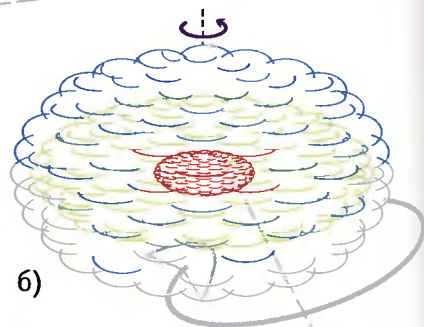
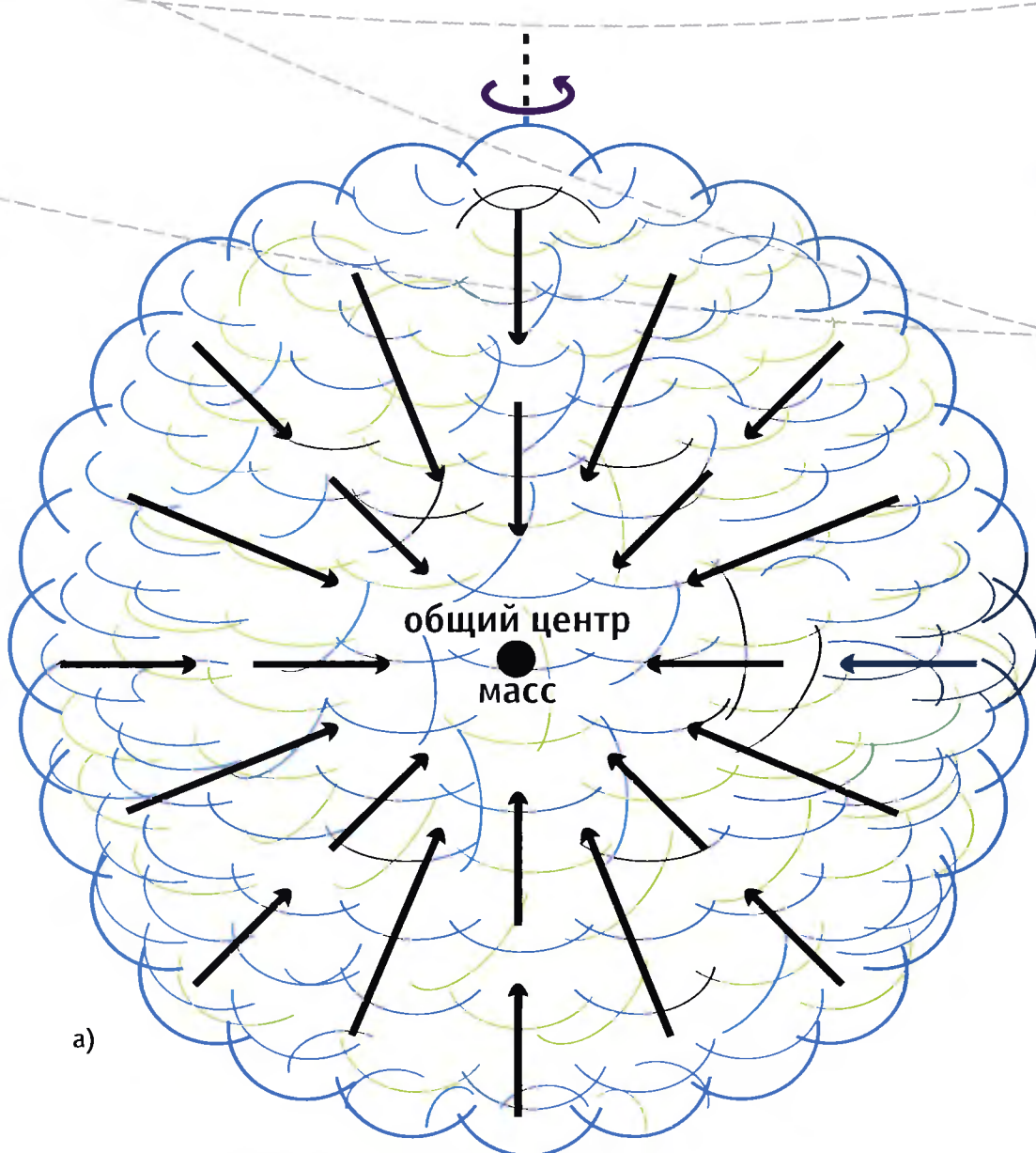


ГЛАВА 2

ЗЕМЛЯ - ПЛАНЕТА СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ

...Мечты и бред, рожденные темницей,
Решетки и затворы расшатал
Каноник Фрауенбургского собора
Смирнейший Коперник. Галилей
Неистовый и зоркий вышиб двери,
Размыкал своды, кладку разметал
Напористый и доскональный Кеплер,
А Ньютон - Дантов Космос, как чулок
Распялив, выворотил наизнанку.
Все то, что раньше было Сатаной,
Грехом, распадом, костью и плотью,
Все вещество в его ночных корнях,
Извилинах, наростах и уклонах -
Вся темная изнанка бытия
Легла фундаментом при новой стройке,
Теперь реальным стало только то,
Что можно было взвесить и измерить,
Коснуться пястью, выразить числом.
И новая вселенная возникла...

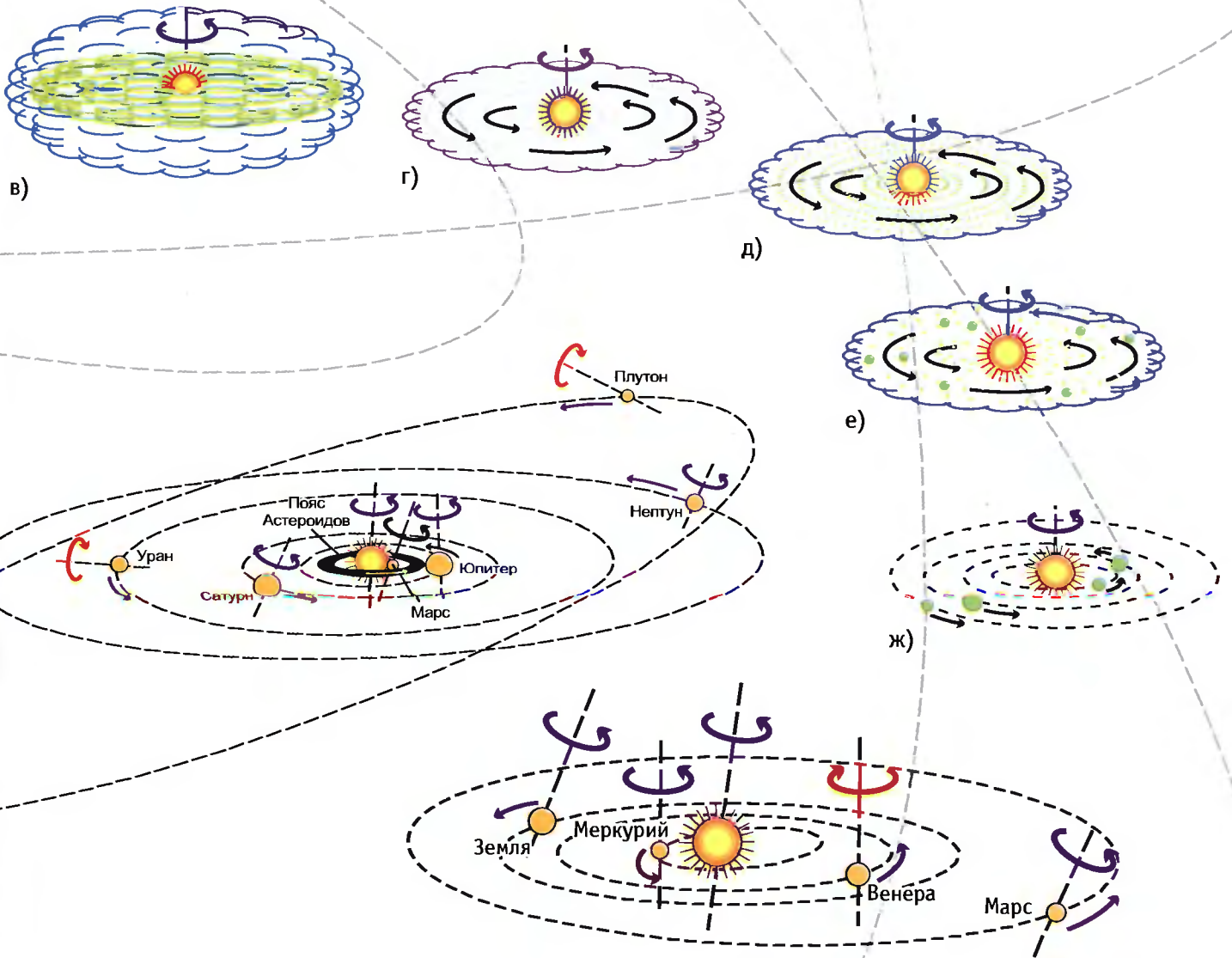
(М. Волошин)



Вопрос о происхождении Земли волновал людей всегда. До нас дошли многочисленные мифы и предания, где порой самым фантастическим образом объяснялось возникновение мира, в котором мы живем. Однако вплоть до XVI-XVII столетия все попытки постичь происхождение Земли были заведомо обречены на неудачу, поскольку для этого необходимо было правильно представить ее место во Вселенной.

Лишь после титанических усилий целой плеяды блестящих европейских ученых - от Николая Коперника до Исаака Ньютона человечество стало осознавать, что Земля является не центром мироздания, а лишь рядовым небесным телом, которое, наряду с другими, обращается вокруг Солнца. Стало очевидным, что происхождение нашей планеты теснейшим образом связано с образованием всей системы, в которую она входит, а потому проблему рождения Земли невозможно рассматривать в отрыве от происхождения Солнечной системы в целом.

Эта глава посвящена становлению современных представлений в области фундаментальных вопросов о происхождении Земли, Солнца и других небесных тел, - вопросов, так давно волнующих умы людей. Вы узнаете о том, как на смену тысячелетним догмам о сотворении мира пришла идея возникновения Солнечной системы в результате эволюции огромной вращающейся туманности, а также о том, какой путь прошло естествознание, прежде чем эта революционная идея Пьера Лапласа обрела свое современное воплощение. В этой главе рассказывается о том, как из бесчисленных пылинок, в гигантском вихре несущихся вокруг только что вспыхнувшего Солнца, в результате столкновений и слипания сформировались девять крупных планет, вращающихся по околосолнечным орбитам. Одной из них была наша Земля.



ВСЯ СОЛНЕЧНАЯ СВИТА

Для того, чтобы понять как могла образоваться Солнечная система, необходимо, прежде всего, правильно представлять как эта система устроена - какие объекты в нее входят, каков характер их движений и какова, хотя бы в самых общих чертах, их физическая природа. **Солнечная система состоит из центральной звезды - Солнца и огромного числа обращающихся вокруг него объектов: планет и их спутников, астероидов и комет.**

В настоящее время в Солнечной системе известно девять больших планет. Среди планет выделяют две очень непохожие друг на друга группы: расположенные вблизи от Солнца небольшие, но высокоплотные планеты земной группы (Меркурий, Венера, Земля и Марс) и более удаленные от Солнца крупные, но низкоплотные планеты-гиганты (Юпитер, Сатурн, Уран и Нептун). Самая удаленная и самая маленькая из девяти планет - Плутон; по своим характеристикам она не подходит ни к первой, ни ко второй группе, а скорее напоминает крупные спутники планет-гигантов.

Все планеты кроме Меркурия и Венеры имеют спутники. У Земли и Плутона известно по одному спутнику, у Марса - два, а каждая из четырех планет-гигантов имеет развитую систему многочисленных спутников. Всего в настоящее время в Солнечной системе известно 67 спутников, но их формальное объединение в одну группу небесных тел не совсем правильно. Среди спутников выделяются довольно крупные шарообразные планетоподобные тела (их диаметр, как правило, более 400 км) и более мелкие тела неправильной формы с грубыми очертаниями, которые скорее всего являются обломками более крупных тел. Семь самых крупных спутников по своим размерам больше, чем планета Плутон, а два из них по диаметру (но не по массе) даже больше Меркурия.

Помимо девяти главных планет и их спутников вокруг Солнца самостоятельно обращается огромное количество малых небесных тел - астероидов и комет. Астероиды, или как их иногда еще называют "малые планеты", за исключением нескольких наиболее крупных шарообразных тел, представляют собой каменные тела неправильной формы. Известно всего лишь четыре астероида с поперечником более 400 км, около двух с половиной сотен - с поперечником от 100 до 400 км, и несколько тысяч - еще более мелких. Подавляющее большинство астероидов имеют орбиты, лежащие между орбитами Марса и Юпитера, образуя так называемый "пояс астероидов". Орбиты астероидов под воздействием гравитационного поля Юпитера могут очень сильно изменяться. Так, не менее 15 астероидов, правда, очень небольших, заходят внутрь земной орбиты, а два из них - даже внутрь орбиты Меркурия.

Кометами называются небольшие тела, состоящие в основном из льда. Их размеры в поперечнике - от долей километра до десятков километров. Предполагается, что во внешних частях Солнечной системы - за орбитой Юпитера - находится огромное количество кометных тел. Расчеты орбит многих из наблюдавшихся комет показывают, что их максимальные удаления от Солнца могут достигать гигантских значений порядка 100 тысяч а.е., т.е. расстояний, на которых притяжение ближайших звезд уже сравнимо с притяжением самого Солнца. Период обращения таких комет должен измеряться десятками миллионов лет, поэтому их называют долгопериодическими.

В 1950 г. голландский астроном Ян Оорт предположил, что долгопериодические кометы образуют вокруг Солнца своего рода гигантское облако, получившее название "облако Оорта". Границы облака Оорта, в принципе, и следует считать внешними границами Солнечной системы. Границы же планетной системы более чем на три порядка меньше - удаление Плутона от Солнца составляет лишь около 40 а.е.

Орбиты комет могут очень резко изменяться за счет гравитационных взаимодействий с планетами-гигантами, при этом некоторые из них даже переходят на параболические и гиперболические орбиты и навсегда выбрасываются из Солнечной системы. Другие же кометы, напротив, переводятся на такие орбиты, двигаясь по которым они регулярно "посещают" центральную часть Солнечной системы. При приближении комет к Солнцу за счет испарения газов с поверхности образуются так называемые "хвосты", благодаря которым они и становятся заметны:

Косматая звезда,
Спешащая в никуда
Из страшного ниоткуда.
(М. Цветаева)

При всем разнообразии и неисчислимости солнечной свиты ее суммарная масса ничтожна по сравнению с массой самого Солнца. По современным оценкам масса Солнца составляет 99,87% от общей массы Солнечной системы. На все остальное приходится лишь 0,13%, причем львиная доля (0,10%) - на Юпитер.

ХАРАКТЕРИСТИКА СПУТНИКОВЫХ СИСТЕМ

* - своеобразными элементами спутниковых систем планет-гигантов являются так называемые кольца, из которых наиболее известны кольца Сатурна, наблюдавшиеся еще Галилеем. Кольца представляют собой своеобразные рои ледовых или каменных частиц, каждая из которых вращается вокруг планеты, как самостоятельный спутник. Размеры этих частиц невелики, их диаметры, в основном, укладываются в пределы от 1 см до 10 м. Общая масса колец очень невелика, и даже у Сатурна составляет не более 0,02% от общей массы спутниковой системы этой планеты.

