

Лекция 7. МОДЕЛИ ОБРАЗОВАНИЯ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ

В 7-ой лекции предлагается принципиально новая модель образования Солнечной системы. Предлагается обзор проблемы, обсуждается вопрос «что такое планеты», приводится информация о некоторых других моделях образования Солнечной системы. Обсуждается модель образования горячей Земли и Солнечной системы: фрактальный характер расстояний планет от Солнца, плотность вещества в Солнечной системе, сжатие диска и критерий Джинса. Возможный механизм образования Солнечной системы, включая такие вопросы как: почему не образовалась планета Фэтон, куда “пропал” момент, сколько воды на Луне и Марсе и др.? Предложена и обсуждается «Единая последовательность: звезда - планета – спутник».

Что такое планеты?

Оказывается, такая постановка вопроса вполне своевременна и актуальна. Данные по обнаружению планет в других звездных системах и изучению планетарных туманностей – своеобразных «колыбелей» планет, полученные с помощью телескопов Хаббла и Спитцера в самые последние годы в межзвездной астрономии, вполне оправдывают привлечение внимания к такому, казалось бы, весьма тривиальному вопросу. На страницах журнала Science (McCaughrean et al., 2001) и в Internet (Lissauer, 2001) в 2001 г. разыгралась дискуссия на тему: “What is a Planet?” Эта дискуссия показала, что однозначно ответить на поставленный вопрос пока нет возможности. Вероятно, дело в том, что холодная модель образования планет находится в противоречии с данными, касающимися проблемы формирования планет, полученными в самое последнее время.

Два примера численного моделирования самогравитации.

Принято считать, что «самогравитация» проявляется лишь в том случае, если некий объем вещества имеет достаточную массу для того, чтобы самогравитация превосходила твердотельные силы и тело могло принять гидростатически равновесную (близкую к сферической) форму. В контексте модели горячей Земли это определение можно трактовать следующим образом: если объем вещества имеет массу M , такую, что $GM/R > U$, где U - теплота плавления, то планета (спутник) в процессе образования, за счет самогравитации, пройдет фазу плавления и примет при этом сферическую форму. Вещество при этом будет нагрето до температуры $T \sim M^{2/3}$.

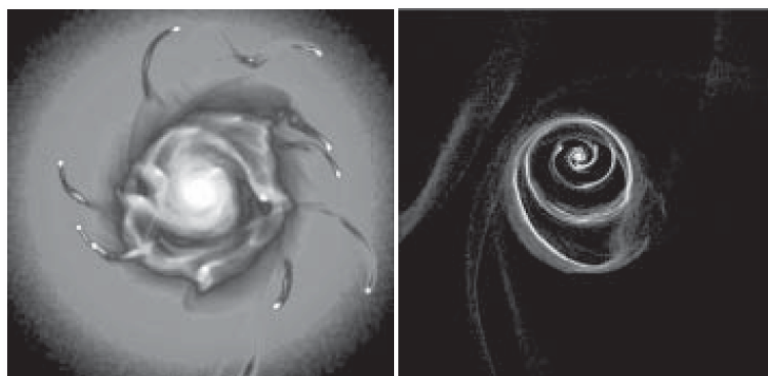


Рис. 1. Расчеты на суперкомпьютере (Снытников и др., 2002). Слева: сгустки вещества при развитии гравитационной неустойчивости. Справа: кольцеобразные структуры из частиц твердой фазы. Количество частиц в расчетах - 300 000.

В институте катализа им. Борескова СО РАН создана 3D численная модель для исследования нестационарных процессов в гравитирующей системе многих тел с газом (Снытников и др., 2002). Модель основана на решении уравнения Пуассона для

гравитационного поля, уравнения Власова для крупных тел и газодинамических уравнений. Для решения на каждом временном шаге уравнения Пуассона построен эффективный итерационный алгоритм с экстраполяцией рассматриваемых эволюционных процессов, что обеспечивает быструю сходимость при высокой точности. Приведены примеры численного решения задачи о развитии физической неустойчивости в модели плоского гравитирующего диска с учетом газовой компоненты при различных начальных условиях.

Задача решалась на суперкомпьютере, получены впечатляющие результаты (рис. 1), но они теряют смысл, - в практической постановке задачи авторами, которыми проводилось моделирование процесса образования Солнечной системы. Авторами в расчетах было принято 300 000 пробных тел. Самая элементарная оценка показывает, что масса Земли составляет именно $1/300\,000$ массы Солнца. Следовательно, пробный шар соответствует массе Земли. Как можно получить Юпитер из 300 таких «пробных тел» как Земля, и, тем более, Луну - не обсуждается.

В ИПМ им. Келдыша РАН (Забродин и др., 2006) рассмотрены аналитическая и численная модели описания протопланетного диска Солнца на начальной стадии его эволюции. Получены аналитические решения для протопланетного диска Солнца и решения для планетных газопылевых колец протопланетного диска. Выполнены численные расчеты стационарных состояний планетных колец протопланетного диска и эволюции протопланетного кольца, находящегося в нестационарном состоянии. Приведены результаты аналитических и численных расчетов, их анализ и сравнение. Предложена модель образования планетной солнечной системы. Эти исследования наиболее близки к нашей постановке, хотя и в этой работе не учитываются механизмы диссипации, приводящие к нагреву центра диска.

Как видно из этих примеров, задачи самогравитации обычно решаются без учета противодействующей силы, возникающей в центральной области исходного сгустка материи за счет его нагрева при сжатии и возникновении противодействующего гравитации газокINETического давления. В таких работах рассматривалась самогравитация твердых шаров в газе, или самогравитация идеального газа. Надо сказать, что альтернативная теория самогравитации звезд в галактике с учетом противодействия была создана Линем и Шу.

Звезды в галактиках образуются в результате развития некоторого волнового механизма, генерирующего волны плотности. Теория спиральной структуры галактик стала быстро развиваться после появления серии работ Линя и Шу, в которых они предложили модель спиральных волн плотности. Согласно модели, по спиральным рукавам Галактики распространяются продольные волны плотности, которые генерируются в её центральной части, аналогично звуковым волнам плотности, распространяющимся в газе. Плотность звездного вещества возрастает в пучностях этих волн, и таким образом, создаются условия, необходимые для образования звезд.

Предположим, что аналогично этому может происходить генерация волн плотности внутри протосолнечной туманности в момент образования Солнца. По крайней мере, в модели Линя и Шу нет никаких масштабных ограничений, которые не позволяли бы использовать механизм генерации волн плотности, сопутствующих образованию Солнца. Аналогичным образом волны плотности должны возникать и при формировании планет гигантов.

Используя механизм Линя и Шу, будем полагать, что при формировании Солнечной системы, (а так же при формировании систем Юпитера, Сатурна и Урана) за счет эффектов самогравитации вещества, в протосолнечном (протопланетном) диске, возникали волны плотности. Волновая структура определяла положение планет,

вращающихся вокруг Солнца, и спутников, вращающихся вокруг планет. Взаимосвязь самогравитации и волн плотности очевидна: Вращение протосолнечного диска имеет фундаментальное значение для нашей модели, однако, трудно представить, что медленное вращение может оказать существенное влияние на процессы самогравитации.

Новая модель образования и эволюции Земли и планет.

Предметом нашего исследования является физика горячей Земли, однако Землю, как планету, нельзя рассматривать отдельно от других планет и спутников, и всей Солнечной системы в совокупности. Физика Солнечной системы до настоящего времени, так же как и физика Земли, остается далеко не ясной. В научной литературе обсуждаются различные сценарии возникновения и дальнейшей эволюции Солнечной системы, обсуждаются её удивительные резонансные свойства, астрономы продолжают обнаруживать наличие планет у других звезд и т.д. Действительно, изучение Земли в контексте всей Солнечной системы, хотя и более громоздко, но, наверняка, более продуктивно. По всей видимости, такой подход поможет “отсечь” из рассмотрения физики Земли какие-то аспекты, несвойственные объектам Солнечной системы в целом.

Фрактальный характер расстояний планет от Солнца. Одна из основных закономерностей, свойственных Солнечной системе, это закон планетарных расстояний (от Солнца до планеты) Тициуса-Боде. Он записывается в виде:

$$R = 0.4 + 0.3 \times 2^n. \quad (1)$$

Это скейлинговое соотношение, здесь R – расстояние (в а. е.), n – целые числа (для Меркурия, $n = -\infty$, для Венеры, $n = 0$, для Земли, $n = 1$ и т.д.). Аналогичные закономерности характеризуют расстояния от планеты до спутников в системах Юпитера, Сатурна и Урана. Этот факт подчеркивает общность механизмов формирования Солнечной системы и систем спутников этих планет.

Если в Солнечной системе имеет место скейлинг, то можно ли говорить о ней как о фрактальной, самоорганизующейся структуре? Положительный ответ на этот вопрос позволил бы совершенно по-новому взглянуть на извечную проблему, как образовалась Солнечная система.

