

ФИЗИКА

ПОДПИСНАЯ НАУЧНО-ПОПУЛЯРНАЯ СЕРИЯ



1988/8

С.Р. Филонович

КАВЕНДИШ, КУЛОН И ЭЛЕКТРОСТАТИКА



ЗНАНИЕ

НОВОЕ В ЖИЗНИ, НАУКЕ, ТЕХНИКЕ

НОВОЕ В ЖИЗНИ, НАУКЕ, ТЕХНИКЕ

ПОДПИСНАЯ НАУЧНО-ПОПУЛЯРНАЯ СЕРИЯ

ФИЗИКА

8/1988

Издается ежемесячно .с 1967 г.

С. Р. Филонович

КАВЕНДИШ, КУЛОН И ЭЛЕКТРОСТАТИКА



Издательство «Знание» Москва 1988

ФИЛОНОВИЧ Сергей Ростиславович — кандидат физико-математических наук, специалист в области квантовой радиофизики и истории науки.

Рецензент: **Болотовский Б. М.** — доктор физико-математических наук.

Редактор **КУТУЗОВА К. А.**

Филонович С. Р.

Ф53 Кавендиш, Кулон и электростатика. — М.: Знание, 1988. — 64 с. (Новое в жизни, науке, технике. Сер. «Физика»; № 8).

11 к.

В брошюре рассказывается об истории установления основного закона электростатики (закона Кулона). Рассмотрены особенности методов физического эксперимента на разных этапах его развития. Описаны современные опыты по проверке закона Кулона, связанные с проблемой массы покоя фотона.

Брошюра рассчитана на широкий круг читателей.

1604050000

ББК 22.33

ВВЕДЕНИЕ

Роль эксперимента в научном познании общепризнанна: изложение любой физической теории начинается с формулировки постулатов, которые являются обобщением опытных фактов. Ясно, что до того, как будут сформулированы основные положения теории, наука в своем развитии должна пройти период накопления экспериментальных фактов. Как происходит этот сложный процесс? Каким образом ставятся эксперименты в тех областях науки, где не сформировалась еще система основных понятий? Эти вопросы относятся к истории физического эксперимента — одного из наименее разработанных разделов истории физики. Их анализ может принести пользу и будущим исследователям — не исключено, что через некоторое время появятся не только новые физические теории, но и целые разделы физической науки.

История исследований в области электростатики позволяет, хотя бы частично, осмыслить поставленные выше вопросы. Как цепочка опытов, начавшаяся с наблюдения притяжения легких предметов натертым янтарем, привела к формированию понятия электрического заряда? Каким образом ученые перешли от грубо качественных опытов к количественным экспериментам? Как в эту область, новую для физики второй половины XVII—XVIII вв., были введены метрические соотношения? Так можно переформулировать общие вопросы применительно к электростатике. Поиски ответов на эти вопросы позволяют коснуться и других проблем истории физического эксперимента: проследить за формированием методов физических измерений, установить взаимосвязь опытов, относящихся к различным областям физики, понять, как в разное время физики-экспериментаторы относились к оценке точности проведенных ими измерений и анализу полученных результатов.

Мы коснемся лишь некоторых из перечисленных выше вопросов. Наше обсуждение будет концентрироваться вокруг исследований двух выдающихся естествоиспытателей

телей второй половины XVIII — начала XIX в. — Генри Кавендиша и Шарля Кулона. Выбор этот не случаен. Можно указать несколько причин, по которым анализ работ именно этих ученых представляет особый интерес.

Кавендиш и Кулон — современники, почти ровесники, поэтому сравнение использовавшихся ими приборов, методов и т. д. не требует поправок, неизбежных при анализе работ ученых, деятельность которых относится к разным эпохам.

При знакомстве с работами Кулона и Кавендиша невольно обращаешь внимание на то, что при исследовании некоторых научных вопросов они шли как бы параллельным курсом, используя для решения одних и тех же задач различные методы. Однако нельзя сказать, что научные интересы ученых полностью перекрывались: Кавендиш, например, был известен в научных кругах как выдающийся химик, а с именем Кулона связан ряд открытий в области механики. Интересно сопоставить стиль и условия научного творчества Кавендиша, принадлежавшего к одному из самых знатных семейств Англии и занимавшегося наукой в «башне из слоновой кости», и военного инженера Кулона, для которого экспериментальная физика многие годы была далеко не основным занятием.

Итак, Кавендиш, Кулон и электростатика. Начнем с предыстории.

РОЖДЕНИЕ НАУКИ ОБ ЭЛЕКТРИЧЕСТВЕ

Свойство натертого янтаря притягивать легкие предметы было известно еще древнегреческим ученым. Однако в течение многих веков явление электростатического притяжения не было тщательно исследовано. Одной из первых работ, где вопрос о притяжении наэлектризованных тел обсуждался достаточно подробно, была вышедшая в свет в 1600 г. знаменитая книга английского врача Уильяма Гильберта «О магните, магнитных телах и о большом магните — Земле; Новая физиология, доказанная множеством аргументов и опытов». В ней были описаны новые опыты с электричеством и даже предложен первый электрический прибор — стрелка на острие (рис. 1). — прототип электроскопа. Гильберт писал: «Для того, чтобы иметь возможность узнать на ос-

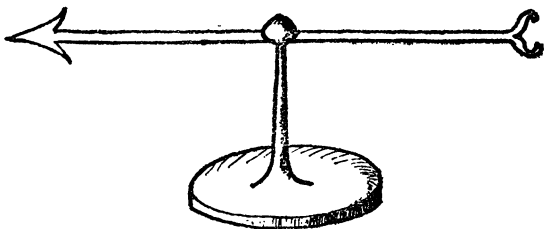


Рис. 1. Металлическая стрелка на острие — первый электрический прибор, предложенный У. Гильбертом

новании ясного опыта, каким образом происходит такое (электрическое. — С. Ф.) притяжение и каковы материи, притягивающие таким образом другие тела (к некоторым из них тела склоняются, но они не поднимают этих тел, по-видимому, вследствие своей слабости, зато тела легче поворачиваются), сделай себе из любого металла стрелку длиной в три или четыре дюйма, достаточно подвижную на своей игле, наподобие магнитного указателя. К одному концу ее приложи янтарь или блестящий и гладкий камешек, слегка потерев его: стрелка немедленно поворачивается».

Следует, правда, отметить, что в отличие от упоминаемого Гильбертом магнитного указателя, который в магнитном поле Земли имеет устойчивое положение равновесия, электрический указатель находился в состоянии безразличного равновесия и поэтому не мог использоваться также для примитивных измерений.

Опыты Гильберта не привели, конечно, к коренному изменению представлений об электричестве и его проявлениях. Причина этого ясна: пока электризация тел могла производиться лишь посредством натирания стеклянной палочки шерстью, вряд ли можно было ожидать получения каких-либо принципиально новых результатов. Понятно поэтому, какое оживление в электрические исследования внесло изобретение О. Герике первой электростатической машины (1660 г.), которая позволила значительно упростить наблюдение электрических явлений.

Машина Герике представляла собой шар из серы, насаженный на горизонтальную ось (рис. 2). С ее помощью можно было создать значительную электризацию: для этого экспериментатор должен был касаться рукой вращающегося шара. До изобретения Герике иссле-



Рис. 2. Электрическая машина О. Герике

дования в области электричества находились в тени опытов по магнетизму, обладавших важным преимуществом — их было гораздо проще воспроизводить. Электростатическая машина сделала и электрические опыты надежно воспроизводимыми.

Новые наблюдения не заставили себя долго ждать. Английский ученый Ф. Гауксби, усовершенствовавший электростатическую машину, провел опыты по электризации тел в разреженном воздухе и обнаружил, что вокруг наэлектризованных тел возникает свечение. Он же впервые наблюдал явление, получившее название «электрический ветер». В 1729 г. англичанин С. Грей, исследуя «передачу электричества», открыл явление электропроводности.

Заслуги этих ученых несомненны. Следует, однако, помнить, что выделение существенных результатов, полученных Гауксби и Греем, из массы второстепенных наблюдений происходило постепенно, по мере развития науки об электричестве. Сами же экспериментаторы начала XVIII в. далеко не всегда улавливали, что в их опытах главное.

Первая половина XVIII в. — это период не только накопления экспериментальных фактов, относящихся к электричеству, но и поиска адекватных понятий для опи-

сания проводимых опытов. Этот этап представляется одним из важнейших в становлении любого раздела физики. Действительно в XX в. даже открытие такого принципиально нового (квантового) явления, как, например, сверхпроводимость, могло быть строго описано с помощью классических понятий (ток, сопротивление, магнитный поток и т. д.), хотя объяснение этому явлению в рамках классической физики дано быть не может. В начале формирования какой-либо области науки такое описание невозможно, поскольку отсутствует адекватная, специфическая для данной области терминология. При этом чем дальше мы уходим в глубь веков, тем острее становится указанная проблема. Вспомним хотя бы историю механики от Аристотеля до Галилея и Ньютона: в определенном смысле это история поисков системы понятий для описания движения тел. Эта система была построена лишь в конце XVII столетия, после чего механика стала эталоном научной дисциплины. Как мы увидим в дальнейшем, именно установление связи между механическими и специфическими электрическими понятиями позволило перейти от качественных исследований в области электричества к исследованиям количественным.

Однако вернемся к экспериментам первой половины XVIII в. К этому времени относится постановка и реализация первой исследовательской программы по электричеству. Ее автором был французский физик Шарль Дюфэ, обратившийся к электрическим опытам под влиянием работ С. Грея. В течение двух лет (1733—1734 гг.) Дюфэ опубликовал шесть мемуаров, каждый из которых был посвящен рассмотрению одного из вопросов, относящихся к электричеству, предварительно сформулированных ученым. В целом эти вопросы образуют исследовательскую программу Дюфэ.

«1. Могут ли все тела стать электрическими сами по себе; если в некоторых из них нельзя возбудить эту силу, то не потому ли, что они не восприимчивы к соответственному трению; является ли, наконец, электричество общим свойством для всех веществ?

2. Вся ли материя способна приобретать эту силу непосредственным ли прикосновением к веревке или любому другому непрерывному телу или же простым приближением электрического тела?

3. Какие тела могут остановить или способствовать

передаче этой силы, совершается ли она по веревке, по палке или при приближении трубки и какие тела лучше всего притягиваются электричеством?

4. Что общего между силой притяжения и силой отталкивания, связаны ли они друг с другом или независимы друг от друга?

5. При каких условиях увеличивается или уменьшается сила электричества, т. е. как влияет на нее пустота, сжатый воздух, температура и т. д.?

6. Какое отношение существует между электричеством и способностью излучать свет, присущей большей части электрических тел, и что можно вывести из этого отношения?»

Эти вопросы прекрасно иллюстрируют характер и уровень экспериментирования в области электричества в описываемую эпоху. С одной стороны, Дюфэ удалось правильно уловить многие ключевые проблемы науки об электричестве. С другой стороны, бросается в глаза сугубо качественная постановка вопросов и их общий, несколько неопределенный характер. Получение развернутых ответов (т. е. реализация программы), казалось бы, могло пролить свет на природу и свойства электричества. Однако этого не произошло. Дело в том, что обобщенность вопросов Дюфэ непосредственно связана с неопределенностью экспериментальных методов, необходимых для их исследования. Эта неопределенность наложила отпечаток и на выводы, к которым пришел Дюфэ. Например, на первый вопрос он дает такой ответ:

«Все имеющиеся в природе тела воспринимают электричество¹ за исключением металлов, а также веществ, не поддающихся трению, вследствие своей консистенции».

Среди выводов Дюфэ встречаются весьма общие, но даны они в очень конкретной форме:

«Вещества по природе электрические (т. е. диэлектрики. — С. Ф.), помещенные между [электрической] трубкой и листочками фольги или другими легкими телами, пропускают электрические истечения, а все остальные тела их прерывают».

¹ С современной точки зрения «воспринимать электричество» означает «электризоваться трением». Именно поэтому в XVIII в. электрическими телами называли диэлектрики, которые относительно легко поддаются такого рода электризации (см. ниже).

Как показала история, важнейший вывод Дюфэ состоял в том, что «существуют два рода электричества, отличных друг от друга, а именно стеклянное и смоляное, из которых одно притягивает тела, отталкиваемые другим». Значение этого открытия, однако, принажалось соседством с таким, например, заключением: «Сжатый воздух внутри трубки, так же как и разреженный, мешает, по-видимому, внешним проявлениям электричества». Среди выводов, сделанных ученым на основе анализа многочисленных опытов, встречаются и другие неточные и даже ошибочные заключения.

Анализ работ Дюфэ и других исследователей приводит к выводу о том, что «неупорядоченность», случайность опытов по электричеству первой половины XVIII в. и грубо качественный характер большинства из них были обусловлены одной причиной: отсутствием сформированной системы понятий в данной области физики.

Переход к принципиально новому этапу исследований стал возможен лишь после создания сколь-нибудь последовательной теории электрических явлений. Такая теория была впервые сформулирована Б. Франклином в 1750 г. Ее постулаты сводятся к следующему:

«1. Электрическая субстанция состоит из чрезвычайно малых частиц...

3. Электрическая субстанция отличается от обыкновенной материи в том отношении, что частицы последней взаимно притягиваются, а частицы первой отталкиваются друг от друга...

4. И хотя частицы электрической субстанции взаимно отталкивают друг друга, они сильно притягиваются всей прочей материей».

Из этих постулатов видно, что Франклин не принял выводов Дюфэ и разработал унитарную теорию: электризация тела зарядом одного знака соответствовала в этой теории превышению количества электрической субстанции над равновесным, а электризация зарядом противоположного знака — недостатку электрической субстанции. Идеи Франклина получили широкое распространение. Однако хотя ученому удалось успешно объяснить многие электрические явления, его теория имела существенный дефект — она была чисто качественной.

Подход Франклина к анализу электрических явлений был развит петербургским академиком Ф. У. Т. Эпинусом в работе «Опыт теории электричества и магнетиз-

ма» (1759 г.). Однако и Эпинусу не удалось придать теории количественный характер. В «Предисловии» к указанной работе он писал:

«Я ввел в эту книгу несколько алгебраических выкладок, правда кратких и нетрудных, частью принужденный к тому самой природой предмета, частью, как я указываю на это в самой книге, чтобы избежать многословия обычной речи. Я уверен, что это не вызовет недовольства ни с чьей стороны».

И все же в работе Эпинуса имеется одно важное новшество: в ней обсуждается количественная характеристика электрического отталкивания и притяжения — сила. Эпинус обсуждал и вопрос о функциональной зависимости этой силы от расстояния:

«...определить эти функциональные зависимости я пока что не решаюсь. Впрочем, если бы понадобилось произвести выбор между различными функциями, то я охотно утверждал бы, что эти величины изменяются обратно пропорционально квадратам расстояний. Это можно предположить с некоторым правдоподобием, ибо в пользу такой зависимости, по-видимому, говорит аналогия с другими явлениями природы».

Приведенный отрывок, конечно, не дает оснований называть Эпинуса автором закона «обратных квадратов». На страницах его трактата встречаются и примеры, в которых сила обратно пропорциональна первой степени расстояния. Кроме того, Эпинус ошибочно утверждал, что проводящие тела равномерно заряжены по объему и сила взаимодействия пропорциональна объемной плотности заряда. Это утверждение не согласуется с законом «обратных квадратов», о чем знал еще Ньютон.

