Туманность IC 443



Рис. 22. Волокнистые туманности в созвездии Лебедя



Рис. 23. Диффузная туманность

радиоизлучения и известным расстояниям и размерам туманности удалось оценить полное количество находящихся в ней космических лучей. По мере расширения и рассеяния туманности заключенные в ней космические лучи выходят в межзвездное пространство. Если учесть, как часто вспыхивают сверхновые звезды в Галактике, то образующихся при этих вспышках космических лучей оказывается достаточно для заполнения ими всей Галактики с наблюдаемой плотностью.

Таким образом, впервые со всей очевидностью удалось доказать, что вспышки сверхновых звезд являются одним из основных источников пополнения Галактики космическими лучами; кроме того, они обогащают межзвездную среду тяжелыми элементами. Это имеет огромное значение для эволюции звезд и всей Галактики в целом.

Крабовидная туманность обладает еще одной удивительной особенностью. Как показал автор этой книги в 1953 г., ее оптическое излучение, по крайней мере на 95%, обусловлено также сверхэнергичными электронами, т. е. имеет «синхротронную» природу. Энергия электронов, излучающих в оптическом диапазоне длин волн, в сотни раз больше энергии электронов, излучающих радиоволны, она достигает 10^{11} — 10^{12} эВ. На основе новой теории оптического излучения Крабовидной туманности удалось предсказать, что это излучение должно быть поляризованным. Советские и американские наблюдения полностью подтвердили этот вывод теории.

Тем самым все теоретические выводы, касающиеся природы радиоизлучения и оценок количества космических частиц, нашли полное подтверждение. В настоящее время синхротронное оптическое излучение обнаружено еще у нескольких объектов, преимущественно радиогалактик. Его исследование имеет очень большое значение для астрономии и физики.

В 1963 г. при помощи ракеты с установленными на ней приборами удалось обнаружить довольно мощное рентгеновское излучение от Крабовидной туманности. В следующем, 1964 г., во время покрытия этой туманности Луной удалось показать, что этот источник рентгеновского излучения протяженен, хотя его угловые размеры в 5 раз меньше угловых размеров «Краба». Следовательно, рентгеновское излучение испускает не звезда, некогда вспыхнувшая как сверхновая, а сама туманность. Было доказано, что рентгеновское излучение Крабовидной туманности имеет также синхротронную природу и обусловлено сверхэнергичными релятивистскими электронами с энергией порядка $10^{13} - 10^{14}$ эВ.

Дальнейшие наблюдения показали, что все без исключения туманности — остатки вспышек сверхновых звезд — оказываются более или менее мощными источниками радиоизлучения, имеющего ту же природу, что и у Крабовидной туманности. Особенно мощным источником радиоизлучения является туманность, находящаяся в созвездии Кассиопеи. На метровых волнах поток радиоизлучения от нее в 10 раз превышает поток от Крабовидной туманности, хотя она дальше последней. В оптических лучах эта быстро расширяющаяся туманность очень слаба. Как сейчас доказано, туманность в Кассиопее — остаток вспышки сверхновой, имевшей место около 300 лет назад. Не совсем ясно, почему вспыхнувшую звезду тогда не заметили. Ведь уровень развития астрономии в Европе был тогда довольно высок.

Туманности — остатки вспышек сверхновых звезд, случившихся даже десятки тысяч лет назад, выделяются среди других туманностей своим мощным радиоизлучением. В частности, источниками радиоизлучения, правда, раз в 10 менее мощными, чем Крабовидная туманность, являются туманности, показанные на рис. 21 и 22.

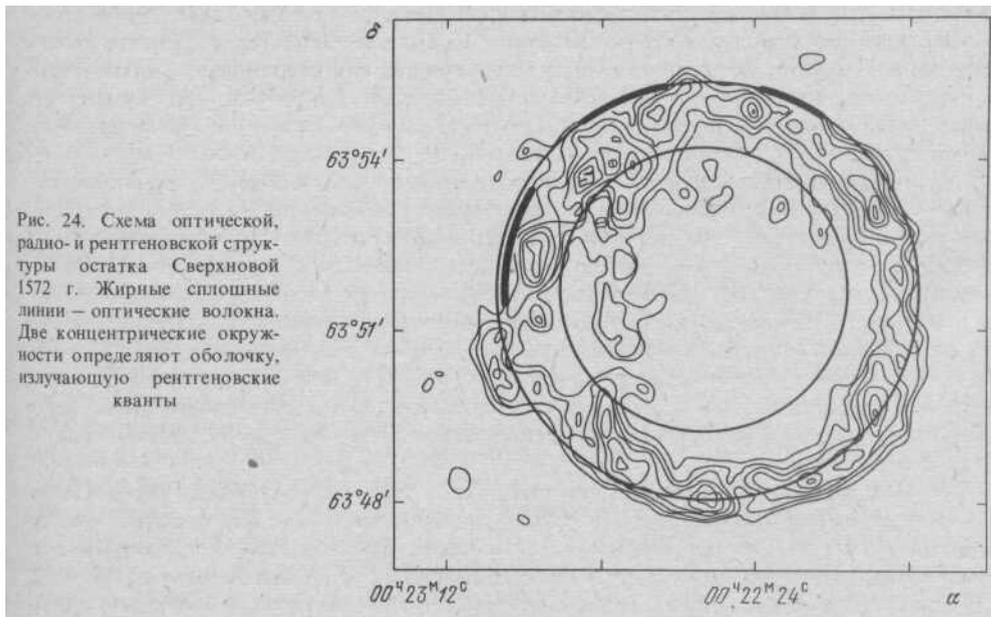
Другим отличительным признаком туманностей, — остатков вспышек сверхновых звезд, — является испускаемое ими рентгеновское излучение. Это излучение полностью поглощается земной атмосферой и может наблюдаться только с помощью аппаратуры, установленной на ракетах и спутника*. Особенно ценные результаты были получены в последние годы на специализированном спутнике «Эйнштейн», запущенном в ознаменование столетия со дня рождения великого ученого. На рис. 24 приведена схема структуры рентгеновского изображения сверхновой, которую наблюдал Тихо Браге в 1572 г. Рентгеновское излучение в таких туманностях вызвано нагревом межзвездного газа до температуры в несколько миллионов градусов движущимися через него с большими скоростями наружными слоями взорвавшейся звезды. Как в радио, так и в рентгеновских лучах структура таких источников носит «оболочечный» характер. В противоположность этому, Крабовидная туманность и несколько сходных с ней объектов в рентгеновских лучах не имеют оболочек (см. рис. 20).

До сих пор речь шла преимущественно о туманностях, образующихся при вспышках сверхновых звезд. Что же можно сказать о самих вспыхивающих звездах? Как уже упоминалось, данные наблюдений относятся к сверхновым, вспыхивающим в других звездных системах. В нашей Галактике последняя такая вспышка наблюдалась в 1604 г. Эту звезду, в частности, наблюдал Кеплер. Тогда еще не был изобретен телескоп, а спектральный анализ — этот мощнейший метод астрономических исследований — стал применяться только спустя два с половиной столетия...

По наблюдениям вспышек в других галактиках удалось установить, — что сверхновые бывают двух типов. Сверхновые I типа — это довольно старые звезды с мас-

сой, лишь немного превосходящей солнечную. Такие сверхновые-вспыхивают в эллиптических галактиках, а также в спиральных звездных системах. Мощность излучения у таких сверхновых особенно велика, хотя массы выброшенных газовых оболочек не превышают нескольких десятых массы Солнца.

Так называемые сверхновые II типа вспыхивают в спиральных галактиках. Они никогда не вспыхивают в эллиптических звездных системах. Сверхновые этого типа, как принято думать, массивные молодые звезды. Именно по этой причине они, как правило, наблюдаются в спиральных ветвях, где еще продолжает идти процесс



звездообразования. Не исключено, что если не большая, то по крайней мере значительная часть горячих массивных звезд спектрального класса O кончат свое существование вспышкой сверхновой этого типа.

Существует несколько гипотез о причине взрывов звезд, наблюдаемых как сверхновые. Однако общепризнанной теории, основывающейся на известных фактах и могущей предсказать новые явления, пока нет. Можно, однако, не сомневаться, что такая теория будет создана в самом ближайшем времени. По всей вероятности, причиной взрыва является катастрофически быстрое выделение потенциальной энергии тяготения при «спаде» внутренних слоев звезды к ее центру.

Мы сейчас остановимся на этой важной для всей современной астрофизики проблеме более подробно. В предыдущей главе была нарисована общая картина образования звезд из межзвездной среды. Решающим фактором в этом процессе является сила всемирного тяготения, которая всегда стремится сблизить отдельные части вещества и тем самым образовать более компактные тела. Можно сразу же задать «детский» вопрос: «А есть ли предел уплотнения вещества под воздействием силы тяжести? Не может ли звезда в конце концов сжаться в точку?» Хорошо известно, что многие из так называемых «детских» вопросов самым глубоким образом затрагивают коренные проблемы мироздания и бытия. Может быть, именно поэтому они и называются детскими... Сформулированный выше вопрос как раз относится к этой категории.

Как же отвечает на него современная наука? Когда протозвезда сожмется до таких размеров, что температура в ее недрах станет достаточно высокой и пойдут

ядерные реакции, она перестанет сжиматься и будет долгое время находиться в равновесном состоянии. Это равновесие осуществляется в каждом элементе ее объема под действием двух равных и противоположно направленных сил: гравитации и разности газового давления. Первая сила стремится сжать звезду, вторая — расширить.

Звезда в таком равновесном состоянии находится на главной последовательности, о чем речь шла в предыдущей главе. Но равновесие не будет продолжаться вечно. Когда ядерное горючее — водород в недрах звезды — будет исчерпано, наступят радикальные и довольно быстрые перемены в ее жизни. В предыдущей главе мы писали, что после исчерпания водородного горючего из центральной части звезды образуется весьма горячее и плотное ядро, сама звезда превращается в красный гигант, а затем, после «сброса» оболочки — в белый карлик.

Но такой путь эволюции могут проделать только звезды, у которых массы, оставшиеся после сброса оболочки, не слишком велики, например не больше 1,2 солнечной массы. Звезды, у которых оставшаяся масса находилась в пределах 1,2 — 2,5 солнечных масс, как показывают надежные теоретические расчеты, не могут образовать устойчивую конфигурацию белого карлика. Они катастрофически быстро сжимаются до ничтожных размеров порядка 10 км, причем их средняя плотность достигает 10^{15} г/см³, что превышает плотность атомного ядра. Как показывают специальные теоретические исследования, вещество таких звезд состоит из чрезвычайно плотно «упакованных» нейтронов, ибо свободные электроны как бы «вдавливаются» в протоны. Именно поэтому такие объекты получили название «нейтронных звезд». Расчеты показывают, что первоначальная температура поверхности у нейтронных звезд около миллиарда Кельвинов. В дальнейшем нейтронная звезда будет быстро остывать, а температура ее поверхности быстро падать.

Открытые теоретически «на кончике пера» нейтронные звезды должны были представлять собой объекты, чрезвычайно трудные для наблюдений. В самом деле, совершенно безнадежно обнаружить тепловое оптическое излучение такой звезды по причине ничтожно малой излучательной поверхности. Если, например, температура поверхности нейтронной звезды около 6000 К (т. е. такая же, как у Солнца), а радиус равен 6 км (т. е. примерно в 100000 раз меньше солнечного), то светимость ее будет в десять миллиардов раз меньше, чем у Солнца. Это означает, что ее абсолютная величина будет близка к 30. Если бы даже такая звезда находилась от нас на расстоянии всего лишь 1 пк (т. е. ближе любой другой звезды), ее блеск соответствовал бы объекту 25-й величины.

Высокая температура поверхности образовавшихся после взрыва сверхновых нейтронных звезд позволяла надеяться, что можно будет обнаружить их рентгеновское излучение.

В самом деле, если температура поверхности такой звезды миллиард кельвинов, то, согласно известному закону Стефана — Больцмана, поток излучения с единицы поверхности нагретого непрозрачного тела пропорционален четвертой степени его температуры; наша крохотная нейтронная звезда будет излучать $\sim 10^{45}$ эрг/с, т. е. больше, чем вся наша Галактика. Однако совершенно очевидно, что такую огромную мощность нейтронная звезда будет излучать только очень короткий промежуток времени. Остывание будет происходить главным образом за счет излучения нейтрино, которые в больших количествах образуются во всем ее объеме при столь высокой температуре. Но даже если температура поверхности была бы «все-го лишь» 10 млн Кельвинов, мощность ее рентгеновского излучения была бы $\sim 10^{37}$ эрг/с, что в несколько тысяч раз больше мощности всего излучения Солнца.

Еще в 1963 г. в созвездии Скорпиона был открыт с помощью счетчика фотонов, установленного на борту ракеты, первый рентгеновский источник, находящийся за пределами Солнечной системы. Вскоре было открыто рентгеновское излучение от Крабовидной туманности (см. выше). В настоящее время известно уже

несколько сотен рентгеновских источников, причем многие из них отождествляются с туманностями — остатками вспышек сверхновых. Большая часть рентгеновских источников — звездообразные объекты. Сразу же после открытия в 1964—1965 гг. многие астрономы и физики решили, что наконец-то долгожданные нейтронные звезды обнаружены... Увы, их ликование, как это часто бывало в истории астрономии, оказалось преждевременным. Понадобилось еще 20 лет, чтобы обсерватория «Эйнштейн» обнаружила в некоторых остатках вспышек сверхновых точечные рентгеновские источники, которые можно интерпретировать как излучение поверхности нейтронной звезды. Теоретики подсчитали, что остывание нейтронных звезд происходит даже быстрее, чем считали раньше: всего лишь за несколько месяцев температура поверхности нейтронной звезды упадет значительно ниже десяти миллионов Кельвинов, а такой объект методами современной рентгеновской астрономии уже не сможет быть обнаружен. Столь быстрый срок остывания нейтронных звезд, во всяком случае за время, много меньшее, чем средний промежуток между вспышками сверхновых, как будто бы означает, что среди наблюдаемых космических рентгеновских источников нейтронных звезд быть не может*).

Таким образом, надежда обнаружить нейтронные звезды по их тепловому рентгеновскому излучению оказалась вроде бы преждевременной.

И вдруг, буквально «как гром среди ясного неба», было сделано открытие, превратившее таинственные нейтронные звезды в наблюдаемые объекты. Речь идет об открытии *пульсаров*, едва ли не самом впечатляющем открытии в астрономии за несколько последних десятилетий.

Мы слишком часто злоупотребляем словом «открытие», отчего оно постепенно «стирается». Между тем в истории науки количество подлинных открытий очень невелико...

Даже по самым строжайшим критериям обнаружение пульсаров действительно является подлинным открытием. Это открытие, как это всегда бывает с настоящим открытием, произошло случайно. Летом 1967 г. аспирантка известного английского радиоастронома Хьюиша мисс Бэлл неожиданно обнаружила на небе совершенно необычный радиоисточник. Этот источник излучал кратковременные радиоимпульсы, которые строго периодически, через каждые 1,33 секунды, повторялись. Вскоре были обнаружены еще три таких же источника с другими также «почти секундными» периодами.

Это открытие настолько ошеломило исследователей, что они, заподозрив, что эти сигналы имеют искусственное происхождение и посылаются некими «сверхцивилизациями» (см. часть 3 нашей книги), засекретили эти наблюдения и в течение почти полугода никто об этом не знал — случай беспрецедентный в истории астрономии... Только после того, как они убедились, что эти сигналы — не результат активности внеземных разумных цивилизаций, результаты наблюдений были опубликованы.

Не сразу было понято, что причиной строгой периодичности радиоимпульсов от этих новых источников (получивших название «пульсары») является быстрое вращение звездообразных объектов. Только вращение массивного тела может объяснить удивительное постоянство (с точностью до стомиллионной доли) периодов пульсаров. Более тщательные наблюдения показали, что на самом деле периоды не строго постоянны, а медленно растут. Представим себе, что излучение радиоволн не равномерно по всем направлениям, а сосредоточено внутри некоторого конуса, ось которого образует определенный угол с осью вращения. Теперь вообразим себе наблюдателя, который в какой-то момент времени находится на продолжении оси конуса. Ясно, что он сможет наблюдать радиоизлучение. Это

*) И все же оказалось, что рентгеновские звезды — это нейтронные звезды в двойных системах (см. гл. 8). Но это стало ясно только после 1970 г.

будет возможно в течение некоторого времени до тех пор, пока из-за вращения звезды ось конуса уйдет достаточно далеко. Однако через промежуток времени, равный периоду вращения звезды, радиоизлучение снова можно будет наблюдать. Эта простая модель пульсара изображена на рис. 25.

Что же это за звезды, быстрое вращение которых есть причина наблюдаемого явления пульсаров? В 1967 г. был открыт пульсар с рекордно коротким периодом в 0,033 с (об этом замечательном пульсаре речь пойдет дальше). Так быстро вращаться может только очень маленькое тело. Ведь линейная скорость вращения на экваторе определяется школьной формулой: $v = 2\pi R/T$, где R — радиус вращающегося тела, T — период его вращения. Из этой формулы следует, что при $T = 1/30$ с,

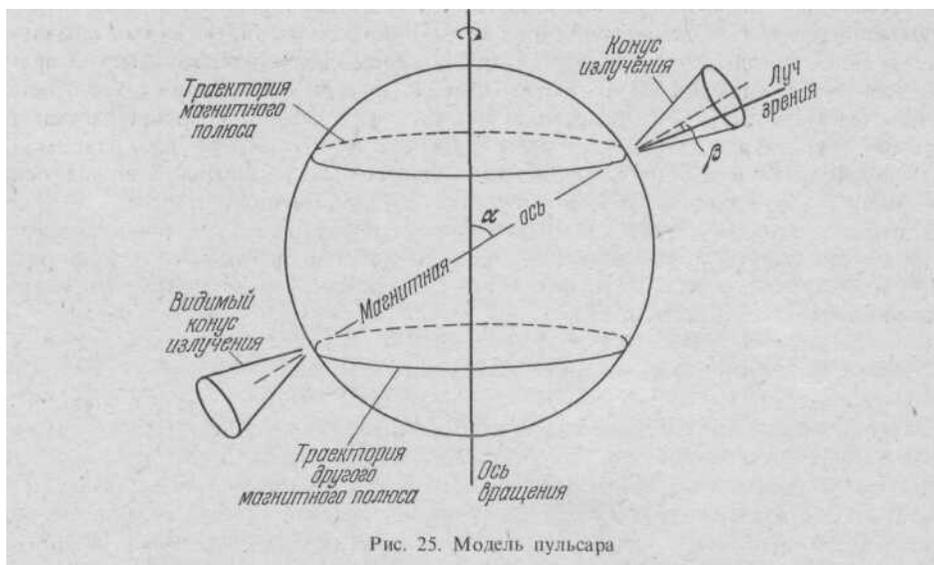


Рис. 25. Модель пульсара

учитывая, что скорость вращения никак не может превышать скорость света, радиус тела не превышает 1500 км, что в 4 раза меньше Земли. Но это является очень грубой оценкой верхней границы размеров вращающегося тела. Так как линейная экваториальная скорость вращения по простым причинам должна быть в десятки раз меньше скорости света, непосредственно ясно, что линейные размеры пульсаров не могут превышать несколько десятков километров. Но если это так, то пульсары — это не что иное, как нейтронные звезды!

Имеется и другое доказательство этого важнейшего вывода. Упомянутый выше рекордно-короткопериодический пульсар (получивший название NP 0532) расположен... в центре Крабовидной туманности! Другой пульсар, период которого всего лишь в три раза длиннее (0,089 с), также находится внутри туманности, являющейся более старым остатком вспышки сверхновой. Итак, пульсары находятся там, где положено находиться нейтронным звездам, которые должны образоваться при вспышках сверхновых! То обстоятельство, что не во всех остатках вспышек сверхновых наблюдаются пульсары и только малая часть пульсаров (их сейчас известно свыше трехсот) находится в остатках сверхновых, не должно нас смущать. Дело в том, что пульсар может быть обнаружен только при «благоприятной» по отношению к нам ориентации его оси вращения. Это ясно из рис. 25. Если учесть это, оказывается, что едва ли 5% всех пульсаров можно хотя бы в принципе наблюдать. Поразительно, что Крабовидная туманность, помимо тех замечательных особенностей, о которых говорилось выше, еще имеет и пульсар, «удачно» ориентированный по отношению к Земле...

С другой стороны, легко понять, почему большинство пульсаров не связано с туманностями — остатками вспышек сверхновых. Дело в том, что последние представляют собой подобно планетарным туманностям сравнительно короткоживущие образования. Благодаря расширению образующих их газовых волокон и находящихся там космических лучей они «расплываются» и через сотню тысяч лет перестают быть наблюдаемыми. Между тем возраст большинства пульсаров исчисляется миллионами и десятками миллионов лет. Это следует из наблюдаемого очень медленного замедления их вращения. Ясно, например, что если за год период какого-нибудь пульсара изменится на одну десятиллионную долю, то его возраст должен быть близок к десяти миллионам лет. Итак, пульсары «переживают» туманности, в которые они были «погружены» при рождении.

На основании наблюдений пульсаров можно нарисовать такую картину развития нейтронной звезды. Она образуется при вспышке сверхновой как быстро вращающийся объект огромной плотности. Причину быстрого вращения понять легко: это следствие одного из основных законов механики — сохранение момента количества движения. Проиллюстрируем этот закон на примере воображаемой звезды, являющейся «двойником» нашего Солнца. Период ее вращения вокруг оси очень велик — около месяца (о вращении звезд подробнее см. гл. 10).

Допустим теперь, что по каким-то причинам эта звезда катастрофически сжалась, причем ее радиус R стал равным 10 км, т. е. уменьшился почти в 100000 раз. Если ее масса M при этом не изменилась, то из закона сохранения момента количества движения

$$vMR = \text{const}$$

следует, что экваториальная скорость увеличится в 100000 раз и составит почти половину скорости света! Период-же вращения уменьшится почти в десять миллиардов раз и будет меньше, чем тысячная доля секунды.

На самом деле, так как часть момента количества движения уносится выброшенным во время вспышки сверхновой веществом, экваториальная скорость вращения образовавшейся при этой катастрофе нейтронной звезды будет немного меньше, а период вращения длиннее, но суть дела от этого не меняется: только что образовавшаяся нейтронная звезда должна вращаться с огромной скоростью.

Теперь обратим наше внимание на другое обстоятельство. Как уже упоминалось в гл. 2, на звездах имеются магнитные поля. Допустим, что на поверхности звезды, которая должна вспыхнуть как сверхновая, магнитное поле невелико, скажем ~ 100 Э (это все же больше, чем на поверхности нашего Солнца). При катастрофическом сжатии звезды должен остаться неизменным поток магнитных силовых линий через ее поверхность, т. е.

$$H \cdot R^2 = \text{const},$$

и если радиус R уменьшается в 100000 раз, то магнитное поле H обязано увеличиться в 10 миллиардов раз, достигнув чудовищного значения 10^{12} Э! Чтобы почувствовать силу этого магнитного поля, приведем такой пример. Плотность магнитной энергии W_m связана с величиной магнитного поля формулой

$$W_m = H^2/8\pi.$$

При $H = 10^{12}$ Э W_m будет равно $4 \cdot 10^{22}$ эрг/см³. Величина $\rho_m = W_m/c^2$, согласно принципу эквивалентности массы и энергии, есть плотность вещества, соответствующего плотности энергии W_m . Оказывается, что $\rho_m \approx 50$ г/см³, что плотнее всех известных на Земле веществ. Плотность же «обычного» вещества в атмосфере нейтронной звезды на много порядков меньше. Такая ситуация нигде в космосе не встречается.

Итак, нейтронная звезда не только быстро вращается, но и сильнейшим образом намагничена, причем ее магнитная ось не совпадает с осью вращения. Оказывается, что магнитная ось нейтронной звезды как раз и является осью того конуса, в пределах которого направлено радиоизлучение (см. рис. 25). Однако истинная причина столь мощного радиоизлучения давно уже остывшей и, казалось бы, мертвой нейтронной звезды пока остается неясной, хотя в разного рода остроумных гипотезах недостатка нет. Несомненно только одно: механизм радиоизлучения должен быть каким-то образом связан с магнетизмом и быстрым вращением нейтронных звезд. Именно высокая «активность» нейтронных звезд оказалась совершенно неожиданной и непредсказуемой. Только поэтому нейтронные звезды были обнаружены совсем не там, где их искали... Это и дает нам право называть обнаружение нейтронных звезд подлинным открытием.

Как уже говорилось выше, период вращения пульсаров — нейтронных звезд непрерывно растет. Так как кинетическая энергия вращающегося тела обратно пропорциональна квадрату периода, то налицо непрерывное уменьшение кинетической энергии вращения пульсаров, обусловленное их торможением. Каковы же причины торможения? По-видимому, основной причиной торможения является излучение этими сильно намагниченными вращающимися объектами сверхдлинных электромагнитных волн, частота которых равна частоте вращения пульсаров. Если, например, эта частота равна 1 «обратной секунде» («герцу») (типичное значение для пульсаров) длина волны будет 300000 км. Существуют и другие причины торможения, например выбрасывание из пульсаров струй вещества. Для очень молодых пульсаров, у которых период вращения меньше одной сотой секунды, основную роль в торможении может играть излучение так называемых «гравитационных волн» — процесс, являющийся следствием общей теории относительности Эйнштейна. Заметим, однако, что пока еще гравитационные волны прямыми наблюдениями не обнаружены, что объясняется огромными экспериментальными трудностями. Автор, однако, не будет удивлен, если первым космическим объектом, от которого будут обнаружены гравитационные волны, будет все та же Крабовидная туманность, вернее, находящийся там пульсар NP 0532.

Об этом замечательном пульсаре стоит еще сказать пару фраз отдельно. Это — самый молодой и быстрее всех вращающийся пульсар. Его период растет (относительно) значительно быстрее, чем у других пульсаров, что естественно объясняется его «молодостью». Но, пожалуй, его самым замечательным свойством является то, что он наряду с радиоимпульсами посылает к нам оптические и рентгеновские импульсы. На рис. 20 в центральной части Крабовидной туманности видна слабая звездочка 16-й величины. Это и есть пульсар, который излучает в оптических лучах короткими импульсами с периодом в 1/30 с. Выяснилось это в начале 1969 г. сразу же после открытия пульсара в Крабовидной туманности. Уже давно астрономы подозревали, что эта слабая звездочка должна быть как-то связана со «звездным» остатком вспышки Сверхновой 1054 г., приведшей к образованию Крабовидной туманности. Когда был открыт «радиопульсар», возникла смелая идея: а не является ли объект, который на протяжении почти 100 лет всеми считался обыкновенной звездочкой, совсем не тем, за кого его принимали? Проверка этого предположения была сделана с большим остроумием и предельной наглядностью. В телескоп был вставлен вращающийся непрозрачный диск, на периферии которого было просверлено восемь отверстий, причем расстояние между отверстиями равнялось их диаметрам. Если представить себе, что во время экспозиции какой-нибудь звезды диск вращается, то для получения негатива такой же плотности, что и без диска, нужно экспозицию примерно удвоить. Теперь представьте себе, что фотографируется не обыкновенная звезда, а импульсный источник света, причем импульсы периодически повторяются. Тогда, если период вращения диска равен периоду повторения световых импульсов от источника, можно, меняя фазу вращения ди-

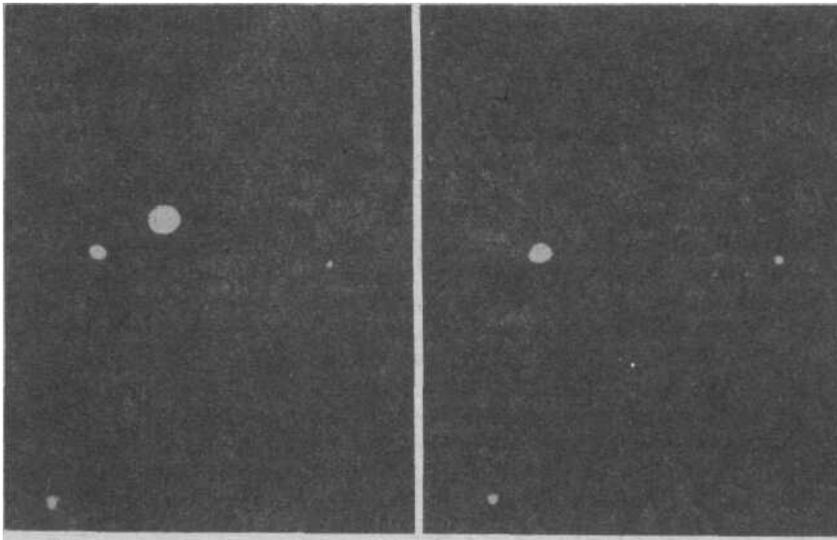


Рис. 26. Фотография пульсара NP 0532, полученная с помощью стробоскопа

ска, в одном случае добиться полного «погашения» источника, а в другом — полностью без потерь на поглощение в диске, использовать излучение источника. Такое устройство сходно с детской игрушкой, называемой «стробоскоп».