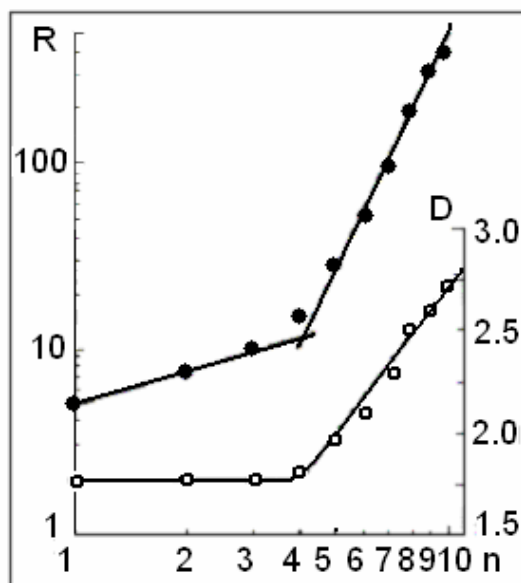


Рис. 2. Зависимость расстояния планеты от Солнца R (а.е.) величины фрактальной размерности D от порядкового номера планеты n (lg - lg). 1- Меркурий, 2- Венера, 3 – Земля, 4 – Марс, 5 – пояс астероидов, 6 – Юпитер и т.д.

Присутствие процессов самоорганизации в такой структуре как Солнечная система обязано проявиться наличием фрактальных свойств, которые, как известно, являются пространственно-временным “срезом” процессов самоорганизации. Самоорганизация происходит, как правило, при наличии двух процессов: диффузии и переноса. Если нам удастся вскрыть два таких взаимосвязанных процесса, фрактальность Солнечной системы получит подтверждение. Представим себе, что Солнечная система действительно обладает фрактальными свойствами. В этом случае можно оценить фрактальную, хаусдорфову размерность (Mandelbrot, 1983) D_H , например, следующим образом:

$$D_H = \lim \frac{\ln N(r)}{\ln(1/r)}. \quad (2)$$

Здесь N – число событий, r – их энергия (сила). Зная величину фрактальной размерности, можно говорить о характере процесса самоорганизации. В Солнечной системе совсем не много параметров, на анализе которых можно делать вывод о наличии процессов самоорганизации. Фактически таких параметров два: номер планеты n и её расстояние от Солнца R . В такой ситуации, если бы была обнаружена зависимость типа:

$$R \approx A + n^D, \quad (3)$$

где размерность D – нецелое число, A – константа, то можно было бы говорить о фрактальности Солнечной системы.

Расстояния планет от Солнца R от номера планеты n представлены на рисунке 2 (точки). Здесь R , для удобства представления, выражается в единицах 10 а.е. Зависимость $\lg R - \lg n$ для планет Солнечной системы позволяет выделить две группы планет, из них, 1-я: Меркурий (1), Венера (2), Земля (3), Марс (4) и 2-я: группа от пояса Астероидов (5), до Плутона (10). На этом же рисунке (рис. 2) показана фрактальная размерность D , которая выявила интересную особенность зависимости (7.3).

Величина D определялась нами по формуле:

$$D \approx \lg R / \lg n, \text{ где } R_{(\text{AU})} \approx 0.1(3 + n^D). \quad (4)$$

Для Меркурия (1), Венеры (2), Земли (3) и Марса (4) величина D неизменна и равна 1.75 (см. рис. 2), для пояса Астероидов (5) D возрастает до 1.97 и дальше, постепенно увеличивается, достигая для Нептуна и Плутона величины 2.6. О чем это может говорить? Принято считать, что чем ниже величина D , тем выше степень самоорганизации структуры и, что по мере эволюции самоорганизующейся системы, величина её фрактальной размерности падает. Величина $D = 1.75$ для планет 1 – 4 может говорить о том, что эти планеты прошли один, общий для них путь формирования.

Солнечная система это двумерная структура, т.е. топологическая размерность её равна двум. Мы получили размерность системы не целое, а дробное число, этот факт говорит об её фрактальности. Размерность внутренних планет оказалась ниже 2, это показывает, что они при образовании и в процессе эволюции достигли более высокой степени самоорганизации, чем внешние планеты. Этот факт может означать, например, что процесс формирования планет земной группы происходил на фоне (как будет показано ниже) единого для Солнечной системы волнового процесса, определившего положение планет относительно Солнца, и механизма переноса массы от этих планет к Солнцу, формирующемуся за счет этого переноса. Рисунок 2 демонстрирует, что разделение планет Солнечной системы на внутренние, подобные Земле, и внешние, имеет не только внешнюю сторону, но и более глубокие внутренние корни. По-видимому, единый в начале формирования Солнечной системы процесс был разорван, что имело смысл бифуркации, произошедшей в зоне пояса астероидов.

Плотность вещества в Солнечной системе. Как известно, планеты вращаются вокруг Солнца в одной плоскости, плоскости эклиптики, совпадающей с его экватором. В первом приближении, структуру, состоящую из Солнца и планет, можно представить как двумерную. В этом случае имеет смысл говорить не об объемной плотности вещества

Солнечной системы, а о - поверхностной. Вполне логично допустить, что каждая из планет образовалась из того вещества, которое было сосредоточено в кольце, ограниченном собственным радиусом n -ой планеты и радиусом внутренней относительно неё планеты $n - 1$, где n - порядковый номер планеты (пояс астероидов мы тоже считаем планетой). Поделив массу планеты на площадь такого кольца, мы получим величину поверхностной плотности:

$$\rho = M_n / \pi(R_n^2 - R_{n-1}^2). \quad (5)$$

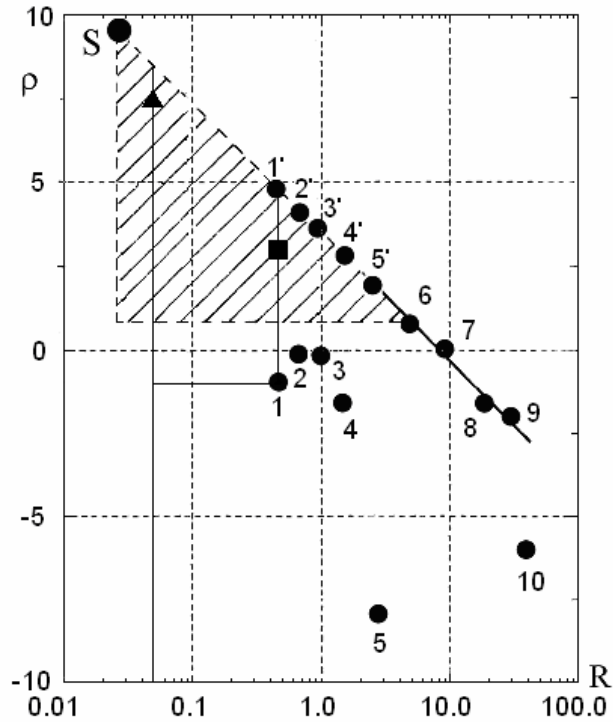


Рис. 3. Величина поверхностной плотности для планет Солнечной системы (lg-lg). Масса заштрихованного треугольника равна массе Солнца. Объяснения – в тексте.

В таблице 1 приведены величины поверхностной плотности для Солнца (С) и планет (М - Меркурий, В - Венера, З - Земля и т.д.). Это же распределение в log-log масштабе для $\rho = f(R)$ изображено на рис. 3. Нельзя не обратить внимания на четкую зависимость величины плотности от расстояния до Солнца, для планет Юпитера, Сатурна, Урана и Нептуна. Эта зависимость не может быть случайной. Скорее всего, она показывает нам распределение плотности в протосолнечной туманности в момент формирования самого Солнца и планетной системы накануне бифуркации.

Таблица 1

| | С | М | В | З | М | А | Ю | С | У | Н | П |
|-------|--------------------|-------|-------|------|-----------|-----|------|------|-------|-------|-------|
| М | 3×10^5 | 0,05 | 0,815 | 1 | 10^{-1} | | 317 | 95 | 14,5 | 17,2 | 0,002 |
| R | 5×10^{-3} | 0,39 | 0,72 | 1 | 1,52 | 2,8 | 5,2 | 9,54 | 19,2 | 30,7 | 39,5 |
| lg(ρ) | 9,6 | -0,97 | -0,14 | -0,2 | -1,62 | | 0,72 | 0,17 | -1,78 | -2,02 | -6 |

Сжатие диска и критерий Джинса. Английский физик Д.Х. Джинс, занимаясь проблемой эволюции и устойчивости звезд, показал, что самогравитации звезд и их последующему сжатию препятствует собственное давление межзвездного газа. Действительно, здесь можно увидеть противоречие: чем плотнее вещество, тем самогравитация должна быть сильнее, но тем выше и собственное (газокинетическое)

давление, препятствующее самогравитации. Соотношение между самогравитацией и газинокинетическим давлением «регулируется» критерием Джинса, который требует, чтобы концентрация вещества должна быть больше некоторой критической плотности ρ_C , при которой гравитационные силы и внутреннее давление точно сбалансированы. Численная оценка плотности вещества для облака с массой M и температурой T (Клейтон, 1982; Jeans, 1916):

$$m_C = 10^3 [T^3/(M/M_\odot)] \text{ см}^{-3}. \quad (6)$$

Здесь критическая плотность вещества: $\rho_C = m_C \mu m_p$, μ - атомный вес, m_p - масса протона. Типичное большое диффузное облако может иметь массу $M = 10^3 M_\odot$ и $T = 100$ К. (M_\odot - масса Солнца). В этом случае, концентрация частиц в облаке $m \approx 10 \text{ см}^{-3}$ составляет всего 10^{-2} от $m_C \approx 10^3 \text{ см}^{-3}$.

