

ГЛАВА 5

Эволюция космоса и Земли

***Чтобы в огромном массиве всевозможных научных фактов обнаружить некие общие черты, исследователь должен внимательно прислушиваться и присматриваться к Природе, пытаясь постичь ее универсальные принципы. Если однажды ему это удалось, начинается работа, результаты которой часто содержат открытие таких взаимосвязей, о которых никто и не подозревал.

Альберт Эйнштейн.

***Речь по поводу принятия в Академию наук в 1914 году=Antrittsrede vor der Akademie 1914

5.1. Большой Взрыв

История возникновения нашей метagalактики — то есть системы галактик, из которых состоит Млечный Путь, — до сих пор полностью еще не выяснена. Тем не менее, существует ряд обоснованных гипотез и ***модель=моделирование, поддерживаемые большинством современных физиков и астрономов. Речь идет о модели Большого Взрыва, в основу которой положены идеи ***Альфера, Германа и Гамова, разработанные в сороковых годах двадцатого века [?, ?]. Эта модель, в ее основной форме называемая стандартной моделью, основана, по большому счету, на пяти важных экспериментальных наблюдениях [?].

1. Изучение спектральных линий звезд показывают, что метagalактика, за исключением некоторых незначительных отклонений, имеет единый химический состав. Доминирующими веществами являются водород и гелий, массовые доли которых колеблются от 77% или, соответственно, 22%; следующими по распространенности элементами оказываются кислород и железо.

2. Спектры элементов удаленных галактик демонстрируют ***постоянное=систематическое смещение в красную часть спектра. Значение этого смещения линейно возрастает по мере увеличения расстояния между наблюдателем и объектом наблюдения.
3. Данные измерения радиоволн, идущих из космоса, доказывают существование ***поля излучения, гомогенно и изотропно наполняющего космическое пространство. Спектральные характеристики этого так называемого фонового излучения приблизительно соответствуют излучению черного тела, имеющего температуру около 2,7 К; плотность фонового излучения составляет примерно 450 фотонов на кубический сантиметр.
4. Итоги астрономических наблюдений показывают, что ***крупномасштабное распределение галактик соответствует некоторой постоянной плотности массы, которая, по современным оценкам, достигает, по меньшей мере, 0,3 барионов на каждый кубический метр метagalактики.
5. Согласно выводам, полученным косвенным путем из анализа процессов радиоактивного распада в метеоритах, следует, что некоторые компоненты, входящие в состав определенных метеоритов, возможно, возникли 14–24 миллиардов лет назад.

Перечисленные нами факты нуждаются в небольших комментариях. Первые попытки изучения спектральных линий звезд были предприняты еще Густавом Кирхгофом и Робертом Бунзенем, которые в 1859 году в Гейдельберге занимались разработкой метода спектрального анализа. Их новый метод, предназначавшийся для определения химических элементов, скоро показал себя как чрезвычайно мощный инструмент, пригодный для исследования Солнца и других удаленных небесных тел. Ученые получили возможность доказать, что в химический состав Солнца и звезд входят те же элементы, что и в состав Земли. После того, как спектральному анализу были подвергнуты все более удаленные галактики, исследователи обнаружили, что химический состав нашей метagalактики, в среднем, един, и в процентном соотношении выглядит следующим образом:

- 77% водорода,
- 22% гелия,
- 0,8% кислорода,

- 0,1% железа,
- 0,1% остальные элементы.

Дальнейшие наблюдения подтвердили удивительную однородность и изотропность галактики и в отношении других важных физических параметров. Поскольку тяжелые ядра образовались лишь значительно позже, для эволюционной модели релевантны, в первую очередь, массовые доли (относительно совокупной массы) легких ядер.

Открытие факта ***систематического смещения спектров удаленных объектов принадлежит американскому астроному Эдвину Пауэллу Хаббл, обнаружившему в 1929 году красное смещение спектров галактик, пропорциональное расстоянию R , на которое они удалены:

$$V = H \cdot R. \quad (5.1)$$

Константа H называется постоянной Хаббла. Размерность этого коэффициента ***обратна времени; точное значение неизвестно. Проводимые наблюдения позволяют дать приблизительную оценку для обратного значения постоянной Хаббла:

$$H^{-1} = 10\text{--}23 \text{ миллиарда лет.} \quad (5.2)$$

В дальнейшем мы будем исходить из значения 20 миллиардов лет. Относительно большая погрешность основана на том, что измерения дальности даже для ближайших больших скоплений галактик на расстоянии 50 миллионов световых лет крайне сложны.

Третий пункт был посвящен открытию фонового, или реликтового, излучения. Двое американских исследователей, Арно Пензиас и Роберт Уилсон, планомерно изучали при помощи ***рупорного рефлектора ***для радиоволн внеземные радиоволны. Добившись высокой чувствительности аппаратуры, они в 1964 году в результате тщательного анализа всех проведенных измерений пришли к заключению: существует ненаправленное слабое радиоизлучение, ***с равномерной интенсивностью окружающее Землю со всех сторон. Измерение спектрального ***распределения этого излучения дало в результате температуру около 2,7 К. Напрашивался вывод о том, что все ***мировое пространство заполнено находящимся в состоянии теплового равновесия ***фотонным газом, температура которого составляет приблизительно 2,7 К. Последующие измерения позволили уточнить это значение, дав результат 2,726 К с колебаниями около 20 μ К [?, ?].

Предположение, касающееся того, что плотность массы в метagalактике находится ***в хорошем приближении к некоторой константе, представляет собой экстраполяцию всего астрономического опыта (принцип Коперника), и с увеличением объема наблюдений оно получает все новые и новые подтверждения. В 1958 году Ян Хендрик Оорт на основе наблюдений ***ярких галактик при учете соотношений между их массами и светимостью дал следующую оценку средней плотности ***барионной материи:

$$\rho \geq 1,7 \cdot 10^{-29} \text{ г} \cdot \text{см}^{-3}.$$

Это значение ***связано с еще большей погрешностью, однако именно оно подтверждено независимыми наблюдениями и исследованиями гелия и дейтерия, дающими результат [?]

$$\rho \geq 5 \cdot 10^{-29} \text{ г} \cdot \text{см}^{-3}.$$

Нуклонная плотность ***сегодня равна, следовательно,

$$n_n \geq 3 \cdot 10^{-7} \text{ см}^{-3},$$

что соответствует приблизительно

$$0,3 \text{ нуклона на кубический метр.}$$

Последнее, пятое из вышеперечисленных экспериментальных наблюдений основано на определении возраста метеоритов. В качестве «космических часов» служат радиоактивные атомные ядра с большими периодами полураспада: торий-232, уран-238, плутоний-244, йод-129, лютеций-176, гафний-176, рений-187, осмий-187. Оценочное значение для среднего возраста установлено в пределах 17,6 миллиардов лет с погрешностью ***плюс-минус 4 миллиарда.

Поскольку галактики образовались, предположительно, уже в первый миллиард лет существования нашей метagalактики, ее возраст с достаточной степенью уверенности должен находиться где-то в пределах ***между 14 и 24 миллиардами лет [?].

Любая гипотеза об истории возникновения нашей метagalактики должна давать удовлетворительные объяснения хотя бы тем пяти перечисленным нами выше экспериментально подтвержденным фактам. По сей день эта проблема вызывает весьма оживленные дискуссии в космологии, причем все шире распространяется мнение, согласно которому теоретическая интерпретация данных фактов должна основываться на выдвинутой Эйнштейном в конце 1915 года общей теории относительности. Фундаментальная

работа, опубликованная Эйнштейном в 1916 году в ***«Annalen der Physik», называлась ***«Основы общей теории относительности». Некоторое время спустя Эйнштейн представил вниманию Прусской Академии наук следующую свою работу ***«Космологические***», в 1917 году увидевшую свет в ***сборнике докладов Академии.

Можно показать, что гипотеза о фотонном, или ***излучающем, космосе дает для малого временного интервала от начала расширения вселенной очень хорошее приближение, что позволяет получить следующую зависимость ***удаления от времени в начале расширения:

$$R(t) \sim \sqrt{t}. \quad (5.3)$$

Из данного закона расширения видно, что первоначальные расстояния между всеми телами должны быть крайне малы, то есть плотность космоса вскоре после начала расширения должна быть чрезвычайно высока. В соответствии с законами термодинамики, предполагается — согласно Альферу, Герману и Гамову (1948), — что сразу после начала расширения ***система оказалась во власти сверхвысоких температур; отсюда возникла модель «Большого Взрыва». Попробуем оценить существовавшие при этом температуры.

Кинетическая энергия релятивистской частицы (фотона) в расширяющемся космосе ***равна ее импульсу и в то же время обратно пропорциональна расстоянию, то есть

$$E = p \sim R^{-1} \sim t^{1/2},$$

на основании чего температура может быть выражена, ***согласно (5.3), как средняя кинетическая энергия:

$$T(t) = c \cdot t^{-1/2}. \quad (5.4)$$

Поскольку к настоящему времени, то есть приблизительно ***при $t = 10^{20}$ с, температура фотонов фонового излучения составляет примерно 2,7 К, то значение ***постоянных находится около

$$c \approx 10^{10} \text{ К} \cdot \text{с}^{1/2}.$$

Температура нерелятивистских частиц должна определяться иным законом, но в связи с тем, что количество фотонов в метagalактике превышает количество более тяжелых частиц примерно в 10^9 раз, ***в начальных фазах температура подчиняется единому закону:

$$T(t) = \frac{10^{10} \text{ К} \cdot \text{с}^{1/2}}{\sqrt{t}}.$$

В рамках классической космологии, построенной на принципах общей теории относительности, вопрос о геометрии космоса остается открытым. Выбор между тремя моделями *** (эллиптическая, евклидова и гиперболическая геометрии), имеющимися на данный момент в распоряжении ученых, может быть осуществлен только экспериментальным путем. Решение вопроса о том, является ли космос *** замкнутым, плоским или открытым, во многом зависит от средних значений плотности массы в космосе. Известное современной науке значение $\rho \approx 10^{-29} \text{ г} \cdot \text{см}^{-3}$ очень близко к критическому значению

$$\rho_{\text{крит}} = (0,5 - 2,0) \cdot 10^{-29} \text{ г} \cdot \text{см}^{-3}. \quad (5.6)$$

Таким образом, на основании экспериментальных данных пока не представляется возможным осуществление выбора между тремя существующими моделями космоса.

Многие исследователи допускают существование скрытых масс (которое ведет к возникновению *** сверхкритических плотностей), тем самым отдавая предпочтение замкнутой модели. При определенных обстоятельствах «отвечать» за скрытые массы могли бы и гипотетические массы покоя нейтрино. Космологические модели, соответствующие квантовой теории поля, относятся к типу замкнутых, в то время как анализ и оценка последних измерений, проведенных в ходе исследований фонового излучения, указывают, скорее, на то, что для нашей Вселенной действительна модель открытого типа [?].

Следующий раздел будет посвящен обсуждению сценария «Большого Взрыва», основанному на уравнении (5.5).

5.2. Восемь *** эпох эволюции протоплазмы

Расширение метагалактики устанавливает общие рамки эволюции, в пределах которых мы условно выделяем (рис. 24) двенадцать периодов, или эпох, подобных геологическим [?]. Возникновение химических элементов и образование протоплазмы охватывает при этом первые восемь из них, и каждую эпоху мы постараемся кратко описать. Более подробные их характеристики читатель может найти в специальной литературе [?, ?, ?, ?, ?].

1. Первая эпоха: физический вакуум.

$$t \leq t_{\text{Планк}} \approx 10^{-43} \text{ с.}$$

Рис. 24. Схематическое представление двенадцати периодов процесса расширения метагалактики. [X-Bosonen = X-бозоны; Quarks = кварки; Annihilation = аннигиляция; Nukleonen = нуклоны; Neutrinosee = ***нейтринное море; Protonen = фотоны; Elemente = химические элементы; Photonensee = ***фотонное море; Stoffstrukturierung = ***структуризация материи; Photonenmühle = ***дробление фотонов; Selbstorganisation = самоорганизация; t in s = время в секундах]

О самой ранней из двенадцати эпох, называемой также эрой Планка, собственно, ничего не известно; существуют лишь носящие спекулятивный характер предположения разной степени смелости. Вероятно, ни пространство, ни время не обладали тогда определяемым значением и размерностью. ***Состояние вселенной можно характеризовать описанием «высокосимметричная пена» [?].

2. Вторая эпоха: «уход вакуума».

$$10^{-43} \text{ с} \leq t \leq 10^{-33} \text{ с}$$

В начале этой эпохи вселенная распалась на различные ***области [?]. Одна из таких областей имела ***пространственно-временную размерность $d = 4$. Наша метагалактика появилась в результате первого нарушения симметрии; метагалактика была наполнена однородной газообразной смесью, так называемой первичной материей, состоявшей из кварков, электронов, нейтрино, фотонов, глюонов, ***мезонов=X-Partikel. Этот первичный газ, согласно уравнению (5.5), имел к началу описываемой эпохи крайне высокую температуру. ***По причине различных космологических затруднений многие авторы допускают, что начало этой эпохи было связано с ***инфляционной фазой, в которой ***коэффициент скорости расширения газового «шара» был равен примерно 10^{50} [?]. Не углубляясь в детали этого спекулятивного предположения, мы ограничимся только рассмотрением в самых общих чертах принадлежащей ***Фридману простой гипотезой, которая ***в среднем, согласно уравнению (5.5), связана с остыванием. Каким образом мог протекать процесс временной эволюции в эту эпоху, также остается неясным; мы будем исходить из того, что, согласно уравнению (5.5), к концу описываемого периода температура опустилась примерно до

$$T \sim 10^{27} \text{ К.}$$

Это соответствует энергиям порядка 10^{24} эВ и процессу ***вывода=отвода=распада? мезонов, вследствие чего происходит нарушение симметрии, которое ведет к ***разделению=сепарации сильных и слабых

***электрических взаимодействий. Таким образом, метagalактика вступает в гораздо более «традиционные» и значительно более доступные для теоретического рассмотрения фазы, о которых современная наука имеет уже определенное представление (вышеупомянутая нами «стандартная модель»).

3. Третья эпоха: *кварково-фотонный газ.** Вступивший в третью эпоху первичный газ состоял из кварков, антикварков, лептонов, фотонов и мезонов. После распада мезонов плотность кварков была ***** порядка 10^8 выше, чем плотность антикварков. С этих пор метagalактика вела себя (с точки зрения термодинамики) как нормальный ***адиабатически расширяющийся газ, к которому применима стандартная модель адиабатического расширения. Разработка этой термодинамической модели была начата еще в 1948 году ***Альфером, Бете и Гамовым; остановимся подробнее на её основные черты.

Из-за крайне высоких температур, достигающих в начале третьего периода примерно 10^{28} К, первичный газ можно рассматривать как идеальный; эффекты, отличающие его от идеального, нерелевантны. Для адиабатических процессов в идеальных газах действительно следующее известное соотношение между температурой и плотностью:

$$T = \text{const } \rho^{\gamma-1}. \quad (5.7)$$

Адиабатический экспонент $\gamma = c_p / c_v$ для атомарных (тяжелых) газов имеет значение $\gamma = 5/3$, а для релятивистских (не имеющих массы покоя) — значение $\gamma = 4/3$.

Поскольку в космосе той эпохи релятивистские частицы доминировали ***количественно и по вкладу в плотность энергетических потоков, ***по средним значениям действительно следующее релятивистское соотношение:

$$T = \text{const } \rho^{1/3}. \quad (5.8)$$

Адиабатическое расширение создает определенные временные рамки для эволюции метagalактики. Временная симметрия нарушается, и эволюция становится необратимым процессом.

Нарушение симметрии

Обратимость \rightarrow *Необратимость*

делает второй закон термодинамики физическим фундаментом эволюции.

Метагалактика той эпохи, хотя и была уже «отмечена» стрелкой, указывающей направленность времени, но еще не имела никакой пространственной структуры. До момента возникновения малейших флуктуаций все существующее пространство было гомогенно заполнено материей. Вопросы, касающиеся масштаба флуктуаций в космосе той эпохи и их влияния на формирование сегодняшних структур, являются, пожалуй, ключевыми для современной космологии [?, ?]. Температуры, во всяком случае, были настолько высоки, что тогдашний космос можно сравнить с батареей, ***переполненной высокоэнергетическим зарядом. Вследствие адиабатического остывания температуры к концу третьей эпохи упали до уровня

$$T \sim 10^{16} \text{ К} \sim 1000 \text{ ГэВ.}$$

*****Падение среднего уровня энергии частиц усугубило нарушение симметрии — нарушилась и симметрия слабых электрических взаимодействий: когда средние энергии упали под воздействием масс W- и Z-бозонов, произошел разрыв энергетических связей. Это привело к ***сепарации=разделению слабых и электромагнитных сил. Нарушение симметрии вызвало переход к новой эпохе эволюции, и важнейшим событием которой был процесс уничтожения кварков.

