



Г. Кавендиш

1731—1810

## Определение плотности Земли

Установление Ньютоном закона всемирного тяготения явилось важнейшим событием в истории физики. Его значение определяется прежде всего универсальностью гравитационного взаимодействия. На законе всемирного тяготения основывается один из центральных разделов астрономии — небесная механика. Непосредственно для физики значение этого закона определялось тем, что его следствия допускали экспериментальную проверку с точностью, недоступной другим механическим опытам конца XVII—XVIII вв. Дискуссия о точности, с которой выполняется закон всемирного тяготения, шла на протяжении всего XVIII в. В итоге с помощью простого соотношения, установленного Ньютоном, был объяснен ряд своеобразных астрономических явлений (в частности, особенности движения Луны), которые первоначально выдвигались как примеры, опровергающие закон всемирного тяготения.

Однако, несмотря на все успехи небесной механики, на протяжении многих десятилетий использование закона всемирного тяготения затруднялось тем, что не было определено значение гравитационной постоянной  $G$ , входящей в закон Ньютона:

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

где  $m_1$  и  $m_2$  — массы материальных точек,  $r$  — расстояние, а  $F$  — сила взаимодействия между ними. Вследствие этого ученые были вынуждены пользоваться в расчетах относительными величинами. К середине XVIII в. назрела необходимость экспериментального определения  $G$ . Поскольку нахождение  $G$  имело значение главным образом для астрономии, эта задача была сформулирована как определение средней плотности Земли. Очевидно, что при известных значениях плотности  $\rho$  и радиуса  $R$  Земли, а также ускорения свободного падения  $g$  на ее поверхности можно найти  $G$ :

$$G = \frac{3g}{4\pi\rho R}.$$

Первым ученым, определившим плотность Земли (а следовательно, и  $G$ ) с удовлетворительной точностью, был Г. Кавендиш.

**Г**енри Кавендиш родился в Ницце 10 октября 1731 г. Он принадлежал к знатному роду герцогов Девонширских. Его мать умерла вскоре после рождения второго сына, когда Генри было всего два года. Воспитанием детей занимался отец, сэр Чарльз Кавендиш, страстный любитель науки, член Лондонского Королевского общества. После учебы в привилегированной средней школе Кавендиш поступил в Кембриджский университет, который закончил без какой-либо ученой степени.

Получив университетское образование, Кавендиш поселился в доме отца, который привлек его к исследованиям в области физики, химии и метеорологии. В дальнейшем на протяжении всей жизни Кавендиш вел очень замкнутый образ жизни чудака-одиночки. Его общение с внешним миром ограничивалось кругом членов Королевского общества, куда он был принят в 1760 г. Однако его научная активность была исключительно высока. Кавендиш вел интенсивную исследовательскую работу, участвовал в деятельности различных комиссий Королевского общества и почти не пропускал его заседаний. Он пользовался огромным уважением и авторитетом среди коллег по Обществу.

Кавендиш опубликовал 18 научных работ в журнале «*Philosophical Transactions*», однако гораздо большее число его исследований осталось неопубликованным и неизвестным современникам. Так, блестящие эксперименты Кавендиша по электричеству (он одним из первых ввел эталонную емкость, первым дал удовлетворительное опытное доказательство закона «обратных квадратов» для сил электрического отталкивания, предвосхитил открытия Ома и т. д.), проведенные в домашней лаборатории, стали известны лишь после публикации в 1879 г. его избранных работ, подготовленной Дж. К. Максвеллом.

При жизни Кавендиш был известен главным образом как выдающийся химик. Так, он независимо от Блэка ввел понятие удельной теплоемкости и указал на существование скрытых теплот (тепловые явления относились в XVIII в. к химии). В 60—70-е годы Кавендиш становится одним из ведущих исследователей в области «пневмохимии», занимавшейся исследованием газов. Он, в частности, получил убедительные свидетельства сложного состава воздуха, независимо от Д. Резерфорда открыл азот, выделил водород и определил его плотность, доказал, что при реакции кислорода и водорода образуется вода.

На протяжении многих лет Кавендиш занимался также математикой, механикой, минералогией и астрономией. Он вел научные исследования практически до конца жизни. Кавендиш умер 24 февраля 1810 г.

