

Реферат

По теме:

Опыты Г. Кавендиша по определению значения гравитационной постоянной.

Студент 1 курса 151 группы
Направления 09.03.04 Программная инженерия
Факультета КНиИТ
Соловьев Артем

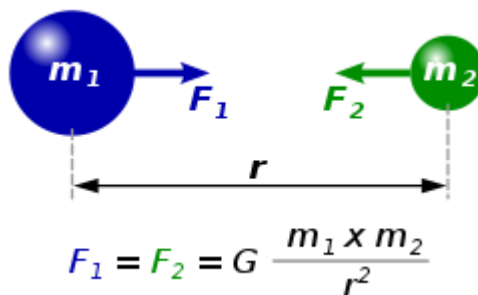
Содержание

1. Введение	3
2. Основная часть	5
2.1. Предыстория.....	5
2.2. Эксперимент Кавендиша.	6
2.3. Современные эксперименты по измерению Гравитационной постоянной.....	13
3. Заключение.....	20
Источники	21

1. Введение

Теория взаимного притяжения двух материальных, обладающих массой была сформулирована Исааком Ньютоном еще в 1666 г. Формула получила статус закона и вошла во все учебники и справочники по физике под именем “Закон всемирного тяготения”.

Формулировка закона. Каждые две материальные частицы притягивают друг друга с силой F , прямо пропорциональной их массам m_1 и m_2 и обратно пропорциональной квадрату расстояния r между ними[1]:



G — Гравитационная постоянная или иначе – постоянная Ньютона – одна из основных констант, используемых в астрофизике. Фундаментальная физическая постоянная определяет силу гравитационного взаимодействия. В СИ её значение примерно равно:

$$G = (6,673 \pm 0,003) \cdot 10^{-11} \text{ н} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{кг}^{-2}$$

Большинство фундаментальных констант известны сегодня с чрезвычайно высокой точностью. Так, масса электрона измерена с точностью 10^{-7} (то есть сотысячная доля процента), а постоянная тонкой структуры α , характеризующая силу электромагнитного взаимодействия, — с точностью 7×10^{-10} . В свете этого может показаться удивительным, что значение гравитационной постоянной, которая входит в закон всемирного тяготения, известно с точностью хуже, чем 10^{-4} , то есть одна сотая доля процента.

Одной из проблем оказалась гравитационная постоянная. Её значение слишком мало для точного измерения. “Два объекта массой в один килограмм на расстоянии одного метра притягиваются друг к другу с силой, равной весу нескольких человеческих клеток” – говорит физик из Университета Вашингтона Дженс Гундлак.

Фактическое числовое значение G не имеет большого значения для физики. Например, известно, что орбиты планет в нашей Солнечной системе подчиняются закону Ньютона и могут быть использованы вместе с G для оценки массы Солнца. Если изменить G в сторону увеличения, скажем, на 0,05%, то предполагаемая масса Солнца просто уменьшится на ту же долю. В настоящее время у нас нет моделей строения Солнца, которые могли бы с пользой ограничить его массу на таких малых уровнях.

В таком случае важно не значение константы G , а наша способность показать, что она на самом деле постоянна. Множество достойных уважения теорий предсказывают нарушения закона обратного квадрата Ньютона на малых масштабах длины. Другие теории предсказывают нарушения принципа эквивалентности - эмпирической основы общей теории относительности и, как таковой, основы закона Ньютона, - который гласит, что свободное ускорение материи в гравитационном поле не зависит от химического состава. Все чаще высказывается мнение, что G может зависеть от плотности материи в астрофизических масштабах.

До сих пор принцип эквивалентности и закон обратного квадрата Ньютона выдерживали экспериментальную проверку. Однако для обеспечения максимальной чувствительности и облегчения бремени метрологии эти экспериментальные тесты хитроумно сконструированы так, что дают существенный сигнал только в том случае, если природа ведет себя не так, как хотелось бы экспериментаторам. Фактические измерения G должны учитывать все соответствующие величины в физических единицах и атаковать метрологию с головой. Неточные измерения G могут свидетельствовать о том, что мы не понимаем метрологию измерения слабых сил, что, в свою очередь, может означать, что экспериментальные тесты, устанавливающие обратный квадратичный закон и универсальность свободного падения, имеют какие-то тонкие изъяны. Подобное развитие событий создаст захватывающую ситуацию, что, возможно, объясняет, почему столь большой интерес у публики вызывает такая, казалось бы, рутинная и кропотливая работа.

Такое положение вещей отражает объективные трудности гравитационных экспериментов. Если попытаться определить G из движения планет и спутников, то необходимо с высокой точностью знать массы планет, а они-то как раз известны плохо. Если же поставить механический эксперимент в лаборатории, например измерить силу притяжения двух тел с точно известной массой, то такое измерение будет иметь большие погрешности из-за чрезвычайной слабости гравитационного взаимодействия.

Измерение таких малых сил на килограммные объекты с точностью до 4-5 знаков нелегко. Существует множество факторов, которые оказывают значительное влияние на гравитацию и должны быть учтены.

Однако, до недавних пор, способа лучше у ученых-физиков не было. И для разбора темы новых способов измерения гравитационной постоянной, необходимо исследовать, как измеряли данную величину в прошлом.

2. Основная часть

2.1. Предыстория

В основном силы тяготения определяют характер движения небесных тел в космическом пространстве. Именно при изучении движения планет и их спутников был открыт Закон тяготения Ньютона и впоследствии строго обоснован.

Во времена Исаака Ньютона не существовало понятия фундаментальной константы. Он не включил константу в свой закон в явном виде; скорее G подразумевалась, как если бы ее значение было равно 1. Только в 1873 году Альфред Корню и Баптистин Бейль ввели символ для константы гравитационной связи, которую они назвали f . Свое нынешнее обозначение G константа получила только в 1890-х годах.

В начале 17 в. И. Кеплером были установлены эмпирическим путём основные закономерности движения планет (Кеплера законы). Исходя из них, современники Ньютона (французский астроном И. Бульо, итальянский физик Дж. Борелли, английский физик Р. Гук) высказывали соображения, что движение планет может быть объяснено действием силы, которая притягивает каждую планету к Солнцу и которая убывает пропорционально квадрату расстояния от Солнца. Однако только Ньютон в «Математических началах натуральной философии» (1687) впервые это строго доказал, опираясь на свои первые два закона механики и на созданные им новые математические методы, составившие основу дифференциального и интегрального исчисления.

Ньютон доказал, что движение каждой планеты должно подчиняться первым двум законам Кеплера именно в том случае, если они движутся под действием силы тяготения Солнца в соответствии с формулой

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



Исаак Ньютон

Далее Ньютон показал, что движение Луны может быть приближённо объяснено с помощью аналогичного силового поля Земли и что сила тяжести на Земле есть результат воздействия этого же силового поля на материальные тела вблизи поверхности Земли. На основании 3-го закона механики Ньютон заключил, что притяжение есть взаимное свойство, и пришёл к формулировке своего закона тяготения для любых материальных частиц. Выведенный по эмпирическим данным, на основании результатов наблюдений, с неизбежностью приближённых, Закон тяготения Ньютона представлял собой вначале рабочую гипотезу. В дальнейшем потребовалась колоссальная работа в течение более чем двухсот лет для строгого обоснования этого закона.

