

спонтанные флуктуации, приводящие к концентрации молекул в одной из половин сосуда, никогда не возникают. Увидав такую ситуацию на экране, мы почти с полной уверенностью можем сказать, что фильм прокручивается в обратном направлении.

1.3. Дополнительные примеры

Простой пример идеального газа, состоящего из N молекул, столкнул нас со всеми проблемами, возникающими при исследовании систем, состоящих из многих частиц. В дальнейшем мы займемся систематическим развитием и усовершенствованием рассмотренных идей. Покажем вначале на нескольких простых примерах макроскопических систем, что рассмотренные нами основные идеи имеют универсальный характер.

Идеальная система из N спинов. Рассмотрим систему, состоящую из N частиц, каждая из которых имеет спин, равный $\frac{1}{2}$, и магнитный момент μ_0 . Такими частицами являются электроны и атомы, имеющие один непарный электрон, или ядра, например, протоны. Наличие у частицы механического момента, т. е. спина, является квантовым эффектом. Так, например, утверждение, что спин частицы равен $\frac{1}{2}$, означает, что измерение составляющей момента количества движения (относительно какого-то выделенного направления в пространстве) может дать только два возможных значения: $+\frac{1}{2}\hbar$ или $-\frac{1}{2}\hbar$ (где \hbar — постоянная Планка, деленная на 2π). Поэтому спин либо параллелен, либо антипараллелен выбранному направлению. Для простоты мы будем говорить, что спин ориентирован либо «вверх», либо «вниз»*).



Рис. 1.21. Простая система, состоящая из нескольких частиц со спином, равным $\frac{1}{2}$. Каждый спин направлен либо вверх, либо вниз

N намагниченных стержней, имеющих магнитный момент μ_0 , направленный либо вверх, либо вниз. Для простоты мы можем считать, что частицы закреплены в каком-то положении подобно атомам в решетке твердого тела **). Будем считать систему спинов *идеальной*; если взаимодействие между ними почти отсутствует. (Это возможно, если среднее расстояние между частицами, имеющими спин, настолько велико, что полем, создаваемым магнитным моментом любой частицы в месте расположения других частиц, можно пренебречь.)

*) Магнитный момент частицы может быть антипараллелен механическому моменту (так обычно бывает, когда частица имеет отрицательный заряд). В этом случае, когда магнитный момент направлен «вверх», механический момент направлен «вниз», и наоборот.

**) Если частицы могут свободно перемещаться в пространстве, то их переносное движение можно рассматривать отдельно от ориентации их спинов.

Идеальная система из N спинов полностью описывается квантовой механикой, но, с другой стороны, она аналогична идеальному газу, состоящему из N молекул. В газе каждая молекула в результате столкновений с другими молекулами может оказаться как в левой половине сосуда, так и в правой. В случае системы из спинов незначительное взаимодействие каждого магнитного момента с другими магнитными моментами приводит к изменению его ориентации. Поэтому магнитные моменты могут быть направлены как вверх, так и вниз. В изолированном газе в состоянии равновесия молекула может с равной вероятностью находиться как в левой половине сосуда, так и в правой. Точно так же, в случае системы со спинами, находящейся в равновесии при отсутствии внешнего магнитного поля, магнитный момент с равной вероятностью может быть направлен как вверх, так и вниз. Обозначим через n число спинов, направленных вверх, а через n' — число спинов, направленных вниз. В равновесии наиболее случайная ситуация, когда $n \approx n' \approx \frac{1}{2}N$, будет возникать очень часто, в то время как флуктуации, при которых n значительно отличается от $\frac{1}{2}N$, будут редки (и если N велико, то неслучайные ситуации, при которых n значительно отличается от $\frac{1}{2}N$, почти всегда будут являться результатом воздействия на изолированную систему спино со стороны другой системы).

