

Роль Максвелла в развитии кинетической теории газов

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 ученых 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 была 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 новейшую физику — в наше время.

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 развитие шло 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, Бошковича 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 К. Lasswitz. Geschichte der Atomistik. Bd. I, II.

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

В 1801 г. Дальтон применил атомистическую гипотезу для объяснения закона парциальных давлений. Работы Авогадро и Ампера, как и дальнейшие работы Дальтона, были тем новым этапом в развитии атомистики, который непосредственно привел к кинетической теории газов.

Учение о беспорядочном непрерывном движении частиц газов начало усиленно разрабатываться после того, как Румфорд обратил внимание на выделение тепла при сверлении стволов пушек и подметил противоречие этого явления с господствовавшей теорией теплорода. В 1798 г. Румфорд объяснил нагревание стволов пушек тем, что теплота есть особый род движения. «Совершенно необходимо добавить, что это нечто, которое любое *изолированное* тело или система тел может непрерывно поставлять *без ограничения*, не может быть *материальной субстанцией*; и мне кажется чрезвычайно трудным, если не совершенно невозможным, создать какую-либо точную идею о чем-то, что в состоянии возбуждаться и передаваться подобно тому, как возбуждается и передается в этих экспериментах теплота; если только не допустить, что это что-то есть движение»¹

Максвелл называет в качестве своих прямых предшественников Даниеля Бернулли, Герапата, Джоуля, Кренига, Клаузиуса и других, показавших, что отношения между давлением, температурой и плотностью в идеальном газе можно объяснить, полагая, что частицы движутся прямолинейно и равномерно, ударяются о стенки сосуда, содержащего газ, создавая тем самым давление.

В приведенной работе Максвелл не ставил перед собой задачи анализировать генезис кинетических представлений и дифференцировать взгляды их творцов.

Уже в 1845 г. Ватерстон представил для опубликования статью «О физической среде, состоящей из свободных и вполне упругих молекул, находящихся в движении», (опубликована Рэлеем в 1892 г.)². В 1850 г. Ранкин рассматривает теплоту, как скрытое движение частиц³. В 1851 г. в работе «Некоторые замечания о теплоте и о строении упругих жидкостей»⁴ он объясняет ряд свойств газов, полагая, что частицы движутся прямолинейно и равномерно. Джоуль полагал, что гипотеза Дэви о вращательном движении молекул также позволяет объяснить некоторые газовые законы. Он писал: «Я лично попытался показать, что вращательное движение, аналогичное описанному Дэви, способно объяснить закон Бойля — Мариотта, а также и другие явления, представляемые упругими жидкостями. (М-р Ранкин в своей работе «О механическом действии газов и паров» дал полное математическое исследование действия вихрей.) Тем не менее, принимая во внимание, что гипотеза Герапата, в которой допускается, что частицы газа постоянно летают во всех направлениях с большой скоростью и что давление газа обязано своим происхождением натиску частиц на всякую по-

ставленную против них поверхность,— несколько проще, и воспользуюсь ею в своих последующих замечаниях о строении упругой жидкости...»¹

В 1856 г. в работе «Grundzüge einer Theorie der Gase»² Крениг выдвинул гипотезу, согласно которой газы состоят из атомов. Эти атомы можно уподобить твердым идеальным упругим шарам. Атомы движутся с определенными скоростями в вакууме. Движение атома газа продолжается до тех пор, пока он не сталкивается с другим атомом. Столкновение может произойти и со стенкой. Взаимодействие между атомами происходит при их соприкосновении на малом расстоянии.

