

Левитирующий магнитный ВОЛЧОК

А. ПАНОВ

ОПРЕДЕЛИМ ЛЕВИТАЦИЮ КАК СВОБОДНОЕ ЗАВИСИАНИЕ тел в воздухе. Мы будем рассматривать исключительно магнитную левитацию. И в самом деле, магниты кажутся подходящими кандидатами. Чтобы заставить тело левитировать, нужно каким-то образом компенсировать силу тяжести. А магниты, обращенные друг к другу одноименными полюсами, отталкиваются. Если расположить их на определенном расстоянии друг над другом, то магнитное отталкивание как раз сможет уравновесить силу тяжести, и верхний магнит зависнет над нижним.

Многие пытались действовать подобным образом, но ничего не получалось. Магниты каким-то образом изворачивались в воздухе, оказывались повернутыми друг к другу разноименными полюсами и притягивались. И на этом все заканчивалось – никакой левитации. Не помогает и замена отталкивающего магнита на целую систему магнитов, расположенных на плоскости или в пространстве, – и в этом случае добиться зависания не удается.

Казалось, что левитация невозможна. И этому было мощное теоретическое подтверждение.

Теорема Ирншоу – невозможность левитации

Начнем с двойной цитаты Гейма – Берри из статьи Андрея Гейма «Магнетизм для всех» (<http://www.physics.umd.edu/grt/taj/411c/EveryonesMagnetism.pdf>, http://www.scientific.ru/journal/translations/magn_ed.html):

«Попробуйте, например, заставить левитировать магнитное тело. Вы, конечно, легко сможете поднять его с помощью подковообразного магнита, но вы не сможете заставить его зависнуть с помощью какой бы то ни было хитроумной конфигурации магнитов. Чтобы понять, в чем здесь дело, нужно вспомнить теорему Ирншоу, которая (как ее недавно переформулировал Майкл Берри) утверждает, что никакой стационарный объект, сделанный из зарядов, магнитов и масс, не может быть подвешен в пространстве с помощью любой фиксированной комбинации электрических, магнитных и гравитационных сил».

Эта теорема была доказана английским священником, математиком и физиком Самуэлем Ирншоу в 1842 году. Она имеет простую формулировку, красивое доказательство и хорошо известна каждому физики. Многие физики считали ее абсолютным запретом магнитной левитации, но оказалось, что существуют обходные пути.

Простой эксперимент

Начнем с простого эксперимента, который на первый взгляд представляет собой не больше чем пародию на магнитную левитацию. На рисунке 1 видны два магнита, нанизанные на деревянный стержень, – один неодимовый, другой ферритовый, но это пока не так важно. Главное, что магниты повернуты друг к другу одноименными полюсами и взаимно отталкиваются – верхний висит над нижним.

Почему это нельзя назвать левитацией? А потому, что это зависание не является свободным – свободному движению верхнего магнита препятствует деревянная палочка. Нет ли здесь противоречия с теоремой Ирншоу? Нет, потому что кроме магнитных и гравитационных сил на верхний магнит действуют упругие силы, возникающие при его взаимодействии с деревянной палочкой.

Но все не так плохо. Продолжим анализ нашего эксперимента. Высота зависания верхнего магнита – это та высота, на которой действующие на него сила тяжести и магнитная сила уравновешиваются. Не будем снимать верхний магнит с палочки, а расположим его на этой высоте строго горизонтально и отпустим. Легко убедиться, что в этом случае потенциальная энергия магнита будет уменьшаться не за счет вертикального падения, а за счет его поворота в магнитном поле. Если бы не деревянная палочка, верхний магнит повернулся бы на 180° – своим противоположным полюсом к нижнему магниту – и притянулся к нему. Палочка препятствует этому.