ЭКВАТОРИАЛЬНЫЕ ДИАМЕТРЫ СОЛНЦА, ПЛАНЕТ И ПЛАНЕТОПОДОБНЫХ ТЕЛ (в км и в сравнении с диаметрами Земли и Луны)

(З, Ю, С, У, Н, П - спутники Земли, Юпитера, Сатурна, Урана, Нептуна и Плутона; астер. - астероиды).

Все указанные в этой таблице небесные тела имеют шарообразную форму. Но уже следующее за Мимасом в порядке уменьшения размеров небесное тело - спутник Сатурна Гиперион - имеет грубообломочную неправильную форму (370 · 280 · 225 км). Среди небесных тел с поперечником меньше 400 км известно, по крайней мере, одно, имеющее правильную сферическую форму (спутник Сатурна Феба, диаметр которого равен 220 км), но, вероятно, это очень редкое исключение.

МАССА И СРЕДНЯЯ ПЛОТНОСТЬ СОЛНЦА, ПЛАНЕТ И ПЛАНЕТОПОДОБНЫХ ТЕЛ

Открытие Закона Всемирного Тяготения не только подвело под гелиоцентрическую модель прочный фундамент физической теории, но и позволило вычислить массы небесных тел. Массу любого небесного тела сравнительно легко определить в случае, если у этого тела имеется хотя бы один спутник. Орбиты спутников имеют эллиптическую форму, но, как правило, они близки к круговым, поэтому в первом приближении можно условиться, что спутники движутся вокруг планет по окружностям. При определении массы Солнца, в роли спутников используются сами планеты.

Как известно из механики, центростремительная сила $F_{цс}$, действующая на тело, движущееся по окружности, т.е. в данном случае на спутник, равна

$$F_{цс} = m \cdot v^2 / R$$

где m - масса спутника, v - линейная скорость его движения по орбите, а R - радиус орбиты.

С учетом того, что $v = 2\pi R / T$ (где $2\pi R$ - длина окружности, а T - период обращения спутника по орбите), центростремительная сила может быть представлена в виде

$$F_{цс} = m \cdot 4\pi^2 R / T^2.$$

Центростремительная сила $F_{цс}$, управляющая орбитальным движением спутника, это не что иное, как сила гравитационного притяжения Солнца $F_{гр}$, которая в соответствии с Законом Всемирного Притяжения описывается формулой

$$F_{гр} = G \cdot Mm / R^2,$$

где M - масса Солнца, G - гравитационная постоянная.

Таким образом

$$G \cdot Mm / R^2 = m \cdot 4\pi^2 R / T^2,$$

из чего после несложных преобразований следует, что

$$M = 4\pi^2 R^3 / G \cdot T^2.$$

Во времена Ньютона значение гравитационной постоянной G было неизвестным, что, впрочем, не помешало великому ученому правильно определить соотношения масс небесных тел. Попытки измерить гравитационную постоянную неоднократно предпринимались в XVIII веке. Первое высокоточное определение гравитационной постоянной (с ошибкой лишь около 1%) было выполнено в 1798 году знаменитым английским ученым Генри Кавендишем (1731-1810). После этого можно было легко рассчитать и абсолютные значения масс небесных тел.

Согласно современным данным масса Солнца составляет около $2 \cdot 10^{33}$ г., а масса Земли - около $6 \cdot 10^{27}$ г.

Определить массу тел, у которых нет спутников, значительно сложнее. В этом случае производится сложный учет того, как гравитационное поле такой планеты искажает правильное эллиптическое движение соседних планет. Ниже приводятся масса и средняя плотность Солнца, планет и некоторых планетоподобных тел. Суммарная масса комет остается неизвестной, но, по всей вероятности, она незначительна.

| Планета | Количество спутников различных диаметров (км) | | | |
|----------|---|----------|---------|---------|
| | > 2300 | 1600-400 | 400-100 | 400-100 |
| Меркурий | - | - | - | - |
| Венера | - | - | - | - |
| Земля | 1 | - | - | - |
| Марс | - | - | - | - |
| Юпитер* | 4 | - | 6 | 6 |
| Сатурн* | 1 | 6 | 5 | 5 |
| Уран* | - | 5 | 2 | 2 |
| Нептун* | 1 | - | 5 | 5 |
| Плутон | - | 1 | - | - |
| Всего | 7 | 12 | 18 | 18 |

| | (км) | ($d_{Земли}$) | ($d_{Луны}$) |
|------------------|---------|-----------------|----------------|
| Солнце | 1391980 | 109,12 | |
| Юпитер | 142984 | 11,21 | |
| Сатурн | 120536 | 9,45 | |
| Уран | 51118 | 4,01 | |
| Нептун | 49528 | 3,88 | |
| Земля | 12756 | 1,00 | 3,67 |
| Венера | 12102 | 0,95 | |
| Марс | 6786 | 0,53 | |
| Ганимед (Ю) | 5262 | | 1,51 |
| Титан (С) | 5150 | | 1,48 |
| Меркурий | 4878 | 0,38 | |
| Каллисто (Ю) | 4800 | | 1,38 |
| Ио (Ю) | 3630 | | 1,04 |
| Луна (З) | 3476 | 0,27 | 1,00 |
| Европа (Ю) | 3138 | | 0,90 |
| Тритон (Н) | 2700 | | 0,77 |
| Плутон | 2300 | 0,18 | 0,66 |
| Титания (У) | 1580 | | 0,45 |
| Рея (С) | 1530 | | 0,44 |
| Оберон (У) | 1520 | | 0,44 |
| Япет (С) | 1440 | | 0,41 |
| Харон (П) | 1200 | | 0,34 |
| Умбриэль (У) | 1170 | | 0,33 |
| Ариэль (У) | 1160 | | 0,33 |
| Диона (С) | 1120 | | 0,32 |
| Тифия (С) | 1050 | | 0,30 |
| Церера (астер.) | 960 | 0,07 | 0,28 |
| Веста (астер.) | 580 | | 0,17 |
| Паллада (астер.) | 520 | | 0,15 |
| Энцелад (С) | 500 | | 0,14 |
| Гигея (астер.) | 490 | | 0,14 |
| Миранда (У) | 470 | | 0,13 |
| Мимас (С) | 420 | | 0,12 |

| | Масса (в массах Земли) | Средняя плотность (г/см ³) |
|---------------|------------------------|--|
| Солнце | 330 000 | 1,41 |
| Меркурий | 0,06 | 5,42 |
| Венера | 0,81 | 5,25 |
| Земля | 1,00 | 5,52 |
| Марс | 0,11 | 3,94 |
| Юпитер | 318 | 1,31 |
| Сатурн | 95 | 0,69 |
| Уран | 14,5 | 1,19 |
| Нептун | 17 | 1,66 |
| Плутон | 0,002 | 1,9 (?) |
| Луна | 0,012 | 3,34 |
| Ганимед | 0,025 | 1,94 |
| Титан | 0,022 | 1,88 |
| все спутники | 0,125 | - |
| Церера | 0,0002 | 2,7 (?) |
| все астероиды | 0,0015 | - |

ПОРЯДОК И СОГЛАСОВАННОСТЬ

*"...И снилось мне, что я ученый,
что не во сне, а наяву
Я на планете отдаленной
В ином созвездии живу.*

*И по ночам, раздвинув стену,
Слежу, наморщив мудрый лоб,
За дальней Солнечной системой
В сверхдальнозоркий телескоп."*
В. Шефнер

Солнце и вся его многочисленная "свита" представляют собой не случайный набор космических тел, а систему определенным и весьма строгим образом организованных объектов. Прежде всего это находит выражение в удивительной согласованности орбитального движения планет вокруг Солнца и собственного осевого вращения самого Солнца:

- все девять планет Солнечной системы и все известные к настоящему времени астероиды движутся по своим орбитам вокруг Солнца в одну и ту же сторону - против часовой стрелки, если смотреть с Полярной звезды;

- плоскости орбит планет и подавляющего большинства астероидов совпадают с точностью до нескольких градусов, т.е. Солнечная система имеет, по существу, форму плоского диска. Из больших планет исключение составляет лишь Плутон, плоскость орбиты которого отклоняется от плоскости орбиты Земли на 17°;

- ось вращения Солнца почти перпендикулярна осредненной плоскости орбит всех планет, т.е. ось вращения Солнца является одновременно и осью вращения планетного "диска", причем Солнце вращается вокруг своей оси в том же направлении, что и планеты вокруг Солнца.

Создается впечатление, что Солнце и вращающиеся вокруг него планеты были приведены в движение в результате единого общего "запуска". Интересно, что и вокруг своих осей большинство планет вращается в том же самом направлении, что и Солнечная система в целом, т.е. "против часовой стрелки" (общая схема Солнечной системы, показывающая направления орбитальных движений и осевых вращений представлена на вступительном развороте этой главы). В обратном направлении, т.е. "по часовой стрелке", вращаются вокруг своих осей только Венера, Уран и Плутон. Отметим, что осевое вращение этих трех планет вообще весьма необычно: Венера вращается чрезвычайно медленно (ее осевой оборот длится дольше, чем оборот вокруг Солнца!), а Уран и Плутон имеют самые большие наклоны осей вращения к плоскостям своих орбит. Такие особенности осевого вращения этих планет наводят на мысль, что когда-то они могли вращаться нормально, а их нынешний обратный характер вращения связан с какими-то катастрофическими событиями, например - столкновениями с другими крупными небесными телами.

С осевым вращением планет, в свою очередь, тесно связано орбитальное движение их спутников, а развитые спутниковые системы планет-гигантов являются своего рода мини-моделями самой Солнечной системы. Подавляющее большинство из известных спутников (61 из 67) вращается вокруг своих планет в ту же сторону, что и сами планеты вокруг своих осей, а плоскости спутниковых орбит обычно почти перпендикулярны к осям вращения планет. Правда, существуют и спутники, вращающиеся в ином направлении, чем сама планета. Их всего шесть, и примечательно, что все они невелики (за исключением Тритона - спутника Нептуна) и расположены на окраинах соответствующих спутниковых систем.

Еще одной важной чертой строения Солнечной системы является закономерное распределение расстояний от Солнца до планет. С некоторыми оговорками можно сказать, что интервалы, разделяющие планетные орбиты, увеличиваются по мере удаления от Солнца, причем во внешней части Солнечной системы эти интервалы примерно на порядок больше, чем во внутренней.

Завершая общий обзор Солнечной системы, еще раз подчеркнем **наиболее важные черты ее строения и динамики: однонаправленность движений и вращений входящих в нее небесных тел, плоская дисковидная форма, неслучайное распределение планетных расстояний и ничтожность суммарной массы всех вращающихся вокруг Солнца тел в сравнении с массой самого Солнца**. Любая гипотеза образования Солнечной системы, претендующая на достоверность, должна если и не объяснять эти факты, то, по крайней мере, не противоречить им.

ПРАВИЛО ТИЦИУСА

Попытки найти математическую формулу, которая бы описывала расстояния от Солнца до планет, предпринимались многими учеными еще со времен Кеплера. Первым, кому удалось сделать это достаточно удачно, был немецкий астроном Иоганн Даниель Тициус (1729-1769). В 1766 году он вывел свое знаменитое правило, иногда называемое правилом Тициуса-Боде, сыгравшее заметную роль в истории науки:

$$R = 0,4 + 0,3 \cdot 2^{n-2},$$

где n - порядковый номер планеты, а R - расстояние от Солнца до планеты, выраженное в астрономических единицах.

Правило Тициуса было опубликовано в 1772 году и вначале не привлекло к себе особого внимания, так как оно описывало расстояния до известных тогда планет лишь с весьма серьезными допущениями. Так, при вычислении расстояния до Меркурия приходилось отбрасывать второй член уравнения, а пятой и шестой планетам (Юпитеру и Сатурну) приписывался порядковый номер на единицу больший, чем был на самом деле. В то же время на том расстоянии от Солнца, где должна была бы находиться планета номер 5, астрономам XVIII столетия никаких небесных тел известно не было.

Отношение к правилу Тициуса изменилось после того, как в 1781 году английский астроном Уильям Гершель (1738-1822) открыл новую планету, которая была названа Уран. Расстояние от Солнца до новой планеты оказалось равным 19,19 а.е., что почти точно соответствовало расстоянию, вычисленному по формуле Тициуса для планеты с порядковым номером 8 (19,6 а.е.).

Воодушевленные открытием Урана, астрономы начали интенсивно искать отсутствующую планету номер 5. Было даже создано специальное международное общество для ее поиска. Однако, желанное открытие суждено было сделать астроному, не приглашенному в это общество - итальянец Джузеппе Пиацци (1746-1826) 1 января 1801 года, в первую ночь нового XIX столетия, открыл небольшую планету, получившую название Церера. Правда, новая планета оказалась разочаровывающе маленькой - по современным данным ее диаметр примерно в 14 раз меньше земного, но среднее расстояние от Солнца до Цереры оказалось равным 2,77 а.е., что почти точно соответствовало расстоянию, предсказываемому формулой Тициуса для планеты номер 5. В течение последующих семи лет примерно на таком же удалении от Солнца было обнаружено три еще меньших, чем Церера, новых планеты - Паллада, Юнона и Веста. Так было положено начало открытию пояса астероидов.

Первооткрыватель Паллады и Весты немецкий астроном Генрих Ольберс (1758-1840) предположил, что в прошлом на расстоянии около 2,8 а.е. от Солнца существовала большая планета, которая вследствие какой-то крупной катастрофы распалась на множество небольших осколков. Гипотетической погибшей планете даже дали свое название - Фазтон, и хотя не все астрономы соглашались с идеей Ольберса, но после открытия первых четырех астероидов уже мало кто сомневался в объективности правила Тициуса. В любом случае, в области, в которой это правило предписывало находиться планете номер 5, существовали реальные небесные тела. Заметим, что согласно современным представлениям гипотетического Фазтона никогда не было, а астероиды представляют собой не разрушившуюся, а, напротив, несформировавшуюся планету.

В 1846 году была найдена еще одна планета Солнечной системы - Нептун. История его открытия широко известна - отклонения в движении Урана от правильной эллиптической орбиты, которые не могли быть полностью объяснены гравитационным влиянием Юпитера и Сатурна, позволяли предполагать существование крупной "заурановой" планеты. Анализируя неправильности в движении Урана, англичанин Джон Адамс (1819-1892) и француз Урбен Леверье (1811-1877) независимо друг от друга и почти одновременно смогли очень точно предвычислить положение на небе гипотетической планеты. Новая планета была обнаружена немецким астрономом Иоганном Галле (1812-1910), который получил от Леверье письмо с указанием ее предполагаемых координат. Открытие Нептуна стало выдающимся триумфом науки, но интересно, что и Адамс, и Леверье полагали, что искомая ими планета находится на расстоянии, предсказываемом правилом Тициуса для планеты номер 9. В действительности же расстояние от Солнца до Нептуна оказалось значительно меньше - не 38,8 а.е., а всего лишь 30,07 а.е. После того, как это было выяснено, интерес к правилу Тициуса постепенно угас.

