

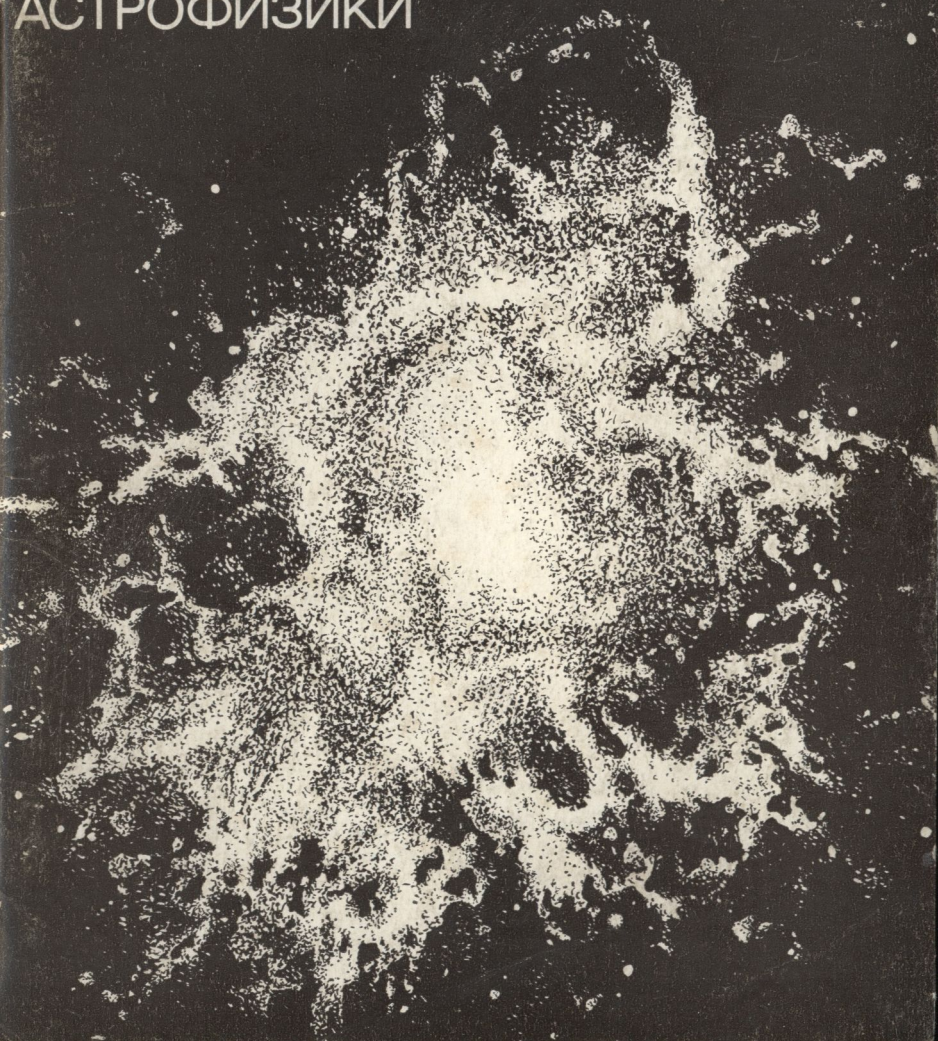
НОВОЕ
В ЖИЗНИ, НАУКЕ,
ТЕХНИКЕ

ЗНАНИЕ

7/1974

СЕРИЯ
КОСМОНАВТИКА, АСТРОНОМИЯ

СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ АСТРОФИЗИКИ



СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ АСТРОФИЗИКИ

(Сборник)

ИЗДАТЕЛЬСТВО «ЗНАНИЕ»
Москва 1974

С 56 Современные проблемы астрофизики
(Сборник). М., «Знание», 1974.

64 с. (Новое в жизни, науке, технике. Серия «Космонавтика, астрономия», 7. Издается ежемесячно с 1971 г.).

Предлагаемый читателю сборник посвящен актуальным проблемам современной астрофизики. Авторы статей — известные ученые, представившие на суд читателя результаты исследований, выполненных за последние годы.

Рассчитан сборник на широкий круг читателей.

20605

524

Составитель Левант Леонид Ефимович

СОДЕРЖАНИЕ

<i>Джеймс Ганн. Форма пространства</i>	3
<i>Барри Тернер. Межзвездные молекулы</i>	19
<i>Брус Моррей. Марс с «Маринера-9»</i>	39
<i>Карл Саган. Есть ли жизнь на Земле?</i>	59

СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ АСТРОФИЗИКИ
(Сборник)

Составитель Л. Е. Левант. Переводчик Н. В. Дейнеко.
Редактор Р. Г. Базурин. Обложка Н. И. Василевской.
Худож. редактор В. Н. Конюхов. Техн. редактор
И. Г. Федотова. Корректор В. И. Гуляева.

Индекс заказа 44207. Сдано в набор 12/IV 1974 г. Подписано к печати 6/VI 1974 г. Формат бумаги 84×108¹/₃₂. Бумага типографская № 1. Бум. л. 1,0. Печ. л. 2,0. Усл.-печ. л. 3,36. Уч.-изд. л. 3,29. Тираж 30 530 экз. Издательство «Знание». 101835, Москва, Центр, проезд Серова, д. 3/4. Заказ 683. Типография Всесоюзного общества «Знание». Москва, Центр, Новая пл., д. 3/4. Цена 10 коп.

© Издательство «Знание», 1974 г.

СУЩЕСТВУЕТ ТОЛЬКО ОДНА ВСЕ-
ЛЕННАЯ. В КОТОРОЙ, НАСКОЛЬКО
МЫ МОЖЕМ СУДИТЬ ОБ ЭТОМ, ПРО-
ИСХОДЯТ ДОВОЛЬНО ПРОСТЫЕ ЯВ-
ЛЕНИЯ. НО ПОНИМАЕМ ЛИ МЫ ЭТИ
ЯВЛЕНИЯ?

Джеймс ГАНН

Форма пространства

Одна из самых очаровательных проблем, к которой мы можем обратиться, — это вечно молодая проблема начала и конца. Космология в основном и посвящена решению этой первой и последней проблемы. Но, как это выясняется, трудно сделать какое-либо открытие о Вселенной в целом из-за ее необъятных просторов и неуловимости населяющих ее объектов, лишенных порой ясных очертаний.

Оценивая открытия и выводы космологов, мы должны обратить внимание на несколько важных предостережений. Прежде всего, было бы огромным сомнением думать, что мы можем пойти в лабораторию, измерить несколько миллиметров, литров или даже несколько километров чего-то, а затем на их основе вывести законы, описывающие эволюцию и свойства Вселенной в целом. Во-вторых, что в сочетании с нашим сомнением является наиболее распространенной и характерной чертой, не являясь исключением и для ученых: наши большие способности и стремления к разумным объяснениям, логическим обоснованиям — одним словом, к рационализации. Мы наблюдаем что-то во Вселенной, выдвигаем теорию, признанную объяснить это наблюдаемое «что-то», и мы счастливы. Но в самом ли деле мы объяснили что-то? В случае космологических теорий очень трудно дать ответ на этот вопрос. В других областях науки это не так трудно, поскольку кто-то другой может пойти по следам первооткрывателя, подтвердить или оспорить его выводы; эксперимент может быть повторен, могут быть исследованы другие случаи.

Но Вселенная существует только одна; в ней происходят, насколько мы можем судить, довольно простые

вещи. Однако совершенно невозможно сказать, в самом ли деле мы понимаем, что происходит в ее бескрайних далеких просторах. А повторить «эксперимент» мы не в состоянии. Более того, мы даже не в состоянии каким-либо серьезным образом нарушить его ход, чтобы убедиться, каковы будут последствия. Пожалуй, не все уж так безнадежно, но в любом случае это обстоятельство довольно-таки затрудняет исследование.

Несмотря на эти трудности, Вселенная, или, вернее, та ее часть, которую мы можем видеть, предоставляет в наше распоряжение некоторые факты, над которыми трудится пытливый ум ученого-исследователя:

ночью небо темное;

Вселенная является расширяющейся;

вокруг нас Вселенная кажется изотропной.

Во-первых, темнота ночного неба является очень примечательным фактором, так как мы увидим — совершенно не очевидно, что это должно быть именно так. Во-вторых, когда мы говорим, что Вселенная расширяется, мы не имеем в виду, что Солнечная система, звезды в нашей Галактике, каждое созвездие и каждая галактика расширяются. Скорее галактики — так называемые островные вселенные, образующие «частицы» единой Вселенной, удаляются от нас и друг от друга; причем скорость удаления удаленных галактик очень велика. Именно в этом смысле мы называем Вселенную расширяющейся, а проявляется это в виде известного красного смещения в спектрах удаленных предметов. Если мы представим красное смещение в виде обычного доплеровского сдвига так, что будет иметь место уменьшение частоты или увеличение длины волны света (по направлению к красному), идущего от удаляющегося от нас предмета, мы можем сказать, что причина такого сдвига заключается в том, что наиболее удаленные из этих галактик удаляются от нас со скоростью, составляющей значительную долю скорости света.

Третий факт — изотропность Вселенной вокруг нас является во многих отношениях самым замечательным и удивительным фактом из всех упомянутых. Мы сталкиваемся здесь с тем, что Вселенная выглядит во многом одинаково в любом избранном нами направлении. Например, если мы выберем любые два одинаковых по размеру участка — один на северном, а другой на юж-

ном небосводе, то найдем в каждом из них примерно равное число галактик.

Другое явление иллюстрирует эту изотропию еще нагляднее: фоновое температурное излучение абсолютно черного тела Вселенной. Оказывается, в космосе существует поле инфракрасного излучения с температурой около 2,7 градуса абсолютной шкалы, приходящее к нам со всех направлений. Температура эта постоянна до десятых долей процента независимо от направления, в котором мы смотрим в космос. Существует общее убеждение, что излучение это является своего рода «эхом», дошедшим до нас с очень отдаленной эпохи Вселенной, так называемого «большого взрыва». Таким образом, Вселенная высокоизотропна не только сейчас, она является таковой на протяжении очень долгого времени.

Давайте посмотрим на выводы, вытекающие из этих трех фактов.

В конце XIX века немецкий астроном Вильгельм Ольберс поднял очень важный теоретический вопрос, который пролил свет на парадоксальное противоречие между явным «фактом» темноты ночного неба и предположениями космологов-современников, согласно которым это должно быть не так. Известный сейчас под названием парадокс Ольберса, вопрос этот касается общего количества радиации, которое мы ожидаем получить на Земле от всех звезд, находящихся во Вселенной. Радиация, получаемая нами от одной звезды, зависит от двух факторов: энергии, излучаемой ею в форме света, и расстоянием от Земли, поскольку поток света (скорость потока энергии через поверхность), получаемый нами на Земле, как раз пропорционален кажущейся площади звезды. Если бы Солнце вдруг оказалось от нас в два раза дальше, кажущийся размер его уменьшился бы вдвое, а яркость — вчетверо. Это означает, что четыре солнца, находящиеся от нас вдвое дальше, давали бы точь-в-точь такое же количество света, какое дает наше Солнце сейчас. Таким образом, свет, излучаемый звездами, зависит лишь от площади, покрытой звездами, а не от удаления каждой из них. Из приводимой схемы (рис. 1) видно, что если бескрайняя Вселенная заполнена звездами равномерно (как это думали во времена Ольберса), то площадь, за-

нимаемая звездами, заключенными в оболочку толщиной, скажем, в один световой год, не зависит от расстояния до этой оболочки. Но, поскольку таких оболочек бесчисленное множество и простираются они в бесконечность, яркость должна бы быть бесконечной. Но еще до того как была бы достигнута «бесконечность»,

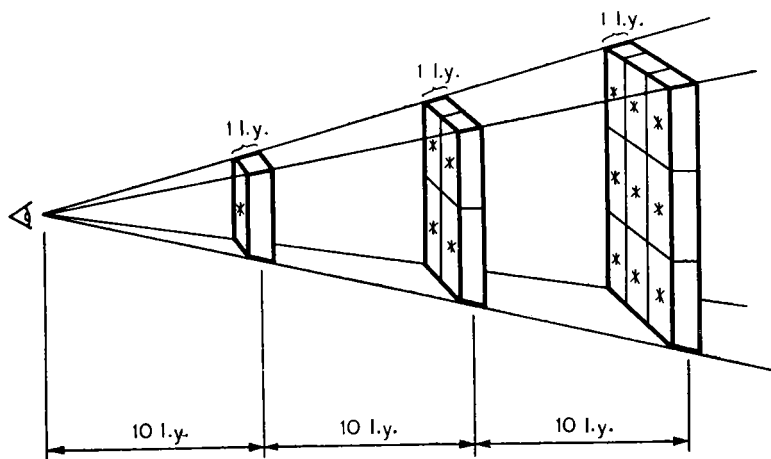


Рис. 1. Парадокс Ольберса иллюстрируется тремя плитами, находящимися на расстоянии 10, 20 и 30 световых лет от наблюдателя. Все ящики одинакового размера и содержат по одной звезде каждый. Расстояние до самой дальней плиты в три раза превосходит расстояние до ближней, но содержит она девять звезд. Радиация от каждой звезды, содержащейся в дальней плите, составляет одну девятуя от радиации ближней звезды.

небосвод был бы усыпан звездами, и ночное небо было бы таким же ярким, как поверхность Солнца!

Когда Ольберс описал этот парадокс, речь шла только о звездах нашей Галактики. И хотя звезды, составляющие нашу Галактику, не простираются в бесконечные просторы, мы не свободны от этого парадокса. И в самом деле, если принять во внимание звезды других галактик, мы вновь сталкиваемся с той же самой трудностью — простираются ли галактики бесконечно, несмотря на огромные расстояния, разделяющие их друг от друга.

Но, к счастью, все мы свидетели того, что ночью темно, а не светло. «Большой взрыв», расширение Вселенной — вот что «спасает» нас от парадокса Ольберса. Ольберс полагал, что Вселенная статична, что звезды и галактики пребывают в состоянии покоя. Но если предположить, что Вселенная расширяется, то мы уви-

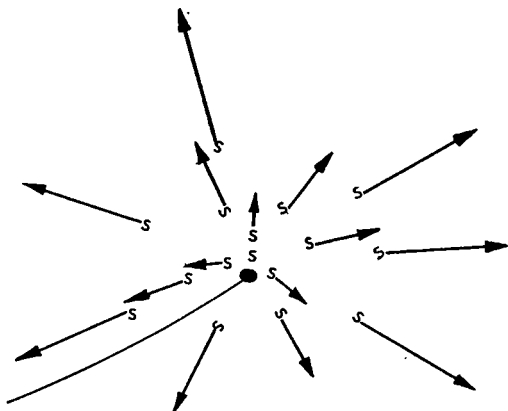


Рис. 2. Наблюдателю, находящемуся на Земле, кажется, что все галактики во Вселенной расширяются с постоянной скоростью, удаляясь от него. Если мы допустим, что ускорения нет, мы должны также допустить, что все галактики покинули одну и ту же окрестность в одно и то же время: по нынешним оценкам, — примерно 19 миллиардов лет назад.

