

молекул, находящихся в какой-то части сосуда в данный момент *). С такой макроскопической точки зрения изолированный газ, который в течение долгого времени находился в невозмущенном состоянии, является очень простым объектом, так как его макроскопическое состояние не меняется со временем. В самом деле, допустим, что, начиная с момента времени t_1 , мы наблюдаем за поведением газа в течение достаточно длительного интервала времени τ и снимаем кинограмму поведения газа. Предположим далее, что, начиная с момента времени t_2 , мы опять наблюдаем за поведением газа в течение такого же интервала времени τ и также используем для этих целей кинокамеру. С макроскопической точки зрения два этих фильма не должны отличаться друг от друга. В обоих случаях число n частиц в левой половине сосуда будет флюктуировать относительно одного и того же уровня $1/2N$ и наблюдаемые флюктуации будут одного и того же характера. Если не обращать внимания на некоторые исключительные особенности (они будут рассмотрены в следующем параграфе), то наблюдаемое макроскопическое состояние газа не зависит от момента начала наблюдений. Это означает, что макроскопическое состояние газа не меняется со временем. В частности, и тот уровень, относительно которого флюктуирует n (или, более точно, его среднее значение), также не меняется со временем. Говорят, что система, состоящая из многих частиц (такая, как наш газ), находится в равновесии, если ее макроскопическое состояние не имеет тенденции к изменению со временем.

З а м е ч а н и е. Дадим точное определение понятию о среднем во времени. Обозначим через $n(t)$ число молекул в левой половине ящика в какой-то момент времени t . Среднее во времени значение $n(t)$, взятое во временному интервале τ , обозначается через $\bar{n}(t)$, и определяется как

$$[\bar{n}(t)]_{\tau} = \frac{1}{\tau} \int_{t}^{t+\tau} n(t') dt'. \quad (6)$$

Соответственно, если съемка, начатая во время t , продолжалась в течение всего интервала времени τ и содержала $g = \tau/\tau_0$ кадров, снятых в последовательные моменты времени $t_1 = t, t_2 = t + \tau_0, t_3 = t + 2\tau_0, \dots, t_g = t + (g - 1)\tau_0$, то выражение (6) примет вид

$$[\bar{n}(t)]_{\tau} = \frac{1}{g} [n(t_1) + n(t_2) + \dots + n(t_g)].$$

Если не указывать, какой интервал времени τ рассматривается, то под $\bar{n}(t)$ понимают среднее значение в течение какого-то разумного интервала времени τ . Для случая равновесного состояния газа \bar{n} почти все время равно $1/2N$.

1.2. Необратимость и приближение к равновесию

Рассмотрим изолированный газ, состоящий из большого числа N молекул. Флюктуации, возникающие в газе, который находится в состоянии равновесия, таковы, что n мало отличается от наиболее

*) Чтобы быть точными, мы должны представить, что сосуд разделен га множество равных ячеек, имеющих достаточный объем для помещения большого числа молекул. Тогда макроскопическое состояние газа будет определено точным заданием числа молекул, находящихся в каждой ячейке.

вероятного значения $\frac{1}{2}N$. Нас будет интересовать, при каких условиях можно ожидать ситуации, когда n значительно отличается от $\frac{1}{2}N$. Такие ситуации могут возникать в двух различных случаях, которые мы и рассмотрим.

Редко возникающие большие флюктуации в равновесном состоянии. Хотя в газе, находящемся в состоянии равновесия, n обычно близко к $\frac{1}{2}N$, все же, хотя и редко, значения n могут отличаться от $\frac{1}{2}N$. Наблюдая за газом достаточно долго, мы можем обнаружить, что в некоторый момент времени значение n существенно отклонилось от $\frac{1}{2}N$.

Предположим, что в какой-то момент времени t_1 мы обнаружили такое большое отклонение $|\Delta n|$ от $\frac{1}{2}N$, т. е. что n_1 намного больше, чем $\frac{1}{2}N$. Что можно сказать о наиболее вероятном поведении n_1 с течением времени? При очень большом значении разности $|n_1 - \frac{1}{2}N|$ величина n_1 соответствует весьма неравномерному распределению молекул, которое в равновесном состоянии возникает крайне редко. Наиболее вероятной причиной появления такого n_1 является флюктуация, максимальное значение которой близко к n_1 (на рис. 1.8 этот максимум обозначен буквой X). Однако такое большое значение n_1 может возникнуть в результате еще большей флюктуации с максимумом, значительно превышающим X (на рис. 1.8 максимум такой флюктуации обозначен буквой Y). Однако возникновение такой большой флюктуации значительно менее вероятно, чем возникновение уже достаточно редкой флюктуации X . Таким образом, наиболее вероятно, что время t_1 , при котором $n=n_1$, соответствует пику X , при котором n максимально. Поведение n в зависимости от времени показано на рис. 1.8. С течением времени n стремится к уменьшению (этот процесс сопровождается небольшими флюктуациями) до тех пор, пока не будет достигнуто обычное состояние равновесия, при котором величина n будет флюктуировать относительно среднего постоянного уровня $\frac{1}{2}N$. Время, необходимое для того, чтобы большая флюктуация (для которой $n=n_1$) перешла в состояние равновесия (для которого $n \approx \frac{1}{2}N$), называется временем релаксации для данной флюктуации. Заметим, что среди большого числа кинограмм кинограмму, описывающую такое поведение газа, можно встретить крайне редко. Но если мы заметили эту кинограмму, то ее легко отличить от других, так как изображаемое на ней состояние газа стремится к изменению со временем *).

