

## 4. Образование Солнечной системы и распространенность элементов

**4.1. Почему необходимо выйти за пределы Земли?** В двух предыдущих главах рассказывалось о том, как было выяснено (с достаточной точностью) распределение плотности и некоторых других параметров внутри Земли. Теперь мы хотим узнать, из какого материала сложена Земля, т. е. какой она имеет химический состав и из каких минералов построена.

Мы уже установили, что Земля состоит из различных слоев, и в частности, что породы земной коры гораздо менее плотные, чем вся Земля в целом. Следовательно, хотя состав поверхностных пород надо, конечно, учитывать, эти породы не могут считаться представительными по отношению к мантии и ядру, и дополнительные сведения необходимо искать где-то вне коры. Мы вынуждены поставить вопрос о том, как образовалась Земля, а это в свою очередь расширяет рамки наших исследований вплоть до истории образования Солнечной системы. (Заглавные буквы используются для того, чтобы подчеркнуть единственность планетной системы, к которой принадлежит Земля; то же правило относится к названиям планет и других единственных в своем роде объектов.) Изучая тела, входящие в Солнечную систему, можно оценить ее первоначальный состав, а также высказать предположения о физических и химических процессах, которые привели к ее современному состоянию.

Эта глава касается главным образом установления общего состава Земли, а гл. 5 будет посвящена процессам, обусловившим слоистое строение нашей планеты.

**4.2. Вводные замечания о Солнечной системе.** Солнечная система состоит из Солнца и всех тел, которые вращаются вокруг него по своим орбитам; наиболее массивные из этих тел — девять планет. В табл. 4.1 представлены многие свойства Солнца, планет и Луны, а на рис. 4.1 показаны их относительные размеры. Особенности, которые нельзя описать в столь сжатом виде, излагаются в нижеследующем очерке, который можно было бы озаглавить «Кто есть кто в Солнечной системе».

Солнце — обыкновенная средняя звезда. Она состоит примерно на 70% из водорода и на 28% из гелия; более тяжелые элементы составляют только 2% его массы. Тепло и свет Солнце производит, превращая в своих глубоких недрах водород в гелий (разд. 4.6.2).

Меркурий — ближайшая к Солнцу планета, имеющая совсем маленький размер. Плотность Меркурия только немного меньше, чем плотность Земли. Поверхность сильно изрыта кратерами, как на Луне.

Венеру называют сестрой Земли, потому что ее масса и плотность только немного меньше соответствующих земных характеристик. Однако вокруг своей оси Венера вращается медленно и в обратном направлении (т. е. в направлении, противоположном направлению движения всех планет вокруг Солнца). Атмосфера Венеры гораздо плотнее, чем наша; температура у поверхности Венеры равна приблизительно 500°C. Венерианская атмосфера состоит главным образом из двуокиси углерода с небольшим количеством воды и такими неприятными субстанциями, как серная и соляная кислоты. Увидеть поверхность Венеры мы не можем, но радар показывает, что она покрыта кратерами.

Таблица 4.1. Главные характеристики Солнца, планет и Луны

Характеристика	Планеты земной группы и Луна					Планеты-гиганты					
	Солнце	Меркурий	Венера	Земля	(Луна)	Марс	Юпитер	Сатурн	Уран	Нептун	Плутон
Расстояние от Солнца:											
средняя величина, млн. км	—	58	108	150	—	228	778	1427	2870	4497	5900
если принять расстояние от Земли до Солнца равным 1	—	0,39	0,72	1	—	1,52	5,20	9,54	19,2	30,1	39,4
Масса (масса Земли = 1)	343 000	0,055	0,815	1	0,012	0,108	318	95	14,6	17,2	~0,002
Средняя плотность	1,4	5,4	5,2	5,5	3,3	3,9	1,3	0,7	1,2	1,7	< 1,7
(плотность воды = 1)											
Радиус, км	696 000	2 400	6 052	6 378	1 738	3 394	71 400	60 000	25 900	24 750	1 900
Продолжительность года, т.е. период обращения вокруг Солнца (земных лет)	—	0,24	0,62	1	—	1,88	11,9	29,5	84,0	164	248
Продолжительность суток, т.е. период вращения вокруг оси (земных суток)	27	59	-243*	1	27,3	1,03	0,40	0,43	-0,89*	0,53	6,4
Эксцентриситет орбиты	—	0,206	0,007	0,017	0,055	0,093	0,043	0,056	0,047	0,009	0,25
Наклон орбиты относительно орбиты Земли, град	—	7	3,4	0	23**	1,9	1,3	2,5	0,8	1,8	17,2
Наклон оси относительно оси земной орбиты, град	7	< 28	3	23	23**	24	3	27	82	29	?
Число известных спутников	—	0	0	1	—	2	14	10	5	2	1?
Атмосфера: главные составляющие	—	Нет	CO <sub>2</sub>	N <sub>2</sub> , O <sub>2</sub>	Нет	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> , He	H <sub>2</sub> , He	H <sub>2</sub> , He, CH <sub>4</sub>	H <sub>2</sub> , He	Нет?
Магнитное поле: момент диполя*** (момент диполя геомагнитного поля = 1)	3 · 10 <sup>6</sup>	6,6 · 10 <sup>-4</sup>	< 10 <sup>-4</sup>	1	< 2 · 10 <sup>-6</sup>	3 · 10 <sup>-4</sup>	1,9 · 10 <sup>4</sup> (1,7 · 10 <sup>4</sup> - Ped.)	?	?	?	?

\* Знак минус показывает, что вращение обратное, т.е. направлено противоположно направлению вращения большинства планет Солнечной системы.  
 \*\* Орбита Луны располагается в плоскости земного экватора. \*\*\* То есть момент эквивалентного стержневого магнита (однако магнитное поле некоторых планет мало похоже на поле диполя).

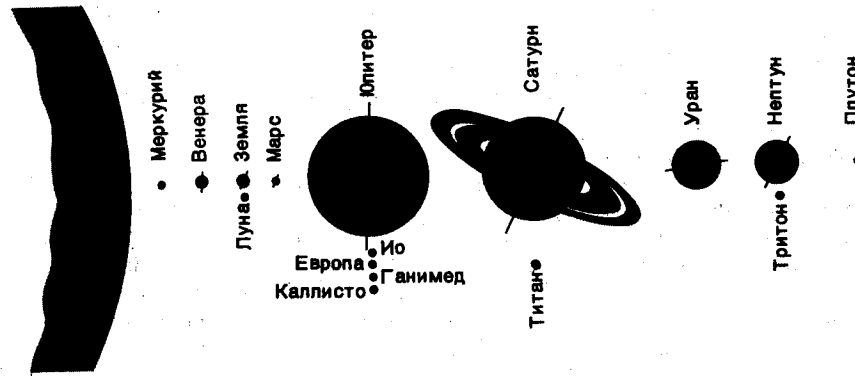


Рис. 4.1. Относительные размеры Солнца, планет и их спутников. Показаны только семь самых крупных спутников, остальные выглядели бы на этой схеме просто точками. Показана ориентировка осей вращения планет (ес-

ли она известна). Расстояния между телами — не в масштабе. (Плоскости орбит планет приблизительно перпендикулярны плоскости чертежа.— Перев.)

Продолжая и дальше в стиле самой грубой схемы, отметим, что Земля обладает наивысшей среди всех планет средней плотностью и выделяется своей необычной атмосферой, состоящей из азота и кислорода, и большим количеством жидкой воды (о том, как это получилось, см. в гл. 10). Причину почти полного отсутствия ударных кратеров (их на Земле всего несколько) можно считать результатом поверхностной геологической активности, в частности эрозии, а наличие гор служит дополнительным доказательством того, что Земля представляет собой внутренне динамичную планету.

Луна среди спутников должна считаться большой: она почти такая же по размеру, как крупнейший из спутников Юпитера. Поверхность Луны сильно изрыта кратерами и состоит из светлоокрашенных возвышенностей и темных, довольно плоских морей.

Марс меньше Земли и обладает меньшей плотностью. У него разреженная атмосфера, состоящая преимущественно из двуоксида углерода, из которой образуются тонкие ледяные полярные шапки; обнаружены также следы воды. Поверхность покрыта кратерами ударного происхождения, но имеются и признаки того, что Марс был активной планетой: с помощью космических аппаратов там обнаружены гигантские русла (каналы), каньоны и вулканы.

Четыре внутренние планеты «земной» группы, а также Луна имеют более высокую плотность, чем внешние планеты. Полагают, что внутренние планеты состоят главным образом из железа, кремния, кислорода и других сравнительно тяжелых элементов с небольшим количеством водорода и гелия — главных элементов, входящих в состав Солнца. Подробнее эти планеты описаны в разд. 5.4. Между планетами земной группы и внешними «планетами-гигантами» существует разрыв: резкое увеличение массы и расстояния от Солнца, а также уменьшение плотности (см. табл. 4.1).

Астероиды — большая группа «малых планет»; орбиты их располагаются преимущественно между орбитами Марса и Юпитера, хотя некоторые астероиды оказываются время от времени внутри орбиты Земли. Между Марсом и Юпитером существует некая «дыра» в последовательности планет, и раньше считали, что астероиды — это остатки пла-

неты, которая когда-то заполняла это зияние, однако убедительных доказательств, подтверждающих эту идею, не найдено. Самый крупный астероид Церера имеет диаметр всего 760 км, а из 2000 других астероидов многие представляют собой просто глыбы неправильной формы, а их общая масса гораздо меньше массы любой планеты. Важное значение астероидов состоит в том, что из них, по-видимому, образуются метеориты; метеориты же в свою очередь играют важную роль в расширении наших представлений о составе Земли, как это будет показано в разд. 4.5.

Юпитер имеет массу, большую, чем все другие планеты вместе взятые, но и при этом его масса составляет меньше 0,1% массы Солнца. Плотность Юпитера невысока, и это можно объяснить только большим содержанием водорода и гелия. Из-за быстрого вращения (его сутки длятся только 10 ч) он обладает значительным экваториальным вздутием. У Юпитера 14 (16.–*Ред.*) известных спутников, сильно отличающихся друг от друга по многим характеристикам.

Сатурн во многом похож на Юпитер. Его плотность ниже (меньше плотности воды), вероятно, потому, что, будучи меньше, он слабее сжат. Его наиболее выразительная особенность – живописная система колец, образованных огромным числом отдельных частиц, состоящих, по всей видимости, из льда и замерзших газов и движущихся по своим орбитам без столкновений.

Уран и Нептун имеют примерно одинаковые размеры; плотность обеих этих планет выше плотности Сатурна, несмотря на меньший диаметр. Вероятно, это связано с меньшим содержанием водорода и гелия. Об этих планетах известно немного; только недавно было обнаружено, что у Урана есть кольца, хотя они выражены гораздо слабее, чем кольца Сатурна. (У Юпитера также имеются очень тонкие кольца.)

Плутон – самая удаленная планета, и о нем известно мало. Только недавно у него был обнаружен спутник, что позволило оценить массу Плутона более точно (см. табл. 4.1). Орбита Плутона отличается от орбит других планет: она наклонена к средней плоскости Солнечной системы на  $17^\circ$  и настолько эксцентрична, что иногда Плутон оказывается внутри орбиты Нептуна. По размерам Плутон меньше, чем Тритон – самый крупный спутник Нептуна, поэтому высказано предположение, что Плутон также когда-то был спутником Нептуна.

Время от времени на ночном небе самыми заметными объектами становятся кометы – с яркой «головой» и размытым «хвостом», который вытягивается на полнеба. Однако голова кометы имеет в поперечнике только несколько километров и представляет собой, как полагают, скопление различных твердых частиц, скрепленных между собой замерзшими газами и льдом. Эти скопления похожи на «грязные снежки». Солнечное тепло испаряет более летучие части кометы, которые и образуют сильно размытый хвост. По-видимому, голова кометы может полностью распасться на мелкие части, и, когда Земля пересекает их орбиту, возникает метеоритный «дождь». При нынешнем уровне изученности кометы мало что добавляют к нашим знаниям о Солнечной системе.

Перед тем как судить о достоинствах той или другой теории образования Солнечной системы, нам надо решить, какие ее существенные особенности требуют объяснения. Иначе говоря, необходимо выделить те особенности, которые должны быть общими для всех других «солнечных» систем, образовавшихся более или менее одинаково, и те черты, которые появились случайно и специфичны только для нашей Солнечной системы. Задача была бы гораздо проще, если бы можно было сравнить нашу Солнечную систему с другими, но на сегодняшний день пока невозможно обнаружить объекты земных размеров, вращающиеся даже вокруг близких звезд, хотя заявки на открытие объектов разме-

ром с Юпитер уже появляются. Таким образом, неизвестно, насколько распространены во Вселенной солнечные системы и, следовательно, насколько закономерно или случайно их появление, т. е. можно ли считать их появление закономерным следствием более или менее обычного процесса развития или же для этого требовалось какое-то редкое стечение обстоятельств. Поскольку ученые в своем большинстве не любят привлекать «особые объяснения» без крайней необходимости, чаще допускается первое.

Ниже перечисляются те особенности Солнечной системы, которые, по-видимому, надо считать существенными и которые должны найти объяснение в любой космогонической теории.

а) Планеты имеют общую плоскость обращения вокруг Солнца (в пределах нескольких градусов), близкую к плоскости солнечного экватора; таким образом, почти все вращательное движение системы имеет общую ось (см. табл. 4.1: данные о наклоне орбит и ориентировке осей вращения планет).

б) Планеты движутся почти по круговым орбитам, причем наибольший эксцентриситет отмечается у самых малых планет — у Меркурия и Плутона (табл. 4.1: данные об эксцентриситете орбит). Из пунктов (а) и (б) следует, что Солнечная система — это действительно одно семейство, имеющее общее происхождение, а не случайное собрание объектов, притянутых Солнцем.

