

ИЗ ИСТОРИИ ФИЗИКИ

92:53

## К 50-ЛЕТИЮ СО ДНЯ СМЕРТИ МАРИАНА СМОЛУХОВСКОГО

С. Г. Суворов

Пятьдесят лет назад в расцвете своей творческой деятельности, в возрасте 45 лет, скончался выдающийся польский физик Мариан Смолуховский (28. V 1872—25. IX 1917).

Будущий ученый получил образование в Вене, где окончил гимназию и университет (1890—1894); последующие четыре года готовился к научной деятельности в лабораториях Лишмана (Париж), лорда Кельвина (Глазго), Варбурга (Берлин). С 1898 по 1913 г. Смолуховский работал во Львове, где с 1900 г. имел профессию по кафедре теоретической физики; в 1913 г. он переехал в Краков, где занял кафедру экспериментальной физики и вскоре стал ректором университета.

Круг научных интересов Смолуховского был весьма широк — от исследования процессов горообразования, методов подобия в аэродинамике до проблем коллоидной химии, которыми он занимался в последние годы жизни. Но главная проблематика его научного творчества — кинетическая теория газов и жидкостей, теория броуновского движения, трактовка законов термодинамики и молекулярной статистики.

Именно эта область физики была в начале века ареной идеологической борьбы. Основоположники кинетической теории — а среди них были такие корифеи физики, как Максвелл, Клаузиус, Больцман — поставили задачу вывести физические законы в первую очередь газов, а затем и вещества вообще, опираясь на представление об атомах и молекулах. Им, действительно, удалось разработать теорию, которая представила в деталях картину молекулярного движения в газах: было найдено распределение молекул по скоростям в равновесном состоянии газа, средняя длина свободного пробега молекул, число столкновений в секунду, связь средней кинетической энергии молекул с температурой и т. п.; на основе этой картины были истолкованы некоторые наблюдавшиеся газовые законы (закон Бойля и Мариотта, закон теплоемкостей Дюлонга и Пти, закон равномерного распределения энергии по степеням свободы и др.).

Однако гипотеза об атомно-молекулярной структуре вещества, на которую опиралась кинетическая теория, в XIX веке еще не была строго обоснованной и общепризнанной. Непосредственная экспериментальная проверка выводов кинетической теории была осуществлена только позднее, в 1905—1915 гг. Опытная проверка закона максвелловского распределения молекул по скоростям была проведена Ричардсоном в 1908 г. Измерение средней длины свободного пробега водородных ионов выполнили Франк и Герц в 1912 г. Подобные экспериментальные исследования стали возможными только после открытия в конце прошлого века электронов и последующего развития ионной физики: указанные выше эксперименты были осуществлены с ионами, так как их движением было легче управлять и их легче регистрировать.

С другой стороны, в самой кинетической теории заключалась известная слабость, обусловленная исторически ограниченными представлениями о механической природе взаимосвязей молекул и атомов; последние мыслились то как упругие шарики, то как центры механических сил, характер взаимодействия которых приспособлялся *ad hoc* применительно к рассматриваемым задачам. Это обстоятельство привело в последующем к различным поправкам к закономерностям классической кинетической теории и статистики. Но уже в конце прошлого века лорд Кельвин указывал на случаи, когда закон равномерного распределения энергии не выполнялся.

Все эти обстоятельства способствовали тому, что в конце девятидесятых годов и в начале следующего десятилетия ряд естествоиспытателей и философствующих физиков (Оствальд, Мах, Гельм, Дюгем и др.) пытались развить иную гносеологическую основу физической науки, в которой исключались предварительные гипотезы о структуре вещества, как недостаточно обоснованные, связывающие мышление и могущие привести к ложным выводам. Некоторые из этих гносеологов считали, что физическую теорию надо строить на основе дальнейшей разработки таких общих

и обоснованных понятий, как энергия, или вообще на основе исключительно термодинамических понятий. Термодинамика в известной мере противопоставлялась кинетической теории и атомистике. Даже такой крупный ученый, как Планк, безусловно превыше всего ценивший научную истину, признавался в «Научной автобиографии» (1948), что к атомистической теории в то время он «относился не только равнодушно, но даже несколько отрицательно» \*); много лет в этот период Планк посвятил разработке проблем термодинамики.

Однако односторонне абсолютизировались не только кинетические представления, но и закономерности термодинамики. Известно, что односторонняя трактовка термодинамического понятия энтропии привела Клаузиуса к выводу о господствующей в мире тенденции возрастания энтропии до некоторого предельного максимума, который достигается при абсолютном равновесном состоянии мира; мыслилось, что последнее состояние само собой никогда уже не нарушается и представляет собой «тепловую смерть» мира, при которой замирают все процессы, энергия оказывается рассеянной и обесцененной. Несомненно, эти «научные выводы» явились блестящей находкой для различных мракобесов.