О правиле Тициуса снова вспомнили в 1930 году, когда американский астроном Клайд Томбо обнаружил еще одну планету - Плутон, среднее удаление которой от Солнца оказалось равным 39,44 а.е. В соответствии с правилом Тициуса примерно на таком расстоянии должна находиться планета номер 9. Однако, "предсказание" Плутона следует считать не более чем случайным совпадением, ведь Нептун, который более чем в 8 000 раз превосходит Плутон по массе, пришлось бы считать "лишней" планетой Солнечной системы.

НЕКОТОРЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОРБИТАЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ ПЛАНЕТ И ОСЕВОЕ ВРАЩЕНИЕ ПЛАНЕТ

| | Период обращения (годы) | Средняя скорость (км/с) | Наклон орбиты |
|----------|-------------------------|-------------------------|---------------|
| Меркурий | 0,24 | 47,9 | 7° 00' |
| Венера | 0,61 | 35,0 | 3° 24' |
| Земля | 1,00 | 29,8 | 0° 00' |
| Марс | 1,88 | 24,1 | 1° 51' |
| Юпитер | 11,86 | 13,1 | 1° 18' |
| Сатурн | 29,46 | 9,6 | 2° 29' |
| Уран | 84,02 | 6,8 | 0° 46' |
| Нептун | 164,79 | 5,4 | 1° 46' |
| Плутон | 244,67 | 4,7 | 17° 08' |

| | Период вращения | Наклон оси вращения к плоскости орбиты* |
|----------|-----------------|---|
| Меркурий | 58,65 сут. | 88° |
| Венера | 243,01 сут. | -87° |
| Земля | 23 ч. 56 м. | 66,45° |
| Марс | 24 ч. 37 м. | 64,8° |
| Юпитер | 9 ч. 50 м. | 86,9° |
| Сатурн | 10 ч. 14 м. | 63,3° |
| Уран | 17 ч. 54 м. | -7,9° |
| Нептун | 19 ч. 12 м. | 60,4° |
| Плутон | 6,38 сут. | -32,6° |

* - знак "минус" указывает на обратное направление вращения.

| Планета | n | Расстояние от Солнца (а.е.) | |
|----------|---|------------------------------|----------|
| | | расчетное | реальное |
| Меркурий | 1 | 0,55 | 0,39 |
| Венера | 2 | 0,7 | 0,72 |
| Земля | 3 | 1,0 | 1,00 |
| Марс | 4 | 1,6 | 1,52 |
| | 5 | 2,8 | |
| Юпитер | 6 | 5,2 | 5,20 |
| Сатурн | 7 | 10,0 | 9,54 |

ВОЗНИКШАЯ ИЗ ВРАЩАЮЩЕЙСЯ ТУМАННОСТИ...

Общее понимание строения и динамики Солнечной системы было уже достаточно ясным к началу XVIII века, несмотря на то что ученые насчитывали тогда в ее пределах только 17 тел. Восемь из них – Солнце, Луна, пять видимых невооруженным глазом планет и, конечно же сама Земля, были известны с незапамятных времен, а еще девять – четыре спутника Юпитера и пять спутников Сатурна, были обнаружены с помощью телескопов в XVII столетии. Три дальние планеты, большинство спутников и все бесчисленные астероиды были еще не известны, но все открытия, сделанные в Солнечной системе со времен Ньютона вплоть до наших дней, лишь детализировали и дополняли уже сложившуюся величественную картину.

Как же могла образоваться эта грандиозная система и что послужило начальным толчком, приведшим ее в движение? Проще всего было приписать создание Солнечной системы сверхъестественным силам, и такие представления господствовали довольно долго. При этом Вселенная и Солнечная система считались неизменными с того момента, когда их создал Бог. Так думал и сам Исаак Ньютон, который, будучи глубоко религиозным человеком, даже в открытом им Законе Всемирного Тяготения усматривал прежде всего проявление воли Божьей. По мнению Ньютона, Всевышний, создав Вселенную, просто "предписал" всем телам вести себя в соответствии с этим законом, в силу чего гигантский механизм Солнечной системы после своего божественного сотворения работал и работает без каких-либо сбоев.

Однако многие ученые пытались найти естественные причины, которыми можно было бы объяснить происхождение Солнечной системы и Вселенной. Одну из первых таких попыток предпринял выдающийся немецкий философ Иммануил Кант (1724-1804), который в 1755 году изложил свои представления о происхождении Вселенной в небольшой книге "Всеобщая естественная история и теория неба". По мнению Канта, все, что существует ныне во Вселенной, образовалось из гигантской туманности, которую он назвал "первичным Хаосом". Под действием силы собственной тяжести эта туманность начала сжиматься. В ходе сжатия частички, составлявшие первичный Хаос, сталкивались между собой. При этом они слипались в более крупные тела, разогревались и могли приобретать вращательное движение. В конечном счете, слипающиеся частички образовали все небесные тела – огромное раскаленное Солнце и вращающиеся вокруг него сравнительно небольшие и холодные планеты, а также другие звезды вместе с неоткрытыми еще планетами около них.

Несмотря на очень высокий авторитет Канта, который был одним из самых блестящих философов своего времени, его представления о развитии Вселенной не получили поддержки современников. Прежде всего это было связано с тем, что гипотеза Канта не была подкреплена какими-либо расчетами и не объясняла ряд характерных черт Солнечной системы, например, ее дисковидную форму и однонаправленность движений планет. Тем не менее, вклад Канта в космогонию (науку, изучающую происхождение и развитие космических тел и их систем) чрезвычайно велик, **ведь он был первым, кто попытался рассмотреть развитие Вселенной как естественный эволюционный процесс, управляемый теми же физическими законами, что действуют и сейчас**, а его блестящая догадка о возможности слияния небольших частичек в крупные небесные тела опередила свое время на два столетия.

Позднее идея о сжатии первичной туманности под действием силы собственной тяжести была независимо от Канта высказана знаменитым французским астрономом и математиком Пьером Симоном Лапласом (1749-1827), который в 1795 году выдвинул свою гипотезу образования Солнечной системы. **Принципиально новым в гипотезе французского ученого было представление об изначальном вращении первичной туманности. В силу закона сохранения момента количества движения такая сжимающаяся и в то же время изначальное вращавшаяся туманность должна была по мере сжатия раскручиваться со все большей и большей скоростью.** В результате сжатия в центре туманности должен был образоваться достаточно плотный сгусток, но одновременно с этим за счет возрастания центробежных сил туманность становилась все более и более сплюснутой и приобретала дисковидную форму. По мнению Лапласа, по мере продолжавшегося сжатия и раскручивания этого диска его периферийные части под действием центробежных сил отрывались в виде концентрических колец. Каждое такое кольцо после своего остывания сконденсировалось в отдельную планету, а из центрального сгустка сформировалось Солнце.

Из вихрей и противоборств возник
 Мир осязаемых
 И стойких равновесий.
 И равновесье стало веществом.
 (М. Волошин)

Почему туманность изначально вращалась, оставалось загадкой, но то, что она должна была вращаться, не вызывало сомнений. Ведь в силу закона сохранения момента количества движения из невращавшейся туманности могло бы образоваться только одинокое невращающееся Солнце, вокруг которого не обращалось бы ни одной даже самой маленькой планеты.

Лаплас разработал свою гипотезу совершенно самостоятельно, но в знак уважения к заслугам Канта, ее обычно называют гипотезой Канта-Лапласа. Мы также будем следовать этой давно устоявшейся традиции, но заметим, что, вопреки расхожему мнению, взгляды Канта и Лапласа во многом различались. Первичная туманность, по мнению Лапласа, была газовой, изначально вращавшейся и очень горячей, а Кант полагал, что она состояла из мелких пылевых частиц и была при этом изначально неподвижной и холодной.

Гипотеза Канта-Лапласа прекрасно объясняла дисковидную форму Солнечной системы и однонаправленность движения составляющих ее небесных тел. А закономерное изменение расстояний от Солнца до планет, как казалось, могло быть увязано с закономерностями, управляющими отслаиванием от туманности концентрических колец. У многих ученых возникло ощущение, что загадка образования Солнечной системы, в общих чертах, уже решена...

...Исчисленный Лапласом и Ньютоном
 Мир стал тончайшим синтезом колес,
 Эллипсов, сфер, парабол - механизм,
 Себя заведшим раз и навсегда
 По принципам закона сохранения
 Материи и силы.
 (М. Волошин)

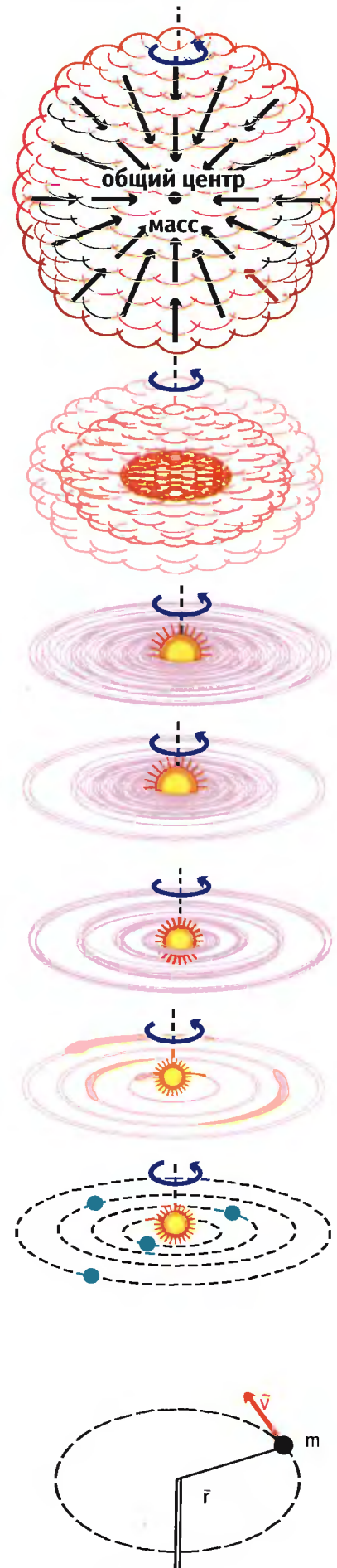
ОБРАЗОВАНИЕ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ ПО ПРЕДСТАВЛЕНИЯМ ЛАПЛАСА (пояснения - в тексте)

ЗАКОН СОХРАНЕНИЯ МОМЕНТА КОЛИЧЕСТВА ДВИЖЕНИЯ И ЕГО КОСМОГОНИЧЕСКИЕ СЛЕДСТВИЯ

Представления Лапласа о формировании Солнечной системы опирались на один из фундаментальных законов механики - закон сохранения момента количества движения. Согласно этому закону в любой системе тел при всех внутренних изменениях, если не происходит никакого вмешательства извне, суммарный момент количества движения остается постоянным. Напомним, что моментом количества движения какого-либо тела называется произведение его количества движения $m\vec{v}$ на расстояние \vec{r} до оси, вокруг которой это тело вращается. Если расстояние \vec{r} уменьшится, например, в два раза, то в силу постоянства величины $m\vec{v}\vec{r}$, линейная скорость тела \vec{v} , напротив, в два раза возрастет. Возрастет и угловая скорость, причем даже не в два, а в четыре раза - ведь помимо увеличения в два раза линейной скорости вращающегося тела произойдет еще и сокращение в два раза длины описываемой им окружности.

В случае вращающейся туманности при ее сжатии ни общая масса, ни масса ее частей не меняется, зато резко уменьшается расстояние от оси вращения до составляющих эту туманность частиц. Суммарный момент количества движения должен оставаться постоянным, а это может произойти только если уменьшение расстояния \vec{r} будет скомпенсировано увеличением скорости частиц \vec{v} , т.е. произойдет резкое ускорение вращения туманности.

В качестве иллюстрации действия закона сохранения момента количества движения часто приводится очень наглядный пример с фигуристкой, которая, начиная вращение, держит руки широко расставленными. Затем она прижимает их к себе, и это приводит к сильному ускорению ее вращения, а когда фигуристка резко раскрывает руки, это помогает ей почти мгновенно остановиться.



...ИЛИ РОЖДЕННАЯ В РЕЗУЛЬТАТЕ КАТАСТРОФЫ?

"...Вселенная не строй, не организм,
А водопад сгорающих миров,
Где солнечная заверть - только случай
Посередине необратимых струй..."
М. Волошин

Гипотеза Канта-Лапласа, получившая также название небулярной (от латинского *nebula* - облако, туманность), господствовала в науке многие десятилетия. Однако во второй половине XIX века она столкнулась с серьезными трудностями. Вначале Джеймс Максвелл (1831-1879), выдающийся английский физик, показал, что горячие газовые кольца скорее рассеются в космическом пространстве, чем сконденсируются в сколь-либо крупные небесные тела. Строго говоря, это был аргумент лишь против представлений Лапласа о том, что первичная туманность была газовой, о пылевом же Хаосе Иммануила Канта к тому времени уже просто не вспоминали. Другим слабым местом гипотезы Канта-Лапласа оказалась ничтожная по сравнению с Солнцем суммарная масса планет. Расчеты показывали, что общая масса оторвавшихся газовых колец должна быть примерно на два порядка больше.

Конечно, можно было предположить, что в планеты сконденсировалась лишь незначительная часть газа, оторвавшегося от центрального сгустка, а основная его часть просто рассеялась в космическое пространство. Но если рассеялся почти весь газ колец, то что же тогда помешало рассеяться его ничтожному остатку? И почему вообще газ отрывался от центрального сгустка отдельными кольцами? Не мог же процесс сжатия первичной туманности идти рывками. Если отрыв газа от центрального сгустка и происходил, то скорее должна была отрываться непрерывная спиральная струя.

Словом, возражений против гипотезы Канта-Лапласа накопилось немало, но роковую роль для нее сыграло необъяснимо медленное вращение Солнца. Было показано, что если бы Солнечная система образовалась так, как это описывал Лаплас, то Солнце должно было бы вращаться в сотни раз быстрее. Никаких правдоподобных объяснений, как могло Солнце замедлить вращение уже после своего образования, в то время найти не удалось, и к началу XX века гипотеза Канта-Лапласа потеряла почти всех своих сторонников.

Конечно, большим достоинством гипотезы Канта-Лапласа было то, что она рассматривала образование планетной системы как результат естественной эволюции досолнечной туманности, но, увы, факты убедительно свидетельствовали против нее. В поисках нового решения вначале предположили, что Солнце просто столкнулось с другой звездой, и планеты представляют собой застывшие "брызги" солнечного материала, "расплескавшегося" при этом столкновении. Потом стали считать, что две звезды непосредственно не сталкивались, но прошли друг от друга на таком близком расстоянии, что между ними возникли сильные приливные взаимодействия, приведшие к выбросу части звездного вещества в окружающее пространство. Предлагались и другие гипотезы. Так, в нашей стране широким распространением пользовалась гипотеза Отто Юльевича Шмидта (1891-1956), известного советского математика и полярного исследователя, который считал, что планетная система у Солнца образовалась в результате его случайного прохождения сквозь совершенно постороннюю газо-пылевую туманность. Эти весьма многочисленные гипотезы, пришедшие на смену эволюционным представлениям Канта и Лапласа, можно условно назвать "катастрофическими", так как все они подразумевали, что планетная система возникла в результате какого-либо из ряда вон выходящего события. Катастрофические гипотезы, однако, как и гипотеза Канта-Лапласа, сами сталкивались с различными трудностями физико-механического характера. При этом одни гипотезы отвергались полностью, другие все же удавалось "спасти", правда, лишь ценой их чрезмерного усложнения и введения всевозможных маловероятных допущений. Это делало катастрофические гипотезы все менее и менее убедительными, и во многом именно поэтому ни одной из них не удалось даже на короткое время занять господствующее положение в науке.

