ТЕНЬ
№ 48 31 ДЕКАБРЯ 2019 г. вторник

Прочти и передай другому!

НЕСТАБИЛЬНОСТЬ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ

1. Присказка: Физика.

Солнце, как и всякая звезда такого типа, в процессе своего термоядерного горения немного худеет.

Это и понятно, ведь стенок у этого котла нет, а скреп всего две: гравитация и электромагнетизм.

За счёт превращения массы в энергию Солнце теряет в год с излучением $\sim 1{,}2 \cdot 10^{16}$ кг, и ещё от половины до трети этого количества теряется с солнечным ветром.

Примерно 99% объёма (хотя при этом где-то лишь 1% массы) Солнца – это не более чем теплоизолирующая инертная оболочка для зоны термоядерного горения в ядре, так что чем больше теряет оболочка, тем ярче для нас становится светило. (На самом деле ещё и эволюция термоядерных процессов идёт в сторону всё большего разогрева активного солнечного вещества.)

В результате, по прогнозам теоретиков, уже через миллиард лет Земля будет сауной, а через 7 миллиардов лет вообще сгорит. Не говоря о Меркурии и Венере.

Особой стабильностью это не назовёшь.

Но мы в эту новогоднюю ночь будем рассуждать не о термоядерной печке, которая сперва порождает, а потом убивает. Речь пойдёт о гравитации.

2. Глубины обратных квадратов.

Закон всемирного тяготения формулируется так просто и элегантно, что его неразрешимость в задаче с тремя и более телами кажется просто наваждением каким-то! Хотелось бы мне представить, что ощущал Пуанкаре, когда в 1892 году доказал неинтегрируемость уравнений задачи трёх тел.

Едва ли не большинство крупных математиков последних веков брались за задачу о гравитационном взаимодействии N тел, но аналитических результатов в ней удалось получить очень мало.

Так, Д. Саари в 1971 году показал, что обычный результат динамической эволюции такой системы – распад на подсистемы, которые разлетаются друг от друга. Позже это было подтверждено многими результатами численного моделирования. И Вселенная даёт подтверждения: «По современным представлениям, звезды образуются группами в молекулярных облаках, и в результате динамической эволюции эти группы распадаются на устойчивые подсистемы малой кратности, большинство из которых – одиночные, двойные или иерархические тройные»*.

В численном моделировании были получены и другие результаты, которые согласуются с тем, что мы видим во Вселенной: гравитация стягивает облако точек в плоский блин, а блины, взаимодействуя друг с другом, могут превращаться в ячеистую трёхмерную структуру типа сетки. Блины мы часто видим в формах галактик и в нашей планетной системе, а сетка из скоплений галактик – это самая крупномасштабная структура Вселенной.

Ещё из интересных результатов численного моделирования я бы отметил наблюдение, что тесные тройные сближения обычно приводят к выбросу одного из трёх тел за пределы системы.

3. Явление Хаоса.

В 1980-х годах при численном решении уравнений для Солнечной системы выяснилось, что ни в будущее, ни в прошлое расчёт далеко протянуть не удаётся. (Очень рекомендую прочесть небольшой, ёмкий, внятно и компетентно написанный обзор В. М. Фёдорова, где сообщено много любопытного о нестабильности орбит в Солнечной системе*. Можно также прочесть популярную заметку И. Иванова**.)

Оказалось, что решения (по крайней мере, при некоторых случайно выбранных начальных условиях) спустя какое-то время начинают проявлять известный «эффект бабочки», то есть оказываются гиперчувствительны к самым ничтожным вариациям начальных условий. И никто не гарантирует, что при интегрировании достаточно далеко в прошлое или будущее «эффект бабочки» не обнаружится при ***любых*** начальных условиях.

Это свойство называют **динамическим хаосом**.

4. Масштаб Хаоса.

О масштабах Хаоса хорошо пишет И. Стюарт со ссылкой на вычисления группы Ф. Хоффмана: моделируя рождение Солнечной системы, начиная с момента, когда в протопланетном облаке существует 2000 зародышей планет (планетезималей), учёные обнаружили, что, изменив положение лишь одной из планетезмалей на 1 мм (!), они спустя миллиарды виртуальных лет получали совершенно другую планетную систему. «Экстраполируя этот результат, Хоффман считает, что добавлением единственной молекулы газа к точной модели нарождающейся Солнечной системы (будь такое возможно) вы могли бы изменить результат так сильно, что Земля не сформировалась бы»***.

