

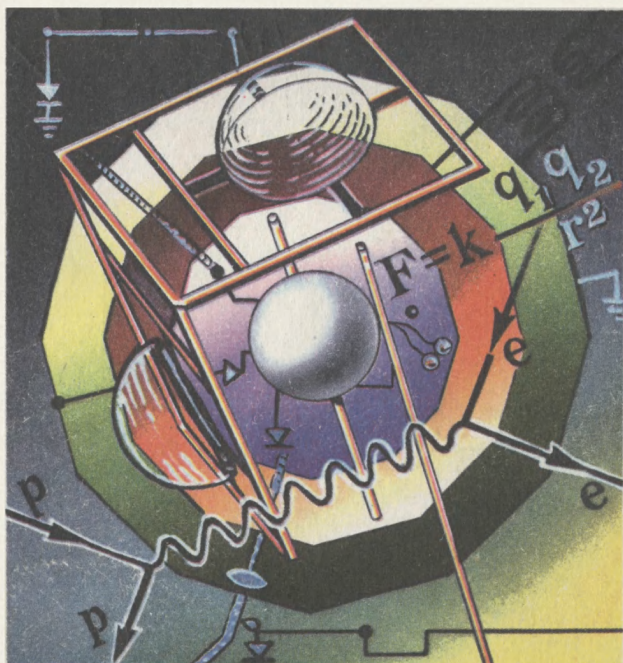


БИБЛИОТЕЧКА • КВАНТ •

выпуск 79

С.Р. ФИЛОНОВИЧ

СУДЬБА КЛАССИЧЕСКОГО ЗАКОНА



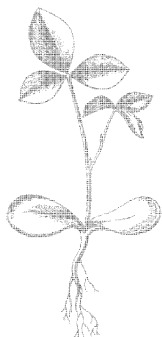


БИБЛИОТЕЧКА • КВАНТ •
выпуск 79

С.Р. ФИЛОНОВИЧ

СУДЬБА КЛАССИЧЕСКОГО ЗАКОНА

**ПРОШЛОЕ
И НАСТОЯЩЕЕ
ЗАКОНА КУЛОНА**



МОСКВА «НАУКА»
ГЛАВНАЯ РЕДАКЦИЯ
ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ЛИТЕРАТУРЫ
1990

ББК 22.33
Ф 55
УДК 537.2(023)

Серия «Библиотечка «Квант»
основана в 1980 г.

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

Академик **Ю. А. Осипьян** (председатель), доктор физико-математических наук **А. И. Буздин** (ученый секретарь), академик **А. А. Абрикосов**, академик **А. С. Боровик-Романов**, академик **Б. К. Вайнштейн**, заслуженный учитель РСФСР **Б. В. Воздвиженский**, академик **В. Л. Гинзбург**, академик **Ю. В. Гуляев**, профессор **С. П. Капица**, академик **А. Б. Мигдал**, академик **С. П. Новиков**, академик АПН СССР **В. Г. Разумовский**, академик **Р. З. Сагдеев**, профессор **Я. А. Смородинский**, член-корреспондент АН СССР

Д. К. Фаддеев

Рецензент доктор философских наук **Г. Я. Мякишев**

Филонович С. Р.

Ф 55 Судьба классического закона.—М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1990. — 240 с. — (Б-чка «Квант»; Вып. 79)

ISBN 5-02-014087-2

Знакомство с событиями, связанными с основным законом электростатики—законом Кулона, помогает определить его место в современной физике, лучше понять многие проблемы электростатики. Много внимания уделяется жизни и деятельности ученых—творцов науки об электричестве (У. Гильберта, Ш. Дюфе, Ш. Кулона, Г. Кавендиша, Дж. Максвелла и др.). Однако не история, а физика—главный герой книги, на страницах которой рассказывается о механизме электризации трением и работе электрофорной машины, об используемых в наши дни методах проверки закон Кулона и границах его применимости, а также о многих других интересных физических вопросах.

Для школьников, студентов, преподавателей.

Ф $\frac{1604050000-004}{053 (02)-90}$ 186-90

ББК 22.33

ISBN 5-02-014087-2

© Издательство «Наука».
Главная редакция
физико-математической
литературы, 1990

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение

| | |
|--|-----|
| Глава 1. ПЕРВЫЕ НАХОДКИ, ПЕРВЫЕ ЗАГАДКИ | 8 |
| Электричество в тени магнетизма | 9 |
| Главное дело жизни придворного медика | 13 |
| «Что такое электризация трением?» | 18 |
| Следующий шаг | 24 |
| Машина со сложным названием | 29 |
| Глава 2. КРИСТАЛЛИЗАЦИЯ ПРОБЛЕМЫ | 35 |
| Наследники Гильберта | 36 |
| Шарль Дюфэ и его исследовательская программа | 42 |
| Первые теории электричества | 47 |
| Что измерять? Как измерять? | 52 |
| Глава 3. «НУЛЕВОЙ» МЕТОД, ИЛИ ЧТО МОЖНО УЗНАТЬ О СИЛЕ, НЕ ИЗМЕРЯЯ ЕЕ | 57 |
| Удивительное наблюдение | 57 |
| Опальный химик и электричество | 58 |
| Загадка Генри Кавендиша | 64 |
| «Нулевой» метод в действии | 71 |
| Глава 4. ЗАКОН ИМЕНИ... ВОЕННОГО ИНЖЕНЕРА | 77 |
| Обманчивая простота | 77 |
| Долгий путь к физике | 83 |
| Рождение крутильных весов | 87 |
| Проверка закона | 96 |
| Глава 5. ЗАКОН КУЛОНА И УРАВНЕНИЯ МАКСВЕЛЛА | 114 |
| От «электричества и магнетизма» к «электромагнетизму» | 115 |
| Дело жизни | 123 |
| «Первый среди равных» | 131 |
| Новая проверка | 143 |
| Глава 6. ОБ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ЗАРЯДЕ И ЕГО СВОЙСТВАХ | 146 |
| Открытие электрона | 147 |
| Измерение заряда электрона и дискретность заряда | 157 |
| В поисках дробных зарядов | 167 |
| Закон сохранения электрического заряда | 171 |
| Заряд в движении | 175 |

| | |
|--|------------|
| Г л а в а 7. МАСШТАБЫ И ПРЕДЕЛЫ | 183 |
| Пушки и снаряды | 184 |
| Электрические модели атома | 189 |
| Стрельба по мишеням | 191 |
| От классической электродинамики к электродинамике квантовой | 198 |
| Г л а в а 8. НОВЫЕ ПОДТВЕРЖДЕНИЯ | 205 |
| Вслед за Кавендишем и Максвеллом | 206 |
| «От двух до пяти» | 211 |
| «Новая экспериментальная проверка закона Кулона: лабораторный верхний предел массы покоя фотона» | 219 |
| Г л а в а 9. ЗАКОН-ВETERAN В НОВОЙ ФИЗИКЕ | 224 |
| О принципе соответствия | 224 |
| О массе покоя фотона | 227 |
| Что если «охладить» фотон? | 231 |
| Закон Кулона и трехмерность пространства | 236 |

ВВЕДЕНИЕ

Закон не может быть точным хотя бы потому, что понятия, с помощью которых мы его формулируем, могут развиваться и в будущем оказаться недостаточными.

А. Эйнштейн

Законы физики. Сколько их? Сложны ли они? Если мы зададим эти вопросы вчерашним десятиклассникам, то получим, разумеется, самые разные ответы. Большинство, вероятно, скажет, что законов физики много и они довольно сложны. Однако среди изучаемых в школе законов есть и такие, что с легкостью запоминаются большинством учащихся и на этом основании кажутся им очень простыми.

К числу этих «любимых» школьниками законов относится и закон Кулона, описывающий взаимодействие неподвижных точечных зарядов. В формулировке учебника он гласит: «Сила взаимодействия точечных неподвижных заряженных тел в вакууме прямо пропорциональна произведению их зарядов и обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними». И далее: «Силы взаимодействия двух точечных заряженных тел действуют вдоль линии, соединяющей эти тела». Слова «закон Кулона» возбуждают в памяти и формулу для определения модуля силы

$$F = k \frac{q_1 q_2}{R^2},$$

где q_1 и q_2 — модули зарядов, R — расстояние между телами, а k — коэффициент пропорциональности.

Однако это простое с виду соотношение при более внимательном рассмотрении оказывается не таким уж элементарным. Если вы в этом сомневаетесь, то попробуйте ответить на несколько вопросов, связанных с законом Кулона. Почему в нем идет речь о точечных телах, а не о наэлектризованных телах любых размеров? Каков диапазон расстояний, на которых закон Кулона остается справедливым? Могут ли величины q_1 и q_2 принимать произвольные значения? Как меняется вид закона для случая движущихся зарядов? Какие дополнительные предположения нужно сделать, чтобы рассчитать силу, действующую на заряженное тело со стороны системы, состоящей из нескольких заряженных тел? Наверное, даже многие из тех, кто знаком с основами

учения об электричестве, затруднятся дать исчерпывающие ответы на эти вопросы. Это означает, что за простой формулировкой закона Кулона скрывается много сложностей реального физического мира, который ученые-физики исследуют уже на протяжении многих столетий.

Знакомство с историей физики в целом и развитием отдельных ее областей способствует не только расширению кругозора изучающего этот предмет, оно помогает лучше понять структуру физических теорий, соотношение между данными опыта и выводами из этих теорий. А как поучительно подчас бывает проанализировать результаты исторически значимого эксперимента с позиций современной физики! Но не будем голословными. Попробуем на примере все того же закона Кулона показать, как история физики может помочь в изучении самого предмета. Для этого поставим перед читателем еще несколько вопросов.

В формулировку закона Кулона входит понятие «модуль заряда». Очевидно, что если мы хотим пользоваться этой формулировкой, то необходимо дать определение модуля заряда независимо. Многие, вероятно, помнят, что это определение строится на основе представления о силе электрического тока. Но явления, связанные с протеканием электрического тока, были исследованы позже установления закона Кулона. Каким образом формировался закон взаимодействия неподвижных точечных зарядов до открытия тока? Как в то время строилась количественная теория электричества?

Но, может быть, это слишком сложные вопросы? Давайте обратимся к более простым. В начальный период изучения электрических явлений основным, даже единственным способом электризации было натирание так называемых электрических тел, подобных янтарю и стеклу, шерстью, кожей, мехом. К этому способу «электризации трением» и в наши дни прибегают при проведении демонстрационных опытов. А каков механизм электризации трением с точки зрения современной физики? Почему эффективность этого метода зависит от состояния атмосферы (температуры и влажности)? Почему при проведении опытов эбонитовую палочку обычно натирают кожей, а стеклянную — мехом? Если вы не можете ответить и на эти вопросы, не отчаивайтесь: несмотря на солидный «возраст» метода электризации трением достаточно обоснованное объяснение его механизма было найдено учеными буквально в последние десятилетия.

Мы уже поставили перед читателем столько вопросов, что он вправе спросить: «А где же ответы?» Ответы на эти и

другие вопросы, связанные с законом Кулона, можно найти на страницах книги, которую вы держите в руках. «Но почему выбран именно закон Кулона, а не какой-нибудь другой закон физики?» — этот вопрос также кажется вполне естественным. Дело в том, что история закона Кулона весьма поучительна. Она начинается с первых шагов исследований в области электричества и тянется практически до наших дней: достаточно сказать, что вопрос о том, является ли закон Кулона точным законом «обратных квадратов», и факт равенства нулю массы покоя фотона в современной физике теснейшим образом связаны друг с другом...

В последующих главах будет рассказано о важнейших опытах по электричеству (точнее — по электростатике), приведших к формированию системы понятий этого раздела физики и установлению его основного закона. Читатель узнает и о том, какое место занимает этот, самый древний, раздел учения об электричестве в структуре современной физики. Физику творят живые люди, и их судьбы часто становятся неотъемлемой частью истории науки. В развитие электростатики важный вклад внесли придворный врач Гильберт и бургомистр Герике, механик Гауксби и политический деятель Франклин, военный инженер Кулон и аристократ Кавендиш, ее история связана с именами Максвелла, Дж. Дж. Томсона, Милликена, Резерфорда и других ученых. Об их жизни и научных исследованиях можно узнать, прочитав эту книгу.

И все же книга, которую вы держите в руках, представляет собой не просто еще один исторический обзор развития представлений об электричестве. Это, скорее, рассказ о физике, основанный на ее истории. Поэтому при рассмотрении тех или иных событий из истории науки мы будем опираться на элементарные представления об электричестве, не выходя за пределы школьного курса физики. И хотя в целом изложение построено по хронологическому принципу, оно не раз будет прерываться обсуждением конкретных физических вопросов и решением простых, но поучительных задач, которые основаны на современных представлениях о предмете. И если знакомство с судьбами выдающихся естествоиспытателей, анализ экспериментов, сыгравших важную роль в становлении науки об электричестве, и решение физических задач, связанных с историей, покажутся читателю интересными и побудят его к более подробному знакомству с физикой и ее историей, то автор будет считать свою задачу выполненной.

ПЕРВЫЕ НАХОДКИ, ПЕРВЫЕ ЗАГАДКИ

Год 1600-й. Рубеж двух веков. Уходящий XVI в. ознаменовался важнейшими политическими событиями (вспомним хотя бы правление Ивана Грозного и первую буржуазную революцию в Нидерландах), на него выпало первое кругосветное путешествие, он славен именами Тициана и Микеланджело, это начало творчества Шекспира, для науки — это столетие Коперника... Наступающий XVII в. будет не менее богат важнейшими политическими событиями: Тридцатилетняя война в Центральной Европе, расцвет абсолютистской монархии во Франции, буржуазная революция в Англии, восшествие на престол юного Петра I. В историю культуры этот век войдет именами Корнеля и Расина, Лопе да Вега и Мольера, Монтеверди и Пёрселла, Веласкеса и Рубенса, Рембрандта и Пуссена. Наконец, это век великой научной революции, творцами которой были Кеплер и Галилей, Гюйгенс и Ньютон и множество других выдающихся естествоиспытателей. Год 1600-й, разделивший столь непохожие друг на друга столетия, ознаменовался двумя важными и во многом символическими для истории науки событиями: в этом году в Риме на костре инквизиции был сожжен выдающийся мыслитель Джордано Бруно, а в Лондоне вышла в свет книга лейб-медика королевы Англии Уильяма Гильберта с длинным названием «О магните, магнитных телах и о большом магните — Земле» (сокращенно — «De Magnete»). Если деятельность Бруно была символом активной борьбы против затхлой церковной схоластики, то книга Гильберта стала одним из первых произведений нового естествознания, в котором автор не рассуждал о природе, а исследовал ее посредством экспериментального метода.

Книга Гильберта представляет интерес для нашего рассказа о развитии науки об электричестве не только в плане развития методологии научных исследований. «De Magnete» — важнейшая веха в конкретном изучении электрических явлений, известных еще со времен античности.

И пусть читателя не вводит в заблуждение название книги — в ней автор касается не только магнитных явлений, но достаточно подробно обсуждает и эффекты электричества.

Электричество в тени магнетизма

Наверняка все, кто когда-либо изучал физику, согласятся с тем, что даже описание магнитных явлений гораздо сложнее, чем описание явлений чисто электрических. Поэтому на первый взгляд может показаться, что исследования электричества должны были предшествовать исследованиям магнетизма.

Однако это почти очевидное предположение резко противоречит историческим фактам. В связи с этим вспоминаются слова выдающегося советского физика и историка науки академика С. И. Вавилова:

«Часто понимают историю науки как последовательное, «одномерное» развитие усложняющегося знания. Эта исключительно стройная схема изолирует науку от живого человеческого общества и личности, от истории в широком смысле и мало похожа на действительность. Она повторяет развернутую во времени внутреннюю логику научной догмы сегодняшнего дня, в этом ее дидактическое оправдание и в этом же ее основной порок. Известно, что последовательность такой логики редко совпадает со сложными зигзагами подлинно происходящего».

В реальной истории электрические явления длительное время находились как бы в тени магнитных эффектов. Для этого имелись весьма серьезные основания. В них полезно разобраться подробнее.

Одна из причин определялась общей закономерностью развития науки: как правило, она решает в первую очередь задачи, выдвинутые практикой. В этом отношении поначалу магнетизм имел заметное преимущество перед электричеством. Действительно, магнитный компас, известный на Востоке уже в I в. н. э. и применявшийся в Европе с XIII в., был важнейшим инструментом при дальних морских путешествиях. После великих географических открытий XV—XVI вв., завоеваний европейскими странами новых колоний, которые привели к бурному развитию морской торговли, вопрос об усовершенствовании ориентации на море с помощью компаса превратился в одну из наиболее актуальных проблем науки и практики. Для ее решения требовалось найти ответы на множество вопросов. Перечислим

лишь самые очевидные (хотя и далеко не самые простые) из них.

Почему стрелка компаса вообще ориентируется вдоль определенного направления? Какие вещества обладают свойствами, в наибольшей степени отвечающими потребностям компасного дела? Почему направление магнитной стрелки несколько отличается от направления географического меридиана (т. е. существует так называемое магнитное склонение)? Почему иногда стрелка компаса начинает вести себя очень странно и ее нельзя использовать для ориентации корабля? Вопросы эти, как видно, были очень важны для практики и поэтому привлекали внимание ученых и многочисленных любителей естествознания.

А электричество? Какое место в сфере интересов ученых занимало оно на рубеже XVI—XVII вв.?

Строго говоря, люди с глубокой древности были знакомы с целым рядом электрических явлений. Назовем хотя бы разряды, которые создает электрический скат — рыба, об удивительных свойствах которой знали уже древние египтяне и о которой позднее писали многие греческие и римские авторы. Во времена античности не раз описывалось явление, которое в средние века получило название «огни святого Эльма» — тлеющий газовый разряд, возникающий на острых концах высоких предметов в грозовую погоду и сопровождающийся заметным свечением. Но, конечно, наиболее известным было свойство янтаря, который при натирании начинал притягивать легкие предметы. Следует отметить, что три перечисленных эффекта в представлении древних никак не связывались между собой. Фактически в развитии науки об электричестве ведущую роль сыграло изучение свойств натертого янтаря *).

Притяжение легких предметов натертым янтарем в представлении как древних, так и средневековых ученых объединялось со свойством магнетита (железной руды) притягивать железо. Так электрические явления впервые «соединились» с магнитными. Однако слабость эффекта притяжения янтаря и его кратковременность в сравнении с действием магнетита и полное отсутствие практического

*) По-гречески янтарь — *ήλεκτρον*, т. е. «электрон». Таким образом, роль этого вещества в истории электричества нашла свое отражение в современной научной терминологии. Отметим, что словом «электрон» в Древней Греции называли и сплав золота и серебра, использовавшийся в ювелирном деле. Общность названий происходит, по-видимому, от общности цветов янтаря и этого сплава.

применения этого слабого притяжения обусловили то, что свойства янтаря оказались на периферии интересов ученых, занимавшихся проблемами минералогии и металлургии. Примером тому может служить суждение знаменитого немецкого естествоиспытателя Георга Бауэра (1494—1555), латинизированное имя которого — Агрикола, считавшего, что если между притяжением янтаря и притяжением магнита и существует различие, то оно носит скорее количественный, нежели качественный характер.

Первым, кто стал настаивать на различии в электрическом и магнитном притяжении, был знаменитый итальянский математик, изобретатель и врач Иероним Кардано (1501—1576). В одном из трактатов он указал причины, на которых основывалось его мнение:

«Янтарь притягивает все легкое; магнит же — только железо. Янтарь не притягивает к себе соломинку, когда что-либо их разделяет; притяжение железа к магниту не испытывает аналогичных помех.

Янтарь не испытывает взаимного притяжения к соломинке; магнит же притягивается к железу.

Янтарь не притягивает концом, магнит притягивает железо иногда к северному полюсу, а иногда — к южному.

Притяжение янтаря значительно усиливается нагреванием и трением; притяжение магнита усиливается путем чистки притягивающих частей».

Попробуем уточнить, все ли доводы Кардано убедительны с современной точки зрения. Притяжение легких тел натертым янтарем обусловлено, главным образом, явлением электростатической индукции, которой подвержены в той или иной степени все тела; магниты оказывают заметное действие лишь на ферромагнитные и антиферромагнитные материалы, из которых самым распространенным является железо. Так что первое замечание Кардано в целом отражает действительность.

Второе замечание Кардано трудно оценить однозначно. Действительно, если рассмотреть взаимодействие двух тел, одного заряженного, а другого нейтрального, между которыми помещена преграда, то нетрудно убедиться, что это взаимодействие решающим образом зависит от того, сделана ли преграда из диэлектрика или металла, а металл заземлен или нет. Для иллюстрации на рис. 1 показано распределение зарядов и силы, действующих на незаряженное проводящее тело в двух случаях: когда оно помещено рядом с заряженным шаром, окруженным незаземленной незаряженной металлической сеткой (а), и когда при таком же

расположении тел сетка заземлена (б). Очевидно, что наличие незаземленной сетки не сказывается заметным образом на силе, с которой незаряженное тело притягивается к заряженному шару, а при заземлении эта сила исчезает: в этом случае говорят, что действие заряда на шаре экранировано.

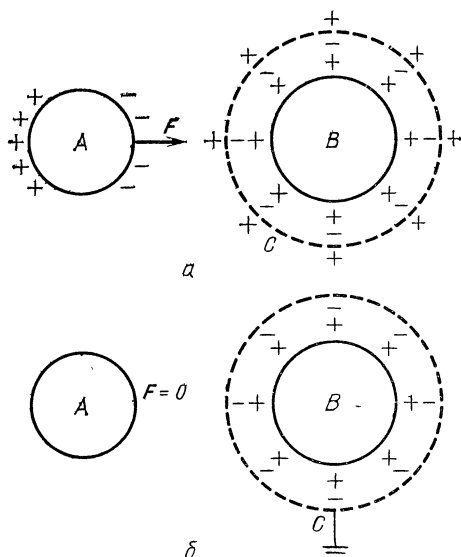


Рис. 1. Взаимодействие заряженного тела (A) с незаряженным (B):
 а — тело A окружено изолированной незаряженной металлической сеткой; б — сетка, окружающая тело A, заземлена

Третье замечание Кардано уж и вовсе ошибочно. Он, конечно, не знал третьего закона Ньютона, а значительное различие масс соломинки и куска янтаря приводило к кажущемуся неравенству действия и противодействия.

Четвертое замечание Кардано соответствует современным представлениям об относительном постоянстве действия полюсов магнита и отсутствию таких полюсов у заряженных тел. Пятое замечание вызывает двойственное чувство: трение действительно способно до некоторой степени усилить эффект притяжения янтаря, что же касается нагревания, то без анализа конкретных условий проведения опыта сделать однозначный вывод о его роли практически невозможно.

Таким образом, мы видим, что в ранних наблюдениях электрических явлений правильные выводы соседствовали с ошибочными и отделить зерна истины от сорняков заблуж-

лений было очень сложно. Причин такого положения было много, и о некоторых из них мы еще расскажем. В связи с суждениями Кардано хотелось бы обратить внимание на глубокое отличие наблюдений, на которых основывались эти суждения, от экспериментов, характерных для современной физики. Простые наблюдения, особенно таких сложных явлений как электрические, не позволяют выявить основные причины и факторы, их определяющие. Для этого необходим анализ эффектов, возникающих в специально созданных и контролируемых условиях. В уяснении необходимости исследовать природу с помощью целенаправленно поставленных опытов и состояла одна из важнейших сторон научной революции, которая разворачивалась в Европе на рубеже XVI—XVII вв. И, как уже отмечалось, одной из первых ласточек этой революции стала книга Гильберта «О магните».

Главное дело жизни придворного медика

Перед нами картина (рис. 2). На ней изображен немолодой уже человек, демонстрирующий окружающим простой опыт по электричеству: легкие кусочки бума-



Рис. 2. Гильберт демонстрирует опыты по электричеству королеве Англии (с картины Э. Худа)

ги под действием притяжения натертого стеклянного стержня поднимаются с подноса, который экспериментатор держит в руках. Так представил себе художник XIX в. зна-

менательный момент: лейб-медик английского двора Уильям Гильберт знакомит со своими опытами по электричеству королеву Елизавету Тюдор и ее придворных. Событие это не имеет документального подтверждения, однако при более близком знакомстве с жизнью Гильберта невольно приходишь к выводу, что оно вполне могло иметь место.

Уильям Гильберт родился около 1540 г. в Колчестере (Англия) в семье уважаемого гражданина города, исполнявшего обязанности его главного судьи.



Уильям Гильберт

Окончив среднюю школу в своем родном городе, Уильям поступил в Кембрижский университет, в колледж св. Джона. Студентом Гильберт был, видимо, прилежным, и после завершения учебы он не бросил занятия наукой: вслед за получением степени бакалавра он становится магистром искусств и, наконец, в 1569 г. удостоивается степени доктора медицины.

Уже в 60-е гг. Гильберт приобрел известность как практикующий врач, причем ему приходилось применять свое искусство не только в Англии, но и в других странах Евро-

пы. Свидетельством признания квалификации Гильберта стало его избрание членом Королевского колледжа врачей — организации со строгим уставом и высокими требованиями, предъявлявшимися к ее членам. В конце жизни Гильберт был избран президентом Колледжа. Наконец, благодаря успехам в медицинской практике он был назначен лейб-медиком королевского двора; эти обязанности он выполнял вплоть до кончины (1603 г.).

Однако обширная медицинская практика не мешала Гильберту заниматься исследованиями и в различных областях естествознания. Неудивительно поэтому, что в его доме часто собирались друзья — любители науки. Среди них было немало моряков и путешественников. Видимо, под влиянием их рассказов о далеких плаваниях Гильберт заинтересовался свойствами магнита и магнитного компаса. Исследованиям этих свойств ученый отдал около пятнадц-

цати лет жизни. Их итогом и стала книга «De Magnete» (рис. 3).

«Ввиду того что при исследовании тайн и отыскании скрытых причин вещей, благодаря точным опытам и опирающимся на них аргументам, получают более сильные

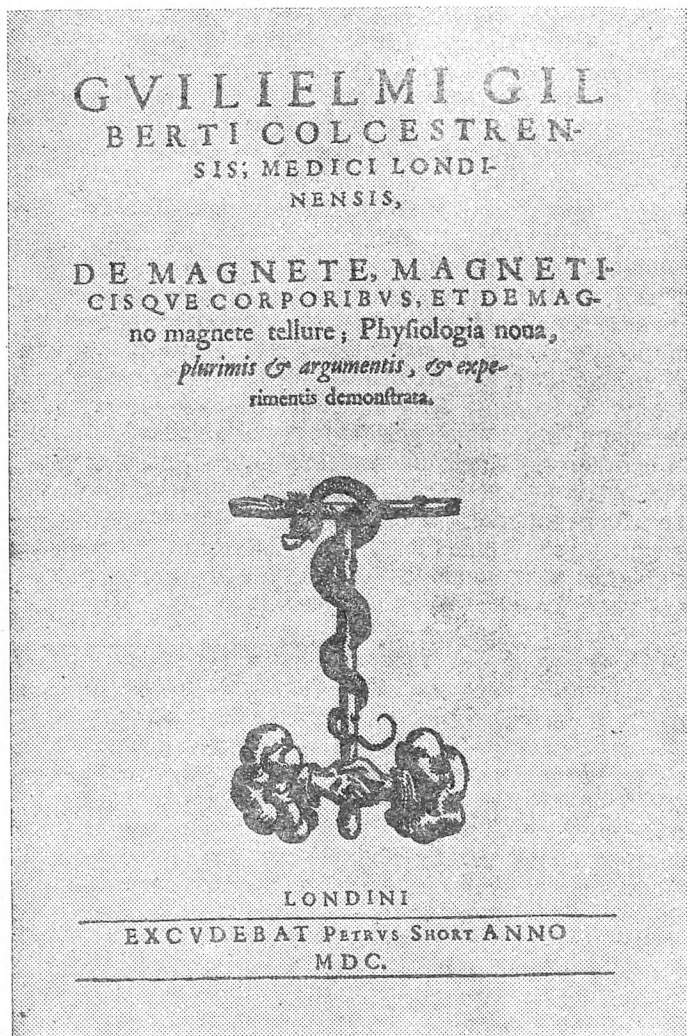


Рис. 3. Титульный лист книги Гильберта «О магните»

доводы, нежели от основанных на одном только правдоподобии предположений и мнений вульгарных философов, мы поставили себе целью — для выяснения благородной сущности совершенно неизвестного до сих пор большого магнита, всеобщей матери (Земли), и замечательной и выдающейся силы этого шара — начать с общеизвестных каменных и железных магнитов, магнитных тел и наиболее близких к ним частей Земли, которые можно ощупывать руками и воспринимать чувствами. {...} Мы нашли, что этот наш труд не был бесполезным и бесплодным, так как при наших ежедневных опытах выяснились новые и неведомые особенности и благодаря тщательному рассмотрению вещей философия обогатилась в такой степени, что мы получили возможность приступить к объяснению с помощью магнитных принципов внутренних частей земного шара и его подлинной сущности и к ознакомлению людей с Землей (всеобщей матерью), как бы показывая на нее пальцем посредством истинных доказательств и опытов, прямо воспринимаемых нашими чувствами. Подобно тому как геометрия восходит от очень малых и легких оснований к величайшему и труднейшему, благодаря чему проницательный ум возносится выше эфира, так и наше учение и наука о магните показывают в соответствующей последовательности сначала некоторые не очень резкие явления, вслед за ними обнаруживают более замечательные, наконец — в порядке очереди — раскрываются величайшие и сокровенные тайны земного шара и познаются их причины — все то, что оставалось неизвестным и было упущено из-за невежества древних или нерадивости новых ученых».

Этот пространный отрывок из предисловия к книге Гильберта прекрасно иллюстрирует его общие требования к методу научного познания: необходимость опытного, а не словесного исследования природы и индуктивного подхода (от элементарных фактов к общим выводам) к решению научных проблем. На протяжении всей книги Гильберт как бы дает современникам предметный урок реализации этих принципов для изучения конкретных явлений. Конечно, в соответствии с названием, большая часть книги посвящена магнитным явлениям, которые лежат за рамками нашей темы. Однако по традиции в одной из глав Гильберт касается «притяжения янтаря». Эта глава называется «О магнитном сходении и прежде всего о притяжении янтаря или, вернее, о приставании тел к янтарию». В ней, как и во введении ко всей книге, ученый клеймит лжеученых, рассуждающих о свойствах янтаря:

«Наше время создало много книг о скрытых, тайных и сокровенных причинах и чудесах. Во всех янтари и гагаты (камень, добывавшийся в Англии.— С. Ф.) упоминаются как притягивающие мякину, однако в них нет никаких доводов, основанных на опытах и наглядных доказательствах. Они действуют лишь словами, напуская еще больший туман на существо дела, именно — «скрыто, чудесно, таинственно, недоступно, сокровенно». Поэтому такая философия не дает никаких плодов».

Далее Гильберт описывает прибор для наблюдения электрического притяжения — первый «электроскоп» (рис. 4):

«Для того чтобы иметь возможность узнать на основании ясного опыта, каким образом происходит такое 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 (7,6—10 см.— С. Ф.), 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».

Принцип действия прибора Гильберта очевиден. При приближении к концу стрелки заряженного тела на ней вследствие электростатической индукции происходит перераспределение зарядов. На конце, ближайшем к телу, наводится заряд противоположного знака (по отношению к заряду на теле), из-за чего возникают силы притяжения между телом и стрелкой, и она поворачивается.

Полезно задать себе вопрос: в чем состоит принципиальное отличие «электроскопа» Гильберта от современных приборов? Оно заключается в том, что «электроскоп» может быть лишь *индикатором* заряда, но он непригоден для проведения даже грубых измерений. В чем же причина? В том, что стрелка на острие находится в состоянии *безразличного равновесия*. В любом измерительном приборе его важнейшая часть — подвижный элемент (рамка, пластина или стрелка) находится в отсутствие внешнего воздействия в состоянии *устойчивого равновесия*. Под действием внешнего возмущения подвижный элемент выходит из этого состояния, вслед-

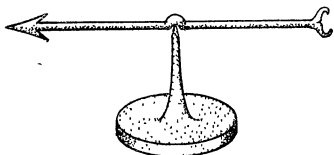


Рис. 4. Прибор Гильберта — первый электроскоп

ствие чего возникает сила, стремящаяся возвратить его в положение равновесия. Новое равновесное состояние элемента устанавливается, когда действия внешней и возвращающей сил компенсируются. Поскольку возвращающая сила, как правило, тем больше, чем больше отклонение от исходного положения равновесия, то это отклонение и может служить *мерой* внешнего воздействия. Ясно, что в «электроскопе» Гильберта поворот стрелки не может быть выбран в качестве такой меры, поскольку угол поворота зависит не от силы внешнего воздействия, а от начального положения стрелки по отношению к поднесенному к ней заряженному телу. Заметим, что *магнитная* стрелка на острие (например, в компасе), в принципе, может использоваться для измерений, поскольку у нее есть положение устойчивого равновесия — в плоскости магнитного меридиана. В XIX в. это свойство магнитной стрелки на острие было использовано при создании прибора для измерений электрического тока — так называемой тангенс-буссоли.

С помощью столь примитивного прибора, как стрелка на острие, Гильберту, конечно, не удалось провести подробное исследование электрического притяжения. Вторая глава его книги наполнена пространными рассуждениями об ошибочности теорий притяжения янтаря и содержит мало новых наблюдений. Впрочем, Гильберт, предлагая теорию электрических истечений, на основе которой объясняются известные эффекты, сам не претендует на окончательное разрешение вопроса. Он, в частности, пишет:

«Это притяжение янтаря и электрических тел нуждается в дальнейшем исследовании; ввиду того что оно представляет собой некое воздействие на материю, можно задать вопрос, для чего янтарь натирается, в чем заключается воздействие трения и какие от этого возникают причины для захватывания веса тела».

Развитие науки показало, что вопрос Гильберта был адресован ...физикам XX в.

«Что такое электризация трением?»

Почему заглавие этого параграфа взято в кавычки? Объяснение очень простое — это название заимствовано. Не подумайте только, что так озаглавлен какой-то старинный трактат или мемуар в научном издании XVII—XVIII вв. Это название научной статьи ленинградского физика М. И. Корнфельда, опубликованной в журнале

АН СССР «Физика твердого тела» за 1969 г. Появление статьи ее автор пояснил следующим образом:

«В свое время при изучении избыточных электрических зарядов в ионных кристаллах *) мне пришлось задуматься над «электризацией трением» — явлением, известным уже древним грекам. Оказалось, что я не имею ни малейшего представления о механизме электризации. Литература не внесла должной ясности в мое понимание явления, поэтому не оставалось ничего иного, как обратиться к эксперименту».

Такое вступление вовсе не характерно для современных научных статей, особенно если они касаются явлений, «известных уже древним грекам». Оно лишний раз подчеркивает необычность ситуации: давно известный и широко используемый физический эффект лишь в наши дни получил надежно обоснованное экспериментом объяснение. Это объяснение сводится к следующему.

Твердые кристаллические диэлектрики никогда не бывают идеальными, они всегда содержат так называемые структурные дефекты. Простейшим из них является вакансия, которая образуется, если в узле кристаллической решетки отсутствует ион или атом. Имеются и более сложные дефекты. Их наличие приводит к тому, что полный собственный заряд кристалла никогда не равен нулю. Вследствие этого вокруг кристалла возникает электрическое поле. На воздухе, в котором всегда имеется некоторое количество ионов разных знаков, под действием собственного электрического поля кристалла на его поверхность оседают ионы противоположного знака, которые постепенно нейтрализуют собственный заряд кристалла. Таким образом, нейтральность кристаллических диэлектриков обеспечивается «ионной шубой», осевшей на поверхности. При трении «ионная шуба» как бы обдирается, и кристалл вновь оказывается заряженным.

Такова общая схема механизма, предложенного М. И. Корнфельдом. Для его доказательства потребовалось провести ряд простых по идее, но требующих большой аккуратности и осторожности экспериментов.

Опыты проводились с образцами из различных материалов (фторопласта, янтаря, рубина и др.). Они имели форму цилиндров диаметром 10 и высотой 14 мм. Образцы

*) Ионными называются кристаллы, в узлах решетки которых находятся ионы различных знаков, взаимодействующие между собой посредством электростатических сил. — С. Ф.

крепилась к латунному держателю, который мог входить в основание и патрубок (рис. 5). При проведении экспериментов держатель одного из образцов вставлялся в основание, а второго — в патрубок. Затем патрубок опускался на основание и образцы приводились в контакт, причем

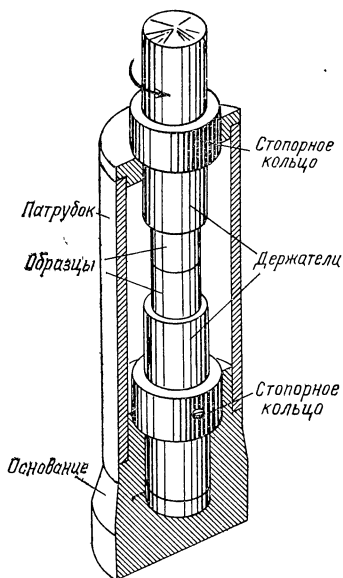


Рис. 5. Устройство Корнфельда для изучения электризации трением

верхний прижимался к нижнему лишь своей тяжестью. Экспериментатор, взявшись за верхний держатель, поворачивал верхний образец относительно нижнего со скоростью примерно 0,5 оборота в секунду. Через каждые три оборота держатели вынимались для измерения электризации образцов, после чего их, поменяв местами, устанавливали обратно для продолжения эксперимента.

Наиболее ответственная часть опыта — измерение заряда образцов. Оно проводилось с помощью специального чувствительного электрометра.

Каковы же были результаты первых экспериментов?

Выяснилось, что соприкосновение образцов без вращения не приводит к заметной электризации. При вращении электризация постепенно увеличивается, приближаясь к некоторому предельному значению. При этом оказалось, что сумма зарядов трущихся образцов с точностью до нескольких процентов на протяжении опыта остается равной нулю. На рис. 6 показана зависимость потенциала образцов U (пропорционального их заряду) полиметилметакрилата и фторопласта от числа оборотов образца n , которая иллюстрирует указанные закономерности.

Однако неизменность суммарного заряда образцов свидетельствует лишь о том, что заряды перераспределяются между ними. В перераспределении, в принципе, могут принимать участие как ионы «шубы», так и носители заряда, принадлежащие самим телам. Можно ли решить, какие заряды играют главную роль в этих процессах?

Оказалось, что на этот вопрос можно ответить, если в опыте использовать два одинаковых образца. В этом случае исключаются всякие причины для обмена собственными носителями и электризация должна быть обусловлена только ионами «шубы». В проверочных опытах использовались кристаллы рубина, тщательно (как говорят, с оптической точностью) пришлифованные друг к другу. Измерения показали, что и закономерности, и порядок величины электризации, характерные для пар разнородных веществ, наблюдаются и для пары рубин — рубин. Это означает, что электризация обусловлена «ионными шубами» торцов образцов. У каждого кристалла — свой избыточный заряд, а значит, и своя специфическая «шуба». Поэтому при трении двух кристаллов одинаковой природы «перемешивание» их «ионных шуб» может приводить к электризации обоих кристаллов.

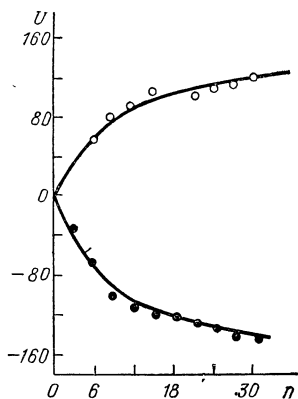


Рис. 6. Зависимость потенциала образцов U от числа оборотов n

И все же у некоторых читателей может возникнуть сомнение в обоснованности сделанного вывода. Ярый скептик может спросить: «А почему вы уверены, что собственные заряды образцов одинаковы? Ведь если они различаются, то предположение о «выключении» обмена собственными носителями заряда несправедливо!» Ну что ж, в современной экспериментальной физике, где очень редко можно получить результаты, свободные от каких-либо возражений, есть выход: одно утверждение следует подтвердить несколькими фактами, независимыми друг от друга. В данном случае тоже имеются экспериментальные данные, подтверждающие сделанный вывод. Они касаются закономерностей уменьшения электризации, полученной с помощью трения, с течением времени. Исследования показали, что на открытом воздухе заряд спадает практически до нуля за сутки. Если же наэлектризованный образец остается в небольшой камере, закрытой для доступа свежего воздуха, то он сохраняет свой заряд в течение нескольких недель. Это означает, что в процессе компенсации заряда основную роль играют не объемная проводимость образца и не проводимость, ко

торая может возникать в его поверхностном слое *), а оседание ионов из воздуха. Тем самым данные о компенсации заряда в различных условиях подтверждают и гипотезу о роли «ионной шубы», и выводы, сделанные из других опытов.

Пока мы говорили лишь о качественных результатах опытов. Однако результаты М. И. Корнфельда позволяют сделать и некоторые количественные оценки. Максимальная полученная электризация пары рубин — рубин соответствует 10^9 элементарным зарядам ($1,6 \cdot 10^{-10}$ Кл). Однако исходя из некоторых дополнительных соображений можно считать, что заряд «ионной шубы» должен быть примерно в десять раз больше. Это означает, что собственный заряд рубина лежит в пределах 10^{10} — 10^{11} элементарных зарядов ($1,6 \cdot 10^{-9}$. . . $1,6 \cdot 10^{-8}$ Кл). Много это или мало? На первый взгляд кажется, что очень много — 10^{11} ! Но давайте пойдем к вопросу по-другому. Сколько ионов одного знака должно отсутствовать в узлах кристаллической решетки, чтобы образец имел такой заряд? Для простоты рассмотрим не кристалл рубина, имеющий довольно сложную решетку, а кристалл поваренной соли, где в узлах решетки чередуются ионы Na^+ и Cl^- . Объем образца равен

$$V = \pi \frac{d^2}{4} h,$$

где $d=10$ мм — диаметр цилиндра, $h=14$ мм — его высота.

Расстояние между узлами решетки для кристалла NaCl равно $a=2,8\text{\AA}=2,8 \cdot 10^{-10}$ м. Поскольку решетка этого кристалла кубическая, то объем одного «кубика» $V_0=a^3$. На него приходится один ион: каждый кубик образован восемью ионами, но один ион участвует в образовании восьми «кубиков» в решетке. Это означает, что всего в кристалле объемом V имеется N ионов:

$$N = \frac{V}{V_0} = \frac{\pi d^2 h}{4a^3},$$

из которых половина со знаком «плюс», а половина — «минус». Найдем число положительных ионов в таком

*) Следует отметить, что в опытах с образцом в закрытой камере источником компенсирующего заряда в принципе мог быть латунный держатель, поскольку он был заземлен. Однако на практике эта возможность не «реализовалась»: скорость уменьшения электризации не зависела от того, заземлялся держатель или нет.

кристалле NaCl:

$$N^+ = \frac{\pi d^2 h}{8a^3} = 2,5 \cdot 10^{22}.$$

Из полученного результата следует, что поскольку каждый ион Na^+ несет один элементарный заряд, то для «потери» 10^{11} ионов в образце должна существовать одна вакансия на $2,5 \cdot 10^{11}$ положительных ионов! Значит, даже при очень малой вероятности образования вакансии в процессе роста кристалла вполне могут возникнуть 10^{11} вакансий,

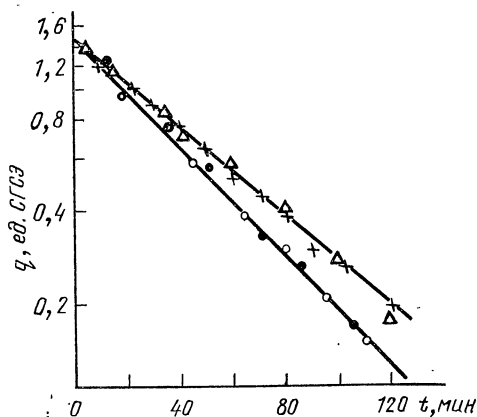


Рис. 7. Зависимость величины остаточного заряда от времени (разными знаками представлены данные измерений различных образцов)

которые и обеспечат собственный заряд образца, соответствующий найденному в эксперименте. В пользу проведенных оценок говорят и данные других опытов М. И. Корнфельда, в которых иным методом определялся заряд кристаллов фтористого лития, похожих на кристаллы поваренной соли: их заряд оказался тоже в пределах $1,6 \cdot 10^{-9} \dots 1,6 \cdot 10^{-8}$ Кл.

Предложенную М. И. Корнфельдом идею относительно электризации трением можно проверить и несколько иначе. Пусть образец диэлектрика наэлектризован трением. Как с течением времени будет спадать его заряд? Опыты показывают, что заряд спадает по экспоненциальному закону

$$q = q_0 \exp(-t/\tau), \quad (1.1)$$

где q_0 — начальное значение заряда, t — время, прошедшее с начала опыта, а τ — постоянная времени, характеризую-

щая скорость уменьшения заряда. Ясно, что если на графике по оси абсцисс откладывать время в линейном масштабе, а по оси ординат — логарифм заряда, то при выполнении соотношения (1.1) экспериментальные точки должны лежать на прямой. В том, что это действительно так, можно убедиться, взглянув на рис. 7, где приведены экспериментальные данные М. И. Корнфельда о зависимости $q(t)$. Из этого графика следует, что постоянная времени $\tau \approx 60$ мин, следовательно, за 1 час заряд уменьшается примерно в 2,8 раза. Если воспользоваться данными метеорологических наблюдений и характеристиками ионов воздуха, то можно показать, что образец вполне способен «переработать» нужный объем воздуха, чтобы его полный заряд уменьшился в нужное число раз.

Таким образом, механизм электризации трением, представляющий стирание «ионной шубы» с поверхности кристалла, оказывается подтвержденным разнообразными опытами и количественными оценками. Следовательно, он правильно отражает важнейшие черты явления.

Следующий шаг

Вернемся из путешествия в наши дни обратно в XVII столетие. Что было сделано учеными после Гильберта в области исследования электричества? При знакомстве с ходом истории невольно напрашивается вывод, что события развивались не слишком быстро. Можно было бы, конечно, отметить отдельные догадки и наблюдения, относящиеся к первой половине XVII в., но они, что называется, «не делали погоду». Первое существенное событие в истории электричества произошло в 60-е гг. этого столетия. Оно было связано с именем человека, известного в наши дни своими исследованиями в совсем иной области. Речь идет об Отто фон Герике.

Герике родился в 1602 г. в Магдебурге, в семье знатного горожанина. Он получил хорошее, разностороннее образование в нескольких немецких университетах: в Хельмштедте и Йене изучал право, в Лейдене — математику и инженерное дело. После возвращения в родной город Герике в возрасте двадцати четырех лет был избран членом городского совета и стал одним из самых активных строителей Магдебурга. Однако 30—40 гг. XVII в. в Германии были не самым удачным временем для созидательной деятельности — страну опустошала страшная Тридцатилетняя война (1618—1648). Не обошла она стороной и Магдебург.

В 1631 г. город был razoren, и Герике пришлось в течение ряда лет служить в качестве инженера в других городах. Однако, находясь на службе то у короля Швеции, то у саксонского курфюрста, Герике не забывал об интересах Магдебурга. Именно он стал представителем города на мирной конференции, положившей конец Тридцатилетней войне.



Отто фон Герике

Вообще дипломатическая деятельность была для Герике основной в течение почти четверти века (1642—1666). Кроме того, с 1646 по 1676 гг. он был бургомистром Магдебурга и постоянной заботой о благе своих соотечественников снискал их глубокое уважение. От должности бургомистра Герике отказался по старости. Последние годы жизни он провел в Гамбурге у сына, который, как и отец, занимал

высокое положение в городском Совете. Умер Герике в 1681 г.

Приведенные факты биографии Герике отражают лишь одну сторону его жизни. При всех ее перипетиях ни на миг не остывала страсть Герике к изучению природы и изобретательству. При этом он был не только активным исследователем, но и энергично пропагандировал свои достижения. Самый яркий пример тому — знаменитые опыты с «магдебургскими полушариями», продемонстрировавшие действие атмосферного давления и доказавшие существование пустоты.

«... Когда я был послан по государственным делам на Имперский сейм, проведенный в 1654 г. в Регенсбурге, некоторые любители этих вопросов (касавшихся пустоты.— С. Ф.) узнали об упомянутых опытах и стали настоятельно от меня требовать, чтобы я показал им некоторые из них, что я и попытался в меру своих возможностей сделать.

К концу сейма, когда его участники уже начали разъезжаться, случилось так, что мои опыты стали известны Его Императорскому Величеству, курфюрстам и некоторым князьям, которые пожелали посмотреть их до отъезда; отказать этому желанию я не мог да и не считал должным.

Больше всего они понравились Высочайшему Курфюрсту Иоганну-Филиппу, архиепископу Матицкому и епископу Вюрцбургскому, и он настоятельно просил меня сделать подобные инструменты. Но так как трудности того времени не позволили мастерам сделать такие же инструменты, он просил меня уступить ему привезенные мною в Регенсбург машины, после уплаты их стоимости, и даже позаботился, чтобы они были перевезены в Вюрцбургский замок».

Так описал Герике обстоятельства демонстрации опыта, вошедшего теперь в школьные учебники. Скромность заставила ученого представить эти события как случайные. Но ведь инструменты для демонстрации оказались у него с собой...

Как часто у нас невольно рождаются сожаления, что тот или иной естествоиспытатель не мог отдавать все свои силы науке! Так и хочется порой сказать: «Если бы Гильберт...» или «Если бы Герике...» Однако эти сожаления далеко не всегда оправданы. Для Герике, например, поездки по различным городам Германии составляли не только часть его обязанностей как государственного деятеля, но и служили способом обмена научной информацией. В середине XVII в., до появления научных журналов, до образования

национальных научных академий сведения о новых опытах, теориях, наблюдениях распространялись либо посредством переписки, либо путем личных контактов ученых. Так что в жизни Герике политика и наука сочетались достаточно гармонично.

Пневматические опыты Герике получили широкую известность в Европе благодаря их описанию, данному профессором-иезуитом К. Шоттом в нескольких книгах. Сам Герике долго не мог найти времени для подготовки собственного сочинения. Под влиянием «магдебургских опытов» к исследованию газов обратился Бойль, привлечший к ним Р. Гука... Так потянулась цепочка открытий.

Однако в 1672 г. в Амстердаме наконец увидела свет книга самого Герике «Новые так называемые магдебургские опыты о пустом пространстве...». В ней ученый как

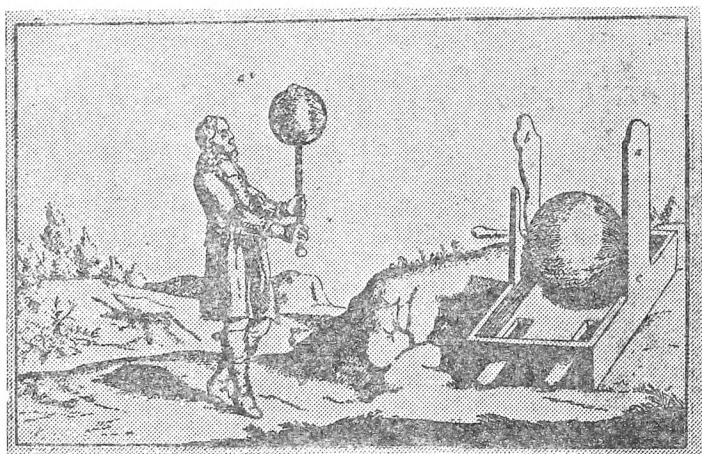


Рис. 8. Электрическая машина Герике

бы подвел итог своих многолетних исследований по пневматике, но не ограничился лишь этой областью. Одна из глав была посвящена электричеству. Она-то и представляет основной интерес для нашего рассказа, поскольку здесь описана первая в истории физики *электрическая машина* (рис. 8):

«Берут [полый] стеклянный шар величиной с голову ребенка, в него насыпают серу, растолченную в ступке, затем ставят его на огонь, где держат до тех пор, пока сера не расплавится; после охлаждения разбивают [стеклянный]

шар и вынимают шар из серы, который сохраняют в сухом, а не влажном месте. При желании в этом шаре можно проделать отверстие таким образом, чтобы он мог приводиться во вращение вокруг железной оси... Под шаром помещают разные обрезки или листочки из золота, серебра, бумаги и других остатков, а затем, касаясь шара очень сухой рукой, натирают его на протяжении двух-трех оборотов или долее. Тогда он притягивает все эти маленькие обрезки и увлекает их за собой по мере вращения вокруг оси так, как если бы перед нашими глазами был земной шар, который подобным образом удерживает посредством притяжения живые существа и все, что располагается на его поверхности, и увлекает их с собой при суточном движении».

Из этого отрывка видно, что вслед за Гильбертом Герике был склонен видеть аналогию между электрическим и гравитационным притяжением. Следует отметить, что она была предложена до открытия закона всемирного тяготения. Мы увидим далее, что эта аналогия сыграет важную роль в истории установления основного закона электростатики.

Полезно оценить, до какого потенциала можно было заряжать шар Герике. Примем его радиус r равным 15 см. Предельная электризация шара соответствует такой напряженности электрического поля, при которой начинается так называемый кистевой разряд ($E_k \approx 10^6$ В/м). Напряженность поля у поверхности шара связана с его потенциалом простым соотношением $E = \varphi/r$. Тогда $\varphi_k = E_k r = 1,5 \cdot 10^5$ В = 150 кВ.

Конечно, на практике с помощью примитивной машины Герике сообщить такой потенциал шару вряд ли удавалось: при значительной электризации трением на воздухе начинают сказываться более тонкие эффекты, которые приводят к ускорению осаждения на шаре «ионной шубы». Но до потенциала в несколько киловольт шар наверняка можно было зарядить.

Создание первой электрической машины было очень существенным шагом вперед. Дело в том, что ее использование позволяло проще наблюдать электрические явления. Применение электрической машины дало возможность увеличить масштабы эффектов: сам Герике описал ряд наблюдений, которые невозможно воспроизвести с помощью традиционных стеклянных палочек. Наконец, электрические опыты стали в значительно меньшей степени зависеть от погодных условий, а, главное, электрические машины обеспечили более высокую воспроизводимость экспериментов.

Все это привело к резкому усилению интереса к электрическим явлениям уже в самом начале XVIII в. Но, прежде чем рассказать о новых опытах и открытиях, давайте заглянем на минуту... в обычный школьный кабинет физики.

Машина со сложным названием

Во многих физических кабинетах можно увидеть прибор, привлекающий внимание необычными очертаниями, — электрофорную машину. Большинству читателей, вероятно, известно, что эта машина используется для «получения» электричества. Однако далеко не многие могут достаточно ясно объяснить принцип ее действия. Между тем он не так уж сложен. Электрофорная машина (используемую в школе модификацию иногда называют машиной Гольца) является далеким потомком электрических машин, строившихся в XVII—XVIII вв.: ее первые модели появились в самом начале XX в. Поскольку мы договорились, рассказывая об истории, по возможности не оставлять в стороне физические основы явлений и действия приборов, упоминаемых в учебнике, то давайте разберемся, как работает электрофорная машина.

Прежде всего о названии этого прибора. Оно происходит от термина «электрофор», которым А. Вольт в 1775 г. назвал придуманное им устройство для получения значительной электризации с помощью тела, наэлектризованного относительно слабо: слово «электрофор» в переводе и означает «усиление электричества».

Устройство Вольты чрезвычайно просто. Оно состоит из металлического блюда *c* (рис. 9, *a*), в которое налита смесь смолы с другими органическими веществами. После затвердевания поверхность смолы становится очень гладкой. Как мы уже знаем, потеряв поверхность смолы, мы снимем «шубу» ионов, делающих ее нейтральной, т. е. дадим возможность проявиться собственному отрицательному заряду смолы. Вслед за натиранием смоляного диска его касаются металлической пластиной *b*, подвешенной на изолирующих нитях. Вследствие электростатической индукции на поверхности пластины *b*, соприкасающейся со смолой, наведется положительный заряд (рис. 9, *б*). Заметьте, что заряд смолы не сможет перейти на металлическую пластину — этот заряд «вморожен» в нее. Тогда если коснуться пальцем верхней поверхности пластины *b*, то отрицательный заряд уйдет с пластины, и после снятия ее со смолы она останется заряженной положительно.

«Но при чем же здесь усиление электризации?» — может спросить нетерпеливый читатель. Дело в том, что приобретенный таким образом заряд пластина может передать другому телу почти полностью. Для этого необходимо, чтобы

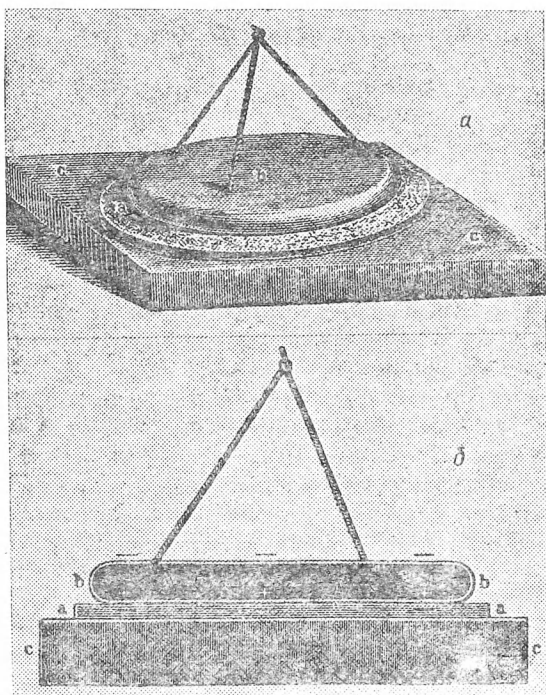


Рис. 9. Электрофор Вольта: а — внешний вид прибора; б — сечение прибора (показано распределение зарядов на различных частях электрофора)

емкость пластины C_1 была много меньше емкости этого тела C_2 . Действительно, при касании пластины и тела заряд q , находившийся на пластине, будет перераспределяться до тех пор, пока не выравняются потенциалы пластины и тела; общий потенциал обозначим ϕ . Тогда заряд пластины станет равным $q_1 = C_1 \phi$, а заряд тела $q_2 = C_2 \phi$. Но если $C_1 \ll C_2$, то $q_1 \ll q_2$, причем $q_1 + q_2 = q$ вследствие закона сохранения заряда. Всю процедуру можно повторить, причем не один раз. В результате телу, которому каждый раз передавался заряд металлической пластины, будет сообщен заряд, во много раз превосходящий тот, что возникает на

металлической пластине при касании ею смолы. Вот вам и усиление!

Естественное развитие мысли Вольты — автоматизация повторяющихся процессов в электрофоре. Именно в этом и состоит основная идея конструкции электрофорной машины (рис. 10). Перечислим ее важнейшие элементы. Два

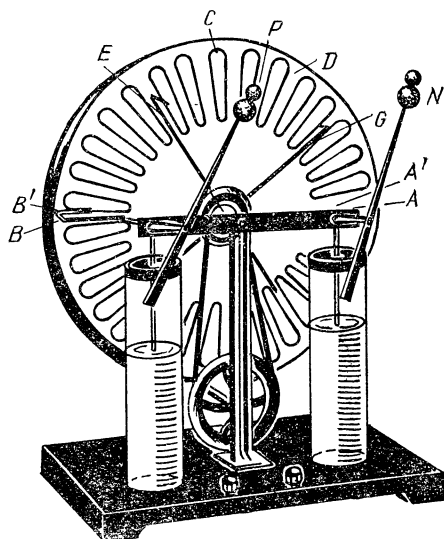


Рис. 10. Электрофорная машина: D , D' — стеклянные диски; P , N — кондукторы; E , G — стержни со щетками; AA' , BB' — вилки

стеклянных диска, насаженных на общую ось, с помощью рукоятки и ременной передачи могут приводиться во вращение в противоположные стороны. На наружных поверхностях дисков на одинаковом расстоянии от оси наклеены секторы из алюминиевой фольги. Вдоль диаметров дисков с двух сторон располагаются стержни со щетками, которые касаются алюминиевых секторов на внешних поверхностях дисков. Эти стержни располагаются перпендикулярно друг другу. Стеклянные диски охватывают (без касания) две двойные вилки, соединенные с кондукторами, расстояние между которыми можно менять. Кондукторы, в свою очередь, соединены с внутренними обкладками цилиндрических конденсаторов — лейденских банок. Внешние обкладки банок соединены с помощью клемм.

Хотя диски вращаются в вертикальной плоскости, мы для удобства анализа работы электрофорной машины будем считать, что вращаются в противоположные стороны два соосных цилиндра D, D' , на поверхностях которых наклеены алюминиевые полоски C, C' (рис. 11). На этом рисунке все элементы машины помечены теми же буквами, что и на рис. 10. Чтобы не загромождать схему, один из стержней со щетками (GH) изображен в виде дуги. Направления вращения цилиндров показаны стрелками.

