

АКАДЕМИЯ НАУК СССР
ИНСТИТУТ ИСТОРИИ ЕСТЕСТВОЗНАНИЯ И ТЕХНИКИ

МАКСВЕЛЛ И РАЗВИТИЕ ФИЗИКИ XIX–XX ВЕКОВ

Ответственный редактор
доктор
физико-математических наук
Л. С. ПОЛАК



МОСКВА
«НАУКА»
1985

Максвелл и развитие физики XIX—XX веков: Сб. статей.— М.: Наука, 1985.

В книгу включены материалы научной сессии, посвященной 150-летию со дня рождения Д. К. Максвелла. Статьи отражают различные аспекты творчества ученого: исторические предпосылки создания Максвеллом электродинамики; его роль в развитии кинетической теории и статистической механики; развитие идей Максвелла русскими физиками; его преподавательскую деятельность; некоторые теоретические проблемы современной физики, связанные с трудами Максвелла.

Издание рассчитано на физиков, историков, методологов физики.

Рецензенты:

Н. Ф. ОВЧИННИКОВ, Я. А. СМОРОДИНСКИЙ

Составитель

О. В. КУЗНЕЦОВА

М 1704010000-200
С42(02)-85 121-85-11

© Издательство «Наука», 1985 г.

ПРЕДИСЛОВИЕ

150-летие со дня рождения великого ученого Джеймса Клерка Максвелла (1831—1879) Институт истории естествознания и техники и Национальное объединение историков физики отмечают научной сессией, на которой были сделаны доклады, охватывающие различные стороны жизни и научного творчества Максвелла и последующее развитие его идей (сессия состоялась с 16 по 18 декабря 1981 года в Звенигороде).

Максвелл поставил первоначально своей задачей перевести на математический язык замечательные идеи и экспериментальные результаты великого Фарадея, показавшего, что передача электрических и магнитных действий во всех случаях связана с изменениями в промежуточной среде. Для решения этой задачи он ввел наряду с давно известным током проводимости еще ток смещения, который возникает в диэлектриках при любом изменении электрического поля — блестящая новая (и неожиданная) идея. Математический анализ этой физической гипотезы с неизбежностью приводил к выводу, что во всех телах и в «вакууме» могут образовываться электромагнитные волны, излучаемые возбуждающими их телами. В вакууме эти волны должны распространяться со скоростью света. Исходя из этого в 1865 г. Максвелл высказал гениальную идею, что сам свет не что иное, как электромагнитные волны, а отнюдь не упругие колебания в гипотетической среде — эфире, как это предполагали раньше.

И, наконец, он написал знаменитые уравнения Максвелла — возникла электродинамика, теория поля. Великий шаг в развитии физики и нашей картины мира в целом!

Бурные возражения, которые встретила теория Максвелла, были окончательно разбиты замечательными экспериментами Г. Герца. Еще одно поколение — и электродинамика Максвелла вошла в золотой фонд знаний человечества и продолжает быть неисчерпаемым источником развития физики, стала достоянием университетских курсов и школьных программ.

Молекулярно-кинетическую теорию газов и статистическую механику нельзя себе представить без функции распределения Максвелла, который одним из первых по-настоящему ввел в физику статистические вероятностные методы.

Об этих и многих других важнейших результатах Максвелла в области физики читатель узнает из помещенных в этом сборнике статей. Статьи эти представляют собой доклады, которые были заслушаны на сессии, посвященной 150-летию со дня рождения Максвелла.

Мы разбили все статьи на несколько групп: 1) формирование

Максвелл и развитие физики XIX—XX веков: Сб. статей.— М.: Наука, 1985.

В книгу включены материалы научной сессии, посвященной 150-летию со дня рождения Д. К. Максвелла. Статьи отражают различные аспекты творчества ученого: исторические предпосылки создания Максвеллом электродинамики; его роль в развитии кинетической теории и статистической механики; развитие идей Максвелла русскими физиками; его преподавательскую деятельность; некоторые теоретические проблемы современной физики, связанные с трудами Максвелла.

Издание рассчитано на физиков, историков, методологов физики.

Рецензенты:

Н. Ф. ОВЧИННИКОВ, Я. А. СМОРОДИНСКИЙ

Составитель

О. В. КУЗНЕЦОВА

М 1704010000-200
С42(02)-85 121-85-П

© Издательство «Наука», 1985 г.

ПРЕДИСЛОВИЕ

150-летие со дня рождения великого ученого Джеймса Клерка Максвелла (1831—1879) Институт истории естествознания и техники и Национальное объединение историков физики отмечало научной сессией, на которой были сделаны доклады, охватывающие различные стороны жизни и научного творчества Максвелла и последующее развитие его идей (сессия состоялась с 16 по 18 декабря 1981 года в Звенигороде).

Максвелл поставил первоначально своей задачей перевести на математический язык замечательные идеи и экспериментальные результаты великого Фарадея, показавшего, что передача электрических и магнитных действий во всех случаях связана с наличием в промежуточной среде. Для решения этой задачи он ввел наряду с давно известным током проводимости еще ток смещения, который возникает в диэлектриках при любом изменении электрического поля — блестящая новая (и неожиданная) идея. Математический анализ этой физической гипотезы с неизбежностью приводил к выводу, что во всех телах и в «вакууме» могут образовываться электромагнитные волны, излучаемые возбуждающими их телами. В вакууме эти волны должны распространяться со скоростью света. Исходя из этого в 1865 г. Максвелл высказал гениальную идею, что сам свет не что иное, как электромагнитные волны, а отнюдь не упругие колебания в гипотетической среде — эфире, как это предполагали раньше.

И, наконец, он написал знаменитые уравнения Максвелла — возникла электродинамика, теория поля. Великий шаг в развитии физики и нашей картины мира в целом!

Бурные возражения, которые встретила теория Максвелла, были окончательно разбиты замечательными экспериментами Г. Герца. Еще одно поколение — и электродинамика Максвелла вошла в золотой фонд знаний человечества и продолжает быть неисчерпаемым источником развития физики, стала достоянием университетских курсов и школьных программ.

Молекулярно-кинетическую теорию газов и статистическую механику нельзя себе представить без функций распределения Максвелла, который одним из первых по-настоящему ввел в физику статистические вероятностные методы.

Об этих и многих других важнейших результатах Максвелла в области физики читатель узнает из помещенных в этом сборнике статей. Статьи эти представляют собой доклады, которые были заслушаны на сессии, посвященной 150-летию со дня рождения Максвелла.

Мы разбили все статьи на несколько групп: 1) формирование

электродинамики; 2) развитие молекулярно-кинетической теории газов, 3) преподавание физики у Максвелла, 4) развитие идеи Максвелла в последней четверти XIX в. и за 75 лет XX в.

Почти всякий сборник, составленный из переработанных текстов докладов и статей юбилейного характера, оказывается обычно пестрым по своему составу. Дело даже не только в подборе статей и полноте охвата всех сторон тем, затрагиваемых в сборнике. Сам стиль и уровень статей не одинаков: от статей научно-популярного характера, не несущих, практически, сколько-нибудь новой информации, через серьезные историко-физические исследования, вводящие в научный оборот новые материалы, либо по-новому трактующие тонкие вопросы возникновения и развития теории электромагнитного поля, до статей, рассматривающих отдельные частные вопросы, иногда больше отражающие научные интересы авторов, чем степень важности этих вопросов в контексте развития экспериментальной и теоретической концепции теории Максвелла. Недостатки такого сборника очевидны. Однако в этом есть и нечто положительное: круг читателей резко расширяется, и для многих из них открывается путь от простейшего к более сложному.

Надеюсь, что и в этом смысле предлагаемый вниманию читателя сборник окажется полезным.

Л. С. Полак



ДЖЕЙМС КЛЕРК
МАКСВЕЛЛ
(1831—1879)

ЭЛЕКТРОДИНАМИКА МАКСВЕЛЛА

УДК 537.874.830.703

Б. И. СПАССКИЙ *

К ИСТОРИИ ОТКРЫТИЯ МАКСВЕЛЛОМ УРАВНЕНИЙ
ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ

Вопрос о том, каким путем Максвелл пришел к открытию уравнений электромагнитного поля, неоднократно служил предметом исторических исследований и к настоящему времени по этому вопросу уже давно сложилось определенное мнение, разделяемое большинством исследователей, занимавшихся этим вопросом.

Это мнение заключается прежде всего в том, что для решения данного вопроса следует верить самому Максвеллу, который не только не скрывал хода своих рассуждений, приведших его к уравнениям электромагнитного поля, а даже специально подчеркивал его в своих статьях, как будто бы стараясь вместе с читателем проделать его.

Максвелл неоднократно повторял, что он следовал взглядам Фарадея, стремясь перевести известные тогда законы электродинамики на язык Фарадея, т. е. язык близкого действия. При этом он в основу взглядов на природу электрических и магнитных явлений положил явление индукции, т. е. явление, которому Фарадей придавал первостепенное значение. Максвелл также указывал и на метод, с помощью которого он предполагал решить указанную задачу. Этим методом был метод аналогий, приводящий к построению механических моделей электромагнитных явлений.

Сказанное выше, как было уже подчеркнуто, не является каким-либо оригинальным выводом, а разделялось и разделяется подавляющим большинством серьезных исследователей научного творчества Максвелла.

Даже те исследователи научного творчества Максвелла, которые не признавали эвристической роли механических моделей в научном творчестве, всегда полагали, что Максвеллу можно верить, когда он говорил о том, каким образом он построил теорию электромагнитного поля. Так, например, П. Дюгем, известный историк науки конца XIX — начала XX века, не признававший эвристической роли механических моделей, считавший их «паразитирующим растением на живом дереве», считал возмож-

* Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова.

ним верить Максвеллу. Во всяком случае, он, как и многие другие, полагал, что Максвелл исходил из идеи Фарадея о роли индукции в электрических явлениях в диэлектриках [1] и не возражал против мнения Максвелла о роли аналогии в научном творчестве.

Однако за последнее время в литературе, посвященной научному творчеству Максвелла, стали высказываться мнения, согласно которым отрицается эвристическая роль не только механических моделей, но даже генетическая связь идей Фарадея и Максвелла. При этом игнорируются собственные высказывания Максвелла и предлагаются новые гипотезы о том, как Максвелл пришел к уравнениям электромагнитного поля.

Так, например, Н. Кемпбелл [2, 3, с. 305] выдвинул гипотезу о том, что Максвелл ввел ток смещения, основное положение своей теории, опираясь на идею о симметрии первого и второго уравнения электромагнитного поля, которые следуют из предположения об аналогии между электрическим и магнитным полем. Тогда из соображений симметрии он добавил в уравнение $\text{rot } \mathbf{H} = \frac{4\pi}{c} \mathbf{j} + \text{член } \frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}$, аналогичный члену $-(\partial \mathbf{B} / \partial t)$ в уравнении $\text{rot } \mathbf{E} = -\frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$.

Действительно, известны примеры, когда принцип симметрии, будучи применен к физическим явлениям, приводил к новым уравнениям. В частности, используя принцип симметрии, можно прийти и к уравнениям Максвелла. Так, основываясь на идее об аналогии между электрическими и магнитными явлениями, Г. Герц вывел в 1884 г. уравнения Максвелла [4, 5]. Но Герц это сделал уже, зная данные уравнения и используя совсем иначе аналогию между электрическим и магнитным явлением, чем Кемпбелл. Что же касается самого Максвелла, то этот метод вывода уравнений электромагнитного поля был ему чужд. В частности, этот вопрос исследовал А. М. Барк [6, 3, с. 305]. Его исследования показывают, что у Максвелла ни о какой аналогии между первым и вторым основным уравнением не было и речи.

Новая версия, претендующая на оригинальность по поводу вывода уравнений электромагнитного поля Максвеллом, принадлежит И. С. Шапиро [7], изложенная им в 1972 г.

Шапиро полагает, что ток смещения был введен Максвеллом якобы для того, чтобы исключить противоречие между уравнением, выражающим теорему Стокса $\text{rot } \mathbf{H} = \frac{4\pi}{c} \mathbf{j}$ и уравнением непрерывности $\text{div } \mathbf{j} = \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0$. Действительно, с точки зрения

электродинамики, рассматривающей неквазистационарные токи, такое противоречие существует. Это сразу видно. Из первого уравнения следует, что $\text{div } \mathbf{j} = 0$. Если же принять во внимание уравнение, выражающее теорему Гаусса $\text{div } \mathbf{E} = 4\pi\rho$ и изменить

первое уравнение на уравнение $\text{rot } \mathbf{E} = \frac{4\pi}{c} \mathbf{j} + \frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}$, то данное противоречие не будет. Но в этом случае мы и получаем уравнение Максвелла, содержащее ток смещения. Такова версия Шапиро.

Однако если по-настоящему познакомиться с оригинальными работами Максвелла, то легко убедиться в несостоятельности этой версии. Шапиро был бы прав, если бы Максвелл при выводе уравнения с током смещения действительно исходил бы из теоремы Стокса и Гаусса и уравнения непрерывности. Но Максвелл поступает иначе. Правда, он приводит уравнение непрерывности $\text{div } \mathbf{j} + (\partial \rho / \partial t) = 0$, но уже после того, как были написаны два основных уравнения электромагнитного поля. При получении же этих уравнений Максвелл нигде не опирается на уравнение непрерывности.

В первой работе «О фарадеевых силовых линиях» Максвелл вообще не приводит уравнения непрерывности и говорит, что он ограничивается замкнутыми токами, для которых $\text{div } \mathbf{j} = 0$ [8, с. 70]. В последующей работе «О физических силовых линиях» Максвелл пишет уравнение непрерывности. Но этим уравнением он не пользуется при выводе уравнения с током смещения $\text{rot } \mathbf{H} = \frac{4\pi}{c} \mathbf{j} + \frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}$ и записывает его уже после других уравнений, принадлежащих им, т. е. уравнений, составляющих систему уравнений электромагнитного поля [8, с. 170].

Таким образом, предположение о том, что Максвелл использовал уравнение непрерывности для того, чтобы сформулировать гипотезу о токе смещения и получить соответствующие уравнения электромагнитного поля, лишено каких-либо оснований.

В третьей работе по теории электромагнитного поля в «Динамической теории поля» Максвелл сразу пишет уравнение $\text{rot } \mathbf{H} = \frac{4\pi}{c} \mathbf{j}$ [8, с. 297], а затем уже, как следствие, на следующих

страницах записывает уравнение непрерывности $\text{div } \mathbf{j} + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0$ [8, с. 297]. Наконец, в «Трактате» мы видим ту же картину. Сначала Максвелл полагает, что в формуле Стокса $\text{rot } \mathbf{H} = \frac{4\pi}{c} \mathbf{j}$, под $\mathbf{j}$ следует понимать сумму плотностей тока проводимости $\mathbf{j}_{\text{пр}}$ и тока смещения $\mathbf{j}_{\text{см}} = \frac{1}{4\pi c} \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}$. И только позже записывает уравнение непрерывности $\text{div } \mathbf{j} + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0$.

Таким образом, из текста работ Максвелла никак нельзя утверждать, что Максвелл пришел к идее о токе смещения, основываясь на уравнении непрерывности. Поэтому, если все же утверждать последнее предположение, то нужно показать, что Максвелл почему-то скрывает ход своих рассуждений. Однако никаких оснований для такого предположения нет и не может быть.

Отметим теперь, что мысль о том, что Максвелл пришел к гипотезе о токе смещения, опираясь на уравнение непрерывности, высказанная Шапиро, не является изобретенной им и не оригинальна. В частности, она высказывалась в недавно опубликованной и переведенной на русский язык статье Пайерлса «Теория поля со времен Максвелла» [9, 3, с. 270].

Однако Пайерлс говорит об этой идее как о возможной естественной с современной точки зрения, а не утверждает, что следуя этой идее Максвелл пришел к гипотезе о токе смещения. Он пишет, что «не имеется никаких доказательств того, что именно такой был путь, который привел его [Максвелла] к этим результатам (т. е. к гипотезе о токе смещения) или, что такие аргументы играли какую-нибудь роль в его рассуждениях» [9, с. 270]. Рассмотрим теперь тот ход мыслей, который должен был привести Максвелла к гипотезе о токе смещения, даже если бы он и не пользовался какими-либо моделями электромагнитного поля, или, точнее, без обращения к этим моделям.

Мы уже говорили, что Максвелл с самого начала исследования электромагнитных явлений решил следовать взглядам Фарадея. Что же касается Фарадея, то последний будучи сторонником близкого действия уже подходил, по существу, к представлению о токе смещения в диэлектриках. По Фарадею, электрическая сила в диэлектриках передается от точки к точке в виде индукции, которой Фарадей придавал особое значение в электрических явлениях.

Следуя Фарадею, и Максвелл придавал особо важное значение индукции. Индукция и процесс распространения поляризации в диэлектриках как для Фарадея, так и для Максвелла были родственны процессу протекания электрического тока в проводниках. Отсюда и возникает идея поставить в соответствие току проводимости в проводниках ток смещения, т. е. смещение зарядов в диэлектриках. В диэлектриках заряды не движутся свободно, а смещаются. Это и есть ток смещения по Максвеллу. Его плотность $j_{см} \approx dh/dt$, где h — величина смещения электрического заряда из положения равновесия в диэлектрике.

В работе «О физических силовых линиях» Максвелл устанавливает связь между смещением h и напряженностью электрического поля E (электрической силой, действующей на электрический заряд, под действием которой происходит его смещение) и полагает, что $h \approx E$. При этом он пользуется построенной им моделью электромагнитного поля, хотя он мог бы просто сделать такое предположение, поскольку оно представляется вполне естественным.

В третьей работе «Динамическая теория поля» Максвелл просто исходит из подобного предположения, утверждая, что $h \approx E$, основываясь на теории упругости, согласно которой смещение пропорционально силе, если последняя не очень велика.

Таким образом, Максвелл и приходит к заключению, что плотность тока смещения $j_{см} \approx dE/dt$. Или это можно записать

где ϵ — постоянный коэффициент для каждого диэлект-

рического тела. Таким образом, ток смещения, поскольку он в конечном счете представляет движение электрических зарядов, так же как и ток проводимости должен создавать вокруг себя магнитное поле. Поэтому в формулу Стокса нужно к плотности тока проводимости $j_{пр}$ добавить плотность тока смещения $j_{см}$.

$$\text{rot } \mathbf{H} = \frac{4\pi}{c} j_{пр} + \alpha j_{см}.$$

Теперь, если мы предположим, что Максвелл имеет в виду обычный диэлектрик, то никакого нового уравнения мы не получим. В этом случае коэффициент α содержит множитель $\epsilon - 1$, где ϵ — диэлектрическая проницаемость диэлектрика, и если мы перейдем к вакууму, для которого $\epsilon = 1$, то $\alpha = 0$, и мы приходим к обычной формуле Стокса. Но дело в том, что Максвелл не разделял обычный диэлектрик и вакуум, и хотя во всех трех работах говорил о токе смещения, он подразумевает, что все выводы остаются справедливыми и для вакуума, который является таким же диэлектриком, как и обычный диэлектрик.

Вакуум наполнен эфиром, состоящим также как и вещество из частиц, которые могут поляризоваться. Если это не иметь в виду, то при рассмотрении данных работ можно высказать сомнение: «Как установил ли Максвелл уравнение Максвелла?»

В связи со сказанным выше коэффициент α у Максвелла будет равен в современных обозначениях ϵ/c , и тогда, действительно, мы получаем одно из основных уравнений Максвелла:

$$\text{rot } \mathbf{H} = \frac{4\pi}{c} j_{пр} + \frac{\epsilon}{c} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \quad \text{или} \quad \text{rot } \mathbf{H} = \frac{4\pi}{c} \mathbf{j} + \frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}.$$

Теперь следует сказать о механическом толковании электромагнитного поля Максвеллом. Здесь прежде всего нужно разделить два вопроса. Первый вопрос — это вопрос об общем механическом понимании электромагнитного поля и электромагнитных процессов вообще. И второй вопрос — вопрос о конкретном понимании, проявляющемся как электромагнитное поле в виде определенной механической модели.

Что касается общего механического понимания электромагнитных процессов, то такое понимание вполне естественно для Максвелла. Вообще вторая половина XIX в. характеризуется развитием механического понимания всех физических процессов, и это несмотря на то, что в этот период физика достигла наибольших успехов в развитии электродинамики и теории теплоты, т. е. немеханических форм движения.

Подвигнувшее большинство физиков второй половины XIX в.: Кануанус, В. Томсон, Гельмгольц, Больцман, Герц, Лоренц — верили в возможность механического объяснения немеханических явлений, и в частности, тепловых и электромагнитных.

Даже Пуанкаре, который, как некоторые думают, подорвал веру в возможность механических объяснений немеханических явлений, доказав теорему о неоднозначности такого объяснения [10, с. 221], все же не отрицал, что в основе электродинамики должна лежать механика. В 1904 г. он писал о теории Максвелла: «Таким образом возможность механического истолкования была поставлена вне сомнения. Если бы он [Максвелл] изложил эту мысль в начале своей книги, вместо того, чтобы помещать ее в отдельном углу второго тома (речь идет о «Трактате» Б. С.), она не ускользнула бы от внимания большинства читателей» [11, с. 242].

Механический взгляд на все физические явления продолжал господствовать в физике вплоть до конца XIX и начала XX в., не входя в противоречия с быстро накапливаемыми новыми физическими фактами. Почему так, почему в период, когда особенно быстро развивалась физика тепловых явлений и физика электрических и магнитных явлений, содержание этой науки долгое время не входило в явное противоречие с механическим взглядом на все физические явления?

Надо сказать, что как тепловые, так и электромагнитные явления подчинялись законам сохранения и прежде всего закону сохранения энергии. Закон же сохранения энергии обычно рассматривался как выражение закона сохранения живых сил, который был получен в механике и рассматривался как чисто механический закон.

Затем, в физике все шире и шире стали применяться вариационные принципы, которые распространялись и на немеханические явления. Это, в свою очередь, укрепляло веру в механическое происхождение немеханических явлений, в данном случае электромагнитных. Ведь нужно учитывать, что вариационные принципы возникли в механике и рассматривались как механические принципы. А их применение расценивалось как доказательство справедливости механического объяснения. Таким образом, механический взгляд на все физические процессы не только не встречал возражений, но наоборот, казался, получал все новые и новые подтверждения. Только позже в связи с открытием электрона, электромагнитной массы, радиоактивности и т. п. стала ощущаться слабость механического подхода к толкованию всех физических процессов. Именно в связи с этими открытиями и развился кризис в физике.

Теперь скажем о самой модели электромагнитного поля, которой пользовался Максвелл при выводе уравнений электромагнитного поля. Сыграла ли эта модель положительную роль в творчестве Максвелла или же ее следует рассматривать, по мнению Дюгема «паразитирующим растением, растением на крепком и полном жизни дереве?»

Мы полагаем, что Дюгем для данного случая и вообще неправ. Безусловно, использование наглядных представлений играло обычно в развитии физики положительную роль и особенно

при возникновении новых теорий. При этом следует отметить, что первоначальные модели, часто основанные на сравнительно грубых аналогиях, бывали весьма грубыми. И тем не менее они обычно играли на первом этапе построения новых теорий эвристическую роль.

В качестве примера можно привести работу С. Карно «О движущей силе огня», в которой, по существу, используется аналогия между действием водяного двигателя и тепловой машины, которая привела Карно к ряду правильных выводов и помогла ему сформулировать теорему о том, что коэффициент полезного действия идеальной машины зависит только от температур холодильника и нагревателя [12].

Кинетическая теория газов начала развиваться на основе весьма примитивной и даже заведомо неправильной модели идеального газа, использованной Кренигом, в которой движение молекул газа совершалось только в трех взаимно-перпендикулярных направлениях. Тем не менее, Крениг получил правильный, очень важный результат, что абсолютная температура пропорциональна средней кинетической энергии движущихся частиц. Можно привести и более близкий для нас пример. Вспомним модель атома Бора, в которой рассматриваются орбиты электронов, а сами электроны считаются за материальные точки. Но ведь теперь мы знаем, что никаких орбит-траекторий электронов в атомах нет. И эти представления об атоме, которые существовали до возникновения квантовой механики, не верны. Однако модель атома Бора сыграла первостепенную роль в развитии физики. И вряд ли без этой модели смогла бы возникнуть современная атомная физика.

Также обстоит дело и с моделью Максвелла для электромагнитного поля. Вряд ли Максвелл или кто-нибудь другой в середине прошлого столетия смог бы прийти к мысли о токе смещения, о том, что его величина пропорциональна $\partial D/\partial t$ без рассмотрения какой-либо модели, которая могла быть грубой и даже противоречивой. Она сыграла свою эвристическую роль, а затем ее можно было забыть. Так и сделал Максвелл. В последующих работах он уже не строил моделей. В «Трактате» Максвелл даже писал: «Попытка, которую я тогда сделал, чтобы представить действующую модель этого механизма, не должна приниматься за большее, чем она есть на самом деле, а именно, доказательство того, что может быть придуман механизм, способный установить связь механически эквивалентную фактическому соединению частей электромагнитного поля» [8, с. 603]. Однако Максвелл все же продолжал подчеркивать, что электромагнитные процессы являются выражением некоего механизма эфира, что модели этого механизма «могут быть более грубы или более тонки, чем другие, но все должны удовлетворять общим условиям механизма как такового».

Итак, построение механической модели электромагнитного поля Максвеллом, а тем более, его механическая трактовка яв-

лялись совершенно естественным для его времени. И хотя с точки зрения сегодняшнего дня эти механические модели представляются нам примитивными, да и сама механическая трактовка электромагнитного поля вызывает у нас протест, тем не менее, подходя исторически к рассмотрению творчества Максвелла, мы должны отметить, что они сыграли положительную роль при открытии теории электромагнитного поля. В связи с этим нам представляются бесперспективными попытки приписать Максвеллу какой-либо из современных подходов, используемый при изложении его теории в настоящее время.

Открытие Максвелла, его замечательная теория электромагнитного поля интересна еще и тем, что их появление не было вызвано какими-либо новыми экспериментами, требующими построения этой теории. Обычно развитие физической теории, да и вообще естественно-научных теорий происходит так, что стимулом к появлению новых идей, новых представлений является эксперимент. Новые экспериментальные данные вступают в противоречие с существующей старой теорией. Они требуют построения новой. Возникшая новая теория, которая пока еще является гипотезой, после подтверждения ее с помощью специально поставленных экспериментов становится уже общепризнанной теорией. Таким образом, обычно эксперимент является как источником построения новых теорий, так и критерием правильности этих теорий.

Можно привести массу примеров, подтверждающих указанное положение. Например, история теорий строения атома. Действительно, начиная с конца прошлого столетия, после открытия электрона именно указанным путем шло развитие теории атома. Открытие электрона, радиоактивности, исследование строения атома с помощью рассеяния частиц, изучение атомных спектров — все это приносило все новый и новый экспериментальный материал, на основе которого непрерывно развивалась теория строения атома.

Однако история науки знает и другие случаи возникновения и развития теорий, когда источником новых идей, новых теоретических концепций были не какие-то новые экспериментальные результаты, которые противоречили бы существующим общепринятым взглядам и представлениям.

В подобных случаях новые идеи, новые теоретические построения вызываются к жизни рядом обстоятельств, таких, как: изменение общих взглядов на ряд явлений, появление новых идей в каких-либо сложных областях науки, развитие новых философских концепций и т. д.

В качестве примера такого рода может служить теория Коперника. Возникновение теории Коперника нельзя рассматривать как результат появления каких-то новых опытных данных или новых наблюдений. Геоцентрическая теория Птолемея, казалось, поконтится на твердом фундаменте. Никаких фактов, которые противоречили бы ее истинности, не было известно. Более того, она

хорошо гармонизировала с основными принципами механики, которая принималась за истинные тогдашними учеными. Помимо теории Птолемея полностью соответствовала религиозному мировоззрению средних веков, соответствовала учению церкви, имевшему тогда огромный авторитет.

Тем не менее, Коперник выдвинул новую революционную теорию — гелиоцентрическую систему мира. И это было сделано, практически без опоры на опыт. По существу, единственным его аргументом в оправдание его теории был довод ее простоты.

Приведем второй подобный же пример появления новой теории — возникновение общей теории относительности. Начал Эйнштейн построение этой теории с предположения о том, что принцип эквивалентности действителен не только в механике, но и для электромагнитных и вообще всех физических явлений. Это основное предположение Эйнштейна не следовало ни из каких экспериментов. Это была его гипотеза, не основанная ни на каких известных фактах. Тем не менее, на основе этой гипотезы Эйнштейн построил новую теорию тяготения, новую теорию пространства и времени.

Только уже после того, как эта теория была построена, только тогда выводы из этой теории были проверены на эксперименте, который и подтвердил ее правильность, подтвердил истинность теории, которая была построена без опоры на эксперимент. Эйнштейн вообще утверждал, что эксперимент является лишь критерием правильности теории. Сама же теория, как полагал он, строится на каких-то общих умоглядных идеях. Он писал: «Я убежден, что посредством чисто математических конструкций мы можем найти те понятия и закономерные связи между ними, которые дадут нам ключ к пониманию явлений природы. Опыт может подсказать нам соответствующие математические понятия, но они ни в коем случае не могут быть выведены из него. Конечно, опыт остается единственным критерием пригодности математических конструкций физики. Но настоящее творческое начало присуще именно математике. Поэтому я считаю в известном смысле оправданной веру древних в то, что чистое мышление в состоянии постигнуть реальность» [13, с. 184].

Мнение Эйнштейна является, конечно, только полуправдой. Только иногда в основе научной теории лежала чистая интуиция. В большинстве же случаев теория строилась на основе экспериментальных данных. Однако история знает примеры, когда только для построения новой теории не являлся эксперимент: это и общая теория относительности, и теория Коперника, и теория электромагнитного поля Максвелла.

Действительно. Ведь во времена Максвелла в середине XIX в. не было экспериментов, которые требовали бы перестройки теорий электромагнитных явлений. Все известные тогда электрические и магнитные явления объяснялись теорией дальнего действия. Она получила уже и количественные выражения с точки зрения теории дальнего действия. Закон Кулона, закон Ампера, законы

Неймана и охватывающий все эти законы закон Вебера, описывали все известные тогда электрические и магнитные явления точки зрения дальнего действия. Противоречий между теорией и экспериментом не возникало. И если, тем не менее, в середине XIX в. начали появляться попытки построить теорию электрических и магнитных явлений на основе принципа близкодействия, то это происходило по особым причинам. В этом виновата была общая тенденция развития физической науки. Это было время, когда возникла волновая теория света, основанная на представлении о передаче световых возмущений в пространстве (в эфире) от точки к точке. Развилась теория теплопроводности, которая с математической стороны основывалась на понятии процесса близкодействия. Подобным же образом строилась теория сплошных сред, которая к этому времени достигла решающих успехов.

Все это вело к возрождению картезианских идей в физике. Кинетическая теория теплоты также способствовала возрождению картезианских идей. Не случайно, что в конце XIX в. французский ученый Корню провозгласил: «Дух Декарта реет над современной физикой». Картезианские идеи возрождались не только в оптике, в теории сплошных сред, в теплофизике, но и в электродинамике. И это несмотря на то, что еще эксперимент не входил в противоречие с теорией в области электрических и магнитных явлений. В подобном же русле развивалась и теория Максвелла. Что она не вытекала из эксперимента, следует также и из того факта, что она вовсе не сразу стала общепризнанной теорией. Такой теорией она стала только после опытов Герца, в которых он получил электромагнитные волны, предсказанные Максвеллом. Но это произошло лишь в 1888 г., т. е. спустя примерно 25 лет после публикации работы Максвелла, в которой он впервые получил уравнения электромагнитного поля.

ЛИТЕРАТУРА

1. Duhem M. P. Les théories électriques de J. Clerk Maxwell. P., 1902.
2. Campbell N. R. What is science? L., 1922, p. 155.
3. Джеймс Клерк Максвелл. Статьи и речи. М.: Наука, 1968.
4. Hertz H. Gesammelte Werke. Bd. 1, S. 259.
5. А. Т. Григорьян, А. Н. Вальцев. Генрих Герц. М.: Наука, 1968, с. 55.
6. Borg A. M. American Journal of Physics, 1963, N 11, p. 854.
7. Шапиро И. С. К истории открытия уравнений Максвелла. — УФН, т. 108, 1972, с. 319.
8. Джеймс Клерк Максвелл. Избранные сочинения по теории электромагнитного поля. М.: Гостехиздат, 1952.
9. Peierls R. E. Clerk Maxwell and Modern Science. L., 1963, p. 26.
10. Пуанкаре А. Электричество и оптика. — В кн.: Из предистории радио АН СССР. М.; Л., 1948, с. 221.
11. Пуанкаре. Наука и гипотеза. М., 1904.
12. Спасский Б. И., Сарангов Ц. С. К истории открытия теории Карно. — УФН, т. 99, 1969, с. 347.
13. Эйнштейн А. Сборник научных трудов. М.: Наука, 1967, т. 4, с. 184.

В. П. ВИЗГИН

ПОТЕНЦИАЛЫ И НАПРЯЖЕННОСТИ В ТЕОРИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ

Сформулируем одно историко-методологическое суждение, относящееся к структуре физической теории, которое, вероятно, не трудно было бы подтвердить достаточно обширным материалом из истории физики: уровень зрелости теории в значительной мере определяется тем, насколько адекватно выбраны величины, характеризующие состояние физической системы. Формирование теории, как правило, неразрывно связано с процессом выявления величин, наиболее адекватно описывающих состояние исследуемой системы.

Крайне любопытную картину, с этой точки зрения, мы наблюдаем в истории теории электромагнитного поля, у истоков которой (теории) стоят имена Фарадея и Максвелла. В этой теории с самого начала, т. е. с Фарадея, всегда фигурировали два типа величин, претендующих на то, чтобы считаться фундаментальными характеристиками, описывающими состояние поля, — напряженности и потенциалы. За прошедшие 150 лет, то есть 150-летие связано не только с максвелловским юбилеем, но и с подлинным началом теории электромагнитного поля — фарадеевским открытием электромагнитной индукции) то одни из этих величин, то другие поочередно, так сказать, выходили на первый план. Если игнорировать тонкую структуру этого соотношения, то всю его трассу можно разделить на три больших этапа. Первый, с 1831 г. до середины 80-х — начала 90-х годов прошлого века, совпадающий с периодом формирования теории, прежде всего в трудах Фарадея и Максвелла, — этап в значительной мере переходный, но с совершенно несомненным лидерством потенциала. Второй, продолжавшийся до конца 50-х годов XX в., — этап еще более определенного главенства напряженностей (он зафиксирован во всех основных учебниках и монографиях по теории электромагнитного поля). И, наконец, на третьем этапе, который длится примерно уже два десятилетия (хотя ростки его можно заметить и раньше, в 20-х и 30-х годах), мы снова видим потенциал в числе лидеров. Сразу замечу, что эти последние метаморфоза была связана, в первую очередь, с разработкой калибровочной концепции взаимодействия (Янг и Миллс, Утияма, Сакураи, Вейнберг, Салам и др.), в которой определяющая роль потенциалов неоспорима, а также с опытом Ларонова—Бома, подтвердившим реальное значение потенциала, по мнению большинства теоретиков, экспериментально.

Таким образом, современная ситуация в какой-то мере сближается с эпохой Фарадея и Максвелла, когда потенциалам приписывалось более фундаментальное и реалистическое значение. Точка зрения недавнего времени, мало кем подвергавшаяся со-



Максвелл со стробоскопом.
Кембридж, 1855 г.

мнению и господствовавшая на протяжении почти 70 лет, образно выражена в словах Э. Вигнера: «Потенциалы нельзя измерить, и действительно измеримыми оказываются лишь величины, инвариантные относительно преобразований, произвольно зависящих от потенциала (именно калибровочных преобразований 2-го рода.— В. В.). Разумеется, такая инвариантность носит искусственный характер. Нечто аналогичное можно было бы получить, введя в наши уравнения координаты какого-нибудь «духа»: уравнения должны были бы быть инвариантными относительно изменений координат «духа», но в действительности никакой пользы от введения такой величины мы бы не получили» [1].

«Призрачный» характер потенциалов («духи»!) связывался с их неизмеримостью и неоднозначностью (калибровочный произвол). Использование же их оправдывалось чисто математическими, вычислительными преимуществами, а также, возможно, историческими обстоятельствами. Начав свою жизнь как реальные

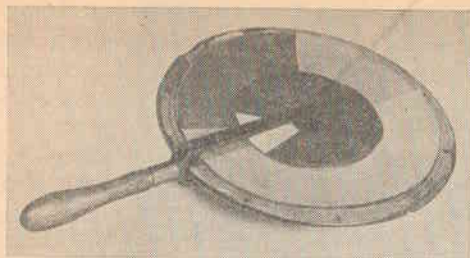
вещности, хотя, как мы увидим, и Максвелл, и особенно Фарадей испытывали порою некоторые сомнения в их реальности или фундаментальности, потенциалы вступили в конце XIX в. в стадию «призрачности», а затем, сравнительно недавно, вновь «материализовались».

В настоящем сообщении мы более подробно остановимся на первой стадии и первой же значительной метаморфозе, произошедшей в конце прошлого века. Помимо первоисточников, мы использовали несколько превосходных сравнительно недавних исторических работ Пирса Вильямса [2], Альфреда Борка [3—4] и Барбары Доран [5], опубликованных в 60—70-х годах.

ФАРАДЕЙ

По книге Вильямса о Фарадее можно во всех деталях проследить развитие взглядов Фарадея на введенное им же понятие **электротонического состояния**, фактически совпадающее с понятием **векторного потенциала**. Более кратко и выразительно эта эволюция изложена самим Максвеллом в 3-й главе IV части «Трактата об электричестве и магнетизме» (п. 540): «Концепция существования такой величины, от изменения которой, а не от ее абсолютной величины зависит ток индукции, встречается у Фарадея в первой серии его «Исследований» (Exp. Res., серия I (60)). Он наблюдал, что вторичная цепь, находясь в покое в электромагнитном поле неизменного напряжения, не показывает наличия какого-нибудь электрического эффекта, в то время как, если то же самое состояние поля было бы достигнуто внезапно, возникнет ток...»

По этой причине он приписал вторичной цепи, находящейся в электромагнитном поле, «особое электрическое состояние материи», которому он дал название **электротонического состояния**. Затем он нашел, что может расстаться с этой идеей при помощи соображений, основанных на линиях магнитной силы (Exp. Res., сер. II (242)), но даже в его последних исследованиях (там же, (3269)) он говорит: «Неоднократно в моем уме настойчиво возникала идея **электротонического состояния**» (там же (60, 1114, 1661, 1729, 1733)). «Вся история развития этой идеи в уме Фарадея,— продолжал Максвелл,— как она показана в опубликованных им «Исследованиях», заслуживает изучения. В результате целого ряда опытов, которые были основаны на тщательном размышлении, но без помощи математических вычислений, он пришел к идее, что существует нечто, что нам ныне известно как математическая величина и что может быть названо основной величиной в теории электромагнетизма. Но так как он пришел к этой концепции чисто экспериментальным путем, он приписал ей физическое существование и предположил, что это — особое состояние материи, хотя был готов отбросить эту теорию, как только он смог бы объяснить явления в любой более привычной нам форме.



Стробоскоп, изобретенный учителем Максвелла Дж. Д. Форбсом и усовершенствованный Максвеллом

тротонического состояния, — заключил Максвелл, — состоит в том, что она направила мысль на признание существования некой величины, от изменения которой зависят наблюдаемые явления» [6].

Заметим, кстати говоря, что Максвелл здесь выступает как дотошный историк науки. В этом отрывке набросан блестящий эскиз «всей истории развития этой идеи (т. е. идеи электротонического состояния. — В. В.) в уме Фарадея».

Таким образом, идея электротонического состояния как фундаментальной характеристики электромагнитного поля была введена Фарадеем не позже 1831 г. и впервые опубликована в третьем разделе первой серии «Экспериментальных исследований» (датированной ноябрем 1831 г.) [7]. 24 ноября Фарадей читал первую серию в Королевском обществе, а спустя пять дней в письме к Р. Филлипсу [8, с. 58—61] писал об электротоническом состоянии как одной из важнейших своих идей¹. Весь третий раздел первой серии посвящен «электротоническому состоянию». Фарадей подчеркивает ненаблюдаемость этого состояния («Покуда длится это особое состояние, оно не производит ни одного из известных электрических действий...» [7, с. 31]), а также то обстоятельство, что наблюдаемые явления возникают лишь при изменении этого состояния («Это особое состояние является, по-видимому, состоянием напряжения, и его можно считать эквивалентным току электричества..., который производится при появлении или исчезновении этого состояния...» [7, с. 35]). Интересно, что не только современники Фарадея и Максвелла плохо понимали концепцию электротонического состояния, но и более поздние исследователи — как физики, так и историки науки. Например, Т. П. Кравец, крупный физик и историк электро-

¹ «Новое электрическое состояние, которое выявляется через индукцию..., служит причиной некоторых весьма любопытных результатов... «Электротоническое состояние»... Не смелый ли я человек, что при всем моем невежестве измышляю (новые) слова... Новое состояние позволило мне, я полагаю, окончательно уразуметь и объяснить все явления Араго относительно вращающегося магнита и медного диска...» [8, с. 60].

магнетизма, обсуждая содержание I серии «Исследований» Фарадея, писал в 1947 г.: «Далее следует неудачный раздел об особом «электротоническом состоянии», в которое якобы приходит ток (60—80); этим состоянием Фарадей пробует объяснить все наблюдавшиеся им явления. Мы не будем останавливаться на этой гипотезе, так как Фарадей сам решительно отказывается от нее во второй серии своих исследований (231). Это единственный раздел в учении об электромагнитной индукции, который не стал классическим, не вошел во все учебники» [9, с. 747]. Впрочем Кравец указывает в примечании: «Эта гипотеза очень пленила Фарадея, и расставив он с ней только скрепя сердце (242). Она вновь овладела им позже (1661, 1729, 1733, может быть, также 1114)»². Грудью представить себе, что Кравец не усмотрел в электротоническом состоянии Фарадея понятие векторного потенциала. Но, как мы увидим, весьма отчетливо проявляется при внимательном просмотре основных работ Максвелла, который, как мы уже заметили, напротив, очень высоко оценил эту концепцию Фарадея. Просто для Кравца, как и для подавляющего большинства физиков XX в., глубокий физический смысл имели напряженности поля, а не потенциалы. Действительно, Фарадей, как заметил еще Максвелл, испытывал определенные сомнения относительно понятия электротонического состояния. Исследования II серии (датированной январем 1832 г.) привели его к выводу, что основной характеристикой поля должны быть силовые линии (напряженности). Поэтому в примечании к цитированному выше третьему разделу I серии (при ее опубликовании) он заметил: «Позднее поздние исследования... законов, управляющих этими явлениями, заставляют меня думать, что последние могут быть полностью объяснены без допущения электротонического состояния» [7, с. 31].

Однако вскоре, как отмечал и Максвелл, и Кравец, Фарадей вернулся к дорогой его сердцу концепции электротонического состояния. Так, в VIII серии (апрель 1834) он пытается его применить для объяснения электролитических явлений (955), в XIII серии (февраль 1838) — к анализу электрических явлений в непроводниках (1658—1661)³, а также (1729—1733). Он все время

² Здесь указанные числа означают номера пунктов соответствующих им разделов «Исследований» Фарадея.

³ Здесь он высказывает важные мысли об электрических явлениях в непроводящих средах и возможной роли понятия электротонического состояния при их истолковании: «Не раз я указывал, что соотношение между проводниками и непроводниками представляет собой не качественную, а лишь количественную противоположность (1334, 1603), а потому как по данному, так и по другим основаниям, вероятно, то, что действует на проводник, будет действовать и на изолятор, производя в нем, может быть, нечто, чему можно дать название электротонического состояния (60, 242, 1114)» [7, с. 695]. Кравец так комментирует эти пункты: «И тут вновь вспоминает давно забытое самим автором «электротоническое состояние» (1661), которое он сначала изобрел для объяснения индукции, а потом оставил. Собственные мысли так легко возвращаются у каждого автора

пытался найти способ экспериментального обнаружения электротонического состояния, пытался обобщить его, вводя в свои поздних исследования понятие «магнитотонического состояния» (1845). И в своих последних исследованиях, опубликованных в III томе (январь—февраль 1855 г.), он возвращается к мысли об электротоническом состоянии как ключевом теоретическом понятии электродинамики: «Вновь и вновь возникает во мне мысль об электротоническом состоянии (60, 1114, 1661, 1729, 1733): такое состояние совпадало бы и могло бы быть отождествлено с тем, чем представились бы тогда физические линии магнитной силы» (п. 3269) [10].

Таким образом, хотя Фарадею не удалось ни обнаружить электротоническое состояние экспериментальным путем, ни развить достаточно ясную теоретическую схему на основе этого понятия (концепция линий напряженностей поля оказалась в то время более жизнеспособной), интуитивно он чувствовал ее глубину и плодотворность и все время возвращался к ней.

МАКСВЕЛЛ

Для Максвелла же фарадеевское понятие электротонического состояния в значительной мере оказалось исходным в разработке теории электромагнитного поля. Первое упоминание об этом понятии, свидетельствующее о его ключевой роли в генезисе максвелловских идей, мы находим в письме Максвелла к В. Томсону от 13 сентября 1855 г.: «Я намереваюсь к этим фактам (речь идет о фактах, относящихся к силовым линиям.— В. В.) применить фарадеевское понятие электротонического состояния. Я извлек немало математического материала из этой жилы и полагаю, что нашел несколько важных истин относительно электротонического состояния. Удалось, например, свести к одному принципу не только притяжение и индукцию токов, но и притяжение зарядов без каких-либо дополнительных предположений» [11].

В первой своей статье по теории поля «О фарадеевых силовых линиях», датированной 1855—1856 гг., Максвелл существенно опирается на фарадеевскую концепцию электротонического состояния, оказавшуюся ключевой при построении математической переформулировки идей Фарадея. Имея в виду эту концепцию (после пророческих слов Фарадея, цитированных Максвеллом), он замечает: «Такая догадка ученого, столь глубоко освоившегося с природой, может иногда иметь больше значения, чем наилучшим образом обоснованный экспериментальный закон, и хотя существование рассматриваемого состояния мы не можем принимать за точно установленную физическую истину, тем не менее мы должны высоко оценить значение этой новой идеи Фа-

рарадея и вновь и вновь... Самое направление исканий Фарадея в кругу этих вопросов отклоняется от того пути, по которому пошла физика в дальнейшем» [9, с. 767].

...способной иллюстрировать наши математические понятия» [12, с. 58]. Интересно, что Максвелл в дальнейшем надеялся дать «механический образ» этого состояния: «До сих пор мне не удалось еще разработать идею об электротоническом состоянии настолько, чтобы можно было ясно представить его природу и свойства, не прибегая к символам... Я сохраняю надежду при внимательном изучении свойств упругих тел и движения вязких жидкостей найти такой метод, который позволил бы дать и для электротонического состояния некоторый механический образ, способный вести к общим заключениям» [12, с. 59].

Вторая часть статьи так и называется «О фарадеевом электротоническом состоянии». Максвелл показывает здесь, что можно ввести такую тройку величин, т. е. вектор в современной терминологии, $(\alpha_0, \beta_0, \gamma_0)$, которые он называет составляющими электротонической напряженности⁴, что с ее помощью удастся в той же точке пространства, где задана эта тройка, определить значения напряженностей электрического и магнитного полей:

$$\alpha_0 = -\frac{1}{4\pi} \frac{d\alpha_0}{dt}, \quad \beta_0 = -\frac{1}{4\pi} \frac{d\beta_0}{dt}, \quad \gamma_0 = -\frac{1}{4\pi} \frac{d\gamma_0}{dt}, \quad (1)$$

$$\alpha_1 = \frac{d\beta_0}{dz} - \frac{d\gamma_0}{dy} + \frac{dV}{dx}, \quad \beta_1 = \frac{d\gamma_0}{dx} - \frac{d\alpha_0}{dz} + \frac{dV}{dy}, \quad \gamma_1 = \frac{d\alpha_0}{dy} - \frac{d\beta_0}{dx} + \frac{dV}{dz}. \quad (2)$$

Здесь $(\alpha_1, \beta_1, \gamma_1)$ — напряженность магнитного поля, $(\alpha_2, \beta_2, \gamma_2)$ — напряженность электрического поля, V — скалярный магнитный потенциал. В современных векторных обозначениях (если $\bar{A}$ — векторный потенциал, V — скалярный магнитный потенциал, $\bar{E}$ и $\bar{H}$ — напряженности полей) (1) и (2) выглядят так:

$$\bar{E} = -\frac{1}{4\pi} \frac{d\bar{A}}{dt}, \quad \bar{H} = \text{rot } \bar{A} + \text{grad } V.$$

В рассуждениях Максвелла при этом существенную роль играли известные ныне теоремы и формулы векторного анализа, связанные с именами и работами Гаусса, Грина, Остроградского, Стокса, В. Томсона. Максвелл непосредственно ссылается на их работы, особенно на фундаментальную работу В. Томсона по математической теории магнетизма (1851), где, по существу, содержалась максвелловская теорема $\text{div } \bar{H} = 0$, согласно которой, если $\text{div } \bar{H} = 0$, то существует такой вектор $\bar{A}$, что $\bar{H} = \text{rot } \bar{A}$. Заметим при этом, что Томсон ни в коей мере не связывал вектор $\bar{A}$ с электротоническим состоянием Фарадея.

Таким образом, одним из важнейших исходных пунктов максвелловской теории стала фарадеевская концепция электротонического состояния.

В следующей работе «О физических силовых линиях» [13],

⁴ Максвелл называет эти величины также «электротоническими функциями».

датированной 1861—1862 гг., Максвелл попытался дать обещанный «механический образ» электротонического состояния, подчеркнув, впрочем, что он использует «механические образы для того, чтобы помочь воображению, но отнюдь не относя их к причинам явлений» [13, с. 109]. Я не буду здесь приводить хорошо известный рис. 8 из этой статьи, изображающий своеобразный механизм, назначение которого — дать механическую интерпретацию формулам (1) и (2) вместе с калибровочным условием

$$\frac{d\alpha_0}{dx} + \frac{d\beta_0}{dy} + \frac{d\gamma_0}{dz} = 0$$

(правда, здесь Максвелл обозначает электротоническое состояние не $(\alpha_0, \beta_0, \gamma_0)$, а (F, G, H)), а также и понятию электротонического состояния. В результате, он приходит к выводу, что «механическим образом» электротонического состояния является «импульс (т. е. количество движения. — В. В.), который действовал бы на ось колеса машины, если бы ведущему колесу покоящейся машины была внезапно сообщена его действительная скорость» [13, с. 146].

Это дало ему основание в следующей работе «Динамическая теория электромагнитного поля» (1865) [14] назвать электротоническое состояние «электромагнитным количеством движения»: «То, что я назвал электромагнитным количеством движения, является той же самой величиной, которую Фарадей обозначил как электротоническое состояние тока, любое изменение которого порождает действие электродвижущей силы, подобно тому как изменение механического количества движения влечет за собой действие механической силы» [14, с. 273].

Заметим, что в число 20 основных величин, характеризующих электромагнитные процессы и фигурирующих в 20 основных уравнениях электродинамики, входят и три компоненты электротонического состояния (оно же — электротоническая напряженность, электромагнитное количество движения и будущий векторный потенциал). При этом по отношению к свободному полю «электромагнитное количество движения» выступает как более фундаментальная величина, так как именно через нее и через скалярный «электрический потенциал» выражаются напряженности полей. То обстоятельство, что «электромагнитное количество движения» определено лишь с точностью до градиента от произвольной функции пространственных координат, Максвеллу было известно со времени его первой работы по электродинамике. Но и эта калибровочная неоднозначность электротонического состояния, и ясное понимание, что сама эта величина ненаблюдаема, а наблюдаемые явления зависят лишь от ее изменения, не помешали Максвеллу признать фундаментальный физический характер этого состояния.

Впрочем, через три года, в 1868 г., Максвелл систематизирует основные уравнения своей теории, не прибегая к потенциалам. На это обратил внимание А. Борк, который также заметил,

что из текста этой статьи не ясно, какую цель преследовал автор, отказавшись от использования потенциалов [15].

Некоторые из писем Максвелла к Тэту, прежде всего письмо от 23 февраля 1871 г. (см. [3, с. 216]), показывают, что, по крайней мере в 1870 г., его мысли снова обратились к потенциалам. Можно предположить, что временный отказ от них был связан с названными двумя недостатками этих величин (ненаблюдаемость и неоднозначность), сомнениями в целесообразности механических моделей и желанием дать наиболее экономную феноменологическую схему электродинамики. Но слишком велика была привязанность Максвелла к потенциалам, слишком большую роль они сыграли в разработке основ теории, слишком хорошо они вписывались в качестве основных величин в концептуальную структуру теории, выявляя также ее глубинную связь со структурой классической механики, чтобы отказ от них стал окончательным. Наконец, появилось еще одно обстоятельство, которое могло стимулировать возврат к потенциалам, в полной мере сказавшийся в «Трактате об электричестве и магнетизме». Это — возможность применения нового математического метода, векторного и кватернионного формализма, которое особенно эффективно выглядело при использовании потенциалов. В упомянутом письме к Тэту, вероятно, впервые встречается кватернионное представление потенциалов

$$T = P + iL + jM + kN, \quad (3)$$

где P — скалярный магнитный потенциал, а (L, M, N) — электротоническое состояние, названное здесь Максвеллом впервые **векторным потенциалом**.

Мы уже приводили высказывание Максвелла из IV части «Трактата», касающееся фарадеевской концепции электротонического состояния, которую он оценивал очень высоко, называя эту характеристику «основной величиной в теории электромагнетизма» [6]. Он называет ее векторным потенциалом в п. 406, озаглавленном «Векторный потенциал магнитной индукции» [16] (впервые опубликованном). Эта величина была названа так по аналогии со скалярным потенциалом, поскольку, как полагает Максвелл в п. 617 [6, с. 488], векторный потенциал выражается (при условии $\text{div } \vec{A} = 0$) с помощью формулы:

$$\vec{A} = \mu \iiint \frac{\vec{C}}{r} dx dy dz \quad (3a)$$

(или в векторной записи $\vec{A} = \mu \int \frac{1}{r} d\vec{v}$). В следующем параграфе (406) он дает кватернионное и векторное представления магнитной индукции $\vec{B}$ и векторного потенциала $\vec{A}$ и соотношения, связывающие их (с помощью вектора набла ∇): $\vec{B} = \nabla \vec{A}$ (4), где $\vec{A}$ — готические буквы B и A , $\vec{B} = \text{Curl } \vec{A}$ (5); последние соотношения выполняются, как замечает Максвелл, при калибровочном условии типа $\text{div } \vec{A} = 0$ ($\vec{A}$ — векторная часть кватерниона $\vec{A}$), при

выполнении которого скалярная часть $\nabla\varphi$ оказывается равной нулю.

Заметим, что в «Трактате» встречаются и другие названия электродинамического состояния, в частности и «электромагнитное количество движения» [6, с. 476—477], и «электрокинетическое количество движения» [6, с. 455], что свидетельствует о важности для Максвелла установленной ранее механической аналогии.

Среди «основных векторов» теории на первом месте у Максвелла оказывается векторный потенциал, а среди скаляров — электрический потенциал [6, с. 489]. Заметим также, что в главе, посвященной электромагнитной теории света, Максвелл не пользуется потенциалами, чтобы с их помощью записать волновые уравнения (п. 784) [6, с. 554].

ПОСЛЕ МАКСВЕЛЛА: ГЕРЦ, ХЕВИСАЙД, ЛАРМОР И ДР.

В начале XX в. во всех монографиях и учебниках по электродинамике, содержащих максвелловскую теорию поля, мы встречаемся с системой уравнений Максвелла в форме Герца—Хевисайда, в которых фигурируют лишь напряженности полей, а потенциалы отсутствуют. Действительно, именно Герц и Хевисайд в первую очередь поставили под сомнение в середине 80-х — начале 90-х годов фундаментальность потенциалов и показали, что систему основных уравнений электродинамики можно записать в терминах одних только напряженностей полей, не прибегая к потенциалам.

Можно предположить, что исключение потенциалов из основных уравнений электромагнитного поля именно Герцем и Хевисайдом было связано с их экспериментальными (у первого) и инженерными (у второго) интересами, поскольку потенциалы не были, в отличие от напряженностей, непосредственно измеримыми величинами [17]. Хевисайд подчеркивал, что знания потенциала в общем случае недостаточно, чтобы однозначно определить состояние поля. Он называл их «в высшей степени искусственными величинами», имеющими вспомогательный характер, и считал, что только напряженности «действительно определяют физическое состояние среды» [18].

Хотя Герц, как и Хевисайд, старался исключить потенциалы из физических рассуждений и использовать их только как вычислительное средство, он не был, подобно Хевисайду (и добавим Дж. Фицджеральду, который также избегал применения потенциалов) столь же категоричен в их оценке как величин, лишенных какого-либо физического смысла. Правда, он считал, что потенциалы физический смысл могут иметь только при рассмотрении электромагнитных процессов в среде (а не в пустоте) [3, с. 227—230]. Близкой точки зрения придерживался Дж. Лармор, который, признавая возможность приписать потенциалу физический смысл при рассмотрении микропроцессов в среде

[там же], писал в своем труде об эфире и материи (1900 г.), что потенциалы вводятся как вспомогательные функции для упрощения вычислений и «не представляют собой действительные физические величины» («do not represent actual physical quantities») [19].

В конце 90-х годов XIX в. и начале XX в. эта точка зрения очень скоро становится почти общепринятой. В распространенном курсе электродинамики А. Грея (1898) можно прочесть: «Использование векторного потенциала иногда удобно в качестве математического приема. Но он не является физической величиной, которая могла бы наблюдаться экспериментально...» [20]. Аналогичные замечания о потенциалах встречаются и в «Теории электронов» Г. А. Лоренца (1909), который подчеркивал, что именно Герц и Хевисайд дали современную формулировку максвелловской теории в ее «ясном и концентрированном виде» [21]. «Так как, однако, вторые члены этих формул,— писал он в этой книге, имея в виду волновые уравнения, записанные в терминах напряженностей $\vec{d}$ и $\vec{h}$,—отличаются некоторой сложностью, мы предпочитаем не определять непосредственно $\vec{d}$ и $\vec{h}$, а вычислить в первую очередь некоторые вспомогательные функции, которые называются потенциалами и через которые можно будет выражать электрические и магнитные силы» [21, с. 42—43]. Примерно в таком же контексте упоминаются потенциалы и в знаменитом курсе электродинамики М. Абрагама (первое издание — 1904 г.). Так потенциалы утратили характер фундаментальных физических величин и приобрели статус вспомогательных характеристик поля, используемых лишь для упрощения математических вычислений при решении полевых уравнений.

СОВРЕМЕННОСТЬ

Описанная выше точка зрения на потенциалы как на величины, лишенные смысла и имеющие лишь формально-вычислительное значение, была преобладающей вплоть до конца 50-х — начала 60-х годов. Положение быстро изменилось, благодаря утверждению калибровочной концепции полей, сильный импульс которой дали ставшие теперь классическими работы Ч. Янга и Р. Миллса (1954), Дж. Сакураи (1960) и др., и привлечшему всеобщее внимание физиков к опыту Ааронова—Бома (1959), являющемуся важным свидетельством в пользу реальности электромагнитного потенциала.

В «Фейнмановских лекциях по физике», увидевших свет в начале 60-х годов и содержащих детальный и ясный анализ опыта Ааронова—Бома, мы можем прочесть следующее: «Векторный потенциал $\vec{A}$ (наряду с сопровождающим его скалярным потенциалом φ), по-видимому, приводит к более прямому описанию физических процессов. Чем глубже мы проникаем в квантовую теорию, тем ясней и прозрачней это становится. В общей теории — квантовой электродинамике — в системе уравнений, заме-

няющих собой уравнения Максвелла, векторные и скалярные потенциалы уже считаются фундаментальными величинами. Векторы $\vec{E}$ и $\vec{B}$ постепенно исчезают из современной записи физических законов: их вытесняют A и φ » [22].

В связи с развитием единых геометризованных теорий гравитационного и электромагнитного полей, а также квантовой механики и электродинамики была понята калибровочная природа электромагнитного поля, в частности связностный характер электромагнитных потенциалов, приобретших в рамках калибровочной концепции фундаментальное физическое значение [23]. Решающую роль здесь сыграли работы 20-х — 30-х годов — Г. Вейля, В. А. Фока (отчасти совместно с Д. Д. Иваненко) и др. «Но все равно осознание физических особенностей поля связности затянулось так надолго, что лишь в шестидесятых годах Ааронов и Бом предложили эксперимент, который показывает истинно «связностную» природу поля Максвелла» [там же].

Ааронов и Бом с помощью несложного интерференционного опыта с электронами в электрических и магнитных полях показали, что «...в квантовой теории некоторый электрон... испытывает воздействие потенциалов, находясь в области, где напряженность поля равна нулю» [24]. Хотя подобные эффекты, как было подчеркнуто ими, зависят от калибровочно-инвариантной интегральной характеристики, концепция локализованного поля требует признания непосредственного воздействия на электрон именно потенциала поля. В ряде опытов 1960—1962 гг. Р. Чемберс, Г. Мелленштедт и В. Бай и др. зарегистрировали эффект Ааронова—Бома экспериментально⁵.

Так, несколько неожиданным образом произошла очередная метаморфоза потенциалов, так сказать «материализация» духов, и мы вернулись, фактически, к позиции Фарадея и Максвелла, пророчески предвидевших фундаментальную физическую роль потенциалов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вигнер Е. Этюды о симметрии. М.: Мир, 1971, с. 28.
2. Williams L. P. Michael Faraday. L.: Chapman and Hall, 1965.
3. Bork A. M. Maxwell and the Vector Potential.— *Isis*, 1967, vol. 58, p. 210—222.
4. Борк А. М. Физика перед возникновением специальной теории относительности.— *УФН*, 1968, т. 94, с. 167—180.
5. Doran B. G. Origins and Consolidation of Field Theory in Nineteenth Century Britain: From the Mechanical to the Electromagnetical View of Nature.— *Hist. Stud. Phys. Sci.*, 1975, vol. 6, p. 133—260.
6. Максвелл Дж. К. Из «Трактата об электричестве и магнетизме». — В кн.: Максвелл Дж. К. Избранные сочинения по теории электромагнитного поля. М.: Гостехтеориздат, 1954, с. 398.
7. Фарадей М. Экспериментальные исследования по электричеству. М.: Изд-во АН СССР, 1947, т. 1.

⁵ Более детальное обсуждение физической стороны этого эффекта и анализ упомянутых экспериментов содержится в работах Х. Эрлихсона [25] и Б. Л. Фейнберга [26].

8. Инессо и Фаллису об открытии электромагнитной индукции.— В кн.: Фарадей М. Избранные работы по электричеству. М.; Л.: ГОНТИ, 1939.
9. Кларк Г. Н. Фарадей и его «Экспериментальные исследования по электричеству». — В кн.: Фарадей М. Экспериментальные исследования по электричеству, т. 1.
10. Фарадей М. Экспериментальные исследования по электричеству, т. 3. М.: Изд-во АН СССР, 1949, с. 584.
11. Origins of Clerk Maxwell's Electrical Ideas as Described in Familiar Letters to William Thomson. Cambridge, Cambridge Univ. Press, 1937.— In: Bork A. Maxwell and the Vector Potential.— *Isis*, 1967, vol. 58, p. 211.
12. Максвелл Дж. К. О фарадеевых силовых линиях.— В кн.: Избр. соч. по теории электромагнитного поля. М.: Гостехтеориздат, 1954, с. 11—88.
13. Максвелл Дж. К. О физических силовых линиях.— В кн.: Избр. соч. по теории электромагнитного поля. М.: Гостехтеориздат, 1954, с. 107—193.
14. Максвелл Дж. К. Динамическая теория электромагнитного поля.— В кн.: Избр. соч. по теории электромагнитного поля. М.: Гостехтеориздат, 1954, с. 251—341.
15. Maxwell J. C. On a Method of Making a Direct Comparison of Electrostatic with Electromagnetic Force; with a Note on the Electromagnetic Theory of Light.— *Phil. Trans.*, 1868, vol. 157, p. 643—657.
16. Maxwell J. C. Treatise on Electricity and Magnetism. Oxford, Oxford Univ. Press, 1881 (2nd ed.).
17. Григорьев А. Т., Вьяльцев А. Н. Генрих Герц. М.: Наука, 1968, с. 221—223.
18. См., напр., Doran B. G. Origins and Consolidation of Field Theory in Nineteenth Century Britain: From the Mechanical to Electromagnetical View of Nature.— *Hist. Stud. Phys. Sci.*, 1975, vol. 6, p. 226. Цит. работа: Heaviside O. On the Self—Induction of Wires.— *Phil. Mag.*, 1886, vol. 22, p. 118—185.
19. Larmor J. Aether and Matter. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1900.— In: Bork A. Maxwell and the Vector Potential.— *Isis*, 1967, vol. 58, p. 222.
20. Gray A. A Treatise on Magnetism and Electricity. London, McMillan, 1898.— Цит. по: Bork A. Maxwell and the Vector Potential.— *Isis*, 1967, vol. 58, p. 222.
21. Лоренц Г. А. Теория электронов. М.: Гостехтеориздат, 1956.
22. Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М. Фейнмановские лекции по физике. М.: Мир, 1966, вып. 6, с. 26.
23. Минин Ю. И. Математика и физика. М.: Знание, 1979, с. 19—20.
24. Aharonov Y., Bohm D. Significance of Electromagnetic Potentials in Quantum Theory.— *Phys. Rev.*, 1959, vol. 115, p. 485—491.
25. Erlichson H. Aharonov-Bohm Effect—Quantum Effects on Charged Particles in Field-Free Regions.— *Amer. Journ. Phys.*, 1970, vol. 38, p. 162—173.
26. Фейнберг Е. Л. Об «особой роли» электромагнитных потенциалов в квантовой механике.— *УФН*, 1962, т. 78, с. 53—64.

УДК 93/99(53)+530.765

О. А. ЛЕЖНЕВА

МАКСВЕЛЛ И РУССКАЯ ФИЗИКА

Тема законна, многоаспектна, но лишена личностного элемента: Максвелл в России не был, и о его встречах с русскими физиками нам ничего неизвестно. По своему характеру Максвелл не был склонен к научным командировкам на континент. С другой стороны, «неустановившийся режим» становления физики в России имел максимумы активности в 40—50-е гг. XVIII в. (Ломоносов, Рихман, Эпинус, Браун) и в 30—40-е гг. XIX в. (Ленц,

В 1898 г. А. И. Садовский, работавший в Юрьевском (ныне Тартуском) университете, предсказал и другой механический эффект: вращательное действие поляризованного по кругу светового луча на кристаллическую пластинку, превращающую его в линейно поляризованный, т. е. фактически показал, что электромагнитное поле обладает моментом количества движения (эффект Садовского). Экспериментально этот эффект получили Р. Бэт (1935) и для сантиметрового диапазона Н. Каррара (1949) [3, с. 375].

В России было завершено заполнение разрыва в спектре электромагнитного излучения между волнами Герца и оптическим участком спектра. Важный шаг в этом направлении был сделан П. Н. Лебедевым, получившим в 1895 г. шестимиллиметровые волны. Волны длиной от нескольких сантиметров до 82 микрополучила с помощью изобретенного ею массового излучателя А. А. Глаголева-Аркадьева (1922) в основанной В. К. Аркадьевым в 1922 г. в Москве Лаборатории электромагнетизма им. Максвелла, а также М. А. Левицкая в Ташкенте (1924).

На доказательство дискуссионной в то время гипотезы о том, что рентгеновские лучи представляют собой более короткие, чем ультрафиолетовые поперечные электромагнитные волны, были направлены опыты Б. Б. Голицына и А. Н. Карножицкого (1896) по обнаружению поляризации этих лучей и был сделан правильный вывод о их природе, но эти опыты были раскритикованы (см. [6, с. 129]). И даже в 1901 г. Лебедев в своем подробном обзоре «Скала электромагнитных волн в эфире» не решился включать туда рентгеновские лучи.

Расширение сферы действия электродинамики Максвелла. Мы не встретим русских имен среди авторов теорий, искавших пути видоизменения уравнений Максвелла применительно к описанию электромагнитных явлений в движущихся телах. Но среди соответствующих экспериментов выдающуюся роль играют опыты А. А. Эйхенвальда, начатые в 1901 г. в Московском инженерном училище и опубликованные в 1904 г., т. е. накануне рождения теории относительности. Результаты его точных измерений магнитного поля движущихся зарядов — свободных и поляризованных — оказались полностью соответствующими теории Эйнштейна. В той же серии опытов была доказана замкнутость всех видов токов и прямым образом измерено магнитное поле тока смещения. В 1911 г. А. Ф. Иоффе измерил и магнитное поле движущихся электронов — катодных лучей при газовом разряде.

Как известно, электрические и магнитные свойства сред, в которых, в частности, распространяются электромагнитные волны, характеризуются в теории Максвелла константами ϵ и μ . Между тем еще в опытах Шиллера 1874 г. были получены данные о зависимости диэлектрической проницаемости ϵ вещества от частоты быстропеременного электромагнитного поля и было, таким образом, положено начало электрической спектроскопии

(тогда и в наше время ее нередко именуют диэлектрической поляриметрией).

В конце XIX — начале XX вв. была поставлена серия опытов учеников Лебедева — А. Р. Колли, Т. П. Кравца, В. И. Романова — по радиоспектроскопии жидких диэлектриков в дециметровом диапазоне, не давших точных количественных результатов.

Более счастливую судьбу имели предпринятые учеником Лебедева В. К. Аркадьевым исследования поведения ферромагнетиков в быстропеременных полях, не только приведшие к созданию магнитной спектроскопии, к открытию ферромагнитного резонанса (1912), но и к созданию теории электромагнитного поля в ферромагнитных металлах с помощью введения понятий магнитного тока, магнитной проводимости, комплексной магнитной проницаемости, что расширило сферу применимости теории Максвелла на ферромагнетики. Работа научной школы магнитологов В. К. Аркадьева после Великой Октябрьской социалистической революции как в университетской лаборатории, так и в других научных центрах получила широкое признание.

В России был теоретически разработан ряд проблем электромагнитной теории света.

В 1891—1892 гг. ученик Столетова Д. А. Гольдгаммер, который, правда, вначале пользовался уравнениями Гельмгольца, но затем убедился в правильности уравнений Максвелла, вывел уравнения для различных случаев поведения плоских волн на границах проводящих сред и диэлектрических (изотропных и кристаллических), а также уравнения, описывающие естественное вращение плоскости поляризации света. Некоторые из его выводов явились лишь переводом на язык максвелловской теории результатов, полученных ранее в рамках волновой механической теории света, но введение им двух магнито-оптических констант позволило описать с единой точки зрения такие явления, как открытое Фарадеем вращение плоскости поляризации света в магнитном поле, эффект Керра и др. Возникшая по этому вопросу полемика с Друде была экспериментально завершена Зееманом в пользу теории Гольдгаммера [7, с. 288—289]. Широкое признание получила изданная на немецком языке монография Гольдгаммера «Дисперсия и поглощение света» (1913), содержащая и его собственные результаты.

Исчерпывающее рассмотрение явлений при отражении и преломлении света по Максвеллу содержится в работах А. А. Эйхенвальда «О движении энергии при полном внутреннем отражении света» (1908) и «О поле световых волн при отражении и преломлении» (1912). В первой из них показана ошибочность теории Друде, принявшего противоречащее теореме Умова—Пойнтинга допущение о совпадении направления электрического поля луча с направлением его распространения [8, с. 175—179].

Мы не касаемся работ русских физиков в направлении другого фундаментального цикла работ Максвелла, которому посвящена в этом сборнике статья О. В. Кузнецовой.

ПРАКТИЧЕСКИЕ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕОРИИ МАКСВЕЛЛА

Среди множества электротехнических изобретений русских физиков к Максвеллу, очевидно, восходят в первую очередь те, которые связаны с применением электромагнитных волн. Это прежде всего изобретение радио А. С. Поповым: демонстрация беспроводной сигнализации на заседании Физического отделения Русского физико-химического общества 7 мая (25 апреля) 1895 г., публикация в первом номере журнала этого общества в 1896 г. Менее широко известно изобретение Б. Л. Розингом, работавшего в Петербургском Политехническом институте, системы телевидения с электронно-лучевой трубкой (патент 1907 г., передача изображения в 1911 г.).

Эти изобретения не могли быть сделаны до Максвелла и положили начало новой эпохе в области коммуникаций. Но огромное влияние было им оказано и на сильноточную электротехнику, развивавшуюся преимущественно изобретателями-эмпириками, иногда, как в случае Якоби и Ленца, в содружестве с учеными уже с 20-х гг. XIX в. Принятие фарадеев-максвелловской полевой картины электромагнитных явлений в корне изменило понятийный аппарат электротехники и открыло путь к совершённой М. О. Доливо-Добровольским (1862—1919) революции в электромашиностроении и электроэнергетике с помощью системы трехфазного переменного тока, основанной на применении вращающегося магнитного поля (генератор, 1888; двигатель, 1890; передача электроэнергии на расстояние 170 км, 1891). Предшествовавший вариант с двухфазным током Г. Феррариса и Н. Теслы, открывших это явление, не получил широкого распространения.

ИНТЕРПРЕТАЦИИ ПОНЯТИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ

В 90-х годах XIX в. эксперимент, теория, практика электротехники сделали существование электромагнитного поля как физической реальности несомненным. Носителем же его считался, в том числе и Максвеллом, эфир, позиции которого укрепились, когда была экспериментально продемонстрирована общность природы оптических и электромагнитных явлений². Но очень скоро в связи с накоплением оптических и электродинамических опытов с явлениями в движущихся средах и их теоретического осмысления привычный при всех своих парадоксальных свойствах эфир оказался исключенным из новой картины мира при том, что сама система уравнений электродинамики Максвелла в нее полностью вписалась (Я. Г. Дорфман вслед за Уиттекером назвал член, соответствующий току смещения, «релятивистской поправкой» [9, с. 100]. «Узаконив» роль среды как носителя

² Не следует думать, что это произошло автоматически после опытов Герца. Требовалось получать все более короткие электромагнитные волны и доказывать наличие у них свойств световых волн.

релятивистской энергии, Максвелл в то же время открыл путь к переосмыслению (между публикацией статьи Максвелла в Британской энциклопедии и рождением специальной теории относительности прошло менее четверти века). Таким образом, «вине» Максвелла физики за короткий промежуток времени дважды испытали ломку представлений об электромагнитных явлениях, связанную в обоих случаях с представлением картины физического мира в целом. В первом случае она менялась, не отрываясь от системы понятий классической механики при противостоянии ньютоновской и картезианской традиций (во втором случае субъективно для современников и к радости картезианских душ), во втором вышла за его пределы. Такие провалы не происходят мгновенно и неизбежно вызывают оппозицию «здорового консерватизма». Ряд попыток построить механические модели эфира, в том числе Л. Больцмана, А. Зоммерфельда, Дж. Лармора, Дж. Дж. Томсона, не увенчались успехом, и одновременно формировалась электромагнитно-полевая программа с ее стремлением свести все законы к уравнениям Максвелла и силам Лоренца либо с эфиром, как первичной реальностью (Э. Вихерт), либо с эфиром и независимо существующими электрическими зарядами [11, с. 23]. В России они имели свои особенности. Столетов, умерший в 1896 г., еще мог надеяться, что «XX век будет веком эфира» [10, с. 509].

Глава Петербургской школы физиков — И. И. Боргман (1849—1914) был десятью годами моложе Столетова и это имело существенное значение: он мог ознакомиться с электромагнитной теорией света еще будучи студентом; когда вышел трактат Максвелла, ему было 24 года. Так что ему не пришлось преодолевать инерцию картины дальнего действия. Пережив же Столетова на 18 лет, он увидел крушение эфира, неразрывно связанного в его сознании с теорией Максвелла.

С докладом «Электромагнитная теория света Максвелла» на общем собрании Русского физико-химического общества Боргман выступил в 1881 г. еще будучи лаборантом кафедры физики Петербургского университета, но уже опубликовав исследование «О влиянии окружающей среды на электродинамические явления» (1877). Назвав теорию замечательной, Боргман приводит все накопленные к тому времени эксперименты, ее подтверждающие, в том числе свои, Зилова, Шиллера и утверждает, что эфир, передающий, по Френелю, свет, вместе с тем является и передатчиком всевозможных электрических действий. «Проникая различные материальные тела, эфир приобретает различные свойства от действия на него частичек материи и, в свою очередь, сам не остается без влияния на эти частички. Отсюда влияние различных тел на передачу электрических действий и те явления, которые происходят в них во время распространения по ним этих действий» (цит. по: [12, с. 9]).

Боргман видит сходство механической теории тепла и теории Максвелла, дающей «подобную же общность, простор для пред-

ставления того или другого рода движений, происходящих в эфире, хотя, конечно, не такую же простоту» (цит. по: [12, с. 2]).

В 1893 г. Боргман, уже профессор, впервые в России изложил теорию Максвелла в университетском учебнике. Эфир считается ее неотъемлемым элементом. На основании этой теории, констатирует Боргман, «нет пока возможности написать уравнения движения частей эфира при распространении по проводникам тока или изобразить характер деформации, претерпеваемой те же эфиром при электризации. Эта теория, объединяющая различные явления света, теплоты и электричества и основывающаяся на допущении возникновения в эфире особых возмущений, вопрос о сущности этих возмущений оставляет вполне открытым. В этом ее недостаток, а с другой стороны, и достоинство» [13, предисловие-вклейка].

В 1892 г., через год после триумфа электротехнической системы Добровольского во Франкфурте-на-Майне, Боргман прочитал лекцию в пользу народных школ в местностях, пострадавших от неурожая. Она называлась «Магнитный поток и его действия. Физическое объяснение динамо-машин, трансформаторов и электромоторов с обыкновенным и вращающимся магнитным полем. С приложением портрета Михаила Фарадея». Его [Фарадея] учение о магнитных силовых линиях, — пишет Боргман, — долгое время не признававшееся в науке и почти осмеянное, теперь составляет основу теории электричества и магнетизма. Даже более: силовые линии для него как-бы нечто материальное, осязаемое. И далее: «При возбуждении магнитного поля изменяется состояние эфира...» [14, с. 29—30].