Воспользовавшись вторым законом Ньютона можно вывести G :

$$G = \frac{gR_3^2}{M_3}$$

Где M_3 и R_3 — масса и радиус Земли, соответственно, а g — ускорение свободного падения.

Почему тогда Ньютон не высчитал значение постоянной? Ускорение свободного падения было известно, а Радиус Земли посчитан еще в Древней Греции. Однако масса Земли не была известна. И опыт по измерению гравитационной постоянной будет проведен через 111 лет после написания “Математических начал” Ньютона, при помощи опыта по взаимодействию шаров большой массы в 1798 г. Английским ученым Генри Кавендишем.

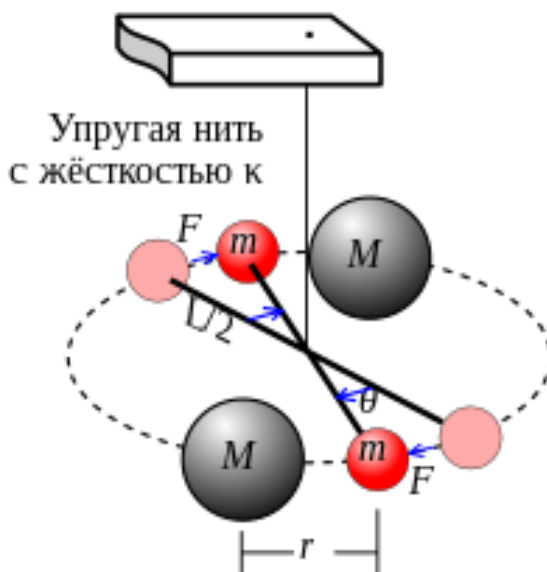
2.2. Эксперимент Кавендиша.

Следствием нахождения гравитационной постоянной можно было бы найти плотность Земли. Именно её искал Кавендиш, так как её значение позволило бы не только найти массу Земли, лучше понять состав планеты, но и найти массы многих других тел Солнечной системы.

Для нахождения гравитационной постоянной G использовались Крутильные весы Кавендиша:



Генри Кавендиш



Упрощенная схема крутильных весов

Крутильные весы – чувствительный физический прибор для измерения малых сил (малых моментов сил), были изобретены Ш. Кулоном в 1784. Крутильные весы простейшей конструкции состоят из вертикальной нити, на которой подвешен лёгкий уравновешенный рычаг. Измеряемые силы действуют на концы рычага и поворачивают его в горизонтальной плоскости до тех пор, пока не окажутся уравновешенными силами упругости закрученной нити. По углу поворота рычага можно судить о величине крутящего момента действующих сил.

Несмотря на то, что прибор был изобретен Кулоном для изучения точечных зарядов, Кавендишу прибор достался от Джона Мичелла, который также спроектировал и построил

крутильные весы, но специально для расчета средней плотности Земли. Однако Мичелл умер до того, как успел провести эксперимент. После его смерти прибор перешел к преподобному Френсису Джону Хайду Волластону, Джексоуанскому профессору в Кембридже, который, не имея условий для проведения экспериментов с помощью этого прибора в таком виде, как ему хотелось, был настолько добр, что передал его Кавендишу.

Оригинальность схемы Мичелла— Кавендиша состояла в том, что средняя плотность Земли определялась в лабораторных условиях по наблюдениям взаимодействия сравнительно небольших масс. До этого все оценки средней плотности Земли базировались на измерениях отклонения отвеса от вертикали под действием расположенной поблизости горы.

Наиболее известным в конце XVIII в. был результат $\rho = 4,71 \text{ г/см}^3$, полученный из наблюдений английского астронома Н. Маскелайна, выполненных вблизи горы Шихаллиен (1774). Этот результат существенно меньше истинного ($\rho = 5,53 \text{ г/см}^3$). Его сравнение со значением, полученным Кавендишем, $\rho = 5,48 \text{ г/см}^3$, показывает, в какой степени последнему удалось повысить точность определения ρ^* .

Описание установки от самого Кавендиша:

Аппарат очень прост: он состоит из деревянной руки, длиной 6 футов, сделанной таким образом, чтобы соединить большую силу с небольшим весом. Рука подвешена в горизонтальном положении на тонкой проволоке длиной 4,0 дюйма, и к каждой конечности подвешен свинцовый шарик, около 2 дюймов в диаметре. И все это закрыто в узком деревянном ящике, чтобы защитить его от ветра.

Поскольку для того, чтобы заставить этот рычаг вращаться вокруг своего центра, требуется не больше силы чем для скручивания подвешенной проволоки, то очевидно, что если проволока достаточно тонкая, то самая незначительная сила, такая как притяжение свинцовой гири диаметром в несколько дюймов в диаметре, будет достаточно, чтобы ощутимо отвести рычаг в сторону.

