

К. Фолсом

Происхождение жизни

Издательство
МИР

The Origin of Life

A Warm Little Pond

Clair Edwin Folsome

University of Hawaii at Manoa

W. H. Freeman and Company

San Francisco

К. Фолсом

Происхождение жизни

Маленький
теплый водоем

Перевод с английского

Д. Б. КИРПОТИНА

под редакцией

проф. Г. А. ДЕБОРИНА

Издательство «Мир»

Москва 1982

ББК 28.0

Ф 75

УДК 576.1+551.7

Фолсом К.

Происхождение жизни: Маленький теплый водоем. Пер. с англ./Перевод Кирпотина Д. Б.; Под ред. и с предисл. Г. А. Деборина. — М.: Мир, 1982. — 160 с. с ил.

В монографии известного американского ученого рассмотрены основные положения космогонии и космохимии, эволюция газовой оболочки Земли, абиогенный синтез сложных органических молекул, формирование обособленных агрегатов макромолекул, значение естественного отбора в становлении и развитии жизни, основные данные о биохимических свойствах современной живой клетки.

Для биологов всех специальностей, геологов, палеонтологов, физиологов, химиков, астрономов, философов, историков Науки, для преподавателей высшей и средней школы.

Ф $\frac{21001-104}{041(01)-82}$ 104—82, ч. 1 2001000000

ББК 28.0

Редакция литературы по биологии

© 1979 by W. H. Freeman and Company

© Перевод на русский язык, «Мир», 1982

Предисловие редактора перевода

Предлагаемая вниманию советского читателя книга о происхождении жизни на Земле написана известным американским ученым профессором микробиологии Гавайского университета (Мапоа) Клэром Фолсом. Занимаясь исследованиями в области химической эволюции в рамках НАСА (NASA, Национальное управление по аэронавтике и исследованию космического пространства, США), профессор Фолсом проявил большой интерес к проблеме происхождения жизни в целом, что и привело его к желанию систематизировать и оценить существующие в науке представления, касающиеся этой проблемы.

Прежде всего следует отметить, что автор целиком и полностью стоит на материалистических позициях, рассматривая возникновение жизни как неизбежный результат эволюционного развития материи. Анализ этой эволюции он начинает с химического состава Вселенной, новейших данных спектроскопии звезд, межзвездных облаков и туманностей, убедительно показавших единство химического состава Вселенной, определяемого системой химических элементов Менделеева. Далее автор рассматривает современные взгляды на процессы образования планетных систем, возраст звезд и планет, затем переходит к вопросам возникновения и эволюции земной атмосферы и процессам химической эволюции на примитивной Земле. В этом разделе автор подробно описывает многочисленные эксперименты по абиогенному синтезу органических веществ из неорганических компонентов, происходящему под действием различных энергетических факторов: электрических разрядов, радиации, температуры и т. п.

Следуя известным представлениям Онзагера и Моровица, автор определяет понятие «жизнь» как экологическое свойство, лишь на короткий миг проявляющееся как свойство индивидуума: «Жизнь есть свойство материи, приводящее к сопряженной циркуляции биоэлементов в водной среде, движимой в конечном счете энергией солнечного излучения по пути увеличения сложности». Данное определение носит, на мой взгляд, слишком общий характер: оно подчеркивает зависимость жизни от окружающей среды, но не фиксирует тех ее материальных по-

сителей (белки, нуклеиновые кислоты и др.), без которых жизнь вообще невозможна. Сводя всю сложность химических соединений и их превращений в живом организме к общему термину «циркуляции биоэлементов», автор, тем не менее, вынужден при дальнейшем изложении раскрыть смысл этого общего определения, назвать те конкретные группы химических веществ, которые зашифрованы в этом определении.

Переходя от рассмотрения периода химической эволюции материи к начальному периоду биологической эволюции, автор, как это обычно и делается в литературе такого рода, излагает представления о протобионтах — промежуточной стадии этого перехода. Он рассматривает имеющиеся в литературе гипотетические модели протобионтов — коацерваты, микросферы, самосборку молекул на фазовых границах, адсорбцию малых органических молекул на глинистых минералах. Рассматривая модели протоклеток, автор особенно подчеркивает трудности, возникающие при объяснении возможности преодоления концентрационного разрыва при переходе от мономерных органических молекул к полимерному материалу, послужившему субстратом возникающих протоклеток. Здесь он приходит к выводу, что протоклетки образовывались в первобытных водоемах из полимерных веществ одновременно с образованием малых органических молекул. Протоклетки эволюционировали около двух миллиардов лет, причем в этот период у них появились и эволюционировали генетический и белоксинтезирующий аппараты и благодаря им наследуемый обмен веществ.

Изложив в доступной форме основные представления современной генетики о передаче наследственной информации и механизмах самовоспроизведения живой клетки, автор высказывает свои догадки о возможных путях возникновения у протоклеток генетического аппарата. Так как вопрос этот до настоящего времени почти не разработан, представления автора окажутся безусловно полезными при его обсуждении в будущем.

В последней главе книги автор выделяет ряд вопросов, являющихся еще недостаточно обоснованными, подчеркивает предположительный характер многих использованных представлений, возможные альтернативные подходы. В частности, он отмечает спорные вопросы в космологии,

в подходах к изучению состава первичной атмосферы Земли, трудности в проблеме химической эволюции (проблема выбора), роль оптических изомеров в механизме отбора предбиологических систем и т. п.

В целом труд Фолсома представляет несомненную ценность для «любопытного читателя, интересующегося космологией» — по определению автора. Добавлю, что книга бесспорно заинтересует студентов биологических и смежных специальностей. Она написана простым, ясным языком, богато иллюстрирована рисунками, схемами, таблицами. Ее издание пополнит библиотечку книг на эту тему, ранее переведенных на русский язык. К этим книгам автор и отсылает читателей, желающих более глубоко вникнуть в суть обсуждаемой проблемы.

Г. А. Деборин

Предисловие

Это краткий рассказ о долгом пути приключений, начавшемся на заре познания и не имеющем конца. Его цель — объяснить (а может быть, и помочь воспроизвести) возникновение жизни на нашей планете. Вместе с тем важно также детально обсудить феномен жизни под тем углом зрения, является ли жизнь редкостью и уникалом, или же это обычное и необходимое свойство Вселенной.

В истории, литературе и фольклоре мы часто сталкиваемся с удивлением, порожденным этими мыслями. Лишь недавно — в течение прошлого столетия и в начале нынешнего — наука и техника снабдили нас данными, позволившими развиваться нашим знаниям, а чувство удивления способствовало формулированию полезных теорий о природе Вселенной и о том месте, которое в ней занимает человек. Объединив методы, теорию и данные спектроскопии, астрономы, физики и химики показали, что солнечная система по своему химическому составу едина со всей Вселенной. С помощью ядерной физики и астрономии стало возможным построение шкалы времен для эволюции звезд и возраста горных пород и метеоритов. Благодаря достижениям астрономии, физической химии и геологии была разработана реалистическая точка зрения на образование и развитие планет и на развитие планетных атмосфер. Основу теории возникновения жизни составляют химические и биологические данные. Существенный вклад вносит также философия. Объективные результаты работ, полученные при наблюдении и в эксперименте, позволяют вплотную подойти к вопросу о происхождении жизни. Это можно сформулировать так: «для каждого события существует разумное объяснение». Одни объяснения сейчас кажутся более разумными, чем другие, в то время как некоторые события до сих пор остаются необъяснимыми наблюдениями. В этом очарование науки.

Моя книга рассчитана на любознательного читателя, интересующегося наукой вообще и космогонией в частности. Я пытаюсь обосновать в ней свою точку зрения на современное положение проблемы происхождения жизни. Быть может она не беспристрастна, но, думаю, что я нарисовал реальную картину того, как в различных областях науки предпринимаются согласованные действия, направленные к общей цели.

Для того чтобы достичь современной ступени развития, биологическим системам понадобилось очень много времени (сотни и тысячи миллионов лет). Изучаем ли мы возникновение жизни по таким источникам, как наша Земля, другие планеты или метеоритное вещество, мы непосредственно располагаем лишь кратким мгновением настоящего. При изучении вопросов происхождения жизни необходимо попытаться прочесть и воссоздать прошлое, в частности, для того чтобы найти химические и морфологические свидетельства предшествовавших образований и определить возраст горных пород. По существу, проблема возникновения жизни есть проблема воссоздания древнейшей из всех древних историй. Чем лучше мы уясним ситуацию, существовавшую в первобытные времена, тем более достоверными и надежными будут эксперименты, в которых имитируются ранние события.

Кропотливый труд и достойные восхищения догадки многих исследователей в этой области нашли отражение в книге лишь в самых общих чертах. Некоторых из тех, кто внес большой вклад в проблему, из-за небольшого объема книги мне не удалось даже упомянуть, с другими я просто не согласен. Я прошу извинения у тех, кого это могло бы обидеть, и надеюсь, что со временем (возможно, после проведения дополнительных экспериментов) наши точки зрения станут более близкими. Логическое несогласие — кратчайший путь между умами, и соответствующие эксперименты должны привести к разрешению объективных разногласий.

Клэр Э. Фолсом

Сентябрь 1978 г.

To Jo, and all the other giants

Часто утверждают, что в настоящее время имеются все условия для возникновения примитивных живых существ, которые имелись когда-то. Но если бы сейчас (и о какое это большое если!) в каком-либо теплом маленьком водоеме, содержащем все необходимые соли аммония и фосфора и доступном воздействию света, тепла, электричества и т. п., химически образовался белок, способный к дальнейшим все более сложным превращениям, то этот белок немедленно был бы разрушен или поглощен, что было невозможно в период до возникновения живых существ.

Чарлз Дарвин



Глава 1

Химия Вселенной

▲ Гигантская туманность в созвездии Ориона. Эту туманность в районе «меча» Ориона можно видеть в бинокль. Она имеет около 15 световых лет в диаметре и содержит такое количество газа и пыли, которого достаточно для образования 100 000 звезд размером с наше Солнце. Это одна из многих туманностей в нашей Галактике — Млечном Пути, диаметр которой около 100 000 световых лет. Туманность Ориона, отстоящая от нас на расстояние около 1500 световых лет, является ближайшей к нам туманностью. (Фотография сделана в Ликской обсерватории с использованием 120-дюймового телескопа-рефлектора Маунт-Гамильтон. Воспроизводится с любезного разрешения НАСА.)

Выйдите на улицу в ясную темную ночь и взгляните на звезды. Среди них одни — желтые или оранжевые, другие — белые, третьи — голубые. По своим видимым размерам и блеску они изменяются от едва заметных простым глазом до таких ярких, что кажется, в их лучах предметы могли бы отбрасывать тени. Благодаря телескопу люди узнали, что некоторые из этих объектов вовсе не звезды, а галактики — громадные скопления звезд; другие представляют собой туманности — огромные светящиеся облака газа и пыли, находящиеся внутри нашей Галактики.

Замечательно, сколь малое число научных принципов достаточно для объяснения всего этого изобилия и разнообразия: химического состава, расстояний, возрастов, происхождения и эволюции звезд и планет. Один из таких принципов гласит, что распространенность химических элементов одинакова во всей Вселенной. Превращения элементов и реакции между ними являются фундаментальными свойствами их строения, концентрации и условий окружающей среды. Химия Земли и Солнца подчиняется тем же законам, что и химия любой другой области Вселенной.

Определение химического состава звезд, удаленных на большие расстояния, или хотя бы нашего Солнца поначалу может показаться невероятно трудной задачей. Единственным связующим звеном между наблюдателем и этими телами является излучаемый ими свет. Но, оказывается, этого достаточно. Свет, излучаемый звездой, можно с помощью спектроסקопа разложить на составляющие с различными частотами колебаний; спектральные линии дадут информацию о присутствии и содержании тех или иных химических элементов.

В самых общих чертах спектроскоп состоит из призмы или дифракционной решетки и узкой щели, расположенной между изображением звезды и фотопленкой или другим приемником излучения. Не разложенный на составляющие белый свет представляет собой один из видов электромагнитного излучения звезды; он состоит из сово-

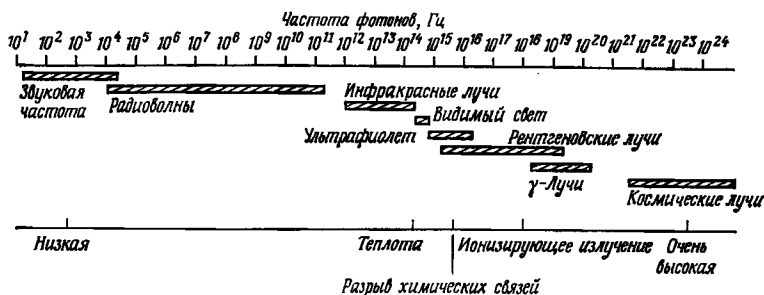


Рис. 1.1. Спектр электромагнитного излучения. Спектр простирается от звуковых волн до космических лучей. Особый интерес представляет диапазон от дальней ультрафиолетовой до видимой области включительно; в этот диапазон попадает большая часть энергии падающего на Землю солнечного излучения.

купности отдельных фотонов, энергии которых пропорциональны их частотам. Зависимость между энергией и частотой, а также место, которое занимает видимый свет среди других электромагнитных излучений, представлены на рис. 1.1.

На рис. 1.2 показано, как в спектроскопе белый свет, содержащий фотоны многих частот, разлагается и образу-

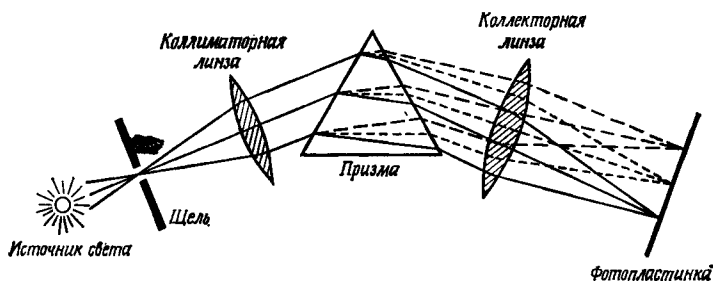


Рис. 1.2. Схема простого спектроскопа. Световые лучи от источника проходят через узкую щель, затем через линзу и в виде параллельного пучка падают на призму (или дифракционную решетку), которая разделяет лучи различных частот. Вторая линза собирает лучи и направляет их на приемник излучения. Чем уже щель, тем лучше разделение лучей по частотам.

ется спектр изображений щели, каждое из которых отвечает узкому диапазону частот излучения.

Рассмотрим в качестве источника света раскаленное добела твердое тело. В этом случае получается сплошной непрерывный спектр. Под действием тепла электроны атомов, составляющих тело, переходят на более высокие энергетические уровни; затем эти электроны возвращаются на более низкие уровни, причем тепловая энергия, благодаря которой электроны попадают на более высокий энергетический уровень, вновь выделяется в форме фотонов (световой энергии). Раскаленное добела тело излучает фотоны практически во всем интервале частот видимого спектра.

При нагревании какого-либо элемента в газообразном состоянии в его спектре на темном фоне появляется набор ярких эмиссионных линий, свойственный данному элементу, который можно назвать его «отпечатками пальцев». Атомы каждого элемента имеют определенное, ему одному присущее число протонов и электронов. При нагревании электроны переходят на более высокий энергетический уровень. При возврате этих электронов на более низкие энергетические уровни их энергия возбуждения высвобождается в форме испускаемых фотонов, частоты которых характерны для данного элемента.

Визуальная эмиссионная спектроскопия использовалась в XIX в. Робертом Бунзеном и Густавом Кирхгофом, когда они разрабатывали простые способы обнаружения металлов, основанные на окраске пламени. Внося соли различных металлов в пламя, исследователи наблюдали характерную для этих металлов окраску пламени. Эта окраска представляет собой преобладающий цвет в спектре испускания соответствующего металла. Например, кусочки хлористого натрия при внесении в пламя давал желтую окраску, хлористый никель — зеленую, а хлористый кадмий — пурпурно-фиолетовую.

Существуют спектры еще одного вида, представляющие собой наборы темных линий на светлом фоне. Это спектры поглощения; они возникают при прохождении белого света от раскаленного твердого тела через более холодные пары какого-либо химического элемента. Источник белого света испускает фотоны всех частот, Темные

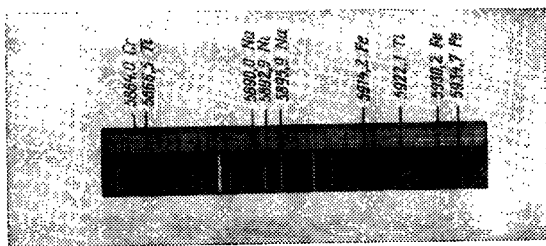


Рис. 1.3. Участок желтой области спектра звезды-гиганта спектрального класса K-1 (*сверху*) в сравнении со спектром неона (*снизу*), на основании которого устанавливается шкала длин волн. Над несколькими линиями поглощения указаны длины волн и обозначены элементы, ответственные за их появление. (Спектр из Ликской обсерватории любезно предоставлен д-ром Спинрэдом.)

линии отвечают тем фотонам, которые были поглощены электронами, находившимися на низких энергетических уровнях, поскольку именно в данных местах спектра расположены полосы их собственных частот. Поэтому данный вид спектра называют разностным. Для любого элемента частоты линий в спектрах испускания и поглощения совпадают.

Спектроскопия — главная точка соприкосновения астрономии и химии. Анализ света, излучаемого звездами, дает богатые сведения об их химическом составе. На рис. 1.3 представлен типичный спектр звезды. Анализ подобных спектров позволяет не только идентифицировать химические элементы, но дает также и другую информацию. Например, сравнивая относительные интенсивности эмиссионных линий одного и того же элемента, можно измерить температуру источника. Относительное содержание каждого элемента можно найти, измеряя относительные интенсивности его главных спектральных линий. Кроме того, из спектра можно определить скорость объекта относительно наблюдателя.

С конца XIX в. было зарегистрировано более 2 млн. спектров примерно 15 тыс. звезд и Солнца, и на основе этих спектров были сделаны выводы об их химическом

составе. Не менее важным является заключение, что всюду во Вселенной существуют одни и те же химические элементы и выполняются одни и те же физические законы.

Когда свет удаленных звезд по пути к наблюдателю проходит через облака межзвездного газа, в спектрах звезд появляются темные линии, соответствующие полосам поглощения. Анализ этих полос позволяет определить, какие атомы и молекулы присутствуют в межзвездном пространстве.

Туманности видны в маломощный телескоп как слабо светящиеся звезды, но на самом деле это огромные облака газа и пыли, распределенные между звездами. Излучение звезд возбуждает составляющие туманность газ и пыль, заставляя их тускло светиться. Поэтому спектры этих светящихся газовых облаков представляют собой спектры испускания.

Миллионы спектров, зарегистрированных от Солнца, звезд, межзвездных облаков и туманностей, вполне доступны интерпретации при использовании удивительно небольшого числа основных положений.

Во-первых, все эти объекты, составляющие почти все вещество Вселенной, имеют, по существу, одинаковый химический состав. В табл. 1.1 приведено относительное содержание самых распространенных элементов во Вселенной.

Таблица 1.1

Содержание во Вселенной
некоторых из наиболее распространенных элементов

Атомы	Относительное содержание, число атомов	Атомы	Относительное содержание, число атомов
Водород	10 000 000	Натрий	17
Гелий	1 400 000	Магний	290
Литий	0,003	Алюминий	19
Углерод	3 000	Фосфор	3
Азот	910	Калий	0,8
Кислород	6 800	Аргон	42
Неон	2 800	Кальций	17
		Железо	80



Рис. 1.4. Эффект Доплера. Когда тело приближается к наблюдателю, частоты всех видов его электромагнитного излучения повышаются по отношению к системе отсчета наблюдателя прямо пропорционально скорости. Когда тело удаляется, частоты всех видов его электромагнитного излучения понижаются по отношению к наблюдателю пропорционально скорости. Приближающиеся тела дают фиолетовое смещение (повышение частоты) видимого спектра, а удаляющиеся — красное (понижение частоты).

Во-вторых, почти все вещество Вселенной находится в виде двух простейших химических элементов — водорода и гелия. Большая часть остальных элементов: углерод, азот, кислород, неон, магний, кремний, сера, фтор, алюминий, хлор, аргон, кальций и железо — расположена в начале периодической таблицы.

В-третьих, в спектрах почти всех галактик наблюдается доплеровское красное смещение: частоты всех фотонов уменьшены — сдвинуты по направлению к красной части спектра (рис. 1.4). Чем дальше галактика, тем больше ее красное смещение. Это означает, что галактики удаляются от наблюдателя, находящегося в любой точке пространства. Из анализа красных смещений следует, что Вселенная расширяется, поскольку все галактики удаляются друг от друга.

Но почему Вселенная расширяется? Почему распространность элементов столь просто связана с порядком их расположения в периодической системе? Эти вопросы лежат вне поля зрения данной книги; ответы на них лучше всего искать в книгах по космологии и в теориях возникновения Вселенной. Здесь мы ограничимся условиями ближайших к нам областей пространства.

На вопрос о распространенности и видах химических элементов можно дать ответ, который хорошо согласуется с открытиями в области ядерной физики и астрономии. Однако точность этого ответа в конечном счете покоится на космологии, которая пока развита недостаточно.

Водород — наиболее часто встречающийся и самый простой элемент. Его атом состоит из одного протона и одного электрона. Если предположить, что первичное вещество Вселенной составлял исключительно водород, то можно объяснить не только наличие, но и распространенность всех остальных элементов в настоящее время.

В такой первичной Вселенной, состоящей из чистого водорода, образовались звезды (модель этого процесса будет обсуждаться в гл. 2). Звезды являются довольно крупными гравитационно связанными скоплениями вещества, в ходе образования которых температура повышается настолько, что начинают протекать ядерные реакции.

Для звезд основной ядерной реакцией является слияние ядер атомов водорода. В этой реакции водород пре-

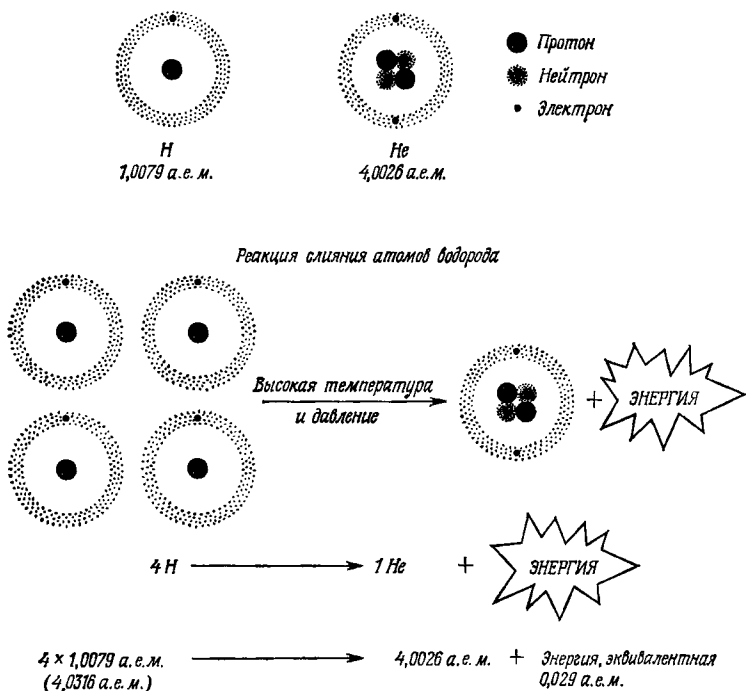


Рис. 1.5. Слияние атомов водорода с образованием атома гелия. Один атом гелия легче, чем четыре атома водорода; дефект масс соответствует выделяющейся энергии излучения.

вращается в гелий с выделением энергии (рис. 1.5). Масса ядра атома гелия, состоящего из двух протонов и двух нейтронов, точно измерена и составляет 4,0026 атомной единицы массы (а. е. м.). При давлениях и температурах, достаточно высоких для того, чтобы началась реакция слияния водородных атомов, четыре атома водорода сливаются в один атом гелия. Но масса одного атома водорода равна 1,0079 а. е. м., и, следовательно, четыре его атома имеют массу 4,0316 а. е. м. Разность между массой четырех атомов водорода и массой одного атома гелия равна 0,029 а. е. м.: это — маленькое число, но именно оно движет Вселенной. По закону сохранения массы и энергии эта разность масс превращается в энергию излучения. Согласно уравнению Эйнштейна, энергия равна массе, умноженной на квадрат скорости света. Превращение водорода в гелий сопровождается небольшой потерей массы — 0,7% на каждый атом гелия — и высвобождением колоссальных количеств энергии.

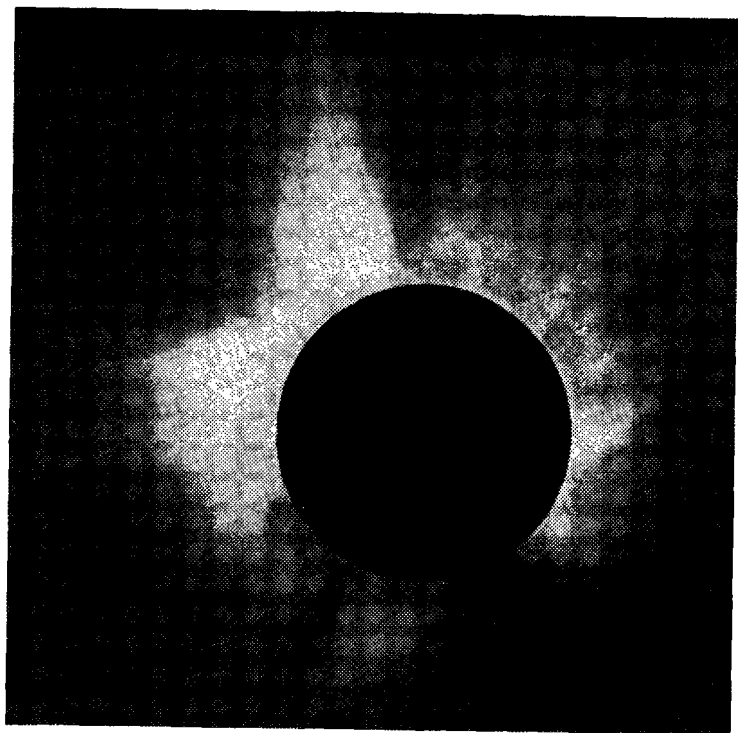
Реакция слияния атомов водорода, протекающая в недрах звезд, объясняет, почему гелий — первичный продукт слияния — является, согласно наблюдениям, вторым по распространенности химическим элементом. В других звездных ядерных реакциях, в которых гелий участвует в качестве компонента, образуются более тяжелые, а также нестабильные радиоактивные элементы, дающие при распаде другие тяжелые элементы.

В исключительно точных экспериментах ядерной физики были установлены наиболее вероятные участники реакций, протекающих в звездах, и определены их скорости. Самый привлекательный аспект этой области исследований состоит в том, что с помощью теоретических вычислений, основанных на этих экспериментах, можно предсказать весь известный набор элементов и их относительную распространенность, действительно наблюдающуюся во Вселенной.

Первые чисто водородные звезды угасают; некоторые из них, взрываясь как сверхновые, выбрасывают свое вещество в межзвездную среду, где теперь помимо водорода появляются более сложные элементы — продукты ядерных превращений в этих звездах.

Используя известные значения распространенности элементов и известные значения скоростей ядерных ре-

акций внутри звезд, можно вычислить возраст Вселенной. Он составляет от 10 000 до 13 000 млн. лет. Другой, независимый путь вычисления возраста Вселенной основан на скоростях разбегания галактик, оцениваемых по красным смещениям. Если допустить, что Вселенная расширяется с постоянной скоростью, то этот метод приводит к тому же значению возраста — 13 000 млн. лет.



Глава 2

Возраст звезд и планет; периодическая система элементов

▲ Вид Солнца во время затмения в 1970 г. Солнце, звезда средних размеров, по массе превосходит Землю примерно в 300 000 раз. Оно состоит в основном из водорода, подвергшегося гравитационному сжатию, и температура в его центре вследствие реакции слияния ядер водорода составляет 15 млн. К. Солнце содержит количество водорода, достаточное для поддержания постоянного потока энергии по крайней мере в течение еще 5000 млн. лет.

Очевидное — это то, чего никогда не видишь, пока кто-нибудь не сформулирует это достаточно просто.

Калил Гибран. Песок и пена

Возраст (или время жизни) звезды можно в принципе определить, исходя из того, что звезда излучает энергию в космическое пространство с измеримой скоростью. Энергия, соответствующая ее массе, обусловлена ядерными реакциями, и, хотя масса звезды очень велика, она не бесконечна.

В качестве первого приближения рассмотрим звезду с массой m , первоначально состоящую исключительно из водорода. Полное количество высвобождаемой ею энергии E составляет

$$E = 0,007 mc^2,$$

где 0,007 — дефект массы, проявляющийся в виде энергии в ходе слияния четырех водородных атомов в атом гелия, а c — скорость света.

Для звезды с массой, равной массе Солнца, $E = 10^{52}$ эрг. В настоящее время мощность излучения Солнца составляет 10^{41} эрг/год. Если бы Солнце излучало энергию с этой постоянной скоростью, то продолжительность его жизни была бы

$$\frac{10^{52}}{10^{41}} = 100\,000 \text{ млн. лет.}$$

Однако этот приближенный результат дает завышенную продолжительность жизни, поскольку, по мере того как протекает слияние водородных атомов и звезда стареет, равновесие звезды сдвигается. Звезды представляют собой массивные газовые тела, в которых направленные внутрь силы гравитационного сжатия уравновешены силами гидростатического давления, направленными наружу. Если температура звезды падает, то давление внутри ее понижается и звезда сжимается. Наоборот, если температура повышается, то давление возрастает и звезда расширяется. Процесс слияния водородных атомов зависит от температуры: с ростом температуры его скорость увеличивается.

Массивные звезды имеют более высокие температуры, чем звезды небольшого размера, и быстрее расходуют во-

дород. В первом приближении, сделанном нами, следует дополнительно учесть как изменения в равновесии звезды в ходе ее эволюции, так и зависимость между массой и температурой.

Один из способов построения картины эволюции звезды и вычисления ее возраста заключается в анализе большой случайной выборки звезд. При этом измеряют расстояния до звезд, их видимый блеск и цвет каждой звезды. Расстояние до близких звезд можно измерить методом параллакса.

Если известны видимый блеск и расстояние до звезды, то можно вычислить ее абсолютную звездную величину, поскольку видимый блеск звезды обратно пропорционален расстоянию до нее. Абсолютная звездная величина есть функция скорости высвобождения энергии независимо от ее расстояния до наблюдателя.

Цвет звезды определяется ее температурой: голубой цвет соответствует очень горячим звездам, белый — горячим, а красный — относительно холодным.

На рис. 2.1 представлена диаграмма Герцшпрунга — Расселла, отражающая зависимость между абсолютной звездной величиной и цветом для большого числа звезд. Поскольку эта классическая диаграмма включает звезды всевозможных размеров и возрастов, она соответствует «средней» звезде на различных стадиях ее эволюции.

Большинство звезд располагается на прямолинейной части диаграммы; они испытывают лишь постепенные изменения равновесия по мере выгорания содержащегося в них водорода. На этой части диаграммы, которая называется главной последовательностью, звезды с большей массой имеют более высокую температуру; в них быстрее протекает реакция слияния атомов водорода, и продолжительность их жизни меньше. Звезды с массой меньшей, чем солнечная, имеют более низкую температуру, слияние водородных атомов протекает в них медленнее, и продолжительность их жизни больше. Когда какая-либо звезда главной последовательности израсходует около 10% своих исходных запасов водорода, ее температура снизится и произойдет расширение. Как предполагают, красные гиганты представляют собой «состарившиеся» звезды всех размеров, принадлежавшие ранее главной последовательности.

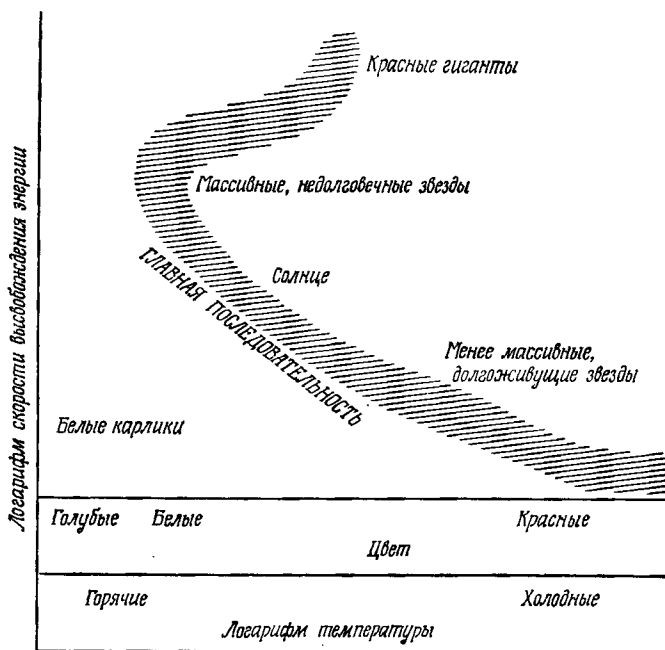


Рис. 2.1. Диаграмма Герцшпрунга — Расселла, отражающая зависимость между абсолютной звездной величиной и температурой для большого числа звезд в пределах нашей Галактики. На эту диаграмму нанесены данные для множества звезд, любая отдельная точка представляет собой звезду. Поскольку выборка звезд является случайной, эта диаграмма дает «усредненную» историю звезды.

При точном определении возраста звезды эти факторы следует принимать во внимание. Вычисления с их учетом показывают, что ни одна звезда в нашей Галактике не старше 11 000 млн. лет. Некоторые маленькие звезды имеют этот возраст; многие более крупные звезды гораздо моложе. Самые массивные звезды могут находиться на главной последовательности не более 1 млн. лет. Солнце и звезды подобных размеров находятся на главной последовательности около 10 000 млн. лет, прежде чем достигают стадии красных гигантов. Возраст, вычисленный таким способом, составляет всего 10% от результата, полученного в первом приближении, — 100 000 млн. лет,

т. е. в предположении, что будет израсходован весь водород. Второе приближение было улучшено, но мы не будем рассматривать здесь, как это было сделано, так как более точные результаты не вносят ничего нового в наши представления об эволюции звезд в той мере, в какой они связаны с вопросами происхождения жизни.

Теперь, когда нам известны максимальные времена жизни звезд и Солнца, можно перейти к следующему вопросу: каков возраст нашей планеты и подобных ей тел? Но прежде чем ответить на этот вопрос, его следует сформулировать как можно более точно. Мы можем определить, как долго какой-либо минерал находился в кристаллическом состоянии, или в течение какого времени определенный метеорит подвергался бомбардировке космическими лучами, или даже (в гораздо менее внушительных масштабах) сколько лет данному куску дерева. В действительности «возраст» дает ответы на все вопросы типа «как долго, в течение какого времени или сколько лет прошло с некоторого события», причем ответы на эти вопросы основываются на атомной химии.