---

* *Л. Л. Соколов, К. В. Холшевников.* Задача N тел и проблема интегрируемости [http://www.astronet.ru/db/msg/1210340/node2.html].

* Законы орбитального движения планет [http://www.solar-climate.com/sc/zodv.htm#r4].

** *И. Иванов*. Хаотична ли Солнечная система? [https://elementy.ru/novosti_nauki/430599/Khaotichna_li_Solnechnaya_sistema].

*** *И. Стюарт*. Математика космоса: Как современная наука расшифровывает Вселенную. М., 2018 [https://books.google.ru/books?id=v0RYDwAAQBAJ&pg=PT228].

5. Порядок в Хаосе.

Но! В этом Хаосе мистически много Порядка. Продолжим цитату из Стюарта: «Хотя каждый прогон модели приводит к возникновению планет разных размеров на разных орбитах, все солнечные системы, рождающиеся в заданном сценарии, очень похожи между собой. Без газовых гигантов мы получаем около 11 каменных миров, уступающих в большинстве своём по размерам Земле. Добавляем газовые гиганты – это более реалистичная модель – и получаем четыре каменные планеты с массами от половинки земной до чуть больше массы нашей планеты».

Я бы сравнил это с калейдоскопом. Конкретных рисунков в его окуляр можно увидеть бесконечно много, но все они в известном смысле заданы всего лишь **N** зеркалами и **M** цветными стёклышками, причём и **N** и **M** – не очень большие числа.

6. Откуда берётся Хаос?

Мне не попалось работы, где было бы внятно рассказано о физических причинах хаотичности орбит в Солнечной системе.

То ли Хаос копится исподволь при решении уравнений движения тел Солнечной системы, и генерируют его гравитационными «перетяжками» друг друга более или менее все эти тела, а экспоненциальный всплеск непредсказуемости траекторий возникает тогда, когда это долгое накопление переваливает некий «потенциальный барьер»?

То ли всплеск неопределённости вызван более прозаическими причинами, редким, но в конце концов случившемся близким прохождением двух тел, при котором, действительно, всё начинает очень радикально зависеть от миллиметров траектории и угловых секунд ориентации: чуть в сторону – и врезался; круто развернулся; вообще улетел из Солнечной системы, оказавшись из-за невольного гравитационного манёвра уже не на замкнутой квазиэллиптической, а на разомкнутой, уходящей в бесконечность квазигиперболической орбите?

То ли Хаос вызывается смесью всего этого и много чего другого, что мне в голову не приходит?

Для дедукции надо лучше знать объект исследования, а с этим, увы, небогато. Машина что-то там считает, выдаёт заказчику то, что он попросил, потом заказчик это как-то интерпретирует, что-то, важное для него, публикует, остальное до нас не доходит: примерно так выглядит научный процесс.

Тем не менее кое-что о Хаосе в Солнечной системе ясно.

7. Особая примета Хаоса.

Хаос явно чувствителен к массе. Он возникает не сразу, а спустя довольно большое время.

Для планет-гигантов это десятки и сотни миллионов лет, для планет земной группы – просто миллионы, а для астероидов и комет – десятки-сотни тысяч лет*.

Проявление хаотичности тоже качественно зависит от массы. Если у планет теряется возможность предсказать конкретное положение тела на орбите, но орбита при этом остаётся более или менее квазиэллиптической (хотя может изменить размер, наклон, меру вытянутости, и за счёт этого, – в очень редких, правда, случаях, – возможно даже столкновение с другой планетой), то у малых тел речь идёт уже даже о возможном выбросе их из Солнечной системы.

Такое свойство Хаоса кажется мне указанием на то, что он рождается дискретно, не копится равномерно все миллионы лет, а возникает за астрономически ничтожное время при тесных сближениях тел.