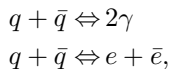
4. Четвертая эпоха: аннигиляция кварков.

$$10^{-11} \text{ с} \leq t \leq 10^{-6} \text{ с}$$

К началу четвертой эпохи в первичном газе еще преобладали кварки q и антикварки \bar{q} . Существует шесть типов кварков, среди которых различают up-кварки и down-кварки. С ***ростом=увеличением адиабатического расширения первичного газа температура (по сравнению с концом ***четвертой эпохи) упала до

$$T \sim 10^{13} \text{ К} \sim 1 \text{ ГэВ.}$$

Таким образом, первичный газ теперь оказался в таком состоянии, при котором вероятность ***попарной аннигиляции кварков и антикварков значительно возросла. Термически равновесные состояния в ходе реакций аннигиляции заметно ***смещены вправо:



что следует из соответствующих данным реакциям законов действующих масс.

***Величина значений свободных ***энтальпий реакций аннигиляции имеет порядок

$$\Delta g \sim 10 \text{ ГэВ.}$$

При реакциях аннигиляции кварков, таким образом, высвобождается энергия ***связи, порядок величины которой достигает 10^{12} эВ.

Термодинамическая ситуация благоприятствует аннигиляции, вследствие чего почти все кварки оказываются в связанном состоянии, соответствующем ***нижним значениям потенциалов Гиббса (***локализация=ограничение квантовой хромодинамики=QCD-confinement). Мы уже указывали на тот факт, что количество кварков в первичном газе несколько (примерно на одну миллионную процента) превышало количество антикварков. В результате реакций аннигиляции «выжили» немногие кварки, а антикварков не осталось совсем, и симметрия, существовавшая между материей и антиматерией, оказалась нарушена:

Симметрия материи и антиматерии → Преобладание материи,

что, бесспорно, серьезнейшим образом сказалось на структурах современного нам с вами мира, в котором античастицы встречаются крайне редко. Нарушение симметрии, так сказать, подготовило почву для перехода к следующей стадии развития космоса — к эпохе образования протонов и нейтронов. В последнее время интенсивно разрабатываются ***гипотезы, отражающие различные точки зрения на ход эволюции в тот период, который обозначен нами как четыре первые эпохи; обсуждаются все новые и новые идеи [?, ?], и иногда признаваемая сегодня все шире модель первых четырех эпох называется *новой стандартной моделью* (в отличие от старой стандартной модели) [?]. В то время, как о первых четырех эпохах эволюции мы имеем довольно-таки скудные сведения и многие положения теории носят спекулятивный характер, переходя к следующим этапам развития космоса, мы, можно сказать, обретаем гораздо более прочный фундамент для рассуждений, и объясняется это тем, что энергии ниже 1 ГэВ могут быть экспериментально исследованы современной наукой. В теоретическую картину, описывающую этот период, внесено не так уж много радикальных изменений, потому о ней и говорят как о *старой стандартной модели*.

5. Пятая эпоха: образование нуклонов.

$$10^{-6} \text{ с} \leq t \leq 10^{-3} \text{ с}$$

***Благодаря=На основании притягивающих хромодинамических взаимодействий каждая тройка кварков, соединяясь, может образовать так

называемое ***состояние связи (***Quark-Confinement), которое соответствует хорошо известному нам нуклону. Один up-кварк и два down-кварка образуют нейтроны

$$u + 2d \Leftrightarrow n,$$

а два up-кварка и один down-кварк — протоны

$$2u + d \Leftrightarrow p.$$

Поскольку в ***ходе этих процессов энтальпии реакций составляют приблизительно 100 МэВ, на всем протяжении пятой эпохи происходит дальнейшее смещение равновесия вправо. Свободные кварки исчезают из метagalактики, и к концу описываемого периода она уже состоит из нуклонов с плотностью, примерно равной

$$n_n \sim 10^{27} \text{ см}^{-3}.$$

Кроме того, существуют электроны, позитроны, фотоны и нейтрино, плотность которых значительно выше. ***Общая плотность составляет около 10^{36} частиц на каждый кубический сантиметр, а концентрация энергии определяется фотонами и отчасти лептонами.

Пятая эпоха привела к нарушению симметрии, связанному с появлением барионов и антибарионов. Барионы достигли абсолютного господства в метagalактике, и сегодня антибарионы едва ли еще встречаются в естественных условиях.

6. Шестая эпоха: ***«расстыковка» нейтрино.

$$10^{-3} \text{ с} \leq t \leq 1 \text{ с}$$

***Физико-химический состав метagalактики в эту эпоху не претерпел существенных изменений, однако температура и плотность продолжали снижаться. К концу эпохи температура опустилась до

$$T \sim 10^{10} \text{ К} \sim 1 \text{ МэВ}.$$

Плотность массы раскаленной плазмы в те времена составляла

$$\rho \sim 10^8 \text{ г} \cdot \text{см}^{-3}.$$

Средние значения плотности материи в метagalактике продолжали ***уменьшаться ***в кубической зависимости от расстояния. Современная нам метagalактика состоит из относительно однородного ***фотонного газа, имеющего плотность около 500 фотонов на каждый кубический сантиметр, что, в

принципе, соответствует реликтовому излучению, равно как и нейтринный газ, плотность которого составляет примерно 300 нейтрино и 300 антинейтрино на каждый кубический сантиметр.

Правда, само существование такого газа до сих пор не подтверждено экспериментально. О средних значениях плотности материи, обладающей массой покоя, мы располагаем, к сожалению, весьма неполной информацией; будь существующая вещественная материя распределена равномерно, она в нулевом приближении соответствовала бы газу, имеющему среднюю плотность, равную примерно 1 атомному ядру на каждый кубический метр, и состоявшему примерно на 70% из протонов, на 30% из ядер гелия, а также незначительной доли других элементов. Соотношение плотностей протонов и атомных ядер, равное приблизительно $5 \cdot 10^9$, почти не изменилось с эпохи раскаленной протоплазмы [?].

Теперь рассмотрим газовую модель эволюции и соответствующие законы для средней плотности протонов, нуклонов и нейтрино:

$$\begin{aligned} n_\gamma(t) &\sim 500 \text{ см}^{-3} [R(t_1)/R(t)]^3, \\ n_v(t) &\sim 1 \text{ м}^{-3} [R(t_1)/R(t)]^3, \\ n_p(t) &\sim 300 \text{ см}^{-3} [R(t_1)/R(t)]^3, \end{aligned} \quad (5.9)$$

где t_1 — начальный момент времени, а R_1 — соответствующее расстояние; за начало отсчета времени мы принимаем настоящий момент $t_1 \sim 10^{20}$ с.

Закон расширения Хаббла

$$R(t)/R(t_1) = H(t - t_1) \quad (5.10)$$

действителен только для ближайшего прошлого, то есть только для $(t - t_1) \ll H^{-1}$, в то время как на малых временах от начала расширения $t \ll H^{-1}$ мы находим закон расширения путем решения уравнения Эйнштейна

$$R(t) = \text{const} t^{1/2}. \quad (5.11)$$

Впоследствии мы рассмотрим функцию расширения $R(t)$ как заданную монотонно возрастающую функцию, которую мы можем получить в явном виде явно построить путем интерполяции выражений (5.10) и (5.11).

На основании этого допущения мы можем теперь приступить к изучению термодинамики эволюции нашей газовой модели метagalактики. Используя приближительные средние значения плотности, можно применять для решения вычислений (как было показано выше) в первом приближении законы идеального квантового газа. Для адиабатического

расширения атомарных газов действителен инвариант $n_A \cdot T_A^{3/2} = \text{const}$. Отсюда следует ***эволюционный закон для температуры:

$$T_A(t) = \text{const} R(t)^{-2}. \quad (5.12)$$

Для ***фотонного газа адиабатический инвариант выглядит иначе: $n_p \cdot T_p^{-3} = \text{const}$, откуда следует ***эволюционный закон температуры:

$$T_\gamma(t) = \text{const} R(t)^{-1}. \quad (5.13)$$

Вычисления показывают, что в расширяющемся космосе плотность и температура ***в пространственном=объемном среднем постоянно понижаются, и этот важный факт лежит в основе эволюции комплексных структур в метagalактике.

Наши оценки для момента времени $t = 1$ с дают следующие средние значения плотности частиц:

$$n_\gamma \sim 10^{30} \text{ см}^{-3}, n_n \sim 10^{21} \text{ см}^{-3}, n_v \sim 10^{30} \text{ см}^{-3}.$$

Таким образом, по крайней мере плотность нуклонов достигла уже «земного» порядка величины: плотность 10^{21} нуклонов на каждый кубический сантиметр примерно соответствует плотности нуклонов в твердых телах и жидкостях. Здесь следует сказать несколько слов об особых свойствах нейтрино: они не участвуют ни в сильных, ни в электромагнитных взаимодействиях, ***а только в слабых и гравитационных, вследствие чего эти частицы обладают способностью проходить сквозь нормальную земную материю, не подвергаясь на пути (причем путь может иметь протяженность, исчисляемую километрами) никаким хоть сколько-нибудь существенным ***влияниям=воздействиям. При таких условиях нейтрино ***преобразуются практически в ***независимый газ. ***Полностью термодинамическое равновесие ***отменяется=сохраняется благодаря ***расстыковке нейтринного газа. Так возникает ***двухтемпературная система.

С тех пор метagalактика состоит из двух фактически независимых ***элементов=подсистем: нейтринного газа и остаточного газа, который содержит фотоны, лептоны и барионы. Существование нейтринного газа из-за ***незначительной величины эффективных сечений взаимодействия нейтрино до сих пор не имеет убедительного экспериментального подтверждения. Многие исследовательские группы предпринимали попытки (почас весьма трудоемкие и связанные с большими затратами) найти надежное доказательство существования космических нейтрино и изучить их свойства.

***Расстыковку нейтринного газа можно рассматривать и как нарушение симметрии:

***Тепловое равновесие → Распад на две независимые ***термические системы. ■

В отличие от описанных ранее нарушений симметрии на этот раз нарушение касалось чисто термодинамической переменной — температуры. В дальнейшем нам больше не придется сталкиваться с нейтринным газом: в последующие эпохи он не оказал влияния на ход эволюционных процессов.

7. Седьмая эпоха: *преломление=разрушение нейтронно-протонной и электронно-позитронной симметрии.**

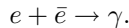
$$1 \text{ с} \leq t \leq 100 \text{ с}$$

Плотность протонов в протоплазме была равна плотности нейтронов. Разность же масс протонов и нейтронов, а вместе с ней и разность их энергий покоя стала заметной, когда температуры опустились ниже

$$T \sim 1,4 \cdot 10^{10} \text{ К} \sim 1,3 \text{ МэВ.}$$

Как известно, масса покоя нейтрона составляет 939,550 МэВ, а масса покоя протона — 938,256 МэВ, поэтому большая часть нейтронов распалась на протоны и электроны до тех пор, пока не установилось равновесие, представленное 75% протонов и 25% нейтронов.

Вторым значительным событием седьмой эпохи была аннигиляция электронов и позитронов:

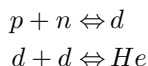


Почти все электроны и позитроны, ***соединившись, образовали ***высокоэнергетические световые кванты; пережить этот процесс, оставшись самими собой, удалось лишь очень немногим электронам. По причине нейтральности заряда метagalактики средняя плотность оставшихся электронов в точности равна средней плотности протонов. В результате описанных процессов космос к концу седьмой эпохи оказался преобразован в ***нейтральную плазму, состоящую из протонов, нейтронов и фотонов. Фоном для такой плазмы, как и прежде, служило ***море расстыкованных нейтрино. Температура плазмы снизилась примерно на миллиард ***кельвинов, а плотность приблизилась к той, что преобладает сегодня внутри звезд.

8. Восьмая эпоха: ядерный синтез.

$$10^2 \text{ с} \leq t \leq 10^4 \text{ с}$$

Состояние протоплазмы восьмой эпохи по температуре и плотности соответствовало состоянию плазмы гигантской звезды. Как известно, звезды получают свою лучистую энергию из реакций ядерного синтеза. Протекавшие в протоплазме процессы синтеза нуклонов, а особенно реакции



все больше ***смещали равновесие вправо. Высокая ***стабильность ядер гелия стала причиной того, что почти все нейтроны оказались именно в ядрах гелия. В конце концов установилось следующее соотношение между водородом и гелием:

$$H : 77\%He : 23\%.$$

Результат вычислений подтверждает приведенные в начале раздела 5.1 экспериментальные данные. Следует отметить, что гипотезу «Большого Взрыва» может подтвердить и обнаруженная экспериментально распространенность легких ядер в природе. Это обстоятельство мы оцениваем как одно из важнейших ***достижений, ставших возможными благодаря изучению стандартной модели. Ядра элементов более тяжелых, чем железо, образовались лишь позднее, в результате таких, например, процессов, как вспышки сверхновых звезд.

Вот мы и добрались до конца «истории о Большом Взрыве». Многие еще остаются невыясненным, есть некоторые противоречия и сомнения, идет интенсивная разработка новых ***понятий. Верится, однако, что по меньшей мере в основном стандартная модель верна; в конце концов, мы можем-таки констатировать тот факт, что гипотеза Большого Взрыва способна вполне удовлетворительно объяснить все перечисленные нами в начале главы экспериментальные данные. Этот результат стал причиной того, что в основу наших представлений о процессе становления метагалактики была положена именно эта модель, пусть даже она и оставляет пока без ответов очень многие вопросы.

5.3. Самоструктурирование ***вещественной материи

В результате процессов, протекавших в ходе восьми описанных нами эпох эволюции протоплазмы и охватывавших временной промежуток продолжительностью примерно в три часа (рис. 24), образовалась раскаленная

плазма, которая состояла из ядер различных химических элементов, а также из электронов и фотонов.

9. Девятая эпоха: *фотонное море.** Плотность электронов в протоплазме к началу девятой эпохи составляла примерно

$$n_e \sim 10^{17} \text{ см}^{-3},$$

а температуры достигали

$$T \sim 10^8 \text{ К.}$$

Такие значения соответствуют параметрам плазмы в установке ядерного синтеза (правда, существующей пока только ***в инженерных проектах).

Таким образом, из релятивистской, исполненной тайн и чудес фазы космос переходит в фазу, гораздо более близкую к «земным условиям», а значит, в значительно большей степени поддающуюся экспериментальному исследованию и изучению.

Рассмотрим теперь новую фазу плазмы, начавшуюся через три часа после Большого Взрыва и ознаменовавшую собой наступление девятой эпохи. О начале этой фазы гипотез существует больше, чем достоверной информации [?, ?]. Однако надежный источник достоверной информации о состоянии Вселенной у нас все же есть — это космическое фоновое излучение, называемое также «реликтовым». Речь идет об уже упоминавшемся нами ***тепловом излучении, имеющем температуру 2,7 К и максимум, лежащий в сантиметровом ***радиодиапазоне [?]. Это тепловое излучение заполняет собой всю Вселенную; плотность его равна примерно $5 \cdot 10^8$ фотонов ***в=на каждый кубический метр пространства, ***вследствие чего оно равномерно окружает Землю со всех сторон. Согласно гипотезе Гамова, ***Дорошкевича, Новикова, ***Dicke, ***Peebles и др., реликтовое излучение происходит от протоплазмы, заполнившей нашу Вселенную через несколько часов после начала процесса расширения.

Поскольку плотность фотонов в протоплазме значительно превосходила плотность остальных частиц, соотношение количества фотонов к количеству нуклонов оценивается примерно ***в 10^9 , а протоплазму поэтому можно назвать еще и ***«фотонной плазмой». В процессе адиабатического расширения ***числовое значение указанного соотношения (связанного также с энтропией системы) практически не изменилось. В сегодняшнем космосе в каждом кубическом метре пространства мы обнаруживаем в среднем один атом водорода, а все остальные атомы встречаются гораздо реже; в противоположность этому средняя плотность фотонов составляет почти 10^9 ***единиц на кубический метр. В отличие от современного

соотношения фотоны плазмы начала девятой эпохи обладали чрезвычайно высокой тепловой энергией, равной примерно 10^5 КэВ. Модель адиабатически расширяющейся вселенной в ходе дальнейшей эволюции непрерывно остывает, причем температура падает в приближенном соответствии с квадратичным законом:

$$T \approx 2 \cdot 10^6 t^{-1/2}, \quad (5.14)$$

где температура T измеряется в кельвинах, а время t — в годах.

