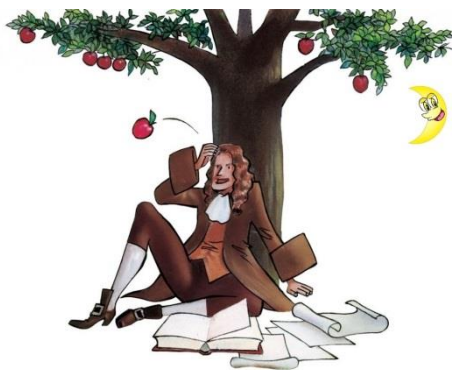


Укрощение гравитационной постоянной G

В далекие, но еще памятные времена, самый выдающийся ученый всех времен и народов Исаак Ньютон сидел под университетской яблоней и занимался привычными для себя занятиями – наблюдением и размышлением. Наблюдал он за падавшими с дерева яблоками, а размышлял – над земным тяготением.



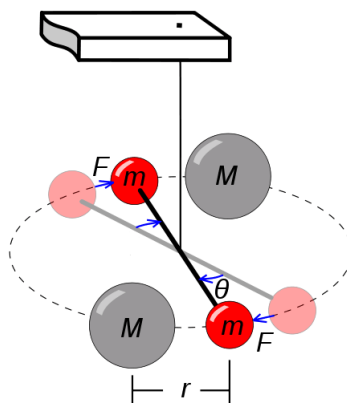
И когда одно из яблок попало в то, чем он думал, и перевело там стрелки его размышлений на правильный путь, он прозрел и пришел к выводу, что все в мире – и он сам, и дерево, и яблоко, и Луна притягиваются не только к Земле, но и друг к другу! (то яблоко, ведь, явно тянулось к его голове). Так Ньютон открыл закон всемирного тяготения.

Все тела притягиваются друг к другу с силой пропорциональной их массам и обратно пропорциональной квадрату расстояния между ними. В качестве связующего все эти силы, массы и расстояния была взята гравитационная постоянная G – цемент мироздания.

$$F = G \frac{m_1 \cdot m_2}{R^2}$$

А замесил этот цемент Генри Кавендиш в своем хрестоматийном опыте с четырьмя шарами на крутильных весах. С тех пор весь мир держится на этой интересной точке G , которую почему-то никто не может точно определить. Казалось бы, такая фундаментальная характеристика нашего мира должна быть аккуратно измерена. Однако ситуация с измерением G до сих пор остается очень необычной.

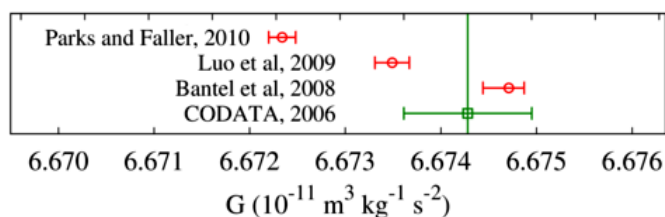
В отличие от многих других фундаментальных констант, гравитационная постоянная с большим трудом поддается измерению. Дело в том, что аккуратный результат можно получить только в лабораторных экспериментах, через измерение силы притяжения двух тел известной массы. Например, в классическом опыте Генри Кавендиша на тонкой нити подвешивается коромысло из двух малых шаров, и когда сбоку к этим шарам пододвигают другое массивное тело, то сила гравитации стремится повернуть это коромысло на некоторый угол, пока вращательный момент сил слегка закрученной нити не скомпенсирует гравитацию. Измеряя угол поворота коромысла, и зная упругие свойства нити, можно вычислить силу гравитации, а, значит, и гравитационную постоянную G .



Так или иначе, но, несмотря на более чем двухсотлетнюю историю, точность измерений остается очень скромной. Причем, относительная погрешность тут составляет одну сотую процента (0,012%)!, и это на несколько порядков хуже, чем точность измерения других столь же важных величин. Более того, вот уже несколько десятилетий измерение гравитационной постоянной не перестает быть источником головной боли для физиков-экспериментаторов. Несмотря на десятки проведенных экспериментов и усовершенствование самой измерительной техники, точность измерения так и осталась невысокой. Относительная погрешность на уровне 10^{-4} была достигнута еще 40 лет назад, и никакого улучшения с тех пор нет.



