

расчеты были проведены в СССР в Институте прикладной математики. Оказалось, что горение углерода в звездном ядре с массой (12.61) может закончиться как ядерным взрывом с полным разлетом вещества звезды с суммарной кинетической энергией $\approx 10^{61}$ эрг, так и «ограниченным» ядерным взрывом, при котором наряду со сбросом оболочки звезды образуется нейтронная звезда. Возможно, что первый случай отвечает вспышке сверхновых II, а второй — сверхновых I.

§ 2. Происхождение химических элементов

1. *Распространенность* химического элемента называют число атомов этого элемента, приходящееся в веществе на определенное, нормировочное число атомов «опорного» элемента. Обычно в качестве такого опорного элемента выбирают водород или кремний. Соответственно распространенностями элементов называют числа их атомов, приходящихся на 10^{12} атомов водорода или на 10^5 (иногда 10^6) атомов кремния.

Распространенности элементов в Солнечной системе определяют из анализа вещества земной коры, Луны, метеоритов, солнечного «ветра» *) и из спектроскопического анализа излучения солнечной фотосферы и короны. Распространенности элементов за пределами Солнечной системы определяют с помощью анализа излучения фотосфер звезд, туманностей, межзвездного газа, галактик, а также анализа состава галактического космического излучения. К настоящему времени чрезвычайно трудоемкая работа по определению относительного содержания элементов в различных космических объектах в основном завершена, и наши представления о главных особенностях распространенности элементов в будущем, видимо, не претерпят кардинальных изменений.

Вообще говоря, относительные содержания элементов в разных космических объектах на разных стадиях их эволюции являются не одинаковыми. Например, в земной коре и в метеоритах очень мало водорода и гелия, в то время как вещество Вселенной в основном состоит именно из этих элементов. Химическая эволюция вещества Земли привела к определенному разделению («сепарации») элементов. Поэтому распространенность элементов в земной коре определяется местом, в котором взят образец для анализа. (Напротив, относительное содержание изотопов по земным образцам определить можно, так как химическая эволюция не затрагивает распределения изотопов.) Аналогично распространенность элементов в недрах звезд, где протекают ядерные реакции, отличается от распространенности элементов в фотосферах звезд и т. д. Для определенности в дальнейшем под распространенностью элементов мы будем понимать распространенность элементов в веществе, из которого образовались звезды плоской составляющей нашей Галактики. В число этих звезд входит Солнце.

*) Солнечным ветром называются потоки плазмы, стекающие с солнечной поверхности вдоль силовых линий магнитного поля.

Если отвлечься от аномалий, обусловленных особенностями эволюции космических объектов (например, отсутствие водорода и гелия на Земле, или дефицит водорода и избыток гелия в звезде HD 168476), то распространенности элементов в различных космических объектах оказываются близкими друг к другу и к распространениям элементов и их изотопов в Солнечной системе.

Рис. 12.7 иллюстрирует это на примере относительного содержания ряда элементов в Солнечной системе и в Туманности Ориона. Поэтому за кривую космической распространенности химических

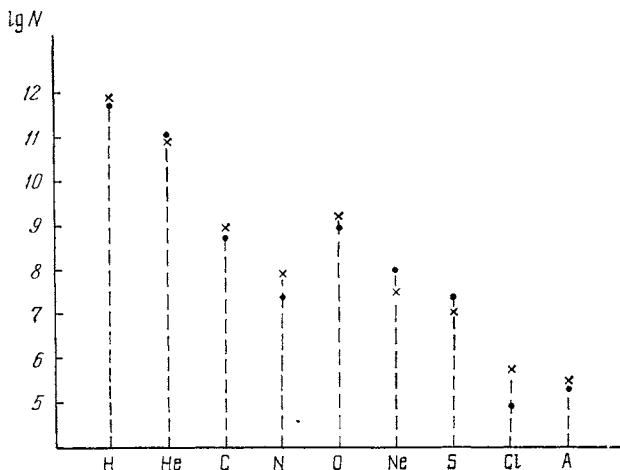


Рис. 12.7. Распространенность элементов в Солнечной системе (крестики) и Туманности Ориона (кружочки).

элементов мы примем кривую распространенностей элементов в Солнечной системе, найденную из анализа главным образом метеоритов (карбонатных хондритов) и «исправленную» на водород, гелий, аргон и ряд других элементов.

2. Кривая, передающая главные особенности космической распространенности, приведена на рис. 12.8. Из этого рисунка видно, что вещество Вселенной в нашу эпоху состоит главным образом из водорода (около 90% по числу атомов), а также гелия (около 8% по числу атомов). Распространенности элементов, следующих за гелием, резко (экспоненциально) уменьшаются приблизительно до $A \approx 100$. При $A \gtrsim 100$ распространенности элементов практически не меняются. Забегая вперед, отметим, что столь резкое изменение зависимости от A при $A \approx 100$ указывает по всей вероятности на разный механизм образования ядер с $A < 100$ и $A > 100$. Более точные кривые распространенностей элементов изображены на рис. 12.9, 12.10. Как видно из этих рисунков, сразу же после гелия

на кривых распространенностей имеет место резкий провал, обусловленный исключительно малой распространенностью лития, бериллия и бора. Суммарное содержание всех этих элементов в сто миллионов раз меньше, чем водорода, и в триста раз меньше, чем значительно более тяжелого элемента кальция. За литием, бериллием и бором кривая резко поднимается вверх. Это связано с большой распространенностью углерода и следующих за ним элементов: кислорода, неона и т. д. вплоть до кальция.

