

Попытка понять Вселенную — одна из очень немногих вещей, которая чуть приподнимает человеческую жизнь над уровнем фарса и придает ей черты великой трагедии.

С. Вайнберг

Судьба существа зависит от судьбы Вселенной. Потому всякое разумное существо должно проникнуться историей Вселенной. Необходима такая высшая точка зрения.

К. Э. Циолковский

В предыдущей главе мы рассмотрели, как современная наука представляет себе пути поиска внеземных цивилизаций. По ходу изложения нам пришлось коснуться некоторых астрономических вопросов, мы упоминали не только о планетах и звездах, но и о таких удивительных объектах, как квазары, радиогалактики, космические мазеры и пульсары. Мы оперировали возможными расстояниями до космических цивилизаций, не заботясь о том, представляет ли читатель хотя бы общую картину строения Вселенной и ее масштабы. К сожалению, очень часто люди имеют весьма смутное представление об этих вещах, не всегда ясно представляя себе даже различие между Солнечной системой и Галактикой. И когда мы встречаем в прессе восторженные репортажи о том, как наши космонавты на космических кораблях «бороздят просторы Галактики», многие читатели (а возможно, и авторы) воспринимают эту метафору буквально. Поэтому, чтобы сознательно продвигаться вперед в исследовании интересующего нас вопроса мы должны прежде всего познакомиться с той ареной, с той сценой, на которой разворачивается Драма Жизни во Вселенной. Мы не будем описывать детали этой сцены. Нам надо представить только общую схему ее строения и общий механизм действия. Более подробные данные читатель сможет найти в литературе, список которой приводится в конце этой главы.

2.1. Как устроена Вселенная

Охватим взором всю ширь ночного неба, облетим мыслью все бесчисленные миры и тайники бесконечного пространства.

Е. И. Перух

2.1.1. Солнечная система — дом, в котором мы живем. Мы живем на поверхности планеты, которую называем Землей. С точки зрения нашего повседневного опыта, это огромный необычайно сложный и прекрасный мир. Если мы хотим посмотреть на Землю со стороны, нам придется отвлечься от многих дорогих нашему сердцу подробностей. Тогда Земля предстанет как космическое тело, приблизительно шарообразной формы, ее диаметр около 12,7 тыс. км, масса $6 \cdot 10^{24}$ кг. Земля вращается вокруг своей оси с периодом около 24 часов. Большая часть ее поверхности покрыта водами мирового океана, 29 % поверхности занимает суша.

Суша Земли образует пять континентов и множество мелких и больших островов. Наружная твердая оболочка Земли — земная кора в районе материков имеет толщину до 70 км, дно океанов образовано более тонкой океанической корой, ее толщина около 10 км. Под твердой корой Земли находится мантия, образованная расплавленным веществом, она состоит из нескольких слоев и простирается до глубины 2900 км. Еще глубже расположено плотное железо-никелевое ядро Земли. Наружные слои ядра — жидкие, центральная внутренняя часть — твердая. Давление в центре Земли достигает $33 \cdot 10^6$ атм, температура около 6000 К. Вследствие вращения Земли вокруг своей оси в жидком ядре генерируются электрические токи, которые являются источником геомагнитного поля.

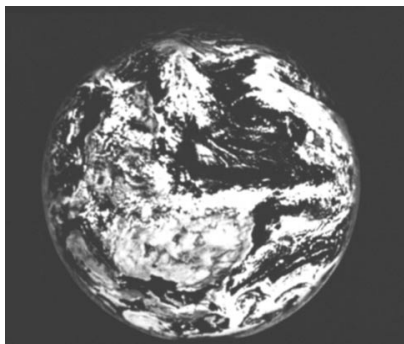


Рис. 2.1.1. Вид Земли из космоса. Видна только освещенная сторона

Над поверхностью мирового океана и континентов расположена воздушная оболочка Земли — ее атмосфера. Она простирается приблизительно до высоты 2000 км и постепенно переходит в межпла-

нетную среду. Основные процессы, связанные с формированием погоды, протекают в нижней атмосфере Земли — тропосфере, ее толщина в средних широтах составляет 10–11 км. На высоте 60 км (в стратосфере) содержится значительное количество озона — озоновый слой, который поглощает большую часть жесткого ультрафиолетового излучения Солнца и таким образом предохраняет органическую жизнь на Земле от губительного действия УФ-радиации. На высоте нескольких сотен километров (от 80 до 800 км) простираются ионизированные слои земной атмосферы, так называемая ионосфера, которая эффективно отражает декаметровые радиоволны и обеспечивает тем самым дальнюю радиосвязь в диапазоне КВ. Атмосфера Земли в основном состоит из азота (78 %) и кислорода (21%); имеется также небольшое количество аргона (0,9 %), углекислого газа (0,03 %) и водяного пара (меньше 0,1%). Атмосфера Земли поглощает большую часть спектра электромагнитного излучения, падающего на нее из Космоса. Лишь в оптической области, приблизительно от 0,3 до 0,7 мкм, и в радиодиапазоне, от нескольких метров до 1 мм, атмосфера относительно прозрачна. Через эти два узких «окна прозрачности» и поступает на поверхность Земли все излучение из космического пространства.

Содержание свободного кислорода в атмосфере Земли целиком обусловлено жизнедеятельностью живых организмов. Таким образом, органическая жизнь на Земле выступает как активный геохимический фактор планетарного масштаба. В соответствии с этим область распространения активной жизни на Земле, охватывающая часть нижней атмосферы, гидросферу и верхнюю часть твердой оболочки, получила название биосфера⁹⁵. Таковы некоторые черты Земли как планеты.

Ближайшее к Земле небесное тело — Луна. Это спутник нашей планеты. Она расположена на расстоянии 384 тыс. км (среднее расстояние) и обращается вокруг Земли с периодом 27,3 суток. Диаметр Луны в 3,5 раза меньше земного, а ее масса в 81 раз меньше массы Земли. Это мертвое, безжизненное тело, лишенное атмосферы и гидросферы. Несмотря на это, Луна оказывает заметное влияние на Землю. Прежде всего, благодаря гравитационному взаимодействию, она вызывает приливы в океане, атмосфере и твердой оболочке Земли. Имеются данные о том, что ритм жизнедеятель-

⁹⁵ Этот термин был введен Э. Зюссом в 1875 г., а учение о биосфере было создано выдающимся российским ученым В. И. Вернадским в 1926 г.

ности земных организмов коррелирует с ритмом лунных приливов. Отмечена также корреляция процессов в биосфере с фазами Луны.

Земля с Луною обращаются вокруг Солнца по почти круговой орбите с периодом 365,26 суток (сидерический год). Всего в Солнечной системе 9 больших планет, — это (в порядке возрастания расстояний от Солнца): Меркурий, Венера, Земля, Марс, Юпитер, Сатурн, Уран, Нептун и Плутон. Расстояния в Солнечной системе принято выражать в астрономических единицах; 1 а. е. равняется среднему расстоянию от Земли до Солнца, 149,6 млн км. Ближайшая к Солнцу планета Меркурий обращается вокруг него на расстоянии 0,39 а. е., а самая удаленная планета Плутон — на расстоянии 39,4 а. е. Все планеты обращаются вокруг Солнца приблизительно в одной плоскости и в одном направлении, совпадающем с направлением вращения Солнца вокруг собственной оси. Основные характеристики планет приведены в таблице 2.1.1.

Таблица 2.1.1

Характеристики планет Солнечной системы

Планета	Среднее расстояние от Солнца, а. е.	Период обращения вокруг Солнца	Экватор. диаметр, км	Масса (в ед. массы Земли)	Средняя плотность, г/см ³	Период вращения вокруг собственной оси	Число известных спутников
Меркурий	0,387	88,0 сут.	4878	0,055	5,4	58,6 сут.	0
Венера	0,723	224,7 сут.	12102	0,815	5,2	243 сут.	0
Земля	1,000	365,3 сут.	12756	1,000	5,5	23 ^h 56 ^m 04 ^s	1
Марс	1,524	687,0 сут.	6794	0,107	3,9	24 ^h 37 ^m 23 ^s	2
Юпитер	5,20	11,86 лет	142980	318	1,3	9 ^h 55 ^m	40
Сатурн	9,56	29,46 лет	120536	95,2	0,7	10 ^h 40 ^m	30
Уран	19,22	84,02 лет	51120	14,5	1,3	17 ^h 14 ^m	21
Нептун	30,11	164,8 лет	49530	17,2	1,8	16 ^h 07 ^m	11
Плутон	39,44	247,7 лет	2390	0,0023	1,1	6,39 сут.	1

Расстояния планет от Солнца подчиняются определенной закономерности (так называемое правило Тициуса–Боде). Согласно этой закономерности, между Марсом и Юпитером должна быть еще одна планета. Но вместо нее там существуют целый рой малых тел —

малых планет или астероидов. Орбиты большинства астероидов заключены в пределах от 2,17 до 3,64 а. е. (эту область Солнечной системы называют поясом астероидов), больше всего их на расстоянии 2,8 а. е., где, согласно правилу Тициуса–Боде, должна находиться несуществующая планета.

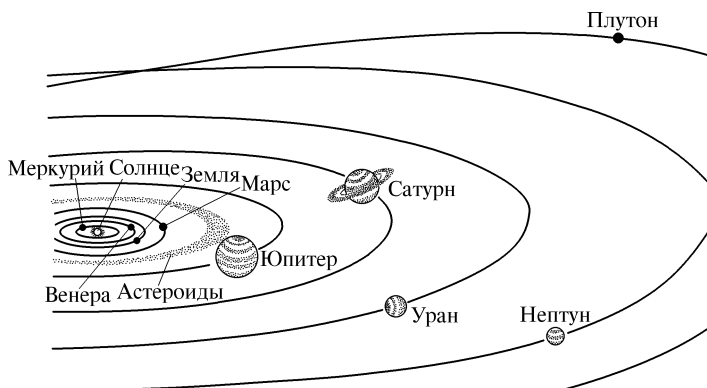


Рис. 2.1.2. Схема строения Солнечной системы. Показаны орбиты 9 больших планет и пояс астероидов между Марсом и Юпитером

В настоящее время зарегистрировано более 10 000 астероидов. Самый крупный из них Церера, ее размер 950 км, а масса в 7000 раз меньше массы Земли. Затем следуют Паллада, Веста, Юнона с диаметром, соответственно, 550, 530 и 240 км. Число астероидов с уменьшением их размера быстро возрастает. Самые малые из зарегистрированных астероидов (т. е. таких, для которых определена орбита) имеют размер порядка нескольких сот метров. Более мелкие тела обычно называют метеороидами. Граница между ними и астероидами условна. И те, и другие представляют собой каменные глыбы неправильной формы, образовавшиеся, вероятно, от дробления более крупных тел. Процесс дробления продолжается и в настоящее время. Чем меньше осколки, тем больше их число, самые мелкие образуют частицы межпланетной пыли. Некоторые метеороиды попадают в поле тяготения Земли и падают на ее поверхность в виде метеоритов или сгорают в атмосфере в виде метеоров. Крупные метеоритные кратеры на Земле соответствуют падению астероидов диаметром около 1 км.

Существовала гипотеза, согласно которой пояс малых планет образовался в результате взрыва планеты Фэтон, обращавшейся по орбите между Марсом и Юпитером. Согласно современным взглядам, астероиды — остатки протопланетных тел, из которых могла

сформироваться планета, однако процесс ее формирования не был завершен из-за гравитационных возмущений со стороны Юпитера.

К числу малых тел Солнечной системы относятся и кометы. Время от времени эти небесные странники появляются на нашем небосводе, создавая красочную картину и оставляя у людей неизгладимое впечатление, часто наполненное смутными предчувствиями каких-то грядущих событий. Ядро кометы представляет собой ледяное тело неправильной формы (ледяную глыбу) размером несколько сот километров, состоящую из замерзших газов (H_2O , NH_3 , CO_2 и др.) с вкрапленными в лед минеральными частицами. Считается, что вещество ядра сохранилось от тех времен, когда происходил процесс формирования Солнечной системы, это остатки тех тел, из которых образовались планеты.

Кометные тела обращаются вокруг Солнца по очень вытянутым эллиптическим орбитам. Большую часть времени они находятся вдали от Солнца, образуя гигантское облако кометных тел, простирающееся на 100–150 тысяч а. е., которое называют облаком Оорта⁹⁶. Вблизи афелия своих орбит кометные тела испытывают притяжение соседних с Солнцем звезд. Под действием этого притяжения орбиты их изменяются. Часть тел приобретает параболическую скорость и покидают Солнечную систему. Другие (их небольшое число) переходят на орбиту с перигелием, расположенным вблизи Солнца. Именно они и образуют кометы. Когда ядро кометы приближается к Солнцу, вначале с ним не происходит никаких заметных изменений. Но когда расстояние становится меньше 6 а. е., замерзшие газы в ядре кометы под действием солнечных лучей испаряются и образуют вокруг ядра туманную газо-пылевую оболочку — кому. Вместе с находящимся внутри ее ядром кома образует голову кометы, размеры которой достигают 10^4 – 10^5 км. Под действием светового давления и солнечного ветра вещество комы отбрасывается назад от Солнца и образует хвост, простирающийся на сотни миллионов километров. Пройдя через перигелий, комета удаляется от Солнца, хвост ее уменьшается, блеск слабеет, и, наконец, она совсем исчезает

⁹⁶ Согласно Ф. А. Цицину, облако (или, точнее, рой) реликтовых кометных тел простирается на значительно большее расстояние, вплоть до 100 св. лет, захватывая окрестности соседних звезд; напомним, что расстояние между звездами вблизи Солнца порядка нескольких световых лет. (См. Цицин Ф. А. Происхождение комет: новый взгляд на старую проблему // Земля и Вселенная. 1999. № 1. С. 60–69.) Если это так, и если у других звезд имеются подобные рои кометных тел, то они взаимно пронизывают друг друга и могут быть источником хотя и редкого, но все же *взаимообмена* кометными телами.

из виду. Когда комета проходит через области Солнечной системы, занятые планетами, кометное ядро вновь испытывает возмущения, но уже не от соседних звезд, а от планет. Часть комет под действием этих возмущений переходят на гиперболические орбиты и уходят



Рис. 2.1.3. Затменная комета 1948 года, открытая в момент полного солнечного затмения

из Солнечной системы, другие захватываются на менее вытянутые эллиптические орбиты. Такие кометы периодически возвращаются к Солнцу. Одна из самых известных периодических комет — комета Галлея, с периодом обращения примерно 76 лет, последнее прохождение ее было в 1986 г.

В последнее десятилетие XX века были получены новые данные о строении внешних частей Солнечной системы⁹⁷. В 1992 г. за орбитой Нептуна, на расстоянии 44,3 а. е. была открыта малая планета размером 283 км, которая обращается вокруг Солнца по почти круговой орбите (с очень малым экс-

центриситетом). В следующем году была открыта вторая такая планета размером 286 км. А к середине 2002 г. число транснептуновых объектов достигло 500. Диаметр самого большого из них — около 1300 км, самого маленького — 96 км. По оценкам количество объектов за орбитой Нептуна размером более 100 км составляет 65 000. Но, конечно, там должны быть и более мелкие тела, количество которых значительно больше (уже открыты первые такие объекты размером от 6 до 10 км).

Все транснептуновые тела можно разделить на два класса. Объекты первого класса движутся по почти круговым орбитам, лежащим целиком за орбитой Нептуна. Это так называемые классические

⁹⁷ Уральская В. С. Внешние области Солнечной системы // Земля и Вселенная. 1999. № 5. С. 20–27.

объекты пояса Койпера. Существование их было предсказано Дж. Койпером в 1951 г. как возможного источника короткопериодических комет. Большинство транснептуновых объектов (до 70 %) относится к этому классу.

В отличие от них объекты второго класса движутся по сильно эксцентричным орбитам и могут заходить внутрь орбиты Нептуна. Плутон принадлежит к этому классу (он также заходит внутрь орбиты Нептуна), поэтому все объекты второго класса получили название *плутино*, т. е. «маленькие плутончики». Все они, как и Плутон, находятся в резонансе с Нептуном, делая 2 обращения вокруг Солнца за 3 оборота Нептуна. Среднее расстояние всех плутино от Солнца примерно равно 39 а. е., а эксцентриситеты и, соответственно, расстояния в перигелии и афелии у различных плутино различны. К середине 2000 г. было открыто около 100 плутино, а общее число таких тел с размером больше 100 км оценивается в 25 000.

Помимо этих двух классов, за орбитой Нептуна находятся объекты, которые движутся по очень вытянутым эллиптическим орбитам и могут уходить далеко за орбиту Нептуна и Плутона. Примером может служить объект TL 66, открытый в 1996 г. Его размер 500 км, период обращения 1000 лет, и он удаляется от Солнца (в афелии) на 135 а. е. Количество подобных объектов оценивается в 10 000, а их общая масса может достигать от 0,5 до 1 массы Земли.

Еще один пояс малых тел расположен внутри орбиты Нептуна, между ним и Юпитером. Это так называемые *кентавры*. Первый кентавр был открыт в 1977 г. и получил название Хирон (не путать с Хароном — спутником Плутона!). В греческой мифологии Хирон — имя одного из кентавров (получеловека, полулошади). Название объекта «Хирон» было оправдано тем, что он сочетал в себе свойства астероидов и комет. Так в 1996 г., находясь весьма далеко от Солнца, Хирон проявил активность кометного типа: у него появились кома и хвост. Впоследствии другие объекты, подобные Хирону, стали называть «кентаврами». К середине 2000 г. было известно около 20 кентавров. Считается, что они попали в область между орбитами Юпитера и Нептуна из пояса Койпера. Это подтверждает предположение о том, что пояс Койпера является источником периодических комет. Расположение некоторых транснептуновых тел и «кентавров» показано на рис. 2.1.4.

Но вернемся вновь к большим планетам. Они делятся на две группы: земная группа — Меркурий, Венера, Земля, Марс и планеты-

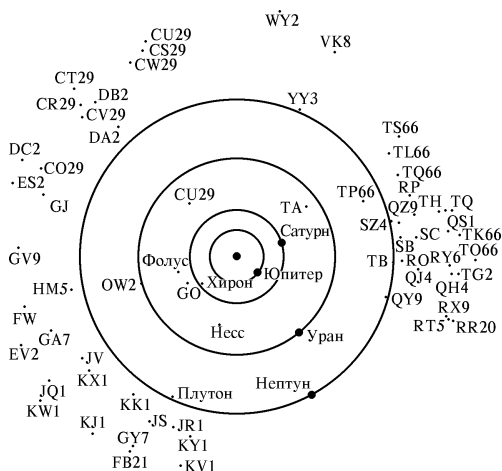
гиганты — Юпитер, Сатурн, Уран и Нептун. Плутон занимает особое положение: по своим характеристикам он больше похож на спутники планет-гигантов или на плутино.

Рассмотрим планеты земной группы. Все они имеют твердые оболочки; наиболее обильные химические элементы в твердой оболочке: железо, кислород, кремний, магний. Жидкая оболочка — гидро-

сфера имеется только у Земли. На Марсе жидкой воды нет, но есть лед H_2O в полярных шапках и в грунте (вечная мерзлота). Венера, Земля и Марс окружены газовой атмосферой. Особенно мощная атмосфера у Венеры, давление ее у поверхности планеты составляет 90 атм, у Земли — 1 атм, у Марса — 0,006 атм. Основные компоненты атмосферы на Венере и Марсе — углекислый газ и азот (на Земле — кислород и азот). У Меркурия атмосферы практически нет. Жидкое ядро имеется у Меркурия, Венеры и Земли, у Марса оно, по-видимому, отсутствует. Все планеты земной группы имеют слабое магнитное поле, у Меркурия оно в 100 раз слабее земного, у Марса — в 10^4 раз слабее, у Венеры — в 10^5 раз.

Температура на поверхности Меркурия в полдень составляет 750 К (477 °С), а в полночь падает до 100 К (–173 °С); на Венере, под ее мощной атмосферой, создающей сильный парниковый эффект, средняя температура поверхности 735 К (462 °С); на Марсе в полдень температура достигает 280 К (7 °С), а в полночь составляет 150 К (–123 °С). Сезонные вариации температуры возникают из-за наклона плоскости экватора планеты к плоскости ее орбиты; помимо Земли они еще имеют место на Марсе и практически отсутствуют на Венере. На Меркурии сезонные изменения температуры связаны с заметной эллиптичностью его орбиты: в перигелии он получает вдвое больше тепла, чем в афелии.

Рис. 2.1.4. Положение транснептуновых объектов и малых тел из семейства «кентавров» в проекции на плоскость эклиптики по данным на октябрь 1997 г.



Рельеф поверхности планет земной группы отличается большим разнообразием. Самые крупномасштабные элементы поверхности — континентальные блоки и океанические впадины. Имеются они на Земле, Марсе и Венере. Характерной особенностью рельефа являются также горные цепи и долины. В формировании рельефа поверхности планет земной группы, помимо внутренних факторов

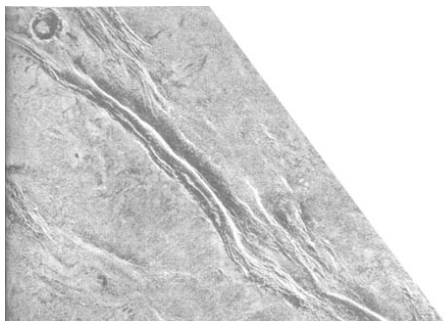
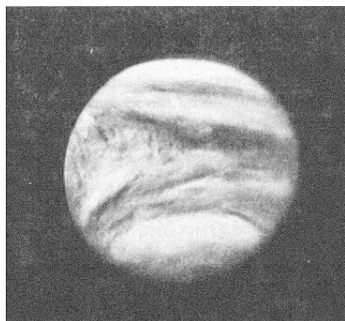


Рис. 2.1.5. Венера. Изображение облачного слоя в УФ-лучах.

Фото с американского космического аппарата «Пионер-Венера» на расстоянии 65 000 км от поверхности планеты, 1979 г.

Рис. 2.1.6. Участок поверхности Венеры под облачным слоем.

По результатам радиолокационной съемки, выполненной с советских космических аппаратов «Венера-15» и «Венера-16» в 1983–1984 гг. Хорошо видна складчатая гряда Лукелонг протяженностью 1500 км

(тектоническая деятельность, вулканы, эрозия), существенную роль играют падения метеоритов, особенно у планет, не имеющих мощной атмосферы. У Марса и Меркурия метеоритные кратеры — наиболее распространенная форма рельефа, имеются они также на Земле и Венере. На Марсе в результате исследования космическими аппаратами «Викинг» обнаружены образования, связанные с водной эрозией — извилистые долины, русла высохших рек, свидетельствующие о том, что в далеком прошлом на Марсе была вода и более плотная атмосфера. Существует гипотеза, согласно которой большие запасы воды сохраняются над поверхностью Марса.

Две внутренние планеты — Меркурий и Венера, не имеют спутников; у Земли один спутник — Луна; у Марса два спутника — Фобос и Деймос, это небольшие тела неправильной формы, напоминающие астероиды.

Планеты-гиганты отличаются от планет земной группы не только своими размерами, но также строением и составом. В их составе мало тяжелых элементов, преобладают самые легкие элементы —

водород и гелий. В этом отношении состав планет-гигантов близок к солнечному. Различие в составе планет земной группы и планет-гигантов объясняется различными условиями их образования. В то время, когда формировались планеты, интенсивное коротковолновое излучение молодого Солнца и солнечный ветер «выдули» большую часть легких газов (водород, гелий) из внутренних частей протопланетного облака, где формировались планеты земной группы. В соответствии с различием в составе, средняя плотность планет-гигантов значительно ниже, чем у планет земной группы.

Строение планет-гигантов также имеет общие черты. В центре их находится каменистое ядро, к которому примыкает ледяная оболочка — мантия, состоящая, в основном, из водяного льда, а также замёрзшего метана и аммиака; над ней простирается очень мощная, протяженная и плотная атмосфера с толстым облачным слоем. У



Рис. 2.1.7. Юпитер

Юпитера и Сатурна атмосфера состоит, в основном, из водорода и гелия с примесью различных аэрозолей. Давление у основания атмосферы столь велико, что водород здесь находится в жидком состоянии, а еще ниже, в слое, примыкающем к ледяной мантии, — в металлической фазе. Ядро Юпитера составляет всего 4% его массы, у Сатурна оно уже достигает 25 %, а у Урана и Нептуна — 90 % полной массы. Внешняя газо-жидкая оболочка Урана и Нептуна состоит из водорода, гелия, метана и аммиака.

Температура видимой поверхности Юпитера (облачного слоя) составляет приблизительно 130 К (–143 °С), а у остальных планет, которые расположены дальше от Солнца, она еще ниже; самая удаленная из планет-гигантов Нептун имеет температуру порядка 60 К (–213 °С). Все планеты-гиганты имеют магнитное поле, особенно сильное оно у Юпитера. Его магнитосфера является источником мощного радиоизлучения, обнаружено радиоизлучение и у Нептуна.

Важной особенностью планет-гигантов является наличие у каждой из них целого семейства спутников. Еще до начала космических исследований с помощью наземных телескопов у Юпитера было об-

наружено 12 спутников, у Сатурна — 10, у Урана — 5, у Нептуна — 2. Исследования с помощью космических аппаратов, побывавших в окрестностях этих планет, позволили обнаружить новые, неизвестные ранее небольшие спутники. В настоящее время общее число спутников, обнаруженных в системе Юпитера, достигло 40, у Сатурна обнаружено 30, у Урана — 21, у Нептуна — 11 спутников. Самым крупным спутником в Солнечной системе является спутник Юпитера Ганимед, его диаметр (5280 км) превосходит диаметр Меркурия. Один из самых интересных — спутник Сатурна Титан. Его диаметр 5150 км, масса почти вдвое превышает массу Луны. Титан обладает довольно мощной атмосферой, давление ее у поверхности спутника 1,6 атм. Состав атмосферы: 90 % азота, 9 % аргона, 1 % метана, имеется также небольшое количество аммиака, цианистого водорода и этана. Облака спутника состоят из капелек жидкого метана. У Титана обнаружено слабое магнитное поле. Вторым спутником, у которого имеется атмосфера, является спутник Нептуна Тритон. Его диаметр 2700 км, масса немного превышает массу Луны. Следы атмосферы имеются и у спутника Юпитера Ио. Хотя Ио не способен удерживать атмосферу, она постоянно пополняется за счет вулканических извержений. Вулканическая деятельность Ио была обнаружена во время полета «Вояджеров». Вулканы Ио выбрасывают вещество со скоростью 1 км/с на высоту в сотни километров. Это во много раз превышает скорость и высоту выбросов при извержении вулканов на Земле. Обнаружена слабая атмосфера у еще одного спутника Юпитера — Европы (см. п. 4.2.5).

С системой спутников связана еще одна особенность планет-гигантов: наличие у них колец. Наиболее ярко выраженное кольцо — у Сатурна, оно было открыто еще на заре телескопических наблюдений⁹⁸. В последние годы обнаружены кольца также у Юпитера,

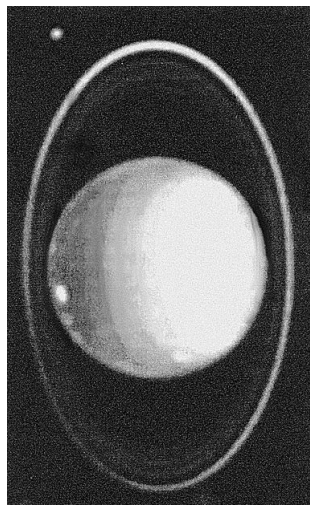


Рис. 2.1.8. Уран с системой колец.

Снимок получен с помощью Космического телескопа им. Хаббла. Белые пятна слева — облака

⁹⁸ Впервые кольцо Сатурна наблюдал Галилей в 1610 г., однако он не смог точно установить его форму. Это удалось сделать Гюйгенсу в 1655 г.

Урана и Нептуна (последние два с помощью космических аппаратов). Кольца образованы совокупностью небольших тел размером от нескольких микрометров до нескольких метров. Они расположены на таком расстоянии от каждой планеты, где сильны вызванные ее тяготением приливные силы. Считается, что кольца представляют собой тот остаточный материал, из которого должен был бы сформироваться очередной спутник, но процесс этот не состоялся из-за разрушительного действия приливных сил планеты.

Последняя планета Солнечной системы Плутон представляет собой небольшое тело диаметром 2280 км, средняя плотность его 2 г/см^3 , значит, в основном он состоит из камня и льда. Температура поверхности Плутона около 43К (-230°C). Атмосфера есть, но очень разрежена, давление у поверхности составляет несколько микробар. В основном, она состоит из метана и азота. В газообразном состоянии атмосфера существует только тогда, когда Плутон находится вблизи перигелия. Однако большую часть своего долгого года (248 земных лет) он находится очень далеко от Солнца, и тогда атмосфера его полностью вымерзает. Очень близко к Плутону, на расстоянии около 20 тысяч км, обращается его спутник Харон, он имеет размеры примерно такого же порядка, как и Плутон (всего в два раза меньше). Фактически это двойная планета.

По своим характеристикам Плутон существенно отличается от других планет Солнечной системы и как бы «не вписывается» в общую схему ее строения. В последнее время у ученых появились сомнения, насколько правомерно относить Плутон к большим планетам. Возможно, это обычный транснептуновый объект (плутино), только самый массивный. Но астрономы — люди консервативные, и они не спешат лишить Плутон статуса 9-й планеты.

Пространство между планетами заполнено мелкими пылевыми частицами. Они образуются от дробления астероидов и метеоритных тел (при их столкновениях), а также при распаде периодических комет. Рассеяние солнечного света на частицах межпланетной пыли создает красивую картину Зодиакального света — слабое конусообразное свечение, которое в средних широтах можно наблюдать в весенние месяцы в западной части неба после окончания весенних сумерек, или осенью — перед началом утренних сумерек, на востоке. Помимо пылевых частичек, межпланетное пространство заполнено частицами солнечного вещества — плазмой с «вмороженными» в нее магнитными полями. Этот намагниченный ионизированный газ движется от Солнца со скоростью сотни километ-

ров в секунду, образуя так называемый «солнечный ветер». Межпланетное пространство пронизано также электромагнитным излучением, космическими лучами, гравитационными волнами и нейтрино, а возможно, и другими неизвестными нам полями.

Солнечная система со всеми ее планетами, их спутниками, кометами, астероидами и межпланетной средой представляет собой тот дом, в котором мы живем. Это наш макрокосмос, по отношению к которому человек является микрокосмом. Центром Солнечной системы, ее сердцем является Солнце.

Диаметр Солнца 1 400 000 км — в 109 раз больше диаметра Земли. Масса Солнца $2 \cdot 10^{30}$ кг — в 330 000 раз больше массы Земли и в 743 раза больше массы всех планет Солнечной системы; иными словами, в Солнце сосредоточено 99,87% всей массы Солнечной системы. Солнце вращается вокруг своей оси с периодом 25,4 земных суток. Вещество Солнца состоит на 71% из водорода, на 26% из гелия, оставшиеся 3% приходятся на все остальные химические элементы. С поверхности Солнца, которая нагрета до температуры 6000 К, излучается гигантская (по нашим земным меркам) энергия $4 \cdot 10^{26}$ Вт, большая часть ее приходится на видимую часть спектра. Этот поток света и тепла играет определяющую роль в процессах, происходящих в атмосферах и на поверхности планет, он является источником, поддерживающим органическую жизнь на нашей планете. Откуда же берется эта энергия?

В недрах Солнца идут ядерные реакции. Зона реакций — ядро Солнца, занимающее 1% его объема, но содержащее почти половину его массы; температура здесь достигает 10–15 млн градусов, давление 40 млрд атмосфер. Вырабатываемая энергия переносится к наружным слоям в виде излучения. На глубине 100–200 тыс. км под поверхностью Солнца находится конвективная зона, температура в ней 10^4 – 10^6 К, давление — 10^6 атм. Ядерные реакции в ней не идут, а энергия переносится не с помощью излучения, а самими элементами вещества. Ячейки горячего газа со скоростью несколько километров в секунду поднимаются к поверхности Солнца и, излучая свет, охлаждаются. Охлажденный газ становится плотнее и погружается в глубь конвективной зоны, где вновь нагревается и поднимается вверх.

Видимая глазом блестящая поверхность Солнца, его фотосфера, расположена непосредственно над конвективной зоной. Толщина фотосферы около 400 км. Может показаться, что это довольно протяженная оболочка, но если принять во внимание размер Сол-

нца, фотосфера составляет всего около 0,03% от его диаметра, т. е. это очень тонкая оболочка. Фотосфера представляет собой основание солнечной атмосферы. Расположенные над ней внешние слои (хромосфера и корона) прозрачны и поэтому в обычных условиях не видны глазом. Их можно видеть вокруг диска Солнца лишь в редкие минуты полного солнечного затмения.

На вид фотосфера кажется твердой поверхностью, но на самом деле она в тысячи раз разреженнее воздуха. Упомянутая выше температура поверхности Солнца около 6000 К — это температура фотосферы. Фотосфера имеет сложную структуру, на фотографиях Солнца можно ви-

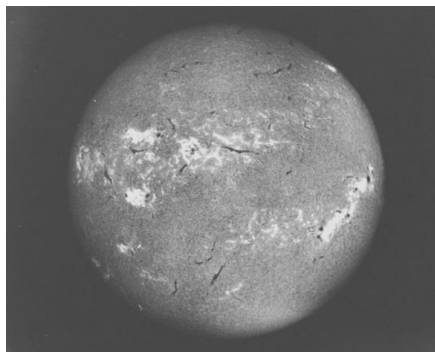
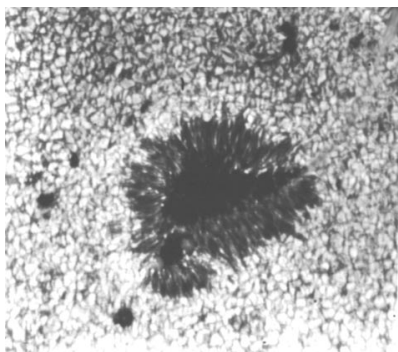


Рис. 2.1.9. Участок поверхности Солнца на уровне фотосферы. Заметна фотосферная грануляция, в центре кадра — солнечное пятно

Рис. 2.1.10. Поверхность Солнца на уровне хромосферы. Видны темные волокна (протуберанцы) и светлые флоккульные поля в активных областях

деть, что она состоит из отдельных зернышек — *гранул*, разделенных узкими менее яркими промежутками. Размеры гранул различны — от 150 до 1500 км, в среднем около тысячи километров. Время жизни гранул — всего несколько минут, поэтому образованная ими картина непрерывно меняется. Гранулы связаны с конвективными ячейками, которые выносятся на поверхность Солнца порции горячего газа.

На поверхности Солнца (через плотный светофильтр) иногда можно видеть темные пятна. Размеры пятен колеблются от тысячи до десятков тысяч километров, т. е. крупные пятна во много раз превышают размеры земного шара. Солнечные пятна — это области с очень сильным магнитным полем. Магнитное поле тормозит движение конвективных потоков газа, поэтому температура в области пятен примерно на 1500 К ниже, чем в окружающей фотосфере, из-за чего они и выглядят более темными. Количество пятен и их суммарная площадь периодически изменяется с периодом около 11 лет. Это период солнечной активности. Пятна являются одним из наиболее показательных индикаторов солнечной активности.

Над фотосферой Солнца простирается хромосфера, ее толщина 10–15 тыс. км. Хромосфера отличается очень сильной неоднородностью и большой изменчивостью, в ней постоянно возникают какие-то струи, петли, отдельные сгустки горячего газа размером в целые земные континенты. Одним из самых замечательных феноменов в солнечной хромосфере являются хромосферные вспышки. Во время вспышки в отдельных областях хромосферы внезапно выделяется колоссальное количество энергии, температура повышается до 10–30 млн градусов, появляется мощное рентгеновское излучение, возникают потоки заряженных частиц — электронов или протонов, которые со скоростью 100 км/с покидают Солнце, при этом генерируется мощное радиоизлучение, резко возрастает яркость в оптическом диапазоне спектра. Во время сильных вспышек выделяется энергия до 10^{25} Дж, что эквивалентно энергии около миллиарда атомных бомб. Такие вспышки происходят редко. Но вспышки в сотни раз более слабые наблюдаются почти каждый день.

Хромосфера постепенно переходит в солнечную корону. Это самые внешние слои солнечной атмосферы, простирающиеся на расстояние в десятки радиусов Солнца. Температура короны достигает 1–2 млн градусов. Во внутренних областях ее часто наблюдаются большие плотные облака причудливой формы — протуберанцы. Хотя протуберанцы поднимаются высоко над хромосферой, в область короны, это, по существу, хромосферные образования. В некоторых из них происходят очень бурные процессы, и они живут всего несколько минут; другие существуют несколько месяцев. Внешние слои солнечной короны постепенно переходят в межпланетную газовую среду. Вещество солнечной короны (электроны, протоны, ионы) непрерывно покидает Солнце со скоростью в сотни километров в секунду. Это и есть солнечный ветер, о котором мы упоминали выше. Солнечный ветер постоянно обтекает Землю, так что, образно говоря, мы живем в атмосфере Солнца, точнее — в атмосфере солнечного ветра. Характеристики его зависят от состояния солнечной активности.