Крениг рассмотрел прямоугольный параллелепипед, в котором атомы, одинаковые по величине, движутся с равными скоростями по трем направлениям, параллельно ребрам параллелепипеда. Число ударов об стенку пропорционально его скорости и обратно пропорционально двойному ребру. Крениг рассматривает гладкую стенку как очень неровную по отношению к атомам газа. Эта неровность создает беспорядочность в траекториях атомов. Беспорядочность траектории и не поддается никакому расчету. Однако Крениг полагает, что понятие вероятности, введенное в теорию, устраняет не поддающуюся расчету беспорядочность. Идеализация полной упорядоченности атомов — результат применения теории вероятности. Допустив равномерное распределение скоростей, Крениг

получил для давления на стенку величину $p = mc \frac{c}{2x} \frac{n}{3}$, где m — масса атома, c — скорость атома, $\frac{c}{2x}$ — число ударов, производимых в одну секунду на одну из стенок, n — число атомов, содержащихся в сосуде. Давление на единицу площади $p = mc \frac{c}{2x} \frac{n}{3} \times \frac{1}{yz} = \frac{nm c^2}{6V}$, откуда $pV = \frac{nm c^2}{6}$. Неправильный подсчет им-

пульса привел к величине $1/6$ вместо $1/3$. Таким путем можно получить не только закон Бойля — Мариотта, но и закон Гей-Люссака и Авогадро. Крениг рассмотрел также вопрос об отклонениях от этих законов. Идеи, им высказанные, привлекли к себе внимание Р. Клаузиуса.

В 1860 г. Максвелл сделал решительный шаг в развитии кинетической теории газов, дав впервые вывод закона распределения скоростей газовых молекул. Максвелл решил ряд задач, сформулированных им в виде предложений. В первом предложении рассматривается чисто механическая задача.

Два совершенно упругих шара, движущихся в противоположных направлениях со скоростями, обратно пропорциональными их массам, сталкиваются друг с другом. Легко доказать, что скорости каждого шара остаются одними и теми же до и после удара и что направления их до и после удара лежат в одной плоскости с линией центров и образуют с ней одинаковые углы. Во втором предложении вводится понятие вероятности, новое для физики того

¹ Цит. по кн.: А. Эйнштейн, Л. Инфельд. Эволюция физики. М., изд-во «Наука», 1965, стр. 40.

² J. Waterston. «Phil. Trans» (A), 1892, 183, p. 1—80.

³ W. Rankine. Miscellaneous scientific papers, p. 16.

⁴ См. сб.: «Основатели кинетической теории материи». М.—Л., ОНТИ, 1937, стр. 31—38.

¹ См. сб.: «Основатели кинетической теории материи». М.—Л., ОНТИ, 1937, стр. 36.

² «Ann. Physik», 1856, Bd. 99, S. 315.

времени. Определяется вероятность того, что направление скорости после удара лежит между заданными пределами, а также равновероятность всех направлений отражения. Максвелл полагает, что столкновения между молекулами газа приводит не к выравниванию скоростей, а к статистическому их распределению.

Работы Максвелла были важнейшим шагом в дальнейшем развитии кинетической теории. До этого средняя скорость газовых частиц вычислялась в предположении, что давление в любом замкнутом объеме одинаково по всем направлениям. Поскольку невыполнимость этого условия была очевидна, то, естественно, возникал вопрос, насколько скорости отдельных молекул способны отклониться от средних скоростей. Эта задача была поставлена и впервые разрешена Максвеллом. Четвертое положение Максвелла, в котором определялось среднее число частиц, скорости которых лежат между заданными пределами после большого числа столкновений между большим числом одинаковых частиц, далеко выходило за пределы общепринятых тогда методов. Оно проложило путь в новую область, оказавшуюся крайне плодотворной для атомистики.

Получив функциональное уравнение, которому удовлетворяет

несложного вида функция $f(x) = \frac{1}{\alpha \sqrt{\pi}} e^{-\frac{x^2}{\alpha^2}}$, Максвелл вывел

четыре заключения:

1. Число частиц, скорость которых, разложенная в определен-

ном направлении, лежит между x и $x + dx$, равно $N \frac{1}{\alpha \sqrt{\pi}} e^{-\frac{x^2}{\alpha^2}} dx$,

где N — общее число частиц, x, y, z — составляющие скорости.

