

зовые точки, изображающие микроканонический ансамбль, лежат в бесконечно тонком слое $6N$ -мерного пространства.

Наконец, при третьем способе рассмотрения берут системы с совершенно одинаковыми значениями энергии. Такой ансамбль называется *ансамблем Эренфеста*, который первый провел его изучение. В этом случае все фазовые точки лежат на некоторой гиперповерхности $6N$ -мерного пространства и при развитии систем двигаются, не покидая этой поверхности.

Представление об ансамбле систем связывается с понятием термодинамической вероятности следующим образом: объем элемента фазового пространства, выделенный между двумя поверхностями энергии U и $U + dU$, для случая канонического ансамбля Гиббса равен произведению термодинамической вероятности («плотности вероятности» Π) на дифференциал энергии dU . Таким образом, *термодинамическая вероятность какого-либо состояния измеряется величиной того объема фазового пространства, в котором расположены точки, изображающие интересующее нас состояние системы.*

Такое определение термодинамической вероятности становится возможным благодаря одной весьма важной теореме, лежащей в основе этого метода, а именно благодаря теореме Лиувилля, заключающейся в следующем. Если представить себе некоторый элемент объема в фазовом пространстве, содержащий столько изображающих точек, сколько систем находилось в данный момент времени в смежных состояниях, и следить за перемещением со временем этих точек по траекториям, изображающим развитие систем, то по законам механики оказывается, что объем, занятый этими точками в процессе движения, будет оставаться неизменным (несмотря на то, что системы, ранее находившиеся в смежных состояниях, со временем могут прийти в состояния, более или менее различные).

5.6.5 Опровержение ложной концепции тепловой смерти мира

Нередко можно наблюдать, что выводы точных наук, вполне достоверные в той области, для которой эти выводы предназначены, проникая в философию, дают почву для смелых, но неубедительных обобщений. Примером может служить проблема так называемой *тепловой смерти мира*. Этой проблеме было уделено немало внимания и философами и физиками, несмотря на то, что сама постановка этой проблемы в корне ошибочна.

Из термодинамической теоремы о возрастании энтропии изолированной системы при необратимых процессах неосмотрительно было сделано заключение (в этом повинен Клаузиус), что энтропия мира стремится к некоторому максимуму. Когда этот максимум будет достигнут, дальнейшее возрастание энтропии делается невозможным, все процессы прекратятся и мир погрузится в состояние «тепловой смерти». Мы постоянно наблюдаем, что самопроизвольные процессы протекают в направлении выравнивания температур или часто в направлении выравнивания давлений, химических потенциалов и других факторов интенсивности. Под состоянием «тепловой смерти» подразумевают такое состояние мира, когда во всех областях мира температура делается одинаковой и когда распределение других факторов интенсивности окажется таким, что больше не будет уже существовать причин, способных вызвать возникновение каких бы то ни было процессов.

Понятно, что концепция такого рода может служить основой для разных теологических спекуляций. Действительно, если когда-либо мир придет к состоянию тепловой смерти, то спрашивается, почему же он к нему не пришел раньше? На этот вопрос, казалось бы, напрашивается ответ, что, следовательно, мир не существовал вечно. Но если мир не существовал вечно, то он когда-то возник, а если он когда-то возник, то встает вопрос: кто был его творцом? Вот какие пути ведут от утверждения о возрастании энтропии мира к религиозным измышлениям.

Многие авторы рассматривали проблему тепловой смерти мира и высказали ряд интересных соображений. Я бы хотел подчеркнуть одну сторону дела, которая мне кажется особенно важной, во-первых, потому что она касается ошибок, которые нередко делают и при других обобщениях, и, во-вторых, потому что она вскрывает ложность самой постановки проблемы тепловой смерти мира и, таким образом, делает излишним какую бы то ни было критику этой проблемы.

Я совершенно убежден в правильности той точки зрения, которая в конечном счете сводится к тому, что никакой проблемы смерти мира не существует, так как эта мнимая «проблема» возникла вследствие грубой методологической ошибки. Очевидно, что всегда, когда мы намерены сделать какое-либо обобщение, мы должны прежде всего взвесить, законно ли это обобщение, не перейдем ли мы, идя по пути обобщений, через ту грань, где количество переходит в качество. Пример: теорема о возрастании энтропии верна и для больших и для малых тел; но она теряет смысл, если ее применять к слишком малым крупницам вещества, размеры которых соизмеримы с размерами молекул, — для таких крупниц вещества понятие энтропии лишено физического содержания. К таким крупницам вещества нельзя прилагать второе начало термодинамики по той простой причине, что для них стирается различие между понятиями работы и тепла.