В процессе расширения температура спустя $10^5 - 10^6$ лет опустилась примерно на две–четыре тысячи кельвин, отчего внезапно=вдруг=сразу началось образование атомов водорода и гелия. Непрозрачная фотонная плазма преобразовалась в прозрачный инертный газ. Процесс этот подтверждается и практическим опытом: когда отключают газосветную=газоразрядную трубку, наполненную горячей непрозрачной плазмой, газ в ней сразу становится прозрачным. Атомарные и молекулярные газы способны только к слабому взаимодействию с излучением, они прозрачны для света. Форма адиабатических кривых в=на плоскости плотности свободных электронов и температуры через интервал, равный примерно 300000 лет, попадает в зону=вступает в область образования атомов водорода [?]. Наблюдаемое сегодня реликтовое излучение представляет собой в некотором роде фотографию космоса времен образования атомов. Фотоны, пребывавшие в состоянии термодинамического равновесия с протоплазмой, исключительно слабо взаимодействовали с только что образовавшимся разреженным газом и могли покрывать огромные расстояния. Некоторые из образовавшихся тогда фотонов в форме реликтового излучения можно наблюдать при помощи современных земных радиотелескопов, получая от них информацию о событиях, происходивших в первые несколько часов после Большого Взрыва.

10. Десятая эпоха: самоструктуризация пространства и времени. К началу десятой эпохи космос был заполнен относительно однородным разреженным инертным газом. В этом состоянии космос оставался, предположительно, от 10^8 до 10^9 лет, продолжая при этом расширяться. Возникает вопрос: каким образом в космосе, пребывающем в подобном состоянии, вообще возможны процессы, положившие начало образованию упорядоченных структур? Назовем лишь три важнейшие физические причины:

1. Дальнейшее понижение температуры и плотности энтропии вследствие расширения, возникновение гравитационных неустойчивостей.

Рис. 25. Самоструктуризация через гравитационную неустойчивость.

2. ***Неоднородность, существовавшая в первоначальном распределении.
3. Передача энтропии ***от вещественной материи к реликтовому излучению.

Основным механизмом структурообразования в десятой эпохе служила ***гравитационная неустойчивость (рис. 25). Уже в 1662 году Ньютон выдвинул гипотезу о том, что галактики и звезды могли сформироваться под воздействием гравитации первоначально ***гомогенно распределенного газа; гипотеза эта сегодня общепризнанна и подкреплена многочисленными теоретическими работами и ***модельными расчетами [?, ?]. Не совсем ясно, правда, какую роль играла существовавшая в протоплазме незначительная ***неоднородность, послужившая ***своего рода затравкой для структурообразования [?, ?]. Предположим, что образовались сгустки газа, обладающие некоторым кинетическим импульсом.

Рассмотрим эволюцию медленно вращающегося газового шара, который образовался ***под влиянием гравитационной неустойчивости. Под воздействием гравитации газовый шар сжимался все сильнее, и частота вращения при этом все увеличивалась ***в соответствии с законом сохранения кинетического импульса. Вследствие сжатия, осуществлявшегося адиабатически, температура росла вместе с плотностью ***($\gamma = 5/3$) согласно уравнению (5.7). С повышением температуры росла и степень ионизации газа, соответствующая уравнению ***Saha [?, ?]. Сильное ***кулоновское отталкивание ядер водорода и гелия сначала удерживало их на удалении друг от друга, но с повышением температуры ядра постепенно сближались до тех пор, пока расстояние между ними не составило приблизительно 10^{-15} м. ***При преодолении кулоновских барьеров важную роль сыграл квантово-механический туннельный эффект(рис. 26). При сближении водородных ядер на расстоянии, ***составляющие долю радиуса ядра=сопоставимые с радиусом?, начинают действовать ***силы ядерного притяжения. ***В центрах газовых шаров были «запущены» реакции ядерного синтеза, в результате которых и произошло рождение первого поколения звезд. ***В процессе эволюции звезд водород медленно сгорал, становясь гелием. Дальнейшая история развития звезд зависит прежде всего от их массы [?]. Как правило, масса звезд составляет от 10^{29} до 10^{33} кг. В ходе эволюции звезды происходит синтез не только ядер гелия, но также ядер других легких элементов (Li, Be, B, C, N, O и т. д. вплоть до Fe). Для реакции ядерного

Рис. 26. ***Слияние ядер протона и дейтрона через туннель, который пересекает отгалкивающий потенциальный барьер. [p = протон; d = дейтрон; r = ***; $U(r) =$ ***]

синтеза необходимы, разумеется, чрезвычайно высокие температуры: так, например, ***сжигание гелия $2\text{He}^4 \rightarrow \text{C}^{12}$ происходит только при температуре около 10^8 К. В тех случаях, когда масса звезды не превышает 10^{31} кг, то есть в не очень больших звездах постоянное сжатие могло быть ***остановлено давлением вырожденных электронов. Таким образом возникли так называемые «белые карлики» — маленькие, «плотно упакованные» звезды, радиус которых приблизительно равен земному, однако масса, заключенная в этом объеме, равна массе Солнца.

Значительно более сложное поведение отличает звезды, обладающие большой массой. Примером таких звезд могут послужить так называемые «красные гиганты»: их плотное «ядро», состоящее из гелия, окружено ***разреженной плазмой, которая выпускает в окружающее звезду пространство ядра и атомы. Для многочисленного класса звезд, обладающих большой массой, характерна неустойчивость: в результате коллапса они превращаются в нейтронные звезды или черные дыры или же взрываются, выбрасывая ***материю в окружающее их космическое пространство. Под воздействием возникающего при этом интенсивного излучения нейтронов образуются ядра более тяжелых, чем железо, химических элементов. Некоторые из возникших таким образом газовых облаков, содержащие бóльшую часть элементов периодической системы, сгущаются, образуя газовые шары «второго поколения», плотность которых продолжает увеличиваться.

Предполагается, что именно из такого газового шара, обладавшего массой, приблизительно вдвое превышающей массу Солнца, и могла зародиться планетная система с солнцем в центре. Разработками гипотез, касающихся процесса образования планетной системы вокруг Солнца со времен Канта (1755) и Лапласа (1796) занимались лучшие теоретики: число такого рода гипотез растет и по сей день, однако ни одна из них не может быть признана доказанной [?, ?].

Рассмотрим здесь лишь один из существующих сценариев: в результате коллапса ***межзвездного газового облака образовался вращающийся газовый шар, диаметр которого примерно равнялся диаметру Солнечной системы, а масса приблизительно вдвое превышала массу Солнца. ***При увеличении сжатия это протосолнце вращалось все быстрее, трансформируясь в эллипсоид и теряя массу в экваториальной области. Эта ионизированная газовая масса сначала оставалась связанной магнитным полем протосолнца и ***принимала все больше кинетический импульс всей системы. Благодаря

такому магнитному соединению (теоретически еще не совсем выясненному) скорость вращения протосолнца, находящегося в центре системы, замедлялась, а стекающий с него газ, напротив, получал ускорение, так что в результате образовался некий плоский вращающийся диск. Возможно, причиной существующего распределения кинетического импульса были ***радикальные конвективные потоки. Непрерывная ***агломерация=агломерирование твердых частиц, содержащихся ***в системе, привела, вероятно, к образованию так называемых ***планетезималей — небольших сгустков, размеры которых исчислялись сначала метрами или даже сантиметрами.

С увеличением массы гравитационное поле таких «зародышей» будущих планет ***захватывало все больше и больше ***газовой массы из окружающего пространства, в результате чего и возникли планеты. Остатки газового облака разнес в окружающем пространстве солнечный ветер. Примерно таким образом можно описать историю образования планетной системы, однако многие детали все же еще только предстоит пока выяснить.

11. Одиннадцатая эпоха: *появление «фотонной мельницы».** Закончив с кратким описанием важнейших пространственных структур, перейдем к представлению не менее важного термодинамического механизма, явившегося, так сказать, мотором дальнейшей эволюции. Речь идет о так называемой ***«фотонной мельнице» (рис. 27). Обобщая все вышесказанное, можно заключить, что судьба фотонов на протяжении первых восьми эпох складывалась, по сути, без особых осложнений: постепенно остывая в процессе продолжавшегося расширения метagalктики (в соответствии с уравнением (5.14)), они достигли сегодняшнего уровня реликтового, или фонового, излучения. В настоящее время реликтовое излучение образует ***фотонное море, относительно гомогенно наполняющее космос и обладающее плотностью 450 см^{-3} и температурой 2, 726 К. Судьба же ***вещественной материи оказалась значительно сложнее, и причина, на наш взгляд, заключается в том, что частицы ***вещества обладают, в отличие от фотонов, массой покоя, а потому подвержены воздействию гравитационных сил. Пока температуры в расширяющейся метagalктике еще были чрезвычайно высокими (то есть в начальной фазе расширения), неупорядоченное тепловое движение оставалось настолько интенсивным, что препятствовало образованию достаточно ***больших неоднородностей, которые могли бы ***оказаться «затравкой» для дальнейшего структурообразования. В условиях постоянного понижения температур влияние гравитации становилось все сильнее: случайные ***флуктуации плотности усиливались гравитацией, происходило образование газовых шаров. Разумеется, возникновение такого рода сгустков материи стало возможным только тогда, когда темпе-

Рис. 27. Образование ***«фотонных мельниц» в расширяющейся метagalктике. [Flucht = ; 3K-Photonen = ; Sonne = Солнце; Erde = Земля; W = ; K = ; $m^2 = m^2$]

ратуры опустились значительно ниже тысячи градусов. Совершенно аналогичный эффект наблюдается в так называемых газах Ван-дер-Ваальса — ***газах с притягивающими взаимодействиями=межмолекулярные силы притяжения. При высоких температурах такие газы ***демонстрируют однородное состояние; при охлаждении же (например, путем адиабатического расширения) наблюдается эффект конденсации, то есть молекулы газа собираются в капельки. Представим себе, как сегодняшние галактические структуры возникли из гигантских скоплений ***массы прежней метagalктики. Из огромных сгустков газа образовались галактики, затем в галактиках начался процесс структуризации: ***неоднородности сжимались все сильнее под воздействием гравитационных ***сил притяжения. Вследствие адиабатического сжатия температура и плотность газа снова повысились следующим образом:

$$T \sim n^{2/3} \sim \rho^{2/3}. \quad (5.15)$$

Достаточно большие газовые шары в результате гравитационного коллапса снова в конце концов достигали температур, исчислялись многими миллионами градусов, в них начинались реакции ядерного синтеза и происходило рождение новых звезд. ***Эти процессы были чрезвычайно сложны (и остаются таковыми до сих пор), так что здесь мы не будем рассматривать их подробнее. Для наших дальнейших рассуждений важен лишь сам факт, что в течение миллиардов лет из неупорядоченного гомогенного ***распределения возникли столь сложные структуры и сверхструктуры, как красные гиганты, белые карлики, ***солнца, планеты, галактики и галактические ***субструктуры. Все эти структуры — одни горячие, другие холодные, — окруженные фоновым излучением, образовали своеобразный насосный механизм, называемый фотонной мельницей. Именно этот механизм, который мы рассмотрим и поясним на примере пары «Солнце–Земля», и является главной движущей силой дальнейшей эволюции космоса.

5.4. ***Солнечная система и Земля

Типичный пример структуры, возникшей в космосе в результате процессов структурообразования, представляет собой наша с вами планетная система. К ней-то и относятся интересующие нас объекты: Солнце, имеющее температуру поверхности, примерно равную 6000 К, и Земля, температура поверхности которой составляет около 300 К. Эта пара соответствует

Рис. 28. «Фотонная мельница» — основная движущая сила самоорганизации и эволюции на Земле. [Sonne = Солнце; Atmosphäre und Erdoberfläche = атмосфера и поверхность Земли; Erde = Земля; Erdkern = ядро Земли; Weltraum = космическое пространство; K = кельвин; W = ватт]

основной структуре нашего мира: относительно плотные и *******вновь нагретые сгустки *******вещественной материи (звезды и планеты) окружены морем однородного излучения (*******3-K фотоны). В данных условиях и начинает свою работу описываемый механизм, представляющий собой движущую силу процессов самоорганизации материи, — речь идет о так называемой фотонной мельнице (рис. 27). Поверхности относительно горячих звезд испускают фотоны, температура которых составляет тысячи градусов; минуя различные промежуточные стадии (например, поверхности планет), они в конце концов попадают *******в фотонное море, имеющее температуру около 3 К. Этот механизм приводит в движение *******мельницу самоорганизации и эволюции на планетах.

Фотонная мельница, в принципе, работает подобно любой традиционной водяной мельнице или тепловому двигателю. Действие водяной мельницы основано на том, что вода, падая с высоты, переходит с более высокого уровня потенциальной энергии на более низкий. Падающая вода вращает мельничное колесо, которое часть полученной потенциальной энергии преобразует в *******полезную=кинетическую энергию вращательного движения. Тепловые машины, тщательная разработка которых была начата еще Карно и Клаузиусом, работают по схожему принципу. Для их работы необходимы два резервуара: в первом (им может быть, к примеру, паровой котел) содержимое имеет более высокую температуру, чем во втором (речная, морская или любая другая вода или же *******окружающий=внешний воздух). Возникающий при этом температурный градиент и обеспечивает работу тепловой машины, *******извлекающей часть энергии в форме полезной механической работы. Современная термодинамика располагает хорошо проработанной теорией действия таких тепловых машин. Благодаря работам Клаузиуса нам хорошо известно, что важную роль здесь играет не только поток энергии, но и энтропийный поток *******упомянутой величины. Если тело принимает теплоту, равную ΔQ при температуре T , то оно получает приток энтропии, равный, по Клаузиусу, следующей величине:

$$\Delta S = \frac{\Delta Q}{T}. \quad (5.16)$$

Тепловая машина получает *******тепло высокой температуры и отдает *******тепло, температура которого оказывается ниже первоначальной; таким образом,

согласно уравнению (5.16), величина отданной машиной энтропии больше, чем величина принятой. В данном случае можно говорить об «экспорте» энтропии. Бельгийский ученый И. Пригожин (в 1977 году ставший лауреатом Нобелевской премии *** по химии) доказал, что «экспорт» энтропии имеет важнейшее значение не только в случае тепловых машин, но и для всех без исключения систем, обладающих способностью к самоорганизации. Рассмотрим с этой точки зрения Землю в роли «фотонной мельницы» (рис.28). Земля принимает от Солнца тепловой поток, мощность которого приблизительно равна 10^{17} Вт, а температура составляет примерно 5800 К, что соответствует эффективной температуре солнечной поверхности. В виде теплового излучения прежней мощности 10^{17} Вт Земля возвращает в космическое пространство примерно то же количество тепла, но температура его составляет уже всего лишь 260 К — ***именно такова температура теплового излучения нашей планеты. Простой расчет позволяет получить значение *** для «экспорта» энтропии за единицу времени:

$$10^{17} \text{ Вт} \cdot \left(\frac{1}{5800 \text{ К}} - \frac{1}{260 \text{ К}} \right) \approx -4 \cdot 10^{14} \text{ Вт/К},$$

что дает в итоге следующее значение для каждого метра земной поверхности:

$$1 \text{ Вт} / \text{м}^2 \cdot \text{К}.$$

Это легко запоминающееся число отражает фундаментальную характеристику земного «экспорта» энтропии. Проще говоря, Земля представляет собой уже упоминавшуюся «фотонную мельницу», которая работает *** за счет разницы между получаемыми от Солнца «горячими» и возвращаемыми в космическое пространство «холодными» фотонами. Значение $1 \text{ Вт} / \text{м}^2 \cdot \text{К}$ характеризует мощность движущих сил этой «мельницы», запускающей процессы самоорганизации и эволюции на Земле. Следует отметить, что наша родная Солнечная система занимает совершенно особое место среди бесчисленных планетных систем. Она обладает семью большими планетами; одна из этих планет, Земля, имеющая твердую поверхность и среднюю плотность $5,51 \text{ г} \cdot \text{см}^{-3}$, удалена от центральной звезды системы, Солнца, масса которого составляет приблизительно $2 \cdot 10^{30}$ кг, на расстояние, равное примерно $1,5 \cdot 10^{11}$ м. Рассмотрим подробнее историю эволюции Земли. Наша планета образовалась около 4,5 миллиардов лет назад. Эволюция космоса продолжалась: возникали и исчезали звездные и планетные системы, звезды становились красными гигантами, белыми карликами, нейтронными звездами или черными дырами. Однако «звездную» историю мы оставим в стороне, поскольку нас интересует, в первую очередь, насчитывающая

четыре с половиной миллиарда лет история процессов самоорганизации и эволюции материи на Земле — планете, выбранной нами в качестве модели. Предшествовавшая космическая эволюция становится для нас подобной прологу к пьесе в театре. Мы изложили этот «пролог», хорошо осознавая, что описанные нами события могли происходить и так, как мы представили их читателю, и как-то иначе. Неясные и слабые места нашего изложения по большей части связаны с нерешенными проблемами ***гравитационных неустойчивостей турбулентных газовых облаков. ***Unsöld [?] замечает:

Крупные нерешенные проблемы в современной астрофизике имеют, по существу, гидродинамическую природу. Это объясняется тем, что космические течения, ***как правило, турбулентны.

