

1.7. Основные проблемы макроскопической физики

Несмотря на то, что рассуждения в этой главе имели большей частью качественный характер, нам удалось понять ряд важных свойств макроскопических систем. Теперь мы обладаем достаточным опытом, чтобы рассмотреть некоторые проблемы, имеющие большое значение.

Основные принципы. Нашей первой задачей является использование качественных представлений о макроскопических системах для создания ясных теоретических принципов, позволяющих делать количественные предсказания. Например, мы знаем, что некоторые состояния макроскопических систем являются более вероятными (или более случайными), чем другие. Но каким образом можно точно определить вероятность данного макросостояния и как измерить степень его случайности? Это вопрос первостепенной важности. Мы выяснили также, что не зависящее от времени состояние равновесия соответствует наиболее случайной ситуации в изолированной системе.

Таким образом, снова возникает проблема точного определения случайности. Трудности возникают и в том случае, когда мы рассматриваем две произвольные системы, находящиеся в тепловом контакте друг с другом. Мы предполагаем, что в состоянии равновесия, соответствующем максимальной случайности (неупорядоченности), некоторый параметр T (характеризующий среднюю энергию атома в системе) должен быть одним и тем же для обеих систем. Но так как мы не знали, как определить понятие случайности в общем случае, то мы не могли дать какое-либо ясное определение параметру T (который условно был назван «абсолютной температурой»). Таким образом, возникает следующий основной вопрос: как использовать вероятностные понятия для последовательного описания макроскопических систем, при котором станет ясным смысл случайности и абсолютной температуры?

В примере с маятником в п. 1.3 мы видели, что вовсе не очевидно, как энергия, распределенная случайным образом между многими молекулами, может переходить в менее случайное распределение, при котором будет производиться работа, выполняемая макроскопической силой на некотором макроскопическом расстоянии. Этот пример вскрывает вопросы большой важности. Во-первых, в какой степени можно использовать энергию, распределенную случайным образом между многими молекулами вещества (например, угля или бензина), и концентрировать ее таким образом, чтобы она приводила в движение поршень? Иначе, каков коэффициент полезного действия парового или бензинового двигателя, осуществивших промышленную революцию? Во-вторых, в какой степени можно использовать энергию, распределенную случайным образом между молекулами некоторых химических соединений, и переводить ее в менее случайные формы, пригодные для создания мускульных усилий или для синтеза высокополимерных молекул,

например, таких как белок? Другими словами, в какой степени химическую энергию можно использовать для обеспечения биологических процессов? Ясное представление о понятии случайности позволит нам ответить на все эти вопросы.

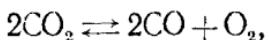
Свойства систем в состоянии равновесия. Так как свойства макроскопических систем в состоянии равновесия особенно просты, то они должны легко поддаваться количественному описанию. Существует много равновесных состояний, которые представляют большой интерес. Рассмотрим некоторые из них.

Однородное вещество является одним из простейших примеров системы, чьи равновесные свойства можно надеяться описать количественно. Предположим, например, что некоторый газ или жидкость при заданной температуре находится в состоянии равновесия. Как зависит величина давления от температуры и объема этой среды? Или предположим, что некоторое вещество содержит атомы железа, имеющие определенный магнитный момент. Пусть это вещество, температура которого задана, помещено в магнитное поле. Чему равна намагниченность, т. е. какой магнитный момент приходится на единицу объема данного вещества? Как эта намагниченность зависит от температуры и магнитного поля? В качестве другого примера допустим, что некоторое вещество (это может быть жидкость, твердое тело или газ) поглощает небольшое количество тепла. На какую величину возрастет температура вещества?

Мы интересуемся, однако, не только макроскопическими параметрами систем, находящихся в равновесии, нас интересует также поведение атомов, из которых эта система состоит. Рассмотрим, например, сосуд с газом, находящийся при определенной температуре. Очевидно, что скорость молекул газа не будет одинаковой. Нас может интересовать, какая часть молекул имеет скорость, лежащую в заданном интервале. Если в сосуде сделать небольшое отверстие, то некоторые молекулы покинут сосуд и проникнут в окружающий его вакуум, где их скорость может быть непосредственно измерена. Таким образом, предсказания теории можно будет сравнить с экспериментом. Рассмотрим пустой сосуд, стенки которого нагреты до высокой температуры. Так как атомы стенок сосуда испускают электромагнитное излучение, то сосуд наполнен излучением (фотонами), находящимся в равновесии со стенками сосуда. Какова величина энергии этого электромагнитного излучения, заключенная в заданном интервале энергий? Если в сосуде сделать небольшое отверстие, через которое излучение может проникать в окружающее пространство, и с помощью спектрометра измерить его энергию в данном интервале частот, то предсказания теории можно будет проверить на опыте. Эта проблема имеет большое значение для понимания процесса испускания излучения нагретым телом, например, солнцем или нитью осветительной лампы.