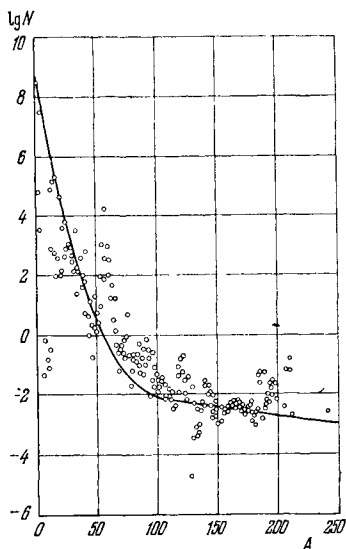


Рис. 12.8. Кривая, передающая главные особенности распространенности химических элементов.

Точками отмечены данные наблюдений; распространенность кремния ${}_{14}\text{Si}^{28}$ считается равной 10^0 .

тально слабо. Тем не менее и в этой области на кривой имеются характерные максимумы, хотя и не столь резко выраженные, как «железный максимум». Эти максимумы расположены в области ядер с магическими числами нейтронов $N = 50, 82, 126$. Имеется и несколько еще более тонких особенностей кривой космической распространенности элементов, из которых мы упомянем только две: во-первых, наблюдается преобладание ядер с четными массовыми числами A и, во-вторых, максимумы при $N = 50, 82, 126$ оказываются двойными.

3. В настоящее время считается, что химические элементы образуются из водорода в результате ядерных реакций. Если не относить образование химических элементов к периодам эволюции

и следующих за ним элементов: кислорода, неона и т. д. вплоть до кальция. Для этой области атомных ядер характерно преобладание изотопов с $A = 2Z = 2N$, например, ядер изотопов углерода ${}_{6}\text{C}^{12}$, кислорода ${}_{8}\text{O}^{16}$, неона ${}_{10}\text{Ne}^{20}$, магния ${}_{12}\text{Mg}^{24}$, кремния ${}_{14}\text{Si}^{28}$ и т. д. Область заканчивается резким скачком к скандию — содержание скандия очень мало по сравнению с кальцием («скандиевый провал»). За скандием кривая распространенности вновь возрастает и достигает максимума в области ядер с $A \approx 50-60$. На этом максимуме располагаются железо и соседние с ним элементы, вследствие чего он называется железным максимумом. Отметим, что аналогичный железный максимум имеется на кривой удельной энергии связи (см. рис. 2.5). Между этими двумя максимумами, по-видимому, имеется непосредственная связь (см. п. 5). После железного максимума кривая распространенности опять резко падает вниз, а, начиная с $A \approx 100$, уже изменяется относи-

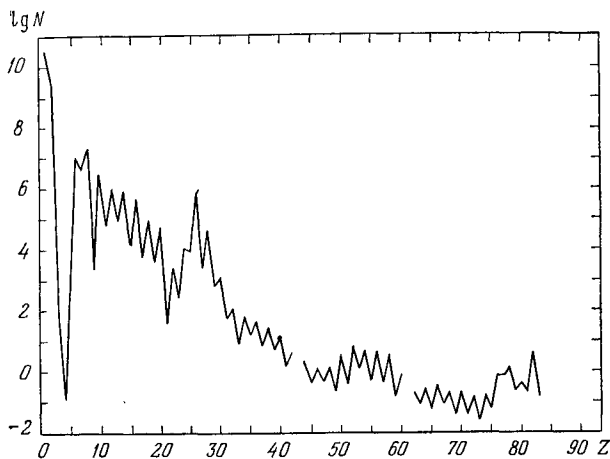


Рис. 12.9. Распространенность элементов в Солнечной системе. Разрывы в кривой приходятся на элементы, у которых нет стабильных изотопов

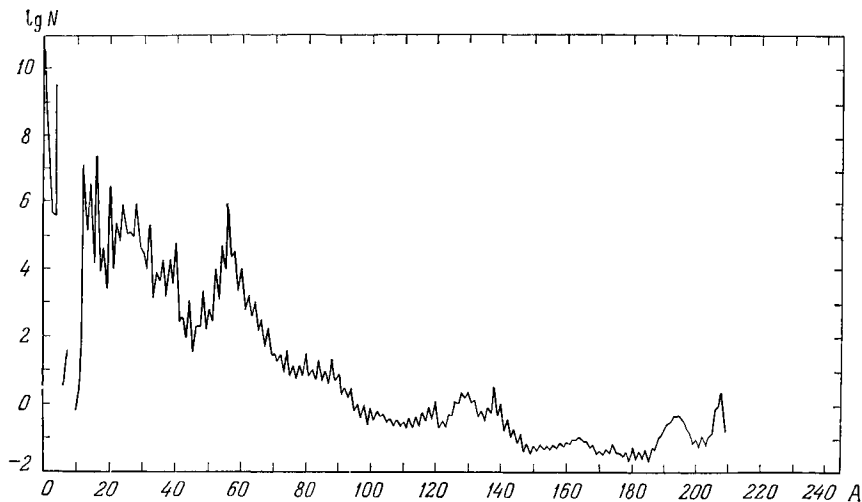


Рис. 12.10. Распространенность нуклидов в Солнечной системе.

Получена суммированием распространенностей элементов и изотопов с заданным значением массового числа. Разрывы в кривой приходятся на массовые числа, для которых не существует стабильных ядер.

