1957 г. Май *Т. LXII, вып. 1*

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК

РАСПРОСТРАНЕННОСТЬ ЭЛЕМЕНТОВ

Г. Зюсс и *Г. Юри**)

В 1889 г. Ф. У. Кларк прочел в Вашингтонском философском обществе доклад, в котором он наметил программу исследований, представляющую содержание настоящей статьи. Доклад Кларка[17] под названием «Относительная распространенность химических элементов» был первым среди многих работ различных авторов. В докладе говорилось, что «в процессе настоящего исследования была сделана попытка представить относительную распространенность элементов кривой, имеющей в качестве одной координаты атомный вес элементов. Предполагалось, что обнаружится какая-либо периодичность, однако никакой закономерности такого рода не проявилось».

В течение последующих пятидесяти лет Кларк со своим сотрудником Вашингтоном продолжал ту же линию исследований. Их классический труд до сих пор рассматривается как один из наиболее ценных источников геохимических данных. С тех пор многие пытались найти объяснение распределения распространенности элементов или по меньшей мере найти эмпирические правила, определяющие основные свойства этого распределения. По этому поводу высказывалось множество предположений; большинство из них имело столь спекулятивный характер, что не могло оказать существенного влияния на дальнейшее развитие. Однако одно наблюдение, основанное на исследовании Кларка и Вашингтона, а именно правило, сформулированное Харкинсом, утверждающее, что все элементы с четными атомными номерами более распространены в природе, чем элементы с нечетными номерами, оказалось чрезвычайно существенным во многих областях науки.

Кларк и Вашингтон в своем исследовании сначала исходили из состава земной коры. С течением времени становилось все более и более очевидным, что метеориты представляют собой лучшие объекты для изучения средней распространенности химических элементов в природе, чем земные минералы. Эти исследования завершились классической работой Гольдшмидта[31], являющейся основой всех позднейших исследований в этой области.

Когда Кларк в 1889 г. искал периодичность в относительной распространенности элементов, он надеялся найти какое-то соотношение между распространенностью и периодической таблицей элементов. Уточнение данных о распространенности элементов, открытие изотопов и определение изотопного состава элементов позволили открыть более 40 лет тому назад определенные типы периодичности; при этом оказалось, что эти периоды подчинялись иным законам, чем законы строения атомов, и не имеют ничего общего с периодической таблицей. Казалось, что распространенность элементов и их изотопов отражает ядерные свойства и что окружающее нас вещество похоже на золу космического ядерного пожара, в котором оно было создано.

---

*) Reviews of Modern Physics **28**, 53 (1956). Перевод С. А. Каменецкого.

В 1948 г. один из авторов настоящей статьи (Зюсс) попытался это доказать. Он показал, что между изотопным составом элемента и его космической распространенностью существует эмпирическая и количественная корреляция, которую нельзя объяснить иначе, чем допустив корреляцию некоторого типа между ядерными свойствами и распределением ядерных распространенностей. С тех пор был достигнут значительный прогресс в геохимии и космохимии, а также в познании строения ядра, так что необходимо было пересмотреть и расширить прежнюю работу.

Подходящей основой для понимания эмпирических и полуэмпирических особенностей распределения распространенности различных видов ядер во вселенной была бы полная теория образования элементов. Такие теории предлагались различными исследователями. Были сделаны попытки найти подходящую космогоническую модель, которая бы разумным путем приводила к пониманию образования ядер различных видов в тех же отношениях, в каких они встречаются в природе. Эти попытки увенчались успехом в том смысле, что позволили качественно понять существование тяжелых ядер и их относительные количества. Однако ни одна из этих теорий не может объяснить ни деталей распределения распространенности, ни количественных особенностей общей картины распространенности ядер.

Независимо от какой-либо теории происхождения вселенной можно попытаться найти указания на природу последней ядерной реакции, которая произошла непосредственно перед окончательным установлением распределения распространенности, которое наблюдается в настоящее время. Возвращаясь назад к прошлому, можно попытаться выяснить, как развивались те условия, при которых эти реакции имели место. В качестве заключительного шага можно, наконец, построить космогоническую модель хода событий. В настоящей статье такая попытка не делается. Однако мы обращаем внимание на некоторые данные, которые могли бы послужить основой для исследований в этом направлении, и приводим некоторые соображения, которые могут оказаться полезными для дальнейшей разработки.

ЗАКОНЫ ОТНОСИТЕЛЬНОЙ РАСПРОСТРАНЕННОСТИ НУКЛИДОВ

В природе встречаются все виды устойчивых ядер. Однако их относительная распространенность обнаруживает вариации с коэффициентом порядка 10^{15}. Впервые Харкинс[35] попытался провести систематическую классификацию устойчивых видов ядер, или нуклидов, основанную на атомных номерах как соответствующих обозначениях элементов, и изотопах как предельных составляющих этих элементов; правила Харкинса отражают важные закономерности в распространенности нуклидов. Маттаух ввел дополнительные правила. В настоящее время эти правила могут быть поняты в свете энергий связи ядер, в частности с точки зрения оболочечной модели ядра, как это было установлено Майер[50, 51] и Хакселем, Иенсеном и Зюссом[36].

В ранней работе Зюсса[84] указаны следующие правила распространенности устойчивых нуклидов:

1) Нуклиды с нечетными массовыми числами: распространенность ядер с нечетными массовыми числами $A > \sim 50$ монотонно изменяется с массовым числом. В случае наличия изобаров следует брать сумму распространенностей изобаров вместо распространенности отдельных ядер.

2) Нуклиды с четным массовым числом: a) в области тяжелых элементов с $A > 90$ суммы распространенностей изобаров с четными массовыми числами монотонно изменяются с массовым числом; b) в области $A < 90$ распространенность ядер с одинаковыми количествами избыточных нейтронов монотонно изменяется с массовым числом.

3) В области легких элементов с $A < 70$ для данного массового числа изобары с большим избытком нейтронов менее распространены. В области

тяжелых элементов с $A > 70$ изобары с наименьшим избытком нейтронов наименее распространены.

4) Исключения из этих правил встречаются для тех массовых чисел, для которых числа нейтронов имеют определенные значения, — так называемые «магические числа».

Эмпирическая сторона вопроса больше всего обязана обширной, и тщательной работе Гольдшмидта и его сотрудников. Классический труд Гольдшмидта[31] все еще остается наиболее ценным источником информации, и те, кто изучал данный предмет позже, в основном опираются на его мнение по вопросу об относительной распространенности элементов. Книга, вышедшая посмертно[30], сделала этот труд более доступным. Ида и Вальтер Ноддаки[53, 59, 60] внесли дополнительные данные, критически рассмотренные Гольдшмидтом. При использовании распространенности, получаемой из метеоритных данных, всегда возникает проблема надлежащего среднего для элементов, встречающихся в метеоритах силикатной фазы, троилитовой фазы (FeS) и металлической фазы. Гольдшмидт принимал следующий относительный вес этих фаз: 10 (силикатная) : 1 (сульфидная) : 2 (металлическая). Ноддаки[60] и Юри[92] пользовались хондритными каменными метеоритами в качестве соответствующего среднего, так как эти метеориты совершенно очевидно представляют гетерогенную смесь веществ из разных источников и, следовательно, могут сами по себе представлять подходящую смесь. Броун[11] применял значительно большую пропорцию железа, и полученные им распространенности отличаются от других, как правило, более высокими значениями для сидерофильных элементов. Юри и Крэйг[98] нашли две выдающиеся группы хондритовых метеоритов, которые по существу представляют собой две группы Приора[66, 67], полученные при помощи других критериев. Пользуясь новейшими методами анализа, Уилк[101] анализировал некоторое количество метеоритов и подтвердил наличие этих двух групп. Эти две группы различаются относительными количествами металлической и силикатной фаз. Хотя мы будем пользоваться этими наблюдаемыми атомными распространенностями, мы должны признать, что не существует доступных нам вполне надежных образцов космического вещества.

То, что космические распространенности элементов подчиняются заметным закономерностям, было очевидно уже в течение ряда лет. Редкие земли имеют весьма сходные химические свойства, так что разделение редкоземельных элементов по трудности приближается к разделению изотопов. В этих элементах обнаруживается заметная закономерность распространенностей, именно, наблюдается правильное чередование распространенности четных и нечетных элементов; распространенность последовательных нечетных и четных элементов изменяется постепенно и закономерно. Один из авторов настоящей статьи (Зюсс) сознавал, что это означает, что распространенность изотопов должна аналогичным образом обнаружить определенную закономерность и что распространенность элементов должна быть такова, что все нуклиды должны изменяться каким-то правильным образом. Соответственно с этим в настоящей работе принято, что относительная распространенность всех видов изотопов имеет определенный смысл и не является просто результатом «случайных» изменений. Оказалось, что это допущение оправдывается почти во всех случаях и мы, конечно, верим, что оно справедливо во всех случаях, хотя мы совершенно откровенно признаемся, что не всегда обнаруживаем, что это так. Мы не претендуем на полное объяснение закономерностей и отступлений от закономерностей, которые мы описываем. Вполне возможно, например, что распространенность нуклидов с нечетными массовыми числами выражается приближенно кривой, выше и ниже которой ложатся без определенной закономерности отдельные нуклиды. Мы полагаем, что в большинстве случаев это не так, что распространенность изотопов элементов

определяет наклон таких кривых удивительно хорошо, особенно наклон кривой для нечетных массовых чисел. Логарифмы распространенности элементов с четными и нечетными массами при правильном истолковании также выражаются кривыми, смещенными одна относительно другой с большей части интервала масс на почти постоянную величину.

Ниже рассматриваются различные элементы в связи со значениями их распространенности и принятые значения распространенности, согласующиеся с вышеприведенными правилами. Это обсуждение по существу основано на эмпирических данных Гольдшмидта с учетом данных, появившихся с тех пор в литературе. Как правило, используется новейшая таблица распространенностей Юри, в которой взяты анализы хондритов преимущественно перед другими средними данными.

ЭМПИРИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ ПО РАСПРОСТРАНЕННОСТИ

Можно было бы ожидать, что атмосфера Солнца содержит все элементы в начальных относительных количествах; правда, ядерные реакции могли изменить эту распространенность и, кроме того, могло произойти перемешивание поверхностных, и внутренних слоев. Это действительно произошло в случае H и He вследствие медленного превращения водорода в гелий и в случаях дейтерия и лития, которые при температуре внутренности Солнца должны превратиться в гелий. О наличии дейтерия в атмосфере Солнца сообщал Де Ягер[19], однако в данном случае отождествление сомнительно, так как оно опиралось только на линию D_α. Гринштейн и Ричардсон[34] нашли, что распространенность лития на Солнце хотя и очень мала, но не равна нулю. Наличие дейтерия указывало бы на то, что во внешних слоях Солнца нет конвекции, но наблюдения лития приводят к противоположному заключению. Трудно получить точные и надежные значения распространенности всех элементов на Солнце, так как интенсивности спектральных линий очень тесно связаны с температурами в различных слоях атмосферы Солнца и, кроме того, происходит расширение спектральных линий по ряду причин, например вследствие допплер-эффекта, столкновений, турбулентности, наконец играет роль и естественное затухание. Распространенность элементов на многих звездах весьма близка к их значениям для Солнца, хотя наблюдаются и существенные различия. Точно так же распространенность в планетарных туманностях очень близка к их значениям для звезд. Хотя по большей части мы фактически обсуждаем значения для Солнца, мы допускаем, что все источники достаточно надежны, так что можно сравнивать численные значения. Однако необходимо соблюдать осторожность, так как в звездах различных типов наблюдаются существенные различия в составе.

Очевидно, что соотношение элементов в земной коре претерпевало различные изменения. В процессе своего образования Земля потеряла бо́льшую часть наиболее летучих элементов — водорода, благородных газов, углерода в виде CH_4, азота в виде NH_3 или N_2, кислорода в виде H_2O, вероятно, также улетучилось некоторое количество серы в виде H_2S, галоидов в углеродных соединениях и некоторое количество других элементов, хотя такие потери не очевидны[96]. Произошла и заметная дифференциация поверхностных областей в результате частичных процессов плавления и кристаллизации и потери сидерофильных и калькофильных элементов, ушедших глубоко внутрь. Эрозия под действием воды привела к дальнейшей дифференциации поверхностных областей. Чрезвычайно трудно дать сколько-нибудь надежную оценку среднего состава поверхности Земли, однако имеются некоторые данные, пригодные для использования в настоящей работе.

Обычно принимают, что метеоритное вещество со времени его образования из солнечного вещества подвергалось меньшему химическому фракционированию, чем любое земное вещество, обнаруженное на земной поверх-

ности. Фракционирование того типа, который можно опознать в метеоритах, можно разделить на три главные фазы — металлическую, сульфидную и силикатную. В соответствии с этим Гольдшмидт разделял все химические элементы на три группы — сидерофильные, калькофильные и литофильные элементы — в зависимости от метеоритной фазы, в которой элементы оказались в большем количестве. Однако эта классификация не всегда определенна, поскольку многие элементы распределены между двумя или тремя фазами в различных пропорциях. Гольдшмидт в своей классификации допускал, что все элементы были распределены в этих трех фазах в равновесных отношениях: если бы установилось равновесие, то во всех образцах этих фаз относительные количества этих элементов были бы постоянными, а это заведомо неверно. Крэйг [18] привел некоторые соображения в пользу того, что при высоких температурах сульфидная фаза должна была бы полностью растворяться в силикатной и железной фазах, если бы они были полностью расплавлены. В этом случае элементы оказались бы распределенными между этими двумя фазами. Вследствие разности плотностей они разделились бы даже в слабых гравитационных полях. Последующее охлаждение привело бы к отделению сульфидной фазы от каждой из остальных, и равновесие между сульфидными фазами в силикатной и металлической фракциях не могло бы больше установиться. С падением температуры произошло бы выделение включений сернистого железа из железной фазы, а эти включения собрали бы растворенные в железной фазе элементы в количествах совершенно иных, чем те, которые накапливаются в сернистом железе, выделившемся из силикатных фаз. Большинство исследователей изучало сернистое железо из железных метеоритов и принимало, что концентрации элементов в сернистом железе, заключенном в силикатах, такие же. Нет оснований считать такое допущение справедливым. Фактически, вероятно, можно пренебречь при определении средних величин количествами элементов в троилитовых включениях железных метеоритов, так как они составляют очень малую долю железных метеоритов, а следовательно, всего метеоритного вещества.

Таблица I

Допущения о среднем составе метеоритного вещества, сделанные различными авторами

Автор	Весовые доли		
	металл	сульфид	силикат
Ноддак и Ноддак (1930) . .	68	9,8	100
Ноддак и Ноддак (1934) . .	14,6	6,7	100
Ферсман (1934)	20	4	100
Гольдшмидт (1937)	20	10	100
Браун (1949)	67	0	100
Юри (1952а)	10,6	7	100

Другое затруднение возникает при вычислении «среднего» состава метеоритов в связи с незнанием относительных количеств трех основных метеоритных фаз. Метеориты, достигающие земной поверхности, не могут служить основанием для оценок этих относительных количеств, так как железные метеориты лучше сохраняются во время падения и на поверхности земли, чем каменные и палласиты. Допущения, сделанные различными исследователями, приведены в таблице I.