Но вот произошли революционные события в физике, родились электрон, кванты, теория относительности. Что же скажет Боргман в речи «Электричество и свет» на XII съезде русских естествоиспытателей и врачей 2 января 1910 г. «Эфир является средой, посредством которой силовыми линиями соединены друг с другом атомы электричества противоположных знаков и в которой возникает и со скоростью света распространяется энергия, когда атомы отрицательного электричества, подвижные в так называемых атомах материи, претерпевают изменение в своем движении. Электричество и эфир находятся в тесной связи, но эта связь еще совсем темна для нас, как вполне темна для нас и структура эфира. Современная механика не дает возможности ясно представить модель эфира. Нужны иные построения, необходимо выяснение конструкции самого электрона, необходимо выяснение и того, что представляет собой атом положительного электричества... Дифференциация электрона — вот следующая задача физики» [15, с. 107]. И надежда на то, что «быть может, корпёскль, или электрон, т. е. атом электричества, есть элемент объема эфира, находящийся в особом состоянии: или в отношении плотности, или в отношении движения — сравнительно с остальным, окружающим этот электрон эфиром» [15, с. 103]. Но... «Вряд ли механика, которой мы пользуемся теперь, в со-

стоянии выяснить конструкцию атома электричества. Это сделает другая механика, только что еще зарождающаяся, основанная на новых началах»² [15, с. 103].

Наконец, в последнем издании «Оснований учения об электрических и магнитных явлениях» 1914 г. Боргман отмечает существенное изменение взгляда на природу электричества, которое стало рассматриваться «как особая субстанция, обладающая атомистическим строением... Учение XVIII в., от которого всемирно старались избавиться во второй половине XIX в., снова выступило на первый план... Представление об атоме электричества вызвало необходимость допущения действия на расстоянии. Принцип «actio in distans» опять является базисом для теоретических построений» [16, предисловие-вклейка]. Но автор «Магнитного потока и его действий», сам участвовавший в развитии электротехники, естественно, не мог с этим примириться и считал, что сведение поля к математическому символу — явление временное.

По-видимому, более легко пережил расставание с эфиром Лебедев. В конце небольшого обзора «Успехи физики в 1911 году» он пишет о предположении, что отрицательные результаты попытки обнаружить движение Земли относительно эфира связаны с невозможностью это сделать, причем «это предположение получило название принципа относительности и поставило обратную задачу: указать во всех рассуждениях те условия, благодаря которым равномерное движение относительно эфира не может быть обнаружено никакими способами. Если раньше электродинамика указывала те приемы, которыми можно было бы попытаться обнаружить движение Земли в эфире, то теперь принцип относительности потребовал таких дополнений в электродинамике, благодаря которым все явления, захватывающие материю (только эти явления мы можем наблюдать), совершаются независимо от ее движения в эфире, — мы можем говорить, следовательно, только об относительном движении масс друг относительно друга, тогда эфир и его свойства, да и самая гипотеза о существовании эфира в той форме, как она понималась до настоящего времени, является уже лишней и ненужной» [17, с. 379—380].

Оценка ситуации со стороны Умова соответствует его статусу первого русского физика-теоретика, склонного к тому же к философскому осмыслению физических теорий. Он склонялся к той точке зрения, что электромагнитное поле это не «силовой архитектурный образ, который следует неизменно за электрическим индивидуумом, внутри некоторого субстрата» [эфира. — О. Л.], а «не-

² Трудно наверняка сказать имел ли он в виду кванты или теорию относительности, но поскольку кванты тогда еще не были связаны со словом механика, видимо, речь идет о последней. Если учесть, что до работ Г. Минковского она не привлекала еще широкого внимания, надо отдать должное информированности Боргмана.

которая пространственно беспредельная единица, составляющая неизменную принадлежность индивида, часть его сущности (цит. по: [18, с. 282]). В книге Д. Д. Гуло приводится еще надежный им в Архиве Академии наук текст Умова, где он говорит об «электромагнитной точке зрения», которая отличается от картезианской тем, что «вселенная представляется не геометрическим пространством, наполненным эфиром-материей, а реальным пространством — деятельным эфиром, электромагнитным полем» [18, с. 283].

Волею судьбы наиболее авторитетные русские физики — Лебедев, Умов, Боргман, Голицын — в 1912—1916 гг. ушли из жизни. Кадры советских физиков, занимавшихся проблемами электродинамики и оптики в 20-е годы, составляли в основном ученики Столетова и Лебедева в Москве и Боргмана в Ленинграде (последние — В. Ф. Миткевич, В. К. Лебединский, М. А. Шателен работали уже на границе физики и электротехники), а также завершавшие свое образование за рубежом — А. Ф. Иоффе, Л. И. Мандельштам, Д. С. Рождественский. Существенно, что появились и молодые физики-теоретики — В. К. Фредерикс, Я. И. Френкель, А. А. Фридман, В. Р. Бурсиан и др.

Проводившиеся ими исследования выходили уже за рамки классической электродинамики, а дискуссия по трактовке ее основных понятий настолько тесно переплеталась с проблемами теории относительности и квантовой физики, стоявших тогда в центре внимания, что они уже, безусловно, выходят за рамки темы «Максвелл и русская физика». Но в 30-е гг. состоялись две дискуссии, где идеи Фарадея и Максвелла оказались на первом плане.

Первая, проведенная по инициативе В. Ф. Миткевича, состоялась 13 декабря 1929 г., 13 января и 14 марта 1930 г. Стенограммы с общим названием «О природе электрического тока» были опубликованы в 3, 8 и 10 номерах журнала «Электричество» за 1930 г. Участники дискуссии представили целый спектр мнений, примыкая в той или иной степени к инициатору дискуссии и его основному оппоненту — Я. И. Френкелю. При этом и те и другие опирались на Максвелла, по-разному его понимая. Положение осложнялось привлечением философских аргументов, которые не могут быть решающими в критике конкретных физических и вообще естественно-научных теорий. Ознакомление с этими стенограммами приводит к выводу, что проблема была и не философская, и не физическая, а психологическая. Спорили, фактически, не физик-материалист и физик-идеалист и не просто два физика, а физик-электротехник и физик-теоретик, и каждый опирался на проверенные на опыте собственной работы, но различные понятия и представления об одних и тех же объективно существующих явлениях и процессах. Позиция Миткевича и его сторонников — физиков не была консервативным стремлением во что бы то ни стало сохранить механистическую картину мира. Это была, скорее, тоска по наглядности. Естественно, что для физиков-тео-

ретиков привыкли иметь дело с уравнениями, а не с приборами и приборами, и более ясно видевших неизбежность перемен, потеря наглядности прошла более безболезненно.

В связи с этой дискуссией появился ряд статей о Фарадее и Максвелле, где акцентировались те их высказывания, которые больше соответствовали позициям авторов, что оказалось возможным, видимо, потому, что путь Фарадея и Максвелла к построению теории электромагнитного поля был первопреходческим, а не сложным и сложным.

Вторая дискуссия, начатая также по инициативе В. Ф. Миткевича, носила менее академический характер. Выступления ее участников были опубликованы в журнале «Под знаменем марксизма» в 1937 г. (№ 11—12). Здесь особенно ясно выявилось, что противопоставление теории Миткевича как материалистической, теории идеалистической позиции А. Ф. Иоффе, С. И. Вавилова и физиков-теоретиков было связано с тем, что они были представителями, по существу, разных наук: «Если бы Иоффе стоял на материалистических позициях, — пишет В. Ф. Миткевич, — он бы понял сущность нового учения о преобразованиях магнитного поля, учения, созданного мною за последние десять лет, имеющего, по моему мнению, большое значение как в чисто теоретическом отношении, так и в отношении правильного освещения важнейших процессов, происходящих в динамо-машинах постоянного и переменного тока и в трансформаторах» (курсив мой. — О. Л.) (с. 152). Завершает публикации в этом номере журнала статья Л. Д. Ландау «Взаимодействие в современной физике», где четко сформулировано: «Окружающее частицы пространство заполнено не мировым эфиром, а некоторым новым видом материи — электромагнитным полем. Никакого дальнего действия в природе не существует». Это понимал, как мы видели, и Умов. Но осторожная редакция опубликовала статью Ландау в порядке обсуждения. Реминисценцией звучит статья электротехников 1954 г., где снова обвинялись в идеализме ученые XIX в., разрабатывавшие корпускулярный аспект физического осмысления электромагнитных явлений (см.: [24, с. 82]).

Понимание того, что электромагнитное поле — это материя, не нуждающаяся в независимо существующем носителе, распространялось постепенно по мере того, как «пустота» заполнялась все большим числом взаимопревращающихся полей и частиц.

ИЗДАНИЕ ТРУДОВ МАКСВЕЛЛА НА РУССКОМ ЯЗЫКЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ЕГО ТВОРЧЕСТВА

Приведенные выше факты свидетельствуют как о значительном вкладе русских физиков в подтверждение и развитие конкретных физических теорий Максвелла, так и о их большом интересе к связанным с этими теориями концептуальным проблемам. Это подтверждается и рано начавшимся изданием трудов Максвелла на русском языке.

С 1883 до 1917 г. были опубликованы переводы следующих трудов Максвелла: «Теория теплоты» (Владимир, 1883; Киев, 1888), «Материя и движение» (Петербург, 1885; Одесса, 1889), «Электричество в элементарной обработке» (Киев, 1886), «Речи и статьи» (Петербург, 1901), «О Фарадеевых силовых линиях» (Петербург, 1907). В 1888 г. была опубликована речь Н. А. Умова, посвященная Максвеллу и далеко выходящая за рамки обычного некролога как по объему, так и по глубине анализа.

В 1924 г. появился перевод книги «Материя и движение» с примечаниями Лармора, переизданный затем в 1929 г. и в серии «Классики науки» в 1940 г. В 1937 г. в сборнике «Основания кинетической теории материи» впервые на русском языке появились «Пояснения к кинетической теории газов», в 1940 г. — работы по теории автоматического регулирования (25). Наконец в 1954 г. вышли в свет «Избранные сочинения по теории электромагнитного поля» и «Статьи и речи» — более солидное, чем «Речи и статьи», издание.

Без имени Максвелла, естественно, не обходится ни одна советская книга по истории физики XIX—XX веков, большие разделы посвящены ему в курсах истории физики П. С. Кудрявцева и Б. И. Спасского. Исчерпывающую библиографию советских работ о Максвелле можно найти в продолжающемся многотомном указателе «История естествознания. Литература, опубликованная в СССР» (вышедшие в свет тома охватывают литературу за 1917—1975 гг.). Некоторые из статей (их около 20) упоминались выше. Вспомним лишь книги, посвященные жизни и творчеству гениального физика, которые написали Ф. Д. Бублейников (1960), В. П. Карцев (1974, 1976) и П. С. Кудрявцев (1976).

Максвелл родился в год открытия электромагнитной индукции Фарадеем. Совпадение юбилейных дат позволяет бросить ретроспективный взгляд на соответствующие торжества в 1881, 1931 и 1981 гг. В 1881 г. Максвелл еще жив, еще не произведены опыты Герца. На первом плане — экспериментальные открытия Фарадея (знаменитая Фарадеевская речь Гельмгольца). В 1931 г. в разгар электрификации планеты. Фарадей выступает как отец электроэнергетики. На II Международном конгрессе историков науки в Лондоне академик В. Ф. Миткевич выступает с докладом о Фарадее. В 1981 г. на первом плане 150-летний юбилей Максвелла. В представленной данным сборником конференции участвуют физики и историки физики. Смещение акцента от Фарадея к Максвеллу не случайно. Путь к атомной энергетике лежал через развитие теоретической физики, через ломку традиций обязательной наглядности. У истоков этого пути стоит имя Максвелла.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лико В. М. Развитие теории электромагнитного поля в трудах русских физиков до опытов Герца. — УФН, 1953, т. 49, вып. 4, с. 569—599.
2. Кудрявцев П. С. История физики. М.: Просвещение, 1956, т. 2, 487 с.
3. Лежнева О. А. Учение об электричестве и электромагнитная теория света. — В кн.: История естествознания в России. М., 1960, т. 2, с. 333—332.
4. Лорфман Я. Г. Физика: (с 60-х годов XIX века до 1917 года). — В кн.: Развитие естествознания в России. М., 1977, с. 334—364.
5. Григорьян А. Т., Вьяльцев А. Н. Генрих Герц. 1857—1894. — М.: Наука, 1968, 309 с.
6. Лежнева О. А. Б. Б. Голцын: К 100-летию со дня рождения. — В кн.: История естествознания и техники, 1963, вып. 14, с. 128—130.
7. Либрас Э. А. Научная деятельность Д. А. Гольдгаммера. — История и методология естественных наук, 1963, вып. 2, с. 286—297.
8. Мандзеевский А. Б. А. А. Эйхенвальд. — В кн.: Очерки по истории физики в России. М., 1949, с. 170—185.
9. Лорфман Я. Г. Всемирная история физики (с начала XIX до середины XX вв.). М.: Наука, 1979, 317 с.
10. Столетов А. Г. Эфир и электричество. — В кн.: Избр. соч. М.: Л., 1950, с. 481—509.
11. Пишин В. Л. В. И. Ленин о состоянии физики на рубеже XIX и XX вв. — В кн.: История естествознания и техники, 1980, № 2, с. 19—40.
12. Борман И. И. Электромагнитная теория света Максвелла. СПб., 1882.
13. Борман И. И. Основания учения об электрических и магнитных явлениях. СПб., 1893.
14. Борман И. И. Магнитный поток и его действия. СПб.: Издание журнала «Электричество», 1893, 108 с.
15. Борман И. И. Электричество и свет. — В кн.: Приложение к № 6 Дневника XII съезда русских естествоиспытателей и врачей в Москве, 1910, с. 93—107.
16. Борман И. И. Основания учения об электрических и магнитных явлениях. 3-е изд. СПб., 1914.
17. Лебедев П. Н. Успехи физики в 1911 году. — В кн.: Собр. соч. М., 1913, с. 376—380.
18. Гуло Д. Д. Николай Алексеевич Умов. М.: Наука, 1971, 320 с.
19. Краец Т. П. Пути развития максвелловской теории. — Природа, 1931, № 11, с. 1043—1066.
20. Миткевич В. Ф. Работа Фарадея в области электромагнитной индукции в связи с его общими физическими воззрениями. — Природа, 1931, № 12, с. 1155—1170.
21. Тамм И. Е. Руководящие идеи в творчестве Фарадея. — УФН, 1932, т. 12, вып. 1, с. 1—30.
22. Цейтлин З. А. О взглядах Фарадея и Максвелла на природу электромагнитных явлений. — Электричество, 1932, № 17—18, с. 841.
23. Лебединский В. К. Д. К. Максвелл и электротехника. — Архив истории науки и техники, 1933, вып. 1, с. 97—102.
24. Нейман Л. Р., Рахимов Г. Р. Д. К. Максвелл: К 75-летию со дня смерти. — Электричество, 1954, № 11, с. 81—87.
25. Максвелл Д. К. О регуляторах. — В кн.: Максвелл Д. К., Вышнеградский И. А., Стодоло А. Теория автоматического регулирования. М.: Изд-во АН СССР, 1949, с. 7—29.

К ИСТОРИИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ОБОСНОВАНИЯ ЗАКОНА КУЛОНА

Закон взаимодействия неподвижных точечных зарядов (закон Кулона) является одним из важнейших в учении об электричестве. Трудно перечислить даже наиболее существенные его следствия. Дж. К. Максвелл, объединивший в теории электромагнитного поля основные законы электричества и магнетизма, считал проверку этого закона одной из насущных задач экспериментальной физики. По его инициативе соответствующие опыты были поставлены в Кавендишской лаборатории в конце 70-х годов XIX в. Эксперименты, посвященные проверке закона Кулона, ставят и в наши дни. Однако этот закон, который часто называют законом «обратных квадратов», важен не только для современной физики. Опыты, связанные с его установлением, составляют интереснейшую страницу истории науки. Они явились первыми количественными опытами по электричеству. На их примере можно проследить два подхода к постановке экспериментов в области, где еще не сформировалась система основных понятий.

В настоящей работе кратко рассмотрена история экспериментального обоснования закона «обратных квадратов»¹. Исторический обзор развития теоретических воззрений на природу электричества дан, например, в [1].

ПРЕДЫСТОРИЯ ЗАКОНА «ОБРАТНЫХ КВАДРАТОВ»

Начало активного экспериментирования в области электричества относится ко второй половине XVII в., хотя некоторые явления из этой области описаны в книге У. Гильберта «О магните» [2], вышедшей в свет в 1600 г. Важнейшим изобретением, способствовавшим прогрессу электрических исследований, было создание О. Герике первой электростатической машины (1660 г.), которое позволило значительно упростить наблюдение электрических явлений, обеспечить их воспроизводимость.

В конце XVII — начале XVIII в. было проведено большое число опытов по электричеству, относительная значимость которых не была ясна ни их авторам, ни современникам. Никаких количественных экспериментов в этот период не проводилось. Эти два факта — «неупорядоченность», случайность опытов и их грубо качественный характер — обусловлены одной причиной: отсутствием сформированной системы понятий в данной области физики.

* Московский государственный педагогический институт им. В. И. Ленина.
¹ Автор выражает глубокую признательность В. В. Брагинскому и Е. М. Гершензону за обсуждение работы и ценные советы.

Переход к принципиально новому этапу исследований стал возможен лишь после создания первой последовательной теории электрических явлений (В. Франклин, 1750 г.). Постулаты теории Франклина сводились к следующему:

1. Электрическая субстанция состоит из чрезвычайно малых частиц...
2. Электрическая субстанция отличается от обыкновенной материи в том отношении, что частицы последней взаимно притягиваются, а частицы первой отталкиваются друг от друга...
3. И хотя частицы электрической субстанции взаимно отталкиваются друг друга, они сильно притягиваются всей прочей материей» [3].

Хотя Франклину удалось объяснить многие обнаруженные к тому времени явления, его теория имела существенный дефект — она была чисто качественной.

Теория Франклина была развита петербургским академиком Ф. У. Т. Эпинусом в работе «Опыт теории электричества и магнетизма» (1759). Однако и Эпинусу не удалось придать ей количественный характер. Тем не менее в его трактате имелось одно важное новшество: в нем обсуждалась количественная характеристика электрического отталкивания и притяжения — сила. Эпинус поставил вопрос о функциональной зависимости электрической силы от расстояния. Он писал: «...определить эти функциональные зависимости я пока что не решаюсь. Впрочем, если бы мне удалось произвести выбор между различными функциями, то я охотно утверждал бы, что эти величины изменяются обратно пропорционально квадратам расстояний. Это можно предположить с некоторым правдоподобием, ибо в пользу такой зависимости, по-видимому, говорит аналогия с другими явлениями природы» [4].

Приведенный отрывок, конечно, не дает оснований называть Эпинуса автором закона «обратных квадратов». На страницах его трактата встречаются также примеры, в которых предполагается, что сила обратно пропорциональна расстоянию.

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

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

где F — сила взаимодействия между объектами, а R — расстояние между ними, были относительно хорошо изучены.

Первые попытки экспериментально определить зависимость $F(R)$ для электрических взаимодействий относятся к середине XVIII в. Одним из первых такую попытку предпринял в 1746 г. немецкий ученый К. К. Кратценштейн, который измерял силу, действовавшую между шаром электрической машины и диском,

подвешенным на стальной проволоке [5]. Он объявил об установлении закона «обратных квадратов»; однако работа Кратцштейна не получила признания, несмотря на поддержку таких авторитетных ученых, как И. Ламберт и Л. Эйлер [6, с. 460].

На первом этапе количественных исследований по электричеству еще не было достигнуто понимание различия между подействующими силами, действующими между заряженными макроскопическими телами, и силами, действующими между «элементарными» зарядами.

Указанное обстоятельство хорошо иллюстрируют эксперименты Д. Бернулли (около 1750 г.) по определению силы взаимодействия между заряженными телами². Бернулли воспользовался идеей измерения электрических сил с помощью гидростатического электрометра, выдвинутой в 1749 г. французским физиком Д'Арси совместно с Ле-Руа. В сосуде с водой плавало чечевицеобразное тело (рис. 1), заканчивавшееся сверху калиброванной стеклянной трубкой, на которой крепился диск из проводящего материала; на крюк в нижней части тела можно было подвешивать грузы разной массы. На некотором расстоянии x над диском, скрепленным с трубкой, закреплялся другой диск (на рис. не показан) того же диаметра, находившийся в постоянном контакте с электростатической машиной. Измерение сводилось к определению массы перегрузки, который следовало подвешивать на крюк, чтобы указатель, прикрепленный к плавающему телу, оставался в одном и том же положении при различных значениях x . На основе полученных результатов Бернулли пришел к выводу, что сила электростатического взаимодействия обратно пропорциональна квадрату расстояния между телами. Ясно, однако, что опыты Бернулли не имеют непосредственного отношения к закону Кулона: в этих опытах при изменении x сохранялась постоянная разность потенциалов между дисками, при этом заряд на них, естественно, менялся. Если приблизительно рассматривать устройство Бернулли как плоский конденсатор, то подействующая сила, действующая между пластинами, $F \sim q^2$, где q — заряд на пластинах. При постоянстве напряжения на пластинах $q \sim x$, и, следовательно, $F \sim x^{-2}$. Понятно, что при изменении формы взаимодействующих тел зависимость силы от расстояния между ними будет иной.

Таким образом, полученный Бернулли результат лишь внешне напоминает закон Кулона. Отметим, что много лет спустя (1787 г.) подобные опыты проводил А. Вольта, который получил сходные результаты. Он, однако, не рассматривал их как универсальные и фундаментальные; Вольта знал о различиях в результатах измерений с помощью гидростатического электрометра сил притяжения и отталкивания, а также о зависимости этих результатов от формы взаимодействующих тел [6, с. 461—462].

Не слишком критичное отношение ученых середины XVIII в. к результатам измерения электрических сил во многом объясня-

² Опыты Бернулли описаны его учеником А. Сосепом [7].

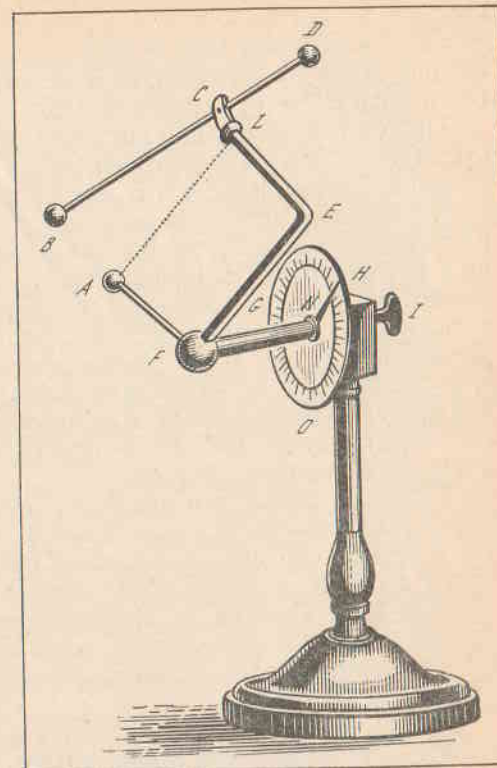
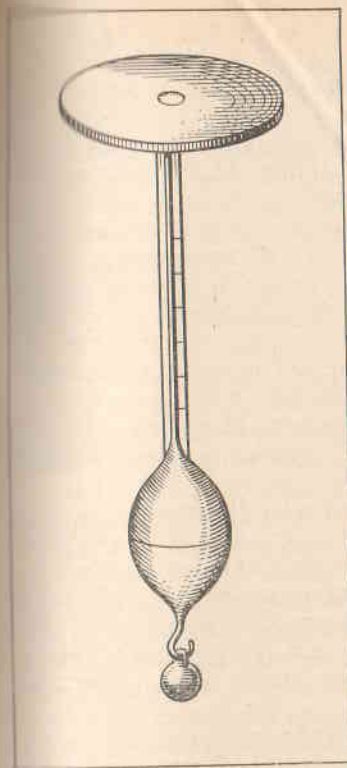


Рис. 1. Прибор Д. Бернулли

Рис. 2. Установка Дж. Робайсона для определения зависимости сил электрического притяжения и отталкивания от расстояния

ется тем, что, как отмечал Вольта, многие исследователи заранее придерживались «мнения, что электрическое действие обратно пропорционально квадрату расстояния» (Цит. по: [6, с. 464]).

Для установления «закона электрической силы» необходимо было найти экспериментальную ситуацию, в которой подействующие силы совпадали бы с силами, действующими между «элементарными» зарядами. Независимо от Кулона и, возможно, раньше него идею о том, что взаимодействующие заряды можно считать точечными, если размеры сфер, на которых они локализованы, много меньше, чем расстояние между ними, использовал для постановки опытов английский естествоиспытатель Дж. Робайсон.

Установка Робайсона показана на рис. 2³. Здесь A — латунный шарик, B и D — одинаковые позолоченные пробковые шари-

³ Подробное описание экспериментальной установки Робайсона содержится в его фундаментальном труде [8], изданном Д. Брюстером после смерти автора.

ки диаметром 6,4 мм, BD — жесткая навошенная шелковая нить, которая может свободно поворачиваться в янтарных щеках. $AFEL$ — изогнутый стеклянный стержень, NH — указатель, с помощью которого измеряется отклонение линии LA от горизонтали (α) и нити BD — от вертикали (β).

Процедура измерений состояла в следующем. Первоначально стержень $AFEL$ располагался так, что линия AL была горизонтальной. Затем шары A и B наэлектризовывались; при этом сила электрического отталкивания, действовавшая между ними была недостаточно велика, чтобы они разошлись. С помощью рукоятки I стержень $AFEL$ поворачивался на угол α , и шарики расходились. Измеряя β и зная α и геометрические размеры установившейся также массу шариков B и D , нетрудно проверить, связаны ли углы α и β между собой таким образом, как если бы сила электростатического отталкивания была обратно пропорциональна квадрату расстояния AB . Аналогично можно было исследовать силу притяжения; для этого рукоятку I следовало поворачивать в противоположную сторону.

Робайсон писал, что проделал много сотен (!) измерений, которые согласовывались между собой, «превосходя его ожидания». Он показал, что две заряженные сферы отталкиваются друг от друга с силой, которая обратно пропорциональна расстоянию в степени 2,06. Приняв во внимание погрешности измерений, Робайсон пришел к выводу, что «действие между сферами в точности пропорционально обратному квадрату расстояния между их центрами» [8, с. 68].

Причины, по которым Робайсон не опубликовал свои результаты сразу после проведения опытов, не ясны⁴. В целом его исследования не оказали влияния на развитие учения об электричестве.

«НУЛЕВОЙ» МЕТОД Г. КАВЕНДИША

Наряду с попытками непосредственного измерения электростатических сил с середины XVIII в. проводились опыты, в которых исследователи стремились определить зависимость этих сил от расстояния без измерения самих сил. В качестве примера эксперимента такого рода можно привести опыты англичанина Ч. Стэнхоупа, описанные в его книге «Принципы электричества» [9]. Метод Стэнхоупа состоял в определении на поверхности проводящего изолированного незаряженного цилиндра линии, которая характеризовалась нулевой плотностью поверхностного заряда, когда весь цилиндр находился в поле заряженного шара. Стэнхоуп утверждал, что ему удалось подтвердить соотношение (1) с точностью до 1%; однако обоснование, которое Стэнхоуп

⁴ О полученных результатах по исследованию электростатических взаимодействий ученый сообщил в статье 1801 г., где утверждал, что эти результаты докладывались публично еще в 1769 г. Это утверждение сомнительно. Дж. Хейлброн, например, считает, что это невольная ошибка памяти, возможно, связанная с болезнью Робайсона [6, с. 466].

своему методу, ошибочно, и его утверждение сомнительно. Неудача Стэнхоупа связана, главным образом, со сложностью опыта. Неудивительно, что успех на этом направлении исследований (без измерений сил) был достигнут при использовании гораздо более простого, с точки зрения теории, метода.

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

В историко-научной литературе можно встретить утверждение, что важную роль в развитии «нулевого» метода и установлении закона «обратных квадратов» сыграл английский ученый Дж. Пристли⁵. Анализ исторических фактов требует уточнения этого утверждения. Факты таковы.

В 1755 г. В. Франклин в одном из писем описал эксперимент, результат которого он не мог объяснить. «Поставив серебряную пробку 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, 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»⁶ [3, с. 178].

Позже Франклин познакомился с начинающим естествоиспытателем Дж. Пристли и посоветовал ему заняться исследованиями по электричеству. Итогом работы Пристли в этой области стало сочинение «История и современное состояние электричества с оригинальными опытами», впервые опубликованное в 1767 г. Эта книга заканчивается описанием опытов Пристли, которые, по его словам, были проведены по совету Франклина: «...я наэлектризовал оловянный кубок объемом в одну кварту, стоявший на табурете из высушенного дерева; я наблюдал, что пара пробковых шариков, которые были изолированы, посылку 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

⁵ См., например, [10].

⁶ В издании писем Франклина 1769 г. было добавлено подстрочное примечание: «Г-н Ф. впоследствии 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» [3, с. 178—179].

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 разделились, испытывая притяжение в разные стороны; так же они вели себя при вытягивании вверх в тот момент, когда нити выступали над горловиной сосуда» [11, с. 372].

Далее Пристли описывает различные модификации этого опыта и затем делает вывод: «Можно ли не заключить из этого эксперимента, что притяжение электричества подчиняется тем же законам, что и тяготение, и поэтому меняется соответственно квадратам расстояний; поскольку легко показать, что если бы Земля имела форму оболочки, то тело, находящееся внутри нее, не притягивалось бы к одной стороне сильнее, чем к другой» [11, с. 374].

Гипотеза Пристли подкреплена опытом (хотя и довольно грубым); в этом состоит ее важное отличие от гипотезы Эпинуса. Однако детали приведенного выше отрывка свидетельствуют о весьма поверхностном подходе Пристли к анализу результатов опыта. Во-первых, делая вывод, Пристли говорит о «притяжении электричества». Между тем притяжение не играет существенной роли в этом опыте. Пристли, по-видимому, не сознавал, что вывод о равенстве силы, действующей на тело, помещенное внутри сферической оболочки, нулю справедлив и для сил отталкивания, подчиняющихся закону (1). Поэтому он использовал примитивную аналогию с тяготением⁷ — отсюда и термин «притяжение электричества». Во-вторых, Пристли ничего не говорит об особенностях в проявлении электрических сил, обусловленных тем, что «электрическая материя» может перемещаться внутри и по поверхности проводников. В-третьих, он не обращает внимания на тот факт, что в случае тяготения тело не испытывает притяжения только внутри сферической оболочки; он же экспериментировал с кубком, форма которого существенно отличается от сферической (рис. 3).

Таким образом, выводы, сделанные Пристли из полученных им результатов, хотя и верны по существу, недостаточно обоснованы. Поэтому вряд ли можно считать этого ученого одним из авторов закона «обратных квадратов».

«Нулевой метод» получил серьезное обоснование и был доведен до высокой степени совершенства выдающимся английским естествоиспытателем Г. Кавендишем. Уровень проведенных им опытов настолько превосходит все предшествующие попытки установить «закон электрической силы», что именно Кавендиша следовало бы считать первым претендентом на открытие закона. Однако при жизни Кавендиша его работа «Экспериментальное определение закона электрической силы» не была опубликована и поэтому не оказала влияния на развитие этой области физики.

⁷ На поверхностный характер аналогии Пристли указывалось также в работе [12].

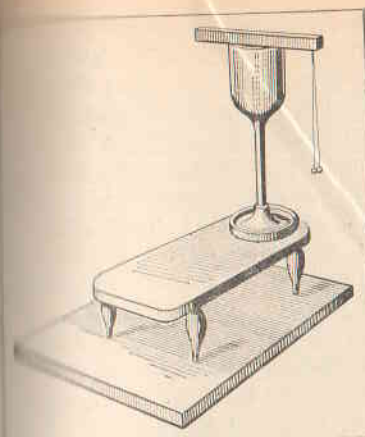


Рис. 3. Кубок, с которым экспериментировал Дж. Пристли

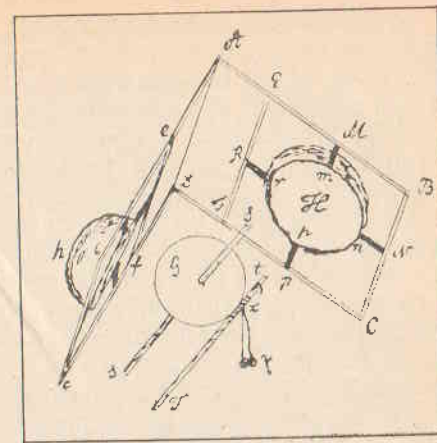


Рис. 4. Рисунок Г. Кавендиша со схемой его экспериментальной установки

Тем не менее она представляет значительный исторический интерес.

Указанную работу Кавендиш начинает с четкой постановки задачи⁸: «Целью следующего эксперимента был ответ на вопрос: когда полый шар электризуется, заряжается ли малый шар, вложенный в первый и соединенный с ним каким-либо проводником? Таким образом можно найти закон электрического отталкивания и притяжения» [13, с. 118].

Далее следует описание первого варианта экспериментальной установки, который, однако, не удовлетворял Кавендиша. Он писал: «Для большего удобства в проведении этих манипуляций я использовал такое устройство. В принципе, оно сложнее, чем нужно, однако эксперимент был для меня настолько важен, что я хотел провести его предельно аккуратно. ABCD и abcd (см. рис. 4.— С. Ф.) — две деревянные рамки одинаковых размеров, 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, и со станиоля свесиваются пробковые шарики...» [13, с. 119—120].

⁸ Первое издание трудов Г. Кавендиша по электричеству было осуществлено Дж. К. Максвеллом в 1879 г. Работы по электричеству составили первый том издания сочинений Кавендиша 1921 г. [13]. В этом издании в примечании сказано, что характер оформления рукописи указанной работы дает основание предполагать, что она подготовлена к печати; описанные в ней эксперименты Кавендиш провел, по-видимому, около 1773 г.

Эксперимент начинался с того, что при помощи электрической машины внешние полусферы заряжались до определенного потенциала, затем последовательно производились следующие действия: удалялся провод, использовавшийся для электризации полусфер, вытаскивался провод, соединявший полусферы и внутренний шар, полусферы разъединялись и к внутреннему шару подносилась палочка Tt . Отметим, что использование специальной системы пружин (не показанных на рис. 4) позволяло в 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 шар G не был наэлектризован.

Описание установки Кавендиша показывает, насколько внимательно он относился к деталям и возможным погрешностям опыта.

В работе Кавендиша следует отметить еще ряд моментов. Во-первых, при всех многочисленных повторениях опыта электризация полусфер производилась строго до одного и того же потенциала (или, как писал сам Кавендиш, «до одинаковой степени»), что контролировалось специальным электрометром. Во-вторых, для повышения чувствительности установки ученый использовал оригинальный прием, состоявший в предварительной электризации шариков, подвешенных к палочке Tt . Допустим, что полусферы в опыте заряжаются положительно. После разъединения полусфер и касания палочкой Tt шара G расхождение пробковых шариков, также предварительно положительно заряженных, уменьшается, поскольку большую часть своего заряда они передают шару G . То же будет происходить и при повторении опыта с тем отличием, что шарики предварительно заряжаются отрицательно. Если на внутренний шар переходит хотя бы небольшая часть заряда полусфер, то конечное расхождение пробковых шариков в этих двух случаях будет разным: в первом случае оно будет больше⁹. Этот прием повышает точность метода, поскольку, «когда шарики уже получили достаточное для их расхождения количество электричества, ощутимое изменение их расхождения вызывается добавлением количества [электрической] жидкости в несколько раз меньшего, чем то, которое необходимо для их первоначального разделения» [13, с. 122].

Наконец, важнейшей особенностью работы Кавендиша является проведение дополнительных экспериментов, позволяющих определить точность основного опыта. При этом Кавендиш пользовался им же разработанной методикой сравнения емкостей

⁹ Это справедливо, конечно, если первоначальная электризация шариков по абсолютной величине одинакова. Кавендиш специально подчеркивал необходимость соблюдения этого условия.

различных проводников. С помощью этой методики он установил, что в опыте может быть зарегистрирована передача шару G менее $1/60$ части заряда внешних полусфер. Поскольку в действительности передача заряда не наблюдалась, то на основании соответствующих математических выкладок он сделал вывод: таким образом, мы можем заключить, что электрическое притяжение и отталкивание должно быть пропорционально расстоянию в степени, лежащей между $2-1/50$ и $2+1/50$, и нет оснований предполагать, что закон отличается от закона обратных квадратов» [13, с. 124].

В связи с исследованиями Кавендиша возникает ряд вопросов. Какую роль могли сыграть его опыты, если бы их результаты были известны современникам? Не потеряла бы в этом случае актуальность постановка экспериментов по прямому измерению электрических сил? Для ответа на эти вопросы и правильной оценки опытов Кавендиша следует подчеркнуть, что последние не исчерпывали проблемы. Во-первых, распространение соотношения (1) на силы притяжения — это экстраполяция, которую необходимо было проверить прямыми опытами. Во-вторых, и это, на наш взгляд, главное, опыты Кавендиша, основанные на «нулевом» методе, не позволяли установить связь между привычными механическими величинами и новыми — электрическими, такими как, например, электрический заряд. Поэтому опыты Кулона не имели бы значимости, даже в случае публикации работы Кавендиша.

КРУТИЛЬНЫЕ ВЕСЫ Ш. КУЛОНА И УСТАНОВЛЕНИЕ ОСНОВНОГО ЗАКОНА ЭЛЕКТРОСТАТИКИ

Решающий шаг в обосновании закона «обратных квадратов» сделал французский военный инженер и ученый Ш. Кулон. Важнейшей особенностью научного творчества Кулона был последовательный количественный подход к изучению различных физических явлений. Характерно название первого мемуара Кулона, посвященного электричеству (1785 г.): «Конструкция и применение электрических весов, основанных на свойстве металлических проволок иметь силу кручения, пропорциональную углу кручения» [14, с. 107–115].

Эта работа основана на установленном ранее Кулоном законе кручения металлических нитей (форма записи современного вида):

$$M = \mu \frac{BD^4}{L} \varphi,$$

где M — момент сил кручения, φ — угол кручения, μ — характеристика упругих свойств нити (в современной терминологии — модуль сдвига), D — диаметр проволоки, L — ее длина, B — геометрический фактор, зависящий от формы сечения проволоки (для круглого сечения $B = \pi/2$). Кулон исходил из наличия кон-

кретной методики измерения малых сил и рассматривал свои опыты как демонстрацию возможностей этой методики.

Для конца XVIII в. крутильные весы Кулона представляли собой шедевр экспериментального искусства. Их устройство показано на рис. 5. Основная часть крутильных весов — тонкая серебряная нить длиной 75,8 см — помещалась внутри двух цилиндров *l* и *ABCD* (рис. 5, 1). Верхний конец нити закреплялся в специальном держателе *q* (рис. 5, 2), соединенном с поворотной головкой *b*, на которой укреплен указатель *o*. На верхнем цилиндре *l* устанавливалась трубка, на выступающем ребре которой были нанесены градусные деления. На нижнем конце нити с помощью специального захвата РСФ (рис. 5, 3) закреплялся цилиндр *aqq'*, на одном конце которого располагался бузиновый шарик *a* диаметром от 4,5 до 6 мм, а на другом — пропитанный скипидаром бумажный диск *g'*, служивший противовесом шарика *a*. Часть цилиндра *qq'* была сделана из шелковой нити, натертой воском, а часть *aq* — из шеллака, служившего хорошим изолятором. Длина всего цилиндра составляла 21,7 см. Нижняя часть серебряной нити и цилиндр *aqq'* располагались внутри стеклянного цилиндра *ABCD* диаметром 32,5 см и такой же высоты, по окружности которого на уровне цилиндра *aqq'* была наклеена шкала с градусными делениями *ZQ*. Через отверстие *m* (рис. 5, 1) в цилиндр *ABCD* вводился стержень *Ф*, нижняя часть которого делалась из шеллака. На конце этого стержня крепился бузиновый шарик *t*, равный по диаметру шарiku *a*.

Измерения проводились так. Закрепленный шарик *t* и шарик *a* устанавливались таким образом, что слегка касались друг друга. При этом шарик *a* находился против нулевого деления шкалы *ZQ*, нить подвеса была не закручена, а указатель *o* находился против нулевого деления шкалы. После этого с помощью специального шарика, укрепленного на изолирующем стержне (рис. 5, 4), шарикам *t* и *a* сообщался некоторый заряд. Возникшее вследствие зарядки отталкивание между шариками приводило к закручиванию нити подвеса на некоторый угол α_0 , который отсчитывался по шкале *ZQ*. Затем с помощью головки *b* верхний конец нити закручивался на определенный угол β , контролируемый по шкале, в сторону, противоположную повороту цилиндра *aqq'*. Это, естественно, приводило к сближению шариков *t* и *a*. По шкале *ZQ* отсчитывалось новое угловое положение цилиндра — α . Затем головка *b* поворачивалась на больший угол, и отмечалось еще одно положение цилиндра *aqq'*.

Поскольку угловое расстояние между шариками не превышало 40°, Кулон считал, что линейное расстояние между ними пропорционально угловому. Уверенный в линейности измерительной системы, он полагал, что сила взаимодействия между шариками при данном равновесном положении цилиндра *aqq'* пропорциональна сумме $\alpha_0 + \beta$, где β — угол поворота головки *b* для данного равновесного положения α . В табл. 1 представлены

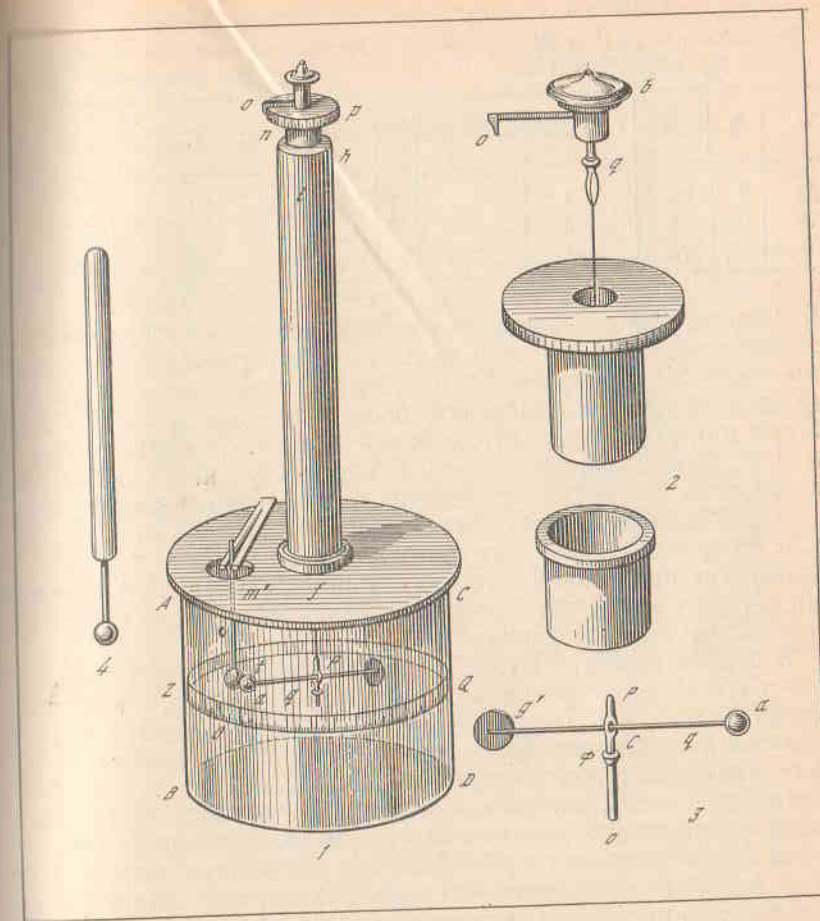


Рис. 5. Крутильные весы Ш. Кулона

1 — общий вид; 2, 3 — детали; 4, 5 — дополнительные приспособления для проведения опытов

результаты, приведенные Кулоном в его первом мемуаре. Согласно Кулону, закон «обратных квадратов» выполняется, поскольку отношения $(\alpha_0 + \beta)/\alpha_0$ и $(\alpha_0/\alpha)^2$ оказываются практически равными (расхождение для третьего измерения составляет 12%). В итоге Кулон формулирует

«Фундаментальный закон электричества.

Сила отталкивания двух маленьких шариков, наэлектризованных электричеством одной природы (одного знака.— С. Ф.) обратно пропорциональна квадрату расстояния между центрами шариков» [14, с. 110].

Представляют интерес и замечания Кулона, касающиеся деталей измерений и различных факторов, которые могут повлиять на результаты опыта. Ученый указывал, что точность установки

Таблица 1
Результаты измерений Ш. Кулона
для сил отталкивания

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

Таблица 2
Результаты измерений Ш. Кулона для
сил 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

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

В первом мемуаре Кулон не дал полного решения проблемы. Как и его предшественники, Пристли и Кавендиш, он поначалу исследовал силы отталкивания и лишь затем перешел к изучению сил притяжения. Для этого ему пришлось изменить методику измерений: при измерении сил притяжения с помощью крутильных весов, по словам Кулона, не удастся избежать касания разноименно заряженных шариков, так как поворот головки b для изменения равновесного расстояния между шариками приводит к возникновению колебаний, при которых и происходит касание, даже если равновесное расстояние между шариками достаточно велико [14, с. 118–119].

Способ исследования сил притяжения, предложенный Кулоном, сводится к измерению периода колебаний цилиндра lqq (рис. 6), на одном конце которого был закреплен заряженный диск из позолоченной бумаги l . Колебания возникали под действием на заряд диска электрического поля, создававшегося зарядом противоположного знака, который находился на медном шаре G . Этот шар располагался на изолирующих опорах так, что его горизонтальный диаметр находился на одном уровне с центром диска. Расстояние между диском l и шаром G регулировалось путем перемещения муфты V вдоль консоли O . Цилиндр подвешивался на шелковой нити длиной 1,8 см, столь тонкой, что при небольших амплитудах колебаний крутильным моментом нити можно было пренебречь.

Кулон проводил измерения для трех расстояний между центрами шара и диска. Полученные им результаты представлены

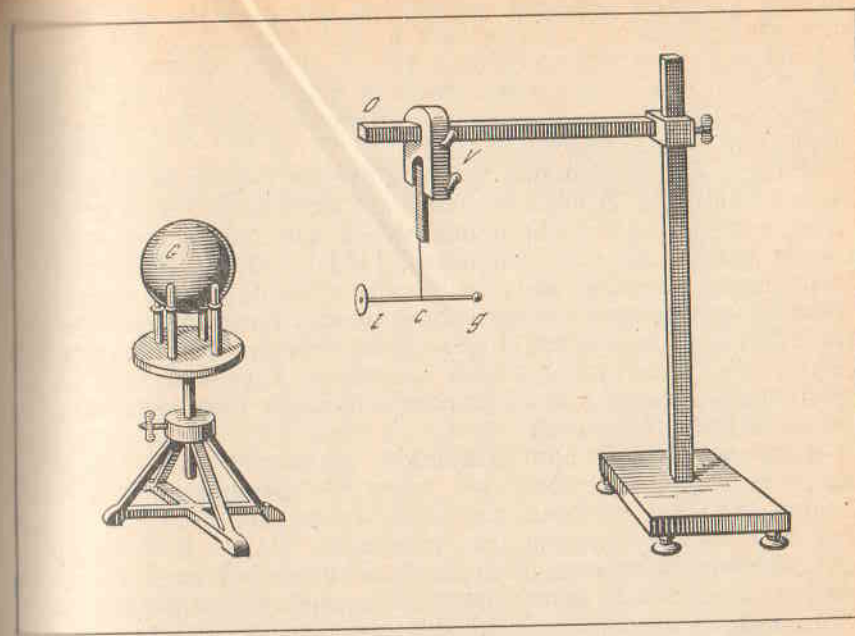


Рис. 6. Установка Ш. Кулона для исследования сил электрического притяжения

в табл. 2. Кулон считал, что поле, создаваемое зарядом на шаре G (диаметр 34,48 см), эквивалентно полю точечного заряда, помещенного в центр шара. Однако, поскольку диаметр диска (≈ 2 см) много меньше, чем расстояние d между его центром и центром шара, и амплитуда колебаний мала, то, пользуясь современной терминологией, поле в области пространства, где происходят колебания диска, можно считать однородным. Тогда, если обозначить через φ силу, действующую на диск со стороны шара, то

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

где T — период колебания диска. Если $\varphi \sim d^{-2}$, то $T \sim d$. Из табл. 2 видно, что данные первых двух измерений подтверждают предположение о пропорциональности φ и d^{-2} . Отклонение от этой зависимости для третьего измерения Кулон связывал с утечкой заряда, которая здесь существенна, поскольку для проведения трех измерений требуется около четырех минут. Введение соответствующей поправки, о которой упоминалось уже в первом мемуаре, позволило уменьшить расхождение между расчетом и данными эксперимента вдвое.

Кулон был удовлетворен полученными результатами. Он использовал метод колебаний и для исследования сил отталкивания и получил еще одно подтверждение закона «обратных квад-

ратов»¹⁰. Таким образом, работу по определению зависимости сил электрического притяжения и отталкивания от расстояния Кулон мог считать законченной. Отметим, что ученый был убежден в том, что сила взаимодействия пропорциональна произведению «электрических масс» и не пытался обосновать это убеждение с помощью опытов.

Опыты Кулона явились важным этапом в истории физического эксперимента. В них впервые были использованы крутильные весы, которые до сих пор применяются для проведения прецизионных измерений (см., например, [15]). Работы Кулона представляются образцовыми для своего времени по тщательности анализа возможных погрешностей опыта. Необычным для конца XVIII в. было и использование результатов одного цикла экспериментальных исследований (изучение кручения нитей) для постановки опытов в другой области физики (изучение электрических и магнитных сил).

Однако при всей оригинальности содержания работ Кулона их стиль вполне соответствует научным традициям второй половины XVIII в., которые требовали тщательного описания приборов, использовавшихся для проведения опытов. В то же время обсуждению процедуры измерений и обработки их результатов не уделялось много внимания. Вследствие этого в связи с работами Кулона возникают вопросы методического характера.

Кулон описывает свои результаты как данные единичного измерения. Между тем представляется, что они не могли быть получены без проведения большой серии измерений.

Известно, что чем больше чувствительность измерительных (колебательных) систем, тем больше соответствующий период колебаний, поэтому проведение опытов на пределе точности в колебательном режиме требует значительных промежутков времени. Однако в электростатических опытах время измерений обычно ограничено, поскольку невозможно полностью устранить утечку заряда. Кулон знал о явлении утечки заряда и проверял, не влияет ли оно на результат опыта. Для этого он измерял время, за которое первоначальное расхождение шариков ($\approx 30^\circ$) уменьшается на 1° . Это время оказалось равным трем минутам. Поскольку точность первоначальной установки цилиндра $\Delta\alpha = 2 \div 3^\circ$, то Кулон заключил, что если измерения проводятся быстрее, чем за 3 мин, то утечкой заряда при анализе результатов можно пренебречь: «...однако, поскольку я тратил не более двух минут на проведение трех испытаний, описанных выше, в этих опытах можно было пренебречь ошибкой, которая обусловлена утечкой электричества. Если желательна большая точность или если воздух влажен и электричество теряется быстро, то необходимо с помощью первого наблюдения определить закон ослабления электрического действия двух шариков за каждую минуту, а затем пользоваться этими наблюдениями для исправления

¹⁰ При этом, однако, Кулон подчеркивал преимущества метода, основанного на использовании крутильных весов.

результатов экспериментов, которые захотят провести в этот день» [14, с. 113–114].

В связи с этим замечанием возникает вопрос: в каком режиме проводились измерения — в колебательном или апериодическом? Для ответа на него проведем необходимые оценки.

Метановка Кулона описана им столь подробно, что можно оценить период крутильных колебаний коромысла весов:

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

где I — момент инерции коромысла весов относительно оси, соединяющей с нитью, G — модуль сдвига серебра, L — длина нити, D — ее диаметр. Величину D можно найти, пользуясь данными Кулона о погонной плотности нити $\rho' = 0,01$ г/м, что соответствует $D \approx 40$ мкм. Оставив в стороне вопрос о возможности изготовления такой нити во времена Кулона, оценим величину I . Для простоты примем, что

$$I = ml^2/2,$$

где m — масса бузинового шарика, l — длина цилиндра aqg (таким образом, мы получаем оценку снизу). Считая плотность шарика $\rho \approx 0,5$ г/см³, получаем $I \approx 3,5$ г·см². Тогда $T \approx 50$ с.

Оценим теперь время релаксации колебаний τ . Будем учитывать лишь сопротивление воздуха, возникающее при движении коромысла. Для грубой оценки можно использовать формулу Стокса. Тогда

$$\tau = m/3\pi\eta r,$$

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

Казалось бы, оценки показывают, что в опыте Кулона использовался апериодический режим. Однако следует учесть приближенный характер этих оценок, а также замечание Кулона о том, что исследованию сил притяжения с помощью крутильных весов препятствовало касание шариков, происходившее при колебаниях коромысла. При истинно апериодическом режиме касания шариков при измерении сил притяжения происходить не должно. Кроме того, по словам самого Кулона, диск-противовес ослаблял (*relantir*) колебания. Поэтому можно предположить, что при проведении опытов с крутильными весами возникали колебания коромысла с большим затуханием. Но тогда, каким образом Кулон фиксировал равновесные положения коромысла? При колебаниях с сильным затуханием эти положения нельзя определять, отмечая крайние положения колебаний. Это означает, что для проведения опыта требуется время $t > 2T$. Следует также помнить, что вследствие непрерывной утечки заряда движение коромысла никогда полностью не прекращается.

Из приведенных рассуждений следует вывод о том, что в действительности для получения результатов по методу Кулона требуется проведение не одного опыта, а большой серии измерений, результаты которых необходимо проанализировать и усреднить. Но к концу XVIII в. еще не сформировались традиции критического анализа результатов измерений, поэтому Кулон в своей работе, по-видимому, привел данные, которые были обобщением результатов многократных измерений, представив их в форме данных единичного опыта. Этот вывод подтверждается и тем фактом, что отношения $(\alpha_0 + \beta)/\alpha_0$ (отношения сил) образуют прогрессию 1 : 4 : 16. Добиться этого без многократных повторений опыта невозможно.

Таким образом, детальный анализ опытов Кулона позволяет, с одной стороны, уточнить, какие черты творчества ученого сближают его работы с работами современных экспериментаторов (стремление к повышению точности измерений, тонкий анализ возможных погрешностей и т. д.). С другой стороны, он помогает понять, чем отличался подход ученого XVIII в. к количественному эксперименту от современного подхода к проведению прецизионных измерений.

Опытами Кулона, проведенными в середине 80-х годов XVIII в., завершился первый этап количественных исследований в области электростатики. Этот этап имел принципиальное значение не только для учения об электричестве, но и для всей экспериментальной физики в целом. В опытах Кавендиша в физику был введен «нулевой» метод, широко использовавшийся впоследствии. Максвелл считал этот метод настолько важным, что в 1878 г. в руководимой им Кавендишской лаборатории были поставлены опыты по схеме Кавендиша [13, с. 404]. Проводивший их сотрудник Максвелла Д. Макалистер внес два изменения в эту схему. Во-первых, при проверке наличия заряда на внутренней сфере уже не требовалось разъединение внешних полусфер: зонд электрометра проходил через небольшое отверстие в одной из полусфер; это позволяло в значительной степени подавить внешние наводки, вносящие основные погрешности в результаты измерений. Во-вторых, Макалистер использовал существенно более чувствительный электрометр. Результат проведенных в Кавендишской лаборатории измерений состоял в том, что верхний предел отклонения показателя степени расстояния в законе Кулона от 2 был снижен до 1/21600.

Следует отметить, что «нулевой» метод стал основой и всех последующих проверок закона «обратных квадратов» (см., например, [16–18]). Однако естественная ограниченность этого метода на первом этапе количественных исследований по электричеству имела принципиальный характер. С одной стороны, с его помощью нельзя было исследовать силы притяжения. С другой (и это, по-видимому, главное) — «нулевой» метод не давал возможности ввести единицу измерения для «количества элект-

ричества» (этот термин широко использовался во второй половине XVIII в.). Для введения метрических соотношений, необходимых для математического описания электростатических явлений, большую ценность, несмотря на меньшую точность, представлял метод Кулона. Он давал возможность определить единицу заряда через уже использовавшиеся в физике механические величины. Впоследствии крутильные весы стали широко распространенным прибором для абсолютных измерений малых сил.

ЛИТЕРАТУРА

1. Whittaker E. T. A History of the Theories of Aether and Electricity: The Classical Theories. 2nd ed., L., 1951, vol. 1.
2. Gilbert W. De magnete, magneticisque corporibus, et de magno magnete tellure; physiologia nova. L., 1600.
3. Франклин В. Опыты и наблюдения над электричеством. М.: Изд-во АН СССР, 1956.
4. Эпинус Ф. У. Т. Теория электричества и магнетизма. М.: Изд-во АН СССР, 1951.
5. Kratzenstein C. G. Theoria electricitatis more geometrico explicata. Halle, 1746.
6. Heilbron J. L. Electricity in the 17th and 18th centuries. Berkeley, Calif., 1979.
7. Socin A. Tentamina electrica in diversis morborum generibus, quibus accedunt levis electrometri bernoulliani adumbratio, et quorundam experimentorum instituendorum ratio.— Acta helvetica, 1760, vol. 4, p. 214.
8. Robison J. A System of Mechanical Philosophy. 4 vols. Edinburgh, 1822.
9. Stanhope C. S. Principles of Electricity. L., 1779.
10. Дорфман Я. Г. Всемирная история физики с древнейших времен до конца XVIII века. М.: Наука, 1974, с. 293.
11. Priestley J. The History and Present State of Electricity, with Original Experiments. 2 vols., L., 1767; reprinted: Johnson Reprint Corporation. The Sources of Science. N. Y.; L., 1966, vol. 2, N 18.
12. Roller D., Roller D. H. D. The Development of the Concept of Electric Charge: Electricity from the Greeks to Coulomb. (Harvard Case Histories in Experimental Science). Case 8. Cambridge, Mass., 1954.
13. Cavendish H. The Scientific Papers. vol. 1. Cambridge, 1921.
14. Coulomb C.-A. Collection de mémoires relatifs à la physique. P., 1884.
15. Luther G. G., Towler W. R. Redetermination of the Newtonian Gravitational Constant G.— Phys. Rev. Lett., 1982, vol. 48, N 3, p. 121.
16. Plimpton S. J., Lawton W. E. A Very Accurate Test of Coulomb's Law of Force Between Charges.— Phys. Rev., 1936, vol. 50, p. 1066.
17. Bartlett D. F., Goldhagen P. E., Phillips E. A. Experimental Test of Coulomb's Law.— Phys. Rev., 1970, vol. D2, N 3, p. 483.
18. Williams E. R., Faller J. E., Hill H. A. New Experimental Test of Coulomb's Law: A Laboratory Upper Limit on the Photon Rest Mass.— Phys. Rev. Lett., 1971, vol. 26, p. 721.

МАКСВЕЛЛ: СОЗДАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ТЕОРИИ

В год рождения Максвелла Фарадей открыл явление электромагнитной индукции. Он обнаружил, что если на железное кольцо намотать две катушки из проволоки, и через одну из катушек пропускать ток, то при включении и выключении тока в первой катушке, во второй возникает мгновенный электрический ток. Это открытие было одним из самых существенных в цепи замечательных достижений науки XIX в.

Наука об электричестве началась с установления закона Кулона и изобретением — в самом начале XIX в. гальванического источника тока — вольтова столба. А в 1820 г. Эрстед открывает действие тока на магнитную стрелку. Опыт почти немедленно вызывает живейший интерес со стороны французских физиков. В том же году он был повторен Араго и Гей-Люссаком, и к исследованию этого эффекта приступил Ампер. В результате, через два года появляется его теория электромагнетизма, «выведенная исключительно из опыта», причем Ампер первым вводит в науку термин «электродинамика».

Опыт Эрстеда привлек к себе такое внимание, потому что в его опыте впервые было обнаружено взаимодействие, направленное не по прямой, соединяющей испытываемые объекты — в его опыте магнитная стрелка устанавливалась перпендикулярно направлению тока, в плоскости, также перпендикулярной этому направлению. Такой результат никак не укладывался в схему физики центральных сил, повсеместно господствующей тогда в науке. Но и само это представление, предполагавшее, что все явления в природе могут быть объяснены с помощью сил, зависящих от расстояния и направленных по прямой, соединяющей центры этих сил, не было неуязвимым, поскольку предполагало наличие действия на расстоянии, распространяющегося мгновенно. Именно поэтому попытка Вебера и других построить теорию, объясняющую электрические явления, впоследствии представлялась несостоятельной в глазах Максвелла.

С другой стороны, не менее критически было положение в оптике. Открытые Френелем законы поляризованного света окончательно укрепили авторитет волновой теории. Однако механизм распространения света оставался невыясненным, несмотря на повторяющиеся попытки построения теорий оптического эфира.

Многочисленные экспериментальные факты ждали своего объяснения, необходима была теория нового типа. Создать ее выпало на долю Максвелла.

ЮНОСТЬ МАКСВЕЛЛА

Максвелл родился в Эдинбурге 13 июня 1831 г. и провел все свое детство в Гленлере — имении своего отца, принадлежавшем к старинному и состоятельному роду шотландских дворян. Максвеллу выпало на редкость счастливое детство, его природная любознательность и склонность к уединенным размышлениям находили полное понимание у его родных, и в первую очередь, у его отца (юриста по профессии), который горячо любил Джеймса и всячески поощрял в нем склонность к научным занятиям. В 1841 г. Максвелл поступил в классическую гимназию (она называлась Эдинбургской академией), и вскоре стал одним из первых учеников. В 1846 г., когда ему было всего 14 лет, он написал свою первую научную работу «О черчении овалов и кривых со многими фокусами», напечатанную впоследствии в трудах Эдинбургского королевского общества. С этого момента будущее Максвелла ни у кого не вызывает сомнений. В следующем году, закончив гимназию, он поступает в Эдинбургский университет и с увлечением продолжает свои занятия по математике и физике. В образовании Максвелла особую роль играет профессор Джеймс Форбс, давно его заметивший и полюбивший, а также профессор Вильям Гамильтон, возглавлявший в Эдинбурге кафедру логики и философии. В 1850 г. Максвелл переезжает в Кембридж и поступает в Тринити-колледж, где почти два года до него учился и работал Исаак Ньютон. Общение с учеными колледжа св. Троицы, в первую очередь, с Джоржем Стоксом и Вильямом Хьюэллом сыграло важную роль в формировании научного мировоззрения молодого Максвелла, а кропотливое изучение работ Фарадея указало путь его собственным дальнейшим исследованиям. Блестяще окончив Кембридж в 1854 г. (Максвелл получил вторую награду, уступив первую Э. Раусу, будущему известному механику и математику), он остается в университете уже полноправным членом Тринити-колледжа.

Максвелл сочетал в себе редкие и противоречивые качества — с одной стороны, он был явно человеком увлекающимся, стремящимся все понять и все перепробовать, а с другой стороны, в нем таилось стремление к глубокой основательности, методичности и порядку. Свидетельством первого является тот факт, что окончив университет, он сразу же приступает к исследованию важнейших проблем, стоящих перед физикой в его время. Речь идет о кинетической теории газов, теории электричества и проблеме цветного изображения. Доказательством другой характерной черты Максвелла могут служить его собственные заметки относительно того, как человек должен планировать свою творческую деятельность: «Для того, чтобы наслаждаться жизнью и пользоваться свободой, он должен постоянно иметь перед глазами то, что необходимо сделать сегодня. Не то, что нужно было сделать вчера — если он не хочет впасть в отчаяние,

и не то, что нужно будет сделать завтра — если он не хочет быть прожектором. ...Счастлив тот человек, который в деле сегодняшнего дня видит закономерную часть дела всей жизни» [1].

То, что Максвелл не только поставил перед собой подобную задачу, но и с успехом ей следовал, подтверждается всей дальнейшей его деятельностью, которая поставила его в первый ряд физиков мира, и это позволило Максвеллу, оценивая значение Максвелла для теоретической физики в Германии, сказать так: «...по рождению он принадлежит Эдинбургу, как личности он принадлежит Кембриджу, а труды его — достояние всего мира» [2].

АНАЛОГИ И МОДЕЛИ

«... также как в каламбуредве истины сокрыты в одном выражении, так и в аналогии единственная истина выражается двойным образом» [1]. Эта цитата взята из доклада Максвелла, который он сделал в 1856 г. в Кембридже перед аудиторией, состоящей из двенадцати блестяще одаренных молодых людей, шуточно именовавших себя «Клубом апостолов». Тема доклада «Аналогии в природе» была выбрана им не случайно. Аналогия как методологический прием и инструмент научного исследования была предметом серьезного интереса со стороны Максвелла. В дальнейшем именно аналогия было предназначено сыграть выдающуюся роль в исследованиях Максвелла по теории электромагнетизма. Здесь Максвелл безусловно находился под влиянием своего старшего друга — Вильяма Томсона, которого никто не мог превзойти в умении строить динамические модели и аналогии для объяснения непонятных физических явлений. В одной из первых своих работ, написанной в семнадцатилетнем возрасте, Томсон сравнивает распределение сил в области, содержащей наэлектризованные тела, с распределением тепла в твердом теле. Эквипотенциальные поверхности в этом случае соответствуют изотермальным поверхностям тела, а электрические заряды — источникам тепла. Рассматривая впоследствии эту работу Томсона, Уиттекер подметил тот факт, что главная ценность томсоновской аналогии заключается не столько в возможности применения математического аппарата теплопередачи для описания электрических явлений, сколько в результате, говорящем о том, что формулы, описывающие электрическое поле, выведенные из закона действия на расстоянии, оказывались идентичными формулам, выведенным на основе предположения о соприкасающихся частицах. Много лет спустя сам Максвелл так оценивал значение этого факта: «Эта статья впервые в математической науке содержала идею, что электрическое действие передается с помощью сплошной непрерывной среды, идею, которая, хотя и была высказана Фарадеем и использовалась как ведущая в его исследованиях, никогда не принималась другими учеными и считалась математиками несовместимой с законами

электрического действия, установленными Кулоном и выведенными Пуассоном» [3].

Максвелла с Томсоном связывали тесные дружеские отношения, и Максвелл еще в детстве иногда проводил каникулы в его доме. Несмотря на небольшую разницу в возрасте (всего в семь лет), к тому времени, когда Максвелл решил заняться теорией электричества, т. е. к середине 50-х годов прошлого века, Томсон не только был одним из самых авторитетных физиков мира, но крупнейшим специалистом в той самой области, которой Максвелл собирался заняться. Поэтому совершенно естественно, что он обращается к Томсону: «Теперь, когда я получил почтенное звание бакалавра, я начал думать о чтении.

Вообразите человека, имеющего некоторое представление об электрических опытах-спектаклях и антипатию к «Электричеству» Мёрфи. Как должен он организовать чтение и работу с тем, чтобы приобрести некоторое понимание предмета, которое было бы полезно и при дальнейшем знакомстве с литературой? Если он захочет читать Ампера, Фарадея и др., то — в каком порядке, а также — на каком этапе ему нужно читать Ваши статьи?» [4].

По совету Томсона Максвелл начал с Фарадея. И скоро понял, что именно в этих работах и содержится главное: «Я решил, пишет он, — не читать ни одного математического труда из этой области, пока не изучу вполне основательно «Экспериментальные исследования по электричеству» [5].

Представление, что все явления в природе могут быть сведены к точечным центрам сил, взаимодействующим друг с другом на расстоянии, стало господствующим в первой половине XIX в., и большинство исследователей не стремилось понять и проникнуть в микроструктуру взаимодействий, рассматривая ее по примеру Лапласа, как «туманную и принадлежащую будущему науке» [6]. Однако в английской науке еще со времени Ньютона существовало стремление проникнуть в эту фундаментальную область. Сам Ньютон безуспешно пытался, вопреки выдвинутому им позднее лозунгу, строить гипотезы относительно механизма действия на расстоянии, очевидно, считая простую констатацию такого взаимодействия неудовлетворительной¹. В духе этой традиции Фарадей рассматривал атом не как мельчайшую частицу, имеющую определенную форму и размер, а скорее как атом Босковича, величина которого могла быть любой в зависимости от протяженности силовых линий частицы, т. е. «Частица предполагается существующей там, где существуют эти силы и лишь только там» [7]. Такой вариант ньюто-

¹ Интересно отметить одну линию преемственности. Ньютон в одном из писем к Лейбницу пытался объяснить механизм взаимодействия при помощи «субстанции, в которой тела двигаются и плавают без сопротивления, и которая, следовательно, не обладает инерцией, но действует согласно иным, нежели механическим законам» (Univ. Library Cambridge, Add. 3965. 17, fol. 253^r). Аналогичным образом Максвелл, конструируя свою модель электрической среды, вводит в рассмотрение жидкость, не обладающую инерцией.

новского эфира, заполняющего пространство и являющегося ареной действия сил был гораздо больше по душе максвелловскому понятию о природе, и поэтому, неудовлетворенный электродинамикой Вебера, превосходной теорией, но основанной на принципе дальнего действия, Максвелл принимает за собственную интерпретацию идей Фарадея. В попытках представить эти идеи нагляднее, он впервые прибегает к помощи аналогии.

В результате этой попытки в 1855—1856 г. появляется большая работа «О фарадеевских силовых линиях», в которой Максвелл использует гидродинамическую аналогию для интерпретации силовых линий, рассматривая их «не как просто линии, а как трубки переменного сечения, заполненные несжимаемой жидкостью» [8]. Направление и величина силы в точке представляется, таким образом, с помощью направления и величины скорости воображаемой жидкости. При этом положительный заряд рассматривается как источник, а отрицательный — как сток этой жидкости, в то время как интенсивность источника изображает величину заряда. Затем Максвелл вводит гидродинамическое сопротивление, которое играет роль электрического сопротивления среды, таким образом, что скорость жидкости уменьшается пропорционально квадрату расстояния от источника. Тогда, поскольку скорость представляет силу электрического поля, давление жидкости в точке становится аналогом потенциала. Все эти предположения дают Максвеллу возможность применить математику для описания получившейся модели, и здесь наиболее значительного результата он добивается в описании фарадеевского «электротонического состояния». Согласно Фарадею, проводник, помещенный в магнитное поле, находится в состоянии, которое не обнаруживает себя, если условия стационарны, но если поле изменяется, то в проводнике возникает электродвижущая сила. «Эта электродвижущая сила», — пишет Максвелл, — «зависит только от изменения числа линий магнитной индукции, пронизывающих контур тока. Напрашивается допущение, что подобная сила, зависящая от изменения числа силовых линий, обуславливается изменением некоторого состояния, которое измеряется этим числом» (курсив мой. — В. К.). Для того чтобы связать индукцию с числом силовых линий, Максвелл вводит понятие «электромагнитного количества движения», которое с современной точки зрения является ничем иным, как вектор-потенциалом A , а затем, выражая индукцию B через вектор-потенциал: $B = \text{rot } A$ и используя закон Ампера в форме $\text{rot } H = 4\pi j$, а также условия сохранения энергии, он получает выражение для эдс индукции: $E = -\partial A / \partial t$.

«ФИЗИЧЕСКИЕ СИЛОВЫЕ ЛИНИИ»

Закончив свою первую работу по теории электричества, Максвелл возвращается в Шотландию, чтобы в 1856 г. занять место профессора физики Абердинского университета. Главной причиной переезда было, по-видимому, желание Максвелла чаще

видеть отца, разлуку с которым он тяжело переживал. Однако из намерения не суждено было осуществиться — его отец умер еще до вступления Максвелла в должность. Единственным делом оставалась работа. Кроме обычных обязанностей профессора и собственных занятий наукой, Максвелл продолжает читать вечерние лекции для рабочих, как он это делал еще в Кембридже. Главным предметом его исследований в Абердине становится задача о строении колец Сатурна, конкурс на разрешение которой был объявлен Кембриджским университетом. После двухлетних трудов Максвелл блестяще справился с задачей, доказав, что кольца представляют собой скопление мелких частиц, находящихся в состоянии постоянного вращения. За эту свою работу он получил почетную премию Адамса и приобрел известность в научном мире как тонкий исследователь и изощренный математик. Вскоре Максвелл обращается к кинетической теории газов, и в 1859 г. появляется его знаменитое исследование, содержащее закон распределения скоростей. Известность и авторитет Максвелла растут; тем не менее в 1860 г. в результате слияния двух университетов в Абердине, профессорская должность, которую он занимал, упраздняется, его увольняют, и Максвелл переезжает в Лондон, где становится профессором физики Кингс-колледжа Лондонского университета. Пять лет, проведенные в Кингс-колледже, стали порой расцвета максвелловской электродинамики.

Результаты, полученные им в предыдущей работе, показали, что идеи Фарадея с успехом поддаются математическому описанию, и сам Фарадей так оценивал эту работу: «Сначала я даже испугался, — писал он Максвеллу в 1857 г., — когда увидел такую математическую силу, примененную к вопросу, но потом изумился, видя, что вопрос выдерживает это столь хорошо» [5, с. 353]. Однако Максвелл отнюдь не был удовлетворен достигнутым результатом. Ему казалось необходимым не столько показать действенность математического описания, сколько найти механизм, целиком объясняющий действие электромагнитного поля и, в первую очередь, явление индукции. «До сих пор мне не удалось разработать идею об электротоническом состоянии настолько, чтобы можно было объяснить природу и свойства без ссылок на одни лишь символы. ...Однако при внимательном изучении законов упругих тел и движении вязких жидкостей я надеюсь найти метод построения механической концепции этого электротонического состояния, приемлемый для объяснения в целом» [8, с. 59]. Эту задачу Максвелл выполнил в работе, опубликованной в 1861—1862 г. «О физических линиях».

Максвелл начинает свое построение механизма среды, моделирующей электромагнитное поле, исходя из двух предположений, лежащих в его основе. Во-первых, это представление Фарадея, что распределение силовых линий определяется натяжением вдоль линий и их давлением друг на друга. Во-вторых, это

представление о вращательной природе магнетизма, выдвинутое Томсоном для объяснения вращения плоскости поляризации в магнитном поле, открытого Фарадеем в 1845 г. Максвеллводит в рассмотрение эфир, — среду, которая пронизывает все пространство, обладает способностью быть приводимой в движение, а также передавать это движение от одной своей части к другой и сообщать это движение плотной материи. Магнитные силовые линии в этой среде будут отождествляться с вращениями частиц среды, вращениями, ось которых совпадает с направлениями силовых линий. Картина таких трубчатых вихрей позволяет немедленно объяснить разницу в силах давления и натяжения линий, о которой говорил Фарадей, и, более того, определить количественно ее величину. Центробежные силы, возникающие в системе таких вихрей, приводят к их расширению в радиальном направлении и к сужению в осевом направлении, причем этот эффект, очевидно, будет зависеть от их скорости. Эта модель, состоящая из вихрей и колес, возмутила Дюгема, который высказался по этому поводу так: «Мы надеялись попасть в мирное и заботливо упорядоченное хозяйство дедуктивного разума, а попали на какой-то завод» [9].

Максвелл находит, что разница давлений будет пропорциональна квадрату линейной скорости вихрей и записывает ее равной $\mu v^2/4\pi$, где μ — магнитная проницаемость среды.

Отождествив систему трубчатых вихрей с магнитными силовыми линиями, Максвелл строит аналогию для электрического тока, которая проиллюстрировала бы связь между током и магнетизмом. По его словам, такая аналогия «заключается в том, что вихри разделены слоем частиц, вращающихся каждая вокруг собственной оси в направлении, противоположном движению вихрей, так что соприкасающиеся поверхности вихрей и частиц имеют одно и то же направление движения» [8, с. 131]. Тогда «электрический ток может быть представлен как поступательное движение частиц, расположенных между соседними вихрями» [8, с. 135].

Следующим этапом в конструировании модели является наделение «электрических» частиц свойством упругости. Отсюда сразу следует, что возмущение в среде будет распространяться с конечной скоростью. С помощью этой гипотезы Максвелл объясняет сущность понятия электрического заряда: поскольку в диэлектрике частицы, выполняющие роль холостых колес, не могут двигаться поступательно (отсюда — отсутствие тока проводимости), а лишь испытывать упругую деформацию, то такую же деформацию испытывают соприкасающиеся с ними ячейки вихрей. Эта деформация будет определять силу, с которой будут взаимодействовать соседние ячейки, она-то и представляет собой электрическую силу, возникающую в результате наличия заряда. Мы сегодня привыкли к тому, что теория электричества строится от электростатики к электродинамике, однако развитие

теории у самого Максвелла шло иначе — посредством создания новой концепции заряда.

Остановимся теперь более детально на аналогиях между свойствами максвелловского механизма и электромагнитными величинами, а также на следствиях этих аналогий. Представление об этом дает табл. 1. К этому надо добавить, что согласно предложенному Максвеллом механизму, ЭДС индукции определяется разницей в скорости двух соседних вихревых ячеек, которая вызывает тангенциальную силу, которая действует на «электрические» частицы, вынуждая их к поступательному движению. Результатом такого движения, как мы помним, является электрический ток.

В диэлектрике ток невозможен, а степень, с которой материал электрических шаров смещается под действием силы, определяется упругой постоянной. Максвелл предположил, что, как обычно, в теории упругости, смещение прямо пропорционально приложенной силе. Обозначив смещение через D , а силу — через E , имеем $E=kD$, или полагая $k=1/\epsilon$, получаем: $D=\epsilon E$.

Точно так же энергия электрического поля будет аналогом упругой энергии смещенных частиц, которая равна работе, потраченной на смещение, т. е. силе, действующей со стороны ячейки, помноженной на длину смещения, т. е. $ED=\epsilon E^2$.

Поскольку вихревые ячейки и «электрические» частицы, играющие роль холостых колес, кинематически связаны между собой, ясно, что движение частиц, изображающее ток, должно в первую очередь определяться параметрами вращения. И действительно, Максвелл находит, что электрический ток должен быть пропорционален $\text{rot } H^2$. Однако придание модели упругих свойств привело Максвелла к результату, значение которого он сначала недооценил. Речь идет о введении понятия тока смещения. Наличие электрического заряда в диэлектрике аналогично наличию в нем напряжения, вызванного упругой деформацией «холостых колес». Когда напряжение снимается, это означает, что происходит движение (хотя и в очень ограниченных пределах) материала этих колес или «электрических» частиц. Такое движение, согласно кинематике модели, должно вызывать изменение скорости вращения вихрей, а следовательно, напряженности магнитного поля. Поэтому изменение смещения должно создавать магнитное поле точно так же, как и ток проводимости. Математической записью этой зависимости будет уравнение:

$$\text{rot } H = 4\pi j + dD/dt.$$

Введение тока смещения было важнейшим достижением теории Максвелла, поскольку именно эта добавка гарантировала

¹ Напомним, что оператор rot является одной из характеристик вращательного движения. В простейшем случае вращения твердого тела вокруг фиксированной оси с линейной скоростью v , $\text{rot } v = 2\omega$, т. е. равен удвоенной угловой скорости.