Масса, необходимая для коллапса протозвезды:

$$M_{Jn} \geq 1/795 (R_g T/G)^{3/2} \rho^{-1/2}, \quad (7)$$

где R_g газовая постоянная, G - постоянная тяготения, ρ - плотность вещества облака.

Критическая Джинсова плотность $\rho_C = M_n/\lambda^2$, где λ - Джинсова длина волны, $\lambda = R_n - R_{n-1}$. Критическая масса Джинса M_{Jn} , при которой может начаться гравитационное сжатие,

$$M_{Jn} = \rho \lambda^2 = M_n (R_n - R_{n-1})^2 / \pi (R_n^2 - R_{n-1}^2); \quad (8)$$

отсюда:

$$M_{Jn}/M_n \approx (R_n - R_{n-1}) / (R_n + R_{n-1}). \quad (9)$$

Условие самогравитации (8.9) выполняется для Юпитера, Сатурна, Урана и Нептуна.

Однако, это совсем не так для планет земной группы: их масса значительно меньше критической Джинсовой: M_{Jn}/M_n для Земли, Марса, Юпитера, соответственно: 10^4 ; 10^5 ; 0.3.

Рисунок 3 показывает зависимость плотности от расстояния до Солнца (R) для Юпитера, Сатурна, Урана и Нептуна: $\rho = A R^n$, где $n \approx 3.55$ - показатель степени, A - константа. Эта зависимость прерывается в районе пояса астероидов (5'), где произошел разрыв, бифуркация в цепи процессов фрагментации протосолнечного диска на отдельные кольца в момент образования Солнца и планет. Процесс формирования Юпитера, Сатурна, Урана и Нептуна из отделившихся от диска колец продолжался, и вещество, находящееся в выделенном кольце, собралось в большую планету. При этом были сформированы системы спутников, аналогичные планетам Солнечной системы. В планетах земного типа к моменту бифуркации успели сформироваться лишь железно-каменные ядра будущих планет. Вся оставшаяся масса протосолнечного диска (в основном водород) пошла на образование Солнца. На рис. 3 заштрихованный треугольник показывает ту часть вещества протосолнечного диска, которая пошла на формирование Солнца массой M_\odot .

Однако, это совсем не так для планет земной группы: их масса значительно меньше критической джинсовой (см. Таблицу 2).

Таблица 2

| | М | В | З | М | А | Ю | С | У | Н | П |
|-----------|--------|--------|--------|-----------|--------|-----|-----|------|------|--------|
| М | 0,05 | 0,815 | 1 | 10^{-1} | | 317 | 95 | 14,5 | 17,2 | 0,002 |
| λ | 0,4 | 0,3 | 0,3 | 0,52 | 1,3 | 3,4 | 4,3 | 9,7 | 11,5 | 8,8 |
| M_J/M | 10^6 | 10^4 | 10^4 | 10^5 | 10^8 | 0,3 | 0,3 | 0,33 | 0,23 | 10^3 |

Таблица 3 лишней раз иллюстрирует различия между планетами земного типа и планетами гигантами. Здесь сравнивается величина гравитационного потенциала Солнца на орбитах Земли, Юпитера и Сатурна с собственным гравитационным потенциалом этих планет. Видно, что у Земли он меньше, чем GM/R Солнца на её орбите, а у Юпитера и

Сатурна - выше. Рисунок 2, Таблицы 2 и 3 показывают нам, что Природа сохранила “подсказку” в виде четкой зависимости $\rho(R)$ для Юпитера, Сатурна, Урана и Нептуна. Наша задача состоит в том, чтобы извлечь из неё пользу.

Таблица 3

| GM/R Солнца вблизи | Земли | Юпитера | Сатурна |
|--------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| каждой из планет: | $6 \times 10^{12} \text{ (см/с)}^2$ | 10^{12} (см/с)^2 | $6 \times 10^{11} \text{ (см/с)}^2$ |
| GM/R планет: | $6 \times 10^{11} \text{ (см/с)}^2$ | $2 \times 10^{13} \text{ (см/с)}^2$ | $6 \times 10^{12} \text{ (см/с)}^2$ |

Еще раз обратимся к рисунку 3 и постараемся проанализировать четкую логарифмическую ($\lg \rho - \lg R$) зависимость плотности от расстояния до Солнца R для четырех больших планет. Зависимость $\rho(R)$ для Юпитера, Сатурна, Урана и Нептуна можно определить выражением: $\rho = A R^{-n}$, где $n \approx 3.55$. Эта зависимость прерывается в районе пояса астероидов. Складывается впечатление, что именно в районе пояса астероидов произошел разрыв, бифуркация в цепи процессов фрагментации протосолнечного диска на отдельные кольца в момент образования Солнца и планет. Процесс формирования планет: Юпитера, Сатурна, Урана и Нептуна из отделившихся от диска колец прекратился и оставшаяся масса протосолнечного диска “пошла” на образование Солнца и лишь малая его часть была “израсходована” на формирование Земли, Венеры, Марса и Меркурия. Если принять такую модель, то масса протовещества, “оставшаяся” после формирования планет земной группы должна быть примерно равна массе Солнца M_{\odot} . Массу M_{\odot} можно оценить по M_{\odot} по формуле:

$$M_{\odot} = \int_r^R x \rho dx, \quad (10)$$

где x – текущий размер протосолнца. Плотность $\rho = A x^{-n}$, (x вместо R), тогда M_{\odot} :

$$M_{\odot} = A \int_r^R x x^{-n} dx = A [x^{-n+2} / (-n+2)] \Big|_r^R. \quad (11)$$

Подставляя R и r , получаем:

$$M_{\odot} \approx A r^2 / (n-2) r^n. \quad (12)$$

Здесь R - радиус орбиты пояса астероидов, а r - радиус протосолнца в момент бифуркации, n мы оценили по наклону прямой ($n = 3.55$). Оценим величину A , подставив значения массы $M_{\text{Ю}}$ и радиуса орбиты $R_{\text{Ю}}$ для Юпитера:

$$A = R_{\text{Ю}}^n M_{\text{Ю}} / \pi R_{\text{Ю}}^2 = 1/1.55 \pi (R_{\text{Ю}}^{1.55} M_{\text{Ю}}). \quad (13)$$

Подстановка формулы A в выражение для M_{\odot} дает:

$$M_{\odot} / M_{\text{Ю}} \approx 1/5 (R/r)^{1.55}, \quad (14)$$

где r текущий радиус формирующегося Солнца. Величина r после подстановок известных величин оказывается равной 2.5 млн. км, что примерно в три с небольшим раза больше чем радиус современного Солнца. Т.о. бифуркация произошла в момент формирования Солнца, когда его радиус был примерно в три раза больше современного, т.е. процесс его формирования еще не закончился (см. рис. 3, слева).

Возможный механизм образования Солнечной системы. Принято считать, что звезды в галактиках образуются в результате развития некоторого волнового механизма, генерирующего волны плотности. Теория спиральной структуры галактик стала быстро развиваться после появления серии работ С.С. Линя и Ф.Х. Шу (Lin, et al., 1969; Roberts, 1969), в которых они предложили модель спиральных волн плотности. Согласно модели, по спиральным рукавам Галактики распространяются продольные волны плотности, которые генерируются в её центральной части, аналогично звуковым волнам плотности,

распространяющимся в газе (Каплан, Пикельнер, 1979; Клейтон, 1982). Плотность звездного вещества возрастает в пучностях этих волн, и таким образом, создаются условия, необходимые для образования звезд.

Предположим, что аналогично этому может происходить генерация волн плотности внутри протосолнечной туманности в момент образования Солнца. По крайней мере, в модели Линя и Шу нет никаких масштабных ограничений, которые не позволяли бы использовать механизм генерации волн плотности, сопутствующую образованию Солнца. Аналогичным образом волны плотности должны возникать и при формировании планет гигантов.

Используем механизм Линя и Шу, причем будем полагать, в дальнейшем, что при формировании Солнечной системы, (а так же при формировании систем Юпитера, Сатурна и Урана) за счет эффектов самогравитации вещества, в протосолнечном (протопланетном) диске, возникали волны плотности. Волновая структура определяла положение планет, вращающихся вокруг Солнца, и спутников, вращающихся вокруг планет. Взаимосвязь самогравитации и волн плотности очевидна: Вращение протосолнечного диска имеет фундаментальное значение для нашей модели, однако, трудно представить, что медленное вращение может оказать существенное влияние на процессы самогравитации.