Каждый атом любого химического элемента состоит из ядра, находящегося в центре и состоящего из протонов и нейтронов, и внешнего облака отрицательно заряженных электронов, обладающих гораздо меньшей массой. Одним из триумфов химии было объяснение на физической основе того эмпирического факта, что элементы могут быть расположены в виде периодической таблицы, в которой они следуют друг за другом в порядке, соответствующем числу протонов в их ядрах (рис. 2.2). Элементы, расположенные таким образом, проявляют периодически повторяющееся сходство химических свойств.

Атом простейшего элемента, водорода, состоит из единственного протона, связанного с одним электроном. Но число нейтронов в ядре водородного атома неопределенно — оно может изменяться. Формы водорода с различным числом нейтронов называют *изотопами водорода*, их массы изменяются от 1 до 3 а. е. м. (рис. 2.3). Изотопы водорода можно отделить друг от друга и измерить количество каждого из них.

Различные изотопы одного и того же элемента содержат разное число нейтронов в ядрах их атомов. Хотя химические свойства изотопов каждого данного элемента,

1	IA	1	H	1,008																	2	He	4,003
2		3	Li	6,941																	10	Ne	20,18
3		4	Be	9,012																	9	F	19,00
4		11	B	10,81																	8	O	16,00
5		12	C	12,01																	7	N	14,01
6		13	N	14,01																	6	C	12,01
7		14	O	16,00																	5	B	10,81
		15	F	18,998																	4	Be	9,012
		16	Ne	20,18																	3	Li	6,941
		17	Na	22,99																	2	He	4,003
		18	Mg	24,31																	1	H	1,008
		19	Al	26,98																			
		20	Si	28,09																			
		21	P	30,97																			
		22	S	32,06																			
		23	Cl	35,45																			
		24	Ar	39,95																			
		25	K	39,10																			
		26	Ca	40,08																			
		27	Sc	44,96																			
		28	Ti	47,88																			
		29	V	50,94																			
		30	Cr	52,00																			
		31	Mn	54,94																			
		32	Fe	55,85																			
		33	Co	58,93																			
		34	Ni	58,71																			
		35	Cu	63,55																			
		36	Zn	65,37																			
		37	Ga	69,72																			
		38	Ge	72,50																			
		39	As	74,92																			
		40	Se	78,96																			
		41	Br	79,90																			
		42	Kr	83,80																			
		43	Rb	85,47																			
		44	Sr	87,62																			
		45	Y	88,91																			
		46	Zr	91,22																			
		47	Nb	92,91																			
		48	Mo	95,94																			
		49	Tc	98,91																			
		50	Ru	101,1																			
		51	Rh	102,9																			
		52	Pd	106,4																			
		53	Ag	107,9																			
		54	Cd	112,4																			
		55	In	114,8																			
		56	Sn	118,7																			
		57	Sb	121,8																			
		58	Te	127,6																			
		59	I	126,9																			
		60	Xe	131,3																			
		61	Ba	137,3																			
		62	La	138,9																			
		63	Ce	140,1																			
		64	Pr	140,9																			
		65	Nd	144,2																			
		66	Pm	(147)																			
		67	Sm	150,4																			
		68	Eu	152,0																			
		69	Gd	157,3																			
		70	Tb	158,9																			
		71	Dy	162,5																			
		72	Ho	164,9																			
		73	Er	167,3																			
		74	Tm	168,9																			
		75	Yb	173,0																			
		76	Lu	175,0																			
		77	Hf	178,5																			

Рис. 2.2. Периодическая система элементов. Все элементы могут быть размещены в виде таблицы в порядке, соответствующем числу протонов в их ядрах и расположению электронов в их внешних оболочках. На основе положения любого элемента в периодической системе можно предсказать его химическое поведение.

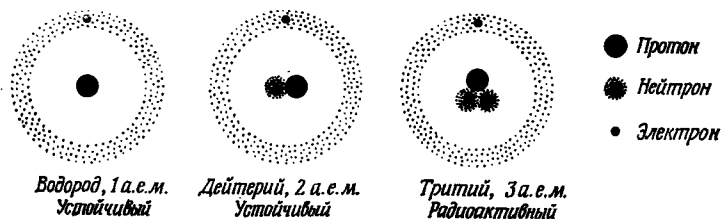


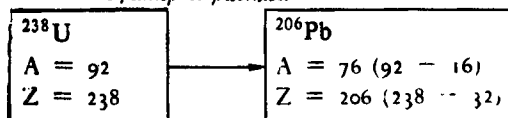
Рис. 2.3. Изотопы водорода. У всех трех изотопов водорода имеется единственный орбитальный электрон, но они отличаются по массе ядер (и по устойчивости). Устойчивые водород и дейтерий имеют один протон и один протон плюс один нейтрон соответственно; в ядре нестабильного (радиоактивного) трития находятся один протон и два нейтрона.

по существу, совпадают, между изотопами существуют два важных различия, которые и составляют основу для схем определения возраста.

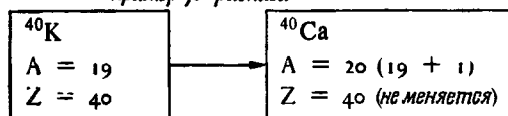
Во-первых, в ультрамикром мире атомов и молекул химические реакции обусловлены их скоростями. При одинаковых ускоряющих воздействиях более тяжелые частицы приобретают меньшие скорости, чем более легкие. В результате этого более легкие изотопы легче вступают в химические реакции, быстро протекающие в одном направлении. Так, в биологических системах изотоп азота ^{14}N реагирует легче, чем более тяжелый изотоп ^{15}N , и поэтому биологические системы стремятся накопить большее количество ^{14}N , чем ^{15}N . Аналогично происходит и обогащение изотопом ^{12}C по сравнению с ^{13}C и ^{16}O по сравнению с ^{18}O . Это селективное обогащение биологических систем легкими изотопами может быть измерено.

Во-вторых, изотопы обладают различной устойчивостью. Физическая теория пока не может этого объяснить, но факты таковы, что некоторые сочетания протонов и нейтронов устойчивы, тогда как другие неустойчивы и подвергаются радиоактивному распаду. И водород ^1H , и дейтерий ^2H устойчивы, но тритий ^3H распадается, высвобождая высокоскоростной электрон, называемый β -частицей; в этом процессе ^3H превращается в ^3He . Изотопы углерода ^{12}C и ^{13}C устойчивы, но ^{14}C распадается с освобождением β -частицы, превращаясь в устойчивый ^{14}N .

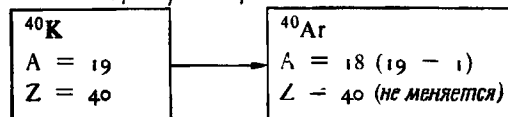
Аналогично изотопы калия ^{39}K и ^{41}K устойчивы, по

Пример α -распада

8 α -частиц
 + (всего 16 протонов
 и 16 нейтронов)

Пример β -распада

+ 1 высокоэнергетический
 электрон

Пример электронного захвата

+ 1 γ -фотон

Рис. 2.4. Механизмы радиоактивного распада. Существует три типа распада радиоактивных изотопов: испускание α -частицы, в котором ядро одновременно теряет два протона и два нейтрона (α -частицу); β -распад, в котором теряется один высокоэнергетический электрон, и электронный захват, в котором теряется один высокоэнергетический (γ) фотон.

^{40}K распадается, испуская β -частицу и превращаясь в ^{40}Ca . ^{40}K может распадаться и по другому пути (называемому путем электронного захвата), в котором один из находящихся на орбите электронов захватывается ядром и соединяется с протоном, образуя нейтрон. В этом случае продуктом является ^{40}Ar .

Многие из более сложных элементов, имеющих большее число протонов и нейтронов, распадаются на продукты, которые сами радиоактивны. Рядами радиоактивного распада характеризуется поведение ^{235}U и ^{238}U . Часто в этих процессах распада испускаются α -частицы (ядра гелия, состоящие из двух нейтронов и двух протонов).

Процессы распада радиоактивных изотопов можно подразделить на группы по типам распада (рис. 2.4). Ядра, испускающие электрон (β -частицу), не просто выбрасывают находившийся на орбите электрон; он появляется в

ядре при распаде нейтрона на протон и электрон. В этом процессе, называемом β -распадом, атомный номер увеличивается на единицу и один элемент превращается в другой. При α -распаде атомный номер уменьшается на две единицы (теряются два протона), а масса — на четыре (два протона плюс два нейтрона) на каждую выбрасываемую α -частицу. Электронный захват (или К-захват) является процессом, обратным испусканию β -частицы, поскольку при этом протон ядра захватывает внутренний электрон с К-орбиты и становится нейтроном. При К-захвате атомный номер уменьшается на единицу, а масса остается неизменной.

Скорость, с которой распадается радиоактивный изотоп какого-либо элемента, строго постоянна для него, она не зависит ни от каких изменений окружающей среды. Скорости распада обычно выражают в периодах полураспада; период полураспада изотопа — это время, требуемое для распада половины его имеющегося количества. Тогда как точный момент распада каждого отдельного атома предсказать невозможно, периоды полураспада определяют со значительной точностью, поскольку этот процесс подчиняется статистическим законам. Даже в очень маленьких по размеру образцах вещества присутствует большое число атомов, например 1 г углерода содержит около $5 \cdot 10^{22}$ атомов.

В табл. 2.1 приведены периоды полураспада и константы распада некоторых элементов, наиболее часто используемых для установления возраста. Сущность большинства схем установления возраста состоит в измерении содержания материнских и (или) дочерних изотопов с очень высокой точностью. Отношение изотопов, подставленное в соответствующую формулу, дает возможность оценить возраст вещества. Этот возраст отвечает времени, в течение которого минерал находился в кристаллическом состоянии. Ниже приводятся несколько примеров.

Углеродные (^{14}C) часы, разработанные Уиллардом Либби, приносят большую пользу в археологии и в датировке различных событий, причем их принцип иллюстрирует принципы методов датировки в целом. Земля с постоянной скоростью подвергается бомбардировке высокоэнергетическими частицами космических лучей. Эти высокоскоростные частицы, в основном протоны, взаимо-

Таблица 2.1

Периоды полураспада и другие данные о некоторых элементах, используемых при определении возраста

Исходный элемент	Конечный элемент	Вид распада	Период полураспада, годы	Константа распада ¹
^{14}C	^{14}N	β -Распад	$5,7 \cdot 10^3$	$1,216 \cdot 10^{-4}$
^{40}K	^{40}Ar	Электронный захват	$1,3 \cdot 10^9$	$0,585 \cdot 10^{-10}$
	^{40}Ca	β -Распад		
^{87}Rb	^{87}Sr	»	$4,7 \cdot 10^{10}$	$1,474 \cdot 10^{-11}$
^{232}Th	^{208}Pb и 6 α -частиц	α -Распад (ряд распада)	$1,39 \cdot 10^{10}$	$4,99 \cdot 10^{-11}$
^{235}U	^{207}Pb и 7 α -частиц	То же	$7,13 \cdot 10^8$	$9,72 \cdot 10^{-10}$
^{238}U	^{206}Pb и 8 α -частиц	»	$4,51 \cdot 10^9$	$1,537 \cdot 10^{-10}$

¹ В некоторых случаях вместо периодов полураспада используются константы распада. Константа распада d связана с периодом полураспада следующим образом:

$$\text{Период полураспада} = \frac{\ln 2}{d} = \frac{0,693}{d}$$

действуют с молекулами атмосферы с образованием нейтронов, энергия которых достаточна для того, чтобы их поглотили ядра ^{14}N . Каждый атом ^{14}N , подвергшийся такому воздействию, превращается в ^{14}C — радиоактивный изотоп с периодом полураспада 5730 лет.

Изотоп ^{14}C образуется и расходуется с постоянными скоростями. С помощью специальных счетчиков Гейгера и точных химических анализов можно измерить количество ^{14}C по отношению ко всем изотопам углерода. Общий запас углерода на Земле — двуокись углерода в воздухе и в океанах, карбонатные минералы в горных породах и живые организмы — содержит равновесное количество ^{14}C , равное $1,2 \cdot 10^{-12}$ г на 1 г всего углерода.

Когда организм погибает, содержащийся в нем углерод временно выводится из мирового круговорота углерода.

Содержание ^{14}C в нем начинает убывать, поскольку в систему не поступает новый углерод. Для исследуемого образца данные о содержании ^{14}C и всего углерода можно объединить с данными о периоде полураспада углерода (одна константа) и о равновесном количестве ^{14}C (другая константа) и получить время, прошедшее с того момента, когда образец был выведен из цикла углерода. На практике точность и охват измерений ограничены. Для системы ^{14}C граница проходит на уровне, отвечающем примерно 10 периодам полураспада, или 57 300 лет, — времени, за которое остается всего около 0,001 его равновесного значения (или 0,16 расп./мин·г).

Этот отрезок времени — всего лишь мгновение в хронологии Земли. Для датировки древних горных пород необходимы другие методы. Принцип использования радиоактивных изотопов или их продуктов остается полезным, но в данном случае требуются изотопы с большими периодами полураспада.

Рассмотрим ураноносную породу. Допустим, что все материнские изотопы вошли в ее состав во время кристаллизации и ни материнские, ни дочерние изотопы с тех пор и до настоящего времени не были утеряны (на практике данное допущение справедливо далеко не всегда, и мы еще столкнемся с этим). Породы, в состав которых входят уран и торий, содержат оба изотопа урана (^{238}U , ^{235}U) и ^{232}Th наряду с четырьмя изотопами свинца (^{204}Pb , ^{206}Pb , ^{207}Pb , и ^{208}Pb).

Изотоп ^{204}Pb не образуется каким-либо известным радиоактивным источником и, по-видимому, является первичным изотопом. Три других изотопа представляют собой продукты распада урановых и ториевых изотопов.

В табл. 2.2 приведены родоначальники различных изотопов свинца и их периоды полураспада. В идеальном случае отношения свинца к урану (или торию) должны приводить к одному и тому же значению возраста, что обеспечивает независимое подтверждение правильности результатов определения. Чем старше порода, тем меньше в ней урана и больше свинца. Отношение $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ может служить в качестве часов, поскольку ^{235}U имеет гораздо меньший период полураспада, чем ^{238}U .

Этим способом был определен возраст многих пород, и в целом результаты вполне согласуются между собой.

Таблица 2.2

Источники изотопов свинца, найденных в минералах, содержащих уран и торий¹

Предшественник	Период полураспада, годы	Изотоп свинца (содержание)
Неизвестен		^{204}Pb (2,0%)
^{238}U (среднее содержание)	$4,5 \cdot 10^9$	^{206}Pb (18,8%)
^{235}U (низкое относительное содержание)	$7,13 \cdot 10^8$	^{207}Pb (20,6%)
^{232}Th (наивысшее относительное содержание)	$1,39 \cdot 10^{10}$	^{208}Pb (58,6%)

¹ Процентное содержание изотопов свинца приведено для метеорита Canyon Diablo.

Ключом к успеху метода является анализ ураноносных минералов, которые в период кристаллизации содержат мало свинца или вообще его не содержат.

Поскольку в качестве часов может служить отношение $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$, для вычисления среднего значения этого отношения и оценки среднего возраста Земли были изучены образцы земной коры, глубинных океанических осадков и других районов. В этих исследованиях была получена величина 4500 млн. лет. По существу, сходный подход, в котором используются каменные и железные метеориты, также дает для возраста Земли значение 4500 млн. лет.

Эти цифры относятся ко времени, прошедшему с момента кристаллизации древнейших обнаруживаемых на Земле пород или с момента образования метеоритов. Возраст пород, подвергшихся кристаллизации в более поздние сроки (от 4500 до 500 млн. лет назад), можно определить с той же точностью (около 4% или большей). Породы, образовавшиеся за период 500 млн. лет назад до наших дней, по большей части осадочные; это создает особые трудности при датировке уран-свинцовым методом,

Однако в этот конкретный промежуток времени, недавний в геологическом представлении, временной масштаб принято давать в терминах осадкообразования и последовательности залегания биологических окаменелостей. В табл. 2.3 приведены возрасты, методы их определения и главные особенности полной геохронологической шкалы.

Таблица 2.3

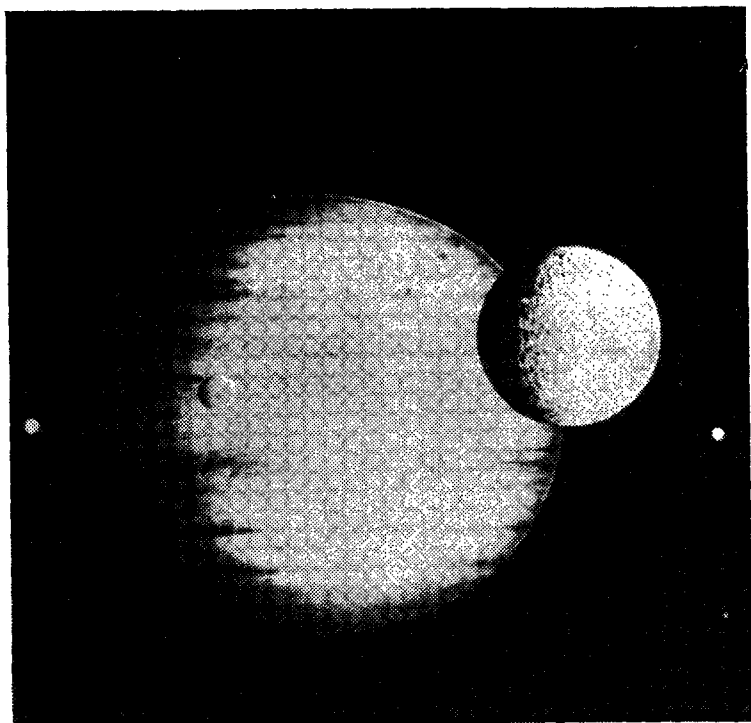
Геохронологическая шкала

Эра	Возраст, млн. лет	Эффективные методы датировки	Главные особенности Земли
Наше время	0—1	^{14}C	Обилие ископае- мых остатков
Кайнозой	1—62	Осадочные слои, последователь- ность окамене- лостей	
Мезозой	62—230	Радиометричес- кие методы U/Pb, K/Ar, Rb/Sr	
Палеозой	230—570		
Протерозой	570—2600		
Архей	2600—3600		Микроископае- мые, впервые свободный кисло- род
Доархейская	3600—4500		Протобионты Химическая эво- люция

Достоверность уран-свинцового метода может быть проверена как по внешним, так и по внутренним независимым данным. С этой целью могут быть использованы другие минералы, которые содержат мало урана, но достаточное количество ^{40}K или ^{87}Rb . Например, ^{40}K медленно распадается как до ^{40}Ca , так и до ^{40}Ar . ^{40}Ar можно высвободить из массы породы и измерить его количество. Результаты измерений количества ^{40}K и ^{40}Ar в минерале свидетельствуют о времени его кристаллизации.

Методы датировки, о которых только что шла речь, позволили построить временную шкалу истории Земли с

момента ее остывания 4500 млн. лет назад и до настоящего времени. Теперь наша задача состоит в том, чтобы внутри этой временной шкалы установить, каковы были условия на примитивной Земле, какого рода атмосферу имела Земля, какая была температура, какое было давление, когда образовались океаны и как образовалась сама Земля.



Глава 3

Образование планетных систем

▲
решения НАСА.)

Юпитер и его спутники. (С любезного раз-

Мы — люди, и наш удел — познавать таинственные новые миры и вторгаться в них.

Дж. Б. Шоу. Человек и сверхчеловек

Основные замечания, которые были сделаны в предыдущих главах, позволяют нам более точно сформулировать вопросы происхождения жизни и вплотную подойти к их изучению.

Во-первых, это возможно благодаря имеющимся сведениям о химии Вселенной, которые дает нам анализ света, излучаемого звездами. На основе этих сведений были сделаны выводы о том, что все химические элементы и их реакции на любой звезде и в любой галактике подчиняются одним и тем же физическим законам. В настоящее время у нас нет причин полагать, что физические явления — электромагнитное излучение, распад радиоактивных изотопов, тяготение и т. п. — неодинаковы во всей Вселенной.

Во-вторых, большое значение в изучении происхождения жизни имеет тот факт, что сроки жизни звезд, в том числе и Солнца, поддаются расчетам. В целом массивные звезды живут меньше, а менее массивные — дольше. Звезды спектрального класса G, такие, как Солнце, находятся на главной последовательности около 10 000 млн. лет.

Эти два обобщения вполне разумны и подтверждаются наблюдениями, но, чтобы с успехом применять их при изучении вопросов происхождения жизни, необходимо использовать философский принцип: «ни один наблюдаемый процесс не может объясняться случайными событиями». Если бы мы, вместо того чтобы пытаться найти глубинные причины процесса, признали возможность чистой случайности, то мы не могли бы формулировать законы и делать обобщения о характере процесса или проверять их экспериментально.

Случайное событие и статистически случайное событие — два совершенно разных понятия. Если использовать понятие случайного события с позиций теории вероятности, то с его помощью можно изучать события, которые имеют несколько возможных исходов. Например, при современном состоянии знаний мы не можем предсказать, когда распадется каждый отдельно взятый радиоактивный

атом. Но для большого числа таких атомов мы с большой точностью можем сказать, каково будет число атомов, распавшихся в течение данного отрезка времени.

Было бы неправильно использовать случайность для объяснения случайной природы отдельного события в историческом плане. Рассмотрим тот факт, что аминокислоты встречаются в двух формах, обозначаемых L и D, которые являются зеркальными отображениями друг друга (подробнее см. в гл. 12). Вместе с тем в белках всех изученных организмов найдены только L-формы аминокислот. Долгое время считалось, что молекулы, являющиеся зеркальными отображениями друг друга, имеют идентичные физические свойства. Поэтому было бы весьма заманчиво «объяснить» факт использования в наших биологических процессах L-, а не D-аминокислот некой исторической случайностью в ходе эволюции. Однако такое объяснение постулирует нашу уникальность, чего мы, быть может, не заслуживаем. К тому же если бы мы приняли философию случайности событий, то мы не смогли бы обращаться к эксперименту. Альтернативное объяснение предпочтительного использования L-аминокислот состоит в том, что это происходит по каким-то пока не известным нам законам.

Философское понятие случайности находит свое место и в проблеме происхождения жизни, когда мы имеем дело с моделями и теориями возникновения планетных систем. Были предложены теории двух типов.

В основе теорий одного типа лежат катастрофические, редкие или почти уникальные события. В них предполагается, что либо какая-то звезда прошла близко от Солнца или столкнулась с ним, либо Солнце совершенно случайно прошло через плотное облако межзвездного газа и пыли. В любом случае в результате происшедших событий образовался уникальный набор планет, из которых Земля — самая необычная. В моделях, построенных на основе теорий этого типа, образование планет «объясняется» случайным событием, и поэтому мы не будем в дальнейшем их обсуждать.

В моделях и теориях второго типа считают, что планеты представляют собой обычный побочный продукт образования звезд. Эта точка зрения, впервые высказанная в XVIII в. Кантом и позднее развитая Койпером, Альве-

ном и Камероном, подтверждается целым рядом свидетельств.

Молодые звезды обнаруживаются внутри туманностей — областей относительно концентрированного межзвездного газа и пыли, размеры которых составляют несколько световых лет. Туманности встречаются по всей нашей Галактике, и полагают, что звезды и связанные с ними планетные системы образуются внутри этих громадных облаков материи.

С помощью спектроскопии было показано, что межзвездное вещество состоит из газа — водорода, гелия и неона — и пылевых частиц, имеющих размеры порядка нескольких микрон и состоящих из металлов и других элементов. Поскольку температура очень низка (10—20 К), все вещество, кроме упомянутых газов, находится в замерзшем состоянии на пылевых частицах. Более тяжелые элементы и некоторое количество водорода ведут свое происхождение от звезд предшествующих поколений; некоторые из этих звезд взорвались как сверхновые, вернув в межзвездную среду оставшийся водород и обогатив ее образованными в их недрах более тяжелыми элементами.

Средняя концентрация газа в межзвездном пространстве — всего 0,1 атома $\text{H}/\text{см}^3$, тогда как концентрация газа в туманностях приблизительно 1000 атомов $\text{H}/\text{см}^3$, т. е. в 10 000 раз больше. (В 1 см^3 воздуха содержится примерно $2,7 \cdot 10^{19}$ молекул.) Хотя туманности состоят как бы из вакуума, благодаря громадным размерам, измеряемым световыми годами, они содержат количества веществ более чем достаточные для тысяч звезд и планетных систем размером с нашу.

Когда газопылевое облако становится достаточно большим в результате медленного оседания и слипания (аккреции) межзвездного газа и пыли под действием гравитации, оно становится неустойчивым — в нем нарушается близкое к равновесию соотношение между давлением и гравитационными силами. Гравитационные силы преобладают, и поэтому облако сжимается. В ходе ранних фаз сжатия тепло, высвобождающееся при превращении гравитационной энергии в энергию излучения, легко покидает облако, поскольку относительная плотность ве-

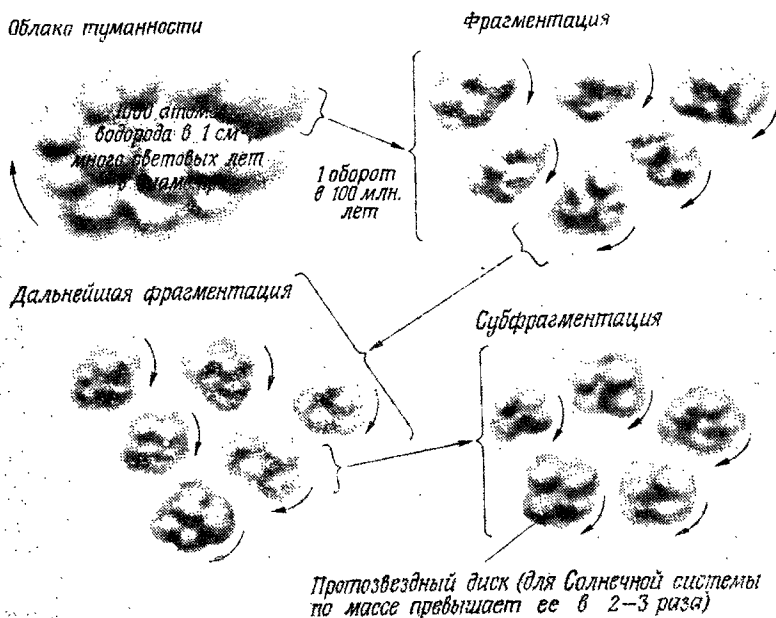


Рис. 3.1. Образование звезд и протопланетных систем путем фрагментации газопылевой туманности.

щества мала. По мере возрастания плотности вещества начинаются новые важные изменения.

Вследствие гравитационных и других флуктуаций крупное облако дробится на облака меньшего размера, которые в свою очередь образуют фрагменты, в конечном счете по своей массе и размерам в несколько раз превышающие нашу Солнечную систему (рис. 3.1). Такие облака называют протозвездами. Конечно, некоторые протозвезды массивнее, чем наша Солнечная система; они образуют более крупные и более горячие звезды, тогда как менее массивные протозвезды образуют меньшие и более холодные звезды, которые эволюционируют медлен-

нее, чем первые. Размеры протозвезд ограничены верхним пределом, выше которого произошла бы дальнейшая фрагментация, и нижним пределом, определяемым той минимальной массой, которая требуется для поддержания ядерных реакций.

Сначала потенциальная гравитационная энергия, превращающаяся в тепло (энергию излучения), в ходе гравитационного сжатия просто излучается наружу. Но по мере того, как плотность вещества возрастает, поглощается все большее количество энергии излучения и в результате возрастает температура. Летучие соединения, первоначально намерзшие на частицах пыли, начинают испаряться. Теперь к H_2 , He и Ne примешиваются такие газы, как аммиак (NH_3), метан (CH_4), пары воды (H_2O) и цианистый водород (HCN). Эти газы поглощают последующие порции энергии излучения, диссоциируют и подвергаются ионизации.

Гравитационное сжатие протекает до тех пор, пока выделяющаяся энергия излучения рассеивается при испарении и ионизации молекул на частицах пыли. Когда молекулы полностью ионизируются, температура быстро возрастает до тех пор, пока сжатие почти прекращается, так как давление газа начинает уравнивать силы тяготения. Таким образом заканчивается фаза *быстрого* гравитационного сжатия (коллапса).

В этот момент своего развития протозвезда, отвечающая нашей системе, представляет собой диск с утолщением в центре примерно того же радиуса, что и Солнечная система, но по массе по крайней мере в три раза превосходящий ее теперешнее значение. Его температуры примерно 10 000—20 000 К в центре и приблизительно 1000 К на уровне орбиты Юпитера.

Такой протозвездный диск продолжает эволюционировать: в нем происходит перестройка и он медленно сжимается. Сама протозвезда постепенно становится все более компактной, более массивной и более горячей, так как теперь тепло может излучаться только с ее поверхности. Передача тепла из глубины протозвезды к ее поверхности осуществляется с помощью конвекционных токов. Область от поверхности протозвезды до расстояния, эквивалентного орбите Плутона, заполнена газопылевым туманом.

В ходе этого сложного ряда сжатий (который, как

полагают, потребовал, самое меньшее, 100 000 лет, а скорее 10 млн. лет) момент количества движения системы должен сохраняться. Вся Галактика, частью которой являются туманности и пылевые облака, вращается с периодом 1 оборот в 100 млн. лет. По мере сжатия пылевых облаков их момент количества движения не может измениться: чем сильнее они сжимаются, тем быстрее вращаются. Благодаря сохранению момента количества движения форма сжимающегося пылевого облака изменяется от сферической к дискообразной. Полагают, что в конечном счете существует возможность образования дисков двух видов: плоских, в форме лепешки, которые дают начало системам двойных звезд, и других — в форме яичницы-глазуньи, в которых образуется единственная звезда и ее планетная система.

Газопылевые частицы в уплотненных периферийных областях вращающейся протозвезды взаимодействуют друг с другом вследствие турбулентности и вязкого трения. В результате вращение внешних областей ускоряется, а вращение центра замедляется. Протозвезда медленно растет путем аккреции, по мере того как все большие количества пыли и газа в замедляющейся внутренней зоне переходят на все уменьшающиеся орбиты.

При наблюдении туманностей, в которых сейчас рождаются звезды, был выявлен уникальный тип звезд, называемый типом Т Тельца. Можно видеть, как из этих звезд с силой выбрасываются обширные облака вещества. Поэтому мы предполагаем, что в свое время в ходе фазы медленного сжатия имело место взрывоподобное истечение солнечного ветра, в ходе которого большое количество вещества протозвезды было «выдуто» обратно в межзвездное пространство. У протозвезды осталось от $\frac{1}{3}$ до $\frac{1}{4}$ ее исходной массы. Это и было то вещество, которое сохранилось для дальнейшей эволюции.

По мере сжатия оставшегося вещества протозвезды его температура становилась достаточно высокой для начала реакции слияния атомов водорода. С притоком большего количества энергии благодаря этой реакции температура становилась достаточно высокой для того, чтобы уравновесить силы дальнейшего гравитационного сжатия. Протозвезда вступала на главную последовательность.

Планеты формировались из оставшихся газов и пыли

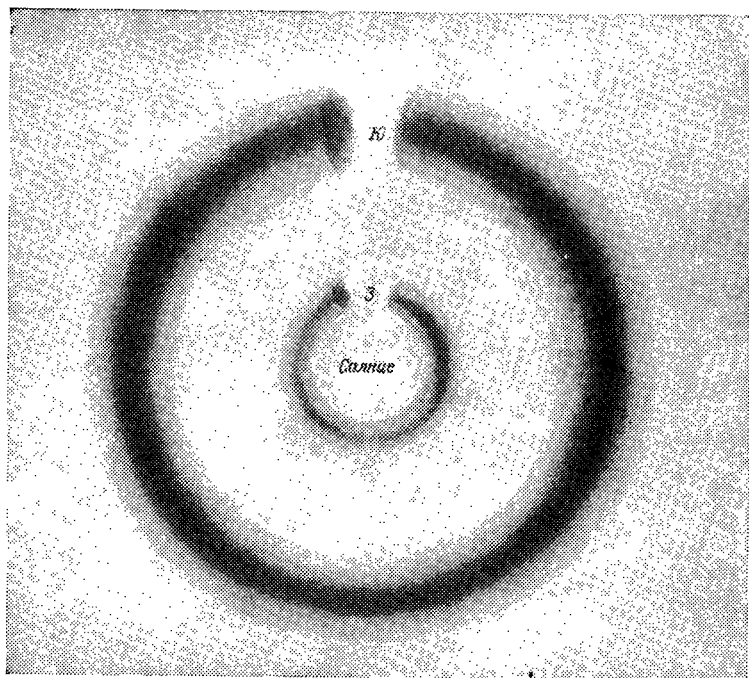


Рис. 3.2. Почему внешние планеты больше? Объем пространства, охватываемого внутренней планетой (З) при ее движении, гораздо меньше объема, охватываемого внешней планетой (Ю). По этой причине внешние планеты должны содержать гораздо больше вещества, если предположить, что газ и пылевые частицы были равномерно распределены по всему протозвездному диску.

на периферии протозвездного диска. Хотя обычно считают планеты массивными объектами, общая масса всех планет составляет всего лишь 0,135% массы Солнечной системы. Наши планеты и, как предполагают, планеты, образующиеся в любом протозвездном диске, располагаются в двух главных зонах. Внутренняя зона, которая в Солнечной системе простирается от Меркурия до пояса астероидов, представляет собой зону мелких планет земного типа. Здесь в фазе медленного сжатия протозвезды температуры настолько высоки, что испаряются металлы. Внешняя холодная зона содержит такие газы, как H_2 , He и Ne, и частицы, покрытые замерзшими летучими веще-



Рис. 3.3. Метеорит Murchison. 28 сентября 1969 г. около г. Мерчисон (Австралия) упал метеорит. Каждый год с Землей сталкивается около 10 000 метеоритов, хотя находят их гораздо меньше. За исключением лунных пород, доставленных «Аполлонами»¹, метеориты — единственный источник доступного для изучения внеземного вещества. Метеориты являются фрагментами агрегатов допланетного вещества: подобные агрегаты варьируют по размерам от пылинок до таких массивных объектов, как астероиды Икар и Церера. (С любезного разрешения НАСА.)

¹ Лунные породы были доставлены также советскими АМС «Луна-16», «Луна-20» и «Луна-24». — Прим. перев.

ствами типа H_2O , NH_3 и CH_4 . Эта внешняя зона с планетами типа Юпитера содержит гораздо больше вещества, чем внутренняя, поскольку она имеет большие размеры (рис. 3.2) и поскольку большая часть летучих веществ, первоначально находившихся во внутренней зоне, выталкивается наружу в результате деятельности протозвезды. Из-за существенно более низких температур внешних областей системы относительное содержание элементов в веществе зоны с планетами типа Юпитера сходно с их содержанием, найденным для туманностей и звезд.