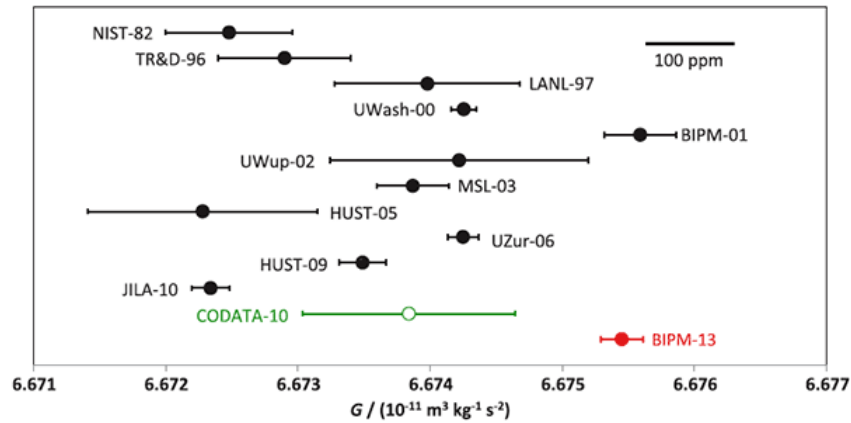
В 2008–2010 годах три группы ученых обнародовали новые результаты измерения G . На рисунке их значения и диапазон погрешности изображены красным цветом. Зеленым же цветом отмечено принятое научным сообществом CODATA значение $G = 6.6743 \cdot 10^{-11}$.



То есть, ученые определяют в ходе эксперимента значение G и тот доверительный интервал (красный отрезок), за который, по их мнению, это значение G , ну, никак не может выйти. Другие ученые в другом эксперименте определяют другое значение G со своими допустимыми границами. То же самое - с третьей группой ученых. Над каждым из них команды экспериментаторов работали годами, причем не только непосредственно измеряли величину G , но и тщательно искали и перепроверяли всевозможные источники погрешностей. Каждое из этих трех измерений обладало высокой точностью. По идее, эти три измерения должны были существенно улучшить наше знание численной величины G .

В результате, как мы видим, эти границы не то, что не пересекаются, а отстоят друг от друга на десяток заявленных погрешностей!

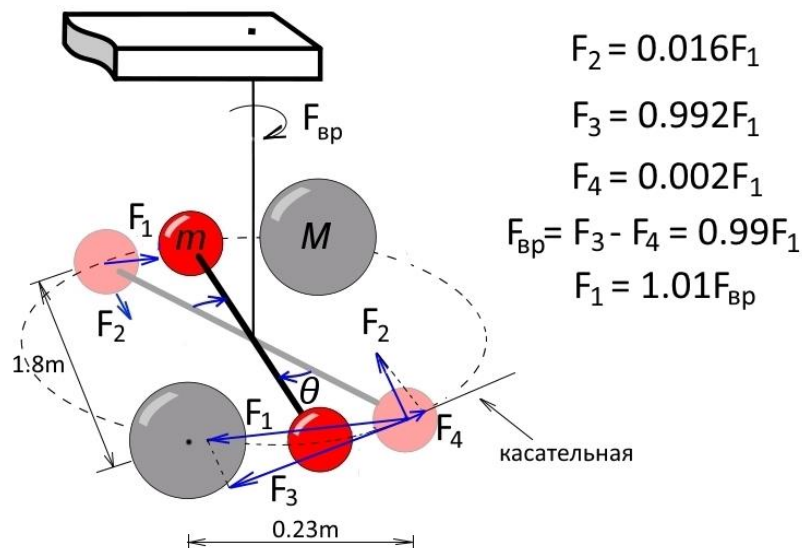
А на этом рисунке показаны результаты определения G за последние 40 лет, и все они кардинально расходятся друг с другом! Разница между двумя самыми крайними значениями уже превышает 20(!) заявленных погрешностей (то есть, 0.024%).



Такая ситуация, когда среди результатов, полученных разными группами, все различаются на десятую-другую заявленных погрешностей, по-видимому, для физики беспрецедентна. Гравитационная постоянная продолжает оставаться головоломкой измерительной физики.