2. Число частиц, действительные скорости которых лежат меж-

ду v и $v + dv$, равно $N \frac{4}{\alpha^3 \sqrt{\pi}} v^2 e^{-\frac{v^2}{\alpha^2}} dv$.

3. Среднее значение скорости $\bar{v} = \frac{2\alpha}{\sqrt{\pi}}$.

4. Среднее значение квадрата скорости $\overline{v^2} = \frac{3}{2} \alpha^2$.

Выводы Максвелла, однозначно вытекающие из основных предположений, означали, что в каждом газе при совершенно равномерной температуре возможны самые различные скорости, но очень большие и очень малые скорости имеют весьма незначительные вероятности. Молекулы движутся главным образом со средними скоростями. Вероятности для каждой из координат у Максвелла выражены одинаково и при составлении основного функционального уравнения перемножаются. Перемножение вероятностей возможно только в том случае, если составляющие данного сложного события независимы друг от друга. Многие, не без основания, считали, что это положение требует дополнительного доказательства, а потому данное Максвеллом обоснование закона распределения скоростей рассматривали как недостаточно строгое.

В то время гипотетическими были исходные представления о молекулах и их движении. Непосредственных опытов, доказыва-

ющих правильность распределения Максвелла, не существовало. Надо отметить, что опытное подтверждение закона Максвелла и в дальнейшем было дано первоначально не на молекулах, а на ионах, благодаря тому, что заряд иона позволяет легко им управлять. Лишь в дальнейшем был разработан экспериментальный метод непосредственной проверки закона Максвелла. При этих условиях строгость методов приобретала для молекулярно-кинетической теории и атомистики особое значение. Анализируя работы Максвелла, Джинс писал: «При помощи соображений, которые, казалось бы, не имели никакого отношения ни к молекулам, ни к динамике их движений, ни к логике, ни даже к здравому смыслу, Максвелл нашел формулу, которая, согласно всем прецедентам и всем правилам научной философии, должна была бы быть безнадежно неправильной. В действительности же, как было впоследствии доказано, она вполне правильна и до наших дней известна как закон Максвелла».

Максвелл был твердо убежден в существовании молекул. Не колеблясь, он ставит атомистику наряду с учением о континууме. Здесь было нечто новое по сравнению с атомизмом Пуассона, Коши. Это новое состояло в стремлении получить картину движения частиц, описываемых уравнениями, определяющими вероятностные состояния. Для атомистики особое значение приобрели VI и XII предложения. В предложении VI доказано, что если две системы частиц движутся в одном и том же сосуде, то средняя живая сила каждой частицы одинакова в обеих системах.

В предложении XII определено давление на единицу площади стенки сосуда, вызванное ударами молекул о стенку.

Посредством этих положений Максвелл приходит к выводу одного из фундаментальных положений атомистики — закону Авогадро.

«Мы видели, — пишет Максвелл, — что на основании гипотезы об упругих частицах, движущихся по прямолинейным путям, давление газа может быть объяснено, если исходить из допущения, что квадрат скорости прямо пропорционален абсолютной температуре и обратно пропорционален удельному весу газа при постоянной температуре, так что при одном и том же давлении и одной и той же температуре $N M v^2$ является общим для всех газов. Но в предложении VI мы установили, что, когда две группы частиц передают друг другу свое движение, то $M v^2$ в каждом из них имеет одно и то же значение. Отсюда следует, что N , число частиц в единице объема, является при равном давлении и равной температуре одинаковым для всех газов. Этот вывод находится в согласии с законом химии, в силу которого равные объемы газов химически эквивалентны»¹.

В 1868 г. Максвелл, исходя из более строгих положений, дал другое доказательство закона распределения.

Внутреннее сопротивление при движении «капельных жидкостей» экспериментально исследовалось Кулоном уже в начале XIX в. (1800)². Сэбин (1929) показал, что замедление колебания

¹ Д. К. Максвелл, Пояснения к динамической теории газов, В сб.: «Основатели кинетической теории материи». М.—Л., ОНТИ, 1937, стр. 201.