Вблизи центральной звездочки в Крабовидной туманности находится другая, вполне заурядная, ничего общего с туманностью не имеющая и случайно на нее проектирующаяся. На рис. 26 приведены фотографии центральной части Крабовидной туманности, снятые через описанный выше вращающийся диск. Диск вращается со скоростью 30 оборотов в секунду (что соответствует периоду пульсара NP 0532), но с разными фазами. Снимок этот поразителен в своей наглядности: в одном случае яркость центральной звездочки гораздо больше, чем у «соседки» (нормальной звезды!), а во втором — центральная звезда совсем не видна. Заметим, что на обоих снимках нормальная звезда выглядит одинаково. Эти снимки с полной очевидностью демонстрируют, что давно известная центральная «звезда» Крабовидной туманности — это пульсар. На рис. 27 приведена «кривая блеска» этого пульсара, полученная обычным фотоэлектрическим методом.

Оптическое излучение пульсара NP 0532 ни в коем случае не является тепловым — в противном случае он никогда бы не наблюдался. Автор этой книги показал, что это излучение является синхротронным, т. е. обусловлено релятивистскими электронами, движущимися в магнитном поле. Излучает,

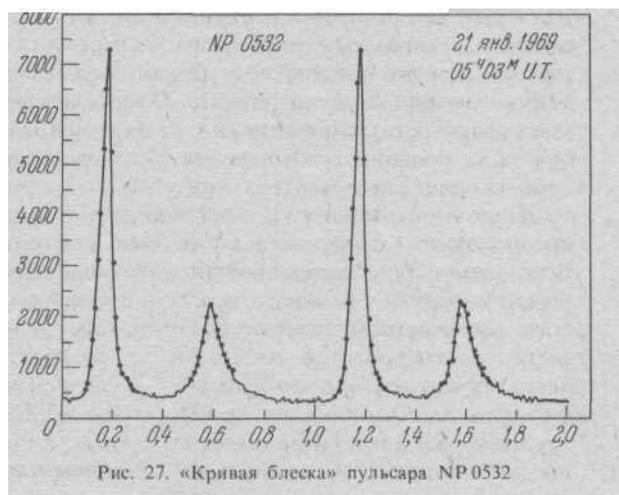


Рис. 27. «Кривая блеска» пульсара NP 0532

конечно, не поверхность нейтронной звезды, а ее «атмосфера», вернее — «магнитосфера», размеры которой в сотню раз больше размеров нейтронной звезды.

Таким образом, в пульсарах имеет место ускорение заряженных частиц до огромных энергий. Похоже на то, что эти частицы попадают из магнитосферы пульсара в Крабовидную туманность и обеспечивают свечение последней.

Можно было бы еще много говорить о замечательных свойствах пульсаров. Например, изучая поляризацию их радиоизлучения, как оказывается, можно определить напряженность межзвездного магнитного поля. Это, пожалуй, лучший из существующих методов определения этой важнейшей характеристики межзвездной среды. Сложнейшие вопросы ставят пульсары и перед теоретиками. Так, внутренние слои пульсара должны находиться в сверхпроводящем и в сверхтекучем состоянии. Для двух самых молодых пульсаров, находящихся в оболочках сверхновых, наблюдались внезапные «сбои» в периодах, что неизбежно должно быть связано с изменением периода вращения. Эти так называемые «звездотрясения», по-видимому, связаны с какой-то перестройкой внутренней структуры пульсаров. Их природа, как и многое другое, касающееся пульсаров, пока неизвестна. Почему, например, оптическое кванты излучает только самый молодой пульсар NP 0532, находящийся в «Крабе»? Похоже на то, что генерация заряженных частиц сверхвысоких энергий должна быстро затухать со временем, но почему? В гл. 8 мы немного коснемся еще одного интересного аспекта, связанного с пульсаром в Крабовидной туманности. О другом недавно появившемся методе изучения нейтронных звезд речь будет также идти в гл. 8. А теперь мы перейдем к другой, не менее волнующей проблеме.

Еще в конце тридцатых годов была доказана теорема, согласно которой давление газа в недрах звезды, лишенной источников энергии (например, внутри нейтронной звезды), не может уравновесить гравитационное притяжение наружных слоев звезды, если масса последней превышает некоторый предел. Этот предел не так уж велик и только немногим превышает 2,5 солнечной массы.

Но ведь масса первоначально образовавшейся из облака межзвездного газа протозвезды может значительно превосходить этот предел. Что же будет тогда? До последнего времени неявно принималось, что звезда в стадии красного гиганта «сбрасывает» излишек массы тем или иным способом (см. гл. 4). Но ведь это совершенно необязательно! Звезда не живое существо, и поэтому она не может точно «помнить», сколько же именно ей надо сбросить с себя вещества, чтобы не попасть в «неприятное положение»...

А положение такой звезды, выражаясь образно, мы вполне можем назвать незавидным. Так как перепад газового давления уже не может противодействовать силе притяжения, наступит катастрофа: звезда начнет с огромной скоростью сжиматься, одновременно уплотняясь. Она будет как бы раздавлена собственным весом. За каких-нибудь несколько секунд звезда может превратиться в сверхплотную «точку». Это явление, которое уже давно занимает умы теоретиков, получило название «гравитационный коллапс».

Но сожмется ли «коллапсирующая» звезда до точечных размеров? То, что будет написано ниже, неподготовленному читателю может показаться фантастикой. И тем не менее это актуальнейшая, строго научная задача современной физики и астрофизики. Итак, звезда будет быстро сжиматься, причем ее масса будет оставаться неизменной. Очевидно, что при этом так называемая «параболическая», или, как многие говорят в последние годы, «вторая космическая», скорость будет непрерывно расти по закону $V_{\text{пар}} \propto r^{-1/2}$, где r — радиус звезды. Для поверхности Солнца параболическая скорость примерно 700 км/с. Если бы наше Солнце сжалось до таких размеров, что его радиус стал равным 3 км (при этом его средняя плотность была бы около 10^{16} г/см³, что в 10 раз превышает плотность атомного ядра), то

параболическая скорость стала бы равной скорости света c . Вот тут-то и начинаются чудеса! Вступают в действие законы общей теории относительности, причем в сильнейшей степени. Прежде всего, в очень сильном гравитационном поле, как известно, течение времени замедляется. Поэтому те несколько секунд, которые требуются для катастрофического спада звезды в точку, отсчитал бы воображаемый наблюдатель, находящийся на сжимающейся звезде. Между тем при подходе к упомянутому выше критическому радиусу, для которого $V_{\text{пар}} \approx c$ (этот радиус, пропорциональный массе тела, называется «шварцшильдовским»), время по часам «земного наблюдателя» будет протекать все медленнее и медленнее и, наконец, остановится, когда звезда сожмется до этого критического радиуса.

Поясним это важное обстоятельство следующим примером. Вообразим себе астронавта, который летит в глубинах Галактики на звездолете. Улетая в космос, он обязался каждую секунду посылать на Землю радиосигнал, который принимают его оставшиеся друзья. Теперь представим себе, что он подлетает к затерявшейся в просторах Галактики «спавшейся» звезде, радиус которой равен критическому шварцшильдовскому радиусу. Он уже совсем близок к этому телу, и земные наблюдатели с удивлением и страхом замечают, что радиосигналы следуют один за другим не через секунду, а реже. Вот уже между ними проходят минуты, затем часы, годы, века. Наконец, сигналы перестают поступать совсем... А между тем астронавт по своим часам аккуратно, каждую секунду посылал сигналы!

Из этого примера, в частности, следует, что посторонний (например, земной) наблюдатель никогда не увидит, что сжимающееся тело достигло своего шварцшильдовского радиуса. Из такого тела вообще не могут выходить ни излучение, ни какие-либо частицы. Оно взаимодействует с окружающим миром только через гравитационное притяжение. Очень образно академик Я. Б. Зельдович называл такую «сколлапсировавшуюся» звезду «гравитационной могилой». В последние годы такие объекты получили не менее образное название — «черные дыры».

Живая наука дает, как мы видим, сюжеты для фантастических романов, с которыми не может сравниться самая пылкая фантазия романиста. Например, пресловутая «железная звезда» из «Туманности Андромеды» И. А. Ефремова выглядит весьма наивно рядом с вполне реальной звездой, оказавшейся в «гравитационной могиле».

Интересную аналогию можно провести между переходом от жизни к смерти для каждого индивидуума и прохождением какого-либо объекта через шварцшильдовский радиус внутрь некоторой черной дыры. Подобно тому, как с точки зрения внешнего наблюдателя последнее событие никогда не произойдет, с точки зрения индивидуума, вернее сказать, его «я», собственная смерть непредставима и в этом смысле тоже никогда не произойдет. Следует отметить, что в этой аналогии понятия «внутренний» и «внешний» как бы меняются местами. Если в «астрономическом» случае мир с его пространственно-временными соотношениями определяется вне окружающих черные дыры шварцшильдовских сфер, то в «психобиологическом» реальное сознание индивидуума находится внутри него, будучи неразрывно связанным с его «я». Автор был бы рад, если бы философы-профессионалы развили эту аналогию с позиций диалектико-материалистического учения о единстве противоположностей. Может быть, это прояснило бы некоторые до сих пор нерешенные проблемы взаимоотношения индивидуума и окружающего мира, частью которого он является. А пока как не вспомнить стихи Сельвинского, написанные лет тридцать назад, в которых развивается близкая идея:

«... Подумайте: как это хорошо...
Нам только жить! Нигде и никогда
мы не увидим собственного тупа.
Мы умираем только для других,
но для себя мы умереть не можем —...»

Пока еще детальная теория гравитационного коллапса звезды не создана. Эта теория должна учитывать и такие важные факторы, как, например, вращение звезды и, наличие на ней магнитного поля. Это очень трудная задача, но уже сейчас, например, ясно, что вращение звезды вокруг своей оси при некоторых условиях может предупредить коллапс сжимающейся звезды. По причине сохранения вращательного момента экваториальная скорость будет быстро расти, а это может привести к сплющиванию сжимающейся звезды и разрыву ее (из-за действия центробежной силы) на отдельные куски до того, как она достигнет шварцшильдовского радиуса. Поэтому достигнуть критических размеров сжимающаяся звезда может только в том случае, если ее первоначальная вращательная скорость была малой.

В принципе гравитационный коллапс может произойти не только со звездой достаточно большой массы, но и с галактическими ядрами. Об этом речь будет идти в следующей главе.

Таким образом, финальная стадия эволюции звезд, которая наступает после «выгорания» в их центральных областях ядерного горючего, существенным образом зависит от их массы. Однако при этом необходимо учитывать неизбежную потерю массы в процессе эволюции, а также вращение звезд.

Если масса звезды меньше некоторого предельного значения (которое немного больше массы Солнца), конечным этапом эволюции будет образование белых карликов, превращающихся после остывания в «черные карлики». В действительности, однако, в белые карлики могут превратиться и звезды со значительной массой. Хорошим примером сказанному является знаменитый спутник Сириуса — исторически первый открытый белый карлик. Так как сам Сириус представляет собой довольно массивную звезду спектрального класса А, то его спутник, который успел сильно проэволюционировать, превратившись в белый карлик, должен был вначале обладать еще большей массой, по крайней мере в три раза превышающей массу Солнца. Ибо время пребывания на главной последовательности тем короче, чем больше масса звезды (см. табл. 2). Так как масса белого карлика — спутника Сириуса равна 0,9 солнечной, это может означать только одно: прежде чем превратиться в белый карлик, спутник Сириуса потерял по крайней мере 70% своей массы.

Если первоначальная масса звезды находилась в пределах 1,2 — 2,5 солнечной массы, «чистая» теория утверждает, что конечным результатом эволюции должно быть образование нейтронной звезды. И здесь, однако, как, впрочем, и всегда, реальная действительность оказалась богаче «чистой» теории. Один из двух пульсаров, отождествляемых с остатками вспышек сверхновых, несомненно образовался после вспышки сверхновой II типа. Это видно по туманности, с которой он отождествляется. Но звезды, вспыхивающие как сверхновые II типа, имеют массу, значительно превышающую 2,5 солнечной! Как же быть? Похоже на то, что здесь решающую роль играет быстрое вращение вспыхнувшей звезды. По этой причине при катастрофическом сжатии только самые внутренние области звезды, линейная скорость вращения которых незначительна, превратились в нейтронную звезду, между тем как основная масса в конце концов была выброшена в межзвездное пространство.

Ну, а как быть с финальной стадией эволюции массивных звезд? Могут ли они действительно превратиться в черные дыры? Так ли уж обязательно образование нейтронных звезд после взрывов? Ведь при гравитационном коллапсе выделяется огромная энергия, которая вполне может быть израсходована на выбрасывание вещества с большой скоростью и на его нагрев? Другими словами, могут ли в результате вспышки сверхновых в некоторых случаях образовываться черные дыры? Общее количество пульсаров в нашей Галактике таково, что позволяет сделать вывод, что почти все вспышки сверхновых приводят к образованию нейтронных звезд. Тогда возникает вопрос: а как все-таки быть с черными дырами? Где их искать?

Белые карлики были обнаружены астрономами свыше полувека назад. Нейтронные звезды (пульсары) были обнаружены около 20 лет назад. На очереди — последняя и, может быть, важнейшая проблема заключительной стадии звездной эволюции — обнаружение черных дыр. Похоже на то, что черные дыры (по крайней мере одна) уже обнаружены (см. дальше, гл. 8).

Мы теперь перейдем к совершенно другому вопросу: может ли наше Солнце вспыхнуть как сверхновая звезда? Разумеется, для проблемы дальнейшего развития жизни на Земле этот вопрос имеет очень серьезное значение: ведь такая вспышка испарит все планеты земной группы. Как же отвечает на этот вопрос современная астрофизика? Прежде всего, Солнце не может вспыхнуть как сверхновая II типа: для этого у нее слишком мала масса. Речь может идти только о вспышке Солнца как сверхновой I типа. Однако и эта участь не грозит Солнцу. Надежные расчеты показывают, что для такого взрыва масса Солнца недостаточна.

Вспышки сверхновых — довольно редкое явление. Но Галактика существует так долго, что за время ее эволюции подобных вспышек было достаточно много. Возникает интересный вопрос: были ли в течение геологической истории Земли такие эпохи, когда сверхновая вспыхивала сравнительно близко, например на расстоянии ближайших к нам звезд? Другими словами, какова вероятность того, что одна из ближайших к Солнцу звезд вспыхнет как сверхновая? Чтобы ответить на этот вопрос, мы сейчас сделаем несложный расчет.

Примем, что одна сверхновая II типа вспыхивает где-нибудь в Галактике один раз в 100 лет. Как уже говорилось, сверхновые этого типа вспыхивают в довольно тонком слое около галактической плоскости. Толщина такого слоя не превышает сотни парсек. С другой стороны, галактическая орбита Солнца целиком находится (и в прошлом находилась) в пределах этого слоя. Введем в рассмотрение сферическую область радиуса R , окружающую Солнце. Отношение объема этой области к объему всего галактического пространства, где вспыхивают сверхновые II типа, составит

$$\frac{4\pi}{3} R^3 : \pi r^2 d,$$

где r — радиус галактического диска, в пределах которого происходят вспышки, d — его толщина. Это отношение объемов представляет собой вероятность того, что при случайной вспышке одной сверхновой Солнце окажется от нее на расстоянии, меньшем R , причем R должно быть меньше d .

Если одна вспышка сверхновой происходит в среднем за T лет, то следует ожидать «близкую» вспышку один раз в течение промежутка времени

$$t_1 = \frac{3r^2 d}{4R^3} T.$$

Полагая $r = 10$ тыс. пк, $d = 100$ пк, $R = 10$ пк и $T = 100$ лет, найдем, что $t_1 = 750$ млн лет. Время t_1 может быть и в несколько раз меньше, если учесть, что значительная часть галактической орбиты Солнца находится в пределах спиральных ветвей, где преимущественно вспыхивают сверхновые II типа. Прделанный только что расчет показывает, что за всю историю Земли, насчитывающую около 5 млрд лет, Солнце несколько раз находилось ближе, чем на расстоянии 10 пк, от вспыхнувшей сверхновой. Что же при этом* произойдет? Если бы в такие эпохи на Земле жили разумные существа, они прежде всего увидели бы на небе необыкновенно яркую звезду. Поток излучения от нее был бы в миллионы раз больше, чем от Сириуса — самой яркой из звезд. Все же он был бы в 10 тыс. раз меньше, чем поток излучения от Солнца. Тем не менее освещенность, созданная такой звездой ночью, была бы в сотню раз больше, чем от полной Луны, и эта звезда ярко освещала бы ночной ландшафт нашей планеты.

Следует, однако, заметить, что поток излучения от вспыхнувшей звезды в ультрафиолетовой области спектра в десятки раз превосходил бы солнечный. Это вызвало бы значительную ионизацию верхних слоев земной атмосферы, однако не привело бы к катастрофическим последствиям. Дело в том, что вся ультрафиолетовая радиация сверхновой была бы полностью поглощена земной атмосферой и до поверхности Земли не дошла бы. Такая необыкновенной яркости звезда горела бы на небе несколько месяцев, постепенно угасая. Вокруг звезды образовалась бы туманность, которая, расширяясь, со скоростью несколько тысяч километров в 1 с, захватила бы через несколько сот лет значительную часть неба. Ночное небо светилось бы в линиях спектра, характерных для таких туманностей. Впрочем, это свечение было бы довольно слабым, едва видимым невооруженным глазом. Через тысячелетия скорость расширения туманности значительно замедлилась бы из-за постепенного торможения ее межзвездной средой. Солнечной системы расширяющаяся туманность достигла бы примерно через 10 тыс. лет. После этого в течение нескольких десятков тысяч лет Солнце и окружающие его планеты находились бы внутри туманности — остатка вспышки сверхновой. Одна из таких туманностей в созвездии Близнецов показана на рис. 21.

Какие можно ожидать эффекты при «погружении» Солнечной системы на столь длительное время в «радиотуманность» — остаток вспышки сверхновой? Прежде всего, плотность первичных космических лучей в окрестностях Земли увеличится во много десятков раз, так как «радиотуманности» «начинены» сверхэнергичными частицами. Космические лучи в пределах радиотуманности распределены довольно неравномерно и в отдельные периоды, длящиеся столетия, плотность космических лучей в сотни раз будет превосходить современную.

К каким же последствиям может привести существенное увеличение плотности первичных космических лучей, длящееся десятки тысяч лет? Безусловно, такое изменение окружающих земной шар условий должно иметь серьезные биологические (точнее, генетические) последствия для ряда видов животных и растений, населяющих нашу планету. Как известно, эволюция видов регулируется естественным отбором под влиянием различных физических условий окружающей среды. Однако до сих пор при анализе такой эволюции совершенно не учитывались возможные изменения со временем уровня жесткой радиации. Между тем естественный уровень радиоактивности в приземном слое воздуха и в воде является одной из причин так называемых «спонтанных мутаций» — внезапных, скачкообразных изменений различных биологических характеристик данного вида, передающихся затем по наследству. Увеличение частоты таких мутаций хотя бы в два раза может повлечь за собой для некоторых видов животных и растений серьезные генетические последствия. Из радиационной биологии известно, что частота мутаций растет при облучении животных и растений жесткой радиацией. Однако различные виды по-разному реагируют на такое облучение. Так, например, для видов с коротким временем цикла размножения в ряде случаев для возрастания частоты мутации вдвое требуется увеличение дозы облучения в сотни и даже тысячи раз. Однако для долгоживущих форм удвоение частоты мутаций требует увеличения дозы лишь в 3—10 раз.

Согласно существующим данным, средняя для Земли радиоактивность воздуха в приземном слое составляет 0,12 Р (рентген) в год. На две трети эта радиоактивность обусловлена «земными» факторами, прежде всего радиоактивностью земной коры. Однако 0,04 Р в год дают космические лучи.

Отсюда следует, что если, например, интенсивность космических лучей повысится раз в 30, то средний уровень ионизации в приземном слое увеличится приблизительно в 10 раз. А это уже может иметь серьезные генетические последствия для различных долгоживущих видов. Особенно уязвимы высокоорганизованные, сильно специализировавшиеся виды животных со сравнительно незначительным количе-

ством особей. Для таких видов длительное, продолжающееся десятки тысяч лет повышение уровня ионизации в окружающей среде в десятки раз может повлечь за собой катастрофические последствия.

В 1957 г. автор совместно с В. И. Красовским высказал гипотезу, объясняющую хорошо известное вымирание рептилий в конце мелового периода стойким увеличением уровня космических лучей в десятки, а может быть, и сотни раз. Это могло произойти, если «рядом», на расстоянии 5–10 пк от Солнца, какая-либо из звезд вспыхнула как сверхновая.

Позже мы рассмотрим другие гипотезы о причинах массового вымирания рептилий за Земле (см. конец гл. 14).

Не для всех видов живых существ длительное увеличение уровня жесткой радиации должно быть губительным. Вполне могло случиться, что такое облучение для ряда видов оказалось бы фактором, благоприятствующим эволюции. Высокий уровень радиоактивности, обусловленный попаданием Солнечной системы в радиотуманность — остаток достаточно близко вспыхнувшей сверхновой, мог быть мощным фактором, стимулирующим само возникновение жизни из неживой материи. Хотя изучение вопроса о происхождении жизни на Земле в последние годы значительно продвинулось, окончательного решения этой важнейшей и вместе с тем труднейшей проблемы пока еще нет. В такой обстановке привлечение новых идей и представлений может принести только пользу.

Представляется возможным, что вызванный космическими обстоятельствами высокий уровень радиоактивности, имевший место в эпоху, отделенную от нас несколькими миллиардами лет, мог стимулировать образование из простых органических соединений сложных комплексов, из которых могла развиться жизнь на Земле.

Таким образом, вспышки сверхновых звезд не только играют огромную роль для возникновения и эволюции жизни во Вселенной (образование тяжелых элементов, уровень жесткой радиации, обуславливающий мутации), но и могут быть первопричиной образования живой субстанции из мертвой. Приходится только удивляться, от какого сложнейшего сплетения различных независимых обстоятельств может зависеть возникновение и развитие жизни во Вселенной.

В связи с затронутым вопросом остановимся еще на одном любопытном обстоятельстве. Уже свыше 30 лет в наблюдаемой картине распределения по небу яркости космического радиоизлучения имеется одна пока необъяснимая деталь. Яркость неба в радиолучах имеет явно выраженную тенденцию концентрироваться к центральной линии Млечного Пути и к галактическому ядру (в созвездии Стрельца). Однако это правило нарушает огромный, яркий (в радиолучах, разумеется)

«язык», тянущийся по небу почти перпендикулярно к Млечному Пути. Он начинается в области Млечного Пути, удаленной от галактического центра приблизительно на 30° , и простирается почти до северного галактического полюса. На рис. 28 схематически приведена карта неба, на которой нанесены кривые, соединяющие точки небосвода, где «радиояркость» одинакова. Такие кривые (называемые «изофотами») дают наглядное представление о распределении яркости радиоизлучения по небу.



Рис. 28. Изофоты радиоизлучения Галактики (схема)

На рисунке отчетливо видна концентрация яркости к полосе Млечного Пути. В то же время видно, что левее галактического центра изофоты радиоизлучения круто поднимаются вверх. Это и есть описанный «язык».

Среди гипотез, которыми в разное время пытались объяснить природу этой аномалии в распределении яркости радиоизлучения, особого внимания заслуживает гипотеза видного английского астронома Брауна. Согласно этой гипотезе, «язык» — это радиоизлучающая оболочка сверхновой, вспыхнувшей очень близко от нас несколько десятков тысяч лет назад. Так как эта оболочка удалена на расстояние всего лишь 30—40 пк, то при ее линейных размерах 30—40 пк она должна занимать огромную часть небосклона. Сказанное поясняет схема, приведенная на рис. 29. Эта гипотеза сталкивается с трудностью: никаких следов опти-

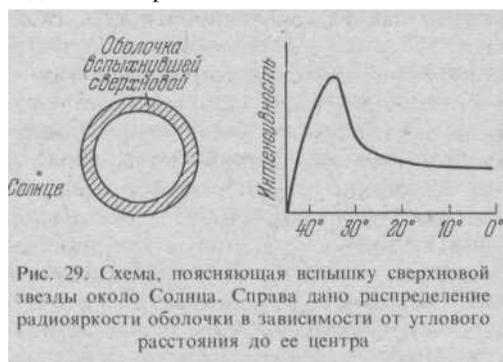


Рис. 29. Схема, поясняющая вспышку сверхновой звезды около Солнца. Справа дано распределение радиояркости оболочки в зависимости от углового расстояния до ее центра

чески наблюдаемой туманности, которой должна быть расширяющаяся оболочка сверхновой, в этой части неба нет. Кроме того, недавно в южной части неба как будто бы была обнаружена деталь радиоизлучения Галактики, весьма напоминающая «язык». Присутствие в близких окрестностях Солнца нескольких остатков вспышек сверхновых, вспыхнувших за последние несколько десятков тысяч лет, представляется весьма маловероятным.

Если, несмотря на все указанные выше трудности, дальнейшие исследования подтвердят гипотезу Брауна, то через несколько тысяч лет плотность космических лучей в пределах Солнечной системы увеличится раз в 10. Может быть, даже и нынешняя плотность космических лучей у Земли является аномально высокой, нетипичной для «средних» периодов эволюции жизни на Земле...

Можно надеяться, что в ближайшем будущем эта увлекательная загадка космической физики будет решена методами рентгеновской, радио- и оптической астрономии *).

<> Частота вспышек сверхновых по соседству с данной звездой может заметно увеличиться, если звезда проходит через спиральный рукав Галактики. Спиральные рукава представляют собой области повышенной концентрации звезд и межзвездной среды. Они вращаются вокруг центра Галактики с постоянной угловой скоростью, не зависящей от расстояния до него. В то же время угловая скорость орбитального движения звезд в Галактике меняется \propto расстоянием R от центра приблизительно обратно пропорционально R . В Галактике имеется коротационная окружность, на которой обе скорости равны. Интересно, что Солнце находится как раз на этой окружности. По-видимому, за время существования Галактики оно не более чем один раз прошло через спиральный рукав. Солнце, так же как и другие звезды, находящиеся вблизи коротационной окружности и расположенные вне спиральных рукавов, относительно более свободно от катастрофического воздействия вспышек сверхновых. Л. С. Марочник и Л. М. Мухин выдвинули гипотезу, что коротационная окружность может быть своего рода «поясом жизни» в нашей и других галактиках, в котором наиболее вероятно встретить обитаемые, планеты, похожие на нашу Землю <>.

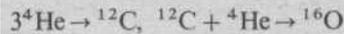
*) Недавно было показано, что в области «языка» наблюдается мягкое рентгеновское излучение повышенной интенсивности. Так как такое излучение характерно для старых оболочек сверхновых звезд, то гипотеза Брауна тем самым получила серьезное обоснование.

6. Об эволюции галактик

В гл. 4 рассматривался вопрос об эволюции звезд. Там было рассказано, в частности, что красные гиганты «сбрасывают» свои наружные оболочки, постепенно рассеивающиеся в межзвездном пространстве. Остается очень плотная горячая звезда, которая, остывая, становится сначала белым, а в конце концов — «черным» карликом. Все же в процессе эволюции звезда «возвращает» в межзвездное пространство значительную часть своей массы. Из этого газа будут образовываться более молодые звезды, которые в свою очередь также будут эволюционировать описанным образом. Следует еще раз подчеркнуть, что за время существования Галактики только сравнительно массивные звезды успели пройти весь свой эволюционный путь.

При кругообороте вещества в Галактике (по схеме «межзвездный газ --> -->звезды --> звезды + межзвездный газ») значительная часть его остается в звездном состоянии в недрах «мертвых» белых карликов, нейтронных звезд и, возможно, черных дыр. Кроме того, из-за ограниченности возраста Галактики звезды, образовавшиеся даже в самую раннюю эпоху ее существования и имеющие массу меньше солнечной, еще не успели «сойти» с главной последовательности. Следовательно, они даже «частично» не успели вернуть в межзвездное пространство затраченное на их образование вещество. Из сказанного следует, что количество межзвездной среды в Галактике должно по мере ее развития убывать. Это важный вывод о направлении развития нашей Галактики. Та же тенденция в развитии должна быть и у остальных звездных систем.

В процессе кругооборота межзвездного газа непрерывно меняется его химический состав — он «обогащается» гелием и тяжелыми элементами. Прежде чем вернуться в межзвездную среду, газ длительное время находился в недрах звезд при достаточно высоких температуре и давлении. В нем происходили термоядерные реакции водородные и гелиевые. По этой причине химический состав его медленно менялся: водород постепенно «выгорал», количество гелия росло, возрастало также количество тяжелых элементов. Последние будут образовываться из-за реакции



и дальнейших реакций ^{12}C и ^{16}O с протонами и нейтронами. При таких реакциях будут преимущественно образовываться изотопы ^{13}C и ^{17}O .

