

ФОРМИРОВАНИЕ ПЛАНЕТ И РАСПРЕДЕЛЕНИЕ МОМЕНТА ИМПУЛЬСА В СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЕ

И.О. ДАВАРАШВИЛИ ⁽¹⁾, И.Р. ЛОМИДЗЕ ⁽¹⁾, Ф.К. КАСУМОВ ⁽²⁾

Тбилисский государственный университет им. Ив. Джавахишвили⁽¹⁾

380128 Грузия, Тбилиси, Чавчавадзе 1

Институт Физики НАН Азербайджана⁽²⁾

AZ 1143 Баку, пр. Г.Джавида, 33

Предложен сценарий поэтапного формирования планетной системы из газо-пылевого облака вокруг протозвезды, учитывающий влияние ранее образовавшихся планет на формирование поздних. Первоначально формируется планета наибольшей массы на том расстоянии от центра облака, где максимальна концентрация частиц, оставшихся после формирования протозвезды. В рамках этого сценария естественно объясняется асимметрия распределения масс и моментов импульса между внутренними и внешними частями образующейся планетной системы.

Одной из нерешенных проблем космогонии солнечной системы является асимметричное распределение масс и моментов импульса между Солнцем и планетами : при $\Sigma m_{пл}/m_{\odot} \sim 10^{-3}$ имеем $\Sigma L_{пл}/L_{\odot} \sim 30$ (без учета моментов малых тел и их осевого вращения) (Таблица1) [1]. В настоящей работе предлагается сценарий возникновения планет вокруг центрального массивного тела из газо-пылевого облака, обладающего центральной симметрией и произвольным моментом импульса, в рамках которого указанная асимметрия возникает естественным образом. Предлагается также механизм передачи момента импульса из центральной плотной области облака его периферическим разреженным частям.

Таблица1.

Наблюдаемые характеристики тел в солнечной системе.

Планета	Среднее удаление от Солнца(а.е.)	Орбитальная скорость ($V_3=1$)	Масса ($m_3=1$)	Момент импульса ($L_3=1$)	Кинетическая Энергия ($E_3=1$)
Меркурий	0.39	1.60	0.055	0.034	0.140
Венера	0.72	1.17	0.805	0.674	1.096
Земля	1.00 ($1.5 \cdot 10^{11}$ м)	1.00 (30 км/с)	1.000 ($6 \cdot 10^{24}$ кг)	1.00 ($9 \cdot 10^{38}$ Дж·с)	1.00 ($6 \cdot 10^{30}$ Дж)
Марс	1.52	0.80	0.110	0.134	0.068
Юпитер	5.20	0.43	314.00	702.10	53.970
Сатурн	9.54	0.32	94.010	287.00	9.830
Уран	19.18	0.23	14.400	63.50	0.750
Нептун	30.06	0.18	17.000	92.00	0.570
Плутон	40.00	0.16	0.002	0.013	0.0000444
Солнце	$5 \cdot 10^{-3}$ *	0.06**	$3.33 \cdot 10^5$	40.00	2453.63

*Экваториальный радиус

** Скорость экваториального вращения

В рамках предложенного сценария формирование планет (планетезималий) описывается поэтапно, сперва в поясе наибольшей плотности частиц ($r=r_1$). Уже сформировавшаяся планета нарушает симметричность гравитационного