Массивная планета, обладающая соответственно солидной инерцией, способна легко пережить тесное сближение, например, с кометой. Да, жизнь на планете при этом может пострадать и даже исчезнуть, но орбитальные параметры планеты мало изменятся.

А вот с точки зрения кометы всё будет наоборот. Её орбита после тесного сближения с планетой изменится до неузнаваемости. Или вообще прекратится, если тесное сближение завершится ударом.

Планеты, как уже было сказано, изредка тоже могут сталкиваться. Но это сверхредкое событие. Чтобы, например, Меркурий достал до Венеры, им обоим надо испытать миллиарды «перетяжек» от планет плюс множество тесных сближений и столкновений с астероидами и кометами. Лишь тогда их орбиты после сонма микропертурбаций теоретически могут стать пересекающимися.

Потому-то, вероятно, хаос в движениях планет и возникает лишь через миллионы и более лет. А чем мельче тело, тем чреватее последствиями для него всякое тесное сближение. Поэтому и наблюдается зависимость времени развития Хаоса от массы тела.

* См., например, самобытную и убедительную работу *В. В. Вечеславова* и *Б. В. Чирикова* «Хаотическая динамика кометы Галлея» (Новосибирск, 1986) [http://www.quantware.ups-tlse.fr/chirikov/publi/binp/chi1986binp184.pdf].

8. Расчёты д-ра Уисдома.

Prof. Jack Wisdom (b. 1953)

Д-р Уисдом – признанный корифей в вопросах небесной механики. Статья о нём в Википедии, цитируя слова наградной речи 2001 года при вручении ему премии Американского Астрономического Общества, отмечает, что он разработал много аналитических и численных методов, ставших фундаментальными в современной небесной механике и составивших «ядро почти каждой схемы интегрирования динамики Солнечной системы, используемой сегодня».

В Сети есть его статья 2017 года*, посвящённая вообще-то объяснению того, почему днём на Землю падает больше метеоритов, чем ночью, но содержащая подробные данные о численном моделировании движения трёх тысяч астероидов, находящихся в известном поясе между Юпитером и Марсом (где, кстати, вращается и астероид около 2,5 км в поперечнике, названный в 1988 г. в честь Уисдома). Время интегрирования составляло 20 млн. лет с подведением итогов каждые 0,5 млн. лет. Исследовались астероиды, находящиеся на трёх особо нестабильных, так называемых резонансных орбитах (что это значит, будет сказано в справке ниже).

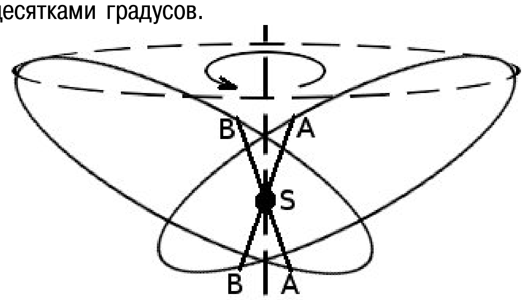
В начальных расчётах Уисдом проверил, насколько влияют на движение этих астероидов внутренние планеты (Марс, Земля, Венера и Меркурий). Их гравитация намного меньше, чем у Юпитера и Сатурна, и интуитивно казалось бы, что без них результат отличался бы на какие-то десятки процентов максимум. Однако на самом деле результаты отличались более чем на порядок!

* *J. Wisdom.* Meteorite transport — Revisited // Meteoritics & Planetary Science, vol. 52, No. 8, pp. 1660–1668 (2017) [http://planetary.brown.edu/pdfs/Wisdom2017MaPS-meteoriteTransport.pdf].

Без внутренних планет 1000 астероидов на орбитах в резонансе 3:1 по истечении 20 млн. лет получили такую судьбу: 350 упали на Солнце, 507 остались на активных орбитах (достающих до планет), 143 – на неактивных орбитах (и ни один не ушёл из Солнечной системы). С внутренними же планетами 1000 астероидов через 20 млн. лет распределились так: 576 упали на Солнце, 247 были выброшены из Солнечной системы, 12 упали на планеты, 125 попали на неактивные орбиты, и лишь 40 остались на активных орбитах, причём у 10 из них большая полуось орбиты a сократилась на 20% и более от изначальных $\mathbf{2{,}5\pm0{,}01}$ астрономических единиц (**а. е.**).

