1965 г. Октябрь *Том 87, вып. 2*

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК

ИЗ ИСТОРИИ ФИЗИКИ

530

К СТОЛЕТИЮ СТАТИСТИЧЕСКОЙ МЕХАНИКИ *)

Э. Монтролл

Организаторов этой конференции, посвященной проблеме многих тел, следует похвалить за их остроумие в выборе времени ее проведения. Оно совпало со столетием со дня возникновения статистической механики. Что касается даты зарождения статистической механики, то она была установлена такими крупными авторитетами, как Максвелл и Гиббс.

Максвелл в своей популярной статье в Британской Энциклопедии, носящей название «Молекулы», после изложения довольно примитивных идей Бернулли и Ласажа, Герапата и Джоуля замечает, что «принято считать, что дальнейшее развитие теории было связано с именем Кренига, однако — насколько я могу судить об этом — он не достиг никакого прогресса по сравнению с тем, что было известно до него. Профессор Клаузиус, основоположник кинетической теории газов, впервые указал, что́ представляет собой тепло, содержащееся в теле; он выяснил, что оно представляет собой среднюю кинетическую энергию». Когда Гиббс писал некролог, посвященный Клаузиусу, он назвал Клаузиуса «отцом статистической механики» и отметил, что работу Клаузиуса «О природе движения, которое мы называем теплом» следует считать первой работой Клаузиуса в этом направлении. Эта работа, вопреки отзыву профессора Вигнера, содержащемуся в его речи по случаю ухода с поста председателя Американского физического общества, была опубликована дважды: сначала на английском языке в «Philosophical Magazine» в августе 1857 г., а затем на немецком языке в «Poggendorf Annalen». Рукопись была послана из Цюриха 5 января 1857 г.

Этой статьей ознаменовалось также рождение современной физики, поскольку в ней в натуральную философию вводился «микроскопический» элемент (наряду со статистикой) уже отнюдь не в спекулятивной манере. Представление о средней длине свободного пробега и первый анализ явлений переноса можно найти в статье Клаузиуса 1859 г.

Работы Клаузиуса вызвали интерес Максвелла к этой области физики. Он появился на сцене в 1860 г. со своей знаменитой работой «Иллюстрации к динамической теории газов». В этой работе впервые было получено всем известное в наше время максвелловское распределение по скоростям и был высказан ряд замечаний по поводу явлений переноса. Наши перво-

*) E. Montroll, Century of Statistical Mechanics, в сб. «The Many-body Problem», ch. 31, Interscience Publ., New York, 1963 (Материалы симпозиума по проблеме многих тел, проведенного в Стивенсонском технологическом институте, Нью-Джерси, 28—29 января 1957 г.). Перевод выполнен В. А. Угаровым с оттиска, любезно предоставленного автором.

курсники-физики с удовольствием узнают, что, оценивая теплопроводность воздуха, Максвелл ошибся примерно в тысячу раз, потому что неправильно перевел фунты в килограммы и, кроме того, ошибочно использовал в качестве единицы измерения час там, где была нужна секунда.

Участие Больцмана в разработке статистической механики началось в конце 1860 г., когда появилось его знаменитое кинетическое уравнение, а также впервые обсуждалась теорема о равномерном распределении энергии по степеням свободы.

В то время, когда кинетическая теория приближалась к зрелости в период 1857—1860 гг., в архивах Королевского общества лежала, покрываясь пылью, старая, но имеющая прямое отношение к вопросу рукопись Джеймса Уотерсона. В конце концов ее извлек на свет в 1891 г. лорд Рэлей, после того как она пролежала сорок пять лет в безвестности. Процитируем Рэлея: «Мое внимание было привлечено сначала к работе Уотерсона, касающейся связи между молекулярными силами и скрытой теплотой парообразования, и оттуда к статье в «Phil. Mag.». (1858 г.) «К теории звука», где он ссылается на теорию газов и статью, озаглавленную «О физике среды, состоящей из абсолютно упругих молекул в состоянии движения.», которая была направлена в архивы Королевского общества в 1845 г.». Рэлей, который в 1891 г. был секретарем Королевского общества, без большого труда обнаружил рукопись, а также отзыв рецензента, в котором, между прочим, было сказано, что «статья ровно ничего в себе не содержит, так что не годится даже для того, чтобы зачитать ее на заседании Общества». Далее Рэлей отмечает, что отклонение этой статьи сыграло весьма печальную роль, задержав, по всей вероятности, развитие вопроса на 10—15 лет, и что особенно удивительно, так это то, что Уотерсон, по-видимому, никогда не настаивал на публикации своей работы в последующее время.