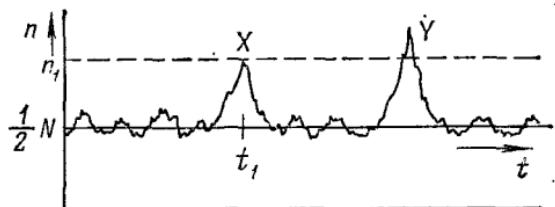


Рис. 1.8. Диаграмма, показывающая редко возникающие большие флюктуации числа молекул в одной половине сосуда относительно равновесного значения $\frac{1}{2}N$.

появления такого n_1 является флюктуация, максимальное значение которой близко к n_1 (на рис. 1.8 этот максимум обозначен буквой X). Однако такое большое значение n_1 может возникнуть в результате еще большей флюктуации с максимумом, значительно превышающим X (на рис. 1.8 максимум такой флюктуации обозначен буквой Y). Однако возникновение такой большой флюктуации значительно менее вероятно, чем возникновение уже достаточно редкой флюктуации X . Таким образом, наиболее вероятно, что время t_1 , при котором $n=n_1$, соответствует пику X , при котором n максимально. Поведение n в зависимости от времени показано на рис. 1.8. С течением времени n стремится к уменьшению (этот процесс сопровождается небольшими флюктуациями) до тех пор, пока не будет достигнуто обычное состояние равновесия, при котором величина n будет флюктуировать относительно среднего постоянного уровня $\frac{1}{2}N$. Время, необходимое для того, чтобы большая флюктуация (для которой $n=n_1$) перешла в состояние равновесия (для которого $n \approx \frac{1}{2}N$), называется временем релаксации для данной флюктуации. Заметим, что среди большого числа кинограмм кинограмму, описывающую такое поведение газа, можно встретить крайне редко. Но если мы заметили эту кинограмму, то ее легко отличить от других, так как изображаемое на ней состояние газа стремится к изменению со временем *).

*) Это не противоречит утверждению, что газ долго находится в состоянии равновесия, так как такие флюктуации, как n_1 , могут быть замечены лишь при очень длительном наблюдении за газом.

Теперь можно сделать некоторые выводы. Если известно, что n имеет значение n_1 , которое существенно отличается от среднего равновесного уровня $\frac{1}{2}N$, то изменения n , почти *) всегда происходят в сторону приближения к равновесному значению $\frac{1}{2}N$. С более физической точки зрения можно сказать, что значение n_1 соответствует весьма неравномерному распределению молекул и что молекулы должны двигаться по очень специальным траекториям, чтобы такое распределение сохранилось. Постоянное движение молекул почти всегда приводит к такому перемешиванию молекул, при котором их распределение внутри сосуда становится максимально равномерным. (См. рис. 1.15—1.20 в конце этого раздела.)

З а м е ч а н и я. Заметим, что утверждения, сделанные выше, в равной степени справедливы для больших флуктуаций обоих знаков. Если флуктуация положительна, то n_1 почти всегда будет соответствовать максимуму возможной флуктуации $n_1 = \frac{1}{2}N$ (это показано на рис. 1.8, где пик флуктуации обозначен буквой X). Если же флуктуация отрицательна, то она почти всегда будет соответствовать минимуму возможной флуктуации. Однако заключение, сделанное выше, является общим для обоих случаев.

Заметим также, что утверждения этого параграфа остаются в силе, независимо от направления изменения времени (т. е. независимо от того, как мы смотрим фильм, вперед или назад). Если максимум n_1 , обозначенный через X , находится на момент времени t_1 , то n_1 должно уменьшаться как для $t > t_1$ так и для $t < t_1$.

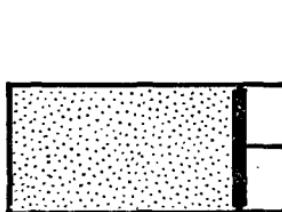
Случай специально приготовленного начального распределения. Хотя упорядоченная ситуация, при которой n значительно отличается от $\frac{1}{2}N$, может возникнуть как результат спонтанной флуктуации газа в состоянии равновесия, все же такая большая флуктуация появляется настолько редко, что практически она никогда не может быть обнаружена [вспомните численные оценки, основанные на уравнениях (2) или (3)]. Большинство макроскопических систем, с которыми мы имеем дело, не могут оставаться изолированными и невозмущенными в течение долгого времени и поэтому не находятся в состоянии равновесия. Упорядоченная ситуация в данном случае возникает не как результат спонтанных флуктуаций, происходящих в состоянии равновесия, а как результат воздействия на систему, которое происходило в недалеком прошлом. Безусловно, создать упорядоченную ситуацию при помощи внешних воздействий на систему довольно просто.

П р и м е р ы. Если сделать одну стенку ящика подвижной, то она превратится в поршень. С помощью такого поршня можно сжать газ в левую половину ящика (как показано на рис. 1.9). Если затем внезапно вернуть поршень в крайнее положение, то все молекулы в первый момент времени останутся в левой половине ящика. Таким способом можно получить крайне неоднородное распределение молекул в ящике.

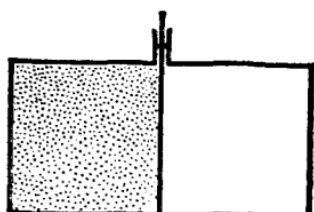
Теперь рассмотрим сосуд, разделенный перегородкой на две равные части (рис. 1.10). В левой половине сосуда находятся все молекулы газа, в то время как

*) Мы использовали слово «почти», так как значение n_1 может не только соответствовать пику X , но и (крайне редко) лежать на восходящей стороне пика Y . В последнем случае n_1 будет вначале возрастать, т. е. удаляться от равновесного уровня $\frac{1}{2}N$.

