

ФИЗИКА НАШИХ ДНЕЙ

ТЕРМОДИНАМИКА, СТАТИСТИКА И ИНФОРМАЦИЯ *)

Л. Бриллюэн

1. САДИ КАРНО — ПИОНЕР

Давным-давно жил одинокий ученый, глубоко призадумавшийся над механическими свойствами паровых машин; долгое время он размышлял над этим загадочным явлением и в конце концов опубликовал небольшую книгу, где изложил свои соображения. Имя этого ученого — Сади Карно **), название книги — «Réflexions sur la puissance motrice du feu» (Paris, 1824).

В это время Карно было двадцать восемь лет, и он только что сформулировал знаменитый принцип, который до сих пор носит его имя. Однако Карно оказался довольно неосторожным и придумал принцип, который мы теперь называем «вторым», до того, как был сформулирован

*) American Journal of Physics 29, 318 (1961). Перевод В. А. Угарова. Оригиналу предшествует аннотация: «В статье содержится краткое изложение двух принципов термодинамики, наряду со статистической интерпретацией энтропии. Показывается, что определение «информации» приводит к прямой связи между информацией и отрицательной энтропией (сокращенно, — негаэнтропией). Всякий эксперимент ведет к уменьшению негаэнтропии (т. е. увеличивает энтропию) и тем самым приносит информацию. Принцип негаэнтропии для информации представляет собой обобщение принципа Карно; он поясняется на нескольких примерах. Рассматривается значение физических законов с точки зрения информации и подчеркивается роль творческого мышления».

**) В истории трех французских Республик фамилия Карно представлена знаменитыми учеными и политическими деятелями. Генерал Лазар Карно (1753—1823) был военным министром во времена Первой французской Республики, а также при Наполеоне I. Он был вместе с тем блестящим математиком, его работы упоминает Зоммерфельд в своих «Lectures on mechanics» (Academic Press, Inc., New York, 1952; см. также А. Зоммерфельд, «Механика», М., ИЛ, 1947, стр. 41—42). Старший сын Лазара Карно, Сади Карно (1796—1832), был основоположником термодинамики. Его последняя работа, касающаяся первого принципа термодинамики, отмечена Зоммерфельдом («Lectures on Thermodynamics», Academic Press, Inc., New York, 1956, стр. 22, примечание, и стр. 26; см. также А. Зоммерфельд, «Термодинамика и статистическая физика», М., ИЛ, 1955, стр. 36, примечание, и стр. 41), который пишет: «Мы будем следовать классическому пути, начало которому было положено в 1824 г. Сади Карно и по которомушли Рудольф Клаузиус (1850) и Вильям Томсон (1851)». Лорд Кельвин неоднократно пытался найти записную книжку Сади Карно (двадцать пять лет спустя!), о которой он слышал от своих французских друзей, но безуспешно.

Вторым сыном Лазара был Ипполит Карно (1801—1888), министр просвещения в 1848 г. (Вторая Республика), известный социолог. Мари-Франсуа Сади Карно (1837—1894), сын Ипполита, стал президентом Третьей Республики в 1887 г. и был убит итальянским анархистом.

Бумаги Сади Карно — ученого — были опубликованы Французской Академией наук в 1927 г. под названием «Biographie et Manuscripts de Sadi Carnot». Биография Карно, написанная крупным французским математиком Е. Пикаром, содержит большое количество весьма ценных сведений.

первый¹ И в течение целого века многочисленные профессора неоднократно упрекали его за этот поступок. Но эти профессора были глубоко неправы, потому что они просто не читали второй книги Карно. Но в их оправдание можно сказать, что вторая книга Карно была опубликована только в 1927 г., более ста лет спустя; вся эта история заслуживает некоторого разъяснения.

Написав свою первую книгу, Карно продолжал интересоваться и размышлять над теми же вопросами; он делал краткие заметки в небольшой записной книжке, намереваясь попозже написать обо всем более подробно. Но это «позже» не состоялось; Сади Карно умер в 1832 г. во время эпидемии холеры, охватившей Париж. Ему было тогда тридцать шесть лет; в его записках содержалось подробное изложение первого принципа термодинамики и к тому же расчет механического эквивалента тепла (с ошибкой всего лишь в 15%); вдобавок к этому в записках был краткий набросок кинетической теории и механизма теплового движения. Надо сказать, что потребовалась половина столетия, чтобы ученые смогли снова открыть эти идеи первостепенной важности.

Но что же произошло с этой записной книжкой? Она была передана брату Сади Карно — Ипполиту, по профессии социологу, который хранил эту записную книжку в своей библиотеке, вовсе и не подозревая о ее необыкновенной ценности. Около 1878 г. Ипполит передал эту книжку Французской Академии наук; в этом же году из нее были опубликованы отдельные выдержки. Полностью эта записная книжка (вместе с фотокопией оригинала) была опубликована лишь в 1927 г. По-видимому, ее публикация не привлекла к себе особого внимания; однако, если не забывать, что книжка была датирована 1830 годом, в ней содержались отдельные потрясающие утверждения:

«Тепло может представлять собой колебательное движение молекул. Если это так, то количество тепла — это не что иное, как та механическая энергия, которая необходима, чтобы привести молекулы в колебательное движение. Термо является движением... Полная энергия (или, как говорит Карно, puissance motrice) существует в природе в определенном постоянном количестве. Она не появляется и не исчезает; она просто принимает другую форму... Чтобы получить единицу механической энергии, необходимо затратить 2,7 единиц тепла».

