

Приложение 2. Кинематика изогнутых трубок

Как было показано¹, изолированное вихревое кольцо кругового сечения с хорошим приближением перемещается со скоростью

$$v = \frac{1}{2} Kc \left[\ln(8/ac) - \frac{1}{4} \right],$$

где c — кривизна кольца, а a — радиус поперечного сечения в предположении, что этот радиус мал по сравнению с радиусом кольца. Направление v совпадает с направлением $x \times c$, где c — векторная кривизна. Вторым членом в скобках можно пренебречь, так как и a , и c крайне малы по сравнению с единицей.

Рассмотрим теперь сечение трубы с кривизной c . Если c достаточно мало, то индуцированная скорость жидкости в этом сечении, происходящая от удаленных частей трубы, будет оказывать пренебрежимо малое действие, так что скорость продвижения будет почти такой же, как и у кругового вихревого кольца той же кривизны. Ради простоты рассмотрим трубы, направленные вдоль оси y с малой кривизной c по отношению к положительной оси x . Эти трубы будут смещаться в направлении отрицательных z со скоростью v . Если добавить к c малое увеличение кривизны Δc также вдоль оси x , то скорость станет

$$v + \Delta v = \frac{1}{2} \kappa (c + \Delta c) \ln [8/a(c + \Delta c)].$$

Если Δc достаточно мало, то можно пренебречь степенями $\Delta c/c$ высшими, чем первая, и разложить правую часть в виде

$$\begin{aligned} v + \Delta v &= \frac{1}{2} \kappa c \ln(8/ac) + \left[\frac{1}{2} \kappa \ln(8/ac) \right] \Delta c = \\ &= v + \alpha' \Delta c, \text{ где } \alpha' = \frac{1}{2} \kappa \ln(8ac). \end{aligned}$$

В нейтральной среде v столь же часто отрицательна, как и положительна, так что макроскопические направляющие эффекты в среднем равны нулю. Кривизна c для различных трубок различна, а также различна для одного и того же элемента трубы в различные моменты времени, так что необходимо воспользоваться средним значением для α' , которое определяется как коэффициент дрейфа α . Если к каждой трубке добавляется кривизна Δc в том же самом направлении, то можно, после взаимного уничтожения членов v , написать

$$\Delta v = \alpha \Delta c.$$

Скорость Δv в направлении $-z$ определяется как дрейф. Поскольку тяга, создаваемая этой скоростью, одинаково направлена для всех трубок, она создает макроскопический направляющий эффект.

¹ H. Lamb. Hydrodynamics, 6th ed., p. 241 (обозначения несколько изменены).

Приложения

Джемс Клерк Максвелл

Наука захватывает нас только тогда, когда, заинтересовавшись жизнью великих исследователей, мы начинаем следить за историей развития их открытий.

Максвелл

Его отец, Джон Клерк, принявший фамилию Максвелл, принадлежал к знатному шотландскому роду Клерков из Неникуика. Среди представителей этого рода были горнопромышленники, купцы, политические деятели, музыканты, поэты, судьи... Членом коллегии адвокатов числился и сэр Джон, но, по его словам, он «питал неприязнь к грязным адвокатским делишкам» и юриспруденцией не занимался. Молодость его прошла в Эдинбурге, бывшем тогда средоточием культурной жизни Шотландии, за что его несколько прозвали «Северными Афинами». Сэр Джон любил путешествовать, вел дневники наблюдений, был отличным металлистом ядра. С необычным для человека его круга интересом следил он за развитием промышленности, за техническими новшествами (особенно в области паровых машин) и даже самставил эксперименты. Так, он пытался сконструировать воздуходувные мехи, дающие постоянный ток воздуха. Он посещал заседания Эдинбургского Королевского общества и опубликовал несколько научных статей на темы прикладного характера. После смерти матери сэр Джон женился на дочери судьи шотландского адмиралтейства Кей, находившегося в дружеских отношениях с самим Вальтером Скоттом. Франсеза была старше мужа на шесть лет. Женщина хозяйственная, предприимчивая, решительная, она была близка ему и по духу. В частности, она разделяла его тягу к деревенской жизни. После того как умерла их маленькая дочь, они решили покинуть Эдинбург. В свое время сэр Джон унаследовал старое поместье Миддлби — на западном побережье, в двух днях езды от столицы. Оно состояло из фермы и деревенской пустоши, каменистую землю покрывали мхи, но Максвеллы верили, что создадут здесь райский уголок. Часть земли обменяли, прикупили новой. Построенный по проекту хозяина двухэтажный, из темно-серого камня дом стоял на возвышенности, около того места, где ручей, вытекавший из торфяника, впадал в Ор. На склоне, у ручья, разбили сад. Так Миддлби превратилось в Гленлэр — «берлога в узкой лопине». Холмистые берега Ора были покрыты лесом; купы деревьев

ов защищали дом от ветров. Милых в восьми находился Солуэй-Ферт — залив Ирландского моря.

13 июня 1831 г. у Максвеллов в Эдинбурге, родился сын Джемс. И, хотя была готова только часть дома, семья переехала в Гленлэр. Через три года мать Джемса, в присущей ей юмористической манере, писала сестре: «Мастер Джемс — счастливейший человек, у него по горло работы с дверями, замками, ключами. Кроме того, он исследует изгороди, течение ручьев, путь воды из пруда в Ор, а затем в море, где плавают корабли... Что касается колокольчиков, то — можно не опасаться — они у нас не заржавеют!..» Льюис Кемпбелл, друг и биограф Максвеля, сообщает, что одним из самых первых воспоминаний Джемса было такое: он лежит возле дома в траве и с изумлением рассматривает солнце. Однажды ему дали поиграть с новой оловянной тарелкой. Выбежав во двор, он торжествующе возвестил: «Это солнце, папа! Я поймал его в оловянную тарелку!» Многие подробности мы узнаем из записных книжек сэра Джона. Многие сцены запечатлены на рисунках Джеммы, старшей кузины Джемса, способной художницы: вот они с отцомдрессируют собаку; вот он плывет, под присмотром взрослых, в бадье по пруду; вот он на деревенской вечеринке, по внимание его привлекают не танцующие, а смычок скрипача... Этот черноволосый и черноглазый мальчик был смел и ловок. Он лазал по деревьям, удил рыбу, бродил по окрестностям. В играх он отличался неистощимой изобретательностью. Практичный отец спадил его особым шестом-ходулей. Мальчик научился владеть им виртуозно: прыгал через изгороди и ручьи, взбирался на обрывы и крыши. Он всегда был чем-нибудь занят. Он очень любил переделывать вещи, улучшать их, это его захватывало, подогревало его фантазию. В непогоду он с кузенами и деревенскими ребятами мастерил игрушки, рисовал, плел из лозы корзинки. Джемс даже научился вышивать и вязать, сам придумывал и рисовал узоры. У него был точный глаз и на редкость умелые руки. Так начинался будущий великий экспериментатор.

Мальчик любил мечтать, был наблюдателем. Природа всегда производила на него глубокое впечатление. «Как? почему? зачем?» — он осаждал всех своими вопросами. Он присматривался к цветам и оттенкам. («Этот камень синий, но откуда известно, что он — синий?») Он наблюдал за повадками животных, переносил с места на место осинные гнезда, мог часами смотреть, как прыгают и плавают лягушки, любил их песни. Чтобы лучше расслышать «тихий голос» лягушат, он брал их в рот. Он испытывал какую-то особую нежность ко всему живому и пронес ее через всю жизнь. Так складывался будущий великий естествоиспытатель.

Вскоре он пристрастился к чтению. Они с матерью читали Библию, Мильтона, распевали псалмы и баллады. Так в нем пробуждался поэт.

Чем старше становился Джемс, тем больше крепла его дружба с отцом. Сэр Джон с удовольствием и с практической основательностью хозяйствничал в своем имении. Сельская жизнь родовитых шотландцев еще отличалась тогда клановой замкнутостью, но отцу Джемса, человеку передовому и общительному, это было не по душе. Он был усерден в делах графства, принимал участие в политическом движении на стороне консерваторов и совершенно был чужд снобизма. Он не прочь был пофилософствовать, любил шутку

и острое словцо. Вещи, сделанные его руками, были грубоваты и долговечны. Его тулоносые башмаки шились деревенским сапожником по его указаниям и из куска кожи, выбранного им самим. Много внимания он уделял воспитанию сына. В летние дни Джемс на своем пони повсюду следовал за фаэтоном отца. Он наблюдал, как груят на телегу снопы, как работают машины и механизмы. Навещая Пеникуик, припадлежавший старшему брату сэра Джона, они с отцом шли на соседнюю бумажную фабрику. Сэр Джон, слушалось, говоривал: «Дико напрасная работа!» Так он осуждал то, что делалось необдуманно и бесцельно. Отцовскую «формулу» Джемс помнил потом всегда. Он говорил, что иметь мудрых и добрых родителей — величайшая удача в жизни.

Характеризуя Англию того времени, Энгельс писал: «60—80 лет тому назад Англия была страной, похожей на всякую другую, с маленькими городами, с незначительной и мало развитой промышленностью, с редким, преимущественно земледельческим населением. Теперь это — страна, непохожая ни на какую другую, со столицей в $2\frac{1}{2}$ миллиона жителей, с огромными фабричными городами, с индустрией, снабжающей своими изделиями весь мир и производящей почти все при помощи чрезвычайно сложных машин, с трудолюбивым, интеллигентным, густым населением, две трети которого заняты в промышленности...»¹

С середины 30-х годов в Англии развернулось чартистское движение — первое массовое, политически оформленное революционное движение английского пролетариата, оказавшее большое влияние на общественное развитие страны.

В 1837 г. на престол взошла 18-летняя Виктория, внучка Георга III, которая царствовала, как некогда Людовик XIV, утомительно долго — до 1901 г. Эпоха «старушки Виктории» (так величали королеву историки) ознаменовалась упадком значения королевской власти, ростом могущества буржуазии, усилением эксплуатации трудовых людей и беспощадным ограблением колоний, прежде всего — Индии.

В декабре 1839 г. Джемс потерял мать. Она мужественно согласилась на тяжелую операцию, но не перенесла ее.

В университет его хотели готовить дома. Был приглашен юноша с хорошими рекомендациями, отсрочивший для этого свои занятия в колледже. Но осенью 1841 г. отец решил определить сына в Эдинбургскую академию — учебное заведение типа классической гимназии. В академию мальчика привели в гленлэрском платье из серого твида, которое сэр Джон считал чрезвычайно «гигиеничным»; на грубых башмаках с квадратными носами блестели модные пряжки. Это было упущение. Новичка, явившегося во второй класс на втором месяце занятий да еще в таком одеянии, сразу же взяли в оборот. Домой он вернулся в синяках, в изорванной одежде. Однако сладить с ним, видимо, было не просто, его сразу прозвали «бешеным». Постепенно он завоевал уважение своей отвагой, неимоверной силой рук и необыкновенной, исполненной какой-то добротой.

Первые школьные годы были для Джемса мучительны. После сельского приволья все в академии было ему постыло. В младших классах сидело по шестьдесят сорванцов, справиться с которыми

¹ К. Маркс и Ф. Энгельс. Сочинения, т. 2. М., 1955, стр. 256.

