

КАЧЕЛИ, РЕЗОНАНСЫ И КОСМИЧЕСКОЕ ХУЛИГАНСТВО

Как раскачать качели? Если вы большой и сильный, а качели маленькие – можно, конечно, просто сильно отклонить их от вертикали и отпустить. А если качели очень высокие и вдобавок тяжёлые? Тогда нужно подталкивать их с определённой частотой, попадая «в такт». Если толкать слишком часто или слишком редко – ничего не получится. А вот если найти нужный ритм – даже маленькими усилиями можно раскачать качели очень сильно!

Что же это за «подходящий» ритм? Это так называемая *собственная частота системы*. Когда качели висят вертикально, они неподвижны и находятся в положении равновесия. Если чуть-чуть отклонить их от вертикали и отпустить, они начнут вокруг этого равновесного положения колебаться. Частота этих собственных, свободных от внешней силы колебаний зависит только от свойств качелей (в основном от длины веревок или жердей, на которых они подвешены). Вот под неё-то и нужно подстраиваться.

Итак, если сила – даже маленькая – действует на систему (в нашем случае качели) периодически с частотой, равной собственной частоте системы, то система раскачивается очень сильно. Эта ситуация называется резонансом.

Резонанс бывает не только у качелей, а у любой системы, которая может колебаться около положения равновесия. Другой простой механический пример – это грузик, подвешенный на пружинке. Если оставить его в покое – он, покачавшись вверх-вниз (с некоторой, своей собственной, частотой), остановится в положении равновесия. Но если теперь с той же самой частотой подталкивать его, например, вверх – он раскачается очень сильно. (Правда, такие колебания неустойчивы – если не принять специальных мер, грузик отклонится от вертикали и станет болтаться в разные стороны.)

Если вам случалось проходить по достаточно длинному и не очень хорошо закреплённому мосту, вы могли заметить, что при определённом ритме ваших шагов он начинает сильно вибрировать. Это значит, что вы случайно приблизились к собственной – резонансной –





частоте. Лучше в таком случае резко сменить темп, чтобы выйти из резонанса. По этой же причине, когда отряд солдат подходит к мосту, командир отдаёт приказ идти «не в ногу», то есть вразнобой, чтобы случайно не попасть в резонанс.

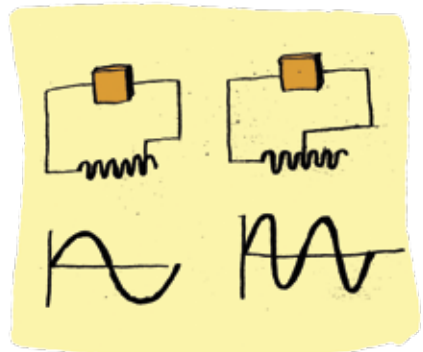
Колебания могут быть и не механическими, а, например, электрическими. В любом радиоприёмнике есть «колебательный контур» – катушка и конденсатор, соединённые между собой. Если в таком контуре создать ток, а потом оставить его в покое, ток будет колебаться, как качели – буквально течь то в одну сторону, то в другую, – пока постепенно не затухнет. А если теперь приделать к этому контуру антенну, то радиоволны будут раскачивать ток в контуре, как мы раскачиваем качели. Причём заметный ток будет получаться только в том случае, если частота радиоволн близка к собственной частоте контура – тогда возникает резонанс и ток оказывается достаточно большим. Дальше этот «раскачавшийся» ток усиливается и преобразуется в звук (как именно – мы здесь обсуждать не будем). Когда мы крутим ручку или нажимаем на кнопку радиоприёмника – мы меняем свойства колебательного контура, например – увеличиваем или уменьшаем «размер» катушки, при этом меняется собственная частота. Теперь уже другие волны – переданные другой радиостанцией – попадут в резонанс и создадут в цепи приёмника ток: мы услышим другую передачу.

Резонанс может возникнуть везде, где есть периодическое движение. Например, в космосе: все планеты движутся по эллипсам (кто не знает, что это такое, может пока считать, что по окружностям), и каждая через некоторое время, называемое по-научному периодом обращения, возвращается в ту же точку. У Земли, например, период обращения – один год. Что произойдёт, если какая-то сила начнёт действовать на планету с резонансной частотой? Орбита планеты начнёт «раскачиваться», меняться... хорошо, что на Землю никто так не действует. Но оказывается, в Солнечной системе так повезло не всем.