Горячая зона малых планет быстро остывает, ее вещество представлено пылевыми частицами и агрегатами в основном нелетучих, хрупких и плотных материалов земного типа, по большей части лишенных летучих веществ и газов.

Это наиболее вероятная причина, объясняющая наличие в нашей Солнечной системе (и, возможно, в других планетных системах с одной звездой) планет двух типов: внутренних небольших плотных планет земного типа и наружных, холодных крупных и менее плотных планет.

Как только масса протопланеты достигала критического значения, одни гравитационные силы уже не могли больше обеспечивать аккрецию пылевых частиц туманности. Агрегаты небольшого размера (рис. 3.3), вероятнее всего, образовывались за счет слипания пылевых частиц

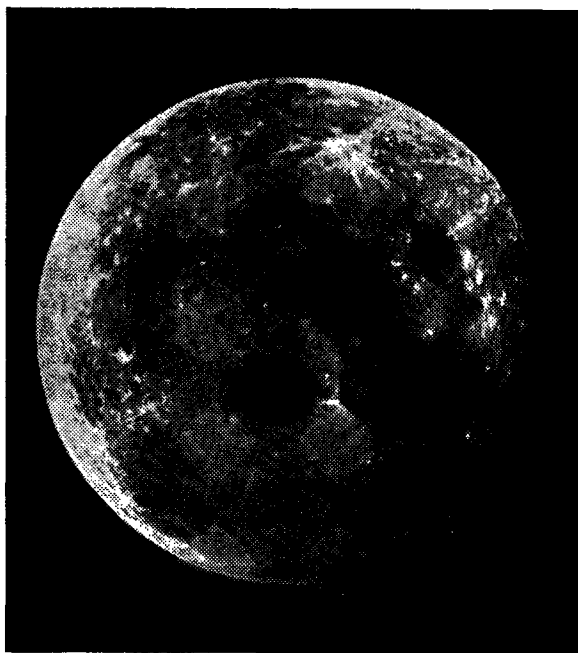


Рис. 3.4. Луна. Ее характерной особенностью являются кратеры всевозможных размеров, возникшие при ударах метеоритов, и расположенные между ними относительно плоские области — моря, которые раньше считали лавовыми потоками или потоками вулканического пепла. Однако скорее всего моря образованы распыленными при ударах метеоритов веществами. Кратеры, возраст которых 4600 млн. лет, отражают процесс образования планеты путем аккреции агрегатов. (С любезного разрешения НАСА.)

покрытых смолистым, клейким органическим веществом и льдом, под действием ферромагнитных и электростатических сил. Все эти факторы, вместе взятые, действовали подобно протопланетному клею и обеспечивали непрерывное образование и рост агрегатов. В то же время флуктуации в излучении энергии протозвезд, готовившейся вступить на главную последовательность, вызывали плавление близлежащих агрегатов. Крупные агрегаты плавились за счет внутренней теплоты, выделявшейся при распаде короткоживущих радиоактивных изотопов, таких, например, как ^{26}Al . (Короткоживущие элементы образовывались в ядерных реакциях во время раннего бурного перехода от протозвезды к звезде. Эти элементы, так же как и многие другие соединения протозвезды, были выброшены, когда протозвезда вступала на главную последовательность.)

Дальнейшее плавление, переплавка и формирование агрегатов привели к образованию планетоидов, масса которых была достаточна для того, чтобы собрать вокруг себя крупные агрегаты за счет гравитационного притяжения. С этой схемой согласуется и наличие кратеров, которые видны на всех планетах земной группы на спутниках Земли и Марса (рис. 3.4).

Планетоид размером с крупный астероид остывал несколько миллионов лет. Планета размера Земли вскоре после образования плавилась, и для остывания и дальнейшей эволюции ей требовалось значительно больше времени.

Вероятно, остатки газа и пылевых частиц, которые удерживались силами гравитации образующихся планет, были выметены сильным солнечным ветром, испускаемым протозвездой на стадии типа Т Тельца. Некоторые из этих выбросов образовывали кометы в нашей Солнечной системе.

В рассмотренной гипотезе образования планетных систем планеты считают нормальным продуктом формирования звезд и их подразделяют на две группы: небольшие плотные планеты типа Земли и крупные менее плотные планеты типа Юпитера.

Есть ли какие-либо доказательства, подтверждающие данную гипотезу? В астрономические оптические приборы нельзя разглядеть планеты вблизи звезд. Как показал

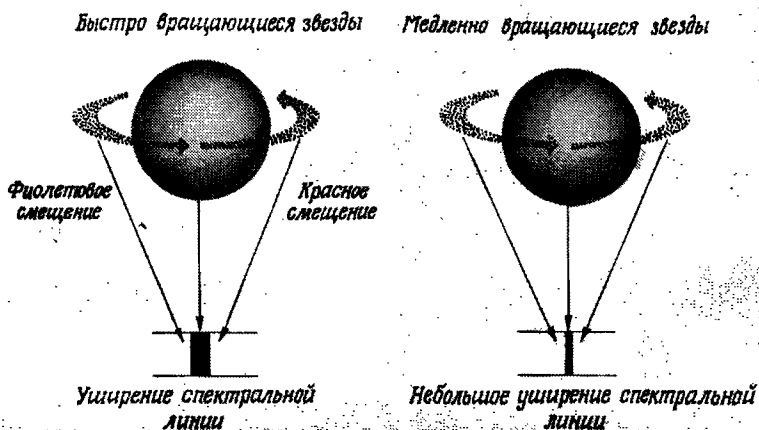


Рис. 3.5. У быстро вращающихся звезд наблюдается значительное уширение спектральных линий, тогда как у медленно вращающихся звезд это уширение гораздо меньше. Для большинства звезд типа Солнца характерно небольшое уширение спектральных линий; следовательно, большинство звезд вращается медленно и имеет планетные системы.

Ван де Камп, можно изучать близкие звезды, такие, как звезда Барнарда, выявляя колебания в собственных движениях, которые можно объяснить только гравитационными взаимодействиями звезды по крайней мере с одной планетой размеров Юпитера. Однако это очень кропотливый метод, и он неприменим к более удаленным звездам.

Убедительные результаты дает спектроскопия. Если справедлива общая теория образования планетных систем, то момент количества движения звезды должен быть малым, а момент количества движения ее планет — большим. Следовательно, если сравнить скорости вращения звезд вокруг своих осей со скоростью вращения нашего Солнца, то можно выявить те звезды, у которых есть планетные системы.

Скорость вращения звезды вокруг своей оси измеряют, применяя эффект Доплера (рис. 3.5). Рассмотрим быстро вращающуюся звезду. Спектр света, излучаемого удаляю-

щимися от наблюдателя участками поверхности, будет смещаться в красную область, а спектр света, излучаемого приближающимися участками, — в фиолетовую. Если измерить ширину любой линии звездного спектра, то она должна быть более широкой для тех звезд, момент количества движения которых велик, и менее широкой для тех, у которых он мал, т. е. звезд, имеющих планеты.

Было обнаружено, что массивные горячие и быстро эволюционирующие звезды вращаются быстро. Звезды спектральных классов от F2 до M, в том числе наше Солнце и более 93% звезд, находящихся на главной последовательности, вращаются медленно. Каким образом был потерян их момент количества движения? По-видимому, он перешел к планетам. В нашей Галактике содержится около 10^{11} звезд, и, согласно этому критерию, почти каждая из них должна иметь планетную систему.



Глава 4

Возникновение и эволюция земной атмосферы

▲ *Извержение вулкана Суртсэй. После этого вулканического извержения вблизи Исландии образовался новый остров из вулканических пород и пепла. Благодаря появлению этого острова биологи получили возможность изучать заселение новых областей различными организмами.*

*Вначале мир был ничто:
Не было ни небес, ни земли,
ни космоса.
Он был ничто и потому по-
мыслил:
Я буду. И извергнул жар.*
(Египетский текст)

Примитивная Земля представляла собой беспорядочный конгломерат сферической формы, состоящий из агрегатов, в значительной части расплавленных благодаря высвобождающейся потенциальной энергии гравитации, распаду короткоживущих радиоактивных изотопов и переносимому потоку излучения Солнца, вступающего на главную последовательность. Газообразной атмосферы не было. Примерно 4000 млн. лет назад Земля состояла по большей части из окислов, солей, карбонатов, карбидов и гидридов металлов и захваченных во внутренние полости летучих веществ, которые первоначально служили в качестве «клея». Вся прошлая и современная атмосфера Земли, так же как и других планет земного типа, образовалась и образуется вулканами, извергающими летучие вещества, которые затем видоизменяются под влиянием окружающих условий.

Голланд на основе изящного теоретического анализа выделил те газы, которые с наибольшей вероятностью могли выделяться на различных стадиях эволюции нашей планеты, но мнения относительно последующей судьбы этих газов в значительной мере расходятся.

Согласно первоначальной аргументации Юри и Опарина, первичная атмосфера состояла из метана, аммиака и воды. Этот вывод впервые был сделан на основе изучения данных о распространенности элементов в космическом пространстве, а также того факта, что водород является относительно наиболее распространенным элементом. Принято считать, что планеты земного типа образуются в основном из устойчивых нелетучих агрегатов, в которых водород хотя и присутствует, но встречается не в очень больших количествах. Обратите внимание, например, насколько редки на Земле другие летучие вещества, в изобилии встречающиеся в космосе, такие, как гелий, неон, криптон, ксенон и радон. Вместе с тем водород должен был бы присутствовать в количествах, достаточных

для полного восстановления всех форм углерода и азота до метана и аммиака в случае достижения равновесия. Однако для наступления химического равновесия требуется время, а на первичной Земле в атмосферу непрерывно поступали новые вулканические газы. И если при температуре извержения 1200°C смесь вулканических газов находится в равновесии, то при температуре атмосферы 25°C она далека от него.

Руководствуясь этими соображениями, некоторые исследователи склонны «начинать» эксперименты по химической эволюции с атмосферы, содержащей перечисленные выше полностью восстановленные соединения. Но эта природа и подчиняется определенному порядку, а в высшей степени сложна, и кажется сомнительным, чтобы в реакциях углерода и азота (испускаемых вулканами в форме окиси углерода, двуокиси углерода и газообразного азота) с водородом образовывались только метан, аммиак и быстро наступило равновесие. Юри выдвинул свою гипотезу в 1953 г.; он рассмотрел и альтернативную точку зрения, согласно которой на пути к равновесию, вероятно, могли бы существовать некие «сложные промежуточные продукты». Практически, по-видимому, разумно представить себе атмосферу первобытной Земли в виде смеси свежих вулканических газов, некоторых высоковосстановленных соединений и смолистых промежуточных продуктов.

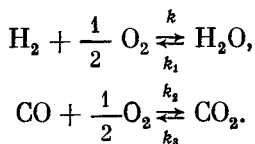
В модели Холланда постулируются три основные стадии. Первая, предшествовавшая формированию земного ядра, называется стадией горячих первичных вулканов. Вторая называется последядерной стадией вулканизма вайского типа, и последняя — биологической. Рассмотрим каждую из них отдельно.

В ходе стадии горячих первичных вулканов, которая, вероятно, продолжалась от 4500 до 4000 млн. лет, ядро Земли еще не сформировалось и внутренняя планета подвергалась быстрым и значительным структурным перестройкам. Вулканическое газовыделение было основным видом активности поверхности Земли в течение 500 млн. лет этого периода. Сегодня мы можем приготовить смеси известных земных минералов, расплавить их при 1200°C — температуре вулканической магмы — и на основе общей химии предсказать вероятные соотношения

различных газов, которые будут выделяться из данной магмы. Это предсказание основано на количестве присутствующего кислорода. Во время доядерной стадии истории нашей планеты металлическое железо, из которого сейчас состоит ядро, было распределено по всему ее объему. Если, следуя Холланду, смешать железо с такими минералами, как кремниевые и магниевые породы современных вулканических расплавов, то можно обнаружить, что давление кислорода в ходе доядерной стадии было крайне низким — $10^{-12,5}$ атм.

Зная количество кислорода в первичных вулканических выбросах и учитывая химическое равновесие, вычисляют соотношение различных, обычно встречающихся вулканических газов и предсказывают, какие газы присутствовали в достаточном количестве при температуре магмы 1200°C .

Рассмотрим следующие обратимые реакции:



Поскольку имеются лабораторные данные о константах скоростей этих реакций (k в вышеприведенных уравнениях), зная количество кислорода, можно вывести соотношения для двух других веществ в каждой из приведенных реакций, так же как в случае любой реакции с участием кислорода.

Когда давление кислорода равно $10^{-12,5}$ атм, отношение водород:вода составляет примерно 2:1, т. е. водорода выделяется в два раза больше, чем водяного пара. Отношение окись углерода:диокись углерода равно при этом примерно 5:1. Метан, как выясняется, представляет собой второстепенный компонент — отношение метан:диокись углерода равно 0,0019:1. В табл. 4.1 дан наиболее вероятный состав газов, выделявшихся вулканами примитивной Земли.

Атмосферное давление газовой смеси рассчитать довольно трудно; вероятно, оно лежало в диапазоне от половины до двух современных значений атмосферного давления.

Состав атмосферы примитивной Земли

Основные газы	Второстепенные газы	Следовые газы
Водород Водяной пар Азот Окись углерода Сероводород	Двуокись углерода Сера	Метан Двуокись серы

Средняя температура поверхности примитивной Земли была близка к современному значению 25°C , а общее давление было довольно высоким. Вода, выделявшаяся в виде паров, конденсировалась и выпадала в виде очень сильных и почти непрерывных ливней. Образовывались неглубокие водоемы и пруды, в которые с дождями попадал вулканический пепел, создававший постоянную красную дымку.

Атмосфера примитивной Земли была ядовитой, хотя и имела все необходимое для того, чтобы в конечном счете появилась жизнь. Человек мог бы находиться на примитивной Земле только в том случае, если бы он дышал через акваланг и был одет в защитный костюм, предохраняющий его от действия ультрафиолетовых лучей Солнца. В формирующихся озерах и водоемах вода была мутной, но пресной, а не соленой; она не успела засолиться, так как еще не произошло заметного выветривания минералов, а ее поверхность была покрыта слоем мелко-го пепла.

Представляя себе химическую обстановку, рассмотрим теперь источники энергии, существовавшие на примитивной Земле. Солнце светило тогда так же, как и сейчас. Но в то время солнечный свет проходил через атмосферу совершенно иного состава. В наши дни атмосфера содержит кислород, запас которого постоянно пополняется фотосинтезирующими растениями. Сейчас в верхних слоях атмосферы кислород сильно поглощает ультрафиолетовое излучение Солнца и образует озоновый слой, кото-

рый поглощает почти все коротковолновое (высокоэнергетическое) ультрафиолетовое излучение. 4500 млн. лет назад это было не так; тогда большая часть солнечного высокоэнергетического ультрафиолетового излучения достигала земной поверхности. Огромные количества фотохимической энергии были в то время доступны для взаимодействия со всеми компонентами атмосферы и их продуктами. Коротковолновое ультрафиолетовое излучение Солнца достигало поверхности Земли с самого начала и до примерно 2000 млн. лет назад, когда биологическим путем образовался свободный кислород. Это излучение было в высшей степени важно для возникновения и эволюции жизни в ходе первых 2500 млн. лет.

Другими источниками энергии, гораздо более мощными в первобытную эпоху, чем сейчас, были электрические разряды и теплота. Для первобытной земной поверхности была характерна высокая вулканическая активность. Жар лавовых потоков, изливавшихся в пруды и озера, создавал разнообразие быстро меняющихся условий и поставлял достаточно энергии для проведения многих реакций синтеза; об этом пойдет речь в гл. 5. Часто проходили сильные ливни, а небо было в облаках вулканического пепла. Почти постоянно происходили грозы, во время которых высвобождались большие количества энергии в виде электрических разрядов как между облаками, так и между облаком и поверхностью Земли.

Все еще в изобилии встречались осколки, оставшиеся после образования планет. В гравитационное поле Земли попадали объекты размерами от пылинок до массивных агрегатов, что вызывало постоянную метеоритную бомбардировку. Значительная часть тепловой энергии высвобождалась при падении и ударах метеоритов, а также при взаимодействии атмосферных ударных волн с поверхностью и атмосферой Земли.

Вещество примитивной Земли в космических масштабах было очень молодым. Короткоживущие радиоактивные элементы распадались, благодаря чему повышалась температура внутренней части Земли и активизировалась вулканическая деятельность. «Фоновая» радиация на поверхности была значительно выше безопасного для живых организмов уровня. Энергия радиоактивных распадов в форме β -частиц, α -частиц и γ -лучей была довольно значи-

тельна. В табл. 4.2 приведены относительные количества энергии, генерируемые разнообразными источниками.

Таблица 4.2

Главные источники энергии на примитивной Земле

Вид или происхождение энергии	Энергия, кал/см ² /год	Относительная энергия
Солнечное коротковолновое	570	712
Ультрафиолетовое излучение		
Электрические разряды	4	5
Радиоактивность	0,8	1
Вулканическое тепло	0,13	0,16
Удары метеоритов	0,05	0,06

Очевидно, что при таком обилии и разнообразии видов энергии газы, выделявшиеся вулканами, должны были вступать в многочисленные сложные реакции. Вопрос о том, к чему приводят происходящие при этом взаимодействия между веществом и энергией, мы обсудим в гл. 5.

После того как в результате радиоактивного распада и гравитационного сжатия внутренняя температура Земли возросла, около 4000 млн. лет назад полурасплавленная внутренняя часть планеты подверглась резкой перестройке. Металлическое железо и никель, ранее находившиеся в верхней мантии в смеси с другими минералами, теперь образовали расплавленное железо-никелевое ядро, поверх которого легли новая мантия и кора. По геохронологическим данным, образование ядра произошло скачком как следствие непрерывного плавления глубоких внутренних областей. После формирования ядра в раннюю эпоху внутреннее строение нашей планеты в течение 4000 млн. лет оставалось, по существу, без изменений (рис. 4.1).

Поскольку при образовании ядра из верхней мантии было удалено много металлического железа, состав вул-

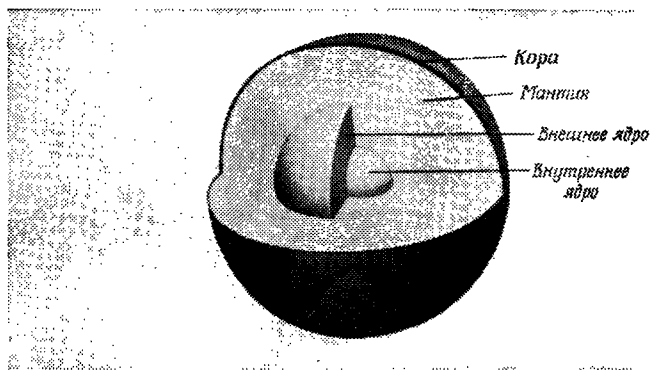


Рис. 4.1. Ядро, мантия и кора Земли.

канических магм сильно изменился, во многих отношениях он стал сходным с составом современных вулканических магм. Расплав состоял в основном из окислов металлов и кремния, таких, как MgO , SiO_2 , FeO и Fe_2O_3 .

Для подобных сплавов было вычислено давление кислорода: оно составляло $10^{-7,1}$ атм. Хотя эта величина все еще очень мала, количество кислорода возросло на этой стадии примерно в 100 000 раз по сравнению с тем, которое было до образования земного ядра.

Эта стадия называется стадией вулканов гавайского типа; с тех пор как произошло образование ядра, минеральный состав мантии и коры сохраняется вплоть до наших дней. Вулканы уже в то время выделяли те же газы, что и сейчас. Подобные черты сходства позволяют проверить теорию, поскольку мы можем вычислить предполагаемые соотношения вулканических газов и сравнить их с современными, которые определены. При таком сравнении выявляется хорошее совпадение.

Как свидетельствуют полученные соотношения, в период гавайской вулканической стадии содержание воды в 100 раз превышает содержание водорода, содержание двуокиси углерода в 40 раз превышает содержание окиси углерода, преобладающей формой серы является двуокись серы, метан почти полностью отсутствует, а азот продолжает выделяться. В табл. 4.3 дан состав вулканического газа в момент его выделения.

Таблица 4.3

**Атмосфера примитивной Земли,
образованная вулканическими газовыми выбросами**

Основные газы	Второстепенные газы	Следовые газы
Водяной пар (в океаны)	Сера	Метан
Двуокись углерода (в океаны)	Окись углерода	Сероводород
Азот		
Двуокись серы		Водород

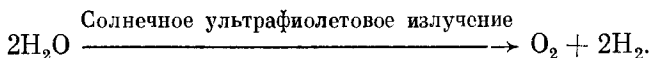
В ходе первых 500 млн. лет стадии вулканов гавайского типа активность была все еще довольно высокой, удары метеоритов становились более редкими, океаны сохраняли свои размеры и высокую концентрацию соли, а электрические разряды были очень частыми. Все еще преобладало большинство форм энергии, присущих предыдущей эре, включая коротковолновое ультрафиолетовое излучение Солнца. Важным аспектом этой стадии было то, что в результате воздействия различных форм энергии исходный газовый состав атмосферы изменился: водные пары сконденсировались в форме дождей, углекислый газ в больших количествах растворялся в быстро возникающих океанах, а азот накапливался в атмосфере. В ходе быстрого формирования океанов атмосфера, вероятно, состояла главным образом из газообразного азота и двуокиси углерода, содержание которой было 0,03% (т. е. такое же, как в настоящее время), и лишь следовых количеств других газов. Присутствующий в небольших количествах водород, по-видимому, быстро соединялся с двуокисью серы, образуя сероводород, или был утрачен вследствие утечки водорода из верхних слоев атмосферы.

Рассматриваемая выше стадия эволюции атмосферы началась 4000 млн. лет назад и продолжалась примерно 1500—2000 млн. лет; она завершилась к тому моменту, когда началось биологическое образование кислорода.

В ходе этого длительного временного промежутка физические условия окружающей среды постепенно изменялись: вулканическая активность падала, объем и соленость океанов увеличивались, частота метеоритной бомбардировки уменьшалась. Но на Землю продолжало поступать высокоэнергетическое ультрафиолетовое излучение Солнца. В таких условиях возникла жизнь, однако появившаяся живая материя была не способна к образованию кислорода путем фотосинтеза. Таким образом, атмосфера того периода, во многом сходная с современной, кардинально отличалась от последней — в ней не было свободного кислорода.

Именно к этому времени относятся древнейшие осадочные породы, что свидетельствует о формировании постоянных океанов. Первые из известных осадочных пород имеют возраст около 3800 млн. лет. Химические данные об этих породах подтверждают наши представления об условиях того времени. Отложения, древнее 4000 млн. лет, представлены только кристаллическими породами; это свидетельствует о том, что в существовавших в то время мелких прудах и озерах вулканический пепел, обломки пород и другие осадки еще не успели собраться, перемешаться и сконцентрироваться, для того чтобы формировать осадочные породы.

Третья, и последняя, стадия эволюции атмосферы, называемая биологической, характеризуется образованием свободного кислорода. Кислород обладает высокой реакционной способностью; он соединяется с различными элементами пород и свободно реагирует с такими вулканическими газами, как окись углерода, двуокись серы и водород. В отсутствие жизни в атмосфере могли бы сохраниться лишь следовые количества кислорода, и, действительно, в этих условиях кислород постепенно образуется и расходуется. Его образование является результатом фотодиссоциации воды. В атмосфере на больших высотах водяной пар подвергается воздействию ультрафиолетового излучения Солнца:

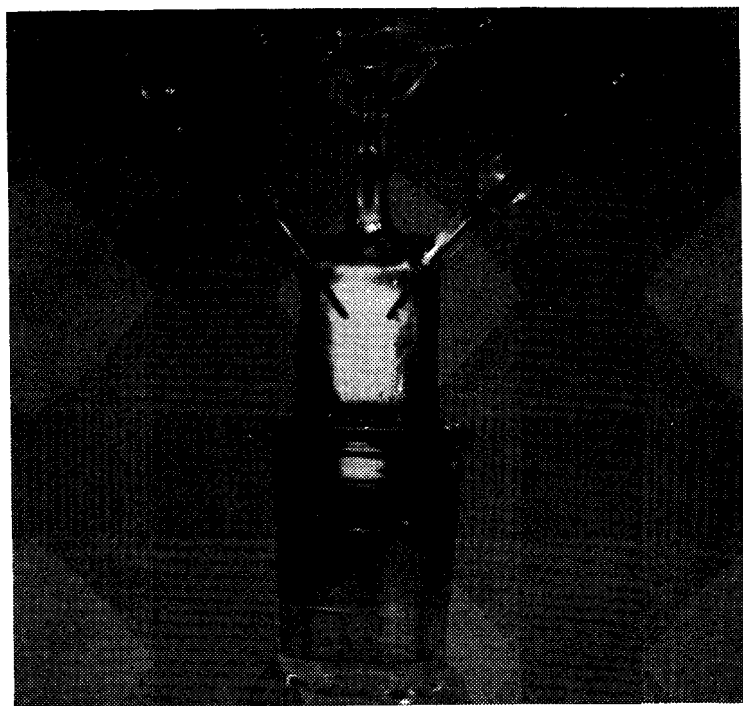


На этих высотах газообразный водород улетучивается с Земли, а кислород остается в свободном состоянии и спо-

собен вступать в реакции с минералами и газами, имеющими меньшую степень окисления. Таким путем постоянно образуется около $2 \cdot 10^{12}$ г кислорода в год. На первый взгляд это число кажется большим, однако, если мы вспомним, что современные фотосинтезирующие растения образуют в год в общей сложности около $181 \cdot 10^{20}$ г кислорода, то первая цифра уже не будет производить на нас особого впечатления. В действительности из указанного количества кислорода, образующегося при фотосинтезе, в современной атмосфере остается только $12 \cdot 10^{20}$ г. Остальные $171 \cdot 10^{20}$ г в год используются в процессах выветривания. Остаток, который сразу не используется при выветривании, составляет 20%-ный (по объему) уровень кислорода, постоянно присутствующего в атмосфере.

Атмосфера, содержащая свободный кислород, начала эволюционировать около 2000 млн. лет назад, когда у фотосинтезирующих организмов развилась способность использовать видимый свет как источник энергии и воду как донор электронов. Кислород является побочным продуктом протекающих при этом процессов. Сведения о присутствии свободного кислорода сверх тех следовых количеств, которые образуются при фотодиссоциации, были получены при изучении состояния окисления железа в осадочных породах. Было показано, что породы моложе 2000 млн. лет характеризуются гораздо большей степенью окисления, чем более древние.

Накопление свободного кислорода в атмосфере, вероятно, проходило линейно с 2000 млн. лет назад до 600 млн. лет назад, когда возникли сложные многоклеточные формы жизни. После того, как в атмосфере накопился свободный кислород фотосинтетического происхождения, он должен был поглощать ультрафиолетовое излучение Солнца и создавать озоновый (O_3) слой. В результате солнечное ультрафиолетовое излучение внезапно перестало достигать поверхности Земли. Хотя это излучение обеспечивает протекание химических реакций, оно способно также разрушать органические соединения и биологические системы. Формирование озонового экрана было одним из самых значительных событий в истории природной среды, поскольку оно позволило развиваться земным биологическим системам.



Глава 5

Химическая эволюция

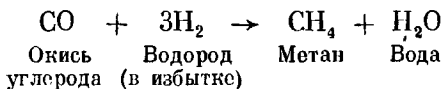
▲ Эксперимент Юри — Миллера с искровым разрядом. В этом эксперименте смесь метана, аммиака и водяных паров в двухлитровой колбе подвергается воздействию постоянного электрического разряда между двумя электродами. Обратите внимание на интенсивное отложение полимерного вещества на поверхности стекла. (С любезного разрешения НАСА.)

...спина змеи
 Без хвоста и чешуи,
 Песья мокрая ноздря
 С мордою нетопыря,
 Лягушиное бедро
 И свиное перо,
 Ящериц помет и слизь
 В колдовской котел вались!

Шекспир. Макбет ¹

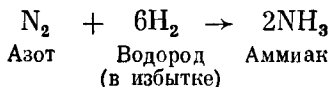
В начале существования Земли, около 4500 млн. лет назад, на поверхности земной коры формировались мелкие озера и пруды с пресной дождевой водой, содержащие вулканический пепел. Температура на ее поверхности была комнатной — около 25°C. Вулканическая деятельность, грозы, падения метеоритов, высокоэнергетическое ультрафиолетовое излучение Солнца — все эти процессы были очень интенсивными, и все виды энергии имелись в изобилии. В атмосфере присутствовали главным образом азот, окись углерода, водород и водяной пар.

При изменении условий изменялись и газы, содержащиеся в атмосфере. Химические реакции были обратимы и зависели от окружающих условий. Например, в реакции



количество образующихся продуктов определяется количеством исходных веществ и температурой окружающей среды. Можно подсчитать, что если водород находится в избытке, то при комнатной температуре практически вся окись углерода быстро превращается в метан.

Аналогичным образом в реакции



почти весь азот превращается в аммиак.

Проанализировав уравнения этих реакций, скорости которых известны, можно было бы прийти к заключению, что атмосфера состояла из метана и аммиака. Однако это

¹ Перевод В. Пастернака.

чересчур упрощенный подход; известно, что при исследовании ранних горных пород не было найдено никаких свидетельств в пользу существования метан-аммиачной атмосферы. Если бы метан находился в изобилии, он быстро превратился бы во всевозможные углеводороды и нефть и эти продукты обнаруживались бы в виде отложений химически видоизмененных углеводородов и графита в толще ранних пород. Но подобных отложений там нет.

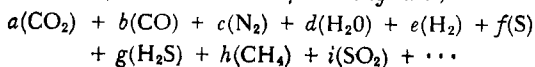
Если бы в атмосфере присутствовал аммиак, то он быстро растворялся бы в водоемах с образованием гидроксида аммония — сильного основания — и тогда пруды и озера были бы гораздо более щелочными, чем сейчас. Вместе с тем известно, что ранние породы содержат силикаты, которые не могли бы осаждаться в столь щелочных условиях. К тому же, если бы в атмосфере в самом деле был аммиак, он быстро разложился бы под действием солнечного ультрафиолетового излучения.

Значит, наши уравнения неверны? Нет, они просто не отражают фактического положения дел. Трудность состоит в том, что каждое из приведенных выше уравнений соответствует некоторым нереальным условиям и каждая реакция рассматривается изолированно. В действительности же все компоненты атмосферы находились в смеси друг с другом, взаимодействовали между собой и с продуктами реакции во всевозможных комбинациях. Реальные сложные природные условия иллюстрирует схема, представленная на рис. 5.1.

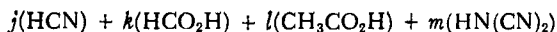
В природе вряд ли найдутся условия, при которых отдельная реакция протекала бы изолированно до своего полного завершения. При протекании реакции между участвующими в ней компонентами возможны различные взаимодействия, что за короткое время приводит к образованию самых разнообразных и весьма сложных соединений. К таким соединениям относятся «смолистые промежуточные продукты», которые, как предполагает Юри, могли образоваться из упомянутых выше исходных веществ. Остальные продукты представляли собой самые различные органические соединения, послужившие основой возникновения жизни на Земле.

Можно ли проводить модельные эксперименты, не зная точного состава исходной атмосферы? Реально со-

Газы, выделяющиеся из первичных вулканов,



При воздействии различных видов энергии реагируют с образованием разнообразных малых органических соединений

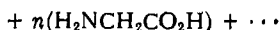


Цианистый
водород

Муравьиная
кислота

Уксусная
кислота

Дицианамид



Глицин



При воздействии различных видов энергии реагируют с образованием более сложных органических соединений

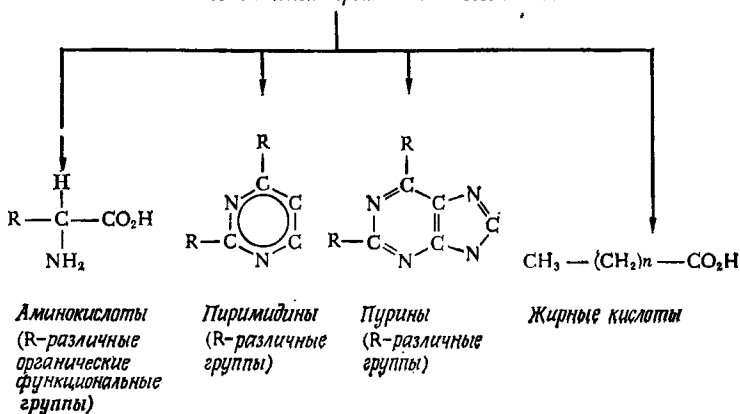


Рис. 5.1. Схема процесса выделения газов из первичных вулканов. Строчные латинские буквы указывают на количества тех или иных компонентов.

став первичной атмосферы постоянно менялся; это была меняющаяся, словно в калейдоскопе, смесь свежих вулканических газов и летучих продуктов реакций, в которых они участвовали. В то же время свойства всех образующихся продуктов зависели в основном от единственного газа — водорода, причем водород был главным продуктом вулканических газовых выделений. Как мы увидим далее, в реакциях, протекающих при воздействии различных источников энергии на любую газовую смесь, содержащую водород, образуются одни и те же продукты.

Судьба первичных вулканических газов зависела от двух факторов: во-первых, от скоростей реакций и взаимодействий газов и их разнообразных продуктов с различными видами энергии, т. е. факторов, определяющих химическую эволюцию, во-вторых, от скорости утечки водорода из верхних слоев атмосферы. Сила тяготения Земли недостаточна, для того чтобы удерживать водород в верхних пределах атмосферы при существовавших температурах, и поэтому водород с постоянной скоростью исчезал из атмосферы, т. е. атмосфера эволюционировала с образованием различных продуктов.

С 1897 г. было проведено множество модельных экспериментов, на основании которых пришли к заключению, что при воздействии энергии на первичные газы образуется большой набор органических соединений, синтезированных случайным образом. Кроме того, в состав этого большого набора небιологических соединений должен входить набор малых органических молекул, необходимых для биологической эволюции. Ниже мы опишем несколько классических экспериментов по химической эволюции, подтверждающих это общее заключение.

В 1953 г. Миллер и Юри из Чикагского университета придумали систему для прямого эксперимента, в котором метан, аммиак и вода подвергались действию электрического разряда. Правда, искровые разряды не относятся к наиболее распространенным видам первичной энергии, каким, например, является солнечное ультрафиолетовое излучение, но если бы они воспользовались последним, то это очень осложнило бы эксперимент. Известно, что химические связи могут образовываться и разрушаться при воздействии любых видов энергии.