Таким образом, статья увидела свет лишь в 1891 г.; несколько вводных замечаний к ней были написаны Рэлеем. Мы находим в этих замечаниях несколько советов молодым авторам: «...Молодой автор, чувствующий в себе способность к великим открытиям, принесет себе немалую пользу, обеспечив благоприятное отношение научного мира к себе какой-либо работой, предмет которой достаточно ограничен и значение которой легко устанавливается; и лишь потом следует отправляться в более дальний полет... Одно обстоятельство, которое могло быть истолковано не в пользу Уотерсона, состояло в том, что он не упомянул никого из своих предшественников. Стоило ему лишь заявить, что его исследования представляют развитие теории Бернулли, как рецензент задумался бы, можно ли сказать о его работе, что она ровно ничего в себе не содержит». Когда вы клянете рецензентов и затяжку с публикацией ваших статей, вспомните Уотерсона.

В рукописи Уотерсона температура газа отождествлялась со средней кинетической энергией образующих этот газ частиц, рассматривалась теорема о равномерном распределении энергии по степеням свободы, закон диффузии Грэма и различные другие вопросы, касающиеся диффузии и теплопроводности. В ней был приведен также первый расчет скорости молекул. Фактически все основные идеи кинетической теории на первой стадии ее развития (за исключением максвелловского распределения по скоростям) уже содержались в этой работе.

Поскольку биография Уотерсона мало кому известна, не будет лишним кое-что рассказать о нем. Отец его был известным фабрикантом, занимавшимся производством сургуча; однако это обстоятельство не имело ни малейшего значения для выбора профессии его сына. Его мать была сестрой Джорджа Сендмана, основателя хорошо известной лондон-

ской виноторговой фирмы, и племянницей Роберта Сендмана, который совместно с своим тестем Джоном Глезом основал небольшую религиозную секту, известную под названием «глезиты» или «сендемиты». Эта секта исповедовала убеждение, что никто не должен быть подчинен никаким группировкам (в том числе и британскому правительству) или соглашениям, но должен следовать заповедям Христа и его апостолов. В этой секте не было ни духовных служителей, ни платных проповедников, и в ней не допускались расхождения во мнениях у членов секты. В Лондоне число членов секты никогда не превышало двадцати семейств. Однако это общество сыграло бóльшую роль, чем это можно было ожидать, в объединении лиц, занимающихся философией естествознания. Двумя жертвами этого общества были Джеймс Уотерсон и Майкл Фарадей.

Фарадей был весьма почитаемым старейшиной и мирским проповедником секты, но был вычеркнут из списков секты за то, что пропустил одну воскресную службу, отправившись на завтрак к королеве Виктории. После этого он в течение пятнадцати лет посещал службу как простой посетитель, после чего был снова восстановлен как старейшина.

Возвращаясь к Уотерсону, отметим, что его первые соображения по кинетической теории газов фактически предшествовали подготовке его забытой рукописи. Они появились в приложении к книге под названием «Размышления об умственных функциях» («Thoughts on the Mental Function»), которая появилась еще в 1843 г., но произвела еще меньшее впечатление, чем его последующая работа по кинетической теории.

Дж. Холдейн (J. S. Haldane), английский физиолог, утверждает в предисловии к собранию трудов Уотерсона, что в этой книге уже обсуждается вопрос о центральной нервной системе и различные другие связи между физиологией и органами чувств, которые опережали свое время еще в большей степени, чем идеи кинетической теории. Уотерсон был убежден в том (и это было в те времена, когда лишь немногие верили в атомы или молекулы), что проблемы жизни и сознательного поведения должны быть в конечном счете связаны с молекулярными или атомными явлениями. Именно эти предполагаемые связи стимулировали его интерес к некоторым вопросам кинетической теории и вызвали появление «Дополнения» к его книге.