Использование Эпинусом аналогии при формировании гипотезы о функциональной зависимости сил электрического взаимодействия имеет очевидное объяснение. Успехи небесной механики, основанной на законе всемирного тяготения, демонстрировали плодотворность ньютоновского метода анализа физических явлений. Кроме того, особенности зависимости

$$F \sim R^{-2}, \quad (1)$$

где F — сила, действующая между взаимодействующими объектами, а R — расстояние между ними, были относительно хорошо изучены. Поэтому почти все попытки

экспериментального исследования электрических сил сводились, по существу, к проверке соотношения (1). Однако правильная догадка о виде того или иного физического закона в экспериментальной физике еще не гарантирует успеха. История изучения электричества лишь раз подтвердила эту очевидную истину.

ПЕРВЫЕ ПОПЫТКИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ОБОСНОВАНИЯ ЗАКОНА «ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СИЛЫ»

Первые опыты по определению зависимости $F(R)$ для электрических взаимодействий относятся к середине XVIII в. Одним из первых попытку найти эту зависимость в 1746 г. предпринял немецкий ученый К. Кратценштейн, измеривший силу, действовавшую между стеклянным шаром электрической машины и диском, подвешенным на стальной проволоке. По утверждению Кратценштейна, в пределах экспериментальной ошибки (которая в одном из приведенных им случаев составляла 245%!) сила уменьшилась обратно пропорционально расстоянию между диском и поверхностью шара. Признание работа Кратценштейна не получила, несмотря на поддержку таких авторитетных ученых, как И. Ламберт и Л. Эйлер.

На первом этапе количественных исследований по электричеству отсутствовало ясное понимание различия между пондеромоторными силами, действующими между макроскопическими заряженными телами, и силами, действующими между «элементарными» зарядами. Это обстоятельство в ряде случаев привело к неправильной интерпретации экспериментальных результатов. Примером могут служить опыты Д. Бернулли, проведенные им около 1750 г., результаты которых были опубликованы его учеником А. Сосеном.

Бернулли воспользовался устройством, которое было предложено в 1749 г. французскими физиками д'Арси и Ле-Руа и получило название гидростатического электрометра. В сосуде с водой плавало чечевицеобразное тело (рис. 3), которое в верхней части заканчивалось калиброванной стеклянной трубкой. На этой трубке крепился диск из проводящего материала. На крюке в нижней части тела можно было подвешивать грузы разной

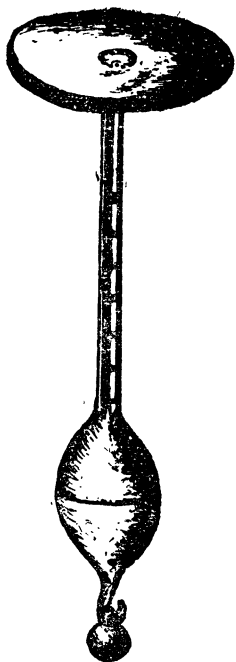


Рис. 3. Прибор Д. Бернулли

массы. Измерения проводились следующим образом. На некотором расстоянии x над диском на трубке закреплялся другой проводящий диск того же диаметра, соединявшийся проводником с электростатической машиной на все время проведения опыта. Верхней пластине сообщался некоторый заряд. Вследствие электростатической индукции на нижней пластине наводился заряд противоположного знака. После этого экспериментатор определял, перегрузок какой массы следует подвесить на крюк в нижней части тела для того, чтобы расстояние между пластинами осталось равным x . Затем опыт проводился при другом значении x . На основе полученных результатов Бернулли пришел к выводу, что сила электростатического взаимодействия убывает обратно пропорционально квадрату расстояния. Ясно, однако, что опыты Бернулли не имеют непосредственного отношения к закону Кулона: здесь в ходе опыта при изменении x сохранялась постоянная разность потенциалов между пластинами, при этом заряд на них, естественно, менялся.

Если приближенно рассматривать устройство Бернулли как плоский конденсатор, то пондеромоторная сила, действующая между пластинами $F \sim q^2$, где q — заряд на пластинах. В свою очередь, при постоянстве напряжения на пластинах $q \sim x^{-1}$ и, следовательно, $F \sim x^{-2}$. Таким образом, полученный результат лишь внешне сходен с законом Кулона; при изменении формы взаимодействующих тел зависимость силы от расстояния между ними может быть иной. Следует отметить, что много лет спустя (в 1787 г.) подобные опыты проводил выдающийся итальянский физик А. Вольта, который получил сходные результаты. Он, однако, не рассматривал их как универсальные и фундаментальные, поскольку знал о зависимости силы взаимодействия от формы тел. Вольта обратил внимание и на различия в результатах измерений сил притяжения и отталкивания, полученных с помощью гидростатического электрометра.

Не слишком критичное отношение современников к результатам измерения электрических сил во многом объясняется тем, что, как отмечал Вольта в одном из писем, многие исследователи заранее придерживались мнения, что «электрическое действие обратно пропорционально квадрату расстояния».

Решение проблемы установления «закона электрической силы» состояло в том, чтобы найти экспериментальную ситуацию, в которой пондеромоторные силы совпадали бы с силами, действующими между элементарными зарядами.

Правильный подход к этой проблеме был найден независимо от Кулона и, вероятно, раньше него английским естествоиспытателем Дж. Робайсоном.

Экспериментальный метод, использованный Робайсоном, основывался на идее о том, что взаимодействующие заряды можно считать точечными, если размеры сфер, на которых они локализованы, много меньше расстояния между центрами сфер. Установка, с помощью которой Робайсон проводил измерения, подробно описана в его фундаментальном труде «Система механической философии», изданном уже после его смерти, в 1822 г., известным шотландским физиком Д. Брюстером. Общий вид этой установки показан на рис. 4. Здесь A — латунный шарик, а B и D — позолоченные пробковые шарики диаметром 6,4 мм, BD — жесткая, навошенная шелковая нить, которая может свободно поворачиваться в янтаре-

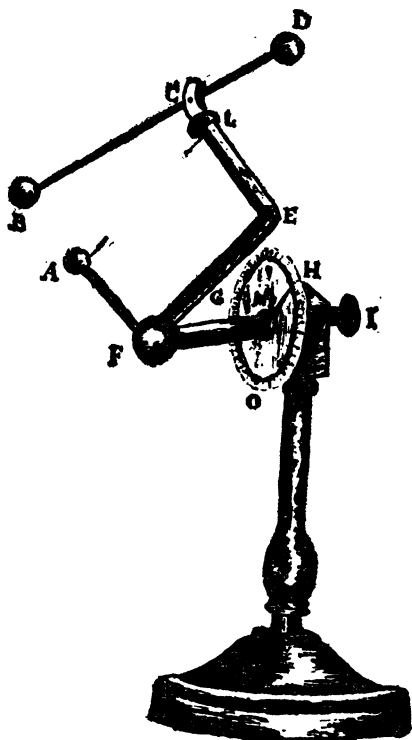


Рис. 4. Установка Дж. Робайсона

ных щеках C ; $AFEL$ — стеклянный стержень; NH — указатель, с помощью которого измерялось отклонение линии LA от горизонта (α) и нити BD — от вертикали (β).

Процедура измерений состояла в следующем. Первоначально стержень $AFEL$ располагался так, что линия AL была горизонтальной. Затем шарам A и B сообщался электрический заряд одного знака; при этом, однако, сила электрического отталкивания была недостаточно велика, чтобы они разошлись. С помощью рукоятки I стержень $AFEL$ поворачивался на угол α , и шарики расходились. Измеряя β и зная α и геометрические размеры установки, а также массу шариков B и D , нетрудно проверить, связаны ли углы α и β так, как если бы сила электростатического отталкивания была обратно пропорциональна квадрату расстояния AB . Аналогично можно было исследовать силу притяжения; для этого

линия AF должна была располагаться ниже горизонтали.

Робайсон писал, что проделал много сотен измерений, которые согласовывались между собой, «превосходя ожидания», и показал, что две заряженные сферы отталкиваются друг от друга обратно пропорционально расстоянию в степени 2,06. Учитывая погрешности измерений, Робайсон пришел к выводу, что «действие между сферами в точности пропорционально обратному квадрату расстояния между их центрами».

Причина, по которой основной закон электростатики не носит имя Робайсона, состоит в том, что о полученных результатах ученый сообщил, как уже отмечалось, лишь в 1801 г. Его утверждение, что об опытах по измерению электрических сил он публично докладывал еще в 1769 г., некоторые историки науки расценивают как ошибку памяти: в то время он еще не был знаком с Эпинусом, а по утверждению самого Робайсона, именно общение с этим петербургским академиком стимулировало его электрические исследования.

Судьба работ Робайсона по электричеству до некоторой степени напоминает судьбу работ по исследованию тепловых явлений его учителя — Блэка. В обоих случаях результаты не были опубликованы сразу после проведения опытов; правда, Блэк рассказывал о своих экспериментах на лекциях, поэтому о его работах коллеги-физики все же имели некоторую информацию, об опытах же Робайсона до 1801 г. не было известно вовсе. В случае Робайсона отсутствие публикаций можно отчасти объяснить приступами меланхолии и неуверенности в своих силах, которым, как следует из его переписки, он был подвержен. Так или иначе его исследования не оказали какого-либо воздействия на прогресс науки об электричестве, хотя описанные Робайсоном опыты и представляют значительный интерес для истории развития количественных методов в физике.

«НУЛЕВЫЕ» МЕТОДЫ И ОСНОВНОЙ ЗАКОН ЭЛЕКТРОСТАТИКИ

Наряду с опытами по непосредственному измерению силы электростатического взаимодействия с середины XVIII в. проводились эксперименты, с помощью которых

ученые пытались определить зависимость $F(R)$, не измеряя самой силы.

Так, в 1773 г. вышла в свет книга английского аристократа, интересовавшегося наукой, Ч. Стэнхоупа «Принципы электричества», в которой автор сообщал об установлении закона «обратных квадратов» с помощью оригинальной методики, которая состояла в определении положения на поверхности проводящего цилиндра линии, которая характеризовалась нулевой поверхностной плотностью заряда в условиях, когда весь цилиндр находился в поле заряженного шара. Стэнхоуп утверждал, что ему удалось подтвердить соотношение (1) с точностью до 1%. Однако рассуждение, посредством которого Стэнхоуп пытался обосновать свой метод, по существу, не связано с постулатами, лежащими в основе его теории электричества. Это с современной точки зрения обесценивает результаты, полученные английским ученым. И хотя в XVIII — начале XIX в. заслуги Стэнхоупа в исследовании электричества признавались многими учеными, его претензии на подтверждение соотношения (1) сомнительны.

Метод, примененный Стэнхоупом, довольно сложен. Не удивительно поэтому, что успех на этом направлении электрических исследований был достигнут при использовании гораздо более простого с точки зрения теории метода.

Еще со времен Ньютона было известно, что тело, помещенное внутрь сферической оболочки, не испытывает со стороны этой оболочки гравитационного воздействия. Этот вывод непосредственно основывался на зависимости (1) для сил тяготения. Аналогия между действием сил тяготения и электричества указывала на возможность проверки соотношения (1) для электрических сил с помощью «нулевого» метода.

Некоторые исследователи утверждают, что важную роль в развитии «нулевого» метода и установлении закона «обратных квадратов» сыграл английский естествоиспытатель Дж. Пристли. Это утверждение требует уточнения. Обратимся для этого к фактам.

В 1755 г. Б. Франклин в одном из писем описал эксперимент, результаты которого он объяснить не мог.

«...Поставив серебряную коробку объемом в одну пинту на электрическую скамью, я наэлектризовал ее и затем опустил в нее на шелковой нити шарик из проб-

ки, диаметром приблизительно в один дюйм, до самого дна коробки. Внутренняя поверхность коробки не стала притягивать пробковый шарик, как это происходит в случае наружной ее поверхности, и хотя шарик дотронулся до дна коробки, все же когда его вытянули из коробки, оказалось, что при этом касании он не наэлектризовался, как это бывает при соприкосновении с наружной поверхностью коробки. Факт этот представляется мне совершенно необычным. Вы спрашиваете о причинах — мне они не известны».

Позднее Франклин познакомился с начинающим естествоиспытателем Дж. Пристли и посоветовал ему заняться исследованиями по электричеству. Итогом работы Пристли в этой области стало сочинение «История и современное состояние электричества с оригинальными опытами», впервые опубликованное в 1767 г. Эта книга заканчивается описанием опытов самого Пристли, которые, по его словам, были проведены по совету Франклина.

«...Я наэлектризовал оловянный кубок объемом в одну кварту, стоявший на табурете из высушенного дерева (рис. 5. — С. Ф.); я наблюдал, что пара пробковых шариков, которые были изолированы, поскольку подвешивались на стеклянной палочке и висели внутри сосуда так, что ни малейшая часть нитей не выступала над его горловиной, оставалась именно в том месте, в какое была помещена, ни в малейшей степени не испытывая воздействия электричества; однако, если палец или любое проводящее вещество, соединенное с землей, касалось шариков или даже просто подносилось к ним, когда они находились вблизи горловины сосуда, они немедленно разделялись, испытывая притяжение в стороны; так же они вели себя при вытягивании вверх в тот момент, когда нити выступали над горловиной сосуда».

Далее Пристли описывает различные модификации этого опыта и затем делает вывод:

«Можно ли не заключить из этого эксперимента, что притяжение электричества подчиняется тем же законам, что и тяготение, и поэтому меняется соответственно квадратам расстояний; поскольку легко показать, что если бы Земля имела форму оболочки, то тело, находящееся внутри нее, не притягивалось бы к одной стороне сильнее, чем к другой».

Пристли в отличие от Эпинуса подкрепил гипотезу,

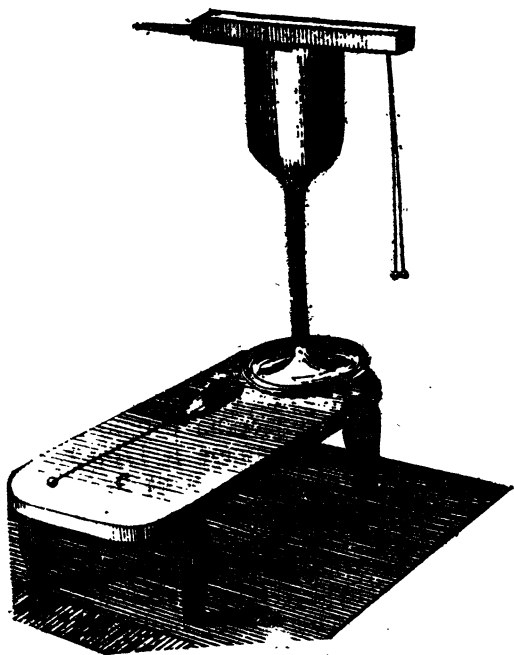


Рис. 5. Предметы, с которыми экспериментировал Дж. Пристли

высказанную по аналогии, опытом, хотя и довольно примитивным. Однако детали приведенного выше отрывка показывают, что аналогия, которой руководствовался Пристли, довольно грубая и что ученый довольствовался лишь поверхностным анализом сделанных им наблюдений.

Вызывает удивление, что в приведенном выше отрывке речь идет о «притяжении электричества». При чем здесь притяжение? Пристли опускал в кубок незаarged шарик; касаясь ими дна, он пытался обнаружить заряд на внутренней поверхности кубка. Отсутствие заряда на этой поверхности — результат действия сил отталкивания, существующих между зарядами, сообщенными кубку, а не притяжения, как пишет Пристли. Случайна ли эта оговорка? Скорее всего, нет. Пристли, по-видимому, не сознавал, что вывод о равенстве нулю силы, действующей на тело, помещенное внутрь сферической оболочки, справедлив и для сил отталкивания, подчиняющихся соотношению (1). Поэтому он использовал примитивную аналогию с гравитацион-

ными силами притяжения — отсюда и термин «притяжение электричества».