Вселенной и к участкам пространства, которые сейчас совсем не изучены, то, пожалуй, «свобода выбора» отсутствует — химические элементы могли образоваться только в недрах звезд. Помимо общих соображений, в пользу того, что химические элементы действительно образуются в звездах, свидетельствуют и некоторые данные наблюдений. Ограничимся указанием двух таких фактов. Во-первых, старые звезды, т. е. звезды, которые образовались непосредственно из вещества дозвездной стадии эволюции Вселенной, содержат во много раз (≈ 100) меньше тяжелых элементов, чем молодые звезды, которые образовались из вещества, частично уже переработанного в звездах. Во-вторых, в атмосферах некоторых звезд обнаружен нестабильный элемент технеций. Время жизни технеция равняется всего лишь $1,5 \cdot 10^5$ лет, так что естественно считать, что он образуется в звездах.

Предположение об образовании элементов в звездах немедленно ставит трудную проблему объяснения механизма выброса вещества недр звезды в космическое пространство. В настоящее время известен только один способ, которым вещество недр звезды может попасть в космическое пространство, — взрыв сверхновой. Поэтому приходится резко ограничивать класс звезд, ядерная эволюция вещества которых каким-либо образом сказывается на кривой распространенности химических элементов. При этом, естественно, возникает сомнение в том, смогут ли столь редко вспыхивающие сверхновые (1 раз в 50—100 лет в целой Галактике) «выбросить» количество тяжелых элементов, достаточное для создания их наблюдаемых распространенностей. Оценки показывают, что вещества, выбрасываемого сверхновыми, по-видимому, достаточно, чтобы обеспечить нашу Галактику необходимым количеством тяжелых элементов.

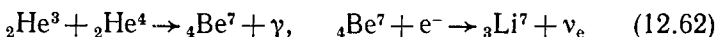
4. Высокое относительное содержание водорода в природе означает, что ядерная эволюция вещества только начинается. Это объясняет главное в распространенности элементов — экспоненциальное уменьшение (см. рис. 12.8) распространенностей с ростом A при $A \lesssim 100$. Железный максимум отражает эффект накопления, поскольку область железного максимума представляет собой с энергетической точки зрения конечный пункт ядерной эволюции вещества. Элементы же, расположенные на кривой распространенности правее железного максимума, содержатся в веществе в относительно небольшом количестве. Поэтому их образование можно рассматривать как побочную, второстепенную ветвь ядерной эволюции вещества.

Приступим теперь к более подробному анализу образования элементов. Сразу же подчеркнем, что образование химических элементов и их изотопов происходило, скорее всего, при участии множества ядерных реакций и в разных условиях. Одновременный учет большого числа реакций, условий их протекания и условий

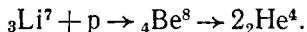
«замораживания» относительного содержания элементов, т. е. условий выброса вещества при взрывах звезд, представляет собой задачу огромной сложности. Фактически теоретики только приступили к ее решению. Поэтому наш анализ происхождения химических элементов будет качественным.

Сначала рассмотрим распространенности элементов, расположенных на кривой (см. рис. 12.10) левее изотопа кислорода ${}^8\text{O}^{16}$. Высокая распространенность изотопа гелия ${}^2\text{He}^4$ не является удивительной: этот изотоп образуется в ядерных реакциях водородного и углеродного циклов. Но удивительно то, что этот изотоп содержится в веществе, по-видимому, в количестве значительно большем, чем этого следует ожидать, считая, что он образуется только в звездах. Массовое относительное содержание гелия в веществе составляет около 30%. Между тем за время существования нашей Галактики должно было сгореть не более 5% водорода. Например, если считать, что светимость Солнца мало менялась с течением времени, то за все время его существования должно было выгореть $\frac{6 \cdot 10^9}{1,3 \cdot 10^{11}} \approx \approx 5\%$ водорода. Отсюда следует, что либо светимость звезд в отдаленном прошлом намного превышала современную, либо гелий в основном образовался на дозвездной стадии эволюции Вселенной. В п. 8 мы увидим, что в «горячей» модели Вселенной действительно имеет место образование гелия на дозвездных стадиях ее эволюции.

Аномально низкое содержание элементов лития, бериллия и бора легко понять, если учесть, что они образуются медленно, а сгорают очень быстро. Например, практически единственный способ образования ядра изотопа лития ${}^3\text{Li}^7$ посредством цепочки

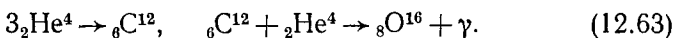


из-за низкого содержания изотопа ${}^2\text{He}^3$ и кулоновского отталкивания ядер ${}^2\text{He}^3$ и ${}^2\text{He}^4$ протекает очень медленно. В то же время образовавшийся литий в водородной среде звезды быстро сгорает в реакции



Аналогичная ситуация имеет место также для бериллия и бора. Поэтому объяснять нужно не факт малой распространенности лития, бериллия и бора, а наоборот, почему эти элементы вообще в заметном количестве существуют в природе.

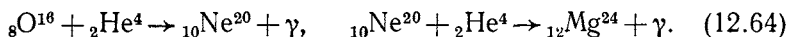
Высокая распространенность изотопов углерода ${}^6\text{C}^{12}$ и кислорода ${}^8\text{O}^{16}$ объясняется тем, что в недрах звезд они прямо образуются из гелия в реакциях



Экспериментальные измерения характеристик резонансных уровней 0^+ в ${}^6\text{C}^{12}$ ($E = 7,65$ МэВ) и 1^- в ${}^8\text{O}^{16}$ ($E = 7,12$ МэВ), через которые

протекают реакции (12.63), позволили с достаточной точностью рассчитать сечения этих реакций и относительные содержания изотопов ${}_6\text{C}^{12}$ и ${}_8\text{O}^{16}$ после сгорания гелия. Хотя отношение распространенностей ${}_6\text{C}^{12}$ и ${}_8\text{O}^{16}$ зависит в некоторой степени от конкретных условий протекания реакций (12.63), однако по порядку величины оно равняется единице.

