Развитие кинетической теории газов (Максвелл) *

С. Дж. Бруш

Существенным свойством газа является случайное движение составляющих его частиц: фактически слово «газ» означает само по себе хаос [1]. Вначале теоретики кинетической теории [2] стремились игнорировать это свойство. Они основывали свои математические доказательства на допущении, что все молекулы движутся с одной и той же скоростью, а иногда вдобавок к этому предполагали, что все молекулы расположены правильными рядами в пространстве, а затем предлагали приемлемые аргументы для доказательства, что результаты были бы теми же самыми, если бы молекулы двигались случайным образом. Именно Максвеллу мы обязаны введением статистического подхода в кинетическую теорию.

Основная гипотеза Максвелла состояла в том, что многочисленные столкновения между молекулами газа, вместо того, чтобы привести к выравниванию скоростей молекул, как предполагали некоторые ученые [3], на деле приводят к статистическому распределению скоростей, в котором могут встречаться любые скорости с известной вероятностью. Существование единственного равновесного распределения, к которому будут стремиться другие распределения, долгое время не было строго доказано и оставалось предметом разногласий в течение многих лет. Однако успех мощных методов статистической механики, которая использует максвелловское распределение в качестве основы для расчета макроскопических свойств физических систем, а также и более непосредственные эксперименты доказывали, что эта гипотеза в основном правильна [4].

Первая статья Максвелла по кинетической теории была доложена на собрании Британской ассоциации в 1859 г. [5]. Он начал с указания на то, что при столкновении двух упругих шаров все направления отдачи являются равноправными [6]. По-видимому, он считал, что этот факт обеспечивает не только то, что все направления движения являются равновероятными в газе, но также и то, что вероятность распределения для каждого компонента скорости не зависит от значений других компонентов. Первое доказательство его закона распределения основывалось на этих двух допущениях. Максвелл позже понял, что справедливость второго предложения не очевидна, и потому попытался дать другое доказательство [7], в котором это свойство выводилось, а не являлось допущением.

Оригинальный вывод закона распределения таков:

«Найти среднее число частиц, скорости которых после большого числа столкновений между большим числом равных частиц лежат между заданными пределами.

Пусть N — целое число частиц. Пусть x, y, z — компоненты скорости каждой частицы в трех взаимно перпендикулярных направлениях, и пусть число частиц, для которых x лежит между x и $x + dx$, будет $Nf(x)\,dx$, где $f(x)$ функция от x, которая должна быть определена.

Число частиц, для которых y лежит между y и $y + dy$, будет $Nf(y)\,dy$; а число частиц, для которых z лежит между z и $z + dz$, будет $Nf(z)\,dz$, где под f всегда подразумевается одна и та же функция.

Наличие скорости x никак не влияет на скорости y или z, потому что все слагающие направлены под прямыми углами друг к другу и не зависят друг от друга, так, что число частиц, скорости которых лежат между x и $x + dx$ и также между y и $y + dy$ и между z и $z + dz$, равно

$$Nf(x)\,f(y)\,f(z)\,dx\,dy\,dz.$$

Если предположить, что эти N частиц начинают движение из начала координат в тот же момент, то это число

* Из журнала «Annals of Science», 1958, 14, № 4, стр. 243—255.

означает число частиц в элементе объема ($dx\,dy\,dz$) через единицу времени, а число, отнесенное к единице объема, будет

$$Nf(x)\,f(y)\,f(z).$$

Но направления координат вполне произвольны, и поэтому это число должно зависеть только от расстояния от начала, т. е.

$$f(x)\,f(y)\,f(z) = \varphi(x^2 + y^2 + z^2).$$

Разрешая это функциональное уравнение, находим

$$f(x) = Ce^{Ax^2}, \quad \varphi(r^2) = C^2 e^{Ar^2}.$$

Если считать A положительным, то это число частиц будет возрастать со скоростью, и мы найдем, что полное число частиц бесконечно. Поэтому допустим, что A отрицательно и равно $-1/\alpha^2$, так что число частиц, заключенных между x и $x + dx$, равно

$$NCe^{-x^2/\alpha^2}\,dx.$$

Интегрируя от $x = -\infty$ до $x = +\infty$, находим полное число частиц

$$NC\sqrt{\pi}\,\alpha = N, \quad \text{откуда } C = \frac{1}{\alpha\sqrt{\pi}},$$

а поэтому $f(x)$ равно

$$\frac{1}{\alpha\sqrt{\pi}}\,e^{-x^2/\alpha^2}.$$

Отсюда мы можем вывести следующие заключения:

1) Число частиц, скорость которых после разложения по определенному направлению лежит между x и $x+dx$, есть

$$N\frac{1}{\alpha\sqrt{\pi}}\,e^{-x^2/\alpha^2}\,dx.$$

2) Число частиц, фактическая скорость которых лежит между v и $v + dv$, равно

$$N\frac{4}{\alpha^3\sqrt{\pi}}\,v^2 e^{-v^2/\alpha^2}\,dv.$$

3) Чтобы найти среднее значение v, необходимо сложить скорости всех частиц и разделить на число частиц. В результате получим: средняя скорость $v = \frac{2\alpha}{\sqrt{\pi}}$.