Не сумев опубликовать свои работы и возбудить интерес к своей книге, Уотерсон никогда не был удостоен научного звания в Англии. Он был всего-навсего военно-морским инструктором в Бомбее. Вернувшись в Англию, он жил на доходы от наследства, обучал математике своих племянников и племянниц, был весьма критически настроен по отношению к таким людям, как лорд Кельвин, за их слишком тесную связь с техническими приложениями науки. Когда речь заходила о Королевском обществе, он позволял себе отпускать по его поводу недостойные английского джентельмена грубые замечания.

Участие Максвелла в развитии статистической механики заметно уменьшилось, после того как он был приглашен профессором в Кавендишскую лабораторию. Он посвятил те многие годы, которые он провел на этом посту, созданию учебной программы лаборатории (эта лаборатория явилась прообразом современного начального физического практикума), а также опубликованию и интерпретации неизданных записных книжек Кавендиша. Завершив эту работу, он заболел; эта болезнь оказалась для него фатальной, и он умер в возрасте сорока восьми лет в полном расцвете сил.

В конце прошлого века как кинетическая теория, так и статистическая механика, казалось, подошли к состоянию коллапса. С двух сторон на них велись основательные нападки. Одна из этих нападок была

начата Лошмидтом и продолжена Цермело. Они и их сторонники не могли понять возможности мирного сосуществования обратимых уравнений движения молекул газа и необратимого кинетического уравнения Больцмана. С другой стороны, Кельвин указывал на нарушение теоремы о равномерном распределении энергии по степеням свободы (согласно которой темплоемкость многоатомных газов связана с числом степеней свободы атома), наблюдаемом у двухатомных газов, таких, как водород.

Цермело, имея в руках доказательство существования циклов Пуанкаре, утверждал, что поскольку замкнутые системы обнаруживают квазипериодическое поведение, у них нет равновесных состояний вообще. Больцман выдвинул против этого утверждения оценку периода цикла Пуанкаре для кубического сантиметра газа; эта оценка более близка к возрасту Вселенной, чем к длительности эксперимента. Хотя Цермело много усилий посвятил нападкам на Больцмана, у него все же нашлось достаточно времени, чтобы написать рецензию и на «Статистическую механику» Гиббса, явно принижающую значение этой книги.

Эти непрерывные нападки привели Больцмана в подавленное состояние и породили в нем манию преследования. Во введении к первому тому своего труда «Лекции по кинетической теории газов» («Vorlesungen über Gastheorie», 1897 г.) он оправдывается перед читателями в том, что рискнул опубликовать книгу, несмотря на то, что «кинетическая теория, по-видимому, совсем вышла из моды в Германии». Отбиваясь от нападок в течение ряда лет, он пишет во введении к своему второму тому лекций (1904 г.): «Тогда, когда печаталась первая часть этой книги, рукопись второй и последней части была уже почти полностью закончена... И как раз в это время нападки на кинетическую теорию стали еще сильнее. Я убежден в том, что эти нападки основаны на недопонимании и что значение кинетической теории до сих пор просто не осознано. По моему мнению, науке будет нанесен сильнейший удар, если те, кто стоит в оппозиции к кинетической теории в настоящее время, сумеют предать ее забвению, подобному тому, как это произошло с волновой теорией света благодаря авторитету Исаака Ньютона. Я вполне отдаю себе отчет в бессилии отдельного человека перед лицом мнения, разделяемого большинством. Для того чтобы была уверенность в том, что, когда человечество вернется к изучению кинетической теории, ему не придется снова переоткрывать уже известные вещи, я постараюсь изложить наиболее трудные и непонятные разделы теории как можно яснее».

Больцман несколько переоценивал могущество своих противников; его идеи были подхвачены Смолуховским и Эренфестом, которые смогли придумать модели, в которых прекрасно уживались динамические и статистические особенности. И хотя по поводу природы необратимости и кинетического уравнения нет окончательного мнения, подавляющая масса экспериментальных данных позволяет нам быть уверенными в справедливости кинетической теории и статистической механики. Эйнштейн своей теорией броуновского движения сумел умиротворить возражения другой группы критиков, именно энергетиков, возглавляемых Оствальдом; в конечном счете Эйнштейн заставил их признать существование атомов и молекул.