Пристли ни слова не говорит об особенностях в проявлении электрических сил, обусловленных тем, что «электрическая материя» может перемещаться внутри и по поверхности проводников. Пристли не обращает внимания и на тот факт, что в случае тяготения тело не испытывает притяжения внутри оболочки только в том случае, если оболочка сферическая, он же экспериментировал с кубком, форма которого существенно отличается от сферы.

Из этих замечаний следует, что выводы, сделанные Пристли из полученных им результатов, хотя и верны по существу, недостаточно обоснованы. Отметим также, что методика проведения опыта Пристли — грубо качественная, вследствие чего нельзя оценить, с какой точностью определен показатель степени расстояния в «законе электрической силы». Таким образом, Пристли вряд ли можно считать одним из авторов закона «обратных квадратов».

Пример опытов Пристли и Стэнхоупа показывает, что успех на пути установления основного закона электростатики с помощью «нулевого» метода мог быть достигнут лишь при тщательно разработанной методике измерений и детальном обосновании математического анализа их результатов. Нельзя сказать, что соблюдение этих требований было характерной чертой экспериментальной физики конца XVIII в. Не удивительно поэтому, что реализация «нулевого» метода оказалась связанной с именем ученого, чьи методы исследования в области физики и химии намного опередили свое время. Имя этого ученого — Генри Кавендиш.

ГЕНРИ КАВЕНДИШ: ЧЕЛОВЕК И УЧЕНЫЙ

В истории науки есть имена, неразрывно связанные с легендами. Это не удивительно. Воображение всегда стремится дорисовать образ выдающегося человека, если для его характеристики недостает фактов. Появлялось много легенд об ученых античности, средневековья, Возрождения. Но и в истории науки нового времени

встречаются исследователи, чье творчество остается загадкой для историков, науковедов, психологов.

К числу таких ученых, безусловно, относится и англичанин Генри Кавендиш. О его жизни известно мало. Больше — о его научном творчестве. Однако о многих открытиях Кавендиша научный мир узнал спустя много лет после смерти ученого: по неясным причинам он не сообщал о значительной части полученных им результатов. В 1879 г. Максвелл опубликовал «Электрические исследования достопочтенного Генри Кавендиша», и с тех пор интерес к личности и творчеству ученого не утихает. Благодаря множеству публикаций научно-популярного характера сформировался и стал почти общепринятым образ ученого-затворника, проводившего исследования лишь для собственного удовольствия, чудака, не интересовавшегося мнением своих коллег. Этот образ во многом противоречит достоверным фактам из жизни Кавендиша. Поэтому рассказ о нем лучше всего начать с сухих фактов.

Генри Кавендиш, сын сэра Чарльза Кавендиша и леди Анны (урожденной Грей), родился 10 октября 1731 г. в Нице, где по совету врачей жила в то время его мать. Семья Кавендишей относилась к знатному роду герцогов Девонширских. Отец Генри, сэр Чарльз, был членом Лондонского Королевского общества (ЛКО) — английской академии наук.

В 1749 г. Кавендиш поступил в знаменитый колледж Кембриджского университета Питерхаус. Он проучился положенный срок, однако не стал сдавать выпускные экзамены и по окончании университета не получил никакой ученой степени.

Первые шаги Кавендиша в науке были, по-видимому, стимулированы отцом, который в середине 50-х годов XVIII в. активно занимался метеорологией. Не удивительно поэтому, что Генри увлекся изучением тепловых явлений. Работы Кавендиша по теплоте продолжались с перерывами более тридцати лет. Своими калориметрическими опытами Кавендиш доказал, что в одинаковых условиях каждое вещество по-своему ведет себя по отношению к нагреванию. Этим выводом Кавендиш, по существу, предвосхитил введение такого понятия, как удельная теплоемкость вещества. С помощью тонких и точных экспериментов Кавендишу удалось продемон-

стрировать существование скрытой теплоты плавления и парообразования.

Кавендиш исследовал тепловое расширение тел, а также влияние нагревания на ход химических процессов. Результаты своих исследований он опубликовал в ряде работ в журнале ЛКО «Философские записки».

Уже при публикации работ по теплоте Кавендиш столкнулся с приоритетными проблемами. Значительные результаты в этой области, во многом перекрывавшиеся с результатами Кавендиша, получил Дж. Блэк. Однако как уже отмечалось, Блэк не публиковал свои результаты, а сообщал о них на лекциях, которые читал сначала в университете Глазго, а затем в Эдинбургском университете. Поэтому крайне трудно судить о том, насколько широко была распространена информация о теплофизических исследованиях Блэка, и оценить степень влияния его результатов на работы Кавендиша очень сложно. Вероятнее всего большинство экспериментов по теплоте Кавендиш провел независимо от Блэка.

Столь же запутанным оказывается вопрос о приоритете Кавендиша в ряде химических открытий, хотя его авторитет как специалиста по химии газов, или, как ее называли в XVIII в., пневматической химии, был общепризнанным. Так, Кавендиш независимо от Д. Резерфорда в 1772 г. открыл азот, но опубликовал сообщение об этом позже, поэтому приоритет открытия принадлежит Резерфорду. Получили известность опыты Кавендиша по выделению «горючего воздуха» — водорода. В экспериментах с водородом отчетливо проявилось стремление Кавендиша внести в химические исследования элементы измерения. Ему удалось, например, определить, что плотность водорода по отношению к воздуху равна 0,09: современное значение этой величины при нормальных условиях — 0,07. Мастерство Кавендиша в проведении количественных химических опытов привело его к установлению состава воды — важнейшему открытию, которое послужило экспериментальным обоснованием кислородной теории, созданной несколько позже А. Лавуазье.

Краткий рассказ об исследованиях Кавендиша в области тепловых и химических явлений, кроме иллюстрации широты научных интересов ученого, имеет еще одну цель: убедить читателя в том, что Кавендиш не был ученым-одиночкой, работавшим вне русла основных

интересов науки того времени. Его работы знали и ценили. Однако обратимся вновь к фактам его биографии.

Генри Кавендиш был избран членом Лондонского Королевского общества в 1760 г., хотя первая его работа, посвященная определению состава воздуха, была опубликована в трудах Общества лишь в 1766 г. В принципе ученый принимал активное участие в деятельности высшего научного Общества Англии. На протяжении многих лет он работал в составе различных его комиссий, регулярно участвовал в традиционных еженедельных обедах в клубе Общества. Почему же человек, опубликовавший в наиболее авторитетном английском научном журнале 18 больших статей (многие из них впоследствии стали классическими), не обнародовал свои исследования по электричеству, которые могли бы составить целую эпоху в развитии этой области физики?

Этот вопрос требует анализа не только творчества Кавендиша, но и положения науки в Англии во второй половине XVIII в. в целом. Особенность английской науки того времени состояла прежде всего в «любительском» подходе к решению научных проблем. В отличие от таких стран, как, например, Франция или Россия, в Англии практически не было ученых-профессионалов, исследовательская деятельность которых обеспечивалась бы государством. Даже главное научное общество страны — Лондонское Королевское общество, игравшее роль английской академии наук, было общественной организацией. В силу этого в Англии сложились весьма специфические традиции оценки и признания научных работ. Если во Франции вопрос о значимости того или иного научного исследования решался, как правило, через Академию наук и соответствующее решение имело официальный характер, то в Англии главную роль в таких ситуациях играло общественное мнение. Таким образом, достижение английского ученого могло рассчитывать на признание на родине только в том случае, если по какой-либо причине оно могло привлечь к себе общественное внимание. Именно так обстояло дело с работой Кавендиша по определению средней плотности Земли, в которой фактически впервые была определена фундаментальная физическая константа — гравитационная постоянная. Опыты Кавендиша находились в русле исследований, проводившихся до него другими учеными, хотя и значительно более грубыми методами. В

то же время эксперименты по электричеству, видимо, по мнению Кавендиша, не могли рассчитывать на столь же внимательный прием английской научной общественности, поэтому он их не публиковал. Какие же особенности научного метода Кавендиша препятствовали их восприятию современниками? Для ответа на этот вопрос перечислим сначала проблемы из области электричества, которыми занимался Кавендиш.

В электростатике Кавендиш одним из первых использовал понятие емкости проводника (правда, такого термина он не применял). В качестве эталонной он выбрал емкость шара определенного радиуса, т. е. емкость у него имела размерность длины, как в современной системе единиц CGSE. Благодаря введению этого понятия Кавендиш раньше других ученых смог проводить количественные измерения в области электричества. Кавендишу принадлежит заслуга первого корректного подтверждения закона «обратных квадратов» для электростатических сил (об этой работе будет подробно рассказано ниже).

Еще при жизни Кавендиша получили известность его опыты с электрическими рыбами, следствием которых стало создание «искусственного» ската. В этих экспериментах ученый исследовал проводимость различных веществ и в значительной степени предвосхитил результаты Ома, полученные почти пятьдесят лет спустя. Новаторство Кавендиша в этой области становится еще более очевидным, если вспомнить, что открытие Гальвани, положившее начало изучению электрического тока, было сделано значительно позже.

Таким образом, Кавендиш в своих электрических исследованиях намного опередил время.

Научная деятельность Кавендиша резко контрастировала с господствовавшим тогда идеалом ученого-джентльмена, посвящающего любопытным опытам часы досуга. Одинокая фигура Кавендиша противостояла тенденции любительства в английской науке: он был полностью поглощен своими исследованиями. В своем лондонском доме ученый создал специальную лабораторию для проведения опытов по электричеству. Об устройстве этой лаборатории мы можем судить по описанию, данному Максвеллом в предисловии к собранию трудов Кавендиша. Это описание основывалось на анализе рукописей ученого и свидетельствах немногих со-

временников Кавендиша, которым, посчастливилось там побывать.

В лаборатор... была установлена большая электрическая машина со стеклянным шаром. То тут то там можно было заметить различные предметы «для проведения испытаний». Часть из них крепилась на изолирующих стеклянных стержнях, а часть подвешивалась на пеньковых веревках к горизонтальной балке, смонтированной на высоте более 2 м от пола. Наиболее заметным из этих предметов был шар диаметром около 30 см, покрытый оловянной фольгой. Он не только служил Кавендишу в качестве эталонной емкости, но и составил часть установки, на которой ученый доказал, что электрическое отталкивание изменяется обратно пропорционально квадрату расстояния.

На той же горизонтальной балке были укреплены блоки со свисавшими с них шелковыми нитями, с помощью которых экспериментатор мог в нужные моменты замыкать и размыкать контакты.

На лабораторных столах лежало множество разнообразных пластин из камня, олова, сланца, использовавшихся Кавендишем для проведения опытов. Основными электроизмерительными приборами служили электрометры, состоявшие из пары пробковых или бузиновых шариков, закрепленных на соломинках или льняных нитях.

Здесь же можно было заметить батареи конденсаторов удивительной для конца XVIII в. формы: каждый конденсатор представлял собой стеклянную пластинку с закрепленными с противоположных сторон кружками станиоля. Батареи были калиброваны: каждая следующая по величине батарея по емкости была примерно в 3 раза больше предыдущей.

Были в лаборатории и вспомогательные приборы, например делительная машина для определения толщины стеклянных пластинок и размеров других малых тел.

Итак, в своем доме Кавендиш создал специальную лабораторию для проведения разнообразных опытов по электричеству. Именно здесь были проведены серии экспериментов, в которых со всей возможной в те времена тщательностью был обоснован закон «обратных квадратов».

«ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАКОНА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СИЛЫ»

Известный английский физик и химик Х. Дэви, знавший Кавендиша лично, писал, что при конструировании приборов последний не придавал никакого значения их внешнему виду: его интересовала только эффективность данного устройства. Вся исследовательская деятельность ученого была подчинена стремлению к проведению опытов в возможно более «чистом» виде, т. е. чтобы на их результатах сказывалось как можно меньше побочных факторов. Эту характернейшую черту стиля Кавендиша можно проследить и в его работе, посвященной установлению основного закона электростатики, которая называется «Экспериментальное определение закона электрической силы»². Метод, использованный в ней Кавендишем, основан на свойстве сил, меняющихся обратно пропорционально квадрату расстояния, на которое ссылался Пристли. Однако нетрудно убедиться, насколько выше уровень экспериментов Кавендиша по сравнению с примитивными опытами Пристли.

Работа Кавендиша начинается с четкой постановки задачи:

«Целью следующего эксперимента был ответ на вопрос: когда полый шар электризуется, заряжается ли малый шар, вложенный в первый и соединенный с ним каким-либо проводником? Таким образом можно найти закон электрического притяжения и отталкивания».

Далее следует описание первого варианта экспериментальной установки, которая, однако, не полностью удовлетворяла Кавендиша. Он писал:

«Для большего удобства в проведении этих манипуляций я использовал такое устройство (рис. 6. — С. Ф.). В принципе оно сложнее, чем нужно, однако эксперимент этот был для меня настолько важен, что я хотел провести его предельно аккуратно.

ABCD и *AbcD* — две деревянные рамки одинаковых размеров и формы, связанные петлями в точках *A* и *D* так, что каждая рамка может двигаться вокруг гори-

² В двухтомном издании трудов Г. Кавендиша (1921 г.) в подстрочном примечании к этой работе указано, что характер оформления рукописи дает основание предположить, что она была подготовлена для публикации: описанные в ней эксперименты Кавендиш провел примерно в 1773 г.

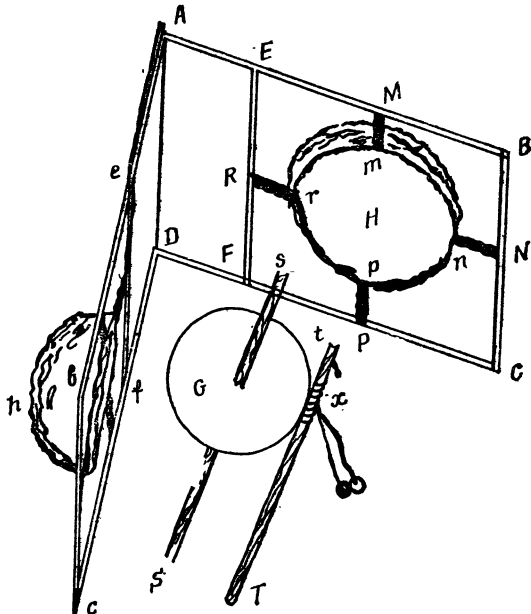


Рис. 6. Рисунок Г. Кавендиша со схемой его экспериментальной установки

горизонтальной оси AD : H — одна из полусфер, прикрепленная к рамке $ABCD$ с помощью четырех стеклянных стержней Mm , Nn , Pp и Rr , покрытых сургучом; h — другая полусфера, прикрепленная таким же образом к рамке $AbcD$; G — внутренний шар, закрепленный на горизонтальном стержне $Ss...$; Tt — стеклянная палочка, обернутая станиолом в точке x , которой предполагалось касаться шара G , и со станиоля свешиваются пробковые шарики... Внутренний шар и полусферы были покрыты станиолом для того, чтобы сделать их хорошими проводниками электричества».

Эксперимент начинался с того, что при помощи электрической машины заряжалась батарея конденсаторов, а затем уже от этой батареи заряжались наружные полусферы, соединенные проводником с шаром G . После этого последовательно производились следующие действия: удалялся провод, использовавшийся для электризации полусфер, вытаскивался проводник, соединявший полусферы и внутренний шар G , полусферы разъединя-

лись, и шара G касались палочкой Tt . Отметим, что использование специальной системы пружин (не показанных на рис. 6) позволяло до некоторой степени автоматизировать эксперимент: все перечисленные действия осуществлялись в результате одного движения руки экспериментатора. Кроме того, было предусмотрено, что электричество, находившееся на полусферах и проводе, посредством которого они заряжались, удалялось немедленно после разъединения полусфер; в противном случае действие этого электричества могло заставить пробковые шарики разойтись, даже если бы внутренний шар не был наэлектризован.

