

и амплитуда его колебаний постепенно уменьшается. Это опять пример типичного необратимого процесса. После того как будет достигнуто состояние равновесия, маятник повиснет вертикально. При этом, однако, возможны очень небольшие колебания относительно положения равновесия.

Рассмотрим один интересный пример. Если при начальной неслучайной ситуации энергия маятника достаточно велика, ее можно использовать для выполнения полезной работы. Например, гиря маятника может забить гвоздь в дерево (рис. 1.23). После достижения равновесия энергия маятника распределится между молекулами газа, и мы не сможем воспользоваться ею для выполнения полезной работы, например, для забивания гвоздя. Чтобы совершить такую работу, мы должны обладать методом, который позволил бы сконцентрировать энергию, распределенную случайнym образом между молекулами газа, движущимися во многих направлениях. Это значит, что нужно найти способ заставить молекулы сместиться на значительное расстояние в одном направлении.

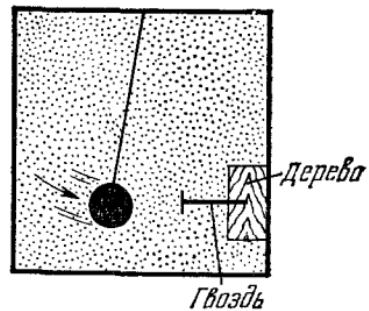


Рис. 1.23. Устройство, позволяющее использовать энергию маятника для выполнения полезной работы. Гиря маятника забивает гвоздь в дерево.

1.4. Свойства равновесного состояния

Простота равновесного состояния. Из рассуждений, приведенных в предыдущих параграфах, следует, что равновесная ситуация в макроскопической системе особенно проста. Причины этой простоты заключаются в следующем:

1. Макросостояние системы, находящейся в равновесии, не зависит от времени (за исключением всегда существующих флуктуаций) и почти всегда может быть описано несколькими макроскопическими параметрами, т. е. параметрами, которые характеризуют свойства системы в большом масштабе. (Примером такого макроскопического параметра может служить число n молекул, находящихся в левой половине сосуда с газом.) Когда система находится в состоянии равновесия, средние значения макроскопических параметров остаются постоянными во времени, однако сами параметры могут флуктуировать (обычно очень незначительно) относительно своих средних значений. Поэтому равновесное состояние системы проще более общего случая неравновесного состояния, когда некоторые макроскопические параметры изменяются со временем.

2. Макросостояние системы в равновесии является, если исключить флуктуации, наиболее случайнym макросостоянием системы, находящейся в определенных условиях. Таким образом, система,

находящаяся в равновесии, характеризуется однозначно. В частности, сказанное имеет следующий смысл:

а) Равновесное макросостояние системы не зависит от ее предыстории. Рассмотрим, например, изолированный газ, состоящий из N молекул и заключенный в некотором ящике. Первоначально молекулы могли быть заперты при помощи перегородки в одной половине ящика или в одной его четверти (предполагается, что полная энергия молекул одна и та же в любом из этих случаев). Однако, после того как была убрана перегородка и достигнуто состояние равновесия, макросостояние газа становится одним и тем же для любого из двух случаев и соответствует равномерному распределению всех молекул по объему сосуда.

б) Равновесное макросостояние системы может быть полностью описано при помощи нескольких макроскопических параметров. В качестве примера снова рассмотрим изолированный газ, состоящий из N одинаковых молекул и заключенный в ящик. Предположим, что объем ящика равен V и полная энергия молекул равна E . Если газ находится в состоянии равновесия, то молекулы должны быть равномерно распределены по всему объему V и в среднем должны поровну делить между собой полную энергию E . Поэтому знания макроскопических параметров V и E достаточно для утверждений, что среднее число молекул \bar{n}_s , находящихся в какой-то части объема V_s , равно $\bar{n}_s = N(V_s/V)$, и что средняя энергия $\bar{\epsilon}$, приходящаяся на одну молекулу, равна $\bar{\epsilon} = E/N$. Если же газ не находится в равновесии, то ситуация будет значительно сложнее. Распределение молекул в этом случае может быть очень неравномерным и знания полного числа молекул N в сосуде уже недостаточно для определения среднего числа молекул \bar{n}_s в любой части объема V_s .