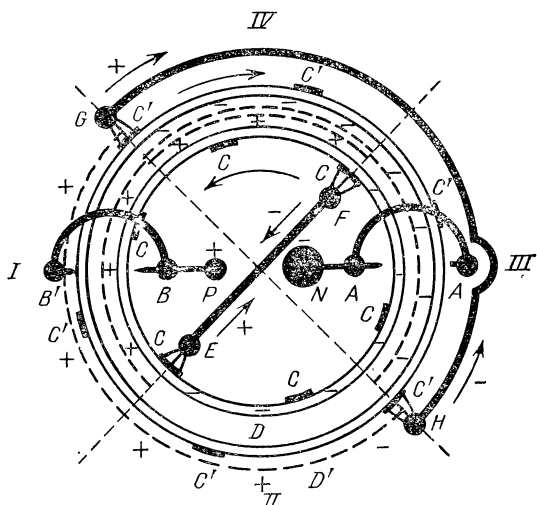


Рис. 11. К объяснению принципа действия электрофорной машины

Представим себе, что в какой-то момент половина полосок цилиндра D' оказалась заряженной положительно (на участке $GB'H$), а половина — отрицательно (на участке HAG). В силу электростатической индукции на стержне EF будет происходить перераспределение зарядов. Действительно, когда против полоски C на цилиндре D , которой касается щетка E , окажется полоска C' , заряженная положительно, на C должен навестись отрицательный заряд — он перейдет со щетки. Далее эта полоска переместится против часовой стрелки, и ее контакт со щеткой E прервется — она останется заряженной отрицательно, причем отрицательный заряд она будет сохранять до тех пор, пока не коснется щетки F . Нетрудно сообразить, что при контакте с F полоска получит положительный заряд, который сохранится до момента контакта со щеткой E . Рассматривая

процессы перезарядки на цилиндре D , мы отвлеклись от цилиндра D' . Что происходит с зарядами на его полосках? Ясно, что полоска C , заряженная отрицательно, проходя мимо щетки H , будет вызывать переход положительного заряда на полосу C' , с которой щетка находится в контакте. После того как эта полоска уйдет из-под щетки H (по часовой стрелке), она сохранит положительный заряд, который при проходе полоски мимо щетки E будет индуцировать на соответствующей полоске диска D отрицательный заряд. Очевидно, что при вращении дисков в противоположные стороны эти процессы будут повторяться. Это означает, что взаимное влияние цилиндров все время способствует их подзарядке. Однако мы еще ничего не сказали о том, как снимается индуцированный заряд с алюминиевых полосок. Эту операцию осуществляют вилки BB' и AA , которые расположены в тех областях, где на полосках обоих цилиндров имеются заряды одного знака. Ясно, что на кондукторе P будет накапливаться положительный заряд, а на N — отрицательный. Поскольку кондукторы соединены с конденсаторами — лейденскими банками, на них может накопиться заряд, во много раз превосходящий заряд, который индуцируется на алюминиевых полосках дисков. Таким образом, можно накопить очень большой заряд.

Легко представить, что аналогичные процессы происходят и на двух стеклянных дисках, вращающихся в реальной электрофорной машине. Более того, из приведенного рассмотрения ясно, какие условия необходимо соблюдать, чтобы машина работала достаточно надежно. Стержни со щетками должны располагаться перпендикулярно друг другу и образовывать углы в 45° с горизонтальными съемными вилками. Для «возбуждения» машины к одному из дисков полезно поднести стеклянную или эбонитовую палочку, наэлектризованную трением и ориентированную параллельно плоскости дисков, и привести диски в медленное вращение. Это приведет к первичной зарядке алюминиевых полосок, которая необходима для начала работы машины.

Стоит обсудить еще один вопрос относительно работы электрофорной машины. Известно, что для разделения разноименных зарядов (что и делает машина) необходимо совершить работу против сил притяжения. Из какого источника черпается энергия для совершения этой работы? Этим источником является рука человека. Если внимательно рассмотреть рис. 11, то можно заметить, что притягивающиеся участки дисков (квадранты II и IV) в целом заряжены

сильнее, чем отталкивающиеся участки диска (квадранты I и III), поскольку участки I и III почти разряжены. Поэтому силы притяжения, действующие между дисками, преобладают над силами отталкивания, и для вращения дисков требуется приложить некоторое усилие к ручке и совершить работу. Таким образом, в электрофорной машине происходит преобразование механической энергии в электрическую.

Таковы процессы, протекающие в электрофорной машине, с помощью которой можно воспроизвести многие опыты, описанные в этой книге.

КРИСТАЛЛИЗАЦИЯ ПРОБЛЕМЫ

Задумывались ли вы, как рождаются физические понятия? Как из неизвестности в научный оборот входят законы физики? Вопросы эти совсем не простые. Чтобы показать их сложность и глубину, поставим проблему более конкретно, взяв в качестве примера далеко не самое сложное физическое соотношение — закон Ома.

Из трех величин, входящих в этот закон, ко времени проведения опытов Ома только одна — сила тока — в принципе, имела определенную меру: ее можно было характеризовать отклонением от положения равновесия магнитной стрелки, помещенной рядом с проводником, по которому течет ток. Что же касается двух других, то представление о напряжении как о физической величине окончательно еще не сформировалось, а понятия о сопротивлении и вовсе не существовало. Понадобилась поистине удивительная интуиция, чтобы в явлении протекания электрического тока по цепи найти закономерности и предложить адекватные понятия для их описания.

О том, насколько трудным был путь Ома, можно судить хотя бы по тому, что большинство немецких физиков более десятилетия не принимало закон Ома как отражение реальности, поскольку... он казался им слишком простым, чтобы быть правильным.

Вообще следует подчеркнуть, что продвижение вперед, как в теории так и в эксперименте, всегда особенно трудно в новой области, где еще не сформировалась система основных понятий. В этих условиях возникают проблемы даже в простом описании наблюдений и экспериментов. Поэтому можно не боясь преувеличения сказать, что установление «простого» закона Ома было не проще открытия сложного явления сверхпроводимости. (При этом мы не касаемся теоретической интерпретации соответствующих закономерностей.) Эта точка зрения позволяет понять, почему для создания основ классической механики потребовались почти два тысячелетия, а другие области физики (например, тер-

модинамика и учение об электричестве и магнетизме) сформировались значительно быстрее — они находили себе опору в уже достаточно развитой механике.

После создания электрической машины и выхода в свет «Математических начал натуральной философии» И. Ньютона у ученых возникло стремление и электрические взаимодействия свести к простым и ясным законам, подобным законам механики. Но должно было пройти еще немало лет для того, чтобы ученые нащупали правильный подход к проблеме. В конце XVII — начале XVIII вв. им было известно об электричестве еще слишком мало. Период «первоначального накопления» фактов не закончился. Попробуем проиллюстрировать это на нескольких примерах.

Наследники Гильберта

В историю английской науки 1703 г. вошел как год избрания на пост президента Лондонского Королевского общества Исаака Ньютона. Надо сказать, что это было трудное время для Общества. Оно испытывало большие финансовые затруднения. Практически прекратились демонстрации экспериментов на его заседаниях, т. е. пресеклась традиция, восходящая к самому основанию Лондонского Королевского общества. Ньютон, заняв пост президента, решил восстановить угасшие традиции. Для постановки экспериментов был привлечен талантливый изобретатель Френсис Гауксби.

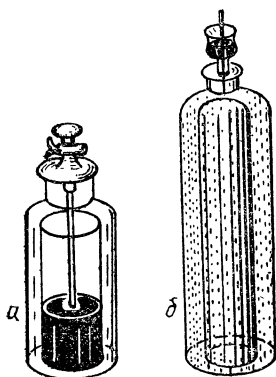
Гауксби родился в Колчестере в 1666 г. О его происхождении известно очень немного. Вероятно, он был сыном ремесленника и не получил систематического образования. Хотя о способностях Гауксби к изобретению новых приборов и экспериментированию с ними было известно и до приглашения в ЛКО, все же пик его творческой активности приходится именно на последние годы жизни — с 1703 по 1713 гг.

Сама должность демонстратора обязывала Гауксби ставить эксперименты, относящиеся к разным областям физики. Он, например, проводил опыты по исследованию распространения звука в сжатом и разреженном воздухе, изучал процесс замерзания воды, занимался измерением плотностей различных веществ и показателей преломления жидкостей. В историю науки вошли его опыты с капиллярами: именно Гауксби первым установил, что высота подъема жидкости в капилляре определяется его внутренним диаметром. Но

все же главным вкладом Гауксби в науку стало исследование электрических явлений.

Любопытно то, как пришел Гауксби к опытам по электричеству. В 1703—1705 гг. он в основном повторял пневматические опыты Бойля, Гука и Папена. При этом он, по-видимому, «переоткрыл» явление, на которое обратил внимание еще в 1675 г. французский астроном Ж. Пикар. Оно заключалось в том, что в барометрической трубке после ее встряхивания над поверхностью ртути возникало свечение. До Гауксби никому не приходило в голову связать

Рис. 12. Схема опытов Гауксби, продемонстрировавших роль трения в возникновении свечения паров ртути. В устройстве *а* пары возбуждались путем пропускания пузырьков воздуха через ртуть, а в устройстве *б* — путем просачивания ртути через узкую воронку, расположенную над внутренним сосудом



это кажущееся чисто оптическим явление с электричеством. Между тем оно имеет непосредственное отношение к... электризации трением.

Современное объяснение свечения, возникающего в барометрической трубке, в общих чертах таково. При встряхивании трубки происходит трение ртути о стекло, вследствие чего стекло электризуется и внутри трубки возникает довольно сильное электрическое поле. Пространство над ртутью заполнено парами ртути, давление которых мало. Благодаря столкновениям атомов ртути, вызванным тепловым движением, часть их оказывается ионизированной. Таким образом, в «торричеллиевой пустоте» всегда имеется некоторое число электронов и ионов, которые, двигаясь в электрическом поле, приобретают энергию, достаточную для возбуждения нейтральных атомов. При «сбрасывании» возбуждения и возникает свечение.

Вы видите, что эффект, который начал исследовать Гауксби, отнюдь не элементарен. Но в том-то и дело, что в период становления какой-либо отрасли знаний практически

невозможно определить, какие эффекты и явления относятся к числу простейших и поэтому заслуживают изучения в первую очередь. Самое поразительное состоит в том, что ученые, даже изучая очень сложные явления, умеют находить зерна истины. Правда, иногда для того, чтобы отделить эти зерна от шелухи, необходимо время... Но вернемся к исследованиям Гауксби.

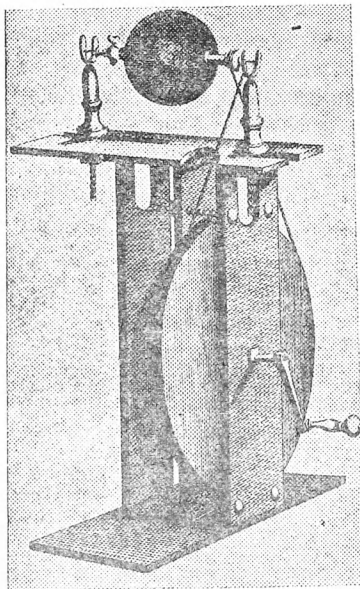


Рис. 13. Электрическая машина Гауксби

Благодаря остроумным опытам, схема которых показана на рис. 12, английскому ученому удалось доказать, что трение играет существенную роль в создании свечения. Отсюда последовало естественное сближение эффектов электризации трением и свечения барометрической трубки. Опыты с барометрической трубкой навели Гауксби на идею конструкции новой электрической машины, с помощью которой можно было проводить электрические опыты в условиях пониженного давления воздуха. В принципе эта машина напоминала устройство Герики (рис. 13), однако она обладала существенными преимуществами. Во-первых,

стеклянный шар мог приводиться в быстрое вращение благодаря ременной передаче. Во-вторых, шар был полый: в него можно было помещать различные тела и откачивать из него воздух. В машине Гауксби была предусмотрена замена шара цилиндром, вокруг которого в серии опытов располагались полуцилиндрические и цилиндрические проводники, к которым были прикреплены тонкие льняные нити. При различных положениях наэлектризованного тела нити ориентировались по-разному, но всегда по направлению к этому телу. Так Гауксби фактически удалось впервые в истории физики «сделать видимым» электрическое поле, подобно тому как ранее с помощью металлических опилок «проявляли» магнитное поле. Демонстрации с бумажными султанчиками, до сих пор используемые в школе

(рис. 14), — по существу, лишь видоизменение опытов Гауксби.

О том, что далеко не всегда самые важные наблюдения должным образом оцениваются их авторами, свидетельствует тот факт, что Гауксби едва не стал автором открытия способа электризации через влияние (эффекта электростатической индукции), о котором уже говорилось в гл. I в связи с описанием электрофорной машины. Гауксби заметил,

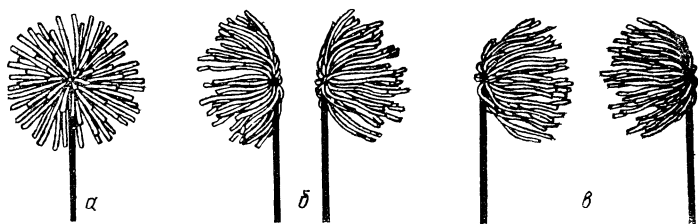


Рис. 14. Опыты по электризации бумажных султанчиков: *а* — расположение бумажных лепестков при зарядке одиночного султанчика; *б* — два султанчика заряжены электричеством одного знака, *в* — султанчики заряжены электричеством разных знаков

что если поднести палец к свободным концам нитей, испытывающих притяжение к заряженному телу, то они отталкиваются от пальца. В то же время при поднесении пальца к закрепленным концам нитей они начинали притягиваться к нему. Гауксби все это чрезвычайно удивляло, ведь ни нити, ни палец не подвергались трению. Однако ученый не сделал из своих наблюдений правильные выводы. Так открытие электризации через влияние было отложено почти на пятьдесят лет: честь этого открытия принадлежит английскому физiku Кантону, который сообщил о нем в 1753 г.

Итак, усовершенствование электрической машины и изобретение простейшего электроскопа из льняных нитей — вот основные заслуги Гауксби в области конструирования первых электрических приборов. Но часто значение, которое придают исследованиям тех или иных ученых далекие потомки, не соответствует оценкам этих исследований современниками. Иногда работа одного естествоиспытателя не приводит к заметным конкретным результатам, но оказывается важным стимулом для последователей. Именно так обстояло дело с изысканиями Гауксби.

Электрические опыты Гауксби привлекли внимание другого английского любителя науки Стефена Грея. Его фигура представляется историкам науки столь же туманной,

как и фигура Гауксби. Грей родился в 1666 г. в Кентербери в семье, быстро поднимавшейся по социальной лестнице. Его дед был простым плотником, а племянник Грея уже стал джентльменом, доктором медицины, выпускником Кембриджского университета. Грей был самоучкой, хотя в его образовании большую роль сыграло общение с первым королевским астрономом Дж. Флемстидом, который сам был сыном ремесленника. Подобно многим самоучкам, Грей интересовался широким кругом природных явлений. Так, его первая научная работа была посвящена микроскопу, в котором линзой служила... водяная капля. Позднее Грей увлекся астрономией и приобрел известность в английских научных кругах как аккуратный наблюдатель. Его даже приглашали для организации астрономической обсерватории в Кембридже, правда, это начинание не увенчалось успехом. Последние годы жизни Грей провел в лондонском Чартерхаусе, доме для престарелых, на положении пенсионария, помогая известному английскому физику Деэагюлье в чтении лекций и проводя самостоятельные исследования. Умер Грей в 1736 г.

Электрические исследования Грея относятся к 20-м — началу 30-х гг. XVIII в. В феврале 1729 г. после тщетных попыток наэлектризовать металл трением Грей попробовал сообщить ему «электрическую силу» от стеклянной трубки. Эта трубка была с обоих концов закрыта пробками. Ученый заметил, что, согласно современной терминологии, заряд трубки передается пробкам. Это заставило его попытаться передать электричество на расстояние по вертикали и горизонтали. В работе, озаглавленной «Письмо Кромвелю Мортимеру, члену и секретарю Королевского общества, содержащее описание различных опытов с электричеством», Грей писал:

«Я занялся исследованием, на какое расстояние передается электрическая сила. Для этого я взял полую трость длиной в 2 фута 7 дюймов, составлявшую, по-видимому, часть удочки, отрезал от нее большой кусок и вделал ее в отверстие трубки (из стекла.— С. Ф.), куда она вошла на 5 дюймов; после того как трубка была возбуждена, трость притянула фольгу на высоту более 2 дюймов.. Такое же действие оказывала и сплошная трость, введенная в трубку тем же способом, что и полая».

Так Грею удалось передать электричество по вертикально расположенной трости на расстояние более 2 футов. Затем масштабы опытов увеличились. Экспериментируя у себя дома, Грей передал электричество на расстояние в 52 фута

Однако наиболее впечатляющие опыты Грею удалось провести в загородном доме своего друга, члена ЛКО Г. Велера. В большом помещении Грей и Велер на тонких шелковых нитях подвешивали веревку, по которой передавалось электричество. Экспериментаторам удалось зафиксировать передачу заряда на несколько сотен футов! Дальнейшему увеличению длины помешал обрыв шелковых нитей под тяжестью веревки. Когда Велер и Грей заменили шелковые нити латунной проволокой той же толщины, эффект пропал. (Как бы объяснили это явление современные школьники?) Таким образом, итогом опытов Грея и Велера стало открытие явления проводимости, которое впоследствии сыграло важнейшую роль в опытах, приведших к открытию закона Кулона.

Надо сказать, что опыты Грея имели и еще одно неожиданное следствие. Оно было связано с экспериментом, который сам Грей описал так:

«8 апреля 1730 г. я произвел следующий опыт над мальчиком лет восьми-девяти. Он весил в одежде 47 футов 10 унций. Я подвесил его горизонтально при помощи двух волосяных веревок, служащих для сушки белья. В балку моей комнаты, толщиной в один фут, были вбиты один против другого два крюка, а на расстоянии двух футов — другая пара их. Вережки эти я повесил на эти крючки за петли, так, что получилось нечто вроде качелей, которые отстояли от пола комнаты примерно на 2 фута. Мальчика положили на эти веревки лицом вниз, одна веревка охватывала его грудь, а другая его бедра. Фольгу положили на подставку, представлявшую собой круглую доску диаметром в 1 фут и с наклеенной белой бумагой; пьедестал ее имел в высоту 1 фут. Когда трубку потерли и подержали около ног мальчика, не прикасаясь к ним, то фольга притягивалась лицом мальчика настолько сильно, что подымалась на высоту 9, а иногда и 10 дюймов».

В этом опыте, как мы видим, вновь был продемонстрирован эффект электризации через влияние и, кроме того, доказано, что человеческое тело обладает заметной проводимостью.

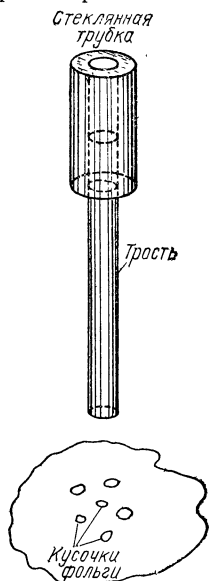


Рис. 15. Опыт Грея по «передаче» электричества на расстояние

мостью. Но главное, эксперимент Грея послужил как бы сигналом к исследованиям воздействия электричества на человека, особенно широко развернувшимся в 40-е гг. XVIII в., после изобретения конденсатора, с помощью которого можно было накапливать большие заряды. Это направление электрических опытов привлекло очень широкое общественное внимание — электричество стало модным. В 40-е гг. об опытах Грея были написаны такие строки:

Безумный Грей, что знал ты в самом деле
О свойствах силы той, неведомой доселе?
Разрешено ль тебе, безумец, рисковать
И человека с электричеством связать?

(Г. Бозе «Электричество в его возникновении и открытиях поэтическим пером описанное»)

Однако работы Грея произвели впечатление не только на обывателей. Они дали импульс новым опытам и открытиям, относящимся к электричеству. В этой области цепочка исследований с начала XVIII в. уже практически не прерывалась.

Шарль Дюфэ и его исследовательская программа

Взгляните на старинный портрет. На нем изображен представительный мужчина в красивом завитом парике, облаченный в латы, прикрытые плащом. Вполне можно предположить, что это какой-нибудь родовитый военный. Однако в действительности это портрет французского ученого Шарля-Франсуа де-Систерне Дюфэ, одного из основоположников учения об электричестве.

Тем не менее, первое впечатление от портрета не столь уж далеко от истины. Шарль Дюфэ родился в 1698 г. в Париже в семье, где служба в армии была традицией. Однако не только военными традициями был славен род Дюфэ. Многие предки Шарля увлекались наукой. Его дед, например, был алхимиком-любителем. Отец же, потеряв на войне ногу и выйдя в отставку, занялся коллекционированием редких книг и рукописей. В его доме часто происходили собрания, на которых обсуждались актуальные проблемы науки, литературы и искусства. Одним словом, Шарлю повезло — он рос в высокоинтеллектуальной атмосфере и, судя по всему, получил основательное образование. Однако традиция есть традиция. Уже в четырнадцать лет Шарль вступает в пикардийский полк в чине лейтенанта.

Когда Дюфэ исполнилось двадцать лет, ему пришлось принять участие в войне за испанский престол.

Несмотря на тяготы военной службы в Дюфэ жил интерес к науке, в особенности к химии. Когда в 1723 г. в Парижской академии наук освободилось место адъюнкта по



Шарль Дюфэ

классу химии, то Дюфэ сразу же выставил свою кандидатуру. Его поддержал известный ученый, член Академии Реомюр (создатель известной термометрической шкалы). Дюфэ был избран на эту должность и сразу же приступил к исследованиям, причем начал с той проблемы, которой когда-то занимался Гауксби — со свечения, возникающего в барометрической трубке при встряхивании. Однако Дюфэ долгое время не мог выбрать какое-то одно научное направ-

ление и поэтому в течение десяти лет переходил от одной темы к другой. Среди его работ можно найти и мемуар, посвященный условиям намагничения железных предметов, и исследование по теплоте, и сочинение по геометрии. Пожалуй, наибольшее значение в начальный период научной деятельности имели его изыскания в области фосфоресценции.

В 1732 г. Дюфэ, заинтересовавшись результатами Грея, обратился к изучению электричества. Здесь в полной мере проявились особенности его научного творчества: систематичность, внимание к деталям опытов, стремление к обобщению наблюдаемых закономерностей. Еще один принцип в подходе Дюфэ к любой научной проблеме состоял в том, чтобы глубоко изучить работы предшественников, прежде чем самому приступить к экспериментам. Об этом свидетельствует название первой статьи по электричеству, представленной ученым в Академию: «История электричества». Этот небольшой, но глубокий очерк может считаться первым историческим обзором в данной области.

Хорошее знание достижений предшественников всегда имеет одно существенное преимущество. Оно позволяет взглянуть на проблему в целом, сформулировать общие нерешенные вопросы и таким образом наметить долгосрочный план исследования, т. е. то, что уже в XX в. стало называться исследовательской программой.

Еще только приступая к изучению электричества, Дюфэ определил шесть основных задач, которые и составили первую в истории науки об электричестве исследовательскую программу:

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 собственному трению; является ли, наконец, электричество общим свойством для всех веществ?
2. Всякая ли материя способна приобрести эту силу непосредственным ли прикосновением к веревке или любому другому непрерывному телу или же простым приближением электрического тела?
3. Какие тела могут остановить эту силу или способствовать ее передаче, совершается ли она по веревке, по палке или при приближении трубки, и какие тела лучше всего притягиваются электричеством?
4. Что общего между силами притяжения и отталкивания, связаны ли они друг с другом или независимы друг от друга?

5. При каких условиях увеличивается или уменьшается сила электричества, т. е. как влияют на нее пустота, сжатый воздух, температура и т. п.?
6. Какое отношение существует между электричеством и способностью излучать свет, присущей большей части электрических тел, и что можно вывести из этого отношения?»

Общность и глубина поставленных Дюфэ вопросов не имели аналогов в современном ему естествознании. Однако как ни важна постановка вопроса, наибольший интерес представляет его решение. Имелось ли соответствие между общностью вопросов Дюфэ и данными им ответов?

На протяжении 1733—1737 гг. Дюфэ опубликовал цикл мемуаров, в которых попытался дать экспериментально обоснованные ответы на вопросы своей программы. Сразу же следует сказать, что в ряде случаев суждения Дюфэ оказались ошибочными и представляют лишь чисто исторический интерес. Однако один из выводов Дюфэ вошел в историю науки как основной для всего учения об электричестве. Ученый пришел к заключению о существовании электричества двух родов — «смоляного» и «стеклянного».

Весьма поучителен путь, которым пришел Дюфэ к этому заключению. Первым шагом было его обращение к исследованию электрического отталкивания. Мы так привыкли к идее о «симметрии» притяжения и отталкивания в электростатике, что не обращаем внимания на то, что в течение длительного времени изучалось лишь притяжение.

Существование отталкивания отмечали уже Герики и Гауксби, но они не исследовали его подробно. Дюфэ, ценивший в физических наблюдениях не только яркие эффекты, но и детали, не мог пройти мимо свойства, обратного притяжению.

Познакомившись с опытами предшественников, Дюфэ сформулировал рабочую гипотезу, состоявшую в том, что «электрическое тело должно притягивать все неэлектрические тела и отталкивать все те, которые становятся электрическими при приближении к нему вследствие сообщения им его силы». Для перевода этой фразы Дюфэ на современный научный язык следует учесть, что «электрическими» телами в XVIII в. называли диэлектрики, которые можно было наэлектризовать трением, а «неэлектрическими» — хорошо проводящие тела, попытки электризации которых трением не приводили к успеху. С учетом этого обстоятельства гипотезу Дюфэ можно переформулировать так: «Заряженные тела всегда притягивают нейтральные проводящие тела и

отталкивают другие заряженные тела». Заметим, что в целом заключение Дюфэ верно, если второму заряженному телу сообщена часть заряда (по выражению Дюфэ — часть «электрической силы») первого.

Далее Дюфэ поставил вопрос: «Не различаются ли электрические тела между собою разными степенями электричества?» Для начала он провел такой опыт: два листка тонкой металлической фольги удерживались в воздухе над натертой стеклянной трубкой. При этом, как ни старался Дюфэ, он не мог сблизить листки фольги — они явно отталкивались. Это вроде бы подтверждало гипотезу Дюфэ: тела, которым была сообщена «электрическая сила», должны были отталкиваться. Когда Дюфэ коснулся пальцем одного из листков, то листки тут же соединились, что снова подтвердило вышеприведенную гипотезу. Но когда один из листков был заменен наэлектризованным кусочком копала *), произошло нечто совершенно неожиданное. Листок фольги мгновенно «прилип к кусочку копала и оставался на нем». Поначалу Дюфэ подумал, что наблюдаемый эффект связан с какой-то погрешностью. Он повторил опыт: «Я принял меры, чтобы устранить всякие сомнения и убедиться, что копал притягивал листок, хотя последний и отталкивался трубкой». Затем эксперимент был проведен с янтарем и сургучом вместо копала. Результат оказался тем же. Когда же был взят наэлектризованный шар из горного хрусталя, то оказалось, что он отталкивает листок так же, как и трубка. Дюфэ писал об этом так:

«Я убедился, что стекло и горный хрусталь производили обратное действие по сравнению с копалом, янтарем и сургучом... и это навело меня на мысль, что существуют два разных вида электричества».

Так родилась идея, сохранившаяся в физике до наших дней. Наличие двух родов электричества — одно из важнейших положений теории электромагнетизма.

Однако Дюфэ все же не удалось выделить главные свойства электричества. Он сформулировал 16 (!) «простых и основных фактов, к которым сводятся все известные опыты с электричеством». Среди них, наряду с указанием на существование двух родов электричества, можно найти, например, и такое: «Самый сильный ветер не отклоняет электрические истечения, сообщенные на расстояние 1250 фу-

*) Копалами называется группа естественных смол, используемых в наше время главным образом для производства высококачественных лаков.

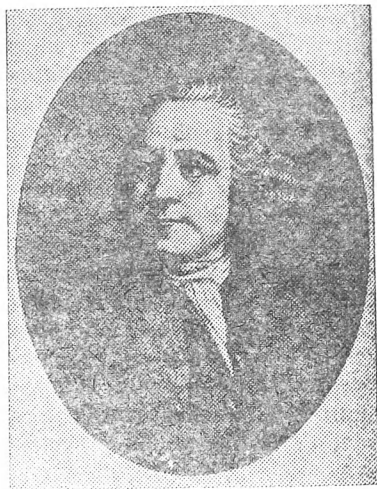
тов при помощи веревки или другого непрозрачного тела». Задача формирования основных понятий теории электричества все отчетливей вставала перед исследователями.

Сам Дюфэ, закончив цикл экспериментов по электричеству, не стал заниматься созданием последовательной теории. Практик, экспериментатор, видимо, преобладал в нем над теоретиком. Уже во время электрических исследований он принял на себя ответственные обязанности директора Королевского ботанического сада. Дюфэ уделял очень много внимания этим обязанностям. По его инициативе были построены новые оранжереи, установлены связи с другими ботаническими садами Европы. Дюфэ оставил богатое наследие своему преемнику на посту директора Сада выдающемуся естествоиспытателю Ж. Бюффону. Да и сам он, возможно, сделал бы еще в области ботаники очень много, если бы не безвременная смерть от оспы, настигшая ученого в 1739 г., когда ему не исполнилось и сорока одного года...

Первые теории электричества

Однако мы несколько увлеклись. В наши планы не входило подробное и последовательное изложение истории электричества. Мы хотели лишь показать, с каким трудом из множества разнообразных наблюдений постепенно выделялись основные, которые могли лечь в основу теории. В результате в середине XVIII столетия американскому естествоиспытателю Б. Франклину удалось сформулировать общие принципы объяснения электрических явлений.

Бенджамин Франклин родился в 1706 г. в Бостоне, в Новой Англии, как тогда называли северо-восточную часть США. Он был пятнадцатым ребенком в семье бедного ремесленника, очень рано познал нужду. Всего два года проучившись в школе, Бенджамин был вынужден поступить на работу в типографию одного из старших братьев.



Бенджамин Франклин

Работая в типографии, мальчик почти все свободное время отдавал самообразованию.

Однако бесправное положение ученика не устраивало юного Франклина, который очень быстро приобрел довольно высокую квалификацию в типографском деле. И он убежал из Бостона в Филадельфию и устроился в типографию, где быстро оценили его способности. Через некоторое время положение Франклина настолько укрепилось, что он стал подумывать об открытии собственного дела. Для приобретения оборудования он даже отправился в Англию. Там он пробыл полтора года и приобрел знакомства в литературных и светских кругах.

После открытия своей типографии Франклин начал активно участвовать в общественной жизни Филадельфии. Он стал организатором клуба «Юнта», в котором собирались молодые люди для обсуждения интересующих их проблем политики и науки. Надо подчеркнуть, что одним из основных принципов деятельности клуба было свободное выражение мнений и равенство членов клуба, независимо от их вероисповедания и политических взглядов. Любовь к истине — вот что объединяло членов «Юнты».

Влияние Франклина на события общественной жизни еще более возросло после того, как он начал выпускать собственную газету. Несмотря на молодость Франклин становится инициатором многих важнейших начинаний — от основания первой в Америке публичной библиотеки до создания философского общества. Франклин проявил свои способности и на государственной службе — он долгое время руководил деятельностью почты на территории английских колоний в Америке.

Во второй половине 40-х гг. Франклин на одной из популярных лекций знакомится с опытами по электричеству и решает сам заняться этими проблемами. Он пишет в Англию своему другу Коллинсону, члену Лондонского Королевского общества, и просит прислать необходимые для проведения экспериментов приборы. Коллинсон прислал Франклину стеклянную трубку с инструкцией по ее использованию. С этим немудреным оборудованием Франклин начал исследования, о результатах которых сообщал в письмах Коллинсону. Тот зачитывал эти письма на заседаниях Лондонского Королевского общества — таким образом об открытиях Франклина становилось известно в Европе. Удивительно, что человек, лишь в сорокалетнем возрасте познакомившийся с весьма актуальной в ту пору областью знаний, сумел всего за несколько лет получить

такие результаты, что стал по праву считаться во всем мире лидером в исследовании электрических явлений!

Франклину принадлежит открытие стекания электрического заряда с острия (так называемого электрического ветра), он доказал, что электричество при трении не образуется заново, а лишь перераспределяется между телами. Огромное впечатление произвело на современников доказательство электрической природы молнии, данное Франклином. Много сил и энергии отдал Франклин пропаганде научных знаний и практическому использованию сделанных им открытий. Широкую известность получили его усилия по распространению громоотводов.

Однако электрическим исследованиям Франклин смог уделить лишь несколько лет жизни. Вихрь политических событий оторвал его от научных проблем. Защита Новой Англии от французов, обосновавшихся в соседней Канаде, политическая борьба внутри колоний, война за их независимость от Англии — все эти исторические события нашли отражение в жизни Франклина. Он возглавлял вооруженные отряды и принимал участие в заседаниях конгресса, выполнял важные дипломатические задания и участвовал в выработке конституции США. В последние годы жизни Франклин вместе с другими прогрессивными американцами боролся за уничтожение рабства. Еще при жизни Франклина о нем с восхищением отзывались политические деятели и ученые многих стран. Он был почетным членом Лондонского Королевского общества, Петербургской академии наук и других академий и научных обществ. Узнав о кончине Франклина (1790 г.), известный деятель французской революции Мирабо, выступая в Национальном собрании, произнес: «Античный мир воздвиг бы алтарь этому смертному, который знал, как покорить и смерть, и деспотизм».

Исследования Франклина по электричеству привлекли современников не только смелостью и остроумием экспериментов, но и простотой принципов, предложенных для их объяснения. Эти принципы он изложил в статье (1750 г.), которой в стиле эпохи было дано длинное название: «Взгляды и предложения касательно свойств и действий электрической субстанции, вытекающие из опытов и наблюдений, проведенных в Филадельфии в 1749 г.» Эта статья разбита на 36 пунктов, в большей части которых содержатся объяснения электрических явлений, наблюдавшихся Франклином, на основе сформулированных им в первых пунктах положений. Вот они:

- «1. Электрическая субстанция состоит из чрезвычайно малых частиц, так как она способна проникать в обыкновенную материю, даже в самые плотные металлы, с большой легкостью и свободой, как бы не встречая при этом сколь-нибудь заметного сопротивления. {...}
3. Электрическая субстанция отличается от обыкновенной материи в том отношении, что частицы последней взаимно притягиваются, а частицы первой отталкивают друг друга. {...}
4. И хотя частицы электрической субстанции взаимно отталкивают друг друга, они сильно притягиваются всей прочей материей. {...}
7. Но в обыкновенной материи содержится [как правило] столько электрической субстанции, сколько она может заключать в себе. Если прибавить ей этой субстанции еще, то она разместится снаружи, на поверхности, и образует то, что мы называем электрической атмосферой; в этом случае говорят, что предмет наэлектризован».

Как видно из приведенного отрывка, Франклин отказался от всяческих «теорий», объяснявших электрические явления действием неких истечений, которые в разных формах существовали со времен Гильберта. Он выдвигает идею об электрической жидкости, которая может переходить с одного тела на другое. В этом отношении он идет дальше Дюфэ, говорившего о видах электричества и не конкретизировавшего представления об их природе. В то же время Франклин отказывается от представления о двух видах электричества и предлагает объяснить явления взаимодействием частиц электрической жидкости между собой и с частицами «обычной» (т. е. неэлектрической) материи. Эта унитарная (однокомпонентная) теория Франклина имела широкое распространение в XVIII в.

Здесь мы произвольно использовали выражение «теория Франклина». Современный энциклопедический словарь поясняет, что слово «теория» *) обозначает систему основных идей в той или иной отрасли знания. В этом смысле, вероятно, идеи Франклина и заслуживают звания теории. Однако в физике наших дней это слово имеет более определенное значение. В частности, этого названия заслуживают лишь построения, дающие количественное описание явления или целой группы явлений. Кроме того,

*) От греческого слова *theōria* — «рассмотрение», «исследование».

настоящая теория должна обладать предсказательной силой: из нее должны вытекать следствия, которые могут быть проверены экспериментально.

Такое понимание слова «теория» пришло не сразу. Первая последовательная и достаточно общая физическая теория была построена в «Началах» И. Ньютона. Однако и после этого в различных областях физики продолжали появляться сугубо качественные теории, которые правильнее было бы назвать словом «спекуляция» в его первоначальном и теперь уже устаревшем значении «философское, умозрительное построение». И все же теория Франклина сыграла заметную роль в становлении науки об электричестве: она послужила важным фактором в упорядочении накопленного экспериментального материала. Кроме того, эта теория идейно была близка к теории тяготения Ньютона, и поэтому ее развитие неизбежно должно было поставить на повестку дня поиск количественных закономерностей в электрических явлениях.

Теорию Франклина развил петербургский академик Ф. У. Т. Эпинус, опубликовавший в 1759 г. солидный трактат «Опыт теории электричества и магнетизма». В этом трактате уже делается попытка ввести в описание электрических и магнитных явлений какие-то количественные (и, следовательно, математические) соотношения. О том, насколько смелым был такой шаг, свидетельствуют пояснения для читателя, которые Эпинус счел необходимым дать в предисловии к своей книге:

«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. Я считаю, что вряд ли кто-нибудь, желающий носить имя естествоиспытателя, будет настолько несведущ в математических науках, что его смогут сколько-нибудь затруднить те легкие выкладки, которые я здесь дал».

Важным новшеством в подходе Эпинуса к теории электричества и магнетизма было обсуждение характера сил, действующих между заряженными и намагниченными телами. Эпинус подчеркивает, что эти силы являются функциями расстояния. Далее он с осторожностью пишет:

«Но 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 пропорцио-

нально квадратам расстояний. Это можно предположить о некотором правдоподобием, ибо в пользу такой зависимости, по-видимому, говорит аналогия с другими явлениями природы».

Таким образом, Эпинус склонялся к гипотезе о том, что электростатические взаимодействия описываются законом «обратных квадратов». И в этом он не был одинок. Более того, ко времени выхода в свет трактата Эпинуса уже были сделаны первые попытки экспериментально обосновать закон «обратных квадратов».

Что измерять? Как измерять?

Первые опыты по определению зависимости электростатических сил от расстояния относятся к 40-м гг. XVIII в. Для всех опытов этого периода характерна одна и та же ошибка: исследуя взаимодействия макроскопических тел, экспериментаторы не задумывались о том, что размеры тел могут влиять на результаты опытов.

Одним из первых попытку найти зависимость электрических сил от расстояния предпринял немецкий ученый К. Кратценштейн, в 1746 г. 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 уменьшалась обратно пропорционально расстоянию между диском и поверхностью шара. Признания работа Кратценштейна не получила, несмотря на поддержку такого авторитетного ученого, как Л. Эйлер.

Кратценштейн получил попросту ошибочные результаты. Но примерно в то же время (около 1750 г.) были проведены более тонкие опыты такого же типа, которые дали, как казалось, правильный результат. Их автором был один из наиболее известных физиков и математиков XVIII в. Даниил Бернулли. Из описания результатов Бернулли, опубликованных его учеником А. Сосеном, следовало, что в этих опытах получено подтверждение закона «обратных квадратов». В действительности же результаты Бернулли не имели непосредственного отношения к тому закону, которому впоследствии было дано имя Кулона. Ошибки выдающихся людей бывают весьма поучительными, поэтому давайте разберемся в опыте Бернулли подробнее.

Бернулли, внимательно следивший за текущей научной литературой, обратил внимание на устройство, которое

в 1749 г. предложили французские ученые д'Арси и Леруа. Оно представляло собой чечевицеобразное тело (рис. 16), имевшее наверху длинную стеклянную трубку с делениями, к которой прикреплялся металлический диск. Это тело опускалось в сосуд с водой и плавало в нем так, что уровень воды приходился на одно из делений трубки. Поднося к диску на трубке заряженное тело, можно было менять глубину погружения «чечевицы» с трубкой: на диске трубки наводился заряд противоположного знака, и между телом и диском возникало притяжение, вследствие чего равновесие между выталкивающей силой и силой тяжести, действующими на «чечевицу», нарушалось, и глубина ее погружения уменьшалась до тех пор, пока выталкивающая сила и сила электростатического притяжения, с одной стороны, и сила тяжести — с другой, не уравновешивались. Тогда к крюку в нижней части «чечевицы» можно было прикрепить такой груз, чтобы «чечевица» вернулась в первоначальное положение. Величина этого добавочного груза и могла служить мерой электростатического притяжения между телом и диском. Прибор д'Арси и Леруа был назван гидростатическим электрометром.

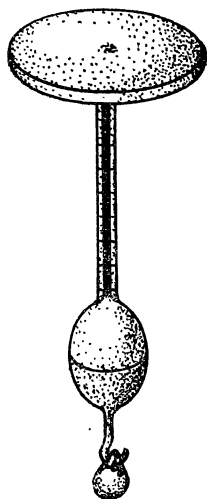


Рис. 16. Прибор, использованный Д. Бернулли для исследования сил электростатического притяжения

Как же с этим электрометром работал Бернулли? На определенной высоте над диском трубки он укреплял такой же проводящий диск. Затем этот второй диск присоединялся к электрической машине и заряжался. Далее, как описано выше, измерялась сила притяжения между дисками. Затем диск, соединенный с машиной, помещался на другом расстоянии от диска на трубке, и т. д. Бернулли обнаружил, что сила притяжения между дисками F обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними x : $F \sim x^{-2}$. Чем не закон «обратных квадратов»?

Самое интересное, что результат Бернулли — правильный! Однако он не может служить подтверждением закона Кулона. Дело в том, что прямая проверка этого закона требует измерения силы взаимодействия между *неизменными* зарядами на разных расстояниях. В опыте Бернулли условие неизменности зарядов не соблюдалось.

Систему из двух дисков можно с некоторым приближением рассматривать как плоский конденсатор. Известно, что емкость такого конденсатора C обратно пропорциональна x . Поскольку электрическая машина во время опыта не отсоединялась от верхнего диска, мы можем допустить, что между дисками поддерживалась постоянная разность потенциалов U . Тогда, в соответствии с соотношением $q = CU$, заряд q на дисках при вариациях x менялся обратно пропорционально x : $q \sim x^{-1}$, и, следовательно, не оставался постоянным. Откуда же возникает соотношение $F \sim x^{-2}$? Напряженность электрического поля, создаваемого зарядом одного диска, в первом приближении (если расстояние x мало по сравнению с диаметром диска) пропорционально этому заряду. Следовательно, сила, действующая со стороны этого поля на заряд второго диска, пропорциональна q^2 . Но поскольку $F \sim q^2$, а $q \sim x^{-1}$, то $F \sim x^{-2}$!

Таким образом, полученный Бернулли результат лишь внешне походил на закон Кулона. В опыте Бернулли при изменении формы взаимодействующих тел зависимость силы от расстояния между ними может быть иной. Стоит заметить, что спустя много лет (в 1787 г.) подобные опыты проводил 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 измерения сил притяжения и отталкивания, полученных с помощью гидростатического электрометра.

В нашем путешествии по истории науки об электричестве мы сделали остановки далеко не во всех важных пунктах. Вне нашего поля зрения осталось, например, такое важное событие, как изобретение конденсатора, или, как говорили в XVIII в., лейденской банки. Этот нехитрый прибор (практически без изменений используемый еще и в наши дни в электрофорных машинах) очень способствовал прогрессу экспериментальных исследований, поскольку с его помощью можно было накапливать большие заряды.

Начиная примерно с 40-х гг. XVIII в. постепенно развивались способы регистрации электричества. Сначала их использовали лишь как детекторы электричества, работающие по принципу «есть-нет». Затем последовали попытки превратить эти устройства в измерительные приборы. На рис. 17 показано несколько электрических приборов, созданных в XVIII в. В этих приборах в качестве подвижных элементов использовались то льняные нити, то бузиновые

или пробковые шарики, подвешенные на шелковых нитях, то листочки золотой фольги. Они обладали различной чувствительностью, но одно свойство у них было общее: их показания, определенные путем измерения углов, на которые

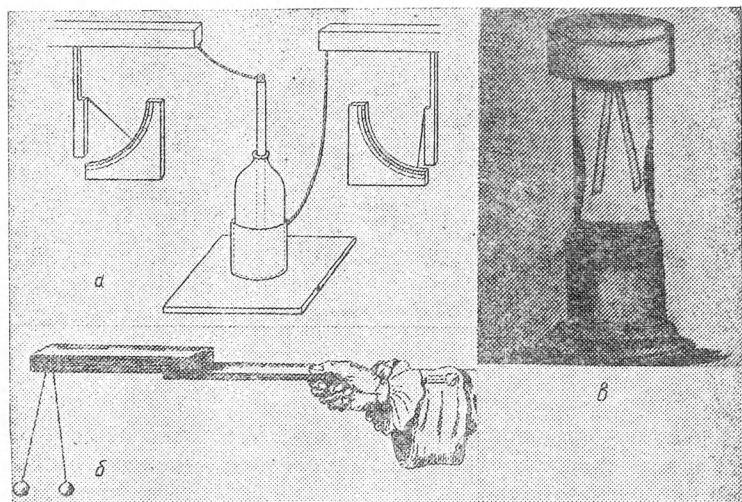


Рис. 17. Электрометры XVIII века: *а* — «электрический указатель» Рихмана; *б* — электрометр Кантона с бузиновыми шариками; *в* — электрометр Беннета с золотыми листочками

расходятся или отклоняются нити, лепестки и т. д., можно было использовать только для качественного анализа наблюдаемых эффектов, поскольку не было ясности в том, что именно измеряется данным прибором. Действительно, даже простейший индикатор электрического поля — электроскоп с золотыми листочками показывает наличие не заряда, а разности потенциалов. Иногда об этом забывают и сейчас. В качестве примера, доказывающего, что даже простые электростатические опыты анализировать не так-то просто, мы приведем иллюстрацию из очень интересной книги выдающихся физиков А. Эйнштейна и Л. Инфельда «Эволюция физики» (рис. 18). Авторы описывают опыт, в котором демонстрируется электризация через влияние. К нейтральному металлическому телу подносят отрицательно заряженную каучуковую палочку. Под действием отрицательного заряда палочки на металлическом теле произойдет перераспределение зарядов: на ближайшем к ней конце скопится положительный заряд, на дальнем — отрицательный.

Листочки электроскопа при этом разойдутся. Если же коснуться дальнего конца тела рукой (т. е. заземлить тело), то отрицательный заряд с него уйдет и тело перестанет быть электронейтральным. Все это так. Но картины, показанной

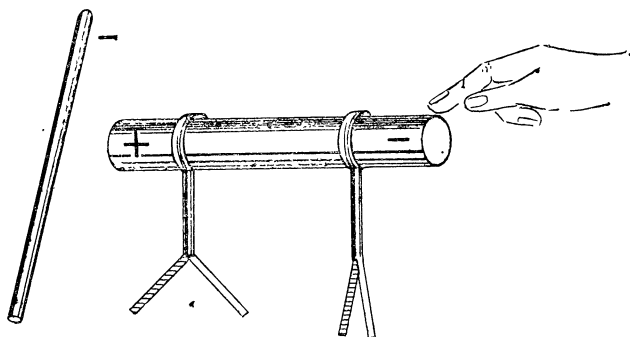


Рис. 18. Иллюстрация из книги А. Эйнштейна и Л. Инфельда «Эволюция физики»

на рисунке, нам никогда не увидеть. При заземлении тела сойдутся листочки обоих электроскопов, именно потому, что они регистрируют разность потенциалов, а не заряд! Об этом, видимо, забыли авторы книги *).

Но вернемся в XVIII в. Несмотря на все трудности и сложности наука продвигалась вперед. Оказалось, что даже с помощью лишь весьма примитивных (с нашей точки зрения) приборов можно установить количественные отношения в учении об электричестве. Эпизод истории физики, о котором идет речь, является одним из ярких примеров удивительно богатых возможностей человеческого познания.

*) На эту ошибку А. Эйнштейна и Л. Инфельда впервые указал известный английский физик Г. Липсон.

«НУЛЕВОЙ» МЕТОД, ИЛИ ЧТО МОЖНО УЗНАТЬ О СИЛЕ, НЕ ИЗМЕРЯЯ ЕЕ

Экспериментальная физика — интереснейшая и очень увлекательная наука. В наши дни она использует множество остроумных и тонких методов, позволяющих решать самые трудные научные задачи. В XVIII в., когда сама физика еще только складывалась как отдельная область естествознания, арсенал экспериментальных средств и методов был еще крайне ограничен. Тогда еще не были сформулированы критерии доказательности опыта, не сложились традиции анализа его результатов. Ученые «века Просвещения» далеко не всегда понимали роль так называемых косвенных экспериментов. Последнее обстоятельство имеет непосредственное отношение к теме нашего рассказа, поскольку именно оно позволяет понять, почему методика проверки закона «обратных квадратов», являющаяся основной в наши дни, не стала общепринятой в XVIII в. Между тем к этому имелись все предпосылки... Но — обо всем по порядку.

Удивительное наблюдение

Начало событий, о которых пойдет речь в этой главе, связано с одним из многочисленных наблюдений Франклина. Следует отметить, что характерной чертой Франклина как ученого было стремление распространить информацию о своих опытах и теориях среди возможно более широкого круга любителей естествознания. Это, с одной стороны, способствовало быстрому внедрению новых идей в науку. Выдающийся советский физик академик П. Л. Капица в этой связи писал: «Конечно, научная истина всегда пробьет себе путь в жизнь, но сделать этот путь скорым и прямым зависит от людей, а не от истины. В этом отношении деятельность Франклина и сейчас может быть примером того, как, говоря современным языком, внедрять свои научные достижения». С другой стороны, сообщая о результатах опытов, которые он не мог объяснить, Франклин по-

буждал других ученых к размышлениям над актуальными проблемами теории электричества. Именно с одного непонятного опыта Франклина и началась история «нулевого» метода.

Е 1755 г. Франклин в одном из писем писал:

«Опыт, далеко не полные и не точные слухи о котором дошли до Вас, заключался в нижеследующем... Поставив серебряную коробку, объемом в одну пинту, на электрическую скамью, я наэлектризовал ее и затем опустил в нее на шелковой нити шарик из пробки, 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, то оказалось, что при этом касании он не наэлектризовался, как это бывает при соприкосновении с наружной поверхностью коробки. Факт этот представляется мне совершенно необычайным. Вы спрашиваете о причинах — мне они неизвестны. Если Вам удастся найти объяснение, то не откажите в подобном случае уведомить меня об этом».

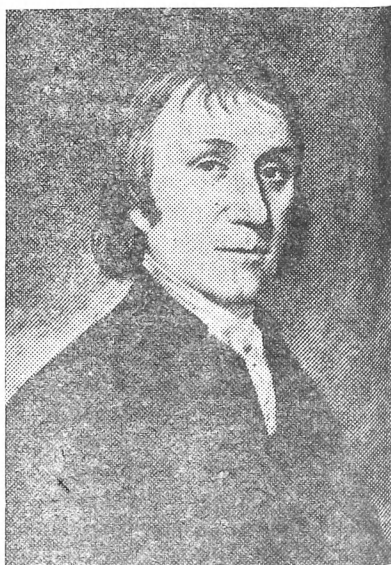
Через некоторое время издатели писем Франклина, посвященных электричеству, сообщили, что впоследствии он «считал возможным, что взаимное отталкивание противоположных сторон внутренней поверхности наэлектризованной коробки предотвращает накопление на них электрической атмосферы, вытесняя ее преимущественно наружу. Но он советовал исследовать этот вопрос дополнительно». Это предположение хотя и дает зримый образ процессов, происходящих при сообщении металлическому телу заряда, все же не позволяет объяснить наблюдаемый эффект исчерпывающим образом. Следующий шаг на пути объяснения отсутствия заряда на внутренней поверхности заряженного металлического тела был сделан не Франклином, а молодым англичанином по фамилии Пристли, с которым Франклин встретился в Англии. Эта встреча, как показало время, была очень важной для развития науки об электричестве.

Опальный химик и электричество

История нередко задает загадки, над разрешением которых бьется не одно поколение философов и историков. Как оценить, например, встречу известного общественного деятеля и естествоиспытателя Франклина и

молодого, ищущего свой жизненный путь Пристли? На первый взгляд, она может показаться случайной. Однако эту точку зрения трудно принять, если познакомиться с биографией Пристли.

Джозеф Пристли родился в 1733 г. в местечке Филдхед близ английского города Лидса, в семье фермера, занимавшегося производством шерсти. Мальчик рано стал проявлять способности к наукам, и его тетушка, которой из-за финансовых затруднений семьи Пристли он был отдан на воспитание, решила дать Джозефу хорошее образование с тем, чтобы впоследствии он смог стать пастором. Однако



Джозеф Пристли

религиозные взгляды, которые с детства прививались Пристли, отличались от взглядов сторонников англиканской церкви. Поэтому он поступил в академию в Дэвентри, где готовили священников-диссидентов, т. е. распространителей неортодоксальных религиозных воззрений. Благодаря заботам тетушки и собственному усердию к моменту окончания академии Пристли был хорошо образованным для своего времени человеком: он был знаком не только с теологическими трудами, но и с работами современных и древних философов, интересовался литературой. Кроме того, он изучил девять иностранных языков — французский, итальянский, немецкий, латинский, древнегреческий, древнееврейский, арабский, сирийский, халдейский.

Получив такую, сугубо гуманитарную подготовку, Пристли начинает свою деятельность в качестве священника. Через некоторое время он пробует себя на педагогическом поприще в открытой им же частной школе. Однако в полной мере его талант педагога раскрылся после 1761 г., когда он начал работать в качестве преподавателя в Уорингтонской академии. В этот период он начинает свои занятия естественными науками, успехи в которых принесли ему впоследствии международную известность. Именно тогда

и произошла встреча Пристли с Франклином, одоббившим интерес молодого преподавателя к проблемам электричества. Результатом работы Пристли в этой области стало сочинение «История и современное состояние электричества, с оригинальными опытами», изданное в двух томах в Лондоне в 1767 г. Эта работа сразу получила признание в кругах английских ученых, и ее автор был избран членом Лондонского Королевского общества.

В дальнейшем научные интересы Пристли сместились в область химии, которую он обогатил рядом важных открытий. Его основные химические исследования были посвящены изучению газов. Пристли принадлежит честь открытия кислорода и нескольких других газов. Вместе с другими учеными, такими как А. Лавуазье, Г. Кавендиш, К. Шееле, он способствовал утверждению представлений о сложном составе воздуха. Пристли обнаружил, что растения поглощают углекислый газ и вырабатывают кислород. Правда, ученый придерживался теории флогистона, отвергнутой трудами Лавуазье, поэтому его теоретические идеи не шли ни в какое сравнение с описанными им остроумными и убедительными экспериментами. И все же большинство историков науки считают Пристли одним из основоположников современной химии.

Известность Пристли в международных научных кругах (в разное время ученый был избран почетным доктором Эдинбургского университета, иностранным членом Парижской и Петербургской академий наук), к сожалению, не могла обеспечить необходимых средств к существованию. Поэтому на протяжении всей жизни ученый был вынужден переезжать из города в город в поисках прилично оплачиваемого места. Долше всего он прожил в Бирмингеме, где с 1780 по 1791 гг. выполнял обязанности приходского священника, а в свободное время проводил химические эксперименты. В этом городе Пристли участвовал в работе так называемого «Лунного общества», члены которого интересовались научными проблемами, главным образом вопросами естествознания. Заседания этого общества происходили раз в месяц по понедельникам, предшествовавшим полнолуннию — отсюда и его название. В Общество входили люди, интересующиеся наукой, независимо от их религиозных и политических взглядов. «Нам нет дела, — говорил Пристли, — до политических и религиозных принципов каждого из нас: мы объединены общей любовью к науке, которой достаточно, на наш взгляд, чтобы соединить всех без различия

лиц — христиан, евреев, магометан, язычников, монархистов и республиканцев».

Последнее высказывание чрезвычайно характерно для Пристли. Он придерживался весьма прогрессивных для второй половины XVIII в. философских и политических взглядов и активно занимался их пропагандой. В философии он был сторонником материализма, хотя и полагал, что законы материального мира созданы божественным разумом. После Великой французской буржуазной революции Пристли стал членом общества «Друзей революции» и как священник пропагандировал идеи равенства и братства. Все это, конечно, не вызывало восторга у деятелей англиканской церкви, да и светских властей Бирмингема. Они воспользовались намерением «друзей революции» отметить годовщину взятия Бастилии и с помощью подстрекательства добились того, что толпа фанатиков разгромила и сожгла дом, лабораторию и библиотеку ученого. Сам Пристли и члены его семьи едва избежали расправы.

Разгром дома Пристли вызвал возмущение не только в Англии, но и за рубежом. Во Франции были собраны средства для восстановления дома и лаборатории, а в сентябре 1792 г. Пристли был провозглашен почетным гражданином Франции. И все же, несмотря на помощь и поддержку друзей, Пристли решил покинуть родину и переехать в Америку, куда ранее эмигрировали его сыновья. С 1794 г. до конца жизни ученый жил в Америке, занимаясь, в основном, литературной работой. Умер Пристли в 1804 г.

Как мы видим, в судьбах Пристли и Франклина много общего — возникновение интереса к естествознанию в зрелом возрасте, большие успехи в исследовательской деятельности, интерес к политике и философским проблемам. История показала, что при встрече в Англии американский ученый как бы передал эстафету в изучении электричества своему английскому другу.

Сочинение Пристли об электричестве можно разделить на две неравные части. Первую, большую, составляет обзор работ предшественников Пристли, вторую — описание его собственных опытов. Среди экспериментов Пристли был и опыт, являющийся по существу повторением наблюдения Франклина, но проведенный более тщательно. Вот как его описывает сам Пристли:

«...я наэлектризовал оловянный кубок объемом в одну кварту (см. рис. 19.— С. Ф.), стоявший на табурете из высушенного дерева; 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, оставаясь именно в том месте, куда была помещена, ни в малейшей степени не испытывая воздействия электричества; однако если палец или любое проводящее тело, соединенное с землей, касалось шариков или даже просто подносилось к ним, когда они находились вблизи горловины сосуда, они немедленно разделялись, испытывая притяжение в разные стороны; так же они вели себя при вытягивании вверх в тот момент, когда нити выступали над горловиной сосуда».

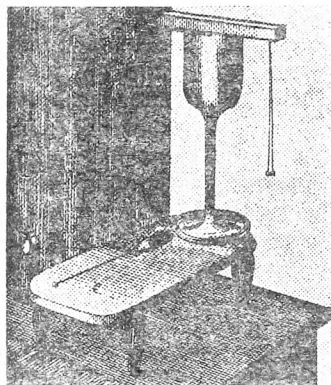


Рис. 19. Приспособления для опыта Пристли

Далее Пристли описал различные варианты этого опыта, а затем сформулировал 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».

Итак, Пристли, вслед за Эпинусом, высказал догадку о том, что электрические силы подчиняются закону «обратных квадратов». Правда, в отличие от Эпинуса Пристли подтвердил свою догадку экспериментом, хотя и довольно грубым. Но и здесь аналогия с тяготением сыграла свою роль. На какой же эффект, связанный с силами тяготения, ссылается Пристли?

Закон всемирного тяготения был сформулирован великим Ньютоном в одной из самых знаменитых в истории естествознания книг — в «Математических началах натуральной философии». Там же Ньютон рассмотрел задачу о том, какая сила действует на тело, помещенное внутрь сферической оболочки. Решим эту задачу и мы.

