

О некоторых общих закономерностях формирования планетных систем.

Использована геометродинамическая идея Дж.Уилера, где пространственный континуум рассматривается как топологически неодносвязная поверхность, в которой допускается существование переходов между отдаленными частями пространства в дополнительном измерении по типу сток-исток. Такая модель предполагает существование замкнутых структур (микро- и макроконтуров), образованных за счет взаимного баланса различных взаимодействий: гравитационных, магнитных и динамических. Эти структуры, вне зависимости от своей материальной основы, образуют сущностную основу объектов на различных уровнях организации материи. На основе данной концепции в статье выведены основные закономерности, действующие в период образования планетных систем. Установлено существование двух резко отличающихся типов планетных систем. Получены зависимости, связывающие массы планет, диаметры планет, расстояние планет от центрального тела и массы центрального тела. Установлена возможность образования планет земного типа вблизи бурых карликов. Определена минимальная масса планеты, могущая возникнуть в планетной системе.

1. Введение

Геометродинамическая идея Дж.Уилера, в которой микрочастицы рассматриваются как вихревые осциллирующие деформации на неодносвязной поверхности и представление о существовании переходов между отдаленными областями пространства в виде Уилеровых «червоточин» дали возможность обосновать существование замкнутых структур (микро- и макроконтуров), действующих на разных уровнях организации материи.

Эти контуры материальны, основаны на балансах между основными взаимодействиями - электрическими, магнитными, гравитационными и инерционными и **не связаны с конкретными свойствами среды**; они определяют важные свойства объектов и позволяют использовать аналогии между объектами различного уровня [1, 2, 3]. Такой подход позволяет работать с моделями, максимально независимыми от свойств объекта или среды.

В представленной работе данная концепция используется для выявления некоторых основных закономерностей при образовании планетных систем. Здесь, как и в работе [2], нет необходимости рассматривать природу космологической среды, т.е. протопланетного облака, из которого образуются планеты, и другие конкретные особенности процесса. Для получения общих закономерностей оказалось достаточным представить планетную систему в виде макроконтуров, образующих планеты, и контуров более высокого порядка, объединяющих планеты и центральное тело в общую систему.

2. Исходные предпосылки

В работе [1] показано, что с чисто механистической точки зрения *заряд* отражает меру неравновесности физического вакуума и пропорционален количеству его движения по контуру вихревой трубки тока, *спин*, соответственно, моменту количества движения относительно продольной оси контура, а *магнитное взаимодействие* между проводниками аналогично силам, действующим между трубками тока. Принято, что единичным элементом такой трубки является элемент, имеющий размер классического радиуса электрона r_e и его массу m_e .

Напомним, что в [1, 2] выражения для электрических и магнитных сил записаны в «безкулоновой» форме, где заряд заменен предельным импульсом электрона. В этом случае электрическая и магнитная постоянные ϵ_0 и μ_0 имеют смысл величины погонной плотности вихревой трубки и величины обратной силе, действующей между двумя элементарными зарядами на данном радиусе соответственно, т.е.

$$\varepsilon_0 = m_e / r_e = 3.33 \cdot 10^{-16} \text{ кг/м}, \quad (1)$$

$$\mu_0 = 1/(\varepsilon_0 c^2) = 0.0344 \text{ 1/н}, \quad (2)$$

где c – скорость света.

В работе [2] проведено взаимное сопоставление различных взаимодействий и получены основные соотношения, некоторые из них необходимы для понимания данной статьи.

1. *Баланс электрических и магнитных сил* дает среднегеометрическое - характерный линейный параметр, не зависящий от направления вихревых трубок и числа зарядов,

$$R_c = (r_0 L)^{1/2} = (2\pi)^{1/2} c * [\text{сек}] = 7.52 \cdot 10^8 \text{ м}, \quad (3)$$

- величина, близкая радиусу Солнца и размерам типичных звезд,

где r_0, L - окружной радиус или расстояние между вихревыми трубками и их длина.

2. *Баланс гравитационных и инерционных (центробежных) сил* дает максимальную гравитационную массу объекта, удовлетворяющую условию (3):

$$M_m = R_c c^2 / \gamma = f R_c \varepsilon_0 = 1.012 \cdot 10^{36} \text{ кг}. \quad (4)$$

3. *Баланс магнитных и гравитационных сил* также приводит к среднегеометрическому:

$$(r_0 L)^{1/2} = (\varepsilon / f)^{1/2} R_c, \quad (5)$$

где $\varepsilon = (z_{g1} z_{g2}) / (z_{e1} z_{e2})$ - отношение произведений относительных величин масс и зарядов в массах и зарядах электрона есть **эволюционный параметр**, который характеризует состояние среды и ее изменение по мере преобладания массовых носителей над электрическими и по существу показывает отличие материальной среды от вакуума;

f - отношение электрических сил к гравитационным, которое при данных обозначениях имеет вид:

$$f = c^2 / (\varepsilon_0 \gamma) = 4.16 \cdot 10^{42}, \quad (6)$$

где γ - гравитационная постоянная. Выражение (5) в общем случае дает семейство протяженных контуров, состоящее из противонаправленных замкнутых вихревых трубок, образующих **тг-контур**ы.

4. В свою очередь эти вихревые трубки могут состоять из ряда параллельных однонаправленных вихревых нитей, вращающихся относительно продольной оси трубки, устойчивость которых обеспечивается *балансом магнитных и инерционных сил*, образующих **тi-зоны**.