Значения, приведенные Г. Брауном и Ноддаками[58], получены из отношения весов ядра и оболочки Земли в предположении, что средний состав Земли отражает среднее солнечное нелетучее вещество. Новое значение, полученное Рабом[69] для массы Меркурия, дает для плотности Меркурия около 5, а это указывает на то, что Меркурий содержит большее относительное количество металлического железа, чем Земля. Юри[91, 94] отмечает, что планеты вообще имеют различную плотность, и дает оценку относительных количеств металлической фазы. Он приходит к выводу, что в процессе образования планет должно было произойти некоторое фракционирование, которое отделило металл от силиката таким образом, что преимущественно был потерян силикат. Следовательно, отношение весов ядра и оболочки Земли не может служить основанием для оценки соответствующих космических отношений. Юри, исходя из термодинамических соображений, связанных с химическими процессами, приведшими к образованию земных планет, пришел к заключению, что Луна и хондриты дали бы лучшее представление о среднем составе нелетучей части солнечного вещества. Значение Юри для железа еще меньше, чем значение Гольдшмидта, и находится в лучшем согласии с солнечной распространенностью, определяемой по новейшим данным об интенсивностях осциллятора для железа, полученным Копферманом и Весселем[45], применившими новый точный метод и получившими новое значение, составляющее $^1/_3$ принятого ранее. Эдвардс, Джонстон и Дитмарс[23] подтверждают свои более низкие значения для давления паров железа. Юри вывел свои значения для отношений трех фаз из состава хондритов по данным Приора[68]. Новое отношение силиката к металлу в метеоритах требует пересмотра всех значений для распространенностей. Эмпирические данные приведены в таблице II.

Пределы ошибок

Гольдберг и Браун[28] показали, что рений распространен приблизительно в 130 раз более, а свинец по крайней мере в 50 раз менее, чем это предполагалось ранее. Это заставляло усомниться в ценности данных, опубликованных относительно космической распространенности меньших составных частей менее распространенных элементов. До исследований Брауна значения для рения и свинца полностью основывались на работе Ноддаков. Сравнение их работы с другими показывает, что вообще нельзя принимать без критики данные, собранные этими авторами. Во многих случаях других данных нет, и Гольдшмидт пользовался значениями Ноддаков, учитывая, однако, возможные источники ошибок в их определениях.

Как мы увидим ниже при подробном рассмотрении отдельных элементов, все имеющиеся данные не свободны от серьезных ошибок. Данные, опубликованные за последние двадцать лет и особенно после войны, по-видимому, вообще значительно более надежны, чем опубликованные ранее. Некоторые данные даже такого серьезного исследователя, как Гольдшмидт, оказались весьма ошибочными; например, в случае олова и свинца. Как правило, количества, которые назывались для редких элементов, особенно в интервале миллионных долей, со временем уменьшались. Поэтому при выборе данных мы стремились брать преимущественно более низкие значения. В некоторых случаях мы выбирали значения, заведомо выходящие за пределы опубликованных аналитических значений. Мы предполагаем, что некоторые опубликованные аналитические данные страдают ошибками, превышающими 1000%, например, данные по вольфраму. Только дальнейшая аналитическая работа может выяснить, правы ли мы в нашем, в некоторых случаях довольно произвольном выборе. Трудно оценить точность астрофизических данных. Вероятно, по большей части возможные ошибки достигают 150%; в частности, в случае редких элементов данные могут быть еще более ошибочными.

Таблица II

Атомные распространенности элементов *)

Кремний = 1×10^6

Элемент	Гольдшмидт	Браун	Юри (исправленные значения)	Аллер (по астрономическим данным)	Значения, принятые в данной статье
1	2	3	4	5	6
1 H		$3,5\times10^{10}$		$2,94\times10^{10}$	$4,00\times10^{10}$
2 He		$3,5\times10^{9}$		$4,05\times10^{9}$	$3,08\times10^{9}$
3 Li	100		100	0,6	100
4 Be	20		16	1,0	20
5 B	24		20	1580	24
6 C		$8,0\times10^{6}$		$2,7\times10^{6}$	$3,5\times10^{6}$
7 N		$1,6\times10^{7}$		$4,9\times10^{6}$	$6,6\times10^{6}$
8 O		$2,2\times10^{7}$		$1,58\times10^{7}$	$2,15\times10^{7}$
9 F	1500	9000	300		1600
10 Ne		$9,0\times10^{5}$		$1,73\times10^{7}$	$8,6\times10^{6}$
		$2,4\times10^{7}$			
11 Na	$4,42\times10^{4}$	$4,62\times10^{4}$	$4,38\times10^{4}$	$7,7\times10^{4}$	$4,38\times10^{4}$
12 Mg	$8,7\times10^{5}$	$8,87\times10^{5}$	$9,12\times10^{5}$	$1,78\times10^{6}$	$9,12\times10^{5}$
13 Al	$8,8\times10^{4}$	$8,82\times10^{4}$	$9,48\times10^{4}$	$7,4\times10^{4}$	$9,48\times10^{4}$
14 Si	$1,0\times10^{6}$	$1,0\times10^{6}$	$1,0\times10^{6}$	$1,0\times10^{6}$	$1,00\times10^{6}$
15 P	$5,8\times10^{3}$	$1,3\times10^{4}$	$5,0\times10^{3}$	$1,9\times10^{4}$	$1,00\times10^{4}$
16 S	$1,14\times10^{5}$	$3,5\times10^{5}$	$9,8\times10^{4}$	$5,2\times10^{5}$	$3,75\times10^{5}$
17 Cl	4000—6000	17 000	2100	300 000	8850
18 Ar		$1,3\times10^{4}$		$1,0\times10^{6}$	$1,5\times10^{5}$
		$2,2\times10^{5}$			
19 K	6900	6930	3160	3900	3160
20 Ca	$5,71\times10^{4}$	$6,7\times10^{4}$	$4,90\times10^{4}$	$8,3\times10^{4}$	$4,90\times10^{4}$
21 Sc	15	18	28	42	28
22 Ti	4700	2600	2440	1800	2440
23 V	130	250	220	300	220
24 Cr	$1,13\times10^{4}$	$9,5\times10^{3}$	7800	$1,9\times10^{3}$	7800
25 Mn	6600	7700	6850	5600	6850
26 Fe	$8,9\times10^{5}$	$1,83\times10^{6}$	$6,00\times10^{5}$	$4,8\times10^{5}$	$6,00\times10^{5}$
27 Co	3500	9900	1800	2200	1800
28 Ni	$4,6\times10^{4}$	$1,34\times10^{5}$	$2,74\times10^{4}$	$4,4\times10^{4}$	$2,74\times10^{4}$
29 Cu	460	460	212	932	212
30 Zn	360	160	180	2880	486
31 Ga	19	65	11,4	2,5	11,4
32 Ge	190	250	65	25	50,5
33 As	18	480	4,0		4,0
34 Se	15	25	24		67,6
35 Br	43	42	49?		13,4

Продолжение табл. II

Элемент	Гольдшмидт	Браун	Юри (исправленные значения)	Аллер (по астрономическим данным)	Значения, принятые в данной статье
1	2	3	4	5	6
36 Kr					51,3
37 Rb	6,8	7,1	6,5	1	6,5
38 Sr	40	41	18,9		18,9
39 Y	9,7	10	8,9		8,9
40 Zr	140	150	54,5		54,5
41 Nb	6,9	0,9	0,8		1,00
42 Mo	9,5	19	2,42		2,42
44 Ru	3,6	9,3	2,1		1,49
45 Rh	1,3	3,5	0,71		0,214
46 Pd	1,8	3,2	1,3		0,675
47 Ag	3,2	2,7	0,35		0,26
48 Cd	2,6	2,6	1,9		0,89
49 In	0,23	1,0	0,26		0,11
50 Sn	29	62	1,33		1,33
51 Sb	0,72	1,7	0,12		0,246
52 Te	0,2		0,16		4,67
53 J	1,4	1,8	1,5		0,80
54 Xe					4,0
55 Cs	0,1	0,1	1,3		0,456
56 Ba	8,3	3,9	8,8		3,66
57 La	2,1	2,1	2,1		2,00
58 Ce	5,2	2,3	2,3		2,26
59 Pr	0,96	0,96	0,96		0,40
60 Nd	3,3	3,3	3,3		1,44
62 Sm	1,15	1,2	1,1		0,664
63 Eu	0,28	0,28	0,28		0,187
64 Gd	1,65	1,7	1,6		0,684
65 Tb	0,52	0,52	0,52		0,0956
66 Dy	2,0	2,0	2,0		0,556
67 Ho	0,57	0,57	0,57		0,118
68 Er	1,6	1,6	1,6		0,316
69 Tm	0,29	0,29	0,29		0,0318
70 Yb	1,5	1,5	1,5		0,220
71 Lu	0,48	0,48	0,48		0,050
72 Hf	1,5	0,7	0,55		0,438
73 Ta	0,40	0,31	0,32		0,065
74 W	14,5	17,0	13,0?		0,49
75 Re	0,12	0,41	0,05		0,135

Продолжение табл. II

Элемент	Гольдшмидт	Браун	Юри (исправленные значения)	Аллер (по астрономичнским данным)	Значения, принятые в данной статье
1	2	3	4	5	6
76 Os	1,7	3,5	0,97		1,00
77 Ir	0,58	1,4	0,31		0,821
78 Pt	2,9	8,7	1,5		1,625
79 Au	0,27	0,82	0,140		0,145
80 Hg	0,33		<0,006		0,284
81 Tl	0,17		0,11		0,108
82 Pb	9,1	<2,0	0,47		0,47
83 Bi	0,11	0,21	0,144		0,144
90 Th	0,59				
92 U	0,23	0,02			

*) Значения Гольдшмидта, приведенные в этой таблице, были несколько изменены Зюссом и Юри в соответствии с данными, имеющими сейчас пятилетнюю давность. Значения Юри представляют собой эмпирические данные для хондритных метеоритов, измененные в соответствии с новыми аналитическими данными, рассмотренными в данной статье. Большинство данных изменено.

Значения для редких земель по соображениям, приведенным в тексте, отличаются от принятых нами.

ОБСУЖДЕНИЕ РАСПРОСТРАНЕННОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ

Все атомные распространенности даны относительно распространенности кремния, принятой 10^6. Гольдшмидт пользовался значением Si = 100, а Браун принимал Si = 10 000.

Мы пользуемся значением Si = 10^6, чтобы получать для редких элементов значения, которые можно записывать не пользуясь огромным количеством нулей после запятой. На рисунке (вклейка) представлены зависимости логарифмов распространенностей (H) от массовых чисел, а в таблице III даны избранные нами значения.

Астрономы в течение многих лет изучали отношение космической распространенности водорода и гелия. Унсольд в своем классическом труде по атмосфере τ Скорпиона нашел, что это отношение равно 7,2; другие исследователи, производившие вычисления методом Унсольда, получали близкие к этому значения [обзор данных сделан в работе Аллера[3]]. Унсольд[99] принял единственное значение для электронного давления во всей толще атмосферы звезды. Недавно Андерхилл[89] использовал модель атмосферы с изменяющимися температурой и давлением для звезды типа 0—9,5 и получил для указанного отношения большее значение — от 20 до 25. Невен и Де Ягер[56] построили модели атмосфер для четырех звезд типа B: τ Скорпиона, δ Центавра, γ Пегаса и ι Геркулеса, исходя из водородных спектров этих звезд, и получили для этого отношения среднее значение 17,7 с небольшими вариациями значений для разных звезд. Аллер считает, что это отношение сильно зависит от применяемой точной модели звездной

Таблица III

Элемент	A	N	I	$\log H$	H
1	2	3	4	5	6
1 H				10,60	$4{,}00\times10^{10}$
	1	**0**	**—1**	**10,60**	$\mathbf{4{,}00\times10^{10}}$
	2	1	0	6,75	$5{,}7\times10^{6}$
2 He	**3**	**1**	**—1**	...	...
	4	2	0	9,49	$3{,}08\times10^{9}$
3 Li				2,00	100
	6	3	0	0,87	7,4
	7	**4**	**1**	**1,97**	**92,6**
4 Be	**9**	**5**	**1**	**1,30**	**20**
5 B				1,38	24
	10	5	0	0,65	4,5
	11	**6**	**1**	**1,29**	**19,5**
6 C				6,56	$3{,}54\times10^{6}$
	12	6	0	6,54	$3{,}50\times10^{6}$
	13	**7**	**1**	**4,59**	$\mathbf{3{,}92\times10^{4}}$
7 N				6,82	$6{,}60\times10^{6}$
	14	7	0	6,82	$6{,}58\times10^{6}$
	15	**8**	**1**	**4,38**	$\mathbf{2{,}41\times10^{4}}$
8 O				7,33	$2{,}14\times10^{7}$
	16	8	0	7,33	$2{,}13\times10^{7}$
	17	**9**	**1**	**3,90**	$\mathbf{8{,}00\times10^{3}}$
	18	10	2	4,64	$4{,}36\times10^{4}$
9 F	**19**	**10**	**1**	**3,20**	**1600**
10 Ne				6,93	$8{,}6\times10^{6}$
	20	10	0	6,89	$7{,}74\times10^{6}$
	21	**11**	**1**	**4,41**	$\mathbf{2{,}58\times10^{4}}$
	22	12	2	5,92	$8{,}36\times10^{5}$
11 Na	**23**	**12**	**1**	**4,64**	$\mathbf{4{,}38\times10^{4}}$
12 Mg				5,96	$9{,}12\times10^{5}$
	24	12	0	5,86	$7{,}21\times10^{5}$
	25	**13**	**1**	**4,96**	$\mathbf{9{,}17\times10^{4}}$
	26	14	2	5,00	$1{,}00\times10^{5}$
13 Al	**27**	**14**	**1**	**4,98**	$\mathbf{9{,}48\times10^{4}}$
14 Si				6,00	$1{,}00\times10^{6}$
	28	14	0	5,96	$9{,}22\times10^{5}$
	29	**15**	**1**	**4,67**	$\mathbf{4{,}70\times10^{4}}$
	30	16	2	4,49	$3{,}12\times10^{4}$
15 P	**31**	**16**	**1**	**4,00**	$\mathbf{1{,}00\times10^{4}}$
16 S				5,57	$3{,}75\times10^{5}$
	32	16	0	5,55	$3{,}56\times10^{5}$
	33	**17**	**1**	**3,44**	$\mathbf{2{,}77\times10^{3}}$
	34	18	2	4,19	$1{,}57\times10^{4}$
	36	20	4	1,71	51
17 Cl				3,95	8850
	35	**18**	**1**	**3,82**	**6670**
	37	**20**	**3**	**3,34**	**2180**
18 Ar				5,18	$1{,}50\times10^{5}$
	36	18	0	5,10	$1{,}26\times10^{5}$
	38	20	2	4,38	$2{,}4\times10^{4}$
	40	22	4		