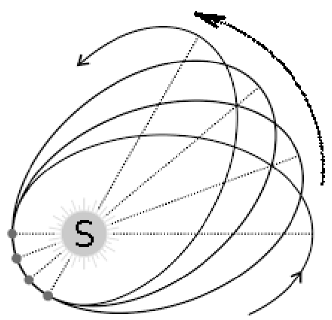
Справка: Резонансные орбиты.

В первом (кеплеровском) приближении все тела Солнечной системы вращаются вокруг Солнца по эллипсам. Во втором (лапласовском) приближении эллипсы как бы сами вращаются, очень медленно, зато сразу двояко. Здесь нужно проявить пространственное воображение. Во-первых, эллипсы не лежат в одной плоскости. Если за базовую плоскость взять эллипс орбиты Земли (исторически понятный, хотя, честно говоря, не лучший выбор), то сегодняшние плоскости орбит остальных крупных планет будут отклоняться от базовой плоскости на несколько градусов, а у астероидов отклонения обычно исчисляются уже десятками градусов.



Если некое тело вращается по эллипсу, причём базовую плоскость эллипс пересекает по линии АВ, то первый тип вращения – это вращение эллипса в объёме вокруг оси, перпендикулярной к базовой плоскости. На схеме выше эта ось обозначена пунктиром. Солнце при этом остаётся в фокусе эллипса S, а линия АВ не выходит из базовой плоскости. В объёме же эллипс описывает нечто вроде чаши.

Второй тип вращения вообразить легче. Это вращение эллипса в своей собственной плоскости вокруг фокуса S. При этом образуется фигура типа ромашки или розетки.



(А теперь сложите мысленно оба типа вращений, добавьте ещё обычно очень медленные, но после тесных сближений способные резко «взбрыкивать» изменения формы эллипсов и их наклона к базовой плоскости – и вы получите некоторое впечатление о ***реальной*** небесной механике…)

Оборот тела по эллипсу занимает годы у ближних к Солнцу планет и десятки лет у дальних. А оба типа оборотов самих эллипсов в объёме и плоскости занимают десятки и сотни тысяч лет.

Резонансными называют орбиты, у которых один или сразу несколько из трёх описанных типов оборотов имеет период, выраженный через период аналогичного типа оборота какой-то другой планеты простой дробью (и обычно с небольшими числителем и знаменателем). Например, упомянутые выше орбиты в резонансе 3:1 означают орбиты, у которых период оборота тела вокруг Солнца втрое меньше, чем у Юпитера.

А резонанс ν_6, также моделированный Уисдомом, относится к орбитам, у которых вращение эллипса орбиты тела второго («ромашечного») типа синхронизировано с аналогичным вращением эллипса орбиты Сатурна (6-й планеты, откуда и индекс в обозначении резонанса).

При резонансной орбите тело часто сближается с планетой, та сильнее гравитационно влияет на тело, и орбита тела быстрее изменяется. А изменения чреваты! Уисдом исследовал самые влиятельные резонансы 3:1, 5:2 (где оказалось 625 активных орбит при исходном $a = \mathbf{2{,}82\pm0{,}01}$ **а. е.**) и ν_6 (там все 1000 орбит при исходном $a = \mathbf{2{,}05\pm0{,}05}$ **а. е.** оказались активными.)

9. Резонансы и планеты.

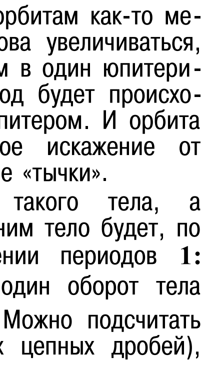
Если речь идёт о нескольких оборотах тела по орбите, то можно временно забыть о лапласовых вращениях орбит, и считать с достаточной точностью, что тело подчиняется законам Кеплера. А третий его закон гласит, что период оборота по орбите пропорционален 1,5-й степени большой полуоси эллипса орбиты ($\mathbf{T} \sim a^{1,5}$). (В астрономии принято исчислять не оси, а полуоси, что ближе к осреднённому «радиусу» орбиты.) То есть резонансы можно выражать как в годах, так и в астрономических единицах.

