

## ВЕЛИКИЙ ФИЗИК

(К 50-летию со дня смерти Людвига Больцмана)

Б. И. Давыдов

6 сентября 1956 г. исполнилось 50 лет со дня смерти Людвига Больцмана — одной из самых ярких фигур теоретической физики XIX века.

Больцман родился 20 февраля 1844 г. в Вене. Воспитанник Венского университета, он окончил его в 1866 г. В 1869 г. Больцман переехал в Грац. Там он занимал кафедру физики, а также возглавлял солидный по тому времени физический институт. В Граце Больцман прожил, с небольшим перерывом, 20 лет, и к этому периоду относятся все основные его работы.

В 1889 г. Больцман переезжает в Мюнхен, затем в Вену и потом в Лейпциг. Больцман был глубоко убежденным сторонником атомистической гипотезы, и на развитие молекулярных представлений он смотрел как на дело своей жизни. Наряду с конкретными вопросами физики он уделял много внимания общим философским проблемам. Выступая в научных дискуссиях с большим полемическим задором, Больцман обострял отношения с представителями махизма, господствующими в то время в университетах Австрии и Германии. Это заставляло его переезжать с места на место. Только после отставки Маха в 1902 году Больцман возвращается в Вену с намерением больше оттуда не уезжать. Он занимает при этом и прежнюю свою кафедру теоретической физики и кафедру натурфилософии.

Воспринимчивый по натуре, Больцман живо интересовался искусством. Свои произведения он снабжал эпиграфами из Гете и других поэтов, а иногда и собственного сочинения. Статью «Путешествие одного немецкого профессора в Эльдорадо», в которой Больцман выступил как популяризатор, он посвятил памяти Шиллера. Больцман часто музиковал в кругу своей семьи. Его неуравновешенность привела к трагическому концу: в 62 года Больцман покончил с собой во время летнего отпуска в Дуине, близ Аббации (курорт на Адриатическом море), где он часто проводил лето со своими близкими.

Говоря о научной деятельности Больцмана сейчас, через 50 лет после его смерти, обычно имеют в виду исключительно его фундаментальные работы по обоснованию кинетической теории газов и статистической физики. Однако научные интересы Больцмана были гораздо шире. Так, он был ревностным пропагандистом электромагнитной теории Maxwellла.

В XIX веке еще не было полного разделения физиков на теоретиков и экспериментаторов, характерного для XX столетия. Больцману принадлежит целый ряд экспериментальных работ с целью проверки и наглядной демонстрации справедливости максвелловской электродинамики. Из них можно упомянуть измерения диэлектрической постоянной газов и твердых тел и установление ее связи с оптическим показателем преломления. Больцман также разработал теорию эффекта Холла и указал, что он дает возможность измерять среднюю скорость поступательного движения носителей тока. Все эти

работы Больцмана, однако, совершенно стущевываются рядом с его исследованиями по молекулярной теории газов и статистической физике.

Длинный ряд работ Больцмана первоначально появился в научных журналах, главным образом в Докладах Венской Академии наук. В 1909 г. ученик Больцмана — Хазенёрль выпустил трехтомное собрание его трудов, в которое вошли все его научные работы, за исключением популярных статей, сборник которых вышел ранее. Помимо того, Больцман выпустил три курса лекций: пользующиеся широкой известностью лекции по теории газов, затем оригинальные по манере изложения лекции по механике и лекции по теории электричества.

Работы Больцмана по кинетической теории газов сразу, конечно, привлекли к себе внимание научных кругов. Им, однако, «больше удивлялись, чем признавали их». Раньше, чем в Германии, научные труды Больцмана получили полное признание в Англии и прежде всего со стороны Максвелла, который сам так много занимался кинетической теорией.

В 1894 г., уже после смерти Максвелла, Больцмана с большим почетом встретили на научном съезде в Кембридже. В 1899 г. его избрали членом-корреспондентом Лондонского королевского общества. Членом-корреспондентом Венской Академии наук он стал еще в 1875 г., а через 10 лет его избрали ее действительным членом.

Уступая постоянным настояниям друзей, в 1896 и 1898 гг. Больцман по-должил свои фундаментальные работы по кинетической теории и статистической физике, опубликовав двухтомный курс «Лекций по теории газов». Этот курс приобрел широкую известность, и после его появления научные открытия Больцмана получили повсеместное признание.