Продолжение табл. III

Элемент	*A*	*N*	*I*	log *H*	*H*
1	2	3	4	5	6
19 K				3,50	3160
	39	**20**	**1**	**3,47**	**2940**
	40	21	2	0,58—1	0,38
	41	**22**	**3**	**2,34**	**219**
20 Ca				4,69	$4,90\times10^4$
	40	20	0	4,68	$4,75\times10^4$
	42	22	2	2,50	314
	43	**23**	**3**	**1,80**	**64**
	44	24	4	3,02	1040
	46	26	6	0,20	1,6
	48	28	8	1,94	87,7
21 Sc	**45**	**24**	**3**	**0,43**	**2,8**
22 Ti				3,39	2440
	46	24	2	2,29	194
	47	25	3	2,28	189
	48	26	4	3,25	1790
	49	**27**	**5**	**2,13**	**134**
	50	28	6	2,11	130
23 V				2,34	220
	50	27	4	0,74—1	0,55
	51	**28**	**5**	**2,34**	**220**
24 Cr				3,89	7800
	50	26	2	2,54	344
	52	28	4	3,81	6510
	53	**29**	**5**	**2,87**	**744**
	54	30	6	2,31	204
25 Mn	**55**	**30**	**5**	**3,84**	**6850**
26 Fe				5,78	$6,00\times10^5$
	54	28	2	4,55	$3,54\times10^4$
	56	30	4	5,77	$5,49\times10^5$
	57	**31**	**5**	**4,13**	$\mathbf{1,35\times10^4}$
	58	32	6	3,30	1980
27 Co	**59**	**32**	**5**	**3,25**	**1800**
28 Ni				4,44	$2,74\times10^4$
	58	30	2	4,27	$1,86\times10^4$
	60	32	4	3,86	7170
	61	**33**	**5**	**2,53**	**342**
	62	34	6	3,00	1000
	64	36	8	2,50	318
29 Cu				2,33	212
	63	**34**	**5**	**2,16**	**146**
	65	36	7	1,82	66
30 Zn				2,69	486
	64	34	4	2,38	238
	66	36	6	2,13	134
	67	**37**	**7**	**1,30**	**20,0**
	68	38	8	1,96	90,9
	70	40	10	0,52	3,35
31 Ga				1,06	11,4
	69	**38**	**7**	**0,84**	**6,86**
	71	40	9	0,66	4,54

Продолжение табл. III

Элемент	*A*	*N*	*I*	log *H*	*H*
1	2	3	4	5	6
32 Ge				1,70	50,5
	70	38	6	1,02	10,4
	72	40	8	1,14	13,8
	73	**41**	**9**	**0,58**	**3,84**
	74	42	10	1,27	18,65
	76	44	12	0,59	3,87
33 As	**75**	**42**	**9**	**0,60**	**4,0**
34 Se				1,83	67,6
	74	40	6	0,81	0,649
	76	42	8	0,80	6,16
	77	**43**	**9**	**0,70**	**5,07**
	78	44	10	1,20	16,0
	80	46	12	1,53	33,8
	82	48	14	0,78	5,98
35 Br				1,13	13,4
	79	**44**	**9**	**0,83**	**6,78**
	81	**46**	**11**	**0,82**	**6,62**
36 Kr				1,71	51,3
	78	42	6	0,24—1	0,175
	80	44	8	0,06	1,14
	82	46	10	0,77	5,90
	83	**47**	**11**	**0,76**	**5,89**
	84	48	12	1,47	29,3
	86	50	14	0,95	8,94
37 Rb				0,81	6,5
	85	**48**	**11**	**0,67**	**4,73**
	87	**50**	**13**	**0,25**	**1,77**
38 Sr				1,28	18,9
	84	46	8	0,03	0,106
	86	48	10	0,26	1,86
	87	**49**	**11**	**0,12**	**1,33**
	88	50	12	1,19	15,6
39 Y	**89**	**50**	**11**	**0,95**	**8,9**
40 Zr				1,74	54,5
	90	50	10	1,45	28,0
	91	**51**	**11**	**0,79**	**6,12**
	92	52	12	0,97	9,32
	94	54	14	0,98	9,48
	96	56	16	0,18	1,53
41 Nb	**93**	**52**	**11**	**0,00**	**1,00**
42 Mo				0,38	2,42
	92	50	8	0,56—1	0,364
	94	52	10	0,35—1	0,226
	95	53	11	0,58—1	0,382
	96	54	12	0,60—1	0,401
	97	**55**	**13**	**0,37—1**	**0,232**
	98	56	14	0,76—1	0,581
	100	58	16	0,37—1	0,234
44 Ru				0,17	1,49
	96	52	8	0,93—2	0,0846
	98	54	10	0,52—2	0,0331
	99	**55**	**11**	**0,28—1**	**0,191**
	100	56	12	0,28—1	0,189

Продолжение табл. III

Элемент	*A*	*N*	*I*	log *H*	*H*
1	2	3	4	5	6
	101	**57**	**13**	**0,40—1**	**0,253**
	102	58	14	0,67—1	0,467
	104	60	16	0,43—1	0,272
45 Rh	**103**	**58**	**15**	**0,33—1**	**0,214**
46 Pd				0,83—1	0,675
	102	56	10	0,73—3	0,0054
	104	58	12	0,80—2	0,0628
	105	**59**	**13**	**0,18—1**	**0,1536**
	106	60	14	0,26—1	0,1839
	108	62	16	0,26—1	0,180
	110	64	18	0,96—2	0,0911
47 Ag				0,41—1	0,26
	107	60	13	0,13—1	0,134
	109	**62**	**15**	**0,10—1**	**0,126**
48 Cd				0,95—1	0,89
	106	58	10	0,04—2	0,0109
	108	60	12	0,90—3	0,0079
	110	62	14	0,04—1	0,111
	111	**63**	**15**	**0,06—1**	**0,114**
	112	64	16	0,33—1	0,212
	113	65	17	0,04—1	0,110
	114	66	18	0,41—1	0,256
	116	68	20	0,83—2	0,068
49 In				0,04—1	0,11
	113	**64**	**15**	**0,66—3**	**0,0046**
	115	**66**	**17**	**0,02—1**	**0,105**
50 Sn				0,12	1,33
	112	62	12	0,13—2	0,0134
	114	64	14	0,96—3	0,0090
	115	**65**	**15**	**0,67—3**	**0,00465**
	116	66	16	0,28—1	0,189
	117	**67**	**17**	**0,01—1**	**0,102**
	118	68	18	0,50—1	0,316
	119	**69**	**19**	**0,06—1**	**0,115**
	120	70	20	0,64—1	0,433
	122	72	22	0,80—2	0,063
	124	74	24	0,90—2	0,079
51 Sb				0,39—1	0,246
	121	**70**	**19**	**0,15—1**	**0,141**
	123	**72**	**21**	**0,02—1**	**0,105**
52 Te				0,67	4,67
	120	68	16	0,62—3	0,00420
	122	70	18	0,06—1	0,115
	123	**71**	**19**	**0,62—2**	**0,0416**
	124	72	20	0,34—1	0,221
	125	**73**	**21**	**0,52—1**	**0,328**
	126	74	22	0,94—1	0,874
	128	76	24	0,17	1,48
	130	78	26	0,20	1,60
52 J	**127**	**74**	**21**	**0,90—1**	**0,80**
54 Xe				0,60	4,0
	124	70	16	0,58—3	0,00380
	126	72	18	0,55—3	0,00352

Продолжение табл. III

Элемент	A	N	I	$\log H$	H
1	2	3	4	5	6
	128	74	20	0,[illegible]—2	0,0764
	129	**75**	**21**	0,02	1,050
	130	76	22	0,21—1	0,162
	131	**77**	**23**	0,93—1	**0,850**
	132	78	24	0,03	1,078
	134	80	26	0,62—1	0,420
	136	82	28	0,55—1	0,358
55 Cs	**133**	**78**	**23**	**0,66—1**	**0,456**
56 Ba				0,56	3,66
	130	74	18	0,57—3	0,00370
	132	76	20	0,55—3	0,00356
	134	78	22	0,95—2	0,0886
	135	**79**	**23**	**0,38—1**	**0,241**
	136	80	24	0,45—1	0,286
	137	**81**	**25**	**0,62—1**	**0,414**
	138	82	26	0,42	2,622
57 La				0,30	2,00
	138	81	24	0,25—3	0,0018
	139	**82**	**25**	**0,30**	**2,00**
58 Ce				0,35	2,26
	136	78	20	0,64—3	0,0044
	138	80	22	0,75—3	0,00566
	140	82	24	0,30	2,00
	142	84	26	0,40—1	0,250
59 Pr	**141**	**82**	**23**	**0,60—1**	**0,40**
60 Nd				0,16	1,44
	142	82	22	0,59—1	0,39
	143	**83**	**23**	**0,24—1**	**0,175**
	144	84	24	0,54—1	0,344
	145	**85**	**25**	**0,08—1**	**0,119**
	146	86	26	0,39—1	0,248
	148	88	28	0,91—2	0,0824
	150	90	30	0,91—2	0,0806
62 Sm				0,82—1	0,664
	144	82	20	0,32—2	0,0108
	147	**85**	**23**	**0,00—1**	**0,100**
	148	86	24	0,87—2	0,0748
	149	**87**	**25**	**0,96—2**	**0,0920**
	150	88	26	0,69—2	0,0492
	152	90	28	0,25—1	0,176
	154	92	30	0,17—2	0,150
63 Eu				0,27—1	0,187
	151	**88**	**25**	**0,95—2**	**0,0892**
	153	**90**	**27**	**0,99—2**	**0,0976**
64 Gd				0,83—1	0,684
	152	88	24	0,14—3	0,00137
	154	90	26	0,17—2	0,0147
	155	**91**	**27**	**0,00—1**	**0,101**
	156	92	28	0,15—1	0,141
	157	**93**	**29**	**0,03—1**	**0,107**
	158	94	30	0,23—1	0,169
	160	96	32	0,17—1	0,149
65 Tb	**159**	**94**	**29**	0,98—2	**0,0956**

Продолжение табл. III

Элемент	*A*	*N*	*I*	log *H*	*H*
1	2	3	4	5	6
66 Dy				0,74—1	0,556
	156	90	24	0,46—4	0,00029
	158	92	26	0,70—4	0,000502
	160	94	28	0,10—2	0,0127
	161	**95**	**29**	**0,02—1**	**0,105**
	162	96	30	0,15—1	0,142
	163	**97**	**31**	**0,14—1**	**0,139**
	164	98	32	0,19—1	0,157
67 Ho	**165**	**98**	**33**	**0,07—1**	**0,118**
68 Er				0,50—1	0,316
	162	94	26	0,50—4	0,000316
	164	96	28	0,67—3	0,00474
	166	98	30	0,02—1	0,104
	167	**99**	**31**	**0,88—2**	**0,770**
	168	100	32	0,93—2	0,0850
	170	102	34	0,65—2	0,0228
69 Tm	**169**	**100**	**31**	**0,50—2**	**0,0318**
70 Yb				0,34—1	0,220
	168	98	28	0,48—4	0,00030
	170	100	30	0,82—3	0,00666
	171	**101**	**31**	**0,50—2**	**0,0316**
	172	102	32	0,68—2	0,0480
	173	**103**	**33**	**0,55—2**	**0,0356**
	174	104	34	0,84—2	0,0678
	176	106	36	0,44—2	0,0278
71 Lu				0,70—2	0,050
	175	**104**	**33**	**0,69—2**	**0,0488**
	176	105	34	0,11—3	0,0013
72 Hf				0,68—1	0,438
	174	102	30	0,90—4	0,00078
	176	104	32	0,35—2	0,0226
	177	**105**	**33**	**0,91—2**	**0,0806**
	178	106	34	0,07—1	0,119
	179	**107**	**35**	**0,78—2**	**0,0604**
	180	108	36	0,19—1	0,155
73 Ta	**181**	**108**	**35**	**0,81—2**	**0,065**
74 W				0,69—1	0,49
	180	106	32	0,78—4	0,0006
	182	108	34	0,11—1	0,13
	183	**109**	**35**	**0,84—2**	**0,070**
	184	110	36	0,17—1	0,15
	186	112	38	0,14—1	0,14
75 Re				0,13—1	0,135
	185	**110**	**35**	**0,70—2**	**0,0500**
	187	**112**	**37**	**0,93—2**	**0,0850**
76 Os				0,00	1,00
	184	108	32	0,26—4	0,00018
	186	110	34	0,20—2	0,0159
	187	**111**	**35**	**0,22—2**	**0,0164**
	188	112	36	0,12—1	0,133
	189	**113**	**37**	**0,21—1**	**0,161**
	190	114	38	0,42—1	0,264
	192	116	40	0,61—1	0,410

Продолжение табл. III

Элемент	A	N	I	$\log H$	H
1	2	3	4	5	6
77 Ir				0,91—1	0,821
	191	**114**	**37**	**0,50—1**	**0,316**
	193	**116**	**39**	**0,70—1**	**0,505**
78 Pt				0,21	1,625
	190	112	34	0,00—4	0,0001
	192	114	36	0,10—2	0,0127
	194	116	38	0,73—1	0,533
	195	**117**	**39**	**0,74—1**	**0,548**
	196	118	40	0,62—1	0,413
	198	120	42	0,07—1	0,117
79 Au	**197**	**118**	**39**	**0,16—1**	**0,145**
80 Hg				0,45—1	0,284
	196	116	36	0,65—4	0,00045
	198	118	38	0,45—2	0,0285
	199	**119**	**39**	**0,68—2**	**0,0481**
	200	120	40	0,82—2	0,0656
	201	**121**	**41**	**0,57—2**	**0,0375**
	202	122	42	0,93—2	0,0844
	204	124	44	0,29—2	0,0194
81 Tl				0,03—1	0,108
	203	**122**	**41**	**0,50—2**	**0,0319**
	205	**124**	**43**	**0,88—2**	**0,0761**
82 Pb				0,67—1	0,47
	204	122	40	0,80—3	0,0063
	206	124	42	0,09—1	0,122
	207	**125**	**43**	**0,00—2**	**0,0995**
	208	**126**	**44**	**0,39—1**	**0,243**
83 Bi	**209**	**126**	**43**	**0,16—1**	**0,144**
90 Th	232	142	52		
92 U	**235**	**143**	**51**		
	238	146	54		

атмосферы. Травинг[88] провел вычисление, исходя из модели атмосферы для τ Скорпиона, и нашел для этого отношения значение 5,9. В частном сообщении Аллер высказывал мнение, что лучшим значением было бы 10, а Унсольд считает, что правильное значение этого отношения есть 6 или 7 и что не опубликованные данные о солнечных протуберанцах подтверждают это значение для Солнца. Мы принимаем для отношения водорода к гелию значение 13, хотя вполне возможно, что истинное значение намного отклоняется от этого.

Для отношения водорода к металлам мы принимаем геометрическое среднее значений Клааса[16] и Унсольда[90] с изменением, сделанным Клаасом, нормализованное к среднему магния и кремния. Это дает 10,60 для $\log H_H$. Распространенность дейтерия по сравнению с протием в метеоритах оказалась, по данным Боато[9] и Эдвардса[20, 22], приблизительно такой же, как на Земле. Де Ягер[19] сообщает, что распространенность дейтерия в атмосфере Солнца приблизительно такая же, как в земном водороде, хотя это заключение основано только на интенсивности линии D_α. Мы принимаем в качестве отношения H/D значение 7000, что несколько превышает земное отношение, равное 6500. Распространенность изотопа He^3 в начальном солнечном веществе неизвестна.

Литий, бериллий, бор

Распространенность этих трех элементов, по-видимому, в 10^5 раз меньше, чем следующей по массе группы элементов во вселенной — углерода, кислорода и азота. Согласно Гринштейну и Ричардсону[34], литий на Солнце распространен, по-видимому, еще приблизительно в 100 раз менее. Малую распространенность этих трех элементов легко объяснить их неустойчивостью при высоких звездных температурах и возможностью термоядерных реакций этих элементов с протонами. Такие реакции могли происходить к концу процессов, при которых образовались эти элементы.

	Li	Be
Литосфера	900	67
Силикатные метеориты	100	20

Гольдшмидт[31] подытожил анализы изверженных пород и метеоритов на эти элементы. Он приходит к следующим данным для атомных отношений Li и Be в литосфере и в силикатных метеоритах к Si, принятому за 10^6 (см. таблицу). Нами приняты эти данные для метеоритов. Гольдшмидт оценивает атомную распространенность бора в 21. Оценка распространенности бора на земной поверхности осложняется значительным содержанием его в осадках и океанских водах.