Интересно отметить, что достижения астрофизики совершенно очевидно связаны с решением ***классических проблем теоретической физики. Однако мы не будем здесь углубляться в анализ этой безусловно любопытной взаимосвязи; обратимся вновь к событиям, происходившим на Земле. История возникновения Земли привела к тому, что планета оказалась окружена газовой оболочкой: горные породы отдавали содержащийся в них газ, водород и гелий ***улетучивались в окружающее пространство, так что химический состав атмосферы постоянно изменялся [?]. На протяжении почти двух миллиардов лет преобладала атмосфера, состоявшая в основном из водяных паров, водорода, аммиака и сероводорода — такая атмосфера, на первый взгляд, не особенно ***располагает к=гостеприимно. Однако исследования показывают, что для эволюционных процессов именно эта смесь газов несет в себе огромный потенциал. Бушующую атмосферу пронизывали разряды молний, бурные извержения вулканов создавали высокотемпературные области, вследствие чего возникали большие перепады температур. Водяной пар и некоторые газы, конденсируясь, образовывали в протодолинах **зачатки будущего океана — соперника раскаленных потоков вулканической лавы. В этих условиях, согласно гипотезе А. И. Опарина, первым выдвинувшего подобное предположение [?, ?], возникли примитивные органические молекулы — в частности, ***молекулы нуклеиновых и аминокислот. Сегодня описанные процессы могут быть воспроизведены в лабораторных условиях. В 1953 году ***Миллер, будучи в то время еще студентом, целыми днями напролет работал в лаборатории ***Urey's, пытаясь обнаружить ***электрические разряды в смоделированной ***первичной атмосфере, — и открыл в результате аминокислоты. Работы ***Миллера и Urey вызвали целый шквал подобных исследований; было доказано, что смесь газов, содержащая углерод, водород, кислород и азот, при подаче к ней энергии (например, в форме электрических разрядов ультрафиолетового

света, или радиоактивного излучения, или тепла) при ***восстановленных условиях производят все основные структурные элементы, необходимые для создания ***биоматерии: аминокислоты, ***гидроксикислоты, ***сахара, пиримидиновые и пуриновые основания [?, ?, ?, ?, ?].

С возникновением химических процессов 4 – 4, 5 миллиарда лет назад на планете началась ***фаза химической эволюции; она длилась около миллиарда лет. Главным результатом первой стадии химической эволюции стала ***интеграция=слияние простых атомов *H, C, N, P* и т.д. в сложные органические молекулы. Процесс дальнейшей эволюции состоял в том, что возникшие сложные молекулы, в свою очередь, сливались, образуя макромолекулы. Некоторые из появившихся таким образом в ***первичной атмосфере молекул складывались в цепи: полипептиды и полинуклеотиды совершенствовались в ходе непрерывной борьбы с разрушающим цепи гидролизом. Полимерные цепи по большей части состояли из мономеров не одного, а нескольких разных ***типов — это были так называемые гетерополимеры. Таким образом ***возникли определенные линейные молекулярные структуры, и их образование имело основополагающее значение [?]: по существу, химическая эволюция была завершена. Уже было упомянуто о главном ее результате, состоявшем в слиянии атомов химических элементов в гораздо более сложные органические молекулы, образовавшие затем еще более сложные цепные молекулы. Важную роль в этом сыграли такие элементарные химические процессы, как гомогенный и гетерогенный катализ, автокатализ, бистабильность и ***осцилляции.

Перейдем к рассмотрению следующей стадии эволюции. Спустя некоторое время на Земле возникло несколько особых органических цепных молекул, обладавших способностью к ***самовоспроизводству. В случае полинуклеотидов это свойство основано на разнице в прочности водородных мостиковых связей между нуклеотидами. Представим себе молекулу рибонуклеиновой кислоты: это линейная цепная молекула, состоящая из элементов четырех типов — из аденина, цитозина, гуанина и урацила. Нуклеотид аденин способен к созданию относительно прочной водородной связи с урацилом, а цитозин — с гуанином. Следовательно, данная цепь нуклеотидов предрасположена к тому, чтобы ***свободно присоединять к своим элементам элементы, являющиеся комплементарными им в вышеозначенном смысле этого слова. В результате совершенствования химических связей между ассоциированными нуклеотидами таким образом может возникнуть ***дополнительная цепь [?]. Сравнительно короткие цепи рибонуклеиновой кислоты способны произвести такого рода «дополнение», и оно в точности будет повторять исходный образец. Таким образом, ***в два шага исходный образец удваивается. Такое спонтанное воспроизведение

в водах протоокеана случалось, правда, исключительно редко из-за отсутствия ***каталитической поддержки и очень низкой концентрации ***подходящих молекул. Полипептидам удалось преодолеть эти трудности: сегодня экспериментально доказано, что еще примитивные абиогенно возникшие полипептиды — так называемые протеиноиды — уже обладали благодаря своей ***пространственной складчатой структуре поливалентными каталитическими свойствами, и достаточное количество спонтанно возникших протеиноидов было способно значительно ускорить течение процессов синтеза и репликации. Материя приобрела фундаментальное свойство — способность к ***саморепликации, вступив таким образом в новую фазу эволюции — фазу самоорганизации путем самовоспроизводства. Важную роль при этом играли процесс образования модификаций (иначе говоря, мутантов) исходных молекул в результате ошибок при копировании и процесс дальнейшего отбора наиболее удачных вариантов. Возможно, возникли целые ***сетки=сетчатые структуры полинуклеотидов и полипептидов, способные к репликации. Гипотетические структуры ***были названы гиперциклами [?, ?] и ***Ribonukleinsäuren-Replikase-Zyklen [?, ?].

Чрезвычайно важным процессом, приведем к ***локальному повышению концентрации макромолекул, был, предположительно, процесс коацервации: сольватные оболочки ионизированных макромолекул в растворах высокомолекулярных веществ ***расщеплялись под воздействием других заряженных молекул, и макромолекулы соединялись, образуя ***каплевидные коацерваты. Коацервация представляет собой одну из форм ***расслоения, причем фаза коацервата содержит макромолекулы в значительно более высокой концентрации, чем остальные ***жидкие фазы. А. И. Опарин [?] высоко оценивал значение коацервации, указывая, в частности, на возможность того, что именно коацерваты были первым, предварительным этапом ***в процессе возникновения жизни. Во многом схожи с коацерватами ***микросферы, тщательно изученные ***Фоксом. Микросферы представляют собой крошечные протеиноидные шарики, диаметр которых не превышает 3 μm . Как в коацерватах, так и в микросферах могут протекать реакции, а следовательно, они являются своего рода микрореакторами, способными к росту и делению, а также к обмену веществами с окружением, то есть еще и к изменению своего ***химического состава. Таким образом, микрореакторы выступают в качестве неких новых ***репликативных единиц наряду с ***репликативными сетчатыми структурами [?]. ***Образование микрореакторов явилось важным шагом к пространственному ***разграничению, а тем самым и к возникновению первых микробов (более подробно этот процесс будет рассмотрен нами в седьмой главе).

Другим чрезвычайно значительным шагом по пути эволюции можно

назвать развитие и совершенствование «молекулярного языка» биополимеров. Элементарным языком биологических систем считается язык химический; алфавит такого языка состоит из нуклеотидов и аминокислот различных типов, язык обладает собственной грамматикой, в соответствии с которой и происходит «словообразование». Иными словами, правила такого «языка» касаются химического состава, мутаций, кодирования и рекомбинаций, цистронов и еще более обширных ***структурных частей генов. Такие подпоследовательности имеют строго определенное значение в биологической ***связности, поскольку именно в них закодированы различные признаки или, к примеру, ***энзимы=ферменты. Элементы описанного молекулярного языка развивались и совершенствовались в протоокеане; процесс этот был обусловлен существованием способных к репликации носителей информации. В протоокеане роль таких носителей информации сыграли полинуклеотиды — сначала рибонуклеиновой, а затем дезоксирибонуклеиновой кислоты. Эффективная репликация полинуклеотидов стала возможной ***благодаря их союзу (его обеспечивали особые ***энзимы) с сетчатыми структурами.

Так возникли все новые — и все более и более сложные — репликативные системы, вступающие между собой в соперничество. Те из них, что справлялись с копированием быстро и с меньшими погрешностями и дефектами, продолжали развитие; системы, не выдержавшие конкурентной борьбы, отставали в развитии. В качестве сырья репликативным системам служили распространенные повсюду примитивные органические молекулы — такие, как аминокислоты и нуклеотиды ***на начальных стадиях развития, — которые вновь и вновь образовывались под воздействием солнечного света, разрядов молний и извержений вулканов. Шло время, и океан постепенно заполнился быстро ***копирующимися репликативными системами; «сырью» становилось все меньше и меньше, и это обстоятельство ограничивало ***репликационный обмен веществ. Возник жесткий естественный отбор, в процессе которого совершенства достигли определенные репликативные единицы, функционирующие на основе полинуклеотидов и полипептидов. Такие системы оказались пространственно изолированы (возможно, путем стабилизации микрореакторов) от окружения и сформировали ***отделяющие мембраны, через которые осуществлялся обмен веществ: так произошло зарождение первых живых существ, возможно схожих с бактериями или примитивными водорослями. Можно предположить, что это случилось три–четыре миллиарда лет назад. Именно отсюда и берет старт эволюция биологических видов (рис. 29). Здесь мы на некоторое время прервем рассмотрение эволюции жизни на Земле, поскольку этой теме

Рис. 29. Схема эволюции биологических видов. [Zeit = время; (in Mrd. Jahren) = (млрд. лет); Gegenwart = ***; Reduzierende Atmosphäre = ***; Sauerstoffatmosphäre = кислородная атмосфера; chemische Evolution = химическая эволюция; biologische Evolution = биологическая эволюция; Protoorganismen = протоорганизмы; Insekten = насекомые; Fische = рыбы; Wirbeltiere = позвоночные животные; Mensch = человек; Fungi = ***грибы; Pflanzen = растения; Bakterien = бактерии; primitive Algen = примитивные водоросли]

будет посвящена отдельная (седьмая) глава; прежде следует обратиться к вопросам, связанным с эволюцией климата.

ГЛАВА 6

Эволюция климата

***Я до сих пор прекрасно помню
То похожее на шок состояние:
Я вышел из самолета в душный,
Насыщенный множеством запахов
Зной Западной Африки.
Казалось, будто я попал в кухню,
Где тысяча поваров
На тысяче плит
Варят, жарят и парят
Тысячу разных блюд.

****Давид Аттенборо***.*
***Жизнь на нашей Земле.

6.1. Земля в роли паровой машины

Это не просто граничит с чудом — это и есть самое настоящее чудо: вода, вещество с поистине уникальными физическими свойствами, сделала возможной жизнь и превратила Землю в обитаемую планету. В пустынных безжизненных просторах Вселенной возник исполненный жизни оазис — наша Земля, а ведь ее ближайшие соседи, Венера и Марс, ***«остались ни с чем», «потому что без воды — и ни туды, и ни сюды!» Водонос (или, как в песенке, водовоз) — фигура, символизирующая то место, ту роль, что играет в нашем ***ежедневном биологическом существовании вода; однако вода «играет» не только «для нас», но и «с нами».

Из всего множества протекающих на нашей планете процессов остановимся для более внимательного рассмотрения на тех, что связаны с климатом. Следует заметить, кстати, ***что понятие «климат» имеет отношение только к очень обширным областям и продолжительным периодам времени, а дождливое лето в Баварии — это еще далеко не изменение климата.

***Представим, что мы находимся на космическом корабле, который движется по геостационарной орбите, совершая за сутки один виток вокруг

планеты, а потому с Земли выглядит как неподвижный *****. Таким образом, Солнце, Земля и наш корабль образуют ***жесткий треугольник в плоскости эклиптики (при условии, что мы не будем принимать в расчет тот факт, что орбита Земли имеет форму эллипса, — иначе наш треугольник будет слегка «пульсировать», подчиняясь годовому циклу). Дневная и ночная стороны Земли, с занятой нами позиции, образуют неизменяющийся «земной серп» (***)ПОНЯТНА ЛИ АЛЛЮЗИЯ НА ЛУННЫЙ?), на котором в течение суток будут сменять друг друга материки и океаны. Нам будут отчетливо видны завихрения гигантских ***облачных спиралей, соответствующих областям низкого давления и выглядящих так, будто они просто нарисованы на ***земном шаре; однако стоит только приглядеться повнимательнее, и мы заметим, что они, скорее, похожи на исполинских амёб, ***медленно ползущих и изменяющих свою форму. Мы увидим и кое-что еще: узор белого цвета на экваторе; он, правда, мерцает и подрагивает, но — подобно значку-логотипу телеканала — ***кажется подсвеченным на подвижном фоне.

Занятая нами позиция позволяет рассматривать Землю в очень больших пространственных масштабах, как того и требует стоящая перед нами задача. Теперь займемся выбором отвечающих тем же масштабам временных рамок. Представим себе, что наш корабль находился на орбите в течение, скажем, пятисот лет, занимая все это время одно и то же положение; с корабля велась съемка фильма (и длина его измеряется километрами) как в видимом, так и ***см.КНИГУ!в инфракрасном диапазоне спектра. Запустим готовый фильм в ***режиме замедленной съемки=ускоренного просмотра. Контуры материков и океанов расплываются в горизонтальные полосы: на севере больше коричневых, а на юге — голубых. В пелене молочных белых облаков, еще не достигших в те времена знакомой нам теперь плотности, отчетливо различимы зоны пассатов и западных ветров. На экваторе опять-таки видны не просто горизонтальные линии, а четкий ***рисунок, возникший на рубеже между востоком и западом. А теперь, используя стробоскопический эффект, просмотрим те из полученных при съемке фильма кадров, на которых материки ***расположены на одних и тех же местах. Картина, полученная нами в результате этих манипуляций, весьма интересна и даже поучительна: в районе Исландии обнаруживается огромная облачная «гора», тогда как ***Азорские острова хорошо просматриваются сквозь тонкую облачную дымку, а вообще весь земной шар кажется окутанным четкими горизонталями волнообразных облаков.

Наша следующая цель заключается в том, чтобы разобраться в полученной картине и ***научиться прогнозировать кажущиеся медленными изменения климата, используя математическую модель.

К сожалению, современная наука пока еще очень далека от достижения этой цели, несмотря на возможности, предоставляемые ей работой метеорологических и исследовательских спутников и применением больших и быстрых компьютеров. Атом водорода представляет собой удобную модель, которая может помочь разобраться в свойствах не только самого водорода, но и любых других атомов; попытаемся найти столь же простую и наглядную климатическую модель, которая могла бы послужить ключом к пониманию основных климатообразующих механизмов, и отдельные элементы такой модели рассмотрим здесь в свете процессов самоорганизации.

Без учета глубинного тепла земной коры, солнечного ветра и метеоритов (а также каких бы то ни было высших сущностей) Земля оказывается замкнутой (полузакрытой) системой, обменивающейся с остальным космосом только лучевой=лучистой энергией. Энергетическое питание Земли, то есть солнечное излучение, достигающее верхних слоев земной атмосферы, можно сравнить с излучением черного тела, температура которого равна температуре поверхности Солнца (около 6000 К), с максимумом в диапазоне зеленого света с длиной волны, составляющей приблизительно 0,5 мкм. Средняя мощность солнечного излучения равна примерно 350 Вт/м^2 ; естественно, конкретное значение мощности для каждой точки земной поверхности зависит от времени суток и положения этой точки относительно экватора и полюсов. Излучаемая Землей энергия состоит, прежде всего, из непосредственно отраженных солнечных лучей, которые в дальнейшем нас интересовать не будут, поскольку не имеют значительного влияния на определяющие климат термодинамические процессы (хотя нас может, пожалуй, заинтересовать доля отраженного излучения, описываемая через так называемое альбедо Земли). Остальная получаемая планетой энергия представляет собой наложение различных тепловых излучений, *durchsetzt*=перемежаемое полосами поглощения элементов атмосферы. Очень приблизительно это распределение можно оценить как тепловое излучение тела, температура которого составляет около 300 К, причем максимальная длина волн равна примерно 10 мкм. Обе кривые излучения относительно хорошо отделяются друг от друга при длине волны около 4 мкм.

Земля не становится ни горячее, ни холоднее, а значит, в среднем поддерживается энергетическое равновесие обоих типов излучения. Как уже было сказано в предыдущей главе, из анализа температур следует, что в космическое пространство с температурой примерно 3 К Земля непрерывно экспортирует около $1 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$ энтропии. Такая «фотонная мельница» забирает поток высокоценной энергии (подобно тому, как колесо водяной мельницы забирает воду из реки или ручья или тепловая машина — из резер-

Рис. 30. Паровая машина или водяная мельница из одного резервуара (реки или ручья в случае мельницы) забирают высокоценную энергию (тепловую или потенциальную), производят работу и отдают во второй резервуар уже обесцененную энергию. [Wärme hoher Temperatur oder große potentielle Energie = ***высокая температура или высокий потенциал; Dampfmaschine = паровая машина; Wassermühle = водяная мельница; Arbeit = работа; Wärme geringer Temperatur oder kleine potentielle Energie = ***низкая температура или низкий потенциал]

Рис. 31. «Фотонная мельница» забирает излучаемые Солнцем ***высокотемпературные фотоны, производит работу и возвращает в космическое пространство (3 К) фотоны с гораздо более низкой температурой излучения. [Sternphotonen = ***звездные фотоны; «Photonenmühle» Erde = Земля в роли «фотонной мельницы»; Photonen-Meer = фотонное море]

вуара; см. схему на рис. 30), ***рассеивает ее на множестве *****, а затем экспортирует энергию уже менее ценную (рис. 31). ***Числовым значением для этой диссипации и является так называемый «экспорт» энтропии, своего рода «ограничительные рамки» возможных процессов самоорганизации. Для климата и самой жизни на Земле безусловно важны и необходимы и горячее Солнце — как источник энергии, и холодный космос — как ***свалка для энтропийных отходов.