Возможно, что наряду с образованием ${}_6\text{C}^{12}$ и ${}_8\text{O}^{16}$ при сгорании гелия образуются в небольшом количестве элементы неон и магний:



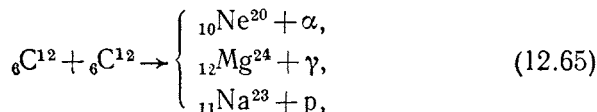
Содержащиеся в небольшом количестве (см. приложение III) изотопы углерода ${}_6\text{C}^{13}$, кислорода ${}_8\text{O}^{17}$ и азота ${}_7\text{N}^{14}$ образуются, видимо, из ядер ${}_6\text{C}^{12}$ и ${}_8\text{O}^{16}$ в реакциях углеродного цикла (12.21). Действительно, как видно из табл. 12.3, известные из наблюдений отношения распространенностей ядер изотопов C^{12} , C^{13} , N^{15} , O^{17} и N^{14} оказываются близкими к рассчитанным в предположении, что эти изотопы образуются при стационарном протекании углеродного цикла.

Т а б л и ц а 12.3. Отношение распространенностей некоторых изотопов в Солнечной системе

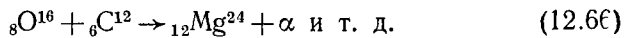
Отношение распространенностей	Наблюдаемые	Рассчитанные
$\text{C}^{13}/\text{N}^{14}$	0,036	0,018
$\text{N}^{15}/\text{N}^{14}$	0,0036	0,0002
$\text{O}^{17}/\text{N}^{14}$	0,022	0,020
$\text{C}^{12}/\text{C}^{13}$	90	40

Дополнительным аргументом в пользу этого предположения является высокая распространенность ($\text{C}^{12}/\text{N}^{14} \approx 3$) изотопа N^{14} : при образовании в стационарном углеродном цикле его высокая распространенность естественным образом объясняется малостью сечения реакции ${}_7\text{N}^{14} (p, \gamma) {}_8\text{O}^{15}$. Наконец, изотопы N^{15} и C^{13} могут образовываться в реакциях (p, γ) на ядрах C^{12} , N^{14} при быстром нагреве и охлаждении вещества. Такие условия создаются при взрывах звезд (прохождение ударной волны через зону горения водорода), а также при аккреции вещества на нейтронную звезду.

5. После выгорания гелия ядро достаточно массивной звезды ($M > 3M_{\odot}$) уплотняется и разогревается. Начинается горение углерода:



а также кислорода в реакциях с углеродом:



В процессе этого горения образуются элементы Ne, Mg, Na.

На рис. 12.11 приведены теоретически рассчитанные распространённости возникающих в реакциях (12.65) ядер ${}_{12}\text{Mg}^{24}$, ${}_{10}\text{Ne}^{20}$, ${}_{11}\text{Na}^{23}$ в зависимости от температуры горения углерода. Как видно

из рисунка, наблюдаемые распространённости хорошо согласуются с рассчитанными при температуре горения $T \approx 10^9$ К, что является веским аргументом в пользу образования ядер Mg^{24} , Ne^{20} и Na^{23} непосредственно при горении углерода. Образование более тяжелых ядер происходит с участием множества различных ядерных реакций. Детали этого процесса зависят от сечений, подчас неизмеряемых на опыте (например, сечений реакций с нестабильными ядрами), плотности и температуры вещества, механизма его выброса. В настоящее время эти детали поняты не полностью. Можно лишь утверждать, что главной особенностью процесса является существование большого числа свободных α -частиц и дефицит свободных нуклонов. Альфа-частицы сначала возникают (с большей вероятностью, чем нуклоны) в реакциях (12.65), а затем в фотоядерных реакциях, вызываемых тепловым излучением. Поэтому в интервале массовых чисел $A = 24-56$ наиболее распространёнными должны быть чётно-чётные ядра с $Z = N = 2n$ (« α -ядра»).

«Железный максимум», однако, нельзя объяснить реакциями с α -частицами. Элементный и изотопный состав этого максимума можно понять, предположив, что он сформировался в условиях статистического равновесия по отношению к ядерным реакциям в узком смысле этого слова (см. гл. IV, § 1). Такое равновесие устанавливается очень быстро, начиная с температуры $T \approx 3 \cdot 10^9$ К.

На рис. 12.12 показаны рассчитанные и наблюдаемые распространённости элементов и их изотопов, формирующих «железный

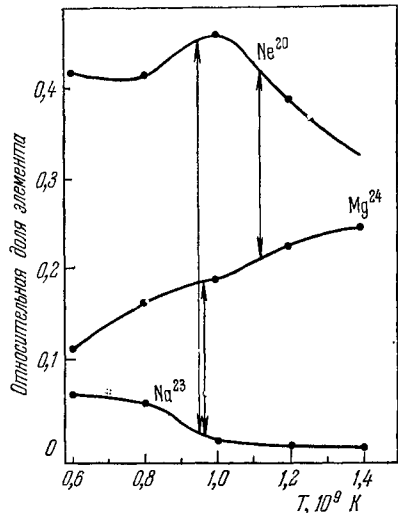


Рис. 12.11. Теоретически рассчитанная зависимость от температуры относительных содержаний изотопов ${}_{10}\text{Ne}^{20}$, ${}_{12}\text{Mg}^{24}$, ${}_{11}\text{Na}^{23}$, возникающих непосредственно при горении углерода.