в) Большая часть всей массы системы заключена в Солнце, т. е. масса распределена чрезвычайно неравномерно: Солнце в 740 раз массивнее всех планет вместе взятых (табл. 4.1: данные о массе).

г) На движение планет вокруг Солнца приходится 99,5% общего момента количества движения системы, несмотря на то что более 99% массы сосредоточено в Солнце. Эта особенность Солнечной системы сильно влияет на характер теоретических представлений о ее образовании.

д) Существует некий разрыв в расстояниях, массе и плотности между планетами земной группы (Меркурий, Венера, Земля и Марс) и планетами-гигантами (Юпитер, Сатурн, Уран и Нептун). Что касается плотности, то этот разрыв отражает, очевидно, заметное различие в среднем составе планет обеих групп.

**4.3. Образование Солнечной системы. 4.3.1: Развитие теоретических представлений.** В этом разделе мы не даем полного обзора выдвигавшихся теорий, а пытаемся показать, как шло развитие идей. С этой целью полезно, вслед за Мак-Креем [142], разбить все теории на три класса:

*Класс 1.* Теории, согласно которым Солнце полностью сформировалось раньше планет, а вещество планет произошло непосредственно из Солнца или из другой звезды. Некогда популярные теории о приливном воздействии относятся к этому классу.

*Класс 2.* Теории, согласно которым Солнце и планеты образовались одновременно из одной вращающейся *туманности*, иначе называемой облаком или небулой, как естественный результат эволюции этого облака под действием гравитационных и других сил.

*Класс 3.* Теории, согласно которым Солнце, как и в теориях класса 1, полностью сформировались раньше, чем планеты, а планетное вещество было захвачено из межзвездных облаков или из другого источника, после чего и образовалась Солнечная туманность.

*Теории класса 1.* Самую раннюю идею этого типа высказал Бюффон в 1776 г.; он предположил, что с Солнцем столкнулась комета, которая и выбила из него материал. Теперь мы знаем, что кометы чересчур малы для этого, но сама идея возродилась в 1878 г., в то время когда теории класса 2 стали испытывать трудности, но место ко-

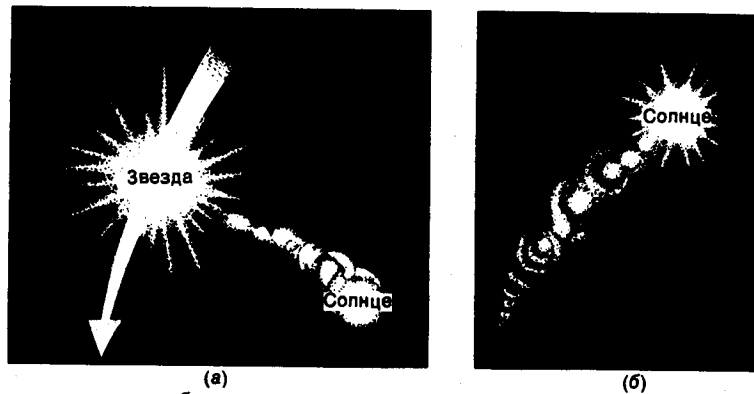


Рис. 4.2. Приливная теория образования планет. *а*—прохождение звезды около Солнца вызывает гигантские приливы и в конце концов вырывает струю раскаленного газообразного вещества; *б*—после ухода звезды струя конденсируется, образуя планеты, причем самая крупная из них возникает в средней, наиболее толстой части струи.

меты заняла тогда звезда. Затем, в 1916 г., Джинс показал путем расчетов, что достаточно и того, чтобы звезда не столкнулась с Солнцем, а приблизилась к нему на некоторое малое расстояние; при этом и на приближающейся звезде, и на Солнце должны возникнуть гигантские приливы, амплитуда которых будет расти до тех пор, пока материал не оторвется от Солнца (или от другой звезды) в виде сигарообразной струи и не займет место между двумя звездными телами (рис. 4.2). Звезда затем снова уходит в глубины пространства, оставив горячую струю конденсироваться, превращаясь в планеты, причем самая массивная планета должна образоваться в средней, более толстой части «сигары».

Эта теория получила тогда широкое признание, но в ней есть несколько слабых мест. Хотя она могла, по-видимому, объяснить, почему вещество появилось на значительном расстоянии от Солнца и стало двигаться вокруг него, и тем самым объясняла большой момент количества движения планет вокруг Солнца, она не показывала, как возникла высокая скорость вращения планет вокруг их собственных осей. Чтобы преодолеть эту трудность, было предложено несколько вариантов этой теории, но в 1939 г. Шпитцер [204] указал на более общий ее недостаток. Дело заключается в том, что струя, чтобы в ней было достаточное количество вещества, должна была вырваться из внутренних областей Солнца или другой звезды, где температура равна миллионам градусов, а при такой температуре струя рассеялась бы раньше, чем смогла остыть.

Только одна из теорий этого класса оказалась жизнеспособной — теория Вульфсона [251, 252]. В целом она следует приливной теории Джинса, но в ней предполагается, что приблизившаяся к Солнцу звезда была одним из многих тел, образовавшихся в новом звездном скоплении. Эта звезда была еще большей и холодной, в ней не произошло сжатия и не началась стадия ядерного синтеза (см. разд. 4.6.2). Привлекая холодную звезду, Вульфсон обходит трудность с горячим веществом, а говоря о звездном скоплении, он делает близкую встречу светил гораздо более вероятной, чем в теории Джинса. Чтобы объяснить различные особенности Солнечной системы, Вульфсон разработал свою теорию достаточно детально, проведя численное моделирование с помощью ЭВМ.

*Теории класса 2.* К этому классу относятся «небулярные» теории, и их можно просле-

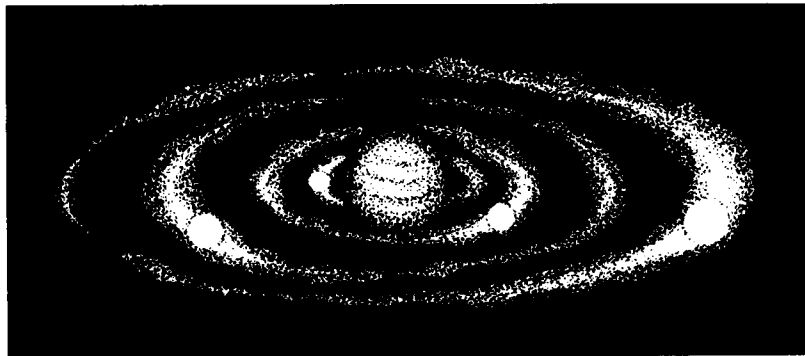


Рис. 4.3. Небулярная теория Лапласа. Газовый диск, сжимаясь, вращается все быстрее и быстрее, пока центробежная сила на его краю не превысит гравитационное притяжение и кольцо не разорвется. Через некоторые интервалы времени процесс повторяется. Кольца превращаются в планеты, а центральная масса становится Солнцем.

дить в прошлое до Канта, который в 1775 г. высказал предположение, что вещество Солнечной системы первоначально существовало в рассеянном виде и собралось вместе в результате гравитационного притяжения. Однако многие детали этой теории выглядели надуманными вплоть до 1830 г., когда под нее было подведено более логичное научное основание. Маркиз де Лаплас указал, что вращающееся облако, сжимаясь под действием собственной силы тяжести, должно было крутиться все быстрее и быстрее, чтобы сохранялся момент количества движения. В конце концов центробежная сила на периметре этого облака должна была превысить гравитационное притяжение к центру, так что кольцо вещества должно было разорваться. Лаплас предположил, что это кольцо конденсировалось в планету, а оставшаяся часть облака продолжала сжиматься, и через некоторые промежутки времени процесс повторялся (рис. 4.3).

И только в конце XIX в. обратили внимание на то, что, согласно этой модели, Солнце должно вращаться со скоростью, близкой к пределу центробежной силы, т. е. с периодом в несколько часов, тогда как на деле оно вращается гораздо медленнее: на один оборот ему требуется 27 сут. Таким образом, по теории Лапласа, на Солнце должна была приходиться бóльшая часть момента количества движения Солнечной системы. В 1918 г. Джеффрис показал, что при том разделении момента количества движения и массы, которое существует в Солнечной системе, газовое облако не могло непосредственно конденсироваться в планеты. Еще один необъясненный пункт: почему вещество туманности разделилось на кольца, а не сохранило форму диска? Именно из-за этих трудностей внимание ученых переключилось на приливные теории класса 1.

Небулярные теории легко объясняют тот факт, почему все планеты вращаются в экваториальной плоскости Солнца и почему планеты и Солнце вращаются в одну и ту же сторону. Но главные проблемы этих теорий состоят в том, чтобы 1) объяснить медленное вращение Солнца и 2) найти правдоподобный механизм, посредством которого разрозненные частицы вещества собирались бы в планеты. Для преодоления этих проблем предложен ряд возможных решений; некоторые из них будут приведены в разд. 4.3.2.

*Теории класса 3.* Эти теории – во многих отношениях гибриды теорий двух первых классов: их авторы пытаются избежать уже известных трудностей, причем обычно посту-

лируют подходящие условия, а не выводят их. Солнце к моменту появления вокруг него газовой туманности считается уже существующим, а сама туманность образуется при прохождении Солнца через межзвездное газово-пылевое облако или каким-то иным, никак не объясняемым, путем.

В середине 1940-х годов фон Вейцекер предложил теорию, в которой допускалось, что Солнце имело раньше газовую оболочку, обладавшую нужным моментом количества движения. Под действием силы тяжести эта оболочка должна была расплющиться до плоского диска, но это тело было нестабильным из-за сравнительно высокого газового давления. Из законов Кеплера следует, что чем дальше частица от Солнца, тем дольше она делает один оборот по орбите (см. уравнение (3.5)), в то время как трение в газе должно заставлять все частицы двигаться с одной и той же угловой скоростью. Фон Вейцекер пришел к выводу, что движение внутренних частей диска в этих условиях должно было замедляться и они должны были падать на Солнце, что в свою очередь замедляло бы его вращение, а внешние части диска должны были разбиваться на правильную систему вихревых образований, из которых и происходила бы конденсация планет.

Однако регулярный характер размещения вихрей весьма мало вероятен, и в более поздних теориях этот пункт заменен случайными турбулентными движениями, которые не дают диску стать нестабильным, как предполагалось раньше. Тер-Хаар [214, 215] высказал поэтому предположение, что вещество должно собираться вместе, образуя планеты, в ходе некоторого процесса *аккреции*, т.е. «слипания» твердых частиц. Различие плотностей планет земной группы и планет-гигантов он объяснил возрастанием температуры в туманности по направлению к Солнцу. В результате этого вблизи Солнца в виде твердых частиц могли существовать только наименее летучие элементы, а поскольку эти элементы отличаются высокой плотностью, возникавшие из них планеты также должны были быть плотными. Важное значение температурного градиента в Солнечной туманности получило сегодня широкое признание (разд. 5.2 и 5.5).

Совершенно другого типа теории основываются на силах, которые воздействуют на ионы (атомы, захватившие или потерявшие один или несколько электронов) в магнитном поле. Особенно детально эти идеи разработаны Альвеном [4], высказавшим в 1954 г. предположение, что межзвездный материал падал на Солнце и что возникавшие при этом высокие скорости иногда приводили при столкновении частиц к образованию ионов. На движение ионизированных частиц влияет магнитное поле, которое обычно имеется. Поскольку различные газы и твердые частицы в разной степени поддаются ионизации, Альвен использовал этот механизм, чтобы объяснить различие в составе планет земной группы и планет-гигантов.

Ни одна из этих теорий при количественном анализе не способна правдоподобно объяснить особенности Солнечной системы без привлечения произвольных постулатов, и сегодня теории данного класса не разрабатываются. Однако некоторые из высказанных в них предположений включаются в новые теории.

**4.3.2. Современные небулярные теории.** В настоящий момент не существует теории, которая удовлетворительно объясняла бы все особенности Солнечной системы начиная с правдоподобного первичного состояния. В то же время каждую отдельную особенность можно объяснить по меньшей мере двумя способами, опираясь на различные теории.