Таблица 1

Механические величины	Электромагнитные величины
Число «электрических» частиц, проходящих через данную точку в единицу времени	Сила тока
Линейная скорость вихрей	Напряженность магнитного поля
Средняя плотность вихрей	Магнитная проницаемость
Кинетическая энергия вращательного движения вихрей	Энергия магнитного поля
Упругая постоянная	Величина, обратная диэлектрической проницаемости

сохранение заряда — один из фундаментальных принципов физики. В дальнейшем он использует это понятие для того, чтобы найти связь между электрической силой и зарядом. В процессе вывода этой зависимости он получает «уравнение непрерывности» $\text{div } j + (de/dt) = 0$, которое говорит о том, что изменение заряда в данной области равно разности между количеством тока, притекающего в область и вытекающего из нее. Это уравнение дает связь между **током проводимости и зарядом**, в то время как предыдущее уравнение дает связь между **током проводимости и смещением**. Отсюда вытекает связь между **зарядом и смещением**: $e = \text{div } D$. С помощью этого результата Максвелл получает затем, что сила взаимодействия между зарядами выражается законом Кулона: $F = c^2 \frac{t_1 t_2}{r^2}$. Таким образом, теория Максвелла получает экспериментальное подтверждение.

ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ТЕОРИЯ СВЕТА

В письме к Томсону от 10 декабря 1861 г. Максвелл писал, что он «вывел эти уравнения в деревне, прежде чем имел какое-либо подозрение о сходстве между двумя величинами — скоростью распространения магнитных эффектов и скоростью света, поэтому я думаю, имеет основание полагать, что магнитная и световосная среды идентичны» [10].

Конечно, Максвелл не имел представления, что эти скорости совпадут, однако представление о неизбежной связи между электромагнитными явлениями и светом ему казалось само собой разумеющимся. Для последователя и ученика Фарадея такая возможность должна была быть естественной. Сам Фарадей определенно указывал на существование такой связи в «Размышлениях о колебаниях лучей» (1846), и более того, еще в 1832 г. полагал, что распространение электромагнитных эффектов происходит посредством колебаний и аналогично распространению света. Максвелл, правда, об этих записках ничего знать не мог, так как они были найдены и опубликованы

только в 1938 г., но ему было достаточно и общих соображений. По-видимому, он считал, что в природе не должно существовать двух промежуточных сред, из которых одна отвечает за электромагнитные, а другая — за оптические явления. Такая точка зрения вполне соответствовала попыткам самого Ньютона объяснить самые разнородные явления с помощью *одного* эфира. Без привычки мыслить в рамках такой традиции, вполне вероятно, что Максвелл не сделал бы этого открытия. Ведь недаром Кирхгоф, получивший в 1857 г. совпадение скорости распространения электрической волны по проводу со скоростью света, не придавал этому факту серьезного значения.

Максвелл с самого начала конструировал свою модель таким образом, чтобы она допускала поперечные колебания. Для этого он наделяет частицы своего эфира исключительно вращательной упругостью. (Подобное предположение позволило гениальному ирландцу Джеймсу Мак-Каллагу двадцатью годами раньше создать замечательную теорию оптического эфира, объяснявшую многие экспериментальные факты, в частности законы Френеля для поляризованного света). Затем он ставит своей целью найти скорость распространения в среде, так сказать, обратив первоначальную задачу, т. е. выразив ее через электромагнитные величины. Для того чтобы получить эти выражения, Максвеллу пришлось детально изучить упругие свойства своей модели, в частности рассмотреть соотношения между упругостью по отношению ко вращению и объемной упругостью. Из теории упругости было давно известно, что скорость распространения колебаний в упругой среде выражается зависимостью $v = E/\rho$, где E — упругость, а ρ — плотность. Следовательно, ему было необходимо выразить упругость и плотность через характеристики электромагнитного поля. Выше уже говорилось, что плотность среды предполагалась аналогичной магнитной проницаемости, точно это соотношение дается формулой: $\mu = \rho r$. В свою очередь, зависимость между упругостью и диэлектрической проницаемостью выразится так: $\epsilon = 1/4\pi c^2$, где c^2 — постоянная в законе Кулона, причем $c^2 = \pi E$. Смысл постоянной c легко выяснить — это коэффициент перехода от электромагнитных единиц к электростатическим. Действительно, пусть единица заряда в CGSM равна с единицам заряда в CGSE, тогда запись закона Кулона (для взаимодействия в вакууме) в соответствующих единицах выразится так:

$$F = \frac{e_1 e_2}{r^2}; \quad (\text{CGSM}). \quad F = \frac{(ce_1)(ce_2)}{r^2} = c^2 \frac{e_1 e_2}{r^2}; \quad (\text{CGSE}).$$

т. е. c — является коэффициентом перехода. Следовательно, скорость распространения электромагнитных колебаний может быть вычислена из опыта по формуле $v = c/\sqrt{\mu}$. Поскольку в воздухе $\mu = 1$, Максвелл получает следующий поистине фундаментальный результат: «Скорость поперечных волновых колебаний в нашей гипотетической среде, вычисленная из электромагнитных опы-

тов Кольрауша и Вебера, столь близко совпадает со скоростью света, вычисленной из опытов Физо, что мы едва ли можем отказать от вывода, что свет состоит из поперечных колебаний той же самой среды, которая является причиной электрических и магнитных явлений» [8, с. 175].

УРАВНЕНИЯ МАКСВЕЛЛА

Статья «О физических силовых линиях» является центральной в истории создания теории Максвелла. Действительно, именно в ней он получил свои уравнения и отождествил электромагнетизм со светом. Но вспомним, что его первоначальной целью было создание механизма объяснения электромагнитных явлений. Максвелл его создал — это и был тот «завод», состоящий из вихрей и холостых колес, которым возмущался Дюам. Но здесь оказалось — и Максвелл отдавал себе в этом полный отчет — что следствия, вытекающие из математического описания механизма, важнее самой структуры. Впрочем, он был осведомлен об этом с самого начала, так как считал, что его модель есть всего лишь первое приближение к выяснению истинного механизма явлений. Максвелл рассматривал свою модель всего лишь как механизм для понимания, и поэтому следующей его задачей было освобождение математических результатов от механической модели. Эту задачу он выполнил в 1864–1865 гг. в своей работе «Динамическая теория электромагнитного поля». Для этого ему было надо произвести ту самую процедуру, которую Джеммер охарактеризовал следующим образом: «В новейшей теории первоначальные положения и аксиомы, несмотря на то, что они логически предшествуют выводам, эпистемологически следуют за ними» [11], а именно, принять выводы своей предыдущей теории (т. е. уравнения) в качестве исходных посылок и вывести из них электромагнитную теорию света без ссылок на модель. Максвелл представил в работе впервые полную систему своих уравнений, дополнив ее и поправив ошибки в знаках так, что, применив векторные обозначения, ее можно привести в таком виде:

[A] уравнение полного тока $\mathbf{j} = \mathbf{j} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}$

[B] уравнение магнитной силы $\mu \mathbf{H} = \text{rot} \mathbf{A}$

[C] уравнение токов $\text{rot} \mathbf{H} = \phi \mathbf{j}$

[D] уравнение ЭДС $\mathbf{E} = \mathbf{v} \times \mu \mathbf{H} - \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} - \text{grad} \phi$

[E] уравнение электрической упругости $\mathbf{E} = k \mathbf{D}$

[F] уравнение электрического сопротивления $\mathbf{F} = -r \mathbf{j}$

[G] уравнение свободного электричества $-\rho + \text{div} \mathbf{D} = 0$

[H] уравнение непрерывности $\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div} \mathbf{j} = 0$.

Для того чтобы объяснить физический смысл этих уравнений, Максвелл уже не говорит ничего о деталях механизма, он лишь



Дж. К. Максвелл с женой Катариной Мари Дьюар в Шотландии около 1875 г.

полагает, что такой механизм существует, а его уравнения связываются с энергетическими характеристиками среды. Он пишет: «Говоря об энергии поля, я хочу быть понятым буквально. Всякая энергия есть то же, что и механическая энергия, существует ли она в форме обычного движения или в форме упругости, или в какой-нибудь другой форме. Энергия электромагнитных явлений — это механическая энергия. Единственный вопрос заключается в том, где она помещается? Согласно старым теориям она находится в электризованных телах, проводящих цепях и магнитах в форме неизвестного качества, называемого потенциальной энергией или способностью производить определенные действия на расстоянии. По нашей теории она находится в электромагнитном поле, в пространстве, окружающем электризованные и намагниченные тела, а также и в этих самых телах и проявляется в двух различных формах, которые могут быть описаны без гипотез как магнитная поляризация и электрическая поляризация» [8, с. 301].

Затем Максвелл переходит к выводу законов механического действия в поле и, наконец, к построению электромагнитной теории света. Пользуясь своими уравнениями (А) — (Е), Максвелл показывает, что μH должно удовлетворять уравнению вида $4\pi\mu/k \cdot d^2H/dt^2 = \nabla^2 \mu H$, т. е. волновому уравнению. Скорость плоской волны, удовлетворяющей такому уравнению, есть $\sqrt{k/4\pi\mu}$. Имея в виду, как и раньше, что $k=4\pi c^2$ и $\mu=1$, Максвелл показывает, что скорость волны равна скорости света. Таким образом, он получает электромагнитную теорию света без всякой ссылки на модель.

Окончание работы над «Динамической теорией электромагнитного поля» совпало (1865) с переездом Максвелла из Лондона. После напряженной работы и утомительных обязанностей профессора Кингз-колледжа здоровье его пошатнулось, и Максвелл решил поселиться в своем имении и, сочетая отдых с научными исследованиями, заняться тем, что его более всего интересовало. В Гленлере Максвелл написал свою последнюю работу по теории электричества — «Трактат по электричеству и магнетизму», который был опубликован в 1873 г. Правда, к этому времени он уже переехал из Шотландии в Кембридж, чтобы возглавить Кавендишскую лабораторию, которая была построена под его наблюдением и стала в дальнейшем одним из самых знаменитых и результативных центров физической науки. (Преемниками Максвелла на посту директора лаборатории стали Дж. Релей, Дж. Дж. Томсон и Э. Резерфорд.)

В Трактате Максвелл подытожил все свои достижения по теории электромагнетизма, свел их в единую систему и сделал ряд существенных добавлений.

Вскоре после завершения «Динамической теории» Максвеллу стала ясна фундаментальность понятия тока смещения — поскольку его введение делало все токи замкнутыми — и уже в «Трактате» он определяет ток смещения как «одну из главных особенностей» его теории. Кроме того, он показал, электрические и магнитные волны должны распространяться во взаимно перпендикулярных плоскостях, а свет должен оказывать давление.

Все свои уравнения Максвелл записывал в координатной форме. Может быть, в этом сказалось влияние В. Томсона, резко выступавшего против векторной, или как тогда говорили — «кватернионной» символики. Тем не менее Максвелл, понимая важность ее использования в математике, ввел в свой «Трактат» параграф, в котором его уравнения были даны в векторной форме (векторы он записывал, используя буквы готического алфавита).

Сегодня уже стала крылатой фраза Герца: «Теория Максвелла — это система уравнений Максвелла». Относительно этого высказывания, однако, уместно привести слова Л. Розенфельда, крупного физика и выдающегося историка науки, который считает, что Герц основывается на том, что, по его мнению, «Мак-

велл пришел к своей теории, основываясь на идее действия на расстоянии и приписывая эфиру свойства сильно поляризованной среды» [12]. «На самом деле,— пишет Розенфельд,— это весьма точное выражение гельмгольцевского подхода, который еще и показывает, что Герц не дал себе труда прочесть работы Максвелла, предшествующие «Трактату». Поэтому неудивительно, что в систематическом изложении электромагнитной теории, которое он дал в 1890 г. и которое до сих пор принято в Германии, имеется лишь формальный скелет теории Максвелла» [13].

На самом деле, оба они правы. Теория Максвелла — действительно уравнения Максвелла, но это — уравнения, которые сегодня обрели новое содержание вследствие пересмотра содержания и смысла физических теорий, а равно и всей картины мира в целом, пересмотра, который был вызван максвелловской электродинамикой, и в первую очередь, введением в обиход самого понятия «поля».

С другой стороны, теория Максвелла — это не одни только уравнения. Это — удивительная физическая интуиция, редкое воображение и способность создавать динамические образы реального мира — то, что всегда нас будет поражать в Максвелле, творце и человеке. Ричард Фейнман даже полагал, что «в истории человечества (если посмотреть на нее, скажем, через десять тысяч лет) самым значительным событием XIX столетия несомненно будет открытие Максвеллом законов электродинамики. На фоне этого важного научного открытия гражданская война в Америке в том же десятилетии будет выглядеть провинциальным происшествием» [14].

ЛИТЕРАТУРА

1. Campbell L., Garnet W. The Life of J. C. Maxwell. L., 1882, p. 200.
2. Планк М. Джеймс Клерк Максвелл и его значение для теоретической физики в Германии.— В кн.: Джеймс Клерк Максвелл. Статьи и речи. М.: Наука, 1968, с. 242.
3. Whittaker E. A History of the Theories of Aether and Electricity. L., 1951, p. 241—242.
4. Origins of Clerk Maxwell's Electrical Ideas/Ed. I. Larmor. Chambridge, 1937, p. 3.
5. Максвелл Д. К. Статьи и речи. М.: Наука, 1968. 422 с.
6. Laplace S. Exposition du système du monde. P., 1813, p. 357.
7. Schaffner K. F. Nineteenth Century Aether Theories. Pergamon. Press, 1972, p. 78.
8. Максвелл Дж. К. Избранные сочинения по теории электромагнитного поля. М.: Гостехтеориздат, 1954.
9. Дюгем П. Физическая теория. СПб., 1910, с. 85.
10. Origins of Clerk Maxwell's Electrical Ideas.
11. Jammer M. Models and Physical Theory.— In: Proceedings of the tenth international congress of history of science. Paris, 1964, vol. 11, p. 694.
12. Hertz H. Gesammelte Werke. Leipzig, 1894, Bd. 2, S. 147.
13. Rosenfeld L. Supplemento al Nuova Cimento, 1956, N 5, p. 1665.
14. Фейнмановские лекции по физике.

МАКСВЕЛЛ: ВЕКТОРЫ И КВАТЕРНИОНЫ

Для того чтобы оценить значение трудов Максвелла в создании векторного анализа, нужно посмотреть, в какой форме существовало векторное исчисление в середине прошлого века, и сравнить векторную систему Максвелла с теориями, развитыми в 1872–1880 гг. Гиббсом и Хевисайдом под влиянием работ Максвелла.

Исчисление с направленными отрезками появилось в математике с геометрической интерпретацией комплексных чисел в конце XVIII — начале XIX вв. Одновременно предпринимались совершенно естественные попытки ввести в математический обиход числа, которые изображались бы точками трехмерного пространства: $x+iy+jz$. Такая теория была создана знаменитым ирландским математиком У. Р. Гамильтоном (1805–1865); в результате многолетних исследований он пришел к выводу, что нужно ввести не «тройки» $x+iy+jz$, а «четверки» $u+xi+yj+zk$ (которые Гамильтон и назвал «кватернионами») и определить произведение «мнимых единиц» следующим образом $i^2=j^2=k^2=-1$, $ij=k=-ji$, $jk=i=-kj$, $ki=j=-ik$, $ijk=-1$.

В 1843–1853 гг. Гамильтон развил последовательное учение — теорию кватернионов. Гамильтон выделил в кватернионе скалярную и векторную части и обозначил их S_q , V_q . Векторы $xi+yj+zk$ — частный случай кватерниона, когда $S_q=0$ — Гамильтон обозначал греческими буквами. Развивая исчисление с векторами, Гамильтон (и его ученики) получили многочисленные результаты, охватывающие, практически, значительную часть современного векторного анализа. В самом деле, алгебра векторов, содержащаяся в теории кватернионов, вошла в современное векторное исчисление с изменениями, относящимися главным образом к форме и методам изложения.

В 1846 г. Гамильтон развил теорию векторной функции скалярного аргумента. Эта часть учения была изложена детально и проиллюстрирована примерами в 60-х годах в статьях Тэта (1831–1901) и, таким образом, приобрела вид, сохранившийся до нашего времени.

Рассматривая векторную функцию векторного аргумента, $\rho=\Phi\sigma$, Гамильтон выделил случай «линейной и векторной функции», которая представляет собой линейный оператор. Учение, созданное в основном Гамильтоном и приведенное в стройный вид Тэтом, существенно отличается от современной теории линейных преобразований, но и этот раздел содержит многие понятия, теоремы и приемы векторного анализа. В учении о скалярной функции векторного аргумента были изучены так называемые

и сопряженные функции, которые аналогичны симметрическим преобразованиям.

Наряду с многочисленными символическими операторами Гамильтон ввел в рассмотрение «символический вектор» $\nabla=i\frac{d}{dx}+j\frac{d}{dy}+k\frac{d}{dz}$ (1846). Гамильтон применил оператор к скалярной функции; в статьях Тэта (1862) этот оператор был применен к векторной функции и, таким образом, впервые даны примеры его использования в физике [2].

После смерти Гамильтона Тэт стал признанным главой школы кватернионистов. Благодаря ему Максвелл познакомился с теорией кватернионов «из первых рук». Максвелл увидел в «доктрине векторов» математический аппарат исследований и тот язык, на котором должна излагаться теория электричества и магнетизма [6, с. 8–29]. Но в середине прошлого века векторное исчисление существовало только как часть теории кватернионов. Эту часть теории — а именно векторы и операции с ними — Максвелл использовал в теории электричества и магнетизма. Нужный ему математический аппарат Максвелл изложил в «Трактате по электричеству и магнетизму» в разделе «Предварительные сведения».

Начало очерка традиционно повторяется во всех учебниках физики — это деление величин на скалярные и векторные. При этом в изложении Максвелла i, j, k — только единичные векторы, о мнимых единицах нет речи. Правда, правила оперирования с векторами — кватернионные; произведение двух векторов, вообще говоря, есть кватернион: $\rho_1\rho_2=(x_1i+y_1j+z_1k)(x_2i+y_2j+z_2k)=-(x_1x_2+y_1y_2+z_1z_2)+i(y_1z_2-y_2z_1)+j(x_2z_1-x_1z_2)+k(x_1y_2-x_2y_1)$. Скалярная часть произведения и векторная обозначены, как и в теории кватернионов $S.\rho_1\rho_2, V.\rho_1\rho_2$. Так, $S.\nabla\sigma=$

$$=-\left(\frac{dX}{dx}+\frac{dY}{dy}+\frac{dZ}{dz}\right), V.\nabla\sigma=i\left(\frac{dZ}{dy}-\frac{dY}{dz}\right)+j\left(\frac{dX}{dz}-\frac{dZ}{dx}\right)+k\left(\frac{dY}{dx}-\frac{dX}{dy}\right).$$

Из теории кватернионов тщательно отобрано самое необходимое, оно перенесено без изменений и изложено в координатах. Таким образом, Максвелл приблизительно очертил объем сведений, которые должны быть перенесены в векторное исчисление, и наметил желательное направление развития метода.

Опубликованные в 1911 г. фрагменты из переписки Максвелла и Тэта (сохранились только письма Максвелла) показывают, что Максвелл никогда не был восторженным кватернионистом и что он размышлял именно над теми чертами теории кватернионов, против которых через двадцать лет восстал векторный анализ.

В статье «On the Importance of Quaternions in Physics» (1890) Тэт доказывал, что кватернионы — «универсальный метод для математики и физики, свободный от искусственности и громоздкости декартова символизма». Из этой веры вытекал отказ

* Московский институт химического машиностроения.

от использования теории определителей, матриц и т. д. вплоть до декартовой системы координат.

Максвелл хотел каким-нибудь образом согласовать векторы с координатами. Об этом свидетельствует координатный язык его трудов и вопросы к Тэту по этому поводу.

В теории кватернионов квадрат вектора — отрицательная величина (это — следствие положения $i^2 = j^2 = k^2 = -1$). Максвелл писал, что в двуязычном исследовании (т. е. когда используются и векторы, и координаты) это обстоятельство вызывает беспокойство, это очень большое неудобство — при переходе от одного языка к другому надо менять знаки у величин и постоянно отмечать, в каком же языке говорят о величине в каждый момент. «Как примирить те факты, что квадрат AB всегда положителен в декартовой системе и всегда отрицателен в теории кватернионов? Как пахать одновременно быком и ослом?»

Значение, которое книга Максвелла имела для развития векторного исчисления, невозможно переоценить. Благодаря ей векторы, отвергаемые вместе с теорией кватернионов, вошли в физику. Для многих ученых эта книга явилась первым знакомством с векторами и причиной дальнейшего изучения векторных методов.

Максвелл не внес в свою векторную систему ничего от методов теории кватернионов; выразив все определения, формулы через декартовы координаты, Максвелл наметил путь отделения векторного анализа от теории кватернионов. Именно этим путем пошли Гиббс (1839—1903) и Хевисайд (1850—1925), создав свои векторные системы после изучения «Трактата по электричеству и магнетизму»; они развили исчисления, отличающиеся лишь деталями.

Первые статьи Хевисайда [4] не противоречат теории кватернионов, т. е. они точно такого же характера, как «Тракта» Максвелла. В 1885 г. Хевисайд дает первое общее изложение своей векторной системы, которую он считал «упрощением» теории кватернионов [3]. Он внес два изменения в векторное исчисление.

Хевисайд вводит определением два вида произведений векторов. Он разделил полное кватернионное произведение двух векторов

$$\rho_1 \rho_2 = S. \rho_1 \rho_2 + V. \rho_1 \rho_2$$

на два различных, назвав скалярную часть произведения «скалярным произведением», а векторную часть — «векторным произведением» векторов.

Хевисайд определяет скалярное произведение как $ab = x_1 x_2 + y_1 y_2 + z_1 z_2$, полагая тем самым $i^2 = j^2 = k^2 = +1$.

Важным следствием (и основным достоинством системы, по мнению Хевисайда) явилась возможность согласовать векторное исчисление с физикой и с «координатной математикой»; Хевисайд неоднократно подчеркивал, что его система — это компро-

мисс между декартовыми методами и кватернионными, т. е. практически он выполнил программу Максвелла (ничего не зная о ней): «одновременно пахать и быком, и ослом». Уже в первом варианте теории он писал: «Дело большой практической важности: обозначения должны гармонизировать с формулами декартовой математики, чтобы можно было легко перейти от одного к другому, как это часто требуется в исследованиях, без изменения в обозначениях ... отрицательный знак является причиной величайшего неудобства при таких переходах» [3, с. 3]. Нельзя не обратить внимание на то, как близки эти слова и слова Максвелла.

В это же время над созданием векторного исчисления, не зависящего от теории кватернионов и без кватернионов, работал американский физик Гиббс. Гиббс так же ввел определением два вида произведений векторов и положил $i^2 = j^2 = k^2 = +1$. Кроме того, он совершил переворот в методах теории: ему принадлежит новая трактовка теории линейных операторов, он ввел в изложение определители и матрицы, т. е. существенно приблизил изложение к современному построению теории.

Так же, как и Хевисайд, Гиббс представлял свою систему как некоторую модификацию теории кватернионов, а не как нечто противоположное ей. Оба они указывали в качестве идейного истока «Тракта» Максвелла. Хевисайд, познакомившись с книгой Максвелла, принял векторное исчисление в той единственной форме, в какой оно тогда существовало — в виде части теории кватернионов. И Гиббс писал: «Мое первое знакомство с кватернионами состояло в чтении максвеллова *E&M*, где существенно использовались кватернионные понятия. Я убедился, что мне необходимо начать овладевать этими методами, чтобы овладеть этим предметом» [8, с. 107].

Тем не менее сторонники теории кватернионов начали в 1890 г. дискуссию, которую Гиббс назвал «Борьбой за существование», а Хевисайд — процессом «Векторы против Кватернионов» [5]. «Так называемый векторный анализ» вызывал протесты из-за догматизма и искусственности — именно такими словами характеризовали введение двух видов произведений векторов, требование $i^2 = j^2 = k^2 = +1$, которые разрывали связь между векторной алгеброй и теорией функций комплексного переменного (да и с алгеброй). Работы Гиббса и Хевисайда были объявлены плагиатом, переложением известных результатов на неуклюжий язык, в громоздких обременительных обозначениях, которые представляют шаг назад — к декартовым координатам [7].

Полемика, продолжавшаяся около четырех лет, сыграла важную роль в распространении векторного анализа. Она обнаружила единомыслие нескольких ученых, развивших независимо более или менее равноценные векторные системы, обнародовала эти системы и познакомила с ними научный мир. Без векторных методов физика уже не могла существовать, решалась

форма существования: «векторы с кватернионами» или «векторы без кватернионов».

Даже в этом беглом обзоре можно увидеть, что все основные вопросы дискуссии были затронуты в переписке Максвелла двадцатью годами раньше, что именно в работах Максвелла были сделаны первые шаги к отделению векторного анализа от теории кватернионов и его «Трактат по электричеству и магнетизму» стимулировал исследования Хевисайда и Гиббса. Кроме этого, можно заметить то глубокое взаимное влияние, которое оказали друг на друга физика и математика при формировании векторного анализа.

ЛИТЕРАТУРА

1. Карцев В. П. Максвелл. М.: Мол. гвардия, 1976. 333 с.
2. Crowe M. A history of vector analysis. L., 1967.
3. Heaviside O. Electromagnetic Theory. L., 1951.
4. Heaviside O. Electrical Papers, vol. 2. L., 1892.
5. Heaviside O. Vectors versus Quaternions.— Nature, 1893, vol. 47, p. 533—534.
6. Maxwell J. C. A Treatise on Electricity and Magnetism. L., 1873.
7. Tait P. G. On the Importance of Quaternions in Physics.— Phil. Mag., 1890, vol. 29, p. 84—97.
8. Wheeler L. P. Josiah Willard Gibbs. New Haven, 1962.

УДК 538.3+536.765

Б. В. БУЛЮБАШ *

МАКСВЕЛЛ И ЭЛЕКТРОДИНАМИКА ВЕБЕРА

Любой рассказ о Максвелле будет неполным без рассказа о работах его современников. Генезис теории поля связывается обычно с интересом Максвелла к исследованиям Фарадея, причем вместе с «фарадеевской» ориентацией указывается на его неудовлетворенность основными постулатами континентальной электродинамики дальнего действия, связанной с именами Вильгельма Вебера, Карла и Франца Нейманов, Рудольфа Клаузиуса и других. Программа Максвелла содержала в качестве исходного постулата принцип близкого действия, согласно которому скорость распространения электрического действия конечна и зависит от свойств промежуточной среды. Программа Вебера, напротив, основывалась на принципе дальнего действия, допускавшем мгновенную передачу силы от одной электрической корпункулы к другой.

Констатируя это различие, история науки обычно рассматривает эти программы как взаимоисключающие, а электродинамика Вебера определяется как преграда широкому распространению идей Фарадея. Соответственно и сравнительный анализ обеих программ сводится обычно к выявлению различий между ними.

* Горьковский педагогический институт.

Такое сравнение можно, однако, провести иначе, ориентируясь на общность целей, стоявших перед исследователями. Подобный подход, по-видимому, вполне соответствует соображениям, высказанным Максвеллом в докладе математической и физической секции Британской ассоциации: «Тот факт, что две теории, по-видимому, столь существенно противоположные, верны в очень широкой области ... действительно имеет философское значение, которое мы сможем полностью оценить только тогда, когда достигнем такой высоты научного понимания, с которой нами может быть усмотрена действительная связь между столь различными гипотезами» [1].

Одну из главных проблем для физики второй половины XIX в. представляло отсутствие адекватной модели светового эфира. Свойства, которыми он должен был обладать согласно требованиям физиков, оказывались несовместимыми друг с другом. Пластичность и упругость (Стокс), априорное исключение продольных колебаний (Ф. Нейман, Мак-Куллах, Грин), неустойчивость эфира в целом (Коши) и т. п. В подавляющем большинстве эти модели вполне соответствовали традициям механицизма, и распространение света в них связывалось с действием упругих сил; возникновение соседних эфирных частиц, у Мак-Куллаха, например, смещением соседних эфирных частиц, у Мак-Куллаха — относительным вращением соседних объемчиков [2]. Главной ценностью подобных моделей следует, по-видимому, считать развитые их авторами математические методы; в некоторых случаях соответствующие уравнения оказывались даже схожими с уравнениями теории электромагнитного поля (см. [3]). Дорфман [3] в этой связи отмечает, что отсутствие ясной физической картины описываемого процесса было главной причиной того, что ни одна из моделей не была признана научным сообществом. В то же время сама идея была столь популярной, что «несмотря на трудности, учение об упругом эфире сохранялось долгое время и все выдающиеся физики XIX в. способствовали его развитию» (М. Борн) [4].

В конечном итоге решение проблемы оказалось несовместимым с традиционным механистическим описанием физических явлений и именно потому большой интерес для нас представляют попытки связать в рамках домаксвелловской электродинамики свет и электричество. В той или иной степени этим вопросом интересовались Р. Клаузиус, Б. Рيمان, К. Нейман, Г. Кирхгоф, Л. Лоренц и, наконец, В. Вебер. Активность их была, однако, существенно различной. Клаузиус, например, просто отмечал несомненное существование связи между светом и электричеством [5].

Г. Кирхгоф, получивший уравнения распространения волны тока в проводе, ограничился указанием на формальное совпадение скорости распространения такой волны со скоростью света. К. Нейман, в свою очередь, предложил рассматривать взаимодействие электрически заряженных частиц как результат пере-

дачи с конечной скоростью потенциала от одной частицы к другой. При этом вначале он предположил полную идентичность процесса передачи потенциала с распространением света, затем, однако, от своей гипотезы отказался [6].

Ближе других к истине был Риман — в качестве решения уравнения Пуассона он ввел запаздывающие потенциалы и прямо говорил об этом как об «открытии связи между светом и электричеством». В своих расчетах он, однако, допустил математическую ошибку и, обнаружив ее, решил к этому вопросу не возвращаться [6]. Безусловно, значительным был также результат Л. Лоренца, получившего уравнение, описывающее распространение волн тока в проводящей среде и предложившего отказать от принципа дальнего действия. Несомненный интерес в этом плане для нас представляют также работы Вебера. Признанный авторитет континентальной физики — Вильгельм Вебер — обсуждает вопрос о связи света и электричества практически во всех своих крупных статьях по электродинамике, начиная с работы 1846 г. [7]. Распространение света он описывает исходя из принятого им представления об электрических корпускулах как о частицах, из которых построены эфир и «весомая материя»; главное отличие светового эфира Вебера от эфира Мак-Куллаха, Коши и Стокса — в его электрическом происхождении.

Именно поэтому сравнение веберовских представлений о природе светового эфира с максвелловскими для нас представляет интерес. Заметим прежде всего, что основные работы Максвелла и Вебера были написаны примерно в одно время — в третьей четверти прошлого столетия. Характеризуя этот период, Ф. Розенбергер писал: «Когда узнали, что целые большие классы действий передаются на расстояние не непосредственно при помощи сил, а посредственно при помощи наполняющей пространство материи и что законы этих действий можно вывести не из особых сил, а из особых движений, тогда вновь стали усердно вводить в круг исследований материя, ее состав и ее внутреннюю структуру» [8].

У Вебера, по крайней мере в окончательном варианте его электрической картины мира, — и эфир, и весомая материя состоят из одних и тех же электрических корпускул. Согласно принятым им постулатам, в природе существуют два вида «элементарных» частиц — отрицательные и положительные, с массой, существенно меньшей массы отрицательных. Движение этих частиц описывается исключительно законом Вебера, справедливость закона тяготения для них «пока не доказана» [9]. Общее число положительных молекул несколько превышает число отрицательных, причем избыточные частицы равномерно распределены в пространстве. В проводнике они образуют своеобразный «электронный газ», а в непроводящих веществах и в мировом пространстве (Weltraum) — световой эфир. Структура эфира, равно как и структура весомой материи, следующим образом

определяется веберовским законом силы. Согласно определению, среднее расстояние между эфирными частицами составляет величину порядка ρ . Согласно [10], $1/8000 \text{ мм} < \rho < 1/4000 \text{ мм}$. Веберовская сила взаимодействия двух одноименно заряженных частиц критична к расстоянию между ними, когда $r \rightarrow \rho$. Если r стремится к ρ сверху, то неограниченно растет сила отталкивания, если снизу — то бесконечно возрастает сила притяжения. Поэтому малые колебания эфирных частиц около положения равновесия приводят к большим колебаниям силы, с которой они взаимодействуют. Именно в передаче колебаний от одной частицы к другой и состоит, по мнению Вебера, процесс распространения света [9]. При этом большое численное значение скорости света Вебер объясняет близостью среднего расстояния между молекулами к ρ .

Для модели строения вещества параметр ρ также весьма существен. Как мы уже отмечали, элементарными частицами у Вебера являются положительно и отрицательно заряженные электрические корпускулы. Молекулы же весомой материи (подчиняющиеся гравитационному закону) образованы, согласно определению, из равного количества невесомых электрических корпускул обоих знаков. При этом между весомыми молекулами и невесомыми корпускулами Вебер вводит промежуточную структурную единицу вещества — так называемую «неделимую» (unscheidbar) молекулу, которая состоит из одноименно заряженных невесомых корпускул, движущихся в пределах сферы диаметра ρ . Понятно, что если начальное удаление любой пары из этих молекул меньше ρ , то оно не превысит ρ никогда. Поэтому неделимая молекула именуется у Вебера также вечной (ewig). В определенном смысле это позволяет говорить о величине ρ как определяющей границу недоступной эксперименту области молекулярных движений.

Конечность скорости распространения электрического действия через веберовский световой эфир вызывает соблазн говорить о признании Вебером принципа близкого действия. Здесь, однако, уместно привести замечание Л. И. Мандельштама, сделанное им в предисловии к сборнику «Из предыстории радио»: «В том обстоятельстве, что Кирхгоф исходил из предположения о мгновенности распространения взаимодействия между зарядами и токами и пришел к конечной скорости распространения волн, противоречия нет, так как последний результат относится к скорости распространения волны плотности зарядов, а не к скорости распространения действия этих зарядов» [11, с. 15]. У Вебера конечность скорости света обусловлена конечностью величины электрической силы упругости, передача же этой силы от молекулы к молекуле предполагается бесконечно быстрой.

В то же время мы должны помнить, что взаимное удаление эфирных частиц-молекул близко к ρ ; поэтому и дальнее действие у Вебера имеет место лишь на малых, «молекулярных расстояниях». Решение классической дилеммы «близкое действие — даль-

подействие» у Вебера, таким образом, оказывается неоднозначным и связанным с принятой им моделью строения вещества и эфира. Существование такой связи отмечает в своих работах (безотносительно к Веберу) М. Хессе [12]. Она указывает, что связь эта была характерна для электродинамики в целом и период, предшествовавший появлению представления о поле в современном виде. Признание близкодействия означало при этом, что пространство между взаимодействующими объектами предполагается заполненным непрерывной средой. Предположив, однако, дискретность этой среды, мы должны будем, как пишет М. Хессе, отказаться от близкодействия в пользу дальнего действия между элементарными частицами, входящими в состав атомов среды.

Колебания в выборе между дальним действием и близкодействием были, по-видимому, характерны в той или иной степени для большинства физиков прошлого столетия. Так, известны противоречивые высказывания по этому поводу самого Ньютона. Для девятнадцатого века характерны были сомнения в справедливости принципа дальнего действия (по крайней мере в его традиционной ньютоновской формулировке) на малых, молекулярных расстояниях. Эфир Вебера также предполагает неоднозначное решение вопроса; в целом, однако, можно констатировать существование неопределенности в решении проблемы, весьма важной для классической физики.

Традиционно к наиболее существенным отклонениям электродинамики от ньютоновской картины мира относят уже упоминавшуюся выше работу Кирхгофа, связывая полученный им результат с предвосхищением теории Максвелла. В то же время сам Кирхгоф полученный результат воспринимал достаточно формально [6]. У Вебера же представление о световом эфире принципиально неотделимо от основных положений его электродинамики. Эта тема возникает еще в его первой статье по электродинамике (1846). В конце статьи он пишет: «Силы, описываемые основным законом, могут быть лишь частью силами, с которыми две электрические частицы непосредственно действуют друг на друга и потому могут зависеть от промежуточной среды... Далее я должен отметить недавнее открытие Фарадеем влияния электрических токов на вибрации света, из которого следует, что всепроникающая нейтральная электрическая среда образует всепроникающий эфир, передающий световые вибрации» [7]. Не говоря уже о влиянии экспериментов Вебера и Кольрауша на Максвелла, мы должны упомянуть и о том, что именно в электродинамике Вебера скорость света определяется как предельная скорость, что в дискуссии Вебера с Гельмгольцем обсуждалась зависимость массы от электрического потенциала [13] и что сравнение закона Вебера с законом Клаузиуса стимулировало обсуждение вопроса о статусе относительных и абсолютных скоростей и о роли эфира как системы отсчета.

В статье [7] в том же небольшом заключительном разделе,

которого мы взяли процитированную выше фразу, Вебер выдвигает еще одну гипотезу — о зависимости взаимодействия двух тел от присутствия третьего. Подобная зависимость может быть обусловлена, по его мнению, «каталитической силой» Берцелиуса. Созданный Берцелиусом образ «основанной на возбужденных электрических соотношениях» каталитической силы, весьма популярный в середине прошлого столетия [14], по-видимому, привлек Вебера возможностью использовать его как аргумент в пользу отказа от традиционного дальнего действия, в рамках которого сила зависит лишь от расстояния между взаимодействующими объектами.

Хотя и частичный и, возможно, не всегда осознанный, отказ Вебера от традиционного дальнего действия, безусловно, приближает его к близкодействию Максвелла. Непосредственным же мостиком к нему может служить, как нам кажется, ссылка на «Динамическую теорию электромагнитного поля», сделанная Вебером в работе «Электродинамические мероопределения, в частности об энергии взаимодействия» (1878 г.). Для предлагаемого им эфира, пишет Вебер, «действительны полученные Максвеллом законы движения динамической среды, главным образом закон распространения воли, совпадающий с законом распространения световых волн» [15].

Попробуем, насколько возможно, прокомментировать это замечание Вебера — иначе говоря, выявить те свойства максвелловского эфира, которые имел в виду Вебер, когда связывал свою гипотезу с той самой работой Максвелла, в которой появилось строгое определение поля. Это определение приводится в самом начале статьи: «Электрическое поле — это та часть пространства, которая содержит в себе и окружает тела, находящиеся в электрическом или магнитном состоянии». Абстрактная формулировка Максвелла, по-видимому, не устраивает, и он уточняет, что «...всегда имеется достаточное количество материи для того, чтобы воспринимать и передавать волновые движения света и тепла... эти движения относятся к эфирной субстанции, а не к плотной материи» [16]. Дополнение вполне традиционное; дальше, однако, Максвелл отклоняется от обычной механической модели эфира: «части этой среды обладают способностью быть приведенными в движение электрическими токами и магнитами...». Максвелл пишет, что «это движение сообщается от одной части среды к другой при помощи сил, возникающих от связей этих частей», что «под действием этих сил возникает определенное смещение, зависящее от упругости этих связей» [16, с. 260]. Эти уточнения вполне могли привлечь внимание Вебера; свойство эфира, о котором Максвелл говорит в достаточно общей форме, — способность к смещениям, зависящим от упругости связей частей эфира — следует у Вебера из принятой им модели автоматически. В 1870 г., в статье «Эфир», написанной для Британской энциклопедии, Максвелл выражается еще определеннее и ближе к Веберу: «Если эфир молекуля-

рен, то группировки молекул должны оставаться одного и того же типа и конфигурация групп должна только слегка изменяться во время движения» [11, с. 103].

Безусловно, не следует забывать и о существенном отличии моделей. В эфире Максвелла распространяются волны, «состоящие полностью из магнитных возмущений, причем направления намагничивания находится в плоскости волны» [16, с. 320]. У Вебера же распространяется чисто электрическое возмущение и волна может быть как продольной, так и поперечной [9]. Справедливости ради заметим, что и Максвелл не безусловно отрицает существование продольных колебаний. Он пишет: «С другой стороны, обе науки (электромагнетизм и оптика.— Б. Б.) бессильны, когда к ним обращаются с вопросом о подтверждении или отрицании существования продольных колебаний» [16, с. 323]. В данном случае, впрочем, расхождения во взглядах вполне естественны и объяснимы, а вот близость представлений двух в целом альтернативных исследовательских программ кажется весьма впечатляющей.

Сходство с Вебером прослеживается и в отношении Максвелла к дилемме «дальнодействие — близкодействие». По его собственным словам, Максвелл стремится свести действие на расстоянии к «игре молекулярных сил» [17] и его предположение о молекулярности эфира в сущности оставляет открытым вопрос о том, следует ли эти силы рассматривать как дальнодействующие или как близкодействующие. В «Динамической теории...», например, Максвелл пишет о своем желании «объяснить взаимодействие между удаленными друг от друга телами без допущения существования сил, способных непосредственно действовать на заметных расстояниях» [16, с. 253]. Дальнодействие Максвелл, таким образом, считает невозможным только на больших расстояниях. Для малых расстояний вопрос, видимо, остается открытым. Неопределенность Максвелла в решении этой дилеммы отмечают биографы Герца: «Изложение Максвелла колеблется между представлениями дальнодействия, из которых он исходил, и представлениями близкодействия, к которым он пришел» [18].

В конечном счете дилемму «близкодействие — дальнодействие», неразрешимую в рамках «силового» подхода, связанного с выбором определенной модели строения вещества, Максвелл переформулирует с помощью представления об энергии. С точки зрения теории близкодействия энергия взаимодействия локализована в пространстве, окружающем взаимодействующие тела — иначе говоря, в электромагнитном поле. Здесь программы Максвелла и Вебера расходятся, так как новизна максвелловского подхода отчасти и «состояла в том, что он показал возможность поставить и разрешить вопрос о природе взаимодействия безотносительно к вопросу о структуре вещества» [19].

Следует в заключение отметить, что тема «Максвелл и Вебер» не исчерпывается высказанными здесь соображениями.

Внимательное прочтение работ Вебера и его (и Максвелла) современников — Клаузиуса, Гельмгольца, Неймана и многих других может прояснить сложный процесс восприятия идей Максвелла в континентальной Европе. Можно предположить, что «размытость» программы Вебера, означавшая в нашем случае отсутствие окончательного выбора между близкодействием и дальнодействием, была одним из тех факторов, которые и определили последовавшее за опытами Герца быстрое признание теории электромагнитного поля.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дж. Максвелл. Статьи и речи. М., 1968, с. 18.
2. MacCullagh J. Trans. Roy. Irish. Acad., 1848, vol. 21, p. 17.
3. Дорфман Я. Г. Всемирная история физики. М., 1974, ч. 2, с. 24.
4. Борн М. Оптика. Харьков; Киев, 1937, с. 10.
5. Clausius R. Über einige Bemerkungen des C. Neumann in Bezug auf Electrodynamik.— Ann. Phys. 1881, Bd. 12, Neue folge, p. 639.
6. Rosenfeld L. Velocity of Light and evolution of electrodynamics.— Nuovo Cimento, Suppl., 1957, Ser. X, vol. 2, p. 1630—1669.
7. Weber W. Elektrodynamische Maasbestimmungen. inbes. über allgemeine Grundgesetz des elektrischen Wirkung (1846) Weber's Werke. Bd. 3, p. 169.
8. Розенбергер Ф. История физики. М.; Л., 1936, вып. 2, ч. 3.
9. Weber W. Elektrodynamische Maasbestimmungen, insbesondere über den Zusammenhang des elektrischen Grundgesetzes mit dem Gravitationsgesetz (1891). Weber's Werke. B., 1894, Bd. 4, p. 479—525.
10. Weber W. Elektrodynamische Maasbestimmungen, inbes. über das Princip der Erhaltung der Energie.— In: Weber's Werke, 1871, Bd. 4, S. 247.
11. Из предьстории радио. М., 1948.
12. Hesse M. Action at a distance in dassical physics.— ISIS, 1955, vol. 46, p. 337—353.
13. Weber W. Elektrodynamische Maasbestimmungen, inbes. über die Bewegungen der Elektrizität in Körpern von molekular konstitution.— Ann. Phys., 1875, Bd. 156, p. 329—334.
14. Соловьев Ю. И., Куринной В. И. Якоб Берцелиус. М., 1981.
15. Weber W. Elektrodynamische Maasbestimmungen, inbes. über die Energie der Wechselwirkung (1878). Weber's Werke, Bd. 4, p. 395.
16. Максвелл Дж. Избранные сочинения по теории электромагнитного поля. М., 1954.
17. Maxwell J. C. Lehrbuch der Elektrizität und des Magnetismus. B., 1883, Bd. 1, S. 163.
18. Григорьян А. Т., Вальцев А. Н. Генрих Герц. М., 1968, с. 217.
19. Московский А. В. Формирование понятия «близкодействие» в работах Фарадея и Максвелла.— В кн.: История и методология естественных наук. Физика, 1978, с. 116.

СРАВНЕНИЕ РАЗЛИЧНЫХ ФОРМ СИСТЕМЫ УРАВНЕНИЙ МАКСВЕЛЛА

Созданную Джеймсом Клерком Максвеллом теорию электромагнитного поля нельзя рассматривать без учета прошлого, настоящего и будущего. Считая утверждение Г. Герца, «Теория Максвелла — это система уравнений Максвелла» [4] отождествлением этих понятий, будем говорить о системах уравнений. Это даст возможность наиболее полно и притом кратко осветить упомянутое рассмотрение.

Обратимся к фактам. Известно, что: 1. Д. К. Максвелл свою теорию электромагнитного поля изложил в четырех работах [8]¹, представив ее системами уравнений. Эти системы не являются одинаковыми. Как проследить эволюцию взглядов Д. К. Максвелла? 2. Г. Герц был уверен в эклектизме максвеллова «Трактата» и стремился дать [3, с. 218] и дал свое изложение электродинамики, представив ее своими системами уравнений [17, 18]. Одинаковы ли эти системы с системами Д. К. Максвелла? Если нет, то чем они отличаются? 3. О. Хевисайд во многом способствовал распространению теории Максвелла своей популяризаторской деятельностью [16], и среди популяризаторов этой теории его называют «скорее всего первым» [2]. Насколько полно им передана суть теории Максвелла?

4. Г. А. Лоренц при создании теории электронов опирался на теорию Максвелла, исходил из нее [7]. Однако у него же находим: «Мы будем пользоваться этими уравнениями не в той, несколько сложной форме, в которой они даны в «Трактате» Максвелла, но в том более ясном и концентрированном виде, который им придали Хевисайд и Герц» [7, с. 21]. Справедливости ради, забегаая вперед, уже здесь необходимо отметить, что именно Г. А. Лоренц меньше всех отошел от Максвелла или больше всех приблизился к нему в своем понимании и применении его уравнений. Причины, по которым Г. А. Лоренц не стал пользоваться формой уравнений из «Трактата», очевидны. Но сумели ли Г. Герц и О. Хевисайд, придав уравнениям «ясный и концентрированный вид», сохранить содержание, которое в них вкладывал Д. К. Максвелл? Это предстоит выяснить.

5. А. Эйнштейну для создания специальной теории относительности [15] потребовались две предпосылки — принцип относительности и постоянство скорости света — и теория Максвелла. Выражаясь дословно, «эти две предпосылки достаточны,

чтобы, положив в основу теорию Максвелла для покоящихся тел (курсив мой. — Н. М.), построить простую, свободную от противоречий электродинамику движущихся тел» [15, с. 7]. Почему необходимо было брать теорию Максвелла для покоящихся тел? Что, теория Максвелла не содержит в себе электродинамику движущихся тел? Это требует выяснения.

Не является очевидным, что прочно утвердившаяся в физике и ее разделах (см., напр., [1, 6, 10, 11, 14]) форма системы, которую называют общепринятой [3, с. 222], содержащая четыре фундаментальных уравнения

$$[\nabla \mathbf{H}] = \partial \mathbf{D} / \partial t + \delta n \rho, \quad (1)$$

$$[\nabla \mathbf{E}] = -\partial \mathbf{B} / \partial t, \quad (2)$$

$$\nabla \mathbf{D} = \rho, \quad (3)$$

$$\nabla \mathbf{B} = 0, \quad (4)$$

соответствует системе общих уравнений электромагнитного поля Максвелла и, что самое важное, полностью выражает суть его теории, его взглядов.

Чтобы ответить на все поставленные выше вопросы, требуется провести сравнение различных форм системы, как данных самим Максвеллом, так и данных или использованных после него и используемых в настоящее время. Такое сравнение даст возможность к тому же определить, какой формой целесообразно пользоваться в будущем, если следовать строго за Д. К. Максвеллом.

Для сравнения составим, соблюдая хронологию, таблицу, содержащую формы уравнений из работ I, II, III, IV, [17], [16], [18]², [15] — исходную и преобразованную, [7] — для эфира, весомых тел и движущихся тел, [14] и [10]. Сравнение систем из I—IV показывает, что за систему уравнений Максвелла следует брать общие уравнения электромагнитного поля из «Трактата». Эта система будет «опорной» и в таблице.

По Максвеллу [8, с. 489—490], «основными векторами, которые мы должны рассмотреть, являются: $\mathbf{r}$, $\mathbf{A}$, $\mathbf{B}$, δ , $\mathbf{D}$, $\mathbf{E}$, механическая сила $\mathbf{F}$, $\mathbf{V}$ или $\dot{\mathbf{r}}$, $\mathbf{H}$, $\mathbf{I}$, $\delta_{\text{лр}}$. «Мы также имеем следующие скалярные функции: электрический потенциал ϕ , магнитный потенциал (там, где он существует) Ω , электрическая плотность ρ , плотность «магнитного вещества» $\mathcal{M}$, а также «величины, указывающие на физические свойства среды в каждой точке» — ϵ , γ , μ .

Система общих уравнений электромагнитного поля, согласно изложенному в гл. VIII, IX и XX «Трактата», имеет вид, представленный в табл. 1 (IV).

Единственное уравнение, которое не было написано Д. К. Максвеллом в приводимой здесь форме, — это уравнение (e), выражающее конечность скорости распространения элект-

² Система из [18] сверена с изложенным в [9].

* Главная геофизическая обсерватория им. А. И. Воейкова, Ленинград.

¹ Имеются в виду работы: «О фарадеевых силовых линиях», «О физических силовых линиях», «Динамическая теория электромагнитного поля» и «Трактат об электричестве и магнетизме». В дальнейшем мы их обозначим соответственно I, II, III, IV.

Таблица 1
Сравниваемые формы системы уравнений Максвелла

Даны Д. К. Максвеллом			в работах		Даны, использованы, преобразованы или используются другими авторами
I (1855—1856)	II (1861—1862)	III (1864)	IV (1873)	Г. Герцем [17] (1884)	
$[\nabla \mathbf{H}] = \delta$ $\nabla \mathbf{D} = 4\pi \rho$ (C) $\mathbf{E} = \mathbf{E}_{\text{ст}} - \nabla U$ (A) $\delta_{\text{пр}} = \gamma \mathbf{E}$ (B) $\mathbf{B} = [\nabla \mathbf{A}]$ $\mathbf{E} = -\dot{\mathbf{A}}$ $\varphi = \int_V \frac{\rho}{r} dv$ $\nabla \mathbf{B} = 0$ $\nabla \delta_{\text{пр}} = 0$	$[\nabla \mathbf{H}] = \delta$ (112) $[\nabla \mathbf{E}] = -\partial \mathbf{B} / \partial t$ (54) $\nabla \mathbf{D} = \rho$ (115) $\mathbf{E} = [\nabla \mathbf{B}] - \dot{\mathbf{A}} - \nabla \varphi$ (77) $\mathbf{f} = \rho \mathbf{H} + \frac{\mu}{2} \nabla H^2 +$ $+ [\delta \mathbf{B}] - \nabla P$ $\mathbf{D} = \epsilon_0 \mathbf{E} + \mathbf{P}$ $\delta = \dot{\mathbf{D}} + \gamma \mathbf{E}$ $\delta_{\text{см}} = \dot{\mathbf{D}}$ $[\nabla \mathbf{A}] = \mu \mathbf{H}$ (53) $\nabla \mathbf{A} = 0$ $\nabla \delta_{\text{пр}} + \partial \rho / \partial t = 0$	$[\nabla \mathbf{H}] = \delta$ (C) $\nabla \mathbf{D} = \rho$ (G) $\mathbf{E} = [\nabla \mathbf{B}] - \dot{\mathbf{A}} - \nabla \varphi$ (D) $\mathbf{D} = \epsilon \mathbf{E}$ (E) $\delta = \dot{\mathbf{D}} + \gamma \mathbf{E}$ (A) $\delta_{\text{пр}} = \gamma \mathbf{E}$ (F) $\delta_{\text{см}} = \dot{\mathbf{D}}$ $\mathbf{B} = [\nabla \mathbf{A}]$ (B) $\nabla \delta_{\text{пр}} + \partial \rho / \partial t = 0$ (H)	$[\nabla \mathbf{H}] = \delta$ (E) $\nabla \mathbf{D} = \rho$ (J) $\mathbf{E} = [\nabla \mathbf{B}] - \partial \mathbf{A} / \partial t - \nabla \varphi$ (B) $\mathbf{f} = [\delta \mathbf{B}] + \nabla \mathbf{D} \mathbf{E} - m \nabla \Omega$ (C) $\mathbf{D} = \epsilon_0 \mathbf{E} + \mathbf{P}$ (F) $\delta = \dot{\mathbf{D}} + \gamma \mathbf{E}$ (H) $\delta_{\text{пр}} = \gamma \mathbf{E}$ (G) $\delta = \left(\gamma + \epsilon \frac{\partial}{\partial t} \right) \mathbf{E}$ (I) $\mathbf{B} = [\nabla \mathbf{A}]$ (A) $\mathbf{B} = \mu \mathbf{H}$ (L) $\mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{H} + 4\pi \mathbf{J}$ (D) $\sigma = \text{Div } \mathbf{D}$ (K) $\delta = \gamma \mathbf{E} + \epsilon (\partial \mathbf{E} / \partial t)$ (I*) $\mathbf{A} = \frac{\mu}{4\pi} \int_V (\delta / r) dv$ (a) $\mathbf{H} = -\nabla \Omega$ (b) $m = \nabla \mathbf{I}$ (c) $[\nabla \mathbf{B}] = \mu \delta$, при $v = \text{const}$ (с. 486) (d) $t' = t - r / V_{\text{эмб}}$ (e) $V_{\text{эмб}} = (\epsilon \mu)^{-1/2}$ (f) $w = w_0 + w_m = (\epsilon E^2 + \mu H^2) / 2$ (i) $\mathbf{E}' = [\nabla \mathbf{B}] - \frac{\partial \mathbf{A}'}{\partial t} - \nabla (\varphi + \varphi')$ (B') $\frac{\partial \mathbf{A}'}{\partial t} = \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} - [\nabla \mathbf{E}] - \nabla \varphi'$ (g) $-\varphi' = (\mathbf{A} \mathbf{V}_e)$ (h)	$\left. \begin{aligned} c[\nabla \mathbf{H}] &= \epsilon \partial \mathbf{E} / \partial t \\ c[\nabla \mathbf{E}] &= -\partial \mathbf{H} / \partial t \end{aligned} \right\} (12)$ $\left. \begin{aligned} \Delta \mathbf{A} - \partial^2 \mathbf{A} / \partial t^2 &= 0 \\ \nabla \mathbf{A} &= 0 \\ \Delta \mathbf{A}_m - \partial^2 \mathbf{A}_m / \partial t^2 &= 0 \end{aligned} \right\} (11)$ $\nabla \mathbf{A}_m = 0$ $\mathbf{H} = c^{-2} \nabla \mathbf{A}$ (9) $\mathbf{E} = c^{-2} \partial \mathbf{A} / \partial t$ (10) $\left. \begin{aligned} \Delta \mathbf{H} - \partial^2 \mathbf{H} / \partial t^2 &= 0 \\ \Delta \mathbf{E} - \partial^2 \mathbf{E} / \partial t^2 &= 0 \end{aligned} \right\} (13)$ $\nabla \mathbf{H} = 0$ $\nabla \mathbf{E} = 0$ $\mathbf{E} \delta_{\text{пр}} = Q$ (4) $\mathbf{W}_0 = \mathbf{E} \mathbf{D} / 2$ (7) $\mathbf{E} \delta = Q + \partial \mathbf{W}_0 / \partial t$ (9) $\mathbf{W}_m = \mathbf{H} \mathbf{B} / 2$ (11) $\delta_m = \partial \mathbf{B} / \partial t$ (12) $\delta_m = \gamma_m \mathbf{H} + \mu \partial \mathbf{H} / \partial t$ (13) $\mathbf{H} \delta_m = \gamma_m \mathbf{H}^2 + \partial \mathbf{W}_m / \partial t$ (14) $\mathbf{I} = -\nabla \Omega$ (18) $\mathbf{h} = [\nabla \mathbf{V}]$ (18a) $[[\nabla (1/\mu)][\nabla \mathbf{E}]] + \gamma (\partial \mathbf{E} / \partial t) + \epsilon (\partial^2 \mathbf{E} / \partial t^2) = 0$ (30)	
Основные векторы: $\mathbf{r}$, $\mathbf{A}$, $\mathbf{B}$, δ, $\mathbf{D}$, $\mathbf{E}$, $\mathbf{F}$, $\mathbf{V}$ или $\dot{\mathbf{r}}$, $\mathbf{H}$, $\mathbf{J}$, $\delta_{\text{пр}}$. Скалярные функции: электрический потенциал — φ, магнитный потенциал (там, где он существует) — Ω, электрическая плотность — ρ, плотность «магнитного вещества» — m. Величины, указывающие на физическое состояние среды в каждой точке — ϵ, γ, μ — скалярные для изотропных сред и тензорные — для анизотропных.			Уравнения отнесены к системе координат покоящейся движущейся		

Даны, использованы, преобразования	
О. Хеви айдом [16] (1885)	Г. Герцем [18] (1890)
$[\nabla H] = \delta$ (15) $[\nabla E] = -\partial B / \partial t$ (20) $D = \varepsilon E$ (6) $\delta = \varepsilon \frac{\partial E}{\partial t} + \gamma E$ (8) $\delta_{np} = \gamma E$ (1) $\delta_{cm} = \partial D / \partial t$ $B = \mu H$ (10) $\nabla \delta = 0$ (17)	$[\nabla H] = \partial D / \partial t + V \cdot \nabla D - [\nabla [VD]] + \delta_{np}$ (1b) $[\nabla E] = -\partial B / \partial t - V \cdot \nabla B + [\nabla [VB]]$ (1a) $\nabla D = \rho$ $\delta = \partial D / \partial t + V \cdot \nabla D + \gamma E$ (с. 378) $\delta_{np} = \gamma E$ $\delta_{cm} = \partial D / \partial t$ $\delta_R = V \cdot \nabla D$ $\left. \begin{aligned} E_1 &= [VB] \\ H_1 &= [VD] \end{aligned} \right\} (2)$ $\nabla B = 0$ $\nabla \delta_{np} + \partial \rho / \partial t = 0$
$[\nabla H] = \gamma E + \varepsilon (\partial E / \partial t)$ (19) $[\nabla (H - h)] = \gamma E + \varepsilon (\partial E / \partial t)$ (22) $S = [(E - e)(H - h)]$ $e\delta + h\delta_m = E\delta + H\delta_m + [(H - h)[\nabla (E - e)] - (E - e)[\nabla (H - h)]]$ $E\delta + H\delta_m = \gamma E^2 + \partial W_s / \partial t + \partial W_m / \partial t$ $e\delta + h\delta_m = Q + \partial W_s / \partial t + \partial W_m / \partial t + \nabla S$ $[[1/\mu][\nabla (e - E)]] = [\nabla h] + \gamma (\partial E / \partial t) + \varepsilon (\partial^2 E / \partial t^2)$ $[[\nabla (1/\mu)][\nabla E]] + \gamma (\partial E / \partial t) = 0$ $[[\nabla (1/\gamma)][\nabla H]] + \mu (\partial H / \partial t) = 0$	$[\nabla E] = \delta_m$ (21) $E = [VB]$ (21a) $[\nabla (e - E)] = \gamma_m H + \mu (\partial H / \partial t)$ (23) (27) (24) (25) (28) (29) (31) (32)

или используются другими авторами

А. Эйнштейном [15] (1905 г)	Г. А. Лоренцом [7] (1909 г)	
	a	б
$[\nabla H] = c^{-1} (\partial E / \partial t + \rho V)$ $[\nabla E] = -c^{-1} \partial H / \partial t$ $\nabla E = \rho$ $[\nabla H'] = c^{-1} (\partial E' / \partial t + \rho' V')$ $[\nabla E'] = c^{-1} \partial H' / \partial t$ $\rho' = \beta (1 - V_0 V / c^2) \rho$ $\beta = (1 - (V_0 / c)^2)^{-1/2}$	$[\nabla h] = \dot{d} + \rho V$ (19) $[\nabla \dot{d}] = -\dot{h} / c$ (20) $\nabla d = \rho$ (17) $f = d + c^{-1} [\nabla h]$ (23) $\nabla h = 0$ (18) $c = \dot{d}$ (1) $\nabla d = 0$ (2) $\nabla h = 0$ (3) $[\nabla h] = c / c = \dot{d} / c$ (4) $c = \dot{d} + \rho V$ (22)	$[\nabla H] = c / c$ (10) $[\nabla E] = -\dot{B} / c$ (11) $D = \varepsilon E$ (12) $c = \varepsilon \frac{\partial E}{\partial t} + \gamma E$ (15) $\delta_{np} = \gamma E$ (14) $C = \dot{D}$ (13) $B = \mu H$ (16) $\nabla B = 0$ (9) $\nabla C = 0$ (8)
	$\nabla d' = (1 - V_0 V_r / c^2) \rho$ (100) $\nabla h' = 0$ (101) $[\nabla h'] = \dot{d}' / c + \rho V_r$ (102) $[\nabla d'] = -\dot{h}' / c$ (103) $\varphi' = \frac{1}{4\pi} \int_V \frac{1}{r} \rho dv$ (104) $d' = -\frac{\dot{a}'}{c} - \nabla \varphi' + \frac{\nabla (V_0 a')}{c}$ (106) $a' = \frac{1}{4\pi c} \int_V \frac{1}{r} (\rho V_r) dv$ (105) $h' = [\nabla a']$ (107)	

Таблица 1 (окончание)

Даны, использованы, преобразованы или используются другими авторами		
Р. Фейнманом [14]	Л. Р. Нейманом и К. С. Демирчяном [10]	
$c^2 [\nabla \mathbf{B}] = \delta / \epsilon_0 + \partial \mathbf{E} / \partial t$	(1) $[\nabla \mathbf{H}] = \delta$	(1)
$[\nabla \mathbf{E}] = -\partial \mathbf{B} / \partial t$	(2) $[\nabla \mathbf{E}] = \partial \mathbf{B} / \partial t$	(2)
$\nabla \mathbf{E} = -\rho / \epsilon_0$	(3) $\nabla \mathbf{D} = \rho$	(3)
$\mathbf{E} = -\partial \mathbf{A} / \partial t$	(4) —	(4)
$\nabla \mathbf{B} = 0$	(5) $\nabla \mathbf{B} = 0$	(5)
	$\delta = \partial \mathbf{D} / \partial t + \rho \mathbf{V} + \gamma \mathbf{E}$	(6)
	$\delta_{\text{пр}} = \gamma \mathbf{E}$	(7)
	$\delta_{\text{см}} = \partial \mathbf{D} / \partial t$	(8)
$\mathbf{B} = [\nabla \mathbf{A}]$	(6) $\delta_{\text{к}} = \rho \mathbf{V}$	(9)
$\Phi(1, t) = \int_V \frac{\rho(2, t - r_{12}/c) dv}{4\pi\epsilon_0 r_{12}}$	(7) $\mathbf{B} = \mu \mathbf{H}$	(10)
$\mathbf{A}(1, t) = \int_V \frac{\delta(2, t - r_{12}/c) dv}{4\pi\epsilon_0 r_{12}}$	(8) $\mathbf{D} = \epsilon_0 \mathbf{E} + \mathbf{P}$	
Представленные здесь уравнения в [14, гл. 21, п. 3] делятся на уравнения Максвелла и их решения. В гл. 15, п. 4 обсуждается вопрос: «В или А?».		
Двойная черта указывает на принятое деление системы уравнений на основные и на уравнения связи, материальные уравнения. То же у Г. А. Лоренца. Д. К. Максвелл такого разделения не делает.		

электромагнитных возмущений. Оно написано исходя из того, что «состояние в точке 0 в каждый момент времени зависит от состояний, существовавших на расстоянии Vt во время, предшествующее моменту t , т. е., что возмущение распространяется через среду со скоростью V » [8, с. 555] и согласно общепринятому ныне (см., напр., [10, с. 340]).

Уравнения (A) — (I*), (a) — (c) содержатся в гл. IX, а уравнения (d) — (h) и (B') включены из глав VIII и XX «Трактата». Такое представление позволило провести сравнительный анализ и выявить различия форм системы. Основные из них состоят в следующем.

1. Второе уравнение у Максвелла содержится только в системе из [8, II] и отсутствует во всех остальных. Зато оно содержится во всех формах системы, используемых с 1884 г.

2. Общие формы уравнений напряженности электрического поля, отнесенные к покоящейся и движущейся в пространстве системам координат, равно как и уравнение (C) объемной плотности электромагнитной силы, содержатся только у Д. К. Максвелла и отсутствуют во всех других, используемых с 1884 г. Частные случаи двух последних содержатся у Г. А. Лоренца (уравнения (106) и (21) из [7].—Н. М.). Из современных форм следует отметить форму системы из [14], которая, хотя и своеобразным образом, но сразу представляет частный случай уравнения (B) и уравнение векторного потенциала электрического тока (по терминологии Д. К. Максвелла.—Н. М.).

3. В системах Д. К. Максвелла не дано выражения для тока конвекции, хотя в [8, с. 528—529] речь идет и об этом токе и о магнитной силе, создаваемой им. Больше того, исходя из этого Г. Роуланд ставил свои опыты (1878). И «за десять лет до открытия Герцем электромагнитных волн результат работы Роу-ланды дал независимое, хотя и менее драматическое подтверждение теории электромагнитного поля Максвелла» [12, с. 220]. И тем не менее включение уравнения тока конвекции в систему уравнений связано с именами Г. Герца (см. уравнение (1, б) и уравнение на с. 378 из [18]), Г. А. Лоренца (см. уравнения (19), (22) и (102) из [7]) и О. Хевисайда [4]. В нашей таблице нет системы О. Хевисайда, в которой содержится это уравнение, и мы поэтому воспользуемся из [4] констатацией факта, что, введя ток конвекции после Г. А. Лоренца, «Хевисайд достиг принципиально нового. Он показал возможность своеобразного синтеза микро- и макроэлектродинамики, приводящего к расширению круга решаемых задач теории электромагнитного поля». Этот ток содержится и в системе из [10].

4. В системах Д. К. Максвелла отсутствует магнитный ток, а у Г. Герца, О. Хевисайда — присутствует.

5. В «Трактате» содержится самое общее выражение электромагнитного возмущения — уравнение (d). Оно содержится и в [14].

6. В системе Г. Герца из [18] уравнение (1, б) в своей правой части содержит четыре члена, третий из которых определен у Г. Герца уравнением (2), а у О. Хевисайда — уравнением (18, а). Другие из представленных здесь форм системы не содержат их. Характеристика системы из [18] дана в [9].

7. В системе из [8, IV] содержатся три определения вектора **B** магнитной индукции, выраженные уравнениями (A), (L) и (D). Во всех других формах системы этого нет. В них нет и определения напряженности магнитного поля, выраженной через магнитный потенциал, и плотности «магнитного вещества».

Таковы основные конкретные различия представленных форм системы уравнений Максвелла. Мы можем охарактеризовать так: система общих уравнений Д. К. Максвелла и формы «системы уравнений Максвелла», используемые с 1884 г., не идентичны. Последние содержат в себе меньше, чем первая, и в то же время в первой меньше условностей, чем в последних. Принципиально важными являются расхождения, изложенные в пп. 1—3. Сосредоточим на них внимание.

Рассмотрим вопрос об «исчезновении» у Максвелла «второго уравнения» и о постоянном его присутствии во всех системах, начиная с 1884 г. Для Максвелла, видимо, такого вопроса не было. Нам придется начать с сути. «Второе уравнение» может быть получено применением операции ротора к уравнению (B). Но такая операция влечет за собой автоматическое исключение третьего члена в силу того, что ротор градиента потенциала тождественно равен нулю и принудительному исключению первого члена — векторного произведения векторов скорости и магнитной индукции, полагая их либо параллельными друг другу, либо равным нулю одного из них. А это неизбежно влечет за собой и разрушение, и исключение из системы всего уравнения (B), определяющего напряженность электрического поля и как физическое явление, и как физическую величину. Но напряженность электрического поля, будучи связана с векторами **A**, **B**, **V**, **δ**, скалярными функциями ϕ и ρ и величинами ϵ , γ , μ , является действительно фундаментальной величиной в теории электромагнитного поля Максвелла и с этой точки зрения не могла быть исключена из системы.

Обратимся к высказываниям Максвелла. Допуская возможность комбинирования величин с целью исключения некоторых из них, он в то же время отмечал, что в его стадии «исследования устранения величины, выражающей полезную идею, скорее было бы потерей, чем выигрышем» [8, IV, с. 485]. Трудно предположить, чтобы, считая «второе уравнение» полезной идеей, он опустил его. Далее. Так как вектор **B** есть вектор, производный от **A** (см. [8, с. 479] и уравнения ([8, с. 73]), (55), (B) и (A) из I—IV), то в определенном смысле можем считать, что «второе уравнение» является производным от уравнения (B) для **E**. И при наличии последнего «второе уравнение» становится, по меньшей мере, необязательным.

По утверждению популяризатора и знатока теории Максвелла Л. Больцмана (см. [5]), элемент случайности в позднейших открытиях Максвелла должен быть исключен [8, с. 90—91]. Все это дает основание полагать, что Максвелл сознательно не включил «второе уравнение» в поздние системы в качестве фундаментального.

Какие причины обусловили введение Г. Герцем и О. Хевисайдом «второго уравнения»? В конечном счете одна — соображения симметрии (см., например, [17, с. 88; 16, уравнения (19) и (20); 2, с. 312]), требовавшей двойной формы представления электромагнетизма. Об асимметрии электродинамики Максвелла см. [15, с. 7].

Все ли принимали и принимают «второе уравнение» или всю «первую пару уравнений» Максвелла [6] без оговорок? Нет. Дж. Дж. Томсон в 1892 г. отмечал: «Этот метод исследования электромагнитного поля имеет преимущество простоты. Его особенно защищал Хевисайд. Однако он уступает в общности методу, указанному в тексте («Трактата».— Н. М.), который может быть применен даже в тех случаях, когда токи текут не в замкнутых цепях» [8, с. 475]. Оговорки имеются в [13, с. 396] и в [6, с. 84]. Возврат к системе из «Трактата» возвратит общность метода и приведет к исчезновению оговорок.

Изложенное в п. 3 обязывает в целях приведения в соответствие формы и содержания ввести в систему из «Трактата» уравнение плотности тока конвекции, т. е. уравнение (H) записывать в виде

$$\delta = \partial \mathbf{D} / \partial t + \nabla \mathbf{D} \cdot \mathbf{V} + \gamma \mathbf{E}. \quad (5)$$

Введение тока конвекции учитывает проделанное после Максвелла, позволяет получить из (C) силу Лоренца и перейти к рассмотрению электродинамики движущихся тел.

Полагая в (C) $m = \partial \mathbf{D} / \partial t = \gamma \mathbf{E} = 0$, получаем из него силу Лоренца

$$\mathbf{f} = \rho \{ [\mathbf{V} \mathbf{B}'] + \mathbf{E} \}. \quad (6)$$

Отметим теперь, что уравнения (B'), (g) и (h) даны в п. 600 «Трактата». Исходя из теории движения твердого тела, Максвелл оперировал с вектором полной скорости. Используя эти и другие уравнения его системы, можно получить всю электродинамику движущихся тел Г. А. Лоренца — уравнения (100) — (107) из [7].

Ограничимся выводом уравнения (100), предварительно указав, что если рассматривать только ток конвекции и относительную скорость, то из (a) получим (105). Далее имеем

$$\begin{aligned} \Phi + \Phi' &= \frac{1}{4\pi\epsilon} \int_V \frac{\rho}{r} dv - \left(\frac{\mu}{4\pi} \int_V \frac{\rho}{r} \mathbf{V}'_1 dv \right) (\mathbf{V}'_0 + [\omega \mathbf{r}']) = \\ &= \frac{1}{4\pi\epsilon} \int_V \left\{ \left(1 - \frac{\mathbf{V}' \mathbf{V}_0}{c^2} \right) \rho \right\} \frac{dv}{r} \Big|_{\omega=0}. \end{aligned} \quad (7)$$

Выражение, заключенное в фигурные скобки, можно представить в виде

$$\nabla D' = \left(1 - \frac{V'V_0}{c^2}\right) \rho,$$

(8)

в точности совпадающим с уравнением (100) из [7].

Из изложенного с очевидностью вытекает, что в системе Максвелла даны уравнения не только «в духе электродинамики Герца» (см. Примечания к II в [8, с. 649]. — Н. М.), но в ней содержится не меньше, чем в электродинамике движущихся тел Г. А. Лоренца. Отсюда же следует, что у Д. К. Максвелла уже была электродинамика движущихся тел, но А. Эйнштейн при создании СТО ее не учитывал.

Получив ответы на основные поставленные вопросы, перейдем к выводам. Они сводятся к следующему.

1. Общеупотребительная ныне система уравнений Максвелла: а) не соответствует ни одной из систем, данных в работах Д. К. Максвелла; в общности она уступает трем последним, поскольку не содержит в себе напряженности электрического поля, выраженной уравнением (В), и объемной плотности электромагнитной силы, выраженной уравнением (С); б) по наличию «второго фундаментального» уравнения она совпадает лишь с системой, данной в одной, второй работе, и не совпадает с другими, поздними. «Трактат» — работа Д. К. Максвелла, вышедшая через одиннадцать лет после второй, — является венцом его работ, в которой теория электромагнитного поля представлена в наиболее законченной форме и которую, следовательно, необходимо принимать за основу, не содержит «второго фундаментального» уравнения Максвелла. И это позволяет утверждать, что уравнения Максвелла в их общеупотребительной форме в определенном смысле не принадлежат Д. К. Максвеллу, а скорее Г. Герцу и О. Хевисайду [3]; в) имея в своем составе два — первое и второе — фундаментальных уравнения, она не представляется единой, разрушает целостность и логическую стройность теории Д. К. Максвелла об электромагнетизме и не полностью соответствует содержанию, вкладываемому им в свои уравнения.
2. В силу всего этого она должна быть заменена системой общих уравнений электромагнитного поля, данной Д. К. Максвеллом в «Трактате», с включением в нее тока конвекции и указанием дополнений, соответствующих идее Д. К. Максвелла о внешних связях электромагнетизма с другими науками [8, с. 346].

Эта система является наиболее полной по сравнению со всеми остальными, содержит в себе уравнения, отнесенные как к неподвижной, так и к движущейся в пространстве системам координат и оди-

наково справедлива для ан- и изотропных сред в любом из их фазовых состояний.

В ней фундаментальным, описывающим двуединый электромагнитный процесс, является закон полного (электрического) тока

$$[\nabla H] = (\partial D / \partial t + \nabla D \cdot V + \gamma E) = \delta,$$

формальным следствием которого является принцип непрерывности электрического тока. Из последнего, как частный случай, получается закон сохранения электрического заряда (по принятой терминологии).

Одной из основных величин является напряженность электрического поля, через которую проявляется связь электромагнетизма с общей динамикой, термодинамикой, химической термодинамикой и статистической физикой (явлениями тепла, света, химическим действием и внутренним строением тел). Ее уравнение

$$E = [VB] - \partial A / \partial t - \nabla \varphi$$

позволяет четко разграничивать индуцированное и стороннее электрические поля и вместе с тем (в рамках классической физики) оставляет это понятие единым, дает единое полевое представление.

Отсутствие в системе «второго уравнения Максвелла» ни в коем случае не означает отмены закона электромагнитной индукции, поскольку напряженность индуцированного электрического поля определяется двумя первыми членами, что приводит лишь к иной форме выражения этого закона.

3. Имеются три пути получения уравнений, описывающих электромагнитные явления в системе координат, движущейся в пространстве: Д. К. Максвелла, Г. А. Лоренца и А. Эйнштейна. «Появление» точки зрения Д. К. Максвелла по-новому ставит этот вопрос. Путь получения этих уравнений Д. К. Максвеллом нигде и никем не рассматривался, он не упоминается даже историками. Рассмотрение этого пути необходимо. И оно неизбежно заставит затронуть существующие, о чем, в частности, свидетельствует возможность получения уравнений электродинамики движущихся сред Г. А. Лоренца как частного случая из аналогичных уравнений Д. К. Максвелла. Исходя из этого можно предположить, что центральным вопросом такого рассмотрения станет сравнение точек зрения и путей получения уравнений Д. К. Максвелла и А. Эйнштейна.

4. Научное наследие Д. К. Максвелла заслуживает большего внимания, чем ему уделялось и уделяется до сих пор.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ахиезер А. И., Берестецкий В. Б. Квантовая электродинамика. М.: Наука, 1969. 623 с.
2. Борк А. М. Максвелл, ток смещения и симметрия.— В кн.: Д. К. Максвелл. Статьи и речи. М., 1968, с. 305—317.
3. Григорьев А. Т., Вязцев А. Н. Генрих Герц. М.: Наука, 1968. 309 с.
4. Дуков В. М. Электродинамика (История и методология макроскопической электродинамики). М.: Высшая школа, 1975. 248 с.
5. Карцев В. П. Максвелл. М.: Мол. гвардия, 1976. 333 с.
6. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Теория поля. М.: Физматгиз, 1962. 422 с.
7. Лоренц Г. А. Теория электронов и ее применение к явлениям света и теплового излучения. М.: Гостехтеориздат, 1953. 472 с.
8. Максвелл Д. К. Избранные сочинения по теории электромагнитного поля. М.: Гостехтеориздат, 1954. 687 с.
9. Мандельштам Л. И. Лекции по оптике, теории относительности и квантовой механике. М.: Наука, 1972. 437 с.
10. Нейман Л. Р., Демирчян К. С. Теоретические основы электротехники. М.; Л.: Энергия, 1966. Т. 1. 522 с. Т. 2. 407 с.
11. Никельнер С. Б. Основы космической электродинамики. М.: Наука, 1966. 408 с.
12. Парселл Э. Электричество и магнетизм. Барклевский курс физики. М.: Наука, 1971. Т. 2. 448 с.
13. Тамм И. Е. Основы теории электричества. М.: Гостехтеориздат, 1956. 620 с.
14. Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М. Фейнмановские лекции по физике. Электродинамика. М.: Мир, 1977. Т. 6. 347 с.
15. Эйнштейн А. К электродинамике движущихся тел.— В кн.: Собр. науч. трудов. М.: Наука, 1967. Т. I. 700 с.
16. Heaviside O. Electrical Papers. L., 1892, vol. 1, p. 429.— 451. Перепечатано из: «Electrician» от 3 января 1885 г.
17. Hertz H. Über die Beziehungen zwischen den Maxwell'schen elektrodynamischen Grundgleichungen und den Grundgleichungen der gegnerischen Elektrodynamik.— Ann. Phys., 1884, Bd. 25, S. 84—103.
18. Hertz H. Über die Grundgleichungen der Elektrodynamik für bewegte Körper.— Ann. Phys., 1890, Bd. 1, S. 369—390.