4) Для того чтобы найти среднее значение v^2, нужно сложить все значения вместе и разделить на N среднее значение $v^2 = \frac{3}{2}\alpha^2$. Это больше, чем квадрат средней скорости, как и должно быть» [8].

Обобщение на случай, когда молекулы подвержены действию внешней силы, было выполнено в 1873 г. [9]. Обозначая через (ξ, η, ς) компоненты скорости, можно записать распределение скоростей в данном месте в виде

$$dN = Ce^{AM(\xi^2+\eta^2+\varsigma^2)}\,d\xi\,d\eta\,d\varsigma\,dx\,dy\,dz,$$

где C функция положения [10]. Максвелл считал, что внешняя сила не влияет на скорости в течение очень краткого времени соударений, так что зависимость от скорости будет все еще сохранять вышеприведенную форму, хотя постоянная A может в принципе зависеть от положения. Если сила выводится из потенциала ψ, то «изменения x, y, z, вызванные движением молекул за время δt, суть

$$\delta x = \xi\delta t, \quad \delta y = \eta\delta t, \quad \delta z = \varsigma\delta t,$$

а изменения ξ, η, ς за тот же промежуток времени вследствие действия силы

$$\delta\xi = \frac{d\psi}{dx}\delta t, \quad \delta\eta = \frac{d\psi}{dy}\delta t, \quad \delta\varsigma = -\frac{d\psi}{dz}\delta t.$$

Положим

$$c = \log C \log\frac{dN}{d\xi\,d\eta\,d\varsigma\,dx\,dy\,dz} = c + AM(\xi^2+\eta^2+\varsigma^2).$$

Изменение этой величины вследствие изменений δx, δy, δz, $\delta\xi$, $\delta\eta$, $\delta\varsigma$ равно

$$\left(\xi\frac{dc}{dx} + \eta\frac{dc}{dy} + \xi\frac{dc}{dz}\right)\delta t -$$
$$-2AM\left(\xi\frac{d\psi}{dx} + \eta\frac{d\psi}{dy} + \xi\frac{d\psi}{dz}\right)\delta t + M(\xi^2+\eta^2+\varsigma^2)\cdot$$
$$\cdot\left(\xi\frac{dA}{dx} + \eta\frac{dA}{dy} + \varsigma\frac{dA}{dz}\right)\delta t.$$

Так как число молекул не меняется за время их движения, то эта величина равна нулю, каковы бы ни были значения ξ, η, ζ. И, в силу последнего члена,

$$\frac{dA}{dx}=0, \qquad \frac{dA}{dy}=0, \qquad \frac{dA}{dz}=0$$

или A постоянно во всей области пересекаемой движением молекул.

Теперь, сравнивая первый и второй члены, находим:

$$c = AM(2\psi + B)«. \quad [11]$$

Постоянные A и B могут быть определены, как обычно, через полное число молекул и полную энергию. Когда присутствуют молекулы разных сортов, получается закон распределения такого же вида, в котором A — то же самое для каждого вида молекул (и следовательно, средняя кинетическая энергия для каждого вида одна и та же), но B может быть различным.

Этот закон более строго выведен Больцманом [12] и известен под названием закона распределения Максвелла — Больцмана. В современных обозначениях можно записать его, определив полную энергию (кинетическую плюс потенциальную), молекулы следующим образом:

$$E = \frac{1}{2}M(\xi^2 + \eta^2 + \varsigma^2) + \psi.$$

Этот закон тогда означает, что относительная вероятность нахождения молекулы с энергией E есть

$$e^{-E/kT},$$

где k — постоянная Больцмана, T — абсолютная температура. В таком виде эта формула является фундаментальным постулатом статистической механики, если считать, что энергия может включать также энергию внутриатомных и внутримолекулярных сил.

Другой вклад Максвелла в кинетическую теорию — это его работа о свойствах переноса и, в частности, вязкости. Первый важный результат, полученный им, заключается в том, что для газа, состоящего из жестких шариков, коэффициент вязкости должен быть независим от плотности. Для того чтобы получить этот результат, он воспользовался методом среднего свободного пробега Клаузиуса.