учителям едва удавалось. Для арифметики у Джемса, говорили, не хватало находчивости. Да и вообще он не мог похвастаться успехами, к занятиям относился скептически, а кроме того много болел. К пятому классу он выучил восемьсот неправильных греческих глаголов и научился сочинять латинские стихи. В письмах к отцу появились и его собственные стихотворные опыты, за которые он вскоре получил приз. Он с увлечением декламировал товарищам Бернса, он полюбил смотреть пьесы Шекспира. Жил он у тетки. Кузина Джеммина, кончавшая художественную школу, давала ему уроки гравирования. Отцу Джемс сообщал не столько о своих учебных делах, сколько о развлечениях, об успехах в плавании, например. «Я плаваю, как наши гленлэрские лягушки!» По Гленлэру он очень скучал. «Как поживают травы, кустарники и деревья? коровы, овцы, лошади, собаки и люди?»

Интерес к учебе у него пробуждался медленно. Известный английский физик Питер Тэт, шедший классом ниже, вспоминал потом, что товарищи считали Максвелла застенчивым и тупым. В свободное время избегая шумных компаний, он читал старинные баллады, Дрейтона, Свифта, рисовал какие-то диаграммы и конструировал механические модели. В пятом классе стали проходить геометрию, и он вдруг увлекся. Он сообщал отцу: «Я сделал тетраэдр, додекаэдр и два других эдра, названия которых еще не знаю». Геометрия словно бы расковала силу его ума. Максвелл становится не просто первым, а самым блестящим учеником академии. Один из его товарищей рассказывает: «Я помню, ... наш учитель трижды заполнял черную доску решением одной сложной задачи по стереометрии; едва он успел закончить, как Максвелл задал вопрос: нельзя ли эту задачу решить геометрическим путем? И показал, как при помощи одной фигуры и нескольких линий немедленно получалось решение».

Скучая без сына, сэр Джон частенько наезжал в Эдинбург. 12 февраля 1842 г. они с Джемсом осматривали новинку — электромагнитную маппину. Они бывали на строящейся железной дороге, в порту... Иногда отец брал сына на заседания Королевского общества. Там во время обсуждения доклада о форме этрусских погребальных урн ученые мужи однажды затронули вопрос — как построить совершенно правильный овал? Джемс заинтересовался задачей и остроумно решил ее. Попутно он придумал простое устройство для вычерчивания овальных кривых и эллипсов посредством куска связанной нити и двух вогнутых в картон (в точках фокусов) булавок; этот способ употребителен и поныне. Своё сочинение Джемс назвал «О черчении овалов и об овалах со многими фокусами». Подростка в куртке немыслимо было выпустить на кафедру перед чопорным ученым собранием. Поэтому работу юного Максвелла представил профессор Форбс. Это произошло 16 апреля 1846 г. Сэр Джон записал в своей памятной книжке: «Он был выслушан с большим вниманием и одобрением». Работа была опубликована в «Трудах» общества.

В то время Максвелл уже всерьез интересовался наукой; особенно занимали его магнетизм и поляризация света. В последнем, пожалуй, повинен Уильям Николь, профессор Эдинбургского университета, изобретатель поляризационной призмы — «николя» (1828). Как-то для Джемса, Джона Кей, взял племянника и Кемпбелла в гости к Николю, который показал им несколько опытов

с поляризованным светом. После того Джемс сконструировал по ляриской и занялся исследованием фигур, получающихся при просвечивании кусков неотожженного стекла и кристаллов. Наиболее интересные фигуры он нарисовал акварелью и послал Николю. Он был щедро вознагражден: ученый подарил ему пару призм собственноручного изготовления. Они Максвеллу долго потом служили.

Своего классического образования он не завершил: осенью 1847 г., по совету Николя, Форбса и других профессоров, он был отдан в Эдинбургский университет. В английских университетах еще жива была традиция предоставлять студентам большую свободу в организации своего обучения. Студенты имели возможность выбирать предметы, следуя собственным склонностям. Но свобода в деле обучения — это одно, второе и — главное — это желание и умение по-деловому ее использовать. Максвелл увлекается опытами по оптике, химии, магнетизму, штудирует книги по механике и физике, много времени проводит в математических размышлениях. Мисс Кей, его тетка, нередко за столом приходилось воскликнуть: «Джемси, ты опять погрузился в математику!» Видя непреодолимую тягу сына к науке, сэр Джон устроил в Гленлэре физико-химическую лабораторию. Теперь, приезжая на каникулы, Джемс не прерывал занятий. В марте 1850 г. он писал одному из друзей: «Я прочел «Лекции» Юнга, «Принципы механики» Уиллиса, «Технику и механику» Мозли, «Теплоту» Диксона, и «Оптику» (*RéPERTOIRE D'OPTIQUE*) Муаньо... У меня имеются кое-какие намерения относительно кручения проволок и стержней, но привести их в исполнение не удастся до каникул; с количественными результатами экспериментов по сжатию стекла, желатина и т. п. дело сделано; далее идут вопросы о связи между оптическими и механическими постоянными, о желательности их определения и т. д., затем висячие мосты, цепные линии, упругие кривые». Максвелл основательно углубился в теорию упругости. В том же году он (на сей раз уже сам!) прочитал перед Королевским обществом свой доклад «О равновесии упругих тел». Он доказал важную в теории упругости и в строительной механике теорему (она стала называться «теоремой Максвелла») и занялся исследованием законов вращения твердого тела. Эту серьезную работу, включая сюда и оптический метод анализа нацрояжений в поляризованном свете, он выполнил на пороге своего 19-летия.

Летом 1850 г. Джемс отправился в Бирмингем навестить друга. Вдогонку отец прислал письмо, содержавшее обширнейшую программу действий. «Ознакомься, если можешь, — писал отец, — с работой оружейников, производством пушек и с их испытаниями, с производством холодного оружия и его испытанием; с папье-маше и лакированием; с серебрением путем цементации и путем накатки; с серебрением электролитическим способом — на заводе Элкингтона; с плавкой и штампованием — на заводе Брайзера, с обточкой и изготовлением чайников из белого металла и т. п.; с производством пуговиц различных сортов, стальных перьев, иголок, булавок и всевозможных мелких предметов, которые очень интересно изготавляются путем разделения труда и при помощи остроумных инструментов; к местной промышленности относится и производство разных сортов стекла, а также и литейное дело всех видов, производство машин, инструментов и приборов (оптических и научных) как грубых, так и тонких». Это письмо свидетельствует не только

о том, что шотландский лейндрорд всерьез и глубоко интересовался техническим прогрессом, но и о том, как высоко он ценил деловые качества сына. Нет сведений, сколь полно сын выполнил поручение отца, но известно, что начал он со стекольного производства и, видимо, не без лично своего к тому интереса...

Он уже бесповоротно решил посвятить себя науке, физике. Потом он скажет: «Мы всегда чувствуем себя увереннее, когда имеем дело с физикой». И даст ей такое определение: «Физика есть тот отдел познания, который изучает господствующий в природе порядок или, другими словами, правильную последовательность событий». Он отчетливо осознал, что принадлежит к тому сорту людей, для которых «момент, энергия, масса не являются просто абстрактным выражением результатов научного исследования. Эти слова имеют для них глубокое значение и волнуют их душу, как воспоминания детства».

Эдинбургский университет его уже не удовлетворял, хотелось вырваться в мир более широкий. Осенью 1850 г. он перевелся в Кембриджский университет, в знаменитый Тринити-колледж, откуда вышли многие английские физики, в том числе Ньютон, и который славился высоким уровнем преподавания математических дисциплин. Англия — страна традиций. В Тринити-колледже сохранился не только прежний дух, но и прежний уклад жизни. Физику постаринке называли натуральной философией, и как самостоятельная наука она не преподавалась. Оптика была частью математики, а некоторые главы теплоты входили в химию. На что тогда нацеливали студентов-натурфилософов? По свидетельству Артура Шустера, им сплошь да рядом винчалось, что, за исключением чисто теоретических работ, пропасти исследователю имя может только усовершенствовать методов измерения; «что все главнейшие факты в природе уже известны, что шансы сделать большое экспериментальное открытие ничтожно малы и что поэтому задача экспериментатора состоит в разрешении споров между соперничающими теориями или в нахождении незначительных остаточных явлений, которые могут добавить более или менее важные подробности к теории». Максвелл к таким советам относился с презрением.

Питер Тэт, перешедший из Эдинбургского университета в Тринити-колледж двумя годами ранее, вспоминает, что в Кембридж Максвелл прибыл с огромным (даже безотносительно к его возрасту) запасом знаний, однако эти знания «находились в состоянии такого беспорядка, что это привело в ужас его руководителя-методиста» У. Гонкинса, пользовавшегося репутацией лучшего репетитора колледжа. Он готовил Максвелла к специальному экзамену по математике и быстро распознал таланты этого, несколько эксцентричного черноволосого шотландца с бледным девичьим лицом и с горячими черными глазами. «Это был самый экстраординарный человек, которого я когда-либо видел,— вспоминал Гонкинс.— Он органически был неспособен думать о физике неверно».

Помимо математики, Максвелл изучает механику, астрономию, физику. В учебных курсах, естественно, излагались господствовавшие тогда физические теории. Но Максвелл не оставляет без внимания и противоположные им учения, проявляя в этом большую самостоятельность. Так, он начал изучать «Экспериментальные исследования по электричеству» Фарадея и был покорен их глубиной и монито. «Я решил,— писал он,— не читать ни одного математи-

ческого труда из этой области, покуда не изучу вполне основательно «Экспериментальных исследований по электричеству». Учение Фарадея не только определило направление деятельности молодого Максвелла, но и привело его вскоре к величайшим открытиям столетия...

Кембридж славился и своей богатой библиотекой. Максвелл много и жадно читает. Читал он быстро, легко схватывая содержание и так же легко переключаясь с предмета на предмет; у него была прекрасная память. Монтер сказал: самые лучшие дарования губятся праздностью. Максвелл отличался прилежанием и работоспособностью. При незаурядном уме это сулило многое. Прочитанные им книги далеко выходят за рамки учебной программы. Исследовал тут и философских, и художественных произведений. Английская литература перекивала тогда расцвет: только что вышла «Ярмарка щеславия» Теккерея, Диккенс опубликовал «Домби и сына» и писал свой восьмой роман — «Давид Копперфильд». Максвелл близко сошелся с наиболее талантливой молодежью и с интересом участвовал в общественной жизни. Он оказался веселым и остроумным собеседником, неистощимым на выдумки, никогда не устававшим от проказ и шуток, проповедником разного рода теорий, подчас казавшихся странными. Необычен и его режим тех лет. Спал он в два приема. Первый сон — от пяти до половины десятого вечера. С десяти до двух ночи он занимался. Затем делал полчасовую разминку — бегал (к неудовольствию тех, у кого чуткий сон) по коридорам и лестницам жилого корпуса. От половины третьего до семи снова спал.

В январе 1854 г. Максвелл держал экзамен, к которому его готовил Гонкинс, и занял второе место, что было блестяще. Кончив университет и получив степень магистра, Максвелл был оставлен в качестве члена Тринити-колледжа для подготовки к профессорскому званию. Он читал лекции по гидравлике и оптике, а в свободное время завершал свои прежние эксперименты по теории цветов. Он выступал как продолжатель теории Юнга, его теория была близка к теории трех основных цветов Гельмгольца. Изучая смешение цветов, Максвелл применил особый волчок, диск которого был разделен на сектора, окраинные в различные цвета («диск Максвелла»). При быстром вращении волчка создавалось впечатление, что цвета смешивались: если диск был закрашен так, как расположены цвета спектра, он казался белым; если одну половину его закрашивали красным, а другую желтым — он казался оранжевым; смешение синего и желтого создавало впечатление зеленого. Различные комбинации давали различные оттенки. Все было просто и убедительно. Несколько позже Максвелл с успехом демонстрировал этот прибор на своих лекциях в Королевском обществе.