Образцом экспериментального искусства Кавендиша стал цикл опытов по определению средней плотности Земли. Идея опыта принадлежала Дж. Мичеллу, с которым Кавендиш многие годы вел переписку по вопросам астрофизики и который стремился решить задачу «взвешивания» (т. е. определения массы) звезд. Смерть Мичелла (1793) помешала реализации его идеи,

и соответствующие эксперименты были проведены Кавендишем на усовершенствованной установке лишь в 1798 г.

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  $\rho^*$ . Отметим, что использование данных Кавендиша дает для гравитационной постоянной значение  $G = 6,71 \cdot 10^{-11} \text{ м}^3/(\text{г} \cdot \text{с}^2)$  (современное значение  $G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ м}^3/(\text{г} \cdot \text{с}^2)$ ).

## Опыты по определению плотности Земли

---

Много лет назад покойный преподобный Джон Мичелл, член этого общества<sup>1</sup>, придумал метод определения плотности Земли с помощью притяжения малых количеств вещества; но так как он был занят другими предприятиями, то закончил прибор лишь незадолго до смерти и не успел провести с ним какие-либо опыты. После его смерти прибор перешел к преподобному Френсису Джону Хайду Волластону, Джексонианскому 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 мне.

Прибор очень прост; он состоит из деревянного коромысла 6 футов длиной, сделанного так, чтобы соединять в себе большую прочность с малым весом. Это коромысло подвешено в горизонтальном положении посредством тонкой проволоки длиной 40 дюймов и на каждом из его концов висит по свинцовому шару диаметром около 2 дюймов; все это помещается в узкий деревянный кожух для защиты от ветра.

Поскольку для того, чтобы заставить это коромысло поворачиваться вокруг его центра, необходима сила не большая, чем та, которая требуется для закручивания подвеса, ясно, что если проволока достаточно тонка, то достаточно малейшей силы, такой,

---

\* Это значение приведено в работе Кавендиша. В 1842 г. Ф. Бейли указал на арифметическую ошибку, допущенную Кавендишем при выводе среднего значения  $\rho$ . С учетом поправки Бейли величина  $\rho$ , определенная по данным Кавендиша, оказывается равной  $\rho = 5,45 \text{ г/см}^3$ .

как притяжение свинцового груза диаметром в несколько дюймов, чтобы заметно отклонить коромысло. Грузы, которые собирался использовать м-р Мичелл, были диаметром 8 дюймов. Один из них должен был помещаться с одной стороны кожуха, напротив одного шарика, так близко к нему, как только можно, а другой — с другой стороны, против другого шарика так, чтобы притяжения со стороны обоих грузов соединялись для отклонения коромысла. Когда его отклонение под воздействием этих грузов устанавливалось, грузы должны были перемещаться по другую сторону кожуха и положение коромысла должно было определяться снова. Следовательно, половина разности этих положений должна показать, насколько коромысло было отклонено притяжением грузов.

Чтобы определить отсюда плотность Земли, необходимо установить, какая требуется сила для отклонения коромысла на данное расстояние. Сделать это м-р Мичелл собирался путем приведения коромысла в движение и наблюдения времени его колебаний, откуда сила может быть легко рассчитана\*  $\langle \dots \rangle^2$ .

На рис. 68 показано продольное вертикальное сечение прибора и помещения, в котором он расположен. *ABCDDCBAEFFE* — это кожух; *x* и *x* — два шарика, свешивающихся на нитях *hx* с коромысла *ghmh*, которое само подвешено с помощью тонкой проволоки *gl*. Это коромысло состоит из тонкого соснового стержня *hmt*, усиленного серебряной проволокой *hgh*. Благодаря этому он делался достаточно прочным для удержания шариков, хотя и оставался очень легким<sup>3</sup>.

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 *Pp*. Эта шпилька проходит над центром прибора через отверстие в бруске *HH* перпендикулярно бруску и поворачивается внутри этого отверстия, удерживаясь от падения пластиной *p*. *MM* представляет собой блок, прикрепленный к этой шпильке, а *Mt* — 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.