² Ch. A. Coulomb. Expériences destinées à déterminer la cohésion des fluides et les lois de leur résistance dans le mouvements très lents. «Mem. de l'inst.». P., 1800, v. III, p. 246—305.

маятника зависит от того, происходили ли эти колебания в сосуде, наполненном при одном и том же давлении воздухом или водородом. Замедления маятника оказались не пропорциональными плотностям газов¹. Гаген² и Пуазель³ исследовали внутреннее сопротивление при течении жидкости в узких трубках. Общее направление работ по трению и вязкости было преимущественно экспериментальным.

В 1860 г. Максвелл предложил объяснение механизма внутреннего трения в газах, основанное на кинетической теории газов. Молекулы определенного слоя, движущегося с определенной скоростью в направлении оси X наряду с упорядоченным движением, обладают хаотическим движением во всех направлениях. Определенное число молекул переходит из верхнего слоя в менее быстро движущийся слой, расположенный под ним, и при столкновении передают им часть своего количества движения. В результате происходит торможение верхнего слоя и ускорение нижнего слоя. Медленнее движущиеся молекулы нижнего слоя, проникая в верхний слой, при столкновении с молекулами верхнего слоя также увеличивают свое количество движения.

В предложении XIII Максвелл определяет внутренне трение в системе движения частиц.

$$F = \frac{1}{3} \rho l v \frac{du}{dz} = \mu \frac{du}{dz},$$

$$\mu = \frac{1}{3} \rho l v = \frac{1}{3} \sqrt{\frac{Mv}{\pi s^2}},$$

где ρ — плотность, μ — коэффициент трения, l — средняя длина пути частиц, v — средняя скорость, s — расстояние между центрами в момент столкновения, M — масса частиц. Эти формулы позволяют определить среднюю длину пути частицы между двумя последовательными столкновениями. Максвелл считал удивительным то, что коэффициент трения не зависит от плотности. Он писал: «Этот вывод из математической теории является крайне поразительным и единственный опыт, с которым я встретился в этой области, его как будто не подтверждает»⁴. В 1866 г. Максвелл провел опыты по методу, найденному Кулоном. Одновременно такие же опыты произвел О. Э. Мейер. Результаты этих опытов широко известны.

Перенос количества движения молекул из одной области в другую приводит к выравниванию скоростей и с этим связаны вязкость и трение. При отсутствии теплового равновесия в газе имеют место потоки молекул — диффузия и потоки энергии.

¹ E. Sabin. On the reduction to a vacuum of the vibrations of an invariable pendulum. «Phil. Trans», 1829, p 207—239.

² G. Hagen. Ueber die Bewegung des Wassers in engen cylindrischen Röhren. «Pogg. Ann.», 1839, 46, S. 423—442.

³ L. Poiseuille. Recherches expérimentales sur le mouvement des liquides dans les tubes de très petits diamètres. C. R. 1840, 11, 961—967, 1041—1048; 1841, 12, 112—115; «Pogg. Ann.», 1843, 58, 424—447.

⁴ В сб.: «Основатели кинетической теории материи». М.—Л., ОНТИ, стр. 203.

Потоки энергии связаны с переходом энергии теплового движения молекул из одной области газа в другую (теплопроводность). Все явления переноса кинетическая теория газов Максвелла позволяла рассматривать с единой точки зрения. Дальнейшие опыты и строгий анализ теории показали, что закон Максвелла должен быть видоизменен, не нарушая при этом целостности атомистической картины мира.