Стрелками отмечены температуры, при которых получаются наблюдаемые в Солнечной системе отношения распространённости.

максимум». Расчеты нуклеосинтеза проводились в условиях, соответствующих взрыву сверхновых в варианте полного разлета звезды.

Общее представление о соответствии рассчитанных и наблюдаемых распространенностей ядер в интервале массовых чисел $A = 20-60$ дает рис. 12.13. Как видно из этого рисунка, наблюдаемые распространенности ядер хорошо объясняются теоретически

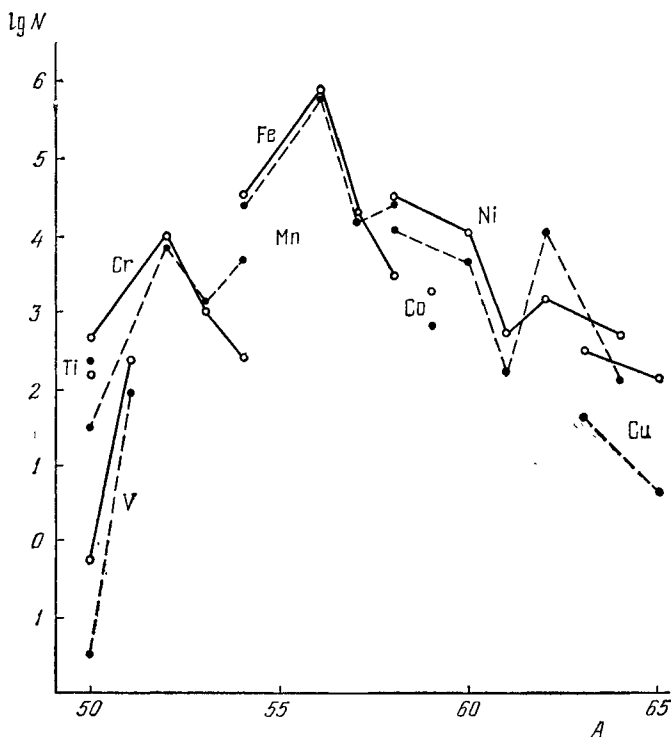


Рис. 12.12. Рассчитанные и наблюдаемые распространенности элементов в области железного максимума.

Рассчитанные распространенности изотопов одного элемента соединены пунктирной линией, наблюдаемые — сплошной.

(исключая распространенность ядра ${}_{20}\text{Ca}^{44}$). Правда, нужно отметить, что расчеты распространенностей выполнены без учета динамики взрыва сверхновых.

6. Перейдем теперь к рассмотрению образования ядер с массовыми числами $A > 100$. Независимость распространенностей этих элементов от A показывает, что они не могли образоваться в реакциях с заряженными частицами. Приходится поэтому предположить,

что эти элементы образовались в процессах последовательного радиационного захвата нейтронов ядрами элементов группы железа *).

Принято различать медленный и быстрый процессы последовательного радиационного захвата нейтронов, или, что то же, r - и s -процессы (s — от английского слова *slow* — медленный, r — от слова *rapid* — быстрый). Рассмотрим сначала s -процесс. Медленный

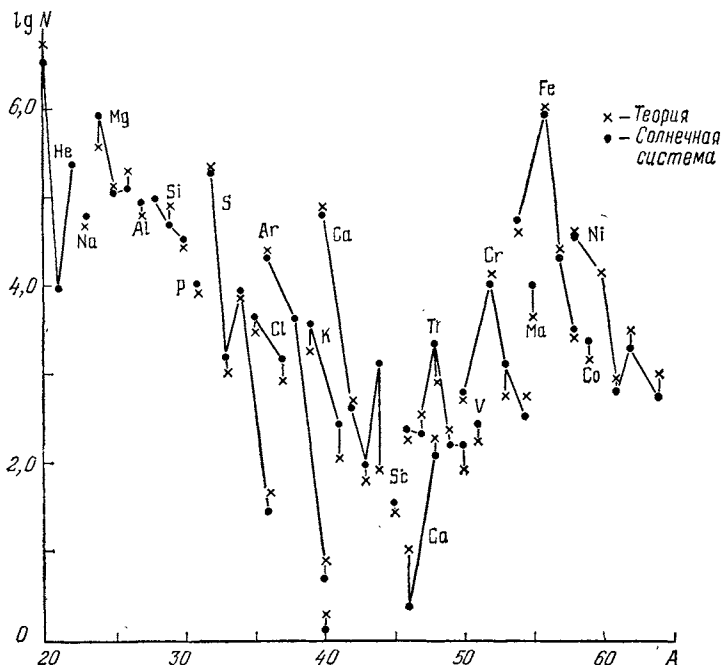


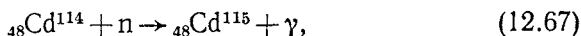
Рис. 12.13. Сравнение рассчитанных и наблюдаемых распространенностей ядер с массовыми числами $A = 20 - 60$.

Сплошными линиями для наглядности соединены распространенности изотопов одного и того же элемента.

