

§ 74. Статистический метод в физике

Поскольку физические тела состоят из огромного множества чрезвычайно мелких частиц, которые притом находятся в чрезвычайно быстром движении, лишь в редких случаях, при помощи особых приспособлений, физик имеет возможность следить за движением какой-нибудь одной определенной частицы. Помимо этих случаев, вопросы о движении мельчайших частиц в физических телах (молекул, атомов, электронов) приходится разрешать на основании особого математического метода — так называемого *статистического метода*. Статистический метод применяется вообще к изучению «массовых» явлений, т. е. таких явлений, которые представляют собой совокупность множества более простых «индивидуальных» явлений, причем эти индивидуальные явления сходны по своим качествам и (хотя бы до некоторой степени) независимы друг от друга. Примером массового явления может служить состояние газа: мы знаем, что газ состоит из огромного числа молекул, движущихся независимо друг от друга; движение каждой отдельной молекулы может рассматриваться как индивидуальное явление.

Если индивидуальное явление до некоторой степени обследовано, то, применяя статистический метод и являющуюся его развитием общую математическую теорию массовых явлений (так называемую теорию вероятностей), мы можем установить и законы массового явления. В теории газов индивидуальное явление, т. е. полет отдельной молекулы, изучается на основе законов механики; отсюда при помощи теории вероятностей получают законы газового состояния и законы различных явлений (вязкости, теплопроводности, диффузии) в газообразных телах.

Обычный подход теории вероятностей к изучаемым ею физическим явлениям состоит в подсчете так называемой *вероятности* какого-нибудь события или, другими словами, числа тех способов, какими данное событие может осуществиться.

Когда газ находится в равновесии и нет воздействия внешних сил, то плотность газа всюду одинакова; это значит, что если мы мысленно разобьем пространство, занятое газом, на малые (но не чрезмерно малые) элементы или ячейки, то в каждой из таких ячеек найдется одинаковое число молекул.

Однако из этого правила могут наблюдаться исключения. В самом деле, молекулы «идеального» газа не связаны друг с другом, движение их вполне хаотично; поэтому не могло ли бы, например, случиться, что некоторая часть сосуда, заключающего газ, окажется на несколько мгновений пустой, в то время как все молекулы газа соберутся в другой части? Исчерпывающее разъяснение этого вопроса дается теорией вероятностей.

Подсчет числа возможных распределений молекул газа по мысленно выделенным ячейкам пространства, занятого газом, показывает,

что, чем равномернее распределяются молекулы по ячейкам, тем больше делается число возможных распределений. Самое большое число возможных распределений получится тогда, когда числа молекул в каждой из ячеек будут возможно ближе к равенству, и подсчет показывает, что в этом случае число возможных распределений будет огромно по сравнению с числом всех других распределений, вместе взятых. А так как все индивидуальные распределения равноправны, то имеется огромная вероятность в пользу того, что фактически в каждый момент будет осуществляться *распределение, соответствующее одинаковой плотности газа во всех местах*. Мы можем сказать, что вероятность такого распределения плотностей «близка к достоверности». Однако возможны и распределения, уклоняющиеся от условий равномерной плотности; но чем больше такие отклонения, тем менее вероятно их осуществление. Больцман отмечал, что газ, заключенный в оболочку и предоставленный самому себе, может сосредоточиться весь в одной половине этой оболочки, причем другая половина останется пустой; но вероятность такого события во много раз меньше, чем вероятность того, что в один и тот же день независимо возникнут пожары во всех домах большого города.

С решением вопроса о распределении молекул газа в пространстве обычно связывается воедино решение более сложного вопроса о распределении молекулярных скоростей в газе (находящемся в равновесии). И здесь возможны такие типы распределений, которые имеют весьма малую вероятность осуществиться вследствие того, что их осуществление возможно лишь сравнительно умеренным числом способов.

Примерами могут служить: 1) такой тип распределения, когда в рассматриваемый момент скорость каждой молекулы направлена вдоль одной из осей прямоугольных координат; 2) такой тип распределения, когда в рассматриваемый момент все молекулы имеют одинаковую величину скорости; 3) такой тип распределения, когда в рассматриваемый момент в одной части пространства, занятого газом, группируются молекулы, обладающие большими скоростями, тогда как в остальной части того же пространства оказываются молекулы, обладающие меньшими скоростями. С другой стороны, статистическая теория показывает, что есть один тип распределения молекулярных скоростей, *вероятность которого подавляюще велика по сравнению с вероятностями всех других типов и который поэтому осуществляется в действительности как правило*; это — тот тип, при котором число молекул, имеющих ту или другую величину скорости, определяется законом Максвелла, который пояснен в § 82; кроме того, молекулы, обладающие какой-нибудь данной величиной скорости, равномерно распределены по объему газа, и, наконец, в каждой данной ячейке скорости этих молекул равномерно распределены по всем направлениям. Это — так называемое *максвеллово распределение*, характеризующее собой *молекулярный хаос*.

Необходимо подчеркнуть, что указанные здесь выводы относительно распределения как самих молекул, так и их скоростей имеют место лишь в том случае, когда число молекул газа весьма велико, так как только тогда будет иметь силу закон *больших чисел*, служащий основой статистического метода ¹⁾.

Одним из частных приемов, присущих статистическому методу, является вычисление *средних значений* различных величин, подверженных индивидуальным колебаниям (например, средней молекулярной скорости и средней энергии поступательного движения одной молекулы).

§ 75. Термодинамический метод

Направления полета молекул, скорости молекул, их соударения, сцепление их в агрегаты, распад этих агрегатов и другие события микромира случайны. Однако в природе нет явлений, которые не были бы подчинены закономерностям, и случайными событиями управляют свои законы и прежде всего закон *больших чисел*. В обширных собраниях молекул выравниваются случайные события, и из «хаоса» микромира закономерно рождается упорядоченный ход явлений в макромире ²⁾ — статистическая закономерность.

Существуют три пути для изучения статистических закономерностей в физике.

Первый путь: представляют себе картину событий, происходящих в микромире, и с помощью точных законов механики и теории вероятностей предугадывают посредством вычислений, к сожалению, сложных, как отразится неупорядоченность микромира на ходе процессов, доступных непосредственному наблюдению. Это — путь *статистической механики*.

Второй путь — постоянное сочетание теории с опытом: на основе физических и химических опытов с помощью догадок нащупывают закономерности, имеющие статистический смысл; придумывают простые «модельные объяснения» этих закономерностей и на

¹⁾ Закон больших чисел формулируется так: при достаточно большом числе независимых испытаний следует с вероятностью, сколь угодно близкой к достоверности, ожидать, что отношение числа появлений события к числу испытаний будет сколь угодно близко к вероятности события.

Вот простой пример для иллюстрации этого закона. Пусть имеется кубик из однородного материала, грани которого отмечены цифрами от 1 до 6. Кубик подкидывают как попало вверх, после чего он падает на стол. Вероятность того, что кубик ляжет определенной гранью вверх (например, той, где цифра 4), выражается отношением $1/6$. С другой стороны, если много раз бросать кубик подобным образом, то число появлений грани 4 («событие») будет относиться к числу бросаний («испытаний»), как $1:6$.

²⁾ Термин *макро* (греч. *μακροσ* — *б о л ь ш о й*) противопоставляется термину *микро*. Макроскопический объем — это объем, содержащий достаточно большое число молекул.