Пусть внутри тонкого сферического слоя (рис. 20) в точке A помещена точечная масса m . Покажем, что полная сила, действующая на эту массу со стороны сферического слоя, равна нулю. Образует мысленно узкий конус с вер-

шиной в точке A . Конус вырежет из сферического слоя небольшой участок площадью ΔS_1 . Другой конус, симметричный первому относительно точки A , вырежет из слоя участок площадью ΔS_2 . Пусть расстояния от A до соответствующих площадок равны r_1 и r_2 . Поскольку углы между осью конусов и нормальными к площадкам равны, то

$$\frac{\Delta S_1}{\Delta S_2} = \frac{r_1^2}{r_2^2}. \quad (3.1)$$

Поскольку слой сферический, то массы соответствующих частей, вырезанных конусами, пропорциональны их площадям: $m_1 = k\Delta S_1$, $m_2 = k\Delta S_2$. Запишем выражения для сил тяготения, действующих на массу m со стороны площадок ΔS_1 и ΔS_2 :

$$F_1 = \gamma \frac{mm_1}{r_1^2} = \gamma \frac{k\Delta S_1 m}{r_1^2},$$

$$F_2 = \gamma \frac{mm_2}{r_2^2} = \gamma \frac{k\Delta S_2 m}{r_2^2}$$

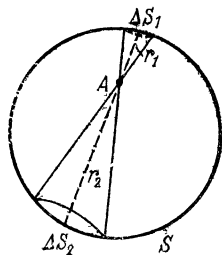


Рис. 20. К доказательству теоремы Ньютона

(γ — гравитационная постоянная). Теперь найдем отношение этих сил:

$$\frac{F_1}{F_2} = \frac{\Delta S_1}{\Delta S_2} \cdot \frac{r_2^2}{r_1^2}.$$

Очевидно, что с учетом (3.1) $\frac{F_1}{F_2} = 1$, т. е. $F_1 = F_2$. Но поскольку площадки ΔS_1 и ΔS_2 малы (т. е. их можно считать точечными массами), то силы F_1 и F_2 действуют в противоположные стороны вдоль оси конусов, и следовательно, компенсируют друг друга. Повторив эти рассуждения для других конусов, мы придем к выводу, что полная сила, действующая на массу m внутри сферического слоя, действительно равна нулю. Поскольку наши рассуждения проведены для произвольной точки внутри слоя, то можно сказать, что нулю будет равна и сила, действующая на тело конечных размеров, помещенное внутрь сферического слоя. Принцип суперпозиции применительно к силам тяготения позволяет, кроме того, обобщить полученный вывод на сферический слой любой толщины: толстый слой можно разбить на множество тонких слоев и провести рассуждения для каждого из них.

Таким образом, мы решили задачу, сформулированную Ньютоном. В связи с этим следует сделать важное замечание. Вывод Ньютона справедлив для любых сил, подчиняющихся закону «обратных квадратов» — ведь только благодаря зависимости $F \sim r^{-2}$ силы, действующие на тело со стороны различных участков сферы, оказались равными. В то же время сила не действует на тело только внутри сферического однородного слоя. При нарушении либо условия сферичности слоя, либо условия его однородности наши рассуждения перестают быть справедливыми.

Воспользуемся теперь этими выводами, чтобы оценить, насколько глубока была аналогия, указанная Пристли, что, в свою очередь, позволит нам судить, в какой мере он может претендовать на обоснование закона «обратных квадратов» в электростатике.

Прежде всего обратим внимание на то, что форма сосуда, с которым экспериментировал Пристли, далека от сферической. Следовательно, решение задачи Ньютона в том виде, в каком оно дано выше, непереносимо на опыт Пристли. Кроме того, Пристли в своих рассуждениях никак не учитывал то, что «электрическая материя» (в современной терминологии — заряд) может перетекать из одной части тела в другую, в отличие от случая тяготеющей сферической оболочки. Наконец, вызывает удивление упоминание Пристли о «притяжении электричества» — в описанном им опыте речь должна скорее идти об отталкивании. Таким образом, вывод Пристли основан на очень грубой аналогии между действием электричества и тяготением, которая не свободна от критики. В то же время в целом идея Пристли — правильная, и развитие науки показало, что «нулевой» метод, т. е. метод, основанный на доказательстве отсутствия (равенства нулю) силы, может быть весьма эффективным при обосновании закона «обратных квадратов». Удивительно, что эффективность этого метода была строго доказана менее чем через десять лет после выхода в свет труда Пристли. Впрочем, удивление вызывает не только этот факт, но и личность ученого, с именем которого связана реализация «нулевого» метода.

Загадка Генри Кавендиша

В истории науки есть имена, которые с течением времени становятся объектом особенно пристального интереса. Интерес этот, как правило, связан с какими-то особенностями в жизни и творчестве ученых. К числу та-

ких «загадочных» исследователей относится и английский естествоиспытатель Генри Кавендиш (1731—1810).

Судьба этого человека необычна, хотя она и не отмечена особенно яркими внешними событиями. Он родился в семье сэра Чарльза Кавендиша, принадлежавшего к знатному



Генри Кавендиш

роду герцогов Девонширских, ведущих свою родословную от епископа, погибшего во время знаменитого восстания Уота Тайлера (XIV в.). Генри рано потерял мать и вместе со своим младшим братом воспитывался под наблюдением отца. Это обстоятельство оказало существенное влияние на формирование характера будущего ученого: впоследствии Кавендиш стал настоящим женоненавистником, говорили даже, что он увольняет служанок, если они попадают ему на глаза.

Получив неплохое начальное образование, Кавендиш поступает в один из колледжей Кембриджского университета — Питерхаус. Проучившись в университете положенное время, он, однако, не получает свидетельства о его окончании, поскольку отказывается от выпускных экзаменов. Точная причина этого странного шага неизвестна, но некоторые историки предполагают, что молодой аристократ

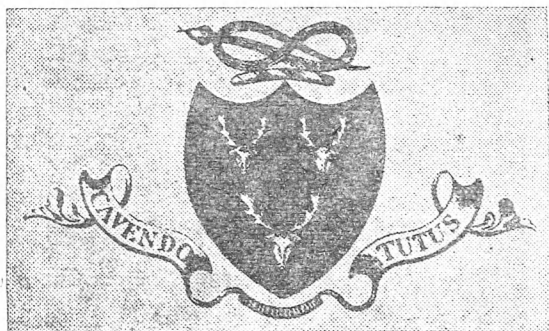


Рис. 21. Герб рода Кавендишей

не пожелал связать себя определенными обязательствами, касавшимися религиозных вопросов, без которых выпускники Кембриджа не допускались к экзаменам.

После выхода из университета и путешествия вместе с братом по Европе Кавендиш поселился в доме отца, и вскоре его основным занятием стали научные исследования. К занятиям наукой Кавендиша привлек, по-видимому, его отец сэр Чарльз, сам большой поклонник естествознания. Он был членом Лондонского Королевского общества и на протяжении почти всей жизни занимался научными наблюдениями и конструированием приборов. За создание одного из них, так называемого максимального термометра, сэр Чарльз был удостоен высшей награды Лондонского Королевского общества — медали Копли. О заслугах Кавендиша-старшего высоко отзывался Б. Франклин, который писал: «Хотелось бы, чтобы такой уважаемый ученый больше сообщал миру о множестве проводимых им с большой тщательностью экспериментов».

Таким образом, обстоятельства благоприятствовали тому, чтобы молодой выпускник Кембриджа превратился, как и многие английские аристократы, в активного любителя науки. Однако хотя любовь к науке действительно

прошла через всю жизнь Генри Кавендиша, он стал не просто любителем естествознания, а одним из первых профессиональных английских ученых. Вся его жизнь, буквально до минуты, была посвящена изучению законов природы. (Среди множества легенд о Кавендише сохранилась и такая: он, якобы, не менял покроя своего платья, чтобы не тратить времени на общение с портным, который должен был попросту шить костюм по образцу изношенного.)

Какими же проблемами естествознания интересовался Кавендиш? Наиболее ранние из сохранившихся рукописей Кавендиша свидетельствуют о том, что он начал с занятий механикой, точнее, его интересовали проблемы динамики. Изучение этих проблем позволило ученому сформулировать закон, близкий по содержанию закону сохранения энергии.

Далее, приняв идею о том, что тепло объясняется быстрым движением мельчайших частиц вещества, Кавендиш попытался распространить выводы своих динамических исследований на тепловые явления. Он экспериментально исследовал нагревание тел, установление теплового равновесия, а также плавление и испарение веществ. Кавендиш, независимо от шотландского ученого Дж. Блэка, пришел к выводу о том, что каждое вещество характеризуется, как мы теперь говорим, удельной теплоемкостью и что при плавлении поглощается «скрытая» теплота.

Интерес к тепловым явлениям привел Кавендиша к занятиям так называемой «пневматической» химией (химией газов), в которой им также были получены важные результаты. В частности, он доказал, что воздух представляет собой сложную смесь газов, и определил относительную плотность некоторых из составляющих.

Хотя тематика исследований Кавендиша, как мы видим, очень разнообразна, не следует думать, что он случайным образом переходил от одной проблемы к другой. Работы ученого объединялись стремлением решить задачу, поставленную еще Ньютоном, а именно: объяснить все явления природы на основе представлений о взаимодействии частиц с помощью сил, подчиняющихся простым законам, подобным закону всемирного тяготения. Отсюда и цепочка работ Кавендиша: столкновение частиц (динамика), взаимодействие частиц при тепловых явлениях, изучение химических процессов для определения сил, действующих между частицами...

В эту же цепочку выстраиваются и теоретические исследования, и эксперименты Кавендиша в области электричества. Ученый надеялся установить «элементарный» закон

электрических сил и с его помощью объяснить многие свойства вещества.

Судьба работ Кавендиша по электричеству столь же удивительна, как и судьба их автора. Уже первое большое экспериментальное исследование Кавендиша, посвященное электростатике, показало, что он является знатоком в этой области физики. В большой статье, опубликованной в журнале Лондонского Королевского общества, он рассматривает ряд вопросов электростатики в духе теории Франклина — Эпинуса. Главным в его работе был анализ возможной зависимости силы электростатического взаимодействия от расстояния. Кавендиш пришел к выводу, что в законе, описывающем эту зависимость, показатель степени расстояния $n \leq 3$. Уточнение этого результата требовало проведения опытов. Но для современников так и осталось неизвестным, проводил ли Кавендиш необходимые эксперименты или нет. Дело в том, что после первой многообещающей работы 1771 г. ученый опубликовал еще лишь одну статью по электричеству, которая была посвящена... моделированию свойств электрического ската.

О Кавендише часто пишут как об ученом, работавшем исключительно для удовлетворения собственного любопытства, не заботившемся о том, чтобы результаты его исследований стали известны другим ученым. Это распространенное суждение в действительности далеко от истины. Кавендиш опубликовал 18 (!) научных статей. Он был членом Лондонского Королевского общества и принимал активное участие в его работе. Современники, и это можно сказать с уверенностью, считали его одним из виднейших естествоиспытателей Англии второй половины XVIII в. Доказательством тому может служить избрание Кавендиша иностранным членом Института Франции (Академии наук). У себя на родине Кавендиш многократно входил в состав различных комиссий, образовывавшихся Лондонским Королевским обществом для решения научно-технических проблем. В некоторых случаях ученый выступал как эксперт по электричеству. Любопытна в этой связи история деятельности комиссии, рассматривавшей вопрос об оптимальной форме концов громоотводов.

В 1771 г. член Лондонского Королевского общества Бенжамин Вильсон рекомендовал артиллерийской службе Англии для предотвращения взрывов на пороховых складах использовать громоотводы с тупым концом. Для оценки этого предложения была создана авторитетная комиссия, в которую входили, в частности, Б. Франклин и Г. Кавен-

диш. Несмотря на то что большинство членов комиссии высказалось в пользу заостренных громоотводов, предложение Вильсона было принято. Как свидетельствуют исторические данные, причины, по которым победило ошибочное предложение Вильсона, были очень далеки от науки — главную роль здесь сыграло вмешательство самого короля. (Военное ведомство Англии поплатились за пренебрежение мнением ученых — через пять лет от попадания молнии взорвался один из крупнейших пороховых погребов страны.) Этот эпизод показывает, что у Кавендиша постепенно могло возникнуть предубеждение против публикации работ, в одобрении которых он не был уверен.

С другой стороны, нельзя сказать, что Кавендиш не поддерживал никаких контактов с людьми, интересующимися наукой, вне Лондонского Королевского общества. Пользовался известностью его научная библиотека, доступ в которую был открыт всем желающим. (Поддерживая порядок в этом обширном собрании, Кавендиш сам, снимая книгу с полки, оставлял на ее месте записку.) Ученый несколько раз совершал поездки по Англии, изучая проблемы геологии и метеорологии, а также знакомясь с современным промышленным производством. В одной из таких поездок он встретился со знаменитым изобретателем Дж. Уаттом. Наконец, известны случаи, когда Кавендиш приглашал коллег по Королевскому обществу к себе домой для демонстрации особенно эффектных экспериментов.

Но это, так сказать, надводная часть айсберга, которому можно уподобить жизнь Кавендиша. Как известно, большая часть айсберга находится под водой и остается невидимой для наблюдателя, находящегося над ее поверхностью. Научная деятельность Кавендиша резко контрастировала с господствовавшим тогда идеалом ученого-джентльмена, посвящающего любопытным опытам лишь часы досуга: он был полностью поглощен своими исследованиями. Но о большей части напряженных исследований Кавендиша его современники и коллеги по ЛКО ничего не знали. О ней стало известно лишь спустя более пятидесяти лет после смерти ученого. Обстоятельства публикации работ Кавендиша по электричеству таковы, что невольно напрашивается мысль, будто история постаралась наилучшим образом исправить свою же ошибку.

В 1870 г. один из потомков «великого отшельника» герцог Девонширский, будучи покровителем Кембриджского университета, предложил его руководству выделить средства для основания специальной физической лабора-

тории и учреждения должности профессора экспериментальной физики. Первым «кавендишским» профессором стал Дж. К. Максвелл, с которым мы еще встретимся в одной из следующих глав. Максвелл энергично принялся за строительство лаборатории и на торжественном ее открытии в 1874 г. герцог Девонширский вручил первому директору пачку рукописей Кавендиша, именем которого была названа лаборатория, с просьбой разобрать их и оценить значимость содержания. Казалось, что для физика такого класса, как Максвелл, это скучная, второстепенная работа, лишь отнимающая время от занятий любимой теоретической физикой. Однако вскоре после первого знакомства с рукописями Кавендиша Максвелл увлекся этой новой, необычной для него деятельностью. Рукописи оказались подлинной сокровищницей, в которой хранились результаты многочисленных, разнообразных и остроумных опытов по электричеству. Максвелл писал одному из коллег:

«...В своих рукописях Кавендиш обнаруживает знакомство с законами параллельного и последовательного соединения проводников... Он провел весьма обширные исследования в области проводимости солевых растворов в трубках, которые можно уподобить проволокам из разных металлов. Создается впечатление, что он достоин еще больших почестей, так как опередил Ома до того, как были открыты постоянные токи. Его измерения емкости заставят нас попотеть в Кавендишской лаб., прежде чем мы достигнем точки, где он остановился».

Работа по исследованию рукописей Кавендиша заняла у Максвелла гораздо больше времени, чем он предполагал. Она не прервалась даже несмотря на резкое ухудшение состояния здоровья ученого. Уже будучи смертельно больным Максвелл продолжал вести подготовку издания работ Кавендиша по электричеству. Это издание увидело свет в 1879 г., незадолго до смерти Максвелла.

Создатель теории электромагнитного поля творчески подошел к публикации трудов своего соотечественника. Он не только упорядочил рукописные материалы, но и снабдил их подробными комментариями, многие из которых могут рассматриваться как небольшие самостоятельные научные исследования. Тексту работ Кавендиша Максвелл предпослал очерк жизни и деятельности ученого, в котором особенно подробно осветил исследования по электричеству. На основе анализа рукописей Кавендиша, а также свидетельств его современников Максвелл составил

почти художественное описание лаборатории, где ученый-отшельник проводил свои электрические опыты. Как же выглядела эта лаборатория?

Она занимала большую комнату с высоким потолком. При входе в лабораторию сразу же бросалась в глаза большая электрическая машина, основным элементом которой был стеклянный шар. 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 двух метров 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: в их ряду каждая следующая батарея по емкости была примерно в три раза больше предыдущей. Были в лаборатории и вспомогательные приборы, например делительная машина для определения толщины стеклянных пластинок и размеров других малых тел.

Именно в этой комнате были выполнены серии экспериментов, в которых со всей возможной в то время тщательностью был обоснован закон «обратных квадратов».

«Нулевой» метод в действии

Известный английский физик и химик Х. Дэви, знавший Кавендиша лично, писал, что при конструировании приборов последний не придавал никакого зна-

чения 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. так, 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». В двухтомном издании трудов Г. Кавендиша (1921 г.) в подстрочном примечании к этой работе отмечается, что характер оформления рукописи дает основание предположить, что она была подготовлена для публикации; описанные в ней эксперименты Кавендиш провел около 1773 г.

Как уже говорилось, Кавендиш был знатоком механики Ньютона. Кроме того, его первая теоретическая работа по электричеству свидетельствовала о глубоком понимании ученым свойств сил, по-разному зависящих от расстояния. Поэтому, приступая к экспериментам по проверке закона «обратных квадратов», Кавендиш сознавал все трудности и проблемы, с которыми ему придется столкнуться. Хотя метод, которым воспользовался Кавендиш, основывался на том же свойстве сил, меняющихся обратно пропорционально квадрату расстояния, даже при беглом знакомстве с работой Кавендиша нетрудно убедиться, насколько уровень его экспериментов выше по сравнению с примитивными опытами Пристли.

Работа Кавендиша начинается с четкой постановки задачи:

«Целью следующих экспериментов 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 (см. рис. 22.— 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 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

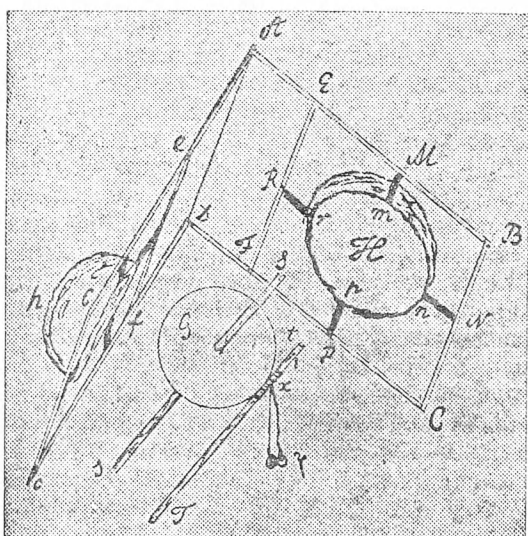


Рис. 22. Набросок экспериментальной установки, выполненный самим Кавендишем

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 заряжали батарею конденсаторов, а затем уже от этой батареи заряжали наружные полусферы, соединенные проводником с шаром G . После этого последовательно производили следующие действия: удаляли провод, использовавшийся для электризации полусфер, вытаскивали проводник, соединявший полусферы и внутренний шар G , полусферы разъединялись и касались шара G палочкой Tt . Отметим, что использование специальной системы пружин (не показанных на рис. 22) по-

зволюло 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.

Тщательное описание установки, данное Кавендишем, отражает характерную для него, но весьма удивительную для XVIII в. настороженность по отношению к возможным источникам погрешностей опыта. Однако в работе Кавендиша удивляет не только это. Стоит, например, обратить внимание на то, что при многочисленных повторениях опыта электризация полусфер производилась не непосредственно от машины трения, а от лейденской банки, заряженной «до одинаковой степени», что контролировалось специальным электрометром. В этом стремлении предельно точно фиксировать условия эксперимента, обеспечивая его воспроизводимость, ученый также намного опередил свое время.

А вот пример изобретательности Кавендиша — оригинальный прием повышения чувствительности его «пробкового» электрометра. Он состоял в том, что перед началом опыта шарикам на нитях сообщался некоторый заряд, благодаря чему они расходились. Смысл этого приема таков. Допустим, что в ходе первого испытания шарики на нитях заряжаются положительно и полусферам также сообщается положительный заряд. Поскольку на внутренний шар при соединении с полусферами может перейти только небольшая часть заряда последних, то, после удаления полусфер, при касании шара пробковыми шариками большая часть их заряда перейдет на шар, и расхождение шариков уменьшится. Если теперь повторить опыт лишь с одним отличием — зарядив шарики предварительно отрицательно, — то в целом эффект будет аналогичен описанному, но... Действительно, если на внутренний шар переходит хотя бы небольшая часть заряда полусфер, то конечное расхождение шариков в этих двух случаях будет различным. Нетрудно сообразить, что в первом случае оно будет больше. Естественно, что это рассуждение справедливо при условии, что первоначальная электризация шариков по абсолютной величине оба раза одна и та же, и Кавендиш подчеркивал необходимость

соблюдения этого условия. Ученый так пояснял преимущество этого приема:

«Когда шарики уже получили достаточное для их расхождения количество электричества, ощущаемое изменение их расхождения вызывается добавлением 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 $1/60$ части заряда внешних полусфер. Это помогло ученому оценить, на какую величину может отличаться от 2 показатель степени расстояния в «законе электрической силы», чтобы это отличие не было заметно в его опытах. Рассуждения Кавендиша таковы:

«Пусть AT проходит через диаметры двух concentрических сфер (см. рис. 23.— С. Ф.) ABD и abd и Aa делится пополам точкой e ; Ae в эксперименте приблизительно равнялось 0,35 дюйма, Te — 13,1 дюйма. Если электрическое отталкивание (и притяжение) обратно пропорционально расстоянию в степени $2+1/50$, то можно показать, что сила, с которой электрическая сила на ABD отталкивает [заряженную] частицу, находящуюся в точке e , по направлению к центру, относится к силе, с которой то же количество жидкости, собранное в центре, будет отталкивать частицу в противоположном направлении, как 1 : 57. (Это утверждение доказано Кавендишем в специальном математическом приложении.— С. Ф.)

Однако поскольку закон отталкивания только слегка отличается от обратной пропорциональности квадрату расстояния, жидкость на внутреннем шаре будет отталкивать частицу в точке e примерно с той же силой, как если бы вся жидкость находилась в центре. Поэтому, если бы жидкость на внутреннем шаре составляла $1/57$ часть жидкости на ABD , частица находилась бы в равновесии. Поскольку e находится посередине между A и a , имеются

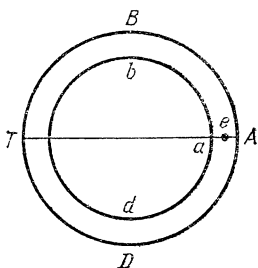


Рис. 23. К оценке Кавендиша точности его опыта

веские основания думать, что все сказанное относится к жидкости всего проводника Aa ».

Итак, рассматривая условия равновесия заряженной частицы на проводнике, соединяющем сферы, Кавендиш определяет точность своих опытов. Вывод, который он делает на основе приведенных выше рассуждений, звучит абсолютно четко, как будто его заимствовали из современной научной статьи:

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

Мы видим, что 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.

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 укладывались 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 бы через привычные механические величины (длину, силу и т. п.). Опыты Кулона стали таким «мостиком», и, значит, при любом ходе событий должны были стать этапом в развитии науки об электричестве.

ЗАКОН ИМЕНИ.. ВОЕННОГО ИНЖЕНЕРА

В современной физике «нулевые» методы, одним из которых является использованный Кавендишем способ проверки закона «обратных квадратов», играют исключительно важную роль. Кроме того, в большинстве случаев «нулевые» методы оказываются более точными, чем методы, основанные на абсолютных измерениях каких-либо величин. Это, однако, вовсе не означает, что последние занимают какое-то второстепенное положение в науке. Напротив, именно «абсолютные» методы составляют фундамент всей экспериментальной физики. Действительно, часто для того, чтобы оценить точность «нулевого» метода, необходимо знать абсолютную чувствительность приборов, используемых для измерений. Не будем забывать и о том, что вся метрология, занимающаяся созданием и совершенствованием эталонов различных физических величин, на которых основаны используемые на практике системы единиц, также имеет дело, в основном, с абсолютными измерениями.

Таким образом, оглядываясь на прошлое физики, следует признать, что несмотря на исключительно высокий уровень опытов Кавендиша они все же не решили проблему определения «закона электрической силы» полностью. Даже если бы работа Кавендиша была своевременно опубликована, скорее всего физика продолжила бы поиски методов, основанных на непосредственном измерении электрических сил. Одна из целей этого метода состоит во введении единицы электрического заряда.

Обманчивая простота

Мы уже говорили о том, что во второй половине XVIII в. многие ученые верили в справедливость «закона электрической силы», подобного закону всемир-

ного тяготения:

$$F = \frac{q_1 q_2}{r^2}. \quad (4.1)$$

Обратим внимание на следующее обстоятельство. В приведенной формуле фигурируют два типа величин. К одному относится сила F и расстояние r — это механические величины, в то время уже широко использовавшиеся физиками. Ко второму типу относятся величины q_1 и q_2 , которые теперь называются электрическими зарядами, а тогда именовались по-разному: «электрические массы», «количества электрического флюида» и т. д. Принципиальное отличие величины второго типа от F и r состоит в том, что во времена Кавендиша не существовало методов их независимого определения. Независимого в том смысле, что оно не опиралось на соотношение (4.1). Но тогда становится очевидной роль экспериментальной проверки этого соотношения: она дает возможность определить единицу электрического заряда.

Может возникнуть вопрос: как можно проверять соотношение (4.1), если оно само является определяющим для единицы заряда? Оказывается, способ обойти эту трудность существует, но об этом мы расскажем позже. А сейчас стоит задать другой вопрос, а именно: какие трудности стояли перед исследователями XVIII в., пытавшимися измерять абсолютную величину электростатических сил?

Трудностей было много. Одна из них уже отмечалась выше в связи с ошибкой, допущенной Даниилом Бернулли при анализе результатов опытов с гидростатическим электрометром. Даже десятилетия спустя после проведения этих опытов многие экспериментаторы еще не различали электрические силы, которые называют пондеромоторными, действующие между макроскопическими телами, и «элементарные» силы, которые действуют между «точечными» зарядами. Лишь последний тип сил подчиняется закону (4.1), и, значит, на опыте требуется исследовать взаимодействие «точечных» зарядов. Решение этой проблемы подсказывала аналогия с силой всемирного тяготения. Согласно теории Ньютона по закону

$$F = \gamma \frac{m_1 m_2}{r^2} \quad (4.2)$$

взаимодействуют точечные массы и массы, характеризующиеся сферической симметрией, — шары и сферы. Может быть, и в случае электростатического взаимодействия сфе-

рическое проводящее тело может выручить экспериментатора? Ответ, как ни странно, звучит так: и да, и нет.

Чтобы понять, в чем тут дело, отвлечемся на время от истории и попробуем решить одну физическую задачу.

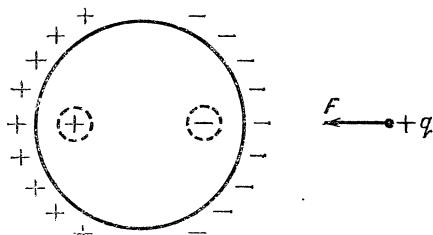


Рис. 24. Действие незаряженной проводящей сферы на точечный заряд

Рассмотрим изолированную и незаряженную проводящую сферу. Поместим на некотором расстоянии от нее положительный точечный заряд q . Будет ли при этом заряд испытывать притяжение к сфере? Наверное, многим читателям сразу же хочется сказать: «Никакого притяжения не возникнет, ведь сфера-то незаряженная!» Однако более искушенные читатели могли бы возразить, что под действием электрического поля точечного заряда на проводящей сфере произойдет перераспределение зарядов и «центр тяжести» положительных зарядов окажется дальше от q , чем «центр тяжести» отрицательных зарядов (рис. 24).

Но это означает, что притяжение между отрицательными зарядами на сфере и зарядом q будет больше, чем отталкивание между положительными зарядами сферы и q . Следовательно, хотя сфера в целом будет оставаться нейтральной, она будет притягивать заряд q !

Мы даже можем рассчитать возникающую силу притяжения. Задача эта уже более сложная, но она вполне под силу каждому, кто помнит формулу для потенциала точечного заряда.

Для начала докажем одно свойство окружности: окружность является геометрическим местом точек, отно-

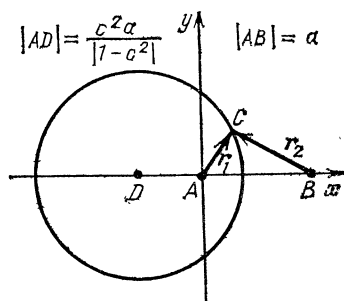


Рис. 25. К доказательству теоремы о свойстве окружности

шение расстояний которых от двух данных точек постоянно. Пусть даны две точки A и B (рис. 25). Проведем оси координат x, y так, чтобы ось x прошла через обе точки, а ось y — через точку A . Обозначим расстояние между точками A и B через a . Покажем, что все точки с координатами x, y такие, что отношение

$$r_1/r_2 = c = \text{const}, \quad (4.3)$$

где r_1 и r_2 — расстояния точки до A и B соответственно, принадлежат одной окружности.

Условие (4.3) можно, очевидно, переписать в виде

$$\frac{x^2 + y^2}{(a-x)^2 + y^2} = c^2.$$

Если это выражение привести к общему знаменателю, а затем провести несложные алгебраические преобразования, то можно получить такое соотношение:

$$\left(x + \frac{c^2 a}{1-c^2}\right)^2 + y^2 = \frac{c^2 a^2}{(1-c^2)^2}. \quad (4.4)$$

Вспомним теперь, что уравнение, описывающее окружность радиуса R с центром в начале координат, имеет вид

$$x^2 + y^2 = R^2. \quad (4.5)$$

Если сравнить (4.4) и (4.5), то можно заметить, что уравнение (4.4) описывает окружность с радиусом, равным

$\frac{ca}{1-c^2}$, и центром, смещенным из начала координат в точку

$D\left(-\frac{c^2 a}{1-c^2}, 0\right)$ (рис. 25). Значит, сформулированное нами свойство окружности доказано. Но не будем останавливаться! Учитывая, что рассмотренная задача характеризуется симметрией относительно оси x , мы можем прийти к выводу, что сфера, которая получается путем вращения найденной окружности относительно оси x , обладает тем же свойством, т. е. является геометрическим местом точек, отношение расстояний которых до двух данных есть величина постоянная.

Пора, однако, вернуться к поставленной выше физической задаче. Решить ее «в лоб» невозможно, поскольку мы не знаем, как под воздействием заряда q перераспределились заряды на проводящей сфере. Известно лишь общее свойство проводников: в электрическом поле заряды на них перераспределяются так, что весь проводник (а значит, и все точки его поверхности) обладает одинаковым

потенциалом. Потенциал центра сферы в поле заряда q равен q/R (рис. 26), где R — расстояние от q до центра сферы *). Следовательно, этим потенциалом характеризуется и вся сфера.

Указанное свойство проводников в электрическом поле позволяет рассматривать некоторые задачи электростатики с помощью красивого приема. Представим себе, что нам удалось найти такие точечные заряды q' и $-q'$, что при помещении их в определенные точки внутри сферы потенциал всех точек поверхности сферы (конечно, при учете поля заряда q) окажется равным q/R . Тогда поскольку вид поля, создаваемого этими двумя зарядами, вне сферы, очевидно, будет совпадать с видом поля нейтральной сферы с перераспределившимися на ней положительными и отрицательными зарядами, то расчет взаимодействия ее с q сведется к нахождению равнодействующих двух сил, с которыми заряды q' и $-q'$ действуют на заряд q . Оказывается, что найти величину q' и точки расположения q' и $-q'$ не очень трудно. Заметим попутно, что метод замены реального распределения зарядов другим, создающим в некоторой области пространства эквивалентное поле, получило специальное название: «метод изображений». Он был впервые предложен выдающимся английским физиком У. Томсоном, впоследствии получившим титул лорда Кельвина.

Как применить его к нашей задаче? Поместим заряд q' в центр сферы, а заряд $-q'$ — на расстоянии x от него (рис. 26). Тогда потенциал некоторой точки сферы будет равен

$$\varphi = \frac{q'}{r} - \frac{q'}{r_1} + \frac{q}{r_2} = \frac{q}{R}.$$

Данное равенство будет выполняться для любой точки сферы, если $q'/r = q/R$, т. е. $q' = qr/R$. Действительно, в

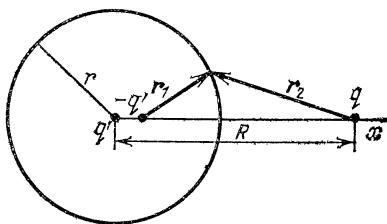


Рис. 26. К расчету взаимодействия незаряженной проводящей сферы и точечного заряда

*) Здесь и далее в формулах для потенциала мы опускаем постоянный множитель $1/(4\pi\epsilon_0)$ ради сокращения выкладок. При расчете силы он будет учтен.

этом случае

$$\frac{q'}{r_1} = \frac{q}{r_2} \quad \text{или} \quad \frac{r_1}{r_2} = \frac{q'}{q} = \text{const},$$

а это и есть условие, согласно которому точки лежат на поверхности сферы.

Из решения геометрической задачи нам известно, что отношение расстояний для данной сферы связано с расстоянием между $-q'$ и q и длиной отрезка от центра сферы до $-q'$ соотношением

$$\frac{(r_1/r_2)^2 (R-x)}{1-(r_1/r_2)^2} = x.$$

Отсюда, учитывая, что $r_1/r_2 = q'/q = r/R$, мы находим $x = r^2/R$. Для окончательного решения задачи требуется вычислить равнодействующую сил F_1 и F_2 , с которыми действуют заряды q' и $-q'$ на заряд q . Пользуясь законом Кулона для взаимодействия зарядов в вакууме, имеем

$$F_1 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q'q}{R^2}, \quad F_2 = -\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q'q}{(R-x)^2}.$$

Следовательно, окончательно имеем

$$F = F_1 + F_2 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} q^2 \frac{r^3}{R^3} \frac{(2R^2 - r^2)}{(R^2 - r^2)^2}. \quad (4.6)$$

Полученный результат весьма поучителен: сила взаимодействия между нейтральной, изолированной проводящей сферой и точечным зарядом очень быстро убывает с ростом отношения r/R . Так, для случая $R=2r$

$$F = \frac{7}{18} \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q^2}{R^2},$$

т. е. сила взаимодействия составляет чуть меньше половины силы, действующей между равными зарядами q , помещенными на расстоянии R . В то же время при $R=4r$

$$F = \frac{31}{1000} \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q^2}{R^2},$$

т. е. эта сила составляет чуть больше 3% силы взаимодействия точечных зарядов.

Теперь пора вспомнить, почему мы обратились к задаче о взаимодействии заряда и проводящей сферы. Нас интересовало, насколько далеко заходит аналогия между электрическим и гравитационным взаимодействиями. Решив задачу, мы убедились, что сила, возникающая между

точечным зарядом и близко расположенным сферически-симметричным проводящим телом, очень сильно отличается от закона «обратных квадратов». Заметим при этом, что если бы мы рассчитали силу, с которой действуют друг на друга материальная точка и сфера некоторой массы, то увидели бы, что закон «обратных квадратов» остается справедливым. Причины различия в решениях ясны: действие заряда одного тела приводит к перераспределению заряда на другом, в то время как в теории тяготения массы не «перетекают». Этим различием можно пренебречь, если $r \ll R$. Но это означает, что в задачах теории электричества требование к «точечности» взаимодействующих тел при проверке закона «обратных квадратов» должно выполняться «строже», чем в гравитационных экспериментах. (Вспомните знаменитый опыт Кавендиша, в котором фактически впервые была определена гравитационная постоянная и в земных условиях проверен закон всемирного тяготения: в нем размеры взаимодействующих шаров были больше расстояния между их поверхностями!)

Эффект электростатической индукции затрудняет проверку электрического закона «обратных квадратов» еще и потому, что заряды наводятся практически на всех телах, окружающих используемый прибор, что снижает точность опытов. К числу серьезных трудностей, встающих перед экспериментатором, относится, конечно, и явление утечки электрического заряда. Одним словом, «куда ни кинь — всюду клин». Но это обстоятельство лишь увеличивает наше восхищение исследователем, отважившимся на штурм столь сложной экспериментальной задачи. А может быть, не случайно, что штурм этот успешно провел именно... офицер Военно-инженерного корпуса армии Его Величества Короля Франции?

Долгий путь к физике

Нет, нельзя не поражаться судьбами многих выдающихся ученых прошлого. Уже на примерах Гильберта и Герики, Дюфа и Франклина мы убедились, что к исследованиям электричества в XVII—XVIII вв. обращались люди самых разных профессий и интересов. Вот и герою этой главы Шарлю Огюстену Кулону пришлось пройти большой жизненный путь, прежде чем он занялся главным делом своей жизни — изучением электричества и магнетизма.

Родился Кулон 14 июня 1736 г. в Ангулеме, на юго-западе Франции. Его отец, в свое время пытавшийся сделать военную карьеру, к моменту рождения сына был правительственным чиновником. Детство Шарля прошло в Париже, где он получил начальное образование, посещая



Шарль Кулон

Коллеж Четырех Наций, основанный по завещанию знаменитого кардинала Мазарини. Коллеж Мазарини славился высоким уровнем преподавания математики, и, видимо, там привили Кулону любовь к этому предмету.

По семейным обстоятельствам после окончания школы Кулон был вынужден уехать из Парижа на родину отца в Монпелье, где он принимал участие в работе местного научного общества и написал свои первые научные работы,

которые, правда, еще носили печать ученичества. Однако Кулон недолго оставался в провинции. Он понимал, что необходимо выбрать какую-то профессию, которая обеспечила бы ему средства к существованию. Для юношей из буржуазной среды было два пути: либо принять духовный сан, либо пойти на службу в армию. Выбор Кулона пал на профессию военного инженера, дававшую достаточно высокое положение в обществе и в наибольшей степени соответствовавшую склонностям молодого любителя науки.

Для вступления в Военно-инженерный корпус французской армии необходимо было закончить специальную школу, которая располагалась в Мезьере. В середине XVIII в. Мезьерская военно-инженерная школа считалась одним из лучших высших технических учебных заведений Европы. Кулон, сдав вступительные экзамены, к которым он основательно подготовился, был зачислен в Школу и в течение полутора лет обучался там математике, черчению, основам физики, строительному искусству. У Кулона были хорошие преподаватели: математике его учил Ш. Боссю, ставший впоследствии академиком, он слушал лекции по физике аббата Нолле, одного из наиболее известных экспериментаторов середины XVIII в., уделявшего особое внимание опытам по электричеству. В Школе Кулон получил и серьезные практические навыки в плотницком деле, в обработке камня, проведении геодезических работ.

Уже вскоре после выпуска из Школы в чине лейтенанта Кулон оказывается в весьма трудных условиях. Он получает назначение на остров Мартинику, в заморскую колонию Франции, где должен был участвовать в сооружении основного укрепления острова — военного форта. То были трудные для Франции времена. Она терпела сокрушительные поражения в колониальных войнах, и поэтому укрепление оставшихся за ней колоний проводилось лихорадочно быстро. Кроме того, даже в далеких колониях кипели интриги, осложнявшие проведение строительных работ. Все это нашло отражение и в жизни Кулона. С первых дней пребывания на Мартинике ему пришлось бороться против рутины и местных интересов верхушки колониальной знати, преодолевать трудности, связанные с нехваткой рабочих, тяжелым климатом, болезнями. Вчерашнему школяру пришлось фактически руководить строительством большого военного укрепления! Но трудности ломают слабых, сильные же мужают в борьбе. Кулон выдержал испытание Мартиникой. Через девять

лет во Францию вернулся уже не юный лейтенант инженерных войск, а опытный офицер, способный квалифицированно решать самые сложные технические задачи. К тому же Кулон вернулся на родину не с пустыми руками.

Удивительно, но тяготы военной службы не отвратили Кулона от научных интересов. Даже занятый повседневными хлопотами на строительстве, вынужденный выполнять обязанности сразу нескольких инженеров, Кулон находил время для занятий наукой. Во Францию он привез материалы исследования, которое позднее было оформлено им в виде мемуара «О применении правил максимумов и минимумов к некоторым вопросам статики, имеющим отношение к архитектуре». Начинаящий исследователь решился представить свой труд в Парижскую академию наук. Там его мемуар не только получил одобрение, но и был опубликован! Академик Боссю писал об этой работе своего ученика: «Под этим скромным названием Кулон охватил, так сказать, всю архитектурную статику... Повсюду в его исследовании мы отмечаем глубокое знание анализа бесконечно малых и мудрость в выборе физических гипотез, а также в их применении...» Оценка Боссю была вполне объективной. Дальнейшее развитие строительной механики показало, что многие идеи Кулона оказались весьма плодотворными и использовались учеными и инженерами не только в XVIII, но и в XIX в. Более того, часто и современные специалисты считают необходимым ссылаться на эту работу Кулона.

Первый успех в Академии окрылил молодого исследователя, и он представляет на ее рассмотрение все новые и новые работы. Примечательно, что почти во всех технических проблемах, с которыми ему приходится сталкиваться, Кулон видит проблемы научные и стремится изучить их как можно глубже. Между тем научные изыскания вовсе не являются основным занятием Кулона. Во Франции продолжается его военно-инженерная служба, по прихоти которой Кулон оказывается то в Бушэне, то в Шербуре, то в Безансоне, то в Лилле...

К числу наиболее интересных работ, подготовленных Кулоном за девять лет службы в различных провинциях Франции, следует отнести разработку метода проведения подводных работ (интересно, что это единственное произведение Кулона, переведенное на русский язык), исследование сухого трения, а также создание чувствительного прибора для изучения магнитного поля Земли.

В 1781 г. научная активность Кулона получила при-

знание: его избрали членом Парижской академии наук по классу механики. В том же году командование, наконец, перевело Кулона в Париж, где его использовали, в основном, как консультанта по различным техническим вопросам. Были, конечно, у него в столице и постоянные обязанности. Кулон, например, был «смотрителем вод и фонтанов короля», т. е. в его функции входили инспекция и ремонт гидротехнических сооружений, принадлежавших королевской семье. И все же после переезда в столицу основным занятием Кулона становятся научные исследования.

Рождение крутильных весов

Как уже говорилось, когда Кулон служил в провинции, его исследования были тесно связаны с техническими проблемами. Однако постепенно интересы ученого смещались в сторону физики. До некоторой степени это смещение интересов было стимулировано Парижской академией, которая регулярно объявляла конкурсы на лучшее исследование, посвященное заданной теме. Многие темы академических конкурсов имели отношение к физике. Одна из них сыграла определяющую роль в научной биографии Кулона. Эта тема была связана с изучением магнетизма.

Проблема изучения магнитного поля Земли продолжала оставаться актуальной и через 170 лет после выхода в свет книги У. Гильберта «De Magnete». За это время, конечно, в истории науки о магнетизме произошло немало событий. Так, известным английским астрономом Э. Галлеем была составлена первая магнитная карта Земли. Это событие как бы знаменовало новый этап в изучении магнитосферы нашей планеты. Более тщательные геомагнитные наблюдения позволили ученым обнаружить ряд тонких эффектов, таких как вариации магнитного склонения.

Напомним, что магнитные полюса Земли не совпадают с ее географическими полюсами. Вследствие этого направление магнитной стрелки не совпадает с линией географического меридиана, а образует с ней в каждой точке земной поверхности (кроме, конечно, Северного и Южного полюсов, где направление меридиана не определено) некоторый угол — угол магнитного склонения. Естественно, что определение этого угла — важная практическая задача: только зная угол склонения, можно правильно судить о направлении на север или юг. Характерно, что зависимость

магнитного склонения от координат точки на поверхности Земли была обнаружена Колумбом во время его знаменитого плавания к берегам Америки.

Вслед за открытием магнитного склонения было обнаружено и магнитное наклонение — свободно подвешенная намагниченная стрелка ориентируется под углом к горизонту. Но еще более осложнило картину магнитного поля Земли открытие так называемых вариаций (т. е. изменений со временем) этого поля. В 1634 г. было установлено, что измеренное в это время склонение в Лондоне отличается от измерения склонения, выполненного там же в 1580 г., более чем на 7° ! В XVII в. было установлено, что существуют долговременные (так называемые вековые) вариации склонения и вариации с периодом от долей секунды до многих суток. Естественно, ученых интересовали причины этих вариаций.

Однако во времена Кулона до выяснения физических причин вариаций магнитного склонения *) было еще очень далеко. На повестке дня тогда стояла задача изучения этого явления, измерения величины вариаций. Решение этой задачи осложнялось явлением трения сопутствующим работе компаса традиционной конструкции, в котором магнитная стрелка опиралась на острие. Трение подпятника магнита об острие, называемое иначе трением вращения, является одним из видов сухого трения, связанного с эффектом застоя: для приведения стрелки в движение необходимо, чтобы на нее подействовала сила (точнее — момент сил), определенной величины. (Вспомните, чтобы поточнее определить направление магнитного меридиана, приходится постукивать по крышке компаса — сила, действующая на стрелку из-за сотрясения, и способствует преодолению застоя.) Поэтому измерения слабых вариаций магнитного поля затруднительны, так как момент магнитных сил, стремящихся повернуть стрелку, оказывается меньше необходимого предела.

Из сказанного ясно, почему тема конкурса Парижской академии наук 1775 г. звучала так: «Изыскание лучшего способа изготовления магнитных стрелок, их подвешивания и проверки совпадения их направления с направлением магнитного меридиана и, наконец, объяснение их регуляр-

*) О современных теориях, объясняющих происхождение магнитного поля Земли и его вариаций, можно узнать из интересной книги: Почтарев В. И., Михлин Б. З. Тайна намагниченной Земли. — М.: Педагогика, 1986.

ных суточных вариаций». Насколько трудной была эта тема, свидетельствует тот факт, что премия после завершения конкурса так и не была присуждена. В то же время актуальность темы была столь велика, что через два года Академия решила повторить конкурс. На этот раз он прошел успешнее. Победителями были объявлены сразу двое: швед ван Швинден и Кулон.

Шведский ученый представил весьма объемистое сочинение, в котором, однако, рассматривались лишь мелкие усовершенствования традиционного метода определения магнитного склонения, в основе которого лежало использование стрелки, опирающейся на острие.

Конкурсная работа Кулона была гораздо оригинальнее. Дело в том, что он решил отказаться от обычного способа удержания стрелки и предложил подвешивать ее на тонкой нити. Сама идея подвеса магнитной стрелки на нити была не нова, ее уже высказывали несколько ученых в XVII в. Однако до Кулона ее никто не реализовал на практике. Вероятной причиной такого положения было то, что в XVII в. просто не было необходимости в создании особо чувствительных приборов для изучения магнитного поля Земли: избыточно чувствительный прибор лишь затрудняет проведение опытов. Было здесь, однако, и еще одно обстоятельство, требующее более подробного рассмотрения.

Как мы уже отмечали, ненамагниченная стрелка на острие находится в состоянии безразличного равновесия относительно поворота вокруг оси, образованной острием. Если стрелку намагнитить, то у нее появляется положение устойчивого равновесия, которое лежит в плоскости магнитного меридиана. Если пренебречь явлением застоя, то покоящаяся стрелка всегда располагается по меридиану. Так ли просто выглядит ситуация, когда стрелка подвешена на нити?

Всякий, кто когда-либо имел дело с грузом, подвешенным на веревке, практически не обладающей упругостью по отношению к растяжению, вероятно, наблюдал так называемые крутильные колебания. В процессе этих колебаний груз вращается вокруг оси, совпадающей с веревкой, которая то раскручивается, то закручивается (отсюда и название колебаний). Если тело совершает колебания, то у него должно быть положение устойчивого равновесия. В случае тела, подвешенного на веревке, положение равновесия соответствует незакрученной веревке. Как только тело поворачивают и веревка закручивается,

сразу же возникает момент сил, стремящийся вернуть тело в положение равновесия.

Из сказанного можно усмотреть проблему, которая возникает при попытке использовать нить в качестве подвеса стрелки прибора для исследования магнитного поля Земли. Дело в том, что если не знать направление магнитного меридиана, то при подвеске стрелки легко ошибиться. Действительно, допустим, что ненамагниченная стрелка при незакрученной нити не располагается в плоскости магнитного меридиана. Тогда после намагничивания стрелки положение ее устойчивого равновесия, строго говоря, не совпадет с направлением магнитного меридиана, а будет лежать где-то между ним и положением равновесия ненамагниченной стрелки, определяемым нитью. Но тогда с помощью этого прибора невозможно определить не только вариации, но и само магнитное склонение! С другой стороны, если точно известна плоскость магнитного меридиана, то нет нужды в приборе! Получается вроде бы замкнутый круг. Он, по-видимому, и отпугивал ученых, удерживая их от попыток создать прибор со стрелкой, подвешенной на нити.

Кулон понял, что это безукоризненное с позиций логики рассуждение не является препятствием в создании реально действующего прибора. И в этом ему помогла инженерная интуиция и большой практический опыт. Инженер Кулон знал, что ни одно измерение, сколько ни старайся, нельзя провести абсолютно точно. А если это так и случайные ошибки все равно неизбежны, то какой смысл отказываться от приближенных методов?

Применительно к задаче о магнитной стрелке на нити правильный путь к приближенному решению состоял в поиске ситуации, когда упругими свойствами нити подвеса по отношению к кручению можно пренебречь, т. е. считать, что момент упругих сил, возникающих в нити при кручении, мал по сравнению с моментом магнитных сил, подлежащих исследованию. Но как искать эту ситуацию?

Можно, конечно, пойти наугад, пробуя различные нити. Однако Кулон как ученый не мог решать задачу «методом проб и ошибок». Ему больше импонировали систематические исследования. И он провел их. Кулон изучил зависимость момента сил кручения от длины нити, от ее диаметра и от угла кручения. В своих опытах он использовал шелковые нити. В целом ему удалось решить проблему: оказалось, что в очень тонкой и достаточно длинной шелковой нити при небольших углах закручивания возникает

столь малый момент упругих сил, что им можно пренебречь в сравнении с силами, действующими на магнитную стрелку при возмущениях магнитного поля Земли. Правда, установить точный закон кручения ему не удалось, но ведь это было побочной целью. Зато прибор был сконструирован, построен и на практике доказал свою эффективность!

Итак, первый шаг Кулона в физике был сделан. Оглядываясь на жизненный путь Кулона с дистанции в 200 лет, мы можем с уверенностью сказать, что, сделав первый шаг, исследователь масштаба Кулона не может остановиться. Здесь уместно еще одно замечание. Обзор творческой жизни крупных ученых, как правило, показывает, что даже при большом тематическом разнообразии их работ все они удивительно тесно взаимосвязаны. Это в полной мере относится и к Кулону. Действительно, отказавшись в конкурсном мемюаре от использования стрелки на острие, Кулон не отказался от изучения трения вращения и несколько лет спустя подробно его исследовал. Его «побочный» анализ деформации кручения привел... к открытию основного закона электростатики. Но не будем опережать события.

Получив в 1777 г. премию Парижской академии наук, ученый на время оставляет проблемы кручения и магнетизма. После переезда в Париж Кулон окунулся в гущу академической жизни. У него появилось много новых знакомых-ученых. Одним из них был Жан Кассини.

Кассини принадлежал к семье выдающихся астрономов, которые в течение более чем столетия руководили знаменитой Парижской обсерваторией, созданной почти одновременно с Академией. Первым директором Обсерватории был Жан Доминик Кассини, приглашенный из Италии Людовиком XIV. Жан Кассини или Кассини IV к моменту знакомства с Кулоном был уже опытным исследователем, правой рукой своего отца Кассини III, директора Обсерватории (через несколько лет он сам занял этот пост). Кассини обратился к Кулону с просьбой помочь установить в Обсерватории прибор для измерения вариаций магнитного поля Земли, основанный на методе, предложенном в его мемюаре 1777 г.

Каждому изобретателю приятно, если его идеи находят практическое применение, или, говоря современным языком, внедряются в практику. Поэтому Кулон согласился помочь Обсерватории. Вопреки ожиданиям Кулона эта работа заняла несколько лет. Задуманный Кулоном и Кассини прибор оказался весьма капризным устройством.

Он был очень чувствителен к различного рода возмущениям: колебаниям подвеса, сквознякам и конвекционным потокам воздуха. Для исключения этих помех прибор перенесли в глубокий подвал Обсерватории, где температура весь год оставалась практически постоянной и где не ощущались вибрации, создаваемые деятельностью служащих Обсерватории. (Сколько важнейших опытов было произведено в подвальных помещениях! В качестве примеров можно указать эксперименты Джоуля по определению механического эквивалента теплоты и знаменитый опыт Майкельсона — Морли. И сейчас многие наиболее прецизионные эксперименты проводятся в специальных подземных лабораториях. Наверное, физика-экспериментатора лучше представлять не в «башне из слоновой кости», а в подвале с основанием из скальных пород.)

Однако и в подвале стрелка прибора вела себя странно: при считывании показаний, когда наблюдатель приближал голову к шкале и концу стрелки, последняя меняла свое положение. Кулон предположил, что этот эффект обусловлен электростатическим взаимодействием тела человека, всегда несущего на себе какой-то заряд, со стрелкой. Этот эффект по существу был модификацией опыта Гильберта с металлической стрелкой, описанного в гл. 1. Для уменьшения воздействия на стрелку со стороны наблюдателя Кулон предложил поместить ее внутри медного цилиндра, который должен был служить как бы экраном от внешних электрических воздействий. Но у такого экрана был один недостаток: он не мог полностью охватывать стрелку и, следовательно, не обеспечивал совершенной защиты.

И тогда Кулону пришла в голову мысль, что влияние внешних воздействий можно уменьшить, если заменить шелковую (изолирующую) нить на тонкую металлическую (проводящую) нить, находящуюся в электрическом контакте с медным цилиндром-кожухом. Но металлические нити гораздо более упруги по отношению к кручению, чем шелковые, поэтому все трудности, о которых говорилось выше, усугубляются. Перед Кулоном вновь встала проблема изучения кручения, но только не шелковых, а металлических нитей.

Необходимость новых исследований не испугала ученого. Напротив, он, вероятно, был рад возможности довести до конца эксперименты, начатые несколько лет назад. В одном отношении эти эксперименты представлялись даже более перспективными: поскольку диаметр ме-

таллических нитей проще контролировать, да и их однородность по длине, как правило, выше, чем у шелка, то можно было надеяться, что зависимость момента упругих сил от диаметра нити будет определена точнее.

К опытам с металлическими нитями Кулон приступил с уверенностью в успехе, поскольку методика измерений была им уже разработана и опробована. Ее основой было наблюдение все тех же крутильных колебаний. Попробуем восстановить ход мысли Кулона, который привел его к этому эффективному методу изучения кручения.

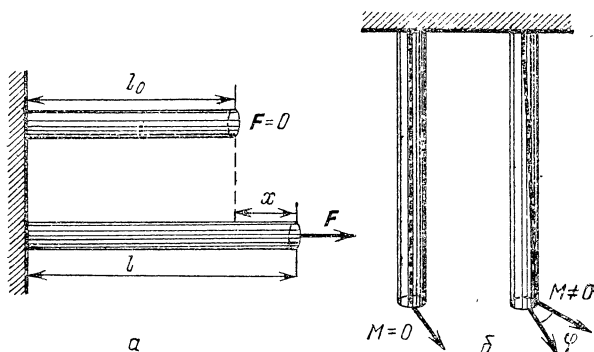


Рис. 27. Два вида деформаций: *a* — растяжение; *б* — кручение

Даже если эта историческая реконструкция не будет очень точной, она поможет нам понять физические основы метода.

Еще с конца XVII в. был известен закон Гука, описывающий деформации растяжения и сжатия: сила упругости $F_{\text{упр}}$ пропорциональна деформации $x=l-l_0$ (рис. 27, *a*):

$$F_{\text{упр}} = -kx, \quad (4.7)$$

где k — коэффициент упругости. Аналогия между деформацией сжатия или растяжения и деформацией кручения подсказывала, что между моментом упругих сил $M_{\text{упр}}$, уравнивающим при данном угле кручения φ момент внешних сил, и углом φ существует линейная зависимость (рис. 27, *б*):

$$M_{\text{упр}} = -g\varphi, \quad (4.8)$$

где g — коэффициент, характеризующий упругость нити по отношению к кручению. Как же проверить, справедлива ли эта аналогия?

Чтобы ответить на этот вопрос, проведем еще одну аналогию. Рассмотрим тело массы m , висящее на пружине

с жесткостью k . Если это тело вывести из положения равновесия, то оно начнет совершать колебания, которые описываются уравнением Ньютона:

$$ma + kx = 0 \quad (a — \text{ускорение}), \quad (4.9)$$

или, пользуясь обозначениями дифференциального исчисления,

$$m \frac{d^2x}{dt^2} + kx = 0.$$

Решение этого уравнения хорошо известно — это гармоническое движение, в простейшем случае описываемое формулой

$$x = x_0 \cos \omega t, \quad (4.10)$$

где x_0 — амплитуда колебания, а ω — его частота, причем $\omega = \sqrt{k/m}$.

Одна из важных особенностей решения (4.10) состоит в том, что частота ω или период $T = 2\pi/\omega$ не зависят от амплитуды x_0 . Это означает, что начальное растяжение пружины может быть большим или малым, но время, за которое пружинный маятник совершает одно колебание, будет одним и тем же. Это свойство гармонических колебаний является следствием линейной зависимости силы упругости от x . Если бы эта сила была пропорциональна $x^{1/2}$ или x^2 , то период колебаний зависел бы от амплитуды и смещение x уже не описывалось бы формулой (4.10).

Теперь обратимся к крутильным колебаниям. Пусть их совершает цилиндр, подвешенный на упругой нити так, что продолжение нити совпадает с его осью. Если соотношение (4.8) справедливо, то уравнение вращательного движения цилиндра можно записать в виде

$$I\eta + g\varphi = 0, \quad (4.11)$$

где η — угловое ускорение цилиндра ($\eta = d^2\varphi/dt^2$), а I — так называемый момент инерции цилиндра, характеризующий его инертные свойства по отношению к вращению (для случая, когда ось вращения совпадает с осью цилиндра $I = \frac{1}{2}mR^2$, где m — масса цилиндра, а R — его радиус). Мы видим, что уравнение (4.11) отличается от уравнения (4.9) только обозначениями. Значит, его решение должно по форме напоминать (4.10). И действительно, это решение имеет вид

$$\varphi = \varphi_0 \cos \omega' t, \quad (4.12)$$

где $\omega' = \sqrt{g/l}$. Но тогда все его свойства должны быть аналогичны свойствам решения (4.10). Так мы приходим к важному выводу, лежащему в основе метода, примененного Кулоном для исследования кручения: если период крутильных колебаний не зависит от амплитуды, то момент упругих сил, возникающий при кручении нити, пропорционален углу кручения.

Понятно, что зависимость $M_{\text{упр}}$ от длины нити l и ее диаметра d скрыта в коэффициенте g , определяющем частоту, а значит, и период колебаний. Поэтому, «варьируя вес груза, длину нити подвеса и ее толщину, можно надеяться определить закон реакции кручения в отношении натяжения, длины, толщины и природы этой нити». Последняя фраза заимствована из мемуара Кулона, в котором он описал результаты своих исследований.

В итоге Кулон установил, что

$$|M_{\text{упр}}| = B \frac{d^4}{l} \varphi, \quad (4.13)$$

где B — константа, зависящая от материала нити и формы ее сечения.

Следует отметить, что Кулон знал об ограниченности области применения соотношения (4.13). В частности, при слишком больших углах кручения пропорциональность между $M_{\text{упр}}$ и φ нарушается, подобно тому как нарушается пропорциональность между $F_{\text{упр}}$ и x при слишком большом растяжении пружины. С другой стороны, ученый обнаружил, что сила натяжения нити, определяемая массой подвешенного к ней груза, может меняться в широких пределах, не влияя на коэффициент B .

Итак, Кулону удалось установить закон кручения нитей и тем самым продвинуться в конструировании прибора для Обсерватории. Но к моменту окончания опытов по кручению Кулон уже понимал, что значение полученных результатов гораздо больше, чем казалось поначалу. Ведь для конструирования прибора с магнитной стрелкой надо было выяснить, когда можно пренебречь моментом упругих сил, а знать точную зависимость $M_{\text{упр}}$ от l и d было вовсе не обязательно. Гораздо важнее было то, что установление закона (4.13) позволяло создать прибор для точного измерения очень малых сил. Действительно, закрутив нить, длина и диаметр которой известны, с помощью заданного момента внешних сил и измерив угол закручивания, при котором этот момент уравнивается моментом упругих сил, можно определить коэффициент B .

После этого, взяв более тонкую и длинную проволоку из того же материала, можно решать обратную задачу: по углу кручения находить момент внешних сил, а затем и величину самих сил.

Для изучения каких сил можно применить новый, уникальный по чувствительности для конца XVIII в. прибор? Кулон решает изучать слабые электрические силы.

Проверка закона

Каких-либо свидетельств о том, почему Кулон выбрал для изучения именно электрические и магнитные силы, нет. Однако можно привести доводы в пользу того, что у него уже давно зрело желание провести исследование электричества и магнетизма. Основным аргументом в пользу этой догадки служит то обстоятельство, что ученый не ограничился одной-двумя работами на эту тему, а последовательно опубликовал семь (!) мемуаров, связанных между собой как бы единой исследовательской программой. Первый из мемуаров по электричеству и магнетизму появился в 1785 г., последний — в 1789 г. Возможно, эта серия была бы значительно длиннее, если бы не бурные события 1789 г., первого года Великой буржуазной французской революции, которая поломала все жизненные и научные планы Кулона.

Но оставим гипотезы и обратимся к первому мемуару цикла, представляющему для нас наибольший интерес. Он назывался «Конструкция и применение электрических весов, основанных на свойстве металлических проволок иметь силу кручения, пропорциональную углу кручения». Начинается мемуар с подробного описания электрических весов. Давайте и мы познакомимся с ними поближе.