5. *Структуризация первичной среды*, где сбалансировано более одной пары сил, приводит к усложнению первоначально бесструктурной массы путем образования в ней локальных **тi-зон**. В частности, определено количество **тi-зон** в объекте произвольной массы M_i :

$$z_i = (M_m / M_i)^{1/4}. \quad (7)$$

3. Планетные системы

Пусть имеется облако из первоначального протопланетного материала, имеющее эволюционный параметр ε , в котором образуется планетная система с центральной массой M_0 и планетой с массой m_p на радиусе r_p , вращающейся с окружной скоростью v_0 . Примем, что центральное тело является точечной массой, а масса планеты образована из **тг-контур**ов

общим числом z_p и их размерами по осям l_p и d_p . Тогда масса планеты может быть выражена суммарной массой контуров:

$$m_p = z_p \varepsilon \varepsilon_0 l_p. \quad (8)$$

Характерный размер такого mg -контур, аналогично (5):

$$(l_p d_p)^{1/2} = (\varepsilon / f)^{1/2} R_c. \quad (9)$$

Допустим, число mg -контуров, составляющих массу планеты, пропорционально расстоянию до центрального тела, т.е. mg -контур является *структурной единицей для контура последующего порядка*, который связывает планету с центральным телом,

$$z_p = r_p / d_p. \quad (10)$$

Это справедливо для случая плоского однородного диска первичной туманности, где mg -контур является *одномерным*, но в общем случае плотность среды может быть различной и, несомненно, уменьшается к периферии. Протопланетный диск может иметь локальные разрежения или сгущения, т.е. иметь рукава или быть *плоскоспиральным*. Поэтому в общем случае примем:

$$z_p = (r_p / d_p)^n, \quad (11)$$

где коэффициент n отражает «упаковку» контуров в модельный объект (планету).

Окружную скорость планеты можно выразить, исходя из баланса гравитационных и инерционных сил:

$$v_0 = (\gamma M_0 / r_p)^{1/2}. \quad (12)$$

С другой стороны, можно использовать аналогию с атомом Бора, где в системе протон - электрон окружная скорость электрона на радиусе r_i равна

$$v_0 = c (r_e / r_i)^{1/2} \quad ; \quad (13)$$

тогда для контура, связывающего планету с центральным телом, принимая за единицу длины параметр l_p , можно записать аналогичное соотношение:

$$v_0 = c (l_p / r_p)^{1/2}. \quad (14)$$

Число mg -контуров для стабильного состояния объекта, как указано в [2], следует принять равным количеству mi -зон:

$$z_p = z_i = (M_m / m_p)^{1/4}. \quad (15)$$

Далее будем использовать безразмерные параметры: $M = M_0 / M_m$, $m = m_p / M_m$, $r = r_p / R_c$, $l = l_p / R_c$, $d = d_p / R_c$, $v = v_0 / c$, и $z = m^{-1/4}$. Учитывая (8-15), получаем после преобразований выражения, характеризующие зависимость массы планеты от радиуса ее орбиты и массы центрального тела:

$$m = (r M^2)^{4n / (5n-1)}, \quad (16)$$

размеры mg -контура

$$d = m^{5/4} / M^2, \quad l = M, \quad (17, 18)$$

и значение эволюционного параметра

$$\varepsilon = f m^{5/4} / M. \quad (19)$$

Однако, такая модель допускает также второй вариант ориентации mg -контура, по другой его оси. В этом случае может быть записано выражение для z_p , аналогичное (11):

$$z_p = (r_p / l_p)^k; \quad (20)$$

тогда зависимость $m(r)$, учитывая (15,18 и 20), получает вид:

$$m = (M / r)^{4k}. \quad (21)$$

В этом варианте масса образующихся планет быстро падает к периферии протопланетного диска, и, можно предположить, что такие первичные туманности имеют *линзовидный* характер. Назовем планеты, отвечающие зависимостям (16) и (20) планетами *тип I* и *тип II*, соответственно.

На рис.1-3 представлены фактические данные по экзопланетам типа I в координатах r - m , где r - размер большой полуоси, во внесолнечных планетных системах, имеющие три и более планеты. Используются материалы сайта <http://www.allplanets.ru/index.htm>. Цифры на рисунках соответствуют положению экспериментальных точек и указывают на разделы каталога экзопланет*.

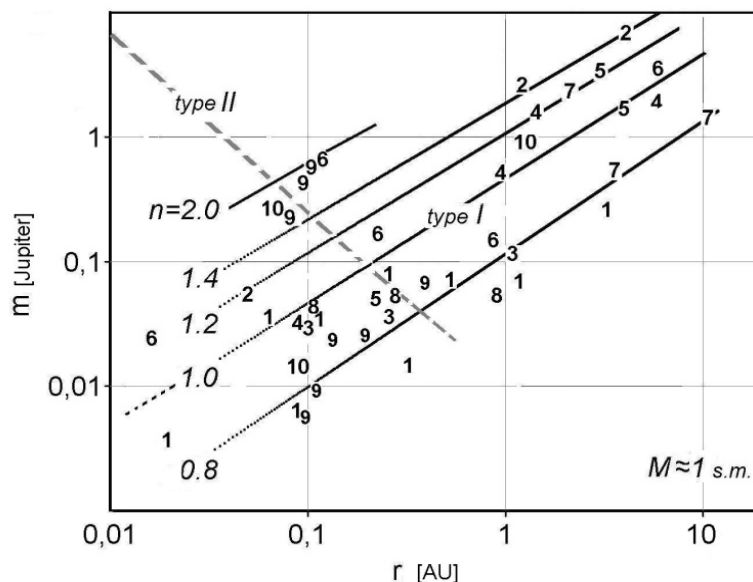


Рис.1. Зависимость массы планет типа I от орбитального радиуса при $M \approx 1$ s.m.
1- HD10180, 2 - HD125612, 3 - HD134606, 4 - HD160691, 5 - HD204313,
6 - HD75732, 7 - HD95128, 8 - HD31527, 9, 10 - KOI.