Солнечная активность связана, прежде всего, с состоянием магнитного поля Солнца. Периодическое изменение магнитного поля на поверхности Солнца сопровождается периодическим изменением различных процессов: изменяется число и площадь солнечных пятен, число протуберанцев и их активность, мощность и число хромосферных вспышек и др. Все эти процессы и характеризуют солнечную активность. Хотя состояние активности Солнца не влияет на поток солнечной радиации, в частности, на количество тепла, которое получает Земля от Солнца, оно оказывает за-

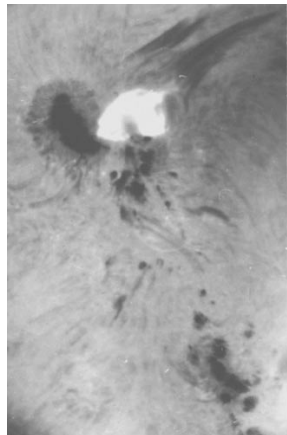


Рис. 2.1.11. Хромосферная вспышка — светлое образование рядом с пятном

метное влияние на различные процессы на земном шаре. Вспышки на Солнце вызывают полярные сияния и магнитные бури, они приводят к изменениям в ионосфере, что сказывается на распространении радиоволн, и к



Рис. 2.1.12. Петлеобразный протуберанец на краю солнечного диска

другим изменениям в земной атмосфере. Обнаружено влияние солнечной активности на живые организмы: рост деревьев, миграцию некоторых видов животных и насекомых, состояние здоровья людей. Имеются данные о воздействии на более тонкие процессы, в частности, в социальной сфере. 11-летний цикл солнечной активности, на самом деле, представляет только половину цикла — полный цикл, включающий также изменение полярности магнитного поля, охватывает период в 22 года. Помимо 11-летнего цикла, по-видимому, существуют и более длительные циклы, но они менее изучены. Так, интенсивность

11-летнего цикла меняется с периодом около 90 лет, имеются указания на существование 600-летнего цикла.

В 1974 г. советские ученые А. Б. Северный, В. А. Котов, Т. Т. Цап обнаружили, что поверхность Солнца пульсирует с периодом 2 часа 40 мин. Амплитуда пульсаций очень мала, она составляет около 20 км или примерно 10^{-5} диаметра Солнца. Интересно, что суточное вращение Земли достаточно хорошо синхронизировано с периодом солнечных пульсаций ($1 \text{ сутки} = 24 \text{ часа} = 9 \times 2 \text{ ч } 40 \text{ мин}$). Имеются

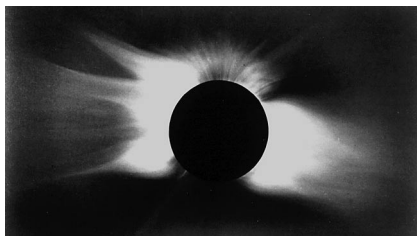


Рис. 2.1.13. Солнечная корона

указания на то, что ритмы биосферы также синхронизированы с периодом солнечных пульсаций. Таким образом, мы не только живем «в атмосфере Солнца», но и, возможно, испытываем на себе влияние ритма его «дыхания».

До сих пор речь шла преимущественно о физических процессах в Солнечной системе. Если иметь в виду ее механику, то здесь определяющую роль играет сила гравитационного притяжения Солнца. Она является доминирующей вплоть до расстояний $2 \cdot 10^5 \text{ а. е.}$ На больших расстояниях начинает сказываться притяжение соседних звезд. Это расстояние (совпадающее с внешним краем облака Оорта)

можно принять в качестве границы Солнечной системы. Двигаясь мысленно за ее пределы, мы должны сделать следующий шаг — к звездам.

2.1.2. Мир звезд. Ближайшая к Солнцу звезда Проксима Центавра расположена на расстоянии от него 270 000 а. е. Расстояние до удаленных звезд в десятки тысяч раз больше. Астрономическая единица оказывается мало удобной для измерения расстояний между звездами. Для этой цели используются более крупные единицы — парсек и световой год. 1 парсек равен расстоянию, на котором радиус земной орбиты виден под углом в $1''$, а световой год — это расстояние, которое свет, распространяясь со скоростью 300 000 км/с, проходит за 1 год:

$$1 \text{ пк} = 3,26 \text{ св. год} = 206265 \text{ а. е.} = 3,086 \cdot 10^{16} \text{ м.}$$

Невооруженным глазом на небе можно видеть несколько тысяч звезд. Современные телескопы позволяют различить сотни миллионов отдельных звезд, а всего в нашей Галактике содержится порядка 10^{11} звезд. Следует иметь в виду, что наша Галактика — не единственная во Вселенной. В наблюдаемой области Вселенной — Метагалактике содержатся десятки миллиардов других звездных систем — галактик, так что общее число звезд в наблюдаемой Вселенной порядка 10^{21} – 10^{22} . Звезды подобны Солнцу. Если бы мы могли удалиться от Солнца на расстояние 10 пк (что совсем немного по масштабам Галактики), мы увидели бы его в виде слабой звезды 5-й звездной величины⁹⁹. Это легко понять, ибо Солнце — рядовая звезда, которая кажется нам столь ослепительно яркой только потому, что она расположена от нас несравненно ближе всех остальных звезд. Солнце — это *наша* звезда. А другие звезды — это *солнца*, многие из которых имеют свои планетные системы.

Характерная особенность звезд состоит в том, что это самосветящиеся тела, они излучают за счет внутренних источников энергии (в отличие, например от планет, которые светят отраженным светом). Источником звездной энергии являются ядерные реакции, протекающие в их недрах. Строение звезд в общих чертах напоминает строение Солнца. По составу звезды также подобны Солнцу: при-

⁹⁹ Самая яркая звезда северного неба Вега имеет нулевую звездную величину, а самые слабые звезды, которые можно видеть невооруженным глазом, соответствуют 6-й звездной величине. Изменению (уменьшению или увеличению) блеска на одну звездную величину соответствует изменение (увеличение или уменьшение) светового потока в 2,512 раза. Изменению на 5 зв. величин соответствует изменение потока в 100 раз.

близительно 70% составляет водород, около 27% — гелий, а на долю остальных химических элементов приходится приблизительно 2% массы. В пределах этих 2% наблюдаются иногда резкие аномалии химического состава, о которых упоминалось в § 1.12. Все химические элементы тяжелее гелия образуются за счет ядерных реакций, которые протекают в звездах¹⁰⁰.

Во внутренних слоях звезд при температуре в миллионы градусов развивается гигантское давление газа (плазмы). Это давление могло бы разорвать звезду, если бы оно не уравнивалось силой гравитационного притяжения частиц звездного вещества. Равновесие этих противоборствующих сил обеспечивает устойчивое состояние звезды. Если количество энергии, которое выделяется в недрах звезды, уменьшается, то давление внутри звезды падает, сила притяжения превосходит силу давления, и звезда начинает сжиматься; при этом температура и давление внутри ее нарастают, пока вновь не наступит равновесие (уже при меньших размерах). Напротив, если количество энергии, выделяемое в недрах звезды, увеличивается, то давление газа возрастает, и звезда начнет расширяться до тех пор, пока уменьшающееся при расширении давление не уравнивается силой притяжения. Таким образом, в зависимости от величины выделяемой энергии и в зависимости от массы звезды равновесие достигается при различных значениях ее радиуса (т. е. при различных размерах звезды).

Массы большинства звезд заключены в пределах от 0,1 до 10 масс Солнца; встречаются (очень редко) звезды в 50 раз массивнее Солнца. Величина 0,1 массы Солнца близка к предельной, при которой, вообще, возможно существование звезды как самосветящегося тела, излучающего за счет ядерной энергии. Это связано с процессом формирования звезд из межзвездного вещества (см. ниже).

Масса звезды M , ее светимость L (т. е. мощность излучения — количество энергии, излучаемой звездой в единицу времени), радиус R и температура поверхности T связаны между собой определенными соотношениями. Светимость звезды определяется количеством энергии, ежесекундно вырабатываемой в ее недрах. Чем больше масса звезды, тем выше давление, а следовательно, и температура в центральных областях ее, где идут термоядерные реакции. Скорость реакций очень сильно зависит от температуры. Поэтому в массивных звездах, где температура выше, реакции протекают быстрее, скорость

¹⁰⁰ Водород и основная часть гелия образуются на ранних стадиях эволюции Вселенной задолго до формирования звезд (см. п. 2.2.2).

выделения энергии, а значит, светимость звезды выше. Теория, в согласии с наблюдениями, дает, что светимость обычной звезды (с умеренной массой) пропорциональна четвертой степени ее массы ($L \propto M^4$). С другой стороны, светимость зависит от температуры поверхности и ее размера. Количество энергии, ежесекундно излучаемой с единицы поверхности звезды, равно σT^4 (здесь σ — постоянная Стефана–Больцмана). Следовательно, $L = \sigma T^4 S = \sigma T^4 4\pi R^2$ (здесь S — площадь излучающей поверхности). Параметры звезды удобно выражать через соответствующие параметры Солнца. На основании приведенных соотношений имеем:

$$\frac{L}{L_{\odot}} = \left(\frac{M}{M_{\odot}} \right)^4 = \left(\frac{T}{T_{\odot}} \right)^4 \cdot \left(\frac{R}{R_{\odot}} \right)^2.$$

Индекс $\odot$ означает, что данная величина относится к Солнцу.

Если построить график, на котором по горизонтальной оси отложить температуру поверхности звезды, а по вертикальной оси отложить светимость, выраженную в абсолютной звездной величине¹⁰¹, то на таком графике каждая звезда изобразится одной точкой (рис. 2.1.14). Этот график играет в астрономии исключительно важную роль и носит название диаграмма Герцшпрунга–Рассела. Большинство звезд на диаграмме располагается вдоль линии, идущей из верхнего левого угла в нижний правый. Эта совокупность звезд получила название главной последовательности; Солнце относится к их числу. Помимо главной последовательности, выделяются еще два типа звезд: гиганты (и сверхгиганты), которые при той же температуре имеют гораздо более высокую светимость, чем звезды главной последовательности, и белые карлики, которые, напротив, при той же температуре имеют гораздо более низкую светимость.

Поверхностная температура звезд меняется в пределах от нескольких тысяч до нескольких десятков тысяч кельвинов, в очень редких случаях она может превышать 100 000 К. Светимость, пропорциональная четвертой степени температуры, меняется в гораздо более широких пределах от $10^{-4} L_{\odot}$ до $10^6 L_{\odot}$.

На рис. 2.1.14 на верхней шкале по горизонтали нанесены спектральные классы звезд. По характеру спектра (т. е. в зависимости от того, какие спектральные линии и какого вида наблюдаются в спектрах звезд) все звезды разделены на несколько спектральных классов,

¹⁰¹ Абсолютной звездной величиной называется звездная величина, которую имела бы звезда, если бы она наблюдалась с расстояния 10 пк. Следует иметь в виду, что чем меньше абсолютная звездная величина звезды, тем выше ее светимость.

которые обозначаются буквами: O, B, A, F, G, K, M. Кроме того, внутри каждого класса выделяются 10 подклассов, обозначаемые цифрами от 0 до 9. Наше Солнце относится к классу G2. Каждому спектральному классу соответствует определенная температура поверхности

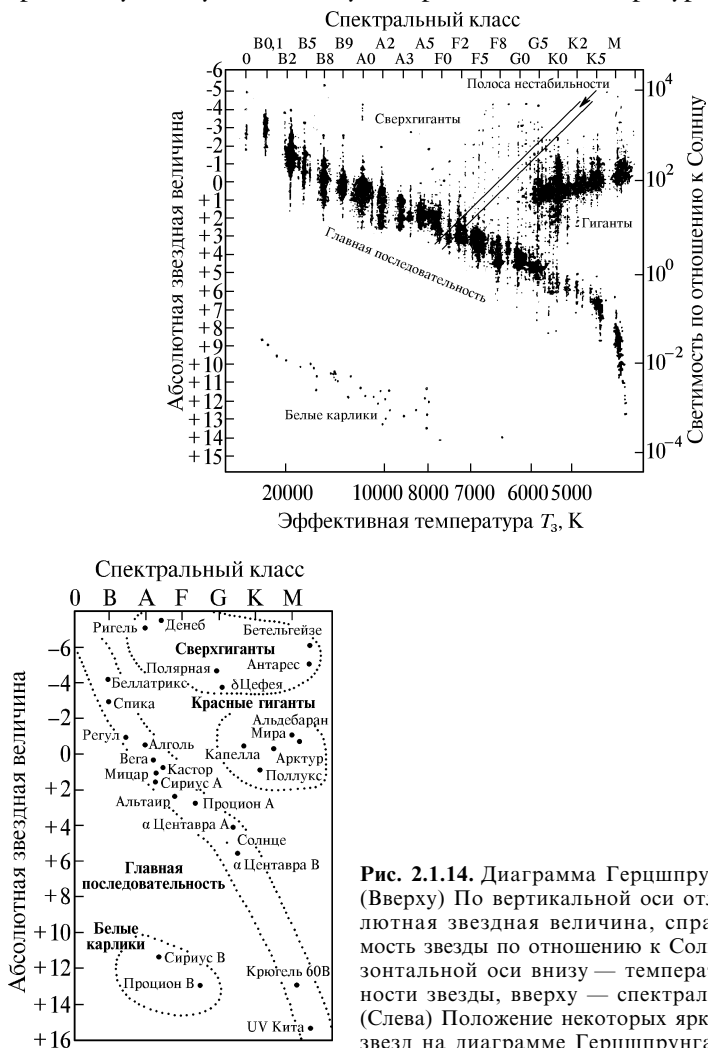


Рис. 2.1.14. Диаграмма Герцшпрунга–Рассела. (Вверху) По вертикальной оси отложена абсолютная звездная величина; по горизонтальной оси внизу — температура поверхности звезды, вверху — спектральный класс. (Слева) Положение некоторых ярких и близких звезд на диаграмме Герцшпрунга–Рассела

сти. Спектральные классы ярких горячих звезд иногда называют «ранними», а холодных звезд — «поздними». Эти названия условны и отражают господствовавшие одно время ошибочные представления

Таблица 2.1.2

Спектральный класс поверхности	Эффективная температура	Масса, $M/M_{\odot}$	Радиус, $R/R_{\odot}$	Светимость, $L/L_{\odot}$	Время жизни на главной последовательности, млрд лет
O7	38000	27	8,5	140000	0,008
B0	32000	16	5,7	16000	0,013
B5	15000	5,4	3,7	750	0,08
A0	9500	2,6	2,3	63	0,48
A5	8700	1,9	1,8	24	1,2
F0	7400	1,6	1,5	9	2,0
F5	6400	1,35	1,2	4,0	3,5
G0	5900	1,08	1,05	1,45	7,6
G2, Солнце	5800	1,00	1,00	1,00	10
G5	5600	0,95	0,91	0,70	12
K0	5100	0,83	0,83	0,36	20
K5	4370	0,68	0,74	0,18	43
M0	3670	0,47	0,63	0,075	190
M4	3200	0,20	0,21	0,005	1000

об эволюции звезд вдоль главной последовательности. Характеристики звезд различных спектральных классов приведены в таблице 2.1.2.

Большинство звезд по размерам сопоставимы с Солнцем, их радиусы составляют от $0,1 R_{\odot}$ до $10 R_{\odot}$. Это относится к звездам главной последовательности. Звезды-гиганты и сверхгиганты в сотни и даже тысячи раз превосходят Солнце. Например, диаметр Бетельгейзе (самая яркая звезда в созвездии Ориона — α Ориона) более, чем в 500 раз превышает диаметр Солнца. По сравнению с таким гигантом Солнце выглядит меньше, чем Земля по сравнению с Солнцем. Если поместить Бетельгейзе на место Солнца, то внутри ее оказалась бы не только орбита Земли, но и орбита Юпитера! Именно, из-за больших размеров гиганты при той же температуре имеют гораздо более высокую светимость. А очень малая светимость белых карликов, напротив, объясняется их очень малыми размерами. При массе приблизительно такой же, как у Солнца, они имеют размер порядка 10^4 км, т. е. сопоставимый с размерами планет земной группы. Средняя плотность таких звезд чудовищно велика, она составляет 10^6 г/см³ — в 100 тыс. раз больше плотности железа (для

сравнения: средняя плотность Солнца $1,4 \text{ г/см}^3$ — порядка плотности воды). Однако это не предел: нейтронные звезды (о которых мы упоминали в § 1.8) приблизительно в 1000 раз меньше Земли, их диаметр составляет всего 10–20 км!

Таким образом, мир звезд весьма разнообразен. Однако сказанное не исчерпывает его многообразия. Существует еще множество

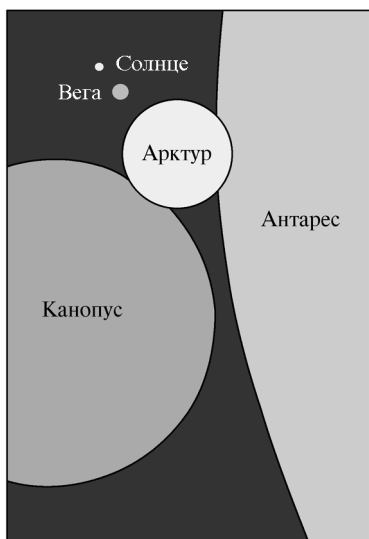


Рис. 2.1.15. Сравнительные размеры звезд

типов переменных и нестационарных звезд, а также вспыхивающие, новые и сверхновые звезды. Среди переменных звезд особенно интересны звезды, которые периодически меняют свой блеск (их часто называют правильными переменными). В зависимости от причин изменения блеска, они делятся на два типа: затменные переменные и физические переменные. Затменные переменные звезды являются двойными, т. е. каждая такая звезда, на самом деле, представляет собой систему двух близко расположенных гравитационно связанных звезд, которые из-за близкого расстояния между ними воспринимаются даже при наблюдении в телескоп, как одна звезда. Обращаясь вокруг общего центра тяжести, эти звезды попеременно затмевают одна другую, чем и объясняются периодические изменения блеска. Примером такой системы является звезда Алголь (β Персея), переменность которой была обнаружена еще в средние века арабскими астрономами. Блеск ее меняется с периодом 2 суток 20 часов 49 минут.

У физических переменных звезд периодические изменения блеска вызываются пульсациями их поверхности. Эти звезды периодически сжимаются и расширяются. При расширении температура поверхности звезды падает, а при сжатии увеличивается, этим и объясняются колебания блеска. Примером такой пульсирующей звезды является δ Цефея. По ее имени все подобные пульсирующие звезды получили название цефеиды. Периоды цефеид составляют от нескольких часов до нескольких недель. Цефеиды играют исключительную роль в астрономии. Дело в том, что их светимость и пери-

од изменения блеска связаны линейной зависимостью. Используя эту зависимость, можно, определив из наблюдений период цефеиды, найти ее светимость. А зная светимость и видимую звездную величину, можно оценить расстояние до цефеиды и, следовательно, до того объекта (звездного скопления, галактики), в котором она находится. Это один из наиболее надежных методов определения расстояний во Вселенной.

Помимо пульсирующих звезд (цефеид), существует большой класс неправильных переменных звезд, которые отличаются непериодическими (неправильными) часто быстрыми и сильными изменениями блеска. Неправильные переменные также относятся к типу физических переменных звезд. Изменение их блеска, по-видимому, вызывается бурными, взрывными процессами, протекающими в их атмосферах. К числу таких звезд относятся недавно сформировавшиеся молодые звезды типа Т Тельца, которые отличаются быстрыми неправильными изменениями блеска, а также вспыхивающие звезды типа UV Кита. Последние характерны тем, что у них блеск менее, чем за одну минуту может возрасти в десятки раз, а затем за 10–15 минут падает до первоначальной величины. Во время таких вспышек выделяется энергия, которая на один-два порядка (т. е. в 10–100 раз) превосходит энергию сильных хромосферных вспышек на Солнце.

Совершенно другой масштаб явлений связан со вспышками новых и сверхновых звезд. Новые звезды во время вспышки за несколько дней увеличивают свою светимость в тысячи и даже миллионы раз (в среднем, приблизительно в 10 тыс. раз). Обычно это слабые звезды, которые не видны невооруженным глазом¹⁰². Но во время вспышки, когда блеск их возрастает в тысячи раз, некоторые из них (не очень далекие) можно видеть даже невооруженным глазом. На небе, где до этого ничего не было видно, появляется новая звезда, отсюда и название — новая. Примером может служить очень яркая новая звезда, которая вспыхнула внезапно в августе 1975 г. в созвездии Лебедя, вызвав сильное волнение в астрономическом мире. Несколько дней она была сравнима по блеску с самыми яркими звездами этого красивого созвездия и была хорошо видна невооруженным глазом. Но затем ее светимость начала падать, звезда стала слабеть и вскоре совсем исчезла из виду, а созвездие приняло свой обычный вид.

¹⁰² Это связано не с тем, что их светимость мала, а с тем, что они, как и большинство других звезд Галактики, расположены далеко от Солнца. Ведь мы можем видеть глазом только самые близкие звезды (или звезды очень большой светимости).

В чем причина вспышек новых звезд? Наблюдения показали, что вокруг новой звезды после вспышки образуется расширяющаяся газовая оболочка. Кроме того, было установлено, что новые звезды представляют собой тесные двойные системы. Одним из компонентов этой системы является обычная звезда, а другим — белый карлик. Из-за очень близкого расположения компонентов вещество обычной звезды под действием притяжения белого карлика непрерывно перетекает на него. Падая с большой скоростью на поверхность плотной звезды, газовый поток нагревает белый карлик. Когда захваченная масса газа (водорода) достигает критической величины ($\sim 10^{30}$ г), температура во внутренних слоях белого карлика увеличивается настолько, что там начинаются термоядерные реакции. Быстрое выделение энергии приводит к взрыву, в результате которого внешние слои белого карлика отрываются от него, образуя расширяющуюся газовую оболочку. Общая энергия, выделяемая при взрыве,



Рис. 2.1.16. Крабовидная туманность — остаток вспышки Сверхновой 1054 года

достигает 10^{40} Дж. Этот процесс мы и наблюдаем как вспышку новой. После взрыва процесс перетекания вещества возобновляется, что приводит к повторным вспышкам. Интервал между вспышками составляет порядка 1000 лет, но иногда бывает значительно короче.

Несравненно более грандиозные процессы происходят при вспышках сверхновых звезд. Светимость звезды в течение нескольких суток возрастает в 10^{10} раз, и она излучает столько же света, сколько все вместе взятые звезды галактики! Мощность излучения во время вспышки превышает 10^{36} Вт, а длительность активной фазы может достигать одного года; полная энергия, выделяемая за это время,

составляет 10^{44} Дж, это приблизительно столько же, сколько Солнце излучает за миллиард лет! В качестве сверхновых вспыхивают, как правило, массивные звезды с массой, превышающей в несколько раз массу Солнца. При взрыве они сбрасывают оболочку, масса которой может достигать нескольких масс Солнца.

Вспышки сверхновых звезд происходят в среднем раз в несколько сотен лет (в одной галактике). По масштабам человеческой истории — это довольно редкое событие. Одна из таких звезд вспыхнула в 1054 г. в созвездии Тельца. Яркость ее, по свидетельству китайских и японских летописцев, была настолько велика, что она была хорошо видна на дневном небе при свете Солнца. Через несколько недель блеск звезды стал слабеть, и вскоре она исчезла из поля зрения. Сейчас на месте, где вспыхнула Сверхновая 1054 г., находится знаменитая Крабовидная туманность — остаток оболочки Сверхновой, а в центре ее обнаружен пульсар — нейтронная звезда, оставшаяся после взрыва. Не всегда на месте вспышки сверхновой обнаруживается нейтронная звезда. Так, на месте Сверхновой, вспыхнувшей в созвездии Кассиопеи

несколько сотен лет назад, имеется мощный рентгеновский источник и самый мощный источник радиоизлучения (он называется Кассиопея А), однако там нет оптической туманности и никакой звезды в центре рентгеновской оболочки не обнаружено. Остается также загадкой, почему вспышка сверхновой в Кассиопее не была зафиксирована средневековыми астрономами. Две последние вспышки сверхновых в нашей Галактике наблюдались

в 1572 г. Тихо Браге и в 1604 г. И. Кеплером. Это было за несколько лет до начала телескопических наблюдений. С тех пор астрономы с нетерпением ждут новой вспышки в нашей Галактике, но пока безрезультатно.

С помощью телескопов ежегодно наблюдаются несколько вспышек сверхновых в других галактиках, но они расположены настолько далеко от нас, что не могут наблюдаться невооруженным глазом. Впрочем, ожидания астрономов были частично вознаграждены в 1987 г., когда сверхновая вспыхнула в Большом Магеллановом Облаке — в ближайших окрестностях нашей Галактики. Немедленно на нее были направлены крупнейшие наземные телескопы (радио и оптические), а также все рентгеновские телескопы, установленные

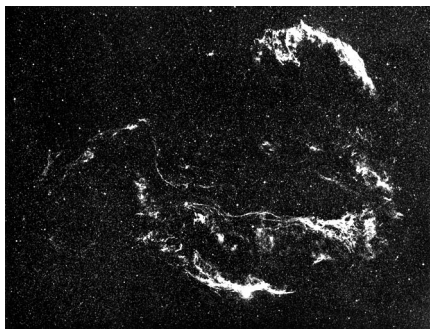


Рис. 2.1.17. Тонковолокнистая туманность в созвездии Лебедя — остаток оболочки сверхновой, вспыхнувшей около 300 000 лет тому назад

на борту космических аппаратов. В их числе рентгеновские телескопы модуля «Квант», который (очень удачно!) был запущен и состыковался со станцией «Мир» незадолго перед вспышкой Сверхновой. Астрономы и физики стремились использовать для изучения Сверхновой все имеющиеся у них средства: были предприняты попытки обнаружить связанный со вспышкой всплеск гравитационного и нейтринного излучения. Из всех результатов, которые были получены по Сверхновой 1987 г., упомянем лишь об одном: удалось обнаружить ту самую звезду (предсверхновую), которая вспыхнула как сверхновая, она была обнаружена на фотографиях, полученных до вспышки. Оказалось, что это массивная голубая звезда — сверхгигант. Это единственный пока в истории астрономии случай, когда звезда, вспыхнувшая как сверхновая, наблюдалась не только после, но и до вспышки.

С чем же связан такой интерес к вспышкам сверхновых? Дело в том, что при взрывах сверхновых звезд происходит синтез тяжелых элементов (тяжелее железа), которые вместе с элементами, синтезированными в ходе предшествующей эволюции, выбрасываются в межзвездное пространство и обогащают его всеми химическими элементами тяжелее гелия. Это определяет важнейшее космогоническое значение сверхновых звезд. О проблемах звездной космогонии мы поговорим чуть позже, а сейчас нам осталось познакомиться с еще одним важным классом звезд — двойными и кратными системами.

О двойных звездах мы уже упоминали, они образуют гравитационно связанную систему и обращаются под действием сил взаимного тяготения вокруг общего центра масс. Их называют *физически двойными*, в отличие от звезд, которые не связаны друг с другом, а просто проецируются в близкие точки небесного свода¹⁰³. Физи-

¹⁰³ Любопытна история открытия двойных звезд. После изобретения телескопа было обнаружено, что некоторые звезды, видимые невооруженным глазом, как одиночные, при наблюдении в телескоп разделяются на две. Первой была обнаружена двойственность Мицара — ξ Большой Медведицы (Риччиоли, 1650 г.). В последующие годы были открыты еще несколько двойных звезд. В 1781 г. Христиан Майер опубликовал список 89 пар звезд. При этом он утверждал, что обнаружил вращение спутников вокруг главной звезды. Это смелое утверждение Майера было осмеяно его современниками, а «планеты», обращающиеся вокруг звезд, были признаны за плод галлюцинации. Только после точных измерений В. Гершеля, выполненных вслед за Майером, в конце XVIII века, было доказано существование физических двойных звезд. Это было не только большим достижением наблюдательной астрономии, но и триумфом ньютоновского закона всемирного тяготения, ибо было установлено, что он действует далеко за пределами Солнечной системы и, действительно, является всемирным.

ческие двойные, двойственность которых обнаруживается при непосредственных наблюдениях в телескоп, называются *визуально-двойными*. Они имеют периоды обращения от нескольких лет до нескольких тысяч лет. Самой короткопериодической из визуально-двойных является звезда М Кита, ее период 2,62 года. Иногда компоненты двойной системы расположены так далеко друг от друга и обращаются друг относительно друга так медленно, что уловить их движение непосредственно невозможно. Их двойственность определяется косвенными методами. Такие звезды образуют *широкие пары*. В пространстве их компоненты отстоят друг от друга на тысячи и десятки тысяч астрономических единиц, а их периоды достигают миллионов лет. Такова, например, звезда α Центавра, которая вместе с ближайшей к нам *Проксимой* Центавра образуют двойную систему с расстоянием между компонентами не менее 10 000 а. е.

В некоторых двойных системах звезды расположены столь близко друг от друга, что их невозможно различить даже при наблюдении в самые сильные телескопы. Двойственность этих звезд может быть обнаружена либо по периодическому изменению блеска, когда одна звезда при вращении затмевает другую (это *затменно-переменные* звезды), либо спектроскопически (*спектрально-двойные* звезды). Примером затменно-двойной системы, помимо уже упоминавшегося нами Алголя, является звезда β Лиры. Известно несколько тысяч затменно-двойных звезд. Их периоды заключены от нескольких часов до десятков лет. Спектрально-двойные обнаруживаются по периодическому смещению спектральных линий из-за эффекта Доплера при обращении звезд друг относительно друга (или вокруг общего центра масс). Половину периода звезда движется на нас, ее линии смещаются к фиолетовому концу спектра; другую половину периода звезда движется от нас, линии смещаются к красному концу спектра.

В тесных двойных системах расстояние между звездами сопоставимо с их размерами. В таких системах существенную роль начинают играть приливные взаимодействия между компонентами. Под влиянием приливных сил звезда вытягивается, приобретая эллипсоидальную форму. В таких системах газ может перетекать с одной звезды на другую, при этом может образоваться газовый диск вокруг одной из звезд (см. рис. 2.1.18). В состав некоторых двойных систем входят новые звезды, пульсары и, возможно, черные дыры (см. с. 216). Обращаясь друг относительно друга, двойные звезды подчиняются тем же законам небесной механики, что и планеты

Солнечной системы при их вращении вокруг Солнца. Определив из наблюдений орбиты звезд в двойной системе, можно найти их массы. Это основной метод определения масс звезд.

Среди двойных систем встречаются такие, в которых один компонент имеет во много раз меньшую массу, чем другой. Такой компонент (темный спутник) не наблюдается, а его присутствие обнаруживается по периодическим колебаниям положения главного компонента на небесной сфере. Массы темных спутников заключены в пределах от 0,2 до 0,01 $M_{\odot}$. Обычно они не превосходят 0,1 $M_{\odot}$; такие объекты называют «коричневыми карликами» и относят к звездам, так как на определенном этапе эволюции их светимость поддерживается термоядерными реакциями. А менее массивные тела с массой меньше 0,01 $M_{\odot}$, относят к планетам, поскольку они полностью лишены термоядерного источника энергии. К концу 2000 г. обнаружены планеты у нескольких десятков звезд (см. п. 4.3.2).

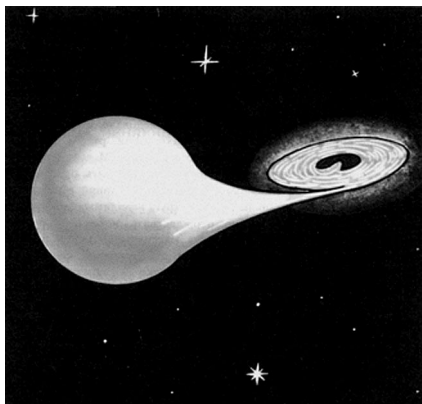


Рис. 2.1.18. Перетекание вещества с одной звезды на другую в тесной двойной системе.

Образование газового диска вокруг меньшего плотного компонента

Помимо двойных систем, существуют тройные и кратные системы. По-видимому, около трети двойных звезд являются тройными и звездами большей кратности. Примером шестикратной системы являются Мицар и Алькор в созвездии Большой Медведицы. Эти звезды образуют широкую пару. Причем Мицар представляет собой визуально-двойную звезду, состоящую из двух компонентов — Мицар А и Мицар В, разделенных угловым расстоянием 14". В свою очередь, Мицар А — спектрально-двойная звезда с периодом 21 сут, Мицар В — тройная система, она состоит из спектрально-двойной звезды с периодом 182 сут, а вокруг этой пары обращается еще третий более далекий компонент с периодом 1350 сут.

Общее число двойных и кратных систем очень велико. Считается, что от 50 до 70 % всех звезд являются системами той или иной кратности. Существует предположение, что и Солнце тоже двойная звезда. Геологические данные показывают, что примерно каждые

Общее число двойных и кратных систем очень велико. Считается, что от 50 до 70 % всех звезд являются системами той или иной кратности. Существует предположение, что и Солнце тоже двойная звезда. Геологические данные показывают, что примерно каждые

30 млн лет на Земле происходят катаклизмы, связанные с интенсивным выпадением метеоритов и кометоподобных тел и приводящие к существенному ограничению жизнедеятельности или даже полному вымиранию отдельных биологических видов. Одна из гипотез, пытающихся объяснить это загадочное явление, предполагает, что вокруг Солнца обращается по очень вытянутой эллиптической орбите небольшая звезда (спутник). Перигелий орбиты лежит внутри облака Оорта, а период обращения составляет около 30 млн лет. Когда звезда проходит через перигелий, она вызывает сильнейшие возмущения в облаке Оорта, в результате чего большое число кометных тел проникает во внутренние области Солнечной системы и, бомбардируя Землю, вызывает периодические катаклизмы. Гипотетическую звезду многозначительно назвали Немезидой — по имени древнегреческой Богини возмездия. (Согласно другой гипотезе, интенсивное выпадение метеоритного вещества связано с прохождением Солнечной системы через галактические пылевые облака. Но в этом случае трудно объяснить строгую периодичность явления.)

Вполне возможно, что у двойных звезд также имеются планеты. В тесных двойных системах, где расстояние между компонентами много меньше астрономической единицы, планеты (если они там существуют) обращаются, по-видимому, сразу вокруг обеих звезд, точнее вокруг их общего центра масс. В широких парах каждая звезда может иметь свою планетную систему. Если бы земным путешественникам удалось побывать на этих планетах (особенно в кратных системах), они увидели бы совершенно необычную для нас картину, когда различные солнца вместе или поочередно появляются на небе. Вероятно, жителям этих планет очень трудно представить, что где-то могут существовать планеты, освещаемые одним-единственным солнцем.

Наш рассказ о мире звезд, по необходимости, был чисто внешним, описательным. Между тем, звезды играют важную роль в жизни Вселенной и в нашей жизни. Дело не только в том, что в них сосредоточено более 95 % всего видимого вещества Вселенной¹⁰⁴. Звезды являются источниками энергии, необходимой для поддер-

¹⁰⁴ Видимого — не означает видимого глазом; имеются в виду все виды вещества, которое мы можем наблюдать с помощью астрономических инструментов. Тем не менее, эта оговорка необходима, ибо, как мы увидим ниже, возможно, часть материи во Вселенной существует в «скрытой» форме, недоступной наблюдению с помощью современных астрономических инструментов.

жания жизни на планетах; в их недрах образуются необходимые для жизни химические элементы. Чтобы лучше понять роль звезд, их влияние на процессы происхождения и развития жизни, надо познакомиться с тем, как рождаются сами звезды. Конечно, многое здесь лежит еще за пределами нашего понимания, но общие контуры картины обрисовать можно.

2.1.3. Как рождаются, живут и умирают звезды.

Космогония должна вызывать величественные мысли.

«Знаки Агни Йоги»

По современным представлениям, звезды образуются из диффузной материи путем гравитационной конденсации. Пространство между звездами заполнено газом и пылью, которые образуют очень разреженную газопылевую среду. Средняя концентрация газа (в основном, водорода) в межзвездной среде составляет 1 атом на куб. см (концентрация других газов значительно ниже). Это соответствует плотности 10^{-24} г/см³; плотность пылевой составляющей на порядок ниже. По нашим земным меркам, это почти абсолютный вакуум. И тем не менее, это не пустота! Земные мерки неприменимы к Космосу. Чем глубже мы будем знакомиться со Вселенной, тем больше будем убеждаться в этом. Нам еще предстоит познакомиться с межзвездной средой, а пока отметим, что она не однородна. Межзвездная среда состоит из отдельных газопылевых облаков разного размера, с плотностью на 1–2 порядка выше средней. В этих облаках и образуются звезды.

Под влиянием различных внешних воздействий (например, магнитного поля или ударной волны), а также чисто случайно, в газопылевом облаке могут возникать локальные уплотнения. Силы гравитации стремятся сжать образовавшееся уплотнение, а давление газа препятствует этому. Сила гравитации пропорциональна линейному размеру уплотнения r , а сила давления обратно пропорциональна r . Ясно, что при некотором размере обе силы должны быть равны. Соответствующий размер называется критическим радиусом Джинса (или длиной волны Джинса). Он зависит от плотности, температуры и средней молекулярной массы среды. Если размер уплотнения больше критического радиуса Джинса, уплотнение будет сжиматься. Образующийся сгусток обладает определенным вращательным момен-

том, так как вещество, из которого он образуется, участвует в общем вращении Галактики. При сжатии скорость вращения возрастает, а это приводит к тому, что массивный сгусток не может сразу сжаться до большой плотности — под действием центробежной силы он разбивается на отдельные фрагменты, которые, в свою очередь, подвергаются фрагментации и т. д. Так, в процессе последовательной фрагментации образуются сгустки вещества с массой порядка массы звезд — это *протозвезды*. Примером такого газо-пылевого комплекса, в котором идет процесс звездообразования, является область вокруг известной туманности Ориона.