В ту пору Максвелл разрабатывал свой метод исследований. Жизненность метода определяется тем, дает ли он возможность ученыму находить новые пути в познании законов природы. Жизненность своего научного метода Максвелл подтвердил мемуаром «О фарадеевых силовых линиях» (1855—1856) — первой из его основных работ по электромагнетизму. Оказалось, что он не только владел оригинальным методом, но был уже вполне сложившимся исследователем — исследователем-философом. Замечательно введение к этой работе: в нем Максвелл изложил свою научную программу — глубоко продуманную, с далеким прицелом. Об этом



Д. К. Максвелл в молодости

введении Людвиг Больцман впоследствии писал: «Оно показывает, как мало обязан он был случайности в своих позднейших открытиях; более того, оно показывает, что он работал по хорошо обдуманному заранее плану. Подобный план грезился, может быть, и другим великим исследователям, но немногие из них сознавали его так ясно и имели достаточно искренности, чтобы заранее разъяснить его так просто».

В 1856 г. Максвелл принял назначение в Абердинский университет на кафедру натурфилософии Маришаль-колледжа. Абердин — шотландский порт на Северном море. Ни в одном университете Англии отдельной кафедры физики еще не было, но «в шотландских университетах,— как отмечал Столетов,— физика несколько ранее получила право гражданства». Кроме того, Максвеллу хотелось быть ближе к отцу, здоровье которого все ухудшалось. Но сэр Джон не дожил ни до переезда сына, ни до своего 60-летия. Это было самое сильное потрясение в жизни Максвелла.

Его лекционная нагрузка в Абердине была небольшой. Помимо чтения лекций, много времени отнимали заботы о доставшемся ему

в наследство Гленлэрэ. За преподавание Максвелл взялся горячо, однако нельзя сказать, что он преуспевал: ни в молодости, ни позже он не был блестящим лектором. Своему приятелю, читавшему проповеди у них в деревне, Максвелл советовал: «Почему бы тебе не дать им этого поменьше?» Но сам таким путем никогда не шел. Он был обаятельный человеком, его лекции были сдобрены особым юмором, в котором была и экспрессивность, и гротеск, и непрямая, с намеками и игрой слов, манера выражать свои мысли. Но едва дело доходило до существа предмета, речь Максвелла становилась точной, ясной, совершенно простой и лишней эмоций. Таким был и стиль его писаний. Однако в его лекциях содержалось столько сложных вещей и до таких глубин любил он докапываться, что многих этим отшугивал. А экзаменовал он строго. В общем, ему трудно было поддерживать мир с теми, кто не возышался над средним уровнем. Зато для тех, кто любил трудности и не боялся работы мысли — лучшего учителя не было.

Весной 1857 г. Максвелл решился наконец заявить о себе Фарадею, своему кумиру. К статье «О фарадеевых силовых линиях», которую он направлял ему, было приложено почтительное письмо. Не избалованный вниманием, маститый учёный был глубоко тронут. «Я не благодарю Вас за то, что Вы сообщили о силовых линиях,— писал он,— ибо Вы это сделали в интересах философской правды и из любви к ней. Но... Ваша работа приятна мне и дает мне большую поддержку...» Фарадея поразила сила таланта 25-летнего своего последователя и то, какой силой была в его руках математика. С этого началась их переписка, так много давшая им обоим.

А следующей весной Максвелл сообщил своей тетке, мисс Кей, что собирается жениться. «Не бойтесь,— шутил он,— она не математик... Но она, разумеется, не станет и помехой для моей математики». Он не ошибся. Напротив того, Кэтрин Мери Дьюар, дочь директора Маришаль-колледжа, ставшая вскоре миссис Максвелл, помогала ему в работе, пока позволяло здоровье. Мемуаристы отмечают, впрочем, что «миссис Максвелл была женщиной трудной»...

Когда Кембриджский университет объявил конкурс на работу об устойчивости колец Сатурна, Максвеллу захотелось попытать счастья. К астрономии у него была давняя любовь. В Гленлэрэ сохранилась своеобразная и явно домашнего изготовления игрушка: карта звездного неба, разнимающаяся на созвездия. На месте звезд (в соответствии с их звездной величиной) были вырезаны разного диаметра отверстия. Если позади ставили свечу, игрушка ожидала. Кроме того, Джемс с отцом сделали солнечные часы, по которым (и это надолго стало обычаем) в доме регулировались все другие часы.

Работа об устойчивости колец Сатурна заняла у Максвелла почти два года (1857—1859). Кольца Сатурна были открыты Галилеем в начале XVII в. и представляли собой удивительную загадку природы: планета казалась окружённой тремя сплошными концентрическими кольцами. Лаплас доказал, что они не могут быть твердыми. «Не жидкое ли они?» — предположил Максвелл. Но в этом случае, как показал математический анализ, они разделились бы на капли. Следовательно, подобная структура может быть устойчивой только в том случае, если она состоит из ряда несвязанных между собой метеоритов. Королевский астроном Эри назвал эссе

Максвелла, изложенное на 68 страницах, одним из замечательнейших приложений математики. (Теоретическое решение Максвелла было со временем подтверждено спектроскопическими исследованиями Белопольского и Килфа.) Молодой ученый, которому была присуждена премия Адамса, «становится лидером математических физиков».

В науке, как и в жизни, все взаимосвязанно. Исследование колец Сатурна пробудило интерес Максвелла к кинетической теории газов. В этой области переплетались такие важнейшие идеи века, как механическая теория теплоты, принцип сохранения энергии, атомистика. С момента своего возникновения кинетическая теория газов опиралась на представления о дискретном строении тел и о хаотическом движении дискретных частиц, составляющих газообразные тела. Углубление в высокую теорию не притянуло живого интереса Максвелла к насущным проблемам техники. В промышленности тогда все шире применялся пар, росло число паровых машин, но неизвестно было, каким законам он подчиняется в их цилиндрах. А с этим, в частности, была связана проблема коэффициента полезного действия. Максвелл называет своих прямых предшественников в деле изучения газовых законов, это — Д. Бернулли, Джоуль, Крениг и Р. Клаузиус. Но до Максвелла, для упрощения математических выкладок, полагали, что частицы (молекулы) газа движутся равномерно, прямолинейно и что их скорости одинаковы. Это допущение Максвелл отверг, как нереальное. Столкновение молекул друг с другом придает им различную скорость. В случае газа, изолированного от воздействия внешних сил, его молекулы распределены по скоростям группами. Невозможно вычислить скорость отдельных молекул газа, но вполне возможно вычислить скорость группы молекул. Как это сделать? Он воспользовался методом теории вероятностей и ввел в кинетическую теорию статистический подход, который потом получил название — *распределение скоростей газовых молекул* («распределение Максвелла») и явился важным этапом в развитии кинетической теории газов. Однако тогда не имелось фактов, доказывающих правильность выводов Максвелла, да и сами представления о молекулах и законах их движения были весьма гипотетическими. Поэтому ученый обращается к своему излюбленному методу механических, или кинетических моделей. Одной из его первых кинетических моделей строения газа было представление о молекулах как об упругих телах конечных размеров (что не расходилось с общепринятыми тогда положениями). Затем Максвелл стал рассматривать молекулы как точечные центры, отталкивающие друг от друга пропорционально 5-й степени расстояния... Прочитав максвелловское «Объяснение динамической теории газов», Клаузиус сказал: «Вот как нужно писать по теории газов!» А Столетов позже констатировал: «В работах Клаузиуса и Максвелла кинетическая теория газов получила высокую степень развития». Впоследствии русский физик Н. Н. Пирогов, сын великого хирурга, распространил закон распределения скоростей на многоатомные газы.

Иногда о Максвелле говорят как об ученом, строившем свои теории при помощи карандаша и бумаги. Это неверно. Никого так не раздражали «холодные и пустые абстракции», как Максвелла. Его главная черта (что проявилось уже в первых работах) — органическое сочетание конкретного и абстрактного, умение мыслить наглядными образами при решении самой отвлеченной задачи,

и отсюда — его стремление к геометрическим методам и кинематическим схемам. В этом он — типичное дитя своего времени, когда одни конструкции быстро сменялись другими, когда конструктивно-кинематические модели находились в центре внимания инженеров и ученых, когда дух классической механики пронизывал не только технику, но и физику. И это не случайно: механика, всесторонне и фундаментально к тому времени разработанная, была в полном смысле слова *точной наукой*. Поэтому физики и стремились свести к ней все физические проблемы, полагая, что, в конечном счете, все может быть объяснено механически. Это хорошо выразил В. Томсон (будущий лорд Кельвин): «...подлинный смысл вопроса — понимаем ли мы данную физическую проблему, определяется тем, можем ли мы сконструировать соответствующую механическую модель?» Максвелл с детства любил механизмы и машины; ставши ученым, он увидел в них еще и механические модели, демонстрировавшие определенные принципы и законы. Естественно поэтому и обратное — его стремление представить вновь найденные принципы и законы в виде механических моделей и схем. Он никогда не ограничивался одной моделью, а давал их, щедро, легко и как бы импровизируя, то несколько, иногда — десятки: выбирайте, мол, ту, которая, по-вашему, наиболее близка к действительной сути явления. Они бывали и примитивны, бывали и грубоваты, но надо помнить, что модели Максвелла — это лишь варианты творческой мысли, наглядное ее отображение; они, предупреждает ученый, «должны пониматься как иллюстративные, а не объясняющие». И в этом — принципиально отличное от других физиков его отношение к механике: он искал в ней лишь внешнее сходство, аналогию, а не разгадку природы изучаемого явления. (Кстати сказать, метод моделей и аналогий получил широкое распространение и в современной науке.)

За четыре абердинских года Максвелл с наилучшей стороны зарекомендовал себя в ученом мире, было самое время перебираться в столицу. В 1860 г. он простился с Абердином, чтобы занять место профессора натурфилософии в Лондонском университете, в Кингс-колледже. Кроме физики, он должен был читать и астрономию. Здесь он наконец встретился с Фарадеем, жившим в здании Королевского института. Фарадей был стар и болен. Он давно жаловался на катастрофическую потерю памяти: «Моя голова так слаба, что я не знаю, правильно ли я пишу слова». Это почти лишало его возможности работать. Однажды после лекции, заметив своего молодого друга в плотном кольце людей, Фарадей воскликнул: «Ха, Максвелл! Вы не можете выбраться?! Если кто и может пробраться сквозь толпу — так это вы, такой специалист по молекулярному движению!..» Фарадей полюбил Максвелла и с интересом следил за его работой. Максвелл завязал знакомства и с другими физиками. «Работа — хорошая вещь, и чтение — тоже, — говорил он, — но лучше всего — друзья!» Он умел распределять время таким образом, что знакомства, встречи, дружеские беседы и развлечения не мешали ему работать. Он говорил: «Человек, вкладывающий в работу всю свою душу, всегда успевает больше...» Он достиг такого состояния интеллекта, когда, по его словам, «даже случайные наши мысли начинают бежать по научному руслу». Работал он легко, как бы играя. И даже когда он действительно играл, развлекался, то и в такие минуты умел думать о вещах серьезных.