Аппарат Миллера — Юри изображен на рис. 5.2. После

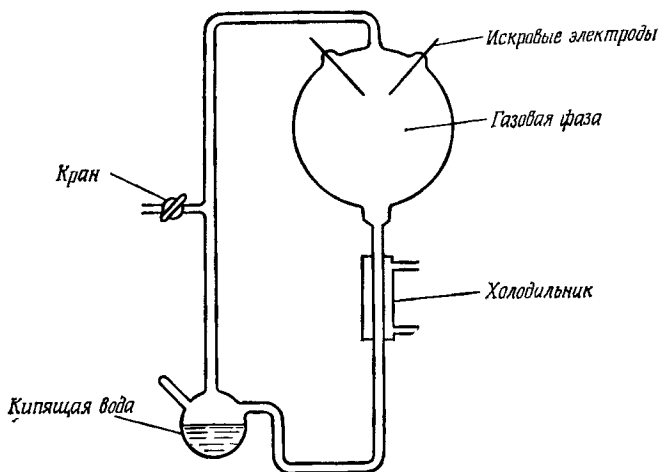


Рис. 5.2. Аппарат Юри — Миллера для экспериментов с искровыми разрядами.

откачивания воздуха в реакционную камеру впускают газы — метан и аммиак. Кипящая вода служит источником водяного пара, а с помощью холодильника поддерживается циркуляция газовой смеси через сосуд, в котором расположены искровые электроды. После непрерывного пропускания искры в течение нескольких дней при напряжении 60 000 В, что по количеству энергии эквивалентно периоду 50 млн. лет на примитивной Земле, водную фазу подвергли химическому анализу для выявления образовавшихся органических соединений.

Разделение, идентификации и количественная оценка органических соединений в смеси — долгая и трудоемкая задача. Но затраты труда окупаются тем, что при этом было обнаружено очень много самых разнообразных малых органических молекул. Среди них — аминокислоты, из которых построены белки живых организмов, и другие малые соединения, такие, например, как молочная кислота, участвующая в биологической утилизации сахаров. Список некоторых из этих соединений приведен в табл. 5.1. Сразу же бросается в глаза, что очень многие биологически важные соединения образуются с большой легкостью

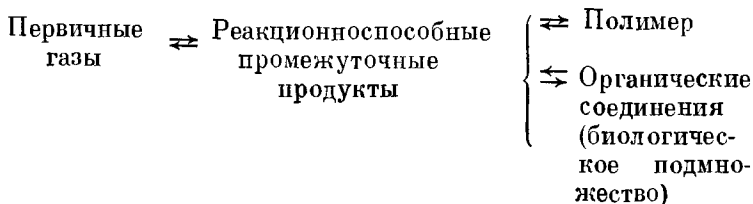
и в изобилии. Найдены также малые органические соединения, которые не используются повсеместно в биохимических процессах, и большое число высокореакционноспособных очень простых соединений, таких, как цианистый водород, муравьиная кислота, уксусная кислота, мочевина и цианамид.

Таблица 5.1

Простые органические соединения, полученные при пропускании искры через смесь CH_4 , NH_3 и H_2
(выход дан по отношению к муравьиной кислоте)

Соединение	Относительный выход
Глицин	270
Саркозин	21
Аланин	145
N-метилаланин	4
β -Аланин	64
α -Амино-п-масляная кислота	21
α -Аминоизомасляная кислота	0,4
Аспарагиновая кислота	2
Глутаминовая кислота	2
Иминодиуксусная кислота	66
Иминоуксусная—пропионовая кислота	6
Молочная кислота	133
Муравьиная кислота	1000
Уксусная кислота	64
Пропионовая кислота	56
α -Оксимасляная кислота	21
Янтарная кислота	17
Мочевина	8
N-метилмочевина	6

Общий ход подобных реакций, запускаемых в результате воздействия энергии искрового разряда, можно записать в виде



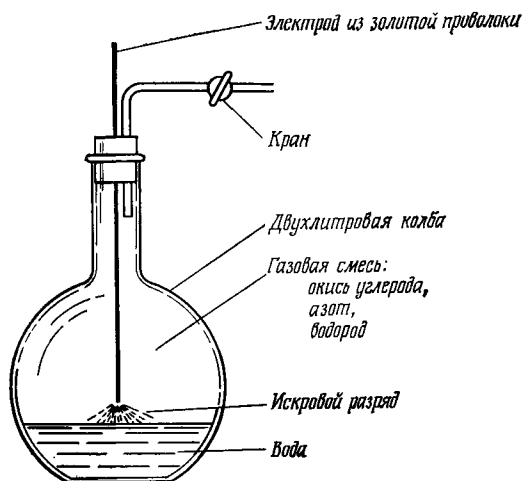


Рис. 5.3. модифицированный эксперимент Юри — Миллера с искровым разрядом. Двухлитровая колба, содержащая небольшое количество воды, соединена с единственным электродом и имеет наверху кран. Через кран удаляется воздух и вводится газовая смесь. Высоковольтная катушка (30 000—60 000 В) соединяется с единственным верхним электродом и разряжается над водной поверхностью. После пропускания разряда в течение нескольких дней реакционный сосуд можно непосредственно соединить с приборами, определяющими виды образовавшихся летучих продуктов. Можно также открыть сосуд и подвергнуть химическому анализу образовавшиеся нелетучие продукты, растворимые в воде. Двое суток пропускания искры по притоку энергии эквивалентны 40 млн. лет примитивной Земли.

С 1953 г. подобные эксперименты проводили многие исследователи, которые использовали при этом разные газы и разные источники энергии (рис. 5.3). Они усовершенствовали многие методы органического химического анализа. Всегда, когда исходная смесь газов содержит углерод (в составе какого-либо газа), азот, воду и немного водорода, общий ход реакций одинаков. В результате образуются реакционноспособные промежуточные соединения, широкий набор малых органических соединений и полимерное вещество. Процесс отличается низкой энергетической эффективностью, однако нет оснований предполагать, что она должна быть высокой, поскольку в то вре-

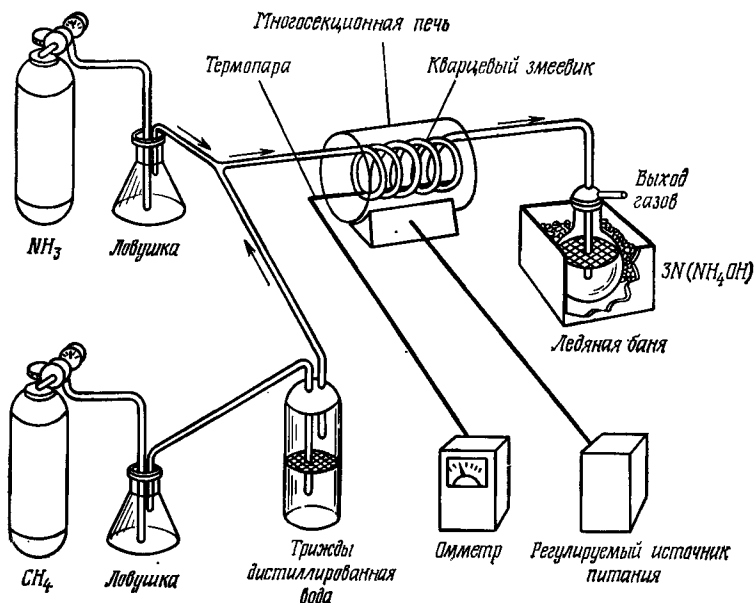


Рис. 5.4. Эксперимент по термическому синтезу. Метан, аммиак и водяной пар проходят через трубку, находящуюся в печи. Трубку содержит порошкообразные металлические катализаторы и нагревается до 900°C . Газы реагируют, образуя нелетучие продукты, которые улавливаются на выходе трубки.

мя различные виды энергии были доступны в достаточно больших количествах.

Искровые разряды в газовых смесях представляют собой лишь одну из форм притока энергии в первобытных природных условиях. К другим формам относятся ультрафиолетовое излучение, тепло (рис. 5.4), ударные волны, β - и γ -излучения (рис. 5.5) и космические лучи. Были поставлены эксперименты с использованием этих видов энергии и различных смесей первичных газов.

Группа Андерса в Чикагском университете изучала реакции типа Фишера — Тропша, в которых газовые смеси нагреваются до высоких температур ($600\text{--}900^{\circ}\text{C}$) в закрытых сосудах в присутствии руд различных металлов как катализаторов. В этих экспериментах имитируются реакции между газами примитивной атмосферы и часты-

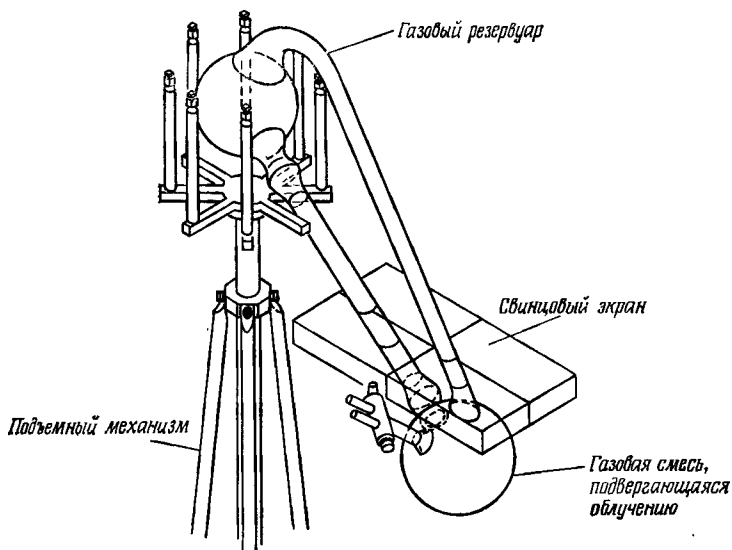


Рис. 5.5. Аппарат для γ -облучения метана, аммиака и воды. Метан, аммиак и водяной пар вводятся в прибор через край в нижней колбе, помещенной на пути γ -лучей, испускаемых источником; колба экранирована свинцовой пластинкой. Верхняя колба в дальнейшем служит источником газов и резервуаром, не доступным излучению. В ней продукты синтезов могут накапливаться, не подвергаясь разрушению под действием радиации.

ми лавовыми потоками. В модельных экспериментах было выделено множество самых разнообразных органических молекул. Были обнаружены не только аминокислоты, но и углеводороды, предшественники сахаров, основания нуклеиновых кислот, жирные кислоты и реакционноспособные промежуточные соединения. В табл. 5.2 дана сводка результатов, полученных в ряде подобных экспериментов.

Как показал Бар-Нун, ударные волны, сравнимые с волнами, возникающими при падении метеоритов, могут воздействовать на газообразные компоненты, в результате чего образуются аминокислоты и реакционноспособные промежуточные соединения.

В качестве источника энергии использовалось также излучение гигантского дугового разряда в аргоне, имити-

Таблица 5.2

Некоторые органические соединения, образующиеся в реакциях типа Фишера—Тропша при нагревании газов CO, H₂ и NH₃ до 900°C с металлическими катализаторами

<i>«Биологические» аминокислоты</i>	<i>«Биологические» азотистые основания</i>	<i>Жирные кислоты</i>
Глицин	Аденин	Все виды, содержа- щие от C ₁₂ до C ₂₀
Аланин	Гуанин	
Валин	Ксантин	Углеводороды
Лейцин	Тимин	
Изолейцин	Урацил	Широкое разнообра- зие углеводов, с- ходных с выделе- нными из углистых метеоритов
Аспарагиновая кис- лота		
Глутаминовая кисло- та	<i>«Небиологические» азотистые основания</i>	
Тирозин	Меламин	
Пролин	Аммелин	
Орнитин	Циануровая кислота	
Лизин	Гуанилмочевина	
Гистидин		
Аргинин	<i>Малые реакционно- способные молекулы</i>	
<i>«Небиологические» аминокислоты</i>		
N-метилглицин	Цианистый водород	
β-Аланин	Формальдегид	
α-Аминоизомасляная кислота	Муравьиная кислота	
α-Аmino-н-масляная кислота	Уксусная кислота	
β-Аминоизомасляная кислота	Мочевина и сходные соединения	
γ-Аминоизомасляная кислота	Гуанидин и сходные соединения	

рующее высокоэнергетическое ультрафиолетовое излучение Солнца, которое через окно из фторида магния попадало в смесь исходных газов, в результате чего происходил синтез аминокислот, полимеров и многих других соединений.

В качестве источника энергии радиоактивного распада можно использовать ускоритель электронов. В группе Кальвина в Беркли облучали смеси метана, аммиака и

воды и обнаружили в них реакционноспособные промежуточные соединения и ряд соединений, участвующих в биологических процессах, в том числе аденин.

Во всех проведенных экспериментах были получены в общем сходные результаты, подтверждающие теорию химической эволюции. Было показано, что при воздействии всех видов энергии на газообразные углерод, азот, воду и водород сначала происходит синтез реакционноспособных промежуточных соединений. Эти соединения дают затем множество биологических и близких к биологическим органических компонентов. Для того чтобы судить о процессах на примитивной Земле, необходимо рассматривать не один отдельно взятый эксперимент, а всю их совокупность. Заметим также, что наряду с малыми органическими молекулами в смеси всегда находят полимер. В табл. 5.3 приведен список примеров реакцион-

Таблица 5.3

Продукты, образующиеся в экспериментах по химической эволюции

Газы					
H_2O	CO	CO_2	H_2	CH_4	N_2 NH_3
↓					
Реакционноспособные промежуточные продукты					
HCN	HCN		HCN		
Цианистый водород	Формальдегид		Муравьиная кислота		
$HN(CN)_2$	$HOCH_2CHO$		CH_3CO_2H		
Дидианамид	Гликолевый альдегид		Уксусная кислота		
↓					
Малые органические соединения					

Аминокислоты: сотни, в том числе «биологические»

Жирные кислоты: все виды, содержащие от C_{12} до C_{20}

Углеводороды: сложная смесь

Азотистые основания: урацил, цитозин, тимин, аденин, гуанин, ксантин, гипоксантин, триазины

Другие малые органические соединения: мочевины и ее производные, гуанидин и его производные, моко- и дикарбоновые кислоты

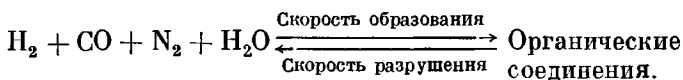
Полимер

неспособных промежуточных соединений и малых органических соединений, образующихся в экспериментах по реконструкции первобытных условий.

Глубоко и подробно изучая небиологический (модельный) синтез аминокислот, группа Миллера из Ла Холлы и группа Лоулесса из исследовательского центра НАСА в Эймсе обнаружили, что в ходе синтеза образуются *все* возможные виды аминокислот. В состав синтезированных аминокислот входят равные количества зеркально отображаемых L- и D-форм, а также большинство «биологических» аминокислот.

Итак, проведенные эксперименты подтверждают идею химической эволюции — представления, согласно которому все малые органические молекулы, обычно используемые в биологических процессах, образуются из более простых компонентов при воздействии на них различных видов энергии.

Какова дальнейшая судьба новосинтезированных органических веществ, появившихся на первобытной Земле? Некоторые летучие вещества, такие, как HCN и формальдегид, остались по большей части в атмосфере и в частично растворенном состоянии в водоемах. Другие, в том числе аминокислоты и азотистые основания, в основном растворились в водоемах. Углеводороды и жирные кислоты с длинной цепью плавали на поверхности воды в виде пленки. Под действием ультрафиолетового излучения Солнца и других видов энергии наряду с синтезом органических соединений происходило также их разрушение. Это привело к стационарному состоянию — переходу компонентов из газовой смеси в органические соединения и обратно:

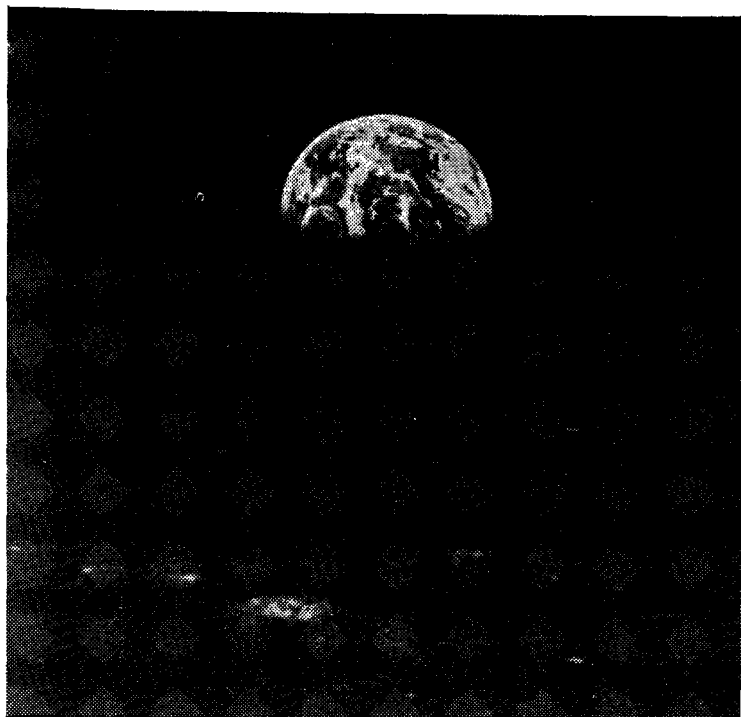


Скорости обеих реакций зависят от притока энергии.

Вычисления, проведенные для определения количества аминокислот, растворенных в водоеме в стационарном состоянии, дают очень низкие значения — порядка 10 миллионных долей грамма на литр для любой из аминокислот. Такой водоем, конечно, не может быть «органическим бульоном», богатым низкомолекулярными предшественни-

ками, способным к взрывообразному рывку, обеспечивающему развитие жизни. Скорее это необыкновенно разбавленное «сусло», содержащее органические соединения и немного ионов металлов. По-видимому, некоторая часть присутствовавших там полимерных веществ опускалась на дно мелководья, а поверхность сплошь покрывалась тончайшим маслянистым налетом.

Казалось бы, ничтожная концентрация органических соединений в водоеме является непреодолимой преградой на пути к возникновению жизни, поскольку для большинства биологических процессов необходима более концентрированная среда, чем наш гипотетический водоем. Однако, как мы увидим в гл. 7, благодаря многочисленным процессам возникновение жизни все же возможно в экологических нишах, подобных рассматриваемому нами водоему.



Глава 6

Определение жизни

▲ Вид Земли с окололунной орбиты. (С любезного разрешения НАСА.)

*Варкалось. Хливкие шорьки
Пырлялись по наве,
И хрюкотали зелюки,
Как мюмзики в мове.*

Льюис Кэрролл¹

Понятие «жизнь» очень трудно целиком и полностью определить; с какой бы стороны мы ни пытались к нему подойти, всегда остается ощущение, что оно ускользает от нас. Можно последовать феноменологическому подходу и составить список свойств живого: живое существо движется, ему присущи функции выделения, питания и метаболизма, оно растет, воспроизводит себе подобных и т. д. Трудность, с которой сталкиваются при использовании этого подхода, состоит в том, что из подобного списка всегда найдутся исключения, ставящие под угрозу само определение. Такое определение — в виде произвольного списка свойств — вряд ли является фундаментальным. Например, в случае вируса, растущего кристалла, бактериальной споры или сложной, обладающей искусственным разумом вычислительной машины оно оказывается неудовлетворительным.

Оригинальный и успешный подход к проблеме определения жизни был разработан Онзагером и Моровицем, и мы будем ему следовать. Одно из основных затруднений в определении жизни состоит в том, что мы настолько близки к живой природе и сами в какой-то степени принадлежим к ней, что существенные черты жизни оказываются скрытыми за массой второстепенных подробностей. В действительности же, если мысленно выйти за пределы нашей сине-зеленой планеты и взглянуть на нее со стороны, то главной и единственной нитью, связывающей друг с другом все живые системы, окажется экологическое равновесие. Жизнь — это экологическое свойство, она лишь на короткий миг проявляется как свойство индивидуума.

Экологические процессы отражают единство разнообразных сложных биологических систем, непрерывно вступающих друг с другом в самые различные, чрезвычайно сложные взаимоотношения; их объединяет общая тенденция: как можно полнее использовать то, что окружающая среда предоставляет им в виде сырья и энергии. Экологи-

¹ Перевод С. Я. Маршака.

ческий подход к определению живого позволяет нам, устранив частности, выявить главное.

Сформулируем и затем проанализируем определение жизни, данное Онзагером и Моровицем.

Жизнь есть свойство материи, приводящее к сопряженной циркуляции биоэлементов в водной среде, движимой в конечном счете энергией солнечного излучения по пути увеличения сложности.

Правда, из этого определения никак не следует уникальность человека, но обладает ли он ею на самом деле? Подобное определение имеет ряд важных преимуществ, поскольку каждое его положение может быть подвергнуто экспериментальной проверке. Оно основывается на недавно сформулированной в биологической науке общей теории, согласно которой поток энергии, текущий через систему, стремится организовать, усложнить ее. Это определение экологическое, оно ориентировано на систему в целом — циркуляция биоэлементов не может осуществляться без участия первичных продуцентов, консументов и деструкторов. Экологическое единство есть сумма всевозможных действий, производимых растениями, животными и микроорганизмами.

Что произошло бы, если с нашей планеты по волшебству исчезли все растения? Очень скоро в атмосфере не осталось бы свободного кислорода, озоновый экран был бы уничтожен, и большинство живых существ, если не все, перестали бы существовать. Если бы исчезли все микроорганизмы, остановился бы возврат биоэлементов в их природные циклы: ничто не могло бы распадаться и тем самым обеспечивать поддержку последующим поколениям. Мы все зависим друг от друга.

Теперь, приняв приведенное выше определение жизни, мы можем по-новому, более точно сформулировать вопрос «Как возникла жизнь?», а именно:

Как возникла сопряженная циркуляция биоэлементов в водной среде, движимая в конечном счете энергией излучения по пути увеличения сложности?

Прежде всего более подробного анализа требует понятие «биоэлементы». К биоэлементам относятся углерод, водород, азот, кислород, фосфор и сера (CHNOPS). По-

чему именно эти, а не другие? Почему основой жизни не стал кремний, а основой дыхания — фтор? Все биоэлементы присутствуют в космосе в достаточном количестве, и каждый из них незаменим для той функции, которую он выполняет. Эти элементы, за исключением, может быть, фосфора, представляли собой газы и изначально были той формой вещества, на которую воздействовала энергия излучения в первую очередь. Все, что было в наличии — С, Н, N, О и S в виде газов, — должно было реагировать, где и как только возможно, и поэтому мы такие, какие мы есть. Нет никаких оснований ожидать чего-либо иного для любой другой планеты земных размеров, находящейся в соответствующей области температур относительно своей звезды. Почему не кремний? Потому, что этот элемент все время участвует в построении кристаллических пород. Кремний не имеет газообразной формы, на которую могла бы воздействовать энергия излучения. Какой бы организм мы ни анализировали, результат всегда будет одним и тем же: более 90% его массы составляют биоэлементы CHNOPS.

Обязательное паличие водной среды — другое непременное и повсеместное биологическое свойство живого. Те биологические системы, в которых жизненные процессы замерли, такие, как споры бактерий и водорослей или яйца рачка *Artemia*, не функционируют и содержат мало воды. Все функционирующие системы состоят в основном из воды. Биохимические реакции протекают в воде, поскольку большинство органических соединений из биологического подмножества водорастворимы. Те органические соединения, которые были летучими, рассеивались в атмосфере, где реагировали и распадались под действием энергии излучения. Те же, которые не растворялись в воде, погружались на дно водоемов и не участвовали в дальнейших взаимодействиях. В водном растворе оставались преимущественно водорастворимые органические вещества. Таково наследство, которое оставила нам первичная экологическая обстановка.

Понятие «сопряженная циркуляция биоэлементов» требует некоторого пояснения. И на Земле, и в других местах Вселенной существуют небиологические циклические превращения материи, движимые энергией излучения. Например, кислород может образовываться благодаря фотодис-

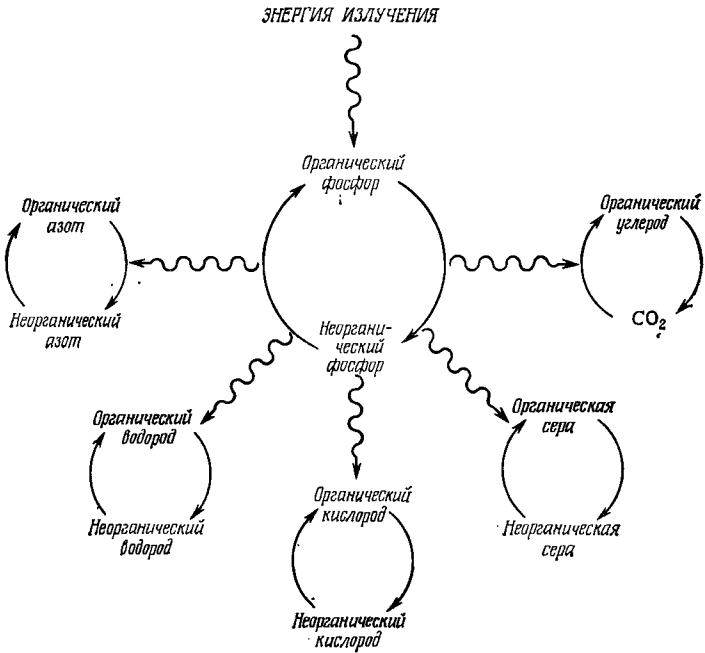


Рис. 6.1. Онзагеровские сопряженные круговороты биоэлементов. Энергия излучения является движущей силой круговорота фосфора. Все остальные круговороты биоэлементов подключены к этому круговороту и благодаря этому работают с присущими им скоростями.

социации воды и затем реагировать с водородом вулканического происхождения, вновь появляясь в составе воды. В биологических системах также происходят циклические превращения вещества, но они отличаются от аналогичных превращений в небиологических системах тем, что все они сопряжены друг с другом. Это можно наблюдать в процессе роста организмов — закономерного, упорядоченного возрастания их размеров и количества всех компонентов. Такое же сопряжение биоэлементов имеет место и в экологических процессах в масштабе всей планеты (рис. 6.1). Цикл фосфора приводится в движение энергией излучения. С каждым оборотом этого цикла во всех ос-

тальных циклах также происходят превращения с присутствием их скоростями.

«Движимая энергией излучения» означает, что в конечном счете всеми биологическими системами движет энергия видимого излучения Солнца. Ни биологический круговорот фосфора, ни какой-либо другой круговорот не совершается самопроизвольно; их движущей силой является солнечная энергия, которая участвует в этих процессах либо непосредственно, как в случае фотосинтеза, либо косвенно, как в случае поедания растений травоядными животными. Энергия, подобно времени, — сложное понятие, которое поддается измерению только в ходе его взаимодействия с веществом: оно ускользает от нас, как только мы стремимся проникнуть в его сущность. Фактом остается то, что энергия вызывает превращения состояний вещества. Когда эти превращения сопряжены, как они сопряжены для биоэлементов, мы имеем дело с биологической системой — так говорит наш опыт.

Вероятно, наиболее существенный, интуитивно очевидный и запутанный аспект данного нами определения жизни заключен в словосочетании «по пути увеличения сложности». Слову «сложность» было отдано предпочтение перед словом «информация» потому, что последний термин имеет слишком много различных значений. Как показал Дарвин, при естественном отборе из любой популяции выбирается только то подмножество, которое наиболее способно к максимальному увеличению численности в своей экологической нише. Действие такого отбора основано на генетической изменчивости, присущей популяции, а также на том, что каждая популяция потенциально способна к воспроизведению себя в огромном избытке. Руководствуясь только этими представлениями, можно было бы прийти к тому, что мир должен быть населен сверхразвившимися микробами, способными быстро и эффективно заполнить любую потенциально доступную нишу и подать всю остальную жизнь. И тем не менее на Земле существуют не только микробы, существуют люди, растения, насекомые и т. д., которые представляют собой удивительно сложные организмы. По-видимому, имеются в большом количестве ниши, недоступные для микробов, в которых находят прибежище сложные формы — многоклеточные организмы. В будущем в биологических теориях

необходимо как можно полнее учесть свойства ниш и справиться с проблемой сложности. В настоящее время это невозможно: сейчас еще не решена задача даже измерения количества информации в ДНК какого-либо организма. Но среди свойств ниши выделяется одно: объединение характеристик, связанных с размерами и временем, на биологической шкале.

Клетки микроорганизмов малы; их размеры ограничиваются в основном диффузией необходимых органических соединений из окружающей среды, так как объем клетки возрастает пропорционально кубу линейных размеров, а поверхность, через которую осуществляется диффузия, — лишь квадрату. Отметим также, что для процесса диффузии требуется определенное время. Более сложные и крупные эукариотические клетки развились из агрегатов микробных клеток. Критическое значение в агрегатах примитивных бактериеподобных клеток имело увеличение внутренней поверхности благодаря использованию множества мембранных систем. Следствием этого явилось возрастание времени деления клетки. Новые, более сложные клетки были способны быстрее обрабатывать поступающее сырье и занимали другую временную нишу: внутри более сложной клетки за меньшее время могло происходить больше молекулярных событий. Для занятия новых ниш было недостаточно возрастающей сложности развивающихся биологических систем. Необходимы были также флуктуации окружающей среды, которые влияли на воспроизведение биологических систем в избыточном количестве и тем самым приводили к отбору наиболее приспособленных.

Свободный кислород стал доступен главным образом благодаря метаболизму фотосинтезирующих сине-зеленых водорослей. В ответ на присутствие свободного кислорода развились сложные эукариотические клетки, поскольку они могли использовать кислород, для того чтобы во много раз увеличить скорости биологического производства энергии. Вероятно, это было самое важное достижение в эволюции по направлению к многоклеточным формам жизни.

Хотя в настоящее время биологическая теория не может, исходя из первичных принципов, адекватно объяснить, почему сложность систем, движимых энергией,

должна возрастать, простыми физическими экспериментами доказано, что это действительно так.

Классический умозрительный эксперимент состоит в следующем: если подвергнуть одну из сторон замкнутого сосуда воздействию точечного источника тепла, что аналогично потоку энергии излучения, то концентрация молекул газа в сосуде вблизи источника тепла понизится, а вдали от него — повысится. Упорядоченность системы, таким образом, возрастет, поскольку, по мере поступления энергии, концентрация молекул газа в сосуде будет становиться все более упорядоченной.

Вследствие неадекватного характера существующей биологической теории весьма трудно оценить такого рода упорядоченность в биологических системах. Пока примем гипотезу, что любая биологическая система характеризуется определенной упорядоченностью (или информацией, или сложностью, или неслучайным характером). Допустим также, что, когда через биологическую либо небιологическую систему течет мощный поток «высококачественной» энергии излучения, небольшая часть его тратится на создание упорядоченности, а остальная переходит в «низкокачественный» вид энергии — тепло.

Под сопряжением циклических превращений биоэлементов подразумевают, что все биологические системы используют общие материалы, и это действительно так. Во всех живых организмах осуществляются сходные биохимические превращения, основанные на удивительно малом числе органических соединений. Из сотен тысяч органических соединений, которые можно получить, в биохимических процессах повсеместно используются лишь около 120. К ним относятся 20 аминокислот, 4 липида, 5 оснований нуклеиновых кислот, 20 витаминов и разнородная группа малых молекул, таких, как органические кислоты, фосфат и вода. Небольшой набор главных органических соединений, общий для всех живых систем, позволяет экосистемам действовать эффективно на различных трофических уровнях.

Этот небольшой набор соединений составляет основную массу сухого остатка всех организмов. Число различных классов полимеров еще меньше. Основу сухой массы любой функционирующей биологической системы составляют белки, полисахариды, липиды и нуклеиновые кислоты.

И здесь простота и универсальность полимерных структур в биологических системах отражают необходимость общего трофического уровня в экосистеме.

Необычайно сложная вычислительная машина состоит из наборов основных единиц. Аналогичным образом все биологические системы имеют основную единицу — клетку, ограниченную мембраной. Диапазон размеров живых клеток очень узок. Размер бактериальных, или прокариотических, клеток очень мал, от $1/2$ до 2 мкм в поперечнике ($1 \text{ мкм} = 1 \cdot 10^{-6} \text{ м}$). Эукариотические клетки, имеющие ядро и органеллы, более крупные и устроены сложнее; их размеры лежат в диапазоне от 5 до 20 мкм. Клетка ограничивает часть водной среды фазовой границей — мембраной, чтобы приспособить эту среду для биосинтеза.

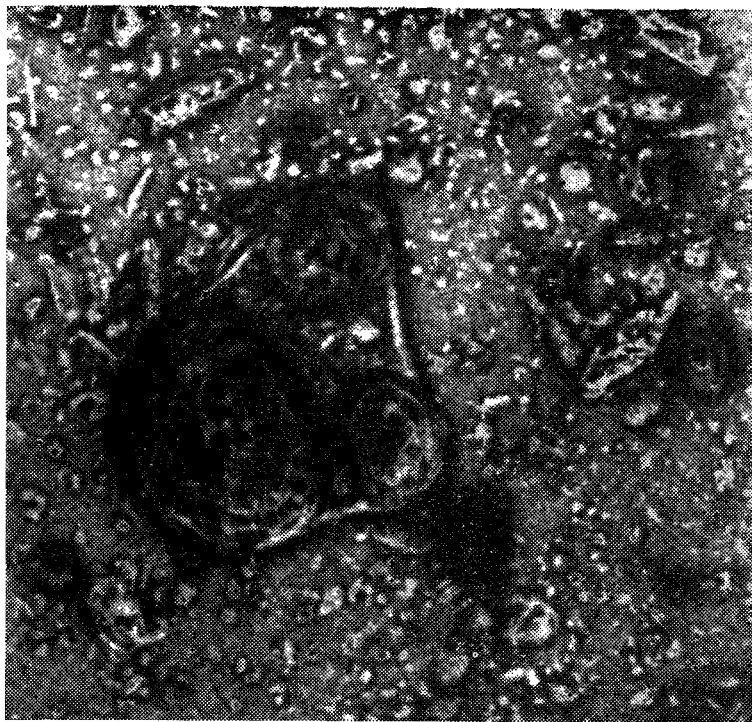
Физические законы диффузии малых молекул в воде резко ограничивают тот максимальный размер, который может иметь клетка. Минимальный размер клетки ограничен количеством функций, которые она должна осуществлять для воспроизведения. Вирус — это нефункционирующая биологическая система: согласно нашему определению, его нельзя назвать живым, он представляет собой покрытый белками «шприц для подкожных инъекций», заполненный нуклеиновой кислотой. Скорее он продукт клетки.

Все клетки имеют одинаковые генетический и белок-синтезирующий аппараты, описание которых мы дадим в гл. 9. Объяснение того, как возникли подобные аппараты, — один из наиболее трудных аспектов вопроса о происхождении жизни. В гл. 10 мы попытаемся дать такое объяснение.