Возможность наблюдения флюктуаций. Рассмотрим макроскопический параметр, который описывает систему, состоящую из многих частиц. Если число частиц очень велико, то относительная величина флюктуаций этого параметра очень мала, и почти всегда ее можно пренебречь по сравнению со средним значением параметра. Поэтому, имея дело с большими макроскопическими системами, мы обычно не осознаем факта существования флюктуаций. С другой стороны, всегда существующие флюктуации могут быть с легкостью обнаружены и иметь большое практическое значение, если макроскопическая система достаточно мала или если мы располагаем достаточно чувствительными методами наблюдения. Несколько рассматриваемых дальше примеров пояснят сказанное.

Флюктуации плотности в газе. Рассмотрим идеальный газ, находящийся в равновесии и состоящий из большого числа N молекул, заключенных в объеме V . Сконцентрируем наше внимание на числе молекул n_s в некотором выделенном объеме V_s внутри сосуда. Это число n_s флюкутирует во времени относительно среднего значения

$$\bar{n}_s = \frac{V_s}{V} N,$$

и величина флюктуации в любой момент времени определяется величиной разности

$$\Delta n_s = n_s - \bar{n}_s.$$

Если мы рассматриваем в качестве выделенного объема левую половину сосуда, то $V_s = \frac{1}{2}V$ и $\bar{n}_s = \frac{1}{2}N$. Если N велико, то среднее число молекул \bar{n}_s также велико. В соответствии со сказанным в п. 1.1, часто возникающие флюктуации будут невелики, так что $|\Delta n_s| \ll \bar{n}_s$.

Теперь предположим, что мы хотим исследовать рассеяние света веществом. Нам нужно знать, что случится в элементе объема V_s , линейные размеры которого одного порядка с длиной волны света. Длина волны видимого света (около $5 \cdot 10^{-5}$ см) значительно больше атомных размеров, и такой элемент объема еще является макроскопическим, хотя сам по себе очень мал. Если число молекул в каждом таком элементарном объеме одинаково (что справедливо в случае твердого тела, например, стекла), то вещество пространственно однородно и будет просто отражать лучок света без рассеяния. Но в случае идеального газа среднее число молекул \bar{n}_s в таком небольшом объеме V_s очень мало и флюктуациями Δn_s числа молекул n_s внутри объема V_s уже нельзя пренебречь по сравнению с величиной \bar{n}_s . Поэтому можно ожидать, что газ будет в значительной степени рассеивать падающий на него свет. В самом деле, то, что небо не выглядит черным, объясняется тем, что свет от Солнца рассеивается молекулами газа в атмосфере. Таким образом, голубой цвет неба — явное доказательство важного значения флюктуаций.

Флюктуации крутильного маятника. Рассмотрим тонкую нить, закрепленную между двумя держателями (или закрепленную только вверху и свободно висящую), к которой прикреплено зеркало. Если повернуть зеркало на некоторый угол, нить будет совершать крутильные колебания. Вся эта система является крутильным маятником. Так как крутильные колебания нити могут быть очень малы, а с помощью пучка света, отраженного от зеркала, можно легко определить его небольшие угловые перемещения, то такая система обычно используется для чувствительных измерений небольших моментов кручения. Например, крутильный маятник был использован Кэвенидишем для определения гравитационной постоянной и Кулоном для определения электрических сил, действующих между заряженными телами.

Когда чувствительный крутильный маятник находится в равновесии, его зеркало не остается неподвижным. Можно заметить, что оно совершает небольшие угловые колебания относительно среднего равновесного положения (то же самое мы наблюдали в п. 1.3, когда обычный маятник испытывал небольшие флюктуации относительно своего равновесного вертикального положения). Эти флюктуации обычно вызваны взаимодействием молекул воздуха с зеркалом.