дим, что от более удаленных галактик света доходит до нас меньше, чем это было бы, если бы они находились в состоянии покоя на том же самом расстоянии от Земли. Чем выше скорость разбегания удаленной галактики, тем слабее получается от нее радиация. И поскольку наиболее удаленные галактики движутся с последовательно возрастающими скоростями, по мере удаления от Земли количество излучаемого ими света, получаемого нами на Земле, уменьшается. Свет от галактик, находящихся на краю обозримой Вселенной и движущихся со скоростью, близкой к скорости света, вообще бы почти не дошел до нас.

Далее, взглянув во Вселенную, мы тем самым заглядываем в прошлое. Поскольку скорость света конечна и мы не можем заглянуть в прошлое, глубже времени «большого взрыва», обозримое прошлое Вселенной является конечным, а не бесконечным. Согласно общей теории относительности Альберта Эйнштейна мы достигнем эпохи «большого взрыва» как раз на расстоянии, на котором предметы разбегаются со скоростью света. Таким образом, оба решения парадокса Ольберса единичны.

Объясняя многие вещи, само расширение Вселенной является источником чрезвычайно надоедливой беспоконечности: Вселенная не вообще расширяется, но, как это сейчас представляется, расширяется, удаляясь от нас. Зависимость между скоростью и расстоянием — линейная: если отдаленный предмет удаляется с данной скоростью, то предмет, находящийся вдвое дальше, движется вдвое быстрее. Скорость определяется путем умножения постоянной величины (называемой «постоянной Хаббла») на расстояние до объекта. Эта формула является по существу законом Хаббла и была впервые выведена из измерений, проведенных Эдвином П. Хабблом в обсерватории на горе Уилсон начиная с 1923 г.

Раз все на свете удаляется, уместно спросить: если данная галактика всегда двигалась с одинаковой скоростью, сколько времени назад она покинула окрестность нашей собственной Галактики? Легко видеть (см. рис. 2), что, поскольку находящийся вдвое дальше объект движется вдвое быстрее, время «отправления» для одного и для всех точь-в-точь одно и то же, из чего напрашивается вывод, что было время, когда все эти галактики были над нами и какое-то мощное событие явилось началом их полета. Мы измеряем возраст Вселенной от этого события. Оценка прошедшего с тех пор времени — возраста Хаббла неоднократно подвергалась кардинальному пересмотру за последние 20 лет по мере появления новых экспериментальных данных и наблюдений. В настоящее время возраст обозримой Вселенной, определенный указанным выше способом, оценивается примерно в 19 млрд. лет. Нам не известны явления старше этого возраста, многие другие — гораздо моложе. Так, исходя из геологических данных, возраст Земли, например, оценивается примерно в 5 млрд. лет.

Теперь относительно нашего местоположения во Вселенной. Находимся ли мы в ее центре? Как мы убедились, Вселенная в высшей степени изотропна вокруг нас; она также расширяется, расходясь от нас во все стороны. Все это пахнет философией антропоцентризма, распространенной в средние века, когда считалось, что Земля находится в центре множества кристаллических шаров, позади которых простирается небо. Выглядит это так, как будто мы находимся в своего рода сверхпривилегированном положении, из которого наблюдаем за Вселенной. Мы привыкли относиться к этой идее с определенной антипатией. Как же выйти из этого затруднительного положения?

Если вообще Вселенная построена по разумному принципу и если мы находимся не в привилегированном положении и живем не в привилегированное время, то она (Вселенная) должна подчиняться следующей догме, называемой космологами космологическим принципом: мы находимся не в привилегированном положении и независимо от местоположения во Вселенной, мы должны видеть, по существу, ту же самую картину. Следствием, вытекающим из этого принципа, является идея о космическом времени. Космологический принцип лишен смысла до тех пор, пока мы не сможем сказать, когда мы должны сравнивать определенные участки Вселенной, поскольку Вселенная расширяется и изменяется во времени. Принцип этот должен утверждать следующее: существует время, на которое каждый обитатель Вселенной должен установить свои часы, с тем чтобы каждый взглянувший на Вселенную в одно и то же космическое время мог увидеть по существу то же самое.

Сразу же ясно одно: Вселенная — если она подчиняется космологическому принципу — не может представлять из себя огромную расширяющуюся глыбу с Землей в центре, так как наблюдатель, находящийся на краю такой глыбы, никогда не увидел бы изотропной Вселенной. Согласуется ли наблюдаемая нами изотропия, которая невольно помещает нас в центральное положение, с космологическим принципом?

Как явствует из диаграммы (см. рис. 3), мы можем убрать себя (по крайней мере в принципе) из центра и тем не менее придерживаться этих двух идей. На ней

изображена двухмерная «вселенная», удовлетворяющая космологическому принципу, а именно — поверхность обычного надувного шара. Давайте наклеим маленькие бумажные галактики на его поверхность. По мере наполнения воздухом каждой галактике будет казаться, что ее соседи удаляются от нее. Каждой из них ка-

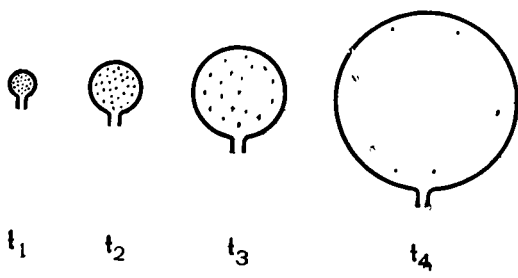


Рис. 3. Двухмерная Вселенная, удовлетворяющая космологическому принципу и одновременно позволяющая наблюдателю видеть Вселенную расширяющейся и уходящей от него, моделируется поверхностью обыкновенного надувного шара. За время, прошедшее с t_1 до t_4 , шар расширяется и точки на его поверхности удаляются друг от друга.

жется, что именно она находится в центре расширения, поскольку каждая точка на поверхности шара ничем не отличается от любой другой ее точки. По мере того как шар наполняется воздухом, оболочка его равномерно расширяется и галактики все больше и больше удаляются друг от друга. И все это согласуется как с изотропией, так и с наблюдаемым расширением.

Такую же аналогию можно пронаблюдать, взяв вместо шара очень большой плоский резиновый лист, равномерно натянутый со всех сторон. Если мы наклеим на него галактики, они также будут равномерно удаляться друг от друга. И если вы заранее не знали, где находится центр этого листа, совершенно невозможно установить его, пользуясь любым видом измерений, которые вы могли бы произвести, находясь на любой из приклеенных галактик.

Итак, мы разобрали две модели двухмерного расширяющегося пространства, которые, как нам кажется, удовлетворяют космологическому принципу. А как в отношении реального мира, трехмерного пространства? Какой он может быть формы? Мы знаем, что обычное пространство характеризуется тремя измерениями, а местонахождение точек — расстоянием в трех направлениях — скажем, на север, восток и вверх. Вероятно, по этим направлениям можно идти на любое желаемое расстояние, и можно двигаться по ним непрерывно. Пространство представляется евклидовым (плоским) при измерении доступных нам масштабов. Но это вовсе еще не означает, что пространство является евклидовым на самых огромных необъятных просторах Вселенной. Мы еще не в состоянии проникнуть достаточно далеко в глубь Вселенной с тем, чтобы иметь возможность произвести определенные измерения. Мы можем, однако, спросить: каковы эти возможности с математической точки зрения? Бесчисленное множество? Или природа все же добрее? Может быть, перед нами лишь ограниченный выбор таких возможностей? Любой наш выбор должен отвечать следующему требованию: пространство должно обладать одними и теми же свойствами повсеместно и во всех направлениях — оно должно быть однородным и изотропным.

Ограничения настолько строги, что существует лишь три возможности для пространства, обладающего такими свойствами. Мы уже имели дело с двумя такими возможностями в двух измерениях — плоскостью и сферой. В двух измерениях аналог его называется псевдосферой, являющейся седлообразной поверхностью. Плоское пространство является бесконечным и неограниченным. Линия, проведенная в любом направлении, простирается бесконечно; параллельные линии остаются параллельными на всем своем протяжении с одинаковым расстоянием между ними. Кривизна такого пространства равна нулю. Сферическое пространство конечно, но неограничено. Линия, проведенная в любом направлении, не будет простирается непрерывно, но она никогда и не закончится. В конце концов она замкнется, образуя круг. Параллельные линии в сферическом пространстве в конце концов сходятся, если их продлить достаточно далеко. Кривизна этого пространства

положительная, кривизна же седлообразного пространства отрицательная. Оно бесконечно и неограничено; параллельные линии в этом пространстве в конце концов расходятся. Линии простираются бесконечно, не встречаясь друг с другом. Такое пространство называется также «гиперболическим».

Эти три возможных формы пространства показаны (частично) на схеме (см. рис. 4). Оказывается, эти

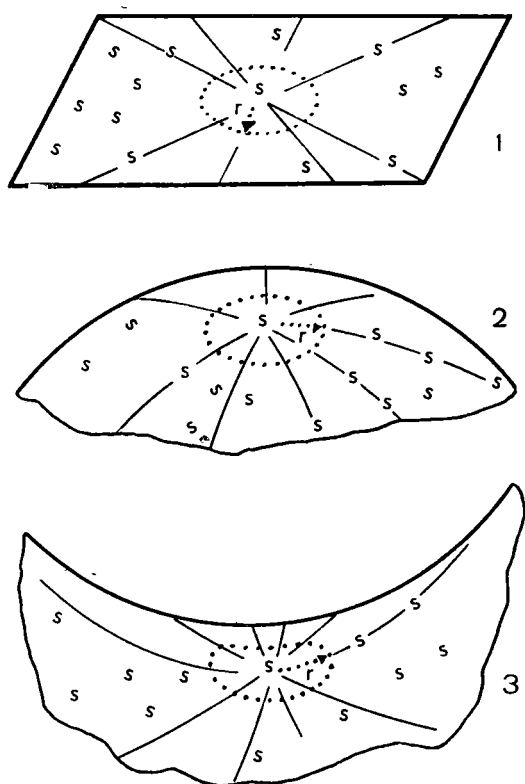


Рис. 4. Три возможные формы пространства — плоская, сферическая и гиперболическая (седлообразная) — иллюстрируются здесь на двухмерной поверхности. То же и в измерениях более высокого порядка:

1 — плоская; 2 — сферическая; 3 — гиперболическая.

три вида пространства существуют не только в двух и трех измерениях, но также и во всех измерениях более высокого порядка. Будь наше пространство девятимерным, и тогда бы имелись только эти три случая кривизны.

Если бы трехмерное пространство было плоским, оно бы подчинялось всем законам двумерной евклидовой плоской геометрии. Один из этих законов гласит: сумма углов треугольника равна 180° . Другой утверждает, что окружность круга равна $2\pi R$ (R — радиус круга). В сферическом пространстве сумма углов треугольника больше 180° , а окружность круга меньше, чем окружность круга в плоском пространстве. В гиперболическом пространстве сумма углов треугольника меньше 180° , а окружность круга больше окружности в плоском пространстве. Пространство должно иметь одну из этих трех форм, если оно подчиняется космологическому принципу. Какую именно? И как мы определяем ее?

В двух измерениях представляется возможным определить, является ли неизвестная поверхность плоской, сферической или седлообразной. Для этого необходимо установить, увеличивается ли площадь круга, вычерченного на ней, строго пропорционально квадрату его радиуса, или она увеличивается медленнее или быстрее. В трех измерениях вопрос заключается в том, насколько быстро объем шара увеличивается в зависимости от его радиуса. Пространство является плоским, сферическим или седлообразным в соответствии с тем — увеличивается ли объем строго пропорционально кубу его радиуса или происходит это более медленно или более быстро. В таком случае форму пространства, в котором мы живем, можно было бы в принципе определить следующим образом: вначале подсчитать число галактик, образующих Вселенную при расстояниях, растущих в глубь пространства, а затем посмотреть, как это число изменяется в зависимости от расстояния, поскольку космологический принцип требует, чтобы число галактик на единицу объема было равномерным.

Но мы не можем определить объем (а следовательно, и форму) пространства непосредственно, так как не в состоянии определить с достаточной точностью расстояния. Мы должны искать другое средство. Мы должны вновь рассмотреть расширение Вселенной, исследо-

вать силы, действующие на него, и определить, как они соотносятся с плотностью материи и «общей энергией» во Вселенной.

Давайте возьмем кусок Вселенной, сделаем пузырь и поговорим о поведении вещества внутри него. Если мы сделаем пузырь достаточно малым, то сможем довольно успешно объяснить его поведение, пользуясь обычными законами физики. Таково уж курьезное следствие, вытекающее из космологического принципа, что этот самый пузырь должен характеризовать Вселенную в целом, поскольку каждый кусок Вселенной подобен любому другому. Таким образом, если понять этот пузырь, то можно понять и всю Вселенную в целом, если мы знаем, как ведут себя эти пузыри вместе.

Рассмотрим такой пузырь. Что заставляет его расширяться? Можно показать вполне убедительно, что силы, могущие вызывать расширение, вероятно, слишком малы для этого. Очевидно, Вселенная расширяется, потому что однажды было положено начало этому процессу и с тех пор он продолжается по инерции. И нет таких сил, которые смогли бы заметно изменить этот процесс расширения, кроме одной очень важной силы — силы тяжести. Как же эта сила воздействует на Вселенную?

И снова мы сталкиваемся здесь с тремя возможностями; с тремя вещами, которые могут случиться во Вселенной под действием одной лишь силы тяжести; с тремя энергетическими состояниями.

Энергия может быть нулевой. Этот случай можно наглядно проиллюстрировать запуском ракеты с поверхности Земли. Ракета может быть запущена точь-в-точь со второй космической скоростью, так что она будет подниматься очень медленно и в конце концов окажется на любом желаемом удалении от Земли, достигая бесконечности с нулевой скоростью.

Энергия может быть положительной. При запуске мы можем сообщить ракете скорость, слегка превышающую вторую космическую. Это означает, что, пройдя однажды некоторый барьер, ракета практически вырывается из-под действия гравитационного поля Земли, после чего продолжает лететь в бесконечность с постоянной скоростью.

И наконец, энергия может быть отрицательной. Мы

можем запустить ракету со скоростью, не вполне достаточной для преодоления силы земного притяжения. В этом случае она достигнет некоторой максимальной высоты, остановится на какой-то миг, возвратится на Землю и врежется в нее со скоростью, равной скорости ее запуска.

Подобным же образом, если полная энергия Вселенной равна нулю, расширение будет продолжаться, замедляясь со временем. Если энергия положительна, Вселенная также будет продолжать расширяться, но в конце концов действие силы притяжения станет пренебрежимо малым и Вселенная будет разлагаться с постоянной скоростью. И наконец, если полная энергия отрицательна, гравитация в конце концов положит конец расширению и Вселенная начнет коллапсировать, на этот раз в направлении, обратном направлению «большого взрыва», в результате которого она возникла. Гравитация всегда замедляет расширение, вопрос заключается лишь в том, за кем останется «победа» в конечном счете.

Из общей теории относительности Эйнштейна вытекает тесная взаимосвязь между энергией и формой пространства. Оказывается, Вселенной с отрицательной энергией соответствует сферическое пространство. Такое пространство имеет конечный объем. Вселенная обладает лишь конечным количеством материи. Вы можете обойти вокруг всей Вселенной и в конце концов вернуться на прежнее место (правда, при этом вы должны были бы двигаться со скоростью, превышающей скорость света). В этом случае вы можете вспомнить, что Вселенную в конечном счете ожидает коллапс, так что все на свете конечно как в пространстве, так и во времени. При нулевой энергии мы имеем плоское пространство. Если энергия во Вселенной положительна, так что процесс расширения в конечном счете протекает без помех, пространство оказывается гиперболическим (седлообразным).