УДК 93/99(53)+538.3

Б. М. БОЛОТОВСКИЙ *

ЧИТАЙТЕ ХЕВИСАЙДА!

Оливер Хевисайд (1850—1925) был одним из крупнейших математиков и физиков конца прошлого века и начала нынешнего. Его жизнь и деятельность во многих отношениях уникальны. Перефразируя известное изречение, можно сказать, что все люди неповторимы, но Оливер Хевисайд неповторим больше, чем другие. О нем еще при жизни рассказывали легенды. Он окончил только неполную среднюю школу, а все остальные знания добыл сам, один, без преподавателей, ведя жизнь затворника. Оливер Хевисайд умер шестьдесят лет тому назад, а слава его с каждым годом растет. По мере изучения его книг выяс-

няется, что все больше результатов научного значения было им получено. При его жизни эти достижения не были оценены должным образом, а некоторые были вскоре после открытия прочно забыты. И даже не столько забыты, сколько не осознаны в свое время, не прочитаны должным образом и оставлены без внимания. Но сейчас, в наши дни, внимательное изучение трудов Хевисайда показывает, что нередко полученные им результаты широко используются без всякого упоминания о том, что их впервые получил Хевисайд, часть его результатов приписывается другим и вообще труды Хевисайда до сих пор должным образом не прочитаны. Кстати, книги Хевисайда не переведены на русский язык, хотя они представляют немалый интерес и для физиков, и для математиков, и для историков науки. Его книги — это богатейшее хранилище идей, методов и результатов, и, вдобавок, собрание афоризмов и высказываний по самым различным поводам. Богатство, запечатанное в его книгах, до сих пор еще не разведано.

Многие важнейшие результаты, полученные Хевисайдом, настолько не укладывались в привычную схему, что не только эти результаты, но даже методы их получения при жизни Хевисайда подвергались суровой и незаслуженной критике. Один из его подвергавшихся критике занимал важный административный пост, но был человек некомпетентный в области науки. Его критика привела к тому, что важнейшие научные журналы на несколько лет прекратили публикацию статей Хевисайда по тем вопросам, которые вызвали возражения, пусть и необоснованные. Ученые также возражали Хевисайду, недовольные тем, что он получал свои результаты «не так, как надо», т. е. при решении труднейших физических и математических проблем применял новые необычные методы, которые сам же и разрабатывал, методы очень эффективные и теперь общепринятые, но в то время, по общему мнению, «ни на чем не основанные», «нестрогие», «неверные» и т. д. Некоторые из методов, разработанных Хевисайдом, были, правда, признаны еще при жизни, но с большим запозданием. Другие так и не были признаны при жизни Хевисайда. Тем не менее и они теперь широко применяются, и их связывают с именами других людей, которые перестроили эти методы спустя много времени.

Многочисленная группа ученых, не признававших Хевисайда, просто не понимала его, настолько непривычны были его статьи и книги.

Если не считать нескольких выдающихся ученых того времени, первыми оценили Хевисайда инженеры — электрики и связисты (может быть, именно поэтому многие считали и считают Хевисайда инженером). Они начали широко использовать методы Хевисайда при расчете электрических систем и линий связи. Простота и мощь операционного исчисления, возможность сравнительно легко получать с его помощью надежные результаты — эти преимущества в глазах инженеров более чем восполняли тот

* Физический институт им. П. Н. Лебедева АН СССР.

«недостаток», что операционное исчисление не имело в то время строгого математического обоснования.

Пожалуй, самая главная причина всех этих несправедливостей судьбы по отношению к Хевисайду лежит в том, что он намного опередил свое время.

Очень немногие способны сразу же отбросить старые неверные представления и принять новое понимание. Гораздо больше таких, которые отнесутся к новым представлениям враждебно или недоверчиво, потому что старое понимание было привычно и в общем не так уж плохо, а новое — непривычно, и вовсе пока не ясно, что оно будет лучше старого.

Хевисайду нередко приходилось встречаться с проявлениями такого консерватизма.

Однако неприятие нового в науке может исходить и из мотивов, вообще не имеющих ничего общего с наукой. К их числу относятся, например, самолюбие, мешающее признать свои ошибки, честолюбие, соображения карьеры. Хевисайду на его жизненном пути пришлось испытать горечь от непонимания и прямого противодействия со стороны людей, которые руководствовались именно такими побуждениями.

Трудности, которые пришлось на долю Хевисайда, усугублялись еще особенностями его характера. Он был резкий и бескомпромиссный человек в вопросах науки, не только в вопросах научного знания, но и научной этики. Он беспощадно и язвительно клеймил невежество своих оппонентов, сохраняя при этом логическую безупречность своих доводов. Встречаясь с критикой со стороны людей понимающих, он мог в пылу полемики незаслуженно резко отозваться о том или другом доводе оппонента. Но нет никакого сомнения в том, что при этом Хевисайд руководствовался научными соображениями, как он их понимал, но никак не соображениями личной выгоды. Вот уж за чем он никогда не гнался, так это за личной выгодой. Всю жизнь он прожил на грани нужды, а последние лет 8—10 — в нужде. Он вел все время жизнь затворника, занимаясь только наукой. Он был вообще склонен к уединению, и если у кого-нибудь возникала необходимость обсудить с ним неясный вопрос, он, как правило, уклонялся от встречи, предпочитая переписку. Кроме ближайших родственников, он за всю свою жизнь встречался только с очень немногими людьми, и то, как правило, всего по нескольку раз. Некоторые из людей, бывавших у Хевисайда дома, оставили свои воспоминания, и эти воспоминания очень интересны. Мы о них расскажем. Но все-таки, главным рассказчиком о Хевисайде явился сам Хевисайд. Не склонный к личному общению, он охотно отвечал на письма. Писем к нему приходило бесчисленное множество. По большей части это были просьбы разобраться в том или ином сложном вопросе. Среди специалистов и студентов широко было распространено мнение, что для Хевисайда трудностей нет. Он охотно и подробно отвечал на письма, настолько подробно, что это не могло не мешать

его собственной научной работе. Некоторые из сохранившихся писем¹ содержат до 10 000 (!) слов. Если такое письмо напечатать на пишущей машинке, оно заняло бы страниц 30. Но Хевисайд не пользовался пишущей машинкой. Он писал собственноручно. И такие большие письма — не редкость в его переписке.

Оливер Хевисайд был безотказным и щедрым корреспондентом, но своими научными трудами он сам способствовал угасанию переписки, создав теорию связи по телеграфным и телефонным линиям.

В своих письмах Хевисайд касается не только узко специальных научных вопросов: он излагает свое мнение по широкому кругу важных научных проблем, вспоминает молодость, описывает свою повседневную жизнь. Письма эти великолепно написаны, они имеют, помимо научной, и чисто литературную ценность.

Книги Хевисайда также несут на себе неповторимый отпечаток его личности. Хевисайда невозможно перепутать ни с каким другим автором. Он может показаться многословным, но это на самом деле не многословие, а фундаментальный разбор фундаментальных проблем. В тексте имеются повторения — это потому, что Хевисайд составлял свои книги на основе своих же журнальных статей. И нередко в начале статьи он для удобства читателей кратко излагал результаты предыдущей статьи или даже предыдущей серии статей. Так это и входило в книги.

Наконец, в книгах довольно часто встречаются интереснейшие отступления на самые различные темы: каким шрифтом надо печатать книги, чтобы их было легко читать; как надо обучать математике в школе; знает ли Англия своих выдающихся ученых; о пределах, налагаемых на любые научные предсказания, и много еще о чем.

В книгах выражаются его симпатии и антипатии не только по отношению к различным физическим проблемам и методам их решения, но и по отношению к людям, которых он знал по личному знакомству или по переписке, или по их опубликованным работам. Это самые разные люди: ученые, администраторы, бизнесмены. С некоторыми из них Хевисайд ведет научную дискуссию, некоторых осуждает за неэтичное поведение, некоторыми восхищается, ценя их научные достижения и человеческие качества. Его выступления, возможно, иногда являются спорными, но всегда интересными.

Имя Хевисайда при его жизни было неизвестно не только широким кругам общественности, но даже и в научных кругах. О нем знали и отдавали ему должное немногие, но наиболее выдающиеся исследователи электромагнетизма: Фитцджеральд, Герц, Кельвин, Рэлей, Дж. Дж. Томсон, Лоренц и еще не очень много других. Для всех остальных Хевисайд был труден и непо-

¹ Немногие уцелевшие письма Хевисайда, его рукописи и записные книжки хранятся в библиотеке Института инженеров-электриков (Лондон). Там же находятся гораздо более многочисленные письма друзей к Хевисайду.

нятен. Теперь, в наши дни, его книги, по-видимому, легче читать, чем в то время. Мне кажется, что стиль научного исследования, созданный Хевисайдом, опередил свое время в той же мере, как и полученные им результаты. «Научная кухня» Хевисайда близка к современной.

Оливер Хевисайд родился 18 мая 1850 года в семье художника. Он был младшим из четырех сыновей. Семья была не очень состоятельная, поэтому Оливер смог закончить только неполную среднюю школу — так неточно мы переводим *elementary school*, общедоступную школу, где учатся дети до 14—15 лет. На продолжение образования в частной школе и тем более на дальнейшее получение высшего образования денег не было.

В детстве Оливер неплохо рисовал, о чем свидетельствуют рисунки, сделанные им в 11-летнем возрасте. Возможно, что отец собирался обучить его своему искусству, но интересы Оливера вскоре обратились от искусства к науке об электричестве. Трудно сказать, что повлияло на этот выбор. Есть, впрочем, одно вероятное объяснение. Его тетка по матери была женой Чарлза Уитстона, известного физика, автора многих исследований по акустике, оптике, электричеству и магнетизму. Уитстон был основателем практической телеграфии. Принципиальная возможность передачи сигналов по проводам была известна и до Уитстона, но он первый осуществил эту возможность и много сделал для дальнейшего технического усовершенствования телеграфии. С его именем, в частности, связано устройство для измерения омического сопротивления (мостик Уитстона).

По-видимому, Уитстон оказал определенное влияние на Оливера Хевисайда, по крайней мере в начале пути: Оливер и его брат Артур Вест — пошли работать в телеграфную компанию. С 1870 по 1874 Оливер проработал телеграфистом в г. Ньюкасл-он-Тайн. Некоторое время из этих четырех лет он, видимо, провел в Дании, так как в сохранившихся записных книжках Хевисайда есть запись о том, что он определял повреждения на линии, находясь в г. Фредерика в Дании.

В 1874 г. Оливер Хевисайд оставил работу телеграфиста и вернулся в Лондон. Некоторые считают, что начинавшаяся глухота заставила его уйти с работы. Однако к тому времени сама работа телеграфиста привлекала Хевисайда все меньше, а на первый план все более отчетливо выступали его научные интересы. Еще в 1868 г., за два года до того, как он поступил на работу в телеграфную компанию, Оливер занялся экспериментами по электричеству. Он оборудовал в доме отца лабораторию, где были элементы питания, измерительные приборы и другое лабораторное оборудование. Его первые работы были посвящены точному измерению сопротивлений. Хевисайд проводил также эксперименты с микрофонами. В частности, исследовалось влияние давления на свойства контактов. Первая статья была опубликована в 1872 г. В этих исследованиях Хевисайд выступал и как

экспериментатор и как теоретик. В частности, его работа, опубликованная в феврале 1873 г. в журнале *Philosophical Magazine*, была посвящена наилучшему подбору сопротивления в схеме типа мостика Уитстона (другое название этой схемы — баланс Кристи). Для выполнения ее расчетной части не требовалось знаний по высшей математике, в статье приведены сравнительно простые алгебраические вычисления. Результаты этой работы Хевисайда были известны Максвеллу. В знаменитой книге Максвелла «Трактат об электричестве и магнетизме» (т. I, ч. II), конец § 351 главы «Измерения электрического сопротивления» посвящен результатам Хевисайда. Эти результаты, упомянутые Максвеллом, представляют собой, пожалуй, самое малое из того, что сделал Хевисайд в теории электромагнетизма. Главный его вклад был сделан уже после смерти Максвелла, и об этом речь пойдет дальше. Но все же в числе великих продолжателей дела Максвелла Оливер Хевисайд — единственный, кого Максвелл упоминает в своем «Трактате».

С 1873 по 1876 г. Хевисайд опубликовал серию статей, в которых была обоснована практическая возможность дуплексной телеграфии. В то время сообщения по телеграфной линии передавались поочередно то в одном, то в другом направлении, т. е. при помощи симплексной связи. Хевисайд показал, что можно по одной и той же телеграфной линии одновременно и передавать и принимать сообщения. Такая связь называется дуплексной. Оливер Хевисайд не только предложил такую схему линии и такую схему включения передающих и приемных устройств, при которой стала возможной дуплексная связь, он практически осуществил дуплексную телеграфную связь в 1873 г. В проведении этого опыта участвовал его брат Артур Вест Хевисайд — второй телеграфист из семьи Хевисайдов. Послания отправлялись «одновременно с обеих станций настолько быстро, насколько можно было передавать ключом». В кавычки заключена запись из записной книжки Хевисайда, куда он заносил результаты опыта.

Теперь, когда по одной линии передаются десятки и сотни телефонных разговоров, дуплексная линия, созданная Хевисайдом, конечно, не поражает воображение. Но надо помнить, что для того времени это было реальное и важное продвижение, вдвое увеличившее объем информации, передаваемой по линии.

В 1873 г. вышла из печати двухтомная книга Максвелла «Трактат об электричестве и магнетизме». Эта книга подводила итог огромной работы по созданию теории электромагнитных явлений. В ней были приведены знаменитые уравнения Максвелла, описывающие электромагнитное поле. Эти уравнения теперь являются основой понимания в очень широкой области явлений природы и составляют один из краеугольных камней физическо-го знания. Но первые годы после появления этой книги мало кто понимал то, что там было сказано. Тем более мало кто понимал, что появление «Трактата» означало появление теории. Многие ученые до Максвелла рассматривали отдельные вопросы теории

электромагнетизма: электростатику, магнитное поле тока, взаимодействие двух токов и т. д. Связи между всеми этими явлениями были тогда неясны, поэтому решение каждой отдельной проблемы рассматривали как теорию. Так и говорили: теория Гаусса (статические поля), теория Ампера (магнитное поле токов), теория Био и Савара (взаимодействие двух токов) и т. д. А широкий круг оптических вопросов до Максвелла вообще не относили к области электрических и магнитных явлений.

Теория Максвелла была действительно теорией. Она описывала все упомянутые выше частные случаи — и электростатику, и магнитостатику, и взаимодействие токов, и многое другое — все те явления, о которых было известно, что они относятся к миру электричества и магнетизма. К этому же самому миру электрических и магнитных явлений оказалась причисленной и оптика, т. е. часть физики, изучающая законы распространения, преломления и отражения света. Максвелл показал, что свет — это электромагнитные волны малой длины.

Большинство ученых приняло книгу Максвелла, как еще одну из многих теорий: есть теории Гаусса, Ампера, Араго, Неймана, Вебера, Био и Савара и т. д., а теперь еще появилась и теория Максвелла, и неясно, чем она лучше остальных, а может быть, она и не лучше. Особенно сильные сомнения вызвало утверждение Максвелла об электромагнитной природе световых волн и вообще предсказание о существовании электромагнитных волн. Скептическое отношение к теории Максвелла держалось до 1888 г., когда Генрих Герц в Германии и Оливер Лодж в Англии экспериментально получили электромагнитные волны.

Хевисайд увидел книгу Максвелла вскоре после ее появления. Книга поразила его и определила всю его дальнейшую жизнь. Можно было бы уточнить последние слова, написав, что книга Максвелла определила всю дальнейшую научную жизнь Хевисайда, но в таком уточнении нет нужды, если речь идет о Хевисаиде. У него, кроме научной, никакой другой жизни не было. Рассказывают, что однажды кто-то сказал уже пожилому Хевисаиду: «Вам надо было жениться, мистер Хевисайд». Он ответил: «Если бы я женился, что бы тогда стало с моей работой?»

Сохранилось письмо Хевисайда к Жозефу Бетено, французскому ученому, радиофизику. Письмо написано в 1918 г., когда Хевисаиду было 68 лет. В нем рассказывается, что в молодые годы Хевисайд безуспешно старался разобраться в электрических явлениях. В 1873 г. он случайно увидел у книжного торговца только что вышедшую книгу Максвелла. Хевисайд тут же, у прилавка, прочел предисловие, проглядел текст, останавливаясь в некоторых местах для более подробного чтения, а затем прочел заключительную главу. Его охватило чувство великого открытия. Он сразу же купил эту книгу и с необычайным рвением приступил к ее изучению. Однако книга оказалась для него очень трудна. В этом нет ничего удивительного. Книга была трудна и для других. Один из биографов Хевисайда пишет, что Хевисайд ку-

пил у торговца не новый, а подержанный экземпляр книги Максвелла. Книга ранее принадлежала лектору по математической физике в колледже. Против заголовка одной из глав лектор написал: «С этого места книгу абсолютно невозможно читать». А ведь это был лектор по математической физике, он свободно разбирался в сложных разделах высшей математики, на которых была построена математическая основа изложения в книге Максвелла. По-видимому, прежний хозяин книги не смог разбраться в физических предпосылках, из которых исходил Максвелл. Хевисайд же изучал в школе лишь элементарную математику, да и ту, как он с юмором отметил в письме к Бетено, к тому времени почти всю уже забыл. Ему понадобилось несколько лет работы, прежде чем он полностью разобрался в книге Максвелла.

Письмо заканчивается словами: «Тогда я отложил Максвелла в сторону и пошел своим собственным путем. На этот раз дело двинулось гораздо быстрее» [9].

Очень вероятно, что именно желание изучить теорию Максвелла и заставило Хевисайда уйти из телеграфной компании. До конца своей жизни он больше ни на какую другую работу не поступал. Жил он на скромные гонорары, которые получал от издателей журнала *The Electrician* за публикацию своих статей. Может быть, какую-то денежную помощь ему оказывали его ближайшие родственники — родители и братья. Это, впрочем, мало вероятно, потому что у Хевисайда был характер самостоятельного человека и он очень неохотно принимал любую помощь.

Эпплъярд, написавший биографию Хевисайда, упоминает, как выглядел Хевисайд в те годы: «Он был несколько ниже среднего роста, рыжеватый, сдержанный, остроумный и обладал сильным характером» [14]. Однако во всех делах, не связанных с научными исследованиями, он был беспомощен и нуждался в уходе. Позднее британское правительство назначило ему пенсию в признание его научных заслуг.

После ухода с работы Оливер Хевисайд до 1889 г. жил в Лондоне в доме своего отца, где ему была отведена одна из комнат. Он неустанно занимался и большую часть времени находился в полном уединении. Обычно он закрывал окна и дверь, закуривал трубку, зажигал камин, керосиновую лампу и в этой невероятной жаре и духоте подолгу работал.

В семье знали, что в часы работы Оливеру нельзя мешать. Заботливая мать приносила ему еду и оставляла за дверью, так что он мог работать без помех.

Первые несколько лет, как мы уже знаем, Хевисайд посвятил максвелловской теории. Прежде всего следовало овладеть математическим аппаратом — изучить дифференциальное и интегральное исчисления, дифференциальные уравнения в частных производных и многое другое. С этой задачей Хевисайд успешно справился. За очень короткое время он в совершенстве изучил все необходимые для него разделы математики (это, само по се-

бе, вызывает почтительное удивление), а в дальнейшем даже создал две новых области математики, нашедших широкое применение в математической физике, векторное исчисление и операционное. Векторное, включая векторный анализ, было частью теории гиперкомплексных чисел — теории кватернионов. Хотя понятие вектора и было известно, практически только Максвелл использовал его. Как писал Хевисайд «в своем великом трактате об электричестве и магнетизме Максвелл, хотя и отмечал, что векторные методы подходят для рассмотрения вопроса, но не пошел дальше использования в первую очередь представления о векторе, и иногда выражал свои результаты в векторной форме... Таким путем его читатели познакомились с представлением о векторе, а также узнали, как выглядят некоторые формулы, записанные в кватернионных обозначениях. Они, однако, не получили никаких сведений о том, как работать с векторами» [3, с. 135].

Хевисайд считал, что кватернионное исчисление слишком сложно и не наглядно, потому что векторная природа электрического и магнитного полей при кватернионной записи в значительной степени оказывается замаскированной.

Хевисайд писал: «В теории кватернионов повелителем является кватернион, и он устанавливает свои законы для вектора и скаляра. Все вращается вокруг кватерниона. Даже законы векторной алгебры выражаются через кватернионы с помощью мнимой единицы». В противоположность сторонникам кватернионного исчисления, Хевисайд считал, что векторные соотношения больше отвечают физике дела и проще в математическом отношении. Он модифицировал понятие произведения векторов и развил простую и мощную схему векторного анализа, которая в своих основных чертах (это касается даже большей части введенных им обозначений) сохранилась до настоящего времени.

Сторонником векторного, а не кватернионного исчисления, кроме Хевисайда, был также Гиббс, который в своих лекциях независимо от Хевисайда (и несколько раньше) также систематически излагал основы векторного исчисления и широко применял векторное описание.

Вопрос о том, какую математическую схему выбрать для описания, векторное исчисление или кватернионное, с чисто математической точки зрения не является существенным, потому что обе эти схемы приводят к одним и тем же результатам.

Но в теории электромагнитного поля векторное описание имело определенные физические преимущества хотя бы потому, что электрическое и магнитное поля в трехмерном пространстве являются векторами, а не кватернионами, поэтому векторное описание обладает большей физической наглядностью. Аналогично обстояло дело и в других областях физики.

Введение векторного исчисления не обошлось без споров со сторонниками кватернионного описания. Гиббса и Хевисайда называли врагами кватернионного прогресса.

В наше время кватернионное описание почти не применяется в физике, векторное же исчисление (его называют иногда «векторное исчисление Гиббса — Хевисайда») нашло широкое применение во многих разделах физики. Если говорить о теории Максвелла, то векторный способ изложения сделал ее более наглядной и более доступной для изучающих.

Второй вклад Хевисайда в математику — это создание операционного исчисления. Он разработал новый эффективный метод решения линейных дифференциальных уравнений. В этом методе операция дифференцирования по одной из переменных заменяется умножением дифференцируемой функции на некоторый символ, который до поры до времени может рассматриваться как простое число. Такая замена упрощает уравнения, а если искома функция зависит только от одной переменной, то дифференциальное уравнение превращается в алгебраическое. Это алгебраическое уравнение решается обычными методами, а затем в полученном выражении для решения символ, заменяющий операцию дифференцирования, вновь получает свой первоначальный смысл. Таким образом, решение является некоторым оператором, который нужно применить к заданной функции, чтобы получить решение в явном виде. Хевисайд показал, что для большого класса физически важных задач получение решения таким методом сводится к выполнению ряда стандартных операций, которые и были им выполнены.

Операционное исчисление получило широкое применение при решении целого ряда задач в различных областях физики: в теории теплопроводности и диффузии, при изучении электрических цепей и линий связи, в задачах распространения радиоволн. Удобство этого метода, помимо стандартного пути вычисления, состоит в том, что таким способом можно эффективно рассматривать процессы установления, или, как говорят, переходные процессы. Рассмотрим для примера некоторую электрическую цепь с отключенным элементом питания. Пусть в некоторый момент времени (скажем, в нулевой момент) элемент питания включается в цепь. Тогда, прежде чем в цепи установятся стационарные токи, должно пройти некоторое время. Операционное исчисление позволяет легко определять поведение цепи непосредственно после включения, когда токи еще не достигли стационарной величины. Для рассмотрения процессов включения Хевисайд ввел специальную функцию. Она теперь так и называется — функция Хевисайда. Эта функция равна нулю во все отрицательные моменты времени и равна единице во все положительные моменты времени.

Хевисайд широко использовал в своих расчетах еще одну функцию, которую назвал импульсной. Эта функция обладала очень странными свойствами и Хевисайд подробно их разобрал: она равнялась нулю во всех точках, кроме одной, а в этой одной точке обращалась в бесконечность таким образом, что интеграл от этой функции равнялся единице, если эта одна точка попадает

ла в промежуток интегрирования. Эта функция описывает импульсное воздействие на систему. Такое воздействие имеет место, например, при упругом соударении двух жестких шаров. Силы действуют на шары только в момент соударения, а интеграл от сил по времени, т. е. переданный при соударении импульс, отличен от нуля. Импульсная функция определяет также плотность точечного источника. Однако работы Хевисайда были забыты. Больше чем через тридцать лет эту функцию заново ввел в физику Дирак. Теперь импульсная функция Хевисайда часто применяется в теоретической физике и носит название дельта-функция Дирака.

Работы Хевисайда по операционному исчислению первоначально не получили признания математиков. Почему так произошло?

По-видимому, основной причиной было непонимание того нового, что содержалось в работах Хевисайда.

Научная традиция налагала определенные условия на математическое рассмотрение физических проблем. Все математическое описание физических явлений нужно было проводить на высоком уровне математической строгости, т. е. не выходя за пределы применимости строго доказанных математических утверждений. Выполнять это требование в полном объеме было очень трудно, да и вряд ли это было нужно. Математический аппарат в физических исследованиях играет подчиненную роль, а основная задача здесь — выяснение физических особенностей явления. В этих условиях может получиться так, что выполнение всех требований строгости математического описания может не помогать выяснению физики дела, а наоборот, затруднять выяснение. Неудивительно, что время от времени даже столь известным людям, как Максвелл и Рэлей, высказывались упреки за уклонение от математической строгости. Отвечая на эти упреки, Рэлей в предисловии ко второму изданию своей книги «Теория звука» писал:

«В математическом исследовании я обычно использовал методы, которые представляются естественными для физика. Чистый математик будет сожалеть и (надо признать) иногда с основанием, о недостатке строгости. Но у этого вопроса есть две стороны. Потому что, сколь бы ни было важно сохранять высокие стандарты в чистой математике, физик иногда хорошо делает, что довольствуется соображениями, которые с его точки зрения вполне удовлетворительны и убедительны. Он использует представления другого порядка, и более строгий образ действий чистого математика может показаться ему не более, а менее доказательным. И, кроме того, во многих затруднительных случаях требование высочайшего уровня означало бы вообще отказ от рассмотрения данного вопроса, из-за объема, который для этого требуется»².

² Рэлей. Теория звука. М.: Гостехтеориздат, 1955, с. 21.

Но если Рэлей, который в своих работах использовал классические методы математической физики, подвергался упрекам за отклонение от математической строгости, то можно себе представить ту критику, которая обрушилась на голову Хевисайда. Математики отказывались признавать функцию Хевисайда, которая не была непрерывной и не была дифференцируемой, они отказывались признавать импульсную функцию, которая отлична от нуля только в одной точке, а интеграл от этой функции все же не равен нулю. Отказывались они и от признания результатов, полученных с использованием этих функций. Математики возражали против того, что Хевисайд заменял операцию дифференцирования значком, а затем обращался с этим значком как с алгебраической величиной. А Хевисайд сделал еще много такого, чего никакой строгий математик в то время бы не признал. Он ввел никакую строгую математику в то время бы не признал. Он ввел функцию, аргументом которой был оператор (скажем, оператор дифференцирования), и разлагал эту функцию в ряд по степеням оператора. Как можно было определить сходимость такого ряда? Ведь его членами были не числа и не функции, а операторы. Он ввел производную дробного порядка, он разлагал функции в расходящиеся ряды. Все это привело к тому, что методы Хевисайда математики рассматривали как нестрогие, а значит, вообще не считали за методы. Сохранилось письмо Рэля к Хевисайду, где Рэлей пишет об одной из работ Хевисайда: «Эта работа не понравилась нашим математикам. ...Они считают, что значительная часть работы представляет собой попытку сделать с помощью несовершенных методов то, что уже сделано с помощью строгих методов» [15]. Такое отношение математиков в большей мере затрудняло публикацию работ Хевисайда (потому что строгие математики были в числе рецензентов, и можно думать, что они писали отрицательные рецензии на посланные в печать статьи Хевисайда), а также вело к явной недооценке его уже опубликованных работ.

Такое отношение математиков из Королевского общества вызывало обиду Хевисайда в течение многих лет. Дело было не только в недооценке его методов, которые со временем все получили обоснование. В частности, его импульсная функция получила полные права математического гражданства в теории обобщенных функций лет через 50 после того, как импульсную функцию систематически использовал Хевисайд, получивший с ее помощью ряд важных физических результатов. Обосновано было и операционное исчисление, причем обоснование оказалось довольно простым делом. В общих словах обоснование это таково. Возьмем функцию вида Ae^{pt} , где p и A — некоторые постоянные числа, а t — независимая переменная. Дифференцирование этой функции по переменной t сводится к умножению на p , вычисление второй производной дает множитель p^2 и т. д. Мы видим, что для этой функции оператор дифференцирования можно заменить числом p , как это и делал Хевисайд. Функция Ae^{pt} является, как теперь говорят, собственной функцией оператора d/dt

с собственным значением p . В базисе, построенном из собственных функций, оператор есть число. Но любую функцию от переменной t можно представить в виде суммы функций вида Ae^{pt} , подобрав для каждого значения p свое значение A . Такое представление — хорошо известное интегральное представление Лапласа (или Фурье). Таким образом, операционный метод Хевисайда применим для широкого класса функций, которые могут быть представлены в виде интеграла Лапласа (или Фурье). Отметим, кстати, что и слово «оператор», и соответствующее этому слову понятие вошло в физику в значительной мере благодаря Хевисайду.

Хевисайд неоднократно выражал свое отношение к требованию математической строгости на самом высшем уровне при изложении физических теорий. Он, в частности, писал:

«Нужно по возможности полнее избегать вошедшего в обычай избавления от физики путем сведения задачи к чисто математическому упражнению. Следует все время не упускать из вида физику, чтобы придать задаче жизнь и реальное значение, и чтобы получить большую помощь, которую физика дает математике. Это не всегда может быть сделано, особенно в деталях, которые требуют больших вычислений, но этот принцип следует проводить в жизнь по возможности полнее, уделяя особое внимание движущим идеям. Ни один математический пурист никогда бы не смог выполнить работу, заключенную в Максвелловском Трактате. Он мог бы знать всю необходимую математику и даже больше, но это не привело бы к цели, потому что он не смог бы сложить все вместе без физического руководства. Это обстоятельство ни в коей мере его не позорит, но только показывает различие в путях мышления. За последние полвека чистая математика достигла огромных успехов, и было бы правильно и справедливо поставить их в соответствие с успехами в физической науке. Но вместе с тем к пуристам пришла склонность возражать против введения физических идей в математику с возмущением, в результате, потерей строгости. Может оказаться, что иногда не только не происходит потери строгости, но увеличивается общность и упрощается рассмотрение» [4, с. 5].

«И я бы еще добавил к этому, что если случится физику зайти слишком далеко, то, чтобы не прерывать работы, было бы правильно отложить на последующее время отыскание ограничений и поправок. Но такой процесс очищения подобает в гораздо большей степени проводить пуристу. Если одно из этих дел столь же необходимо, как другое, то ясно, что физик мало бы чего достиг, пытаясь делать оба этих дела из опасений перед поборниками строгости. Что может быть ненавистнее, чем физическая работа, состоящая из предложений и следствий? Она достаточно плоха и как чисто математическая, и я хотел бы, чтобы пуристы взяли урок у Фурье, Томсона и Тэта, Максвелла или Рэлея, и чтобы они излагали свою повесть иначе, и сделали бы ее интереснее, допустив немного воображения. Я имел возмож-

ность ознакомиться со значительной частью большой книги по теории функций, пытаясь найти там то, чего я не нашел. Самое большое восхищение вызывают старательность и суровая строгость, но как это отличается от физической математики³, как трудно что-то вычитать из сурового формализма, и насколько ужасно кажется книга из-за недостатка физических примеров. Пожалуй, вопрос проявился бы в значительной степени, если бы имелась физическая теория, основанная на этом материале или поясняющая его» [4, с. 6].

Как видно из приведенных высказываний, Хевисайд был противником математической строгости ради строгости. Он был великим представителем математической физики. Он ценил математику лишь постольку, поскольку она помогала решать физические задачи.

Хевисайд не отрицал, что применяемые им математические методы не имеют пока строгого обоснования. Но он считал, что если метод доказал свою эффективность, то нужно этот метод применять, не дожидаясь строгого обоснования. Он приводит в пример введенные им операторы сопротивления электрической цепи: «Действительно, их использование часто ведет к большим упрощениям и избавляет от необходимости проводить сложные вычисления определенных интегралов. Но при этом строгая логика дела не ясна! Ну и что из того? Буду ли я отказываться от обеда потому, что не понимаю полностью процесс пищеварения? Нет, не буду, если я удовлетворен результатом. Подобным образом и физик может применять нестрогие процессы с удовлетворением и пользой, если он, проводя проверки, убеждается в точности своих результатов» [4, с. 9].

Мнение Хевисайда о том, что чистая математика скучна и бесполезна, а физическая математика интересна и плодотворна — это его личное мнение, отражение его симпатий и антипатий. О вкусах не спорят. Хевисайд изучил математику, имея в виду единственную цель — разобраться в физической теории. Мы привели его мнение не к умалению чистой математики, а для того чтобы полнее выразить взгляды Хевисайда на соотношение физики и математики.

Но в приведенных высказываниях Хевисайда о чистой математике есть и такое, с которым согласится всякий. Хевисайд утверждает, что успехи математики связаны с успехами физической науки. Строгая математика времен Хевисайда в конечном счете уходит корнями в ньютоновскую механику, как и почти вся математика XIX столетия. Те, кто упрекал Хевисайда в математической нестрогости, не понимали, что наступает время новой физики, которая не сводится к ньютоновской механике. А новая физика требовала новой математики, и Хевисайд это понимал.

³ В наше время принято название «математическая физика». Это название было принято и во времена Хевисайда, но он в приведенном отрывке, желая подчеркнуть свою мысль, применяет сочетание «физическая математика».

В частности, когда его упрекали за применение расходящихся рядов, которые тогда не рассматривались в теории функций, он отвечал: «А как насчет теории функций, которая сознательно отказывается от рассмотрения расходящихся рядов? Может ли она действительно быть теорией функций? Разве не нужна теория с большим охватом, объединяющая и сходящиеся и расходящиеся ряды в единое гармоническое целое?» [4, с. 10].

Добавим еще, что, насколько известно, обвинение в математической нестрогости и в применении необоснованных методов никогда не сопровождалось конкретным указанием на ошибочность тех или иных результатов, полученных Хевисайдом. Хевисайд вычислял правильно, может быть, как раз потому, что он как никто другой мог провести физический анализ проблемы.

Приведем еще одно рассуждение Хевисайда о путях научного исследования.

«Сопоставляя и согласуя между собой разные части единой теории и убеждаясь в ее согласованности, мы приходим к пониманию теории. Мы можем начать, где угодно и двигаться любым путем. Конечно, некоторые пути будут предпочтительны, потому что они могут быть легче, или дают широкий и ясный обзор, но нет необходимости строго придерживаться определенного курса. Это, может быть, даже и нежелательно. Может быть, более интересно и поучительно не идти по кратчайшему логическому курсу от одной точки к другой. Может быть, лучше бродить, и руководствоваться обстоятельствами при выборе пути и не закрывать глаза на виды по сторонам, а в дальнейшем менять маршруты, чтобы посмотреть на ту же страну с других точек. Ясно, что если нужно провести кого-то по хорошо известной стране, уже хорошо исследованной, то лучше придерживаться некоторых определенных дорог. Но дело обстоит несколько иначе в случае исследования сравнительно неизвестной области с непроходимыми джунглями, горами и пропастями. В этом случае было бы абсурдно следовать логическим курсом от одной точки к другой. Вам надо быть бдительным и непредубежденным, и руководствоваться обстоятельствами. Прежде всего вам нужно выяснить, что именно следует выяснить. Как вы это делаете — это уже совсем другое дело. Без сомнения, впоследствии будут найдены пути гораздо более легкие и, может быть, лучшие, и по этим путям сможет пройти толпа. Я полагаю, ясно, что жалобы на недостаток совершенства в выборе путей и в образе действий исследователя со стороны людей, привыкших к более строгим методам, в значительной степени смехотворны. Хотя и безвредные по намерению, они могут действовать несправедливо, если приводят, как иногда бывает (совсем недавно я узнал про такого рода случай), к отклонению самой добросовестной работы, которая не смогла быть признана судьями, имеющими, без сомнения, другой образ действий и мыслей и другой жизненный опыт. Когда такое происходит, это ставит ученое сообщество в положение, достойное сожаления: кажется, что сообщество существует не

только для поощрения исследований по установленным направлениям, но также и для того, чтобы активно противодействовать работам не столь общепринятого характера. Невозможно поверить, что именно так и обстоит дело в действительности. Но, с другой стороны, статьи ценятся так дешево, одной больше, одной меньше — какая разница?

И опять, вероятно, судьи были одушевлены доброжелательными побуждениями и хотели только увести заплутавшего автора с его ошибочных путей и вывести на более строгие одобряемые ими следы. Но автору от этого ничуть не легче. У него есть свои пути, и он должен их придерживаться, пусть даже ему скажут (фактически), что его работа не представляет никакой ценности, недостойна опубликования, и, конечно, в силу всего этого он должен прекратить присылку дальнейших работ» [4, с. 4].

Из приведенного отрывка видно, что Хевисайд болезненно переживал нетерпимость в выборе научного пути, узость подхода оппонентов и несправедливую критику своих работ. Не только математическая сторона его статей встречала непонимание — физические результаты также нередко встречали непонимание или вызвали резкие и необоснованные возражения. Приведем красноречивое письмо [14], полученное Хевисайдом в конце октября 1881 года из Королевского Общества:

Мне поручено передать Вам благодарность Королевского Общества за Вашу работу «О силах, натяжениях и потоках энергии в электромагнитном поле» и сообщить Вам, что комитет по публикации статей направил эту работу для опубликования в *Philosophical Transactions*...

Р. Т. О.⁴ Оба рецензента, хотя и высказались благоприятно о том, что поняли, жалуются на исключительную трудность Вашей работы. Один из них назвал ее самой трудной из всех, какие он когда-либо пытался читать. Понимает ли Вы, что Вы могли бы что-то сделать (например, добавить иллюстрации или дополнительные разъяснения) для того, чтобы учесть эти замечания? Я опасаясь, что Ваша статья, в том виде, как она есть, никому бы не принесла пользу.

Рэлей

Из этого письма видно, что статью Хевисайда, присланную в Королевское Общество, смотрели два рецензента, и обе рецензии были в целом благоприятные. Поскольку публикациями физических статей ведал тогда Рэлей, то надо думать, что рецензенты были выбраны компетентные. Сам Рэлей высоко ценил работы Хевисайда и впоследствии, переиздавая свою «Теорию звука», добавил в нее большой раздел об электромагнитных колебаниях, построенный на результатах Хевисайда. И все-таки, несмотря на благожелательное отношение к автору, все трое (два рецензента и Рэлей) в один голос жалуются на трудность понимания. Как же тогда относились к работам Хевисайда рядовые читатели? Без сомнения, в те годы, когда Хевисайд начал публикацию своих статей по развитию максвелловской электродинамики, его мало кто понимал. Уже позднее Генрих Герц писал в письме к Хевисайду:

⁴ Please Turn Over — проверните страницу.

«Это факт, что чем больше вопросов прояснялось для меня и чем больше я после этого возвращался к Вашей книге, тем больше я понимал, что, по существу, Вы уже совершили гораздо раньше то продвижение вперед, которое я думал сделать, и тем больше росло во мне уважение к Вашему труду. Но я не сразу извлекал это из Вашей книги, и другие говорили мне, что они вообще с трудом могли понять Ваши работы, поэтому я должен предупредить Вас, что Вы немного непонятны обычному человеку» [14].

Обратите внимание на первую фразу, в которой Герц отдает Хевисайду должное.

Во второй фразе из приведенного отрывка Герц сетует на то, что и ему, и многим другим трудно читать Хевисайда. В одном из последующих своих писем к Хевисайду Герц снова упрекает Хевисайда за трудную для понимания манеру, в которой написаны его статьи: «...я боюсь, что Вы до некоторой степени гордитесь тем, что непонятны для других. Я думаю, что это напрасная гордость. Вы, наверное, не знаете, до какой степени трудно другим понять Ваши работы. Людям больше нравится, когда Вы приходите к ним, чем когда они приходят к Вам, пускай даже Ваши заслуги столь велики» [14].

Трудно утверждать с уверенностью, но, скорее всего, никакой гордости от непонимания своих работ Хевисайд не испытывал. Он писал об одной серии своих статей:

«В статьях был найден тот недостаток, что их было трудно читать. Но еще труднее было их писать. В журнале, где рассматриваются все разделы физики, где объем так ограничен и так ценится, сжатое изложение было крайне необходимым. Что делать исследователю, если в журналах научно-технического направления, имеющих большое число читателей, у него не принимают материал, изложенный сравнительно элементарно, а в чисто научном журнале со сравнительно небольшим числом читателей и с малым предоставляемым объемом у него не принимают тот же материал, изложенный более научно? Чтобы вообще опубликоваться, он должен сильно сжать изложение и выбросить весь объяснительный материал, какой он только может. Иначе ему могут сказать, что его статьи больше подходят для издания в виде книги и потому отклоняются» [3, с. 3].

Научный журнал, о котором говорит Хевисайд — это *Philosophical Magazine*. Как и во всяком научном журнале, присланные статьи там рецензировались. Не все рецензенты были столь доброжелательны, как те двое, о которых писал Хевисайду лорд Рэлей в приведенном выше письме. Те, хотя и указывали, что статьи Хевисайда трудны для понимания, все же дали благоприятные отзывы и Рэлей в связи с этим просил Хевисайда дополнить статью, чтобы легче было ее читать. В том случае, о котором пишет Хевисайд, рецензенты требовали сокращения его статей. Но если первоначальный, неурезанный вариант статьи было трудно читать, то можно себе представить, насколько труднее

стало читать эту же статью после сокращения, ибо сокращение могло проводиться только за счет пояснительного текста. А «в журнале научно-технического направления» с большим числом читателей статью Хевисайда не приняли вообще. По-видимому, речь идет о «*Electrician*», где в течение нескольких лет редактор отказывался от публикации его статей. Об этом будет сказано далее.

Трудности с публикацией даже привели Хевисайда к мысли о том, что, может быть, и не стоит стараться напечатать полученные результаты удовлетворившись уже тем, что они получены и хранить их про себя, как это делал великий английский ученый Кавендиш. Но, обдумав такую возможность, Хевисайд от нее решительно отказался. Он писал, полусерьезно, полусмешливо:

«Засекречивание вроде того, которое практиковал Кавендиш, является абсолютно непростительным. Это грех. Можно вообразить такой случай, когда человек молчит либо от неуверенности в себе, либо от разочарования в приеме, от непризнания той работы, которую он дает миру. Мало людей имеет неограниченную силу упорства. Но делать великие открытия и хранить их в тайне, как поступил Кавендиш, без всякой уважительной причины — это, пожалуй, одно из самых больших преступлений, в которых может быть повинен такой человек. Кажется, что это сильное выражение, но поскольку, как учит нас профессор Тэт, почти преступно не знать нескольких иностранных языков, что по мнению других является вполне простительной бедой, то, наверное, необходимо применять сильные выражения в тех случаях, когда преступность более очевидна» [3, с. 3].

Изучив трактат Масквелла и отложив его в сторону, Хевисайд, как он пишет в письме к Бетено, «пошел своим собственным путем». Но его собственный путь в науке был на всю жизнь определен «Трактатом». Хевисайд продолжил развитие электродинамики Масквелла с того места, на котором Масквелл оставил свою теорию. Та теория электрических и магнитных явлений, которую мы теперь широко используем, имеет во многом тот вид, который ей был придан Хевисайдом. В течение ряда лет в журнале *The Electrician* из номера в номер публиковались подробные статьи Хевисайда, посвященные систематическому развитию теории электромагнитного поля. В работах Хевисайда подробно проанализированы основные физические понятия, лежащие в основе теории: электрическое и магнитное поля (Хевисайд называл их «электрическая сила» и «магнитная сила»), энергия поля, поток энергии поля (этого понятия у Масквелла не было), работа поля над системой зарядов и токов, и т. д. Параллельно с подробнейшим разбором физических особенностей Хевисайд рассмотрел количественно огромное число практически важных задач. Многое из того, что он сделал, теперь входит в учебники по электричеству без всякого упоминания о том, кто впервые провел это рассмотрение.

«The Electrician» («Электрик») был журналом научным, рассчитанным на широкий круг читателей, не имевшей высокой научной подготовки. Для большинства из них Хевисайда были непонятны. Тем большей благодарности живут редакторы журнала, предоставившие место для фундаментально важных исследований по созданию и развитию теории магнитной теории.

Что же сделал Хевисайд уже в первые годы своей работы? Он ввел понятие потока электромагнитной энергии. Несколько раньше и независимо от Хевисайда это понятие ввел Пойнтинг⁵. Хевисайд тогда не знал работы Пойнтинга, вышедшей несколько месяцев раньше. Но он пошел дальше Пойнтинга и разобрал ряд случаев, важных для понимания, в которых энергия переносится полем. В частности, он рассмотрел выделение тепла в проводе при прохождении электрического тока. Хевисайд показал, что это тепло создается за счет энергии поля, окружающего проводник. Поток энергии электромагнитного поля втекает внутрь проводника через его боковую поверхность и превращается в тепло.

Хевисайд рассмотрел прохождение переменного электрического тока по проводу. Он показал, что переменный ток неравномерно заполняет провод, величина тока растет по мере удаления от середины сечения и по мере приближения к поверхности. Чем быстрее меняется ток во времени, тем сильнее он прижимается к поверхности проводника. (Это явление позднее получило название «скин-эффекта» от английского слова «скин» — кожа, шкура.) Скин-эффект широко распространен и его теория (разумеется, без упоминания имени Хевисайда) имеется во всех учебниках.

Через год после предсказания Хевисайда скин-эффект был обнаружен Юзом.

Интересно отметить, что рассматривая скин-эффект, Хевисайд привел очень поучительный пример этого явления, который так и просится в учебники по электричеству, хотя в известных мне учебниках этого примера нет. Он заключается в следующем. Рассмотрим электрическую цепь, составленную из источника постоянного тока и проводов. Пусть сначала эта цепь разомкнута. Тогда ток в цепи равен нулю. Теперь замкнем цепь. Тогда ток будет нарастать, и за определенное время достигнет постоянного значения. Таким образом, при включении постоянного напряжения ток в цепи первое время будет переменным. Это означает, что в первые моменты после включения ток в цепи будет течь по поверхности проводников и только по мере установления будет заполнять всю толщу проводника. Как писал Хевисайд, такой переходный ток течет «слоями, сильный на поверхности провода, слабый в середине». Очевидно, при размыкании цепи имеет место такое же явление.

⁵ В советской учебной литературе это понятие носит название вектора Умова — Пойнтинга.

Хевисайд ввел в уравнения Максвелла магнитные заряды и магнитные токи на равных правах с электрическими зарядами и электрическими токами. Записанная таким образом система уравнений поля получила название дуально симметричной. Мы знаем, что электрические заряды и токи существуют в природе, магнитные заряды и токи до сих пор не обнаружены. Возможно, что их и не существует. Поэтому симметричная форма записанных Хевисайдом уравнений Максвелла, добавив магнитные токи и заряды, может показаться только лишь математическим упражнением, не имеющим отношения к действительности. Однако это не так. В связи с поисками магнитного заряда дуально симметричная система уравнений Хевисайда была довольно подробно исследована. Это исследование представляет постоянный интерес, не обязательно связанный с проблемой существования магнитного заряда. Кроме того, дуально симметричные уравнения Хевисайда оказались удобны в технических расчетах, такая запись дает большое облегчение при вычислении полей от источников сложного вида, потому что можно, например, некоторое сложное распределение токов заменить на некоторое расположение вспомогательных магнитных зарядов.

Хевисайд также получил ряд точных решений волнового уравнения для большого количества физически важных случаев. Ближайшим отличием теории Максвелла от всех остальных теорий электромагнитного поля было то, что она предсказывала существование электромагнитных волн. Но как раз это предсказание и было встречено с недоверием. Исследователей волновых электромагнитных процессов на основе теории Максвелла в то время можно было сосчитать по пальцам. В Англии таких было двое — Хевисайд и Фитцджеральд. Может быть именно поэтому, а может быть и по другим причинам между этими двумя исследователями завязалась тесная дружба.

Джордж Френсис Фитцджеральд, профессор натуральной и экспериментальной философии Дублинского университета, был младше Хевисайда. Фитцджеральд, как и Хевисайд, был убежден в справедливости теории Максвелла, которую научный мир тогда не понимал. Фитцджеральд рассмотрел с помощью теории Максвелла ряд конкретных физических процессов. Его исследования относились к электромагнитной теории света. В первой работе, посвященной этому вопросу, Фитцджеральд с помощью теории Максвелла объяснил найденный Керром поворот плоскости поляризации света при отражении от полюса магнита. Вторая его работа была посвящена отражению и преломлению света. Он показал, что теория Максвелла приводит к формулам Френеля. Этот результат был серьезным доводом в пользу теории Максвелла и как раз в той ее части, которая относилась к распространению электромагнитных волн. Затем Фитцджеральд заинтересовался вопросом, можно ли так подобрать токи и заряды, чтобы создать источник, излучающий электромагнитные волны. Первоначально он пришел к неправильному выводу о том,

что как бы мы ни подбирали токи и заряды, «они никогда не будут так распределены, чтобы породить волновые возмущения, распространяющиеся в пространстве вне системы». Однако уже в 1882 г. Фитцджеральд исправил допущенную ранее ошибку. Она заключалась в том, что решение уравнений поля было выбрано в виде стоячих волн, поэтому и отсутствовало излучение. Он показал, что переменные электрические токи являются источником излучения электромагнитных волн. Исправление заканчивалось словами: «В заключение я должен просить извинение за то, что рискнул исследовать эти вопросы, будучи настолько незнаком с ранее выполненными работами, что сделал ошибки, требующие столь серьезных исправлений, как приведенные в этой работе». Он также рассчитал простейший излучатель — круговой виток с током, изменяющимся по гармоническому закону — и вычислил энергию, излучаемую такой системой за единицу времени. Виток с переменным током эквивалентен переменному магнитному моменту, и, следовательно, Фитцджеральд вычислил энергию излучения переменного магнитного момента. Энергия оказалась пропорциональной четвертой степени частоты. Поэтому для проведения опытов по излучению электромагнитных волн нужно было создать в витке колебания как можно более высокой частоты. Фитцджеральд предложил получать быстропеременный ток, разряжая конденсаторы через цепь с малым сопротивлением. Эта теоретическая работа была проведена за четыре года до опытов Герца, проведенных в 1886 г.

Сейчас имя Фитцджеральда, если и упоминается, то чаще всего в связи с тем, что он задолго до создания специальной теории относительности предположил, что форма движущегося тела отличается от формы того же тела, находящегося в покое: при движении сокращаются размеры в направлении скорости. Эта гипотеза, которую Фитцджеральд высказал одновременно с Лоренцом, так и называется: гипотеза Лоренца — Фитцджеральда. Эта гениальная догадка, которая нашла несколько иное выражение в теории относительности, много говорит о Фитцджеральде. Но не менее важную работу Фитцджеральд проделал, когда развивал теорию излучения электромагнитных волн. Он и в этом деле был первым, точнее говоря, одним из первых. В одном направлении с ним работал Хевисайд.

Мы не имеем здесь возможности сколько-нибудь полно описать огромный вклад Хевисайда в развитие электродинамики. Приведем лишь наиболее яркие примеры, показывающие, как далеко он опередил свое время и как велик был его вклад не только в теорию, но и в практические приложения.

В те годы телеграф уже прочно вошел в жизнь общества. В 1858 г. был успешно проложен первый трансатлантический кабель, в 1865 — второй и в 1866 — третий.

Теория передачи сигнала по кабелю была развита У. Томсом (Кельвином) в 1855 г. Кельвин рассматривал кабель как систему, обладающую двумя параметрами — значениями емко-

сти и сопротивления на единицу длины кабеля. При этом ρ для тока и для напряжения в кабеле получились уравнения типа уравнения теплопроводности, но только роль теплопроводности играла величина, обратная произведению емкости и сопротивления. Таким образом, в этом случае распространение сигнала по кабелю подчиняется тем же законам, что и распространение тепла вдоль длинного стержня с теплоизоляцией на боковой поверхности. В этом приближении сигнал на другом конце провода появляется одновременно с моментом его поступления в линию на другом конце. Величина принимаемого сигнала сначала очень мала, а потом сигнал нарастает. Поэтому в теории Томсона момент приема может практически совпадать с моментом передачи, если чувствительность приемного устройства достаточно высока. Время установления сигнала, т. е. время, за которое сигнал на другом конце кабеля нарастает до наибольшей величины, оказывается пропорционально квадрату длины кабеля и значениям погонной емкости и погонного сопротивления. Величина времени установления в теории Кельвина устанавливает предел на частоту передаваемых сигналов. Если за промежуток времени, равный времени установления, с передающей станции отправляется несколько сигналов, то принимающая станция может их принять как один непрерывный сигнал. Поэтому число передаваемых в единицу времени сигналов не должно превышать обратного времени установления. Пока речь шла о передаче телеграфных сигналов, с этим ограничением еще можно было мириться, увеличивая чувствительность приемной аппаратуры и ограничивая скорость передачи точек и тире в очень длинной линии. Но через некоторое время после распространения телеграфной связи появился телефон. В телефонной связи по кабелю передается человеческая речь, и спектр передаваемых частот становится намного шире, чем при передаче телеграфных сигналов. Теория Кельвина в применении к передаче человеческой речи приводила к пессимистическим прогнозам. Телефонная связь без искажений, согласно этой теории, была возможна лишь на малых расстояниях. С увеличением расстояния сигнал расплывался настолько, что вместо человеческой речи на другом конце провода слышалось невнятное бормотание. Эксперименты по телефонной связи на большие расстояния подтверждали теорию Кельвина.

В середине 80-х годов прошлого века Хевисайд подробно исследовал распространение сигнала по проводной линии. В его теории учитывались такие параметры линии, которые не вошли в рассмотрение Томсона. Кроме емкости линии на единицу длины и сопротивления на единицу длины (эти величины входили в теорию Томсона), Хевисайд учел еще индуктивность линии на единицу длины и утечку на единицу длины. Для краткости мы все эти величины будем называть: емкость, сопротивление, индуктивность и утечка.

Чтобы пояснить смысл всех этих величин, рассмотрим линию, состоящую из двух параллельных проводов. Возьмем участок

этой линии, имеющий единичную длину. Этот участок обладает омическим сопротивлением, которое необходимо учитывать. Далее, два параллельных провода, как и любые два металлических тела, находящихся вблизи друг от друга, можно рассматривать как пластины конденсатора. Это значит, что рассматриваемый участок линии имеет емкость. Если ток в линии меняется со временем, то меняется и магнитное поле, создаваемое токами, а следовательно, меняется и магнитный поток через поверхность, ограниченную контуром линии. Это приводит к появлению в линии электродвижущей силы индукции, которую необходимо учитывать. Электродвижущая сила индукции пропорциональна скорости изменения тока в линии, причем коэффициент пропорциональности и дает введенную Хевисайдом индуктивность. Наконец, из-за различия в потенциалах, от одного провода к другому идет ток через среду, разделяющую эти провода. Этот ток Хевисайд назвал током утечки. Он определяется по закону Ома, как отношение разности потенциалов к сопротивлению среды между проводами. Величину, обратную сопротивлению среды, Хевисайд назвал утечкой.

Учет Хевисайдом индуктивности и утечки имел принципиальное значение. Для распространения сигнала по кабелю Хевисайд получил волновое уравнение. Он далее исследовал закон распространения волны по кабелю. Волны разных частот имеют, вообще говоря, разную фазовую скорость, и это приводит к расплыванию сигнала. Но, как показал Хевисайд, можно так подобрать параметры кабеля, что волны всех частот будут иметь одну и ту же фазовую скорость и одинаковое затухание вдоль кабеля. Поэтому сигнал любой формы будет распространяться без расплывания, хотя, конечно, будет ослабляться из-за потерь в кабеле. Условие, найденное Хевисайдом, состояло в следующем: надо так подобрать параметры кабеля, чтобы произведение емкости на сопротивление было равно произведению утечки на индуктивность. Тогда сигнал по кабелю будет распространяться без изменения формы. Вы видите, что учет индуктивности и утечки, действительно, имел принципиальное значение. По теории Кельвина все процессы в линии определяются произведением емкости на сопротивление. Но эта теория приводила к выводу о сильном искажении сигнала. Хевисайд показал, что необходимо учитывать также индуктивность и утечку, причем для связи без искажений произведение этих двух величин должно быть равно произведению емкости на сопротивление, т. е. индуктивностью и утечкой никак нельзя пренебрегать. Далее Хевисайд оценил параметры реально действующих линий и пришел к выводу, что, как правило, для этих линий произведение индуктивности на утечку оказывается намного меньше, чем нужно для связи без искажений. Увеличить это произведение можно было либо за счет увеличения утечки, либо за счет увеличения индуктивности. Но увеличение утечки приводит к сильному затуханию сигнала и поэтому нежелательно. Увеличение же индуктивности

даже уменьшает затухание, и, кроме того, что самое важное, дает линию без искажений.

Создалось удивительное положение. Большинство ученых равнодушно или с сомнением относились к возможности существования электромагнитных волн. Немногочисленные энтузиасты думали о том, как создать электромагнитные волны, планировали или уже проводили эксперименты. Но открытие волн было еще впереди. И тут появляются исследования Хевисайда, из которых следует, что эти самые электромагнитные волны уже существуют в линиях связи, в реально уже действующих линиях связи, и параметры линии определяют условия распространения этих волн. Больше того, можно добиться таких условий, при которых все волны идут по линии с одинаковой скоростью, и тогда сигнал переносится без искажений вдоль линии. Высокая теория, от которой не ждали особой пользы, обернулась важными практическими советами.

Но советы Хевисайда были встречены в штыки. Вот что он сам писал об этом впоследствии: «Но в 1877 г. я был на некоторое время остановлен намертво, когда я подошел к разработанному практически приложением моей теории с новыми предложениями (частично опубликованными ранее) большого практического значения относительно телефонной связи на большие расстояния. Эти предложения были в противоречии с теми взглядами, которые в то время официально отстаивались...» [1].

Хевисайд под официальными взглядами имеет в виду, в частности, взгляды Уильяма Генри Приса, одного из руководящих работников британского почтового ведомства, а впоследствии главного инженера почтового ведомства. Занимая высокий официальный пост и веда всеми техническими устройствами связи, он препятствовал распространению выводов Хевисайда о роли индуктивности в телефонной связи. Прис отрицал какую бы то ни было роль индуктивности в обеспечении телефонной связи, свободной от искажений. Величину индуктивности Прис оценивал неверно, сильно занижая ее. В своих возражениях против Хевисайда Прис опирался на теорию передачи сигнала по кабелю, разработанную Кельвином. Об этой теории мы уже упоминали. Но теория Кельвина была частным случаем более общей теории, разработанной Хевисайдом, а именно, из теории Хевисайда в пределе малых частот получалась теория Кельвина. Для высоких же частот теория Кельвина была неприменима. Прис этого не понимал и неизменно давал отрицательные отзывы на работы Хевисайда, препятствуя их публикации. В этом его союзниками оказались математики, ставившие под сомнение методы, при помощи которых Хевисайд пришел к своим результатам.

Прис был учеником Фарадея и, по-видимому, неплохим практическим инженером. О нем, в частности, известно, что он ввел электрическую сигнализацию на английских железных дорогах. Это, несомненно, способствовало повышению безопасности движения. Прис также много сделал для развития беспроводной

связи. Он обратил внимание на то, что при передаче сигналов по телеграфной линии возбуждались токи в другой линии, расположенной по соседству. Прис использовал это явление для передачи сигналов на расстояние порядка мили, например, с берега на маяк, расположенный на прибрежном острове. Позднее Прис также оказал значительную помощь Маркони в его опытах по развитию радиосвязи.

Но теоретические исследования Прис явно недооценивал, а к работам Хевисайда относился как к чепухе, о чем с уверенностью заявлял во всеуслышание. Это была уверенность невежества, но Хевисайду от этого легче не было. Вот что пишет о развитии конфликта сам Хевисайд:

«Что касается меры индуктивности, то официальная сторона приняла, что индуктивность на один см воздушной телефонной цепи (в электромагнитных единицах) составляет лишь малую долю единицы, в то время как другая сторона [т. е. Хевисайд.— Б. Б.] провозгласила, что индуктивность имеет значения, в сотни раз большие, скажем, от 10 до 20 единиц на 1 см цепи. В этом состоял наиболее полный из возможных антагонизм между моей и официальными точками зрения как в основах, так и в деталях. Желательно было провести подробное рассмотрение и обсуждение проблемы. Однако я обнаружил, что провентилировать все это более чем невозможно. Прежде всего обстоятельства, о которых нет нужды упоминать, помешали мне изложить вопрос перед Обществом телеграфных инженеров и электриков весной 1887 г. (представленный доклад Хевисайда был отклонен.— Б. Б.). Затем, несколько позднее, редактор журнала *Philosophical Magazine* не смог далее предоставлять место для продолжения моей работы «Самоиндукция проводов», часть VIII, где речь шла о цепи без искажений и о телефонии. В-третьих, после частичной публикации (разделы X до XVI) статьи «Электромагнитная индукция» произошла смена редактора в журнале *Electrician*, и новый редактор попросил меня прервать публикацию. Он вежливо информировал меня, что хотя он провел частный опрос среди студентов, выясняя, кто из них хотел бы читать мои статьи, чтобы найти хотя бы одного, кто их читал, он не смог найти ни одного. В-четвертых, он вернул короткую статью по тому же вопросу телефонии на большие расстояния. В этой статье были подробно показаны официальные ошибки и обращалось внимание на противоположные результаты, вытекающие из моей теории. До того как она была возвращена, статья побывала в официальных руках. И, наконец, три других журнала отклонили эту самую статью по причинам, которые лучше всего известны им самим.

По-видимому, полагали, что официальные точки зрения с гораздо большей вероятностью являются правильными, и поэтому было бы предусмотрительно отказаться от обсуждения новых точек зрения, столь поразительно противоречащих официальным. По-видимому, сыграла роль и мысль о том, что официальные взгляды, в силу их официальной природы, не должны оспариваться или критиковаться. Но во всем этом есть нечто несправедливое, как показали приведенные выше факты и последующие доказательства в поддержку моих взглядов. Потому что какую же другую цель могут иметь люди науки, кроме цели познать истину? И как это можно сделать без свободной дискуссии?» [1, предисловие].

По свидетельству Дервента Мерсера, Прис был *showman* [18]. Это слово буквально переводится как хозяин цирка, балаганщик. В данном случае этому слову можно придать смысл «человек показухи». Он занимал высокое положение, но не имел реального представления о научных основаниях телеграфии и телефонии. Это, кстати, понимали и его современники. Например, Оливер Лодж, упоминая о споре Хевисайда с Присом, называет

Хевисайда «математический гений исключительной силы», а про Приса пишет так: «В частности, столь выдающаяся личность, как сэр Уильям Генри Прис, гениальный оратор и в течение многих лет главный инженер телеграфного департамента в британском почтовом ведомстве, рассматривал эти работы как чепуху». Далее Лодж пишет, что одно время Хевисайд испытывал горечь непонимания и враждебности, «о чем добродушный человек, подобный сэру Уильяму Прису первый бы сожалел, если бы был лучше информирован». Эти слова, правда, были написаны больше чем через сорок лет после дискуссии, но за это время мнение Лоджа не изменилось. Он был в этой дискуссии на стороне Хевисайда.

Кстати, именно Прис привез телефон из Америки, но он же заявлял, что телефон никогда не принесет пользы и не заменит телеграфа.

Прис был влиятельным человеком, и кроме того, академическая наука не поддержала Хевисайда. Отстаивая свои взгляды, Хевисайд попал в трудное положение. Можно еще добавить, что статья его брата Артура Веста Хевисайда, в которой результаты математических исследований Оливера были облечены в более практическую форму, также была отклонена обществом телеграфных инженеров.

Статья Хевисайда с критикой взглядов У. Приса, отвергнутая в 1887 г. четырьмя редакциями, была им позднее опубликована в сборнике «Работы по электричеству» (1892). Это — прекрасный образец дискуссионной статьи, где точка зрения Хевисайда выражена с полной ясностью и проиллюстрирована убедительным численным материалом, имеющим и до сего дня учебное значение. Причина, по которой эта статья была отвергнута четырьмя научными журналами, лежит не только в опасении выступить против официальных взглядов, как полагал Хевисайд. Дело в том, что в статье имеется ряд довольно ядовитых замечаний против У. Приса. Приведем одно из них:

«Результаты и рассуждения [У. Приса.— Б. Б.] настолько удивительны по своему характеру, что следует заключить одно из двух: или, во-первых, общепринятая теория электромагнетизма нуждается в фундаментальных изменениях, или, во-вторых, мнения, выраженные мистером Присом в его работе, фундаментально ошибочны. Вопрос о том, какую из этих альтернатив принять, был для меня делом серьезнейших и даже тревожных размышлений. В конце концов я был вынужден прийти к заключению, что электромагнитная теория правильна и что, следовательно, мистер Прис неправ, не только в некоторых второстепенных пунктах, но радикально неправ, вообще говоря, в методах, аргументах, результатах и заключениях. Чтобы показать, что это так и есть, я предлагаю несколько замечаний по его работе» [2, с. 160].

В бумагах Хевисайда сохранилось письмо от издателя, который отказывался печатать одну из работ Хевисайда, содержа-

щую резкие замечания в адрес своих научных оппонентов. Издатель опасался возможного судебного преследования со стороны обиженного оппонента и уговаривал Хевисайда не настаивать на опубликовании.

Примерно в это время Хевисайд придумал слово для обозначения псевдоученого — *scienticulist*, сайнтикулист. По-английски ученый — *scientist*, сайнтист, а что означает сайнтикулист — трудно сказать, но, во всяком случае не ученого, и в то же время слово звучное и по видимости научное, и даже длиннее, чем слово «сайнтист», ученый. По смыслу слово «сайнтикулист» можно приблизительно сопоставить со словом «специкулист». Сначала слово «сайнтикулист» употреблялось в переписке самим Хевисайдом, потом словом стали пользоваться и другие в письмах к Хевисайду. Наконец, оно вошло в печатные издания. Уже значительно позднее, через десять лет, Хевисайд писал в предисловии ко второму тому «Электромагнитной теории» (1899): «Независимо от того, что утверждает сайнтикулист, читатель не должен опасаться, что забудет себе голову фантастическими теориями, лишенными практического значения». В этой фразе слышны отзвуки дискуссий десятилетней давности.

Но в этой дискуссии время работало на Хевисайда. 1888 г. принес экспериментальное доказательство существования электромагнитных волн. Генрих Герц получил электромагнитные волны в открытом пространстве, а Оливер Лодж наблюдал их распространение вдоль проводов. Как вспоминал Лодж, «Хевисайд приветствовал оба наблюдения, как одно и то же, хотя, без сомнения, исследования Герца затмевают мои как по тщательности, так и по практическим результатам». Но Хевисайд, приветствуя оба эти достижения как одно, имел в виду не различия в постановке опыта, не тщательность выполнения и не практические результаты, а подтверждение основного положения теории Максвелла о существовании электромагнитных волн.

В 1889 г. Кельвин в президентской речи, прочитанной в Институте инженеров-электриков признал, что его теория передачи сигнала по кабелю не учитывает электромагнитной индукции. Но недавно, сказал он, очень полная теория была разработана мистером Оливером Хевисайдом. В качестве вывода из своей математической теории мистер Хевисайд указал и подчеркнул, что электромагнитная индукция дает положительный эффект — она помогает переносить ток. Возможно, что после этой речи Хевисайд написал Кельвину письмо, потому что в бумагах Хевисайда сохранилось письмо Кельвина, где говорится:

«Я очень рад узнать, что Вам было приятно мое упоминание Вашей работы. Я думаю, что не все понимают, с какой полнотой Вы применили Ваши результаты к важным практическим вопросам и, кроме того, до сих пор Ваши результаты не столь широко известны. Однако среди тех, кто интересуется вопросами науки об электричестве, сравнительно немногие могут читать и понимать такие работы, как Ваши, и это, без сомнения, является

главной причиной, по которой Ваши работы намного меньше известны и признаны, чем они того заслуживают».

Практический совет Хевисайда заключался в том, что для создания линии, передающей сигнал без искажений, нужно увеличить ее индуктивность. Сделать это можно, например, подключая к линии расположенные на равных расстояниях друг от друга катушки индуктивности. По этому пути (хотя и с задержкой из-за непонимания) и пошла телефония. К 1920 г. только в Америке индуктивная нагрузка была установлена на дальних телефонных линиях протяженностью 300 тыс. км. С развитием техники телефонной связи нужда в нагрузках на дальних линиях уменьшилась, но даже и при этом к 1949 г. число катушек только на линиях компании Bell System составляло приблизительно 20 миллионов.

В 1889 году журнал *Electrician* вновь предоставил свои страницы для статей Хевисайда. За четыре года до этого редактор сообщил Хевисайду, что публикация его работ прекращается, потому что его (Хевисайда) никто не читает. По некоторым сведениям, дело было так. Редактор распорядился, чтобы в часть тиража вклеили листки с вопросом к читателям, читают ли они статьи Хевисайда. Никаких ответов на этот вопрос не поступило, и редактор решил, что Хевисайда никто не читает. Публикация статей Хевисайда была прекращена, точнее говоря, она была прервана «на самом интересном месте» — на практических рекомендациях, обеспечивающих телефонную связь без искажений на большие расстояния. Но за те несколько лет, что Хевисайда не печатали, редакция получила много писем от своих читателей с одним и тем же вопросом — почему прервана публикация статей Хевисайда и когда она возобновится. Авторы писем были именитыми физиками и инженерами, и это указывало, что у Хевисайда был небольшой, но избранный круг читателей. Издатель сокрушался, что статьи Хевисайда читают только несколько профессоров, «а профессора, как Вы знаете, не подписываются на наш журнал». Оставалось непонятным, почему эти люди в свое время не ответили на вопрос, помещенный на вклейке. Редактор опросил печатников, и оказалось, что вклейки с вопросом к читателям так и не были вклеены. После этого публикация работ Хевисайда возобновилась. Такова одна из версий того, что произошло.

Сам Хевисайд не очень верил, что все так и было. Возобновляя серию публикаций в журнале *Electrician*, он писал в январе 1891 г.: «Главная цель серии статей, из которых данная статья является первой, состоит в том, чтобы продолжить работу под названием «Электромагнитная индукция и ее распространение», публикация которой началась в журнале *Electrician* 3 января 1885 года и продолжалась вплоть до 46 раздела этой работы, опубликованного в сентябре 1887 года, когда большое давление, вызванное недостатком места и недостатком читателей, по-видимому, привело к необходимости резко прекратить дальнейшую

публикацию (отставший 47 раздел появился 31 декабря 1887 года). Вероятно, для такого прекращения были и другие причины, кроме упомянутых. Но, как было мне сказано вскоре после этого, «приближается время, когда все обнаружится». Сам я не такой оптимист и думаю, что колодец, в котором, как говорят, скрывается истина, на самом деле является бездонной ямой» [3, с. 1].

Здесь следует сделать одну важную оговорку. Журналы *The Electrician* и *Philosophical Magazine* не полностью прекратили публикацию статей Хевисайда. Отвергались лишь работы, имевшие отношение к спору Хевисайда с Присом, т. е. к проблеме телефонии без искажений. Исследования Хевисайда по другим вопросам принимались к печати и публиковались. В эти годы, в частности, было опубликовано несколько статей, в которых Хевисайд начал исследование нового большого раздела теории электричества.

В конце 80-х годов Хевисайд занялся определением электрического и магнитного полей, образованных равномерно движущимся электрическим зарядом. Как известно, поле покоящегося электрического точечного заряда сферически симметрично, т. е. определяется только расстоянием от покоящегося заряда до той точки, где измеряется поле. Электрическое поле направлено по прямой, соединяющей заряд с точкой наблюдения и по величине обратно пропорционально квадрату расстояния от заряда до точки наблюдения. Магнитное поле покоящегося заряда равно нулю. Если заряд не покоится, а равномерно движется, то характер поля меняется. Рассмотрение этого вопроса для случая, когда скорость заряда мала в сравнении со скоростью света, провел Дж. Дж. Томсон. Он показал, что в этом случае электрическое поле по-прежнему является сферически симметричным, и по-прежнему электрическое поле обратно пропорционально квадрату расстояния от заряда до точки наблюдения и направлено по прямой, соединяющей заряд с точкой наблюдения. Таким образом, в приближении Томсона электрическое поле движущегося заряда имеет такой же вид, как и поле покоящегося, но только оно переносится вместе с движущимся зарядом. Кроме того, при движении заряда возникает и магнитное поле, и Дж. Дж. Томсон вычислил также и его. Важно здесь отметить, что Томсон вычислял поле движущегося заряда приближенно, считая, что скорость заряда u много меньше, чем скорость света c . В этом предположении отношение u/c есть малая величина. Томсон учитывал члены первого порядка по u/c , а более высокие степени этого параметра не учитывал. Хевисайд в серии статей, первая из которых была опубликована в 1888 г., подробно изучил поле равномерно движущейся точечной заряженной частицы. Он получил точные выражения для электрического и магнитного полей частицы, сначала в предположении, что скорость частицы не превышает скорость света в той среде, где частица движется. Как показал Хевисайд, характер поля частицы существ-

венно меняется по мере увеличения ее скорости. Чтобы получить представление о том, как меняется поле, рассмотрим сначала случай, когда частица покоится. Окружим частицу сферической поверхностью некоторого радиуса, так что частица находится в центре этой поверхности. Тогда электрическое поле в любой точке поверхности направлено по нормали к этой поверхности и во всех точках поверхности имеет одинаковую величину. Рассмотрим теперь движущуюся частицу. Окружим ее сферой того же радиуса, что и в предыдущем случае. Те точки сферы, которые пересекаются линией движения частицы, назовем полюсами. В случае медленного движения заряда поле на всей сфере имеет одинаковую величину, т. е. скажем, поле на экваторе такое же, как и на полюсах. В этом случае решения, найденные Хевисайдом, переходят в решения Томсона, который и ограничил свое рассмотрение случаем медленного движения. Но при дальнейшем росте скорости заряда характер электрического поля меняется: величина поля в разных точках сферы теперь различна: «Если скорость растет, электромагнитное поле все больше сгущается вблизи от экваториальной плоскости $\theta = \frac{1}{2}\pi$. Чтобы дать представление об этом сгущении, положим $u^2/v^2 = 0,99$ [Хевисайд скорость света в среде, в которой движется заряд, обозначает через v , а скорость заряда через u . — Б. Б.] Тогда поле E в полюсе составляет 0,01 от нормального значения q^2/r^2 , а на экваторе поле в 10 раз больше нормального значения» [2, с. 504].

Он показал также, что в пределе $u = v$, т. е. когда скорость заряда становится равна скорости света, все поле собирается в плоскости, проходящей через экватор, «образуя плоскую электромагнитную волну» [2, с. 494].

В настоящее время поле равномерно движущегося заряда приводится во всех учебниках по электричеству, но, пожалуй, ни в одном вы не найдете указания на то, что соответствующие выражения впервые получены Хевисайдом в 1889 г.

В этой же работе 1889 г. Хевисайд вычислил полную энергию электромагнитного поля, связанного с равномерно движущимся зарядом. Как известно, плотность энергии электромагнитного поля равна сумме квадратов электрического и магнитного полей. Чтобы найти полную энергию электромагнитного поля, нужно вычислить интеграл от плотности энергии по всему пространству. Хевисайд отдельно вычисляет интегралы от квадрата электрического поля и от квадрата магнитного поля. Первый интеграл Хевисайд обозначает через U и называет полной электрической энергией. Второй интеграл обозначен буквой T и назван полной магнитной энергией. Разумеется, для случая точечного заряда обе эти величины расходятся. Поэтому Хевисайд при вычислении предполагает, что источник поля не точечный, а идеально проводящая сфера радиуса a , движущаяся равномерно со скоростью u и обладающая полным зарядом q . Тогда выражения для электрической энергии U и магнитной энергии T оказываются

ся конечными. Мы не будем здесь их приводить, отметим только, что если скорость заряда u стремится к скорости света v в той среде, где движется заряд, то в пределе (как теперь говорят, в релятивистском пределе) из формул Хевисайда получается, что электрическая энергия U и магнитная энергия T равны друг другу и обе зависят от скорости заряда одинаковым образом, а именно, пропорциональны множителю $1/\sqrt{1-\frac{u^2}{v^2}}$. Та-

ким образом, и полная энергия электромагнитного поля, порожденного движущимся зарядом, пропорциональна тому же множителю $1/\sqrt{1-\frac{u^2}{v^2}}$. Этот множитель теперь называется лоренц-фактором, он часто встречается в формулах специальной теории относительности. Но вспомним, что работа Хевисайда по-

слана в печать в декабре 1888 г. И в этой работе получена зависимость энергии от скорости (или, что то же самое, зависимость массы от скорости) такая же, как в специальной теории относительности, появившейся семнадцатью годами позднее. Ничего удивительного в таком совпадении нет, мы теперь знаем, что уравнения Максвелла инвариантны относительно преобразования Лоренца, поэтому прямой подсчет поля движущегося источника дает тот же результат, что и пересчет поля с помощью преобразования Лоренца из той системы координат, где источник покоится. Во времена появления работы Хевисайда, где была вычислена энергия поля движущегося заряда, ни теории относительности, ни названия «лоренц-фактор» еще не существовало. «Лоренц-фактор» переводится как множитель Лоренца. Но этот множитель впервые появился в работах Хевисайда.