С этих позиций кинетические представления подвергались острой критике, которая казалась неопровержимой: поскольку термодинамические законы представляются абсолютными и тенденция возрастания энтропии — необратимой во времени, постольку в основе тепловых процессов не могут лежать законы механики, обратимые по своей природе.

Ярым защитником атомистических идей и кинетической теории выступил в конце прошлого века венский физик Людвиг Больцман (1844—1906). Он считал атомно-молекулярную структуру вещества достаточно обоснованной. Поэтому Больцман перевернул постановку проблемы: поскольку в основе термодинамических процессов лежат обратимые кинетические процессы, постольку необратимость термодинамических процессов не может быть абсолютной. Эта идея руководила Больцманом. Его важнейшей заслугой перед наукой является вывод, что энтропия системы не имеет абсолютного значения, она определяется вероятностью состояния системы; так он пришел к знаменитому соотношению  $S = k \ln W$ , где  $S$  — энтропия,  $k$  — некоторая константа, равная  $R/N$ , а  $W$  — вероятность состояния системы (впрочем, точнее им не определена). Эту трактовку энтропии Больцман направил против вывода о «тепловой смерти» мира. С этой позиции равновесное состояние мира, соответствующее максимуму энтропии, Больцман трактует не как конечное, а как лишь наиболее вероятное состояние, от которого в принципе возможно дальнейшее развитие мира, уже с последующим уменьшением энтропии. Классическая статистическая механика должна допускать возможность такого отклонения от равновесного состояния системы. На этом пути мыслилось разрешение противоречий между кажущейся необратимостью тепловых и обратимостью механических процессов, лежащих в основе тепловых. Правда, доводы Больцмана не были еще достаточно убедительными для всех современников: обстоятельные экспериментальные исследования, раскрывающие механизм отклонения системы от равновесного состояния, еще отсутствовали; хотя броуновское движение было много десятилетий объектом наблюдений физиков, оно еще не связывалось с молекулярной кинетикой, и даже Больцман не обратил на него внимания; из теоретических же соображений было трудно понять, как однозначно определенные уравнения механики могут привести к статистическим представлениям, на которые опирался в своих доводах Больцман. Решение этой задачи оставалось на долю последующего поколения физиков.

Смолуховский как раз и явился идейным учеником Больцмана и продолжателем его дела \*\*). Уже в 1898 г. он опубликовал теоретическую работу по обоснованию явления температурного скачка на границе газ — твердая стенка, экспериментально открытого в середине семидесятых годов Варбургом и Кундтом. В некрологе памяти Смолуховского (1917) Эйнштейн указывает, что это явление «действительно было сильным аргументом в пользу молекулярной кинетики». Теоретическая работа молодого Смолуховского была замечена и Больцманом, который упомянул ее в знаменитом предисловии ко второй части своих «Лекций по теории газов», полном пессимизма в отношении судьбы кинетической теории на ближайшее время \*\*\*). Но это было только начало. Идеи Больцмана еще более развивали и обосновывали последующие работы Смолуховского и среди них работы по броуновскому движению и по вопросу о границе применимости второго начала термодинамики.

\*) См. УФН 64 (4), 625 (1958).

\*\*) Биографы отмечают, что по странной случайности Смолуховский, учившийся в Вене, не встречался с Больцманом.

\*\*\*) К сожалению, в издании перевода этого труда Больцмана на русском языке это историческое предисловие опущено (см. Л. Больцман, Лекции по теории газов, перев. под ред. Б. И. Давыдова, М., Гостехиздат, 1953).

Непреодолимое значение имеют его работы по броуновскому движению. Эйнштейн, который примерно в те же годы и сам провел блестящие исследования броуновского движения, в упомянутом некрологе писал о значении исследований Смолуховского: «Существование скачка температуры вряд ли можно было понять без кинетической теории, но реальность теплового движения еще не вытекала непосредственно из этого движения. Кинетической теории теплоты удалось добиться общего признания лишь в 1905—1906 гг., когда было доказано, что она может количественно объяснить давно открытое хаотическое движение взвешенных микроскопических частиц, т. е. броуновское движение. Смолуховский создал особенно изящную и наглядную теорию этого явления, исходя из кинетического закона равномерного распределения энергии... Познание сущности броуновского движения привело к внезапному исчезновению всяких сомнений в достоверности Больцмановского понимания термодинамических законов» \*).