Если вы хотите поверить этим предсказаниям общей теории относительности, существует несколько возможностей узнать форму пространства.

Вот одна из них: обратимся к плотности материи во Вселенной. Измерить ее очень трудно, но мы получили бы ответ на наш вопрос, если бы смогли это сде-

лять. Чем больше плотность, тем больше гравитационная сила, замедляющая расширение. Зная плотность, закон всемирного тяготения и скорость расширения Вселенной, мы можем вычислить энергию, откуда получим кривизну пространства. Но как узнать плотность? Существует прямой путь: использовать приблизительно известные массы наблюдаемых нами галактик. Мы можем затем умозрительно взять «мазок» этой массы и найти среднюю плотность. Плотность эта эквивалентна примерно одному атому на каждые 10^3 м³. Такая плотность означает, что полная энергия Вселенной явно положительна. Следовательно, процесс расширения будет продолжаться вечно. Вселенная бесконечна и безгранична и имеет гиперболическую форму. Мы должны, однако, относиться к этому результату с большой осторожностью; в самом деле, ведь мы в состоянии измерить плотность только той материи, которую видим, а ведь мы должны исходить из предположения, что существует еще материя, которую мы по той или другой причине не видим.

Есть некоторые ученые, для которых с точки зрения философской очень важно, чтобы Вселенная была замкнутой, энергия отрицательной, чтобы Вселенная вела свое начало с сильного взрыва и заканчивала им. Согласно этой концепции Вселенная представляет собой аккуратный маленький пузырь, существующий в пространстве и времени. Для такой точки зрения существовали и существуют псевдонаучные причины, однако я не думаю, что они непреодолимы. Для получения замкнутой Вселенной такого рода необходима плотность порядка трех атомов на каждый кубический метр пространства, иначе говоря, в 30 раз больше того, что содержат галактики. Некоторые искали очень усердно, стараясь найти такой материал, но, увы, поиски их не увенчались успехом. С другой стороны, очень трудно доказать, что его нет, хотя в этом направлении намечается некоторый успех. Сейчас становится ясно, что, по всей вероятности, для изменения направления расширения на обратное требуется больше материи, чем ее есть в наличии, однако вывод этот сугубо предварительный.

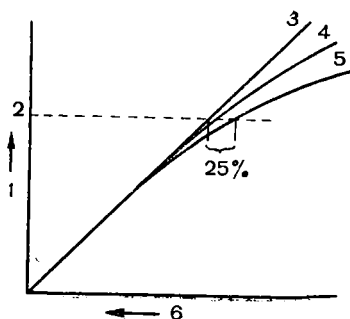
Существует также косвенный метод решения этой проблемы — метод, который, вероятно, в конечном счете

представит в наше распоряжение самые надежные данные, а именно приглядеться к зависимости между скоростью разбегания и расстоянием. Мы уже упоминали, что зависимость эта линейная, но, как выяснилось, это справедливо только для предметов, находящихся в непосредственной близости от нас. И по очень простой причине: вглядываясь вдаль, мы тем самым заглядываем в прошлое. Гравитация замедляет Вселенную; таким образом, выглянув в пространство, мы заглядываем в ушедшие эры, когда скорость разбегания была выше по сравнению с нынешней. Таким образом, мы можем измерить скорость замедления и, следовательно, определить тяготение и энергию. Этот метод нельзя использовать непосредственно, поскольку мы не в состоянии достаточно хорошо измерить расстояние. Мы можем измерить яркость отдаленных предметов и, конечно же, их красные смещения и таким образом определить их скорости. Зная яркость источника — его общую светотдачу, «мощность (в ваттах) его лампочки», мы можем определить его расстояние. Если мы располагаем набором «обычных лампочек» абсолютно одинаковой мощности, но установленных на разных расстояниях, мы можем надеяться увидеть зависимость, представленную посредством диаграммы, показанной на рис. 5. Для достаточно отдаленных объектов разница в кажущейся яркости для различных видов пространства довольно ощутима.

Что дает в наше распоряжение природа, чем можно

Рис. 5. Диаграмма, показывающая, как изменяется радиация, получаемая от «обыкновенной лампочки», по мере изменения красного смещения для трех типов кривизны пространства. При современном пределе красного смещения для сверхгигантских галактик (0,46 от скорости света) разница составляет лишь 25%. Она слишком мала для надежного определения из-за статистических и других ошибок:

1 — красное смещение; 2 — современный предел красного смещения (0,46); 3 — сферическая; 4 — плоская; 5 — гиперболическая; 6 — яркость.



было бы воспользоваться в качестве обычных лампочек для упомянутых исследований? Одно время была надежда на квазары, поскольку они отличаются большой яркостью и видны с огромных расстояний. Но вот беда — «мощности» их неодинаковы, да еще вдобавок, как видно, нет способа отличить естественно тусклого от яркого. После квазаров лучше всего для наших целей подходят сверхгигантские галактики, которые, по неразгаданным причинам, кажутся нам удивительно похожими друг на друга. К тому же их легко найти на небосводе, поскольку они всегда светятся ярче других в скоплении галактик.

Эти ярчайшие галактики, к сожалению, выглядят тусклыми по сравнению с квазарами, а поэтому очень трудно наблюдать их с больших расстояний. Наиболее отдаленная из уже изученных галактик разбегается со скоростью, составляющей около трети скорости света, и находится на недостаточном удалении от нас, чтобы можно было достоверно утвердить, какая кривая (из трех) характеризует форму пространства.

Развитие светообнаруживающих устройств происходит настолько быстро, что в ближайшие несколько лет мы получим возможность изучать объекты, находящиеся вдвое дальше любого из уже изученных нами.

У нас все еще есть надежда узнать форму пространства.

Барри ТЕРНЕР

Межзвездные молекулы

Между звездами нашей Галактики находятся огромные облака, состоящие из газа и пыли. Эти межзвездные облака были открыты около двухсот лет назад В. Гершелем, который назвал их «дырами в небе», так как они поглощают свет находящихся за ними звезд. Это свойство долго приписывали космической пыли — мельчайшим частицам неизвестного состава, которые поляризуют свет многих звезд и придают ему красноватый оттенок. За последние 35 лет постепенно выяснилось, что межзвездная среда содержит также самые различные свободные молекулы, нередко довольно сложного состава. Молекулы концентрируются в местах наибольшей плотности пыли. Их можно обнаружить в областях вероятного образования звезд, а также во внешней атмосфере холодных звезд. Изучение межзвездных молекул проливает свет на физическое состояние таких областей, что до последнего времени было почти недоступно астрономам.

Количественное изучение межзвездной среды стало возможным благодаря применению спектрографа, который позволяет подробно анализировать свет, излучаемый звездами. В 1904 г. немецкий ученый И. Ф. Хартман высказал предположение, что линия поглощения ионизованного кальция, которая видна в спектрах некоторых ярких звезд, имеет межзвездное происхождение. Иными словами, между землей и звездами находятся ионы кальция (ионы — атомы, утратившие один или несколько электронов), которые поглощают свет звезд

определенной длины волны. Позднее в составе межзвездной среды был найден нейтральный (неионизованный) натрий. К 1937 г. стало ясно, что водород — наиболее часто встречающийся в космосе элемент и, следовательно, именно он должен преобладать в межзвездной среде. Предполагали, что водород находится в форме одиночных атомов, а не двухатомной молекулы (H_2). Сейчас мы знаем, что по сравнению с водородом содержание кальция и натрия в космосе весьма незначительно.

В видимой области спектра атомы водорода (H) можно наблюдать только в ионизованном состоянии по излучению так называемых рекомбинационных линий Бальмера. Эти спектральные линии возникают при захвате свободного электрона водородным ядром, в результате которого атом переходит на более низкий энергетический уровень. Ионизованный водород можно обнаружить около очень горячих звезд в виде красноватых туманностей, которые носят название «зон H II». Ионизованный водород в этих туманностях связан с незначительными количествами ионизованных атомов гелия, кислорода, азота, углерода и других элементов. Ионы являются показателями температуры и плотности газовых облаков, непосредственно окружающих самые горячие звезды, — облаков, из которых, по-видимому, и родились эти звезды. Уже давно известно, что высокие температуры ($10\,000^\circ\text{K}$) и относительно высокие плотности (100 атомов на 1 см^3), характерные для зоны H II, резко отличаются от условий, царящих в темных холодных областях космоса, удаленных от горячих звезд.

Первая межзвездная молекула была открыта в 1937 г. Это был свободный химический радикал углерода и водорода (CH). Ионизованный радикал (CH^+) и циановый радикал (CN^-) были обнаружены в последующие четыре года в спектрах нескольких ярких голубых звезд спектрального класса O и B, нередко именно тех звезд, около которых наблюдались облака кальция и натрия. Однако эти компоненты непригодны для изучения межзвездной среды. Во-первых, их можно наблюдать лишь на фоне очень ярких звезд. Во-вторых, содержащие их облака должны быть достаточно плотными, чтобы обеспечить доступную для наблюдения ли-

нию поглощения, но не настолько плотными, чтобы слишком сильно поглощать свет находящейся сзади звезды. Следовательно, необходимы совершенно особые условия. В-третьих, волны видимого света распространяются в межзвездной среде на расстоянии не более 2000—3000 световых лет, так как эти волны сильно поглощаются космической пылью. В-четвертых, такие компоненты, как кальций, натрий, CH , CH^+ и CN^- , ничего не говорят об общем количестве межзвездного газа. К тому же нельзя доказать, что эти компоненты физически никак не связаны с теми немногими горячими звездами, в направлении которых они видны.

И если бы не быстрое развитие радиоастрономии за последние 20 лет, решение этого вопроса зашло бы в тупик. Однако в 1951 г. радиоастрономы обнаружили в межзвездном пространстве нейтральные атомы водорода, которые излучают спектральную линию с длиной волны 21 см. А ведь радиоволны почти не поглощаются космической пылью и, следовательно, с их помощью можно изучать всю Галактику на расстоянии до 60 000 световых лет. Поэтому исследования на волне 21 см нашли широкое применение, начиная с 1951 г., для изучения межзвездной среды Галактики. Межзвездный газ составляет 5—7% всей массы Галактики. Было установлено также, что Галактика имеет форму сильно сжатого эллипсоида вращения. Прежде об этом можно было лишь строить смутные догадки, исходя из расположения звезд.

Какие выводы о физических и химических свойствах межзвездного газа можно сделать при помощи исследований на волне 21 см? Уже первые данные позволили определить, что в среднем газ имеет температуру 100°K и плотность от 1 до 10 атомов на 1 см^3 вдоль ветвей спирали Галактики и 0,1 атома на 1 см^3 между ее ветвями. Более точные наблюдения, а также теоретические соображения привели к созданию «двухкомпонентной» модели межзвездной среды. Первый компонент состоит из холодных облаков газа с плотностью от 10 до 100 атомов на 1 см^3 и температурой 100°K или менее. Эти облака находятся в состоянии равновесия со вторым компонентом — горячим газом с плотностью около 0,1 атома на 1 см^3 и температурой до $10\,000^\circ\text{K}$. Газ внутри ветвей спирали состоит из обоих компонен-

тов, в то время как газ между ветвями спирали содержится в основном горячий компонент.

Такой была в общих чертах картина межзвездной среды в 1968 г. Именно этот год увидел рождение молекулярной астрономии в том виде, в каком мы ее знаем сейчас. В 1963 г. радиоастрономы обнаружили гидроксильный радикал (ОН)¹. К 1968 г. этот радикал нашли в нескольких десятках областей Галактики, как правило, недалеко от зон Н II и молодых звезд, которые раньше можно было обнаружить в инфракрасном свете. Поскольку зоны Н II излучают при температуре, превышающей температуру межзвездной среды и содержащегося в ней газа из ОН радикалов, можно было ожидать, что этот газ будет частично поглощать излучение зон Н II и его спектральные линии поглощения будут присутствовать в радиоспектре зон Н II.

Изучение гидроксила

Однако во многих случаях ОН дает не линию поглощения, а, напротив, интенсивную узкую линию испускания в радиоспектре зон Н II. Если бы молекулы ОН поглощали излучение, то это бы означало, что большинство из них находится на низком энергетическом уровне. Противоположное поведение этих молекул показывает, что их энергетические уровни совершенно иные, чем если бы газ ОН находился в равновесии с холодным окружением. Очевидно, происходит «накачка» газа ОН при помощи какого-то механизма в возбужденное состояние, что приводит к усилению излучения в радиолиниях гидроксила. Так работает космический гидроксильный мазер.

Мазер является предшественником лазера, только он усиливает радиоволны, а не видимый свет. Молекулы ОН в космическом мазере в результате возбуждения находятся на более высоком энергетическом уровне. Переходя на более низкий уровень, молекула испускает квант энергии на волне определенной линии радиоспектра, побуждая к этому же и другие молекулы. Некоторый «сторонний» источник энергии внутри звездного об-

¹ По его радиолинии с длиной волны 18 см. Существование этой линии было теоретически предсказано советским радиоастрономом И. С. Шкловским в 1949 г. (*Прим. перев.*)

лака («накачка»)¹ активизирует молекулы, возвращая их в возбужденное состояние, и таким образом процесс продолжается.

Вместо того чтобы пролить свет на физическое состояние межзвездной среды, странное поведение молекул ОН породило множество новых вопросов, относящихся к возбужденному состоянию межзвездных молекул. В областях сильного излучения молекул ОН плотность среды по космическим масштабам очень велика — на 1 см³ приходится 10⁸ частиц. Похоже, что эти области можно найти только в атмосфере холодных молодых звезд или протозвезд, которые представляют собой раннюю стадию звездообразования.

Более сложные молекулы

Межзвездные молекулы, состоящие более чем из двух атомов, впервые были открыты в 1968 г. Они в корне изменили наше представление о космической химии и в какой-то степени о физических условиях в космосе. В 1968 г. большинство астрономов считало, что плотность межзвездного пространства столь мала, что соединение более чем двух атомов практически исключено. Они ожидали встретить в космосе только двухатомные молекулы, и даже эти молекулы, по их мнению, были обречены на короткое существование из-за разрушительного действия ультрафиолетовых и космических лучей. Эти взгляды пришлось изменить коренным образом после того, как группа ученых из Калифорнийского университета в Беркли обнаружила аммиак (NH₃) в нескольких межзвездных облаках в центре Галактики. Вскоре после этого в ряде областей Галактики этими учеными было зарегистрировано излучение водяных паров.

И хотя впоследствии были открыты более сложные молекулы, первое место в межзвездных молекулярных облаках продолжают занимать аммиак и вода. Во-первых, эти облака довольно плотные по сравнению с остальными областями космоса. Во-вторых, физические

¹ Вопрос о природе механизма «накачки» космических мазеров еще не решен. По-видимому, это мощное инфракрасное излучение, хотя некоторые химические реакции могут быть другим механизмом «накачки». (Прим. перев.)

условия, приводящие к излучению или поглощению возбужденных молекул, резко отличаются от земных условий. В одних случаях эти условия приводят к возникновению космического мазера. В других случаях они создают своего рода космический холодильник. На некоторых волнах такая молекула, как формальдегид (H_2CO), поглощает больше энергии, чем, казалось бы, позволяет окружающая среда, если судить об этой среде исходя из земных законов термодинамики.