В тех же статьях Хевисайд рассмотрел еще один вопрос: что будет с полем движущегося заряда, если скорость заряда превосходит скорость света в той среде, где заряд движется. По-видимому, впервые вопрос об этом был поставлен в работе Хевисайда, опубликованной в журнале *Electrician* в ноябре 1888 г.

В этой работе Хевисайд говорит о поле заряда, который равномерно движется в диэлектрике со скоростью u , превышающей скорость света v в диэлектрике. Он пишет: «...если скорость заряда превышает скорость света, возмущения целиком остаются позади заряда и сосредоточены внутри конуса AqB (рис. 1). Заряд находится в вершине конуса и движется слева направо вдоль Cq . Половина угла раствора конуса, или угол AqC , определяется соотношением

$$\sin \theta = v/u,$$

где v — скорость света, а u — скорость заряда. Магнитные силовые линии представляют собой окружности с центрами на оси, т. е. на линии движения. Смещение, конечно, направлено от q и полный поток смещения равен q , но смещение неоднородно рас-

пределено внутри конуса. Электрический ток направлен к точке q внутри конуса и от точки q вне конуса.

Видно, что электрическая сила стремится тянуть заряд назад. Поэтому для того, чтобы поддерживать движение, нужно к заряду q приложить силу в направлении Cq . Работа этой силы идет на непрерывное и однородное увеличение электрической и магнитной энергии вблизи от вершины q . Ибо движение волнового фронта в любой точке на Aq или Bq направлено по перпендикуляру наружу, а не к точке q . Таким образом, конус непрерывно захватывает все новые области пространства, в то время как движение заряда q вперед непрерывно обновляет вершину конуса и сохраняет его форму неизменной.

Рассматривается только равномерное движение.

Во избежание недоразумений я должен заметить, что это рассмотрение ни в коей мере не описывает того, что могло бы случиться, если бы заряд принужден был двигаться через эфир со скоростью, в несколько раз превышающей скорость света, о чем я ничего не знаю; но проведенное выше рассмотрение описывает то, что могло бы случиться, если бы теория Максвелла для диэлектрика в рассматриваемых условиях была верной, и если бы я ее правильно понял» [2, с. 492].

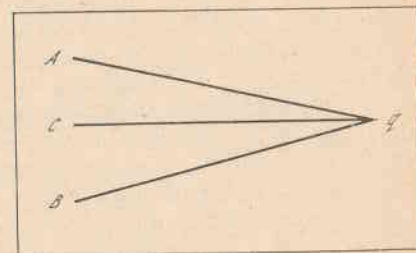


Рис. 1.

В приведенном отрывке из работы Хевисайда многое нуждается в пояснении. Под словом «возмущение» здесь понимается отличное от нуля электромагнитное поле. Слово «смещение» означает (вернее, в те годы означало) электрическую индукцию. Утверждение Хевисайда о том, что внутри конуса смещение (т. е. электрическая индукция) направлена от q , неверно. В дальнейшем Хевисайд получил точные формулы для поля внутри конуса, и из этих формул вытекало, что для положительного электрического заряда q вектор электрической индукции (и электрической напряженности) направлен не от заряда, а к заряду, по прямой линии, соединяющей заряд с точкой наблюдения. При этом по мере приближения изнутри к поверхности конуса смещение (электрическая индукция) растет и при неограниченном приближении к поверхности принимает сколь угодно большие значения. На внешней поверхности конуса электрическая индукция направлена по образующим от вершины и для случая точечного заряда имеет бесконечную величину. Полный поток индукции к заряду внутри конуса в сумме с потоком индукции от заряда по внешней поверхности конуса удовлетворяет известной теореме Гаусса, т. е. пропорционален величине движущегося заряда. Это все Хевисайд полно и точно рассмотрел впоследствии. Для него

вообще было характерно возвращаться к ранее рассмотренному вопросу, возвращаясь неоднократно, каждый раз все полнее и полнее рассматривая проблему, до тех пор, пока он не добивался для себя полной ясности. Фраза в приведенном отрывке о том, что электрический ток внутри конуса направлен к точке q , а вне конуса от точки q также неверна. Это, по-видимому, описка. Через десять лет после появления работы, Хевисайд, пересмотрев ее, заметил, что слово «ток» следует заменить словом «смещение» (а смещение, говоря современным языком, это электрическая индукция).

Большой интерес представляет заключительное замечание Хевисайда, в котором, по существу, выражается сомнение, может ли частица двигаться со скоростью, превышающей скорость света в пустоте (Хевисайд пишет не «в пустоте», а «в эфире»). В то время считали, что пустота заполнена некоей средой, которая обладает определенными механическими свойствами, такими, что в этой среде могут распространяться волны, и эти волны как раз и представляют собой электромагнитные волны. Предполагаемую среду, переносящую электромагнитные волны, называли светоносным эфиром или просто эфиром. Многие статьи того времени, в том числе и статьи Хевисайда, сегодня гораздо легче читать, если всюду слово «эфир» заменить на слово «пустота». Мы теперь знаем — это достижение теории относительности, — что в эфире, как механической среде для распространения электромагнитных волн нет нужды). Мы уже упоминали, что Хевисайд подсчитал полную энергию электромагнитного поля, порожденного равномерно движущимся зарядом. Он получил, что электромагнитная энергия неограниченно растет по мере приближения скорости заряда к скорости света. Возможно, поэтому он и сомневался, может ли скорость заряда превышать скорость света в пустоте (в «эфире») — ведь даже для того, чтобы заряд достиг скорости света, надо ему сообщить бесконечно большую энергию. Интересно, что это замечание Хевисайда тоже предвосхищает положение теории относительности о том, что скорость света в пустоте есть предел скорости всех материальных тел.

Однако Хевисайд в дальнейшем был далек от идей специальной теории относительности. Он не считал скорость света максимально возможной скоростью для материальных тел, из его работ не видно, что он признавал преобразования Лоренца. Более того, он прямо высказывался против закона сложения скоростей, который следует из преобразований Лоренца. Хевисайд умер в 1925 г., через 20 лет после создания специальной теории относительности и более чем через 10 лет после появления общей теории относительности. Но в его работах нет никаких упоминаний ни о специальной, ни об общей теории относительности. Некоторые его результаты (как, например, упомянутая выше зависимость энергии электромагнитного поля, созданного равномерно движущимся зарядом, от скорости движения) предвосхищают

результаты специальной теории относительности, но лишь постольку, поскольку электродинамика Максвелла была первой релятивистски инвариантной теорией, которая вошла без изменений в схему специальной теории относительности. Что же касается общей теории относительности, глубокой теории, которая связывает свойства пространства, инерцию тел и силы тяготения, то Хевисайд не проявил к ней никакого интереса. Он сам пытался создать теорию тяготения, основанную на максвелловской электродинамике.

Если изложить его идеи очень грубо и схематично, то они сводились к следующему. В пространстве, окружающем тело, имеются электромагнитные волны самых разных частот, распространяющиеся в самых различных направлениях. При падении какой-либо электромагнитной волны на тело возникает сила, обязанная своим существованием силе светового давления. Поскольку волны падают на тело со всех сторон, силы светового давления от разных волн уравниваются, и поэтому никакой результирующей силы на него не действует. Но если в таком поле случайных волн имеются два тела, находящихся на некотором расстоянии друг от друга, то картина меняется. Представим себе волну, падающую на первое тело с такого направления, что второе тело оказывается в тени, полностью или частично. В этом случае силы светового давления, действующие на каждое из тел, оказываются различны, и тела «притягиваются» друг к другу. Хевисайд, таким образом, пытался построить теорию тяготения на основе электродинамики. Своих работ, посвященных этой проблеме, он не публиковал. Есть сведения, что в последние годы своей жизни он подготовил для печати рукопись четвертого тома «Электромагнитной теории» (первые три книги вышли из печати первым изданием с 1899 до 1912 г.). Некоторые даже видели эту рукопись. Но она исчезла, и поиски ее пока не дали результатов⁶. О работах Хевисайда по «электромагнитной» теории тяготения можно судить по немногим уцелевшим разрозненным черновикам. По-видимому, это направление не привело бы к развитию теории, которая могла бы конкурировать с общей теорией относительности. Впрочем, не имея перед глазами полной картины, трудно сделать определенное заключение.

Но вернемся к работам Хевисайда, в которых рассматривалось поле заряженной частицы, движущейся в преломляющей среде со скоростью, превышающей скорость света в этой среде. С 1888 по 1901 г. Хевисайд в серии работ создал строгую и полную теорию излучения, возникающего при таком (как говорят «сверхсветовом») движении заряда. Эти работы, однако, были быстро забыты. Для этого имелись свои причины. Во-первых, в те годы трудно было представить себе, что могут существовать материальные частицы, скорость которых сравнима со скоростью

⁶ Дом Хевисайда после его смерти был ограблен. Возможно, что тогда пропала и рукопись четвертого тома.

света или, тем более, превосходят скорость света в среде. Во-вторых, специальная теория относительности, созданная в 1905 г., вообще привела к выводу о невозможности движения материальных тел со скоростями, превышающими скорость света в пустоте. И никто не обратил внимание на то, что скорость света в преломляющей среде оказывается в ряде случаев меньше, чем скорость света в пустоте. Поэтому частица может двигаться быстрее, чем световая волна в среде, хотя и медленнее, чем световая волна в пустоте.

В 1934 г. молодой советский ученый Черенков, тогда аспирант академика С. И. Вавилова, обнаружил свечение в чистых жидкостях, возникающее под действием гамма-излучения. Природа этого свечения сначала была неясна, и потребовалось множество тонких опытов, чтобы определить характеристики этого свечения — спектр, интенсивность, угловую направленность. В разработке программы и методики экспериментов П. А. Черенкова важную роль играли указания его учителя С. И. Вавилова. Ему же принадлежали и первые соображения о природе нового свечения, определившие дальнейший ход исследования.

Через три года после открытия, в 1937 г. новое свечение получило теоретическое объяснение в работе И. Е. Тамма и И. М. Франка — сотрудников Физического института Академии наук, которым руководил С. И. Вавилов и где было сделано открытие П. А. Черенкова. Тамм и Франк показали, что свечение вызывают электроны, движущиеся в жидкости со скоростью, превышающей скорость света в этой жидкости. Работа Хевисайда к тому времени была начисто забыта. Тамм и Франк рассмотрели этот вопрос заново. Их рассмотрение отличается от работ Хевисайда в двух отношениях. Во-первых, Хевисайд не учитывал дисперсии света, а Тамм и Франк ее учли. Хевисайд считал, что световые волны всех частот в среде имеют одну и ту же фазовую скорость. На самом деле это не так — волны разных частот имеют разные фазовые скорости. Это явление и называется дисперсией. Заряженная частица в среде может обогнать волну одной частоты (и тогда возникает конус излучения на этой частоте как на рис. 1) и отставать от более быстрых волн, имеющих другие частоты (и на этих частотах тогда не будет излучения). В опытах Черенкова дисперсия оказывалась существенной, и она была учтена в теоретическом рассмотрении Тамма и Франка. Учет дисперсии привел к ряду существенных отличий в результатах. В частности, без учета дисперсии нельзя даже оценить энергию излучения.

Второе уточнение, сделанное Таммом и Франком, заключается в следующем. Хевисайд рассмотрел случай, когда скорость заряженной частицы в среде превышает скорость света в этой среде. В остальном он считал, что скорость частицы может быть сколь угодно большой. Теперь мы знаем, что скорость любой частицы имеет предел — скорость света. Хевисайд этот предел не признавал. В остальных отношениях теория Хевисайда близ-

ка к теории Франка и Тамма, которые, не зная работ Хевисайда, рассмотрели все заново и более полно.

О том, что некоторые существенные черты явления предсказаны в работах Хевисайда, вспомнили только в 1974 г., через 40 лет после того, как было обнаружено излучение Вавилова — Черенкова и через восемьдесят лет после того, как в работах Хевисайда появились первые указания на возможность такого излучения. В этом случае Хевисайд опередил свое время почти на пятьдесят лет.

Излучение сверхсветовых заряженных частиц получило название излучение Вавилова — Черенкова. (За рубежом более принято название «излучение Черенкова».)

В 1958 г. за открытие и объяснение этого явления Тамм, Франк и Черенков были удостоены высшего международного научного отличия — Нобелевской премии. К тому времени свечение Вавилова — Черенкова нашло важные применения в ядерной физике.

В статье Эйнштейна «О методе теоретической физики» есть рассуждение о связи опыта и логического мышления: «Но если опыт есть начало и конец всего нашего знания, то какова же роль логического мышления в науке? Полная система теоретической физики состоит из понятий, фундаментальных законов, которые должны иметь силу для этих понятий и следствий, выведенных посредством логической дедукции. Это те следствия, которые должны соответствовать нашему единичному опыту. В любом теоретическом трактате их логический вывод занимает почти все страницы» и дальше: «Логическое мышление определяет структуру этой системы; то, что содержит опыт и взаимные соотношения опытных данных, должно найти свое отражение в выводах теории»¹.

Максвелловская электродинамика — один из примеров, которые поясняют мысль Эйнштейна. В этой теоретической схеме основные понятия — электрическое поле и магнитное поле. Связь этих понятий между собой задается уравнениями Максвелла. Для того чтобы получить из теории следствия, проверяемые на опыте, надо решить систему уравнений Максвелла, т. е. определить поля при заданных физических условиях.

Мы знаем теперь, что теория Максвелла охватывает колоссальный круг явлений и является основой для важнейших приложений.

Теория Максвелла широко применяется для расчета и проектирования электродвигателей, генераторов, радиоприемных и радиопередающих устройств, линий связи, линий электропередачи, сетей энергоснабжения, ускорителей термоядерных установок — все перечислить невозможно. Такое широкое применение вызвано не тем, что мы умеем решать уравнения Максвелла, а

¹ Эйнштейн А. Собр. научных трудов. М.: Наука, 1967, с. 182.

света или, тем более, превосходят скорость света в среде. Вторых, специальная теория относительности, созданная в 1905 г., вообще привела к выводу о невозможности движения материальных тел со скоростями, превышающими скорость света в пустоте. И никто не обратил внимания на то, что скорость света в преломляющей среде оказывается в ряде случаев меньше, чем скорость света в пустоте. Поэтому частица может двигаться быстрее, чем световая волна в среде, хотя и медленнее, чем световая волна в пустоте.

В 1934 г. молодой советский ученый Черенков, тогда аспирант академика С. И. Вавилова, обнаружил свечение в чистых жидкостях, возникающее под действием гамма-излучения. Природа этого свечения сначала была неясна, и потребовалось множество тонких опытов, чтобы определить характеристики этого свечения — спектр, интенсивность, угловую направленность. В разработке программы и методики экспериментов П. А. Черенкова важную роль играли указания его учителя С. И. Вавилова. Ему же принадлежали и первые соображения о природе нового свечения, определившие дальнейший ход исследования.

Через три года после открытия, в 1937 г. новое свечение получило теоретическое объяснение в работе И. Е. Тамма и И. М. Франка — сотрудников Физического института Академии наук, которым руководил С. И. Вавилов и где было сделано открытие П. А. Черенкова. Тамм и Франк показали, что свечение вызывают электроны, движущиеся в жидкости со скоростью, превышающей скорость света в этой жидкости. Работа Хевисайда к тому времени была начисто забыта. Тамм и Франк рассмотрели этот вопрос заново. Их рассмотрение отличается от работ Хевисайда в двух отношениях. Во-первых, Хевисайд не учитывал дисперсии света, а Тамм и Франк ее учли. Хевисайд считал, что световые волны всех частот в среде имеют одну и ту же фазовую скорость. На самом деле это не так — волны разных частот имеют разные фазовые скорости. Это явление и называется дисперсией. Заряженная частица в среде может обогнать волну одной частоты (и тогда возникает конус излучения на этой частоте как на рис. 1) и отставать от более быстрых волн, имеющих другие частоты (и на этих частотах тогда не будет излучения). В опытах Черенкова дисперсия оказывалась существенной, и она была учтена в теоретическом рассмотрении Тамма и Франка. Учет дисперсии привел к ряду существенных отличий в результатах. В частности, без учета дисперсии нельзя даже оценить энергию излучения.

Второе уточнение, сделанное Таммом и Франком, заключается в следующем. Хевисайд рассмотрел случай, когда скорость заряженной частицы в среде превышает скорость света в этой среде. В остальном он считал, что скорость частицы может быть сколь угодно большой. Теперь мы знаем, что скорость любой частицы имеет предел — скорость света. Хевисайд этот предел не признавал. В остальных отношениях теория Хевисайда близ-

ка к теории Франка и Тамма, которые, не зная работ Хевисайда, рассмотрели все заново и более полно.

О том, что некоторые существенные черты явления предсказаны в работах Хевисайда, вспомнили только в 1974 г., через сорок лет после того, как было обнаружено излучение Вавилова — Черенкова и через восемьдесят лет после того, как в работах Хевисайда появились первые указания на возможность такого излучения. В этом случае Хевисайд опередил свое время почти на пятьдесят лет.

Излучение сверхсветовых заряженных частиц получило название излучение Вавилова — Черенкова. (За рубежом более принято название «излучение Черенкова».)

В 1958 г. за открытие и объяснение этого явления Тамм, Франк и Черенков были удостоены высшего международного научного отличия — Нобелевской премии. К тому времени свечение Вавилова — Черенкова нашло важные применения в ядерной физике.

В статье Эйнштейна «О методе теоретической физики» есть рассуждение о связи опыта и логического мышления: «Но если опыт есть начало и конец всего нашего знания, то какова же роль логического мышления в науке? Полная система теоретической физики состоит из понятий, фундаментальных законов, которые должны иметь силу для этих понятий и следствий, выведенных посредством логической дедукции. Это те следствия, которые должны соответствовать нашему единичному опыту. В любом теоретическом трактате их логический вывод занимает почти все страницы» и дальше: «Логическое мышление определяет структуру этой системы; то, что содержит опыт и взаимные соотношения опытных данных, должно найти свое отражение в выводах теории»⁷.

Максвелловская электродинамика — один из примеров, которые поясняют мысль Эйнштейна. В этой теоретической схеме основные понятия — электрическое поле и магнитное поле. Связь этих понятий между собой задается уравнениями Максвелла. Для того чтобы получить из теории следствия, проверяемые на опыте, надо решить систему уравнений Максвелла, т. е. определить поля при заданных физических условиях.

Мы знаем теперь, что теория Максвелла охватывает колоссальный круг явлений и является основой для важнейших приложений.

Теория Максвелла широко применяется для расчета и проектирования электродвигателей, генераторов, радиоприемных и радиопередающих устройств, линий связи, линий электропередачи, сетей энергоснабжения, ускорителей термоядерных установок — все перечислить невозможно. Такое широкое применение вызвано не тем, что мы умеем решать уравнения Максвелла, а

⁷ Эйнштейн А. Собр. научных трудов. М.: Наука, 1967, с. 182.

главным образом тем, что мы теперь понимаем основные понятия и руководящие физические идеи, лежащие в основе теории Максвелла. Здесь, как и всюду понимание основных принципов является главным, а математический аппарат — играет хотя и важную, но вспомогательную роль.

Прояснение физических идей, положенных в основу электромагнитной теории, является великой заслугой Хевисайда, человека, опередившего свое время и, видимо, потому не получившего того признания, которого он заслуживает.

ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ СПИСОК РАБОТ ХЕВИСАЙДА

Практически все опубликованные работы Хевисайда собраны в его пяти книгах:

1. *Heaviside O. Electrical Papers.* L.; N. Y.: Macmillan, vol. 1, 1892.
 2. *Heaviside O. Electrical Papers.* L.; N. Y.: Macmillan, vol. 2, 1892.
 3. *Heaviside O. Electromagnetic Theory.* L.: The Electrician Co., vol. 1, 1893.
 4. *Heaviside O. Electromagnetic Theory.* L.: The Electrician Co., vol. 2, 1899.
 5. *Heaviside O. Electromagnetic Theory.* L.: The Electrician Co., vol. 3, 1912.
- Трехтомник *Electromagnetic Theory* [3—5] издавался трижды, каждый раз другим издательством (второе издание — в 1922, третье — в 1951). Третье издание снабжено введением Э. Вебера с историческим и критическим анализом трудов О. Хевисайда.

СТАТЬИ О ХЕВИСАЙДЕ

6. *Fitzgerald G. F. The Scientific Writings of the late George Francis Fitzgerald.* Dublin and London, 1902.
 - Рецензия на двухтомник О. Хевисайда *Electrician Papers*.
 7. *Lodge O.* — *El. World*, 85, p. 403 (1925).
 8. *Behrend B. A.* — *El. World*, 85, N 8, p. 405 (1925).
 9. *Bethenod M. J.* — *Bulletin de la Société Française des Electriciens*, vol. 5, p. 232 (1925).
 10. *Gill F.* — *The Bell System Technical Journal*, July, 1925, p. 349.
 11. *Russel A.* — *Nature*, February 14, 1925, p. 237.
- В статьях [7—11], написанных в год смерти Хевисайда, кратко дана оценка его трудов и немного сказано о личных качествах.
12. *Behrend B. A.* *Electric Journal*, Jan. and Feb., 1928, Pittsburg, Pa.

О ТРУДАХ ХЕВИСАЙДА

13. *Berg J. Heaviside's Operational Calculus.* McGraw Hill, N. Y. and London, 1936 (second edition).
- В предисловии автор рассказывает о Хевисайде и приводит личные впечатления от встречи с ним. В приложении к книге дана работа Б. Беренда [12].
14. *Appleyard R. Oliver Heaviside.* — In: *Pioneers of Electrical Communication.* Macmillan and Co., 1930, p. 211—260.
- Биография Хевисайда, содержащая много сведений о его жизни.
15. *Lee G. Oliver Heaviside and the mathematical theory of Electrical Communication.* London, Longmans, Green and Co., 1947.
- Биография О. Хевисайда с изложением некоторых полученных им важных результатов.
16. *Wagner K. W. Physikalische Blätter*, 1950, N 10, p. 460.
- Статья, написанная к столетию со дня рождения О. Хевисайда. В сравнительно небольшом объеме имеется много полезных сведений о жизни и творчестве Хевисайда и о судьбе некоторых его открытий.
17. *Heaviside Centenary Volume.* London, the Institution of Electrical Engineers, 1950.

Материалы заседания Института инженеров-электриков 18 мая 1950 года по случаю столетия со дня рождения Хевисайда. Очень содержательное издание, включающее воспоминания о Хевисайде, анализ его неопубликованных рукописей, выступления специалистов (физиков, математиков, инженеров) о развитии идей, высказанных О. Хевисайдом.

18. *Dr. Derwent Mercer.* Rewards that came too late. Broadcast on BBC on Jan. 22 and March 2, 1976.

Популярная статья о Хевисайде, посвященная 125-летию со дня рождения.

УДК 93/99(53)+536.765

Г. А. СУЛЕЙМАНИАН *

МАКСВЕЛЛ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ ПРИРОДЫ НОСИТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА В МЕТАЛЛАХ

Дж. К. Максвелл, являясь создателем электромагнитной теории и основ статистической физики, является также родоначальником нового экспериментального направления в истории физики; экспериментальное изучение по выяснению природы носителей электрического тока в металлах («субстанциональность» или «несубстанциональность») впервые начал Максвелл вскоре после создания им научной модели электромагнитного поля в 1861 г. Но в истории физики эти вопросы не нашли должного внимания и оценки; дело в том, что история электроинерционных экспериментов в современных руководствах и специальных историко-научных исследованиях излагается недостаточно объективно. По этому поводу справедливо заметил акад. П. Л. Капица: «До сих пор во всех известных мне энциклопедиях и курсах физики не было отмечено, что идея этих опытов (т. е. электроинерционных. — Г. С.) уже высказана Максвеллом в его «Трактате». Максвелл допускает, и приводит два эксперимента, осуществленных им для ее обнаружения» [1]. Максвелл не принадлежит к числу тех ученых, чьи работы и результаты остались незамеченными его современниками. Но тем не менее в историко-научной литературе имеет место такое (досадное) явление.

Если в первой части своей работы «О физических силовых линиях» [2] («Теория молекулярных вихрей в применении к магнитным явлениям») Максвелл строит вихревую теорию электромагнитных явлений, то во второй части этой работы («Теория молекулярных вихрей в применении к электрическим токам») он строит последовательно на основе вихревого поля и промежуточных частичек теорию электрической проводимости в такой среде: «...согласно нашей гипотезе электрический ток может быть

* Всесоюзный научно-исследовательский институт электромеханики.

представлен как поступательное движение частиц, расположенных между соседними вихрями» [2, с. 135]. Здесь нужно особо отметить, что Максвелл одновременно сконструировал специальные приборы-установки и поставил эксперименты по обнаружению инерции токов, которые он подробно описывает в своем «Трактате об электричестве и магнетизме» (1873) (см. т. 2, гл. 6).

В своих экспериментах Максвелл пытался обнаружить взаимодействие вращения с вихрями и промежуточными частичками. Максвелл по этому поводу пишет: «Вращательный момент системы вихрей зависит от их среднего диаметра, так что если бы диаметр был не столь мал, мы могли ожидать, что магнит был бы себя так, как если бы он содержал внутри себя вращающееся тело. Существование такого вращения могло бы быть обнаружено опытами по свободному вращению магнита. Я делал опыты с целью исследования этого вопроса, но еще не полностью проверил аппарат» [2, с. 156]. Это он пишет в 1861 г.

В экспериментах Максвелла проверялась «субстанциональность» или «несубстанциональность» носителей электрического тока в металлах. В этих экспериментах Максвелл исследовал влияние механического движения проводников на движение носителей тока и наоборот. При постановке своих экспериментов Максвелл исходил из того, что если электрический ток есть нечто вроде материального потока, то он должен обладать некоторой инерцией. Тогда, если электрический ток действительно обладает инерцией, то он должен иметь и механические проявления (гироскопические свойства). Ниже коротко опишем первую экспериментальную установку Максвелла («Трактат», п. 574). Это устройство представляет собой свободно подвешенную горизонтальную катушку, через которую по подвесам пропускается относительно сильный ток. Пройдя по всем виткам катушки, ток идет далее вниз через проволоку в направлении подвеса и цепь замыкается через сосуд с ртутью, в который опущена проволока. По зайчику от зеркала, прикрепленного к катушке, Максвелл пытался в опыте обнаружить колебания катушки при пропускании через нее тока, и заодно инерцию носителей тока. Идея опыта с точки зрения современных представлений в высшей степени правильна. Забегая вперед нужно особо отметить, что именно с этого эксперимента Максвелла начинается идея инерционных экспериментов в области электромагнетизма; идея этого эксперимента лежит в основе всех последующих инерционных экспериментов, которые привели к важным следствиям в физике. В своем эксперименте Максвелл не мог обнаружить инерцию носителей тока. По этому поводу Максвелл многозначительно замечает: «Если бы было открыто какое-либо действие такого рода, мы могли бы рассматривать один из так называемых родов электричества, или положительное, или отрицательное, как реальную субстанцию, и мы имели бы возможность описывать электрический ток как истинное движение субстанции в определенном направлении» [3, с. 437].

Максвелл поставил и другого рода инерционный эксперимент по определению природы носителей тока (см. «Трактат», т. 2, п. 575). Эта установка сложнее, чем описанная выше. Но принцип тот же самый: обнаружить взаимодействие вращения и электрического тока. В этом эксперименте Максвелл тоже не получил положительного результата, что заставило его признаться: «...если магнит содержит материю, находящуюся в быстром вращении, момент количества движения должен быть весьма малым по сравнению с любыми величинами, которые мы можем измерить» [3, с. 440].

В «Трактате» Максвелл одновременно развил очень строгий (и изящный) математический аппарат, при помощи которого подробно анализировал последствия своих экспериментов. Нужно особо отметить, что главы 5 и 6 (т. 2) являются одним из лучших разделов этого бесценного труда. На основе своих опытов и анализа результатов Максвелл делал общий вывод, что отсутствует взаимодействие механического движения проводников с текущим по ним электричеством; он делает общее заключение, что если есть материальные носители электрического тока, то их скорость ничтожна, или нуль.

Доказывают ли эксперименты, проведенные Максвеллом, что электрический ток не имеет инерции?

Из отрицательного результата экспериментов Максвелла можно делать только следующие выводы: а) ток мог состоять из двух идентично равных, но противоположных течений электрических субстанций, так что механические следствия двух потоков взаимно компенсировались, или б) инерция электрического тока так мала, что эксперименты Максвелла не могли зафиксировать ее наличие.

Теперь мы можем констатировать, что хотя идея экспериментов Максвелла верна, но несовершенство экспериментальной техники того времени явилось единственной помехой обнаружения носителя электрического тока в металлах — электрона.

Эксперименты, в которых ставили целью определить природу и скорость носителей тока в металлах, интересовали многих известных физиков, которые разрабатывали новые методы на новых идейных началах для проверки инерционных свойств носителей тока. И один из тех, кто начал свою научную деятельность с экспериментами в этой области, был Г. Герц (1857—1894). Первая работа Герца на научном поприще была опытная проверка наличия кинетической энергии или инертности у электрических носителей тока (тема была предложена Г. Гельмгольцем) при протекании тока в металлических проводниках (1880) [4]. На основе своих экспериментов Герцу удалось доказать, что находящаяся под вопросом кинетическая энергия движущегося электричества, если только она вообще отлична от нуля, должна быть, во всяком случае, очень малой величиной.

По сравнению с экспериментами Максвелла, которые были чисто механическими, опыты Герца были более совершенными и

более точными, хотя еще недостаточными для обнаружения инерции носителей.

Одновременно с Герцем занялся этим же вопросом Э. Г. Холл (1855—1938), который вел исследование с других позиций. Холл исследовал влияние внешнего магнитного поля на протекающий электрический ток в металлах (эффект Холла) (1879) [5]. Эффект Холла свидетельствует о том, что при прохождении электрического тока через металл происходит перенос заряда, так как на покоящиеся заряды магнитное поле не действует. На основе экспериментов Холла можно дать утвердительный ответ на многие вопросы, волновавшие Максвелла и Герца; носителями электрического тока в металлах являются заряды, а не что-либо другое (эфирные частицы и т. п.). На основе эффекта Холла (в сочетании с другими электрическими характеристиками металла) можно получить также косвенные данные о скорости движения носителей электрического тока. Трудно переоценить роль и значение эффекта Холла особенно для современной физики; измеряя постоянную Холла, можно определить знак (и плотность) носителей электрического тока.

Наряду с открытием явления переноса заряда, возникли и принципиальные трудности. Так, например, если для благородных металлов постоянная Холла отрицательна (т. е. носители тока отрицательные заряды), то для некоторых металлов (железо, кобальт, цинк, и т. д.) эта постоянная оказалась положительной (т. е. носители, вроде, положительные заряды).

После открытия электрона (1897) и возникновения классической электронной теории проводимости металлов (1900) вопрос о носителях тока получил сильное подкрепление. Хотя теория, следующая из эффекта Холла, не могла разрешить возможность существования двух видов носителей тока, все же она разрешила многие вопросы физики металлов, и в особенности — теории электропроводности металлов.

Известно, что наличие свободного электронного газа (гипотеза, лежащая в основе классической электронной теории металлов) влечет за собой такие следствия, которые экспериментально невозможно было зафиксировать (значительная электронная теплоемкость сверх атомно-решеточной; парамагнетизм электронного газа и др.). Поэтому в электронной теории металлов наступило время кризиса; все, связанное с электронным газом, взялось под сомнение (начиная примерно с 1905 г.). В такой обстановке, естественно, нужны были только прямые, а именно инерционные эксперименты, которые однозначно дали бы ответ о наличии (или об отсутствии) электронного газа в металлах.

В течение первой четверти XX в. в духе экспериментов Максвелла было поставлено несколько новых экспериментов по обнаружению и выяснению природы носителей тока в металлах. Эти эксперименты были поставлены более совершенными экспериментальными методами и более чувствительными измеритель-

ными приборами. Как известно, идея механического обнаружения инерции электронов в своей основе не сложна, но ее экспериментальное осуществление представляет большие технические трудности.

Начало новой (можно сказать электронной) серии инерционных экспериментов связано с именем Е. Ф. Никольса (1906) [6]. В своем эксперименте Никольс исходил из того, что если металлический диск привести во вращение, то электроны под влиянием инерционной силы должны переместиться к краю диска; поэтому край диска зарядится отрицательно, а середина — положительно. Равновесие наступит тогда лишь, когда электрическое поле, созданное смещением зарядов, как раз скомпенсирует действие центробежной силы на электроны. Эффект в опыте Никольса (по оценкам) оказался таким ничтожным, что он, следовательно, не мог статически измерить ожидаемую разность потенциалов между центром и краем диска.

Следующий эксперимент по обнаружению инерции электронов предприняли известные советские физики Л. И. Мандельштам (1879—1944) и Н. Д. Папалекси (1880—1947). Советские физики Я. Г. Дорфман и И. К. Кикоин в книге «Физика металлов» (1934) пишут (ссылаясь на сведения, полученные от самого Папалекси): «В 1913—1914 гг. Л. И. Мандельштам и Н. Д. Папалекси в Страссбурге впервые (это досадная неточность.— Г. С.) попытались обнаружить электроинерционный эффект у металлов. Идея опыта заключалась в следующем: пусть кусок металла сначала быстро движется, в момент остановки его электроны проводимости продолжают по инерции двигаться дальше, и это продолжающееся поступательное движение проявится как толчок электрического тока. Аналогичный эффект, но в обратном направлении, должен получиться в момент начала движения металла. Мандельштам и Папалекси укрепили на оси толстого латунного стержня катушку медной проволоки, соединенную с телефоном. Посредством особого механического приспособления стержень приводится в крутильные колебания с частотой, соответствующей его собственному периоду. Благодаря резонансу амплитуда колебаний достигла значительных размеров. Весь прибор был изготовлен из неферромагнитных материалов и тщательно защищен от действия магнитных полей (в основном Земли.— Г. С.). Авторам удалось наблюдать наличие толчков тока по звуку в телефоне» [7]. Нужно отметить, что опыт Мандельштама — Папалекси качественный (акустический эффект через телефон). К сожалению, этот эксперимент не завершился из-за начавшейся первой империалистической войны, а в последующем так и не был снова поставлен.

Цель любого электроинерционного эксперимента заключается не только в качественном доказательстве наличия (или отсутствия) подвижных носителей тока в металлах, но и в конечном счете определение отношения заряд/масса, откуда можно было бы заключить о конкретном виде носителей тока. В вышеуказан-

ных экспериментах Никольса и Мандельштама — Папалекси не-возможно было определение этого отношения. Они в лучшем случае указали верность выбранного направления поисков природы тока в металлах.

Следующий успешный этап экспериментального исследования природы носителей электрического тока в металлах связан с именами американских физиков Р. Толмена (1881—1948) и Т. Стюарта, которые по предложению Г. А. Лоренца (1853—1928) в 1916 г. осуществили идею Максвелла [8]. В опыте Толмена и Стюарта катушка из металлической проволоки приводилась в быстрое вращение вокруг своей геометрической оси (линейная скорость на поверхности катушки достигла 300 м/с). Исследуемые катушки изготовлялись из медной, алюминиевой и серебряной проволоки. Направление отклонения гальванометра показало, что, во-первых, носителями тока в исследованных металлах являются отрицательные заряды. А во-вторых, для удельного заряда было получено следующее численное значение для всех исследованных образцов:

$$e/m = 1,6 \cdot 10^{11} \text{ (Кл/кг)}. \quad (1)$$

Соответствующее значение со свободными электронами в катодных трубках

$$e/m = 1,77 \cdot 10^{11} \text{ (Кл/кг)}. \quad (2)$$

Как видно из приведенных значений (1) и (2), в пределах ошибок эксперимента, они почти одинаковы.

Первая установка Толмена и Стюарта, однако, имела некоторые недостатки, которые снизили точность измерений. Поэтому в 1923 г. Толмен, Каррер и Гернси [9] поставили новый, более точный эксперимент; мы не будем здесь описывать детали этого эксперимента. Стоит только напомнить, что во избежание каких-либо магнитных воздействий Земли на измерительный цилиндр все металлические части были сделаны из неферромагнитных металлов. А для защиты от случайных трясок цилиндров в земном магнитном поле вся установка была укреплена чрезвычайно прочно на специально построенном массивном бетонном столбе. В этом новом эксперименте были получены следующие значения (Кл/кг) удельного заряда:

$$\begin{aligned} &1,60 \cdot 10^{11} \text{ (для меди)} \\ \frac{e}{m} &= 1,485 \cdot 10^{11} \text{ (для серебра)} \\ &1,54 \cdot 10^{11} \text{ (для алюминия)} \end{aligned} \quad (3)$$

Эти значения довольно близки к современному значению удельного заряда электрона: $1,759 \cdot 10^{11}$.

Перечень электроинерционных экспериментов не так уж большой, чтобы не охватить их всех в данной работе (особенно те, которые завершились конкретными результатами). Такого характера эксперименты ставились большей частью эпизодиче-

ски; запланированные эксперименты в различных лабораториях с проверкой результатов друг друга не проводились до сих пор в физике. Эксперименты в области непосредственного доказательства наличия свободного квантовой теории электропроводности продолжались и после успеха квантовой теории электропроводности металлов. Так, в 1944 г. Каттеринг и Скотт [10] произвели опыт, являющийся как бы обратным опыту Толмена и Стюарта. Они наблюдали изменение момента импульса проволоочной катушки при изменении тока в ней. Этот эксперимент поставлен значительно точнее и с использованием более современной экспериментальной техники. В результате экспериментов Каттеринга и Скотта были получены следующие результаты (к/кг):

$$\frac{e}{m} = \begin{aligned} &1,76 \cdot 10^{11} \text{ (для меди)} \\ &1,77 \cdot 10^{11} \text{ (для алюминия)} \end{aligned} \quad (4)$$

Значение удельного заряда для вакуума весьма близко к вышеприведенным данным (4) для электрона.

Как видно из всех вышеприведенных результатов, значение удельного заряда носителя электрического тока в металле с незначительными отклонениями почти совпадает с тем же значением для электрона в вакууме.

По отношению экспериментов по электроинерционному определению природы носителей тока в металлах нужно делать следующее важное замечание: для всех металлов, даже для тех, в которых наблюдается аномальный эффект Холла, знак удельного заряда оказался отрицательным.

В заключение нужно еще добавить, что все электроинерционные эксперименты, проведенные до сих пор, требовали производить нужные измерения в очень короткое время, время торможения электронов в металле. Чтобы иметь возможность произвести опыты в более благоприятных условиях более точно, желательно произвести их со сверхпроводящими металлами при температурах ниже их критической температуры сверхпроводящего перехода. В этом случае будут выявлены более интересные следствия, чем это имеет место с несверхпроводящими металлами. А еще интереснее произвести электроинерционные эксперименты выше и ниже критической температуры и, таким образом, выявить особенности сверхпроводящего перехода на движение электронов, взаимодействие вращающегося на сверхпроводящее состояние проводников. Эти новые электроинерционные эксперименты подтвердят (или опровергнут) гипотезу куперовских электронных пар, дадут сведения о характере тока в сверхпроводниках.

ЛИТЕРАТУРА

1. Капица П. Л. Эксперимент, теория, практика. М.: Наука, 1974, с. 240.
2. Максвелл Дж. К. О физических силовых линиях. — В кн.: Избр. соч. по теории электромагнитного поля. М.: Гостехтеориздат, 1954.
3. Максвелл Дж. К. Трактат об электричестве и магнетизме. — В кн.: Избр. соч. по теории электромагнитного поля. М.: Гостехтеориздат, 1954.

4. Hertz H. Versuche zur Feststellung einer oberen Grenze für die kinetische Energie der elektrischen Strömung.— Ann. Phys., 1880, vol. 10, S. 414—448.
5. Hall E. H. About new method action of magnet on the electrical currents.— Amer. J. Math., 1879, vol. 2, p. 287—296.
6. Nichols E. F. Die Möglichkeit einer durch zentrifugale Beschleunigung erzeugten elektromotorische Kraft.— Phys. Zs., 1906, vol. 7, S. 3—12.
7. Дорфман Я. Г., Кикоин И. К. Физика металлов. М.; Л.: Гостехтеориздат, 1934, с. 125—126.
8. Tolman R. C., Stewart T. D. The Electromotive force produced by the acceleration of metals.— Phys. Rev., 1916, vol. 8, p. 97—116.
9. Tolman R. C., Sarrer S., Guernsey E. F. Further experiments on the mass of electric Carrier in Metals.— Phys. Rev., 1923, p. 525—539.
10. Kettering C. F., Scott G. G. Inertia of the Carrier of Electricity in Copper and Aluminium.— Phys. Rev., 1944, vol. 66, p. 257—267.

УДК 533.3+536.765

Б. Е. ЯВЕЛОВ, А. Я. КИПНИС *

МАКСВЕЛЛ И ВАН-ДЕР-ВААЛЬС

14 июня 1873 г. в Лейденском университете И. Д. Ван-дер-Ваальс защитил ставшую впоследствии знаменитой докторскую диссертацию «О непрерывности газообразного и жидкого состояния» [1]. Первым из физиков за рубежом Голландии откликнулся на «Непрерывность»¹ Максвелл (во всяком случае, найти более раннее упоминание никому пока не удалось). Этот примечательный факт хорошо известен, но — как это довольно часто происходит со славными эпизодами истории науки — подспудно он трансформировался в своего рода назидательную и изрядно подслащенную притчу о том, как один гениальный физик трогательно напутствовал выдающегося собрата по науке, еще только начинающего творческий путь.

Мы постараемся показать, что в свете имеющихся материалов этот эпизод выглядит далеко не столь банальным и примитивным, что реальная ситуация была достаточно своеобразной, даже по-своему драматичной, наконец, интересной... Словами поэта:

Чреду веков питает новость.
Но золотой ее пирог,
Пока преданье варит соус,
Встает нам горла поперек. [2, с. 257]

МИФОЛОГИЯ

Сначала вкратце о преданье или, точнее, о «мифе».

Пишет видный американский историк физики С. Браш: «Я должен сказать, что собственная работа Ван-дер-Ваальса

* Институт Гипроникель (Ленинград).

¹ Так в течение полувека обычно называли классическую работу Ван-дер-Ваальса.

была сначала опубликована на голландском языке и едва ли бы о ней так быстро узнали в Англии и других странах, если бы не то обстоятельство, что шотландский физик Джеймс Клерк Максвелл не опубликовал восторженную рецензию (enthusiastic review) в «Nature» в 1874 г. Как отметил Максвелл в лекции в следующем году, диссертация Ван-дер-Ваальса «определенно направила внимание не одного исследователя на изучение голландского языка, на котором она написана» [3]. Крупный современный специалист по молекулярной физике, знаток творчества Ван-дер-Ваальса, английский ученый Дж. С. Роулинсон: «Эта голландская работа могла бы не найти быстрого признания, если бы Максвелл не посвятил ей в «Nature» обширную рецензию» [4]. Тот же Роулинсон в другой статье: «То, что он (Ван-дер-Ваальс) сделал и что вызвало восхищение (admiration) таких людей, как Максвелл, Рэлей, Оствальд, было...» [5].

Чтобы не загромождать изложение цитатами, ограничимся этими примерами, хотя их число нетрудно умножить. Отметим только, что высказывания такого рода встречаются и в голландской, и в немецкой и в отечественной литературе (см., напр., [6, с. 420; 7, с. 42]).

УРАВНЕНИЕ ВАН-ДЕР-ВААЛЬСА

Перефразируя известное изречение Г. Герца о теории Максвелла, можно сказать: «Непрерывность» Ван-дер-Ваальса — это вандерваальсовское уравнение состояния реальных газов

$$\left(p + \frac{a}{v^2}\right)(v - b) = RT \quad (1)$$

(здесь p — внешнее давление, v — удельный объем, T — температура, R — универсальная газовая постоянная, a и b — константы, характеризующие соответственно силы межмолекулярного притяжения и собственный объем молекул).

От известного задолго до Ван-дер-Ваальса уравнения состояния идеального газа (газа из невзаимодействующих молекул точечных размеров)

$$pv = RT \quad (2)$$

уравнение (1) отличается тем, что введены две поправки. К внешнему давлению p добавлено внутреннее или «молекулярное» давление a/v^2 , возникающее вследствие притягательных сил, стремящихся сблизить молекулы, а из объема v , занимаемого газом, вычтен объем, недоступный для теплового движения молекул b , который, согласно расчетам Ван-дер-Ваальса, равен учетверенному суммарному объему молекул (а не просто суммарному объему молекул, как это кажется на первый взгляд).

Свое знаменитое уравнение Ван-дер-Ваальс построил, исходя из опубликованной Р. Клаузиусом в 1870 г. теоремы вириала,

выражаемой равенством

$$\left\langle \sum_i \frac{1}{2} m_i \bar{u}_i^2 \right\rangle = -\frac{1}{2} \left\langle \sum_i \bar{r}_i \bar{F}(\bar{r}_i) \right\rangle, \quad (3)$$

в котором m_i , $\bar{u}_i$ и $\bar{r}_i$ — соответственно масса, скорость и радиус-вектор i -й частицы, $\bar{F}(\bar{r}_i)$ — действующая на эту частицу сила, а угловые скобки означают усреднение по времени. Величину, стоящую в угловых скобках с правой стороны (3), Клаузиус назвал вирналом (от латинского *vires* — силы). Таким образом, теорема вирнала, справедливая для системы материальных частиц, совершающих «стационарное» движение (т. е. движущихся в ограниченном пространстве и без постоянных ускорений), гласит, что среднее значение кинетической энергии этой системы равно взятой со знаком минус половине среднего значения вирнала. Построив уравнение (1), Ван-дер-Ваальс, используя экспериментальные данные по сжимаемости газов, полученные знаменитым в те времена французским физиком В. Реньо, определил численные значения констант a и b для нескольких газов.

В числе этих газов была и углекислота, результаты экспериментальных исследований которой были впервые «обнародованы» шотландским физиком (и химиком) Т. Эндрюсом в 1869 г. в его исторической бэйкеррианской лекции «О непрерывности газообразного и жидкого состояния материи» (таким образом, названия лекции Эндрюса и диссертации Ван-дер-Ваальса, фактически, совпадают). В своих глубоко продуманных и тщательно выполненных опытах Эндрюс определил семейство изотерм, т. е. кривых $p(v)$ для углекислоты в диапазоне давлений до 110 атм и при температурах от 13 до 50°С (рис. 1). Важнейшим результатом этой работы (с ней Ван-дер-Ваальс познакомился не ранее 1871 г.) было прямое и не оставляющее никаких сомнений экспериментальное доказательство того фундаментального положения, что «...газообразное и жидкое состояние (states) суть только далеко отстоящие состояния (conditiones) материи, и что они способны переходить друг в друга путем непрерывного изменения» [8, с. 49]. Эндрюс также показал, что переход из газообразного состояния в жидкое может происходить лишь ниже определенной температуры, которую он назвал критической². Для критической температуры (T_k) углекислоты он нашел значение 31°С; при более высоких температурах ожижение не достигается ни при каком давлении.

Ван-дер-Ваальс показал, что изотермы, соответствующие его уравнению (1) с константами, определенными по скудным данным Реньо, самым блестящим образом согласуются с тщательно промеренными изотермами Эндрюса. Уравнение Ван-дер-Ваальса полностью воспроизводило и характерное изменение вида

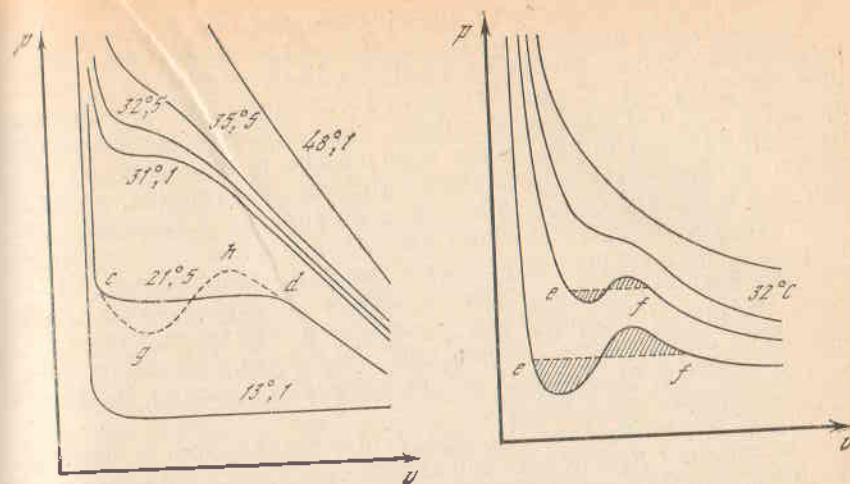


Рис. 1. Изотермы Эндрюса, дополненные построением Дж. Томсона (пунктир)

Рис. 2. Изотермы Ван-дер-Ваальса, дополненные прямыми ef , проведенными по правилу равных площадей Максвелла (заштрихованные области)

эндрюсовских изотерм при переходе через критическую температуру. Действительно, уравнение (1), как кубическое по v , может обладать либо тремя, либо одним вещественным положительным корнем (естественно, что физический смысл имеют лишь такие решения) и, следовательно, при данной температуре возможны либо три значения удельного объема, либо одно (рис. 2). Температуру, начиная с которой уравнение (1) обладает только одним решением, естественно сопоставить с критической точкой. Вычислив критическую температуру для углекислоты по уравнению (1), Ван-дер-Ваальс получил значение 32,5°С, впечатляющим образом согласовавшееся с эндрюсовским экспериментальным значением 31°С!

При температурах ниже критической уравнение Ван-дер-Ваальса вместо прямолинейного участка cd дает «волну» ef . Но это обстоятельство не выглядело как противоречие между ван-дер-ваальсовской теорией и данными опыта. Еще в 1871 г. коллега Эндрюса по Квин-Колледжу (Белфаст) Джеймс Томсон³ выдвинул гипотезу о том, что в каких-то специфических условиях вместо прямолинейных участков эндрюсовских изотерм могут реализовываться «волны» $cghd$ (совсем как ван-дер-ваальсовские), сообщающие кривым физически привлекательную непрерывность [9]. Отсутствие этих «волн» в реальных экспериментах Томсон, как и вслед за ним Максвелл и Ван-дер-Ваальс, склонен был объяснять неустойчивостью гипотетических состояний.

³ Старший брат Уильяма Томсона — лорда Кельвина.

² Общеизвестно, что приоритет в открытии этого факта принадлежит Д. И. Менделееву, который в работе 1860 г. назвал эту температуру «абсолютной точкой кипения».

«Открыл» ли Максвелл Ван-дер-Ваальса? Прежде, чем перейти к максвелловской рецензии на «Непрерывность», опубликованной в «Nature» 15 октября 1874 г., повторим еще раз, что сказал Максвелл 18 февраля 1875 г. в лекции, прочитанной в Лондонском химическом обществе: «диссертация Ван-дер-Ваальса определенно направила внимание не од-ного исследователя на изучение голландского языка, на котором она написана» [10]. Максвелл не говорит «направит», он констатирует, что диссертация уже привлекла к себе внимание и причем, по меньшей мере, нескольких исследователей. И исследователей — не голландцев, которым «изучать» голландский язык, очевидно, не требуется. Кроме того, думается, что выступая перед Лондонским химическим обществом, Максвелл имеет в виду, конечно, английских исследователей, а скажем, не немецких или французских ученых.

Таким образом, едва ли фразу Максвелла можно истолковывать иначе, чем как констатацию того довольно примечательного факта, что к февралю 1875 г. уже несколько английских ученых дали себе труд ознакомиться с голландским языком настолько, чтобы разобратся в ван-дер-ваальсовской «Непрерывности».

Кто же были эти ученые? К сожалению, с уверенностью указать нескольких мы не в состоянии. Но зато одно имя мы можем назвать с абсолютной уверенностью — Т. Эндрюс.

Собственно говоря, это вполне очевидно и а priori. Традиция рассылать тексты защищенных диссертаций в другие университеты, в том числе зарубежные, существует с незапамятных времен. Нетрудно привести ряд фактов, свидетельствующих о том, что научные связи Лейденского университета с университетами Англии, близкой «соседки» Голландии, были достаточно тесными давние. Связан с английскими профессорами был и научный руководитель Ван-дер-Ваальса (а впоследствии и Лоренца) профессор П. Л. Рейке. В свете сказанного можно ли себе представить, что работа Ван-дер-Ваальса, столь блестяще объяснявшая находившиеся в ту пору в центре внимания физиков всей Европы эксперименты Эндрюса, не была ему направлена?

Но имеется и документальное свидетельство. Сохранилось письмо, посланное Эндрюсом 4 февраля 1874 г. Дж. Томсону в Белфаста (в это время Дж. Томсон уже не работал в Белфасте). В постскрипуме письма Эндрюс сообщал: «Мы упорно работаем над Дидериком Ван-дер-Ваальсом» (с. LXXI). Таким образом, ясно, что, по крайней мере в 1874 г., «Непрерывность» уже «направила внимание на изучение голландского языка». Столь же несомненно, что в курсе дела в это время был и Дж. Томсон — иначе как

тум белфастского послания был бы для него безнадежным ребусом. Скорее всего, Дж. Томсон также получил свой экземпляр «Непрерывности» — ведь как-никак Ван-дер-Ваальс ссылаясь там и на него и, более того, придавал основательность его все же очень зыбкой гипотезе неустойчивых состояний. К этому нужно еще добавить, что имя Дж. Томсона в те годы было весьма популярно, в частности, в связи с воспринятым, как сенсация, его открытием повышения температуры плавления льда под давлением.

Нам кажется, что приведенная аргументация вполне доказывает, что Максвелл не «открыл» Ван-дер-Ваальса, по крайней мере, Эндрюсу и Дж. Томсону — ведь эндрюсовское письмо было написано за восемь месяцев до рецензии Максвелла. Чтобы окончательно развеять миф об этом «открытии» Максвелла (думаем, его величие от этого никак не померкнет), предоставим, наконец, слово самому автору «Непрерывности».

В своей Нобелевской лекции в декабре 1910 г. Ван-дер-Ваальс⁴ совершенно недвусмысленно отметил: «...я пришел к формуле (1), получившей всеобщую известность только благодаря усилиям Эйльгарда Видемана» [12]. Действительно, в 1877 г. в первом номере сразу завоевавшего популярность немецкого реферативного журнала «Beiblatter zu den Annalen der Physik und Chemie» появился подробный (на 12 страницах) реферат ван-дер-ваальсовской диссертации, составленный Э. Видеманом⁵ при участии автора» [13]. И именно этим рефератом было положено начало международному признанию Ван-дер-Ваальса.

Думается, что эта фраза Ван-дер-Ваальса в Нобелевской лекции отнюдь не случайна — (голландский ученый вообще никогда не допускал необдуманных высказываний) — имеются основания и для дальнейшего — полагать, что и он сам хотел откrestить от уже тогда бытовавшего мифа об этом максвелловском «открытии».

ПЕРВЫЙ ОТКЛИК МАКСВЕЛЛА

Вспомогательным фактом за пределами Голландии первым откликнулся на «Непрерывность» все-таки Максвелл. И это произошло за несколько месяцев до появления его подробного разбора работы Ван-дер-Ваальса.

В номере «Nature» от 18 июня 1874 г. Максвелл поместил свою историческую рецензию [14] на книгу замечательного физика-экспериментатора (слепого!) и одновременно создававшего его многочисленные и необычайно кра-

сивные работы уже 73 года, но, судя по продолжавшейся памяти ему не изменяла.

Интересная фигура: сын маститого физика и математика Г. Видемана и дочери выдающегося ученого, которого он получил свое имя Эйльгарда Видемана, историк арабской науки, человек, владевший несколькими европейскими языками.

⁴ Бесси — одна из дочерей Эндрюса, которую он, видимо, считал своим научным преемником.

сивые опыты с пленками жидкостей' [15]. Рецензия Максвелла «Плато о мыльных пузырях» — короткое, но блистательное эссе, впечатляющее литературным мастерством, живостью изложения и широтой подхода — так, наряду с прочим, создатель электродинамики обсуждает и «современную» коллизии физики и лирики. Но для нас наибольший интерес представляет следующее место: «Мистер Ван-дер-Ваальс, академическая диссертация которого «О непрерывности газообразного и жидкого состояния», принадлежит к ценнейшим вкладам (is a most valuable contribution)⁷ в молекулярную физику, попытался приблизительно рассчитать толщину слоя, в пределах которого происходит постепенное изменение энергии⁸, и нашел, что в случае воды это $3 \cdot 10^{-8}$ см. Чтобы мы не могли думать об этих расчетах (whatever we may think of these calculations), они, по меньшей мере, указывают на то, что единственный путь, посредством которого мы можем надеяться получить сведения относительно размеров молекул обычной воды, следует изыскивать среди тех явлений, которые становятся заметными, когда размеры тел в сильной степени уменьшаются, как в случае поверхностного слоя жидкости».

В этом коротком упоминании о диссертации Ван-дер-Ваальса уже присутствуют два положения, которые Максвелл через три месяца основательно разовьет в своей подробной рецензии. Первое — отменно благожелательный общий отзыв — «принадлежит к ценнейшим вкладам». Второе — в лучшем случае сдержанное отношение к конкретным результатам — «Чтобы мы не могли думать об этих расчетах...»

Не будем дальше анализировать эту короткую выдержку, отметим только еще следующее. В июне 1874 г. Максвелл уже имеет некоторое представление о диссертации Ван-дер-Ваальса. Известно, что наряду со многими другими выдающимися способностями Максвелл обладал и лингвистическим даром [16, с. 325]. Но «единственный язык, в освоении которого у него встретились какие-то трудности, был голландский» — как будто по нашей просьбе информируют нас близкие знавшие Максвелла биографы [16, с. 325]. Значит, великому физiku все же пришлось посидеть над текстом, хотя, безусловно, ему не надо было переводить слово за словом — он все схватывал налету, да и близкий

к голландскому немецкий он знал очень неплохо. Добавим еще, что в это время Максвелл был чрезвычайно занят: в 1873 г. — вышел его эпохальный «Трактат по электричеству и магнетизму», а за два дня до выхода «Nature» (с рецензией на Плато) была торжественно открыта Кавендишская лаборатория, в ходе создания которой он был душой всех дел — от проектирования, до строительства и оборудования.

Как бы там ни было, но кажется очевидным, что работа Ван-дер-Ваальса появилась у него задолго до июня 1874 г. А раз так, то напрашивается довольно естественный вывод: Эндрюс, Томсон и Максвелл (и Плато) получили свои экземпляры диссертации Ван-дер-Ваальса где-то в конце 1873 г. Во всяком случае из текста «вечерней лекции» Максвелла 25 сентября 1873 г. во время съезда Британской ассоциации в Бредфорде видно, что Максвелл работу Ван-дер-Ваальса еще не просматривал¹⁰.

КАК РЕАГИРОВАЛИ КОЛЛЕГИ МАКСВЕЛЛА?

К сожалению, дать сколько-нибудь полного ответа на вопрос, вынесенный в подзаголовок, мы не можем, и столь существенный для нашей темы параграф оказывается не солидно куцым.

Собственно говоря, мы располагаем лишь одним указанием.

О письме Эндрюса, poslanном Дж. Томсону в феврале 1874 г., уже говорилось. В письме, написанном Эндрюсом этому же адресату через два месяца, наряду с прочим сообщалось: «...я погрузился в голландскую работу (I am deep in the Dutch paper) и занимаюсь также моими собственными результатами, которые, я полагаю, окажутся более важными, чем я предполагал» [11, с. LXXI].

О чем свидетельствует эта фраза?

Во-первых, о том, что Эндрюс, по меньшей мере в течение двух с лишним месяцев, упорно разбирается в нелегком голландском тексте. А во-вторых, он, кажется, прямо говорит, что ван-дер-ваальсовская диссертация заставила его переосмыслить собственные результаты, осознать, что они, возможно, важнее, чем он считал ранее¹¹, т. е. до того, как познакомился с «Непрерывностью».

Во всяком случае, никаких признаков сколько-нибудь негативного отношения к диссертации Ван-дер-Ваальса усмотреть невозможно.

В 20 числах августа 1874 г. Максвелл, Эндрюс и Дж. Томсон присутствовали на ежегодном съезде Британской ассоциации в

⁷ Помимо собственных опытов в своем монументальном трактате (два тома общим объемом около 1000 страниц) Плато детально осветил и историю вопроса, систематизировал результаты других физиков; содержит трактат и обширную библиографию, доведенную почти до конца 1873 г. (Заметим, что труд Плато также датирован 1873 г.). В этом библиографическом списке под № 44 на 495 странице 2-го тома стоит «Непрерывность»! Кроме того, Ван-дер-Ваальс также значится и в именном указателе. Однако какие-либо комментарии отсутствуют, так что говорить об отклике Плато едва ли будет правильно.

⁸ Нам кажется, что перевод «...является ценнейшим вкладом...» был бы неточен, поскольку использован неопределенный артикль «a».

⁹ Речь идет о разности внутренних энергий жидкости и ее пара.

¹⁰ Максвелл мобилизовал все известные ему литературные данные по молекулярным параметрам, но ван-дер-ваальсовские — фактически самые прямые и достоверные — он не привел [17, с. 91].

¹¹ А. Эндрюс и ранее не склонен был недооценивать свое достижение. Еще в 1869 г. он писал жене: «Я в самом деле думаю, что Госпожа Природа, наконец, оказалась добра ко мне и одарила меня открытием более высокого порядка, чем я когда-либо надеялся сделать» [18, с. XXXI].

Белфасте. Каждый из них выступил с докладом, но только сообщение Эндрюса имело отношение — правда не непосредственное — к проблематике «Непрерывности»: он рассказал о своих исследованиях изотерм газовых смесей. Из письма Максвелла Эндрюсу, написанному в ноябре [18, с. LV], — цитировать это письмо было бы излишним — явствует, что, во-первых, «частных» бесед Максвелла, Эндрюса и Дж. Томсона во время съезда скорее всего не было, и, во-вторых, — и это можно утверждать с полной определенностью — осенью 1874 г. Максвелл был по-настоящему увлечен проблемой непрерывности газообразного и жидкого состояний, проблемой создания общей молекулярно-кинетической (или, как он предпочитал говорить, «динамической») теории газа и жидкости. При этом нельзя не отметить, что именно эта ван-дер-ваальсовская «Непрерывность» ознаменовала собой исторически первую попытку построения подобной теории.

МАКСВЕЛЛОВСКАЯ РЕЦЕНЗИЯ

Как же отнестись к «Непрерывности» Максвелл?

Начнем с общей оценки, больше характеризующей отношение Максвелла к автору работы, нежели к ее содержанию. «Мистер Ван-дер-Ваальс, взявшись за этот трудный вопрос¹² (inquiry), продемонстрировал свое понимание его важности для современного состояния науки, многие из его исследований (investigations) проведены чрезвычайно оригинальным и ясным образом и он постоянно высказывает новые и наводящие на размышления (suggestive) идеи; поэтому не может быть сомнения в том, что его имя скоро будет в числе лидеров молекулярного учения» [19].

Установившееся мнение о «восторженности» максвелловской рецензии существенно базируется именно только на этом высказывании. Безусловно, оно очень доброжелательно, но ведь Максвелл был всегда и ко всем исполнен доброжелательства и ни в одном из своих отзывов о работах коллег он не обходился без комплиментов, даже если не был со всем согласен. Но если вдуматься, приведенная максвелловская оценка очень далека от идилической восторженности. По существу, в качестве безусловной заслуги Ван-дер-Ваальса отмечается лишь понимание важности поставленной им перед собой задачи. «Многие (значит, во всяком случае, не все) его исследования проведены чрезвычайно оригинальным и ясным образом» — но Максвелл не говорит, что они проведены правильно. «Он постоянно высказывает новые и наводящие на размышления идеи» — но Максвелл не говорит, что идеи верны. И, наконец, комплимент относительно ожидающих голландского ученого блестящих перспектив — тоже с «двойным дном»: «Непрерывность» Максвелл расценивает как

¹² Речь идет о проблеме молекулярно-кинетического описания конденсированного состояния (заметим, что Максвелл употребляет именно этот «современный» термин).

заявку на будущее, заявку твердую, но все же лишь заявку: тем самым ценность уже сделанного Ван-дер-Ваальсом, по существу, отрицается. Таким образом, если в июне Максвелл еще полагал, что «Непрерывность» «принадлежит к ценнейшим вкладам в молекулярную физику» вне зависимости от того «что мы могли бы думать о [ван-дер-ваальсовских] расчетах», то в октябре, внимательно проанализировав эти расчеты, речи о научном значении диссертации Ван-дер-Ваальса он уже не ведет.

Может показаться, что мы излишне «придираемся» к Максвеллу, делаем уже слишком сильный упор на одной его фразе, как бы выворачиваем ее наизнанку. Но это не так. С нашей интерпретацией «изысканного комплимента» полностью согласуется максвелловский разбор конкретного содержания «Непрерывности» — это полный разнос, непредвзятый, коррективный, но тем не менее разнос. При этом нужно еще сказать, что проанализированное нами высказывание непосредственно предваряет критику — разнос начинается сразу же за ним. Поэтому кажется почти очевидным, что «комплимент» Максвелла тщательно выверен и взвешен: ему хочется, не покрывив душой, максимально смягчить удар.

Отметим основные направления максвелловской критики.

1. При построении своего уравнения на основе теоремы вириала Клаузиуса Ван-дер-Ваальс принял: $\left\langle \sum_i \frac{m u_i^2}{2} \right\rangle = RT$.

Указав, что в отношении учета роли внутренних степеней свободы частиц еще много неясного, Максвелл отмечает: «Таким образом, представляется, что мистер Ван-дер-Ваальс несколько поспешно принимает, что температура вещества в любом случае измеряется энергией (тепловой) возбуждения его отдельных молекул, хотя это несомненно справедливо в случае вещества в газообразном состоянии».

2. В отношении ван-дер-ваальсовской трактовки «внутреннего давления» (a/v^2), возникающего вследствие взаимного притяжения частиц, Максвелл говорит, что она «представляется остроумной (ingenious) и в целом удовлетворительной». Однако при этом он не без сожаления отмечает, что голландский физик «не попытался произвести полный расчет притягательного вириала в терминах закона силы»¹³.

3. Ван-дер-Ваальс уподоблял молекулы твердым и идеально упругим сферам. Свою объемную поправку b он получил, анализируя, как изменяется средняя длина свободного пробега молекул при переходе от точечных к протяженным частицам. Максвелл предпринимает попытку учесть собственные размеры молекул путем прямого вычисления «отталкивательного вириала» в ван-дер-ваальсовской модели твердых сфер. Не приводя промежуточных вычислений, он выписывает довольно сложное конеч-

¹³ «Законом силы» Максвелл называет конкретный вид силового взаимодействия между молекулами.

ное выражение¹⁴ и недвусмысленно отмечает: «Форма этого уравнения совершенно непохожа (is quite different) на ван-дер-ваальсовскую (напомним, что у Ван-дер-Ваальса константа b просто равна учетверенному суммарному собственному объему молекул».

4. Максвелл воспроизводит ставшее впоследствии классическим уравнение Ван-дер-Ваальса (1), сопровождая его прямо-таки убийственным резюме: «Мне кажется, что уравнение не согласуется с теоремой Клаузиуса, на которой оно основано. В этой теореме p — давление на стенки сосуда (в котором находится вещество), а v — объем сосуда. Ни в одну из этих величин не могут быть введены поправки».

«Результаты, полученные мистером Ван-дер-Ваальсом, — вносит свой приговор Максвелл, — путем сопоставления своего уравнения с наблюдениями Реньо и Эндрюса, весьма поразительны (very striking) и едва ли не убеждают нас в том, что уравнение воспроизводит истинное положение вещей. Однако, хотя это согласие было бы сильным свидетельством в пользу точности эмпирической формулы, придуманной (devised) для описания экспериментальных результатов, провозглашение (professing) ее — как это делается — выведенной из динамической теории необходимо подвергнуть гораздо более суровой критике».

Таким образом, от уравнения Ван-дер-Ваальса Максвелл буквально «не оставляет камня на камне»: он заявляет, что и оба сомножителя в левой части (1) неверны и приравнивание их произведения величине RT сомнительно. Само же уравнение, блестящее согласие которого с экспериментом не может не произвести на него сильного впечатления, он не склонен расценить как нечто большее, чем эмпирическая формула.

Уравнение Ван-дер-Ваальса не выведено — вот, пожалуй, самое главное возражение рецензента, фактически перечеркивающее весь труд голландского ученого. Лишь одну действительную заслугу усматривает — и не без удовлетворения — Максвелл в этом труде: только Ван-дер-Ваальсу молекулярная физика обязана идеей привлечения теоремы Клаузиуса к рассмотрению проблемы перехода из газообразного в жидкое состояние. И еще он одобрительно отзывается о ван-дер-ваальсовском анализе капиллярности, но этот анализ не имеет прямого отношения к уравнению состояния.

КТО ЖЕ ПРАВ?

Как выглядит максвелловская критика с позиций сегодняшнего дня? Строго говоря, Максвелл прав во всем, за исключением того, что, как это показал впервые Рэлей [20], во-первых,

¹⁴ Заметим, что подобный вывод мог бы явиться предметом отдельной и важной научной публикации. Максвелл же приводит лишь конечный результат (в рецензии!) и этим ограничивается.

«отталкивательный вириал» вычислен им неверно и, во-вторых, его заключение о недопустимости введения поправок в p и v необосновано.

Действительно, уравнение Ван-дер-Ваальса нельзя считать «выведенным из динамической теории». Да и вообще строго вывести уравнение состояния жидкости невозможно.

Максвелл обосновывает это утверждение тем, что «в конденсированном состоянии свойства вещества зависят от взаимодействия молекул, входящих в тесное соприкосновение, а оно (это взаимодействие) определяется конкретным строением сталкивающихся молекул». Примечательно, что максвелловская аргументация 1874 г. (!) почти дословно совпадает с тем, что говорится по этому поводу в «Статистической физике» Л. Д. Ландау и Е. М. Лифшица: «В последней (в жидкости) взаимодействие между молекулами велико, и свойства этого взаимодействия (а потому и свойства жидкости) сильно зависят от конкретного рода жидкости. По этой причине невозможно... установить какие-либо общие формулы, которые бы количественно описывали свойства жидкости» [21, с. 257].

Уравнение Ван-дер-Ваальса Ландау и Лифшиц характеризуют как «одну из бесчисленных возможных интерполяционных (между газом и жидкостью) формул, удовлетворяющих поставленным требованиям» [21, с. 259] «и нет, — добавляя они, — никаких физических оснований для выбора одной из них». И это заключение полностью совпадает с суждением Максвелла, расценившего ван-дер-ваальсовское уравнение как эмпирическое.

Но ведь существует и другое мнение, которого придерживается огромное число специалистов по молекулярной физике. Приведем лишь одно высказывание, принадлежащее М. К. Вукаловичу и И. И. Новикову, авторам фундаментальной монографии по реальным газам: «...уравнение Ван-дер-Ваальса не является одной из многочисленных и беспочвенных интерполяционных формул. Отыскание точного уравнения состояния может основываться только на дальнейшем развитии взглядов Ван-дер-Ваальса» [22, с. 103].

Мы не можем вдаваться дальше в проблему оценки действительного значения ван-дер-ваальсовского уравнения, тем более что этот вопрос продолжает оставаться дискуссионным (вот уже сто лет!). Скажем только, что развитию молекулярной физики (и развитию техники низких температур) это классическое уравнение и воплощенные в нем идеи принесли неоценимую пользу. Кроме того, нельзя не сказать, что не найдется ни одного физика, который не знал бы формулы Ван-дер-Ваальса. Тот факт, что эта формула приближенная, вполне осознается, но едва ли кого-нибудь смущает.

Психологически причины отрицательного отношения Максвелла к «Непрерывности» совершенно очевидны. Он был одним из трех — наряду с Клаузиусом и Больцманом — великих основоположников молекулярно-кинетической теории. Когда он пи-

сал свою рецензию, его «стаж работы» в этой области — причем не только теоретической, но и экспериментальной — насчитывал уже 15 лет. Великий физик перепробовал уже несколько моделей газа (в том числе и модель твердых сфер, но без ван-дер-ваальсовских сил взаимного притяжения), несколько видов «закона силы» между молекулами, он получил целый ряд важнейших результатов, блестяще подтвержденных опытами. Но в то же время оставалось и множество нерешенных проблем, и Максвелл отнюдь еще не был совершенно убежден даже в том, что вся молекулярно-кинетическая концепция не является рискованной спекуляцией. Поэтому он искал однозначных ответов, а для этого требовалось знать точный «закон силы».

И вот он знакомится с диссертацией никому не известного голландца, который «выводит» уравнение состояния, описывающее не только газ, но и переход газа в жидкость. И при этом о конкретном виде «закона силы» речь даже не ведется! Не заходит также речь и о кинетических характеристиках — теплопроводности, диффузии и внутреннем трении — исследование которых стоило столько трудов основоположникам статистической физики.

Неудивительно поэтому, что сразу же после вступительного комплимента, отдающего должное ван-дер-ваальсовскому пониманию актуальности поставленной в диссертации задачи, Максвелл, по существу, выговаривает голландцу: «Однако он [Ван-дер-Ваальс], кажется, еще не столь же хорошо знаком со всеми разделами предмета, так что в некоторых местах, где он заимствовал результаты Клаузиуса и других, способ, посредством которого он их применил, представляется мне ошибочным» [19].

ПОСЛЕДСТВИЯ КРИТИКИ

Итак, совершенно ясно, что максвелловский отзыв о «Непрерывности» был сугубо отрицательный. Максвелл пользовался в Англии исключительно высоким авторитетом, так что его суровый приговор для всех английских (впрочем «Nature» пользовался популярностью и за пределами Англии) ученых, интересовавшихся молекулярной физикой, мог означать одно: лейденская работа ошибочна и читать ее не стоит, тем более, что никого не прельщала перспектива разбираться в незнакомом языке.

Этот очевидный вывод вполне однозначно подтверждают слова близкого друга Максвелла и достаточно видного английского ученого П. Г. Тэта, писавшего в 1891 г.: «Частично из-за ее незнакомости языка, но главным образом из-за определенно очень неблагоприятного мнения (very definite unfavourable opinion), выраженного Максвеллом, я не попытался прочесть брошюру [Ван-дер-Ваальса], когда она появилась; и только в 1888 г. ...я подробно ознакомился с ней в немецком переводе» [23].

В феврале 1875 г. в лекции, прочитанной в Лондонском химическом обществе, в той самой лекции, в которой содержалось

известное высказывание о «пользе изучения голландского языка», Максвелл вывел свое знаменитое правило площадей (см. рис. 2). Стоит отметить, что это правило, уже сто лет рассматриваемое в комплексе с уравнением Ван-дер-Ваальса, выведено им до упоминания о голландском ученом. Отказываясь признать ван-дер-ваальсовскую формулу законом природы, Максвелл воспроизводит характерный вид изотерм Ван-дер-Ваальса путем простых качественных рассуждений, базирующихся на теореме вириала. Лишь после этого следует комплимент автору «чрезвычайно остроумной (exceedingly ingenious) диссертации», который «так талантливо и смело взялся за этот трудный вопрос (переход между газообразным и жидким состояниями), что его исследование не может не дать заметного импульса развитию молекулярного учения». Не будем снова подтверждать текстуальным анализом всю сдержанность и взвешенность этой похвалы — фактически смысл ни на йоту не отличается от аналогичного места из рецензии в «Nature». Добавим только, что и этот комплимент Максвелл сопровождает замечанием, по существу, полностью дискредитирующим работу голландского физика перед ученой аудиторией: «Мне кажется, что в некоторых пунктах он впал в математические ошибки...» [10]. В конце 1876 г. в Англии выходит в свет — под непосредственным «курированием» Максвелла [24, с. IV] — «Трактат по кинетической теории газов» Г. В. Уотсона. Фактически это было исторически первое в мировой научной литературе специализированное и последовательное (хотя и краткое) изложение основ нового направления в теоретической физике. Уотсон затрагивает многие вопросы, имеющие самое непосредственное отношение к «Непрерывности» — и теорема вириала, и межмолекулярные силы, и проблема «механической модели газа», но о результатах Ван-дер-Ваальса (несомненно, с одобрения Максвелла) ни и Эндрюс не говорится.

Вероятно, прислушался к максвелловскому менее искушенный, блестящий экспериментатор, несравнимый с Максвеллом. Какова была его реакция на критику в «Nature», нам, к сожалению, неизвестно. Но реакцию Ван-дер-Ваальса и никаких отступлений от своей теории у него не вызвала, то после максвелловской критики Эндрюс о ней больше не упоминает. Причем не упоминает даже тогда, когда такое упоминание, казалось бы, совершенно неизбежно. Знаменитый экспериментатор продолжает и расширяет исследования поведения газов от идеальных законов — анализирует изотермы сжижения, но никаких попыток сопоставить получаемые данные с предназначенным для их описания — он это знает — уравнением Ван-дер-Ваальса он не предпринимает. Совершенно ясно, что на «Непрерывности» им, так сказать, поставлен крест.

В сентябре 1876 г. в Глазго собирается очередной съезд Британской ассоциации. Председательствует — весьма почетная обязанность — Эндрюс, слава которого в это время достигла зенита. В своей пространной речи на торжественном открытии представительного форума Эндрюс называет имя Ван-дер-Ваальса. Эндрюс отмечает, что научный уровень английских университетов существенно ниже, чем у университетов на континенте и иллюстрирует этот тезис примером Лейденского университета: «Два квалификационных сочинения (proof essay), недавно написанных в Лейдене для получения степени доктора наук — одно Ван-дер-Ваальсом, другое Лоренцем — представляют собой работы необычайного достоинства (unusual merit)» [18, с. 411].

Удивительно. Ведь докторская защита Лоренца состоялась только 11 декабря 1875 г. Его диссертация еще не опубликована ни в одном журнале — она появилась только в виде небольшой брошюры на голландском языке. Да и в ее содержании — диссертация называется «К теории отражения и преломления света» — Эндрюс совершенно не компетентен. Ясно, что уважаемый председатель говорит с чьих-то слов. С чьих же? Ответить на этот вопрос совсем не трудно. В своей выдающейся диссертации Лоренц выступил как прямой преемник Максвелла в развитии его электродинамики (еще почти полностью игнорировавшейся в это время за пределами Англии). Было бы странно, если бы диссертация Лоренца не была послана Максвеллу. И в трудах глазговского Съезда мы без труда обнаруживаем его «ропись в получении». Максвелл представил (сам он на съезде не присутствовал) сообщение «О законе Ома», в котором речь шла об опытах по прецизионной проверке этого основного закона электротехники. Наряду с прочим в сообщении говорилось: «Лоренц из Лейдена также предложил теорию, согласно которой закон Ома перестает быть справедливым в случае быстро меняющихся токов» [25] — речь, конечно, идет об оптических частотах. Таким образом, совершенно ясно, что к сентябрю 1876 г. Максвелл уже ознакомился с новой голландской диссертацией и еще до Съезда благожелательно отозвался о ней Эндрюсу. Больше ни от кого высокопрофессиональной и авторитетной оценки по существу математической работы Лоренца Эндрюс услышать не мог. Стоит еще сказать, что в отличие от ван-дер-ваальсовской «Непрерывности» работа Лоренца никаких критических замечаний у Максвелла не вызвала.