Описание установки Кавендиша показывает, насколько внимателен был ее создатель к деталям и возможным погрешностям эксперимента.

В работе Кавендиша необходимо отметить еще ряд моментов. Во-первых, при всех многочисленных повторениях опыта электризация полусфер производилась с помощью лейденской банки, заряженной «до одинаковой степени», что контролировалось специальным электрометром. Это обеспечивало воспроизводимость результатов опыта. Во-вторых, для повышения чувствительности метода Кавендиш использовал оригинальный прием, состоявший в предварительной электризации пробковых шариков. Его смысл таков. Допустим, что полусферы в опыте заряжаются положительно. Пусть сначала пробковые шарики тоже заряжаются положительно. После удаления полусфер и соприкосновения палочки Tt с внутренним шаром G расхождение шариков уменьшается, поскольку большую часть заряда они передают шару. То же будет происходить, если повторить опыт с тем только отличием, что шарики первоначально заряжаются отрицательно. Однако если на внутренний шар переходит хотя бы небольшая часть заряда полусфер, то конечное расхождение шариков в этих двух случаях будет различным: в первом случае оно будет больше³. Этот прием повышает точность метода, поскольку, как писал Кавендиш, «когда шарики уже получили достаточное для их расхождения количество электричества, ошутимое изменение их расхождения вызывается добав-

³ Это справедливо, конечно, если первоначальная электризация шариков по абсолютной величине одинакова. Кавендиш подчеркивал необходимость соблюдения этого условия.

лением количества [электрической] жидкости в несколько раз меньшего, чем то, которое необходимо для их первоначального разделения».

Наконец, важнейшей особенностью работы Кавендиша является проведение дополнительных экспериментов, позволяющих определить точность главного опыта. Для этого Кавендиш пользовался им же разработанной методикой сравнения емкостей различных проводников. С помощью этой методики он установил, что в его опыте может быть зарегистрирована передача внутреннему шару менее чем $\frac{1}{60}$ заряда внешних полусфер. Поскольку в действительности передача заряда не наблюдалась, то на основании соответствующих математических выкладок он сделал вывод:

«Таким образом, мы можем заключить, что электрическое притяжение и отталкивание должно быть обратно пропорционально расстоянию в степени, лежащей между $2 - \frac{1}{50}$ и $2 + \frac{1}{50}$, и нет оснований полагать, что закон отличается от закона обратных квадратов».

Таким образом, в отличие от Пристли Кавендиш пришел к выводу о справедливости закона «обратных квадратов» не на основании грубой аналогии с законом всемирного тяготения, а в результате проведения весьма точных количественных экспериментов. Особенно хочется подчеркнуть новаторство Кавендиша в оценке точности опытов. В этом его исследование превосходит работу Ш. Кулона, который не пытался оценить точность определения показателя степени расстояния.

Как уже отмечалось, описанные выше опыты Кавендиша не были известны современникам. Тем не менее для истории науки представляет интерес вопрос: если бы работа Кавендиша была опубликована, были бы поставлены опыты Кулона, т. е. не потеряли бы они свою актуальность? Анализ работ двух выдающихся экспериментаторов XVIII в. показывает, что даже в случае обнародования результатов, полученных Кавендишем, опыты по непосредственному измерению электрических сил, по-видимому, были бы проведены. В пользу этого вывода можно привести следующие соображения. Кавендиш в своих неопубликованных работах широко пользовался понятиями, которые в переводе на современный язык означают «потенциал» и «емкость».

Эти понятия, очевидно, не укладываются в строгие рамки механических представлений, распространенных

во второй половине XVIII в. Для их широкого внедрения необходимо было построение «мостика», связывающего эти собственно электрические понятия с понятиями механическими. Таким «мостиком» должны были стать опыты, с помощью которых электрические величины (например, заряд) определялись через привычные механические величины (расстояние, силу). «Нулевой» метод Кавендиша не позволял этого сделать, а в существенно более грубых опытах Кулона эта задача была решена. Кроме того, следует подчеркнуть, что опыты Кавендиша не исчерпали проблемы установления «закона электрической силы». В этих опытах, по существу, была определена зависимость от расстояния только сил отталкивания, определяющих распределение заряда по поверхности сферы. Распространение соотношения (1) на силы притяжения — это экстраполяция, которую следовало бы подтвердить прямыми опытами, что опять-таки было сделано Кулоном. Таким образом, для обоснования основного закона электростатики были использованы два дополняющих друг друга метода. Несколько позже мы коснемся вопроса о том, как эти методы были развиты впоследствии, а сейчас перейдем к рассказу о Ш. Кулоне, чьим именем назван закон взаимодействия точечных зарядов.

ШАРЛЬ КУЛОН — ВОЕННЫЙ ИНЖЕНЕР И УЧЕНЫЙ

Шарль Огюстен Кулон родился в Ангулеме в 1736 г. Его отец сначала служил в армии, а затем, уйдя в отставку, стал откупщиком. Хотя доходы семьи были невелики, Кулон получил неплохое начальное образование, посещая в Париже, куда переехала семья, коллеж Мазарини. Вследствие семейных неурядиц и нежелания подчиниться воле матери и стать медиком Кулон был вынужден переехать в Монпелье, где принимал участие в деятельности местного научного общества. Однако необходимость обрести профессию, которая позволила бы занять подобающее место в обществе, заставляет Кулона поступить в военно-инженерную школу в Мезьере — лучшую высшую техническую школу Европы того времени. Здесь он получил хорошую математическую подготовку и практические навыки, необходимые будущему инженеру-строителю.

В 1761 г. Кулон окончил училище и был направлен для прохождения службы в Брест — крупный торговый порт Франции. Однако служить на родине Кулону пришлось недолго — в феврале 1764 г. он направляется на остров Мартинику — французскую колонию в Вест-Индии. Там, в тяжелейших условиях он в течение восьми лет занимается строительством военных укреплений. Напряженная работа в непривычном для европейца тропическом климате подорвала здоровье Кулона, и хотя после возвращения на родину в 1772 г. он продолжал служить в армии, последствия работы в тропиках ощущались им постоянно. На Мартинике, несмотря на занятость на строительстве, Кулон часы своего досуга посвящал исследовательской деятельности.

Вскоре после окончательного возвращения на родину он представил в Парижскую Академию наук свой первый научный мемуар «О приложении правил максимумов и минимумов к некоторым проблемам статики, относящимся к архитектуре». Работа была высоко оценена в академии, и в 1774 г. Кулон был избран ее членом-корреспондентом. Нельзя сказать, что во Франции у Кулона высвобождается много времени для занятий интересующими его научно-техническими проблемами. Он служит сначала в Бушене, потом — в Шербуре, Рошфоре и Лилле. Лишь после того как его избрали действительным членом Парижской Академии наук (1781 г.), ему удалось добиться перевода в Париж, где он сразу оказывается в центре научной жизни.

Но и в столице, все еще находясь на военной службе, Кулон вынужден выполнять множество разнообразных поручений, часто весьма далеких от его научных интересов. Так, в 1783 г. он участвует в деятельности комиссии, занимавшейся вопросом о прокладке каналов в Бретани; на следующий год Кулон назначается на должность интенданта «вод и фонтанов короля» — в его обязанности входит совершенствование водоснабжения Парижа и устройство фонтанов; через некоторое время он становится одним из экспертов по реформе системы больниц Парижа; с 1786 г. ученый как «хранитель карт и рельефов» занимается проблемами геодезии и картографии; наконец, в 1788 г. Парижская Академия наук включает Кулона в состав комиссии по реформе системы мер и весов.

Широта деятельности Кулона удивительна. Кажется,

что в таких условиях невозможно вести какие-либо серьезные исследования, однако упорство в достижении поставленной цели позволяет Кулону одновременно с выполнением обязанностей военного инженера заниматься наукой. До переезда в Париж его исследовательские работы имеют главным образом прикладной характер. Их тематика дает представление о разнообразии интересов Кулона. Во время службы в Шербуре Кулон в связи с конкурсом, объявленным Парижской Академией наук, занимается изысканием наилучшего способа изготовления магнитных стрелок для компасов (в 1777 г. его работа получила премию академии). В Рошфоре им подготовлена получившая известность работа «Теория простых машин с учетом трения их частей и жесткости канатов». Примерно в это же время он исследует вопрос о проведении подводных гидравлических работ без применения откачки воды. В Лилле его интересует вопрос об оптимальной форме крыльев ветряных мельниц. По всем этим проблемам Кулон публикует статьи, многие из которых не раз впоследствии переиздавались.

Что же общего можно усмотреть во всех этих сколь многочисленных, столь и разнообразных работах Кулона? Во-первых, это глубокий интерес к инженерным (практическим) проблемам, с которыми ему приходилось сталкиваться. Особенность подхода Кулона к их решению состояла в том, что он ставил перед собой не отдельные, пусть и весьма важные, задачи, а старался путем серьезного исследования целого класса задач подняться до научных обобщений. Во-вторых, в своих технических изысканиях Кулон широко пользовался экспериментом. В-третьих, во всех исследованиях он стремился к нахождению количественных соотношений и законов. Все это резко выделяло исследования Кулона среди других работ в области инженерии второй половины XVIII в.

Из перечисленных работ Кулона мы должны выделить одну, которую можно считать первым шагом на пути к исследованиям электрических и магнитных сил, принесшим ученому широкую известность. Это работа 1776 г., годом позже получившая премию академии, посвященная созданию предельно чувствительного прибора, с помощью которого можно было бы регистрировать малейшие изменения магнитного поля Земли. Кулон предложил вместо иглы на опоре использовать магнит-

ную стрелку, подвешенную на длинной шелковой нити или тонком волосе. Такой подвес позволял избавиться от влияния трения в опоре (т. е., говоря современным языком, от явления застоя) и тем самым повысить чувствительность прибора. Система подвеса, предложенная Кулоном, была использована в Парижской обсерватории, где пытались исследовать суточные и вековые изменения магнитного поля Земли. При внедрении своего изобретения Кулон столкнулся с рядом трудностей, преодоление которых заставило его провести исследования, способствовавшие развитию различных областей физики. В частности, попытки уменьшить влияние сопротивления воздуха на показания прибора пробудили в Кулоне интерес к изучению явления вязкого трения. Итогом этих исследований стала работа «Эксперименты, посвященные определению силы сцепления жидкостей и законов их сопротивления при очень медленных движениях». Но она увидела свет только в далеком еще 1801 г. А непосредственно после установки своего подвеса в Парижской обсерватории (1780 г.) Кулон занялся другими проблемами.

При устройстве подвеса в обсерватории была использована шелковая нить, упругими свойствами которой можно было пренебречь при небольших углах поворота стрелки. Но каков закон кручения нити из более жесткого материала, например из металла? На этот вопрос Кулон пытался дать ответ еще в мемуаре 1776 г., но формула, предложенная им тогда, не выдержала экспериментальной проверки. Новые многочисленные и тщательно проведенные опыты, поставленные не в провинциальном Шербуре, а в столице, в несравненно лучших условиях позволили получить правильную формулу, связывающую момент силы M , закручивающий нить, угол закручивания φ , геометрические размеры нити (длину L и диаметр d):

$$M = \mu \frac{d^4}{L} \varphi \quad (2)$$

В этой формуле μ — это коэффициент, зависящий как от упругих свойств веществ (в современных терминах — от модуля сдвига), так и от формы поперечного сечения нити.

Кулон экспериментировал с нитями, изготовленными из различных веществ: стали, серебра, латуни — и оп-

ределял постоянную μ . О точности его опытов можно судить по такому примеру. Согласно данным Кулона для стальной проволоки $\mu = 7,6 \cdot 10^{11}$ дин/см³, в то время как современное значение этой постоянной $\mu = (7,5 \div \div 8,0) \cdot 10^{11}$ дин/см³. Кроме установления основного закона, Кулон обнаружил еще целый ряд фактов, характеризующих кручение тонких нитей. Он отметил, что линейная связь между M и φ существует только до определенных значений φ , причем предел упругости зависит от характера обработки нити. Им было обнаружено, что при большом натяжении нити ее свойства по отношению к кручению меняются. На основе проведенных исследований ученый пытался объяснить явление упругости, руководствуясь представлениями о молекулярном строении вещества.

Закончив работу по изучению кручения тонких металлических нитей, Кулон, как истинный инженер, задумывается о возможных применениях крутильного подвеса, но уже не такого, как в обсерватории, где упругостью нити можно пренебречь, а подвеса, в котором используются упругие свойства нити.

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ВЕСЫ КУЛОНА И ЕГО ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ЭЛЕКТРОСТАТИКЕ

Один из способов использования свойств крутильного подвеса пришел в голову Кулону, по-видимому, в связи с затруднениями, которые встретились при установке этого подвеса в обсерватории. Тогда после длительных поисков ученый обнаружил, что одно из возмущений, испытываемых стрелкой, объясняется явлением электростатической индукции: сравнительно небольшие электрические поля, возникающие, например, вокруг руки экспериментатора, приводят к перераспределению зарядов на металлической стрелке, вследствие чего она отклоняется. Этот факт мог подтолкнуть Кулона к созданию его знаменитых электрических весов.

О том, что создание этих весов рассматривалось Кулоном прежде всего как демонстрация возможностей изобретенного им метода измерения малых сил, говорит название его первого мемуара, посвященного исследованию электрических взаимодействий: «Конструкция и применение электрических весов, основанных на свой-

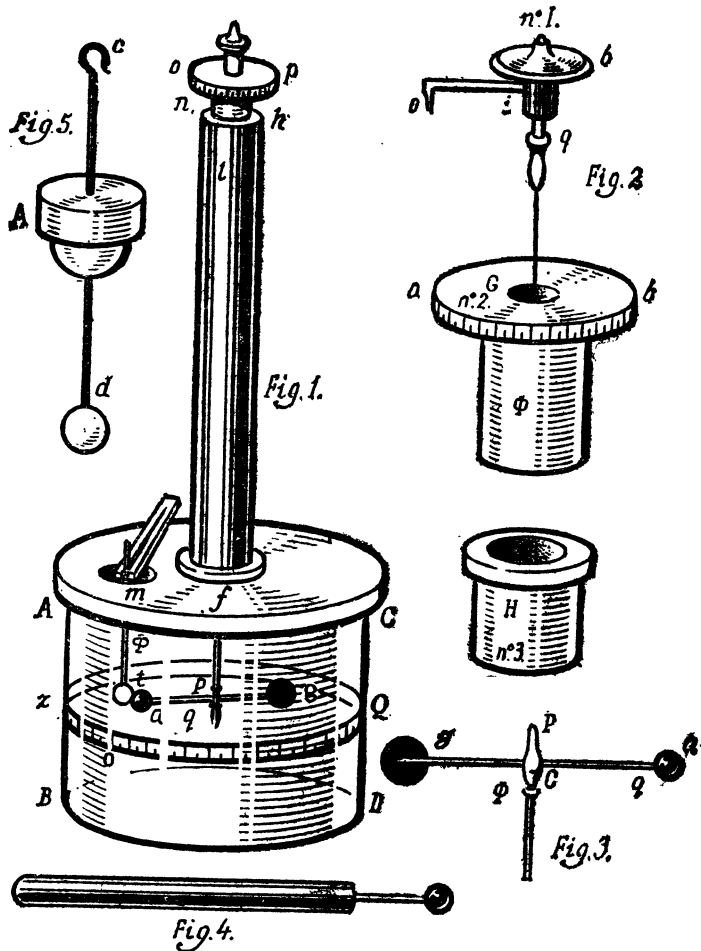


Рис. 7. Крутильные весы Ш. Кулона. Fig. 1 — общий вид; Fig. 2—3 — детали; Fig. 4—5 — дополнительные приспособления для проведения опытов

стве металлических проволок иметь силу кручения, пропорциональную углу кручения». Эта работа была опубликована в 1785 г.