Самое важное в работах Эйнштейна и Смолуховского по броуновскому движению состоит в установлении связи между законами движения видимых и доступных непосредственному измерению взвешенных в жидкости броуновских частиц и законами движения невидимых молекул. Оказалось, что к взвешенным броуновским частицам применимы газовые законы; их распределение в поле тяжести (барометрическая формула) такое же, как и распределение газов; их средняя кинетическая энергия равна средней кинетической энергии молекул жидкости, в которой они взвешены; следовательно, как это вытекает из кинетической теории, эта энергия равна  $\frac{3}{2} \frac{RT}{N}$ , где  $R$  — газовая постоянная,  $N$  — число Авогадро, а  $T$  — абсолютная температура. Значит, в броуновском движении наблюдаемых частиц мы имеем наглядную и измеримую картину кинетического движения молекул. Все это раскрыло богатейшие возможности для разнообразных приемов экспериментальной проверки величин, характеризующих молекулярные системы, которые ранее выглядели лишь как гипотетические. Так результаты исследования броуновского движения дали множество способов измерений числа частиц в грамм-молекуле (число Авогадро) — через измерение вязкости газов, распределение частиц диффузии растворимых тел, явление опалесценции, явление голубизны неба и т. д. Во всех случаях результаты оказались удивительно совпадающими, в пределах ошибок эксперимента. Много экспериментировавший в этой области Жан Перрен в докладе «Броуновское движение и молекулы», прочитанном во Французском физическом обществе 15 апреля 1909 г., говорил: «Мне кажется невозможным, чтобы ум, свободный от предрассудков, не испытал сильнейшего впечатления при мысли о необычайном разнообразии явлений, которые с такой точностью стремятся дать одно и то же число, тогда как для каждого из этих явлений, не руководствуясь молекулярной теорией, можно было бы ожидать любой величины, заключенной между нулем и бесконечностью. Отныне уже будет трудно защищать разумными аргументами враждебное отношение к молекулярным гипотезам». Значение исследований броуновского движения хорошо понимал и Смолуховский, который на съезде в Мюнстере в 1912 г. говорил: «...Здесь впервые серьезно принимается во внимание максвелловский закон распределения скоростей и вообще представление о теплоте как о процессе движения, в то время как раньше все это рассматривали обычно как своего рода поэтические сравнения».

Главное в теоретических исследованиях Смолуховского было установление законов флуктуаций — нарушений равновесных состояний в молекулярных системах. Он изучил результаты экспериментальных исследований Сведбергом изменений плотности коллоидного раствора золота под воздействием движения молекул растворителя и вывел из этих исследований вероятности различных флуктуаций плотности. Подобно Эйнштейну, он стремился немедленно применить развитую теорию к объяснению давно наблюдавшихся физиками явлений, связанных с флуктуациями плотности среды, — явлений критической опалесценции жидкостей и газов, а также явления голубого цвета неба. Сам Смолуховский высоко оценивал значение разгадки сущности этих явлений для утверждения кинетической теории; он писал о голубизне неба: «В известном смысле можно было бы сказать, что люди испокон веков имели перед глазами наглядное доказательство превосходства молекулярно-кинетической теории перед термодинамикой» (см. стр. 732). В этой фразе еще чувствуется отголосок неостывшей борьбы.

Теперь мы можем сказать, что последующее развитие физики еще более подтвердило справедливость оценки Смолуховским огромной роли флуктуаций.

\*) А. Эйнштейн, Собрание научных трудов, т. IV, Мариан Смолуховский, М., «Наука», 1937, стр. 36.

Следует отметить, что к позиции Больцмана еще ранее пришел и Планк, который в поисках закона распределения плотности излучения черного тела был вынужден использовать Больцмановское соотношение энтропии и вероятности. Подробности этих поисков см. в переводе статьи М. Клейна, УФН 92 (4), 679 (1967).

В наше время теория флуктуаций переживает второе рождение: вопросы флуктуаций в электрических цепях имеют огромное значение для техники связи и радиоэлектроники. С одной стороны, колебательный контур как целое должен иметь в среднем такую же энергию колебаний, что и механический осциллятор. С другой стороны, новые специфические явления возникают в связи с дискретностью самого электрического заряда. Наконец, в определенной области для флуктуаций становятся существенными квантовые явления. Здесь уместно напомнить, что само обоснование квантовой природы света впервые было дано с помощью анализа движения броуновской частицы, взаимодействующей с излучением (Эйнштейн, 1905).

Результаты исследований законов флуктуаций Смолуховский использовал для обоснования Больцмановской идеи об ограниченности классической трактовки (Клаузиусом) второго начала термодинамики. Если равновесное состояние системы в малом нарушается по закону случая флуктуациями, то такое же нарушение должно происходить во всем мире в целом. Движение мира в целом можно также рассматривать как никогда не прекращающееся колебание около термодинамического равновесия. Отдельные флуктуации могут переводить систему в чрезвычайно далекое от равновесного, аномальное состояние. В настоящее время наш мир находится в таком аномальном состоянии и движется от него к равновесному, поэтому мы наблюдаем возрастание энтропии. Через чрезвычайно большое, но конечное время неизбежно возникнет новая флуктуация мира от равновесного состояния в аномальное. Энтропия мира будет уменьшаться. Развитая Смолуховским теория позволяет определить время, по истечении которого наступает новое аномальное состояние. Это время возрастает с увеличением системы и размеров аномальной флуктуации. Для системы мира в целом это время непостижимо велико; вероятность перехода системы мира в аномальное состояние чрезвычайно мала, но она не равна нулю. Этим Смолуховский и обосновывает утверждение об ограниченности классической трактовки второго начала термодинамики.