Но были и еще две причины общего характера, по которым научное сообщество в целом весьма настороженно относилось к катастрофическим гипотезам образования Солнечной системы. Во-первых, из этих гипотез следовало, что формирование у звезды планетной системы является событием исключительно маловероятным. Получалось, что во всей нашей Галактике, насчитывающей около ста миллиардов звезд, Солнце было одной из очень немногих, если не единственной из них, имеющей планеты. Принять такой вывод для большинства ученых было очень тяжело, к тому же это оставляло нас совершенно одинокими в грандиозных просторах Галактики.

Ну а, во-вторых, к началу XX века естественные науки уже глубоко прониклись духом эволюционизма, и привлекать случайную катастрофу в качестве объяснения первоначального развития Солнечной системы было уже, попросту говоря, "немодным". В то время в ученой среде было широко признано, что многие важнейшие природные процессы, такие как геологическое развитие Земли или биологическое развитие видов, имеют эволюционный характер. Конечно, все признавали, что на Земле и во Вселенной могут происходить крупные катастрофы, но мало кто считал, что именно они играют решающую роль в истории Природы.

Тем не менее, найти эволюционное объяснение образования Солнечной системы, которое было бы корректно с физической точки зрения, не удавалось...

ГИПОТЕЗА СТОЛКНОВЕНИЯ СОЛНЦА С НЕБОЛЬШОЙ ЗВЕЗДОЙ

Представление о том, что планетная система образовалась в результате столкновения с другим небесным телом, впервые высказал еще в 1766 году французский естествоиспытатель Жорж Луи Леклерк Бюффон (1707-1788), известный главным образом своими работами по биологии. Бюффон считал, что на Солнце упала большая комета. Эта гипотеза никогда не пользовалась особой популярностью, тем более, что вскоре стало ясно, что масса комет ничтожно мала, чтобы вызвать при столкновении значительный выброс солнечного материала.

В конце XIX века, когда гипотеза Канта-Лапласа оказалась перед лицом серьезных трудностей, идея Бюффона была возрождена, правда, комету заменили маленькой звездой. Гипотезы столкновения, однако, не выдерживают критики по двум причинам. Во-первых, они не объясняют согласованности движений и вращения составляющих Солнечную систему небесных тел, ведь плоскости орбит образовавшихся таким путем планет и направления их движения были бы совершенно хаотичными. Во-вторых, так же как и в гипотезе Канта-Лапласа, остается неясным, почему выброшенный горячий материал сконденсировался в крупные планеты, вместо того, чтобы рассеяться в космическом пространстве.

ГЛАВНЫЙ АРГУМЕНТ ПРОТИВ ГИПОТЕЗЫ КАНТА-ЛАПЛАСА

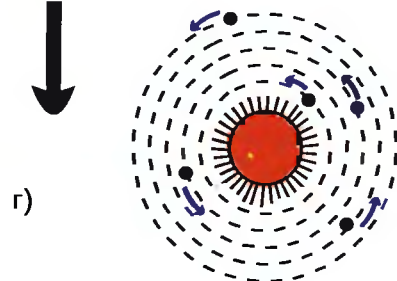
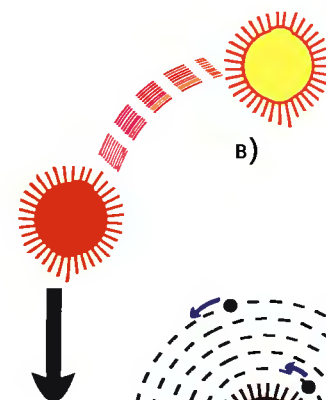
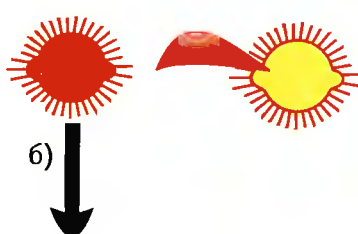
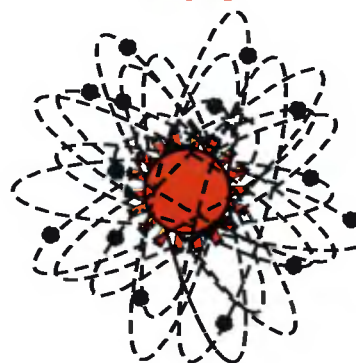
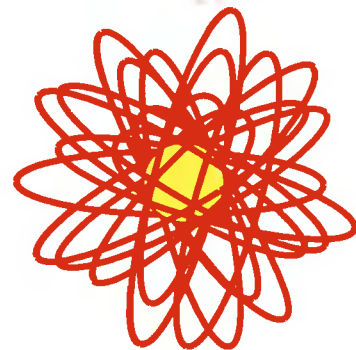
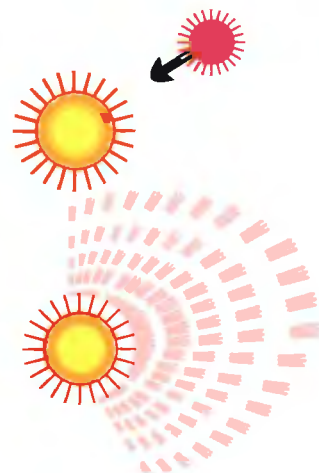
Ротационной неустойчивостью называется такое состояние тела, когда оно начинает саморазрушаться вследствие своего быстрого вращения. Так, если бы Солнце совершало один оборот вокруг своей оси за период около 2 часов, то центробежные силы на его экваторе превысили бы силу притяжения и солнечное вещество начало бы разбрасываться в окружающее пространство.

Предполагаемый в гипотезе Канта-Лапласа отрыв протопланетных колец из центрального сгустка вращающейся туманности обусловлен не чем иным, как его ротационной неустойчивостью, т.е. превышением центробежных сил над силами притяжения. При этом, после того как оторвалось последнее из колец, центральный сгусток, из которого сформировалось Солнце, в силу закона сохранения момента количества движения уже не мог замедлить свое вращение. Поэтому следовало бы ожидать, что Солнце будет вращаться со скоростью, близкой к ротационной неустойчивости, т.е. совершая один оборот примерно за два часа. Однако реальное Солнце вращается гораздо медленнее - один оборот вокруг оси оно совершает почти за месяц.

ГИПОТЕЗА БЛИЗКОГО ПРОХОЖДЕНИЯ ПОСТОРОННЕЙ ЗВЕЗДЫ

В 1916 году английский физик и астроном Джеймс Хопвуд Джинс (1877-1946) расчетным путем показал, что если бы на некотором расстоянии от Солнца прошла посторонняя звезда, то в результате гравитационного взаимодействия на поверхности обеих звезд возникли бы приливные "горбы" (а), один из которых, а может быть и оба, оторвались бы в виде сигарообразных струй в окружающее пространство (б). В дальнейшем этот выброс распался бы на отдельные фрагменты (в), из которых и конденсировались планеты (г).

Эта гипотеза хорошо объясняла, почему планеты вращаются вокруг Солнца в одну сторону и в одной плоскости, однако требовала чрезвычайно точного прохождения двух звезд друг относительно друга. Кроме того, гипотеза Джинса обладала тем же недостатком, что и гипотеза столкновения или же гипотеза Канта-Лапласа - струя чрезвычайно горячего солнечного материала должна была бы рассеяться в Космосе, а не сконденсироваться в планеты.



ГИДРОМАГНИТНОЕ ТОРМОЖЕНИЕ И... НЕМНОЖКО ПЫЛИ

Главым камнем преткновения гипотезы Канта-Лапласа было медленное вращение Солнца. Найти решение этой проблемы удалось в 1942 году шведу Ханнесу Альвену, впоследствии знаменитому астрофизику и лауреату Нобелевской премии, а в то время - молодому инженеру-электрику. Альвен показал, что между Солнцем и частично ионизированным газовым облаком могут происходить весьма сложные, т.н. гидромагнитные взаимодействия, в результате которых вращение Солнца будет тормозиться, а окружающее его облако, наоборот, будет дополнительно раскручиваться. Это открытие зажигало зеленый свет на пути развития небулярных гипотез, но случилось так, что мировое научное сообщество узнало о нем лишь спустя двенадцать лет: первую статью Альвена просто не заметили, так как она была опубликована в малоизвестном журнале, на шведском языке и, к тому же, в самый разгар Второй мировой войны.

После того как удалось "затормозить" Солнце, решить другие проблемы было уже легче. Оказалось, что для этого достаточно лишь "добавить" в исходную газовую туманность небольшое количество космической пыли. По современным оценкам, о которых пойдет речь в разделе 2.6, досолнечная туманность на 98% состояла из газа и на 2% из пылевых частиц. Несложный анализ показывает, что газовые молекулы и пылевые частицы, не вошедшие в состав центрального тела - Солнца, должны были вести себя во вращающейся туманности совершенно по-разному. Одновременное действие гравитационных сил, направленных к центру масс туманности и центробежных сил, направленных перпендикулярно оси ее вращения, привело к тому, что пылевые частицы довольно быстро сосредоточились в экваториальной плоскости этой гигантской системы, сформировав тонкий вращающийся диск. Газовые же молекулы из-за своего хаотического теплового движения такой диск образовать не могли, и они по-прежнему были распределены в облаке сфероидальной, хотя и несколько сплюсненной формы. В дальнейшем это газовое облако в значительной степени рассеялось в окружающем космическом пространстве. Еще раз подчеркнем, что речь идет только об остатке вещества, не вошедшего в состав центрального тела системы - основная же часть, как газового, так и пылевого вещества первичной туманности, сформировала само Солнце.

Тонкий пылевой диск, образовавшийся в ходе сжатия первичной туманности, не являлся чем-то монолитным, а состоял из бесчисленного множества пылинок, каждая из которых представляла своего рода отдельное небесное тело, самостоятельно вращавшееся вокруг Солнца. Пылевой диск был очень неустойчивым и недолговечным образованием - пылинки постоянно сталкивались между собой и слипались в небольшие скопления, получившие название "планетезималей". Процесс слипания пылинок был возможен потому, что скорости сталкивающихся частичек, двигавшихся по смежным орбитам, были очень близки и их столкновения происходили очень "мягко".

Первые планетезимали были очень мелкими, они имели размеры, измеряемые долями сантиметра, но они также сталкивались между собой, слипались, и поэтому быстро росли. По мере увеличения их массы возрастало и гравитационное взаимодействие между ними: более крупные планетезимали начинали притягивать к себе мелкие частицы из близлежащего пространства, а после достижения критического размера, оцениваемого в несколько сот километров, этот процесс приобретал лавинообразный характер. Самые крупные планетезимали - "зародыши" будущих планет - стремительно вычерпывали из соответствующей "зоны питания" весь, или почти весь, материал и дорастали до размеров планет. Процесс роста планетезималей от размеров пылинок до размеров планет называется аккрецией (от латинского *accretio* - приращение).

После того как в первичную туманность было "добавлено" немножко космической пыли, удалось решить и другие проблемы, с которыми ранее столкнулась гипотеза Канта-Лапласа. Прежде всего, отпал вопрос о том, как же планеты смогли конденсироваться из газа, ведь согласно новой небулярной модели, они возникли совершенно иным путем - путем аккреции пылинок. Также становилось понятным, почему масса всех планет вместе взятых столь мала, хотя расчеты и показывали, что при раскручивании первичной туманности вне центрального тела, т.е. Солнца, должно оказаться по крайней мере несколько процентов от общей массы системы. По видимому, так оно и было, но львиную долю вещества, не вошедшего в состав Солнца, представляли газы, которые в дальнейшем рассеялись в космическом пространстве. Планеты же сформировались главным образом из пылевой составляющей, доля которой была заведомо невелика.

Так в конце пятидесятых - начале шестидесятых годов XX века небулярная гипотеза, правда существенно модифицированная, вернула себе главенствующее положение в науке. От своей ранней предшественницы - гипотезы Канта-Лапласа, она унаследовала ключевую идею о сжатии, раскручивании и превращении в протопланетный диск изначально вращавшейся первичной туманности.

При этом современная небулярная гипотеза смогла объяснить главные физико-механические особенности Солнечной системы и успешно обойти те трудности, которые когда-то явились непреодолимым барьером для гипотезы Канта-Лапласа. Несмотря на всю убедительность современной небулярной гипотезы, некоторые ученые по-прежнему поддерживают и, более того, активно разрабатывают различные сценарии катастрофического рождения Солнечной системы. Заметим, что такие усилия отнюдь нельзя считать напрасными, ибо пути науки неисповедимы, и в ее истории очень часто бывало так, что прорыв к новым истинам совершался там, где его меньше всего ждали. К тому же в ходе разработок катастрофических сценариев отрабатываются подходы к решению некоторых очень важных частных задач. Так например, представление об аккреции планетезималей, являющееся одной из главных опор современной небулярной гипотезы, было до этого достаточно детально разработано именно в рамках катастрофических моделей.

Отметим, что и сама современная небулярная гипотеза пока еще далека от совершенства, к тому же в ней существует несколько остро конкурирующих между собой вариантов. Так, весьма различаются представления о конкретных путях аккреции планетезималей и о причинах уменьшения скорости вращения Солнца (после Альвена были предложены и другие правдоподобные объяснения этого процесса). Совершенно по-разному оценивается роль газов в процессе формирования планетных тел, а также общая масса вещества туманности, не вошедшего в центральное тело системы - Солнце. Кроме того, остается открытым и фундаментальный вопрос о причине изначального вращения первичной туманности, хотя сам факт такого вращения не вызывает никакого сомнения. Таким образом, проблем остается немало, и, возможно, для их окончательного решения потребуются усилия еще нескольких поколений ученых.



СПЛЮСНУТАЯ ФОРМА ВРАЩАЮЩЕЙСЯ ТУМАННОСТИ

На каждую частицу одновременно действует и сила притяжения, направленная к центру масс туманности, и центробежная сила, направленная перпендикулярно оси ее вращения. В общем случае их результирующая направлена к экваториальной плоскости туманности, чем и обусловлена сплюснутая форма последней.

ОБРАЗОВАНИЕ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ ПО СОВРЕМЕННЫМ ПРЕДСТАВЛЕНИЯМ (См. серию рисунков на вводном развороте этой главы)

Изначальные размеры газо-пылевой туманности, по-видимому, значительно превышали размеры современной планетной системы, а по своей форме туманность была близка к шарообразной (а).

По мере сжатия туманность начинала вращаться быстрее и быстрее, а ее форма становилась все более и более сплюснутой. При этом пылевые частицы и молекулы газов вели себя совершенно по-разному. Собственно газовая составляющая туманности сплющивалась гораздо медленнее, чем пылевая, т.к. этому препятствовало интенсивное хаотическое движение газовых молекул (б).