Из трех классов теорий, обсуждавшихся в предыдущем разделе, теории класса 3 не имеют современных вариантов, а класс 1 представлен только приливной теорией Вульфсона. Большие усилия вкладываются в развитие небулярных теорий, среди которых имеется целый ряд вариантов; некоторые из них будут здесь вкратце изложены. Все эти



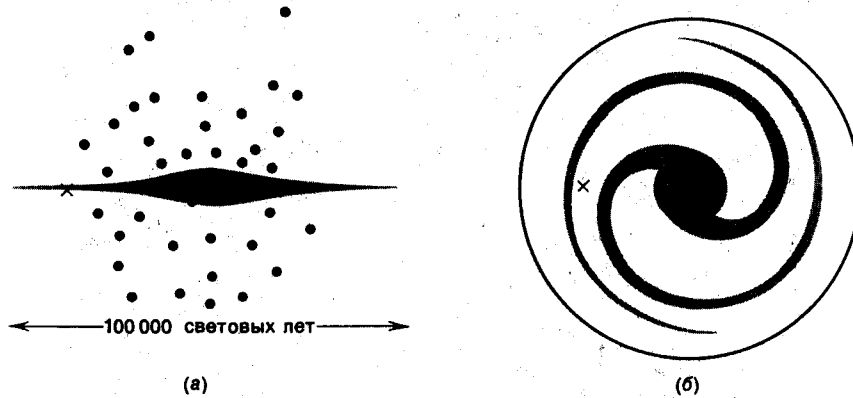


Рис. 4.4. Галактика в поперечном разрезе (а) и в плане (б). Большая часть материи сосредоточена в центре и в спиральных рукавах, но, кроме того, имеются шарообразные звезд-

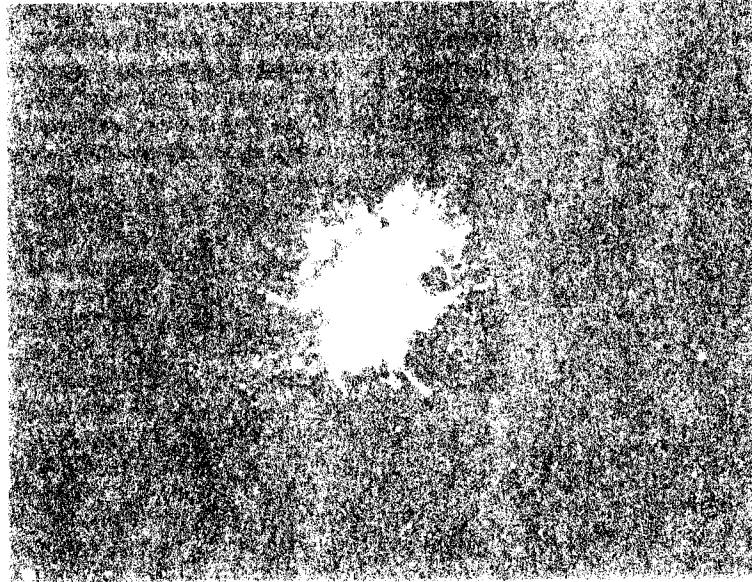
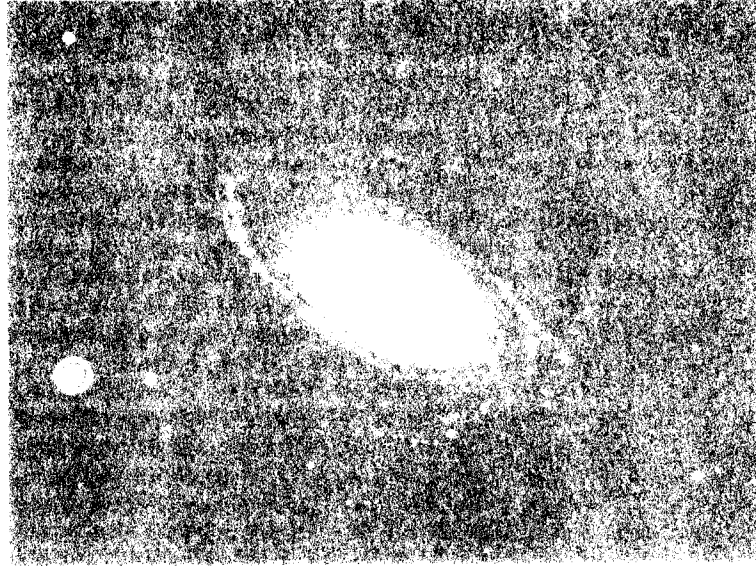
ные скопления, состоящие из многих звезд, которые образуют сферическое «гало». Приблизительное положение Солнца в Галактике показано крестиком.

теории, включая и теорию Вульфсона, рассматривают эволюцию Солнечной системы не изолированно, а как часть общего развития звездного скопления, возникающего из межзвездного облака. Эволюция должна проходить через ряд стадий, которые будут рассмотрены последовательно.

Образование протозвезд из межзвездного облака. Солнце — всего лишь одна из примерно  $10^{11}$  звезд, относящихся к нашей Галактике (рис. 4.4, 4.5) и сосредоточенных преимущественно в центре Галактики и в ее спиральных «рукавах». Предполагается, что эти спиральные ветви — не фиксированные образования, а «волны» повышенной плотности, которые пронесены вокруг центра. Звезды, попадая в спиральные рукава туманности, движутся медленнее, что приводит к увеличению плотности, точно так же, как это происходит на дороге, когда скопление многих машин вынуждает их замедлить ход.

Между звездами находится «межзвездная среда», которая состоит из разреженного газа с небольшой добавкой пыли — твердых зерен размером в несколько микрон. В этой же среде располагаются межзвездные облака, которые и холоднее, и плотнее: типичное облако имеет плотность 10 атомов в кубическом сантиметре, температуру 100 К ( $-170^{\circ}\text{C}$ ) и общую массу, равную  $10^4$  масс Солнца. Плотность такого облака недостаточна, чтобы в нем могло начаться сжатие под действием собственного гравитационного притяжения, а расширению препятствует окружающая межзвездная среда. Однако если облако входит в спиральный рукав туманности, то возникающее уплотнение вещества может оказаться достаточным для начала самопроизвольного сжатия. Это предположение подтверждается тем фактом, что большие яркие звезды, как и звезды, находящиеся на стадии скорого превращения в сверхновую, т. е. «молодые звезды» (см. разд. 4.6.2), обнаруживаются главным образом вдоль ведущих краев спиральных ветвей галактик.

Проблема образования звезд из такого облака заключается в том, что если каждая звезда получит пропорциональную долю момента количества движения облака, она будет вращаться слишком быстро и потеряет стабильность. Это означает, что период вращения звезды должен уменьшиться в 10 000 раз, чтобы материал перестал отрываться от ее экваториальной области. А Солнце вращается еще медленнее этого в сотни раз!



Одно из предложенных решений этой проблемы основывается на соображении, что облако характеризуется высокой турбулентностью. Турбулентные вихри приводят к возникновению временных «облачков», или «флоккул» [144]. Если два таких образования, вращающиеся в противоположные стороны, сталкиваются, из них может получиться более стабильное скопление материи, способное притянуть другие флоккулы, и вместе они будут иметь относительно малый момент количества движения. В результате момент количества движения первоначального облака сосредотачивается в относительном движении образовавшихся из него звезд и не переходит в их вращение.

В другом решении [181] предполагается, что облака частично ионизированы благодаря световому воздействию звезд и космическим лучам. Столкновения ионов в чрезвычайно разреженном газе происходят редко, поэтому ионы должны вести себя там как почти совершенный проводник электричества. Известно, что в межзвездных облаках существуют слабые магнитные поля (порядка  $3 \cdot 10^{-10}$  Тл, или  $10^{-5}$  магнитного поля Земли), захватывающие и окружающую межзвездную среду. Эти магнитные поля взаимодействуют с ионизированным облаком и эффективно стабилизируют его (см. приложение 4). В итоге, когда облако, сжимаясь, стремится вращаться быстрее, магнитное взаимодействие работает как тормоз и переносит момент количества движения из облака в окружающую среду.

Очевидно, что, независимо от деталей предполагаемого механизма, во время превращения облака в звезды момент количества движения не переходит к ним, потому что в противном случае звезды вращались бы чересчур быстро и были бы нестабильными. Кроме того, среди звезд нередки двойные (бинарные), и оси вращения этих пар не ориентируются в каком-либо преимущественном направлении, как можно было бы ожидать, если бы их вращательное движение произошло от вращения облака при простом разделении.

Развитие протозвезды в систему протопланет, обращающихся вокруг центральной массы. К началу этой стадии облако разбилось на много тысяч отдельных мелких облачков, или протозвезд. Они значительно плотнее материнского облака и могут поэтому удерживаться посредством собственного тяготения. Поскольку протозвезда испытала такое сильное сжатие, она будет вращаться гораздо быстрее, чем материнское облако, даже не обладая пропорциональной долей его момента количества движения. Дальнейшему сокращению объема звезды препятствует газовое давление, центробежная сила и, по мнению некоторых специалистов, ее магнитное поле. Таким образом, протозвезда будет грубой моделью материнского межзвездного облака, но уже с иными значениями плотности, размеров и других параметров.

В результате ускоренного вращения протозвезда будет расплющиваться в диск, или в солнечную туманность (небулу). Это можно представить себе яснее с помощью рис. 4.6. Гравитационное притяжение всюду направлено к центру массы, но центробежная сила направлена перпендикулярно оси вращения. Эти две силы не антипараллельны (кроме как в срединной плоскости), и поэтому равнодействующая (суммарная) сила будет перемещать газовый и пылевой материал протозвезды ближе к срединной плоскости по мере того, как протозвезда будет сжиматься, а ее вращение ускоряться. Следующая проблема — показать, как солнечная туманность сможет исторгнуть из себя часть вещества, которое пойдет затем на образование планет, при том, что основная масса, сжимаясь, превратится в центральное солнце. Согласно Прентису [174], диаметр «нашей» туманности во много раз превосходил диаметр Солнечной системы, а плотность составляла около  $10^{-16}$  кг/м<sup>3</sup> (около  $10^{10}$  атомов в кубическом сантиметре). Она была еще холодной

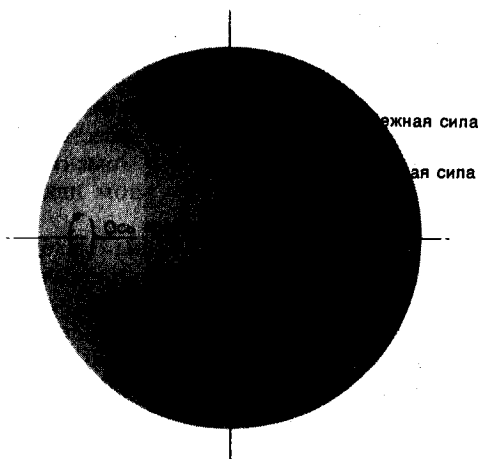


Рис. 4.6. Сжатие сферического облака в диск. Поскольку гравитационная и центробежная силы не антипараллельны, существует равнодействующая сила, направленная к срединной плоскости. Эта сила обеспечивает расплющивание массы вдоль этой плоскости по мере сжатия вещества.

(около 100 К), потому что тепло, хотя и выделялось при сжатии, терялось путем излучения. Однако на данной стадии своей эволюции туманность как раз становилась достаточно плотной для того, чтобы задерживать непосредственное излучение; следовательно, дальнейшее сжатие должно было заставить туманность нагреваться. При повышении температуры росло и газовое давление, что способствовало тому, что туманность стабилизировалась и не поддавалась дальнейшему сжатию. Здесь эволюция достигает фазы квазиравновесия, при которой тепло только медленно просачивается из внутренних областей туманности в пространство. Это приводит к медленному сжатию туманности и ее *разогреву*.

В лаборатории сжатие газа при постоянной температуре не только приводит к уменьшению его объема, но и повышает его давление, так что наступает момент, когда внутреннее газовое давление уравнивается приложенное внешнее давление. Но в крупной самосжимающейся массе газа этот простой механизм достижения равновесия не действует. Так происходит потому, что сжатие, сближая все частицы вещества, повышает силу тяготения, причем эта сила растет быстрее, чем давление, обусловленное сжатием. Единственная возможность достичь равновесия — оставить в облаке часть тепла, выделяющегося при сжатии, поднимая тем самым его температуру и, следовательно, давление газа. Отсюда и кажущийся парадокс: потеря тепла заставляет облако *нагреваться* и одновременно сжиматься, причем часть выделенной тепловой энергии идет на то, чтобы обеспечить достаточные потери внешнего тепла, а часть — на поднятие внутренней температуры. Этот процесс играет в звездной эволюции первенствующую роль (разд. 4.6.2).

Эта фаза медленной эволюции заканчивается, когда сжатие поднимает температуру до уровня, достаточного для испарения зерен твердых газов ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{NH}_3$  и т. д.), так как при этом тепло поглощается, что препятствует компенсационному росту температуры, описанному выше. Вещество туманности начинает падать по направлению к центру, и стабильность не восстанавливается до тех пор, пока не будут исчерпаны все возможности скрытой теплоты (не только испарение, но и диссоциация газовых молекул, например  $\text{H}_2$ , на атомы и их ионизация). Когда это произойдет, диаметр протозвезды должен быть

всего лишь в несколько раз больше диаметра нынешнего Солнца, а температура составит тысячи градусов.

Этот коллапс захватывает только самую внутреннюю часть облака, составляющую несколько процентов его массы, так как именно эта часть первой достигает температуры испарения. После резкого сокращения объема она восстанавливает свою стабильность уже как центральное «ядро», прежде чем внешняя часть успевает испытать дальнейшее сжатие. Внешняя часть продолжает сжиматься, но затем переходит в стабильное состояние вследствие подъема температуры, вызванного как собственным сжатием, так и теплом, исходящим от горячего центрального «ядра». Прентис считает, что на этой стадии туманность должна иметь примерно такой же диаметр, как у орбиты Нептуна, и быть сильно турбулентной.

Предположение о турбулентности имеет важное значение, так как обмен веществом между внутренними и внешними частями туманности не позволяет внутренним частям вращаться быстрее внешних частей, что имело бы место в сжимающейся туманности в ином случае. Это переносит момент количества движения изнутри туманности к нетурбулентному кольцу на ее краю. В конце концов внешнее кольцо отчленяется от туманности, продолжая сжиматься. Через какие-то промежутки времени этот процесс повторяется, в результате чего образуется серия колец примерно одной и той же массы, но располагающихся все теснее друг к другу по мере приближения к центральному ядру. Таким образом, согласно этой теории, Лаплас был прав, когда допускал, что должны появляться кольца. Образование колец, отвечающих существующим планетам, заняло бы только около 0,2 млн. лет, хотя окончательное сжатие туманности с преобразованием ее ядра в настоящее солнце заняло бы несколько миллионов лет.

Альвен [5] в 1978 г. предположил, что ключевую роль в развитии туманности играет магнитное поле, если вещество туманности частично ионизировано. Электромагнитные силы (см. приложение 4) переносят момент количества движения во внешние области, позволяя тем самым основной массе сжиматься и производя частичную сепарацию элементов.