На рис. 28 воспроизведена иллюстрация из мемуара Кулона, на которой показаны сами весы (Fig. 1), их отдельные детали в увеличенном масштабе (Fig. 2, 3) и дополнительные приспособления для проведения опытов (Fig. 4, 5).

Основу весов составляла тонкая серебряная нить, которая помещалась внутри двух стеклянных цилиндров *ABCD* и *l*. Верхний конец нити удерживался специальным захватом *q* (Fig. 2), который соединялся с поворотной головкой *b*, снабженной указателем *o*. Головка *b* вставлялась в специальную оправку, на выступающем ребре

которой были нанесены градусные деления; оправка, в свою очередь, наглухо вклеивалась в трубку *l*.

К нижнему концу нити крепилось легкое, но довольно сложное по устройству коромысло (Fig. 3). Важнейшей

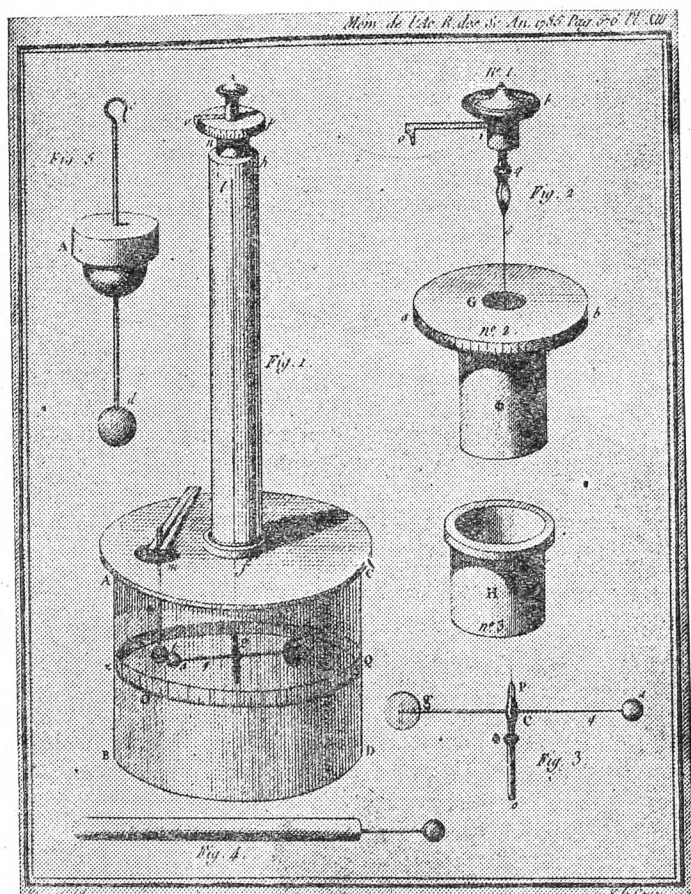


Рис. 28. Крутильные весы Кулона (рисунок из его мемуаров)

частью этого коромысла был цилиндр *aqg*, состоявший из двух частей — *gq*, которая была сделана из шелковой нити, натертой воском, и *aq*, изготовленной из шеллака — материала с хорошими изолирующими свойствами. На конце коромысла, сделанном из шеллака, укреплялся

бузиновый шарик a , а на противоположном конце — бумажный диск g , пропитанный скипидаром, что придавало диску необходимую жесткость. Диск g служил противовесом, уравновешивавшим шарик a , и, кроме того, по выражению Кулона, он «ослаблял колебания».

Нижняя часть нити и коромысло находились внутри большого стеклянного цилиндра $ABCD$. По его периметру на уровне коромысла была наклеена бумажная шкала, одно деление которой соответствовало повороту коромысла на 1° . Наконец, через специальное отверстие m внутрь цилиндра $ABCD$ помещался изолирующий стержень с бузиновым шариком t на конце; верхний конец стержня закреплялся в плоском зажиме, который лежал на стеклянной крышке цилиндра $ABCD$.

Представление о размерах весов Кулона дают следующие данные: длина нити 75,8 см, диаметр цилиндра $ABCD$ 32,5 см, длина коромысла весов около 21,7 см, диаметр бузиновых шариков a и t (они были одинаковыми) в разных опытах варьировался от 4,5 до 6 мм. Особый интерес представляет нить подвеса. Ее диаметр был настолько мал, что Кулон не мог определить его непосредственно, поэтому в мемуаре указана лишь погонная масса, т. е. масса единицы длины нити $\rho' = 10^{-2}$ г/м. Нить имела форму круглого цилиндра, поэтому, зная плотность серебра $\rho = 1,05 \times 10^4$ кг/м³, нетрудно определить его диаметр:

$$d = \sqrt{4\rho'/\pi\rho} \approx 40 \text{ мкм!}$$

На первый взгляд, в полученный результат трудно поверить — он кажется слишком малым. Ведь толщина человеческого волоса примерно 10—15 мкм. Однако здесь нет никакой ошибки. Значение $d = 40$ мкм вполне реально. Дело в том, что ювелиры очень давно освоили технику волочения исключительно тонких металлических нитей. Этим, кстати, объясняется и выбор материала нити — серебра. Другая причина, видимо, повлиявшая на выбор Кулона, состоит в том, что серебро, как благородный металл, менее подвержено влиянию окружающей среды, и серебряная нить, в сравнении, скажем, с медной, латунной или железной, дольше сохраняет свои механические свойства.

Впрочем, у нас есть возможность проверить расчет значения d . Для этого воспользуемся современной записью закона кручения, установленного Кулоном,

$$|M_{\text{упр}}| = B'G \frac{d^4}{l} \varphi, \quad (4.14)$$

где G — так называемый модуль сдвига — величина табличная (для серебра $G=2,6 \cdot 10^{10}$ Н/м²), а B' — числовой коэффициент, зависящий от формы сечения нити (для круглого сечения $B'=\pi/2$). С помощью формулы (4.14) можно найти величину момента внешних сил, который уравновешивается моментом сил упругости, возникающим при повороте коромысла на 1° . Более показательным, однако, является значение не момента, а самой силы. Если считать, что она прикладывается перпендикулярно коромыслу с плечом, равным половине его длины $D/2$, то нетрудно найти и силу:

$$F = \frac{2|M_{\text{упр}}|}{D} = \frac{2B'Gd^4}{Dl} \varphi.$$

Если подставить в эту формулу числовые значения величин, приведенные выше, то мы получим $F \approx 4 \cdot 10^{-9}$ Н!

Проведенный расчет показывает, что прибор Кулона обладал уникальной для конца XVIII в. чувствительностью. Но он также позволяет сравнить найденную нами чувствительность с данными, которые приводит в своем мемуаре сам Кулон. Он писал, что для закручивания нити на 360° требуется сила в $1/340$ грана, т. е. $1,5 \cdot 10^{-6}$ Н. Это означает, что по оценке Кулона F составляет $4,2 \cdot 10^{-9}$ Н. Значит, наши расчеты не так уж далеки от истины и мы правильно оценили величину d .

Однако нам пора перейти от описания весов Кулона к рассказу о методике их использования. Заметим, что они применялись Кулоном только для изучения сил электростатического отталкивания (о причинах этого ограничения мы поговорим несколько позже). Однако предоставим слово самому Кулону:

«Чтобы начать работать с этим прибором, я поступал примерно так: располагал крышку таким образом, чтобы отверстие m отвечало начальному делению или точке O шкалы zoQ , прочерченной на сосуде. Я устанавливал указатель микрометра oi в точку O , или на начальном делении этого микрометра; затем я заставлял весь микрометр поворачиваться в вертикальной трубке fh до тех пор, пока игла ag не оказывалась отвечающей начальному делению круга zoQ , если смотреть на вертикальную нить, на которой подвешена игла, и центр шарика. Затем через отверстие m я вводил другой шарик t , подвешенный на цилиндре $m\Phi t$, таким образом, чтобы он коснулся шарика a и чтобы при взгляде через центр нити подвеса и шарик t последний отвечал начальному делению круга zoQ . Теперь весы го-

товы ко всем операциям; мы приведем в качестве примера способ, использованный нами для установления фундаментального закона, согласно которому отталкиваются наэлектризованные тела. {...}

Эксперимент

Электризуется маленький проводник (Fig. 5), представляющий собой простую булавку с большой головкой, которая изолирована путем втыкания ее острия в конец палочки из испанского воска; эта булавка вводится в отверстие m , и ею касаются шарика t , находящегося в контакте с шариком a ; после удаления булавки два шарика оказываются заряженными электричеством одного и того же рода, и они расходятся на расстояние, которое определяется по наблюдению соответствующего деления шкалы zoQ при взгляде на нить подвеса и центр шарика a ; поворачивая затем указатель микрометра в направлении rho , закручивают нить подвеса lp и создают силу, пропорциональную углу кручения, которая стремится приблизить шарик a к шарiku t . Таким способом наблюдают расстояние, на которое разные углы кручения придвинут шарик a к шарiku t , и, сравнивая силы кручения с соответствующими расстояниями между двумя шариками, определяют закон отталкивания.

Я привожу здесь только несколько измерений, которые легко повторить и которые тут же делают зримым закон отталкивания. {...}

В нашем первом опыте, когда указатель микрометра стоял на точке O , мы нашли, что шарики удалились на 36° ; во втором опыте расстояние между шариками равно 18° , но поскольку микрометр закручен на 126° , то в результате для расстояния 18° сила отталкивания была 144° ; таким образом, на середине первого расстояния отталкивание шариков учетверилось.

В третьем опыте нить подвеса закрутили на 567° и шарики находились на удалении всего только восемь с половиной градусов. Общее закручивание, следовательно, было 576° , т. е. равнялось учетверенному закручиванию второго опыта, и отсюда следует, что в третьем опыте расстояние между шариками всего лишь на полградуса меньше половины расстояния второго опыта. Значит, из этих трех опытов вытекает, что отталкивательное действие, которое два шарика, наэлектризованных электричеством одного рода, оказывают друг на друга обратно пропорционально квадратам расстояний».

Возможно, для современного читателя непривычно рассмотрение методики измерений на конкретном примере, как было принято в XVIII в. Поэтому сделаем некоторые пояснения. Очевидно, что коромысло *ag* находилось в равновесии, когда момент силы электростатического отталкивания уравнивался моментом упругих сил, возникающих при закручивании нити. Последний

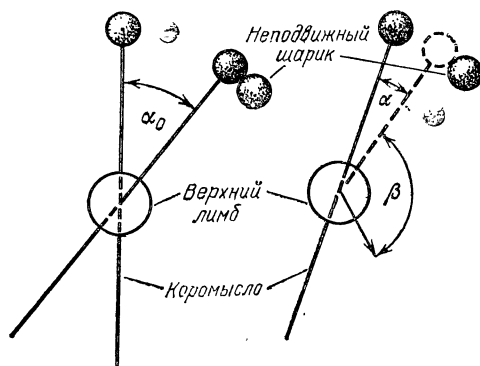


Рис. 29. К объяснению методики измерений Кулона

пропорционален сумме углов $\alpha + \beta$, где α — угловое расстояние между шариками *a* и *t*, измеренное по шкале $20Q$, а β — угол поворота головки *b*. С другой стороны, момент сил электростатического отталкивания, если закон взаимодействия зарядов — это действительно закон «обратных квадратов», должен быть пропорционален $1/\alpha^2$ (рис. 29). Действительно, для не слишком больших углов α линейное расстояние между шариками можно считать пропорциональным угловому. В этих же условиях при приближенных расчетах допустимо пренебречь тем, что сила взаимодейст-

Таблица 1

Результаты опытов Кулона по исследованию сил электрического отталкивания

| α | β | $\alpha + \beta$ | $(\alpha + \beta)/\alpha_0$ | $(\alpha_0/\alpha)^2$ | K |
|----------|---------|------------------|-----------------------------|-----------------------|------|
| 36 | 0 | 36 | 1 | 1 | 1 |
| 18 | 126 | 144 | 4 | 4 | 4,05 |
| 8,5 | 567 | 575,5 | 16 | 17,9 | 18,2 |

вия, направленная по прямой, соединяющей центры шариков, не перпендикулярна коромыслу, т. е. плечо силы не равно, строго говоря, $D/2$. Следовательно, если до закручивания головки b , при $\beta=0$, шарики расходились на угол α_0 , а после закручивания на угол β равновесие устанавливалось при угловом расстоянии между шариками α , то должно выполняться соотношение $(\alpha_0/\alpha)^2 = (\alpha+\beta)/\alpha_0$. Для облегчения анализа результатов Кулона они сведены в табл. 1. Из нее видно, что ученый имел основание сформулировать

«Фундаментальный закон электричества»

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

Так родился знаменитый закон Кулона. В принципе, здесь можно было бы поставить точку. Но тогда мы прошли бы мимо весьма любопытных физических и исторических проблем. Поэтому давайте продолжим анализ опытов Кулона.

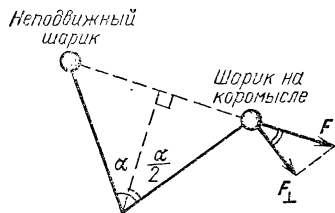


Рис. 30. К расчету поправок к результатам опытов Кулона

Кулон, конечно, знал о том, что его рассуждения можно рассматривать лишь как приближенные. Почему же он не провел их более строго? На этот вопрос мы получим ответ, если определим величину поправок, которые даст строгое рассмотрение геометрии опыта. На рис. 30 показано расположение коромысла относительно неподвижного шарика для некоторого угла α . Очевидно, что расстояние между шариками равно $D \sin(\alpha/2)$; момент силы отталкивания F равен $F_{\perp} D/2 = (FD/2) \cos(\alpha/2)$. Таким образом, сравнивать с отношением $(\alpha+\beta)/\alpha_0$ следует не $(\alpha_0/\alpha)^2$, а

$$K = \frac{\cos(\alpha/2) \cdot \sin^2(\alpha_0/2)}{\cos(\alpha_0/2) \cdot \sin^2(\alpha/2)}.$$

Результаты расчета по этой формуле приведены в последнем столбце табл. 1. Из этих данных видно, что вносимая погрешность невелика, а рассуждения сильно усложняются, поэтому Кулон не привел данные строгого расчета.

Здесь следует иметь в виду одно обстоятельство, относящееся к анализу данных любого эксперимента. Уточнение теоретической модели, на основе которой анализируются эти данные, и усложнение соответствующих методов расчета оправданы лишь тогда, когда вносимые поправки превосходят неизбежные погрешности измерений. Так, нет смысла пользоваться формулами общей теории относительности или учитывать сплюснутость Земли для расчета ускорения свободного падения g на ее поверхности, если имеющиеся для проверки приборы позволяют определять g лишь с точностью до двух значащих цифр. Кулон, имевший большой опыт в проведении различных измерений, как научных так и инженерных, видимо, понимал это. Он указал, что основная погрешность обусловлена тем, что коромысло не удается установить в исходное положение, т. е. определить, когда нить не закручена, с точностью, лучшей чем $\Delta\alpha=3^\circ$ — этому препятствует движение воздуха. Ясно, что эта погрешность «портит» результаты гораздо сильнее, чем геометрические приближения. Кстати, именно потому, что максимальная относительная погрешность оценивалась Кулоном как $\epsilon=\Delta\alpha/\alpha_{\min}=3^\circ/8,5^\circ=35\%$, он счел, что его результаты подтверждают закон «обратных квадратов»: относительная погрешность в его опытах составляла около 12 %.

Здесь уместно воспользоваться результатами решенной ранее задачи об эффекте, связанном с конечными размерами заряженной сферы. Для простоты будем считать, что заряд на неподвижном шаре точечный. Тогда для наименьшего расстояния между a и t имеем ($r=5$ мм, $R=l\sin(\alpha/2)+2r=18$ мм)

$$\frac{F}{F_{\text{точ}}} = \frac{r^3(2R^2 - r^2)}{R(R^2 - r^2)} \approx 5 \cdot 10^{-2}.$$

Учет того, что и на шаре t происходит перераспределение заряда, может в худшем случае удвоить эту поправку. Но и тогда поправка, связанная с перераспределением зарядов, не будет превосходить погрешности измерений, и, значит, в учете этого перераспределения нет необходимости.

Из описания опыта Кулона мы можем получить и другие сведения о самом эксперименте и об имевшихся в распоряжении ученого приборах. Попробуем, например, оценить, какой заряд сообщался шарикам a и t , а также до какого потенциала мог заряжаться проводник.

Воспользуемся результатами рассмотрения поправок и приближенным рассуждением Кулона (см. рис. 30). Абсолютную величину силы отталкивания, действующей между зарядами, можно найти по формуле

$$F = F' \cdot \alpha_0,$$

где $F' = 4 \cdot 10^{-9}$ Н — сила, которую нужно приложить к концу коромысла, перпендикулярно ему, чтобы повернуть его на 1° . Расстояние между шариками равно $x = l \sin(\alpha_0/2)$. Тогда из равенства

$$F = \frac{q^2}{4\pi\epsilon_0 x^2}$$

можно найти значение q :

$$q = \sqrt{4\pi\epsilon_0 \alpha_0 F'} l \sin(\alpha_0/2).$$

Подстановка числовых значений дает $q \approx 10^{-10}$ Кл.

Будем приближенно считать, что при касании шарика t палочкой с шариком m заряд, сообщенный m , перераспределяется поровну между тремя шариками. Тогда этот исходный заряд $q' = 3q$. Потенциал заряженного шарика радиуса r

$$\varphi = \frac{q'}{4\pi\epsilon_0 r},$$

где $r \approx 5$ мм. Следовательно, $\varphi \approx 500$ В. Это значение φ вполне достижимо при использовании электростатических машин трения, которые существовали во времена Кулона.

В «Замечаниях», которыми Кулон сопровождал описание своих опытов, он указал и на утечку заряда как источник возможной погрешности. Для проверки того, насколько важен этот эффект, он измерял время, за которое первоначальное расхождение шариков $\alpha_0 = 30^\circ$ уменьшается на 1° . Это время оказалось равным 3 мин. Поскольку точность начальной установки коромысла $\Delta\alpha \approx 2-3^\circ$, 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 ос-

лабления электрического действия двух шариков за каждую минуту, а затем пользоваться этими наблюдениями для исправления результатов экспериментов, которые захотят провести в этот день.

При внимательном анализе работы Кулона с позиции современного экспериментатора невольно напрашивается вопрос: каким образом Кулону удавалось проводить эксперименты так быстро? Для читателя, не слишком хорошо знакомого с тонкостями физических измерений, этот вопрос может показаться странным. Поэтому стоит более подробно пояснить его источник.

Весы Кулона, как и многие другие чувствительные приборы, представляют собой колебательную систему. Существует закономерность, связывающая чувствительность прибора и период его колебаний: чем выше чувствительность, тем больше этот период. Выше уже говорилось о том, что прибор Кулона обладал уникальной для XVIII в. чувствительностью. Отсюда можно заключить, что период крутильных колебаний коромысла T должен быть достаточно большим. Установка описана столь подробно, что мы можем оценить эту величину. Период определяется такой формулой:

$$T = 8\pi \sqrt{\frac{2I}{\pi G d^4}}. \quad (4.15)$$

Здесь I — момент инерции коромысла весов относительно оси, совпадающей с нитью, G — модуль сдвига, l — длина нити, d — ее диаметр.

Для расчета по формуле (4.15) необходимо оценить еще и величину I . Для простоты примем, что

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

где m — масса бузинового шарика, D — длина цилиндра *ag*. Считая плотность шарика $\rho = 0,5$ г/см³, получаем $I = 3,5$ г·см². В итоге расчет периода колебаний дает $T \approx 50$ с.

Но не только период колебаний характеризует процесс измерений. Колебания крутильного маятника неизбежно происходят с затуханием (тем более, что Кулон специально сделал противовес шарика в виде бумажного диска). Значит, нам нужно оценить и так называемое время релаксации τ , которое показывает, за какое время амплитуда колебаний уменьшается в e раз (e — основание натурального логарифма; $e = 2,71828$). Если учитывать только сопротивление воздуха, то для грубой оценки можно вос-

пользоваться 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, $m\approx 3\cdot 10^{-2}$ г и $\eta=2\cdot 10^{-4}$ г/(см·с), получаем $\tau\approx 30$ с.

Конечно, наши расчеты — это лишь очень грубые оценки, определяющие T и τ с точностью до порядка величины. И все же из них следует однозначный вывод: величины T и τ сравнимы между собой. А тогда стоит задуматься о том, как Кулон определял равновесное положение коромысла (угол α).

В принципе есть два основных подхода к этой задаче. Первый состоит в том, чтобы наблюдать последовательные крайние точки колебаний и находить угол α как среднее между этими показаниями. Очевидно, что такой метод дает точный результат только тогда, когда колебания происходят практически без затухания (или если τ очень велико); в противном случае среднее двух последовательных отклонений не совпадает с равновесным положением коромысла.

Второй метод можно использовать, если сопротивление движению коромысла столь велико, что колебания не возникают и реализуется так называемый аperiodический режим, т. е. коромысло постепенно (с одной стороны) приближается к равновесному положению по экспоненциальному закону. При этом, однако, для того чтобы сделать отсчет, требуется ждать очень долго; соответствующее время должно в несколько раз превосходить τ . Кроме того, следует напомнить, что из-за утечки заряда коромысло вообще не должно было останавливаться до окончательного соприкосновения шариков a и l !

У Кулона, видимо, не осуществлялся аperiodический режим: он сам писал, что при попытках исследования сил притяжения с помощью крутильных весов происходило касание шариков вследствие *колебаний* коромысла. Но тогда это были колебания с большим затуханием, и корректное определение равновесного угла α требовало тщательных наблюдений в течение времени $t>3T$. Именно поэтому нас и удивляет быстрота измерений Кулона.

Но как же все-таки Кулон получил свои результаты? По-видимому, его данные суть обобщение результатов большого числа экспериментов, представленное как итог единичного опыта. Это предположение подтверждается еще одним фактом: отношения $(\alpha + \beta)/\alpha_0$ (т. е. отношения 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.

Мы очень подробно рассмотрели опыты Кулона по исследованию сил электростатического отталкивания. Теперь пора обратиться к его экспериментам, посвященным силам притяжения. Прежде всего необходимо понять, почему Кулону пришлось в этих экспериментах отказаться от крутильных весов. Сам Кулон объяснял это тем, что в процессе изменения равновесного расстояния между шариками, которое достигается поворотом головки b , неизбежно происходило касание шариков, а значит, менялся их заряд. В итоге опыт приходилось повторять, но касание происходило снова, и т. д. В чем кроется причина этих злосчастных касаний? Кулон нашел ответ на этот вопрос. Попытаемся это сделать и мы.

Допустим, что мы работаем с крутильными весами и хотим воспользоваться методикой Кулона, примененной им для сил отталкивания. Понятно, что поскольку силы взаимодействия между шариками изменили знак, то для удержания их на определенном расстоянии нам необходимо закрутить головку b в сторону, противоположную той, в которую она поворачивалась при отталкивании шариков. Точнее говоря, положение, соответствующее незакрученной нити, должно соответствовать некому углу поворота головки β . Теперь, если под действием притяжения шарiki сблизятся до угла α , сила притяжения будет определяться разностью $\beta - \alpha$. Остальные проведенные нами рассуждения остаются в силе. Тогда результирующий момент $M_{\text{рез}}$, действующий на коромысло, можно представить в виде

$$M_{\text{рез}} = -K_1/\alpha^2 + K_2(\beta - \alpha),$$

где K_1 и K_2 — постоянные, смысл которых ясен из преды-

дущего. В положении равновесия $M_{\text{рез}}=0$, или

$$K_1/K_2 = \alpha_p^2 (\beta_p - \alpha_p) \quad (4.16)$$

(α_p и β_p — значения углов при равновесии).

Допустим теперь, что по какой-то причине (вследствие неловкого движения экспериментатора, из-за движения воздуха или почему-либо еще) угол α немножко изменится и станет равным $\alpha' = \alpha + \Delta\alpha$ ($\Delta\alpha \ll \alpha$). Естественно, что из-за нарушения равновесия на коромысло начнет действовать момент $M_{\text{рез}} \neq 0$. Попробуем определить его знак:

$$M_{\text{рез}} = -K_1/(\alpha_p + \Delta\alpha)^2 + K_2(\beta_p - \alpha_p - \Delta\alpha).$$

Воспользовавшись приближением $(1 + \Delta\alpha/\alpha)^2 \approx 1 - 2(\Delta\alpha/\alpha)$, справедливым, когда $\Delta\alpha \ll \alpha$, перепишем последнее соотношение в виде

$$M_{\text{рез}} \approx (2K_1/\alpha_p^2 - K_2) \Delta\alpha.$$

Поскольку K_1 и K_2 связаны соотношением (4.16), имеем

$$M_{\text{рез}} = (2\beta_p/\alpha_p - 3) \Delta\alpha.$$

Таким образом, если $\beta_p > \frac{3}{2}\alpha_p$, $M_{\text{рез}} > 0$ и, следовательно, $M_{\text{рез}}$ способствует сближению шариков. Но при малых α , для которых только и справедливо это рассмотрение, данное условие действительно выполняется. Значит, даже при небольшом случайном уменьшении α ($\Delta\alpha < 0$) возникает момент $M_{\text{рез}} < 0$, стремящийся еще больше отклонить коромысло, т. е. еще сильнее нарушить равновесие и сблизить шарики. В итоге происходит их касание. С подобными эффектами, вероятно, знакомы многие читатели — они возникают при неустойчивом равновесии.

Для сравнения можете убедиться, что для сил отталкивания, для которых справедливо уравнение

$$M_{\text{рез}} = K_1/\alpha^2 - K_2(\alpha + \beta),$$

аналогичный расчет дает для смещения из положения равновесия

$$M_{\text{рез}} = -G(2\beta_p/\alpha_p + 3) \Delta\alpha.$$

Отсюда следует, что при любом знаке $\Delta\alpha$ $M_{\text{рез}}$ имеет прогнвоположный знак, т. е. стремится вернуть тело в положение устойчивого равновесия.

Итак, Кулон с сожалением вынужден был оставить свои электрические весы. В поисках замены он вновь об-

ратился к теории колебаний. И она снова его выручила! Новая установка Кулона показана на рис. 31.

Большой медный шар G устанавливался на специальной подставке, позволявшей регулировать его положение по высоте. Шар непосредственно опирался на четыре изолирующие ножки и поэтому мог относительно долго сохранять

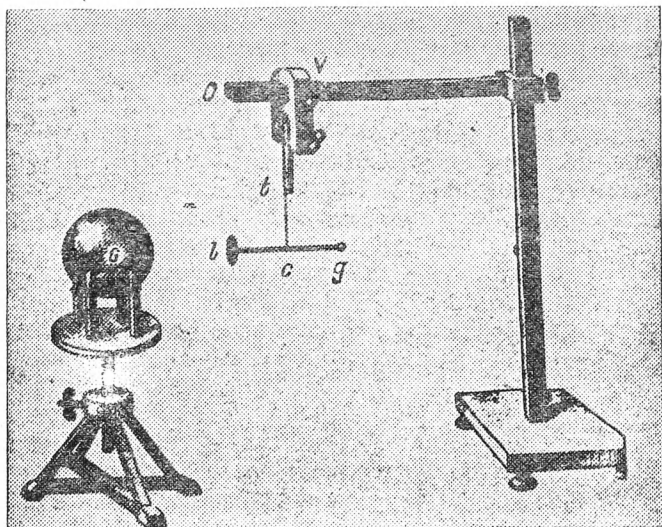


Рис. 31. Установка Кулона для исследования сил электростатического притяжения

свой заряд. Основной деталью второй части установки было легкое коромысло, изготовленное из соломинки, натертой воском; на одном его конце был приклеен диск l из позолоченной бумаги, на другом укреплен шарик-противовес. Коромысло висело на очень тонкой шелковой нити, верхний конец которой зажимался в специальном держателе t , части муфты V ; муфта могла перемещаться вдоль консоли O штатива E , благодаря чему можно было регулировать расстояние от шара G до диска l (в состоянии покоя коромысло lcg служило как бы продолжением горизонтального диаметра шара G). Приведем размеры важнейших частей установки: диаметр шара $G=34,5$ см, диаметр диска $d=2$ см, длина нити $L=1,8$ см.

Как мы видим, Кулон вновь использует для подвеса шелковую нить. Как и в случае с прибором для измерения вариаций магнитного поля Земли, здесь ему важно, чтобы

упругими свойствами нити можно было пренебречь. Удивительно, как тонко Кулон применяет свои знания закономерностей деформации кручения: где-то он ими пренебрегает, а где-то их эффективно использует!

Идея измерений Кулона состояла в следующем. Представим себе, что шару G и диску I сообщили заряды разных знаков. Между ними, естественно, возникает притяжение. Если теперь слегка отклонить коромысло от направления на центр шара G , но так, чтобы оно оставалось в горизонтальной плоскости, и затем его отпустить, коромысло начнет колебаться. Понять причину возникновения колебаний проще всего, если воспользоваться аналогией. Нетрудно убедиться, что колебания коромысла вблизи шара напоминают колебания математического маятника в поле тяжести Земли. Действительно, гравитационное поле Земли похоже на электрическое поле, создаваемое заряженным

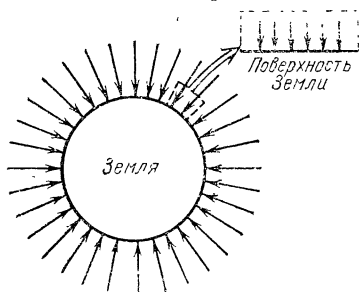


Рис. 32. Гравитационное поле Земли можно приближенно считать однородным в малой области вблизи ее поверхности

шаром, а ведь именно под действием поля тяготения Земля колеблется математический маятник.

Однако оказывается, что аналогия даже несколько глубже, чем кажется на первый взгляд. Напомним, что период колебаний математического маятника определяется формулой

$$T = 2\pi \sqrt{l/g}. \quad (4.17)$$

В эту формулу входит характеристика гравитационного поля Земли g — ускорение свободного падения. Заметим, что при выводе соотношения для T делается одно допущение, о котором иногда забывают. Гравитационное поле Земли, строго говоря, неоднородно: оно меняется от точки к точке. Тем не менее, поскольку оно похоже на поле материальной точки, помещенной в центр Земли, то на достаточно больших расстояниях от этого центра его можно считать приближенно однородным (см. рис. 32). Но что значит «на достаточно большом расстоянии»? С чем это расстояние сравнить? Его нужно сравнивать с размерами той области, в которой происходит колебание. Если учесть, что опыты с маятниками проводятся обычно на поверхности Земли, т. е. на расстоянии в 6400 км от ее центра, а амплитуда колебаний не превосходит нескольких

метров *), то становится ясно, что допущение об однородности поля вполне оправдано.

Если перенести наши рассуждения на случай с заряженным шаром, то они будут и здесь полностью применимы, если только заряд диска l не слишком велик. Вы, наверное, уже догадались, почему сделана эта оговорка. Если заряд диска будет слишком большим, то под его влиянием сильно исказится сферическая симметрия поля шара и наши выводы придется изменить. Но допустим, что заряд на диске мал. Тогда мы можем найти связь между периодом его колебаний и расстоянием R от диска до центра шара G . Ускорение свободного падения g определяется формулой

$$g = \gamma \frac{M_3}{R_3^2},$$

где γ — гравитационная постоянная, M_3 — масса Земли, R_3 — ее радиус. Соответствующая постоянная для электростатического взаимодействия тоже будет обратно пропорциональна квадрату расстояния R . Но это означает, что период колебаний T маятника Кулона должен быть пропорционален R :

$$T \sim R.$$

Проведя это рассуждение в обратном порядке, мы приходим к выводу: если период колебаний коромысла в опыте Кулона окажется прямо пропорциональным расстоянию между центром шара G и диском l , то закон «обратных квадратов» справедлив для сил электростатического притяжения.

Посмотрим, какие результаты получил Кулон. Они сведены в табл. 2. В ней даны значения R и T , а также отношения расстояний и соответствующих им периодов колебаний. Из табл. 2 видно, что результаты довольно хорошо соответствуют закону «обратных квадратов».

Кулон объяснил расхождение данных третьего измерения и теоретического предсказания тем, что проведение одного опыта требует довольно большого времени (несколько минут). За это время, как мы знаем из описания

*) Для реализации гармонических колебаний маятника, которые описываются формулой (4.17), необходимо, чтобы амплитуда колебаний была много меньше длины маятника l . Длина одного из самых больших маятников — маятника, демонстрируемого в Исаакиевском соборе в Ленинграде, — равна 98 м, амплитуда его колебаний составляет примерно 5 м.

Результаты опытов Кулона по исследованию
сил электрического притяжения

| d , см | Длительность 7,5 колебаний, с | d/d_0 | T/T_0 |
|----------|----------------------------------|---------|---------|
| 24,36 | 20 | 1 | 1 |
| 48,72 | 40 | 2 | 2 |
| 64,97 | 60 | 2,67 | 3 |

предшествующего опыта, утечка заряда становится уже ощутимой, взаимодействие между шаром и диском ослабевает, что приводит к увеличению периода T для данного расстояния R . (К этому выводу можно прийти, если предположить, что масса Земли с течением времени уменьшается — см. формулы (4.17) и (4.18).)

В мемуаре, где были изложены результаты опытов с силами притяжения, Кулон сообщил, что он использовал метод колебаний и для исследования сил отталкивания, причем получил удовлетворительные результаты. Однако для сил отталкивания он все же отдавал предпочтение опытам с крутильными весами.

В связи с обсуждением опытов по исследованию сил притяжения Кулон упомянул о приеме, который позволяет выйти из «порочного круга» при определении единицы заряда, о чем говорилось в начале этой главы. Этот прием получил название метода деления. Его суть состоит в следующем. Пусть сначала, как и в опыте Кулона с крутильными весами, двум равным по размеру шарикам сообщаются равные заряды и измеряется сила взаимодействия между ними F_1 . Затем одного из шариков касаются третьим шариком того же размера, но незаряженным. Тогда заряд на ранее заряженном шарике уменьшится вдвое (это ясно из соображений симметрии). После этого вновь измеряется сила взаимодействия между шариками F_2 , на которых теперь находятся заряды q и $q/2$. Затем процедура повторяется и измеряется сила взаимодействия между зарядами q и $q/4$. Тогда если в результате проведения серии измерений найденные значения сил будут образовывать последовательность, такую что $F_1:F_2:F_3 \dots = 1:1/2:1/4 \dots$, то мы получим подтверждение гипотезы о пропорциональности силы взаимодействия величинам зарядов.

Отметим, что Кулон, по-видимому, не проводил подобных опытов при изучении сил взаимодействия и уж во всяком случае их не описывал. Он, вероятно, был уверен в том, что электростатические силы пропорциональны «электрическим массам». Правильность этого предположения была подтверждена всей совокупностью последующих экспериментов Кулона по электростатике.

Итак, Кулон закончил проверку «закона электрической силы». Однако до завершения его программы исследования электричества и магнетизма было еще очень далеко. Далее Кулон попытался установить закон взаимодействия магнитных полюсов, изучал процесс утечки заряда, исследовал распределение заряда по проводникам сложной формы. На первый взгляд, последнее исследование представляло чисто академический интерес. Но в действительности оно оказалось не только очень важным, но и весьма своевременным. Когда в 1811 г. выдающийся французский математик и физик С. Пуассон построил первую математическую теорию электростатических явлений (теорию потенциала), то оказалось, что эксперименты для ее проверки уже давно проведены — результаты опытов Кулона полностью подтвердили теорию Пуассона.

Однако, как уже говорилось, Кулон не смог завершить свои исследования по электричеству и магнетизму. Вскоре после начала революции он вынужден был покинуть Париж и провел почти два года в провинции. Там он пытался вести научную работу, но вдали от своих приборов, не имея возможности пользоваться мастерской, тематика его исследований меняется: он изучает циркуляцию сока в деревьях. Изменение привычных условий для ученого, которому уже было за пятьдесят, не могло пройти бесследно. После возвращения в Париж его научная активность постепенно спадает. Даже избрание членом Института Франции — новой Академии наук не стало стимулом его новых исследований. Последние годы жизни Кулон посвятил совершенствованию системы народного образования во Франции. Умер ученый в 1806 г. Выдающийся английский ученый Т. Юнг так отозвался о заслугах Кулона: «Среди всех людей науки, принесших славу Франции, трудно было бы указать одного человека, кто с точки зрения развития земной физики мог бы хоть как-то сравниться с Кулоном». Если иметь в виду французскую науку XVIII в., то Юнг был, несомненно, прав.

ЗАКОН КУЛОНА И УРАВНЕНИЯ МАКСВЕЛЛА

Установление закона взаимодействия неподвижных точечных зарядов могло бы, вероятно, очень порадовать великого Ньютона, если бы ему довелось дожить до этого знаменательного события. И дело здесь не только и не столько в формальном сходстве закона Кулона с законом всемирного тяготения. Радость Ньютона могла быть связана с тем, что установление этого закона знаменовало торжество программы, которую определил Ньютон для дальнейшего развития физики. В предисловии к первому изданию «Математических начал натуральной философии» Ньютон писал:

«Вся трудность физики, как будет видно, состоит в том, чтобы по явлениям движения распознать силы природы, а затем по этим силам объяснить остальные явления». И далее: «Было бы желательно вывести из начал механики и остальные явления природы, рассуждая подобным же образом, ибо многое заставляет меня предполагать, что все эти явления обуславливаются некоторыми силами, с которыми частицы тел, вследствие причин покуда неизвестных, или стремятся друг к другу и сцепляются в правильные фигуры, или же взаимно отталкиваются и удаляются друг от друга. Так как эти силы неизвестны, то до сих пор попытки философов объяснить явления природы и оставались бесплодными. Я надеюсь, однако, что или этому способу рассуждения, или другому, более правильному, изложенные здесь основания доставят некоторое освещение».

Кулон оправдал надежды Ньютона — ему удалось исследовать силы нового типа, под действием которых частицы «или стремятся друг к другу... или же взаимно отталкиваются». Исследование взаимодействия полюсов магнитов, проведенное Кулоном, также, казалось, подтверждало правильность ньютоновского подхода. Однако триумф ньютоновской программы оказался временным. История науки не раз преподносила сюрпризы. «По-

шутила» она и на этот раз. Всего через год после установления Кулоном основного закона электростатики было сделано открытие, которое ознаменовало начало заката механицизма (так часто называют подход Ньютона к объяснению физических явлений).

От «электричества и магнетизма» к «электромагнетизму»

Рассказывая об опытах С. Грея, мы уже говорили о том, что в XVIII в. интерес к электричеству проявляли не только физики, но и широкие круги образованной публики. Особое внимание электричеству уделяли физиологи XVIII в., мечтавшие поставить его на службу медицине. В полной мере этим мечтам в ту эпоху

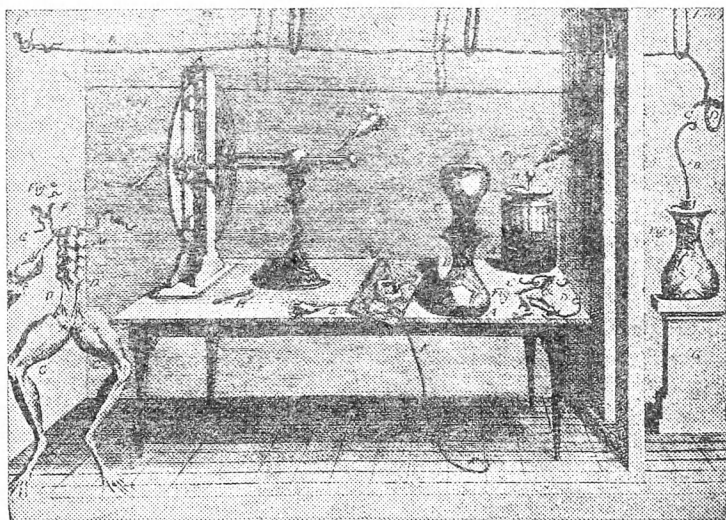


Рис. 33. Приборы, с которыми экспериментировал Гальвани

не суждено было реализоваться. А вот долг физике физиология вернула сполна. Исследования в области электрофизиологии привели к открытию первостепенной важности. Его автор итальянский профессор акушерства и гинекологии и хирург-практик Луиджи Гальвани (1737—1798), вся жизнь которого была связана с Болоньей, описал его так:



Алессандро Вольта

«После опытов с силами грозowego атмосферного электричества я загорелся желанием исследовать также могущество дневного и спокойного электричества.

И вот, замечая иногда, что препарированные лягушки, которые были подвешены на железной решетке, окружавшей балкон нашего дома, при помощи медных крючков, воткну-тых в спинной мозг, впада-ли в обычные сокращения не только в грозу, но иног-да также при спокойном и ясном небе, я решил, что сокращения вызываются изменениями, происходя-

щими днем в атмосферном электричестве.

Поэтому с некоторой надеждой я начал исследовать действие этих изменений на указанные мышечные движе-ния и ставить самые разнообразные опыты. В различные часы и в течение многих дней я наблюдал за животными, подготовленными для этого соответствующим образом, но в их мышцах почти не наблюдалось движений. Утом-ленный, наконец, тщетным ожиданием, я начал прижимать медные крючки, воткнутые в спинной мозг, к железной решетке, желая посмотреть, не возникнут ли благодаря этому приему мышечные движения и не обнаружат ли они в чем-либо отличие и изменение, смотря по различному состоянию атмосферы и электричества. Хотя я нередко наблюдал сокращение, но ни одно не соответствовало перемене в состоянии атмосферы и электричества...

Когда же я перенес животное в закрытую комнату, поместил на железной пластинке и стал прижимать к ней проведенный через спинной мозг крючок, то появились такие же сокращения, такие же движения. То же самое я постоянно наблюдал при употреблении других металлов».

Этот отрывок из сочинения Гальвани, опубликован-ного в 1791 г., показывает, каким внимательным наблю-дателем он был. Менее счастлив был Гальвани в построе-нии теории отмеченных им явлений. Он выдвинул идею

о существовании особого «животного» электричества, которую оспорил другой итальянский ученый — Алессандро Вольта.

Вольта родился в небольшом итальянском городке Комо, близ Болоньи, 18 февраля 1745 г. в аристократической семье. Он получил хорошее образование и уже в молодости под влиянием всеобщего интереса к электричеству занялся его изучением. Ко времени открытия Гальвани Вольта накопил большой опыт экспериментальных исследований. На его счету было изобретение электрофора и чувствительного электроскопа с конденсатором. Он был известен в научных кругах Европы: во время путешествий по Англии, Швейцарии, Франции, Германии, Голландии Вольта познакомился почти со всеми ведущими физиками того времени. Большую часть жизни Вольта проработал в качестве профессора физики в университете в Павии. Характеризуя личность ученого, французский физик Араго писал: «Смелый и быстрый ум, большие и верные мысли, мягкий и искренний характер — таковы были основные качества знаменитого профессора. Никогда честолюбие, жадность к деньгам, дух соперничества не повелевали его действиями. Единственная страсть, которую он испытал, была любовь к исследованиям».

Узнав о работах Гальвани, Вольта прежде всего повторил его опыты. По мере экспериментирования у Вольта постепенно складывалось убеждение, что теория Гальвани, согласно которой электричество рождается в организме животного, ошибочна. Проведенные Вольта оригинальные опыты убедили его в том, что основной причиной сокращения мышц лягушки является контакт двух разнородных металлов. Далее он понял, что для наблюдения эффектов «гальванического» электричества вообще нет необходимости использовать мышцы животного. И хотя в своей теории «контактного» электричества Вольта во многих пунктах ошибался, последняя мысль оказалась исключительно плодотворной. Она привела ученого к созданию знаменитого «вольтова столба» — первого источника постоянного тока. Таким образом, ему удалось доказать, что система «железная пластина — мышечная ткань — медный крючок» представляет собой электрическую цепь, в которой мышца выполняет одновременно и функцию электролита, необходимого для работы гальванического элемента, и функцию прибора, регистрирующего протекание постоянного тока.

Построение «вольтова столба» (рис. 34), о котором ученый сообщил президенту Лондонского Королевского общества Бэнксу в 1800 г., произвело огромное впечатление на ученый мир. Вольта пригласили в Париж, где на заседании Академии наук в присутствии Наполеона он демонстрировал действие своего прибора. Ученый был осыпан наградами и почестями. Можно было бы ожидать, что

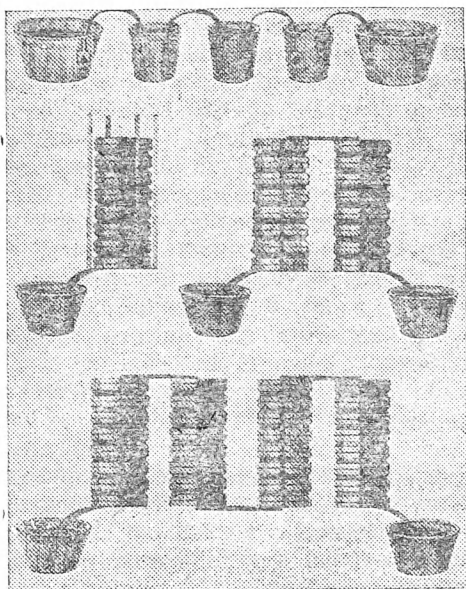


Рис. 34. «Вольтов столб» — первый источник постоянного тока

именно создателю первого источника постоянного тока удастся исследовать многочисленные эффекты, связанные с протеканием тока. Однако этого не произошло. В первые годы XIX в. Вольта отошел от дел и хотя дожил до преклонного возраста (он умер в 1827 г. в возрасте восьмидесяти двух лет), уже больше ничем не обогатил науку об электричестве.

Заслуги применения «вольтова столба» принадлежат другим ученым. Вскоре после обнародования письма Вольта к Бэнксу с помощью «столба» было открыто разложение воды электрическим током. Затем было обнаружено световое действие тока, получена электрическая дуга. Однако важнейшее открытие, обусловленное созданием ис-

точника тока,— это действие тока на магнитную стрелку (Х. К. Эрстед, 1820 г.).

Значение очень простого и наглядного опыта Эрстеда состояло в том, что была обнаружена связь между электричеством и магнетизмом, которые до этого рассматривались как явления хотя и сходные по некоторым своим проявлениям, но все же сугубо отличные друг от друга. Исследования Ампера, Араго и других ученых привели к построению теории, которую Ампер назвал электродинамикой — это название сохранилось в физике до наших дней.

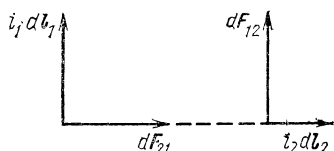


Рис. 35. Взаимодействие взаимноперпендикулярных элементов тока

Электродинамика Ампера описывала взаимодействия электрических токов между собой. Следует подчеркнуть, что Ампер строил свою теорию, намеренно стремясь остаться в рамках ньютоновской программы. Характерно в этом смысле его стремление получить формулу, описывающую взаимодействие двух элементов тока, согласно которой сила направлена по прямой, соединяющей элементы тока. Причина этого стремления кроется в том, что в механике Ньютона силы были центральными, т. е. действующими по прямой, соединяющей взаимодействующие тела. Как мы теперь знаем, надежды Ампера описать взаимодействие токов центральными силами не оправдались. Достаточно посмотреть на рис. 35, чтобы убедиться в том, что не всегда силы, действующие между элементами тока, оказываются центральными. Действительно, если два элемента тока лежат в одной плоскости и перпендикулярны друг другу, то сила F_{12} , действующая на второй элемент со стороны первого, оказывается направленной параллельно первому элементу, а сила F_{21} , действующая на первый элемент со стороны второго, — параллельно второму. Некоторые читатели, вероятно, уже догадались, что заставляло Ампера уходить от рассмотрения таких сил: при этом подходе нарушается третий закон Ньютона. В случае контуров с током такое противоречие разрешается просто. В природе не существует незамкнутых постоянных токов, и строгое рассмотрение взаимодействия проводников не может ограничиться парой абстрактных элементов тока. Однако в действительности причина трудностей, с которыми столкнулся Ампер при попытке применить подход Ньютона к магнитному взаи-

модействию, имеет более глубокие корни. Но для разрешения этих трудностей должно было пройти еще немало времени.

Одним из важнейших достижений теории Ампера было объяснение свойств постоянных магнитов на основе гипотезы молекулярных токов. Сравнивая эффекты взаимодействия проводников, а также проводников и магнитов, Ампер пришел к выводу, что «одно и то же непрерывно существующее электродинамическое состояние, заключающееся в разложениях и соединениях нейтральной (электрической.— С. Ф.) жидкости, которое наблюдается в проводниках с током, существует и вокруг частиц намагниченных тел и производит в них действия, подобные тем, какие вызывают проводники».

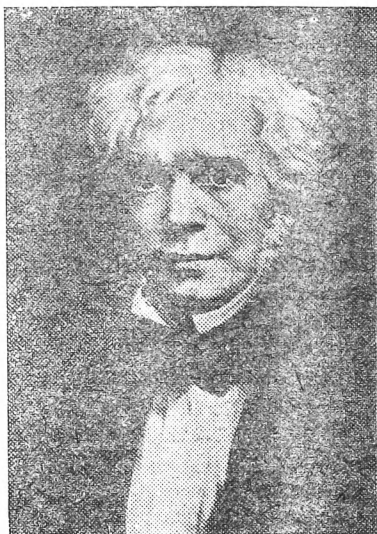
Выдвижение такой модели было важно прежде всего потому, что она позволяла физике избавиться от еще одной гипотетической жидкости — магнитной, представление о которой использовалось в науке XVIII — начале XIX вв. наряду с представлением об электрической жидкости. Таким образом, гипотеза Ампера связывала электричество и магнетизм.

Следует отметить, что теорию Ампера сближало с теорией тяготения Ньютона и то обстоятельство, что в ней не рассматривался механизм передачи магнитных взаимодействий. Согласно Амперу, силы, действующие между элементами токов, возникают в тот же момент, когда эти элементы помещаются в данные точки пространства, или по проводникам пропускается ток. Поэтому электродинамика Ампера вместе с теорией тяготения Ньютона *) относится к так называемым теориям дальнего действия, уравнения которых описывают непосредствен-

*) Следует отметить, что Ньютон понимал ограниченность такого подхода. В одном из писем он писал: «Что тяготение должно быть врожденным, присущим и необходимым свойством материи, так что одно тело может взаимодействовать с другим на расстоянии, через пустоту, без участия чего-то постороннего, при посредстве чего и через что их действие и сила могли бы передаваться от одного к другому,— это мне кажется столь большим абсурдом, что я не представляю себе, чтобы кто-либо, владеющий способностью компетентно мыслить в области вопросов философского характера, мог к этому прийти». Однако отрицательно относясь к гипотезам, не основанным на достоверных опытных данных, Ньютон не разрабатывал модель передачи гравитационного взаимодействия. Позднее, в XVIII в., приведенное выше замечание Ньютона было предано забвению и взаимодействие на расстоянии стало восприниматься как нечто почти само собой разумеющееся,

ные взаимодействия тел, находящихся на конечном (не бесконечно малом) расстоянии друг от друга.

Работы Ампера стали очень важным, но не последним шагом на пути превращения отдельных теорий электричества и магнетизма в единое учение об электромагнетизме. Основные исследования ученого были выполнены в 20-е гг. XIX в., когда еще не был открыт эффект, как бы замкнувший систему взаимосвязей между электрическими и магнитными явлениями. Речь идет о явлении электромагнитной индукции, открытом выдающимся английским экспериментатором М. Фарадеем в 1831 г.



Майкл Фарадей

Будучи самоучкой, Фарадей начал вести научные исследования после того, как стал ассистентом известного английского физика и химика Г. Дэви. Поначалу Фарадей занимался химией, а затем перешел к физике. С 1831 г. он регулярно представлял в Лондонское Королевское общество отчеты об экспериментах по электричеству и магнетизму, которые впоследствии образовали фундаментальный труд «Исследования по электричеству». Вклад Фарадея в развитие этой области огромен. Чтобы дать о нем представление, достаточно перечислить лишь основные достижения ученого.

1821 г. Осуществлен опыт с вращением магнита вокруг проводника с током и проводника с током вокруг магнита. Таким образом был создан лабораторный прототип электродвигателя.

1831 г. Открыто явление электромагнитной индукции.

1833 г. Установлены законы электролиза.

1837 г. Обнаружено влияние диэлектриков на электрическое взаимодействие (поляризация диэлектриков) и введено понятие диэлектрической проницаемости.

1845 г. Открыто явление диамагнетизма. Открыто яв-

ление вращения плоскости поляризации света в веществе, помещенном в магнитном поле.

1847 г. Открыто явление парамагнетизма.

В этот перечень включены лишь экспериментальные открытия Фарадея. Однако значение его работ для истории науки далеко выходит за рамки эксперимента. Фарадей в огромной степени способствовал и прогрессу физической теории. Это может показаться парадоксальным, поскольку он не имел практически никакой математической подготовки. Тем не менее это так. Воображение и интуиция Фарадея были столь сильны, что позволили ему на основе анализа очень простых с современной точки зрения опытов выдвинуть фундаментальную физическую идею — идею о поле.

К представлению о поле Фарадей шел постепенно, шаг за шагом уточняя свои представления о нем. Его основная идея состояла в том, что пространство, окружающее электрические заряды и токи, а также магниты, характеризуется свойствами, отличными от свойств «пустого» пространства Ньютона. Именно благодаря тому, что в данной точке пространства существует магнитное поле (по терминологии Фарадея — через нее проходит силовая линия), помещенный в нее магнит испытывает силовое воздействие. Фарадей, конечно, понимал, что образа силовых линий, пронизывающих пространство, еще недостаточно, чтобы считать теорию электромагнетизма построенной. Однако он с удивительной прозорливостью отмечал перспективность полевого подхода к описанию электромагнитных явлений. В 28-й серии своих «Экспериментальных исследований по электричеству» он писал:

«Мне думается, что этими линиями (магнитными силовыми линиями.— С. Ф.) можно с большим успехом воспользоваться для того, чтобы представить природу, состояние, направление и относительную величину магнитных сил, и что во многих случаях, по крайней мере для физика-теоретика, они имеют преимущество перед тем методом, который представляет силы сосредоточенными в центрах действия, каковы полюса магнитов или магнитных стрелок; а также перед другими методами, например перед тем, который рассматривает северный и южный магнетизм как некоторые жидкости, разлитые по концам стержня или между его частицами. Нет сомнения, что каждый из этих методов, если он не прибегает к слишком большому допущениям, даст при правильном применении верные результаты... Однако некоторые из них по самой

своей природе могут получить гораздо более широкое применение и дать гораздо более разнообразные результаты, чем другие».

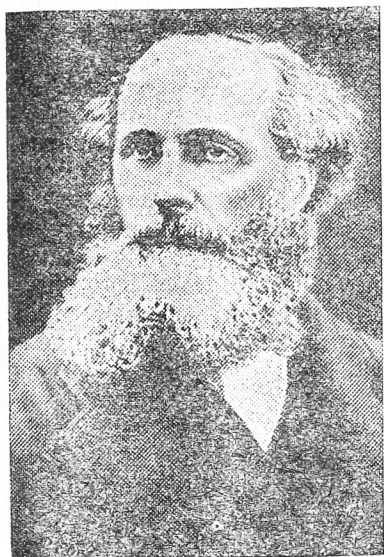
Сам Фарадей, естественно, считал, что этим наиболее продуктивным методом будет метод силовых линий; требовалось лишь перевести качественные представления о силовых линиях на язык математики. Но этого, как уже говорилось, сам Фарадей сделать не мог, поскольку не владел математикой. Объективно физике был необходим теоретик, который мог проникнуться идеями великого экспериментатора и выразил бы их в виде уравнений. Теперь, оглядываясь на события почти полуторавековой давности, можно с уверенностью сказать, что это должен был быть ученый следующего за Фарадеем поколения — молодежь легче воспринимает новые идеи. И действительно, Джеймс Кларк Максвелл, решивший эту сложную задачу, в пору его первого знакомства с воззрениями Фарадея был молод — ему не было еще и двадцати пяти лет.

Дело жизни

Максвелл родился 13 июня 1831 г. в Эдинбурге в семье юриста, проявлявшего большой интерес к естествознанию. Детство Джеймса прошло в поместье отца Миддлби. У мальчика рано проявился интерес к точным наукам: первую научную работу, представленную в Эдинбургское Королевское общество, которая была посвящена так называемым овальным кривым, Максвелл подготовил в четырнадцать лет.

Образование юноша получил сначала в Эдинбургской академии (средней школе), затем в Эдинбургском университете и, наконец, в знаменитом Кембриджском университете, который он закончил в 1854 г., получив премию Смита, присуждавшуюся за победу на труднейшем математическом экзамене.

Ко времени окончания университета на счету Максвелла было уже несколько научных работ. Было ясно, что исследовательская деятельность может и должна составить основу всей его дальнейшей жизни. В середине XIX в. в Англии почти не было специальных центров, в которых ученые могли бы вести научную работу. Научная жизнь была практически целиком сосредоточена в университетах и колледжах. Естественно, поэтому талантливые молодые люди, желавшие посвятить себя науке, стремились получить место преподавателя в одном из высших учебных за-



Джеймс Кларк Максвелл

ведений. Максвелл не был исключением. Его преподавательская деятельность началась практически сразу же после окончания университета и продолжалась с шестилетним перерывом до конца жизни.

Современники Максвелла свидетельствуют, что он не был блестящим преподавателем, хотя, конечно, относился к своим педагогическим обязанностям очень добросовестно. Его истинной страстью были научные исследования. Прожив всего сорок восемь лет, Максвелл получил важные результаты почти во всех разделах физики. Не имея возможности под-

робно рассказать хотя бы об основных работах Максвелла, мы ограничимся их перечислением и указанием, к какому периоду жизни ученого они относятся.

1854—1856 гг. Максвелл работает в качестве преподавателя в Кембриджском университете и ведет исследования, завершившиеся созданием трехкомпонентной теории цветового зрения. К этому времени относится пробуждение интереса Максвелла к проблемам электричества и магнетизма.

1856—1860 гг. Максвелл — профессор кафедры физики Маришаль-колледжа в Абердине. В 1857 г. он публикует статью «О фарадеевских силовых линиях», ставшую важным шагом на пути к созданию последовательной теории электромагнетизма. К этому периоду относится и его знаменитое исследование, посвященное устойчивости колец Сатурна, за которое он получил премию Адамса, учрежденную Кембриджским университетом. В 1859 г. Максвелл закончил свою первую статью по кинетической теории газов, в которой вывел закон распределения по скоростям молекул газа, находящегося в состоянии теплового равновесия.

1860—1865 гг. Максвелл — профессор физики Кингс-колледжа в Лондоне. В эти годы он публикует еще две

важных статьи по электромагнетизму, в одной из которых («Динамическая теория электромагнитного поля») изложено представление о свете как электромагнитных волнах.

В 1865 г. Максвелл оставляет кафедру в Лондоне и переезжает в Гленлейр, в свое поместье, где на протяжении шести лет ведет интенсивные исследования по теории

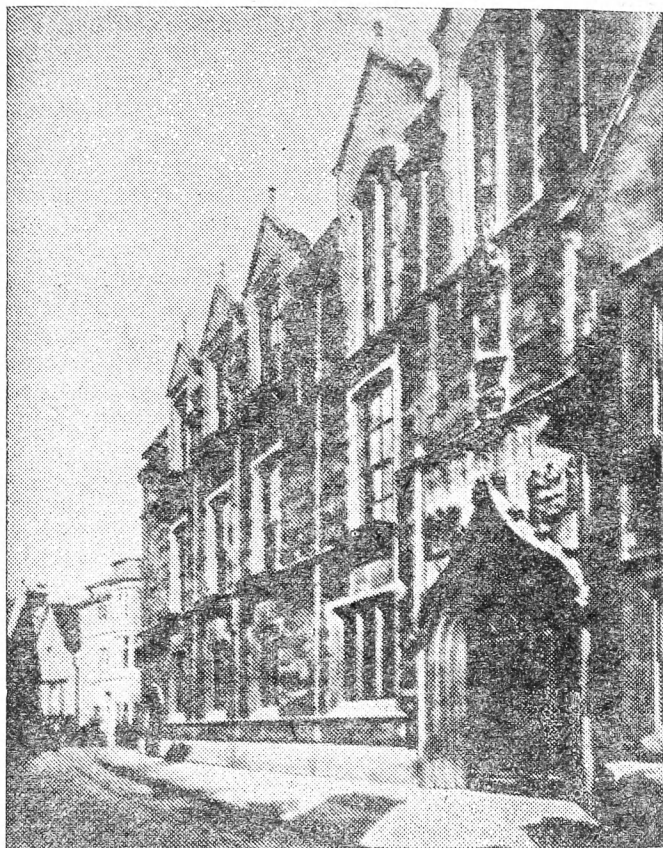


Рис. 36. Здание Кавендишской лаборатории в Кембридже

электромагнетизма и теплоты. Его термодинамические изыскания обобщены в работе «Теория теплоты», опубликованной в 1871 г.

