

## О непостоянстве гравитационной постоянной.

В.А. Лекомцев.

**Наука как одна из форм проявления человеческой глупости  
бесконечна в своем развитии.**

**Легенду об упавшем яблоке Ньютон сочинил для своей племянницы Катерины Кондуит, рассказывая, как открыл свой закон всемирного тяготения. После того как эта история попала в первую опубликованную в 1728 году биографию великого ученого, яблоко стало неразрывно ассоциироваться с этим законом. Однако суть открытия заключалось в том, что замкнутые эллиптические орбиты планет Солнечной системы возможны в единственном случае — когда сила притяжения их к Солнцу обратно пропорциональна квадрату расстояния до него.**

В ряду фундаментальных физических констант — скорость света, постоянная Планка, заряд и масса электрона — гравитационная постоянная стоит как-то особняком. Даже история её измерения изложена в знаменитых энциклопедиях [Britannica](#) и [Larousse](#), не говоря уж о [«Физической энциклопедии»](#), с ошибками. Из соответствующих статей в них читатель узнает, что её численное значение впервые определил в прецизионных экспериментах 1797–1798 годов знаменитый английский физик и химик Генри Кавендиш ([Henry Cavendish](#), 1731–1810), герцог Девонширский. В действительности Кавендиш измерял среднюю плотность [Земли](#) (его данные, кстати, всего лишь на полпроцента отличаются от результатов современных исследований). Располагая же информацией о плотности Земли, мы легко можем вычислить её массу, а зная массу, определить гравитационную постоянную.

Интрига состоит в том, что во времена Кавендиша понятия гравитационной постоянной ещё не существовало, и [закон всемирного тяготения](#) не принято было записывать в привычном для нас виде. Напомним, что сила тяготения пропорциональна произведению масс тяготеющих тел и обратно пропорциональна квадрату расстояния между этими телами, коэффициентом же пропорциональности как раз и является гравитационная постоянная. Такая форма записи ньютоновского закона появляется только в XIX столетии. А первые опыты, в которых измерялась именно гравитационная постоянная, были выполнены уже в конце столетия — в 1884 году.

Как отмечает российский историк науки [Константин Томилин](#), гравитационная постоянная отличается от других фундаментальных постоянных ещё и тем, что с ней не связан естественный масштаб какой-либо физической величины. В то же время скорость света определяет предельное значение скорости, а постоянная Планка — минимальное изменение действия.

И только в отношении гравитационной постоянной была высказана гипотеза о том, что её численное значение, возможно, **меняется со временем**. Впервые эту идею сформулировал в 1933 году английский астрофизик Эдвард Милн ([Edward Arthur Milne](#), 1896–1950), а в 1937 году знаменитый английский физик-теоретик Поль Дирак ([Paul Dirac](#), 1902–1984), в рамках так называемой «гипотезы больших чисел», предположил, что гравитационная постоянная уменьшается с течением космологического времени. Гипотеза Дирака занимает важное место в истории теоретической физики XX века, однако никаких более или менее надежных экспериментальных подтверждений её не известно.

**Несколько замечаний о физическом смысле гравитационной постоянной.**

Вообще-то гравитационная постоянная имеет размерность, и если исходить из теории размерности, то эта постоянная должна зависеть от двух величин, от плотности вещества и квадрата времени, т.е.

$$G = 1/\rho t^2$$

На это обратил внимание еще Р. Фейман в своем многотомном учебнике. Но, к сожалению, он не выяснил физический смысл этих параметров, которые легко определяются из закона Кеплера

$$GM = R^3/T^2$$

Где как известно  $M$  – это масса тяготеющего тела,  $R$  – средний радиус орбиты планеты или спутника, а  $T$  – период обращения вокруг тяготеющего тела.