Распределение энергии в идеальном газе. Рассмотрим опять изолированный идеальный газ, состоящий из N молекул. Мы пришли к общему выводу, что состояние равновесия, характеризующееся независимостью распределения молекул от времени, достигается системой после достаточно большого промежутка времени, необходимого для установления наиболее случайного распределения. В наших предыдущих рассуждениях мы обращали внимание главным образом на положение молекул. Было показано, что состояние равновесия газа соответствует наиболее случайному распределению молекул в пространстве, т. е. существенно однородному распределению молекул по объему сосуда. Но что можно сказать о скоростях молекул? Нам следует воспользоваться фундаментальным законом механики, утверждающим, что если газ представляет собой изолированную систему, то его полная энергия E должна оставаться постоянной. Полная энергия газа E равна сумме энергий отдельных молекул, так как потенциальная энергия взаимодействия между молекулами пренебрежимо мала. Поэтому основным интересующим нас вопросом является распределение полной энергии газа по отдельным молекулам. (Энергия e одноатомной молекулы просто равна кинетической энергии $e = \frac{1}{2}mv^2$, где m — масса, а v — скорость молекулы.) Может случиться, что у одних молекул энергия будет очень велика, а у других очень мала. Но такая ситуация является исключительной и не сохраняется долго, так как молекулы сталкиваются, обмениваясь при этом энергией. В конце концов будет достигнуто состояние равновесия, не зависящее от времени, когда распределение полной энергии газа будет наиболее слу-

чайным. Каждая молекула будет иметь в среднем одну и ту же энергию и одну и ту же скорость *).

В заключение заметим, что поскольку все направления движения в пространстве равновероятны, то наиболее случайным распределением скоростей будет такое, когда любое направление движения молекул равновероятно.

Колебания маятника в газе. Рассмотрим маятник, находящийся в сосуде, наполненном идеальным газом (рис. 1.22). В отсутствие

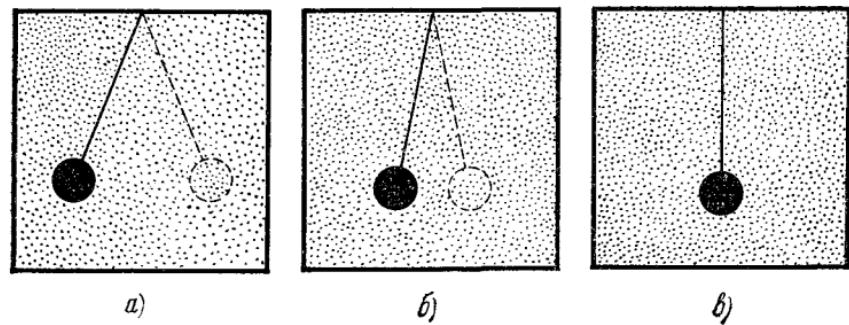


Рис. 1.22. Колебания маятника в газе: а) сразу же после начала колебаний, б) через некоторое время и в) после очень большого промежутка времени. Кинограмма, прокрученная назад, будет показывать обратную последовательность кадров, т. е. в), б), а).

газа колебания маятника продолжались бы бесконечно долго без изменений амплитуды. (Мы пренебрегаем трением в точке подвеса маятника.) При наличии газа положение резко меняется. Молекулы газа постоянно сталкиваются с гирей маятника. При каждом таком ударе происходит обмен энергией между гирей маятника и молекулами. К чему приведут эти удары? Мы ответим на этот вопрос, используя общие принципы и не рассматривая детально процесс соударения **). Так как система изолирована, то сумма энергии маятника E_m (кинетическая плюс потенциальная) и полной энергии всех молекул газа E_g должна оставаться постоянной. Если энергия маятника передается молекулам газа, то она распределится между многими молекулами самым различным способом и уже не будет полностью заключена в гире маятника. Результатом такого взаимодействия будет максимально случайное состояние системы. Так как изолированная система стремится к этому состоянию, то маятник постепенно отдает всю свою энергию молекулам газа,

*) Это не значит, что в любой момент времени энергия молекулы будет одна и та же. В результате столкновения с другими молекулами энергия отдельной молекулы может достаточно сильно флюктуировать с течением времени. Но когда мы наблюдаем за поведением молекулы в течение значительного интервала времени t , ее средняя энергия в течение этого интервала будет такой же, как и любой другой молекулы.

**) При детальном рассмотрении проблемы оказывается, что маятник чаще сталкивается с молекулами, расположенными на той стороне, куда движется гиря, чем с молекулами на противоположной стороне. В результате число столкновений, при которых маятник отдает энергию молекулам, будет больше числа столкновений, при которых он ее приобретает.

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.

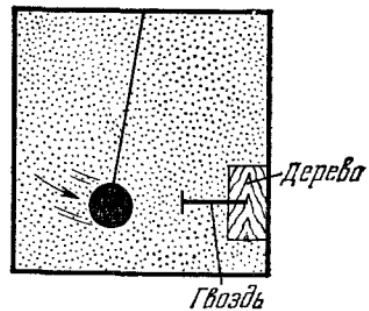


Рис. 1.23. Устройство, позволяющее использовать энергию маятника для выполнения полезной работы. Гиря маятника забивает гвоздь в дерево.

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,