В центре сжимающейся протозвезды плотность вещества выше, на периферии — ниже. Чем выше плотность, тем быстрее протекает сжатие; это, в свою очередь, увеличивает плотность и, следовательно, повышает скорость сжатия и т. д. В результате сжимающаяся протозвезда разделяется на два компонента: компактное ядро и протяженную оболочку. Вещество оболочки, притягиваясь к ядру, непрерывно выпадает на него и увеличивает его массу. Ядро при сжатии нагревается и излучает тепловую энергию. Такая протозвезда, состоящая из ядра и оболочки, наблюдается в виде источника инфракрасного излучения. Мы упоминали о подобных объектах в § 1.12, когда говорили о поисках сфер Дайсона.

Если сжимающаяся протозвезда вращается очень быстро, то на определенном этапе она разделяется на отдельные фрагменты — так образуются тесные двойные системы. Из более медленно вращающихся протозвезд образуются одиночные звезды. При определенных условиях оболочка протозвезды трансформируется в протяженный газопылевой диск, которому передается основная доля вращательного момента. Из такого диска затем формируются пла-



Рис. 2.1.19. Туманность Ориона. Она является частью гигантского газопылевого комплекса, в котором идет процесс звездообразования

неты. Известно, что в Солнечной системе 98 % вращательного момента приходится на долю планет и лишь 2 % на долю Солнца. Если бы весь момент количества движения принадлежал Солнцу, оно вращалось бы со скоростью 100 км/с на экваторе. С такой скоростью вращаются звезды главной последовательности ранних спектральных классов от О до F. Звезды более поздних спектральных классов от F5 до М имеют такую же, как у Солнца скорость вращения — порядка нескольких км/с. Важно отметить одно обстоятельство: у звезд главной последовательности при переходе от одного спектрального класса к другому все параметры звезды (масса, светимость, температура, радиус) меняются непрерывно, а вот скорость вращения ведет себя иначе. При переходе от звезд В0 к звездам F0 она медленно непрерывно уменьшается, но в районе спектрального класса F5 резко падает до значения нескольких км/с. Это может служить указанием на то, что у звезд спектральных классов от F5 до М на определенном этапе эволюции сформировался протопланетный диск, которому была передана основная доля вращательного момента протозвезды. Если это так, то все звезды указанных спектральных классов должны иметь планетные системы. Поскольку протопланетный диск образуется на стадии формирования звезды, можно заключить, что образование планет происходит в едином процессе со звездообразованием. Наблюдения последних лет подтверждают этот вывод. Как уже отмечалось выше, планетные системы обнаружены у нескольких десятков звезд¹⁰⁵, причем все они имеют спектральные классы от F8 до М4.

Пока оболочка протозвезды непрозрачна, мы не видим находящуюся внутри ее формирующуюся звезду. Но по мере выпадения вещества оболочки на ядро и по мере формирования планет оболочка (или протопланетный диск) становятся прозрачными. В это время звезда наблюдается как *звездообразный* объект с нерегулярно изменяющейся светимостью. Считается, что к этой стадии относятся звезды типа Т Тельца. Ядро протозвезды (будущая звезда) продолжает сжиматься, температура в центре его неуклонно возрастает. Когда она достигает нескольких миллионов градусов, в недрах ядра «загорается» водород: начинаются термоядерные реакции превращения водорода в гелий. Выделяющаяся при этом энергия поддерживает высокую температуру 10^7 К; давление горячего газа уравнивает силу тяготения, сжатие останавливается — *протозвезда превращается в звезду*. Момент начала термоядерных реакций и

¹⁰⁵ Сурдин В. Г. Каталог экзопланет // Природа. 2000. № 7.

есть момент рождения звезды. На этом заканчивается первая стадия звездной эволюции — стадия образования звезды.

Вторая стадия связана с термоядерными реакциями, в которых ядерным горючим является водород. К этой стадии принадлежат все звезды главной последовательности (включая Солнце), поэтому ее можно назвать *стадией главной последовательности*. Начинается она с началом ядерных реакций; астрономы говорят, что в этот момент звезда вступает на главную последовательность. Знаменательно, что ядерным горючим на этой стадии является самый распространенный элемент во Вселенной. Надо признать, что Природа распорядилась здесь весьма разумно, ибо запасы этого горючего наиболее велики.

При сгорании водорода в недрах звезд главной последовательности образуется гелий. В результате цепочки ядерных реакций четыре ядра атома водорода (протона), соединяясь, образуют ядро гелия (гелий-4), состоящее из двух протонов и двух нейтронов, при этом выделяется энергия $4 \cdot 10^{-5}$ эрг на одно образующееся ядро гелия¹⁰⁶. У звезд с массой меньше $0,3 M_{\odot}$ температура в центре звезды недостаточна для образования гелий-4, здесь процесс завершается на образовании изотопа гелия ^3He .

Пока идут термоядерные реакции, звезда находится в устойчивом состоянии; все ее параметры: радиус, масса, светимость, температура остаются постоянными. На диаграмме Герцшпрунга–Рассела она занимает строго определенное место на главной последовательности. Положение звезды определяется ее массой. Массивные звезды имеют высокую светимость, они занимают верхнюю часть главной последовательности. Звезды малой массы имеют низкую светимость, они находятся в нижней части главной последовательности. Это красные карлики. Их масса заключена в пределах от $0,08 M_{\odot}$ до $0,3 M_{\odot}$.

Звезд с массой меньше, чем $0,08 M_{\odot}$ не существует. Почему? Если масса протозвезды меньше $0,08 M_{\odot}$, то в процессе сжатия температура в ее центре никогда не достигает величины, необходимой для начала ядерных реакций с участием водорода. Такое тело (его уже нельзя назвать протозвездой) сжимается до тех пор, пока его вещество не перейдет в состояние вырожденного газа, давление которого остановит сжатие. Это достигается при огромных плотностях, порядка 10^6 г/см³, радиус такого

¹⁰⁶ В большинстве звезд идут реакции протон-протонного цикла: сначала два протона, сталкиваясь, образуют дейтон (ядро дейтерия), состоящий из протона и нейтрона, затем к нему присоединяется еще один протон, образуя ядро изотопа гелия (гелий-3), состоящее из двух протонов и одного нейтрона, и, наконец, два ядра гелий-3, сталкиваясь, образуют одно ядро гелий-4 и два протона. В некоторых наиболее массивных звездах идут реакции так называемого углеродного цикла; в них ядерным горючим также является водород, а углерод выступает в роли катализатора. В результате цепочки реакций этого цикла, в конечном итоге, четыре протона также образуют одно ядро гелий-4.

объекта будет порядка 3000 км. Вырожденный газ обладает рядом замечательных свойств. Прежде всего, в отличие от обычного газа, он практически несжимаем. У обычного газа давление зависит от температуры; когда температура падает — газ сжимается. У вырожденного газа давление не зависит от температуры. Поэтому по мере остывания звездобразный объект из вырожденного газа не будет сжиматься. Даже если объект потеряет все запасы тепла, сила давления вырожденного газа по-прежнему будет противостоять силе тяготения, которая не сможет сжать объект до меньших размеров¹⁰⁷. Постепенно, высветив всю свою тепловую энергию, накопившуюся во время сжатия до вырожденного состояния, подобные звездобразные объекты превратятся в черные карлики — безжизненные несветящиеся тела, которые могут существовать в таком состоянии миллиарды миллиардов лет. Таким образом, нижний предел массы звезд определяется массой, при которой в центре сжимающейся звезды достигается температура, необходимая для «загорания» водорода. А чем определяется верхний предел массы? Вспомним, что при сжатии массивной протозвезды на ее ядро непрерывно выпадает вещество оболочки, в результате чего масса ядра (будущей звезды) растет. Чем больше масса ядра, тем выше его температура и интенсивнее излучение. При массе, равной приблизительно $100 M_{\odot}$, давление излучения достигает такой величины, при которой дальнейшее выпадение вещества из оболочки прекращается. Это и определяет верхний предел наблюдаемых масс звезд.

Вернемся к звездам главной последовательности. Чем больше энергии излучает звезда (т. е. чем выше ее светимость), чем быстрее она расходует ядерное горючее, тем короче стадия устойчивого состояния звезды (время жизни звезды на главной последовательности). Запасы ядерного горючего в звезде пропорциональны ее массе, а темп расходования пропорционален светимости. Поэтому время жизни звезды на главной последовательности $t \propto M/L$. Но, как уже отмечалось выше, $L \propto M^4$, следовательно, $t \propto M^{-3}$. Звезды с массой, равной массе Солнца, «живут» 11–13 млрд лет. Звезды с массой вдвое меньше $M_{\odot}$ живут на главной последовательности почти 100 млрд лет, а красные карлики — много дольше¹⁰⁸. Самые массивные горячие звезды с массой больше $10 M_{\odot}$ находятся на главной последовательности менее 10 млн лет. Если бы такая звезда образовалась вместе с нашим Солнцем 5 млрд лет тому назад, то к настоящему времени она давно бы исчерпала запасы водородного горючего и прекратила свое существование, вероятнее всего, взорвавшись как сверхновая (см. ниже). То, что мы наблюдаем подобные звезды, свидетельствует о том, что они очень молодые и сформировались не более 20 млн лет назад; по космогоническим (и даже геологическим!) масштабам, это совсем мало. Следо-

¹⁰⁷ Правда, если масса тела больше $1,4 M_{\odot}$, давление вырожденного электронного газа уже не сможет противостоять силе тяготения, и такое тело все-таки сожмется, превратившись в нейтронную звезду или черную дыру (см. ниже), но сейчас речь идет об объектах, масса которых много меньше этого предела.

¹⁰⁸ Это значит, что за все время своего существования (не более 10–20 млрд лет, ибо таков возраст Вселенной — см. § 2.2) они израсходовали лишь ничтожную часть имеющегося у них запаса водородного горючего.

вательно, процесс звездообразования в Галактике продолжается и в настоящее время.

Что же происходит со звездой по мере выгорания водородного горючего? Во внутренних слоях звезды энерговыделение уменьшается и давление газа уже не в состоянии противостоять силам тяготения. Внутренние слои звезды слегка сжимаются, температура в них повышается, давление останавливает сжатие; интенсивность ядерных реакций при повышенной температуре возрастает, восстанавливая прежний темп энерговыделения. Светимость звезды и температура ее поверхности не меняются. Так в недрах звезды осуществляется управляемый термоядерный синтез, который позволяет поддерживать равновесие звезды. В это время звезда находится на главной последовательности.

Но когда значительная доля водорода выгорит, в центре звезды образуется гелиевое ядро. В прилегающих к нему слоях звезды продолжают термоядерные реакции с образованием гелия. Гелиевое ядро растет и, в конце концов, вокруг него остается только очень тонкий слой, где идут ядерные реакции. Лишенное источников энергии гелиевое ядро начинает сжиматься, температура его растет; одновременно повышается температура примыкающей к ядру тонкой оболочки, где идут термоядерные реакции. Скорость реакций очень сильно зависит от температуры. С повышением температуры скорость реакций возрастает, а это, в свою очередь, повышает температуру и увеличивает скорость ядерных реакций. Такое состояние является неустойчивым. Наружные слои звезды начинают расширяться, все параметры звезды (ее радиус, спектр, светимость, температура поверхности) изменяются. Период стационарного состояния звезды закончился. Начинается новая, **третья** стадия звездной эволюции — стадия *красного гиганта*.

Процесс перехода в состояние красного гиганта у звезд разной массы протекает по-разному. У звезд малой массы температура поверхности (не путать с температурой внутри звезды!) при расширении оболочки практически не меняется. Значит, не меняется и поток энергии с единицы поверхности. А так как излучающая поверхность при расширении увеличивается, то светимость звезды возрастает. Эволюционный трек такой звезды на диаграмме Герцшпрунга–Рассела изображается почти вертикальной линией (см. рис. 2.1.20). За счет чего увеличивается мощность излучения звезды? Очевидно, за счет возрастания энерговыделения в ее внутренних слоях. Такое кратковременное возрастание энергии, как мы видели, возможно, несмотря на истощение ядерного горючего, за счет повышения температуры в зоне, где идут ядерные реакции. У звезд большой массы температура поверхности с расширением быстро падает, излучательная

способность единицы поверхности уменьшается, но это полностью компенсируется увеличением поверхности звезды, так что ее светимость не меняется. На диаграмме Герцшпрунга–Рассела эволюционный трек такой звезды изображается горизонтальной линией. Каким бы путем звезда ни пришла в состояние красного гиганта, в этом состоянии она имеет температуру поверхности значительно ниже, чем звезда главной последовательности с той же светимостью (или

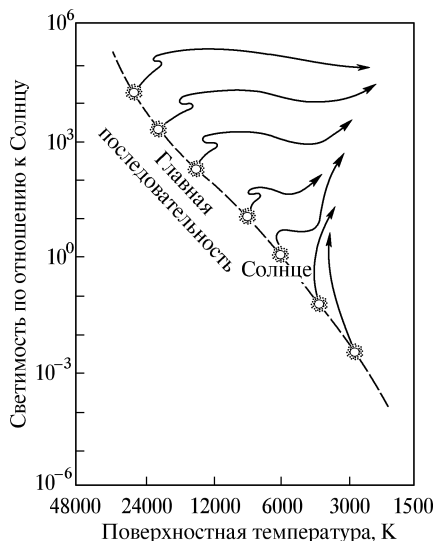


Рис. 2.1.20. Эволюционные треки звезд на диаграмме Герцшпрунга–Рассела при переходе с главной последовательности к стадии красного гиганта

здесь возникают условия, при которых она может совершать регулярные пульсации. В это время звезда наблюдается в качестве цефеиды или переменной типа RR Лиры.

Как же протекает третья стадия звездной эволюции? Некоторое время после образования красного гиганта звезда остается стационарной: ее радиус, температура, светимость не меняются. В центре звезды находится гелиевое ядро. Еще на стадии образования красного гиганта оно начало сжиматься. Если масса ядра больше $0,4\text{--}0,5 M_{\odot}$, то температура при сжатии достигает 10^8 К, начинается новый цикл ядерных реакций, при которых гелий превращается в углерод (три ядра гелия-4 образуют ядро углерода ^{12}C). Выделяющаяся при этом энергия поддерживает излучение звезды. Таким образом, в отличие от звезд главной последовательности, красный гигант излучает не за счет водородного, а за счет гелиевого горючего. По мере выгорания гелия в центре звезды образуется углеродное ядро. Когда весь гелий выгорит, стадия красного гиганта заканчивается.

с той же светимостью (или светимость выше, чем звезда главной последовательности с той же температурой). Характерной особенностью звезд на этой стадии эволюции является то, что они становятся очень неоднородными: выделяется плотное компактное очень горячее ядро и холодная протяженная внешняя оболочка. У обычных звезд плотность и температура непрерывно изменяются от поверхности звезды к ее центру, здесь же возникает резкий скачок плотности между ядром и оболочкой. По своему строению красный гигант, в какой-то мере, похож на протозвезду в начальном состоянии сжатия.

Время перестройки звезды, время перехода ее в состояние красного гиганта в сто раз меньше срока жизни звезды на главной последовательности. В процессе перестройки звезда находится в неустойчивом состоянии,

Если масса ядра меньше $0,4\text{--}0,5 M_{\odot}$ (масса такой звезды, вероятно, меньше одной $M_{\odot}$), то температура его при сжатии никогда не достигает величины, при которой «загорается» гелий; лишенное источников энергии такое ядро эволюционирует по уже известному нам сценарию, превращаясь в черного карлика. Но в отличие от несостоявшейся прото-звезды, которая превращается в водородный черный карлик, в данном случае образуется черный карлик из гелия. Причем в данном случае это будет гелий-4, а не гелий-3, как для звезд с $M < 0,3 M_{\odot}$.

Продолжительность каждой из рассмотренных стадий звездной эволюции зависит от массы звезды, но относительная длительность стадий для звезд разной массы сохраняется. Используя это обстоятельство Д. Голдсмит и Т. Оуэн в книге «Поиски жизни во Вселенной» применяют остроумный прием, сопоставляя время жизни звезды с человеческой жизнью. Если принять, что полное время жизни звезды соответствует 70 годам, то в этом масштабе времени первая стадия — сжатие протозвезды (детство) занимает 15–16 лет, стадия главной последовательности — приблизительно 50 лет, переходный период к стадии красного гиганта — около года, а сама стадия красного гиганта (старость звезды) — около трех лет. Отсюда видно, что большую часть своей жизни звезда проводит на главной последовательности.

Следующая заключительная стадия связана с гибелью звезды. В зависимости от массы звезда либо превращается в белый карлик и медленно угасает, либо взрывается как сверхновая.

На первый взгляд может показаться, что чем массивнее звезда, тем больше плотность вещества в ее центре. Но на самом деле это не так. Для равновесия звезды важна не плотность, а давление, которое сдерживает вес вышележащих слоев и препятствует гравитационному сжатию. Но давление зависит от температуры, а температура в центре массивных звезд выше, чем у звезд малой массы. Давление нагретого до высокой температуры газа уравнивает вес вышележащих слоев при меньшей плотности, чем в недрах менее массивных звезд, где температура не так высока. В результате ядро менее массивных звезд более плотное. Это обстоятельство оказывает решающее влияние на судьбу звезд на конечной стадии их эволюции.

У звезд средней массы (вероятно, не превышающей $2,5 M_{\odot}$) после выгорания гелия остается углеродное ядро, сжатое до уже знакомого нам вырожденного состояния, при котором дальнейшее сжатие невозможно. Если бы ядро могло сжиматься дальше, то темпе-

ратура его повысилась бы до значения, при котором начинаются термоядерные реакции следующего цикла. Но давление вырожденного электронного газа препятствует этому. Поэтому такое ядро обречено на медленное остывание и превращение в черный углеродный карлик. Но прежде чем это произойдет, звезда претерпевает существенные изменения. Наружные слои звезды (красного гиганта) благодаря интенсивному истечению вещества в межзвездное пространство (звездный ветер) постепенно рассасываются, обнажая горячее углеродное ядро. Это и есть белый карлик. У некоторых звезд с массой $\sim M_{\odot}$ сброс оболочки происходит на ранних стадиях



Рис. 2.1.21. Планетарная туманность в созвездии Водолея

образования красного гиганта, когда начинается горение гелия. У этих звезд возгорание гелия сопровождается резким выделением энергии. Звезда теряет устойчивость и сбрасывает с себя наружные водородные слои, они отделяются от звезды, образуя медленно расширяющуюся оболочку, которая наблюдается в виде планетарной туманности¹⁰⁹. Оставшееся в центре ее ядро становится новой плотной и

горячей звездой с температурой 50–100 тыс. К, которая, теряя энергию и охлаждаясь, постепенно превращается в белый карлик.

Таким образом белые карлики «вызревают» в недрах звезды красного гиганта и «появляются на свет» после того, как звезда тем или иным способом сбросила свои наружные слои. Они представляют собой очень плотные остатки этих звезд, состоящие в основном из ядер углерода и электронов. Плотность вещества в них в миллион раз выше средней плотности Солнца. Белые карлики не имеют термоядерных источников энергии и светят за счет тепловой энергии, запасенной на предшествующих стадиях эволюции. Температура их поверхности довольно высока (от 5000 до 15000 К), но благодаря

¹⁰⁹ Планетарные туманности были открыты Гершелем в конце XVIII века, их название отражает чисто внешнее сходство с дисками планет при визуальных телескопических наблюдениях с небольшим увеличением.

малой излучающей поверхности светимость их в тысячи раз меньше, чем у Солнца. Таким образом, экономно расходуя свою энергию, белый карлик может светить в течение миллиардов лет, прежде чем, медленно остывая, превратится в черный углеродный карлик. Подобная участь ожидает и наше Солнце. Возраст Солнца около 5 млрд лет. Через 6–8 млрд лет водородное горючее в недрах Солнца исчерпается, и оно превратится сначала в красный гигант, а затем, сбросив оболочку и пройдя, вероятно, через стадию планетарной туманности, станет белым карликом, а потом черным карликом размером с Землю.

Масса белых карликов близка к массе Солнца и не превышает $1,4 M_{\odot}$. Масса родительской звезды, из которой он образовался, может быть значительно больше. Это зависит от того, какую долю вещества сбрасывает звезда, прежде чем из нее «вылупится» белый карлик. Звезды типа Солнца, вероятно, сбрасывают небольшую долю своей массы. Более массивные звезды могут сбрасывать значительную часть массы. Хорошим примером является спутник Сириуса — Сириус В, исторически первый открытый белый карлик. Вместе со звездой Сириус А они образуют тесную двойную систему. Очевидно поэтому, что обе звезды образовались одновременно и имеют одинаковый возраст. Сириус А (та самая звезда, которая так ярко сияет на нашем небе) является звездой главной последовательности, а звезда, из которой образовался Сириус В, уже прошла через стадию главной последовательности и превратилась в белый карлик, следовательно, она эволюционировала быстрее. А это значит, что она имела большую массу. Масса Сириуса А $2,3 M_{\odot}$, следовательно, звезда, из которой образовался Сириус В, могла иметь массу $2,5\text{--}3 M_{\odot}$. Вероятно, это одна из наиболее массивных звезд, из которых образуются белые карлики. Так как масса белого карлика Сириус В равна $0,9 M_{\odot}$, это значит, что звезда, из которой он образовался, потеряла до 70 % своей первоначальной массы.

Почему масса белых карликов не превышает $1,4 M_{\odot}$? Мы уже отмечали, что если масса тела, лишенного внутренних источников энергии, превышает $1,4 M_{\odot}$ (предел Чандрасекара), то давление вырожденного электронного газа не может противостоять силе тяготения, и такое тело продолжает сжиматься, превращаясь в нейтронную звезду или черную дыру. Поэтому если в недрах звезды после прекращения термоядерных реакций образуется ядро с массой больше указанного предела, то оно превращается в нейтронную звезду или черную дыру.

Мы подошли к самым драматическим событиям звездной эволюции. В центре массивной звезды температура очень высока, вещество там находится не в вырожденном состоянии, а в состоянии обычного газа, который может сжиматься. Когда содержание гелия

в ядре истощается, ядро начинает сжиматься, температура в центре его повышается, и там начинается новый цикл ядерных реакций с участием углерода, т. е. ядерным горючим становится углерод. В результате слияния ядер ^{12}C и ^4He образуется ядро кислорода ^{16}O . По мере истощения углерода «загорается» кислород: ядро ^{16}O , присоединяя ^4He , образует ядро неона ^{20}Ne и т. д. То есть следует цикл ядерных реакций, в которых последовательно синтезируются тяжелые элементы вплоть до железа. В каждом последующем типе реакций выделяется все меньше и меньше энергии. Но чтобы противостоять сжатию, звезда должна выделять энергию в прежнем темпе. Это достигается за счет того, что каждый последующий элемент «сгорает» все быстрее и быстрее. Горение углерода длится тысячи лет. Затем смена горючего происходит через годы, сутки и даже часы. Загорание каждого очередного элемента происходит тогда, когда масса его достигнет некоторого критического значения, которое близко к пределу Чандрасекара для ядра из этого элемента. В результате звезда приобретает структуру «луковицы»: в центре находится железное ядро, окруженное многочисленными слоями из продуктов ядерного горения в предыдущих циклах.

Когда образуется железное ядро, дальнейшая цепь ядерных реакций прерывается. Почему? Дело в том, что в ряду химических элементов железо занимает особое место. При синтезе ядер сравнительно легких элементов, включая железо, не надо затрачивать энергию. Напротив, синтез этих ядер сопровождается выделением энергии, которая и является источником светимости звезд. В отличие от этого, для синтеза ядер элементов тяжелее железа необходимо затратить определенную энергию (которая освобождается при распаде этих ядер). Поэтому такой процесс не может поддерживать излучение звезды.

Итак, когда образуется железное ядро, ядерные реакции в звезде прекращаются. Звезда охлаждается и начинает сжиматься. Сжатие железного ядра происходит катастрофически быстро: менее чем за секунду оно уменьшает свои размеры в тысячи раз (говорят, что ядро коллапсирует). Казалось бы вещество звезды должно прийти в вырожденное состояние, и давление вырожденного электронного газа должно остановить сжатие. Но этого не происходит. Дело в том, что в центре такой коллапсирующей звезды развивается фантастически высокая температура, она достигает миллиардов градусов. При такой температуре электроны вступают в реакцию с протонами и образуют нейтроны (происходит процесс нейтронизации ве-

щества). В результате количество электронов быстро уменьшается. Но откуда в центре звезды появились протоны? Ведь водород там давно выгорел на предшествовавших стадиях эволюции. А происходит вот что: при повышении температуры ядра атомов железа соударяются друг с другом и разрушаются, распадаясь, в конечном итоге, на протоны и нейтроны. Образующиеся при этом протоны и соединяются с электронами. Энергия, необходимая для распада атомных ядер железа черпается из кинетической энергии коллапсирующей звезды. Быстрое уменьшение плотности электронов в результате их слияния с протонами снимает вырождение (исчезает вырожденный электронный газ, давление которого могло бы предотвратить сжатие). Образующиеся нейтроны заполняют звездное ядро, и коллапс продолжается до тех пор, пока в центре звезды не образуется чудовищно плотный компактный объект размером порядка 10 км, состоящий почти исключительно из нейтронов.

Столкновения атомных ядер при коллапсе приводит, как мы видели, в основном, к их распаду с образованием протонов и нейтрино. Однако в этих же столкновениях, очень редко, но все же происходит образование ядер более тяжелых, чем железо, таких, как медь, молибден, олово, иод, серебро, золото, платина, ртуть, свинец, уран, и т.д. Описанный процесс длится примерно 1 секунду, но именно в эту последнюю секунду жизни звезды рождается, по существу, вся химия Вселенной, все химические элементы таблицы Менделеева. Энергия, необходимая для образования ядер этих элементов, черпается из кинетической энергии коллапсирующей звезды. Заканчивая свой жизненный путь, звезда использует последний шанс, последний источник энергии для образования тяжелых элементов. Надо сказать, что этот процесс имеет для нас немаловажное значение. Хотя живые организмы состоят преимущественно из элементов более легких, чем железо, — в основном, это водород, углерод, азот, кислород, фосфор — небольшая доля элементов тяжелее железа также входит в состав живых организмов, и они играют важную роль в процессах жизнедеятельности (не говоря уже об использовании их в технологических целях для нужд развивающейся цивилизации).

Когда в центре звезды образуется нейтронной ядро, наружные слои обрушиваются на него с колоссальной скоростью. Возникает взрыв, отбрасывающий вещество назад. Мощная ударная волна, движущаяся от центра звезды, вызывает сброс оболочки. При этом выделяется колоссальная энергия порядка 10^{45} Дж, а образовавшиеся в звезде тяжелые элементы разбрасываются в окружающее косми-

ческое пространство. Это и есть взрыв звезды, приводящий к вспышке сверхновой. Обнажившееся нейтронное ядро образует уж знакомую нам нейтронную звезду, которая наблюдается в виде пульсара.

Нейтронная звезда образуется лишь в том случае, если масса железного ядра меньше $2 M_{\odot}$. Если масса ядра превышает $2 M_{\odot}$, коллапс идет неограниченно с образованием черной дыры. Так называются совершенно необычные объекты, сжавшиеся до такой степени, что их поле тяготения удерживает не только вещество, но и излучение, не позволяя ему вырваться за пределы объема, ограниченного так называемым гравитационным радиусом $R_g = 2GM/c^2$ (G — постоянная тяготения, M — масса тела, c — скорость света). Для тела с массой Солнца $R_g = 3$ км. Всякое гравитирующее вещество характеризуется определенной скоростью освобождения, ее называют также параболической или второй космической скоростью. Если скорость частицы, находящейся в поле тяготения рассматриваемого тела, больше параболической, частица вырывается из поля тяготения и уходит в космическое пространство. Для Земли параболическая скорость равна 11,2 км/с, для Солнца она составляет 600 км/с, а для черной дыры параболическая скорость больше скорости света. Поэтому ни одна частица (даже квант света), находящаяся внутри черной дыры (под гравитационным радиусом), не может вырваться наружу. Черная дыра не светит и не греет, но своим мощным гравитационным полем затягивает внутрь себя вещество из окружающего пространства. Академик Я. Б. Зельдович образно назвал черную дыру гравитационной могилой. Но это грубая картина. Как показал крупнейший современный физик-теоретик С. Хокинг, учет квантовых эффектов приводит к тому, что черная дыра все же будет светиться, но очень слабо (излучение Хокинга). Обнаружить по этому излучению обычные черные дыры невозможно. Но их можно заметить по свечению падающего на черную дыру газа. К середине 2001 г. было обнаружено около 20 черных дыр звездной массы и 60 сверхмассивных черных дыр (с массой более миллиона солнечных масс) в ядрах галактик. Образование последних не связано со звездной эволюцией.

Описанная картина может быть не точна в деталях и она не описывает всех возможностей. При определенных условиях могут вспыхивать, как сверхновые, и не очень массивные звезды, с массой не сильно превышающей солнечную. Не обязательно в результате взрыва образуется нейтронная звезда или черная дыра: звезда может взорваться полностью, без остатка. Важно, что при взрыве освобождается гигантская энергия и разбрасываются в пространство синтезированные в звезде химические

элементы. В белых карликах синтез элементов не продвинулся дальше углерода, но и он, в конечном итоге, оказывается запертым в недрах черного углеродного карлика, в который после остывания превратится белый карлик. Взрыв же сверхновых звезд обеспечивает процесс космического метаболизма: он обогащает межзвездную среду, из которой формируются новые поколения звезд. Звезды первого поколения сформировались из вещества, которое образовалось на ранних стадиях развития Вселенной. Они состояли практически целиком из водорода (70 % по массе) и гелия (30 %) с небольшой примесью бериллия, лития и бора (меньше одной миллионной). Вероятно, это были массивные звезды, которые давно закончили свою эволюцию, взорвавшись, как сверхновые, и разметав по Галактике тяжелые элементы от углерода до урана. Самые старые звезды, которые наблюдаются сегодня, относятся ко второму поколению; они содержат уже заметную долю тяжелых элементов, хотя значительно меньшую, чем звезды следующего третьего поколения, к которому принадлежит и наше Солнце. Существенно, что, как сверхновые, взрываются, в основном, массивные звезды, которые очень быстро эволюционируют и, следовательно, за время существования Галактики сверхновые звезды многократно обогащали межзвездную среду.

Итак, звезды формируются из межзвездной среды путем гравитационной конденсации диффузной материи. Они проходят длительную стадию главной последовательности, когда устойчивое состояние звезды обеспечивается за счет ядерных реакций превращения водорода в гелий. Затем следует более короткая стадия красного гиганта, когда жизнь звезды поддерживается за счет горения гелия. И наконец, наступает заключительная фаза, когда, в зависимости от массы звезды, она либо превращается в белый карлик и медленно угасает, унося с собой в черную могилу накопления своей жизни, либо взрывается, как сверхновая, щедро разбрасывая в пространство плоды своего творчества для использования их в следующих поколениях звезд. Вспышка света необычайной яркости оповещает всех, кто может ее увидеть, об этом подвиге самоотверженности звезды, отдающей себя, свою материю, свою сущность во имя продолжения Беспредельной Нити Жизни Космоса. Умирая, она, подобно фениксу, возрождается вновь в поколениях звезд, которые приходят ей на смену.

2.1.4. Звездная система — Галактика. Мы познакомились с миром звезд, с их свойствами, с тем, как они рождаются, живут и умирают. Теперь нам предстоит краткое знакомство с той страной, в которой они обитают, — с грандиозной звездной системой Галактикой, имеющей размер более 100 тыс. св. лет и содержащей порядка 10^{11} звезд. Напомним, что в Галактике астрономы измеряют расстояние в парсеках (1 пк = 3,26 св. года) или килопарсеках.

Большинство наблюдаемых звезд Галактики сосредоточено в плоском диске с небольшим сферическим утолщением в центре. Поперечник диска около 30 килопарсек (кпк), толщина — в десятки раз меньше; поперечник центрального утолщения (иногда его называют «балдж») составляет около 4 кпк. Диск с балджем окружены звездным гало сферической формы, размер которого около 20 кпк. Диск и гало — две основные подсистемы звездного населения Галактики. Предполагается, что вокруг этой «видимой» части Галактики простирается еще невидимая галактическая корона, об-

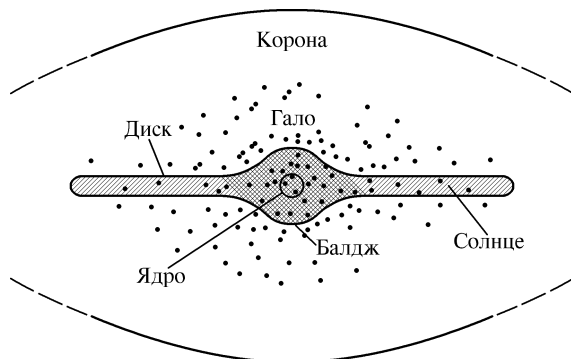


Рис. 2.1.22. Схема строения Галактики (вид с ребра)

разуемая очень слабыми звездами, присутствие которых обнаруживается только по их суммарному гравитационному полю. В центре Галактики расположено компактное ядро размером около 20 пк. Схематически строение Галактики показано на рис. 2.1.22.

Солнце относится к населению диска, оно расположено на периферии Галактики, ближе к краю диска, на расстоянии около 8 кпк от центра и лежит почти точно в плоскости симметрии диска (на расстоянии 20 пк над нею). Земной наблюдатель видит диск «с ребра», и огромное число удаленных звезд сливается для него в светящуюся полосу Млечного Пути, который в безлунную ночь хорошо виден на небе невооруженным глазом. Отсюда происходит и название нашей звездной системы — Галактика, т. е. звездная система Млечного Пути («галактикос» по-гречески означает молочный¹¹⁰). Звезды, видимые невооруженным глазом вне поло-

¹¹⁰ Согласно греческой мифологии, Млечный Путь произошел из струи молока, брызнувшей на небо из груди Богини Геры, жены Зевса. По приказу Зевса его сын

сы Млечного Пути, — это звезды диска, расположенные близко к Солнцу, поэтому они наблюдаются на больших углах по отношению к галактической плоскости.

Концентрация звезд в окрестности Солнца соответствует приблизительно одной звезде на 8 кубических парсеков. Это значит, что среднее расстояние между звездами составляет около 2 пк (или 6,5 св. лет). В центральных областях Галактики концентрация звезд в миллион раз выше, а расстояние между ними в 100 раз меньше, чем в окрестностях Солнца.

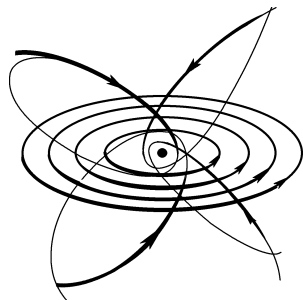
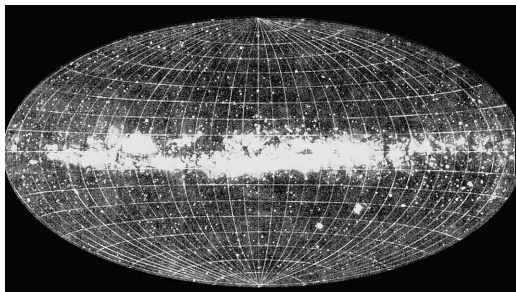


Рис. 2.1.23. Мозаичная фотография Млечного Пути

Рис. 2.1.24. Траектории вращения звезд вокруг центра Галактики.

В одной плоскости лежат орбиты звезд галактического диска, а пересекают плоскость орбиты звезд гало (сферической составляющей)

Звезды двух основных составляющих — диска и гало отличаются возрастом (а, следовательно, химическим составом) и характером движения. В состав гало входят наиболее старые звезды Галактики, относительно бедные тяжелыми элементами. Звезды диска более молодые, и они богаче тяжелыми элементами по сравнению со звездами гало.

Важно подчеркнуть, что Галактика представляет собой не просто случайное скопление гигантского количества звезд, а **динамическую** систему, в которой составляющие ее элементы совершают упорядоченное движение под действием центральной силы, определяемой суммарным тяготением галактической материи. Если мы выделим 100 или 1000 звезд в окрестности Солнца — они не образуют динамическую систему, а вот Галактика в целом является такой системой.

Геракл, рожденный смертной женщиной, был поднесен к груди спящей Геры, чтобы молоко Богини сделало его бессмертным. Но проснувшаяся Гера оттолкнула младенца. Геракл не стал бессмертным, а брызнувшее из груди Богини молоко оставило на небе вечный, бессмертный след — Млечный Путь.

Звезды диска обращаются вокруг ядра Галактики по почти круговым орбитам, лежащим приблизительно в одной плоскости. При этом все они обращаются в одну сторону. Скорость их движения зависит от расстояния от центра Галактики. Для звезд в окрестности Солнца скорость галактического вращения составляет приблизительно 200 км/с, это соответствует полному периоду обращения вокруг центра Галактики примерно за 250 млн лет. Звезды сферической составляющей обращаются вокруг центра Галактики по сильно вытянутым эллиптическим орбитам, наклоненным под всевозможными углами к плоскости диска (рис. 2.1.24)¹¹¹. Такой характер вращения напоминает вращение тел Солнечной системы. Звезды диска движутся подобно планетам, а звезды гало — подобно кометам. По-видимому, это связано с тем, что процесс формирования Галактики и Солнечной системы имеют общие черты.