Однако необходимо подчеркнуть, что самые тяжелые элементы этим способом «последовательного наращивания» образоваться не могут. Дело в том, что по мере такого «роста» ядер путем присоединения к ним новых нуклонов они с неизбежностью должны стать неустойчивыми ядрами радиоактивных изотопов некоторых элементов. Эти ядра распадутся до того, как к ним будет присоединен очередной нуклон. Тем самым дальнейший процесс «утяжеления» ядра путем последовательного присоединения нуклонов будет остановлен.

Где же могут образовываться сверхтяжелые элементы? По современным представлениям «тиглем», в котором «варятся» эти элементы, могут быть вспышки сверхновых. По-видимому, при взрыве такой звезды происходят цепные реакции, сопровождающиеся образованием весьма большого количества нейтронов. Не исключено, что столь большое количество нейтронов обеспечит последующий захват ядрами двух и более нейтронов, так что промежуточные ядра не успевают распасться. После того как такие ядра быстро захватят очередной нейтрон, они станут устойчивыми, и дальнейший рост их будет уже идти без помех. Так могут образовываться элементы вплоть до трансурановых.

В результате вспышек сверхновых в межзвездное пространство непрерывно поступают тяжелые и сверхтяжелые элементы, которые постепенно перемешиваются

с межзвездным газом. Мы видели, что сверхновые II типа — это молодые массивные звезды. Так как скорость образования таких звезд из межзвездной среды сильно зависит от плотности последней (имеются некоторые основания полагать, что она пропорциональна кубу плотности), то мы приходим к следующему интересному выводу.

Раньше, когда в Галактике содержание межзвездного газа было значительно больше, чем сейчас, и скорость процесса образования звезд из него была много выше современной, сверхновые звезды вспыхивали гораздо чаще. Специально выполненные расчеты показывают, что когда возраст Галактики был меньше 1 млрд лет, частота вспышек сверхновых была примерно в 100 раз больше, чем сейчас.

Учитывая это обстоятельство, можно сделать вывод, что за всю историю развития Галактики в ней вспыхнуло примерно 1 млрд сверхновых звезд. Этого количества как будто бы достаточно для объяснения наблюдаемого содержания тяжелых и сверхтяжелых элементов в межзвездном газе и образовавшихся из него в разное время звезд «второго поколения». В то же время звезды, образовавшиеся в эпоху формирования Галактики (это субкарлики и звезды, входящие в состав шаровых скоплений, массы которых меньше одной солнечной), сохранили, по крайней мере в своих наружных слоях, «первоначальный» химический состав межзвездной среды, из которой они образовались. И действительно, у таких звезд «первого поколения» относительное содержание тяжелых элементов в десятки раз меньше, чем у Солнца, которое является звездой «второго поколения». Таким образом, наблюдаемые характерные различия в химическом составе звезд главной последовательности и субкарликов, о которых шла речь в гл. 2, находят естественное объяснение в рамках общей картины непрерывного обогащения вещества Галактики тяжелыми элементами.

До сих пор речь шла преимущественно о нашей звездной системе Галактике. Общие сведения о нашей Галактике, а также о других галактиках уже излагались в первой главе. Здесь мы остановимся на морфологических различиях между галактиками. Подобно тому как была в свое время разработана классификация звезд, основывающаяся на их спектрах и светимостях и нашедшая свое выражение в знаменитой диаграмме Герцшпрунга — Рассела (см. рис. 15—17) был классифицирован и мир галактик. Известно, что классификация — это первый шаг к познанию закономерностей природы. Вспомним, например, Линнеевскую классификацию животного и растительного мира. Последующее развитие науки приводит к более глубокому пониманию чисто эмпирической классификации. Например, только спустя ~40 лет был правильно понят эволюционный смысл диаграммы Герцшпрунга — Рассела.

Общепринятая классификация галактик была предложена великим американским астрономом Хабблом еще в 20-х годах нашего столетия. Он же немного позже открыл знаменитое «красное смещение» в спектрах галактик (см. гл. 1), вытекающее из развитой несколькими годами раньше космологической теории выдающегося советского математика А. А. Фридмана. Таким образом, не будет преувеличением сказать, что Хаббл открыл Метагалактику — вот уже действительно самое большое открытие в истории науки...

Согласно Хабблу галактики делятся на три основных типа: а) эллиптические, б) спиральные, в) неправильные. Фотографии типичных представителей всех классов галактик приведены на рис. 6. Эллиптические галактики («Е-галактики») представляют собой сфероиды с разной степенью сплюснутости и с большой концентрацией яркости к центру. Как показали последующие спектроскопические исследования, Е-галактики состоят из огромного количества старых звезд малой массы с избыточным содержанием водорода. Такой же природы звезды, образующие сферическую составляющую нашей Галактики (см. гл. 1).

Спиральные галактики («S-галактики») наряду со сферической звездной составляющей характеризуются наличием нескольких спиральных рукавов неправильной, клочковатой структуры. Хотя суммарная масса этих рукавов в сотни раз меньше массы «сферической составляющей» соответствующей галактики, они резко выделяются из-за присутствия значительного количества молодых массивных звезд высокой светимости. Эти звезды непрерывно образуются из облаков межзвездной газопылевой среды, концентрирующейся к плоскости, в которой лежат спиральные рукава. Заметим, что у E-галактик содержание межзвездного газа в сотни и тысячи раз меньше, чем у S-галактик. Поэтому процесс звездообразования в E-галактиках практически давно уже прекратился.

Наконец, неправильные галактики характеризуются своей нерегулярной формой и сравнительно малой массой. Кстати, по своей массе (определяемой количеством находящихся в них звезд) галактики различаются в весьма широких пределах. Наша Галактика с ее массой в 10^{11} солнечных масс принадлежит к числу гигантов. Туманность Андромеды (M 31), как уже говорилось в гл. 1, имеет приблизительно в три раза большую массу. Пожалуй, самой большой из известных масс обладает знаменитая галактика M 87, находящаяся в центральной части скопления галактик в созвездии Девы. По-видимому, масса этой галактики в сотню раз превышает массу нашей Галактики. На другом полюсе находятся карликовые галактики, массы которой $\sim 10^7$ солнечной, что только в несколько десятков раз больше массы шаровых скоплений.

Наряду с массой важнейшей характеристикой галактики является мера ее осевого вращения — вращательный момент на единицу массы. Мера вращения у E-галактик гораздо меньше, чем у S-галактик. Очень медленное вращение E-галактик не может объяснить их наблюдаемую эллиптичность, т. е. сплюснутость, подобно, например, тому, как действием центробежной силы можно объяснить сплюснутость земного шара у полюсов. По-видимому, сплюснутость E-галактик объясняется самим характером звездных движений в таких галактиках. В противоположность этому влияние центробежной силы у сравнительно быстро вращающихся рукавов S-галактик весьма существенно. Следует подчеркнуть, что различия между E- и S-галактиками не являются эволюционным эффектом. Другими словами, галактики рождаются либо как S, либо как E, и в процессе эволюции тип галактики сохраняется. Структура галактики определяется начальными условиями ее образования (например, характером вращения того сгустка газа, из которого она образовалась).

В настоящее время имеются уже довольно хорошо разработанные модели превращения огромного облака газа, сжимающегося в результате действия закона всемирного тяготения сперва в протогалактику, а потом в галактику. Построение таких моделей оказалось возможным только благодаря введению в практику исследований быстродействующих электронно-вычислительных машин (ЭВМ). В самом начале следует представить себе огромный газовый шар, сжимающийся по закону свободного падения к центру. Первоначальная температура этого газа могла быть достаточно высокой, быстро уменьшалась, причем из-за гравитационной неустойчивости образовывались больших размеров сгущения, эволюционировавшие в облака. Благодаря беспорядочным движениям, эти облака сталкивались, что вело к их дальнейшему уплотнению. На этом довольно раннем этапе из облаков стали образовываться звезды «первого поколения». Наиболее массивные из них успевали проэволюционировать задолго до того, как прекратилось сжатие протогалактик. Взрываясь как сверхновые, они обогащали межзвездную среду металлами. По этой причине звезды следующих поколений имели уже другой химический состав. Это привело, например, к тому, что звезды вблизи центра эллиптических галактик более богаты тяжелыми элементами, чем находящиеся на периферии, что как раз и наблюдается.

Обрисованная сейчас картина эволюции относится к E-галактикам. В прото- S-галактиках звездообразование шло медленнее. Поэтому в них смог образоваться газовый диск довольно значительной массы. Этому способствовало также довольно быстрое вращение прото- S-галактик, препятствующее стеканию всего газа в область ядра и превращению его там в звезды. Другими словами, вращение протогалактик уменьшает скорость звездообразования.

Резюмируя, мы можем сказать, что разные типы галактик происходят от протооблаков с разными плотностями и разным разбросом скоростей внутренних движений. В частности, E-галактики образовались из более плотных облаков газа, находящегося в состоянии довольно быстрого беспорядочного движения. Этим, в частности, объясняется, почему «богатые», сравнительно плотные скопления галактик содержат преимущественно E-галактики, в то время как в «бедных» разреженных скоплениях наблюдаются преимущественно S-галактики. Когда же происходил важнейший процесс превращения огромных сжимающихся облаков газа сначала в протогалактики, а затем в галактики? Несомненно, это было очень давно — даже по астрономическим масштабам. Возраст галактик (во всяком случае, их подавляющего большинства) практически равен возрасту Вселенной. Это означает, что галактики образовались тогда, когда Вселенная была совсем еще юной. Ниже мы увидим, что величина красного смещения для наиболее удаленных из наблюдаемых объектов $\frac{\lambda}{\lambda_0} = 1 + z = 4,5$ (λ — измеренная длина волны какой-нибудь спектральной линии, λ_0 — ее лабораторное значение). С другой стороны, имеет место простое соотношение,

$$\frac{R}{R_0} = 1 + z,$$

где R_0 и R — характерные размеры расширяющейся Вселенной в эпоху, когда была излучена наблюдаемая спектральная линия, и в современную эпоху. Мы видим, что в ту отдаленную от нас эпоху размеры расширяющейся Вселенной были приблизительно в пять раз меньше, чем сейчас. А ведь галактики образовались еще раньше. Когда же?

В следующей главе мы увидим, что при $z \sim 1000$ никаких галактик во Вселенной еще не было. Значит, скорее всего, они образовались где-то между $z = 10$ и $z = 100$. Средняя плотность Вселенной тогда была в $10^2 - 10^6$ раз больше современного значения. И вообще Вселенная была совсем непохожа на нынешнюю. И едва ли не величайшим достижением науки является то, что мы имеем сейчас реальнейшую возможность «заглянуть» в далекое прошлое Вселенной, когда она была совсем еще юной. Об этом будет идти речь в следующей главе.

Описанная схема эволюции звездных систем по мере дальнейшего развития астрономии будет уточняться и все более и более конкретизироваться. Многие вопросы, сюда относящиеся, еще далеко не ясны и ожидают своего решения. И прежде всего — это проблема галактических ядер. До сравнительно недавнего времени на эти самые центральные области спиральных и эллиптических звездных систем галактик не обращалось должного внимания. Астрономы предполагали, что это — просто небольшие области с весьма высокой плотностью звезд. Пожалуй, первый, кто обратил внимание на нетривиальные, качественно своеобразные свойства галактических ядер, был академик В. А. Амбарцумян. В последние годы накопился огромный наблюдательный материал, касающийся галактических ядер, который действительно показывает, что они играют огромную роль в эволюции галактик. Самым удивительным результатом этих наблюдений, которые проводились во всем диапазоне шкалы электромагнитных волн — от радио до рентгеновских, явилось открытие активности ядер. Это открытие (как и всякое открытие) было неожиданным. Предполагалось всегда, что галактические ядра — это просто скопле-

ния сотен миллионов звезд, погруженных в межзвездную среду. При такой картине, конечно, не приходится ожидать, что мощность излучения ядра на какой-либо волне может заметно измениться за сколь угодно длинный промежуток времени наблюдений (например, сотню лет). Меняться может излучение какой-либо одной звезды, но усредненная по гигантскому количеству звезд мощность излучения должна, казалось бы, оставаться постоянной. И вот оказывается, что как оптическое, так и особенно радиоизлучение некоторых галактических ядер может заметно измениться за несколько месяцев и даже недель! Это означает, что в течение сравнительно короткого промежутка времени по каким-то причинам освобождается гигантское количество энергии, в сотни раз превышающее то, которое освобождается при вспышках сверхновых. Такие ядра получили название «активных», а совокупность процессов, по-видимому, взрывного характера, приводящая к освобождению столь огромного количества энергии, получила несколько неопределенное название «активность» ядер. По существу, природа активности ядер галактик еще не понята, хотя отдельные стороны этого грандиозного явления сейчас уже можно осмыслить. Следует подчеркнуть, что активность наблюдается только у весьма незначительной части ядер галактик. Подавляющее большинство их (в частности, ядро нашей Галактики) излучают строго постоянно и вполне заслужили название «спокойных». Наблюдения говорят, однако, о том, что это «спокойствие» не продолжается вечно. Вулканы на Земле в промежутки времени между извержениями тоже можно считать спокойными... Точно так же и галактические ядра после длительного периода «спокойствия» (исчисляемого, может быть, промежутками времени в десятки миллионов лет) испытывают сравнительно кратковременные, длительностью в тысячи и десятки тысяч лет, периоды активности. Таким образом, явление активности ядер носит «повторяющийся» характер. Однако следы кратких, но бурных периодов активности галактических ядер можно наблюдать длительное время после того, как активная «вспышка» закончилась.

Особенно впечатляюще активность ядер проявляет себя в радиодиапазоне. Еще в 1946 г. на заре радиоастрономии была открыта первая галактика, являющаяся исключительно мощным источником радиоизлучения. Это — знаменитый объект Лебедь А. В настоящее время число известных занесенных в каталог радиоисточников, находящихся в Метагалактике, превосходит уже 10000. Все они являются галактиками, по каким-то причинам сильно излучающими в радиодиапазоне. Такие объекты получили название «радиогалактик». Наша Галактика также излучает радиоволны, но мощность этого излучения («радиосвежимость») у нее в десятки и сотни тысяч раз меньше, чем у радиогалактик. Вообще следует заметить, что все галактики излучают в той или иной степени радиоволны. У радиогалактик, однако, этот процесс выражен особенно сильно.

Как надежно установлено, непосредственной причиной радиоизлучения и «нормальных» галактик (вроде нашей), и «радиогалактик» является наличие там огромного количества космических лучей, которые движутся в более или менее сильных межзвездных магнитных полях. Центральным вопросом является происхождение этих космических лучей. Если в нашей Галактике они образуются при «распылении» в межзвездной среде туманностей — остатков вспышек сверхновых (которые, как мы видели в предыдущей главе, «начинены» космическими лучами), то в случае радиогалактик дело обстоит иначе. Сверхновых звезд там явно не хватает для того, чтобы образовать очень уж большое количество космических лучей. Последние образуются при гораздо более мощных процессах взрывного характера, происходящих в ядрах в периоды их высокой активности. Обычно релятивистские частицы выбрасываются из ядер в виде двух огромных облаков, разлетающихся в разные стороны и сравнительно быстро (за «какие-нибудь» сотни тысяч лет) покидающих пределы галактики (см. рис. 33 в следующей главе). В конце концов они рассеиваются в межгалактическом пространстве. Наблюдаются случаи, когда около

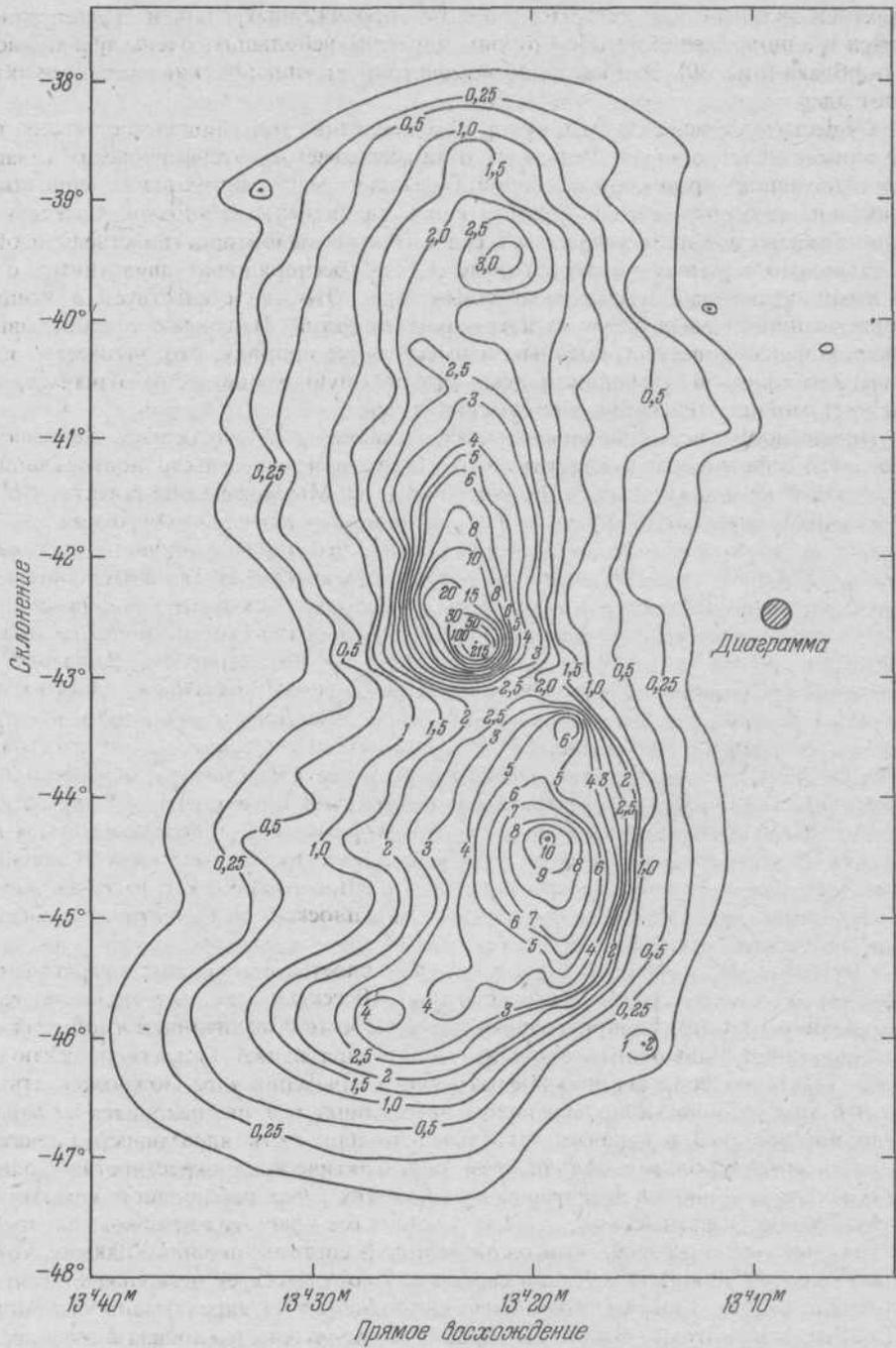


Рис. 30. «Радионизображение» галактики NGC 5128

галактики видны два «старых», весьма протяженных, почти расплывшихся облака и одновременно по обе стороны ядра два небольших, очень ярких, «молодых» облака (рис. 30). Это наглядно демонстрирует «циклический» характер активности ядер.

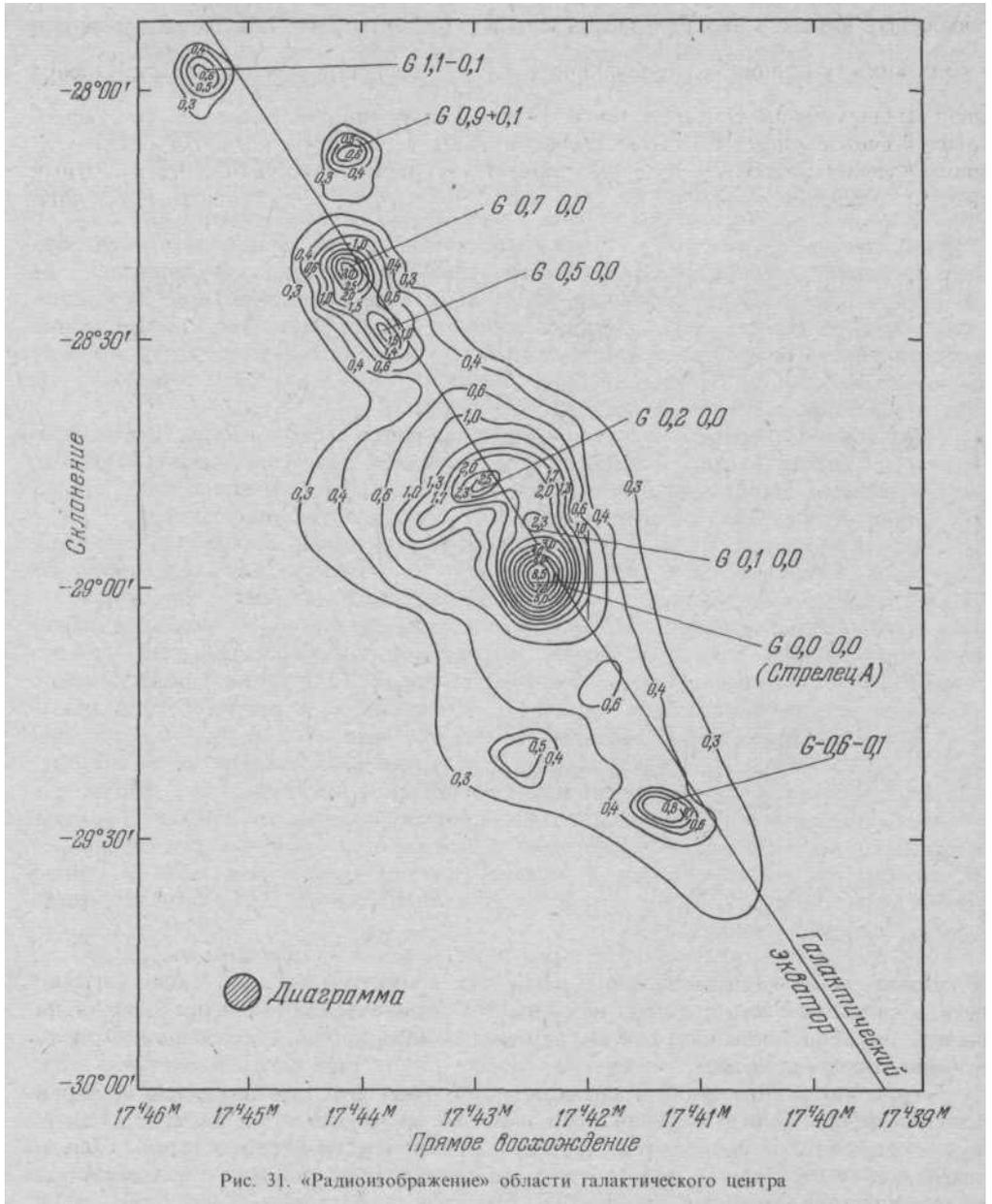
Существует класс галактик, который в последние годы привлекает к себе особое внимание астрономов. Речь идет о так называемых «сейфертовских галактиках». Последние представляют собой более или менее нормальные спиральные галактики, но только с очень яркими и весьма активными ядрами. Спектры последних указывают на наличие там в сравнительно малой пространственной области довольно плотных облаков горячего газа, беспорядочно движущихся с огромными скоростями в несколько тысяч км/с. Это свидетельствует о мощном выбрасывании газовых струй из ядер таких галактик. Излучение с непрерывным спектром часто бывает переменным и имеет ту же природу, что оптическое излучение Крабовидной туманности (см. предыдущую главу). Это означает, что там идет мощная генерация космических лучей.

Примерно 1 % всех спиральных галактик является сейфертовским. Все говорит о том, что сейфертовские галактики — это более или менее часто повторяющийся этап в развитии нормальных спиральных галактик. Мы можем еще сказать, что это нормальные галактики, у которых ядра находятся в активном состоянии.

Вполне возможно и даже весьма вероятно, что много миллионов лет назад ядро нашей Галактики было «сейфертовским», т. е. активным. Так как Солнце и вся наша планетная система находятся очень близко от галактической плоскости, где много космической пыли, мы не можем методами оптической астрономии наблюдать ядро нашей Галактики. Однако в радио- и инфракрасном диапазоне это оказывается возможным. На рис. 31 приведено «радиоизображение» области галактического центра. Компактный источник размерами в 10 секунд дуги в центре рис. 31 и есть ядро нашей Галактики. Так как оно находится от нас на расстоянии около 30000 световых лет, его линейные размеры оказываются меньше одного парсека. Недавние радиоастрономические наблюдения показали, что в центре ядра имеется еще меньшее образование, размеры которого меньше нескольких тысячных парсека. По всем признакам в настоящее время ядро нашей Галактики «спокойно», хотя следы его довольно высокой активности в прошлом можно и сейчас наблюдать в виде газовых струй, поднимающихся над плоскостью Галактики на расстоянии в несколько сотен парсек.

Интересно, что галактическое ядро также является источником инфракрасного излучения. Угловые размеры этого источника 10 секунд дуги, т. е. такие же, как и у совпадающего с ним радиоисточника. Из-за огромной величины поглощения света межзвездной пылью оптическое излучение ядра нашей Галактики наблюдать нельзя. Тем не менее из анализа инфракрасного излучения ядра можно сделать вывод, что там, в области поперечником всего лишь в 1 пк, находится несколько миллионов звезд. Это означает, что звездная плотность ядра нашей Галактики в десятки миллионов раз больше, чем в «галактических» окрестностях Солнца!

В центре туманности Андромеды в оптических лучах наблюдается компактный объект с угловыми размерами $1'' \times 1,5''$. Его видимая звездная величина около 12^m . Так как расстояние до этой гигантской звездной системы около 700000 пк, то линейные размеры ее ядра 3×5 пк, а светимость соответствует нескольким десяткам миллионов Солнц. Заметим, что оптические наблюдения ядра туманности Андромеды возможны потому, что ее экваториальная плоскость наклонена к лучу зрения под большим углом, так что протяженность поглощающего свет слоя межзвездной пыли сравнительно невелика. Между тем из-за того, что Солнце находится очень близко от галактической плоскости, к которой концентрируется межзвездная пыль, излучение от центра нашей Галактики проходит через огромную толщу поглощающего свет вещества.



В 1963 г. были обнаружены метagalacticкие (т. е. расположенные за пределами нашей Галактики) объекты нового типа. Это открытие было сделано голландским астрономом Маартеном Шмидтом, работающим в Калифорнии. Указанные объекты имеют звездообразный вид и некоторые из них еще раньше были отождествлены с радиоисточниками весьма малых угловых размеров. Спектр этих «квазизвездных объектов», или, как их сейчас повсеместно называют, «квazarов» состоит из ярких линий излучения на «непрерывном» фоне. Совершенно неожиданно Шмидт отождествил их с обычными линиями водорода, кислорода и магния, но только сильно смещенными по спектру в красную сторону. Если через $\Delta\lambda = \lambda - \lambda_0$

обозначить разность наблюдаемой длины волны и измеренной в лаборатории или в «близких» туманностях, то величина $z = \frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0}$ характеризует красное смещение спектральных линий. Она одинакова для всех линий данного источника. Для первого из исследованных Шмидтом квазаров $z = 0,36$. В дальнейшем было открыто много (несколько сотен) подобных объектов, причем наибольшее из известных красных смещений $z = 4$. Эта величина фантастически велика — ничего подобного

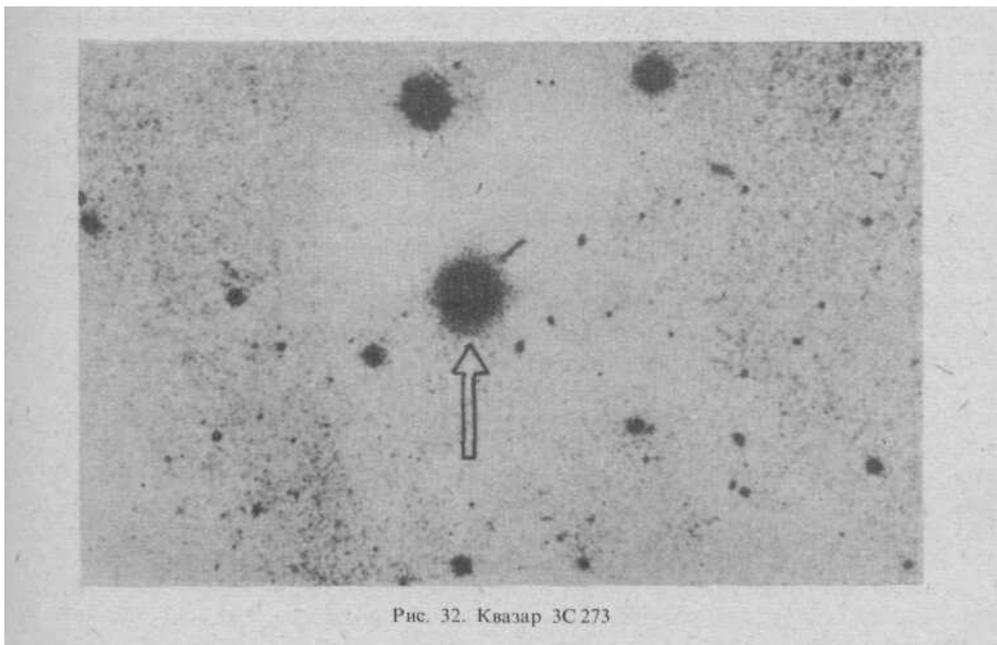


Рис. 32. Квазар 3C 273

до этого астрономы не обнаружили ни у одного небесного светила! Из определения z следует, что $\frac{\lambda}{\lambda_0} = 1 + z$. А это означает, что в спектрах квазаров наблюдаются далекие ультрафиолетовые линии, из-за огромного красного смещения «схвачившие» в видимую часть спектра. Если бы не такое красное смещение, эти линии никогда бы не наблюдались, так как земная атмосфера полностью поглощает ультрафиолетовое излучение.