Кулон начинает изложение с подробнейшего описания созданных им крутильных весов, представляющих

для своего времени шедевр экспериментального искусства. Их устройство показано на рис. 7⁴. Основная часть крутильных весов — тонкая серебряная нить длиной 75,8 см помещалась внутри двух цилиндров (рис. 7.1): l и $ABCD$. Верхний конец нити закреплялся в специальном держателе q (рис. 7.2), соединенном с поворотной головкой b , на которой крепился указатель o . На вершине цилиндра l устанавливалась трубка Φ , на выступающем ребре которой были нанесены градусные деления. На нижнем конце нити с помощью специального захвата $PC\Phi$ (рис. 7.3) удерживался составной цилиндр-коромысло aqq , на одном конце которого располагался бузиновый шарик a (диаметром от 4,5 до 6 мм), а на другом — пропитанный скипидаром бумажный диск g , служивший противовесом шарика a и, по выражению Кулона, «замедлявший колебания». Часть цилиндра qg была изготовлена из шелковой нити, натертой испанским воском, а часть aq — из шеллака, служившего хорошим изолятором. Длина всего цилиндра составляла 21,7 см. Нижняя часть серебряной нити и цилиндр aqq располагались внутри стеклянного цилиндра $ABCD$ диаметром 32,5 см и такой же высоты, по окружности которого на уровне коромысла была наклеена шкала с градусными делениями (zQ). Через отверстие m (рис. 7.1) в цилиндр $ABCD$ вводился стержень Φ , нижняя часть которого изготовлялась из шеллака. На конце этого стержня находился бузиновый шарик t , равный по диаметру шарiku a .

Процедура измерений состояла в следующем. Закрепленный шарик t и шарик a располагались таким образом, что слегка касались друг друга. При этом шарик a находился против нулевого деления шкалы zQ , нить подвеса была не закручена, а указатель o стоял напротив нулевого деления шкалы Φ . После этого с помощью специального шарика, укрепленного на изолирующем стержне (рис. 7.4), шарикам t и a сообщался заряд. Поскольку шарики t и a были одного диаметра, то Кулон из соображений симметрии полагал, что заряд между

⁴ На рис. 7 воспроизводится факсимильное изображение весов Кулона. На рисунке изображены сами весы (Fig. 1) и их отдельные узлы (Fig. 2 и 3), а также специальные приспособления для проведения опытов (Fig. 4 и 5). Далее в тексте ссылки на отдельные части рис. 7 будут даваться с индексами, например, рис. 7 (Fig. 1) = рис. 7.1,

ними распределялся поровну. (Впрочем, в дальнейших рассуждениях Кулон этот факт нигде не использовал.) Возникшее вследствие зарядки отталкивание между шариками приводило к тому, что нить подвеса закручивалась на некоторый угол α_0 , который отсчитывался по шкале zQ . Затем с помощью головки b верхний конец нити закручивался на определенный угол β , контролируемый по шкале Φ , в сторону, противоположную повороту цилиндра aqg . Это, естественно, приводило к сближению шариков t и a . По шкале zQ отсчитывалось новое угловое положение цилиндра aqg — α . Затем головка b поворачивалась на больший угол, и отмечалось еще одно положение цилиндра aqg .

Поскольку угловое расстояние между шариками не превышало 40° , то Кулон считал, что линейное расстояние между ними пропорционально угловому. Будучи уверен в линейности измерительной системы весов, Кулон полагал, что сила взаимодействия между шариками при данном равновесном положении цилиндра aqg пропорциональна сумме $\alpha_0 + \beta$, где β — угол поворота головки b для данного равновесного положения α . В табл. 1 представлены результаты из первого мемуара Кулона. Согласно Кулону закон «обратных квадратов» выполняется, поскольку отношения $(\alpha_0 + \beta)/\alpha_0$ и $(\alpha_0/\alpha)^2$ оказываются практически равными; расхождение для случая 3 составляет 12%.

Т а б л и ц а 1

$\alpha,^\circ$	$\beta,^\circ$	$\alpha_0 + \beta,^\circ$	$(\alpha_0 + \beta)/\alpha_0$	$(\alpha_0/\alpha)^2$
36	0	36	1	1
18	126	144	4	4
8,5	567	575,5	16	17,9

В итоге Кулон формулирует «Фундаментальный закон электричества».

Сила отталкивания двух маленьких шариков, наэлектризованных электричеством одной природы (одного знака. — *С. Ф.*), обратно пропорциональна квадрату расстояния между центрами шариков».

Для истории эксперимента важны и «Замечания» Кулона, в которых обсуждаются детали опыта и влияние различных факторов на его результат. Ученый ука-

зал, что точность установки весов в начальное положение составляет $\Delta\alpha \cong 2 \div 3^\circ$, причем основной помехой для более точной установки весов является движение воздуха. Погрешность в 12% представляется лежащей в пределах точности измерений, поскольку $\Delta\alpha/\alpha_{\min} = 35\%$. Далее Кулон предупреждает, что, с одной стороны, цилиндр *agg* не должен быть слишком тяжелым, поскольку значительное натяжение нити влияет на ее свойства по отношению к кручению, а с другой — он не может быть сделан очень легким, так как в этом случае нить не будет прямой. Кулон отмечал также, что существует предельный угол закручивания нити, при превышении которого линейная связь между закручивающим моментом и углом нарушается.

В первом мемуаре Кулон не дал полного решения проблемы. Как и его предшественники, Пристли и Кавендиш, Кулон поначалу исследовал силу отталкивания и лишь затем перешел к изучению притяжения. Для этого ему пришлось изменить методику измерений. Причина отказа Кулона от уже проверенной методики связана с тем, что в ходе опыта не удавалось избежать касания разноименно заряженных шариков: поворот головки *b* для изменения равновесного расстояния между шариками приводит к возникновению колебаний, в ходе которых и происходит касание, даже если равновесное расстояние между шариками достаточно велико.

Способ исследования сил притяжения, предложенный Кулоном и описанный им в следующем мемуаре (1785 г.), сводится к измерению периода колебаний цилиндра *lcg* (рис. 8), на одном конце которого закреплен заряженный диск из позолоченной бумаги *l*. Колебания возникали под действием на заряд диска электрического поля, создававшегося зарядом противоположного знака, который находился на медном шаре *G*. Этот шар располагался на изолирующих опорах так, что его горизонтальный диаметр оказывался на одном уровне с центром диска. Расстояние между диском *l* и шаром *G* регулировалось путем перемещения муфты *V* вдоль коңсоли *o*. Цилиндр подвешивался на шелковой нити длиной 1,8 см, столь тонкой, что при небольших амплитудах колебаний крутильным моментом нити можно пренебречь. Таким образом, Кулон очень тонко использовал знание упругих свойств нитей относительно кручения: первый метод основан на использовании этих свойств,

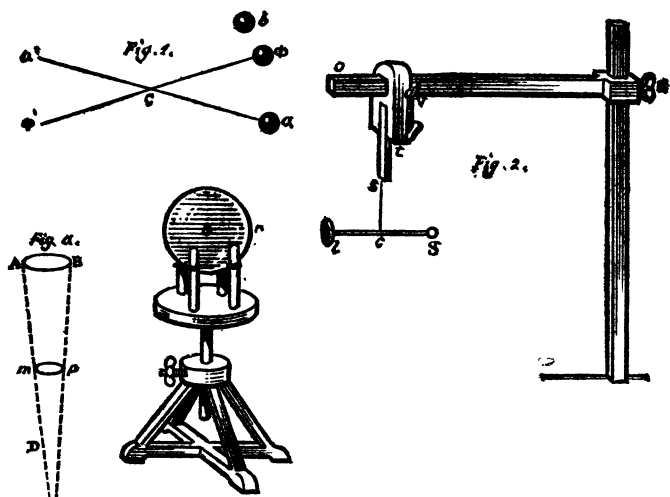


Рис. 8. Установка III. Кулона для исследования сил электрического притяжения

а второй — на возможности пренебречь упругостью нити.

Кулон проводил измерения для трех расстояний между центрами шара и диска: 24,36; 48,72 и 64,97 см. Полученные им результаты представлены в табл. 2.

Таблица 2

d , см	Длительность 7,5 колебаний, с	d/d_0	T/T
24,36	20	1	1
48,72	40	2	2
64,97	60	2,67	3

Кулон считал, что поле, создаваемое зарядом, находящимся на шаре G (диаметр 32,5 см), эквивалентно полю точечного заряда, помещенного в центре шара. Однако поскольку диаметр диска l (≈ 2 см) много меньше, чем расстояние d между его центром и центром шара, и амплитуда колебаний мала, то, пользуясь современной терминологией, поле в области пространства, где происходят колебания диска, можно считать одно-

родным. Тогда, если обозначить через F силу, действующую на диск со стороны шара в положении равновесия, то

$$T \sim F^{-1/2},$$

где T — период колебаний диска. Если $F \sim d^{-2}$, то $T \sim d$.

Из табл. 2 видно, что данные первых двух измерений подтверждают предположение о пропорциональности F и d^{-2} . Отклонение от этой зависимости для третьего измерения Кулон связывал с утечкой заряда, которая здесь существенна, поскольку для проведения трех измерений, по словам Кулона, требуется около 4 мин. Введение соответствующей поправки, о которой упоминалось уже в первом мемуаре, позволило уменьшить расхождение между расчетом и данными эксперимента вдвое.

Кулон был удовлетворен полученными результатами. Он использовал метод колебаний и для изучения сил отталкивания и получил еще одно подтверждение закона «обратных квадратов»⁵. Таким образом, работу по определению зависимости сил электрического притяжения и отталкивания от расстояния Кулон мог считать законченной.

Следует сказать о том, что Кулон принимал как очевидный тот факт, что сила электрического взаимодействия пропорциональна произведению «электрических масс», и не пытался обосновать это утверждение с помощью опыта. В последующих мемуарах, посвященных электрическим исследованиям, Кулон уже непосредственно использовал это утверждение. Здесь, как и в других областях, где еще не сформировалась четкая система понятий для количественного описания явлений, важнейшие новые понятия и связи между величинами вводились и использовались без их строгой формализации. Построение логически безупречной системы понятий — это задача следующего поколения ученых. Отметим, что строгое доказательство пропорциональности «электрической силы» произведению взаимодействующих зарядов было невозможным, поскольку закон Кулона сам стал определяющим соотношением для введения единицы

⁵ При этом, однако, Кулон подчеркивал преимущества метода, основанного на использовании крутильных весов.

заряда. Однако любая другая форма определяющего соотношения сделала бы очень сложным описание электрических явлений, в том числе и исследованных самим Кулоном в его более поздних мемуарах. Таким образом, практика доказала эффективность использованного Кулоном способа введения единицы заряда. Поэтому трудно не согласиться со словами английского историка науки Дж. Кинга о том, что «законы природы типа законов Кулона и Ампера не столько математические соотношения, которые эти ученые доказали посредством экспериментальной проверки, сколько теоремы существования, которые включают определения величины рассматриваемого физического понятия».

Опыты Кулона явились важным этапом в развитии физического эксперимента. Крутильные весы, использованные ученым, представляли собой универсальный прибор для измерения малых сил. Значение этого изобретения подчеркивается тем фактом, что крутильные весы до сих пор используются для проведения прецизионных экспериментов.

Однако для правильного понимания истории развития экспериментальных методов необходимо не только выделять черты, сближающие тот или иной исторически значимый опыт с экспериментами, характерными для современной физики, но и выявлять различия в подходе к постановке опыта и анализу его результатов. Имеются ли какие-либо принципиальные особенности в работе Кулона, отличающие ее от работ современных физиков-экспериментаторов? Более глубокий анализ свидетельствует о том, что такие отличия есть. Приведем пример.

В первом мемуаре Кулон описывает свои результаты как данные единичного измерения. Однако можно ли их получить, проводя опыт только 1 раз? Представляется, что получение этих результатов невозможно без проведения большой серии опытов.

Каждый, кто работал с чувствительной измерительной (колебательной) системой, знает, что чем выше чувствительность такой системы, тем больше период ее колебаний. Вследствие этого проведение измерений с высокой точностью требует значительных промежутков времени. В качестве примера можно привести знаменитые опыты Кавендиша по определению средней плотности Земли, в которых также использовались крутильные ве-

сы⁶. Период колебаний в опытах Кавендиша составлял в одном случае 7 мин, в другом — 14. Однако в электростатических опытах проведение длительных измерений и сейчас затруднительно, а в XVIII в. оно было практически невозможно. Причина этого — в утечке заряда.

Кулон знал о явлении утечки заряда (его третий мемуар по электричеству посвящен количественному исследованию этого явления), поэтому он проверял, не влияет ли утечка на результаты опыта. Для этого он измерял время, за которое первоначальное расхождение шариков $\simeq 30^\circ$ уменьшается на 1° . Это время оказалось равным 3 мин. Поскольку точность начальной установки коромысла $\Delta\alpha = 2 \div 3^\circ$, Кулон вполне обоснованно заключил, что если измерения проводятся быстрее, чем за 3 мин., то утечку заряда при анализе результатов можно не принимать во внимание. Он писал:

«...однако, поскольку я тратил не более двух минут на проведение испытаний, описанных выше, в этих опытах можно было пренебречь ошибкой, которая обусловлена утечкой электричества. Если же желательна большая точность или если воздух влажен, и электричество теряется быстро, то необходимо сначала определить закон ослабления электрического действия двух шариков за каждую минуту, а затем пользоваться этими наблюдениями для исправления результатов экспериментов, которые захотят провести в этот день». В связи с этим замечанием Кулона возникает вопрос: можно ли с помощью такого чувствительного прибора, как его крутильные весы⁷, провести три измерения за 2 мин, используя колебательный режим?

Для ответа на этот вопрос сделаем простые оценки. Установка Кулона описана столь подробно, что можно

⁶ Крутильные весы, использованные Кавендишем, были созданы его другом Дж. Мичелом; Кавендиш лишь усовершенствовал их. Большинство историков науки считает, что Мичел изобрел крутильные весы независимо от Кулона.

⁷ Для своего времени весы Кулона обладали, конечно, исключительно высокой чувствительностью: Кулон писал, что для закручивания на 360° нити весов, описанных в первом мемуаре, при плече $r = 10,83$ см требуется сила $F = 0,153$ дин. Правда, эта величина, по-видимому, получена не в результате прямых измерений, а при помощи экстраполяции, проведенной с использованием соотношения (2) и данных для более толстых нитей.

оценить период крутильных колебаний коромысла весов:

$$T = 8\pi \sqrt{\frac{2IL}{\pi G d^4}},$$

где I — момент инерции коромысла весов относительно оси, совпадающей с нитью, G — модуль сдвига серебра, L — длина нити, d — ее диаметр. Величину d можно найти, пользуясь данными Кулона о погонной плотности нити: $\rho' = 0,01$ г/м, что соответствует $d \simeq 40$ мкм. Столь малая величина d не должна вызывать удивление: технология изготовления очень тонких нитей из благородных металлов издавна была известна ювелирам. Отметим, что близкая к полученному значению величина d следует и из анализа данных Кулона о чувствительности его весов.