«Пусть система будет разделена на слои параллельные плоскости xy, пусть переносное движение каждого слоя в направлении x есть u, и пусть $u = A + Bz$. Мы должны рассмотреть взаимодействие между слоями с положительной и отрицательной сторон плоскости xy. Сначала определим взаимодействие между двумя слоями dz и dz', расположенными на расстояниях z и $-z'$ с противоположных сторон плоскости, площадь каждого из которых единична. Число частиц в единицу времени, начинающих движение от dz и достигающих расстояния между nl и $(n+dn)l$, равно

$$N\frac{v}{l}e^{-n}\,dz\,dn.$$

Число частиц, заканчивающих пробег в слое dz', равно

$$N\frac{v}{2nl^2}e^{-n}\,dz\,dz'\,dn.$$

Средняя скорость в направлении x, которую имела каждая из частиц до столкновения, равна $A + Bz$, а после столкновения $A + Bz'$. Средняя масса слоя равна M, так что среднее количество движения, сообщаемое каждой частицей, равно $MB(z - z')$. Полное действие этих столкновений выражается поэтому следующим образом:

$$NMB\frac{v}{2nl^2}(z - z')e^{-n}\,dz\,dz'\,dn.$$

Сначала нужно интегрировать по z' между $z'=0$ и $z'=z-nl$. Это дает

$$\frac{1}{2}NMB\frac{v}{2nl^2}(n^2l^2 - z^2)e^{-n}\,dz\,dn$$

для действия между слоем dz и всеми слоями ниже плоскости xy. Затем, интегрируя от $z=0$ до $z=nl$, получим

$$\frac{1}{6}MNBlvn^2e^{-n}\,dn.$$

Интегрируя от $n = 0$ до $n = \infty$, находим полное трение между единицей площади над и под плоскостью:

$$F = \frac{1}{3}MNlvB = \frac{1}{3}\rho lv\frac{du}{dz} = \mu\frac{du}{dz},$$

где μ — обычный коэфициент внутреннего трения:

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

где ρ — плотность, l — средняя длина свободного пробега частицы, v — средняя скорость... [13] (s — расстояние между центрами)».

Предположение, что вязкость не зависит от плотности, допускало ясную экспериментальную проверку справедливости кинетической теории, так как другая, статическая теория заведомо приводила бы к тому, что следовало бы ожидать, что вязкость будет увеличиваться с плотностью (как это действительно имеет место в жидкости). В то время точных экспериментов по вязкости газов еще не было, и Максвелл спроектировал и выполнил сам собственный эксперимент. Он обнаружил, что вязкость воздуха при данной температуре оставалась постоянной при изменении давления между половиной дюйма и тридцатью дюймами [14]. Этот результат, независимо подтвержденный Мейером [15], вероятно, обратил внимание ученых, которые еще не признавали кинетической теории.

Приведенная выше формула подразумевает также, что вязкость должна быть пропорциональна квадратному корню из абсолютной температуры, если считать молекулы упругими шариками. Однако эксперименты, по-видимому, доказывали, что вязкость просто пропорциональна температуре [16]. Тогда Максвелл разработал значительно более общую и детальную теорию переноса свойств в газах, основанную на допущении, что молекулы отталкиваются с силой, обратно пропорциональной n-й степени расстояния между их центрами [17]. Его метод состоял в определении среднего значения различных функций скоростей молекул, которые могут быть записаны в виде интегралов по динамическим переменным, описывающим соударение молекул. Затем он мог отождествить макроскопические свойства, например диффузию, теплопроводность, давление и вязкость с соответствующими средними значениями. В общем этот подход приводит к выражениям типа

$$\iiint Q V^{\frac{n-5}{n-1}} f(\xi, \eta, \varsigma)\, d\xi\, d\eta\, d\varsigma,$$

где Q — некоторая функция компонентов скорости (ξ, η, ζ), зависящая от рассматриваемого свойства, а V — относительная скорость двух соударяющихся молекул [18]. В частном случае $(n = 5)$ V выпадает, и это выражение приводится к среднему значению Q; тогда можно, например, доказать, что вязкость пропорциональна абсолютной температуре независимо от характера функции f [19]. Так как Максвелл полагал, что это действительно имеет место, то в дальнейших своих вычислениях он и принял функцию силы пятой степени. (Молекулы с взаимодействием этого типа теперь называют «максвелловскими».) Позже было показано экспериментально, что зависимость вязкости от температуры более сложна, чем допускал Максвелл, и полное теоретическое объяснение потребовало определения функции распределения скоростей f для неоднородного газа, где максвелловское распределение справедливо только приближенно. За дальнейшей историей этого вопроса мы отсылаем читателя к монографии Чепмена и Коулинга [20].