процесс захвата нейтронов протекает в том случае, когда концентрация свободных нейтронов столь мала, что интервал времени между последовательными актами поглощения нейтронов превышает время жизни всех нестабильных ядер, которые образуются в этом процессе. О ядрах, которые могут образоваться в s -процессе, иногда говорят как о лежащих на «пути» s -процесса. На рис. 12.14 для иллюстрации приведен путь s -процесса в области ядер

*) Наиболее распространенные ядра ${}^6\text{C}^{12}$, ${}^8\text{O}^{16}$ и т. д. обладают очень малыми сечениями радиационного захвата нейтронов. Поэтому маловероятно, что процесс последовательного захвата нейтронов начинался именно с них.

с $A = 110—120$. Нетрудно убедиться, что далеко не каждое ядро может образоваться в s -процессе. Проиллюстрируем это на примере. Пусть s -процесс начинается с ядра изотопа кадмия ${}_{48}\text{Cd}^{114}$. Стабильное ядро изотопа кадмия ${}_{48}\text{Cd}^{114}$, поглощая нейтрон, превращается в нестабильное ядро ${}_{48}\text{Cd}^{115}$,



период полураспада которого равняется 54 часам. Если бы время между последовательными поглощениями нейтрона было меньше 54 часов, то образовывался бы стабильный изотоп кадмия ${}_{48}\text{Cd}^{116}$.

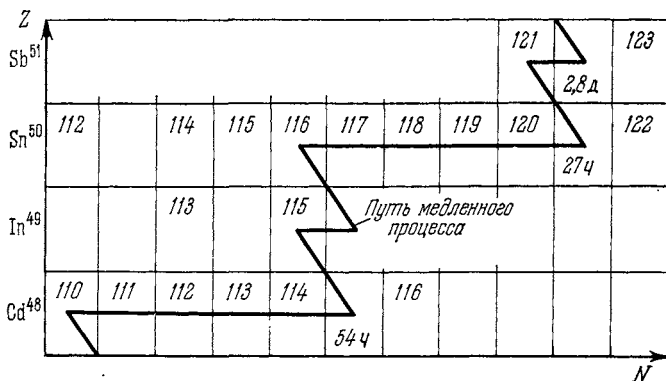


Рис. 12.14. «Путь» s -процесса.

Сплошной линией соединены ядра, образующиеся в s -процессе. Указаны массовые числа стабильных ядер и периоды полураспада тех ядер, на которых изменяется направление s -процесса (д — дни, ч — часы).

Поскольку, однако, интервал между последовательными актами поглощения предполагается большим, то до поглощения нейтрона ядро ${}_{48}\text{Cd}^{115}$ успеет посредством β -распада превратиться в стабильное ядро изотопа индия ${}_{49}\text{In}^{115}$.

Между распространенностями элементов, образовавшихся в s -процессе, и их сечениями радиационного захвата нейтронов существует отчетливая корреляция. Обозначим через $n(A)$ число ядер с массовым числом A . Тогда изменение числа $n(A)$ в s -процессе будет, очевидно, описываться уравнением

$$\frac{dn(A)}{dt} = \nu \sigma(A-1) n(A-1) - \nu \sigma(A) n(A), \quad (12.68)$$

где ν — поток нейтронов, а $\sigma(A)$ — сечение поглощения нейтронов ядром с массовым числом A . Первый член справа в (12.68) дает число ядер, образующихся в единицу времени, второй — число исчезающих ядер. В стационарных условиях $\frac{dn(A)}{dt} = 0$ и, следо-

вательно, имеет место равенство

$$\sigma(A-1) \cdot n(A-1) = \sigma(A) n(A). \quad (12.69)$$

Поэтому распространенности N для элементов, образующихся в s -процессе, и сечения σ радиационного захвата нейтронов их ядрами связаны соотношением

$$\sigma \cdot N = \text{const.} \quad (12.70)$$

На рис. 12.15 приведена кривая зависимости произведения распространенностей элементов на экспериментальное сечение радиационного захвата нейтронов с энергией 30 кэВ от массового числа A .

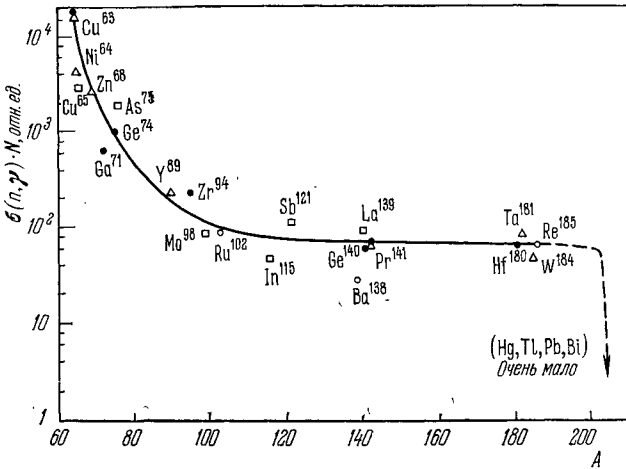


Рис. 12.15. Зависимость от массового числа A произведения $\sigma \cdot N$ сечения $\sigma(n, \gamma)$ радиационного захвата нейтронов с энергией $E = 30$ кэВ и распространенности N ядер.

$N_{\text{Si}} = 10^5$. Точки — данные наблюдений.

Как видно, в интервале массовых чисел $A = 100$ — 200 очень хорошо выполняется соотношение (12.70), что является сильным аргументом в пользу того, что в период образования элементов происходил s -процесс.