Углерод, азот, кислород, неон

Наши сведения о распространенности этих элементов целиком основаны на спектроаналитических астрономических наблюдениях звезд (помимо Солнца) и планетарных туманностей, так как необходимы очень высокие температуры или коротковолновый свет для возбуждения этих элементов до высоких энергетических уровней нейтральных атомов или для их ионизации. Боуэн[10] исследовал одну линию кислорода на Солнце и получил несколько более высокую распространенность, чем высшие оценки для углерода и азота, а именно 7×10^{20} *атом см*$^{-2}$ по сравнению с 0,3 и $1{,}0 \times 10^{20}$ *атом см*$^{-2}$ для углерода и азота соответственно. Миннаэрт[54] свел результаты Унсольда[90], Клааса[16] и Гуннаэртса[44] по Солнцу, а Аллер[3] подвел итоги данных по звездам. Мы принимаем оценки Аллера для данных по C, N и O, нормализованные к значению для водорода $\log H = 10{,}60$. Полученные таким образом данные не сильно отличаются от значений, приводимых другими авторами.

Аллер[3] приходит к выводу, что кислород и неон приблизительно одинаково распространены в звездах и планетарных туманностях. Аллер[4] дает значение 0,28 для отношения неона к кислороду в планетарной туманности NC, C 7027. Травинг[88] оценивает распространенность неона в 0,4 распространенности кислорода. Если кислород и неон почти одинаково распространены, то логарифмы распространенности Ne^{20}, Ne^{22}, Mg^{24} и Mg^{26} располагаются почти на одной и той же прямой. Если неон значительно менее распространен, чем кислород, то это можно приписать уменьшению распространенности за нейтронным числом 8 кислорода O^{16}. Мы принимаем распространенность неона за 0,4 распространенности кислорода.

Фтор

Астрономические значения для фтора всегда были весьма ненадежны, и здесь следует опираться на земные и метеоритные данные. Единственное значение распространенности фтора в метеоритах, а именно $30 \cdot 10^{-6}$, дано Ноддаками[60]. Новейшее подробное исследование земного распределения[46] дало в результате $100 \cdot 10^{-6}$ для пироксенов и перидотитов и повышающиеся значения для более кислых пород, а в среднем для литосферы $700 \cdot 10^{-6}$. Эти данные не представляют крайнего расхождения по сравнению с некоторыми

другими элементами. Мы принимаем распространенность фтора за $200 \cdot 10^{-6}$ относительно кремния, для которого взято значение 0,185 по весу в первичном солнечном нелетучем веществе; таким образом, мы принимаем для атомной распространенности фтора значение 1600.

Элементы от натрия до железа

По элементам от натрия до железа имеется много, по-видимому, хорошо обоснованных анализов как для земной поверхности, так и для метеоритов. Гольдшмидт[31], а также Браун и Паттерсон[12] пересмотрели прежние анализы; но наиболее полный и современный обзор прежних анализов принадлежит Юри и Крэйгу[98]. Последние отобрали 94 лучших анализа хондритов из 350 имеющихся и специально мотивировали такой отбор. Полученная таким образом распространенность незначительно отличается от принятых в таблице Гольдшмидта. Юри и Крэйг показали, что существуют две довольно хорошо определенные группы хондритов с различным суммарным количеством железа, так что атомные отношения железа к кремнию в этих двух группах в среднем соответственно равны 6084 и 8494, если для кремния принять значение 10 000. Они нашли, что количества кобальта и никеля в этих двух группах различаются еще более, чем количества железа. Они считали, что более вероятно меньшее значение для распространенности железа, на том основании, что, имевшее место в планетах фракционирование[91], вероятно, как правило, происходило путем потери силикатной фазы, а не металлической, как это предполагал Юри ранее. Уилк[101] проверил наличие этих двух групп и нашел несколько меньшее количество железа в группе с малым количеством железа; он также проверил распространенность никеля. Мы принимаем округленное значение 6×10^5 для распространенности железа и значения Юри и Крэйга для никеля и кобальта. Эта малая распространенность железа находится в очень хорошем согласии с новейшими астрономическими данными.

Теоретические значения для калия, приводимые в более ранних анализах, заведомо слишком велики, как это показано в [2], где получено в качестве аналитического значения для калия в хондритных метеоритах 0,09%. Эдвардс и Юри[22], внеся дальнейшие улучшения в методы анализа, показали, что содержание калия и натрия в хондритах замечательно постоянно. Мы принимаем для распространенности калия значение $820 \cdot 10^{-6}$ по отношению к кремнию, для которого взято значение 18,5% по весу в первичном нелетучем солнечном веществе, представляющее среднее из анализов многих хондритов, проведенных Эдвардсом[21]. Мы не приняли меньшего значения для распространенности этого элемента, как это предлагал Юри[97], так как предварительные результаты нового вычисления солнечных распространенностей, сделанного Гольдбергом и Аллером, не подтвердили теоретического значения Юри. Это дает 3160 для атомной распространенности калия*).

---

*) Юри предполагает, что концентрация радиоактивных элементов — калия, урана и тория в метеоритах увеличилась в 3—4 раза, а распространенность других элементов, сконцентрированных в заметных количествах на земной поверхности, была такой же в метеоритах. Мы много раз обсуждали целесообразность принятия такой точки зрения. Вообще постулаты такого типа следовало бы подвергать испытанию временем прежде, чем основывать на них дальнейшие работы. Посоветовавшись с проф. Гольдбергом и проф. Аллером, мы сначала пришли к заключению, что предположенное Юри малое значение для калия будет, вероятно, подтверждено их исследованиями солнечных распространенностей. Как оказалось в настоящее время, это не имеет места.

Мы построили кривые распространенности элементов для обоих предположений. Если принять большие метеоритные распространенности, как предлагается в настоящей работе, то получатся плавные кривые при использовании больших значений для хлора и серы, а следовательно, также и для брома и селена, наблюденные же значения для рубидия и стронция в метеоритах ложатся на эту кривую. Это позволяет принять более высокие значения для криптона и, следовательно, для ксенона, а это в свою

Мы принимаем распространенность Na, Mg, Al и Si из новейшей работы Уника[101] по метеоритам, так как в ней анализы для этих элементов проведены наиболее совершенными современными средствами. Полученные значения мало отличаются от значений других исследователей, кроме Al, для которого получено несколько большее значение. Уник нашел, что осажденное железо содержит некоторое количество алюминия, и поправка на эту ошибку несколько повысила значение для алюминия.

Фосфор, сера и хлор

Астрономические данные для этих элементов всегда выше, чем данные, которые получаются из анализов метеоритов. Аналитические данные для фосфора дают весьма различные значения, даже в случае новейших данных Уника[101]. Поэтому мы выбрали приближенное астрономическое значение 10^4. Аналитические данные Уника дают метеоритное значение приблизительно 4000. Возможно, что фосфор вошел в углеродные соединения во время образования метеоритов[95].

Отношение кремний — сера представляет собой важное данное, потому что сера существует в качестве отдельной фазы в виде сернистого железа, и многие элементы растворяются в этой фазе. Оценки Гольдшмидта для серы много ниже астрономических значений; впрочем, астрономические значения базируются на данных, которые очень трудно интерпретировать. Юри дает меньшее значение, чем Гольдшмидт. Такие значения, вероятно, содержат ошибку в сторону уменьшения, так как сернистое железо при умеренных температурах, т. е. при температуре плавления железа и ниже, должно было бы восстанавливаться водородом; поэтому сера, вероятно, частично была потеряна при образовании метеоритов в виде сероводорода. Поскольку сера имеется в соединениях углерода углеродистых хондритных метеоритов, как это было показано Мюллером[52], этот элемент мог исчезнуть в таких соединениях в процессе образования солнечной системы. Мы приняли значение, промежуточное между астрономическим и метеоритным, а именно $3{,}75 \times 10^5$. Если принять для серы такое малое значение, какое получается из анализов метеоритов, то было бы очень трудно подобрать для селена удовлетворительное значение по сравнению с другими элементами, расположенными рядом с ним в периодической системе, и в то же время напрасно не отклониться от наблюденного отношения сера — селен. На наш выбор сильно повлияли высокие астрономические значения.

Распространенность хлора недавно была подвергнута подробному исследованию Бенэ[8] и Сальпетером[75]. Первый из них изучил много земных изверженных и осадочных пород и несколько метеоритов, а второй анализировал значительное число метеоритов. Оба ряда значений вообще расходятся. Бенэ получил в двух хондритах $100 \cdot 10^{-6}$, а среднее из хондритных значений Сальпетера составляет $840 \cdot 10^{-6}$. Селиванов[8] дает для одного хондрита значение $100 \cdot 10^{-6}$. Юри[92] пользовался значением Ноддаков, а именно $470 \cdot 10^{-6}$. Некоторые железные метеориты содержат малые количества хондритов. Мюллер[52] показал, что органические соединения углеродистых хондритов содержат заметные количества хлора, и предположил возможность потери этого

очередь приводит к бо́льшему значению для бария. Между обеими кривыми имеются и другие различия, но отмеченные являются наиболее важными.

Пока рассматриваются только ядерные закономерности, трудно отдать предпочтение той или другой кривой. Однако, если воспользоваться меньшими значениями Юри для калия и других элементов, концентрирующихся при процессах плавления, то можно получить лучшее согласие между отношениями скандия к галлию и меди к галлию для Солнца, хотя все еще оставались бы большие расхождения. Пока что нельзя объяснить очень большие расхождения в этих отношениях; и мы определенно отказываемся верить, что эти расхождения являются результатом ошибок в анализах метеоритов.

элемента через летучие соединения, как это было указано Юри[95]. Астрономические данные дают почти в 100 раз большую распространенность, чем метеоритные. Такая большая распространенность не укладывается на наши кривые без больших искажений. Мы приняли наивысшее возможное значение для хлора и все же сохранили достаточное разделение кривых для четных и нечетных масс.

Тяжелые редкие газы

Редкие газы, за исключением гелия, на Солнце не наблюдаются ввиду низкой температуры Солнца и малой распространенности редких газов. Неон и аргон наблюдались в звездах типа B и планетарных туманностях. Унсольд[90] и Аллер[3] приводят обзор данных. Разумеется, пределы вероятных ошибок очень велики, так как наблюденные линии — это линии ионов, между тем очень трудно оценить условия возбуждения с достаточной точностью, чтобы уверенно, менее чем с десятикратным расхождением получить распространенность.

Отношения количеств редких газов в атмосфере хорошо известны. Из этих отношений можно вывести некоторые важные заключения независимо от какой-либо теории образования атмосферы. В частности, можно, по-видимому, с достаточным основанием допустить, что на поверхности Земли тяжелые редкие газы были обогащены по сравнению с легкими. Это означает, что отношение криптона к ксенону в солнечном веществе должно быть равно или больше отношения этих газов в атмосфере. То же самое будет справедливо для отношения аргона к криптону или неона к аргону, за исключением изотопа A^{40}. Такое утверждение представляется вполне обоснованным, так как неизвестен никакой химический или физический процесс, при котором тяжелый газ улетучивался бы легче, чем более легкий. Земной гелий и A^{40} должны быть радиогенными, и, следовательно, к ним неприменимы подобного рода аргументы.

Астрономические значения для распространенности аргона и хлора в планетарных туманностях значительно выше тех, которые можно ожидать в результате простой интерполяции для аргона и хлора из значений для соседних элементов в метеоритах. Если воспользоваться астрономическими значениями для графического представления ядерных распространенностей, то получится весьма замечательная особенность, а именно острый пик на кривых распространенности четных и нечетных масс у значений 35 и 36, за которым следует крутое падение к малым распространенностям Cl^{37}, K^{39}, K^{41}, Ca^{43} на одной кривой и A^{38}, Ca^{42} на другой. Нет никаких физических оснований ожидать такого поведения этих кривых. Мы считаем такую интерпретацию неправильной и проводим для A^{36} и A^{40} плавную интерполяцию между серой и кальцием и пользуемся рассмотренным выше значением для хлора. Для отношения криптон — ксенон мы принимаем атмосферное значение 12,5 в согласии со сделанным выше допущением. Значение для ксенона определяет неизвестную распространенность теллурия.

От кальция до никеля

Значения для кальция в метеоритах определены с большой точностью. Значение Юри и Крэйга[98] 53 600. Новейшие определения Уника[101] дали 49 000. Концентрация скандия в метеоритах определялась Пинсоном, Аренсом и Франком[65] и оказалась равной $6 \cdot 10^{-6}$, что по существу совпадает со значением Гольдшмидта. Уник получил $8 \cdot 10^{-6}$ для хондритов. Рэссел обратил наше внимание на то, что линии скандия в солнечном спектре значительно более интенсивны, чем линии галлия, несмотря на бо́льшую интенсивность, присущую линиям галлия. Поэтому мы приняли наибольшее наблюденное значение для скандия в метеоритах.

Значение для титана было определено за много лет с исключительной точностью. Среднее Юри и Крэйга равно 0,066%. Тщательные анализы ряда хондритов, сделанные недавно Уиком (1955), привели его к заключению, что количество титана очень устойчиво и составляет около 0,079%, что дает 2440 для атомной распространенности по сравнению со средним значением 2100 Юри и Крэйга.

Новейшие анализы Уика для хрома и марганца хорошо согласуются с более ранними данными, суммированными Юри и Крэйгом[98]. Мы пользуемся этими данными для этих трех элементов.

Для распространенности железа, кобальта и никеля нами приняты значения, получающиеся из данных, суммированных Юри и Крэйгом[98] для случая группы хондритов с малым содержанием железа. Эти данные были подтверждены Уиком, который дает несколько меньшее значение для железа. Астрономическая оценка Гринштейна для железа значительно ниже, чем взятая нами распространенность, и это не противоречило бы аргументам Юри и Крэйга. Мы пользуемся их значениями для того, чтобы обеспечить совместимые значения относительных распространенностей железа и никеля.

Важные отношения распространенности элементов

Отношения титан — цирконий — гафний, по-видимому, хорошо установлены. Имеющиеся данные доказывают, что эти отношения почти одинаковы в метеоритных и земных источниках. Гольдшмидт дает значение, близкое к 20 для весового отношения Ti/Zr и приблизительно 50 для отношения Zr/Hf для обоих источников. Пинсон, Аренс и Франк[65] нашли $33 \cdot 10^{-6}$ для Zr в хондритах, а Уик[101] нашел 0,079% для титана, т. е. получил отношение, равное 24. Мы принимаем это значение и считаем атомную распространенность Zr равной 1/45 принятой нами распространенности титана.

Отношение Zr/Hf основано на обширном исследовании Хевеши и Вюрстлина[41, 42] по распространенности гафния и циркония в различных источниках. Их значения для Zr в метеоритах Пултуск и Ваконда заметно отличаются от значений Пинсона, Аренса и Франка[65]. В имеющихся данных содержится какая-то значительная вероятная ошибка. Благодаря любезности д-ра Инглиша (English S. G.) мы узнали о многих новейших анализах циркониевых минералов на гафний, проделанных Горным Бюро США (U. S. Bureau of Mines). Среднее из 68 анализов составляет 2,37% гафния по отношению к сумме циркония и гафния. Это несколько бо́льшая распространенность гафния, чем данная Гольдшмидтом. Невозможно установить, имелась ли определенная концентрация гафния по отношению к цирконию в процессе образования этих минералов, но некоторые образцы (не включенные в среднее) имеют значительно бо́льшую концентрацию гафния. Мы принимаем для этого весового отношения значение 55, а для отношения атомной распространенности — значение 110.