С принципом действия паровой машины знакомится каждый школьник или студент, изучающий термодинамику. Он узнает, ***что необходимы два котла (для горячего и охлажденного пара) и что машина отводит из потока между котлами (от горячего к холодному) энергию для производства полезной работы (рис. 30). Землю тоже можно рассматривать как некую огромную паровую машину: разумеется, Земля не оборудована поршнями — она справляется с делом при помощи воды и ветра, но без ***вентилей=клапанов, регулирующих поток энергии, ей все же не обойтись — их-то мы и рассмотрим повнимательнее, проследив процесс ***превращений энергии.

Солнечный свет сначала попадает в атмосферу. При встрече с облаками (в зависимости от высоты они состоят из капель воды или из кристаллов льда) часть света рассеивается, то есть отклоняется от первоначального своего направления в результате отражения или преломления. Часть света (примерно четверть) сразу же отражается обратно в космическое пространство; другая часть (около половины) добирается до поверхности в виде более или менее ***яркого=рассеянного=диффузного (в зависимости от толщины облачного слоя) дневного света. Облака практически не поглощают света и хоть и «регулируют» световой поток, но энергию из него едва ли извлека-

Рис. 32. ***Распределение земной поверхности по высоте: так называемое ***гипсографическое распределение высот=высотное распределение, составленное по высотной карте мира (5' × 5'). [Höhe = высота; km = км; Anteil der Erdoberfläche = площадь земной поверхности]

ют, а потому и почти не реагируют непосредственно на сам свет, являясь, таким образом, чуть ли не идеальным ***«выпускным» клапаном. (Вода, естественно, заметно поглощает свет — но это должен быть многометровый слой воды.)

В областях, не занятых облаками, свет, так сказать, беспрепятственно проникает сквозь атмосферу, хотя и в этом случае происходит рассеяние, окрашивающее земное небо в голубой цвет, и ***проявляется эффект поглощения. Как известно, воздух ***в оптическом окне совершенно прозрачен. Для достигшего поверхности Земли света существует две возможности: он ***встречается с землей или с водой. В обоих случаях часть света отражается, а часть — поглощается. Характер отражения может меняться в зависимости от того, на какой участок поверхности попадает свет: на суше это могут быть камни, или покрытая растениями почва, или снег и т. д. Вода как таковая обладает неизменными ***поглощающими характеристиками, однако в каждом конкретном случае, разумеется, возможны различные изменения поглощающей способности; это может произойти из-за присутствия в воде каких-то живых организмов (скажем, планктона) или, например, если большая часть поверхности воды покрыта льдом или ***пенными гребнями волн. ***Однако бóльшая часть света попадает в низкие широты, и там лишь изредка случаются сильные, продолжительные штормы и бури, захватывающие обширные пространства, а снег и лед появляются (***высокогорья) еще реже.

Две трети земной поверхности заняты водой, и значительная часть этой воды находится в экваториальной зоне (рис. 32). Таким образом, мы можем предположить, что примерно три четверти всей солнечной энергии поглощает вода, и лишь четверть приходится на долю суши. Суша обладает очень небольшой теплоемкостью, и свет практически не проникает ***вглубь, так что мы ***не будет большой ошибкой предположение относительно того, что приходящаяся на долю суши энергия сразу же поглощается нижними слоями воздуха; мы можем исключить из нашей картины ***энергопоглощения и земные материки. Доля светового излучения, ***поглощаемая хлорофиллом растений, а затем прodelывающая длинный путь по всей биологической питательной цепочке, в общем-то, незначительна: она составляет примерно тысячную от общего количества получаемой Землей энергии.

***Свет=Энергия, поглощенная водой, вызывает ее нагревание, кото-

рое, впрочем, ***почти не вызывает ощутимых изменений температуры воды из-за большой ее теплоемкости и ***большой глубины проникновения света (около 50 см). Постоянным перераспределением тепловой энергии, ***покидающей водную стихию, занимаются, в основном, воздушные потоки. ***Малая часть этой энергии отражается обратно в космическое пространство, гораздо большая часть сначала попадает в атмосферу, где и объединяется с тепловой энергией, принесенной воздушными потоками с материков. Поскольку океаны в среднем не становятся ни теплее, ни холоднее, энергетическое равновесие ***выравнивается (вплоть до небольшого, но важного «остатка»), то есть в атмосферу попадает столько энергии, сколько было получено ***путем инсоляции.

Энергия покидает Землю только в виде излучения; теперь следует рассмотреть процесс ***производства атмосферой этого излучения. Воздух ***имеет четко выраженную полосу поглощения в инфракрасном диапазоне, волны длиной от 5 до 8 мкм ***поглощаются водяным паром, в диапазоне от 8 до 13 мкм (***)интервал максимального излучения) ***воздух прозрачен, волны длиной от 13 до 17 мкм поглощает углекислый газ, а более длинные (длина превышает 17 мкм) — вновь водяной пар; естественно, мы представили все это в весьма упрощенной форме. Однако самую важную роль играет здесь вовсе не газ, а вода, постоянно присутствующая в виде капель и кристаллов льда (испарения, туман, облака). Значение ее велико потому, что она в любом виде оказывает влияние не на узкий ***диапазон спектра, а на весь длинноволновой ***диапазон=интервал, самым решительным образом вмешиваясь в происходящее. Собственно, в инфракрасном диапазоне вода в виде жидкости, снега и льда так же черна, как черна сажа, и свет способен проникать в нее на глубину всего лишь нескольких ***микро- или даже нанометров. Углекислому же газу в описываемых процессах отведена всего-навсего третьеразрядная роль: его эффективная ***спектральная область значительно уже, чем ***двух других, концентрация его в ***воздухе=атмосфере ничтожна и, ко всему прочему, пространственно-временное его распределение почти постоянно; подробнее рассматривать углекислый газ мы здесь не будем. Водяной пар, напротив, располагает ***непрерывной полосой поглощения (обусловленной ***вращением дипольных молекул), начинающейся уже вскоре после превышения ***максимума излучения и «контролирующей», таким образом, практически половину всей проходящей энергии, ***в то время как водяные капли и кристаллы воздействуют на всю область спектра.

Однако вернемся к судьбе энергии в атмосфере. Температура воздуха падает с увеличением высоты, ***и происходит это приблизительно так же, как и адиабатическое охлаждение воздуха в результате падения давления

Рис. 33. «Вертикальный профиль» атмосферы: зависимость температуры и влажности воздуха от высоты (измерения проведены радиозондом, который стартовал с находившегося у побережья Марокко (34,40° с. ш., 9,82° з. д.) исследовательского судна «Александр фон Гумбольдт» 5 октября 1992 года в 10:14 ***по всемирному координированному времени). [Temperatur in = ; Luftfeuchte in g/m^3 = влажность воздуха в г/м^3 ; Höhe = высота; km = км]

при подъеме (рис. 33). Рассмотрим сначала простейший случай: над океаном находится сухой воздух, ***покрытый на большой высоте тонким, но относительно плотным облачным слоем. Океан излучает тепло, соответствующее температуре воды в его верхнем слое (на профессиональном жаргоне это называется SST, Sea Surface Temperature¹), поскольку в инфракрасном диапазоне он является совершенно черным и непрозрачным. Сухой же воздух над ним, напротив, прозрачен; он не поглощает и не испускает излучение (если не принимать во внимание CO_2 , O_3 и т. д.). Однако капельки воды, находящиеся в облаках, тоже оказываются черными, и их излучение соответствует температуре воздуха в облаке, так как каждая капля парит в ***пузырьке из теплого воздуха. Облако излучает в мировое пространство тепловую энергию, соответствующую температуре его верхней стороны, а к поверхности Земли отправляется тепловая энергия, соответствующая температуре нижней стороны. Поскольку более холодный излучатель отдает меньше энергии, чем более теплый, постоянно существующая между облаком и поверхностью воды ***разница лучистых энергий становится причиной возникновения ***нетто-транспорта=первичного от поверхности океана к облаку, а затем от ***поверхности=облака в верхние слои ***атмосферы, откуда она и излучается в мировое пространство.

В том случае, когда в схеме отсутствуют облака, а воздух по-прежнему сухой, поверхности суши и воды могут излучать непосредственно в космос; ***эффект каждый наверняка имел возможность наблюдать в ясные ночи, особенно зимой. Если же воздух влажен (каким, собственно, и бывает обычно морской воздух) или облачные слои значительно толще, чем мы пытались представить их в первом, упрощенном случае, то излучение вынуждено пройти через целую цепь процессов поглощения и ***реемиссии=вторичного излучения. Такого рода препятствие при передаче тепловой энергии в космическое пространство часто называется «парниковый эффект»; действие его можно представить в виде картинки: Земля «по уши» укутана в одеяло из ***пара и облаков.

Тем, кому довелось бывать на Красном море или в Мексиканском за-

¹Температура поверхности моря (англ.) — *Прим. перев.*

ливе, знаком тот особый душный влажный зной, плывущий над морем и ***в низине на побережье залива. Несмотря на чистое, безоблачное небо все та же влажная жара царит и по ночам. Этот эффект вызван воздействием водяного пара и испарений, которые являются результатом высокой скорости испарения в тропиках и вопреки высоким температурам воздуха у поверхности земли едва ли допускают охлаждение ***за счет излучения тепловой энергии. Однако стоит только подняться выше на Мексиканское ***плато=нагорье или ***в Эфиопию (от 500 до 2000 м), как влажность очень быстро уменьшается, и ясные ночи приносят с собой вполне ощутимый ***холод=ок. (В штате Чьяпас на юге Мексики на высоте 1600 м над уровнем моря располагалась старая столица штата — ***город San Cristobal de las Casas; новая столица, Тустла-Гутьеррес, находится всего в 500 м над уровнем моря и как раз отличается влажностью и жарой. Решение о переносе столицы, принятое в девятнадцатом веке, уже тогда удивило путешественников-исследователей, ***как можно заключить теперь из их сообщений.)

***Суммарная энергия, передаваемая с поверхности Земли в атмосферу=курсирующая между земной поверхностью и атмосферой, почти в точности равна общей энергии солнечного излучения!

Наряду с описанной ***вертикальной передачей излучения есть и другие пути, по которым энергия может достигнуть верхних слоев атмосферы, чтобы там подвергнуться ***«удалению». Во-первых, существует тепло, которое накапливает сам воздух, движущийся снизу вверх в процессе конвекции, но вследствие малой теплоемкости воздуха доля этой энергии отнюдь не самая значимая. Огромное количество теплоты необходимо для испарения воды с поверхности океанов, морей, озер и т.д., и огромное количество энергии высвобождается при адиабатическом остывании поднимающегося на большие высоты воздуха, который, достигнув точки росы, снова конденсирует воду в облака. Этот «эффект холодильника», благодаря которому происходит непрерывная ***транспортировка воды (в виде пара) с поверхности на большие высоты, откуда она вновь устремляется вниз в жидком или твердом состоянии, ***высушивает земную поверхность в тех областях, ***где воздушные массы опускаются вниз (зона пассатов, области ***вокруг 30° с. ш. и 30° ю. ш.), и ***производит большое количество осадков в тех областях, где воздушные массы поднимаются наверх (экваториальная зона и области вблизи 60° с. ш. и 60° ю. ш.); схема этих процессов представлена на ***рис. 6.5 34.

Обобщая все вышесказанное, можно утверждать, что «впускные и выпускные клапаны» описанной нами паровой машины (в роли которой и представлена наша планета) существуют прежде всего благодаря воде, со-

Рис. 34. ***Глобальное широтное распределение осадков и испарений. Сухие нисходящие воздушные массы ***на широтах, где властвуют пассаты, обуславливают образование пустынных поясов; восходящие воздушные массы способствуют выпадению осадков в экваториальной зоне и средних широтах. [N = с. ш.; S = ю. ш.; Niederschlag = осадки; Verdunstung = испарение]

держщейся в атмосфере. «На входе» такими клапанами являются облака, ***почти исключительно обеспечивающие охлаждение, и поглощающий излучение водяной пар. «На выходе» оказываются облака, испарения водяной пар, которые действуют, с одной стороны, как нагреватели, а с другой — образуя ***энергетические транспортные ленты для скрытой теплоты — как охладители. Управление этими клапанами осуществляется ***комплексным способом — посредством множества взаимосвязанных процессов в ***мировом океане и атмосфере. ***Толстый и низкий облачный слой действует, в основном, охлаждающе, тогда как тонкие высокие облака создают над поверхностью воды и материков иной эффект, ограничивая нагревание днем и остывание ночью. Анализ данных, полученных с применением метеоспутников, ***свидетельствует — значительно упрощая результаты — о существовании ***охлаждающего эффекта между 30° с. ш. и 60° с. ш. и между 30° ю. ш. и 60° ю. ш., а также теплового эффекта в полярных и экваториальных широтах. Все это вместе взятое незначительно превышает охлаждение. Облака ***на дневной стороне регулируют приток и выделение тепла, а на ночной стороне — только выделение, и Земля с их помощью охлаждается в общем почти так же сильно, как и нагревается; отсюда следует, что на дневной стороне явно преобладает ***охлаждающий эффект облачности, а на ночной — уже упоминавшийся парниковый эффект. По этой причине для климата средний ***суточный *Gang; ход; течение; цикл; операция; пропуск; выпуск* может оказаться намного важнее, чем, к примеру, обычные суточные или месячные средние значения.

К ***этим процессам наряду с уже описанной вертикальной передачей относится и чрезвычайно существенное горизонтальное перераспределение энергии. Поскольку прием солнечной энергии осуществляется только дневной стороной планеты, а возвращается в мировое пространство энергия, излучаемая всей Землей (то есть и дневной, и ночной сторонами) в соответствии с локальными температурами, то днем ***прием превышает выделение, а ночью, естественно, наоборот. Это нарушение баланса выравнивается ***чистым потоком энергии, существующим почти исключительно благодаря механическому вращению Земли и устремляющимся с дневной стороны на ночную. Кроме того, плотность энергии солнечного излучения ***на единицу площади в низких широтах, разумеется, намного

больше, чем в высоких (изменения средней облачности в зависимости от широты), а отсюда следуют и более высокие значения средней температуры ***вблизи поверхности. ***Однако=И все же, как мы уже увидели, излучение ***определяется прозрачностью атмосферы в инфракрасном диапазоне, температурой верхних сторон облаков и скоростью вертикального потока, несущего скрытую теплоту, вследствие чего широтное распределение количества выделенной теплоты существенно отличается от широтного распределения ***лучепоглощения. Разница ***выравнивается за счет переноса тепла с севера на юг в атмосфере и ***верхних слоях океана (и тот, и другой способ предполагают перенос примерно равного количества энергии за единицу времени), регулируется всеобщим ветровым режимом и в значительной мере ***зависит от формы и положения континентов.

6.2. ***Климатическая машина Океан

В предыдущем разделе речь шла о ветрах и облаках, и может показаться, что атмосфера не так уж решительно влияет на климат (во всяком случае, непосредственно, напрямую не связана с ним). Мы с вами живем в атмосфере и день за днем наблюдаем за каприолями (или даже кульбитами) погоды; на первый взгляд, мы имеем дело с климатическими процессами. Однако такое представление ошибочно. Атмосфера слишком «шустра», а атмосферные явления слишком скоротечны для тех временных рамок, в которых можно говорить о климате. Считается, что энергия в атмосфере «обновляется» в течение двух недель, и соответственно можно предположить, что спустя 14 дней атмосфера уже и сама не знает, какова была погода в свое время. Именно поэтому опыт породил ставшую теперь обычной практику метеорологов ***вычислять среднемесячные значения с целью ***освободить данные от чересчур поспешных ***колебаний. Можно оценить ***по памяти две недели или даже месяц, но немыслимо предполагать, что память может сохранить сведения о погоде за сто лет, не говоря уже о тысячелетии.

Поступающее на Землю солнечное излучение поглощается, как известно, очень тонким приповерхностным слоем и преобразуется там в тепловую энергию. Приповерхностный слой, лежащий между абиссальной зоной и верхними слоями атмосферы, — то есть тот, в котором мы все живем, — является самым теплым. Таким образом, атмосфера нагревается снизу и, следовательно, находится в принципиально неустойчивом слое, где ***происходит непрерывная вертикальная конвекция. Конвективные процессы протекают с относительно высокой скоростью и обеспечивают ***в значительной степени адиабатически определенные ***профили давления

и температуры, эффективно создавая теплоту на высоте, где Земля может избавиться от нее, отправив ее в виде излучения в мировое пространство, и защищая таким образом поверхность планеты от перегрева.