Характерной особенностью Галактики является ее спиральная структура. Собственно говоря, спиральная структура относится не ко всей Галактике, а лишь к ее диску. Если бы мы могли посмотреть на нашу Галактику со стороны, в направлении перпендикулярном плоскости диска, то увидели бы, что от центра диска к периферии отходят спиральные рукава (рис. 2.1.25). Спиральные рукава представляют собой области повышенной концентрации (сгущения) звезд и межзвездного вещества. В промежутках между рукавами плотность галактической материи меньше. Солнце расположено между рукавами — между рукавом Стрельца и рукавом Персея, и движется в направлении последнего.

В спиральных ветвях Галактики сконцентрированы почти все молодые горячие звезды высокой светимости. Именно они наиболее ярко очерчивают спиральные ветви. Эти звезды образуются в спиральных ветвях и за время своего существования не успевают покинуть их. Таким образом, спиральные ветви представляют собой место, где наиболее интенсивно идет процесс звездообразования. Когда газопылевое облако при своем вращении вокруг центра Галактики входит в спиральный рукав, то на внутренней кромке рукава возникает ударная волна, здесь образуется область повышенной плотности, что способствует процессу звездообразования. Возникающие молодые звезды ярким блеском отмечают область своего звездного «инкубатора».

¹¹¹ На самом деле характер их движения более сложный: см. *Сурдин В. Г.* Динамика звездных систем. — М.: 2001. 32 с.

Что же является причиной возникновения спиральной структуры? Считается, что из центра Галактики распространяется спиральная волна плотности. Она представляет собой периодическое чередование сгущения и разряжения галактической материи (звезд и межзвездного вещества). Но в отличие от обычной волны, например, на поверхности воды, которая распространяется по прямым линиям во все сторо-



Рис. 2.1.25. (Слева) Спиральная галактика NGC 1232.

По-видимому, она похожа на нашу Галактику. Светлые точки в верхней части рисунка представляют собой распределение молодых объектов в спиральных рукавах нашей Галактики вблизи Солнца, наложенные на фотографию NGC 1232. При выбранном масштабе точки хорошо ложатся на спиральные ветви NGC 1232.

(Справа) Галактика NGC 5364 в созвездии Девы — одна из типичных спиральных галактик

ны от источника возбуждения, галактическая волна плотности распространяется от центра Галактики по спирали. Эта спиральная волна плотности обращается вокруг галактического центра с постоянной угловой скоростью (не зависящей от расстояния от центра Галактики). Поэтому спиральный узор при вращении сохраняется. Но этот узор есть картина распределения плотности. Что же касается отдельных «частиц» вещества — звезд или межзвездных облаков, скорость вращения которых зависит от расстояния от центра Галактики, то они при своем движении пересекают спиральную структуру. Звезды входят в спиральный рукав и, миновав его, вновь выходят в пространство между рукавами. На расстоянии 10–15 кпк от центра Галактики (пока расстояние точно не известно) скорость галактического вращения совпадает со скоростью вращения спирального узора. Эта область получила название зоны коротации. Вблизи нее звезды никогда не пересекают спиральные рукава. Некоторые авторы считают, что Солнце находится как раз в зоне коротации и что это оказало решающее влияние на происхождение жизни в Солнечной системе.

Как возникают в Галактике волны плотности, что является их «генератором» — этот вопрос остается пока нерешенным. Возможно, разгад-

ка таится в природе самого Галактического центра, откуда распространяются волны плотности.

Диск, гало, корона, спиральные ветви — это наиболее крупные элементы галактической структуры. Но и внутри этих крупных структурных образований распределение галактической материи также неоднородно. Звезды диска часто группируются в скопления. Причем это не эффект случайной проекции: звезды скопления располагаются в одной области пространства и гравитационно связаны между собой. Плотность звезд в скоплении в десятки раз выше, чем в окружающем звездном фоне, но заметной концентрации к центру скопления не наблюдается. Такие скопления получили название «рассеянные». Число звезд в рассеянных скоплениях меняется в широких пределах — от нескольких десятков звезд (бедные скопления)

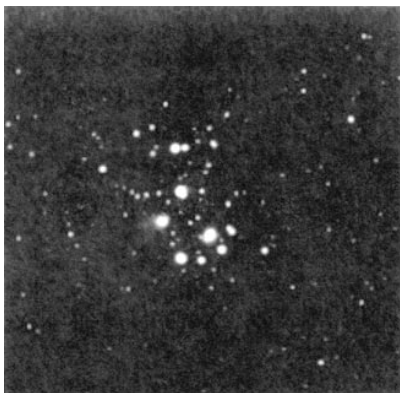


Рис. 2.1.26. Скопление Плеяды

до нескольких тысяч звезд (богатые скопления). Примером рассеянного звездного скопления может служить хорошо известное скопление Плеяды в созвездии Тельца, видимое невооруженным глазом (см. рис. 2.1.26); оно содержит сотни звезд, из которых глазом видны 5–6 самых ярких. Диаметры рассеянных скоплений составляют от 1,5 до 30 пк, а массы — от 100 до 3000 $M_{\odot}$. В пределах 2 кпк от Солнца известно более тысячи рассеянных скоплений, а общее их число в Галактике оценивается в 20 тысяч.

Все рассеянные звездные скопления наблюдаются в полосе Млечного Пути, т. е. они расположены в диске Галактики. В состав ближайшего к Солнцу очень разреженного скопления входят пять звезд ковши Большой Медведицы, Сириус и другие близкие звезды. Поскольку Солнце расположено рядом с этим скоплением, и мы наблюдаем его как бы изнутри, звезды скопления не образуют компактную группу на небе, а разбросаны по всему небосклону.

Все звезды одного скопления не только расположены в одном месте, но имеют близкий возраст, следовательно, они связаны общим происхождением. Мы уже знаем, что звезды образуются из межзвездной среды. Звезды, возникающие в процессе фрагмента-

ции одного газопылевого облака, как раз и образуют рассеянное звездное скопление. Так как, помимо общего галактического вращения, они имеют еще хаотические, случайные скорости, то скопление с течением времени «рассасывается». Обычно это происходит за время нескольких десятков оборотов вокруг центра Галактики. Наше Солнце представляет собой одиночную звезду. Вероятно, оно образовалось в составе рассеянного скопления вместе с сотней других звезд, но за 5 млрд лет это скопление полностью рассосалось, и сегодня мы не знаем братьев и сестер Солнца.

Наряду с рассеянными звездными скоплениями в диске Галактики наблюдаются разреженные группировки молодых горячих звезд, которые получили название звездных ассоциаций. Считается, что звезды ассоциации также сформировались в пределах одного облака, но не смогли объединиться в гравитационно связанное скопление.

Следующим, более крупным структурным образованием являются звездные комплексы, в состав которых входят несколько рассеянных звездных скоплений, ассоциаций и облаков межзвездного газа.

Размер комплексов 500–1000 пк, масса 10^6 – $10^7 M_{\odot}$. Все они располагаются вдоль спиральных ветвей Галактики.

Некоторые звезды сферической составляющей также группируются в скопления. В отличие от рассеянных скоплений, они имеют очень высокую концентрацию звезд к центру скопления и имеют, как правило, шаровую форму. Поэтому они получили название шаровых скоплений. По размерам шаровые скопления превосходят рассеянные, их диаметр от 15 до 200 пк. Число звезд в шаровых скоплениях также больше: сотни тысяч, а в отдельных случаях вплоть до миллиона звезд. Массы шаровых скоплений составляют 10^4 – $10^6 M_{\odot}$. Концентрация звезд в центральных областях шарового скопления очень

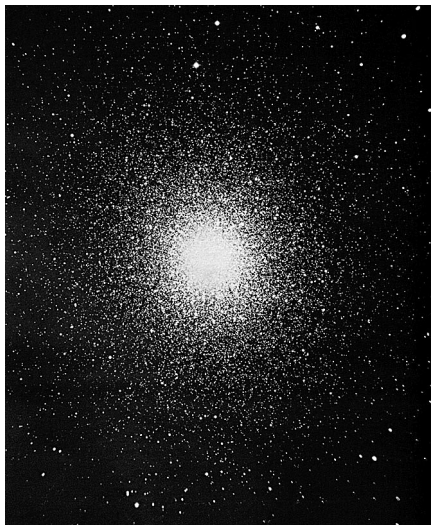


Рис. 2.1.27. Шаровое скопление М 13 в созвездии Геркулеса.

К нему было направлено радиопослание из Аресибо (см. гл.1)

велика: в сотни тысяч раз выше, чем в окрестностях Солнца. Если бы вокруг одной из таких звезд обращалась планета, населенная разумными существами, то они, вероятно, не знали бы, что такое настоящая ночь, ибо даже после захода солнца на небе осталось бы множество светил, сияющих, как Луна в полнолуние. Характерной особенностью шаровых скоплений является то, что они практически не содержат газа. В составе их также нет молодых звезд. Это наиболее древние объекты Галактики, возраст их порядка 10 млрд лет. В настоящее время известно около 150 шаровых скоплений. Они распределены в пространстве неоднородно, концентрируясь к центру Галактики. Как и одиночные звезды сферической составляющей (гало), шаровые скопления движутся по сильно вытянутым эллиптическим орбитам с периодом обращения 10^8 – 10^9 лет. Большую часть времени они проводят вдалеке от Галактического центра, но один раз за период обращения проходят через плотные центральные области Галактики.

До сих пор речь шла о звездном населении Галактики. Но, помимо звезд, важную роль в жизни Галактики играет межзвездная среда, из которой образуются и сами звезды. Она состоит из газа и пыли, перемешанных в соотношении 100 : 1 (по массе), т. е. масса пыли составляет 1 % от массы газа. Газ и пыль сосредоточены в галактическом диске. Средняя плотность газа здесь, как уже отмечалось выше, составляет 1 атом/см³. Для сравнения напомним, что в 1 см³ атмосферы у поверхности Земли содержится $3 \cdot 10^{19}$ молекул. Несмотря на столь ничтожную плотность межзвездной среды, общая масса газа, занимающего огромное пространство, составляет заметную долю — около 3 % массы Галактики (без учета массы короны). Как и звезды, газ (и пыль) в диске распределены неравномерно, образуя отдельные газопылевые облака. Средний размер облаков — несколько десятков парсек. Химический состав межзвездного газа подобен солнечному. Главным компонентом является водород. Он может находиться в атомарном или молекулярном состоянии. Соответственно говорят об облаках атомарного или молекулярного водорода. Плотность газа в облаках атомарного водорода составляет 10–100 ат/см³ (в среднем 20 ат/см³), плотность в межоблачной среде порядка 0,2 ат/см³. Плотность молекулярных облаков H₂ на много порядков выше, она может достигать 10⁶ молекул/см³, а масса таких облаков достигает миллиона солнечных масс. Так как пропорция между газом и пылью всюду остается приблизительно одинаковой, то в более плотных облаках содержится также больше пыли.

Плотные газопылевые облака не пропускают свет звезд, находящихся за ними. Поэтому они выглядят как темные области на небе, которые получили название темных туманностей. Примером может служить темная туманность «Конская голова» в созвездии Ориона (рис. 2.1.28).

Большая часть атомарного водорода находится в нейтральном состоянии. Облака нейтрального водорода образуют так называемые области HI. Это холодные облака с температурой меньше 100 К. Они совсем не светятся в видимой области спектра, и если бы не радиоизлучение на волне

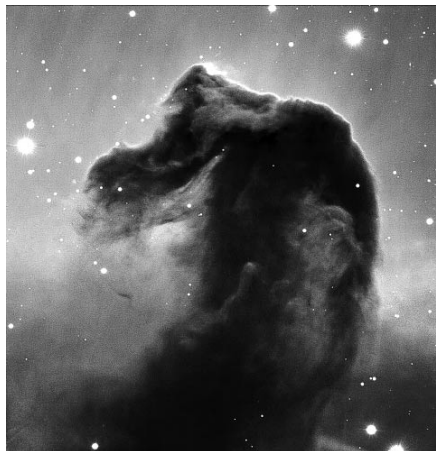


Рис. 2.1.28. Темная туманность «Конская голова»



Рис. 2.1.29. Отражательная туманность в скоплении Плеяды

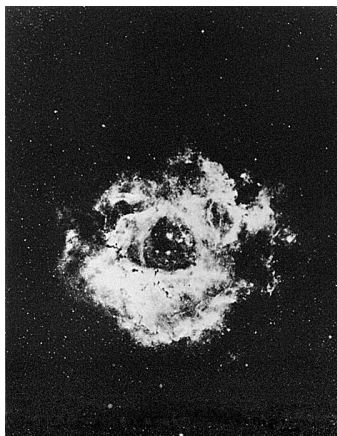


Рис. 2.1.30. Диффузная туманность NGC 2237 («Розетка») в созвездии Единорога

21 см, такие облака невозможно было бы обнаружить. К счастью, излучение в линии 21 см дает богатую информацию о распределении этих облаков в Галактике, их движении и физических условиях в них.

Если вблизи газопылевого облака находятся яркие звезды, то благодаря рассеянию света звезд на частицах пыли такие облака могут наблюдаться в виде светлых туманностей, которые получили название отражательных. Примером может служить отражательная туманность в скоплении Плеяды (рис. 2.1.29). Таким образом, отражательные туманности представляют собой газопылевые облака, подсвеченные звездами. Когда температура звезд, находящихся внутри (или вблизи) газопылевого облака, достаточно высока, они своим мощным УФ-излучением ионизируют водород. Образуется область ионизированного водорода НII. Температура в таких областях достигает 10000 К, и они являются интенсивными источниками теплового радиоизлучения. Кроме того, ионизованный водород при рекомбинациях¹¹² интенсивно излучает в оптической области спектра, благодаря чему зона НII светится, образуя диффузные туманности (рис. 2.1.30). Формы их необычайно разнообразны, они обладают очень богатой тонкой структурой и по красоте не уступают картинам облаков в земной атмосфере. Конечно, наблюдать их можно только с помощью телескопов. Области НI и НII, а также молекулярные облака располагаются преимущественно в спиральных ветвях Галактики.

Межзвездные молекулярные облака играют особую роль. Именно в этих плотных облаках интенсивно идет процесс образования звезд (и планетных систем). Помимо молекулярного водорода H_2 , они содержат десятки других молекул. Среди них молекулы воды, играющей такую важную роль в известной нам водно-углеродной форме жизни, к которой принадлежим и мы сами, а также молекулы органических веществ. Причем речь идет не только о простейших органических веществах типа метана CH_4 , но и более сложных соединениях, таких как муравьиная кислота $HCOOH$, этиловый спирт C_2H_5OH и др. Молекулы метиламина CH_3NH_2 , обнаруженные в межзвездной среде, являются важным звеном в формировании аминокислот, а это уже ступень к образованию белков. Чем сложнее молекула, тем труднее ее обнаружить. Поэтому неизвестно, как далеко зашла химическая эволюция в молекулярных облаках межзвездного газа и какие типы молекул там действительно существуют. Согласно гипотезе Ф. Хойла и Ч. Викрамасинга, в межзвездных молекулярных облаках могут возникать даже простейшие формы жизни. Мы подробнее рассмотрим эту проблему в гл. 4.

¹¹² Рекомбинацией называется процесс обратный ионизации, когда свободный электрон присоединяется к ионизированному атому и нейтрализует его.

Газовый диск Галактики пронизан галактическим магнитным полем. Напряженность его в сотни тысяч раз меньше, чем напряженность геомагнитного поля, но оно играет важную роль в физике и динамике межзвездного газа. Галактическое магнитное поле имеет довольно сложную структуру. Вдоль его силовых лучей движутся заряженные частицы космических лучей. В их состав входят электроны, протоны, позитроны, мезоны, гипероны, ядра тяжелых элементов. При движении электронов в магнитном поле излучаются радиоволны. Это один из основных механизмов радиоизлучения Галактики, в целом, и отдельных дискретных источников радиоизлучения. Космические лучи генерируются в ядре Галактики и при вспышках сверхновых. В составе Галактики они удерживаются ее магнитным полем.

Заканчивая наше знакомство с Галактикой, нам остается «заглянуть» еще в ее центральную область. Эта область радиусом около 1 кпк, носит название «Галактический центр». Внутри ее находится компактное ядро нашей Галактики размером приблизительно 20 пк (в поперечнике). Галактический центр расположен в направлении созвездия Стрельца за плотным слоем пылевых облаков, ослабляющих свет в десятки тысяч раз. Поэтому наблюдать его в оптическом диапазоне невозможно. К счастью, пылевая среда прозрачна для инфракрасного и радиоизлучения, и это позволяет наблюдать Галактический центр в указанных диапазонах волн. Подавляющая часть вещества в Галактическом центре сосредоточена в звездах. Среди них много молодых горячих звезд спектрального класса О. Это указывает на то, что в центральной области нашей Галактики интенсивно идет процесс звездообразования. Помимо звезд, в Галактическом центре имеется значительное количество газа и пыли. Эта газопылевая среда образует быстро вращающийся диск радиусом около 600 пк, наклоненный под углом 22° к галактической плоскости. Его называют «околядерным», так как он непосредственно примыкает к ядру Галактики, расположенному в центре этого диска. Диск состоит из облаков атомарного и молекулярного водорода (перемешанных с пылью); во внутренних частях диска водород полностью ионизирован, образуя область НII радиусом 150 пк. В околядерном диске газ движется со скоростью около 200 км/с. По-видимому, эти газовые потоки истекают из ядра Галактики.

В пределах Галактического центра находится мощный источник радиоизлучения Стрелец А. Он состоит из двух компонентов — Западного и Восточного. Источник Стрелец А Западный, занимаю-

ший область размером около 20 пк, совпадает с динамическим центром Галактики, вокруг которого вращаются входящие в нее звезды. Эта область и представляет собой ядро нашей Галактики. Внутри ядра обнаружены более компактные источники инфракрасного и радиоизлучения. Особый интерес представляет сверхкомпактный радиоисточник, обнаруженный методом радиоинтерферометрии. Его угловой размер меньше $0,001''$, что соответствует линейному размеру, не превышающему 10 а. е. Предполагается, что это черная дыра с массой порядка $10^6 M_{\odot}$.

Ядро Галактики — это самая загадочная область нашей звездной системы. Возможно, оно играет такую же определяющую роль для Галактики, как Солнце для Солнечной системы. Роль ядер особенно хорошо видна на примере других галактик. К описанию мира галактик мы теперь и переходим.

2.1.5. Другие галактики

Даже простое наблюдение звездного неба наполняет сердце трепетом. Этот трепет возрастает, когда астрономы поясняют нам, что среди этих мириадов сверкающих центров огромных сил лишь несколько точек являются нашими планетами, а остальные — это могучие центры далеких Солнечных систем и грандиозные скопления Солнц — галактики.

Н. Уранов. «Размышляя над Беспредельностью»

Еще в начале XX века известная астрономам Вселенная ограничивалась рамками нашей Галактики. Воображение с трудом улавливало контуры этой грандиозной системы, границы ее сливались с практической бесконечностью. И все-таки пытливая человеческая мысль стремилась проникнуть за эти пределы. Развернувшаяся здесь драма идей длилась почти два столетия.

Умозрительные идеи об островной Вселенной¹¹³ высказывались еще в XVIII веке. У истоков этих воззрений стоит известный шведский ученый и философ, великий мистик и оккультист Э. Сведенборг. Он не только впервые определил Млечный Путь как реально существующую динами-

¹¹³ Под островной Вселенной понимается Вселенная, состоящая из множества отдельных звездных систем («островов» Вселенной), каждая из которых представляет собой связанную динамическую систему со своим центром.

ческую систему звезд, удерживаемых вместе физическими силами, но и создал картину Мироздания, основанную на иерархическом принципе — существования сложных космических систем, включающих целые «млечные пути» и системы все более и более высокого порядка. Эти идеи развивались затем И. Кантом¹¹⁴ и И. Ламбертом. Но они не имели убедительного подтверждения астрономическими наблюдениями.

Во второй половине XVIII века великий английский астроном В. Гершель, на основании звездных подсчетов, показал, что наш звездный мир (наша Галактика) конечен, и сделал правильный вывод о том, что он представляет собой лишь один из «островов» Вселенной. Гершель связал эти «острова» с открытым им же миром туманностей. Это было правильное предположение, ибо 80 % открытых им туманностей, действительно, расположено за пределами нашей Галактики и являются другими галактиками. Однако вскоре Гершель отказался от этого предложения. Дело в том, что, как показали дальнейшие исследования, ряд туманностей — планетарные, диффузные (т. е. те, которые мы теперь связываем с областями III) принадлежат нашей Галактике. Гершель ошибочно распространил этот вывод на все туманности.

Во второй половине XIX века было обнаружено, что многие туманности Гершеля имеют спиральную структуру. «Перед глазами астрономов как бы материализовались угаданные древними натурфилософами и возрожденные в свое время Декартом и Сведенборгом космические вихри»¹¹⁵. Это открытие имело важнейшее значение. Спиральные туманности наблюдаются, в основном, на высоких галактических широтах, они избегают полосы Млечного Пути. Это понятно, ибо, если мы сквозь толщу пылевых облаков не видим центр нашей собственной Галактики, то тем более мы не можем наблюдать другие галактики. Однако такой аргумент не рассматривался, и не мог рассматриваться как решающее подтверждение внегалактической природы спиральных туманностей. Более того, концентрация спиралей к полюсам Галактики создавала иллюзию, что они каким-то образом связаны с системой Млечного Пути. Великий спор о природе спиральных туманностей продолжался в течение нескольких десятилетий. Еще в 20-х годах XX века выдающийся американский астроном Х. Шепли отстаивал представление о том, что спиральные туманности имеют диффузную природу и принадлежат нашей Галактике. Одна из гипотез предполагала, что спирали представляют собой формирующиеся планетные системы. В таком случае они должны были располагаться недалеко от Солнца.

¹¹⁴ «Мы видим первые члены непрерывного ряда миров и систем, — писал Кант, — и первая часть этой бесконечной прогрессии уже дает нам возможность представить, каково целое. Здесь нет конца, здесь бездна подлинной несоизмеримости, перед которой бледнеет всякая способность человеческого понимания, хотя бы и подкрепленного математикой». (И. Кант. Очерк системы неподвижных звезд, а также о многочисленности подобных систем неподвижных звезд. Цит. по кн.: Еремеева А. И., Цицин Ф. А. История астрономии. — М.: Изд-во Моск. ун-та, 1989. С. 199.)

¹¹⁵ Еремеева А. И., Цицин Ф. А. История астрономии. С. 221.

В 1917 г. на горе Маунт Вилсон начал работать самый крупный в ту пору зеркальный телескоп диаметром 2,5 м. Директор обсерватории Дж. Хейл считал, что важнейшим направлением исследований с помощью нового телескопа должно стать наблюдение спиральных туманностей. Он полагал, что это внесет решающий вклад в проблему образования планетных систем. Телескопу, действительно, суждено было сыграть решающую роль в определении природы спиральных туманностей, но оказалось, что она совершенно иная. Решить загадку спиралей выпало на долю Эдвина Хаббла — человека, который сыграл совершенно исключительную роль в астрономии XX века.

К августу 1924 г. Хаббл с помощью 2,5-метрового телескопа получил около 200 негативов туманностей Андромеды, Треугольника и NGC 6822. Ему удалось разрешить их на отдельные звезды, среди которых были обнаружены цефеиды. Мы уже отмечали, что, зная период изменения блеска цефеид, можно найти их светимость и, следовательно, определить расстояние до туманностей, в которых они находятся. Проведя эту процедуру, Хаббл нашел, что расстояние до туманностей значительно превышает размер нашей Галактики, а сами они по размеру сопоставимы с Галактикой. Так была поставлена точка в вековом споре.

Было доказано, что спиральные туманности представляют собой другие звездные системы, подобные нашей. Они стали называться галактиками (с маленькой буквы), а за нашей звездной системой сохранилось название Галактика (с большой буквы) или система Млечного Пути.

Мир галактик не менее разнообразен, чем мир звезд. Напомним, что общее число галактик в наблюдаемой области Вселенной

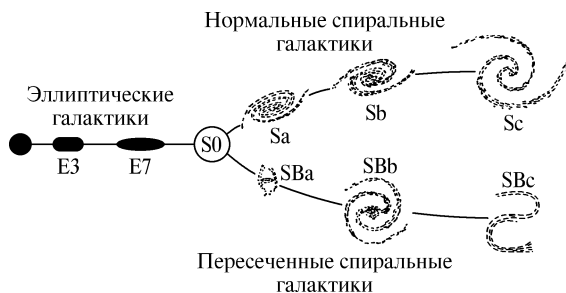


Рис. 2.1.31. Классификация галактик по Э.Хабблу

порядка 10 млрд. По своему внешнему виду галактики делятся на три основных типа: эллиптические (E), спиральные (S) и неправильные (Ir). Эллиптические галактики имеют форму эллипса и, в зависимости от степени сжатия, подразделяются на 8 подтипов: от сфе-

рических E0 до очень сплюснутых E7. Спиральные галактики, характеризующиеся наличием спиральных рукавов, делятся на нормальные спирали (S) и пересеченные спирали (SB). У первых спиральные рукава начинаются от ядра галактики, у вторых они закручиваются от краев яркой прямой перемычки, пересекающей центр галактики и выходящей далеко за пределы галактического ядра. В зависимости от характера спиральной структуры, от того, как раскручиваются спиральные ветви, как быстро они удаляются от ядра (или перемычки) — и нормальные, и пересеченные спирали подразделяются еще на несколько подтипов, обозначаемых буквами a, b, c ... Например, Sa, SBc и т. д. (см. рис. 2.1.31). Наша Галактика, вероятней всего, относится к типу Sb. Существует также промежуточный тип между эллиптическими галактиками и спиралями. Они получили название линзообразных (обозначаются S0). У линзообразных галактик различается ядро, диск и слабый ореол (гало) вокруг него. В наружных частях диска иногда видны зачатки (или остатки) спиральных рукавов и перемычки, а иногда наблюдается наружное кольцо. Любопытно, что этот тип галактик был предсказан теоретически, и лишь затем они были обнаружены. Наиболее многочисленны спиральные галактики (50 %), эллиптические составляют около 25 %, линзообразные — около 20 %, а на долю крупных неправильных (иррегулярных) галактик приходится только 5 %. Фотографии некоторых галактик приводятся на рис. 2.1.32–2.1.35.

Основные типы галактик отличаются не только по своему внешнему виду, но и по составу, структуре и характеру движения. В эллиптических галактиках нет звездных дисков, они состоят как бы из одной сферической составляющей. Плотность звезд в них плавно убывает с расстоянием от центра галактики. Эти галактики практически не содержат газа, в их составе нет также молодых звезд; видимо, процесс звездообразования в них уже закончился. Звезды вращаются вокруг центра эллиптической галактики в самых различных плоскостях, а сами галактики, как целое, вращаются очень медленно. По размерам они охватывают широкий диапазон — от 3 кпк (карликовые галактики) до гигантских галак-

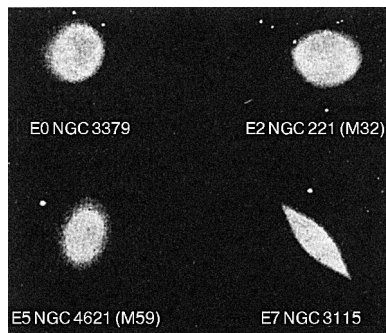


Рис. 2.1.32. Эллиптические галактики

тик диаметром 100 кпк. Соответственно, массы их изменяются от 10^6 до $10^{12} M_{\odot}$, а светимость от 10^6 до $10^{11} L_{\odot}$.

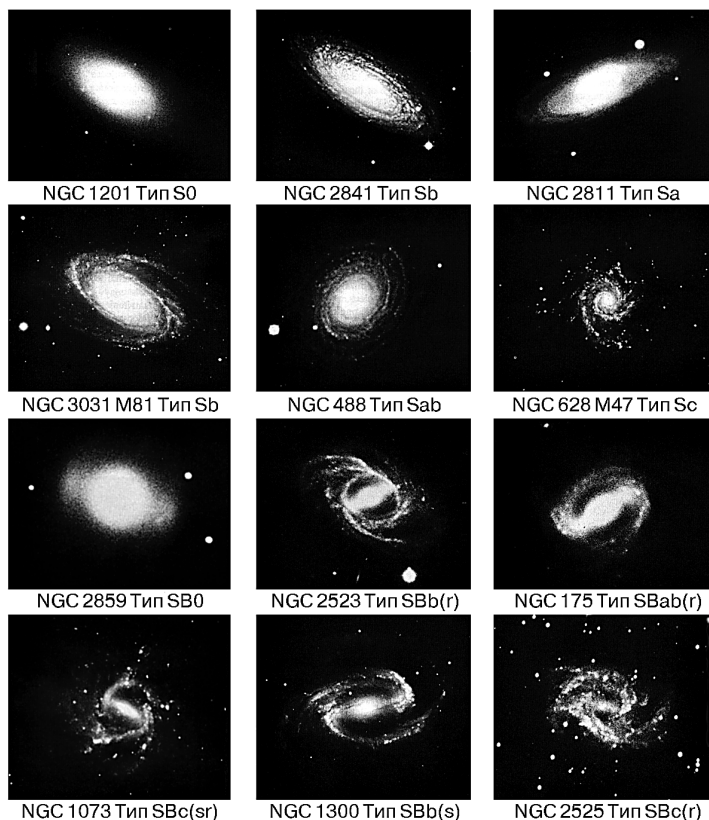


Рис. 2.1.33. Спиральные галактики

Спиральные галактики представляют собой сильно уплощенные звездные системы. Подобно нашей Галактике, они состоят из диска и гало, в центральной части их расположено сфероидальное вздутие (балдж), внутри которого находится галактическое ядро. В спиральных ветвях диска сосредоточены самые яркие молодые звезды, диффузные туманности, молодые звездные скопления и ассоциации. Поэтому спиральный узор в галактиках так отчетливо выделяется, хотя на долю спиральных ветвей приходится всего несколько процентов массы каждой галактики. Основная масса звезд равномерно распределена в галактическом диске. Их химический состав

близок к солнечному. Звезды вращаются вокруг центра галактики по почти круговым орбитам в плоскости, совпадающей с плоскостью диска. Звезды гало имеют сфероидальное пространственное распределение, сильно концентрируясь к центру галактики. Они вращаются по сильно вытянутым эллиптическим орбитам, наклонен-

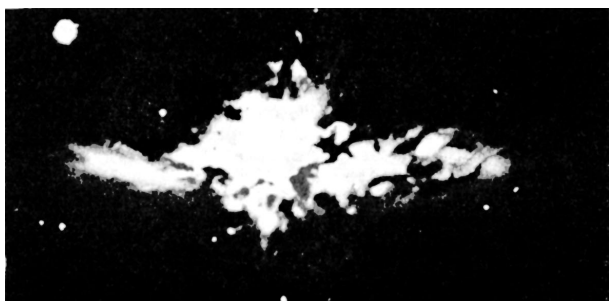


Рис. 2.1.34. Неправильная галактика М 82

ным под всевозможными углами к галактической плоскости. Звезды гало относительно бедны тяжелыми элементами, это наиболее старые звезды спиральных галактик — их возраст порядка 10 млрд лет. Диапазон масс и светимостей у спиральных галактик более узкий, чем у эллиптических: массы заключены в пределах от 10^9 до $10^{12} M_{\odot}$, а светимость от 10^8 до $10^{11} L_{\odot}$.

В неправильных галактиках полностью отсутствует сферическая составляющая. Большинство звезд сосредоточено в плоском диске, но спиральных ветвей в нем нет, отсутствует также галактическое ядро. В них много молодых звезд и много газа, в некоторых галактиках газ составляет до 50 % общей массы.

Описанные основные типы галактик не исчерпывают всего их многообразия. Известный советский астроном Б. А. Воронцов-Вельяминов изучил с помощью микроскопа (!) фотографические снимки неба («Паломарский атлас»). Он описал многие сотни peculiarных галактик, каждая из которых имеет совершенно уникальную форму. Среди них Б. А. Воронцов-Вельяминов выделил осо-

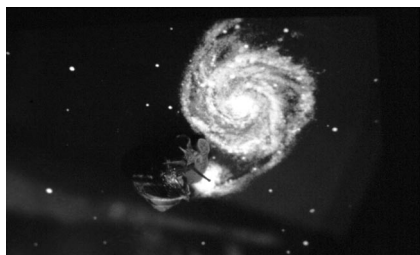


Рис. 2.1.35. Взаимодействующие галактики: спиральная галактика М 51 и ее спутник — галактика NGC 5195

бый тип взаимодействующих галактик. Это, как правило, двойные галактики, в которых между компонентами наблюдаются перемычки светлой и темной материи или хвосты, уходящие далеко в межгалактическое пространство. Считается, что наша Галактика вместе с ее ближайшими спутниками Магеллановыми Облаками также образует взаимодействующую систему. От Магеллановых Облаков в сторону нашей Галактики движется поток газа, полная масса которого составляет не менее 100 млн солнечных масс. На небе этот поток образует длинную полосу, протянувшуюся из южного полушария в северное более чем на 90° . Однако ни в какие оптические телескопы его не видно, он был обнаружен по радиоизлучению нейтрального водорода на волне 21 см.

Особый тип галактик представляют галактики с **активными ядрами**¹¹⁶. Хотя доля объема, занимаемого ядрами галактик, ничтожна (менее 10^{-15} от полного объема галактики), количество энергии, излучаемое активными ядрами (их светимость), составляет заметную долю от светимости галактики в целом. При этом светимость ядра не остается постоянной, она может заметно меняться за время от нескольких недель до нескольких месяцев. В некоторых случаях из активных ядер истекают потоки газа, движущегося со скоростями в несколько десятков тысяч километров в секунду.

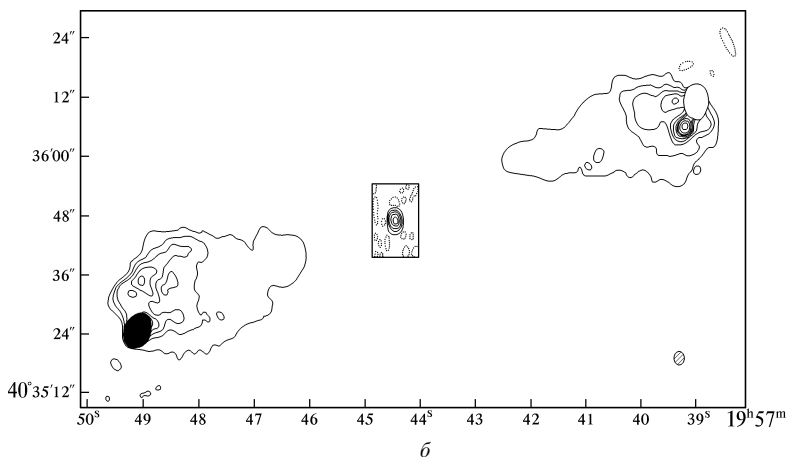
К числу галактик с активными ядрами относятся радиогалактики. У обычных галактик светимость в радиодиапазоне в миллионы раз меньше, чем в оптическом. Радиогалактики излучают в радиодиапазоне столько же энергии, как и в оптической области спектра (или даже больше). Эти мощные потоки радиоволн являются следствием тех бурных процессов, которые протекают в ядре галактики. Из ядра радиогалактик выбрасываются интенсивные потоки элементарных частиц (космических лучей), движущихся с околосветовыми скоростями, чаще всего в двух противоположных направлениях. Двигаясь в магнитном поле, электроны космических лучей порождают мощное синхротронное радиоизлучение. За счет этого процесса вблизи таких галактик образуются интенсивные радиоисточники, по размерам превосходящие размеры самой галактики. Примером может служить один из ярчайших источников Лебедь А (рис. 2.1.36).

¹¹⁶ Большую роль в привлечении внимания к феномену активности ядер и в их изучении сыграл выдающийся советский астроном В. А. Амбарцумян.

Долгое время самыми загадочными объектами за пределами нашей Галактики оставались квазары (квазизвездные радиоисточники). Они были обнаружены в 1963 г. и поистине стали астрономической сенсацией. Для объяснения квазаров было выдвинуто много остроумных гипотез, но постепенно стала проявляться их связь с галактическими ядрами. На фотографиях квазары выглядят, как слабые голубоватые звездочки. Однако спектр их совершенно не похож ни на спектр звезд, ни на спектр галактик. В отличие от линий поглощения звездного спектра, спектр квазаров содержит яркие эмиссионные линии. Когда было измерено рас-



a



б

Рис. 2.1.36. Радиогалактика Лебедь А.

a) Фотография оптической галактики.

б) Распределение радиоизлучения, область оптической галактики выделена прямоугольником

стояние до квазаров, оказалось, что это самые далекие объекты в наблюдаемой области Вселенной. Обычные галактики на таких расстояниях невозможно было бы обнаружить. Следовательно, квазары не только самые далекие, но и самые мощные, обладающие самой высокой светимостью объекты Вселенной. Особенно много энергии излучают они в инфракрасной области спектра. Дальней-

шие исследования показали, что вокруг квазаров наблюдается слабое свечение, обусловленное присутствием звезд. Это позволило связать квазары с ядрами далеких галактик. Следует иметь в виду, что в квазарах, так же как в активных галактических ядрах, наблюдается излучение быстро движущегося газа (скорость которого достигает тысяч км/с). Подобно активным ядрам многие квазары заметно меняют свою светимость за время порядка нескольких месяцев. Все это указывает на то, что квазары — это ядра далеких галактик, которые находятся на ранних стадиях эволюции в состоянии очень высокой активности. Такое представление позволяет выяснить место квазаров в ряду других объектов Вселенной, но это не раскрывает загадку их природы, поскольку природа самих галактических ядер, источников их энергии остается неизвестной. Великий астроном XX века Джеймс Джинс считал, что в центре галактик находятся особые точки, где «в нашу Вселенную вливается вещество из каких-то других пространственных измерений...»¹¹⁷. Как знать, может быть, эта мысль — в несколько измененном виде (как это не раз случалось в истории науки) — получит со временем подтверждение и развитие.