Проследив в основных чертах развитие теории до того момента, когда она была радикально пересмотрена Максвеллом и Больцманом, мы перейдем теперь к реакции других ученых на эту теорию. Хотя отождествление теплоты с молекулярным движением было достаточно широко принято после 1850 г., по вопросу о строении молекул и их взаимодействиях были значительные разногласия. Вихревая теория атома, разработанная Ранкиным [21] и Гельмгольцем [22], была весьма популярна в этот период. Томсон (лорд Кельвин) допускал, что математическое развитие свойств этих атомов может доказать, что гельмгольцевы кольца являются истинными атомами.

«Вероятно, изящные исследования Д. Бернулли, Герапата, Джоуля, Кренига, Клаузиуса и Максвелла относительно различных термодинамических свойств газов могут содержать все те положительные допущения, которые они были вынуждены сделать относительно сил взаимодействия между двумя атомами и кинетической энергии, приобретаемой отдельными атомами или молекулами, которым удовлетворяют вихревые кольца, не требуя никаких дополнительных свойств от вещества, движения которого составляет их, кроме инерции и несжимаемости в занимаемом ими пространстве. Полное математическое исследование взаимодействия между двумя вихревыми кольцами данных величин и скоростей, проходящих одно через другое по любым двум линиям, направленным так, что они никогда не сближаются более, чем на большое кратное число диаметров каждого, есть вполне разрешимая математическая задача; а новизна привходящих обстоятельств представляет трудности возбуждающего характера. Решение этой задачи будет основой предположенной новой кинетической теории газа» [23].

Таким образом, точка зрения Томсона являлась не столько оппозиционной к кинетической теории, сколько желанием, чтобы эта теория была разработана с иной точки зрения. Максвелл также поддерживал вихревую теорию, потому что она казалась обнадеживающей в отношении вывода закона внутриатомных сил из основных принципов.

«Если будет построена теория такого рода после преодоления огромных математических трудностей в этом вопросе, теория, которая будет представлять в какой-то степени действительные свойства молекул, то она будет занимать совершенно иное научное положение, чем те теории молекулярного действия, которые построены на том, что молекула наделяется произвольной системой центральных сил, придуманных исключительно для того, чтобы учесть наблюдаемые явления.

В вихревой теории нет ничего произвольного: ни центральных сил, ни таинственных свойств какого-либо другого рода. Мы не имеем ничего, кроме материи и движения, и вихрь, однажды приведенный в движение, обладает теми свойствами, которые были определены начальным импульсом, и никакие дополнительные предположения здесь невозможны.

Даже при современном неразработанном состоянии теории утверждение индивидуальности и неразрушимости кольцевого вихря в идеальной жидкости должно разрушить общепринятое мнение, что молекула должна представлять очень жесткое тело для сохранения постоянства» [24].

Затем Максвелл рассматривает спектроскопическое доказательство того, что молекула может быть приведена в состояние внутреннего колебания и предсказывает:

«Тогда, если мы желаем получить эталоны длины, времени и массы, которые бы были абсолютно неизменными, мы должны искать их не в размерах или в движении или в массе нашей планеты, но в длине волн и периоде колебаний и в абсолютной массе неуничтожаемых и неизменных, идеально подобных молекул» [25].

Вихревой атом пользовался значительной популярностью в течение многих лет, как способ визуализации атома, но математические исследования, предложенные Томсоном, никогда не были осуществлены. С другой стороны, надежды Томсона и Максвелла на вывод внутриатомных сил из более фундаментальной гипотезы относительно строения атомов были осуществлены в современной теории квантов.

Другая теория строения атомов была описана Цейнером:

«Наиболее широко распространен тот взгляд на строение тел, который рассматривает тело, как составленное из неизменных частиц, «атомов», расстояния которых друг от друга относительно велики... Эти атомы притягивают друг друга... Относительно большие промежутки между молекулами заполнены эфиром... Эфир окружает молекулы и атомы в виде атмосферы. Эти атмосферы, плотность которых уменьшается изнутри наружу, составляют вместе с ядром атома индивидуальное целое. Атом со своей оболочкой из эфира Редтенбахер называет «динамитом»... Только в одном пункте эти взгляды расходятся, а именно в вопросе о том, является ли причиной так называемого теплового движения движение атомов, т. е. материальных частиц тела, или движение эфирных частиц собранных в теле... Редтенбахер считал, что тепловое движение состоит из радиального движения эфирных оболочек, окружающих атомы или молекулы тела. Эти оболочки расширяются и сжимаются... Клаузиус защищал другую точку зрения, с далеко идущими следствиями...» [26].