Таким образом, постоянная тяготения имеет вполне определенные физические параметры

$$G = 1/\rho T^2 = V^2/\rho R^2$$

Где  $\rho$  – плотность вещества тяготеющего тела, а  $T$  – предельный период вращения поверхности этого тела с первой космической скоростью  $V$ . Зависимость от плотности понятна. При одинаковой концентрации вещества в единице объема тяжелые ядра атомов должны оказывать более сильное гравитационное воздействие, чем легкие. А предельный период вращения указывает на границу устойчивости тела, т.е. при увеличении периода вращения тело просто разлетается в пространстве. Зависимость гравитационной постоянной от плотности пород вблизи поверхности Земли заметили и успешно используют геологи и по гравитационным аномалиям открывают месторождения и нефти, и металлов. И еще ее чувствуют лозоходцы, когда определяют потенциальные источники воды вблизи поверхности Земли.

Если написать еще более точное выражение для наблюдаемой величины гравитационной постоянной на поверхности тела с учетом скорости вращения тела, то получим следующее выражение для гравитационной постоянной.

$$G = (V^2 - v^2)/\rho R^2 = 1/\rho T^2 - 1/\rho t^2$$

Из выражения видно, что при  $V=v$ ,  $T=t$   $G=0$ , т.е. мы будем наблюдать состояние невесомости, т.е. как выясняется, что гравитационная постоянная зависит еще и от скорости движения тел. Но для планет Солнечной системы второй член в этом выражении достаточно мал. А вот для Земли заметен.

Но если гравитационная постоянная зависит от плотности, то у планет с разной плотностью она должна быть разная. Либо мы неправильно определяем эту плотность, используя в качестве гравитационной постоянной константу.

И действительно, например, для Луны и Земли имея предельный период вращения  $T=1.5$  часа (или 90 минут), мы должны иметь одинаковую плотность.

Но для Луны средняя плотность равна  $3.3 \text{ г/см}^3$ .

А для Земли –  $5.5 \text{ г/см}^3$ . Но если использовать данные по средней плотности всех земных пород, то она находится где-то в пределе  $3-3.5 \text{ г/см}^3$ . Такую же плотность имеют практически все падающие метеориты. И мы полагаем, что добавку к плотности дает внутреннее тяжелое ядро планеты.

Поэтому можно предположить, что либо мы не точно измеряем гравитационную постоянную, используя шары из тяжелых металлов. Либо, гравитационная постоянная для Земли и Луны разная, в соответствии с отношением их средней плотности. Для Луны все может оказаться гораздо сложнее, так как Луна обращена к Земле одной стороной, и поэтому ее тяжелое внутреннее ядро смещено в сторону Земли. И поэтому для Луны

гравитационная постоянная должна быть разная для видимой и невидимой стороны. Я так предполагаю.

Для малых планет Солнечной системы, я полагаю, гравитационная постоянная не сильно отличается от измеренной на Земле, но можно предположить, что и их средние плотности также завышены, как и на Земле.

Что касается Солнца, то для него  $T=2.7$  часа, и учитывая, соотношения плотностей, то гравитационная постоянная для Солнца точно соответствует гравитационной постоянной, измеренной на Земле.

И если мы и ошибаемся с гравитационной постоянной в пределах Солнечной системы, то это на Юпитере. Но не очень сильно. Но точное знание гравитационной постоянной не очень и важно для тел с примерно равными плотностями. Главное иметь точное значение произведения  $GM$ , а оно определяется по периодам обращения спутников.

Но вот если мы начинаем оперировать с такими понятиями как «черные дыры» или нейтронные звезды, то относительно них мы можем очень сильно ошибаться. Астрофизики утверждают, что плотность вещества в карликах, или нейтронных ядрах равно примерно  $10^7$  г/см<sup>3</sup>, т.е. в определении гравитационных сил возле таких объектах мы можем ошибаться на несколько порядков.

И в микромире для гравитационной постоянной, я бы использовал ее значение для легких частиц

$$G = k c^2 r_e / m_e$$

А для тяжелых частиц типа протонов и нейтронов

$$G = K c^2 r_p / m_p$$

Где постоянные  $k$ ,  $K$  близки к единице.

И выяснил бы, что они очень даже не маленькие. Но это тема отдельных рассуждений.

И прежде чем этим заниматься, надо экспериментально подтвердить зависимость гравитационной постоянной от плотности.