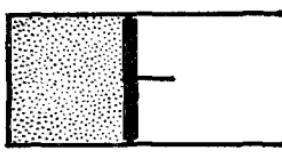
правая половина пуста. Если при этих условиях газ находится в состоянии равновесия, то можно считать, что распределение молекул в левой половине сосуда однородно. Представим, что перегородка быстро убирается. В первый момент времени распределение молекул в левой половине сосуда не нарушится. Однако это распределение является чрезвычайно неоднородным для новых условий, при которых молекулы могут свободно двигаться внутри всего сосуда.



а)



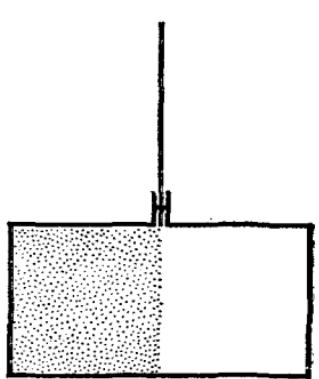
с)



б)



д)



е)

Рис. 1.9. Поршень из положения (а) смещается в положение (б), сжимая газ в левой половине сосуда. Если внезапно вернуть поршень в первоначальное положение, как показано на рисунке (д), то все молекулы сразу после расширения останутся в левой половине, в то время как правая половина будет пустой.

Рис. 1.10. Когда перегородка (а) неожиданно убирается, все молекулы в первый момент остаются в левой половине сосуда (б).

Предположим, что у нас имеется изолированная система с очень неоднородным распределением молекул, а именно большинство молекул газа находится в левой половине сосуда, так что n существенно отличается от $\frac{1}{2}N$. Нас не интересует способ, каким система оказалась в таком состоянии. Это может быть как спонтанская флуктуация, возникшая из состояния равновесия, так и какое-нибудь внешнее воздействие. Независимо от прошлого системы, ее поведение будет аналогично поведению системы при рассасывании большой флуктуации. Так как все возможные способы движения молекул в системе приводят к более случайному распределению молекул, то это распределение будет стремиться к максимально

случайному. После того как максимально случайное распределение достигнуто, состояние системы не будет иметь тенденции к изменению, что соответствует предельному состоянию равновесия. Например, на рис. 1.11 показано, что произойдет, если неожиданно убрать перегородку, разделяющую сосуд на две равные части. Число молекул n в левой половине сосуда будет меняться от начального

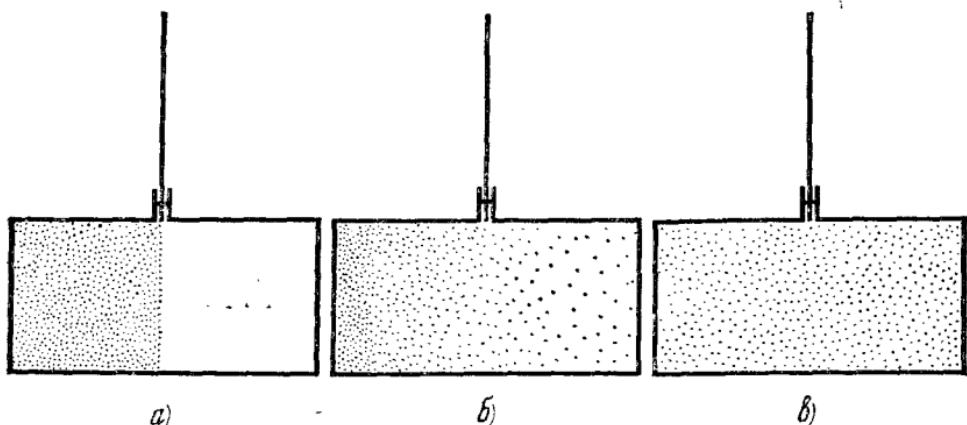


Рис. 1.11. а) Ящик из рис. 1.10 сразу же после того, как была убрана перегородка, б) через небольшой промежуток времени и в) после того, как прошло достаточно много времени. Кинограмма, рассматриваемая в обратном направлении, будет показывать обратный порядок $\theta, \bar{\theta}, a$.

значения $n = N$ (соответствующего крайне неравномерному распределению молекул в сосуде) до предельного состояния равновесия, при котором $n \approx 1/2N$ (соответствующего совершенно равномерному распределению молекул). (См. рис. 1.12 и 1.18.)

Таким образом, мы пришли к важному выводу:

Если изолированная система находится в крайне неоднородном состоянии, то она будет стремиться с течением времени к предельно случайному состоянию (мы не обращаем внимания на небольшие флуктуации), которое отвечает равновесию.

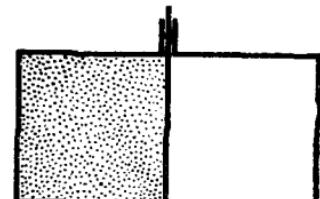
(7)

Заметим, что это утверждение ничего не говорит о времени *релаксации*, т. е. о времени, необходимом системе для возвращения в состояние равновесия. В зависимости от свойств рассматриваемой системы это время может лежать в пределах от микросекунд до веков.

При мер. Вернемся к рис. 1.10 и снова рассмотрим ящик, разделенный перегородкой на две равные части. Левая часть ящика содержит N молекул газа, правая пустая. Внезапно, но лишь частично уберем перегородку (рис. 1.13). В этом отличие этого мысленного опыта от опыта, показанного на рис. 1.10, где перегородка убрана полностью. В обоих опытах иеравновесная ситуация, возникшая немедленно после удаления перегородки (когда число молекул в левой части равно N).