Где находятся молекулы

С 1968 г. темпы обнаружения новых межзвездных молекул резко возросли. Сейчас известно уже 26 таких молекул. Где же их находят? Как они образуются и распадаются? Как астроном может использовать их сигналы для расшифровки тех физических и химических процессов, которые происходят в космическом пространстве?

Последние два года Галактику интенсивно обследовали при помощи волн, характерных для гидроксильного радикала, формальдегида и окиси углерода (CO). Оказалось, что эти молекулы, так же как и атомы водорода, сконцентрированы в направлении экваториальной плоскости Галактики в виде слоя, который вблизи Солнца имеет толщину менее 1000 световых лет. Внутри этого диска молекулы распределены беспорядочно, а по направлению к центру Галактики их концентрация увеличивается. Большинство остальных межзвездных молекул, однако, было найдено лишь в очень немногих областях. Мы не знаем, то ли они действительно отсутствуют в остальных районах Галактики, то ли их состояние возбуждения недостаточно для поглощения или испускания обнаруживаемых сигналов.

Чем выше плотность космического пространства, тем выше вероятность того, что атомы соединятся в молекулу либо в результате простого столкновения, либо на поверхности частиц космической пыли. Излучение многих межзвездных молекул можно уловить только тогда, когда они находятся на достаточно высоком энергетическом уровне. Этот уровень может быть достигнут при постоянном столкновении с другими атомами и молекулами газа, и чем плотнее газ, тем чаще будут столк-

новения. В каких же областях космоса мы можем встретить достаточно высокую плотность?

Темные облака и протозвезды

В радиусе тысячи световых лет от Солнца находится около десятка темных облаков. Их масса почти в 20 раз превышает массу Солнца. Только некоторые межзвездные молекулы (гидроксильный радикал, аммиак, формальдегид и окись углерода) были обнаружены в этих облаках. Плотность газа, как правило, колеблется между несколькими сотнями и тысячами частиц на 1 см^3 , а температура — от 4 до 25°K . Эти облака есть, по-видимому, не что иное, как ранняя стадия развития протозвезд, следующая непосредственно за их конденсацией из межзвездной среды.

Каждая стадия развития звезды из межзвездной среды связана с определенными молекулами. Как мы уже говорили, гидроксильный радикал, формальдегид и окись углерода были обнаружены фактически во всех областях ветвей спирали Галактики и, возможно, между ними. Более крупные облака пыли содержат также аммиак. И только в районах, где должен идти процесс образования звезд, мы обнаруживаем остальные молекулы. Здесь они могут быть связаны с самими протозвездами. Эти молекулы могут также существовать в плотных, неионизованных облаках, которые окружают зоны H II, созданные вновь образовавшимися звездами.

Молекулы существуют в заметных количествах только в областях, удовлетворяющих двум условиям: 1) скорость образования молекул превышает скорость их распада и 2) молекулы могут быть возбуждены здесь до более высокого энергетического уровня. Области с высокой плотностью удовлетворяют обоим этим условиям. Гидроксильный радикал (когда его можно наблюдать как линию поглощения) и окись углерода находятся на низком энергетическом уровне, и кроме того, сравнительно устойчивы к разрушению под действием света. Поэтому их наблюдают по всей Галактике. Напротив, молекулы цианистого водорода (HCN), формальдегида, метилового спирта (CH_3OH), односернистого углерода (CS), аммиака и цианацетилена (HC_3N) можно наблю-

дать лишь в нескольких, по-видимому, очень плотных областях около некоторых зон Н II.

Космические мазеры

Одним из первых доказательств того, что межзвездные молекулы связаны с протозвездами, явилось мазерное излучение гидроксильного радикала и водяных паров. В отличие от гидроксильного радикала, водяной пар имеет интенсивные линии испускания¹ в области радиоволн; кроме того, его можно наблюдать только в областях, меньших по размеру, чем Солнечная система, и даже, возможно, чем орбита Земли. Линии H_2O настолько сильны, что если бы они излучались обычным нагретым телом, то температура этого тела должна была бы быть 10^{130} К. Такие температуры не могут быть связаны с кинетической энергией молекул или с любыми температурами излучения, если только оно не было усилено. Следовательно, здесь работает космический мазер.

Вскоре после открытия в 1968 г. «водяного» мазера было замечено, что его обычно встречают в тех же областях, что и «гидроксильный» мазер. Температура излучения гидроксильного радикала почти столь же высока, что и в случае воды. Некоторые источники излучают столько же энергии на этих двух узких спектральных линиях гидроксильного радикала и воды, сколько Солнце на всех длинах волн. Эта энергия является, очевидно, побочным продуктом гравитационного коллапса протозвезды: излучение ведет к охлаждению облака и ускорению коллапса.

Столь необычное поведение гидроксильного радикала и воды проявляется только при плотности 10^8 частиц на 1 см^3 и температуре около 1000°К . Подобные условия встречаются только в протозвездах, а также во внешних областях некоторых очень холодных звезд. Вот мы и подошли к последней группе небесных тел, где можно обнаружить молекулы. Ряд молекул — молекулярный водород (H_2), вода, окись углерода, циановый радикал, двухатомный углерод (C_2), цианистый водород (HCN) и ацетилен (C_2H_2) уже давно известны благо-

¹ С длиной волны 1,35 см. (Прим. перев.)

даря их видимому и инфракрасному спектрам в атмосфере холодной красной звезды спектрального класса М. Однако только в 1968 г. У. Уилсон и А. Барретт из Массачусетского технологического института обнаружили мощные сигналы гидроксильного радикала на радиоволнах, излучаемых инфракрасными звездами, которые не были связаны с зонами H II. Двумя годами позднее было зарегистрировано мазерное излучение водяных паров; «накачкой» этих мазеров служит, по-видимому, мощное инфракрасное излучение.

Излучение гидроксильного радикала и воды возникает, по-видимому, в оболочке из газа и пыли, которая окружает протозвезды. Смещение спектральных линий этой оболочки («эффект Доплера») говорит о том, что она расширяется (или сжимается) со скоростью 10—30 км/сек.

Многие или даже все звезды, содержащие во внешней атмосфере гидроксильный радикал и водяной пар, характеризуются преобладанием кислорода. Напротив, в холодных звездах преобладает углерод. В таких «углеродных» звездах найдены не гидроксильный радикал и вода, а углеродсодержащие молекулы, например окись углерода, односернистый углерод, цианистый водород и циановый радикал. Интересно, что в этих молекулах был обнаружен не только обычный изотоп углерода ^{12}C , но и более редкий изотоп ^{13}C . Соотношение $^{12}\text{C} : ^{13}\text{C}$ составляет в этих звездах 4 : 1, в то время как на Земле и в большей части космического пространства оно равно 89 : 1.

Молекулы — космические зонды

Состав, расположение и скорость перемещения космических облаков можно определить непосредственно, измеряя местоположение составляющих их молекул и величину смещения их спектральных линий. В сочетании с другими данными анализ интенсивности сигналов может дать информацию о физических условиях внутри облаков и их динамике. Определенные спектральные линии, своего рода автографы молекул, возникают при изменении характера движения молекулы или составляющих ее электронов. Помимо изменений в колебательном и вращательном движении (поглощение или испу-

скание в инфракрасной и микроволновой областях спектра), электроны в атоме могут переходить с одной орбиты на другую (поглощение или испускание в видимой и ультрафиолетовой областях спектра).

Односернистый углерод может служить примером простейшей двухатомной молекулы. В космическом пространстве она может находиться только на самом низком энергетическом уровне. Эта молекула способна, как бы по ступенькам лестницы, подниматься на более высокие энергетические уровни, если она столкнется с другой молекулой (или иной частицей), а также если она поглотит фотон (квант излучения). Вслед за этим молекула обычно испускает фотон и возвращается на низший энергетический уровень. Уровни энергии принято обозначать квантовым числом I , мерой вращательного момента молекулы.

На высшем энергетическом уровне молекула односернистого углерода остается сравнительно недолго. Какой-то механизм должен препятствовать ее возвращению на исходный уровень. Этим механизмом могут быть поля излучения или, что более вероятно, столкновения с другими частицами.

Мы можем примерно подсчитать плотность, необходимую для поддержания такой молекулы, как односернистый углерод в возбужденном состоянии. В облаках односернистого углерода, наблюдаемых вблизи зон H II, эта плотность составляет около миллиона частиц на 1 см^3 . Аналогичная картина наблюдается для молекул окиси углерода, окиси кремния (SiO), сернистого карбонила (OCS), цианистого водорода и цианацетилен. Однако скорость спонтанного затухания излучения возбужденной молекулы сернистого углерода значительно меньше, чем у других линейных молекул. Поэтому и для поддержания сернистого углерода на высоких энергетических уровнях требуется гораздо меньше столкновений с другими частицами. Теперь понятно, почему односернистый углерод удавалось обнаруживать чаще по сравнению с другими молекулами даже в тех межзвездных облаках, где плотность не превышает 100 частиц на 1 см^3 .

Наблюдая различные переходы молекул внутри облака, можно выделить области с различной плотностью. Для перехода молекул на более высокие энергетические

уровни требуется и более высокая плотность. Ширина данной спектральной линии находится в прямо пропорциональной зависимости от температуры внутри облака и в какой-то степени от его турбулентности, т. е. скорости движения молекул внутри облака.

Молекулы помогают также определить температуру внутри облака. Односернистый углерод излучает энергию слишком быстро, поэтому более чувствительными зондами для определения температуры служат молекулы окиси углерода и аммиака. Если молекула окиси углерода находится в термическом равновесии со своим окружением, то интенсивность различных переходов между энергетическими уровнями может быть с точностью подсчитана как функция только температуры. Так, при помощи окиси углерода было установлено, что температура внутри больших пылевых облаков составляет от 5 до 25° К и около 100° К — в облаках, окружающих зоны Н II.

Аммиак является уникальным зондом для изучения физических условий внутри межзвездных облаков, так как его молекулы могут находиться в нескольких энергетических состояниях, в частности в виде ортоаммиака и парааммиака. Переходы между этими двумя состояниями возможны только при изменении спина¹ водородных ядер (протонов), например в результате столкновения молекул с частицами межзвездной пыли, приводящего к их распаду и последующей сборке. Средний промежуток времени между такими столкновениями, вызывающими перемену спина, составляет около миллиона лет. Таким образом, отношение между интенсивностью спектральных линий ортоаммиака и парааммиака позволяет судить о температуре внутри облака миллион лет назад. Оказалось, что эти температуры были выше, чем те, которые мы регистрируем в настоящее время, и, следовательно, в процессе сжатия облака охлаждаются.

Могут ли молекулы дать нам информацию о том, какова их концентрация внутри облаков? К сожалению, это можно сделать лишь очень приблизительно. Интен-

¹ Спином называется свойство частиц ориентироваться во внешнем магнитном поле: либо в направлении поля, либо в противоположном направлении. (*Прим. перев.*)

сивность излучения или поглощения электромагнитной энергии на данной волне зависит не только от общего числа молекул, но и от того, какая часть их находится на соответствующем энергетическом уровне. Эту часть молекул можно было бы подсчитать, если бы они были в состоянии термического равновесия со своим окружением. Однако этого нельзя сказать про большинство межзвездных молекул, прежде всего про «гидроксильный» и «водяной» мазеры. Далее, луч радиотелескопа не способен уловить полностью молекулярное излучение, поэтому результаты бывают обычно заниженными. Тем не менее даже такие данные во многом способствовали развитию наших представлений о межзвездной химии.

Химический состав облаков

Межзвездные облака, в которых можно обнаружить молекулы, содержат в основном частицы пыли и молекулярный водород. Частицы пыли можно наблюдать непосредственно, поскольку они поглощают свет расположенных за ними звезд и придают ему красноватый оттенок. Из-за колоссальных технических трудностей молекулярный водород удалось пока наблюдать только в двух случаях — перед звездами Кси Персея и Дельта Скорпиона. Других молекул в этих облаках, по-видимому, не содержится. Скорость образования молекул водорода на частицах пыли превышает скорость их распада под действием ультрафиолетовой радиации.

Всякое облако, содержащее достаточно большое количество молекул, которое может быть обнаружено на радиоволнах, включает также в себя очень много пыли, которая может полностью скрывать звезды. А ведь именно на спектрах этих звезд можно обнаружить молекулы по линиям их поглощения. Вот почему лишь в облаках с низкой плотностью (менее 100 частиц на 1 см^3) можно наблюдать такие молекулы, как H_2 , CN или CN^+ , по линиям их поглощения в ультрафиолетовом и видимом свете. Напротив, радиоволны дают возможность зарегистрировать присутствие молекул в облаках с плотностью от 100 до 10^9 частиц на 1 см^3 .

В таких плотных облаках из молекулярного водорода и пыли молекулы наблюдаются только в следовых

количествах. Дело в том, что эти молекулы содержат атомы, которые в космосе распространены гораздо реже по сравнению с водородом. На каждые 10 000 атомов водорода приходится 3—4 атома кислорода, 2 атома углерода, 1—2 атома азота и 1 атом серы. Это позволяет сделать следующий немаловажный вывод. Если такая космическая шкала распространенности элементов (построенная главным образом на основании атомных спектров звезд около Солнца) справедлива для космических облаков в целом, то все зарегистрированные атомы углерода и значительная часть атомов кислорода (около 30%) входят в состав этих молекул. Напротив, не более 0,0001% всего азота содержится в этих молекулах, а остальные атомы образуют двухатомную молекулу N_2 .

Два ключевых вывода следуют из этих фактов. Во-первых, образование молекул из атомов в межзвездных облаках должно быть весьма эффективным процессом. Во-вторых, космическая химия способствует, по-видимому, образованию органических молекул, т. е. молекул, содержащих углерод. В космическом пространстве были найдены все простейшие органические молекулы, в то время как многие из еще более простых неорганических соединений, например окись азота (NO), окись серы (SO) и сульфгидрильный радикал (SH), так и не удалось обнаружить. И мы не можем объяснить пока, почему космическая химия является в основном органической.

Содержание изотопов

На Земле и Солнце, в кометах и метеоритах различные изотопы химических элементов находятся в определенных соотношениях. Так, соотношение между изотопами углерода ^{12}C и ^{13}C равно 89:1. Соотношение между изотопами кислорода ^{16}O и ^{18}O равно 490:1; между изотопами азота ^{14}N и ^{15}N — 270:1; между изотопами серы ^{32}S и ^{34}S — 22:1. Эти соотношения меняются в звездах, в ядерных реакциях которых участвуют углерод, азот и кислород. Соотношение между изотопами углерода может снизиться до 4:1, а между изотопами азота очень сильно возрасти. В некоторых звездах почти совсем не остается изотопа ^{13}C .

Звезды постоянно обновляются при помощи межзвездной среды. Они созданы из космического газа; газ участвует в ядерных реакциях звезд и возвращается в космическое пространство при выбрасывании вещества или при вспышке сверхновой звезды. Таким образом, изотопные соотношения в Солнечной системе должны быть случайными, зависящими от неравновесных процессов и от смешивания газов из различных источников.

Чрезвычайно интересно, что соотношение между изотопами в космическом пространстве примерно такое же, что и на Земле. Исключение составляет центр Галактики, в котором соотношение между изотопами углерода ^{12}C и ^{13}C почти в два раза выше, чем в любом другом месте. По-видимому, через звезды, «сжигающие» углерод, проходит в центре Галактики больше межзвездного вещества—либо потому, что здесь на каждую звезду приходится меньше газа, либо из-за большего количества звезд, относящихся к массивным, «сжигающим» углерод.