В лаборатории он был очень искусным, быстрым; экспериментируя, имел привычку негромко насыщивать.

Переезд в Лондон совпал еще с одним успехом Максвелла-ученого: за исследования по восприятию цветов и по оптике ему была присуждена Румфордовская медаль Королевского общества. Максвеллу шел тридцатый год, талант его был в полном расцвете. В мае 1861 г. на лекции в Королевском институте он продемонстрировал первую в мире цветную фотографию — бант из разноцветных лент на фоне черного бархата. Правда, в современном смысле это еще не было цветной фотографией: цветное изображение давали, проецируясь на экран, три диапозитива (красный, зеленый, синий). Максвелл, признанный глава математической физики, становится «одним из главных авторитетов по цвету»; им опубликовано пять работ, относящихся к этой области (по физиологии цветового зрения, колориметрии, цветовой печати и цветной фотографии). Некоторые из них замечательны по тем экспериментальным приемам, которые в них использованы. Навестивший несколько позже Максвелла Гельмгольц писал жене в Гейдельберг: «Был темный, дождливый день, но я все-таки поехал в Кенсингтон (район Лондона) к профессору Максвеллу. Он показал мне прекрасные приборы, относящиеся к учению о цветах,— области, в которой я сам ранее работал... Он пригласил для меня коллегу, страдающего цветовой слепотой, профессора Поля, над которым мы делали опыты». Максвелл потом скажет: «Чтобы вполне правильно вести научную работу посредством систематических опытов и точных демонстраций, требуется стратегическое искусство...» Сам он, как, быть может, никто тогда, владел таким искусством. Лаборатории в его распоряжении, по существу, не было. Но он жил в окружении приборов, причем дома у него их было даже больше, чем в колледже; одни были изготовлены им самим, другие — по его указаниям. Приборы служили ему еще и чем-то вроде игрушек: он придумывал забавные опыты, развлекался сам и развлекал других. С мыльными пузырями он манипулировал как заправский фокусник. Иаучая смешение цветов, он часами выставлял у окна, заглядывая в отверстие цветового ящика — соседи посчитали его за сумасшедшего. Работы по измерению вязкости газов он проводил в большой мансарде своего дома. Необходимо было поддерживать постоянную температуру; на плите, даже в жару, кипели чайники, из которых внутрь «лаборатории» непрерывно струился пар. Хрупкая миссис Максвелл действовала в качестве истопника.

Устойчивый интерес к практическим вопросам заставлял Максвелла продолжать работы по теории сооружений. Он, кроме того, деятельно участвовал, как член комиссии, в организации работ по определению единицы электрического сопротивления (эталона сопротивления) и по проверке закона Ома. В качестве материала для эталона был выбран сплав серебра и платины. Эта единица была названа омом. Измерениям Максвелл придавал огромное значение и даже в сугубо теоретических своих работах отводил большое место системам единиц, инструментам и методам измерений. Многие физики в точности измерений видели цель, конец работы, для Максвелла это было средство для достижения иной цели. «Я мог бы, — говорит он, — привести примеры из любой отрасли науки, показывающие, как работа на: тщательными измерениями была воз-

награждена открытиями новых областей исследования и развитием новых научных идей».

Лондонский период был для него плодотворным. Одна за другой выходят его работы. Вырос круг друзей, но круг научных проблем остался, по сути, прежним. Он с явным удовольствием продолжал те исследования, которые пачты были в юности. В 1861—1864 гг. он публикует вторую и третью из своих основных работ по электромагнетизму — «О физических линиях сил» и «Динамическую теорию электромагнитного поля». В эти годы Максвелл пришел к основным идеям в молекулярно-кинетической теории и в области электромагнетизма. Эти проблемы не только двигали науку XIX столетия, но сохранили свое значение и поныне.

Работа в Кингс-колледже была более напряженной, чем в Абердине. Девять месяцев в году читались лекции. Кроме того, по вечерам Максвелл читал физику мастеровому люду. Лето он проводил у себя в поместье. В сентябре 1865 г. он перенес тяжелое рожистое воспаление головы; плохим было и здоровье жены. И вот — неожиданно — Максвелл, как некогда его отец, решает променять столицу на Гленлэр. Он отказался от кафедры и, отращивая бороду, зажил как лэрд. Выполнив волю отца, он перестраивает дом, занимается хозяйством, благоустраивает поместье. Он навещает соседей, играет с их детьми (своих у него не было), ездит верхом, совершает длинные прогулки с собакой Тоби. Вечера обычно посвящались чтению вслух, причем предпочтение отдавалось старым авторам — Чосеру, Мильтону, Шекспиру. Но Максвелл отлично был знаком и с современной ему английской литературой, особенно с поэзией. У него был острый критический глаз, тонкое чувство прекрасного, он помнил множество стихов и прозаических отрывков, целые сцены из Шекспира. Его суждения об искусстве были столь же самобытны и глубоки, как и его научные статьи. Он вел большую переписку, изучал теологию, сочинял «каверы» для конкурсных задач по математике, писал стихи. Весной он ездил в Лондон на учевые совещания и на экзамены в Кембридж; в таких случаях он ежедневно писал жене. Летом 1867 г. они совершили путешествие по Италии. Чтобы объясняться с итальянскими физиками, в частности с профессором Моссоти, Максвелл основательно изучил язык (из языков ему почему-то трудно давался только датский). Встретивший его в Италии Кемпбелл пишет, что Максвелл смотрел на собор св. Петра в Риме глазами «сочувствующего гения». В Гленлэр Максвелл львиную долю своего времени отдавал научному творчеству и написал несколько сочинений по математике и физике и две книги — «Теорию теплоты» и «Трактат по электричеству и магнетизму», в которых подытожил и завершил свои основные теоретические исследования.

Теория электромагнетизма имела большую историю и до Максвелла. «Постепенное разгадывание законов электромагнетизма в течение последних полутора веков, — писал У. Брагг, — является одним из самых удивительных достижений науки во все времена. Путь был длинным и трудным, хотя сами по себе основные принципы не трудны».

Изучение электромагнетизма началось в XVIII в. Максвелл отмечает: «Кавендиш, Кулон и Пуассон — основатели точной науки об электричестве и магнетизме». (К ним следовало бы еще причислить и Вольта). В 1819 г. Эрстед открыл действие тока на магнит-

ную стрелку, показав таким образом, что электрический ток создает вокруг себя магнитное поле. До этого не знали, что между электричеством и магнетизмом есть какая-то связь. Ампер установил, что провод с током обладает всеми свойствами магнита и «исследовал математические законы механического взаимодействия между электрическими токами» (Максвелл). Араго открыл способность тока намагничивать железо. Дэни объяснил, почему железные опилки, рассыпанные на листе картона, сквозь который, перпендикулярно к нему, проходит провод с током, располагаются вокруг провода по концентрическим кругам. Взаимодействие электричества и магнетизма таило в себе нечто необыкновенное. Ученый мир был взбудорожен.

Увлечение опытами по электромагнетизму становится модой.

Занялся этими опытами и ассистент Дэви, Майкл Фарадей.

К своим опытам, составившим в науке эпоху, он приступил в 1821 г., но только через десять лет добился успеха — открыл электромагнитную индукцию.

Открытия Фарадея, Ленца, Ома обогатили науку. После изобретения телеграфа Роберт Оуэн писал: «Возможность передавать мысли людей на расстояние 200 тысяч миль в секунду представляет собой самое чудесное открытие в летописи всех народов». Но не было теории, в которой бы математически разрабатывались принципы электродинамики и удобной для практических целей, а жизнь ее требовала. В объяснении притяжения и отталкивания электрических зарядов и магнитных полюсов господствовал так называемый принцип дальнодействия (*actio in distans*). Взаимное притяжение тел, удаленных подчас на огромные расстояния да еще разделенных непроводящей средой, казалось чем-то нереальным. Чтобы как-то найти объяснение, пространство заполнили вещественной средой — эфиром. При этом считалось, что действие и всемирного тяготения, и магнитоэлектрических сил распространяется мгновенно и без участия промежуточной среды. Все тогдашние теории (например, теория Неймана, Вебера, Грасмана и др.) базировались на принципе дальнодействия.

И лишь один Фарадей, отрицавший этот принцип, шел против течения. В теории Фарадея главное внимание было обращено на пространство, которым разделены взаимодействующие заряды или магнитные массы. Молодой Максвелл напишет потом Фарадею: «Вы — первый человек, которому пришла в голову идея о действии тел на расстоянии через посредство окружающей среды». Дж. Дж. Томсон замечает: «Фарадей был глубоко убежден в аксиоме или, если хотите, в догме, что материя не может действовать там, где ее нет». Поэтому существование эфира — упругой, непроводящей среды — он принимал. Через нее-то (быстро, но не мгновенно) и распространяется электрическое действие — последовательно от точки к точке — так что имеет место *близкодействие*. Пространство, участвующее в передаче электрического действия, Фарадей назвал электрическим полем; оно пронизано потоками электрических и магнитных сил — силовых линий. Силовые линии окружают электрические заряды и магнитные полюсы. «Фарадей,— писал Максвелл,— своим умным глазом увидел силовые линии, пересекающие пространство...» Они сделали это пространство чем-то живым и вполне реальным. Фарадей считал, что понятие о силовых линиях

должно раскрыть загадку природы взаимодействия магнетизма и электричества.

Теория Фарадея, однако, не была проста. Гельмгольц, например, вспоминает, как он «часами просиживал, застрявши на описание силовых линий, их числа и напряжения...» Фарадей не владел математическим методом и не делал поэтому попыток им воспользоваться. Он считал, что самые сложные вопросы можно изложить просто, не прибегая к «языку иероглифов». (Эйнштейн потом скажет о нем: «ум, который никогда не поглязал в формулах»). И что же получилось? В то время как теории адептов дальнодействия были блестяще математически обоснованы, гениальные фарадеевы «Экспериментальные исследования по электричеству», изложенные на языке «житейской логики», казались чем-то прикладным и пребывали вне «высокой науки». Открытия Фарадея использовались на практике очень широко, но к ним, однако же, относились свысока, иронически сомневались — а можно ли вообще под его теорию подвести математическую базу? Роберт Милликэн писал: «Когда Фарадей подтвердил свои гениальные физические идеи гениальнейшими открытиями в области электромагнетизма, он этим не завоевал своим идеям даже минимального признания. Формалисты школы Ампера — Вебера, подобно современным формалистам школы Маха — Авенариуса, с тайным, а иногда и явным преарением смотрели на «грубые материальные» силовые линии и трубы, порожденные плебейской фантазией переплетчика и лабораторного сторожа Фарадея». Вот почему молодой Максвелл имел все основания заявить: «Современное состояние учения об электричестве представляется особенно неблагоприятным для теоретической разработки».

В этот решающий момент Максвелл и начал сражение за теорию Фарадея. Что же он сделал? Образно Милликэн определил это так: «облек плебейски обнаженное тело фарадеевских представлений в аристократические одежды математики». Известный советский физик Т. П. Кравец это же самое выразил в других словах: «Если мы теперь освоились с системой воззрений Фарадея, если его электромагнитное поле стало одним из наших основных знаний, если его система превратилась в стройную теорию и получила адекватное математическое выражение, то это заслуга Максвелла и только Максвелла».