Другие предложенные теории также основаны на привлечении магнитных или турбулентных вязких сил, способствующих коллапсу туманности, но эти теории различаются только в деталях и здесь не рассматриваются.

**Образование планет.** В результате эволюции туманности большая часть ее массы сосредотачивается в небольшом горячем центральном теле, которое пока еще не стало настоящим солнцем, однако часть вещества остается вне этого тела на расстояниях, соответствующих планетным, в виде диска или колец. Как это вещество собралось вместе и образовало планеты? По этому поводу существуют различные мнения, но все согласны в том, что процесс развивался в несколько стадий.

В облаке каждый элемент с точкой плавления, меньшей температуры облака, может существовать только в виде пара или газа. Однако если точка плавления выше этой температуры, то такие элементы лишь частично присутствуют в виде твердых зерен. Так происходит потому, что все вещества имеют какое-то давление пара, хотя оно и очень мало, если температура значительно ниже точки плавления. В межзвездном облаке давление настолько низкое, что значительная часть равномерно распределенного железа и силикатов существует в виде пара (при таких низких давлениях жидкая фаза отсутствует).

Когда из части межзвездного облака образуется солнечная туманность, рост давления приводит к тому, что часть пара конденсируется в зерна. Одновременно гравитационное

тяготение материала туманности стягивает эти зерна к срединной плоскости, так как хотя центробежная сила не позволяет им двигаться к оси вращения, эта сила не мешает движению перпендикулярно срединной плоскости (см. рис. 4.6). Вначале зерна, преодолевая сопротивление газа, падают медленно, но затем, по мере того как растут их размеры в результате конденсации из пара, зерна начинают падать все быстрее. Если пар не истощенный, то зерна при диаметре 3 см должны достигнуть срединной плоскости через 10 лет [84].

Если общая масса вещества на единицу площади (т. е. поверхностная плотность) пылевого диска в каких-то местах оказывается достаточно большой, то случайные скопления вещества в этом диске будут сжиматься под действием собственного тяготения. В результате такого процесса пылевое облако соберется в локальные агрегации, так называемые *планетезимали*, имеющие, вероятно, около 100 м в поперечнике. В свою очередь распределение планетезималей также нестабильно, и они собираются в планетезимали второй генерации с поперечником около 5 км, на что уходит несколько тысяч лет [84]. После этого рост связан не только с притяжением, но и со столкновениями тел, и в течение примерно 0,1 млн. лет образуются планеты<sup>1</sup>. В других теориях главным процессом, приводящим к аккреции, считается слипание зерен. Керридж [121] перечисляет несколько механизмов слипания, включая сварку при столкновениях и электростатическое притяжение. Указывалось и на роль магнитного притяжения между зернами железа. Когда планетезималь достигает достаточно больших размеров, важным фактором дальнейшего добавления материала становится гравитационное притяжение.

Специалисты согласны в том, что механизм слипания требует, чтобы аккреция продолжалась в течение десятков миллионов лет, т. е. много дольше, чем характерное время действия механизма гравитационной неустойчивости, описанного выше. Поэтому слипание не имело бы большого значения, если бы в диске, находящемся в состоянии аккреции, не было турбулентности, препятствующей росту планетезималей.

Согласно другим теориям, материал солнечной туманности (небулы) под действием гравитационных сил сначала собирается в отдельные облака, или протопланеты, и только после этого начинают действовать описанные выше механизмы аккреции, приводящие к тому, что протопланеты становятся теми планетами, которые мы знаем.

Фракционирование элементов и роль температуры. В ходе процесса образования центрального солнца и планет из части межзвездного облака существует много возможностей для того, чтобы элементы испытали в какой-то мере сегрегацию, или *фракционирование* (т. е. разделились бы на фракции). Один из главных факторов — отличие зерен, сложенных менее летучими и обычно более тяжелыми элементами, от газов. Фракционирование могло происходить путем простого оседания зерен в газе, как это отмечалось при описании образования пылевого диска; оно может быть связано с тем, что зерна гораздо реже, чем газовые частицы, получают электрический заряд и, таким образом, подвергаются действию электромагнитных сил; фракционирование могло быть вызвано способностью зерен слипаться посредством различных описанных здесь механизмов. Вероятно также, что зерна силикатов могли отделяться от зерен металлов из-за их различной плотности, а эксперименты показали, что при столкновении зерен металлов их слипание гораздо более вероятно, чем при столкновении зерен силикатов. Помимо

<sup>1</sup> По-видимому, должно быть сказано не «десятая доля миллиона лет», а «десятки миллионов лет». — Прим. ред.

этого, если магнитное притяжение между зернами имеет сколько-нибудь важное значение, то оно, очевидно, благоприятствует аккреции железа и никеля.

До сих пор температура упоминалась только изредка, но она играет ключевую роль в большинстве теорий аккреции и состава планет. То, какие элементы или соединения сформируют зерна, зависит, в ряду других факторов, от температуры, так как все вещества способны испариться, если температура достаточно высока. Кроме того, все согласны, что туманность должна при сжатии нагреваться, причем самая высокая температура будет вблизи ее центра. Однако различные теории расходятся в вопросе о том, когда оказывает температура наибольшее воздействие – на ранних стадиях эволюции туманности, разогревая ее, или же позже, когда протопланеты станут остывать и зерна начнут снова образовываться при конденсации.

Прентис [174] в своей теории предполагает, что хотя внутри орбиты Меркурия и образовались кольца, температура была там слишком высока, чтобы могли существовать какие-либо зерна, и поэтому начало аккреции там оказалось невозможным. На орбите Меркурия температура составляет около  $1000^{\circ}\text{C}$ , и только наиболее тугоплавкие вещества – некоторые металлы и силикаты – могут там конденсироваться, что и объясняет высокую плотность этой планеты. В широком смысле это относится ко всем планетам земной группы, тогда как Юпитер является самой близкой к центру планетой, при образовании которой могла происходить аккреция более летучих и более легких элементов, таких, как соединения Н, С, N и О (см. также разд. 5.2).

С некоторыми из этих механизмов фракционирования связаны, вероятно, различия в общем составе планет, особенно различия между планетами земной группы и планетами-гигантами, в то время как другие механизмы могли привести к расслоению планеты путем аккреции одних элементов раньше других.

Что же мы узнали, попытавшись проникнуть в суть проблем, связанных с образованием Солнечной системы? Хотя здесь остается еще много неопределенностей, некоторые общие заключения можно сделать. Вероятно, Солнечная система произошла в конечном счете из межзвездного облака, причем вместе со многими другими звездами. Состав, наиболее близкий к составу первоначальной Солнечной туманности, должен характеризовать само Солнце, так как оно образовалось, не испытав сложных процессов аккреции и фракционирования, пройденных планетами (на многие планеты повлияло, кроме того, развитие Солнца). Массы и состав планет можно вывести из грубо равных масс солнечного состава, разделившихся путем последовательного фракционирования. Юпитер потерял сравнительно мало водорода и гелия, Сатурн – значительно больше, тогда как Уран и Нептун утратили большую часть этих элементов и состоят главным образом из соединений углерода, азота и кислорода с небольшим количеством водорода. Планеты земной группы состоят преимущественно из более тяжелых элементов. Более подробные данные о различиях состава вывести из теорий образования Солнечной системы пока что нельзя, и в гл. 5 для этого будет использован иной подход.

**4.4. Распространенность элементов в атмосфере Солнца.** Распространенность элементов на Солнце («солнечные обилия» элементов) определяется по спектральным линиям поглощения, появляющимся, когда свет, излучаемый с видимой поверхности Солнца, проходит через тонкие, более холодные слои, расположенные над этой поверхностью. Поглощенные длины волн те же, которые испускались бы парами данного элемента при их нагреве или ином возбуждении. Примером может служить желтый свет натриевых ламп уличных фонарей. Когда солнечный свет расщепляется спектрометром на составляющие световые волны, линии поглощения выглядят на спектре черными.

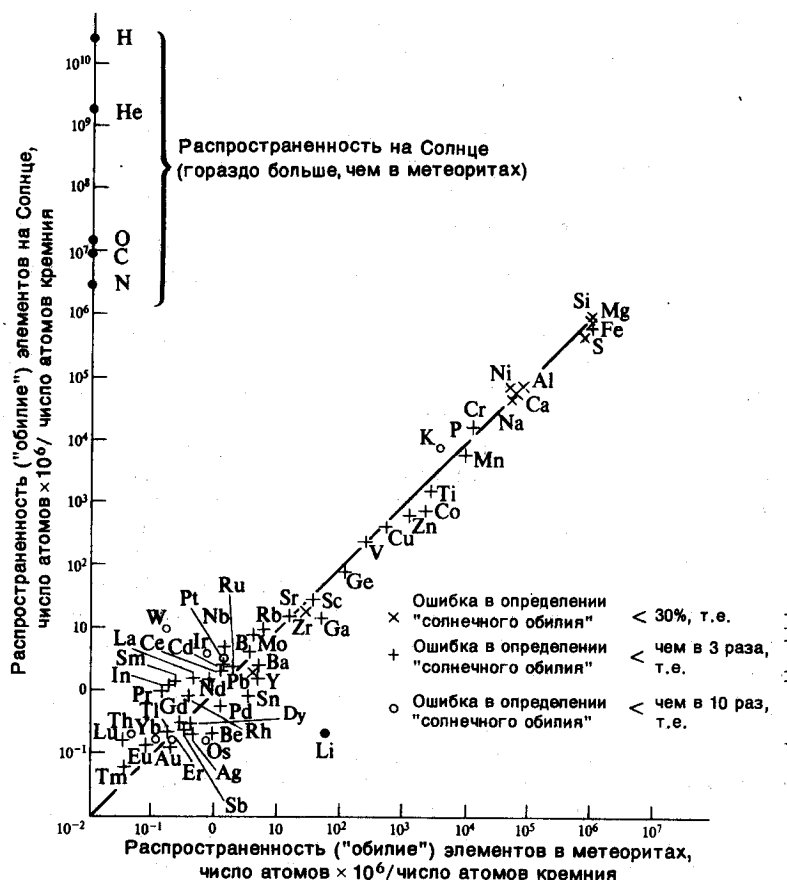


Рис. 4.7. Сравнение распространенности элементов на Солнце и в метеоритах — хондритах (распространенность кремния принята за  $10^6$ ). В отношении H, He, O, C и N сравнение не проводится, так как они в основном метеоритами потеряны благодаря их большой летучести, но на оси «солнечных обилий» они показаны, и можно видеть, что на Солнце они преобладают. Аномальное положение лития обсуждается в разд. 4.6. (Данные взяты из работы [220].)

Интенсивность поглощения зависит не только от количества присутствующего элемента, но также от температуры, давления и от того, насколько эффективно данный элемент поглощает свет (т.е. от «силы осциллятора»). Последний фактор трудно определить расчетным или экспериментальным путем, и он вносит неопределенность в вычисленные значения распространенности некоторых элементов, изменяя их в 10 и более раз.

Поскольку Солнце получает свою энергию путем ядерных реакций, в которых один элемент превращается в другой, возникает вопрос: не повлияли ли эти процессы на распространенность элементов со времени образования Солнца? Однако из теорий звездной эволюции (разд. 4.6.2) следует, что такие процессы ограничены, вероятно, глубокими вну-



Таблица 4.2. Классификация метеоритов (по данным Уоссона [237])

		Наблюдавшиеся падения метеоритов		
		%	Число	
Дифференцированные метеориты	Железные	1,1	8	
	Железосодержащие	3,2	22	
	Ахондриты	8,3	57	
Недифференцированные метеориты	Хондриты	Каменные	87,4	602

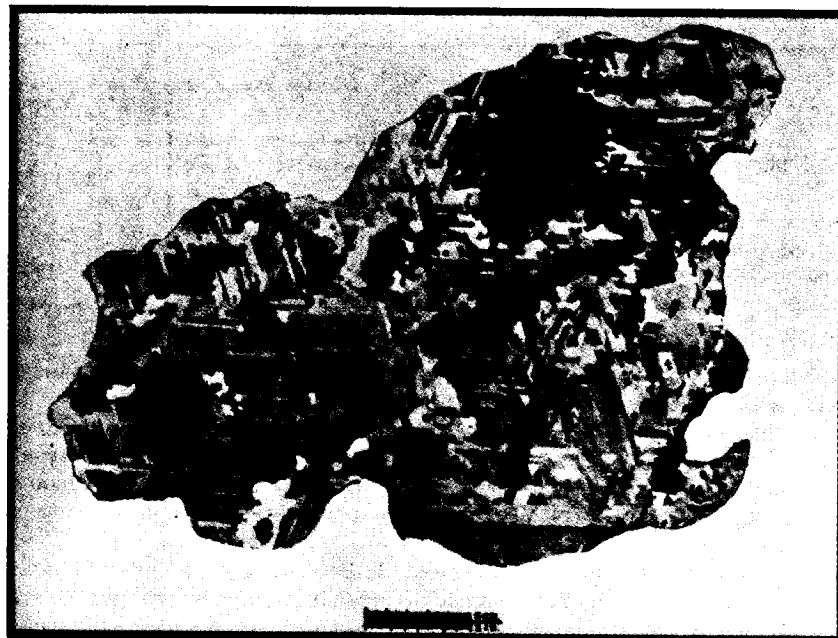
тренними областями (за исключением процессов, влияющих на распространенность лития), так что внешние слои должны сохранять свой состав.