В 1857 году, когда уже открыли пояс астероидов между Марсом и Юпитером и начали изучать параметры их орбит, американский астроном Кирквуд заподозрил, что на определённых орбитах будет меньше астероидов,



Дэниел Кирквуд
1814–1895



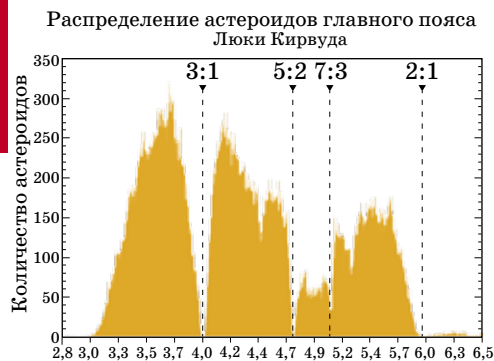
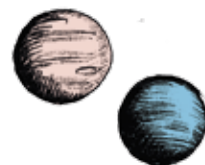
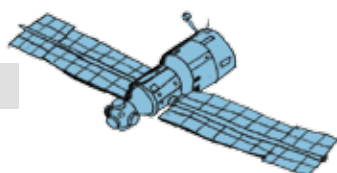
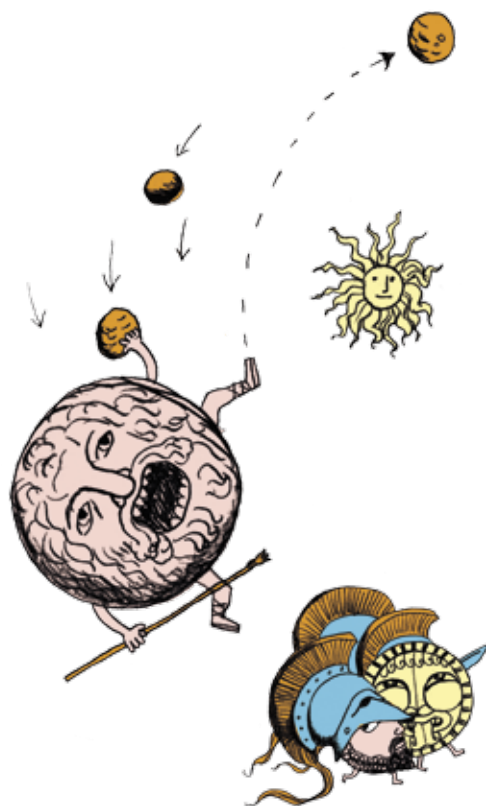


Рис. 1. Распределение астероидов по периоду обращения и люки Кирквуда. По горизонтали – период обращения астероида в годах. Цифры сверху показывают отношение периодов обращения Юпитера и астероидов из люка Кирквуда.

чем на других. Чтобы это продемонстрировать, он написал астероиды в порядке возрастания периода их обращения вокруг Солнца. И действительно, на тех орбитах, период обращения по которым близок половине, трети или двум пятым периода обращения Юпитера, астероидов оказалось гораздо меньше, чем вокруг них. Такие «дырки» – пробелы в распределении периодов – назвали *люками* или *щелями Кирквуда*. Чтобы их увидеть, будем откладывать по горизонтальной оси периоды обращения астероидов. Разобьём горизонтальную ось на маленькие интервалы и над каждым интервалом нарисуем прямоугольник, высота которого равна количеству попавших в него астероидов. Получится картина как на рисунке 1. (Сейчас астероидов известно уже очень много – около 300 тысяч, и диаграмма получается довольно подробной.) Люки Кирквуда видны очень хорошо.

Почему в этих местах, как и говорил Кирквуд, астероидам спокойно не живётся? Всё дело в резонансе: те астероиды, чей период был равен, скажем, половине периода Юпитера, сближаются с ним на одном и том же участке. Воздействия Юпитера при этом каждый раз понемногу меняют орбиту, причём в одном и том же направлении, в отличие от нерезонансных орбит, которые Юпитер гнёт то в одну сторону, то в другую, в среднем особо не меняя. Так резонансные орбиты из кругов вытягивались во всё более узкие эллипсы. Период обращения при этом не менялся, и резонансная раскачка продолжалась до тех пор, пока космический хулиган Юпитер не выбрасывал астероид из Солнечной системы. А вокруг «главного резонанса» – периода обращения Юпитера – на гистограмме вообще почти пусто: Юпитер раскачивал орбиты таких астероидов до тех пор, пока они не начинали пересекать его орбиту, а потом просто «съедал» их.