На рис. 69 приведен вид прибора сверху: *AAAA* — кожух, *SSSS* — четыре поддерживающие его винта, *HH* — коромысло и шарик, *W* и *W* — грузы, *MM* — блок для их передвижения. Когда грузы находятся в таком положении, то оба стремятся отклонить коромысло в направлении *hW*; когда же они передви-

\* М-р Кулон во множестве случаев уже использовал приспособление такого рода для изучения слабых притяжений. М-р Мичелл сообщил мне о своем намерении провести этот эксперимент и о методе, который он собирался применить, до публикации каких-либо экспериментов м-ра Кулона.

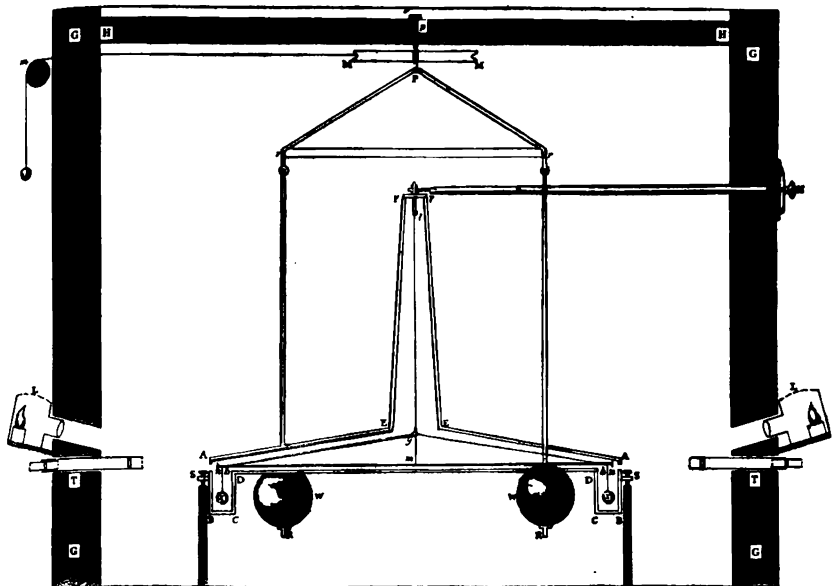


Рис. 68

гаются в положения  $\psi$  и  $\omega$ , представленные точечными линиями, то оба стремятся отклонить коромысло в противоположном направлении  $h\omega$ . От ударов о кожух эти грузы предохраняют кусочки дерева, останавливающие их, как только они приближаются на расстояние  $\frac{1}{5}$  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 помещены на каждом конце коромысла и служат верньером, подразделяя 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. 68] 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 пропускался.

Деления на пластинке из слоновой кости идут в направлении  $W\omega$  [рис. 69], так что, когда грузы помещались в позицию  $\psi$  и  $\omega$ , представленную точечными кружками, коромысло отклонялось в таком направлении, что указатель должен был отмечать

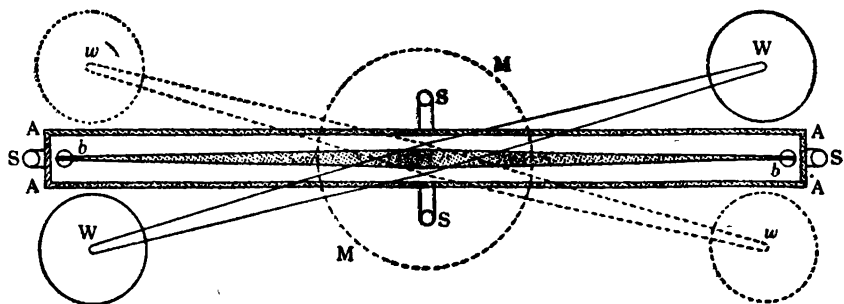


Рис. 69

большие числа на пластинках из слоновой кости. По этой причине я называю эту позицию грузов положительной.

Деревянный стержень *FK* [рис. 68] посредством бесконечного винта поворачивает держатель, к которому прикреплена проволока *gl*, что позволяет наблюдателю закручивать провод до тех пор, пока коромысло не установится в центре кожуха, без опасения коснуться какой-либо из его стенок. Проволока *gl* наверху прикреплена 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.