потенциала, создаваемого центральным телом (протозвездой) и создает эффект «пастуха» [2]: планета, движущаяся по законам Кеплера в центрально-симметричном гравитационном поле звезды на расстоянии r_1 от центра имеет скорость v_1 , большую, чем скорость частиц облака (молекул и пыли) во внешней области $r > r_1$ и меньшую, чем скорость частиц во внутренней области облака $r < r_1$. Поэтому в прилегающей к планете части облака тяготение планеты тормозит частицы облака с внутренней стороны планетной орбиты, вызывая их падение на протозвезду, уменьшение радиуса их орбит и моментов импульса. При этом момент импульса планеты возрастает на соответствующую величину. С другой стороны, тяготение планеты ускоряет частицы облака с внешней стороны орбиты планеты, увеличивая их моменты импульса и отбрасывая их на орбиты большего радиуса. Момент импульса планеты при этом уменьшается. Орбита планеты будет стабильной лишь при условии компенсации этих приращений моментов импульса планеты. Сама планета при этом является «пастухом», управляющим формированием орбит частиц облака. Удалившись от планеты на достаточно большое расстояние, частицы облака продолжают двигаться в поле центральной звезды согласно законам Кеплера, поскольку притяжение планеты становится пренебрежимым. В результате, в окрестности орбиты уже образовавшейся планеты формируется «коридор» разряжения и происходит передача момента импульса из внутренней области $r < r_1$ во внешнюю область $r > r_1$. В каждой из указанных областей возникает новое квазиравновесное распределение концентрации частиц пыли и газа по радиусу. Предполагая (в низшем приближении) это распределение (также как первоначальное распределение) гауссовым, находим радиусы r_2 и r_3 максимальной концентрации частиц в этих областях ($r_2 < r_1$ и $r_3 > r_1$). Этот механизм позволяет заключить, что первоначально формируются крупные планеты, между которыми остаются «дорожки» пыли с более или менее низкой концентрацией частиц. Эти «дорожки» сжимаются по радиусу в узкие полоски, благодаря все тому же эффекту «пастуха» [2], и, впоследствии, в более или менее поздний момент времени, приводят к образованию меньших планет. Таким образом, расстояния, на которых (преимущественно) образуются планеты, закономерно определяются массой облака и его динамическими характеристиками, а также сильно зависят от природы (размера, химического состава, плотности, коэффициента неупругости [2], составляющих облака частиц). Предлагаемый сценарий позволяет надеяться, что удастся найти естественное объяснение известного правила Тициуса-Боде [3], равно как и распределение радиусов орбит «своих» спутников вокруг планет-гигантов.

Рассмотрим центрально симметричное газопылевое облако. Потенциал в этом облаке определяется уравнением Пуассона

$$\Delta\varphi(r) = 4\pi G\rho(r), \quad (1)$$

где G - гравитационная константа, $\rho(r)$ -локальная плотность облака, Δ - оператор Лапласа.

Важно различать пылевую компоненту плотности $\rho_{\text{пыль}} = \rho_1 = n_1 m_1$ от газовой компоненты $\rho_{\text{газ}} = \rho_2$, поскольку молекулы газа обладают гораздо большей упругостью, чем пылинки. Неупругие процессы с участием молекул имеют место лишь при энергиях $E_{\text{кин}} \geq 0.1 \div 10 \text{ эВ} \sim 10^3 \div 10^5 \text{ К}$, что гораздо больше эффективной температуры в нецентральных частях облака. Пылевые частицы испытывают неупругое рассеяние при любых энергиях, перерабатывая кинетическую энергию во внутреннюю и накапливаясь в центральных областях. Центральная область обогащается химическими элементами, характерными для межзвездной пыли (C, Si

и т.п.), а во внешней области концентрация этих элементов понижается. На этот процесс накладывается тепловая обработка облака излучением протозвезды (после её образования). Причем пыль, непрозрачная для электромагнитного излучения в довольно широком диапазоне длин волн, нагревается и в процессе выравнивания температуры с газовой компонентой сообщает молекулам газа весьма высокую скорость. В результате нагретый газ будет улетучиваться из облака. В общем случае молекулы газа и частицы пыли двигаются по эллиптическим орбитам, периодически приближаясь к центру облака на расстояние $r_{\min} \leq \lambda / \pi$, где λ - длина свободного пробега частиц данного вида. Тогда для радиуса протозвезды находим $r^* \sim \lambda / \pi$.

Частицы, для которых $r_{\min} \leq r^*$ испытывают столкновения в центральной области облака, теряют кинетическую энергию (но момент импульса при этом сохраняется) и больше не покидают эту область, формируя тело большой массы. Оценить массу и момент импульса протозвезды можно подсчитав число частиц, попавших в эту область, и их момент импульса. Подсчет [4] дает следующую оценку для облака с массой $\sim m_{\odot}$.

Из закона сохранения в отсутствие столкновений, для движения в гравитационном поле можно написать формулу

$$E = m v_r^2 / 2 + L^2 / 2 m r^2 + E_{\text{пот}}, \quad (2)$$

где E – полная энергия тела массы m , движущегося на расстоянии r от центра притяжения, L – момент импульса этого тела, v_r – проекция скорости на радиус-вектор-радиальная скорость; при движении по окружности $v_r=0$, $E_{\text{пот}}$ – потенциальная энергия тела массы m в гравитационном поле. Из (2) получаем неравенство

$$L^2 \leq 2 m r^2 (E - E_{\text{пот}}), \quad (3)$$

причем равенство выполняется лишь при $v_r=0$ (в частности, в перигелии). Но разность $E - E_{\text{пот}} = E_{\text{кин}}$ можно оценить из распределения Максвелла. Видим, что большинство частиц, обладая небольшой ($\langle E_{\text{кин}} \rangle = kT$) кинетической энергией, обладает и маленьким моментом импульса.