Если бы удалось заменить палочку на что-то менее вещественное, но тоже препятствующее повороту, то возможно, проблема левитации была бы решена. Оказывается, в этом может помочь гироскопический эффект. Именно закрутка кольцевого магнита вокруг оси может воспрепятствовать его опрокидыванию и дальнейшему падению. Это – ключевая идея для того типа левитации, который мы обсуждаем. Но, во-первых, ее не так просто реализовать. А во-вторых, как уже

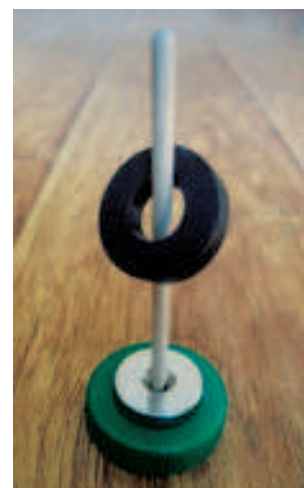


Рис.1. Магнит на палочке

говорилось, для ее реализации имеется дополнительное психологическое препятствие в виде теоремы Ирншоу.

Рой Харриган – практика левитации

В 1976 году американский изобретатель Рой Харриган после многочисленных экспериментов заставил левитировать в магнитном поле магнитный волчок. В 1983 году Харриган получил патент на свое изобретение. С дальнейшей судьбой этого изобретения связана целая детективная история, но здесь мы не будем ею заниматься. Так или иначе, на основе этого изобретения была создана игрушка под названием *левитрон*, которая пользуется огромным успехом и продается миллионными тиражами.

Майкл Берри – теория левитации

Одна из первых научных публикаций о данном типе левитации принадлежит известному английскому ученому, специалисту в области математической физики Майклу Берри. В 1996 году он опубликовал статью, где описана теория движения магнитного волчка в магнитном поле (http://www.phy.bris.ac.uk/people/berry_mv/the_papers/Berry271.pdf). Это упрощенная теория, но она хорошо согласуется с результатами конкретных экспериментов. В статье много математики, и мы ограничимся лишь небольшим извлечением оттуда (к счастью, Берри написал еще и короткий популярный текст, который распространялся вместе с игрушкой: http://www.phy.bris.ac.uk/people/berry_mv/the_papers/Berry272.pdf).

Оказывается, что для данной магнитной базы (большого магнита, находящегося внизу) и маленького магнита, расположенного внутри волчка, существует узкий диапазон масс волчка, для которых возможна левитация. Это означает, что нужно очень точно отрегулировать массу волчка. На практике это достигается его постепенным утяжелением с помощью пластмассовых шайб или резиновых колечек малого веса. Имеются существенные ограничения относительно скорости вращения волчка и высоты его полета. Нужен определенный навык доставки волчка в точку левитации. Также необходимо аккуратное горизонтальное выравнивание магнитной базы. Наконец, эти настройки могут меняться в промежутке от одного запуска до другого. Немудрено, что Харригану при-

шлось проявить немалое упорство, чтобы заставить волчок левитировать.

Но мы отклонились от теории, вернемся к ней. В своей статье Берри выводит упрощенную формулу для потенциальной энергии магнитного волчка в магнитном поле, созданном магнитным диском радиусом a . Используется система координат, в которой ось z направлена вертикально вверх, а оси x и y – горизонтально. После перехода к безразмерным величинам:

$$x \rightarrow \xi = \frac{x}{a}, \quad y \rightarrow \eta = \frac{y}{a}, \quad z \rightarrow \zeta = \frac{z}{a}$$

и после соответствующих преобразований массы волчка и его потенциальной энергии формула для потенциальной энергии E приобретает следующий вид:

$$E = M_0 \zeta + \frac{1}{(1 + \zeta^2)^{3/2}} + \frac{8(\xi + \eta^2)(2 - 5\zeta^2)}{8(1 + \zeta^2)^{7/2}},$$