Примем следующие элементы концепции:

- Распределение плотности вещества в диске и его устойчивое вращение с необходимой кинетической энергией, обеспечивало планетам, после их формирования, необходимую скорость движения их по Кеплеровским орбитам.
- Плотность и температура вещества диска были достаточно высоки для того, чтобы начался процесс самогравитации с гравитационной (Альфвеновской) скоростью падения частиц на центральное тело (Солнце или планету), большей, чем та скорость, которая требуется по критерию Джинса.
- Химический состав вещества диска соответствовал химическому составу образующихся планет.
- В момент образования Солнца характер распределения плотности вещества диска резко изменился, т.е. произошла бифуркация процесса образования.
- Процессы самогравитации планет (спутников), с последующим сжатием и уплотнением вещества диска, являются следствием гравитационного возмущения, вызванного формированием Солнца (планеты)
- Распределение плотности вещества родительского диска от расстояния до Солнца соответствовало распределению плотности до бифуркации.

Сделаем пару дополнительных замечаний: 1. Скорость увеличения радиуса центрального уплотнения диска dr/dt автомодельно возрастает с увеличением размера тела. 2. Если мы правы в нашем предположении, что Солнечная система и системы регулярных спутников Юпитера, Сатурна, и Урана имеют общий, единый механизм формирования, мы имеем возможность оценить нижний предел массы планеты, у которой образуется такая система спутников: $\approx 15 M_E$, (M_E – масса Земли). Вокруг Урана, масса которого $14.5 M_E$ система регулярных спутников имеется, в то время как вокруг Нептуна ($17.2 M_E$), - её нет. Возможной причиной такого различия между Ураном и Нептуном состоит в том, что плотность вещества диска в области формирования Нептуна значительно ниже, чем в области формирования Урана (рис. 3). Вероятно, эта же причина привела к тому, что в окрестности Земли сформировалась Луна, аналогично тому, как около Нептуна сформировался Тритон.

Приведем оценку времени формирования звезды, планеты, спутника, полагая, что по какой-то причине в протопланетном диске начался процесс формирования её центральной части – ядра. Модель будем строить на аналогии с процессом коагуляции, т.е. роста капли при “падении” на неё частичек газа. Обозначим характерное время столкновения частицы газа с “каплей” (зародышем звезды, планеты, спутника), через t .

Время $t = (\sigma n v)^{-1}$, где $\sigma = \pi r^2$ – сечение “капли”, $n = \rho/m$ – концентрация частиц в газе, m – масса частицы, v – её скорость, $r = (V_k)^{1/3}$ – радиус капли, $V_k = V_c g$ – объем капли, V_c – объем частицы, g – число частиц в капле.

Время роста капли:

$$t = \int dg / \sigma n v, \quad (15)$$

т.к. $\sigma = \pi(V_c g)^{2/3}$, то $t = g^{1/3} / (V_c^{2/3} n v)$, или $t \approx r / (V_c n v)$. Подставляя значение n и заменяя: $m/V_c = \rho_n$ – плотность планетного вещества ($\rho_n = 3 \text{ г/см}^3$), получаем выражение для t :

$$t = (\rho_n / \rho_0) \times (r/v), \quad (16)$$

здесь ρ_0 – плотность вещества протопланетного диска.

Из формулы 16 следует, что время формирования космического тела пропорционально его размеру, обратно пропорционально исходной плотности вещества и скорости дрейфа частиц диска. Подставляя выражение для $v = (GM/R)^{1/2}$ и плотности ρ_n , получаем выражение для t_{min} :

$$t_{min} = 1 / \rho_0 \times (\rho_n / 4\pi G)^{1/2}. \quad (17)$$

Время образования (в годах) после подстановки ρ_0 (г/см^3):

$$t_{min} \approx 10^{-4} / \rho_0 \quad (18)$$

Скорость роста “капли” dr/dt оценим аналогично предыдущему:

$$dr/dt = r \rho_0 (4\pi G / \rho_n)^{1/2}. \quad (19)$$

Как мы условились, при образовании Солнца и планет Солнечной системы действовал единый механизм. Во-первых, происходило сжатие вещества и образование центрального тела, во-вторых, – вращение всего диска и, в-третьих, возникновение волн плотности, в пучностях которых образовывались центры вторичных, уже протопланетных дисков. Действие этого автомодельного механизма было прервано, произошла бифуркация, в результате чего на месте пояса Астероидов не образовалось планеты “Фазтон”, а масса внутренних планет оказалась значительно меньше, чем внешних. Как мы выяснили выше, это явление могло быть связано с изменением режима сжатия диска при образовании Солнца.

Есть ли свидетельства, подтверждающие или опровергающие сказанное нами? Для ответа на этот вопрос, вернемся ещё раз к рисункам 2 и 3. Как мы отмечали (рис. 2), расстояния от Солнца до внутренних планет $R \sim n^{1.75}$. Затем (начиная с пояса астероидов) показатель степени постепенно возрастает по мере удаления от Солнца. Плотность вещества диска убывает по мере роста расстояния (увеличения номера планеты n): $\rho \sim R^{-3.55}$ (рис. 3). Допустим, что до бифуркации распределение плотности в области образования внутренних планет было точно таким же.

Предположим, что в сжимающемся протосолнечном диске действовал волновой механизм, генерировались волны плотности с частотой ω , аналогичные звуковым, причем, скорость их распространения c_s зависит от давления p и плотности вещества ρ как: $c_s \sim (\gamma p / \rho)^{1/2}$ (γ – показатель адиабаты). Предположим, что $p \sim 1/R$, $\rho \sim 1/R^2$, тогда $c_s \sim R^{1/2}$. Ранее было принято, что $\lambda \sim R$, тогда: $\omega = c_s / \lambda \sim R^{-1/2}$, т.е. частота волн плотности весьма слабо зависит (убывает) от расстояния до Солнца R . Зависимость $\omega \sim R^{-1/2}$ показывает, что вещество диска вращалось дифференциально, что вполне естественно, если учесть наличие вязкости его вещества.

Возможно, частота ω каким-то образом связана с частотой вращения протосолнца, которая, как будет показано ниже, раньше была значительно больше, чем современная. Если это действительно так, то получающиеся при этом скорости распространения волн плотности в протосолнечном диске оказываются несколько большими, чем принятые для скорости звука в такой газообразной среде. Как относиться к этим оценкам и можно ли на их основании делать какие-либо определенные выводы, не совсем ясно. Ясно одно, что мы слишком мало знаем о физике процессов, происходящих в момент образования звезды и её планетной системы.

Можно ли что-либо определенное сказать о роли самоорганизации в процессе формирования планет, особенно, планет земного типа? Для самоорганизации необходимо наличие двух связанных друг с другом процессов: диффузии и перколяции. На эту роль могли бы претендовать два очевидных механизма: обмен волнами плотности, во-первых, и, во-вторых, - собственно сама самогравитация (самосжатие). Вполне возможно, что для описания механизма образования Солнечной системы удастся записать уравнения типа уравнений Фоккера-Планка. Очевидно, что получить простое дифференциальное уравнение, которое можно было бы попытаться решить аналитически, надежды нет.

Почему не образовалась планета Фэтон? Если масса планеты меньше Джинсовой критической массы, то она не должна образоваться за счет механизма самогравитации (самосжатия). Если учесть, что начальная плотность вещества обособившегося кольца, из которого формировалась планета, была значительно больше, чем та, которая получается делением массы планеты на площадь кольца (например, для Земли эта плотность была больше примерно на 4 порядка: точки 3 и 3' на рис. 3), то окажется, что начало самосжатия вполне возможно. Важным моментом здесь будет то, что бифуркация произошла тогда, когда самосжатие внутренних планет уже началось, и уже успели сформироваться ядра будущих планет, но окончательно оно ещё не закончилось. Почему же не образовалась планета Фэтон? Ведь и в этом случае начальная плотность вещества диска была больше критической Джинсовой. Кажется, что хотя бы маленькая планета, пусть даже меньше Марса, но должна бы успеть сформироваться в районе пояса Астероидов. Очевидно, что процесс самосжатия на орбите пояса Астероидов имел место, но в результате появились лишь астероиды, а не планета. Следовательно, существует какая-то другая причина, помешавшая формированию планеты. Попробуем предложить одно из возможных решений.

Обратим внимание на ещё один критерий, связанный с формированием планеты, о существовании которого мы раньше не упоминали. Обозначим: v_R – скорость дрейфа частиц вдоль кольца радиусом R (R равно расстоянию до Солнца). Эта скорость определяет время формирования протопланетного диска t_R : $t_R = 2\pi R/v_R$, отсюда следует, что $t_R \sim R$. Условие образования планеты очевидно: $t_p > t_R$, где t_p мы оценили выше как: $t_p \approx t_{min} \approx 10^4/\rho_0$. Для удобства, вместо t_R введем некую плотность $\rho_R \sim 1/t_R$, которая $\sim 1/R^2$. Вполне возможно, что именно в области пояса астероидов условие: $t_p > t_R$ не выполнялось. Из рисунка 8-3 следует, что линия ρ_R проходит ниже точки 5', которая показывает плотность диска перед началом бифуркации. Вполне возможно, что этот, или подобный ему механизм, был причиной того, что Фэтон в Солнечной системе не образовался. В области формирования этой планеты произошло изменение плавного течения процесса. Характер сжатия изменился, произошел разрыв сплошности диска, началась стадия быстрого, коллапсирующего сжатия и формирование Солнца. Распределение плотности диска изменилось и вместо начальной плавной функции (продолжение прямой 9 – 6 на рис. 3), оказалось, что по мере приближения к Солнцу, величина плотности стала убывать (точки 4 – 1 на рис. 3).