Цейнер также указывал на то, что ученые, которые пишут по теории света, обычно начинают со сложных гипотез, между тем как те, которые пишут труды о теплоте, «редко начинают с предположения о специфическом роде теплового движения... Вообще в математических разработках избегали определенных предположений относительно природы движения, которое мы называем теплотой» [27].

Тиндаль в лекции от 1862 г. указывал, что «...идея относительно газовых частичек, которая в настоящее время с успехом поддерживается, это — идея, что частицы летят по прямым линиям сквозь пространство» [28].

В сноске он ссылается на Джоуля, Кренига, Максвелла и Клаузиуса. Он рассматривает диффузию какого-либо благовония в комнате с точки зрения кинетической теории и производит эксперимент для иллюстрации поведения газов.

Но в 1863 г. в другой статье он, по-видимому, игнорирует кинетическую теорию: «...среда, таким образом, охватывает наши атомы; внутри нашей атмосферы находится вторая, более тонкая атмосфера, в которой атомы кислорода и азота как бы подвешены в виде зерен... Мы не только должны представлять себе наши атомы, подвешенными в этой среде, но должны представлять себе их совершающими колебания в этой среде. В этом движении атомов и состоит то, что мы называем их теплотой. ...Мы должны представлять себе, что это движение сообщается среде, в которой атомы совершают колебания» [29].

Беркс в 1862 г. опубликовал книгу «О материи и эфире или тайна законов физического изменения». Рецензент «Philosophical Magazine» цитирует из этой книги следующий абзац:

«Теплота представляет собой просто атомную или молекулярную живую силу. Ощущаемая теплота зависит от колебаний твердых атомов, переносимых через отталкивания составляющего их или прилежащего эфира к соседним атомам... Теплота жидкости состоит из живой силы каждого атома при вращении его вокруг собственной оси с наибольшим моментом, причем полярность соседних атомов ослабляется или нарушается. Теплота парообразования состоит из живой силы, расходуемой или поглощаемой на отталкивание химических атомов на большее среднее расстояние за пределы максимальной силы сцепления».

Несмотря на подобие кинетической теории и других атомных теорий, которые были рассмотрены на страницах «Philosophical Magazine» прежде, рецензент говорит:

«Конечно, все эти многочисленные утверждения могут рассматриваться только как выражение личных представлений, соответствие которых физическим реальностям не доказано ни непосредственными объяснениями явлений, ни объяснениями, полученными путем математических рассуждений» [30].

Но в 1863 г. еще два ученых поддержали кинетическую теорию. В Англии Томас Грехэм, указывая, как кинетическая теория объяснила его эксперименты по диффузии, писал:

«В соответствии с общепринятой теперь физической гипотезой газ состоит из твердых и идеально упругих сферических частичек или атомов, которые движутся во всех направлениях и наделены различными степенями скорости в различных газах» [31].

В Германии Стефан применил кинетическую теорию к вычислению скорости звука, решив, что как теплота, так и звук, передаются в газе с одинаковой скоростью, но что количество тепла, переносимое путем теплопроводности, относительно мало потому, что, как он думал, в каждом соударении скорости молекул усредняются. Таким образом, только половина разности температур переносится от одного слоя следующему [32].

Кинетическая теория также рано получила признание в Америке; так, в 1861 г. Ньюком докладывал на собрании Американской академии искусств и наук в Бостоне:

«Одна из наиболее изящных гипотез, когда-либо предложенных в физике, это гипотеза, которая позже была известна под названием «динамической теории газов» [33].

Он ссылается на статьи Максвелла и упоминает о разногласиях по вопросу об удельных теплотах, заключая:

«Учитывая количество и разнообразие явлений в газах, которые объясняются этой теорией, и, в частности, точность, с которой она объясняет необъяснимые до сих пор явления диффузии, можно считать, что эта теория имеет значительную вероятность в ее пользу. Небольшие разногласия между наблюденным и рассчитанным отношением удельных теплот (1,42 и 1,33), возможно, объясняются некоторым свойством частиц, не принятым во внимание в математическом анализе» [34].

Другой американец, Леконт, рассматривал различные теории скорости звука в статье, написанной в 1861 г. и опубликованной в «Philosophical Magazine» в 1864 г. Он ссылался на формулу Герапата для скорости звука, которая, «по-видимому, являлась выводом из замысловатых спекуляций по молекулярной физике, основу которых составляют атомные соображения». Он также говорил, «что тот факт, что развитие динамической теории теплоты пролило столько света на теорию распространения звуковых волн в атмосфере, служит, наряду со многими другими, иллюстрацией связи между отдельными разделами физической науки» [35].