Существование s -процесса позволяет естественно объяснить максимумы на кривой распространенности в области ядер с магическими числами нейтронов $N = 50, 82, 126$ (рис. 12.16). На рис. 12.16 приведены экспериментальные сечения радиационного захвата нейтронов с энергией 30 кэВ для различных ядер. На рисунке видны четкие минимумы в ходе сечений захвата в области магических чисел. Поэтому, если считать справедливым соотношение (12.70) (s -процесс), то на кривой распространенности должны быть максимумы в области магических чисел.

7. Наряду с медленным процессом захвата нейтронов в период образования элементов должен был протекать быстрый захват нейтронов — r -процесс, т. е. такой процесс, в котором время между последовательными захватами нейтронов значительно меньше времени жизни нестабильных ядер. Наиболее убедительно об этом свидетельствует тот факт, что элементы, следующие за висмутом (${}_{83}\text{Bi}$), не могли образоваться в s -процессе. В самом деле, атомные ядра всех изотопов астата ${}_{85}\text{At}$ и франция ${}_{87}\text{Fr}$ являются α -радиоактивными с очень малым периодом полураспада (например, время жизни наиболее долгоживущего изотопа франция не превышает 20 минут).

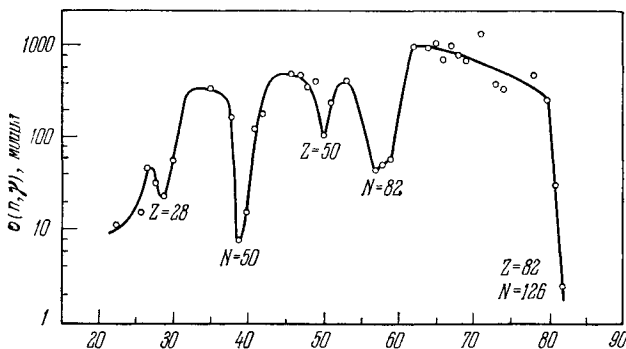
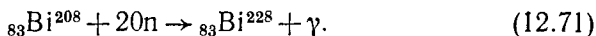


Рис. 12.16. Зависимость от Z сечения радиационного захвата нейтронов с энергией $E = 30$ кэВ.

Точки — экспериментальные данные.

В результате α -распада атомные ядра элемента франция превращаются в ядра астата, а последние вновь в ядра висмута. Следовательно, s -процесс заканчивается на этих элементах. Поэтому для объяснения существования более тяжелых элементов (например, урана) приходится предположить, что наряду с s -процессом имел место r -процесс захвата нейтронов. Очевидно, что быстрый процесс может легко преодолеть область астата и франция. Например, ядро изотопа висмута ${}_{83}\text{Bi}^{208}$ может последовательно присоединить 20 нейтронов и превратиться в ядро изотопа висмута ${}_{83}\text{Bi}^{228}$:



Ядро изотопа висмута ${}_{83}\text{Bi}^{228}$ является, конечно, нестабильным (вследствие большой перегруженности нейтронами) и в результате цепочки β -распадов должно превратиться уже в одно из ядер, находящихся за астатом и францием.

8. Рассмотрим возможность образования элементов на дозвездной стадии эволюции Вселенной. Факт разбегания галактик («расширения» Вселенной) показывает, что в отдаленном прошлом веще-

ство Вселенной было сконцентрировано в значительно меньшем объеме и, следовательно, его средняя плотность была выше современной плотности $\rho \approx 10^{-30}$ г/см³. С другой стороны, существование реликтового излучения, т. е. заполняющего все пространство изотропного электромагнитного излучения с температурой около 3 К, считается доказательством того, что вещество в прошлом было не только более плотным, но и в среднем значительно сильнее разогретым. С каких плотностей и температур вещества началось расширение Вселенной, надежно оценить трудно. Единственным путеводителем в прошлое в данном случае являются уравнения гравитации Эйнштейна. Согласно этим уравнениям расширение Вселенной началось с состояния, когда очень сильно разогретое вещество имело огромную плотность. По времени это состояние удалено от нас примерно на 10^{10} лет. Чтобы представить себе масштабы температур и плотностей, приведем без вывода формулы, связывающие плотность ρ и температуру T со временем t , отсчитываемым от того гипотетического момента времени, когда началось расширение пространства:

$$\rho = \frac{4,5 \cdot 10^5}{t^2} \text{ г/см}^3, \quad (12.72)$$

$$T = \frac{1,5 \cdot 10^{10}}{\sqrt{t}} \text{ К}. \quad (12.73)$$

Например, в момент времени $t = 0,01$ с плотность

$$\rho = 4,5 \cdot 10^9 \text{ г/см}^3,$$

а температура

$$T \approx 1,5 \cdot 10^{11} \text{ К};$$

в момент времени $t = 10^{-6}$ с плотность и температура соответственно равнялись $4,5 \cdot 10^{17}$ г/см³ и $1,5 \cdot 10^{13}$ К. Последовательность событий после начала расширения выглядит следующим образом. На очень ранних этапах расширения ($t \approx 10^{-6}$ с) температура была столь высокой, что в столкновениях могли рождаться любые известные сейчас элементарные частицы (и античастицы). Это был действительно ядерный мир, в котором все элементарные частицы существовали и находились в термодинамическом равновесии друг с другом. По мере расширения Вселенной вследствие процессов аннигиляции антибарионы исчезали, и к моменту времени $t \approx 1$ с остались только протоны и нейтроны. С этого момента начинается этап ядерных реакций в узком смысле этого слова. Из-за малого времени, предоставленного ядерным реакциям темпом расширения Вселенной, успевают образоваться ядра изотопа гелия ${}^4_2\text{He}^1$ и в небольшом количестве (но, возможно, достаточном для объяснения их распространенностей!) ядра d , ${}^3_2\text{He}^3$, ${}^7_3\text{Li}^7$. К концу «эпохи» ядерных реакций состав вещества оказывается следующим: 70% водо-

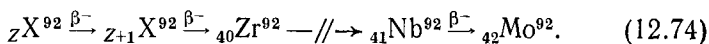
рода, 30% гелия (по массе или около 10% по числу ядер). Таким образом, исходное вещество, из которого впоследствии образовались звезды, должно было состоять практически из водорода и гелия.