Флюктуации уменьшаются, но не исчезают даже в том случае, когда молекул не будет, т. е. если система находится в вакууме. В этом случае полная энергия крутильного маятника будет состоять из двух частей: из энергии E_ω , определяемой угловой скоростью движущегося зеркала, и энергии E_i , определяемой внутренним движением атомов зеркала и нити. (Атомы могут совершать небольшие колебания относительно своего положения в твердом теле.) Так как полная энергия $E_\omega + E_i$ остается постоянной, флюктуации связаны с распределением этой энергии между E_ω и E_i . Любая флюктуация, при которой E_ω увеличивается за счет внутренней энергии атомов, приводит к возрастанию угловой скорости зеркала, и наоборот.

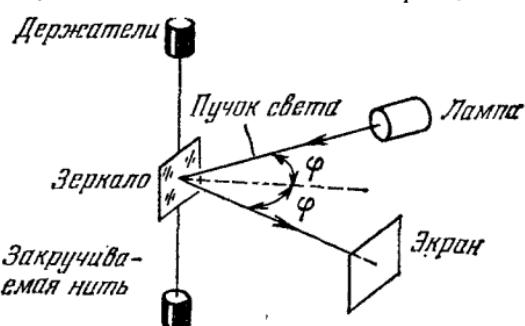


Рис. 1.24. Крутильный маятник, состоящий из тонкой нити и зеркала. Пучок света, отраженный от зеркала, указывает угол его поворота.

Броуновское движение частиц. Если маленькие твердые частицы размером порядка 10^{-4} см поместить в каплю жидкости и наблюдать их движение под микроскопом, то оказывается, что частицы не находятся в покое, а постоянно движутся в разных направлениях. Это явление получило название броуновского движения в честь английского ботаника Броуна, который впервые наблюдал его в прошлом веке, но не понял его причины. Только в 1905 г. Эйнштейн объяснил броуновское движение случайными флуктуациями, возникающими в состоянии равновесия. Движение твердых частиц подвержено воздействию флуктуаций силы, появляющейся в результате многих случайных столкновений частиц с молекулами жидкости. Так как частицы имеют небольшой размер, то число

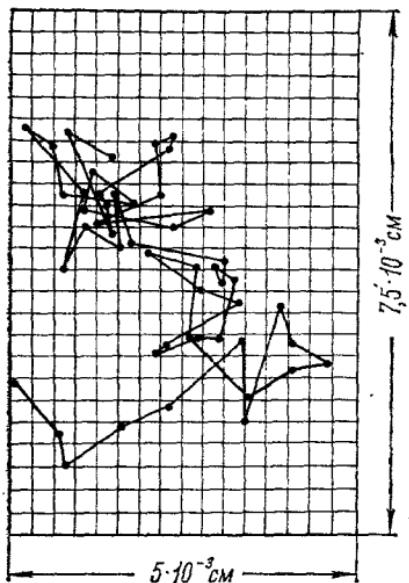


Рис. 1.25. Наблюдаемое под микроскопом броуновское движение частиц, взвешенных в капле воды. Диаметр частиц 10^{-4} см. На этой диаграмме показано положение частиц в поле зрения микроскопа через каждые тридцать секунд.

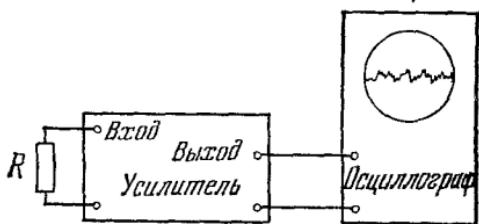


Рис. 1.26. Сопротивление R подключено ко входным зажимам чувствительного усилителя, выход которого подан на осциллограф.