Некоторые физические понятия и законы испытывают глубокое качественное изменение, когда мы переходим от макрофизических к микрофизическим явлениям. Недооценка этого качественного изменения уже привела классическую физику к конфликту с теорией квантов. Нечто аналогичное мы имеем и при переходе от макрофизических процессов к процессам космических масштабов (супрафизическим).

Я рассчитываю показать, что сущность грубой методологической ошибки, допускаемой при постановке проблемы тепловой смерти мира, заключается в забвении или же в игнорировании качественного изменения (при распространении термодинамики на мир в целом) всех основных понятий, используемых в теореме о возрастании энтропии, а именно, во-первых, понятия изолированной системы, во-вторых, энтропии и, в-третьих, равновесного состояния. Рассмотрим последовательно каждое из этих понятий с точки зрения допустимости его применения к процессам космического масштаба.

В термодинамике, когда мы говорим об изолированной системе, мы имеем в виду такую совокупность тел, на которую извне не производится механических и термических воздействий, но (это чрезвычайно важно и необходимо для хода доказательств) мы предполагаем, что при желании воздействия на систему могут быть произведены. В термодинамике изолированная система это «часть», а не «целое». С термодинамической точки зрения энтропия системы представляет собой величину, которая некоторым образом определяет соотношения системы с другими, не входящими в состав системы телами, а именно, это есть сумма приведенных теплот, или же, иначе, это есть наименьшее количество тепла, которое надо отнять (внешнее воздействие) у системы, чтобы перевести ее из заданного состояния в начальное (не прибегая при этом к использованию холодильников с температурой ниже 1°K). Нетрудно показать, что и статистическое понимание энтропии вследствие необходимости сопоставления двух состояний системы содержит в себе в качестве обязательной предпосылки возможность реализации внешнего теплового воздействия на систему. Это указывает на то, что и в статистике понятие изолированной системы означает «часть», а не «целое». Но мир представляет собой нечто целое; это «изолированная система» в философском, а не в термодинамическом смысле слова: это такая вечно изолированная система, которая по самой сути своей никогда не может испытать внешних воздействий, никогда не может ни отдавать, ни получать тепло. Поэтому применительно к

миру понятие энтропии не имеет обычного термодинамического содержания; можно составить сумму энтропий всех тел мира, но никак нельзя утверждать, что по своим свойствам эта величина будет иметь смысл энтропии мира. Уже по одному этому нельзя безоговорочно обобщать на мир в целом теорему о возрастании энтропии.

Обращаясь к понятиям равновесного состояния и энтропии, чтобы разобраться в качественном изменении этих понятий для процессов космического масштаба, прибегнем к простому, но, как мне кажется, довольно поучительному сопоставлению. А именно, следуя полету фантазии, вообразим себе, что смотрим на звездный мир, как смотрим на стакан воды. Мы не могли бы различать отдельные звезды. Звездный мир нам представился бы как некое сплошное супракосмическое тело. С таким же основанием и по тем же причинам, в силу которых мы считаем, что вода в стакане находится в равновесном состоянии, мы, возможно, решили бы, что наблюдаемое нами супракосмическое тело достигло максимума супраэнтропии и пребывает в некоем суправывесном состоянии. С точки зрения «надзвездной термодинамики» это есть состояние тепловой смерти мира точно так же, как с точки зрения обычной термодинамики равновесное состояние воды, молекулы которой находятся в вечном движении и испытывают соударения, ассоциацию, распад, перескоки электронов в оболочках и т. д., есть состояние тепловой смерти воды.

Термодинамика имеет свою ограниченную область применения. Под термодинамическим состоянием мы подразумеваем задание тех параметров, которые в конечном счете близко связаны с положением и движением отдельных частиц тела. Таковы плотность, давление, температура, химические силы, парциальное давление, концентрации и т. д. Это арсенал понятий служит нам при выводе термодинамических законов. Движение тела в целом, его перемещения в пространстве мы в термодинамике или не рассматриваем или, если и учитываем, то посредством сочетания выводов термодинамики с законами механики. Во всяком случае в выражение таких термодинамических величин, как энтропия, скорость тела, движущегося как целое, не входит.

Небесные тела реют в мировом пространстве подобно молекулам газа. В жизни мира первенствующее значение имеет распределение небесных тел в пространстве и направлении их скоростей, т. е. такие факторы, которые не учтены в определяемой обычными методами величине энтропии (макроэнтропии) небесного тела и которые не учтены, следовательно, и в величине суммы макроэнтропий небесных тел.