Предположим, некое тело вращается в резонансе с Юпитером 2:1. Это значит, что орбита такого тела имеет большую полуось $a = a_5/2^{2/3} = \mathbf{3{,}278}$ **а. е.** За один юпитерианский год это тело совершит два оборота, то есть окажется на том же расстоянии от Юпитера, как и год (юпитерианский) назад. Взаимное расстояние тела и Юпитера будет при их движениях по своим орбитам как-то меняться, увеличиваться, уменьшаться, снова увеличиваться, но всё это будет повторяться с периодом в один юпитерианский год. В частности, раз в такой год будет происходить максимальное сближение тела с Юпитером. И орбита тела там будет испытывать небольшое искажение от гравитации Юпитера. Это довольно частые «тычки».

Юпитер будет внешним соседом такого тела, а внутренним его соседом будет Марс. С ним тело будет, по тому же закону Кеплера, в соотношении периодов $\mathbf{1:(3{,}278/}a_4\mathbf{)^{1,5} = 1:3{,}156}$. То есть за один оборот тела Марс будет совершать **3,156** оборота. Можно подсчитать (например, с помощью так называемых цепных дробей), что это отношение в целых числах примерно соответствует таким дробям: **6/19 = 1:3,167; 13/41 = 1:3,154;** и т. д.

Тут, как видим, повторения сближений будут реже: каждые 6 оборотов тела соответствуют чуть менее чем 19 оборотам Марса, каждые 13 оборотов тела уже довольно точно соответствуют 41 обороту Марса, и т. д.

Особенная точность здесь не так важна. Так, спустя **6** оборотов тела после его максимального сближения с Марсом Марс будет не в точке их максимального сближения, а недолетит до неё на $\mathbf{6\cdot3{,}156 - 19 = 0{,}064}$ оборота. Это порядка **0,61 а. е.** (вся орбита Марса – **9,55 а. е.**), тогда как само минимальное их расстояние при любой ориентации орбит и любом положении на орбитах не будет меньше $\mathbf{3{,}278\cdot(1-\varepsilon) - 1{,}666 \approx 0{,}63}$ **а. е.** (здесь ε – эксцентриситет, показатель сплюснутости эллипса; он даже у астероидов редко превышает **0,3**, а у планет и того меньше; в расчёте для тела здесь было взято $\varepsilon = \mathbf{0{,}3}$).



При недолёте Марса на $\mathbf{K_1 = 0{,}61}$ **а. е.** кратчайшее расстояние (катет $\mathbf{K_0 = 0{,}63}$ **а. е.**) заменяется на гипотенузу $\mathbf{Г_1}$, которая, по Пифагору, равна тут **0,88 а. е.** Гравитация Марса, по закону обратных квадратов, в точке недолёта будет действовать на тело в $\mathbf{(0{,}88/0{,}63)^2 = 1{,}95}$ раза слабее.

Но давайте возьмём момент, когда Марс совершил полных **19** оборотов. В это время тело перелетело за точку максимального сближения на $19/3{,}156 - 6 = 0{,}02$ оборота, т. е. на катет $К_2$ порядка **0,4 а. е.** (орбита тела с $a = 3{,}278$ **а. е.** и $\varepsilon = 0{,}3$ равна **20,2 а. е.**) Гипотенуза $Г_2$ составит около **0,75 а. е.**, разница в гравитации – $(0{,}75/0{,}63)^2 = 1{,}41$ раза.

И мы понимаем, что где-то рядом с этими двумя вариантами, с недолётом и перелётом, вполне может быть точка, в которой расстояние между Марсом и телом будет ещё ближе к минимально возможному, а гравитационное воздействие Марса – ещё ближе к максимуму.

То есть около-6-оборотная периодичность не так плохо работает. «Тычок» от Марса, видимо, будет на несколько десятков процентов меньше, чем при идеальном резонансе, но это не слишком большая разница.