начинает меняться во времени, пока число молекул в обеих частях ящика не выравнивается ($n \approx 1/2 N$). Опыт, иллюстрируемый рис. 1.13, отличается от опыта рис. 1.10 лишь тем, что он требует большего времени для установления окончательного равновесия.

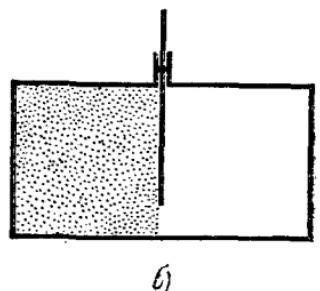
Необратимость. Утверждение (7) означает, что если в системе происходят изменения, то они происходят в весьма определенном направлении, т. е. от менее случайного к более случайному распределению. Мы можем наблюдать за процессом изменения распределения молекул в сосуде с помощью кинограммы. Предположим



а)



Рис. 1.12. Диаграмма показывает изменение со временем числа молекул n в левой половине ящика на рис. 1.11 после поднятия перегородки. Время релаксации обозначено через τ_r .



б)

Рис. 1.13. Перегородка неожиданно поднята, но не до конца.

теперь, что мы смотрим фильм в обратном направлении (т. е. прокручиваем фильм в направлении, противоположном тому, в котором снимались процессы, происходящие в системе). В этом случае мы увидим на экране процесс, обращенный во времени (т. е. процесс, который имел бы место при изменении хода времени на обратный). Картина на экране будет выглядеть весьма своеобразно. Мы увидим процесс, при котором распределение молекул в системе изменяется от случайного к упорядоченному, что в действительности можно наблюдать крайне редко. Поэтому теперь, наблюдая за экраном, мы почти с полной уверенностью можем сказать, что фильм прокручивается через проектор в обратном направлении.

Пример. Предположим, что мы смотрим фильм, на котором заснят процесс, начавшийся в сосуде сразу же после поднятия перегородки (см. рис. 1.10). Если прокручивать фильм в прямом направлении, то мы увидим, как газ будет распространяться по всему объему сосуда до тех пор, пока не будет достигнуто относительно равномерное распределение молекул (см. рис. 1.11). Такое поведение газа вполнеично. С другой стороны, прокручивая фильм в обратном направлении, мы увидим, как газ, равномерно распределенный по всему объему, неожиданно начинает концентрироваться в левой половине сосуда до тех пор, пока в правой половине не останется ни одной молекулы. В действительности такой процесс никогда не наблюдается. Это, однако, не означает, что он невозможен: такой процесс просто чрезвычайно невероятен. То, что мы видим на экране, прокручивая фильм в обратном направлении, могло бы произойти в действительности лишь в том случае, если бы молекулы двигались по совершенно особым

траекториям *), что чрезвычайно маловероятно. В самом деле, это так же невероятно, как возникновение флуктуации, при которой $n = N$ (в случае, когда газ равномерно распределен по объему сосуда).

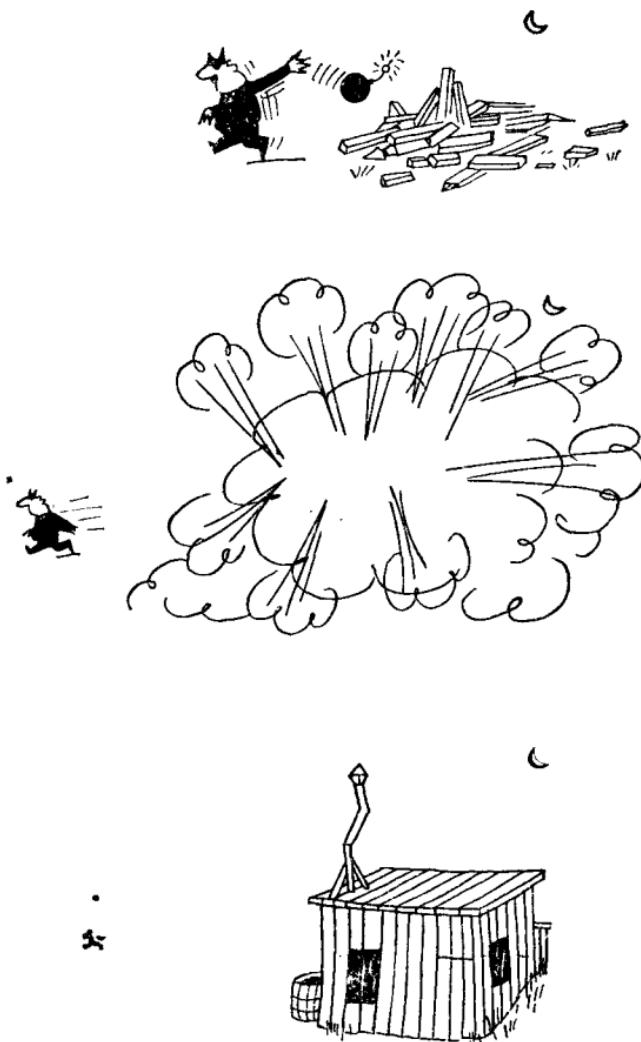


Рис. 1.14. На этом юмористическом рисунке необратимый процесс показан в обратном порядке. Такая последовательность событий в *принципе* возможна, но чрезвычайно невероятно, чтобы это когда-либо случилось.

