

## МОДЕЛЬ ОБРАЗОВАНИЯ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ В ЕДИНОМ МЕХАНИЗМЕ РОЖДЕНИЯ СОЛНЦА

В.В. Кузнецов

## THE MODEL OF SOLAR SYSTEM FORMATION IN THE UNIFIED MECHANISM OF THE SUN'S BIRTH

V.V. Kuznetsov

Наличие фрактальности, скейлинга и бифуркации в Солнечной системе может говорить о том, что в момент ее образования имели место процессы самоорганизации. Оценка величины фрактальной размерности  $D$  зависимости планетарных расстояний  $R$  от номера планеты  $n$ ,  $D = \lg R / \lg n$  показала, что  $D$  внутренних планет одинакова ( $D = 1.75$ ), а у внешних возрастает, по мере увеличения  $n$  от 1.97 у пояса астероидов до 2.6 у Нептуна. Характер зависимости  $D(n)$  показывает, что внутренние планеты формировались в условиях, несколько отличающихся от условий формирования внешних планет. В процессе образования Солнечной системы в области пояса астероидов произошло резкое изменение характера процесса – бифуркация, разделившая его на две различные стадии. К моменту бифуркации, протосолнечный диск был разбит на кольца и в каждом из колец начался процесс формирования ядер планет, аналогичный тому, который привел к образованию Солнца.

Процесс формирования Солнца, планет и их спутников един. Время формирования планет и спутников лишь немного больше времени формирования Солнца. Эта посылка определяет «горячий» механизм образования планет и спутников Солнечной системы.

The model of Solar System formation and evolution in the unified mechanism of the Sun birth is presented. Fractal dimensions, scaling, and bifurcation in the Solar System bear evidence of self-organization at the moment of its formation. Fractal dimensions  $D$  defined by planetary distance  $R$  vs. planet number  $n$  logarithmic relationships ( $D = \lg R / \lg n$ ), are the same (1.75) for the terrestrial (inner) planets and increase with  $n$  for the giant outer planets from 1.97 in the asteroid belt to 2.6 in Neptune. The behavior of  $D(n)$  function shows that the inner and outer planets were formed in different conditions. During the process of the Solar System formation there was abrupt bifurcation in the region of the asteroid belt whereby the protosolar disc split into several disks and the formation of iron-rocky planet cores proceeded within each disk, by the same mechanism that produced the Sun.

The Sun, the planets, and their satellites apparently formed in a unified process, by the "hot" mechanism, and the formation of the planets and the satellites was only slightly longer than the Sun formation.

### Введение

Проблема образования Солнца, Земли, других планет и их спутников – одна из самых старых проблем, волнующих человечество. Механизм образования планеты играет принципиальную роль и определяет ее физические свойства и особенности эволюции. В течение последних 50 лет принято рассматривать только один из двух возможных сценариев образования Земли и других планет. Это сценарий, по которому Земля постепенно, в течение примерно 100 млн. лет, «склеивалась» из планетозималей, возникающих в протопланетном пылевом облаке. Такой механизм приводит к образованию «холодной» планеты, так как все тепло, которое выделяется при ее формировании, излучается в космос. Другой возможный механизм образования планеты – быстрое сжатие ее вещества за счет самогравитации. При этом вещество планеты, в том числе и Земли, оказывается нагретым до высокой температуры, а тепло, выделяющееся при образовании, запасается в ее недрах. Например, вещество Земли при таком способе «изготовления» оказывается нагретым до температуры ~30000 К [1]. Температура вещества Юпитера в момент его образования, согласно оценке, аналогичной [1], оказывается порядка 300000 К и т.п.