* С момента написания статьи обнаружено много новых экзопланет. Их параметры в подавляющем большинстве случаев согласуются с представленными в данной

статье закономерностями.

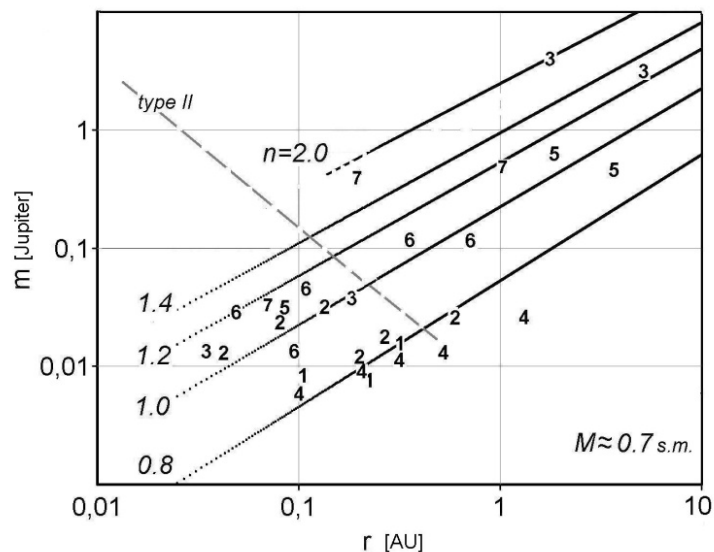


Рис.2. Зависимость массы планет типа I от орбитального радиуса при $M \approx 0.7$ s.m. 1 – HD20794, 2 - HD40307, 3 - GJ676A, 4 - HD10700, 5 - HD181433, 6 - KOI 701, 7 - HIP57274.

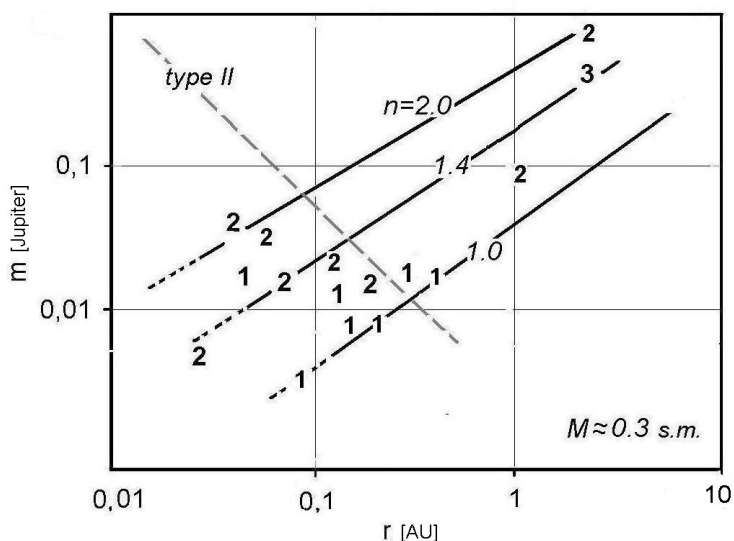


Рис.3. Зависимость массы планет типа I от орбитального радиуса при $M = 0.3 \dots 0.4$ s.m. 1 - GJ, 2 - Gliese, 3 - OGLE.

Расчетные зависимости $m(r)$ по формуле (16) пересчитаны в координаты, выраженные в массах Юпитера и астрономических единицах умножением m на $M_m / 1.87 \cdot 10^{27}$ и r на $R_c / 1.5 \cdot 10^{11}$. Эти зависимости соответствуют периоду образования планет, но, т.к. условия образования планет и их дальнейшая эволюция неизвестны, то показано несколько изолиний n . Несмотря на большой разброс значений, что является как в данном случае, так и на других представленных диаграммах неизбежным по ряду причин, зависимость масс экзопланет от радиуса их орбит и массы центральной звезды выявляется вполне отчетливо и согласуется с выражением (16). Эти закономерности, т.е. увеличение массы планеты с увеличением расстояния от центральной звезды и при увеличении массы звезды подтверждаются также в работах [4 - 7] и других.

Планеты типа II не укладываются в данную закономерность. На рис.1-3 они располагались бы вблизи штриховой линии. Большинство из них имеют массы порядка массы Юпитера и больше и находятся на орбитах, близких к центральной звезде (горячие юпитеры).

На рис.4 представлены фактические данные по экзопланетам типа II, что согласуется с выражением (21) при коэффициенте k весьма мало отличающемся от $1/3$. Сопоставляя (11) и (20), учитывая, что $k \approx 1/3$, приходим к выводу, что в этом случае mg -контур является *трехмерным*. По мере уменьшения плотности среды к периферии диска размерность mg -контура может уменьшаться.