После больших успехов кинетической теории материи, в конце прошлого века, особенно в Германии, наступила реакция, связанная с именами Маха и Остwalda. Господствующей становится чисто описательная феноменология. Эта реакция объяснялась прежде всего тем, что физикам в те времена все же не удавалось получить достаточно убедительных доказательств существования молекул и их теплового движения. К тому же в электродинамике теория Максвелла носила также феноменологический характер. Попытки применить к ней атомные представления вначале потерпели неудачу. Они стали плодотворными лишь позже, с развитием электронной теории Лоренца.

Атомные представления были основой всего научного мировоззрения Больцмана. «Понять» какое-либо явление означало для него понять его атомный механизм, объяснить его взаимодействием атомов, в какой-то мере подчиняющихся законам классической механики. Вот, например, характерная для Больцмана фраза: «Механическое обоснование (феноменологических) дифференциальных уравнений при помощи средних чисел, связанных с представлением о приходе и уходе мельчайших частиц, чрезвычайно повышает их наглядность, и до сих пор, кроме атомистики, не найдено никакого иного механического объяснения явлений природы»\*).

Ясно сознавая всю гипотетичность имевшихся в те времена представлений о молекулах и их физических свойствах, Больцман с осторожностью говорит лишь о «механических аналогиях» и «моделях», состоящих из отдельных молекул макроскопических тел. Больцман пытается применять атомные представления всюду: в теории газов, и там они приводят его к фундаментальным открытиям, заложившим основу статистической физики; в макроскопической электродинамике, где они остаются тогда бесплодными. Несмотря на это Больцман все же и там не хочет отказываться от атомных представлений, и в своем курсе по теории электричества он вводит их хотя бы для того, чтобы «лучше представлять себе механизм явления». При этом, уже не претен-

\* ) Все цитаты — из «Лекций по теории газов» Больцмана.

дуя на какую-либо научную глубину, он не останавливается перед тем, чтобы при объяснении различных электродинамических явлений вводить различные, противоречащие друг другу механические аналогии.

Больцману, человеку с широким кругозором и с исключительной научной интуицией, был, однако, совершенно чужд узкий догматизм. Выступая против махизма, он восклицает: «Прочь с любой догматикой, как в атомистическом, так и в антиатомистическом смысле». В восемидесятых и девяностых годах Больцман на научных съездах упорно продолжает выступать против модной тогда «антиатомистической доктрины». Сейчас странно слышать, что на него смотрели как на реакционера. Только с наступлением XX века произошел общий перелом.

В фундаментальных работах Больцмана по кинетической теории можно указать четыре основных результата, значение которых выходит далеко за рамки теории идеальных газов, к которым они первоначально относились. Это, во-первых, установление основного интегро-дифференциального уравнения теории газов, известного сейчас под названием кинетического уравнения Больцмана, затем открытие «больцмановского распределения», далее, доказательство «*H*-теоремы», явившейся статистическим аналогом закона возрастания энтропии и, наконец, установление статистического смысла понятия энтропии как логарифма априорной вероятности состояния.

Работы Больцмана по кинетической теории газов иногда настолько тесно переплетались с работами Максвелла, что их даже трудно разделить. Уже в 1859 г. Максвелл перешел от рассмотрения средних значений различных физических величин к изучению их функций распределения и вслед за первоначальным эвристическим выводом дал в 1867 г. доказательство стационарности максвелловского распределения скоростей в газе.

Вскоре после этого Больцман получил свое кинетическое уравнение уже для газа, находящегося во внешнем силовом поле. Это уравнение и его обобщения являются сейчас основой всей физической кинетики.

Кинетическое уравнение сразу дало Больцману доказательство стационарности больцмановского распределения. Это доказательство, однако, не удовлетворяет Больцмана, и в 1872 г. появляется его работа, содержащая *H*-теорему, вероятно, самая глубокая из работ Больцмана. Этой теоремой доказывается единственность больцмановского распределения. При этом в ней вводится функционал *H*. Доказав монотонность его возрастания, Больцман получил право рассматривать его (с обратным знаком) как статистический аналог термодинамической энтропии. Наконец, в 1877 г. Больцман показал, что определенная таким образом энтропия совпадает с логарифмом априорной вероятности данного распределения молекул по малым фазовым ячейкам.