Другой проблемой, представляющей большой интерес, является возможность химических реакций между молекулами разного рода. Рассмотрим сосуд объемом V , наполненный двуокисью углерода

CO_2 . В соответствии с химической реакцией



(34)

молекулы CO_2 можно превратить в молекулы окиси углерода CO и в молекулы кислорода O_2 , или наоборот. Если повышать температуру сосуда, содержащего молекулы CO_2 , то некоторые из них будут диссоциировать в молекулы CO и O_2 . В результате сосуд будет содержать молекулы CO_2 , CO и O_2 , находящиеся в равновесии друг с другом. Возникает вопрос, каким образом можно подсчитать относительное число молекул CO_2 , CO и O_2 , находящихся в сосуде при заданной температуре?

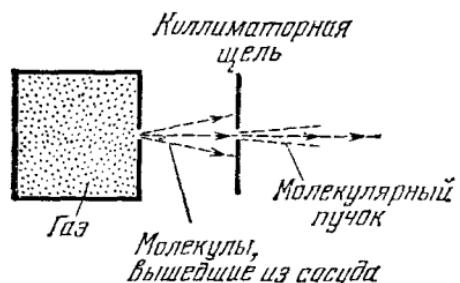


Рис. 1.37. Сосуд, наполненный газом, имеет очень маленькое отверстие, через которое молекулы могут выходить в окружающий вакуум. С помощью одной или нескольких коллиматорных щелей можно выделить молекулярный пучок. Распределение молекул по скорости определяется распределением в сосуде. Метод молекулярного пучка позволяет изучать поведение изолированных атомов или молекул. Его очень часто используют в современных физических экспериментах.

Даже рассмотрение простого вещества, состоящего из молекул одного типа, приводит к ряду интереснейших проблем. Такое вещество существует в различных формах или фазах, т. е. может быть газом, жидкостью либо твердым телом. Простым примером служит вода, имеющая все три фазы: водяной пар, жидкую воду и лед. В любо-

й фазе вещество состоит из одних и тех же молекул (в случае воды это молекулы H_2O), но расположенных по-разному. В газе молекулы находятся сравнительно далеко друг от друга и движение их носит случайный и почти независимый характер. В твердой фазе расположение молекул весьма упорядоченно. Они расположены в узлах правильной кристаллической решетки и могут совершать лишь небольшие колебания относительно этих положений. В жидкой фазе расположение молекул имеет промежуточный характер, так как они связаны не так жестко, как в твердом теле, но и не обладают свободой молекул газа. В жидкости молекулы достаточно близки, чтобы оказывать сильное влияние друг на друга, но в то же время они достаточно удалены, чтобы перемещаться друг относительно друга на большие расстояния. Изучение рассеяния рентгеновских лучей подтверждает сказанное нами о характере расположения молекул в этих различных фазах.

Хорошо известно, что вещество переходит из одной фазы в другую при вполне определенной температуре (принимая или отдавая тепло в результате такого перехода). Например, вода при 0°C переходит из твердой фазы (лед) в жидкую (воду), которая в свою очередь (при давлении в одну атмосферу) переходит в газ при 100°C . При некоторых условиях возможно одновременное существование двух фаз, находящихся в равновесии друг с другом (например, лед и вода при 0°C). Теория, описывающая поведение систем в равновесии,

позволяет сделать предсказание о давлении и температуре, при которых возможно равновесие двух фаз. Используя эту теорию, мы можем предсказать, при какой температуре данное твердое вещество превращается в жидкость и при какой температуре жидкость испаряется и становится газом.

Все это очень трудные и интересные задачи. Их решение опять связано с понятиями о степени случайности и упорядоченности.

При возрастании абсолютной температуры вещества (или средней энергии атомов) оно переходит из относительно упорядоченного (или менее случайного) твердого состояния в жидкое состояние, обладающее промежуточной степенью порядка. При еще большем увеличении температуры жидкость переходит в газообразное состояние, которому соответствует наибольший беспорядок. Удивительно, однако, что такие изменения в степени порядка происходят скачком, при вполне определенной температуре. Причиной этого является своего рода критическая нестабильность молекул в веществе. Предположим, например, что температура твердого тела достаточно велика, так что молекулы имеют относительно большую энергию и могут совершать около своих узлов в кристаллической решетке колебания, амплитуда которых сравнима с расстояниями между узлами. Предположим далее, что в результате флуктуации несколько соседних молекул одновременно покидают регулярную кристаллическую решетку. Это облегчает близлежащим молекулам возможность покинуть свои узлы в решетке, и т. д. В результате мы наблюдаем процесс, который очень похож на обвал домика из домино, т. е. высокий порядок в расположении молекул в твердом теле неожиданно начинает уменьшаться и твердое тело превращается в жидкость.