Вернемся к нашим оценкам. Выше мы отмечали, что если разделить массу планет земного типа на Джинсову критическую массу, то оказывается, что самосжатие и образование их невозможно. Однако будем учитывать, что начальная плотность вещества обособившегося кольца, из которого формировалась планета, была значительно больше, чем та, которая получается делением массы планеты на площадь кольца. Например, для Земли эта плотность была больше примерно на 4 порядка. В этом случае гравитационное самосжатие вполне возможно, по крайней мере, возможно, начало этого процесса. Важным моментом здесь будет то, что бифуркация произошла тогда, когда самосжатие внутренних планет уже началось, но ещё не окончилось. Почему же не образовалась

планета Фазтон? Ведь и в этом случае начальная плотность вещества диска была больше критической Джинсовой.

Здесь необходимо сказать ещё об одном, достаточно очевидном критерии, о котором мы раньше не упоминали. Он связан с формированием планеты. Температура газа вещества диска и его молекулярный состав определяют скорость распространения через него звуковых волн. Очевидно, что любые другие скорости дрейфа молекул будут меньше чем скорость звука (c_s). Если это не так, то в системе образуются ударные волны, роль которых мы пока не рассматриваем. В этой связи, введем скорость дрейфа частиц вдоль кольца радиусом R : $v_R < c_s$. Эта скорость определяет конечное время, в течение которого вещество кольца соберется в новый протопланетный диск. Это время, обозначим его t_R , будет в основном определяться радиусом кольца R : $t_R = 2\pi R/v_R$, иначе: $t_R \sim R$. Очевидное условие формирования протопланетного диска, а вслед ему и самой планеты, можно определить так: $t_p > t_R$, где t_p мы оценили выше как: $t_p \approx 10^{-4} / \rho_0$. Так как плотность вещества диска $\rho_0 = A R^{-n}$, где $n \approx 3.55$, то, казалось бы, зависимости $\lg t - \lg R$ должны быть параллельны друг другу, никогда не пересекаться, а наше условие всегда должно выполняться.

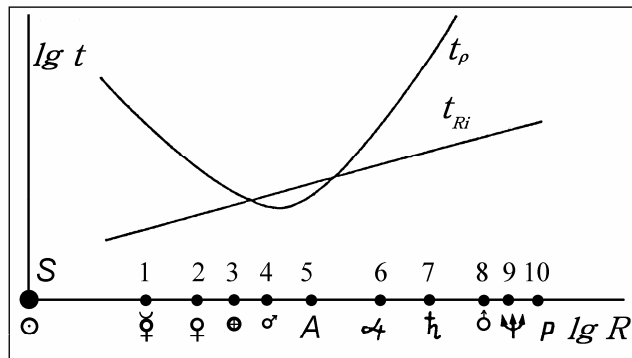


Рис. 4. Соотношение $(\lg - \lg)$ времён образования планеты t_p и стягивания вещества кольца t_R в зависимости от расстояния планеты R до Солнца (S).

1 – Меркурий, 2 – Венера, и т.д.

По всей видимости, на самом деле это было совсем не так. Вернемся к нашей модели образования Солнечной системы, к моменту начала бифуркации. Благодаря волновому механизму, обособились кольца, начался процесс стягивания материала колец в протопланетные диски, и здесь что-то случилось с плавным течением процесса. Характер сжатия изменился, произошел разрыв сплошности диска, началась стадия быстрого, коллапсирующего сжатия и формирование Солнца. Распределение плотности диска изменилось и вместо начальной плавной функции, оказалось, что по мере приближения к Солнцу (скорее, еще к протосолнцу), величина плотности стала убывать, как это показано на рис. 8-3. В области, занимаемой поясом астероидов, величина плотности оказалась близкой той, которая была в зоне роста Марса и Земли.

В (Кузнецов, 1984, 1990) приведены величины плотности для Земли, Марса и пояса астероидов, соответственно: 10^{-8} , 2×10^{-8} , 2×10^{-8} г/см³, что дает величины t_p : 10^4 , 5×10^3 , 5×10^3 лет. В свою очередь, величина t_R равна 3×10^3 , 4.8×10^3 , 8.4×10^3 лет для Земли, Марса и пояса астероидов, соответственно. Следовательно, условие: $t_p > t_R$, для области пространства диска, занимаемой поясом астероидов, не выполнялось. Вполне возможно, что в эту область частично попало кольцо протомарса, и именно поэтому он оказался таким маленьким. Рисунок 4 иллюстрирует сказанное: время t_p в области Марса и пояса астероидов оказывается примерно одинаковым, но для пояса астероидов меньшим, чем время “собирания” вещества в планетный диск, а затем в планету.

Единая последовательность: звезда – планета – спутник. Наша модель базируется на постулате, согласно которому Солнце, планеты и их спутники образовались по единому “сценарию”, и в едином процессе. Механизм образования один для звезды, планеты, спутника. Все различия между ними заключаются лишь в количестве исходного материала, участвующего в этом процессе. Однако, это, казалось бы, естественное и очевидное предположение, находится в противоречии с общепринятыми на сегодня взглядами на образование планет и спутников. Поэтому, нам необходимо обосновать это предположение.

Принято считать, что в основе существования звезды лежит термоядерная реакция. Принято так же считать, что минимальная масса звезды, в которой еще способна протекать термоядерная реакция, составляет примерно $1/25$ от массы Солнца. Естественно, возникает вопрос, что же получится за объект, если его масса окажется меньше минимальной? Хорошо известно, что если масса меньше, чем масса Солнца примерно в 1000 раз, то “получается” Юпитер. Есть ли в Природе объекты, больше Юпитера, но меньше $1/25$ Солнца? Оказываются такие, “промежуточные” объекты - несостоявшиеся звезды, сравнительно недавно были обнаружены. Существование коричневых карликов было предсказано еще в 1963 году астрофизиком индийского происхождения Шивом Кумаром (университет штата Виргиния, США). Крис Дэвидсон (университет штата Миннесота, США) назвал эти неведомые звезды «инфракрасными карликами»; другие предлагали называть их «малиновыми карликами», но в 1975 году студентка-дипломница из университета в Беркли (США) Джил Тартер придумала термин «brown dwarf», и он прижился. На русский язык его перевели как «коричневый карлик», хотя в действительности эти объекты имеют «инфракрасный» цвет, и точнее было бы перевести brown как «темный» или «тусклый». В 1997 году были открыты два первых изолированных коричневых карлика (Kelu-1 и DENIS-PJ1228-1547). Их масса составляла примерно $1/100$ массы Солнца, температура поверхности ≈ 1400 К.

Казалось бы, цепь замкнулась: Солнце - коричневый карлик - Юпитер. Однако препятствием здесь является убеждение в том, что Юпитер, это холодная планета, в центре которой находится твердый водород. Это общее убеждение даже не подвергается капли сомнения, несмотря на то, что ещё космические аппараты “Пионер X” и “Пионер XI” обнаружили мощное тепловое излучение, исходящее из планеты Юпитер, значительно превышающее тепловое излучение Солнца на орбите Юпитера. Кроме этого, гравитационное поле Юпитера симметрично и соответствует по своему характеру гравитационному полю газового шара. Несколько лет тому назад на страницах популярных журналов широко дискутировался вопрос о том, что представляет собой Юпитер, планету или звезду. Аналогичные наблюдения были сделаны космическими аппаратами и в окрестности Сатурна и Урана. И там тоже было обнаружено мощное тепловое излучение, превышающее по интенсивности Солнечное на их орбитах. Тем не менее, общепринятая модель внешних планет признает их холодными телами, содержащими твердый водород во внутреннем ядре, и жидкий водород в ядре внешнем. Именно в этом, жидководородном ядре, согласно холодной модели, происходит генерация магнитного поля за счет возбуждения динамо-эффекта. Таким образом, наличие “коричневых карликов” продолжает логичную последовательность “недоросших” звезд. В то же время холодные планеты, с массой, меньшей, чем у “карликов” всего в 10 раз, эту последовательность - разрушают.

Согласно развиваемой здесь модели, такая последовательность, включающая звезды, планеты и спутники, должна иметь место, хотя она, естественно, является неким, достаточно грубым приближением. Эта последовательность не учитывает многих аспектов и особенностей, среди которых, например, различия в светимости между одновозрастными звездами, обладающими одинаковыми массами и т.д. Рисунок 5 показывает зависимость логарифма температуры звезды, планеты, спутника от логарифма

их массы. Как следует из этого рисунка, спутники, планеты и “коричневые карлики” (инфракрасные звезды), все они являются продолжением Главной последовательности звезд. Как тут еще раз не вспомнить Мак-Крея, с его идеей относительно того, что звезды и планеты (добавим: и спутники, и инфракрасные звезды) “проходят один путь”. Все их различия определяются только количеством вещества, участвующего в процессе. Именно оно определяет главную характеристику объекта - его температуру.