Конечно, на около-12-оборотной встрече тела и Марса результат прогнозируется похуже, кратчайшее сближение произойдёт дальше, гравитационный «тычок» окажется слабее, но мы ведь помним, что зато на 13-м обороте резонанс будет почти идеальным (**13/41**), а из соображений симметрии догадываемся, что и 14-й оборот будет схож с 12-м, так что в районе от 12-го до 14-го оборота тело испытает сразу трио гравитационных «тычков» от Марса, и средний «тычок» будет почти чемпионским.

Аналогичные рассуждения можно построить и для всех прочих планет, и для более малых тел Солнечной системы. Малость массы у какого-то или даже у каких-то из них может искупиться такими параметрами орбиты, которые приведут к очень тесному сближению с нашим телом, и в результате взаимный гравитационный «тычок» может стать даже больше, чем от массивной, но более далёкой планеты.

10. Резонансы и Время.

Переходя к тысячам лет и больше, мы должны учитывать и лапласовы вращения орбит и медленные изменения наклонов и осей эллипсов. Из-за этого поплывут и периоды вращения и резонансы любого тела с соседями по Солнечной системе.

Какое-то время роли игроков могут более или менее поддерживаться той дрейфоустойчивостью резонансов, которую мы видели на примере марсианских расчётов. Возможно, этого хватит на тысячи или даже десятки тысяч лет. Но рано или поздно картина должна измениться основательно.

11. Хаос и Время.

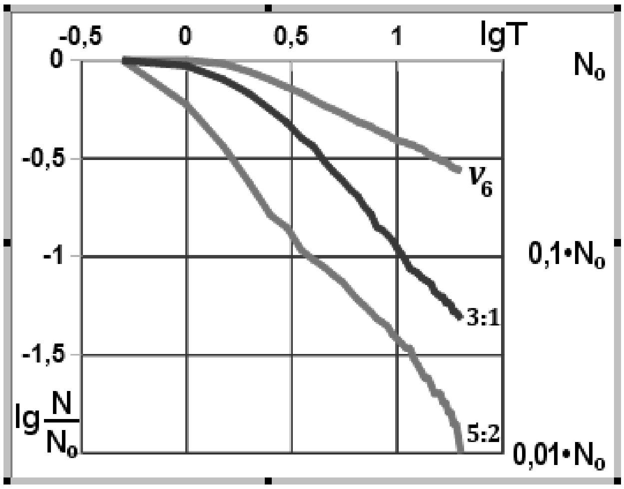
Если уж связывать Хаос с тесными сближениями тел Солнечной системы, как подсказывает здравый смысл, то нужно понять, как зависит от времени число таких сближений. Здравому смыслу и тут есть что предложить нам. Всякое тесное сближение есть плод долгого постепенного изменения траекторий тел (изначально, как правило, достаточно обособленных в безбрежных просторах Солнечной системы: все необособленные давно сошли со сцены, потому что такое состояние нестабильно).

Траектории особенно заметно изменяются под действием гравитационных «тычков» соседей. Число «тычков» вначале, как мы видели, примерно линейно растёт со временем, но в долгой перспективе, когда начинают плыть параметры орбит, – тут предсказать общую картину затруднительно. Например, потери сближений с одними телами могут компенсироваться возникновением сближений с другими. Общий же баланс при этом может и продолжать рост, и убывать, и выходить на какую-то константу или ряд констант, меняющихся в ещё более долгой перспективе…

12. Вновь к данным д-ра Уисдома.

Судьбы астероидов, рассчитанные Уисдомом, дают количественные ответы на этот вопрос, ведь доля астероидов, сохранившихся на активной орбите спустя такое-то время, – это, по сути дела, и есть вероятностная мера числа полученных (вернее, неполученных) «тычков», то есть, в конечном счёте, мера пути до Хаоса.

В билогарифмических координатах (время – в млн. лет), данные Уисдома по активным орбитам примерно таковы:



Примерно после 2-3 млн. лет зависимости, как видим, тяготеют к прямолинейным (кроме нижней кривой, но в конце её погрешность может быть внесена мною при визуальном измерении «ступенек» на исходной диаграмме Уисдома). Прямая в билогарифмических координатах означает степенную зависимость величин. У орбит с резонансами периодов вращения тел (3:1 и 5:2) графики дают $N \sim 1/T^{1{,}25 \div 1{,}3}$, а у орбит с резонансами периодов вращения орбит (v_6) получается $N \sim 1/T^{0{,}5}$.