### **Измерение величины гравитационной постоянной:**

Гравитационная постоянная  $G$  и по сей день остается одной из наименее точно измеренных фундаментальных констант. Несмотря на простоту [методики измерений](#), измерение затруднено из-за мизерности величины (сила притяжения между двумя килограммовыми шарами, расположенными на расстоянии 10 см будет всего около  $6.67 \cdot 10^{-9}$  Н) и отсутствия возможности экранировки внешних гравитационных возмущений (читайте об экранировании гравитации в эксперименте [Евгения Подклетнова](#)). Показательный пример: Группа исследователей в Калифорнии долго никак не могла понять откуда берутся регулярные отклонения в измерениях  $G$  по утрам, пока один из студентов не сообразил, что поливалка газона за окном, включающаяся регулярно утром, разбрызгивает достаточно воды, чтобы вызвать наблюдаемую гравитационную аномалию.

Если мы посмотрим на общепринятые значения  $G$  то удивимся. За прошедшие годы точность её определения не только не увеличилась, но и уменьшилась.

До 1999 года  $G = 6.67259(85) \cdot 10^{-11} \text{ Н} \cdot \text{м}^2 / \text{кг}^2$ ,  
с 1998 года  $G = 6.673(10) \cdot 10^{-11} \text{ Н} \cdot \text{м}^2 / \text{кг}^2$  или в более понятной записи  
 $= (6.673 \pm 0.010) \cdot 10^{-11} \text{ Н} \cdot \text{м}^2 / \text{кг}^2$

Что- же произошло? Неужели космические корабли не вписываются в расчетные траектории? Всё гораздо проще, но для этого давайте вернёмся к истории определения гравитационной постоянной  $G$ .