В наше время представление о «тепловой смерти» подвергается справедливой критике с других позиций, в силу того, что изменилось понимание роли взаимодействия частиц для процесса развития мира в целом. Классическая физика исходила из того, что состояние с максимальной энтропией при данной энергии представляет собой газ постоянной плотности, равномерно распределенный в пространстве. Однако теперь стало ясно, что такое представление — абстракция, вытекающая из пренебрежения взаимодействием между частицами. Даже если бы такое распределение установилось, уже небольшие местные флуктуации от него благодаря силам тяготения привели бы к структурному изменению газа. В космических масштабах благодаря тяготению происходит превращение более или менее однородного газа в обособленные галактики, звезды и т. п. Это возникновение структуры и отдельных тел является естественным процессом и наблюдается на любом этапе развития мира, в том числе и в наше время (см. работы В. А. Амбарцумяна); оно сопровождается увеличением энтропии и находится в согласии с термодинамикой.

Может быть, полезно вспомнить, что энтропия характеризует вероятность состояния, которую в свою очередь можно представить как произведение вероятности пространственного распределения частиц и вероятности распределения частиц (по их скоростям). Вероятность того, что частицы сосредоточатся в галактике или звезде (вместо равномерного распределения в пространстве) невелика. Но когда они сосредоточиваются таким образом, энергия их гравитационного взаимодействия превращается в тепловую энергию. Возрастает температура вещества, увеличиваются скорости частиц и обмен энергиями, увеличивается вероятность такого распределения частиц по скоростям. В целом вероятность состояния (зависящая и от расположения частиц, и от их скорости) возрастает. Это выражается в возрастании энтропии. Таким образом, учет взаимодействия между частицами, в первую очередь гравитационного взаимодействия, снимает кажущееся противоречие между вторым началом термодинамики и наблюдаемой картиной мира. Перед космологией встали теперь другие неразрешенные проблемы.

Конечно, реальная картина развития мира еще более сложна. Гравитационное взаимодействие является общей формой взаимодействия в мире, но не единственной, ибо реальные частицы обладают не только массой, но и другими зарядами. В силу этого при определенных условиях возникают и другие структурные формы (атомы, молекулы, клетки и т. п.). Аморфное состояние мировой системы, флуктуация от которого якобы связана с убыванием энтропии, никогда не устанавливается. Жупел «тепловой смерти» мира как неизбежного превращения всего сущего в аморфное, бесструктурное, серое образование является антинаучным, ошибочным по вполне конкретным физическим причинам.

Развитие науки вносит свои поправки в решение проблемы, обсуждавшейся Смолуховским. Теперь мы понимаем, что его работы раскрыли лишь одно из простейших условий логической совместности второго начала термодинамики и кинетической теории теплоты, найденного для нереализуемой абстракции. Логика природы оказывается более сложной. И, по-видимому, Смолуховский допускал такую возможность (см. стр. 748), хотя в свое время резонно остерегался отходить от основ класси-

ческой статистики. Как бы то ни было, критика неправомерности такой трактовки второго начала термодинамики, которая приводит к «тепловой смерти» мира, не потеряла своего принципиального значения. И наше поколение должно с благодарностью вспомнить о работах Смолуховского, требовавших в свое время не только широкого ума, но и большого мужества.

На русский язык переведено свыше десятка важнейших работ Смолуховского; большинство из них опубликовано в сборнике «Броуновское движение», вышедшем под редакцией Б. И. Давыдова в 1936 г. Появившаяся уже после смерти Смолуховского статья «О понятии случайности и о происхождении законов вероятности в физике» переведена на русский язык и опубликована в УФН (7 (5), 329 (1927)) к 10-летию со дня его смерти; из нее видно, что исследования броуновского движения и флуктуаций неизбежно выдвигали перед ученым методологические проблемы о роли случайности в физике и что в трактовке этой категории Смолуховский, в противовес многим теоретикам, занял правильную позицию, указав на объективную природу случайности.

Отмечая память крупного ученого, физика-материалиста, редакция публикует ниже перевод одной из его последних больших работ — «Границы справедливости второго начала термодинамики». Читатель найдет в ней квинтэссенцию физических взглядов Смолуховского. На русский язык эта статья переводится впервые.

\* \* \*

Автор выражает благодарность Я. Б. Зельдовичу за обсуждение космологических проблем.

---