Механизм образования холодной Земли и других планет Солнечной системы считается общепринятым. Однако, согласно экспериментальным данным астрономии и астрофизики, этот механизм не получил ни одного подтверждения. По-видимому, первый

удар механизму холодного образования планет был нанесен после интерпретации данных, полученных космическими аппаратами «Пионер-Х» и «Пионер-Х1», с помощью которых 25 лет тому назад было обнаружено мощное тепловое излучение, исходящее от Юпитера [2]. В этих экспериментах также обнаружена высокая симметрия гравитационного поля Юпитера, характерная для газового шара. Автор [2] оценил температуру центральной части Юпитера по величине теплового потока из его недр. Эта температура оказалась равной 165000 К, что примерно в два раза ниже, чем наша оценка (см. рис. 1). После открытия теплового излучения Юпитера возникла дискуссия о том, что представляет собой Юпитер: планету или звезду. Заметим, что в последнее время появились работы, в которых, например как в [3], авторы допускают, что недра Юпитера, как и других планет гигантов, горячие. Второй удар механизму холодного образования планет был нанесен открытием коричневых карликов – инфракрасных звезд, занимающих по массе промежуточное положение между Юпитером и Солнцем [4–6]. Возникла парадоксальная ситуация: Юпитер – планета холодная, в недрах которой водород находится в жидком и даже твердом состоянии, а коричневый карлик, масса которого всего в 10 раз больше, чем у Юпитера, – звезда (хоть и инфракрасная). Наконец, результат, полученный в самое последнее время с использованием внеатмосферного телескопа Хаббла [7], можно считать третьим и самым решительным ударом по

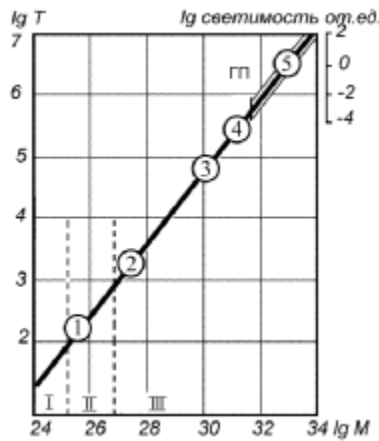


Рис. 1. Температура  $T$  образования объектов: Солнца (5), коричневого карлика (4), Юпитера (3), Земли (2) и Луны (1) – как функция их массы  $M$ . В верхнем правом углу зависимость светимости звезд Главной последовательности (в отн. ед.) от их массы I–III – классы объектов Солнечной системы.

холодной модели. В [7] приведены результаты исследований спектров пропускания галактического электромагнитного излучения в широком диапазоне длин волн при просвечивании околозвездных дисков в туманности Ориона. Возраст этих околозвездных дисков не превышает 100000 лет. Согласно общепринятой модели образования планет, в таком диске должны находиться планетозимали, рассеивающие это излучение. Однако ожидаемого эффекта поглощения электромагнитного излучения не обнаружено. Авторы [7] пришли к выводу, что планеты в этом диске уже сформировались, хотя время их формирования значительно меньше (в 1000 раз!), чем следует из принятой модели формирования планет.

Что же 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 телескопа Хаббла в самые последние годы в межзвездной астрономии, вполне оправдывают привлечение внимания к такому, казалось бы, весьма тривиальному вопросу. На страницах журнала Science [8] и в сети Интернет [9] 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 последнее время.

### Фрактальность Солнечной системы

Одна из основных закономерностей, свойственных Солнечной системе – закон планетарных расстояний (от Солнца до планеты) Тициуса-Боде – записывается в виде [10, 11]:

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

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 образования Солнечной системы.

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. Фрактальность Солнечной системы может быть обнаружена, если оценить фрактальную, хаусдорфову размерность [12]  $D_H$ :

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

Здесь  $N$  – число событий;  $r$  – их энергия (сила). Зная величину фрактальной размерности, можно говорить о характере процесса самоорганизации. В Солнечной системе совсем немного параметров, на анализе которых можно делать вывод о наличии процессов самоорганизации. Фактически таких параметров два: номер планеты  $n$  (в отличие от (1)) и ее расстояние от Солнца  $R$ . В такой ситуации, если бы была обнаружена зависимость типа:

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

где размерность  $D$  – не целое число;  $A$  – константа, то можно было бы говорить о фрактальности Солнечной системы.