Творцы кинетической теории, опираясь на атомистику, одновременно развивали и ряд основных ее положений. В речи, произнесенной на съезде Британской ассоциации в Бредфорде в 1873 г., Максвелл тесно связывает вопросы атомистики с общепhilosophическими проблемами конечности и бесконечности. «Человеческий ум, — пишет он, — в недоумении останавливается перед многими трудными вопросами. Бесконечно ли пространство, и если да, то в каком смысле? Бесконечен ли по своему протяжению материальный мир, и все ли места внутри того, что протяженно, также наполнены материей? Существуют ли атомы, если материя делима до бесконечности?»¹. В этой же речи Максвелл отмечает, во-первых, переход от уравнений динамики к статистическому методу, не имеющему притязаний на абсолютную точность, свойственную законам абстрактной динамики, и, во-вторых, то, что мы наряду с этим твердо узнаем, что молекулы образованы по одному и тому же типу. Максвелл подробно анализирует три рода диффузии — материи, количества движения и энергии.

В 1875 г. в лекции «О динамическом доказательстве молекулярного строения тел» Максвелл обратился к вопросу о возможности молекулярной структуры эфира. Для атомистики XIX в. вопрос этот при той роли, какая придана была эфиру, стал существенным. «Прежде всего, — пишет Максвелл, — молекулярный эфир был бы не чем иным, как газом. Мы можем, если хотим, предположить, что каждая из его молекул равна одной тысячной, одной миллионной части молекулы водорода и что они могут свободно проходить в промежутке между обычными молекулами, но, как мы видим, само собой установилось бы равновесие между движением обычных молекул и движением молекул эфира. Другими словами, эфир и находящиеся в нем тела стремились бы к выравниванию температуры и эфир подчинялся бы в отношении давления и температуры обычным газовым законам. Среди других свойств газов он обладал бы и свойством, установленным Дюлонгом и Пти и заключающимся в том, что теплоемкость единицы объема эфира должна была бы быть равна теплоемкости единицы объема любого обычного газа при том же давлении. Поэтому мы обязательно обнаружили бы его присутствие при наших опытах с удельной теплотой, так что мы можем утверждать, что эфир не обладает молекулярным строением»².

В статье «Атом» Максвелл уточняет основные понятия атомистики, дает краткий исторический очерк ее развития, анализ современной ему молекулярной физики и, в частности, молекулярной теории газов, анализирует возможность дискретной структуры эфира.

¹ Д. К. Максвелл. Молекулы. (Речь, произнесенная на съезде Британской ассоциации в Бредфорде.) Опубликовано в «Nature», 1875, 8. См. стр. 71 в этом сборнике.

² «Nature», 1875, т. XI. См. стр. 119 в этом сборнике.

ра, указывает на различия между динамической и химической трактовками молекулы.

«Химики, — пишет Максвелл, — убеждаются опытом, каковы отношения масс различных веществ в соединении. Отсюда они выводит эквиваленты различных веществ, взяв за единицу химический эквивалент одного вещества, скажем водорода. Свои доводы, на которые они опираются, они заимствуют исключительно из химических соединений. Таким образом, чтобы дать себе отчет в фактах, являемых соединениями, допускается, что причина, почему вещества соединяются в определенных отношениях, заключается в том, что молекулы веществ находятся в отношении своих химических эквивалентов и что то, что мы называем соединением, есть некоторое действие, имеющее место, когда молекулы одного вещества соединяются с молекулой другого»¹.

Отдав должное химическим исследованиям, Максвелл анализирует тот вклад, который внесла кинетическая теория в трактовку о молекулах, используя чисто динамические методы.

Учение о центральных силах не явилось ни основным, ни решающим как в развитии атомистики, так и в развитии кинетической теории газов. Уже в конце XIX в. Больцман усмотрел, что слияние кинетической теории с учением о центральных силах — явление чисто случайное и отметил другую интересную связь теории газов с электродинамикой. Сходство теории газов с электродинамикой заключается в том, что видимое движение газа, внутреннее трение и тепло рассматриваются как явления, кажущиеся существенно различными только в стационарных или приближенно стационарных состояниях, тогда как в переходных случаях невозможно резко разделить видимые движения от тепловых. В электродинамике Максвелла в переходных случаях также невозможно провести разделение электростатических и электродинамических сил. «Как раз, — пишет Больцман, — в этих переходных областях теория электричества Максвелла внесла нечто совершенное новое. Также и теория газов в таких переходных случаях приводит к совсем новым законам, из которых вытекают обычные гидродинамические уравнения, исправленные на трение и теплопроводность только как приближенные формулы...»². Интересно отметить, что хотя структуры теории газов электричества не идентичны, но прерывистая структура, присущая самим объектам, сказала во многом, в том числе и в том, что методы, разработанные в кинетической теории газов, применимы и к электронной теории металлов.