Таков многообразный мир галактик. Нам остается рассмотреть, каким образом они распределены в пространстве. Подобно звездам галактики образуют группы, скопления и сверхскопления. Скопления делятся на правильные и неправильные. Правильные скопления обладают сферической формой и содержат десятки тысяч галактик. Неправильные скопления менее населенные, в них входят от нескольких десятков до нескольких сотен галактик. Ближайшее к нашей Галактике скопление галактик находится в созвездии Девы, это неправильное скопление, содержащее около 200 галактик, расстояние до него 20 мегапарсеков (Мпк), размер скопления 5 Мпк. Ближайшее сферическое скопление находится в созвездии Волосы Вероники, на расстоянии 125 Мпк, оно содержит более 30 тыс. галактик. Самое далекое скопление их тех, до которых измерено расстояние, также находится в Волосах Вероники, расстояние до него 5200 Мпк. Всего сейчас известно более 7000 скоплений.



Рис. 2.1.37. Скопление галактик в созвездии Геркулеса

дамы галактики образуют группы, скопления и сверхскопления. Скопления делятся на правильные и неправильные. Правильные скопления обладают сферической формой и содержат десятки тысяч галактик. Неправильные скопления менее населенные, в них входят от нескольких десятков до нескольких сотен галактик. Ближайшее к нашей Галактике скопление галактик находится в созвездии Девы, это неправильное скопление, содержащее около 200 галактик, расстояние до него 20 мегапарсеков (Мпк), размер скопления 5 Мпк. Ближайшее сферическое скопление находится в созвездии Волосы Вероники, на расстоянии 125 Мпк, оно содержит более 30 тыс.

галактик. Самое далекое скопление их тех, до которых измерено расстояние, также находится в Волосах Вероники, расстояние до него 5200 Мпк. Всего сейчас известно более 7000 скоплений.

¹¹⁷ Цит. по кн.: Новиков И. Д. Эволюция Вселенной. — М.: Наука, 1983. С. 178.

Часть галактик (около 10 %) не входит в скопления. Среднее расстояние между ними 1–2 Мпк, приблизительно в 100 раз больше размеров галактик. Среднее расстояние между галактиками в скоплениях — несколько сотен килопарсек, всего в 10–20 раз меньше размеров галактик. В этом отношении распределение галактик сильно отличается от распределения звезд: среднее расстояние между звездами приблизительно в 20 млн раз превышает их размеры. Таким образом, галактики «упакованы» в пространстве гораздо более плотно. Еще «плотнее» упакованы скопления галактик, расстояние между ними практически одного порядка с размером скоплений. Часть скоплений, как было уже сказано, объединяются в сверхскопления.

Наша Галактика и Туманность Андромеды входит в состав так называемой Местной группы галактик. Она содержит около 40 членов и состоит из двух семейств — семейства Млечного Пути (нашей Галактики) и семейства Андромеды. В семейство нашей Галактики входят несколько карликовых сфероидальных галактик, несколько внегалактических шаровых скоплений и неправильные галактики — Большое и Малое Магеллановы Облака. В семейство Андромеды входит

дюжина галактик различных типов. Кроме того, около 10 неправильных галактик образуют периферию Местной группы. Местная группа, скопление в Деве и еще ряд скоплений образуют Сверхскопление галактик, диаметр его около 30 Мпк, а число галактик порядка 20 тысяч. С нашим Сверхскоплением соседствует сверхскопление в созвездии Льва (расстояние 140 Мпк) и в созвездии Геркулеса (расстояние 190 Мпк). Всего пока выделено около 50 сверхскоплений.

Как распределены сверхскопления? Заполняют ли они равномерно все пространство наблюдаемой Вселенной или образуют струк-



Рис. 2.1.38. Галактика М 31 (Туманность Андромеды).

Ближайшая к нам галактика, расположенная на расстоянии около 2 миллионов световых лет, относится к типу спиральных галактик

туры еще более высокого порядка — «скопления сверхскоплений», как это предполагалось в теории островной иерархической Вселенной? Оказалось — ни то, ни другое. Крупномасштабная структура Вселенной состоит из сети объемных ячеек, что-то наподобие гигантских пчелиных сот с размером ребра порядка 100 Мпк. Стенки ячеек образованы сверхскоплениями галактик, а внутри ячеек галактик почти нет. Эти области получили название пустот или войдов. На пересечении стенок расположены длинные тонкие волокна, толщиной около 10 Мпк. Эти волокна представляют собой наиболее мощные сверхскопления. А на пересечении волокон в вершинах ячеистой структуры располагаются самые крупные, богатые скопления галактик. Важно подчеркнуть, что ячеистая структура не собирается в более крупные образования, а в среднем равномерно заполняет пространство наблюдаемой Вселенной.

Подобные ячеистые структуры широко распространены на Земле, в минеральном царстве и в живой природе. Мы встречаемся с ними на Солнце в явлениях фотосферной грануляции и хромосферной сетки. И, наконец, они проявляются на самых верхних этажах структурной лестницы Вселенной. Это свидетельствует о том, что во Вселенной в явлениях самых различных масштабов — от молекул до сверхскоплений галактик действуют одни и те же законы организации материи¹¹⁸.

Вся доступная наблюдениям область Вселенной, включающая в себя галактики, их скопления и сверхскопления, собранные в ячеистую структуру, образуют систему, называемую Метагалактикой¹¹⁹.

2.1.6. Метагалактика. Итак, знакомясь с окружающей нас Вселенной, мы прошли путь от планеты Земля до Метагалактики. Чтобы лучше представить себе размер этого пути и соотношение различных структурных образований во Вселенной, воспользуемся масштабом Шкловского. Уменьшим мысленно земную орбиту до размеров первой боровской орбиты атома водорода ($0,5 \cdot 10^{-8}$ см).

¹¹⁸ Общие законы самоорганизации материи изучаются синергетикой, сравнительно молодой и очень перспективной областью науки. В последние годы в работах И. К. Розгачевой и др. развивается астросинергетика, изучающая процессы самоорганизации материи в космических масштабах.

¹¹⁹ Этот термин был предложен К. Шарлье (1862–1934) в связи с его теорией иерархической островной Вселенной для обозначения системы более высокого порядка по сравнению с Галактикой. В современной астрономии он употребляется в ином смысле (вся наблюдаемая Вселенная).

В этом масштабе 1 пк соответствует 10^{-3} см. Следовательно, расстояние до ближайших звезд будет составлять сотые доли миллиметра. Расстояние до центра Галактики составит 10 см, размер нашей Галактики — 30 см. Расстояние до Туманности Андромеды составит около 7 м, до скопления в Деве — 200 м. Размер среднего скопления галактик будет соответствовать нескольким десяткам метров, толщина волокон ячеистой структуры Метагалактики — 100 м, а линейный размер ячейки — порядка 1 км. Границы наблюдаемой области Вселенной в этом масштабе теряются где-то около 10 км. Таким образом, объем Метагалактики в сотни раз превышает объем ячейки крупномасштабной структуры.

По мере совершенствования астрономических наблюдений с применением все более крупных телескопов границы наблюдаемой Вселенной непрерывно раздвигаются. Может ли этот процесс продолжаться бесконечно? Наблюдая далекие галактики, мы видим их такими, какими они были миллиарды лет тому назад. Мы не можем видеть, как они выглядят в настоящее время (ибо для этого мы должны перенестись на несколько миллиардов лет в будущее), потому мы способны изучать только их прошлое. Таким образом, проникая все дальше и дальше в просторы Вселенной, мы погружаемся все глубже и глубже в пучину времени. Двигаясь к границам Метагалактики, мы как бы получаем развертку событий во времени. Это обстоятельство, как мы увидим ниже, кладет практический предел нашему проникновению в пространство, устанавливает своего рода горизонт, за пределы которого мы проникнуть не можем. Это связано с расширением Вселенной, о котором мы расскажем в следующем параграфе.

Рассмотрим распределение вещества в Метагалактике. В малых объемах (малых по сравнению с размером Метагалактики) вещество распределено крайне неравномерно. Действительно, подавляющая часть вещества сосредоточена в звездах, звезды группируются в скопления, образуют различные составляющие (плоскую, сферическую), межзвездное вещество в галактиках также распределено неравномер-

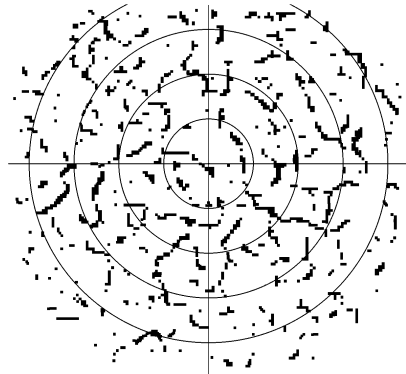


Рис. 2.1.39. Крупномасштабная структура Метагалактики

но. Сами галактики образуют группы, скопления и сверхскопления. Иное дело в больших масштабах; при осреднении по большим объемам (больше характерного размера ячеистой структуры) средняя плотность вещества остается постоянной¹²⁰. Можно провести следующую аналогию. Представим себе некое сложное химическое соединение, молекулы которого равномерно распределены в пространстве. Очевидно, если мы выделим какой-либо объем, содержащий достаточное количество молекул, средняя плотность вещества в таком объеме будет постоянной, независимо от его расположения. Но если мы проникнем внутрь этой молекулы, ситуация изменится коренным образом. В одном из выделенных объемов будут находиться одни атомы (более тяжелые), а в другом — более легкие. Далее, в самих атомах масса распределена крайне неравномерно: подавляющее часть ее сосредоточена в атомном ядре, занимающем ничтожную долю объема атома. Похожая картина наблюдается и для распределения вещества в Метагалактике, где роль «молекул» играют элементы ячеистой структуры.

Однородность Вселенной в больших масштабах — это ее важнейшее свойство, с однородностью связано расширение Вселенной — факт, имеющий ключевое значение для понимания истории ее развития. С расширением Вселенной мы и познакомимся в следующем параграфе.

2.2. Эволюция Вселенной

Выдыхание «Непознаваемой Сущности» рождает мир, а вдыхание заставляет его исчезнуть. Этот процесс продолжается извечно, и наша Вселенная есть лишь одна из бесконечных серий, не имеющих ни начала, ни конца.

«Тайная Доктрина»

Одна из важнейших (может быть, самая важная!) особенность астрономии XX века состоит в том, что она стала «насквозь» эволюционной. В течение веков в европейской культуре господствовало

¹²⁰ Средняя плотность наблюдаемого «светящегося» вещества в галактиках составляет 10^{-24} г/см³, средняя плотность в сверхскоплениях (в волокнах ячеистой структуры) — 10^{-27} г/см³. Если же «размазать» массу галактик по всему объему ячейки, средняя плотность составит $3 \cdot 10^{-31}$ г/см³. Эта величина остается постоянной для любой ячейки в любом месте Метагалактики, она и определяет среднее значение плотности «светящегося» вещества во Вселенной.

представление о стабильности Вселенной. В отличие от изменчивого мира земной природы, Небеса представлялись эталоном неизменяемости, царством непреходящего порядка, существующего от Вечности. Начиная с Канта, эволюционные идеи проникают в астрономию, но они касаются происхождения и эволюции *отдельных* небесных объектов: происхождение Солнечной системы, эволюция звезд и т.д. Что же касается Вселенной в целом, то она остается неизменной и «безразличной» по отношению к любым локальным изменениям, происходящим в отдельных ее частях — подобно кристаллу, на неизменности и совершенстве которого не сказываются внутренние молекулярные движения. Во второй четверти XX века эти представления подверглись глубочайшему изменению. «XIX век покончил с метафизической традицией в истории и биологии. На долю XX века выпало обосновать эволюционную точку зрения для мира как целого»¹²¹. Решающую роль здесь сыграло открытие фундаментального факта расширения Вселенной и появление космологических теорий эволюции Вселенной как целого. Наряду с возникшей позже, уже во второй половине века, теорией самоорганизации материи¹²², которая вводит эволюционные представления в физику, космология расширяющейся Вселенной открыла путь к становлению идеи глобального эволюционализма.

2.2.1. Вселенная расширяется

При начале периода деятельности, говорит Тайная Доктрина, в силу повиновения вечному и непреложному закону, совершается распространение этой Божественной Сущности... и феноменальный или видимый мир является конечным результатом длинной цепи космических сил, последовательно приведенных в движение. Так же, когда наступает возвращение к пассивному состоянию, происходит сокращение Божественной Сущности, и предыдущее созидание постепенно и последовательно растворяется. Видимый мир разлагается, его материя рассеивается, и единая «Тьма», еще раз одинокая, лежит над ликом «Бездны».

Е. П. Блаватская

Расширение Вселенной было открыто Э. Хабблом в 1929 г. по наблюдениям с 2,5-метровым телескопом обсерватории Маунт Вил-

¹²¹ Сахаров А. Д. Симметрия Вселенной / Будущее науки. — М.: Знание, 1968. С. 76.

¹²² Нелинейная термодинамика И. Пригожина, синергетика Г. Хакена.

сон. Это открытие основано на результатах измерения лучевых скоростей галактик. Лучевой скоростью называется составляющая полной скорости, направленная вдоль луча зрения наблюдателя. Она определяется по доплеровскому смещению спектральных линий. Если галактика удаляется от нас, все линии в ее спектре смещены в сторону красного конца, т. е. длины волн их возрастают; если галактика приближается к нам, линии смещаются к фиолетовому концу, длины волн их убывают. Величина смещения $\Delta\lambda$ зависит от лучевой скорости галактики V_r . Если эта скорость много меньше скорости света, то

$$V_r = \frac{c \Delta\lambda}{\lambda} = c \left(\frac{\lambda_{\text{набл}} - \lambda}{\lambda} \right); \quad (2.1)$$

здесь c — скорость света, $\lambda_{\text{набл}}$ — наблюдаемая длина волны, λ — лабораторная длина волны, т. е. длина волны линии в случае неподвижного источника. Зная из наблюдений величину $\Delta\lambda$, можно определить лучевую скорость V_r .

Первые измерения лучевых скоростей галактик были выполнены В. Слайфером на Ловелловской обсерватории в самом начале XX века. Уже эти измерения показали, что галактики обладают колоссальными скоростями в несколько сотен километров в секунду, во много раз превосходящими скорости звезд. Причем подавляющая часть галактик имеет положительные лучевые скорости. Это могло означать, что Солнце движется относительно наблюдаемой системы галактик со скоростью в несколько сотен км/с, или рой галактик удаляется от Солнца с той же, но противоположно направленной скоростью. Так как каждая галактика роя имеет еще свою собственную скорость, то наблюдаемая скорость галактики складывается из скорости удаления всего роя и скорости движения каждой галактики внутри роя. Чтобы разобраться в картине движения, надо было иметь лучевые скорости для большого числа галактик. Слайферу, с его 60-сантиметровым телескопом, эта задача была непосильна, он мог измерять лучевые скорости только самых близких галактик.

В конце 1920-х годов в измерение лучевых скоростей галактик включилась Маунт Вилсоновская обсерватория. Спектры галактик на 2,5-метровом телескопе получал М. Хьюматон, а расстояния до них по наблюдениям на том же телескопе определял Хаббл. В 1929 г., накопив достаточный наблюдательный материал, Хаббл сопоставил данные о лучевых скоростях галактик с расстояниями до этих галактик. Оказалось, что скорость удаления галактик пропорциональна

расстояниям до них (рис. 2.2.1). Чем дальше расположена галактика, тем с большей скоростью она удаляется от Солнца:

$$V_r = H \cdot r. \quad (2.2)$$

Эту зависимость, в честь ее первооткрывателя, стали называть законом Хаббла, а коэффициент пропорциональности — постоянной Хаббла (Hubble), которую стали обозначать буквой H . Это одна из

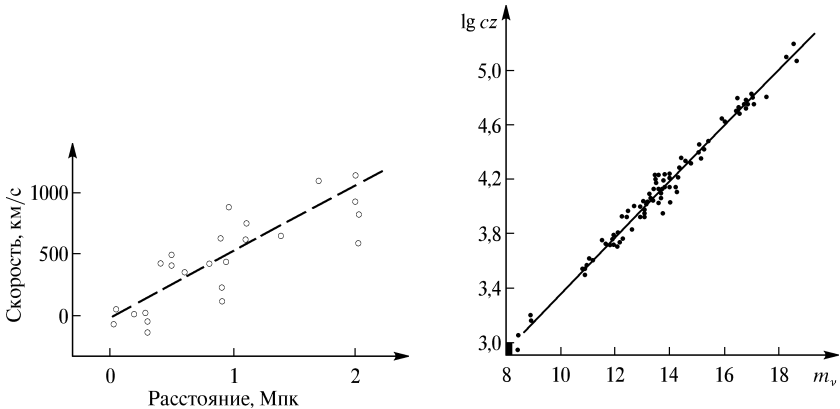


Рис. 2.2.1. Зависимость между лучевой скоростью галактик и расстоянием до них, полученная Э. Хабблом

Рис. 2.2.2. Зависимость между красным смещением и видимой звездной величиной галактик (закон Хаббла).

По данным Сендиджа и Таммана, 1981 г. черный прямоугольник в левом нижнем углу соответствует области данных, доступных Хабблу в 1929 г.

фундаментальных космологических постоянных. В настоящее время закон Хаббла проверен по огромному числу удаленных галактик и квазаров (рис. 2.2.2). Справедливость его подтверждается наблюдениями в разных диапазонах волн от радиодиапазона до рентгеновского.

Закон Хаббла означает, что вся наблюдаемая система галактик расширяется. На первый взгляд, может показаться, что, поскольку все галактики удаляются от Солнца, — наша Галактика, вместе с Солнцем, расположена в центре этого расширяющегося роя. Но на самом деле это не так. Если две галактики удаляются от третьей со скоростями, пропорциональными расстояниям до этой галактики, то и скорость их взаимного удаления также пропорциональна расстоянию между ними¹²³. Поэтому наблюдатель, в какой бы галакти-

¹²³ Если $\bar{V}_{12} = H\bar{r}_{12}$ и $\bar{V}_{13} = H\bar{r}_{13}$, то $\bar{V}_{23} = H\bar{r}_{13} - H\bar{r}_{12} = H\bar{r}_{23}$.

ке он ни находился, будет видеть, что другие галактики разбегаются от него со скоростями, пропорциональными расстояниям до этих галактик. Вся система галактик напоминает разлетающийся из улья пчелиный рой, или расширяющееся облако газа. В одной популярной книге я прочел сравнение с пирогом, напшигованным изюмом: когда пирог печется, он поднимается, расстояние между изюминками возрастает. Можно представить себе также резиновый шар с металлическими заклепками, укрепленными на его поверхности; если надувать шар, поверхность его расширяется и расстояние между заклепками увеличивается.

Расширение Вселенной характеризуется величиной красного смещения:

$$z = \frac{\lambda_{\text{набл}} - \lambda_{\text{изл.}}}{\lambda_{\text{изл.}}} \quad (2.3)$$

При малых z , когда скорость расширения мала по сравнению со скоростью света, справедливо соотношение $V = cz$, совпадающее с формулой (2.1). В этом случае, в соответствии с законом Хаббла, имеется линейная зависимость между z и r . На больших расстояниях, когда скорость расширения становится сравнимой со скоростью света, соотношение $V = cz$ не выполняется и, соответственно, зависимость между красным смещением и расстоянием отклоняется от линейной. В этом случае надо пользоваться формулами теории относительности¹²⁴, из которых следует, что при $V = c$ $z = \infty$. Таким образом, z может принимать любые значения от 0 до ∞ . Максимальное значение z , которое использовал Хаббл в 1929 г., составляло 0,004, в настоящее время наблюдаются квазары, для которых $z > 5$. Чем больше z , тем дальше от нас находится наблюдаемый объект, тем дальше в прошлое отстоит момент излучения наблюдаемого нами света. Таким образом, красное смещение характеризует как распределение объектов в пространстве в заданный момент времени, так и распределение их во времени, т. е. позволяет проследить историю Вселенной.

Несмотря на необычность результата, полученного Хабблом, он не был полностью неожиданным: предсказание о расширении Вселенной вытекало из космологических моделей, построенных на основе общей теории относительности А. Эйнштейна.

¹²⁴ При не очень сильных полях тяготения можно пользоваться формулой специальной теории относительности $z + 1 = \sqrt{\frac{c + V}{c - V}}$.

Первую космологическую модель, опирающуюся на ОТО, построил сам Эйнштейн в 1917 г. Исходя из господствовавших в то время представлений о неизменности Вселенной, Эйнштейн искал стационарное решение, в котором расстояние между любыми двумя точками в пространстве и другие параметры Вселенной не меняются со временем. Однако уравнения общей теории относительности не давали такого решения. Чтобы избежать этой «неприятности», Эйнштейн ввел в свои уравнения дополнительную величину Λ -член (лямбда-член), который описывает действующие во Вселенной гипотетические силы отталкивания. Подобно силам гравитации, эти космологические силы отталкивания носят универсальный характер, т. е. они не зависят от свойств тел, а зависят только от их взаимного расстояния. Но в отличие от сил гравитации они не убывают, а, напротив, возрастают с расстоянием, увеличиваясь пропорционально r . В обычных масштабах, с которыми мы имеем дело, и даже в астрономических масштабах вплоть до размеров Галактики, эти силы совершенно ничтожны по сравнению с силами гравитации, и их можно не учитывать. Но на космологических расстояниях силы отталкивания становятся сравнимыми с силами тяготения. Взаимодействие этих двух противоборствующих сил и определяет динамику Вселенной. При определенных условиях, при определенном расстоянии r , обе силы уравновешивают друг друга, и Вселенная остается стационарной. Именно такую модель Вселенной и построил Эйнштейн.

Мир Эйнштейна оказался стационарным, но при этом он обладал необычными геометрическими свойствами. Будучи безграничным (мы могли бы двигаться в этом мире в любом направлении сколь угодно долго и никогда не вышли бы за его предел), он имеет конечный объем. Геометрия Евклида в этом мире неприменима, здесь действует геометрия Римана. Это замкнутый мир — мир постоянной положительной кривизны. Аналогом такого трехмерного мира среди двумерных многообразий может служить поверхность сферы. Она замкнута и безгранична; двигаясь вдоль ее поверхности, двумерное существо никогда не выйдет за ее пределы. Между тем поверхность сферы конечна, она равна $4\pi R^2$. Радиус сферы R определяет постоянную положительную кривизну ($\kappa = 1/R^2$) в каждой ее точке. Геометрия на сфере (сферическая геометрия), как известно, отличается от евклидовой геометрии, действующей на плоской поверхности. Подобно тому как на сфере, двигаясь по большому кругу, можно обойти сферу и прийти в исходную точку — так же и в трехмерном замкнутом мире, двигаясь по геодезической линии¹²⁵, мы, в конце концов, обойдем этот мир и вернемся к точке старта.

Принципиальным недостатком модели Эйнштейна, как было обнаружено позже, является ее неустойчивость: малейшее изменение параметров приводит к тому, что Вселенная выходит из равновесия и больше не возвращается в это состояние. Подобные системы не могут реализоваться в Природе. В дальнейшем Эйнштейн сам отказался от своей модели и даже считал ее самой большой ошибкой в своей жизни. Но введенные

¹²⁵ Геодезическая линия есть обобщение понятия прямой на случай неевклидовой геометрии, она играет ту же роль, что и прямая в евклидовом пространстве. В частности, дуга геодезической линии, подобно отрезку прямой, определяет кратчайшее расстояние между двумя точками.

им космологические силы отталкивания сыграли очень важную роль в космологии, хотя значение их не сразу было оценено.

Силы отталкивания не зависят от плотности вещества во Вселенной. Они будут действовать и при отсутствии вещества — в вакууме. Поэтому их называют еще силами гравитационного отталкивания вакуума. Модель Вселенной, в которой, плотность вещества ничтожно мала — так называемая «пустая» модель была рассмотрена голландским астрономом В. де Ситтером сразу после появления модели Эйнштейна, в том же 1917 г. В «пустой» Вселенной действуют только силы отталкивания (силами тяготения вещества можно пренебречь), поэтому такая Вселенная будет расширяться. Причем поскольку силы отталкивания пропорциональны расстоянию, то и скорость взаимного удаления частиц вещества в «пустой» Вселенной (а под такими частицами можно подразумевать целые галактики) будет пропорциональна расстоянию. Это и есть закон Хаббла. Модель де Ситтера, в силу присущих ей «экзотических» свойств (на которых мы пока останавливаться не будем), практически не использовалась в космологии. И только спустя много десятилетий выяснилось, что с ее помощью можно описать самые ранние этапы развития Вселенной.

Задача об эволюции Вселенной в общем виде — без априорных предположений о ее стационарности или об отсутствии вещества — была решена советским математиком А. А. Фридманом в 1922 г. Единственное условие, которое Фридман положил в основу своей теории, это предположение об однородности и изотропии Вселенной. Однородность означает равномерное распределение вещества во Вселенной в больших масштабах. Как мы видели в предыдущем параграфе, это предположение подтверждается астрономическими наблюдениями. Изотропия утверждает равноценность всех направлений в пространстве. Оба предположения кажутся вполне естественными (самыми простыми) и в дальнейшем они полностью подтвердились. Основной вывод, который вытекает из полученного Фридманом решения космологических уравнений, состоит в следующем: материя во Вселенной в больших масштабах не может находиться в покое, Вселенная в целом является нестационарной, она может либо расширяться, либо сжиматься¹²⁶.

¹²⁶ В уравнениях Фридмана, как и в уравнениях Эйнштейна, имеется Λ -член. Фридман положил его равным 0. Однако это допущение не обязательно. Существуют модели с Λ -членом, не равным 0, все они дают нестационарное решение (Вселенная или расширяется, или сжимается). Эти модели также называют *фридмановскими*. Принимая те или иные значения параметров, получаем различные конкретные модели эволюции Вселенной. Так, при $\rho = 0$ получаем модель де Ситтера, при $\Lambda = 0$ — модель Фридмана, а при ускорении, равном нулю, — модель Эйнштейна. В этом смысле, как отмечает И. Д. Новиков, и модель де Ситтера, и модель Эйнштейна являются частными предельными случаями фридмановских моделей (*Новиков И. Д. Как взорвалась Вселенная*, с. 24). Можно сказать, что модель Эйнштейна является частным случаем фридмановских моделей, как покой является частным случаем движения.

Работа Фридмана имела выдающееся значение. Эйнштейн не сразу согласился с Фридманом, но затем дал высокую оценку его работе, отметив фундаментальную важность теоретического вывода о нестационарности Вселенной¹²⁷. А. А. Фридман умер в 1925 г., не дожив всего несколько лет до триумфа своей теории. Несмотря на признание и высокую оценку Эйнштейна, его работа на многие годы выпала из поля зрения не только астрономов, но и физиков-теоретиков.

В 1927 г. аббат Ж. Леметр, бельгийский астроном (ученик Эддингтона), независимо от Фридмана получил решение космологических уравнений и подтвердил вывод о нестационарности Вселенной. Таким образом, к концу 1920-х годов в космологии были получены очень важные результаты, касающиеся эволюции Вселенной. Тем не менее они не привлекли внимание астрономов. Анализируя это обстоятельство, А. С. Шаров и И. Д. Новиков отмечают, что одна из причин состояла в сложности теории и разобщенности между теоретиками и наблюдателями. Другая причина, по их мнению, — «психологическая, вероятно, состояла в необычности выводов теории, утверждавшей, например, возможность замкнутости пространства или существование начала эволюции нашего мира в прошлом. Астрономам-практикам, с помощью новых телескопов проникавшим все дальше и дальше в глубины пространства, психологически было трудно поверить в реальность таких утверждений, в корне менявших их представление о Вселенной»¹²⁸. Вот почему такое большое значение имеет работа Хаббла, экспериментально подтвердившая факт расширения Вселенной. Это открытие, несомненно, является крупнейшим достижением естествознания XX века.

Необходимо отметить, что расширение Вселенной никак не влияет на отдельные тела: расстояние между галактиками увеличивается, но размеры самих галактик (а тем более звезд и планет) остаются без изменения — подобно тому, как не меняются размеры пчел в разлетающемся рое или размеры молекул в расширяющемся облаке газа. То есть гравитационно связанные тела в расширяющейся Вселенной не подвержены космологическому расширению.

¹²⁷ По мнению советских историков астрономии А. И. Еремеевой и Ф. А. Цицина, «исторически соотношение имен “Фридман–Эйнштейн” повторило другое великое сочетание “Кеплер–Коперник”. Как и Кеплер, Фридман разрушил господствовавший в его время принцип космологии. Во времена Кеплера это была... всеобщая “одержимость округленностью”; во времена Фридмана — принцип стационарности Вселенной». (История астрономии. — М.: 1989. С. 278.)

¹²⁸ Шаров А. С., Новиков И. Д. Человек, открывший взрыв Вселенной. — М.: Наука, 1989. С. 74–75.

Каждая галактика участвует в общем космологическом расширении и имеет, кроме того, свое собственное движение. Полная относительная скорость двух галактик складывается из скорости их космологического удаления и относительной скорости собственного движения галактик. Для далеких галактик космологическая скорость намного превышает собственную скорость галактик (которой в этом случае можно пренебречь), поэтому из наблюдений далеких галактик мы получаем скорость их космологического расширения. Для близких галактик их собственная скорость сравнима со скоростью космологического расширения и может даже превышать ее. Поэтому полная скорость может сильно отличаться от космологической и может быть даже отрицательной. Так, например, Туманность Андромеды имеет отрицательную скорость, т. е. она не удаляется от нашей Галактики, а приближается к ней.

Поскольку в настоящее время Вселенная расширяется, расстояние между галактиками увеличивается, то ясно, что в прошлом они были расположены ближе друг к другу и размер наблюдаемой Вселенной (Метагалактики) был меньше. Следовательно, средняя плотность вещества была выше, т. е. условия во Вселенной в прошлом отличались от тех, которые имеют место в настоящее время. Но насколько велико это различие? Закон Хаббла сам по себе не дает ответа на этот вопрос. Здесь необходима помощь теории. Мы должны обратиться к космологическим моделям и выбрать ту из них, которая лучше соответствует наблюдениям.

Простейшей и, как казалось, наилучшим образом соответствующей наблюдениям является модель Фридмана однородной изотропной Вселенной с Λ -членом, равным нулю. В этой модели действуют только силы гравитации¹²⁹. Если в некоторый момент остановить расширение Вселенной, то в следующий момент под действием гравитации она начнет сжиматься. Поскольку в настоящее время Вселенная расширяется, значит, когда-то в прошлом, в какой-то начальный момент времени, по причине, о которой мы пока ничего не знаем, частицы вещества приобрели скорость разлета, подобно облаку газа, образовавшемуся при взрыве. В дальнейшем Вселенная расширялась по инерции, а силы тяготения тормозили расширение. Динамика Вселенной зависит от соотношения между начальной скоростью и силами тяготения, которые определяются средней плотностью вещества во Вселенной. Если плотность не превышает некоторого критического значения ($\rho \leq \rho_{кр}$), то силы тяготения

¹²⁹ В теории горячей Вселенной учитывается также давление (см. п. 2.2.2.), но на поздних стадиях расширения оно несущественно.

не в состоянии остановить расширение, и Вселенная будет расширяться неограниченно. Если $\rho > \rho_{кр}$, то силы тяготения останавливают расширение; в некоторый момент постоянно уменьшающаяся скорость расширения обращается в нуль, после чего Вселенная начинает сжиматься.

На рис. 2.2.3 показано, как изменяется с течением времени масштабный фактор $a(t)$ в рассматриваемой модели. Поскольку расстояние между любыми точками в расширяющейся Вселенной пропорционально масштабному фактору ($r(t) = r_0 a(t)$), то аналогичным образом будет меняться расстояние между двумя любыми далекими галактиками, радиус Метагалактики и, вообще, радиус любой достаточно большой сферы, выделенной во Вселенной.

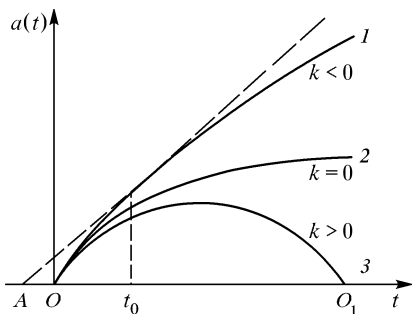


Рис. 2.2.3. Изменение масштабного фактора в модели Фридмана с Λ -членом, равным нулю.

По горизонтальной оси отложено время, по вертикальной — масштабный фактор $a(t)$: 1 — $\rho < \rho_{кр}$; 2 — $\rho = \rho_{кр}$; 3 — $\rho > \rho_{кр}$. Угол наклона касательной к кривым в любой точке этого графика определяет скорость расширения Вселенной в соответствующий момент времени. t_0 — современный момент времени. Отрезок At_0 определяет хаббловское время $1/H_0$ для открытой модели (при $\rho < \rho_{кр}$)

Такой характер изменения масштабного фактора можно понять, исходя из следующих соображений. Выделим мысленно в однородной Вселенной некую сферу произвольного, но достаточно большого радиуса, так, чтобы в ней содержалось большое число галактик. Рассмотрим «частицу» вещества (галактику), находящуюся на границе сферы¹³⁰. Она обладает определенной скоростью, с которой удаляется от центра сферы, и соответствующей кинетической энергией. Как будет двигаться такая галактика по отношению к центру сферы? В однородной Вселенной на галактику действует только тяготение вещества, расположенного внутри сферы; тяготение наружных слоев взаимно уравнивается. Следовательно, задача аналогична задаче о движении тела, например ракеты, находящейся на поверхности планеты, которой сообщили вертикальную скорость. Полная энергия E выбранной нами галактики складывается из кинетической и потенциальной, последняя определяется силами тяготения. В процессе расширения Вселенной

¹³⁰ В теории принимается, что вся масса галактик равномерно «размазана» по объему сферы и вместо «пробной» галактики рассматривается элемент объема единичной массы, находящийся на поверхности сферы. Но для понимания сути дела это уточнение несущественно.

кинетическая и потенциальная энергии изменяются, а полная энергия E остается без изменения (закон сохранения энергии). Напомним, что потенциальная энергия отрицательна, а кинетическая энергия — положительна. Полная энергия зависит от плотности. При $\rho < \rho_{кр}$ полная энергия $E > 0$; это соответствует случаю, когда ракета приобретает скорость, превышающую вторую космическую. Как известно, в этом случае она будет двигаться по гиперболической орбите, неограниченно удаляясь от планеты, причем скорость на бесконечности будет стремиться к предельному значению $V_{пред} > 0$. Так же будет вести себя и рассматриваемая нами «пробная» галактика. А поскольку мы выбрали эту галактику совершенно произвольно на поверхности выделенной сферы — так будет вести себя любая другая галактика, значит, вся сфера будет неограниченно расширяться. И так как сфера, в свою очередь, выбрана произвольно, то это относится к любой выделенной сфере во Вселенной, т. е. вся Вселенная будет неограниченно расширяться. При $\rho = \rho_{кр}$ $E = 0$; это соответствует случаю, когда ракета приобретает параболическую скорость. Вселенная будет также неограниченно расширяться, только скорость на бесконечности будет стремиться к нулю. Наконец, при $\rho > \rho_{кр}$ полная энергия $E < 0$; это соответствует случаю, когда ракета приобретает скорость меньше параболической. В этом случае она удаляется от планеты на определенное расстояние, а затем падает на нее. Подобно этому наша сфера (и любая другая сфера во Вселенной) расширяется до определенного предела, а затем начнет сжиматься. Эта аналогия позволяет понять, почему космологические уравнения без введения дополнительных сил отталкивания не дают статического решения. Ведь и ракета не может неподвижно висеть над Землей, она или улетает от нее, или падает на поверхность. Чтобы удержать ракету неподвижно, нужны дополнительные силы.

Критическая плотность, от которой зависит характер расширения Вселенной, определяет также геометрию Мира. При $\rho > \rho_{кр}$ мы имеем, как и в модели Эйнштейна, замкнутый мир постоянной положительной кривизны, в котором выполняется геометрия Римана. При $\rho = \rho_{кр}$ Вселенная пространственно бесконечна, кривизна пространства равна нулю, следовательно, в этом случае справедлива евклидова геометрия. Наконец, при $\rho < \rho_{кр}$ Вселенная тоже открыта: она бесконечно простирается во все стороны, кривизна ее постоянна и отрицательна; это мир, в котором выполняется геометрия Лобачевского. Таким образом, открытая Вселенная расширяется неограниченно, а в замкнутой Вселенной расширение сменяется сжатием; в момент остановки, когда скорость расширения становится равной нулю, радиус кривизны (и объем) Вселенной достигает максимального значения, а затем начинает уменьшаться.

Какой же сценарий имеет место в действительности? Это зависит от отношения $\rho/\rho_{кр}$. В современную эпоху $\rho_{кр} \approx 10^{-29}$ г/см³. Средняя

плотность светящегося (наблюдаемого) вещества, как мы видели, составляет $3 \cdot 10^{-31}$ г/см³. Эта величина приблизительно в 30 раз меньше критической. Если бы во Вселенной никакого другого вещества не было, мы бы имели вариант открытого бесконечно расширяющегося мира, для которого на больших масштабах справедлива геометрия Лобачевского.