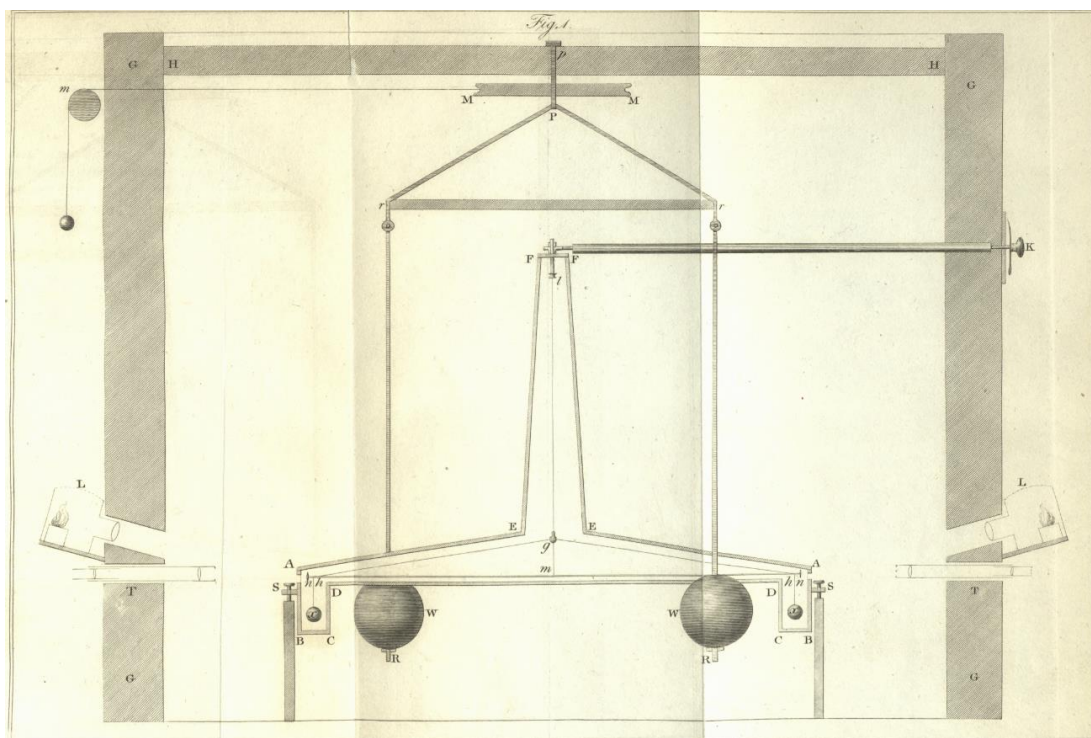


Рис. 1. Установка продольное вертикальное сечение

На рисунке показано продольное вертикальное сечение прибора и помещения, в котором он расположен. А В С D D С В А Е F F Е — это кожух; х и л: — два шарика, свешивающихся на нитях hх с коромысла g h m h , которое само подвешено с помощью тонкой проволоки gl. Это коромысло состоит из тонкого соснового стержня h m h у усиленного серебряной проволокой h g h . Благодаря этому он делался достаточно прочным для удержания шариков, хотя и оставался очень легким.

Кожух поддерживается и устанавливается горизонтально посредством четырех винтов, опирающихся на столбы, жестко врытые в землю. Два из них S и S представлены на рисунке, а два другие не показаны во избежание путаницы. GG и GG — края стен помещения. W и W — свинцовые грузы, которые подвешены на медных стержнях RrPrR и деревянном бруске rr с осевой шпилькой Рр. Эта шпилька проходит над центром прибора через отверстие в бруске НН перпендикулярно бруску и поворачивается внутри этого отверстия, удерживаясь от падения пластиной р. ММ представляет собой блок, прикрепленный к этой шпильке, а М т — нить, накрученную на блок и проходящую через край стены; с ее помощью наблюдатель может поворачивать блок и таким образом передвигать грузы из одного положения в другое.

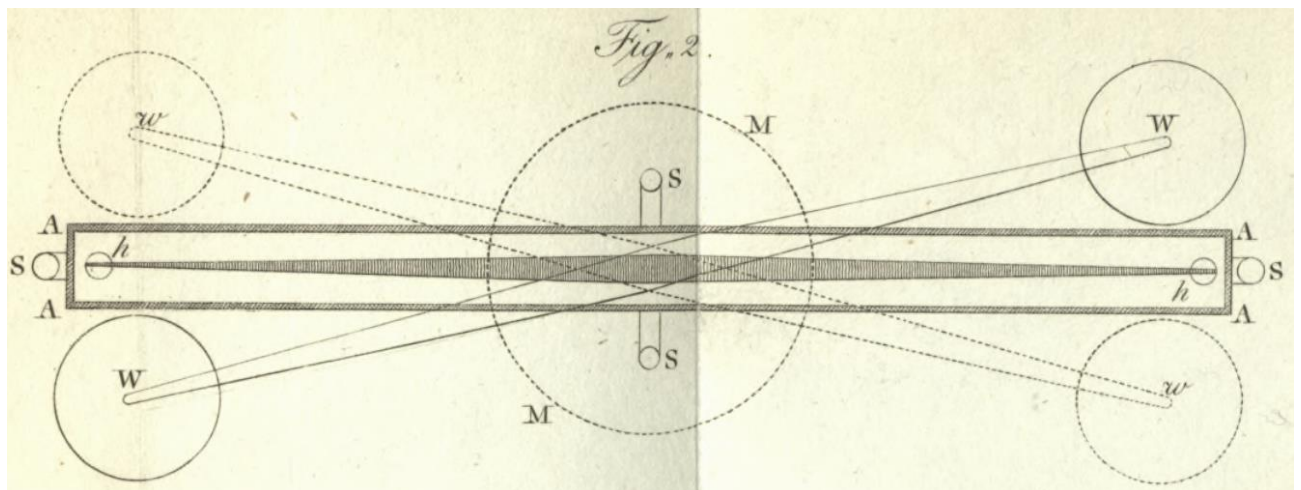


Рис. 2

На рис. 2 приведен вид прибора сверху: А А А А — кожух, S S S S — четыре поддерживающие его винта, НН — коромысло и шарик, W и W — грузы, ММ — блок для их передвижения. Когда грузы находятся в таком положении, то оба стремятся отклонить коромысло в направлении hW когда же они передвигаются в положения w и w, представленные точечными линиями, то оба стремятся отклонить коромысло в противоположном направлении h w . От ударов о кожух эти грузы предохраняют кусочки дерева, останавливающие их, как только они приближаются на расстояние 1/5 дюйма к кожуху. Кусочки дерева прикреплены к стене здания; и я обнаружил, что грузы могут ударяться о них со значительной силой без ощутимого сотрясения прибора.

Чтобы определить положение коромысла, внутри кожуха расположены пластинки из слоновой кости настолько близко к каждому из концов коромысла, насколько это возможно без опасения коснуться его; пластинки разделены на двадцатые доли Дюйма. Другие маленькие пластинки из слоновой кости помечены на каждом конце коромысла и служат верньером, под разделяя эти деления на пять частей, так что положение коромысла может легко наблюдаться с точностью до одной сотой Дюйма и оцениваться с еще большей

точностью. Эти деления рассматриваются с помощью коротких телескопов T и T [рис. 1] через щели, прорезанные на концах кожуха и закрытые стеклами. Они освещаются лампами L и L с выпуклыми стеклами, расположенными так, чтобы отбрасывать свет на деления. Никакой другой свет в комнату не пропускаться.

Деления на пластинке из слоновой кости идут в направлении w и w [рис. 2], так что, когда грузы помещались в позицию w и w , представленную точечными кружками, коромысло отклонялось в таком направлении, что указатель должен был отмечать бОльшие числа на пластинках из слоновой кости. По этой причине Кавендиш называет эту позицию грузов положительной.

Деревянный стержень $F K$ [рис. 1] посредством бесконечного винта поворачивает держатель, к которому прикреплен провод $g l$, что позволяет наблюдателю закручивать провод до тех пор, пока коромысло не установится в центре кожуха, без опасения коснуться какой-либо из его стенок. Проволока $g l$ наверху прикреплен к держателю, а внизу — к центру коромысла с помощью латунных зажимов, в которых она удерживается винтами.

На этих двух рисунках различные части изображены почти в естественной пропорции по отношению друг к другу и в масштабе один к тридцати.

Способ наблюдения. Прежде чем я перейду к описанию экспериментов, следует кое-что сказать о способе наблюдений. Предположим, что коромысло покоится и его положение определено. Пусть затем грузы сдвигаются. Вследствие этого коромысло не только сдвинется, но будет вынуждено колебаться и его колебания будут продолжаться довольно долго. Поэтому, чтобы выяснить, насколько сдвинуто коромысло, необходимо найти крайние точки колебания и отсюда определить точку, в которой оно о казалось бы в покое, если бы его движение было уничтожено, или точку покоя, как я буду ее впредь называть. Для этого Кавендиш наблюдал три последовательные крайние точки колебания и брал среднее между первой и третьей точками, а затем принимал среднее между ней и второй крайней точкой за точку покоя. Так как колебания непрерывно уменьшались, очевидно, что среднее между двумя крайними точками не могло дать истинную точку покоя.