Возражения Кельвина против кинетической теории были милы сердцу тех, кого больше занимало соответствие между результатами эксперимента и выводами теории, чем философские соображения. Кельвин возражал против теоремы о равномерном распределении энергии по степеням свободы на том основании, что в многоатомных молекулах некоторые степени свободы оказываются «замороженными» (классическим примером может служить H_2). Хотя сам он рассматривал эту трудность

как весьма серьезную, его в еще большей степени беспокоило отсутствие какого-либо вклада в теплоемкость тех степеней свободы, которые обеспечивают оптический спектр; эти соображения относились как к одноатомным, так и к многоатомным газам. Причина появления атомных спектров вовсе не была ясной к 1900 г., но как Стокс, так и Кирхгоф были убеждены, что каждый атом обладает внутренней структурой, которая и обусловливает спектр атома. Когда Резерфорд бегал еще в коротких штанишках, Кельвин уже подозревал, что у атома есть тяжелое центральное ядро и что легкие «сателлиты», образованные «ионами» Дж. Дж. Томсона, обращаются по устойчивым орбитам вокруг центрального ядра. Он понимал, что если теорема о равномерном распределении энергии по степеням свободы справедлива, все эти «ионы» должны вносить свой вклад в теплоемкость газа. Попытки Кельвина найти ошибки в различных выводах теоремы о равномерном распределении энергии по степеням свободы оказались бесплодными, однако он сумел коснуться одного из важнейших парадоксов теории, разъяснение которого потребовало привлечения квантовой механики.

Эти затруднения, а также неувязки, связанные с теорией эфира (которые были до известной степени разрешены квантовой теорией и теорией относительности), были во всех подробностях рассмотрены в статье Кельвина, появившейся в 1900 г.; эта статья называлась «Облачка XIX века над динамической теорией тепла и света». Эту статью можно найти в Приложении В «Балтиморских лекций» Кельвина.

Хотя вклад Кельвина в кинетическую теорию и статистическую механику носил преимущественно критический характер и существенно отличался поэтому от фундаментальной деятельности других авторов, о которых речь шла выше, мой доклад был бы не полон без некоторых замечаний по поводу роли, которую играл в физике XIX в. человек, чье имя всегда читается совместно с именем Больцмана в любой формуле статистической механики (... где k — постоянная Больцмана, а T — температура в шкале Кельвина). По словам Дж. Дж. Томсона, «любой рассказ о развитии физики конца прошлого века будет похож на постановку «Гамлета», в которой не участвует принц датский, если в нем не будет отражена та роль, которую играл лорд Кельвин, который более сорока лет, вплоть до своей смерти в 1907 г., оказывал наибольшее влияние на английскую физику». Трудно представить себе сегодня физика, который обладал бы таким же влиянием; в его лице сочетались Эйнштейн, Ферми и Штейнмец своего времени.

Оценка Кельвина научной общественностью XIX в. имеет и свое денежное выражение. Вновь организованный Университет Джона Гопкинса заключил контракт с Кельвином. Кельвин должен был прочесть 15 лекций в течение двух недель (фактически он прочел с 1 по 17 октября 1884 г. двадцать лекций). После некоторых переговоров президент Гилман предложил 2000 долларов и оплату проезда от Глазго. Эта сумма составляла примерно годовую зарплату большинства преподавателей. Балтиморские лекции посещали все выдающиеся американские физики того времени. Стенографический отчет о лекциях был выполнен Гесвеем и немедленно папирографирован (папирограф был весьма примитивной копировальной машиной, дающей пурпурный оттиск). Среди естествоиспытателей эта папирограмма ходила в качестве первого машинописного «препринта». Сам Кельвин описывал подробности окончательной стадии публикации этих лекций следующими словами: «Печатание настоящего тома началось в августе 1885 г.; оно продолжалось весьма нерегулярным образом в течение девятнадцати лет с того момента; я опасаюсь, что этот способ печатания был чрезвычайно неудобен моим издателям».

Исследования Кельвина практически охватывают все разделы как чистой, так и инженерной физики. Его 661 работа составляет существенную часть того, что мы называем теперь классической физикой: термодинамику, электричество и магнетизм, гидродинамику и теорию упругости; ссылки на его работы практически превосходили ссылки на всех остальных авторов, упоминавшихся в больших черных томах издания Кембриджского университета, которые столь энергично изучались двадцать пять лет назад. Почти все важнейшие работы того времени начинались фразами типа: «Согласно Томсону...» или «Томсон выдвинул проблему...».

