Лунный тормоз, столкновение с Тейей и закон сохранения момента импульса

С.ПАРНОВСКИЙ

«Ничто не вечно под луной», – поется в известной оперетте. Меняется многое, в том числе и длительность суток. Точные эталоны времени утверждают, что за год она увеличивается на 23 микросекунды. Иными словами, вращение Земли замедляется, пусть и очень медленно. Это замедление предсказал еще в конце 19 века английский астроном Джордж Дарвин (сын Чарльза Дарвина). Он и указал виновника – ту самую Луну, под которой все не вечно.

Луна вызывает приливы на Земле, которые создают момент силы, заставляющий нашу планету замедляться. При этом ее момент импульса передается Луне, которая за счет этого удаляется от Земли. Расстояние между Луной и Землей, усредненное за период обращения Луны, возрастает за год на 38 миллиметров. Это явно немного в астрономических масштабах, но если подумать, что за миллиарды лет изменения станут очень большими, то к ним не стоит относиться пренебрежительно.

Подробно о том, что приливы передают момент импульса от Земли к Луне, рассказывается в статье Л.Асламазова «Лунный тормоз» в «Кванте» №8 за 1987 год (который легко найти в архиве старых номеров) или в книге Л.Г.Асламазова и А.А.Варламова «Удивительная физика». Поэтому не будем повторять, как притяжение Луны вызывает приливные волны в океане, как эти волны немного повернуты относительно направления на Луну из-за вращения Земли и как их притяжение к Луне обеспечивает тот самый момент сил, который и вызывает все те изменения, о которых уже упоминалось. Скажем только, что расчет этого момента очень сложен и что он зависит не только от меняющегося со временем расстояния до нашего спутника, но и от конфигурации материков на Земле.

Однако, для ответа на многие вопросы его и не надо вычислять. Достаточно воспользоваться законом сохранения момента импульса в системе Земля–Луна. Его мы вычислим относительно центра Земли. Естественно, что он будет суммой момента импульса вращения Земли вокруг своей оси и момента импульса движения Луны по орбите вокруг Земли. Оценим эти величины.

Начнем с Луны. Ее момент импульса равен $L_Л = mvr = m\omega r^2 \approx 28 \cdot 10^{33}$ кг·м^2/с, где $m \approx 7{,}3 \cdot 10^{22}$ кг – масса Луны, $r \approx 3{,}8 \cdot 10^8$ м – среднее расстояние от Земли до Луны, $\omega = 2\pi/T_Л$ – угловая скорость обращения Луны, $T_Л \approx 27{,}32$ суток – период обращения Луны вокруг Земли. При желании можно учесть и момент импульса, связанный с вращением Луны вокруг своей оси, но он мал по сравнению с $L_Л$.

Момент импульса Земли найдем по известной формуле $L_З = I\Omega$, где угловая скорость вращения Земли равна $\Omega = 2\pi/T_З$, а $T_З = 1$ сутки. Момент инерции Земли $I = 2Mr_З^2/5$ оценим как эту величину для однородного шара массой $M \approx 6 \cdot 10^{24}$ кг и радиусом $r_З \approx 6{,}4 \cdot 10^6$ м. Подставив численные значения, получим $L_З \approx 7 \cdot 10^{33}$ кг·м^2/с.

Итак, момент импульса, связанный с движением Луны, приблизительно вчетверо больше, чем момент импульса, связанный с вращением Земли. Но из-за приливов первый со временем увеличивается, а второй уменьшается. Так что Земля замедляет скорость своего вращения. А что Луна?

Изменение радиуса ее орбиты за время одного оборота, т.е. приблизительно за месяц, настолько незначительное, что движение можно считать круговым. (На самом деле Луна обращается вокруг Земли по эллипсу, но он очень близок к окружности.) Условие равенства силы притяжения Земли

DOI: https://doi.org/10.4213/kvant20210504

и Луны и центростремительной силы движения Луны по орбите:

$$m\omega^2 r = \frac{GmM}{r^2},$$

где G – гравитационная постоянная, дает соотношение

$$\omega^2 r^3 = GM.$$

Отсюда нетрудно получить выражение

$$L_Л = m\omega r^2 = m\sqrt{GMr}.$$

Мы видим, что возрастание момента импульса Луны приводит к ее удалению от Земли, при этом уменьшается ее угловая скорость и, следовательно, увеличивается продолжительность периода обращения Луны, который мы называем месяцем.