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 оказалось бы в покое, если бы его движение было уничтожено, или точку покоя, как я буду ее впредь называть. Для этого я 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 я нахожу следующим образом: определяю две крайние точки колебания, а также моменты времени, в которые коромысло достигает двух данных делений между этими крайними точками, заботясь о том, насколько я мог предвидеть, чтобы эти деления располагались по разные стороны от средней точки и не очень далеко от нее. Затем я рассчитываю среднюю точку колебания и с помощью пропорции нахожу момент времени, в который коромысло проходит через среднюю точку. Затем после нескольких колебаний я повторяю эту операцию и делю 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  $10^h 23' 4''$ , 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  $41' 59''$ , или одно колебание за  $7' 0''^3$ . (...)

Время одного колебания может быть определено либо из предварительных испытаний, либо это можно делать в каждом

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				

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 опытов.** В моем первом опыте проволока, на которой подвешивалось коромысло, была из посеребренной меди длиной  $39\frac{1}{4}$  дюйма; один фут ее весил  $2\frac{2}{5}$  грана. Ее жесткость была такой, что заставляла коромысло совершать одно колебание примерно за 15 мин. Вообще-то я сразу же обнаружил, что она недостаточно жесткая, поскольку притяжение грузов слишком сильно отклоняло шарики, так что заставляло их касаться стенок кожуха; тем не менее, прежде чем ее заменить, я решил провести несколько опытов.

В этом эксперименте стержни, с помощью которых подвешивались свинцовые грузы, были сделаны из железа. Так как я позаботился, чтобы в коромысле не было ничего магнитного, то, казалось бы, не имело никакого значения, были ли стержни магнитными или нет. Однако для большей безопасности я снял свинцовые грузы и испытал, какой эффект создадут стержни сами по себе. В это время путем расчета я нашел, что гравитационное притяжение шариков к этим стержням относится к притяжению грузов примерно как 17 к 2500. Поскольку, как показали последующие испытания, притяжение грузов оказалось достаточным, чтобы отклонить коромысло примерно на 15 делений, притяжение одних стержней должно отклонять его приблизительно на  $\frac{1}{10}$  деления, и поэтому перемещение стержней из одной крайней позиции в другую должно сдвигать его примерно на  $\frac{1}{5}$  деления.

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  $\frac{1}{2}$  или  $1\frac{1}{2}$  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, сделанных с этими стержнями, движение было всегда



одного и того же рода, хотя и различалось по величине от  $1/2$  до  $1\frac{1}{2}$  деления, то представляется, что имеется веское основание считать, что оно создается действием стержней.

Поскольку мне казалось, что этот эффект обязан магнетизму, хотя он и не был таким, какой я ожидал от этой причины, я заменил железные стержни на медные и также 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 эксперименты.

Следует отметить, что эффект, который, казалось, создает перемещение железных стержней из одной крайней позиции в другую, составлял в среднем не более одного деления. В то же время эффект, создаваемый движением грузов из средней в крайнюю позицию, был около 15 делений. Таким образом, если бы я продолжал пользоваться железными стержнями, то порожденная этим ошибка в результате вряд ли могла превосходить  $1/30$  целого.

*Опыт I. 5 августа*  
**Грузы в средней позиции**

Крайние точки	Деления	Время, ч, мин, с	Точка покоя	Время середины колебания, ч, мин, с	Разность, мин, с
	11,4	9 42 0			
	11,5	55 0			
	11,5	10 5 0	11,5		
<i>В 10 ч 5 мин грузы передвинуты в положительную позицию</i>					
23,4	—	—	25,82		
27,6	—	—	26,07		
24,7	—	—	26,1		
27,3	—	—			
25,1	—	—			
<i>В 11 ч 6 мин грузы возвращены в среднюю позицию</i>					
5	11	0 0 48	—	0 1 13	
	12	1 30	—		
18,2	—	—	12	—	14 56
	12	16 29	—	16 9	
	11	17 20			
6,6	—	—	11,92	—	14 36
	11	30 24	—	30 45	
	12	31 11			
16,3	—	—	11,72	—	15 13
	12	45 58	—	45 58	
	11	47 4			
7,7	<i>Смещение коромысла при сдвиге грузов из средней в положительную позицию . . . . .</i>				14,32
	<i>из положительной в среднюю позицию . . . . .</i>				14,1
	<i>Время одного колебания</i>				14 55