Теперь уже мало кто сомневается, что причиной красного смещения квазаров является эффект Доплера. Следовательно, все квазары удаляются от нашей Галактики с огромными скоростями, вплоть до 290 тыс. км/с, т. е. вполне сравнимыми со скоростью света! Эти огромные скорости связаны с расширением Вселенной (см. следующую главу).

Так как скорость удаления какого-нибудь объекта, обусловленная красным смещением, тем больше, чем объект более удален, то из огромной величины красных смещений квазаров следует, что они от нас невероятно удалены, значительно дальше, чем даже самые удаленные из наблюдаемых галактик. Если при таком удалении мы все же их можем наблюдать, то это означает, что их светимости во много десятков раз превосходят светимости даже самых больших галактик. Ведь мощные маяки видны с очень больших расстояний!

Всего удивительнее то, что яркость квазаров (в оптическом диапазоне) меняется. Это означает, что квазары не могут быть объектами, сходными с галактиками,

т. е. состоящими из сотен или тысяч миллиардов звезд. Скорее они родственны галактическим ядрам, мощность излучения которых, как мы видели, довольно быстро меняется. Есть, однако, разница в масштабе явления: мощность излучения квазаров превосходит мощность излучения сейфертовских ядер в тысячи раз! Из того факта, что за какую-нибудь неделю квазар заметно меняет свой блеск (за счет непрерывного спектра, так как интенсивность его линий излучения остается неизменной), следует простой, но очень важный вывод, что линейные размеры его излучающей области не превосходят нескольких световых недель, т. е. близки к сотой доле парсека, между тем как размеры галактик исчисляются многими тысячами парсек. И такой ничтожный по астрономическим масштабам объем излучает энергию в сотни раз больше, чем какая-нибудь гигантская звездная система типа нашей Галактики! Это указывает на грандиозность тех физических процессов, которые там происходят.

Сейчас в общем ясно, что имеется непрерывная последовательность компактных объектов, идущая от ядер нормальных галактик, через ядра сейфертовских галактик, радиогалактик к квазарам, где действуют какие-то сходные, а скорее всего — одинаковые физические процессы, отличающиеся лишь масштабом энерговыделения. Кстати заметим, что, если отвлечься от красного смещения, спектры квазаров удивительно похожи на спектры сейфертовских ядер. И там, и тут мы имеем дело с быстрыми движениями облаков горячего газа. Однако в квазарах масса этого газа достигает миллионов солнечных масс, что в тысячи раз больше, чем у сейфертовских ядер. Имеются и другие общие черты. Как некоторые квазары, так и некоторые сейфертовские ядра характеризуются меняющимся со временем довольно мощным радиоизлучением*). Из характера изменений со временем на разных частотах радиодиапазона можно сделать вывод, что в обоих случаях наблюдаются выбрасывания облаков космических лучей, которые довольно быстро расширяются.

Итак, квазары — это что-то похожее (или даже тождественное) на «сверхмощные» галактические ядра. Хотя в настоящее время мы еще очень далеки от понимания их природы, кое-какие соображения по этому поводу можно уже высказать.

Прежде всего обращают на себя внимание крайне малые размеры области, где сосредоточена первопричина самого феномена ядра галактики. Так, например, у нашей Галактики размеры самого центрального источника радиоизлучения не превосходят нескольких тысячных парсека. Возможно, что эти размеры не превышают радиус орбиты Юпитера, т. е. 10^{14} см. Несомненно, что наблюдаемое радиоизлучение вызывается потоками электронов очень высоких энергий, движущихся в магнитном поле. Из наблюдаемой мощности этого излучения следует, что ежесекундно в этой малой области выделяется до 10^{40} эргов энергии в форме космических лучей. Это в миллион раз больше мощности солнечного излучения! Откуда же берется эта энергия, что это за могучий ускоритель там работает?

Нельзя исключить, что ядро нашей Галактики — это одна черная дыра с огромной массой, в миллионы раз превышающей массу Солнца, либо множество менее массивных черных дыр, движущихся в этой малой области. Заметим, кстати, что если в центре нашей Галактики находится одна черная дыра с массой в миллион солнечных масс, ее размеры будут больше радиуса Солнца лишь в 4 раза.

На гигантскую центральную черную дыру непрерывно натекает межзвездный газ. Совершенно так же, как в случае звездной черной дыры Лебедь X-1 (см. гл. 8) газ образует быстро вращающийся диск и постепенно падает в «дыру», выделяя при этом огромное количество энергии.

*) Так же как и ядра галактик, далеко не все квазары активны, т. е. меняют свои свойства со временем.

Черная дыра в центре нашей Галактики — сравнительно скромное образование. У других галактик и квазаров массы черных дыр могут быть в десятки тысяч раз больше.

Наблюдаемая активность галактических ядер связана с неравномерностью выпадения на соответствующие «черные дыры» окружающего газа.

Следует подчеркнуть, что пока еще «черно-дырная» теория галактических ядер является только гипотезой, правда, весьма правдоподобной. Будем надеяться, что скоро эта важнейшая проблема астрономии будет решена.

Многое, может быть, очень важное, остается пока загадочным и непонятым. Давно уже, например, удивляет тот факт, что квазары определенно избегают скоплений галактик, между тем как по крайней мере 90% всех галактик сосредоточены в скоплениях. Имеются и другие проблемы, еще ждущие своего решения.

В заключение этой главы заметим, что для проблемы распространенности жизни во Вселенной феномен активных взрывающихся ядер представляет определенный интерес. Если такие взрывы достаточно мощны и происходят не так уже редко (скажем, раз в несколько десятков миллионов лет), вряд ли из-за высокого уровня жесткой радиации там где-нибудь может развиваться жизнь. С другой стороны, можно представить себе такую ситуацию, когда не катастрофически высокий уровень такой радиации является благоприятным фактором для возникновения и развития жизни. Для этого процесса взрывы ядер галактик могут иметь даже большее значение, чем вспышки близких сверхновых. Следует, однако, подчеркнуть, что мощность взрывов в нашей Галактике, по-видимому, всегда была незначительной и серьезного влияния на развитие жизни в ней они не оказали.

7. Большая Вселенная

Человеческое мышление не терпит ограничений. Несомненно, у читателей возник вопрос: откуда взялось то первоначальное достаточно разреженное газовое облако, из которого в дальнейшем образовались скопления галактик и галактики? Здесь мы сталкиваемся, пожалуй, с самой грандиозной проблемой современного естествознания. Речь идет о так называемой «космологической проблеме». Космология занимается исследованием структуры и развития всей наблюдаемой нами части Вселенной. Конечно или бесконечна Вселенная, какая у нее геометрия, в чем причина разбегания галактик, вызывающего наблюдаемое красное смещение,— вот вопросы, которыми занимается космология.

Эти вопросы связаны с общей проблемой эволюции Вселенной, в частности с ее наблюдаемым расширением. Если, как это считают в настоящее время, скорость «разлета» галактик увеличивается на 50 км/с на каждый миллион парсек, то экстраполяция к прошлому приводит к удивительному результату: примерно 20 млрд лет назад вся Вселенная была сосредоточена в очень маленькой области. Многие ученые считают, что в то время плотность Вселенной была около 10^{14} – 10^{15} г/см³, т. е. такая же, как и у атомного ядра. А еще раньше, когда возраст Вселенной исчислялся ничтожными долями секунды, ее плотность была значительно выше ядерной. Проще говоря, Вселенная тогда представляла собой одну гигантскую «частицу» сверхъядерной плотности. По каким-то причинам эта «частица» пришла в неустойчивое состояние и взорвалась. Последствия этого взрыва мы и наблюдаем сейчас как разлет системы галактик.

Возникает естественный вопрос: не означает ли (в предположении, что изложенная гипотеза справедлива), что около 20 млрд лет назад было «начало света»? Отсюда один шаг до представления, что 20 млрд лет назад был сотворен мир... Надо сказать, что церковники широко использовали и используют описанное одно из возможных следствий наблюдаемого разлета галактик для религиозной пропаганды. На этом примере видно, как церковь пытается использовать выводы современной науки, предварительно исказив и извратив их.

Следует, однако, иметь в виду, что если вывод о том, что 20 млрд лет назад вся Вселенная представляла собой сверхплотную «ядерную» каплю, является правильным (а это, по-видимому, так), всякие рассуждения о «начале» и тем более «сотворении» мира являются ненаучными. Вообще само понятие «время» при таких огромных плотностях может потерять всякий наглядный смысл. Столь же бессмысленно говорить в таких условиях о каком-то «начале времени». Здесь должны были действовать законы квантовой теории тяготения — науки, которая пока еще не создана. Излишне подчеркивать, что в условиях такой Вселенной — сверхплотной «частицы» — никакая жизнь невозможна.

Нужно, однако, заметить следующее: нельзя заранее исключить, что наблюдаемая нами сейчас картина разлета галактик происходила с одинаковой скоростью и в сколь угодно далеком прошлом. Ведь можно считать, что в прошлом скорость разлета галактик была другой и, в частности, меньшей. Некоторые космологи полагали, что Вселенная не расширялась «от точки» с постоянной скоростью, а как бы пульсировала между конечными пределами ее средней плотности. Это означало бы, что в прошлом скорость разлета галактик была меньше, чем сейчас, а еще раньше система галактик, может быть даже сжималась, т. е. галактики приближались друг к другу с тем большей скоростью, чем большее расстояние их разделяло. И в будущем наблюдаемая нами сейчас эпоха красного смещения постепенно может смениться эпохой фиолетового смещения.

Необходимо, однако, заметить следующее. Если бы даже гипотеза «пульсирующей Вселенной» оказалась правильной, она не стала бы альтернативой гипотезе

«сверхплотной частицы» как начального состояния Вселенной. Дело в том, что нельзя себе представить неограниченно большое число пульсаций между пределами средней плотности, которые ниже ядерной.

В самом деле, во Вселенной идет не обратимый процесс — превращение водорода в гелий при термоядерных реакциях в недрах звезд. В наблюдаемой нами (довольно значительной) части Вселенной уже несколько десятков процентов атомов водорода превратилось в атомы гелия. На этот процесс могло уйти самое большее несколько десятков миллиардов лет. Если бы Вселенная в том примерно виде, в каком мы ее наблюдаем сейчас, существовала свыше сотни миллиардов лет, она была бы «почти гелиевая». Весь водород уже давно «выгорел» бы, светимости звезд, образующих галактики, были бы малы. Но этого заведомо нет. Другими словами, наблюдаемая нами Вселенная термодинамически достаточно молода. Так как пульсации Вселенной между не слишком большими пределами плотности не могут изменить темп эволюции звезд, можно сделать вывод, что если пульсации Вселенной в прошлом и имели место, число их можно пересчитать по пальцам одной руки...

Можно себе представить (по крайней мере, математически) неограниченно большое число пульсаций, при которых, однако, в каждом цикле Вселенная сжимается по крайней мере до ядерных плотностей. Ядра гелия (так же как и других элементов) при этом распадаются на нуклоны и как бы «обезличиваются». А потом все опять начинается сначала... В этой модели Вселенная вполне может быть уподоблена легендарной птице Феникс...

Вряд ли, однако, это так. Простое повторение циклов по существу исключает развитие Вселенной в целом, что философски совершенно неприемлемо. И уже если Вселенная когда-то «взрывалась» и стала расширяться — не проще ли считать, что это было один раз*).

Развитие астрофизики, и особенно радиоастрономии, в последние годы показало полную несостоятельность концепции пульсирующей между конечными пределами плотности Вселенной (см. ниже).

По настоящему альтернативой концепции эволюционирующей от «сверхплотной частицы» Вселенной является гипотеза «не меняющейся», сохраняющей свои характеристики Вселенной, которой придерживался известный английский астрофизик Хойл и некоторые другие ученые. Неизменность Вселенной (несмотря на ее расширение) в этой гипотезе достигается допущением, что имеет место непрерывное «творение» материи из... ничего. Эта странная идея физически ничем не была обоснована.

О Лишь в 1986 г. советский астрофизик А. Д. Линде выдвинул гипотезу, подкрепляющую модель. Он предположил, что «творение» материи происходит из вакуума, обладающего в большей части объема Вселенной сверхвысокой плотностью. Этот процесс происходит в виде рождения расширяющихся пузырей обычного вещества, в одном из которых мы и живем. О

Окончательно решить вопрос — эволюционирует ли Вселенная или остается неизменной — смогли только астрономические наблюдения. Эти же наблюдения должны решить вопрос об общих свойствах Вселенной (например, вопрос об ее конечности, характере метрики и пр.).

Наиболее эффективными для решения космологической проблемы являются радиоастрономические методы исследования. Современные большие радиотелескопы позволяют изучать радиогалактики и квазары (см. гл. 1,6), удаленные на такие огромные расстояния, при которых уже начинают сказываться релятивистские эффекты.

*) Можно, правда, полагать, что в предыдущие циклы образования (галактик и звезд) не происходило. Однако это предположение выглядит довольно искусственным.

Вопрос о замкнутости пространства в принципе может быть решен измерением угловых расстояний между компонентами двойных радиогалактик*). До недавнего времени считалось, что расстояния между этими компонентами меняются в сравнительно небольших пределах**) и составляют около 100 тыс. пк. Если бы пространство было евклидовым, то угол между компонентами неограниченно уменьшался по мере увеличения расстояния до радиогалактик. Если же пространство неевклидово, то, как оказывается, этот угол будет уменьшаться только до определенного предела (около 20") и при дальнейшем увеличении расстояния останется постоянным или даже начнет расти.

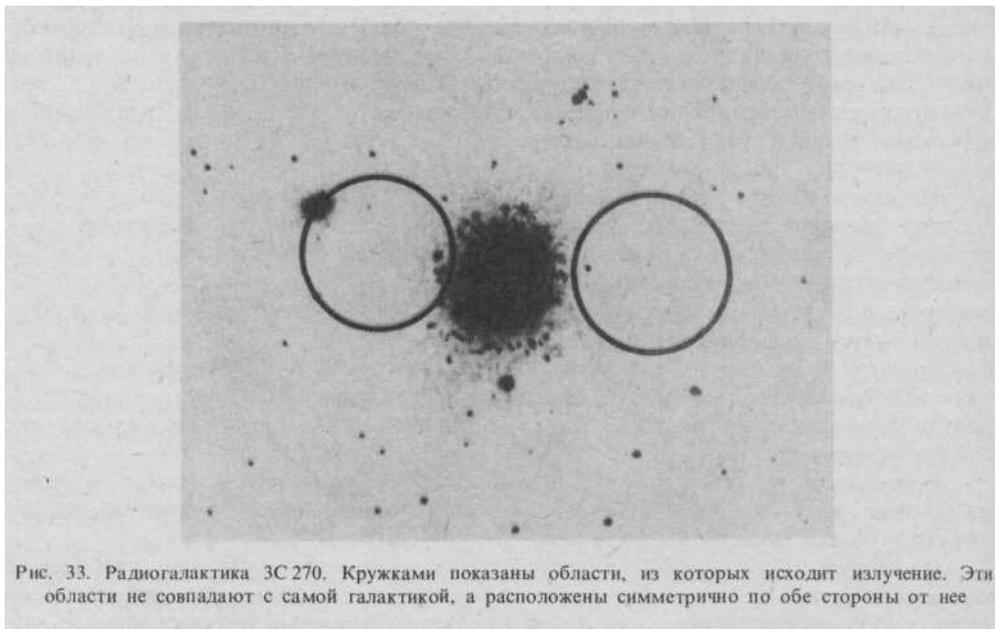


Рис. 33. Радиогалактика 3С 270. Кружками показаны области, из которых исходит излучение. Эти области не совпадают с самой галактикой, а расположены симметрично по обе стороны от нее

Пока таких наблюдений, которые должны быть очень многочисленны, чтобы исключить случайные эффекты, нет. Однако в перспективе ближайшего десятилетия они вполне могут быть выполнены.

Прежде всего, радиоастрономические наблюдения позволяют уверенно исключить гипотезу «неизменной» Вселенной. Найдено, что пространственная плотность радиогалактик и квазаров, удаленных от нас на расстояние в несколько миллиардов световых лет, значительно больше, чем в сравнительной «близости» от нас***). Это означает, что в более ранние эпохи эволюции Вселенной отношение числа радиогалактик к числу всех галактик было значительно больше, чем сейчас. Причиной этого явления может быть, например, значительно большая плотность межгалактического газа. Следовательно, приток этого газа в области галактических ядер был тогда значительно более интенсивен, чем в нашу эпоху расширения Вселенной. Если взрывы в галактических ядрах, являющиеся причиной образования радиогалактик, связаны, как полагает автор, с притоком межгалактического газа, то, очевидно, наблюдаемый радиоастрономами эволюционный эффект будет объяснен. Впрочем,

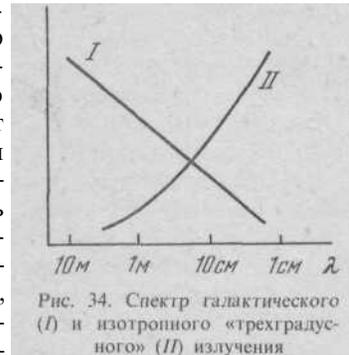
*) Установлено, что двойственность весьма распространена среди радиогалактик (см., например, рис. 33).

**) Сейчас выяснилось, что расстояния между компонентами двойных радиогалактик меняются в довольно широких пределах, что осложняет задачу, но не делает ее безнадежной.

***) Разумеется, «близость» в этом случае следует понимать относительно: речь идет об объектах, находящихся от нас не дальше, чем, например, миллиард световых лет.

возможны и другие объяснения. Но, так или иначе, радиоастрономические наблюдения говорят о том, что миллиарды лет назад Вселенная была другая, чем сейчас, т. е. она эволюционирует.

Однако самый выдающийся вклад в космологию радиоастрономия сделала в 1965 г., когда при испытании новой, весьма чувствительной приемной радиоаппаратуры в лаборатории Бэлла (США) на волне около 7 см был обнаружен совершенно новый тип космического радиолучения, интенсивность которого со всех направлений на небе была одинаковой. На более длинных волнах это излучение наблюдать затруднительно, так как оно «маскируется» более интенсивным радиолучением Галактики и Метагалактики. Дело в том, что, как показали дальнейшие наблюдения на других волнах сантиметрового диапазона, интенсивность этого излучения растет с ростом частоты пропорционально квадрату последней, между тем как интенсивность галактического и метагалактического синхротронного радиолучения довольно быстро падает с ростом частоты (рис. 34). Спектр и интенсивность вновь открытого «изотропного» радиолучения соответствует черному телу, нагретому до температуры около 3 К. Это излучение заполняет всю Метагалактику, так как никакой концентрации к Млечному Пути не обнаруживает (оно ведь «изотропно!»). Простой расчет показывает, что плотность энергии нового типа излучения составляет приблизительно 10^{-12} эрг/см³. Это значительно больше плотности всех видов энергии в Метагалактике, например, энергии оптического излучения от галактик, кинетической энергии движения материи и пр. Только плотность энергии покоя, равная ρc^2 , где ρ — средняя (или, как говорят, «размазанная») плотность метагалактического вещества, превышает плотность энергии открытого в 1965 г. нового вида излучения.



Объяснение этого таинственного «трехградусного» излучения, наполняющего всю Вселенную, было дано быстро. Еще в 1948 г. известный физик Г. А. Гамов (тот самый, который за двадцать лет до этого объяснил α -распад радиоактивных ядер на основе представлений квантовой механики) разработал теорию первоначально очень горячей расширяющейся Вселенной. Речь идет о самых ранних этапах ее эволюции, когда не было ни звезд, ни галактик, ни даже тяжелых элементов, (ведь последние образуются только в недрах звезд; см. гл. 6). По мере расширения этого чрезвычайно горячего «огненного шара» его температура должна быстро падать (по той же причине, по которой охлаждается расширяющийся в пустоту газ). Наконец, когда температура газа упадет приблизительно до 4000 К (как показывают расчеты, это было тогда, когда «возраст» Вселенной был около 500 тыс. лет, а размеры примерно в 1000 раз меньше современных), водород перестанет быть ионизованным. После этого заполняющее Вселенную излучение (которое в ту эпоху соответствовало нагретому до 4000 К телу) перестанет взаимодействовать с веществом и в дальнейшем будет менять свою интенсивность и спектральный состав не так, как расширяющаяся материя. Расчеты показывают, что по мере расширения Вселенной это излучение будет все время сохранять свой «равновесный» характер (т. е. описываться известной формулой Планка), а его температура будет убывать обратно пропорционально размерам Вселенной. Между тем газ будет охлаждаться значительно быстрее обратно пропорционально квадрату «размеров» Вселенной*). Так как после «отклейки» излучения от вещества Вселенная увеличила

*) Под «размерами» расширяющейся Вселенной здесь понимается расстояние между двумя какими-нибудь точками, которое в процессе расширения непрерывно растет.

свои размеры более чем в 1000 раз, то сейчас температура заполняющего Вселенную излучения должна быть около 3 К; именно это излучение и было обнаружено сотрудниками лаборатории Бэлла. Таким образом, это излучение не генерируется какими-либо телами «современной» Вселенной, а отражает ее состояние на раннем этапе эволюции. По этой причине автор книги назвал его «реликтовым» и сейчас этот термин получил всеобщее распространение. Подобно тому, как некоторые виды животных и растений являют собой анахронизм и оказываются «застывшими» остатками той жизни, которая была на Земле в прошедшие геологические эпохи (например, сумчатые млекопитающие, некоторые виды рыб и т. д.), трехградусное излучение есть как бы «реликт» давно прошедшего этапа в эволюции мира.

Обнаружение «реликтового» излучения, наряду с открытием Хабблом «разбегания» галактик, является крупнейшим достижением наблюдательной космологии. Оно резко сокращает количество возможных гипотез об эволюции Вселенной. Например, оно наверняка закрывает гипотезу «стационарной», не меняющейся со временем Вселенной, о которой речь шла выше, по крайней мере в ее первоначальном виде. Оно делает также несостоятельной гипотезу пульсирующей между конечными значениями средней плотности Вселенной.

Теперь можно считать полностью доказанным основное положение: Вселенная эволюционирует, и притом сильнейшим образом. Вместе с тем открытие «реликтового» излучения и его объяснение демонстрирует поистине безграничные возможности познания объективно существующего, реального мира. Стоит немного задуматься: до 1963 г. максимальное наблюдаемое значение красного смещения было $z = 0,47$ (для радиогалактики 3C 295 — см. предыдущую главу). В этом случае наблюдаемый объект излучал тогда, когда размеры Вселенной были в полтора раза меньше, чем сейчас, и она была моложе в два раза. Всего лишь 20 лет назад это считалось большим достижением. Открытие квазаров резко увеличило возможности астрономов «заглядывать» в прошлое Вселенной: • квазар с $z \sim 4$ (а такие объекты наблюдаются, см. гл. 6) соответствует размерам Вселенной, уже примерно в 5 раз меньшим, чем сейчас, и возрасту, в 10 раз меньшему! Это, конечно, гигантское продвижение «назад». И вот всего лишь через 2 года после обнаружения квазаров открывается реликтовое излучение, позволяющее наблюдать Вселенную, когда ее размеры были примерно в 1000 раз меньше современных, а возраст — в десятки тысяч раз меньше. И мы «непосредственно» видим, что в столь отдаленную эпоху еще никаких галактик и звезд не было и в помине, а Вселенная представляла собой просто расширяющееся, довольно горячее облако водородно-гелиевой плазмы с плотностью в несколько тысяч частиц на кубический сантиметр. Это — простейшая астрофизическая плазма, сходная с плазмой планетарных туманностей, но только «попроще» — ведь тяжелых элементов, присутствующих в планетарных туманностях, тогда еще не было. Есть, однако, одно существенное различие: в то время как плотность излучения в планетарных туманностях сравнительно невелика, наш «огненный шар» наполнен равновесным планковским излучением, плотность энергии которого на много порядков больше, чем плотность тепловой энергии плазмы*). И вот надо представить, что закономерное развитие этого простейшего плазменного облака, наполненного равновесным излучением, привело к той невероятной богатой картине Вселенной, которую мы сейчас наблюдаем. Огромное разнообразие звезд, включая сюда и нейтронные звезды, планеты, кометы, живую материю с ее невероятной сложностью и много еще такого, о чем мы сейчас не имеем даже понятия, — все в конце концов развилось из этого примитивного плазменного облака. Невольно напрашивается аналогия с каким-то гигантским геном, в котором была закодирована вся будущая, невероятно сложная история материи

*) При этом на каждый протон вещества Вселенной приходится несколько десятков миллионов квантов. Важно отметить, что это отношение сохранится в течение всей дальнейшей эволюции Вселенной..

во Вселенной... Конечно, это весьма поверхностная аналогия, но чувство безмерно-го удивления остается, по крайней мере у автора этой книги...

Кто может поручиться за то, что успехи науки в ближайшие несколько лет или десятилетий не позволят «заглянуть» в еще более ранние эпохи эволюции Вселенной? Заглянуть не глазами теоретиков (которым в известных пределах «все позволено»), а найти экспериментально нечто похожее на «реликтовые» кванты, но дающие информацию о гораздо более молодой Вселенной. Какой же она была до того, как излучение «отклеилось» от вещества? Ясно одно: она была еще меньшей, более горячей и более плотной. Никаких квантов излучения от той далекой эпохи сохраниться во Вселенной не могло. Похоже на то, что, в принципе конечно, сохраниться могли только нейтрино, для которых чудовищной плотности слои вещества — не преграда. Возможно, что когда-нибудь удастся наблюдать во Вселенной нейтрино, сохранившиеся во Вселенной от тех времен, когда ее возраст был меньше тысячных долей секунды, плотность превышала ядерную, а температура была выше, чем десятки миллиардов Кельвинов, т. е. она была той самой «ядерной сверхчастицей», о которой речь шла в начале этой главы. Сейчас нейтринная астрономия делает свои первые, совсем еще робкие шаги. Ее развитие будет неизбежно сопряжено с огромными трудностями. Но высочайшая цель — найти во Вселенной реальные (т. е. материальные) следы первых мгновений жизни Вселенной — должна оправдать все усилия на трудном пути развития нейтринной астрономии. Похоже на то, что первые следы уже найдены. Мы уже неоднократно говорили о химической эволюции Вселенной, о ее непрерывном обогащении тяжелыми элементами, возникающими путем нуклеосинтеза в недрах звезд — стационарных и взрывающихся. В частности, в течение многих миллиардов лет происходил процесс обогащения космического вещества гелием за счет водорода. Возникает, однако, вопрос: можно ли таким образом объяснить происхождение всего космического гелия? Оказывается, нет. В противном случае яркость удаленных галактик была бы значительно больше наблюдаемой. Это означает, что большая часть космического гелия (так же как и дейтерия) образовалась на дозвездной стадии эволюции Вселенной. Расчеты показывают, что это было тогда, когда плотность Вселенной была близка к ядерной, а температура исчислялась многими миллиардами Кельвинов. Но это означает, что возраст Вселенной исчислялся немногими минутами! Таким образом, хотя и косвенным путем, но, опираясь на реальные астрономические наблюдения галактик, мы можем заглянуть в эпоху, когда она была еще в сотни тысяч раз моложе, чем в эпоху «отклейки» реликтового излучения!