Зависимость расстояния планет от Солнца  $R$  от номера планеты  $n$  представлены на рис. 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. Первая: Меркурий (1), Венера (2), Земля (3), Марс (4). Вторая: группа от пояса астероидов (5) до Плутона (10). Здесь же показана фрактальная размерность  $D$ , которая выявила интересную особенность зависимости (3).

Величина  $D$  определялась нами по формуле:

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

Для Меркурия, Венеры, Земли и Марса величина  $D$  неизменна и равна 1.75 (см. рис. 2, ромбы), для пояса астероидов  $D$  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 вы-

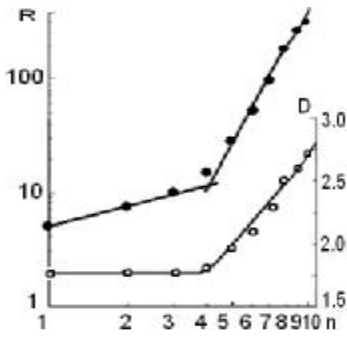


Рис. 2. Зависимость расстояний планеты от Солнца  $R$  (а.е.) и фрактальной размерности  $D$  от порядкового номера планеты  $n$  ( $\lg-\lg$ ). 1 – Меркурий, 2 – Венера, 3 – Земля, 4 – Марс, 5 – пояс астероидов, 6 – Юпитер и т.д.

ше степень самоорганизации структуры и что по мере эволюции самоорганизующейся системы величина ее 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 ее размерность равна 2. Мы получили размерность системы, равную не целому, а дробному числу, что говорит о ее 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 материи в Солнечной системе

Как известно, планеты вращаются вокруг Солнца в одной плоскости плоскости эклиптики, совпадающей с его экватором. Полагая структуру, состоящую из Солнца и планет, двумерной, имеет смысл оценивать не объемную плотность вещества Солнечной системы, а поверхностную. 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 нее 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:

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

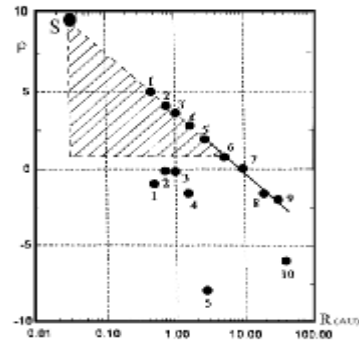


Рис. 3. Зависимость  $(\lg-\lg)$  величины поверхностной плотности  $\rho$  для планет Солнечной системы от их расстояний  $R$  до Солнца. Номера соответствуют номерам планет на рис. 2. Масса заштрихованного треугольника равна массе Солнца. Величина плотности, обозначенная  $1'$ ,  $2'$ ,  $3'$  и т.д. соответствует плотности до бифуркации.

На рис. 3 приведены величины поверхностной плотности  $\lg\rho(R) - \lg R$  для Солнца (S) и планет: Меркурия (1), Венеры (2), Земли (3) и т.д. Обратим внимание на характер зависимости величины  $\rho(R)$  для Юпитера (6), Сатурна (7), Урана (8) и Нептуна (9). Очевидно, что эти данные не случайны. Такое распределение характеризует нормальное (гауссово) распределение плотности по расстоянию от Солнца. Предположим, что зависимость  $\rho(R)$  для  $n = 6-9$ , показывает распределение плотности в протосолнечной туманности в начальный момент формирования самого Солнца и планетной системы накануне бифуркации. Продолжение прямой линии, соединяющей точки 9, 8, 7, и 6 в направлении от Нептуна к Солнцу (S), показывает, согласно нашим предположениям, начальное распределение плотности в протосолнечном диске на этапе формирования Солнца и планет. Точки  $5'$ ,  $4'$ ,  $3'$ ,  $2'$  и  $1'$  показывают  $\rho(R)$  на орбите пояса астероидов и планет земной группы накануне бифуркации. Следуя принятому предположению, можно сделать вывод, что если бы бифуркация произошла ближе к Солнцу, чем она имела место в Солнечной системе, например, в области формирования Марса ( $4'$ ), то вместо пояса астероидов в Солнечной системе образовался бы коричневый карлик. Если начало процесса бифуркации затянулось бы на некоторое время (порядка одного года) и произошло бы на орбите Земли ( $3'$ ), то вместо Марса сформировалась бы еще одна звезда. При этом Солнечная система принадлежала бы ряду двойных звезд, составляющих 90 % нашей Галактики. Планеты, такой как Земля, пригодной для развития жизни, образоваться уже не могло бы.