Очень похоже на то, что все эндрюсовское «похвальное слово Лейдену» — подсказано Максвеллом. Во всяком случае, в отношении Ван-дер-Ваальса совершенно явственно проступает основное положение рецензий в «Nature»: «Непрерывность» — превосходное «квалификационное сочинение», характеризующее высокий уровень научной подготовки студента, залог его будущих успехов... но не больше.

В речи Эндрюса содержался шпирокий обзор последних научных достижений. Кратко остановился он и на своей области ин-

тересов — на изучении газовых законов и переходов газ — жидкость. Его резюме было следующим: «Когда мы приближаемся к жидкому состоянию или даже доходим до него, проблемы становятся более запутанными, но их решение, даже в этих случаях — мы можем это ожидать с уверенностью — окажется под силу мощным средствам исследования, которыми мы теперь располагаем» [18, с. 495] (имеется в виду новое экспериментальное оборудование). Таким образом, Эндрюс вслед за Максвеллом отказывается признать, что указанные им проблемы, во всяком случае в значительной мере, решены Ван-дер-Ваальсом и тем самым, по сути дела, перечеркивают его работу.

Однако мы проявили бы недопустимую тенденциозность, если бы умолчали о том, что и сам Эндрюс уже к лету 1875 г. (все же после максвелловской рецензии), видимо, разуверился в ван-дер-ваальсовской теории. Дело в том, что, усовершенствовав свою экспериментальную установку и существенно повысив точность измерений, Эндрюс получил новые изотермы углекислоты (при других температурах), которые, по его расчетам, согласовались с формулой голландского ученого значительно хуже, чем прежние [26]¹⁵. От каких-либо «публичных» опровержений шотландский физик воздержался. И только в его второй бэйкернианской лекции — 27 апреля 1876 г. — мы можем усмотреть намек на подобное опровержение: «...по отношению к целям научным (как мне не раз случалось замечать это в ходе этих опытов) результаты эмпирических формул способны вводить ученого в соблазн и редко помогают исследованию»¹⁶ [8, с. 83].

Но если это действительно «камешек в огород» Ван-дер-Ваальса, то нелестный для его формулы эпитет «эмпирическая» явно заимствован у Максвелла, «яркому и дальновидному ученому», лектору [18, с. 404] которого Эндрюс отдавал должное.

Нам кажется, что наш, быть может, несколько излишне по-все же беспристрастный анализ достаточен. Ван-дер-Ваальс казывает, что миф об «открытии» Мю, что установившееся са несостоятелен. Более того, верно «с точностью до наоборот»: мнение, как говорят физики Ван-дер-Ваальса, а «закрыв» его (во «Максвелл не «открыл» Ван-дер-Ваальса) лет на пять — семь. В любом случае — английских ученых) — лет на пять — семь.

Едва ли этот эпизод может бросить тень на образ Максвелла — великого ученого и человека высоких душевных качеств. И в этом эпизоде, как и во всей своей научной деятельности, он был безупречно честен, принципиален и благожелателен, да и его критика, как уже говорилось, была вполне оправданной. Он не воспринял идей другого выдающегося ученого. Но ведь подобные ситуации в действительной, а не приглаженной, истории

¹⁵ Ван-дер-Ваальс вскоре показал, что принципиальное согласие не нарушается [27].

¹⁶ См. Дополнение в конце статьи.

науки скорее правило, чем исключение: крупные ученые — обычно яркие индивидуальности, совершенно несхожие между собой по стилю мышления.

Но как бы там ни было Ван-дер-Ваальсу в самом начале его научного пути был нанесен весьма чувствительный удар. Можно ли отыскать в его огромном научном наследии, так сказать, отзвуки этого удара?

Конечно, великие ученые, за редкими исключениями, не мелочны, но они все же люди и люди не простые. В своих работах Ван-дер-Ваальс очень часто ссылаясь на Максвелла и при случае всегда воздавал ему должное — да иначе и быть не могло, ведь Максвелл — один из основоположников той области науки, в которой всю жизнь работал голландский физик. Но тем не менее едва приметные для несведущего глаза «шпильки» он порой все-таки вставлял.

Вот одна такая «шпилька», как нам кажется довольно забавная. В своей Нобелевской лекции семидесятилетнему Ван-дер-Ваальсу довольно неожиданно заметил: Максвелл ошибался, полагая, что он вывел распределение Максвелла. И тут он был прав — великий английский физик скорее угадал носящий его имя закон распределения молекул по скоростям, ибо строгий вывод был, как известно, дан Больцманом. Таким образом, Ван-дер-Ваальс адресовал Максвеллу в точности тот же упрек, который тот предъявил когда-то его уравнению. Но Максвелла уже тридцать с лишним лет как не было в живых.

ДОПОЛНЕНИЕ

Уже после того, как настоящая работа была направлена в печать, благодаря любезности г-жи М. Келли из Библиотеки Белфастского Университета Королевы (Сев. Ирландия), мы получили датированный августом 1876 г. неопубликованный отзыв Максвелла на вторую байерскую лекцию Эндрюса (этот отзыв потребовался для ее публикации в трудах Лондонского Королевского Общества). К сожалению, мы не имеем возможности полностью воспроизвести здесь этот весьма интересный документ, имеющий прямое отношение к теме нашей статьи. Отметим лишь два наиболее важных для нас момента.

1. Максвелл продолжает отвергать «законность» ван-дер-ваальсовского вывода формулы (1): «Динамическое обоснование в поддержку этой формулы ни коим образом не является надежным (sound), но она весьма удачно (with considerable felicity) передает ход явлений при сжатии угольной кислоты».

2. Процитированная нами эндрюсовская «филиппика» по адресу эмпирических формул никакого сочувствия у великого теоретика не вызывает. Он считает, что эмпирические формулы могут быть двух категорий. Формулы первой категории подобраны так, чтобы описывать результаты опыта в том диапазоне изменений экспериментальных условий, в котором проводился опыт.

Но существуют эмпирические формулы совсем иного рода. «Так закон Ома для сопротивления проводников, по-видимому, точен в очень высокой степени и для чрезвычайно широкого диапазона как материалов, так и сил тока. Но это чисто эмпирический закон (во времена Максвелла. — Авт.). <...> С другой стороны, газовый закон Бойля был эмпирическим пока не показали, что он — следствие определенных гипотез относительно молекул газа... Будь эти гипотезы верными, закон Бойля строго бы соблюдался и его следовало бы считать не эмпирической формулой, а законом природы».

Таким образом, в противоположность Эндрюсу Максвелл вовсе не считает, что эпитет «эмпирическая» сам по себе дискредитирует формулу, ибо такие формулы, если они только обладают достаточной общностью, вполне могут возвыситься в ранг «законов природы» или хотя бы помочь в их поиске. Неудивительно поэтому, что, квалифицировав ван-дер-ваальсовское уравнение как эмпирическое соотношение — и тем самым изрядно скомпрометировав его в глазах своих английских коллег! — Максвелл сам интереса к этому уравнению не утратил и впоследствии не раз использовал его в расчетах и оценках.

ЛИТЕРАТУРА

1. Van der Waals J. D. Over de continuïteit van den gas- en vloeistoestand. Leiden: 1873. 134 blz.
2. Пастернак Б. Стихотворения и поэмы. М.; Л.: Сов. писатель, 1965.
3. Brush S. G. J. D. Van der Waals and the state of matter. — Phys. Teacher, 1973, vol. 11, p. 261—270.
4. Rowlinson J. S. A. Andrews and the critical point. — Nature, 1969, vol. 224, p. 541—543.
5. Rowlinson J. S. Van der Waals revisited. — Chemistry in Britain, 1980, vol. 16, p. 32—35.
6. Гельфер Я. М. История и методология термодинамики и статистической физики. М.: Высш. школа, 1981. 536 с.
7. Кляус Е. М., Франкфурт У. И., Френк А. М. Г. А. Лоренц. М.: Наука, 1974. 239 с.
8. Эндрюс Т. О непрерывности газообразного и жидкого состояния вещества. — В кн.: Т. Эндрюс. М.; Л.: Гостехтеориздат, 1933. 119 с.
9. Thomson J. Speculation on the continuity of the liquid state of matter and on relations between the gaseous, the liquid and the solid state. — B. A. A. S. Reports, 1871, vol. 41, p. 30—33.
10. Maxwell J. C. On the dynamical evidence of the molecular constitution of bodies. — Nature, 1875, vol. 11, p. 357—359; 374—377.
11. Thomson J. Collected papers in physics and engineering. Cambridge: 1912. CIV+484 p.
12. Ван дер Ваальс И. Д. Уравнение состояния. — ЖРФХО, 1911, т. 43, отд. 11, с. 175—185.
13. Van der Waals J. D., Wiedemann E. Ueber den Uebergangszustand zwischen Gas und Flüssigkeit. — Beibl. zu d. Ann. d. Phys. Chem., 1877, vol. 1, S. 10—21.
14. Maxwell J. C. Plateau on soap-bubbles. — Nature, 1874, vol. 10, p. 444—445.
15. Plateau J. Statique expérimentale et théorique des liquides soumis aux forces moléculaires. P., 1873, vol. 1. 450 p., vol. 2. — L., 1882, XVI+662 p.
16. Campbell L., Garnett W. The life of J. Максвелл Дж. К. Речи и статьи.
17. Максвелл Дж. К. Молекулы. — В кн.: М.: Гостехтеориздат, 1940. 226 с. London, 1889. LXI+509 p.
18. Andrews T. The scientific basis of the continuity of the gaseous and liquid states. — Nature, 1874, vol. 10, p. 477—485.
19. Maxwell J. C. On the virial of a system of hard colliding bodies. — Nature, 1891, vol. 45, p. 80—82. On Van der Waals treatment of Laplace's pressure in the virial equation: letters to prof. Tait. — Nature, 1891, vol. 44, p. 499, 597.
20. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Статистическая физика. М.: Наука, 1976.
21. Вукалович М. П., Новиков И. И. Уравнение состояния реальных газов. М.: Л.: Госнефтеиздат, 1948. 339 с.
22. Tait P. G. On Van der Waals treatment of Laplace pressure. — Nature, 1891, vol. 44, p. 546—547.
23. Watson H. W. A treatise on the kinetic theory of gases. Oxford, 1876. 51 p.
24. Maxwell J. C. On Ohm's law. — B. A. A. S. Reports 1876, vol. 46, p. 49—52.
25. Andrews T. Preliminary notice on further researches on the physical properties of matter in the liquid and gaseous states under varied conditions of pressure and temperature. — Proc. Roy. Soc. Lond., 1875, vol. 23.
26. Wiedemann E. Реферат работ Т. Эндрюса. — Beibl. zu d. Ann. d. Phys. Chem., 1877, vol. 1, S. 21—28.

КИНЕТИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ ГАЗОВ И СТАТИСТИЧЕСКАЯ МЕХАНИКА

УДК 533.7+536.765

О. В. КУЗНЕЦОВА

МАКСВЕЛЛ И ГРАНИЦЫ ПРИМЕНИМОСТИ ВТОРОГО НАЧАЛА ТЕРМОДИНАМИКИ

Способность Максвелла к глубокому проникновению в самые тонкие и сложные законы природы ярко проявилась в понимании им вероятностного характера второго начала термодинамики.

В 1824 г. в классическом трактате «Размышления о движущей силе огня и о машинах, способных развивать эту силу» [1] Сади Карно установил необратимый характер процесса превращения тепла в механическую работу на примере анализа работы идеальной тепловой машины. Поиски четких формулировок необратимости и его адекватного математического выражения, а также попытки ввести новый закон в цельную систему физики в сильной степени определяют специфику развития физики в середине XIX в. Своеобразным ключом к особенностям творчества ученых, внесших наиболее значительный вклад в развитие учения о теплоте, — Клаузиуса, В. Томсона, Больцмана, Максвелла — может служить способ постижения или природы обратимых и необратимых явлений. Здесь мы можем видеть не только плоды их суждений, но и саму работу мысли.

Вот как сформулировал этот принцип Клаузиус в 1850 г. в статье «О движущей силе тепла и о законах учения о теплоте, которые могут быть отсюда выведены», само название которой указывает на ее связь с трактатом С. Карно: «Различные способы рассмотрения поведения и природы теплоты привели меня к заключению, что выступающее при теплопроводности и при обычном тепловом излучении стремление теплоты переходить от более теплых тел к более холодным и тем самым выравнивать существующие разности температуры, связано столь глубоко со всей ее сущностью, что оно должно проявляться при всех обстоятельствах. Поэтому я принял следующий принцип в качестве основного закона: Теплота не может самопроизвольно переходить от более холодного тела к более теплему; или иначе: Переход тепла от более холодного тела к более теплему телу не может совершаться без компенсации» [2].

Этот принцип в качестве одного из двух фундаментальных законов (первым является закон сохранения энергии) Клаузиус

положил в основу учения о теплоте. Принцип необратимости явлений, связанных с превращением тепла в работу и с переходом тепла от более горячих тел к более холодным (иначе — второе начало термодинамики) обладало для Клаузиуса абсолютной справедливостью, подобно законам механики Ньютона. По словам Гиббса, «термодинамика как наука с прочными основаниями, ясными определениями и четкими границами обязана своим возникновением Клаузиусу» [3]. Клаузиус изложил ее под названием *Mechanische Wärmetheorie* в 1865 г. [4]; здесь же была введена функция S , названная им энтропией, которая обладала тем свойством, что для обратимых явлений $dS/dt=0$, а для необратимых $dS/dt>0$, таким образом, по мысли Клаузиуса, с помощью энтропии возможно описывать необратимые процессы.

В 1851 г. свое определение закону теории тепла, описывающему необратимые явления в природе, дал В. Томсон, он же ввел и термин термодинамика, который был принят английскими учеными, тогда как немецкие называли новую науку вслед за Клаузиусом *Mechanische Wärmetheorie*.

В статье «О динамической теории тепла» В. Томсон писал: «Невозможно при помощи неодушевленного материального агента получить механический эффект от какой-либо части вещества, охлаждая ее ниже температуры самого холодного из окружающих тел» [5]. И далее Томсон поясняет, что имелось в виду, когда говорилось о неодушевленном материальном агенте: «Невозможно при помощи неодушевленного материального агента получить механический эффект от какой-либо части вещества, охлаждая ее ниже температуры самого холодного из окружающих тел ... Живое тело действует не так, как термодинамическая машина. Невозможно понять без специального экспериментирования и наблюдения тот способ, каким в живом теле производится механические эффекты ... Каждый индивид, независимо от природы этих способов, сознает, что он в известной мере подвержен усилиям своей воли. Следовательно, живые существа способны непосредственно воздействовать на движущиеся внутри своих тел частицы материи таким образом, чтобы направлять движение этих частиц на то, чтобы произвести желаемый механический эффект» [5].

Таким образом, мы видим, что смелая идея описания в терминах динамической теории теплоты работы мыслящего существа впервые была высказана В. Томсоном. Он же в 1852 г. показал, что попытка применения принципа спонтанного выравнивания температур ко всей Вселенной в целом приводит к необходимости принять предположение об «универсальной тенденции в природе к диссипации механической энергии», — это предположение, развитое впоследствии Гельмгольцем и Клаузиусом, привело к представлению о так называемой тепловой смерти Вселенной.

Надо сказать, что идея тепловой смерти Вселенной захватила самые широкие круги ученых середины XIX в.: физиков, гео-

логов, философов. Одним из первых философов, внедривших идею о диссипации энергии в общую философскую систему, был Герберт Спенсер [6]. Несмотря на то, казалось бы, пессимистический вывод о тепловой смерти, Спенсер из второго начала термодинамики выводит основание для убежденности в том, что конец эволюции наступит вместе с установлением «величайшего совершенства и полного счастья». Даже он утверждал, что после того как движение всех звезд деградирует к форме тепловой энергии под влиянием гравитации, начнут развиваться процессы концентрации энергии. Им на смену вновь придут процессы диссипации — таким образом Вселенная будет развиваться в бесконечной последовательности Эволюции и Диссолюции.

Максвелл воспринимал второе начало термодинамики в стиле установленного им в 1859 г. закона распределения молекул по скоростям и полагал, что оно выражает собой лишь статистическую упорядоченность, возникающую в системе, состоящей из очень большого числа части, и не может быть сведено к динамике.

Больцман же считал, что в своей докторской диссертации «Механический смысл второго начала теории тепла» (1866) [7] ему удалось получить аналитическое выражение для этого начала. По вопросу о сведении второго начала к общим теоремам механики между Клаузиусом и Больцманом возникли некие разногласия: в 1871 г. Клаузиус получил свое аналитическое выражение для второго закона, Больцман отстаивал свой приоритет, Клаузиус доказывал, что его выражение получено из более общих соображений и т. д.

Максвеллу казался совершенно чуждым и непримлемым подход к проблеме, развиваемый Больцманом и Клаузиусом, а тем более их приоритетная борьба. В письме к Тэту в 1873 г. он писал: «Редкий азарт испытываешь, наблюдая, как эти ученые немцы оспаривают приоритет в отождествлении второго начала термодинамики с принципом Гамильтона, когда при этом они полагают температуру тела равной живой силе составляющих его молекул, — как это было принято в работах Гей-Люссака, Дюлонга и др., но впервые выведено из динамико-статистического рассмотрения Максвеллом (by dp/dt)¹. Принцип Гамильтона парит одиноко в областях, не подвластных статистическому подходу, тогда как немецкие Икары размахивают своими кукушечьими восковыми крыльями [8].

Начало антагонизму между феноменологической механической теорией тепла Клаузиуса и статистическим подходом ко вто-

¹ Свои письма к В. Томсону и Тэту Максвелл подписывал знаком dp/dt . Это объясняется тем, что Максвелл записывал второе начало термодинамики в виде уравнения $dp/dt = JCM$, где J — механический эквивалент тепла, C — функция температуры Карно $C(t)$, M — коэффициент пропорциональности в уравнении, связывающем полученное тепло с увеличением объема при изотермическом расширении. JCM — это инициалы Максвелла.

O.T. R.V. ATOME? $\iint \rho \mathbf{v} \cdot d\mathbf{S}$ was done in the most general form in 1867. I have now bagged $\mathbf{E} \cdot \mathbf{v}$ from T & T and done the numerical value of $\iint (\mathbf{v}_i^{(1)})^2 dS$ in 4 lines. Thus verifying T & T's value of $\iint (\mathbf{v}_i^{(1)})^2 dS$. Your plan seems indep^t of T & T or of me. Publish! I am busy supplying the physical necessities of scientific life. Address 11 Servoise Terrace, Cambridge. Prooves have got as far as grooves, corrugated plates, gratings and $\mathbf{v}_i^{(1)}$ ring. I give him time for criticism they are $\mathbf{v}_i^{(1)}$ and $\mathbf{v}_i^{(2)}$. $\iint (\mathbf{v}_i^{(1)})^2 dS = \frac{8\pi a^2}{2i+1} \frac{1-i}{2^i} \frac{1-i}{2^i}$ except when $S=0$ when $\iint (\mathbf{v}_i^{(1)})^2 dS = \frac{4\pi a^2}{2i+1}$ Hence $\int_{-1}^{+1} (\mathbf{v}_i^{(1)})^2 d\mu = \frac{2}{2i+1} \frac{1-i}{2^i} \frac{1-i}{2^i}$ without exception for $\frac{d\mathbf{v}}{dt}$

Почтовая открытка, адресованная Максвеллом Тэту от 23 октября 1871 г.

После того, как в 1869 г. Британское почтовое ведомство стало выпускать почтовые открытки за полленин, Томсон, Тэт и Максвелл начали вести регулярную переписку. Томсон обычно подписывался сокращенно буквой Т, Тэт — Т', а Максвелла — dp/dt . Это объясняется тем, что в «Очерке по термодинамике» Тэт ввел уравнение $dp/dt = JCM$

рому началу положил Тэт. В 1868 г. он написал учебник по термодинамике, предварительно попросив Максвелла ознакомиться с рукописью и высказать свои замечания. В письме от 11 декабря 1867 г. Максвелл ответил Тэту, что, по его мнению, возможно «пробить некую брешь во втором законе термодинамики». Максвелл предложил вообразить «крошечное существо, которое знает траектории и скорости всех молекул, просто наблюдая их, и не совершает никакой работы, кроме как открывает и закрывает дверцу в перегородке, разделяющей два газа разной температуры» [9]. Благодаря своей информированности о состоянии движения молекул, этот «демон»² может открывать дверцу всякий раз, когда со стороны более холодного газа к ней подлетают самые быстрые молекулы, а со стороны более горячего — наиболее медленные. В результате, горячий газ все сильнее нагревался бы, а холодный охлаждался, и при этом не совершалось бы никакой работы, служащей для компенсации этого процесса, не

² В 1874 г. В. Томсон в статье «Кинетическая теория диссипации энергии» назвал крошечные существа (living beings) Максвелла демонами, название укрепились в литературе.

считая того, что эксплуатируется интеллект субтильного существа» [8].

В 1870 г. Максвелл повторил подобный аргумент в письме к Дж. В. Стретту (впоследствии лорду Рэлею): «Если мир представляет собой чисто динамическую систему, и если Вы в точности обратите в какой-либо момент движение каждой частицы в мире, тогда все события будут протекать в направлении к своим истокам: капли дождя, упавшие на землю, вновь соберутся в облака и т. д. и т. д. Возможность осуществления такого эксперимента сомнительна, но я не думаю, что для того, чтобы нарушить второй закон термодинамики, необходимо проявление такого большого искусства» (цит. по: [8, с. 214]).

Указывая далее, что обратить вспять движение всех молекул динамической системы могла бы армия демонов, Максвелл заключает: «Второй закон термодинамики имеет ту же степень достоверности, как и утверждение, что, если вылить в море стакан воды, то невозможно снова собрать в стакан эту воду».

В 1871 г. вышел в свет знаменитый учебник Максвелла «Теория тепла», где в разделе «О молекулярной теории строения тел» Максвелл вновь обсуждает свой «демонический» аргумент в связи с поставленной им проблемой о границах применимости второго начала термодинамики.

«Один из фундаментальных фактов термодинамики заключается в том, что невозможно создать неравенство температуры или давления без затраты работы в системе, заключенной в оболочку, не позволяющую изменять объем и не пропускающую тепло, и внутри которой температура и давление одинаковы в каждой точке.

Это есть второе начало термодинамики. И оно безусловно справедливо до тех пор, пока мы имеем дело с телами большой массы, и не можем выделить и взять в руки отдельные молекулы, из которых они состоят.

Но если мы вообразим существо, чьи способности столь обострены, что оно в состоянии проследить за каждой молекулой в ее движении, такое существо, по своей сущности подобное нам, в состоянии сделать то, что сейчас является невозможным для нас. Ибо видели, что молекулы в сосуде, наполненном воздухом, при равномерной температуре, движутся со скоростями, ни в коем случае неодинаковыми, хотя средняя скорость любого большого числа молекул, произвольно выбранных, почти в точности одинаковая.

Теперь давайте предположим, что такой сосуд разделен на две части *A* и *B* перегородкой, в которой имеется маленькое отверстие, и что существо, которое различает отдельные молекулы, открывает и закрывает это отверстие, так чтобы только быстрые молекулы проникали из *A* в *B*, а из *B* в *A* — только медленные. Оно может таким образом, не производя работу, повысить температуру в *B* и понизить в *A*, что противоречит второму началу термодинамики.

Этот только один из примеров того, что заключения, которые мы выводим из опытов с телами, состоящими из огромного числа молекул, возможно не применимы в случае более тонких наблюдений и экспериментов, которые, как мы можем предположить, могло бы проделать существо, способное осязать и воспринимать отдельные молекулы, с которыми мы имеем дело только в массе.

Так как мы не воспринимаем отдельные молекулы, а имеем дело с массой их, мы вынуждены принять то, что я описал, как статистический метод вычисления, и отказаться от прямого динамического» [10, с. 306—308].

Максвелл неоднократно подчеркивал, что главный смысл демона состоял в том, чтобы «показать», что второй закон термодинамики обладает только статистической закономерностью — второе начало имеет свои истоки в нашем экспериментировании с телами, состоящими из огромного числа молекул, и нет причин ожидать, что этот закон был бы справедлив в отношении более тонких экспериментов, которые, как можно вообразить, были бы проделаны существами, способными «потрогать» отдельные молекулы.

Здесь же Максвелл приводит в качестве аргумента против возможности сведения второго начала к динамике следующий мысленный эксперимент: «Предположим, что тело содержит энергию в форме тепла, тогда при каких условиях эта энергия или часть может быть извлечена из тела?

Если тепло в теле находится в форме движения его частей, и если мы можем различать эти части и направлять и контролировать их движения с помощью какого-либо механизма, а затем, устроив такое приспособление, чтобы привести в покой каждую движущуюся часть тела, мы могли бы посредством соответствующей цепи таких механизмов передавать энергию от движущихся частей нагретого тела любому другому телу в форме обычного движения. Нагретое тело при этом превратилось бы совсем в холодное и вся его тепловая энергия была бы превращена в видимое движение другого тела.

Однако это предположение прямо противоречит второму закону термодинамики, но совместно с первым законом. Тем самым, второй закон эквивалентен опровержению нашей способности выполнять описанную процедуру как при посредстве цепи механизмов, так и при помощи какого-либо другого известного способа.

Следовательно, если тепло — это движение частей тела, то отдельные движущиеся части тела должны быть столь малы или столь неосязаемы, что мы не можем никаким образом остановить их» [там же].

И далее Максвелл формулирует проблему о соотношении динамических и статистических методов: «Следует быть осмотрительным при распространении заключений, полученных из экспериментирования с телами, состоящими из огромного числа час-

тиц, на более тонкие наблюдения и эксперименты, которые могли бы быть выполнены, если бы было возможно воспринимать отдельные молекулы. Если же это невозможно, то мы вынуждены использовать статистический метод расчета и отказаться от чисто динамического метода» [там же].

Представление Максвелла о том, что второе начало термодинамики обладает статистической природой разделял и В. Томсон. В упомянутой выше статье «Кинетическая теория диссипации энергии» он писал: «Демон, по определению в соответствии с использованием этого слова Максвеллом, есть разумное существо, одаренное свободой воли, обладающее восприимчивостью и осязанием, дающими ему способность видеть и влиять на отдельные молекулы материи. Демон Максвелла отличается от реального живого существа только чрезвычайной малостью и подвижностью — он не может творить или уничтожать энергию — он может накапливать определенное количество ее и использовать по своему желанию».

Концепция „сортирующего демона“ — чисто механическая и очень ценная для чистой физической науки, она была изобретена не для того, чтобы помочь нам в вопросах, касающихся влияния жизни и разума на движение материи, но она существенным образом затрагивает круг вопросов чистой динамики» [11].

В 1878 г. в обзоре «Термодинамики Тэта» Максвелл вновь подчеркнул несводимость второго закона к чистой динамике, рассматривая различие между двумя видами энергии, передаваемой от одного тела к другому — тепла и работы: «Согласно молекулярной теории, единственное различие между этими двумя видами энергии заключается в том, что движения и смещения, которые связаны с передачей тепла — это движения и смещения молекул, и они столь многочисленны, столь неразличимы, их смещения столь нерегулярны, что практически не поддаются нашим методам наблюдения; тогда как если движения и смещения относятся к видимым телам, состоящим из большого числа молекул, движущихся синхронно, — передача энергии называется работой» [12]. Максвелл повторяет еще раз, что, если бы было возможно наблюдать индивидуальные молекулярные движения, то «исчезло бы различие между работой и теплом».

Тэт близко подошел к идее о флуктуационных явлениях: «Действительная основа второго закона термодинамики лежит в чрезвычайно малых размерах и чрезвычайно большом числе частиц материи и вытекающей отсюда устойчивости их среднего поведения. Имей мы возможность оперировать с индивидуальными частицами, мы могли бы развить в большом масштабе то, что постоянно имеет место в очень малом масштабе во всей массе газа: редкое и краткое скопление более теплых частиц в одной малой области и более холодных в другой» [13]. Таким образом, мы видим, что представление о том, что второе начало термодинамики обладает статистической природой, обусловленной огромным числом частиц, из которых состоят макроскопические

тела, ясно воспринималось Максвеллом, Тэтом, В. Томсоном, однако, как именно второе начало связано с теорией вероятностей, понял только Больцман, начавший с попытки дать механическое объяснение этому закону теории тепла.

Больцман же был уверен, что в 1872 г. ему удалось найти механический аналог термодинамической энтропии: он ввел H -функцию, которая вела себя подобно энтропии, — если система пребывает в состоянии термодинамического равновесия, то $dH/dt=0$, если же система находится в возбужденном состоянии, то $dH/dt<0$.

В 1876 г. Лошмидт выдвинул против H -теоремы возражение, основанное на некоем аналоге максвелловских демонов. Размышляя над возражением Лошмидта, Больцман пришел в 1877 г. к своей вероятностной трактовке второго начала термодинамики. Он предположил, что следует рассматривать ансамбль состояний макроскопической системы, в котором присутствуют также и немарксовские состояния, только вес немарксовских состояний чрезвычайно мал, хотя и отличен от нуля. Он получил свою знаменитую формулу $S=k \ln W$, связавшую энтропию с вероятностью состояния системы. Тем самым стало возможно численное определение вероятности состояния системы, и понятие вероятности стало равноправным членом в системе физических понятий [14].

Максвелл же, по-видимому, не читал фундаментальной статьи Больцмана 1877 г., во всяком случае ни он, ни Тэт ни разу не упомянули этой статьи. Максвелл вообще с трудом воспринимал стиль Больцмана, он писал Тэту, что длинноты Больцмана — камень преткновения для него и что ему хочется переписать все статьи Больцмана в пяти строках.

Оценивая значение концепции сортирующих демонов Максвелла, В. Томсон писал, что «эта ценная для чистой физической науки концепция была изобретена не для того, чтобы помочь нам в вопросах, касающихся влияния жизни разума на движение материи, но она существенным образом затрагивает круг вопросов чистой динамики» [13].

ЛИТЕРАТУРА

1. Carnot S. Réflexions sur la puissance motrice du feu. P., 1878.
2. Clausius R. Ueber die bewegende Kraft der Wärme und die Gesetze welche sich daraus für die Wärmelehre selbst ableiten lassen. Pogg. Ann. 79, 1850, S. 368.
3. Gibbs J. W. Rudolf Julius Emanuel Clausius.— Proc. Amer. Acad., vol. 16, 1889, S. 458.
4. Clausius R. Ueber Verschiedene für die Anwendung bequeme Formen der Hauptgleichungen der mechanischen Wärmetheorie.— Pogg. Ann., vol. 125, 1865.
5. Thomson W. On the Dynamical Theory of Heat.— Trans. Roy. Soc. Edinb., vol. 20, 1851, S. 261.

6. *Spencer H. First Principles*. L., 1870, p. 514—517.
7. *Boltzmann L. Ueber die mechanische Bedeutung des zweiten Hauptsatzes*.—Wien. Ber., vol. 53, 1866, S. 195.
8. *Knott C. C. Life and Scientific Work of P. G. Teit*. Cambridge, 1911, p. 214.
9. *Klein M. J. Maxwell, His Demon and the Second Law of Thermodynamics*.—Amer. Sci., vol. 58, 1976, p. 84—97.
10. *Maxwell J. C. Theory of Heat*. L., 1875, p. 306—308.
11. *Thomson W. The Kinetic Theory of Dissipation of Energy*.—Proc. Roy. Soc. Edinb., vol. 8, 1874, p. 325—334.
12. *Maxwell J. C. Teit's Thermodynamics*.—Nature, vol. 17, 1878, p. 257.
13. *Teit P. G. Clerk-Maxwell Scientific Work*.—Nature, vol. 21, 1880, p. 313.
14. *Boltzmann L. Ueber die Beziehung zwischen dem zweiten Hauptsatzes der mechanische Wärmetheorie und Wahrscheinlichkeitsrechnung*.—Wien. Ber., Bd. 46, 1878, S. 373.

УДК 533.7+536.765

С. Ф. ШУШУРИН*

МАКСВЕЛЛ И СТАТИСТИЧЕСКИЙ МЕТОД В ФИЗИКЕ

Анализу вклада Максвелла в развитие кинетической теории газов и вообще статистической физики посвящен ряд работ (см. [1] и библиографию к ней). Если кратко подвести итоги этого анализа, то необходимо отметить следующее. Главный и существенный вклад Максвелла в кинетическую теорию газов состоял в построении теории средней (элементарной) длины свободного пробега молекул в работе [1]¹. Максвелл использовал введенное Клаузиусом понятие средней длины и вывел формулы для коэффициентов переноса в газах: динамической вязкости, коэффициентов теплопроводности и диффузии. Максвелл первым показал, что упомянутые свойства газов являются следствием процессов (в рамках механической модели газа) переноса некоторых физических величин, что дало возможность позднее создать ему более общую теорию процессов переноса. В работе [1] содержатся такие фундаментальные результаты как предсказание независимости динамической вязкости газов от их плотности и ее повышение с ростом температуры (для жидкостей наблюдалось обратное!); он установил связь между значением динамической вязкости и диаметром молекулы как элемента механической модели газа (или диаметром атома для случая молекулных газов). Она оказала большое влияние на последующий ход изучения явлений переноса: Браш [2] указывает, что она породила не менее 50 публикаций, излагающих результаты экспериментальных работ, если ограничиться отрезком времени до 1900 г., т. е. 40 годами.

* Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова.

¹ Работы Д. К. Максвелла обозначены римскими цифрами.

И в этой работе содержится, быть может, самый значительный результат: введение максвелловского распределения. Это был принципиально новый шаг, не содержащийся в работах его предшественников по кинетической теории газов. В настоящее время это распределение пронизывает всю физику, по крайней мере классическую, а введение его в 1860 г. мало кого убедило, поскольку оно было введено Максвеллом независимо от предложенных им механических моделей (модель упругих шаров, модель точечных тел, сила отталкивания которых обратно пропорциональна пятой степени расстояния между ними). Лишь только позднее, в 1866—1872 гг., когда Максвелл и Больцман вывели его на основе учета столкновения молекул в рамках механической модели, оно перестало быть просто гипотезой, коей оно до этого являлось.

Прежде чем закончить краткое введение, содержащее изложение вклада Максвелла в создание статистической физики, хотелось бы определить цель настоящей статьи. Введение Максвеллом фундаментального статистического понятия: плотности распределения (элементов множества по подмножествам) — не только создало современную кинетическую теорию газов и статистическую физику вообще, оно было первым введением в физику статистического метода, статистического способа рассмотрения, приложения которого в физике в настоящее время очень широко и разнообразно. Подчеркнуть это и показать, как именно вошел в физику статистический метод — такова цель настоящей статьи. (Мы ограничимся анализом работы [1].)

Следующее достижение Максвелла, которое, как справедливо указывает Браш [2], уступает по своей значимости лишь построению им же теории электромагнитных явлений, состоит в создании общей теории переноса [II, III]. Это достижение также связано с введением в физику статистического метода, хотя и более косвенно. Максвелловские уравнения для потока массы, количества движения и энергии были в 1872 г. переписаны Больцманом в виде одного уравнения для плотности распределения множества молекул по значениям их скоростей. Это дало Больцману прямой выход к *H*-теореме, породившей проблему соотношения между макронеобратимостью и микрообратимостью.

Прямое отношение к созданию статистической физики, говоря несколько строже, к созданию статистической механики Гиббсом, имели последующие работы Максвелла. В 1873 г. Максвелл обобщил форму плотности распределения по скоростям путем учета действия на систему, моделирующую газ, внешних сил [IV]. Но при этом причиной установления распределения у него по-прежнему были столкновения молекул, тип которых разумно предположить только для газа (время столкновения мало по сравнению со временем движения молекул между столкновениями; столкновения молекул только бинарные). Для того чтобы сделать теорию справедливой и для столкновений молекул вещества

в жидком и твердом состоянии, Максвелл постулировал, что механическая система, описываемая обобщенно, в обобщенных координатах Лагранжа — Гамильтона «рано или поздно пройдет через каждую фазу, которая совместна с уравнением энергии» [V]. Этим Максвелл сформулировал эргодическую гипотезу (Больцман, правда, выдвинул ее раньше, в 1872 г. [3]). Эргодическая гипотеза породила эргодическую теорию, представляющую в настоящее время одну из бурно развивающихся глав математики (см. [4]). Максвеллу же эта гипотеза была нужна для обоснования теоремы о равномерном распределении механической энергии по степеням свободы механической системы. Так Максвеллом были созданы общие принципы статистического равновесия, которые и были использованы Гиббсом в 1902 г. для создания статистической механики. Надо отметить, что в деле создания этих принципов наиболее сильно проявляется взаимосвязь работ Максвелла и Больцмана: Максвелл в [V] исходил из работ Больцмана, а Больцман явно следовал работам Максвелла [I, II].

В своей «Теории теплоты» в 1871 г. Максвелл первым осознал статистическую природу второго начала термодинамики и использовал для иллюстрации этого существа, которое позднее получило название «демона Максвелла». Не углубляясь в эти представления Максвелла, необходимо отметить, что введение такого существа было бы немыслимо без предположения о наличии распределения множества молекул по значениям их скорости, или, иначе говоря, без предположения о том, что скорость молекул имеет не одно значение (устойчивость распределения в данном случае не существенна). В противном случае существо нечего было бы сортировать, оно было бы совершенно излишним, и от его услуг пришлось бы отказаться.

Вот таков весьма сжатый перечень работ Максвелла, имеющих отношение к введению в физику статистического метода в самом широком смысле.

I

В современную физику проник статистический метод в широком смысле слова. Под последним мы будем понимать то, что не вполне точно называется сейчас вероятностно-статистическими методами исследования, в основе которых лежит применение такой классической и давно сложившейся математической дисциплины как теория вероятностей и более молодой, но претендующей на роль руководства эмпирическими исследованиями тоже математической дисциплины — математической статистики. Ниже будет показано, что в основе теории вероятностей, по сути дела, лежат статистические категории, поэтому правильнее говорить не о вероятностно-статистических методах, а о статистическом методе.

В каких разделах физики в настоящее время используется статистический метод?

1. Прежде всего он работает в современной кинетической теории газов, прямо продолжающей линию исследований, намеченную Максвеллом. В 1916—1917 годах теория средней длины свободного пробега Максвелла была обобщена Чепменом и Энскогом для весьма широкого закона взаимодействия частиц, которая нашла много частных приложений. Уравнения переноса и их решения стали предметом интенсивных исследований математиков (Гильберт, Карлеман, Грэд, Трусделл). Решение уравнений Чепмена-Энскага позволило предсказать термодиффузию, сыгравшую огромную роль в технике разделения изотопов урана. В настоящее время бурно развивается кинетическая теория плазмы и механика разреженного газа, иницированные задачами, возникающими при решении проблемы управляемых термоядерных реакций и освоения космического пространства.

2. Статистическая механика, как и вся статистическая физика (это уже отмечалось выше), прямо вытекают из работ, обязанных введению Максвеллом статистического распределения. Широки применения статистической физики в настоящее время в теории газов, жидкостей, твердых тел, в частности в теории магнитных явлений, полупроводников, сверхпроводимости. Соединение статистической физики и квантовой механики породило такую важнейшую отрасль теоретической физики как квантовая статистика.

3. Ближайшим к статистической физике разделом, выросшим из решения задач современной радиофизики и электроники, является статистическая радиофизика. На ее основе выросла важная прикладная дисциплина статистическая радиотехника, но сама она занимает место самостоятельной главы физики.

4. Родной сестрой статистической радиофизики является недавно возникшая, бурно развивающаяся статистическая оптика как ответ на нужды физики и техники ОКГ (лазеров).

5. Огромное значение приобрела в настоящее время статистическая гидромеханика. Она выросла в связи с потребностями изучения турбулентности при движении жидкости и газа, в технических приложениях гидромеханики и в геофизике (физика атмосферы и физика моря).

6. Возникновение волновой и квантовой механики не было связано со статистической физикой, но предложенное Борном в 1927 г. статистическое истолкование волновой функции стало существенной частью современной квантовой теории вообще.

7. Открытый в 1902 г. Резерфордом и Содди закон радиоактивного распада был объяснен Мейером в рамках статистической теории в 1904 г. Таким образом возникла статистическая теория радиоактивного распада, из которой следовал экспоненциальный характер этого закона. Развившаяся после этого ядерная физика и физика элементарных частиц существенно опираются на эту статистическую теорию.

Кроме того, в физике сейчас развиваются направления, имеющие несколько общий характер (8, 9).

8. Теория информации в физике.

9. Теория ошибок наблюдений и планирование эксперимента. Может быть, они носят также вспомогательный характер, но для них существенно использование статистических концепций.

II

В чем же состоят эмпирические и теоретические основы статистического метода вообще, работающего во многих науках, не только в физике?

Обычно предметом эмпирического исследования является единичный объект (предмет или явление). Но очень часто объектом исследования становятся совокупности однородных объектов. Это, например, характерно для биологии. Вопросы классификации, т. е. разбиение множества на более однородные подмножества и систематизация (например, упорядочение множества этих подмножеств) подмножеств всегда занимали в биологии столь большое место, что в рамках последней сформировалась самостоятельная глава — таксономия (таксиномия) или систематика как учение о классификации. Но биология не единственна в смысле существенности для нее решения вопросов классификации. Таксономический этап обязателен для каждой науки хотя бы потому, что у понятий науки должны быть свои предметные области, возникающие как итог классификационного этапа исследования. Так, еще М. В. Ломоносов писал о невозможности того, «... чтобы, собрав великое множество разных вещей и материй в беспорядочную кучу, глядеть и удивляться их множеству, не размышляя о их расположении и приведении в порядок» [5]. Огромную роль классификация играла и играет в астрономии (от каталога Мессье до работ по классификации галактик, в частности, работ Воронцова—Вельяминова). Блестящим итогом огромной классификационной работы многих поколений химиков было создание Д. И. Менделеевым периодической системы химических элементов. Вопрос о таксономическом этапе в физике требует особого исследования, так как в основном он был пройден на очень ранней стадии человеческой культуры, хотя отдельные таксономические проблемы возникают и в настоящее время (например, в физике металлов и сплавов).

В настоящее время таксономия вышла за рамки биологии и складывается в некоторую достаточно общую методологическую дисциплину, очень важную для дальнейшего развития прежде всего тех наук, в которые начинают проникать количественные методы исследования (антропология, археология, языкознание) [67]. Видимо, можно утверждать, что проникновение математики в науки возможно только после того, как в них достаточно надежно пройден таксономический этап.

Основной задачей таксономии является разработка методов

установления объективной разбиваемости множества эмпирических объектов на более однородные (в некотором особо определяемом смысле) подмножества и методов упорядочения этих подмножеств. Если тем или иным способом некоторое множество объектов разбито на подмножества, то можно считать, что установлен таксономический факт. Если показано, что совокупность множеств однородного происхождения разбиваются на подмножества, в какой-то степени одинаково, т. е., если показана повторяемость таксономического факта, то тем самым можно утверждать об установлении таксономической закономерности.

Итак, первым этапом анализа эмпирических множеств является таксономический анализ, являющийся и эмпирической основой теории множеств, а следовательно, и значительной доли современной математики вообще.

Следующим этапом анализа эмпирических множеств (не всегда, правда, обязательно присутствующим) является их статистический анализ. Основной величиной последнего является относительная доля подмножества (ОДП), т. е. отношение числа элементов подмножества к числу элементов всего множества. Функциональная же зависимость ОДП от параметра, характеризующего подмножество, носит название плотности распределения множества по подмножествам. Она полностью определяет статистическую структуру множества. Статистические же свойства множества (средние значения, дисперсия, стандартное отклонение, энтропия) выражают функционалами от этой плотности.

Установление плотности распределения некоторого множества по подмножествам или, иначе говоря, нахождение его статистической структуры является установлением статистического факта. Обнаружение же повторяемости статистической структуры или, иначе говоря, повторяемости плотности распределения есть установление статистического закона (или статистической закономерности).

Вышесказанное о двух этапах анализа эмпирических множеств в равной степени применимо и к множествам предметов, и к множествам событий. Можно говорить о таксономии событий и о статистике событий. Они-то и лежат в основе теории вероятностей.

Вопрос о методологическом статусе теории вероятностей неразрывно связан с процедурой предсказания, играющей огромную роль и в повседневной жизни, и в научном исследовании [8, 9]. Не останавливаясь подробно на анализе основ научного предсказания, отметим лишь, что предсказание может осуществляться на основе первой половины логического принципа: *ab esse ad posse valet, a posse ad esse non valet* [10]. Предсказание чаще всего осуществляется на основе повторяемости функционального закона (часто их называют динамическими, если речь идет о физике), но оно может осуществляться и на основе повторяемости статистических (и таксономических) фактов, т. е. на

основе статистических и таксономических закономерностей. Математическая теория вероятностей представляет собою теорию, касающуюся количественных и расчетных аспектов предсказаний, основанных на осуществлении статистических законов, т. е. на использовании повторяемости статистической структуры нескольких множеств событий. Поэтому правильнее говорить о статистическом методе научного исследования, а не о вероятностно-статистических методах.

III

Как же статистический метод был введен Максвеллом в физику? Первая попытка введения в физику через кинетическую теорию газов статистического метода принадлежит немецкому химику Карлу Августу Крёнигу, опубликовавшему в 1856 г. статью «Основные положения некоторой теории газов» [11]. Представляя себе газ как совокупность упругих шаров, Крёниг смог вывести простые газовые законы. И он упомянул теорию вероятностей в следующем контексте: «если рассмотреть стенку, о которую ударяются атомы газа как очень шероховатую, траектория каждой молекулы должна считаться нерегулярной, и рассчитать ее невозможно. Однако согласно законам теории вероятностей можно предположить, несмотря на этот хаос, полную однородность». Это упоминание теории вероятностей сразу влечет за собою два вопроса: 1) какие законы теории вероятностей имел в виду Крёниг? 2) что имел Крёниг в виду, когда говорил о порождении хаосом однородности? На первый вопрос, видимо, можно ответить так: закон больших чисел и еще что-то (ответ на вопрос, что именно, требует дополнительного исследования). Дать ответ на второй вопрос несколько сложнее. Видимо, Крёниг впервые выдвинул часто после него использовавшуюся гипотезу о равномерном распределении множества молекул по направлениям их скоростей, т. е. об изотропности распределения скоростей молекул. Во всяком случае самого Крёнига такой уровень обоснования модели газа вполне удовлетворял. Браш объясняет это тем, что Крёниг был более химиком, чем физиком [12].

Статья Крёнига явилась поводом для первой публикации Клаузиуса, в которой он развил свои взгляды на кинетическую теорию газов [13]. Клаузиус в ней утверждал, что его молекулярно-кинетические представления сложились независимо от Крёнига и раньше публикации статьи последнего. Во всяком случае в статье Клаузиуса была построена более строгая кинетическая теория газов, которая содержала в себе все результаты, полученные Крёнигом. В его статье содержатся два утверждения, как бы предвещающие введение в кинетическую теорию газов статистического метода. Клаузиус допускал, что соударения молекул со стенкой объема могут и не быть упругими. Поэтому он писал: «Хотя фактически не обязательно, что молекула должна подчиняться обычным законам упругого удара, справедливым в

случае упругих шаров и совершенно плоской стенки; другими словами, что при соударении со стенкой угол и скорость падения должны быть равны углу и скорости отражения, но согласно законам вероятностей, мы можем предположить, что сколько молекул, угол отражения которых попадает в определенный интервал, например, между 60° и 61° , столько же будет и молекул, угол падения которых заключается в тех же самых пределах, и что в целом скорости молекул не изменяются стенкой. Поэтому конечный результат изменен не будет, если мы предполагаем, что для каждой молекулы угол и скорость отражения равны углу и скорости падения» [13, с. 370].

Второе важное утверждение Клаузиуса состояло в том, что он явно признавал, что скорость, входящая в его выражения для давления и в другие формулы, была усредненным значением скорости молекул. Это значение скорости находилось из следующего условия: если все молекулы будут иметь скорость этого значения, то их совокупность будет иметь такую же *vis viva*, которую имеет совокупность молекул с фактическими значениями скоростей. Клаузиус писал: «В то же самое время возможно, что фактические скорости ряда молекул, по существу, отличаются от среднего значения» [13, с. 376].

Что касается первого утверждения, Клаузиус также не уточнял, что он имеет в виду под законами вероятностей. Он, фактически, предположил устойчивость, постоянность распределения множества скоростей молекул по направлениям скоростей и абсолютным значениям. Если с первым предположением еще как-то можно согласиться, то наличие неупругих соударений никак не совместимо с устойчивостью распределения по абсолютной величине скорости.

Все введенные им предположения Клаузиус использовал для оценки средних скоростей молекул некоторых газов. Бейс-Баллот сразу же поставил эти оценки под сомнение [14], так как они не согласовывались с данными о диффузии (диффузия протекает довольно медленно). И вот это-то возражение заставило ввести Клаузиуса представление о средней длине свободного пробега молекул [15]. Хотя общая идея Клаузиуса была правильна, он не смог рассеять сомнения, высказанные Бейс-Баллотом, так как он не смог дать оценки ни размера, ни количества молекул в единице объема. На этом этапе дальнейшим развитием кинетической теории газов занялся Максвелл. Как пишет Гарбер [16], для Клаузиуса изучение свойств газов было средством исследования теплоты, а Максвелл использовал идеи кинетической теории для уточнения представлений о строении вещества.

IV

Каким путем пришел к этому направлению исследований Максвелл, не совсем ясно. И этот вопрос заслуживает дальнейшего исследования со стороны историков науки и биографов

Максвелла. Известно, что в 1848 г., когда Максвелл занимался в классе Уильяма Гамильтона в Эдинбурге, он написал работу: «Свойства вещества». Косвенно она говорит в пользу того, что Максвелл скорее придерживался тогда статической концепции строения газов, в которой теплота была источником сил отталкивания молекул. Данные, свидетельствующие об эволюции его взглядов между 1848 г. и 1859 г., отсутствуют. Бесспорно, значительным толчком в направлении кинетической теории газов была его работа о кольце Сатурна [VI]. Отсутствуют также сведения о степени знакомства Максвелла с работами по теории вероятностей. Известно лишь, что он был знаком с работами Лапласа, Пуассона, Кетле и Гершеля (младшего) [2]. Явно он был знаком с работами Гаусса по теории ошибок, но, видимо, через других авторов.

Максвелл развил мысль Клаузиуса о введении статистического подхода. Лучше всего об этом он писал сам в 1870 г. в письме к Уильяму Томсону. Перечисляя достижения Клаузиуса, Максвелл отмечает, что Клаузиус ввел: «... математический метод для статистического рассмотрения огромного числа молекул путем расположения их в группы по их направлениям, скоростям и т. д.» [17]. В этом же письме Максвелл отметил свой вклад, являющийся продолжением работы Клаузиуса. Он писал, что им было показано, что «скорости молекул принимают любые значения, будучи распределенными по тому же самому закону, который преобладает в распределении ошибок наблюдений и вообще во всех случаях, когда в массе существует общая однородность наряду с очевидной нерегулярностью в отдельных случаях».

Иногда встречаются утверждения (особенно в книгах инструктивного характера), что Максвелл вывел в работе 1860 г. закон распределения скоростей. Нам представляется (и это подтверждается замечанием Максвелла в письме к Томсону), что в работе 1860 г. Максвелл лишь предположил конкретный вид плотности распределения множества молекул (элементов механической модели газа) по значениям их скоростей. Остановимся на этом подробнее, еще раз подчеркнув, что речь идет только о работе 1860 г.

V

Если строго следовать тексту Максвелла в разделе «О движении и столкновениях совершенно упругих шаров», то плотность распределения получается как функция, удовлетворяющая функциональному уравнению. (Следует заметить, что equation можно перевести и словом «равенство».) Это уравнение (или лучше сказать, равенство) содержит две неизвестные функции, одна из которых содержится в левой части в мультипликативной форме, а другая — в правой. Не указывая метода решения уравнения-равенства, Максвелл приводит конкретный вид функции, ему удовлетворяющей.

На наш взгляд ход мысли Максвелла с современной точки зрения был следующим.

Рассмотрим некоторую плотность распределения множества объектов в обычном трехмерном физическом пространстве. Она может быть записана как функция радиуса-вектора, определяющего положение ячейки объема, на которые разбит полный объем, занимаемый объектами $f(\mathbf{r})$, причем

$$\int_V f(\mathbf{r}) dV = 1. \quad (1)$$

Для проведения конкретных расчетов необходимо выбрать некоторую систему координат и расписать в ней радиус-вектор. Выберем для начала декартову прямоугольную систему; в ней радиус-вектор будет иметь компоненты: $\mathbf{r}(x, y, z)$. Тогда (1) запишется в виде

$$\int_V f_D(x, y, z) dx dy dz = 1,$$

где f_D — плотность распределения в декартовой прямоугольной системе координат. Но мы имеем право выбрать и иную систему координат для описания одной и той же плотности распределения $f(\mathbf{r})$. Выберем, например, сферическую систему координат. Тогда (1) запишется в виде:

$$\int_V f_s(r, \theta, \varphi) r^2 \sin \theta dr d\theta d\varphi = 1,$$

где $r = (x^2 + y^2 + z^2)^{0.5}$ — длина радиуса-вектора, $\varphi = \arctg(y/x)$ — долгота, $\theta = \arctg \frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{z}$ — полярное расстояние, а $r^2 \sin \theta dr d\theta d\varphi$ —

элемент объема в сферической системе координат.

Это позволяет поставить следующую задачу: в некоторой системе координат задана плотность распределения объектов в пространстве; найти конкретный вид этой же плотности распределения в другой системе координат, если заданы формулы перехода от координат первой системы к координатам второй системы (т. е. если задан якобиан преобразования).

В работе 1860 г. Максвелл сделал следующее:

1) он предположил, что в декартовой системе координат пространства скоростей значения компонент скоростей распределены нормально, по Гауссу,

2) далее он предположил, что плотность распределения скоростей как векторов в декартовой системе координат мультипликативна, т. е. выражается как произведение плотности для различных компонент;

3) он неявно совершил переход к сферической системе координат в пространстве скоростей, свернув плотность по долготе φ и полярному расстоянию θ . Правда, он записал плотность в сферической системе не как функцию от радиуса-вектора, а как

функцию квадрата длины радиуса-вектора и опустил якобиан преобразования. Последний у него появился позже: во втором следствии.

По счастливой случайности экспоненциальная функция вошла в оба конкретных вида плотности распределения. Максвелл выбрал удачный конкретный вид плотности распределения по пространству скоростей в декартовой прямоугольной системе координат.

В настоящее время можно было бы предположить наличие треугольной или трапециевидальной плотности распределения молекул по значениям компонент декартовой системы и перейти к сферической системе. В принципе, ничто от этого не изменится, лишь нормировочный коэффициент будет иным, да сама плотность распределения по модулю скорости окажется заданной на конечном отрезке значений скоростей. Все качественные выводы, сделанные Максвеллом в [I], остаются теми же самыми, а ведь в них-то и есть главное содержание работы Максвелла 1860 г., в которой он ввел в физику статистический метод.

ЛИТЕРАТУРА

РАБОТЫ Д. К. МАКСВЕЛЛА

- I. Illustrations of the Dynamical Theory of Gases.—Phil. Mag., 1860, vol. 4, ser. 19, N 124, p. 19—32, (рус. пер.: Максвелл Д. К. Пояснения к динамической теории газов.—В кн.: Основатели кинетической теории материи/Под ред. А. К. Тимирязева. М.; Л.: ГОНТИ, 1937, с. 183—220).
- II. On the Dynamical Theory of Gases.—Phil. Mag., 1866, vol. 4, ser. 32, N 217, p. 390—393.
- III. On Stresses in Rarefied Gases Arising from Inequalities of Temperature.—Phil. Trans. Roy. Soc. London, 1880, vol. 170, Pt. 1, p. 231—256.
- IV. On the Final State of a System of Molecules in motion Subject to forces of any kind.—Nature, 1873, vol. 8, N 208, p. 537—538.
- V. On Boltzmann's Theorem on the average distribution of energy in a system of material points.—Trans. Cambr. Philos. Soc. 1879, vol. 12, p. 547.
- VI. On the stability of the motion of Saturn's Rings.—Sci. Papers, vol. 1, p. 288—376.

РАБОТЫ ДРУГИХ АВТОРОВ

1. Ельяшевич М. А., Протко Т. С. Вклад Максвелла в развитие молекулярной физики и статистических методов.—УФН, 1981, т. 135, вып. 3, с. 381—423.
2. Brush S. G. James Clerk Maxwell and the Kinetic Theory of Gases: A Review Based on Recent Historical Studies.—Amer. J. Phys., 1971, vol. 39, N 6, p. 631—640.
3. Boltzmann L. Studien über das Gleichgewicht der lebendigen Kraft zwischen bewegten materiellen Punkten.—Sitzungsber. d. k. Akad. Wien, 1868, Bd. 58, S. 517—560.
4. Корнфельд И. П., Синай Я. Г., Фокин С. В. Эргодическая теория. М.: Наука, 1980. 383 с.
5. Ломоносов М. В. Слово о происхождении света, новую теорию о цветах представляющую.—Полн. собр. соч., т. 3. М.; Л., 1952, с. 342.
6. Sokal R. R., Sneath P. M. A. Principles of Numerical Taxonomy. N. Y.; Toronto, 1971.

7. Leman I. C. Introduction à une méthode de classification automatique illustrée par la recherche d'une typologie des personnages enfants à travers la littérature enfantine.—Rev. stat. appl., 1973, vol. 21, p. 23—49.
8. Виноградов В. Г. Научное предвидение. М.: Высш. школа, 1973. 188 с.
9. Виноградов В. Г., Гончарук С. И. Законы общества и научное предвидение. М.: Госполитиздат, 1972. 231 с.
10. Кондаков Н. И. Логический словарь-справочник, 2-е изд. М.: Наука, 1975, с. 58.
11. Kronig K. A. Grundzuge einer Theorie der Gase.—Ann. Phys., 1956, Bd. (175) 99, N 2, S. 315—322.
12. Brush S. G. The Development of the Kinetic Theory of Gases. III. Clausius.—Ann. Sci., 1958, vol. 14, N 3, p. 185—196.
13. Clausius R. J. E. Ueber die Art der Bewegung welche wir Wärme nennen.—Ann. Phys., 1857, Bd. (176) 100, N 3, Bd. 353—380.
14. Buys-Bullot Chr. H. D. Über die Art der Bewegung, welche wir Wärme und Electricität nennen.—Ann. Phys., 1858, Bd. (179) 103, S. 240.
15. Clausius R. J. E. Ueber die mittlere Länge der Wege, welche bei Molecularbewegung gasförmigen Körper von den einzelnen Moleculen zurückgelegt werden, nebst einigen anderen Bemerkungen über die mechanischen Wärmetheorie.—Ann. Phys., 1858, Bd. (181) 105, N 2, S. 239—258.
16. Garber E. W. Clausius and Maxwell's Kinetic Theory of Gases.—Hist. Stud. in Phys. Sci., Philadelphia, 1970, vol. 2, p. 299—319.
17. Bernstein H. T. J. Clerk Maxwell on the History of the Kinetic Theory of Gases, 1871.—Isis. 1963, vol. 54, Pt. 2, N 176, p. 206—216.

УДК 93/99(53)+536.765

О. В. КУЗНЕЦОВА

РАЗВИТИЕ МОЛЕКУЛЯРНО-КИНЕТИЧЕСКИХ И СТАТИСТИЧЕСКИХ ИДЕЙ МАКСВЕЛЛА РУССКИМИ ФИЗИКАМИ КОНЦА XIX — НАЧАЛА XX В.

Русские физики внесли достойный вклад как в разработку чисто теоретических основ молекулярно-кинетической теории и статистико-вероятностного подхода к термодинамике в духе идей Максвелла и Больцмана, так и в разработку отдельных конкретных вопросов, таких как теория реальных газов и жидкостей, критическое состояние вещества, теория теплового излучения и т. д.

Молекулярно-кинетическая теория и проблема статистического обоснования второго начала термодинамики привлекли внимание ряда русских физиков, начиная с 80-х годов XIX в.

Прежде всего отметим исследования Н. Н. Пирогова (1843—1891), относящиеся к доказательству закона распределения скоростей Максвелла. Анализируя доказательства этого закона Максвеллом, Больцманом и О. Мейером, Пирогов предложил также свой вывод, основанный на уточнении доказательства О. Мейера. Хотя его вывод был нестрогим и не содержал доказательства единственности решения, однако в связи с попытками дальнейшего развития этих идей, Пирогов пришел к статистиче-

ским проблемам в термодинамике. В 1886 г. он опубликовал работу «Новое аналитическое доказательство второго начала термодинамики» [1]. Для доказательства закона возрастания энтропии, Пирогов развил специальный математический аппарат, содержащий зачатки теории случайных процессов. Его главная работа, посвященная этому вопросу, была напечатана в 1890 г. [2]. Пирогов рассматривает макроскопическое тело как систему из огромного числа N материальных точек, состояние которой может быть представлено как 6-мерная последовательность координат и импульсов всех N молекул. В результате естественного движения системы эта последовательность будет «варьироваться» и можно сделать вывод о монотонном изменении энтропии системы.

Пирогов отчетливо понимал, что вместе с развитием молекулярной физики возникает неизбежность введения статистических закономерностей. В этом контексте он говорил о двух формах закономерностей: «Еще в 1860 г. появился знаменательный мемуар Clerk Maxwell'a: Illustration of the Dynamical Theory of Gases, мемуар, которому, по-видимому, суждено сделаться одной из исходных точек новой эры естествознания. Если период до шестидесятих годов настоящего столетия справедливо может быть назван ньютоновской эрой, эрой изучения закономерного, то с шестидесятих годов проявляется с особой силой почти во всех отраслях естествознания новое направление изучения закономерностей случайного» [2, с. 198]. Не имея возможности подробно останавливаться на работах Н. Н. Пирогова, отсылаем читателя к обстоятельной работе Б. И. Спасского [3].

Выдающийся русский физик Умов Николай Алексеевич (1846—1915), сейчас более всего известный введением понятия потока энергии, пришел к своей теории локализации энергии и ее движения от гипотезы о природе молекулярных и тепловых сил. В 1872 г. в диссертации «Теория термомеханических явлений в твердых упругих телах» Умов попытался связать механическую теорию упругости с феноменологической теорией теплопроводности, «исходя из начала сохранения энергии» [4]. В качестве следствия полученных им уравнений Умов пришел к выводу о существовании интегрирующего делителя у выражения для бесконечно-малого количества тепла, сообщаемого элементу объема среды: «В существовании подобного делителя и заключается, как известно, второй закон механической теории тепла,— пишет Умов.— В нашей теории он является не более как следствием основных предположений и для своего вывода не требует никаких новых допущений» [4, с. 124]. В этом заключался вклад Умова в поиски рациональной формулировки второго закона. В этой же работе Умов дал интерпретацию потока тепла с энергетической точки зрения, что явилось основой учения о движении энергии, разработанного Умовым в ряде работ 1873—1874 гг.

В 1913 г. в связи с широко развернувшейся дискуссией по вопросу о связи теории квант Планка с классическими представле-

ниями Умов опубликовал заметку «Возможный смысл теории квант» [4, с. 506]. Умов здесь пытался спасти закон распределения энергии Максвелла—Больцмана. Он рассматривает взаимодействие частиц с окружающим агентом — эфиром — и предполагает, что оно может иметь как упорядоченный, так и неупорядоченный характер. Чувствительность агента по отношению к движению молекулы моделируется неким манометром. Манометр типа «демона Максвелла» способен воспринимать импульсы отдельных молекул, и для него вся энергия будет энергией неупорядоченных движений. Обычный же макроскопический манометр обладает нулевой чувствительностью к микроскопическим флуктуациям. «Между этими крайними типами могут быть вставлены манометры, чувствительность которых определяется способностью воспринимать группы импульсов, энергия которых лежит между пределами: произвольным E и другим $E+\varepsilon$, где величину ε мы будем считать пока определяемой природой манометра и дробь $1/\varepsilon$ мерой его чувствительности». Окончательный свой вывод Умов формулирует следующим образом: «Эфир обладает различной степенью чувствительности по отношению к неупорядоченным движениям материальных систем. Эта чувствительность зависит от числа естественных колебаний молекулы и представляется величиной $1/h\nu$, где h есть постоянная, зависящая от свойств эфира и потому универсальная, а ν есть число естественных колебаний молекулы системы». Обозначив наименьшую энергию, воспринимаемую прибором, через ΔE , а период молекулы $1/\nu$ через Δt , можно записать $\Delta E \cdot \Delta t = h$. «Таким образом, мы видим, насколько близко Умов подходил уже тогда к современным воззрениям волновой механики», — комментирует эту статью А. С. Предводителев [4, с. 553].

Б. Б. Голицын (1862—1916), занимавшийся исследованием молекулярных явлений, разработал теоретическое обоснование давления света с точки зрения термодинамики (1892) [5]. Эта проблема стояла в термодинамике с 70-х годов XIX в. Бартоли, исходя из термодинамических соображений, показал необходимость существования светового давления, а Максвелл вычислил величину давления света.

Развивая идеи Бартоли, Максвелла и Больцмана о существовании давления излучения, Голицын в своей магистерской диссертации «Исследования по математической физике» (1893) [6] пришел к мысли о применимости к электромагнитному излучению такой термодинамической характеристики, как абсолютная температура. Таким образом, излучение, подобно любой термодинамической системе, может быть охарактеризовано объемом, давлением, температурой, энергией, энтропией. По Голицыну, «абсолютная температура обуславливается совокупностью всех электрических смещений», т. е. всем электромагнитным процессом, разыгрывающимся в вакууме.

Одной из первых русских работ, посвященных статистическому толкованию второго начала термодинамики, является сочи-

нение В. А. Михельсона (1860–1927) «Второй закон термодинамики с точки зрения аналитической механики и теории вероятностей» (1886) [7]. В этой работе В. А. Михельсон детально анализирует всевозможные механические интерпретации второго закона. Подводя итог сделанным в этом направлении попыткам различных авторов, Михельсон подчеркнул, в стиле идей Максвелла, что обоснование второго закона термодинамики вряд ли возможно «на чисто механической почве» без применения теории вероятностей. Он обнаруживает ясное понимание статистического характера второго закона термодинамики. В 1887 г. в диссертации «Опыт теоретического объяснения распределения энергии в спектре твердого тела» [8] Михельсон сделал попытку применить методы кинетической теории газов и, в частности, закона распределения Максвелла к черному излучению.

Для этого Михельсон рассматривал тело, состоящее из атомов, каждый из которых заключен в сферическую полость радиуса r и совершает периодическое колебание с периодом $\tau = 4r/v$ (где v — скорость данного атома), которое сопровождается излучением электромагнитной монохроматической волны того же периода τ . При этом Михельсон предполагает, что скорости атомов распределены по закону Максвелла. Используя функцию зависимости интенсивности излучения от температуры, входящую в закон Стефана–Больцмана, Михельсон получает формулу для интенсивности излучения тела при температуре T в интервале длин волн λ и $\lambda + d\lambda$. Он получил закон смещения в виде $\lambda_{\max}^2 T = \text{const}$, вместо найденного эмпирически в 1888 г. Вебером и теоретически обоснованного в 1894 г. Винем выражения $\lambda_{\max} T = \text{const}$. Однако Михельсон оказался первым, кто применил максвелл-больцмановскую статистику к проблеме теплового излучения. В 1896 г., возобновляя эту попытку, Вин отметил, что эта работа Михельсона основана на «счастливой идее» использования максвелловского закона распределения. Михельсон, используя кинетическую модель колеблющегося атома, считал, что длина волны излучения $\lambda \sim 1/v$. Вин изменил это исходное предположение Михельсона и полагал, что $\lambda \sim 1/v^2$ в соответствии с законом смещения. Используя, как и Михельсон, закон Стефана–Больцмана, Вин получил свою знаменитую формулу

$$E_\lambda = c\lambda^{-5} \exp^{-b/\lambda T} d\lambda,$$

где b и c — константы.

Немалую роль в развитии и подтверждении следствий молекулярно-кинетической теории Максвелла сыграла школа А. Г. Столетова (1830–1896). Сам А. Г. Столетов в своих университетских лекциях по теории теплоты следовал скорее Клаузиусу, В. Томсону и Гирну, чем Максвеллу, второй закон термодинамики он выводил из рассмотрения циклов Карно. Однако целый ряд теоретических и экспериментальных исследований самого Столетова и его учеников был посвящен проблеме реальных газов и жидкостей. В 1873 г. Ван-дер-Ваальс получил свою зна-

менитую изотерму и выдвинул проблему критического состояния вещества. Этой проблемой занимался и Максвелл. Этот сложный вопрос исследуется в работах Столетова [9], Б. Б. Голицына [10] и А. И. Надеждина [11].

Большой резонанс получили работы Максвелла и Гиббса, касающиеся геометрического представления термодинамических свойств вещества при помощи поверхностей, в кандидатском сочинении ученика А. Г. Столетова Д. А. Гольдгаммера (1860–1922) «Термодинамическая поверхность воды», напечатанном в «Ученых записках Московского университета» в 1885 [12]. Гольдгаммер исследуя термодинамическую поверхность воды, полагал, что ее состояние описывается уравнением Ван-дер-Ваальса, связывающим объем, давление и температуру, но не позволяющим определить энергию и энтропию системы. Как указывает Гольдгаммер, «проф. Гиббс предложил определять состояние тела тремя другими аргументами, а именно: ζ , η и V » (энергия, энтропия и объем). При определении поверхности воды и ее свойств Гольдгаммер использует работы Гиббса, Максвелла, Ван-дер-Ваальса и Планка. Гольдгаммер был непримиримым и последовательным борцом против махизма и энергитизма. Утверждение Маха, что цепь науки — факты, а большее — вредно, Гольдгаммер воспринимал, как «цепи, налагаемые на свободу науки, на свободу исследования природы».

Позволим себе привести заключительный абзац из введения к разделу «Механические процессы» для книги «Итоги науки и теории и практике»: «Наука есть учение о существующем, о реальном, а не о кажущемся и мнимом. Не может быть науки о призраках, и не должно быть в науке безнадоедного скептицизма — этого проявления как бы страха пред неизвестным. Такой страх разрушает ход мысли у генов человечества, тормозит полет их фантазии и душит в своих цепях всякий возможный прогресс точного знания, без которого невозможно счастье будущего человечества» [13].

Проблемами кинетической теории газов занимался также Б. В. Станкевич (1860–1917), работавший в Варшавском университете. Хотя первый курс термодинамики на русском языке, принадлежащий М. Ф. Окатову (1829–1901) и получивший высокую оценку Клаузиуса, был издан уже в 1871 г. [14] (и это был вообще один из первых курсов: ему предшествовали только курсы Фэнкина, Цейнера и Гирна). Однако Окатов излагал термодинамику как строгую механическую теорию тепла и совершенно не касался молекулярно-кинетической теории и тем более теоретико-вероятностных идей. Таким образом, в 80-х годах в русской физической литературе еще не было монографии, в которой были бы систематизированы положения молекулярно-кинетической теории. Задачу «собрать воедино и систематизировать отдельные исследования по кинетической теории газов, разбросанные по брошюрам и газетным статьям, и попытаться дать ответ на некоторые из вопросов, стоящих на очереди в этой теории» [15]

поставил перед собой Станкевич в монографии «Кинетическая теория газов в математическом изложении». В этой работе Станкевич обосновывает доказательство максвелловского закона распределения; подробно останавливается на теории Максвелла явлений переноса (диффузии и теплопроводности); специально исследует с молекулярно-кинетической точки зрения электропроводность газа. В 1886 г. в статье «К динамической теории газов» Станкевич вновь обращается к выводу закона распределения Максвелла, видя в нем «краеугольный камень динамической теории газов» [16]. Позднее Станкевич занялся теорией реальных газов и жидкого состояния в духе теорий Ван-дер-Ваальса и Максвелла, свои результаты он изложил в книге «Этюды по кинетической теории строения тел».

Большой вклад внесли русские физики в учение о критическом состоянии вещества. Н. Н. Шиллер (1848–1910), более известный своими пионерскими работами в области аксиоматического обоснования термодинамики, предложил в 1890 г. заменить уравнение Ван-дер-Ваальса другим, более точно описывающим свойство реальных газов и жидкостей [17].

В 1906 г. А. И. Бачинский (1887–1944), талантливый ученик Умова, предложил уравнение

$$p(v + V) = \alpha T - \beta + \gamma \sqrt{T_{кр} - T},$$

где p — давление, v — объем жидкости, V — объем насыщенного пара, T — абсолютная температура, $T_{кр}$ — критическая температура, α , β , γ — константы [18]. Бачинский развивал также идеи Максвелла касательно внутреннего трения жидкости. Положив, что внутреннее трение жидкости зависит от молекулярных сил, а те в свою очередь от расстояния между молекулами, Бачинский пытался установить связь между вязкостью и удельным объемом жидкости. На этом пути он открыл «закон Бачинского»

$$\eta = c/(v - \omega),$$

где η — коэффициент вязкости, v — удельный объем, c и ω — константы. Этот закон Бачинский тщательно проверил на большом экспериментальном материале [19].

Внутренним трением в разреженных газах и явлением температурного скачка у стенки занимался А. К. Тимирязев (1880–1955). Исходя из теории Максвелла–Больцмана, в которой молекулы рассматриваются как силовые центры, взаимодействующие с силой, пропорциональной пятой степени расстояния, Тимирязев разработал новую методику для определения внутреннего трения и скольжения в газе [20].

Скачок температуры на границе твердого тела с газом изучал П. П. Лазарев (1878–1942), нашедший экспериментально величину температурного скачка, подтвердив тем самым теоретический расчет его величины, выполненный ранее Смолуховским [21].

Внутреннее трение в газах в рамках молекулярно-кинетической теории изучал С. А. Богуславский (1883–1923). Он показал ограниченность метода последовательных приближений Гильберта, применявшегося при решении некоторых проблем кинетической теории и наметил собственный путь решения этих проблем [22]. В 1918 г. Богуславский разработал статистический метод вычисления полного термодинамического потенциала на основе молекулярно-кинетических представлений.

Как отметил Я. М. Гельфер, работы русских физиков конца XIX — начала XX вв., развивавших идеи молекулярно-кинетической теории и статистической физики, имели определенный резонанс в научном мире: «Их охотно публиковали ведущие западно-европейские физические журналы, их цитировали и ссылались на них физики других стран. Ряд русских физиков (Михельсон, Богуславский и др.) были лично связаны либо переписывались с ведущими учеными Европы, работавшими в области молекулярно-кинетической теории и термодинамики. Этот личный контакт позволял ученым России постоянно находиться в курсе всех последних достижений в этой области физики» [23, с. 414].

Исследование связи работ русских физиков конца XIX — начала XX вв. в области молекулярно-кинетической теории и обоснования термодинамики с творчеством Максвелла в этой статье скорее ставится как задача, чем решается.

Специального историко-научного исследования, касающегося этой проблемы, нет. В работе Я. М. Гельфера имеется небольшой раздел, в котором кратко излагаются исследования русских физиков по молекулярно-кинетической теории [23]. В курсах истории физики Б. И. Спасского, П. С. Кудрявцева, Я. Г. Дорфмана содержится определенный материал, относящийся к данной проблеме, однако он подчинен, естественно, совсем иной логике исследования. Ближе всего к поставленной задаче подходит большая статья П. С. Кудрявцева, О. А. Лежневой и А. Е. Медунинной «Термодинамика и молекулярная физика» [24]. Все эти работы, безусловно, стимулируют интерес историков физики, но в целом проблема всесторонних связей русских физиков, занимавшихся развитием термодинамики, молекулярно-кинетической теории и статистической физики с ведущими физиками Европы ждет своих исследователей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пирогов Н. Н. Новое аналитическое доказательство второго начала термодинамики. — ЖРФХО, 1887, т. 18, с. 307.
2. Пирогов Н. Н. О законе Boltzmann'a. — ЖРФХО, 1890, т. 22, с. 44.
3. Спасский Б. И. Об исследованиях Н. Н. Пирогова по статистическому обоснованию второго начала термодинамики.
4. Умов Н. А. Избранные сочинения. М., 1950, с. 74.
5. Голицын Б. Б. Wied. Ann. Bd. 47, 1892.
6. Голицын Б. Б. Исследования по математической физике. — Уч. зап. ИМУ, отд. физ.-мат., 1893, вып. 10.

7. Михельсон В. А. Собрание сочинений. М., 1930. Т. 1.
8. Михельсон В. А. Опыт теоретического объяснения распределения энергий в спектре твердого тела.— ЖРФХО. ч. физ., 1887, т. 19, с. 79.
9. Столетов А. Г. Собрание сочинений. М.; Л., 1939, т. 1, с. 198—206; 276—338.
10. Голицын Б. Б. Избранные труды. М., 1960, т. 1, с. 15—33.
11. Надеждин А. И. Известия Киевского университета. 1885, № 6, с. 32.
12. Гольдгаммер Д. А. Термодинамическая поверхность воды.— Уч. зап. ИМУ, отд. физ.-мат., 1885, вып. 6, с. 3.
13. Гольдгаммер Д. А.— В кн.: Итоги науки в теории и практике/Под ред. М. М. Ковалевского, Н. Н. Ланге, Н. Морозова и В. М. Шилекевича. М., 1911, т. 1, с. 7.
14. Окатов М. Ф. Термодинамика. СПб., 1871.
15. Станкевич Б. В. Кинетическая теория газов в математическом изложении. М., 1884, с. 3.
16. Станкевич Б. В. К динамической теории газов.— Изв. Варшавского ун-та. 1886, № 4, с. 1—13.
17. Шиллер Н. Н. Возможные формы уравнения состояния газов, вытекающие из опытов Томсона и Джоуля над охлаждением при истечении газов.— ЖРФХО, ч. физ., 1890, т. 22, вып. 3, с. 110.
18. Бачинский А. И.— Ann. Phys., 1906, Bd. 19, S. 367; 1906, Bd. 21, S. 31, 1061.
19. Bulchinski A. I.— Phys. Zs., 1912, Bd. 113, S. 1157; Zs. phys. Chem., 1913, Bd. 84, S. 643.
20. Тимирязев А. К. О внутреннем трении в разреженных газах.— В кн.: Курс теоретической физики. М.: ГИЗ, 1928.
21. Лазарев П. П. О скачке температуры при теплопроводности на границе твердого тела и газа.— ЖРФХО, 1911, т. 43.
22. Богуславский С. Л. Избранные труды по физике. М.: Физматгиз, 1916, с. 63.
23. Гельфер Я. М. История и методология термодинамики и статистической физики. М.: Высшая школа, 1969, т. 1, с. 410—415.
24. Кудрявцев П. С., Лежнева О. А., Медунине А. Е. Термодинамика и молекулярная физика.— В кн.: История естествознания в России. М.: Изд-во АН СССР, 1960, с. 387—419.