В искусных руках Максвелла математика оказалась могучим средством. Раньше других это понял Фарадей. Прочитав присланную ему статью «О фарадеевых силовых линиях», великий физик в марте 1857 г. писал Максвеллу: «Сначала я даже испугался, когда увидел такую математическую силу, примененную к вопросу, но потом изумился, видя, что вопрос выдерживает это столь хорошо». Для Максвелла математика никогда не была самоцелью, и не наслаждения он искал в математических тонкостях, а орудие познания. «Насколько возможно,— писал он,— я буду избегать вопросов, которые хотя и могут явиться предметом полезных упражнений для математиков, но не в состоянии расширить наших научных знаний». Вместе с тем Максвелл безоговорочно берет под защиту фарадеевский метод: «Может быть, для науки является счастливым обстоятельством то, что Фарадей не был собственно математиком, хотя он был в совершенстве знаком с понятиями пространства, времени и силы. Поэтому он не пытался углубляться в

интересные, но чисто математические исследования, которых требовали его открытия. Он был далек от того, чтобы облечь свои результаты в математические формулы, либо в те, которые одобрялись современными ему математиками, либо в те, которые могли дать основание новым начинаниям. Благодаря этому он получил досуг, который требовался ему для работы, соответствующей его духовному направлению, смог согласовать идеи с открытыми им фактами и создать если не технический, то естественный язык для выражения своих результатов».

Максвелл решительно опровергает версию о якобы «антиматематичности фарадеевского мышления». Он писал: «...по мере того, как я подвигался вперед в изучении Фарадея, 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...» Более того, говорит Максвелл: «Способ, который Фарадей использовал для своих силовых линий при координировании явлений электромагнитной индукции, показывает, что он был математиком высокого порядка и таким, у которого математики будущего смогут перенять ценные и плодотворные методы». Он, писал Максвелл, «сообщил этой концепции силовых линий такую ясность и точность, каковые математикам удалось сообщить своим формулам».

«Трактат об электричестве и магнетизме» (*Treatise on electricity and magnetism*) разделен Максвеллом на два тома, а каждый том — на две части; в первом томе — электростатика и электрический ток, во втором — магнетизм и электромагнетизм.

По характеру мышления Максвелл был геометром, поэтому ему была близка геометрическая модель Фарадея, который оперировал с электрическими и магнитными силовыми линиями. В работах В. Томсона и Гельмгольца получила завершение гидродинамическая модель трубок. Между этими двумя моделями Максвелл усматривал аналогию. Следя, с другой стороны, по пути Ома, использовавшего гидродинамические образы при установлении законов тока, Максвелл перенес эти образы в свое учение об электромагнетизме.

Еще в «Динамической теории поля» он писал: «Теория, которую я предлагаю, 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». Свою задачу Максвелл видит в том, чтобы объяснить электромагнитные явления «при помощи механического действия, передаваемого от одного тела к другому при посредстве среды, занимающей пространство между этими телами». Это был путь, указанный Фарадеем. Сосредоточив внимание на новом объекте — электромагнитном поле, Максвелл вывел электродинамику на единственно верный путь.

Еще в 20-х годах было известно, что магнитное поле возникает вокруг проводника, по которому проходит электрический ток («ток

проводимости», по терминологии Максвелла). В его гипотезе утверждалось, что магнитное поле возникает и при отсутствии тока проводимости, если электрическое поле меняется во времени. Тем самым Максвелл утверждал, что существует явление, обратное явлению электромагнитной индукции и названное им «магнитоэлектрической индукцией». Если электрическое поле меняется не в пустоте, а в некой диэлектрической среде, то изменение это вызывает смещение (т. е. движение) зарядов — называемый «ток смещения». Идея тока смещения — центральная идея электромагнитной теории Максвелла. Анри Пуанкаре отмечал потом с изумлением: «Все опыты того времени, казалось, противоречили этому, так как токи наблюдались исключительно в проводниках. Как мог Максвелл примирить свою смелую гипотезу с фактом так прочно установленным?». На это можно ответить словами репетитора Гопкинса: «Он органически был неспособен думать о физике неверно».

В мемуаре «Динамическая теория поля» (Джинс считал эту работу Максвелла «наиболее важной и имеющей наибольшее влияние... из всего им написанного») дана знаменитая электродинамическая система уравнений, в которой нашло отражение все то, что было тогда известно из теории электромагнетизма: 1-е уравнение выражает электромагнитную индукцию Фарадея; 2-е — магнитоэлектрическую индукцию, открытую Максвеллом и основанную на представлениях о токах смещения; 3-е — закон сохранения количества электричества, а 4-е — вихревой характер магнитного поля. (Это, в частности, дало повод Энгельсу заметить: «...вихри старого Декарта снова находят почетное место во всех новых областях знания»¹).

Свою роль в развитии учения Фарадея Максвелл оценивал чрезвычайно скромно: «Я только облек идеи Фарадея в математическую форму». Работы Максвелла развеяли миф о «нематематичности» теории Фарадея. Но возник другой миф — что теория Максвелла якобы не физическая теория, а исключительно математическая. Теперь вряд ли надо опровергать, что это не так, что теория Максвелла — глубоко физическая теория, как не требуется доказывать и то, что Максвелл не только «пересказал» идеи Фарадея на языке математики, не только объяснил все известные в ту пору электромагнитные процессы, но и открыл для науки электромагнитное поле, представление о котором вскоре вытеснило понятие об эфире и — под именем «теория поля» — стало одной из основ современной физики. Пуанкаре считал теорию Максвелла вершиной математической физики. «Самым увлекательным предметом во времена моего учения была теория Максвелла,— вспоминает Эйнштейн.— Переход от сил дальнодействия к полям, как основным величинам, делал эту теорию революционной».

Это не все. Анализируя свои уравнения, Максвелл установил, что должны существовать импульсы, или волны, которые распространяются в пространстве как свободные поля (это предполагал и Фарадей). Вычислив их скорость, Максвелл получил 186 тысяч миль в секунду, т. е. скорость этих волн равнялась скорости света. И Максвелл говорит: «...мы едва ли можем отказаться от вывода, что свет состоит из поперечных колебаний той же самой среды, ко-

¹ Ф. Энгельс. Диалектика природы. М., 1952, стр. 88.

торая суть причина электрических и магнитных явлений». К такому же выводу он пришел и с другой стороны — разрабатывая свою гипотезу о токе смешения. Все это позволило ему уверенно заявить: «...свет есть электромагнитное возмущение в непроводящей среде», т. с. свет — это разновидность электромагнитных волн. Это мы находим в той части второго тома «Трактата», которая озаглавлена «Электромагнитная теория света». Так, по меткому замечанию Луи де Бройля, Максвелл «сделал всю оптику частной главой электромагнетизма». Здесь же содержится и еще один замечательный вывод: «В среде, в которой распространяется волна, появляется в направлении ее распространения давящая сила, которая во всякой точке численно равна количеству находящейся там энергии, отнесеной к единице объема». И далее: «Плоское тело, подвергающееся действию солнечного света, будет испытывать это давление только на своей освещенной стороне и, следовательно, будет отталкиваться от той стороны, на которую падает свет». Максвелл подсчитывает и величину этого давления. П. Н. Лебедев писал потом: «Максвелл вычислил в 1873 г., что при ясном небе, в полдень давление солнечных лучей на поверхность в 4 м^2 едва достигает величины тысячной доли грамма». Как тут не вспомнить восклицание маленького мальчика Джемса Максвелла, которое стало, можно сказать, пророческим: «Это солнце, папа! Я поймал его в оловянную тарелку!».

Сын поэтической Шотландии, Максвелл в душе всегда был поэтом. Это сказалось не только в том, что он всю жизнь писал стихи; глубокой поэтичностью отличается и его научное творчество. Математика же окрыляла его мысль, полную «самобытной силы».

Гению удается понять и четко сформулировать то, что ранее, подчас в течение долгих веков, лишь смутно угадывалось. О существовании светового давления говорил еще Кеплер. Ломоносов, поддерживавший волновую теорию света Гюйгенса, полагал, что между светом и электричеством имеется некая связь. Эйлер считал свет волнами в эфире. К началу XIX в. теория оптических явлений была уже основательно разработана. Но это была механическая теория, и тот общепризнанный факт, что световые волны являются волнами почеречными, поставил ее перед большими трудностями. Теория Максвелла, сведя теорию света к электромагнитным волнам, вывела ее тем самым из тупика. Это был замечательный синтез физики второй половины XIX столетия.

Мы помним: в своих исследованиях (в том числе и в исследованиях по электричеству) Максвелл отталкивался от механики. Он, например, писал: «Энергия электромагнитных явлений есть механическая энергия» (сегодня мы говорим «эквивалентна»). «То обстоятельство,— замечает Макс Планк,— что первоначально Максвелл вывел свои уравнения с помощью механических представлений, не изменяет существа дела». Больцман писал: «...этот цикл исследований, в котором Максвелл впервые пришел к своим уравнениям, принадлежит к наиболее интересному, что только знает история физики, и именно как раз по причине своей оригинальности, по причине отличия его метода от всех применявшимся ранее и позднее, а также вследствие той скромной простоты, с которой Максвелл показывает, с каким трудом он постепенно продвигался вперед и достиг наиболее абстрактной и наиболее своеобразной

теории, которую только знает физика, пользуясь совершенно специальными и конкретными представлениями, связанными с трибуальными задачами обычной механики».

В «Эволюции физики» А. Эйнштейна и Л. Инфельда значение уравнений Максвелла определено так: «Их простая форма скрывает глубину, обнаруживаемую только при тщательном изучении. Формулировка этих уравнений является самым важным событием со временем Ньютона не только вследствие ценности их содержания, но и потому, что они дают образец нового типа законов».

Опираясь на механику, Максвелл пришел к тому, что глубже, чем законы механики, вскрывало взаимосвязь явлений природы, — к законам электромагнетизма, а это был уже новый метод познания. Пропицательный Больцман не ошибся, утверждая, что Максвелл «был столь же крупным творцом в теории познания, как и в области теоретической физики». Дж. Бернал в книге «Наука и общество» отмечает, кроме того, что «уравнения Максвелла составили теоретическую базу будущего электромашиностроения, представлявшего собой сложную взаимозависимость теории и практики». Максвелл понимал значение разрабатываемой им области: «...мене представляется,— писал он,— что изучение электромагнетизма во всех его проявлениях как средства движения науки вперед сейчас приобрело первостепенную важность». Эти слова актуальны по сей день.

25 августа 1867 г. умер Фарадей. Начиная несколькими годами позже, в «Nature» с Фарадея серию «Портреты выдающихся ученых», Максвелл писал: «Мы... рассматриваем Фарадея как наиболее полезный и одновременно наиболее благородный тип ученого. Тот факт, что Фарадей существовал, делает более великой и сильной всю нацию, и нация была бы еще более великой и сильной, если бы среди нас было бы больше Фарадеев». Лучшим памятником Фарадею мог быть только «Трактат». И Максвелл работает над ним с еще большим рвением.