Знание «солнечных обилий» позволяет определить начальный состав Солнечной туманности, а его можно сравнить с данными о распространенности элементов в других частях Солнечной системы, в частности в метеоритах и в земной коре. Такое сравнение проводится на рис. 4.7 и 5.4, где все «обилия» сопоставлены с распространенностью кремния.

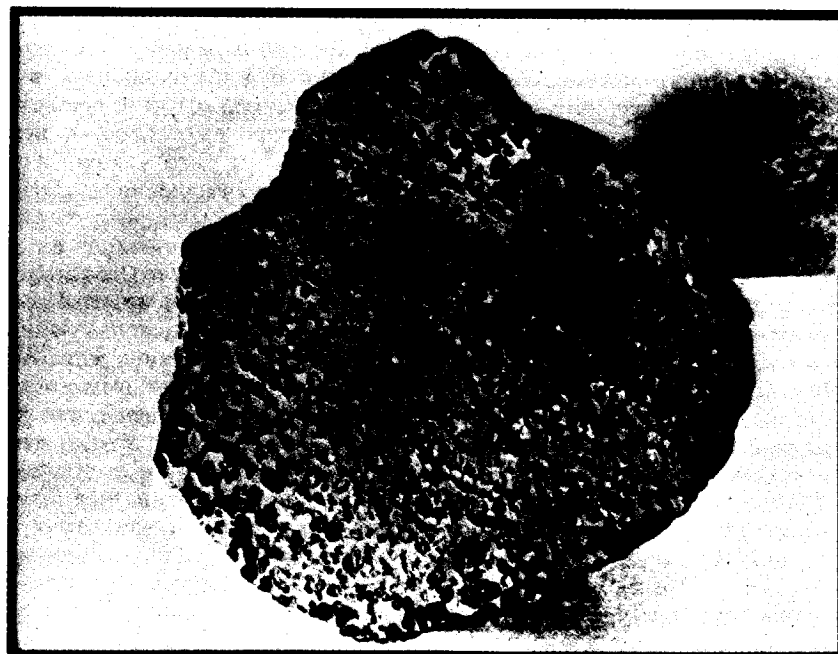
**4.5. Метеориты. 4.5.1. Вводные замечания.** Метеориты играют чрезвычайно важную роль, потому что они, как полагают, являются представителями различных стадий процесса аккреции планет—своего рода «окаменевшими остатками» развивающейся ранней Солнечной системы, какой бы она ни была,—и тем самым дают нам сведения о процессах аккреции, следы которых на планетах были стерты дальнейшими процессами. Считается, в частности, что некоторые метеориты имеют состав, эквивалентный среднему составу Земли (с учетом изменений, вызванных некоторой потерей отдельных элементов), и эта идея привела к хондритовой модели Земли, которая будет рассмотрена в разд. 5.4.

По определению метеорит—это кусок внеземного вещества, который прошел через атмосферу Земли и упал на ее поверхность. Метеоры же, напротив, полностью испаряются, создавая явление, известное как «падающие звезды». Помимо того что они значительно меньше метеоритов, они, по мнению большинства ученых, совершенно не связаны с метеоритами и больше упоминаются здесь не будут.

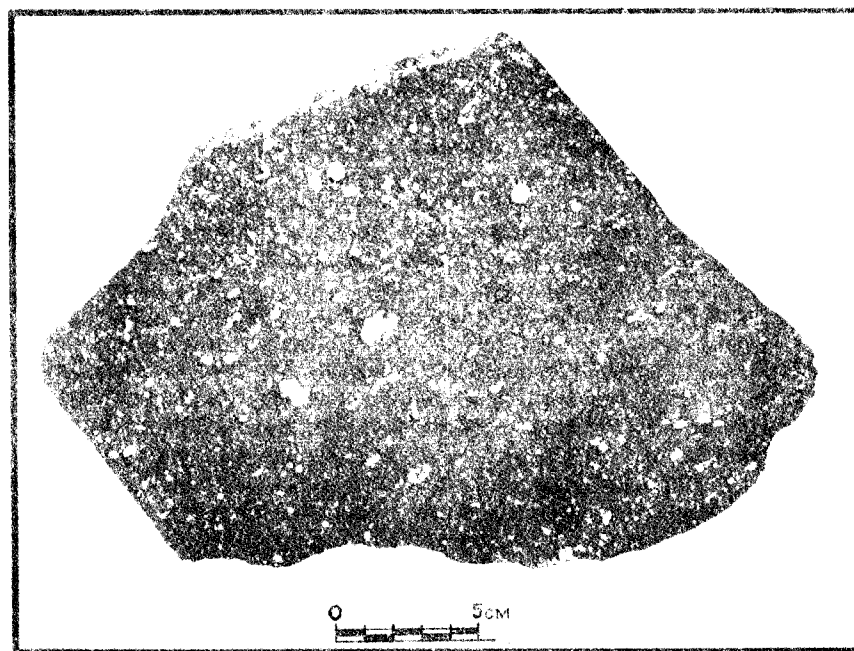
Внезапное появление метеорита, часто сопровождающееся возникновением впечатляющего огненного шара (болида), иногда делало такого «небесного гостя» предметом почитания; например, священный камень мусульман, хранящийся в мечети Кааба в Мекке, считается метеоритом. В других местах первобытные племена использовали металлические метеориты для более практических целей; правда, ковали из них чаще мечи, нежели орала. Фантастические истории, окружающие метеориты, иной раз вызывали у ученых необоснованный скептицизм в отношении их небесного происхождения, так что Эрнст Хладни с явной неохотой опубликовал в 1794 г. свои соображения о том, почему метеориты надо считать внеземной материей. Однако его теория вскоре получила широкое признание. (Одним из известных скептиков, не веривших этой теории, был Томас Джефферсон, который участвовал в составлении проекта Американской конституции, а позднее стал президентом. По поводу сообщения о падении метеорита, сделанного двумя профессорами из Йельского университета, Джефферсон заметил: «Проще поверить в то, что профессора-янки врут, чем в то, что камни падают с неба». Однако эта фраза жившего



(a)



(b)



(B)

Виргинии Джефферсона может сказать нам больше о его отношении к американским звездам, чем о метеоритах.)

Принято делить метеориты на четыре большие группы (табл. 4.2). *Железные* метеориты (рис. 4.8, а) состоят более чем на 90% из никеля и железа в виде металлического сплава; *каменные* метеориты сложены преимущественно силикатными минералами, главным образом такими, которые широко развиты на Земле; *железосиликатные* метеориты обычно наполовину металлические, наполовину силикатные (рис. 4.8, б). *Каменные* метеориты подразделяются на *хондриты*, содержащие *хондры* (рис. 4.8, в), и *ахондриты*, в которых хондры отсутствуют или очень редки и которые в отличие от других трех типов содержат мало свободного металла (< 1%). В музейных коллекциях представлены в большинстве случаев железные метеориты, но это объясняется тем, что их легче опознать, так как они сильнее отличаются от земных пород. Табл. 4.2 показывает, что на деле гораздо шире распространены хондриты. Однако мы не знаем, насколько точно эта таблица отражает распространенность метеоритов в их источнике хотя бы потому, что большинство известных метеоритов выпали только в последние несколько сотен лет.

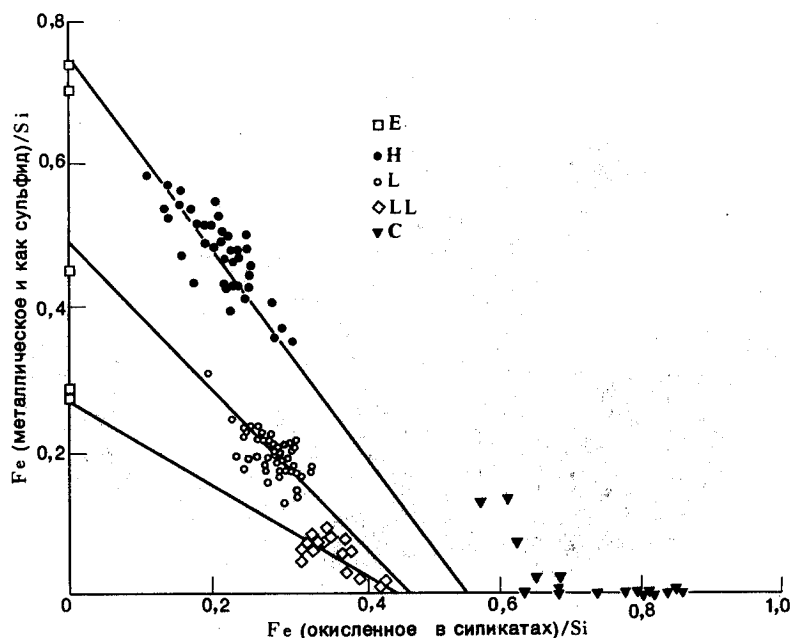


Рис. 4.9. Содержание железа в хондритах (относительное количество, доля окислов). Пример того, как метеориты разных классов раз- биваются на группы по составу. Значения символов объясняются в табл. 4.3. ([120], с разрешения издательства D. Reidel Publishing Co.)

Метеориты можно подразделять и дальше, используя различные критерии, на много классов, но обычно главное внимание обращается на преобладающие минералы. Для нас полезнее разбить метеориты сначала на две группы: группу *дифференцированных* метеоритов (табл. 4.2) со следами послееаккреционного плавления (или других процессов), которое привело, очевидно, к заметной сегрегации элементов, и группу *недифференцированных* метеоритов, которые не подвергались плавлению и поэтому значительно ближе по составу к первоначальному веществу, из которого образовались их материнские тела и вся Солнечная система.

**4.5.2. Недифференцированные метеориты — хондриты.** Хондриты характеризуются присутствием хондр (рис. 4.8, в), имеющих грубо такой же состав, что и матрица, в которую они заключены. По-видимому, хондры приобрели свою почти сферическую форму в результате плавления, которое произошло еще до того, как они были заключены в матрицу, хотя в точности неизвестно, как и когда они образовались. Согласно одному из предположений, они конденсировались непосредственно из пара, но это потребовало бы неправдоподобно высоких давлений. По другой гипотезе, имело место ударное плавление зерен или мелких планетезималей, подтверждением чему служит по меньшей мере один известный пример частичного плавления при ударе. Такие соударения происходили, вероятно, на ранней стадии аккреции вещества Солнечной туманности в материнские тела метеоритов.

Хондриты можно классифицировать двумя способами. Первый способ – классификация по составу. На рис. 4.9 показано, как хондриты можно разбить на дискретные классы, используя в данном случае соотношения между железом, кислородом и кремнием. Полагают, что эти классы представляют различные материнские тела, находящиеся на разных стадиях окисления и имеющие разные отношения Fe/Si (подробное обсуждение см. в разд. 5.4). Вторая классификация – непрерывная и основана на степени перекристаллизации (или «метаморфизма»), которой подвергся метеорит. Например, в некоторых метеоритах хондры видны очень четко, в других – не столь четко, а в третьих они различаются только как «призраки»: кристаллы прорастают через их границы. Вообще говоря, метеориты, прошедшие только низшие ступени метаморфизма, далеки от химического равновесия, т. е. некоторые минералы, входящие в состав этих метеоритов, при достаточном нагреве не могут существовать совместно, и их элементы будут перестраиваться, например



Это происходит в хондритах более высоких ступеней метаморфизма.

Ван Шмус и Вуд [230] разработали в 1967 г. классификацию хондритов одновременно и по составу, и по степени метаморфизма (табл. 4.3). Метеориты, располагающиеся в каждой отдельной строке, относятся к одной химически родственной серии с возрастанием метаморфизма слева направо. Соответственно те метеориты, которые помещены слева, изменены в наименьшей степени и рассматриваются как наиболее «примитивный», т. е. первичный, материал. Углистые (углеродистые) хондриты отличаются от других типов значительным содержанием кристаллизованной (связанной) воды, углеродных соединений и серы, но малым содержанием свободных металлов. На рис. 4.9 видно, что это наиболее окисленная группа метеоритов с высокими значениями отношения Fe/Si. Углистые хондриты испытали самый слабый по сравнению с другими метеоритами мета-

Таблица 4.3. Классификация хондритов

Типы хондритов	Степень метаморфизма					
	( Возрастание степени перекристаллизации → Пribлижение к химическому равновесию → Уменьшение содержания летучих и т. д. → )					
	1	2	3	4	5	6
Энстатитовые (E), т. е. содержащие богатый магнием ортопироксен энстатит			E3(0)	E4(3)	E5(2)	E6(6)
Высокожелезистые (H)		H3(6)		H4(23)	H5(53)	H6(32)
Низкожелезистые (L)		L1(9)		L2(11)	L3(28)	L4(117)
Очень низкожелезистые (LL)		LL1(6)		LL2(1)	LL3(7)	LL4(20)
Углистые (C)	C1(5)	C2(18)	C3(9)	C4(1)		

*Примечание.* Цифры в скобках показывают число падений метеоритов данной категории. Рамкой обведены так называемые обыкновенные хондриты – наиболее распространенная группа. (По Ван Шмусу и Вуду [230], с изменениями.)

морфизм, потому что они потеряли бы свои более летучие компоненты, если бы были нагреты всего лишь до  $180^{\circ}\text{C}$ . Метеориты же, помещенные в колонку 6, испытали воздействие температур  $700\text{--}800^{\circ}\text{C}$ .

Важное значение углистых хондритов заключается в том, что, будучи самыми «примитивными» из метеоритов, они считаются самыми близкими по составу к первоначальной Солнечной туманности. Сопоставление хондритовых и солнечных «обилий» элементов (рис. 4.7) указывает на заметное сходство в относительной распространенности большинства элементов, кроме наиболее летучих. Исключение составляет литий, который, вероятно, уничтожается на Солнце в процессе ядерных реакций (разд. 4.6.2).