Гольдшмидт принял земное отношение S/Se равным 6000, а метеоритное весовое отношение равным 3300. С тех пор Бейерс[14] исследовал много метеоритов, включая и ряд хондритов. Среди хондритов были Аллеган и Табори, падение которых наблюдалось, остальные исследованные им метеориты — найденные. Для селена в этих двух метеоритах даны значения 13 и $10 \cdot 10^{-6}$, в других хондритах получены меньшие значения. Бейерс также определил для весового отношения S/Se в троилите из каньона Дьябло значение 4215, т. е. значение, промежуточное между значениями Гольдшмидта. Если воспользоваться метеоритным отношением Гольдшмидта и нашим значением для серы, то получится для атомной распространенности 47, между тем как из данных Бейерса получается 24,2. Вследствие различия устойчивости H_2S и H_2Se и углеродных соединений этих двух элементов, невероятно, чтобы

селен улетучивался из метеоритов так же легко, как сера. Мы приняли 67,6 для распространенности селена. Для этого отношения необходимы дополнительные данные. Данные по теллуру наименее надежны, и нам приходится интерполировать значение для этого элемента.

Отношение хлора к брому, вероятно, более надежно, чем значения для брома. Это отношение по весу в морской воде равно 292. Селиванов[30] [см. Ранкама и Сахама[72]] сообщал о значениях в пределах от 100 до приблизительно 300 для отношения в земных минералах. Бенэ[8] дает для этого отношения значения, изменяющиеся в широких пределах в различных изверженных породах. Мы пользуемся океанским отношением и нашим значением для хлора и получаем для распространенности брома 13,4. Океанское значение для иода не имеет никакого значения, так как иод поглощается живыми организмами и, следовательно, истощается в море по сравнению с осадками.

Отношение калия к рубидию подвергалось обширному исследованию в последние годы. Аренс, Пинсон и Керс[2] нашли весовое отношение, равное 100. Эдвардс и Юри[22] получили на нескольких образцах метеоритов значение 180. Херцог и Пинсон[37] считают, что правильным было бы принять значение 200. Это значение вполне сравнимо с отношением хлор—бром. Наблюденная распространенность по весу дает $3{,}8 \cdot 10^{-6}$, что эквивалентно значению атомной распространенности рубидия 6,65.

Мы полагаем, что на кривой в этом участке имеется минимум для значения массы меньшего, чем 50 нейтронов, так же как имеется минимум для массы, меньшей 82 нейтронов, а наша кривая похожа на кривую, ранее данную Зюссом[85].

Гольдберг, Учияма и Браун[29] определили количества Ni, Co, Pd, Au и Ga в 45 железных метеоритах. Содержание галлия заметно изменяется, и здесь наблюдается некоторая незначительная корреляция с содержанием палладия. Найденное этими авторами весовое отношение никеля к палладию является наиболее надежным значением этого отношения, а именно $2{,}24 \cdot 10^4$. Принимая наше значение для никеля, получаем отсюда 0,675 для распространенности палладия. Гольдшмидт дает 2,5 для этого значения. Предположение Гольдшмидта о большей доле металлической фазы увеличило это значение. Если принять 10% металлической фазы и пренебречь троилитовой фазой, то это значение будет $0{,}9 \cdot 10^{-6}$, что лишь незначительно превышает выбранное нами значение. Исследования Гольдберга и других привели также к отношению Ni—Au, а это фиксирует положение золота по отношению к никелю. Эти два отношения наиболее надежны из всех, которые мы имеем для определения наших кривых в интервале больших массовых чисел.

Атомное отношение криптона к ксенону в атмосфере равно 12,5, а на Солнце это отношение должно быть таким же или выше, так как криптон мог улетучиться быстрее, чем ксенон, как было указано выше. Любопытно, что во всех наших попытках обеспечить значения распространенности, совместимые со всеми доказательствами, мы никогда не считали желательным увеличивать значение этого отношения выше 12,5. Мы принимаем для криптона и ксенона, соответственно, распространенность 51,3 и 4,0, что совместимо с этим значением отношения.

Медь, цинк, галлий, германий, мышьяк, криптон, стронций, иттербий

Принимая разумные оценки ошибок в опубликованных распространенностях элементов от железа до циркония, можно благодаря нашему выбору распространенности хлора и серы получить в этом интервале плавную кривую для элементов с нечетными массами с максимумом у брома. Пары изотопов меди, гадолиния и брома определяют наклон кривой в трех точках.

Сообщалось, что содержание меди в метеоритах изменяется в удивительно широких пределах. Гольдшмидт после обстоятельного изучения лучших данных, расходящихся между собой более чем в 10 раз, принял атомную распространенность, равную 460. Неопубликованные данные Уника и Санделла указывают на большее постоянство данных по меди в хондритных метеоритах. Наш выбор значения 212 для атомной распространенности находится в согласии с данными этих двух анализов.

Цинк в метеоритах представляет собой типичный калькофил и сконцентрирован в сульфидной фазе. Для сделанного Гольдшмидтом выбора данных необходимо было бы, чтобы цинк был менее распространен, чем медь, что было бы удивительно. Значение Унсольда, основанное на трех линиях в солнечном спектре, более чем в 10 раз превосходит оценку Гольдшмидта, равную 360 для атомной распространенности. Мы принимаем 486 для того, чтобы обеспечить плавность кривых распространенности в этом интервале. Это значение заведомо находится в пределах ошибок аналитических значений для метеоритов.

Галлий в железных метеоритах изучался Гольдбергом, Учияма и Брауном[29], которые обнаружили три группы железных метеоритов с различным содержанием галлия, а именно 60, 20 и $2 \cdot 10^{-6}$. Никакого удовлетворительного объяснения этих вариаций не дано. Эти распространенности загадочны, в особенности потому, что галлий является в значительной степени электроположительным элементом и в известной мере сконцентрирован в поверхностных земных породах. Представляется вероятным, что галлий частично присутствует также и в силикатных фазах. Санделл[77] сообщил свои новейшие данные по галлию. Эти данные очень близки к данным Гольдшмидта и Ноддаков. Мы принимаем для атомной распространенности 11,4, что эквивалентно значению Санделла для хондритов, равному $5{,}3 \cdot 10^{-6}$. Принятое нами отношение скандия к галлию, именно 2,5, по-видимому, расходится с астрономическими значениями для Солнца, как это было указано нам проф. Ресселом. Аллер[3] дает для отношения скандия к галлию на Солнце значение 15, а более новые данные указывают даже на большее значение. Аллер дает для отношения меди к галлию значение приблизительно 400, между тем как из метеоритных данных получается около 20. Нет достаточных оснований полагать, что это различие объясняется большими ошибками данных по метеоритам. Если данные по Солнцу надежны, то между Солнцем и метеоритами наблюдается действительное различие в составе.

Тщательные исследования Гольдшмидта и Питерса[32] над содержанием германия в метеоритах дали в среднем по силикатной, троилитовой и металлической фазам $79 \cdot 10^{-6}$. Германий обнаруживался главным образом в металлической фазе. Мы принимаем в нашем среднем значительно меньше железа и меньше в металлической фазе, чем Гольдшмидт. Для того чтобы Ge^{73} уложился на нашу плавную кривую для нечетных масс, нам пришлось принять для германия приблизительно $24 \cdot 10^{-6}$ или атомную распространенность, равную 50,5 вместо значения Гольдшмидта, равного 188. Есть достаточно оснований считать, что значения, принятые Гольдшмидтом для германия, так же как и для олова и свинца, слишком велики, как будет показано ниже, при рассмотрении олова и свинца.

Новейшее значение Санделла[77] для мышьяка, равное $2{,}2 \cdot 10^{-6}$ в хондритных метеоритах, или значение 4,0 для атомной распространенности, по-видимому, очень надежно. Оно является средним по 14 хондритным метеоритам. Значения Ноддаков[60] слишком преувеличены.

Наши значения для распространенности меди, галлия и мышьяка, взятые из новейших превосходных аналитических данных, укладываются на плавную кривую. Астрономическое значение для меди выше, а для галлия ниже, чем получается из этих данных.

Как уже указывалось, при испарении в процессе образования метеоритов не происходило фракционирования элементов менее летучих, чем ртуть. Медь и галлий образуют весьма нелетучие соединения, а все соединения мышьяка в значительной степени летучи. Тем не менее все эти три элемента точно укладываются на плавную кривую. Цинк также достаточно летуч. Наше значение для него интерполировано, однако оно не сильно отклоняется от приближенных аналитических данных по метеоритам.

Пинсон, Аренс и Франк[65] недавно определяли стронций в метеоритах улучшенной методикой и получили в среднем $11 \cdot 10^{-6}$. Шумахер[79], применив изотопное растворение, получил $12 \cdot 10^{-6}$ в хондрите Форест Сити. По нашему представлению, было бы лучше, если бы значение для стронция было несколько выше; однако имеющиеся данные, по-видимому, не позволяют сделать такое допущение.

Распространенность иттрия и редких земель оценить трудно. Концентрации иттрия в кислых и основных породах в значительной мере одинаковы; кроме того, они весьма близки к опубликованным концентрациям их в метеоритах. Поэтому мы принимаем значение Гольдшмидта в метеоритах, а именно $5 \cdot 10^{-6}$, и атомную распространенность, равную 8,9 [см. Ранкама и Сахама[72] (стр. 510 и 516), где приведен обзор данных].

Кривые в этом интервале имеют максимум у брома и минимум перед нуклидами с магическим числом при $N=50$. Мы считаем этот минимум реальным и сходным с минимумом, предшествующим нуклидам с магическим числом при $N=82$. Мы считаем также, что минимум у германия реален и что кривые в этом интервале, предшествующем значению $N=50$, похожи на кривые в интервале, предшествующем значению $N=82$.

От циркония до олова

Рассмотренное выше фундаментальное отношение никель—палладий фиксирует распространенность палладия. Определенное таким образом значение хорошо согласуется с определением Курода и Санделла[47] для молибдена, а именно $1{,}54 \cdot 10^{-6}$ в хондритах с соответствующей атомной распространенностью 2,42. Это новое аналитическое значение составляет около половины старого[58, 59]. Уменьшение распространенности изотопов циркония указывает на быстрое уменьшение распространенностей после нейтронного числа 50. Нуклиды с четными массами элементов с четными атомными номерами Ru, Pd, Cd и Sn можно уложить на плавную кривую зависимости распространенности от массового числа, и в то же время можно построить достаточно плавную кривую для нуклидов с нечетными массами. Отношения рутения, родия и палладия недостаточно известны. Гольдшмидт оценивает эти отношения как 10:5:9. Мы принимаем атомные распространенности соответственно равными 1,49, 0,214 и 0,850, что дает для отношения 10:1,44:5,7. Это дает плавную кривую, и мы полагаем, что наши значения не выходят за пределы ошибок, существующих в настоящее время, хотя наши отношения значительно отличаются от отношений Гольдшмидта. Для кадмия мы принимаем атомную распространенность 0,89 при значении Ноддака для хондритных метеоритов, равном 1,86. Для этого элемента остро нужны лучшие аналитические данные.

Анализы метеоритов, проведенные Гольдшмидтом и Петерсом[33] и Гольдшмидтом[31], дали для олова в металлической, троилитовой и силикатной фазах соответственно 100,15 и $5 \cdot 10^{-6}$. Принимая отношения металл:троилит:силикат равными 10:5:85, получим приблизительно $15 \cdot 10^{-6}$ и атомную распространенность, равную 19. Ноддаки[60] дали значение 50 для атомной распространенности олова. Применение значения Гольдшмидта или Ноддаков привело бы к искажению кривой по отношению ко всем соседним элементам, если принимать за основу современные известные данные. Мы приходим к выводу,

что аналитические данные для этого элемента весьма неправильны. Олово — это такой элемент, который широко применяется в лабораторной практике в качестве припоя, в качестве материала для дистиллятора и т. д. По мнению д-ра М. Флейшера, часто для олова в силикатных материалах дают слишком высокие значения вследствие применения паяных сит для разделения размолотых образцов. По частному сообщению Санделла[77], он недавно нашел, что средняя концентрация олова в хондритах равна $1 \cdot 10^{-6}$, что эквивалентно распространенности, равной 1,33. Это значение и послужило нам в качестве фиксированного значения при построении кривой в этом интервале.

Для ниобия в хондритных материалах Ранкама[70, 71] получил значение $0{,}5 \cdot 10^{-6}$, что эквивалентно атомной распространенности 0,81. Это значение близко к принятому нами значению 1,00. Принятое значение для серебра много ниже, чем значение, получаемое из аналитических данных. Гольдшмидт принял для этой распространенности значение 3,2 на основании своих собственных данных и данных Ноддаков. Мы нашли, что нам нужно принять для серебра значение 0,26, если мы хотим, чтобы серебро укладывалось на нашу кривую для нечетных масс. Джоэнсу (Joensuu) указал нам,что многие аналитические данные для небольших количеств серебра неправильны вследствие легкости возбуждения резонансных линий серебра и вследствие присутствия в руках и карманах аналитиков серебряных монет. Для этого халькофильного элемента могут быть также получены слишком высокие значения частично потому, что сообщалось о высоких концентрациях этого элемента в троилитовых включениях из железных метеоритов. По сообщению Ноддаков, концентрация серебра в сернистом железе из силикатных метеоритов составляет $5 \cdot 10^{-6}$, а в сернистом железе из железных метеоритов $38 \cdot 10^{-6}$. Если пренебречь троилитовой фазой железных метеоритов и оценить вес троилитовой фазы силикатов в 0,05, то данные Ноддаков будут приближаться к принятому нами значению для серебра.

Более ранние данные по индию дают $0{,}15—0{,}20 \cdot 10^{-6}$ в метеоритах, но недавно Шоу[82], пользуясь методом, чувствительность которого, как полагают, достаточна, чтобы обнаружить $\sim 0{,}02 \cdot 10^{-6}$, не смог обнаружить индия в двух хондритах и одном ахондрите. Принятое нами интерполированное значение 0,11 соответствует $0{,}085 \cdot 10^{-6}$ в хондритном метеоритном веществе. Трудно понять столь малые значения, полученные Шоу, если не допустить, что большие количества железа в метеоритах помешали проведенным им спектральным анализам вследствие большого фона, создаваемого большим количеством линий железа.

На обеих наших кривых максимумы расположены при нейтронном числе 58; эти максимумы нам не удалось устранить никакой допустимой подгонкой принятых распространенностей. При этом числе нейтронов оболочка $g_{7/2}$ может быть заполнена. Мейер и Иенсен[52] считают, что оболочка $d_{5/2}$ должна быть впервые заполнена при нейтронном числе 56. Мы не обнаруживаем никакой особенности в распространенности при этом числе нейтронов.

Очевидно, было бы весьма желательно получить новые аналитические данные по элементам от циркония до олова. Между массовыми числами 99 и 123 включительно имеется пять пар изотопов с нечетными массовыми числами и максимальным отношением распространенностей 1,34, т. е. $Sb^{121}:Sb^{125}$. Принятые нами значения выбраны на основе допущения, что отношения распространенностей нуклидов, не являющихся изотопными парами, должны иметь близкие к этому значения.

Сурьма, селен, теллур, иод, ксенон, цезий и барий

Аналитические данные по первым пяти из этих элементов не имеют существенного значения. Несомненно, при массе 120 на кривой распространенностей четных масс имеет место заметное падение. Гольдшмидт утверждает,

что отношение селен — теллур, основанное на данных Ноддаков[60], «может быть», даст правильный порядок величины, причем он дает для этого отношения значение 80. Мы принимаем для атомного отношения значение 14,5, что также, может быть, имеет основания.