«Трактат» — это вершина его научного творчества и вместе с тем это настоящая энциклопедия электромагнетизма, где обобщены результаты труда нескольких поколений ученых. Электромагнитной теории Максвелл отдал половину жизни, а «Трактату» — около восьми лет. Он вышел в 1873 г. Максвелл кончал его уже в Кембридже, куда переехал в 1871 г. Старинный друг Максвелла профессор Форбс убеждал его стать директором колледжа университета в Сент-Эндрю, но Максвелл не хотел об этом и слушать. В это время в Кембридже была учреждена кафедра экспериментальной физики. В. Томсон, имевший кафедру в Глазго, отказался ее возглавить. Тогда предложили Максвеллу. По настоянию друзей-ученых он, не без колебаний, все-таки согласился. Вместе с кафедрой он принял и лабораторию, только начатую строительством. Формальное назначение состоялось 8 марта 1871 г., в октябре Максвелл прочел вступительную лекцию. Тогда ходила студенческая шутка, что Кембридж-де «утратил связь с большими научными движениями, проходившими... вне его стен». В своей лекции Максвелл говорил: «Кембриджский университет... он с большей или меньшей быстрой приспособляется к требованиям времени, недавно ввел курс экспериментальной физики. Курс этот, требуя поддержания способностей к вниманию и анализу, ...требует также упражнения наших чувств в наблюдении и наших рук в общении с приборами.

Привычные принадлежности — перо, чернила и бумага — не будут уже достаточны, и нам потребуется большее пространство, чем пространство кафедры, и большая площадь, чем поверхность доски».

Максвелл на собственном примере убедился, как трудно ученым без лаборатории. Будучи одним из самых дальновидных людей своего времени, он понимал, что основа дальнейшего развития физики, будущее физики — это эксперимент. Только сознание этого и вынудило его взять на себя бремя по организации новой лаборатории. В печати потом не упускали случая отметить, что лаборатория-де «обязана своим существованием щедрости герцога Девонширского, лорда-канцлера университета». Однако немало вложил в нее личных средств и Максвелл, не говоря уже о времени и нервах. Она строилась не только под его наблюдением, но и по его указаниям. Он вникал во все детали и все старался предусмотреть. Лаборатория была приспособлена как для научной работы, так и для лекционных демонстраций. Первоначально она называлась «Девонширской», потом была переименована в «Кавендишскую» — в честь замечательного английского ученого конца XVIII в. Генри Кавендиша, которому герцог, кстати сказать, доводился внучатым племянником.

Дж. Дж. Томсон, уже на склоне дней, вспоминал, что в Англии 60—70-х годов физических лабораторий как таковых не было. Джоуль, например, свои замечательные опыты проводил у себя дома в Манчестере. В. Томсону лабораторией служила клетушка по соседству с угольным подвалом. Стокс в Кембриджеставил оптические эксперименты в тех же условиях, что и Ньютона полтораста лет до него. Но к 70-м годам XIX в. обстановка менялась. А. Г. Столетов отмечает: «С тех пор, как открыт спектральный анализ и настало новое движение в электротехнике, на физику особенно не жалеют денег, как уже издавна не жалели на химию и астрономию». Физические открытия остро были нужны промышленности. Конкурентная борьба требовала от науки новых темпов развития, толкала на поиски новых форм организации труда ученых. Ученых-одиночек с их примитивными домашними лабораториями заменили исследовательские институты и крупные, богато оснащенные лаборатории, во главе которых стояли лучшие физики. Все увеличивался поток «пожертвований», идущих на строительство лабораторий. Появлялись научные школы. В 1869 г. вышло руководство лабораторных работ Кольрауша. Лабораторные занятия начали вводиться во всех университетах. Крупные лаборатории возникают в Гейдельберге (1863), Вене, Париже (1867), Оксфорде, Страсбурге...

Открытие Кавендишской лаборатории состоялось 16 июня 1874 г. Через пять дней газета «Московские ведомости» напечатала статью молодого русского физика Столетова, очевидца этого события. «Сегодня великий день в классическом Кембридже. Люди, кебы, колокола — все в необычайном движении,— писал Столетов.— Праздновалось открытие одного из учреждений, еще редких в Европе, но размножающихся с каждым годом». Далее говорилось: «Едва ли не самая роскошная и комфортабельная из существующих, кембриджская физическая лаборатория, вверенная одному из первоклассных физиков нашего времени, профессору Джемсу Клерку Максвеллу, без сомнения будет играть видную роль и в истории



Кавендишская лаборатория

физики, и в истории английских университетов». Столетов, мы знаем, не ошибся в своих предположениях.

Далее следует подробное описание новой лаборатории. «План дома представляет вид наугольника, т. е. двух удлиненных частей, смыкающихся под прямым углом. ...Нижний этаж лаборатории содержит в себе ряд комнат для работ, требующих полной неподвижности снарядов, каковы измерения длины, времени и массы, а также некоторые измерения из области электричества, магнетизма и теплоты. Магнитная комната составляет северо-западный конец наугольника, и на значительное расстояние от нее... устранены железо и сталь. Комната для весов освещается двумя широкими окнами; смежная комната, назначенная для теплоты, сообщается с нею помощью подъемного окошка, позволяющего издали наблюдать в трубу термометры и другие снаряды, которым мешало бы близкое присутствие наблюдателя. Обширная кладовая (store-room), мастерская и комната для большой гальванической батареи составляют остальную часть нижнего этажа.

«Второй этаж (first floor) содержит обширную аудиторию, комнату для приготовления лекционных опытов (preparation room), большое помещение для аппаратов, огромную рабочую комнату и комнату профессора. Лекционный стол, разделяющий аудиторию во всю ширину ее на две части, покоится на каменной стене, идущей от грунта, и представляет совершенно неподвижное помещение, где можно пользоваться даже самыми чувствительными к малейшим сотрясениям снарядами. Все рабочие столы в доме почти в такой же мере удовлетворяют этому условию неподвижности, столь необходимому для многих физических снарядов. Столы покоются не на полу, а на особых балках, независимых от пола и укрепленных в капитальных стенах здания. ... Другое важное удобство представляет обилие подъемных дверок (trap doors) во всех полах; с помощью их можно делать сообщение между всеми этажами дома, проводить из одного этажа в другой проволоки батарей, нити привеса маятников, акустические трубы и т. п. ...

«Верхний этаж вмещает комнаты для акустики, лучистой теплоты, оптики и электричества. Особая зала назначена для вычисления и графической редукции наблюдений; имеется также темная комната для фотографических работ. В комнате для электричества необходимая сухость воздуха будет искусственно восстанавливаться, по мысли Клерка, особым снарядом, состоящим из фланелевой простины, нагреваемой с одной стороны и врачающейся наподобие телеграфной ленты. Электричество большой машины, помещенной в этой комнате, проводится системой проволок в аудиторию и рабочую залу.

«Наконец, электрическая комната, а равно и аудитория металлически сообщены с металлическим шестом, водруженным на кровле здания,— коллектором атмосферного электричества. Наблюдатель, помещенный в электрической комнате или в аудитории, может в любое время измерять напряжение (потенциал) атмосферного электричества.

«Здание отопляется горячей водой с помощью системы чугунных (в магнитном отделении — медных) труб. Нечего и говорить, что все комнаты обильно и удобно снабжены водой и газом. Аудитория освещена двумя газовыми люстрами, помещенными на самом верху комнаты; газ регулируется с лекционного стола и может быть мгновенно зажжен помостью небольшого гальванического снаряда. Окна аудитории закрываются черными ставнями посредством системы зубчаток, управляемой рукояткой. В одну минуту можно погрузить аудиторию в абсолютную темноту, в одну секунду — осветить ее газом или электричеством».

Не только восхищение, но и зависть сквозит в этом описании. И не без умысла поместил Столетов статью в московской газете! Русские физики тоже мечтали о лабораториях. Столетов надеялся привлечь к этому внимание общественности и тем помочь делу. Однако мечты долго еще оставались мечтами. В 1883 г. Столетов напишет статью «Физические лаборатории у нас и за границей», где будет горько сетовать: «Нет во всей России ни одного здания, которое было бы построено собственно для физики...» И далее: «Вот главная причина почему физика «не может у нас идти быстро», — еще диво, если хоть как-нибудь идет».

Кавендишская лаборатория — питомник учеников и последователей Максвелла — со временем стала прославленным научным уч-

реждением Англии. Стоять во главе ее считалось и считается большой честью. После Максвелла ее возглавляли Рэлей, Дж. Дж. Томсон, Резерфорд, Брэгг-сын — ученые с мировым именем. Здесь, например, были заложены основы для развития атомной физики. Однако результаты первых лет деятельности лаборатории были незначительны, на что имелись свои причины. Построив такую лабораторию, как Кавендишскую, надо было круто менять всю кембриджскую систему обучения, что в консервативной Англии совсем не просто. Упор делался на математику и на теоретическое изучение физики, а для овладения экспериментальным искусством оставалось мало времени. К тому же некоторые профессора стремились этому препятствовать. Артур Шустер, обучавшийся в ту пору у Максвелла, рассказывает о таком анекдотическом случае. «Максвелл, имевший врожденное стремление видеть собственными глазами все, что можно видеть, был очень взволнован, когда ему удалось показать в вырезанной и отшлифованной им пластинке двоякокрепеломляющего кристалла коническую рефракцию. Этот опыт был труден, и обрадованный Максвелл, встретив одного из преподавателей математики, Тодгентера, спросил его: «Хотите видеть коническую рефракцию?» — «Нет,— отвечал профессор,— я ее преподавал всю свою жизнь и вовсе не хочу, чтобы все мои представления перевернулись, когда я ее увижу». Тодгентер был образованным человеком и талантливым математиком, но это не мешало ему неприязненно относиться даже к попыткам вводить лекционные демонстрации. Студент, говорил он, «должен доверять утверждениям своего учителя — вероятно, проповедника зрелых знаний, человека признанных способностей и безупречного характера...».

И все же влияние лаборатории и лично Максвелла на кембриджскую мысль постепенно росло. Росло и значение лаборатории. Но первые годы все держалось главным образом на энтузиазме сотрудников и на их вере, что положение должно измениться. Штат лаборатории состоял тогда из 5—6 человек. Шустер вспоминает: «Мы сами должны были заряжать наши батареи и подучиваться стеклодувному искусству и обычайенным приемам работы в мастерской, так как ближе Лондона механика не было» (а это — около полусотни миль от Кембриджа).

Сотрудники лаборатории, как, впрочем, и все те, кто имел дело с Максвеллом, сохранили воспоминание об его «интеллектуальном внимании и обаятельности обхождения». Всегда он был абсолютно искренен; простота и мягкость сочетались в нем с большой проницательностью, активность — со спокойствием. Всякий мог его критиковать — он воспринимал это с благодарностью, поскольку не был ни обидчив, ни себялюбив и даже в молодости никогда не стремился к славе. Но он вовсе не был каким-то ангелом, и многие побаивались его утонченного сарказма.

Максвелл, рассказывает Шустер, если он был здоров, «ежедневно посещал лабораторию и обходил помещения, в которых производились работы. Он расспрашивал о ходе опытов, но обыкновенно больше говорил о том, что занимало в ту минуту его мысли, так как он всегда был до такой степени поглощен собственными идеями, что не мог сразу переключиться на новый предмет. Случалось, он ничего не отвечал на обращенный к нему вопрос, заставляя сомневаться, слышал ли он его, но на следующий день он обыкновенно начинал свой разговор так: «Кстати, вы вчера задали мне вопрос,

я подумал о нем...» Затем следовал глубоко обдуманный, побуждающий к исследованию ответ. Тем, кто вступал с Максвеллом в отношения, запомнились его тонкие и остроумные замечания, придававшие такую прелесть его беседе. В то время, насколько я помню, мысли его были особенно заняты тем, что теперь называется равномерным распределением энергии. Работы Больцмана были только что опубликованы, и Максвелл, казалось, с ними соглашался, хотя и с некоторым колебанием: он не видел, как далеко они могут за- нести...»