Оценить местоположение точки бифуркации можно из простого соотношения. Если на радиусе орбиты планеты  $R$  гравитационный потенциал Солнца  $GM_{\odot}/R$  больше или равен собственному потенциалу образующейся планеты массой  $M_p$  и радиусом  $R_p$  ( $GM_{\odot}/R \geq GM_p/R_p$ ), то бифуркация может произойти на расстоянии  $R$ . Например, гравитационный потенциал Солнца  $GM_{\odot}/R$  на расстоянии до Земли  $R = 6 \cdot 10^{12}$  см/с<sup>2</sup>, в то время как собственный потенциал Земли:  $6 \cdot 10^{11}$  см/с<sup>2</sup>. Для Юпитера  $GM_{\odot}/R = 10^{12}$  см/с<sup>2</sup>,

а собственный потенциал  $GM_p/R_p = 2 \times 10^{13} \text{ см}^2/\text{с}^2$ . Для пояса астероидов выполняется условие  $GM_{\odot}/R = GM_p/R_p \approx 2 \cdot 10^{12} \text{ см}^2/\text{с}^2$ . В этом случае возникает возможность оценить  $M_p/R_p$  планеты, вместо которой образовался пояс астероидов. Перемена местоположения точки бифуркации, о которой шла речь выше, связана с тем, при каких параметрах  $M_{\odot}$ ,  $R$ ,  $M_p$  и  $R_p$  выполняется это равенство.

### 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 сжатию за счет самогравитации. Соотношение между давлением самогравитации и газокинетическим давлением «регулируется» критерием Джинса, который требует, чтобы концентрация вещества была больше некоторой критической плотности  $\rho_c$ , при которой гравитационные силы и внутреннее давление точно сбалансированы [13]. Численная оценка плотности вещества для облака с массой  $M$  и температурой  $T$  [14]:

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

Здесь критическая плотность вещества  $\rho_c = m_c \mu m_p$ ;  $\mu$  – атомный вес;  $m_p$  – масса протона. Типичное большое диффузное облако может иметь массу  $M = 10^3 M_{\odot}$  и  $T = 100 \text{ К}$ . ( $M_{\odot}$  – 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;  $\rho$  – плотность вещества облака.

Критическая джинсова плотность  $\rho_c = M_n/\lambda^2$ , где  $\lambda$  – 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

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

Условие самогравитации (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.

На рис. 3 показана 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 мо-

мент 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 железо-каменные ядра будущих планет. Вся оставшаяся масса протосолнечного диска (в основном водород) была использована на образование Солнца. На рис. 2 заштрихованный треугольник показывает ту часть вещества протосолнечного диска, которая пошла на формирование Солнца массой  $M_{\odot}$ .