Значение для ксенона относительно значения криптона задается в силу приведенных выше соображений. Отношение криптон — ксенон либо равно 12,5, либо больше; мы принимаем максимально возможное значение для ксенона. Необычная распространенность его изотопов с нечетными массами и их отношения к распространенностям изотопов с четными массами требуют максимумов на обеих кривых — как на кривой для четных, так и на кривой для нечетных масс близ массового числа 130. Недавно Пинсоном, Аренсом и Франком[65] было дано значение $8 \cdot 10^{-6}$ для распространенности бария в хондритах. Это дает для атомной распространенности 8,8. Таким образом, принятое нами значение 3,66 значительно меньше. Мы предпочли бы большее значение распространенности, но тогда для сохранения плавности кривой в области редких нуклидов от олова до церия (рисунок) необходимо было бы принять бо́льшие распространенности для ксенона и теллура, что в свою очередь требует большей распространенности для криптона. Нам не удалось разрешить свои сомнения в этих пунктах. Любопытно, однако, что неопределенность в отношении этих относительных распространенностей приводит к значениям, различающимся лишь в 1,25 или 1,5 раза. Принятое нами отношение стронция к барию равно 6,6.

Изотопы с нечетными массами этих элементов с четными атомными номерами лежат вне кривой для нечетных масс. Иод и цезий при 0,80 и 0,456 хорошо укладываются на кривую. Данные по этим двум элементам весьма неудовлетворительны. Данные Фелленберга[26] приводят к среднему значению $1{,}25 \cdot 10^{-6}$ для иода, а из данных Ноддаков[60] получается $0{,}035 \cdot 10^{-6}$. Принятое нами значение, полностью основывающееся на интерполяции, равно $0{,}66 \cdot 10^{-6}$. Наше интерполированное значение для распространенности цезия составляет $0{,}40 \cdot 10^{-6}$, между тем как Ноддаки[58, 60] дали два значения: 0,01 и $1{,}1 \cdot 10^{-6}$.

Для сурьмы в метеоритах Ноддаки[59, 60] приводят лишь несколько данных. Мы приняли значение, укладывающееся на кривую для нечетных масс, а именно 0,246, что эквивалентно $0{,}2 \cdot 10^{-6}$. Это совпадает со значением Ноддака, если игнорировать данные по троилиту, допустив, что анализы троилита из металлических метеоритов дают слишком высокие значения для сернистой фазы в средних хондритных метеоритах. По частному сообщению Санделла[77], его приближенные анализы находятся в пределах от 0,5 до $0{,}2 \cdot 10^{-6}$.

Очевидно, для этого интервала имеется слишком мало данных наблюдений, и все они сомнительного качества. Выбранные нами значения можно будет пересмотреть в значительной мере как только будут получены новые данные, хотя мы полагаем, что общий вид кривых, по-видимому, сохранится.

Редкоземельные элементы и гафний, тантал и вольфрам

Как уже указывалось, относительная распространенность редкоземельных элементов использовалась в качестве аргумента за приведенные правила для распространенности. Редкоземельные элементы имеют настолько сходные химические свойства, что разделение этих элементов в сколько-нибудь больших масштабах в любом космохимическом процессе представляется невероятным. Следовательно, аналитические данные по метеоритам должны дать весьма надежные значения относительной распространенности этих элементов друг относительно друга. Далее, представляется также невероятным, чтобы даже на земной поверхности происходило значительное разделение этих

элементов, кроме минералов определенного типа и кроме того, что, по Гольдшмидту и Бауэру [цитировано Гольдшмидтом[31]], европий имеет тенденцию отделяться от других редкоземельных элементов и в своем геохимическом поведении уподобляется стронцию и свинцу. Минами[53] выполнил в институте Гольдшмидта полный анализ земных осадочных пород на редкоземельные элементы. Он нашел, что в осадочных породах европий не обнаруживает никакой аномальной распространенности; отсюда он заключил, что эти осадочные породы содержат редкоземельные элементы в отношениях, соответствующих средним отношениям на земной поверхности.

Анализы метеоритов, выполненные Идой Ноддак[57], привели к значениям, сильно отличающимся от значений Минами для земных осадочных пород. Отношение лантана к тяжелым редкоземельным элементам, как эрбий, итербий и т. д., при значениях Минами для осадочных пород приблизительно в 8 раз больше, чем при значениях Ноддаков для метеоритов. Трудно поверить, что в процессе образования Земли могло произойти фракционирование такого порядка величины; более вероятно, что одна из серий аналитических данных содержит значительную ошибку.

Мы предварительно допускаем, что значения Минами для распространенности редкоземельных элементов по отношению друг к другу в земных осадочных породах дают лучшее приближение к истине, чем значения Ноддак. Гольдшмидт[31], Браун[11] и Юри[92, 93, 94] пользовались данными Ноддак; поэтому между их таблицами и таблицей настоящей статьи имеются значительные расхождения. Распространенность всей этой группы в целом относительно кремния была принята нами произвольно — так, чтобы получить значение, представляющееся авторам настоящей статьи разумной интерполяцией между распространенностями элементов с бо́льшими и меньшими массами. Наши данные заведомо не выходят за пределы допустимых ошибок этих данных.

Таблица IV

Элемент	Распространенность по Минами	Принятая авторами распространенность
La	1,00	1,00
Ce	2,46	1,13
Pr	0,295	0,20
Nd	1,25	0,72
Sm	0,215	0,332
Eu	0,052	0,093
Gd	0,31	0,34
Tb	0,043	0,048
Dy	0,21	0,28
Ho	0,052	0,059
Er	0,11	0,16
Tm	0,0084	0,0159
Yb	0,12	0,11
Lu	0,032	0,025

По сравнению со значениями Минами нами допущена лишь небольшая подгонка, для того чтобы получить более плавные кривые. В таблице IV дано сравнение наблюденных и принятых значений; те и другие нормализованы к лантану, принятому за единицу. Наиболее серьезное расхождение получается в случае церия. Правда, расхождения заведомо находятся в пределах ошибок наблюдений, но также верно, что истинные кривые могут быть менее правильными, чем мы их изображаем. Распространенность гафния принята за $\sim 1/110$ распространенности циркония, как уже выяснялось выше. Ранкама[70, 71] дает значение $0{,}38 \cdot 10^{-6}$ для максимального количества тантала в метеоритах, что эквивалентно атомной распространенности 0,32. Мы приняли меньшее значение, получив путем интерполяции 0,065. Мы обсудили этот вопрос с д-ром Ранкама, который согласился, что меньшее значение вероятно.

Согласно Санделлу[76] и Ландергрену[48], можно считать, что более ранние аналитические данные по вольфраму сильно преувеличены. Результаты Ноддаков[58, 59] и Хевеши и Хобби[40], полученные на изверженных породах, превышают значения Санделла более чем в 10 раз. Отсюда мы заключаем, что

и данные Ноддаков по метеоритам также ошибочны и что не существует аналитических данных по вольфраму в метеоритах. Путем интерполяции мы получили значение 0,49, соответствующее $0{,}59 \cdot 10^{-6}$. Это интерполированное значение составляет приблизительно одну треть значения Санделла для изверженных пород.

Рений, осмий, иридий, платина и золото

Браун и Гольдберг[13] определяли рений методом нейтронной активации в пяти железных метеоритах и получили значения, изменяющиеся от 0,25 до $1{,}45 \cdot 10^{-6}$, а в среднем $0{,}62 \cdot 10^{-6}$. Принимая, что в среднем метеоритное вещество содержит около 10% металлической фазы, получаем отсюда приблизительно $0{,}062 \cdot 10^{-6}$ для этого элемента. Термодинамические свойства рения и его соединений почти неизвестны, но обсуждение его химических свойств заставляет предполагать калькофильную природу в некоторой степени, наряду с доказанной сидерофильной природой. Мы приняли для атомной распространенности значение 0,155, превышающее в 2,5 раза значение, получаемое из оценки одной только железной фазы.

Гольдшмидт[31] дает следующую оценку долей осмия, иридия и платины (в миллионных долях):

Элемент	Металл	Троилит	Среднее	Атомная распространенность
Os	8	9	0,8	0,64
Ir	4	0,4	0,4	0,31
Pt	20	2	2,0	1,5

Среднее было получено в предположении 10% металлической фазы и в пренебрежении троилитовой фазой из железных метеоритов, а также в предположении, что эти элементы отсутствуют в силикатной фракции и ее троилите. Принятые нами атомные распространенности равны 1,00; 0,82 и 1,62, соответственно для Os, Ir и Pt. Оценки Гольдшмидта заведомо приближенные, и согласие у нас удовлетворительное. Данные по этим элементам с той точностью, которая достигнута Гольдбергом, Учияма и Брауном[28] по Pd и Au, были бы весьма желательны. Кривые для четных и нечетных масс должны быть расположены близко друг к другу и иметь максимумы при массах 193 и 194, если эти кривые плавные и если их наклон определяется изотопной распространенностью Re^{185} и Re^{187}, Os^{187} и Os^{189} и Ir^{191} и Ir^{193} для кривой нечетных масс и в основном Os^{188} и Os^{190}, Pt^{194}, Pt^{196} и Pt^{198} для кривой четных масс. Максимумы кривых похожи на максимумы вблизи массового числа 130.

Для того чтобы фиксировать атомную распространенность золота, мы пользуемся данными Гольдберга, Учияма и Брауна (1951) для отношения никель — золото. Эти аналитические данные имеют довольно широкий разброс значений для этого отношения со средним значением отношения по весу $5{,}8 \cdot 10^4$. Полученные ими отношения палладий — золото более постоянны. При нашем значении распространенности никеля это дает 0,140 для атомной распространенности.

Ртуть, таллий, свинец, висмут, уран и торий

Ртуть — летучий элемент, который мог частично исчезнуть из метеоритов. Кроме того, он всегда в значительной мере присутствует в химических лабораториях, так что все анализы подозрительны. Ноддаки[60] сообщали о присутствии его в троилите каньона Дьябло. Мы получили для распространен-

ности ртути значение 0,284 путем интерполяции. Оно вполне может быть больше или меньше, так как наши оценки для нуклидов с большими массами очень ненадежны, а также и потому, что нет даже приближенной теории поведения кривой распространенностей.

Для атомной распространенности таллия Ноддаки (1934) дают значение 0,108 или $0{,}15 \cdot 10^{-6}$ в хондритах. Шоу[81] не мог обнаружить присутствие таллия в двух хондритах и одном ахондрите и дает значение $< 0{,}01 \cdot 10^{-6}$. Обширные исследования Шоу установили среднюю распространенность в изверженных породах в $1{,}3 \cdot 10^{-6}$. Мы принимаем данные Ноддаков и не можем объяснить результатов Шоу иначе, как влиянием помех со стороны большого количества железа в метеоритах, повлиявшего на анализ.

Гольдшмидт и Ноддаки приводили довольно высокие значения для свинца во всех фазах метеоритов. В настоящее время все эти данные представляются сомнительными, так как Браун и его сотрудники установили, что свинец во всех фазах присутствует в значительно меньших количествах. Свинец — элемент в значительной мере вездесущий; он присутствует во многих реагентах и в воде в малых количествах, а также и в атмосферной пыли — в связи с применением в автомобильном горючем тетраэтилсвинца. Поскольку троилит из металлических метеоритов, вероятно, не вносит сколько-нибудь значительной доли в среднее, даже весьма надежные определения свинца Паттерсоном, Брауном, Тилтоном и Ингрэмом[63] не увеличивают наших сведений о естественной распространенности свинца.

Паттерсон и др. (1953) определяли количество и изотопный состав свинца из металлической фазы метеорита Каньон Дьябло и из троилитовой фазы метеоритов Хенбэри и Каньон Дьябло. Свинец из этих метеоритов содержит наименьшее количество радиогенного свинца по сравнению с любыми другими известными образцами элементарного свинца. Паттерсон и др. предположили, что это — первобытный свинец. Паттерсон и др.[63, 64], Тилтон и др.[87] и Паттерсон[62] выделили свинец из земных базальтов, из хондритов Форест Сити и Модок и из ахондрита Нуэво Ларедо. Вычитая количества Pb^{206}, Pb^{207} и Pb^{208} относительно Pb^{204}, принятого за единицу, в железных метеоритах из количеств этих же изотопов в базальтах и в каменных метеоритах, они получили количества этих изотопов, являющиеся, предположительно, продуктами радиоактивного распада U^{238}, U^{235} и Th^{232}. Не имея сведений о количествах урана и тория, можно вычислить возраст из отношения Pb^{206} к Pb^{207}. Вычисленный таким образом возраст оказался равным $\sim 4{,}5 \cdot 10^9$ лет. Вычисление основано на предположениях, что 1) каменные метеориты первоначально содержали свинец из состава железных метеоритов, 2) что с тех пор никакие химические процессы не имели места и 3) что каменные метеориты содержат такие количества урана и тория, какие необходимы для получения наблюдаемых количеств радиогенного свинца. Этот возраст подтвержден Вассербургом и Хэйденом, применявшими на трех хондритах метод $K^{40} - A^{40}$. Этот метод датирования зависит только от состава каждого метеорита и представляет собой время, протекшее с тех пор, как газообразный аргон улетучился из метеорита. Шумахер[79] приближенно подтвердил этот возраст, пользуясь методом $Rb^{87} - Sr^{87}$. Все три метода были применены к метеориту Форест Сити.

В таблице V сведены данные по этим распространенностям свинца и его изотопов и указаны необходимые количества U^{238} и Th^{232}, которые должны быть в метеоритах в настоящее время, чтобы могли быть получены требуемые количества радиогенного свинца.

Требуемые для хондритов количества урана и тория близки к значениям, найденным Чаккетом, Гольденом, Мерсером, Панетом и Резбеком[15] в хондрите Бедгелерт (Bedgelert), а именно $0{,}106 \cdot 10^{-6}$ и $0{,}335 \cdot 10^{-6}$, соответственно для урана и тория. Однако Дэвис (1950), Де Ягер[19] и Паттерсон

Таблица V

	Pb, в милл. долях	Pb^{206}/Pb^{204}	Pb^{207}/Pb^{204}	Pb^{208}/Pb^{204}	Требуется	
					U^{238}, в милл. долях	Th^{232}, в милл. долях
(1) Каньон Дьябло (троилит)	18	9,41	10,27	29,16		
(2) Хенбэри (троилит) . .	5	9,50	10,30	29,26		
(3) Айронс, среднее . . .		9,455	10,285	29,21		
(4) Форест Сити	0,4	19,27	15,95	39,05		
(5) Модок	0,9	19,48	15,76	38,21		
(6) Среднее по хондритам	0,65	19,375	15,855	38,63	0,0995	0,366
(7) Радиогенный свинец . .		9,920	5,570	9,42		
(8) Нуэво Ларедо	0,7	50,28	34,86	67,97	0,214	0,817
радиогенный (8) — (3)		40,825	24,575	38,76		

с сотрудниками[64] опубликовали гораздо меньшие значения, а именно от 0,01 до $0{,}03 \cdot 10^{-6}$ для урана. Юри[97] указал, что большие количества урана и тория, полученные Чаккетом и др., с одной стороны, и наблюденные количества калия в метеоритах, с другой стороны, приводят к большим трудностям в объяснении теплового баланса Земли, Луны и Марса, если считать, что количества этих элементов в планетах и метеоритах одинаковы. Мы не приняли предложенной Юри распространенности, однако серьезные затруднения, связанные с указанными проблемами, остаются вполне реальными. Если правильны меньшие распространенности урана и тория, то мы должны допустить наличие двух первобытных свинцов, т. е. свинцов из железных метеоритов и из Нуэво Ларедо, так как хондритный свинец может представлять собой смесь обоих этих свинцов в пропорции 3:1.

Мы не смогли разрешить этой задачи. Поскольку в настоящей статье всюду применяются распространенности элементов в хондритных метеоритах и в общем они оказались приемлемыми, мы будем пользоваться для распространенности свинца средними из данных по Форест Сити и Модоку.