Однако океан нагревается снизу и, следовательно, находится в принципиально устойчивом слое, только в исключительных случаях изменяющемся под воздействием ***интенсивных горизонтальных течений. По этой причине ***вертикальные профили определены преимущественно соответствующей климатической историей поверхности и разные моря в этом смысле очень отличаются друг от друга; изменение ***профилей происходит чрезвычайно медленно. Представим себе, что поверхность подвергается ***систематическому охлаждению; в этом случае в процессе конвекции холодная вода с поверхности постоянно будет ***попадать на глубину, и охлаждение поверхности повлечет за собой охлаждение всей воды ***в море. Поскольку теплоемкость воды достаточно велика — а изменение температуры всего океана на один лишь градус соответствует целому годовому бюджету потребления Землей солнечной энергии, — процессы охлаждения также оказываются чрезвычайно медленными. Теперь представим себе обратную ситуацию — систематическое медленное нагревание поверхности. В этом случае рассматриваемый слой становится только ***устойчивее и эффективно блокирует вертикальный теплообмен. Описанная картина — так называемый «диодный эффект» океана — при возникновении климатических изменений температур ***сделала бы их пилообразными, и медленные охлаждения регулярно сменялись бы более быстрыми потеплениями; на такие тенденции действительно указывают имеющиеся в распоряжении ученых ***образцы льда, полученные при бурении.

Собственно, все факты свидетельствуют в пользу того, что изменения погоды суть не что иное, как хаотический процесс, весьма чувствительный к любым, даже небольшим, возмущениям. Имея дело с подобной чувствительностью погоды к начальным и граничным условиям, можно, кажется, счесть, что любая попытка составить долгосрочные прогнозы изначально обречена на неудачу [?]. ***С позиции климата, однако, эта беда могла бы обратиться в добродетель=недостаток в достоинство.

Рассмотрим в качестве модели газ. Его микроскопическое состояние описывается координатами и скоростями всех составляющих его частиц, проследить которые представляется практически безнадежным делом. К счастью, хаотическая динамика такой многочастичной системы приводит ее к эргодичному поведению, позволяющему успешно применить к системе статистическое описание. Путем введения новых эмпирических величин (таких, как температура и энтропия) удастся достичь ***поразительного упрощения при моделировании почти всех важных макроскопических

характеристик в рамках ***термодинамики, не так давно бывшей просто механической теорией.

Возможность ***выбрасывания КАКИХ-ТО быстрых kleinskaligen переменных является предпосылкой для формулировки самых разнообразных практических законов, и примерами тому могут послужить ***законы химических реакций, закон диффузии (называемый еще законом Фика), закон Ома и т.д. Соотнося все вышесказанное с климатом, можно с некоторой долей уверенности (или хотя бы с крепнувшей надеждой) предположить, что и атмосфера ведет себя подобным образом (то есть ***эргодично), и на больших временных интервалах все флуктуации погоды можно не учитывать, сочтя достаточными в качестве релевантных ***средств описания всего лишь определенные средние значения и корреляционные функции.

Одной из самых важных величин такого рода является средняя температура поверхности Земли (в частности, уже упоминавшаяся ***SST). ***Усреднение осуществляется через некий подходящий большой промежуток времени, который хотя и мал во временном масштабе климатических изменений, все же достаточно значителен для временной шкалы погодных явлений. При этом предпочтительнее ***усреднение осуществлять (**по возможности) в координатной системе, не вращающейся вместе с Землей, а жестко связанной с осью Солнце–Земля (представленное стробоскопически, ***усреднение *****). Такой выбор координатной системы основан на том факте, что облака на дневной и ночной сторонах контролируют земной энергетический баланс совершенно разными способами. Если дневная и ночная стороны статистически лишь незначительно отличаются друг от друга, а облачность, как известно, имеет некий ***типичный суточный проход=пробег=см.выше (особенно в тропиках), то это весьма существенно влияет на величину, характеризующую парниковый эффект.

В качестве заключения достаточно подробного описания ***передвижений энергетических потоков в атмосфере можно привести следующую гипотезу: на основании эмпирических данных (**сообщения спутников) может быть установлена ***замкнутая корреляция=неразрывная взаимосвязь, представляющая временное изменение средних значений ***SST как функционал пространственного распределения температуры. С учетом такой корреляции атмосфера ***существует уже не эксплицитно, а лишь как «параметризованная» обратная связь SST с самой собой, суммарно представляющая все сложные,но быстрые процессы. Здесь же имеются и указания на ***Machbarkeit=осуществимость=выполнимость такого рода ***представления=понятия=плана; так, к примеру, существует ряд исследований, показавших, что ***среднемесячное количество воды в атмосфере в некоторой ***выбранной=данной точке можно приблизительно вычислить

как простую функцию от температуры поверхности воды в этой точке. Однако это количество воды, как уже подчеркивалось в предыдущем разделе, образует важнейшие клапаны, обеспечивающие приток и отток энергии.

Не могут и не должны быть исключены из составляемой нами «формулы климата» и определенные океанические процессы, рассмотреть которые нам еще предстоит. Но прежде чем мы этим займемся, обратимся все же еще раз к ***«маленьким и быстрым» шкалам: к тем, которые характеризуют взаимодействие океана и атмосферы, и к тем, которые относятся к пространственному распределению энергии (в частности, к распределению энергии в вертикальных слоях в самом океане).

Океан состоит из трех качественно очень различных слоев. Самый верхний — пограничный между океаном и атмосферой — слой можно назвать «кожей» океана, и толщина его составляет всего несколько миллиметров; такая «кожа» способна настроиться на окружение в течение считанных секунд. Под «кожей» находится следующий слой — ***смешанный покровный слой, глубина которого, как правило, варьируется в пределах от нескольких десятков до нескольких сотен метров. ***Этот слой не подвержен прямым воздействиям света, ветра и волн; должны пройти часы и даже дни, прежде чем исчезнут, скажем, последствия шторма или «следы» прошедшего судна; водовороты, ***потоки или запасы тепла могут сохраняться здесь месяцами. Временная шкала последнего, глубинного слоя, или абиссальной зоны (средняя толщина его равна примерно 4000 м), вмещает в себя тысячелетия, и поэтому образует собственно климатическую машину.

Приняв за условные ориентиры массу и теплоемкость океана и атмосферы, ученые вычислили, что то количество тепла, которое повысило бы температуру океана примерно на $0,001^{\circ}\text{C}$, вызвало бы повышение средней температуры в атмосфере на 1°C . Таким образом, становится ясно, что едва поддающиеся измерению ***изменения мирового океана могут оказывать весьма существенное влияние на ***атмосферный климат. Уже один только ***покровный слой, реагирующий на атмосферные процессы значительно быстрее, нежели глубинный, а с другой стороны — куда более инертный, чем атмосфера, имеет теплоемкость, превышающую теплоемкость атмосферы в 10–100 раз. Предположительно, именно этот слой и «отвечает» за изменения во временных интервалах, исчисляемых годами и десятилетиями. Тепловое расширение этого слоя, ставшее результатом глобального потепления, могло быть причиной повышения уровня моря.

Атмосфера, ***покровный слой и абиссаль сообщаются между собой только посредством особых «***Flaschenhals=бутылочных горлышек=воронок», свойства и характеристики которых стоит рассмотреть подробнее. Все три названные нами системы «живут» в рамках отличных

друг от друга ***характеристических временных шкал и обладают очень разными способностями к сохранению тепла. Континентальный климат (допустим, в пустыне) ***характеризуется=определяется скоростью изменения температуры в атмосфере; морской климат — напротив, несет на себе печать ***покровного слоя. Воздействие абиссальных зон значительно растянуто во времени и обнаруживается лишь в средних величинах, ***вычисленных на больших интервалах времени. Представим ***климатический аттрактор в виде пучка траекторий в некотором фазовом пространстве: он определяется в величинах, относящихся к шкалам абиссальной зоны. Добравшись до ***тонкой структуры=микроструктуры отдельной траектории такого пучка, мы обнаружим, что воздействие океанического ***покровного слоя есть не что иное, как «аттрактор в аттракторе». Углубившись же в тонкую структуру, мы наткнемся на неустойчивость и изменчивость рядовых погодных явлений. ***Грубо говоря, все перечисленные ***тонкие структуры суть спирали, периодические петли ***Jahres- und Tagesgänge.

Взаимоотношения между атмосферой и ***покровным слоем сводятся, главным образом, к двум чрезвычайно отличным друг от друга процессам. Во-первых, это ***передача=перенос механических сил из атмосферы в ***покровный слой (иными словами, волнение на море), турбулентное ***смешивание воды и ***мировая система океанических течений, которая может восприниматься как «ответ» на ***мировую систему воздушных течений; эти течения переносят колоссальное количество тепла из низких широт в высокие. Во-вторых, это существующий между атмосферой и ***покровным слоем мирового океана процесс обмена теплом и водой, который осуществляется благодаря энергетической поддержке со стороны системы воздушных течений (проще говоря, ветров), и наряду с осадками (снег, дождь, роса и проч.) охватывает все явления, описываемые понятием «скин-эффект», то есть «поверхностный эффект».

Поток энергии — не всегда, но преимущественно — направлен из воды в атмосферу. Потери тепла на поверхности воды можно условно разложить на три компонента: тепловое излучение (в мировое пространство, в облака или в ***пар непосредственно над водой), ***теплопроводность от воды в воздух или наоборот (этот эффект ***растянут во времени и сравнительно невелик) и, наконец, испарение, которое ***связывает значительное количество энергии и ***в виде скрытой теплоты переносит эту энергию от воды в воздух.

Отводимое таким образом с поверхности воды тепло попадает туда с больших глубин, преимущественно в результате вертикального турбулентного обмена, происходящего в тонком граничном слое — уже описанной выше «коже» толщиной всего 1–2 мм, ***за счет молекуляр-

ной теплопроводности. Поскольку процесс молекулярного ***теплообмена=теплопроводность протекает значительно медленнее, чем ***турбулентная передача тепла в более глубоких слоях, создается достаточно большой вертикальный перепад температур: согласно данным, полученным со спутников в результате съемок в инфракрасном диапазоне, обычно разность температур между поверхностным и более глубокими слоями составляет примерно 1°C . Мощность проявления поверхностного эффекта зависит от скорости, с которой в воде ***приготавливается тепло, и скорости, с которой воздух ***отводит передаваемые водой теплоту и влагу, а также от соотношения ***испускаемого водой теплового излучения и излучения, отраженного ***от атмосферы и облаков, — то есть в итоге мощность «скин-эффекта» определяется температурой воды и воздуха, относительной влажностью и скоростью ветра, а также распределением воды и водяного пара в воздухе не только непосредственно над поверхностью воды, но и на больших высотах.

Чем же объясняется столь важное значение этого, казалось бы, незаметного поверхностного эффекта для климата всего земного шара? С одной стороны, это связано с применением специальных спутников, предназначенных для регистрации ***температуры инфракрасного излучения мирового океана. Такие спутники используются уже несколько лет (с 1991 года к ним присоединился и европейский ERS-1), однако из-за поверхностного эффекта они в действительности измеряют температуру не самой воды, а температуру, примерно на 1°C (в зависимости от места и времени) отличную от нее в результате атмосферного влияния. Естественно, эту разницу между действительными и получаемыми значениями хотелось бы знать точно, чтобы учесть ее при измерениях, ведь несколько десятых градуса означают существенную ошибку при определении, допустим, количества тепла, сохраненного ***покровным слоем. С другой стороны, вся энергия, попадающая из мирового океана в атмосферу, должна пройти сквозь игольное ушко скин-эффекта. Располагая сведениями о перепаде температур в тончайшем поверхностном слое (добытых, к примеру, с помощью спутников), ученые смогут подробно и полно ***фиксировать на протяжении долгого времени процессы обмена энергией и водой между океаном и атмосферой и таким образом экспериментально получить наиболее значительные ключевые величины, характеризующие климатические процессы.

Обратимся теперь к следующему уровню — к тепловому обмену между ***покровным слоем и абиссальной зоной. Прежде всего следует пояснить, в чем, собственно, заключается суть проблемы и почему «наружные», поверхностные слои океана столь разительно отличаются от «внутренних», глубинных. ***С самого начала напомним: подъемные силы в воде обра-

зуют значительный импульс для движения воды и во многом определяют квази-стационарное состояние, в котором пребывает мировой океан. Импульс вызывает движение в тех случаях, когда под одним и тем же давлением находится вода различной плотности. В этих условиях вода меньшей плотности (более «легкая») поднимается вверх, в области меньшего давления, а вода большей плотности (более «тяжелая») под воздействием гравитационных сил опускается вниз, на большую глубину, достигая тем самым состояния с минимальной потенциальной энергией, в котором вода на определенной глубине повсюду обладает одинаковой плотностью. Плотность воды в мировом океане зависит от ее температуры, содержания в ней солей и давления, под которым она находится. Океан создает, таким образом, устойчивое вертикальное расслоение: плотность воды в нем монотонно растет с увеличением глубины.

Как известно, Солнце нагревает только самые верхние слои воды. теплая вода легче холодной, а потому нагретые слои стабильно остаются наверху, а холодные — внизу. Процессы ***теплопроводности выравнивают возникающую при этом разность температур, но бесконечно медленно, а устойчивость расслоения препятствует конвекции. Ветер и волны, хотя и перемешивают верхние слои, не достигают все же достаточной глубины, ведь для поднятия наверх холодной и потому «тяжелой» воды требуется большое количество энергии.

Нагревание за счет солнечного излучения происходит в тропиках значительно интенсивнее, нежели на полюсах. По этой причине, в принципе, холодные воды с полюсов и направляются в экваториальные области, что компенсируется водами, несущими тепло из низких широт в высокие. Поскольку глубины мирового океана заполняет холодная вода, ***процесс этот — начавшийся, по предположениям ученых, уже очень давно — практически закончен. Итак, на поверхности океана находится относительно теплая вода, а в глубине — относительно холодная. Теплую воду от холодной отделяет так называемый «слой скачка», ***температура в котором (а его глубина составляет несколько десятков метров) резко понижается.

Итак, обмен между ***покровным слоем и абиссальной областью вследствие сложившегося устойчивого расслоения почти совершенно невозможен, и существует всего несколько ***«медленных» процессов, поддерживающих этот обмен несмотря на препятствия. Прежде чем мы перейдем к более подробному рассмотрению таких процессов, остановимся еще на одном моменте. ***Если после того, как было достигнуто устойчивое состояние, должно было произойти глобальное похолодание, то ***этот механизм оказался бы вновь запущен для обмена холодной воды ***абиссальных областей на еще более холодную. Как только климат снова потеплеет,

эти «врата» опять окажутся закрыты, так что абиссаль ***всегда=постоянно запечатлевает холодные периоды и в сменившем холод потеплении чрезвычайно медленно забывает эту информацию. Разумеется, в действительности это только условно соответствует истине, так как ниже определенной температуры (которая зависит от давления и содержания в воде ***солей) вода снова расширяется, и как только абиссаль заполняется водой наибольшей плотности, ***схлопывающий=клапанный механизм прекращает действовать.

Действительная температура на глубине около 4000 м в больших океанах колеблется от $+2^{\circ}\text{C}$ до $+4^{\circ}\text{C}$, а содержание ***солей составляет примерно 3,6% (36 г в килограмме воды). При таких условиях максимум плотности воды находится, в зависимости от давления, между -4°C и -5°C , а при давлении, царящем на глубинах более 800 м вода вообще ***перестает иметь максимум плотности. Правда, вода при погружении нагревается за счет ***компрессии, однако менее, чем на 1°C (всего лишь $0,3^{\circ}\text{C}$, если воду нулевой температуры погрузить на 4000 м). Соленая вода с максимальной плотностью имеет на поверхности температуру -4°C , а при погружении -3°C . Глубокие подземные воды, таким образом, очевидно теплее, чем вода с максимальной плотностью. Мы, к сожалению, пока не знаем точно, что именно могла бы рассказать об истории земного климата такая температура, однако согласно предположениям ученых, ***это в значительной степени связано со структурой бассейна ***абиссали=ли, позволяющего литься из одного бассейна в смежный только ***воде «выше края» (и при том небольшой плотности).