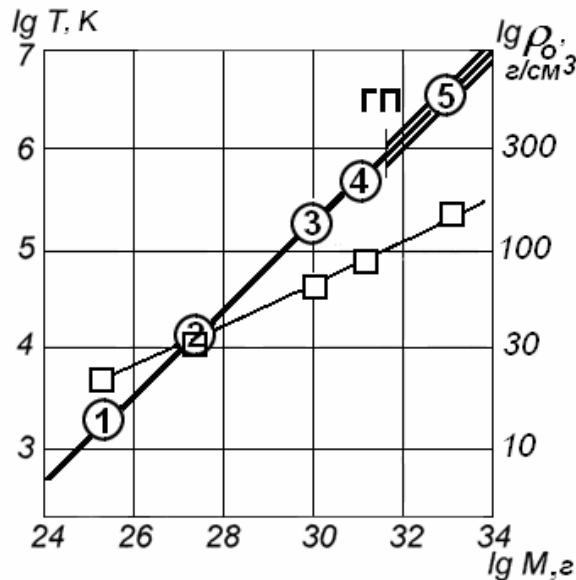


Рис. 5. Температура T образования звезд (Солнце - 5), Коричневого Карлика (4), Юпитера (3), Земли (2) и Луны (1) как функция их массы M . Плотность центральной части тел (квадраты) в момент их образования.

Под температурой (T , рис. 5) мы понимаем температуру центральной части звезды, планеты, спутника. Такой температурой обладало вещество космического тела в момент образования. За время эволюции Солнечной системы эта температура сохранилась (несколько уменьшившись) лишь в центральной части тела. Величину температуры оцениваем по формуле: $T \approx 3/5 \times GM/Rc_p$, где c_p - теплоемкость вещества, G - гравитационная постоянная, R - радиус космического тела. В первом (грубом) приближении, можно считать теплоемкость и плотность вещества примерно постоянными для всех объектов, тогда выявляется простая зависимость температуры от величины массы вещества звезды, планеты, спутника: $T \sim M^{2/3}$. В эту зависимость включены звезды «Главной последовательности», «Коричневые карлики», планеты и их семь “больших” спутников. Заметим, что реально величина c_p увеличивается с ростом температуры, поэтому оценки температуры по этой формуле несколько завышены.

Зависимость подобную ($T \sim M^{2/3}$) для звезд Главной последовательности можно получить (Кузнецов, 1984), если сопоставить два графика из книги Чандрасекара (1950). На одном из них приведена зависимость светимости (в относительных единицах) от температуры T , а на втором - светимость от массы звезды M . Сопоставляя данные этих графиков, можно получить примерно: $T \sim M^{2/3}$. (В предположении, что температура поверхности звезды однозначно связана с температурой её ядра).

Обратим внимание на закономерность Солнечной системы: все тела в ней, размером от Солнца до спутника Юпитера - Европа, обладают сферической формой. Гравитационный потенциал GM/R Европы примерно равен 2 кДж/г, что при “разумной” величине теплоемкости $c_p = 0.3$ кал/г. град определяет температуру её вещества порядка 1.5×10^3 К. Все остальные космические тела (включая астероиды и спутники), обладающие

массой, меньшей, чем у Европы, сферической формы не имеют и, по-видимому, фазы полного плавления “не проходили”. Примем теплоту фазового перехода испарения (конденсации) для окиси кремния, как основного “строительного” материала планет земного типа, равной $U_{и} = 15$ кДж/г, а величину теплоты плавления (кристаллизации) $U_{п} = 1$ кДж/г. Космические тела Солнечной системы можно условно разделить на три класса. К первому, отнесем те, у которых $GM/R < U_{п}$, ко второму: $U_{п} < GM/R < U_{и}$ и к третьему те объекты, у которых $GM/R > U_{и}$. Малые спутники и астероиды отнесем к первому классу, ко второму, - большие спутники и маленькие (меньше Венеры) планеты и, к третьему, - планеты с массой, большей, чем у Венеры.

Таблица 4.

Масса, радиус, гравитационная энергия и давление в центре Земли, планет и спутников.

| | | M/M _{Земли} | R/R _{Земли} | E/E _{Земли} | p/p _{Земли} | E/U _п (U _и) |
|----|----------|---------------------------|---------------------------|----------------------|----------------------|------------------------------------|
| 1 | Титания | 7×10^{-4} | 0,08 | 7×10^{-3} | | 0.2 |
| 2 | Европа | 8×10^{-3} | 0,23 | 0,034 | 0,015 | 1.2 |
| 3 | Ио, Луна | $1,2 \times 10^{-2}$ | 0,26 | 0,038 | 0,026 | 1.3 |
| 4 | Ганимед | $2,5 \times 10^{-2}$ | 0,4 | 0,06 | 0,04 | 1.4 |
| 5 | Меркурий | $5,5 \times 10^{-2}$ | 0,375 | 0,14 | 0,13 | 4.2 |
| 6 | Марс | 10^{-1} | 0,53 | 0,19 | 0,14 | 6.0 |
| 7 | Венера | 0,815 | 0,93 | 0,85 | 0,76 | 1.7 |
| 8 | Земля | 1 (6×10^{27} г) | 1 ($6,4 \times 10^8$ см) | 1 (30 кДж/г) | 1 (3,6 Мбар) | 2.0 |
| 9 | Уран | 14,5 | 3,8 | 3,77 | 1,11 | 7.5 |
| 10 | Нептун | 17,2 | 3,9 | 4,35 | 2,34 | 8.7 |
| 11 | Сатурн | 95 | 9,4 | 10 | 1,4 | 20.0 |
| 12 | Юпитер | 317 | 11,14 | 28,3 | 7,03 | 57.0 |

Можно ли обосновать принятые нами величины теплоты плавления U_1 и теплоты конденсации U_2 ? Постараемся это сделать на известном материале из астрономии. Наименьшее космическое тело, обладающее шарообразной формой – Европа, наибольшее тело, не имеющее такой формы – Титания. Их массы различаются примерно в 10 раз, а размеры всего в три раза. По-видимому, удельная энергия равна теплоте плавления для космического тела промежуточного размера. Такое тело должно иметь примерно: $M \approx 2 \times 10^{25}$ г и $R \approx 10^8$ см., а $GM/R = 1$ кДж/г. Согласно нашей модели, Земля в момент образования полностью прошла газообразную стадию. Критерий полного испарения (Зельдович, Райзер, 1966) требует выполнения условия: $GM/R = 2 U_{и}$, отсюда (см. таблицу 8.4) $U_{и} = 15$ кДж/г.

С точки зрения модели горячей Земли проблема сферической формы у крупных спутников и несферической, - у более мелких спутников и астероидов решается очень просто. Совсем не так обстоят дела с её решением в модели холодной Земли. Сошлемся на работу Слюты и Воропаева (1998), посвященной этой проблеме. Эти авторы считают, что наблюдаемый резкий переход между малыми телами с неправильной угловатой фигурой и планетными телами, обладающими сфероидальной фигурой, обусловлен пределом текучести вещества при низких температурах как силикатных, так и ледяных тел Солнечной системы. Величина дифференциальных напряжений, способных превысить предел текучести, определяется массой тела. Предел текучести, согласно модели авторов, зависит от температуры, которая различается на разных расстояниях от Солнца. Величина предела упругости определяет величину критической массы, выше которой космическое тело становится сфероидальным. Так, например, радиус железного тела, обладающего критической массой в районе пояса астероидов ($T = 200 - 300$ К) будет иметь 260 км, а в

области системы Сатурна ($T = 70 - 80$ К), уже 340 км. (Надо заметить, что авторами предложено весьма не простое и не очень убедительное объяснение очевидного факта).

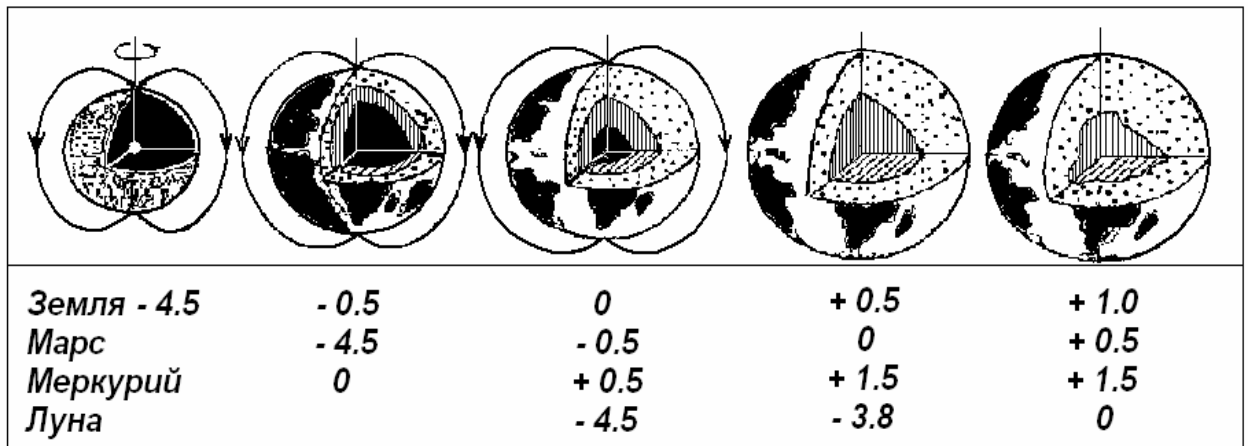


Рис. 6. Внутреннее строение Земли, Марса, Меркурия и Луны на различных этапах эволюции.