III

ПЕДАГОГИЧЕСКАЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ МАКСВЕЛЛА

УДК 37.01+536.765

В. ФАБРИКАНТ *

НЕКОТОРЫЕ ПЕДАГОГИЧЕСКИЕ ИДЕИ Д. К. МАКСВЕЛЛА

...оставляем погребенными
среди других плодов ленивой
доверчивости...

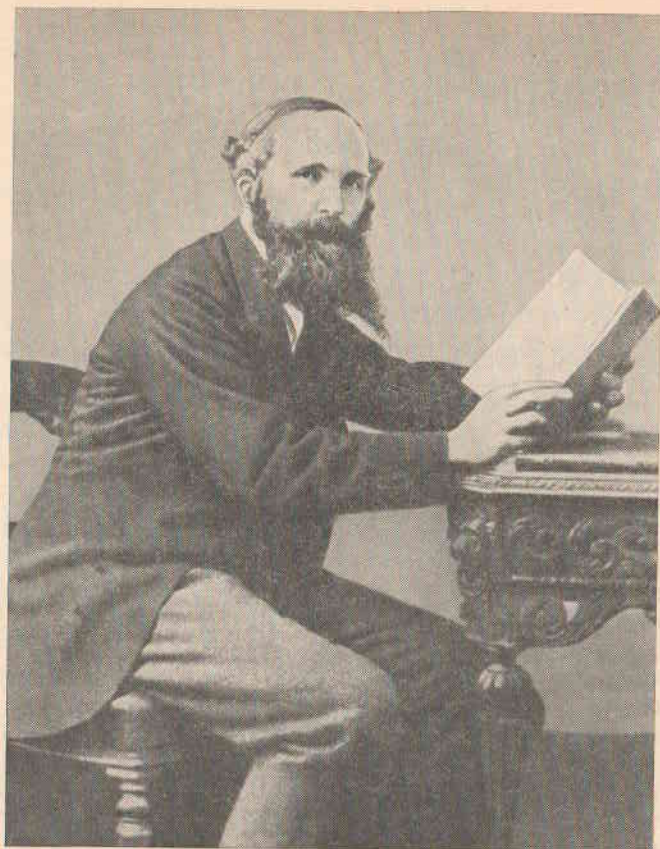
Д. К. Максвелл

В современных учебниках по педагогике подчеркивается в качестве одного из главных требований к овладению знаниями — «действенность знаний, умение оперировать ими, мобилизовать прежние знания для получения новых. Это в значительной мере достигается вооружением учащихся методами науки» [1].

Здесь возникает своеобразная трудность. Существует, как известно, большое различие между методами получения новых результатов в науке и методами изложения уже полученных результатов. Это относится не только к учебной литературе, но и к оригинальным научным публикациям, что неоднократно отмечалось крупными учеными. В частности, у Максвелла на этот счет имеются очень интересные высказывания в его основном труде «Трактате об электричестве и магнетизме» [2].

«Хотя он (Ампер) придерживается в своем изложении индуктивного метода, однако он не дает возможности заглянуть в лабораторию своей мысли. Мы не видим, каким образом у него одно заключение следует за другим, и едва можем верить, что Ампер, действительно, вывел свой закон из тех опытов, которые он описывает. Можно подозревать — и он даже сам рассказывает об этом, — что закон был открыт им другим путем, о котором он, однако, ничего не сообщает, и что уже потом, когда для закона им было найдено полное доказательство, все подмости, служившие для постройки здания, были удалены». Максвелл противопоставляет Амперу Фарадея. «Совсем иначе действует Фарадей. Он сообщает о своих неудачных опытах столько же, сколько об удачных, и излагает свои предварительные, еще не созревшие идеи наравне с вполне зрелыми. Поэтому читатель, даже далеко уступающий исследователю по силе индукции, чувствует к нему скорее симпатию, чем удивление, и в нем почти рождается уверенность, что и он сам, — при подходящих условиях, мог бы сделать

* Московский энергетический институт.



Дж. К. Максвелл (около 1870 г.)

такие же открытия. Учащийся должен читать Ампера, чтобы по этому блестящему образцу узнать, как следует поступать при обосновании и проработке открытия. Но если он желает развить в себе научное мышление, ему следует тщательно изучать также и исследования Фарадея, так как последний, раскрывая перед читателем историю своих открытий и весь ход своих идей, вызывает читателя на критику того пути, по которому он шел, и вместе с тем показывает, как следует вести нужные изыскания». Следует подчеркнуть, что «Экспериментальные исследования по электричеству» Фарадея по стилю изложения представляют уникальное произведение научной литературы. «Трактат» Максвелла по стилю ближе к Амперу, чем к Фарадею, но, конечно, не может, вместе с тем, рассматриваться как учебное пособие.

Здесь уместно напомнить блестящее описание стиля Максвелла, данное Больцманом. «Кто не знает его динамической теории газов? Сначала величественно развертываются вариации

скоростей, затем, с одной стороны, выступают уравнения состояний, с другой — уравнения центрального движения, все выше и выше вздымается хаос формул; но вот раздаются известные четыре слова «Put $n=5$ ». Злой демон n исчезает также внезапно, как иногда в музыке неожиданно замолкает дикая, до сих пор все подавляющая партия басов; как бы по мановению волшебной палочки упорядочивается то, что раньше казалось неукротимым. Тогда не время объяснять, почему сделана та или иная подстановка; кто этого не чувствует, пусть отложит книгу; Максвелл — не сочинитель программной музыки, который поверх нот должен писать их объяснение. Стремительно раскрывают перед нами формулы результат за результатом, пока нас не ошеломит заключительный эффект — тепловое равновесие тяжелого газа, и занавес падает.

Припоминаю также, что в разговоре по поводу этой статьи Кирхгоф заметил: «вот как нужно писать по теории газов»¹ [3].

Основные педагогические идеи Максвелла нашли отражение в его двух вступительных лекциях и в трех книгах, носящих элементарный характер: «Теория теплоты», «Материя и движение», «Электричество в элементарной обработке». Прежде всего это высказывания об особенностях человеческого мышления, с которыми приходится считаться при обучении. Ему принадлежит несколько мрачная констатация: «Я знаю, что человеческий ум имеет тенденцию стремиться делать все, что угодно, только не мыслить». И дальше поясняет: «Однако умственный труд — это еще не мышление» [4, с. 379]. С этими высказываниями перекликается замечание о «ленивой доверчивости», вынесенное в эпиграф к настоящей статье [5, с. 30].

Максвелл явно считает одной из главных задач обучения борьбу с «ленивой доверчивостью», активизацию мышления учащегося. Сейчас мы это называем проблемным обучением. Обращаясь к студентам, он говорил: «Процесс познания всегда одинаков, поэтому, следуя открытиям, сделанным учителями, вы, конечно, испытаете в какой-то степени такую же страсть к познанию и радость узнавания, которые вдохновляли и ободряли учителей. Не сдерживайте эти чувства из-за того, что нельзя ждать от человечества восхищения по поводу вашей победы над какой-нибудь элементарной проблемой»² [4, с. 380].

Аналогичные мотивы звучат в современной педагогике. Например, известный методист математик Д. Пойа в книге «Как решать задачу» пишет: «Крупное научное открытие дает реше-

¹ В комментариях к этому месту речи Больцмана о Кирхгофе почему-то не указывается, что выбор пятой степени в законе взаимодействия молекул привел к утере возможности предсказания эффекта термодиффузии, нашедшего применение для разделения изотопов в первые годы ядерной энергетики. Кроме того, для теории теплового равновесия тяжелого газа, благодаря принципу детального равновесия совершенно не существенна форма закона взаимодействия молекул.

² Думаю, что в данном случае было бы точнее перевести английское problem словом задачей.

ние крупной проблемы, но и в решении любой задачи присутствует крупница открытия» [6]. Решение задач дает больше для овладения научным методом, чем пассивное изучение учебника или слушание лекций. Будучи избран на вновь созданную в Кембридже кафедру экспериментальной физики, Максвелл в соответствующей вступительной лекции уделил много внимания важной роли эксперимента в обучении физике. Здесь хотелось бы отметить одно замечание Максвелла, приобретшее в последнее время особую важность. «Чем проще материалы иллюстративного опыта и чем более они привычны учащемуся, тем глубже он поймет идею, которую должен иллюстрировать этот опыт. Воспитательная ценность таких опытов часто обратно пропорциональна сложности приборов. Студент, пользующийся самодельной, неточно работающей установкой, часто научается большему, нежели тот, который пользуется тщательно выверенными приборами, которым он может доверять, но которые он не смеет разбирать на части» [5, с. 29]. Современная техника дает возможность весьма богатого оснащения учебных физических лабораторий, но не следует при этом забывать о предостережении Максвелла. Иначе мы опять столкнемся с «ленивой доверчивостью» ума студентов. Так же важна и другая мысль, сформулированная в той же лекции. «Весьма необходимо, чтобы те, кто пытается узнать из книг факты физики, могли распознать эти факты с помощью нескольких иллюстративных опытов, когда они встретятся с ними во внешнем мире» [там же]. Аналогичное высказывание имеется и в лондонской вступительной лекции. «Научившись воспроизводить в аудитории научные формулы или физические явления, мы не извлечем из этого никакой выгоды, пока не начнем узнавать эти явления вне аудитории, в том их первоначальном, не приглашенном для лекции виде, в котором они ускользнули от внимания многих мудрых философов прошлого» [4, с. 379].

В учебнике «Теория теплоты» реализована идея о необходимости даже на элементарном уровне подводить учащихся к еще не решенным наукой проблемам. В качестве такой проблемы Максвелл выбрал абсолютную идентичность молекул одного и того же вещества и отсутствие эволюции свойств молекул со временем. Эта проблема сильно интересовала самого Максвелла. Он явно чувствовал, что здесь мы встречаемся со свойствами, выпадающими из классической картины мира и передал это ощущение в «Теории теплоты». Указав, что животные одного и того же вида не вполне идентичны и что в животном мире существует эволюция, Максвелл пишет: «Наши молекулы, с другой стороны, не могут быть изменены какими-либо процессами, осуществимыми при настоящем состоянии вещей (существенная оговорка.— В. Ф.); все индивидуумы каждого вида имеют совершенно одинаковую форму, как пули, отлитые в одну и ту же форму, а не как дробинки, рассортированные по их величине» [7]. В русском переводе почему-то выпала фраза, связанная с невозможностью

описать движение каждой отдельной молекулы. «По той же причине, как теория эффективности обучения, выведенная из анализа данных, в которых отсутствуют фамилии отдельных учеников, не может быть применена учителем для оценки успехов каждого ребенка» [8]. Как известно, обычно пишут об идентичности молекул мимоходом и это утверждение воспринимается без всяких раздумий («ленивая доверчивость»). Вместе с тем это свойство молекул действительно удивительно в рамках классической физики и нашло объяснение только в квантовой физике. К приему, примененному Максвеллом, в известной мере подходит термин «остранение», введенный в русскую поэтику В. Шкловским.

В заключение несколько замечаний о Максвелле как преподавателе. Его вступительные и публичные лекции — блестящие образцы лекторского мастерства, но читались они по заранее написанному тексту. Сложнее было с обычными регулярными лекциями. Его бывший студент известный гидродинамик Г. Лэмб указывал, что на рядовых лекциях: «У него было много неудач, когда он имел дело с доской, и у нас постепенно создавалось впечатление, которое подтверждается, мне кажется, изучением его печатных работ, что хотя он твердо владел существенными понятиями и мог формулировать серьезные математические концепции, он был не очень хорошо знаком с деталями мелких расчетов. Его физические инстинкты спасли его от существенных ошибок»³ [9, с. 145].

Другой студент, А. Флеминг, ставший выдающимся радиоинженером, описывает свое удивление, когда он обнаружил, что лекции Максвелла в Кембридже слушала аудитория, состоявшая всего из двух или трех студентов. Он сопоставляет это с сотнями студентов, внимательно слушающих лекции в шотландских и немецких университетах [9, с. 117]. Однако Максвелла отнюдь не смущала малочисленность аудитории, и он читал лекции с большим подъемом.

ЛИТЕРАТУРА

1. Педагогика школы/Под ред. Г. И. Шукиной. М.: Просвещение, 1977, с. 260.
2. Maxwell J. C. A Treatise on Electricity and Magnetism. Oxford, 1873, vol. 2, p. 162—163.
3. Больцман Л. Статьи и речи. М.: Наука, 1970, с. 50.
4. Вступительная лекция, прочитанная Д. К. Максвеллом в Лондонском королевском колледже.— УФН, 1981, т. 135.
5. Максвелл Д. К. Вводная лекция по экспериментальной физике (Кембридж 1871 г.)— В кн.: Речи и статьи. М.: ГИЗ, 1940.
6. Пойа Д. Как решать задачу. М.: ГУПИ, 1959, с. 9.
7. Максвелл Д. К. Теория теплоты. Пер. с 7 изд. Киев, 1888, с. 291.
8. Maxwell J. C. Theory of Heat. L., 1888, p. 309.
9. Maxwell J. C. A commemorial Volume. 1831—1931. Cambridge, 1931.

³ В этом смысле характерны две ошибки в «Теории теплоты», сделанные при выводе формулы для давления газа. Максвелл выводит эту формулу не из ударов молекул о стенку, а из обмена импульсами двух частей объема газа, но теряет множитель 1/2 при учете числа молекул, летящих из первой части объема во вторую, зато забывает учесть молекулы, вылетающие из второй части объема в первую. Указанные две ошибки компенсируют друг друга и результат получается правильный.

МАКСВЕЛЛ — ПРЕПОДАВАТЕЛЬ

Творческий портрет Максвелла будет далеко не полным без анализа его преподавательской деятельности и педагогических идей. Еще в молодости ученый с большой охотой включился в традицию, берущую свое начало в античной науке: сочетать исследовательскую работу с просвещенческой деятельностью — передачей научной информации следующему поколению. Преподавательская карьера Максвелла началась и закончилась в Кембридже. Сразу же после сдачи выпускного экзамена — трайпоса и получения звания бакалавра в начале 1854 г. Максвелл оказывается в роли преподавателя-аспиранта, готовящегося стать «феллоу» — полноправным членом совета Тринити-колледжа — и одновременно ведущего занятия с несколькими студентами.

Первые лекции по гидростатике и оптике студентам третьего года обучения он начал читать с октября 1855 г. в качестве «феллоу»: «1 ноября 1855. Я уже в течение двух недель читаю лекции, и класс как будто бы продвигается вперед. Они встают и задают вопросы, что является добрым признаком...» [1, с. 112].

Один за другим следуют периоды его профессорской деятельности: Маришаль-колледж, Абердин (1856—1860); Кингс-колледж, Лондон (1860—1865); Кембриджский университет (1871—1879).

В работах, посвященных жизнеописанию Максвелла [2, 3], неизменно проскальзывает точка зрения, что преподавательская деятельность — слабая сторона многогранного творчества великого шотландского физика. Действительно, Максвелл не был блестящим лектором. В своих лекциях, стремясь вложить в слова больше смысла и глубины, он все время поправлял себя, уточнял, что создавало у довольно-таки невежественных студентов (их число на лекциях колебалось от 2 до 8) ощущение сумбура и непонимания. В результате — отсутствие контакта между лектором и слушателями, плохая дисциплина, шум в аудитории... Слава неуверенного в себе, неумелого преподавателя следовала за Максвеллом все время и, несомненно, причиняла ему много неприятностей.

Однако поразительно следующее. Если отвлечься от этих биографических фактов и постараться проанализировать преподавательскую деятельность и педагогические идеи Максвелла, отраженные в документах и книгах ученого [4—9], с точки зрения современной методики преподавания физики, то вырисовывается фигура преподавателя мудрого и доброжелательного, обладающего ярким методическим талантом, что позволяло ему мастерски обходить трудности при изложении абстрактного, трудно воспринимаемого материала. В наиболее законченном и кон-

центрированном виде свое методическое кредо и педагогическую программу подготовки студентов к будущей профессиональной деятельности Максвелл сформулировал в инаугурационной лекции перед слушателями Кембриджского университета в октябре 1871 г. Современный преподаватель физики вузов и средней школы может найти здесь ответы на целый ряд проблем, связанных с обучением физике. Вот некоторые из них.

Во-первых, отказ от так называемой «меловой физики», необходимость организации и эффективного проведения учебного демонстрационного эксперимента. Отметим, что Максвеллу приходилось отстаивать этот тезис перед коллегами, считавшими, что «студент должен доверять утверждениям своего учителя без всяких экспериментальных доказательств». Ко времени прихода Максвелла в Кембриджский университет там господствовала традиционная система обучения, делавшая упор на математику и чисто теоретическое изучение физики.

В лекции же ученый провозглашал: «Привычные принадлежности — перо, чернила и бумага — не будут достаточны, и нам потребуется большее пространство, чем пространство кафедры, и большая площадь, чем поверхность доски...

Целью иллюстративных опытов является освещение некоторых научных идей для того, чтобы сделать их понятными студенту. Условия опыта подобраны так, чтобы явление, которое мы хотим наблюдать или показать, выступало на первый план, а не затемнялось и запутывалось другими явлениями, как это имеет место, когда явление происходит в обычных естественных условиях...

Чем проще материалы иллюстративного опыта и чем более они привычны учащемуся, тем глубже он поймет идею, которую должен иллюстрировать этот опыт. Воспитательная ценность таких опытов часто обратно пропорциональна сложности приборов» [10, с. 22].

Во-вторых, сочетание в едином познавательном процессе учебной и научно-исследовательской работы — то, что сегодня в практике вузов страны наиболее актуально и получило специальные названия «УИРС» и «НИРС» (учебно-исследовательская и научно-исследовательская работа студентов). Максвелл был глубоко убежден, что подготовка будущего ученого должна проходить в научной лаборатории, где студент должен самостоятельно ставить эксперимент, практически знакомиться с научными методами познания материального мира: «Нашей главной задачей в лаборатории будет ознакомление со всякого рода научными методами, сравнение их и их оценка.

Я думаю, будет достойным нашего университета и как раз будет той работой, которую скорее можно произвести здесь, чем в какой-либо частной лаборатории, если свободным и всесторонним обсуждением значимости различных научных процедур нам удастся образовать школу научной критики и помочь развитию учения о методе» [10, с. 30].

* Коломенский государственный педагогический институт.

Как известно, Кавендишская лаборатория, созданная Максвеллом, реализовала эту методическую идею ученого, заложила основы выдающейся школы экспериментальной физики, славу которой упрочили такие физики, как Рэлей, Дж. Дж. Томсон, Резерфорд.

В-третьих, подчеркивание роли истории науки в преподавании. Это не только и не столько ознакомление с жизнью великих ученых, сколько проникновение в их внутреннюю «лабораторию»: «История науки не ограничивается перечислением успешных исследований. Она должна сказать нам о безуспешных исследованиях и объяснить, почему некоторые из самых способных людей не смогли найти ключа знания и как репутация других дала лишь большую опору ошибкам, в которые они впали...» [10, с. 32].

Максвеллу принадлежат и следующие слова: «Наука всегда усваивается более полно, когда она рассматривается в состоянии рождения» [10, с. 67]. И в настоящее время решение ряда задач преподавания физики в средней школе (таких как формирование диалектико-материалистического мировоззрения и коммунистической убежденности, развитие научно-технического мышления учащихся, формирование их познавательных интересов и творческих способностей) необходимым образом требует историко-методологического подхода к обучению физике. Суть его заключается в таком изложении основных физических идей и теорий, при котором изучаются не только результаты, но и способы получения знаний, выработанные наукой и техникой в процессе познания природы.

В-четвертых, преодоление односторонности образования, противоречия между гуманитарным и техническим образованием (то, что на Западе за последние 30 лет приняло громадные размеры и получило название проблемы «two cultures»).

Максвелл в своей лекции отмечал: «Мы должны постоянно стремиться поддерживать живую связь между нашей работой и гуманитарными курсами Кембриджа: литературными, филологическими, историческими или философскими».

Среди ученых появляется иногда узкий профессиональный дух, такой же, какой появляется среди людей, занимающихся какой-либо другой специальностью. Но, конечно, университет как раз является местом, в котором можно преодолеть тенденцию людей разбиваться на замкнутые кружки, в которых, именно благодаря их замкнутости, господствуют мелкие цеховые интересы» [10, с. 38].

Современного физика-методиста, занимающегося вопросами обучения в средней школе, может удивлять и книга Максвелла «Материя и движение» [2], задуманная им как учебное пособие по механике для начинающих изучение физики. Дело в том, что логическая структура этого учебного пособия совершенно идентична изложению классической механики в ныне действующем учебнике для 8 класса средней школы, написанном И. К. Кикои-

ным и А. И. Кикоиным [11] (вышедшем ровно через 100 лет после книги Максвелла): то же введение элементов векторной алгебры в начале курса, та же последовательность изложения, тот же обзор наиболее важного в курсе — в конце книги. В книге Максвелла включены и механика колебательных движений и закон Кеплера — вопросы, отсутствующие в ныне действующем учебнике. По мнению ряда методистов, это определенный недостаток учебника и программы по физике 8 класса. Предельная ясность, стройность, лаконичность, живость языка — методические достоинства учебника Максвелла, по которому можно с небольшими примечаниями изучать классическую механику и в настоящее время.

Можно со всей определенностью сказать, что и в преподавании физики Максвелл был пионером, идущим далеко впереди своего времени, остающимся современным и сегодня.

ЛИТЕРАТУРА

1. Карцев В. П. Максвелл. М.: Мол. гвардия, 1976. 333 с.
2. Maxwell J. C. The Scientific Papers of J. C. Maxwell. Cambridge, 1890, vol. 2, 806 p.
3. Campbell L., Garnett W. The Life of J. C. Maxwell. L., 1882, 146 p.
4. Максвелл Д. К. Теория теплоты в элементарной обработке. Киев, 1888. 292 с.
5. Максвелл Д. К. Материя и движение. СПб., 1885. 156 с.
6. Максвелл Д. К. Электричество в элементарной обработке. Киев, 1886. 248 с.
7. Maxwell J. C. A Treatise on Electricity and Magnetism. Oxford: Clarendon press, 1873, vol. 2, 506 p.
8. Maxwell J. C. Matter and Motion. L.: Soc. for promoting christian knowledge, 1894. 128 p.
9. Maxwell J. C. An Elementary Treatise on Electricity. Oxford: The Clarendon press, 1881. 208 p.
10. Максвелл Д. К. Речь и статьи. М.: 1901. 138 с.
11. Кикоин И. К., Кикоин А. К. Физика-8. М.: Просвещение, 1979.

УДК 37.01+536.765

С. П. КУДРЯВЦЕВ *

МАКСВЕЛЛ И КАВЕНДИШСКАЯ ЛАБОРАТОРИЯ

В данной статье мы остановимся на деятельности Максвелла как организатора экспериментальных исследований в Кембридже, основателя Кавендишской лаборатории.

С середины XIX столетия в организации физической науки происходят важные перемены. Если физика до этого времени создавалась учеными-одиночками, то теперь в результате изменившихся экономических условий и развития самой физической

* Тамбовский педагогический институт.

науки создаются физические лаборатории как новая форма организации исследований в физике.

Первая физическая лаборатория в 1831 г. создается в Гейдельбергском университете в Германии под руководством профессора Вебера, затем в 1846 г. Вильям Томсон создает лабораторию в Шотландии. Создаются лаборатории во Франции (Реньо—1854 г.); в России (Петрушевский—1865 г.); Америке (Пикеринг—1869 г.).

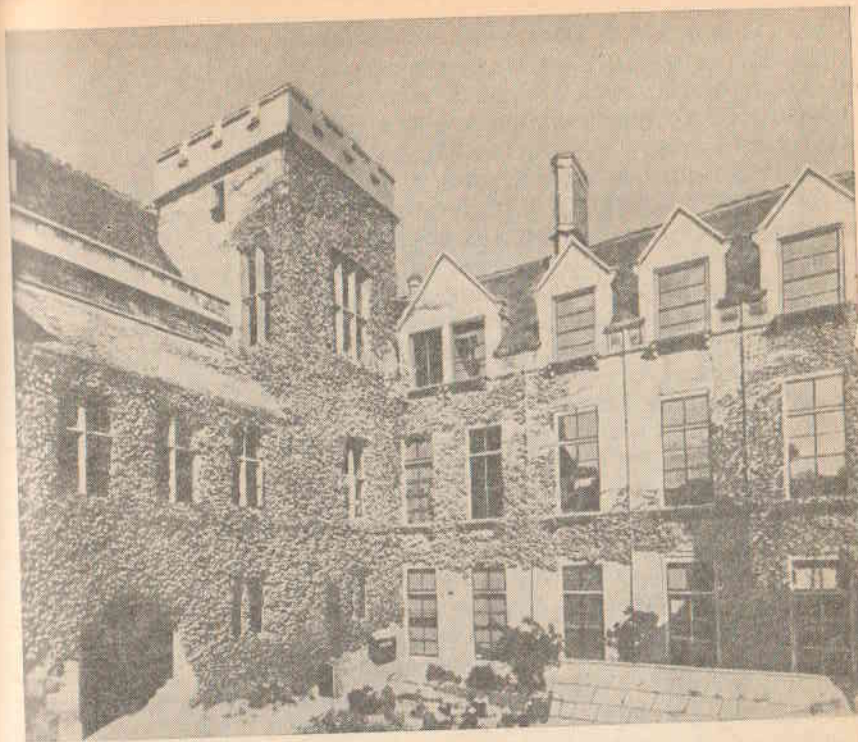
В 70-х годах новое веяние коснулось и старейшего английского университета в Кембридже. Здесь в 1868 г. к математическому трипосу (экзамену на получение степени бакалавра по математике) прибавились новые разделы: тепло, свет, электричество, магнетизм. Необходимо было предусмотреть лучшие методы обучения этим предметам. И 27 февраля 1869 г. сенат университета высказался за основание кафедры экспериментальной физики с созданием физической лаборатории, снабженной всей необходимой аппаратурой. Однако идея будущей лаборатории могла потерпеть крах из-за недостатка средств. Положение исправил герцог Девоншира Вильям Кавендиш, потомок известного ученого Генри Кавендиша, который выразил готовность предоставить средства на строительство в размере 6300 фунтов.

Следует отметить, что пожертвование герцога Девоншира было не единственным. В марте 1872 г. сенат принял от мистера Джона Ловеди деньги на строительство лаборатории в размере 8450 фунтов стерлингов. Как видим, это сумма даже большая, чем сумма, пожертвованная Вильямом Кавендишем.

Встал вопрос о руководителе лаборатории. На этот пост пригласили виднейших физиков Вильяма Томсона и Германа Гельмгольца, но оба ученых отказались по различным соображениям от этого поста. Выбор пал на Максвелла и 8 марта 1871 г. он был избран первым профессором Кавендишской лаборатории. «Во время избрания Максвелла работы его были мало известны, его слава была совсем не та, что сейчас, — вспоминал Дж. Дж. Томсон, — «Трактат по электричеству и магнетизму» появился двумя годами позже, и хотя он публиковал фундаментальные идеи в научных журналах задолго до его избрания, они привлекали мало внимания. Репутация его поддерживалась, в основном, его работой по кинетической теории газов» [1, с. 100—101].

В октября 1871 г. первый профессор Кавендишской лаборатории прочитал свою инаугурационную лекцию о функциях экспериментальной работы в университетском образовании. Лекция оказалась программой всей будущей деятельности лаборатории. «Мы должны начать в лекционном зале с курса лекций в какой-нибудь отрасли физики, пользуясь опытами как иллюстрациями, и закончить в лаборатории рядом исследовательских опытов» [2, с. 22].

Максвелл высказывал глубокие мысли о назначении преподавателя. Главное для преподавателя — это сконцентрировать внимание студента на проблеме. Полемицируя с противниками



Кавендишская лаборатория в Кембридже около 1890 г.

Лаборатория была спроектирована в 1871 г. У. М. Фосеттом специально для Максвелла и построена на средства Вильяма Кавендиша герцога Девонширского седьмого, потомка Генри Кавендиша

экспериментального обучения, Максвелл заявлял, что если человек увлекается проблемой, вкладывает всю душу в разрешение ее, если он понял главную пользу математики в применении ее для объяснения природы, то не будет нанесен ущерб основной специальности, не смутят экспериментальные знания веру в формулы учебников, студент не будет чрезмерно утомляться.

Максвелл начал свою деятельность в Кембридже с чтения лекций по теплоте. Вообще о лекциях Максвелла надо сказать, что они несмотря на их глубину, плохо посещались. Так, Шустер вспоминал о его лекциях, что он был очень удивлен, найдя учителя, которого он «считал на передовом крае знаний, и трех или четырех студентов»... «В действительности Максвелл читал... курс великолепных лекций», — писал Шустер [3, с. 35]. Много времени он уделял вопросам строительства и организации лаборатории. Он изучал опыт создания подобных лабораторий за границей и в своей стране, посетил лабораторию Томсона, Кларендонскую лабораторию. Максвелл был очень озабочен организа-

цией лаборатории. Со своими сомнениями и проектами он делился с некоторыми физиками, в частности, с Рэлеем. В письме к Рэлею от 15 марта 1871 г. он благодарил его за пожелание относительно будущей лаборатории: «Я всегда смотрел на нее с большим интересом, — пишет Максвелл в этом письме, — умеряемым некоторым беспокойством. Я принимаю твои добрые пожелания лично ко мне, и мое беспокойство развивается в ответственность». Он пишет, что для сохранения лаборатории еще надо много усилий, «чтобы экспериментальная физика слилась с нашей университетской системой...» [3, с. 18].

Проект здания разработал архитектор Фоусетт. Кларендонская лаборатория послужила в значительной мере образцом для Кембриджской. 16 июня 1874 г. произошло торжественное открытие лаборатории. На открытии был наш замечательный ученый А. Г. Столетов, который написал отчет об этом событии в редакцию «Московские ведомости».

Лаборатория — это основательное трехэтажное здание, в котором разместились комнаты по электричеству, магнетизму, теплоте, оптике, акустике, лекционная аудитория, препаратная и т. д. Все столы лаборатории покоились на балках, независимых от пола, что позволяло производить очень тонкие эксперименты, не боясь сотрясений. На крыше лабораторий укреплен металлический шест. Все комнаты присоединялись к нему, так что в любой момент можно было измерить потенциал атмосферного электричества. Подъемные двери в полах делали возможным тянуть провода между этажами, повесить маятник Фуко и т. п. Во всех лабораториях газ, вода, свет.

В первом отчете в апреле 1875 г. Максвелл писал, что занятия в лаборатории начались с октября 1874 г. В нем он также сообщал, что экспериментальные работы проводились в области магнитных и оптических измерений. Максвелл также сообщил о получении лабораторией стандартного электродинамометра из Королевского общества, термометра из Академии опытов, собственной аппаратуры для демонстраций.

Во втором отчете в мае 1876 г. он дает список аппаратуры, преподнесенной лаборатории канцлером и Британской ассоциацией. В третьем упоминает о даре Элфинстоном исторической аппаратуры, принадлежавшей Волластону. И, наконец, в четвертом, спустя три года после открытия, Максвелл пишет, что лаборатория включает все «инструменты, требуемые настоящим состоянием науки» [4, с. 75].

В 1877 г. Максвелл пригласил в лабораторию механика приборов, тем самым положив начало мастерским, которые постепенно разрослись и составили важное дополнение к лаборатории. У Максвелла была трудная задача — создание новой кафедры экспериментальной физики. Новое всегда с трудом пробирует себе дорогу. Наставники студентов последних курсов отговаривали их идти в лабораторию. Этим объясняется то, что на первых порах в лабораторию приходило не много желающих.

Сюда пришли вначале те, кто сдал математический трикос и хотел получить навыки практической работы. Среди первых студентов были Хик — впоследствии глава Фёс-колледжа в Шеффилде, который измерял в лаборатории горизонтальную компоненту магнитной силы Земли магнитометром Кью. Он также провел в лаборатории неудачную попытку определить скорость распространения электромагнитных волн.

Гордон, впоследствии ученый и инженер, под руководством Максвелла определял точные значения электрических констант. Как писал Шустер, Гордон был одним из первых студентов Кавендишской лаборатории, опубликовавших свои результаты в апреле 1875 г. В 1879 г. он проводил исследования по определению диэлектрических постоянных различных веществ с целью проверки теории Максвелла, а именно, что показатель преломления $n = \sqrt{\epsilon\mu}$, но результат, полученный им, не был удовлетворительным. По-видимому, это исследование Гордона, как и исследование Хика о скорости распространения электромагнитных волн, были первыми попытками в Англии проверить справедливость теории Максвелла.

Георг Кристалл, впоследствии профессор математики Эдинбургского университета, проверял справедливость закона Ома (эксперимент был подобран ему Максвеллом, им же была сконструирована установка). Необходимость этой проверки возникла от того, что некоторые ученые, в частности, Шустер и Вебер, высказывали соображения, что закон Ома при сильных токах будет неверен. Был даже создан комитет Британской ассоциации для экспериментальной проверки закона Ома. Максвелл писал Кэмпбеллу, что Кристалл «...непрерывно работал, с октября проверял закон Ома, и Ом вышел из испытаний с триумфом» [5, с. 371]. Так же Кристалл и Саундер в отчете Британской ассоциации докладывали о результатах сравнения единиц сопротивления катушек Британской ассоциации.

Весной 1876 г. Артур Шустер, впоследствии известный ученый, просит разрешения у Максвелла поработать в лаборатории. Максвелл отвечал, что «это окажет всем нам огромную пользу, если Вы приедете работать в Кавендишскую лабораторию... Шустер и анти-Шустер эффекты долго были объектами нашего рассмотрения» [3, с. 24]. Шустер вначале проводит здесь исследования по диамагнетизму. Детали этих исследований были обсуждены в письмах Максвелла и Шустера. Далее Шустер увлекся исследованиями в области спектроскопии и прохождения электричества через газы.

Флеминг также был привлечен в лабораторию возможностью работать под руководством Максвелла. Он пришел сюда в 1878 г. и продолжил здесь трудные исследования по сравнению единиц сопротивления Британской ассоциации, начатые Кристаллом. Для этих исследований им был сконструирован специальный мост.

Важные исследования провел в лаборатории Глазбрук на форму волновой поверхности двухосных кристаллов. Он установил, что уравнения Френеля верно описывают форму волновой поверхности.

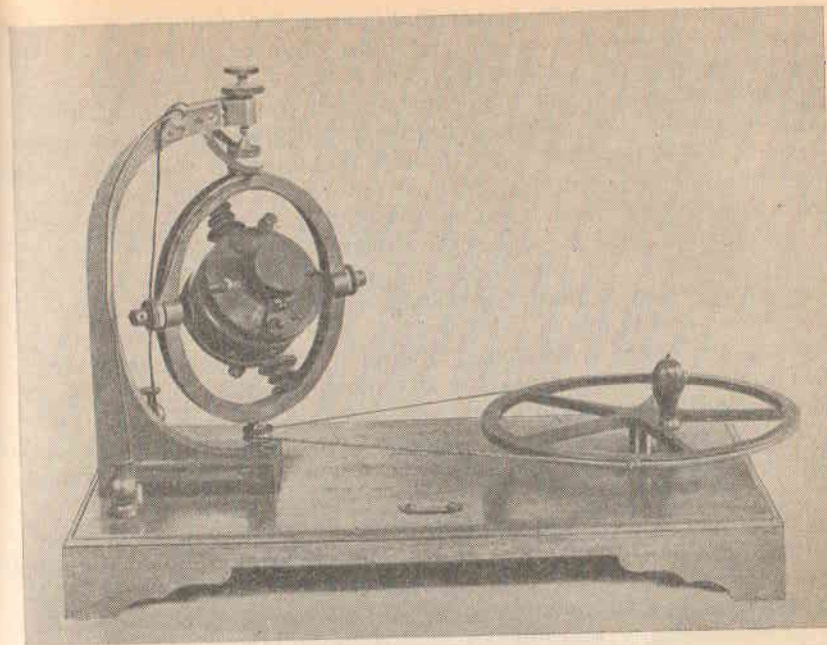
Максвелл в своем «Трактате» получил уравнение волновой поверхности, аналогичное френелеву. Но поскольку теория Максвелла еще не была признана большинством физиков, то результат экспериментальной проверки этого вопроса, начатой Глазбруком, послужил частичным подтверждением электромагнитной теории. Максвелл заинтересовался исследованиями Глазбрука и провел с ним ряд экспериментов по этому же вопросу.

Его очень увлекло исследование Пойнтинга в лаборатории на определение гравитационной постоянной, которое было проведено уже после смерти Максвелла. Но уже о начальном этапе этого исследования Максвелл с гордостью писал Джоулю: «Ты видишь, что век героических экспериментов еще не прошел» [3, с. 31].

В области измерений электрических величин в лаборатории работал Дональд Макалистер, позднее глава Эдинбургского университета. В лаборатории под руководством Максвелла работали Нивен, Шоу, которые основные свои исследования провели здесь уже после смерти Максвелла. Максвелл принимал активное участие во всех исследованиях, проводимых в Кавендишской лаборатории. Как вспоминал Шустер, он ежедневно обходил комнаты лаборатории и обсуждал результаты или делал предположения.

Большинство тем исследований, проведенных в максвелловское время, было подобрано главой лаборатории, но Максвелл никогда не подавлял своим авторитетом инициативы учеников и предоставлял им полную самостоятельность в выборе тем. Он говорил Шустеру: «Я никогда не пытался отговорить человека от попытки эксперимента. Если он не найдет, что он хочет, он может найти нечто кроме» [3, с. 39]. Все работающие у Максвелла, прежде чем приступить к оригинальным исследованиям, проходили небольшой общий практикум, изучали приборы, измеряли время, учились делать отсчеты и др., т. е. Максвелл закладывал основы будущего общего практикума лаборатории.

Помимо руководства исследованиями, Максвелл много времени отдавал редактированию трудов Генри Кавендиша — большая кропотливая работа историка науки. Генри Кавендиш опубликовал при жизни всего две статьи и оставил неопубликованными двадцать пачек манускриптов по математике и экспериментальному электричеству. Максвелл, изучив эти работы, проделав опыты, описанные в них, выпустил в 1879 г. статьи под названием «Электрические исследования Генри Кавендиша». Из них следовало, что Кавендиш задолго до Ома установил закон, который пришлось переоткрывать Ому, сформулировал закон Кулона, ввел понятие электростатической емкости.



Прибор, изобретенный Максвеллом в 1861 г. для исследования гиромагнитного действия на электромагнит

Явление, которое пытался обнаружить Максвелл, было открыто в 1907 г. Дж. Баррютом

Максвелл был очень увлечен изучением наследия Кавендиша. Так, Шустер вспоминал разочарование молодого американского астронома, приехавшего в Кембридж специально для того, чтобы обсудить с Максвеллом некоторые темы из астрономии, но «Максвелл говорил только о Кавендише и почти вынудил его снять пиджак и опустить руку в таз с водой и получить ощущение от серии электрических ударов» [3, с. 33].

Исследование Максвеллом трудов Кавендиша отняло у него пять лет. Вероятно, этим объясняется, что сам Максвелл не предпринимал в лаборатории сколько-нибудь серьезных экспериментальных исследований. Правда, нельзя также забывать о продолжительной болезни Максвелла, начавшейся в то время и сведшей его в могилу 5 ноября 1879 г. Вильям Томсон в 1882 г. писал: «Влияние Максвелла в Кембридже имело несомненный большой эффект в направлении математического обучения в более плодотворные каналы, чем те, в которых они текли многие годы. Его опубликованные научные статьи и книги, его работа как экзаменатора в Кембридже, его профессорские лекции — все содействовало этому эффекту. Но выше всего его работа в планировании и устройстве Кавендишской лаборатории. Здесь,

в самом деле, взлет физической науки в Кембридже в течение последних десяти лет, и это целиком обусловлено максвелловским влиянием» [6, с. 128—132].

Основное направление исследований, проводимых в лаборатории в максвелловский период, — точные измерения, и, прежде всего, — измерения электрических величин. Важность этих исследований объяснялась тем, что в то время не было твердо установленной системы единиц. Единицы, принятые Британской ассоциацией в 1864 г., были еще очень несовершенны, не было связи с другими системами единиц, еще не воплотилась в жизнь гауссова система единиц, и Максвелл понимал, что надо навести порядок в этом вопросе. Кроме того, в повышении точности физических измерений Максвелл видел пути к будущим открытиям. Традиции, заложенные Максвеллом, поддерживались и развивались его преемниками.

Рэлей продолжает работу, начатую в лаборатории Максвеллом, по определению абсолютных значений электрических величин.

Традиции Максвелла принимает и третий профессор Кавендиша Дж. Дж. Томсон. При нем продолжают исследования в области электрических стандартов. Эти исследования сделали Кавендишскую лабораторию центром по установлению стандартов электрических единиц до учреждения Национальной физической лаборатории.

Развивая традиции Максвелла, Дж. Дж. Томсон создал в лаборатории знаменитую международную школу физики, внесшую значительный вклад в атомную физику и физику электронов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Thomson J. J. *Recollections and Reflections*. L., 1936.
2. Максвелл Дж. Кл. Статьи и речи. М.: Наука, 1968, 406 с.
3. A history of the Cavendish laboratory. London, 1910.
4. Glazebrook R. T. *Maxwell and modern physics*. N. Y., 1905.
5. Карцев В. П. Открытие Кавендишской лаборатории и первые годы кавендишской физической школы. — В кн.: Школы в науке. М., 1977.
6. The Cavendish laboratory. — *Nature*, vol. 69, 1903—1904.

IV

РАЗВИТИЕ ИДЕЙ МАКСВЕЛЛА В СОВРЕМЕННОЙ ФИЗИКЕ

УДК 93/99(53)+536.765

И. С. АЛЕКСЕЕВ *

МАКСВЕЛЛ ЭЙНШТЕЙНА И МАКСВЕЛЛ БОРА

У каждого свой Максвелл. Эта формулировка, при всех неизбежных издержках, обусловленных ее резкостью, тем не менее отражает реальную ситуацию, возникающую в связи с обсуждением значения творчества одного из величайших физиков всех времен и народов для современности и для будущего. По сути дела, говоря и думая о Максвелле, каждый из нас окрашивает его своей индивидуальностью, понимает его по-своему.

Почему же тогда в качестве темы нижеследующего обсуждения выбраны Максвелл Эйнштейна и Максвелл Бора, а, скажем, не Максвелл Планка или Максвелл Герца? Объяснением этого может послужить то, что идеи Эйнштейна и Бора (как собственно физические, так и философско-методологические), воплощенные в теории относительности и квантовой механике, определяют лицо современной физики. В безличном плане статью можно было бы назвать «Максвелл и физика XX века». Этого не сделано потому, что физика XX в. в значительной мере «запрограммирована» в идейном отношении именно Эйнштейном и Бором.

Следуя только что намеченной логике, подчеркивающей индивидуальные вклады в обычно безлично воспринимаемое научное знание, не лишним, по-видимому, будет оговориться, что более точное название данной статьи — это «Мой Максвелл Эйнштейна и мой Максвелл Бора»...

Основным материалом нижеследующего обсуждения будут две коротенькие статьи, написанные 50 лет тому назад в связи со столетним юбилеем Максвелла. Одна из них — «Влияние Максвелла на развитие представлений о физической реальности» — принадлежит Эйнштейну, другая — «Максвелл и современная теоретическая физика» — Бору. Их сравнительный анализ помогает внести дополнительные штрихи в картину дискуссии между двумя гигантами физической мысли XX в.

Первое, что бросилось мне в глаза при чтении этих статей, — это противоположная оценка отношения Максвелла к Ньютону Эйнштейном и Бором. Как известно, Ньютон, как и Максвелл,

* Завод-ВТУЗ при ЗИЛе.

олицетворяет собой классическую физику. Если для Бора они выступают всегда в «тандеме», не только не противопоставляясь, но даже порой и не различаясь, если, по Бору, в Максвелле «весь мир признает достойного продолжателя великого дела Ньютона» [2, с. 380], то Эйнштейн не упускает случая подчеркнуть свое противоположное отношение к Ньютону и Максвеллу. Так, в юбилейной статье он пишет: «До Максвелла физическая реальность, поскольку она должна представлять процессы в природе, мыслилась в виде материальных точек, изменения которых состоят только в движении, описываемом обыкновенными дифференциальными уравнениями. После Максвелла физическая реальность мыслилась в виде непрерывных, не поддающихся механическому объяснению полей, описываемых дифференциальными уравнениями в частных производных. Это изменение понятия реальности является наиболее глубоким и плодотворным из тех, которые физика испытала со времени Ньютона» [1, с. 138]. Еще более явно и определенно Эйнштейн противопоставляет Максвелла Ньютону в другом месте: «Первый удар по учению Ньютона о движении как о программе для всей теоретической физики, нанесла максвелловская теория электричества» [1, с. 86].

Интересно, что противопоставление Максвелла Ньютону у Эйнштейна и их отождествление у Бора несколько утрачивают свою противоположность при сопоставлении идей классической физики с идеями, лежащими в основе квантовой механики. Но и здесь Эйнштейн и Бор проводят это сопоставление с противоположных позиций — у Эйнштейна акценты делаются на подчеркивании различий между классическим и квантовым способами мышления, у Бора — на сходстве. Так, у Эйнштейна читаем: «Самое последнее и наиболее успешное создание теоретической физики — квантовая механика — в своих основах принципиально отличается от обеих программ, которые мы ради простоты будем называть программами Ньютона и Максвелла. В самом деле, величины, выступающие в ее основных законах, не претендуют на то, чтобы описывать саму физическую реальность, они описывают только вероятность появления физической реальности» [1, с. 139]. У Бора же по этому поводу написано прямо противоположное: «Хотя фундаментальное открытие Резерфордом атомного ядра... ярче всего обнаружило ограниченность обычной механики и электродинамики, единственным путем развития в этой области осталось сохранение возможно более тесного контакта с классическими идеями Ньютона и Максвелла» [2, с. 73].

В полном соответствии с только что приведенными оценками отношения классической и квантовой физики у Эйнштейна и Бора находятся и их прогнозы, касающиеся будущего развития теоретической физики. Согласно Эйнштейну, «физики не будут долго довольствоваться такого рода косвенным описанием физической реальности... Тогда мы снова должны будем вер-

нуться к попыткам реализации той программы, которую по праву можно назвать максвелловской...» [1, с. 139]. Согласно же Бору, «мы должны осознать, что однозначное истолкование любого измерения должно быть, по существу, выражено в терминах классических теорий, и мы можем сказать, что в этом смысле язык Ньютона и Максвелла останется языком физиков на все времена... Даже если мы должны быть готовы к отказу от ставших привычными физических представлений, основные понятия физики, которыми мы обязаны великим учителям, несомненно, окажутся незаменимыми также и в новой области физики» [2, с. 74].

Причины столь существенно различных оценок Эйнштейном и Бором состояния физики в 30-х годах нашего столетия и перспектив ее дальнейшего развития прежде всего следует искать в фундаментальном с философско-методологической точки зрения различии их идеалов научного познания.

Сравнивая эти идеалы, которые, несмотря на всю противоположность их конкретной реализации, продолжают оставаться классическими, можно с полным правом сказать, что они выступали в творчестве патриархов физики XX века в качестве априорных условий их мышления. Но если для Эйнштейна эта априорность имела содержательный характер (воплощаясь, в частности, в требовании, чтобы математическим аппаратом физики были дифференциальные уравнения, с помощью которых, по мысли Эйнштейна, только и можно было выразить идеи непрерывности и строгой причинности, от которых он никак не желал отказаться), то для Бора априорный характер классических понятий был сугубо формальным требованием, не предreshавшим конкретные способы их содержательного сочетания и напоминавшим в этом плане кантовский «категорический императив».

Общими теоретико-познавательными ценностями для Бора и Эйнштейна были требования «внутреннего совершенства» и «внешнего оправдания» физической теории. Но у Эйнштейна требования к внутреннему совершенству теории были более жесткими, нежели у Бора — если для Бора было вполне достаточно внутренней непротиворечивости теории и ее полноты по отношению к возможному опыту, то для Эйнштейна в дополнение к этому требовалось, чтобы физическая реальность, описываемая теорией, была однородной по содержанию (непрерывной и лапласовски детерминистской) и не зависящей от опыта, характеристики которого не должны были входить в ее состав. Поэтому Эйнштейн не хотел и не мог согласиться с боровской концепцией дополненности, нарушавшей оба его дополнительные требования к физической реальности. Отсюда же проистекает и диаметрально противоположная оценка Эйнштейном и Бором методологического статуса классической электродинамики — если для Бора она была эталоном внутреннего совершенства теории [3, с. 167], то для Эйнштейна она обладала принципиальным с его точки зрения внутренним дефектом, соединяя в се-

бе представления о непрерывном поле и дискретных частицах [4, с. 722].

В конечном же счете в основе всех расхождений Эйнштейна и Бора лежали несовместимые философские установки в понимании самого смысла понятия «физическая реальность» [5]. Для Эйнштейна, как уже указывалось выше, физическая реальность противостояла процедурам измерений как их объект и не должна была от них зависеть, для Бора же физическая реальность включала в свой состав измерительные процессы, которые были для Бора определяющими в деле характеристики ненаблюдаемого.

Имея в виду философско-методологические различия Эйнштейна и Бора, сравним теперь их отношение к некоторым методологическим установкам Максвелла, в первую очередь — к использованию механических аналогий для описания и объяснения немеханической реальности.

Как известно, для Максвелла механические аналогии имели не только иллюстративный смысл. Правда, ни одной из этих аналогий Максвелл не приписывал безоговорочно статус физической реальности, но, тем не менее, он верил в то, что реальность имеет механическую природу. Пусть те или иные конкретные аналоговые модели электромагнитных явлений и неадекватны в своих частностях реальности, но сама реальность устроена по законам механики.

Для Бора, в отличие от Максвелла, механические (вообще — классические) аналогии корпускулы и волны имели только иллюстративный смысл. Бор считал определенность существования отдельных фрагментов физической реальности относительной к экспериментальной ситуации [6, с. 137]. Классические понятия, неизбежные при описании любой экспериментальной ситуации, и в этом смысле априорные, согласно Бору можно было комбинировать различным, в том числе и неклассическим образом в зависимости от конкретной определенности экспериментальной ситуации. Одним из примеров этого является боровская концепция дополнительности.

Что же касается Эйнштейна, который, так же, как и Бор, признавал за механическими аналогиями чисто иллюстративный смысл, то для него, в отличие от Бора и в параллель с Максвеллом, характерна установка на вполне определенные обязательные категориальные характеристики физической реальности, к числу которых относятся непрерывность и классический лапласовский детерминизм, отказ от которых был равносильен для Эйнштейна отказу от физического познания вообще.

Другим интересным методологическим моментом, по которым будут сравниваться позиции Максвелла, Эйнштейна и Бора, является их отношение к математике как средству физического познания. Здесь Эйнштейн также гораздо ближе к Максвеллу, чем Бор, и оказывается более определенным, чем сам Максвелл.

Для Максвелла характерно глубоко физическое понимание математики, выражающей, по его мысли, самую суть физики. Так, говоря о Фарадее, Максвелл вспоминал: «по мере того, как я подвигался вперед, ...я замечал, что его способ понимания явлений также был по своей природе математическим, хотя он и не был представлен в обычной математической форме. Я убедился, что его идеи могут быть выражены в виде обычных математических формул, и эти формулы вполне сравнимы с формулами профессиональных математиков...» [7, с. 354]. В другом месте Максвелл пишет об этом еще более определенно: «Способ, которым Фарадей использовал свою идею силовых линий для того, чтобы координировать явления электромагнитной индукции, доказывает, что он был математиком высокого класса — одним из тех, у кого математики будущего могут черпать ценные и благотворные методы» [7, с. 69—70].

Для Эйнштейна так же, как и для Максвелла, характерна онтологизация математики, приписывание ей бытийного статуса. Оба они не задумываясь подписались бы под крылатой фразой Галилея: «Книга Природы написана на языке математики». Но если для Максвелла математика лишь отображала физические явления или коренилась в их сути, то Эйнштейн отводил математике еще более важную — формирующую роль по отношению к физической реальности. Это ясно усматривается из следующих его слов: «Весь предшествующий опыт убеждает нас в том, что природа представляет собой реализацию простейших математически мыслимых элементов. Я убежден, что посредством чисто математических конструкций мы можем найти те понятия и закономерные связи между ними, которые дадут нам ключ к пониманию явлений природы. Опыт может подсказать нам соответствующие математические понятия, но они ни в коем случае не могут быть выведены из него. Конечно, опыт остается единственным критерием пригодности математических конструкций физики. Но настоящее творческое начало присуще именно математике» [1, с. 184].

В противовес Максвеллу и Эйнштейну, Бор видел в математике лишь удобный вспомогательный языковой инструмент для компактного выражения зависимостей между опытными данными. Он отводил ей лишь оформленческую роль, не придавая математике онтологического статуса, указывая, что «несмотря на всю пользу, которую нам всегда приносит математика, следует помнить, что всякое определение математических символов и операций основывается на простом логическом применении обычного языка. В самом деле, математика никогда не рассматривалась как отдельная отрасль знания, основанная на совокупности опытных данных, а, скорее, считалась рафинированием обычного языка с прибавлением к нему соответствующих добавок, позволяющих описывать такие взаимоотношения, для которых обычные словесные средства общения либо недостаточно точны, либо слишком неудобны. Говоря точнее, математический

формализм квантовой механики и квантовой электродинамики попросту устанавливает правила подсчета математических ожиданий для наблюдений, производимых в хорошо определенных экспериментальных условиях, описанных с помощью представлений классической физики» [2, с. 576—577].

Статьи Эйнштейна и Бора о Максвелле были написаны полвека тому назад. Что же можно сказать сегодня о тех прогнозах будущего развития физики, которые были в них высказаны?

Насколько я могу судить, современная квантовая физика, как это ни странно, естественнейшим образом воплощает в себе довольно противостественный гибрид методологических установок Эйнштейна и Бора. Вопреки мнению Эйнштейна, она является сугубо вероятностной, и не помышляет больше о возврате к лапласовскому детерминизму. Вопреки Бору, она ухитрилась ассимилировать вероятностные представления без всяких ссылок на познающего субъекта, приписывая ей природе микрообъектов «самой по себе». Точно так же ей удалось объективировать боровскую концепцию дополнителности, представив ее в виде объектно трактуемых корпускулярно-волнового дуализма и соотношений неопределенностей. Сложные и тонкие методологические проблемы измерений, встающие в связи с задачей синтеза квантовых и релятивистских представлений, игнорируются подавляющим большинством физиков.

Почему все это произошло? Почему физика утратила насыщенность методологическими и философскими размышлениями, характерную для нее в эпоху становления теории относительности и квантовой механики? На мой взгляд, это произошло в результате «парадигматизации» физики, обретшей надежный математический формализм и получило — в условиях отсутствия вопиющего расхождения теории с экспериментом, сохраняющихся уже несколько десятилетий — возможность спокойно решать «задачи-головоломки» типа объяснения невыедания кварков или придания последним цвета и аромата. В такой ситуации методологические размышления, подвергающие сомнению самые основания теории, просто не нужны — они даже мешают. Многие уже поговаривают о близком конце физики.

История физики продолжается. Будущее покажет, насколько долго сохранится «квантово-релятивистский рай», и действительно ли физикам удастся принципиально завершить свою науку. Экстраполяция прошлой истории физики на будущее заставляет в этом сомневаться. Но кто знает?..

ЛИТЕРАТУРА

1. Эйнштейн А. Собрание научных трудов. М.: Наука, 1967. Т. 4.
2. Бор Н. Избранные научные труды. М.: Наука, 1971. Т. 2.
3. Бор Н. Избранные научные труды. М.: Наука, 1970. Т. 1.
4. Эйнштейн А. Собрание научных трудов. М.: Наука, 1966. Т. 2.

5. Алексеев И. С. По поводу дискуссии Эйнштейна и Бора.— *Вопр. истории естествознания и техники*, 1980, вып. 3 (67)—4 (68).
6. Алексеев И. С. Концепция дополнителности. Историко-методологический анализ. М.: Наука, 1978.
7. Максвелл Дж. Статьи и речи. М.: Наука, 1968.

УДК 519.48+536.765

Н. П. КОНОПЛЕВА*

МАКСВЕЛЛ И СОВРЕМЕННЫЕ ТЕОРИИ ПОЛЯ

Как известно, из всех современных теорий поля наиболее общей и жизнеспособной в настоящее время является теория калибровочных полей, созданная в основном в 50-е—60-е годы XX в. Экспериментальное подтверждение, признание и широкое распространение эта теория получила в 70-е годы, а сейчас продолжает интенсивно развиваться, находя новые и новые применения в различных областях физики [1—9].

Теория калибровочных полей, в действительности, представляет собой целый класс теорий поля, устроенных по единому принципу и описывающих все известные в настоящее время типы фундаментальных взаимодействий: сильные (т. е. ядерные силы), электромагнитные, слабые (радиационные силы) и гравитационные. Из упомянутых теорий до создания теории калибровочных полей фундаментальными могли быть названы только электродинамика Максвелла и общая теория относительности Эйнштейна. Калибровочная теория сильных взаимодействий (квантовая хромодинамика), единая теория электромагнитных и слабых взаимодействий, а также различные варианты объединенных (модельных) теорий нескольких видов взаимодействий (например сильных, электромагнитных и слабых и др.) появились в течение последних 10—15 лет на базе теории калибровочных полей. Все эти теории по своей математической структуре обобщают максвелловскую электродинамику, и в этом смысле можно говорить о «максвеллизации» современной теории поля. Поэтому интересно проанализировать особенности калибровочных теорий и те черты, которые они унаследовали от электродинамики Максвелла. В то же время здесь необходимо упомянуть и об ОТО, которая, будучи первой геометрической теорией реального физического поля [10], также передала в обобщенном виде часть своих концепций теории калибровочных полей. Здесь будут рассмотрены следующие вопросы:

- 1) возможность аксиоматического построения физической теории; соотношение между моделями, экспериментом, феноменологическими и фундаментальными теориями;
- 2) близкое действие и дальнее действие, геометрический и алгебраический подходы в физике и роль пространственно-временных представлений;

* Всесоюзный научно-исследовательский институт электромеханики.

3) новое представление о симметрии, переход от симметрии положений к симметрии между видами взаимодействий, различных по своей физической природе.

Если первый в истории физики пример аксиоматического построения теории дал Ньютон, то первым, кто построил фундаментальную физическую теорию с близкодействием и сознательно применил при ее построении представление о новом типе симметрии — симметрии между физически различными взаимодействиями — был Максвелл. В процессе построения теории Максвелл использовал принципиально важное требование существования реальных физических моделей, описываемых новой теорией, как требование, ограничивающее форму уравнений этой теории. Особенно ярко это проявилось при поиске правильных уравнений электродинамики в «долагранже» период ее построения.

Итак, рассмотрим первый из поставленных выше вопросов.

До создания общей теории относительности Эйнштейна традиционным методом построения физической теории был индуктивный, идущий от эксперимента к теории. Вначале накапливался экспериментальный материал, который затем классифицировался, обобщался и подводился под теоретическое описание. Так было не только в физике, но во всех науках, опирающихся на эксперимент. Даже геометрия была вначале экспериментальной наукой. Но уже в Древней Греции было понято, что положения геометрии могут быть доказаны без обращения к эксперименту путем вывода логических следствий из небольшого числа основных положений — аксиом. В физике этот процесс начался на две с лишним тысячи лет позже. Вначале, как и в геометрии, было обнаружено, что совокупность известных результатов механики может быть классифицирована таким образом, что все множество отдельных утверждений будет выводиться путем логических рассуждений из небольшого количества аксиом. Заслуга аксиоматического изложения механики принадлежит, как известно, Ньютону [11]. Возможно, что первая аксиоматическая формулировка физической теории родилась именно в Англии потому, что за 100 лет до Ньютона его соотечественник великий английский натурфилософ Фрэнсис Бэкон критиковал теории, основанные только на экспериментальных исследованиях, за то, что их утверждения основаны на неполной индукции и не несут в себе критерия истинности подобно математическим утверждениям [12]. Поэтому они не гарантированы от опровержений со стороны эксперимента. Эти идеи Бэкона постоянно обсуждались в литературе учеными последующих поколений.

Очень важную роль в формировании мировоззрения Фарадея и Максвелла сыграли споры между ньютонианцами и картезианцами о природе пространственно-временных представлений: материально ли пространство и является ли активной средой, в которой распространяются взаимодействия, или оно является

абстрактным и пассивным вместилищем центров, взаимодействующих друг с другом на расстоянии? В «Трактате об электричестве и магнетизме» Максвелл пишет: «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» [13, с. 349].

Максвелл, считая полезным для науки иметь две разных точки зрения на один предмет и не отвергая результатов ньютонианской школы, тем не менее писал: «эти физические гипотезы, однако, совершенно чужды принятому мною воззрению на вещи». Но и правоверным картезианцем Максвелл тоже не был. В книге «Материя и движение» [14] Максвелл подробно изложил свое отношение к воззрениям Декарта и Ньютона. В частности, он пишет: «Мы считаем более способствующим научному прогрессу признать вместе с Ньютоном идеи времени и пространства отличными, по крайней мере в воображении, от понятия материальной системы, для выражения свойств которой и нужны эти идеи» [14, с. 9]. Максвеллу было известно, что и сам Ньютон рассматривал представления об абсолютном пространстве и времени как вынужденную абстракцию и не допускал мысли, что реальные взаимодействия могут осуществляться без посредства некоего промежуточного агента путем дальнего действия (см., например, письма к Бентли в [15]). Опираясь на экспериментальные исследования Фарадея, Максвелл осуществил мечту Ньютона, построив теорию с близкодействием [16].

«Теория, которую я предлагаю, — пишет Максвелл в статье «Динамическая теория электромагнитного поля», — может быть названа теорией электромагнитного поля, потому что она имеет дело с пространством, окружающим электрические или магнитные тела, и она может быть названа также динамической теорией, поскольку она допускает, что в этом пространстве имеется материя, находящаяся в движении, посредством которой и производятся наблюдаемые электромагнитные явления» [13, с. 253]. Таким образом, Максвелл впервые ввел в физику представление о поле как особом виде материи, отличном по своим свойствам от известных ранее видов плотной материи. Это представление было введено аксиоматически, а реальные свойства электромагнитного поля Максвелл пытался угадать с помощью механических моделей, подбирая их так, чтобы математические уравнения описывающие их, правильно предсказывали результаты экспериментов Фарадея. При этом Максвелл исходил из предположения о том, что математическая форма теорий, описывающих явления из разных областей физики, должна быть сходной. Физическая реальность, по его мнению, лишь наполняет различным содержанием одну и ту же математику. Поэтому

для проникновения в новую для нас область явлений можно пользоваться методом аналогий, перенося из известной области физики некоторые хорошо изученные соотношения между аналогичными величинами в новую область. «Для составления физических представлений следует освоиться с существованием физических аналогий (сравнений). Под физической аналогией я разумею то частное сходство между законами в двух каких-нибудь областях явлений, благодаря которому одна область является иллюстрацией для другой», — пишет Максвелл [15, с. 127].

Начиная, как и Ньютон, с анализа экспериментального материала, Максвелл стремился в конечном счете к аксиоматической форме теории и, действительно, нашел ее, используя аналитическую механику Лагранжа [13]. Предшествовавший этому период строительства механических моделей процесса передачи электромагнитного взаимодействия через среду от точки к точке имел лишь одну цель: установить, какие величины, характеризующие электромагнитное взаимодействие, аналогичны координатам и импульсам в аналитической механике. После того как этот феноменологический период теории был пройден, строительные леса были убраны самим Максвеллом. Однако для того чтобы новая теория не осталась в архивах научных обществ, а вызвала к жизни экспериментальные исследования, Максвелл и его последователи при изложении теории продолжали иллюстрировать отдельные ее положения механическими моделями. В главе V «Трактата», которая называется «Об уравнениях движения систем со связями», читаем: «Воображаемый механизм, который соединяет каждую из частей системы, должен быть свободным от трения ... Впрочем, этот механизм служит главным образом для того, чтобы помогать воображению приписать телу положение, скорость и количество движения, которые в исследовании Лагранжа являются чисто алгебраическими величинами» [13, с. 414]. И далее вновь: «Для того чтобы иметь возможность опираться на результаты этого анализа, употребляя обычный язык динамики, мы постарались снова перевести основные уравнения этого метода на тот язык, который мог бы быть понятным без применения символов» [13, с. 427]. Именно о таком изложении просил Максвелла Фарадей в своих письмах [15].

Один из ближайших друзей Максвелла В. Томсон (впоследствии лорд Кельвин) говорил: «Мне кажется, что подлинный смысл вопроса о том, понимаем ли мы данную физическую проблему, сводится к следующему: можем ли мы сконструировать соответствующую механическую модель?» [13, с. 20]. Таким образом, строительство механических моделей, иллюстрирующих теоретические высказывания, считалось во времена Максвелла обязательным.

Как известно, сочетание высокой математики со сложными механическими моделями крайне затрудняло понимание теории

Максвелла его современниками. В связи с этим часто цитируют высказывание Пуанкаре: «Система Максвелла была странна и малопривлекательна, так как он предполагал весьма сложное строение эфира: можно было подумать, что читаешь описание завода с целой системой зубчатых колес, рычагами, передающими движение и сгибающимися от усилия, центробежными регуляторами и передаточными ремнями» [17, с. 2]. Но сразу же вслед за этим Пуанкаре пишет: «Но не нужно сожалеть о том, что его мысль следовала таким окольным путем, она все-таки привела его к величайшим открытиям». Таким образом, Пуанкаре понимал, что механические модели у Максвелла — лишь метод размышлений и иллюстраций возможных наблюдаемых следствий экспериментаторам. В той же работе Пуанкаре пишет: «...в книге же Максвелла не надо искать полного механического объяснения явлений электрических, а только изложение условий, которым должно удовлетворять всякое объяснение. Творение Максвелла оттого и будет долговечно, что оно не зависит от какого-либо частного объяснения» [17, с. 10]. Сам Максвелл постоянно подчеркивает, что природа электрического тока, в действительности, еще не ясна, что истинные свойства эфира не известны, что ему удалось лишь установить математическую форму теории электромагнитного поля, а полная динамическая теория электричества возникнет тогда, когда будут выяснены эти вопросы. «В такой теории», — пишет Максвелл в «Трактате», — мы могли бы рассматривать электрические действия не как явления неизвестной причины, лишь подчиняющиеся общим законам динамики, что делается в этом трактате, но как результат известных движений известных частей материи, в которых не только общие эффекты и конечные результаты, но и весь промежуточный механизм и детали движения принимаются в качестве объектов изучения» [13, с. 437].

Итак, истинный механизм передачи взаимодействия через эфир был для Максвелла проблемой, которую предстояло решить на следующем этапе развития электродинамики [13, с. 346]. Строительство механических моделей и их феноменологическое описание Максвелл рассматривал как преддверие к настоящей строго математически обоснованной и аксиоматизированной теории электромагнитного поля. Как язык и метод мышления современных Максвеллу физиков механические модели сыграли очень важную роль в последовавших за теорией новых экспериментах. Об этом говорит Больцман в «Примечаниях к работе Максвелла «О физических силовых линиях»»: «Открытие, однако, произошло при посредстве механических представлений. Максвелл нашел свои уравнения в результате стремления доказать при помощи механических моделей возможность объяснения электромагнитных явлений, исходя из концепций близкого действия, и только эти модели впервые указали путь к тем экспериментам, которые окончательно и решительно установили факт близкого действия и в настоящее время

образуют простой и наиболее достоверный фундамент найденных другими путями уравнений» [13, с. 195]. Пуанкаре говорит: «...чтобы можно было вывести учение о свете из тех электродинамических теорий, которые были тогда в моде, надо их было совершенно перестроить, но так, чтобы ими по-прежнему могли объясняться все уже известные явления. Это-то и сделал Максвелл» [17, с. 12].

Что же помогло Максвеллу построить теорию совершенно нового типа? Его новый, впервые в истории физики появившийся подход к физической теории, делающий Максвелла нашим современником по методу мышления. В статье «О математической классификации физических величин» Максвелл пишет: «Первый этап развития физической науки состоит в отыскании системы величин, относительно которых можно предположить, что от них зависят явления, рассматриваемые данной наукой. Второй ступенью является отыскание математической формы соотношений между этими величинами. После этого можно рассматривать эту науку как науку математическую. Проверка ее законов осуществляется путем теоретического исследования условий, при которых могут быть возможно более точно измерены некоторые величины, а также путем последующего экспериментального осуществления этих условий и действительного измерения этих величин» [18, с. 37]. Таким образом, мы видим, что Максвелл считает принципиально возможным построение теории новых физических явлений до их полного экспериментального изучения, идя от теории к эксперименту, т. е. от общего к частному, а не наоборот, как делалось всеми физиками до него. И к этой мысли Максвелла привели исследования Фарадея. В предисловии к «Трактату» читаем: «Когда я переводил то, что считал идеями Фарадея, в математическую форму, я нашел, что в большинстве случаев результаты обоих методов (индуктивного и дедуктивного. — Н. К.) 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» [13, с. 349]. О своем методе Максвелл пишет: «Применяя математику к исчислению электрических величин, я в первую очередь буду стараться вывести наиболее общие заключения из имеющихся в нашем распоряжении данных, с тем, чтобы после этого применить результаты к избранным простейшим случаям» [13].

Как известно, следующим, кто применил аксиоматический метод построения новой физической теории, был Эйнштейн. В его распоряжении не было обширного и хорошо классифицированного экспериментального материала подобного исследованиям Фарадея. Тем не менее анализируя мысленные эксперименты и применяя некоторые общие требования к структуре фи-

зической теории, Эйнштейн сконструировал правильные уравнения поля тяготения [10]. В то же время Гильберт, используя, как и Максвелл, аналитическую механику Лагранжа и подставляя вместо обобщенных координат компоненты метрического тензора, получил правильные уравнения поля тяготения вариационным путем [19]. (Максвелл, выводя свои уравнения вариационным методом, подставлял вместо обобщенных координат вектор-потенциалы электромагнитного поля [13].) Примерами современных аксиоматически построенных теорий могут служить аксиоматическая квантовая теория поля (построена после накопления экспериментальных результатов) и теория калибровочных полей (построена до накопления экспериментальных результатов). Классическая теория калибровочных полей обобщает принципы, лежащие в основе электродинамики Максвелла и общей теории относительности Эйнштейна [3].

Обсудим теперь второй из поставленных вопросов.

Величайшей заслугой Фарадея был отказ от гипотезы о действии на расстоянии между телами. На эту теорию опиралась механика Ньютона, полностью господствовавшая в XIX в. Из нее следовало, в частности, что свет распространяется с бесконечно большой скоростью, т. е. взаимодействие передается от одного тела к другому, удаленному от него на некоторое расстояние, мгновенно. Сам Ньютон допускал возможность конечной скорости света, но никакой последовательной теории, явно учитывающей такой факт, до Максвелла не существовало. Первой теорией такого рода стала электродинамика Максвелла. Как всякая хорошая и правильно устроенная теория, электродинамика не только объяснила все экспериментальные результаты Фарадея, но и предсказала новые, еще не наблюдавшиеся в эксперименте явления. Так, Максвелл предсказал, что не только изменения магнитного поля порождают электрическое, но и наоборот, изменения электрического поля порождают магнитное поле («магнитоэлектрическая» индукция в отличие от электромагнитной индукции, открытой Фарадеем). Этот эффект возникает благодаря присутствию в уравнениях Максвелла так называемого тока смещения $\partial D/\partial t$. В теории эта величина с необходимостью следует из логических рассуждений, но поскольку никогда ранее в физике не встречались токи, не являющиеся токами каких-либо вещественных частиц, представление о токе смещения многими было встречено в штыки. Дискуссии о природе тока смещения и его реальном существовании продолжались более полувека, хотя к тому времени радио уже стало бытовым явлением. Исходя из своих уравнений, Максвелл раскрыл электромагнитную природу света и объединил тем самым оптику и электромагнитные явления, причем скорость распространения света численно определяется уравнениями Максвелла и оказывается конечной величиной.

Исходя из механических аналогий Максвелл предсказал существование механического давления света, которое лишь в

1901 г. было экспериментально обнаружено русским физиком П. Н. Лебедевым. По поводу этого открытия лорд Кельвин сказал Тимирязеву: «Вы, может быть, знаете, что я всю жизнь воевал с Максвеллом, не признавая его светового давления, и вот Ваш Лебедев заставил меня сдаться перед его опытами» (цит. по: [13, с. 276]).

Теория Максвелла привела к предсказанию электромагнитных волн, которые были открыты экспериментально лишь спустя 20 лет в опытах великого немецкого физика Генриха Герца.

Об отношении Герца к уравнениям Максвелла можно судить по следующему его высказыванию: «Трудно избавиться от чувства, что эти математические формулы живут независимой жизнью и обладают своим собственным интеллектом, что они мудрее, чем мы сами, мудрее даже, чем их первооткрыватель, и что мы извлекаем из них больше, чем было заложено в них первоначально» [13, с. 278]. Своими блестящими экспериментами Герц полностью подтвердил теорию Максвелла, а также положил начало электродинамике движущихся сред. Развитие теоретической мысли в этом направлении привело впоследствии к созданию теории электрона Лоренца и специальной теории относительности Лоренца—Пуанкаре—Минковского—Эйнштейна.

Специальная теория относительности носит и другое название: релятивистская механика, т. е. механика очень быстро движущихся тел (со скоростью, близкой к скорости света). Релятивистская механика переходит в ньютонову механику, если скорость движущегося тела падает и становится гораздо меньше скорости света. В отличие от ньютоновой релятивистская механика явным образом учитывает, что на практике положение и скорость любого движущегося тела определяется посредством обмена сигналами с какими-либо другими телами (телами отсчета), а сигналы (как правило, электромагнитные), согласно теории Максвелла распространяются с конечной скоростью. Поэтому картина движения в тех случаях, когда запаздывание сигнала существенно, сильно отличается от классической (ньютоновой) картины. Таким образом, релятивистская механика в некотором смысле объединяет механику и электродинамику в одну теорию. Это происходит в начале XX в.

Вернемся к идее близкодействия. Если принять идею близкодействия, то становится необходимым отказ от представлений о дискретном строении материи из атомов, отделенных друг от друга пустотой. «Действительно, — говорит Максвелл, — если вообще энергия передается от одного тела к другому не мгновенно, а в конечное время, то должна существовать среда, в которой она временно пребывает, оставив первое тело и не достигнув еще второго. Поэтому эти теории должны привести к понятию среды, в которой и происходит это распространение» [20]. В другой работе [18, с. 124] Максвелл отмечал: «... есть два способа представлять себе строение тел, и у обоих были сторонники и в древнее, и в новое время. Они соответствуют двум спо-

собам рассмотрения количества — арифметическому и геометрическому. Для атомиста верно оценить количество материи в теле — это сосчитать, сколько в нем атомов. Пустые промежутки между атомами считаются за ничто. Для тех, кто отождествляет материю с пространством, объем пространства, занимаемого телом, только и может служить мерой количества вещества в нем».

В теории калибровочных полей вакуум, действительно, рассматривается как некая среда, причем изучение свойств вакуума как среды превратилось в последнее десятилетие в особое направление современной физики и астрофизики [21].

Согласно концепции Фарадея, из которой исходил и Максвелл, все пространство является областью действия электрических и магнитных сил, и все электромагнитные явления в данной точке пространства вполне могут быть определены явлениями, происходящими в соседних точках пространства. Такое представление о пространстве было принципиально новым, не встречавшимся в физике ранее. До Фарадея представление о пространстве пользовались лишь для определения расстояний между телами. В древнегреческих гипотезах мироздания, если и говорилось о соединении «стихий» (воды, огня, воздуха, земли), то имелось в виду соединение частичек соответствующих веществ, как это происходит в химии. Пространство оставалось лишь ареной действия этих «стихий». В средние века способность переносить электрические заряды и теплоту приписывалась особым жидкостям; но свойства этих жидкостей также никак не связывались со свойствами пространства.

Для XIX в. поиск связи между пространственно-временными представлениями и способами получения информации о внешнем мире, т. е. свойствами физических процессов, стал одной из ведущих идей. Великий русский геометр Николай Иванович Лобачевский считал, что опыт должен решить, какая из геометрий — «употребительная» (т. е. та, которая употреблялась в то время) или «воображаемая» — действительно соответствует природе. Это не значит, что Лобачевский предлагал экспериментально искать новую геометрию. Он, как позже и Максвелл, относился к математике как к языку физики, т. е. как к форме нашего мышления о природе и поэтому считал возможным исследовать заранее, до опытных данных различные допустимые формы такого мышления. Во вступлении к «Новым началам геометрии с полной теорией параллельных» (1835) он пишет: «В природе мы познаем собственно только движение, без которого чувственные впечатления невозможны. Итак, все прочие понятия, например Геометрические, произведены нашим умом искусственно, будучи взяты в свойствах движения; а потому пространство само собой, отдельно, для нас не существует. После чего в нашем уме не может быть никакого противоречия, когда мы допускаем, что некоторые силы в природе следуют одной, другие своей особой геометрией» [22].

Спустя 70 лет, действительно, оказалось, что в отличие от механики Ньютона, имеющей дело с медленно движущимися телами, и вполне адекватно использующей евклидову геометрию, в релятивистской механике необходимо использовать геометрию Лобачевского [23]. Электродинамика Максвелла допускает чисто геометрическую формулировку в терминах геометрии расслоенных пространств, которая в своей более общей форме применяется при геометризации взаимодействий в рамках теории калибровочных полей [3].

В настоящее время уже достаточно хорошо понято, что фундаментальными общими принципами, лежащими в основе любой последовательной физической теории, являются принципы инвариантности и симметрии. Они определяют структуру понятий, используемых для передачи информации о внешнем мире. В то же время они представляют собой теоретический образ приборов, используемых в эксперименте [24].

Аналогичная ситуация существует и в геометрии. Действительно, 2-мерную геометрию Евклида можно рассматривать как теорию инвариантов группы движений плоскости. В то же время 2-мерные вращения и сдвиги представляют собой группу подвижности инструментов, которые используются для построений геометрических фигур, доказательств конгруэнтности некоторых из них и доказательства теорем. Эти инструменты — циркуль и линейка без делений. Использование других инструментов (например, линейки с делениями) вывело бы нас за пределы геометрии Евклида, так как группой подвижности инструментов и группой симметрии теории стала бы конформная группа.