Итак, мы говорим, что процесс *необратим*, если обратный во времени процесс (т. е. процесс, который можно наблюдать при просмотре кинограммы в обратном направлении) в действительности почти никогда не возникает. Все макроскопические системы, не находящиеся в состоянии равновесия, стремятся приблизиться к это-

*) Действительно, рассмотрим молекулы в некоторый момент времени t_1 , после того как они равномерно распределились по объему сосуда. Теперь допустим, что в некоторый последующий момент времени t_2 каждая молекула заняла точно то же положение, что и в момент t_1 , и имеет скорость, равную по величине, но направленную противоположно, скорости в момент t_1 . Тогда каждая молекула совершил обратный путь и газ сам по себе снова соберется в левой половине сосуда.

му состоянию, т. е. приблизиться к наиболее случайным ситуациям. Отсюда мы можем заключить, что все такие системы ведут себя как необратимые во времени. В повседневной жизни мы окружены системами, которые не находятся в состоянии равновесия. Поэтому понятно, что время имеет вполне определенное направление, позволяющее отличить прошедшее от будущего. Например, мы знаем, что люди рождаются, растут и умирают. Однако мы никогда не сможем наблюдать процесс, обратный во времени (который в принципе возможен, но фантически невероятен), когда человек поднимается из могилы, становится постепенно все моложе и моложе и затем исчезает во чреве матери.

Заметим, что законы, определяющие движение частиц системы, не задают никакого преимущественного направления времени. Предположим, что мы снимаем кинограмму изолированного газа, находящегося в равновесии (см., например, рис. 1.4), или рассматриваем временную зависимость числа молекул n в одной из половин сосуда (как показано на рис. 1.5).

Рассматривая эту кинограмму на экране, мы не сможем указать, в каком направлении пленка пропускается через проектор. Направление времени становится определенным только в том случае, если известно, что в какой-то момент времени t_1 в изолированной макроскопической системе было очень специальное, неслучайное распределение. Однако, если система была невозмущенной в течение очень долгого времени и попала в такую специальную ситуацию в результате крайне редкой флуктуации из состояния равновесия, то мы опять не можем сказать ничего определенного о направлении времени. Как уже указывалось в связи с пиком X на рис. 1.8, в этом случае система будет стремиться к наиболее случайному распределению независимо от направления времени (т. е. как в случае, когда пленка прокручивается в прямом направлении, так и в случае обратного направления прокручивания). Отсчет времени ведется от t_1 . Другим способом, при помощи которого система может оказаться в очень специальной неслучайной ситуации в момент t_1 , является взаимодействие системы с какой-то другой системой в предшествующий момент времени. В этом случае мы можем точно определить направление времени, так как известно, что прежде чем система была оставлена в покое, она находилась во взаимодействии с другой системой во время, *предшествовавшее* моменту t_1 .

И наконец, следует заметить, что степень необратимости спонтанно возникающих процессов может иметь различную величину. Например, с увеличением числа частиц степень необратимости возрастает, так как при этом вероятность возникновения неслучайной ситуации чрезвычайно сильно уменьшается по сравнению с вероятностью возникновения случайной.

П р и м е р. Рассмотрим сосуд, содержащий одну молекулу, которая движется и упруго сталкивается с его стенками. Если снять кинограмму такой системы и затем рассмотреть ее на экране, то мы никогда не сможем сказать, в каком направлении пленка пропускается через проектор.