Любопытное подтверждение этой теории дает исследование ископаемых кораллов. Американский ученый Дж.Уэльс обнаружил на них следы суточного цикла смены освещенности, а затем Г.Панелла и К.Мак-Клинток обнаружили еще и следы месячного цикла. В результате, исследуя окаменевшие кораллы разного возраста, ученым удалось узнать, во сколько раз продолжительность месяца превышала продолжительность дня в то время, когда росли эти кораллы. Оказалось, что для очень старых кораллов и месяц и сутки были меньше, чем теперь. Так что пару миллиардов лет тому назад Луна была ближе к Земле. Джордж Дарвин даже предположил, что она была оторвана от жидкой еще Земли центробежными силами. Давайте проверим эту гипотезу.

В то время, когда должно было произойти это событие, почти весь момент импульса системы Земля–Луна приходился на вращение Земли. Как мы уже прикинули, он приблизительно впятеро больше, чем момент импульса Земли сейчас. А так как размеры и масса Земли особо не менялись, это дает основание для вывода о том, что сутки в то время были почти впятеро меньше, чем теперь, и продолжались около 5 часов. Хорошо, но хватило бы такого вращения для того, чтобы от планеты оторвался кусок?

Легко видеть, что нет, не хватило бы. Если мы положим камень где-то на экваторе, то он сможет улететь в космос, только если скорость его вращения превысит первую космическую скорость. При движении спутника по особо низкой орбите, т.е. именно с этой минимальной скоростью, он делает полный оборот вокруг Земли где-то за 1,5–2 часа. А скорость даже быстрого вращения юной Земли обеспечивала бы один оборот за 5 часов, что недостаточно для того, чтобы оторвать часть вещества Земли. Вот и очевидный вывод: Луна не была оторвана от Земли центробежными силами.

В наше время гипотеза о том, что Луна оторвалась от Земли, опять стала актуальной, но с важным добавлением. Луна не оторвалась, а была выбита из Земли при гигантском столкновении с другой планетой, которую назвали именем титаниды Тейи, матери Гелиоса, Эос и богини Луны Селены. Удар Тейи пришелся почти по касательной по краю Земли и смог оторвать кусок, из которого и сформировался со временем наш естественный спутник. В пользу этой гипотезы говорят результаты геологического и изотопного исследований лунных пород.

Итак, с помощью несложных оценок нам удалось пролить свет на начало процесса удаления Луны. А чем он закончится? Да тем, что угловые скорости обращения Луны и вращения Земли сравняются друг с другом и Луна будет все время находиться над определенной стороной Земли, как сейчас сама Луна всегда повернута к Земле одной своей стороной. День и месяц сравняются по продолжительности и будут длиться около двух современных месяцев. Это можно узнать все из того же выражения для момента импульса. Надо положить в нем $\Omega = \omega$, приравнять его текущему значению момента импульса, получить уравнение, используя соотношение $\omega^2 r^3 = GM$, и решить его, хотя бы численно, с помощью компьютера.

Но можно и не решать, ведь нас интересует оценка, а не точная величина. Нетрудно догадаться, что при $\Omega = \omega$ практически весь момент импульса будет связан с обращением Луны. Так что по сравнению с существующим ее движением момент импульса должен будет вырасти на четверть. Поскольку эта величина пропорциональна $\sqrt{r}$, то средней радиус орбиты Луны должен возрасти в $1{,}25^2$ раза, а угловая скорость уменьшиться в $1{,}25^3$ раз. При этом длительность месяца (и равная ей длительность суток) увеличится по сравнению с нынешним месяцем в $1{,}25^3 \approx 2$ раза.