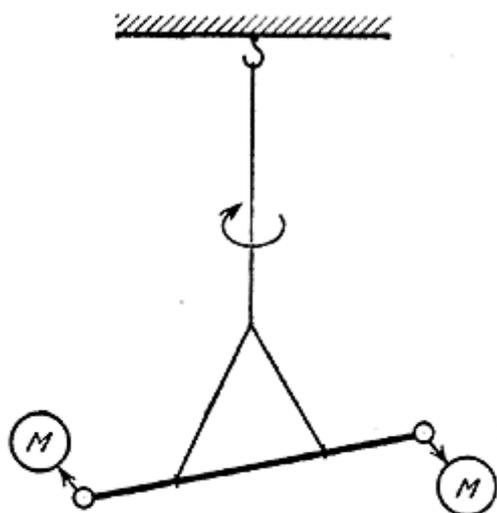


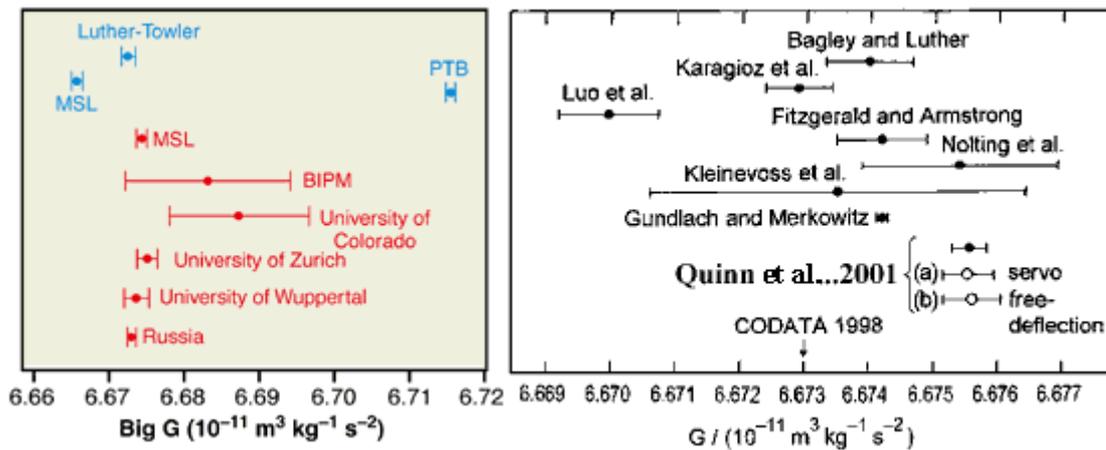
Рис. 11

Первый прямой опыт сделал Кавендиш (Генри Кавендиш (1731-1810) - английский физик и химик) при помощи прибора, который показан на рисунке. Идея состояла в том, чтобы подвесить на очень тонкой кварцевой нити стержень с двумя шарами и затем поднести к ним сбоку два больших свинцовых шара. Притяжение шаров слегка перекрутит нить - слегка, потому что силы притяжения между обычными предметами очень слабы. Силу притяжения между двумя шарами можно измерить. Кавендиш назвал свой опыт "взвешиванием Земли". Педантичный и осторожный преподаватель наших дней не позволит студентам так выразиться; нам пришлось бы сказать "измерение массы Земли". При помощи такого прибора Кавендишу удалось

непосредственно измерить силу, расстояние и величину обеих масс и, таким образом, определить постоянную тяготения  $G = 6,740(50) \cdot 10^{-11} \text{ м}^3 \text{кг}^{-1} \text{ с}^{-2}$

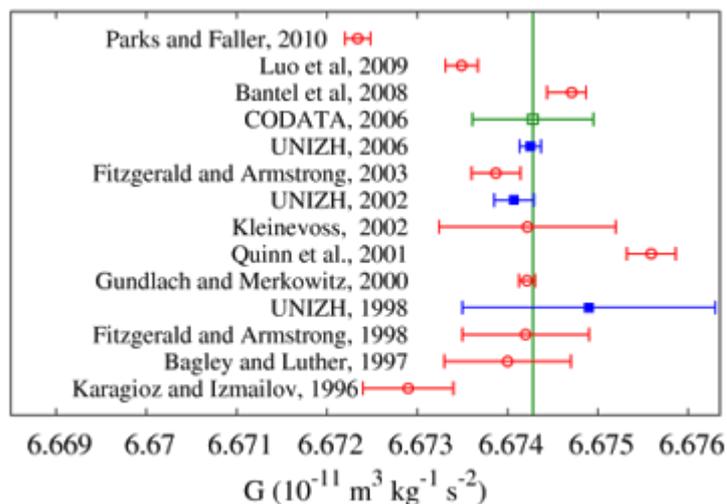
С тех пор физики не раз повторяли измерения с целью уточнения гравитационной постоянной. Ключевой эксперимент был проведён в Лос-Аламосе в 1982-м году Гейбом Лютером (Gabe Luther) и Уильямом Таулером (William Towler). Их установка напоминала установку Кавендиша, правда с шарами из вольфрама. Результат этих измерений  $6,67260(50) \cdot 10^{-11} \text{ м}^3 \text{кг}^{-1} \text{ с}^{-2}$  (т.е.  $6,6726 \pm 0,0005$ ), лег в основу в основу общепринятых значений CODATA в 1986-м году.

Всё было спокойно до 1995-го года, когда группа физиков в немецкой лаборатории РТВ в Брауншвейге, используя модифицированную установку (весы плавали на слое ртути, что позволило использовать шары большей массы), получили значение  $G$  на  $(0.6 \pm 0,008)\%$  больше общепринятых. [Michaelis, W., Haars, H. & Augustin, R. Metrologia 32, 267276 (1996)]. Этот факт стимулировал проведение различных экспериментов по определению постоянной тяготения  $G$ . Разнобой в экспериментальных данных и побудил CODATA в 1998-м году внести уточнения в величину  $G$ , заодно увеличив допустимую погрешность. Впрочем и после 1998-го года эксперименты продолжались, например Jens H. Gundlach и Stephen M. Merkowitz [VOLUME 85, NUMBER 14 PHYSICAL REVIEW LETTERS 2 OCTOBER 2000] получили в 2000м году значение  $G = (6,674215 \pm 0,000092) \cdot 10^{-11} \text{ м}^3 \text{кг}^{-1} \text{ с}^{-2}$ , а группа исследователей из Франции (Quinn, Speake, Richman Davis, Picard) получила в 2001-м году результат  $G = (6,67559(27) \pm 0,0027) \cdot 10^{-11} \text{ м}^3 \text{кг}^{-1} \text{ с}^{-2}$  [VOLUME 87, NUMBER 11 PHYSICAL REVIEW LETTERS 10 SEPTEMBER 2001]. На графике можно ознакомиться с результатами наиболее значимых экспериментов.