Первая работа Томсона, написанная им в возрасте семнадцати лет, была ответом на книгу некоего Келланда, который утверждал, что в книге Фурье «Аналитическая теория тепла» неоднократно использовано неправильное разложение в ряд. Кельвин заново получил многие разложения более современными методами, чем те, которые использовал сам Фурье. Его вторая работа касалась теории изображений и первых приложений разложений Фурье в электростатике. Именно отсюда Максвелл почерпнул идеи для своей электромагнитной теории: «Это была работа, которая ввела в математику идею об электрическом действии, передаваемом посредством сплошной среды». Когда Кельвин был еще студентом, он был уже настолько известен, что в двадцать два года стал профессором естественной философии в университете Глазго. Это место он занимал вплоть до того времени, когда в возрасте семидесяти лет стал президентом.

Образование, полученное Кельвином, весьма поучительно для всех тех, кто учит. Он был одним из семи детей в семье. Его мать умерла, когда ему было всего шесть лет. Отец, который был профессором математики в Глазго, остался с большой семьей, причем его преподавательская деятельность была весьма интенсивной. Дети совсем не посещали школу. Однако из-за отсутствия няни они иногда попадались на глаза отцу, и он был вынужден сажать их на задние скамьи аудитории. Профессор был однажды чрезвычайно поражен, когда крохотный десятилетний Вилли по своей инициативе решил сложную задачу, которая ставила в тупик даже университетских студентов. И Вилли скоро оказался в числе студентов первого курса. Большинство студенческих премий досталось ему, однако он воздержался от сдачи последних экзаменов, которые могли бы обеспечить ему степень; таким образом, он отправился в Кембридж снова в роли студента. Поступая в Кембридж в возрасте шестнадцати лет он уже изучил работы Лапласа, Лагранжа, Пуассона, Фурье и многих других классиков. В отличие от многих вундеркиндов, Кельвин имел вполне нормальную внешность, а его поведение ничем не отличалось от поведения его сверстников.

Кельвин, так же как и его протеже Максвелл девять лет спустя, был вторым из окончивших с отличием по математике в Кембридже. Однако, как это часто бывает, первый бесследно исчез куда-то в провинциальную школу, а второй всю свою долгую жизнь продолжал доказывать, что он на самом деле куда компетентнее первого. Так как многие задачи на экзамене для получения отличия в Кембридже брались просто из текущей литературы, Кельвин имел счастливую возможность вновь воспроизвести результат одной из своих работ на экзамене. К сожалению, он не очень хорошо помнил свою же собственную работу, а экзаменатор знал ее весьма детально.

Как это должно быть ясно всякому, кто попытается написать 661 работу, Кельвин вычислял и писал свои работы непрерывно. Особенно продуктивно он использовал время за чаем, заседания совета директоров (он был в правлении одной из самых выдающихся английских фирм,

занимавшейся инженерными и электротехническими вопросами); неплохо получалось у него в поездах и даже дилижансах. В его пальто были специально вделаны огромные карманы, в которых всегда лежали его знаменитые громадные зеленые блокноты, содержавшие всегда в себе несколько незаконченных статей.

Кельвин получил рыцарское звание за участие в первой успешной прокладке кабеля через Атлантический океан. В связи с этим он впервые применил многожильную проволоку в качестве проводника (чтобы обеспечить более однородное сопротивление) и изобрел много прецизионных инструментов (мост Томсона, гальванометр Кельвина и т. д.), необходимых для работы с кабелем. Напряженная и монотонная работа по прокладке кабеля на Дальнем Востоке чередовалась у Кельвина с одновременной работой над несколькими статьями.

Хотя он был одним из великих волшебников и изобретателей в области макроскопической и прикладной физики, сам Кельвин всегда очень интересовался природой атомов и молекул, а также природой эфира. Именно его энтузиазм при обсуждении этих вопросов, его серьезность при публичном их обсуждении придали изучению этих в высшей степени спекулятивных тем оттенок респектабельности и тем самым проложили путь для развития современной физики.

В заключение я хочу еще раз выразить свою благодарность организаторам конференции.