Такая нестабильность, результатом которой является плавление твердого тела, вовлекает в процесс все молекулы вещества. Мы называем такие явления *коллективными процессами*. К ним принадлежит, например, таяние или парообразование. Для анализа таких явлений необходимо одновременное рассмотрение взаимодействия всех молекул. Решение подобных проблем на микроскопическом уровне является очень трудной теоретической задачей.

Системы, не находящиеся в равновесии. Рассмотрение систем, не находящихся в равновесии, значительно сложнее рассмотрения равновесных систем. Здесь мы имеем дело с процессами, изменяющимися во времени, и нас прежде всего интересует, насколько быстро или медленно такие изменения происходят. Изучение этих вопросов требует детального рассмотрения взаимодействия молекул друг с другом. За исключением довольно простого случая разреженного газа такой анализ поведения молекул очень сложен.

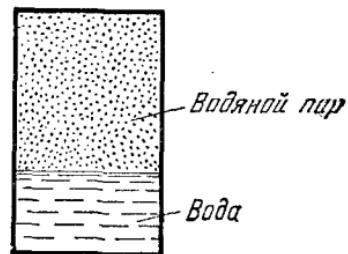


Рис. 1.38. Здесь показано совместное существование двух фаз, воды и пара, находящихся в равновесии при некоторой определенной температуре. Давление пара зависит только от температуры.

Рассмотрим несколько интересных примеров. Первым из них будет химическая реакция (34). Предположим, в сосуде при определенной температуре находится газ CO_2 . Через какое время будет достигнута равновесная концентрация CO и O_2 ? Для ответа на этот вопрос нам нужно определить скорость, с которой химическая реакция (34) протекает в обоих направлениях.

В качестве другого примера рассмотрим два больших тела, имеющих различные температуры, T_1 и T_2 , и соединенных между собой стержнем. Такая система не находится в равновесии, и через соединяющий стержень тепло будет переходить от одного тела к другому.



Рис. 1.39. Два тела с различной температурой соединены стержнем, проводящим тепло от одного тела к другому.

На рисунке 1.39 изображены два тела с различной температурой, соединенные стержнем, проводящим тепло от одного тела к другому. Нас интересует, насколько эффективно передается энергия по стержню, т. е. как быстро данное количество тепла может перейти от одного тела к другому. Это зависит от внутренних свойств стержня, а именно, от его «теплопроводности». Например, стержень, сделанный из меди, проводит тепло лучше, чем стержень из нержавеющей стали, т. е. медь обладает более высокой теплопроводностью, чем сталь. Задачей теории является точное определение понятия теплопроводности и ее вычисление.

Некоторые выводы. Примеры, рассмотренные в предыдущем параграфе, показывают, что существует ряд макроскопических явлений, количественное рассмотрение которых может быть выполнено на основе фундаментальных микроскопических понятий. Однако нашей целью не будет детальное рассмотрение этих проблем. Действительно, некоторые из рассмотренных нами вопросов (например, расчет фазовых переходов, таких, как таяние или парообразование) не решены еще до конца и являются областью интенсивного научного исследования. С другой стороны, мы уже достаточно подготовлены, чтобы использовать качественные замечания этой главы для более глубокого количественного изучения макроскопических систем. Это изучение будет длиться достаточно долго, но в конце концов мы получим ответ на большую часть поднятых здесь проблем.

Сводка определений

Изолированная система. Система, которая не взаимодействует с любой другой системой.

Идеальный газ. Газ, взаимодействие между молекулами которого почти пренебрежимо мало (т. е. оно достаточно велико, чтобы молекулы могли обмениваться энергией, но пренебрежимо мало в других отношениях).

Идеальная система спинов. Система, состоящая из спинов, взаимодействие между которыми почти пренебрежимо мало (т. е. оно достаточно велико для того, чтобы спины могли обмениваться энергией, но пренебрежимо мало в других отношениях).

Микроскопическая величина. Величина порядка атомных размеров или меньше.

Макроскопическая величина. Величина, значительно большая атомных размеров.