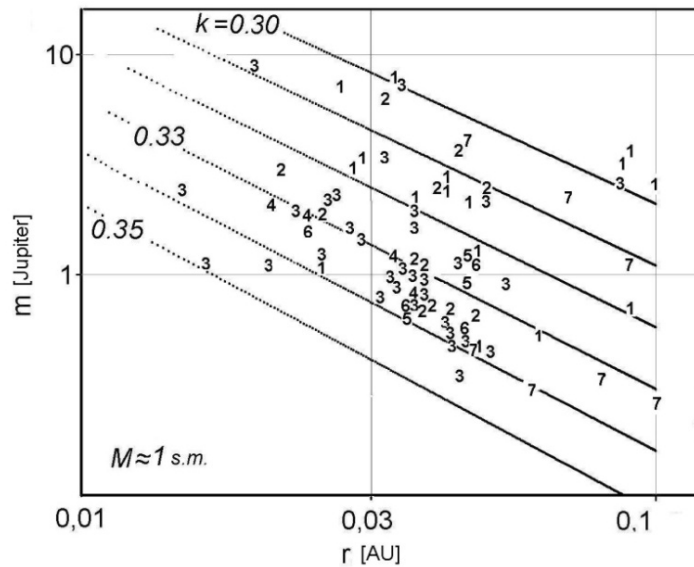


Рис.4. Зависимость массы планет типа II от орбитального радиуса при $M \approx 1$ s.m.

1 - CoRoT, 2 - HAT-P, 3 - WASP, 4 - TrES, 5 - XO, 6 - OGLE, 7 - HD .

Эти планеты встречаются преимущественно в однопланетных системах. Существование систем такого типа оказалось неожиданным для астрофизиков. Предполагается, что их формирование шло другим путем, когда эти планеты образовывались на периферии диска, а далее мигрировали на более близкие орбиты [8]. В рамках представленной модели существование таких планетных систем является *закономерным*. Причем, подобная ситуация по типу II встречается и в системах спутников планет, например Земля-Луна, Нептун-Тритон, Плутон-Харон.

На рис.5, заимствованного из работы [9], приведен большой массив по экзопланетам в координатах r - m (массы звезд различны). В целях подтверждения полученных закономерностей на диаграмму наложены изолинии $m(r)$ по формулам (16) и (21) при $M = 1$ м.с., которые как раз проходят по зонам наибольшей группировки экзопланет. Более того, модель позволяет объяснить наличие большого количества массивных планет и области их сосредоточения.

В работе [2] показано, что для центральной звезды существует период эволюции, характеризующийся *стабильным или равновесным состоянием*, когда количество mg -контуров равно количеству mi -зон. Именно этот период наиболее благоприятен для образования наиболее массивных планет. При этом эволюционный параметр ε принимает значение:

$$\varepsilon = f M^{11/12} . \quad (22)$$

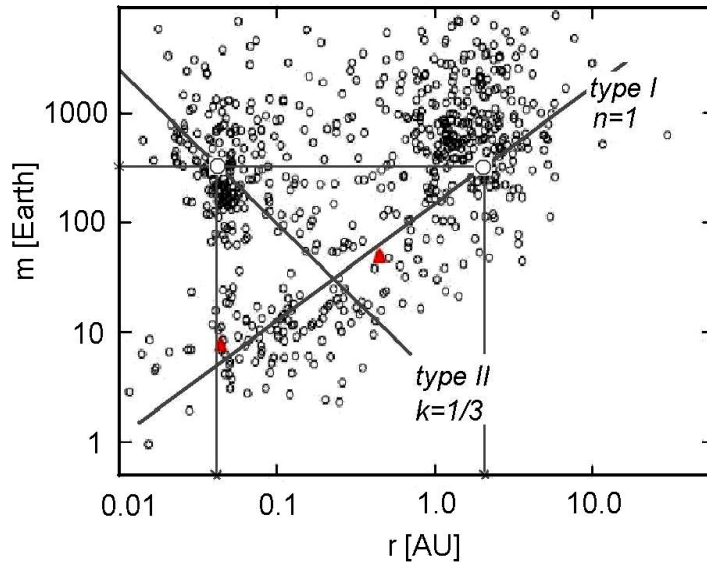


Рис.5. Расчетные зависимости $m(r)$ на фоне распределения экзопланет в координатах большая полуось орбиты – минимальная масса. Треугольниками показаны планеты системы GJ 221. Массы указаны в массах Земли.

В этом случае из (19) и (22) следует:

$$m = M^{23/15}. \quad (23)$$

Для массы Солнца $M = 2 \cdot 10^{-6}$. Тогда $m_p = (2 \cdot 10^{-6})^{23/15} M_m$ или $1.85 \cdot 10^{27}$ кг, что составляет почти точно массу Юпитера. В зависимости от типа планетной системы эта масса может возникать на орбитах размером 0.038 а.е. (горячий юпитер) или 2.3 а.е. (холодный юпитер), как показано на рис.5. Более массивные звезды порождают планеты большей массы.

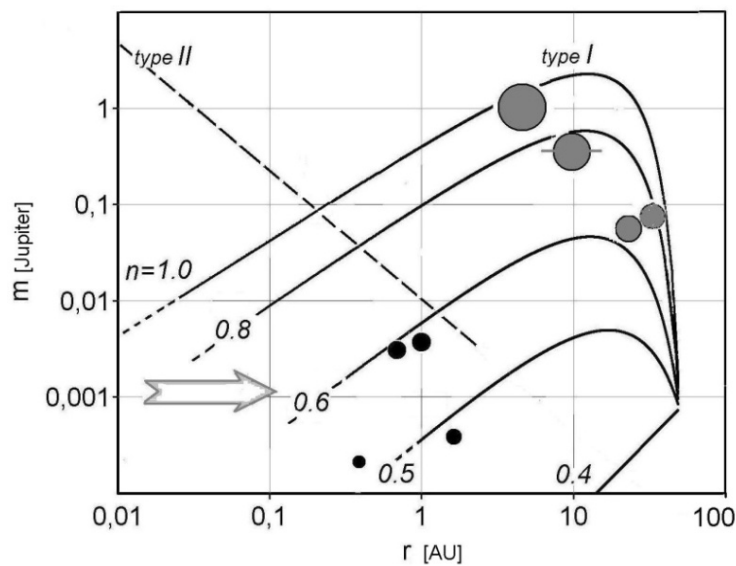


Рис.6. Зависимость массы планеты от орбитального радиуса для планет Солнечной системы.