Оценим массу  $M_{\odot}$  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:

$$M_{\bar{a}} \gg A r^2 / (n-2) r^n. \quad (12)$$

Здесь  $R$  – радиус орбиты пояса астероидов;  $a$  – радиус протосолнца в момент бифуркации;  $n$  мы оценили по наклону прямой ( $n = 3.55$ ). Оценим величину  $A$ , подставив значения массы  $M_{J0}$  и радиуса орбиты  $R_{J0}$  для Юпитера:

$$A = R_{J0}^n M_{J0} / \pi R_{J0}^2 = 1/1.55 \pi (R_{J0}^{1.55} M_{J0}). \quad (13)$$

Подстановка формулы  $A$  в выражение для  $M_{\bar{a}}$  дает:

$$M_{\bar{a}}/M_{J0} \gg 1/5 (R/r)^{1.55}, \quad (14)$$

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. Таким образом, бифуркация произошла в момент формирования Солнца, когда его радиус был примерно в три раза больше современного, т.е. процесс его формирования еще не закончился.

### Возможный механизм формирования Солнечной системы

Принято считать, что формирование звезд, входящих в состав галактик, является следствием некоего волнового механизма, приводящего к генерации волн плотности. После исследований Линя и Шу [15, 16], которые предложили модель спиральных волн плотности, теория спиральной структуры Галактики стала активно развиваться. Согласно этой модели, по спиральным рукавам Галактики распространяются продольные волны плотности, которые генерируются в центральной части Галактики аналогично звуковым волнам плотности, распространяющимся в газе. Плотность звездного вещества возрастает в пучностях этих волн, и при этом создаются условия, необходимые для образования звезд.

Предположим, что аналогичным образом 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.

Используем механизм Линя и Шу и будем полагать в дальнейшем, что при формировании Солнечной системы, а также при формировании систем Юпитера, Сатурна и Урана за счет самогравитации их вещества в протосолнечном (протопланетном) диске возникали волны плотности, структура которых 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 по кеплеровским орбитам.

- Плотность и температура вещества диска были достаточно высоки для того, чтобы начался процесс самогравитации с гравитационной (альфвенской) скоростью падения частиц на центральное тело (Солнце или планету), большей, чем та скорость, которая требуется по критерию Джинса [13].

- 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 можем оценить нижний предел массы планеты, у которой образуетаякая система спутников,  $\approx 15M_E$ , ( $M_E$  – масса Земли). Вокруг Урана, масса которого  $14.5M_E$ , система регулярных спутников имеется, в то время как вокруг Нептуна ( $17.2M_E$ ) ее нет. Возможная причина

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 ее центральной части: железо-каменного ядра. Модель будем строить на аналогии с процессом коагуляции, т.е. роста капли при «падении» на нее частичек газа. Обозначим характерное время столкновения частицы газа с «каплей» (зародышем звезды, планеты, спутника) через  $t$ . Время  $t = (\sigma nv)^{-1}$ , где  $\sigma = \pi r^2$  – сечение капли,  $n = \rho/m$  – концентрация частиц в газе,  $m$  – масса частицы,  $v$  – ее скорость,  $r = (V_k)^{1/3}$  – радиус капли,  $V_k = V_q g$  – объем капли,  $V_q$  – объем частицы,  $g$  – число частиц в капле.

Время роста капли:

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

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

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

где  $\rho_o$  – плотность вещества протопланетного диска.

Из (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  $\rho_n$ , получаем выражение для  $t_{\min}$ :

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

Время образования (в годах) после подстановки  $\rho_o(\text{г/см}^3)$ :

$$t_{\min} \gg 10^{-4} / \rho_o \quad (18)$$

Скорость роста капли  $dr/dt$  оценим аналогично предыдущему:

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

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 Фэтон, 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.

Примем, что в сжимающемся протосолнечном диске действовал волновой механизм, генерирова-

лись волны плотности, аналогичные звуковым, с частотой  $\omega$ . Скорость их распространения  $c_s$  зависит от давления  $p$  и плотности вещества  $\rho$  как:  $c_s \sim (\gamma p/\rho)^{1/2}$ , ( $\gamma$  – 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.

### Почему не образовалась планета Фэзтон?

Если масса планеты меньше джинсовой критической массы, то она не должна образоваться за счет механизма самогравитации (самосжатия). Однако 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 еще не закончилось. Почему же не образовалась планета Фэзтон? 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 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.