В результате сжатия происходил сильный разогрев внутренних областей туманности. Ее наиболее горячая центральная часть в конечном счете начала светиться - образовалась протозвезда (Протосолнце). По мере сосредоточения основной части вещества туманности (и газа, и пылевых частиц) в центральной протозвезде, последняя все более сжималась и разогревалась. Когда температура в ее центре достигла нескольких миллионов градусов, начались термоядерные реакции превращения водорода в гелий (основной источник энергии звезд), тем самым Солнце из протозвезды превратилось в настоящую звезду. Остаток пылевых частиц, не вошедший в центральное тело системы, сосредоточился в экваториальной плоскости туманности в виде тонкого вращающегося диска, а не вошедший в центральное тело остаток газа по-прежнему образовывал нечеткое сфероидальное облако, которое частично рассеивалось в окружающее пространство (в).

Пылевые частицы аккрецировали в мелкие планетезимали (г), мелкие планетезимали аккрецировали в более крупные (д), а наиболее крупные планетезимали превратились в зародыши планет, которые за счет своего гравитационного поля начали интенсивно "вычерпывать" из окружающего пространства все мелкие и средние планетезимали (е). В конечном счете сформировалась система, состоящая из небольшого количества планетных тел (ж).

ЕЩЕ ОДНО СВИДЕТЕЛЬСТВО В ПОЛЬЗУ НЕБУЛЯРНОЙ ГИПОТЕЗЫ

На протяжении многих десятилетий астрономы всего мира пытались обнаружить планеты около других звезд, однако первое важное открытие в этом направлении было сделано только в восьмидесятые годы XX века, когда удалось сфотографировать пылевые диски около некоторых молодых звезд. Из широко известных звезд такого рода диском окружена Вега (α Лиры) - самая яркая звезда Северного полушария. Полагают, что в окрестностях этих звезд в настоящее время происходит формирование планетных систем.

Разглядеть или сфотографировать сами планеты около других звезд пока еще никому не удалось - планеты для этого слишком малы, а межзвездные расстояния чрезвычайно велики. Тем не менее, факт существования планет достоверно установлен уже для нескольких десятков звезд - это удалось сделать косвенными методами в девяностые годы XX века. Открытие околозвездных дисков и доказательство существования планет около других звезд служат очень серьезными аргументами в пользу небулярной гипотезы, ведь согласно ей, формирование планетных систем представляет собой обычный процесс, сопровождающий образование звезд.

2.6

ГАЗЫ, ЛЬДЫ, КАМЕНИСТОЕ И МЕТАЛЛИЧЕСКОЕ ВЕЩЕСТВО

*"В мире вечного движенья,
В превращеньях вещества,
Возникают на мгновенья
Все живые существа.*

*Но, явившись на мгновенье,
Знать уж хочет существо, -
В чем же вечное движенье?
Что такое вещество?"*
Н. Морозов

После того как в конце пятидесятых - начале шестидесятых годов XX века были решены основные физико-механические проблемы небулярной гипотезы, фокус внимания ученых, занимающихся вопросами образования Солнечной системы, переместился на проблемы космохимии. Действительно, любая гипотеза, претендующая на правдоподобность, должна объяснять не только характер движения входящих в Солнечную систему небесных тел, но и особенности их химического состава.

Время поставило перед наукой новую задачу - выяснить, по крайней мере в основных чертах, пути химической эволюции Солнечной системы. Но можем ли мы хоть что-нибудь сказать о химическом составе первичной газо-пылевой туманности, ведь как таковой ее уже не существует несколько миллиардов лет? Оказывается - да, более того, определение элементного состава первичной газо-пылевой туманности является относительно несложной космохимической задачей. Дело в том, что почти все вещество туманности оказалось сосредоточенным в центральном теле системы - Солнце. В первом приближении можно ожидать, что его элементный состав должен быть близок элементному составу первичной туманности. А состав Солнца, благодаря спектральным исследованиям излучаемого им света, в настоящее время известен ученым очень хорошо.

Выяснилось, что на Солнце присутствуют почти все элементы таблицы Менделеева, правда, количественно они представлены крайне неравномерно. Около 98,4% массы Солнца составляют водород и гелий (в примерном соотношении три к одному). На все остальные элементы приходится лишь около 1,6%. Из них наиболее заметную роль играют кислород (0,8%), углерод (0,4%), азот и железо (по 0,1%). Далее в порядке убывания идут: кремний, неон, магний, сера и никель, содержание которых измеряется сотыми долями процента, а все остальные элементы присутствуют на Солнце в еще меньших количествах. К настоящему времени на Солнце установлено наличие и определено содержание 73 химических элементов. Не вызывает никакого сомнения, что на Солнце присутствуют еще 10 химических элементов, известных на Земле, просто их содержания ниже чувствительности современных методов.

От этих данных можно почти напрямую перейти к элементному составу первичной туманности, правда, надо иметь в виду, что находящийся сейчас на Солнце гелий частично образовался в его же недрах в ходе термоядерного "горения" водорода. Суммарное же содержание водорода и гелия в первичной туманности составляло те же 98,4% от ее массы, что и в настоящее время на Солнце. Содержание остальных химических элементов в первичной туманности должно соответствовать их современному содержанию на Солнце (строго говоря, некоторые незначительные поправки еще надо ввести на учет радиоактивных превращений элементов и на "сгорание" в термоядерных реакциях на Солнце наиболее легких элементов - лития, бериллия и бора).

Итак, элементный химический состав первичной туманности в настоящее время известен достаточно хорошо. Но в каком физическом состоянии находилось это вещество? Ответить на этот вопрос можно, выяснив, во что превратится фрагмент солнечного вещества, если дать ему медленно остыть - иными словами, надо проследить его обратную эволюцию. Разумеется, ученым никогда не удастся взять для такого опыта пробу настоящего солнечного вещества, да это и не требуется, - ведь состав Солнца хорошо известен, а приготовить смесь элементов, имеющую "солнечный" состав, можно искусственно. После этого надо разогреть ее до состояния плазмы, а затем наблюдать, что будет происходить с ней при остывании.

Во второй половине XX века подобные исследования были проведены многими учеными. В результате этих работ было установлено, что почти весь водород и весь гелий, вплоть до самых низких температур и в условиях очень низких давлений, которые могли иметь место в первичной туманности, находятся в газообразном состоянии, а все остальные элементы, оставаясь простыми веществами или образуя различные химические соединения, конденсируются в небольшие твердые частички - "пылинки" (в образовании твердых частичек участвует и небольшая часть водорода - около 0,4%, которая входит в состав таких соединений как метан CH_4 , аммиак NH_3 и вода H_2O). Образующиеся "пылинки" по массе составляют только 2%, а остальные 98% вещества остаются в газообразном состоянии (водород H_2 и гелий He), что отражает количественное соотношение газов и пыли в первичной туманности.

Установлено также, что пыль, входившая в досолнечную туманность, должна была представлять смесь довольно многих простых и сложных веществ, которые можно разделить на три главные группы: "льды" (замерзшие вода, аммиак, метан, инертные газы и некоторые другие легкоплавкие вещества), каменное, или как принято говорить в астрономии - каменистое вещество (разнообразные окислы и силикаты), а также металлическое вещество (железо-никелевый сплав). Поясним, что силикатами называется очень многочисленная группа разнообразных по химическому составу веществ, основу кристаллических решеток которых составляют атомы кремния и кислорода. Судя по элементному составу современного Солнца, льды должны были составлять 1,5% массы первичной туманности, а каменистое и металлическое вещество вместе взятые - около 0,5%.

Основная часть вещества первичной газо-пылевой туманности, как уже отмечалось выше, была мобилизована на формирование Солнца, где газы, льды, каменистое и металлическое вещество сразу же утратили свою изначальную индивидуальность, образовав гигантский хорошо перемешанный шар, состоящий из несвязанных между собой ионизированных атомов. "Судьба" остатка вещества первичной туманности, не вошедшего в состав центрального тела системы, "сложилась" совершенно иначе - как уже обсуждалось ранее, газы в значительной мере рассеялись в окружающее пространство, а из пылевых частиц сформировался тонкий протопланетный диск, из которого в дальнейшем образовались все небесные тела, вращающиеся в настоящее время вокруг Солнца.

Мы были звездами. Истоки наши - в них.
Все в мире скроено из их горячей ткани.
Материя миров в небесных кладовых
хранится штуками, рулонами, кусками...
(Л. Вышеславский)



ФАЗОВЫЙ СОСТАВ ПЕРВИЧНОЙ ГАЗО-ПЫЛЕВОЙ ТУМАННОСТИ ИЗ ИСТОРИИ СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА

Испокон веков считалось, что белый цвет является самым простым из всей цветовой гаммы. Такое представление было опровергнуто в 1672 году Исааком Ньютоном, который с помощью стеклянной призмы разложил пучок белого света на монохроматические составляющие. Почти два столетия спустя, в 1859-60 гг., немецкие ученые Густав Кирхгофф (1824-1877) и Роберт Бунзен (1811-1899), опираясь на это открытие Ньютона, разработали метод спектрального анализа химических веществ. Ими было установлено, что в раскаленном состоянии каждому химическому элементу в спектре испускаемого им света соответствует строго определенный набор очень узких цветовых полос, так называемых спектральных линий.

Суть метода заключается в том, что анализируемая проба сжигается при температуре в несколько тысяч градусов, а излучаемый при этом свет раскладывается на спектральные линии с помощью специального прибора - спектрографа, основой которого опять-таки является обыкновенная стеклянная призма. Любой химический элемент, присутствующий в пробе, обязательно "выдаст" себя характерными только для него спектральными линиями, при этом чем выше содержание элемента в пробе, тем ярче его линии в спектре. Первоначально спектральные исследования позволяли устанавливать только наличие тех или иных элементов в анализируемых пробах. В дальнейшем по яркости зарегистрированных на фотопластинке спектральных линий стали производить и весьма точные количественные оценки содержания химических элементов.

Физическая природа спектров излучения и причины их различия у разных элементов были установлены уже после смерти Кирхгоффа и Бунзена, но это ничуть не помешало первооткрывателям метода спектрального анализа широко применять его в своих исследованиях. Были составлены каталоги спектральных линий разных элементов и изучен химический состав многих природных минералов, а в одном из исследуемых минералов - лепидолите - даже открыли два ранее неизвестных элемента - рубидий и цезий. Свои названия новые элементы получили по цвету спектральных линий, по которым они были первоначально обнаружены (от латинских слов rubidius - красный и caesius - небесно-голубой).

Конечно, не могло не привлечь внимания Кирхгоффа и Бунзена и Солнце, ведь наше дневное светило представляет собой своего рода гигантскую постоянно горящую "пробу". Они обнаружили на Солнце присутствие тех же элементов, что были известны и на Земле, и это послужило веским подтверждением материального единства мира. Спектральными исследованиями солнечного света активно занялись и другие ученые. В 1868 году французский астроном Жан Жансен (1824-1907) и его английский коллега Джозеф Локьер (1836-1920) независимо друг от друга обнаружили в солнечном спектре неизвестную ранее желтую линию. Некоторое время полагали, что она принадлежит какому-либо из известных химических элементов, однако все попытки обнаружить "солнечную" линию в спектрах земных веществ не увенчались тогда успехом, и спустя три года ученое сообщество согласилось с предположением Локьера о том, что новую линию дает какой-то неизвестный химический элемент. Ввиду необычных обстоятельств его открытия он получил название "гелий", что в переводе с греческого означает "солнечный". Обнаружить гелий на Земле впервые удалось только в 1895 году - через 27 лет после его открытия на Солнце.

Спектральный анализ позволил также хорошо изучить химический состав и столь удаленных объектов как звезды. В этой связи интересно упомянуть, что в 1844 году французский философ Огюст Конт (1798-1857) утверждал, что люди никогда ничего не будут знать о звездах, кроме того, что они существуют.

*"И кто б подумать мог,
Что было у тебя великое мгновение,
Когда ты озарил
Все небо вдруг падучею звездою,
Забывтый в уголке музея темный камень."
Есано Тэкан (из японской поэзии)*

Представления о веществе, из которого сформировались планеты и их спутники, основываются не только на теоретическом и экспериментальном моделировании фазового состава газо-пылевой туманности. Решающую роль в понимании того, каким было это исходное вещество, сыграло исследование метеоритов. Оказалось, что **несмотря на разнообразие встречающихся метеоритов, их средний химический состав практически идентичен химическому составу условной каменно-металлической составляющей Солнца**, т.е. той части солнечного вещества, которая потенциально при остывании образовала бы каменные и металлические частицы. **Это указывает на глубокое родство солнечного и метеоритного вещества и позволяет рассматривать метеориты как образцы наименее измененного, или, как иногда говорят, "примитивного" вещества первичной туманности.**

Метеориты являются наиболее древними "документами" природной истории, которые в настоящее время доступны прямым исследованиям в земных лабораториях. **Возраст пород, которыми сложены метеориты, почти всегда составляет около 4,5 млрд. лет - они возникли в ходе одного и того же глобального процесса, знаменовавшего самые ранние стадии формирования Солнечной системы** (методы определения возраста горных пород рассмотрены в разделе 2.11). Если бы был выявлен метеорит с надежно установленным существенно большим возрастом, то его следовало бы считать "пришельцем" из других частей Галактики. Но пока ни одного такого метеорита из более чем 10 тысяч, хранящихся в земных коллекциях, не обнаружено.

Изучение метеоритов позволяет приподнять занавес неизвестности над самыми ранними этапами эволюции Солнечной системы. Безусловно, эти удивительные природные объекты заслуживают подробного знакомства с ними, чему и посвящен этот раздел.

КЛАССИФИКАЦИЯ МЕТЕОРИТОВ

Каменное и металлическое вещество в метеоритах не утратили своей индивидуальности и в зависимости от их количественного соотношения метеориты традиционно разделяют на "каменные" (около 96% от общего числа метеоритов), "железо-каменные" (1%) и "железные" (3%). Заметим, что присутствие металлического железа - одна из характернейших черт, отличающая метеориты от горных пород земной коры, в которых самородное железо отмечается исключительно редко. Среди каменных метеоритов выделяют два главных типа - резко преобладающие "хондриты" (88%) и сравнительно редкие "ахондриты" (8%). Все вышеупомянутые типы метеоритов, в свою очередь, разбиваются на более мелкие классификационные группы.

Хондриты представляют собой, по-существу, механическую смесь каменного и металлического материала, при этом первый резко преобладает. Свое название хондриты получили из-за наличия в их внутренней структуре так называемых "хондр" - маленьких шариков, различающихся по своему составу, микростроению и происхождению. Помимо наличия хондр от всех других типов метеоритов хондриты отличаются еще двумя очень важными особенностями: а) внутренняя структура хондритов свидетельствует, что эти породы никогда после своего образования не пребывали в расплавленном состоянии, т.е. не испытывали прогрева выше 900° С; б) хондриты резко отличаются от остальных метеоритов тем, что именно их состав подобен "солнечному".

Среди хондритов особого упоминания заслуживает сравнительно редкая группа углистых хондритов (около 8% от общего числа метеоритов). В целом, их химический состав близок к составу хондритов других групп, но углистые хондриты отличаются наличием в их составе большого количества летучих веществ, т.е. веществ, переходящих в газообразное состояние при небольшом нагревании, в первую очередь - находящейся в связанном состоянии воды. Еще одной особенностью углистых хондритов является присутствие в них небольших количеств органических (углеродсодержащих) веществ, с чем, собственно, и связано название этой группы метеоритов (см. также разделы 5.6 и 6.2). Наличие органических и летучих веществ свидетельствует о том, что углистые хондриты никогда в своей истории не испытывали прогрева свыше 400° С.