Для атомной распространенности висмута Ноддаки дают 0,144; мы принимаем это значение.

Рассмотренные выше данные показывают, что распространенность урана в метеоритах имеет значение, промежуточное между 0,01 и $0{,}1 \cdot 10^{-6}$, т. е. атомная распространенность урана имеет значение между 0,0063 и 0,063. Та же неопределенность имеет место и в случае тория, но его распространенность в 3 или 3,5 раза больше распространенности урана.

ПРОБЛЕМЫ, СВЯЗАННЫЕ С ИНТЕРПРЕТАЦИЕЙ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЯДЕРНОЙ РАСПРОСТРАНЕННОСТИ

Теория происхождения элементов

Распределение ядерных распространенностей, получающееся из вышеприведенного обсуждения, дает основу для сравнения эмпирических данных с различными теориями происхождения различных видов ядер. Мы не будем здесь приводить такое сравнение, а отошлем читателя к трем превосходным обзорным статьям Альфера и Германа[5,6,7] по теории проис-

хождения и относительной распространенности элементов. Из этих статей видно, что ни одна из существующих теорий не может даже грубо приближенно объяснить все эмпирические факты. Следовательно, попытка объяснения какой-либо из этих теорий в ее теперешней форме более тонких деталей, описанных здесь, представляется совершенно безнадежной.

Однако, по-видимому, возможно, что та или иная теория в измененном виде, в частности при введении некоторых допущений относительно вторичных и последующих реакций, может привести к удовлетворительному согласию. Авторы надеются, что приводимое ниже рассмотрение поможет изучению природы таких реакций.

Значения ядерной распространенности, полученные вышеописанным способом, в некоторых интервалах масс довольно сильно отличаются от прежних оценок (Зюсс[85]). Однако сравнение приведенного рисунка с соответствующими кривыми, опубликованными ранее, показывает, что основные черты распределения распространенности сохранены. Эти черты по существу не зависят от выбора значения для распространенности элемента и представляют собой вполне определенные проблемы, рассматриваемые ниже. Это обсуждение не полно, и читателю представляется возможность открыть еще новые особенности рисунка, которые могут послужить свидетельством за или против преобладания определенного механизма образования элементов.

Между характером области более легких ($A < 90$) и области более тяжелых ($A > 90$) ядер наблюдается существенное различие. В области меньших A кривая суммы распространенностей изобаров для четных A имеет неправильный зигзагообразный вид, и значения распространенностей сильно зависят от числа избыточных нейтронов. При тех массовых числах, при которых имеются два устойчивых изобара, тот изобар, у которого число избыточных нейтронов меньше, обладает большей ядерной распространенностью в области легких масс.

В области больших массовых чисел кривые суммы распространенностей изобаров становятся более правильными, и изобары с большим числом избыточных нейтронов оказываются более распространенными.

Для того чтобы попытаться понять это различие, следует рассмотреть два типа ядерных реакций:

1. Реакции, приводящие к образованию ядер, расположенных со стороны обогащенных нейтронами ядер относительно энергетической впадины. Эти реакции преобладали при больших массовых числах и давали «сглаженное» распределение распространенности.

2. Реакции, приводящие к образованию ядер, расположенных со стороны ядер с недостатком нейтронов относительно энергетической впадины. Эти реакции преобладали в области малых масс и образовывали «тонкую структуру» в распределении распространенности.

Можно предполагать, что реакции типа 1 представляли собой «захват нейтрона, образование», т. е. ($n\gamma$) с последующим β-распадом, как это постулируется в теории захвата нейтронов. Для объяснения реакций типа 2 пока не было предложено ни одной подходящей теории, однако из эмпирических данных очевидно, что реакции такого типа необходимы, как показано ниже.

К выводу о равномерном изменении распространенности с массовым числом должна приводить любая теория, в которой постулируются очень высокие температуры ($kT > 1$ *Мэв*) для превращения ядер с данным массовым числом в ядра с другим массовым числом. В случае очень высокой температуры в реакцию будут вовлечены не только основное состояние, но и много возбужденных состояний, так что эффект резкого изменения какого-нибудь свойства основных состояний (например, при «магическом» числе)

будет «смазан» в результате участия возбужденных состояний. То же самое будет справедливо, если реакции, приводящие к изменениям в массовых числах, имеют место в области, где расположены β-неустойчивые ядра на склонах энергетической впадины, как это предполагается в теории образования элементов путем захвата нейтронов (Альфер и Герман[5, 6, 7]).

Правило суммы распространенностей изобаров

В области $A > 70$ изобар с большим числом избыточных нейтронов почти всегда более распространен. Распространенность изобара с меньшим избытком нейтронов, так называемого «экранированного» изобара, т. е. изобара, у которого имеется только один нейтрон сверх замкнутой оболочки, имеет сравнимое значение лишь тогда, когда этот изобар имеет значительно большую энергию связи, чем неэкранированный изобар. В большинстве случаев значение суммы распространенностей этих двух изобаров совпадает со значением, интерполированным между значениями неэкранированного изобара при массовых числах $A - 2$ и $A + 2$.

Такое распределение производит впечатление, что в этом интервале масс экранированные ядра образовались из их экранированных изобаров после того, как установилось распределение масс. Однако можно показать, что такое превращение не могло произойти путем двух последовательных β-распадов, исходя из уровня теплового возбуждения. Это можно доказать, рассматривая изобарную пару $In^{115} - Sn^{115}$, относительно которой имеются следующие данные.

Отношение распространенностей $In^{115}/Sn^{115} = 23$; возбужденный уровень в In^{115}: 0,335 *Мэв* $= E^*$. Период полураспада в этом состоянии 4,5 часа. Частичный период полураспада для β-распада в этом состоянии равен 70 час. Спины In^{115} в возбужденном и в нормальном состояниях равны $^9/_2$ и $^1/_2$. Число ядер In^{115} в возбужденном состоянии N^* при температуре T будет равно $N^* = (g^*/g)\, N \exp(-E^*/kT)$. Из приведенных экспериментальных данных вытекает, что природный индий не мог находиться при температуре T в течение более чем $1 \times e^{0,335/kT}$ часов, где kT выражено в *Мэв*.

Это значит, что In^{115} в природе не мог находиться при температуре, превышающей приблизительно 0,3 *Мэв* $= kT$, более чем в течение нескольких часов, в противном случае большая доля ядер с массой 115 должна была находиться в форме Sn^{115}. Сравнивая этот результат с имеющимися данными по возбужденным состояниям, можно прийти к выводу, что невозможно объяснить распространенность экранированного ядра путем допущения β-распада из уровней теплового возбуждения, более высоких, чем основное состояние промежуточного нечетно-нечетного изобара. Согласно теории захвата нейтронов экранированные ядра образуются на более поздней стадии образования нейтронов, когда скорость процессов захвата нейтронов становится меньше, чем средняя скорость β-распада, так что формирование имеет место в области устойчивых ядер. Тогда они будут образовываться из ядер с нечетным A с достаточной продолжительностью жизни или устойчивых путем $(n\gamma)$ с последующим β-распадом нечетно-нечетных ядер. Однако нельзя ожидать, что эти распространенности будут следовать картине распределения, требуемой правилом суммы.

Легкие изотопы в области больших масс

Теория захвата нейтронов не объясняет наличия такого типа экранированных ядер, который обладает меньшей энергией связи, чем их экранированные изобары, расположенные со стороны β+ относительно энергетической впадины. Этот тип ядер вообще приблизительно в 10 раз менее распространен, чем находящийся в более привилегированном энергетическом состоянии

тип экранированных нуклидов. Их распространенность не коррелирует с их относительными энергиями связи. В этом можно убедиться непосредственно на основании того, что у ряда элементов распространенность самого легкого изотопа больше, чем распространенность следующего по массе. Такое явление имеет место у Mo, Ru, Cd, Sn, Xe и Ba. В случаях Ce и Dy самый легкий изотоп лишь незначительно уступает по распространенности следующему. Разумеется, самый легкий изотоп всегда обладает меньшей энергией связи, чем следующий по массе.

Самой замечательной особенностью распределения распространенностей этих редких нуклидов является то, что в широких интервалах массовых чисел значения их распространенностей, как функции A, по-видимому, подчиняются их собственному закону «плавности». Особенно ярко выявляется этот закон на поведении распространенностей Sn^{112}, Sn^{114}, Te^{120}, Xe^{124}, Xe^{126}, Ba^{130} и т. д. Отсюда, по-видимому, неизбежно следует вывод, что в этих интервалах масс часть ядерного вещества должна была образоваться со стороны $\beta+$ энергетической впадины в области неустойчивых видов ядер с недостатком нейтронов и притом таким путем, который приводил к образованию «плавного» распределения устойчивых типов ядер. Возможно, к образованию этих нуклидов в требуемых отношениях приводили вторичные процессы отщепления.

Эффекты магических чисел в области больших масс

Первым физиком, заметившим, что распространенность некоторых видов ядер, содержащих определенные количества нейтронов или протонов, исключительно велика, был Эльзассер[24, 25]. Эти количества, или так называемые «магические числа», суть:

2, 8, 20, 28, 50, 82, 126, . . .

Они принадлежат к двум различным арифметическим рядам:

1) 2, 8, 20, 40, 70, 112,...

2) 2, 6, 14, 28, 50, 82, 126,...

Первый ряд существенен при малых массовых числах, второй преобладает при массовых числах, превышающих 40. Эффекты магических чисел в настоящее время хорошо поняты с точки зрения теории оболочечного строения ядра [Мейер и Йенсен[52]].

Магическое число характеризуется внезапным падением энергии связи следующего нуклона. Однако энергия связи ближайшего нуклона также является функцией числа избыточных нейтронов. В области больших массовых чисел нет очевидной корреляции между распространенностями и избытком нейтронов; поэтому нельзя ожидать простой корреляции между значениями распространенности и падением энергии связи последней частицы при магическом числе.

Юз и Шерман[43] показали, что сечение захвата нейтронов у ядер, содержащих магическое число нейтронов, исключительно мало. Этот экспериментальный результат был принят за строгое доказательство в пользу теории происхождения элементов путем захвата нейтронов, так как по этой теории большие космические распространенности ядер с магическим числом нейтронов вполне удовлетворительно вытекают из малых сечений захвата нейтронов. Процесс образования нейтронов, происходящий в области устойчивых ядер, приводит, согласно этой теории, к резкому подъему при значении нейтронного числа, соответствующем заполнению нейтронной оболочки, и к постепенному плавному выравниванию ядерных распространенностей при переходе к большим массовым числам. Если образование нейтронов происходит в области обогащенных нейтронами $\beta-$-неустойчивых ядер, то ожидаемый максимум будет сглажен и смещен в сторону меньших массовых чисел.

Возможно, что широкие максимумы на кривых распространенностей около массовых чисел 130 и 194 являются эффектами магических чисел завершения оболочек при N, равном 82 и 126, в результате образования нейтронов в областях, где $N - Z$ равно 34 и 54. С уменьшением плотности нейтронов центр реакции образования нейтронов сместится к меньшим числам избыточных нейтронов; таким образом, острые максимумы при A, равном 138 и 208, могли получиться после образования основной массы ядер в этом интервале масс.

Пока невозможно описать кинетику таких реакций количественно более строго и определить, какие допущения необходимы для того, чтобы объяснить острые минимумы близ A, равного 135 и 206, непосредственно предшествующие N, соответствующему замкнутым оболочкам 82 и 126.

В соответствующей области, предшествующей завершению оболочки при N, равном 50, имеются указания на обнаружение аналогичной картины, хотя нельзя рассматривать картину в этой области как столь же надежно установленную, как в области перед N, равным 82 и 126. При A, равном 120 и 121, на кривых распространенностей наблюдается разрыв, который не может быть сглажен никакими средствами. Разрыв, связанный с изменением характера распределения изотопных распространенностей, происходит в точке, где число нейтронов в ядре достигает 70. Разрыв при этом числе — неожиданный, но, видимо, нельзя не прийти к заключению, что большой суммарный спин нейтронов в оболочке $6h_{11/2}$ должен быть каким-то образом связан с этой неправильностью. На соответствующем месте при 112 нейтронах можно заметить небольшое изменение характера распределения распространенностей, однако разрыв на кривых распространенностей, который, возможно, существует при A, равном 186 и 187, можно сгладить без труда. Вероятно, заполнение нейтронной оболочки $7i_{13/2}$ начинается до того, как число нейтронов достигнет 112.

Другие неправильности в области больших масс менее внушительны и не так твердо установлены. Неопределенность относительных распространенностей редкоземельных элементов делает невозможным количественное определение неправильности, которая, видимо, имеет место в области A, равного 170, и выяснение вопроса о том, какую конфигурацию можно коррелятивно связать с тем фактом, что значения распространенности изотопов гафния с нечетными A не соответствуют общему направлению кривой распространенностей для нечетных A. Можно отметить, что правило сумм не соблюдается при массовом числе 176. Соблазнительно было бы коррелятивно связать большую продолжительность жизни природного Lu^{176} с этой неправильностью, но для такой связи нельзя предложить никакого приемлемого основания.

В противоположность распространенному мнению, в распределении распространенностей нельзя обнаружить никаких следов таких эффектов, которые можно было бы безошибочно приписать завершенным оболочкам протонов.

Область масс $70 < A < 90$

Из сказанного в предыдущем параграфе можно вывести заключение, что в области $A > 90$ бо́льшая часть ядерного вещества должна была образоваться на обогащенной нейтронами стороне энергетической впадины и только небольшая доля, порядка 1%, могла образоваться на обедненной нейтронами $\beta+$-стороне. В следующем параграфе показано, что противоположное положение, очевидно, справедливо для области легких элементов, с массовыми числами $A < 70$, где основная масса ядерного вещества должна была образоваться в виде $\beta+$-активных нуклидов с недостатком нейтронов. Исходя из этого, было бы резонно заподозрить, что должна существовать промежуточная область массовых чисел, где ядра образовались непосредственно в области

устойчивых типов ядер близ дна энергетической впадины. Если, например, допустить, что окончательное распределение распространенности определялось рассмотренными выше двумя противоположными реакциями таким путем, что на более поздней стадии развития одна реакция («образование нейтронов») преобладала в области больших масс, а противоположная реакция преобладала в области малых масс, то распространенность в области промежуточных масс должна отражать условия равновесия в большей степени, чем распространенность в других областях масс. Это, по-видимому, и обнаруживается эмпирическими данными по распространенности. Распространенности нечетных A в области значений A от 57 до 87 укладываются на плавную кривую. Однако распространенности четных A обнаруживают странное, неправильное поведение, а правило сумм распространенностей изобаров заведомо не соблюдается. Однако, если соединить значения распространенностей для ядер с одинаковым избытком нейтронов на рисунке, то сразу выявляется другой тип закономерности. В этом случае получаются плавные кривые. В областях между замкнутыми оболочками энергия связи будет плавной функцией массового числа для ядер с одинаковым избытком нейтронов; поэтому плавность этой конфигурации может служить указанием на внутреннюю связь между энергией связи и космической распространенностью ядер в этом интервале масс. Оценка температуры, определяющей эту связь, дает значение kT порядка 1 *Мэв*.

Тот факт, что кривая распространенностей для нечетных A не обнаруживает явной корреляции между распространенностями и избытком нейтронов, не удивителен, потому что доля β-неустойчивых изобаров в окончательных распространенностях устойчивых ядер гораздо больше в случае нечетных массовых чисел, чем в случае четных. Кроме того, небольшие неправильности на кривой распространенностей нечетных A могли быть «сглажены» при оценке значений распространенностей элементов.