Важнейшими вехами в литературной деятельности Максвелла стали публикация обобщающего сочинения «Трак-

тат об электричестве и магнетизме» (1873 г.) и издание рукописей Г. Кавендиша «Работы по электричеству» (1879 г.), о чем уже говорилось в гл. 3.

С 1871 г. и до конца жизни (1879 г.) Максвелл руководит кафедрой экспериментальной физики в Кембридже. В действительности нет ничего удивительного в том, что выдающийся теоретик возглавил сначала кафедру экспериментальной физики, а затем и построенную под его наблюдением и руководством Кавендишскую лабораторию — учебный и исследовательский центр, прославившийся впоследствии на весь мир. Максвелл с юных лет интересовался экспериментом и сам проводил опыты. Так, во время работы над созданием теории цветового зрения он много экспериментировал с цветовым волчком, с помощью которого и сейчас демонстрируются эффекты смещения цветов. В музее Кавендишской лаборатории хранятся и другие приборы Максвелла, например динамический регулируемый волчок, иллюстрирующий устойчивость вращательного движения. Во время работы в Лондоне Максвелл активно сотрудничал в комиссии, занимавшейся определением единицы электрического сопротивления. Он провел важные опыты по сравнению электростатической и электромагнитной единиц электрического заряда, применив метод, отличный от использованного в знаменитом опыте Вебера и Кольрауша. Рассказывают, что жена Максвелла разводила огонь в подвале их лондонского дома, чтобы он мог проводить эксперименты по изучению тепловых свойств газов. Мы видим, что приглашение Максвелла в качестве профессора в Кембридж было вполне обоснованным.

Характеризуя в целом «труды и дни» Максвелла, нельзя не рассказать подробнее еще об одном его «произведении» — Кавендишской лаборатории. Именно благодаря Максвеллу созданный на средства потомка Кавендиша научный центр оказался оборудованным на уровне самых высоких требований дня, а сложившиеся в лаборатории традиции обучения студентов и подготовки исследователей позволили ей превратиться, по образному выражению одного из историков, в «колыбель гениев». К счастью, мы имеем возможность составить достаточно полное представление об этом детище Максвелла. Выдающийся русский ученый А. Г. Столетов, присутствовавший на открытии Кавендишской лаборатории, оставил ее подробное описание:

«Нижний этаж лаборатории содержит в себе ряд комнат для работы, требующей полной неподвижности приборов, каковы измерения длины, времени и массы, а также

некоторые измерения из области электричества, магнетизма и теплоты. Магнитная комната составляет северо-западный конец наугольника, и на значительное расстояние от нее во все стороны вполне устранены железо и сталь. Комната для весов освещается двумя широкими окнами; смежная комната, назначенная для теплоты, сообщается с нею с помощью подъемного окошка, позволяющего издали наблюдать в трубу термометры и другие снаряды, которым мешало бы близкое присутствие наблюдателя. {...}

Второй этаж содержит обширную аудиторию, комнату для приготовления лекционных опытов, большое помещение для аппаратов, огромную рабочую комнату и комнату профессора. Лекционный стол, разделяющий аудиторию во всю ширину ее на две части, покоится на каменной стене, идущей от грунта, и представляет совершенно неподвижное помещение, где можно пользоваться даже самыми чувствительными к малейшим сотрясениям снарядами. {...} Другое важное устройство представляет обилие подъемных дверок во всех полах; с помощью их можно делать сообщение между всеми этажами дома, проводить из одного этажа в другой проволоки батарей, нити подвеса маятников, акустические трубы и т. п. С помощью такой системы дверок предполагается с самого верха здания проделать в нижний этаж маятник Фуко, длиной около 60 футов (около 18 м.— С. Ф.). Кроме того, через все этажи дома будет проходить железная труба ртутного манометра, для измерения больших давлений.

Верхний этаж вмещает комнаты для акустики, лучистой теплоты, оптики и электричества. {...} В комнате для электричества необходимая сухость воздуха будет искусственно восстанавливаться {...} особым снарядом, состоящим из фланелевой простыни, нагреваемой с одной стороны и вращающейся наподобие телеграфной ленты. Электричество большой машины, помещенной в этой комнате, проводится системой проволок в аудиторию и рабочую зону.

Наконец, электрическая комната, а равно и аудитория металлически сообщены с металлическим шестом, водруженным на кровле здания, — коллектором атмосферного электричества».

Это довольно пространное описание показывает, насколько тщательно Максвелл продумал устройство лаборатории, как много энергии он должен был затратить в годы ее строительства на проблемы, непосредственно не

связанные с его любимым делом — научными исследованиями. История создания Кавендишской лаборатории свидетельствует, что выдающийся мыслитель может оставить после себя и вполне «рукотворный» памятник!

Итак, можно подвести некоторый итог. Исследования Максвелла касаются механики (динамики) и теории теплоты, оптики и молекулярной физики. И все же главным делом его жизни было построение последовательной теории электромагнетизма: цепочка работ, посвященных этому предмету, тянется с середины 50-х гг. до самой смерти Максвелла.

Максвелл заинтересовался электромагнетизмом на сложном этапе развития этого раздела физики. Уже была накоплена большая совокупность экспериментальных данных и значительная часть их включена в теоретические схемы. Однако несмотря на то что над созданием теории электромагнетизма трудились такие выдающиеся теоретики, как В. Вебер, Г. Гельмгольц, Г. Кирхгоф, Ф. Нейман и другие, единой теории в середине XIX в. не существовало. Поэтому совершенно прав был Максвелл, начавший свою первую большую работу по электромагнетизму такими словами:

«Современное состояние учения об электричестве представляется особенно неблагоприятным для теоретической разработки. Законы распределения электричества на поверхности проводников были аналитически выведены из опытов. В некоторых своих частях математическая теория магнетизма была установлена, между тем как в других недостает опытных данных. Теория проводимости гальванического тока и взаимодействия проводников представлена математическими формулами, но еще не связана с остальными отделами науки. Современная теория электричества и магнетизма, охватывающая все относящиеся сюда явления, не только должна уяснить связь между покоящимся электричеством и электричеством текущим, но также между притяжениями и индуктивными действиями в обоих состояниях. Такая теория должна полностью удовлетворять законам, математическое выражение которых уже известно, и, кроме того, давать средства для теоретического вычисления случаев, когда известные формулы неприменимы».

Казалось бы, Максвелл-теоретик должен был прежде всего попытаться выяснить, в чем заключаются основные недостатки уже существующих теорий электромагнетизма, т. е. заняться изучением работ перечисленных выше теоре-

тиков. К счастью для науки, этот «естественный» путь не был реализован.

Побудительным мотивом к занятиям электродинамикой для Максвелла послужило знакомство с трудами Фарадея. В них он нашел нечто гораздо большее, чем собрание пусть и очень остроумных экспериментов, обогативших науку новыми фактами. В них он обнаружил принципиально новый подход к описанию явлений электричества и магнетизма. Что именно увидел Максвелл у Фарадея? Об этом он написал великому исследователю электричества в письме после публикации статьи «О фарадеевых силовых линиях»:

«Насколько мне известно, Вы являетесь первым человеком, у которого возникла идея о том, что тела действуют друг на друга на расстоянии посредством обращения окружающей среды в состояние напряжения, идея, в которую действительно следует поверить. У нас были когда-то потоки крючочков, летающих вокруг магнитов, и даже картины, на которых изображены окруженные ими магниты; но нет ничего более ясного, чем Ваше описание всех источников силы, поддерживающих состояние энергии во всем, что их окружает, состояние, усилением или ослаблением которого можно измерить проделанную в системе работу. Мне кажется, что Вы ясно видите, как силовые линии огибают препятствие, гонят всплески напряжения в проводниках, сворачивают вдоль определенных направлений в кристаллах и несут с собой везде все то же самое количество способности к притяжению, распределенной более разреженно или густо в зависимости от того, расширяются эти линии или сжимаются...»

При чтении этого отрывка следует иметь в виду, что под средой, посредством которой передаются электромагнитные взаимодействия, Максвелл понимал эфир. Если же заменить слово «эфир» словом «поле», то картина, нарисованная Максвеллом, будет очень близка к современной.

Не избалованный пониманием со стороны современников Фарадей откликнулся на письмо молодого Максвелла следующими строками:

«Мне очень хотелось бы задать Вам один вопрос. Предположим, математик занимается исследованием физического явления и приходит, наконец, к каким-то определенным выводам. Нельзя ли их выразить в общедоступной форме не менее полно, ясно и конкретно, чем с помощью математических формул? Если можно, то для таких, как я, было бы великим благом получить их переведенными с языка иероглифов, так чтобы мы могли оперировать ими

в процессе эксперимента. Я думаю, что это можно сделать, поскольку идея Ваших выводов мне совершенно ясна, хотя я и не всегда могу проследить в деталях за ходом Ваших рассуждений. Результаты, полученные на основании Ваших формул, неизменно лежат не выше и не ниже истинных, и смысл их вполне очевиден, так что я могу работать с ними. Если это так, то математики могли бы сослужить нам хорошую службу, представляя свои результаты не только в удобной форме, но и в более популярном, рабочем виде».

Хотя Фарадей и говорит о том, что «для таких, как он» математическая символика непонятна, в действительности его точка зрения на предмет оказалась созвучна стилю мышления Максвелла. В истории физики трудно указать другой пример, когда бы отношение к физической реальности столь точно совпало бы у двух выдающихся естествоиспытателей. Спустя много лет Максвелл, как бы отвечая на давний вопрос Фарадея, напишет в своем «Трактате об электричестве и магнетизме»:

«Приступив к изучению труда Фарадея, я установил, что его метод понимания явлений был также математическим, хотя и не представленным в форме обычных математических символов. Я также нашел, что этот метод можно выразить в обычной математической форме и таким образом сравнить с методами профессиональных математиков.

Так, например, Фарадей видел силовые линии, пронизывающие все пространство там, где математики видели центры сил, притягивающих на расстоянии; Фарадей видел среду там, где они не видели ничего кроме расстояния; Фарадей предполагал источник и причину явлений в реальных действиях, протекающих в среде, они же были удовлетворены тем, что нашли их в силе действия на расстоянии, приписанной электрическим флюидам.

Когда я переводил то, что считал идеями Фарадея, в математическую форму, я понял, что в большинстве случаев результаты обоих методов совпадали, так что ими объяснялись одни и те же явления и выводились одни и те же законы действия, но что методы Фарадея походили на те, при которых мы начинаем с целого и приходим к частному путем анализа, в то время как обычные математические методы были основаны на принципе движения от частных и построения целого путем синтеза».

Таким образом, Максвелл отдавал предпочтение идеям Фарадея, поскольку они позволяли с общих позиций охватить все известные в то время электромагнитные явления,

превратить эмпирически найденные законы в следствия основных положений теории. Конечно, Максвелл несколько приуменьшал свои заслуги, когда говорил, что он лишь переводил идеи Фарадея в математическую форму. Он не только внес решающий вклад в формулировку теории, но и «обеспечил» возможность ее экспериментальной проверки. Действительно, с одной стороны, без введения Максвеллом представления о так называемом токе смещения, определяемом скоростью изменения электрического поля, который, как и ток проводимости, создает вокруг себя магнитное поле, было бы невозможно получение непротиворечивой системы уравнений электромагнитного поля. С другой стороны, теория Максвелла отличалась от многих других теорий электромагнетизма тем, что она предсказывала существование электромагнитных волн, обнаружение которых Г. Герцем явилось важнейшим подтверждением ее справедливости.

Значение теории Максвелла для физики состояло прежде всего в том, что она способствовала объединению таких разделов, которые до ее появления считались крайне слабо связанными между собой. Электромагнитная теория света связала электромагнетизм и оптику; обмен энергией между телами посредством электромагнитных волн (тепловое излучение) поставил вопрос о применении законов термодинамики к явлениям электромагнетизма. Эту объединяющую функцию теории Максвелла имеют в виду, когда говорят, что ее появление привело к формированию электромагнитной картины мира.

Однако от общей характеристики теории Максвелла нам пора перейти к вопросу о том, каким образом в нее вошел эмпирический закон Кулона. Анализируя этот вопрос, мы на конкретных примерах познакомимся с представлениями об электромагнитном поле, составляющими основу теории Максвелла.

«Первый среди равных»

Генрих Герц, открывший электромагнитные волны и тем самым подтвердивший идеи Максвелла о поле, высказал мысль о том, что «теория Максвелла — это уравнения Максвелла». Как во всяком афоризме, в этом высказывании есть доля преувеличения, однако в нем прекрасно отражено главное достижение Максвелла — перевод представлений Фарадея о поле на язык математики. Идеи Фарадея о поле рождались при обдумывании многочисленных

и разнообразных опытов. Поэтому уравнения Максвелла, как, впрочем, и уравнения фундаментальных теорий других областей физики, связаны с экспериментом. Очень полезно проследить эту связь — так можно получить правильную перспективу восприятия всей теории.

В наши дни под системой уравнений Максвелла понимают не совсем ту систему, которая была им записана в «Трактате по электричеству и магнетизму». Дело в том, что ученый пользовался непривычным для современного читателя математическим аппаратом — исчислением кватернионов *). Впоследствии выяснилось, что более удобным для формулировки теории электромагнитного поля является векторное исчисление. Кроме того, последователям Максвелла (прежде всего Г. Герцу и О. Хевисайду) удалось уменьшить число основных уравнений теории до четырех векторных соотношений **). Каждое из них отражает закономерности, которые можно проверить на опыте. Одно уравнение показывает, что магнитное поле порождается токами проводимости и меняющимся электрическим полем (током смещения). Второе, по существу, описывает явление электромагнитной индукции. Третье отражает тот факт, что в природе не существует магнитных зарядов (распиливая магнит, нельзя получить отдельно северный и южный полюса). Наконец, четвертое показывает, что электрическое поле может создаваться электрическими зарядами. Вот это уравнение нас и интересует больше всего, поскольку оно обязано своим происхождением все тому же закону Кулона. Однако прежде чем записать и проанализировать это уравнение, необходимо более подробно остановиться на отличии описания явлений электростатики с помощью сил, действующих между зарядами, от полевого описания этих явлений.

Итак, закон Кулона определяет силу взаимодействия между двумя точечными заряженными телами:

$$F = k \frac{q_1 q_2}{r^2}.$$

*) Кватернионы представляют собой математические объекты, до некоторой степени напоминающие комплексные числа (в исчислении кватернионов используются три мнимые единицы), поэтому их еще называют гиперкомплексными числами. Система кватернионов была предложена в 1843 г. выдающимся ирландским математиком и физиком У. Гамильтоном. В популярной форме о кватернионах рассказано в книге: *Понтрягин Л. С. Обобщения чисел.* — М.: Наука, 1986. — Библиотечка «Квант», вып. 54.

**) Иногда в систему уравнений Максвелла включают и так называемые материальные уравнения, характеризующие свойства среды, в которой возбуждено электромагнитное поле.

Иначе говоря, сила, с которой тело, несущее заряд q_1 , действует на тело с зарядом q_2 , определяется формулой

$$\mathbf{F} = k \frac{q_1 q_2}{r^2} \mathbf{r}, \quad (5.1)$$

где \mathbf{r} — радиус-вектор, направленный от тела 1 к телу 2. Если теперь разделить правую и левую части этого равенства на q_2 , то мы получим выражение для *напряженности поля \mathbf{E}* , создаваемого зарядом q_1 :

$$\mathbf{E} = k \frac{q_1}{r^2} \mathbf{r}. \quad (5.2)$$

Некоторым читателям, уже изучавшим курс физики средней школы, эти выкладки могут показаться лишними и тривиальными. И в самом деле, с формальной точки зрения они элементарны. Однако в действительности переход от соотношения (5.1) к соотношению (5.2) представляет собой очень важный, принципиальный шаг.

Переход от силы к напряженности — это переход от ньютоновских представлений о взаимодействующих телах к полевым представлениям Фарадея — Максвелла. Из формулы (5.2) следует, что вектор \mathbf{E} является характеристикой некой точки пространства, соответствующей радиус-вектору \mathbf{r} , которая зависит только от величины заряда q_1 . При этом важно, что определенная напряженность существует в любой точке пространства при данном положении q_1 независимо от того, есть ли в этой точке заряд q_2 или нет. Принято говорить, что заряд q_1 окружен электрическим полем, которое проявляется в виде действия силы на заряд, помещенный в точку, где это поле существует.

При первом знакомстве с понятием поля, когда в качестве примера используется электростатическое поле, может показаться, что, переходя от силы к напряженности, мы лишь меняем одно слово на другое, тем более что при решении конкретных задач последовательное применение и того и другого понятия приводит к одинаковым результатам. Чтобы избавиться от этого обманчивого впечатления, следует вспомнить, что формула (5.2) есть выражение напряженности электростатического поля лишь для частного случая, когда поле создается точечным зарядом. В общем случае

$$\mathbf{E} = \frac{\mathbf{F}}{q}, \quad (5.3)$$

где \mathbf{F} — сила, действующая на заряд q со стороны любого электростатического поля. А ведь электрическое поле не

всегда создается неподвижным зарядом. Например, изменение магнитного поля порождает так называемое вихревое электрическое поле (это и есть суть явления электромагнитной индукции, открытого Фарадеем), напряженность

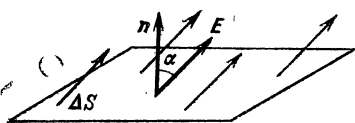


Рис. 37. К определению понятия «поток вектора»

которого вовсе не задается формулой (5.2). На примере вихревого электрического поля можно особенно отчетливо продемонстрировать своеобразие полевого подхода к описанию электрических явлений: зная напряженность этого

поля E в некоторой точке, можно найти силу, действующую на заряд q , помещенный в эту точку. Но при этом часто нельзя указать *тело*, которое действует на этот заряд. Тем не менее это воздействие создается вполне реальным объектом — полем. Поле может меняться при переходе от одной точки пространства к другой, оно может меняться с течением времени. Это означает, что E является функцией r и t : $E = E(r, t)$. Практически решение задач электродинамики показывает эффективность использования понятия «напряженность электрического поля». Поэтому в дальнейшем вместо силовой формулировки закона Кулона (5.1) мы будем пользоваться его формулировкой (5.2), в которой используется понятие напряженности. Однако, чтобы получить интересующее нас уравнение Максвелла, необходимо преобразовать соотношение (5.2). Для этого введем понятие потока вектора напряженности электрического поля. Выберем в пространстве площадку ΔS , столь малую, чтобы мы могли считать напряженность поля E одинаковой во всех ее точках (рис. 37). Тогда поток вектора напряженности E через эту площадку будет определяться выражением

$$\Delta\Phi = E \Delta S \cos \alpha,$$

где α — угол, образованный вектором E и перпендикуляром (вектором нормали n) к площадке ΔS . Заметим, что если спроецировать площадку ΔS на плоскость, перпендикулярную вектору E , то произведение $\Delta S \cos \alpha$ будет численно равно площади этой проекции.

Происхождение термина «поток вектора» легко понять, если воспользоваться аналогией. Представим себе, что вместо вектора E мы нарисуем векторы v , изображающие скорости частиц текущей в данной области жидкости. Тогда произведение $\Delta\Phi = v \Delta S \cos \alpha$ будет численно равно объему

жидкости, проходящей через площадку ΔS в единицу времени. Отсюда и термин «поток». Впервые введенный в гидродинамике, он оказался удобным для описания явлений в других областях физики (вспомните известное из школьного курса физики понятие магнитного потока).

Если мы хотим найти поток через площадку, на которой вектор не везде одинаков, то эту площадку следует разбить на множество маленьких площадок, на каждой из которых E можно будет считать приближенно постоянным, найти значение потока через них, а затем найти сумму таких значений. При переходе к бесконечно большому числу элементарных площадок и соответственно к бесконечно малым значениям их площадей суммирование заменяется интегрированием и выражение для потока записывается в виде

$$\Phi = \int_S E dS \cos \alpha.$$

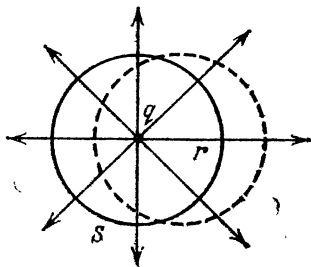


Рис. 38. К расчету потока вектора E поля точечного заряда

Теперь рассмотрим очень простую задачу. Вычислим поток вектора E поля точечного положительного заряда q через сферическую поверхность радиуса r , центр которой совпадает с зарядом (рис. 38). Ясно, что в силу сферической симметрии поля точечного заряда векторы напряженности E в любой точке сферы S будут перпендикулярны этой поверхности и, следовательно, если принять за положительное направление вектора n направление внешней нормали, то во всех точках сферы $\alpha=0$ и $\cos \alpha=1$. Кроме того, значение модуля вектора E одинаково во всех точках сферы и равно

$$E = k \frac{q}{r^2}.$$

Следовательно, в данном случае при вычислении потока Φ можно обойтись без интегрирования:

$$\Phi = E \cdot 4\pi r^2 = 4\pi kq.$$

Если записать выражение для k , принятое в СИ: $k=1/4\pi\epsilon_0^*$),

*) Здесь и далее мы будем рассматривать поле в вакууме, где $\epsilon=1$.

то мы получим

$$\Phi = \frac{q}{\varepsilon_0}. \quad (5.4)$$

Мы пришли к очень важному выводу: поток вектора Φ не зависит от радиуса сферы. Заметим, что этот результат получился благодаря тому, что напряженность поля точечного заряда убывает с расстоянием от него как $1/r^2$, а площадь сферы растет как r^2 . Если бы в законе Кулона показатель степени расстояния отличался от двойки, то величина Φ зависела бы от r .

Попробуем теперь обобщить полученный результат. Прежде всего заметим, что наш вывод не изменится, если мы перенесем заряд из центра сферы в любую другую точку внутри нее. Конечно, в этом случае соображения симметрии, которыми мы пользовались выше, оказываются неприменимыми. Однако и теперь можно обойтись без громоздких вычислений. Для этого воспользуемся геометрическим образом линий напряженности. Напомним, что согласно договоренности густота линий напряженности в данной области пространства пропорциональна величине напряженности. Если учесть сделанное выше замечание о смысле произведения $\Delta S \cos \alpha$, входящего в определение потока, то станет очевидным тот факт, что сама величина потока пропорциональна числу силовых линий, пронизывающих площадку ΔS . Но тогда поток вектора \mathbf{E} в рассмотренной выше задаче пропорционален полному числу линий напряженности, исходящих из заряда q . Ясно, что это число не зависит от радиуса сферы! Таким образом, геометрическая интерпретация понятия потока вектора согласуется с результатом, полученным на основе строгого расчета. Но эта же геометрическая интерпретация помогает понять, почему поток вектора \mathbf{E} через сферу остается неизменным при перемещении заряда внутри нее: при этом не меняется число силовых линий, пронизывающих сферу (рис. 38).

Следующий шаг в обобщении формулы (5.4) состоит в рассмотрении потока вектора напряженности поля, созданного несколькими точечными зарядами, помещенными внутрь сферы. Чтобы сделать этот шаг, необходимо вспомнить важнейший принцип электродинамики — принцип суперпозиции. Он гласит, что напряженность поля, образованного несколькими зарядами, равна векторной сумме напряженностей полей, созданных каждым из зарядов. Поскольку для каждого из зарядов справедливо соотно-

шение (5.4), то полный поток Φ равен

$$\Phi = \frac{q_1}{\varepsilon_0} + \frac{q_2}{\varepsilon_0} + \dots + \frac{q_N}{\varepsilon_0}, \quad (5.5)$$

если система состоит из N зарядов. Отметим попутно, что поток вектора напряженности в случае отрицательного заряда будет отрицательным, поскольку положительный вектор нормали к сфере и вектор \mathbf{E} будут направлены в противоположные стороны, т. е. $\alpha = \pi$, $\cos \alpha = -1$. Поэтому полный поток Φ равен алгебраической сумме электрических зарядов внутри сферы, деленной на ε_0 .

Наконец, последний шаг в анализе формулы (5.4) состоит в переходе от сферы к произвольной замкнутой поверхности. Из анализа рис. 39 ясно, что число линий на-

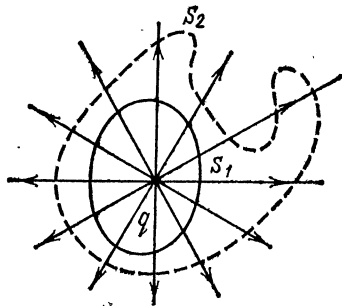


Рис. 39. К расчету потока вектора \mathbf{E} через несимметричные поверхности

пряженности, выходящих из замкнутой поверхности любой формы, охватывающей заряд q , одинаково. Это относится как к поверхности относительно простой формы S_1 , так и к сложной поверхности S_2 , на которой имеются «складки». Видно, что линия напряженности A трижды пронизывает поверхность S_2 : дважды выходит из нее и один раз входит. Поэтому при расчете потока два слагаемых, связанных с этой линией, будут положительными, а одно — отрицательным. Одно положительное слагаемое компенсирует отрицательное, а в сумму, определяющую полный поток, войдет лишь одно положительное слагаемое, как и в случае простых выпуклых фигур.

Таким образом, мы путем рассуждений (хотя и не очень строгих) пришли к важной теореме.

В вакууме поток вектора напряженности электрического поля через произвольную замкнутую поверхность пропорционален алгебраической сумме зарядов, охватываемых данной поверхностью. (Коэффициент пропорциональности зависит от выбора единиц. В СИ он равен $1/\varepsilon_0$.)

Эта теорема носит имена двух выдающихся математиков — М. В. Остроградского и К. Гаусса. В общем виде

она может быть выражена уравнением

$$\oint_S E dS \cos \alpha = \frac{1}{\epsilon_0} \sum_i q_i, \quad (5.6)$$

где кружок у знака интеграла означает интегрирование по замкнутой поверхности S , а знак \sum — суммирование по всем зарядам, находящимся внутри этой поверхности.

Может показаться странным, что физическая теорема названа именами математиков. Однако следует иметь в виду, что соотношение, подобное (5.6), применимо для любого векторного поля, порождаемого точечными источниками, для которых справедлив закон «обратных квадратов». В частности, соотношение можно записать и для напряженности гравитационного поля.

В принципе, систему зарядов, создающую электростатическое поле, всегда можно представить в виде совокупности точечных зарядов. Однако в реальных системах заряды иногда удобнее рассматривать как распределенные непрерывно *) по поверхности проводника или по объему диэлектрика. В этих случаях полный заряд внутри поверхности находится путем интегрирования по поверхности или объему, и уравнение (5.6) приобретает вид

$$\oint_S E dS \cos \alpha = \frac{1}{\epsilon_0} \int_{S'} \sigma dS \quad \text{или} \quad \oint_S E dS \cos \alpha = \frac{1}{\epsilon_0} \int_{\delta} \rho dV, \quad (5.7)$$

где σ — поверхностная плотность заряда, S' — поверхность, по которой он распределен, ρ — объемная плотность заряда, δ — область пространства, ограниченная поверхностью S .

Итак, пользуясь законом Кулона, мы сформулировали теорему Остроградского — Гаусса для электростатики. Каково же значение этой теоремы? Оказывается, с ее помощью можно легко решать некоторые задачи электростатики, рассмотрение которых непосредственно на основе закона Кулона затруднительно. Мы обсудим только один пример. Условия задачи таковы. Пусть дан бесконечно длинный проводящий цилиндр радиуса R , толщина которого мала по сравнению с R , равномерно заряженный по поверхности

*) Конечно, представление о непрерывном распределении заряда — это лишь приближение, поскольку заряд обладает свойством дискретности (см. гл. 6). Однако при рассмотрении задач макроскопической электродинамики это приближение дает вполне удовлетворительные результаты.

с поверхностной плотностью σ . Требуется найти напряженность электрического поля внутри и вне цилиндра.

Рассмотрим сначала область пространства, внешнюю по отношению к цилиндру, т. е. определяемую условием $r > R$. Для нахождения \mathbf{E} воспользуемся теоремой Остроградского — Гаусса. Чтобы применить уравнение (5.6), требуется выбрать какую-то поверхность внутри цилиндра. Из формулировки теоремы следует, что эта поверхность может быть произвольной. Однако для решения конкретной задачи произвольная поверхность не годится. Действительно, не зная явной зависимости $\mathbf{E}(\mathbf{r})$, мы в этом случае не сможем записать выражение для потока вектора \mathbf{E} . По-

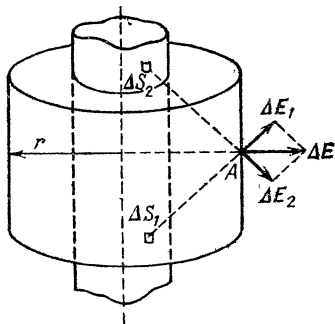


Рис. 40. К расчету напряженности поля заряженного цилиндра

лучается, на первый взгляд, замкнутый круг. Но не будем отчаиваться! Попробуем воспользоваться соображениями симметрии — они часто оказываются незаменимыми помощниками при решении физических задач. Выберем не произвольную поверхность, а поверхность, отвечающую симметрии исходной задачи, например цилиндрическую поверхность радиуса r и длины l , ось которой совпадает с осью заряженного цилиндра (рис. 40). Почему мы выбрали именно цилиндр? Из соображений симметрии ясно, что напряженность поля во всех точках его поверхности одинакова — ведь все эти точки находятся на равном расстоянии от поверхности заряженного цилиндра. Второе обстоятельство, которое заставляет нас отдать предпочтение поверхности этого вида, состоит в том, что векторы \mathbf{E} на боковой поверхности мысленно выбранного нами цилиндра перпендикулярны ей. Это тоже следует из соображений симметрии. Однако можно пояснить более подробно, почему это так. Рассмотрим произвольную точку A на поверхности радиуса r и небольшой участок заряженной поверхности ΔS_1 (рис. 40). Поскольку участок ΔS_1 мал, то заряд, который он несет, можно считать точечным. Этот заряд создает в точке A поле, напряженность которого $\Delta \mathbf{E}_1$ определяется законом Кулона. Вектор $\Delta \mathbf{E}_1$ в общем случае не будет перпендикулярен поверхности цилиндра r . Однако поскольку заряженный цилиндр бесконечно длин-

ный, мы всегда можем найти на его поверхности участок ΔS_2 , равный по площади участку ΔS_1 и симметричный ему по отношению к перпендикуляру, опущенному из точки A на ось цилиндров. Ясно, что заряд на участке ΔS_2 создает в точке A такую напряженность ΔE_2 , что результирующая напряженность $\Delta E = \Delta E_1 + \Delta E_2$ будет направлена вдоль перпендикуляра к оси цилиндров, проходящего через точку A . Вследствие бесконечной длины заряженного цилиндра всю его поверхность можно разбить на пары таких участков и, следовательно, полная напряженность поля, которая создается всем зарядом цилиндра, должна быть направлена по радиусу, т. е. должна быть перпендикулярна боковой поверхности цилиндра r .

Проведя такое рассуждение, мы уже легко можем рассчитать величину потока через поверхность цилиндра радиуса r и высоты l . В принципе, этот поток должен складываться из потока через боковую поверхность и потока через верхнее и нижнее основания цилиндра. Но второе слагаемое в данном случае равно нулю, поскольку вектор E в любой точке основания параллелен ему ($\alpha = \pi/2$ и $\cos \alpha = 0$). Таким образом, мы должны учесть только поток через боковую поверхность цилиндра:

$$\Phi = E \cdot 2\pi r l,$$

поскольку $S = 2\pi r l$, а $\alpha = 0$ и $\cos \alpha = 1$.

Заряд, который находится внутри этого цилиндра, равен

$$Q = \sigma \cdot 2\pi R l.$$

По теореме Остроградского — Гаусса

$$\Phi = Q/\epsilon_0$$

или

$$E \cdot 2\pi r l = \sigma \cdot 2\pi R l / \epsilon_0.$$

Отсюда

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon_0} \cdot \frac{R}{r}. \quad (5.8)$$

Записав это выражение, мы можем сразу же дополнить его формулой, описывающей электрическое поле внутри заряженного цилиндра: $E = 0$. Действительно, все рассуждения, на основе которых был рассчитан поток вектора E для случая $r > R$, остаются в силе, а заряд, находящийся внутри мысленно выделенного цилиндра с $r < R$, будет равен нулю.

Из формулы (5.8) видно, что поле длинного равномерно заряженного цилиндра сильно отличается от поля точеч-

ного заряда: E убывает как $1/r$, а не как $1/r^2$. В этом, конечно, нет ничего удивительного: сколько ни удаляйся от бесконечного цилиндра, он никогда не будет выглядеть как точка.

Подчеркнем, что получение формулы (5.8) непосредственно на основе закона Кулона, путем разбиения поверхности цилиндра на малые участки, и суммирования (точнее, интегрирования) элементарных составляющих вектора напряженности — довольно утомительное занятие даже для человека, хорошо владеющего математической техникой. Теорема Остроградского — Гаусса позволила это сделать практически в одно действие.

Увы, но задач, в которых теорема Остроградского — Гаусса работает так эффективно, очень немного. Даже для цилиндра конечной длины применить ее уже нельзя, поскольку соображения симметрии перестают быть справедливыми. Все дело в том, что невозможно заранее выбрать поверхность, на которой значение напряженности поля постоянно. Иначе говоря, трудности в использовании теоремы Остроградского — Гаусса связаны с тем, что значение потока вектора напряженности, определяемое интегралом

$$\oint_S E dS \cos \alpha,$$

зависит от значений напряженности в *разных* точках пространства. Математики разработали метод, позволяющий перейти от рассмотрения поверхностей конечных размеров и, следовательно, различных точек пространства к бесконечно малым поверхностям, т. е. к описанию свойств поля в *одной-единственной* точке. Опишем в общих чертах этот метод.

Воспользуемся уравнением (5.7), являющимся одним из представлений теоремы Остроградского — Гаусса, и разделим и правую, и левую его части на объем V , охватываемый поверхностью S , который определяется интегралом

$$V = \int_{\delta} dV.$$

Таким образом, мы получим

$$\frac{\oint_S E dS \cos \alpha}{\int_{\delta} dV} = \frac{\frac{1}{\epsilon_0} \int_{\delta} \rho dV}{\int_{\delta} dV}. \quad (5.9)$$

Теперь будем постепенно уменьшать поверхность S (и, следовательно, объем, ею охватываемый). Когда эта поверхность станет очень малой, то различие плотности заряда в разных точках внутри ограниченного ею объема можно будет пренебречь и ρ можно будет вынести за знак интеграла. Иначе говоря, при переходе к пределу при $\delta \rightarrow 0$ мы получим

$$\lim_{\delta \rightarrow 0} \frac{1}{\varepsilon_0} \frac{\oint_{\delta} \rho dV}{\int_{\delta} dV} = \frac{\rho}{\varepsilon_0} \frac{\oint_{\delta} dV}{\int_{\delta} dV} = \frac{\rho}{\varepsilon_0}. \quad (5.10)$$

Правила математики требуют, чтобы мы применили предельный переход и к левой части равенства (5.9), т. е. рассмотрели бы предел отношения

$$\lim_{\delta \rightarrow 0} \frac{\oint_S E dS \cos \alpha}{\int_{\delta} dV}.$$

Многим читателям, вероятно, это выражение ни о чем не говорит. Между тем в математике этот предел играет большую роль, из-за чего он получил даже специальное название: о нем говорят как о дивергенции вектора \mathbf{E} и обозначают $\operatorname{div} \mathbf{E}$:

$$\operatorname{div} \mathbf{E} = \lim_{\delta \rightarrow 0} \frac{\oint_S E dS \cos \alpha}{\int_{\delta} dV}. \quad (5.11)$$

Приравнивая (5.10) и (5.11), имеем

$$\operatorname{div} \mathbf{E} = \frac{1}{\varepsilon_0} \rho. \quad (5.12)$$

Важнейшей особенностью полученного уравнения является то, что оно связывает значение напряженности электрического поля \mathbf{E} в *данной точке пространства* с плотностью заряда в *этой же точке*. В этом наиболее ярко проявляется полевой подход к описанию электрических явлений: из уравнения (5.12) удалены всякие следы взаимодействия на расстоянии, поэтому оно и вошло в электродинамическую теорию близкого действия, какой является теория Максвелла. Соотношение (5.12) и есть то уравнение в системе Максвелла, которое непосредственно отражает эмпириче-

ский закон Кулона, хотя по своей форме оно и не имеет ничего общего с формулой (5.1). Поскольку исторически закон Кулона был первым количественным соотношением, установленным в электромагнетизме, мы можем назвать уравнение (5.12) «первым среди равных» в системе основных уравнений Максвелла.

Новая проверка

Рассказывая о жизни Максвелла, мы уже упоминали о том, что этот великий теоретик не чурался эксперимента. Более того, Максвелл был одним из первых ученых, указывавших на необходимость комплексной (теоретической и экспериментальной) подготовки будущих физиков. Многие положения, сформулированные им во вводной лекции по экспериментальной физике, прочитанной в 1871 г., актуальны и сейчас. Трудно удержаться от цитирования такого, например, отрывка из этой лекции:

«Когда мы сможем использовать при обучении науке не только сосредоточенное внимание студента и его знакомство с символическими обозначениями, но и зоркость его глаза, остроту слуха, тонкость осязания и ловкость его пальцев, мы не только распространим наше влияние на целую группу людей, не любящих холодных абстракций, но, раскрывая сразу все ворота познания, обеспечим ассоциирование этих научных доктрин с теми элементарными ощущениями, которые образуют смутный фон всех наших сознательных мыслей и придают блеск и рельефность идеям, которые, будучи представлены в абстрактной форме, могут совершенно исчезнуть из памяти».

Неудивительно поэтому, что на страницах «Трактата об электричестве и магнетизме» можно найти немало отрывков, посвященных эксперименту. Не обойдены вниманием и опыты Кулона, которых Максвелл касается в связи с обсуждением закона взаимодействия зарядов, входящего, как мы уже говорили, в систему основных уравнений теории. Он писал:

«Можно считать, что эксперименты Кулона с крутильными весами приближенно 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, не слишком малые в сравнении с расстоянием

между ними, чтобы они могли нести заряды, достаточные для возникновения заметных сил. Тогда действие одного тела влияет на распределение электричества на другом, так что нельзя даже считать, что заряды распределены по поверхности или сосредоточены в центре тяжести; этот эффект следует учитывать путем сложных выкладок...

Другая трудность происходит от действия электричества, индуцированного на стенках кожуха, 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 отчетливо указал на основные 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. Но в «Трактате» нет ссылки на Кавендиша — в 1873 г. Максвелл еще не знал о его выдающихся исследованиях по электричеству. Позднее, после знакомства с рукописями Кавендиша, Максвелл организовал во вновь открытой лаборатории повторение ряда опытов «великого отшельника». Среди них был и эксперимент по проверке закона «обратных квадратов». Новая лаборатория «зарабатывала» право называться Кавендишской...

В усовершенствованном виде опыт Кавендиша был повторен сотрудником Максвелла Дональдом Макалистером в 1878 г. Он, сохранив основную идею об использовании сферического конденсатора, несколько упростил процедуру измерений. В ходе опыта внешние полусферы не разъединялись; в одной из них было проделано отверстие, которое при электризации полусфер прикрывалось металлическим колпачком с прикрепленным к нему проводником, обеспечивавшим электрический контакт полусфер и внутреннего шара. После электризации колпачок убирался, что приводило к прерыванию контакта между полусферами и внутренним шаром, а в отверстие вводился зонд, соединенный с электрометром, с помощью которого пытались обнаружить электризацию шара. Этот прием, а также использование значительно более чувствительного прибора, чем «пробковый» электрометр Кавендиша, позволили понизить предел возможной поправки q в показателе степени

расстояния в законе Кулона, имеющего с учетом этой поправки вид $F \sim R^{-2 \pm q}$. Результат Макалистера

$$q < \frac{1}{21\,600}. \quad (5.13)$$

Столь сильное ограничение на возможную поправку к закону «обратных квадратов» не могло не доставить Максвеллу глубокого удовлетворения, ведь тем самым один из основных законов, на которых базировалась построенная им электродинамика, оказывался подтвержденным с уникальной для того времени точностью! Закон Кулона благодаря Максвеллу и Макалистеру вполне мог претендовать на роль рекордсмена среди физических законов по точности экспериментальной проверки.

Ограничение (5.13) продержалось в науке более полувека. За это время в физике произошли поистине революционные изменения, которые привели к новым проверкам и новым уточнениям. Но прежде чем рассказать о них, мы должны обсудить еще несколько вопросов, связанных с законом Кулона.

ОБ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ЗАРЯДЕ И ЕГО СВОЙСТВАХ

До сих пор, говоря о законе Кулона, мы сосредоточивали внимание на зависимости силы взаимодействия между точечными зарядами от расстояния. Теперь же нам пора обратиться к величине, которая стоит в числителе дроби в формуле (4.1), — электрическому заряду. Ясно, что понятие о величине заряда или количестве электричества было введено по аналогии с законом всемирного тяготения, в котором соответствующую роль играет масса (в работах XVIII в. можно встретить даже термин «электрическая масса», который, однако, не прижился). Метод деления заряда, описанный в гл. 4, позволял, хотя бы принципиально, обосновать справедливость такой формы закона взаимодействия, в которой сила определяется произведением зарядов взаимодействующих тел. Когда в 1811 г. французский физик и математик С. Пуассон построил математическую теорию электростатических явлений, основанную, по существу, на законе Кулона, и ее предсказания совпали с результатами опытов того же Кулона, в которых исследовалось распределение заряда на поверхности проводящих тел, то практически отпали всякие сомнения в плодотворности формальной аналогии между гравитационными и электростатическими силами. Так электрический заряд получил права гражданства в физике.

Открытия конца XVIII — первой половины XIX вв., о которых частично говорилось в предыдущей главе, обогатили представление об эффектах, связанных с электрическим зарядом. Но многие вопросы оставались без ответа. Каковы свойства электрического заряда? Каким образом электрические заряды входят в состав вещества? Почему большинство макроскопических тел в естественном состоянии оказываются электронейтральными, хотя в их состав входят электрические заряды? На эти и другие вопросы, связанные с понятием заряда, ученые нашли ответы гораздо позже, чем начали пользоваться данным понятием. В этой главе мы рассмотрим свойства электрического

заряда. Надо сказать, что история обнаружения и исследования каждого из этих свойств могла бы составить предмет отдельной главы, а то и книги. Поэтому здесь мы только наметим ход событий, а более или менее подробно рассмотрим лишь отдельные эпизоды.

Открытие электрона

Идея о том, что в состав вещества входят частицы, несущие определенный заряд, перестала быть умозрительной гипотезой и превратилась в весьма вероятное предположение после установления Фарадеем законов электролиза (1833 г.). В разделе 13 серии VII «Опытов по электричеству», который называется «Об абсолютном количестве электричества, связанном с частицами или атомами материи» Фарадей написал такие пророческие строки:

«Теория определенности электрического и электрохимического действия (т. е. законы электролиза.— С. Ф.) представляется мне непосредственно связанной с вопросом об *абсолютном количестве* электричества, или электрической силы, присущей различным веществам. Пожалуй, невозможно говорить об этом вопросе, не выходя за пределы известных нам в настоящее время фактов; однако было бы в равной степени невозможно, а может быть, и нерационально, вовсе не обсуждать этого вопроса. Хотя мы ничего не знаем о том, что такое атом, но мы невольно представляем себе какую-то малую частичку, которая является нашему уму, когда мы о ней думаем; правда, в таком же или в еще большем неведении мы находимся относительно электричества; мы даже не в состоянии сказать, представляет ли оно собой особую материю или же просто движение обыкновенного вещества, или еще какой-то вид силы или агента; тем не менее имеется огромное количество фактов, заставляющих нас думать, что атомы материи каким-то образом одарены электрическими силами или связаны с ними, и им они обязаны своими наиболее замечательными качествами, и в том числе своим химическим сродством друг к другу».

На чем основывал свои заключения Фарадей? На пропорциональности массы вещества, выделившегося на электроде, заряду, прошедшему через электролит (первый закон Фарадея): если предположить, что выделяющееся вещество состоит из одинаковых атомов, то «атомы тел, эквивалентные друг другу в отношении их обычного химического

действия, содержат равные количества электричества, естественно связанного с ними».

Однако приведенные рассуждения Фарадея все же не были строгим доказательством существования «атомов электричества». На протяжении последующих десятилетий физики накапливали экспериментальный материал, и лишь в самом конце века было доказано существование удивительной частицы, которая оказалась неделимым «кирпичиком» электричества, частицы, получившей название «электрон».

Соображения относительно существования такого элементарного заряда высказывались в 80-х гг. XIX в. выдающимся немецким физиком Г. Гельмгольцем. Имя электрону было дано в 1891 г., еще до его открытия, ирландским физиком Дж. Стонеем в таких выражениях:

«При электролизе каждой химической связи, которая разрывается, присуще определенное количество электричества, одинаковое во всех случаях... Заряд такой величины связан в химическом атоме с каждой связью... Эти заряды, которые будет удобно называть «электронами», не могут быть отделимы от атома; они не проявляют себя, если атомы находятся в химическом соединении».

Вы обратили внимание, что в фразе, где вводится термин «электрон» сделано ошибочное утверждение о том, что его невозможно отделить от атома. Это лишь подтверждает, насколько прав был Фарадей, когда писал, что с некоторым подозрением относится к термину «атом», «так как хотя об атомах очень легко говорить, но весьма трудно составить себе ясное представление об их природе».

Интересно, что прогресса в изучении электрических частиц физики добились именно тогда, когда отделили частицу, несущую элементарный заряд, от атома. Это удалось сделать, пропуская через воздух электрический ток — создавая газовый разряд.

История исследования электрических разрядов в газах сложна и запутана. Этому способствовали особенности самого физического явления — вид, характер разряда зависит от множества причин. Следить за перипетиями исследований токов в газах мы просто не имеем возможности и поэтому отметим среди них лишь одно событие, имеющее непосредственное отношение к исторической судьбе электрона. Речь идет об открытии так называемых катодных лучей.

На примере работы Кулона, посвященной кручению тонких нитей, мы уже видели, как тесно взаимосвязаны

различные области физики: продвижение в изучении упругих свойств нитей по отношению к кручению привело в конечном итоге к прогрессу электрических исследований. Изучение электрического разряда в газах дает нам еще один пример подобного рода. В 1855 г. немецкий физик

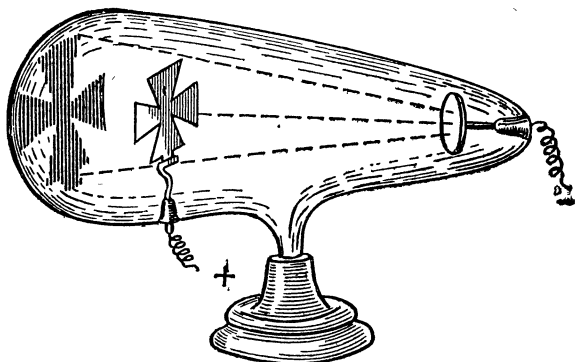


Рис. 41. «Крест» Крукса

Г. Гейсслер изобрел вакуумный насос нового типа (ртутный насос), позволивший резко снизить остаточное давление в различных трубках. Понижение давления привело к обнаружению новых явлений. В 1869 г. немец В. Гитторф, экспериментируя с разрядными трубками низкого давления, заметил, что во время разряда стекло трубки испускает свечение. Возникновение этого свечения было объяснено воздействием на стекло некоторого агента, источником которого является катод. Позднее этому агенту было дано название «катодные лучи».

В течение ряда лет физики разных стран интенсивно исследовали катодные лучи. Важнейший вклад в эти исследования внес английский ученый У. Крукс. Он сумел доказать, что катодные лучи могут оказывать механическое действие. В его опыте под действием катодных лучей начинала вращаться «мельница», помещенная в откачанный сосуд, где возбуждался разряд. С помощью специальной трубки с крестом (рис. 41) ученому удалось показать, что лучи распространяются прямолинейно — крест отбрасывал тень на стенку трубки. Крукс продемонстрировал, что катодные лучи оказывают тепловое воздействие на преграду, на которую они падают. Наконец, он поставил опыт по отклонению катодных лучей в магнитном поле

(рис. 42). Этот опыт показал, что лучи ведут себя как электрические токи.

На основе своих опытов Крукс выдвинул гипотезу (1879 г.) о том, что катодные лучи представляют собой заряженные молекулы остаточного газа, которые находятся в ультраразреженном состоянии — в четвертом состоянии вещества (в дополнение к твердому, жидкому и газообразному). Он считал, что «при изучении этого четвертого состояния вещества создается впечатление, что мы имеем, наконец, в своем распоряжении «окончательные» частицы,

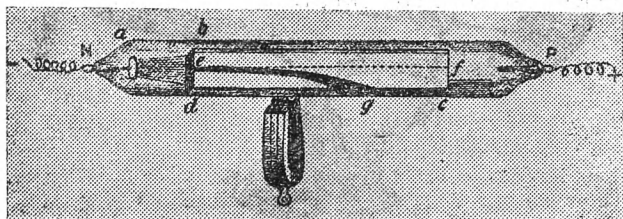


Рис. 42. Схема опытов Крукса по отклонению катодных лучей в магнитном поле

которые мы можем с полным основанием считать лежащими в основе физики Вселенной». Это утверждение Крукса оказалось во многом пророческим, но, как часто случается, оно не было единодушно одобрено современниками. Дискуссия о природе катодных лучей составила яркую страницу в истории физики 80—90-х гг. XIX в.

Немецкие физики практически единодушно отрицательно отнеслись к идее Крукса, поскольку в начале 80-х гг. были обнаружены факты, которые, казалось бы, противоречили представлению о катодных лучах как потоке заряженных частиц. Г. Герц пытался обнаружить заряд, переносимый катодными лучами. Для этого лучи задерживались специальным проводником, соединенным с электрометром. И электрометр не обнаруживал зарядку проводника! Далее Герц попробовал добиться отклонения катодных лучей в электрическом поле. Но катодные лучи упорно не хотели поддаваться воздействию электрического поля!

Мы знаем, что Герц был выдающимся экспериментатором. На его научном «счете» такие важные работы, как доказательство существования электромагнитных волн, предсказанных Максвеллом, и изучение их свойств. Он открыл фотоэлектрический эффект, ставший одним из первых, яв-

лений, получивших объяснение на основе квантовых представлений об излучении. Но каждый, даже самый талантливый исследователь имеет право на ошибку — ведь он идет по неизведанному пути. В опытах с катодными лучами Герц ошибся. Основной причиной его неудачи было чересчур высокое давление в разрядной трубке. Но не будем слишком строги — ведь эти злополучные эксперименты Герц проводил еще в самом начале своей научной деятельности.

Таким образом, в физике 80-х — начале 90-х гг. XIX в. сложилась любопытная ситуация: дискуссия о катодных

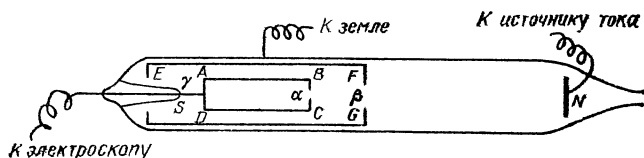
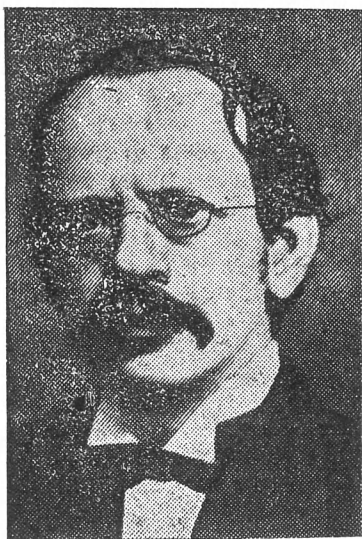


Рис. 43. Схема опыта Перрена

лучах приняла почти национальный характер. Англичане отстаивали представление о лучах как потоке частиц, немцы считали, что это продольные волны, распространяющиеся в электромагнитном эфире. «Третьим судьей» в этом споре выступило, как и полагается, лицо нейтральное — французский физик Ж. Перрен. В 1895 г. он сообщил об опыте, с помощью которого доказал, что «катодные лучи обладают отрицательным электрическим зарядом». Схема эксперимента Перрена показана на рис. 43. Внутри разрядной трубки находился катод N и анод, выполненный в виде полого цилиндра EFG с отверстием β . Внутри цилиндрического анода помещался еще один полый проводящий цилиндр ABCD с отверстием α , который был изолирован от анода и с помощью проводника S соединен с электрометром. Во время разряда в трубке катодные лучи, ускоряясь в пространстве между катодом и анодом, по инерции пролетали сначала в отверстие β , а затем и α , и попадали на цилиндр ABCD. Электрометр фиксировал, что этот цилиндр заряжается отрицательно.

Несмотря на важность опытов Перрена, у них, как, впрочем, и практически у всех предшествующих опытов по исследованию катодных лучей, был весьма существенный недостаток — они были чисто качественными. А качественные опыты можно интерпретировать по-разному. Для того чтобы окончательно решить вопрос о природе катод-



Джозеф Джон Томсон

ных лучей, требовалось определить величину их заряда.

За решение этой задачи взялся английский физик Джозеф Джон Томсон. Он сыграл решающую роль в истории открытия электрона, и поэтому о нем стоит рассказать подробнее.

Дж. Дж. Томсон прожил долгую жизнь и оставил яркий след в науке конца XIX—начала XX вв. Он родился в 1856 г. в семье книготорговца в местечке близ Манчестера. Томсон получил неплохое начальное образование и поступил в Оуэнс-колледж, рассчитывая стать инженером. Там он учился у известных физиков О. Рейнольдса,

Г. Роско и Б. Стюарта, причем последний привлек молодого Томсона к научным исследованиям в области электричества. По традиции того времени из Оуэнс-колледжа Томсон перешел для завершения образования в Тринити-колледж Кембриджского университета. Это было в 1876 г., когда в Кембридже под руководством Максвелла уже действовала Кавендишская лаборатория. Этот учебно-научный центр привлек внимание Томсона, но, хотя он начал там работать, с Максвеллом встретиться ему так и не удалось...

В 1880 г. Томсон закончил учебу, причем на выпускном экзамене он был вторым вслед за Дж. Лармором, также ставшим впоследствии известным физиком. В 1881 г. Томсон был избран членом Тринити-колледжа, с которым оказалась связанной вся его последующая жизнь.

Первые научные работы Томсона в Кембридже касались проблем динамики. Так, в 1882 г. он получил премию Адамса за исследование взаимодействия вихрей в идеальной жидкости. Это «вихревое» направление Томсон не представлял в течение многих лет. Причина привязанности ученого к вихрям, весьма любопытным объектам, крылась в характере общезначимых взглядов Томсона. Он был типичным представителем механицизма — направления, в

рамках которого все физические явления должны были рассматриваться на основе механических моделей. Неудивительно поэтому, что Томсон пытался использовать модель вихрей и для объяснения взаимодействия магнитов и даже... для описания химических эффектов.

Приверженность к механическим моделям не мешала Томсону вести теоретические исследования, в которых развивалась электромагнитная теория Максвелла. В частности, он выдвинул идею о так называемой электромагнитной массе, т. е. об инертных свойствах, присущих заряженным частицам. В Кембридже Томсон вел и экспериментальную работу. Однако поначалу в этой области у него не все шло гладко. В начале 80-х гг. он опубликовал ошибочные результаты, касавшиеся измерения отношения единиц заряда в электростатической и электромагнитной системах. Эта неудача едва не подорвала веру в способности Томсона как экспериментатора.

В 1884 г. известный английский физик Дж. Рэлей, преемник Максвелла, ушел с поста Кавендишского профессора и главы лаборатории. На образовавшуюся вакансию было несколько кандидатов, но руководители университета по причинам, о которых теперь трудно судить, предпочли Томсона. Так, возможно несколько неожиданно для себя самого, Томсон стал во главе Кавендишской лаборатории, когда ему едва исполнилось двадцать восемь лет. Надо сразу же отметить, что руководителям университета не пришлось жалеть о своем выборе. За четверть века, в течение которой Томсон возглавлял Кавендишскую лабораторию, в ее стенах прошли подготовку семь будущих лауреатов Нобелевской премии, двадцать семь членов Лондонского Королевского общества и множество профессоров-физиков, работавших затем во многих странах мира.

Молодой Кавендишский профессор не собирался полностью отдавать себя административной деятельности. Он продолжил исследовательскую работу. Заинтересовавшись газовым разрядом, который Томсон считал подобным току в электролитах, ученый поставил своей целью определить величину заряда, переносимого частицами, составлявшими катодные лучи. Результаты опытов, начатых в 1895 г., были опубликованы Томсоном в 1897 г. Этот год и считается годом «рождения» электрона.

Схема одной из установок Томсона показана на рис. 44. По своему устройству она очень напоминает трубку электронного осциллографа с одной парой пластин. Катодные лучи, исходящие из катода *K*, ускорялись в пространстве

между катодом и анодом A , проходили через щели в аноде и металлической пробке B (щели играли роль диафрагм, формировавших узкий пучок лучей) и попадали в пространство между двумя параллельными алюминиевыми пластинами длины 5 см и ширины 2 см, расстояние между которыми составляло 1,5 см. Если на пластины не подавалось

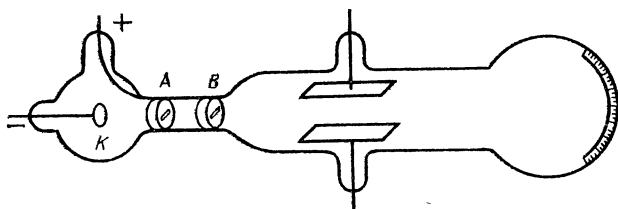


Рис. 44. Схема установки Томсона

напряжение, то катодные лучи проходили по прямой до фосфоресцирующего экрана, где оставляли резко очерченный след. Если же на пластинах имелась разность потенциалов, то под действием вертикального электрического

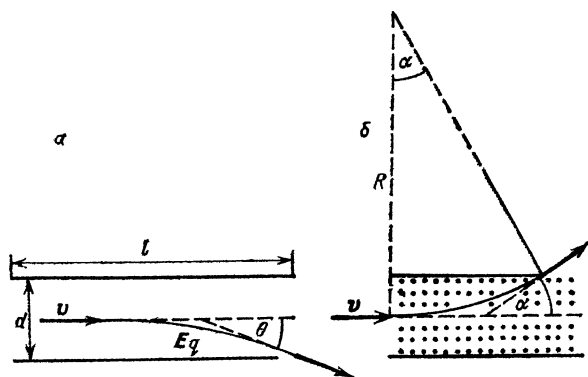


Рис. 45. К расчету смещения катодных лучей в электрическом поле (a) и в магнитном поле (б)

поля лучи отклонялись и след на экране смещался. Смещение можно было измерять по шкале, наклеенной на внешней поверхности трубки.

Попробуем рассчитать угловое отклонение луча. Если на пластины плоского конденсатора (рис. 45, a) подано напряжение U , то между пластинами возникает электрическое поле напряженностью $E=U/d$, где d — расстояние

между пластинами. (Мы будем пренебрегать краевыми эффектами и считать поле в любой точке внутри конденсатора однородным; вне конденсатора $E=0$.) Тогда сила, стремящаяся отклонить заряженную частицу e в вертикальном направлении, равна $F=eE$. Если частица до попадания в конденсатор имела скорость v , направленную по горизонтали, то время ее пролета в конденсаторе равно $t=l/v$, где l — длина конденсатора. Двигаясь в вертикальном направлении равноускоренно, частица за это время приобретет вертикальную скорость

$$v' = \frac{F}{m} t = \frac{eE}{m} \frac{l}{v}.$$

Тогда тангенс угла θ , образованного вектором скорости частицы при ее вылете из конденсатора с направлением ее исходного движения, определится соотношением

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{v'}{v} = \frac{eE}{m} \frac{l}{v^2}. \quad (6.1)$$

При больших скоростях частицы $\operatorname{tg} \theta \approx \theta$.

Однако даже если в опыте будет определен угол θ , рассчитать величину e/m , являющуюся характеристикой частицы, не удастся, пока не будет известна скорость v . Томсон использовал два способа постановки эксперимента для решения этой задачи. В первом скорость определялась по тепловому эффекту, который производили катодные лучи, падающие на препятствие. Во втором было применено магнитное отклонение заряженных частиц. Этот способ мы рассмотрим подробнее.