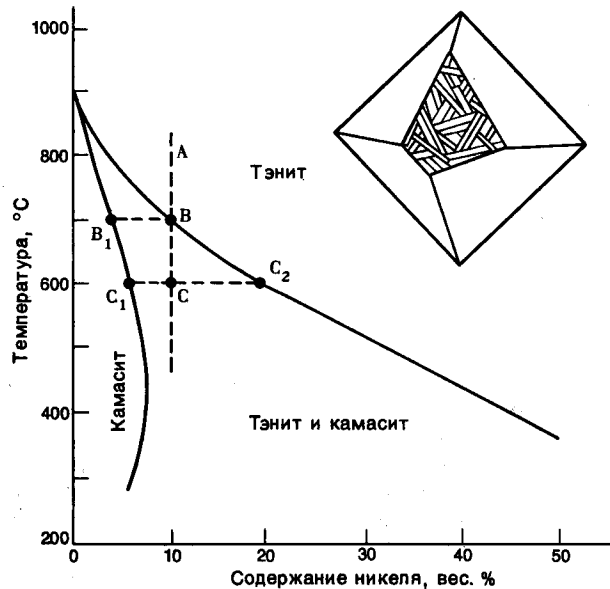
Это сходство состава подтверждает, что метеориты имеют важное значение для развития представлений о Солнечной системе. Метеориты дают также сведения об изотопных отношениях и о физико-химических условиях в развивающейся Солнечной туманности — сведения, которые нельзя получить, изучая только Солнце.

4.5.3. *Дифференцированные метеориты — железные, железокремнистые и ахондриты.* Железные метеориты. У большинства железных метеоритов, когда их распилят, отполируют и протравят кислотой, на обработанных поверхностях обнаруживается решеткообразный узор, который называют видманштеттовыми фигурами (рис. 4.8, а). Такой узор возникает в том случае, если при понижении температуры два кристаллизующихся минерала уже не могут полностью смешиваться в твердом виде. Предположим, атомы двух элементов сходны, но не идентичны (таковы, например, атомы железа и никеля), и поэтому они, каждый в отдельности, образуют кристаллические решетки, слегка отличающиеся одна от другой. При высокой температуре эти два типа атомов могут свободно обмениваться в кристалле вследствие рыхлой упаковки в расширившейся кристаллической решетке. Но при понижении температуры различие между атомами разных типов становится заметным. Наступает момент, когда энергия всей системы может быть уменьшена путем распределения атомов в две различные решетки с преобладанием разных элементов, даже если при этом в местах стыка решеток не получается хорошего совпадения границ. Чтобы несовпадение было минимальным, новые решетки растут в материнской решетке вдоль преобладающих направлений в виде *пластинок экссольюции* (распада твердого раствора). Знакомый петрологам пример — пертитовая структура в щелочных полевых шпатах.

На рис. 4.10 приводится фазовая диаграмма для твердых железо-никелевых смесей. Рассмотрим смесь, содержащую, скажем, 10% никеля в железе, при начальной температуре  $1000^{\circ}\text{C}$  (точка А на рис. 4.10). При этой температуре оба элемента полностью смешиваются в твердом растворе, но когда температура падает до точки В, это уже не так. Ниже точки В внутри решетки тэнита ( $\gamma$ -фазы никелистого железа) образуется камасит ( $\alpha$ -фаза никелистого железа)<sup>1</sup>, имеющий состав  $\text{V}_1$ . Дальнейшее охлаждение до точки С увеличивает несходство двух кристаллических решеток, хотя доли  $\text{C}_1$  и  $\text{C}_2$  должны быть такими, чтобы в общем составе было 10% Ni и 90% Fe. Камасит образуется внутри тэнита вдоль определенных плоскостей, соответствующих поверхностям октаэдра; поэтому для таких метеоритов иногда используется название «октаэдрит». Поверхности октаэдра (состоящего из двух пирамид, примыкающих основаниями) принадлежат только четырем плоскостям, так как противоположные грани параллельны, и на случайных сре-

<sup>1</sup> В оригинале тэнит ошибочно назван  $\alpha$ -фазой, а камасит —  $\gamma$ -фазой никелистого железа. — Прим. перев.

Рис. 4.10. Фазовая диаграмма твердой смеси Fe–Ni при атмосферном давлении. Камасит образуется вдоль плоскостей октаэдра первоначального тэнита, и возникающие при этом видманштеттовы фигуры можно обнар­ужить, как показано на схеме-врезке, на произвольном срезе через кристаллическую решетку [85].



зах через кристалл появляются разнообразные видманштеттовы фигуры, похожие, однако, на узоры, которые видны на рис. 4.8, а и на врезке к рис. 4.10.

Для полного развития пластинок экссолюции необходимо, чтобы у атомов было достаточно времени для перераспределения путем диффузии в твердом состоянии, а поскольку при понижении температуры диффузия замедляется, в конце концов состав кристаллических решеток оказывается «замороженным». Чем быстрее происходит охлаждение, тем выше температура торможения диффузии. Детальное исследование состава пластинок экссолюции в ряде железных метеоритов дает для скорости охлаждения величины порядка 1–10°C за миллион лет. Такое медленное охлаждение лучше всего объясняется, если предположить, что каждый такой метеорит был частью горячего тела, остывавшего медленно из-за своего размера, а также вследствие изолирующего действия «мантии», состоявшей из силикатов. Расчеты показывают, что диаметр такого тела должен быть порядка нескольких сотен километров, что сравнимо с размерами крупных астероидов.

**Ахондриты.** Из четырех групп метеоритов только ахондриты в чем-то похожи на известные земные породы. Некоторые ахондриты близки к оливинным базальтам и мелкозернистым перидотитам и, следовательно, могли образоваться только в процессе химической очистки, включающей плавление внутри какого-то тела, как это описывается в разд. 5.2.2.

**Железокаменные метеориты.** Наиболее распространенные метеориты этой группы состоят из железо-никелевой массы с включениями оливина и небольшим количеством других силикатных минералов (рис. 4.8, б). Металлическая фаза похожа на то, что наблюдается в октаэдритах, и, вероятно, эти два типа метеоритов связаны между собой.

Минералы дифференцированных метеоритов всех трех типов кристаллизовались при высоких температурах, а в случае железных метеоритов имеются данные о медленном

охлаждении. Возможно, это обломки, образовавшиеся в результате столкновения астероидов, что подтверждается чрезвычайно неправильной формой малых астероидов, а также небольшой длительностью существования обнаженной поверхности метеоритов. Вывод о таком возрасте делается по степени изменения, связанного с бомбардировкой космическими лучами и затрагивающего только обнаженные поверхности. Возраст обнаженных поверхностей бывает гораздо меньше, чем возраст образования вещества метеоритов (см. разд. 4.5.4), и в некоторых случаях составляет только несколько миллионов лет. Часто оказывается, что поверхности метеоритов целого класса имеют один и тот же возраст; это позволяет предположить, что все они возникли при одном столкновении.

Считают, что дифференцированные метеориты происходят, по всей видимости, из астероидов, испытавших когда-то плавление: металлы выпали из расплава, образовав ядро, окруженное силикатной мантией с переходным слоем между ними. Такое тело медленно остывало, а затем было разбито при столкновении на куски, и из трех его слоев получились железные и железокремниевые метеориты и хондриты. Аналогия с соответствующими слоями Земли напрашивается сама собой.

**4.5.4. Возраст и интервалы времени образования метеоритов.** Возраст образования метеоритов, т. е. время, когда они приобрели свой нынешний минеральный состав, определяется рубидий-стронциевым методом изохрон (приложение 5) или другими способами. В большинстве случаев этот возраст составляет от 4,3 до 4,7 млрд. лет. Это близко к оценке возраста Солнечной системы по данным об изотопах свинца (приложение 6).

Дополнительным доказательством того, что метеориты достигли своего современного состояния на ранних этапах эволюции Солнечной системы, служат оценки величины интервала времени образования, т. е. промежутка времени между возникновением определенных радиоактивных изотопов и их включением в метеориты. Полагают, что эти изотопы (объяснение термина «изотоп» и других относящихся к данному вопросу терминов см. в приложении 7) образовались в сверхновой незадолго до появления Солнечной туманности (разд. 4.6.2). Главный интерес для нас представляют изотопы с коротким периодом полураспада:

$^{244}\text{Pu}$  → продукты деления, в том числе некоторые изотопы ксенона, период полураспада 82 млн. лет;

$^{129}\text{I}$  →  $^{129}\text{Xe}$  — период полураспада 16,4 млн. лет;

$^{26}\text{Al}$  →  $^{26}\text{Mg}$  — период полураспада 0,72 млн. лет.

Если какой-то из этих материнских изотопов был включен в минерал раньше, чем он распался до незначительных количеств, то последующий распад приводит к появлению некоторого количества дочернего изотопа, которое можно обнаружить как изотопную аномалию. Метод можно проиллюстрировать на примере изотопа  $^{26}\text{Al}$ .

У алюминия есть только один стабильный изотоп ( $^{27}\text{Al}$ ), который должен был синтезироваться одновременно с  $^{26}\text{Al}$  (см. разд. 4.6), так что если при образовании того или иного минерала в его составе было какое-то количество алюминия, то он должен содержать как  $^{27}\text{Al}$ , так  $^{26}\text{Al}$  в соотношении, пропорциональном прошедшему времени. Рассмотрим несколько различных минералов, образовавшихся одновременно, но содержащих разное количество Al и Mg. Предположим, что в одном минерале алюминия нет; тогда отношение  $^{26}\text{Mg}/^{24}\text{Mg}$  в нем будет соответствовать времени образования, и коэффициент пропорциональности не должен, следовательно, меняться, так как минерал не содержал радиоактивного  $^{26}\text{Al}$ . На диаграмме зависимости  $^{26}\text{Mg}/^{24}\text{Mg}$  от  $^{26}\text{Al}/^{24}\text{Mg}$  (рис. 4.11,а) это будет соответствовать точке А. Предположим, что второй минерал содержит Al, и Mg: в момент образования этого минерала соотношение изотопов соответ-



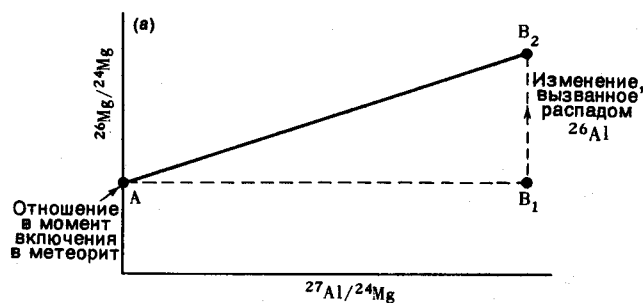
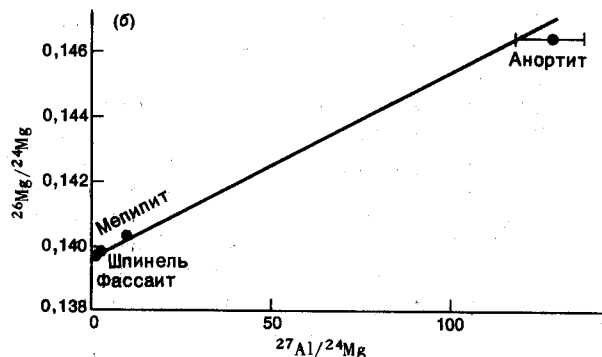


Рис. 4.11. Доказательство былого существования исчезнувшего изотопа  $^{26}\text{Al}$ . а — схема изменения состава минералов с различным отношением  $\text{Al}/\text{Mg}$  в процессе распада  $^{26}\text{Al}$ ; б — пример изменения состава одного из включений в углистом хондрите Allende. Подробности см. в тексте. (По данным из работы [130], с разрешения издательства Pergamon Press.)



ствовало точке  $B_1$ , находящейся на одном уровне с точкой А. Но поскольку минерал содержал как изотоп  $^{27}\text{Al}$ , так и изотоп  $^{26}\text{Al}$  (на диаграмме не показан), отношение  $^{26}\text{Mg}/^{24}\text{Mg}$  со временем должно было расти и достигнуть конечной величины  $B_2$ , когда практически весь  $^{26}\text{Al}$  распался. Другие минералы с различными соотношениями  $\text{Al}/\text{Mg}$  попадают на диаграмме на ту же самую прямую. Если же, напротив, все минералы образовались после того, как  $^{26}\text{Al}$  полностью распался, то они сохраняют первоначальное отношение  $^{26}\text{Mg}/^{24}\text{Mg}$  и на диаграмме попадут на горизонтальную линию. Таким образом, чем круче линия, тем меньше времени должно было пройти до момента образования алюминия перед его включением в минерал. Соотношение между  $^{27}\text{Al}$  и  $^{26}\text{Al}$ , возникающее в момент синтеза, можно оценить на основании теории нуклеосинтеза (разд. 4.6.1), и тогда по наклону линии можно рассчитать интервал образования: крутой наклон означает, что этот интервал был коротким.

На рис. 4.11, б представлены результаты анализа для различных минералов из одного и того же включения в метеорите Allende — углистом хондрите категории С3, упавшем в Мексике в 1969 г. (рис. 4.8, в). Поскольку период полураспада  $^{26}\text{Al}$  составляет всего лишь 0,7 млн. лет, то очевидно, что интервал образования этого метеорита должен был быть коротким; расчеты дают максимальное значение этого интервала 3 млн. лет. Включения в метеорите Allende состоят из наиболее тугоплавких минералов. Это показывает, что они были первыми минералами, конденсировавшимися в охлаждающемся паре, и их

можно, вероятно, считать очень ранними конденсатами, возникшими в Солнечной туманности [17].