Вернемся, однако, к эпохе эволюции Вселенной, когда произошла «отклейка» излучения от вещества и возникли «реликтовые» кванты, улавливаемые современными радиотелескопами. Впереди еще гигантский эволюционный путь до современного состояния Вселенной. Плазма довольно быстро становится нейтральным водородно-гелиевым атомарным газом. Этот газ, расширяясь, быстро охлаждается, гораздо быстрее, чем излучение. Можно показать, что молекулы водорода образоваться не успеют — слишком мала скорость соответствующей химической реакции. Когда размеры Вселенной увеличатся в несколько десятков раз, а температура газа опустится ниже 5 К, наступит следующий очень важный период ее развития. Первоначально почти однородная газовая среда разобьется на отдельные сгустки. В чем причина такой «фрагментации»? Ведь первоначально такие сгустки представляли собой просто области Метагалактики, где плотность вещества только незначительно превышает среднюю плотность. Как же возникли эти области с избыточной плотностью в почти однородном, да еще к тому же быстро расширяющемся веществе Вселенной? На этот, казалось бы, такой простой вопрос современная наука не дает еще однозначного ответа. С достоверностью можно только сказать, что «зародыши» неоднородности Вселенной в ней присутствовали всегда, если угодно — изначала. Вселенная никогда не была строго однородной,

она была почти однородной даже в первые мгновения своего существования. И надо ясно понимать, если бы не эти «зародыши» неоднородности, история ее развития была бы совсем другой и, прежде всего убийственно скучной, лишенной какого бы то ни было многообразия форм и, конечно, жизни. Может быть, эти «зародыши неоднородности» и есть тот «сверх-ген», о котором речь шла выше...

Итак, из «зародышей» неоднородности Вселенной (о происхождении и природе которых мы пока не знаем ничего достоверного) вполне закономерным, теоретически осмысленным путем при $z \sim 10-100$ возникли гигантские газовые сгустки. Из этих сгустков, являющихся «протоскоплениями» галактик, путем дальнейшей фрагментации образовались меньшие сгустки. Каждый такой сгусток, характеризовавшийся определенной массой и вращательным моментом, постепенно эволюционировал в галактику. После этого расширение Вселенной сводилось к разлету галактик (т. е. к непрерывному увеличению расстояния между галактиками), между тем как сами галактики практически не расширялись.

Таким образом, нарисованная картина показывает, что галактики, а потом звезды образовались на сравнительно позднем этапе эволюции Вселенной, когда размеры последней были примерно в 10—100 раз меньше, чем сейчас. На ранних этапах своей эволюции галактики, по-видимому, были значительно более «активны», чем в наши дни (об активности галактик, точнее их ядер, см. предыдущую главу). Именно поэтому количество радиогалактик и квазаров в ту довольно отдаленную от нас эпоху было значительно больше, чем сейчас, о чем речь шла выше.

Далеко не весь газ Вселенной сконденсировался в галактики. Некоторая часть газа осталась в межгалактическом пространстве. Ультрафиолетовое и рентгеновское излучение образовавшихся к тому времени звезд и галактических ядер будет ионизировать и нагревать межгалактический газ. Температура его подымется до многих десятков миллионов Кельвинов*). Таким образом, ожидаемая довольно высокая температура межгалактического газа в современной Вселенной есть результат его «вторичного» разогрева — ведь к моменту образования скоплений галактик он был очень холодный. Межгалактическое пространство заполнилось также сверхэнергичными заряженными частицами — космическими лучами, которые образовались в результате активности ядер галактик и взрывов сверхновых звезд. До образования галактик во Вселенной не было космических лучей так же, как и тяжелых элементов. Постепенно Вселенная стала принимать те черты, которые мы сейчас наблюдаем.

Итак, Вселенная эволюционировала и эволюционирует. Эта эволюция, являющаяся ее основной особенностью, наблюдается на всех уровнях. Мы сейчас обрисовали картину эволюции Вселенной в целом от примитивной водородно-гелиевой плазмы до того грандиозного по своему многообразию феномена, который мы наблюдаем сейчас. В свою очередь эволюционируют галактики от простейших облаков до сложных спиральных звездных систем с огромным разнообразием популяций. Об эволюции звезд мы уже говорили в гл. 4. В гл. 9 речь будет идти об эволюции планетных систем. И, конечно, огромную эволюцию претерпела жизнь на Земле и, как можно полагать, на других планетах.

Современная наука о Вселенной — астрономия — вся насквозь эволюционна. Не всегда так было. Только развитие нашей науки, потребовавшее огромных усилий от ее творцов, привело к эволюционному взгляду на Вселенную, причем не в плане умозрительных заключений, а на основе строгого анализа фактов. В XVIII, XIX и даже первой половине XX столетия астрономия была статичной, застывшей. Изучались с большой точностью движения планет и комет, модели звездных атмосфер, их химический состав. И это, конечно, было очень важно. Но истинная

*) Недавно было обнаружено рентгеновское излучение от межгалактического газа в скоплениях галактик; согласно этим наблюдениям температура межгалактического газа около 10^8 Кельвинов, а плотность $\sim 10^{-4}$ частицы на кубический сантиметр или $\sim 10^{-28}$ г/см³.

картина меняющейся, поражающей многообразием явлений, богатой «скачками» и взрывами Вселенной стала ясной астрономам только в последнюю четверть века. Этот период «бури и натиска» по справедливости может быть назван «революцией в астрономии». В первую треть нашего века аналогичную революцию пережила физика. Сейчас мы являемся свидетелями революционного взрыва в биологии. Вместе с последней астрономия в наши дни находится в авангарде наук о природе.

Однако вернемся к космологии. Для решения общих вопросов о геометрии и метрике Вселенной очень важно оценить среднюю плотность вещества в ней. Эта оценка имела бы большое значение для выбора модели Вселенной, т. е. для вопроса о ее конечности или бесконечности. Оказывается, что «размазанная» плотность галактик дает величину, меньшую чем 10^{-30} г/см³.

Пока еще, однако, не совсем ясен вопрос, какая доля вещества во Вселенной находится в форме межгалактического газа. Можно только полагать, что этот газ должен быть очень горячим и достаточно разреженным. Если, например, окажется, что средняя плотность межгалактического вещества не больше размазанной плотности галактик, Вселенная не будет замкнута (так называемая «открытая модель»). Имеются основания полагать, что важнейший вопрос о плотности межгалактической среды будет в близком будущем окончательно решен методами рентгеновской астрономии.

Для того чтобы Вселенная была замкнута, нужно, чтобы средняя плотность межгалактического газа была примерно в 30 раз больше «размазанной» плотности галактик. Вряд ли это так. Если же все-таки окажется, что Вселенная замкнута, следует иметь в виду, что это является некоторой характеристикой четырехмерного пространственно-временного многообразия. Непонимание этого обстоятельства часто находит свое выражение в недоумевающем вопросе: если Вселенная замкнута, то что же находится за ее пределами? Конечно, можно было бы представить и другие Вселенные, более или менее сходные с нашей, если бы Мир (или «Сверхвселенная») был многообразием пяти или большего количества измерений. Нет, однако, никаких серьезных оснований в пользу этого произвольного предположения (см., впрочем, конец этой главы).

Приходится также слышать мнение, что вывод о замкнутости Вселенной якобы несовместим с философией диалектического материализма. Это, конечно, заблуждение. Основным атрибутом Вселенной с точки зрения философии диалектического материализма является ее объективное существование и познаваемость. Нелепо связывать судьбу этой философии с каким-нибудь конкретным свойством Вселенной, например свойством конечности или бесконечности. Закономерности Вселенной потому и называются объективными, что не зависят от предвзятых взглядов отдельных людей, плохо понимающих дух философии диалектического материализма.

Для проблемы происхождения и развития жизни во Вселенной ее расширение имеет очень большое значение. Как легко показать математически, плотность поля излучения в бесконечной Вселенной, равномерно заполненной излучающими объектами, должна быть очень большой. Так как в этом случае звезды должны экранировать друг друга, то поверхностная яркость неба должна быть такой же, как у звезд или Солнца. Иными словами, небо было бы ослепительно ярко, а температура вещества во всей Вселенной была бы около 5—10 тыс. К. Тот факт, что яркость неба, обусловленная излучением всех объектов Вселенной, все-таки незначительна, хотя Вселенная может быть и бесконечной, требует объяснения. Эта проблема известна астрономам уже свыше полутора столетий. Она получила название «фотометрический парадокс».

Еще в XIX столетии делались попытки устранить фотометрический парадокс при помощи тех или иных гипотез о характере распределения излучающих объектов во Вселенной. Эти попытки, однако, носили весьма искусственный характер

и оказались неудачными. Столь же неудачны были попытки устранения фотометрического парадокса путем введения поглощающей материи, распределенной по всей Вселенной. Анализ показал, что наличие такой поглощающей свет материи только усилило бы парадокс.

Развитие современной космологии, основывающейся на теории относительно-сти и подтвержденной наблюдениями реликтового излучения, устранило фотометрический парадокс. Решающим обстоятельством является наличие красного смещения в спектрах галактик. Благодаря этому явлению кванты света — фотоны, излученные очень далекими галактиками и дошедшие до нас, как бы «деградируют» или «тошуют»: соответствующие им длины волн станорятся все больше и больше, а энергии уменьшаются. Излучение самых удаленных от нас частей Вселенной благодаря явлению красного смещения уходит в длинноволновую, невидимую область спектра, и его интенсивность сильно падает. Можно сказать, что красное смещение как бы «срезает» излучение далеких областей Вселенной, тем самым устраняя фотометрический парадокс.

Необходимо подчеркнуть, что явление красного смещения, вызванного расширением, разлетом галактик, благоприятствует возникновению и развитию жизни в тех или иных уголках Вселенной. Если бы Вселенная не расширялась и была бы бесконечной, температура в ней была бы настолько высокой, что даже простейшие молекулярные соединения вряд ли могли образоваться. Конечно, нарисованная в этой главе картина развития и эволюции Вселенной является самой общей и по мере развития науки должна конкретизироваться и уточняться. Не исключено, что отдельные важные детали этой картины претерпят существенное изменение. Но основной вывод, к которому подводит нас развитие космологии и астрофизики во второй половине XX столетия, вряд ли будет поколеблен: в истории развития Вселенной, рассматриваемой как целое, были (и, вероятно, будут) эпохи, весьма затрудняющие, если не исключают, возникновение и развитие жизни. Жизнь есть закономерный этап развития материи во Вселенной. Тем более это относится к разумной жизни.

После того как современная астрофизика восстановила далекое прошлое Вселенной и были освещены все этапы ее удивительного развития, начиная от сверхгорячего и сверхплотного состояния, имеет смысл обсудить ее будущее развитие. В самом деле, более чем уместно поставить вопрос: а как будет выглядеть Вселенная в далеком будущем? Мы уже знаем, что в далеком прошлом она качественно отличалась от современного своего состояния. Можно ли ожидать качественного отличия состояния будущей Вселенной от современного?

Для ответа на этот вопрос надо прежде всего знать, замкнута Вселенная или, напротив, открыта. Другими словами, будет ли Вселенная сколь угодно долго расширяться («открытая» модель Вселенной) или когда-нибудь ее расширение сменится сжатием*). Выше мы уже подчеркивали, что окончательный выбор между этими двумя моделями сделать пока нельзя. Это будет возможно тогда, когда с полной надежностью будет определена средняя («размазанная») плотность вещества во Вселенной.

Заметим, что размазанная плотность галактик в несколько десятков раз меньше критической. Существует, однако, косвенный метод определения средней плотности вещества во Вселенной. Выше мы заметили, что дейтерий во Вселенной мог образоваться только в первые минуты после Большого Взрыва, когда плотность

*) Характер поведения Вселенной вполне аналогичен поведению камня, брошенного вверх в поле земного тяготения. Если его первоначальная скорость достаточно велика, он преодолеет тяготение и будет все время удаляться от Земли (аналог «открытой» модели). Если же скорость недостаточна, тяготение остановит его и он упадет обратно (аналог «закрытой» модели).

и температура были достаточно велики. Зная количество дейтерия в межзвездной среде (в 50000 раз меньше, чем водорода) и тогдашнюю температуру Вселенной, можно найти ее плотность. Этот метод дает значение плотности в сотню раз меньшую, чем критическая. В настоящее время это один из главных аргументов в пользу открытой модели.

Сравнительно просто предсказать будущее Вселенной для «закрытой» модели. Уж если Вселенная начнет сжиматься, то этот процесс ничто не остановит и она, в конце концов, пройдя через компактную, сверхплотную горячую фазу, сожмется в точку. В этом случае Вселенная как бы повторит историю «в обратном порядке». Весь цикл «расширение → остановка → сжатие» должен занять время порядка 100 миллиардов лет. Так как со времени начала расширения прошло «только» 15—20 миллиардов лет, то мы (в случае «закрытой» модели) находились бы в начале цикла. Начнет ли Вселенная после своего сжатия в точку новый цикл расширения? Будут ли новые циклы полным подобием предыдущего (т. е. нашего, в котором мы живем)? Однозначных ответов на эти вопросы пока нет, хотя вряд ли можно ожидать тождества разных циклов. Например, при каждом новом цикле могут образовываться совершенно разные элементарные частицы, что, конечно, радикально отразится на характере его протекания.

В случае «открытой» модели, которой придерживается сейчас большинство космологов и специалистов по внегалактической астрономии, при своем неограниченном расширении Вселенная и материя, из которой она состоит, в невообразимо далеком будущем претерпят ряд качественных изменений. Необходимо подчеркнуть, что речь идет о чудовищно огромных интервалах времени, по сравнению с которыми 15—20 миллиардов лет, прошедших после первоначального взрыва Вселенной, кажутся мгновением. Что и говорить — в случае открытой модели «у нас в запасе вечность», хотя эту категорию постичь нашими жалкими чувствами, мягко выражаясь, затруднительно. В этой связи следует заметить, что как огромные, так и ничтожно малые величины, мы воспринимаем условно, всегда примеряя к ним свой весьма ограниченный жизненный опыт. Именно это мы имели в виду, когда в гл. 1 рассказывали о пространственных и временных масштабах Вселенной. Добавим к этому, что физики, занимающиеся элементарными частицами, ничтожный интервал времени 10^{-23} с (время жизни самых нестабильных частиц, так называемых «резонансов») отождествляют со временем, за которое частица, движущаяся со скоростью c , пробегает отрезок, равный размеру ядра (10^{-13} см).

Вернемся, однако, к открытой модели Вселенной. Что ее ожидает в столь необозримо удаленном от нас будущем?

Прежде всего, через 10^{14} лет (что во много тысяч раз превышает возраст современной Вселенной) «остынут», исчерпав свое ядерное горючее, все карликовые звезды с массой, превышающей несколько сотых долей солнечной массы. Эти звезды превратятся в белые карлики, которые, остывая, станут холодными «черными» карликами с размерами порядка Земли и с очень большой плотностью. Несмотря на то, что взаимные случайные сближения звезд в галактиках будут происходить редко, через 10^{15} лет по этой причине практически все планеты будут оторваны от своих материнских звезд. По этой же причине (случайные сближения звезд) спустя $\sim 10^{19}$ лет по крайней мере 90% всех звезд покинут свои галактики, а центральные области последних сожмутся, образуя весьма массивные ($M \sim 10^6 M_{\odot}$) черные дыры. Итак, наступит эпоха, когда галактики прекратят свое существование (от них останутся только массивные черные дыры), а из звезд останутся только холодные белые карлики. При этом отдельные звезды будут участвовать в расширении Вселенной.

До этой эпохи разлетались только галактики, размеры которых сравнительно мало менялись, так что расстояния между звездами были такими же, как в нашу эпоху, т. е. несколько световых лет. Теперь же расстояния между соседними звезда-

ми будут в начале этой эпохи превышать много мегапарсек и дальше будут неограниченно расти. Расстояния между соседними звездами станут превосходить нынешние расстояния до квазаров, исчисляемые миллиардами парсек. Если учесть, что к тому времени все звезды будут белыми карликами весьма низкой светимости, то на воображаемом небосклоне какого-нибудь ничтожного такого карлика никаких светил ни в какой телескоп обнаружить будет нельзя. До чего же эти звезды будут изолированы — страшно даже представить. И какая там будет царить черная ночь...

Переходя к неизмеримо более удаленному будущему, мы должны учитывать качественно новые изменения в самой структуре материи. Прежде всего, нельзя исключить возможность того, что с материей могут произойти «крупные неприятности». Дело в том, что нельзя гарантировать стабильность протонов — основных «кирпичей», из которых построена вся материя. Существующие экспериментальные данные гарантируют, что период радиоактивного распада протона во всяком случае превышает 10^{30} лет. Но где гарантия, что протон останется стабильным в течение неизмеримо больших промежутков времени? Существуют, например, теории, согласно которым протоны самопроизвольно распадаются на у-кванты и нейтрино за время $\sim 10^{32}$ лет. Сейчас уже планируются эксперименты, имеющие целью обнаружить самопроизвольный распад протонов. Если эти эксперименты дадут положительный результат, то Вселенная через $\sim 10^{32}$ лет будет представлять совокупность разлетающихся квантов и нейтрино с непрерывно убывающей (по мере расширения Вселенной) энергией. Хочется, однако, верить (сейчас речь может идти только о вере), что протон абсолютно стабильная частица и такой мало интересный финал нашей Вселенной не угрожает...

Имеется еще одна серьезная проблема: где гарантия того, что законы природы, действующие во Вселенной в современную эпоху, будут действовать в чудовищно отдаленном будущем? Гарантий, конечно, нет, но обнадеживающее обстоятельство все же имеется. Одним из удивительнейших открытий последних десятилетий является обнаружение естественного уранового реактора в Габоне (Западная Африка). По причине высокого уровня выделения нейтронов за последние пару миллиардов лет изотопный состав в окрестных минералах там сильно изменен. И вот оказывается, что из анализа относительного содержания изотопов самария следует, что в этих ядрах баланс электромагнитных и ядерных сил поддерживается на постоянном уровне по крайней мере миллиарды лет! Это и доказывает неизменность законов природы по крайней мере в течение миллиардов лет!

Итак, для дальнейшего анализа мы будем придерживаться гипотез об абсолютной стабильности протонов и неизменности законов природы. В таком случае следует считаться с тем, что через $\sim 10^{65}$ лет любое твердое тело становится даже при абсолютном нуле жидким. Значит, все остывшие белые карлики, некогда бывшие звездами — «хорошими и разными», станут сферическими жидкими каплями! Еще через чудовищный промежуток времени $\sim 10^{1500}$ (!) лет любое вещество становится радиоактивным. Дело в том, что за такие промежутки времени легкие ядра будут «сливаться» в более тяжелые, а тяжелые станут делиться. В результате этих процессов все жидкие капли — бывшие звезды — станут железными.

Но что произойдет с другой компонентой Вселенной — бывшими массивными звездами и ядрами галактик, ставшими черными дырами? Для дальнейшего анализа очень существен вывод, полученный несколько лет тому назад выдающимся английским теоретиком Хокингом. Он показал, что черные дыры отнюдь не являются «вечными образованиями» (как это считалось раньше). Через промежутки времени, пропорциональные кубам их масс, они «испаряются», излучая электромагнитные волны с длиной порядка размеров черной дыры. Например, черная дыра с массой, равной 10 солнечным массам (что близко к массе подозреваемой черной дыры Лебедь X-1) «испарится» через 10^{67} лет, излучая радиоволны дли-

ной около 30 км. А сверхмассивная черная дыра ($M \approx 10^9 M_{\odot}$ — бывшее ядро какой-нибудь галактики) испарится через 10^{61} лет, излучая сверхдлинные волны длиной порядка десяти астрономических единиц. Итак, все черные дыры — «звездные» и «ядерно-галактические» в конце концов превратятся в сверхдлинноволновое электромагнитное излучение. Останутся от Вселенной только плотные, жидкие, -холодные железные капли. Но это еще не все! Оказывается, что когда истечет больше, чем 10^{1026} (!!) лет, эти железные капли превратятся либо в нейтронные звезды (которые потом превратятся в черные дыры), либо прямо в черные дыры. Последние же, практически мгновенно (всего за «какие-нибудь» 10^{67} лет), испарятся.

Итак, в открытой модели, при всех вариантах (даже если протон нестабилен!) в конечном итоге Вселенная превратится в совокупность разлетающихся сверхдлинноволновых квантов, а также нейтрино малых энергий. Остается только утешаться тем, что это будет, мягко выражаясь, ох, как не скоро! Имеется огромное количество проблем, неизмеримо более актуальных, от решения которых зависит будущее человечества и его отдельных представителей. Все же согласитесь, любопытно знать, что будет со Вселенной в необозримо далеком будущем. Такова уж природа человека...

В заключение этой главы остановимся на очень интересном и, по-видимому, важном вопросе о соотношениях между «мировыми константами» макро и микромиров. Мы увидим, что для интересующей нас проблемы жизни во Вселенной эти соотношения играют решающую роль.

Из современной физики известно, что все закономерности мира управляются четырьмя типами взаимодействий: 1) электромагнитными, 2) гравитационными, 3) слабыми и 4) сильными. Первый тип взаимодействия определяет структуру атомов, а следовательно, описывает всю картину явлений в химии и физике (за исключением ядерных процессов). Он характеризуется «константой взаимодействия» — зарядом электрона e , связанной с известной безразмерной постоянной тонкой структуры $\alpha = \frac{e^2}{hc} \approx \frac{1}{137}$ ($h = \frac{h}{2\pi}$ — постоянная Планка, c — скорость света). Гравитационное взаимодействие достаточно массивных тел имеет решающее значение для планетной, галактической и метagalactic астрономии. Оно может характеризоваться своей константой взаимодействия — гравитационной постоянной G и связанной с ней безразмерной $\alpha_G = \frac{Gm_p^2}{hc} \approx 5 \cdot 10^{-39}$. Сильные взаимодействия доминируют в области атомных ядер и элементарных частиц, в то время как слабые описывают такие процессы, как β -радиоактивность. Для сильных и слабых взаимодействий также можно ввести свои константы взаимодействия, по смыслу аналогичные α . Они обозначаются как α_s и α_w и имеют определенные значения.

Несомненно, приведенная выше классификация взаимодействий отражает современный уровень физической науки. Вполне возможно, что в будущем (может быть, и недалеко) взаимодействия будут либо полностью объединены, либо их останется меньше. (Это означает, что между константами взаимодействия может быть какая-то связь.) Но это обстоятельство не должно уменьшить наше удивление тому факту, что между константами взаимодействия и характеристиками Вселенной существует какая-то странная зависимость. Например, $R_b \approx ct_0 \approx \left(\frac{\alpha}{\alpha_G}\right) a_0$, где

R_b и t_0 — радиус и возраст Вселенной $a = \frac{h}{m_0 c^2} = 0,53 \cdot 10^{-8}$ см — радиус первой орбиты боровской модели водородного атома. Другими словами, отношение радиуса Вселенной ($R_b \sim 10^{28}$ см, так как возраст Вселенной $t_0 \sim 10^{10}$ лет = 3- 10^{17} секунд) к размерам атома равно отношению электромагнитных и гравитационных сил, действующих между элементарными частицами!

Для объяснения этого удивительного обстоятельства знаменитый английский физик Дирак еще в 1937 г. предложил гипотезу, что гравитационная постоянная G меняется обратно пропорционально возрасту Вселенной t , в то время как остальные константы (c, \hbar, e) остаются неизменными. Однако современные наблюдения метагалактических объектов исключают такую возможность.

Совершенно другую гипотезу развил в 1961 г. выдающийся американский физик и астроном Дике. Эту гипотезу по праву можно назвать «антропной». Суть ее состоит в следующем. Для того чтобы где-нибудь во Вселенной возникла жизнь, необходимо, чтобы были тяжелые элементы, которые образуются при вспышках сверхновых. Об этом мы уже говорили раньше (см. гл. 5). Но отсюда следует, что возраст познаваемой разумными наблюдателями Вселенной должен быть не меньше возраста звезд, вспыхивающих как сверхновые. Если масса последних $\sim 1,5$ солнечной (что соответствует сверхновой I типа — см. гл. 5), то этот возраст t порядка нескольких миллиардов лет. Из теории внутреннего строения и эволюции звезд можно получить соотношение: $t_1 \approx \alpha_G^{-1} t_p$, где $t_p \approx \frac{r_p}{c} \approx 10^{-23}$ с, $r_p = \frac{\hbar}{m_p c} \approx 10^{-13}$ см — радиус протона. С другой стороны, возраст Вселенной t_0 не может быть много больше t_p , так как в этом случае почти все звезды превратились бы в белые карлики и нейтронные звезды, о чем речь уже шла выше. Поскольку мы

такой Вселенной не наблюдаем, то $t_0 \sim t_1 \approx \alpha_G^{-1} \cdot t_p$, $ct_0 \approx \alpha_G^{-1} \cdot r_p = \left(\frac{\alpha}{\alpha_G}\right) a_0$.

Таким образом, соотношение между размерами Вселенной и атома есть простое следствие из условия наблюдаемости Вселенной разумными существами!

Между константами гравитационного и слабого взаимодействий имеется соотношение: $\alpha_G \approx \alpha_w^4$ где $\alpha_w = \frac{gm_c^2}{\hbar^3}$. Возможно, что это соотношение также выражает «антропный» принцип. Как оказывается, это соотношение объясняет, почему во время первичного синтеза ядер, когда возраст Вселенной исчислялся немногими минутами, 25 % всех образовавшихся ядер (по массе) были гелиевыми. Если бы α_w было чуточку меньше, все образовавшиеся ядра были бы гелиевыми. В такой «гелиевой» Вселенной жизнь, конечно, невозможна (например, не было бы воды). С другой стороны, если бы α_w было бы чуточку больше, гелия во Вселенной не было бы совсем и эволюция звезд шла бы совсем по-другому. Небезынтересно также отметить, что если бы α_w даже незначительно отличалось от своего наблюдаемого значения, не было бы вспышек сверхновых, так как условия взаимодействия нейтрино с веществом были бы совершенно другими.

Остановимся теперь на другом обстоятельстве. Выше мы уже отмечали, что во Вселенной на каждые $S \approx 10^8$ фотонов приходится один протон. Ни физика, ни космология не дают объяснения этому надежно установленному факту. И вот выясняется, что «антропный» принцип ограничивает значение S . Оказывается, это предельное значение $S \approx \alpha_G^{-1/4} \approx 10^9$. В противном случае ни галактики, ни звезды не могли бы образоваться путем конденсации газа под действием силы тяготения.

Для возникновения где-нибудь во Вселенной жизни, как оказывается, решающее значение имеют соотношения между массами элементарных частиц. Отношения масс элементарных частиц удивительным образом связаны с константами сильного и электромагнитного взаимодействий. Например, $f^2 = \frac{2m_p}{m_n}$, $\alpha = \frac{m_n - m_p}{m_n}$, где $f^2 = 15$, m_n и m_p — массы нейтронов и π -мезонов. Если бы эти соотношения не выполнялись, в процессе нуклеосинтеза элементы, необходимые для жизни, не образовывались бы. Следовательно, эти соотношения могут также иметь «антропный» смысл. Заметим в этой связи, что условие $m_c \ll m_p$ необходимо для образования сложных многоатомных молекул, являющихся основой жизни.

Мы видим, таким образом, что наша реальная Вселенная поразительно приспособлена для возникновения и развития в ней жизни. Если бы, например, первичный набор масс элементарных частиц, формировавшийся в первые секунды после «Большого Взрыва», был бы 'другой (а это, в принципе, в тех условиях вполне было возможно!), Вселенная была бы совсем другой и уже во всяком случае безжизненной. Точно так же решающее значение имеет и первичная удельная энтропия вещества Вселенной, определяемая величиной S (см. выше).

Вопрос о том, существуют ли другие Вселенные, представляется отнюдь не праздным. Современная наука не в состоянии даже подойти к этой проблеме. Пока сделаны только первые попытки к первому шагу в этом фантастически трансцендентном направлении. Мы имеем в виду чисто абстрактные конструкции американцев Уиллера и Эверетта. Последний пытался связать этот вопрос с фундаментальной для квантовой механики проблемой измерений. Согласно Эверетту при каждом таком измерении Вселенная «разветвляется» на ряд параллельных Вселенных, каждая из которых соответствует определенному результату измерений. Пока это, конечно, игра ума. Но — кто знает, чем такая игра кончится? Не является ли идея Эверетта «безумной» в высоком «Боровском» смысле этого слова? Придется, увы, подождать, по крайней мере до XXI века... А пока, вместе с Вольтеровским Панглосом мы имеем все основания считать, что живем в лучшем из миров, так как практически все «Вселенные Эверетта» должны быть «мертворожденными». Как же мог Вольтер предвидеть такую ситуацию?..

Необходимо подчеркнуть следующее обстоятельство. До последнего времени молчаливо принималось, что возникновение и развитие жизни на Земле есть строго локальный феномен. Другими словами, в возникновении и эволюции жизни на Земле Галактика и Метагалактика никакой роли не играют*). Считалось, что если бы ничего, кроме Солнечной системы, во Вселенной не было, жизнь развивалась так, как мы это знаем. Предполагалось, что Солнечная система и з о л и р о в а н а . Теперь ясно, что это не так. Вся эволюция Вселенной от момента ее возникновения при «Большом Взрыве» как бы подготовила возникновение в отдельных ее малых частях очагов жизни. Нельзя понять возникновение и эволюцию жизни на Земле без понимания процесса возникновения и развития всей Вселенной.