Представим, что в области между пластинами электрического поля нет, но зато создано однородное магнитное поле B , направленное перпендикулярно исходной скорости частицы и параллельно плоскости пластин (рис. 45, б). Тогда на частицу в области между пластинами будет действовать так называемая сила Лоренца, равная $F_{\text{Л}}=evB$, вызывающая движение частицы по окружности. Действительно, сила Лоренца всегда перпендикулярна вектору скорости v и вектору B и вследствие этого не меняет по модулю v . Поэтому она играет роль центростремительной силы, величина которой постоянна. На рис. 45 буквой R обозначен радиус окружности, по которой движется частица. Если допустить, что угол α отклонения частицы при пролете между пластинами мал, то мы можем считать, что все время пролета $t=l/v$ на частицу действует сила $F_{\text{Л}}=evB$, создающая ускорение $a'=evB/m$. Тогда угол α

можно определить аналогично случаю движения частицы в электрическом поле:

$$\operatorname{tg} \alpha \approx \alpha = v'/v,$$

где $v' = at = eBl/m$. Таким образом,

$$\alpha = \frac{eBl}{mv}.$$

Теперь допустим, что электрическое и магнитное поля включены так, что отклонение, создаваемое электрическим полем, компенсируется отклонением, созданным влиянием магнитного поля. Тогда $\alpha = \theta$. Из этого условия нетрудно получить выражение для e/m , из которого исключено значение скорости:

$$\frac{e}{m} = \frac{E\theta}{lB^2}. \quad (6.2)$$

Томсон поставил опыты по описанной схеме, в которых катодные лучи получались в трубках, заполненных различными газами (воздухом, водородом, углекислым газом). Он варьировал также давление газов и менял материал электродов. При всех изменениях в постановке опыта ученый получал близкие значения отношения e/m — они лежали в пределах от $9,1 \cdot 10^8$ до $6,7 \cdot 10^8$ (в единицах «заряд CGSM/миллиграмм»). Из полученных результатов Томсон сделал вывод, что «величина m/e не зависит от природы газа и что ее величина 10^{-1} очень мала по сравнению с величиной 10^{-4} , которая представляет наименьшее до сих пор известное значение этого отношения для водородного иона при электролизе».

Сравнение отношений e/m (или, как у Томсона, m/e) для иона водорода имело принципиальное значение. Оно свидетельствовало о том, что в случае катодных лучей ученые столкнулись с частицей принципиального нового типа. Так в 1897 г. «родился» электрон.

Несмотря на убедительность опытов Томсона с современной точки зрения, и после их постановки высказывались сомнения в правомочности вывода о существовании электрона (или, по терминологии Томсона, «корпускулы»). Потребовалось еще несколько лет, в течение которых накапливались дополнительные свидетельства в пользу выводов Томсона, чтобы идея об электроне стала общепризнанной. Оказалось, что «корпускулы» Томсона проявляют себя и в тонких явлениях, относящихся к спектрам (эффект Зеемана), и в фотоэлектрическом эффекте, и в явлении

радиоактивности (β -лучи). В конечном счете английский физик А. Шустер имел основание заявить, что «научный мир как бы внезапно осознал тот факт, что его фундаментальные понятия оказались революционизированными».

Открытие электрона было звездным часом Дж. Дж. Томсона. (В 1906 г. Томсон был удостоен Нобелевской премии за «теоретические и экспериментальные исследования прохождения электричества через газы».) Но на этом его исследования не закончились. В 1904 г. он предложил ставшую знаменитой модель атома-пудинга, о судьбе которой будет рассказано в гл. 7. Он же стал создателем классической теории рассеяния рентгеновских лучей, которую суждено было опровергнуть одному из иностранных стажеров, пользовавшихся гостеприимством главы Кавендишской лаборатории,— американцу А. Комптону (об этом тоже пойдет речь в гл. 7). Эти работы Томсона, основывавшиеся на представлениях классической физики, способствовали более отчетливому осознанию учеными необычности явлений, наблюдаемых в микромире. Поэтому, хотя выводы Томсона оказались ошибочными, эти его работы высоко оцениваются историками науки. Приверженность к классической физике оказалась у Томсона столь сильной, что он не смог принять новые идеи квантовой теории *). Вследствие этого во второй половине 10-х гг. XX в. научная продуктивность ученого падает. В 1919 г. он передает Кавендишскую кафедру и лабораторию своему ученику Э. Резерфорду. Он сохранил за собой лишь пост главы Тринити-колледжа, который занимал до конца жизни. Дж. Дж. Томсон умер в 1940 г.

Измерение заряда электрона и дискретность заряда

Хотя значение отношения e/m , полученное в опытах Томсона, и свидетельствовало об обнаружении частицы нового типа, исследование нельзя было считать завершенным, пока не был определен ее заряд. Первые

*) Символично, что сын Дж. Дж. Томсона Джордж Паджет Томсон стал одним из авторов открытия, продемонстрировавшего волновые свойства электрона,— дифракции электронов. Это открытие доказало правильность новых представлений о свойствах микрочастиц, развивавшихся в рамках квантовой механики. За открытие дифракции электронов Дж. П. Томсон, вместе с американским физиком К. Дэвиссоном, был удостоен Нобелевской премии (1937 г.).

эксперименты, нацеленные на определение заряда электрона, провел ученик Дж. Дж. Томсона Дж. Таунсенд. В его опытах был использован тот факт, что заряженные частицы являются центрами конденсации влаги. С помощью весьма сложной установки Таунсенд получил облако тумана, образованного мелкими капельками воды. Зная полный заряд этого облака и определяя число капелек в нем, ученый на основе предположения о том, что каждая капля связана только с одним ионом, находил заряд этого иона. Итогом опытов Таунсенда стали значения зарядов положительных и отрицательных ионов, равные соответственно

$$e_+ = 2,4 \cdot 10^{-10} \text{ ед. заряда CGSE } (8 \cdot 10^{-20} \text{ Кл}),$$

$$e_- = 3,1 \cdot 10^{-10} \text{ ед. заряда CGSE } (1 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}).$$

Эти результаты не отличались особой точностью, хотя по порядку величины значение e , как мы теперь знаем, и было близко к значению элементарного заряда. Томсон решил уточнить данные Таунсенда. В опытах, проведенных в 1899 г., Томсон определял заряд электронов, получавшихся при фотоэффекте. Было найдено среднее значение

$$e = 6,8 \cdot 10^{-10} \text{ ед. заряда CGSE } (2,3 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}).$$

Однако и это значение не удовлетворяло физиков — данные различных измерений (а их проводили не только в Кавендишской лаборатории) и оценок все же не слишком хорошо согласовывались между собой. Впрочем, самого Томсона такое положение, возможно, и не слишком беспокоило — он как экспериментатор никогда не ставил во главу угла определение «следующего десятичного знака». Тем не менее увеличение точности определения заряда электрона в первое десятилетие XX в. становилось весьма актуальной задачей. В ее решении преуспел ученый, который до этого не был известен в мире физики, — американец Р. Милликен.

Роберт Артур Милликен родился в 1868 г. в Иллинойсе в семье священника конгрегационалистской церкви. Поначалу он не выказывал каких-то особенных способностей к науке. Учась в колледже небольшого провинциального городка, Милликен осваивал традиционные гуманитарные предметы и, возможно, так и не столкнулся бы с физикой всерьез, если бы не случайность. Учитель греческого языка, расположенный к Милликену, предложил ему вести физику в классах подготовительной школы, имевшейся при колледже. Милликен вспоминал, что когда он стал возражать, что совершенно не знает физики, то получил ответ:

«Любой, хорошо успевающий по моему греческому языку, может учить физику». После окончания колледжа Милликен еще два года преподавал на подготовительном отделении, а затем поступил в Колумбийский университет, где оказался единственным студентом, специализировавшимся по физике. Уровень преподавания физики в университете был невысок, и Милликен пользовался любой возможностью, чтобы углубить свое образование. Целое лето в период учебы он провел, работая у одного из самых известных в то время американских физиков А. Майкельсона в Чикагском университете. Знакомство с Майкельсоном позднее сыграло в жизни Милликена большую роль.



Роберт Артур Милликен

Защитив докторскую диссертацию в Колумбийском университете, как и многие другие молодые американские ученые того времени, Милликен отправился на стажировку в Европу, где слушал лекции М. Планка, В. Нернста, А. Пуанкаре. Однако стажировка продлилась всего лишь год — летом 1896 г. Милликен получил телеграмму от Майкельсона с предложением стать его ассистентом в Чикаго. Для Милликена это было большой удачей, поскольку физика в то время не была популярным предметом и получить место преподавателя было не так-то просто. Он сразу же вернулся на родину.

В это время Милликену было уже 28 лет. По современным меркам он уже упустил лучшие годы для начала серьезных исследований. Впрочем, его шеф Майкельсон и не собирался привлекать Милликена к научной работе; он поручил новому ассистенту подготовку учебных пособий по курсу физики. Учебные заведения США остро нуждались в современных учебниках по физике, которые учитывали бы специфику национальной системы образования. До этого американцам приходилось пользоваться, в основном, ли-

тературой, изданной в Европе. Двенадцать лет жизни отдал Милликен совершенствованию преподавания физики в США. Им были подготовлены учебники по общей физике и руководства по лабораторному физическому практикуму. Лишь в 1907 г. Милликен, автор четырех учебников и всего лишь пяти малозначительных статей, решает заняться измерением заряда электрона. В это время ученому было уже почти сорок лет...

Милликен начал с повторения опытов, которые провел еще в 1903 г. в Кавендишской лаборатории Г. Вильсон. Суть опытов состояла в наблюдении за движением вершины облака тумана между горизонтальными пластинами, когда на них было подано напряжение, и в отсутствие напряжения. По различию в движении заряженных капелек в этих двух случаях можно было оценить их заряд. Но очень скоро Милликен понял, что метод Вильсона не позволит ему существенно продвинуться вперед. Впрочем, рассказывая о работе Милликена, мы можем опереться на его автобиографические воспоминания — это сделает изложение событий более точным:

«Было ясно, что метод должен быть радикально изменен, чтобы избавиться от вышеупомянутой неопределенности (в фиксации вершины облака.— С. Ф.) и других, столь же неприятных, таких как конвекционные токи, быстрое испарение заряженных капель воды в облаке и т. д. и т. п.

Мой первоначальный план состоял в том, чтобы использовать электрическое поле, которое должно быть достаточно сильным не только для небольшого увеличения скорости падения верхней поверхности ионизированного облака, но и достаточно сильным для удержания вершины облака в равновесии так, чтобы можно было непосредственно наблюдать скорость испарения и учесть его в расчете. (...)

В качестве первого шага в области предполагаемых усовершенствований я в 1906 г. сконструировал небольшую по габаритам батарею на 10 000 вольт (что само по себе было в то время немалым достижением), которая создавала поле, достаточно сильное, чтобы удерживать верхнюю поверхность облака Вильсона в подвешенном состоянии, как «гроб Магомета» между небом и землей. (...) Когда у меня было все готово, произведено расширение и таким образом получено облако, я поворотом рубильника включил электрическое поле. *То, что я увидел, было мгновенным и полным исчезновением облака — иными словами, не осталось верх-*

ней поверхности облака для наведения на них нитей (теле-скопа.— С. Ф.), как это делал Вильсон и собрался делать я. Это, очевидно, означало, что предположение, обычно принимавшееся в то время при работе с «туманной камерой», а именно что каждая капля несет единичный заряд, было неверным. (...) Сначала мне показалось, что *это полное исчезновение облака при включении сильного электрического поля между верхней и нижней пластинами моего воздушного конденсатора испортило опыт...* однако когда я повторил испытание, то сразу же увидел нечто гораздо более важное, чем верхняя поверхность облака, на что следовало наводить нити зрительной трубы. Повторные опыты показали, что после рассеивания облака в сильном электрическом поле на его месте *можно было различить несколько отдельных водяных капель.* Это были капли, которые давали возможность получить именно то отношение заряда к массе, или весу, которое было необходимо, чтобы действующую на каплю силу тяжести, направленную вниз, можно было скомпенсировать силой, действующей со стороны электрического поля на электрический заряд капли и направленной вверх. (...) Так возник метод, который я называл «методом уравнивания капель» для определения e — очень большой успех по сравнению с предшествующими методами».

Попробуем дать количественный анализ метода Миллика. Пусть сначала электрическое поле отсутствует. Тогда капля воды массы m и радиуса r будет падать в воздухе со скоростью v , при которой сила тяжести уравнивается силой вязкого трения:

$$mg = F_{\text{тр}}.$$

(При этом мы пренебрегаем силой Архимеда, действующей на каплю в воздухе.) Сила вязкого трения $F_{\text{тр}}$ при небольших скоростях движения подчиняется закону Стокса

$$F_{\text{тр}} = 6\pi\mu r v,$$

где μ — коэффициент вязкого трения. Если учесть, что $m = \frac{4}{3}\pi\rho r^3$, где ρ — плотности воды, то из двух предшествующих формул можно получить соотношение

$$v = \frac{2}{9} \frac{g\rho r^3}{\mu}. \quad (6.3)$$

Если теперь действием электрического поля на заряд капли q добиться ее равновесия, то будет выполняться равенство

$$mg = qE,$$

где E — напряженность поля между пластинами. Перепишем последнее выражение в виде

$$\frac{4}{3} \pi r^3 \rho g = qE. \quad (6.4)$$

Тогда уравнения (6.3) и (6.4) образуют систему относительно r и q . Решив ее, получаем

$$q = \frac{18\pi}{V\sqrt{2}} \frac{(\mu v)^{3/2}}{V\rho g}.$$

Таким образом, если определить v , то можно, воспользовавшись независимыми измерениями величин E , g , μ и ρ , найти q . Милликен провел соответствующие измерения, и ему удалось определить заряды различных капель. Но ведь при этом не было оснований считать, что какой-либо из определенных зарядов равен по модулю заряду электрона. Но эти заряды могли быть кратны e ! Следовательно, необходимо было вычислить наименьшее общее кратное полученных зарядов. Оно оказалось равным $1,55 \cdot 10^{-19}$ Кл. В ходе экспериментов Милликен нашел способ для проверки своих выводов:

«В связи с этими опытами мне удалось наблюдать явление, которое тогда меня очень заинтересовало, так как оно открывало совершенно новые возможности. Работая над этими взвешенными каплями, я несколько раз забывал заслонять их от лучей радия *). Тогда мне случалось замечать, что время от времени одна из капель внезапно изменяла свой заряд и начинала двигаться вдоль поля или против него, очевидно, захватив в первом случае положительный, а во втором случае отрицательный ион. Это открывало возможность измерять с достоверностью не только заряды отдельных капель, как это я делал до тех пор, но и заряд отдельного атмосферного иона. В самом деле, измеряя скорость одной и той же капли два раза, один раз до, а второй раз после захвата иона, я, очевидно, мог совершенно исключить свойства капли и свойства среды и оперировать с величиной, пропорциональной только заряду захваченного иона».

Поясним мысль Милликена. Пусть экспериментатор не добивается строгого равновесия капли и при включенном поле она движется вверх со скоростью v_2 (без поля она

*) С помощью радиоактивного излучения радия Милликен создавал первичную ионизацию паров воды.

падает со скоростью v_1). Тогда можно записать соотношение

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{mg}{Eq - mg}.$$

Отсюда

$$q = \frac{mg}{Ev_1} (v_1 + v_2).$$

Если заряд капли меняется и становится равным q' , то она, очевидно, начинает двигаться с иной скоростью — v'_2 . Нетрудно видеть, что изменение заряда Δq равно

$$\Delta q = \frac{mg}{Ev_1} (v'_2 - v_2).$$

Если бы масса капли оставалась длительное время неизменной, то можно было бы проследить за скачками заряда и исследовать, происходят ли изменения непрерывно или же определенными порциями, и в последнем случае найти минимальную величину этой порции. Но в этом-то и была загвоздка! Водяные капли быстро испарялись, что заставляло сомневаться в достоверности результатов.

Еще не решив проблему испарения капель, Милликен выступил с сообщением о своих опытах на конференции Британской ассоциации содействия развитию науки в Виннипеге (1909 г.). На этой конференции присутствовали Дж. Дж. Томсон, Э. Резерфорд, Дж. Пойнтинг, Дж. Лармор. Сообщение Милликена вызвало интерес, но были сделаны и замечания... О пользе научных дискуссий свидетельствуют воспоминания Милликена:

«Возвращаясь в Чикаго с этой конференции, я смотрел из окна моей почтовой кареты на равнины Манитобы и внезапно сказал себе: «Какой я был глупец! Пытаться таким грубым способом прекратить испарение воды в водяных капельках в то время, как человечество затратило последние триста лет на усовершенствование масла для смазки часов, стремясь получить смазочное вещество, которое вообще не испаряется!» (...)

Когда я вернулся в Чикаго, у входа в лабораторию я встретил Майкельсона. Мы уселись на пороге и начали болтать. Я спросил его, насколько, по его мнению, точно измерил он скорость света. Он ответил, что измерение произведено с точностью примерно до одной десяти тысячной. «Так вот, — сказал я, — я придумал метод, при помощи которого смогу определить величину заряда электрона с точностью до одной тысячной, или грош мне цена».

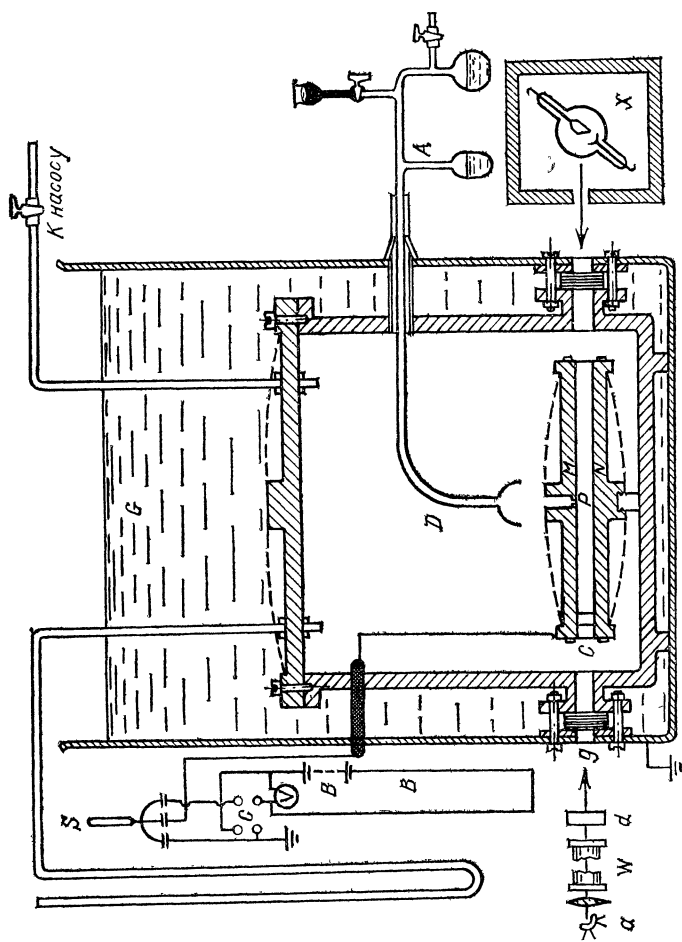


Рис. 46. Схема установки Милликена

Используя не водяные, а масляные капли, Милликен добился поставленной цели. В итоге его установка приняла вид, показанный на рис. 46. Медные, тщательно отполированные пластины M и N диаметра 22 см (расстояние между ними составляло 15 мм) были помещены внутри камеры, в которой могло изменяться давление, измерявшееся манометром. На пластины с помощью батареи B могло подаваться напряжение (10 000 В). Камера была окружена масляной ванной G , служившей для поддержания постоянной температуры. Капли масла вдувались через распылитель A и цилиндр D . Оказавшаяся между пластинами капля p освещалась светом дуговой лампы a , проходившим через фильтры w и d (сосуды с водой и хлористой медью) для поглощения инфракрасного излучения, которое могло нагревать каплю, а затем через окна g и c . Для ионизации воздуха между пластинами использовалось рентгеновское излучение от трубки x , попадавшее в пространство между пластинами через особые окна. Напряжение от батареи B через переключатель CS подавалось на пластины и контролировалось вольтметром V . Наблюдения за каплями велись с помощью короткофокусного телескопа, не показанного на рисунке.

Измерения по методу Милликена были весьма трудоемкими. Однако они приносили ученому глубокое удовлетворение. Вспоминая об этой работе, Милликен писал:

«Меня зачаровывала та абсолютная уверенность, с которой можно было точно пересчитать количество электронов, сидевших на данной капле, будь это один электрон или любое их число, до сотни включительно. Для этого требовалось лишь заставить исследуемую каплю проделать большую серию перемещений вверх и вниз, точно измерив время, потраченное на каждое перемещение, а затем вычислить наименьшее общее кратное довольно большой серии скоростей».

Оказалось, что заряд капли меняется почти всегда на одну и ту же величину и лишь изредка — на величину в два или три раза большую, «независимо от того, какие именно капли употреблялись для захвата ионов и в каком газе взвешены эти капли. Во многих случаях капля наблюдалась в течение пяти или шести часов, и за это время она захватывала не восемь или десять ионов, как в описанном опыте (речь идет о конкретном эксперименте, данные которого Милликен рассмотрел подробно.— С. Ф.), но сотни их. В общей сложности я наблюдал таким путем захват многих тысяч ионов, и во всех случаях захваченный заряд, опре-

деленный, как указано выше, либо был в точности равен наименьшему из всех захваченных зарядов, либо равнялся небольшому целому, кратному этой величины. В этом заключается прямое и неопровержимое доказательство того, что электрон не есть «статистическое среднее», но что все электрические заряды на ионах либо в точности равны заряду электрона, либо представляют небольшие целые, кратные этого заряда».

Опыты Милликена продолжались не один год. В 1913 г. он получил значение элементарного заряда

$$e = 4,774 \cdot 10^{-10} \text{ ед. заряда CGSE } (1,591 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}).$$

Впоследствии он уточнял этот результат, однако эти уточнения уже не были столь важны — существование элементарного заряда было доказано и его значение определено с достаточной точностью.

После исследований по определению заряда электрона Милликен обращается к новой проблеме — проверке уравнения Эйнштейна для фотоэффекта. И здесь он добился блестящего результата. Ученый не только подтвердил справедливость этого уравнения, но и дал новое независимое определение важнейшей физической константы — постоянной Планка h . Когда это исследование было завершено, оказалось, что Милликен всего за несколько лет превратился из малоизвестного автора учебников по физике в одного из лидеров американской науки. Это, конечно, не могло не сказаться на его карьере. (В 1923 г. Милликену была присуждена Нобелевская премия по физике «за исследование в области элементарных зарядов и фотоэлектрического эффекта».)

После избрания его членом Национальной академии наук США (1915 г.) Милликен начинает активную деятельность в этой организации, стремясь укрепить позиции молодой американской физики. Он становится научным консультантом фирмы «Вестерн Электрик». В 1917 г. Милликен занимает пост вице-президента и руководителя исследовательского отдела Национального исследовательского совета, организованного при академии наук, целью которого было привлечение ученых к работам, связанным с обороной.

После окончания первой мировой войны Милликен принимает предложение возглавить вновь созданный Калифорнийский технологический институт и одновременно стать директором его физической лаборатории. Здесь проявились блестящие организаторские способности Милликена. Во многом благодаря его усилиям и научной компе-

тентности Калтех, как сокращенно называют теперь этот учебный и исследовательский центр во всем мире, превратился в один из ведущих вузов США. В нем в разное время работали такие известные физики, как П. Эпштейн, Р. Оппенгеймер, Р. Фейнман.

В 20—30-е гг. Милликен проводил исследования в области физики космических лучей. Он, в частности, предложил провести опыт, в котором измерялось изменение ионизации, создаваемой космическими лучами, с глубиной в горных озерах в Калифорнии. Сравнение зависимостей, полученных для двух озер, подтвердило предположение, что ионизирующее излучение приходит из космоса. Следует отметить, что в вопросе о происхождении космических лучей Милликен придерживался ошибочных взглядов. Тем не менее его дискуссия по этому вопросу с другим известным американским физиком А. Комптоном способствовала проведению крупномасштабных исследований, благодаря которым были уточнены представления о свойствах космических лучей.

В конце 30-х гг. Милликен отошел от активной исследовательской деятельности, хотя продолжал вести административную и литературную работу. Он умер в 1953 г. в возрасте восьмидесяти пяти лет.

Конечно, история определения элементарного заряда в действительности не закончилась работами Милликена. Впрочем, здесь удалось упомянуть далеко не обо всех исследованиях этого выдающегося экспериментатора. Автору очень хотелось бы рассказать о весьма любопытных событиях, связанных с электроном, в частности о дискуссии вокруг «открытия» частицы с зарядом, меньшим e , так называемого «субэлектрона», о котором объявил в 1910 г. австрийский физик Ф. Эренгафт, о предсказании и открытии «положительного электрона» — позитрона. Но нельзя объять необъятное. В этом параграфе мы рассказали об открытии важнейшего свойства заряда — его дискретности. Теперь обратимся к исследованиям, связанным с этим свойством, проведенным уже в наше время.

В поисках дробных зарядов

Дискретность электрического заряда после опытов Милликена и последующих многочисленных проверок полученных в них результатов стала рассматриваться как одна из важнейших особенностей физической реальности. Уверенность в отсутствии зарядов, меньших заря-

да электрона, просуществовала в физике более пятидесяти лет. Лишь в 1964 г. американские физики М. Гелл-Манн и Дж. Цвейг независимо друг от друга выдвинули гипотезу о существовании нового вида частиц (им было дано имя *кварков*), которые должны были обладать зарядами $+\frac{2}{3}e$ и $-\frac{1}{3}e$. Эта гипотеза позволяла объяснить целый ряд явлений микромира и была с интересом воспринята учеными многих стран. Естественно, что перед экспериментаторами встала задача обнаружения кварков.

Гипотетические частицы оказались весьма капризными объектами. Как физики ни старались, им не удавалось обнаружить дробный заряд в свободном состоянии. Оговорка о поисках свободных кварков сделана здесь не случайно. Сама кварковая гипотеза была выдвинута для объяснения строения определенного класса частиц, называемых адронами (к этому классу, в частности, относятся протон и нейтрон). Физики получили экспериментальные свидетельства того, что кварки в связанном состоянии («внутри» адронов) действительно существуют, а вот отдельный кварк («вне» адронов) никак зарегистрировать не могли. И тогда был поставлен на первый взгляд довольно неожиданный вопрос: а могут ли вообще существовать свободные кварки? К настоящему времени большинство физиков разделяют точку зрения, что кварки могут существовать только в связанном состоянии.

История поиска кварков не лишена драматизма. Так, в 1969 г. экспериментаторы из Стэнфордского университета (США) сообщили об обнаружении свободных кварков. Но в наши дни свидетельство, полученное в одной, пусть даже весьма авторитетной лаборатории, не получает признания, пока его не подтвердят другие исследователи. А повторить результаты стэнфордцев не удалось. Выяснилось, что их изощренная методика не свободна от недостатков. Сенсация не состоялась...

Однако для нашей темы отрицательные результаты попыток обнаружить свободные кварки интересны тем, что соответствующие опыты дали новые подтверждения «элементарности» заряда электрона. В связи с этим мы расскажем об одном из опытов, посвященных поискам свободных кварков, который провели в 1970 г. советские ученые В. Б. Брагинский, Л. С. Корниенко и С. С. Полосков.

Идея опытов Брагинского, Корниенко и Полоскова состояла в наблюдении колебаний небольшого тела в переменном электрическом поле. Допустим, что с помощью специального устройства маленький шарик массы m удержи-

вается в положении устойчивого равновесия между пластинами плоского конденсатора (рис. 47). Этот шарик по случайным причинам может обладать некоторым избыточным электрическим зарядом q (подобно капле масла в опыте Милликена). Тогда при подаче на пластины конденсатора некоторой разности потенциалов на этот шарик в горизонтальном направлении начнет действовать сила со стороны электрического поля, создаваемого зарядом на пластинах. Под действием этой силы шарик сместится из положения равновесия. Поскольку исходное положение равновесия устойчивое, то вследствие смещения шарика возникнет сила, стремящаяся вернуть его в это положение. Это означает, что возникнут колебания шарика в горизонтальном направлении с некоторой частотой ω_0 , которые вследствие потерь на трение о воздух будут постепенно затухать. Если же включать не постоянное поле, а периодически менять его по величине (особенно удобно, если это изменение происходит по гармоническому закону $E = E_0 \cos \omega t$, где E_0 — амплитуда напряженности электрического поля, ω — частота, t — время), то возникнут так называемые вынужденные колебания. Амплитуда колебаний шарика при вынужденных колебаниях будет максимальной при резонансе — когда частота ω близка к частоте ω_0 . Можно показать, что эта амплитуда определяется формулой *)

$$A_{\text{рез}} = \frac{qE_0Q}{m\omega_0^2}, \quad (6.5)$$

где q — избыточный заряд шарика, а Q — добротность колебательной системы, которая определяется отношением энергии, запасенной системой, к энергии, расходуемой за один период колебаний на преодоление трения. Качественно зависимость $A_{\text{рез}}$ от q , E_0 , m и Q нетрудно понять. Чем больше q и E , тем больше сила, стремящаяся отклонить шарик из положения равновесия. Уменьшение m приводит к росту $A_{\text{рез}}$, поскольку масса характеризует

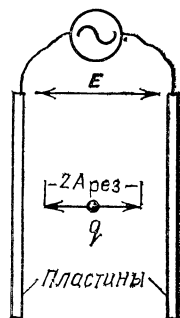


Рис. 47. К объяснению опытов по измерению малых зарядов

*) Вывод формулы (6.5) не слишком сложен, однако требует знания некоторых фактов из теории колебаний, на которых мы не имеем возможности останавливаться; поэтому формула для $A_{\text{рез}}$ дается в готовом виде.

инертность тела, т. е. способность сопротивляться изменению его состояния под действием внешних сил. Установившаяся амплитуда колебаний определяется балансом энергии: внешняя вынуждающая сила за период совершает над колебательной системой работу, которая в точности компенсирует потери энергии за период на трение. Поэтому

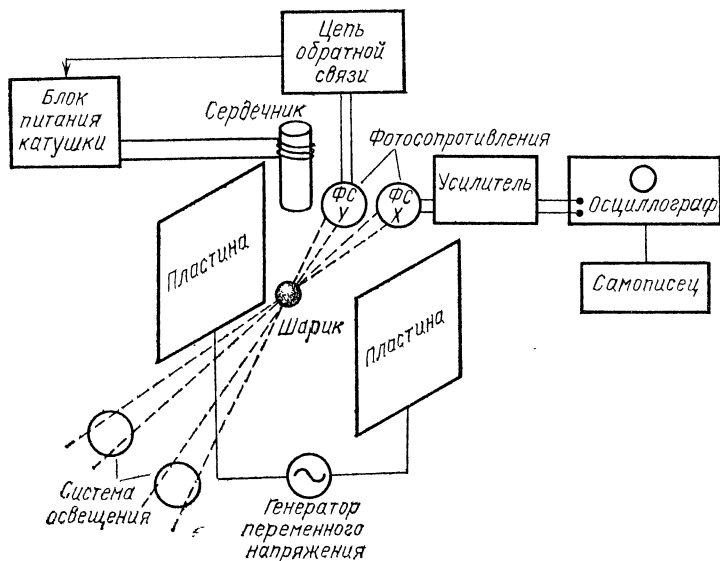


Рис. 48. Схема опытов Брагинского, Корниенко и Полосова, посвященных поискам свободных кварцов

чем больше Q , т. е. чем меньше потери на трение, тем больше амплитуда колебаний при данном значении E_0 .

В формуле (6.5) все величины кроме q в левой части равенства допускают независимое определение. Вследствие этого измерение $A_{\text{рез}}$ дает возможность определить q .

Несколько упрощенная схема реального опыта показана на рис. 48. Железный шарик ($m \approx (2,5 \div 4) \cdot 10^{-5}$ г) подвешивался между пластинами плоского конденсатора с расстоянием между пластинами $d \approx 1$ см с помощью катушки с сердечником: шарик намагничивался под действием магнитного поля, создававшегося катушкой, и сила притяжения к сердечнику компенсировала силу тяжести, которая действовала на шарик. Конденсатор был подключен к источнику переменного напряжения и находился в камере, откуда был откачан воздух до давления $\approx 10^{-2}$ мм рт. ст. (Интересно отметить, что дальнейшая откачка воздуха,

которую нетрудно было осуществить, была невыгодной. Хотя она приводила к росту Q , при уменьшении трения о воздух ухудшалась стабильность колебаний шарика. Таким образом, трение не всегда оказывается врагом экспериментатора!) Вертикальное и горизонтальное смещения шарика определялись с помощью оптической системы: два пучка света освещали шарик и его смещения регистрировались с помощью фоторезисторов (резисторов, изменяющих свое сопротивление при изменении освещения). С фоторезистора, регистрировавшего смещение по оси x , сигнал подавался на усилитель, затем на осциллограф и, наконец, на самописец, на ленте которого фиксировалась зависимость координаты x от времени. С фоторезистора, определявшего смещения шарика по оси y , сигнал подавался на цепь обратной связи, под влиянием которой ток в катушке менялся таким образом, чтобы погасить вредные колебания по оси y .

Эксперименты проводились на частоте $\omega = 13 \text{ с}^{-1}$ при амплитуде электрического поля в конденсаторе $E_0 = 3 \text{ кВ/см}$; добротность колебательной системы Q составляла примерно 50. В этих условиях заряд шарика, равный элементарному электрическому заряду e , приводил к колебаниям с амплитудой $A_{\text{рез}} = 4 \cdot 10^{-5} \text{ см}$. Изменение заряда вызывает изменение амплитуды, причем если заряд меняется дискретно, то и амплитуда испытывает «ступенчатые» вариации. При этом чувствительность установки позволяла фиксировать избыточный заряд, равный $0,1e$. Измерения показали, что амплитуда колебаний шарика всегда меняется ступеньками, соответствующими изменению заряда на целое число e . Это означало, что никаких следов кварков в железном образце, содержащем около 10^{20} протонов и нейтронов, не обнаружено.

За годы, прошедшие после опытов Брагинского и его коллег, с помощью других методик оценка верхнего предела числа свободных кварков к числу протонов была понижена еще на 7 порядков. Теперь считается доказанным, что существует не более 1 свободного кварка на 10^{27} протонов. Таким образом, представление об элементарном свободном заряде, равном по величине заряду электрона, получило впечатляющее подтверждение.

Закон сохранения электрического заряда

Еще в середине XVIII в. создатель первой теории электрических явлений Б. Франклин высказал идею о неумножимости электричества и невозможности его

создания. Собственно, на этой идее и строилась его унитарная теория. В XIX в. М. Фарадей на основе анализа закономерностей электролиза сформулировал закон сохранения электрического заряда на новом уровне, основываясь на представлении о двух типах зарядов.

В наши дни закон сохранения электрического заряда считается одним из фундаментальных законов природы. Он подтверждается всей совокупностью имеющихся в нашем распоряжении фактов. Хотя этот закон, строго говоря, независим от других законов сохранения, в рамках классической электродинамики можно показать его связь с законом сохранения энергии. Известный американский физик-теоретик Ю. Вигнер привел такое доказательство этой связи *).

«Предположим, что с помощью какого-то процесса мы можем создавать заряды в некоторой замкнутой системе. Поместим эту замкнутую систему в клетку Фарадея (иначе говоря, внутрь полого проводника.— С. Ф.), зарядим клетку и создадим определенный заряд. Для этого потребуется затратить некоторое количество энергии E . Поскольку ни одно физическое явление не зависит от абсолютного значения потенциала, количество энергии E не может зависеть от потенциала клетки Фарадея, внутри которой создается заряд. Извлечем затем нашу замкнутую систему (см. рис. 49.— С. Ф.) из клетки Фарадея и перенесем ее подальше от клетки. При этом мы получим некоторое количество работы W (предполагается, что созданный заряд имеет тот же знак, что и заряд, сообщенный клетке.— С. Ф.). Обратим теперь процесс, который привел к образованию заряда, и получим количество энергии E , равное ранее затраченной энергии, поскольку процесс в замкнутой системе не должен зависеть от абсолютного значения электрического потенциала, под которым находится система. Разряженную систему вновь поместим в клетку Фарадея. При этом нам не придется производить никакой работы. Таким образом возникает замкнутый цикл, при совершении которого мы получаем работу W . Но, согласно первому началу термодинамики (т. е. закону сохранения энергии.— С. Ф.), это невозможно; следовательно, одно из наших допущений должно быть ложным. Таким допущением является предположение о том, что электрический заряд можно создать внутри замкнутой системы».

*) Сам Вигнер писал, что идея этого рассуждения была подсказана ему Р. Оппенгеймером.

Рассуждение Вигнера имеет одно ограничение. Дело в том, что если бы закон Кулона хотя бы очень слабо, но отличался от закона «обратных квадратов», то предположение о независимости характера физических явлений от абсолютного значения потенциала было бы несправедливым и,

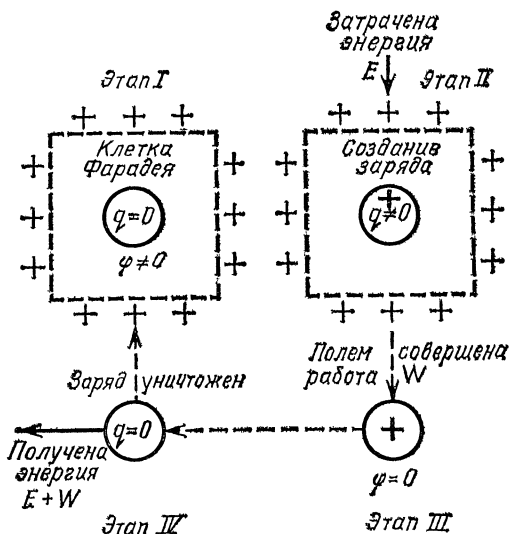


Рис. 49. К рассуждению Е. Вигнера

следовательно, рухнуло бы само основание этого рассуждения. Но на вопрос о том, является ли закон взаимодействия точечных зарядов точным законом «обратных квадратов», может ответить лишь эксперимент. Вопрос о сохранении электрического заряда тоже является предметом экспериментальных исследований.

В принципе, существует множество подходов к задаче об экспериментальной проверке закона сохранения заряда. Мы рассмотрим лишь один из них. Среди известных ученым заряженных частиц электрон — самая легкая частица. Поэтому если бы электрон был нестабильным, т. е. испытывал какой-либо распад, то такой распад был бы неизбежно связан с несохранением заряда. Приведем две схемы распада электрона, при реализации которых выполнялись бы все законы сохранения, кроме закона сохранения заряда. Первая схема — распад электрона e^- на нейтрино ν_e и γ -квант:

$$e^- \rightarrow \nu_e + \gamma.$$

Вторая схема — распад электрона на два нейтрино и одно антинейтринс:

$$e^- \rightarrow 2\nu_e + \bar{\nu}_e.$$

Таких схем можно было бы привести и больше. Но для нас главное подчеркнуть, что вопрос о стабильности электрона одновременно является вопросом о сохранении электрического заряда.

На протяжении трех последних десятилетий физики разных стран не раз ставили опыты для определения нижней границы так называемого времени полураспада электрона, т. е. времени, за которое половина имеющихся электронов должна претерпеть распад. Большинство методов основывалось на следующем рассуждении. Пусть имеется некоторое количество вещества, в котором могут происходить распады электронов. Число электронов даже в сравнительно небольшой массе вещества огромно *). Естественно предположить, что распад каждого электрона может происходить независимо от наличия других электронов. Тогда, даже если время полураспада очень велико, наблюдая за некоторой массой вещества, за обозримое время можно надеяться на регистрацию хотя бы нескольких актов распада электронов. Допустим далее, что распадается один из электронов внутренних электронных оболочек атома. Тогда его место должен занять один из электронов внешних оболочек. Но при переходе электрона с внешней оболочки на внутреннюю должен быть испущен квант рентгеновского излучения определенной энергии. Регистрируя такие кванты, можно получить свидетельства распада электрона.

Наиболее удобным веществом для регистрации распада электрона оказывается германий. Если в кристалл германия добавить некоторое количество атомов лития, то этот кристалл может быть и тем объектом, в котором пытаются обнаружить распад, и прибором, с помощью которого этот распад регистрируют. Подробности соответствующего эксперимента увели бы нас слишком далеко от основной темы. Поэтому сразу же сообщим результат опыта, проведенного в 1983 г. группой итальянских физиков, в котором был использован кристалл Ge(Li). Было установлено, что ниж-

*) Оценим число электронов в одном кубическом сантиметре элемента германия (Ge). Заряд ядра атома Ge равен $Z=32$, следовательно, с каждым атомом связаны 32 электрона. Плотность Ge равна $\rho=5,46 \text{ г/см}^3$, а масса одного атома равна $m_{\text{Ge}}=1,2 \cdot 10^{-21} \text{ г}$. Тогда число электронов в одном кубическом сантиметре Ge определяется соотношением $n=\rho Z/em_{\text{Ge}}=1,5 \cdot 10^{24} \text{ см}^{-3}$.

ний предел периода полураспада электрона с внутренней электронной оболочки на два нейтрино и одно антинейтрино равен $2 \cdot 10^{22}$ лет *). Для сравнения напомним, что время существования нашей Вселенной оценивается в $2 \cdot 10^{10}$ лет. Это означает, что электрон, вероятнее всего, абсолютно стабильная частица. Такой вывод укрепляет нас в убеждении в фундаментальности закона сохранения заряда.

Заряд в движении

До сих пор мы все время подчеркивали, что закон Кулона описывает лишь взаимодействие неподвижных зарядов. Теперь можно поставить более сложный вопрос: как описывать электрическое поле, создаваемое движущимися зарядами?

Это действительно сложный вопрос. Прежде чем дать на него ответ, следует установить, как именно мы будем измерять заряд движущейся частицы. Если, как и раньше, мы захотим воспользоваться пробными зарядами для определения силы, с которой движущийся заряд действует на них, то столкнемся с неопределенностью. Теперь в задаче отсутствует сферическая симметрия, поскольку имеется выделенное направление — то, по которому движется заряд.

Поэтому заранее неясно, будут ли равны силы, действующие на одинаковые пробные заряды q_1 и q_2 , покоящиеся в данной системе отсчета, в тот момент времени, когда они находятся на одинаковых расстояниях от движущегося заряда q , если один из пробных зарядов (q_1) расположен на линии движения, а другой (q_2) — на линии, перпендикулярной ей и проходящей через точку, где находится движущийся заряд q в данный момент (рис. 50). Одно из наиболее простых предложений состоит в том, чтобы определить заряд q , измеряя силы, действующие на одинаковые пробные заряды, помещенные на сфере с центром в точке, где в данный момент находится q , а затем усредняя измеренные величины.

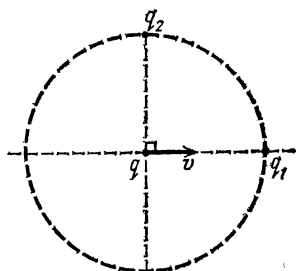


Рис. 50. К вопросу об электростатическом взаимодействии движущихся и неподвижных зарядов

*) В этом эксперименте определялся и нижний предел периода полураспада электрона на γ -квант и нейтрино. Полученная оценка оказалась еще более впечатляющей — $3 \cdot 10^{23}$ лет.

Предложенная процедура эквивалентна определению потока вектора \mathbf{E} , создаваемого зарядом q , через сферу. Значит, теорема Остроградского — Гаусса дает возможность определить величину движущегося заряда *). Это еще раз подтверждает тот факт, что теоремы (законы) физики часто оказываются эффективными даже в тех областях, на которые их первоначально не распространяли.

Итак, мы можем считать определением величины движущегося заряда соотношение

$$q = \varepsilon_0 \oint_S \mathbf{E} d\mathbf{S}. \quad (6.6)$$

Экспериментальный факт состоит в том, что значение q не зависит от размеров и формы поверхности S . Действительно, расчеты, основанные на этом определении, не приводят к расхождению с данными опыта.

Более остро стоит вопрос, не зависит ли значение q , определяемое формулой (6.6), от скорости движения заряда. Физики формулируют этот вопрос и несколькими иными словами. Известно, что при переходе из одной инерциальной системы в другую, движущуюся с постоянной скоростью относительно первой, меняются скорости всех тел, которые рассматривались в первой системе. Поэтому мы можем сказать, что один и тот же заряд в двух таких различных системах отсчета будет двигаться с разными скоростями. Можем ли мы считать, что величина заряда не меняется при переходе из одной системы в другую, т. е. *инвариантен* ли заряд по отношению к этому переходу? На этот вопрос должен ответить опыт.

К настоящему времени проведено уже немало экспериментов, в которых физики пытались обнаружить зависимость величины заряда от скорости. Обычно предполагается, что если эта зависимость и существует, то она слабая и ее в первом приближении можно описать соотношением

$$q = q_0 \left(1 + k \frac{v^2}{c^2} \right), \quad (6.7)$$

где q_0 — величина неподвижного заряда, v — скорость заряда, c — скорость света, k — числовой коэффициент,

*) Оговоримся, что этот способ не является единственным. Он, однако, позволяет построить последовательную и, главное, относительно простую теорию, выводы которой хорошо согласуются с данными опыта.

много меньший единицы. Цель практически всех экспериментов — определить верхнюю границу возможного значения k .

Мы рассмотрим лишь один из ряда опытов по оценке k , проведенный в 1973 г. в Массачусеттском технологическом институте (США), авторы которого Ф. Дилла и Дж. Кинг. Идею опыта Кинга и Диллы можно пояснить так. Молекулы состоят из атомов, атомы — из ядер и электронных оболочек, ядра — из протонов и нейтронов. Характер и скорость движения протонов в ядре и электронов оболочек существенно различаются. Значит, если в формуле (6.7) $k \neq 0$, то значения заряда протонов и электронов должны слегка различаться, и в опыте у молекул должен проявляться небольшой избыточный заряд, даже если абсолютные величины зарядов покоящихся протона и электрона строго равны между собой.

Американские физики предложили весьма оригинальный способ регистрации нарушения нейтральности молекул. Они рассуждали так. Если молекула газа несет некоторый заряд, то она будет испытывать воздействие со стороны внешнего электрического поля. Если поле будет переменным, то и воздействие будет изменяться со временем. Но это приведет к периодическим вариациям давления газа, которые можно регистрировать как обычный звук. Для проведения опыта была собрана установка, схема которой показана на рис. 51.

Основной частью установки был полый медный шар радиуса около 20 см, в центре которого располагался сферический латунный электрод E диаметра 2,5 см. С помощью звукового генератора, усилителя и высоковольтного трансформатора T_2 между шаром и электродом E могло создаваться напряжение звуковой частоты (около 500 Гц). Звук регистрировался с помощью двух микрофонов M_1 и M_2 , сигналы с которых подавались на трансформатор T_1 , проходили предварительное усиление, затем усиливались с помощью специального прибора (синхронного усилителя *), который, кроме того, выделял часть сигнала, обусловленную воздействием на акустическую систему переменного электрического поля. Наконец, усиленный сигнал регистрировали на ленте самописца. Частота электрического воздействия определялась с помощью частотомера, а его амплитуда фиксировалась вольтметром. Во избежание паразитных

*) О принципе действия синхронного усилителя см, гл. 8, параграф «От двух до пяти».

акустических воздействий на шар он помещался внутрь специальной камеры, из которой можно было откачивать воздух; шар покоился на гибкой амортизирующей подставке.

Перед началом опыта из шара откачивался воздух, а затем он наполнялся рабочим газом (либо гексафторидом

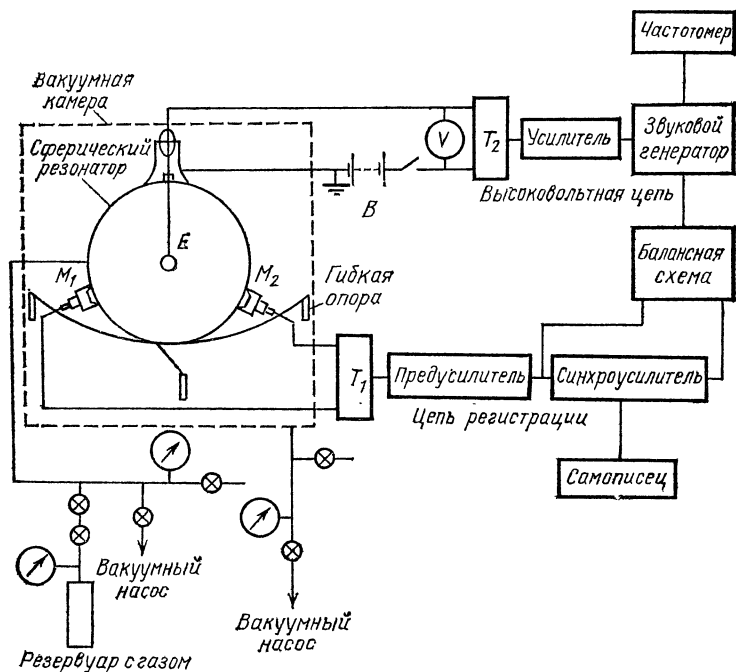


Рис. 51. Схема установки Кинга и Диллы для исследования нейтральности молекул

серы SF_6 , либо азотом N_2) до давления около 1 атм. Затем на некоторое время на шар и электрод E вместе с переменным подавалось и постоянное напряжение (с помощью батареи B): под действием постоянного поля из газа уходили ионы, случайно оказавшиеся внутри шара. Основные измерения проводились в отсутствие постоянного напряжения.

Результат опытов оказался, как, впрочем, и ожидалось, отрицательным: никакого звукового сигнала на частоте электрического поля зафиксировать не удалось. Чтобы убедить читателя в обоснованности такого вывода, мы приводим на рис. 52 зависимости сигнала от времени, полученные

Кингом и Диллой, для двух случаев: а) когда вместо микрофонов к регистрирующей системе был подключен обыкновенный резистор (600 Ом) и б) когда к системе были подключены микрофоны. Характер сигнала в обоих случаях одинаков — записан так называемый шум — напряжение на входе системы меняется хаотически.

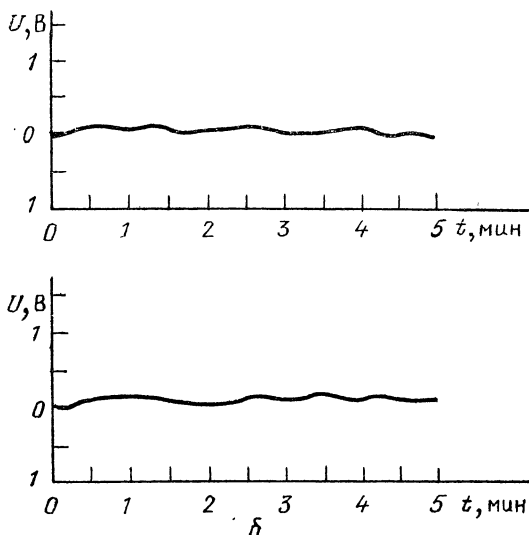


Рис. 52. Зависимости звукового сигнала от времени: а — к регистрирующей системе вместо двух микрофонов подключен резистор; б — к регистрирующей системе подключены микрофоны

Для оценки точности, с которой в данном опыте была установлена нейтральность молекул, авторы проводили калибровку системы. Нейтральные молекулы газа образуют диэлектрик, который под действием электрического поля поляризуется: положительные и отрицательные заряды каждой молекулы смещаются в противоположные стороны. Такое воздействие на газ должно также проявляться в возникновении звука, но этот звук должен иметь частоту, вдвое большую частоты переменного электрического поля. Измеряя сигнал на удвоенной частоте, можно сделать вывод о том, какой наименьший эффект, связанный с нарушением нейтральности молекул, можно было зарегистрировать. На основе анализа полученных данных Кинг и Дилла пришли к выводу, что если каждая молекула и несет избыточный заряд q , то он по модулю не превышает $2 \cdot 10^{-19} e$. От-

сюда же можно получить и оценку верхней границы различия между зарядами протона и электрона. Действительно, если предположить, что разность зарядов протона и электрона равна заряду нейтрона — нейтральность последнего ведь тоже всего лишь экспериментальный факт, установленный с определенной точностью, — то для оценки этой разности необходимо разделить правую и левую части неравенства $|q| \leq 2 \cdot 10^{-19} e$ на число протонов и нейтронов, содержащихся в молекуле SF_6 , которое равно $M=146$. Отсюда получается, что $|e_p - e_e| \leq 10^{-21} e$.

Как же теперь перейти от оценки нейтральности молекулы к оценке верхней границы коэффициента k из соотношения (6.7)? Для этого мы воспроизведем рассуждение из работы группы американских физиков «Новый предел на независимость заряда и скорости» (1979 г.), которые опирались на данные исследований того же Кинга. (Правда, эти исследования были проведены до описанных опытов со «звучащим шаром», где исследовалась нейтральность атомов гелия He и молекул изотопа водорода — дейтерия D_2 . Но, в принципе, шар в опыте Кинга можно наполнить и этими легкими газами...)

Допустим, что зависимость заряда от скорости подчиняется соотношению (6.7). Тогда общий заряд атома (не иона!) можно представить в виде

$$Q = Z\Delta q_0 + Nq_n + \frac{Zke}{c^2} (v_{pA}^2 - v_{eA}^2). \quad (6.8)$$

Здесь Z — число протонов ядра, $\Delta q_0 = q/M$ — возможное различие между зарядами протона и электрона, находящихся в покое, N — число нейтронов в ядре, а q_n — возможный заряд нейтрона, v_{pA}^2 и v_{eA}^2 — среднеквадратические скорости протонов и электронов.

Ясно, что, даже получив оценку Q , не зная значений Δq_0 и q_n , невозможно рассчитать k . Обойти эту трудность можно, если оценить возможное отклонение от нейтральности не только атома, но и молекулы, в состав которой входит то же число протонов и нейтронов, что и в атоме. Такой подходящей парой является атом He и молекула дейтерия. В их состав входят по два протона и по два нейтрона. Если записать уравнение, подобное (6.8), для молекулы D_2 , то два первых слагаемых будут такими же, что и в (6.8). Тогда мы можем получить

$$k = \frac{(Q_{He} - Q_{D_2}) c^2}{2e [(v_{pHe}^2 - v_{pD_2}^2) - (v_{eHe}^2 - v_{eD_2}^2)]}. \quad (6.9)$$

Теперь нам следует сравнить скорости электронов и протонов. Для этого мы воспользуемся так называемым соотношением неопределенностей, которому подчиняются объекты микромира. Согласно этому соотношению неопределенность координаты Δx микрообъекта связана с неопределенностью его импульса Δp неравенством

$$\Delta x \cdot \Delta p \leq \frac{h}{2\pi},$$

где h — постоянная Планка ($h=6,62 \cdot 10^{-34}$ Дж·с).

Поскольку импульс не может быть меньше неопределенности Δp , мы можем оценить p из неравенства

$$p \geq \frac{h}{2\pi \Delta x}.$$

Если скорость микрообъектов невелика по сравнению со скоростью света, то

$$v \geq \frac{h}{2\pi m \Delta x},$$

где m — масса микрообъекта.

Неопределенность Δx для электрона по порядку величины примем равной размеру атома: $\Delta x_e \approx 10^{-10}$ м. Неопределенность Δx для протона можно принять равной размеру ядра: $\Delta x_p \approx 10^{-15}$ м. Учитывая, что $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31}$ кг, а $m_p = 1,7 \cdot 10^{-27}$ кг, получаем $v_e \approx 10^6$ м/с, $v_p \approx 6 \cdot 10^7$ м/с, т. е. $v_p^2 \gg v_e^2$. Поэтому соотношение (6.9) можно переписать в виде

$$k = \frac{(Q_{\text{He}} - Q_{\text{D}_2})c^2}{2e(v_{p\text{He}}^2 - v_{p\text{D}_2}^2)}. \quad (6.10)$$

Поскольку размеры ядра He меньше, чем размеры ядра дейтерия ($r_{\text{He}} = 1,64 \cdot 10^{-15}$ м, $r_{\text{D}_2} = 2,1 \cdot 10^{-15}$ м), то среднеквадратическая скорость протонов в ядре He будет больше. Подстановка данных для Q_{He} и Q_{D_2} , полученных Кингом, и расчетных значений $v_{p\text{He}}^2$ и $v_{p\text{D}_2}^2$ дает

$$k \leq 2,5 \cdot 10^{-18}.$$

Более строгий расчет дает еще меньшее значение

$$k \leq 8 \cdot 10^{-19}.$$

Таким образом, даже при скоростях заряженных частиц, очень близких к скорости света ($v^2/c^2 \leq 1$), поправка к значению заряда, связанная с его движением, если она и существует, ничтожна.

Вернемся теперь к вопросу, поставленному в начале этого раздела: каково поле движущегося заряда? О величине заряда мы уже говорили. Но какой вид имеет электрическое поле, например, для простейшего случая равномерно движущегося заряда? Строгий анализ этого вопроса невозможен без привлечения представлений специальной теории относительности, и поэтому мы его приводить не будем, а сообщим сразу результат. Поле равномерно движущегося заряда лишено сферической симметрии — оно осесимметрично, причем осью симметрии является направление движения заряда. Напряженность поля \mathbf{E} описывается формулой

$$\mathbf{E} = \frac{q}{4\pi\epsilon_0} \frac{\mathbf{r}}{r^3} \frac{1 - \beta^2}{(1 - \beta^2 \sin^2 \theta)^{3/2}}, \quad (6.11)$$

где \mathbf{r} — радиус-вектор, проведенный из точки, где в данный момент времени находится заряд, в точку, для которой рассчитывается \mathbf{E} , а θ — угол между радиус-вектором и направлением движения заряда.

Видно, что выражение (6.11) отличается от соответствующего выражения для неподвижного заряда ($\mathbf{E} = \frac{q}{4\pi\epsilon_0} \frac{\mathbf{r}}{r^3}$) множителем $\frac{1 - \beta^2}{(1 - \beta^2 \sin^2 \theta)^{3/2}}$, зависящим от θ . Ха-

актер поля, лучше всего можно проиллюстрировать диаграммой, на которой из единого центра отложены значения E , рассчитанные для одного и того же r , но для различных углов θ , причем соответствующее значение E откладывается вдоль прямой, образующей угол θ с осью x , вдоль которой движется заряд. Точки, отложенные согласно этому принципу, образуют замкнутую поверхность. При $v=0$ эта поверхность — сфера (E не зависит от θ); чем ближе отношение v/c к единице, тем сильнее поверхность отличается от сферы — она как бы сплющивается вдоль направления скорости. На рис. 53 показано сечение поверхности плоскостью (X, Y) для трех значений v/c . При неравномерном движении заряда вид поля оказывается еще сложнее.

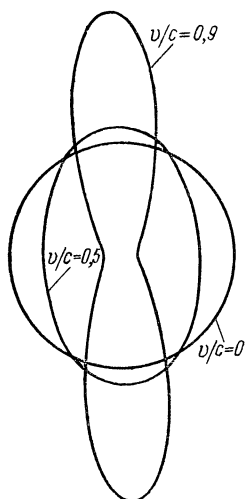


Рис. 53. Диаграмма, иллюстрирующая характер электрического поля равномерно движущегося заряда для различных отношений v/c

МАСШТАБЫ И ПРЕДЕЛЫ

В самом начале книги мы задали риторический вопрос: много ли существует физических законов? Нетрудно перечислить самые популярные: те, в которых содержание отражено в их названии, такие как законы сохранения энергии и импульса, закон преломления света, а также «именные» — Кулона, Ампера, Ома и множество других, известных каждому школьнику. В это перечисление мы намеренно включили очень непохожие друг на друга законы. Они отличаются не только тем, что относятся к различным областям физики. Их главное отличие — степень общности. Действительно, сегодня не известно ни одного примера нарушения закона сохранения энергии ни в мега-, ни в макро-, ни в микромире. Что же касается, например, закона преломления света, то о его нарушении ученые узнали уже через пятьдесят лет после его установления, когда датский физик Э. Бартолин открыл явление двойного лучепреломления света. Естественно, что физики установили определенную иерархию среди множества законов, которыми им приходится пользоваться, и хотя называют их одним словом «закон», относятся к ним с разной степенью «почтения». История становления этой иерархии преподнесла физикам урок, который они прочно усвоили. Его смысл состоит в том, что в природе очень мало абсолютных законов. Даже если конкретный закон длительное время хорошо «работает», это еще не означает, что он гарантирован от уточнений при более глубоком изучении природы. Примеров такого уточнения можно было бы привести множество. Вероятно, один из самых впечатляющих — это переход от закона всемирного тяготения Ньютона к новому учению о гравитации, к общей теории относительности Эйнштейна. Не избежал этой участи и закон Кулона. Однако чтобы убедиться в ограниченности области его действия, физикам пришлось пройти нелегкий путь. Начало же пути не предвещало ничего особенного.

Пушки и снаряды

Мы уже говорили о том, что разные области физики, развиваясь, помогают друг другу. Неоспорима, например, роль механики (как идейная, так и практическая) в истории установления основного закона электростатики. Но и закон Кулона не остался в долгу. С его помощью была решена важнейшая задача физики микромира — доказано существование атомного ядра.

После открытия электрона идея об электрической природе материи овладела физиками. Иногда говорят, что физика начала строить электромагнитную картину мира. Но для дальнейшего проникновения в глубь строения вещества требовались «зонды», которые играли бы роль, подобную пробным частицам в классической электродинамике. Как это не раз случалось в истории, неожиданное открытие предоставило физикам необходимые «снаряды».

