УДК 523; 524.3; MSC 70F15, 70F07

ДИНАМИКА СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ

Ихлов Борис Лазаревич

Пермский государственный национальный исследовательский университет

Аннотация

Указан ряд существенных отличий солнечной системы от других планетных систем. Введена функция потенциальной и кинетической энергий каждой планеты, которая связывает данные группы планет. Показано, что две группы планет Солнечной системы формировались самосогласованно и связаны особым образом. Составлена таблица параметров планет Солнечной системы, включающая введенную функцию. Показано, что эволюция Солнечной системы происходила путем образования двух газопылевых сгустков, из которых образовались две группы планет – земная группа и группа планет-гигантов. Найдено новое решение задачи трех тел в виде кеплеровских орбит, решена модельная задача о биениях при приближении планет к стационарному радиусу. Предложен критерий однородности пространства в звездных системах. Рассмотрен вопрос о возникновении момента импульса звездных систем (и вращающихся галактик), в связи с тем, что в рамках общей теории относительности поступательное движение порождает момент вращение, предложен новый сценарий эволюции газопылевого облака в Солнечную систему, указывается, что на структуру Солнечной системы и ее вращение существенным образом влияло релятивистское гравитационное взаимодействие между группами планет. Указано, что в Солнечной системе пространство неоднородно.

Ключевые слова: вращение, гравитация, число Фидия, колебания, орбита, асимметрия

Abstract

A number of significant differences between the solar system and other planetary systems are indicated. The function of the potential and kinetic energies of each planet is introduced, which connects these groups of planets. It is shown that two groups of planets of the Solar system were formed in a self-consistent manner and are connected in a special way. A table of parameters of the planets of the Solar system has been compiled, including the introduced function. It is shown that the evolution of the Solar System occurred by the formation of two gas–dust clumps, from which two groups of planets were formed - the terrestrial group and the group of giant planets. A new solution to the problem of three bodies in the form of Keplerian orbits has been found, and the model problem of beats when planets approach a stationary radius has been solved. A criterion for the uniformity of space in stellar systems is proposed. The question of the origin of the angular momentum of stellar systems (and rotating galaxies) is considered, due to the fact that, within the framework of general relativity, translational motion generates a moment of rotation, a new

scenario for the evolution of a gas-dust cloud into a Solar system is proposed, it is indicated that the structure of the Solar system and its rotation were significantly influenced by relativistic gravitational interaction between groups of planets. It is indicated that space is inhomogeneous in the Solar System.
Keywords: rotation, gravity, Phidias number, oscillations, orbit, asymmetry

Введение

Движение планет Солнечной системы достаточно изучено и продолжает изучаться, см., напр., [1, 2]. Динамическая структура околоземного орбитального пространства в областях орбитальных резонансов 1:4, 1:6 и 1:8 со скоростью вращения Земли и орбитальная эволюция объектов, движущихся в этих областях, изучена в [3]. Оценивая движение планет вокруг Солнца как квазипериодическое, стохастическое, приходят к выводу о метастабильности системы [4]. Структура планетных систем диктуется параметрами звезды (системы звезд), ее металличности.

Формирование Солнечной системы – сложный стохастический процесс, включающий образование протопланетных дисков, платенезималей, миграцию планет внутрь системы и обратно. В этом процессе действуют эффект Пойнтинга-Робетсона и световое давление, реализуются сценарии аккреции (слипания мелких частиц) и гравитационного сжатия. Эксцентриситет планет солнечной системы близок к нулю, орбиты почти круговые. Считается, что данный факт есть следствие того, что орбитальное движение планет вокруг звезды сформировалось в процессе формирований самих звезды и планет, и масса звезды значительно больше массы планет.

Однако это не совсем верное объяснение. В ОТО эллиптические орбиты периодически эволюционируют к круговым орбитам, в том числе из-за гравитационного излучения, мощность которого у планетных систем ничтожно мала, например, для Солнечной системы - 5 кВт, из которых около 90% приходится на систему Солнце-Юпитер. В ближайшие 50 тыс. лет эксцентриситеты Марса и Меркурия почти не изменятся, эксцентриситет Венеры уменьшится вдвое, эксцентриситет Земли уменьшится в 8 раз, затем начет возрастать.

Отметим некоторые особенности Солнечной системы.