Однако помимо этой наблюдаемой материи во Вселенной существует материя, которая непосредственно не наблюдается, а проявляет себя только гравитационным воздействием. Часть ее может быть обусловлена обычным веществом, сосредоточенном в «коричневых» карликах (о которых мы упоминали в п. 2.1.3), но доля его невелика. Считается, что обычное вещество, как наблюдаемое, так и ненаблюдаемое, составляет не более 5% массы Вселенной (или даже еще меньше), остальные 95% приходится на долю так называемой *темной материи* или *скрытой массы*.

Значение этого обстоятельства не всегда оценивается в должной мере. Вдумаемся — все, что мы знаем о Вселенной, основано на изучении не более 5% ее массы! А остальное для нас пока полностью сокрыто. Чтобы яснее осознать, что это значит, представим себе, что мы занимаемся реставрацией большого полотна, полностью закрытого позднейшими наслоениями. И вот нам удалось отреставрировать 5% картины. Уже проступают ясно какие-то черты пейзажа. Мы видим деревья на скалистом берегу моря, видим облака на небе, еще какие-то детали. Но мы не можем пока сказать, что представляет собою картина в целом: пейзаж, портрет с пейзажем на заднем или переднем плане, батальная эпопея или бытовая сцена. Примерно в таком же положении оказались астрономы. Дело не в том, что нам известны не все звезды или не все галактики. Для того чтобы понять строение и эволюцию Вселенной, в этом нет никакой необходимости. Дело в том, что 95% материи — это не галактики и не звезды, это не межзвездная пыль и не газ, это не плазма, состоящая из обычных частиц, из которых строятся атомы вещества. Это нечто, нам пока неизвестное и неизученное. Сказанное не означает, что наши знания о Вселенной не достоверны — нет, то, что установила наука, достаточно надежно. Но это значит, что наша картина Вселенной на сегодня еще весьма *ограничена*.

С учетом скрытой массы средняя плотность материи во Вселенной весьма близка к критической. Это означает, что кривизна пространства близка к нулю, *мы живем в евклидовом (почти евклидовом) мире*.

Какова природа скрытой массы? Это тоже до конца неизвестно. Вначале, когда проблема впервые остро встала перед космологией, предполагалось, что скрытая масса может быть обусловлена нейтрино. Долгое время после открытия нейтрино считалось, что их масса равна нулю. Однако в 1980-х годах экспериментально было обнаружено, что хотя масса нейтрино действительно очень мала, она все же отлична от нуля. Первые оценки массы нейтрино давали величину порядка $5 \cdot 10^{-32}$ г, затем они были снижены до 10^{-32} г, это в 100 тысяч раз меньше массы электрона, но вполне достаточно, чтобы объяснить всю или почти всю скрытую массу. Действительно, в 1 см^3 пространства в современную эпоху содержится около 500 нейтрино всех видов, их общая масса порядка 10^{-29} г. Однако по современным данным масса нейтрино значительно меньше, и их вклад в массу темной материи невелик. Считается, что подавляющая доля скрытой массы, до 70 %, падает на долю особой «вакуумной материи», равномерно заполняющей все пространство Вселенной. Эта материя обладает отрицательной гравитацией и является источником тех самых сил отталкивания, связанных с Λ -членом, которые были введены в модели Эйнштейна (дополнительно см. п. 2.2.3). В отличие от обычной материи, «вакуумная материя» не тормозит расширение Вселенной, а, напротив, ускоряет его. Поэтому хотя доля этой материи велика, она не может привести к образованию замкнутой Вселенной. Остается еще 30 % скрытой массы. Предполагается, что она может быть обусловлена такими гипотетическими частицами, как аксионы, нейтралы и другие суперсимметричные частицы, которые «с необходимостью» возникают в теории, но экспериментально пока не обнаружены. Иногда в этой связи указывают и на такие тоже гипотетические объекты, как «монополи», «струны», «мембраны», первичные черные дыры и даже горловины «кратовых нор», о которых мы упоминали в § 1.15. Поскольку вклад всех этих объектов точно не известен, рассматривается еще одна возможность — «зеркальное вещество».

Современная физика элементарных частиц принимает в качестве фундаментального постулата симметрию между правым и левым. Отсюда следует, что каждая частица нашего мира должна иметь свой зеркальный аналог. Из них могут быть образованы зеркальные атомы, молекулы, звезды, галактики и ... внеземные цивилизации. При этом частицы нашего мира могут взаимодействовать с частицами зеркального мира только гравитационно. По образному выражению одного из физиков, через комнату, в которой вы сейчас сидите, может проходить поезд из зеркальной материи, и никто этого не заметит, если только не будут поставлены тончайшие гравитационные эксперименты. Но поскольку зеркальное вещество подвержено тяготению, оно вносит свой вклад в скрытую массу нашего мира (как и наша материя вносит свой вклад в скрытую массу их мира). Если доля обычного вещества (барионная составляющая) в зеркальном мире такая же, как и у нас, зеркальная материя вносит 5% в скрытую массу нашего мира. Если барионная составляющая в зеркальном мире выше, то соответственно повышается и обусловленная зеркальным веществом доля скрытой массы нашего

мира. По мнению Н. С. Кардашева, доля зеркального вещества может доходить до 25 %¹³¹.

Читателя не должна смущать неопределенность приводимых здесь данных. Обсуждая проблему скрытой массы, мы не только подошли к передовому краю развития науки, но коснулись таких областей, где перед физикой встали фундаментальные проблемы, которые, возможно, существенно изменяют наши представления о мире. Развитие здесь происходит очень быстро, и когда читатель будет пробегать глазами эти строки, многое, наверное, уже изменится.

Важно подчеркнуть, что хотя мы не знаем точно, какова плотность материи во Вселенной — больше критической или меньше, но она заведомо *близка* к критической. (Именно потому, что плотность близка к критической, трудно выбрать между двумя альтернативными вариантами.) Также надо иметь в виду, что описанный выше характер расширения Вселенной справедлив для модели с Λ -членом, равным нулю. Наличие «вакуумной материи» означает, что Λ -член не равен нулю. Если это так, то истинный характер расширения должен отличаться от описанного выше.

Каков бы ни был характер расширения Вселенной, в начальный момент ($t = 0$) масштабный фактор $a(t)$ обращается в нуль (см. рис. 2.2.3). Для замкнутой Вселенной это означает, что ее объем в начальный момент был равен нулю, и значит, она начала расширяться из точки (!). Что касается бесконечной Вселенной, то она всегда остается бесконечной, но любая ее конечная область (в том числе наша Метагалактика) в начальный момент тоже имела нулевой объем. Плотность вещества в этот момент была бесконечной, а скорость расширения стремилась к скорости света. Это состояние бесконечной плотности получило название «сингулярного состояния». Таким образом, в начальный момент Вселенная расширяется из сингулярного состояния с предельно большой скоростью. Процесс «возникновения» Вселенной из сингулярности Леметр назвал Большим взрывом.

Какова природа сингулярного состояния, реализуется ли оно в действительности? Как близко можно подойти к этому состоянию, изучая историю Вселенной? Что означает «возникновение» Вселенной при $t = 0$? Что было до этого момента? Эти фундаментальные

¹³¹Кардашев Н. С. Космология и цивилизации / Древняя астрономия: небо и человек. — М., 1998. С. 158–168. *Он же*. Скрытая масса и поиск внеземных цивилизаций / Препринт ФИАН № 65. — М., 1999.

проблемы космологии не получили пока окончательного решения. Однако за пределами сингулярности теория хорошо согласуется с наблюдениями.

Возникает вопрос — как давно произошел Большой взрыв? Оказывается, можно определить этот момент, зная значение постоянной Хаббла¹³². Если Вселенная расширяется с постоянной скоростью, равной ее современному значению, то время расширения от момента $t = 0$ до современного момента t_0 равно $t_H = 1/H_0$ (H_0 — значение постоянной Хаббла в современную эпоху)¹³³. Это время называется хаббловским временем. Фактически время расширения будет отличаться от хаббловского. Для модели с Λ -членом, равным нулю, в случае $\rho = \rho_{кр}$, что, как мы видели, близко к действительности:

$$t_0 = \frac{2}{3} \frac{1}{H_0} = \frac{2}{3} t_H. \quad (2.4)$$

Если постоянную Хаббла H_0 выражать, как это принято в наблюдательной астрономии, в единицах (км/с)/Мпк, а время t_H — в годах, то $t_H = 10^{12}/H_0$. Точное значение H_0 не известно, но из наблюдений следует, что H_0 заведомо не превышает 100 (км/с)/Мпк, и не меньше, чем 50 (км/с)/Мпк. Более точная оценка H_0 : в пределах от 65 до 80 (км/с)/Мпк. Отсюда $t_H = 10 \div 20$ млрд лет, или более точно $12 \div 15$ млрд лет, а $t_0 = 8 \div 10$ млрд лет. Здесь опять-таки следует иметь в виду, что и эти оценки справедливы при условии $\Lambda = 0$. В последнее время появляется все больше свидетельств того, что Λ -член не равен нулю и, более того, связанные с ним силы отталкивания приводят к тому, что Вселенная в современную эпоху расширяется *ускоренно*. Если это так, то возраст Вселенной (время от момента t_0 до современного момента) должен быть больше хаббловского.

¹³² Во фридмановских моделях постоянная Хаббла $H = \frac{1}{r} \frac{dr}{dt}$ есть функция времени: $H = H(t)$. При заданном значении $t = t_0$ она принимает фиксированное значение $H(t_0) = H_0$, т. е. не зависит от пространственных координат. Именно в этом смысле она и является постоянной. То, что это подтверждается наблюдениями (закон Хаббла), означает, что во Вселенной достаточно хорошо выполняются условия однородности и изотропии, из которых следует независимость H от пространственных координат.

Заметим, что в модели де Ситтера H не зависит от времени: $H = \text{const}$, а в модели Эйнштейна $H = 0$ (это следует из условия стационарности: $V\dot{r} = H\dot{r} = 0$). Таким образом, модель де Ситтера есть частный случай фридмановских моделей при $H(t) = \text{const}$; если константа равна нулю, то получаем модель Эйнштейна.

¹³³ $t_H = a_0/V_0$ (a_0 — значение масштабного фактора в современную эпоху). С другой стороны, $V_0 = a_0 H_0$ (закон Хаббла), следовательно, $t_H = 1/H_0$.

Наличие сингулярности приводит к существованию горизонта Вселенной. Чем дальше от нас находится наблюдаемый объект, тем ближе к началу расширения Вселенной относится момент времени, когда был испущен свет, достигающий сейчас наблюдателя. Точки в пространстве, от которых до нас доходит свет, испущенный в момент начала расширения ($t = 0$), и образуют горизонт Вселенной. Горизонт охватывает лишь часть Вселенной, а в случае открытой Вселенной за его пределами находится бесконечное пространство. И тем не менее, ни один объект за горизонтом не может наблюдаться даже с помощью самого совершенного телескопа, ибо за все время существования Вселенной свет, испущенный любым из этих объектов, еще не успел достичь наблюдателя. Эти объекты станут доступными для наблюдения в будущем, когда свет от них дойдет до наблюдателя. Следовательно, горизонт со временем расширяется. В современную эпоху радиус горизонта $R_{\text{гор}} = c/H_0$; в зависимости от значения постоянной Хаббла он составляет $10 \div 20$ млрд св. лет. На горизонте красное смещение становится бесконечным, а скорость расширения равна скорости света.

Сколь близко астрономы подошли к горизонту Вселенной? Если в начале XX века область Метагалактики, для которой были определены расстояния, составляла менее 1 % от радиуса горизонта, то сейчас она превысила 50 %. Расстояние до далеких объектов (с $z > 1$) выражается формулой

$$r(z) = R_{\text{гор}} \left(1 - \frac{1}{\sqrt{1+z}} \right) \quad (2.5)$$

При $z \rightarrow \infty$ $r(z) \rightarrow R_{\text{гор}}$. Наиболее далекие из обнаруженных к настоящему времени объектов имеют z порядка $5 \div 6$. При $z = 6$ отношение $r(z)/R_{\text{гор}} = 0,62$. Свет, который мы сейчас наблюдаем от этого объекта, был испущен, когда Вселенная была в 18,5 раза моложе и в 7 раз компактнее, чем сейчас. (Здесь мы использовали соотношения: $r_{\text{набл}}/r_{\text{изл}} = 1 + z$; $t_{\text{набл}}/t_{\text{изл}} = (1 + z)^{3/2}$, справедливые для модели Фридмана при $\rho = \rho_{\text{кр}}$ на достаточно поздних стадиях расширения, когда давлением излучения можно пренебречь.)

Вблизи горизонта незначительному приращению расстояния соответствует большое изменение z и, следовательно, существенное продвижение в прошлое Вселенной. При этом возможна ситуация, когда из двух объектов более удаленный сейчас в момент излучения находился ближе к нам, чем более близкий (в момент его излучения). Действительно, свет от более удаленного объекта был излучен давно, когда Вселенная была сильно сжата, и все расстояния в ней, в том числе расстояние от объекта до наблюдателя, были существенно меньше. Свет же от более близкого объекта был излучен не так давно, Вселенная была тогда не столь сжата,

и его расстояние от наблюдателя не сильно отличается от современного, поэтому он в момент излучения был дальше от наблюдателя, чем более удаленный объект в момент его излучения. Так в расширяющейся Вселенной проявляется относительность понятий «близкое» и «далекое»: близкое становится далеким и далекое близким.

Проиллюстрируем сказанное следующим примером. Рассмотрим две галактики с красными смещениями $z_1 = 2$ и $z_2 = 5$. Используя формулу (2.5), получим $r_{2\text{набл}}/r_{1\text{набл}} = 1,40$. В момент излучения первая галактика была в 3 раза ближе к нам, чем сейчас, а вторая — 6 раз ближе. Следовательно, расстояние этих галактик в момент излучения было $r_{2\text{изл}}/r_{1\text{изл}} = 1,40 : 6 \times 3 = 0,70$.

Как долго длится сингулярное состояние? Длится ли оно бесконечно долго от $t = -\infty$ до $t = 0$, когда Вселенная «вдруг» начинает расширяться, или это короткий, неизмеримо короткий миг? Теория Фридмана не дает ответа на этот вопрос. Более того, теоретики утверждают, что вопрос не имеет смысла, ибо в сингулярности не только не действуют все известные нам физические законы, но и само понятие времени из-за квантовых эффектов становится неопределенным. Пусть так. Но как бы там ни было, она как бы возникает из Небытия, проявляется из какого-то непостижимого для нас сингулярного состояния. Этот факт рождения Вселенной при $t = 0$ и, следовательно, ее конечность во времени представляет серьезную проблему в плане философского осмысления Мира.

Если допустить, что сингулярность длится конечное время (с точки зрения «несингулярного» наблюдателя), то, опуская вопрос о том, что творится в самой сингулярности, правомерно спросить — а что было *до* сингулярного состояния? Возможно, что когда-то, в бесконечно далеком прошлом, Вселенная сжималась из крайне разреженного состояния, плотность ее со временем увеличивалась до тех пор, пока постоянно уменьшающийся масштабный фактор при $t = 0$ ни обратился в нуль — Вселенная перешла в сингулярное состояние, после чего начала расширяться. Мы живем на стадии расширения, которая в случае открытой модели будет продолжаться бесконечно долго. Этот сценарий снимает трудность с возникновением Вселенной — Вселенная существует вечно (от «минус бесконечности» до «плюс бесконечности»). При этом она один раз проходит через сингулярное состояние.

Что происходит в момент, когда Вселенная проходит через сингулярность? А. Д. Сахаров, исходя из законов симметрии, предположил, что при прохождении через сингулярность все частицы заменяются на античастицы, все пространственные конфигурации

частиц изменяются на зеркально отраженные, а течение времени меняется на обратное¹³⁴ (рис. 2.2.4). При этом «сверхкомбинированная», так называемая СРТ-симметрия Мира сохраняется. Таким образом, все явления и тела до момента сингулярности являются

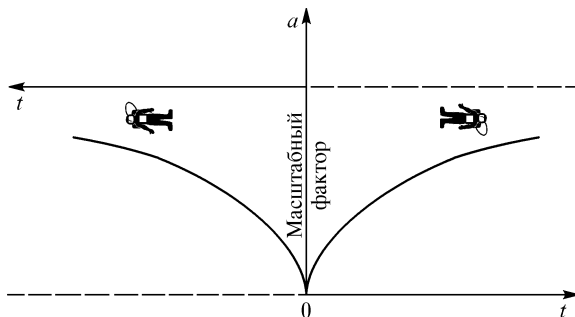


Рис. 2.2.4. Гипотетическая модель сжатия Вселенной от состояния бесконечно малой плотности до сингулярности с последующим неограниченным расширением.

По вертикальной оси отложен масштабный фактор, по горизонтальной — время. Согласно гипотезе А.Д.Сахарова, при прохождении через сингулярность частицы меняются на античастицы, левое на правое, и ход течения времени меняется на обратный. Нижняя горизонтальная линия изображает ход течения времени в нашем мире, верхняя — в антимире

точной зеркальной копией тел и явлений после этого момента с заменой частиц на античастицы и с заменой направления течения процессов. С нашей точки зрения, Мир до сингулярности (Антимир) существовал в далеком прошлом, когда Вселенная еще сжималась. Но с точки зрения обитателей Антимира (не хочется называть их антилюдьми, хотя они состоят из антивещества и имеют сердце с правой стороны) — это наш Мир существует в их далеком прошлом, причем наш Мир, следуя направлению их времени, сжимается, а их Мир — расширяется. «Фактически ОНИ — это МЫ (или МЫ — это ОНИ), так как с точностью до условного определения знака времени, условного отличия правого от левого и условного отличия вещества от антивещества, отраженный мир не отличается от нашего»¹³⁵.

В случае замкнутой Вселенной расширение, как мы видели, сменяется сжатием. В конце стадии сжатия Вселенная приходит в сингулярное состояние, такое же, из которого она начала расширяться.

¹³⁴ Сахаров А. Д. Симметрия Вселенной / Будущее науки. — М.: Знание, 1968. С. 74–96.

¹³⁵ Сахаров А. Д. Цит. работа. С. 92.

Следовательно, те же силы и те же причины, которые привели к расширению Вселенной в начальный момент времени, теперь снова заставят ее начать расширяться. В конце нового цикла картина вновь повторится и т. д. Мы получим, таким образом, вечно существующую пульсирующую Вселенную, в которой периоды расширения-сжатия разделены сингулярностями. Если каждый раз в сингулярности происходит замена Мира на Антимир (как описано выше), то эволюция Вселенной во времени будет представлять собой чередующуюся вереницу миров и антимиров, между которыми Вселенная пребывает в сингулярном состоянии. Возможность существования пульсирующей модели Вселенной была ясна еще Фридману. В связи с этим он вспоминал сказания индусской мифологии о периодах жизни. Действительно, в индусской мифологии и в древнеиндийской философии существует представление о периодическом процессе проявления (манифестации) Вселенной, в котором активные процессы — Манвантары чередуются с пассивными периодами — Пралайями, образуя циклы различного масштаба длительности¹³⁶. Самый крупный цикл — Махакальпа составляет $311\,040\,000\,000\,000 \approx 3 \cdot 10^{14}$ лет. Махакальпа — это Век Брам, он состоит из 100 Годов Брам. Каждый Год делится на 360 суток (360 Дней и 360 Ночей Брам). Одни Сутки Брам равны $8\,640\,000\,000$ лет, а одна секунда в этом масштабе времени составляет 100 000 земных лет. Обращает внимание, что Сутки Брам по порядку величины близки к длительности расширения во Фридмановской Вселенной ($8 \div 10$ млрд. лет). Если принять, что длительность расширения t_0 в точности равна Суткам Брам, то получим постоянную Хаббла $H_0 = 77$ (км/с)/Мпк, что попадает как раз внутрь интервала неопределенности для H_0 : $65 \div 80$ (км/с)/Мпк.

Привлекательной чертой пульсирующей модели является то, что она позволяет избежать проблемы Генезиса Вселенной. Однако некоторые космологи указывают, что это не так. Дело в том, что в каждом цикле Вселенной как в период расширения, так и в период сжатия происходит рост энтропии (которая в конечном итоге определяется числом фотонов, приходящихся на один нуклон). Если накопленная в данном цикле энтропия сохраняется при переходе через сингулярность, то в каждом следующем цикле энтропия будет выше, а следовательно, максимальный

¹³⁶ Представления о периодическом процессе возникновения, уничтожения и нового возрождения Вселенной развивались также древнегреческими философами Гераклитом Эфесским (VI век до н. э.) и позднее, уже в III веке нашей эры, известным христианским богословом и философом Оригеном (см. с. 340).

радиус кривизны (связанный с энтропией) и период пульсации будут больше, чем в предыдущем (рис.2.2.5). То есть будет происходить «раскачка» Вселенной. Необходимая для раскачки положительная энергия берется за счет отрицательной энергии гравитационного поля, а полная энергия, равная сумме положительной и отрицательной энергии, не меняется, т. е. закон сохранения энергии при переходе от цикла к циклу

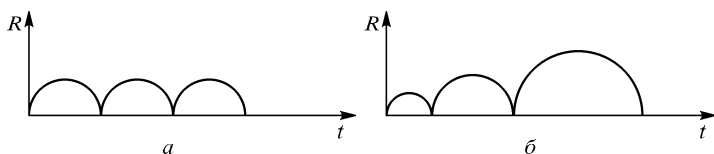


Рис. 2.2.5. Изменение масштабного фактора в осцилирующей модели Вселенной: а) без увеличения энтропии; б) с увеличением энтропии

выполняется. Если бы пульсирующая Вселенная существовала бесконечно долго в прошлом, то за бесконечное число пульсаций должна была накопиться бесконечная энтропия. Но этого нет. Следовательно, с момента возникновения Мира прошло конечное число пульсаций, т. е. мы снова возвращаемся к проблеме Начала, только отодвигаем его во времени. Следует отметить, что эти рассуждения справедливы, если энтропия при прохождении через сингулярность сохраняется. Предположение — далеко не очевидное, если учесть, какие глубокие преобразования происходят в сингулярности.

Мы рассмотрели механическую картину эволюции Вселенной, не касаясь физики процессов. Теперь нам следует обратиться к физике.

2.2.2. Горячая Вселенная

Была Тьма: скрытое сперва во Тьме все это было бесформенным Хаосом. Все, что существовало тогда, было пустым и бесформенным. Великой силой тепла рождено было это Единое.

Ригведы «Песнь Творения»

На ранней стадии эволюции Вселенной, в первые минуты после начала расширения, плотность вещества была очень велика. При такой плотности должны были протекать ядерные реакции. Характер их существенным образом зависит от температуры. Была ли Вселенная в это время холодной или горячей?

Исторически первой еще в 1930-е годы была рассмотрена модель холодной Вселенной. Предполагалось, что все вещество существовало в виде холодных нейтронов. Однако, как выяснилось позднее, в такой Вселенной в результате цепочки ядерных реакций (с

образованием протона, дейтерия и т. д.) все вещество, в конце концов, превратилось бы в гелий. Это противоречит наблюдениям, поскольку подавляющая часть вещества Вселенной состоит из водорода. Другой вариант теории холодной Вселенной был предложен Я. Б. Зельдовичем в начале 60-х годов. Он предполагал, что первоначально холодное вещество Вселенной состояло из смеси протонов, электронов и нейтрино. При расширении Вселенной такая смесь должна была превратиться в чисто водородную плазму. Что касается гелия и других химических элементов, то, согласно этой гипотезе, они синтезировались много позднее, после того, как образовались звезды. В отношении всех элементов, кроме гелия, это справедливо. Но обилие гелия (30 % от всего вещества Вселенной по массе) невозможно объяснить ядерными реакциями в звездах.

Модель горячей Вселенной была предложена российско-американским физиком Г. Гамовым в 1948 г. Гамов стремился объяснить происхождение *всех* химических элементов ядерными реакциями, которые протекали в горячем веществе ранней Вселенной при ее расширении. Это была неверная посылка, ибо, как мы теперь знаем, элементы тяжелее гелия образуются в звездах. Однако сама идея о горячей Вселенной оказалась правильной.

Один из выводов, который вытекал из теории Гамова, состоял в том, что в настоящее время во Вселенной, помимо излучения звезд (и других источников), должно существовать электромагнитное излучение, образовавшееся в ту далекую эпоху, когда никаких звезд еще не было, а Вселенная представляла собой однородную горячую плазму. В этой плазме, состоящей, в основном, из электронов и протонов, все частицы, тесно взаимодействуя, находились в равновесии между собой и с излучением. При взаимодействии протонов и электронов образовывались нейтральные атомы, но они тут же разрушались под действием квантов электромагнитного излучения. Процессы ионизации уравнивались рекомбинациями, и вся эта плазма вместе с излучением, участвуя в общем космологическом расширении Вселенной, постепенно охлаждалась. Когда температура ее упала до 4000 К, энергия квантов стала уже недостаточной, чтобы ионизовать вещество. Равновесие нарушилось, процессы рекомбинации стали преобладать над ионизацией — в результате рекомбинации образовалось нейтральное вещество. С этого момента Вселенная стала прозрачна для излучения. Излучение практически перестало взаимодействовать с веществом, оно как бы отделилось от него и стало эволюционировать независимо. Эволюция вещества привела к образованию того сложного, многообразного Мира, в

котором мы живем. А излучение продолжало равномерно заполнять все пространство, только плотность его с расширением Вселенной уменьшалась, и температура тоже падала. В настоящее время температура этого реликтового излучения¹³⁷, согласно расчетам Гамова и его сотрудников, должна составлять несколько кельвинов. Если бы мы могли наблюдать это излучение, мы бы получили информацию о далекой, дозвездной стадии эволюции Вселенной, когда в результате рекомбинации образовалось нейтральное вещество.

Несмотря на столь фундаментальный вывод, вытекающий из теории Гамова, никто не пытался его проверить. Видимо, все эти теоретические построения представлялись экспериментаторам слишком отвлеченными, далекими от действительности. (Игра ума теоретиков! Разве можем мы знать, что происходило во Вселенной в такую отдаленную эпоху?!) Надо сказать, что сам Гамов не надеялся на обнаружение реликтового излучения, так как полагал, что оно полностью маскируется излучением звезд, возникших на более поздней стадии эволюции Вселенной. В 1964 г. советские астрофизики А. Г. Дорошкевич и И. Д. Новиков показали, что хотя общее количество энергии реликтового излучения сравнимо с излучением галактик, но в сантиметровом и миллиметровом диапазонах радиоволн оно значительно превышает излучение всех остальных радиисточников и, следовательно, его можно обнаружить. Эта работа еще не была в полной мере осознана, когда в 1965 г. реликтовое излучение было открыто чисто случайно американскими физиками Р. Вилсоном и А. Пензиасом с помощью 7-метровой рупорной антенны, предназначенной для наблюдения искусственного спутника Земли «Эхо». Таким образом, теория горячей Вселенной получила экспериментальное подтверждение, а Пензиас и Вилсон за открытие реликтового излучения были удостоены Нобелевской премии.

Максимум энергии реликтового излучения приходится на длину волны около 1 мм, а распределение энергии по спектру соответствует чернотельному излучению с температурой около 3 К. Как уже отмечалось, реликтовое излучение равномерно заполняет все пространство. В современную эпоху плотность энергии реликтового излучения составляет приблизительно $5 \cdot 10^{-13}$ эрг/см³, энергия одного фотона около 10^{-15} эрг, следовательно, в одном кубическом сантиметре

¹³⁷ Название «реликтовое» было предложено И. С. Шкловским позднее, когда это излучение уже было обнаружено.

содержится 500 фотонов реликтового излучения. Это очень большая величина. Для сравнения напомним, что концентрация атомов водорода — самого распространенного элемента, в котором сосредоточена практически вся «вещественная» масса Вселенной, составляет $3 \cdot 10^{-7} \text{ см}^{-3}$ (один атом водорода или один протон на несколько кубических метров). Следовательно, отношение числа фотонов к числу частиц вещества порядка 10^9 , т. е. на каждый атом вещества приходится миллиард реликтовых фотонов. Согласно соотношению Эйнштейна эквивалентности массы и энергии ($E = mc^2$), плотности энергии реликтового излучения $\epsilon_{\text{изл}} = 5 \cdot 10^{-13} \text{ эрг/см}^3$ соответствует плотность массы $\rho_{\text{изл}} = 5 \cdot 10^{-34} \text{ г/см}^3$, что приблизительно в 1000 раз меньше, чем плотность массы обычного вещества $\rho_{\text{вещ}} = 3 \cdot 10^{-31} \text{ г/см}^3$. Таким образом, хотя по числу частиц реликтовых фотонов в миллиард раз больше, чем частиц вещества, они дают вклад в плотность Вселенной в 1000 раз меньший. Это относится к современной эпохе. Но так было не всегда. Дело в том, что при расширении Вселенной концентрация частиц и плотность вещества убывает пропорционально a^{-3} (напомним, что a — масштабный фактор); концентрация фотонов также убывает пропорционально a^{-3} , но, помимо этого, из-за красного смещения частота излучения и, следовательно, энергия ($E = h\nu$) каждого фотона убывает как a^{-1} . Значит, плотность излучения убывает пропорционально a^{-4} , т. е. быстрее, чем для вещества. Отношение $\rho_{\text{вещ}}/\rho_{\text{изл}} \propto a(t)$. В современную эпоху оно равно 10^3 , но с течением времени, по мере возрастания масштабного фактора из-за расширения Вселенной, эта величина будет расти. Напротив, в прошлом отношение $\rho_{\text{вещ}}/\rho_{\text{изл}}$ было меньше, чем сейчас. В эпоху, когда масштабный фактор (а значит, и размер Метагалактики) был в 1000 раз меньше современного значения, плотность вещества равнялась плотности излучения. Это соответствует эпохе, когда с начала расширения Вселенной прошло около 300 000 лет. При $t > 3 \cdot 10^5$ лет $\rho_{\text{вещ}} > \rho_{\text{изл}}$, плотность Вселенной определяется веществом; этот период развития Вселенной, в который живем и мы с вами, называется *эрой вещества*. При $t < 3 \cdot 10^5$ лет $\rho_{\text{изл}} > \rho_{\text{вещ}}$, плотность Вселенной определяется излучением; соответствующая эра в развитии Вселенной называется *эрой излучения*.

Выше речь шла о *плотности* вещества и излучения. Что касается отношения числа фотонов к числу частиц вещества, то, поскольку концентрация и тех и других с расширением Вселенной падает как a^{-3} , отношение $n_{\text{фот}}/n_{\text{вещ}}$ со временем не меняется и равно 10^9 . Возникает вопрос — почему это отношение столь велико? Ведь, если в

горячей Вселенной на раннем этапе все частицы находились в равновесии, то число частиц разного типа должно было быть примерно равным. Но как только мы задумываемся над этим вопросом, возникает другой, гораздо более важный вопрос — а почему, вообще, существует вещество в нашей Вселенной? Ведь если когда-то все частицы находились в равновесии, то число частиц должно было равняться числу античастиц. Почему же тогда образовалось только вещество, куда делось антивещество? Конечно, для нас это обстоятельство весьма благоприятно, ибо если бы во Вселенной существовало в равных количествах вещество и антивещество, то в какой-то момент оно должно было аннигилировать, и тогда весь Мир состоял бы только из излучения. Разгадка этих проблем, как оказалось, кроется в самых ранних этапах эволюции Вселенной, когда после сингулярности прошли ничтожные доли секунды.

Как близко можно подойти к сингулярности, двигаясь назад во времени, и как определить условия в *ранней* Вселенной? Теория горячей Вселенной дает простые соотношения для масштабного фактора, плотности и температуры в любой момент времени для ранней Вселенной:

$$a(t) \propto t^{1/2}; \quad \rho(t) \propto a^{-4} \propto t^{-2}; \quad T \propto a^{-1} \propto t^{-1/2}$$

или:

$$\rho(t) = \frac{5 \cdot 10^5}{t^2} \text{ г/см}^3; \quad T = \frac{10^{10} \text{ К}}{\sqrt{t}}; \quad a(t) = a(t_0) \frac{3\text{К}}{T}.$$

Здесь t — время в секундах, отсчитываемое от сингулярности, t_0 — современный момент времени.

В своей замечательной книге «Первые три минуты»¹³⁸, изданной в 1977 г., С. Вайнберг начинает историю Вселенной с момента $t = 0,01$ с, когда температура составляла 10^{11} К (в 10 тыс. раз выше, чем в недрах Солнца). Современные космологи идут гораздо дальше, они начинают с момента $t = 3 \cdot 10^{-44}$ с. Это так называемое планковское время. Дальше к сингулярности двигаться уже невозможно, ибо здесь начинают сказываться квантовые эффекты, и привычное нам понятие времени теряет смысл. Мы начнем описание истории горячей Вселенной с момента $t = 10^{-34}$ с; более ранний период будет рассмотрен в следующем пункте.

¹³⁸ Вайнберг С. Первые три минуты. Современный взгляд на происхождение Вселенной. — М.: Энергоиздат, 1981.

При $t = 10^{-34}$ с температура составляла 10^{27} К, радиус Метагалактики равнялся 30 см (!), а плотность составляла 10^{74} г/см³. Температуру $T = 10^{27}$ К называют температурой великого объединения, ибо при этой температуре стирается различие между тремя видами физических взаимодействий — электромагнитным, сильным и слабым. Существует Единое физическое взаимодействие, проявлением которого при меньшей температуре является электрослабое и сильное взаимодействие. Но здесь нам придется сделать небольшой экскурс в физику элементарных частиц.

Все многообразие физических сил и взаимодействий, существующих в природе, сводится к четырем основным взаимодействиям: гравитационному, электромагнитному, слабому и сильному. Гравитационное взаимодействие — сила всемирного тяготения действует на все тела и частицы. По сравнению с другими взаимодействиями, оно очень слабо и в мире элементарных частиц практически не называется. Тяготение становится заметным на больших расстояниях и для тел достаточно большой массы. Электромагнитные силы определяют взаимодействие между заряженными частицами. Было время, когда электрические и магнитные явления, известные с незапамятных времен, рассматривались как совершенно независимые. Но затем была установлена тесная взаимосвязь между ними: движение электрических зарядов порождает магнитное поле, а изменение магнитного поля создает электрический ток. В теории Максвелла электрические и магнитные явления были объединены в единое электромагнитное взаимодействие. Слабые взаимодействия характеризуют все типы процессов с элементарными частицами, в которых принимают участие нейтрино. Они, в частности, ответственны за распад нейтрона и, следовательно, за процессы радиоактивного распада. В отличие от гравитационного и электромагнитного взаимодействий, которые изменяют только внешнее состояние движения частиц, слабое взаимодействие меняет внутреннюю природу самих частиц (например, нейтрон превращается в протон, электрон и нейтрино). В обычных условиях слабое взаимодействие слабее электромагнитного и тем более сильного (отсюда и его название), но оно значительно сильнее гравитационного взаимодействия. Наконец, сильное взаимодействие характеризует ядерные силы, которые удерживают протоны и нейтроны в атомных ядрах. Важной особенностью сильных и слабых взаимодействий является то, что они действуют только на очень малых расстояниях. Радиус действия ядерных сил порядка 10^{-13} см, а радиус действия «слабых» сил порядка 10^{-16} см. Поэтому в обычных масш-

табах эти силы не сказываются, здесь действуют только гравитационные и электромагнитные силы.

В соответствии с типами взаимодействий, все элементарные частицы делятся на два больших класса: сильно взаимодействующие частицы, или адроны, и частицы, не участвующие в сильных взаимодействиях, — лептоны. К последним относятся: электрон, мюон, тау-лептон и три вида нейтрино — электронное, мюонное и тау-нейтрино (а также соответствующие античастицы). Что касается адронов, то в последние десятилетия было установлено, что они, строго говоря, не являются элементарными частицами: адроны состоят из фундаментальных частиц — кварков. В обычных условиях (т. е. в тех условиях, которые имеют место во Вселенной в современную эпоху) кварки в свободном виде не встречаются, они существуют только в составе адронов. Силы, которые удерживают кварки в составе адронов, также относятся к сильному взаимодействию. Адроны, в свою очередь, подразделяются на два типа частиц: мезоны и барионы. Каждый мезон состоит из кварка и антикварка, а барион — из трех кварков. К барионам относятся протоны, нейтроны и нестабильные частицы — гипероны. Полное число имеющих в системе барионов минус число антибарионов определяет барионный заряд. Если число барионов равно числу антибарионов, то барионный заряд равен нулю.

Физические взаимодействия осуществляются с помощью особых частиц-переносчиков. Переносчиками гравитационного взаимодействия являются кванты гравитационного поля — гравитоны, переносчиками электромагнитного взаимодействия — фотоны, а переносчиками сильного взаимодействия — глюоны. В отличие от частиц материи — фермионов, к которым относятся и адроны, и лептоны, частицы-переносчики называются бозонами. К ним относятся фотоны, гравитоны, глюоны и другие виды бозонов. Так, переносчиками слабого взаимодействия являются три вида частиц: W^+ , W^- и Z^0 -бозоны. Эти частицы обладают большой массой и для их образования надо затратить очень большую энергию. При температуре $T > 10^{15}$ К, когда энергия частиц превышает 100 ГэВ, W^+ , W^- и Z^0 -бозоны рождаются столь же легко, как и γ -кванты. При этих условиях исчезает различие между слабым и электромагнитным взаимодействиями, и они объединяются в единое электрослабое взаимодействие. При еще более высокой температуре $T = 10^{27}$ К, когда энергия частиц составляет 10^{14} ГэВ, исчезает различие между силь-

ным и электрослабым взаимодействием, и они объединяются в единое универсальное взаимодействие (взаимодействие великого объединения). Переносчиками этого взаимодействия являются сверхтяжелые частицы X и Y -бозоны. С их помощью кварки могут превращаться в лептоны и антикварки, т. е. стирается грань между основными типами элементарных частиц.