Необходимо оценить еще величину I . Для простоты примем, что

$$I = \frac{ml^2}{2},$$

где m — масса бузинового шарика, l — длина цилиндра *агг* (таким образом, мы получаем оценку I снизу). Считая плотность шарика $\rho = 0,5$ г/см³, получаем $I \simeq 3,5$ г·см². В итоге расчет периода колебаний дает $T \simeq 50$ с.

Теперь оценим время релаксации колебаний τ . Будем учитывать лишь сопротивление воздуха, возникающее при движении коромысла. Для грубой оценки можно воспользоваться формулой Стокса, определяющей силу сопротивления, действующую на шарик, движущийся с небольшой скоростью в вязкой жидкости. Тогда

$$\tau = \frac{m}{3\pi\eta r},$$

где η — вязкость воздуха, m — масса шарика, равная массе диска-противовеса g , r — радиус этого диска. Принимая $r = 0,5$ см, $m = 3 \cdot 10^{-2}$ г и $\eta = 2 \cdot 10^{-4}$ г/см·с, получаем $\tau \simeq 30$ с.

Если бы приведенные расчеты были строгими, то следовало бы сделать вывод, что Кулон проводил измерения в аperiodическом режиме. Однако эти расчеты — приближенные, и поэтому близость полученных значений τ и T заставляет искать дополнительные факты в

пользу того или иного ответа на поставленный вопрос. Таким фактом может служить высказывание Кулона (из его второго мемуара) о том, что исследованию сил притяжения с помощью крутильных весов препятствовали касания шариков, происходившие при колебаниях коромысла весов. При истинно аperiодическом режиме измерений касание шариков происходить не должно. Кроме того, по словам самого Кулона, диск-противовес ослаблял колебания. Поэтому на основе проведенных расчетов и анализа описания опытов, данного Кулоном, можно заключить, что при проведении экспериментов с крутильными весами возникали колебания с большим затуханием. Но тогда возникает следующий вопрос: каким образом Кулон фиксировал равновесные положения коромысла, представленные в табл. 1? При колебаниях с сильным затуханием эти положения нельзя определять, отмечая крайние положения коромысла, а необходимо дожидаться полного затухания колебаний. Это означает, что для проведения трех измерений требуется время, превосходящее $3T$, т. е. не менее 3 мин. Следует также помнить, что вследствие непрерывной утечки заряда движение коромысла никогда полностью не прекращается, что создает дополнительные трудности при фиксации равновесных положений коромысла.

Так как же все-таки Кулон получил свои результаты? По-видимому, его данные суть обобщение результатов большого числа экспериментов, представленное как данные единичного опыта. Это предположение подтверждается еще одним фактом: отношения $(\alpha_0 + \beta) / \alpha_0$ — т. е. отношение сил — образуют, по данным Кулона, прогрессию 1:4:16 (см. табл. 1); очевидно, что добиться этого без предварительного подбора углов β невозможно.

Причина такого непривычного для физики наших дней представления результатов опыта вполне очевидна: во второй половине XVIII в. еще не сложились традиции критического анализа результатов и процедуры физических измерений. В качестве еще одного примера, иллюстрирующего эту особенность экспериментальной физики XVIII в., могут служить работы А. Лавуазье и П.-С. Лапласа по калориметрии. Оценивая точность своих данных в 1,5—2%, авторы приводят значения рассчитанной теплоемкости с точностью до седьмого знака!

В связи с изложенным предположением о способе из-

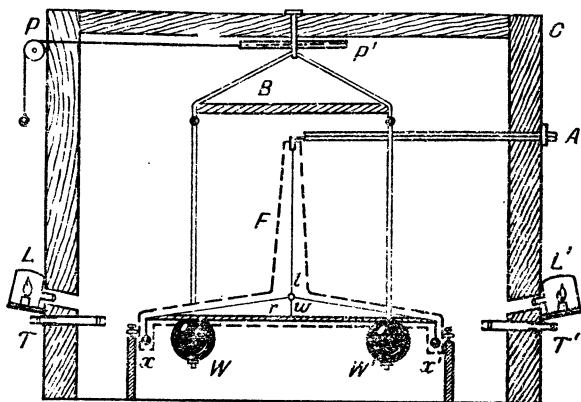


Рис. 9. Схема установки Кавендиша для определения средней плотности Земли. C — внешний кожух, предохраняющий весы от потоков воздуха, возбуждаемых движениями экспериментатора; PP' — тяга, с помощью которой вращается стержень B и перемещаются массивные свинцовые шары W и W' (диаметр 30,5 см); F — внутренний кожух; A — передача для установки крутильного подвеса; L — нить; r — деревянный стержень, стабилизируемый нитями w , на концах которого закреплены малые шары x и x' ; L и L' — лампы; T и T' — зрительные трубы

мерений в опытах Кулона интересно сравнить его методику с той, которую применил Кавендиш в упоминавшемся уже эксперименте по определению средней плотности Земли, в основе которого также лежало использование крутильных весов.

Схема установки Кавендиша показана на рис. 9. Основная задача измерений состояла в определении периода крутильных колебаний медной посеребренной нити, к которой был прикреплен деревянный стержень с двумя малыми свинцовыми шарами на концах (x и x'). Этот период зависел от взаимодействия между парами шаров $x-W$ и $x'-W'$, которое определяется законом всемирного тяготения. Для измерения периода по методу Кавендиша требовалось проводить точные отсчеты положения шаров x и x' . Применение зрительных труб T и T' позволяло фиксировать положения шаров с точностью $1/20$ дюйма (1,3 мм). Если учесть, что расстояние от оси вращения коромысла до центра одного из малых шаров составляло около 1 м, то точность отсчета углового

положения шара соответствовала $0,07^\circ$, т. е. была намного выше, чем в опытах Кулона.

Сам Кавендиш так описывает процедуру определения периода колебаний коромысла:

«Я определял последовательно проходимые три крайние точки колебания, брал среднее между первой и третьей точками, считая его крайней точкой отклонения в одном направлении, а затем определял точку покоя (т. е. равновесное положение коромысла. — С. Ф.) как среднее между найденной путем расчета и второй крайней точками». И далее: «Я определял две крайние точки колебания, а также моменты времени, в которые конец стержня проходил через две заданные точки, находящиеся между крайними, стараясь, чтобы эти две точки находились по разные стороны от точки покоя и не слишком далеко от нее. Затем я определял точку покоя и, составляя пропорцию, находил моменты времени, в которые стержень проходил через нее. После нескольких колебаний я повторял эту процедуру и, деля промежуток времени между прохождением весов через точку покоя на число колебаний, находил время одного колебания».

Из приведенного отрывка из работы Кавендиша видно, что он пользовался гораздо более утонченной процедурой определения как положений равновесия коромысла (что необходимо делать при исследовании сил электростатического отталкивания по методу Кулона), так и периода колебаний (сравните с кулоновским методом проверки закона «обратных квадратов» для сил притяжения), чем Кулон. При определении «точки покоя» Кавендиш, судя по описанной им процедуре, старался учесть затухание колебаний, которое в его опыте должно было сказываться на результатах измерений по крайней мере не больше, чем в опытах Кулона. Принятые Кавендишем меры предосторожности, а также изощренная методика измерений и анализа результатов позволили ему определить искомую величину средней плотности Земли ρ_3 настолько точно, что ее значение $\rho_3 = 5,45 + 0,04 \text{ г/см}^3$ лишь на несколько сотых долей единицы г/см^3 отличается от современного⁸.

⁸ При обработке данных измерений Кавендиш вследствие арифметической ошибки получил результат $\rho_3 = 5,48 \text{ г/см}^3$; ошибка была исправлена английским астрономом Ф. Бейли. В тексте приведено исправленное значение ρ_3 .

Следует отметить, что столь тонкая процедура измерений представляла собой уникальное явление в экспериментальной физике конца XVIII в., вследствие чего методику Кавендиша некоторые современники воспринимали с большим трудом. Свидетельством этого может служить работа англичанина Ч. Хаттона — человека, который начал заниматься измерением ρ_z задолго до Кавендиша. В ней Хаттон резко критиковал опыты Кавендиша, причем характер критики свидетельствует о непонимании им существа метода, в них использованного. Заметим, что статья Хаттона была опубликована в ведущем английском научном журнале в 1821 г., т. е. спустя более двадцати лет после экспериментов Кавендиша! Не опасения ли такого рода выступлений заставили Кавендиша отказаться от публикации своей работы, посвященной закону «обратных квадратов»?

Таким образом, сравнение экспериментов Кулона и Кавендиша показывает преимущества более утонченных методов последнего: его опыты очень близки к современным тонким физическим экспериментам. Опыты Кулона более традиционны для конца XVIII в. и характеризуются, если так можно выразиться, «инженерной» точностью.

Детальный анализ опытов Кулона позволяет, с одной стороны, уточнить, какие черты творчества ученого сближают его работы с работами современных экспериментаторов (стремление к повышению точности измерений, использование вновь исследованных эффектов — кручения нитей — для постановки опытов в других областях физики, тонкий анализ возможных погрешностей и т. д.). С другой стороны, он помогает понять, чем отличается подход ученого XVIII в. к количественному эксперименту от современного подхода к проведению прецизионных измерений.

Следует, конечно, сказать и о последующих работах Кулона в области электричества и магнетизма, и о его судьбе. В дальнейшем Кулон исследовал процесс утечки электрического заряда, изучил распределение заряда по поверхности проводников различной формы. Данные, полученные Кулоном, послужили экспериментальным обоснованием теории электростатических явлений, развитой С. Пуассоном в начале XIX в. Кулон ставил опыты и по изучению магнитных сил; здесь, однако, его результаты вряд ли сравнимы по своей фунда-

ментальности с результатами электрических исследований.

Все важнейшие работы в области электричества и магнетизма были завершены Кулоном до 1789 г., т. е. до Великой французской революции. Будучи офицером королевской армии, Кулон имел все основания опасаться, что революционный террор не обойдет и его. Поэтому, получив отставку, он удалился в свое поместье в окрестностях Блуа. Там Кулон уже не мог проводить эксперименты, сравнимые по уровню с опытами по электричеству, поэтому тематика его исследований изменилась. Он изучал вопрос о циркуляции соков в деревьях, а также ставил опыты по определению эффективности мускульных усилий человека. Работы по этим вопросам Кулон опубликовал после возвращения в Париж, где в 1797 г. был организован Французский национальный институт, в котором ученый вновь занял почетное место академика.

С 1802 г. до самой смерти, последовавшей в 1806 г., Кулон много сил отдавал преподавательской деятельности и работе в качестве инспектора народного образования. Друзья и коллеги сохранили о Кулоне добрую память, ибо, по словам Т. Юнга, «его моральный облик был таким же безупречным, как и его математические работы».

СУДЬБА ЗАКОНА

Как же работы Кулона и сформулированный им закон были восприняты современниками и ближайшими потомками ученого? На этот вопрос вряд ли можно дать однозначный ответ. Некоторые ученые, в основном старшего поколения, не признали выводов Кулона, поскольку они противоречили их взглядам на природу электричества. Некоторые сомневались в корректности использованной им методики. Следует заметить, что физики, попытавшиеся повторить его эксперименты, столкнулись с большими трудностями. Один из них, немецкий физик П. Симон, даже назвал весы Кулона «совершенно неустойчивой крутильной машиной». В итоге большинство физиков поверило все же в закон «обратных квадратов», хотя многие считали, что его следовало бы проверить с помощью более точных экспериментов. Однако бурные

события в истории электромагнетизма первой половины XIX в. отодвинули проблему проверки закона Кулона на второй план.

В 1873 г. вышло в свет знаменитое сочинение Дж. К. Максвелла «Трактат об электричестве и магнетизме», в котором была изложена теория электромагнитного поля. В этой работе, обсуждая закон взаимодействия электрических зарядов, Максвелл писал:

«Можно считать, что эксперименты Кулона с крутильными весами с некоторым приближением к точности установили закон силы. Эксперименты этого рода, однако, считаются трудными и до некоторой степени неопределенными из-за нескольких возмущающих воздействий, за которыми необходимо тщательно следить, чтобы вносить соответствующие поправки.

Во-первых, два наэлектризованных тела должны иметь размеры, ощутимые в сравнении с расстоянием между ними, чтобы они могли нести заряды, достаточные для возникновения заметных сил. Тогда действие каждого тела влияет на распределение электричества на другом, так что нельзя будет даже считать, что заряды распределены по поверхности или сосредоточены в центре тяжести; этот эффект должен быть учтен путем сложных рассматриваний...

Другая трудность происходит от действия электричества, индуцированного на стенках чехла, в котором находится прибор. Если сделать внутренность прибора в точности цилиндрической, а ее внутреннюю поверхность — из металла, то этот эффект можно считать определенным и измеримым.

Независимая трудность проистекает от несовершенства изоляции тел, вследствие которой заряд непрерывно уменьшается...»

Максвелл точно указал на трудности, связанные с проведением опытов Кулона. В «Трактате» он отмечает, что существует гораздо более удобный путь проверки основного закона электростатики — «нулевой» метод, по существу, эквивалентный методу Кавендиша. Правда, в 1873 г. Максвелл еще не знал о выдающихся работах ученого, чьим именем будет названа одна из самых знаменитых физических лабораторий мира. Лишь год спустя на торжественном открытии Кавендищской лаборатории один из потомков Генри Кавендиша вручил Максвеллу двадцать пакетов с рукописями «великого от-

шельника». Следующие пять лет Максвелл с исключительной тщательностью изучает, упорядочивает, комментирует работы Кавендиша по электричеству. В одном из писем, относящихся к тому времени, Максвелл писал: «...его (Кавендиша. — С. Ф.) измерения емкости заставят нас попотеть в Кавендишской лаборатории, прежде чем мы достигнем точки, где он остановился. Его единственным несчастьем было то, что он не имел электрометра Томсона...» И это не просто дань восхищения трудами гениального предшественника. По инициативе Максвелла в руководимой им Кавендишской лаборатории действительно повторяются и совершенствуются эксперименты Кавендиша. В частности, в 1878 г. был воспроизведен его опыт по проверке закона «обратных квадратов». Сделал это сотрудник Максвелла Дональд Макалистер. Не изменяя основной идеи опыта, он несколько упростил его. В частности, в ходе эксперимента полусферы, из которых составлялась наружная сфера, не разъединялись; снимался лишь небольшой колпачок, к которому крепился проводник, соединявший внешнюю сферу и внутренний шар. В образовавшееся вследствие снятия колпачка отверстие вводился зонд, соединенный с электрометром, с помощью которого пытались обнаружить электризацию внутреннего шара. Этот прием и использование более чувствительного прибора для регистрации электризации позволили понизить верхний предел поправки q в законе Кулона ($F \sim R^{-2 \pm q}$). Макалистер получил, что

$$q < \frac{1}{21\,600}.$$

Однако история закона «обратных квадратов» не была закончена. И в методике Кавендиша, и в методике, примененной Макалистером, был серьезный недостаток — при каждом повторении опыта контакт между зондом, соединенным с электрометром, и внутренним шаром создавался заново, и качество этого контакта раз от раза менялось. Следовательно, менялась и величина контактной разности потенциалов, возникающей при соединении двух разнородных проводников. Таким образом, точность определения потенциала шара ограничивалась контактной разностью потенциалов между зондом и шаром. Устранение этой помехи дало бы возможность повысить точность опытов. Кроме того, имелась

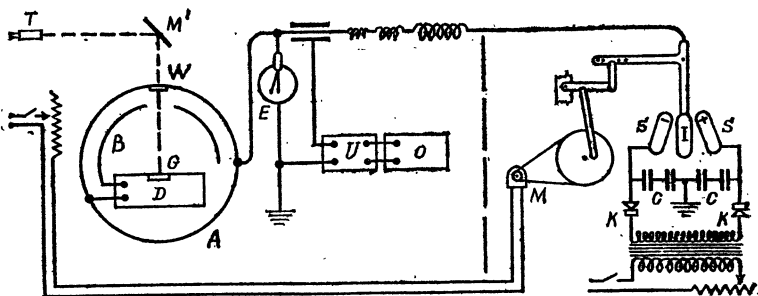


Рис. 10. Схема установки С. Плимптона и У. Лоутона: А — внешняя сфера; В — внутренняя полусфера; D — детектор с гальванометром G; U — усилитель; O — осциллограф; CC — конденсаторный генератор; M — мотор; T — телескоп; M' — зеркало; W — кювета с прозрачным дном, наполненная соленой водой; KK — кенотроны; I — индуктор; SS — статоры; E — электрометр

еще одна возможность понижения верхней границы q — повышение потенциала, до которого заряжается внешняя сфера.