Во всех биологических системах белки являются теми молекулярными машинами, которые обуславливают точность биосинтеза полимеров и быстроту превращения веществ и энергии. Очень небольшое число белков (если такие вообще существуют) действуют сами по себе, чаще всего они функционируют в комплексе с ионами металлов или другими ионами. Особо выделим два примера — наличие магния в хлорофилле и железа в гемоглобине. Эти металлы жизненно необходимы для функционирования биологических систем, хотя они не являются биоэлементами, причем ионы металлов чаще связаны ионными, а не ковалентными связями. Не являясь участниками био-

логической структуры, ионы металлов имеют решающее значение для функционирования биологической системы.

Даже столь краткий обзор основных особенностей биологических систем ясно демонстрирует, что граничные условия для размеров и функциональной природы клеток заданы физическими и химическими законами и процессами. Кроме того, накладываемое экологической системой ограничение, связанное с общностью трофических уровней, приводит к универсальности биохимических процессов, происходящих во всех биологических системах.



Глава 7

Протобионты

▲ Органические микроструктуры, полученные в эксперименте с искровым разрядом над поверхностью воды. На этой микрофотографии вы видите каплю воды, взятую прямо из экспериментальной колбы; $\times 10\,000$. В подобных экспериментах около 60% вошедшего в реакцию углерода обнаруживается в микроструктурах. Более крупные объекты, похожие на клетки, имеют около 15 мкм в диаметре. При микроскопическом изучении более крупных структур показано, что они имеют фазовую границу; при изменении осмотической активности среды, в которой они взвешены, они набухают или сжимаются. Подобные структуры обнаруживаются почти во всех экспериментах с искровыми разрядами, в которых присутствует водная фаза, если в исходной газовой смеси нет избыточного количества водорода. (Фотография любезно предоставлена лабораторией экзобиологии, Гавайский университет.)

«Ничего не выйдет», — сказала Алиса. «Я не умею верить в невероятные вещи».

«Ты просто давно не упражнялась», — предположила Королева — «в твои годы я каждый день занималась этим по полчаса. Случалось, что до завтрака я успевала одним махом поверить в шесть невероятных вещей».

Льюис Кэрролл¹

«Протобионт» — термин, припятый для обозначения промежуточного звена в процессе возникновения жизни, находящегося между эволюционирующими химическими соединениями с одной стороны и явно биологическими формами, имеющими генетический аппарат и подвергающимися дарвиновскому отбору, — с другой. На стадии образования этого продукта уже появились некоторые биологические признаки, в то время как другие находились в состоянии развития.

Для того чтобы объяснить возникновение клеточных форм жизни, был разработан целый ряд гипотетических моделей, как лабораторных, так и теоретических. Все они представляются до некоторой степени вероятными и, несомненно, были в числе других испробованы в течение 1500 млн. лет земной истории между 4500 и 3000 млн. лет назад.

Опарин с сотрудниками предложил в качестве модели протоклеток коацерватные капли, построенные из смесей коллоидных частиц. В роли этих частиц могут выступать длинные, в значительной степени неспецифичные макромолекулы, связывающие молекулы воды и при подходящих значениях рН, концентрации соли и температуры объединяющиеся друг с другом с образованием коацерватных структур, по размерам напоминающих клетки. Смеси, в которых образуются коацерваты, легко получить в лаборатории, например смешивая разбавленные растворы желатины (белок) и гуммиарабика (полисахарид). Раствор остается прозрачным, если его не подкислять; при подкислении же осаждаются частицы коацервата, т. е. для того, чтобы желатина и гуммиарабик вступили во

¹ Перевод Вл. Орла.

взаимодействие и образовали структуры клеточных размеров, необходимо низкое значение рН. Коацерваты можно также получить из полиадениловой кислоты (полинуклеотида) и гистона (белка). Аналогичным образом взаимодействуют и многие другие полимерные молекулы, хотя в каждом конкретном случае для образования коацерватов требуются определенные внешние условия.

Модельные системы чрезвычайно полезны, поскольку они позволяют изучать протекание специфических синтетических и биохимических реакций в системах клеточных размеров, отделенных от внешней среды, в которых локальные условия могут сильно отличаться от условий внешней среды. Например, как показал Опарин, коацерваты, состоящие из рибонуклеиновой кислоты и гистона, при добавлении полинуклеотидфосфорилазы в присутствии аденозиндифосфата синтезируют полинуклеотид — полиадениловую кислоту. Этот процесс идет и без коацерватов, но существенно то, что в присутствии достаточного количества гистона коацерваты увеличиваются в объеме и, возможно, механическим путем делятся надвое. Коацерваты другого типа, включающие добавленный хлорофилл, переносят электроны с красителя-донора на краситель-акцептор, моделируя один из этапов фотосинтеза.

В модельных коацерватных системах используются полимеры биологического происхождения: белки, нуклеиновые кислоты и полисахариды. Для экстраполяции к условиям еще безжизненного «маленького теплого водоема» необходимо накопление случайно образовавшихся полимеров, способных объединяться в подобные структуры. Среди множества коацерватов, состоящих из хаотически синтезированных полимеров, те, которые были способны медленно синтезировать дополнительные количества сходных полимеров, могли расти и подвергаться отбору длительное время. В конце концов последовательные этапы отбора могли привести к развитию обмена веществ и наследственности.

Хотя эта модель исключительно полезна, мне кажется, что она неверна. Для приготовления коацерватов в лаборатории требуются очень высокие концентрации полимеров. Но в первобытных водоемах присутствовал весьма разбавленный бульон, содержащий небольшие органические соединения. Следовательно, для того чтобы низкомо-

лекулярные предшественники реагировали, образуя полимеры, они должны были преодолеть первый концентрационный разрыв.

Чтобы образовались коацерваты, появившиеся в разбавленном растворе, полимеры должны были преодолеть второй концентрационный разрыв. Наконец, сами коацерваты должны были осуществлять дальнейший синтез в очень разбавленном растворе. Ниже мы еще много раз будем сталкиваться с проблемой преодоления концентрационного разрыва.

Теоретически можно найти способы обойти проблему концентрационного разрыва, но они представляются скорее пожеланиями, нежели правдоподобной реальностью. Например, вполне вероятно, что многочисленные неглубокие водоемы, разбросанные между крупными вулканами, интенсивно испарялись. При этом удалялась вода и летучие органические соединения типа формальдегида и синильной кислоты и образовывался действительно более концентрированный бульон. Иногда в водоемах до следующего дождя оставались только влажная глина и ил. Несомненно, это и могло, и должно было происходить, но этот процесс еще не проанализирован достаточно подробно.

В водоемах присутствовали также соли типа хлористого натрия. Хотя в первобытных водоемах содержалось гораздо меньше солей, чем в современном океане, количество их молекул все же далеко превосходило количество молекул органических веществ. Учитывая, что в ходе испарения концентрируются и те, и другие, проведем грубую оценку. Концентрация солей в водоеме могла быть приблизительно 1,5 г/л (10% концентрации солей в современных океанах), а общая концентрация двадцати аминокислот могла быть около $2 \cdot 10^{-4}$ г/л. Итак, отношение количеств молекул соли и аминокислот было приблизительно 10 000 : 1. Помня, что мы должны прийти к синтезу нерегулярных молекул белка, представим себе случайные столкновения молекул аминокислот друг с другом. Трудность состоит в том, что молекула аминокислоты будет сталкиваться с молекулами соли в 10 000 раз чаще, чем с молекулами другой аминокислоты! В данном примере не учитывается также тот факт, что аминокислоты — не единственное подмножество общего набора нелетучих

органических соединений в высыхающем водоеме. Следовательно, аминокислоты могли сталкиваться и реагировать с другими молекулами органических соединений и с молекулами солей значительно чаще, чем с молекулами других аминокислот. К тому же по мере испарения под действием ультрафиолетового излучения Солнца быстро разрушалось все, что бы ни сконцентрировалось. В особых условиях, в лаборатории, концентрирование действительно происходит, но образование коацерватов в реальном мире — совсем другое дело.

Для модели протоклеток, выдвинутой Фоксом, также характерны практические затруднения, связанные с преодолением концентрационного разрыва. Как и модель Опарина, модель Фокса изучалась весьма тщательно, она вполне этого заслуживает. Если смесь аминокислот нагреть и затем перенести в воду, то из нее можно выделить полимеры, названные Фоксом протеиноидами. Протеиноиды представляют собой белковоподобные молекулы со случайной последовательностью аминокислот, которые образуются с отщеплением одной молекулы воды на каждую пептидную связь. Растворы протеиноидов при охлаждении мутнеют. Когда их рассматривали в микроскоп, обнаружили сферы диаметром около 10 мкм, напоминающие клетки, каждая из которых имеет толстую, как скорлупа, протеиноидную мембрану. Иногда были заметны образования, похожие на почки, а также сдвоенные частицы (рис. 7.1).

Протеиноид, который легко получить в лаборатории, является беспорядочной смесью довольно крупных полимеров, большей частью полипептидов. Он подвергается частичному расщеплению под действием ферментов, расщепляющих белки биологического происхождения.

Фокс и его сотрудники показали, что такие протеиноиды, имеющие нерегулярную структуру, обладают широким набором незначительных каталитических активностей. Они предполагают, что аминокислоты концентрировались в испаряющихся водоемах и затем под действием тепловых потоков или в ходе высушивания под действием солнечных лучей полимеризовались. После дождя протеиноиды претерпевали самосборку в микросферы. Микросферы представляют собой популяцию протоклеток, подвергавшихся отбору в соответствии с их каталитическими

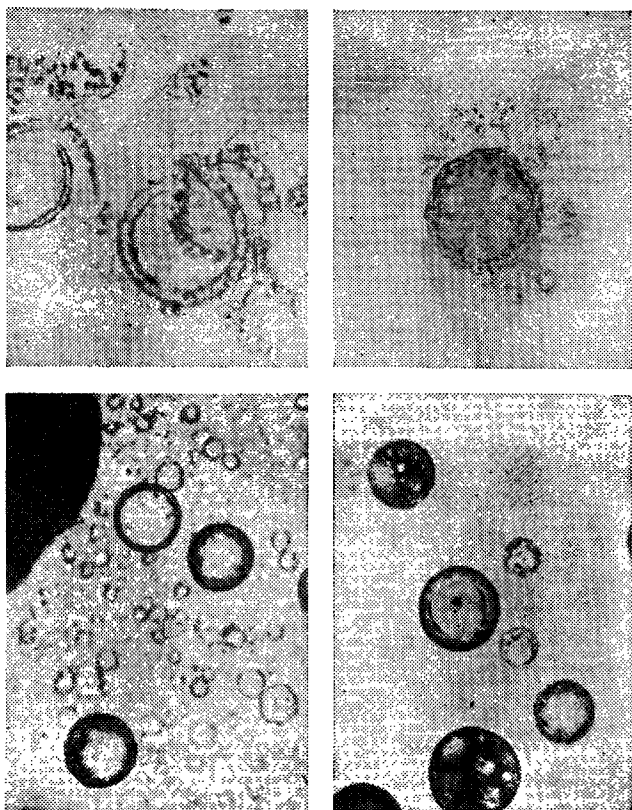


Рис. 7.1. Протеиноидные микросферы, синтезированные д-ром Янгом. Смесь сухих аминокислот конденсируется под действием тепла или конденсирующих агентов с образованием протеиноидов. Охлаждение суспензии протеиноида в воде приводит к появлению микросфер.

активностями, необходимыми для первичного метаболизма.

Протеиноидные микросферы легко приготовить, и это делается во многих школьных лабораториях. Необходимо всего лишь нагреть кусок лавы на газовой горелке, бросить на горячую лаву ложку сухих L- или D-аминокислот и смыть с лавы полученные протеиноиды чашкой воды.

Центральным остается вопрос: откуда в реальном биологическом мире взялись чистые, сухие, концентрированные и оптически активные аминокислоты? Второй вопрос касается природы пограничных слоев в протеиноидных микросферах. Клетки имеют липопротеидную мембрану, тонкую, как паутинка, через которую путем диффузии могут медленно проникать различные малые молекулы. Протеиноидные микросферы ограничены толстыми, грубыми наслоениями частично гидрофобных белков. Эти наслоения настолько толсты, что напоминают скорее почти непроницаемые клеточные стенки или оболочки спор, чем клеточные мембраны.

Бернал предположил, что ключевым моментом в образовании полимеров из небольших органических молекул является их адсорбция на глинистых минералах. Многие виды глины действительно весьма эффективно и избирательно адсорбируют аминокислоты, азотистые основания и сахара. В модели Бернала концентрационный разрыв преодолевается благодаря присутствию глин, повышающих локальные концентрации полимеров биологического типа со случайной последовательностью составляющих его мономеров. Предполагается, что на более поздней стадии эти полимеры самоорганизуются в протоклетки и популяция первичных протоклеток служит основой для отбора тех, которые обладают синтетической и метаболической активностью. Определенная сложность заключается в том, что вещества на глинах могут разрушаться под действием ультрафиолетового излучения. К тому же многие полимерные вещества адсорбируются гораздо сильнее, чем малые молекулы, и становятся недоступными для дальнейших превращений. Тем не менее механизм концентрирования на глинах остается полезным и заслуживает дальнейшего изучения.

Во всех вышеописанных моделях протоклеток остается нерешенной главная проблема преодоления концентрационного разрыва. В связи с этим возникает вопрос: нет ли альтернативных подходов? Я лично считаю, что есть, и ниже остановлюсь на одном из них, которому я отдаю предпочтение.

При воздействии энергии на смесь первичных газов образуются не только малые органические молекулы — неизменно обнаруживается также и полимерный матери-

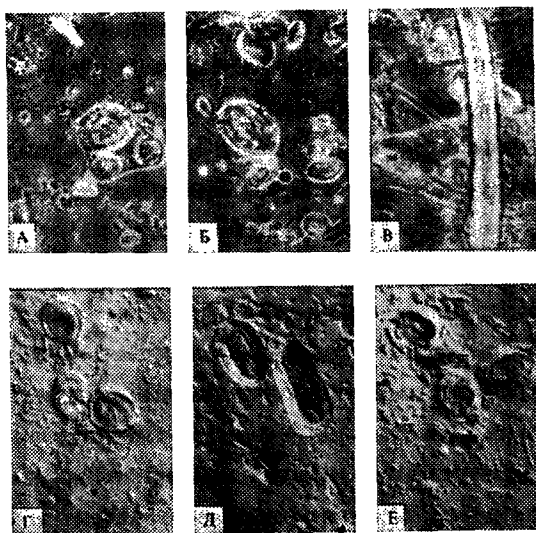


Рис. 7.2. Органические микроструктуры, образовавшиеся под действием искрового разряда над поверхностью воды. Эти фотографии капли воды после 20 ч пропускания искры сделаны в фазово-контрастном микроскопе; $\times 900$. Более крупные сферы имеют в диаметре около 20 мкм. Обратите внимание на обилие более мелких, похожих на бактерии объектов и на обилие мелкого мембранного материала, заполняющего более крупные структуры. (С любезного разрешения лаборатории экзобиологии Гавайского университета.)

ал, в состав которого обычно входит почти весь углерод, участвовавший в реакции. Этот, в основном гидрофобный, материал не удастся полностью охарактеризовать с химической точки зрения. В обычных экспериментах с электрическим разрядом он выявляется в форме осадка (конденсата) на электродах и на стенках реакционного сосуда. Полимеры образуются также и тогда, когда электрическая искра проходит через смесь газов и достигает поверхности воды. В этом случае органический материал выпадает в виде тонкой маслянистой пленки на поверхности воды. При перемешивании или встряхивании пленка отделяется от поверхности и образуются сферулы размером от 1 до 20 мкм в диаметре, а также более сложные структуры. Новообразовавшиеся сферулы имеют тонкую гидрофобную мембрану, которая окружает другой мембраноподоб-

ный материал и часть водного раствора. Рис. 7.2 иллюстрирует сложное строение этого полимерного материала, для которого характерны довольно высокие выходы.

Подобные органические микроструктуры, очевидно, являются результатом самосборки полимерного материала на поверхности воды. Завершив самосборку, они медленно опускаются на дно водоема. Но если регистрировать скорость образования этих структур путем простого подсчета под микроскопом их количества через различные промежутки времени после начала реакции в искровом разряде, наблюдается удивительная вещь: число микроструктур экспоненциально возрастает со временем. Это свидетельствует о том, что одна структура, по-видимому, служит центром для самосборки других. Такая же кинетика автокаталитического роста наблюдается и в биологических популяциях растущих клеток. В последующих главах мы будем обсуждать и другие свойства органических микроструктур. Их существование приводит нас к следующему ключевому положению.

Протоклетки образовывались в первобытных водоемах из полимерного вещества одновременно с образованием органических соединений.

Итак, для образования протоклеток не требуются специальные концентрационные механизмы. Протоклетки в большом количестве находились в водоемах с самого начала, образуясь при воздействии энергии на первичные газы и пленку. После образования они опускаются на дно водоема, где оказываются защищенными от разрушительного действия сильного ультрафиолетового излучения.

Дают ли древнейшие горные породы какие-нибудь непосредственные доказательства существования протоклеток? Как можно отличить подобные структуры от остатков истинно биологических структур?

Для ответа на эти вопросы был разработан ряд методов. В одном из них осадочную породу растворяли в смеси плавиковой и соляной кислот. При этом минеральная основа растворялась, а неповрежденное органическое вещество высвобождалось, и его исследовали затем под микроскопом. При изучении другим методом минералы разрезали на тонкие пластинки, полировали их и искали под микроскопом ископаемые клетки. Это утомительный труд:

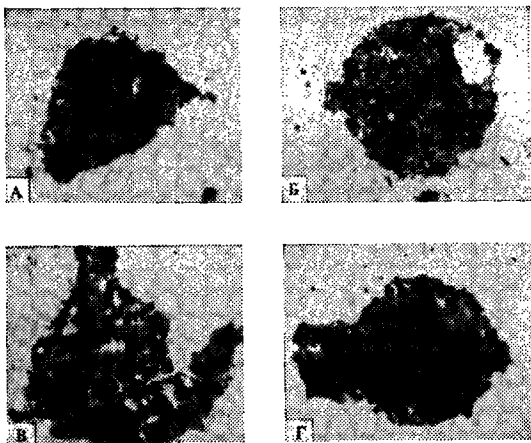


Рис. 7.3. Органические микроструктуры, обнаруженные Б. Наги в слюдястых метакварцитах из Исуа (Гренландия). Данные, полученные при их изучении, свидетельствуют об абиогенном синтезе этих структур. (С любезного разрешения д-ра Б. Наги.)

для того чтобы обнаружить ископаемые клетки, необходимо просмотреть многие и многие образцы. Сбор и установление возраста древних пород сами по себе являются нелегкой задачей. Еще труднее решить, какие критерии биогенности применить к наблюдаемым ископаемым образованиям органического происхождения.

Бартоломью и Лоис Наги и их сотрудники в Аризонском университете дали описание древнейших из известных органических микроструктур, имеющих возраст 3769 ± 70 млн. лет, которые были найдены в слюдястом метакварците из Исуа (Гренландия). Их примеры представлены на рис. 7.3. Эти микроструктуры идентичны микроструктурам, образующимся при искровом разряде над поверхностью воды.

Более древние осадочные породы не обнаруживаются, поскольку устойчивая система океанов образовалась не ранее 4000 млн. лет назад. Вполне вероятно, что те структуры, о которых сообщали Наги, являются протоклетками, по крайней мере по своей морфологии они их напоминают. Структуры из Исуа очень похожи на органические микроструктуры, полученные из южноафриканских оса-

дочных пород формаций Онвервахт (3400 млн. лет) и Фиг-Три (3000 млн. лет).

Итак, находки микроскопаемых свидетельствуют о том, что остатки протоклеток можно обнаружить в осадках, имеющих возраст 3000 млн. лет и более и что начиная с 3000 млн. лет назад и по настоящее время сложность микроструктур изменяется.

Древнейшие из известных микроскопаемых, несомненно биологического происхождения, были найдены Луи-

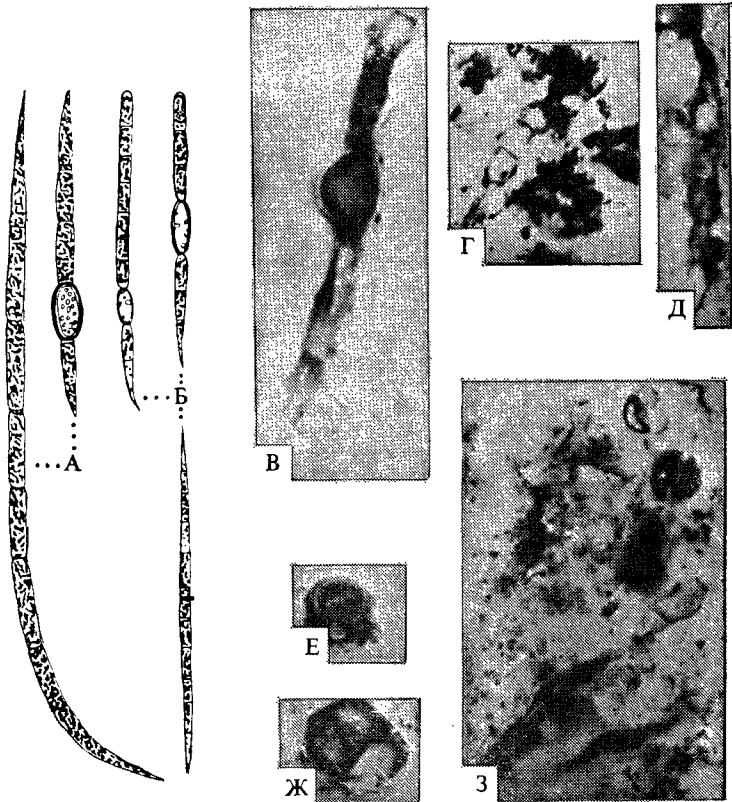


Рис. 7.4. Окаменевшие остатки сине-зеленых водорослей, найденные Л. Наги в строматолите Трансвааля возрастом 2200 млн. лет. (С любезного разрешения д-ра Л. Наги.)

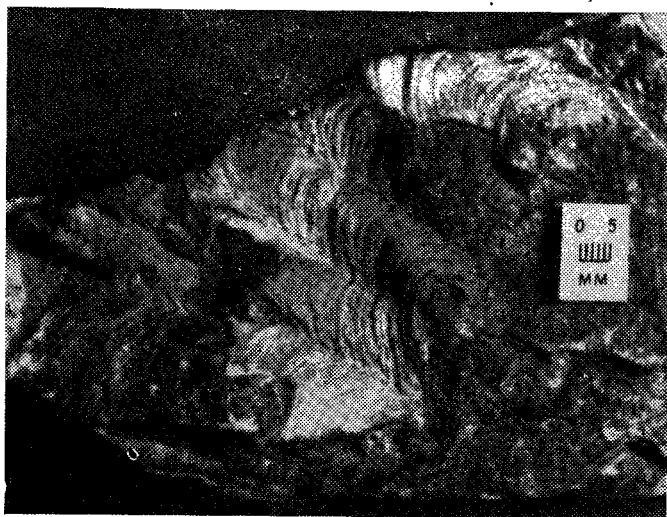


Рис. 7.5. Строматолиты. Эти пластинчатые отложения карбонатов характеризуются волнистой слоистостью. Они являются результатом осадкообразующей деятельности сине-зеленых водорослей и некоторых бактерий. Хотя в породах этого типа микроископаемые сохраняются редко, само наличие такого биологически индуцированного породообразования — существенное свидетельство в пользу ранней биологической деятельности. Этот образец представляет собой часть древнейшего известного строматолита из системы Булавайо (Южная Родезия), возраст которого 3100—2700 млн. лет. (С любезного разрешения НАСА.)

сом Наги в строматолитах Трансвааля (возраст 2200 млн. лет). Они настолько сходны с современными сине-зелеными водорослями, что их можно отнести к определенным таксономическим группам (рис. 7.4). Баргхоорн и Шопф сообщили о напоминающих бактерии палочковидных объектах, выделенных из осадочных пород формации Фиг-Три в Южной Африке, насчитывающих 3000 млн. лет. Эти палочковидные ископаемые могут быть остатками протоклеток или бактерий.

Строматолиты представляют собой рельефные и слоистые отложения карбонатов в осадочных породах. Они возникли в результате осадкообразующей деятельности фотосинтезирующих сине-зеленых водорослей (рис. 7.5). Эти

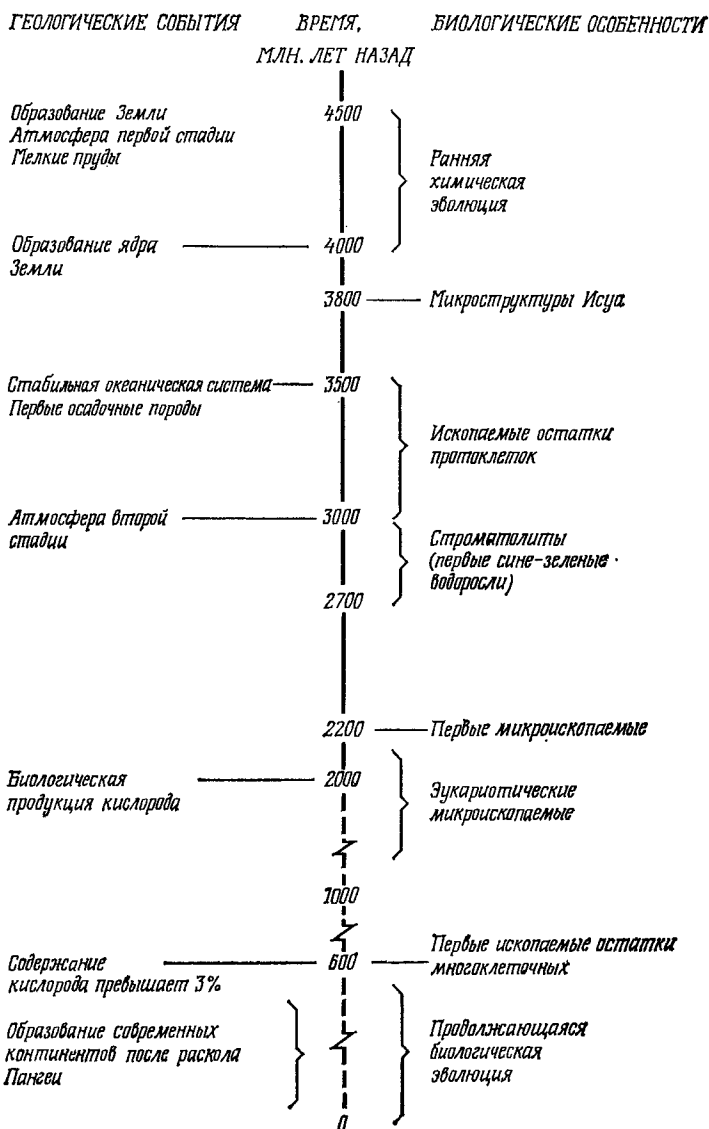
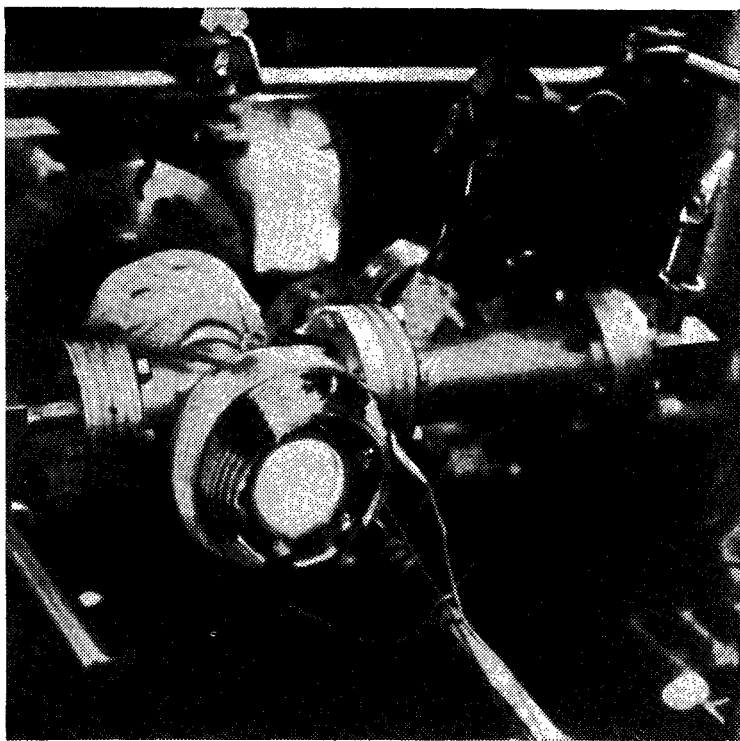


Рис. 7.6. Геологические и биологические события на одной и той же временной шкале.

единственные в своем роде структуры дают наилучшее в настоящее время однозначное доказательство существования таких форм жизни, как водоросли. Древнейшие из известных строматолитов встречаются в системе Булавайо (Южная Родезия), их возраст от 3100 до 2700 млн. лет.

Эти данные приводят нас к убеждению, что эволюция протоклеток продолжалась в течение огромного периода времени, начиная от первых протоклеток около 4500 млн. лет назад и достигая наивысшей точки примерно через 1500 млн. лет, когда появились бактерии и сине-зеленые водоросли. В эту раннюю эпоху у протоклеток появились и эволюционировали генетический и белоксинтезирующий аппараты, а также обусловленный этими двумя аппаратами наследуемый обмен веществ.

Для того чтобы представить во времени главные события, имеющие как биологическое, так и геологическое значение, мы нанесли их на временную шкалу (рис. 7.6). В упомянутый выше период в течение 1500 млн. лет протоклетки подвергались разнообразным испытаниям, результатом которых было возникновение истинно биологических форм.



Глава 8

Органические автоматы

▲ *Фотолиз метана под действием ультрафиолета. Показанная здесь реакционная камера изготовлена из нержавеющей стали и покрыта золотом для того, чтобы ее поверхность была как можно менее реакционноспособной. Через систему кранов из камеры откачивается воздух, и вводится туда метан или другие газы. Пучок ультрафиолетового света попадает внутрь камеры через окно из фторида магния, пропускающего все излучение с длиной волны выше 170 нм. Источник ультрафиолетового излучения (не показан) — гигантская дуговая аргоновая лампа в Исследовательском центре НАСА в Эймсе. Поскольку многие продукты этой реакции нелетучи, они стремятся сконденсироваться на поверхности окна из фторида магния. Поэтому для поддержания этих продуктов в газообразном состоянии окно подогревается нагревательной лентой. [С любезного разрешения д-ра Дуайера (Пенсильванский университет).]*

Меньшую степень сложности автомата можно компенсировать за счет соответствующего повышения сложности инструкций.

Джон фон Нейманн

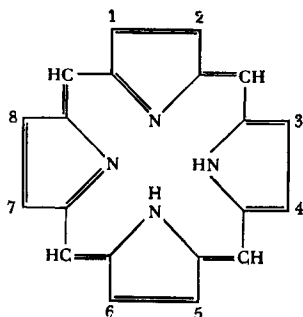
Рассмотрев вероятные пути возникновения протоклеточных структур, мы еще не обсуждали ни их деятельности, ни их возможности к эволюции. Эта глава будет посвящена теоретическому анализу свойств и требований к конструкции простейших модельных органических автоматов, а также взаимосвязи между модельными системами и вероятными событиями в ходе возникновения первых протобионтов.

Считают, что автомат является устройством, способным к самопроизвольным действиям. Человеческий организм и бактериальная клетка — природные автоматы изумительной сложности; искусственные механические сооружения, такие, как вычислительная машина или телефонный коммутатор, тоже автоматы, но гораздо более просто устроенные. В этой главе мы поставим мысленный эксперимент, задачей которого будет создание простейшего из возможных органических автоматов с учетом в качестве граничных условий наших представлений о биологии клетки и знаний о характере внешней среды 4000 млн. лет назад. Как мы увидим, эти автоматы могут быть крайне простыми, но только в том случае, если окружающая среда имеет сложный характер.

Первое граничное условие: биологическая клеточная теория. Для того чтобы отграничить часть внешней среды, требуется граница раздела фаз, или мембрана. В водных системах граница раздела фаз должна быть гидрофобной. Наносся липиды на поверхность воды при перемешивании, можно получить сферулы, возникающие в результате самосборки липидов. Действительно, как показано в опытах с коацерватами Опарина, протеиноидными микросферами Фокса и органическими микроструктурами, полученными мною, частично гидрофобный материал в водных системах способен к самосборке с образованием сферических частиц.

Второе граничное условие: энергия и ее рецепторы. Что касается энергии, то здесь, видимо, имеется широкий

Рис. 8.1. Скелет порфириновой молекулы. Порфирины различаются органическими функциональными группами, присоединенными в положениях 1—8, и способностью к комплексообразованию с разными ионами металла, связывающимися с четырьмя пиррольными азотами.



набор возможностей — от использования потенциальной химической энергии солнечного происхождения, заключенной в малых органических молекулах, до непосредственного использования солнечной энергии. Разберем последний случай (которому я отдаю предпочтение), поскольку солнечная энергия являлась и является преобладающей формой доступной энергии. В настоящее время и в последующие 2500 млн. лет наиболее высокоэнергетической частью солнечного спектра будет коротковолновое ультрафиолетовое излучение. Этот вид энергии является достаточно мощным для непосредственного образования и разрушения химических связей между биоэлементами и легко поглощается разнообразными органическими соединениями. Поэтому использование в качестве энергии солнечного ультрафиолетового излучения очень удобно.

Чтобы эта энергия не была утрачена, необходимо использовать специальные рецепторы ультрафиолета. Обычно рецепторы моделируют по типу тех, которые используются фотосинтезирующими организмами, т. е. по типу порфиринов. Порфирины представляют собой плоские сопряженные системы, построенные из четырех молекул пиррола, удерживаемых вместе метиленовыми мостиками. Порфирины различаются между собой заместителями, расположенными с внешней стороны пиррольных групп (рис. 8.1), и обладают целым рядом общих полезных свойств. Все они поглощают как видимое, так и ультрафиолетовое излучение и служат поэтому превосходными рецепторами энергии. Все они гидрофобны и очень плохо растворяются в воде: в основном они присоеди-

ются к гидрофобным границам раздела фаз органического автомата. Все они образуют комплексы с ионами металлов.

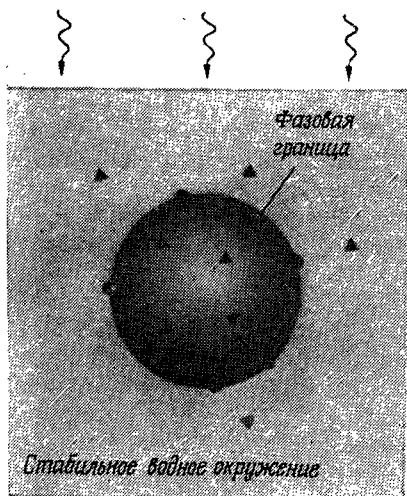
Четыре атома азота пиррольных колец смотрят внутрь, и их пространственное расположение и заряд способствуют удержанию ионов металлов, валентность которых может меняться. Это позволяет такому металлоорганическому рецептору переносить электроны, переходя при этом из одного состояния в другое. Порфирины могут образовываться путем сочетания пирролов, которые легко получить в экспериментах по имитации химической эволюции.