В наше время абиссальные конвекционные процессы считаются спорадическими и наблюдаются в очень немногих районах мирового океана. (Вполне может быть, что глубинные воды, до сих пор памятуя — как раз в том смысле, о котором мы упоминали — о последнем ***ледниковом периоде, продолжают блокировать обмен.) К таким районам можно отнести Гренландское море и море Уэдделла. При замерзании морской воды образуется пресный лед, а морская соль ***в=с очень высокой концентрации остается в той части воды, которая еще не успела замерзнуть. Если эта вода достаточно холодна и содержит достаточно соли, то она становится настолько тяжелой, что может опускаться даже на очень большую глубину. Насколько нам известно, такая конвекция происходит? по большей части, не в той «упорядоченной» форме, что знакома нам по эффекту Бенара («ячейчатые структуры»), а напоминает, скорее, об облаке, ***пролившемся стремительным дождем, капли и струи которого на пути к земле смешиваются со своим окружением. Поскольку при этом общее количество глубинных вод увеличивается, ***слой скачка по всему мировому океану

тоже чуть-чуть поднимается. ***Глубоководные шторма, к примеру, так или иначе выравнивают этот уровень, смешивая под ***покровным слоем воду, поднятую в прилегающих к ***слою скачка областях.

Другой важнейший процесс является результатом разделения единого ***мирового океана на множество ***относительно замкнутых морей. Красное и Средиземное моря, к примеру, сообщаются с мировым океаном только узкими и мелкими проливами — ***Аденским(залив)=Баб-эль-Мандебский и Гибралтарским. Холодные глубинные воды, идущие с полюсов, едва ли достигают таких морей, и потому каждое из них обзавелось ***собственным абессалем, обладающим некими только ***ему присущими свойствами. В Красном и Средиземном морях, скажем, абиссаль отличается довольно высокой температурой и высоким содержанием ***солей благодаря быстрому испарению и сильному нагреванию поверхности. Существующая здесь несмотря на ***тепло высокая плотность позволяет глубинным водам, оставаясь много ниже уровня моря, ***на малых скоростях стекать в Атлантический или Индийский океаны и таким образом вносить свою — и весьма существенную при том — долю энергии ***в мировой абиссаль.

Все эти ***массивы воды, собранной из самых разных мест и обладающей самыми разными свойствами, движутся на большой глубине, не подвергаясь воздействию ***быстрых колебаний температуры воздуха, возникающих из-за ветров, суточных и ***годовых=сезонных ритмов (таких, допустим, как шторма или ***). При этом они подчинены внутренним процессам старения и ***смешения=смешивания, в особенности в тех областях, где соприкасаются воды различных типов. ***Незначительная скорость ***производства=выработки «молодой» воды (контакт будущей глубинной воды с воздухом) эффективно способствует усреднению ***по всем быстрым флуктуациям; таким образом, в ***абиссале существует квазистационарное состояние поразительной пространственной и временной устойчивости. Это состояние является одновременно и своего рода ***записью=мемуары климатической истории последних тысячелетий, и активным участником климатических процессов следующего тысячелетия.

К сожалению, мы только-только начали понимать, какие именно истории могла бы рассказать нам великая книга под названием «Океан». Для того, чтобы расшифровать эти письма, необходимо провести не только огромное количество измерений, но и значительно продвинуться в теории ***таких сложнейших необратимых термо- и гидродинамических явлений, как поток=течение, старение и смешение=смешивание.

6.3. Устойчивость климата

Наша модель климата, ***представленного в виде паровой машины, состоит из трех подсистем, каждая из которых действует в собственных временных рамках (то есть имеет собственную временную шкалу) и обладает способностью тем или иным образом сохранять энергию. Речь идет об атмосфере (ее временная шкала ***включает в себя дни и недели), океаническом ***покровном слое (месяцы и годы) и ***абиссали (века и тысячелетия). Приток и отток энергии регулируется, в основном, водой, содержащейся в атмосфере; эта вода в форме водяного пара и облаков действует при поглощении и передаче энергии, охлаждая или нагревая, — в зависимости от ***транспортного потока и распределения плотности каждого из двух названных агрегатных состояний.

Океан является мощным буфером, накапливающим тепло и атмосферные газы (в частности, углекислый газ). Однако действует он отнюдь не как простой конвейер, ***на который что положишь, то, спустя некоторое время и место, и снимешь: ***свойства, запечатленные сейчас, к примеру, в океанической циркуляции, в будущем вернуться в атмосферу, распределенные в пространстве и времени; иными словами, информация, которой в данный момент ***владеет=располагает океан, является ***интегральной функцией отклика на изменения климата ушедших времен в самых разных уголках Земли.

Многие ученые (и авторы в том числе) склоняются к мнению, что, занимаясь климатом и погодой, нельзя обойти молчанием такую фигуру, как хаотический аттрактор — в том понимании, которое вкладывается в этот термин теорией нелинейных динамических систем. Поток лучистой энергии, изливающийся на Землю, по ряду астрономических причин подвержен ***периодическим колебаниям, на которые планета реагирует нелинейной динамикой своих океанов и атмосферы. Сюда относятся различные стохастические ***наложения, возникающие, к примеру, из-за извержений вулканов, и медленные сдвиги, вызываемые дрейфом материков, ***эрозией горных пород, ***а также биологическая эволюция и развитие техники. Если же существует некий «климатический аттрактор», то он представляет собой довольно-таки сложный математический объект. И хотя все попытки извлечь такой аттрактор из массы имеющихся в распоряжении ученых геологических, океанологических и метеорологических данных до сих пор не увенчались большим успехом, мы все же предлагаем читателям — просто несколько опережая время — исходить в дальнейшем из того, что такой аттрактор уже найден.

Насколько же устойчив наш гипотетический аттрактор? Такой вопрос

обычно подразумевает ***локальную устойчивость траекторий аттрактора в фазовом пространстве, то есть является, по сути, вопросом о том, насколько ***скачкообразны и иррегулярны эти траектории и в каких пределах могут находиться происходящие из года в год изменения погоды. Мы этот вопрос пока оставим в стороне; прежде займемся ***областью притяжения аттрактора. Если принять во внимание ближайших соседей Земли, Венеру и Марс, то становится очевидно, что в весьма схожих условиях наряду с земным аттрактором существуют еще и другие. Пока никто не может со всей определенностью сказать, избежала ли Земля незавидной участи своих соседей просто благодаря счастливой случайности или же ***наш аттрактор является единственно возможным поведением нашей планеты. Однако с полной уверенностью мы можем утверждать, что земной климат ***должен находиться в действительно ***устойчивом=робастном состоянии. Почему?

На сегодняшний день мы располагаем достаточно точной картиной развития Земли в течение последнего миллиарда лет. На протяжении этого колоссального отрезка времени Земля стабильно сохраняла температуру около 300 К с диапазоном колебаний примерно 10%. Такую ***стабилизацию следует считать очень хорошей, ***учитывая 6000 К солнечного пекла и 3 К межзвездной стужи. С тех пор, как на земном шаре возникла жизнь, ее существование, очевидно, ни разу не подвергалось опасности, ***сулящей полное исчезновение. ***Но что же произошло за это время? Атмосфера первоначально содержала, вероятно, 10 – 30% углекислого газа — сегодня мы можем наблюдать только следы его присутствия в атмосфере. Солнечное излучение за этот промежуток времени ***должно было уже вполне измеримо измениться. Вращение Земли, ***замедленное приливами и отливами, когда-то, предположительно, обладало скоростью, которая в 3–5 раз превышала сегодняшнюю (а большие планеты до сих пор продолжают так вращаться). Материки поразительным образом покинули свои исходные позиции, и соответственно полностью сменила режим работы океаническая ***система тепловых потоков. Не следует забывать, что расколовшиеся материки и складки, приобретенные горными массивами, должны были быть связаны с активной вулканической деятельностью, в результате которой в атмосферу выбрасывалось огромное количество пыли и газов. ***А уж последствия столкновения Земли с чудовищно крупным телом (оставленные им на Луне и Меркурии шрамы до сих пор бросаются в глаза) — пожалуй, никому не под силу представить себе эту картину полностью. Жизнь «отравила» океан и атмосферу кислородом, покрыв обширные области ***торфяными болотами и известняковыми и меловыми породами. При этом Земля, с космической точки зрения, все это время действовала скорее как ***прецессионный термостат, нежели как свеча на ветру. Уровень

воды в течение длительного периода едва ли мог значительно измениться (под словом «значительно» мы имеем в виду изменения, не превышающие нескольких десятков метров; для людей такие перемены равнозначны катастрофе, однако смотреть на них с позиций истории Земли, они суть не более, чем флуктуации). Если бы в процессе горообразования не возникали все новые и новые горы, то все существующие ***эрозия в атмосфере разрушила бы примерно за сто миллионов лет. Под водой все это происходило на порядок медленнее; таким образом, как только земля оказывается под водой, эрозия практически прекращается. Все материки были бы ***плоскими морями=равнинными морями, и гипсографическая кривая Земли (рис. 32) ***при нуле имела бы очень плоский максимум. Реальная гипсографическая кривая ***имеет высоты над нулем, но вместе с тем только ***одно выраженное плато — при нуле (другое плато располагается на кривой ***на высоте океанической коры, и ***причина здесь объясняется иначе). Многие равнины, существующие сейчас на материках (на одной из них, кстати, живут и авторы этой книги), ???***наводят на мысль о том, что современный нам уровень воды в мировом океане несколько ниже того среднего значения, что сохранялось на протяжении длительного периода времени; ***поэтому представляется весьма вероятным, что маятник вновь качнулся в другую сторону (или, может, это случится очень скоро, или через тысячи лет). Никто сегодня не может сказать с полной уверенностью, какую играет человечество в этом процессе, и насколько эта роль важна.

Существует ряд исключительно серьезных соображений по поводу того, что стабильность земного климата на протяжении столь длительного периода времени обусловлена следующим обстоятельством: хотя различные условия из числа вышеперечисленных существенно изменились, их влияние, однако, могло быть в значительной степени компенсировано. Исключать такую возможность, разумеется, нельзя; однако с научной точки зрения представляется более ***плодотворным=конструктивным ответить сначала на вопрос, касающийся стабилизирующих обратных связей: могли ли такие связи оказаться порождением собственной силы ***системы и возможно ли найти им объяснение, не прибегая к услугам «поддерживающей руки», принадлежащей добрым духам.

Обратимся сначала к ***диаграмме атмосферного распределения влажности; такую диаграмму можно получить, произведя измерения при помощи шара-зонда (рис. 33). На высоте примерно 15 км существует выраженный температурный минимум, который играет роль, схожую с ролью крышки, ***накрывающей кастрюлю: над ним воздух остается почти совсем сухим. Такая «ловушка для холода» с температурой около -80°C существует во всех климатических зонах в любое время года. Почему же эта

крышка настолько значима? Дело в том, что ее существование связано с соотношением силы тяжести и тепловым движением частиц газа. Газ в состоянии теплового равновесия при определенной температуре состоит из частиц, движущихся с самыми разными скоростями. Плотность распределения $f(v)$ частиц, обладающих некоторой скоростью v , определяется распределением Максвелла–Больцмана:

$$f(v) \sim v^2 \exp(-mv^2/2kT).$$

При некоторой определенной температуре T всегда существуют еще и частицы с очень высокой скоростью v , и их количество тем больше, чем меньше масса m частиц. Каждая планета или звезда характеризуется=обладает легко вычисляемой второй космической скоростью: тело, оторвавшееся от поверхности планеты (или звезды) со скоростью, превышающей это значение, может никогда не вернуться на поверхность. Именно это и происходит: частицы газа непрерывно «улетучиваются» из внешних слоев атмосферы в мировое пространство, и скорость протекания этого процесса можно вычислить, исходя из температуры атмосферы, размера и массы планеты. Небольшие небесные тела — скажем, Луна и Меркурий — уже лишились таким образом своих газов.

Легкие атомы, как уже было отмечено, отличаются от тяжелых значительно большей подвижностью. Когда вода достигает верхних слоев атмосферы, молекула под воздействием обладающего мощной энергией солнечного излучения легко расщепляется на водород и кислород. Водород, легчайший из всех известных химических элементов, навсегда покидает планету, отправляясь в мировое пространство, а реактивный кислород тем временем занимается поисками нового химического «партнера». Если бы вода непрерывно попадала с Земли в верхние слои атмосферы, наша планета к настоящему времени, возможно, оказалась бы уже иссушена. (Поскольку Венера практически лишена воды, было повторно проверено, может ли этим путем исчезнуть с планеты вся вода. Максимальные потери, согласно оценке, примерно равны всего лишь четверти земных запасов воды на протяжении всего существования Венеры. С другой стороны, «пошедший вразнос» парниковый эффект представляется наиболее приемлемым и достоверным объяснением высохшей Венеры, и вычисления с измененными допущениями, в принципе, не исключают этого полностью.)

Скорость, с которой водород сегодня покидает Землю, оценивается в $300\,000\,000$ атомов/см² · с, что соответствует всего 80 000 т воды в год. При массе мирового океана в 1,5 триллиона тонн (доля водорода равна примерно 10%) пройдет не меньше 2 000 миллиардов лет, прежде чем Земля лишится всей своей воды. Таким образом, мы видим, что

описанная «ловушка для холода» обеспечивает нашу планету своего рода водонепроницаемым покровом.

Раз уж сложилось так, что земной климат ***расположен=находится в устойчивом хаотическом аттракторе, и это состояние поддерживается преимущественно за счет гибкой и быстродействующей «вентильной» системы (водяной пар–облака), то можно надеяться, что такой системе под силу также окажется и эффективное выравнивание и компенсация (в определенных пределах) всех небольших изменений параметров Солнца, состава атмосферы и т. п. посредством ***перераспределения все тех же облаков и водяного пара. Однако те факты, которыми располагает современная наука, не дают надежного основания ни для пессимизма, ни для оптимизма: и то, и другое преждевременно, но все же может послужить поводом к более интенсивному изучению данной проблемы.

В мире сейчас много говорится о парниковом эффекте (сам термин был ***придуман в 1896 году Аррениусом в связи с CO_2), и в качестве его первопричины общепринято представлять углекислый газ. Однако положение совсем не так просто и очевидно, как может показаться на первый взгляд. Прежде всего прочего следует отметить, что без парникового эффекта температура повсюду на Земле была бы примерно на тридцать градусов ниже, а ***жидкий океан отсутствовал бы вовсе. Таким образом, становится ясно, что сначала стоит говорить об изменении эффекта. Разумеется, верно, что повышение концентрации углекислого газа в атмосфере ведет к тому, что поглощается ***больше инфракрасного излучения и тем самым затрудняется доступ теплового излучения к поверхности Земли; однако при этом речь идет лишь об относительно небольшой доле по сравнению с водой и водяным паром. Парниковый эффект, создаваемый водяным паром, оценивается значением 100 Вт/м^2 , углекислым газом — 50 Вт/м^2 , а облаками — всего 30 Вт/м^2 . Заметим, что о существующем в настоящий момент распределении в атмосфере пара и ***капель можно только высказать предположение, то есть приведенные цифры суть балансы ***из больших вкладов, которые в случае облаков в значительной мере взаимно компенсируются. При возникновении климатических изменений эти значения для H_2O могут благодаря обратной связи стать совершенно иными, ***менее чувствительными для углекислого газа. Действительно, в атмосфере в течение последних десятилетий наблюдается систематическое повышение концентрации CO_2 , которое довольно-таки уверенно можно связать с использованием человечеством ископаемых горючих веществ. Если же рассматривать только прямое воздействие ***газов, появление которых в атмосфере имеет антропогенные причины, то они удерживают в атмосфере

ре примерно на 1% (то есть около 3Вт/м^2) от общего количества энергии больше, чем это было в доиндустриальную эпоху.

Итак, вывод о том, что такое повышение концентрации углекислого газа в атмосфере должно стать причиной глобального потепления на Земле, представляется поспешным ввиду того, что климатическая система нашей планеты снабжена комплексной обратной связью. Основанный на недопустимой линейной экстраполяции ***контуров управления=цепочке воздействий, этот вывод ***утверждает, что непосредственное воздействие CO_2 (то есть уменьшившийся в результате усиления инфракрасного поглощения отток тепловой энергии) ***является также косвенным указанием на то, что все остальные ***управляющие факторы — океанические течения, ветер, облака и пр. — грядущего потепления, в принципе, не принимают к сведению и ***остаются совершенно равнодушны к происходящим изменениям. Это абсолютно противоречит всему, что мы знаем об этих чувствительных величинах: они продемонстрируют нам весьма ярко выраженную реакцию, которая, вероятно, ***уменьшит отрицательное влияние на климат, но при неблагоприятных обстоятельствах может и еще более усилиться.