Можно подумать, что более точно было бы наблюдать много крайних точек колебания, чтобы находить точку покоя по разным сериям из трех крайних отклонений и брать средний результат. Однако надо отметить, что, несмотря на предосторожности, соблюдавшиеся во избежание какой-либо возмущающей силы, коромысло редко будет оставаться в покое в течение целого часа. По этой причине лучше определять точку покоя из наблюдений, выполненных, насколько это возможно, сразу же после передвижения грузов.

Вторая величина, которую надо определить, — это время колебания. Ее Кавендиш нашел следующим образом: определил две крайние точки колебания, а также моменты времени, в которые коромысло достигает двух данных делений между этими крайними точками, заботясь о том, насколько он мог предвидеть, чтобы эти деления располагались по разные стороны от средней точки и не очень далеко от нее. Затем он рассчитывал среднюю точку колебания и с помощью пропорции нашел момент времени, в который коромысло проходит через среднюю точку. Затем после нескольких колебаний он повторил эту операцию и поделил интервал времени между приходом коромысла в эти две средние точки на число колебаний, что дает время одного колебания. Следующий пример более отчетливо пояснит сказанное.

Первая колонка содержит крайние точки колебаний, вторая — промежуточные деления, третья указывает время, когда коромысло проходит эти деления, четвертая дает точку покоя, которая находится таким образом: среднее между первой и третьей крайними точками равно 27,1, и среднее между ним и второй крайней точкой равно 24,6, что

соответствует точке покоя, найденной по первым трем крайним смещениям. Аналогично найденная по второму, третьему и четвертому крайним смещениям точка покоя равна 24,7 и т. д. В пятой колонке указано время, когда коромысло проходило среднюю точку колебания, которое находится так: среднее между 27,2 и 22,1 равно 24,65, и это есть средняя точка первого колебания. Поскольку коромысло проходит деление 25 в $11^h 23'4''$, а деление 24 — в $10^h 23'57''$, то с помощью пропорции мы находим, что деление 24,65 оно проходит в $10^h 23'23''$. Аналогично, коромысло проходит среднюю точку седьмого колебания в $11^h 5'22''$, и поэтому шесть колебаний совершается за $4 \text{ Г } 5' 9''$, или одно колебание за $7'0''3$.

Крайние точки	Деление	Время, ч. мин. с	Точка покоя	Время середины колебания, ч. мин. с
27,2	25	10 23 4	—	10 23 23
	24	57	—	
22,1	—	—	24,6	
27	—	—	24,7	
22,6	—	—	24,75	
26,8	—	—	24,8	
23	—	—	24,85	
26,6	—	—	24,9	
	25	11 5 22	—	11 5 22
	24	6 48	—	
23,4				

Время одного колебания может быть определено либо из предварительных испытаний, либо это можно делать в каждом эксперименте, определяя время колебаний коромысла, которые реально возникают вследствие передвижения грузов.

Однако у последнего метода есть одно преимущество, а именно: если бы имелась какая-то случайная причина притяжения (как, например, электричество на стеклянных пластинках, через которые наблюдается движение коромысла), увеличивающая силу, необходимую для отклонения коромысла, то она уменьшила бы также и время колебания. Следовательно, ошибка в результате должна быть значительно меньше, когда сила, необходимая для отклонения коромысла, выведена из опыта, проведенного в то же время, чем когда она определяется из предшествующих опытов.

Описание экспериментов. В опыте проволока, на которой подвешивалось коромысло, была из посеребренной меди длиной 391/4 дюйма; один фут ее весил 2.4 грана. Ее жесткость была такой, что заставляла коромысло совершать одно колебание примерно за 15 мин.

Результат опыта состоял в том, что в течение первых 15 мин после перемещения стержней из одной крайней позиции в другую коромыслу было сообщено очень слабое движение, вряд ли большее, чем то, что должно сообщаться действием гравитационного притяжения. Однако затем движение усилилось, так что оказалось, что за следующие четверть часа или полчаса оно сдвинулось на 0.5 или 1.5 деления в том же направлении, в каком это должно происходить под действием тяготения. При возвращении железных деталей обратно в их исходное положение коромысло сдвигалось назад так же, как ранее двигалось вперед.

Следует отметить, что в этих экспериментах движение коромысла вряд ли было сильнее, чем движение, которое иногда имеет место без видимых причин. Тем не менее так

как в трех опытах, проделанных с этими стержнями, движение было всегда одного и того же рода, хотя и различалось по величине от 0.5 до 1.5 деления, то представляется, что имеется веское основание считать, что оно создается действием стержней.

Поскольку Кавендишу казалось, что этот эффект обязан магнетизму, хотя он и не был таким, какой он ожидал от этой причины, я заменил железные стержни на медные и так же испытал их. Результат оказался таким, что все-таки наблюдался некоторый эффект того же рода, но более случайный, так что я отнес его к некой случайной причине и поэтому подвесил свинцовые грузы и продолжил эксперимент.

Метод расчета плотности Земли из экспериментов. Сначала рассмотрим задачу в предположении, что медные стержни невесомы и что груз оказывает ощутимое притяжение лишь на ближайший шарик; затем я исследую, какие исправления необходимы для учета [массы] коромысла и стержней и некоторых других малых факторов.

Первая задача состоит в том, чтобы найти силу, которая требуется для отклонения коромысла, что, как было сказано выше, должно быть определено по времени одного колебания. Расстояние между центрами двух шариков равно 73,3 дюйма, и поэтому расстояние каждого из них от центра движения составляет 36,65 дюйма, длина же секундного маятника в этих широтах равна 39,14 [дюйма]. Поэтому если жесткость проволоки, на которой подвешено коромысло, такова, что сила, которая должна быть приложена к каждому шарiku для отклонения коромысла на угол A , так относится к весу шариков, как дуга A к радиусу, то коромысло будет совершать колебание за то же время, что и маятник, длина которого 36,65 дюйма, т. е. за $\sqrt{\frac{36,65}{39,14}}$ секунд. И поэтому если жесткость проволоки такова, что порождает одно колебание за N секунд, то сила, которую необходимо приложить к каждому из шариков для отклонения коромысла на угол A , так относится к весу шариков, как дуга $A \frac{1}{N^2} \frac{36,65}{39,14}$ относится к радиусу. Но шкала из слоновой кости на конце коромысла находится на расстоянии 38,3 дюйма от центра движения, и каждое деление равно 1/20 дюйма, поэтому оно стягивает центральный угол, дуга которого равна 1/766, а значит, сила, которая должна быть приложена к каждому шарiku для отклонения коромысла на одно деление, относится к весу шарика, как $\frac{1}{766N^2} * \frac{36,65}{39,14}$ к 1, или как $\frac{1}{818N^2}$ к 1

Следующая задача состоит в нахождении отношения, которое притяжение шариков грузами образует с их притяжением к Земле, в предположении, что шарики расположены в середине кожуха, т. е. не ближе к одной из его стенок, чем к другой. Когда грузы приближаются к шарикам, их центры находятся на расстоянии 8,85 дюйма от осевой линии кожуха. Однако по небрежности расстояние между стержнями, удерживающими эти грузы, было сделано равным расстоянию между центрами шариков, в то время как оно должно быть несколько больше последнего. Вследствие этого центры грузов не становятся в точности против центров шариков при сближении с ними. Действие грузов при отклонении коромысла оказывается меньше, чем оно должно быть в противном случае, в утроенном отношении 8.85/36.65 к хорде угла, синус которого равен 8.85/36.65 или в утроенном отношении косинуса 1/2 этого угла к единице, или в отношении 0,9779 к 1.