1) Планеты вращаются в одной плоскости, близкой к плоскости экватора Солнца. Ссылка на гравитационное сжатие газопылевого облака, из которого возникло Солнце, в диск, несостоятельна, поскольку в других системах планеты не вращаются в одной плоскости.

2) Гравитационное сжатие Солнца и увеличение скорости его вращения, которое передалось всем планетам, произошло уже после формирования планет, эффект центрифуги оттеснил планеты-гиганты с большой массой на периферию системы. В противном случае легкие элементы, из которых состоят планеты-гиганты, оказались бы ближе к Солнцу.

3) Все планеты системы вращаются в ту же сторону, что и Солнце. В то же время некоторые транзитные экзопланеты (например, горячие гиганты HAT-P-7b и WASP-17b) демонстрируют аномальный эффект Росситера-МакЛафлина, планета вращается вокруг звезды в сторону, противоположную направлению вращения звезды вокруг своей оси.

Две группы планет

По аналогии с [5] сконструируем комплекс z_i из энергетических характеристик планеты под номером *i*, из функций ее потенциальной и кинетической энергий, кинетическую энергию – пропорциональную корню из ее энергии вращательного движения, соответственно, через угловую скорость $z_i = U_i \omega_i$. Используя второй закон Кеплера в приближении круговой орбиты $T^2 / \mathrm{a}^3 = 4\pi^2 / [\gamma M(1 + m / \mathrm{M})] \approx 4\pi^2 / \gamma M \approx T^2 / r^3$ получим:

$$z_i = m_i \sqrt{\gamma M} r^{2/3} / 2\pi$$

Выписывая выражения для потенциальной энергии, выделяя множители $m_i r_i$, где m – масса планеты, r – расстояние до Солнца, и суммируя по *i*, получаем аналог центра тяжести относительно Солнца с весовыми коэффициентами.

Таблица 1

	m, 10^{24} кг	$R_{ср}$, 10^6 м	ω , 10^{-6} сек$^{-1}$	*W*, 10^{-7} сек$^{-1}$	*r*, 10^6 м	*M*, 10^{24}	*L*, 10^{33}	$z/z_{Земли}$
Меркурий	0,33	58	1,22	8,3	2,4	0,93	0,9	0,559
Венера	4,86	108	0,3	3,2	6,1	21,7	3,7	1,844
Земля	6	150	72,7	2,0	6,4	7146,7	27,0	1
Марс	0,64	228	71,5	1,1	3,4	211,6	3,7	0,038
Юпитер	1907	778	176,2	0,017	70	6,6 x 10^8	19 x 10^9	5,152
Сатурн	571	1427	165,6	0,068	58	1,3 x 10^8	7,8 x 10^9	0,339
Уран	87	2869	101,0	0,024	25	0,02 x 10^8	1,7 x 10^9	0,009
Нептун	103	4498	109,3	0,012	24	0,03 x 10^8	2,6 x10^9	0,003
Солнце	2,2 x 10^7	0				0,6 x 10^{18}	0	

Параметры планет Солнечной системы

M – момент импульса планеты относительно оси собственного вращения, *L* – относительно Солнца. Момент количества движения планеты - $m[\vec{v}, \vec{r}] = mr^2 W$. Моменты инерции планет посчитаны огрублено, по формуле $J = 0,4mr^2$.

Выделим планеты по естественным группам – планеты земной группы и планеты-гиганты. Оказывается, что аналоги их центров тяжести пропорциональны друг другу

$$\sum_i U_i^C \omega_i^C \square \sum_j U_j^Г \omega_j^Г \square \sum_k U_k^З \omega_k^З \qquad (1)$$

Коэффициенты пропорциональности – число Фидия Φ и Φ^2 соответственно. То есть, суммы комплексов z_i являются аналогами отрезков прямой *a* и *b*, удовлетворяющих соотношению

$$a / b = (a + b) / a = \Phi = 1,618$$

Разумеется, все расчеты носят приближенный характер, поскольку планеты обладают спутниками и кольцами, в Солнечной присутствуют планетоиды, главный пояс астероидов, пояс Койпера, другие группы астероидов, кометы, космическая пыль.

Число Ф указывает на то, что в системе сформировалось однородное пространство. Отклонения о числа Фидия в рамках приближений составляют порядка 1%, с учетом пояса Койпера, вновь открываемых планет и т.д. они увеличатся, что может свидетельствовать о некоторой асимметрии пространства в Солнечной системе.