*) Если, конечно, не говорить о гипотезе панспермии.

8. Кратные звездные системы

В гл. 2 мы рассматривали некоторые основные характеристики звезд: диаметр, светимость, цвет и др. К этим характеристикам следует добавить еще одну — кратность. Значительное число звезд (от 30 до 50%) образует двойные, тройные и другие кратные системы. Явление кратности, очевидно, является фундаментальным свойством огромного количества звезд.

Наблюдается большое разнообразие свойств кратных систем. В ряде случаев звезды, образующие систему (или, как говорят астрономы, «компоненты системы»), находятся на довольно большом расстоянии (рис. 35). Систематические наблюдения позволяют установить орбитальное движение таких звезд друг относительно друга.



На рис. 36 приведены последовательные положения одной из компонент двойной системы ξ Большой Медведицы относительно другой. Периоды обращения в отдельных случаях меняются от нескольких лет до тысячелетий. Применение известных законов небесной механики позволяет делать оценки масс звезд.

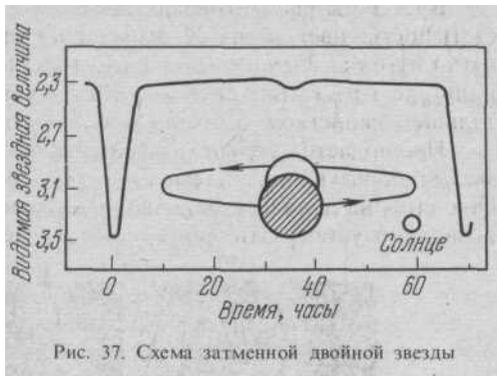


В большом числе случаев, однако, компоненты двойных систем расположены настолько близко, что их нельзя наблюдать раздельно; при таком положении двойственность системы доказывается спектральными наблюдениями. Благодаря орбитальному движению звезд друг относительно друга их скорости по лучу зрения неодинаковы. Например, одна звезда может в данный момент к нам приближаться, другая — удаляться. Из-за эффекта Доплера это приведет к небольшому сдвигу спектральных линий одной звезды относительно соответствующих линий другой. Так как из-за орбитального движения

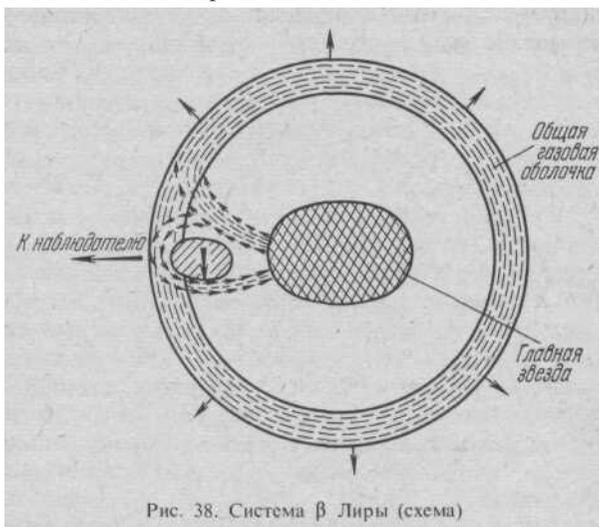
скорости по лучу зрения периодически меняются*), то и смещение соответствующих линий тоже будет периодически меняться. Систематически наблюдая такое смещение и установив его зависимость от времени, можно совершенно надежно вычислить основные характеристики орбиты и получить некоторое представление о массах компонент тесной двойной системы. Такие тесные двойные системы называются астрономами «спектрально-двойными».

*) Очевидно, период изменения скоростей равен периоду обращения одной звезды относительно другой.

В тех сравнительно редких случаях, когда плоскость орбиты тесной пары звезд образует небольшой угол с лучом зрения, можно наблюдать как бы «затмение» одной звезды другой. Так как обе компоненты такой системы раздельно не видны ни в один даже самый мощный телескоп, то во время такого «затмения» можно наблюдать только уменьшение блеска звезды. Когда затмение кончается (обычно оно длится несколько часов), звезда восстанавливает свой первоначальный блеск. Построив по возможности точную зависимость блеска звезды от времени (так называемую «кривую блеска» звезды), можно совершенно уверенно определить не только основные параметры орбиты, но и диаметры звезд и даже установить, как спадает яркость их дисков от центра к краю. Схема орбиты затменной переменной звезды Алголь и соответствующая ей кривая блеска приведены на рис. 37.



Компоненты спектрально-двойных и затменных переменных звезд бывают расположены очень близко друг к другу — иногда они почти соприкасаются своими поверхностями. В таких случаях наблюдаются интересные и сложные явления вытекания материи из звезд, вызванные мощными приливными силами. Часто такие звезды погружены в общую протяженную, сильно разреженную газовую оболочку. Схема одной такой тесной пары приведена на рис. 38. Следует напомнить, что вся картина явления получается только из анализа спектров и блеска звезд. Разумеется, в телескопы изображения, подобные приведенному на рис. 38, никогда не наблюдаются; для этого недостаточна разрешающая способность даже самых крупных инструментов.



Периоды обращения тесных пар, как это следует из известного закона Кеплера и непосредственно подтверждается наблюдениями, очень малы. Самый короткий из известных периодов принадлежит затменной переменной АМ Гончих Псов. Он близок к 18 мин.

Как уже упоминалось в гл. 5, весьма вероятно, что все так называемые «новые» звезды представляют собой очень тесные двойные системы. Несколько таких звезд, согласно наблюдениям, являются затменными переменными. Оказывается, наличие «звезды-соседки», расположенной слишком близко, «мешает» нормальной эволюции звезды, в частности, переходу ее в стадию красного гиганта (см. ниже). При этом может возникнуть некоторая неустойчивость, приводящая к регулярно повторяющимся (через сотни и тысячи лет) вспышкам. Во время таких вспышек светимость новых хотя и велика, но в тысячи раз меньше, чем у сверхновых. Масса газа, выбрасываемого при каждой вспышке, составляет $10^{-3} - 10^{-5}$ массы Солнца.

Массы компонент двойной системы (в тех случаях, когда их можно найти по-разному, а это возможно далеко не всегда) обычно меняются не в очень широких пределах. Часто массы их почти одинаковы или, во всяком случае, близки. Бывает, однако, и так, что масса одной компоненты в 10 раз меньше другой, а светимости отличаются в тысячи раз и более. Среди компонент двойных систем наблюдаются белые карлики. Примером может служить спутник Сириуса. Для интересующей нас проблемы особое значение имеет тот факт, что некоторые компоненты кратных систем обладают настолько малой массой, что их светимость совершенно ничтожна. Их нельзя наблюдать ни в какие телескопы, хотя они иногда находятся на довольно значительном расстоянии от «главной» массивной и яркой звезды. В таких случаях говорят о «невидимых спутниках» звезд. Классическим примером такой системы является одна из ближайших к нам звезд 61 Лебеда, особенно тщательно исследовавшаяся пулковским астрономом А. Н. Дейчем. Факт двойственности у этих звезд устанавливается путем изучения ничтожно малых периодических колебаний в движении главной звезды. Излишне подчеркивать, что такие наблюдения требуют большой точности и тщательности. В настоящее время известно уже несколько «невидимых» спутников. Их массы очень малы, приблизительно 0,01 солнечной массы, что всего лишь в 10 раз превышает массу планеты-гиганта Юпитера! И все же такие небесные тела являются звездами, т. е. самосветящимися газовыми шарами, а не холодными планетами, светящими (в видимой части спектра) отраженными лучами звезды.

Впрочем, следует подчеркнуть, что разница между планетами-гигантами и невидимыми спутниками звезд не принципиальна. Во-первых, химический состав у них должен быть сходен; как те, так и другие состоят в основном из водорода и гелия. В последние годы на орбитальных станциях обнаружено много «рентгеновских звезд», оказавшихся тесными двойными системами (см. ниже). Если бы масса Юпитера была раз в 10 больше, температура в его центральных частях повысилась бы настолько, что он стал бы излучать (хотя и слабо) в видимой части спектра. Юпитер стал бы весьма слабой звездой — красным карликом с температурой поверхности 1—2 тыс. К.

Обращает на себя внимание большая распространенность невидимых спутников звезд. Так как условия их наблюдений очень трудны, они могут быть обнаружены только у очень близких к нам звезд. И вот оказывается, что в сфере радиусом в 10 пк, окружающей Солнце, из 53 звезд 5 имеют невидимые спутники! Вполне естественно возникает вопрос: не имеются ли у некоторых звезд еще меньших размеров спутники, которые в силу своей относительно ничтожно малой массы не вызывают заметных колебаний в движении этих звезд? Но такие «ультраневидимые» спутники уже не отличаются практически от больших планет типа Юпитера и Сатурна. Тем самым мы подходим к основному вопросу: имеются ли основания полагать, что у многих звезд существуют планетные системы, в той или иной степени напоминающие нашу?

К этой центральной проблеме мы вернемся в следующей главе. Здесь же мы рассмотрим более узкий вопрос: можно ли в настоящее время средствами современной наблюдательной астрономии доказать наличие планет у ближайших к нам звезд? Ограничим рассмотрение только большими планетами-гигантами. Ясно, что если, например, в настоящее время не существует возможности наблюдать даже около самых близких к нам звезд большие планеты, то не может быть и речи о непосредственных наблюдениях, особенно интересных для нас планет типа Земли или Марса.

Допустим, что на расстоянии 10 пк от нас (около 33 световых лет) находится звезда, похожая на Солнце. Вокруг этой звезды на таком же расстоянии, что и Юпитер от Солнца (в 5,2 больше, чем расстояние от Солнца до Земли), обращается планета-гигант. Пусть эта планета будет «двойником» Юпитера, т. е. имеет

такие же размеры и массу. Предположим еще, что мы находимся почти точно в плоскости орбиты этой планеты. В принципе обнаружить наличие такой планеты около звезды можно тремя способами (рис. 39). Первый из них заключается в следующем. Очень медленное прямолинейное перемещение звезды по небу*), обусловленное ее движением относительно Солнца, должно дополняться «волновыми» колебаниям. Период «волны» будет, очевидно, равен периоду движения планеты,



т. е. в нашем случае 11,9 года. Такое «волновое» движение объясняется тем, что звезда из-за притяжения планетой движется по эллиптической орбите вокруг общего центра тяжести звезды и планеты. Это орбитальное движение складывается с пространственным движением. Так как масса звезды в 1000 раз больше, чем масса планеты, центр масс системы находится близко от центра звезды. Поэтому амплитуда «волны» в собственном движении звезды очень невелика.

Расчеты, выполненные в свое время известным американским астрономом О. Л. Струве, показывают, что отклонение собственного движения от прямолинейного не превышает 0,0005 сек. дуги в год, т. е. ничтожно мало и находится за пределами точности современных астрономических наблюдений. Заметим, что, если бы масса спутника звезды была в 10 — 20 раз больше, чем у Юпитера, такие колебания в собственном движении уже можно было бы (правда, с трудом) обнаружить. Именно этим способом были открыты и изучаются невидимые спутники некоторых близких звезд, о которых шла речь.

Другой способ — спектроскопический. Движение звезды по орбите вокруг центра масс системы «звезда — планета» должно вызывать периодические колебания составляющей скорости звезды по лучу зрения. В самом деле, легко убедиться, что будут такие промежутки времени, когда орбитальная скорость направлена к нам и от нас. Период колебаний лучевых скоростей должен быть равен периоду обращения планеты. Однако этот эффект ничтожно мал. Расчет О. Л. Струве показывает, что периодические изменения лучевой скорости звезды не превышают 10 м/с, что составляет примерно тысячную долю полной лучевой скорости звезды. Скорости 10 м/с соответствует смещение длины волны спектральной линии примерно на $0,0001\text{Å}$ (напомним, что $1\text{Å} = 10^{-10}\text{м}$, а длина волны видимого света лежит в пределах 4 — 7 тыс. Å). Такие ничтожно малые изменения длины волны измерить невозможно, особенно если учесть, что спектральные линии не бесконечно узки, а имеют конечную ширину порядка десятых долей ангстрема и больше.

Третий способ — фотометрический, т. е. сводится к систематическому, по возможности точному, измерению блеска звезды. Так как по условию земной наблю-

*) Такое перемещение называется «собственным движением» звезды. Для близких звезд оно достигает нескольких секунд дуги в год.

датель находится в плоскости орбиты планеты, то периодически каждые 11,9 года планета будет проектироваться на диск звезды. Подобное явление наблюдается и в Солнечной системе. Мы имеем в виду прохождение планет Венеры и Меркурия по диску Солнца. Так как планета — темное, не самосветящееся тело, то в случае, когда она проектируется на звезду, некоторая (малая) часть диска последней будет закрыта. Поэтому блеск звезды будет несколько уменьшен. Это аналогично явлению затменных переменных звезд (см. рис. 37).

Расчеты показывают, что при прохождении планеты размером с Юпитер через диск звезды, подобной Солнцу, ее блеск уменьшится на 0,01 звездной величины. Интересно отметить, что такие малые изменения потока излучения от звезд современная электрофотометрия зарегистрировать уже может. Вспомним, однако, что мы рассматривали очень маловероятный случай, когда направление «Солнце - звезда» лежит в плоскости орбиты планеты. Достаточно отклониться этому направлению всего лишь на 2—3 мин. дуги, как уже планета ни при каком положении не будет проходить через диск. Таким образом, и этот возможный способ наблюдения планет, обращающихся вокруг звезд, оказывается практически нереальным.

Напомним, что речь шла о возможности наблюдений очень большой планеты, обращающейся по орбите вокруг достаточно близкой к нам звезды. Из сказанного следует, что современная астрономия прямыми наблюдениями пока не в состоянии обнаружить присутствия планет у звезд, удаленных от нас на расстояние более 10 пк. Впрочем, необходимо заметить, что недалеко то время, когда такие наблюдения смогут быть проведены. Если на космической научной станции, установленной на искусственном спутнике Земли, будет крупный телескоп с объективом диаметром 2 м или больше, то появится возможность непосредственных наблюдений планет-гигантов, обращающихся вокруг близких к нам звезд. Дело в том, что возможности больших телескопов, расположенных на Земле, используются далеко не полностью. Из-за преломления света на мелких, беспорядочно движущихся струях и неоднородностях атмосферы даже точечный источник света (например, звезда) размывается в диск размерами 0,5—2 сек. дуги. Между тем если планета-гигант удалена от своей звезды на расстояние, равное расстоянию от Земли до Солнца («астрономическая единица»), а сама звезда удалена от нас на 10 пк, то угловое расстояние между планетой и звездой никогда не будет превышать 0,1 сек. дуги. Это означает, что телескоп любых размеров, если он установлен на Земле, не разделит изображения планеты и звезды. Кроме того, ввиду рассеяния света в земной атмосфере, вокруг сравнительно яркой звезды всегда будет светящийся ореол, в котором полностью «утонет» ничтожно слабая по своей яркости планета.

Другое дело, если такой телескоп помещен на космической станции. Атмосферные помехи, о которых шла речь, уже не будут мешать наблюдениям. Это, конечно, не означает, что можно будет отдельно наблюдать (например, фотографировать) сколь угодно близкие друг к другу звезды. Существует и здесь предел, обусловленный волновой природой света. Ввиду дифракции на оправе объектива телескопа каждая звезда в фокальной плоскости последнего даст систему колец конечной толщины. По этой причине предельное угловое «разрешение» телескопа пропорционально отношению длины волны света к диаметру объектива. Например, для синих лучей при диаметре объектива 1 м предельное угловое расстояние между звездами, при которых их еще можно наблюдать отдельно, будет меньше 0,1 сек. дуги. Применение специальных приборов — интерферометров — позволяет измерять углы даже в 0,01 сек. дуги.

Звездная величина большой планеты, сходной с Юпитером, находящейся на расстоянии одной астрономической единицы от звезды, похожей на Солнце и удаленной от нас на расстояние 10 пк, будет около 24.

<> На рис. 40 показана мощность излучения Солнца и Юпитера в разных диапазонах спектра. В оптическом диапазоне различие в миллиард раз, в инфракрасном около волны 30 мкм — всего в 10 тысяч раз. В США заканчивается подготовка к запуску телескопа с зеркалом 2,4 м, с помощью которого, вероятно, удастся обнаружить планеты около ближайших звезд. Космический инфракрасный телескоп с раскрывающимся рефлектором диаметром около 15 м способен обнаружить юпитероподобные планеты в пределах десятка световых лет от нас <>

Приведенные выше соображения относятся к оценке возможности наблюдать планетные системы на расстояниях 10 пк и больше. Ну, а если планетная система находится «совсем близко», на расстоянии 1,5–2 пк? На таком расстоянии от нас находится столь малое число звезд, что их можно буквально пересчитать по пальцам. Казалось бы, вероятность обнаружения планетных систем у наших ближайших соседей должна быть весьма незначительной. Тем большее значение имеет исключительно важное исследование известного американского астронома

ван де Кампа, касающееся одной из наиболее близких к нам звезд — знаменитой «летающей звезды Барнарда».

Эта замечательная звезда находится в созвездии Змееносца и отличается самым большим собственным движением среди всех известных звезд. По этой причине она и получила свое необычное название. Хорошо известно, что звезды только в первом приближении можно называть «неподвижными», т. е. не меняющими своего положения друг относительно друга. В действительности из-за того, что они движутся в пространстве с относительными скоростями порядка десятков километров в секунду, их взаимное расположение очень медленно меняется. Однако по причине огромной величины межзвездных расстояний угловое перемещение по небесной сфере за год (а это и есть «собственное движение») даже для самых близких звезд очень редко превышает 1 с. Для звезды Барнарда эта величина равна 10,3 с в год. Это означает, что за 180 лет она переместится по небу на величину лунного диаметра, который, как известно, близок к $\frac{1}{2}$ градуса. Столь большое собственное движение этой звезды объясняется, прежде всего, тем, что после тройной системы а Центавра звезда Барнарда является нашей ближайшей соседкой. Расстояние до нее всего лишь 1,8 пк. Это очень слабый красный карлик спектрального класса M5, радиус которого в 6 раз меньше солнечного, а масса составляет 15% солнечной массы.

Многолетние наблюдения ван де Кампа привели к открытию у этой звездочки невидимого спутника рекордно малой массы. На протяжении 25 лет американский астроном получил около 2000 фотографий этой звезды. Годичному собственному движению исследуемого объекта соответствовало смещение положения изображения на фотографии на 0,546 мм. Тщательные измерения «траектории» звезды Барнарда по отношению к соседним звездам позволили обнаружить волнообразный характер движения.

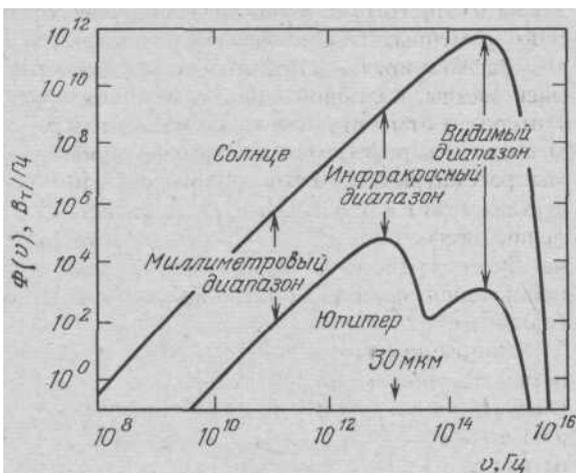


Рис. 40. Кривые зависимости мощности излучения в единичном частотном интервале от частоты для Солнца и Юпитера в идеализированном предположении о чернотельном механизме излучения

На рис. 41 приведены осредненные результаты этих измерений по двум небесным координатам — прямому восхождению и склонению. Из этого рисунка отчетливо видны периодические колебания собственного движения звезды Барнарда, причем период близок к 24 годам. Для того чтобы почувствовать малость измеряемого эффекта, на рис. 41 в верхнем правом углу приведен масштаб, равный $0,01''$. Такие периодические изменения собственного движения могут быть объяснены наличием «легкого» невидимого спутника. Зная массу звезды и период обращения, можно определить из третьего закона Кеплера большую полуось орбиты спутника, которая оказывается равной 4,4 астрономической единицы. На таком расстоянии полуось орбиты была бы видна под углом $2,4''$. Сама звезда движется с тем же периодом вокруг центра масс системы, причем максимум ее углового смещения должен быть во столько раз меньше $2,4''$, во сколько раз ее масса больше. Отсюда

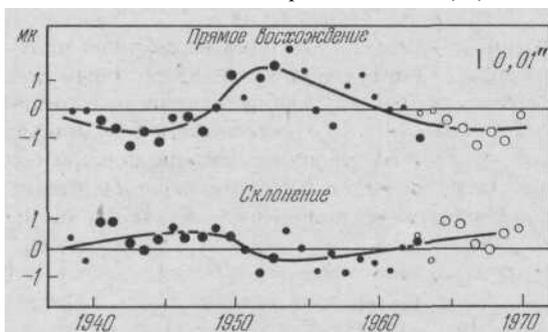


Рис. 41. Отклонения в собственном движении звезды Барнарда за 24 года

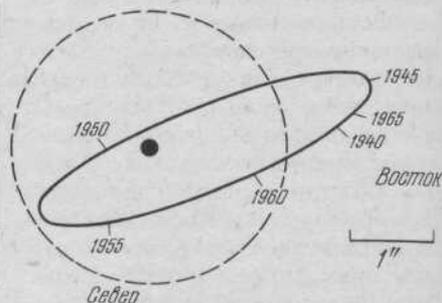


Рис. 42. Орбита спутника звезды Барнарда. Штриховая окружность показывает размеры фотографического изображения этой звезды при средних условиях наблюдений

следует, что масса невидимого спутника должна быть почти в 100 раз меньше, чем масса самой звезды Барнарда. Это значит, что его масса составляет $0,0015$ солнечной массы и всего лишь в 1,5 раза больше массы Юпитера! Увы! Этот увлекательный результат сейчас оспаривается. Не исключено, что он обусловлен какой-нибудь периодической ошибкой винтов измерительного инструмента. Во всяком случае другие исследователи пока не подтвердили открытие ван де Кампа.

Если это открытие подтвердится, то, скорее всего, невидимый спутник звезды Барнарда — это большая планета, очень похожая на Юпитер. Она не может быть самосветящимся объектом, а светит только отраженным светом своего маленького красного «солнца». При таких условиях его видимая звездная величина составляет около 30, в то время как видимая величина самой звезды Барнарда равна 9,5. Нет никакой надежды при помощи современных методов астрономии непосредственно наблюдать спутник звезды Барнарда. На рис. 42 приведена орбита спутника этой звезды. Окружность (штриховая линия) соответствует величине изображения звезды Барнарда при средних условиях наблюдений.

Если бы открытие ван де Кампа подтвердилось, оно доказывало бы огромную распространенность планетных систем во Вселенной, ибо даже у самой близкой к нам звезды имеется планетная система. Правда, налицо одно существенное различие между нашей планетной системой и системой звезды Барнарда: спутник последней движется по резко эллиптической орбите, между тем как большие планеты Солнечной системы движутся по почти круговым орбитам. Пока неясно, является ли это различие принципиальным. Еще раз, однако, подчеркнем, что открытие ван де Кампа пока не подтверждено.

Вполне естественно считать, что кратность звезд и наличие планетных систем суть одно и то же явление. В этой связи отметим, что согласно исследованиям аме-

риканского астронома Койпера среднее расстояние между компонентами двойных звезд около 20 астрономических единиц, что близко к размерам Солнечной системы.

В пользу вывода о том, что кратные звездные системы и планетные системы это, по существу, одно и то же явление, говорит статистический анализ проблемы. В начале этой главы мы писали, что по разным оценкам от 30 до 50 % всех звезд входят в состав кратных систем. Эти оценки, однако, страдают одним существенным дефектом: они не полны и отягощены наблюдательной селекцией. Главная ошибка при таких подсчетах — трудность наблюдения пары, у которой масса одной компоненты значительно больше, чем второй. Об этом уже шла речь выше, при анализе проблемы невидимых спутников звезд. Недавно американские астрономы Абт и Леви выполнили тщательное исследование кратности у 123 ближайших к нам звезд солнечного типа.

Все эти звезды, видимые невооруженным глазом, находятся в северном полушарии неба и удалены от Солнца на расстояния, не превышающие 85 световых лет, так что речь идет о наших ближайших соседях. Так как выбранные звезды достаточно яркие, их можно было самым тщательным образом исследовать с помощью спектрографа с высокой дисперсией на 2,1-метровом рефлекторе Национальной обсерватории Китт Пик (Аризона). В результате этих исследований оказалось, что из 123 выбранных звезд 57 оказались двойными, 11 — тройными и 3 — четверными.

Таким образом, около 60% всех звезд солнечного типа оказались кратными. Но в действительности этот процент должен быть выше, ибо, как это уже подчеркивалось, по причинам чисто наблюдательным, мало массивные компоненты непосредственно наблюдать было невозможно. Чтобы учесть системы с мало массивными компонентами, Абт и Леви на основе полученного ими наблюдательного материала построили зависимость числа пар от отношения масс компонент. Эта зависимость строилась для разных периодов обращения звезд — см. рис. 43. Из этого рисунка видно, прежде всего, что для длинных (> 100 лет) и коротких периодов эта зависимость получается разной. В то время как для коротких периодов число пар по мере уменьшения отношения масс главной звезды и ее спутника медленно убывает, для длинных периодов получается обратная картина. Таким образом, имеются как бы два типа кратных звездных систем. Не вдаваясь в обсуждение этого явления (что будет сделано в гл. 9), обратим здесь внимание только на то, что кривые для малых периодов допускают экстраполяцию вплоть до самых малых, пока еще не наблюдаемых, отношений масс компонент. И вот оказывается, что если экстраполировать кривые до значения этого отношения $M_2/M_1 = 1/100$, то можно ожидать еще 20 пар, а если экстраполировать до $M_2/M_1 = 0$, то добавится еще 25. Следовательно, полное количество двойных систем будет почти точно равно 123! Другими словами, если учитывать достаточно малые значения отношения M_2/M_1 , то получится, что практически все звезды солнечного типа либо кратные, либо окру-

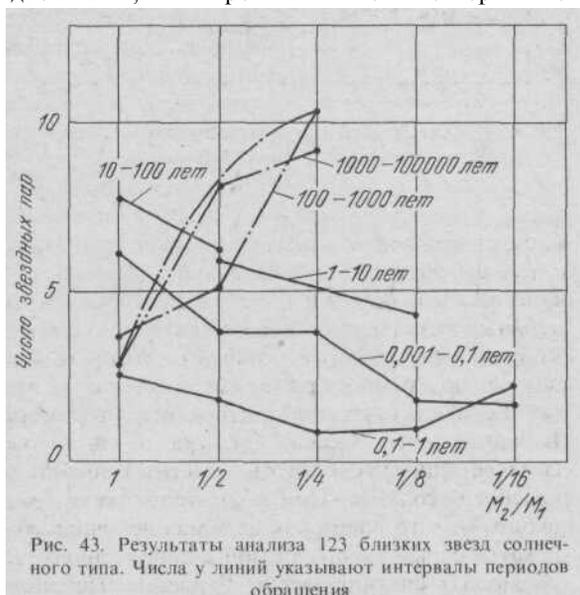


Рис. 43. Результаты анализа 123 близких звезд солнечного типа. Числа у линий указывают интервалы периодов обращения

жены семей планет. Если условно положить, что наибольшая масса планеты равна $10^{-3} M_{\odot}$ (Юпитер!), то получится, что $\sim 10\%$ всех звезд типа Солнца имеют планетные системы. По нашему мнению, несмотря на сравнительную бедность использованного статистического материала, исследования Абта и Леви являются лучшим из всех существующих обоснованием множественности планетных систем для звезд солнечного типа.

Рассмотрим теперь вопрос о происхождении кратных звездных систем. В свое время большое распространение имела гипотеза деления одной первоначальной звезды на две компоненты. Причиной деления могло быть очень быстрое вращение звезды. Под действием центробежной силы поверхность быстро вращающейся звезды перестает быть сферической. Расчеты показывают, что при некоторых идеализированных условиях быстро вращающееся тело приобретает характерную грушевидную форму, а при еще более быстром вращении оно может потерять устойчивость и распасться на две части.