## Неловкая ситуация с измерениями гравитационной постоянной.

Гравитационная постоянная, та самая  $G$ , которая входит в закон всемирного тяготения, до сих пор измерена на удивление плохо. Если другие фундаментальные физические константы известны с точностью  $10^{-7}$ - $10^{-8}$ , то у  $G$  неопределенность составляет аж  $10^{-4}$ , т.е. одну десятитысячную (а в 1998 году вообще одно время точность решили «ухудшить» до одной тысячной!). Вообще, есть несколько групп, которые пытаются измерить  $G$  разными способами. [Атомно-интерферометрические методы](#), конечно, очень [перспективны](#), но что-то прогресс в них пока медленный. В результате гравитационную постоянную измеряют пока старым механическим способом, по притяжению двух макроскопических грузиков, только методы для измерения отклонения используют разные. Таких измерений за последние годы было сделано несколько. В каждом из них точность неплохая, порядка  $10^{-5}$ . Беда только в том, что эти такие аккуратные измерения страшно расходятся друг с другом.



Вот картинка с некоторыми результатами измерения  $G$ , с [тематической странички](#) Стефана Шламмингера. Зеленая точка с усаями — это «официально рекомендованное» значение  $G$ . Обратите внимание на три самые верхние красные точки. Это результаты самых последних измерений: [Parks, Faller \(2010\)](#), [Luo et al. \(2009\)](#) (у них есть и [более свежее измерение](#), которое отличается несильно) и измерение [калифорнийской группы](#), которое опубликовано, похоже, только в [диссертации](#) одного из ее членов. Видно, что эти три точки **отстоят друг от друга на десяток стандартных отклонений**. При этом, каждая группа пишет, что она несколько лет(!) перепроверяла всё на свете, что только могла предположить. Ясно, что у каких-то двух (либо у всех трех) экспериментов есть неучтенные источники погрешностей или просто ошибки эксперимента, но у каких именно, непонятно.

Интересно, как CODATA собирается усреднять эти данные для своего следующего «сборника констант» в 2011 году. Не исключено, что они будут вынуждены будут взять среднее и еще больше увеличить погрешность по сравнению с текущим значением.

**Дополнение от 19 июля 2011:** [новое официальное значение G](#) составляет  $(6.67384 \pm 0.00080) \cdot 10^{-11} \text{ m}^3\text{kg}^{-1}\text{s}^{-2}$ . То бишь, значение сдвинуто в сторону новых результатов и ошибка ухудшена.

Что надо сделать в этих экспериментах, чтобы подтвердить или опровергнуть предположение о зависимости гравитационной постоянной от плотности. А просто провести эти эксперименты с шарами из разных материалов, из стали, алюминия, графита, гранита, свинца, и выяснить, что значения гравитационной постоянной будут сильно отличаться. Но как выясняется, гравитационная постоянная сильно отличается еще и от методики ее измерения. А чтобы точно измерить массу Земли, то необходимо провести измерения этой постоянной с помощью шаров из разных материалов, вложенных один в другой, моделирующих распределение плотности внутри Земли. И вот когда такие измерения будут проведены, то выяснится, что плотность всех малых планет уменьшится до  $3.5 \text{ г/см}^3$ . А для Солнца и Юпитера мы получим свои значения гравитационных постоянных. И сильно поменяем свои умозаключения о черных дырах и прочих экзотических астрофизических объектах. И прежде, чем оперировать с такими объектами, хорошо бы разобраться для начала с гравитационной постоянной. Но можно все оставить как было. Просто в нашей жизни точное значение гравитационной постоянной ни каким образом не сказывается на общий уровень благосостояния, основные показатели экономики, и урожайность зерновых. А то что гравитационная постоянная зависит от плотности геологи уже давно знают и успешно используют это в своих изысканиях.