Биения

Предположим, неким аналогом системы двух групп планет является простая колебательная система, где участвует число Ф. Рассмотрим два одинаковых грузика, висящие на пружинах, одна из которой прикреплена к потолку. Получить выражение для собственной частоты их колебаний можно из уравнений Лагранжа:

$$\frac{d}{dt}\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} - \frac{\partial L}{\partial q_i} = 0,\ i = 1, 2, \dots n,$$

где L – функция Лагранжа, определяемая через кинетическую энергию T и потенциальную энергию U: $L(q,\dot{q}) = T(q,\dot{q}) - U(q)$. Здесь $q, \dot{q}$ - векторы обобщенных координат и обобщенных скоростей соответственно.

$$L = \frac{m\dot{x}_1^2}{2} + \frac{m\dot{x}_2^2}{2} - \frac{k\cdot(x_2 - x_1)^2}{2} - mg(x_{01} - x_1) - m(x_{02} - x_2)$$

где x_{0i} – положения равновесия грузиков.

$$m\ddot{x}_1 = mg - kx_1 - k(x_1 - x_2)$$

$$m\ddot{x}_2 = mg - k(x_2 - x_1)$$

Введем собственную частоту отдельных грузиков $w^2 = k/m$. Поскольку сила тяжести постоянна, она лишь определяет положения равновесия, потому ее можно исключить переопределением координат. Ищем решение в виде $x_j = A_j\, exp(iwt), j = 1,2$. Подстановка приводит к однородной системе алгебраических уравнения для определения A_j :

$$A_1(2\omega_0^2 - \omega^2) - A_2\omega_0^2 = 0$$

$$-A_1\omega_0^2 + A_2(\omega_0^2 - \omega^2) = 0$$

Система имеет решения только при определенных значениях частоты ω. Последняя должна определяться из условия равенства нулю ее детерминанта. Получаем $\omega^4 - 3\omega_0^2\omega^2 + \omega_0^4 = 0$ и

$$\omega_1^2 = \omega_0^2(1+\Phi); \omega_2^2 = \omega_0^2(2-\Phi)$$

$$\omega_1 = \pm\omega_0\sqrt{1+\Phi}; \omega_2 = \pm\omega_0\sqrt{2-\Phi}$$

Таким образом, собственных частот синхронных колебаний системы двух грузиков не одна, а четыре, и все пропорциональны «парциальной» собственной частоте отдельных грузиков. Коэффициент пропорциональности выражается через число Фидия.

Частное решение задачи с тремя грузиками разной массы приведено в [6], известно также общее решение со многими одинаковыми грузиками. Частное решение синхронного колебания многих разных масс имеет вид: $w \sim M^{-1/2}$, где M – среднее гармоническое масс [7]. Движение в поле центральных сил и кеплерова задача подробно рассмотрены в [6].

Усложним систему, но упростим подход. Покажем, что колебательный режим возможен и в поле центральных сил. Рассмотрим систему двух взаимодействующих грузиков (двух групп планет), где роль стягивающей пружины выполняет сила гравитации, противодействующей ускорению вращательного движения вокруг неподвижного Солнца. Центробежное ускорение $a = v^2/r$ и $v = wr$, и система уравнений движения запишется следующим образом:

$$m_1\ddot{r}_1 = \gamma M m_1 / r_1^2 - m_1\omega_1^2 r_1 - \gamma m_1 m_2 / (r_2 - r_1)^2$$

$$m_2\ddot{r}_2 = \gamma M m_2 / r_2^2 - m_2\omega_2^2 r_2 + \gamma m_1 m_2 / (r_2 - r_1)^2$$

где M – масса солнца, m_1 и m_2 – массы планет, вторая – более удаленная. Данная система – задача трех тел в коллинеарном представлении Эйлера, при одном неподвижном теле (Солнце) и при $M >> m_2 > m_1$. Покажем, что стационарные орбиты планет – кеплеровские. Приравняем производные к нулю и сложим оба уравнения:

$$\gamma M[1/r_1^2 + 1/r_2^2] = \omega_1^2 r_1 + \omega_2^2 r_2$$

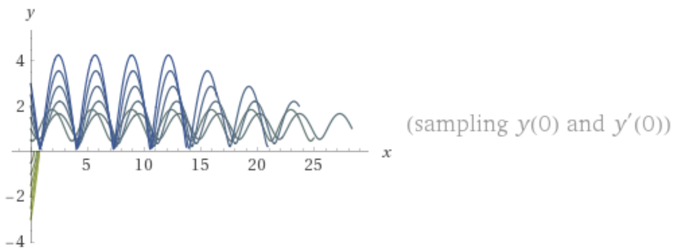
Если подставить в левую часть выражение для огрубленного (вместе эллипса – круг) 2-го закона Кеплера, получим тождество. Если в виду сравнимости разницы радиусов со вторым радиусом малости масс планет в сравнении с массой Солнца и пренебречь взаимодействием планет, система распадается на два одинаковых несвязных уравнения:

$$\ddot{r}_i = \gamma M / r_i^2 - \omega_i^2 r_i$$

Сделаем уравнения безразмерными, введем $t = \omega\tau$, $\omega^2 / \gamma M = k^2$ и $r = k^{-1}y$. Тогда уравнения запишется в виде $\ddot{y} + y - k / \mathrm{y}^2 = 0$. Подстановкой $\dfrac{dy}{dy}\dfrac{d\dot{y}}{d\tau}$ можно получить

$$\dot{y} = (C_1 - 2k / y + y^2)^{1/2}, \ \tau = \int \frac{dy}{\sqrt{y^2 - 2k / y + C_1}}$$

что соответствует формуле 14.6 в [5, стр. 101]. Окончательное решение не выражается в аналитических функциях. Компьютерное моделирование показывает, что множество решений представляет собой биения, затухающие вблизи некоторого стационарного радиуса. *График 1.*



Изменение радиуса планеты в поле Солнца от времени

Из *Графика 1* видно, что частоты биений никак не могут быть связаны с числом Фидия, что говорит об асимметрии пространства в начальной стадии формирования Солнечной системы. Аналогичный вид будет иметь решение для второй планеты. Таково решение задачи трех тел, сведенной к задаче двух тел при пренебрежении их взаимодействием. Отсюда следует, что параметры планет, удовлетворяющие соотношению (1), установились именно благодаря взаимодействию между планетами. Как видим из уравнений, в данном приближении величина стационарного радиуса не зависит от массы планеты.

Решение Лагранжа задачи трех тел, дающее равносторонний треугольник, не описывает структуру Солнечной системы. Таким образом, можно считать, что в Солнечной системе реализовано еще одно решение задачи трех тел, где одно тело – Солнце, другое – земная группа, третье – группа планет-гигантов, причем структура двух групп планет такова, что выполняется соотношение (1). Данное решение не справедливо для всех планетных систем, в которых могу реализовываться совершенно иные решения задачи трех и более тел.

Вращение

Исследование фиксации моментов импульсов планет Солнечной системы изложено, в частности, в [8]. В [9] отмечается, что наиболее широко принятая модель формирования Солнечной системы, известная как гипотеза туманностей, не решает проблему углового момента, в частности, почему орбитальный импульс Юпитера больше вращательного момента Солнца. В [10] представлена модель вращательного деления для создания и эволюции макроструктур – сверхскоплений и галактик, основанную на сверхскоростных ядрах макрообъектов и на классическом законе сохранения углового момента. Однако в [9] нет ответа, за счет чего возникло вращение Солнечной системы. Ссылка на асимметрию первичного газопылевого облака несостоятельна, если изначально у газопылевого облака нет момента импульса, он будет равен нулю и в дальнейшем.

В [10] использован приближенный метод Фока, показано, что релятивистская теория гравитации в сравнении с теорией Ньютона приводит к выводу, что если в системе тел не было вращения, оно возникает из их поступательного движения.

К сожалению, в статье допущена неточность, утверждается, что имеет место закон сохранения полного момента – суммы орбитального и собственного моментов.

Элементарный подсчет для Солнечной системы показывает, что это не так, что и видно из *Табл. 1.* Уже то, что почти все планеты вращаются вокруг себя в ту же сторону, в какую вращаются вокруг Солнца, говорит о том, что полный момент импульса Солнечной системы не равен нулю. То есть, при формировании системы из газопылевого облака, не имевшего момента импульса, закон сохранения момента импульса был нарушен.