Если вывод кинетического уравнения является логическим развитием идей Максвелла, если больцмановское распределение можно рассматривать как формальное обобщение максвелловского распределения, то статистическая интерпретация понятия энтропии и второго начала термодинамики всецело является заслугой Больцмана. Интересно, что уже ранняя, еще незрелая работа Больцмана, которую он написал в возрасте 21 года, была посвящена этому вопросу.

Термодинамическая необратимость стоит в качественном противоречии с полной обратимостью законов классической механики. Нужно было поэтому иметь несокрушимую убежденность в том, что все наблюдаемые свойства макроскопических тел вытекают из механических законов взаимодействия атомов, из которых состоят эти тела, для того, чтобы поставить перед собой задачу: раскрыть механический смысл понятия энтропии. У Больцмана была такая убежденность, основанная на непосредственных наглядных представлениях. Он мог при этом исходить из картины таких простейших необратимых процессов, как, например, диффузия.

После появления  $H$ -теоремы разгорелась оживленная дискуссия о статистической интерпретации термодинамической необратимости. Дискуссия эта велась подчас с большой страстью. Она была плодотворной. Шум ее давно уже отзвучал, и сейчас можно с полной отчетливостью сформулировать, что, собственно, удалось доказать и каков физический смысл сделанных при этом допущений.

В основе кинетического уравнения Больцмана, а следовательно, и в основе  $H$ -теоремы лежит представление о «молекулярной неупорядоченности», т. е. предположение о статистической независимости сталкивающихся между собой молекул. Из этого предположения уже вытекает закон частоты столкновений, лежащий в основе кинетического уравнения.

Больцман вполне резонно указывает, что «без такого предположения вообще нельзя доказать ни одной теоремы теории газов. Оно делается при вычислении трения, теплопроводности и т. д.». Предположение это аналогично всем предположениям, которые приходится делать при любом применении теории вероятностей, предположениям о равной вероятности каких-то величин, точные значения которых считаются *a priori* неизвестными, или о каком-то простом законе распределения их вероятностей. Применение математической теории вероятностей только и становится возможным после того, как подобные предположения сделаны. Все, что мы вправе при этом требовать, — это внутренняя непротиворечивость создаваемой таким путем теории и согласие ее с наблюдениями.

Замечательно, что как раз согласие всех выводов кинетической теории с опытом ни у кого не вызывало никаких сомнений: они неопровергимо оправдывались на громадном экспериментальном материале. Вся дискуссия, развернувшаяся вокруг  $H$ -теоремы, была связана с вопросом о внутренней непротиворечивости теории и о ее принципиальных основаниях.

До тех пор, пока речь идет о термодинамически равновесных состояниях, т. е. о распределениях, удовлетворяющих принципу детального равновесия, никаких внутренних противоречий не возникает. Напротив, при исследовании неравновесных состояний всякая попытка приписать всеобщее значение заключениям кинетической теории приходит в неустранимый конфликт с полной обратимостью классической механики.

Предположение о полной статистической независимости молекул совершенно симметрично во времени. Поэтому если оно выполняется для какого-то распределения координат молекул и их скоростей, то для такого же распределения, но со скоростями, измененными на прямо противоположные, оно также будет выполняться. Следовательно, если для данного неравновесного распределения молекул функционал  $H$  в силу теоремы Больцмана должен уменьшаться, то для такого же распределения, но с обращенными скоростями он обязан увеличиваться. Это и есть известное выражение Лошмидта. Оно показывает, что момент, для которого выполняется предположение о полной статистической независимости молекул, должен быть точкой максимума для функции  $H(t)$ . Таким образом, для неравновесных распределений это предположение может выполняться только в исключительные моменты.

Предположение о «молекулярном беспорядке», господствующем в газе в любой момент времени, приводит, таким образом, к внутреннему противоречию, и для того чтобы спасти  $H$ -теорему, необходимо его изменить. Путь к этому очевиден. При доказательстве  $H$ -теоремы предполагается, собственно, что сталкивающиеся молекулы статистически независимы перед своим столкновением. В силу уравнений механики они после столкновения уже не будут тогда статистически независимы, как это легко уяснить себе на простых примерах. Поэтому, не приходя в конфликт с законами механики, можно предполагать либо статистическую независимость сталкивающихся молекул перед их столкновением, либо — после него. Эти две возможности *a priori* равнозначны.

ценны. Опыт показывает, что следует остановиться на первой из них: именно она приходит к монотонному возрастанию энтропии, тогда как вторая возможность приводит к ее убыванию.