Оба способа повышения точности проверки закона Кулона — применение постоянных контактов и повышение потенциала наружной сферы — были использованы при следующей «атаке» на закон «обратных квадратов». Произошло это в 1936 г., почти через шестьдесят лет после опытов Макалестера. За это время методы физического эксперимента шагнули далеко вперед, и авторы нового опыта — американские физики С. Плимpton и У. Лоутон имели в своем распоряжении новый арсенал средств.

Плимpton и Лоутон решили использовать не строго статический режим измерений, а работать с переменным напряжением низкой частоты (около 2 Гц). Это позволяло, с одной стороны, воспользоваться резонансными свойствами измерительной системы гальванометра, бывшего составной частью системы детектирования, а с другой — пренебречь индукционными эффектами, связанными с периодическими изменениями потенциала внешней сферы, максимальное значение которого превышало 3000 В.

Схема установки Плимптона и Лоутона показана на рис. 10. Ее важнейшими частями были: сфера А диаметром около полутора метров, образованная двумя стальными полусферами, детектор D с гальва-

нометром G , помещавшийся внутри шара A , электрометр E , с помощью которого в любой момент времени можно было определить потенциал сферы A , усилитель U и осциллограф O , позволявшие непосредственно исследовать зависимость потенциала сферы A от времени, и специально сконструированный конденсаторный генератор CC , приводившийся в действие мотором M , подключенным к сети переменного тока.

Плимpton и Лоутон путем расчетов выяснили, что результаты опыта не должны измениться, если будет измеряться разность потенциалов не между двумя концентрическими сферами, а между внешней полной сферой и внутренней полусферой (на рис. 10 эта полусфера обозначена буквой B), поэтому вместо нижней полусферы, как видно из рисунка, была установлена медная коробка с детектором. Наблюдения за показаниями детектора велись с помощью телескопа T и зеркала M' . Для достижения планировавшейся точности опыта окно W , через которое велись наблюдения, необходимо было сделать проводящим — иначе внешнее электрическое поле могло проникнуть внутрь сферы A . Экспериментаторы решили эту задачу весьма остроумно: окно представляло собой кювету со стеклянным дном, заполненную соленой водой, обладавшей достаточно высокой проводимостью; вода заливалась до такого уровня, что ее поверхность служила как бы продолжением наружной поверхности сферы A . Заметим, что эта предосторожность авторов опыта оказалась ненужной: было обнаружено, что, когда во время опыта воды в кювете не было, детектор регистрировал сигнал, превышавший уровень тепловых шумов.

Любопытно и устройство конденсаторного генератора. Система конденсаторов CC заряжалась через кенотроны KK и повышающий трансформатор от сети переменного тока. Периодическое изменение потенциала шара A происходило вследствие попеременного подключения индуктора I к статорам SS . И индуктор, и статоры имели форму гребенки; под действием шатуна, соединенного с мотором, зубцы индуктора приводились в состояние зацепления то с одним, то с другим статором. Использование системы дросселей позволило добиться практически синусоидальной зависимости потенциала шара A от времени. Следует отметить, что Плимpton и Лоутон применили высококачественные конденсаторы,

которые могли сохранять заряд на обкладках практически неизменным в течение многих часов, благодаря чему после зарядки батареи СС трансформатор можно было отключить и тем самым избежать необходимости дополнительной фильтрации помех на частоте 60 Гц.

Итогом многочисленных опытов, возможно более точной калибровки измерительной системы и специальных проверочных экспериментов, проведенных Плимптоном и Лоутоном, стало новое ограничение на величину q :

$$q \lesssim 2 \cdot 10^{-9}.$$

Следующая попытка понизить верхний предел поправки q была предпринята лишь в 1967 г. американскими физиками из Мичиганского университета, которые использовали в своих опытах техническую новинку того времени — синхронные усилители. Особенностью их опыта было использование не вложенных друг в друга сфер, а системы вложенных прямоугольных металлических коробок. В этих опытах была значительно повышена частота переменного напряжения (0,2 МГц). В итоге был получен результат

$$q \lesssim 9,2 \cdot 10^{-12}.$$

Вскоре, в 1970 г., еще одна группа американских экспериментаторов занялась уточнением закона Кулона. Они вернулись к сферически симметричной установке, состоявшей из пяти концентрических сфер, наибольшая из которых имела диаметр около 3 м, а наименьшая — 0,76 м. Сферы были изготовлены из разных материалов (алюминия, стали, меди). На наружные сферы (алюминий — сталь) подавалось высокое напряжение (до 70 кВ), а с двух внутренних (алюминиевых) производилось синхронное детектирование сигнала. Средняя (медная) сфера служила экраном для подавления индукционных эффектов и эффектов, связанных с неравномерным растеканием переменного тока по стальной сфере. Измерения проводились на частотах 250 и 2500 Гц. В этих опытах предел поправки q был понижен до величины $1,3 \cdot 10^{-13}$. Интересно, что и в экспериментах, столь сильно отличающихся по уровню от первых попыток проверить закон «обратных квадратов», ученым приходилось решать проблемы, связанные с обеспечением надежного контакта между полусферами, из которых сос-

тавлялись внешние сферы, а также заботиться о предотвращении скопления зарядов на внутренних сферах до начала опыта. Для того чтобы избежать нежелательных эффектов, система сфер перед опытом выдерживалась в смонтированном состоянии не менее 4 ч.

Однако уже через год американцы Э. Уильямс, Дж. Фоллер и Г. Хилл понизили верхний предел q до величины $6 \cdot 10^{-16}$. Они работали с пятью вложенными концентрическими икосаэдрами (рис. 11), наибольший из которых имел в диаметре около 1,5 м. Переменное напряжение с частотой 4 МГц, менявшееся от 5 до — 5 кВ, подавалось на внешние икосаэдры, а на внутренних пытались зарегистрировать синхронно изменявшееся напряжение. В опыте можно было зафиксировать напряжение порядка 10^{-12} В. Измерения велись в течение трех суток, причем сигнал фиксировался каждые 50 с. Проводя соответствующую статистическую обработку, экспериментаторы и пришли к величине q , указанной выше.

Почему же ученые продолжают ставить эти сложные и трудоемкие эксперименты, если для практических целей можно было бы ограничиться результатами Плимптона и Лоутона? Может быть, есть какая-то фундаментальная проблема, связанная с законом Кулона? Да, такая проблема есть. Она отражена в названии работы Уильямса, Фоллера и Хилла «Новая экспериментальная проверка закона Кулона: лабораторный верхний предел на массу покоя фотона».

Все многовековое развитие науки демонстрирует непрерывное стремление человека установить взаимосвязи между кажущимися весьма далекими фактами и явлениями. Вспомним хотя бы легенду о яблоке Ньютона — догадка о связи между явлением падения тел на Земле и закономерностями движения небесных тел была одним из первых важных обобщений физики. Примерно сто пятьдесят лет спустя настойчивый поиск таких ученых, как Г. Х. Эрстед, А.-М. Ампер, М. Фарадей, привел к объединению двух областей физики — электричества и магнетизма. Фарадей, открывший в 1845 г. явление вращения плоскости поляризации света в веществе, которое помещено в магнитное поле, продемонстрировал, что электромагнетизм и оптика не отделены друг от друга непреодолимым барьером. Наконец, Максвелл в рамках теории электромагнитного поля показал, что

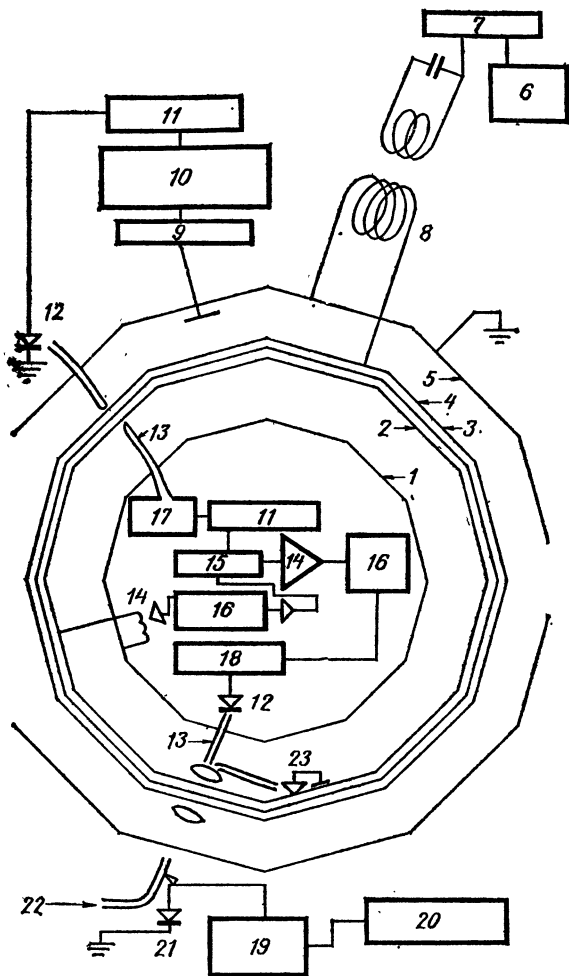


Рис. 11. Схема установки Э. Уильямса, Дж. Фоллера и Г. Хилла; 1—5 — система вложенных концентрических икосаэдров; 6 — генератор на кристалле кварца с термостатом; 7 — трансмиттер; 8 — высокочастотная охлаждаемая катушка; 9 — осциллограф; 10 — преобразователь фазы; 11 — компараторы; 12 — светодиоды; 13 — усилители; 14 — смеситель; 15 — фильтры; 16 — фотоэлемент; 17 — преобразователь; 18 — счетчик импульсов; 19 — фурье-анализатор; 20 — фотодиод; 21 — калибровочный сигнал; 22 — калибровочный конденсатор

световые волны по своим свойствам должны быть подобны электромагнитным волнам, существование которых следовало из основных уравнений теории. В 1888 г. Г. Герц доказал справедливость этого вывода Максвелла: он обнаружил электромагнитные волны и изучил их свойства.

Казалось бы, опыты Герца явились триумфом теории электромагнитного поля, в которой объединилось сразу несколько разделов «старой» физики. Это и был триумф. Но развитие физики продолжалось. Диалектика этого развития проявилась в том, что в ходе ставших классическими опытов с электромагнитными волнами Герц обнаружил новое явление, позднее получившее название внешнего фотоэлектрического эффекта. Менее чем через двадцать лет фотоэффект оказался одним из явлений, ставших обоснованием квантовой теории света.

В 1905 г. А. Эйнштейн в работе «Об одной эвристической точке зрения, касающейся возникновения и превращения света» высказал идею о том, что свет представляет собой поток частиц — квантов. В одном из параграфов этой работы он с помощью гипотезы о квантах света (позднее они были названы фотонами) дал объяснение важнейших закономерностей внешнего фотоэффекта.

Борьба за утверждение нового взгляда на природу света была долгой и сложной. Ее острота объяснялась во многом тем обстоятельством, что предлагавшиеся изменения затрагивали не только оптику, но и всю электродинамику. Ведь со времен Максвелла и Герца эти области уже нельзя было рассматривать в отрыве друг от друга! Но если взгляды на свет претерпевали кардинальные изменения, то и на законы электродинамики нельзя уже было смотреть по-старому. Судьба этих законов явилась подтверждением мысли, высказанной Эйнштейном: «Закон не может быть точным хотя бы потому, что понятия, с помощью которых мы его формулируем, могут развиваться и в будущем оказаться недостаточными».

Усилиями многих ученых была построена квантовая электродинамика, принципиально по-иному, чем теория Максвелла, объясняющая взаимодействие зарядов. Но это не значит, что законы классической электродинамики были полностью отброшены. Взаимоотношения квантовых и классических законов определяются принципом

соответствия: классические законы оказываются предельным случаем квантовых, и, следовательно, между ними должна существовать связь. Одним из проявлений этой связи оказывается утверждение: если закон Кулона не является точным законом «обратных квадратов», то масса покоя фотона m_λ должна отличаться от нуля. Следует подчеркнуть, что вопрос о равенстве нулю m_λ — это вопрос экспериментальный. На это обстоятельство впервые обратил внимание один из создателей квантовой механики Л. де Бройль.

Итак, поскольку многие важнейшие положения современной физики базируются на предположении о том, что $m_\lambda = 0$, проблема экспериментального подтверждения этого предположения должна рассматриваться как принципиально важная. Опытная проверка закона Кулона — один из путей ее решения. В частности, опыты Уильямса, Фоллера и Хилла позволили понизить верхний предел массы покоя фотона до значения $m_\lambda \lesssim 1,6 \cdot 10^{-47}$ г.

Однако проверка закона Кулона — не единственный способ оценки верхнего предела m_λ . Теоретическое рассмотрение показывает, что если $m_\lambda \neq 0$, то должна наблюдаться дисперсия электромагнитных волн в вакууме (напомним, что отсутствие подобной дисперсии — одно из следствий теории Максвелла). В этом случае для групповой скорости электромагнитных волн v можно было бы записать:

$$v = \frac{c}{\sqrt{1 + (\lambda/\Lambda_\lambda)^2}},$$

где c — предельная скорость движения тел, входящая в преобразования Лоренца (очевидно, что при $m_\lambda \neq 0$ эта скорость не совпадает со скоростью света), λ — длина электромагнитной волны, $\Lambda_\lambda = \frac{h}{m_\lambda c}$ — комптоновская длина волны фотона. Из этого выражения следует, что при $m_\lambda = 0$ скорость синего света была бы больше, чем красного. Тот факт, что в действительности дисперсия электромагнитных волн в вакууме при достигнутой точности измерений не обнаружена, также свидетельствует в пользу предположения, что $m_\lambda = 0$. Однако оценка верхней границы m_λ , полученная из анализа данных о распространении электромагнитных

волн, дает значение худшее, чем опыты по проверке закона Кулона.

Более сильные ограничения на массу фотона дает анализ статических полей, существующих вокруг планет. Так, на основе данных о протяженности магнитного поля Земли Э. Шредингер получил условие $m_{\lambda} \lesssim 10^{-47}$ г. Еще более сильное ограничение было найдено при рассмотрении устойчивости галактик. Наличие у фотона ненулевой массы покоя должно было бы сказаться на условии равновесия газа в этих объектах Вселенной. М. Рейнгарт и Г. В. Чибисов показали, что соответствующее условие для Малого Магелланового облака дает неравенство

$$m_{\lambda} \lesssim 3 \cdot 10^{-60} \text{ г.}$$

Интересно, что в принципе нет необходимости стремиться к понижению верхней границы m_{λ} до бесконечности. Дело в том, что эффекты электродинамики, обусловленные отличием m_{λ} от нуля, могут проявиться лишь на расстояниях $l \lesssim \Lambda_{\lambda}$. Но мы можем получать информацию лишь в пределах так называемого горизонта, который определяется возрастом Вселенной t . Поэтому если будет установлено, что $ct < \Lambda_{\lambda}$ (c — максимальная скорость распространения сигнала), т. е. $m_{\lambda} <$

$$< \frac{\hbar}{c^2 t} \quad (\hbar — \text{постоянная Планка}), \text{ то дальше понижать}$$

верхний предел m_{λ} будет бессмысленно: даже если бы фотон обладал столь малой массой покоя, мы это не смогли бы обнаружить.