где M_0 – приведенная безразмерная масса волчка. Обозначим через ζ_0 высоту (равновесную высоту), на которой гравитационная и магнитная силы, действующие на волчок массой M_0 , компенсируют друг друга. Между M_0 и ζ_0 имеется такое соотношение:

$$M_0 = \frac{3\zeta_0}{(1 + \zeta_0^2)^{5/2}}.$$

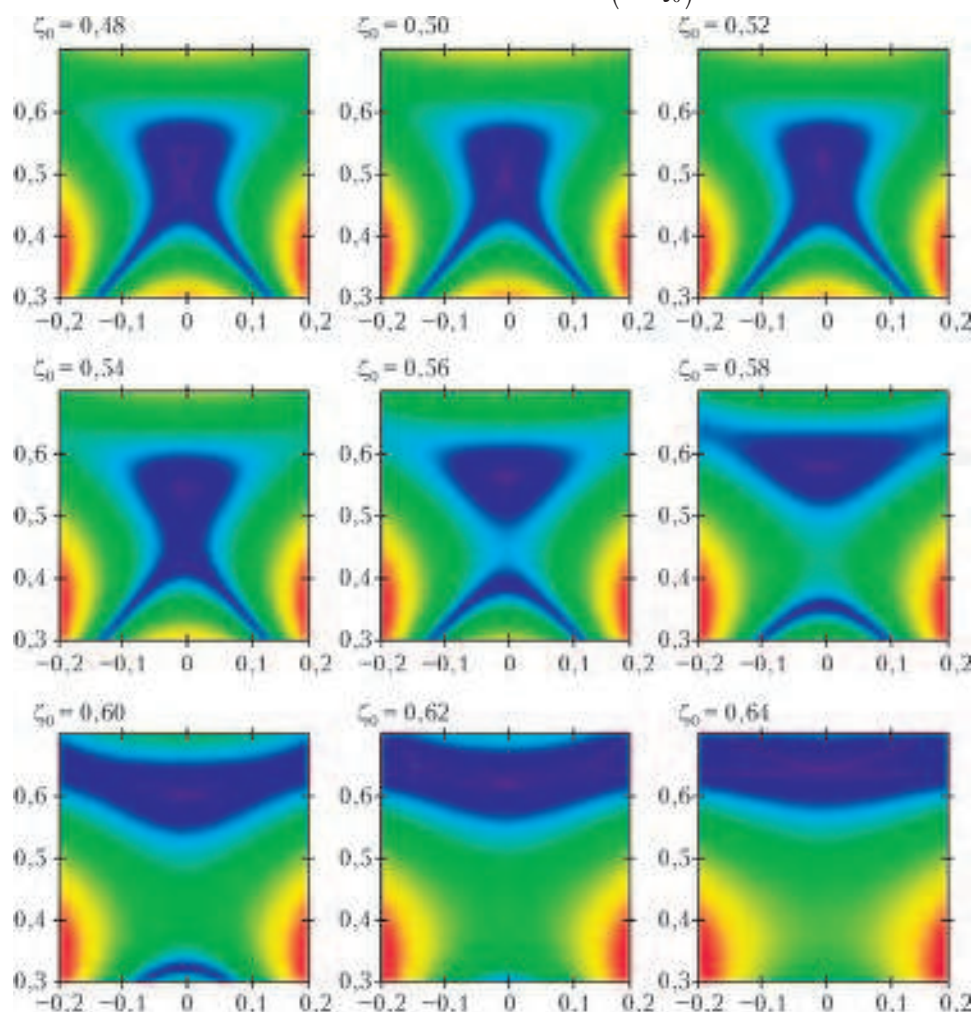


Рис.2. Картины уровней потенциальной энергии волчка для разных равновесных высот

Из формулы для потенциальной энергии следует, что левитация возможна только тогда, когда относительная высота нахождения волчка $\zeta = z/a$ заключена в пределах

$$0,5 < \frac{z}{a} < \sqrt{\frac{2}{5}} = 0,632\dots$$

Тогда диапазон для соответствующих масс получается таким:

$$0,859\dots > M_0 > 0,818\dots$$

Мы видим, что эти диапазоны на самом деле достаточно узки.