На рис.6 показаны зависимости $m(r)$ по (16) при различных n и по (21) при $k=1/3$, а также положение планет солнечной системы. Уменьшение величины показателя n по мере увеличения радиуса и снижения плотности вещества протопланетного диска интерпретировано выражением $n = (n - 0.4)r / 50$ в предположении, что диск был ограничен радиусом в 50 а.е., где n уменьшилось до величины 0.4 на периферии диска.

В целом исходное протопланетное облако для солнечной системы соответствовало бы плоской модели при $n \approx 1$, если допустить, что малые планеты образовались вблизи Солнца, но впоследствии переместились на более удаленные орбиты по мере увеличения эволюционного параметра и влияния образующихся далее массивных планет. Обнаружение планет земного типа очень близко от центральной звезды [10, 16] подтверждает данное предположение. Возможно также, что первоначальное облако имело низкую плотность ($n=0.5 \dots 0.6$) на орбитах, где образовывались малые планеты.

4. О параметрах планет

Для планет типа I из расчетов следует, что $d > l$, т.е. mg -контур фактически является одномерной структурой, и при «упаковке» его в объем отношения линейных размеров, т.е. отношения диаметров усредненных по плотности планет $D = D_1/D_2$, учитывая (17), должны отвечать соотношению:

$$D = d^{1/3} = m^{5/12} M^{-2/3}, \quad (24)$$

где параметры являются безразмерными и могут быть выражены, например, через параметры Юпитера и Солнца.

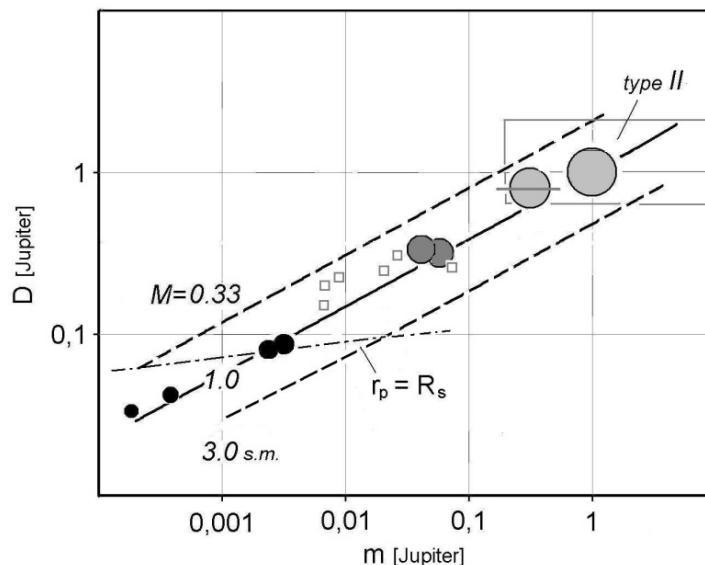


Рис.7. Зависимость диаметра планеты от ее массы для планет типа I. Квадратами обозначены планеты системы Kepler-11. Прямоугольником ориентировочно ограничена область массивных планет типа II при $M \approx 1$ м.с. Штрихпунктирной линией показана граница минимальных планетных масс, определенной из условия $r_p = R_c$ при $n=1$.

На рис.7 представлена безразмерная зависимость $D(m)$ по (24), приведенная к параметрам Юпитера и массе Солнца для планет типа I. Сплошная линия - для планет солнечной системы. Там же показано положение шести планет промежуточной плотности системы Kepler-11 [11], которое в целом соответствует расчетной зависимости.

Интересно отметить, что выражение (24), полученное исключительно на основе общих положений и справедливое в широком диапазоне для планет типа I, фактически совпадает с аналогичной безразмерной зависимостью, выведенной авторами работы [7] путем решения уравнение состояния, описывающего отношения между плотностью, давлением и температурой для данного вещества в условиях термодинамического равновесия. Положение планет земного типа точно соответствуют общей тенденции, что подтверждает предположение об образовании этих планет вблизи Солнца по типу I.

В процессе эволюции первые планеты образуются, когда **орбитальный момент импульса планеты сравнивается с вращательным моментом импульса центрального тела**. Приравняем соответствующие выражения - для центрального тела, выведенное в работе [2], и, имея в виду (10,12,17,19) при $n=1$, аналогичное, полученное для планеты:

$$M(\varepsilon/f)M_m c R_c = M^{7/10}(\varepsilon/f)^{6/5}M_m c R_c, \quad (25)$$

откуда следует:

$$\varepsilon = f M^{3/2}, \quad m = M^2, \quad r = 1. \quad (26,27,28)$$

Радиус $r_p = R_c$ является естественной границей для *минимальных масс планет типа I*. Внешние планеты большей массы имеют момент импульса, *превышающий* таковой для центральной звезды. При $M = 1$ м.с. $m_{p \min} = 4 \cdot 10^{-12} M_m = 4 \cdot 10^{24}$ кг, что как раз соответствует средней массе планет земной группы. Таким образом, в рамках данной модели существование планет земного типа вблизи центральной звезды является закономерным.