Из этого результата вытекает ряд важных следствий. Во-первых, столь короткий интервал означает, что образование Солнечной системы связано с синтезом элементов; по этому поводу было высказано предположение, что сверхновая и синтезировала некоторые элементы, и послужила спусковым механизмом для образования Солнечной системы (см. разд. 4.3.2, 4.6.1). Во-вторых, включение даже малых количеств короткоживущих радиоактивных изотопов, особенно  $^{26}\text{Al}$ , в состав только что образовавшихся планет и астероидов должно было дать столько тепла, сколько хватило бы для того, чтобы их расплавить (см. разд. 5.2.2).

Малые значения интервала образования, полученные на основе учета  $^{26}\text{Al}$ , противостоят оценкам (около 100 млн. лет), сделанным по  $^{244}\text{Pu}$  и  $^{129}\text{I}$ . Такое расхождение можно объяснить, предположив, что два последних радиоактивных изотопа образованы более ранней сверхновой, когда межзвездное облако, из которого затем возникло Солнце, проходило предыдущий спиральный рукав, а это было, вероятно, на 100 млн. лет раньше (разд. 4.3.2).

Хотя о метеоритах многое еще не известно, думается, что уже сейчас можно сделать следующие выводы:

а) По всей петроструктуре хондриты совершенно не похожи ни на какие земные породы; для образования хондритов требовались совсем другие условия. Эти условия отвечают ранним стадиям развития Солнечной туманности.

б) Углистые метеориты наиболее близки по составу к веществу Солнечной туманности: они потеряли только наиболее летучие элементы. Поэтому представляется логичным считать их возникновение той начальной точкой, от которой шло формирование состава Земли. Такое предположение приводит к хондритовой модели Земли (разд. 5.4.1).

в) Метеориты образуются при столкновении астероидов.

г) Дифференцированные метеориты сформировались в недрах малых планет, или астероидов, достаточно нагретых, чтобы там произошло расслоение с образованием железного ядра, силикатной мантии и переходной области между ними. При последующем расколе в результате столкновения возникли железные метеориты, ахондриты и железокремневые метеориты.

**4.6. Нуклеосинтез и эволюция звезд. 4.6.1. Нуклеосинтез.** Допускается, что началом должен быть водород, так как это простейший и безусловно самый распространенный из элементов. Чтобы заставить слиться атомные ядра (см. приложение 7), их надо свести очень близко, а это трудно из-за сильного отталкивания между их положительными электрическими зарядами. Удастся это только при случайных тепловых скоростях, возникающих в «газе», нагретом до многих миллионов градусов. Поскольку более тяжелые ядра имеют больший электрический заряд, увеличивающий силу отталкивания, для построения последующих элементов требуется уже целый ряд *термоядерных* реакций, происходящих при все более высоких температурах (см. рис. 4.12). (В ускорителях элементарных частиц те же скорости достигаются без высоких температур, и это позволяет изучать такие реакции в лаборатории.)

Первый этап — *термоядерное сгорание водорода*, в ходе которого четыре протона, т. е. четыре ядра водорода, сливаются в результате ряда реакций, происходящих при температуре  $2 \cdot 10^7$  К или больше, в одну  $\alpha$ -частицу, или ядро гелия. При более высоких температурах (около  $2 \cdot 10^8$  К) *сгорание гелия* заставляет сливаться  $\alpha$ -частицы, но образующийся из двух  $\alpha$ -частиц изотоп  $^8\text{Be}$  нестабилен, поэтому при объединении трех  $\alpha$ -частиц обра-

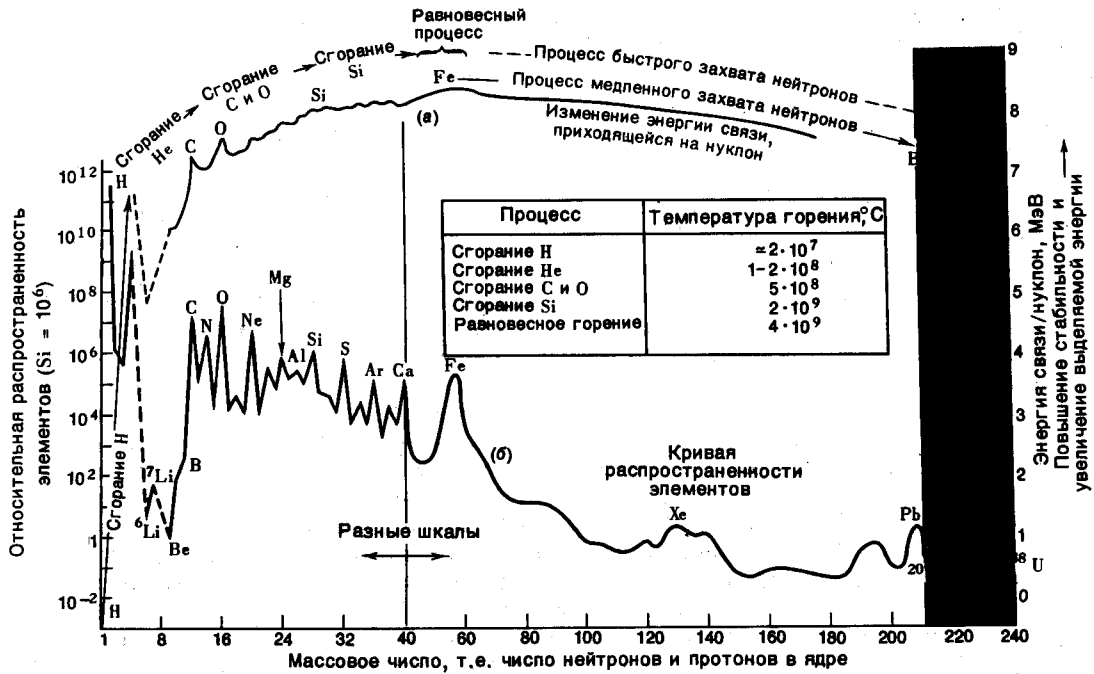


Рис. 4.12. Нуклеосинтез и распространенность элементов. *a* – энергия связи, приходящаяся на один нуклон, т.е. протон или нейтрон (верхняя кривая); чем выше находится элемент на этой кривой, тем он стабильнее. При превращении менее стабильного ядра в более стабильное высвобождается энергия, которая пропорциональна разности ординат, умноженной на число захваченных нуклонов. Показаны наиболее важные ядерные реакции. Дальнейшие объяс-

нения см. в тексте и в приложении 7; *b* – относительная распространенность элементов (нижняя кривая): значения выведены из данных о солнечных и метеоритных обилиях и соответствуют, как предполагается, распространенности элементов в Солнечной туманности. Заметьте, что на общую тенденцию к убыванию значений накладываются пики, соответствующие пикам или изменениям наклона на верхней кривой [38].

зуется  $^{12}\text{C}$ , который может принять еще одну  $\alpha$ -частицу и превратиться в  $^{16}\text{O}$ . Эти реакции вызывают истощение гелия, и для начала термоядерного сгорания углерода или кислорода температура должна подняться примерно до  $5 \cdot 10^8$  К. В результате этих реакций получается  $^{28}\text{Si}$ , который особенно стабилен, и образуются некоторые другие ядра.

Чтобы заставить непосредственно слиться два ядра  $^{28}\text{Si}$ , потребовалось бы дальнейшее значительное повышение температуры, но еще до этого развиваются другие реакции, при которых, по сути дела, происходит случайное разрушение некоторых имеющихся ядер и соединение их осколков с другими ядрами, что в конце концов превращает ядра кремния в более стабильные и тяжелые ядра. Этот процесс сгорания кремния при дальнейшем повышении температуры достигает равновесия (*e-процесс*). Случайный *e-процесс*, при котором постоянно происходит как удаление частиц от ядер, так и их добавление, можно уподобить встряхиванию каких-либо предметов в коробке: если встряхивать не слишком сильно, то это приведет к более стабильному расположению предметов. Точно

так же  $e$ -процесс перестраивает нуклоны и создает наиболее стабильные ядра. Среди них – железо и другие элементы, занимающие высокое положение на кривой  $a$  рис. 4.12.

Элементы, расположенные дальше группы железа, нельзя построить путем повышения температуры, так как если бы они образовались, они оказались бы менее стабильными и в ходе  $e$ -процесса вскоре снова бы превратились в элементы группы железа. Более тяжелые элементы формируются иначе: путем простой бомбардировки нейтронами, которые, не имея электрического заряда, легко захватываются ядрами. Из эксперимента известно, что отношение числа нейтронов к числу протонов в ядре должно оставаться в довольно узких пределах, зависящих от размера ядра. При бомбардировке медленными нейтронами ( $s$ -процесс) захват нейтронов идет через достаточно длительные промежутки времени, так что, когда ядро становится нестабильным из-за слишком высокого отношения числа нейтронов к числу протонов, оно успевает принять более стабильную форму, прежде чем будет захвачен очередной нейтрон. Это осуществляется посредством внутренней конверсии нейтрона в протон с испусканием электрона, т. е.  $\beta$ -частицы, для сохранения электрического заряда. Такой процесс может занять недели или даже больше – очень длительное время в масштабе скоростей ядерных превращений.

Синтез элементов посредством  $s$ -процесса может идти только до  $^{209}\text{Bi}$ , потому что следующее, более тяжелое ядро нестабильно вне зависимости от того, каким будет соотношение нейтронов и протонов. Это препятствие преодолевается в ходе  $r$ -процесса, при котором нейтроны захватываются так быстро, что образовавшиеся ядра не успевают распасться до захвата очередного нейтрона. Таким способом синтезируются значительно более тяжелые ядра. Конечно, когда бомбардировка нейтронами прекращается, богатые нейтронами ядра будут испытывать многократный  $\beta$ -распад с образованием ядер, сравнительно более стабильных, но в свою очередь подвергнутых  $\alpha$ -распаду и дальнейшему распаду на более легкие ядра. Однако в ходе  $r$ -процесса образуются также ядра  $^{238}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$  и  $^{232}\text{Th}$ , периоды полураспада которых сравнимы с возрастом Земли. Поэтому они еще не распались до пренебрежимо малых количеств. Примером тяжелого, но короткоживущего изотопа служит  $^{244}\text{Pu}$ , который был синтезирован, но распался; этот изотоп упоминался в связи с вопросом об интервалах времени образования метеоритов. В результате  $r$ -процесса осуществляется переход от в высшей степени нестабильных ядер, следующих непосредственно за  $^{209}\text{Bi}$ , к сравнительно более стабильным ядрам, имеющим более высокое массовое число.

Заполнению некоторых промежутков между более легкими элементами (например, между  $^{12}\text{C}$  и  $^{16}\text{O}$ ), оставшихся после тех или иных термоядерных процессов, способствует  $s$ -процесс. Однако, поскольку он может создавать только ядра, богатые нейтронами, необходим еще один процесс, который мог бы быть причиной образования известных ядер с низким (ниже среднего) отношением числа нейтронов к числу протонов. Это  $p$ -процесс, действие которого состоит в добавлении протонов.

Последний вопрос: как образовались легкие элементы Li, Be и B? Большинство их изотопов не могут появиться в результате описанных выше процессов: дело в том, что они разрушаются при температуре термоядерного сгорания водорода. Вероятно, они возникли как осколки при ударах космических лучей о тяжелые ядра в межзвездной пыли («продукты скалывания»). Скорость такого образования элементов очень мала, но ведь ядра проводят в космосе долгое время!

4.6.2. Эволюция звезд. Наиболее вероятное место, где могут идти ядерные реакции (за исключением только что упомянутой), – внутренние области звезд, так как для этих реакций необходимы чрезвычайно высокие температуры. В разд. 4.3.2 мы проследили эволю-

цию межзвездного облака в протозвезды, т.е. в довольно конденсированные массы с температурой в несколько тысяч градусов. Как уже объяснялось, при таком состоянии собственное тяготение может быть уравновешено высокой внутренней температурой, так что потеря тепла с поверхности приводит к сжатию протозвезды и ее разогреву. Когда температура становится достаточно высокой, начинается термоядерное сгорание водорода. Это компенсирует тепловые потери с поверхности, и звезда уже не должна сжиматься. Поскольку термоядерное сгорание водорода — чрезвычайно производительный источник тепла, звезда входит в длительный стабильный период, известный как «главная последовательность»<sup>1</sup>; в случае Солнца этот период должен продолжаться примерно  $10^{10}$  лет, т.е. вдвое превышать нынешний его возраст. Однако в конце концов водород начинает иссякать. Сначала это происходит в центре, так как в глубоких недрах звезды нет конвекции, и накапливающийся гелий не может быть удален. В результате образуется гелиевое ядро, размеры которого непрерывно растут, а окружающая его оболочка сгорающего водорода медленно смещается к внешним областям.

Поскольку давление — это просто суммарный эффект ударов всех частиц, присутствующих в «газе», постольку уменьшение числа частиц при ядерных реакциях (таких, как превращение четырех ядер водорода в одно ядро гелия) ведет к понижению давления внутри звезды. Звезда отвечает на это сжатием, что вызывает повышение температуры до уровня начала термоядерного сгорания гелия, результатом которого в свою очередь становится появление углеродно-кислородного ядра звезды и т.д. Насколько далеко заходит эта черед термоядерных реакций, зависит от массы звезды. Малая масса газа никогда не достигнет температуры, достаточной для начала сгорания водорода, так как прежде чем она сможет сжаться в достаточной степени, атомы водорода войдут в соприкосновение друг с другом, что предотвратит дальнейшее сжатие, и эта масса останется холодной. Так, в грубой схеме, произошло с Юпитером. Солнце гораздо массивнее, и там стало возможным сгорание водорода, но только водорода, а не гелия. Однако в самых крупных звездах, с массой, в шесть раз превышающей массу Солнца, термоядерные реакции развиваются дальше, и такие звезды состоят из серии концентрических оболочек, в каждой из которых происходит сгорание более тяжелых элементов, чем в более верхнем слое (рис. 4.13).