Вместе с тем очевидно, что для характеристики состояния звездных скоплений важными являются как раз именно эти величины — скорости движения небесных тел в целом и распределение небесных тел в пространстве. Поэтому, если можно образовать такое понятие, как энтропия мира, то было бы совершенно неразумно рассматривать эту величину как сумму энтропий небесных тел. Статистическое понимание термодинамики указывает, что такая величина, как энтропия мира, если бы мы хотели ее построить по аналогии с обычной макроэнтропией, должна была бы зависеть от «звездной температуры» (т. е. от средней скорости движения небесных тел) и от «звездной плотности» (т. е. от числа звезд в космической единице объема), но не от температуры и плотности звезд.

Очевидно, что делать какие бы то ни было выводы о поведении так понимаемой супраэнтропии мира обычная термодинамика не может; это являлось бы сферой компетенции особой «надзвездной термодинамики». Но если бы даже, соблазняясь аналогией, мы предположили, что в надзвездной термодинамике верна теорема о возрастании супраэнтропии, то и тогда мы не имели бы права строить пессимистические заключения о тепловой смерти мира. Мы могли бы только прийти к выводу, что состояние мира либо должно стать термодинамически равновесным в смысле супратермодина-

мики, построенной на скоростях звезд и плотности их распределения так же, как обычная термодинамика построена на скоростях молекул и плотности распределения молекул. Однако такое супратермодинамическое равновесие никак не может быть отождествлено с понятием тепловой смерти. Чтобы убедиться в этом, достаточно вспомнить приведенное сопоставление состояния космоса с состоянием воды в стакане. С точки зрения термодинамики любое равновесное состояние возможно, если хотите, назвать состоянием «тепловой смерти вещества». Тем не менее, как нам хорошо известно, молекулы всегда находятся в движении и вечно происходит непрерывная смена событий микромира. Так и для мира в целом состояние супратермодинамического равновесия отнюдь не означало бы тепловой смерти в смысле прекращения движения и эволюции звезд. Напротив, гибель и рождение новых звезд при их соударениях — вечная жизнь космоса — являлись бы необходимой предпосылкой супратермодинамической равновесности мира, подобно тому, как аналогичные явления в микромире поддерживают макрофизическую равновесность.

Итак, воображаемый закон возрастания супраэнтропии вовсе не страшен. Что же касается закона возрастания макроэнтропии, то он предугадывает направление процессов, протекающих в недрах и на поверхности небесных тел и в отдельных более или менее значительных участках мирового пространства, но ничего не может нам сказать о судьбе мира в целом. Для хода супракосмических процессов, в которые вовлечены миллиарды звезд, остается совершенно несущественным, где и когда какая-либо звезда погаснет и где возникнет новая звезда.

Здесь мы имеем аналогию с макрофизическими процессами, ход которых не зависит от того, какой именно из атомов отдаст квант энергии и какой получит. Вообразим, что электрон не является пределом делимости вещества и имеет сложную физическую структуру; вообразим, что существует величина, аналогичная энтропии, определяющая направление процессов, разыгрывающихся в недрах электрона и в той или иной мере отражающихся на жизни атома (микроэнтропия). Поскольку мы заняты изучением макрофизических процессов, нам нет надобности знать, существует или не существует микроэнтропия. Если изолированное тело (скажем, вода в термосе) находится в равновесном состоянии, энтропия (макроэнтропия), достигнув максимума, остается неизменной, но движение молекул будет происходить вечно, и суммарная микроэнтропия, если эта величина существует, может беспредельно возрастать, как беспредельно тянется время.

Точно так же не важно, существует ли величина, определяющая супракосмическое состояние мира (супраэнтропия). Возможно, что эта величина существует; быть может, она стремится к определенному максимуму или вечно остается неизменной, свидетельствуя о некоей равновесности мира. Мир в целом может пребывать в некоем суправывесном состоянии; но движение, возникновение и распад небесных тел будут происходить вечно; вечно будут протекать макрофизические процессы; и, может быть, беспредельно, как время, будет возрастать суммарная макроэнтропия мира.

СТАТИСТИЧЕСКИЙ МЕТОД ВЫЧИСЛЕНИЯ ЭНТРОПИИ И ДРУГИХ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН. КВАНТОВАЯ ТЕОРИЯ ТВЕРДЫХ ТЕЛ

5.7. Вывод формулы для энтропии

Вычисление энтропии тесно связано с вычислением других термодинамических функций: свободной энергии, внутренней энергии, теплоемкости.

Имеются два существенно различных метода вычисления энтропии. Первый метод — это метод экспериментальной термодинамики: вычисле-