Одетый скорее удобно, чем элегантно, среднего роста, плотный, Максвелл напоминал сельского джентльмена с севера Англии. Его редко видели гуляющим без собаки, а то и двух — Тоби и Гуни. С Тоби он часто появлялся в лаборатории. Казалось, он зашел сюда случайно, посреди прогулки или что он создает видимость этой случайности. Но было не так: одно время Тоби активно участвовал в опытах. Он ориентировался в лаборатории, как у себя дома и был знаком с действием некоторых аппаратов. Электрические разряды, например, всегда вызывали у него беспокойство. Его то натирали кошачьей шкуркой, усадив на изолирующую подставку, то пропускали по нему ток от машины. При этом, сидя у ног хозяина, он лишь тихонько рычал, словно это помогало ему сохранить «душевное равновесие». В конце концов Максвелл сказал: «Лучше живая собака, чем мертвый лев!» и прекратил опыты над своим любимцем.

Немало времени у Максвеля уходило на участие в делах по руководству университетом. Как член комиссии по подготовке закона об экзаменах, он старался убедить своих коллег, что научные занятия в университете должны вестись в тесном союзе с другими научными учреждениями, что в работы по математике необходимо включать и задачи из разных отделов физики, что естественникам — для широты развития — следует «поддерживать живую связь с гуманитарными курсами Кембриджа». Обеспокоенный состоянием английской науки, Максвелл писал, что растет число профессоров и студентов, увеличивается количество учебников и популярных книг, а «творческая исследовательская работа — источник благосостояния нации — падает. Польза, которую ученый, как таковой, приносит нации, измеряется количеством новых знаний, которым он ее обогащает ... нам нужны еще Фарадеи, другими словами, нужны люди, работающие над созданием новых знаний». Он говорит: «для развития науки требуется... не только, чтобы люди мыслили вообще, но чтобы они концентрировали свои мысли на той части обширного поля науки, которое в данное время требует разработки».

Сам он увлеченно занимался и небольшими, и частными вопросами (например, мог писать о способе выведения жирных пятен с одежды), но вместе с тем — такова особенность его гения — он умел намечать что называется магистральные проблемы, которые на десятилетия предопределяли направление развития научной и технической мысли.

1869 год — крупнейшая веха в истории науки: Менделеевым открыта периодическая система элементов. Максвелл проявляет большой интерес к атомистике и строению вещества. В Британской энциклопедии печатаются серия его популярных статей — «Молекулы», «Атом», «Строение тел», «Эфир»... Будучи сторонником ато-

мистического учения Демокрита, Эпикура и Лукреция, он придерживался концепции неизменных атомов и молекул. «Они остаются такими, какими создал их творец». Однако он готов повторить вслед за Фарадеем: «Я не люблю слова *атом*» (в смысле «неделимый»). Его статья «Атом» начинается определением: «Атом есть тело, которое нельзя рассечь пополам». И — почти одновременно — в своей прекрасной популярной книге «Материя и движение» (1873) он писал: «Даже атом, если мы рассматриваем его, как нечто способное к вращению, должен быть представляем состоящим из многих материальных частичек». Понятия дискретности и непрерывности Максвелл рассматривал, не отдавая предпочтения ни тому, ни другому, допуская, так сказать, возможность и того и другого. «Всякое наше знание как о времени, так и о месте и сущности относительно», — писал он. И это отсутствие предубежденности позволило ему, не владея еще достоверным знанием, проявлять большую широту в мыслях, в догадках, в прогнозах. «Великой задачей ученых нашего века является распространение наших знаний о движении вещества от тех случаев, в которых мы можем видеть и измерять движение, к тем, в которых наши чувства не могут его обнаружить». Заявление Максвеля о том, что должны существовать «молекулы электричества», было встречено, даже его учениками, скептически. Об этом вспомнили лет через двадцать, когда был открыт электрон. Максвелл был единственным, пожалуй, в Европе ученым, оценившим значение термодинамических работ американского физика-теоретика Гиббса. Словно бы предвосхищая появление гипотезы Планка, Максвелл говорил тогда: «Принципы термодинамики бросают яркий свет на все явления природы и, вероятно, многие важные применения этих принципов могут быть получены в будущем».

Он продолжал размышлять и над электромагнитной теорией, однако после «Трактата» ничего существенного к ней уже не добавил.

Работу над книгой «Электричество в элементарном изложении» Максвелл закончить не успел, она выпала посмертно.

В последние годы жизни ученый предпринял еще одно интересное исследование, относящееся к истории науки, — занялся подготовкой к изданию трудов Генри Кавендиша. Он был поражен и введен в заблуждение фигурой этого великого оригинала, отшельника, отдавшего всего себя науке, сделавшего ряд замечательных открытий в физике и химии, искусного экспериментатора. Однако физических работ Кавендиша почему-то не публиковал (напечатал лишь две из них). Никому не известные, они более ста лет пролежали в архиве. Двадцать пакетов ценнейших манускриптов! Максвелл получил их в 1874 г. от герцога Девонширского. Он не только их изучил, но собственноручно все переписал, повторил большую часть описанных Кавендишем опытов и многие результаты уточнил. Такую работу никто лучше и добросовестнее Максвеля выполнить бы, конечно, не смог. Это был достойный подражания образец экспериментального, творческого подхода к историко-научным исследованиям. В итоге Максвелл открыл науке Кавендиша — физику, и в этом открытии было немало удивительного: оказалось, что Кавендиш за 12 лет до Кулона установил закон взаимодействия электрических зарядов, за 65 лет до Фарадея изучил вопрос о влиянии диэлектрика, разделяющего обкладки конденсатора, на его

емкость; он предвосхитил открытие закона Ома и т. д. Два больших тома Кавендиша увидели свет в октябре 1879 г. На пять лет растянулась у Максвелла эта работа. Он сделал огромного значения дело, но, знай он, как мало уже оставалось у него времени, он бы, наверное, за это не взялся.

Все эти годы подолгу и серьезно хворала его жена. Максвелл настоял на том, чтобы ухаживать за ней самому. Сиделкой он был искусной и самоотверженной. Однажды он три недели не ложился в постель. А еще был такой случай. Как-то он зашел в комнату жены. Спавшая там собачка Гуни, когда он наклонился над больной, цапнула его с перепуга за нос. Не издав ни звука, Максвелл вышел, бережно придерживая висевшую у него на лице собачку. Спокойствие и выдержка ему никогда не изменяли. Он был бодр, деятелен, доброжелателен. Он все успевал, и работа шла, как обычно. Он никогда ни на что не жаловался; егодержанность с годами возрастила, словно он все больше и больше уходил в себя. Некогда отъявленный спорщик, он теперь уклонялся от споров, предпочитая, уединившись, написать о предмете спора язвительные стихи (и не только язвительные). Иногда — под секретом — он читал их своим друзьям. Иногда публиковал в «Nature», подписываясь псевдонимом $\frac{dp}{dt}$. (Кстати, одному историку стихи ученого помогли установить, когда был впервые употреблен термин «ток смещения».) За эти годы он сильно поседел — «стал серый, как железо». Но здоровье его не вызывало опасений. Весной 1877 г. внезапно начались боли в груди, он стал задыхаться при глотании. Он никому об этом не говорил, не обращался почему-то к врачам, хотя самочувствие его ухудшалось. Он еще держался, походка его оставалась, твердой. Темные глаза на обычно бледном лице все так же сверкали мыслию, иронией, но к весне 1879 г. он настолько ослабел, что еле дотянул семестр. В лаборатории он был почти ежедневно, но не подолгу. В июне, сдав рукописи Кавендиша в типографию, он уехал в Гленлэр. Все надеялись, что физические упражнения и благодатный воздух родных мест, напоенный запахом близкого моря и цветущего вереска, восстановят его здоровье. Этого не случилось. Больному становилось все хуже, страдания его были ужасны; боли не прекращались, он потерял аппетит и сон. В октябре, узнав отedinбургского врача, который его освидетельствовал, что ему остается жить не более месяца, Максвелл поспешил в Кембридж. Его главной заботой оставалась жена, прикованная в те дни к постели. Кембридж был печален. «Максвелл уходит», — говорили друг другу при встрече люди. Умер он 5 ноября 1879 г. сорока восьми лет, как и его мать и от той же болезни — рака. «Не было человека, — писал пользовавший его врач, — который бы встретил смерть с большим спокойствием и в более ясном сознании». Погребли его, после панихиды в Тринити-колледже, на Пэртонском кладбище, в Корсоко, близ Гленлэра — фамильном месте погребения Максвеллов.

Макс Планк сказал: «...по рождению он принадлежит Эдинбургу, как личность он принадлежит Кембриджу, а труды его — достояние всего мира».

Максвелл не дожил до торжества своей теории. Почти ни одно из основных ее положений не было при его жизни подтверждено

опытом, поэтому теория фактически оставалась на правах гипотезы. Маститые физики относились к ней с недоверием, а молодые — приняли ее, безоглядно в нее поверили, но, полагая (справедливо, конечно), что опыты по ее доказательству сопряжены с огромными трудностями, не помогали ей завоевать признание. Для ученого, казалось бы, нет большего несчастья, чем остаться непонятым, не увидеть победы своих идей! Однако для Максвелла это не обернулось трагедией. Он не подталкивал других, потому что не в его принципах было кому-то что-то навязывать, но и сам ничего не предпринимал, спокойно предоставив событиям идти своим чередом (эту черту мы встретим потом у Эйнштейна). Так что ни подтверждение гипотезы о токе смещения, ни открытие электромагнитных волн и светового давления — все это дело рук не английских физиков. Но английские физики тоже внесли лепту в разработку и распространение теории своего великого соотечественника. Назовем хотя бы О. Хевисайда, Д. Пойнтинга, А. Шустера, Дж. Дж. Томсона. Шuster в 1875/76 учебном году в Оуэн-колледже (Манчестер) прочитал первый систематический курс физики, основанный на теории Максвелла. «Сэр Джозеф Томсон, — вспоминает он, — был одним из трех (!) студентов, которые слушали мой курс».

«Научная слава Максвелла при его жизни поддерживалась главным образом британскими теоретиками физики, особенно Кавендишской школы, — писал Д. Лармор. — Но с тех пор, как Гельмгольц занялся изучением его теории... и подвергнул ее обсуждению в многочисленных серьезных работах, внимание, уделявшееся произведениям Максвелла за границей, стало возрастать...» Горячим пропагандистом идей Максвелла в Германии выступил также Больцман, благодаря которому электромагнитная теория в значительной степени перестала быть «книгой за семью печатями». И все же до работ Генриха Герца, занявшегося получением электромагнитных волн по совету Гельмгольца, теория Максвелла не была широко известна на континенте.

Электромагнитные волны Герц получил в 1888 г. После этого уже ничто не могло остановить победоносного шествия теории Максвелла. П. Н. Лебедев, учившийся тогда в Страсбургском университете, вспоминал потом характерный эпизод. За год до опытов Герца курс теоретической оптики у них читал профессор Э. Кон. Этот курс был построен на основе классической теории Юига — Френеля, т. е. на механической теории света. Курс был большой — по четыре часа в неделю, но взглядам Максвелла, преподносимым к тому же как некий курьез, отводилось всего... полчаса на одной из заключительных лекций. А в 1889 г. профессор Кон тот же курс читал уже полностью на основе теории Максвелла. Так стремительно утверждалась в науке фарадей-максвелловская теория! Она словно брала реванш за десятилетия пренебрежения и уничижительного к ней недоверия.