Фундаментальная константа	Обозначение	Численное значение (2002 г.)	Относительная погрешность
Постоянная Планка	h	$6,626\,069\,3(11) \times 10^{-34}$ Дж с	$1,7 \times 10^{-7}$
	$\hbar = \frac{h}{2\pi}$	$1,054\,571\,68(18) \times 10^{-34}$ Дж с	$1,7 \times 10^{-7}$
Элементарный заряд Постоянная Авогадро Постоянная Фарадея	e	$1,602\,176\,53(14) \times 10^{-19}$ Кл	$1,7 \times 10^{-7}$
	N_A	$6,022\,141\,5(10) \times 10^{23}$ моль $^{-1}$	$1,7 \times 10^{-7}$
	$F = eN_A$	$96\,485,338\,3(83)$ Кл моль $^{-1}$	$8,6 \times 10^{-8}$
Постоянная Джозефсона	$K_J = \frac{2e}{h}$	$483\,597,879(41) \times 10^9$ Гц В $^{-1}$	$8,5 \times 10^{-8}$
Масса электрона	m_e	$9,109\,382\,6(16) \times 10^{-31}$ кг	$1,7 \times 10^{-7}$
Масса протона	m_p	$1,672\,621\,71(29) \times 10^{-27}$ кг	$1,7 \times 10^{-7}$
Масса нейтрона	m_n	$1,674\,927\,28(29) \times 10^{-27}$ кг	$1,7 \times 10^{-7}$
Магнетон Бора	$\mu_B = \frac{e\hbar}{2m_e}$	$927,400\,949(80) \times 10^{-26}$ Дж Тл $^{-1}$	$8,6 \times 10^{-8}$
Ядерный магнетон	$\mu_N = \frac{e\hbar}{2m_p}$	$0,505\,078\,343(43) \times 10^{-26}$ Дж Тл $^{-1}$	$8,6 \times 10^{-8}$
Магнитный момент протона	μ_p	$1,410\,606\,71(12) \times 10^{-26}$ Дж Тл $^{-1}$	$8,7 \times 10^{-8}$
Гравитационная постоянная	G	$6,674\,2(10) \times 10^{-11}$ м 3 кг $^{-1}$ с $^{-2}$	$1,5 \times 10^{-4}$
Универсальная газовая постоянная	$R = kN_A$	$8,314\,472(15)$ Дж моль $^{-1}$ К $^{-1}$	$1,7 \times 10^{-6}$
Магнитный момент нейтрона	μ_n	$-1,041\,875\,63(25) \times 10^{-3}$ μ_B	$2,4 \times 10^{-7}$
		$-1,913\,042\,73(45) \mu_N$	$2,4 \times 10^{-7}$

Попробуем разобраться в причинах такого разброса значений. Вернемся к схеме опыта Кавендиша, которая, так или иначе, применяется и в современных экспериментах. Посмотрите на рисунок.



Малый шар под действием силы тяготения к большому шару F_1 стремится повернуть коромысло на угол θ . Ученые измеряют этот угол, по нему определяют силу скручивания нити и эту силу принимают за силу притяжения между двумя шарами.

А, интересно, почему при этом не принимается во внимание сила притяжения малого шара к **дальному** большому шару F_2 ? А, ведь, она не так уж и мала: ее величина по модулю в данном эксперименте составляет почти полтора процента от силы F_1 . Эта сила F_2 препятствует повороту коромысла на угол θ , а, значит, уменьшает искомое нами значение силы притяжения между двумя шарами F_1 .

Но это еще не все. Давайте разберемся, какая сила и в какой мере способствует вращению коромысла, ведь именно по закручиванию его нити мы и пытаемся определить величину силы притяжения. Нить коромысла скручивается под действием вращательного момента. Заметьте, не просто модуля силы F_1 или F_2 , а той ее части, которая направлена перпендикулярно коромыслу, то есть, по касательной к траектории движения малого шара. Скажем, если бы эта сила была направлена вдоль коромысла, то никакого бы вращения не происходило. Поэтому во вращении принимают участие проекции сил F_1 и F_2 на касательную: $F_3 = 0.992F_1$ и, соответственно, $F_4 = 0.002F_1$. Таким образом, сила, вызывающая вращение коромысла, назовем ее сила вращения $F_{вр} = F_3 - F_4 = 0.99F_1$. Или $F_1 = 1.01F_{вр}$.

Таким образом, искомая нами сила притяжения между шарами оказывается на 1% больше значения, полученного в этом эксперименте!

Следовательно, постоянная гравитации G должна быть откорректирована в сторону увеличения на 1%! Ее значение следует принять равным $G = 6.74 \cdot 10^{-11}$.

Наш мир слегка изменится: он поправится в прямом и переносном смысле!

Вот в этом и кроется причина неуловимости для экспериментаторов точного значения G , ведь, в каждой новой экспериментальной установке соотношение сил F_1 и F_2 будет различно как по модулю, так и по направлению.