Ахондриты представляют собой каменные метеориты, которые, в отличие от хондритов, совершенно лишены хондр. Внутренняя структура ахондритов показывает, что на каком-то этапе своей истории они испытали полное переплавление, и это отчасти сближает их с земными магматическими породами.

Так называемые железные метеориты состоят из железо-никелевого сплава с редкими вкраплениями других минералов, в том числе и силикатных. В железо-каменных метеоритах силикатный и металлический материал представлены примерно в равных количествах.

В отличие от хондритов, все другие типы метеоритов (ахондриты, железо-каменные и железные) обладают химическими составами, резко отличающимися от "солнечного". Отдельные типы нехондритовых метеоритов резко различаются по составу и между собой. Но, как оказалось, осредненный химический состав всех нехондритовых метеоритов довольно хорошо соответствует среднему составу хондритов. Это указывает на то, что ахондриты, железо-каменные и железные метеориты образовались в результате дифференциации (т.е. разделения) хондритового вещества. С генетической точки зрения метеориты следует классифицировать на "недифференци-

рованные" и "дифференцированные". К первым относятся только хондриты (в т.ч. и углистые), а ко вторым - ахондриты, железо-каменные и железные метеориты. Вопрос о том, где и как могла произойти дифференциация первичного хондритового материала, рассматривается в разделе 2.8.

МЕТЕОРИТЫ - ОСКОЛКИ АСТЕРОИДОВ.

Метеориты, находясь в космическом пространстве, постоянно подвергаются воздействию так называемых "космических лучей", представляющих собой, в основном, протоны высокой энергии. Бомбардировка протонами приводит к ряду изменений в приповерхностных слоях метеоритных тел, в частности к образованию некоторых необычных изотопов (^{21}Ne , ^{36}Ar и др.), и, естественно, чем дольше находится метеорит в открытом космосе, тем больше в нем накапливается таких изотопов. Это открывает возможность устанавливать продолжительность времени пребывания метеоритов в космосе в качестве самостоятельных небесных тел. Результаты соответствующих исследований оказались совершенно неожиданными - из всех изученных каменных метеоритов ни один не находился в открытом космосе более 60 млн. лет! А это означает, что почти все четыре с половиной миллиарда лет своего существования метеориты провели в недрах каких-то других тел. Представление о метеоритах, как о неких первичных планетезиমাлях, случайно избежавших общей "участи" и не вошедших в состав более крупных небесных тел, сформировавшихся 4,5 млрд. лет, оказалось несостоятельным.

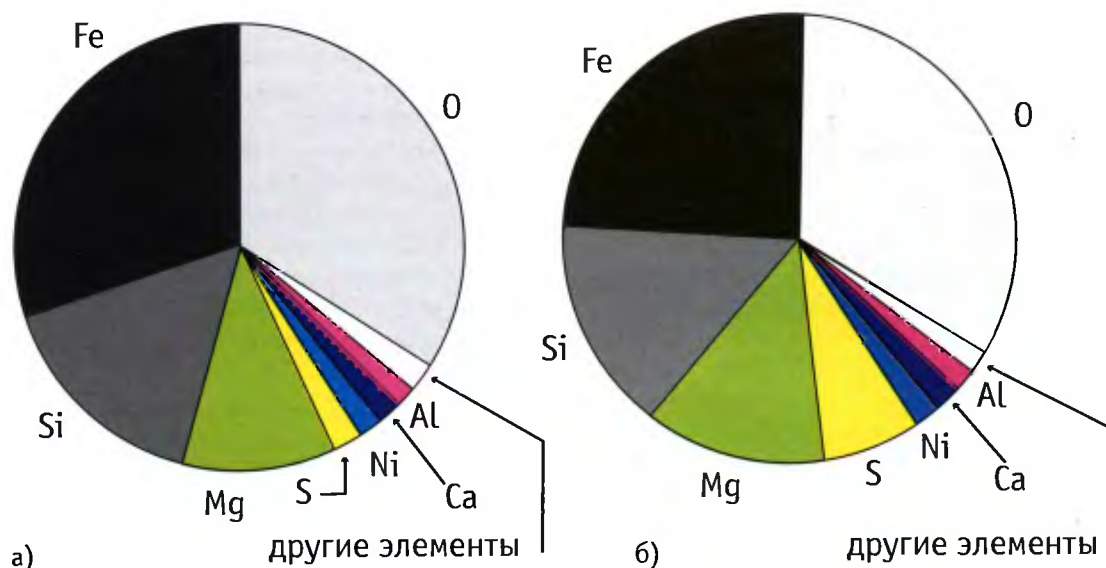
Итак, где-то в пределах Солнечной системы должен постоянно происходить процесс высвобождения метеоритов. Теоретически это может происходить: а) за счет таяния комет, представляющих собой ледовые тела, "загрязненные" небольшой долей каменистого вещества; б) за счет выброса материала с поверхности планет в результате сильных взрывов при их столкновениях с другими небесными телами; в) за счет образования осколков при взаимных столкновениях астероидов. Кометы, однако, не могут быть источником подавляющего большинства метеоритов, так как ледовые недра комет всегда были очень холодными, а особенности внутренней структуры почти всех метеоритов свидетельствуют о том, что они в течение своей истории претерпевали периоды прогрева. Не подходят на роль "родительских тел" метеоритов и планеты - ведь взрывы, способные выбросить фрагменты горных пород с поверхности планет в космическое пространство, должны были быть столь мощными, что метеоритные породы непременно несли бы следы очень сильных ударных воздействий, а этого почти никогда не наблюдается.

Родительскими телами подавляющего большинства метеоритов, по видимому, являются астероиды. Такая гипотеза хорошо согласуется со всеми известными ныне фактами. Длительный и глубокий прогрев, который испытали породы большинства метеоритов, объясняется разогревом недр астероидов за счет распада радиоактивных элементов. Отсутствие же следов сильных деформаций в метеоритных породах связано с тем, что для безвозвратного разлета осколков достаточно даже слабых столкновений астероидов.

СРЕДНИЙ ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ МЕТЕОРИТОВ (а) И УСЛОВНОЙ КАМЕННО-МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ СОЛНЕЧНОГО ВЕЩЕСТВА (б)

Как видно из диаграмм, состав каменно-металлической части солнечного вещества и средний состав метеоритов очень похожи. Помимо отображенных на диаграммах восьми главных химических элементов, хорошие совпадения содержаний отмечаются и для других менее распространенных элементов.

Существенные различия в содержании главных элементов касаются только содержания серы (в метеоритах серы примерно в три раза меньше). По-видимому, содержание этого элемента в не вошедшем в состав Солнца остатке туманности было таким же, как и на самом Солнце, однако ввиду очень высокой летучести серы, она, подобно водороду и гелию, частично рассеялась в космическом пространстве.



ПУТИ АККРЕЦИИ

Ледовые, каменные и металлические частицы, которые не вошли в состав Солнца, а остались в окружающем его тонком протопланетном диске, уже никогда в ходе дальнейшей эволюции не теряли своей индивидуальности. Особенности их поведения предопределили различия в химическом составе образовавшихся из них тел - планет и их спутников, астероидов и комет. Прежде всего, отметим, что протопланетный диск состоял из двух главных частей: внутренней (околосолнечной), в которой присутствовали только каменные и металлические частички, и внешней, в которой присутствовали частички всех трех типов.

Отсутствие ледовых частичек в околосолнечной зоне, простиравшейся до пояса астероидов включительно, легко объяснимо - здесь было очень жарко, поэтому все льды просто испарились. Аккреции в этой области подвергались только каменные и металлические частицы, и, следовательно, здесь сформировались тела, имеющие высокую плотность - планеты земной группы (Меркурий, Венера, Земля и Марс), Луна и астероиды. Во внешней зоне протопланетного диска было гораздо холоднее, следовательно, в ней существовали ледовые частицы. Более того, их было даже гораздо больше, чем каменных и металлических частиц вместе взятых, поэтому здесь сформировались тела, состоящие преимущественно из льдов и характеризующиеся низкой плотностью: планеты-гиганты, многие их спутники, а также кометы. Двум самым крупным планетам - Юпитеру и Сатурну - благодаря мощному гравитационному полю, удалось удержать и значительную часть находившихся в этой части диска газов, т.е. гелия и водорода.

Планеты земной группы сформировались из тех же каменных и металлических частиц, что и метеориты, поэтому, зная среднюю плотность каждой из планет, а также среднюю плотность силикатного ($3,3 \text{ г/см}^3$) и железо-никелевого ($7,8 \text{ г/см}^3$) материала в метеоритах, можно рассчитать, какую долю при формировании планет составляли металлические частицы, а какую - каменные. Данные по средней плотности планет земной группы свидетельствуют о том, что каменные и металлические частицы были распределены в пределах внутренней части протопланетного диска неравномерно. В целом, доля металлических частиц существенно снижалась с увеличением расстояния от Солнца, составляя около $2/3$ в области современного Меркурия, лишь около $1/5$ в области Марса и еще меньше в поясе астероидов.

В той части диска, в которой произошла аккреция Земли, соотношение каменных и металлических частиц (по их массе) составляло примерно 2:1 - об этом убедительно свидетельствует средняя плотность нашей планеты. Вопрос об исходном материале, из которого сформировалась Земля, во всяком случае в первом приближении, можно считать решенным, однако остается неясным в какой последовательности происходила аккреция каменных и металлических частиц. На этот счет в современной науке существуют два прямо противоположных представления, лежащих в основе двух конкурирующих моделей аккреции - "гомогенной" и "гетерогенной".

Согласно гипотезе гомогенной (т.е. однородной) аккреции, каменные и металлические частицы соединялись в планетезимали одновременно, а сформировавшиеся при этом планеты, в том числе и наша Земля, первоначально представляли собой однородно перемешанные каменно-металлические шары. Современное же разделение планетных тел на внутреннюю металлическую (ядро) и внешнюю каменную (мантия и кора) части, по мнению сторонников гипотезы гомогенной аккреции, является вторичным. То, что металлическое вещество, первоначально распределенное по всему объему тела планеты, смогло каким-то образом собраться в его центре, особого удивления у ученых не вызывало. Вследствие распада радиоактивных элементов, находившихся в недрах планет, выделялось большое количество тепла, и это влекло за собой плавление металлического компонента, который является несколько менее тугоплавким, чем каменный. Поскольку металлический расплав тяжелее силикатного материала, он просто "стекал" вниз, т.е. к центрам планет, в то время как силикатный - наоборот, "всплывал" вверх и собирался в их периферийных зонах.

Гипотеза гомогенной аккреции была впервые отчетливо сформулирована в начале пятидесятых годов выдающимся американским космохимиком Гарольдом Клейтоном Юри (1897-1981). До этого сходные представления о формировании Земли из однородно перемешанных частиц высказывал наш соотечественник Отто Юлиевич Шмидт и некоторые другие ученые, а после Юри эта идея активно разрабатывалась многими исследователями на протяжении более двух десятилетий.

Однако с конца шестидесятых годов стала набирать популярность и другая гипотеза - **гипотеза гетерогенной (т.е. неоднородной) аккреции, согласно которой металлические частицы соединялись в планетезимали гораздо эффективнее, чем каменные.** В качестве причин, по которым аккреция металлических частиц происходила быстрее, называются взаимное притягива-

ние этих частиц друг к другу при высоких температурах и магнитное взаимодействие - при сравнительно низких. Из металлических частиц довольно быстро выросли металлические "зародыши" планет, которые после достижения ими критических размеров "вычерпали" за счет гравитационного притяжения из окружающего пространства все остальные планетезимали. **В рамках этой гипотезы разделение Земли и других планет на каменную и металлическую части считается изначальным.**

В настоящее время более популярна гипотеза гетерогенной аккреции, но это отнюдь не значит, что наука сделала свой окончательный выбор. Не исключено, что аккреция Земли, а также планет земной группы происходила в соответствии с каким-то промежуточным сценарием. Как мы увидим в дальнейших разделах курса, каждая из двух конкурирующих гипотез имеет свои сильные и слабые стороны.

Время, в течении которого из протопланетного диска сформировались планеты, оценивается по-разному. Согласно гетерогенной модели это произошло всего за несколько десятков или сотен тысяч лет, согласно гомогенной модели - этот процесс растянулся на десятки или даже первые сотни миллионов лет. Но в любом случае по космическим меркам, **по сравнению с общим временем существования Солнечной системы время формирования планет было весьма коротким.**

РАЗДЕЛЕНИЕ (ДИФФЕРЕНЦИАЦИЯ) ХОНДРИТОВОГО ВЕЩЕСТВА В НЕДРАХ КРУПНЫХ АСТЕРОИДОВ (см, рисунок сверху)

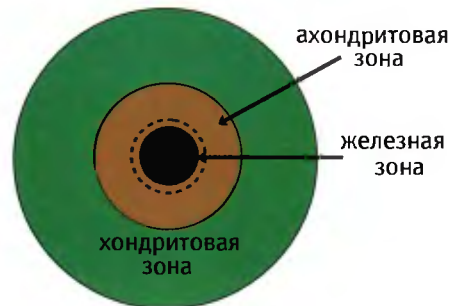
88% выпадающих на Землю метеоритов представлено хондритами, из чего следует, что астероиды, являющиеся родительскими телами метеоритов, состоят в основном из недифференцированного "примитивного" материала. В то же время, 12% метеоритов (ахондриты, железо-каменные и железные) представлено дифференцированным материалом, и, по всей вероятности, дифференциация исходного хондритового вещества произошла в недрах крупных астероидов на самых ранних этапах их эволюции.

Предполагается, что астероиды первоначально представляли собой планетезимали, сложенные только хондритовым материалом. Распад радиоактивных элементов, содержащихся в этом материале, приводил к его разогреву. При небольших размерах планетезималей выделявшееся тепло рассеивалось в окружающее пространство, но если планетезимали были достаточно велики, то в их центральных наиболее раскаленных частях начиналось плавление хондритового материала. При этом образовывалась две смешивающихся расплава - силикатный и металлический. Силикатный расплав "всплывал" к верхней границе расплавленной зоны, а металлический расплав, напротив, "тонул" к самому центру планетезимали. После остывания и кристаллизации расплавов астероид, как это показано на рисунке, будет представлять собой тело, состоящее из железного ядра, окружающей его силикатной ахондритовой оболочки и не затронутой процессами дифференциации внешней хондритовой оболочки. Такой путь образования дифференцированных метеоритов косвенно свидетельствует в пользу гомогенной модели аккреции планет.

ОЦЕНКА ИСХОДНЫХ СООТНОШЕНИЙ КАМЕННОГО И МЕТАЛЛИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА ПРИ АККРЕЦИИ ПЛАНЕТ ЗЕМНОЙ ГРУППЫ

При расчетах исходных соотношений каменного и металлического материала учитывается не истинная средняя плотность планет, а их средняя плотность, приведенная к нулевому давлению, т.е. плотность, которую планеты имели бы, если бы их недра не были сжаты под давлением вышележащих слоев.