Сходство между изотопными соотношениями на Земле и в межзвездной среде указывает также на то, что космическая химия почти не изменилась, очевидно, за те пять миллиардов лет, которые прошли с момента возникновения Земли. Чем это объясняется? Возможно, что число звезд, в которых сгорает гелий, превышает (за исключением центра Галактики) количество звезд, использующих в качестве «горючего» углерод. Другое объяснение — межзвездный газ должен быть хорошо перемешан на больших расстояниях в течение времени, сравнимого с относительно коротким временем жизни самых горячих звезд.

Циклы жизни молекул

Открытие простых молекул, как мы уже говорили, явилось для астрономов неожиданностью. Они ведь предсказывали, что число таких молекул должно быть ничтожно мало, поскольку очень низка вероятность столкновения двух атомов с образованием молекулы, а возникшие молекулы будут быстро распадаться под действием космической ультрафиолетовой радиации. Скорость распада сложных органических молекул еще выше, а между тем встречаются они еще чаще, нежели

такие простые молекулы, как CN , CH и CH^+ . Следовательно, их существование нельзя объяснить, пользуясь старыми теориями.

За последние годы было предложено несколько механизмов образования молекул. Они распадаются на пять основных категорий. Во-первых, молекулы могут возникать при столкновении атомов, которые движутся в газовой межзвездной среде. Во-вторых, молекулы могут образовываться из атомов или других молекул, находящихся на поверхности частиц пыли. В-третьих, молекулы могут появляться в результате распада частиц пыли, который происходит под действием фотонов или других источников энергии. В-четвертых, молекулы способны синтезироваться благодаря столкновениям с атомами в плотной атмосфере звезд и последующего выброса в космическое пространство. В-пятых, молекулы могут формироваться в плотной среде «досолнечной туманности», т. е. на последних стадиях сжатия протозвезды в звезду.

Молекулы должны возникать с такой же скоростью, с какой они уносятся из молекулярного облака, иначе время жизни последнего будет весьма ограничено. Разрушение межзвездных молекул происходит в результате двух основных процессов — фотодиссоциации под действием ультрафиолетовых лучей и вымораживания на поверхности частиц пыли. Недавно Л. Стиф и его сотрудники установили, что такие молекулы, как вода, аммиак, формальдегид и сернистый карбонил, диссоциируют менее чем за сто лет (время очень короткое по астрономическим масштабам), если только они не защищены частицами пыли от разрушающего действия космической ультрафиолетовой радиации. В последнем случае время жизни молекул возрастает до десяти миллионов лет. Итак, либо межзвездные молекулы образовались внутри пылевых облаков, либо они были перенесены туда, будучи как-то защищены, например на поверхности частиц пыли.

Плотность частиц внутри больших пылевых облаков такова, что вероятность конденсации молекулы из газа на поверхности частицы пыли составит около 100 000 лет. Температура в этих облаках слишком низка, чтобы молекулы могли перейти обратно в газообразное состояние. Сто тысяч лет — срок куда меньший, чем вре-

жизни таких облаков. Следовательно, независимо от своего происхождения молекулы должны быть неоднократно регенерированы в течение жизни облака. Не исключено, что эта регенерация осуществляется за счет тех немногих космических лучей или фотонов ультрафиолетовой радиации, которые проникают внутрь облака, либо под действием невидимых источников инфракрасного излучения, например протозвезды внутри облака.

Картина осложняется в случае плотных молекулярных облаков, связанных с зонами H II. Из-за высокой плотности облака вероятность образования молекулы на поверхности частицы пыли составит всего сто лет. Правда, более высокая температура будет способствовать переходу значительного числа молекул обратно в газообразное состояние. Находясь на поверхности частиц, молекулы способны реагировать между собой, давая начало более сложным молекулам. Действительно, около зон H II найдено гораздо больше разнообразных сложных молекул, чем в пылевых облаках с низкой плотностью.

Специалисты по молекулярной астрономии не склонились пока в пользу какого-то одного из пяти механизмов образования межзвездных молекул. Возможно, каждый из этих механизмов содержит долю истины. Некоторые выводы могут быть сделаны на основании проведенных наблюдений. Так, маловероятно, чтобы атмосфера звезд служила непосредственным источником большей части космических молекул. При прохождении через горячую корону звездной атмосферы сложные молекулы обязательно разрушились бы, даже если бы и существовал механизм выбрасывания их в космическое пространство.

По некоторым данным, молекулы не могут возникать только в результате распада межзвездных частиц пыли. Иначе сами частицы должны бы были быть выброшены из звезд, а не образоваться в космическом пространстве. Хотя сам по себе такой выброс теоретически возможен, значительное количество частиц пыли может образоваться лишь в звездах с низким соотношением между изотопами ^{12}C и ^{13}C , и это соотношение сохранится и в частицах пыли и в молекулах, которые из

них возникнут. Наблюдения, между тем, показывают обратное.

Таким образом, либо первый, второй и пятый механизмы, либо их сочетание лежат в основе образования межзвездных молекул. В различных молекулярных облаках могут протекать разные процессы. Реакции на поверхности пылевых частиц теоретически возможны в облаке любого типа, а скорость их будет зависеть от плотности, температуры и химического состава частиц. Далее, молекулы могут быть синтезированы в «досолнечных туманностях» внутри плотных облаков, окружающих зоны Н II. Эти туманности способны выбрасывать молекулы и пыль в окружающие молекулярные облака под давлением инфракрасного излучения из центральной протозвезды или при помощи избыточного вращательного момента на последних стадиях сжатия туманности. Ядерные реакции в протозвездах отсутствуют, и изотопные соотношения в них будут те же, что и в космическом пространстве.

В менее плотных пылевых облаках, удаленных от зон Н II, возможны только первый и второй механизмы образования молекул. Но и здесь остается много неясного. Как возникают частицы пыли? Они могли образоваться в звездах и остаться в облаках, а могли явиться результатом медленного постепенного скопления молекул, прежде всего двухатомных. Однако двухатомные молекулы в результате последующих столкновений с атомами в окружающем газе скорее распадались бы, чем давали начало другим, более сложным молекулам. Только в том случае, если по меньшей мере десяток атомов входит в состав молекулы, дальнейшие столкновения приведут к ее увеличению.

Каков бы ни был механизм образования молекул, скорость их взаимодействия с частицами пыли гораздо ниже в пылевых облаках, чем около зон Н II. Кроме того, в облаках с низкой плотностью, по сравнению с более плотными облаками около зон Н II, встречаются в основном простые молекулы (гидроксильный радикал, односернистый углерод, формальдегид), а более сложные соединения (например, цианацилген и метиловый спирт) — гораздо реже. Это говорит о том, что механизмы образования молекул могут различаться в зависимости от того, где именно происходит их синтез.

Дальнейшие вопросы

До сих пор мы рассматривали образование молекул в областях, защищенных от разрушающего действия ультрафиолетовой радиации. При этом возникает вопрос: почему одни молекулы встречаются часто, а другие — никогда? Далее, оказалось, что имеется некоторое противоречие между скоростью разложения молекул под действием ультрафиолетовой радиации и наблюдаемыми количествами молекул. По-видимому, образование молекул протекает при участии очень сложного и специфического механизма. Реакции происходят, очевидно, на поверхности пылевых частиц, в том числе и в облаках около зон Н II, где первичным источником образования молекул служат «досолнечные туманности»: будучи выброшенными из протозвезды в окружающее облако, молекулы быстро реагируют с частицами пыли. К сожалению, мы пока мало знаем о характере реакций, которые протекают на поверхностях. Нам неизвестен также состав межзвездной пыли, а он может быть весьма различным — состоять из графита, смеси графита, силиката и железа, графита, покрытого замороженной водой, аммиаком и метаном и т. д. Совершенно ясно, что состав молекул, которые образуются на поверхности пылевых частиц, будет зависеть от состава этих частиц.

Для того чтобы решить проблемы, выдвинутые космической химией, потребуются участие различных научных дисциплин. Микроволновая спектроскопия дает информацию о том, на каких частотах надо искать новые молекулы. Фотохимия определяет вероятность разрушения молекул под действием ультрафиолетовых протонов. Уже много лет исследователей привлекает проблема происхождения жизни. Сейчас открыто по меньшей мере четыре межзвездные молекулы (вода, формальдегид, цианистый водород и цианацетилен), которые являются необходимыми предшественниками биомолекул. И мы не можем не спросить: а нельзя ли обнаружить в космическом пространстве простейшую жизнь или по крайней мере аминокислоты, которые являются ее важнейшими составными частями?

Еще одна нерешенная проблема — это идентификация некоторых спектральных линий в космическом про-

странстве, которые могут иметь молекулярное происхождение. В радиодиапазоне известны две такие линии: одна принадлежит так называемому «Икс-огену», другая — предполагаемому весьма нестойкому изомеру цианистого водорода, неизвестному на Земле. Кроме того, неидентифицирована до сих пор широкая, диффузная спектральная линия в видимом диапазоне на волне 4430 Å. Эти линии были зарегистрированы во многих областях космического пространства. Они могут оказаться весьма важными для нашего понимания косми-

Обнаруженные межзвездные молекулы

Год открытия	Название	Формула	Длина волны	Число областей Галактики, где обнаружена молекула
1937	Метилидин (ионизован.)	CH^+	3958 Å	88
1937	Метилидин	CH	4300 Å	60
1939	Циановый радикал	CN	3875 Å	14
1963	Гидроксильный радикал	OH	18,0 см	~ 600
1968	Аммиак	NH_3	1,3 см	12
1968	Вода	H_2O	1,3 см	35
1969	Формальдегид	H_2CO	6,2 см	~ 150
1970	Окись углерода	CO	2,6 мм	60
1970	Цианистый водород	HCN	3,4 мм	10
1970	Икс-оген	?	3,4 мм	8
1970	Цианацетилен	HC_3N	3,3 см	4
1970	Водород	H_2	1060 Å	2
1970	Метиловый спирт	CH_3OH	35,9 см	3
1970	Муравьиная кислота	HCOOH	18,3 см	1
1971	Односернистый углерод	CS	2,0 мм	20
1971	Формамид	NH_2CHO	6,5 см	2
1971	Сернистый карбонил	OCS	2,5 мм	1
1971	Окись кремния	SiO	2,3 мм	2
1971	Ацетонитрил	CH_3CN	2,7 мм	1
1971	Изоциановая кислота	HNCO	3,4 мм	1
1971	Изоцианистый водород?	HNC?	3,3 мм	3
1971	Метилацетилен	CH_3CCH	3,5 мм	1
1971	Ацетальдегид	CH_3CHO	28,1 см	1
1972	Тиоформальдегид	H_2CS	9,5 см	1
1972	Сероводород	H_2S	1,8 мм	7
1972	Метанимин	$\text{-CH}_2\text{NH}$	5,7 см	1

ческой химии. Если эти линии принадлежат молекулам, нестойким в земных условиях, то, выяснив, что стабилизирует их в космических условиях, мы расширим наши знания о молекулярной структуре. Следующий аспект — это химия поверхностей. Хотя данная проблема и была довольно хорошо исследована для ряда промышленных каталитических процессов, нам все еще недостает глубокого понимания тех элементарных процессов, которые осуществляются на поверхностях.

Ценная информация может быть получена астрономами, в каком бы диапазоне — видимом, инфракрасном или радиодиапазоне — они ни работали. Состав космической пыли можно определить по ее поглощению и поляризации света в диапазоне видимых и ультрафиолетовых волн и по инфракрасному излучению. Многие молекулы, которые могут играть важную роль в космической химии, поддаются наблюдению лишь в видимом и инфракрасном свете. К таким молекулам относятся молекулярный азот (N_2), молекулярный углерод (C_2) и метан (CH_4) (список обнаруженных межзвездных молекул см. в таблице).

В ближайшем будущем можно ожидать открытия новых видов молекул, благодаря более широкому применению инфракрасных волн, дающих более высокое разрешение по сравнению с радиоволнами. Не менее важным является исследование пространственного распределения молекул внутри облаков. Наконец, способность длинных волн спектральных линий молекул проникать сквозь газопылевую среду позволяет изучать пылевые облака и ранние стадии образования звезд внутри них. Недалеко то время, когда мы сможем заглянуть в холодные области других галактик.

Брус МОРРЕЙ

Марс с «Маринера-9»

В ноябре 1971 г., автоматический космический аппарат «Маринер-9» включил свои тормозные двигатели и перешел на орбиту вокруг Марса, став, таким образом, искусственным спутником другой планеты. С высоты от 1650 до 17 100 км над поверхностью Марса «Маринер-9» начал передавать на Землю непрерывный поток фотографий и научной информации, рассчитанный примерно на год.

«Маринер-9» в сто раз превысил объем информации, накопленной в результате всех предшествующих полетов к Марсу. Он также решительно изменил взгляд человека на планету, которая, по мнению поколений астрономов и писателей-фантастов, больше любой другой планеты напоминает Землю. В результате полета «Маринера-9» стало возможным сделать правдоподобные предположения о геологии Марса, предположения, сравнимые, скажем, с предположениями, сделанными в отношении Луны в начале шестидесятых годов.

Следует напомнить, что на первых фотографиях Марса, сделанных «Маринером-4» в 1965 г. в непосредственной близости от планеты, мы увидели поверхность, главной отличительной чертой которой были большие кратеры, напоминающие унылый облик Луны. Четыре года спустя фотографии, присланные с борта «Маринера-6» и «Маринера-7», показали, что не вся поверхность Марса равномерно покрыта кратерами, что существуют районы хаотической местности — картина, не схожая ни с какими фотографиями Земли или Луны, когда-либо

заснятыми. Кроме того, огромный чашеобразный район, давно известный земным астрономам как «пустыня» Хеллас, оказался почти лишенным каких-либо подробностей при разрешающей способности фотокамер «Маринеров». Ни одна из фотографий, присланных первыми тремя «Маринерами», не свидетельствовала о какой-либо вулканической активности, на основании чего можно было сделать вывод, что планета тектонически неактивна.

Вывод этот пришлось коренным образом пересмотреть в свете фотографий, присланных с борта «Маринера-9». Новые доказательства выявились постепенно по мере того, как оседала пыль, окутывавшая планету на протяжении многих недель. Среди других особенностей рельефа перед объективом фотокамер предстали четыре горы-вулкана значительно больших размеров по сравнению с земными. На этих фотографиях мы увидели также обширную систему каньонов, притоков-оврагов и извилистых каналов, кажущихся на первый взгляд созданными проточной водой. Нигде больше на поверхности планеты нет ни малейшего намека на вымывание почвы. Это, пожалуй, самый загадочный факт, заснятый «Маринером-9», весьма успешно справившимся с возложенной на него миссией.