У Максвелла мы встречаем живой интерес ко многим другим аспектам атомистики. Он отмечает, что свойства вихревых колец подали В. Томсону мысль построить новую форму атомистической теории. Вихревое кольцо Гельмгольца, которое Томсон считает истинной формой атома, количественно неизменно в отношении его объема и напряжения, а качественно — в отношении степени сложности его внутреннего строения. Наряду с тем оно способно и к бесконечным изменениям формы и может совершать колебания различных периодов подобно молекуле. Высшее достоинство вих-

ревой теории атома Максвелл усматривает в том, что она не допускает введения гипотетических сил. Подробно также анализирует Максвелл вопрос о теории массы у Томсона. Он писал: «...одно из первых, если не самое первое требование полной теории материи есть объяснение, во-первых, массы и, во-вторых, тяготения. Объяснить массу — это может показаться предприятием абсурдным. Мы вообще предполагаем, что сущность материи — быть носителем количества движения и энергии, и даже Томсон в определении своей основной жидкости приписывает ей обладание массой. Однако, согласно Томсону, хотя основная жидкость и есть единственная истинная материя, но то, что мы называем материей, не есть сама основная жидкость, а способ движения этой основной жидкости. Вихревое кольцо и есть этот способ движения, и оно являет нам пример постоянства...материи. Основная жидкость, эта единственная истинная материя, совершенно недоступна нашим чувствам, если она не наделена способом движения, превращающим известные ее участки в вихревые кольца и таким образом делающим ее молекулярной. Следовательно, в теории Томсона масса тел требует объяснения. Нам нужно объяснить инерцию чего-то, что есть лишь способ движения, инерция же есть свойство материи, а не способа движения...»¹.

Яркая оценка деятельности Максвелла в развитии кинетической теории газов была дана Ланжевеном. Часто случается, писал Ланжевен, что особенная форма индивидуальных законов ступает вываляется или даже исчезает, когда исследователь переходит к целому, в котором некоторые свойства лишь результат очень большого числа имеющих элементов, и подчинены исключительно статистическим выводам. В таком случае принципы и законы должны дать повод к значительным отклонениям и колебаниям.

Наблюдение над отклонениями в весьма различных областях принесло физике убедительные аргументы в пользу существования прерывных элементов и дало общий и точный метод определения количества и величины этих элементов. Чтобы создать эту физику прерывности, следует использовать данные статистики и беспрестанно пользоваться вычислениями теории вероятностей. Введение же в физику теории вероятностей было впервые осуществлено Максвеллом в связи с кинетической теорией газов. «Легко себе представить, что применение этого способа расчетов, зачастую весьма сложного, к совершенно новой области, не могло осуществиться сразу... Первые заключения Максвелла страдали отсутствием необходимой точности и вызвали возражения, которые, наряду с трудностями вычислений, препятствовали большинству физиков уделить кинетической теории заслуженное ей внимание и признать все совершенство полученных результатов...»².

Дальнейшее развитие физики целиком оправдало это чужеродное для классической физики направление, показав одновременно неизбежность и правомерность тех упрощений, которые были допущены при обосновании теории.

У. И. Франкфурт

¹ См. стр. 133 в этом сборнике

² Л. Больцман. Лекции по теории газов. М., ГТТИ, 1953, стр. 25.

¹ См. стр. 151—152 в этом сборнике.

² П. Ланжевен. Физика прерывности. (В кн.: П. Ланжевен. Избранные произведения. М., ИЛ, 1949, стр. 256—257).