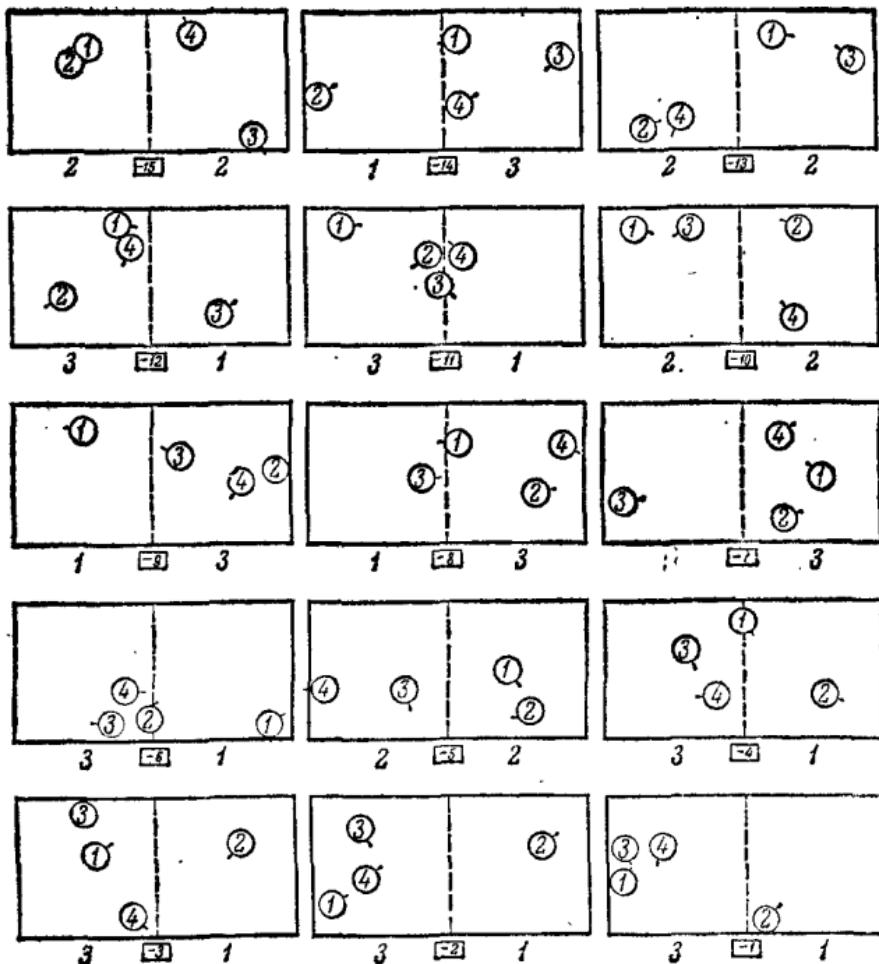


Рис. 1.15. Здесь показана возможная предыстория событий, рассматриваемых на рис. 1.16. Рисунки получены из исходного кадра $f=0$ (см. рис. 1.16), на котором скорости всех четырех частиц (находящихся в левой половине ящика) изменены на обратные. Эволюция системы во времени представлена последовательностью кадров $f=-15, -14, \dots, 14$. Короткая черточка у каждой частицы показывает направление ее скорости. Если теперь представить себе, что скорости всех частиц на этом рисунке изменены на противоположные, то последовательность кадров $f=-15, -14, \dots, -1, 0, 1, \dots, 14$ (т. е. кадры на рис. 1.15 и 1.16) представляет собой возможное движение частиц.

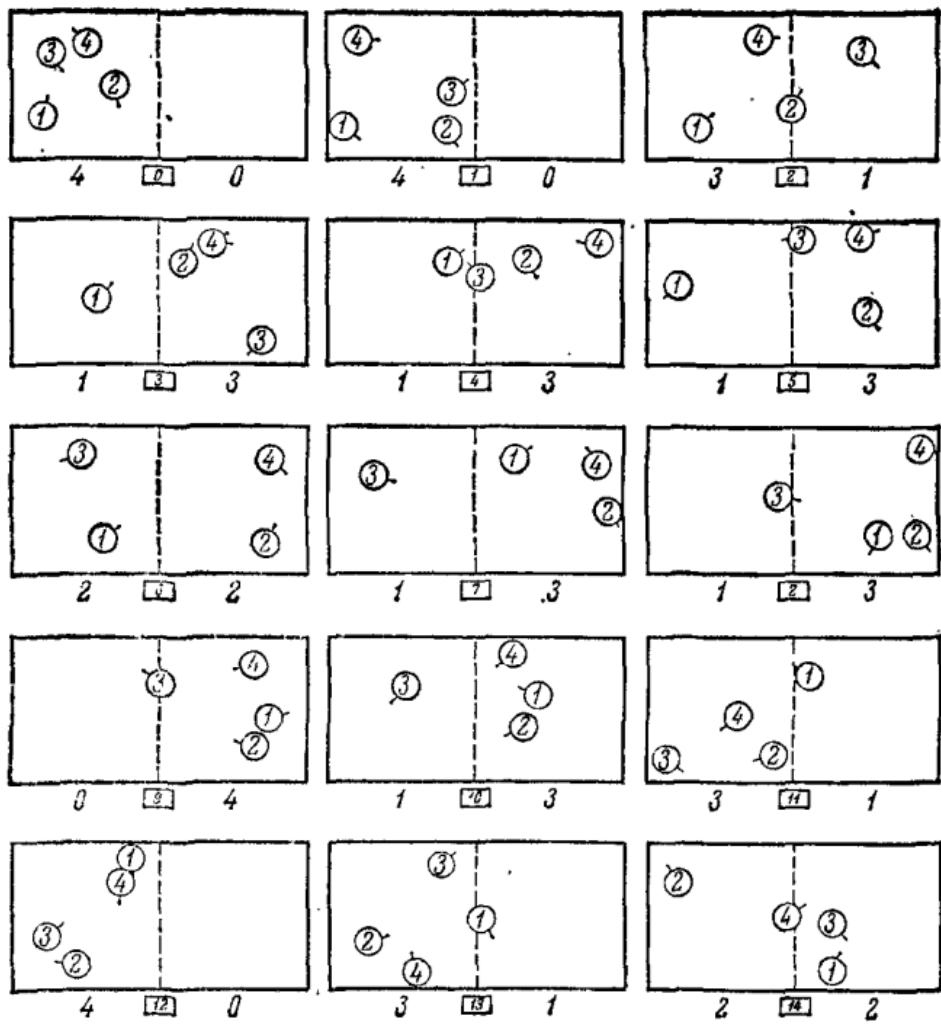
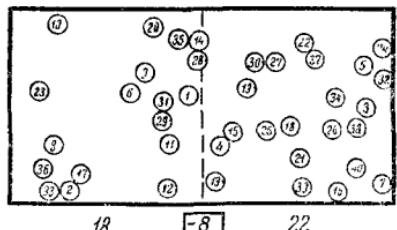
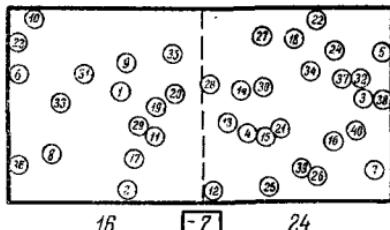


Рис. 1.16. Кадры, полученные с помощью электронной вычислительной машины, показывают положения четырех частиц в ящике. Началом этой последовательности кадров является специальный случай, когда частицы находятся в левой половине ящика и имеют некоторое произвольно заданные скорости (кадр $j=0$). Эволюция системы во времени показана последовательностью кадров $j=0, 1, 2, \dots, 14$. Число частиц в каждой половине ящика записано непосредственно под кадром. Короткая черточка у каждой частицы показывает направление ее скорости.