Пик железа и область малых масс

Новое значение для отношения Fe и Si, составляющее одну треть значения, принятого ранее, все еще оставляет бо́льшую распространенность Fe^{56}, чем сумма распространенностей всех остальных видов ядер с массовыми числами, превышающими 40. Неизвестны никакие свойства ядра Fe^{56}, которые могли бы объяснить его преобладание в природе. Но Fe^{56} является изобаром «вдвойне магического» неустойчивого Ni^{56}, содержащего 28 протонов и 28 нейтронов. Ожидание корреляции между распространенностями и ядерными свойствами неизбежно приводит к заключению, что Ni^{56} был первичным ядром, из которого образовалось Fe^{56} *), и что, следовательно, ядра в этом интервале масс образовались на той стороне энергетической впадины, где имеется недостаток нейтронов. Период полураспада Ni^{56}, превращающегося путем K-захвата в Co^{56} (80 d), недавно был определен в 6, 5 дня [Шелин и Стотон[83] и Уортингтон[102]]. Следовательно, процесс, приводящий к избыточной распространенности массы 56, не мог продолжаться более нескольких дней.

Вместе с Fe элементы Cr, Ti и Ca также обнаруживают слишком большую распространенность изотопов с числом избыточных нейтронов I ($=2N-A$), равным 4. Это можно рассматривать как указание на то, что во всем этом интервале масс сначала образовались ядра с нулевым избытком нейтронов ($N=Z$), а затем они распались, превратившись в свои I, равные 4 изобарам. Вообще ядра с $N=Z$, по-видимому, обладают большей энергией связи, чем та, которая соответствовала бы идеально параболической

*) Эта мысль была впервые высказана одному из авторов Хакселем (Haxel) в 1946 г. и цитирована Зюссом (1948) как частное сообщение.

энергетической впадине, а это делает правдоподобной большую первоначальную распространенность*). То, что распределение распространенностей действительно установилось меньше чем за день, доказывается периодом полураспада Fe^{52}, равным 7,8 часа, в результате которого Fe^{52} превращается в Cr^{52}.

Несомненно, при $N = 8$, 14 и 20 имеют место эффекты магических чисел, хотя неопределенность в значениях распространенностей и быстрое изменение распространенностей с массовым числом в этом интервале несколько затемняет характер этих эффектов. Повышенная распространенность ядер Mg^{30} и A^{38} с I, равным 2, указывает на эффекты замыкания оболочек ядер при N, равных 12 и 20 соответственно.

Правило Харкинса и распространенности ядер с нечетными A

Согласно закону Маттауха для каждого нечетного массового числа имеется только один устойчивый изобар. Но для каждого нечетного массового числа, превышающего 32, существует по меньшей мере один неустойчивый изобар с периодом полураспада, большим, чем сутки, т. е. с периодом полураспада, продолжительным по сравнению с временем установления распределения масс. Очевидно, в случае нечетных массовых чисел неустойчивые изобары должны были в среднем участвовать в относительно большей степени в распространенности устойчивых ядер, чем в случае четных массовых чисел. Отсюда можно понять, почему кривая распространенностей для нечетных A гораздо более плавная, чем кривая для четных A. В других отношениях различие распространенностей четных и нечетных ядер может быть только качественным.

Как следует из правила Харкинса, всегда имеется один изобар с четным A и с распространенностью, превышающей геометрическое среднее соответствующих соседних изобаров с нечетными A. Различие распространенностей элементов с четными и нечетными A, т. е. четно-нечетный эффект распространенностей, уменьшается с увеличением массовых чисел и исчезает для нескольких массовых чисел близ $A = 170$ и 190.

Четно-нечетный эффект распространенностей, выраженный правилом Харкинса, не может быть простым следствием различия энергий связи ядер с четными и нечетными A, как это предполагалось в течение многих лет. Этот эффект не вытекает из теории образования элементов путем захвата нейтронов, однако при введении ряда уточнений и дополнительных предположений можно удовлетворительно объяснить этот эффект в рамках теории захвата. Так, например, скорость процессов в ряде β-распадов в среднем несколько больше для нечетных, чем для четных массовых чисел, так что ядра с нечетными A, образовавшиеся на обогащенном нейтронами склоне энергетической впадины, будут распадаться, превращаясь в ядра с меньшим избытком нейтронов несколько быстрее, чем ядра с четными A. Сечение захвата нейтронов зависит от избытка нейтронов и для данного массового числа будет тем больше, чем избыток нейтронов меньше, так что ядра с нечетными A путем захвата нейтронов будут превращаться в четные изотопы ближайшего бо́льшего массового числа с несколько бо́льшей скоростью, чем четные ядра в нечетные.

Обсуждение общей картины распределения распространенностей можно значительно продолжить. Однако мы надеемся, что отмеченные здесь пункты в конечном счете приведут к улучшению теоретической базы и космологической модели, что в свою очередь облегчит истолкование эмпирических особенностей распределения космической ядерной распространенности.

---

*) См. Блатт и Вайскопф, Теоретическая ядерная физика, ИЛ, 1951. Теоретически «симметричная» энергия приводит к двум параболам, пересекающимся при $N = Z$.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. L. H. Ahrens, Trans. Proc. Geol. Soc. S. Africa **49**, 133 (1947).
2. L. H. Ahrens, W. H. Pinson and M. M. Kearns, Geochim. et Cosmochim. Acta **2**, 229 (1952).
3. L. H. Aller, The Atmospheres of the Sun and Stars (Ronald Press Company, New York, 1953).
4. L. H. Aller, Astrophys. J. **120**, 411 (1954).
5. R. A. Alpher and R. C. Herman, Rew. Mod. Phys. **22**, 153 (1950).
6. R. A. Alpher and R. C. Herman, Phys. Rev. **84**, 60 (1951).
7. R. A. Alpher and R. C. Herman, Ann. Rev. Nuclear Sci. **2**, 1 (Annual Review of Nuclear Science, Inc. Stanford, 1953).
8. W. Behne, Geochim. et Cosmochim. Acta **3**, 186 (1953).
9. G. Boato, Geochim. et Cosmochim. Acta **6**, 209 (1954); Phys. Rev. **93**, 640 (1954).
10. I. S. Bowen, Rev. Mod. Phys. **20**, 109 (1948).
11. H. S. Brown, Rev. Mod. Phys. **21**, 625 (1949).
12. H. S. Brown and C. J. Patterson, J. Geol. **55**, 405 and 508 (1947).
13. H. S. Brown and E. Goldberg, Phys. Rev. **76**, 1260 (1949).
14. H. Byers, Ind. and Eng. Chem. News Ed. **16**, 459 (1938).
15. K. F. Chackett, J. Golden, E. R. Mercer, F. A. Paneth and P. Reasbeck, Geochim. et Cosmochim. Acta **1**, 3 (1950).
16. W. J. Claas, Proc. Acad. Sci. Amsterdam **52**, 518 (1951).
17. F. W. Clarke, Bull. Phil. Soc. Washington **11**, 131 (1889).
18. H. Craig, Meeting of the A. A. A. S. at Boston, December, 1953.
19. C. De Jager, Mém. 8° de la Soc. Roy. Sci. Liège, fourth series **13**, Fasc. III, стр. 460 (1953).
20. G. Edwards, Nature **176**, 109 (1955a).
21. G. Edwards, Geochim. et Cosmochim. Acta (1956).
22. G. Edwards and H. C. Urey, Geochim. et Cosmochim. Acta **7**, 154 (1955).
23. J. W. Edwards, H. L. Johnston and W. E. Ditmars, J. Am. Chem. Soc. **72**, 4729 (1951).
24. W. Elsasser, Nature **131**, 764 (1933).
25. W. Elsasser, J. phys. radium **5**, 625 (1934).
26. Th. v. Fellenberger, Biochem. Zs. **187**, 1 (1927). См. также Th. v. Fellenberger and G. Lunde, Norsk. Geol. Tidskr. **9**, 48 (1926), and Biochem. Zs. **187**, 15 (1926).
27. L. E. Glendenin, E. P. Steinberg, M. G. Inghram and D. C. Hess, Phys. Rev. **84**, 860 (1951).
28. E. Goldberg and H. Brown, Anal. Chem. **22**, 308 (1950).
29. E. Goldberg, A. Uchiyama and H. Brown, Geochim. et Cosmochim. Acta **2**, 1 (1951).
30. V. M. Goldschmidt, Geochemistry (Oxford University Press, New York, 1954).
31. V. M. Goldschmidt, Geochemische Verteilungsgesetze der Elemente, IX, Skrifter Norske Videnskaps-Akad. Oslo. I. Mat. Natur. Kl. № **4** (1937) или (1938).
32. V. M. Goldschmidt and C. Peters, Nachr. Ges. Wiss. Göttingen, Math. physik. Kl. IV, **141**, (1933a).
33. V. M. Goldschmidt and C. Peters, Nachr. Ges. Wiss. Göttingen, Math. physik. Kl. III, 36; IV, 37 and 278 (1933b).
34. J. Greenstein and R. S. Richardson, Astrophys. J. **113**, 536 (1951).
35. W. D. Harkins, J. Am. Chem. Soc. **39**, 856 (1917).
36. O. Haxel, J. H. D. Jensen and H. E. Suess, Phys. Rev. **75**, 1766 (1949).
37. L. Herzog and W. H. Pinson (частное сообщение, 1955).
38. H. Hess (частное сообщение, 1955).
39. G. v. Hevesey, Kgl. Danske Videnskab. Selskab Mat. fys. Medd. **VI**, 7 (1925).
40. G. v. Hevesey and R. Hobbie, Zs. anorg. u. allgem. Chem. **212**, 134 (1943).
41. G. v. Hevesey and K. Würstlin, Zs. phys. Chem. A, Haber-Band 605 (1928).
42. G. v. Hevesey and K. Würstlin, Zs. phys. allgem. Chem. **216**, 305 (1934).
43. D. J. Hughes and D. Sherman, Phys. Rev. **78**, 632 (1950).
44. J. Hunnaerts, Trans. Intern. Astron. Union **7**, 462 (1950).
45. H. Kopferman and C. Wessel, Zs. Phys. **130**, 100 (1951).
46. S. Koritnig, Geochim. et Cosmochim. Acta **1**, 89 (1951).
47. P. K. Kuroda and E. B. Sandell, Geochim. et Cosmochim. Acta **6**, 59 (1954).
48. S. Landegren, Arkiv Kemi, Mineral. Geol. **19A**, № 25, 7 (1948); № 26, 31 (1948).
49. J. Mattauch, Phys. Zs. **91**, 361 (1934).
50. Mayer, M. Goeppert, Phys. Rev. **74**, 235 (1948).
51. Mayer, M. Goeppert, Phys. Rev. **75**, 1969 (1949).

52. Mayer, M. Goeppert and H. Jensen, Elementary Theory of Nuclear Shell Structure (John Wiley and Sons, Inc., New York, 1955).
53. E. Minami, Nachr. Ges. Wiss. Göttingen IV, N. F., 1, № 14, 155 (1935).
54. M. Minnaert, The Sun, изд. G. P. Kuiper (University of Chicago Press, Chicago, 1953).
55. G. Mueller, Geochim. et Cosmochim. Acta **4**, 1 (1952).
56. L. Neven and C. De Jager, B. A. N. **12**, 103 (1954).
57. I. Noddack, Zs. anorg. u. allgem. Chem. **225**, 337 (1935).
58. I. Noddack and W. Noddack, Naturwiss. **35**, 59 (1930).
59. I. Noddack and W. Noddack, Zs. phys. Chem. **A154**, 207 (1931).
60. I. Noddack and W. Noddack, Svensk. Kemisk. Tidskrift **46**, 173 (1934).
61. H. Onishi and E. B. Sandell, Geochim. et Cosmochim. Acta **7**, 1 (1955).
62. C. Patterson, Geochim. et Cosmochim. Acta **7**, 151 (1955).
63. C. Patterson, H. Brown, G. Tilton and M. Inghram, Phys. Rev. **92**, 1234 (1953).
64. C. Patterson, H. Brown, G. Tilton and M. Inghram, Science **121**, 69 (1955).
65. W. H. Pinson, L. H. Ahrens and M. L. Franck, Geochim. et Cosmochim. Acta **4**, 251 (1953).
66. G. T. Prior, Mineralog. Mag. **18**, 26 (1916).
67. G. T. Prior, Mineralog. Mag. **19**, 51 (1920).
68. G. T. Prior, Mineralog. Mag. **23**, 33 (1933).
69. E. Rabe, Astron. J. **55**, 112 (1950).
70. K. Rankama, Bull. comm. géol. Finlande № 133 (1944).
71. K. Rankama, Ann. Acad. Sci. Fennicae **A**, **III**, 13 (1948).
72. K. Rankama and Th. G. Sahama, Geochemistry (University of Chicago Press, Chicago, 1950).
73. C. S. Ross, M. D. Foster and A. T. Meyers, Am. Mineralogist **39**, 693 (1954).
74. Th. G. Sahama, Bill. comm. géol. Finlande № 135 (1945).
75. E. Salpeter, Ricerche Spettroscop. Lab. astrofis. spècola vaticana **2**, 1 (1952).
76. E. B. Sandell, Am. J. Sci. **244**, 643 (1946).
77. E. B. Sandell, частное сообщение, 1955.
78. E. B. Sandell and S. S. Goldrich, J. Geol. **51**, 99, 167 (1943).
79. E. Schumacher (в печати, 1956).
80. L. S. Selivanov, Compt. Rend. Acad. Sci. URSS **26**, 389 (1940).
81. D. M. Shaw, Geochim. et Cosmochim. Acta **2**, 118 (1952a).
82. D. M. Shaw, Geochim. et Cosmochim. Acta **2**, 185 (1952b).
83. R. K. Sheline and R. W. Sloughton, Phys. Rev. **87**, 1 (1952).
84. H. E. Suess, Zs. Naturforsch. **2a**, 311 and 604 (1947).
85. H. E. Suess, Experientia **5**, 226 (1949).
86. H. E. Suess and H. S. Brown, Phys. Rev. **83**, 1254 (1951).
87. G. Tilton, C. Patterson and G. Davis, Bull. Geol. Soc. Amer. **65**, 1314 (1954).
88. G. Traving, Zs. Astrophys. **36**, 1 (1955).
89. A. Underhill, Can. J. Research **29**, 447 (1951).
90. A. Unsöld, Zs. Astrophys. **24**, 306 (1948).
91. H. C. Urey, Geochim. et Cosmochim. Acta **1**, 209 (1951).
92. H. C. Urey, Phys. Rev. **88**, 248 (1952a).
93. H. C. Urey, Geochim. et Cosmochim. Acta **2**, 269 (1952b).
94. H. C. Urey, The Planets (Yale University Press, New Haven, 1952c).
95. H. C. Urey, Mém. 8 Soc. Roy. Sci. Liège, fourth series **XIV**, Fasc. unique (1954a).
96. H. C. Urey, Astrophys. J. Suppl. **1**, 147 (1954b).
97. H. C. Urey, Proc. Nat. Acad. Sci. **41**, 127 (1955).
98. H. C. Urey and H. Craig, Geochim. et Cosmochim. Acta **4**, 36 (1953).
99. G. J. Wasserburg and R. J. Hayden, Phys. Rev. **97**, 86 (1955).
100. K. Way, L. Fano, R. Scott and K. Thew, Nuclear Data, Nat. Bur. Standards (U. S.) Circ. 499 (1950).
101. H. B. Wilk, Geochim. et Cosmochim. Acta (в печати, 1956).
102. W. J. Jr. Worthington, Phys. Rev. **87**, 158 (1952).