Обратим внимание еще на один критерий, связанный с формированием планеты, о существовании которого мы раньше не упоминали. Обозначим скорость дрейфа частиц вдоль кольца радиусом  $R$  ( $R$  равно расстоянию до Солнца) через  $v_R$ . Эта скорость определяет время формирования протопланетного диска:  $t_R = 2\pi R/v_R$ , отсюда следует, что  $t_R \sim R$ . Условие образования планеты очевидно:  $t_T > t_R$ , где  $t_T$  мы оценили выше (18):  $t_T \gg t_{\min} \gg 10^4/\rho_0$ . Для удобства, вместо  $t_R$  введем некую плотность  $\rho_R \sim 1/t_R$ , которая пропорциональна  $1/R^2$ . Вполне возможно, что именно в области пояса астероидов условие  $t_T > t_R$  не выполнялось. Из рис. 3 следует, что линия  $\rho_R$  проходит ниже точки 5', которая показывает плотность диска перед началом бифуркации. Вполне возможно, что этот, или подобный ему механизм был причиной того, что Фэзтон 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 (про-

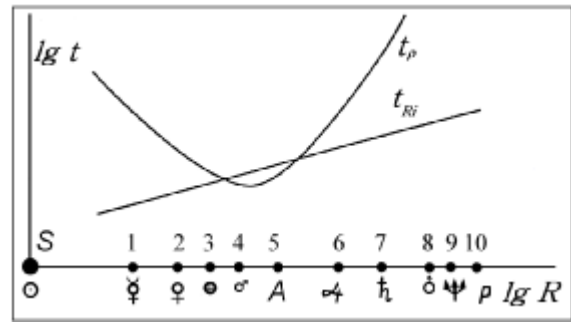


Рис. 4. Соотношение  $(\lg - \lg)$  времен образования планеты  $t_T$  и стягивания вещества кольца  $t_R$  в зависимости от расстояния планеты до Солнца  $R$ . 1–Меркурий, 2 – Венера, и т.д.

должение прямой 9–6 на рис. 3), оказалось, что по мере приближения к Солнцу, величина плотности стала убывать (точки 4–1 на рис. 3).

Плотности для Земли, Марса и пояса астероидов были оценены и оказались равными соответственно:  $\rho_0 = 10^{-8}$ ,  $2 \cdot 10^{-8}$ ,  $2 \cdot 10^{-8}$  г/см<sup>3</sup>. Эти оценки использовались для определения величин  $t_T$  и  $t_R$  (в годах):  $t_T$ :  $10^4$ ,  $5 \cdot 10^3$ ,  $5 \cdot 10^3$  и  $t_R$ :  $3 \cdot 10^3$ ,  $4.8 \cdot 10^3$ ,  $8.4 \cdot 10^3$ . Отсюда следует, что условие  $t_T > t_R$  не выполняется для зоны пояса астероидов. Это условие для кольца Марса выполнялось частично, что, вероятно, и привело к тому, что планета Марс оказалась такой маленькой. На рис. 4 показана эта ситуация, согласно которой  $t_T \gg t_R$  для Марса и  $t_T < t_R$  для пояса астероидов. Возможно невыполнение условия  $t_T > t_R$  определило то, что на месте пояса Астероидов так и не образовался Фэзтон. Однако самосжатие вещества началось еще до бифуркации, и именно этот факт послужил причиной того, что вместо формирования целого железо-каменного ядра образовались мелкомасштабные компоненты, составляющие пояс астероидов.

### Главная последовательность: звезды – планеты – спутники

Наша модель базируется на постулате, согласно которому Солнце, планеты и их спутники образовались по единому сценарию и в едином процессе. Механизм образования един для звезды, планеты, спутника. Все различия между ними заключаются лишь в количестве исходного материала, участвующего в этом процессе.