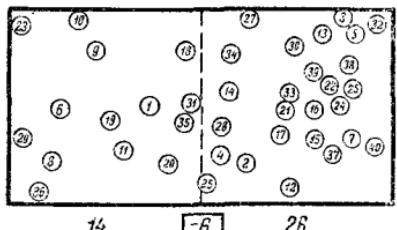
Пусть теперь сосуд содержит N молекул идеального газа. Предположим, что мы рассматриваем кинограмму газа на экране и обращаем особое внимание на кадры, где все молекулы, первоначально распределенные равномерно по всему объему сосуда, оказались в левой половине сосуда. Какие можно сделать выводы?



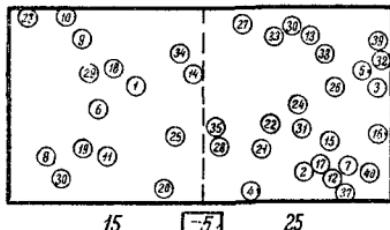
18 -8 22



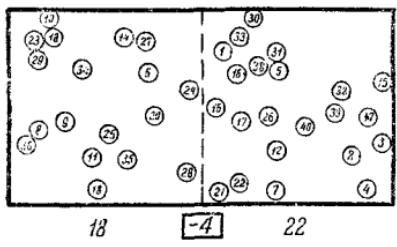
16 -7 24



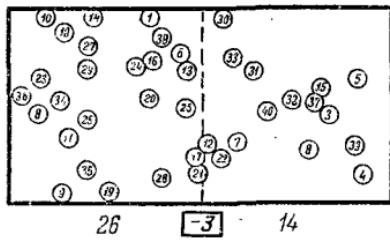
14 -6 26



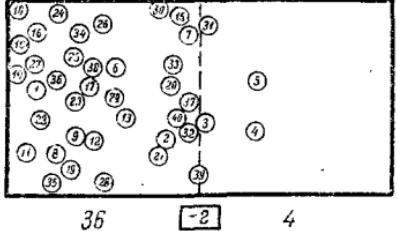
15 -5 25



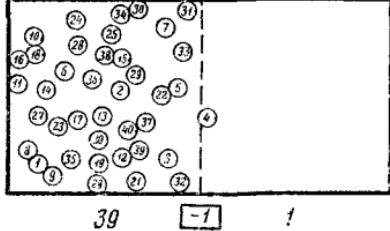
18 -4 22



26 -3 14



36 -2 4



39 -1 1

Рис. 1.17. Здесь показана возможная предыстория событий, рассматриваемых на рис. 1.18. Рисунки получены из исходного кадра $j=0$ (на рис. 1.18), на котором скорости всех сорока частиц (находящихся в левой половине ящика) изменены на обратные. Эволюция системы во времени показана последовательностью кадров $j=-8, -7, \dots, -1, 0, 1, \dots, 7$. Скорости не указаны. Если теперь представить себе, что скорости всех частиц на этом рисунке изменены на противоположные, то последовательность кадров $j=-8, -7, \dots, -1, 0, 1, \dots, 7$ (т. е. кадры на рис. 1.17 и 1.18) представляет собой возможное движение частиц. Это движение, начавшись с распределения молекул, показанного на кадре $j=-8$, затем приходит к флюктуациям, заключающейся в том, что все молекулы оказываются в левой половине сосуда (кадр $j=0$).

Если $N = 4$, то такие кадры в результате спонтанных флюктуаций будут появляться относительно часто. (В среднем на одном кадре из шестнадцати все молекулы будут находиться в левой половине сосуда.) Поэтому мы не можем с полной уверенностью сказать, в какую сторону прокручивается фильм (рис. 1.15). Но если

$N = 40$, распределение молекул, при котором все они будут находиться в левой половине сосуда в результате спонтанной флуктуации, будет возникать очень редко. (В среднем только на одном кадре из $2^N = 2^{40} \approx 10^{12}$ мы будем наблюдать такое