Размер планет типа II можно оценить по величине орбитального радиуса, приходящегося на один *mg*-контур, r/z . Имея в виду, что $z = m^{-1/4}$ и выражая r из (21), при $k=1/3$ получаем (в параметрах Юпитера и Солнца):

$$D \sim M/m^{1/2}, \quad (29)$$

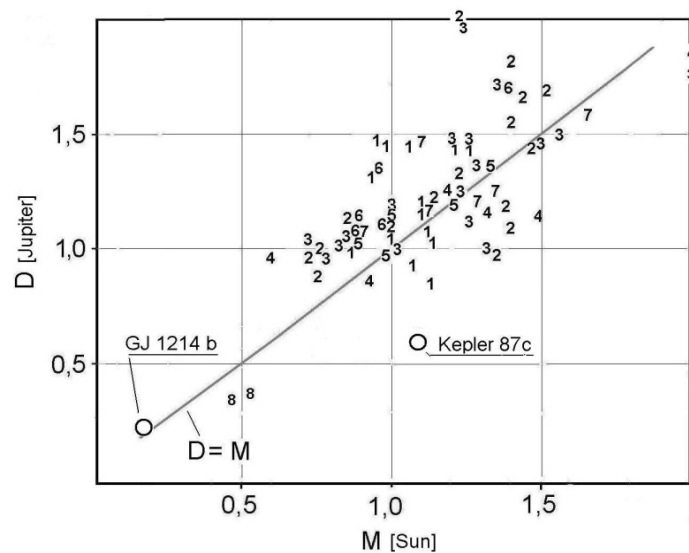


Рис.8. Зависимость диаметра планеты от массы центральной звезды (массы планет различны). 1 – CoRoT, 2 – HAT-P, 3 - WASP, 4 – KOI, 5 – XO, 6 – TrES, 7 – OGLE, 8 – GJ.

На рис.8 приведена зависимость $D(M)$. Но дополнительно необходимо учесть, что единственный *mg*-контур в данном случае не является одномерным, а масса модельного объекта

пропорциональна параметру ε , формула (8). Таким образом, следует дополнить соотношение (29); учитывая (19), переходя от отношения масс к отношению линейных величин, в случае трехмерного mg -контура в итоге приходим к выражению:

$$D = (M/m^{1/2})(m^{5/4}M^{-1})^{1/3} = M^{2/3}/m^{1/12}. \quad (30)$$

Для менее плотной среды и двухмерного контура (30) принимает вид:

$$D = (M/m^{1/2})(m^{5/4}M^{-1})^{1/2} = M^{1/2}m^{1/8}. \quad (30a)$$

Полученные безразмерные зависимости в целом согласуются с фактическими закономерностями. На рис.9 приведены зависимости $D(m)$ по формулам (30) и (30a), в целях иллюстрации наложенные на диаграмму, заимствованную из работы [12]. В частности, становится понятным существование как планет с близкими размерами, но резко различающимися массами, так и имеющих одинаковые массы при различных размерах. Планеты, имеющие относительно малые массы, например, GJ 1214b [13], Kepler-87c (они указаны на рис.8 и 9) и другие, образовались, вероятно, по типу II; их диаметры сильно отличаются и согласуются со значениями, вычисленными по варианту (30a).

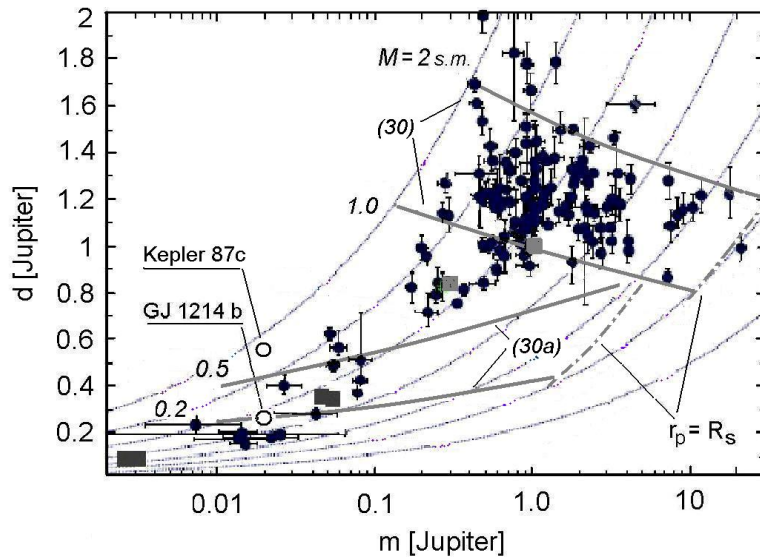


Рис. 9. Расчетные зависимости $D(m)$ для планет типа II на фоне распределения известных транзитных экзопланет в координатах масса планеты – радиус. Квадратами показаны планеты солнечной системы. Пунктирными линиями указаны линии равной плотности - 0.1, 0.3, 0.9, 3.0, 9.0, 25.0 и 100 г/см³. Штрихпунктирная линия ограничивает максимальные массы планет, $k=1/3$.

Плотности для планет типа I и типа II через их массу и массу звезды в безразмерных единицах (относительно массы и плотности Юпитера и массы Солнца), имея в виду, что $\rho \sim mD^{-3}$, имеют кардинально различный характер и выражаются следующим образом:

$$\rho_1 = m^{-1/4}M^2, \quad \rho_2 = m^{5/4}M^{-2}, \quad \rho_{2a} = m^{5/8}M^{-3/2} \quad (31,32,32a)$$

Конечно, полученные зависимости не являются точными или окончательными. Они лишь отражают общие тенденции, связывающие диаметр планеты с ее массой и массой звезды в период образования планетных систем.