Когда e-процесс в центре звезды завершился образованием элементов группы железа, энергия ядерных реакций там выделяться уже не может (рис. 4.12, кривая (a)), хотя сгорание более легких элементов в окружающих оболочках еще продолжается. Ядро, состоящее из элементов группы железа, сжимается, как это было уже с более ранними центральными ядрами звезды, и температура повышается. Звезда остается стабильной, пока температура не достигнет  $10^{10}$  К, когда атомные ядра элементов группы железа начинают распадаться на более простые частицы, такие, как  $\alpha$ -частицы и нейтроны. (Это аналогично чересчур сильному встряхиванию предметов в коробке, при котором они выбрасываются оттуда.) При такой дезинтеграции ядер, конечно, много энергии поглощается, и звезда реагирует на это дальнейшим сжатием, что только усугубляет обстановку.

Темп эволюции звезды все время ускоряется. Кривая энергии связи, приходящейся на нуклон (рис. 4.12, кривая (a)), показывает, что большая часть тепла выделяется при превращении водорода в гелий; на последующих же стадиях тепла производится все меньше

<sup>1</sup> Более 90% наблюдаемых звезд находятся в таком состоянии. Термин «главная последовательность» относится к расположению звезд по светимости (и родственным параметрам) на диаграмме Герцшпрунга — Рассела. — Прим. перев.

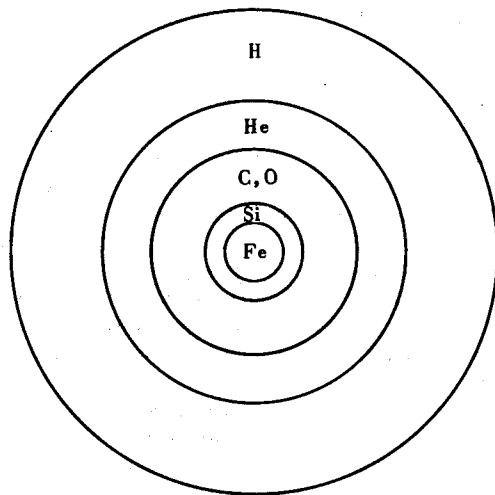


Рис. 4.13. Разрез через массивную звезду на зрелой стадии эволюции. На схеме показано, что в центре звезды нуклеосинтез привел к образованию железа, тогда как окружающие концентрические оболочки находятся еще на более ранних стадиях. На показанной стадии эволюции ядерное горючее в центре уже почти исчерпано, и звезда вскоре должна стать нестабильной и взорваться как сверхновая.

и меньше. В сочетании с повышением температуры и увеличением тепловых потерь с поверхности это приводит к тому, что каждая последующая стадия развивается значительно быстрее предыдущей, и, согласно оценкам, стадия равновесия ( $\epsilon$ -процесс) занимает, по видимому, всего несколько минут. Конечная стадия — сжатие ядра, разрушение ядер группы железа — означает обрушение, коллапс, и звезда, сжигающая ядерное горючее в течение миллионов лет, оказывается «обанкротившейся» в считанные секунды.

Коллапс внутренних областей звезды оставляет внешние части без поддержки, так что они тоже сжимаются и резко нагреваются. Но в них еще содержится много несожженного горючего, и, поскольку ядерные реакции чрезвычайно чувствительны к температуре, события развиваются неудержимо: термоядерное сгорание повышает температуру, а это в свою очередь повышает скорость сгорания. У звезды нет уже времени приспособиться к новой обстановке, и большая часть оставшегося горючего сжигается в какую-то долю секунды. Взорванная внешняя оболочка звезды рассеивается в пространстве.

Этот катастрофический конец эволюции звезды является, как полагают, одной из вероятных причин появления сверхновой, которая в течение нескольких недель может светиться так ярко, как целая звездная галактика. Самая известная сверхновая наблюдалась китайскими астрономами в 1054 г., а ее быстро разлетающиеся осколки до сих пор видны. Они образуют Крабовидную туманность (рис. 4.5, б). (Термины «туманность», «небула» применяются для обозначения астрономических объектов разного типа. Этими словами называют расплывчатое («туманное») пятно света, какое и можно было только увидеть в старые телескопы.) В центре туманности находится пульсар, или нейтронная звезда, которую отождествляют с центральным ядром звезды, коллапсировавшим до плотности атомного ядра (не менее  $10^{17}$  кг/м<sup>3</sup>. — *Перев.*) и имеющим размер всего лишь несколько километров в поперечнике.

Сколько изотопов, встречающихся в природе, может произвести сверхновая? Совершенно ясно, что она может создать многие элементы, вплоть до группы железа включительно, еще до того, как достигнет катастрофической стадии, но какие изотопы возникнут потом? Анализ относительной распространенности изотопов между <sup>56</sup>Fe и <sup>209</sup>Bi показывает, что они образовались в ходе s-процесса, а не r-процесса. Этот вывод делает-

ся на основании того, что s-процесс допускает распад ядер, содержащих на один нейтрон больше, чем при стабильном состоянии. В результате этого образуются изотопы, которые не могут появиться при г-процессе, когда к ядру присоединяются новые нейтроны, а  $\beta$ -распад еще не может начаться. Однако построение  $^{209}\text{Bi}$  из ядер группы железа занимает несколько сотен лет: для  $\beta$ -распада требуется время, а как раз времени-то на последних стадиях эволюции звезды (перед ее превращением в сверхновую) не хватает. Решение этой проблемы, по-видимому, состоит в том, что s-процесс развивается при эволюции звезды в то же самое время, что и некоторые из более ранних реакций, и воздействует на то небольшое количество изотопов группы железа, какое оказывается в составе звезды, когда она только что образовалась из межзвездного облака. Изотопы тяжелее  $^{209}\text{Bi}$  создаются в ходе г-процесса в последние моменты перед взрывом и выносятся этим взрывом в пространство, где рассеиваются среди других частиц межзвездного газа и пыли.

Это объяснение синтеза тяжелых элементов только отбрасывает решение задачи обратно — к вопросу о том, откуда взялись в межзвездной среде элементы группы железа? Ответ — от взрыва предыдущей сверхновой. Это ведет к схеме образования элементов по меньшей мере двух поколений: из водорода последовательно строятся элементы вплоть до группы железа; затем они возвращаются в межзвездную среду при взрыве одной сверхновой, включаются в состав другой и перерабатываются дальше. По сути дела, предполагается, что в производство элементов, из которых построена Земля и создан сам человек, было вовлечено много сверхновых.

Звезды в стадии, предшествующей превращению в сверхновые, сжигают свое горючее гораздо быстрее, чем звезды меньшего размера, из-за гораздо более высоких внутренних температур. Таким образом, между временем, когда образовалась Галактика (около  $15 \cdot 10^9$  лет назад), и временем, когда образовалась Солнечная система (около  $4,6 \cdot 10^9$  лет назад), могло возникнуть много поколений звезд, которые превращались в сверхновые, взрывались и понемногу обогащали межзвездное пространство, а значит, и более поздние звезды тяжелыми элементами, составляющими теперь 2% массы Солнечной системы.

Предположение о постепенной постройке тяжелых элементов не объясняет возраст метеоритов, определяемый по  $^{244}\text{Pu}$ ,  $^{129}\text{I}$  и  $^{26}\text{Al}$  (разд. 4.5.4). Одно из вероятных решений проблемы — допущение, что межзвездное облако, уже обогащенное за счет взрывов многих сверхновых, вошло в спиральный рукав некоторой галактики. Сжатие не привело к образованию звезды в этом облаке, но способствовало формированию звезды где-то по соседству; звезда быстро превратилась в сверхновую, которая дала дополнительный вклад элементов. Процесс повторился при следующем прохождении через спиральный рукав (что, вероятно, должно было случиться 100 млн. лет спустя). Интервал образования, равный 100 млн. лет, который был определен по  $^{244}\text{Pu}$  и  $^{129}\text{I}$ , отражает первое прохождение, тогда как гораздо меньший интервал, вычисленный по  $^{26}\text{Al}$ , соответствует второму прохождению.

Для того чтобы произвести вычисленное количество  $^{26}\text{Al}$  и создать другие изотопные аномалии (и чтобы интервал образования составил только 2–3 млн. лет), последняя сверхновая должна была появиться близко к облаку в пространстве и времени, и это позволяет предположить, что ее взрыв и послужил толчком к образованию Солнечной системы. Это подтверждается тем наблюдением, что новые звезды иногда возникают на расширяющемся фронте взрыва сверхновой, создающего местное сжатие.

Короче говоря, тяжелые элементы Солнечной системы накапливались в течение очень длительного времени, но затем их количество резко увеличилось вследствие взрывов

двух сверхновых, причем один из них произошел как раз перед образованием Солнечной системы.

Последний вопрос: в какой мере состав внешней, видимой части Солнца изменен ядерными реакциями, идущими внутри? Полагают, что это изменение совсем невелико, так как в тех частях, где происходит термоядерное сгорание, нет конвекции в отличие от более холодных внешних частей. Однако литий разрушается уже при температуре  $3 \cdot 10^7$  К, что ниже температуры сгорания водорода; вероятно, литий попадает в ходе конвекции достаточно глубоко и медленно уничтожается. Это могло бы объяснить, почему литий на Солнце и на других старых звездах истощен по сравнению с молодыми звездами, с метеоритами, а также с земной корой (рис. 4.7, 5.4).

Конечно, в нашем изложении теория термоядерного синтеза сильно упрощена. Мы уделили мало внимания той ключевой роли, какую играют в эволюции звезд их размеры, и игнорировали, например, тот факт, что некоторые звезды превращаются в сверхновые уже на стадии термоядерного сгорания углерода – кислорода. Однако мы смогли понять, 1) как возникла наблюдаемая относительная распространенность элементов на Солнце (разд. 4.4), где термоядерное сгорание почти не изменило первоначальный состав вещества, если не считать превращения водорода в гелий в глубоких внутренних частях, 2) почему на Земле и в метеоритах должны среди элементов преобладать кислород, кремний, магний, сера и железо (см. пики на кривой (б) рис. 4.12) и 3) как образование Солнечной системы может быть связано со взрывом какой-то определенной сверхновой.

**Краткое содержание.** 1. Рассматривая Солнечную систему в целом, можно выделить те важные особенности, на которых легко проверить предлагаемые теории ее образования. В результате мы приходим к заключению, хотя и не считаем это догмой, что она сформировалась из Солнечной туманности – богатого водородом вращающегося облака, состоявшего из газа и пыли. Хотя планетные системы нельзя считать неизбежным следствием развития такой туманности (хотя бы потому, что планетные системы не могут образоваться вблизи двойных звезд, которых большинство), обычно допускается, что для возникновения Солнечной системы не требовалось какого-то исключительного стечения обстоятельств, как это предполагалось в первых приливных теориях. Однако это возникновение можно считать в какой-то мере необычным явлением, поскольку толчком к нему был взрыв сверхновой. Главная масса Солнечной туманности, сжавшись, образовала Солнце, но по периметру туманности такого сжатия не произошло из-за большого момента количества движения, и это привело к образованию планет.

2. Распространенность элементов на Солнце близка к той, которая была в Солнечной туманности, за исключением лития. В самом общем виде состав планет можно считать производным от состава Солнца с последовательной потерей летучих, причем Юпитер потерял их мало, а планеты земной группы смогли сохранить только наиболее тугоплавкие элементы и соединения. Это будет обсуждаться в следующей главе.

3. Метеориты – хондриты дают нам ценную возможность увидеть мельком отдельные моменты ранних стадий аккреции, хотя, вероятно, на них направлено, за неимением других сведений, слишком большое внимание. Распространенность элементов в хондритах близка к наблюдаемой на Солнце, если учесть потерю наиболее летучих элементов и соединений; детальное изучение состава и структуры этих метеоритов приводит к хондритовой модели Земли (разд. 5.4). Дифференцированные метеориты испытали процессы сегрегации элементов; вероятно, это произошло в астероидах. Возможно, что эти процессы сходны с теми, которые развивались в недрах Земли.



4. Анализ данных о звездной эволюции и нуклеосинтезе подтверждает сделанные выше выводы и объясняет, почему кислород, кремний, магний, сера и железо являются, вероятно, самыми распространенными элементами на Земле.

*Общие журнальные статьи, рекомендуемые для дальнейшего чтения*

Описание Солнечной системы и теории ее образования – журнал «Scientific American», сентябрь 1975 г.

Изотопные аномалии в метеоритах [194].

*Общие книги, рекомендуемые для дальнейшего чтения*

Теории образования Солнечной системы [241].

Солнечная система [250].

Метеориты [248, 141].

Нуклеосинтез [210].

Эволюция звезд [211].

«Кембриджская энциклопедия астрономии» – Mitton S., The Cambridge encyclopaedia of astronomy, London: Jonathan Cape, 1977.

*Журнальные статьи, рекомендуемые для более детального изучения*

Характерные особенности Солнечной системы и теории ее образования [242, 105].

Доклады на конференции по Солнечной системе, анализ развития науки [180].

Плутон – статьи в журналах «Icarus» (1980, 42, с. 29–34) и «New Scientist» (1978, 79, с. 273).

Распространенность элементов и нуклеосинтез [220].

*Книги, рекомендуемые для более детального изучения*

Теории образования Солнечной системы [59].

Метеориты [237, 164].

Звездная эволюция [200].