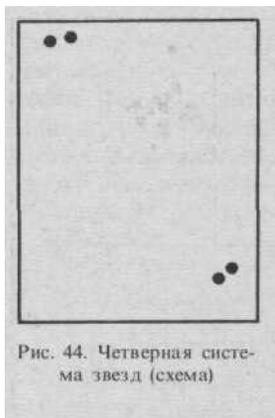


Рис. 44. Четверная система звезд (схема)

Однако гипотеза деления оказалась неспособной объяснить результаты наблюдения и должна была быть поэтому оставлена. Некоторые ученые (например, О. Ю. Шмидт) выдвигали гипотезу «захвата», согласно которой при определенных условиях две звезды, до этого двигавшиеся в пространстве независимо, сближаясь, могут образовать двойную систему. Хотя математически такой процесс возможен (например, при случайном сближении трех звезд одновременно), вероятность его ничтожно мала. Кроме того, он противоречит наблюдениям. Никак нельзя объяснить, например, почему четверные системы всегда бывают такие, как это схематически изображено на рис. 44. Вся совокупность фактов, накопленных астрономией за последние два десяти-

летия, говорит о том, что кратные системы образовались совместно из некоторой первоначальной газопылевой межзвездной среды.

В процессе звездообразования возникают, как правило, целые группы звезд - ассоциации, скопления и кратные системы. Отсюда следует важный вывод: компоненты кратной системы должны иметь одинаковый возраст. Современные представления об эволюции звезд, о которых было рассказано в гл. 4, позволяют понять некоторые характерные особенности кратных систем. Эти особенности были установлены чисто эмпирически уже давно и представлялись совершенно непонятными.

Например, очень часто встречается такая комбинация, когда обе компоненты кратной системы являются горячими звездами спектральных классов O или ранних подклассов B. Современные представления об эволюции звезд вполне объясняют этот факт: из первичной туманности образовались одновременно две звезды с очень близкими массами, которые, естественно, находятся на одинаковых стадиях эволюции.

В случае, когда эволюционирует тесная двойная система, с периодом обращения меньше недели и с расстоянием между компонентами меньше 0,1 астрономической единицы, факт двойственности существенно определяет характер эволюции. Вначале, пока обе звезды находились на главной последовательности, их эволюция протекала так же, как и в случае, когда они были бы изолированы. Но затем более массивная звезда после «выгорания» водорода в ее ядре начнет «разбухать», переходя в стадию красного гиганта; она достигнет такого критического радиуса, при котором дальнейшее его увеличение становится невозможным, ибо вещество в поверхностных слоях эволюционирующей звезды начнет перетекать на вторую компоненту. За «каких-нибудь» несколько десятков тысяч лет, существенная часть массы эволюционирующей звезды перетечет на вторую компоненту, которая ста-

нет более массивной, между тем как светимость эволюционирующей, но уже менее массивной компоненты, будет более высокой, хотя и не такой высокой, как у гигантов. Такие звезды называются «субгигантами» и их можно видеть на диаграмме Герцшпрунга — Рессела (см. рис. 9). Все это время от эволюционирующей звезды на вторую компоненту будут течь струи газа, а сама двойная система будет как бы погружена в газовое облако (см. рис. 38). Ввиду огромной распространенности явления кратности среди звезд нашей Галактики особый характер эволюции звезд в таких системах имеет принципиальное значение.

Лет двадцать назад к этой коллекции фактов, касающихся характеристик компонент двойных систем, присоединился новый, не менее интересный. Как известно, массивные горячие молодые звезды имеют сравнительно малые хаотические скорости пространственных движений, как правило, меньше 10 км/с. Именно поэтому они очень сильно концентрируются к галактической плоскости (см. гл. 1). Но из этого правила имеются уже давно известные исключения. Небольшое количество горячих массивных звезд движется с необыкновенно большими пространственными скоростями, достигающими 100 км/с. Оказывается, что такие звезды некоторое время назад «вылетели» из тех или иных звездных ассоциаций — групп молодых горячих звезд (см. гл. 4). Это хорошо видно на рис. 45, где звездочками изображены три такие «быстрые» горячие звезды. Пунктирные прямые — направления их движений по небу. Три прямые почти пересекаются в области созвездия Ориона, где находится большая ассоциация горячих звезд. Так как расстояние до ассоциации Ориона известно, то по найденным скоростям звезд можно установить, что «беглецы» покинули ассоциацию совсем «недавно» — от 2 до 5 млн лет назад.

По какой же причине выбрасываются такие звезды из ассоциации? Голландский астроном Блау обратил внимание на то, что звезды-«беглецы» всегда являются одиночками. Между тем кратность среди массивных, горячих звезд особенно распространена — почти половина их образует кратные системы. Чтобы объяснить этот удивительный факт, голландский астроном выдвинул предположение о том, что раньше звезды-беглецы были компонентами двойных систем. Вторая компонента — более массивная горячая звезда того же спектрального класса O — взорвалась как сверхновая II типа (см. гл. 5).

Что произойдет, если более массивная звезда в двойной системе вдруг как бы исчезнет, пропадет? Сила притяжения не будет больше удерживать оставшуюся звезду на ее эллиптической орбите. Она уйдет по касательной к своей орбите, сохранив при этом орбитальную скорость. В действительности, конечно,

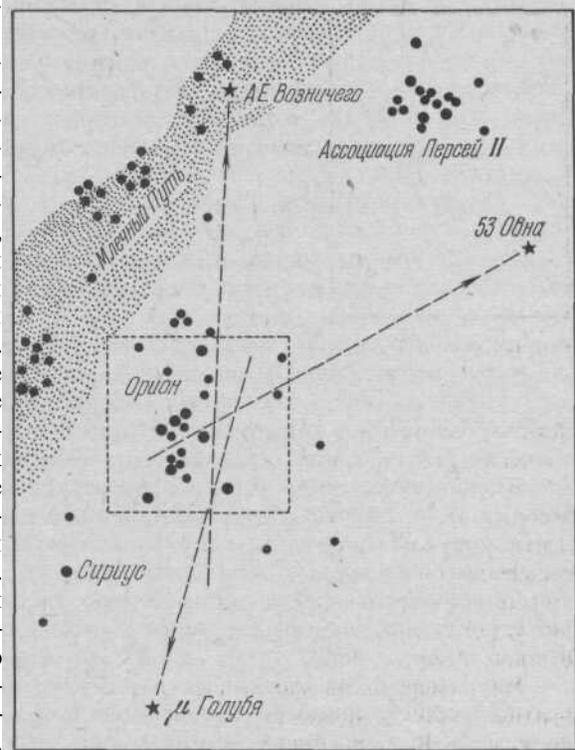


Рис. 45. Горячие звезды, вылетающие из созвездия Ориона

масса взорвавшейся звезды не может бесследно исчезнуть. Если расширяющаяся туманность — остаток взрыва сверхновой — находится внутри орбиты оставшейся звезды, сила притяжения почти не изменится и звезда никогда «не убежит». Если же звезда окажется внутри туманности, последняя почти не будет ее притягивать. Чтобы описанный «эффект пращи» (иначе его трудно назвать) имел место, необходимо, чтобы газы — продукты взрыва сверхновой — ушли за орбиту оставшейся звезды за время, значительно меньшее, чем период обращения. Это условие будет выполняться для двойной системы, компоненты которой удалены одна от другой достаточно далеко, например на 10 — 20 астрономических единиц. При этом периоды обращения должны быть порядка нескольких лет, а орбитальные скорости (при достаточно массивных звездах) — около 100 км/с.

Наличие среди компонент кратных систем белых карликов (например, в системе Сириуса) легко объясняется тем, что более массивная компонента закончила свой эволюционный путь, став маленькой, очень плотной звездой (см. гл. 4). Напротив, нельзя представить двойную систему, у которой одна компонента — горячая, массивная звезда спектрального класса O, а вторая — обыкновенный красный гигант с массой в 1,5 — 2 раза больше солнечной. Ведь для того, чтобы звезда такой массы сошла с главной последовательности и стала красным гигантом, нужно соответственно 4 и 2 млрд лет (см. табл. 2), в то время как горячая звезда класса O не может существовать свыше 10 млн лет. И действительно, подобные двойные системы неизвестны.

В гл. 5 мы уже говорили, что «звездные» рентгеновские источники никак не могут быть «молодыми», еще не успевшими остыть нейтронными звездами, так как последние слишком быстро остывают. И все же совершенно неожиданно выяснилось, что эти космические рентгеновские источники являются нейтронными звездами. Наблюдения, выполненные на специализированном американском рентгеновском спутнике «Ухуру» привели к удивительному открытию: поток излучения от довольно большого количества источников меняется со временем строго периодически, причем периоды составляют несколько дней. У двух источников были обнаружены, кроме того, короткопериодические изменения потока с периодами 1,25 и 4,88 секунды. Эти короткие периоды в свою очередь плавно менялись с указанным выше длинным периодом, причем амплитуды изменений малых периодов хотя и малы, но вполне измеримы*).

Объяснение этим удивительным фактам весьма простое и даже очевидное. Рентгеновский источник — это маленькая, компактная звезда, вращающаяся вокруг второй, «нормальной», звезды, причем луч зрения почти «скользит» вдоль плоскости орбиты. Минимум потока рентгеновского излучения наблюдается тогда, когда рентгеновская компонента заходит за оптическую. Другими словами, мы наблюдаем затменную двойную систему.

Наличие секундных периодов означает, что наблюдаемые источники представляют собой «рентгеновские пульсары», т. е. очень быстро вращающиеся маленькие звезды. Так как минимальный период такого осевого вращения лишь немногим больше секунды, то это не могут быть белые карлики. Только нейтронные звезды могут иметь такие короткие периоды вращения. Изменение величины периода коротких рентгеновских импульсов, обусловленных осевым вращением, в течение орбитального периода очевидным образом объясняется эффектом Доплера. Из амплитуды этих изменений непосредственно определяется орбитальная скорость рентгеновской звезды.

В ряде случаев по изменениям положения линий поглощения в спектре оптической компоненты такой двойной системы был определен орбитальный период, ко-

*) В настоящее время уже известно около 20 рентгеновских источников с аналогичными периодическими изменениями потока излучения.

торый оказался в точности равным периоду, полученному из рентгеновских наблюдений.

Во всех случаях нейтронные звезды, излучающие рентгеновские кванты, входят в состав тесных двойных систем. В таких системах при достаточно большом радиусе оптической компоненты с части ее поверхности, обращенной ко второй компоненте, непрерывно будет истекать струя газа. По этой причине вокруг нейтронной звезды образуется быстро вращающийся газовый диск, вещество которого будет падать на поверхность нейтронной звезды. Так как скорость подобного падения газа довольно близка к скорости света, при таком процессе (называемом «аккрецией») будет выделяться огромное количество энергии, которая нагреет газ в диске до температуры в несколько десятков миллионов Кельвинов, сделав его мощным источником рентгеновского излучения. Сходные процессы будут иметь место и тогда, когда компонентой «оптической» звезды будет черная дыра. Отличить черную дыру от нейтронной звезды можно тогда, когда известна масса рентгеновской компоненты из наблюдений двойной системы, в которой она находится. Напомним, что если масса «компактной», «проэволюционировавшей» рентгеновской компоненты больше 2,5 солнечных масс, она должна быть черной дырой (см. гл. 5). Похоже на то, что одна черная дыра уже наблюдается — это знаменитый рентгеновский источник Лебедь X-1.

Таким образом, нейтронные звезды «сами по себе» не являются рентгеновскими источниками. Только тогда, когда они окажутся в тесной двойной системе, при определенных условиях начнет действовать «машина», весьма эффективно вырабатывающая рентгеновское излучение с помощью глубокой «потенциальной ямы» в окрестностях нейтронной звезды, куда падает газовая струя, поставляемая оптической компонентой. То же самое относится, конечно, и к черным дырам.

Все изложенные факты доказывают, что компоненты кратных систем образовались совместно. Коль скоро имеются основания предполагать, что планетные системы в принципе не отличаются от кратных звездных систем, планеты, скорее всего, должны образоваться параллельно с формированием соответствующих звезд.

9. О происхождении Солнечной системы

Вот уже два века проблема происхождения Солнечной системы волнует выдающихся мыслителей нашей планеты. Этой проблемой занималась, начиная от философа Канта и математика Лапласа, плеяда астрономов и физиков XIX и XX столетий. Ей отдал дань наш замечательный соотечественник, человек разносторонне талантливый, Отто Юльевич Шмидт. И все же мы еще очень далеки от ее решения. Какие только тайны не были вырваны у природы за эти два столетия! За последние три десятилетия существенно прояснился вопрос о путях эволюции звезд. И хотя детали удивительного процесса рождения звезды из газопылевой туманности еще далеко не ясны, мы теперь четко представляем, что с ней происходит на протяжении миллиардов лет дальнейшей эволюции. Об этом довольно подробно шла речь в гл. 4. Увы, вопрос о происхождении и эволюции планетной системы, окружающей наше Солнце, далеко не так ясен.

На первый взгляд кажется странным и даже парадоксальным, что астрономы смогли узнать о космических объектах, весьма удаленных и наблюдаемых с большими трудностями, гораздо больше, чем о планетах и Солнце, которые (по астрономическим масштабам, разумеется) находятся у нас «под боком». Однако в этом нет ничего удивительного. Дело в том, что астрономы наблюдают огромное количество звезд, находящихся на разных стадиях эволюции. Изучая звезды в скоплениях, они могут чисто эмпирически установить, как зависит темп эволюции звезд от начальных условий, например массы. Если бы не было этого обширного эмпирического материала (прежде всего рассматривавшейся нами выше диаграммы «цвет — светимость» для большого числа скоплений), вопрос об эволюции звезд был бы предметом более или менее бесплодных спекуляций, как это и было примерно до 1950 г.

В совершенно другом положении находятся исследователи происхождения и эволюции нашей планетной системы. Ведь мы пока не можем непосредственно наблюдать такие системы даже около самых близких звезд (см. гл. 8). Если бы это удалось и мы имели реальное представление, как выглядят планетные системы на разных этапах своей эволюции или хотя бы как сильно отличаются одни планетные системы от других, эта волнующая проблема была бы, несомненно, решена в сравнительно короткие сроки. Но пока мы наблюдаем планетную систему, так сказать, «в единственном экземпляре». Более того, необходимо еще доказать, что около других звезд имеются планетные системы. Ниже мы попытаемся это сделать, пользуясь наблюдаемыми характеристиками звезд.

Значит ли это, что мы еще решительно ничего не можем сказать о происхождении Солнечной системы, кроме тривиального утверждения, что она как-то образовалась не позже чем 5 млрд лет назад, потому что таков приблизительно возраст Солнца? Такая «пессимистическая» точка зрения так же мало обоснована, как и излишний оптимизм адептов той или иной космогонической гипотезы. Можно сказать, что кое-что о происхождении семьи планет, обращающихся вокруг Солнца, мы уже знаем. Во всяком случае, круг возможных гипотез о происхождении Солнечной системы сейчас значительно сузился.

Переходя к изложению (по необходимости весьма краткому) различных космогонических гипотез, сменявших одна другую на протяжении последних двух столетий, мы начнем с гипотезы, впервые высказанной великим немецким философом Кантом и спустя несколько десятилетий независимо предложенной замечательным французским математиком Лапласом. Из дальнейшего будет видно, что существенные предпосылки этой классической гипотезы выдержали испытание временем, и сейчас в самых «модернистских» космогонических гипотезах мы легко можем найти основные идеи гипотезы Канта — Лапласа.

Точки зрения Канта и Лапласа в ряде важных вопросов резко отличались. Кант, например, исходил из эволюционного развития холодной пылевой туманности, в ходе которого сперва возникло центральное массивное тело — будущее Солнце, а потом уже планеты, в то время как Лаплас считал первоначальную туманность газовой и очень горячей, находящейся в состоянии быстрого вращения. Сжимаясь под действием силы всемирного тяготения, туманность, вследствие закона сохранения момента количества движения, вращалась все быстрее и быстрее (об этом подробнее речь будет идти ниже). Из-за больших центробежных сил, возникающих при быстром вращении в экваториальном поясе, от него последовательно отделялись кольца. В дальнейшем эти кольца конденсировались, образуя планеты (схема, иллюстрирующая эту гипотезу, приведена на рис. 46).

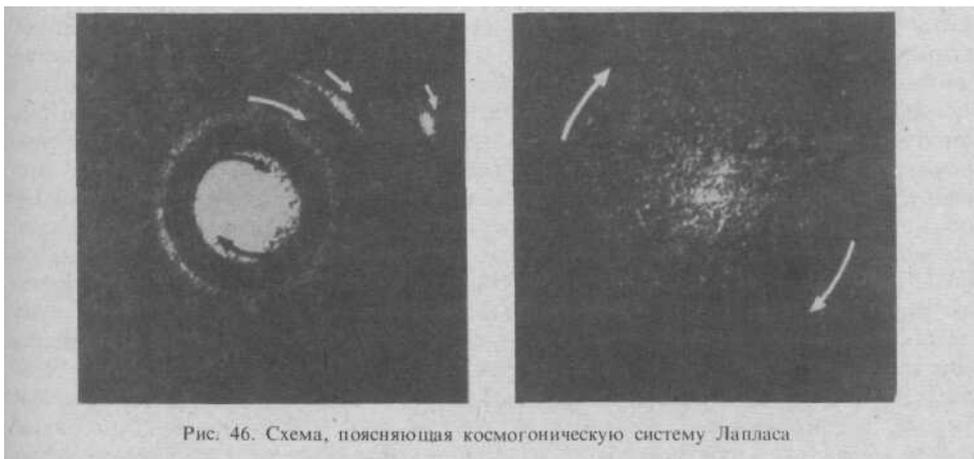


Рис. 46. Схема, поясняющая космогоническую систему Лапласа

Таким образом, согласно гипотезе Лапласа, планеты образовались раньше Солнца. Однако, несмотря на такое резкое различие между двумя гипотезами, общей их важнейшей особенностью является представление, что Солнечная система возникла в результате закономерного развития туманности. Поэтому и принято называть эту концепцию «гипотезой Канта — Лапласа».

Уже в середине XIX столетия стало ясно, что эта гипотеза сталкивается с фундаментальной трудностью. Дело в том, что наша планетная система, состоящая из девяти планет весьма разных размеров и массы, обладает одной замечательной особенностью. Речь идет о необычном распределении момента количества движения Солнечной системы между центральным телом — Солнцем и планетами.

Момент количества движения есть одна из важнейших характеристик всякой изолированной от внешнего мира механической системы. Именно как такую систему мы можем рассматривать Солнце и окружающую его семью планет. Момент количества движения может быть определен как «запас вращения» системы. Это вращение складывается из орбитального движения планет и вращения вокруг своих осей Солнца и планет.

Математически «орбитальный» момент количества движения планеты относительно центра масс системы (весьма близкого к центру Солнца) определяется как произведение массы планеты на ее скорость и на расстояние до центра вращения, т. е. Солнца. В случае вращающегося сферического тела, которое мы будем считать твердым, момент количества движения относительно оси, проходящей через его центр, равен $0,4 MvR$, где M — масса тела, v — его экваториальная скорость, R — радиус. Хотя суммарная масса всех планет составляет всего лишь $1/700$ солнечной, учитывая, с одной стороны, большие расстояния от Солнца до планет и

с другой — малую скорость вращения Солнца*), мы получим путем простых вычислений, что 98 % всего момента Солнечной системы связано с орбитальным движением планет и только 2% — с вращением Солнца вокруг оси. Момент количества движения, связанный с вращением планет вокруг своих осей, оказывается пренебрежимо малым из-за сравнительно малых масс планет и их радиусов.

На рис. 47 схематически представлено распределение момента количества движения между Солнцем и планетами. Значения моментов даны в системе единиц CGS. Найдем, например, момент количества движения Юпитера /. Масса Юпитера равна $M = 2 \cdot 10^{30}$ г (т. е. 10^{-3} массы Солнца), расстояние от Юпитера до Солнца $r = 7,8 \cdot 10^{13}$ см (или 5,2 астрономической единицы), а орбитальная скорость $v = 1,3 \cdot 10^6$ см/с (около 13 км/с).

Отсюда

$$/ = Mvr = 190 \cdot 10^{48}.$$

В этих единицах Момент количества движения вращающегося Солнца равен всего лишь $6 \cdot 10^{48}$. Из рисунка видно, что все планеты земной группы — Меркурий, Венера, Земля и Марс — имеют суммарный момент в 380 раз меньший, чем Юпитер. Львиная доля момента количества движения Солнечной системы сосредоточена в орбитальном движении планет-гигантов Юпитера и Сатурна.

С точки зрения гипотезы Лапласа, это совершенно непонятно. В самом деле, в эпоху, когда от первоначальной, быстро вращающейся туманности отделялось

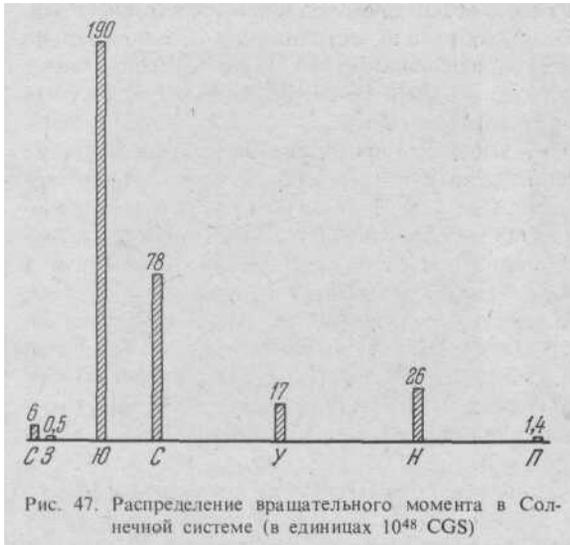


Рис. 47. Распределение вращательного момента в Солнечной системе (в единицах 10^{48} CGS)

кольцо, слои туманности, из которых впоследствии сконденсировалось Солнце, имели (на единицу массы) примерно такой же момент, как вещество отделившегося кольца**). Так как масса последнего была значительно меньше массы основной части туманности («протосолнца»), то полный момент количества движения у кольца должен быть много меньше, чем у «протосолнца». В гипотезе Лапласа отсутствует какой бы то ни было механизм передачи момента от «протосолнца» к кольцу. Поэтому в течение всей дальнейшей эволюции момент количества движения «протосолнца», а затем и Солнца должен быть значительно больше, чем у колец и образовавшихся из них планет. Но этот вывод находится в разительном противоречии с фактическим распределением момента количества движения между Солнцем и планетами!

Для гипотезы Лапласа эта трудность оказалась непреодолимой. На смену ей стали выдвигаться другие гипотезы. Мы не будем их здесь даже перечислять — сейчас они представляют только исторический интерес. Остановимся лишь на гипотезе Джинса, получившей повсеместное распространение в первой трети текущего столетия. Эта гипотеза во всех отношениях представляет собой полную противоположность гипотезе Канта — Лапласа. Если последняя рисует образование планетных систем (в том числе и нашей Солнечной) как единый закономерный процесс эволюции от простого к сложному, то в гипотезе Джинса образование таких систем есть дело случая и представляет редчайшее, исключительное явление.

*) Скорость вращения Солнца на его экваторе составляет всего лишь 2 км/с, что в 15 раз меньше скорости Земли на орбите.

**) Так как угловые скорости кольца и оставшихся частей были почти одинаковы.

Согласно гипотезе Джинса, исходная материя, из которой в дальнейшем образовались планеты, была выброшена из Солнца (которое к тому времени было уже Достаточно «старым» и похожим на нынешнее) при случайном прохождении вблизи него некоторой звезды. Это прохождение было настолько близким, что практически его можно рассматривать как столкновение. При таком очень близком прохождении благодаря приливным силам, действовавшим со стороны налетевшей на Солнце звезды, из поверхностных слоев Солнца была выброшена струя газа. Эта струя останется в сфере притяжения Солнца и после того, как звезда уйдет от Солнца. В дальнейшем струя сконденсируется и даст начало планетам.

Что можно сказать сейчас по поводу этой гипотезы, владевшей умами астрономов в течение трех десятилетий? Прежде всего, она предполагает, что образование планетных систем, подобных нашей Солнечной, есть процесс исключительно маловероятный. В самом деле, как уже подчеркивалось в гл. 1, столкновения звезд, а также их близкие взаимные прохождения в нашей Галактике могут происходить чрезвычайно редко. Поясним это конкретным расчетом.

Известно, что наше Солнце по отношению к ближайшим звездам движется со скоростью около 20 км/с. Даже самая близкая к нам звезда — Проксима Центавра находится от нас на расстоянии 4,2 светового года. Чтобы преодолеть это расстояние, Солнце, двигаясь с указанной скоростью, должно потратить приблизительно 100 тыс. лет. Будем считать (что в данном случае правильно) движение Солнца прямолинейным. Тогда вероятность близкого прохождения (скажем, на расстоянии трех радиусов звезды) будет, очевидно, равна отношению телесного угла, под которым виден с Земли увеличенный в 3 раза диск звезды, к 4 π . Можно убедиться, что данное отношение составляет около 10^{-15} . Это означает, что за 5 млрд лет своей жизни Солнце имело один шанс из десятков миллиардов столкнуться или очень сблизиться с какой-либо звездой. Так как в Галактике насчитывается всего около 150 млрд звезд, то полное количество таких близких прохождений во всей нашей звездной системе должно быть порядка 10 за последние 5 млрд лет, о чем уже речь шла в гл. 2.

Отсюда следует, что, если бы гипотеза Джинса была правильной, число планетных систем, образовавшихся в Галактике за 10 млрд лет ее эволюции, можно было пересчитать буквально по пальцам. Так как это, по-видимому, не соответствует действительности и число планетных систем в Галактике достаточно велико (см. ниже, а также гл. 8), гипотеза Джинса оказывается несостоятельной.

Несостоятельность этой гипотезы следует также и из других соображений. Прежде всего, она страдает тем же фатальным недостатком, что и гипотеза Канта-Лапласа: гипотеза Джинса не в состоянии объяснить, почему подавляющая часть момента количества движения Солнечной системы сосредоточена в орбитальном движении планет. Математические расчеты, выполненные в свое время Н. Н. Парийским, показали, что при всех случаях в рамках гипотезы Джинса образуются планеты с очень маленькими орбитами. Еще раньше на эту классическую космогоническую трудность применительно к гипотезе Джинса указал американец Рессел.

Наконец, ниоткуда не следует, что выброшенная из Солнца струя горячего газа может сконденсироваться в планеты. Наоборот, расчеты ряда известных астрофизиков, в частности, Лаймана Спитцера, показали, что вещество струи рассеется в окружающем пространстве и конденсации не будет. Таким образом, космогоническая гипотеза Джинса оказалась полностью несостоятельной. Это стало очевидным уже «в конце тридцатых годов текущего столетия».

Тем более удивительным представляется возрождение идеи Джинса на новой основе, которое произошло в последние годы. Если в первоначальном варианте гипотезы Джинса планеты образовались из газового сгустка, выброшенного из Солнца приливными силами при близком прохождении мимо него звезды, то новейший

вариант, развиваемый Вулфсоном, предполагает, что газовая струя, из которой образовались планеты, была выброшена из проходившего мимо Солнца космического объекта. В качестве последнего принимается уже не звезда, а протозвезда — «рыхлый» объект огромных размеров (в 10 раз превышающий радиус нынешней земной орбиты) и сравнительно небольшой массы $\sim 0,25 M_{\odot}$. На рис. 48 приведена схема такого «столкновения», основанная на точных расчетах. Положение протозвезды на гиперболической орбите вокруг Солнца приведено для разных моментов времени, которое выражается в секундах. Все явление близкого прохождения протозвезды, схематически изображенное на рис. 48, занимает около 30 лет. Из рисунка видно, как деформируется поверхность протозвезды под влиянием приливных сил. На этом рисунке приведены также различные орбиты захваченных Солнцем отдельных «кусков» протозвездного сгустка. Для каждой такой орбиты указаны кратчайшее расстояние до Солнца и эксцентриситет. Непосредственно видно, что некоторые орбиты так же удалены от Солнца, как орбита Юпитера и даже дальше, — как показывают расчеты, — до 30 астрономических единиц. Таким образом, новейшая модификация гипотезы Джинса снимает основную трудность, с которой столкнулся ее первоначальный вариант — объяснение anomalно большого вращательного момента планеты.