Установив таким способом количественные соотношения каменного и металлического материала в составе планет земной группы, можно в первом приближении построить модели их внутреннего строения. Из общего ряда резко выделяется Луна, почти целиком состоящая из силикатного материала. Возможные объяснения такого состава Луны рассмотрены в разделе 2.9.



| Планета | Средняя плотность * (г/см ³) | Металл (%) | Силикаты (%) |
|----------|--|------------|--------------|
| Меркурий | 5,3 | 65 | 35 |
| Венера | 3,96 | 29 | 71 |
| Земля | 4,07 | 33 | 67 |
| Луна | 3,34 | 2 | 98 |
| Марс | 3,73 | 20 | 80 |

* - средняя плотность приведена к нулевому давлению.

ПЛАНЕТА ЛУНА: "СЕСТРА", "ДОЧЬ" ИЛИ "ПЛЕННИЦА" ЗЕМЛИ?

Обстоятельства рождения нашей планеты невозможно выяснить, не установив происхождение ее загадочной и прекрасной спутницы - Луны. Вопрос же об образовании Луны пока еще очень далек от своего разрешения - существует лишь множество различных версий этого события, которые могут быть сведены к трем главным гипотезам: 1) захват Луны гравитационным полем Земли; 2) отрыв Луны от Земли; 3) совместное образование Земли и Луны. Разумеется, как теория образования Солнечной системы в целом, так и теория образования ее отдельного звена - системы Земля-Луна, должны хорошо согласовываться не только с данными небесной механики, но и с данными космохимии. В частности, любая гипотеза происхождения Луны должна объяснить, почему она почти нацело сложена каменным (силикатным) материалом, в то время как почти треть массы земного шара составляет металлическое вещество.

Гипотеза захвата Луны подразумевает, что она сформировалась как небесное тело совершенно независимо от Земли в какой-то другой части Солнечной системы - скорее всего, в районе современного пояса астероидов. Затем, под действием гравитационного поля гигантского Юпитера, орбита Луны изменилась и приобрела вытянутую форму. Луна стала регулярно пересекать земную орбиту, и однажды Земля и Луна оказались столь близко друг от друга, что наша планета захватила этот, в сущности, посторонний астероид в качестве своего спутника. Косвенным аргументом в пользу гипотезы захвата Луны являлось то, что астероиды, пересекающие земную орбиту, действительно существуют. С этих позиций легко объяснить небольшую плотность Луны, указывающую на то, что доля металлического материала в ее составе очень невелика. Это не характерно для планет земной группы, и, наоборот, судя по метеоритам, скорее, присуще астероидам. Хотя гипотеза захвата Луны легко объясняет ее каменный состав (она просто "досталась" Земле такой, какая есть), большинство ученых все же считало, что происхождение системы Земля-Луна, так же как и происхождение всей Солнечной системы, следует объяснять естественными эволюционными процессами, а не случайным стечением различных обстоятельств. Но основным аргументом, который фактически сокрушил гипотезу захвата Луны, явились сухие цифры математических расчетов: было показано, что гравитационный захват Луны Землей исключительно маловероятен.

В настоящее время почти никто не сомневается, что Луна является не чужеродной "пленницей", а близкой "родственницей" Земли, образовавшейся в этой же области Солнечной системы. Спор идет о том, кем именно приходится Луна нашей планете - "дочерью", как предполагают сторонники гипотезы отрыва, или же "сестрой", как считают приверженцы гипотезы совместного образования Земли и Луны.

Гипотеза отрыва Луны от Земли была впервые высказана в конце XIX века английским астрономом Джорджем Хаурдом Дарвином (1845-1912), сыном выдающегося естествоиспытателя Чарльза Дарвина. На первый взгляд, сама идея отрыва нашего спутника от Земли кажется совершенно невероятной, но ни сам Дарвин, ни его последователи и не утверждали, что Луна отделилась от нашей планеты в виде уже сформировавшегося планетного тела. Подразумевалось, что с поверхности Земли произошел выброс в космическое пространство материала, из которого в дальнейшем путем аккреции и образовалась Луна. Выброс в космос такой большой массы земного материала мог произойти только в случае, если наша планета какое-то время находилась в состоянии ротационной неустойчивости, т.е. Земля вращалась столь быстро, что находившийся в ее экваториальном поясе материал под действием центробежных сил оторвался в окружающее пространство.

Австралийский геолог А. Рингвуд показал, что гипотеза отрыва Луны от Земли согласуется с гипотезой гомогенной аккреции нашей планеты. После формирования однородно перемешанного силикатно-металлического шара его недра стали разогреваться в связи с выделением тепла при распаде радиоактивных элементов, а также по некоторым другим причинам. По мнению Рингвуда, в тех физико-химических условиях, которые царили в это время в земных недрах, металлическое вещество начинало плавиться раньше, чем силикатное и после образования капель железо-никелевого расплава они неизбежно должны были "просочиться" к центру планеты, тогда как твердые, но легкие силикаты должны были "всплыть" вверх. С точки зрения механики это означает, прежде всего, перераспределение масс во вращающемся теле (подобно тому, как фигуристка, выполняющая вращение, прижимает к себе руки для того, чтобы раскрутиться). В силу закона сохранения момента количества движения вращение Земли должно было резко ускориться. Так как в результате вышеописанных процессов у периферии планеты оказалось преимущественно силикатное вещество, то именно оно и было выброшено в окружающее пространство. В дальнейшем из этого силикатного материала сформировалась Луна.

Гипотеза совместного образования Луны и Земли, напротив, согласуется с гипотезой гетерогенной аккреции нашей планеты. Подразумевается, что Луна аккрецировала одновременно с силикатной оболочкой Земли (мантией). К этому времени неаккрецировавших железо-никелевых частичек уже

почти не оставалось - они были сосредоточены в образовавшемся несколько ранее металлическом зародыше Земли (ядре), чем и объясняется силикатный состав нашего спутника. Согласно этой гипотезе Луна образовалась из той части каменных планетезималей, которые так же, как и планетезимали, сформировавшие мантию, притягивались к растущему зародышу Земли под действием его гравитационного поля, но имели такую скорость и направление своего движения, что не падали на нее, а захватывались на околоземные орбиты в качестве спутников. В дальнейшем из бесчисленного роя таких спутников и сформировалась путем их аккреции Луна. В настоящее время большинство исследователей придерживаются именно таких представлений о происхождении Земли и Луны. Заметим, однако, что никакие научные проблемы не могут быть решены "голосованием".

Как гипотеза отрыва Луны от Земли, так и гипотеза их совместного образования, требуют объяснения вращения системы Земля-Луна в ту же сторону, в которую вращается Солнечная система в целом. Объяснение этого факта в рамках обеих гипотез основывается на анализе изменения моментов количества движения частиц, сформировавших систему Земля-Луна, и ввиду сложности математических выкладок выходит за рамки настоящего курса.

Каким бы путем ни сформировалась система Земля-Луна, вся ее последующая динамическая эволюция предопределяется так называемыми приливными взаимодействиями, в результате которых Земля постепенно замедляет свое осевое вращение, а Луна постепенно удаляется от Земли.

ПРИЛИВНЫЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В СИСТЕМЕ ЗЕМЛЯ-ЛУНА

"В кипящей пене валуны,
Волна блистая заходила -
Ее уж тянет, тянет сила
Всходящей за морем луны."

И. Бунин

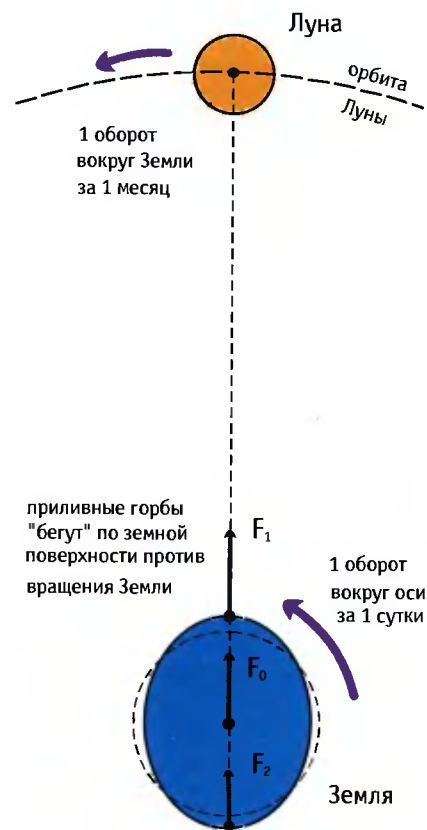
Сила притяжения F_0 , действующая со стороны Луны на единичную массу в центре Земли, меньше, чем сила F_1 , действующая на такую же массу, находящуюся в наиболее близкой к Луне точке земной поверхности, и больше, чем сила F_2 , действующая на единичную массу в наиболее удаленной от Луны точке земной поверхности. Если вычесть из сил F_1 и F_2 составляющую F_0 , то станет очевидно, что форма Земли несколько вытягивается вдоль линии, соединяющей центры масс двух тел. При этом один "горб" должен быть направлен в сторону Луны, а другой - в противоположном направлении. Эти горбы проявлены как в твердом теле планеты, так и в водной массе Мирового океана.

Так как Земля вращается вокруг своей оси значительно быстрее, чем Луна вокруг Земли, то оба горба бегут по поверхности нашей планеты в направлении противоположном ее вращению, вызывая морские приливы, и приводя к медленному торможению вращения Земли. При этом торможение Земли в большей мере обусловлено внутренним трением в твердом теле Земли, чем перемещением водных масс. Предположение, о том что земной шар систематически замедляет свое вращение в результате приливных взаимодействий с Луной, впервые высказал еще в XVIII веке выдающийся немецкий философ Иммануил Кант. В настоящее время замедление вращения Земли измерено инструментально.

Если небольшая Луна оказывает столь заметное влияние на осевое вращение Земли, то, очевидно, что гораздо более массивная Земля должна оказывать гораздо более сильное влияние на осевое вращение Луны. Прежде всего это влияние проявлено в постоянной ориентации Луны по отношению к Земле одной и той же, т.н. "видимой" стороной. Первоначально Луна вращалась вокруг своей оси с другой скоростью, но за счет замедляющего приливного влияния Земли она уже давно синхронизировала свое вращение вокруг оси с периодом своего обращения вокруг Земли.

Замедление вращения Земли имеет очень важное космогоническое следствие - в силу того, что суммарный момент количества движения в системе Земля-Луна должен оставаться постоянным, оно должно компенсироваться увеличением расстояния от Земли до Луны. Конечным результатом динамического развития системы Земля-Луна будет такое состояние, когда вращение обоих тел будет строго синхронизировано - период одного оборота Земли вокруг своей оси будет равен периоду обращения Луны вокруг Земли, т.е. не только Луна будет обращена к Земле одной и той же стороной, но и Земля к Луне тоже.

Заметим, что если бы радиус лунной орбиты был меньше 38 тысяч км, то тогда Луна бы вращалась вокруг Земли быстрее, чем Земля вокруг своей оси, а приливные горбы не тормозили бы вращение земного шара, а, наоборот, ускоряли бы его. Увеличение момента количества движения системы вследствие ускорения вращения Земли компенсировалось бы приближением Луны к Земле вплоть до ее падения на земную поверхность.



ВЕЛИКИЙ СПОР ГЕОЛОГОВ И ФИЗИКОВ

"В эту глыбу
Земляную
Сила неба
Жизнь вложила..."
Много ль время
Пролетело?
Много ль время
Есть впереди?"
А. Кольцов

Разумеется, люди всегда старались представить не только то, как образовалась наша Земля, но и то, как долго она существует. Ныне общеизвестно, что возраст Земли и Солнечной системы составляет около 4,5-4,6 млрд. лет. Это удалось установить с помощью методов радиоизотопного датирования, о которых пойдет речь в следующем разделе. Но изотопные методы были разработаны лишь в XX веке, а как же пытались определить возраст Земли ученые прошлых эпох?

Для решения проблемы возраста Земли применялись два главных подхода, которые условно можно назвать "геологическим" и "физическим". В первом случае ученые старались оценить продолжительность тех геологических процессов, которые привели к образованию наблюдаемых ныне в природе горных пород и геологических структур. Понятно, что **возраст Земли должен быть по крайней мере не меньше, чем продолжительность происходивших на ней процессов**. К концу XIX века многие геологи пришли к выводу, что наша планета существует, как минимум, несколько сотен миллионов, а то и более миллиарда лет.

Второй подход заключался в оценке продолжительности некоторых физических процессов космического масштаба, заведомо ограничивающих существование Земли. Например, предпринимались попытки определить время горения Солнца, ведь не вызвало никакого сомнения ни у сторонников небулярной гипотезы, ни у приверженцев катастрофических моделей, **что Земля не может быть старше Солнца**. К концу XIX века многие физики были уверены, что возраст Земли, скорее всего, составляет 20-25 млн. лет и уж, в любом случае, не превышает 100 млн. лет, т.е. является значительно меньшим, чем предполагали геологи.

Острая дискуссия, которую, начиная с середины XIX века, вели сторонники "геологического" и "физического" возрастов Земли, вошла в историю науки как один из "великих геологических споров". Обе стороны приводили, казалось, неопровержимые доказательства своей правоты, но полученные результаты были взаимоисключающими. Установить же истину удалось только в XX веке.

МУДРОСТЬ ДРЕВНИХ

Еще античные мыслители полагали, что Земля существует очень давно, а некоторые из них даже считали ее вечной. Их представления отнюдь не были голословными - они опирались на вполне конкретные наблюдения. Так, еще в V в. до н.э. знаменитый древнегреческий историк Геродот (около 485-425 гг. до н.э.), которого часто называют "отцом истории", наблюдая за скоростью прироста дельты Нила в результате ежегодных наводнений, осознал, что этот процесс длится непостижимо долгое по человеческим меркам время.

ДЕНЬ И ЧАС СОТВОРЕНИЯ МИРА

Античные представления об очень древнем возрасте Земли были отброшены с наступлением эпохи христианства. Главным источником знаний в средневековой Европе стала Библия, и хотя в ней нигде прямо не говорилось, когда именно Бог сотворил Землю, тем не менее библейские тексты содержали ряд косвенных указаний на это, а потому были предприняты неоднократные попытки определить возраст Земли на основании тщательного анализа текста Библии. Одна из наиболее известных оценок "библейского" возраста Земли была выполнена в середине XVII столетия североирландским епископом Джеймсом Ашером (1581-1656). Ашер не только скрупулезнейшим образом исследовал библейские тексты, но и изучил многие древние исторические документы, проанализировал и сопоставил даты имевших место в древности затмений и существовавшие у разных народов системы календарей. В итоге он установил, что Земля была сотворена Всевышним 26 октября 4004 г. до н.э. в 9 часов утра. Точность, с которой был произведен этот расчет, всегда вызывала некоторую иронию, тем не менее, оценка Ашера в дальнейшем считалась наиболее близкой к истине.

НАУЧНОЕ "ПОДТВЕРЖДЕНИЕ" СЛОВА БОЖЬЕГО

Представление о том, что Земля и Вселенная были сотворены Всевышним примерно шесть тысяч лет назад, прочно утвердилось в сознании европейцев, причем вплоть до XIX века именно в таком возрасте нашей планеты было уверено и большинство ученых. И причиной этому было вовсе не слепое следование религиозной догме - библейская оценка возраста Земли, как казалось, имела очень солидное научное подтверждение.