Каждый из грузов весит 2 439 000 гранов, и поэтому он равен по весу 10,64 сферического фута воды. Отсюда создаваемое им притяжение частицы, помещенной в центр шарика, так относится к притяжению сферического фута воды, действующего на равную частицу, помещенную на его поверхности, как $10,64 * 0,9779 * \left(\frac{6}{8,85}\right)^2$ к 1.

Средний диаметр Земли равен 41 800 000 футов, и поэтому, если средняя плотность Земли так относится к плотности воды, как D к 1, то притяжение шарика к свинцовому грузу будет относиться к его притяжению к Земле, как $10,64 * 0,9779 * \left(\frac{6}{8,85}\right)^2$ к 41 800 000 D , или 1 к 8 739 000.

Таким образом показано, что сила, которую необходимо приложить к каждому из шариков, чтобы отклонить коромысло на одно деление от его естественного положения, составляет $\frac{1}{818N^2}$ веса шарика. Если средняя плотность Земли относится к плотности воды как D к 1, то притяжение шарика грузом равно $\frac{1}{8739000D}$ веса этого шарика, и поэтому данное притяжение сможет отклонить коромысло от его естественного положения на $\frac{818N^2}{8739000D}$ или $\frac{N^2}{10683D}$ делений. Следовательно, если окажется, что при передвижении грузов из средней в крайнюю позицию коромысло сдвинулось на B делений, или если оно сдвигается на $2B$ делений при перемещении грузов из одной крайней позиции в другую, то плотность и Земли равна $\frac{N^2}{10683B}$.

Вывод. Ниже приведенная таблица содержит результаты опытов. Из этой таблицы следует, что хотя эксперименты достаточно хорошо согласуются между собой, все же различие между ними как в смещении коромысла, так и во времени колебания больше чем это может следовать из одних только ошибок наблюдений.

Опыт	Сдвиг грузов	Смещение коромысла	То же с поправкой	Время колебания, мин, с	То же с поправкой	Плотность
1	из ср. в +	14,32	13,42	—	—	5,5
	из + в ср.	14,1	13,17	14 55	—	5,61
2	из ср. в +	15,87	14,69	—	—	4,88
	из + в ср.	15,45	14,14	14 42	—	5,07
3	из + в ср.	15,22	13,56	14 39	—	5,26
	из ср. в +	14,5	13,28	14 54	—	5,55
4	из ср. в +	3,1	2,95	—	6 54	5,36
	из + в —	6,18	—	7 1	—	5,29
	из — в +	5,92	—	7 3	—	5,58
5	из + в —	5,9	—	7 5	—	5,65
	из — в +	5,98	—	7 5	—	5,57
	из ср. в —	3,03	2,9	—	—	5,53
6	из — в +	5,9	5,71	—	—	5,62
7	из ср. в —	3,15	3,03	7 4	—	5,29
	из — в +	6,1	5,9	среднее	6 57	5,44
8	из ср. в —	3,13	3,00	—	—	5,34
	из — в +	5,72	5,54	—	—	5,79
9	из + в —	6,32	—	6 58	—	5,1
10	из + в —	6,15	—	6 59	—	5,27
11	из + в —	6,07	—	7 1	—	5,39
12	из — в +	6,09	—	7 3	—	5,42
	из — в +	6,12	—	7 6	—	5,47
13	из + в 2	5,97	—	7 7	—	5,63
	из — в +	6,27	—	7 6	—	5,34
14	из + в —	6,13	—	7 6	—	5,46
15	из — в +	6,34	—	7 7	—	5,3
16	из — в +	6,1	—	7 16	—	5,75
	из — в +	5,78	—	7 2	—	5,68
17	из + в —	5,64	—	7 3	—	5,85

Таблица результатов опытов Кавендиша 1

Главное следствие из опыта Кавендиша – плотность Земли оказывается в 5,48 раз больше плотности воды. Из этого можно найти, что значение гравитационной постоянной $G = 6,754 \cdot 10^{-11} \text{ м}^3/(\text{с}^2 \cdot \text{кг})$, что незначительно отличается от современного значения ($G = 6,67430(15) \cdot 10^{-11} \text{ м}^3 \cdot \text{с}^{-2} \cdot \text{кг}^{-1}$)

В публикации 1798 года Кавендиш в мельчайших подробностях описывает, возможно, первый точный эксперимент в физике. Его торсионные весы были одним из самых значительных физических приборов, когда-либо изобретенных. В сборнике опубликованных работ по измерению G Джордж Гиллис перечислил около 350 статей, почти все из которых ссылаются на работу, выполненную с помощью торсионных весов⁴. Среди дюжины или около того экспериментов, использованных в последней оценке CODATA, все, кроме трех, были выполнены с помощью торсионных весов.

2.3. Современные эксперименты по измерению Гравитационной постоянной.

Прорывов в способе измерения за последние 200 лет было немного. В большинстве случаев это просто улучшенный метод Кавендиша. С современным оборудованием, увеличением весов, наличием вакуума в камере для уменьшения погрешностей и так далее.

Так или иначе, но, точность измерений остается очень скромной. Нынешнее «официальное» значение, рекомендованное американским Национальным институтом стандартизации (NIST), составляет $(6.67430 \pm 0,00080) \cdot 10^{-11} \text{ м}^3 \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{с}^{-2}$. Относительная погрешность тут составляет 0,012%, или $1,2 \cdot 10^{-4}$, или, в еще более привычных для физиков обозначениях, 120 ppm (миллионных долей), 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 30 лет назад, и никакого улучшения с тех пор нет.

Измерение постоянной командой Терри Куина. Терри Куин созвал собрание в британской академии наук по поводу несоответствия расчетов постоянной, с целью найти выход из данного научного тупика.

Метод Куина заключался в повторении метода Кавендиша, но с новым технологическим уровнем, в частности, проволока на установке Куина была заменена на широкую полосу из бериллиевой бронзы, которая позволила их крутильным весам выдержать вес гораздо больших масштабов.