Теперь мы можем вернуться к ранней Вселенной в момент, когда от начала расширения прошло 10^{-34} секунды. При $t < 10^{-34}$ с температура $T > 10^{27}$ К, т. е. больше температуры великого объединения. При такой температуре адроны распадаются на кварки, значит, сильно взаимодействующие частицы существуют только в виде свободных кварков. Вселенная состоит из кварков, лептонов и фотонов. Все частицы находятся в равновесии, кварки свободно переходят в лептоны и наоборот, частицы переходят в античастицы. Число частиц равно числу античастиц, в том числе число кварков равно числу антикварков. Полный электрический заряд и барионный заряд равны нулю. Эта чудовищно горячая динамичная смесь взаимопревращающихся частиц и есть та Первичная «Огненная» Субстанция Физического Мира, из которой, в конце концов, возникает известная нам Вселенная со всем многообразием существующих в ней форм материи. Рассмотрим главные этапы эволюции горячей Вселенной.

При $t > 10^{-34}$ с температура падает ниже 10^{27} К. При такой температуре тяжелые X -бозоны не образуются, а существующие начинают распадаться. Теперь уже кварки не могут превращаться в лептоны, происходит разделение великого взаимодействия на сильное и электрослабое. Одновременно, благодаря несимметрии в свойствах частиц и античастиц, при распаде X -бозонов нарушается равновесие между кварками и антикварками. Возникает избыточный барионный заряд, равный 10^{-9} на одну частицу. Это значит, что число барионов на одну миллиардную часть превосходит число антибарионов. Но именно эта ничтожная разница в числе барионов и антибарионов приводит впоследствии к возникновению мира из вещества. Как это происходит?

Прежде всего при температуре порядка $3 \cdot 10^{12}$ К кварки объединяются в ядерные частицы — образуются протоны и нейтроны. При этом барионный заряд сохраняется, т. е. число нуклонов¹³⁹ на одну миллиардную превышает число антинуклонов. Так как пол-

¹³⁹ Нуклон — общее название ядерных частиц: протона и нейтрона.

ный электрический заряд остается равным нулю, то имеется также небольшой избыток электронов над позитронами порядка 10^{-9} , отрицательный электрический заряд которых компенсирует положительный заряд избыточных протонов. Этот избыток электронов возник одновременно с возникновением избыточного барионного заряда. Почти сразу же после образования ядерных частиц при $T \approx 10^{12}$ К ($t = 10^{-4}$ с) происходит аннигиляция нуклонов и антинуклонов. При этом остаются только избыточные нуклоны, для которых не хватило соответствующих античастиц. Эти избыточные нуклоны и образуют основу современного вещества Вселенной. Если бы не было этого небольшого числа избыточных нуклонов, мир бы сейчас был практически «пустым» (т. е. лишенным вещества). Так как основная масса нуклонов аннигилировала, образовав кванты электромагнитного излучения, то отношение числа оставшихся частиц к фотонам $n_{\text{нукл}}/n_{\text{фот}} = 10^{-9}$. Это как раз та величина, которая наблюдается в современной Вселенной, что является свидетельством правильности нарисованной картины.

В течение всего периода до аннигиляции нуклонов основная масса Вселенной была сосредоточена в адронах. Поэтому этот период получил название *адронная эра*. Она длилась примерно от $3 \cdot 10^{-35}$ с до 10^{-4} с. Аннигиляция нуклонов знаменует конец адронной эры. Поскольку почти все адроны аннигилировали, оставив лишь ничтожный избыток $\approx 10^{-9}$, то основная масса Вселенной после аннигиляции сосредоточилась уже не в адронах, а в лептонах. Соответствующий период в истории Вселенной получил название *лептонная эра*. Она длилась от 10^{-4} до 100 секунд. Вселенная в этот период состоит из лептонов (т. е. электронов, позитронов, нейтрино и антинейтрино), а также из фотонов и остаточного числа нуклонов, образовавшихся после аннигиляции. В начале лептонной эры, когда температура была еще очень высока, все частицы находились в термодинамическом равновесии, тесно взаимодействуя друг с другом. В середине лептонной эры, при $t = 0,2$ с, когда температура упала до $2 \cdot 10^{10}$ К, происходит важное событие в жизни Вселенной: нейтрино перестают взаимодействовать с электронно-позитронной плазмой, так как их энергии уже недостаточно для образования пары электрон-позитрон. Начиная с этого момента, они отделяются от вещества и независимо от него (не взаимодействуя с веществом) участвуют в общем расширении Вселенной. Эти реликтовые нейтрино должны существовать и в настоящее время, их температура (упавшая из-за расширения Вселенной) в современную эпоху составляет 2 К, а концентрация рав-

на 450 частиц в куб. см (всех видов нейтрино). Если бы нам удалось зарегистрировать эти нейтрино, мы могли бы «заглянуть» в эпоху, отстоящую от сингулярности всего на 0,2 с (!), т. е. значительно ближе, чем с помощью реликтовых фотонов. К сожалению, обнаружение реликтовых нейтрино находится пока за пределами экспериментальных возможностей.

Спустя примерно 10 с после начала расширения Вселенной, когда температура упала до $3 \cdot 10^9$ К, началась аннигиляция электронов и позитронов. Этот процесс закончился приблизительно через 3 минуты (при $T \approx 10^9$ К). В результате электроны и позитроны превратились в кванты электромагнитного излучения, остался лишь небольшой избыток электронов, отрицательный электрический заряд которых в точности компенсирует положительный электрический заряд избыточных протонов. Выделившаяся при аннигиляции энергия пошла на увеличение температуры фотонного газа. Температура нейтринного газа осталась без изменения, так как нейтрино не взаимодействуют ни с веществом, ни с излучением. Благодаря этому современная температура реликтовых фотонов (3 К) на 1 К выше температуры реликтовых нейтрино. Поскольку большая часть лептонов проаннигилировала, основная масса Вселенной сосредоточилась теперь в фотонах. Наступила *эра излучения*, о которой мы упоминали выше. Эта эра длилась несколько тысяч лет.

В самом начале эры излучения, приблизительно через 5 минут после начала расширения, когда температура упала ниже 10^9 К, начался процесс нуклеосинтеза — образование ядер гелия в результате цепочки ядерных реакций (с участием дейтерия). Этому предшествовал процесс распада нейтронов — превращения их в протоны. К моменту начала ядерных реакций (длившихся всего несколько секунд) доля нейтронов ненамного превышала 10 %, все они в результате реакций оказались связаны в ядра гелия. Таким образом, масса нуклонов (протонов и нейтронов), сосредоточенных в ядрах ${}^4\text{He}$, составила 25 % от общей массы нуклонов. Оставшиеся 75 % пришлось на долю протонов, которые в конце эры излучения, после рекомбинации, вошли в состав атомов водорода. Следовательно, первичное вещество Вселенной должно было на 75 % состоять из водорода и на 25 % из гелия. Это соответствует наблюдаемому химическому составу. Правда, в современную эпоху гелия несколько больше — около 30 %, но ведь часть гелия образуется в звездах. **Объяснение наблюдаемого обилия водорода и гелия, как и предсказание реликтового излучения, является важ-**

ным достижением горячей модели и всей фридмановской космологии.

После периода ядерных реакций ионизированный водород и гелий еще долго находятся в равновесии с излучением, и только через 200 000 лет, когда температура водородно-гелиевой плазмы упала до 4000 К, произошла рекомбинация и вещество отделилось от излучения. Спустя еще около 100 тыс. лет, при температуре меньше 3000 К, плотность образовавшегося нейтрального вещества превысила плотность излучения. Началась *эра вещества*. В это время Вселенная была в 1000 раз меньше, чем сейчас. С переходом к эре вещества изменился и закон расширения Вселенной: до этого масштабный фактор увеличивался со временем пропорционально $t^{1/2}$, а с переходом к эре вещества этот закон сменился законом $a(t) \propto t^{2/3}$.

Некоторые параметры Вселенной в различные периоды ее эволюции приведены в таблице 2.2.1.

Таблица 2.2.1

Эра	Длительность	Температура, К	Радиус Метагалактики
Адронная эра	$3 \cdot 10^{-35} \div 10^{-4}$ с	$1,8 \cdot 10^{27} \div 10^{12}$	$17 \div 3 \cdot 10^{16}$ см
Лептонная эра	$10^{-4} \div 10^2$ с	$10^{12} \div 10^9$	$0,01 \div 10$ пк
Эра излучения	$10^2 \div 10^{13}$ с	$10^9 \div 3 \cdot 10^3$	$10 \div 3 \cdot 10^6$ пк
Эра вещества	$3 \cdot 10^5 \div 10^{10}$ лет	$3 \cdot 10^3 \div 3$	$3 \div 3000$ Мпк

После рекомбинации Вселенная представляла собой однородное первичное вещество — нейтральный водородно-гелиевый газ, погруженный в океан фотонов и нейтрино. Эти три составляющие, не взаимодействуя, взаимопроникали друг друга, участвуя в общем расширении Вселенной. Теперь ее дальнейшая судьба связана с эволюцией вещества. Лишенное какой бы то ни было структуры первичное вещество Вселенной в потенции должно было содержать в себе весь тот богатый, многообразный мир форм, который окружает нас сегодня. В течение сотен миллионов лет в первичном веществе постепенно созревали условия для образования галактик. Как это произошло, мы рассмотрим позднее. А сейчас нам надо вернуться к самому началу, чтобы понять, как началось расширение Вселенной.

2.2.3. Первичный импульс

Не было ни дня, ни ночи, ни неба, ни земли, ни тьмы, ни света, ничего другого, за исключением Одного, непостижимого разумом, что есть Браман и Пумс (Дух) и Прадхана (Изначальная Материя).

«Тайная Доктрина»

Кто знает, воистину, и кто может сказать, когда это родилось, и когда свершился этот акт творения? Боги появились гораздо позже сотворения этого мира. Кто же тогда знает, когда появился мир?

Ригведы «Песнь Творения»

В первые мгновения после сингулярности, в те ничтожные доли секунды, которые соответствуют адронной эре, Вселенная была очень горяча, давление излучения было невообразимо велико. На первый взгляд, может показаться, что именно это чудовищное давление и является причиной расширения подобно тому, как это имеет место при взрыве какого-либо заряда, когда большое давление, возникающее в центре взрыва, разбрасывает окружающее вещество. Но на самом деле это не так. Для того чтобы произошел взрыв, важно не давление само по себе, а *перепад* давления. При взрыве бомбы этот перепад определяется разностью между высоким давлением горячего газа внутри быстро сгорающего взрывчатого вещества и низким давлением окружающего воздуха. Именно этот перепад и создает силу взрыва. Но ведь Вселенная однородна и изотропна, давление в каждой ее точке одинаково, перепад (или, как говорят физики, градиент) давления отсутствует. Следовательно, давление не может быть причиной Большого взрыва. Более того, согласно общей теории относительности, давление создает дополнительное поле тяготения и, следовательно, только усиливает тормозящее действие гравитационных сил. Но все это относится к обычной материи, состоящей из частиц вещества и различных физических полей. Однако на самом раннем этапе эволюции Вселенной, в эпоху близкую к планковскому времени $t_{пл} = 3 \cdot 10^{-44}$ с (т. е. в момент, отстоящий от теоретической фридмановской сингулярности $t = 0$ на величину $3 \cdot 10^{-44}$ с) материя, по-видимому, находилась в так называемом вакуумно-подобном состоянии. В свойствах этого состояния и надо искать причину Взрыва, причину расширения Вселенной. Что такое вакуумно-подобное состояние? Здесь нам придется сделать еще одно отступление и познакомиться с физическим вакуумом.

Физический вакуум определяют как низшее состояние квантовых полей, при котором энергия поля минимальна, а все квантовые числа, характеризующие эти поля (электрический заряд, импульс и др.), равны нулю. Более просто, хотя, может быть, несколько грубо, можно определить его так: физический вакуум это то, что остается в некоторой области пространства, если убрать оттуда все частицы и все кванты любых физических полей. Но что же останется в таком случае в рассматриваемой области пространства? На первый взгляд, ничего не останется — будет абсолютная пустота. Но оказывается в этой «пустоте» постоянно рождаются и аннигилируют так называемые виртуальные частицы. От реальных частиц они отличаются тем, что живут очень короткое время, столь малое, что их принципиально невозможно обнаружить за это время — не потому, что точность измерения времени мала, а потому что длительность их жизни лежит за пределом обнаружения, допускаемого соотношением неопределенностей квантовой механики. Виртуальные частицы рождаются парами: частица–античастица и, по истечении времени Δt аннигилируют¹⁴⁰. На образование частиц необходимо затратить определенную энергию, которая берется из «ничего», но по истечении времени Δt частицы аннигилируют и выделяющаяся при этом энергия возвращается в «ничто». Закон сохранения энергии выполняется. А так как весь этот процесс рождения–аннигиляции частиц остается вне наблюдения, то вроде бы ничего и не происходит; виртуальные частицы существуют и как бы не существуют. Зачем же тогда говорить о них? Дело в том, что хотя виртуальные частицы невозможно зарегистрировать непосредственно, косвенно они проявляются: за короткое время своей жизни виртуальные частицы успевают прореагировать с реальными частицами и результаты этих взаимодействий обнаруживаются в физическом эксперименте. Следовательно, физический вакуум это не пустота, а **особое состояние материи**. Оно характеризуется постоянным рождением и аннигиляцией частиц и античастиц, которое образно называют «кипением» вакуума.

Как и всякая физическая материя, вакуум обладает определенной плотностью энергии $\epsilon_{\text{вак}}$ и соответствующей плотностью массы $\rho_{\text{вак}} = \epsilon_{\text{вак}}/c^2$. Теоретические оценки показывают, что вблизи планковского времени плотность вакуума могла составлять

¹⁴⁰ Время жизни виртуальных частиц $\Delta t \sim \hbar/mc^2$, где m — масса частицы. Для $m = m_e$ (масса электрона) время жизни $\Delta t \sim 10^{-21}$ с.

$\rho_{\text{вак}} \approx 10^{74} \div 10^{94} \text{ г/см}^3$. Так что эта «пустота» была необычайно плотной!

Важной особенностью физического вакуума является его уравнение состояния. Уравнение состояния связывает плотность и давление. Для обычной материи давление с ростом плотности монотонно возрастает. Значит, если увеличивать число частиц в каком-то объеме, то давление в этом объеме возрастает и оно стремится вытолкнуть частицы из занимаемого объема. В вакууме все происходит наоборот. Уравнение состояния вакуума имеет вид

$$p_{\text{вак}} = -\varepsilon_{\text{вак}} = -\rho_{\text{вак}} c^2.$$

То есть в отличие от обычной материи, давление вакуума отрицательно!

Посмотрим теперь, каковы гравитационные свойства вакуума. Если положительное давление обычной материи создает дополнительное поле тяготения, то можно ожидать, что отрицательное давление вакуума уменьшает поле тяготения. В действительности, происходит более радикальное преобразование: сила притяжения трансформируется в силу отталкивания.

В ньютоновской теории тяготения сила тяготения пропорциональна плотности вещества $\rho_{\text{вещ}}$. В релятивистской теории тяготения (общей теории относительности) для любого вида физической материи сила тяготения пропорциональна величине $\rho_{\text{эф}} = \rho + 3p/c^2$, где ρ — плотность материи, а p — давление. В обычных условиях, с которыми мы сталкиваемся в физике и астрофизике, второе слагаемое очень мало по сравнению с первым. Так например, даже в центре Солнца, где давление очень высоко, второе слагаемое составляет 10^{-5} от первого. Если взять Вселенную в целом, то для нее в современную эпоху можно с большой степенью точности положить $p = 0$, $\rho_{\text{эф}} = \rho = \rho_{\text{вещ}}$.¹⁴¹ Тяготение определяется плотностью вещества. В дореккомбинационную эпоху (эра излучения) $\rho_{\text{вещ}} = 0$, $\rho_{\text{эф}} = 3p/c^2$, здесь p — давление излучения. Уравнение состояния для излучения имеет вид $p = (1/3) \varepsilon_{\text{изл}} = (1/3) \rho_{\text{изл}} c^2$. Следовательно, $\rho_{\text{эф}} = \rho_{\text{изл}}$. Тяготение определяется плотностью излучения. Но для вакуума $p = -\rho_{\text{вак}} c^2$, следовательно, $\rho_{\text{эф}} = -2\rho_{\text{вак}}$. Эффективная плотность оказывается отрицательной! Это означает, что сила тяготения вакуума, по сравнению с обычной материей, меняет знак.

Если для обычной материи мы имеем гравитационное притяжение, то в вакууме возникают силы гравитационного отталкивания. Это и есть те самые космологические силы отталкивания, которые

¹⁴¹ Такая материя называется пылевидной.

Эйнштейн ввел в свои уравнения с помощью Λ -члена (см. п. 2.2.1). Оказывается, он не зря это сделал! Для того чтобы силы гравитационного отталкивания существенно превышали силы притяжения, необходимо выполнение условия $\rho_{\text{вак}} \gg \rho$, где ρ — плотность обычной материи. Состояние материи, для которого выполняется это условие, называется вакуумно-подобным.

Теперь мы можем вернуться к нашей Вселенной. В очень ранней Вселенной, в момент близкий к планковскому времени $t_{\text{пл}} = 3 \cdot 10^{-44}$ с, при температуре $T = T_{\text{пл}} = 10^{32}$ К и плотности равной $\rho_{\text{пл}} = 10^{94}$ г/см³ материя находилась в вакуумно-подобном состоянии. В этом состоянии сила гравитационного отталкивания вакуума намного превышала силу притяжения обычной материи. Она-то и послужила причиной Взрыва, создала тот Начальный Импульс, под действием которого Вселенная начала расширяться. Когда этот импульс исчерпался, расширение продолжалось по инерции.

В фридмановской космологии, которая справедлива для обычной материи, плотность при расширении уменьшается. Это вполне естественно и понятно. Поразительное свойство вакуума состоит в том, что его плотность остается постоянной¹⁴². Соответственно, не меняется со временем при расширении и сила отталкивания, действующая на фиксированном расстоянии. В этих условиях любые две частицы движутся друг относительно друга с нарастающей скоростью, и расстояние между ними изменяется по экспоненциальному закону¹⁴³:

$$r(t) = r_0 e^{bt}; \quad b \approx 1/t_{\text{пл}} = 3 \cdot 10^{43}.$$

Такой закон расширения соответствует модели де Ситтера. Размер Вселенной увеличивается очень быстро. Этот процесс получил название раздувание (или инфляция), а модель, описывающая расширение Вселенной под действием гравитационных сил вакуума, получила название инфляционной. Инфляционная модель, по существу, является моделью де Ситтера. Только длится эта стадия не до современного момента и дольше, как полагал Ситтер, а заканчивается значительно раньше.

¹⁴² Строго говоря, плотность вакуума все-таки уменьшается, но несравненно медленнее, чем для обычной материи; поэтому по сравнению с ней плотность вакуума можно считать постоянной.

¹⁴³ Ускорение гравитационного отталкивания $d^2r/dt^2 = b^2 r$, где $b^2 = 4\pi G \rho_{\text{вак}}/3$. Поскольку $\rho_{\text{вак}} = \text{const}$, то и $b = \text{const}$, откуда следует $dr/dt = br$, а это и есть закон Хаббла с постоянной Хаббла $H = b = \text{const}$. Интегрируя выражение для dr/dt , получаем $r = r_0 e^{bt}$.

Раздувание Вселенной началось при $t = t_{\text{пл}} = 3 \cdot 10^{-44}$ с из области размером порядка планковской длины $r = 10^{-33}$ см и длилось в течение времени Δt . Величина Δt в разных моделях инфляции различна. Согласно одной из первых моделей (см. Новиков И. Д. Как взорвалась Вселенная. — М.: Наука, 1988. С. 117–118), $\Delta t = 10^9 t_{\text{пл}}$, т. е. инфляция длилась примерно до $t = 3 \cdot 10^{-35}$ с. К концу этого периода размер Вселенной увеличился в $e^{10^9} = 10^{4 \cdot 10^8}$ раз, температура упала практически до абсолютного нуля ($T = 10^{-4 \cdot 10^8}$ К). Плотность обычной материи (не вакуума!), которая, как и в теории горячей Вселенной, убывает пропорционально r^{-4} , уменьшилась в 10^{10^9} раз и стала равной $10^{94} : 10^{10^9} = 10^{10^{-9}}$ г/см³. При такой плотности одна частица материи отстоит от другой на расстояние $10^{3 \cdot 10^8}$ св. лет, т. е. на расстояние в невообразимое число раз превышающее современный размер Метагалактики! В это время Вселенная была практически пустой для обычной физической материи. Единственное, что осталось к концу стадии раздувания, это переохлажденное вакуумно-подобное состояние материи. Но такое состояние является неустойчивым. При $t = 3 \cdot 10^{-35}$ происходит фазовый переход, связанный с распадом вакуумно-подобного состояния. Вакуум переходит в состояние с очень малой плотностью. За счет освобожденной энергии рождаются частицы и античастицы обычной материи. Температура повышается до температуры великого объединения $T = 10^{27}$ К, и Вселенная (после непродолжительной переходной стадии) начинает развиваться по законам горячей модели. Частицы и античастицы, заполняющие Вселенную в эту эпоху, возникают при распаде вакуумно-подобного состояния. И если эта горячая плазма является *первичной субстанцией* нашей Вселенной, то вакуум, из которого она возникает, можно назвать *пра-материей* физического мира.

Как точно происходит инфляция — в настоящее время неизвестно. Существуют разные модели, которые отличаются длительностью инфляционной фазы и другими параметрами. Но общие черты нарисованного сценария сохраняются. Раздувание происходит из вакуумно-подобного состояния за счет сил гравитационного отталкивания вакуума. Расширение идет по экспоненциальному закону. При этом плотность обычной материи быстро падает, а плотность вакуумно-подобного состояния практически не меняется. По окончании инфляционной стадии происходит фазовый переход, вакуумно-подобное состояние распадается, образуется горячая плазма из обычной материи, и Вселенная начинает расширяться по сте-

пенному закону (как в горячей модели). Силы гравитационного притяжения, которые теперь превосходят силы отталкивания вакуума, начинают тормозить расширение. Такое замедленное расширение будет продолжаться вплоть до тех пор, пока плотность обычного вещества не станет меньше плотности «вакуумной материи», оставшейся после распада вакуумно-подобного состояния. После этого Вселенная начнет расширяться ускоренно. В самое последнее время (как уже упоминалось) появились данные о том, что Вселенная в современную эпоху расширяется ускоренно. Возможно, это связано с описанным процессом, а та «вакуумная материя», под действием которой происходит ускоренное расширение и которая составляет преобладающую долю «скрытой массы», и есть то, что осталось при распаде вакуумно-подобного состояния в конце инфляции.

Итак, Большой взрыв представляет собой экспоненциальное расширение (раздувание) Вселенной под действием гравитационных сил вакуума — сил отталкивания, которые и являются причиной Первотолчка. Наличие инфляционной стадии в эволюции Вселенной позволяет избежать неприятностей, связанных с обращением в нуль масштабного фактора при $t = 0$ (во фридмановской модели). При экспоненциальном расширении масштабный фактор обращается в нуль при $T = -\infty$. В любой конечный момент времени он отличен от нуля, соответственно, и плотность никогда не обращается в бесконечность. Означает ли это, что в инфляционной модели исчезает понятие сингулярности? Нет, не исчезает, но претерпевает качественное изменение. Сингулярным состоянием современные космологи называют состояние, которое имеет место при $t = t_{\text{ин}}$. Как мы видели, в этом состоянии плотность материи очень высока, но не бесконечна. Сингулярность связана не с бесконечно большой плотностью, а с тем, что в этом состоянии перестают действовать все известные физические законы и, главное, понятия времени и пространства из-за квантовых эффектов теряют смысл. По существу, сингулярное состояние является переходным к новым состояниям материи, которые еще не вошли в сферу изучения современной физики.

Помимо сингулярности, инфляционная стадия позволяет решить и другие важнейшие космологические проблемы. Одна из них *проблема горизонта*. В п. 2.2.1 мы говорили о горизонте Вселенной или горизонте событий. По существу, он ограничивает размер причинно-связанной области. В современную эпоху радиус горизонта по порядку величины совпадает с радиусом Метагалактики. Но радиус горизонта изменяется со временем пропорционально t , а радиус Метагалактики

пропорционально $t^{2/3}$. Поэтому если мы будем двигаться назад в прошлое, то радиус горизонта будет убывать быстрее, чем радиус Метагалактики, и горизонт событий будет охватывать все меньшую часть Метагалактики. Так, при $t = 10^{-34}$ с (время Великого объединения) радиус Метагалактики составлял 30 см, а радиус горизонта $3 \cdot 10^{-24}$ см. Следовательно, Метагалактика состояла примерно из 10^{70} отдельных причинно не связанных областей. Между этими областями невозможно никакое взаимодействие. Возникает вопрос — как же в этих условиях при отсутствии всякого обмена установилось однородное изотропное распределение материи во Вселенной? В рамках фридмановской модели это невозможно объяснить и приходится принимать просто как постулат, подтверждаемый наблюдениями реликтового излучения. В де-ситтеровской модели проблема горизонта, вообще, не возникает, так как расширение Вселенной происходит значительно быстрее, чем рост горизонта. Это относится и к инфляционной модели. Более того, в ней раздувание происходит из причинно-связанной области размером 10^{-33} см, которую, естественно, считать однородной и изотропной. Это свойство сохраняется и в процессе раздувания. В конце инфляционной стадии невообразимо раздувшийся «вакуумный пузырь» распадается, превращаясь в обычную материю. При этом область, из которой возникла наша Метагалактика, составляет лишь ничтожную часть «лопнувшего пузыря». Поэтому нет ничего удивительного в том, что эта область оказывается однородной и изотропной. В образовавшейся горячей Вселенной расширение идет медленнее, чем рост горизонта, но это уже не может повлиять на однородность и изотропию той исходной области, с которой стартует модель горячей Вселенной.

Вторая проблема связана с критической плотностью. Мы уже отмечали, что в современную эпоху средняя плотность материи во Вселенной по порядку величины близка к критической; она может отличаться от нее не более чем в тридцать раз, а с учетом скрытой массы — существенно меньше. Это в современную эпоху. А что было раньше? Принимая во внимание характер изменения плотности со временем¹⁴⁴, нетрудно получить, что в эпоху Великого объединения ($t = 10^{-34}$ с) отличие плотности от критической $(\rho_{\text{кр}} - \rho)/\rho = 10^{-50}$. Это поразительное совпадение! Ведь критическая плотность определяется постоянной Хаббла и, следовательно, зависит от скорости расширения Вселенной в рассматриваемый момент времени. Скорость определяется силой Большого взрыва. Почему же силу взрыва Природа подобрала таким образом, что критическая плотность на ранней стадии расширения с величайшей точностью совпала с реальной плотностью материи в этот момент? В рамках космологии Фридмана эта загадка остается неразрешимой. Инфляционная модель снимает проблему. Дело в том, что плотность вакуумо-подобного состояния в точности равна критической. Когда в конце стадии раздувания вакуумно-подобное состояние распадается и превращается в обычную материю, плотность $\rho_{\text{вак}}$ этого состояния переходит в плотность обычной ма-

¹⁴⁴ $(\rho_{\text{кр}} - \rho)/\rho \propto [a(t)]^2$, где $a(t)$ — масштабный фактор.

терии. Понятно поэтому, что последняя с величайшей точностью совпадает с критической плотностью в момент перехода.

Инфляционная модель успешно решает и другие космологические проблемы: проблему магнитных монополей, начальных флуктуаций плотности. Все это можно рассматривать как косвенное подтверждение ее справедливости. А нет ли прямых экспериментальных доказательств справедливости этой модели? В теории горячей Вселенной такими экспериментальными подтверждениями являются: реликтовое излучение, относительное обилие водорода и гелия, наблюдаемое отношение числа фотонов к числу частиц вещества ($n_{\text{фот}}/n_{\text{вещ}} = 10^9$). А как обстоит дело в инфляционной теории? В планковскую эпоху, согласно теории, в сверхсильных гравитационных полях должны интенсивно рождаться кванты гравитационного поля — гравитоны. Рожденные на заре возникновения Вселенной они в дальнейшем не взаимодействуют с другими частицами и должны сохранить информацию об эпохе своего рождения. В современной Вселенной эти реликтовые гравитоны должны образовывать фон гравитационного излучения подобно позднему фону реликтовых нейтрино и фотонов. К сожалению, регистрация реликтового гравитационного излучения находится пока за пределами экспериментальных возможностей.

Итак, согласно инфляционной модели, наша Вселенная возникла в момент $t_{\text{пл}}$, раздуваясь из одной-единственной причинно-связанной области размером $r_{\text{пл}} = 10^{-33}$ см. Означает ли это, что все пространство физического мира в этот момент времени сводилось к столь ничтожной области? С точки зрения фридмановской космологии, в рамках закрытой модели дело обстоит бы именно так. Современная космология исходит из других представлений.

Согласно этим представлениям, извечно существует бесконечное (вообще говоря, многомерное) пространство, заполненное физическим вакуумом. В этой вечно-кипящей субстанции (вакуумной пене) непрерывно происходят квантовые флуктуации, в результате которых могут рождаться трехмерные¹⁴⁵ планковские миры размером $r_{\text{пл}} = 10^{-33}$ см с плотностью $\rho_{\text{пл}} \approx 10^{94}$ г/см³. Большая часть их из-за квантовых флуктуаций тут же (за время порядка 10^{-44} с) возвращается в состояние пены. Но небольшая доля, в результате длинной цепочки случайных флуктуаций, приобретает плотность заметно

¹⁴⁵ Образование трехмерного мира из многомерного пространства, т. е. уменьшение размерности, происходит благодаря процессу компактификации. Современная теоретическая физика рассматривает такие процессы.

отличающуюся от $\rho_{пл}$ (причем меньшую, чем $\rho_{пл}$). Такие «пузырьки» уже не могут вернуться в состояние исходной вакуумной пены. Они то и составляют зародыши будущих вселенных. Материя в них находится в вакуумно-подобном состоянии ($\rho_{вак} \gg \rho$). Под действием сил гравитационного отталкивания они начинают раздуваться и после распада вакуумно-подобного состояния превращаются в горячие фридмановские вселенные. В одной из таких вселенных живем мы. Эту вселенную, в отличие от других, мы и называем нашей вселенной, или Вселенной с большой буквы (подобно тому, как это имеет место для галактик), а часть нашей Вселенной, охваченную астрономическими наблюдениями, мы по-прежнему, будем называть Метагалактикой.

Каждый из возникающих миров развивается из своей собственной причинно-связанной области. Между собой они никак не взаимодействуют, и это оправдывает название — вселенные. А как же тогда назвать совокупность всех этих вселенных и тот бесконечный в пространстве и времени Мир, из которого они возникают? Иногда этот мир также называют Вселенной (с большой буквы), но тогда возникает путаница с нашей Вселенной. Философы используют понятие «Универсум», а физики пользуются термином «Большая Вселенная» в отличие от мини-вселенных, к которым принадлежит и наша. Можно также называть этот Мир Физическим Миром, или, используя древнее название, — Физическим Космосом.

Подавляющая часть его находится в состоянии сверхплотного «кипящего» вакуума. Из него изредка отпочковываются «пузыри», которые развиваются в самостоятельные вселенные. Если возникающие таким образом вселенные являются замкнутыми, то по окончании стадии расширения они переходят в стадию сжатия и в конце ее, сжавшись до планковской плотности, возвращаются вновь в состояние вакуумной пены (сингулярное состояние), из которого рождаются новые вселенные. В этом смысле история каждой отдельной вселенной напоминает историю водяной капли, испарившейся с поверхности Океана. После долгих «странствий» капля-вселенная возвращается в Океан, где она покоится в слитом состоянии, в неразрывном Единстве с другими каплями, до тех пор пока не придет срок нового путешествия, и она вновь не покинет порог родного Дома. «У такого мира в целом нет начала и не будет конца. Он вечен и юн одновременно. Это картина взрывающейся Вечности»¹⁴⁶.

¹⁴⁶ Шаров А. С., Новиков И. Д. Человек, открывший взрыв Вселенной. — М.: Наука, 1989. С.191.

Так современная космология вернулась к представлению о вечном и бесконечном Космосе. Когда было открыто расширение Метагалактики и построены первые космологические модели, показавшие, что расширению подвержено *все теоретическое пространство Вселенной*, которое может намного превосходить объем Метагалактики и быть даже бесконечным (в случае открытой модели) — возникло представление о *конечной во времени* Вселенной, расширяющейся из сингулярности. Причем в случае закрытой модели такая Вселенная (единственная в своем роде, тождественная всему существующему) оказывалась также конечной и в пространстве (хотя и беспредельной). Дальнейшее изучение эволюции ранней Вселенной и причин ее расширения привело к описанной выше картине Космоса, в которой наша Вселенная является одной из многих, других вселенных, возникающих из вакуумной пены. Этот Космос не сводится ни к открытой, ни к закрытой модели, хотя содержит черты и той, и другой. Подобно открытой Вселенной, он пространственно бесконечен, но рождающиеся в нем вселенные могут быть пространственно конечны. Этот Космос существует вечно, а вселенные могут иметь свою конечную историю¹⁴⁷.

В какой мере нарисованная картина соответствует действительности? Поскольку мы приблизились к переднему краю науки, многие вопросы здесь остаются пока неразработанными, многие проблемы не решенными. Но общий контур картины представляется верным. По словам И. Л. Розенталя, этот контур предстает перед нами, «как абрис стройного здания, освещенного полыхающими отблесками далеких ночных зарниц»¹⁴⁸.

Позволим себе небольшое философское отступление. Одной из не вполне ясных проблем является природа физического вакуума, из которого возникает Вселенная. Вспомним, что вакуум представляет собой состояние материи, в котором постоянно рождаются и аннигилируют виртуальные частицы. Но откуда берутся эти частицы? Физики говорят, что — из «ничего». Поэтому они считают, что Вселенная также возникает из «ничего». Крупнейший советский физик и космолог академик Я. Б. Зельдович одну из своих последних статей так и назвал «Рождение Вселенной из “ничего”»¹⁴⁹. Зельдович подчеркивает, что рождение замкнутого мира из «ничего» не противоречит закону сохранения энергии, поскольку масса веще-

¹⁴⁷ О периодических манифестациях открытой Вселенной мы расскажем в п. 2.2.5, когда будем говорить о будущем Вселенной.

¹⁴⁸ Розенталь И. Л. Проблема начала и конца Метагалактики. — М.: Знание, 1985. С. 46.

¹⁴⁹ Зельдович Я. Б. Рождение Вселенной из «ничего» / Вселенная, астрономия, философия. — М.: Изд-во Моск. ун-та, 1988. С. 39–40.

ства такого мира и связанная с нею положительная энергия полностью компенсируется отрицательной гравитационной энергией связи этой массы. Конечно, математически ноль всегда можно представить как сумму положительного и отрицательного количеств. Но физически очень трудно представить себе возникновение чего-либо из ничего. Касаясь этой проблемы, А. М. Мостепаненко замечает, что, когда говорят о возникновении Вселенной из ничего, то, «по сути дела, имеют в виду либо вакуум современной квантовой теории поля, либо еще более глубокий вакуум, природа которого еще не стала предметом изучения современной теории»¹⁵⁰.

Вернемся к виртуальным частицам. На их образование необходимо затратить определенную энергию. Считается, что она берется из «ничего». Физиков это не смущает, поскольку виртуальные частицы честно возвращают заимствованную ими энергию обратно в «ничто». Более того, физический «контролер» не успевает и принципиально не может успеть зафиксировать этот акт заимствования-отдачи энергии. Поэтому исходя из положения «не пойманный — не вор», он считает, что никаких «нарушений» не происходит. Но раз мы знаем о заимствовании энергии, мы должны поинтересоваться, откуда она берется. Невозможно получить что-то из ничего. Поэтому «за пределами» вакуума должно быть НЕЧТО, рождающее виртуальные частицы, НЕЧТО, откуда берется энергия, необходимая на их рождение, и куда она затем возвращается. Это НЕЧТО лежит вне пределов физической реальности, т. е. представляет собой состояние материи, не описываемое современными физическими теориями. Значит, вакуум можно определить как *пограничное состояние материи*, отделяющее физическую реальность от того мира, который лежит за ее пределами. Так как этот мир — вне физической реальности, то, с точки зрения физики (но только с этой точки зрения!), он, действительно, представляет собою ничто (физическое ничто), хотя и является вполне материальным. Возможность существования иных миров, сложенных из неизвестных нам видов материи, должна приниматься во внимание при обсуждении проблемы внемозного разума, ибо нельзя исключить того, что какие-то формы разумной жизни могут быть связаны с такими видами материи.

Теперь, познакомившись с представлениями о том, как рождаются и начинают расширяться вселенные, мы можем вернуться к

¹⁵⁰ Мостепаненко А. М. Проблема «возможных миров» в современной космологии // Там же. С. 79–89; см. с. 88.

нашей Вселенной, которую мы оставили в предыдущем пункте в предверии образования в ней сложной структуры.