Сконструированный и построенный в лаборатории реактивного движения Калифорнийского технологического института, как и все предыдущие его собратья, «Маринер-9» был обильно оснащен всевозможными приборами, в том числе и электронными. После того как тормозные двигатели израсходовали 360 кг горючего, которое он транспортировал на протяжении 460 млн. км в течение 167 дней, «Маринер-9» весил около 540 кг к окончательному моменту выхода на орбиту вокруг Марса (рис. 6). Фотокамеры и приборы, установленные на его борту, были сконструированы несколькими группами исследователей из правительственных лабораторий и более десятка университетов. Телевизионная группа, к которой принадлежал и я, возглавлялась Гарольдом Мазурски из Геологической разведки Соединенных Штатов и насчитывала около 30 человек. Несколько меньшие группы отвечали за конструирование ультрафиолетового спектрометра, инфракрасного радиометра и инфракрасного интерферометрического спектрометра,

а также за обработку данных, поступавших от этих приборов. Другие группы анализировали данные относительно траектории полета (получая, таким образом, ценную информацию о гравитационных аномалиях Марса), а также данные, полученные в результате многочисленных (около ста) исчезновений радиосигналов с «Маринера-9», что расширило наши познания об атмосфере и поверхности Марса.

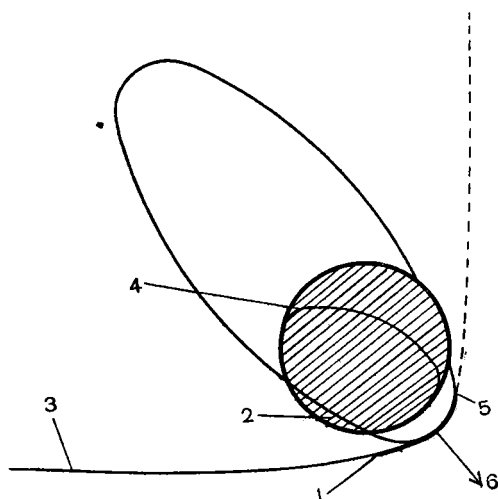


Рис. 6. Захват «Маринера-9» Марсом произошел 13 ноября 1971 г. после того, как тормозные двигатели развили замедляющую тягу около 120 кг в течение 15 минут 15,6 секунды. Покрыв расстояние около 460 миллионов километров за 167 дней, «Маринер-9» приблизился к Марсу снизу и перешел на «околомарсовую» орбиту, наклоненную под углом около 64° к его экватору. Первоначальная орбита находилась на расстоянии от 1385 до 17 300 км от поверхности планеты. Последующая коррекция орбиты до 17 100 км увеличила минимальное удаление до 1650 км, тем самым был достигнут желаемый орбитальный период в 11,98 часа:

1 — включение тормозных двигателей; 2 — южный полюс; 3 — траектория «Маринера-9» при приближении к Марсу; 4 — экватор планеты; 5 — выключение тормозных двигателей; 6 — к Солнцу.

Старый Марс

Для традиционной точки зрения о сходстве между Марсом и Землей имелись довольно веские причины. И в самом деле, Марс совершает один оборот вокруг своей оси за 24,5 часа, его ось наклонена к плоскости его орбиты почти точно под таким же углом, что и ось Земли, обеспечивая, таким образом, такую же базу для сезонных изменений в количестве солнечной радиации, получаемой обоими полушариями планеты. На Марсе видны белые полярные шапки, состоящие (по традиционным представлениям) из воды, переходящие из одного полушария в другое один раз на протяжении каждого марсианского года (длящегося 687 земных дней). На планете то появляются, то исчезают темные и светлые пятна в зависимости от времени года.

Вначале астрономы думали, что темные участки это, вероятно, растительность. Позже более осторожные исследователи все еще считали правдоподобным, что ранняя история Марса аналогична ранней истории Земли, что подразумевало существование океанов и атмосферы с достаточным количеством водяных паров, выпадающих в виде осадков и вызывающих эрозию поверхности. Высказывалось предположение, что в связи с небольшой массой Марса (составляющей одну десятую массы Земли) и слабой гравитацией такая водянистая атмосфера в конце концов улетучилась, оставив планету в ее нынешнем засушливом состоянии. Такая точка зрения о «землеподобном» Марсе оказала сильное влияние на предложения о биологическом исследовании планеты в начале космического века. Казалось разумным предположить, что жизнь могла зародиться на Марсе примерно таким же образом, как и на Земле, возможно, в результате высоких концентраций подходящих первичных молекул в Мировом океане. С появлением жизни на Марсе по меньшей мере микроорганизмы могли оказаться хорошо приспособленными к изменяющимся условиям окружающей среды и дожить до момента их открытия и изучения автоматическими космическими аппаратами, запускаемыми с Земли.

Но эти надежды были омрачены результатами исследований, проведенных «Маринером-4». Марс оказался не только суровым, неприветливым и похожим на Луну,

но выяснилось также, что он лишен магнитного поля, которое могло бы защитить его поверхность от энергичных заряженных частиц солнечного излучения. Более того, было определено, что атмосферное давление на Марсе составляет более трети силы тяжести у поверхности Земли, Марс должен был бы смочь легко удерживать атмосферу, давление которой у поверхности составляло одну десятую от давления атмосферы у поверхности Земли.

«Маринер-6» и «Маринер-7» расширили и углубили эти наблюдения. Они подтвердили, что полярные шапки состоят из очень чистого твердого углекислого газа — «сухого льда», а не из замерзшей воды. Фотографии, изображающие хаотическую местность, дают основание предполагать, что некоторые части поверхности Марса подвергались разрушению и что на планете продолжается определенная внутренняя активность. В результате некоторые исследователи предполагают, что планета в настоящее время как раз нагревается, что подтверждается также тепловыми моделями внутренней структуры Марса.

И все же из экспериментов, проведенных по программе «Маринер», напрашивается вывод, что в главном Марс больше напоминает Луну, чем Землю. До этого светлую и темную окраски на Марсе, видимые в телескоп, обычно относили к определенному виду взаимодействия атмосферы и пыли. На другом комплекте фотографий, заснятых с борта «Маринера», были видны указания на то, что такое взаимодействие зависит от местной топографии; однако общего объяснения дано не было. Некоторые же исследователи придерживались того взгляда, что различие в окраске отражает различие в почвенной влаге.

Программа исследований Марса в 1971 г. первоначально предполагала запуск двух автоматических аппаратов — «Маринер-8» и «Маринер-9»; оба они должны были стать искусственными спутниками Марса. Целью их было заснять большую часть (если не всю) поверхности планеты при разрешении, достаточно высоком для обнаружения как внешних, так и внутренних процессов, изучить неустойчивые кратковременные явления на поверхности и в атмосфере и обеспечить аэрофоторазведку на протяжении достаточно длительного периода вре-

мени (от девяти месяцев до одного года) для наблюдения сезонных изменений в окраске в надежде выяснить происхождение этого явления. После того как «Маринер-8» был потерян во время запуска, задачи, поставленные перед двумя аппаратами, пришлось выполнять одному.

Когда «Маринер-9» достиг Марса 13 ноября 1971 г., над планетой бушевала пыльная буря, самая сильная за последние сто с лишним лет, застилая почти целиком ее поверхность. Первые фотографии, снятые с расстояния нескольких сот тысяч километров, не зафиксировали каких-либо важных деталей, кроме южной полярной шапки. Пыльная буря доставила наслаждение исследователям, занятым изучением атмосферы Марса, поскольку она благоприятствовала раскрытию закономерностей переноса частиц такой тонкой средой, но огорчила исследователей поверхности планеты. Например, у них были планы по мере приближения «Маринера-9» к Марсу сделать ряд последовательных снимков, с которых имелось в виду получить цветные отпечатки, которые показали бы, как Марс становится все больше и больше, и тем самым создать своего рода визуальный мост между уровнем деталей, видимых посредством телескопа с Земли, и уровнем деталей, видимых на фотографиях, сделанных с борта «Маринера-9» после выхода его на орбиту вокруг Марса. Попытка получить цветные фото с изображением Марса в естественных красках была уже предпринята со снимками, доставленными с борта «Маринера-7», посредством красного, зеленого и синего фильтров.

Большие вулканы

Пыльная буря задержала систематическое фотографирование поверхности Марса примерно на три месяца. Однако еще во время бури в экваториальной зоне были видны четыре темных пятна, которые были запечатлены на ранних снимках, сделанных после выхода «Маринера-9» на орбиту. Пятна эти ясно представляли постоянные детали поверхности, достаточно высокие, поскольку они торчали из высокого слоя пыли. Вероятно, они казались темными просто потому, что отражатель-

ная способность их поверхности ниже отражательной способности яркой пыльной атмосферы.

Одно из этих четырех пятен соответствовало местонахождению горы Никс Олимпики («Снега Олимпа»), названной так потому, что с Земли она обычно видна в виде светлого изменяющегося пятна (рис. 7). Когда

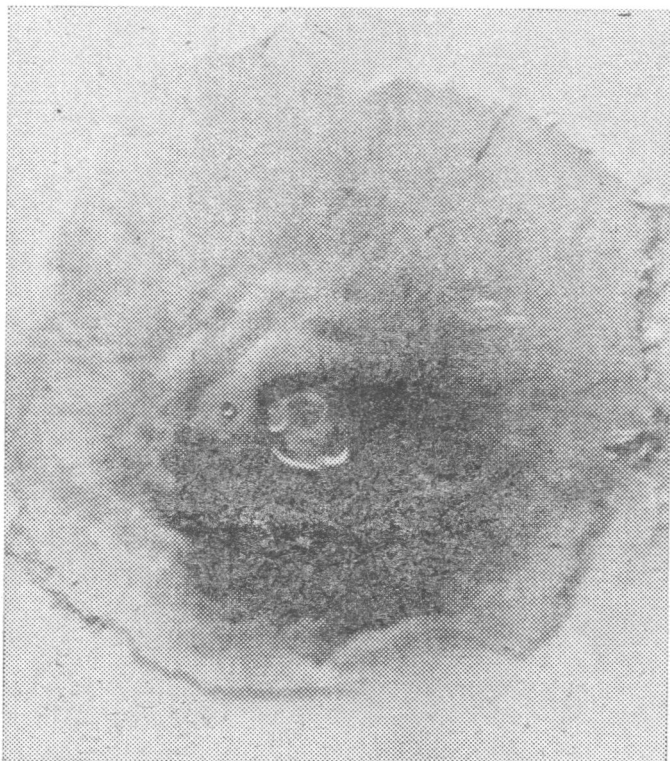


Рис. 7. Вулкан Никс Олимпики, снятый крупным планом. Север на фото находится справа, а солнечный свет падает с верхнего обреза страницы. Таким образом, нет сомнения, что это конус, а не впадина. Вулканическая гора, возвышающаяся над обширной равниной, имеет 500 км в поперечнике у своей подошвы, т. е. значительно крупнее аналогичных вулканических гор на Земле. Высота Никс Олимпики составляет 25 км. Главный кратер, сложное вулканическое жерло (так называемая кальдера), имеет 65 км в диаметре.

это темное пятно попало в объектив камеры, установленной на борту «Маринера-9» и обладающей высокой разрешающей способностью, фотоснимок явил собой захватывающее зрелище. Перед нами был великолепный образец объединившихся кратеров, образующих вулканическую кальдеру. Такие кальдеры можно встретить и на Земле, например на Гавайских островах. Однако диаметр марсианской кальдеры в 30 раз больше любой кальдеры Гавайской гряды. Когда пыль улеглась, Никс Олимпика предстала перед взором целиком во всем своем величии. Это огромный вулкан с диаметром подошвы более 500 км, гораздо больше аналогичных земных вулканических гор; кальдера — лишь его вершина. Карты атмосферного давления, составленные позже при помощи ультрафиолетового спектрометра и других приборов, показывают, что высота этого вулкана по меньшей мере 15 км, а возможно, и 30. Для сравнения напомним, что Мауна Лоа — самый высокий вулкан на Гавайских островах возвышается над уровнем Тихого океана менее чем на десять километров. «Высокоразрешающие» фотографии дали возможность установить, что три других темных пятна также являются вулканами, несколько меньшими по сравнению с Никс Олимпика и образующими единую длинную вулканическую гряду. Эта гряда названа сейчас Грядой Тарсис — традиционным именем этого района.

В связи с первыми же распознанными элементами рельефа, заснятыми «Маринером-9», невольно возникает любопытный вопрос: как можно объяснить, почему целое полушарие планеты, а именно полушарие, исследованное тремя предыдущими «Маринерами», не дало почти никакого свидетельства внутренней активности планеты, в то время как первый же детально изученный район другого полушария является обладателем четырех грандиозных вулканов? Объяснение, очевидно, заключается в том, что Марс как раз начинает «бурлить» внутри, проявляя поверхностную вулканическую активность. Возможно, этот процесс сейчас энергично захватил район Никс Олимпика — гряда Тарсис, но еще не распространился на всю планету. Возможно, мы являемся свидетелями той фазы в развитии Марса, через которую прошла Земля в своей ранней истории и следы от которой к настоящему времени окончательно

стерты последующими вулканическими и осадочными процессами.

Скорость внутреннего нагревания планеты зависит от целого ряда факторов, но главным образом от количества радиоактивного материала в ее первоначально сросшейся массе и общей массы, определяющей давление внутри планеты, и степени изоляции. Не входя в подробности, следует сказать, что, если бы Марс и Земля имели одинаковый первоначальный состав, можно было бы ожидать, что он нагревался бы медленнее, поскольку его масса составляет лишь одну десятую часть от массы Земли. Сам размер вулкана Никс Олимпика говорит о возможности глубоких крутящих конвекционных течений — процесса, который мог быть главенствующим на протяжении нескольких сот миллионов лет и привести в конечном счете к своего рода явлениям тектонических плит, являющимся причиной медленного дрейфа материков на Земле.

Непосредственно на восток от района вулканов располагается в высшей степени изломанная местность, а за ней еще один топографический сюрприз: ряд огромных каньонов, простирающихся на восток и запад вдоль экватора. Каньоны эти шириной от 80 до 120 км и глубиной от 5 до 6,5 км гораздо внушительнее своих земных собратьев. И опять мы должны предположить, что своим происхождением они обязаны сравнительно недавней внутренней активности. Возможно, обширная сбросовая деятельность по направлению с востока на запад обнажила глубинные слои планеты, химический состав которых, по всей вероятности, вызвал процесс эрозии.

Одна из гипотез относит это за счет толстого слоя вечной мерзлоты, вошедшего, очевидно, в контакт с ювенильной водой, подошедшей близко к поверхности, которая предшествовала и сопровождала подъем расплавленной породы у поверхности планеты во время вулканического эпизода по всей видимости в заданном направлении. Под тонким поверхностным слоем по всей планете находится мерзлота. Однажды вечная мерзлота обнажилась, войдя в контакт с атмосферой, в результате чего вода сублимировала, образовав рыхлый, рассыпчатый материал, достаточно подвижный для того, чтобы служить в качестве эродирующего агента в процессе массопереноса. В таком случае напрашивается вопрос,

куда девался этот материал? Возможно, марсианские ветры унесли его в виде пыли в другие районы. (Несмотря на то что слой атмосферы на Марсе довольно тонкий, скорость ветра достигает нескольких сотен километров в час). Вторая возможность — исчезнувший материал может быть обнаружен в одном из районов, лежащих на восток от каньонов. И наконец, третья возможность — он мог исчезнуть с лица планеты, уйдя в ее недра в результате сложного обменного процесса.

Самый большой каньон соответствует складке местности, давно известной под названием Копратес, чей вид иногда изменяется в зависимости от времени года. Наблюдая этот каньон после окончания пыльной бури, мы смогли подробно изучить его изменяющийся вид. Каньон этот настолько глубок, что значительное количество пыли все еще удерживалось в атмосфере между его стенками уже после того, как атмосфера над окружающим его районом почти целиком очистилась от пыли. Взвешенная в атмосфере пыль является причиной того, что каньон выглядит светлее окружающего его ландшафта. После того как атмосфера каньона очищается, разница между его внутренностью и окружающей местностью остается незначительной. Следовательно, традиционно наблюдаемая изменяющаяся окраска «поверхности» Копратес, вероятно, не имеет вообще ничего общего с поверхностью.