После того, как получила широкое признание гипотеза Канта-Лапласа, стало очевидным, что Земля и Солнце образовались примерно в одно и то же время, во всяком случае, не вызывало сомнений то, что Земля не может быть старше Солнца. Но каков возраст Солнца? Что заставляет его гореть?

В XX веке стало известно, что источником энергии Солнца являются протекающие в его недрах термоядерные реакции превращения водорода в гелий. Было установлено также, что водородного "топлива" должно хватить Солнцу примерно на 10 млрд. лет, из которых 4,5 млрд. лет уже прошли. Однако в XIX столетии наука была очень далека от подобных заключений.

В начале XIX века предполагалось, что Солнце горит в результате обычной реакции окисления, протекающей в его недрах, т.е. за счет сгорания какого-либо горючего вещества. Поскольку масса Солнца была к тому времени известна, стали предприниматься попытки рассчитать продолжительность его возможного горения. Так было показано, что если бы Солнце состояло из угля, то оно при существующей энергоотдаче должно было бы сгореть всего за полторы тысячи лет. Этого не хватало, даже чтобы обеспечить библейскую продолжительность существования Земли. Но другие, более калорийные виды топлива, позволяли увеличить время возможного горения Солнца до 10 тысяч лет. Такое значение вполне устраивало как теологов, изучавших Слово Божье, так и физиков и астрономов, изучавших Солнце и Солнечную систему. Однако эта оценка совершенно не устраивала геологов, изучавших саму Землю и процессы, протекающие на ее поверхности.

А ЧТО ДУМАЛИ ГЕОЛОГИ?

Одним из первых, кто подверг очень серьезному сомнению библейские представления о возрасте Земли, был шотландский геолог Джеймс Геттон (1726-1797). Он обратил внимание на то, что образование реально наблюдаемых в природе толщ песчаников и других осадочных пород вследствие размыва реками горных массивов и последующего переотложения обломочного материала требует чрезвычайно больших интервалов времени, намного превышающих человеческое воображение.

Сам Геттон, правда, не уточнял, сколь именно велики эти интервалы, но его последователи, которые в первой половине XIX века провели подобные расчеты, пришли к совершенно ошеломляющим результатам - продолжительность процессов осадконакопления должна исчисляться миллионами лет! Из этого следовало, что возраст нашей планеты, на поверхности которой происходили все эти процессы, должен был быть, по крайней мере, не меньше.

ЛОРД КЕЛЬВИН ПРОТИВ СЭРА ДАРВИНА

Уильям Томпсон (1824-1907), впоследствии известный как лорд Кельвин, был уже широко известен своими теоретическими и практическими достижениями в физике, когда в круге его научных интересов оказалась проблема возраста Земли и Солнца. В 1853 году Кельвин присутствовал на лекции, где его соотечественник Джеймс Уотерстон высказал предположение, что источником энергии является не только процесс окисления солнечного вещества, но и падение на его поверхность метеоритов. Эта идея, совершенно ошибочная по своей сути, произвела на Кельвина большое впечатление. Сделав ряд допущений относительно плотности несуществующего в действительности околосолнечного метеоритного облака, Кельвин рассчитал, что энергия падающих метеоритов могла бы поддерживать свечение Солнца в течение 300 тысяч лет. Это было уже слишком много для теологов, но по сравнению еще очень мало для геологов...

В 1859 году вышла из печати книга сэра Чарльза Роберта Дарвина (1809-1882) "Происхождение видов", в которой излагалась теория биологической эволюции, а в качестве движущей силы эволюционного процесса рассматривался естественный отбор. Подобный механизм эволюции требовал огромных интервалов времени. Неизбежным выводом новой эволюционной теории была ошибочность не только "библейского" возраста Земли, но и оценок, полученных лордом Кельвином. Сам Дарвин, который был не только великим биологом, но и наблюдательным геологом, на основании оценки продолжительности отложения осадков и масштаба размывания поверхности суши на территории Англии, пришел к выводу, что возраст Земли составляет не менее 500 млн. лет. Это настолько расходилось с представлениями того времени, что на голову ученого обрушилась острейшая критика как со стороны Церкви, так и со стороны официальной Науки.

Через год после того, как книга Дарвина вышла из печати, Кельвин сломал ногу и в течение нескольких месяцев вынужден был пролежать в постели, что позволило ему подробней ознакомиться с эволюционной теорией Дарвина. Идеи Дарвина, как когда-то идеи Уотерстона, произвели на Кельвина большое впечатление, и он решил попытаться найти какой-нибудь неучтенный источник энергии, который мог бы существенно продлить срок "горения" Солнца. Через некоторое время Кельвин пришел к выводу, что таким источником энергии должно быть медленное сжатие Солнца под действием его собственного притяжения. Сжатие вещества, как известно, приводит к его разогреву, а сильный разогрев - к свечению. Расчеты Кельвина показали, что возраст Солнца, а значит и Земли, скорее всего, составляет 20 млн. лет. Максимальная величина, которую допускал лорд Кельвин - 100 млн. лет, но большее представлялось совершенно невозможным.

Кроме опосредованных оценок возраста Земли через время горения Солнца, Кельвин рассчитал еще и время, необходимое для остывания Земли до современного состояния (как и все ученые того времени, он полагал, что Земля образовалась в результате конденсации из горячего газового облака и изначально была полностью расплавленной). В результате проделанных расчетов Кельвин установил, что время остывания должно было составлять от 25 до 100 млн. лет. В настоящее время известно, что многие исходные посыпки этого расчета были совершенно неверными, и, более того, в свете современных представлений о "холодном начале" Земли, сама идея такого расчета ее возраста является ошибочной. Но в XIX веке случайное совпадение результатов двух совершенно независимых расчетов воспринималось как триумф физики. Авторитет лорда Кельвина, безупречная "научность" его подходов к оценке возраста Земли сыграли свою роль: 100 миллионов лет явились той безусловной величиной, которой большинство геологов стало оценивать максимально возможную продолжительность существования нашей планеты.

Тем не менее, и в конце XIX века небольшая часть ученых, вопреки тому, что "этого не может быть", все-таки продолжала вслед за Чарльзом Дарвином считать, что возраст нашей планеты исчисляется многими сотнями миллионов лет. Они продолжали непредвзято видеть геологические факты, свидетельствовавшие именно о таком, очень древнем возрасте Земли. А то, что эти факты не вписывались в господствовавшую физическую теорию, свидетельствовало, по их мнению, о несовершенстве самой теории. В конце концов, теории должны объяснять факты, какими бы неудобными они не были, а не факты - подгоняться под теории. Некоторые из сторонников "геологического" возраста, среди которых были, кстати, как геологи, так и физики, пророчески полагали, что, скорее всего, и на Земле, и на Солнце существуют какие-то мощные источники энергии, о которых наука конца XIX века просто еще не знала.

В 1896 году Антуан Анри Беккерель (1852-1908), профессор физики из Политехнической школы в Париже, обнаружил, что соединения, содержащие уран, самопроизвольно испускают излучение, способное в темноте засвечивать фотопластинку. Так была открыта радиоактивность, и это событие стало предвестником грандиозных изменений в науке. Спустя семь лет, один из учеников Кельвина, молодой британский физик Эрнест Резерфорд (1859-1937) и независимо от него Пьер Кюри (1859-1906) из Сорбонны (Парижского университета) установили, что радиоактивность сопровождается интенсивным выделением тепла. Так на стыке XIX и XX столетий был открыт принципиально новый колоссальный источник энергии, ранее не известный физикам. Новый источник энергии, как тогда казалось, мог объяснить очень длительное горение Солнца и неполное остывание Земли в течение многих сотен миллионов лет. В 1904 году Резерфорд писал: "...время, в течение которого Земля находится при температуре, способной поддержать жизнь растений и животных, возможно много продолжительнее, чем оценка, сделанная лордом Кельвином". И хотя современные представления о внутренних источниках энергии Солнца и о термической истории Земли совершенно иные, чем в начале XX века, тем не менее, открытие радиоактивности освободило сознание ученых от многих догм и вновь поставило в центр внимания вопрос о возрасте Земли.

Радиоактивности было суждено сыграть главную роль в решении проблемы возраста Земли, но не потому, что она является источником тепла, а потому, что этот процесс лежит в основе метода радиоизотопного датирования, позволяющего ученым объективно определять длительность геологических процессов. В первые же годы исследований радиоактивности Резерфорд вместе со своим коллегой Фредериком Содди (1877-1956), обнаружили, что радиоактивный распад происходит с постоянной скоростью, не зависящей от внешних условий (температура, давление и т.д.). Время, за которое половина исходных радиоактивных изотопов распадется и превратится в дочерние, получило название периода полураспада. В 1904 году американский физик Бертрам Борден Болтвуд (1870-1927) выяснил, что уран и торий - два наиболее распространенных в природе радиоактивных элемента - после целой цепочки радиоактивных распадов превращаются в стабильный свинец. Из этого следовало, что в любых горных породах и минералах, содержащих уран или торий, содержание этих элементов со временем закономерно уменьшается, а содержание дочернего свинца, напротив, возрастает. Образно говоря, в любой содержащей радиоактивные элементы горной породе, в момент ее кристаллизации включаются своего рода радиоактивные "часы", и остается лишь найти способ как снять с них показания.

Спустя некоторое время Болтвуд догадался, что если измерить соотношение урана и свинца в каком-нибудь минерале, который по химическим причинам изначально не мог содержать свинец, то можно рассчитать, сколько времени прошло с момента кристаллизации этого минерала, а значит и всей породы. Вскоре после этого Резерфорд и Содди разработали конкретную методику, позволявшую определять возраст горных пород, и установили, что возраст некоторых горных пород превышает два миллиарда лет! Тем самым, оценка возраста Земли, полученная лордом Кельвином, была отвергнута.

В течение XX века ученые разработали еще несколько методов определения возраста горных пород (т.н. геохронологических методов), в которых измеряются соотношения других пар исходных радиоактивных и дочерних стабильных изотопов: калий-аргоновый, рубидий-стронциевый, самарий-неодимовый и другие методы. В настоящее время самый древний из надежно установленных возрастов горных пород на Земле составляет 3,9 млрд. лет - эти породы обнаружены в Антарктиде на Земле Эндерби. Период истории нашей планеты от 3,9 млрд. лет до настоящего времени иногда называют "геологическим", так как он запечатлен в каменной летописи Земли сохранившимися до наших дней горными породами.

Однако возраст горных пород, даже наиболее древних, - это еще не возраст самой планеты, ведь горные породы, образовавшиеся на самом раннем этапе земной истории, могли попросту не сохраниться из-за переплавления, эрозии и других более поздних процессов. Этот этап истории нашей планеты - между временем ее формирования как самостоятельного космического тела и временем образования наиболее древних из сохранившихся горных пород - называют "догеологическим" или "космическим" этапом. Впрочем, деление истории Земли на "космический" и "геологический" этапы весьма условно, так как новые исследования выявляют все более и более древние породы.

Но все-таки как определить возраст самой Земли, если горные породы, существовавшие на нашей планете в момент ее образования, до наших дней не сохранились? Подходы к решению этой проблемы впервые наметил английский геолог Артур Холмс (1890-1965). Упрощенно суть предложенного им метода сводится к тому, что в качестве "образца", в котором должно определяться соотношение исходных радиоактивных и дочерних стабильных изотопов используется не какая-либо конкретная горная порода, а земная кора в целом, то есть берется средняя по земной коре величина данного изотоп-

ного соотношения. В 1955 году Клара Паттерсон из Калифорнийского технологического института получила по этому методу **значение возраста Земли около 4,5-4,6 млрд. лет.** В дальнейшем этот результат неоднократно перепроверялся и подтверждался другими исследователями.

Заметим, что метод, предложенный Холмсом, основан на некоторых допущениях, которые сами по себе не могут быть строго доказаны. В частности, подразумевается, что земная кора (точнее, континентальная кора) обособилась от всего остального вещества нашей планеты сразу же после ее аккреции. Поэтому возраст Земли, определенный по этому методу, нельзя было бы считать достаточно надежным, если бы он не имел одно совершенно независимое подтверждение. **Оказалось, что подавляющее большинство хондритов - наименее измененных (недифференцированных) метеоритов - имеют возраст 4,55 млрд. лет.** Более древние метеориты не обнаружены, и **столь точное соответствие независимо определенных значений возраста Земли и возраста хондритовых метеоритов указывает, что это значение следует интерпретировать как возраст Солнечной системы.**

УРАН-СВИНЦОВЫЙ ГЕОХРОНОЛОГИЧЕСКИЙ МЕТОД

В природе встречаются два изотопа урана - ^{238}U (99,3%) и ^{235}U (0,7%), которые в результате длинных цепочек радиоактивных распадов превращаются в стабильные изотопы свинца - ^{206}Pb и ^{207}Pb , соответственно.

В уран-свинцовом геохронологическом методе чаще всего используется минерал циркон ZrSiO_4 , кристаллизующийся в процессе остывания многих типов магм. Только что кристаллизовавшийся циркон содержит значительную примесь урана, но при этом изначально совершенно не содержит свинца. В дальнейшем количество урана закономерно уменьшается, и в то же время в кристаллах циркона закономерно накапливается примесь свинца, образующегося за счет распада урана. Измерив в цирконе современное содержание изотопов урана и свинца и рассчитав их соотношения (раздельно для каждой пары), можно определить время, которое прошло с момента кристаллизации циркона, а значит, и всей породы.

ВОЗРАСТ АХОНДРИТОВ

Возраст ахондритов, как правило, несколько меньше, чем возраст хондритов, и в среднем составляет около 4,45 млрд. лет. Это и не удивительно, поскольку процесс переплавления, приведший к образованию ахондритов, мог протекать лишь в недрах довольно крупных космических объектов, а значит является более поздним процессом, чем аккреция первичных планетезималей, соответствующих по составу хондритам.

КАЛИЙ-АРГОНОВЫЙ ГЕОХРОНОЛОГИЧЕСКИЙ МЕТОД

В природе встречаются три изотопа калия - стабильные ^{39}K (93,11%) и ^{41}K (6,88%), и радиоактивный ^{40}K (0,01%). При этом ^{40}K распадается двумя различными способами: 89% превращается в ^{40}Ca , а 11% - в ^{40}Ar . Как правило, в минералах, содержащих калий, содержится и значительная первичная примесь кальция, поэтому образующийся из ^{40}K дочерний ^{40}Ca не представляет интереса для геохронологических исследований.

В калий-аргоновом методе лучше всего использовать кристаллизующиеся во время остывания магм минералы богатые калием (например, слюды). В этих минералах изначально не может быть аргона, т.к. это благородный газ, не вступающий в химические соединения, но затем он начинает накапливаться в результате распада калия. При низких температурах аргон оказывается "замурованным" внутри кристаллов, но в случае, если порода испытает сильный прогрев (около 500°C) он улетучится. После повторного охлаждения горной породы накопление аргона начнется вновь. Измерив в соответствующих минералах современные соотношения изотопов калия и аргона, можно определить время, которое прошло с момента последнего сильного прогрева горной породы. Если после своего образования горная порода не испытывала повторных прогревов, то полученный результат будет соответствовать возрасту породы, совпадая с результатом уран-свинцового датирования.