Третье граничное условие: устойчивая внешняя среда. Сложное строение биологических систем позволяет им приспосабливаться к меняющимся внешним условиям и в свою очередь изменять их. Для органических автоматов мы должны допустить наличие постоянных внешних условий. Это допущение поможет нам перенести потенциальную сложность автомата в область инструкций — в саму внешнюю среду. Поэтому при создании внешней среды мы обеспечим: 1) постоянный и неограниченный приток всех необходимых малых органических молекул в постоянных концентрациях; 2) постоянный приток энергии излучения и постоянные физические параметры, такие, как температура, pH и содержание солей.

Допустим, что в нашей простой системе присутствуют молекулярные предшественники мембран, порфирины и еще один вид малых молекул — молекулы-мишени, типичные представители малых молекул, участвующие в процессах биосинтеза. На рис. 8.2 представлен обобщенный вид простого органического автомата.

При объединении всех составных частей нашей системы произойдет следующее. Рецепторы энергии — порфирины — будут поглощать ультрафиолетовое излучение. В ходе этого процесса электроны рецептора перейдут на более высокий энергетический уровень и обеспечат протекание необходимых реакций либо непосредственно, либо путем создания протонного градиента. В случае непосредственного участия можно представить себе малую молекулу-мишень, скажем аминокислоту, которая должна активироваться для того, чтобы связаться с молекулой другой аминокислоты. В случае протонного градиента можно предположить, что высокоэнергетические электроны вы-

Постоянный поток солнечного ультрафиолетового излучения.



- ▲ *Малые органические соединения или неорганические молекулы-мишени*
- *Адсорбированные молекулы порфиринов*

Рис. 8.2. Простейший органический автомат. Постоянный поток ультрафиолетового излучения падает на сферу, отделенную от окружающей среды фазовой границей и несущую на своей поверхности рецепторы и молекулы-мишени.

качиваются из сферулы наружу (хотя такой механизм может быть и неэффективным). Это приведет к установлению градиента заряда, который обеспечит проведение химической работы — полимеризацию или активацию молекул-мишеней.

Итак, наши малые молекулы-мишени активировались и полимеризовались благодаря превращению энергии излучения с помощью рецептора и высокоэнергетических электронов в потенциальную химическую энергию. Это

будет происходить как на внутренней, так и на наружной поверхности сферул. Объем, заключенный внутри сферул, конечен, тогда как внешний объем можно во всех практических случаях считать бесконечным, поскольку мы считаем внешнюю среду неизменной. Автомат изменит свойства своего внутреннего пространства, используя полностью большую часть своих молекул-мишеней. Когда это произойдет, возникнет концентрационный градиент. Снаружи будет находиться больше молекул-мишеней, чем внутри, и поэтому они начнут диффундировать внутрь автомата.

В конце концов в автомате накопится полимер в высокой концентрации, и реакции молекул-мишеней будут подавлены, т. е. сферула «умрет», она не будет больше функционировать. Продолжительное высокоэнергетическое ультрафиолетовое излучение разрушит адсорбированные порфирины и мембрану, и ее компоненты будут освобождены и станут доступными для включения в следующих поколениях.

Существует и другая возможность: полимер, находящийся внутри в высокой концентрации, может взаимодействовать с фазовой границей и ее предшественниками, вызывая увеличение поверхности раздела фаз и в конце концов приводя к делению автомата. Вновь образовавшиеся дочерние автоматы будут содержать части родительского автомата, а также вновь включившиеся вещества рецептора и фазовой границы. Заметим, что в этом случае синтезированный родителями полимер распределяется между потомками случайным образом.

Поскольку, согласно предположению, в окружающей среде поддерживается постоянная концентрация мембранных и других предшественников, мы будем иметь стационарную скорость синтеза новых автоматов посредством самосборки, фиксированную скорость полимеризации молекул-мишеней и постоянную скорость деградации «постаревших» автоматов.

В случае сложной внешней среды, которая искусственным образом поддерживается постоянной, очень небольшое число относительно простых органических молекул может отражать деятельность живых клеток. Именно поэтому наша модель не требует ферментов или генетического аппарата. Дает ли эта модель органических автома-

тов какой-либо ключ к пониманию происхождения и направления развития ранней клеточной жизни? Чтобы ответить на этот вопрос, расширим подход, основанный на модельных автоматах, и рассмотрим теперь, как подобная система могла бы вести себя действительно в сложных условиях внешней среды в маленьком теплом водоеме.

В гл. 7 мы обосновали положение, согласно которому протоклетки образовались из полимерного материала одновременно с образованием малых органических молекул. У подобных протоклеток обнаруживается сложная граница раздела фаз, имеющая гидрофобный характер, и поэтому они способны избирательно адсорбировать порфирины и сходные с ними малые органические молекулы. Порфирины, адсорбированные на веществе протоклеток, могут служить рецепторами ультрафиолетового излучения, устанавливать протонные градиенты и превращать энергию излучения в потенциальную энергию химической связи.

Существует большое количество молекул-мишеней. К ним можно отнести аминокислоты, основания нуклеиновых кислот, предшественники сахаров, неорганический фосфат и др. Из них могут быть построены нерегулярные полимеры аминокислот (белки), нуклеотидов (нуклеиновые кислоты) и сахаров (полисахариды). Напомним, что органический «бульон» очень разбавлен. Любая аминокислота присутствует там в концентрации 10^{-7} М; это значит, что в каждом 500 мкм^3 (приблизительный объем средней протоклетки с радиусом 5 мкм) содержится около $3 \cdot 10^4$ молекул каждой аминокислоты. Если считать, что присутствует около 200 различных видов малых молекул, то в каждой вновь образовавшейся протоклетке может содержаться всего $6 \cdot 10^6$ малых органических молекул. Внутренний объем защищен от внешних воздействий и относительно мал по сравнению с внешним. По мере того как молекулы-мишени включаются внутри протоклетки в нерегулярные полимеры, для каждой из них возникает концентрационный градиент и внутрь протоклетки диффундируют новые молекулы-мишени.

Таким путем протоклетка преодолевает концентрационный разрыв, правда, эффективность этого процесса не сравнима с эффективностью соответствующего процесса в

развитой биологической системе. В нашей модели сложность, выражающаяся в разнообразии возможностей, в огромной степени возрастает уже в первом поколении протоклеток, поскольку большее число молекул-мишеней обуславливает и большее число возможных реакций и взаимодействий. В последующих поколениях сложность возрастает еще быстрее, так как нерегулярные полимеры аминокислот и нуклеиновых кислот влияют на ход реакций между молекулами-мишенями.

Стейнман показал, что нерегулярные полимеры аминокислот не являются «статистически» неупорядоченными. В зависимости от структуры аминокислотного «хвоста» наблюдаются отклонения от чисто статистической вероятности строения полимеров, так как большие массивные, а также одноименно заряженные «хвосты» отталкиваются друг от друга. Поэтому абиогенные полимеры аминокислот не являются чисто статистическими, а отражают индивидуальную архитектуру молекул составляющих их аминокислот. То же самое справедливо и для любого процесса абиогенной полимеризации, в котором используются низкомолекулярные предшественники более чем одного вида.

Как показал Фокс, протеиноиды, образующиеся путем неупорядоченной полимеризации, обладают широким набором слабых каталитических активностей. Эти активности — еще одна характеристика сложности системы. Протоклетки, содержащие белки со случайными последовательностями аминокислот, также обладают широким спектром слабых каталитических активностей и благодаря им в дальнейшем развивают свои метаболические способности.

По мере накопления различных полимеров протоклетка увеличивает поверхность своих мембран. В результате слабые силы взаимодействия, удерживающие компоненты мембраны вместе, становятся недостаточными, и протоклетка вынуждена образовать почку илиделиться надвое. Наши гипотетические протоклетки не имеют генетического материала или специфической системы белкового синтеза. При делении любые вещества, содержащиеся в родительской протоклетке, случайным образом удерживаются одними потомками и утрачиваются другими. Однако уже здесь намечается тенденция к образова-

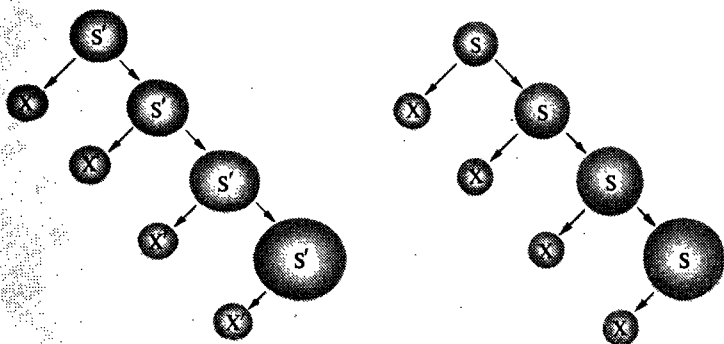


Рис. 8.3. Накопление эффективных линий потомства протоклеток. Одна протоклетка «S», обладающая способностью к синтезу, может в лучшем случае образовать единственную линию потомства, поскольку она не имеет генетических механизмов для того, чтобы передать эту способность дочерним протоклеткам. Дочерние почки, помеченные «X», не получили синтетических функций и больше не могут почковаться.

нию определенной линии потомков. Протоклетки, более эффективно производящие белки, полезные для метаболизма, дадут начало линиям потомков, которые будут отобраны уже на этой ранней стадии. Это неэффективный и пассивный вид отбора. Во всем сообществе протоклеток будут накапливаться те из них, которые дадут начало потомкам, успешнее других производящим неупорядоченные полимеры. Одну из этих возможностей иллюстрирует рис. 8.3.

Итак, на этой ранней стадии возникновения жизни мы получили гетеротрофные фотосинтезирующие организмы, использующие УФ-излучение. Протоклетка использует энергию УФ-излучения для создания полимеров; этот процесс требует постоянного и небольшого притока всех аминокислот, оснований нуклеиновых кислот, сахаров и других малых органических молекул. Нерегулярные поли-

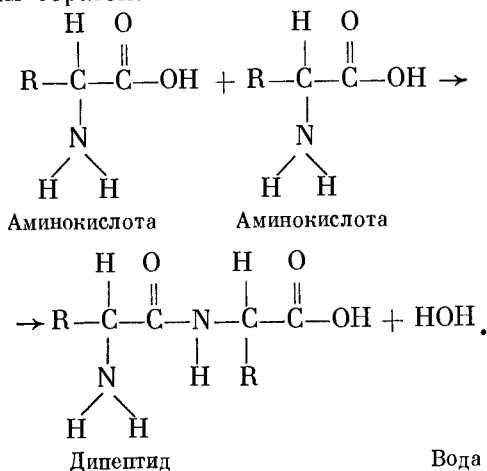
меры аминокислот, образующие комплексы с ионами металлов, наделяют протоклетку набором слабых каталитических активностей, которые наследуются единственной линией потомства. То же можно сказать и о таких неупорядоченных полимерах, как нуклеиновые кислоты и сахара.

Потомки протоклеток, наделенные каталитическими активностями, существовали лишь очень короткое время, разрушаясь при высыхании водоемов или опускаясь на такие глубины, где энергия излучения была уже недоступна. Однако эти ранние формы обладали способностью к быстрой и повторяющейся самосборке. Можно представить себе, как на протяжении 500 или 1000 млн. лет в водоемах происходили бесчисленные эксперименты с протоклетками. Вероятнее всего, первыми возникли фотосинтетические гетеротрофы, использующие ультрафиолет, и с их появлением открылось множество потенциальных экологических ниш. Рассмотрим протоклеточных потомков, которые сначала были способны к фотосинтезу при помощи ультрафиолета, но содержали набор случайным образом синтезированных белков. Эти белки осуществляли непрерывную полимеризацию аминокислот с использованием химической энергии продуктов распада разрушившихся протоклеток. Даже находясь вне пределов воздействия энергии излучения, такие потомки все же продолжали функционировать, возможно повышая вероятность появления чередующихся линий потомства в этой новой гетеротрофной нише.

Развивая основные доводы в пользу гетеротрофного организма, осуществляющего фотосинтез при помощи ультрафиолета, и негенетических линий потомства, мы молчаливо допускали, что полимеры сахаров, аминокислот и нуклеотидов образовывались непосредственно путем столкновений активированных низкомолекулярных предшественников. Это допущение требует пересмотра, и ниже мы остановимся на механизме синтеза полимеров в протоклетке.

Большинство биологических реакций полимеризации протекает путем соединения двух молекул с кажущимся отщеплением молекулы воды. Эти реакции совершенно ошибочно называют реакциями конденсации с отщеплением воды из-за того, что суммарное уравнение выглядит

следующим образом:



Действительно, для того чтобы соединились две молекулы аминокислоты, необходимо удалить молекулу воды. Дело, однако, в том, что в нашем первичном водоеме аминокислоты и другие предшественники находятся в исключительно разбавленном водном растворе. Вода же присутствует в таком колоссальном избытке, что здесь едва ли могла протекать эта или какая-либо другая реакция конденсации с отщеплением воды. В принципе с подобной трудностью сталкиваются и в синтезе полинуклеотидов, и в синтезе полисахаридов, но мы рассмотрим все на примере синтеза полипептидов.

Известны три способа преодоления трудностей, связанных с водой: воду можно удалить высушиванием, аминокислоты можно перевести в химически реакционноспособную форму и активированные аминокислоты можно заставить соединяться с помощью ферментов.

Несмотря на то что большое число протоклеток часто подвергалось попеременному высушиванию и увлажнению, относительные концентрации аминокислот внутри протоклеток оставались очень незначительными. Тем не менее мы все-таки допускаем, что в какой-то степени синтез полимеров мог происходить благодаря высушиванию.

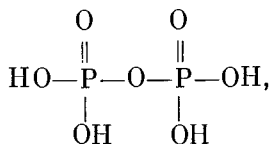
Гипотеза, предполагающая участие ферментов, кажется несостоятельной, во-первых, потому, что в тот ранний период ферментативные активности, носителями которых являлись белки со случайной последовательностью аминокислот, были очень слабыми и, во-вторых, потому, что все известные ферменты не соединяют аминокислоты, а превращают их сначала в реакционноспособные формы, которые затем конденсируются.

Остается единственная возможность — сделать аминокислоты реакционноспособными. В условиях Земли основной механизм, с помощью которого малые органические молекулы можно сделать реакционноспособными в водном растворе, заключается в соединении этих молекул с различными формами фосфата.

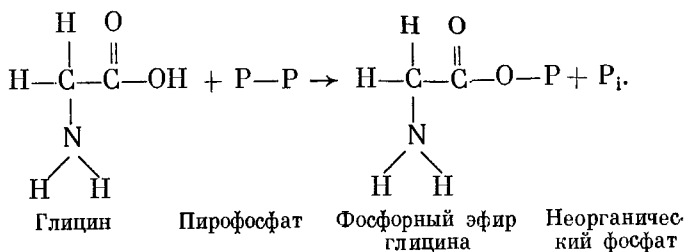
При переносе фосфатной группы энергия высвобождается или поглощается, поэтому в биологических системах благодаря таким переносам энергия запасается и затем используется в реакциях конденсации или в обмене веществ. В настоящее время высокоэнергетические связи, образуемые между фосфатами и органическими соединениями, обеспечивают протекание всех биологических реакций. Не исключено, что это было справедливо и для протоклеток.

Разберем простой пример использования реакций конденсации с активацией фосфатом и один возможный путь образования высокоэнергетических фосфатов.

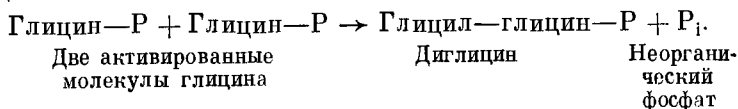
Рассмотрим соединение, пазываемое пиродфосфатом



которое для краткости будем обозначать P—P. Связь между двумя фосфатами содержит потенциальную химическую энергию, которая может высвободиться для активации органических соединений. Например, простейшая аминокислота глицин может быть активирована следующим образом:



При переносе фосфата на глицин часть энергии теряется, но сложноэфирная связь фосфата и глицина содержит более чем достаточно энергии для проведения реакции:



Следует отметить, что диглицин остается в активированном состоянии и при этом исключается реакция конденсации с отщеплением воды, так как в данной реакции участвуют активированные молекулы аминокислоты и происходит перенос фосфата. Очень многие малые органические биомолекулы способны легко вступать почти во все реакции в присутствии больших количеств воды в том и только в том случае, когда они активированы фосфатом. Общий вывод заключается в следующем:

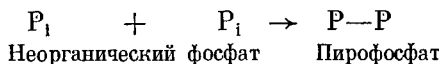
Синтез полимеров в прото клетках обеспечивали активированные фосфатом промежуточные соединения.

Реакции конденсации с отщеплением воды не свойственны современным биохимическим процессам, и, по-видимому, это правило следует отнести и к тем временам, когда существовали прото клетки. Реакции с переносом фосфата и сейчас, и тогда составляли единственный путь осуществления конденсаций в богатом водой окружении.

Остается невыясненным еще один момент. Для проведения реакций переноса фосфата требуется источник высокоэнергетического фосфата, простейшей формой которого является пирофосфат. Эта молекула неустойчива в водном растворе, и поэтому прото клетке был доступен

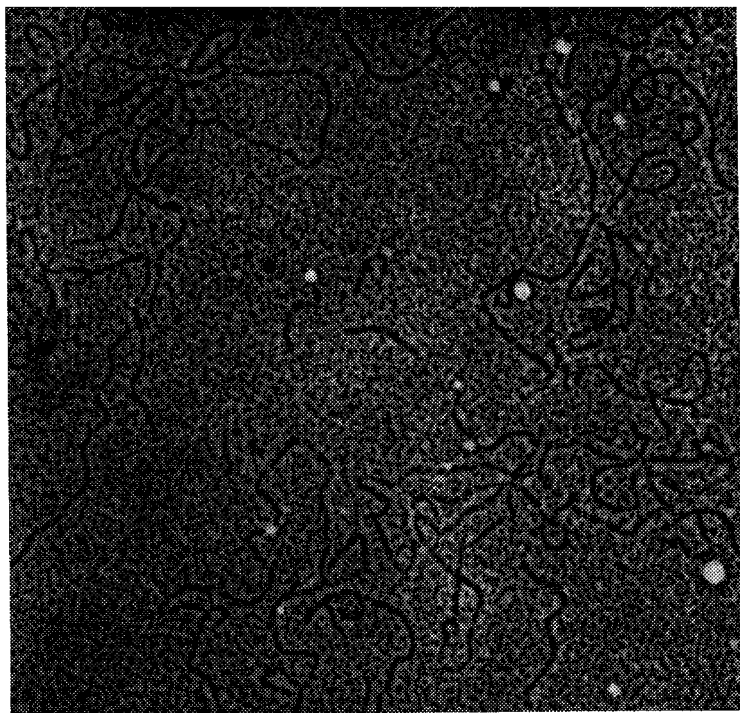
лишь растворенный неорганический фосфат P_i . Откуда же мог взяться необходимый для реакций в протоклетке пирогосфат?

Когда обособленная система, содержащая рецепторы энергии, подвергается воздействию энергии излучения, электроны переносятся на более высокие энергетические уровни: они могут как бы перекачиваться через мембрану. Таким путем устанавливается градиент зарядов, который является достаточно интенсивным для проведения следующей реакции:



Вероятно, фотосинтетическое образование пирогосфата было одним из важных свойств первичного метаболизма протоклеток. Современные фотосинтезирующие клетки формируют протонные градиенты заряда для проведения синтеза аденозинтрифосфата из аденозиндифосфата либо непосредственно — как при циклическом фосфорилировании, либо косвенно — как при нециклическом фосфорилировании. Этот процесс гораздо более эффективен, чем механизм образования пирогосфата, предложенный для протоклеток, но схема его по существу та же.

Замена реакций конденсации с отщеплением воды на реакции с переносом фосфата, составляющие основу наших биохимических процессов, началась с первой протоклеткой. Может быть, именно поэтому в сопряженных реакциях круговорот фосфора движет круговоротами всех остальных биоэлементов.



Глава 9

Генетика

▲ *Электронная микрофотография ядерной и митохондриальной ДНК из печени крысы; $\times 72\,000$. Молекулы ДНК расправлены на очень тонких коллодиевых пленках и оттенены сплавом платины и палладия. Белые пятна — это мельчайшие отверстия в пленке. Молекулы ДНК шириной примерно 20 Å выглядят как более темные, беспорядочно скрученные и вытянутые тяжи. В отличие от ядерной линейной ДНК митохондриальная ДНК является кольцевой. (Фото любезно предоставлено д-ром Филпоттом, Исследовательский центр НАСА в Эймсе.)*

Мы можем создать правдоподобную модель протоклеток, возникавших в ранний период в неустойчивых мелких водоемах. Но эти протоклетки весьма далеки от того, что мы называли бы клеткой, поскольку они не имеют ни генетического, ни белоксинтезирующего аппарата. Любой нерегулярный полимер, синтезированный в протоклетке, в лучшем случае мог бы передаваться от одной клетки другой в какой-то одной линии потомства и в конце концов подвергся бы распаду. В последующих главах мы попытаемся показать, как внутри протоклетки могли возникнуть, правда весьма примитивные, но функционирующие, генетический и белоксинтезирующий аппараты. Сущность нашего подхода составит внимательный анализ того, какими возможностями к взаимодействию обладали те полимеры, которые хаотически образовывались внутри протоклеток.

В данной главе мы остановимся на наиболее характерных чертах генетического и белоксинтезирующего аппаратов современных биологических систем. Термин «информация» относится только к специфической последовательности аминокислот или азотистых оснований.

Генетический аппарат в современной клетке представлен дезоксирибонуклеиновой кислотой (ДНК), в молекуле которой хранится информация. Двухцепочечная полимерная молекула ДНК состоит из азотистых оснований — аденина (А), тимина (Т), цитозина (С) и гуанина (G), каждое из которых соединено с сахаром (дезоксирибозой). Последовательно расположенные молекулы сахара удерживаются вместе фосфодиэфирными связями. Двухмерная модель молекулы ДНК представлена на рис. 9.1. Остов молекулы составляют две сахарофосфатные цепочки. Информация, хранящаяся в этой молекуле, заключена в последовательности ее оснований. Каждая цепь ДНК состоит из сахарофосфатного остова и оснований, отходящих от остатка сахара, и имеет химически заданное направление. В целом молекулу ДНК составляют две цепи, сложным образом закрученные одна вокруг другой, идущие в противоположных направлениях и удерживаемые вместе слабыми водородными связями, образуя

щились между основаниями (штриховые линии на рис. 9.1). Молекула ДНК содержит сотни тысяч пар оснований. Две цепи ДНК удерживаются вместе водородными связями только в том случае, если они комплементарны, т. е. если они подходят друг другу. А образует две водородные связи только с Т, а G образует три водородные связи только с С. Эти *правила спаривания оснований* лежат в основе копирования и функционирования генетического аппарата.

Если последовательность оснований для одного из

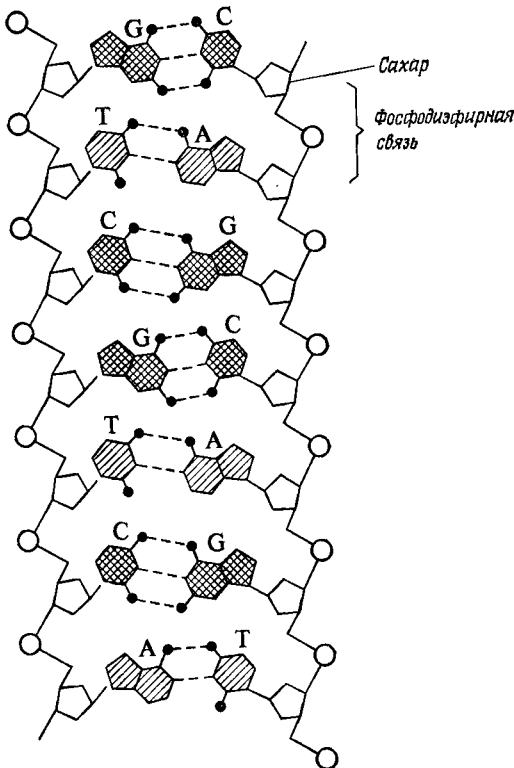
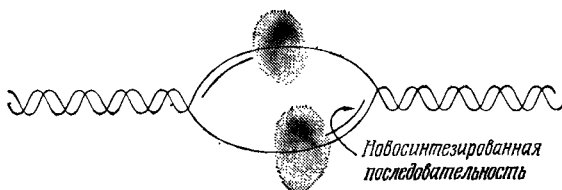


Рис. 9.1. Вторичная структура двухцепочечной молекулы ДНК. (Кориберг А. Синтез ДНК. — М.: Мир, 1977.)

С помощью полимеразы происходит подбор молекул-предшественников из общей смеси нуклеотидов по правилу спаривания оснований. Если основания подобраны правильно, то полимеразы смещается на одно основание, процесс подбора повторяется и два соседних основания дочерней цепи соединяются.

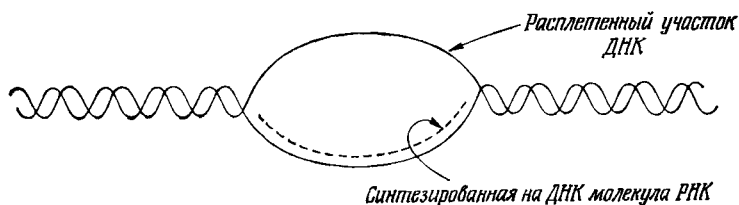


Описанным способом последовательность оснований родительской молекулы ДНК очень точно копируется с образованием двух дочерних молекул. Замечательной особенностью репликации ДНК является то, что ее точность обеспечивается специальными ферментами репликации, способными отличить правильные пары оснований от неправильных. Таким образом, точная репликация молекулы ДНК обусловлена как структурой ДНК, так и природой ферментов репликации.

Каким образом информация, заключенная в ДНК, переводится с языка оснований на язык аминокислот в молекуле белка? Ниже мы увидим, что в процессе такого перевода (в процессе трансляции), так же как и в процессе репликации ДНК, важную роль играют и правила спаривания оснований, и взаимодействия сложных белков.

Рибонуклеиновые кислоты (РНК) синтезируются в виде однопечечных молекул на молекуле ДНК. Основу структуры РНК, так же как и ДНК, составляет сахарофосфатный остов. К каждому остатку сахара, который здесь представлен рибозой, присоединено одно из оснований: А, G, C или U (U — урацил, соединение, родственное тимину; при спаривании оснований имеет одинаковую с ним конфигурацию).

Синтез молекул РНК происходит с помощью различных ферментов, в частности полимераз; в результате синтеза образуются цепи РНК, последовательности которых комплементарны отдельным участкам цепей ДНК.



РНК-полимераза, которая представляет собой довольно крупный фермент, в комплексе с кофакторами начинает синтез на определенном участке ДНК, имеющем специфическую последовательность оснований, согласно правилам спаривания оснований. Если комплементарность между основанием в цепи ДНК и основанием в цепи РНК достигнута, то примыкающие друг к другу основания РНК полимеризуются в одном из центров полимеразы; этот процесс повторяется вдоль одной из цепей ДНК до тех пор, пока полимераза не достигнет специфической последовательности оснований ДНК, функционирующей как стоп-сигнал. Образовавшиеся транскрипты РНК при этом отсоединяются от молекулы ДНК и теперь могут участвовать в синтезе белков. Копируется только одна из двух цепей ДНК, причем опять-таки РНК-полимераза узнает, какая цепь ДНК должна копироваться.

По этому единому механизму на ДНК синтезируются РНК-транскрипты трех классов: транспортная РНК (тРНК), матричная РНК (мРНК) и рибосомная РНК (рРНК).

рРНК после расщепления и модификации с помощью ферментов вместе с пятью десятками белков формирует рибосому — универсальную органеллу живых систем, на которой и происходит собственно синтез белка. Благодаря специфически организованной поверхности рибосомы на ней могут быть собраны все необходимые для синтеза белка исходные вещества в нужных пространственных соотношениях.

В последовательности оснований мРНК закодирована линейная последовательность аминокислот. После синтеза на ДНК мРНК способна находить рибосому, на поверхности которой она вместе с тРНК участвует в процессе декодирования.

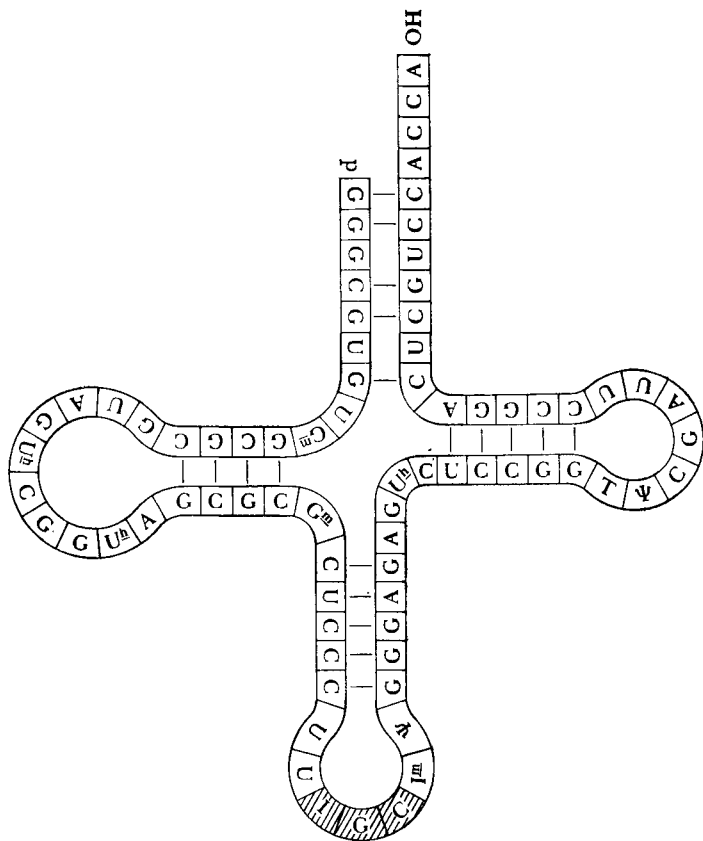


Рис. 9.2. Последовательность оснований и вторичная структура одной из молекул тРНК (Holley, The Nucleotide Sequence of a Nucleic Acid, 1966, Scientific American, Inc.).

Существует более двадцати классов тРНК, различающихся последовательностями оснований. Все тРНК синтезируются как линейные транскрипты ДНК, а затем под действием ряда ферментов подвергаются модификации: некоторые основания метилируются, другие оксиметилируются, третьи восстанавливаются и т. д. После модификаций тРНК формируются вторичные (называемые «клеверным листом») и третичные структуры молекул тРНК.

К одному из свободных концов молекулы тРНК ферментативным путем присоединяется один и тот же триплет оснований (ССА), а к концевому А этого триплета позднее прикрепляется аминокислота. В средней петле клеверного листа экспонированы три основания. На рис. 9.2 показана вторичная структура одной из молекул тРНК. Три или более концевых оснований всегда остаются неспаренными в силу геометрии рибозофосфатного остова.

тРНК определенного вида с помощью особого фермента специфически присоединяет одну из аминокислот. Этот фермент имеет центр, узнающий соответствующую ему молекулу тРНК, центр, узнающий определенную аминокислоту, и центр, связывающий аминокислоту с концевым А тРНК.

Для клеток, активно синтезирующих белок, характерно присутствие большого числа рибосом, высокое содержание тРНК с присоединенными к ним соответствующими аминокислотами и интенсивное образование копий мРНК.

На рис. 9.3 представлена упрощенная схема синтеза белка. мРНК образует непрочную связь с определенным участком рибосомы. Процесс декодирования начинается в «стартовом» комплексе, состоящем из тРНК и метионина (у бактерий — формилметионина). Три экспонированных основания (антикодон) тРНК находят соответствующий триплет (кодон) в мРНК и взаимодействуют с ним согласно правилам спаривания оснований. Со следующим кодоном в мРНК может взаимодействовать только комплементарный ему антикодон соответствующей тРНК, несущей аминокислоту; все остальные, неподходящие антикодоны отвергаются. В результате происходящих взаимодействий две аминокислоты оказываются тесно сближенными на поверхности рибосомы таким образом, что между ними ферментативным путем легко образуется пептидная связь. При образовании пептидной связи освобождается некоторое количество энергии и мРНК передвигается вперед на один триплет; процесс подбора кодон — антикодон и последующее образование пептидной связи повторяется многократно до тех пор, пока не достигается «стоп»-триплет, не кодирующий ни одну из аминокислот.

Наше схематическое изложение процесса биосинтеза белка может показаться сложным, хотя мы старались все

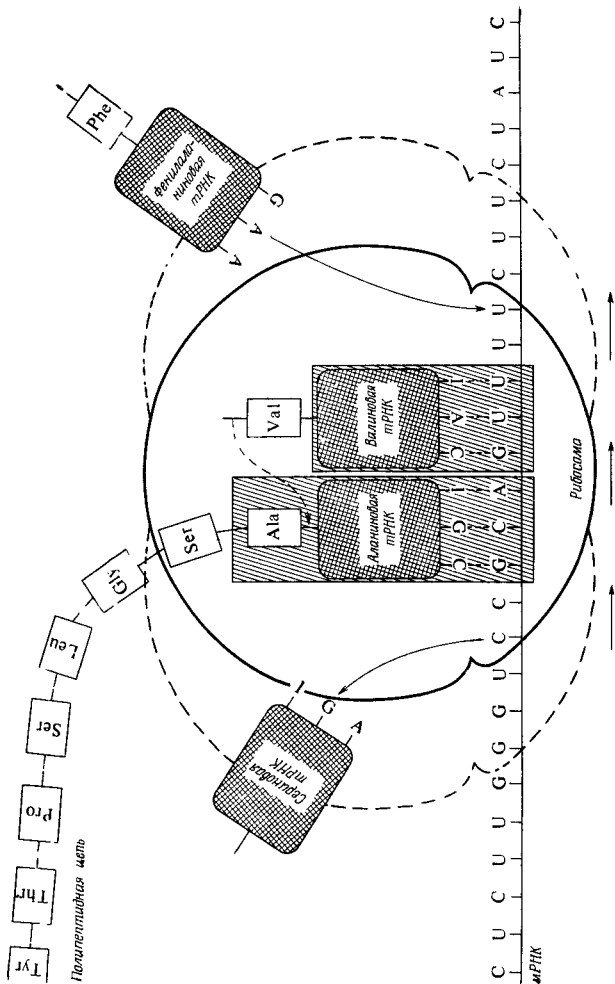
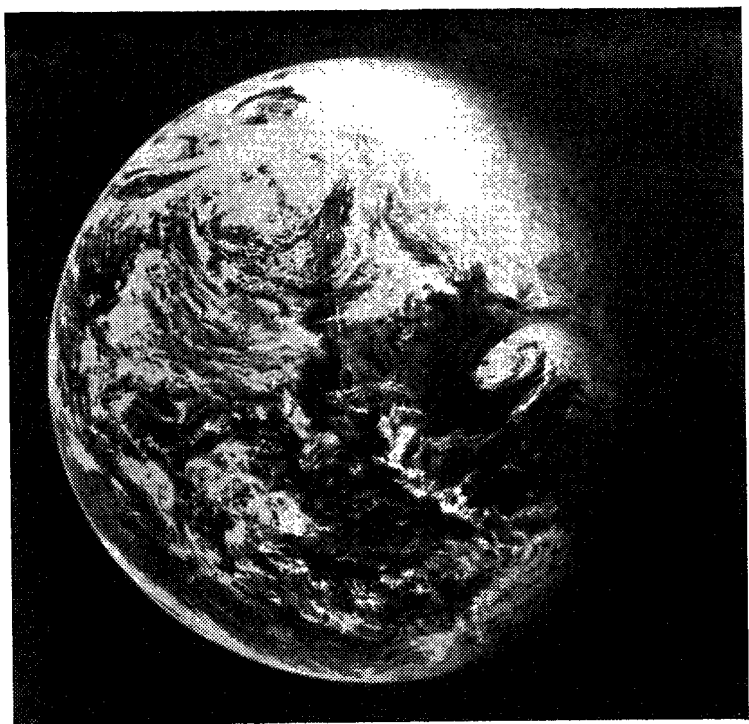


Рис. 9.3. Схема синтеза белка (Crick, The Genetic Code: III, 1966, Scientific American, Inc.).