Но и к такому космическому хулиганству можно приспособиться и даже извлечь из него выгоду. Вот пример: оказывается, есть две группы астероидов – они называются *греки* и *троянцы*, – период которых точно совпадает с периодом Юпитера! Более того, сами их орбиты совпадают с орбитой Юпитера, только «греки» движутся по ней, «опережая» Юпитер на $\frac{1}{6}$ круга, а «троянцы» – на столько же «отстают» (рис.2). Эти



астероиды похожи на мышей из мультика, которые ходят по пятам за котом и так от него спасаются. И резонанс им никак не мешает и не раскачивает их орбиты, а наоборот, делает их устойчивыми.

Это может показаться бессмыслицей, ведь «троянцев» Юпитер постоянно тянет вперёд, а «греков» тормозит. Почему «троянцы» его не догонят, а Юпитер не догонит «греков»? Дело в том, что и астероид, и сам Юпитер (и даже само Солнце) на самом деле вращаются не вокруг Солнца, а вокруг некоторой неподвижной точки – центра масс системы Солнце-Юпитер. То есть центр круга, по которому крутится Юпитер, чуть-чуть сдвинут от Солнца в сторону Юпитера. И именно к этому центру, а не к Солнцу, должны притягиваться астероиды на орбите Юпитера, чтобы не убегать вперёд и не отставать. Вот «греки» и устроились там, где тормозящая сила от Юпитера компенсируется разгоняющей от Солнца (рис. 3).

Точка на орбите Юпитера, отстоящая от него на 60° и движущаяся синхронно с ним, называется лагранжевой. Астероид, находящийся в этой точке, будет оставаться в ней вечно (конечно, вращаясь при этом вместе с Юпитером). Безусловно, в одной точке несколькими «троянцам» не поместиться. Но они «болтаются» вокруг этой точки, никогда сильно от неё не удаляясь.

Кстати, есть ещё 3 точки Лагранжа, которые движутся синхронно с Юпитером по круговым орбитам: помещённый в них астероид тоже в них бы и оставался (правда, только теоретически: это равновесие неустойчиво). Попробуйте угадать, где расположены эти точки.

Не только Юпитер занимается космическим хулиганством. У других планет, правда, меньше возможностей проявить себя таким образом: массы не хватает или астероидов поблизости маловато. Но вот Нептуну повезло: сразу за его орбитой начинается пояс Койпера – область малых планет, то есть тех же астероидов, только покрупнее. Именно из-за их открытия Плутон перестали считать планетой: оказалось, что таких, как он, там довольно много. Так вот, большая часть известных малых планет пересекают орбиту Нептуна, и практически все они находятся с Нептуном в резонансе. Это помогает им избежать столкновения с ним: похоже, остальных Нептун проглотил!

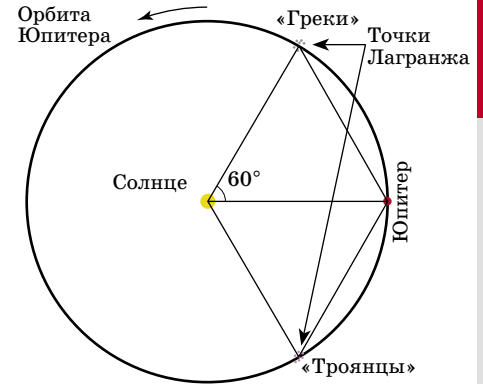


Рис. 2. Взаимное расположение Солнца, Юпитера и астероидов-троянцев. Размеры всех тел изображены без соблюдения масштаба.

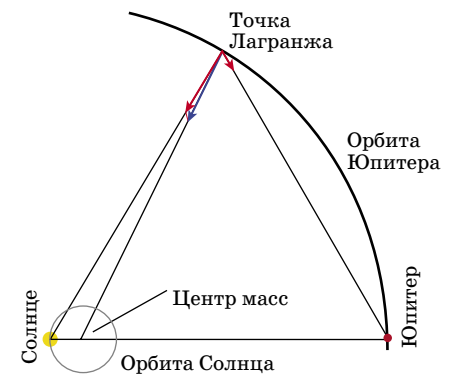


Рис. 3. Силы, действующие на астероид в точке Лагранжа. Расстояние от Солнца до центра масс и размер орбиты Солнца преувеличены примерно в 100 раз относительно размера орбиты Юпитера.