Аналогичные атмосферные процессы могут столь же достоверно объяснить и некоторые другие случаи изменяющейся окраски, ранее приписываемые сезонным изменениям поверхности планеты. Некоторые другие изменения окраски объяснить не так просто, но, по всей вероятности, они всегда связаны с взаимодействием пыли, складок местности и атмосферы.

Подобно вулканам, огромные каньоны на Марсе свидетельствуют о довольно свежем эпизоде в истории этой планеты, характеризуемой большими событиями. На Земле мы часто находим довольно устойчивое состояние между процессом эрозии и процессами восстановления; таким образом, нам удастся проследить весь цикл эрозии от юности до зрелости. В случае марсианских каньонов эрозия, как видно, не сбалансирована соответствующим восстановлением; мы не видим старых размытых каньонов созревшей формы.

Каналы

Восточная оконечность каньонов примыкает к обширному участку хаотической местности, небольшую часть которого заснял «Маринер-6». Вид этой хаотической местности сильно напоминает последствие некоего обвала, разрушения, а также указывает на генетическую связь с каньонами, находящимися к западу от нее. Беря свое начало непосредственно в пределах хаотической местности, в северо-западном направлении простираются какие-то необычайные каналы, встречающиеся также в некоторых других местах на поверхности планеты. Глядя на эти каналы, трудно отделаться от мысли о том, что, по всей вероятности, они были прорезаны проточной водой. И в самом деле, некоторые мои коллеги считают, что это единственное разумное объяснение.

Можно приблизительно установить возраст каналов, заметив зависимость между размером и частотой ударных кратеров на их дне. Очевидно, каналы моложе усыпанной кратерами местности, составляющей значительную часть поверхности планеты, и в то же время они ни в коем случае не являются самыми молодыми элементами марсианского ландшафта.

Открытие каналов воскресило гипотезу о том, что в истории Марса могла быть эпоха, сильно напоминающая земную. Согласно этому выводу, на Марсе когда-то, возможно, была более плотная атмосфера и водяной пар был в таком изобилии, что могли выпадать дожди. При наличии дождей каналы становятся легко объяснимым явлением. Гораздо труднее объяснить, почему они сохранились лишь в немногих районах и почему более ранние элементы ландшафта не свидетельствуют об эрозии, причиной которой была бы вода. Довольно трудно объяснить, как примитивная марсианская атмосфера, по всей вероятности, сухая и слабая (в химическом смысле этого слова) могла превратиться в плотную и влажную, а затем подвергнуться обратному превращению в нынешнюю разреженную, сухую атмосферу, состоящую почти целиком из углекислоты. Более того, нынешняя атмосфера сильно стабилизирована наличием большого количества твердой углекислоты в полярных районах. Если принять, что каналы были соз-

даны в результате ливней, то пришлось бы допустить два чуда подряд: во-первых, создать за сравнительно короткий исторический период атмосферу, подобную нашей, и, во-вторых, разрушить ее.

Другая гипотеза сопряжена с меньшими трудностями. Согласно этой гипотезе в результате таяния вечной мерзлоты жидкая вода задерживалась и собиралась в подземных резервуарах. Внезапно эти резервуары были разрушены и вода, вырвавшаяся из них и устремившаяся к поверхности, создала каналы. Однако каналы эти настолько большие и глубокие, что на их создание понадобился огромный объем воды. Поэтому приписывание возникновения каналов какому-то стремительному процессу открытого цикла вызывает еще больше трудностей, чем процессу закрытого цикла типа дождя.

Разгадка происхождения каньонов и каналов — вот одна из главных задач, поставленных перед «Маринером-9». Поскольку, как нам известно, жидкая вода очень важна для жизни, возможная роль воды в создании каньонов и каналов привлекла к себе особый интерес.

И, наконец, на Марсе существует несколько районов, к которым очень подходит термин «бассейны». Главным среди них является круглый бассейн Хеллас — более 1600 км в диаметре. Хеллас наблюдается с Земли уже более двух веков, иногда соперничая в яркости с полярными шапками. «Маринер-7» продемонстрировал, что Хеллас в самом деле является низменным равнинным бассейном. Фотографии, взятые крупным планом, показали, что поверхность Хелласа, по всей вероятности, сглажена притоком большого количества пыли, принесенной в бассейн ветром. «Маринер-9», однако, обнаружил, что Хеллас располагает несколькими слабыми особенностями рельефа. Удалось это заснять как раз в момент окончания пыльной бури, охватившей всю планету. Очевидно, изменение в яркости Хелласа можно объяснить частыми пыльными бурями более локального характера — точка зрения, первоначально высказанная Карлом Саганом (Корнелльский университет) и его сотрудниками на основании метеорологических данных. Таким образом, Хеллас выступает в роли долговременного пылесборника, но может также служить в качест-

ве источника пыли, когда марсианские ветры дуют особенно сильно. Наблюдения «Маринера-9» за местными пыльными бурями и признание того, что они могут изменять яркость отдельных районов поверхности Марса, дают нам возможность глубже заглянуть в некоторые изменчивые элементы ландшафта, наблюдавшиеся с Земли на протяжении многих лет.

Одним из коренных достижений «Маринера-7» было изучение при высокой разрешающей способности очень большой полярной шапки, наблюдаемой во время южной зимы 1969 г. Измерения отражательной способности и температуры, произведенные при помощи инфракрасного спектрометра и инфракрасного радиометра, установленных на его борту, доказали окончательно, что южная полярная шапка состоит из очень чистой твердой углекислоты, как это было предсказано несколькими годами раньше. Фотографии показали, что слой льда тонкий (вероятно, менее нескольких метров в среднем) и что вблизи южного полюса имеются также разнообразные необычные элементы поверхности.

«Маринер-9» достиг Марса, когда в его южном полушарии была поздняя весна — идеальное время для контрольного наблюдения за «таянием» сухого льда полярной шапки и детального изучения необычных элементов поверхности, продолжая их обнаружение. Исчезновение южной полярной шапки началось ожидаемым образом, но затем стало ясно, что в ее поведении появились аномалии. Любопытно, что общее очертание «подтаявшей» шапки продолжало удерживаться на протяжении всего позднего лета, когда сублимация углекислоты должна была бы быть максимальной. Это натолкнуло меня на мысль, что, после того как обширная годовая шапка углекислоты сублимировалась, она обнаружила остаточную шапку обычного водяного льда. Скорость испарения обычного льда, естественно, намного ниже, чем у углекислоты. Наличие в марсианской атмосфере следов водяного пара укрепило меня в этой мысли.

Фотографии, полученные с борта «Маринера-9», обнаружили также наиболее любопытную местность в южном полярном бассейне, которую мы называли слоистой местностью. Хотя очертания ее не симметричны, занимает она большую часть южного полярного бассей-

на, простираясь примерно до 70° южной широты. Стоит она из очень тонких перемежающихся слоев — светлых и темных, чьи слегка наклоненные грани характеризуются определенной текстурой или рельефом.

Собранные вместе 20 или 30 (и более) тонких слоев образуют мощные плиты толщиной, пожалуй, в полкилометра (и более) и до 200 км в поперечнике. Плиты эти характеризуются обращенными наружу склонами, в которых можно проследить полосатую структуру. Слоистые отложения обнаружены только в полярных районах, где углекислота образует годовое отложение льда. Это наводит на мысль о том, что наслоения связаны некоторым образом с приходом и уходом летучих веществ и что они могут даже сохранять некоторое количество углекислоты или водяного льда. Поскольку наслоения отмечены очень малым числом ударных кратеров, можно предположить, что они отражают современный этап в истории Марса.

Северный полюс

Район северного полюса Марса стал доступен для наблюдения «Маринером-9» уже к концу выполнения им своей миссии в результате постепенного изменения освещенности, связанного со сменой времени года, а также благодаря тому, что характерный для полюсов осенний легкий туман наконец рассеялся. Вокруг северного полюса квазициркулярной структуры, характерной для слоистой местности, было обнаружено еще больше, чем вокруг южного полюса. Можно наблюдать 20 или 30 отдельных плит, расположение которых напоминает упавшие стопки лучины для растопки камина. Наличие слоистой местности и круглоплиточной структуры в районах северного полюса, равно как и южного, несомненно, указывает на то, что их появление должно определенным образом ассоциироваться с периодическим осаждением и испарением летучего материала.

Майкл Мэлин, студент-выпускник Калифорнийского технологического института, и я высказали мысль о том, что распределение круглых плит и их перекрывающее расположение может быть объяснено изменяющимся наклоном оси Марса. Мы исходим из того, что его ось смещается на протяжении последних десятков мил-

лионов лет в результате конвенционных течений, залегающих глубоко в недрах мантии; течений, являющихся, вероятно, причиной вулканической деятельности в экваториальных районах планеты. По мере смещения оси вращения Марса слоистые плиты образуются концентрично вокруг каждого последующего положения полюсов.

Это предположение по крайней мере согласуется с информацией о распределении (по высоте) в поле тяготения Марса, полученной на основании изменений орбиты «Маринера-9». Планета Марс проявляет гравитационные аномалии, что свидетельствует о глубоких различиях в плотности, — обстоятельство, могущее быть связанным с глубокой конвенцией. Более того, существует тесная взаимосвязь между гравитационными аномалиями и дислокацией экваториальных вулканов.

Правильные формы слоев и самих плит наводят на мысль, что они также некоторым образом связаны с периодическими изменениями климата на Марсе. Вместе с двумя другими студентами-выпускниками я изучил теоретические изменения в орбите Марса на протяжении отдаленного периода времени. Мы установили, что пертурбации в его орбите, причиняемые другими планетами, изученные несколько лет назад Д. Брауэром и Г. Клеменсом, изменяют эксцентриситет. Оказывается, таким образом, что это лишь подтверждает нашу гипотезу. Эксцентриситет орбиты Марса изменяется от 0,04 (почти круг) до 0,141. Нынешнее его значение 0,09.

Это изменение в эксцентриситете влечет за собой изменение в среднегодовом количестве солнечного света, достигающем полюса планеты, сопровождаемые гораздо более сильным изменением в максимальном солнечном потоке, когда планета находится на минимальном удалении от Солнца. И хотя среднее поступление солнечной радиации у полюсов колеблется лишь в пределах нескольких процентов, этого оказывается при определенных условиях достаточным для того, чтобы вызвать циклическое изменение в росте и сублимации постоянно существующих смежных шапок из углекислоты. Предположив, что пыльные бури регулярно наносят пыль во время фаз сублимации, можно объяснить происхождение тонких слоев наблюдаемого типа. Сами

плиты поэтому соответствовали бы периодичности порядка двух миллионов лет. Слоистая местность, следовательно, довольно точно отражает флуктуации в среднем потоке радиации, достигающем планету как за сравнительно короткий период времени (около 90 000 лет), так и за более продолжительный (два миллиона лет). Таким образом, 20 или 30 плит, наблюдаемые в общей сложности в северном полушарии в районе слоистой местности, запечатлели примерно 100 млн. лет марсианской истории. Согласно другому взгляду происхождение слоистой местности связано в первую очередь с эрозией, а не с постепенным наращиванием слоев.

Эволюция атмосферы

Если все полярные слоистые образования, собранные воедино, представляют лишь не более пяти процентов истории Марса, что же было раньше? Геологу XVIII столетия Хаттону принадлежит известный афоризм: «Ключом к прошлому является настоящее». Если бы мы стали руководствоваться этим афоризмом, мы бы встретились с основной трудностью в понимании Марса. Куда бы мы ни взглянули: на вулканическую местность, каньоны, каналы или полярные наслоения — все они отражают значительную степень активности и изменений на протяжении самого современного периода геологической истории Марса. Под влиянием этих рассуждений мне захотелось спросить самого себя: не является ли атмосфера Марса, какой мы ее представляем себе сейчас, сравнительно недавним, современным приобретением? Мэлин и я высказываем этот взгляд в качестве «спорного предположения». Возможно, на Марсе вообще не было никакой атмосферы (а если была, то очень разреженная, незначительная) на протяжении среднего периода его истории, длившегося, очевидно, несколько миллиардов лет. Возможно, вначале и существовала примитивная атмосфера, связанная с аккрецией планеты, но вскоре могла быть утрачена, особенно если она состояла в основном из водорода и метана.

Мы думаем, что значительная часть нынешней марсианской атмосферы вышла на поверхность планеты во время образования Никс Олимпика и других трех

вулканов гряды Тарсис. Наличие распространенных горизонтальных пластов из горной породы и другие свидетельства несколько более раннего и более экстенсивного вулканизма и образование осадочных пород говорит о том, что в более поздние геологические периоды довольно большие объемы летучих веществ вышли из недр планеты на ее поверхность. Таким образом, по мере того как Марс достаточно созрел для «кипения», он одновременно начал вырабатывать устойчивую атмосферу, которая, в свою очередь, создала слоистую местность, а также позаботилась о механизмах ветряного транспорта и эрозии, необходимых для формирования каналов и гигантских каньонов. Согласно этой гипотезе Марс еще далеко не достиг устойчивого состояния, при котором эрозия уравнивалась бы созидательными процессами, в результате которых появились бы разнообразные формы рельефа. Продолжая высказывать нашу спорную гипотезу, можно даже представить, что на ранних стадиях развития нынешней марсианской атмосферы, прежде чем оформились полярные холодные ловушки для углекислоты, у поверхности могло скопиться достаточно воды для формирования каналов в специфичных неповторяющихся условиях. Эта возможность по крайней мере исключает проблему двух чудес, следующих друг за другом, и позволит нам сосредоточиться на одной из них, если в конечном счете жидкая вода действительно необходима для объяснения происхождения каналов.

Гипотеза о юной атмосфере может также помочь объяснить, почему «постоянные темные районы» (как, например, двухгребенчатый Синус Меридиани) устояли перед лицом частых глобальных пыльных бурь. И опять-таки все же Марс не представляется нам планетой, находящейся в установившемся состоянии, хотя другие исследователи не разделяют нашей точки зрения. Согласно нашей гипотезе, темные пятна могут соответствовать местонахождению остатков более раннего поверхностного слоя, еще не подвергнувшихся химическому выветриванию, связанному с новой атмосферой. И в самом деле, существует некоторая связь между постоянными темными пятнами и местностью, «населенной» самими старыми кратерами.

Другие исследователи, занятые обработкой инфор-

мации, полученной с борта «Маринера-9», так же как К. Саган и У. К. Хартман, высказали другую точку зрения на историю Марса. Характер старых, усыпанных кратерами местностей наводит их на мысль о том, что захватывающим событиям сравнительно недавнего прошлого предшествовал долгий период атмосферной эрозии. Таким образом, концепция «землеподобного» Марса все еще жива. Тем не менее взгляды на геологическую историю Марса быстро меняются в свете чрезвычайно успешной миссии «Маринера-9». Возможно, в конечном счете некоторая промежуточная интерпретация лучшим образом объяснит результаты наблюдений.

Есть ли жизнь на Марсе?