Из условия равенства орбитального момента импульса планеты и вращательного момента импульса центрального тела получаем соотношения, аналогичные (25-28), для планет типа II при $k=1/3$:

$$M(\varepsilon/f)M_m c R_c = M^{3/2}(\varepsilon/f)^{1/2}M_m c R_c, \quad (33)$$

$$\varepsilon = fM, \quad m = M^{8/5}, \quad r = M^{-1/5}, \quad (34,35,36)$$

которые определяют их характерные массу и орбитальный радиус. При $M = 1$ м.с. $m_p = 7.6 \cdot 10^{-10} M_m = 7.6 \cdot 10^{26}$ кг или 0.4 массы Юпитера, $r_p = 13.8 R_c = 1.03 \cdot 10^{10}$ м или 0.07 а.е. Внутренние планеты большей массы имеют момент импульса *меньший* такового для центральной звезды.

Как следует из (21), (32) и (32а), массы планет типа II уменьшаются по мере удаления от центральной звезды, а их плотность падает, что видно на примере планеты Kepler 87с, имеющей очень малую плотность при орбитальном радиусе $136 R_c$ или 0.68 а.е. Еще более поразительным примером является система планет Kepler-51. Формулы (32) и (32а) поясняют их очень малую плотность. Образование планет на более отдаленных орбитах маловероятно, где они присутствуют тем реже, чем массивнее большая планета [8].

Маломассивные *твердые* планеты типа II не могут образовываться около звезд с массой Солнца и более, но, как следует из (32) и (32а), их образование становится возможным у звезд-карликов, когда $M < 1$ м.с. Действительно, другой проверкой правильности представленной модели может служить нахождение масс звезд, при которых могут формироваться планеты, близкие по массе и размерам земным. Пусть их масса находится в пределах от 0.001...0.01 масс Юпитера, а плотность составляет 3...5 плотностей Юпитера. Тогда для планет типа I из (31) следует: $M = 0.73 \dots 1.26$ м.с., а для планет типа II из (32) и (32а), соответственно, получаем: $M = 0.006 \dots 0.032$ и $M = 0.019 \dots 0.07$ м.с. Первое решение очевидно и соответствует звездам с массой, близкой к массе Солнца, а второе решение как раз и соответствует звездам очень малой массы - *бурым карликам*.

Это предсказание оказалось верным. Действительно, недавние наблюдения показали, что около бурых карликов вполне возможно образование планет земного типа, и могут создаваться подходящие для зарождения жизни условия [14]. Этот тип планетных систем даже более предпочтителен, т.к. отсутствует необходимость миграции планеты на более удаленные орбиты, как в случае с Землей, а подходящие массы бурых карликов варьируют в более широких пределах.

Возникает вопрос, существуют ли условия, когда образование планет по обоим типам эволюции равновероятно?

Логично предположить, что в начальный период существовало первичное облако разреженного вещества сферической формы вокруг центрального тела, которое затем трансформировалась либо в плоскостиральный диск, либо в линзовидную форму; из них далее и произошли планеты типа I или типа II, соответственно. Гипотетически такое исходное состояние соответствовало бы полному равенству условий образования планет обоих типов, т.е. $l = d = M$, $n = k$, массы планет по (16) и (21) равны.

Имея в виду (16,17,21), находим:

$$n = k = 0.2 (\lg(rM^2) / \lg(M/r) + 1) , \quad (37)$$

$$m = M^{12/5}. \quad (38)$$

Таким образом, эта масса в зависимости от величины коэффициента n может возникнуть на *любой орбите*, рис.10. Размер планеты в таком случае является неопределенным, т.к. зависимости (24,30, 30a) здесь некорректны. Можно определить лишь максимальный размер объекта при укладке mg -контуров в линейную структуру, когда $D_{max} = zl$. Так как $z = m^{-1/4}$ и $l=M$ то, учитывая (38), получаем:

$$D_{max} = M^{2/5}. \quad (39)$$

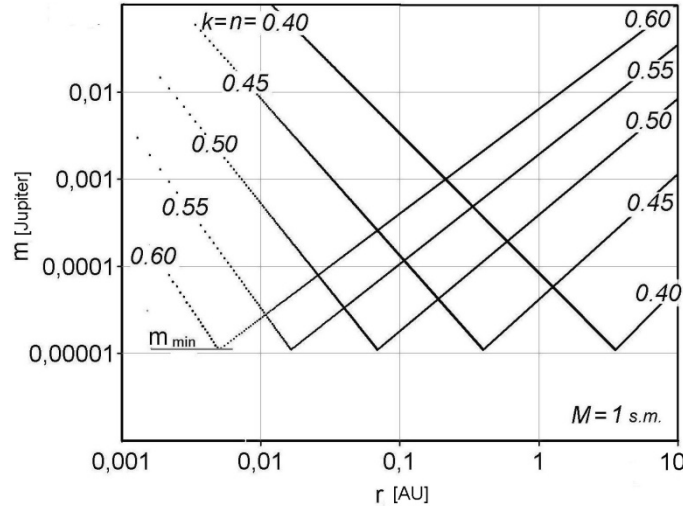


Рис.10. Зависимость массы планеты от орбитального радиуса при $l = d$.

Сближение значений коэффициентов n и k формально указывает на уменьшение плотности среды в любом варианте эволюции, что, очевидно, и соответствует какой-то наименьшей массе. Среднему значению коэффициента, равному 0.5, при $M=1$ м.с. соответствует радиус орбиты 0.07 а.е., совпадающий с характерным радиусом обиты для планет типа II.