Малость момента импульса приводит к тому, что перигелии частиц оказываются настолько близкими к центру притяжения, что столкновения между частицами становятся частыми. Попавшие в такую зону частицы теряют свою механическую энергию и не могут больше покинуть эту зону.

Таким образом, мы получим оценки

$$\begin{aligned} L_1 &\leq (2 m_1 E_{\text{кин}})^{1/2} r \\ L &\leq n 4 / 3 \pi R_{\text{кр}}^3 \langle L_1 \rangle, \\ m &> n 4 / 3 \pi R_{\text{кр}}^3 m_1 \end{aligned} \quad (4)$$

где $R_{\text{кр}}$ – максимальный радиус, на котором происходит хотя бы одно столкновение.

Отсюда находим отношение

$$L / m < \langle L_1 \rangle / m_1 \sim (2 E_{\text{кин}} / m_1)^{1/2} r. \quad (5)$$

Поскольку во всем протопланетном облаке $\langle E_{\text{кин}} \rangle$ и m_1 одинаковы, из (5) заключаем, что

$$L_{\odot} / L_{\text{пл}} : m_{\odot} / m_{\text{пл}} \sim r / r_{\text{пл}} \sim 10^{-4} \quad (6)$$

или в другой форме

$$(\Sigma m_{\text{пл}}/m_{\odot}) : (\Sigma L_{\text{пл}}/L_{\odot}) \sim 10^{-4}, \quad (7)$$

которую следует признать неплохо согласующейся с наблюдаемым значением $\sim 0.4 \cdot 10^{-4}$ при расчёте даже в выбранном низшем приближении (гауссовское распределение плотности частиц по радиусу облака, оставшегося после формирования протозвезды).

Отметим также, что химический состав протозвезды должен отличаться от химического состава планет-гигантов, которые (если их образование отстает во времени от формирования звезды) должны быть обедненными по тяжелым элементам по сравнению со звездой. Это обстоятельство может быть использовано в качестве наблюдательного теста предложенного сценария.

В случае подтверждения этого тезиса (для этого необходимы достаточно прецизионные измерения химического состава внешних планет) представляется заслуживающим внимания детальный расчет химического состава внутренних планет с целью определить насколько закономерно наблюдаемая распространенность химических элементов, в первую очередь, тех, которые необходимы для зарождения жизни (C,O,N).

1. В.Г. Демин, *Судьба солнечной системы*. Москва, "Наука", (1975).
2. Физический энциклопедический словарь, Москва, "Советская энциклопедия", (1988).
3. Р.И. Киладзе, *Современное вращение планет, как результат развития околопланетных роев мелких частиц*. Тбилиси, Мецниереба, (1986).
4. И.О. Даварашвили, И.Р. Ломидзе, *Физические закономерности формирования планетных систем*. Доклад на республиканской конференции по астрономии, Тбилиси, (2001).

PLANETLƏRİN YARANMASI VƏ GÜNƏŞ SISTEMİNDƏ İMPULS MOMENTİNİN PAYLANMASI

I.O.DAVARASHVILI, I.R.LOMIDZE, F.Q.QASIMOV

Protoulduzu əhatə edən gaz-toz buludundan mərhələylə planet sisteminin yaranması öncə əmələ gələn planetlərin sonlarına təsirini nəzərə alan yeni sənari təklif edilir. Protoulduzun yaranmasından qalan hissəciklərin buludun mərkəzindən maksimum konsentrasiyası olan məsafədə öncə ən böyük kütləli planet yaranır. Bu sənari çərçivəsində yaranan planet sisteminin daxili və xarici hissələrində olan kütlə və impuls momentinin assimetrik paylanması təbii izah edilir.

FORMATION OF THE PLANETS AND DISTRIBUTION OF THE IMPULSIVE MOMENT IN THE SOLAR SYSTEM

I.O. DAVARASHVILI, I.R. LOMIDZE, F.K. KASUMOV

The scenery of the step by step formation of the planetary system from gas-and-dust cloud around the protostars was offered, which also takes into account the influence of the previously formed planets on those ones which formed later. Originally, the planet with the greatest mass was formed in such a remoteness from the center of the cloud where a concentration of the parts remained after the formation of the protostar reaches maximum value. In the frames of this scenery the asymmetry in distribution of masses and angular momenta between interior and external parts of the formatting planetary system have been explained.

Редактор: А.Гулиев