Команда также пошла дальше — попытка измерения гравитации новым самостоятельным методом — в дополнение к измерению отклонения рейки весов, исследователи провели эксперимент, поместив электроды внутрь крутильных весов, которые останавливали возможность поворота последних. Сила тока, необходимая для предотвращения вращения весов, была в прямой пропорции от Силы гравитационного взаимодействия.

В результате этих двойных опытов команда Куина получила значение G равное $6.67545 \cdot 10^{-11} \text{ м}^3 \text{ кг}^{-1} \text{ с}^{-2}$. Это значение на 241 миллионную (ppm) выше эталона $6.67384(80) \cdot 10^{-11} \text{ м}^3 \text{ кг}^{-1} \text{ с}^{-2}$.



Различия этих полученных экспериментальным путем значений доходят до 450 ppm, однако погрешность метода составляет всего 40 ppm. Из чего следует, что большинство методов содержат скрытые серьезные ошибки или неопределенности.

Три “Самых точных измерения”. В последние несколько лет ситуация стала еще более драматичной. В 2008–2010 годах три группы обнародовали новые результаты измерения G . Над каждым из них команда экспериментаторов работала годами, причем не только непосредственно измеряла величину G , но и тщательно искала и перепроверяла всевозможные источники погрешностей. Каждое из этих трех измерений обладало высокой точностью: погрешности составляли 20–30 ppm. По идее, эти три измерения должны были существенно улучшить наше знание численной величины G . Беда лишь в том, что все они отличались друг от друга аж на 200–400 ppm, то есть на целый десяток заявленных погрешностей!

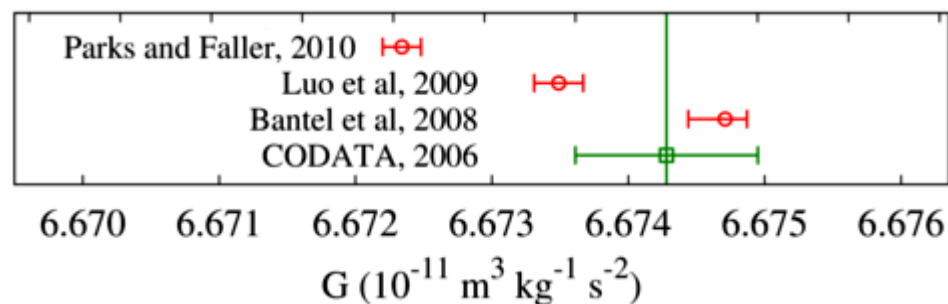


Рис. 3. Измерение гравитационной постоянной с точностью на 2010 г.

Совершенно ясно, что сама гравитационная постоянная тут не виновата; она действительно обязана быть одной и той же всегда и везде. Например, есть спутниковые данные, которые хоть и не позволяют хорошо измерить численное значение константы G , зато позволяют убедиться в ее неизменности — если бы G изменилась за год хоть на одну триллионную долю (то есть на 10^{-12}), это уже было бы заметно. Поэтому единственный вытекающий отсюда вывод таков: в каком-то (или в каких-то) из этих трех экспериментов есть неучтенные источники погрешностей. Но вот в каком?

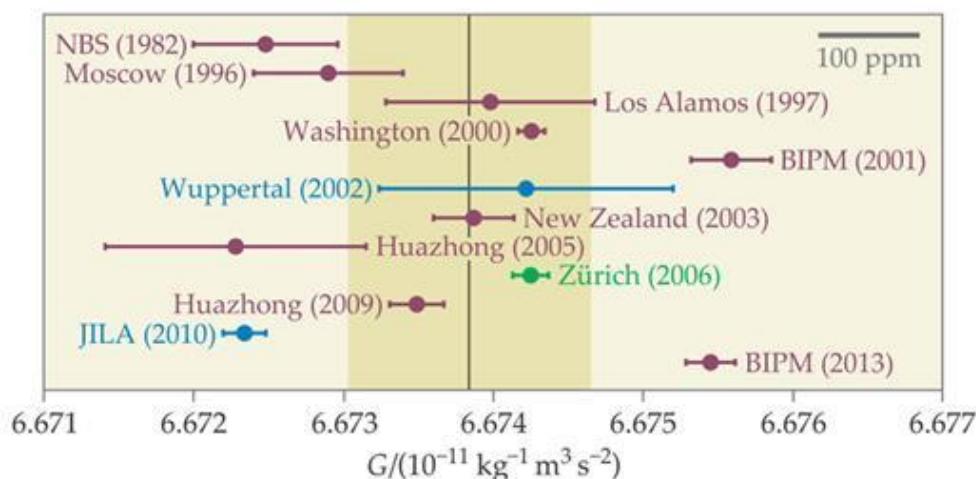
Единственный метод попробовать выяснить где ошибка, это повторять измерения на другими методами, на других установках, и желательно ликвидируя внешние факторы. Увы, особого разнообразия методов здесь пока достигнуть не удалось, так как во всех экспериментах используется то или иное механическое устройство. Но всё же разные установки могут обладать (и будут) разными инструментальными погрешностями, и сравнение их результатов позволит разобраться в ситуации.



Установка, изготовленная в Международном бюро мер и весов, на которой было выполнено новое измерение гравитационной постоянной. Фото с сайта www.bipm.org

В журнале *Physical Review Letters* было опубликовано одно такое измерение. Небольшая группа исследователей, работающих в Международном бюро мер и весов в Париже, заново спроектировала аппарат, который позволил измерить гравитационную постоянную двумя разными способами. Он представляет из себя те же крутильные весы, но не с двумя, а с четырьмя одинаковыми цилиндрами, установленными на диске, подвешенном на металлической нити. Эти четыре груза гравитационно взаимодействуют с четырьмя другими, более крупными цилиндрами, насаженными на карусель, которую можно повернуть на произвольный угол. Схема с четырьмя телами вместо двух позволяет минимизировать гравитационное взаимодействие с несимметрично размещенными предметами (например, стенками лабораторной комнаты) и сфокусироваться именно на гравитационных силах внутри установки. Сама нить имеет не круглое, а прямоугольное сечение; это, скорее, не нить, а тонкая и узкая металлическая полоска. Такой выбор позволяет более равномерно передавать нагрузку по ней и минимизировать зависимость от упругих свойств вещества нити. Весь аппарат располагается в вакууме и при строго определенном температурном режиме, который выдерживается с точностью до сотой доли градуса.

Эта установка может выполнять три вида измерения гравитационной постоянной. Во-первых, это классический вариант опыта Кавендиша: поднесли груз, весы повернулись на некоторый угол, и этот угол измеряется оптической системой. Во-вторых, его можно запустить в режиме крутильного маятника, когда внутренняя установка периодически вращается туда-сюда, а наличие дополнительных массивных тел изменяет период колебаний (этот способ, впрочем, исследователи не использовали). Наконец, их установка позволяет выполнять измерение гравитационной силы без поворота грузиков. Это достигается с помощью электростатического сервоконтроля: к взаимодействующим телам подводятся электрические заряды так, чтобы электростатическое отталкивание полностью компенсировало гравитационное притяжение. Такой подход позволяет избавиться от инструментальных погрешностей, связанных именно с механикой поворота. Измерения показали, что два метода, классический и электростатический, дают согласующиеся результаты.