Таким образом, постулаты об инвариантности и симметрии в структуре аксиом каждой физической теории отражают те свойства, которыми должны обладать приборы, используемые для ее проверки. И наоборот, выбор приборов и схемы эксперимента предопределяет возможный тип симметрии теории, описывающей данный эксперимент. Хотя физический эксперимент несравненно сложнее планиметрических построений, и непосредственно определить адекватный эксперименту тип симметрии бывает трудно, логическая связь между экспериментальными средствами исследования мира и теоретическими образами одинакова в физике и геометрии. «Мы должны помнить, — говорил Гейзенберг, — что то, что мы наблюдаем, — это не сама природа, а природа, которая выступает в том виде, в каком она выявляется благодаря нашему способу постановки вопросов» [25, с. 36].

Итак, теория Максвелла — первая в истории физики фундаментальная теория поля как непрерывной субстанции, заполняющей все пространство-время и взаимосвязанной по своим свойствам со свойствами пространства и времени. Следующая фундаментальная теория поля — общая теория относительности Эйнштейна, созданная через 43 года после электродинамики

Максвелла, является теорией пространства-времени, поскольку основная полевая переменная в этой теории — метрика пространства-времени. Как и электродинамика, ОТО опирается на идею близкодействия. Идея близкодействия лежит также в основе теории калибровочных полей. Все эти теории поля допускают чисто геометрическую формулировку. Но геометрические подходы бывают различными.

Существуют три основных способа построения геометрии:

1) *клеиновский* подход, предполагающий, что пространство однородно; все свойства геометрических объектов в геометрии Клейна описываются наборами инвариантов группы симметрии пространства; 2) *римановский* подход, не предполагающий какой-либо симметрии пространства; в этом случае характеристики геометрических объектов выражаются в дифференциальных выражениях; для построения пространства в целом необходимы коэффициенты связности; 3) *картановский* подход, при котором пространство в целом представляет собой совокупность локальных однородных клеиновских пространств, ассоциированных с каждой точкой риманова пространства и связанных между собой обобщенными коэффициентами связности.

Геометрические подходы в физике естественно классифицируются в соответствии с приведенными выше концепциями геометрии. Клейновская точка зрения представляет собой алгебраический подход к геометрии. Предположение об однородности пространства в целом означает, что соответствующая физическая теория будет инвариантной относительно некой глобальной симметрии, а классификация свойств физических объектов сведется к классификации представлений группы глобальной симметрии. Примерами клеиновских геометрий являются евклидова геометрия (произвольной размерности), геометрия Лобачевского, мир де Ситтера и другие. Физические теории, использующие алгебраический подход к геометрии, — это теории взаимодействий в плоском пространстве-времени или пространстве-времени постоянной кривизны. Например, механика Ньютона и релятивистская механика, квантовая теория поля. К теориям такого типа относятся и суперсимметричные теории, в которых симметрия понимается как симметрия в некоем конфигурационном пространстве обычных координат и спинорных переменных, а также все прочие теории, использующие однородность конфигурационных пространств.

Связь между физикой и геометрией определяется символической формулой Пуанкаре: $G = G_0 + F$, где G — динамическая геометрия, G_0 — геометрия «фона», F — силы взаимодействия. Смысл этой формулы следующий: в опыте нет отдельно физики и геометрии, проверке на опыте подлежит только сумма: геометрия + физические законы. Разбиение суммы G на чисто геометрический фон G_0 и взаимодействие F зависит от нас, а точнее, от выбора средств измерения.

Геометрия пространства-времени определяется аксиомой инерциальном (бессиловом) движении. Инерциальные траектории связаны между собой преобразованиями группы симметрии, задающей принцип относительности теории. Если группа симметрии глобальна, пространство-время будет однородным пространством Клейна с жесткой, т. е. не связанной с динамической геометрией. Локальные симметрии приводят к динамической геометрии риманова или картанова типа. Образы римановой геометрии: метрика, коэффициенты связности, кривизна были успешно использованы Эйнштейном в ОТО. Картановский подход, получивший свое развитие в современной геометрии расслоенных пространств, позволил геометризировать теорию калибровочных полей.

Выбор типа симметрии теории (глобальной или локальной) связан с выбором одной из двух гипотез: дальнего действия или близкого действия при описании систем отсчета, а также выбором силового или бессилового описания взаимодействий. До Максвелла (в механике Ньютона) использовалась глобальная симметрия, дальнее действие и силовое описание внешних полей. В максвелловской электродинамике впервые использована локальная симметрия, близкое действие и бессиловое описание поля. Хотя нужно заметить, что за исключением близкого действия, два других момента были осознаны во всей своей важности только в XX в., а тот факт, что уравнение Лоренца, описывающее движение электрона во внешнем электромагнитном поле, подобно уравнению геодезического движения в ОТО, в том смысле, что описывает электрон как пробную частицу, т. е. тело, подвергающееся воздействию внешнего поля, но обратного действия на поле не оказывающее, и сейчас не является широко известным.

Предположение о локальности симметрии теории означает, что используемая в эксперименте система отсчета имеет конечные размеры (порядка области, в которой выполняется симметрия). Предположение о глобальности симметрии означает наличие абсолютной системы отсчета, распространенной на все пространство-время. Такое предположение влечет за собой гипотезу о существовании дальнего действующего взаимодействия, связывающего воедино отдельные элементы реальной системы отсчета. Поэтому постулат о локальности симметрий кажется более физическим. Он более адекватно отражает реальную экспериментальную ситуацию. Но в пределах точности эксперимента постулат о глобальности той или иной симметрии может не приводить к противоречиям с экспериментом, если масштаб изучаемых явлений гораздо меньше характерных размеров системы отсчета.

Постулат о локальности симметрий приводит к необходимости ввести представление о полях, связывающих воедино локальные системы отсчета, отнесенные к разным пространственно-временным точкам. Учет этих полей позволяет пересчитывать результаты, полученные в одной локальной системе отсчета, в

другую локальную систему отсчета и сравнивать их между собой. Поля, ассоциированные с локальными симметриями, называются калибровочными полями. К ним относятся гравитационные и электромагнитные поля, а также поля, переносящие сильные и слабые взаимодействия. Калибровочное поле — математическое понятие, означающее объект с определенными трансформационными свойствами. Вначале теория была построена для калибровочных полей, преобразующихся подобно коэффициентам связности некоего конфигурационного пространства, а затем аппарат был обобщен таким образом, что оказалось возможным, наряду с внутренними симметриями, последовательно локализовать пространственно-временные симметрии и рассматривать в качестве калибровочных полей тензорные величины произвольной размерности. Это позволило включить в число калибровочных теорий эйнштейновскую теорию тяготения. Вейлевский подход к гравитации как к полю типа электромагнитного максвелловского поля предписывал в качестве полевых переменных использовать коэффициенты связности, а не метрику, как это делал Эйнштейн. В течение 50 лет казалось невозможным совместить точки зрения Вейля и Эйнштейна, но в калибровочной теории тяготения с высшими производными это удалось сделать весьма естественным образом [26].

Реальные физические модели абстрактно-математического понятия «калибровочное поле» могут быть очень разнообразны. Это могут быть потоки одиночных частиц (фотоны), мультиплеты частиц (векторные мезоны), какие-либо коллективные возбуждения среды и пр.

Если глобальные симметрии позволяют классифицировать элементарные частицы по их свойствам, т. е. по значениям инвариантов группы симметрии, то локальные симметрии позволяют классифицировать взаимодействия по ассоциированным с ними калибровочным группам и построить иерархию взаимодействий. Локальные симметрии являются частным случаем бесконечных групп Ли. Поэтому в теории калибровочных полей возникает принцип классификации, использующий теорию бесконечных групп Ли, как предсказывал Гильберт, формулируя свою шестую проблему.

Третий из поставленных в начале статьи вопросов частично уже обсуждался выше, причем отмечалась исключительно важная теоретико-познавательная роль идеи симметрии между различными по своей физической природе видами взаимодействий, которую Максвелл реализовал в своем методе аналогий. Нужно заметить, что современникам Максвелла, привыкшим к более конкретной физике, эта идея, а также основанные на ней поиски единых принципов построения теорий любых наперед заданных видов взаимодействий, были непонятны. Пуанкаре в статье «Электричество и оптика» отмечает: «Все сочинение [Максвелла] проникнуто одним и тем же духом. Подробно рассматривается только существенное, т. е. общее всем возможным теориям,

и почти везде обходится молчанием все, что согласуется лишь с одной частной теорией. Поэтому читатель видит перед собой форму, почти лишенную содержания, и он склонен с первого взгляда принять ее за беглую и неуловимую тень. Это вызывает у читателя усилия и новые размышления, и в конце концов читатель убеждается в искусственности теоретических построений, которые вызывали у него раньше такое восхищение» [15, с. 276].

Однако Максвелл, как истинный теоретик, сознательно ставил на первое место абстрактно-математические истины, а затем наполнял их физическим содержанием. «Именно развитие идей и методов чистой математики сделало возможной разработку математической теории динамики и тем самым способствовало пролитию света на целый ряд истин, которые не могли быть открыты без математического исследования. Поэтому, если перед нами стоит задача разработать динамические теории других областей науки, мы должны пропитать наши мысли этими динамическими истинами в той же мере, как и математическими методами» [13, с. 427]; «...ознакомившись с рядом различных наук, исследователь замечает, что математические процессы и ход рассуждений в разных науках так похожи один на другой, что знание им одной науки может стать чрезвычайно полезным подспорьем при изучении другой.

Вдумываясь в причины этого, он обнаруживает, что в двух различных науках он имеет дело с системами величин, в которых математическая форма связи одинакова, несмотря на то, что физическая природа их может быть совершенно различна.

Таким образом, он приходит к классификации величин, основанной на новом принципе, согласно которому физическая природа величины подчинена ее математической форме» [18, с. 7]. В другой статье Максвелла читаем: «Но та классификация, о которой я сейчас говорю, основана на математической или формальной аналогии между различными величинами, а не на предмете, к которому они относятся. Так, отрезок прямой линии, сила, скорость вращения и т. д. суть величины, различные по своей физической природе, но сходные по своей математической форме. Мы можем различать эти два способа классификации, называя первую физической, а вторую математической классификацией величин». И далее: «Но ясно, что все аналогии такого рода основаны на значительно более глубоких принципах и что если бы мы имели настоящую математическую классификацию величин, то мы могли бы сразу открыть аналогию между любой представленной нам системой и другими системами величин в уже известных нам науках. Таким образом, мы не теряли бы времени, так как пользовались бы математическими трудами тех, кто уже в основном разрешил проблемы того же рода» [18, с. 37].

Именно идеи о единстве структуры физического знания, о существовании глубоких общих принципов, определяющих ма-

тематическую форму любой физической теории, стали впоследствии основой поисков единой теории всех взаимодействий и привели в настоящее время к созданию теории калибровочных полей.

Оценивая влияние Максвелла на развитие представлений о физической реальности, Эйнштейн пишет: «После основания теоретической физики Ньютоном наиболее значительное изменение ее аксиоматической основы было вызвано исследованием электромагнитных явлений Фарадеем и Максвеллом» [18, с. 243].

Нильс Бор, один из создателей квантовой механики, человек, очень много размышлявший над принципиальными вопросами теоретической физики, сказал: «...мы должны осознать, что недвусмысленное истолкование любого измерения должно быть, по существу, выражено в терминах классических теорий, и мы можем сказать, что в этом смысле язык Ньютона и Максвелла останется языком физиков на все времена» [18, с. 251].

Автор благодарит академика АрмССР А. Г. Иосифьяна, обратившего его внимание на работы Максвелла.

ЛИТЕРАТУРА

1. Электромагнитные взаимодействия и структура элементарных частиц/Под ред. А. М. Балдина. М.: Мир, 1969.
2. Элементарные частицы и компенсирующие поля: Сб. статей/Под ред. Д. Д. Иваненко. М.: Мир, 1964.
3. Коноплева Н. П., Попов В. И. Калибровочные поля. М.: Атомиздат, 1972. 2-е изд., 1980.
4. Попов В. И. Континуальные интегралы в квантовой теории поля и статистической физике. М.: Атомиздат, 1976.
5. Квантовая теория калибровочных полей: Сб. статей/Под ред. Н. П. Коноплевой. М.: Мир, 1977.
6. Славнов А. А., Фаддеев Л. Д. Введение в квантовую теорию калибровочных полей. М.: Наука, 1978.
7. Гейлор Дж. Калибровочные теории слабых взаимодействий/Пер. с англ. под ред. Г. В. Ефимова. М.: Мир, 1978.
8. Окунь Л. Б. Лептоны и кварки. М.: Наука, 1981.
9. Андреев И. В. Хромодинамика и жесткие процессы при высоких энергиях. М.: Наука, 1981.
10. Эйнштейн А. Собрание сочинений. М.: Наука, 1966. Т. 2.
11. Newton I. Philosophiae naturalis principia mathematica. L., 1713.
12. Бэкон Ф. Собрание сочинений Бэкона. СПб., 1874.
13. Максвелл Д. К. Избранные сочинения по теории электромагнитного поля. М.: Гостехтеориздат, 1954.
14. Максвелл К. Материя и движение. М.: Гос. изд-во. 1924, с. 9.
15. Карцев В. П. Максвелл. М.: Мол. гвардия, 1976.
16. Коноплева Н. П. Об эволюции понятия инерции (Ньютон, Мах, Эйнштейн). — В кн.: Эйнштейновский сборник, 1975—1976. М.: Наука, 1978.
17. Пуанкаре А. Теория Максвелла и герцовские колебания. СПб., 1900.
18. Максвелл Д. К. Статьи и речи. М.: Наука, 1968.
19. Гильберт Д. Основания физики. — В сб.: Вариационные принципы механики. М.: Физматгиз, 1959, с. 589.
20. Maxwell J. C. Treatise of electricity. t. 2. s. 606—607.
21. Гриб А. А., Мамаев С. Г., Мостепаненко В. М. Квантовые эффекты в интенсивных внешних полях. М.: Атомиздат, 1980.

22. Об основаниях геометрии. М.: Гостехтеориздат, 1956, с. 64.
23. Фок В. А. Применение идей Лобачевского в физике. М.: Гостехтеориздат, 1950.
24. Коноплева Н. П. О структуре физических теорий. — В кн.: Теоретико-групповые методы в физике. М.: Наука, 1980, т. 1, с. 337.
25. Гейзенберг В. Физика и философия. М.: Изд-во иностр. лит., 1963, с. 36.
26. Коноплева Н. П. О теории тяготения с высшими производными. — Докл. АН СССР, 1981, т. 257, с. 296.

УДК 538.3+536.765

Ю. А. КУХАРЕНКО *

НЕОБРАТИМОСТЬ РЕШЕНИЙ УРАВНЕНИЙ МАКСВЕЛЛА И ОБРАТИМОСТЬ ЭЛЕКТРОДИНАМИКИ

Цель настоящей статьи показать, каким образом появляются необратимые решения у обратимых динамических уравнений. Впервые эта проблема возникла в статистической механике. Однако простейшей системой, в которой эта проблема возникает, является не механическая система, а электромагнитное поле Максвелла.

Уравнения Максвелла

$$\left(\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} - \nabla^2 \right) A(t, x) = \frac{4\pi}{c} j(t, x) \quad (1)$$

являются обратимыми, т. е. инвариантными к преобразованию $t \rightarrow -t$. Однако, как известно, решение их в бесконечном пространстве, описывающее излучение, выражается через запаздывающие потенциалы и необратимо:

$$A(t, x) = \frac{4\pi}{c} \int_{-\infty}^{\infty} dt' \int dx' D^r(t-t', x-x') j(t', x'), \quad (2)$$

$$\text{где } D^r(\tau, r) = \frac{\theta(\tau)}{4\pi r} \delta\left(\tau - \frac{r}{c}\right), \quad \theta(\tau) = \begin{cases} 1, & \tau > 0, \\ 0, & \tau < 0 \end{cases} \quad (3)$$

— запаздывающая функция Грина волнового уравнения (1).

Обычно считают, что выбор решения (2) может быть сделан на основе добавочного постулата, роль которого может играть принцип излучения Зоммерфельда, принцип предельного поглощения, правило обхода полюса Ландау и т. д.

Мы покажем, что необратимое решение (2) непосредственно возникает на больших временах из общего решения уравнения (1) для системы с непрерывным спектром, и для его обоснования не нужно привлекать добавочные постулаты. С этой целью

* Всесоюзный научно-исследовательский Центр по изучению свойств поверхности и вакуума.

совершим преобразование Фурье по пространственным координатам

$$A(t, x) = \int \frac{dk}{(2\pi)^3} A(t, k) e^{ikx}, \quad j(t, x) = \int \frac{dk}{(2\pi)^3} j(t, k) e^{ikx}, \quad (4)$$

переводящее волновое уравнение (1) в систему уравнений для осцилляторов поля

$$\left[\frac{d^2}{dt^2} + \omega^2(k) \right] A(t, k) = 4\pi c j(t, k), \quad \omega(k) = c|k|, \quad (5)$$

общее решение которой имеет следующий вид:

$$A(t, k) = a(k) e^{i\omega(k)t} + b(k) e^{-i\omega(k)t} + \int_0^t d\tau \frac{\sin \omega(k)\tau}{\omega(k)} 4\pi c j(t-\tau, k). \quad (6)$$

Первые два члена в правой части (6) описывают свободные колебания осцилляторов, функции $a(k)$, $b(k)$ выражаются через начальные значения $A(0, k)$ и $\frac{d}{dt}A(0, k)$, третий член описывает вынужденные колебания, возбужденные током $j(t-\tau, k)$. Мы будем предполагать, что функция $a(k)$, $b(k)$, $j(t, k)$, квадратично интегрируемы. Физический смысл имеют интегралы вида

$$\int dk u(k) A(t, k) \quad (7)$$

с квадратично интегрируемыми функциями $u(k)$. Подставляя общее решение (6) в интеграл (7) и используя теорему Римана — Лебега, легко убедиться, что на больших временах вклад от членов, содержащих $a(k)$, $b(k)$, обращается в нуль, а верхний предел интеграла по времени, описывающего вынужденные колебания, может быть заменен на ∞ . В результате, электромагнитное поле, определяющее вклад в интеграл (7) на больших временах, можно записать в виде

$$A(t, k) = 4\pi c \int_0^{\infty} d\tau \frac{\sin \omega(k)\tau}{\omega(k)} j(t-\tau, k). \quad (8)$$

Отсюда, совершая обратное преобразование Фурье, непосредственно приходим к запаздывающим потенциалам (2), (3).

Подчеркнем, что исчезновение вклада свободных колебаний обусловлено не специальным выбором начальных условий, как это часто утверждается, а процессом фазового перемешивания, происходящим в системе с непрерывным спектром; значения же поля $A(0, k)$, $\frac{d}{dt}A(0, k)$ в начальный момент времени могут быть произвольными. В механических системах с конечным числом степеней свободы, движение оказывается квазипериодиче-

ским, теорема Римана — Лебега неприменима, и вклад от начальных условий не исчезает; таким образом, ситуация в этом случае совершенно отличается от той, которая имеет место в теории поля.

Отметим также, что $A(t, x)$ являются полностью детерминированными неслучайными функциями, так что энтропия поля равна нулю во все моменты времени. Отсюда вытекает, что электромагнитное поле представляет собой пример чисто динамической системы, в которой возникает необратимость.

Покажем теперь, что необратимый характер решений уравнений Максвелла не противоречит обратимости электродинамики. В самом деле, нетрудно убедиться, что общее решение уравнений Максвелла (6) инвариантно к преобразованию $t \rightarrow -t$. Заменяя в (6) t на $-t$, подставляя в (7) и используя теорему Римана — Лебега, находим, что на больших временах начальные значения поля своего вклада не дают и решение уравнений Максвелла выражается через опережающие потенциалы в полном соответствии с обратимостью электродинамики. Подчеркнем, что непосредственное обращение времени в выражении (2), приводящее к противоречию с обратимыми уравнениями Максвелла, незаконно, поскольку, как показано выше, выражение (2) представляет собой асимптотику решений уравнений Максвелла на больших временах.

УДК 519.48+536.765

М. И. МОНАСТЫРСКИЙ *

ВИХРИ И МОНОПОЛИ В НЕАБЕЛЕВЫХ УРАВНЕНИЯХ МАКСВЕЛЛА

Что общего между существованием тяжелых векторных мезонов в единых теориях слабых и электромагнитных взаимодействий и возникновением точечных особенностей на поверхности нематического жидкого кристалла, видимых в поляризованном свете? Еще так недавно отсутствие связей между явлениями, взятыми из столь различных областей физики казалось бы естественным. Сейчас ситуация представляется совершенно другой. Прогресс в объяснении многих фундаментальных явлений физики элементарных частиц и теории конденсированных сред основан на некоторых общих идеях как математического, так и физического характера. В этой статье я постараюсь весьма фрагментарно проследить на двух примерах, взятых из последних исследований, наметившиеся тенденции. Первый пример — монополь в теории калибровочных полей. Второй — существование вихревых решений в сверхтекучем ^3He .

* Институт теоретической и экспериментальной физики.

Небольшой исторический экскурс во времена создания электромагнитной теории поможет яснее представить те связи, о которых пойдет речь.

ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ И ГИДРОДИНАМИКА (XIX В.)

Теория электромагнетизма Максвелла — первая полевая теория в физике. Однако сам Максвелл первоначально шел по другому пути, пытаясь свести действия поля к чисто механическому взаимодействию элементарных («молекулярных» по терминологии Максвелла) вихрей. Аналогия между гидродинамическими и электромагнитными явлениями вдохновила Максвелла. Подтверждением служит примечание, сделанное Максвеллом ко второй главе работы «О физических силовых линиях». В этой работе содержатся его знаменитые уравнения.

«После того как была написана первая часть этой работы, я в Crelle's Journal за 1859 год увидел статью профессора Гельмгольца о движении жидкости. В этой статье он устанавливает, что линии тока в жидкости распределяются сообразно тем же самым законам, как магнитные силовые линии, причем линия электрического тока соответствует осевой линии элементов объемов жидкости, которые находятся в состоянии вращения. Это — дополнительный пример физической аналогии, исследование которой может служить выяснению одновременно двух рядов явлений — электромагнетизма и гидродинамики» [1].

Аналогия между гидродинамикой и электродинамикой имеет большую эвристическую ценность. Например, одни и те же уравнения описывают стационарные течения несжимаемой идеальной жидкости и электростатические и магнитостатические распределения на поверхности.

Однако существует фундаментальное различие между уравнениями электромагнетизма и гидродинамики, связанное с принципиальной несводимостью действия электромагнитного поля к системе чисто механических движений. Напротив, нелинейные уравнения гидродинамики, где роль поля играет поле скоростей частиц, могут быть в принципе выведены из законов Ньютона.

Одна из особенностей полевого характера уравнения Максвелла, не имеющая аналога для уравнений гидродинамики, связана со свойством локальной калибровочной инвариантности.

ЛОКАЛЬНАЯ КАЛИБРОВОЧНАЯ ИНВАРИАНТНОСТЬ

Пусть A_μ — вектор-потенциал электромагнитного поля. Уравнения Максвелла (заданные в четырехмерной форме) имеют вид:

$$\partial_\mu F_{\mu\nu} = 0, \quad (1)$$

где $F_{\mu\nu} = \partial_\mu A_\nu - \partial_\nu A_\mu$ — тензор напряженности электромагнитного поля. Уравнения (1) инвариантны относительно калибровочных преобразований.

$$A_\mu \rightarrow A_\mu + \partial_\mu f. \quad (2)$$

Здесь $f(x)$ — произвольная функция, зависящая от точки x ($x \in M^4$ — четырехмерное пространство — время Минковского).

Преобразования вида (2) с непостоянной функцией f и означают локальность преобразований.

Калибровочные преобразования образуют группу — коммутативную (абелеву) группу калибровочных преобразований. Инвариантность уравнений Максвелла относительно калибровочных преобразований имеет фундаментальное значение для теории электромагнитных взаимодействий.

Взаимодействие электрически заряженных частиц на классическом уровне описывается калибровочным полем A_μ . При этом константа взаимодействия e (e — электрический заряд) определяет как величину взаимодействия, так и вид лагранжиана системы взаимодействующих полей. Взаимодействие такого рода называется минимальным. Идея описания взаимодействия элементарных частиц с помощью калибровочных полей лежит в основе современных теорий элементарных частиц. С каждым типом взаимодействия связано свое калибровочное поле с группой преобразований в большинстве случаев неабелевой. Сами уравнения движения оказываются существенно нелинейными и их решение представляется сложнейшей математической задачей.

Полевое описание электродинамики резко отдалило ее от гидродинамики и значительно изменило круг актуальных задач. В частности, традиционные для гидродинамики задачи о движении вихрей потеряли всякое значение для теории электромагнетизма. Теория электромагнетизма естественно включилась в основное русло квантовой теории и, слившись со специальной теорией относительности, пришла к своему триумфу — квантовой электродинамике.

Развитие гидродинамики проходило в рамках классической физики с упором на трудные вопросы течения вязкой жидкости и проблемами механики сплошных сред. «Развод» гидродинамики и электродинамики имел еще одно последствие, оставшееся незамеченным при «разделе имущества». Были прерваны связи с тем, что зародившейся новой математической дисциплиной — топологией. Стоит напомнить, что работы Гельмгольца по уравнениям идеальной жидкости среди прочего содержали и гидростатическую интерпретацию уравнений Коши — Римана (аналитических функций) на поверхностях.

В трудах Римана также явственно прослеживаются связи топологии с современной ему физикой. Среди немногих великих ученых, предчувствовавших тесный союз топологии с физикой, был и Максвелл.

В статье, посвященной Фарадею, опубликованной в 1873 г. в

«Nature», он с исключительной интуицией предвосхитил роль топологии в физике. «Верно, конечно, что нельзя углубленно заниматься какой-либо точной наукой, не зная ее математики. Однако мы не думаем, что выкладки и формулы, которые математики считают столь полезными, представляют собой всю математику в целом; исчисление — лишь часть математики.

Геометрия положения представляет собой пример математической науки, созданной без помощи одних лишь вычислений. Фарадеевы линии сил занимают в науке об электромагнетизме такое же положение, как пучки линий в геометрии положения. Они позволяют нам воспроизвести точный образ предмета, о котором мы рассуждаем. Способ, которым Фарадей использовал свою идею силовых линий, чтобы координировать явления электромагнитной индукции, доказывает, что он был математиком высокого класса — одним из тех, у кого математики будущего могут черпать ценные и плодотворные методы» [2].

Прошло немало лет прежде чем стала ясна роль топологии в современной физике. Замечательно, что многие из недавних топологических применений тесно связаны с проблематикой, уходящей истоками к уравнениям Максвелла. Вот один из таких примеров.

МАГНИТНЫЙ МОНОПОЛЬ В КАЛИБРОВОЧНЫХ ТЕОРИЯХ ПОЛЯ

Еще на заре исследований электромагнитных явлений возникла следующая принципиальная проблема. Почему в Природе наблюдаются электрически заряженные частицы и не наблюдаются изолированные магнитные полюса? Исчерпывающего ответа на этот вопрос нет и до сих пор. Проблема магнитных полюсов — магнитных монополей обсуждалась в рамках классической теории Максвелла рядом выдающихся ученых, включая Пуанкаре, рассмотревшего задачу о движении заряженной частицы в поле монополя [3], но только Дирак придал этому вопросу новое звучание. Он связал эту задачу с другой, принципиальной с точки зрения квантовой теории, проблемой — целочисленным квантованием электрического заряда частиц. Дирак показал, что из гипотезы существования монополей следует и квантование электрического заряда. Его анализ базируется на основных принципах квантовой механики.

Пусть Ψ — волновая функция электрона в поле монополя. Волновая функция преобразуется под действием калибровочной группы преобразований:

$$\Psi \rightarrow S\Psi \quad S = \exp(ief). \quad (3)$$

Если предположить, следуя Дираку, существование магнитного полюса с зарядом q и линией сингулярности l поля вектора-потенциала A , то условие однозначности волновой функции Ψ при обходе по замкнутому контуру, охватывающему линию l , при-

водит к следующему правилу квантования:

$$eq = n/2 \quad (n - \text{целое число}). \quad (4)$$

Дирак доказал, что гипотеза магнитных полюсов, дополненная условием квантования (4), не приводит ни к каким противоречиям ни с уравнениями Максвелла, ни с современной квантовой теорией. В присущем ему стиле он заключил: «С этой точки зрения было бы удивительно, если бы Природа не использовала этой возможности» [4]. Однако до сих пор, несмотря на многолетние усилия, магнитные монополи не наблюдались в Природе.

Введение в теорию элементарных частиц идей калибровочной инвариантности позволило совершенно по-новому взглянуть на проблему монополей. Решающий шаг был сделан в последнее десятилетие.

В ряде моделей, описывающих слабые и электромагнитные взаимодействия, были найдены статические решения с конечной энергией. Такие решения интерпретируются как частицы. Их массы M , значительно превышают массы заряженного W -бозона — переносчика слабого взаимодействия: $M_r \sim \frac{M_W}{\alpha} C(\beta)$ (α — постоянная тонкой структуры, $C(\beta)$ — универсальная функция, зависящая от модели, $C(\beta) \sim 1$). Интересная особенность найденных решений — появление «магнитного заряда».

Посмотрим, как появляется магнитный монополь в одной из моделей, так называемой модели Джорджи — Глешоу. Пример носит чисто иллюстративный характер.

Для наших целей нет необходимости выписывать лагранжиан модели. Достаточно сформулировать лишь свойства полей Янга — Миллса и Хиггса, которые используются при нахождении решений. В модели участвуют два типа полей: векторные янг-миллсовские поля W_μ^i (аналоги полей A_μ) и скалярное поле Хиггса ϕ^i , которые принимают значения в изотопическом пространстве R^3 . Калибровочная группа $SO(3)$ — некоммутативная группа вращений R^3 . Пространственный индекс μ — принимает четыре значения: 0, 1, 2, 3, изотопический i — три: 1, 2, 3. Так как будут рассматриваться стационарные решения, временную компоненту полагаем равной нулю. Потенциальная энергия системы задается плотностью, выбираемой в следующем виде:

$$U(\phi) = \mu^2/2 (\phi\phi) + \lambda/4 (\phi\phi)^2$$

$$\mu^2 < 0, \quad \lambda > 0, \quad \mu^2, \lambda - \text{const}. \quad (5)$$

Потенциал $U(\phi)$ в теории поля называется потенциалом Хиггса. Аналогичный потенциал в теории фазовых переходов называется потенциалом Гинзбурга — Ландау.

Множество точек минимума потенциала $U(\phi)$ определяет пространство вакуумов Ω и удовлетворяет соотношениям:

$$\partial U / \partial \phi = 0, \quad \partial^2 U / \partial \phi^2 \geq 0.$$

В данном случае пространство вакуумов совпадает с двумерной сферой S^2 .

Фиксировать вакуум можно, выбрав некоторую точку на двумерной сфере. Простейшее вакуумное решение, назовем его хиггсовским вакуумом, имеет вид:

$$\phi^i(x) = \mu / \sqrt{\lambda} e_3; \quad W_\mu^i(x) \equiv 0. \quad (6)$$

Здесь e_3 — единичный вектор в пространстве R^3 , направленный по оси z .

Но существует и другой класс вакуумных решений. При $|x| \rightarrow \infty$ они имеют следующий вид:

$$\phi^i(x) = \frac{x^i}{|x|}, \quad W_\mu^i(x) = \epsilon_{\mu ij} \frac{x^j}{|x|}. \quad (7)$$

Здесь $\epsilon_{\mu ij}$ — антисимметрический тензор. Такое решение называется ежом. «Иголки» ежа образуют радиальное векторное поле. Понадобится совсем немного аналитики, чтобы объяснить почему решение вида (7) интерпретируется как монополь.

Вернемся немного назад и посмотрим внимательно на хиггсовский вакуум (6). Хиггсовское поле ϕ^i направлено по оси z и поэтому остается инвариантным при вращениях вокруг оси z .

Оказывается, что с полем ϕ можно связать безмассовую частицу, отождествляемую с фотоном γ . В точной аналогии с электромагнетизмом фотон γ определяется электромагнитным полем $F_{\mu\nu}$. Поле $F_{\mu\nu}$ выражается через поле ϕ и W_μ^i и определено для любых вакуумных решений, в частности для ежа. Прямой подсчет поля $F_{\mu\nu}$ для (7) привел к поразительному результату:

$$F_{\mu\nu} = -1/\tilde{e} \epsilon_{\mu\nu\alpha} \frac{x_\alpha}{|x|^3}. \quad (8)$$

С точностью до знака оно совпадает с радиальным магнитным полем B точечного источника с магнитным зарядом $q = 1/\tilde{e}$.

$$B = \tilde{e} \frac{x}{|x|^3}. \quad (9)$$

Величина $\tilde{e}$ связана с электрическим зарядом e соотношением $\tilde{e} = 2e$. Решение типа ежа приобрело все основания, чтобы называться магнитным монополем. За всеми приведенными рассуждениями стоит весьма интересная топология. Одно из следствий — простое объяснение «появления» струны Дирака.

В конструкции Дирака, как уже отмечалось, требовалось существование линии сингулярности, ведущей из монополя, на которой терпел разрыв вектор-потенциал A_μ . Требование конечности значений наблюдаемых физических величин, в частности магнитного поля, приводило к введению специальных правил квантования при обходе струны. В связи с этим возник вопрос о наблюдаемости струны. В калибровочном монополе такой проблемы нет. Возникновение линии сингулярности объясняется

весьма просто. Переход от вакуума типа ежа к хиггсовскому вакууму возможен только разрывным калибровочным преобразованием, так как они принадлежат к разным топологическим типам. Линии разрыва вектора-потенциала и будут «струнами Дирака». Очевидно также, что «струна Дирака» может иметь произвольную форму и направление в пространстве.

Экспериментальное подтверждение существования калибровочных монополей возможно лишь на ускорителях нового поколения. Калибровочные монополи должны иметь массы приблизительно в 100 раз большие, чем массы W — бозонов, наблюдаемых в протон-антипротонных столкновениях (Cern Courier, 1983, vol. 23, N 9). В стандартной модели слабых и электромагнитных взаимодействий калибровочных монополей нет и по топологическим соображениям. Однако в теориях с более высокими группами симметрии (модели «большого объединения») монополи могут существовать.

Но есть совсем другая область физики, где монополи уже, по-видимому, наблюдаются или, по крайней мере, могут наблюдаться в более «земных» условиях.

Речь идет о физике конденсированного состояния [5]¹.

ВИХРИ И МОНОПОЛИ В СВЕРХТЕКУЧЕМ ^4He

Как известно, уравнения гидродинамики сверхтекучего ^4He , выведенные Ландау, являются чисто классическими уравнениями, дополненными представлением о двух компонентах скорости: нормальной и сверхтекучей. Квантовые эффекты проявляются в весьма своеобразных свойствах вихрей, образующихся при вращении сверхтекучей жидкости.

Вихри в сверхтекучем ^4He квантованы. Условия квантования выводятся из тех же соображений, что и дираковские правила квантования, но в этой ситуации имеют реальный физический смысл. Существует еще несколько физических эффектов, в частности квантование магнитного потока в кольцевых сверхпроводниках, которые, опуская некоторые тонкости, видимо, можно объединить с проблемой дираковских монополей, условиями квантования с коммутативной калибровочной группой.

С топологической точки зрения, обнаруживающей прямую связь с уравнениями калибровочных полей, большой интерес представляет недавнее открытие в сверхтекучести ^3He . Экспериментальное открытие сверхтекучести ^3He при температурах $2 \cdot 10^{-3} \text{ K}$ — блестящее достижение физики низких температур последнего десятилетия. Одно из поразительных свойств, присущих сверхтекучему состоянию ^3He — существование нескольких термодинамических фаз. Сложная топологическая структура уравнений сверхтекучего ^3He приводит к появлению нового класса особенностей, отсутствующих в сверхтекучем ^4He . Одна из таких особенностей — монополь в A -фазе ^3He .

¹ В книге имеется список литературы по затронутым в статье темам.

Представим себе сферический сосуд, заполненный A -фазой сверхтекучего ^3He . Параметр порядка Ψ — волновая функция конденсата в ^3He , в случае A -фазы задается репером векторов Δ_1, Δ_2, l . Векторы Δ_1 и Δ_2 касательны к поверхности сосуда, а вектор $l = \Delta_1 \times \Delta_2$ — нормален к поверхности. Из чисто топологической теоремы, принадлежащей еще Пуанкаре, следует, что касательное поле векторов на поверхности сферы всегда имеет особенность. Оказывается, что эта сингулярность может возникать из монопольной особенности, находящейся в центре сосуда. Монополь в центре сосуда релаксирует в точечную особенность на поверхности.

Если сопоставить поле сверхтекучей скорости v с полем вектор-потенциала A , то монополь в A -фазе будет соответствовать магнитному монополю типа ежа. Однако монополь в A -фазе, в отличие от магнитного монополя, неустойчив. Он будет двигаться в сторону границы сосуда пока не достигнет ее, образуя устойчивую точечную особенность.

Такие особенности существуют и в других вполне классических объектах, например в холестерических и нематических жидких кристаллах, где их наблюдение представляется значительно более доступным.

Единый подход к изучению структуры особенностей в квантовой теории поля и в теории конденсированных сред, основанный на существенном использовании топологии, одна из примечательных особенностей последнего десятилетия.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Кратко суммировать содержание статьи можно в двух схемах: первая характеризует период конца XIX в. (времена Максвелла), вторая — наши дни.

Схема 1

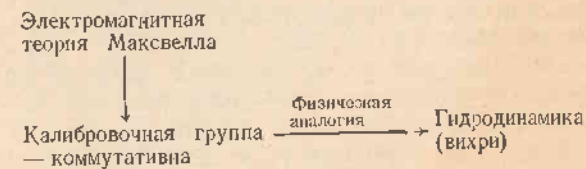
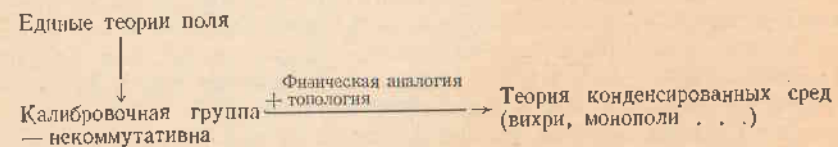


Схема 2



Сравнение схем еще раз показывает как далеко ушла наука и как поразительно много было заложено в трудах одного человека — Джеймса Клерка Максвелла.

1. Maxwell J. C. On Physical Lines of Force: In Sci. Papers of J. C. Maxwell. N. Y.: Dover Publ., 1927, vol. 1, p. 451—513.
2. Maxwell J. C. Faraday: In Sci. Paper of J. C. Maxwell. N. Y.: Dover Publ., 1927, vol. 2, p. 355—360.
3. Poincaré H. Remarques sur une expérience de M. Birkeland.—C. r. Acad. Sci. Paris, 1896, vol. 123, p. 530—533.
4. Dirak P. A. M. Quantum singularities in the electromagnetic field.—Proc. Roy. Soc. Lond., 1931, vol. A133, p. 601—609.
5. Monastyrsky M. I. Riemann. Topology. Physics. Boston: Birkhäuser, 1985.

УДК 539.378.6+536.765

Л. А. ГЛЕБОВ*

МАКСВЕЛЛОВСКАЯ ФОРМУЛА ДИСПЕРСИИ И РЕЛЯТИВИСТСКАЯ ФИЗИКА

Исследовательская программа, развитие которой связано с именем Ньютона, в качестве основного момента включала концепцию абсолютного пространства. При этом принимался принцип относительности для равномерных движений, а абсолютное пространство выделялось тем, что к абсолютному пространству относились ускорения и действия сил. Вращательное движение по отношению к абсолютному пространству рассматривалось как порождающее центробежные ускорения и силы (см. знаменитый опыт Ньютона с ведром [1, с. 34]). Из приведенного в III книге «Начал» утверждения, что «центр системы мира» покоится в абсолютном пространстве [1, с. 529], следует, что Ньютон относил и к абсолютному пространству действие сил, вызывающих поступательное движение.

Исследовательская программа Максвелла строится на отрицании абсолютного пространства. Это ярко выражено в электродинамике Максвелла и ее последующем развитии.

В своей книге «Материя и движение» (1877 г.) [2] Максвелл последовательно проводит релятивистский принцип по отношению к механике. Он указывает, что «ускорение, подобно положению и скорости, есть относительное понятие и не может быть истолковано абсолютным образом» [2, с. 21]. Далее он утверждает, что «если бы каждая частица материального мира, находящаяся в пределах достижения наших средств наблюдения, изменила в данный момент свою скорость прибавлением для каждой скорости, одинаковой по величине и направлению к ней новой такой частицы, то все относительные движения тел внутри системы сохранились бы совершенно неизменными и ни астрономы, ни физики, какими бы инструментами они не пользовались, не были бы в состоянии обнаружить, что нечто случилось» [2, с. 22].

* Архив АН СССР.

Это утверждение очевидным образом противоречит утверждению Ньютона о неподвижности центра мира. Замечу также, что в подчеркнутых мною строках произведено распространение принципа относительности с механики на всю физику и, следовательно, осуществляется переход к программе релятивистской физики, а не только на механику.

В данной работе хочу обратить внимание на то, что Максвелл в конкретном случае вывода формулы дисперсии на основе волновой теории в упругой среде также стоит на своих релятивистских позициях. Я хочу также уточнить ряд вопросов, связанных с выводом этой формулы.

Как известно, Максвелл предложил свой вывод в 1869 г., впервые построив теорию, правильно объясняющую аномальную дисперсию на основе представлений об упругом сжимаемом эфире. Эта работа не была замечена до тех пор пока о ней в 1889 г. не напомнил Рэлей [3].

Возникает вопрос, почему Максвелл, который к 1865 г. уже построил свою электромагнитную теорию света, в своей работе вернулся к упругой теории? На это, по-видимому, можно дать следующий ответ.

В процессе работы над «Динамической теорией электромагнитного поля» (появившейся в 1864—1865 гг.) Максвелл столкнулся с проблемой дисперсии и стал ее разрабатывать, о чем свидетельствует письмо, которое он написал Стоксу в 1864 г. [4]. Эти поиски отражены и в самой «Динамической теории». В этой связи для нас особенно интересен раздел, посвященный отношению между электрическим сопротивлением и прозрачностью. В нем Максвелл пишет: «Если среда не идеальный изолятор, а проводник, сопротивление которого на единицу объема равно ρ , то будут иметь место не только электрические смещения, но и действительные токи проводимости, благодаря которым электрическая энергия превращается в тепло, что ведет к затуханию волн. Для определения коэффициента поглощения рассмотрим распространение вдоль оси x поперечного возмущения G » [5]. Под G Максвелл понимает составляющую по оси векторного потенциала, который он определяет как плотность электромагнитного количества движения, отождествляя его с электротоническим состоянием Фарадея. Для изменения G в среде Максвелл принимает выражение

$$G = e^{-px} \cos(qx + nt).$$

Он определяет зависимость коэффициента затухания волны p , изображаемой этим выражением в зависимости от сопротивления. Он даже проверяет полученную формулу экспериментально, получая при этом, что для тонкого золотого листа, сквозь который, согласно расчетам, должно проходить только 10^{-30} от падающего света, на самом деле проходит $1/500$ до $1/1000$, причем зеленого цвета.

В этом Максвелл увидел противоречие опыта с электромагнитной теорией света. Противоречие заключалось и в том, что хотя, согласно электромагнитной теории света, все диэлектрики должны быть непрозрачными, на самом деле это не так. С другой стороны, электролиты, которые являются проводниками, часто прозрачны. Вряд ли мимо внимания Максвелла прошло и то, что не только дисперсия, но и само значение показателя преломления для диэлектриков находится в вопиющем противоречии с опытом (например, для воды).

Видимо, Максвелл вернулся к механической модели для дисперсии в поисках новых более широких аналогий. Такой более широкой аналогией и являются представления, намеченные Максвеллом в экзаменационном вопросе 1869 г. Здесь рассматривается упругая среда эфира с распределенными в ней атомами другой материи, которые могут смещаться из положения равновесия, но притягиваются к нему под действием силы, пропорциональной расстоянию.

Колебания атомов под действием волн в эфире создают дисперсию волн в эфире, которые определяются формулой

$$\eta = c \cdot l^{-\frac{x}{v}} \cos n \left(t - \frac{x}{v} \right),$$

где n — частота колебания волны, v — ее скорость, а l характеризует затухание. Максвелл приводит систему уравнений, описывающих смещение среды η и смещение частиц относительно среды ξ :

$$\rho \frac{\partial^2 \eta}{\partial t^2} - E \frac{\partial^2 \eta}{\partial x^2} = \sigma \left(\rho^2 \xi + R \frac{\partial \xi}{\partial t} \right),$$

$$\rho \frac{\partial^2 \eta}{\partial t^2} - E \frac{\partial^2 \eta}{\partial x^2} = -\sigma \left(\frac{\partial^2 \eta}{\partial t^2} + \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} \right),$$

где ρ , E и σ характеризуют соответственно плотность эфирной среды, ее упругость и плотность атомарной среды, вкрапленной в эфир, и дает результат ее решения:

$$\frac{1}{v^2} \cdot \frac{1}{n^2} = \frac{\rho + \sigma}{E} + \frac{\sigma n^2}{E} \cdot \frac{p^2 - n^2}{(p^2 - n^2)^2 + R^2 n^2},$$

$$\frac{2}{v n} = \frac{\sigma n^2}{E} \cdot \frac{R n}{(p^2 - n^2)^2 + R^2 n^2},$$

приглашая экзаменующегося интерпретировать эти результаты «на языке волновой теории света».

Рэлей в заметке 1899 г., полностью приведя максвелловский «вопрос», замечает, что при $R=0$ из формул Максвелла следует формула аномальной дисперсии

$$\mu^2 = \frac{v_0^2}{v^2} = 1 - \frac{\sigma}{\rho} \cdot \frac{p^2}{p^2 - n^2},$$

полученная Зельмеером только в 1872 г.

В работе 1917 г. Рэлей [6] сравнивает максвелловскую теорию дисперсии с теорией дисперсии Г. Гельмгольца и приходит к выводу, что последняя хуже отражает действительность чем первая, причем единственными отличиями теории Гельмгольца (не считая обозначений) является то, что Гельмголец как сопротивление атома движению, так и возвращающую силу рассматривает не относительно эфирной среды, а относительно абсолютного пространства, что и приводит к ее ошибочности.

Как известно, Рэлей до конца жизни не признавал теории относительности и поэтому последнему факту не придавал принципиального значения. Мы же скажем, что теория дисперсии Максвелла давала правильный результат потому, что она с самого начала строилась на релятивистской основе, что соответствовало релятивистской программе Максвелла, о которой было сказано выше.

Следует указать, что модель эфира, которой пользуется Максвелл в своем выводе, это не абсолютно твердый световой эфир Френеля, а эфир сжимаемый. Последнее следует хотя бы из того, что частицы, вкрапленные в эфир, могут двигаться в нем так же, как и точки самого эфира. Действительно, если поперечные волны в эфире имеют скорость $v = \sqrt{E/\rho}$, то кроме них могут распространяться также и продольные волны со скоростью

$v_l = \sqrt{\left(K + \frac{4}{3}E\right)/\rho}$. Для того чтобы исключить существование продольных волн обычно предполагалось, что коэффициент, характеризующий сжатие, равен бесконечности. Тогда продольное возмущение распространяется с бесконечной скоростью [7].

Сам Максвелл прекрасно понимал, что существование только поперечных волн не следует из его теории, а является добавочным постулатом, введенным, чтобы удовлетворить экспериментальные факты.

В «Динамической теории» он писал: «Наука об электромагнетизме ведет к совершенно таким же заключениям, как и оптика в отношении направления возмущений, которые могут распространяться через поле; обе эти науки утверждают поперечность этих колебаний, и обе дают ту же самую скорость распространения. С другой стороны, обе науки бессильны, когда к ним обращаются с вопросом о подтверждении или отрицании существования продольных колебаний» [8].

Мне хочется заметить, что сложность с продольными волнами исчезает, если обратиться к модели сжимаемого эфира, которая была построена в 1888 г. Кельвиным [9].

Кельвин в этой своей модели эфира допускает, что продольное возмущение вообще отсутствует потому, что его скорость равна нулю. Отсюда следует, что $K + \frac{4}{3}E = 0$ и K является отрицательной величиной.

Кельвин показал, что такая среда не является неустойчивой, если эфир неизменно связан с поверхностью, ограничивающей среду. Эту границу можно рассматривать как граничные условия на бесконечности (так кстати делается в современной квантовой электродинамике). Используя свою модель сжимаемого эфира, Кельвин получил формулу тангенсов Френеля для амплитуды света, поляризованного перпендикулярно плоскости падения (результат, являвшийся камнем преткновения для всех предшествовавших эфирных теорий).

Много следствий было получено на основе модели Кельвина Глэзбруком [10], который, в частности, построил теорию двойного лучепреломления, а также пришел к формулам дисперсии, полностью совпадающим с формулами, полученными Максвеллом в 1869 г.

Модель Кельвина обратила на себя внимание В. Гиббса [11, с. 238], который в 1889 г. показал, что она является полным аналогом электродинамики Максвелла в той форме, в которой он сам ее незадолго до этого представил. Придавая этой аналогии большое значение, Гиббс называет статью Кельвина замечательной и пишет в объяснении такой характеристики, что «давая нам новую интерпретацию уравнений электрической теории, автору новой теории удалось фактически достигнуть такой математической теории физики, которая может быть сравниваема с превосходным принципом дуальности в геометрии» [там же].

Гиббс здесь рассуждает полностью в стиле метода аналогий Максвелла и остается только жалеть, что смерть не дала Максвеллу ни ознакомиться с работами Кельвина и Гиббса, ни развить аналогичные представления самому. Во всяком случае из вышеприведенного видно, что теория дисперсии Максвелла давала начало далеко идущей аналогии.

Модель эфира Кельвина 1888 г. не получила развития как благодаря несоответствию «обычным представлениям идеи о закреплении на границах эфире и идеи об отрицательной сжимаемости среды» [12], а также потому, что ее вытеснила электромагнитная теория света. Следует отметить, что отношение к средам с отрицательной сжимаемостью сейчас изменилось и их рассмотрение для описания соков в растениях приобретает все более широкий характер [13].

Следуя взглядам Гиббса, мы имели бы в электромагнетизме хорошую аналогию для описания таких сред.

ЛИТЕРАТУРА

1. Крылов А. Н. «Математические начала естественной философии» Ньютона (перевод). Собр. тр. АН СССР, 1936.
2. Максвелл Д. К. Материя и движение. М.: ГИЗ, 1924.
3. Rayleigh. The theory of anomalous dispersion.— Phil. Mag., 1899, vol. 48, p. 151.

4. Whittaker E. A. History of the theories of aether and electricity, 1960, p. 266.
5. Максвелл Д. К. Избранные сочинения по теории электромагнитного поля. М.: Гостехтеориздат, 1952, с. 328.
6. Rayleigh. The theory of anomalous dispersion.— Phil. Mag., 1917, vol. 186, p. 496.
7. См. Шустер А. Введение в теоретическую оптику. Л.; М.: ГОНТИ, 1935, с. 248.
8. Максвелл Д. К. Избранные сочинения по теории электромагнитного поля. М.: Гостехтеориздат, 1952, с. 323.
9. Thomson W. On reflection and refraction of light.— Phil. Mag., 1888, vol. 26, p. 541.
10. Glaserbrook M. A. On the application of Sir William Thomson theory of a contractive aether of double refraction, dispersion, metallic reflection and other problems.— Phil. Mag., 1888, vol. 26, p. 521.
11. Gibbs W. A comparison of the electric theory of light and Sir William Thomson's quasilabile aether.— Phil. Mag., 1889, vol. 27.
12. Хвольсон О. Д. Курс физики. М.: ГИЗ, 1923, т. 5, с. 472.
13. Хейворд А. Отрицательные давления в жидкостях: как их заставить служить человеку.— УФН, 1972, т. 108, вып. 2, с. 303.

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие	3
-----------------------	---

I

ЭЛЕКТРОДИНАМИКА МАКСВЕЛЛА

Спасский Б. И. К истории открытия Максвеллом уравнений электромагнитного поля	5
Визгин В. П. Потенциалы и напряженности в теории электромагнитного поля	15
Лежнева О. А. Максвелл и русская физика	27
Филонович С. Р. К истории экспериментального обоснования закона Кулона	40
Кирсанов В. С. Максвелл: создание электромагнитной теории	58
Александрова Н. В. Максвелл: векторы и кватернионы	72
Будлюбаши Б. В. Максвелл и электродинамика Вебера	76
Маркчев Н. Т. Сравнение различных форм системы уравнений Максвелла	84
Болотовский Б. М. Читайте Хевисайда!	96
Сулейманян Г. А. Максвелл и экспериментальное изучение природы носителей электрического тока в металлах	133
Явелов Б. Е., Кипнис А. Я. Максвелл и Ван-дер-Ваальс	140

II

КИНЕТИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ ГАЗОВ И СТАТИСТИЧЕСКАЯ МЕХАНИКА

Кузнецова О. В. Максвелл и границы применимости второго начала термодинамики	158
Шушурин С. Ф. Максвелл и статистический метод в физике	166
Кузнецова О. В. Развитие молекулярно-кинетических и статистических идей Максвелла русскими физиками конца XIX — начала XX в.	177

III

ПЕДАГОГИЧЕСКАЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ МАКСВЕЛЛА

Фабрикант В. А. Некоторые педагогические идеи Д. К. Максвелла	185
Голин Г. М. Максвелл — преподаватель	190
Кудрявцев С. П. Максвелл и Кавендишская лаборатория	193

IV

РАЗВИТИЕ ИДЕИ МАКСВЕЛЛА В СОВРЕМЕННОЙ ФИЗИКЕ

Алексеев И. С. Максвелл Эйнштейна и Максвелл Бора	201
Коноплева Н. П. Максвелл и современные теории поля	207
Кухаренко Ю. А. Необратимость решений уравнений Максвелла и обратимость электродинамики	222
Монастырский М. И. Вихри и монополи в неабелевых уравнениях Максвелла	224
Глебов Л. А. Максвелловская формула дисперсии и релятивистская физика	232

МАКСВЕЛЛ
И РАЗВИТИЕ ФИЗИКИ
XIX—XX веков

Утверждено к печати
Институтом истории
естествознания и техники
АН СССР

Редактор издательства И. М. Столярова
Художник А. А. Лукьяненко
Художественный редактор С. А. Липяк
Технические редакторы
О. М. Гуськова, Т. А. Прусакова
Корректоры В. А. Алешкина, Е. Л. Сысоева

ИБ № 29193

Сдано в набор 19.12.84
Подписано к печати 21.03.85
Т-04235. Формат 60×90^{1/8}
Бумага книжно-журнальная импортная
Гарнитура литературная
Печать высокая
Усл. печ. л. 15,36. Уч.-изд. л. 17,5
Усл. кр. отт. 15,61. Тираж 2550 экз.
Тип. зак. 4277
Цена 1 р. 80 к.

Ордена Трудового Красного Знамени издательство «Наука»
117864 ГСП-7, Москва В-485, Профсоюзная ул., 90.

2-я типография издательства «Наука»
121099, Москва, Г-99, Шубинский пер., 6

УДК 538.3+536.765

Спасский Б. И. К истории открытия Максвеллом уравнений электромагнитного поля.— В кн.: Максвелл и развитие физики XIX—XX веков: Сб. статей.— М.: Наука, 1985.

Делается попытка реконструкции хода мыслей Максвелла, который мог бы привести его к гипотезе о токе смещения, если предположить, что Максвелл, как он сам не раз повторял, следовал взглядам Фарадея на роль индукции и старался перевести известные тогда законы электродинамики на язык Фарадея, т. е. на язык близкодействия. Как известно, Фарадей, будучи сторонником близкодействия, уже подходил к представлению о токе смещения в диэлектриках. Полемизируя с исследователями творчества Максвелла Кемпбеллом, Барком и Мапиро, автор статьи утверждает, что Максвелл решал поставленную задачу методом аналогий, и приводит целый ряд примеров, когда использование наглядных представлений играло положительную роль в развитии физики, особенно при создании новых теорий.

Отмечается, что во времена Максвелла не было экспериментов, которые требовали бы перестройки теорий электромагнитных явлений — все известные тогда электрические и магнитные явления объяснялись теорией дальнего действия. Но картезианские идеи о передаче взаимодействия от точки к точке возрождались в XIX в. не только в оптике, теории сплошных сред и в теплофизике, но и в электродинамике.

Библиогр. 13 назв.

УДК 538.3+536.765

Визгин В. П. Потенциалы и напряженности в теории электромагнитного поля.— В кн.: Максвелл и развитие физики XIX—XX веков: Сб. статей.— М.: Наука, 1985.

На основе анализа первоисточников и работ по истории электродинамики рассмотрена эволюция соотношения между двумя основными характеристиками электромагнитного поля: напряженностями и потенциалами. Выделено три периода в этой истории. Первый связан с трудами М. Фарадея и Д. К. Максвелла, которые приписывали потенциалу фундаментальное физическое значение (аналогом потенциала у Фарадея было понятие электростатического состояния). В течение второго периода, начавшегося работами Г. Герца и О. Хевисайда, главной физической характеристикой поля считались напряженности, потенциалы же рассматривались как чисто вспомогательные величины, не имеющие реального физического значения. И, наконец, с конца 50-х гг. XX в. в связи с разработкой теории калибровочных полей и опытами Ааронова — Бома потенциалы вновь вышли на передний план в качестве основных полевых характеристик.

Библиогр. 26 назв.

УДК 93/99(53) + 536.765

Лежнев О. А. Максвелл и русская физика.— В кн.: Максвелл и развитие физики XIX—XX веков: Сб. статей.— М.: Наука, 1985.

В первой части статьи подытожены результаты исследований автора и других советских историков физики, показана роль русских физиков в экспериментальном доказательстве следствий электродинамики Максвелла, в расширении сферы ее применения в науке и технике.

Во второй части автор прослеживает особенности восприятия русскими физиками дважды происшедшей ломки представлений об электричестве: торжества концепции электромагнитного поля с эфиром в качестве его носителя вместо картины далекодействующих зарядов, а затем крушения эфира и минимого возврата к дальнему действию. Выявляется различие позиций физиков-теоретиков, физиков-экспериментаторов и физиков-электротехников в дискуссиях 30-х годов XX в. В заключении приводятся краткие сведения об изданиях трудов Максвелла в России и СССР и о посвященных ему публикациях.

Библиогр. 25 назв.

УДК 93/99(53)

Филонович С. Р. К истории экспериментального обоснования закона Кулона.— В кн.: Максвелл и развитие физики XIX—XX веков: Сб. статей.— М.: Наука, 1985.

В работе рассмотрена история установления основного закона электростатики — закона взаимодействия неподвижных точечных зарядов. Особое внимание уделено анализу экспериментальных методов подтверждения закона «обратных квадратов». Показана относительная значимость процедур, основанных на непосредственном измерении сил, и «нулевых» методов. В связи с исследованиями Г. Кавендиша и Ш. Кулона обсуждаются некоторые общие проблемы истории физического эксперимента.

Ил. 6. Табл. 2. Библиогр. 18 назв.

Кирсанов В. С. Максвелл: создание электромагнитной теории.— В кн.: Максвелл и развитие физики XIX—XX веков: Сб. статей.— М.: Наука, 1985.

Проводится детальный анализ основных этапов формирования максвелловской теории поля. При этом выделяется роль в исследованиях Максвелла по теории электромагнетизма сыграли аналогии, как методологический прием и инструмент научного исследования. Глубоко изучив «экспериментальные исследования по электричеству» труды Фарадея, Максвелл внес наряду с давно известным током пролонгации еще ток смещения, который возникает в диэлектриках при любом изменении электромагнитного поля. Дальнейший математический анализ привел к выводу, что во всех телах и в вакууме могут образовываться электромагнитные волны, излучаемые возбуждающими их телами, которые распространяются в вакууме со скоростью света, что позволило Максвеллу высказать идею, что сам свет это электромагнитная волна.

Анализ формирования теории поля Максвеллом проводится на фоне основных вех творческой биографии Максвелла, а также обрисовываются особенности личности Максвелла — творца и человека — удивительная физическая интуиция, редкое воображение и способность создавать динамические образы мира.

Табл. 1. Библиогр. 14 назв.

УДК 538.3+536.765

Александрова Н. В. Максвелл: векторы и кватернионы.— В кн.: Максвелл и развитие физики XIX—XX веков: Сб. статей.— М.: Наука, 1985.

В статье показано, что в XIX в. векторное исчисление существовало как часть теории кватернионов — теории гиперкомплексных чисел. Максвелл выделил из этой теории часть, относящуюся к векторам (1873 г.). Так векторное исчисление стало языком и математическим аппаратом электромагнитной теории. Идея по пути, намеченному Максвеллом, Гиббс и Хевисайд развили в 80-е годы свои собственные векторные системы, превратившиеся в современный векторный анализ.

Библиогр. 8 назв.

УДК 538.3+536.765

Булубаш Б. В. Максвелл и электродинамика Вебера.— В кн.: Максвелл и развитие физики XIX—XX веков: Сб. статей.— М.: Наука, 1985.

В статье сделана попытка рассмотреть программы Максвелла и Вебера с учетом общности целей, к которым они стремились. В статье описывается электрический молекулярный световой эфир Вебера, проанализированы его представления о строении вещества и в качестве одного из выводов указывается на неоднозначность решения им дилеммы «близкодействие — далекодействие». Так, далекодействие у Вебера оказывается существенным лишь на малых, молекулярных расстояниях.

Сравнение же веберовской модели эфира с максвелловской тем более оправдано, что и сам Вебер полагал возможным использовать при описании распространения света уравнения Максвелла. В связи с этим в статье анализируются соображения Максвелла по поводу возможного строения эфира. Отмечается близость их представлениям Вебера.

Проведенный в статье анализ может оказаться полезным при историко-физической реконструкции процесса превращения электродинамики из далекодействующей в близкодействующую.

Библиогр. 19 назв.

УДК 538.3+536.765

Маркчев Н. Т. Сравнение различных форм системы уравнений Максвелла.— В кн.: Максвелл и развитие физики XIX—XX веков: Сб. статей.— М.: Наука, 1985.

В статье затрагиваются вопросы истории электродинамики и собственно уравнений Максвелла, охватывающий период с 1854 г. и до наших дней. Проведен сравнительный анализ различных форм системы уравнений Максвелла, данных как самим Д. К. Максвеллом, так и данных, использованных или измененных в работах Г. Герца, О. Хевисайда, А. Эйнштейна, Г. А. Лоренца и современных авторов. Показано, что целесообразно использовать систему из его «Трактата об электричестве и магнетизме» с включением в нее тока конвекции и указанием дополнений, соответствующих идее Д. К. Максвелла о внешних связях электромагнетизма с другими науками. Кроме того, высказывается предположение возможного сравнения взглядов и путей получения уравнений электродинамики движущихся тел Д. К. Максвелла и А. Эйнштейна.

Табл. 1. Библиогр. 18 назв.

УДК 53/99(53)+538.3

Болотовский Б. М. Читайте Хевисайда!— В кн.: Максвелл и развитие физики XIX—XX веков: Сб. статей.— М.: Наука, 1985.

Выдающийся английский физик и математик Оливер Хевисайд (1850—1925) внес большой вклад в развитие электромагнитной теории после Максвелла. Он также является основателем современной теории связи и ему принадлежит ряд важных практических предложений по ее усовершенствованию. В статье рассказывается о жизни и научной деятельности Хевисайда и о некоторых его физических идеях, не получивших должного признания при его жизни.

Илл. 1. Библиогр. 18 назв.

УДК 93/98(53)+536.765

Сулейманян Г. А. Максвелл и экспериментальное изучение природы носителей электрического тока в металлах.— В кн.: Максвелл и развитие физики XIX—XX веков: Сб. статей.— М.: Наука, 1985.

Если носители электрического тока обладают механической инерцией, то при вращении по замкнутому траекториям они обладают вращательным моментом и, следовательно, подвержены действию гироскопических сил. Впервые теоретически эти силы были предсказаны Максвеллом, но техника того времени (1861 г.) была слишком несовершенна для их обнаружения. Впоследствии предсказания Максвелла были подтверждены более совершенными экспериментами. В нашей работе дан краткий обзор рассматриваемого вопроса.

Библиогр. 10 назв.

УДК 538.3+536.765

Явелов Б. Е., Кипнис А. Я. Максвелл и Ван-дер-Ваальс.— В кн.: Максвелл и развитие физики XIX—XX веков: Сб. статей.— М.: Наука, 1985.

Максвелл первым откликнулся в печати на ставшую впоследствии знаменитой докторскую диссертацию Ван-дер-Ваальса, защищенную в 1873 г. в Лейденском университете. Отзыв Максвелла был, хотя и очень доброжелательный, но сугубо критический. Вследствие этого восприятие результатов голландского ученого было в определенной мере задержано. Несмотря на то, что формально критика Максвелла была совершенно правомерна, последующее развитие показало, что значение и плодотворность ван-дер-ваальсовского подхода он все-таки недооценил.

Илл. 2. Библиогр. 27 назв.

УДК 533.7+536.765

Кузнецова О. В. Максвелл и границы применимости второго начала термодинамики.— В кн.: Максвелл и развитие физики XIX—XX веков: Сб. статей.— М.: Наука, 1985.

В статье подчеркивается, что Максвелл воспринимал второе начало термодинамики в стиле установленного им в 1859 г. закона распределения молекул по скоростям и полагал, что оно выражает собой лишь статистическую упорядоченность, возникающую в системе, состоящей из очень большого числа частиц, и не может быть сведено к динамике. Максвелл высказал представление о так называемых демонах Максвелла для того, чтобы «показать», что второй закон термодинамики обладает только статистической закономерностью и имеет свои истоки в экспериментировании с телами, состоящими из огромного числа молекул, и нет причин ожидать, что этот закон был бы справедлив в отношении более тонких экспериментов, которые, как можно вообразить, были бы проделаны с существами, способными «потрогать» отдельные молекулы.

Библиогр. 14 назв.

УДК 533.7+536.765

Шушурин С. Ф. Д. К. Максвелл и статистический метод в физике.— В кн.: Максвелл и развитие физики XIX—XX веков: Сб. статей.— М.: Наука, 1985.

Анализируется введение Максвеллом фундаментального статистического понятия — плотности распределения, которое не только создало современную кинетическую теорию газов и статистическую физику вообще, но было первым введением в физику статистического метода, приложения которого в физике в настоящее время очень широки и разнообразны. Здесь же рассматривается создание Максвеллом общей теории переноса, а также общие принципы статистического равновесия. Даже автор кратко характеризует те разделы физики, в которых в настоящее время используется статистический метод вообще; определяет тип статистического метода, введенного в физику Максвеллом.

Библиогр. 17 назв.

УДК 93/99(53) + 536.765

Кузнецова О. В. Развитие молекулярно-кинетических и статистических идей Максвелла русскими физиками конца XIX — начала XX в. — В кн.: Максвелл и развитие физики XIX—XX веков: Сб. статей. — М.: Наука, 1985.

В статье показано, что русские физики внесли достойный вклад как в разработку чисто теоретических основ молекулярно-кинетической теории теплоты и статистико-вероятностного подхода к термодинамике в духе идей Максвелла и Больцмана, так и в разработку отдельных конкретных вопросов, таких как теория реальных жидкостей и газов, критическое состояние вещества, теория теплового излучения и пр.

Отмечено, что в целом проблема исследования всесторонних связей русских физиков, занимавшихся развитием термодинамики, обоснованием второго начала и статистической физики с ведущими физиками Европы, ждет своего решения. Библиогр. 24 назв.

УДК 37.01+536.765

Фабрикант В. А. Некоторые педагогические идеи Д. К. Максвелла. — В кн.: Максвелл и развитие физики XIX—XX веков: Сб. статей. — М.: Наука, 1985.

Делается ряд утверждений о взглядах Максвелла на преподавание физики. Так Максвелл придерживался принципа проблемного метода обучения, имевшего целью борьбу с «ленной доверчивостью ума», активизацию мышления учащегося. Максвелл полагал крайне эффективным простой учебный эксперимент. Он считал необходимым отражение в элементарном курсе физики еще не решенных научных проблем, например, абсолютная одинаковость атомов одного и того же химического элемента.

Наконец, Максвелл утверждал, что, изучая физику, необходимо читать классиков науки.

Библиогр. 9 назв.

УДК 37.01+536.765

Голин Г. М. Максвелл — преподаватель. — В кн.: Максвелл и развитие физики XIX—XX веков: Сб. статей. — М.: Наука, 1985.

В статье излагается педагогическая деятельность Д. К. Максвелла в университетах Великобритании, анализируются учебники и учебные пособия по физике, написанные великим ученым. Сравниваются учебники Максвелла с ныне действующими учебниками в нашей стране, на основании чего делается вывод, что в преподавании английский физик шел далеко впереди своего времени, а его педагогические идеи остаются современными и сегодня.

Библиогр. 11 назв.

УДК 37.01+536.765

Кудрявцев С. П. Максвелл и Кавендишская лаборатория. — В кн.: Максвелл и развитие физики XIX—XX веков: Сб. статей. — М.: Наука, 1985.

В статье рассматривается деятельность Максвелла как организатора и руководителя Кавендишской лаборатории. Показана его роль в проектировании и устройстве лаборатории и в организации коллективных экспериментальных исследований по физике. Освещаются вопросы, связанные с исследованиями самого Максвелла в лаборатории и его вклада в превращение лаборатории в крупный центр исследований. В статье использованы малоизвестные материалы.

Библиогр. 6 назв.

УДК 93/99(53) + 536.765

Алексеев И. С. Максвелл Эйнштейна и Максвелл Бора. — В кн.: Максвелл и развитие физики XIX—XX веков: Сб. статей. — М.: Наука, 1985.

Сопоставляются оценки Эйнштейном и Бором творчества Максвелла в связи с намеченными ими перспективами развития физики в статьях Эйнштейна и Бора, посвященных 100-летию со дня рождения Максвелла. Если для Бора в Максвелле Эйнштейн полагал достойного продолжателя великого дела Ньютона, то плодотворное изменение реальности из тех, которые физика испытала со времени Ньютона. Для Бора электродинамика Максвелла была эталоном внутреннего совершенства теории. — для Эйнштейна она обладала принципиальным с его точки зрения внутренним дефектом, соединяя в себе представление о непрерывном поле и дискретных частицах.

Показано, что в основе различного восприятия Максвелловского творчества Эйнштейном и Бором лежали и различные философские установки в понимании самого смысла понятия «физическая реальность».

Библиогр. 7 назв.

УДК 519.48+536.765

Коноплева Н. П. Максвелл и современные теории поля. — В кн.: Максвелл и развитие физики XIX—XX веков: Сб. статей. — М.: Наука, 1985.

Анализируются особенности современных калибровочных теорий поля и те черты, которые они унаследовали от электродинамики Максвелла, а также от теории тяготения Эйнштейна. Рассматриваются следующие вопросы: возможность аксиоматического построения физической теории; соотношение между моделями, экспериментом, феноменологическими и фундаментальными теориями; близкое действие и дальное действие, геометрический и алгебраический подходы в физике и роль пространственно-временных представлений; новое представление о симметрии, переход от симметрии положений к симметрии между видами взаимодействия, различных по своей физической природе.

Показано, что калибровочные теории по своей аксиоматической структуре обобщают электродинамику максвелловскую и в этом смысле можно говорить о «максвеллизации» современной теории поля.

Библиогр. 26 назв.

УДК 538.3+536.765

Кухаренко Ю. А. Необратимость решений уравнений Максвелла и обратимость электродинамики. — В кн.: Максвелл и развитие физики XIX—XX веков: Сб. статей. — М.: Наука, 1985.

Показано, что необратимые решения уравнений Максвелла, описываемые западающими потенциалами, возникают на больших временах в результате фазового перемешивания, происходящего в системе с непрерывным спектром. Этот результат позволяет обойтись без привлечения дополнительных постулатов типа условий Зоммерфельда для выделения западающих решений. Показано, что необратимый характер решения уравнений Максвелла не противоречит обратимости электродинамики.

УДК 519.48+536.765

Монастырский М. И. Вихри и монополи в неабелевых уравнениях Максвелла. — В кн.: Максвелл и развитие физики XIX—XX веков: Сб. статей. — М.: Наука, 1985.

Современные теории калибровочных полей можно рассматривать как широкое обобщение уравнений Максвелла с неабелевыми калибровочными группами.

Математическим фундаментом теории калибровочных полей служит топология, в частности теория расслоенных пространств. Ведущую роль топологии в современной физике предвидел сам Максвелл.

В статье дано фрагментарное изложение недавних достижений в теории калибровочных полей. Описаны, важные для приложений в теории слабых и электромагнитных взаимодействий элементарных частиц, классические решения — монополи.

Топологическая точка зрения, проводимая в статье, позволяет прояснить глубокую аналогию, существующую между теорией калибровочных полей и теорией конденсированного состояния.

Рассмотрены аналоги монополь: — вихри и точечные особенности в жидких кристаллах и сверхтекучем ³He.

Библиогр. 5 назв.

УДК 539.378.6+536.765

Глэзов Л. А. Максвелловская формула дисперсии и релятивистская физика. — В кн.: Максвелл и развитие физики XIX—XX веков: Сб. статей. — М.: Наука, 1985.

Приводится идея, что исследовательская программа Максвелла строится из отрицания абсолютного пространства: в конкретном случае вывода формулы дисперсии на основе волновой теории в упругой среде Максвелл стоит на релятивистской позиции. При этом Максвелл использует в своем выводе представление не об абсолютном твердом световом эфире Френеля, но об эфире сжимаемом. Модель сжимаемого эфира, построенная Кельвином в 1888 г., уже после смерти Максвелла разрешает сложность с продольными волнами.

Библиогр. 13 назв.

В ИЗДАТЕЛЬСТВЕ «НАУКА»

ГОТОВИТСЯ К ПЕЧАТИ

ИСТОРИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ.

Вып. 28.

20 л. 2 р. 50 к.

Сборник содержит оригинальные статьи по истории различных разделов теории чисел, алгебры, геометрии, математического анализа от древности до XX в. В сборник включены письма Д. Ф. Егорова к Ф. Клейну, письма Н. Е. Жуковского, Н. Н. Лузина и др., а также русский перевод работы китайского математика Сяхоу Яна.

Издание рассчитано на математиков и историков науки.

ИСТОРИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ.

Вып. 29.

20 л. 2 р. 50 к.

Сборник содержит статьи по истории античной и средневековой математики, а также статьи, относящиеся к различным вопросам математического анализа. В сборник включены также статьи, посвященные творчеству Л. Эйлера, Н. В. Бугаева, П. С. Александрова, В. Я. Буняковского, А. М. Ляпунова и А. Пуанкаре и др.

Издание рассчитано на математиков и историков науки.

ПАМЯТНИКИ НАУКИ И ТЕХНИКИ.

1984.

20 л. 2 р. 40 к.

Сборник является третьим выпуском ежегодника, посвященного изучению памятников науки и техники. В сборнике рассматриваются общие вопросы изучения и сохранения памятников науки и техники, а также приведены описания отдельных памятников (исторических

зданий, научных приборов, отечественного оружия и др.). В особый раздел выделены вопросы, связанные с возникновением и деятельностью музеев науки и техники.

Издание рассчитано на историков науки и техники, музейных работников.

Болотовский Б. М.

ОЛИВЕР ХЕВИСАЙД (1850—1925).

12 л. 90 к.

Книга посвящена жизни и деятельности выдающегося английского физика и математика Оливера Хевисайда, сыгравшего важную роль в развитии классической электромагнитной теории после Максвелла и создавшего два больших раздела математической физики — векторное и операционное исчисление. Хевисайд создал также теорию проводной связи, предсказал существование слоя в верхней атмосфере, отражающего радиоволны («слой Хевисайда»).

Издание рассчитано на широкий круг читателей, интересующихся историей науки.

Для получения книг почтой заказы просим направлять по адресу: 117192, Москва, Мичуринский проспект, 12, магазин «Книга — почтой» Центральной конторы «Академкнига»; 197345 Ленинград, Петрозаводская ул., 7, магазин «Книга — почтой» Северо-Западной конторы «Академкнига» или в ближайший магазин «Академкнига», имеющий отдел «Книга — почтой».

- | | |
|--|---|
| 480091 Алма-Ата, ул. Фурманова, 91/97 («Книга — почтой»); | 196034 Ленинград, В/О, 9 линия, 16; |
| 370005 Баку, ул. Джапаридзе, 13 («Книга — почтой»); | 220012 Минск, Ленинский проспект, 72 («Книга — почтой»); |
| 320093 Днепропетровск, проспект Гагарина, 24 («Книга — почтой»); | 103009 Москва, ул. Горького, 19а; |
| 734001 Душанбе, проспект Ленина, 95 («Книга — почтой»); | 117312 Москва, ул. Вавилова, 55/7; |
| 375002 Ереван, ул. Туманяна, 31; | 630076 Новосибирск, Красный проспект, 51; |
| 664033 Иркутск, ул. Лермонтова, 289; | 630090 Новосибирск, Академгородок, Морской проспект, 22 («Книга — почтой»); |
| 420043 Казань, ул. Достоевского, 53; | 142292 Пушкино, Московская обл. МР, «В», 1; |
| 252030 Киев, ул. Ленина, 42; | 620151 Свердловск, ул. Мамина-Сибиряка, 137 («Книга — почтой»); |
| 252030 Киев, ул. Пирогова, 2; | 700029 Ташкент, ул. Ленина, 73; |
| 252142 Киев, проспект Вернадского, 79; | 700100 Ташкент, ул. Шота Руставели, 43; |
| 252030 Киев, ул. Пирогова, 4 («Книга — почтой»); | 700187 Ташкент, ул. Дружбы народов, 6 («Книга — почтой»); |
| 277012 Кишинев, проспект Ленина, 148 («Книга — почтой»); | 634050 Томск, наб. реки Ушайки, 18; |
| 343900 Краматорск Донецкой обл., ул. Марата, 1; | 450059 Уфа, ул. Р. Зорге, 10 («Книга — почтой»); |
| 660049 Красноярск, проспект Мира, 84; | 450025 Уфа, ул. Коммунистическая, 49; |
| 443002 Куйбышев, проспект Ленина, 2 («Книга — почтой»); | 720001 Фрунзе, бульвар Дзержинского, 42 («Книга — почтой»); |
| 191104 Ленинград, Литерный проспект, 57; | 310078 Харьков, ул. Чернышевского, 8 («Книга — почтой»). |
| 199164 Ленинград, Таможенный пер., 2; | |