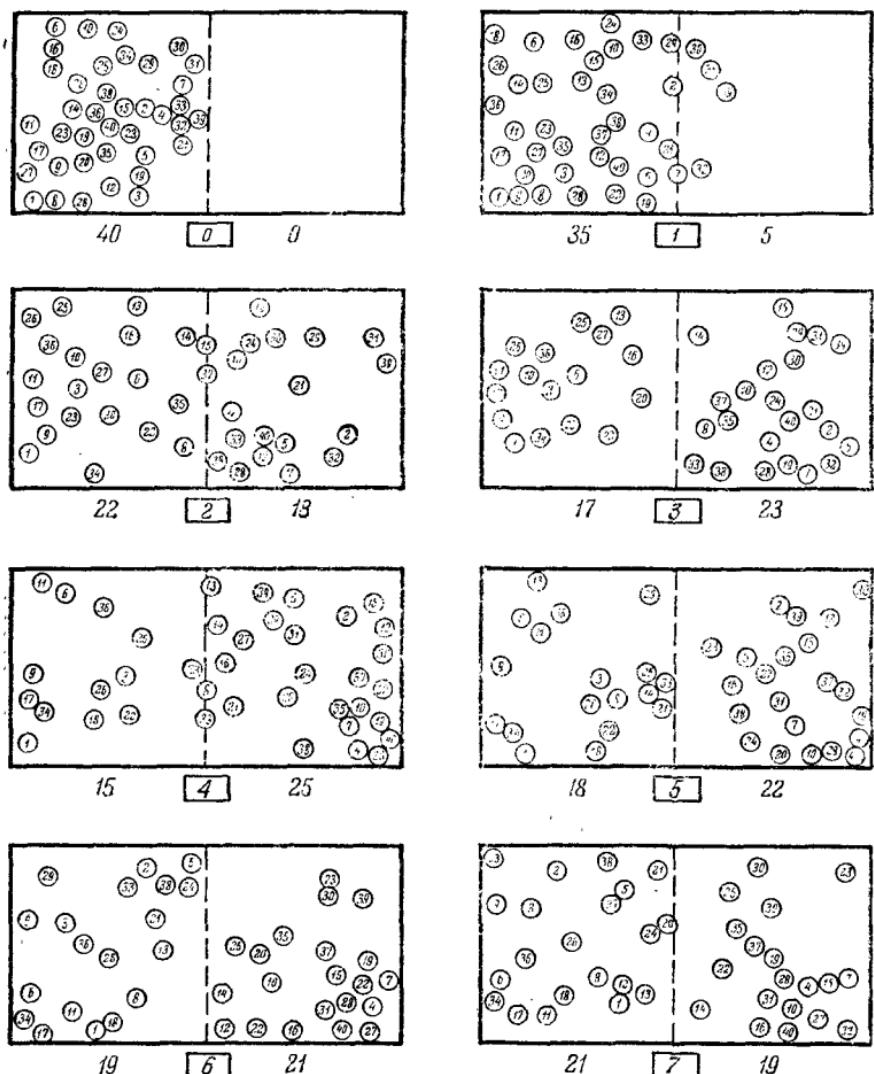


Рис. 1.18. Кадры, полученные с помощью электронной вычислительной машины, для 40 частиц, помещенных в ящик. Началом последовательности кадров является специальный случай, когда все частицы находятся в левой половине ящика в положениях, показанных на кадре $j=0$, и имеют некоторые, произвольно заданные, скорости. Эволюция системы во времени показана последовательностью кадров $j=0, 1, 2, \dots, 7$. Число частиц в каждой половине ящика записано непосредственно под кадром. Скорости не указаны.

распределение.) Поэтому, когда мы видим на экране такую ситуацию, то с достаточно большой вероятностью можем сказать, что фильм прокручивается в обратном направлении, а данное распределение молекул есть результат предшествующего воздействия. Например, такая ситуация могла возникнуть при использовании перегородки, при помощи которой в первоначальный момент все молекулы были собраны в левой части сосуда (рис. 1.17). В обычных условиях, когда $N \sim 10^{20}$,

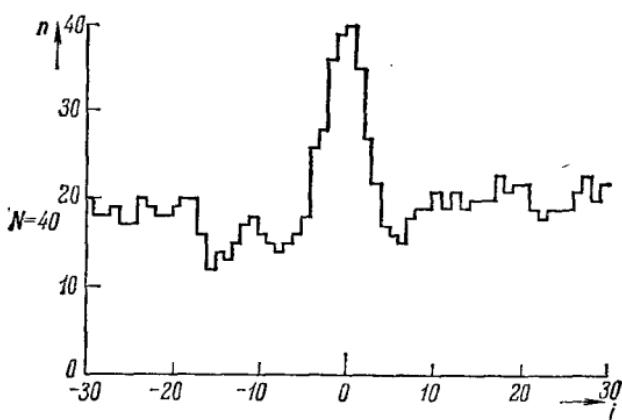
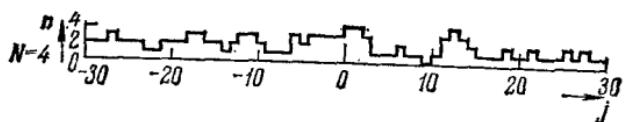


Рис. 1.19. Число n частиц в левой половине ящика в зависимости от номера кадра j или от времени $t=j\tau_0$. Число частиц n на j -м кадре указано горизонтальной чертой, идущей от j до $j+1$. Графики иллюстрируют рис. 1.15 и 1.16 для $N=4$ и рис. 1.17 и 1.18 для $N=40$ частиц, но содержат информацию о большем числе кадров, чем показано на этих рисунках. Правая половина каждого рисунка показывает приближение системы к равновесию. Весь рисунок иллюстрирует возникновение редкой флуктуации, возможной в состоянии равновесия.

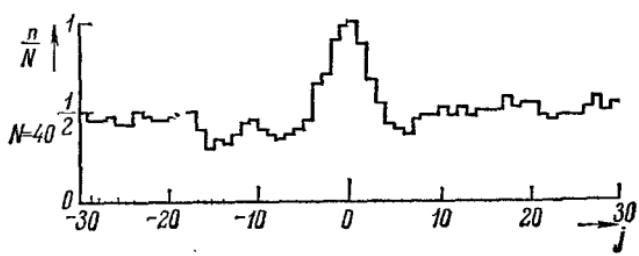
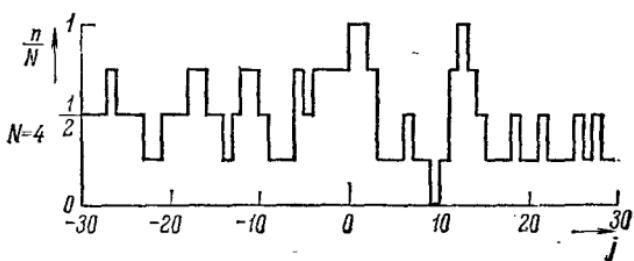


Рис. 1.20. Относительное число n/N частиц в левой половине ящика в зависимости от номера кадра j или времени $t=j\tau_0$. Эти графики содержат ту же информацию, что и рис. 1.19.

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.