Поттер, отвечая на эту статью, не соглашался с такой оценкой динамической теории:

«Что касается взаимной поддержки, которую оказывают друг другу теория звука и механическая теория теплоты, как утверждает доктор Леконт, то чем меньше будет об этом сказано, тем лучше» [36].

Леконт и Поттер не сумели принять во внимание кинетическую теорию Клаузиуса и Максвелла.

Густав Фехнер также игнорировал кинетическую теорию. Он писал: «Со времени появления предыдущего издания настоящего труда (1855) положение физической атомистики не изменилось существенно, она только развивалась дальше и дальше и тем самым все крепче укоренялась — подобно дереву, которое по мере того, как оно выпускает больше ветвей, крепче укореняется» [37].

В 1864 г. Кролль критиковал теорию излучения Тиндаля, основанную на «движениях» атома поперек центров равновесия, внешних по отношению к нему. Он утверждал, что «... атом сам по себе по *существу упруг*. В самом деле, если тепловые колебания не состоят из движений атома, тогда теплота должна состоять из попеременных расширений и сжатий самого атома. Это, в свою очередь, противоречит обычному представлению о том, что атом по существу тверд и непроницаем. Но это благоприятствует современному представлению о том, что материя состоит из силы сопротивления, действующей из некоторого центра» [38].

Нортон, американец, предлагает подобную же теорию атома, в котором теплота зависит от молекулярного притяжения и отталкивания [39]. Ни Кролль, ни Нортон не ссылаются на кинетическую теорию, хотя Кролль в позднейшей статье разработал свои взгляды на атом:

«Общее понятие материи, однако, начинает отрицаться многими ведущими физиками и химиками, а именно то, что материя состоит из атомов, по существу твердых, неделимых и непроницаемых и бесконечно жестких. Излишне, пожалуй, говорить, что это представление полностью гипотетично... Все, что следует по необходимости подразумевать в материи, поскольку это касается свойства, которое называется жесткостью или твердостью, это — то, что это свойство либо является *силой* сопротивления в пространстве, либо *веществом*, которое проявляет сопротивление, как свойство... Наиболее философским способом выражения будет — утверждать вместе с Фарадеем («Phil. Mag.», февраль 1844 и май 1846 г.), что атом есть просто центр силы...» [40].

Следующей из многих атомных теорий была теория Чаллиса, которая основывалась на гидродинамических исследованиях. Чаллис говорит о своей теории:

«Я предполагаю, что упругая жидкость состоит из инертных сферических атомов постоянной величины, каждый из которых, благодаря отражению эфирных колебаний от его поверхности, становится центром отталкивательной силы, причем колебания по необходимости таковы, что их динамическое действие удерживает атомы на расстоянии друг от друга» [41].

В другой статье в 1865 г. он рассматривает математически возможность того, что колебательные движения эфира создают «перманентные трансляционные движения атомов» и намекает на то, что силы теплоты, агрегации и гравитации объясняются этим явлением [42]. Однако он нигде не ссылается на кинетическую теорию.

Но в 1865 г. Гирдельстон писал:

«То, что газы суть тела, частицы которых движутся по прямым линиям, теперь является не гипотезой, а фактом, основанным на физических доказательствах, полученных из явлений диффузии, теплоты и т. д. [43].

Бальфур Стюарт в своем учебнике теплоты (1866) также считал, что эта теория была установлена, и ссылался на эксперименты Максвелла по вязкости [44].

В 1867 г. Науман использовал кинетическую теорию для оценки размеров и скоростей молекул [45] и рассуждал о состоянии теории.

«Непрерывное развитие механической теории теплоты дало постоянно усиливающееся основание для поддержки точки зрения Клаузиуса, что тепловое содержание идеального газа... представляется движением молекул и движением атомов, составляющих молекулы. В частности, принцип Клаузиуса, согласно которому живая сила этого движения молекул для всех газов пропорциональна абсолютной температуре... получил изящное экспериментальное подтверждение в новейших исследованиях О. Э. Мейера по внутреннему трению в газах...» [46].

Науман также ссылался в качестве доказательства в пользу кинетической теории на «новейшие микроскопические наблюдения (F i c k, «Die Naturkräfte in ihrer Wechselbeziehung») того, что мельчайшие частицы, находящиеся во взвешенном состоянии в воздухе, обладают вибрационным движением...» [47].