упрощать. В действительности же в каждой из фаз этого процесса, если рассмотреть ее подробно, будут обнаруживаться все новые и новые детали. Однако для наших целей достаточно уяснить, что в целом в генетическом и белоксинтезирующем аппаратах используется большой набор белков и кофакторов, причем каждый из них имеет множество специфических участков, распознающих как нуклеотидные последовательности, так и различные аминокислоты. Информация, заключенная в последовательности оснований ДНК, передается более коротким последовательностям различных РНК, которые модифицируются сложными белками. В подборе тРНК и соответствующей ей аминокислоты также участвует семейство особых белков. С помощью специальных механизмов последовательность оснований переводится в последовательность аминокислот так, что каждый триплет ДНК отвечает одной отдельной аминокислоте. По-видимому, генетический код универсален: триплет, кодирующий данную аминокислоту у изученных в настоящее время бактерий, кодирует ту же самую аминокислоту в растительных или животных клетках.



Глава 10

Происхождение генетического аппарата протоклетки

▲ Вид на Калифорнию с околоземной орбиты.
(С любезного разрешения НАСА.)

Мы все согласны, что Ваша теория сумасшедшая. Вопрос, по которому мы разделились, — достаточно ли она безумна, чтобы быть правильной?

Нильс Бор

Каким образом у протоклеток, которые мы постулировали, могла развиться система, характеризующаяся описанными в предыдущей главе взаимоотношениями между белками и нуклеиновыми кислотами? В этой главе мы рассмотрим одну из возможностей такого развития. Мы не будем прослеживать весь ход эволюции этой системы (который, возможно, занял более 1000 млн. лет), покажем лишь, как могли возникнуть самые характерные ее свойства.

Для всех протоклеток характерна одна общая проблема. Даже если случайно в какой-нибудь протоклетке оказался бы полезный ей белок, возможный путь, который бы гарантировал изготовление копий этого белка для передачи дочерним протоклеткам, отсутствовал. Поэтому при образовании дочерних клеток он может быть передан только одной из них. Из-за отсутствия воспроизведения не было избытка специфических наследуемых свойств, которые могли бы подвергнуться естественному отбору.

Протоклетки действительно содержали полимеры нерегулярной структуры, причем скорее всего они не были такими большими, как современные биополимеры. Первичные «белки» представляли собой совсем небольшие молекулы, состоящие примерно из 5—7 аминокислотных остатков (в отличие от современных белков, насчитывающих 100—300 аминокислот). Первичные полинуклеотиды также содержали не миллионы, а 10—12 оснований. Многие эксперименты, в которых проводили полимеризацию аминокислот и нуклеиновых кислот в первичных условиях, подтверждают это общее положение. Если первичные полимеры были такими небольшими, то как они функционировали? Каталитический активный центр фермента почти всегда имеет небольшое число аминокислотных остатков. Остальная часть крупной биомолекулы нужна для контроля, стабилизации, достижения специ-

фических внутриклеточных центров, т. е. она служит носителем свойств, важных для целостного контроля, но не для катализа отдельной реакции.

В соответствии с этим мы можем несколько снизить масштабность проблемы и ограничиться рассмотрением синтеза небольших специфических пептидов и олигонуклеотидов.

Нам не потребуются также ни высокоразвитые ферменты, ни особые поверхности глин. Для объяснения возникновения генетической и белоксинтезирующей систем на самом простейшем уровне нам понадобится только рассмотреть взаимодействия коротких полинуклеотидов двух типов, необходимых для изготовления короткого пептида.

Для начала допустим наличие небольшой *генераторной* РНК, которая выполняет как генетическую, так и матричную роль, а также небольшого семейства прото-тРНК. Как могла бы работать такая система? Рассмотрим отдельно генетический и белоксинтезирующий аспекты этой первичной системы.

Представьте себе протоклетку, содержащую группу полинуклеотидов длиной около 12 мономеров (додекамер). В некоторых случаях это могли быть линейные молекулы, но, поскольку предшественники полинуклеотидов находились в большом разведении и попадались нечасто, вероятнее всего, додекамер замыкался по типу голова-хвосту с образованием маленькой кольцевой молекулы (это можно показать в лаборатории). Кольцевые формы полинуклеотидов химически более устойчивы, чем линейные, поскольку в них нет ни свободных гидроксильных групп, ни свободных фосфатных групп, доступных для случайного разрушения. Основания кольцевой молекулы свободны и могут спариваться со свободными нуклеотидами согласно правилам спаривания оснований. Медленно и с ошибками на этой кольцевой генераторной молекуле все же возможно образование копий комплементарного полимера без участия фермента. Однако так же, как это происходит в некоторых современных бактериальных системах, синтез комплементарной копии может продолжаться и за точкой инициации, и тогда образуется молекула более длинная, чем исходная. Не исключено также, что репликация может случайным образом начинаться в любой точке кольца. Поэтому

последовательности комплементарных копий являются результатом циклических перестановок генераторной последовательности.

Таким путем могут синтезироваться комплементарные копии небольших кольцевых генераторов, а также большие и малые линейные молекулы. Схема этапов первичной репликации представлена на рис. 10.1. Поскольку копирование могло начинаться в любой точке маленького двенадцатичленного генератора, линейные молекулы представляют собой результат случайных циклических перестановок повторяющейся генераторной последовательности.

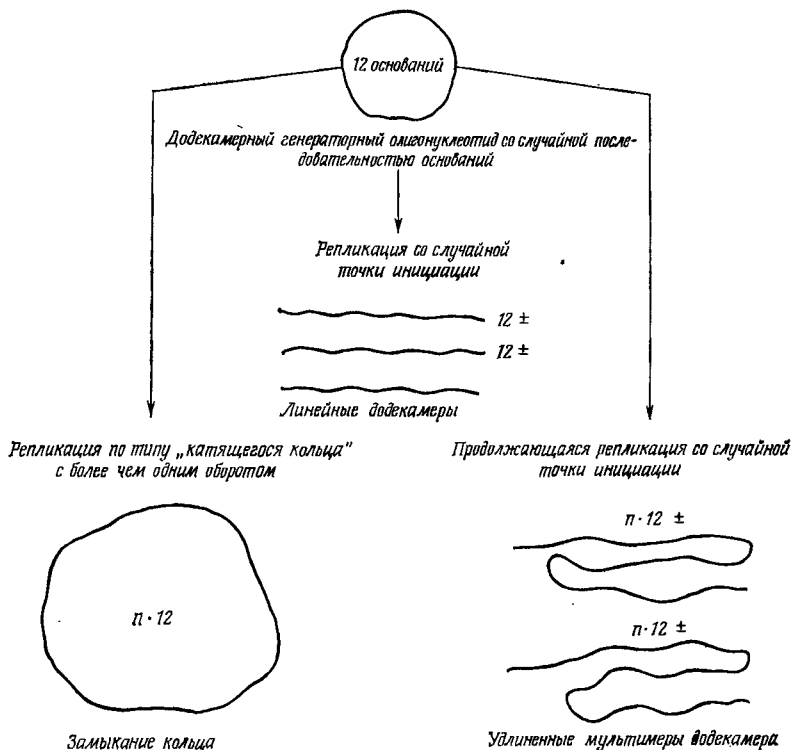


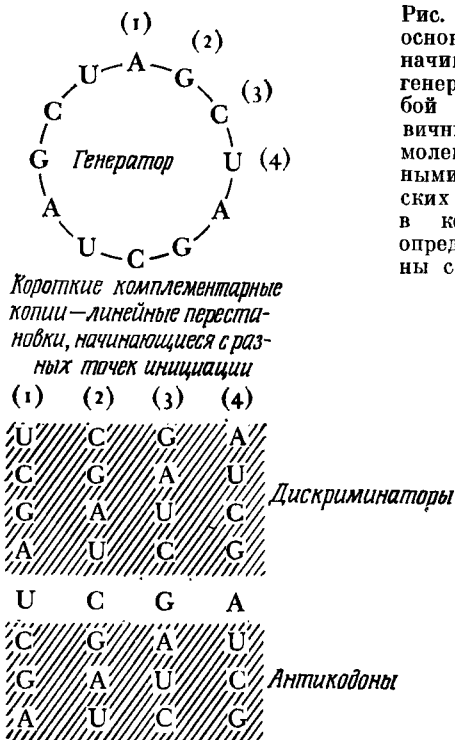
Рис. 10.1. Возможные продукты репликации примитивного додекануклеотида.

Допустим, что циклические комплементарные копии выполняли функции мРНК, а циклический генератор — генетическую функцию. Небольшие (а затем и более крупные) олигонуклеотидные фрагменты, полученные в результате перестановок, служили тем набором, из которого могли отбираться первичные тРНК.

На этой стадии возникает основная трудность. У ныне существующих тРНК подбор правильной аминокислоты, согласно ее антикодону, осуществляется крупными высокоорганизованными белками. Каким образом в первичной системе достигался правильный подбор без этих ферментов? Ниже мы обсудим ряд предположений, которые по своему характеру противоречат нашему принципу не обсуждать вероятность исторических случайностей.

Прежде чем преодолеть эту трудность, остановимся на некоторых исходных положениях. В настоящее время в синтезе белков используются двадцать с лишним аминокислот, которые подразделяются на четыре группы: основные, содержащие больше аминогрупп, чем карбоксильных групп, например лизин; кислые, содержащие больше карбоксильных групп, чем аминогрупп, например аспарагиновая кислота; неполярные, содержащие углеродный скелет с единственной амино- и карбоксильной группой, например лейцин; и полярные, имеющие дополнительные гидроксильные группы, например серин. Небольшие первичные пептиды, имевшие слабую каталитическую активность, могли без особой потери функции взаимодействовать с любой из аминокислот, принадлежащих к *одной и той же группе*. Итак, наша задача суживается; теперь мы должны определить способ подбора отдельными первичными тРНК не каждой из двадцати аминокислот, а каждой из четырех групп. Один из способов состоит в следующем: короткий отрезок последовательности оснований у акцепторного конца первичных тРНК действовал как дискриминатор (рис. 10.2). Дискриминатор с определенной последовательностью оснований мог выбирать с помощью заряда, водородных связей или других слабых взаимодействий, приводящих к притяжению или отталкиванию, аминокислоты одной группы чаще, чем другой. При этом семейства первичных тРНК, имеющие различные последовательности дискриминаторов, связывались со специфическими функциональными группами аминокис-

Рис. 10.2. Последовательности оснований, синтезированные начиная с различных точек генератора, представляют собой короткие молекулы первичных тРНК. Они являются молекулами, синтезированными в результате циклических линейных перестановок, в которых дискриминаторы определенным образом связаны с антикодоном.



лот. Те из активированных в виде фосфорных эфиров аминокислот, которые приближались к дискриминатору (или не отталкивались от него), могли связаться с концевой группой тРНК, в результате чего образовывалась активированная форма первичной тРНК. Связывание аминокислоты с тРНК, возможно, обеспечивалось энергией пиррофосфатной связи.

В этой схеме есть одна существенная трудность: на первый взгляд не ясно, каким образом может существовать какое-либо соответствие между антикодоном и дискриминатором первичной тРНК.

Но на самом деле определенное соответствие существует, и его можно показать. Представьте себе циклическую последовательность небольшого додекануклеотидно-

го генератора. Проанализируем линейные копии этой последовательности, начинающиеся с любого нуклеотида. Все копии должны быть короткими и одинаковой длины. Назовем один конец линейной копии дискриминатором, а другой участок, находящийся на определенном постоянном расстоянии от него, будет представлять собой антикодон. Поскольку все линейные копии являются результатом циклических *перестановок* генераторной последовательности, мы придем к неизменному результату:

в любом транскрипте, полученном в результате циклической перестановки, каждому дискриминатору соответствует единственный антикодон.

Несколько примеров случайно выбранных копий генераторных последовательностей приведено на рис. 10.2. Проанализируйте какие-нибудь другие и убедитесь, что их антикодоны будут для них единственными.

Описанное выше образование короткой первичной тРНК иллюстрирует принцип перестановок линейной последовательности: не исключено, что именно так синтезировались первые тРНК. При копировании генераторной молекулы любой длины, длинной или короткой, в полученных путем линейных перестановок молекулах всегда будет наблюдаться соответствие между дискриминатором и антикодоном.

Более крупные молекулы тРНК представляют собой продукт дальнейшей эволюции, но правило перестановок применимо и к ним. Соответствие между дискриминатором и антикодоном существует только благодаря перестановкам. Эйген изобрел очень простую и наглядную игру: последовательно 80 раз бросают четырехгранные кости, каждая грань которых помечена А, G, C и U, и записывают случайную выпадающую при этом последовательность оснований, которая представляет собой полинуклеотид со случайной последовательностью оснований. Цель игры: используя эту последовательность и правила спаривания оснований, найти такой способ складывания молекулы полинуклеотида, который обеспечил бы максимально возможное число комплементарно спаренных участков. Почти всегда получается структура типа клеверного листа, напоминающая тРНК. Это, по-видимому, свидетельствует о том, что при формировании более ус-

тойчивых форм линейные молекулы РНК со случайной последовательностью оснований часто образуют структуры, подобные тРНК. Однако соответствие между дискриминатором и антикодоном присуще только последовательностям, полученным в результате перестановок одного генератора, тогда как во *всем* семействе *случайно* синтезированных последовательностей (таких, как последовательности Эйгена) его нет, поскольку они не происходят от общего генератора.

Существуют ли данные, подтверждающие, что последовательность оснований дискриминатора способна специфически взаимодействовать с аминокислотами различных групп? Саксинджер и Поннамперума четко показали, что специфические взаимодействия между аминокислотой и олигонуклеотидом действительно существуют. Это положение подтверждается также и тем, что современные ферменты (полимеры аминокислот) с большой точностью распознают специфические короткие последовательности нуклеотидов.

Второе основание

	U	C	A	G	
<i>Первое основание</i>	U UUU } Phe UUC } UUA } Leu UUG }	UCU } UCC } Ser UCA } UCG }	UAU } Tyr UAC } UAA non UAG non	UGU } Cys UGC } UGA non UGG Trp	U C A G
C	CUU } CUC } Leu CUA } CUG }	CCU } CCC } Pro CCA } CCG }	CAU } His CAC } CAA } Gln CAG }	CGU } CGC } Arg CGA } CGG }	U C A G
A	AUU } Ile AUC } AUA } AUG Met	ACU } Thr ACC } ACA } ACG }	AAU } Asn AAC } AAA } Lys AAG }	AGU } Ser AGC } AGA } Arg AGG }	U C A G
G	GUU } Val GUC } GUA } GUG }	GCU } Ala GCC } GCA } GCG }	GAU } Asp GAC } GAA } Glu GAG }	GGU } Gly GGC } GGA } GGG }	U C A G

Третье основание

Рис. 10.3. Генетический код. Каждому триплету — кодону мРНК — соответствует аминокислота. Кодон, помеченный «non», не определяет ни одну из аминокислот; он сигнализирует об окончании процесса синтеза.

При любом объяснении происхождения первичных тРНК возникает еще одно затруднение. Казалось бы, нет никаких необходимых причин существования именно такого генетического кода, а не какого-нибудь другого. Современный генетический код представлен на рис. 10.3. 20 аминокислот кодируются 64 ($4 \times 4 \times 4$) триплетами оснований, т. е. код вырожден, так как одной аминокислоте соответствует более чем один кодон. Почему фенилаланин у всех организмов кодируется триплетом UUU и UUC? Хотелось бы призвать на помощь историческую случайность и естественный отбор и представить себе возможное многообразие одинаково вероятных кодов. Но это был бы не научный подход. Рассмотрим другие варианты ответа на этот вопрос.

В соответствии с правилом общности трофических уровней в экологии для всех организмов необходимо лишь сходство малых молекул, участвующих в их биохимических процессах; в нем нет требования общности генетического кода. Набор оснований — А, Г, С и U (или Т) — ограничен, но код сам по себе не определен.

Используя аргументы дарвиновского естественного отбора, можно представить ситуацию, приводящую к универсальности кода для всех сложных организмов, клетки которых имеют ядра. Клетки этого типа являются результатом комбинации и делений различных симбиотических прокариотов, следы которых остаются и поныне. Например, хлоропласты зеленых растений — эукариотические органеллы — обладают своими собственными белоксинтезирующим и генетическим аппаратами. В этом отношении с ними сходны митохондрии всех эукариотических клеток. Универсальность кода является важным требованием симбиоза, поскольку клетка поставляет молекулы тРНК и для себя, и для своих симбиотических компаньонов.

Нам неизвестны причины, по которым в ходе ранней эволюции прокариот появился единый код. Однако если бы (и это большое если) глубоких химических или физических причин появления универсального кода не было, то следовало ожидать, что мы обнаружили бы какие-то другие коды у бактерий, таксономически далеко отстоящих друг от друга.

Имеющиеся в настоящее время доказательства, подтверждающие универсальность генетического кода, ос-

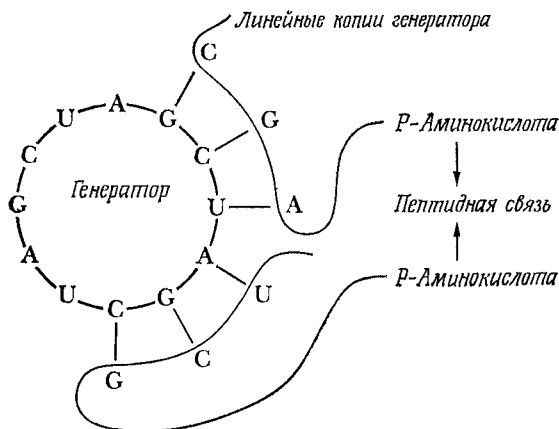


Рис. 10.4. Модель примитивного пептидного синтеза. Короткая кольцевая генераторная последовательность служит как генетическим материалом, так и переносчиком информации в пептидном синтезе. Копии генераторной последовательности, полученные в результате линейных перестановок; несущие аминокислоты определенных групп, присоединенные фосфоэфирной связью к дискриминатору, выстраиваются, согласно правилам спаривания оснований, вдоль генератора (мРНК), благодаря чему обеспечивается необходимое для образования пептидной связи расположение аминокислот. Поскольку аминокислоты находятся в активированной форме фосфорных эфиров, энергия, требуемая для образования пептидной связи, доступна в достаточном количестве.

пованы на одном прокариотическом организме *Escherichia coli*, код которого совпадает с кодом эукариот. До сих пор не исследовались никакие другие эволюционно отдаленные от *E. coli* прокариоты с целью определить, действительно ли генетический код универсален для всех прокариот.

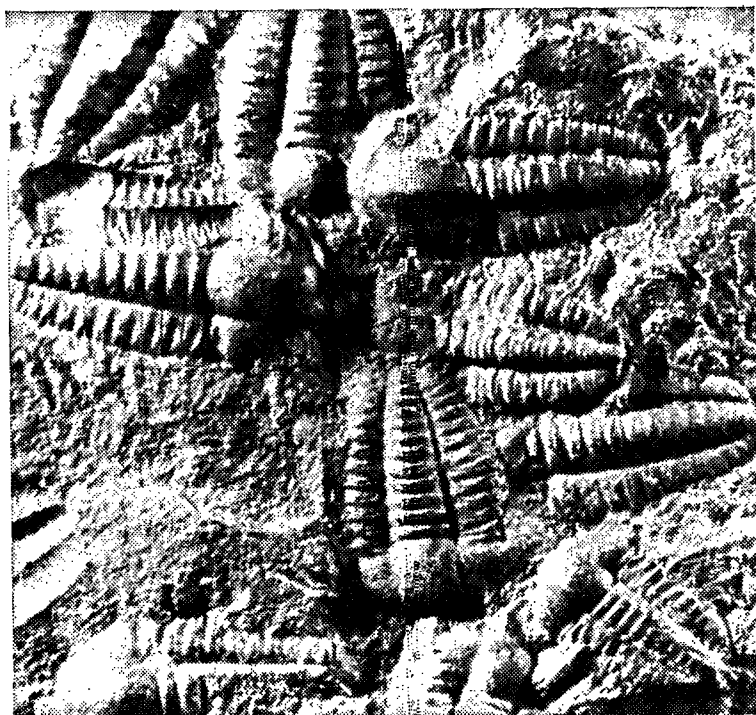
Итак, приходится признать, что существующих данных пока недостаточно для доказательства универсальности кода. Возможно, какая-нибудь новая информация в этой области будет получена при изучении таких бактерий, как клостридии. Еще более заманчивым (правда, маловероятным в наши дни) представляется исследование кода внеземных организмов.

Оставляя нерешенным вопрос об универсальности

кода, попробуем воспроизвести способ, которым примитивный «генетический» протобионт мог бы синтезировать специфический белок, и предложить, каким образом он мог бы передавать это свойство потомству.

Согласно нашей гипотезе, протоклетка содержит циклический генератор и семейство коротких (а позже и более длинных) молекул первичных тРНК, каждая из которых несет аминокислоту из группы, соответствующей ее дискриминатору. Задача состоит в том, чтобы синтезировать небольшой пяти-семичленный пептид, имеющий специфическую последовательность (рис. 10.4).

Допустим, что кольцевой генератор или его комплементарные копии служили как первичным генетическим материалом, так и неким двойником мРНК. Для того чтобы получить пептид со специфической последовательностью, мы должны лишь представить, как первичные молекулы тРНК, несущие аминокислоты, взаимодействуют с матрицей, так что аминокислоты располагаются в нужной последовательности. Во многих случаях подбор аминокислот с помощью взаимодействия кодон — антикодон будет неправильным, и тогда процесс будет замедляться. Но в общем синтез будет идти. Таким образом, протоклетка, обладающая генетическим аппаратом, сможет вступить в новый мир дарвиновского естественного отбора, поскольку теперь она способна изготавливать копии специфических пептидов и своего примитивного генетического материала. Все остальное — дело истории. Впрочем, так ли это?



Глава 11

Эволюция протоклеток, обладающих генетическим аппаратом

▲ Окаменевшие трилобиты. Трилобиты вместе с ископаемыми плеченогими и губками являются окаменелостями, свидетельствующими о том, что сложные многоклеточные формы жизни возникли около 600 млн. лет назад. Этим формам предшествовали 2000 млн. лет эволюции микробных и одноклеточных форм. Здесь показано скопление нескольких особей *Ellipsoccephalus hoffi*. [С любезного разрешения Hall (Foothill College, Los Altos, California).]

С появлением примитивного генетического аппарата обладавшие им линии протоклеток могли передавать обеим дочерним клеткам способность синтезировать специфические полипептиды. Образующиеся из этих дочерних клеток линии давали семейства родственных протоклеток с наследуемыми свойствами, которые были способны подвергаться истинному дарвиновскому естественному отбору. Мы кратко рассмотрим этот механизм и обсудим теоретически дальнейшее развитие ранней клеточной жизни.

В протоклетке с примитивным генетическим аппаратом содержалось лишь несколько коротких кольцевых молекул генераторной нуклеиновой кислоты и несколько коротких первичных тРНК. Этого едва достаточно для получения одного-двух полипептидов, состоящих из четырех-пяти аминокислотных остатков каждый. Каким образом в подобной примитивной системе могла возникнуть способность синтезировать специфические полипептиды, что позволило развиваться метаболическим функциям?

Во-первых, циклический генератор, например из двенадцати нуклеотидов, может реплицироваться непрерывно, образуя молекулы гораздо большего размера, чем исходные, которые сами могут замыкаться в кольцо (рис. 11.1). Для этого необходимо наличие нескольких пептидов, катализирующих образование олигонуклеотидов.

Постепенно образуются новые, более длинные молекулы двух типов: крупные кольцевые и линейные молекулы, полученные в результате циклических перестановок. Первые могут служить новыми генераторами, поскольку они имеют многократно удвоенную последовательность первоначального генератора. Крупные линейные молекулы путем самосборки будут переходить в более устойчивую конформацию «клеверного листа». Они представляют собой семейство линейных молекул, полученных в результате синтеза на удвоенных последовательностях исходного генератора, т. е. являются более крупными первичными тРНК. Таким образом, теперь в протоклетке имеется генетический аппарат, состоящий из 80 и более

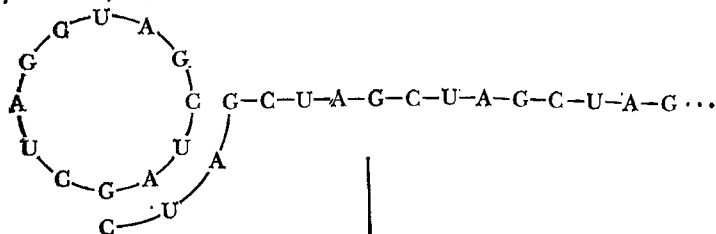
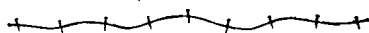
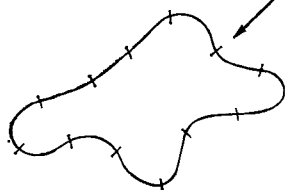
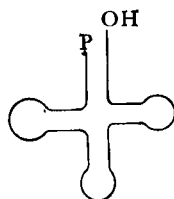
Первичный генератор*В результате репликации образуются**Крупные
кольцевые генераторы**Длинные копии—линейные циклические
перестановки, образующие при сборке
наиболее стабильную форму*

Рис. 11.1. Репликация кольцевых генераторов с образованием более крупных и сложных структур.

нуклеотидов, который позволяет синтезировать повторяющиеся полипептиды длиной около 25 остатков, и нескольких небольших пептидов.

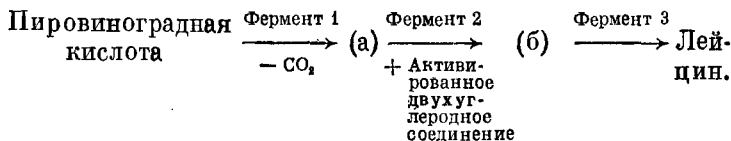
Несомненно, копирование первичных генераторов при помощи первичных пептидов — процесс неточный. Крупные генераторы содержат многократно повторенную последовательность первичного генератора, и в некоторых из повторов могут быть отклонения от исходной последовательности оснований. Если наблюдаются действительно

существенные изменения первичного генетического материала, называемые мутациями, то может начаться действие естественного отбора.

Посредством дупликации и редупликации обладающие наследственностью протоклетки могли довольно быстро развить способность к синтезу крупных белков, имеющих множество различных функций. Сам генератор, взаимодействуя с крупными белками, мог превратиться в крупную кольцевую протохромосому. После того как в состав примитивной клетки стали входить большие молекулы, обладающие функциональными возможностями, можно говорить о ее биологической природе.

Как мы предполагаем, в это время внешняя среда представляла собой постоянный источник всех необходимых малых молекул в низких концентрациях, а в результате фотосинтетического использования солнечного ультрафиолетового излучения становилась доступной химическая энергия для получения пироглутамата. После заселения этой среды первичными клетками биологической природы она изменялась. Некоторые низкомолекулярные питательные вещества использовались быстрее, чем внешняя среда могла их поставлять. Начинало сильно сказываться давление отбора, благодаря которому приобретали преимущества клетки, способные модифицировать соединения, родственные недостающим. Используя эту аргументацию, Горовитц представил развитие клеточного метаболизма как отбор, идущий шаг за шагом в *обратном направлении*, от более сложных малых молекул к более простым.

В целом метаболизм представляет собой ряд стадий, осуществляемых посредством ферментов, на каждой из которых молекула слегка видоизменяется до тех пор, пока не образуется необходимое соединение. Например, аминокислота лейцин образуется из пировиноградной кислоты в ряду превращений:



Предположим теперь, что во внешней среде иссякает источник лейцина, требующегося для синтеза белка.

Клетки, которые содержат белки, способные модифицировать все еще доступное соединение (б), будут отбираться с большей эффективностью. Аналогично при истощении соединения (б) будут отобраны те клетки, которые способны модифицировать (а) в (б) и затем (б) в лейцин. Подобная схема эволюции характерна для всей сложной сети биохимических реакций клетки; она подчиняется требованиям развития общности экологических трофических уровней на основе общего набора малых органических соединений.

Все биологические системы используют одинаковые пути биохимических превращений — одинаковые пути метаболизма сахаров, синтеза аминокислот, синтеза и распада жиров и т. д. Для общности трофических уровней в экологии требуется только общий набор малых молекул и, по-видимому, не требуется универсальности метаболических путей. Существующую универсальность метаболических путей можно объяснить двояко. Согласно первому объяснению, все современные живые существа являются потомками единой исходной популяции. Мы отвергаем это объяснение, поскольку для объяснения желаемого результата в нем используется историческая случайность. Другое объяснение состоит в том, что каждый метаболический путь в современных биохимических процессах является результатом эволюции в направлении максимального использования единственно пригодных молекул. Сейчас это объяснение основано на том убеждении, что во Вселенной существует порядок. У нас нет другого способа проверить принцип использования единственно пригодных молекул, кроме изучения жизни, имеющей независимое происхождение, а это недоступно.

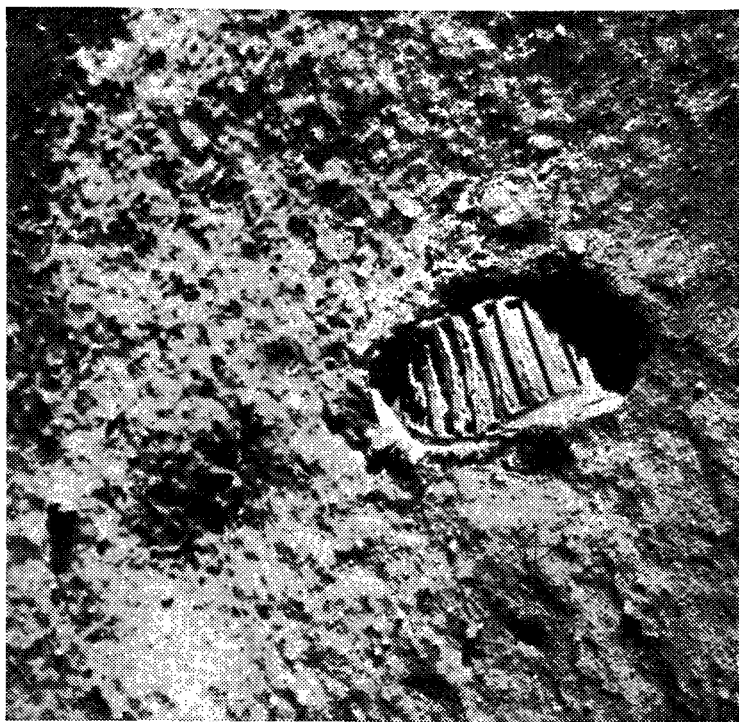
По мере эволюции метаболических путей со все возрастающей скоростью возникают новые экологические ниши. Наряду с другими формами метаболизма возникают гетеротрофные системы — те, которые используют в качестве источников химической потенциальной энергии органические соединения.

Солнце является поставщиком энергии, но вместе с тем его ультрафиолетовое излучение повреждает клетки, так как под действием этого излучения может нарушаться структура белков и нуклеиновых кислот. Порфирины, роль которых мы обсуждали ранее, поглощают и ультра-

фиолетовое излучение, и видимый свет. В водоемах на глубине нескольких метров большая часть ультрафиолета поглощается водой, тогда как видимый свет поглощается незначительно. Можно представить себе интенсивный отбор организмов, проходивший в тот ранний период в отношении использования видимого солнечного света. Для такого отбора существенным было наличие в организме хлорофилла (порфирина) и ферментной транспортной системы электронов.

Как только появились фотосинтезирующие клетки, использующие видимый свет, в качестве побочного продукта фотосинтеза в атмосферу стал высвобождаться молекулярный кислород. Со временем биологическая продукция кислорода определила его расходование в геологических циклах. Озоновый экран, не пропускающий ультрафиолетовое излучение, появился в верхних слоях атмосферы Земли около 2250 млн. лет назад. С тех пор и примерно до 600 млн. лет назад уровень кислорода в атмосфере постепенно возрастал до его современного значения — 20% (по объему). Когда это произошло, появились новые экологические ниши, а при концентрации свободного кислорода, превышающей 3%, стало возможным его использование в качестве высокоэффективного акцептора электронов в аэробном метаболизме.

Все эти и многие другие события могут происходить после появления в протоклетке генетического аппарата и системы синтеза белка, обуславливающих существование клеточных популяций, для которых возможен естественный отбор. Как только появляется клетка, обладающая этими двумя признаками, возникновение жизни уже не проблема.



Глава 12

Перспективы

▲ *Первый след человека на Луне. (С любезного разрешения НАСА.)*

...в конце пути наших поисков мы придем туда, откуда мы начали, и впервые узнаем это место.

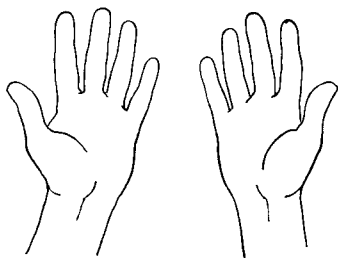
Т. Элиот

В этом очерке о происхождении жизни многое осталось допущением, а еще больше вовсе не было затронуто. Отчасти это было сделано для того, чтобы не упустить из вида центральные проблемы, отчасти для того, чтобы я мог изложить свою точку зрения, а не просто дать обзор взглядов других исследователей, подробно рассмотренных в многочисленных книгах. К настоящему времени в области происхождения жизни остался целый ряд слабых мест и вопросов, которые требуют пересмотра или подкрепления фактами.