Для массы Солнца по (38) и (39) $m_{p\ lim} = 2.1 \cdot 10^{-14} M_m = 2.1 \cdot 10^{22} \text{ кг}$, $D_{p\ max} = 0.0053 R_c = 3.9 \cdot 10^6 \text{ м}$. Пока неизвестно, могут ли образовываться подобные планеты в реальности. Во всяком случае, в Солнечной системе нет регулярных планет меньшей массы за исключением Плутона, имеющим близкую массу $1.3 \cdot 10^{22} \text{ кг}$, статус которого является неопределенным. То же можно сказать и о системах спутников больших планет. Не обнаружены до настоящего времени массы, меньшие расчетных, и среди экзопланет.

Существование наименьших масс для формирующихся планет и, соответственно, их наименьших диаметров объясняет факт резкого уменьшения планет малого радиуса и наличие максимума радиусов таких планет, установленных в работе [15].

5. Заключение

Планетные системы могут быть весьма разнообразными, т.к. их строение зависит от первоначального состава протопланетного облака, массы и типа звезды, истории образования планетной системы и от случайных факторов. Все же отдельные общие закономерности существуют.

Возможны два типа планетных систем. В первой из них планеты образуются из плоскоспирального протопланетного облака. Масса планет типа I увеличивается к периферии, проходя через максимум (холодные юпитеры), которые возникают в отдалении от центра, предположительно, в более поздние периоды эволюции в локальных сгущениях среды (рукавах, спиралях). Планеты земного типа образуются вблизи центральной звезды и, возможно, могут мигрировать на более удаленные траектории.

Во втором типе планетных систем планеты образуются из протопланетного облака линзовидного или эллиптического типа. Массы и плотности планет типа II уменьшаются к периферии диска. Массивные планеты (горячие юпитеры) образуются в сгущениях вблизи центральной звезды, образование других планет на более отдаленных орбитах является маловероятным, причем их плотности могут быть очень малы. Маломассивные твердые планеты в этих системах могут образовываться только у звезд малой массы (бурых карликов).

Вывод о возможности образования планет земного типа в планетных системах бурых карликов подтвержден наблюдениями.

Получены закономерности между массами, размерами, орбитальными радиусами планет и массами центральных звезд.

References:

1. Belyakov A.V. Charge of the electron, and the constants of radiation according to J.A.Wheeler's geometrodynamical model. *Progress in Physics*, 2010, v.4, 90–94.
2. Belyakov A.V. Evolution of Stellar Objects According to J. Wheeler's Geometrodynamical Concept. *Progress in Physics*, 2013, v.1, 25–40.
3. Belyakov A.V. On the independent determination of the ultimate density of physical vacuum. *Progress in Physics*, 2011, v.2, 27–29.
4. Stephane Udry. *Geneva University*, Debra Fischer. *San Francisco State University*, Didier Queloz. *Geneva University*. A Decade of Radial-Velocity Discoveries in the Exoplanet Domain.
5. Montet B. T., Crepp J. R. et al. The trends high-contrast imaging survey. iv. the occurrence rate of giant planets around m-dwarfs. 24 July 2013, arXiv: astro-ph/1307.5849 v1.
6. Jones M. I., Jenkins J. S. et al. Study of the impact of the post-MS evolution of the host star on the orbits of close-in planets. A giant planet in a close-in orbit around the RGB star HIP63242. June 2013, arXiv: astro-ph/1306.3939 v1.
7. Seager S., Kuchner M., Hier-Majumder C., Militzer B. Mass-Radius Relationships for Solid Exoplanets. 19 Jul 2007, arXiv: 0707.2895.
8. Steffen J. H., Ragozzine D. et al. Kepler constraints on planets near hot Jupiters. 10 May 2012, arXiv: astro-ph.EP/1205.2309 v1.
9. Arriagada P., Anglada-Escud G. et al. Two planetary companions around the K7 dwarf GJ 221: a hot super-Earth and a candidate in the sub-Saturn desert range. 9 May 2013, arXiv: astro-ph/1305.2203 v1.
10. Sanchis-Ojeda R., Rappaport S. et al. Transits and occultations of an earth-sized planet in an 8.5-hour orbit. 17 May 2013, arXiv: astro-ph /1305.4180 v1.
11. Lissauer J. J., Jontof-Hutter D. et al. All Six Planets Known to Orbit Kepler-11 Have Low Densities. 14 Jun 2013, arXiv: astro-ph /1303.0227 v2.
12. Sato B., Hartman J. D. et al. HAT-P-38b: A Saturn-Mass Planet Transiting a Late G Star. 24 Jan 2012, arXiv: astro-ph/1201.5075 v1.
13. Charbonneau D., Berta Z. K. et al. A super-Earth transiting a nearby low-mass star. <http://fr.arxiv.org/ftp/arxiv/papers/0912/0912.3229.pdf>. Nature 2009.

14. Ricci L., Testi L., Natta A., Scholz A., Gregorio-Monsalvo L. Alma observations of *c*-oph 102: grain growth and molecular gas in the disk around a young brown dwarf. 28 Nov 2012, arXiv: astro-ph.SR/1211.6743 v1.
15. Morton T. D., Swift J. The radius distribution of small planets around cool stars. 14 Mar 2013, arXiv: astro-ph/1303.3013 v1.
16. Charpinet S., Fontaine G. et al. A compact system of small planets around a former red-giant star. 22 Dec 2011, Nature, 480, 496–499.