Герц (в одно время с О. Хевисайдом) придал уравнениям Максвелла их современную форму. Больцман по этому поводу замечает: «Я мог бы сказать, что последователи Максвелла в этих уравнениях, пожалуй, ничего кроме букв не переменили. Однако это было бы слишком. Конечно, не тому следует удивляться, что к этим уравнениям вообще что-то могло бы быть добавлено, а гораздо более тому, как мало к ним было добавлено».

В той борьбе за утверждение теории Максвелла, которая велась в науке на разных этапах, исключительная заслуга принадлежит русским ученым. А. Г. Столетов был не только активным пропагандистом первых статей Максвелла, он предложил свой метод для экспериментального измерения «постоянной Максвелла», выражающей скорость распространения волны. В «Трактате» Максвелл потом отметил, что метод Столетова является одним из самых надежных и точных.

Для подтверждения теории Максвелла важное значение имела проверка соотношения $n^2 = \epsilon$ (квадрат показателя преломления равен диэлектрической постоянной). В 1872—1874 гг. Больцман предпринял серию работ по проверке и уточнению n и ϵ для ряда твердых и газообразных тел. В 1874 г. ученик Столетова П. И. Шиллер, следуя указаниям Максвелла, первым стал измерять диэлектрические постоянные в *переменных* магнитных полях. А через год П. А. Зилов провел в лаборатории Столетова измерение диэлектрических постоянных жидкостей. О точности и большом значении результатов Больцмана, Шиллера и Зилова Максвелл писал в своей последней книге «Электричество в элементарном изложении», которую в 1886 г. издал киевский профессор М. П. Авенариус. Это была первая на русском языке книга Максвелла.

Замечательный русский физик Н. А. Умов, введя в 1873 г. (правда, независимо от максвелловской концепции) понятие о движении и потоке энергии, сделал существенный вклад в разработку теории поля. Умов с восхищением отзывался о теории Максвелла. «Работу Максвелла,— писал он,— можно сравнить с работой художника, разбившего вазу с изящным рисунком и из черепков этой вазы построившего новую. Получился новый рисунок, составленный из элементов старого...»

После опытов Герца борьба за теорию Максвелла вступила в новую fazu. И вновь русская физика заняла самые передовые, а в ряде направлений и главенствующие позиции. У. Брэгг говорит: «После того как Максвелл сформулировал четыре математических уравнения... радио, как мы теперь называем его, стало возможностью». Эту возможность впервые осуществил А. С. Попов, который в мае 1895 г. произвел передачу и прием радиосигналов. Изобретение Попова вывело теорию Максвелла в широкий мир техники и многочисленных ее приложений. В том же году П. Н. Лебедев получил самые короткие (6 мм) электромагнитные волны, а еще через четыре года доказал существование светового давления. Опыты Лебедева имели для подтверждения теории Максвелла огромное значение. Лорд Кельвин, издавна скептически относившийся к электромагнитной теории, признался потом К. А. Тимирязеву: «Вы, может быть, знаете, что я всю жизнь воевал с Максвеллом, не признавая его светового давления, и вот вам Лебедев заставил меня сдаться!» Работы последующего поколения русских ученых (А. А. Эйхенвальда, Д. С. Рождественского, В. Ф. Миткевича, А. А. Глаголовой-Аркадьевой и др.) еще более упрочили и развили теорию Максвелла. Таким образом, практика — критерий истины — подтвердила истинность электромагнитной теории.

Максвелл никогда не ставил перед собой задачи — дать законченную картину мира, но исторически сложилось так, что ему и Гельмгольцу суждено было завершить картину мира классической физики, начатую Галилеем и Ньютона. «Имя его блестает на вра-

тах классической физики», — сказал М. Планк. Но, вместе с тем, Максвелл — это и конец классической физики.

Опираясь на теорию Максвелла, Г. А. Лоренц построил свою электронную теорию. Максвелл является одним из главных предшественников Эйнштейна, родившегося в год его смерти. Эйнштейн писал, что «теория относительности обязана своим возникновением уравнениям Максвелла для электромагнитного поля». И — в другом месте: «Теория Максвелла — Лоренца неизбежно вела к специальной теории относительности». Эйнштейн освещает и такой интересный вопрос — а что дала теория относительности теории Максвелла, «своей родительнице»: «До того времени электрические и магнитные поля считали существующими независимо, хотя между этими двумя видами поля благодаря уравнениям Максвелла и устанавливалась тесная причинная связь. Но специальная теория относительности показала, что эта причинная связь есть проявление тождественной сущности двух видов поля» («Новая теория поля. I», 1929 г.). И тем не менее теория Максвелла получила от теории относительности несколько серьезных ударов, поколебавших ее основы. Но еще более сильные удары ей нанесла квантовая теория излучения Планка, возникшая в начале XX в. на стыке термодинамики и оптики. (Одним из истоков теории квантов была динамическая теория газов Максвелла). Максвелл учил: «Из всех гипотез... выбирайте ту, которая не пресекает дальнейшего мышления об исследуемых вещах». К ужасу многих, в том числе и самого Планка, казалось, что под ударами теории квантов электромагнитная теория вот-вот рухнет. Но она выстояла и даже сохранила свое значение.

В статье о Фарадее Максвелл писал: «...мы не знаем даже названия той науки, которая вырастет из ныне собираемых нами материалов...» Истинный смысл теории Максвелла раскрывается только теперь; вместе с тем становится ясным, что даже сам Максвелл, не говоря о его современниках, еще не вполне представлял себе всю неисчерпаемую глубину, все значение своего открытия. (В истории науки такое случалось не однажды!) Это тонко почувствовал уже Герд, писавший: «Нельзя изучать эту удивительную теорию, не испытывая по временам такого чувства, как будто в математических формулах есть самостоятельная жизнь, собственный разум — как будто они умнее нас, умнее даже самого автора, как будто они дают нам больше, чем в свое время было в них вложено».

«Как за Ньютоном последовала эпоха математического оформления механики, так отныне наступила пора математической обработки теории Максвелла», — писал Макс Лауз. — В современном изложении теория Максвелла является замечательным творением, равнозначенным механике».

Максвелл говорил: «...прямая цель всякого научного труда — раскрывать тайны природы». Один из величайших естествоиспытателей всех времен, Максвелл с честью служил этой высокой цели. Огромного охвата ума, он поднимал и решал такие проблемы, которые питают науку вот уже целое столетие. В нем органически сединился гениальный теоретик и блестящий экспериментатор, проницательный математик и мудрый натурфилософ; его пылкую научную фантазию постоянно контролировала трезвость практика. Он был материалистом, однако материализм его — непоследовательный, подчас механистический. По складу интеллекта Максвелл близок

Фарадею, но работал иным методом, что позволило ему продвинуться дальше учителя. Глубина сочеталась в нем с необыкновенной разносторонностью; его научное наследие и обширно, и разнообразно: тут и работы по теории электричества и оптике, по механике и астрономии, по молекулярно-кинетической теории газов и теории сооружений, по математике и машиностроению, по методам электрических измерений и по истории науки. Его перу принадлежит ряд образцовых популярных статей и книг, интересно и богато его эпистолярное наследие. «Всякий великий человек,— писал Максвелл,— является единственным в своем роде. В историческом шествии ученых у каждого из них своя определенная задача и свое определенное место». Имя Максвелла прочно и навсегда вошло в науку. Мы говорим: «электромагнитная теория Максвелла», «закон Максвелла», «распределение Максвелла», «статистика Максвелла — Больцмана», «число Максвелла», «маятник Максвелла», «диск Максвелла», «правило Максвелла» (правило винта), «ток Максвелла» (ток смещения), *максвелл* — единица измерения магнитного потока в системе ЦГС...

В свое время в Кавендишской лаборатории была учреждена стипендия имени Максвелла. «Она дается на три года лучшему из работающих в лаборатории, и получение ее считается большой честью»,— писал П. Л. Капица, которому она была присуждена в 1923 г.

Теория Максвелла сыграла огромную роль не только в науке, но и в духовном развитии человечества.

В 1931 г. широко отмечалось 100-летие со дня рождения великого ученого. На торжества в Англию съехались делегаты от научных корпораций всего мира. 30 сентября в Вестминстерском аббатстве, неподалеку от надгробия Ньютона, были открыты мемориальные доски Фарадея и Максвелла. 1 и 2 октября с речами выступили Резерфорд, Планк, Бор, Джинс... Для юбилейного сборника написали статьи Эйнштейн и ряд других физиков.

Темой выступления Нильса Бора было — Максвелл и современная теоретическая физика. Говоря «о применении электромагнитной теории к проблеме строения атома, где теория Максвелла не только была исключительно плодотворна в истолковании явлений, но дала максимум того, что может дать какая бы то ни было теория», Бор отметил, что применение идей Максвелла к атомной теории «само по себе составляет целую главу физики». И — далее: «Когда приходится слышать как физики в наши дни толкуют об электронных волнах и фотонах, может показаться, пожалуй, что мы полностью оставили почву, на которой строили Ньютон и Максвелл». Однако, подчеркнул Бор, «теория Максвелла не перестала использоваться в качестве направляющего начала и на позднейшей стадии развития атомной теории. Хотя фундаментальное открытие лордом Резерфордом атомного ядра, приведшее к замечательному завершению наших представлений об атоме, 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».

Так «старик Максвелл» входит в новую и повсейшую физику — в наше время.

Роль Максвелла в развитии кинетической теории газов

В 1859—1860 гг. Максвелл развил ряд фундаментальных положений кинетической теории газов.

Кинетическая теория газов с момента ее возникновения базировалась на представлениях о дискретном строении всех тел и о беспорядочном непрерывном движении дискретных частиц, образующих газообразные тела. В самом начале своего трактата «Пояснение к динамической теории газов» Максвелл писал: «Из гипотезы, согласно которой мельчайшие частицы материи находятся в быстром движении, причем скорость этого движения возрастает с температурой, может быть выведено так много свойств материи, в особенности если ее взять в газообразной форме,— что истинная природа этого движения является предметом естественного интереса¹».

Учение о дискретной структуре материи восходит к глубокой древности. Атомистику древности и средневековья, натурфилософскую по своему существу, можно условно расчленить на «физическую атомистику» и «математический атомизм», тесно переплетающиеся между собой². В начале XVII в. возрождается «физическая атомистика» (Гассенди), но уже последующее ее развитиешло иными путями. Атомистика Галилея, Декарта, Бойля, Ньютона, как и вся атомистика середины и второй половины XVII в., связана в явном или скрытом виде с новыми задачами механики, физики и математики. На ее основе в XVIII в. развилась атомистика Бернулли, Лесажа, Ломоносова, Бопкова и многих других, промежуточное звено между атомистиками XVIII и XIX вв. Кинетическая теория газов генетически связана со всей атомистикой в целом, но непосредственно базируется на атомистике XIX в.³

¹ Д. К. Максвелл. Пояснения к динамической теории газов. В кн.: «Основатели кинетической теории материи». М., ОНТИ, 1937, стр. 187.

² K. Lasswitz. Geschichte der Atomistik. Bd. I, II.

³ В. П. Зубов. Развитие атомистических представлений до начала XIX в. М., изд-во «Наука», 1965.