Необходимо отметить, что в этом опыте притяжение грузов отклоняло коромысло с деления 11,5 до деления 25,8, так что если бы не было предпринято никаких мер, то импульс, приобретенный при этом, перенес бы коромысло к делению 40 и поэтому заставил бы шарики удариться о кожух. Чтобы предотвратить этот удар, после того как коромысло приближалось к делению 15, я возвращал грузы в среднюю позицию и оставлял их там до того момента, когда коромысло подходило близко к крайней точке своего колебания, и тогда снова сдвигал грузы в положительную позицию. Тогда колебания оказывались настолько ослабленными, что шарики не касались стенок. Именно эта причина мешала мне наблюдать первую крайнюю точку колебания. Аналогичный метод использовался и тогда, когда грузы возвращались в среднюю позицию, а также в двух следующих экспериментах.

Колебания [возникавшие] при перемещении грузов из средней в положительную позицию были столь малы, что в это время казалось нецелесообразным определять время колебания. Когда грузы возвращались в среднее положение, я определял моменты времени прихода коромысла в среднюю позицию каждого колебания с целью убедиться, насколько близко времена различных колебаний согласуются между собой. В большей части следующих опытов я удовлетворялся наблюдением времени прихода коромысла в среднюю точку лишь для первого и последнего колебаний. <...>

**О методе расчета плотности Земли из этих экспериментов.** Сначала я рассмотрю задачу в предположении, что медные стержни невесомаы и что груз оказывает ощутимое притяжение

*Опыт II. 6 августа*

**Грузы находятся в средней позиции**

Крайние точки	Деления	Время, ч, мин, с	Точка покоя	Время середины колебания, ч, мин, с	Разность, мин, с
	11	10 4 0			
	11	11 0			
	11	17 0			
	11	25 0			

**Грузы передвинуты в положительную позицию**

29,3					
24,1	—	—	26,87		
30	—	—	27,57		
26,2	—	—	28,02		
29,7	—	—	28,12		
26,9	—	—	28,05		
28,7	—	—	27,85		
27,1	—	—	27,82		
28,4					

Крайние точки	Деления	Время, ч, мин, с	Точка покоя	Время середины колебания, ч, мин, с	Разность, мин, с
---------------	---------	------------------	-------------	-------------------------------------	------------------

*Грузы возвращены в среднюю позицию*

6	12	1 3 50	—	1 4 1	
	13	4 34			
18,5	—	—	12,37	—	14 52
	13	18 29	—	18 53	
	12	19 18			
6,5	—	—	11,67	—	14 16
	11	33 48	—	33 39	
	12	34 51			
15,2	—	—	11	—	13 46
	13	45 8	—	47 25	
	12	46 22			
7,1	—	—	10,75	—	15 25
	11	2 3 48			
	12	5 18	—	2 2 50	
13,6					

<i>Смещение коромысла при сдвиге грузов из средней в положительную позицию . . . . .</i>	15,87
<i>из положительной в среднюю позицию . . . . .</i>	15,45
<i>Время одного колебания . . . . .</i>	14 42

*Опыт III. 7 августа*

Грузы находятся в положительной позиции, и коромысло слегка движется

Крайние точки	Деления	Время, ч, мин, с	Точка покоя	Время середины колебания, ч, мин, с	Разность, мин, с
---------------	---------	------------------	-------------	-------------------------------------	------------------

31,5					
29	—	—	30,12		
31	—	—	30,02		
29,1	—	—			

*Грузы передвинуты в среднюю позицию*

9	14	10 34 18	—	10 34 55	
	15	35 8			
20,5	—	—	14,8	—	14 44
	15	49 31	—	49 39	
	14	50 27			
9,2	—	—	14,07	—	14 38
	14	11 5 7	—	11 4 17	
	15	6 18			
17,4	—	—	13,52	—	14 47
	14	11 18 46	—	11 19 4	
	13	19 58			
10,1	—	—	13,3	—	14 27
	13	33 46	—	33 31	
	14	35 26			
15,6					