Для полученных теоретических результатов имеется хорошее визуальное представление. На рисунке 2 представлены картины уровней потенциальной энергии для различных значений равновесной высоты ζ_0 , а можно сказать, и для соответствующих значений равновесной массы $M_0 = 3\zeta_0 / (1 + \zeta_0^2)^{3/2}$. Горизонтальная ось на каждом кадре – это ось $\xi = x/a$, идущая вдоль радиуса дискового магнита, представляющего базу. Вертикальная ось – это ось $\zeta = z/a$. Цветами представлены значения потенциальной энергии – от фиолетового для минимума до красного для максимума. На кадрах от $\zeta_0 = 0,52$ до $\zeta_0 = 0,62$ видны фиолетовые точки минимума потенциальной энергии, их окружают потенциальные ямы, и вблизи этих точек волчок может левитировать. На крайних кадрах равновесные точки $(0; \zeta_0) = (0; 0,48)$ и $(0; \zeta_0) = (0; 0,64)$ находятся на вершинах небольших горок, и эти равновесные точки неустойчивы. С первой из них волчок скатывается вниз, со второй – вбок.

Заметим, что теоретическое описание хорошо согласуется с реальными экспериментами. Но тем не менее, это всего лишь приближенная модель, которая описывает поведение быстро вращающегося волчка. В статье Берри есть и более точная модель, которая устанавливает дополнительные границы для скорости устойчиво вращающегося волчка. Но это уже для самостоятельного чтения.

На этом мы заканчиваем наше затянувшееся вступление и переходим к главному.

Как это сделать самому

Конечно, вы всегда можете посмотреть в интернете, как можно добиться левитации волчка. Поиск на слово Levitron даст гигантское количество ссылок. А я расскажу о своем опыте.

В качестве базы использовались три кольцевых ферритовых магнита (рис.3) с внешним диаметром 110 мм. Заказывались они в петербургской компании «Магниты и системы» (<http://magnet-prof.ru>). Выбор именно ферритовых магнитов – принципиальная вещь. А.Гейм в своей уже цитировавшейся статье пишет, что использование керамических магнитов необходимо для предотвращения возникновения индуцированных токов, рассеивающих энергию вращения.

Самое сложное – это сборка и настройка магнитного волчка. В волчке использовался маленький кольцевой ферромагнит диаметром 20 мм, вынутый из

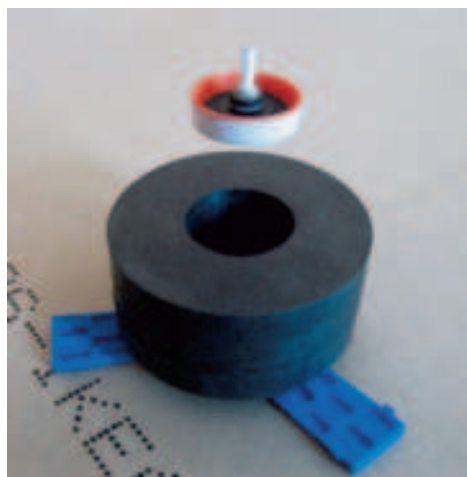


Рис.3. Левитация магнитного волчка

динамика. На рисунке 4 представлен весь тот дополнительный «мусор», из которого собран волчок. Осью волчка служит четырехсантиметровый пластиковый



Рис.4. Детали для сборки волчка

винт с резьбой в 5 мм и с отпиленной головкой. И винт, и гайка, что побольше, куплены в магазине авиамоделей, а та, что поменьше, – в магазине радио-деталей. Основой для сборки волчка служит пластмассовая крышка от молочной бутылки. В центре крышки шилом протыкается отверстие, в которое ввинчивается винт. В крышку вкладывается магнит и утяжеляющие элементы: резиновые прокладки, пластиковые или картонные шайбы и т.п. При этом лучше настройка будет происходить позже. И все это с двух концов стягивается гайками. Скажем еще, что пластиковые крышки по краям делаются ребристыми, чтобы их легче было откручивать. Но эти ребрышки в то же время ухудшают аэродинамику волчка, тормозят его, что приводит к уменьшению времени левитации. Так что боковую поверхность крышки стоит обмотать гладкой клейкой лентой.