2.2.4. Образование структуры Вселенной. Согласно древним мифам, наш Мир произошел из Хаоса, т. е. из совершенно беспорядочной, бесформенной материи. Таково, в действительности, было вещество Вселенной, образовавшееся после ядерных реакций и рекомбинаций. Может ли бесструктурная материя *сама из себя* выделить определенные структуры? Современная наука о самоорганизации — синергетика отвечает на этот вопрос положительно. Самоорганизация это и есть появление макроскопически упорядоченных структур в первоначально бесструктурной среде. В результате самоорганизации система переходит из однородного бесструктурного состояния в неоднородное, обладающее определенной структурой («структурированное») состояние. Иными словами, она переходит от Беспорядка к Порядку, от Хаоса к Плану. Начальное и конечное состояния системы — устойчивые, а сам процесс перехода, процесс самоорганизации — существенно неравновесный. Он осуществляется благодаря тому, что в системе возникают микроскопические взаимодействия между частицами, в результате чего их движение становится взаимосогласованным. Таким образом, самоорганизация проявляется как согласованный коллективный процесс.

Классическим примером самоорганизации является образование ячеистой структуры в силиконовом масле. Если сосуд с маслом подогревать снизу, то в плоском горизонтальном слое масла возникают беспорядочные неоднородности плотности. Развитие этих начальных неоднородностей приводит к тому, что, независимо от формы и размера сосуда, образуется вполне упорядоченная структура в виде шестигранных ячеек. Жидкость поднимается в центре каждой ячейки и опускается вблизи ее граней. Исходное состояние системы — однородная бесструктурная жидкость, конечное состояние — шестигранная структура. Существенным моментом в этом процессе является то, что для образования структуры необходим приток тепла снизу.

В общем случае процесс самоорганизации в открытых системах можно представить следующим образом. Поток энергии через первоначально однородную среду выводит ее из равновесного состояния. В системе начинают развиваться неустойчивости, т. е. возникают случайные (стохастические) движения частиц. Благодаря взаимодействию частиц их движения, по крайней мере частично, становятся согласованными. Такое состояние называется *динамическим хаосом*. От истинного хаоса оно отличается наличием коллективного эффекта — согласованным движением частиц. В случае истинного хаоса движения частиц полностью не-

зависимы. Другое отличие динамического хаоса от истинного состоит в том, что его свойства зависят от времени. Если время наблюдения меньше некоторого характерного времени, называемого временем перемешивания, то движения отдельных частиц коррелированы (согласованы) между собой — в системе наблюдается определенная структура. То есть динамический хаос состоит из структур, которые постоянно сменяют друг друга по истечении времени перемешивания. В качестве аналогии можно представить себе узоры, возникающие в калейдоскопе при его вращении. Если сфотографировать эти узоры с экспозицией, значительно превышающей время изменения узоров (время перемешивания), то на фотографии получим чисто хаотическую картину. Но каждый моментальный снимок даст определенную структуру, которая будет меняться от снимка к снимку. (Для истинного хаоса любой снимок с самой короткой экспозицией даст полностью бесструктурную картину.)

Таким образом, если развитие неустойчивостей в системе приводит к возникновению хаоса с очень большим временем перемешивания, много большим времени наблюдения (как если бы мы на некоторое время остановили вращение своего калейдоскопа), то будет наблюдаться определенная структура. С этой точки зрения, процесс самоорганизации можно рассматривать как рождение определенной структуры из хаоса возможных структур.

Очень заманчиво применить эти идеи в астрономии для интерпретации различных космических структур. Астросинергетика делает пока только первые шаги, но она уже добилась определенных успехов¹⁵¹.

Нас интересует образование структуры Вселенной из первоначально бесструктурной материи (Космического хаоса). Решающую роль в этом процессе играло тяготение. В однородном веществе всегда существуют хотя бы небольшие флуктуации плотности. При определенных условиях они под действием тяготения начинают уплотняться (мы касались этого вопроса в пункте, посвященном образованию звезд), в результате однородное вещество распадается на отдельные сгустки. Этот процесс называется гравитационной неустойчивостью. Именно гравитационная неустойчивость и ответственна за образование структуры Вселенной.

Во Вселенной первичные флуктуации плотности образовались с самого начала, еще при распаде вакуумно-подобного состояния. Они и явились теми семенами, из которых позднее образовались скопления галактик и отдельные галактики. В процессе эволюции Вселенной до эпохи рекомбинации все неоднородности с малой массой затухают, и в нейтральном веществе, оказавшемся после реком-

¹⁵¹ См., например, *Розгачева И. К.* Самоорганизующиеся системы во Вселенной. — М.: Знание, 1989.

бинации, остаются только массивные неоднородности. Из них-то и образуются галактики и скопления галактик. Надо отметить, что величина отклонения плотности от среднего значения в этих флуктуациях $\Delta\rho/\rho$ в момент рекомбинации очень мала (это следует из наблюдений реликтового излучения), так что вещество практически является однородным. Но под влиянием гравитации неоднородности начинают уплотняться — развивается гравитационная неустойчивость. Из теории, развитой Я. Б. Зельдовичем и его сотрудниками, следует, что в результате сжатия образуются тонкие плоские образования, которые авторы называли «блинами». Масса «блинов» порядка массы скоплений галактик. Вероятно, они представляют собой протоскопления. Линии пересечения «блинов» образуют плотные волокна, а пересечение волокон — плотные узлы. Из них образуются сверхскопления и самые богатые скопления галактик. Эволюция «блина» приводит к тому, что в его центральных частях вещество распадается на сгустки порядка массы галактик, а во внешних частях остается нагретый газ, который входит в состав формирующегося скопления.

Разумеется, это очень грубая картина. Существуют и другие варианты теории. Процесс формирования структуры Вселенной до конца не ясен. Но каковы бы ни были детали этого процесса, ясно, что в основе его лежит гравитационная неустойчивость.

Мы видели, что в процессе самоорганизации в открытых системах неустойчивость, развитие которой приводит к образованию определенной структуры, возникает за счет притока энергии извне. Вселенная не является открытой системой, поэтому в ней развитие неустойчивостей может происходить только за счет внутренней энергии. Конечно, такой энергией служит энергия гравитационного поля. Следует отметить одно важное обстоятельство. По мере развития гравитационной неустойчивости и образования все новых и новых структур энтропия Вселенной возрастает. При этом рост энтропии сопровождается появлением все новых и новых структур, и процессы не замирают, как можно было бы ожидать, а развиваются. За счет чего это происходит? Счастливым для Вселенной (и для нас с вами) обстоятельством состоит в том, что гравитационная энергия отрицательна. В процессе уплотнения сгущений потенциальная гравитационная энергия уменьшается (модуль ее растет, а сама энергия, будучи отрицательной, уменьшается). А так как полная энергия системы, равная сумме потенциальной и кинетической, сохраняется, то уменьшение потенциальной энергии сопровождается ростом кинетической. Положительная кинетическая энергия (не даром ее называли «живая сила») может переходить в другие виды энергии и, следовательно, служить источником самых разнообразных процессов. Поэтому рост эн-

ропии, сопровождающий развитие гравитационной неустойчивости, не приводит к замиранию процессов во Вселенной.

Развитие гравитационной неустойчивости во Вселенной означает, что в ней развивается динамический хаос. «Если Вселенная находится в состоянии динамического хаоса, — отмечает И. К. Розгачева, — то ей суждена эволюция с бесконечной сменой структур, которые могут оказаться более совершенными, чем наблюдаемые нами галактики, звезды и живые существа. Встав на эту точку зрения, можно не согласиться с замечанием С. Вайнберга, что “чем постижимей представляется Вселенная, тем более она кажется бессмысленной”. Конечно же в идеальном хаосе нет ни смысла, ни гармонии. В космическом же хаосе есть “законы, охраняющие сокровища жизни, которыми украшает себя Вселенная” (Гете)»¹⁵².

2.2.5. Будущее Вселенной. Как бы интересна ни была история Вселенной — она уже состоялась, и мир, в котором мы живем, существует. А какова дальнейшая судьба этого мира и населяющих его разумных существ, каково будущее Вселенной? В отличие от прошлого, которое оставило свои следы, помогающие воссоздать историю Вселенной, будущее не имеет следов в нашем мире. Изучение его может основываться только на экстраполяции протекающих сегодня процессов. Зная законы механики, мы можем на много лет вперед предвычислить положение планет, предсказывать солнечные затмения и т. д. Точно так же, зная законы развития Вселенной, можно предсказать ее будущее. Чем точнее мы знаем законы эволюции, и чем ближе по времени рассматриваемый момент к современной эпохе — тем точнее будут наши предсказания. Не исключено, что в будущем (в реальной Вселенной, а не в нашей идеальной модели!) возникнут такие условия, при которых проявятся неизвестные нам законы природы. Тогда наши предсказания, основанные на известных сегодня законах, окажутся неточными, а для далекого будущего — неверными. Все это надо иметь в виду при изучении будущего Вселенной. С учетом этих оговорок рассмотрим, какова картина будущего, вытекающая из установленных на сегодня фундаментальных законов физики, какова судьба окружающего нас физического мира.

¹⁵² Там же. С. 57.

Мы видели, что будущее развитие Вселенной зависит от плотности материи. Если средняя плотность физической материи меньше или равна критической, Вселенная будет расширяться неограниченно; если она больше критической — расширение сменяется сжатием. Рассмотрим оба сценария в отдельности. Начнем с открытой модели.

В своей увлекательной книге «Как взорвалась Вселенная» И. Д. Новиков приводит слова одного из создателей современной космологии бельгийского астронома Ж. Леметра: «Эволюцию мира можно сравнить со зрелищем фейерверка, который мы засняли в момент, когда он уже кончается: несколько красных угольков, пепел и дым. Стоя на остывшем пепле, мы видим медленно угасающие солнца и пытаемся воскресить исчезнувшее великолепие начала миров»¹⁵³. Похоже, что аббат Леметр несколько сместил акценты. Наша Вселенная, скорее всего, находится в самом расцвете своего развития. Но несомненно, что в будущем, когда исчерпаются запасы ядерного горючего в звездах, они перестанут светить, превратившись в холодные черные карлики (см. п. 2.1.3). Это произойдет через 10^{14} лет. Любопытно, что длительность звездной стадии эволюции Вселенной по порядку величины совпадает с Махакальпой (см. стр. 258).

По окончании звездной стадии галактики будут состоять из остывших звезд и черных дыр, образовавшихся при вспышках сверхновых. Сами галактики также постепенно разрушаются. Это происходит из-за того, что отдельные звезды в результате гравитационного взаимодействия с другими звездами (очень редко, но все же) приобретают большую скорость, при которой они покидают галактику. Этот процесс аналогичен медленному испарению воды при комнатной температуре. В результате такого «испарения» звезды будут постепенно уходить из галактики, а ее центральная часть будет понемногу сжиматься. В конце концов, около 90 % всех звезд рассеются в пространстве, а оставшиеся в центральной части галактики поглотятся черной дырой, находящейся в галактическом ядре. Процесс завершится через 10^{19} лет. К концу этого периода Вселенная будет состоять из рассеянных в пространстве остывших звезд, планет и черных дыр с массой от нескольких масс Солнца до $10^{10} M_{\odot}$. Останется также крайне разреженный межзвездный газ, масса

¹⁵³ Цитируется по книге: Новиков И. Д. Как взорвалась Вселенная. — М.: Наука, 1988. С. 162–163.

которого составляет около 1 % от всей массы Вселенной. Этой, казалось бы, незначительной составляющей в дальнейшем суждено сыграть важнейшую роль в эволюции Вселенной.

Что же произойдет дальше? Во Вселенной идет очень медленный, но неуклонный процесс разрушения самого вещества, связанный с распадом протона. Время жизни протона порядка 10^{32} лет. Оно невообразимо велико по сравнению с современным возрастом Вселенной, поэтому протон считается очень стабильной частицей. Но все же оно не бесконечно! Через 10^{32} лет все вещество звезд и планет полностью распадется. Образующиеся в процессе распада позитроны аннигилируют с электронами, в результате остаются только фотоны и нейтрино. Что касается межзвездного газа, то при его распаде из-за крайней разреженности вещества вероятность столкновения электрона и позитрона очень мала, поэтому аннигиляция не происходит, и, наряду с фотонами и нейтрино, образуется очень разреженная электрон-позитронная плазма.

Остаются еще черные дыры, но основная масса Вселенной после распада вещества будет сосредоточена в излучении (фотонах и нейтрино¹⁵⁴). В теории горячей Вселенной мы видели, что плотность излучения убывает быстрее, чем плотность вещества. Поэтому через 10^{33} лет плотность материи будет определяться массой вещества, а не излучения. Вещество в это время будет состоять из электрон-позитронной плазмы и черных дыр, в которых и будет сосредоточена основная масса Вселенной. Но и это еще не конец. Оказывается, черные дыры тоже не вечны. Около черных дыр происходит рождение квантов излучения. Это приводит к уменьшению массы черной дыры — черная дыра «испаряется», превращаясь в фотоны, нейтрино и гравитоны. Процесс этот чрезвычайно медленный, но тоже не бесконечный. Черная дыра с массой $10 M_{\odot}$ «испарится» за 10^{69} лет, а сверхмассивная черная дыра с массой $10^{10} M_{\odot}$ — за 10^{96} лет. По истечении этого времени все черные дыры превратятся в излучение, и оно вновь станет доминирующим по массе. Однако вследствие расширения Вселенной, так как плотность излучения, как уже неоднократно отмечалось, падает быстрее плотности вещества, то уже через 10^{100} лет плотность излучения станет ничтожно малой по сравнению с плотностью электрон-позитронной плазмы.

¹⁵⁴ В рамках этой модели считается, что масса покоя нейтрино равна нулю.

Начиная с этого момента дальнейшая трансформация материи во Вселенной прекратится. Вселенная будет состоять из электронов и позитронов, концентрация которых будет уменьшаться с расширением Вселенной. При $t = 10^{100}$ лет плотность электрон-позитронной плазмы будет соответствовать одной частице на объем, равный 10^{185} объемам наблюдаемой сегодня Вселенной (!), и эта плотность будет еще убывать со временем. Воображение теряется перед такими величинами! И все же означает ли это, что в той невообразимо далекой Вселенной невозможны никакие формы жизни и разума?

«Конечно, с нашей сегодняшней точки зрения, — пишет И. Д. Новиков, — все процессы в будущем будут чрезвычайно замедлены. Но это с нашей точки зрения! Ведь и пространственные масштабы тогда будут несравненно грандиознее современных. Напомним, что в самом начале расширения «нашей» Вселенной, когда температуры были, например, 10^{27} К и происходили процессы рождения вещества, текли бурные реакции, продолжительность которых исчислялась 10^{-34} с, а масштабы 10^{-24} см. С точки зрения тех процессов, сегодняшние события в «нашей» Вселенной, в том числе наша жизнь, это нечто невероятно протяженное в пространстве и очень медленное. Вселенная не считается с нашими вкусами. В будущем жизнь «нашей» Вселенной будет продолжаться, хотя и в весьма своеобразных формах»¹⁵⁵. Это очень поучительное рассуждение, приучающее нас к осознанию относительности наших привычных представлений, когда речь идет о категориях Космоса.

Но не все космологи согласны с таким рассуждением. Они думают, что если жизнь и возможна в таких условиях, то это будет жизнь в темном и очень скучном мире. Поэтому они называют эту эпоху темной, и тогда наша эпоха — эпоха существования биологической жизни — представляется как очень тонкий во времени переходный слой от Инфляции и Большого взрыва к Темному времени¹⁵⁶.

Будет ли «темное время» длиться бесконечно? Если бы Λ -член был равен нулю, то так бы оно и было — расширение Вселенной в открытой модели с $\Lambda = 0$ замедляется под действием гравитации, но длится бесконечно (см. рис. 2.2.3). Но, как мы уже отмечали, наблюдения свидетельствуют, что в нашей Вселенной Λ -член не равен нулю — в ней присутствует «вакуумная материя» (вероятно, ос-

¹⁵⁵ Новиков И. Д. Как взорвалась Вселенная. С. 167.

¹⁵⁶ Сажин М. В. Современная космология в популярном изложении. — М.: УРСС, 2002. С. 225–230.

тавшаяся от фазы инфляции), которая приводит к тому, что Вселенная в современную эпоху расширяется ускоренно. Что же будет с ней дальше? Под влиянием ускоренного расширения плотность обычной материи будет быстро убывать, а плотность «вакуумной материи» (ее еще называют «квинтэссенцией») будет оставаться постоянной. И вот в этих условиях возможна ситуация, когда вновь начнется инфляция, которая приведет к рождению новой мини-вселенной. Начнется новый круг эволюции. Образовавшаяся в конце инфляции плазма будет развиваться по законам горячей модели. Эра излучения сменится эрой вещества, образуются галактики, звезды, возникнет жизнь и разум. Затем все повторится вновь. Если это так — история Вселенной будет состоять из периодов существования биологической (или иной?) жизни, разделенных эпохами «темного» времени. Это очень напоминает представления древнеиндийской космологии о чередовании манвантар (периодов активного существования Вселенной, когда она проявляется из непроявленного состояния) и пралай (когда все процессы на доступном нам плане Бытия замирают).

Рассмотрим сценарий развития для замкнутой Вселенной. После того как будет достигнуто максимальное значение радиуса, Вселенная начнет сжиматься. Полное время существования замкнутой Вселенной (период расширения-сжатия от сингулярности до сингулярности) меньше длительности звездной стадии Вселенной. Из-за этого звезды не успевают спокойно закончить свой век. Они будут разрушены в результате бурных процессов, сопровождающих сжатие Вселенной на последних этапах. Примерно за миллион лет до новой сингулярности начнут разрушаться звезды главной последовательности. За 100 с до сингулярности разрушатся белые карлики, за 10^{-4} с — нейтронные звезды. Когда до новой сингулярности останется меньше чем 10^{-35} с, вероятно, должны произойти фазовые переходы в вакууме, приводящие к возникновению сверхплотного вакуумно-подобного состояния. Одновременно степенной (фридмановский) закон сжатия Вселенной должен смениться на экспоненциальный, соответствующий де-ситтеровской модели. То есть конец Вселенной является как бы зеркальным отражением ее начала. В конечном итоге, замкнутая Вселенная, возникающая из вакуумной пены, вновь возвращается в нее. И из этой «пены» рождаются новые вселенные. Мы уже отмечали, что история каждой отдельной вселенной напоминает историю водяной капли, испарившейся с поверхности Океана и после долгих «странствий» вновь возвратившейся в него. В этом

вечно бурлящем Космосе постоянно рождаются новые вселенные и поэтому в нем, как подчеркивает И. Д. Новиков, *всегда* будут существовать достаточно большие области (подобные нашей Вселенной), способные поддерживать жизнь известного нам типа.

Насколько достоверны рассмотренные нами сценарии? И. Л. Розенталь замечает в этой связи, что любой сценарий весьма далек от отснятого фильма. «Все же, — пишет он, — представляется, что мы достаточно продвинулись в понимании качественной картины... однако наших знаний недостаточно, чтобы количественно оценить детали этой картины»¹⁵⁷. Это — задача будущей науки. И хотя она пока не создана, некоторые черты ее предугадываются, просматриваются уже в настоящее время.

2.3. Беспредельный Космос

Космос беспределен и бьет, как огненная струя, разбрасывающая свои искры на зарождение жизни во всем пространстве. Единая струя и многочисленны искры. Един Космос и беспредельны формы.

«Беспредельность», 71

Завершая наш рассказ о Вселенной, полезно оценить пределы наших знаний и попытаться заглянуть «за завесу». Все известное нам многообразие физических явлений, объектов и процессов описывается с помощью основных (фундаментальных) физических теорий. В процессе развития науки неоднократно происходила смена представлений, отдельные физические теории оказывались ошибочными и полностью отбрасывались. Но к фундаментальным теориям это не относится. Фундаментальные теории, составляющие ядро физической парадигмы, не отбрасываются в процессе развития — уточняется лишь область их применимости, а вне этой области действуют другие, более общие теории, имеющие более широкую область применимости. Благодаря этому в развитии науки имеет место **преемственность**. И хотя в процессе развития науки мы постоянно сталкиваемся со сменой представлений, сменой физических картин мира, но это не означает, что происходит просто замена одного знания другим — происходит *расширение* знания, ибо ядро

¹⁵⁷ Розенталь И. Л. Проблемы начала и конца Метагалактики. С. 52.

старой парадигмы включается в новую парадигму, в новое знание (а все ошибочные представления и теории при этом отбрасываются).

В настоящее время известны шесть основных физических теорий: ньютонова механика (НМ); ньютонова теория тяготения (НТТ); специальная теория относительности (СТО); общая теория относительности (ОТО), или эйнштейновская теория тяготения (ЭТТ); квантовая механика (КМ); релятивистская квантовая механика (РКМ). В каком соотношении между собой они находятся? При рассмотрении этого вопроса мы будем опираться на идеи Абрама Леонидовича Зельманова, изложенные в его работах^{158, 159}. При этом представляется более удобным (конечно, это дело вкуса) изме-

нить геометрический образ взаимосвязей и вместо «куба Зельманова» представить совокупность физических теорий в виде «пирамиды знания»¹⁶⁰.

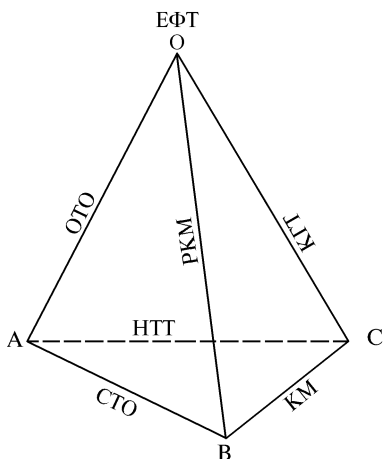


Рис. 2.3.1. Пирамида физических теорий

На рис. 2.3.1 изображена четырехгранная пирамида (тетраэдр). Каждое ребро этой пирамиды изображает определенную фундаментальную физическую теорию. В основании пирамиды лежат три основные теории: ньютонова теория тяготения, специальная теория относительности и квантовая механика. Все они характеризуются одной фундаментальной физической постоянной (мировой констан-

той). Для ньютоновой теории тяготения это постоянная тяготения G , для специальной теории относительности это фундаментальная скорость распространения физического взаимодействия c (совпадающая численно со скоростью света в пустом пространстве) и для квантовой механики — постоянная Планка h .

¹⁵⁸ Зельманов А. Л. О бесконечности материального мира / Диалектика в науках о неживой природе. — М.: Мысль, 1964. С. 227–269.

¹⁵⁹ Зельманов А. Л. Многообразие материального мира и проблема бесконечности Вселенной / Бесконечность и Вселенная. — М.: Мысль, 1969. С. 274–324. Зельманов А. Л., Агаков В. Г. Элементы общей теории относительности. — М.: Наука, 1989. С. 5–13.

¹⁶⁰ См. Гиндилис Л. М. Пирамида физического знания // Дельфис. 1996. № 1 (6). С. 79–85.

Источком всех этих теорий является ньютонова механика (не содержащая никакой фундаментальной постоянной). Как известно, механика Ньютона справедлива при описании движения тел со скоростями, малыми по сравнению со скоростью света. Она не распространяется на гравитационные явления и не включает в себя закон всемирного тяготения. Ньютонову теорию тяготения можно рассматривать, как расширение ньютоновой механики, обобщение ее на область гравитационных явлений. При отсутствии гравитации уравнения НТТ сводятся к уравнениям ньютоновой механики. При скоростях, близких к скорости света, ньютонова механика не применима. Это область специальной теории относительности. Она также не охватывает гравитационных явлений. Можно сказать, что специальная теория относительности есть обобщение ньютоновой механики на случай, когда скорость движения тел близка к скорости света. При условии $v \ll c$ (скорость много меньше скорости света) уравнения СТО переходят в уравнения механики Ньютона. Это позволяет рассматривать ньютонову механику как частный случай СТО, а последнюю, как более общую теорию, включающую в себя НМ. Ньютонова теория тяготения и специальная теория относительности справедливы при описании движения макроскопических тел. В области микромира они не применимы. Здесь действуют законы квантовой механики. Они справедливы, когда произведение энергии движущихся частиц на время (или количества движения на пройденный путь) сопоставимо с квантом действия $\hbar$. Если эти величины много больше $\hbar$, действуют законы ньютоновой механики. Таким образом, квантовая механика есть обобщение НМ на область микромира. При $\hbar \rightarrow 0$ (т. е. когда квантом действия $\hbar$ можно пренебречь) уравнения квантовой механики переходят в уравнения механики Ньютона.

В нашем тетраэдре ребра основания пересекаются в точках А, В и С. Каждая из этих точек служит истоком более общей теории, каждая из них характеризуется двумя мировыми константами. Так, точка А, в которой пересекаются НТТ и СТО, служит истоком общей теории относительности. Она является обобщением ньютоновой теории тяготения на область сильных гравитационных полей и быстрых движений (со скоростями, близкими к скорости света). В то же время она является распространением, обобщением СТО на область гравитационных явлений. Соответственно, общая теория относительности характеризуется двумя фундаментальными постоянными G и c . При отсутствии гравитации уравнения ОТО переходят в уравнения специальной теории относительности. А при медленных скоростях

движения $v \ll c$) уравнения ОТО переходят в уравнения ньютоновой теории тяготения. Таким образом, обе теории — НТТ и СТО — можно рассматривать как частные проявления более общей теории — ОТО. Последняя справедлива для макроскопических тел и не распространяется на явления микромира. Точка В, где пересекаются СТО и КМ, является истоком релятивистской квантовой механики. Она является обобщением квантовой механики на случай движения частиц с релятивистскими (т. е. близкими к c) скоростями и в то же время — обобщением СТО на область микромира. Соответственно, РКМ характеризуется двумя мировыми константами c и $\hbar$. Наконец, точка С, где пересекаются НТТ и КМ, может быть истоком теории, которую Зельманов назвал (нерелятивистской) квантовой гравитационной теорией (КГТ). Она характеризуется двумя постоянными G и $\hbar$ и является обобщением НТТ и КМ. Подобной теории пока не существует. И возможность ее построения вызывает сомнение, так как кванты гравитационного поля (гравитоны) должны перемещаться со скоростью света и, следовательно, квантовая теория гравитации неизбежно должна быть релятивистской. Тем не менее Зельманов формулирует условия, при которых КГТ может существовать как самостоятельная теория. Получается, в целом, довольно симметричное построение. Грань тетраэдра АОВ образована релятивистскими теориями, грань ВОС — квантовыми теориями и грань АОС — гравитационными теориями.

В этой схеме не нашлось места для ньютоновой механики НМ, которая служит истоком всех остальных теорий. Можно изобразить ее в центре основания и, проведя стрелки на ребра АВ, АС и ВС, указать тем самым, что соответствующие теории исходят из НМ. Другой вариант, предложенный В. Г. Сурдиным, — пристроить к основанию еще одну пирамиду вершиной вниз и поместить в эту вершину НМ.

Что касается таких физических дисциплин, как статистическая физика, термодинамика и электродинамика, то первоначально они были сформулированы в рамках ньютоновых представлений, но впоследствии, должным образом обобщенные, они вошли в рамки тех представлений, которые вытекают из более общих теорий: СТО, ОТО и КМ. Основные физические взаимодействия также охватываются этой схемой. Теория электромагнитного взаимодействия входит в СТО, а теория слабого и сильного взаимодействия — в РКМ. Гравитационное взаимодействие описывается гравитационными теориями.

Все физические теории в нашей схеме сходятся к вершине пирамиды, которая изображает наиболее общую теорию, являющуюся

синтезом всех существующих. Зельманов назвал ее Единой физической теорией (ЕФТ). Она характеризуется тремя мировыми константами G , h и c . Эта теория, объединяющая все виды физических взаимодействий, находится сейчас в стадии становления. Мы уже упоминали об объединении электромагнитного и слабого взаимодействий и создании теории электрослабого взаимодействия, а также о Великом объединении трех физических взаимодействий: электромагнитного, слабого и сильного. Чтобы завершить этот процесс синтеза физических теорий, необходимо включить в объединенную теорию и гравитационное взаимодействие. Такая формирующаяся сейчас теория получила название Суперобъединения.

Тенденция к синтезу, интеграции основных понятий и теорий характерна для развития физических наук. Специальная теория относительности объединила столь различные категории, как пространство и время, в единую сущность — четырехмерный пространственно-временной континуум. Оказалось, что лишь при скоростях, малых по сравнению со скоростью света, эта единая сущность разделяется на две независимые составляющие — пространство и время, никак не связанные друг с другом. Но при скоростях, близких к скорости света, пространство и время уже не являются независимыми: при движении тел с такими скоростями совместно меняются и геометрические свойства пространства, и темп течения времени. Мы уже упоминали о том, как еще до создания теории относительности произошло объединение теорий электричества и магнетизма в единую теорию электромагнитного поля. Это стало возможным потому, что электрические и магнитные силы, как выяснилось, являются проявлением одного электромагнитного взаимодействия. Впоследствии произошло объединение этого взаимодействия со слабым и сильным. Все они оказались проявлением одной универсальной силы Великого объединения. Создатель теории относительности А. Эйнштейн мечтал о построении теории, в которой были бы объединены все силы природы. Много лет после создания теории относительности, практически всю вторую половину жизни он напряженно работал над созданием такой теории. Современная теория суперобъединения (еще до конца не завершенная) является воплощением этой мечты Эйнштейна¹⁶¹.

¹⁶¹ См. Паркер Б. Мечта Эйнштейна: в поисках единой теории строения Вселенной. — М.: Наука, 1991.

Единое универсальное взаимодействие, объединяющее все силы природы, все виды физических взаимодействий, проявляется как синтетическое начало только при очень больших энергиях частиц, порядка планковской энергии $E_{\text{пл}} = \sqrt{c^5 \hbar / G} = 10^{19}$ ГэВ.

Она на пять порядков больше энергии Великого объединения. При меньшей энергии происходит расщепление Единого взаимодействия, сначала отщепляется гравитационное взаимодействие, затем сильное и, наконец, происходит разделение электрослабого взаимодействия на слабое и электромагнитное. В условиях, с которыми мы обычно имеем дело, все эти взаимодействия выступают как совершенно различные силы, хотя и являются проявлением одной Универсальной Силы Природы.

В рамках теории Суперобъединения исчезает различие между частицами физической материи фермионами и частицами переносчиками взаимодействий — бозонами. При $E \sim 10^{19}$ ГэВ они могут свободно переходить друг в друга.

Другой важнейшей чертой Суперобъединения является дальнейшее обобщение понятия пространства — введение **многомерных пространств** и, соответственно, дополнительных пространственных измерений. Мы привыкли к тому, что наше физическое пространство трехмерно, и не допускаем того, что мир может быть устроен более сложно. Но математики давно работают с многомерными пространствами, однако до последнего времени считалось, что это — лишь теоретические конструкции. В физике многомерные фазовые пространства широко используются в качестве удобных теоретических моделей, но не более. Мир предполагается трехмерным и считается, что дополнительные пространственные измерения не могут иметь никакого отношения к действительности. Это превратилось в своего рода философскую догму.

Однако уже первая попытка объединить теорию гравитации с электромагнетизмом, предпринятая в 1920-е годы Т. Калуцой и О. Клейном, привела к неожиданному результату. Оказалось, что это возможно только в том случае, если ввести дополнительное четвертое пространственное измерение, т. е. рассматривать пятимерный пространственно-временной мир. Работа Т. Калуцы и О. Клейна была первым шагом. Они пытались объединить гравитацию непосредственно с электромагнетизмом. Сегодня мы знаем, что синтез возможен только через Великое объединение (сначала электромагнетизм объединяется со слабым взаимодействием, потом с сильным

и только после этого возможно объединение с гравитацией). Однако возникшая в их теории необходимость введения дополнительных пространственных измерений оказалась не случайной. Современные теории показывают, что невозможно добиться Суперобъединения в рамках трехмерного пространства. Наименьшее число пространственных измерений, для которых удастся построить теорию суперобъединения, равно 9. То есть мы имеем 9-мерное пространство или 10-мерный пространственно-временной мир. Возможно, полное число пространственных измерений больше 10.

Конечно, все эти дополнительные пространственные измерения не могут быть пустыми, поскольку пространство не существует вне материи. Автор полагает, что дополнительные пространственные измерения имеют определенный не равный нулю объем, в отличие от тех теоретических построений, которые приводят к нулевому объему. Несомненно, они заполнены какой-то материей. Но какой? Скорее всего, это материя неизвестного нам вида, которую мы пока не научились обнаруживать посредством физического эксперимента. Может быть, это та материя, которая лежит «за пределом» физического вакуума. Вероятно, в этих неизвестных нам пространственных мирах действуют и какие-то другие, неизвестные нам закономерности. Например, в нашем трехмерном мире каждая физическая величина выражается определенным действительным числом. Развитый в математике аппарат мнимых чисел остается невостребованным¹⁶². Может быть, в других пространственных измерениях какие-то характеристики материи измеряются мнимыми числами? Может быть... Космос, несомненно, таит в себе еще много неизведанного.

В свете этих представлений философская идея о неисчерпаемости форм материи приобретает более реальные очертания. Вместе с тем качественно новое значение приобретает понятие «беспредельности». Если ранее оно трактовалось как беспредельность пространственного протяжения Вселенной, то теперь мы должны включить в это понятие все беспредельное многообразие миров и форм материи вечно меняющегося, эволюционирующего Космоса.

Вернемся к «пирамиде физических теорий». Симметрия и завершенность этой конструкции могут навести на мысль, что с объе-

¹⁶² Аппарат мнимых (комплексных) чисел широко используется в некоторых разделах физики (например, в электродинамике) для выполнения промежуточных математических преобразований. Однако все конечные величины, получаемые в результате этих вычислений, — величины, непосредственно сопоставляемые с результатами физического эксперимента, выражаются только действительными числами.

динением всех фундаментальных физических теорий в одну Единую физическую теорию (теорию Суперобъединения) завершается развитие физического знания¹⁶³. Так ли это? Несомненно, создание ЕФТ будет означать окончание очень важного этапа в развитии наших знаний о физическом мире. Но, конечно, это не финал познания. Я думаю, что Единая физическая теория явится не только завершением, но и мощным *исток*ом новых теоретических представлений, новых теорий, новых знаний, опирающихся на новые экспериментальные открытия. Более того, завершенность «пирамиды знания» указывает, на мой взгляд, на то, что дальнейшее развитие будет связано в принципиальными качественными изменениями. Вероятно, оно будет включать изучение новых пространственных измерений и новых форм движения материи.

Несмотря на волнующие воображение достижения науки в изучении безграничных пространств и глубин Вселенной, не следует слишком обольщаться этими успехами. Мы познали (и притом не полностью!) лишь один срез, один слой окружающего Мира. Сегодня мы стоим на пороге революционного изменения всей научной картины мира. Многие процессы, которые сейчас происходят в физике, биологии, психологии, являются предвестниками того, что ожидает нас за этим порогом — там, где сияет Беспредельный Космос.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бакулин П. И., Кононович Э. В., Мороз В. И. Курс общей астрономии. — М.: Наука, 1977. 544 с.; новое издание: Кононович Э. В., Мороз В. И. Курс общей астрономии / Под ред. В. В. Иванова. — М.: УРСС, 2001. 544 с.
2. Засов А. В., Кононович Э. В. Астрономия. Пробный учебник для 10 класса средней школы. — М.: Просвещение, 1986. С. 192.
3. Физика Космоса. Маленькая энциклопедия. — М.: Советская энциклопедия, 1986. 783 с.

¹⁶³ Идея о конечности процесса познания и о близости современной науки к полному познанию окружающего нас мира высказывались рядом авторов. Так например, И. С. Шкловский высказывает мысль, что в результате двух революций в астрономии построение адекватной действительности астрономической картины мира близко к завершению. Остается лишь работа по ее детализации и уточнению. Эта работа не может коренным образом изменить лица астрономии, ибо «генеральный план» Вселенной и история ее развития в настоящее время полностью поняты и уже перешли в категорию абсолютных истин. (См. Шкловский И. С. Вторая революция в астрономии подходит к концу // Вопросы философии. 1979. № 9. С. 54–69.)

4. *Еремеева А. И., Цицин Ф. А.* История астрономии (основные этапы развития астрономической картины мира). — М.: Изд-во Моск. ун-та, 1989. 349 с.
5. *Зельдович Я. Б., Новиков И. Д.* Строеение и эволюция Вселенной. — М.: Наука, 1975. 736 с.
6. *Чаругин В. М.* Космология: теория и наблюдения. — М.: Знание, 1979. 59 с.
7. *Вайнберг С.* Первые три минуты. Современный взгляд на происхождение Вселенной. — М.: Энергоиздат, 1981. 208 с.
8. *Новиков И. Д.* Эволюция Вселенной. — М.: Наука, 1988. 175 с.
9. *Новиков И. Д.* Как взорвалась Вселенная. — М.: Наука, 1988. 175 с.
10. *Шаров А. С., Новиков И. Д.* Человек, открывший взрыв Вселенной. Жизнь и труд Эдвина Хаббла. — М.: Наука, 1989. 205 с.
11. *Розенталь И. Л.* Проблемы начала и конца Метагалактики. — М.: Знание, 1985. 54 с.
12. *Розгачева И. К.* Саморегулирующиеся системы во Вселенной. — М.: Знание, 1989. С. 58.
13. *Паркер Б.* Мечта Эйнштейна: в поисках единой теории строения Вселенной. — М.: Наука, 1991.
14. *Сажин М. В.* Современная космология в популярном изложении. — М.: УРСС, 2002. 240 с.
15. *Куликовский П. Г.* Справочник любителя астрономии. — М.: УРСС, 2002. 688 с.

См. также астрономические главы в книгах [3–5] из списка литературы к главе 1.