Крайние точки	Деления	Время, ч, мин, с	Точка покоя	Время середины колебания, ч, мин, с	Разность, мин, с
---------------	---------	------------------	-------------	-------------------------------------	------------------

## Грузы сдвинуты в положительную позицию

32	28	0 2 48	—	0 2 29	
	27	3 56			
23,7	—	—	27,8		
31,8	—	—	28,27		
25,8	—	—	28,62		
	27	44 58	—	47 40	
	28	46 50			
31,1					

<i>Смещение коромысла при сдвиге грузов из положительной</i>	
<i>в среднюю позицию . . . . .</i>	15,22
<i>из средней в положительную позицию . . . . .</i>	14,5
<i>Время одного колебания при грузах</i>	
<i>в средней позиции . . . . .</i>	14 39
<i>в положительной позиции . . . . .</i>	14 54

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 шару 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  $\frac{1}{20}$  дюйма, поэтому оно стя-

гивает центральный угол, дуга которого равна  $1/766$ , а значит, сила, которая должна быть приложена к каждому шару для

отклонения коромысла на одно деление, относится к весу шарика, как  $\frac{1}{766N^2} \cdot \frac{36,65}{39,14}$  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  $\frac{8,85}{36,65}$  к хорде

угла, синус которого равен  $\frac{8,85}{36,65}$ , 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  $10,64 \cdot 0,9779 \times \left(\frac{6}{8,85}\right)^2$  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  $10,64 \cdot 0,9779 \times \left(\frac{6}{8,85}\right)^2$  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  $\frac{1}{8\,739\,000\,D}$  веса этого шарика, и поэтому данное притяжение сможет отклонить коромысло от его естественного положения на  $\frac{818\,N^2}{8\,739\,000\,D}$  или  $\frac{N^2}{10\,683\,D}$  делений. Следовательно, если окажется, что при передвижении грузов из средней в крайнюю позицию

\* Строго говоря, мы должны были бы вместо среднего диаметра Земли взять диаметр сферы, притяжение которой равно силе тяжести в этих широтах; однако это отличие учитывать не стоит.

коромысло сдвинулось на  $B$  делений, или если оно сдвигается на  $2B$  делений при перемещении грузов из одной крайней позиции в другую, то плотность  $D$  Земли равна  $\frac{N^2}{10\,683\,B}$ .

Теперь мы должны рассмотреть поправки, которые необходимо внести в этот результат, учитывающие: 1) влияние, которое сопротивление движению коромысла оказывает на время колебания; 2) притяжение коромысла к грузам; 3) их притяжение дальнего шарика; 4) притяжение шариков и коромысла к медным стержням; 5) притяжение, действующее на шарики и коромысло со стороны кожуха; 6) изменение притяжения шариков к грузам в зависимости от положения коромысла и влияние, которое оно имеет на время колебания. Вообще говоря, ни одна из этих поправок, исключая последнюю, не имеет большого значения, но ими нельзя полностью пренебречь<sup>5</sup>. <...>

**Вывод.** Нижеприведенная 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,

Опыт	Сдвиг грузов	Смещение коромысла	То же с поправкой	Время колебания, мнн, 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
6	из ср. в —	3,03	2,9	—	—	5,53
	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

чем это может следовать из одних только ошибок наблюдений. Что касается различий в смещениях коромысла, то его можно легко отнести за счет тока воздуха, создаваемого разностью температур; однако сомнительно, что этим можно объяснить различие во времени колебания. Я не думаю, чтобы ток воздуха был постоянным и одинаковым по скорости во всех фазах колебания шарика; но поскольку весьма вероятно, что в токе имелась большая нерегулярность, что очень возможно, то этого достаточно для объяснения указанных различий.