Возможно, что некоторые факты, о которых пойдет речь ниже, уже известны части читателей. Тем не менее мы расскажем обо всем по порядку, тем более, эта страница «биографии» физики обычно освещается под несколько иным углом зрения. Начало нашей истории было положено открытием французским физиком А. Беккерелем явления радиоактивности.

Беккерель был представителем династии ученых, на протяжении многих десятилетий занимавшихся изучением явления люминесценции. Отдавая дань семейной традиции, проводил опыты по фосфоресценции солей урана и А. Беккерель. (Его опыты были стимулированы открытием нового вида невидимого излучения — x -лучей, обнаруженных в 1895 г. В. Рентгеном, хотя в итоге сделанное Беккерелем открытие никак не было связано с рентгеновскими лучами.) Однажды, в пасмурный день, когда экспериментировать с фосфоресцирующими веществами было неудобно, Беккерель оставил в ящике рабочего стола препарат двойного сульфата уранила и калия. По случайности этот препарат оказался лежащим поверх медного креста, который в свою очередь покоился на стопке свежих фотопластинок, завернутых в черную ткань. Через несколько дней, вернувшись к опытам, Беккерель решил проверить, не испортились ли пластинки и проявил одну из них. К его удивлению пластинка оказалась засвеченной, но не полностью, а так, как будто на ней отпечаталась тень от креста. Ученый насторожился. Мысль о невидимом излучении после открытия рентгеновских лучей не казалась чересчур безумной. Про-

верочные опыты показали, что Беккерель действительно столкнулся с новым видом излучения, которому позднее было дано название радиоактивного.

«Механизм» исследований радиоактивности раскручивался сначала довольно медленно, а затем все быстрее и быстрее. Открытие этого явления поставило перед учеными множество вопросов. Однородно ли новое невидимое излучение? Только ли уран может порождать его? Какова природа радиоактивного излучения? Какова его энергия? Какие особенности строения атомов объясняют радиоактивность? Многие из этих вопросов касались коренных проблем физики конца XIX — начала XX вв. Достаточно сказать, что результаты измерения энергии радиоактивного излучения даже заставили некоторых физиков усомниться в справедливости закона сохранения энергии.

Мы не имеем возможности последовательно пролистать все страницы летописи исследований радиоактивности. Для нашего рассказа интерес представляет лишь одна из них, хотя и весьма примечательная. Поэтому проследим начальный этап развития событий по хронологии.

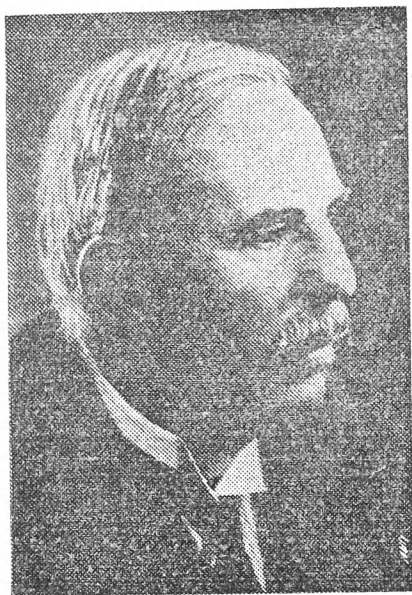
1899 г. Э. Резерфорд обнаружил неоднородность невидимого излучения урана. Он ввел понятия об α -лучах (сильно поглощаемая часть) и β -лучах (менее поглощаемая часть).

1900 г. П. Вийар обнаружил у радия новый вид излучения, которое не отклонялось в магнитном поле и по своим свойствам было похоже на рентгеновские лучи. Позднее это излучение было названо γ -лучами. М. Кюри пришла к выводу, что α -лучи являются потоком частиц, теряющих энергию при прохождении через вещество.

1903 г. Э. Резерфорд продемонстрировал, что α - и β -лучи отклоняются в магнитном поле в противоположные стороны. Этот результат был подтвержден М. Кюри. Резерфорд, а вслед за ним французский физик Т. де Кудр измерили среднюю скорость α -частиц, которая оказалась равной примерно $2 \cdot 10^7$ м/с, и определили удельный заряд α -частицы. В. Крукс изобрел спинтарископ — прибор для визуальной регистрации α -частиц, которые, попадая на экран, покрытый сернистым цинком, вызывают вспышки — сцинтилляции.

1906 г. Э. Резерфорд впервые обнаружил явление рассеяния α -частиц.

1908 г. Э. Резерфорд и Г. Гейгер измерили заряд, переносимый α -частицей, и показали, что α -частица идентична дважды ионизованному атому гелия.



Эрнст Резерфорд

Как видно из приведенного перечня, мы выбрали события из истории исследования радиоактивности, большая часть которых связана с именем выдающегося английского физика Эрнста Резерфорда. Это не случайно — именно работы Резерфорда позволили по-новому взглянуть на закон Кулона.

Резерфорд родился в 1871 г. в Новой Зеландии, в семье колесного мастера. Несмотря на то что семья была многодетной, родители Эрнста сумели дать ему неплохое образование. Резерфорд поступил в Новозеландский универси-

тет в Крайчестере, где еще будучи студентом начал вести научную работу. После окончания университета начинающий исследователь получил стипендию для одаренных выходцев из университетов английских колоний, благодаря которой смог отправиться в Англию на стажировку.

Осенью 1895 г. Резерфорд начал работать в Кавендишской лаборатории, которой руководил Дж. Дж. Томсон. Поначалу он продолжал заниматься проблемами радиосвязи, которыми заинтересовался еще на родине. Но открытия Рентгена и Беккереля круто изменили тематику его работ. Он сотрудничает с Томсоном в проведении экспериментов, приведших в конечном счете к открытию электрона. В 1898 г. Резерфорд начал исследовать радиоактивность. Не изменил он этой теме и после переезда в 1898 г. в Монреаль, где стал профессором университета Мак-Гилла. О результатах, полученных Резерфордом за годы работы в Канаде (1898—1907 гг.), можно судить по приведенной выше хронологии. Правда, эта хронология не отражает всех достижений ученого. На его счету были также открытия эманации тория (1899 г.) и естественного превращения элементов, создание теории радиоактивного распада (1901—

1902 г.). Одним словом, ко времени возвращения в Англию Резерфорд был среди лидеров в изучении радиоактивности. Свидетельством тому стала Нобелевская премия по химии за 1908 г., присужденная ему «за исследование по превращению элементов и по химии радиоактивных веществ».

Однако получение высокой научной награды было лишь эпизодом, хотя и очень приятным, в напряженной жизни исследователя. Для Резерфорда была характерна исключительно тесная взаимосвязь всех его работ. Какой бы важный результат ни был получен им в уже законченном исследовании, Резерфорд уже видел следующую цель, для достижения которой этот результат был крайне необходим.

Разнообразные эксперименты с α -частицами не только позволили установить их природу и характеристики, но и привели Резерфорда к мысли о том, что α -частица может служить эффективным «зондом» для изучения строения вещества. Первые указания на это можно найти уже в его работах монреальского периода. В статье 1906 г. «Торможение α -частиц, испускаемых радием, при прохождении через вещество» Резерфорд писал:

«... α -частица вследствие огромной энергии движения протекает сквозь атом вещества, не испытывая значительного отклонения. Как я указал в предыдущей статье, бесспорно существует, однако, слабое рассеяние или отклонение траектории α -частицы при прохождении через вещество...

Из измерений ширины линии *), обусловленной рассеянными α -лучами, легко показать, что некоторые α -частицы при прохождении через слюду отклонялись от своего первоначального направления примерно на угол 2° . Возможно, что некоторые α -частицы отклонялись на значительно больший угол, но если это так, то их фотоэффект был слишком слабым, чтобы его можно было заметить на пластинке.

Это рассеяние α -частиц, как и следовало ожидать, возрастает с уменьшением их скорости. Из величин q/m и v (отношение заряда к массе и скорости.— С. Ф.) для α -частиц... можно легко рассчитать, что для изменения направления движения на угол 2° для некоторых частиц при прохождении ими слоя слюды толщиной 0,03 см потребовалось бы поперечное электрическое поле напряженностью около 1000 млн В/см. Такой результат ясно показывает, что атомы вещества должны обладать теми областями, где действуют

*) Имеется в виду линия на фотопластинке.

очень интенсивные электрические силы,— вывод, который находится в согласии с электронной теорией вещества».

Вывод Резерфорда очень важен. Попробуем самостоятельно получить оценку величины электрического поля E , существующего в веществе, пользуясь данными из работы Резерфорда. Для грубой оценки годится такая модельная

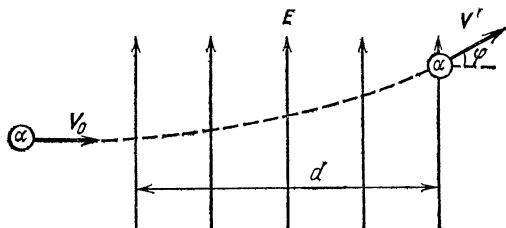


Рис. 54. К оценке электрического поля в веществе

задача. Допустим, что α -частица влетает в область однородного поля E перпендикулярно его линиям напряженности (рис. 54). Очевидно, что после вылета из этой области направление движения частицы будет составлять некоторый угол φ с ее первоначальной скоростью v_0 . Как, зная этот угол ($\varphi \approx 2^\circ$), ширину области $d \approx 0,03$ см, начальную скорость α -частицы $v_0 \approx 2 \cdot 10^7$ м/с и ее удельный заряд $q/m = 4,8 \cdot 10^7$ Кл/кг, найти значение E ?

Нетрудно заметить, что сформулированная задача аналогична той, которую пришлось решать Дж. Дж. Томсону при проведении экспериментов с катодными лучами. Единственное отличие состоит в ином значении удельного заряда q/m . Поэтому мы можем воспользоваться полученным ранее результатом (6.1) и сразу записать

$$E = \frac{m}{q} \frac{v_0^2}{d} \varphi \quad (7.1)$$

(мы учли, что угол φ мал и, следовательно, $\tan \varphi \approx \varphi$). Подстановка числовых значений величин в (7.1) дает $E \approx 10^9$ В/м, что несколько меньше значения, приведенного Резерфордом. Но главное — это свидетельство существования больших электрических полей внутри атома, на много порядков превосходящих поля, доступные в лаборатории.

В 1907 г. Резерфорд стал профессором университета Виктории в Манчестере (Англия). Здесь постепенно начала формироваться школа экспериментаторов, сыгравшая важную роль в развитии физики в первой половине XX в. Резерфорд был выдающимся учителем, умевшим увлекать

своих учеников проблемами, которыми интересовался сам. Одним из самых способных молодых исследователей, работавших в Манчестере у Резерфорда, был немец Г. Гейгер. Ему и была поручена разработка темы, которую Резерфорд сформулировал еще в Монреале, связанной с рассеянием α -частиц. Эта тема уходила своими корнями в исследования, проводившиеся Дж. Дж. Томсоном в период работы Резерфорда в Кавендишской лаборатории.

Электрические модели атома

Идея о том, что в состав вещества входят заряженные частицы, родилась, как мы помним, еще в XVIII в. Она получила подкрепление после открытия электролиза (У. Никольсон, А. Карлейль, И. Риттер, 1800 г.), явившегося одним из первых следствий изобретения источника постоянного тока. В 30-е гг. XIX в. исследования электролиза Фарадеем еще более укрепили позиции этой гипотезы: Фарадей ввел термин «ион», которым мы пользуемся до сих пор. Позднее опыты с газовыми разрядами подкрепили представление об электрическом строении вещества. Но сигналом к разработке конкретных электрических моделей атома стало лишь открытие электрона.

В 1901 г. французский физик Ж. Перрен, позднее прославившийся исследованием броуновского движения, опубликовал статью «Молекулярные гипотезы», где высказал предположение, что атомы вещества походят на «миниатюрные планетарные системы», в которых «положительно заряженное ядро окружено отрицательными электронами, двигающимися по определенным орбитам». При этом скорость движения электронов по орбитам соответствует частотам основных спектральных линий. В больших, тяжелых атомах внешние электроны, согласно идее Перрена, могут отрываться от положительного центра. Эта гипотеза, имевшая своей целью объяснение механизма радиоактивного распада, не показалась физикам убедительной: она объясняла появление β -излучения, но ничего не говорила о причинах возникновения α - и γ -лучей.

Механизм возникновения радиоактивного излучения на основе модели атома Перрена попытался усовершенствовать А. Беккерель, но и его соображения не привлекли внимания физиков. Сравнение атома со звездной системой (не только в плане механического подобия, но и в смысле сходства характера их временной эволюции) развил в 1903 г. еще один французский физик Ф. Ре.

Однако модели атома разрабатывались не только во Франции. В 1902 г. свою модель предложил патриарх английской физики У. Томсон (лорд Кельвин). Он предположил, что положительный заряд равномерно распределен по атому, а электроны образуют в нем определенную устойчивую конфигурацию. Знаменательно название статьи, в которой Томсон изложил свои мысли: «Aepinus Atomized», что означает «Эпинус атомизированный» — автор подчеркивал связь электрических моделей атома с давно ставшими достоянием истории электрическими теориями XVIII в.

Спустя год, в 1903 г., немецкая физика в лице Ф. Ленарда предложила новую модель строения атома. Ленард выдвинул представление о так называемых динамидах — особых образованиях из положительных и отрицательных частиц размером порядка $3 \cdot 10^{-12}$ см, которые и составляют атом. Поскольку к этому времени уже была сделана оценка размеров атома ($\approx 10^{-8}$ см), то согласно теории Ленарда большая часть объема атома должна быть пуста. Взгляды Ленарда не получили распространения, так как подтвердить существование динамид не удалось.

В это время практически каждый год приносил новую модель атома. В 1904 г. появились еще две. Одну предложил японский физик Х. Нагаока, уподобивший атом Сатурну: положительно заряженная частица образует центральное тело, вокруг которого располагаются отрицательные кольца (электроны). Нагаока считал, что его модель объясняет относительную стабильность атома и, в то же время, иллюстрирует явление радиоактивности, поскольку при больших атомных массах из нестабильного кольца могут выбрасываться легкие составные части.

Другая модель 1904 г. принадлежала Дж. Дж. Томсону, который сохранил идею Кельвина о положительной сфере, внутри которой находятся электроны, но предложил оригинальную картину их распределения: в атоме электроны образуют оболочки или кольца. Устойчивость таких конфигураций периодически меняется по мере роста числа электронов. Томсон попытался на основе своей модели объяснить периодичность химических свойств элементов.

Как мы видим, в первые годы XX в. не было недостатка в атомных моделях. Достоинства и слабости каждой из них обсуждались многими известными физиками (лордом Рэлеем, Дж. Джинсом, В. Круксом, О. Лоджем и др.) Однако кроме теоретических трудностей, с которыми сталкивались многие модели, почти у всех них был один принципиальный недостаток — они лишь так или иначе объясняли уже

известные факты. Для их проверки требовалось выбрать какой-то эффект, относительно которого разные модели давали бы различные предсказания, или же сравнить данные опыта с количественными следствиями моделей. Одну из первых попыток такого рода предпринял Дж. Дж. Томсон в 1906 г.

В модели Томсона было одно слабое место — неопределенность в числе электронов, входящих в состав атома. Для уточнения этой характеристики атома Томсон попытался использовать экспериментальные данные, касающиеся трех эффектов, а именно: рассеяния света газами, рассеяния рентгеновских лучей в газах и поглощения β -лучей. В результате рассмотрения этих эффектов Томсон пришел к выводу, что «число корпускул не очень отличается от атомной массы». В том же году английский физик Ч. Баркла экспериментально показал, что число электронов атома, которые рассеивают рентгеновские лучи, для легких элементов, за исключением водорода, равно примерно половине атомной массы.

Но, как мы убедились, большинство моделей различалось распределением зарядов внутри атома. Самый простой способ проверки того, распределен заряд равномерно по всему объему или сконцентрирован в областях, составляющих лишь небольшую часть объема атома, состоял в зондировании атома быстрыми заряженными частицами. По рассеянию этих частиц можно было бы составить представление об электрической структуре атома. Таким образом, рассеяние α -частиц в веществе, обнаруженное Резерфордом, требовало более подробного изучения.

Стрельба по мишеням

Итак, Резерфорд поручил Гейгеру возможно более тщательно изучить рассеяние α -частиц в тонких металлических фольгах. Далее произошли события, о которых много лет спустя Резерфорд рассказывал так:

«Он (Гейгер.— С. Ф.) обнаружил, что на тонких листках тяжелых металлов рассеяние обычно невелико, порядка 1° . Однажды Гейгер пришел ко мне и сказал: «Не считаете ли Вы, что пора бы молодому Марсдену, которого я обучаю радиоактивным методам, начать небольшое исследование?» Я думал так же, а поэтому ответил: «Почему бы не поручить ему посмотреть, не могут ли некоторые α -частицы рассеяться на больший угол?» Скажу вам по секрету, что я не предполагал, что они так могут рассеяться, поскольку

было известно, что α -частицы — это очень быстрые массивные частицы, обладающие чрезвычайно большой энергией. Можно убедиться, что если большое рассеяние есть результат накопления некоторого числа малых рассеяний, то вероятность рассеяться назад для α -частицы очень мала. Помню, что через два или три дня ко мне пришел весьма возбужденный Гейгер и сказал: «Нам удалось наблюдать α -частицы, возвращающиеся назад...» Это было самым невероятным событием, которое мне пришлось пережить. Это было почти столь же невероятно, как если бы выстрелили 15-дюймовым снарядом в листок папиросной бумаги, а он вернулся бы назад и угодил в вас. Поразмыслив, я понял, что это обратное рассеяние должно быть результатом однократного столкновения, а когда я произвел расчеты, то увидел, что невозможно получить величину того же порядка, разве что вы рассматриваете систему, в которой большая часть массы атома сконцентрирована в малом ядре. Вот именно тогда у меня родилось представление об атоме с малым массивным центром, несущим заряд.

Годы стирают в памяти детали даже самых важных событий. Рассказывая в 1936 г. об обстоятельствах открытия атомного ядра (а именно к этому времени относится лекция, отрывок из которой процитирован выше), Резерфорд не упомянул о тех днях, неделях и месяцах, в течение которых у него «вызревала» идея планетарной модели атома. Между тем первая работа Гейгера и Марсдена с сообщением о регистрации актов рассеяния на большие углы была опубликована в 1909 г., а основополагающая статья Резерфорда «Рассеяние α - и β -частиц веществом и строение атома», в которой была описана планетарная модель и проанализированы ее следствия, появилась лишь в 1911 г.! На что же ушло два года?

Резерфорд понимал, что его модель с точки зрения классической физики противоречит важнейшему экспериментальному факту — устойчивости атома. Действительно, двигаясь с ускорением по круговой орбите вокруг ядра, электроны должны излучать электромагнитные волны, терять энергию и в конечном счете падать на ядро. Поэтому публикация с описанием планетарной модели, в которой давалось бы лишь качественное объяснение явления рассеяния α -частиц, наверняка подверглась бы резкой критике. Следовало обосновать эту модель количественным анализом.

Думать о необходимости количественного теоретического анализа рассеяния α -частиц Резерфорд начал еще до неожиданного наблюдения Гейгера и Марсдена. Вскоре

после получения Нобелевской премии он специально прослушал курс теории вероятностей своего коллеги по Манчестерскому университету Г. Лэмба. Математические знания помогли Резерфорду понять, что отклонение α -частиц на большие углы не может быть обусловлено накоплением отклонений при рассеянии на атомах Томсона. При «перемешивании» положительных и отрицательных зарядов, которым характеризовалась эта модель, суммарное электрическое поле должно было быть слишком слабым для того, чтобы вызвать сильное отклонение при взаимодействии с одним атомом. Теория вероятностей утверждает, что случайное возникновение значительного эффекта в результате суммирования малых отклонений крайне маловероятно. Вероятность такого события столь мала, что не может объяснить даже наблюдение рассеяния 1 частицы из 20 000 на угол $\approx 90^\circ$. Поэтому Резерфорд решил рассмотреть рассеяние α -частиц в рамках планетарной модели. Математика не была сильной стороной таланта Резерфорда. Однако вопрос был настолько важен, что он решил задачу сам и получил формулу, которая впоследствии вошла во все учебники физики под названием «формула Резерфорда».

При выводе формулы рассеяния Резерфорд воспользовался законом Кулона. Рассмотрим сначала задачу о рассеянии качественно. Представим себе, что α -частица (которую мы будем считать материальной точкой) летит в направлении массивной положительно заряженной частицы (ядра), размерами которой также можно пренебречь. Очевидно, что вследствие отталкивания между одноименно заряженными частицами α -частица изменит направление своего движения. При этом если α -частица летит прямо на неподвижное ядро, то она приблизится к ядру на некоторое минимальное расстояние, а затем отскочит обратно — произойдет рассеяние на 180° .

Если же вдали от ядра направление скорости α -частицы \mathbf{v}_0 отстоит от прямой, параллельной \mathbf{v}_0 и проходящей через ядро, на некоторое расстояние d (его называют прицельным параметром), то частица рассеется на угол $\varphi < 180^\circ$. Понятно, что чем больше d , тем меньше угол рассеяния φ . На рис. 55 показаны орбиты α -частиц, пролетающих мимо тяжелого ядра для разных углов рассеяния. Заметим, что траекторию α -частицы нетрудно рассчитать, если описывать ее взаимодействие с ядром силой Кулона.

К этой задаче можно подойти и по-другому. Представим себе поток α -частиц, с равными скоростями \mathbf{v}_0 падающих на рассеивающий центр. Допустим, что этот поток одноро-

ден по сечению, т. е. вдали от центра через произвольную единичную площадку, перпендикулярную \mathbf{v}_0 , в единицу времени проходит одинаковое число частиц n . Разные

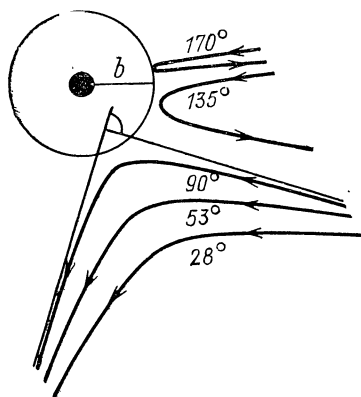


Рис. 55. Схема рассеяния α -частиц на разные углы

частицы в потоке обладают разными прицельными параметрами, поэтому они будут рассеиваться на разные углы. Целесообразно рассмотреть частицы, которые рассеиваются в единицу времени в интервале углов от φ до $\varphi + \Delta\varphi$ ($\Delta\varphi \ll \varphi$). Заметим, что если откладывать векторы скоростей таких рассеянных частиц из одной точки, то вследствие осевой симметрии задачи (т. е. симметрии относительно оси, параллельной \mathbf{v}_0 и проходящей через рассеивающий центр) они окажутся лежащими между поверхностями конусов с

углами при вершине 2φ и $2(\varphi + \Delta\varphi)$. Обозначим число указанных рассеянных частиц через ΔN . Тогда отношение

$$\Delta\sigma = \frac{\Delta N}{n} \quad (7.2)$$

будет иметь размерность площади. Оно характеризует эффективность рассеяния на данный угол и называется эффективным сечением рассеяния. Резерфорд показал, что для кулоновского поля рассеивающей частицы

$$\Delta\sigma \sim \frac{1}{\sin^4(\varphi/2)}. \quad (7.3)$$

Соотношение (7.3) с учетом коэффициента пропорциональности, зависящего от зарядов ядра и α -частицы, а также от ее кинетической энергии, называется формулой Резерфорда. Формула Резерфорда позволяет провести экспериментальную проверку планетарной модели атома. Действительно, если направить однородный поток α -частиц, летящих с почти одинаковыми скоростями, на фольгу, достаточно тонкую, чтобы вероятность двукратного рассеяния одной α -частицы была малой, то можно подсчитать число частиц, рассеянных в описанном выше диапазоне углов от φ до $\varphi + \Delta\varphi$ при различных углах φ . Обозначим это число N_φ и

умножим его на $\sin^4(\varphi/2)$. Из соотношений (7.2) и (7.3) следует, что если модель Резерфорда справедлива, то полученное произведение должно быть постоянным для любых значений φ .

Теория рассеяния частиц на кулоновском центре дана Резерфордом в уже упоминавшейся работе 1911 г. Гейгер и Марсден взялись за ее экспериментальную проверку, на которую у них ушло два года. В 1913 г. они опубликовали статью, подводившую итог их исследований.

Нарис. 56 показана схема установки Гейгера и Марсдена. Она «состояла в основном из прочной цилиндрической металлической камеры B , где помещался источник α -частиц R , рассеивающая фольга F и микроскоп M , на котором был жестко закреплен экран из сульфида цинка S . Камера укреплялась на круглой платформе A с делениями по образующей; платформа могла вращаться благодаря коническому герметичному сочленению C . При повороте платформы вокруг своей оси камера, а вместе с ней и микроскоп перемещались, тогда как рассеивающая фольга и излучающий источник оставались неподвижными, поскольку они были укреплены на трубке T , которая в свою очередь была прикреплена к станине L . Камера B сверху прикрывалась матовым стеклом P и могла быть откачана через трубку T ».

Следует отметить, что Гейгеру и Марсдену пришлось нелегко. Визуальный подсчет вспышек-сцинтилляций на экране из сернистого цинка, вызываемых падающими на него α -частицами, был крайне



Ханс Вильгельм Гейгер

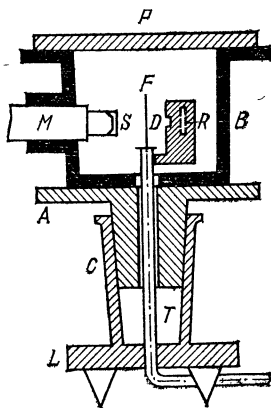


Рис. 56. Схема установки Гейгера и Марсдена



Эрнст Марсден

утомительным занятием. Подсчет сцинтилляций при изучении рассеяния на большие углы затруднялся люминесценцией экрана под действием β - и γ -лучей, поскольку в этих условиях экран находился близко к источнику R . На результатах опыта сказывались и случайные акты рассеяния на стенках камеры и краях диафрагмы, ограничивавшей пучок α -частиц. При анализе опытных данных необходимо было учитывать естественный радиоактивный фон, уменьшение интенсивности радиоактивного источника с течением времени и другие факторы.

На рис. 57 представлены графики, построенные по результатам, полученным Гейгером и Марсденом для листов фольги из серебра и золота. Видно, что для больших углов φ произведение $N_{\varphi} \sin^4(\varphi/2)$ остается почти постоянным, что свидетельствует в пользу модели Резерфорда. С уменьшением угла наблюдается отклонение от теоретической зависимости. О них авторы эксперимента писали:

«Отклонения носят довольно систематический характер... Однако любая, хотя бы и незначительная асимметрия в аппаратуре, а также другие причины могли систематическим образом изменять результаты, так что... отклонение отношений (N_{φ} и $1/\sin^4(\varphi/2)$).— С. Ф.) от постоянных значений лежат, вероятно, в пределах ошибок измерений. Таким образом, эксперименты доказали, что число α -частиц, рассеянных в определенном направлении, изменяется с углом как $\operatorname{cosec}^4(\varphi/2)$ ».

Итак, результаты Гейгера и Марсдена подтвердили гипотезу Резерфорда. Но это был не только триумф научной смелости великого английского физика. Это был и новый шаг закона Кулона по пути расширения его «владений». Формула Резерфорда, основанная на законе Кулона, была подтверждена для рассеяния микрообъекта — α -частицы на микрообъекте — ядре атома. Следовательно, закон Кулона справедлив и для масштабов, всего в несколь-

ко раз превосходящих размеры атомного ядра. Как оценить эти масштабы?

Рассмотрим упругое рассеяние назад ($\varphi=180^\circ$) α -частицы, налетающей на ядро атома, например, серебра. Поскольку в целом рассеяние хорошо описывается соотношением (7.3), базирующимся на законе Кулона, то мы

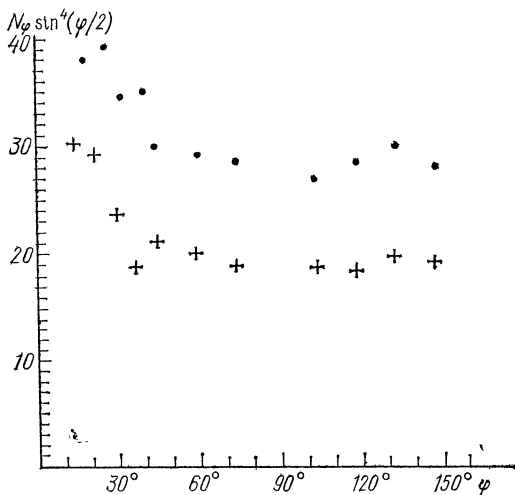


Рис. 57. Результаты опытов Гейгера и Марсдена по исследованию рассеяния α -частиц. Точками показаны данные для серебряной фольги, крестиками — для золотой

можем считать, что частица подойдет к ядру на минимальное расстояние b , определяемое законом сохранения энергии, который запишется в виде

$$\frac{mv^2}{2} = \frac{2Ze^2}{4\pi\epsilon_0 b},$$

где m и v — масса и скорость α -частицы, Z — заряд ядра. Отсюда нетрудно найти b :

$$b = \frac{Ze^2}{\pi\epsilon_0 mv^2}.$$

Воспользуемся данными Резерфорда относительно $v=2 \cdot 10^7$ м/с, $m=6,67 \cdot 10^{-27}$ кг, Z (серебро)=47. Тогда $b=1,6 \cdot 10^{-14}$ м.

Значит, области расстояний $b \simeq 10^{-14}$ м еще подвластны закону Кулона. Правда, тут же следует добавить — для взаимодействия относительно тяжелых частиц, таких как α -частица и ядро атома. Если же говорить об электронах...

От классической электродинамики к электродинамике квантовой

Становление планетарной модели атома — это, конечно, важное, но далеко не единственное событие в периоде «бури и натиска» в истории физики начала XX в. Параллельно с исследованием радиоактивности шло развитие теории излучения, формировались новые представления о пространстве и времени — одним словом, происходила крупнейшая научная революция. О ней написаны десятки и сотни статей и книг и, казалось бы, этот период истории физической науки изучен и описан с удивительной полнотой. И все же, задумываясь над отдельными эпизодами этой истории, не перестаешь удивляться теснейшей взаимосвязи разнообразных открытий, теорий и экспериментов, которая просматривается с высоты современных достижений физики. Вот и сейчас, когда пришло время рассказать о том, как были установлены границы применимости закона Кулона, автор испытывает большие затруднения. Кажется, что нельзя не упомянуть и об этом открытии, и о той гипотезе, и о важных экспериментах. Материал разрастается, а повествование нужно уже заканчивать. Выход один — попробовать нарисовать лишь общую схему событий, отбрасывая хотя и интересные, но все же второстепенные детали.

Начнем с того, что еще до расширения сферы полномочий закона Кулона вследствие работ Резерфорда и его сотрудников над классической электродинамикой начали сгущаться тучи. В 1900 г. выдающийся немецкий ученый М. Планк предложил формулу, описывающую распределение энергии в спектре излучения некоего идеализированного объекта — абсолютно черного тела. Эта формула удивительно точно описывала имевшиеся экспериментальные результаты. В то же время ее никак не удавалось вывести на основе представлений классической физики. Планк смог обосновать формулу только когда отказался от представления о непрерывности процесса излучения энергии, на котором базировалась классическая электродинамика, и ввел представления о квантовом (дискретном) характере излучения. Планк ввел и новую фундаментальную постоянную — квант действия *) $h = 6,62 \cdot 10^{-34}$ Дж·с.

Еще более радикальный шаг сделал А. Эйнштейн. Его работа «Об одной эвристической точке зрения, касающейся

*) Действием называют физическую величину, имеющую размерность «энергия×время».

возникновения и превращения света», опубликованная в 1905 г., начинается такими словами:

«Между теоретическими представлениями физиков о газах или других весомах телах и максвелловской теорией электромагнитных процессов в так называемом пустом пространстве существует глубокое формальное различие. Состояние любого тела мы считаем полностью определенным, если известны координаты и скорости хотя и очень большого, но все же конечного числа атомов и электронов; напротив, для определения электромагнитного состояния пространства мы используем непрерывные функции в этом пространстве, так что для полного описания электромагнитного состояния пространства недостаточно конечного числа величин. Согласно теории Максвелла, во всех электромагнитных, а значит и световых, явлениях энергию следует считать величиной, непрерывно распределенной в пространстве, тогда как энергия весомаго тела, по современным физическим представлениям, складывается из энергий атомов и электронов. Энергия весомаго тела не может быть раздроблена на сколь угодно большое число произвольно малых частей, тогда как энергия пучка света, испущенного точечным источником, по максвелловской (или вообще по любой волновой) теории света, непрерывно распределяется по все возрастающему объему».

Для преодоления указанного различия Эйнштейн предложил рассматривать световой поток как совокупность неделимых квантов энергии, «поглощаемых или возникающих только целиком». Так родилось представление о кванте света или фотоне, энергия которого определяется его частотой ν : $\epsilon = h\nu$. Хотя Эйнштейну удалось с помощью представления о фотонах объяснить особенности нескольких физических явлений, в целом физики восприняли его теорию скептически — слишком непривычным казалось сочетание в одном объекте и корпускулярных, и волновых свойств. В течение ряда лет Эйнштейн практически в одиночку разрабатывал квантовую теорию излучения. В 1916 г. он опубликовал работу, в которой ввел новую характеристику фотона — импульс. Эйнштейн писал:

«Почти все теории теплового излучения основываются на рассмотрении взаимодействий между излучением и молекулами. Однако в общем ограничиваются рассмотрением обмена *энергией*, не учитывая обмена *импульсом*. Это легко оправдывается, ибо малая величина передаваемых излучением импульсов приводит к тому, что в действительности последние почти всегда отстают перед дру-

гими факторами, вызывающими движение. Но в *теоретическом* рассмотрении такие малые действия нужно считать равнозначными наряду с бросающимся в глаза переносом энергии посредством излучения, поскольку энергия и импульс непосредственно связаны друг с другом; поэтому теорию можно считать правильной лишь в том случае,

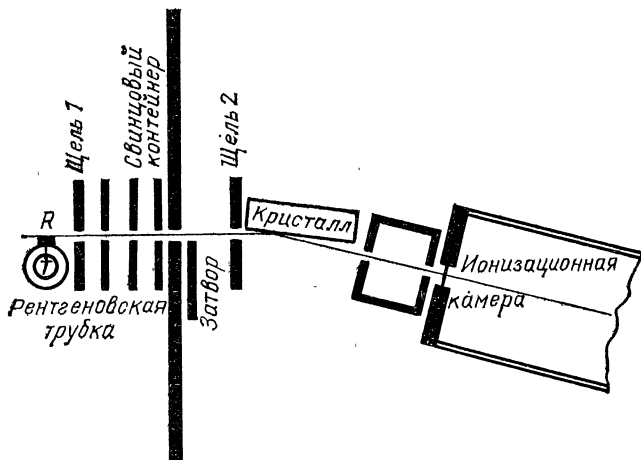


Рис. 58. Схема установки Комптона. Рентгеновские лучи, исходящие из специальной трубки T , рассеивались на образце R (рисунок соответствует углу рассеяния $\theta=90^\circ$). Рассеянное излучение проходит через систему щелей и анализируется спектрометром (кристалл+ионизационная камера)

если показано, что импульсы, переносимые, согласно этой теории, от излучения к веществу, приводят к таким движениям, которых требует теория тепла».

Импульс фотона равен $p_\phi = h\nu/c$. Ко времени написания работы Эйнштейна было исследовано лишь одно явление, связанное с переносом импульса светом, — давление света. Однако давление света — коллективный эффект, создаваемый огромной совокупностью фотонов; он одинаково удовлетворительно объясняется как квантовой теорией излучения, так и теорией электромагнитного поля Максвелла. Поэтому наиболее убедительным подтверждением теории Эйнштейна мог бы быть какой-либо эффект, вызванный проявлением импульса отдельного фотона.

Такой эффект был открыт в 1923 г. американским физиком А. Комптоном. При изучении рассеяния рентгеновских лучей на различных веществах (рис. 58) он обнаружил, что часть рассеянного излучения характеризуется длиной

волны, отличной от длины волны падающего излучения. На рис. 59 показаны результаты двух серий измерений Комптона, полученные с использованием щелей разной

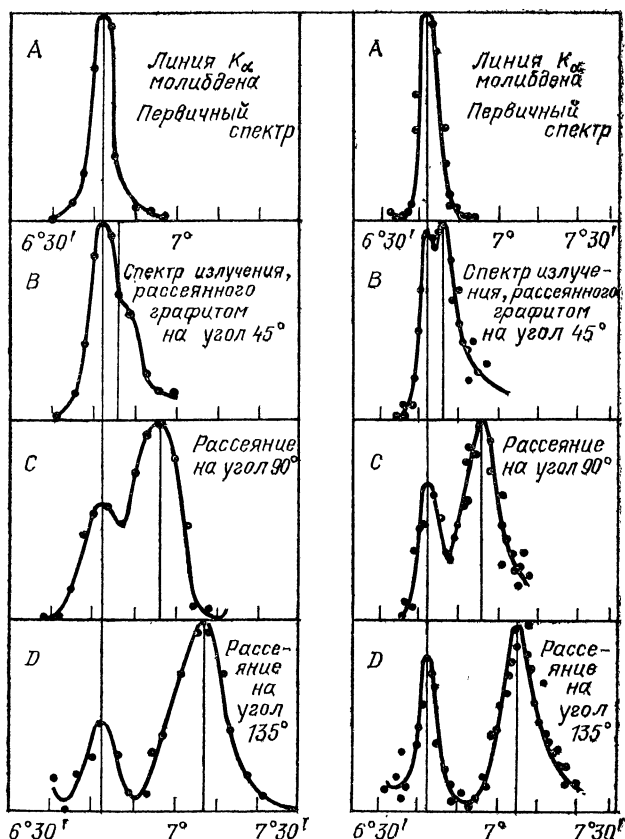


Рис. 59. Результаты экспериментов Комптона. Увеличение угла скольжения по отношению к кристаллу спектрометра (кальциту) соответствует росту длины волны рассеянного излучения

ширины. Несмотря на некоторые различия в правых и левых графиках на их основе можно выявить следующие закономерности обнаруженного явления. В спектре рассеянного излучения, кроме линии с длиной волны первичного излучения молибдена (несмещенная компонента), присутствует линия с иной, большей длиной волны (смещенная компонента). При этом разность длин волн этих компонент растет с увеличением угла рассеяния. Проводя опыты

с рассеивателями другой природы, Комптон установил, что общие закономерности эффекта не зависят от того, на каком материале происходит рассеяние.

Данные Комптона противоречили классической теории. Действительно, она утверждает, что рассеянное излучение возникает вследствие колебаний электронов вещества, возбужденных под действием электрической компоненты падающей на это вещество электромагнитной волны. Но эти вынужденные колебания могут происходить только с

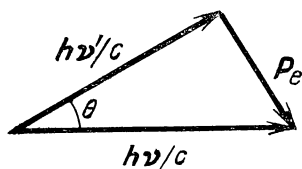


Рис. 60. Диаграмма импульсов для комптоновского рассеяния

частотой вынуждающей силы, т. е. с частотой первичной волны. Следовательно, рассеянное излучение не должно отличаться по спектральному составу от первичного излучения. Эта красивая и простая картина, увы, оказалась не соответствующей действительности...

Хотя Комптон был по специальности экспериментатором, он сам дал элементарную теорию обнаруженного эффекта. Для объяснения наблюдавшихся закономерностей ему пришлось обратиться к квантовой теории излучения в том виде, в каком ее разработал Эйнштейн. Комптон предположил, что квант рентгеновского излучения испытывает рассеяние на практически свободном электроне, который для простоты можно считать покоящимся. При этом выполняются законы сохранения энергии и импульса. Диаграмма импульсов для комптоновского рассеяния показана на рис. 60, где импульс фотона до рассеяния $p_\phi = h\nu/c$, импульс рассеянного фотона $p'_\phi = h\nu'/c$, p'_e — импульс электрона отдачи (до рассеяния $p_e = 0$). Поскольку эффект рассеяния фотона релятивистский, то при записи законов сохранения следует пользоваться релятивистскими формулами для импульса и энергии электрона. Соответствующая система уравнений имеет вид

$$\left(\frac{h\nu}{c}\right)^2 = \left(\frac{m_e v}{\sqrt{1-v^2/c^2}}\right)^2 - \left(\frac{h\nu'}{c}\right)^2 + 2\left(\frac{h}{c}\right)^2 \nu\nu' \cos \theta, \quad (7.4)$$

$$h\nu + m_e c^2 = h\nu' + \frac{m_e c^2}{\sqrt{1-v^2/c^2}},$$

где θ — угол рассеяния, m_e — масса электрона, v — его скорость после акта рассеяния, c — скорость света. Решение системы уравнений (7.4) для данного угла θ (при пере-

ходе от частот к длинам волн) дает

$$\lambda' - \lambda = \Lambda_e (1 - \cos \theta), \quad (7.5)$$

где $\Lambda_e = h/m_e c$ — постоянная, называемая комptonовской длиной волны электрона, числовое значение которой равно $\Lambda_e = 2,42 \cdot 10^{-12}$ м *).

Теория Комптона хорошо объясняла основную закономерность наблюдавшегося эффекта: длина волны рассеянного излучения растет с увеличением угла рассеяния. Отметим, что присутствие в спектре рассеянного излучения несмещенной компоненты Комpton объяснил наличием в веществе электронов, сильно связанных с ядрами атомов, которые тоже участвуют в процессе рассеяния. При взаимодействии с таким электроном рентгеновский квант рассеивается как бы на частице с массой не электрона, а ядра, и поскольку масса ядра в тысячи раз превосходит массу электрона, то, как видно из формулы для комptonовской длины волн, соответствующая разность $\lambda' - \lambda$ очень мала.

Обнаружение эффекта Комптона не только подтвердило справедливость квантовых представлений об электромагнитном излучении. Оно еще более остро поставило вопрос о разработке непротиворечивой электродинамики, которая учитывала бы такие квантовые эффекты, как эффект Комптона. В истории физики можно привести немало примеров, когда результаты того или иного эксперимента не вписывались в существовавшие в это время теории, что приводило к пересмотру старых представлений и выработке новых. Ситуация, которая сложилась к середине 20-х гг. XX в. в электродинамике, была несколько иной. Существовали параллельно и как бы независимо друг от друга теория Максвелла и феноменологическая квантовая теория излучения, причем каждая удовлетворительно объясняла определенный круг явлений. Самое удивительное состояло в том, что согласно представлениям физиков о единстве материального мира все эти явления имели одну и ту же природу. Было ясно, что от двойственности в теоретических представлениях следует избавляться. Борьба за единство и последовательность в теоретическом описании электромагнитных явлений привела к созданию квантовой электродинамики (КЭД).

Представления КЭД сильно отличаются от тех, на которых основана классическая электродинамика. Например,

*) Иногда комptonовской длиной волны электрона называют величину $\lambda_e = \Lambda_e / 2\pi$,

в классической теории взаимодействие двух покоящихся электронов описывается так: один электрон создает вокруг себя электрическое поле, которое действует на второй. В рамках КЭД это взаимодействие рассматривается как обмен так называемыми виртуальными фотонами — квантами электромагнитного поля *). Таким образом, в микромире простой закон Кулона уже не отражает физическую реальность. Читатель может удивиться: а как же масштабы, определенные в опытах Гейгера и Марсдена, $\approx 10^{-14}$ м? Мы должны успокоить читателя. Здесь нет противоречия. Масштабом, определяющим размеры областей, в которых становятся существенными квантовые релятивистские эффекты, оказывается комптоновская длина волны частицы. Продемонстрируем это лишь на одном примере.

Допустим, что электрон локализован в области пространства с размером порядка его комптоновской длины волны (иными словами, неопределенность его координаты $\Delta x \approx \lambda_e$). Тогда неопределенность импульса электрона Δp можно оценить из соотношения Гейзенберга: $\lambda_e \Delta p \geq h/2\pi$ или $\Delta p \geq m_e c$.

Но это означает, что неопределенность энергии электрона оказывается сравнимой с его энергией покоя $m_e c^2$ и, следовательно, в этих условиях, в принципе, могут происходить такие процессы, как рождение электрон-позитронных пар (для этого требуется энергия, не меньшая чем $2m_e c^2$, так как масса позитрона равна m_e), которое не описывается классической электродинамикой.

Как мы уже говорили, для электрона $\lambda_e \approx 10^{-12}$ м. Для протона, который обладает массой, в 1836 раз большей, чем электрон, комптоновская длина волны составляет $\lambda_p \approx 2 \cdot 10^{-16}$ м. Поэтому размеры областей, в которых закон Кулона оказывается бессильным, для частиц, отличающихся по массе, различаются. Поскольку электрон — самая легкая из известных заряженных частиц, то для него размер такой области наибольший.

Итак, первая половина XX в. принесла закону Кулона как «успехи», так и «неудачи». Как это происходило со многими другими законами физики, были определены границы его применимости. Однако на этом биография основного закона электростатики не закончилась.

*) Подробнее о квантовой электродинамике можно узнать, прочитав статью «Квантовая теория поля» в книге: Физика микромира. Маленькая энциклопедия.— М.: Советская энциклопедия, 1980 или книгу: Фейнман Р. КЭД — странная теория света и вещества.— М.: Наука, 1988.— Библиотечка «Квант», вып. 66.

НОВЫЕ ПОДТВЕРЖДЕНИЯ

Человека, не связанного с физикой непосредственно, должна, вероятно, удивлять настойчивость ученых. В опытах, проведенных в Кавендишской лаборатории по инициативе Максвелла, закон «обратных квадратов» был проверен с очень большой точностью. Возможная поправка к показателю степени, равному 2, оказалась меньше чем $1/21\ 600$. Так и хочется сказать: «Куда уж точнее!» Но нет, история подтверждения закона Кулона на этом не завершилась. Прошло чуть более полувека, и эта экспериментальная задача вновь оказалась в поле зрения ученых. В чем же причина все новых и новых повторений одних и тех же физических экспериментов, в частности опытных проверок закона взаимодействия точечных электрических зарядов?

Как это часто бывает, на такой вопрос нельзя дать однозначный ответ. Здесь сказываются несколько факторов. Прежде всего любая физическая теория базируется на данных опыта. Но никакой физический эксперимент не может быть абсолютно точным. Поэтому физиков никогда не оставляет желание получше проверить основания своих теорий. Иногда ситуация складывается иначе: усовершенствованная теория предсказывает какой-то эффект, который можно наблюдать только при значительном повышении точности уже известных опытов. Большую роль играет и прогресс техники физического эксперимента. Случается, что создание одного прибора приводит к резкому расширению возможностей в постановке опытов, ставших уже классическими. Во всех этих случаях один и тот же физический эксперимент ставится снова и снова.

В истории повторений опытов по проверке закона Кулона на том или ином этапе свою роль сыграли все перечисленные факторы. Так, интерес Максвелла к этой проблеме был обусловлен его исследованиями, приведшими к созданию теории электромагнитного поля, в которой закон Кулона является одним из основных. Самые современные

проверки тоже стимулированы развитием физической теории. А опыт, с которого мы начнем обзор экспериментов, посвященных закону Кулона и проведенных в XX в., был связан с прогрессом техники физических измерений.

Можно только удивляться, какой большой путь прошла в своем развитии измерительная техника в XX в. Ламповая и полупроводниковая электроника совершила буквально переворот в этой области. Но вспомним, что простейший электровакуумный прибор — двухэлектродная лампа — был изобретен Дж. Флемингом в 1904 г., а первый полупроводниковый транзистор создан лишь в конце 40-х гг. Следует также отметить исключительно быстрое превращение уникальных физических приборов в серийные устройства, используемые не только в научных лабораториях, но и на производстве, в вузах и даже школах. Школьнику наших дней трудно представить, что осциллограф, с которым он сталкивается в физическом кабинете, еще в 30-е гг. представлял предмет гордости многих исследовательских центров. А как быстро вошли в обиход квантовые генераторы — лазеры! Изменение скорости разработки и внедрения новой измерительной техники не могло не сказаться и на тематике экспериментальных исследований.

Вслед за Кавендишем и Максвеллом

В истории физики 30-е гг. нашего столетия обычно связываются с бурным развитием ядерной физики. Такие события, как открытия нейтрона и позитрона, предсказание существования нейтрино, открытие искусственной радиоактивности, как бы «затеняли» многие другие важные исследования, выполненные в это время. Между тем 30-е гг. — период становления радиофизики, методы которой играют исключительно важную роль в современном физическом эксперименте. Интенсивное совершенствование измерительных приборов, основанных на использовании электронных ламп, и связанный с ним прогресс в теории колебаний в значительной степени определили пути физики в последующие два десятилетия. Именно совершенствование способов измерения малых электрических сигналов позволило провести новую проверку закона Кулона. Ее осуществили два американских физика, работавших в Ворчестерском политехническом институте, — С. Плимpton и У. Лоутон.

Они, как за шестьдесят лет до этого Максвелл, решили использовать метод Кавендиша. При этом перед ними

стояла задача избавиться от основных источников погрешностей, характерных для опытов Максвелла — Макалистера: «спонтанной ионизации» и контактной разности потенциалов.

При использовании электростатических методов измерений особое внимание со времен Кулона уделялось подавлению утечки заряда. Но хорошая изоляция иногда... затрудняет проведение опыта. Представьте себе, что по какой-то случайной причине внутренний шар в опыте Кавендиша приобрел заряд. При малых токах утечки этот заряд будет сохраняться на шаре очень долго, что, естественно, скажется на результатах опыта. Именно эту трудность имели в виду Плимpton и Лоутон, когда говорили о «спонтанной ионизации».

Второй недостаток методики Кавендиша и Максвелла — Макалистера состоял в том, что электрический контакт между внешней и внутренней сферами то устанавливался, то прерывался. В этих условиях, даже если шар и зонд, которым его касаются, сделаны из одного и того же материала, возможно возникновение так называемой контактной разности потенциалов (вследствие загрязненности поверхности и других причин). Эту разность потенциалов можно по ошибке принять за следствие отклонения закона Кулона от точного закона «обратных квадратов».

Американские физики решили преодолеть эту трудность с помощью двух принципиальных видоизменений схемы Кавендиша. Они перешли от чисто статических измерений к квазистатическим: потенциал внешнего шара менялся периодически, но с очень малой частотой — всего 2 Гц. При этом регистрировалось переменное напряжение той же частоты, возникавшее между внешним и внутренним шарами. Ясно, что наличие постоянного заряда (потенциала) на этом шаре не может сказаться на результатах опыта. Так была решена проблема «спонтанной ионизации».

Этот же прием позволил подавить влияние контактной разности потенциалов, поскольку во время эксперимента никаких переключений контактов не происходит. Однако в наибольшей степени от всех электрических помех помог освободиться второй прием, использованный Плимптоном и Лоутоном. Предварительные теоретические расчеты показали, что результат опыта не изменится, если вместо сплошной внутренней сферы использовать только одну полусферу, а на месте другой расположить систему регистрации. Схема установки Плимптона и Лоутона показана на рис. 61.

Внешняя сфера А, сделанная из спаянных стальных

листов, имела диаметр около 1,5 м, внутренняя полусфера В—1,2 м. Полусфера В удерживалась на стеклянных изоляторах. Детектор *D* вместе с гальванометром *G*, предназначенным для регистрации изменений потенциала, помещался в медную коробку; детектор присоединялся и к внешней сфере, и к внутренней полусфере.

Проблему считывания показаний гальванометра, находящегося внутри сферы *A*, авторы эксперимента решили довольно оригинально. Они сделали в этой сфере окно *W*.

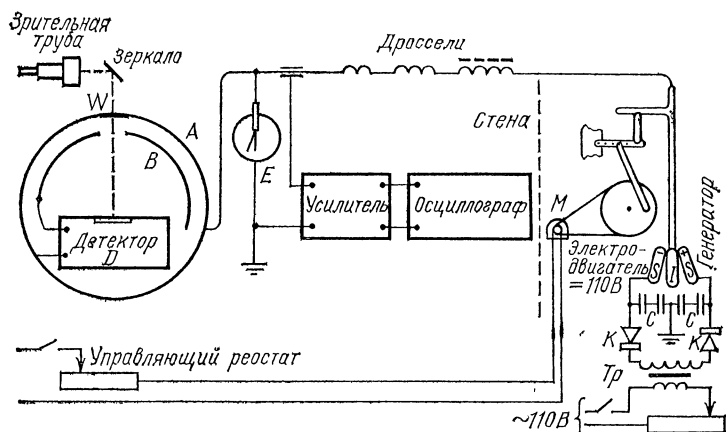


Рис. 61. Схема опытов Плимптона и Лоутона

Через него свет лампы, которая питалась от батарей усилителя, находившегося в медной коробке, попадал на зеркало и отражался в телескопическую трубу. Чувствительность системы регистрации в опыте была столь велика, что при использовании обыкновенного стеклянного окна помехи, обусловленные наличием отверстия в проводящей сфере *A*, оказывались весьма существенными. Поэтому, дабы сделать всю поверхность сферы проводящей, экспериментаторы воспользовались окном в форме кюветы со стеклянным дном, в которую наливалась соленая вода, обладавшая достаточно высокой проводимостью; уровень воды находился вровень с поверхностью сферы *A*.

Следует подробнее рассказать о проблемах, с которыми столкнулись Плимpton и Лоутон при создании системы регистрации малых разностей потенциалов между сферами. В этой системе исследуемый сигнал подавался на вход специального лампового усилителя, к выходу которого был подключен чувствительный гальванометр постоянного тока.

Последнее обстоятельство может вызвать удивление — ведь искомый сигнал должен быть переменным. Однако здесь нет никакой ошибки. Просто авторы опыта прекрасно знали о том, что рамка чувствительного гальванометра представляет собой колебательную систему (вспомните весы Кулона!). Обычно — при работе на постоянном токе — колебания рамки демпфируются, т. е. их специально гасят, и рамка движется в апериодическом режиме. Но демпфирование можно убрать, и тогда рамка сможет колебаться, причем с небольшой частотой. Выбор частоты 2 Гц для переменного напряжения, подаваемого на внешнюю сферу, определялся как раз тем, что она совпадала с собственной частотой колебаний рамки использовавшегося гальванометра. Следовательно, при наличии внешнего периодического возмущения с частотой 2 Гц рамка могла эффективно «откликаться» на него вследствие явления резонанса.

Здесь необходимо пояснить, почему исследователи выбрали столь неудобный диапазон частот, из-за которого пришлось применить нетрадиционный метод регистрации, хотя в 30-е гг. уже существовали достаточно чувствительные приборы переменного тока, рассчитанные на большую частоту. Дело в том, что на больших частотах начинают сказываться электромагнитные эффекты, происхождение которых можно понять, если вспомнить, что конденсатор не представляет собой бесконечно большое сопротивление для переменного тока и что оно убывает с ростом частоты тока. Эти эффекты также могут затенять основное явление. При такой маленькой частоте, как 2 Гц, их величина оказывается пренебрежимо малой.

Согласно теории, обнаруживаемая величина поправки q должна быть тем меньше, чем больший потенциал сообщается внешней сфере. В рассматриваемом опыте сфера A заряжалась до потенциала 3000 В. Для того чтобы получить столь высокое напряжение низкой частоты, Плимptonу и Лоутону пришлось сконструировать специальный «гребенчатый» генератор (рис. 62), в котором гребенка индуктора I попеременно входила в промежутки двух статоров S . Индуктор приводился в движение двигателем постоянного тока M , питание которого поддерживалось реостатом R . Разность потенциалов между статорами поддерживалась постоянной с помощью батареи конденсаторов CC , которая заряжалась посредством высоковольтного трансформатора и двух кенотронов K — мощных двухэлектродных ламп, применяемых для выпрямления переменного тока промышленной частоты (напряжение, подававшееся на первичную обмотку

трансформатора, составляло 110 В). Заряд конденсаторов мог сохраняться практически неизменным в течение нескольких часов, поэтому после их зарядки во избежание помех на время проведения эксперимента трансформатор отключался от источника переменного напряжения.

Дополнительными, хотя и важными, частями установки были дроссели (катушки с большой индуктивностью), служившие фильтрами побочных высокочастотных возмущений, которые могли исходить от генератора. Для контроля

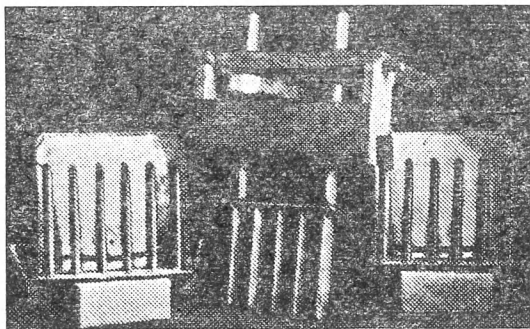


Рис. 62. «Гребенчатый» генератор в разобранном виде

напряжения, подававшегося в ходе опыта на сферу *A*, использовались электрометр *E*, усилитель и осциллограф.

В результате анализа проведенных наблюдений Плимpton и Лоутон пришли к выводу, что переменной разности потенциалов с частотой 2 Гц между внешней сферой *A* и внутренней полусферой *B*, обнаружимой с помощью имевшейся в их распоряжении аппаратуры, нет. Предел на точность опыта накладывали так называемые тепловые шумы — хаотические сигналы, возникающие на входе усилителя вследствие флуктуаций плотности электронов во входном сопротивлении усилителя. Амплитуда этих шумов достигала 0,5 мкВ, и меньшее напряжение, обусловленное возможным отклонением от закона Кулона, если бы оно даже и возникало, измерить было невозможно. Поэтому ограничение на поправку *q*, полученное Плимптоном и Лоутоном, имеет вид

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

На этом можно было бы поставить точку в рассказе о первом в XX в. опыте по проверке закона Кулона. Однако стоит упомянуть о замечании, сделанном авторами в заклю-

чение статьи. Оно было озаглавлено «Эффект тяготения». В нем отмечалось, что при выводе формул, составляющих теоретическую основу опыта, предполагалось, что плотность заряда по всей поверхности внешней сферы одинакова. Между тем под действием тяготения симметрия в расположении электронов должна нарушаться — внизу их должно быть больше, чем сверху. Расчет показал, что максимальная разность потенциалов между точками поверхности сферы A не превосходит 10^{-10} В. Это означает, что в данном опыте, где минимальная измеряемая величина напряжения составляла 10^{-6} В, эффекты гравитации пренебрежимо малы. Так что же, этот раздел — «лишний» в работе Плимптона и Лоутона? Нет, своим замечанием они как бы показали, что точность физических экспериментов приближается к пределу, за которым нужно будет учитывать факторы, даже упоминание о которых раньше казалось странным. Это было как бы напутствие экспериментаторам новых поколений.

«От двух до пяти»

Если название этого параграфа напомнило читателю известную книгу К. И. Чуковского, посвященную развитию детей-дошкольников, то оно выполнило свое назначение: здесь пойдет речь о развитии уже рассмотренных идей и методов, характеризующем «взросление» экспериментальной физики. Но это название — не только символ. Мы расскажем об опытах, проведенных со вложенными сферами, число которых возросло... с двух до пяти. Однако обо всем — по порядку.

Развитие электронной техники в 60-е гг. привело к созданию прибора нового типа — синхронного усилителя. Этот прибор может выполнять функции, сходные с теми, которые выполнял «резонансный» электрометр в опытах Плимптона и Лоутона: выделять сигнал нужной частоты. Но при этом синхронный усилитель обладает существенным преимуществом, поскольку он может выделять сигнал, имеющий не только интересующую экспериментатора частоту, но и фазу, что, конечно, резко уменьшает влияние различных помех. Отсюда и слово «синхронный» в названии прибора. Эффект синхронного детектирования (обнаружения сигнала) реализуется благодаря тому, что на вход усилителя специально подается напряжение, называемое опорным, фаза которого совпадает с фазой интересующего исследователя сигнала. Прибор как бы сравнивает фазы опорного и

исследуемого сигналов и выделяет, а затем и усиливает «полезную» составляющую последнего. Несмотря на простоту принципа действия синхронный усилитель представляет собой сложный электронный прибор. С его помощью можно обнаруживать сигналы с амплитудой менее 1 нВ (10^{-9} В).

Именно значительное увеличение чувствительности прибора для измерения переменного напряжения заставило группу физиков из лаборатории имени Дж. Генри Принстонского университета (США) в составе Д. Бартлета, П. Голдхагена и Э. Филлипса заняться проверкой закона Кулона. Эта группа воспользовалась идеей Плимптона и Лоутона и поместила измерительную систему внутрь установки. Однако члены принстонской группы внесли в методику проведения опыта важное новшество: высокое переменное напряжение подавалось на пару внешних сфер. Кроме того, регистрировалось не изменение потенциала внутренней сферы, а вариации разности потенциалов между парой внутренних сфер. Между этими двумя парами сфер помещалась еще одна сфера, о назначении которой будет сказано ниже. Параметры всех пяти сфер приведены в табл. 3.