Все вышесказанное не означает, что связь, обнаруживаемая между CO_2 и потеплением, непременно является ошибкой; это значит лишь, что подобный вывод в настоящее время в лучшем случае может представлять собой рабочую гипотезу, но никак не полностью достоверные научные данные. Даже если через какое-то — причем немалое — время путем измерений удастся подтвердить существование причинно-следственной связи между повышением концентрации CO_2 в атмосфере и глобальным потеплением (имеются данные о последних 100 000 лет, ***свидетельствующие о возможности такого рода корреляции), один только этот факт даст науке не больше, чем сравнение изменений, произошедших за последние 10 лет в росте ***ребенка, родившегося в 1980 году, с выделением в атмосферу углекислого газа. Нам удастся установить ***хорошее согласие трендов обеих кривых, но было бы преждевременно выводить отсюда каузальные связи. Если две величины — скажем, A и B — ***коррелируют друг с другом, то и A может казаться следствием B , и B может оказаться следствием A , или же, к примеру, и A , и B могут иметь некую общую причину. Решить этот вопрос можно только путем изучения действующих механизмов A и B , но никак не сравнением двух кривых. Можно ли совершенно исключить вероятность того, что глобальное потепление, например, способствует высвобождению некоторого количества углекислого газа из необъятных кладезей мирового океана, ***а следовательно, каузальная связь как раз обратна установленной нами? Холодная вода на полюсах ежегодно поглощает около 100 миллиардов тонн углерода *** (МТС) *** в CO_2 , теплые экваториальные воды

примерно равное количество его высвобождают; 100 МТС ежегодно «путешествуют» по живым организмам; люди производят дополнительно всего 10 МТС, и половина этого количества ***остаётся в воздухе; в атмосфере находится в общей сложности около 750 МТС, тогда как в мировом океане в растворённом виде содержится 40 МТС — таков баланс, колоссально зависящий от самих климатических процессов, и человечеству отведена в нём всего лишь второстепенная роль.

Например, около 1550 года в течение примерно столетия во всем мире воцарился так называемый «малый ледниковый период»; средние температуры этой эпохи были приблизительно на 1°C ниже, чем в наше время. Причины такого похолодания нам неизвестны, однако подобные факты убедительно доказывают, что климат и безо всякого вмешательства человека ни в коей мере не является чем-то абсолютно постоянным. Лишь когда мы действительно разберемся в основных действующих механизмах и обратных связях и ***сумеет проверить и испытать их количественные характеристики, мы сможем осторожно приблизиться к такого рода суждениям. До тех пор мы живем с риском ***пожарь когда-нибудь неизвестные пока плоды человеческой деятельности. И все же девиз ***«Кто ничего не делает, тот не может ошибиться», то есть профилактическое сокращение до неизбежного минимума всех антропогенных изменений, остается пока, пожалуй, единственным ***девизом, с которым можно согласиться не раздумывая. Впрочем, и он не дает никаких гарантий того, что никаких глобальных изменений климата на Земле не произойдет.

Данные, собранные по всему миру с 1850 года до наших дней, свидетельствуют о том, что температура за это время поднялась на $0,5^{\circ}\text{C}$. Повышение температуры ***осуществлялось «в несколько приемов», и при этом процессы на суше отличались от процессов на море, а изменения, произошедшие в северном полушарии, отличались от таковых, случившихся в южном. С 1980 года каждый последующий год оказывается теплее предыдущего, и несмотря на все ***подъемы и спады существует, кажется, ***линейная тенденция к повышению температуры в пределах $0,5^{\circ}\text{C}$ за каждые сто лет. Тщательное наблюдение за содержанием углекислого газа в атмосфере было начато только в 1957 году, и уровень его с тех пор поднялся с $0,0315\%$ до $0,0354\%$ (по данным 1990 года). Широко известно о таянии альпийских ледников, начавшемся еще в средние века, однако в ***Балтийском оледенении, регистрируемом в Финляндии с 1720 года, не находится никаких признаков ***тренда в нашем столетии; равным образом, ни одна из полярных шапок не ***демонстрирует никаких систематических изменений на протяжении последних двадцати лет. Даже на фоне интенсивных международных исследований положение сейчас таково, что

каузальная связь между увеличением содержания в атмосфере углекислого газа и потеплением климата хотя и предполагается, но в настоящий момент все же не может быть окончательно подтверждено.

ГЛАВА 7

Эволюция жизни

***Сегодня становится все яснее, что вопрос о сущности жизни может быть решен только в свете научных сведений о процессе ее становления.

А. И. Опарин.

Жизнь, ее природа, происхождение и развитие

7.1. Самоорганизация и жизнь

Старейшая научно обоснованная теория возникновения жизни принадлежит А. И. Опарину [?, ?]. Одна из самых молодых и основанных уже на новейших научных данных и современных экспериментах теория биогенеза разработана Манфредом Эйгеном и ***учеными его школы [?, ?, ?, ?, ?, ?]. Мы попытаемся перебросить мостик от одной теории к другой; при этом хотелось бы подчеркнуть, что нас в данном случае интересуют не столько химические и биологические подробности, сколько путь, сделавший возможным переход от случайного, с физической точки зрения, синтеза к простейшим каталитическим структурам, на которых дарвиновский принцип отбора впервые мог быть эффективно осуществлен на молекулярном уровне, — путь, направивший и значительно ускоривший дальнейшее развитие ***жизни на нашей планете.

Предварим рассмотрение конкретных моделей несколькими принципиальными замечаниями касательно той роли, что отведена в описываемых процессах второму закону термодинамики и самоорганизации. Еще в девятнадцатом веке сложилось убеждение, что зарождение жизни противоречит физическим законам. Так, к примеру, ***в 30х–40х годах ведущий физиолог того времени Иоганнес Мюллер в своих лекциях в Берлинском университете постулировал существование некоей особой ***«силы жизни», так называемой *vis vitalis*. Ученик Мюллера студент-медик Герман Гельмгольц, опираясь на эксперименты и теоретические обобщения, сумел доказать существование единых законов, которым подчиняются и живая, и неживая

материя. Научные данные, полученные Гельмгольцем, легли в основу первого закона термодинамики. К совершенно аналогичным выводам в результате своих исследований пришел и врач Юлиус Майер, ***утверждавший, что солнечное излучение является непосредственным источником потока ***высокоценной энергии, которая поддерживает жизнь на Земле. Эти идеи получили развитие в работах Людвига Больцмана, который по праву может быть назван предтечей ***теории эволюции жизни.

Однако подлинный прорыв в понимании взаимосвязи между существованием жизни и вторым законом термодинамики был совершен уже другими учеными: Оствальдом, Шрёдингером, ***Берталанффи и Пригожиным. Именно этим исследователям мы обязаны представлением о том, что живые существа следует рассматривать ***как принципиально открытые системы [?, ?]. Термодинамика же открытых систем совершенно очевидно допускает структурообразование и самоорганизацию, что и было с особой четкостью показано в работах ученых, принадлежавших к ***брюссельской школе Пригожина. Эйген [?] приложил полученные научные результаты к проблеме биогенеза. Одним из важнейших итогов этих ***всеобъемлющих исследований стал следующий вывод: Земля, которая представляла собой открытую систему, около 4 000 миллионов лет назад оказалась в состоянии неустойчивости вследствие флуктуаций, носивших характер самоорганизации на молекулярном уровне. Таким образом, возникновение различных форм жизни стало наконец закономерным и неизбежным процессом. У его истоков, однако, стояли случайные события, приведшие к образованию структур, способных к эволюционному (в дарвиновском смысле) развитию.

Последствия событий, вызванных упомянутыми «флуктуациями», сегодня уже нельзя восстановить во всех подробностях, поскольку следы этих событий, так сказать, ***почти растворились=погребены среди геологических, метеорологических и биологических процессов, имевших место на Земле на протяжении последних нескольких миллиардов лет. И все же данные, которыми располагают молекулярная биология и науки, изучающие прошлое нашей планеты, позволяют создать некую многоступенчатую схему, где отражено ***возможное протекание земного биогенеза. ***Случайный характер биогенеза подразумевает и еще одно условие: существовал ни в коем случае не один, а по крайней мере целый ряд более или менее вероятных сценариев развития событий. От каждого из этих гипотетических сценариев требовалось, чтобы их отдельные фазы могли быть верифицированы в ходе экспериментов и/или на основании теоретических моделей и чтобы вероятность случайных событий, оказывающих влияние на переход от одной фазы к другой, была достаточно велика. Это эвристические принципы достоверности и ***непрерывности, сформулированные еще ***Ле-

Рис. 35. Эволюционное древо: увеличение сложности с позиций обработки информации (подробнее см. в тексте). [Übergang = переход; Grenzfläche = ***пограничная поверхность; Sexualität = сексуальность; fern vom Gleichgewicht: nichtlineares chemisches Rauschen = удаленное от равновесия состояние: нелинейный химический ***шум; Individualität = индивидуальность; Genetik = генетика; Morphogenese = морфогенез; Neuronen = нейроны; Netzwerk = ***нейронная сеть; Denken = мышление; Physik = физика; Chemie = химия; Biologie = биология; Gesellschaft = общество]

нингером (в 1971 году), а затем развитые ***Романовским, Чернавским и Степановой (1975).

Все известные к настоящему моменты гипотезы протекания биогенеза содержат пока отдельные элементы, не совсем соответствующие приведенным нами принципам. И все-таки, несмотря на это обстоятельство, от дальнейшей разработки таких конкретных моделей отказываться ни в коем случае не следует. Манфред Эйген сформулировал свою основную позицию (к которой мы присоединяемся) следующим образом:

Для понимания сути биологической самоорганизации нам следует исходить из конкретных моделей, о релевантности которых можно судить только по наблюдениям или экспериментам.

Хотя наука располагает огромным количеством примеров самоорганизующихся систем, поистине сложна лишь одна из них — сама *жизнь*. Всем известно, что процесс возникновения жизни на Земле должен нести на себе отпечаток неимоверного многообразия отдельных элементов молекулярных структур, каталитических механизмов, явлений обратной связи и внешних условий. Многие теории занимаются целенаправленным рассмотрением определенных классов таких элементов; наша же основная цель сводится, скорее, к попытке обнаружить некий термодинамический и информационный «скелет» этой единственной в своем роде иерархии самоорганизации. Такой «скелет» в значительной степени независим от случайностей внешних условий и представляет собой только общий организационный аппарат всего организма. Основные элементы «скелета» (в ***исторической последовательности) представлены в виде схемы на рис. 35.

Эта схема охватывает три иерархические ступени ***эволюционной сложности: химические, биологические и социальные явления. Несколько опережая события, здесь нам хотелось бы указать на тот факт, что переход между классами явлений каждый раз отмечен возникновением нового качества развивающейся ***способности к обработке информации.

Земля тех далеких времен, бесспорно, представляла собой огромную термодинамическую ***лабораторию состояний, удаленных от равновесия.

***Энергетическое питание, значительные градиенты и физические процессы ***приносили *нелинейный химический шум*, то есть множество случайным образом возникающих и распадающихся химических соединений. ***Простые молекулы появлялись в стационарных или равновесных концентрациях, более сложные — только стохастически ***распределенно, поскольку число теоретически возможных молекул многократно превышает любые имеющиеся на Земле запасы атомов. ***Случайное присутствие в одном месте и в одно время особых катализаторов вызвало цепные реакции, некоторое время производившие определенные молекулы в гораздо более высоких концентрациях, нежели те, что постоянно могли ***иметься=существовать в океане или следовать из ***распределения Больцмана энергии.

Есть веские основания для предположения о том, что эти ***редкие концентрации могли ***запустить процессы дальнейшего развития только внутри небольших, ограниченных пространств; например, скорость производства особых ценных веществ должна была превышать ***скорость разложения=распада и потерю на диффузию. ***Для таких пространств было предоставлено множество естественных возможностей: ***песочные поры, ***поверхности=поверхностные слои, коацерваты, микросферы, ***зародышевые равновесные и неравновесные состояния и т. д.

Становление *индивидуумов* в этом смысле сопряжено с образованием и совершенствованием *пограничной поверхности*, отделяющей индивидуум от окружающей его среды; начало было положено скачкообразными изменениями концентрации ***изнутри наружу, границами раздела фаз или примитивными липидными мембранами. Такая пограничная поверхность предохраняет индивидуум от внешних негативных воздействий и защищает его внутреннюю химическую и физическую среду, но в то же время должна сохранять ***термодинамическую открытость системы. Понятие индивидуума и его сопряжения с окружающим миром по-прежнему является фундаментальным принципом существования биологических систем, и два противоположных требования — к открытости и ***ограниченности=отделенности — приводят к сложным компромиссам (таким, например, как рецептные пищеварительные, дыхательные и половые органы, или появление кожи, органов чувств, мышц и костей, предназначенных для активного движения и т. д.). Конкретная форма пограничной поверхности в каждом случае отражает конкретную форму окружающей среды и потому зачастую оказывается достаточно специфичной; однако принципиально ее функция имеет абсолютно универсальную природу и значение со времен первых биохимических ***капель и до наших дней. Обмен энергией и материей всегда был, с позиций термодинамики, неизбежным, и распознавание

сигналов возникло сначала как случайный побочный продукт такого обмена и развилось затем в особые, оцениваемые селективным путем формы. На базе двух этих способностей — к обмену энергией и материей и распознаванию сигналов, — ***основана возможность постепенного перехода к коммуникационной и информационной системам. Именно этот последний переход и обозначается как ***переход ритуализации.

Термин *ритуализация* был введен Хаксли в ???***этнологию и подразумевает возникновение из различных практических действий определенных ***«сигнальных действий» [?]. Мы предлагаем расширить область употребления этого термина за пределы ***биологии поведения, распространив понятие «ритуализация» на все процессы самоорганизации, ведущие к возникновению языка символов (*****) вместе с его приемниками и передатчиками). Описываемый переход по сути своей схож с кинетическими переходами второго рода и демонстрирует такие типичные особенности, как нарушение симметрии, отсутствие ***фазового разделения, ***нейтральная устойчивость и макроскопические флуктуации. Процесс или структура, постепенно редуцированные до рудиментарной формы — символа, — получают свободу, которую может дать инвариантность кодирования, и при этом по-прежнему принимаются и понимаются соответствующим аппаратом именно так, как если бы они все еще оставались исходными процессом или структурой, а не были бы замесившими эти процесс или структуру символами.

Описанный переход ритуализации представляется нам ключевым механизмом, обеспечившим возникновение систем обработки информации; и это обстоятельство будет нами неоднократно отмечено и подчеркнuto в дальнейшем, при рассмотрении различных стадий естественной эволюции.

***Впервые переход состоялся при создании генетического кода. ***Из химического шума выделились каталитические неравновесные структуры, становившиеся все более прочными и частыми, если в их конфигурациях случайно обнаруживались самоусиливающиеся корни=основы; это стало началом примитивной химической дарвиновской эволюции. Скорость ***общего=совокупного первичного воспроизводства взяла на себя роль ***селективной ценности=критерия отбора; уже были предложены и рассмотрены различные ***физические условия, молекулярные типы и механизмы реакций.

Высочайшая каталитическая активность требовала и более сложных катализаторов, и процесс их создания и совершенствования можно описать как путь от случайных связей случайно оказавшихся рядом ***фрагментов до организованной ***модульной технологии. Комбинирование и соединение в цепи всего нескольких стандартных элементов позволяло достигать

гораздо более высокой степени гибкости и сложности; теперь требовался некий проект, своеобразная матрица. Такая матрица (а ею может быть, к примеру, цепь нуклеиновой кислоты) осуществляет ***переход ритуализации — к первому природному генетическому языку, где полное индивидуальное описание всех элементов заменено знаками, предписывающими последовательность элементов при «монтаже», — кодонами. Эти первые химические автоматы, способные преобразовать генетическую информацию в фенотипические свойства, называются ***протоклетками. Именно ***переход ритуализации представляется нам началом жизни как таковой, переходом от химии к биологии, отмеченным образованием самых первых систем обработки информации.

***Из-за нейтральной устойчивости (произвола) распределения элементов в коде синтаксис дрейфовал и быстро разветвлялся до тех пор, пока наконец не ***достиг стадии достаточной сложности. Следы этих процессов до сих пор отчетливо различимы в сложности и избыточности генетического кода.

Сексуальность, возможно, возникла в результате «канныализма» времен дифференциации видов как первая форма внутривидовых коммуникаций, как обмен ***генетически сформулированным опытом в борьбе за выживание. Этот метод передачи информации показал себя затем настолько важным и мощным, что сохранялся на всем протяжении биологической эволюции [?]. Первоначальная бинарная симметрия ***двустороннего обмена информацией между индивидуумами позднее стала неустойчивой и разбилась на два фенотипически отличных друг от друга пола. Кинетический переход второго рода в «женское» и «мужское» ввел в борьбу за выживание новое качество селективной оценки — так называемую «красоту», половую ***избирательность=половой отбор.

Морфогенез был результатом нарушений симметрии в скоплениях или колониях клеток ***в значении=формулировке Эрнста Геккеля. Уже на ранних стадиях=этапах жизни клетки нуждались в «органе вкуса» — химических рецепторах для ***поиска и обнаружения пищи, выявления врагов или других опасностей, а также для управления важными активными видами деятельности (скажем, сменой режима обмена веществ). Последнее может пониматься еще и как дифференцированная интерпретация генетической информации в зависимости от преобладающих внешних условий. В результате обмена веществ клеток колонии возникли пространственные распределения продуктов питания и отходов ***жизнедеятельности, колония передавала сведения о «вкусе» отдельных клеток

ссылки [?, ?] (рис. 36)