Запуск волчка удобно производить со стопки из прозрачных коробок для компакт-дисков (они тоже присутствуют на рисунке 4). Их надо положить на базу

из кольцевых магнитов точно по центру. Волчок нужно раскрутить, и это уже непросто. Следует одновременно и подобрать высоту стопки, с которой запускается волчок, и убедиться в том, что волчок достаточно тяжел, иначе он не будет устойчиво вращаться.

Как только волчок у вас раскрутится, нужно осторожно и медленно поднимать стопку коробок вместе с волчком. И, если повезет, в некоторый момент волчок оторвется вверх и повиснет. Но, скорее всего, сразу так не случится. Либо волчок не будет отрываться, и тогда нужно уменьшить его массу – снять один из грузиков. Либо его резко подбросит вверх, и он отлетит в сторону и сразу рухнет. В этом случае его нужно утяжелить, и удобнее всего это сделать с помощью резиновых колечек. Часть из тех колечек, что показаны на рисунке 4, куплены в магазине сантехники, а светлые вырезаны из резинки от пипетки. И те и другие удобно натягиваются на гайки.

Но и это еще не все. Даже при правильно подобранной массе волчка он может не зависать, а сваливаться вбок. Однако в этом случае сваливание при каждом запуске обязательно будет происходить в одну и ту же сторону. И тогда нужно заняться выравниванием магнитной базы. Именно для этого нужны синие клинья, два из которых видны на рисунке 3, а третий скрыт за магнитами.

Отметим, что все эти настройки придется повторить неоднократно. Но если вам хоть раз удастся запустить волчок, дальше он будет летать как миленький. Правда, время от времени придется проводить микроскопическую корректировку массы волчка.

В принципе, можно купить и готовую игрушку, но это уже совсем другое дело.

Послесловие

В то же самое время, когда Майкл Берри разбирался с левитроном, Андрей Гейм заставил левитировать лягушку в сильном магнитном поле. Это был другой тип левитации – диамагнитная левитация. Но полученные Берри теоретические результаты подходили и для этого случая, и в 1997 году Берри и Гейм написали уже совместную статью «Летающие лягушки и левитроны» (Of flying frogs and levitrons; http://www.phy.bris.ac.uk/people/berry_mv/the_papers/Berry285.pdf). За эту работу им в 2000 году присудили Игнобелевскую премию (http://www.phy.bris.ac.uk/people/berry_mv/igberry.html). Вот, что они сказали по этому поводу:

«В последние годы левитация была нашим сильным научным увлечением. Мы потратили на нее много сил и много времени, отвечая на поставленные перед нами вопросы. Но мы ничуть не жалеем об этом и считаем, что наши усилия оправданы тем общественным интересом, который вызвали полученные нами результаты».

А в 2010 году Андрей Гейм вместе с Константином Новоселовым получил уже и Нобелевскую премию – за открытие графена (Нобелевская лекция А.Гейма; <http://ufn.ru/ru/articles/2011/12/e/>).

Приложение

После экспериментов с левитирующим магнитным волчком осталось несколько небольших магнитов. Давайте пустим их в дело и сделаем еще одну движущуюся игрушку – простой электромотор. Кроме магнитов понадобится также батарейка, пара английских булавок или металлических скрепок, скотч и моток тонкой медной изолированной проволоки. Из деталей, изображенных на рисунке 5, можно будет собрать два мотора.



Рис.5. Детали для сборки электромотора

Самое первое, что нужно сделать, это намотать несколько витков проволоки, скажем, на толстый фломастер, затем снять их и сделать колечко. Длина такого колечка вместе с двумя прямолинейными отводами должна немного превышать длину батарейки, как это видно на рисунке 5. Сразу же зачистите от изоляции оба прямых конца проволоки. Изогните две скрепки или английские булавки, как показано на рисунке 5, и



Рис.6. Работающие моторы

примотайте их скотчем к батарейке. В ушки скрепок (булавок) вставьте зачищенные концы проволоки, добавьте магниты – и моторы закрутятся (рис.6).