Результаты исследования Марса «Маринером-9» сделали меня противником ранних астрономов, которые думали, что когда-то Марс был подобен Земле, а сейчас представляет собой высушенное ископаемое. Я бы сказал наоборот: вероятно, как раз сейчас он и становится похожим на Землю с развитием устойчивой атмосферы. «Как раз сейчас» трудно определить количественно, поскольку возраст, приписываемый кратерам исходя из скоростей метеоритных потоков, все еще в высшей степени неопределенный. Догадка моя заключается в том, что «происшествие» с атмосферой, если оно действительно случилось, имело место на протяжении последней четверти истории Марса, и уж наверняка на протяжении второй ее половины. Если бы это спорное предположение восторжествовало, оно принесло бы с собой пессимизм относительно возможности того, что существовавшие условия были благоприятными для появления простых форм жизни на Марсе. Если Марс действительно был похож на Луну и был фактически лишен атмосферы почти на всем протяжении своей истории и если максимальное количество воды на его поверхности было достаточным лишь для создания нескольких каналов, кажется в высшей степени неправдоподобным, чтобы когда-либо собралось достаточно жидкой воды в поверхностных слоях Марса, позволяющей предположить случайное развитие жизни из добиологических органических материалов. С другой стороны, сторонники существования жизни на Марсе утверждают

обратное, подчеркивая при этом, что, если бы вода наличествовала в поверхностных слоях, она бы создала благоприятную среду для развития жизни. Само собой разумеется, что такой спор не может быть решен лишь на базе информации, собранной «Маринером-9». Окончательный ответ может быть дан лишь на основании тщательного химического и минералогического анализа самого поверхностного грунта планеты.

Одновременно с полетом «Маринера-9» СССР принял запуск автоматической космической станции «Марс-3», которая, покрыв расстояние от Земли до Марса, должна была совершить мягкую посадку на его поверхность с целью проведения ее анализа. К сожалению, эта автоматическая станция вскоре после достижения поверхности Марса прекратила свое существование.

Я думаю, что СССР постарается повторить этот дерзкий эксперимент во второй половине 1973 г., и я с нетерпением ожидаю возможности взглянуть на фотографии, переданные непосредственно с поверхности Марса, а возможно, и на результаты некоторых простых химических анализов¹.

Мы надеемся к 1976 г. получить информацию с борта американского автоматического аппарата типа «Викинг», «примарсившегося» на поверхность планеты, а возможно, и с русской автоматической станции второго поколения. «Викинг» предназначается не только для непосредственных поисков органических соединений, но

¹ Большой комплекс исследований Марса и межпланетного пространства был успешно проведен совсем недавно (март 1974 г.) советскими космическими аппаратами «Марс-4», «Марс-5», «Марс-6» и «Марс-7», каждый из которых имел на своем борту спускаемый аппарат. Это дало возможность впервые в истории космических исследований провести прямой анализ химического состава атмосферы Марса, а также собрать уникальную научную информацию, дополняющую портрет «красной планеты» — нашего доселе загадочного соседа.

Обработка результатов, полученных на советских космических аппаратах, только началась, но уже первые данные, по мнению советских ученых, говорят о том, что перед нами живая планета, подверженная быстрым изменениям.

Новые данные о планете, полученные в течение последних лет, особенно за последние месяцы, помогут окончательно дать ответ на вопрос, издавна занимавший ум человека: есть ли жизнь на Марсе? (Прим. перев.)

также и для проведения некоторых простых, но важных определений основного неорганического состава поверхностных минералов. Такие измерения предоставят в наше распоряжение важный ключ к пониманию прошлой химической эволюции поверхностных минералов, включая и ответ на вопрос, вступали ли они в химические реакции с водой.

Даст ли наконец наш «Викинг» долгожданный ответ на вопрос о существовании в настоящее время или когда-либо в прошлом жизни на Марсе? Я лично сомневаюсь, я уверен, что трудность получения однозначного ответа «да» или «нет» столь велика, что вряд ли под силу даже такому грандиозному замыслу, каким является программа «Викинг». Я думаю, что поиск жизни на Марсе увенчается окончательным ответом лишь после доставки, по всей вероятности автоматическим аппаратом, на Землю образцов марсианского грунта для тщательного его анализа в земных лабораториях. Я думаю, что СССР, продемонстрировавший возможность доставки образцов грунта с Луны, сможет повторить свой научный подвиг и с Марсом где-то в 1980 г. (исходя из предположения, что предпочтение по-прежнему будет отдано советскими учеными исследованию космоса посредством автоматических станций, как это мы видели в прошлом). У США нет других планов исследования Марса, кроме программы «Викинг». Таким образом, «Маринер-9» надолго останется в памяти как веха в исследовании Марса.

Карл САГАН

Есть ли жизнь на Земле?

Вокруг Марса вращаются три космические станции. Нам известно, что по крайней мере одна из них — «Маринер-9» передает на Землю ценнейшие и богатейшие сведения. Впервые далекая планета стала объектом детального и тщательного научного изучения.

Несмотря на широко распространенное мнение об отсутствии жизни на Марсе, «Маринер-9» обнаружил, что условия на его поверхности не исключают целиком, а наоборот, предполагают возможность существования жизни на этой загадочной планете. Сейчас нам ясно, что она геологически молода и активна, защищена, по крайней мере местами, атмосферной пылью от ультрафиолетового излучения и обладает загадочными волнистыми, разветвленными чертами ландшафта, напоминающими земные русла рек.

Ввиду ближней разведки Марса и огромного числа вопросов относительно возможности жизни на других планетах любопытно было бы посмотреть еще раз, как выглядит наша собственная планета для внешнего наблюдателя. Если бы марсиане решили приступить к предварительному изучению Земли, что бы им следовало предпринять для обнаружения жизни на ней?

Они могли бы, например, охарактеризовать земную внешность. Систематические наблюдения при помощи телескопа обнаружили бы температуры, атмосферные давления, состав атмосферы, наличие жидкой воды, снежные шапки вершин, яркие и темные очертания контуров континентов и океанов. На основании этих на-

блюдений родились бы всякого рода гипотезы и предположения о пригодности Земли для жизни. Появился бы и такой веский аргумент, что большой избыток кислорода в атмосфере Земли наверняка исключает возможность жизни, поскольку все органические соединения целиком окислились бы до углекислого газа и воды. Были бы, возможно, и такие доводы: земные температуры слишком высоки по «марсианским» стандартам.

Однако другие марсианские ученые возражали бы против такого взгляда, считая его чересчур шовинистическим, и, в свою очередь, утверждали бы, что жизнь, пожалуй, может быть построена на несколько других принципах и существовать при несколько отличных режимах температуры, давления и состава. Наиболее эксцентричной была бы гипотеза о том, что земные организмы дышат хорошо известным отравляющим газом — молекулярным кислородом.

Думается, что такие дебаты на Марсе, как и у нас на Земле, длились бы бесконечно. Только новые свежие данные могли бы пролить свет на поставленные проблемы.

Одним из очень простых методов обнаружения разумной жизни является установка небольшого радиотелескопа соответствующей частоты, нацеленного на Землю. Как только Североамериканский континент повернулся бы «лицом» к Марсу, произошел бы буквально взрыв радиоизлучения, в результате которого наблюдатель вряд ли устоял бы на ногах. Продолжительное тщательное изучение, по всей вероятности, обнаружило бы минимально разумное содержание телевизионных сигналов, посредством чего была бы открыта элементарная форма жизни на Земле.

Однако этот метод дал бы желаемый результат, если бы марсиане вели свои наблюдения в определенный период истории Земли, а именно после открытия радио, но до массового проникновения в жизнь землян телевидения, а также других методов промышленного использования средств связи. Им пришлось бы вести свои наблюдения сто или двести лет из нескольких миллиардов лет, на протяжении которых существует жизнь на Земле.

Можно представить себе и другой способ обнаруже-

ния жизни на Земле — фотографирование ее с Марса в дневное время. При помощи небольшого телескопа ученые-марсиане наверняка увидели бы различные фазы Луны и Венеры. Для более подробного изучения поверхности нашей планеты понадобились бы более мощные телескопы. Легкая изменчивая оболочка, окутывающая Землю, предстала бы атмосферным явлением — облаками неразличимой структуры. С установлением температурного режима атмосферы стало бы ясно, что это водяные облака, а не скопление углекислоты или пыли.

Под облаками они бы разглядели коричневатые континенты, которые были бы названы светлыми районами. Более синеватые или черноватые районы вначале были бы наречены темными зонами. Но затем было бы замечено, что эти темные участки земной поверхности время от времени светятся ярким блеском зеркального отражения. Было бы определено вращение Земли и ее наклонение — отклонение от плоскости эклиптики. Однако при такой разрешающей способности телескопов было бы невозможно обнаружить признаки жизни.

Временами при исключительной видимости, когда тонкий слой марсианской атмосферы совершенно очищался бы от пыли, ученые-марсиане при помощи мощного телескопа могли бы добиться разрешающей способности около одного земного километра. При такой разрешающей способности стало бы возможным разбирать довольно четко отдельные элементы земной поверхности протяженностью более одного километра. Предметы же размерами менее одного километра (даже высококонтрастные по отношению к своему окружению) по-прежнему не удалось бы разглядеть.

Можно было бы при этих условиях обнаружить жизнь на Земле?

Метеоспутники «Тирос» и «Нимбус» сфотографировали Землю с высоты, обеспечивающей разрешающую способность в один километр, и мы тщательно изучили несколько тысяч таких снимков. С точки зрения биологической они оказались неинтересными. Никаких признаков, дающих возможность распознать грандиозные инженерные сооружения или крупнейшие столицы, мы не обнаружили на них. Нам не раз приходилось слышать, что по причинам экономическим и геометрическим технически цивилизованное общество стремится

возводить сооружения, имеющие ярко выраженную искусственную внешность. Однако таких сооружений, видимых при разрешающей способности в один километр, очень мало. Лишь один из тысячи упомянутых фотоснимков свидетельствовал о наличии прямолинейной геометрии на Земле. Большинство же таких объектов оказались естественными, а не созданными руками человека, — это полуострова, песчаные дюны, перемычки и, возможно, облака, образованные реактивной струей самолета.

При разрешающей способности в один километр мы не заметили никаких признаков жизни (разумной или какой-либо иной) в Вашингтоне, Бостоне, Нью-Йорке, Москве, Пекине, Мельбурне, Берлине, Париже, Лондоне или в каком-либо другом крупном населенном пункте.

Хотя, по нашему мнению, мы кардинально изменили лицо нашей родной планеты, оставив на ней глубокий след, тем не менее практически нас все еще нельзя обнаружить из космоса при разрешающей способности в один километр.

Более эффективно разрешающую способность можно достичь, изучая Землю с борта космических кораблей. Точно так же, как мы можем сейчас при помощи «Маринера-9» изучать Марс при стометровой разрешающей способности, наши предполагаемые марсианские ученые могли бы проводить наблюдения над Землей с борта космического корабля при той же самой разрешающей способности.

Обнаружили бы они жизнь на Земле в этом случае?

Мы тщательно изучили 1800 отобранных высокоразрешающих цветных фотографий Земли, сделанных космонавтами с борта космических кораблей «Аполлон» и «Джемини». Большинство из них было сделано при стометровой разрешающей способности и изображают районы земной поверхности, не закрытые облаками. Поскольку Земля в среднем наполовину закрыта облаками, это соответствует эффективному неизбирательному изучению 3600 фотографий того же самого разрешения. В результате изучения этих фотографий были обнаружены десятки прямолинейных объектов или предметов с явно выраженными геометрическими формами, из которых 60 геологического происхождения и 20 метеорологического.

Некоторые явления, как, например, дюны, бесспорно, прямолинейных очертаний, но происхождения небиологического. Другие явления, такие, как коралловые рифы, безусловно биологического происхождения, но почти наверняка не были бы приняты за таковые (на основании их геометрических форм), не располагая глубокими знаниями земной биологии. Бассейны некоторых рек являют весьма удивительные геометрические формы для космического наблюдателя, то же самое относится и к некоторым видам облаков. Наносные песчаные острова и кратеры имеют поразительное сходство, но никоим образом не указывают на присутствие жизни на Земле.

На значительном числе фотографий (57) правильные геометрические формы настолько явно выражены, что небиологические объяснения сразу же отпадают. Исходя из познаний жизни на Земле (недоступных марсианам), эти фотографии расшифровываются следующим образом: дороги — 29; каналы — 5; сельский ландшафт — 15; следы инверсии реактивных самолетов — 4; следы промышленного загрязнения, особенно клубы дыма из заводских труб, — 4. На фото легко распознаются некоторые города, изрезанные магистральными линиями дорог, такие, как Даллас—Форт-Уэрт. Другие крупные города (как, например, Каир) распознаются гораздо труднее. Пожалуй, наиболее убедительными приметами, свидетельствующими о существовании разумной жизни на Земле, являются прямоугольные клеточки, разбросанные в шахматном порядке по сельской и городской местности.

Вывод таков: располагая достаточно большим количеством фотографий со стометровым и лучшим разрешением, обнаружить разумную жизнь на Земле очень легко. При разрешениях худших чем один километр сделать это трудно, а то и вовсе невозможно.

Человеческие существа населяют Землю лишь на протяжении немногих миллионов лет, а человеческие существа, способные преобразовать окружающую природу, всего лишь несколько тысяч лет. Марсианам, прилетавшим на космическом корабле к Земле в любую предшествующую эпоху, не удалось бы заметить на ней только что описанных нами искусственных объектов, так как созданы они сравнительно недавно. А тем не менее

жизнь на нашей планете существует уже на протяжении где-то около трех миллиардов лет.

Как же обнаружить существа, которые, в отличие от человека, не преобразуют окружающей их среды?

При разрешении от одного до десяти метров становится возможным распознать крупные растения (особенно деревья) и животных. Биологическое происхождение коров, например, было бы прослежено очень быстро благодаря их неустойчивой геометрии (верхняя часть их перевешивает нижнюю). Корова очень неустойчива динамически, что само по себе является характерным признаком, отличающим корову, скажем, от каменной глыбы. Вообще, формы живой материи характеризуются химической, физической и динамической неустойчивостью, а также некоторыми другими явлениями нарушения равновесия. Хотя, как мне представляется, невозможно предсказать доподлинно, каковы будут проявления жизни на любой другой планете, ясно одно: они будут характеризоваться сильными отклонениями от равновесия — отклонениями, которые мы будем стремиться обнаружить при биологическом исследовании любой другой планеты.

Поскольку растений и животных гораздо больше по сравнению с искусственными сооружениями, созданными на Земле рукой человека, задача их обнаружения значительно облегчается, как только мы достигаем разрешающей способности, большей чем 10 м.

На какой стадии нашего изучения Марса смогли бы мы обнаружить формы жизни, скажем, столь же богатые и разнообразные, как наши земные? Как показывают расчеты, все наблюдения, проведенные человеком посредством «Маринера-6» и «Маринера-7», не смогли бы обнаружить на Марсе даже цивилизацию, стоящую на более высоком уровне развития по сравнению с земной.

«Маринер-9» впервые предоставляет нам возможность проверить наше давнишнее предположение о существовании разумных существ на Марсе. Однако вряд ли это прольет свет на самую насущную проблему — может ли Марс быть приютом для простейших форм жизни. Помоему, этот вопрос остается целиком открытым, по крайней мере до высадки на Марсе космической станции типа «Викинг», намеченной на 1976 г.

10 коп.

Индекс 70101