Принято считать, что в основе существования звезды лежит термоядерная реакция и минимальная масса звезды, в которой еще способна протекать термоядерная реакция, составляет примерно 1/25 от массы Солнца. Что представляют собой объекты, масса которых меньше минимальной? Известно, что масса Юпитера меньше массы Солнца в 1000 раз, а масса коричневого карлика в 100, таким образом наличие коричневых карликов, продолжает логичную последовательность звезд и планет. На рис. 1 показана примерная зависимость логарифма температуры звезды, планеты, спутника от логарифма их массы. Как следует из этого рисунка, спутники, планеты и коричневые карлики, могут являться продолжением Главной последовательности звезд. Их различия опреде-

ляются только количеством вещества, участвующего в процессе, так как именно оно, определяет главную характеристику объекта – его температуру.

Под температурой ( $T$ , рис. 1) 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:  $T \gg 3/5 GM/Rc_p$ , 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.

Для звезд Главной последовательности зависимость, аналогичную  $T \sim M^{2/3}$ , можно получить, и сопоставить два графика из [17]: зависимостей светимости звезды от температуры  $T$  и светимости от массы звезды  $M$  (рис. 1, вверху справа). При этом сопоставлении мы полагали, что температура поверхности звезды однозначно связана с температурой ее ядра, что тоже не совсем очевидно.

Обратим внимание на закономерность Солнечной системы: все тела в ней размером от Солнца до спутника Юпитера Европы 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 ее вещества порядка  $1.5 \cdot 10^3$  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  $U_u = 15$  кДж/г, а величину теплоты плавления (кристаллизации)  $U_n = 1$  кДж/г. Космические тела Солнечной системы можно условно разделить на три класса. Для первого класса  $GM/R < U_n$ , для второго  $U_n < GM/R < U_u$ , для третьего  $GM/R > U_u$ . Малые спутники и астероиды отнесем к первому классу (см. рис. 1), ко второму – большие спутники и маленькие (меньше Венеры) планеты и к третьему – планеты с массой, большей, чем у Венеры.

### Заключение

Солнечная система в момент ее образования представляла собой открытую самоорганизующуюся структуру, в которой Солнце, планеты и спутники образовались одновременно и в едином процессе. Такой подход однозначно определяет характерное

время процесса. Оно не должно слишком отличаться от времени формирования звезды, которое, как принято считать, не превышает 1 млн. лет. Этот подход однозначно определяет «горячий» способ происхождения звезды, планет и спутников.

Обратимся к физике самоорганизации. Как известно, открытая система самоорганизуется в том случае, если в системе сосуществуют два процесса: диффузия и перенос (перколяция). Как отмечалось, в основе нашей модели образования Солнечной системы положено взаимодействие двух механизмов. Во-первых, это генерация и распространение волн плотности вдоль радиуса 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, также говорит в пользу того, что планеты образовались по одному сценарию образования звезды.

Заметим, что используемое нами понятие самогравитации (самосжатия) не имеет четкого и однозначного толкования. В теории звездообразования Линя и Шу [15, 16] используется понятие самогравитации как единственного способа образования звезды в тех областях пространства, где находится 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 образующемуся Солнцу. Если предположить, что процесс самогравитации уже начался, и он начался с формирования железо-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 [18]. Согласно модели, во внутрен-

нем 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 нее Солнца и планет, сохранивших как вращение в плоскости эклиптики, так и приобретенных 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 – 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 [19], медленное вращение вещества не дает заметного вклада в процесс самогравитации.