При такой ослабленной формулировке исходного предположения возражение Лошмидта отпадает. Если изменить все скорости молекул на прямо противоположные, то молекулы, сближающиеся перед столкновением, превратятся в разлетающиеся после него. Предположение о статистической независимости молекул перед их соударением превратится в соответствующее предположение, относящееся к молекулам, только что испытавшим столкновение. Таким образом, наше предположение, которое является своего рода начальным условием, теперь уже не симметрично во времени, и именно эта асимметрия начального состояния при полной симметрии уравнений механики и приводит к монотонному убыванию больцмановского функционала  $H$ .

Первоначально при доказательстве  $H$ -теоремы Больцман исходил из интуитивных представлений, аналогичных тем, какие делались уже до того при решении простейших задач кинетической теории газов. То, что эти предположения сводятся к гипотезе о статистической независимости сталкивающихся молекул, стало ясно только в ходе развернувшейся дискуссии. Даже в «Лекциях по теории газов» формулировки Больцмана еще не безупречны. Больцман нигде явно не оговаривает необходимого ослабления предположения о статистической независимости сталкивающихся молекул при переходе к изучению неравновесных состояний, о котором мы говорили выше. Он вначале определяет «молекулярно неупорядоченное распределение» как такое, при котором получается обычное выражение для числа сталкивающихся молекул. Поскольку речь идет о неравновесных состояниях, такое распределение при обращении скоростей всех молекул должно переходить в «молекулярно упорядоченное» по терминологии Больцмана. Несмотря на это, Больцман пишет, например, во второй части книги, что «состояние, противоположное упорядоченному, является всегда снова упорядоченным состоянием».

Желание совместить наблюдаемую термодинамическую необратимость с неограниченной применимостью законов классической механики привело Больцмана к его «флюктуационной гипотезе». Согласно этой гипотезе необратимость окружающих нас явлений носит ограниченный характер. Она связана с тем, что мы присутствуем при распаде флюктуации чудовищных, сверхкосмических размеров.

Флюктуационной гипотезе нельзя отказать в грандиозности. По своим масштабам она, однако, выходит далеко за рамки сколько-нибудь исследованных явлений природы. Полное отсутствие каких-либо прямых подтверждений заставляют относиться к ней с осторожностью.

Мы подробно остановились на вопросах статистического обоснования второго начала термодинамики, связанных с доказательством  $H$ -теоремы, так как она является, вероятно, самой значительной из работ Больцмана. Она появилась в 1872 г., когда Больцману было 28 лет. Через пять лет появилась его вторая фундаментальная работа в том же направлении, устанавливающая связь функционала  $H$  с априорной вероятностью распределения молекул в шестимерном фазовом пространстве, связь, которая выражается лаконической формулой  $H = -k \ln W$ . Тем самым закон возрастания энтропии приобрел наглядную статистическую интерпретацию как выражение тенденции эволюции молекулярных систем в сторону «более вероятных» распределений.

Теоретические работы Больцмана относились непосредственно к простейшему объекту статистической физики — идеальному газу. Применение статистических методов к более сложным макроскопическим телам стало возможным после перехода от исследования статистических распределений в шестимерном фазовом пространстве одной молекулы к распределениям в многомерном фазовом пространстве всех молекул рассматриваемого макроскопического тела. Пере-

ход этот связывается обычно с именем Гиббса, давшего изумительное по своей законченности изложение метода, который лег в основу всей статистической термодинамики. Необходимо, однако, отметить, что идея статистического распределения в многомерном фазовом пространстве принадлежит Больцману, который говорил о таких распределениях еще в 1871 г., когда он рассматривал свое «эргодическое распределение».

В исследованиях по кинетической теории Больцман исходил из основного представления об атомном строении макроскопических тел. В его времена при этом неминуемо приходилось предполагать, что движение атомов и молекул подчиняется законам классической механики. Больцман вполне сознавал всю рискованность такого предположения. Он указывал даже на возможность того, что в действительности уже элементарные законы движения отдельных молекул носят статистический характер. Развитие современной квантовой механики крайне своеобразным образом оправдало такое предположение.

Имя Больцмана звучит для нас как имя одного из создателей классической теоретической физики. В то же время именно применение разработанных им статистических методов в теории излучения привело к созданию теории квантов. Первая работа по теории теплового излучения, — теоретическое объяснение закона, экспериментально открытого Стефаном, принадлежит самому Больцману.

---