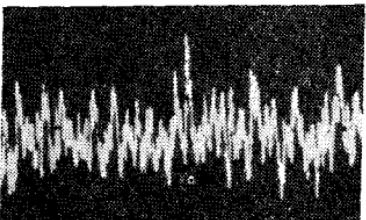


Рис. 1.27. Фотография шумов выходного напряжения, сделанная с помощью схемы, показанной на рис. 1.26.

молекул, взаимодействующих с ними в единицу времени, также мало, и соответственно флуктуации велики. Следует также заметить, что масса частицы мала и столкновение с молекулой может заметно изменить движение частицы. Результирующее случайное движение частицы поэтому легко наблюдать.

Флуктуации напряжения на сопротивлении. Если электрическое сопротивление присоединить ко входу чувствительного электронного усилителя, то на его выходе можно наблюдать случайные флуктуации напряжения. Если шумами самого усилителя можно пренебречь, то эти флуктуации вызваны случным броуновским движением электронов в сопротивлении. Предположим, например, что такое движение электронов приводит к флуктуации, при которой число электронов в одной части сопротивления становится больше, чем в другой. Возникающая таким образом разность зарядов вызывает электрическое поле в сопротивлении и разность потенциалов между его концами. Вариации этой разности потенциалов и образуют флуктуации напряжения, которые усиливаются электронным прибором.

Флуктуации могут иметь большое практическое значение. Их необходимо иметь в виду при измерении слабых сигналов или эф-

фектов, которые мало отличимы от флуктуаций самого измерительного прибора. (Такие флуктуации, создаваемые прибором, называют шумами, поскольку они затрудняют измерения.) Например, крутильный маятник трудно использовать для измерения моментов, значительно меньших, чем моменты, создаваемые внутренними флуктуациями самой измерительной системы. Точно так же, в случае сопротивления, присоединенного к усилителю, трудно измерить напряжение на сопротивлении, если оно меньше, чем величина внутренних флуктуаций напряжения, которые всегда существуют на самом сопротивлении *).

1.5. Темплота и температура

Неизолированные макроскопические системы могут взаимодействовать и обмениваться энергией. Одним из простых очевидных примеров такого взаимодействия является совершение макроскопической работы одной системой над другой. Например, на рис. 1.28

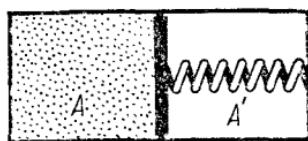


Рис. 1.28. Когда поршень смещается на некоторое макроскопическое расстояние, пружина A' совершает работу над газом A .

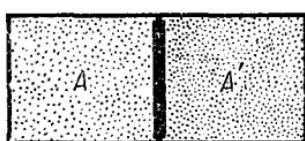


Рис. 1.29. Сжатый газ A' совершает работу над газом A при макроскопическом перемещении поршня.

показана пружина A' , которая давит на поршень, ограничивающий объем газа A . На рис. 1.29 газ A' , находящийся под большим давлением, действует на поршень. Если поршень продвинется на некоторое расстояние, то система A' совершит некоторую работу над системой A **).

Возможно, однако, и такое взаимодействие двух макроскопических систем, которое происходит без совершения макроскопической работы. Этот тип взаимодействий, который мы будем называть *тепловым*, возникает в результате обмена энергиями между системами в молекулярном масштабе. Энергия, переданная таким образом, называется *тепловой*. Предположим, что поршень на рис. 1.29 закреплен неподвижно. В этом случае одна система не может совершать макроскопическую работу над другой системой, независимо от того, какая сила действует на поршень. С другой стороны, атомы системы A постоянно взаимодействуют в момент соударений

*) Например, напряжение в один микровольт и меньше уже трудно измерить. Однако усреднением большого числа измерений можно выделить полезный сигнал, использовав то обстоятельство, что он не флуктуирует во времени.

**) Термин *работа* используется здесь в своем обычном механическом смысле, т. е. работа равна произведению силы на путь, на котором действует эта сила.