Хорошо известно, что многие малые органические молекулы обладают оптической активностью. Оптически активные молекулы являются зеркальными отображениями друг друга, подобно левой и правой руке (рис. 12.1). Когда аминокислоты синтезируются небиологическим путем, образуются равные количества обоих энантиомеров (зеркально-симметричных форм) каждой аминокислоты. Так, экспериментируя с искровым разрядом или выделяя аминокислоты из метеорита, мы находим равные количества L-валина и D-валина, L-лейцина и D-лейцина и т. д. (Обозначения L и D относятся к оптическим свойствам чистых форм энантиомеров.)

Для биологических систем требуются определенные энантиомеры: в белках используются только L-аминокислоты, в РНК — только D-рибоза и т. д. Это связано с тем, что пространственная форма биополимеров требует наличия или всех L-, или всех D-мономеров. Ни один белок не мог бы иметь структуры с регулярной периодичностью, требуемой для каталитических свойств, если бы в него входили и L-, и D-аминокислоты. Точно так же РНК не была бы пространственно упорядоченной цепью оснований, если бы в ее структурном остоле использовались как L-, так и D-формы рибозы.

Но почему в биополимеры входят только L-аминокислоты или только D-сахара? Долгое время считали, что химические свойства L- и D-энантиомеров идентичны. Если



Левая рука

Правая рука

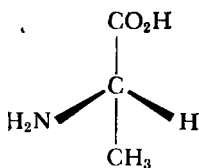
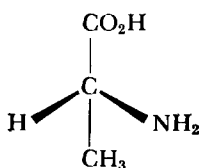
*L-аланин**D-аланин*

Рис. 12.1. L- и D-энантимеры как зеркальные отображения друг друга.

бы это было так, то разумно было бы предположить случайный выбор тех или других изомеров. Но, видимо, это не так.

Если вы просмотрите любой справочник по физике и химии, вы сразу заметите, что физические свойства некоторых энантиомеров сильно варьируют. Заметно отличаются растворимости, точки плавления и другие свойства. Следовательно, оптические изомеры, используемые в биологических системах, были отобраны в ходе эволюции, по-видимому, в связи с тем, что они обладали какими-то более предпочтительными свойствами.

Тиманн недавно исследовал скорости полимеризации смесей активированных L- и D-аминокислот. Он обнаружил, что образующиеся полимеры всегда содержали больше L-, чем D-аминокислот. Другие исследователи сообща-

ли о подобных явлениях как о любопытном отступлении от общепринятого положения.

Для того чтобы точно выяснить, какие химические особенности L-аминокислот повышают вероятность их полимеризации, требуются дальнейшие исследования. Наблюдения Тиманна свидетельствуют в пользу той точки зрения, согласно которой оптические изомеры, входящие в состав биологических систем, единственно пригодны для выполняемых ими функций и отбор их происходил не случайно.

На протяжении всей книги мы пользовались допущениями, основанными на усредненных данных. Наша планета, которая состоит из вещества, повсеместно встречающегося во Вселенной, образовалась из остатков газопылевой туманности около своей протозвезды. Она, подобно многим другим планетам, находящимся в той же области и имеющим тот же размер, путем дегазации приобрела атмосферу, в которой протекали самые разнообразные химические реакции, приведшие в конце концов к образованию биосферы. Если достаточно тщательно подойти к изучению вопросов: почему мы устроены так, а не иначе; почему клетки имеют именно такие, а не другие размеры; как будет развиваться система наследственности, — то можно найти на них ответы. Можно даже прийти к заключению, что путь создания биологических систем, характерный для всей Вселенной, есть единственный и наилучший путь, подобно тому как в ней существует единственный и наилучший путь слияния водородных атомов.

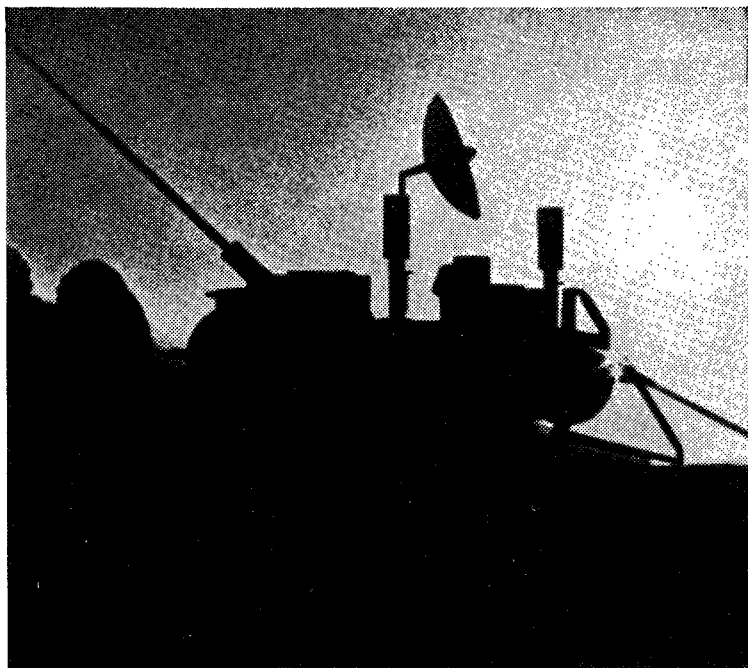
Но не будет ли такая точка зрения в действительности утонченной формой «земного шовинизма»? Нет ли других таких же хороших путей, помимо известного нам, по которым могла бы развиваться экосистема? Как отбор в ходе химической эволюции, так и естественный отбор протоклеток, обладающих наследственностью, вслепую протекавший на протяжении длительных периодов времени, в эволюционном отношении представляли собой поворотные пункты, к которым, если они были однажды пройдены, возврата нет. Будь временная последовательность событий в ходе отбора иной, могли бы мы сами быть такими, какие мы есть?

Сейчас на эти вопросы ответить невозможно. Мы мо-

жем привести серьезные причины, свидетельствующие о том, что единственно возможный набор биоэлементов — это тот, который мы имеем, или что клетка — это логическая единица для любой экосистемы. Но мы не можем найти убедительных доводов, доказывающих, что данная экосистема должна была бы произвести данный вид деревьев или человека.

Один из шагов на пути к разрешению этих вопросов — изучение жизни на других планетах, возникшей независимо и вследствие сходных с земными событий. Миссия «Викинга» на Марсе не сообщила о наличии там каких-либо органических веществ или микробов, и, следовательно, на Марсе нет жизни. Венера, по-видимому, слишком горяча. У Меркурия нет атмосферы, и он слишком близок к Солнцу. Такие гигантские планеты, как Юпитер и Сатурн, мы вообще не обсуждаем уже потому, что они совершенно отличны от Земли в химическом и физическом отношении. Видимо, жизнь — явление, возникшее в пределах Солнечной системы только на нашей Земле. Быть одиночками — трагично. Даже если бы нашими компаньонами были марсианские микробы, было бы заманчиво использовать их для проверки здравости нашего постулата о неизбежности возникновения жизни. Изучение форм жизни независимого происхождения позволило бы нам оценить, в какой степени в процессах отбора действует случайность.

Для того чтобы получить утешение по поводу нашего одиночества в Солнечной системе, можно поразмыслить над замечанием, что в нашей Галактике около 10^{11} звезд и, согласно принятой нами модели образования звезд, планеты — неизбежный исход этого процесса. Но чтобы доказать, что мы не одиноки, мы должны отправиться к звездам или сделать так, чтобы звезды приблизились к нам.



Глава 13

Действительность

▲ Спускаемый аппарат «Викинга». (С любезного разрешения НАСА.)

В этой книге нет ответов на все вопросы, связанные с происхождением жизни, поскольку на многие вопросы мы просто не знаем ответов. Однако на ряд вопросов мы попытались ответить. Некоторые ответы были даны в виде фактов, — некоторые — в виде вероятных моделей, а другие — в виде правдоподобных догадок, которые еще предстоит проверить в будущих экспериментах. Эти ответы не всегда были настолько четкими и ясными, насколько этого обычно требует научная монография. Напомним, однако, что главная цель книги — выработать логически единую локальную космологию. В данной главе мы отметим те области, в которых спорные моменты и догадки преобладают над фактами, и предложим ряд экспериментов, в которых ощущается потребность.

Прежде всего планеты не обязательно являются обычным результатом рождения звезд. Некоторые астрономы, например Кумар, считают, что почти все звездные системы при своем образовании стремятся стать двойными, чаще всего такого типа, где одна из звезд относительно велика, а другая совсем мала. В самом деле, если бы масса Юпитера в пять раз превышала ее теперешнее значение, он был бы достаточно большим для того, чтобы в нем начались внутренние термоядерные реакции, и наша система могла бы быть двойной, совершенно отличной от того, что мы сейчас имеем. Хотя наш довод в пользу повсеместности планетных систем основан на низком моменте центральной звезды нашей системы, можно себе представить, как такая проблема была разрешена в двойной системе: не исключено, что большая звезда передала часть своего момента количества движения меньшему спутнику. Сейчас трудно сказать, какая из двух гипотез ближе к истине. Единственные определенные данные, которыми мы располагаем, относятся к нашей собственной планетной системе. У нас нет причин считать, что создавшие ее силы в каком-либо отношении уникальны. Конечно, многие аспекты космогонии имели бы более прочное основание после того, как мы смогли бы ответить на вопрос, обычны или редки планетные системы.

Следует также отметить, что приведенные в данной

книге представления о первичной атмосфере не являются общепринятыми. Некоторые исследователи, основывая свои заключения на данных, касающихся химического равновесия, считают, что эта атмосфера состояла из метана и аммиака. Мы уже упоминали об этом в гл. 4. Однако мы не обсуждали другие возможные атмосферы, состоящие в основном из двуокиси углерода, воды и азота, особенно те, которые рассматривает Руби. Согласно Руби, содержание двуокиси углерода в атмосфере примитивной Земли было, вероятно, гораздо выше, чем сейчас. Возможно, это действительно так, но существуют факты, не подтверждающие этого положения. Во-первых, Руби не принимает в расчет, что в первичных вулканических выбросах было по крайней мере в пять раз больше окиси углерода, чем двуокиси. Во-вторых, если бы двуокись углерода присутствовала в значительных количествах, то она растворилась бы в воде океанов, что привело бы к закислению этой воды. Выветривание пород протекало бы очень быстро, и поэтому минералы, отлагавшиеся в осадочных породах, должны были бы весьма отличаться от пород, отлагавшихся позже. Однако этого не наблюдается; в известных осадочных породах не обнаружено ни намека на подобную неоднородность.

В-третьих, мы исходили из того, что в экспериментах, имитирующих химическую эволюцию, могут быть с легкостью получены все биомономеры. Это верно лишь в самом общем смысле. Такие соединения, как сахара, которые очень реакционноспособны, обычно не обнаруживаются в экспериментах, имитирующих химическую эволюцию. Сахара могут быть синтезированы в концентрированных щелочных растворах формальдегида, и это послужило аргументом в пользу возможности их синтеза, однако ни один из сахаров не был обнаружен в реакциях с использованием искрового разряда. Для химика-органика это не должно быть удивительно, поскольку любые синтезированные сахара быстро прореагировали бы с образующимися в изобилии реакционноспособными промежуточными соединениями. Общепринятым является мнение, что в открытом и большом мире, где существовали маленькие теплые водоемы, сахара имели множество микронизов, но в замкнутом объеме небольшой колбы период их полураспада был слишком мал для того, чтобы химик

мог выделить и обнаружить их прежде, чем они прореагируют с другими компонентами.

Еще одну трудность в химической эволюции представляет собой «проблема выбора». С помощью каких химических механизмов был сделан выбор именно тех аминокислот, которые составляют биологическое подмножество? Почему в набор пуринов и пиримидинов входят именно те, которые обнаруживаются в биологических системах, а не какие-либо другие? Ответы на подобные вопросы найдены пока лишь в очень небольшом числе случаев, но есть все основания надеяться, что скоро их будет значительно больше. Например, недавно было обнаружено, что комплексы глины с некоторыми ионами металлов специфически связывают только аминокислоты, входящие в биологическое подмножество, и совсем не связывают другие аминокислоты. Было показано также, что пуриновые и пиримидиновые основания, используемые в биологических процессах, являются наиболее устойчивыми среди оснований, способных спариваться с помощью водородных связей. Наибольшая трудность, к разрешению которой пока нет подходов, заключается в крайне неустойчивой природе сахаров и той центральной роли, которую они играют в метаболизме в целом. Кажется логичным, что сахара должны быть краеугольным камнем обмена веществ, поскольку их молекулы столь чувствительны к любому воздействию и неустойчивы, но пока нет убедительных работ, в которых это было бы четко показано.

Действительно ли сначала должны были появиться протоклетки или же с помощью глины, эвапоритов и др. могли быть обеспечены достаточно высокие локальные концентрации полимеров и метаболизм появился до протоклеток? В соответствии с «бритвой Оккама» (принципом, который состоит в том, что следует предпочитать гипотезу, вводящую наименьшее число предположений) наиболее вероятным является вариант, согласно которому сначала появились протоклетки. Данные о микроскопических подтверждают этот вариант. Однако известно, что несколько групп исследователей активно изучают влияние различных глинистых минералов на полимеризацию аминокислот и нуклеотидов. Правы ли они, продолжая заниматься этими вопросами, и не теряют ли они зря время? Нет. Какова бы ни была непосредственная роль

глин в первобытные времена, они (и другие хорошо охарактеризованные поверхности) представляют собой двумерные аналоги различных поверхностей внутри протоклетки. Все, что мы узнаем о хорошо определенных поверхностных свойствах глин, можно с большим успехом применить ко многим внутренним поверхностям, разграничивающим разные фазы протоклеток. Однако предложенные в экспериментах с глинами механизмы концентрирования, включающие испарение, нуждаются в самой тщательной проверке. Когда предполагают, что водоем, содержащий аминокислоты, испаряется и в нем остаются кристаллические аминокислоты, способные вступить в реакцию конденсации с отщеплением воды за счет нагревания, необходимо учесть абсолютно все. Кроме аминокислот там присутствуют и другие вещества. Никто еще не выделял продукты, образующиеся в колбе с морской водой в условиях искрового разряда и не подвергал ее содержимое нагреванию для того, чтобы посмотреть, что при этом происходит.

Как развился генетический аппарат? Предложенный здесь механизм — всего лишь догадка. Любой предлагаемый механизм будет догадкой, пока мы не получим конкретных данных, основанных на анализе внеземной жизни. Генетический аппарат — продукт примерно 1000 млн. лет эволюции, и строить догадки о том, что происходило в этот промежуток времени, будучи неуверенными в данных, касающихся окружающей среды и путей отбора, почти безрассудно. Новое в представленной здесь схеме состоит в том, что между дискриминатором и антикодонном первичной тРНК обязательно существует соответствие, обусловленное перестановками. Конечно, новизна не доказывает справедливости догадки, и подобные догадки — всего лишь догадки. Но это предположение более чем догадка. Хорошо известно, что в настоящее время существует фиксированное соответствие между белковыми и нуклеиновыми последовательностями. Чтобы это соответствие существовало сейчас, оно в каком-то виде должно было существовать и при возникновении системы. В любых механизмах, предлагаемых для объяснения возникновения генетического аппарата, это обстоятельство необходимо учитывать.

В этой книге допускалось, что механизм отбора, по-

средством которого оптически активные формы аминокислот, сахаров и других молекул стали компонентами эволюционирующих предбиологических систем благодаря паличию у них энантиомерных форм, известен. По-видимому, это не так. Предложенный механизм основывался на том, что физические свойства L- и D-энантиомеров отличаются. Некоторые исследователи не придают значения небольшим различиям между энантиомерами; другие утверждают, что эти различия проистекают от лабораторных ошибок или вследствие работы с нечистыми образцами L- и D-форм. Известна всего лишь одна работа Тиманна, упоминавшаяся в гл. 12, целью которой было непосредственно показать небольшие различия в физических свойствах энантиомеров, хотя необходимость таких работ совершенно очевидна. В 1969 г. Моровиц на основе теоретических расчетов пришел к выводу, что между энантиомерами должны существовать небольшие различия, но никаких экспериментальных данных, подтверждающих этот вывод, он не представил. Как показано в обстоятельном обзоре Тиманна, научная литература изобилует примерами небольших различий между энантиомерами, так что остается только ждать решающих экспериментов.

Гипотеза образования сложной эукариотической клетки как результат симбиоза прокариотических клеток, обладавших различными возможностями, быстро завоевала популярность, однако она относится скорее к проблеме ранней биологической эволюции.

Остановилась ли эволюция на человеке? Является ли человек конечным этапом развития жизни? Считать так, все равно что придерживаться взгляда, согласно которому Земля находится в центре Вселенной. Еще на заре развития техники возникло представление о самовоспроизводящихся автоматах. Вычислительным машинам разрешено участвовать в шахматных турнирах при условии, что время, которое они используют для передвижения фигур, ограничено. Экспериментальная работа в области искусственного интеллекта вычислительных машин зашла столь далеко, что некоторые машины способны разговаривать с ничем не подозревающим собеседником и проявлять существенные человеческие качества. Возможно, мы являемся разновидностью сообразительных обезьян, кото-

рые спроектировали еще более сообразительные вычислительные машины, следуя естественному развитию Вселенной. Даже если это так, мы оставим нашим вычислительным машинам в наследство одно очень человеческое качество, может быть, самое человеческое из всех — любопытство.

Литература

Список данных ниже литературных источников далеко не исчерпывающий. Полная библиография по химической эволюции и происхождению жизни имеется в:

West M. W., Ponnampertuma C. Bibliography on Chemical Evolution and the Origin of Life, Space Life Sciences, 2, 225—295, 1970.

Это сводка более чем 1500 ссылок на книги и журнальные статьи. Библиография Уэста и Поннамперумы периодически обновляется в выпусках журнала «Origins of Life», публикуемого D. Riedel Company, Dordrecht, Holland.

Дополнительная литература к гл. 1, 2 и 3

Faul H. Ages of Rocks, Planets and Stars, New York, McGraw-Hill, 1966.

Gingerich Owen, ed. New Frontiers in Astronomy: Readings from Scientific American, San Francisco, W. H. Freeman and Company, 1975.

Gingerich Owen, ed. Cosmology ± 1 : Readings from Scientific American, San Francisco, W. H. Freeman and Company, 1977.

Hoyle Fred. Highlights in Astronomy, San Francisco, W. H. Freeman and Company, 1975.

Hoyle Fred. Ten Faces of the Universe. San Francisco, W. H. Freeman and Company, 1977.

Дополнительная литература к гл. 4.

Clark S. P., Jr., Turekian K. K., Grosman L. Model for the Early History of the Earth. In: The Nature of the Solid Earth, E. C. Robertson, ed. New York, McGraw-Hill, 1972.

Gass I. G., Smith P. J., Wilson R. C. L. Understanding the Earth, New York, Academic Press, 1971.

Kummel Bernard. History of the Earth: An Introduction to Historical Geology, 2nd, ed., San Francisco, W. H. Freeman and Company, 1970.

Mason Brian. Principles of Geochemistry, New York, John Wiley and Sons, 1966.

Phinney R. A. The History of the Earth's Crust, Princeton, N. J., Princeton University Press, 1968.

Press F., Siever R., eds. Planet Earth, 2nd, ed., San Francisco, W. H. Freeman and Company, 1978.

Urey H. C. The Planets, Chicago, University of Chicago Press, 1952.

Urey H. C. Evidence Regarding the Origin of the Earth, Geochimica et Cosmochimica Acta, 26, 1—14, 1962.

Wilson J. T., ed. Continents Adrift and Continents Aground: Readings from Scientific American, San Francisco, W. H. Freeman and Company, 1976.

Windley B. F., ed. The Early History of the Earth, New York, John Wiley and Sons, 1976.

Дополнительная литература к гл. 5—12

- Bernal J. D.*, *Origin of Life*, Cleveland, World Publishing Company, 1967. [Имеется перевод: Бернал Дж. Возникновение жизни. — М.: Мир, 1969.]
- The Biosphere: A Scientific American Book*. San Francisco, W. H. Freeman and Company, 1970.
- Buvét R., Ponnampertuma C.*, eds. *Molecular Evolution I: Chemical Evolution and the Origin of Life*, Amsterdam, North-Holland, 1971.
- Calvin M.* *Chemical Evolution*, Oxford and New York, Oxford University Press, 1969. [Имеется перевод: Кальвин М. Химическая эволюция. — М.: Мир, 1971.]
- Ehrensward G.* *Life: Origin and Development*, Chicago, University of Chicago Press, 1962.
- Fox S. W.*, ed. *The Origin of Prebiological Systems*, New York, Academic Press, 1965. [Имеется перевод: Происхождение предбиологических систем/ Под ред. А. И. Опарина и С. Фокса. — М.: Мир, 1966.]
- Gibor A.*, ed. *Conditions for Life: Readings from Scientific American*, San Francisco, W. H. Freeman and Company, 1976.
- Haldane J. B. S.* *Science and Human Life*, New York, Harper and Brothers, 1929.
- Hanawalt P. C., Haynes R. H.*, eds. *Chemical Basis of Life, An Introduction to Molecular and Cell Biology: Readings from Scientific American*, San Francisco, W. H. Freeman and Company, 1973.
- Keosian J.* *The Origin of Life*, New York, Reinhold Publishing Corporation, 1964.
- Kimball A. P., Oro J.* *Prebiotic and Biochemical Evolution*, Amsterdam, North-Holland, 1971.
- Margulis L.*, ed. *The Origin of Life*, London, Gordon and Breach, 1970.
- Опарин А. И.* *Возникновение жизни на Земле.* — 3-е изд. — М.: Изд-во АН СССР, 1957.
- Опарин А. И.* *Материя → жизнь → интеллект.* — М.: Наука, 1977.
- Rutten M. G.* *The Origin of Life by Natural Causes*, Amsterdam, Elsevier, 1971. [Имеется перевод: Руттен М. Происхождение жизни (естественным путем). — М.: Мир, 1973.]

- Абсолютная звездная величина 23
- Автоматы 98
- энергия и ее рецепторы 98—99
- Азот, сопряженный круговорот 77
- Азотистые основания, образующиеся в экспериментах по химической эволюции 70
- Аккреция 44—45
- Аминокислоты, взаимодействие с олигонуклеотидами 125, 128
- концентрация в первичном океане 71—72
- — — первобытных водоемах 86
- L-формы в биомолекулах 37
- образующиеся в экспериментах по химической эволюции 70—71
- полимеры 104
- роль глины и ионов металлов в их отборе из биологического подмножества 146
- Антикодон 118—119
- подбор аминокислот 125
- Астеронды 42
- Атмосфера, метан и аммиак 60—61
- примитивной Земли, давление 51—52
- фотодиссоциация воды 57—58
- эволюция 56—58
- Атомная единица массы 25
- Белки, комплексы с ионами металлов 81—82
- Белки, размер 122
- синтез 118—120
- участие в репликации ДНК 114—115
- Биологические события, сопоставление с геологическими 95
- Биомолекулы, активация фосфатом 109—110
- диффузия 81
- образование и ходе химической эволюции 63
- синтез термический 67
- Биоэлементы 75—77
- общность исходных соединений 80—81
- онзагеровские сопряженные круговороты 77
- циркуляция 75—77
- Вирусы 81
- Вода, обязательное наличие ее в биологических системах 76
- фотодиссоциация 57—58
- Водород, водородная связь 127
- слияние ядер атомов 18—19, 22—23, 41
- сопряженный круговорот 77
- улетучивание 57—58
- Вселенная, возраст 20
- Вулканические газы, выделение в атмосферу 55—56
- — на первичной Земле 49—50
- — реакции при воздействии энергии 63—64
- — состав 50—52, 62
- — температура при извержении вулканов 50

- Галактика, количество звезд 47
Гелий 19
Генератор 133—135
Генетическая изменчивость, роль в экологии 78
Генетический аппарат, последовательность оснований ДНК 112—114
— — характерные черты в современных биосистемах 112—120
— код, время эволюции 122
— — вырожденность 129
— — гипотеза происхождения 122—131
— — соответствие кодон—аминокислота 128
— — универсальность 129
Геологические события, сопоставление с биологическими 95
Гетеротрофы, фотосинтез при помощи ультрафиолета 106
Глины, роль в возникновении жизни 89
Гравитационные силы 44
Граница раздела фаз 98

Двуокись углерода в атмосфере примитивной Земли 51—52
Дефект массы 18—19, 22
Диаграмма Герцшпрунга—Рессела 23—24
Дискриминатор 125—127
ДНК, генетическая информация 112—114
— модель 112—113
— правила спаривания оснований 113
— репликация 114—115
— — точность 115
— ядерная и митохондриальная из печени крыс 111

Естественный отбор 133
— — роль в эволюции путей биохимических превращений 134—136

Жизнь, определение 72—82
Жирные кислоты, образующиеся в экспериментах по химической эволюции 70

Звезда Барнарда 46
Звезды, возраст 23—25
— — вычисление 22—25
— диаграмма Герцшпрунга—Рессела 23—24
— количество в Галактике 47
— образование 37—41
— сверхновые 19
— скорость вращения, измерение 46—47
— температура 15
— типа Т Тельца 41
— химический состав 12
— цвет 23
— эволюция 23
— ядерные реакции 18
Земля, возраст 31—34
— доядерная атмосфера 50—52
— примитивная, атмосфера 49
— — температура 52
— условия окружающей среды в начале существования 60
— формирование ядра 54—55
— хронологическая шкала 33

- Извержение вулкана Суртсай 48
 Изотопы 25, 27
 — в химических реакциях 27
 — обогащение биологических систем 27
 — радиоактивные 28—29
 — — короткоживущие 45
 — — период полураспада 29—30
 — — применение для установления возраста 29—31
 — — распад, механизмы 28, 29
 — — скорость распада 29
 — свинца, содержание и источники 32
 Историческая случайность 37
 Источники энергии в первобытных природных условиях 67
 — — на примитивной Земле 52—54, 56
- Кислород, давление и ход ядерной стадии образования Земли 51
 — — при послейдерных извержениях 55
 — значение для экологии 75
 — источники 52—53
 — круговорот 77
 — расход в процессах выветривания 58
 — скорость биологического образования 58
 Клетка, размер 81
 Клеточная теория 98
 Коацерваты, модель протобионтов 84—86
 — синтез из полиадениловой кислоты и гистона 85
 Кодон 118—119
 Кометы, образование 45
- Конденсация 107—108
 Константы скорости реакций 51
 Концентрационный градиент в модельных протоклетках 101—102
 — разрыв 85—86
 Красное смещение 17, 20
 Кремний 76
- Межзвездное вещество 38, 40
 Метаболизм, эволюция 134—136
 Металлы, роль ионов в биологии 81—82
 Метан в атмосфере примитивной Земли 51—52
 Метеорит Murchison 43
 Метеориты как источник энергии на примитивной Земле 54
 Микроископаемые, выделение из древнейших горных пород 91—93
 — соотношение с протоклетками 146
 Микроструктуры органические 83
 — — и протоклетки 91
 — — самосборка 91
 — — свойства 90—91
 Миссия «Викинга» на Марсе, результаты 142
 Молекулы-мишени 100—102
 Момент количества движения, образование планет 41, 46
- Нейтрон 27
 Ниша временная 79
 — экологическая 78
 — — гетеротрофы 106, 136
 — — фотосинтез 137

- Озоновый слой 52—53
 — — формирование 58
 Океаны, возникновение 56
 Окись углерода в атмосфере
 примитивной Земли 51—52
 Окружающая среда, изменение
 в ходе эволюции примитив-
 ной Земли 57
 — — требования устойчивости
 и сложности 100
 Олигонуклеотиды 123
 Определение возраста Земли
 32—34
 — — метеоритов 32
 — — осадочных пород 33
 Оптические изомеры 139
 — — химические свойства 140—
 141
 Органический автомат 100—101
 — — разрушение 100—102
 — — репликация 102—103
 — бульон в первобытных водо-
 емых, концентрация 85—86
 Осадочные породы, выделение
 микроскопических 91—93
 — — древнейшие 57
 — — состояние окисления же-
 леза 58
 — — формация Онвервайт 93
 — — — Фиг-Три 93
 Пептиды 123
 Первичные белки, размеры 123
 Периодическая таблица элемен-
 тов 17, 25—26
 Пиррофосфат, синтез 109—110
 Планетные системы 45—46,
 144—145
 — — типы моделей и теорий
 возникновения 37—38
 — — формирование 41—45
 Планетоиды, образование 44—45
 Планеты, аккреция 44—45
 — — земного типа 44
 — — масса относительно массы
 солнечной системы 42
 — — определение возраста 25
 — — типа Юпитера 43
 Полимеры биологические 106—
 108
 — — классы 80—81
 — — образующиеся в модельных
 экспериментах 66, 70
 — — самоорганизация в прото-
 клетке 89—91
 Полинуклеотиды, размеры пер-
 вичных молекул 122
 Порфирины, комплексы с иона-
 ми металлов 99—100
 — рецепторы энергии, 99, 137
 Последовательность оснований
 нуклеиновых кислот, синтез
 РНК на ДНК 115—116
 — — — — случайная 127—128
 Прокариотические клетки, раз-
 мер 79
 Протенноиды, каталитическая
 активность 87, 104
 — образование микросфер 87
 Протобичонт, определение 84
 Протозвезды 39—40
 — сжатие 40
 — типы 41
 — эволюция 39—41
 Протоклетки, деление 104
 — — естественный отбор 122
 — — концентрация биомолекул
 103, 104
 — — линии потомков 105—106
 — — обладающие генетическим
 аппаратом 133—135
 — — пассивный вид отбора 105
 — — преодоление концентрацион-
 ного разрыва 103—104

- Протоклетки
 — примитивный белковый синтез 130—133
 — роль границы раздела фаз 103
 — синтез полимеров 105—107
 — — протонный градиент 100—101
- Протопланеты 44
- Путь электронного захвата 28—29
- Радиоактивный распад, виды 28—29
 — — источник энергии 53—54, 67, 69—70
- Распространенность элементов в космическом пространстве 16—17, 49
 — — во Вселенной 16
 — — короткоживущих 45
- Реакции типа Фишера—Тропша 67—69
- Рибосомы 116, 118—119
- РНК генераторная 123—126
 — дискриминаторы 125, 126
 — кольцевая форма 123
 — матричная 116—118
 — — в генераторной последовательности 126—127
 — — перестановки в последовательности оснований 124
 — примитивная 125—126
 — рибосомная 116
 — синтез на ДНК 115—116
 — транспортная 116—118, 125, 126
- РНК-полимераза 116
- Самосборка гидрофобного материала 98
- Сахара, синтез в экспериментах по химической эволюции 145—146
- Сера, сопряженный круговорот 77
- Системы, движимые энергией, сложность 79—80
- Слабые взаимодействия 125
- «Сложность», «информация» и биология 78—82
- «Смолистые промежуточные продукты» Юри 61
- Солн, концентрация и роль в первобытных водоемах 86
- Солнце, главная последовательность 36
 — затмение 21
 — мощность излучения 22
- Спектр звезды 15
 — поглощения 116
 — эмиссионные линии 15
- Спектроскоп 12, 13
- Спектроскопия, измерение момента количества движения 47
- Статистически случайное событие 36—37
- Строматолиты 93—96
- Трилобиты 132
- Туманность 12, 16, 38
 — в созвездии Орiona 11
 — размеры и концентрация газа 38
 — фрагментация 39
- Углеводороды, образующиеся в экспериментах по химической эволюции 70
- Углерод, сопряженный круговорот 77

- Ударные волны, использование
в синтезе органических соединений 67—68
- — как источники энергии на
примитивной Земле 53
- Ультрафиолетовое излучение
52—53
- — как источник энергии на
примитивной Земле 67
- — разрушение органических
веществ 71
- — фотоллиз метана 97
- Уширение спектральной линии,
измерение скорости вращения
звезд 46—47
- Физические законы, универ-
сальность 36
- Фосфор, сопряженный круго-
ворот 77
- Фосфорилирование циклическое
110
- Фотосинтез 78
- Циркуляция сопряжения 75—
77
- Эволюция путей биохимических
превращений 134—136
- химическая 50, 60—72
- — модельные эксперименты
50, 63
- — — — полученные продук-
ты 70
- — реакционноспособные про-
межуточные продукты 65
- — экспериментальное под-
тверждение 71
- Экология 74
- трофические уровни 80—81
- Эксперименты по химической
эволюции, реакционноспособ-
ные промежуточные продук-
ты 70
- с искровыми разрядами
(Юри—Миллера) 59, 63—67
- Электрические разряды на при-
митивной Земле 53
- Энантиомеры 139
- Энергии излучения, организа-
ция системы 75
- — роль в биологических си-
стемах 80
- Эукариотические клетки, проис-
хождение 129
- — размеры 81
- — эволюция 79
- Эффект Доплера 17, 46—47

Оглавление

Предисловие редактора перевода	5
Предисловие	8
Глава 1. Химия Вселенной	11
Глава 2. Возраст звезд и планет; периодическая система элементов	21
Глава 3. Образование планетных систем	35
Глава 4. Возникновение и эволюция земной атмосферы .	48
Глава 5. Химическая эволюция	59
Глава 6. Определение жизни	73
Глава 7. Протобионты	83
Глава 8. Органические автоматы	97
Глава 9. Генетика	111
Глава 10. Происхождение генетического аппарата прото-клетки	121
Глава 11. Эволюция протоклеток, обладающих генетическим аппаратом	132
Глава 12. Перспективы	138
Глава 13. Действительность	143
Литература	150
Предметный указатель	152

Клэр Э. Фолсом

ПРОИСХОЖДЕНИЕ ЖИЗНИ

Научный редактор Т. И. Жилиева
Мл. научн. редактор О. А. Горгун
Художник В. Е. Карпов
Художественный редактор Л. М. Кузнецова
Технический редактор Н. И. Борисова
Корректор В. И. Постнова

ИБ № 2661

Сдано в набор 17.04.81.
Подписано к печати 25.09.81.
Формат 84×108¹/₃₂.
Бумага кн. журнальная.
Гарнитура обыкновенная. Печать высокая.
Объем 2,50 бум. л.
Усл. печ. л. 8,40. Усл. кр.-отт. 8,59.
Уч.-изд. л. 7,67. Изд. № 4/1262.
Тираж 30 000 экз. Зак. 266. Цена 55 коп.

ИЗДАТЕЛЬСТВО «МИР»
Москва, 1-й Рижский пер., 2.

Ярославский полиграфкомбинат
Союзполиграфпрома при Государственном
комитете СССР по делам издательств,
полиграфии и книжной торговли.
150014, Ярославль, ул. Свободы, 97.