В ОТО собственный момент импульса имеет вид:

$$L_d = \varepsilon_{abcd}(J^{ab} - Y^a p^b + Y^b p^a) p^c / m,$$

где ε_{abcd} - 4-символ Леви-Чивита, m - масса, p^a - 4-импульс, $Y^a = J^{ab} p_b m^2$, J^{ab} - момент импульса относительно начала координат:

$$J^{ab} = \int (x^a T^{b0} - x^b T^{a0}) d^3 x,$$

где интегрирование проводится по области, занятой системой. Закон изменения 4-момента импульса формулируется сложным образом, через эффективный тензор энергии-импульса, получаемый добавкой к обычному тензору псевдотензора Ландау-Лившица. 4-импульс и 4-момент импульса сохраняются лишь в линеаризованной теории и при введении калибровки. Запишем уравнение движения для частицы в постньютоновском приближении:

$$a = 3v\dot{\varphi} + 4v(v \cdot \nabla)\varphi - v^2 \nabla \varphi + v \times (\nabla \times \varsigma) - \nabla(\varphi + 2\varphi^2 + \psi) - \dot{\varsigma}$$

где φ, ψ, ς - потенциалы постньютоновского разложения.

Вычисление гравитационного поля на больших расстояниях от произвольного конечного распределения энергии – импульса показывает, что вектор углового момента $(G/r^3)(x \times J) \sim \varsigma$ не равен нулю. Таким образом, вывод в [10] о порождении вращения поступательным движением остается и почти тривиален: в искривленном пространстве поступательное движение должно порождать вращение, расширение Вселенной создало моменты импульса Солнечной и других планетных систем, а также галактик.

Заключение

Таким образом, есть наблюдаемые данные, которые говорят об асимметрии пространства в Солнечной системе. Возможно, есть другой ряд данных. В [11] отмечено, что для многих процессов разброс результатов измерений, представленный в виде гистограммы (по оси абсцисс значение измеряемой величины, по оси ординат частота ее появления), имеет «тонкую» структуру, периодически меняется во времени с некоторым «космофизическим» ритмом. Возможно, что дело в другом: в том, что симметрия вероятностных распределений (Гаусса, Пуассона и др.) является следствием симметрии и изотропии пространства. Эту изотропию нарушает даже слабое гравитационное поле. Уже в СТО вероятностные распределения теряют симметрию [12]. Вполне вероятно, что путем анализа большого числа гистограмм была обнаружена анизотропия пространства в Солнечной системе.

Литература

1. Park, R.S., et al., 2021, The JPL Planetary and Lunar Ephemerides DE440 and DE441 // Astronomical Journal, 2021. V. 161. P. 105.

2. Archinal, B. A., et al., 2018, Report of the IAU Working Group on Cartographic Coordinates and Rotational Elements // Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy. 2015. V. 130. P.22.

3. I. V. Tomilova, E. V. Blinkova and T. V. Bordovitsyna. Features of the Dynamics of Objects Moving in the Zones of Orbital Resonances 1 : 4, 1 : 6, and 1 : 8 with the Earth's Rotation // Solar System Research. 2021. V. 55. №5. P.420.

4. Federico Mogavero and Jacques Laskar. Long-term dynamics of the solar system inner planets // Astronomy & Astrophysics manuscript. No. iss. June 1, 2021. P. 1-25

5. Гили В. Ф. Динамика вращательного движения. Пермь, 2014. ч. 1. 80 с.

6. Ландау Л. Д., Лившиц Е. М. Краткий курс теоретической физики. Т. I, «Механика», М.: «Наука». 1988. 214 с.

7. Ихлов Б. Л. Спектры ДНК // Вестник новых медицинских технологий. 2018. Т. 25, №2. С. 121–134.

8. M. Feissel. Rotation of Solar System Bodies // Highlights of Astronomy. Published online by Cambridge University Press. 2016. V. 9. P. 507–536

9. Vladimir S. Netchitailo. Solar System. Angular Momentum. New Physics. Journal of High Energy Physics, Gravitation and Cosmology Vol.5 No.1, January 2019. 112-139.

10. Сандина И. В. Система вращающихся тел и законы сохранения в общей теории относительности // Ярославский педагогический вестник. Серия «Физико-математические и естественные науки. 2010. Вып. 1. С. 81-85.

11. Шноль С. Э. и др. О реализации дискретных состояний в ходе флуктуаций в макроскопических процессах // УФН. 1998. Т. 168. С. 1129-1140.

12. Ихлов Б. Л. Термодинамический подход в космологии. Евразийский научный журнал. 2019. №1 http://journalpro.ru/articles/termodinamicheskiy-podkhod-v-kosmologii/?sphrase_id=14205