Итог нового измерения виден в самом низу на рисунке с датой от 2013 года. Видно, что этот результат не только не решил давнюю проблему, но еще только сильнее усугубил вопрос: он сильно отличается от всех остальных недавних измерений, проведенных ранее. Итак, к настоящему моменту у нас имеется уже четыре разных и при том довольно точных

измерения, и все они совершенно расходятся друг с другом, и с прошлыми! Разница между двумя самыми крайними (и хронологически — самыми последними) значениями уже превышает 20(!) заявленных погрешностей.

Новый метод измерения гравитационной постоянной. На роль такого метода уже давно предлагалась **атомная интерферометрия**, но только сейчас эту идею удалось реализовать. В статье американских физиков J. B. Fixler et al., [*Science*, vol. 315, p. 74](#), говорится о нахождении гравитационной постоянной этим методом.

Данный метод основан на явлении того, что все микроскопические частицы, например атомы, в некоторых условиях ведут себя как волны, в частности могут интерферировать. В гравиметре (приборе, измеряющем гравитацию), в котором используется это явление, сверххолодное облачко атомов цезия вначале удерживается с помощью нескольких скрещенных лазерных лучей, а затем подкидывается в поле тяжести. В определенный момент в него снизу выстреливают специально настроенным лазерным импульсом, который переводит атомы в полувозбужденное-полунормальное состояние — специфическое состояние, которое возможно в квантовой механике. В таком состоянии облачко как бы «расщепляется» на две компоненты, которые летят в поле тяжести по слегка отличающимся траекториям. Затем — под воздействием еще одного лазерного импульса — эти компоненты сливаются вновь и при слиянии интерферируют. Измерив получившееся состояние атомного облака, можно выяснить, насколько отличались эти траектории, и отсюда получить значение силы тяжести.

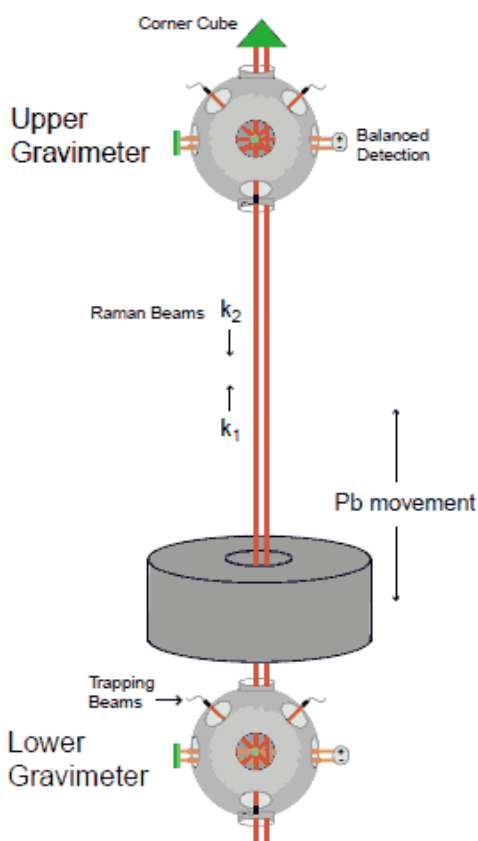


Схема атомно-интерференционной установки по измерению гравитационной постоянной (картинка из статьи в *Science*)

Такого вида эксперименты уже проводились, однако они, как уже говорилось, не помогали измерить значение G с нужной точностью. Американцы слегка модифицировали этот эксперимент. Они установили два одинаковых гравиметра на разной высоте, а между ними на платформе закрепили свинцовый груз массой 540 кг. Этот груз по-разному влиял на силу тяжести, испытываемую атомными облачками в двух гравиметрах — в верхнем сила тяжести слегка увеличивалась из-за дополнительного притяжения к грузу, а в нижнем — слегка уменьшалась. По разности измерений в верхнем и нижнем гравиметре ученые получали чистый эффект, вызванный гравитацией только от массивного груза, поскольку сила земного притяжения не влияет на эту разность (остаточное воздействие земного притяжения, связанное с разностью высот двух гравиметров, устранялось с помощью многократного повторения эксперимента при различном вертикальном положении груза). Поскольку масса и положение груза были измерены с большой точностью, не представляло труда вычислить гравитационную постоянную.

Задачей этого эксперимента была лишь демонстрация того, что данный метод измерения G действительно работает. Значение гравитационной постоянной была определена с точностью около 3 тысячных, что всё еще в 20 раз хуже точности «стандартных» экспериментов. Однако уже в ближайшее время ожидается существенный прорыв в данном методе измерения.

Последнее крупное измерение. Последнее крупное измерение случилось в 2018 году. работу провела группа ученых под руководством Цзюнь Ло (Jun Luo) из Университета науки и технологий Центрального Китая при участии Вадима Милюкова.

Для уменьшения погрешности исследователи повторяли опыты на нескольких установках с принципиально разной конструкцией и различными значениями параметров. На установках первого типа постоянная измерялась с помощью метода TOS (time-of-swing), в котором величина G определяется по частоте колебаний крутильных весов. Чтобы повысить точность, частота измеряется для двух различных конфигураций: в «ближней» конфигурации внешние массы находятся поблизости от равновесного положения весов (эта конфигурация представлена на рисунке), а в «дальней» — перпендикулярно равновесному положению. В результате частоты колебаний в «дальней» конфигурации оказываются немного меньше, чем в «ближней» конфигурации, и это позволяет уточнить значение G .

С другой стороны, установки второго типа полагались на метод AAF (angular-acceleration-feedback) в котором коромысло крутильных весов и внешние массы вращаются независимо, а их угловое ускорение измеряется с помощью системы управления с обратной связью, которая поддерживает нить незакрученной. Это позволяет избавиться от систематических ошибок, связанных с неоднородностью нити и неопределенностью ее упругих свойств.