Выше мы не останавливались на проблеме, которая может возникнуть в ходе обсуждения модели образования Солнечной системы. Суть ее 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 простой оценкой на примере Меркурия. Почему выбран именно Меркурий? С одной стороны, это самая маленькая планета, которую проще всего «сбить» с орбиты, с другой, на нее 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 ( $M \approx 3 \cdot 10^{26}$  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). Необходимо оценить только величину  $m$ . Полная масса потока (см. рис. 3) равна площади треугольника: от точки б до линии 1–1', которая должна составлять примерно  $10^{-5}M_{\bar{a}}$ . Как было показано выше, площадь всего треугольника равна  $M_{\bar{a}}$ . Выясним, какая же часть потока от  $10^{-5}M_{\bar{a}}$  может попасть на Меркурий. Для этого необходимо задаться толщиной протосолнечного диска  $H$ . Примем, что  $H$  равна диаметру протосолнца на момент бифуркации  $H = 5$  млн. км. Тогда часть потока, попадающего на Меркурий, равна отношению площади его поверхности ( $\pi r_M^2$ ) к площади сечения потока ( $2\pi R_1 H$ ), 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). Часть потока  $\approx 10^{-8}$ . 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 во взаимодействии 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 вначале:

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. Определенное, согласно нашей модели, время образования планет (для Земли примерно 10000 лет) существенно меньше 1 млн. лет, что соответствует оценке Троопа [7], и значительно меньше принятой оценки времени образования Земли порядка 100 млн. лет.

И, наконец, согласно теореме Геделя, 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 приводит к пересмотру системы взглядов на звезды, коричневые карлики, большие и малые планеты и их спутники.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Магницкий В.А. Внутреннее строение и физика Земли. М.: Наука, 1965. 379 с.
2. Козырев Н.А. Внутреннее устройство Юпитера // *Астрономический журнал*. 1977. Т. 54. С. 372–377.
3. Boss A.P. Formation of gas and ice giant planets // *Earth Planet. Sci. Lett.* 2002. V. 202. P. 513–523.
4. Allard F. A very cool customer // *Nature*. 1995. V. 378. P. 441–442.
5. Nelson L.A. A bright future for faint stars // *Nature*. 1995. V. 377. P. 102–103.
6. Rebolo R., Zapareto Osorio M. R., Martin E.L. Discovery of a brown dwarf in the Pleiades star cluster // *Nature*. 1995. V. 377. P. 129–131.
7. Throop H.B., Bally J., Esposito L.W., Mc Caughrean M.J. Evidence for dust grain growth in young circumstellar disks // *Science*. 2001. V. 292. P. 1686–1689.
8. McCaughrean M., Reid N., Tinney C., et al/ Gizis J. Hawley S. What is a Planet? // *Science*. 2001 V. 291. P. 1487.
9. Lissauer J. What is a Planet? // [www.sciencemag.org/cgi/content/full](http://www.sciencemag.org/cgi/content/full).



10. Melchior P. Elements canoniques des orbites et representations des distances planetaires // Acad. Roy. Sci. Lett. Beaux-Arts Belgique, Bull.33. 1947. P. 212–221.
11. Nieto M.M. The Titius-Bode law of planetary distances: its history and theory. Pergamon Press. Oxford. 1972.
12. Mandelbrot B.B. The Fractal Geometry of Nature. Freeman. New York. 1983.
13. Jeans J.H. Gravitational instability and the figure of the Earth // Roy. Soc. London Proc. 1916. V. A93. P. 413–417.
14. Clayton D.D. Between stars clouds. In Protostars and Planets / Ed. T. Gehrels. The Arizona Board of Regents. 1978.
15. Lin C.C., Yuan C., Shu F. H. On the spiral structure of disk Galaxies. III. Comparison with observations // Astrophys. J. 1969. V.155. P. 721–746.
16. Roberts W.W. Large-scale shock formation in spiral galaxies and its implications on star formation // Astrophys. J. 1969. V. 158. P. 123–143.
17. Chandrasekhar S. An introduction to the study of stellar structure. Oxford University Press. London. 1939.
18. Kuznetsov V.V. The Earth as a thermodynamic system. Russian Geology and Geophysics // 1998. V. 39. P. 993–1013.
19. Votyakov E.V., Hidmi H.I., De Martino A., Gross D.H.E. Microcanonical mean-field thermodynamics of self-gravitation and rotating systems // Phys. Rev. Lett. 2002. V. 89, P. 031101-1.

*Институт космофизических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН, п. Паратунка,*