Сколько воды на Луне и Марсе? Наша модель позволяет более или менее строго ответить на этот вопрос, который в последнее время стал очень популярным в связи с успехами и достижениями в изучении космических тел Солнечной системы, полученными с помощью космических аппаратов. Согласно нашей модели горячей Земли (подробнее в третьей и последующих главах), её эволюция связана с образованием кристаллической мантии. Именно этот процесс происходит с образованием воды мирового океана. Отношение количества воды на Земле к массе мантии равно примерно $k = 3.5 \times 10^{-4}$. Будем считать, что он сохраняется таким же и для других планет и спутников Солнечной системы. Будем считать (приближенно), что вся энергия планеты GM^2/R пошла на плавление и частичное испарение массы M_0 от полной массы планеты M . (Такая ситуация имела место с планетами и спутниками обладающими массой, меньшей чем у Венеры):

$$GM^2/R = M U_{\text{п}} + M_0 2U_{\text{и}},$$

Отсюда масса воды $M_{\text{в}}$:

$$M_{\text{в}} = kM/2U_{\text{и}} (GM/R - U_{\text{п}})$$

Цифры, приведенные в правом столбце таблицы 8.4, позволяют оценить часть вещества планеты (спутника), которая находилась в момент образования в газообразном (солнечном) состоянии (M_0). В процессе эволюции это вещество сначала конденсировалось, затем кристаллизовалось, а при кристаллизации выделилась вода. Мы полагаем, что вещество, находящееся в расплавленном состоянии в момент образования планеты (спутника) воду, как и другие летучие, «потеряло». Цифры, расположенные в левой части правого столбца, показывают отношение удельной гравитационной энергии спутника (планеты) к теплоте испарения. Если это число больше 1, то оставшаяся (после вычитания 1) часть показывает, сколько вещества оказалось в газообразном состоянии. Например, отношение $E/U_{\text{п}}$ для Марса равно 6 (см табл.). Это означает, что $5 U_{\text{п}}$ гравитационной энергии Марса пошло на испарение. Теплота испарения больше, чем теплота плавления примерно в 15 раз. Значит, фактически испарилось $5U_{\text{п}}/U_{\text{и}} = 1/3$ массы Марса (2×10^{26} г). Учитывая коэффициент $k = 3.5 \times 10^{-4}$, на который необходимо умножить величину испарившейся массы планеты (M_0), количество воды на Марсе не должно превышать 10^{22} г, а на Луне воды должно быть примерно в сто раз меньше (5×10^{20} г). Аналогично можно оценить количество воды, выделившейся на Меркурии, однако там

процесс релаксации вещества внутреннего газообразного ядра ещё не окончился (на Меркурии ещё существует магнитное дипольное поле), поэтому можно назвать только приближенное количество воды: 2×10^{22} г.

Другие планетные системы.

В ноябре 1999 года в некоторых газетах появилось сенсационное сообщение относительно того, что астрономам удалось впервые увидеть (прямым методом) вращение планеты вокруг звезды HD209458 в созвездии Пегас. Яркость этой звезды уменьшалась при прохождении планеты по её диску примерно на 1.7 %. Затмение позволило оценить размер далекой планеты. Звезда HD209458 находится от нас на расстоянии в 153 световых года.

До этого времени астрономам было известно о существовании более чем 20 планет у различных звезд. Все эти планеты были вычислены с использованием т.н. косвенного метода, по доплеровскому смещению. Кстати, в 1995 году в том же созвездии Пегас была вычислена планета, обращающаяся вокруг звезды «51 – Пегас».

Прямой метод прост по постановке, однако, сложен по исполнению. Дело в том, что излучение планеты «меркнет» в лучах более яркой «родительской» звезды. Косвенные методы включают в себя тщательное наблюдение за звездой для того, чтобы обнаружить гравитационное влияние на неё, обращающейся вокруг звезды планетой (Блэк, 1991). Когда планета перемещается по орбите, она «тянет» звезду то в одну, то в другую сторону. Эти гравитационные возмущения проявляются в слабых колебаниях звезды, накладывающихся на её траекторию движения. Они могут быть зарегистрированы как периодические изменения скорости дрейфа звезды по регистрации эффекта Доплера. К примеру, если бы какой-либо астроном следил за Солнцем с другой звездной системы, то он зафиксировал бы основное колебание нашей звезды на орбите, с периодом обращения Юпитера в 11.5 лет.

Среди звезд, у которых искали планетные системы, наиболее известная, это звезда Барнарда. Эта звезда быстрее других перемещается по небу и находится сравнительно недалеко от Солнца (6 световых лет). Примерно к 1960 году после почти 45-летнего периода наблюдений за этой звездой было вычислено, что на её орбите вращаются две планеты, размером примерно с Юпитер, с периодами обращения 12 и 24 года. Другим широко известным объектом с субзвездной массой стал открытый в 1984 году спутник соседней с Солнцем звезды Ван Бисбрук 8, получивший обозначение VB8-b. Его масса составляла примерно 1/20 от массы Солнца. Именно этот объект был первым обнаруженным коричневым карликом. В настоящее время можно утверждать, что не существует непрерывного ряда объектов, заполняющих промежуток между звездами и планетами

Полученные в последние годы наблюдения, по мнению многих астрономов, заставляют пересматривать свои взгляды на проблему образования Солнечной системы и, вообще, на устройство Мира. В первом случае, вопрос заключается в том, как же смогли сформироваться планеты вблизи звезды, когда и сама звезда и далекие планеты ещё находятся в стадии образования, Суть второго вопроса: «как же смог сформироваться столь массивный и плотный мир в такой необычайно близости от своей звезды»? Речь идет о наблюдении планеты CoRoT-Echo-3b, плотность которой достигает 45 г/см^3 .

Астрономы из США, Мексики и Венесуэлы нашли две звезды, которые, не успев ещё полностью сформироваться, уже обзавелись целыми семьями планет. Считается, что это самые молодые планетные системы, известные к настоящему времени (рис. 3, слева). Ситуация изображенная на этом рисунке повторяет ситуацию, следующую из нашей модели, когда планеты 6–9 (Юпитер, Сатурн, Уран и Нептун) ещё формировались, планеты 1-4 были уже созданы, а звезда (Солнце) в это время ещё находилось в стадии формирования (её масса равна площади заштрихованного треугольника). Формирование

планет 1-9 началось одновременно с формированием звезды, однако, произошла бифуркация и часть вещества, «принадлежащего» планетам 1-5, было «отобрано» звездой.

Спутник CoRoT нашёл сразу несколько внесолнечных планет и, среди них, - загадочный тёмный объект неизвестной природы. Его масса в 50 раз меньше, чем у Солнца, а плотность в 4 раза больше, чем у свинца. Для бурых карликов – объектов промежуточных между планетами и звёздами масс – это слишком плотно, и, возможно, астрономам придётся переписать их теорию.

Приведем параметры планеты CoRoT-Echo-3b (далее, С) и определим «отношение» к такому объекту нашей модели образования Солнечной системы: масса $M_c = 4 \cdot 10^{31}$ г, радиус $R_c = R_{\text{Ю}} = 610^9$ см, расстояние от звезды до С: $r = 7.5$ млн. км (что составляет 0.05 АЕ). Масса звезды немного больше массы Солнца. Для грубой оценки, массы звезд будем считать равными.

Объект С обращается вокруг звезды за 4,25 земных дня по почти круговой орбите радиусом около 7,5 миллиона километров и при массе 20,2 масс Юпитера (около 2% солнечной) имеет диаметр лишь около 0,8–0,9 юпитерианских. Средняя температура поверхности CoRoT-Echo-3b при такой близости к центральной звезде должна быть около 2 200 градусов по шкале Цельсия – если, конечно, у него нет внутренних источников энергии.

Гравитационный потенциал GM/R планеты С: $GM/R = 6 \cdot 10^{-8} \cdot 4 \cdot 10^{31} / 6 \cdot 10^9 = 4 \cdot 10^{14}$ см²с⁻². GM/R звезды на расстоянии r до планеты С: $GM/R = 6 \cdot 10^{-8} \cdot 4 \cdot 10^{31} / 7.5 \cdot 10^{11} = 3.2 \cdot 10^{14}$ см²с⁻². Отсюда следует, что звезда, если бифуркация произошла вблизи планеты С, могла «снести» её газовую компоненту и, в этом случае, у такой звезды крупных планет (типа Юпитера) - быть не может, чего, собственно, и не наблюдается. На рис. 3 эта ситуация отображена треугольником, находящимся в непосредственной близости от S (Солнца). Начальная плотность такого объекта может быть равна плотности центральной части Коричневого карлика (рис. 5) и могла достигать в момент образования 80 г/см³. В процессе эволюции такая «планета» остывает, расширяется и её плотность уменьшается и достигает величины 45 г/см³.