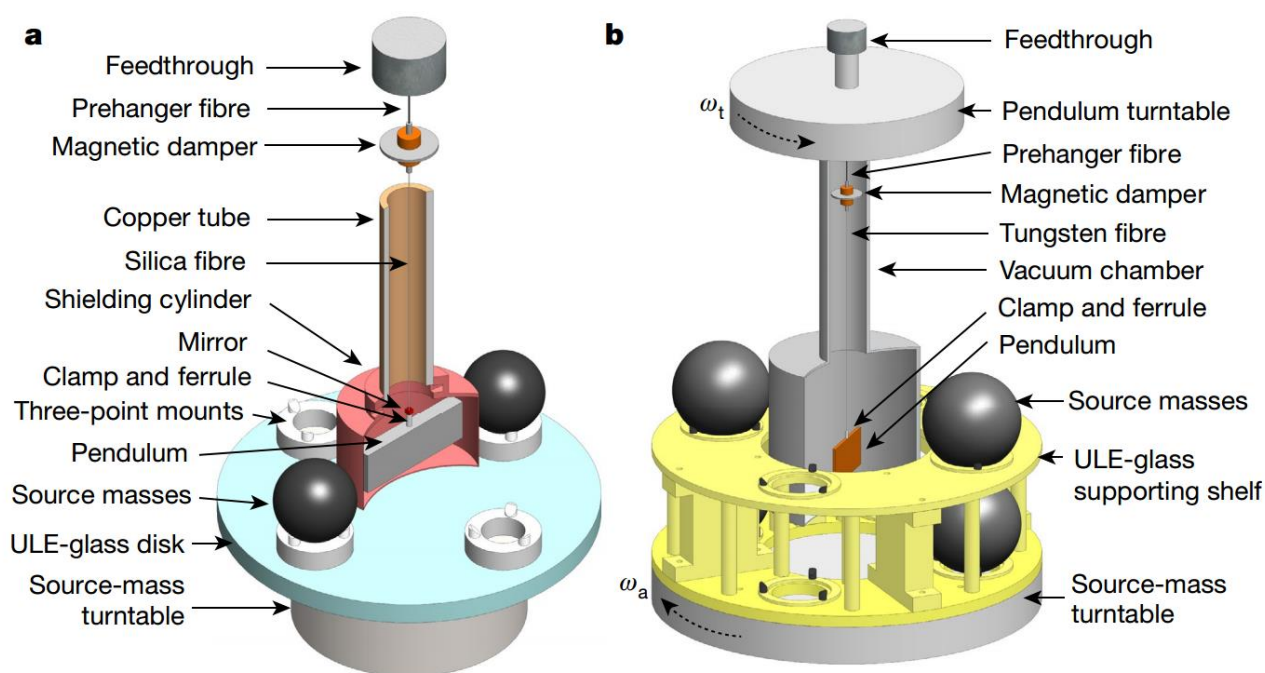


Схема установок для двух методов соответственно

Кроме того, физики постарались до минимума уменьшить возможные ошибки метода. Во-первых, они проверили, что гравитирующие тела, участвующие в опытах, действительно однородны и приближены к сферической форме — построили пространственное распределение плотности тел с помощью сканирующего электронного микроскопа, а также измерили расстояние между геометрическим центром и центром масс двумя независимыми методами. В результате ученые убедились, что колебания плотности не превышают 0,5 части на миллион, а эксцентриситет — одной части на миллион. Кроме того, исследователи

поворачивали сферы на случайный угол перед каждым из опытов, чтобы скомпенсировать их неидеальности.

Во-вторых, ученые учли, что магнитный демпфер, который используется для подавления нулевых мод колебаний нити, может вносить погрешность в измерение постоянной G , а затем изменили его работу таким образом, чтобы этот вклад не превышал нескольких частей на миллион.

В-третьих, физики покрыли поверхность грузов тонким слоем золотой плёнки, чтобы избавиться от электростатических эффектов, и пересчитали момент инерции крутильных весов с учетом плёнки. Замеряя электростатические потенциалы частей установки в ходе опыта, физики подтвердили, что электрические заряды не влияют на результаты измерений.

В-четвертых, экспериментаторы учли, что в способе AAF кручение происходит в воздухе, и рассчитывали движение коромысла с учетом сопротивления воздуха. В методе TOS все части установки находились в вакууме, поэтому подобные факторы можно было не учитывать.

В-пятых, ученые поддерживали температуру установки постоянной в течение всего эксперимента (погрешность не превышала 0.1 градуса Кельвина), а также непрерывно измеряли температуру нити и корректировали замеры с учетом едва заметных изменений ее упругих свойств.

В-шестых, ученые учли, что металлическое покрытие сфер позволяет им взаимодействовать с магнитным полем Земли, и оценили значение этого фактора. На протяжении всего эксперимента ученые каждую секунду считывали все данные, включая угол поворота нити, температуру, колебания плотности воздуха и сейсмическую активность планеты, а затем строили полную картину и рассчитывали на ее основе значение постоянной G .

В результате ученые получили усредненные значения гравитационной постоянной $G = 6,674184(78) \times 10^{-11} \text{ м}^3 \cdot \text{с}^{-2} \cdot \text{кг}^{-1}$ для метода TOS и $G = 6,674484(78) \times 10^{-11} \text{ м}^3 \cdot \text{с}^{-2} \cdot \text{кг}^{-1}$ для метода AAF. Относительные погрешности в каждом случае примерно равны 11,6 ppm. На данный момент это самые точные значения гравитационной постоянной. Кроме того, авторы отмечают, что эти значения получены с помощью усреднения данных различных установок, а потому должны быть избавлены от систематических погрешностей. Однако, авторы исследования до сих пор не могут объяснить расхождение для значений постоянной, полученных методами TOS и AAF, которое составляет почти 45 ppm.

3. Заключение

В данном реферате была рассмотрена история измерений гравитационной постоянной. От классического метода Кавендиша до его модификаций и метода атомной интерференции.

Если сравнивать с первым полученным значением G ($6,754 \cdot 10^{-11} \text{ м}^3 \cdot \text{с}^{-2} \cdot \text{кг}^{-1}$), то точность современных измерений в лучшем случае доходит до ~ 20 ppm, что в 1000 раз выше точности измерения Кавендиша.

проблема получения надежного значения G вряд ли будет решена одним или двумя дополнительными результатами, полученными, как в прошлом, группами, работающими независимо друг от друга. Точные оценки G зависят от точных измерений таких параметров, как масса, плотность, длина, время, электрический ток, напряжение, емкость и угол. Все эти измерения должны быть отслежены до проверенных национальных и международных эталонов килограмма, метра и секунды с оценкой неопределенностей относительно СИ. Кроме того, будущие эксперименты должны проводиться в лабораториях с высочайшим качеством температурного и экологического контроля.

На фоне застоя старого метода Кавендиша появился новый метод атомной интерференции. Несмотря на его сегодняшние результаты (точность около 3 тысячных), у него большой потенциал на доработку и в будущем, возможно, он произведет революцию в области.

Наконец хочется сказать, что нынешнего значения гравитационной постоянной вполне хватает для прикладных задач и скорее всего продвижения в области измерения её значения не последует.

Источники:

1. <https://elibrary.ru/item.asp?id=29667411>
2. <https://elibrary.ru/item.asp?id=35766378>
3. Cavendish, H (1 gener 1798). *"Experiments to Determine the Density of the Earth. By Henry Cavendish, Esq. F. R. S. and A. S."* *Phil. Trans. R. Soc. Lond.* **88**: 469—526. [doi:10.1098/rstl.1798.0022](https://doi.org/10.1098/rstl.1798.0022).
4. <https://elibrary.ru/item.asp?id=8834702>
5. Speake C., Quinn T. [The search for Newton's constant](#) // [Physics Today](#). — 2014. — Vol. 67, № 7. — P. 27—33.