Согласно среднему результату опытов, проведенных с первой из использованных проволок, плотность Земли оказывается в 5,48 раза больше плотности воды. Согласно среднему результату опытов, проведенных со второй проволокой, она оказывается такой же. Наибольшая разность результатов 23 наблюдений, выполненных с этой проволокой, равна всего лишь 0,75; так что крайние результаты отличаются от среднего значения не больше чем на 0,38 или на  $1/14$  целого. Следовательно, плотность должна считаться определенной с большой точностью. Вообще, можно возразить, что, поскольку результат оказывается зависящим от тока воздуха или какой-то другой причины, с законом которой мы недостаточно хорошо знакомы, эта причина может действовать всегда или, как правило, в одном направлении и поэтому может вносить значительную ошибку в результат. Тем не менее, поскольку эксперименты проводились в разную погоду при большом разнообразии в разности температур грузов и воздуха и при различных расстояниях покоящегося коромысла от стенок кожуха, маловероятно, чтобы эта причина действовала столь постоянно в одном направлении, чтобы сделать ошибку в среднем результате почти равной разности между средним и крайним. Поэтому маловероятно, чтобы плотность Земли отличалась от 5,48 так сильно, как на  $1/14$  этой величины.

Относительно этих опытов может быть сделано и другое возражение, а именно: неясно, следует ли сила тяготения на этих малых расстояниях в точности тому же закону, что и на больших расстояниях. Однако нет никаких причин думать, что какая-то нерегулярность этого рода имеет место до тех пор, пока тела не подвергаются действию, которое называется притяжением сцепления и которое, по-видимому, распространяется лишь на очень малые расстояния. Чтобы посмотреть, может ли это притяжение влиять на результат, я проделал эксперименты 9, 10, 11 и 15, в которых шарики были вынуждены оставаться так близко к стенкам кожуха, как только было возможно. Между результатами, полученными в этих условиях и тогда, когда шарики помещались в любой другой части кожуха, не было различий, зависящих от данных условий.

Согласно экспериментам по измерению притяжения горы Шихаллиен, выполненным д-ром Маскелайном, плотность Земли составляет  $4\frac{1}{2}$  плотности воды, что отличается от вышеописанного определения значительно сильнее, чем я мог ожидать. Од-

нако я опасаюсь входить в рассуждения, какому определению следует больше доверять, пока я не выясню более тщательно, насколько описанное выше определение подвержено влиянию нерегулярностей, величину которых я не могу измерить.

---

#### Комментарий

Сокращенный перевод с английского работы Г. Кавендиша выполнен С. Р. Филоновичем по изданию: *The Scientific Researches of the Honourable Henry Cavendish*, F. R. S. Cambridge, 1921, Vol. 2, p. 249—286.

- <sup>1</sup> Речь идет о Лондонском Королевском обществе. Работа Кавендиша была доложена на заседании этого Общества и впервые опубликована в его трудах — журнале «*Philosophical Transactions*».
  - <sup>2</sup> Далее Кавендиш поясняет, что прибор Мичелла по ряду причин не удовлетворял его, и поэтому установка для проведения опытов была изготовлена практически заново. Ниже следует описание конструкции прибора Кавендиша.
  - <sup>3</sup> Здесь и далее (в описании экспериментов) выпущены отрывки, в которых излагаются результаты контрольных опытов, поставленных с целью выявления возможных источников погрешностей.
  - <sup>4</sup> Всего Кавендиш провел 17 серий экспериментов; большая часть таблиц, содержащих соответствующие результаты, опущена.
  - <sup>5</sup> Далее Кавендиш подробно рассматривает величины этих поправок. Приведенные в таблице результаты для плотности Земли даны с учетом указанных поправок.
- 

#### Литература

- [1] Собрание работ Г. Кавендиша: *The Scientific Researches of the Honourable Henry Cavendish*, F. R. S. Cambridge, 1921. Vol. 1. *The Electrical Researches*; vol. 2 *Chemical and Dynamical*.
- [2] *Berry A. J. Henry Cavendish: his life and scientific work*. London, 1960.
- [3] Сагитов М. У. Постоянная тяготения и масса Земли. М., 1969.
- [4] Филонович С. Р. Генри Кавендиш // *Квант*. 1981. № 10. С. 17—22.



**Голин Г. М., Филонович С. Р.**

Классики физической науки (с древнейших времен до начала XX в.): Справ. пособие. — М.: Высш. шк., 1989. — 576 с.: ил. ISBN 5-06-000058-3