Наша модель позволяет оценить и то, что бы могло произойти, если бы бифуркация произошла не в районе пояса астероидов, а вблизи Меркурия. Расстояние Меркурия до Солнца $r = 58.5$ млн. км, $GM_{\text{М}}/R_{\text{М}} = 6 \cdot 10^{-8}$ Мм/Рм. Положим, что начальная плотность Меркурия была 45 г/см³. Примем условие бифуркации в области Меркурия: GM/R Солнца $\geq GM/R$ Меркурия = $GM/R = 6 \cdot 10^{-8} \cdot 2 \cdot 10^{33} / 5.8 \cdot 10^{13} = 210^{13}$ см²с⁻². Можно оценить массу Меркурия до бифуркации $M_{\text{М}}^{2/3} = 2 \cdot 10^{21}$, или: $M_{\text{М}} = 9 \cdot 10^{32}$ г, что больше массы Меркурия ($3 \cdot 10^{26}$) в $3 \cdot 10^6$ раз.

Эта ситуация отражена на рис. 3 положением прямоугольника на орбите Меркурия (1). Плотность этого объекта примерно на 6 порядков больше плотности Меркурия.

Обсуждение модели.

Обратимся к физике самоорганизации. Как известно, открытая система самоорганизуется в том случае, если в системе сосуществуют два процесса: диффузии и переноса (перколяции). Как отмечалось, в основе нашей модели образования Солнечной системы положено взаимодействие двух механизмов. Во-первых, это генерация и распространение волн плотности вдоль протосолнечного диска от его центра к периферии. Этот механизм приводит к образованию сгущений материи в пучностях волн. Здесь, в дальнейшем, начинается гравитационное самосжатие вещества. Во-вторых, это перенос вещества от периферии диска к образующейся в его центре звезде – Солнцу. Чем эффективнее происходит взаимодействие этих механизмов друг с другом, тем эффективнее самоорганизация, и тем ниже параметр D . Параметр D оказался ниже в

области внутренних планет. Этот факт говорит о том, что процесс их образования проходил в более «комфортных» условиях, чем у больших газообразных планет. То, что этот параметр плавно меняется от $D = 1.75$ до $D = 2.6$, - показывает, что все планеты Солнечной системы образовались в едином процессе. Уменьшение плотности потока переноса массы с увеличением расстояния от Солнца очевидно, По-видимому, именно этот факт был определяющим в том, что D возрастает с ростом R . То, что масса вещества, «отнятого» у планет земного типа, точно равна массе Солнца, - так же говорит в пользу того, что планеты образовались в одном сценарии образования звезды.

Заметим, что используемое нами понятие самогравитации (самосжатия) не имеет четкого и однозначного толкования. В теории звездообразования Линя и Шу (Lin, et al., 1969; Roberts, 1969) используется понятие самогравитации, как единственный способ образования звезды в тех областях пространства, куда приходится пучность галактической волны плотности. Очевидно, что для начала процесса самогравитации необходимо выполнение условия критерия Джинса. Однако совершенно не ясно, что может произойти, если процесс самогравитации уже начался, а в силу изменившихся обстоятельств, - количество вещества стало уменьшаться, например, за счет выноса его к образуемому Солнцу. Если предположить, что процесс самогравитации уже начался, и он начался с формирования железно-каменного ядра (принято считать, что у Юпитера и других планет гигантов, именно такое ядро), и он в любом случае прерваться не может, то наша модель оказывается вполне правдоподобной.

Обсуждая модель образования Земли и всей Солнечной системы из одного материала, мы не касались проблемы, состоящей в том, как может образоваться твердая силикатная Земля из газообразного облака. Эта проблема рассмотрена в рамках разрабатываемой модели горячей Земли (Кузнецов, 1990, 1998). Согласно модели, во внутреннем ядре Земли находится то же самое вещество, из которого образовались Солнце и планеты, как большие, так и маленькие. Другие оболочки Земли состоят из этого же вещества в конденсированном (жидком и кристаллическом) состоянии, причем, именно в той же самой пропорции, что и на Солнце, за вычетом легких газов (водорода, кислорода, азота и др.).

Заметим, что наша модель образования Солнечной системы не учитывает эффектов вращения протосолнечной туманности и образовавшихся из неё Солнца и планет, сохранивших как вращение в плоскости эклиптики, так и приобретших собственное вращение вокруг оси. Причина состоит в том, что до сих пор нет понимания, почему все гравитирующие тела, от спутника до Вселенной, - вращаются? Очевидно, что вращение, - это фундаментальное свойство природы, однако, ясного понимания этого феномена пока нет. Учет приливных сил в модели конечно возможен, но это только усложнит модель и не даст принципиальных отличий от рассматриваемой нами ключевой идеи образования Солнечной системы. Как показано в (Votyakov, et al., 2002), медленное вращение вещества не дает заметного вклада в процесс самогравитации.

Выше мы не останавливались на таком вопросе, который может возникнуть в ходе обсуждения модели образования Солнечной системы. Вопрос состоит в том, может ли поток вещества от точки бифуркации, - к Солнцу, взаимодействуя (соударяясь) с планетой, двигающейся по своей орбите, изменить эту орбиту. Легко показать, что этого случиться не может. Докажем это на простой оценке, которую проведем для Меркурия. Почему выбран именно Меркурий? С одной стороны, это самая маленькая планета, которую проще всего «сбить» с орбиты, с другой, на неё действует самый большой поток вещества. Если окажется, что отношение импульсов $Mv/mV_m \gg 1$ (орбитальный импульс значительно больше импульса бокового «удара»), то утверждение можно считать доказанным. Здесь M – масса Меркурия ($M \approx 3 \times 10^{26}$ г), v - орбитальная скорость ($v \approx 50$ км/с), m - масса потока, V_m – скорость падения вещества на орбите Меркурия ($V_m \approx 5$ км/с). На рис. 3 показано, что, полная масса потока пропорциональна площади треугольника: от точки 6 до линии 1 1', которая должна составлять примерно $10^{-5} M_{\odot}$.

(Как было показано выше, площадь всего треугольника равна M_{\odot}). Выясним, какая же часть потока от $10^{-5}M_{\odot}$ может попасть на Меркурий. Для этого необходимо задаться толщиной протосолнечного диска H . Примем, что толщина H равна диаметру протосолнца на момент бифуркации $H = 5$ млн. км. Тогда часть потока, попадавшего на Меркурий равна отношению площади его поверхности (πr_M^2) и площади сечения потока ($2\pi R_1 \times H$), где R_1 – радиус орбиты Меркурия ($R_1 \approx 60$ млн. км). Здесь r_M – радиус планеты Меркурий ($r_M \approx 2.4$ тыс. км). Это составляет $\approx 10^{-8}$ потока. Отношение импульсов $Mv/mV_m \approx 10^7$, значительно больше 1, что и требовалось доказать.

Несмотря на эту оценку, показывающую малый вклад потока в орбитальное движение планет земной группы, именно этот поток при взаимодействии его с волновым механизмом, приводит к «корректировке» орбит этих планет таким образом, что фрактальная размерность этой системы уменьшается, что свидетельствует о более высокой степени самоорганизации. По всей видимости, это взаимодействие основано не на упругом соударении частиц потока с планетой, а, скорее, на изменении параметров самого волнового процесса.

В заключение отметим, что наша модель решает все три проблемы, упомянутые в начале: 1. Юпитер, как и другие планеты-гиганты, – планета горячая. (Можно сделать предположение, что источником теплового потока Юпитера может быть, например, механизм рекомбинации ионизированного, в момент образования планеты, водорода). 2. Коричневые карлики, – естественные в природе образования, связующие звезды с газообразными планетами-гигантами. (Оценив внутреннюю температуру Коричневых карликов, можно предположить, что действующий в их недрах механизм состоит в синтезе водорода из протонов и нейтронов). 3. Оцененное время образования планет (для Земли примерно 10 000 лет) существенно меньше 1 млн. лет, что соответствует оценке Тропа (Throop, et al., 2001), и значительно меньше принятой оценки времени образования Земли равной 100 млн. лет.

И, наконец, согласно теореме Гёделя, которая утверждает, что полнота и непротиворечивость в рамках одной логической системы не сочетаются, модель образования Земли и всей Солнечной системы, претендуя на возможную полноту картины, не может не содержать некоторых неясностей и даже противоречий. Основная идея состоит в доказательстве, казалось бы, очевидного факта, что все элементы Солнечной системы (звезда, планеты и спутники) образовались одновременно и в едином процессе. Этот вывод неумолимо приводит к требованию пересмотра общепринятой системы взглядов на звезды, Коричневые карлики, большие и малые планеты и их спутники.