9. В заключение остановимся на некоторых более тонких вопросах происхождения элементов. Ядра ${}^3\text{Li}^6$, ${}^4\text{Be}^9$, ${}^5\text{B}^{10,11}$ не могли образовываться ни в звездах, ни на дозвездной стадии эволюции Вселенной. Весьма вероятно, что они образуются в ядерных реакциях фрагментации (см. гл. IV, § 10, п. 2) космических лучей на межзвездном газе. Подтверждением этого являются данные табл. 12.4, из которой видно, что отношения распространенностей ядер изотопов ${}^3\text{Li}^6$, ${}^4\text{Be}^9$, ${}^5\text{B}^{10,11}$, рассчитанные в предположении их образования космическими лучами, хорошо согласуются с наблюдаемыми.

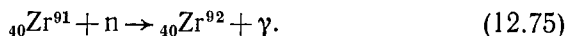
Таблица 12.4. Сравнение наблюдаемых и рассчитанных распространенностей изотопов элементов Li, Be, B

Отношения распространенностей	Наблюдаемые	Рассчитанные
$\text{B}^{11}/\text{B}^{10}$	4	2—3
Li^6/Be^9	1/3	1/5
B/Be	≈ 10	10—20

Не все средние и тяжелые атомные ядра могут синтезироваться в s - и r -процессах. Имеются ядра, называемые «обойденными», которые вообще не могут образоваться посредством захвата нейтронов. Примером обойденного ядра является ядро изотопа молибдена ${}_{42}\text{Mo}^{92}$. Действительно, в быстром процессе это ядро возникнуть не может, так как цепочка β -распадов прекращается на стабильном ядре изотопа циркония:



В медленном процессе ядро ${}_{42}\text{Mo}^{92}$ также не может появиться, так как из стабильного ядра ${}_{40}\text{Zr}^{91}$ при захвате нейтрона образуется стабильное же ядро изотопа циркония:

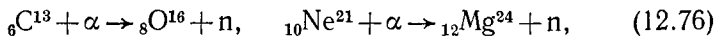


Существование в природе обойденных ядер заставляет считать, что они образовались либо в процессе реакций (p , γ), либо в результате реакций с нейтрино, которые испускаются при вспышках сверхновых.

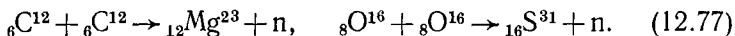
Отметим, наконец, что образование элементов в s - и r -процессах требует значительных концентраций свободных нейтронов. Например, для s -процесса нужно, чтобы в течение длительного времени в 1 см^3 находилось примерно 10^{10} нейтронов, а для r -процесса в те-

чение нескольких секунд — 10^{20} нейтронов. Между тем ядерная эволюция звезд происходит с определенным дефицитом свободных нейтронов. Поэтому нетривиальным является вопрос о реакциях, снабжающих звезды достаточным количеством нейтронов.

Источниками нейтронов могли бы быть реакции (α, n) на ядрах ${}_6\text{C}^{13}$ и ${}_{10}\text{Ne}^{21}$:



а также реакции горения углерода и кислорода:



В настоящее время, однако, не ясно, могут ли эти реакции обеспечить звезду необходимым количеством нейтронов, особенно в случае r -процесса.

§ 3. Космические лучи

1. Космическими лучами (В. Гесс, 1912) называются заполняющие космическое пространство высокоэнергичные стабильные микрочастицы — протоны, α -частицы и т. д. с энергией от десятка МэВ до $\sim 10^{20}$ эВ и выше. На пути к поверхности Земли космические лучи должны пройти толстый ($\approx 10^3$ г/см²) слой вещества — атмосферу, в которой они претерпевают сложную цепь превращений. Вследствие этого на поверхность Земли падает излучение, по своему составу не имеющее ничего общего с существующим в космическом пространстве. Это излучение часто называют *вторичным космическим излучением*, оставляя термин *первичное космическое излучение* за высокоэнергичными микрочастицами космического пространства.

В окрестности Земли первичное космическое излучение состоит из галактического космического излучения, генерированного в удаленных от Земли, но еще точно не известных объектах, и солнечного космического излучения. В дальнейшем, если не будет специально оговорено, мы под первичными космическими лучами будем понимать галактические космические лучи.

Если отвлечься от искажающего влияния магнитных полей Земли и межпланетного пространства, то в месте нахождения Солнечной системы первичное космическое излучение изотропно по направлению и постоянно во времени. Интенсивность его равняется 2—4 частиц/(см²·с). Пространственная и временная изотропия являются, по-видимому, результатом длительного «блуждания» частиц, в процессе которого стерлась всякая пространственная и временная выделенность источников космических частиц по отношению к Земле.

Анализ химического состава первичного космического излучения сопряжен со значительными техническими трудностями (регистрирующую и анализирующую аппаратуру нужно вынести