Т а б л и ц а 3

Параметры сфер, использованных
в опытах Д. Бартлета, П. Голдхагена и Э. Филлипса

| Номер сферы | Материал | Средний диаметр, м | Толщина, см |
|----------------|----------|-----------------------|----------------|
| 5 | Алюминий | 2,96 | 0,06 |
| 4 | Сталь | 1,10 | 5 |
| 3 | Медь | 1,00 | 0,19 |
| 2 | Алюминий | 0,91 | 0,17 |
| 1 | Алюминий | 0,76 | 0,14 |

Общая схема установки принстонской группы показана на рис. 63. Сферы и часть электронного оборудования располагались внутри специального помещения, защищенного от электростатических воздействий. В сфере 1 помещались синхронный усилитель L , фотоприемник R , батарея аккумуляторов B и самописец C , на ленте которого фиксировался сигнал с выхода усилителя. Один из выходов последнего подключался к паре точек на сферах 1 и 2, располагавшихся на одном радиусе. Опорный сигнал, необходимый для работы усилителя, подавался от фотоприемника R , на который падал модулированный световой

поток от неоновой лампочки, проходивший через небольшие отверстия, просверленные во всех пяти сферах. Лампочка, в свою очередь, через усилитель была подключена к

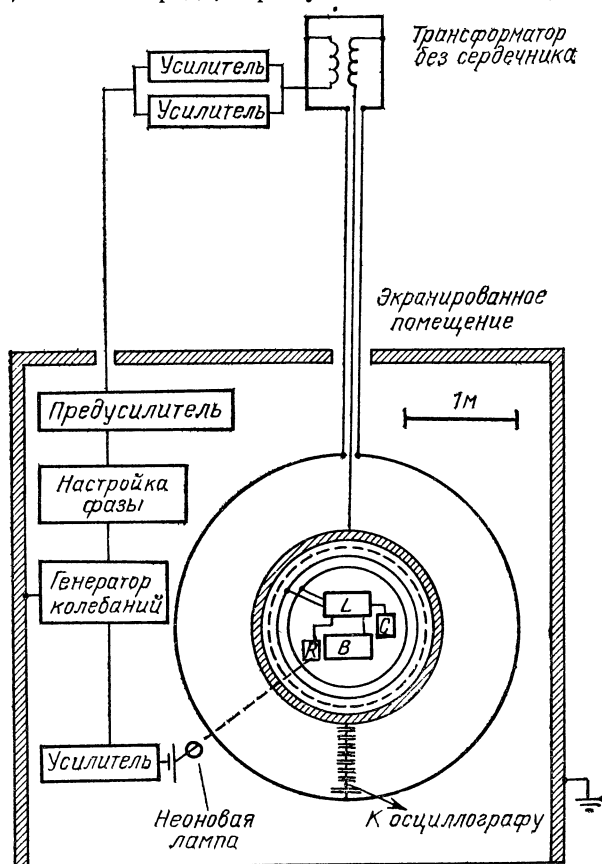


Рис. 63. Схема опытов принстонской группы

генератору, создававшему колебания фиксированной частоты.

Но формирование опорного сигнала — это побочная функция генератора. Его основная задача состояла в создании переменного синусоидального напряжения, которое после регулировки фазы, а также предварительного и основного усиления подавалось на первичную обмотку высоковольтного воздушного трансформатора, со вторичной обмотки которого напряжение в несколько десятков киловольт

передавалось по коаксиальному кабелю на сферы 5—4. Величина напряжения и его форма контролировались с помощью осциллографа, подключавшегося к батарее конденсаторов, которая соединяла сферы 4 и 5.

Итак, идея эксперимента ясна: как и в предшествующих опытах, ученые пытались зарегистрировать изменения электрического поля внутри сферы, потенциал которой менялся. Можно, конечно, было бы сразу перейти к изложению результатов. Но если не рассказать о трудностях, которые пришлось преодолеть принстонской группе, то у читателя может возникнуть ложное представление о тривиальности новой проверки закона Кулона. Поэтому обратимся к деталям опыта.

Перед учеными из Принстона, как когда-то перед Кавендишем, стояла проблема калибровки установки, т. е. определения, какой по величине отклик возникает в ней при подаче сигнала данной величины. Помните, Кавендиш когда-то решал ее с помощью эталонной емкости. Как же была осуществлена калибровка в рассматриваемом эксперименте? Чтобы услышать «живой голос» его авторов, приведем небольшую цитату из их работы «Экспериментальная проверка закона Кулона», опубликованной в ведущем американском физическом журнале «Physical Review» в 1970 г.:

«В эксперименте, где регистрирующая аппаратура спрятана в «черный ящик» и где ожидаемый отклик равен нулю, существует очевидная необходимость в проведении калибровочного измерения. Простейший способ калибровки детектора состоит в том, чтобы выяснить, какая часть приложенного высокого напряжения возникает между сферами 1 и 2. Удивительно, но сверление отверстия в сферах 4 и 2 (в отсутствие сферы 3.— С. Ф.) не дает эффекта. Стальная сфера столь толста, что даже отверстие диаметром 1 см не пропускает доступную измерению часть высокого напряжения в пространство между сферами 4 и 2, а сигнал, проходящий через отверстие в сфере 2, оказывается еще меньше. Этот факт мы обнаружили, когда просверлили отверстие для пучка света, обеспечивающего опорный сигнал; тем не менее все отверстия в стальной сфере во время проведения опыта закрывались *) специальными вставками или прикрывались металлическими экранами. Необходимый емкостный делитель напряжения был создан путем сверления

*) Закрывалось и отверстие для опорного сигнала: синхронный усилитель настраивался на нужную фазу до начала опыта, так что при его проведении нужда в опорном сигнале отпадала,

небольшого отверстия в сферах 4 и 2 и последующим заполнением их изолированной металлической вставкой. Эквивалентная схема показана на рис. 64. Таким образом удавалось добиться, чтобы между алюминиевыми сферами возникало напряжение, составлявшее примерно 10^{-12} величины высокого напряжения. Рассчитанный и измеренный калибровочные сигналы совпали с точностью до 30 %.

Если читателям не все понятно в эквивалентной схеме, приведенной на рис. 64, не беда. Главное — понять основную мысль: металлическая вставка играла роль своеобразной антенны, передававшей на сферы 1 и 2 сигнал, который можно было измерить с помощью синхронного усилителя. Согласие расчета и данных измерений свидетельствовало о работоспособности всей установки.

Следует, конечно, пояснить, зачем вообще понадобилось увеличивать число вложенных сфер по сравнению с предшествующими опытами. Наличие наружной сферы способствовало устранению внешних паразитных наводок на стальную сферу 4, что сделало опыт более надежным. Измерение разности потенциалов между двумя алюминиевыми сферами на частотах 250 и 2500 Гц (именно эти частоты использовала принстонская группа) благодаря большой емкости такого сферического конденсатора позволяло избавиться от влияния тепловых шумов; в описываемом эксперименте основную роль играл другой вид шумов, величина которых уменьшалась с ростом частоты, что и определило выбор рабочих частот. Однако переход к большим частотам привел к тому, что начали сказываться активное и индуктивное сопротивления стальной сферы, вследствие чего потенциалы точек верхней и нижней полусфер, ее образующих, в один и тот же момент времени оказывались различными. Так, разность потенциалов между верхней и нижней точками этой сферы могла достигать до 10^{-3} В. Возникновение этого эффекта требует принятия дополнительных мер предосторожности. Для борьбы с ним стальная сфера была сделана толстой — это уменьшило ее сопротивление — и была установлена медная экранирующая сфера. Приме-

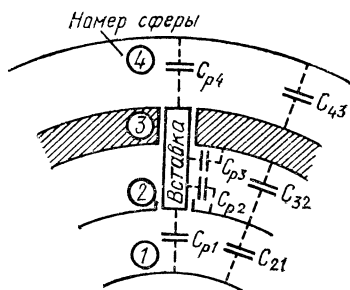


Рис. 64. Эквивалентная схема для калибровки установки из четырех вложенных сфер

нение пары внутренних сфер также способствовало подавлению этого эффекта.

Из нашего рассказа ясно, что внутренние сферы окружены переменными магнитными полями, из-за чего между точками, к которым подсоединен вход синхронного усилителя, возникает переменное напряжение, которое хотя и характеризуется «нужными» значениями частоты и фазы, в действительности не имеет никакого отношения к искомому эффекту. Чтобы исключить влияние паразитных индукционных явлений, экспериментаторы проводили измерения для разных пар точек на сферах (для различных углов, образованных радиусом, на котором выбирались точки, и вертикальной осью симметрии). Усреднение полученных значений напряжения позволяло исключить влияние индукции *).

Для получения более надежных результатов экспериментаторы проводили две различные серии измерений, принцип которых можно пояснить так. Регистрация разности потенциалов между сферами 1 и 2 при совпадении фаз высокого напряжения и опорного сигнала эквивалентна определению заряда сферического конденсатора Q . Если же изменить фазу высокого напряжения на 90° , не меняя настройки усилителя, то будет определяться величина, пропорциональная переменному току I , протекающему через этот конденсатор. Оба типа измерений равноправны и, как показал опыт, дают практически одинаковые результаты.

Как же проводились измерения на практике? Перед тем как закрыть полусферы, проверялась фазовая настройка усилителя: на выходе усилителя добивались максимального сигнала, совпадающего по фазе с сигналом генератора. Затем все полусферы складывались, а стальные полусферы еще и стягивались специальными болтами (рис. 65). После

*) Для тех, кто хорошо продумал содержание теоремы Гаусса², поясним, почему усреднение таких измерений представляет эффективное средство борьбы с влиянием индукции. При измерении разности потенциалов между точками, расположенными на одном радиусе, определяется лишь эффект, создаваемый радиальной компонентой электрического поля. Но радиальная компонента (точнее, ее часть), не связанная с отклонением от закона Кулона, а обусловленная электромагнитной индукцией, должна менять знак для разных частей сфер, поскольку поток вектора E через замкнутую поверхность равен нулю в силу отсутствия внутри сфер и на их поверхности избыточных зарядов. Это означает, что при усреднении измерений для разных пар точек можно добиться компенсации составляющих, обусловленных индукцией.

такой подготовки проводилась серия измерений, занимавшая обычно около четырех часов. В течение этого времени режим работы установки периодически изменялся. Сначала десять минут записывался сигнал на выходе усилителя при совпадении фаз высокого напряжения и сигнала генератора. Затем высокое напряжение отключалось и следующие десять минут велась «нулевая» запись. После этого высокое напряжение вновь включалось на десять минут, но уже с фазой, измененной на 180° . Полуразность сигналов, записанных в течение первой и третьей десятиминут, представляла искомый сигнал. Восемь таких полуразностей усреднялись, и среднее значение принималось за разность потенциалов между сферами 1 и 2 в данной серии (Q-измерение). Затем, после изменения фазы высокого напряжения, аналогичным образом проводились I-измерения. По окончании одной серии полусферы разъединялись, лента самописца с записью данных вынималась для их обработки, а вход усилителя присоединялся к новой паре точек. После этого верхние полусферы устанавливались на место, и начиналась новая серия.

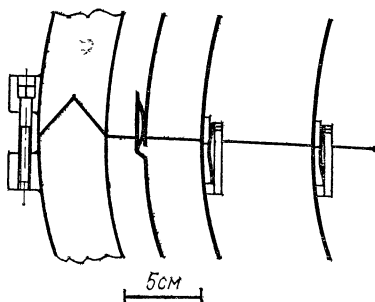


Рис. 65. Система соединения полусфер, образующих вложенные сферы

При проведении первых же опытов обнаружилось одно обстоятельство, заставившее экспериментаторов еще раз тщательно рассмотреть все детали установки. Оказалось, что результаты двух серий, проведенных для одной и той же пары точек съема сигнала, не совпадали между собой! Отсутствие повторяемости результатов для экспериментатора означает примерно то же, что сигнал бедствия SOS — для моряка. Начались поиски источника погрешностей. Вскоре выяснилось, что они обусловлены плохим электрическим контактом между стальными полусферами. Несмотря на специальную V-образную форму паза в верхней полусфере и соответствующего ему выступа на нижней (рис. 65), которая должна была обеспечить большую площадь контакта, и огромную массу полусферы (эту массу очень легко рассчитать, она оказывается равной 3000 кг), полусферы касались друг друга всего ... в 8 точках! Этот дефект был исправлен путем покрытия поверхности V-образного соеди-

нения оловянно-индиевым сплавом и его последующего золочения.

Итоговые данные измерений на двух частотах приведены в табл. 4 и 5. Из данных измерений на частоте 250 Гц

Таблица 4

Измерения на частоте 250 Гц
(действующее значение высокого напряжения 70 кВ)

| Расположение точек съема низкого напряжения | | Низковольтный сигнал $V_2 - V_1$, нВ | |
|---|-------------------------------|--|------|
| азимутальный угол *), градусы | полярный угол **), градусы | «Q» | «I» |
| ... | 0 | +0,1 | -0,5 |
| 0 | 60 | +1,5 | +1,1 |
| 0 | 60 | +0,4 | -0,2 |
| 120 | 60 | +0,4 | -1,4 |
| 240 | 60 | +0,2 | -0,9 |
| 0 | 97 | -0,3 | +1,1 |
| 0 | 97 | +2,1 | -0,2 |
| 0 | 110 | +0,2 | +0,1 |
| 0 | 170 | +0,5 | +0,8 |
| | Среднее значение | +0,6 | 0,0 |

*) Азимутальный угол определяет положение проекции радиуса в горизонтальной плоскости.
**) Полярным называется угол между радиусом и вертикальной осью.

следует, что отношение разностей потенциалов между сферами 1 и 2 и 4 и 5 оказывается равным

$$\left| \frac{V_2 - V_1}{V_4 - V_5} \right| \approx \frac{1,2 \text{ нВ}}{70 \text{ кВ}} = 1,7 \cdot 10^{-14}.$$

Для измерений на частоте 2500 Гц

$$\left| \frac{V_2 - V_1}{V_4 - V_5} \right| \approx \frac{0,3 \text{ нВ}}{40 \text{ кВ}} = 0,8 \cdot 10^{-14}.$$

В итоге использование этих значений для оценки верхней границы поправки q в законе Кулона дало

$$q < 1,3 \cdot 10^{-13}.$$

Точность проверки закона Кулона по сравнению с опытами Плимптона и Лоутона была повышена сразу на четыре порядка! Но когда результаты принстонской группы еще только готовились к печати, ее члены уже знали, что их

Измерения на частоте 2500 Гц
(действующее значение высокого напряжения 40 кВ)

| Расположение точек съема низкого напряжения | | Низковольтный сигнал $V_2 - V_1$, нВ | |
|---|---------------------------|--|-------|
| азимутальный угол, градусы | полярный угол, градусы | «Q» | «I» |
| ... | 0 | -0,15 | +0,24 |
| ... | 0 | +0,44 | ... |
| 20 | 60 | -0,19 | +0,29 |
| 240 | 60 | +0,36 | +0,01 |
| 0 | 97 | -0,12 | +0,42 |
| 0 | 135 | +0,16 | -0,31 |
| 0 | 170 | +0,31 | +0,10 |
| 0 | 170 | +0,09 | +0,06 |
| | Среднее значение | +0,12 | +0,12 |

результат превзойден другой группой американских исследователей. Правда, из предварительных частных сообщений следовало, что верхняя граница q снижена еще на порядок, до $1,1 \cdot 10^{-14}$. В действительности же...

**«Новая экспериментальная
проверка закона Кулона:
лабораторный верхний предел
массы покоя фотона»**

Так называлась работа трех физиков Э. Уильямса, Дж. Фаллера и Г. Хилла из Веслейского университета, которые провели наиболее точную на сегодняшний день проверку закона Кулона. Эта работа была опубликована в 1971 г. Как видно из ее названия, мотивы постановки экспериментов этой группы несколько отличались от мотивов их предшественников. В данном случае основную роль сыграло желание проверить гипотезу о том, что фотон обладает хотя и малой, но конечной массой покоя. Современная теория показывает, что возможное отклонение закона Кулона от точного закона «обратных квадратов» непосредственно связано с этой гипотезой. Однако оставим подробное обсуждение этого вопроса до следующей главы и рассмотрим особенности опытов Уильямса, Фаллера и Хилла.

Единственным существенным новшеством в этих опытах было использование высокочастотного напряжения, пода-

вавшегося на внешние... икосаэдры. Да, авторы эксперимента отказались от традиционных вложенных сфер и использовали 5 правильных многогранников, 20 граней которых имели форму равносторонних треугольников. Так вот, на внешнюю пару икосаэдров подавалось синусоидальное напряжение с амплитудой 5 кВ и частотой 4 МГц ($4 \cdot 10^6$ Гц). В остальном по принципу проведения этот опыт не отличался от эксперимента принстонской группы.

Однако принцип принципом, а реальная схема установки Уильямса и его коллег, как это видно из рис. 66, была сложнее, чем у принстонцев. Источником высокочастотных колебаний служил передатчик с кварцевой стабилизацией частоты и термостабилизацией. Синусоидальное напряжение через специальную катушку с малыми потерями (на научном языке — с высокой добротностью) подавалось на икосаэдры 4 и 5. Икосаэдры 1, 2 и 5 были сделаны из алюминия, а икосаэдры 3 и 4 — из меди; размеры внешнего икосаэдра составляли примерно 1,5 м. Исследуемый сигнал снимался с индуктора, который на схеме показан как катушка, присоединенная к икосаэдрам 1 и 2. Далее он подавался на синхронный усилитель, помещавшийся внутри икосаэдра 1. На схеме показаны составные части этого усилителя (усилитель, фильтры, смеситель, компаратор).

Опорный сигнал для синхронного усилителя получался с помощью схемы, показанной в верхней левой части рис. 66. Часть сигнала, подававшегося на внешние икосаэдры, попадала на вход осциллографа, к выходу которого подключалась система из фазовращателя, компаратора и буферного усилителя. Эти устройства осуществляли преобразование сигнала, основная цель которого — линейное изменение исходной фазы сигнала (со скоростью 360° за $1/2$ часа). Преобразованный сигнал управлял светодиодом, излучение которого по световоду направлялось внутрь системы икосаэдров. Там свет падал на вакуумный фотоэлемент, и световой сигнал снова преобразовывался в электрический, который и поступал на компаратор синхронного усилителя. Выделенное и усиленное исследуемое напряжение подавалось на преобразователь, переводивший величину этого напряжения в единицы частоты. После этого напряжение, модулированное по частоте, подавалось на светодиод, излучение которого по световоду выводилось наружу. Здесь оно попадало на фотодиод, который, в свою очередь, передавал сигнал в систему обработки (счетчик импульсов и фурье-анализатор). Для контроля за ходом опыта в пространстве

между икосаэдрами 1 и 2 была смонтирована схема для передачи на внутренние икосаэдры калибровочного сигнала (светодиод и калибровочный конденсатор). Измерительная система обладала чувствительностью, позволявшей

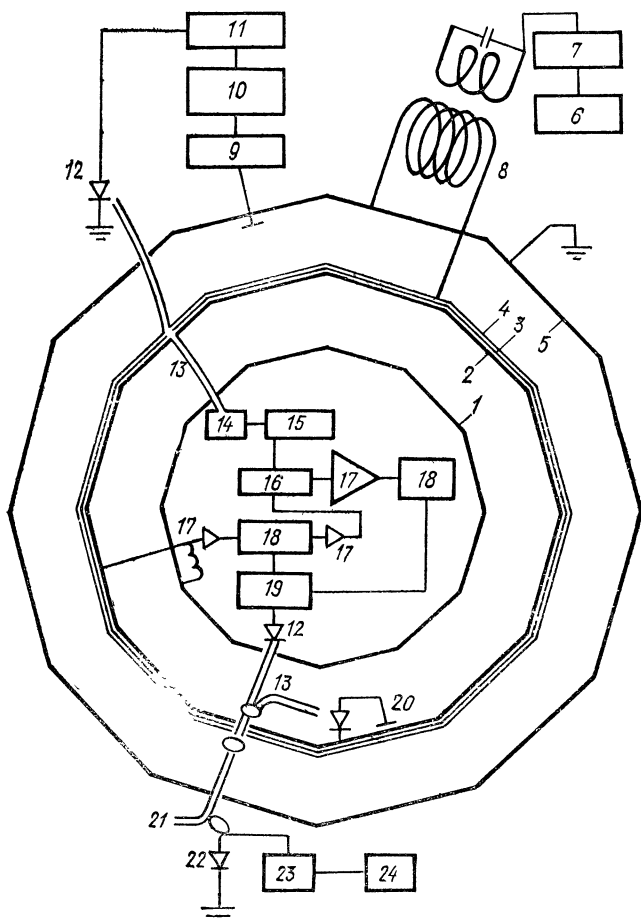


Рис. 66. Схема установки Уильямса, Фаллера и Хилла: 1—3 — система вложенных концентрических икосаэдров; 6—7 — термо- и частотостабилизированный генераторы; 8 — высокодобротная охлаждаемая катушка; 9 — осциллограф; 10 — преобразователь фазы; 11 — компаратор и буферный усилитель; 12 — светодиоды; 14 — фотоэлемент; 15 — компаратор; 16 — смеситель; 17 — усилитель; 18 — фильтры; 19 — преобразователь; 20 — калибровочный конденсатор; 21 — калибровочный сигнал; 22 — фотодиод; 23 — счетчик импульсов; 24 — фурье-анализатор

регистрировать разность потенциалов между икосаэдрами $\approx 10^{-12}$ В.

Можно предположить, что читатели уже несколько утомлены перечислением деталей экспериментальной установки, тем более назначение некоторых ее частей им, вероятно, не очень понятно. Ну, что ж, это естественно — со стороны автора было бы наивно рассчитывать, что ему удастся объяснить схему современного физического эксперимента, не прибегая к сложным формулам и не пользуясь терминами, неизвестными непрофессионалам. Тем более

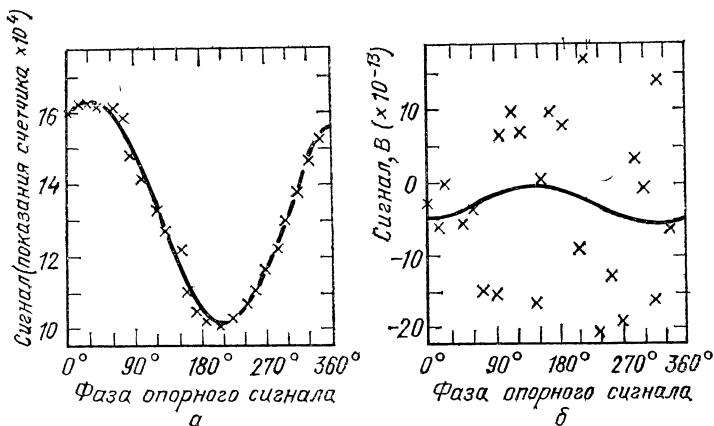


Рис. 67. Результаты опытов Уильямса и его коллег: а — данные контрольного эксперимента; б — данные основного эксперимента

нет смысла вдаваться в подробности весьма изощренной методики статистической обработки данных опыта. Достаточно сказать, что измерения велись в течение трех суток, причем сигнал фиксировался каждые 50 с. Таким образом, было сделано более 5000 отсчетов!

О характере полученных результатов можно составить представление по графикам, представленным на рис. 67. Слева (а) показана зависимость сигнала от сдвига фаз, который вносится в опорный сигнал, при регистрации этого сигнала в условиях, когда на внутренние икосаэдры подается калибровочное напряжение с амплитудой $1,9 \cdot 10^{-10}$ В. Справа (б) показаны результаты обработки экспериментальных данных, полученных в отсутствие калибровочного сигнала. Точки на графике расположены практически случайным образом, из чего можно сделать вывод, что никакого регулярного изменения напряжения между икоса-

эдрами не наблюдается. Однако одного впечатления мало, необходимо еще получить и какие-то количественные выводы. Количественный анализ этих результатов производился по следующей схеме. Допустим, что мы имеем реальную (но очень малую) разность потенциалов между икосаэдрами, обусловленную тем, что поправка q в законе Кулона отлична от нуля. Тогда изменение этой разности потенциалов должно следовать зависимости, показанной на рис. 67, *а*, но характеризующейся гораздо меньшим размахом. Пусть эта зависимость «испорчена» случайными помехами, вследствие чего точки, соответствующие измерениям, имеют очень большой разброс. Как в этом случае должна проходить по графику кривая, соответствующая идеальному сигналу, чтобы сумма квадратов отклонений от нее экспериментальных точек была бы наименьшей? На этот вопрос дает ответ специальный метод обработки данных опыта, так называемый метод наименьших квадратов. При обработке данных по этому методу исследователи пришли к выводу, что искомая кривая имеет вид, показанный на рис. 67, *б* сплошной линией. Диапазон вариаций сигнала, меняющегося по этой кривой, равен $(6,7 \pm 7,3) \cdot 10^{-13}$ В. Эта величина оказывается меньше той, которая может быть зафиксирована в данном опыте, и поэтому авторы пришли к выводу, что им не удалось обнаружить отклонения от закона «обратных квадратов». В итоге была получена новая оценка верхней границы q :

$$q \leq 2,7 \pm 3,1 \cdot 10^{-16}.$$

Такая точность проверки физического закона не может не поражать воображение. Но физикам и этого кажется мало. И дело здесь, конечно, не в каких-то практических нуждах или требованиях точности реальных расчетов. Дело — в принципе. Такое ограничение на поправку q соответствует верхнему пределу массы покоя фотона $m_\phi = 1,6 \cdot 10^{-50}$ кг... Но здесь мы уже касаемся темы следующей главы.

ЗАКОН-ВETERАН В НОВОЙ ФИЗИКЕ

В одной из предыдущих глав мы рассказали о том, как развитие физики привело к установлению пределов, за которыми описание физических процессов на основе закона Кулона становится невозможным. Может показаться, что в результате определения таких пределов этот закон выходит из сферы интересов современной физики. Это, однако, не так. Несмотря на то что закон Кулона вполне заслуживает звания ветерана, он не теряет связи с современностью.

О принципе соответствия

Стабильный интерес физиков к величине верхней границы поправки q в основном законе электростатики отражает одну общую закономерность в развитии физики. Чтобы понять, в чем состоит эта закономерность, напомним читателю о двух физических теориях, с появлением которых связана научная революция начала XX в. Речь идет о теории относительности и квантовой механике.

Специальная теория относительности (СТО) отказалась от представлений об абсолютном пространстве и абсолютном времени, на которых построена классическая механика. Эксперименты подтвердили предсказания СТО. Однако механика Ньютона не была полностью отвергнута физиками как ошибочная теория. Она сохранила за собой место в науке как некоторое приближение к описанию физической реальности, справедливое при движении тел со скоростями, значительно меньшими скорости света. Было показано, что при переходе от больших скоростей v , сравнимых со скоростью света c , к скоростям $v \ll c$ формулы СТО переходят в формулы классической механики, т. е. между этими разными теориями имеется соответствие.

Квантовая механика при описании явлений микромира также отказалась от многих классических представлений. Однако выяснилось, что и здесь существует предельный

переход, связывающий квантовые соотношения с классическими. Приведем пример такого перехода. Рассмотрим процесс излучения атомами света с квантовой и классической точек зрения.

Квантовая механика утверждает, что существуют такие состояния атома (они называются стационарными), находясь в которых он не излучает. Акт испускания кванта света (фотона) происходит при переходе из стационарного состояния, соответствующего большей полной энергии, в стационарное состояние, характеризующееся меньшей энергией.

Рассчитаем энергию стационарного состояния атома водорода на основе модели атома Резерфорда — Бора. Напомним, что в рамках этой модели электрон движется по окружности вокруг ядра. Допустим, что ядро покоится. Тогда мы можем считать, что полная энергия атома равна полной энергии электрона W , которая складывается из кинетической энергии $E_k = \frac{m_e v^2}{2}$ (m_e и v — масса электрона и его скорость на орбите) и потенциальной энергии электрона в кулоновском поле ядра $E_n = -\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r}$ (r — радиус орбиты):

$$W = E_k + E_n = \frac{m_e v^2}{2} - \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r}. \quad (9.1)$$

Поскольку электрон движется по окружности, на него должна действовать центростремительная сила $F_{ц.с.} = m_e v^2/r$. Ее роль играет кулоновская сила взаимодействия между электроном и ядром. Следовательно,

$$\frac{m_e v^2}{r} = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r^2}. \quad (9.2)$$

Исключая из (9.1) v с помощью (9.2), получаем

$$W = -\frac{e^2}{8\pi\epsilon_0 r}. \quad (9.3)$$

Согласно теории Бора, радиус стационарной орбиты электрона не может быть произвольным. Он определяется условием

$$m_e v r = \frac{h}{2\pi} n, \quad (9.4)$$

где h — постоянная Планка, а n — так называемое квантовое число, которое может принимать только целые положительные значения, т. е. $n=1, 2, 3, \dots$. Тогда, комби-

нируя формулы (9.1) — (9.4), нетрудно получить, что

$$W = -\frac{1}{8\epsilon_0^2} \frac{m_e e^4}{h^2} \frac{1}{n^2}. \quad (9.5)$$

Таким образом, энергия, соответствующая стационарным состояниям атома, принимает лишь дискретные значения, иначе говоря, квантуется. Знак «минус» в выражении (9.5) означает, что электрон в атоме находится в связанном состоянии, т. е. при конечном n в отсутствие внешних воздействий он не может оторваться от ядра.

Теперь ясно, что стационарные состояния атома можно пронумеровать, а энергии этого состояния приписать индекс, равный квантовому числу, характеризующему состояние. Тогда если мы рассмотрим два стационарных состояния с квантовыми числами k и m такими, как $k > m$, то $W_k > W_m$ (с учетом знака энергии). При переходе из k -го состояния в m -е атом должен испустить квант энергии (фотон), частота которого ν_{km} определяется законом сохранения энергии:

$$h\nu_{km} = E_k - E_m = \frac{1}{8\epsilon_0^2} \frac{m_e e^4}{h^2} \left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{k^2} \right).$$

Таким образом,

$$\nu_{km} = \frac{1}{8\epsilon_0^2} \frac{m_e e^4}{h^3} \left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right). \quad (9.6)$$

Теперь обсудим тот же вопрос с точки зрения классической физики. Она утверждает, что излучение возникает тогда, когда электрический заряд движется с ускорением. У электрона, обращающегося вокруг ядра, имеется центростремительное ускорение, и, следовательно, он должен излучать электромагнитные волны. Их частота равна частоте обращения электрона по орбите:

$$\nu = \frac{v}{2\pi r}. \quad (9.7)$$

Пользуясь формулами (9.2) и (9.4), можно найти частоту излучения ν_n , которая должна характеризовать движение электрона по орбите с номером n :

$$\nu_n = \frac{m_e e^4}{4\epsilon_0^2 h^3} \frac{1}{n^3}. \quad (9.8)$$

При сравнении формул (9.6) и (9.8) видно, что они существенно отличаются друг от друга. Это неудивительно, поскольку они получены на основе двух разных пред-

ставлений о механизме излучения. И все же между ними есть связь. Допустим, что $k=m+1$; это означает, что мы рассматриваем переход между соседними уровнями энергии.

Тогда

$$\nu_{km} = \frac{1}{8\epsilon_0^2} \frac{m_e e^4}{h^3} \left[\frac{1}{(k-1)^2} - \frac{1}{k^2} \right]$$

или

$$\nu_{km} = \frac{1}{8\epsilon_0^2} \frac{m_e e^4}{h^3} \frac{2k-1}{(k-1)^2 k^2}. \quad (9.9)$$

И эта формула сильно отличается от (9.8). Однако не будем спешить с выводами. Рассмотрим предельный переход $k \rightarrow \infty$. В этом случае можно записать

$$\nu_{km} \rightarrow \frac{1}{4\epsilon_0^2} \frac{m_e e^4}{h^3} \frac{1}{k^3},$$

поскольку в числителе и в скобке знаменателя дроби $(2k-1)/(k-1)^2 k^2$ можно пренебречь единицей.

Вот теперь уже ясно видно, что при переходе к большим квантовым числам квантовое соотношение (9.6) переходит в классическое (9.8).

Мы не имеем возможности обсуждать здесь все аспекты принципа соответствия и анализировать примеры его проявления более подробно. Нам важно было показать, что этот принцип связывает старые и новые теории физики. Заметим, что в XVIII и XIX вв. при смене одних теорий другими чаще всего нельзя было связать их отношением соответствия. Действительно, кинетическая теория тепла полностью отвергла теорию теплорода, а волновая оптика находилась в антагонистических отношениях с корпускулярной. Так что принцип соответствия стал одним из важных методологических принципов, описывающих развитие науки, лишь в XX в.

О массе покоя фотона

Мы остановились на вопросе о связи старых и новых теорий в физике столь подробно, поскольку своего рода «принцип соответствия» существует и между законом Кулона и описанием взаимодействия электрических зарядов в рамках квантовой электродинамики. Правда, здесь речь идет не о прямой связи формул, а о взаимной обусловленности важнейших положений классической и квантовой электродинамики. Оказывается, что равенство нулю массы фотона и точное выполнение закона «обратных квад-

ратов» непосредственно связаны друг с другом: если бы выяснилось, что нарушается одно из положений, то это неизбежно привело бы к отказу от другого.

Многим читателям, впервые узнавшим о том, что вообще допустимо ставить вопрос о массе фотона, следует дать некоторые пояснения. Сложность, изощренность построений современной теоретической физики таковы, что часто невольно забываешь о том, что основные положения любой физической теории, претендующей на описание реальных явлений и процессов, суть обобщение опытных фактов. Так вот, вопрос о массе покоя фотона — это вопрос не теоретический, а экспериментальный.

Общепринятая сейчас квантовая электродинамика относится к числу так называемых калибровочных теорий, уравнения которых инвариантны (т. е. неизменны) относительно определенных преобразований. Именно это требование инвариантности уравнений и приводит к заключению, что масса покоя фотона m_ϕ равна нулю. Однако всякая физическая теория основывается в конечном счете на данных опыта. Поэтому если бы появились экспериментальные свидетельства того, что $m_\phi \neq 0$, то квантовая электродинамика потеряла бы доверие физиков. Любопытство физиков столь велико, что даже в отсутствие таких свидетельств они уже построили «впрок» теории, где m_ϕ считается отличной от нуля. К каким же следствиям приводит отказ от условия $m_\phi = 0$?

В этом случае предельная скорость распространения сигналов, входящая в преобразование Лоренца специальной теории относительности, была бы отличной от скорости света в вакууме. Заметим, что это не сказалось бы на самой структуре СТО. Далее, скорость света в вакууме потеряла бы свой статус фундаментальной постоянной, поскольку скорость электромагнитных волн в вакууме оказалась бы зависящей от их длины волны (частоты).

К числу гипотетических следствий теории с ненулевой массой покоя фотона относится и изменение вида закона, описывающего статическое взаимодействие точечных зарядов — закона Кулона. При описании этого изменения обычно пользуются не силовой (векторной) характеристикой поля точечного заряда — напряженностью, а скалярной — потенциалом. Выражение для потенциала точечного заряда в классическом случае записывается в виде

$$\varphi(r) = k \frac{Q}{r}, \quad (9.10)$$

где k — постоянная, зависящая от системы единиц, Q — заряд, r — расстояние.

Если же $m_\phi \neq 0$, то выражение для потенциала должно иметь вид

$$\varphi(r) = k \frac{Q}{r} \exp(-r/\Lambda_\phi), \quad (9.11)$$

где Λ_ϕ — величина, имеющая размерность длины, с которой мы уже отчасти знакомы. Это комптоновская длина волны, но не электрона, а фотона:

$$\Lambda_\phi = \frac{h}{m_\phi c}. \quad (9.12)$$

В гл. 7 мы рассказывали о той роли, которую играет комптоновская длина волны электрона $\Lambda_e = h/m_e c$ в современной физике. Появление величины Λ_ϕ , пусть в гипотетической теории, отражает единство методов, применяемых физиками для описания явлений природы.

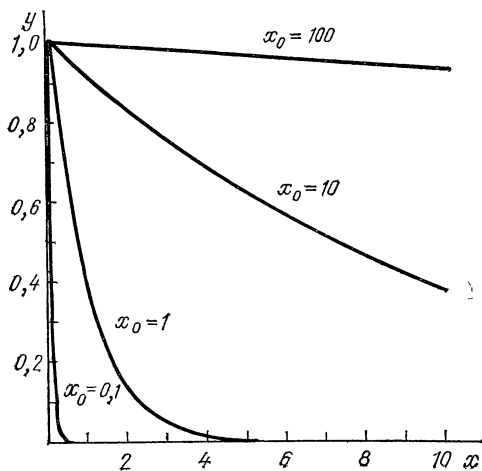


Рис. 68. Графики функции $y = e^{-x/x_0}$ для различных значений параметра x_0

Рассмотрим выражения (9.11) и (9.12) подробнее. В формулу (9.11) вместе с кулоновским множителем $1/r$ входит экспоненциальный множитель $\exp(-r/\Lambda_\phi)$. Чтобы понять, какую роль играет этот последний, рассмотрим графики функции $y = \exp(-x/x_0)$ для нескольких значений параметра x_0 (рис. 68) в области $x > 0$. Из рис. 68 видно, что кривые, соответствующие экспоненциальной функции, различаются диапазонами x , в которых значение функции

сильно отличается от единицы. Из анализа графиков можно сделать вывод, что отличие значения функции от единицы заметно при $x > x_0$. Это математическое заключение позволяет нам прийти к важному физическому выводу: заметное отклонение поля неподвижного точечного заряда от кулоновского должно наблюдаться на расстояниях, превышающих комптоновскую длину волны фотона, т. е. при $r > \Lambda_\phi$.

Теперь обратимся к формуле (9.12). Из нее следует, что чем меньше масса покоя фотона m_ϕ , тем больше Λ_ϕ . При $m_\phi \rightarrow 0$ $\Lambda_\phi \rightarrow \infty$, т. е. при очень малых массах покоя фотона, «почувствовать» отличие закона Кулона от точного закона «обратных квадратов» можно лишь на очень больших расстояниях.

Однако нам пора вернуться к исходному пункту рассмотрения: отклонение закона Кулона от точного закона «обратных квадратов» может свидетельствовать о наличии у фотона массы. Описанные в предшествующей главе современные проверки закона Кулона дали не только верхнюю границу для поправки q в показателе степени расстояния, но и верхнюю границу для массы покоя фотона. Так, из результатов опыта Уильямса, Фоллера и Хилла следует, что $m_\phi \leq 1,6 \cdot 10^{-47}$ г, т. е. почти на двадцать порядков меньше массы покоя электрона ($m_e = 9,1 \cdot 10^{-28}$ г)! Интересно оценить комптоновскую длину волны частицы с массой, соответствующей этой верхней границе m_ϕ :

$$\Lambda_\phi \geq \frac{h}{m_\phi c} \approx 1,4 \cdot 10^8 \text{ м},$$

что по порядку величины соответствует расстоянию от Земли до Луны.

В нашем путешествии в историю физики в связи с законом Кулона мы уже не раз убеждались в удивительной взаимосвязи явлений природы. Еще одной иллюстрацией этого является проблема массы фотона. Она затрагивает не только электростатику, но и магнетизм, а через него... астрофизику. Существующие во Вселенной магнитные поля играют важную роль в определении устойчивости таких образований, как галактики. Если бы масса покоя фотона была отлична от нуля, то возникли бы новые физические эффекты, связанные с этими полями, и, следовательно, изменились бы условия равновесия межзвездного газа. Поэтому анализ этого равновесия позволяет получить еще одну оценку верхней границы массы покоя фотона. Изучение газа в Большом и Малом Магел-

лановых Облаках — двух ближайших галактиках, спутниках нашей Галактики — дало неравенство

$$m_{\phi} \leq 3 \cdot 10^{-60} \text{ г}, \quad (9.13)$$

что соответствует условию $\Lambda_{\phi} \geq 6 \cdot 10^{20} \text{ м}$.

Может показаться, что это путешествие в область малых масс будет продолжаться бесконечно. Но это не так. Понижать границу m_{ϕ} (и, значит, повышать Λ_{ϕ}) имеет смысл до тех пор, пока остается надежда обнаружить реальные отличия электродинамики, в которой $m_{\phi}=0$, от теории, где $m_{\phi} \neq 0$. Выше было показано, что значительные отличия становятся заметными лишь при $r \geq \Lambda_{\phi}$. Но мы не можем получить информацию о событиях во Вселенной, происходящих на расстояниях, превышающих путь, который мог бы пройти свет за время существования Вселенной t . Следовательно, если бы удалось получить ограничение

$$\Lambda_{\phi} \geq ct, \quad (9.14)$$

то вопрос о массе фотона можно было бы считать решенным: даже если бы m_{ϕ} отличалась от нуля, мы не могли бы этого заметить, а, следовательно, дальнейшее понижение предела для m_{ϕ} не имело бы смысла и можно было пользоваться условием $m_{\phi}=0$ без всяких оговорок. Какой «путь» отделяет физиков от неравенства (9.14)? Согласно современным данным $t \approx 10^{18} \text{ с}$, следовательно, $ct \approx 10^{26} \text{ м}$. Таким образом, нас отделяет от предельного ограничения «всего» 6—7 порядков...

Что если «охладить» фотон?

Итак, мы выяснили, что закон Кулона связан со вполне современной проблемой массы покоя фотона. Но то, о чем было рассказано, относится к уже устоявшимся представлениям физики. А развитие науки продолжается. И вот на повестке дня оказывается новый аспект проблемы массы фотона, и снова «школьный» закон Кулона призывается на помощь для ее решения.

Физика элементарных частиц в наши дни — одна из наиболее интенсивно развивающихся областей физической науки. Центральной задачей этой области является построение теории, которая объединяла бы все виды фундаментальных взаимодействий: гравитационное, слабое, электромагнитное и сильное. В последние десятилетия физикам удалось построить объединенную теорию элект-

рослабых взаимодействий, которая уже получила экспериментальное подтверждение. На очереди стоит так называемое Великое объединение, которое должно связать электрослабое и сильное взаимодействия. Общая идея построения единых теорий состоит в том, что при достаточно больших энергиях частиц (или, иначе — при очень высоких температурах) все фундаментальные взаимодействия сливаются в одно. Наоборот, при уменьшении энергии (понижении температуры) различия между ними начинают проявляться все более и более отчетливо. Построение единой теории фундаментальных взаимодействий должно объяснить детали процессов, происходивших на ранних стадиях образования нашей Вселенной *).

Стремление физиков описать события, происходившие во Вселенной ранее, и явления, наблюдаемые сейчас, с общих позиций привело к выдвижению новой удивительной гипотезы, суть которой состоит в том, что фотон является «безмассовой» частицей ($m_\phi=0$) лишь при температурах, превышающих некоторый порог T_c . При $T < T_c$, согласно этой гипотезе, фотон должен характеризоваться массой, отличной от нуля ($m_\phi(T) \neq 0$).

Новые идеи об эволюции элементарных частиц привлекли внимание не только теоретиков. Физики-экспериментаторы заинтересовались возможностью их опытной проверки. В 1985 г. группа американских ученых из Принстонского университета в составе Дж. Райана, Ф. Аксетта и Р. Остина сообщили о новой проверке закона Кулона, проведенной при температуре $T=1,36$ К.

Постановка опытов при столь низких температурах предъявляет к экспериментаторам особые требования. Кроме тщательного измерения электрических сигналов, защиты от помех, калибровки измерительной системы и других задач, о которых уже говорилось в связи с последними проверками закона «обратных квадратов» при комнатной температуре, здесь необходимо обеспечить надежную работу криогенной части установки.

Криогенная техника, или просто криогеника (от греч. *krýos* — «холод»), — отрасль науки и техники, занимающаяся получением и использованием низких температур, в наши дни играет важную роль в экспериментальной

*) Здесь не место вдаваться в подробности, связанные с физикой элементарных частиц. Для тех, кто заинтересуется этим вопросом, можно рекомендовать книгу. Окунь Л. Б., *αβγ...Z*, — М.: Наука, 1985, — Библиотечка «Квант», вып. 45.

физике *). Это объясняется тем, что многие интересные физические явления можно наблюдать лишь при температуре, близкой к абсолютному нулю. Более того, целый ряд современных физических приборов может работать только в условиях глубокого охлаждения. Поэтому не следует думать, что экспериментирование при температурах в несколько кельвинов — какая-то экзотика. Сейчас низкотемпературные опыты ставятся в десятках и даже сотнях лабораторий во многих странах мира. Когда потребовалось проверить закон Кулона при возможно более низкой температуре, экспериментаторы смогли воспользоваться достаточно развитой техникой.

Для проведения опытов с низкими температурами обычно используют жидкий гелий (точнее, его изотоп ^4He), температура кипения которого при атмосферном давлении равна $T=4,2\text{ К}$. Чтобы уменьшить скорость испарения гелия, его заливают в специальные сосуды, называемые криостатами; в криостат же помещают ту часть экспериментальной установки, которая должна подвергаться охлаждению. Пользуясь ^4He , можно получить и температуры $T < 4,2\text{ К}$. Для этого необходимо с достаточно большой скоростью откачивать пары над поверхностью жидкого гелия: при интенсивном испарении жидкость сильно охлаждается, поскольку для ее превращения в пар требуется теплота. (Вспомним школьный опыт: при быстрой откачке воздуха и паров воды из-под колокола, на подставке которого разбрызганы капли воды, последние не успевают полностью испариться и замерзают.) При давлении паров гелия $1,8\text{ мм рт. ст.}$, которое обеспечивается их непрерывной откачкой, температура жидкости оказывается равной $1,36\text{ К}$. Технические возможности, которыми располагала группа из Принстона, и определили нижнюю границу температуры в проведенном опыте.

Своеобразие криогенных условий заставило экспериментаторов отказаться от традиционной геометрии установки. Схема ее охлаждаемой части показана на рис. 69. Начнем ее описание с ферромагнитного стержня, выполнявшего двойную функцию. Во-первых, он играл роль сердечника окружавшего его сверхпроводящего соленоида (катушки индуктивности), а, во-вторых, его поверхность (3) исполь-

*) Подробно с методами получения низких температур и с физическими явлениями, протекающими в условиях глубокого охлаждения веществ, можно познакомиться, прочитав книгу: Эдельман В. С. Вблизи абсолютного нуля, — М.: Наука, 1983. — Библиотечка «Квант», вып. 26.

зовалась для создания эффекта, обнаружение которого свидетельствовало бы об отклонении от точного закона «обратных квадратов». Соленоид в свою очередь был окружен стеклянным цилиндром, с внутренней поверхностью (2), покрытой слоем серебра толщиной 0,2 мкм. Этот цилиндр находился внутри еще одного стеклянного цилиндра, посеребренного снаружи (поверхность 1). На

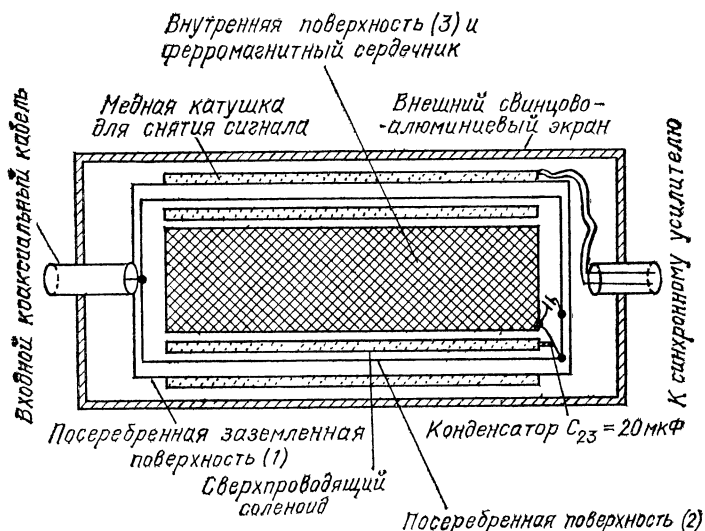


Рис. 69. Схема охлаждаемой части установки для обнаружения фазового перехода фотона

внешний цилиндр была намотана медная катушка, служившая для съема сигнала. Во избежание помех вся описанная система окружалась свинцово-алюминиевым экраном. О размерах установки дают представление такие данные: радиус ферромагнитного сердечника составлял примерно 0,8 см, внутренний радиус первого стеклянного цилиндра (т. е. поверхности 2) — 1,1 см.

Идея опыта состояла в следующем. С помощью коаксиального кабеля создадим между проводящими поверхностями 1 и 2 переменную разность потенциалов. Тогда, если строгий закон «обратных квадратов» нарушается, между поверхностями 2 и 3 также возникнет переменное напряжение, а поскольку эти поверхности, сверхпроводящий соленоид и емкость $C_{23} \approx 20 \text{ мкФ}$ образуют электрическую цепь, то по ней будет протекать переменный ток. Как

известно, протекание по обмотке соленоида переменного тока приводит к возникновению переменного магнитного потока, что должно породить переменную электродвижущую силу индукции во внешней медной катушке. Этот переменный сигнал можно обнаружить, если по двужильному кабелю подать его на вход синхронного усилителя.

Приведем параметры сверхпроводящего соленоида: он имел 6300 витков, его сердечник характеризовался магнитной проницаемостью более 20 000, так что индуктивность соленоида при комнатной температуре составляла примерно 4,9 Гн. Медная катушка состояла из 7200 витков.

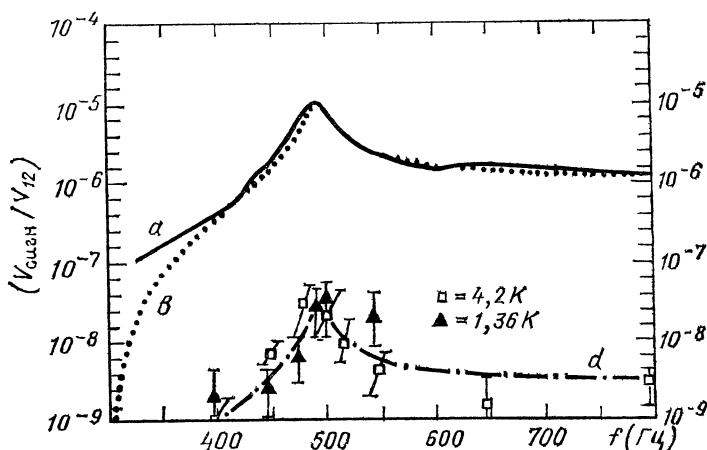


Рис. 70. Результаты опытов по определению верхней границы массы покоя фотона в криогенных условиях

Специальные контрольные опыты показали, что с помощью медной катушки действительно можно эффективно регистрировать изменение магнитного потока, создаваемого током, протекающим через соленоид.

Как обычно, проведение основного эксперимента потребовало постановки целого ряда проверочных опытов. Итоги всего цикла исследований суммированы на рис. 70, где приведены графики зависимостей отношения сигнала, снимаемого с медной катушки, к входному напряжению, которое создается между поверхностями 1 и 2, от частоты.

Кривая α описывает сигнал, который был зафиксирован при проведении опыта, когда одно из оснований внутреннего стеклянного цилиндра было удалено, а точечная

линия b соответствует теоретическому расчету для этого случая. Светлыми квадратами показаны данные измерений при закрытом внутреннем цилиндре и $T=4,2$ К; темные треугольники соответствуют закрытому цилиндру и $T=1,36$ К (отрезки прямых, проходящие через экспериментальные точки, показывают диапазон возможных погрешностей измерений). Кривая d соответствует теоретическому расчету сигнала при учете того, что между поверхностями I и 3 существует очень маленькая емкость $C_{13}=5 \cdot 10^{-16}$ Ф.

Хотя авторы зарегистрировали некий сигнал при закрытом цилиндре, они сочли, что его возникновение связано не с отклонением от закона Кулона, а с несовершенством различных уплотнений в системе. Этот вывод они обосновали тем, что астрономические оценки массы фотона (и, следовательно, оценки поправки к закону Кулона) дают гораздо меньшее значение m_ϕ , чем то, которое получается, если считать сигнал, зарегистрированный в опыте, не паразитным, а истинным. В то же время температура, отвечающая этой астрономической оценке, $T \approx 3$ К, что соответствует температуре так называемого реликтового излучения *), заполняющего Вселенную. Поэтому маловероятно, чтобы конечная масса покоя фотона проявилась при $T \approx 4,2$ К в земных условиях. Однако важнее то, что характер зависимости сигнала от частоты при $T=4,2$ К и $1,36$ К оказывается практически одинаковым. Это означает, что в диапазоне температур $4,2 \div 1,36$ К никакого фазового перехода фотона из состояния с нулевой массой в состояние с ненулевой массой покоя не происходит.

Закон Кулона и трехмерность пространства

В 1747 г. в Кенигсберге вышла в свет книга с длинным названием «Мысли об истинной оценке живых сил и разбор доказательств, которыми пользовались г-н Лейбниц и другие знатоки механики в этом спорном вопросе, а также некоторые предварительные соображения, касающиеся силы тел вообще». Она была посвящена проблеме, вокруг которой уже не одно десятилетие шли жар-

*) Происхождение реликтового излучения астрофизики связывают с процессами, протекавшими на ранних стадиях развития Вселенной. Подробнее об этом можно прочитать в книге: *Смординский Я. А.* Температура, — 2-е изд., — М.: Наука, 1987, — Библиотечка «Квант», вып. 12.

кие споры: какая из величин mv (т. е. в современной терминологии — импульс) или mv^2 («живая сила») является «истинной» мерой движения? Хотя дискуссия о «живой силе» представляет несомненный интерес для истории становления основных понятий механики, мы упомянули о книге, вышедшей в Кенигсберге, не из-за нее. Это была первая опубликованная работа знаменитого немецкого философа И. Канта. Но главное не в этом.

В сравнительно небольшой книжке молодой Кант поставил интересный вопрос о размерности окружающего нас пространства. Мы настолько привыкли к мысли, что живем в трехмерном пространстве, что часто не задумываемся о том, как связан этот факт с характером действующих в природе физических законов. Кант одним из первых попытался установить такую связь. Мы не будем вдаваться в подробности его рассуждений, а приведем лишь основной вывод:

«Трехмерность происходит, по-видимому, оттого, что субстанции в существующем мире действуют друг на друга таким образом, что сила действия обратно пропорциональна квадрату расстояния».

Эта идея Канта указывает на то, что закон Кулона (о котором Кант, конечно, не знал — ведь до опытов, приведших к его установлению, оставалось более 35 лет!) можно рассматривать как свидетельство в пользу привычных нам представлений о трехмерности пространства.

В XVIII и даже XIX вв. соображения Канта не получили развития — физики в это время были заняты другими проблемами. Лишь в 1917 г. выдающийся австрийский физик П. Эренфест, работавший тогда в Голландии, опубликовал статью, в которой поставил проблему Канта в более физическом, чем философском плане. Она называлась «Каким образом в фундаментальных законах физики проявляется то, что пространство имеет три измерения?» Во введении к этой работе Эренфест переформулирует вопрос, вынесенный в заголовок: «Какие особенности отличают геометрию и физику в R_3 (т. е. в пространстве с числом измерений, равным 3.— С. Ф.) от геометрий и физик в других пространствах R_n ?»

Эренфест рассмотрел несколько фундаментальных законов физики. Для нас наибольший интерес представляет первый параграф работы, где он обсуждает, как выглядели бы траектории движения планет в пространстве, размерность которого $n \neq 3$. В этом случае сила притяжения, действующая на планету, уже не будет пропорциональна

r^{-2} , а будет выражаться формулой

$$F = \gamma \frac{Mm}{r^{n-1}} \quad (n \neq 3). \quad (9.15)$$

Оказывается, что, в отличие от случая $n=3$, при $n=2$ траектория планеты остается финитной при любых значениях энергии планеты, т. е. планета не может удалиться на бесконечно большое расстояние от центра притяжения ни при каких энергиях! При $n>3$ не существует движений, аналогичных движению планеты по эллипсу, характерных для случая $n=3$: планета всегда движется по спирали, т. е. либо падает на притягивающий центр, либо удаляется от него.

Но ведь закон всемирного тяготения, как и закон Кулона, относится к числу законов «обратных квадратов». Поэтому следствия, касающиеся движения планет, с определенными оговорками можно перенести и на движение электрона вокруг атомного ядра. Как же можно получить формулу, подобную (9.15), для электростатического взаимодействия?

Это можно сделать, если воспользоваться уже знакомой нам теоремой Остроградского — Гаусса. Например, для случая $n=2$ в качестве замкнутой «поверхности», окружающей заряд, можно взять окружность радиуса r . Тогда содержание теоремы Остроградского — Гаусса выражается соотношением $E \cdot 2\pi r = \frac{q}{\varepsilon_0}$, и, следовательно, $E = \frac{q}{2\pi\varepsilon_0 r}$. Аналогично можно показать, что при $n=4$ $E \sim \frac{1}{r^3}$, при $n=5$ $E \sim \frac{1}{r^4}$ и т. д.

Чтобы убедиться, к каким неожиданным следствиям приводит изменение закона взаимодействия точечных зарядов при «переходе» в пространство другой размерности, повторим рассуждения, которые мы провели, когда рассматривали боровскую модель атома водорода. Уравнение (9.2) перепишем в виде

$$\frac{m_e v^2}{r} = \frac{e^2}{4\pi\varepsilon'_0 r^{n-1}}; \quad (9.16)$$

условие для стационарных орбит (9.4) остается неизменным:

$$m_e v r = \frac{h}{2\pi} \tau \quad (\tau = 1, 2, 3, \dots). \quad (9.17)$$

Обсудим наиболее интересный случай, когда $n=4$. Из

(9.16) и (9.17) нетрудно получить, что

$$\tau = \frac{\pi e \sqrt{m_e}}{h \sqrt{\epsilon_0}}. \quad (9.18)$$

Но в правую часть соотношения (9.18) входят только постоянные величины. Это означает, что квантовое число τ должно быть строго фиксировано, т. е. при $n=4$ должны существовать орбиты только с одним квантовым числом. Более того, постоянные e , m_e , h и ϵ_0 должны быть связаны между собой! Эти выводы противоречат данным опыта. Действительно, если было бы справедливо соотношение (9.18), то никаких спектров не существовало бы. Экспериментальные данные, в том числе выполнение с высокой точностью закона «обратных квадратов» для электростатического взаимодействия, подтверждают представление о трехмерности физического пространства.

* * *

В этой небольшой по объему книге мы попытались проследить судьбу лишь одного из множества физических законов. Какой же вывод можно сделать на основе знакомства с историей закона Кулона? Можем ли мы применить к нему известный афоризм о том, что каждая истина в момент рождения кажется неприемлемой, затем становится привычной, а затем и тривиальной? Вероятно, читатели согласятся с тем, что если в судьбе основного закона электростатики действительно можно выделить первые две стадии, то в разряд тривиальных закон Кулона так и не попал. Это характерно и для других законов, относящихся к числу наиболее важных в физике.

Ожидают ли законы «обратных квадратов» какие-либо важные события в будущем?

Вполне вероятно. Стремление физиков построить единую теорию фундаментальных взаимодействий может привести к тому, что электромагнитное взаимодействие окажется связанным с гравитационным, и тогда оба закона «обратных квадратов» как бы породнятся друг с другом. История физики как будто подтверждает неизбывную веру ученых в мировую гармонию.

Научно-популярное издание

ФИЛОНОВИЧ Сергей Ростиславович

СУДЬБА КЛАССИЧЕСКОГО ЗАКОНА
(Прошлое и настоящее закона Кулона)

Библиотечка «Квант», выпуск 79

Заведующий редакцией *Г. С. Куликов*

Редактор *Л. А. Панюшкина*

Художник *С. Ф. Лукин*

Художественный редактор *Т. Н. Кольченко*

Технический редактор *Е. В. Морозова*

Корректоры *Е. Ю. Рычагова, Н. Д. Дорохова*

ИБ № 32730

Сдано в набор 09.06.89 Подписано к печати 08.12.89. Т-17346. Формат 84×108/32. Бумага тип. № 2. Гарнитура литературная. Печать высокая. Усл. печ. л. 12,6. Усл. кр.-отт. 13,02. Уч.-изд. л. 13,29. Тираж 70500 экз. Заказ № 9—344. Цена 55 коп.

Ордена Трудового Красного Знамени издательство «Наука»
Главная редакция физико-математической литературы
117071 Москва В-71, Ленинский проспект, 15

Набор и матрицы ордена Октябрьской Революции и ордена Трудового Красного Знамени МПО «Первая Образцовая типография» Государственного комитета СССР по печати 113054, Москва, Валовая, 28

Отпечатано на полиграфкомбинате ЦК ЛКСМ Украины «Молодь» ордена Трудового Красного Знамени издательско-полиграфического объединения ЦК ВЛКСМ «Молодая гвардия». 252119 г. Киев-119, ул. Пархоменко, 38—44.

55 коп.