Заканчивая рассказ о современных исследованиях, так или иначе связанных с законом Кулона, следует упомянуть об одной идее, выдвинутой американскими физиками Дж. Примаком и М. Шером в 1980 г. Они предположили, что при понижении температуры может происходить фазовый переход, при котором фотон из безмассовой частицы превращается в частицу с массой покоя $m_{\lambda} \simeq 2 \cdot 10^{-35}$ г. Хотя теоретические соображения этих авторов подвергались критике, группа экспериментаторов из Принстонского университета в 1985 г. проверила гипотезу о «холодном массивном» фотоне с помощью опыта.

Общая идея новой проверки закона Кулона осталась прежней. Однако оказалось удобней использовать не

систему вложенных шаров или икосаэдров, а три вложенных коаксиальных цилиндра. На два внешних цилиндра подавалось переменное напряжение. В случае отклонения закона Кулона от точного закона «обратных квадратов» между двумя внутренними цилиндрами, связанными друг с другом конечной емкостью (≈ 20 мкФ), должен был протекать переменный ток, который экспериментаторы старались зарегистрировать. Основная часть экспериментальной установки помещалась в криостат, где поддерживалась низкая температура. Опыты проводились при $T=4,2$ и $1,36$ К. Результаты анализа полученных данных показали, что при переходе от $4,2$ К к $1,36$ К фазового перехода не наблюдается и ограничение на возможную массу «холодного» фотона определяется неравенством

$$m_\gamma \lesssim (1,5 \pm 1,38) \times 10^{-42} \text{ г.} \quad (\text{при } T=1,36 \text{ К}).$$

Таким образом, вопрос о массе покоя фотона и, следовательно, о том, является ли закон Кулона строгим законом «обратных квадратов», продолжает интересовать физиков. Как мы видели, тот или иной ответ на этот вопрос может либо подтвердить правильность представлений, которые сейчас разделяются большинством физиков, либо заставить ученых обратиться к экзотическим теориям с ненулевой массой фотона, которые уже загодя разработаны. Пока же оснований для волнений нет: опыты, сделанные в земных условиях, а также оценки, сделанные путем анализа астрофизических данных, не дают оснований считать массу покоя фотона отличной от нуля, и следовательно, закон взаимодействия точечных электрических зарядов сохраняет статус точного закона «обратных квадратов».

Мы убедились, что метод Кавендиша успешно применяется и в наши дни. А что же крутильные весы Кулона? Для электростатических измерений они не используются из-за экспериментальных осложнений, на которые указывал еще Максвелл. Однако как средство измерения малых сил другой природы они эффективно работают и сейчас. Напомним, что наиболее фундаментальное применение им нашел тот же Генри Кавендиш, использовавший их для изучения гравитационных сил. Удивительно, но несмотря на огромный прогресс экспериментальных методов за прошедшие после опыта Ка-

вендиша почти двести лет, и в наши дни наиболее точное измерение гравитационной постоянной (1982 г.) было выполнено с помощью крутильных весов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

История установления и проверки основного закона электростатики дает возможность сделать выводы, важные для характеристики различных этапов развития физического эксперимента.

Принято считать, что возникновение науки Нового времени в значительной степени обусловлено обращением ученых к экспериментальному методу. Действительно, еще Ф. Бэкон во второй части «Нового Органона» писал о нем так: «Истинный же метод опыта сначала зажигает свет, потом указывает светом дорогу: он начинает с упорядоченного и систематического опыта, отнюдь не превратного и отклоняющегося в сторону, и выводит из него аксиомы, а из построенных аксиом — новые опыты...» Но от деклараций до широкого распространения метода на практике было еще очень далеко. Период становления количественного физического эксперимента растянулся практически на два столетия. На это обстоятельство обращают внимание крайне редко: говорится «абберация», возникающая из-за того, что наиболее важные с современной точки зрения опыты, относящиеся к XVII—XVIII вв., упоминаемые на страницах учебников, в той или иной мере можно отнести к количественным экспериментам. При этом, однако, забывают, что история произвела отбор и в современной науке, которая основана на математизированных теориях, наибольший интерес представляют опыты именно этого типа. Если же перелистать страницы научных сочинений и немногочисленных периодических изданий того времени, то нетрудно убедиться в преобладании качественного эксперимента или грубо количественных опытов, методика и анализ результатов которых существенно отличаются от современных. Если посмотреть на исследования Кулона и Кавендиша по электростатике с этой точки зрения, то мы приходим к выводу, что бесспорно выдающиеся для своего времени опыты Кулона были завершением первого этапа развития экспериментальной физики Нового времени, в то время

как опыты Кавендиша знаменовали начало принципиально нового этапа этого развития.

История закона Кулона прекрасно иллюстрирует особенности развития экспериментальных методов в области физики, где система основных понятий еще только складывается. В конце XVIII в. метод, основанный на использовании крутильных весов, обеспечивавший лишь довольно грубую проверку закона «обратных квадратов», стал важным шагом на пути введения основных понятий теории электричества. С его помощью можно было определить единицу электрического заряда — величину, без которой дальнейший прогресс количественных исследований был бы невозможен.

С точки зрения теории эксперименты Кавендиша представляются более утонченными. Развита Кавендишем методика сравнения емкостей проводников позволила оценить точность, с которой было проверено соотношение (1). В то же время «нулевой» метод не давал возможности определить какие-либо специфические электрические величины. Кроме того, использование, пусть неявное, нового понятия «электроемкость» могло затруднить восприятие работы Кавендиша в том случае, если бы она все же была опубликована.

Подчеркнем, что такая относительная оценка обоих методов справедлива лишь на начальном этапе изучения электрических явлений. После того как основные представления учения об электричестве сформировались, «инженерная» точность проверки его основного закона уже не могла удовлетворить физиков. На этом этапе преимущества «нулевого» метода были осознаны и использованы в полной мере.

История электростатики позволяет в общих чертах понять и историю экспериментального исследования электромагнитных явлений. Случайным, конечно, является тот факт, что наиболее выдающийся экспериментатор в этой области М. Фарадей не имел математического образования. Качественный характер большинства его опытов был обусловлен вовсе не этим. Фарадей работал в только нарождавшейся области науки, где отчетливо ощущался недостаток в понятиях для описания получаемых результатов. Именно это и явилось основной и, подчеркнем, вполне закономерной причиной специфики его метода экспериментирования.

Опыты Кулона и Кавендиша имеют непосредственное

отношение и к проблеме, которая приобрела большое значение в современной экспериментальной физике. Ее с наибольшей отчетливостью сформулировал американский историк физики П. Галисон в книге с несколько неожиданным названием «Как кончаются эксперименты». Галисон обратил внимание на то, что по мере усложнения физического эксперимента исследователю становится все труднее ответить на вопрос о том, когда его работа может считаться законченной. И в самом деле, в какой момент можно прекратить многочисленные проверочные и вспомогательные измерения, которые зачастую занимают значительно больше времени, чем основной эксперимент?

О том, что это вовсе не праздные вопросы, говорит, например, такой факт: в наши дни при новых измерениях фундаментальных констант зачастую получают значения, выходящие за пределы возможных погрешностей, указанных в предшествующих работах. Это означает, что при оценке погрешностей ранее что-то не было учтено, а ведь решение о завершении эксперимента принимается чаще всего тогда, когда исследователь считает все средства уточнения результатов (как экспериментальные, так и теоретические) на сегодняшний день исчерпанными. Заметим, что в период становления экспериментальной физики вопрос о том, когда заканчивать опыты, не стоял так остро. Это объяснялось как отсутствием развитых теоретических моделей, так и несформированностью традиций анализа результатов. Поэтому, в частности, Галилей мог утверждать, что установил на опыте изохронность колебаний маятника вплоть до амплитуд 60° и более...

Электростатические эксперименты Кулона и Кавендиша дают представление о том, как рождалась проблема завершения эксперимента. Кулон изложил свои результаты как окончательные, и в тексте его работы трудно усмотреть какой-то намек на необходимость их уточнения. И действительно Кулон еще в течение нескольких лет после представления первого мемуара занимался изучением электрических и магнитных явлений, но так и не попытался уточнить данные 1785 г. Кавендиш же, сделав оценку точности подтверждения закона «обратных квадратов», как бы подчеркнул, что эта точность может быть повышена. И хотя он сам по неясным причинам отошел от исследований по электростатике, мы

имеем основание считать, что принципиальная возможность усовершенствования методики и техники практически любого эксперимента (т. е. невозможность постановки «окончательного» опыта) отчетливо осознавалась Кавендишем. Об этом говорят, например, заключительные строки знаменитой работы Кавендиша по определению средней плотности Земли, в которых он подчеркивает необходимость дальнейшего анализа примененного им метода и уяснения причин различия полученных им данных и данных предшественников, основанных на измерениях отклонений отвеса вблизи гор.

Однако на вопрос об отношении к точности эксперимента со стороны Кулона и Кавендиша можно взглянуть по-другому. В различии позиций этих ученых проявляется расхождение в их общей ориентации в науке. Кулон и по образованию, и по опыту работы тяготел к решению прикладных проблем, не требовавших предельной точности опытов. Его исследования в области электричества были стимулированы поисками применения созданного им прибора для измерения малых сил — крутильных весов. Кавендиш, напротив, ориентировался в основном на фундаментальные физические проблемы, для исследования которых необходима максимально достижимая на данный момент точность. Кавендиш, по-видимому, глубже осознавал важнейшую особенность всякого физического опыта, заключающуюся в том, что ни один даже самый совершенный эксперимент не может с абсолютной точностью доказать какое-либо утверждение.

И все же жизнь науки сложна и часто препятствует строгим, однозначным оценкам. Это обстоятельство отчетливо проявляется в исторической перспективе, если обратиться к анализу воззрений Кавендиша и Кулона на природу электричества. Действительно Кавендиш, чей метод проверки закона «обратных квадратов» используется до сих пор, придерживался ошибочной унитарной теории. Кулон же, метод которого давно не применяется в экспериментах по электричеству, разделял идею о двух видах зарядов, подтвержденную дальнейшим развитием науки.

Таким образом, в классических опытах Кулона и Кавендиша, проведенных более двухсот лет назад, мы можем усмотреть тенденции, которые сохранили свое значение до наших дней. Есть весомые основания ду-

мать, что многие из них еще долго будут «работать» в физике, столь сильно отличающейся ныне от «натуральной философии» второй половины XVIII в. Выявление и изучение этих тенденций представляют одну из важнейших задач истории науки. Поэтому трудно не согласиться со средневековым историком, который еще в X в. писал, что «если и имеется какое-либо из благ, приносящих пользу в жизни, то во всяком случае не меньше, а больше всего оказывает нам услуги, является необходимой и полезной история».

ЛИТЕРАТУРА

Дорфман Я. Г. Всемирная история физики с древнейших времен до конца XVIII века. — М.: Наука, 1974.

Лакур П., Аппель Я. Историческая физика. — Т. II. — Одесса: Матезис, 1908.

Лежнева О. А. Жизнь и научная деятельность Шарля Огюстена Кулона // Труды ИИЕиТ. — Т. 19. — С. 386—396. — М.: Изд-во АН СССР, 1957

Филонович С. Р. Генри Кавендиш // Квант. — 1981. — № 10. — С. 17—22.

Кавендиш Г. Экспериментальное определение закона электрической силы // Квант. — 1981. — № 10. — С. 22—26.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	3
Рождение науки об электричестве	4
Первые попытки экспериментального обоснования закона «электрической силы»	11
«Нулевые» методы и основной закон электростатики	15
Генри Кавендиш: человек и ученый	19
«Экспериментальное определение закона электрической силы»	25
Шарль Кулон: военный инженер и ученый	29
Электрические весы Кулона и его исследования по электростатике	33
Судьба закона	47
Заключение	59
Литература	63

Научно-популярное издание

Сергей Ростиславович ФИЛОНОВИЧ

КАВЕНДИШ, КУЛОН И ЭЛЕКТРОСТАТИКА

Гл. отраслевой редактор *Л. А. Ерлыкин*

Редактор *К. А. Кутузова*

Мл. редактор *Н. А. Сергеева*

Обложка художника *Г. Ш. Басырова*

Худож. редактор *П. Л. Храмцов*

Техн. редактор *О. А. Найденова*

Корректор *Л. В. Иванова*

ИБ № 9610

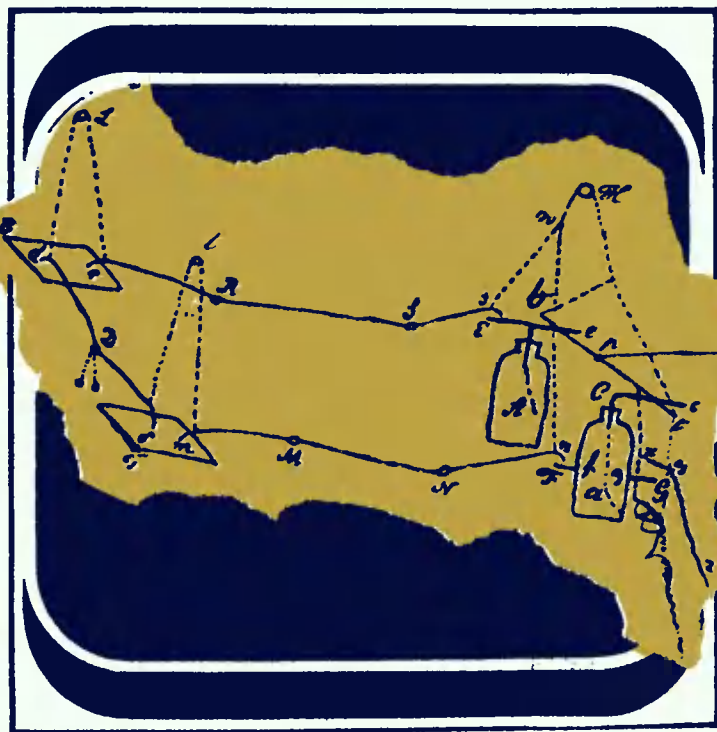
Сдано в набор 23.05.88. Подписано к печати 11.07.88. Т-05412. Формат бумаги 84×108¹/₃₂. Бумага тип. № 8. Гарнитура литературная. Печать высокая, Усл. печ. л. 3,36. Усл. кр.-отт. 3,57. Уч.-изд. л. 3,36. Тираж 34 383 экз. Заказ 1038. Цена 11 коп. Издательство «Знание». 101835, ГСП, Москва, Центр, проезд Серова, д. 4. Индекс заказа 884008.
Типография Всесоюзного общества «Знание», Москва, Центр, Новая пл., д. 8/4.

ДОРОГОЙ ЧИТАТЕЛЬ!

Брошюры этой серии в розничную продажу не поступают, поэтому своевременно оформляйте подписку. Подписка на брошюры издательства „Знание“ ежеквартальная, принимается в любом отделении „Союзпечати“.

Напоминаем Вам, что сведения о подписке Вы можете найти в „Каталоге советских газет и журналов“ в разделе „Центральные журналы“, рубрика „Брошюры издательства „Знание“.

Цена подписки на год 1 р. 32 к.



СЕРИЯ

ФИЗИКА