Логично предположить, что у орбит без резонансов путь к хаосу будет идти ещё медленнее. Впрочем, в ходе дрейфа параметров орбиты рано или поздно всякая орбита окажется с чем-то в резонансе! И для самых долговременных прогнозов реалистичнее должны быть оценки, близкие к двум нижним линиям на графике. А именно: после долгого (от десятков до, возможно, сотен миллионов лет) периода подхода к резонансу начнётся падение вероятности сохранения эллиптической орбиты с темпом порядка 4÷10 тыс. раз за миллиард лет.

Такая арифметика согласуется с известными оценками прошлого величия пояса астероидов. Считается, что в эпоху формирования Солнечной системы там находилось столько вещества, что могла бы сложиться планета массой с Землю. А сейчас там во всех астероидах набирается лишь порядка 1/1600 от массы Земли. Согласуется и со скоростью изменения параметров орбит. Например, у всем известного Апофиса большая полуось орбиты меняется примерно на 1 км в год. За 150 млн. лет таким темпом набежит целая астрономическая единица, немало в масштабе Солнечной системы, особенно вблизи Земли!

Мажорный финал.

Итак, гравитационные нестабильности и даже Хаос в Солнечной системе есть и всегда были, но сроки попадания в эти неспокойные зоны, к счастью, на много порядков превосходят горизонт текущих проблем человечества.

Так что – с Новым годом, братцы!

Бесплатно. Учредитель, главный редактор, издатель: Е. Б. Шиховцев. Вёрстка — Е. Шиховцев. 12+
Адрес редакции и издателя: 156000, г. Кострома, ул. Ивановская д. 33. Свид. о рег. СМИ от 05.12.96 г. № Т-0972 выдано Центральным региональным управлением Госкомпечати РФ (г. Тверь). Отпечатано на ризографе издателя. Тираж 500 экз.
Время подписания в печать: по графику — 31.12.2019, 18.00; фактически — 31.12.2019, 18.00.

Интернетъ-бонусъ!!!

Давно бы надо догадаться так делать: в сетевую выкладку газеты добавлять то, что в каждом номере приходится с сожалением выкидывать, чтобы уместиться в жёсткий газетный объём.

В этом номере жертвой стал второй раздел. Зато в общей нумерации разделов вместо чёртовой дюжины всё свелось к обычной.

И вот что в этом выпавшем разделе было:

2. Открытие Литлвуда.

John Edensor Littlewood (1885–1977)

В студенческие годы я приобрёл за 35 копеек (примерно треть моего тогдашнего суточного бюджета) и с огромным удовольствием прочёл небольшую брошюру Дж. Литлвуда «Математическая смесь» (1978), которая и до сих пор со мной и всё так же замечательна. Пожалуй, особенно сильно поразил меня такой результат, полученный Литлвудом в 1952 году (в 67 лет!): в гравитирующей системе точечных масс («чтобы избежать трудностей, связанных с соударением тел конечных размеров», – поясняет автор) «никогда не может произойти захвата (или, наоборот, потери) даже пылинки».

Литлвуд распространял эту теорему на Солнечную систему. Студентом я не видел в этом противоречий. По крайней мере, в нашу эпоху, когда всё более или менее устоялось и столкновений сравнительно мало. Недоумение вызывало, почему об этом поразительном выводе не говорят в школьной астрономии и физике и вообще везде.

Сейчас я по-иному оцениваю в реальной динамике Солнечной системы вклад негравитационных сил, прежде всего давления излучения, магнитных полей и солнечного ветра; ну и соударений, конечно; а в дальней перспективе – и того, о чём было сказано в присказке. А ещё есть релятивистские эффекты, да и мало ли что сверх того! И теорема Литлвуда, ничуть не потеряв изящества интеллектуального артефакта, уже не кажется мне астрономическим предсказанием.

(Хотя, замечу, в мире тёмного вещества она, возможно, могла бы стать и правилом!)