Артур Рансом в 1867 г. указывал на то, что теории молекулярного строения тел основывались на форме и размерах составляющих их частиц (Дальтон), на наличии у них одной или более полярных осей (Гирдельстон) и на их колебаниях в различных орбитах. Явления теплоты, света, электричества и т. д. использовались как указание на обладание материальными частицами невесомых атмосфер с различными свойствами (Нортон, цит. соч. и электромагнитная теория Максвелла). Но Рансом не признавал ни одной из этих теорий; он полагался на молекулярные силы, которые представляли собой обратную функцию расстояния в какой-то большой степени [48].

В 1868 г. Стоней писал:

«Динамическая теория молекулярного строения газов, которая, если я не ошибаюсь, должна быть поставлена в один ряд как по значению, так и по вероятности с волновой теорией света, по-видимому, еще не встречает того всеобщего внимания и признания, которых она, кажется, заслуживает» [49].

А. Казин указывал на то, что калорическая теория теперь оставлена, но он колебался в признании кинетической теории, потому что эта теория настолько спекулятивна, что единственный противоречащий ей эксперимент может ее опровергнуть [50]. Но Казин теперь был в меньшинстве, так как большинство ученых к 1870 г., по-видимому, признавали кинетическую теорию (по крайней мере, молчаливо). Позднейшие нападки на эту теорию исходили не от приверженцев тепловой теории, а от тех, которые, подобно Маху и Оствальду, отказывались вообще верить в существование атомов, или от тех, которые, подобно лорду Кельвину, Лошмидту и Цермело, выдвигали математические возражения против утверждения о том, что атомные соударения должны приводить к перманентному состоянию равновесия. Эти возражения привели к дальнейшим уточнениям теории, какими были открытие квантовой природы материи и энергии; но гипотеза о том, что давление газа в основном объясняется атомным движением, выстояла. В качестве заключительного примера цитируем выдержку из статьи Пелля:

«Динамическая теория газов, обязанная главным образом трудам Клаузиуса и Максвелла, помогает нам в некоторой степени. Эту теорию можно считать установленной и являющейся важнейшим добавлением к нашему познанию законов неорганической материи, которое было сделано нашим поколением» [51].

Примечания

1. См. «Oxford English Dictionary».
2. S. G. Brush. «Annals of Science», 1957, **13**, 177, 273.
3. Например, Jochmann «Zts. f. Math. u. Phys.». 1860, **5**, 128.
4. Ornstein v. Wyk. «Zts. Phys.», 1932, **78**, 734; Estermann, Simpson and Stern. «Phys. Rev.» 1947, **71**, 238; Kofsky and Levinstein. «Phys. Rev.», 1948, **74**, 500.
5. Maxwell. «Phil. Mag» (4th ser.), 1860, **19**, 19; «The Scientific Papers of James Clerk Maxwell», N. Y., 1952, т. 1, стр. 377.
6. Maxwell. «Phil. Mag.,» 1860, **19**, 21; Papers, I, 379.
7. Maxwell. «Phil. Trans.», 1867, **157**, 62; «Phil. Mag.», 1868, **35**, 185; Papers, II, стр. 43.
8. Maxwell. «Phil. Mag.,» 1860, **19**, 22—23; Papers, I, 380—381.
9. Maxwell. «Nature», 1873, 8, 537; Papers, II, стр. 351.
10. Maxwell. «Nature», 1873, 8, 537; Papers, II, стр. 353.
11. Maxwell. «Nature», 1873, 8, 537; Papers, II, стр. 354.
12. Boltzmann. «Sitzber. K. Akad. Wiss.», Vienna, 1875, **72**, 427.
13. Maxwell. «Phil. Mag.», 1860, **19**, 31; Papers, I, стр. 390—391.
14. Maxwell. «Phil. Trans.», 1866, **156**, 256; Papers, II, стр. 10.
15. Meyer. «Pogg. Annal.», 1861, **113**, 55, 193, 383. См. также: «Die Kinetische Theorie der Gase», Breslau, 1877.
16. Maxwell. «Phil. Trans.», 1866, **156**, 256, 265, 266; Papers, II, стр. 10, 21, 23.
17. Maxwell. «Phil. Trans.», 1867, **157**, 49; «Phil. Mag.», 1866, **32**, 393; 1868, **35**, 129, 185; Papers, II, стр. 26.
18. Maxwell. «Phil. Trans.», 1867, **157**, 62; «Phil. Mag.», 1868, **35**, 145; Papers, II, стр. 42.
19. Maxwell. «Phil. Trans.», 1867, **157**, 83; «Phil. Mag.», 1868, **35**, 211; Papers, II, стр. 70.
20. Chapman and Cowling. The Mathematical Theory of Non-Uniform Gases. Cambridge, 1952.
21. Rankine. «Proc. Roy. Soc. Edin.», 1850, **2**, 275; «Phil. Mag.», 1864, **27**, 313; 1865, **30**, 241; 1870, **39**, 211.
22. Helmholtz. «J. f. reine u. ang. Math.», 1858, **55**, 25; «Phil. Mag.», 1867, **33**, 485.
23. Thomson. «Phil. Mag.», 1867, **34**, 15.
24. Maxwell. Address to the Mathematics and Physics section of the British Association. Liverpool, 1870; Papers, II, стр. 223.
25. Maxwell. Papers, II, 224.
26. Из введения ко второму изданию книги: Zeuner. Grundzüge der mechanischen Wärmetheorie», Leipzig, 1866; цитировано на стр. 6—7 английского перевода «Technical Thermodynamics», L.; цитированные труды Редтенбахера: «Dynamidensystem» и «Grundzüge einer mechanischen Physik», Mannheim, 1857.
27. Zeuner. Technische Thermodynamik, стр. 9.
28. Tyndall. Heat Considered as a Mode of Motion. L., 1863, стр. 76.
29. Tyndall. «Phil. Mag.», 1863, **25**, 200.
30. «Phil. Mag.», 1863, **25**, 304. Цитированный абзац находится на стр. 109 книги Биркса.
31. «Graham. Phjl. Mag.», 1863, **26**, 409.
32. «Stefan. Pogg. Ann.», 1863, **119**, 492; «Phil. Mag.», 1864, **27**, 75.
33. Newcomb. «Proc. Amer. Acad.», 1862, **5**, 112.