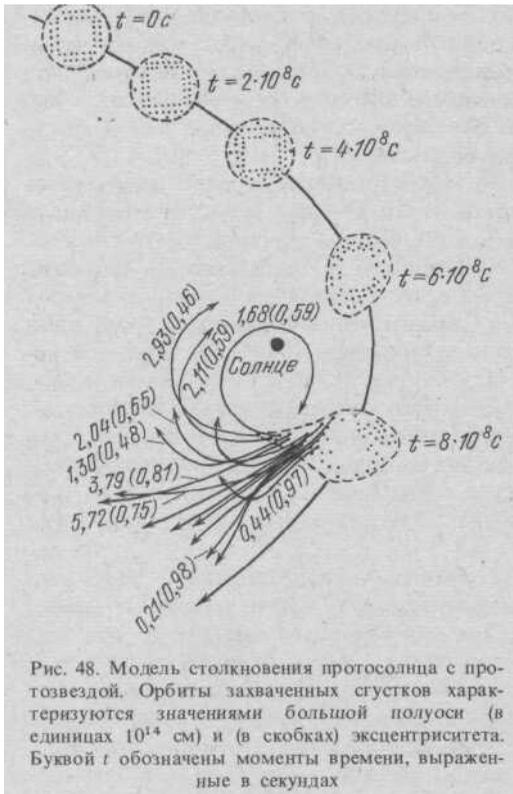


Рис. 48. Модель столкновения протосолнца с протозвездой. Орбиты захваченных сгустков характеризуются значениями большой полуоси (в единицах 10^{14} см) и (в скобках) эксцентриситета. Буквой t обозначены моменты времени, выраженные в секундах

В схеме Вулфсона это достигается предположением о больших размерах «сталкивающегося» с Солнцем объекта и его сравнительно небольшой массе. Из рис. 48 видно, что первоначальные орбиты сгустков были весьма эксцентричны. Так как заведомо не весь захваченный Солнцем газ смог конденсироваться в планеты, вокруг движущихся сгустков должна была образоваться некоторая газовая среда, которая тормозила бы их движение. При этом, как известно, первоначально эксцентричные орбиты постепенно будут становиться круговыми. На это потребуется сравнительно мало времени — порядка нескольких миллионов лет. Каждый такой сгусток будет довольно быстро эволюционировать в протопланету. Вращение протопланет может быть обусловлено действием приливных сил, исходящих от Солнца. В рамках этой модели можно также понять происхождение спутников планет. Последние отделяются от протопланет при сжатии из-за их несимметричной фигуры. Следует заметить, что эта гипотеза сравнительно легко объясняет происхождение больших планет и их спутников. Для объяснения планет земной группы необходимо привлечь новые представления.

Гипотеза Джинса в модификации Вулфсона заслуживает внимания. Она, по существу, связывает образование планет с образованием звезд. Последние образуются из межзвездной газопылевой среды группами в так называемых «звездных ассоциациях» (см. гл. 4). В таких группах, как показывают наблюдения, сперва образуются сравнительно массивные звезды, а потом всякая "звездная мелочь". ко-

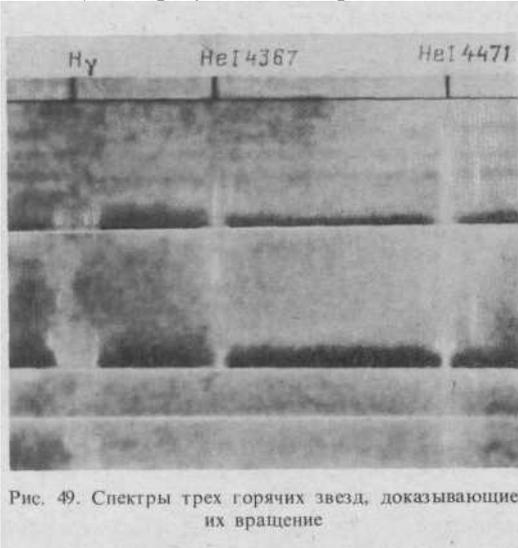
торая эволюционирует в карлики. Это хорошо согласуется с гипотезой Джинса — Вулфсона. Расчеты показывают, однако, что если этот механизм был бы единственной причиной образования планетных систем, то их количество в Галактике было бы весьма мало (одна планетная система, примерно, на 100000 звезд), хотя и не так катастрофически мало, как в первоначальной гипотезе Джинса. По существу, это является единственным уязвимым пунктом современной модификации гипотезы Джинса. Если с достоверностью будет доказано, что около хотя бы некоторых ближайших к нам звезд имеются планетные системы, эта гипотеза будет окончательно похоронена. Похоже на то, что в настоящее время такое доказательство уже имеется (см. предыдущую главу).

Выше мы уже упоминали, что выдающийся советский ученый и общественный деятель О. Ю. Шмидт в 1944 г. предложил свою теорию происхождения Солнечной системы. Согласно О. Ю. Шмидту наша планетная система образовалась из вещества, захваченного из газопылевой туманности, через которую некогда проходило Солнце, уже тогда имевшее почти «современный» вид. При этом никаких трудностей с вращательным моментом планет не возникает, так как первоначальный момент вещества облака может быть сколь угодно большим. Начиная с 1961 г. эту гипотезу развивал английский космогонист Литтлтон, который внес в нее существенные улучшения. Нетрудно видеть, что блок-схема «аккреционной» гипотезы Шмидта — Литтлтона совпадает с блок-схемой «гипотезы захвата» Джинса — Вулфсона. В обоих случаях «почти современное» Солнце сталкивается с более или менее «рыхлым» космическим объектом, захватывая части его вещества. Следует, впрочем, заметить, что для того, чтобы Солнце захватило достаточно много вещества, его скорость по отношению к туманности должна быть очень маленькой, порядка ста метров в секунду. Если учесть, что скорость внутренних движений элементов облака должна быть не меньше, то, по существу, речь идет о «застрявшем» в облаке Солнце, которое, скорее всего, должно иметь общее с облаком происхождение. Тем самым образование планет связывается с процессом звездообразования. В следующей главе мы рассмотрим гипотезы, в которых планеты и Солнце образовались из единой «солнечной» туманности. По существу, речь пойдет о дальнейшем развитии гипотезы Канта — Лапласа.

10. Вращение звезд и планетная космогония

Прежде чем перейти к изложению современных гипотез, являющихся развитием идей Канта и Лапласа, необходимо остановиться на важной характеристике звезд — их вращении вокруг своих осей. Еще в 1877 г. почти забытый сейчас английский астроном Эбни предложил совершенно правильную идею определения скорости вращения звезд путем спектрографических наблюдений. В самом деле, представим себе звезду, достаточно быстро вращающуюся вокруг оси, составляющей некоторый угол с лучом зрения. Тогда, очевидно, часть поверхности звезды будет двигаться от наблюдателя, часть — к наблюдателю. Вследствие эффекта Доплера все линии в спектре этой звезды будут расширены, так как этот спектр обусловлен излучением всей звезды в целом.

В те времена астроспектроскопия была еще в зачаточном состоянии, и блестящая идея Эбни не могла быть реализована. Положение осложнилось еще тем, что, как показали дальнейшие наблюдения, в спектре одной и той же звезды могут быть как узкие, так и широкие линии. Потребовалось несколько десятилетий, прежде чем астрономы смогли разобраться в многочисленных причинах, приводящих к расширению линий звездных спектров. Оказалось, что ряд явлений в атмосферах звезд (где образуются спектральные линии), не имеющих ничего общего с вращением



звезды как целого, по-разному расширяют различные линии. В частности, линии, принадлежащие достаточно распространенным элементам, при соответствующих физических условиях в атмосферах звезд могут быть очень широкими, независимо от вращения звезды.

Только в 1928 г. американский астроном О. Л. Струве и советский астроном Г. А. Шайн решили эту проблему. На рис. 49 приведены участки спектров трех горячих звезд: ζ Геркулеса, η Большой Медведицы и звезды, обозначаемой как HR 2142. Три самые интенсивные линии в этих спектрах принадлежат водороду (крайняя левая) и гелию. Сравнение верхней и средней спектрограмм показывает, что в то время как водо-

родная линия H_{γ} выглядит почти одинаково, гелиевые линии на средней спектрограмме заметно шире и не так контрастны, как на верхней. На нижней спектрограмме все линии очень широки и размыты, что делает их почти невидимыми. Истолкование этих спектров простое: на верхней спектрограмме составляющая скорости вращения по лучу зрения близка к нулю (т. е. звезда почти не вращается или же вращается вокруг оси, практически совпадающей с лучом зрения), между тем как средняя спектрограмма указывает на скорость вращения 210 км/с. Так как ширина водородной линии (объясняемая разными причинами, ничего общего с вращением звезды не имеющими) очень велика, то вращение звезды еще не оказывает на нее заметного влияния. Иное дело звезда, спектр которой приведен в нижней части рис. 49. Здесь скорость вращения настолько велика (450 км/с), что все линии в спектре, в том числе и H_{γ} , оказываются сильно расширенными и «замытыми».

Подобным методом к настоящему времени исследовано вращение большого количества звезд. Анализ этого обширного наблюдательного материала показал, что скорости вращения звезд вокруг своих осей весьма неодинаковы. Мы видели, что, например, экваториальная скорость вращения Солнца вокруг своей оси всего лишь около 2 км/с, в то время как скорости вращения некоторых звезд превосходят солнечную в 200 раз! Оказалось, что скорости вращения закономерно связаны со спектральным классом звезд. Быстрее всего вращаются массивные звезды классов О и В, практически не вращаются желтые и красные карлики. В табл. 3 приведены данные о скоростях вращения звезд различных спектральных классов.

Обращает на себя внимание следующее обстоятельство: где-то вблизи спектрального класса F5 (температура поверхности звезд этого класса около 6 тыс. К) скорости вращения резко, почти скачком уменьшается. В то время как звезды более «ранних» спектральных классов вращаются с экваториальной скоростью, как правило, превышающей 100 км/с, карлики спектральных классов G, K, M практически не вращаются. Последнее обстоятельство доказано самыми тщательными спектрографическими наблюдениями.

Возникает основной вопрос: почему такая характеристика звезд, как вращение, изменяется не плавно вдоль главной последовательности звезд, а скачком, вблизи спектрального класса F5? Ведь другие основные характеристики, как, например, спектральный класс, светимость, температура поверхности, меняются вдоль главной последовательности звезд непрерывно. Чтобы попытаться ответить на этот важный вопрос, рассмотрим следующий мысленный эксперимент. Что было бы, если бы все планеты Солнечной системы слились с Солнцем? Так как в изолированной системе момент количества движения должен сохраниться, а масса всех планет ничтожно мала по сравнению с массой Солнца, то Солнце с необходимостью должно было бы вращаться с экваториальной скоростью, в 50 раз большей, чем сейчас (так как его вращательный момент должен был бы увеличиться с 2 до 100% полного момента количества движения Солнечной системы). Следовательно, экваториальная скорость вращения Солнца стала бы близкой к 100 км/с. Но это как раз нормальная скорость вращения звезд, более массивных и горячих, чем F5. Напрашивается важный вывод: скорость вращения Солнца, которая когда-то была довольно высокой, резко уменьшается (в 50 раз) благодаря тому, что основная часть момента количества движения была передана планетам.

Мы можем считать, что не горячие звезды аномально быстро вращаются, а наоборот, холодные карликовые звезды почему-то очень медленно вращаются. По аналогии с Солнцем следует как бы напрашивающийся вывод: причина медленного вращения звезд главной последовательности, начиная со спектрального класса F5 и более поздних, — наличие вокруг них планетных систем, по какой-то пока неизвестной причине «вобравших» в себя большую часть первоначального момента того сгустка вещества, из которого сформировались звезды и планеты.

Мыслимы по крайней мере два механизма «перекачки» момента от центральной звезды к планетам. Первый такой механизм был предложен известным шведским физиком и астрономом Альвеном, который обратил внимание на то, что роль «передаточного ремня» может выполнять магнитное поле. Развитие идеи Альвена содержится в космогонической гипотезе английского астрофизика Хойла, выдвинутой в 1958 г.

Таблица 3*)

Скорость вращения, км/с	Процент звезд, скорость вращения которых находится в заданных пределах					
	Oe, Be	O, B	A	F0 - F2	F5 - F8	G, K, M
0 - 50	0	21	22	30	80	100
50 - 100	0	51	24	50	20	0
100 - 150	0	20	22	15	0	0
150 - 200	1	6	22	4	0	0
200 - 250	3	2	9	1	0	0
250 - 300	18	0	1	0	0	0
300 - 500	78	0	0	0	0	0

*) Во втором столбце обозначения Oe, Be относятся к горячим, массивным звездам, в спектрах которых имеются линии излучения.

Следуя классической традиции, Хойл считает, что планеты образовались из некоторой газопылевой туманности. В первоначальную эпоху плотность вещества в этой туманности была очень низка. Отдельные «куски» туманности двигались друг относительно друга с беспорядочными скоростями. Величина таких скоростей, как следует из наблюдений «диффузных» туманностей, около 1 км/с.

По этой причине первичная туманность должна обладать некоторым моментом количества движения, причем он оказывается очень большим (главным образом из-за больших размеров туманности — порядка нескольких световых лет). Если бы в процессе конденсации момент количества движения сохранялся, то экваториальная скорость «новорожденной» звезды была бы почти равна скорости света. Поскольку, однако, это заведомо не так, необходимо допустить, что по крайней мере 99 % момента количества движения было потеряно туманностью до того, как образовалась звезда. Такая «утечка» момента, согласно Хойлу, может быть обусловлена межзвездным магнитным полем. Так как силовые линии этого поля, «приклеенные» к конденсирующемуся облаку, уходят в бесконечность, то, как оказывается, вдоль них, как по гибким струнам, может «перекачиваться» момент от облака к окружающей его межзвездной среде. Однако такой процесс «перекачки» по причине, на которой мы не можем здесь останавливаться, будет идти только до тех пор, пока плотность облака не станет достаточно высокой. Начиная с этого времени эффективная передача момента от облака к окружающей среде прекратится.

Этот результат имеет большое значение, так как он не позволяет объяснять очень медленное вращение сравнительно холодных звезд (в том числе Солнца) передачей момента сжимающейся туманностью окружающей межзвездной среде. Как показывают расчеты, выполненные Хойлом, оставшийся момент, если бы он был сосредоточен только в сконденсировавшейся звезде, соответствовал бы экваториальной скорости вращения последней в несколько сот километров в секунду. Именно такие скорости вращения наблюдаются у сравнительно горячих звезд. Коль скоро более холодные звезды вращаются очень медленно, необходимо допустить, что они потеряли свой момент только после того, как первичная туманность сжалась до небольших размеров, например до размеров Солнечной системы.

Остается объяснить два факта:

а) почему звезды, спектральные классы которых более поздние, чем F5, потеряли почти весь свой вращательный момент?

б) почему это не произошло у более горячих звезд?

Чтобы ответить на эти вопросы, обратим внимание на то, что по мере сжатия туманности (мы можем теперь называть ее «протозвездой») будет вращаться вокруг своей оси все быстрее и быстрее. Можно показать, что при массе протозвезды, равной солнечной, и при радиусе, превышающем солнечный в 40 раз, центробежная сила на экваторе будет уравновешивать силу притяжения. Наступает состояние неустойчивости, и вещество отделяется от звезды, образуя экваториальный диск. Пока это еще соответствует схеме Лапласа.

Однако в формирующейся звезде можно ожидать наличия общего магнитного поля. Если силовые линии этого поля проходят через отделившийся диск (а в процессе отделения диска они не могли «порваться»), вращение оставшейся основной массы протозвезды будет закручивать их. В результате существования такой «магнитной» связи между отделившимся от протозвезды диском и ее основной массой из-за натяжения силовых линий вращение протозвезды будет тормозиться, а диск начнет удаляться от поверхности протозвезды, причем каждая его точка будет уходить наружу по спирали. С течением времени диск вследствие трения «размажется», и часть его вещества превратится в планеты, которые таким образом «унесут» с собой значительную долю момента.

Почему же такой процесс происходит у сравнительно холодных протозвезд, а у более горячих нет? Ответ на этот важный вопрос состоит в следующем. Масса

отделившегося от протозвезды диска не очень велика, поэтому диск не может «намотать» на себя большое количество витков силовых линий магнитного поля. В противном случае упругость силовых линий разорвала бы его и дальнейший процесс «наматывания» прекратился. Единственное место, где могут находиться наматываемые витки силовых линий, — это внешние слои протозвезды. В процессе такого наматывания силовые линии должны погружаться в сравнительно глубокие слои протозвезды. Оказывается, что благоприятные условия для такого «погружения» силовых линий имеются только у сравнительно холодных звезд. Именно у таких звезд под поверхностью находится довольно толстый слой вещества, охваченный бурными, беспорядочными движениями вверх и вниз. Первопричиной образования таких слоев является то, что ввиду падения температуры по мере приближения к поверхности звезды водород, до этого ионизованный, становится нейтральным. Из-за этого нарушается тепловой режим, теряется механическая устойчивость и возникают конвективные потоки газа. При этих условиях магнитные силовые линии, как бы «приклеенные» к движущимся потокам газа, могут погружаться на значительные глубины под поверхностью протозвезды.

Если же протозвезда достаточно горяча, водород в ней ионизован вплоть до самых поверхностных слоев и «конвективной зоны» не образуется. Поэтому силовые линии магнитного поля не могут уходить вглубь. Они будут наматываться только в самых поверхностных слоях, причем очень недолго. Довольно скоро вследствие малой плотности вещества в этих слоях упругость силовых линий приведет к сбрасыванию нового газового диска, в то время как старый еще не успеет получить сколько-нибудь значительного момента количества движения.

Таковы в общих чертах основные результаты космогонической гипотезы Хойла. Она довольно непринужденно объясняет резкость обрыва вращения звезд в районе спектрального класса F5. Эта резкость вызвана в конечном итоге сильной зависимостью ионизации атомов водорода от температуры. Уже у звезд класса F0, температуры поверхностей которых всего лишь на 2000 К выше, чем у F5, конвективная зона начинается так близко от поверхности, что эффективное наматывание силовых линий почти исключается. Приходится только удивляться сложности взаимосвязей явлений, приводящих к такому «жизненно необходимому» для возникновения и развития жизни во Вселенной процессу, как образование планет...

Гипотеза Хойла, однако, имеет ряд трудностей и противоречий. Например, нелегко представить, как могли «отсортироваться» избыточный водород и гелий в первоначальном газовом диске, из которого образовались планеты.

Однако главной трудностью гипотезы Хойла является требование слишком сильного магнитного поля у «протосолнца», резко противоречащее современным астрофизическим представлениям.

В 1962 г. французский астрофизик Шацман обратил внимание на то, что наличие магнитных полей на звездах открывает возможность эффективной потери вращательного момента без образования планет. Известно, что наше Солнце является источником потоков заряженных частиц — корпускул, выбрасываемых из его атмосферы (солнечный ветер)., Отдельные сгустки горячего ионизованного газа как бы «выстреливаются» из областей, окружающих солнечные пятна, и движутся от Солнца со скоростями в несколько сот и даже тысяч км/с. Так как ионизованное вещество таких сгустков является хорошим проводником электричества, то их движение должно происходить по силовым линиям солнечных магнитных полей. На больших расстояниях от солнечных пятен магнитные поля имеют почти радиальное направление. Двигаясь радиально вдоль силовых линий, сгустки могут уходить на значительные расстояния от поверхности Солнца, исчисляемые десятками его радиусов.

Теперь необходимо отметить, что силовые линии магнитного поля Солнца, концы которых уходят в его глубокие слои, вращаются вокруг оси с той же угло-

вой скоростью, что и поверхностные слои. Наглядное представление об этом дает проволочный каркас, прикрепленный к вращающемуся шару. Отсюда следует, что выброшенный из Солнца сгусток по мере его движения вдоль силовых линий наружу будет непрерывно увеличивать свой вращательный момент. Если в конце концов он «сорвется» с силовых линий солнечного магнитного поля (которое на больших расстояниях уже значительно ослабевает и не сможет больше определять движение сгустка), то унесет с собой довольно значительный момент.

Представим, например, что такие «срывы» происходят на расстоянии 30 радиусов Солнца от его центра. Тогда, чтобы потерять почти весь свой вращательный момент, Солнце должно выбросить приблизительно 0,001 часть своей массы. Такая сравнительно малая потеря массы за миллиарды лет эволюции вполне возможна. Следует, правда, заметить, что в настоящее время эффективное торможение Солнца этим способом не происходит — его «корпускулярное излучение» слишком мало. Но в прошлом это могло быть и не так... Можно представить, что такой механизм потери вращательного момента действует на всех (или почти всех) звездах, где имеются связанные с активными областями на их поверхностях магнитные поля. Так как такие образования обусловлены наличием у звезд «конвективных зон», то открывается возможность понять, почему наблюдается резкий «обрыв» вращения около спектрального класса F5.

Работа Шацмана имела целью объяснить медленное вращение звезд поздних спектральных классов. Но вместе с тем она поставила под сомнение веру в правильность аргумента, что медленное вращение мало массивных звезд есть аргумент в пользу наличия около них планетных систем. Однако недавно было доказано путем наблюдений, что мало массивные протозвезды вращаются медленно. Тем самым доказано, что механизм Шацмана не объясняет медленное вращение мало массивных звезд.

Наиболее последовательным сторонником гипотезы образования Солнечной системы из первичной «солнечной» туманности является американский астроном Камерон. Он связывает в единый процесс образование звезд и планетных систем. Современная наблюдательная астрономия практически доказала, что звезды образуются путем конденсации облаков межзвездной среды в результате их гравитационной неустойчивости (см. гл. 4). Первоначально такая конденсация происходит с облаками, масса которых во много тысяч раз превосходит солнечную. Следует подчеркнуть, что в определенной эпоху только малая часть таких облаков находится в стадии гравитационного сжатия, в то время как подавляющее большинство их имеют плотности, недостаточные для этого. Важно подчеркнуть, что время от времени сторонние причины увеличивают плотность облаков, после чего последние начинают сжиматься. Такими причинами могут быть взрывы сверхновых неподалеку от облаков. Образовавшаяся после такого взрыва в межзвездной среде сильная ударная волна сжимает газ в близлежащем облаке, создавая тем самым условия для его дальнейшего сжатия уже под влиянием внутренней силы тяготения. Таким образом, вспышки сверхновых могут служить как бы «триггерами», «стимуляторами» процесса звездообразования. Эта идея, высказанная четверть века назад замечательным эстонским астрономом Эпиком, сейчас подтверждается наблюдениями.

То, что «у колыбели» нашей Солнечной системы стояла взорвавшаяся звезда, Камерон обосновывает аномальным изотопным составом метеоритов, являющихся частью вещества Солнечной системы. В частности, из подобного анализа следует, что в первичном веществе Солнечной системы должен был присутствовать радиоактивный изотоп алюминия ^{26}Al , период полураспада которого меньше миллиона лет.

По мере сжатия массивного облака оно разбивалось на более мелкие сгустки, один из которых и был «солнечной» туманностью. Первоначально газ, образовавший эту туманность, находился в состоянии быстрого, беспорядочного движения

и по этой причине обладал значительным вращательным моментом. Это обстоятельство мешало ему сразу же сконденсироваться в одно компактное тело — протозвезду. Вместо этого образовался довольно уплощенный диск с радиусом в несколько десятков астрономических единиц.

Теоретический анализ дальнейшей эволюции такого диска с учетом вязкости образующего его газа позволяет сделать вывод о возникновении в нем неустойчивости, которая приводит к образованию нескольких (2—3) газовых колец. Заметим, что это должно произойти на ранней стадии эволюции диска, когда центральное тело (т. е. будущее Солнце) еще не сформировалось. Дальнейшие теоретические расчеты показывают, что каждое такое кольцо довольно быстро превратится в огромный газовый сгусток. Такие сгустки Камерон называет «гигантскими газовыми протопланетами». Заметим, что размеры этих сгустков должны быть порядка астрономической единицы. Образование таких протопланет в ситуации, когда протосолнце еще не образовалось, имело весьма существенное значение для дальнейшей эволюции Солнечной системы. В частности, этот вариант гипотезы «солнечной туманности», по-видимому, решает классическую проблему распределения вращательного момента Солнечной системы.

Камерон рассматривает дальнейшую эволюцию гигантских газовых протопланет. При этих расчетах принималось, что масса протопланеты равна массе Юпитера. В процессе эволюции протопланеты сжимаются, причем температура в их центральных областях достигает 3—4 тыс. Кельвинов. При такой температуре и соответствующем давлении все твердые фракции становятся жидкими. Большую роль в эволюции протопланет должна была играть конвекция, приводящая к перемешиванию вещества. Во внутренних частях Солнечной системы благодаря приливным возмущениям оболочки протопланет как бы «обдирались» и входящие в них вещество попадало обратно в межпланетную среду, обогащая ее включениями кусочков твердых фракций, которые прошли через стадию расплавления во внутренних частях гигантских протопланет. На более поздней стадии эволюции солнечной туманности, когда она уже потеряла большую часть газа, истраченного на образование Солнца или диссипировавшего, входящие в нее твердые частицы образуют тонкий слой в экваториальной плоскости диска. В дальнейшем по причине все той же гравитационной неустойчивости из этого слоя образуются астероиды.

<> Другой сценарий эволюции «солнечной туманности» предполагает, что не только астероиды, но и все планеты земной группы (Меркурий, Венера, Земля, Марс) сформировались из этого слоя в результате столкновения твердых частиц, их слипания, образования и роста планетных зародышей — планетезималей. В. С. Сафронов, детально изучивший этот вариант, показал, что для «сборки» Земли потребовалось бы около 100 миллионов лет.

Многие метеориты содержат загадочные стекловидные включения — хондры. Их структура показывает, что вещество хондр по крайней мере один раз было в расплавленном состоянии. В гипотезе Камерона это естественно объясняется, если предположить, что вещество хондр прошло через недра протопланет. Однако расплавление и даже испарение могло произойти и непосредственно в газопылевой среде, если ее потоки проходили через ближайшие окрестности рождающегося Солнца 0.

Итак, мы разобрали основные современные гипотезы об образовании Солнечной системы. Хотя автор старался быть беспристрастным, его симпатии всегда были на стороне гипотезы «солнечной туманности». По нашему мнению, основным достоинством этой продолжающей и развивающей классическую космогоническую традицию гипотезы является ее неразрывная связь с фундаментальной проблемой происхождения звезд из межзвездной газопылевой среды. Как мы уже неоднократно подчеркивали, эта проблема в последние годы стала предметом изучения наблюдательной астрономии. В гл. 8 было показано, что статистика кратных

звездных систем непосредственно подводит нас к представлению, что образование планетных систем неразрывно связано с образованием звезд.

В чем коренная причина кратности звезд? В конце концов, — в законе сохранения вращательного момента сжимающегося под действием собственного притяжения межзвездного газового облака. Обладающее значительным вращательным моментом облако на основании законов механики просто не может превратиться в одиночную медленно вращающуюся звезду (вроде Солнца, но без планет). Вернее сказать, если бы такая звезда образовалась — это было бы большой редкостью. Ведь для этого надо приписать первичному сжимающемуся облаку вращательный момент, в сотни раз меньший, чем у «нормальных» сжимающихся облаков, число которых составляет во всяком случае больше 90% всех таких облаков! Сразу же видно, что такие облака будут встречаться чрезвычайно редко. Почти наверняка практически все звезды типа Солнца, которых пока считают одиночными, имеют невидимые спутники с достаточно малой массой и светимостью. И среди них можно ожидать звезды, окруженные семейством планет. Вопрос, однако, состоит в следующем: как часто среди систем этого типа попадают (наряду с карликовыми звездами и большими планетами) планеты земного типа? В «оптимистическом» случае доля таких систем по отношению ко всем звездам солнечного типа будет 10%, как это следует из статистического анализа Абта и Леви (см. гл. 8), в «пессимистическом» — неопределенно меньше. То обстоятельство, что Солнце представляет собой зауряднейшую звезду спектрального класса G, лишенную каких бы то ни было особенностей, есть некоторый аргумент в пользу «оптимистического» варианта. В этом случае полное число галактических планетных систем, в состав которых входят планеты земного типа, может быть порядка нескольких десятков миллионов, а если прибавить еще звезды спектрального класса K, то это число $\sim 10^8$. В этом «оптимистическом» случае расстояние до ближайших к нам планетных систем будет ~ 50 световых лет. Заметим, однако, что эти оценки носят сугубо ориентировочный характер.

В последнее время появился дополнительный, очень важный аргумент в пользу гипотезы солнечной туманности как первоосновы происхождения Солнечной системы. В гл. 4 мы уже говорили о космических мазерах и связали их с проблемой звездообразования. Накопившийся большой наблюдательный материал по «гидроксиловым» и, особенно, «водяным» мазерам, позволил недавно построить их модель. Оказалось, что лучше всего данные наблюдений объясняются моделью массивной газовой диска, в общих чертах напоминающего камероновскую солнечную туманность. Это направление радиоастрономии сейчас быстро развивается и можно ожидать, что в самом близком будущем начальные стадии эволюции планетных систем будут поняты и уточнены. Заметим, что первая попытка связать космические мазеры с протопланетами была сделана советскими учеными В. С. Стрельницким и Р. А. Сюняевым. Экстраполяция данных наблюдений Абта и Леви (см. рис. 43) вплоть до малых значений отношений масс M_p/M_* приводит к выводу, что все 123 близкие звезды класса G входят в состав кратных звезд; 67% вторичных компонент — нормальные звезды, 15% — невидимые слабые звезды («черные» карлики) и 20%, по-видимому, имеют планетные системы. Естественно считать, что короткопериодические системы образовались из одного газового сгустка, который в процессе образования диска распадается на две конденсации с примерно одинаковыми массами. Между тем долгопериодические системы с самого начала конденсировались в двух центрах, гравитационное взаимодействие которых было незначительным. При этом вращательный момент сжимающегося облака оказался сосредоточенным в орбитальном движении этих сгустков.

Таким образом, развитие современной наблюдательной астрономии естественно приводит к выводу о множественности планетных систем во Вселенной.