34. Там же, 113.
35. Le Conte. «Phil. Mag.», 1864, 27, 1.
36. Potter. «Phil. Mag.», 1864, 27, 107.
37. Fechner. Введение ко второму изданию книги «Ueber die physikalische und philosophische Atomlehre», Lpz., 1864.
38. Croll. «Phil. Mag.», 1864, 27, 346; «Sillmann's J.», 1864, 38, 267.
39. Norton. «Sillmann's J.», 1864, 38, 61; «Phil. Mag.», 1865, 30, 95.
40. Croll. «Phil. Mag.», 1867, 34, 449.
41. Challis. «Phil. Mag.», 1864, 27, 92.
42. Challis. «Phil. Mag.», 1865, 30, 207.
43. Girdolstone. «Phil. Mag.», 1865, 29, 108.
44. Stewart. An Elementary Treatise on Heat. Oxford. 1866, стр. 367.
45. Naumann. «Ann. der Chemie und Pharm.», 1867, 142, 284; «Phil. Mag.», 1867, 34, 373; Naumann. «Liebig's Ann.», 1867, 5, 253; «Phil. Mag.», 1867, 34, 551.
46. Naumann. «Ann. der Chemie und Pharm.», 1867, 142, 265; «Phil. Mag.», 1867, 34, 205.
47. Naumann. «Ber. der deutsch. chem. Ges.», 1869, 2, 690; «Phil. Mag.», 1870, 39, 217.
48. Ransome. «Phil. Mag.», 1867, 33, 360.
49. Stoney. «Phil. Mag.», 1868, 36, 132.
50. Cazin. The Phenomena and Laws of Heat. L., 1868, стр. 29.
51. Pell. «Trans. Roy. Soc. New South Wales», 1871, 5, 27; «Phil. Mag.», 1872, 43, 161.

Максвелл, ток смещения и симметрия *

А. М. Борк

В физике XX столетия соображения математической симметрии и красоты стали играть существенную роль как в создании новых физических теорий, так и в изящном сочетании симметрии с законами сохранения. Иногда приписывают Джемсу Клерку Максвеллу то, что он одним из первых использовал такие соображения при развитии новой теории. Норман Кемпбелл [1] говорит: «Предположим, вы нашли страницу со следующими знаками на ней — не важно, что они что-нибудь означают (уравнения Максвелла без токов смещения — в левой части и с токами смещения — в правой части). Я думаю, вы увидите, что совокупность символов в правой части «красивее» в некотором смысле, чем символы в левой части: они более симметричны. Оказывается, великий физик Джемс Клерк Максвелл около 1870 г. думал то же самое и, подставив символы правой части вместо символов левой части, основал современную физику и, среди прочих результатов, сделал возможным беспроволочный телеграф». Подобные же утверждения встречаются также и в более новых источниках [2].

В аудитории мы привыкли подчеркивать симметрию уравнений Максвелла; мы можем даже позволить аудитории «открыть» ток смещения так, как, по мнению Кемп-

---

* Из журнала «American Journal of Physics», 1963, № 11, стр. 854—859.