Расчеты основывались на опытах по диффузии газов и очень похожи на расчеты Р. Майера (1842), произведенные значительно позже.

Некоторые записи Карно расшифровываются далеко не просто. У него был свой особый набор терминов, которые мы зачастую просто не в состоянии понять. Но ведь он был пионером. Он прокладывал свой путь через неизвестную страну и мог позаботиться только о тропинке для себя. он не имел времени для того, чтобы оставить за собой удобную дорогу для тех, кто пойдет за ним. Например, в его понимании слово «теплород» зачастую совсем неопределенно. Он пользуется термином «количество тепла», но в книге Карно этот термин, по существу, должен переводиться как «энтропия», что впервые установили Бронстед и Ла-Мер¹.

Карно был одним из величайших гениев науки, но ранняя смерть оборвала его жизнь, трагически оставив его труды незавершенными

2. ДВА ПРИНЦИПА ТЕРМОДИНАМИКИ

Первый принцип: закон сохранения энергии. Несмотря на различные формы, в которых проявляется энергия, и на ее непрерывные превращения, полное количество энергии остается неизменным, если мы рассматриваем замкнутую систему, изолированную

от ее окружения. Заряженная электрическая батарея и груз, поднятый на определенную высоту над землей, олицетворяют собой весьма типичные формы энергии, которые могут быть превращены в химическую энергию, работу или тепло. Обратное превращение, например из тепла в работу, также возможно, но с определенными ограничениями, устанавливае-мыми вторым принципом.

К привычным формам энергии Эйнштейн добавил еще одну — массу. Всякая масса обладает определенной энергией, а всякая энергия пред-ставляет собой некоторую массу. Старинный закон сохранения массы ока-зался, таким образом, расширенным и стал частью закона сохранения энергии.

Второй принцип — принцип Карно. Тепловая энергия требует особого рассмотрения, напоминающего двойную бухгал-терию. Рассмотрим машину или физическую систему, находящуюся в кон-такте с источниками тепла. Прежде всего мы составляем энергетический баланс всей операции, в котором будут графы для кредита и дебета, соотвествующие тому, поглощает или отдает тепло рассматриваемая машина.

Далее мы должны использовать коэффициент обмена, который изме-няется в зависимости от температуры, при которой происходит переход тепла. Разделив количество тепла Δq (положительное или отрицательное) на этот коэффициент обмена, мы подсчитаем количество полученной энтропии ΔS ; подсчет энтропии тем самым ведется отдельно. Коэффициент обмена, разумеется, есть не что иное, как абсолютная температура T . В шкале Цельсия — это просто обычная температура, к которой добавлено 273,16°. Абсолютный нуль соответствует температуре — 273,16° С. Мы опираемся на фундаментальное соотношение между количеством тепла Δq , получен-ным системой в течение данного процесса, и увеличением энтропии в той же самой системе ΔS :

$$\Delta S = \Delta q/T, \text{ или } \Delta q = T\Delta S,$$

причем подсчет величин q и S мы должны вести отдельно.

Вспомним, как ведет свои дела ювелир, имеющий дело с драгоцен-ными металлами. В одной граfe он учитывает вес проданного или куплен-ного металла. В соседней граfe он проставляет суммы, полученные при продаже или уплаченные при покупке. Каждая сделка, отраженная в первом столбце, имеет соответствующую запись во втором столбце. Предста-вим себе, что Δq представляет вес купленного металла, например серебра. Если T представляет собой то весовое количество серебра, которое стоит один рубль, то величина ΔS представляет собой размер операции, выра-женный в рублях. Это сравнение сопоставляет понятие энтропии с поня-тием о ценности. Несколько позже, в разделе 4, нам представится удоб-ный случай подробнее остановиться на этой аналогии.

Между теплом и энтропией существует обменное бюро, пользующееся различным тарифом, в зависимости от температуры: странная форма пла-нового хозяйства. Еще более удивительной является постоянная тенденция энтропии к возрастанию. Погрузите горячий металл с температурой T_1 в сосуд с холодной водой (температура T_2). Некоторое количество тепла перейдет от металла к воде. Энтропия, потерянная металлом, подсчиты-вается с очень большим коэффициентом T_1 ; энтропия, приобретенная водой, содержит меньший коэффициент T_2 . Отсюда вытекает, что энтро-пия, потерянная металлом, меньше, чем энтропия, приобретенная водой. В общем, система металл — вода приобретает энтропию. Но вот еще один опыт: пусть вода нагревается электрическим сопротивлением, по которому идет ток, создаваемый батареей. Батарея теряет электрическую

энергию, но не энтропию. Вода приобретает тепло и энтропию. Можно высказать следующее общее правило: в любой изолированной системе полная энергия не меняется, но полная энтропия имеет тенденцию к возрастанию. Энтропия системы может в крайнем случае оставаться постоянной (если вообще ничего не происходит или если все превращения являются обратимыми); энтропия должна возрастать в случае необратимых превращений (как это было в двух приведенных примерах), но она никогда не может уменьшаться, если речь идет об изолированной системе.

Итак, построение энтропии не только строго планируемое, но и односторонне направляемое.

Сделанные замечания требуют определения полной энтропии системы S . Допустим, что мы можем построить систему из составляющих ее частей, используя для этого только обратимые процессы; в этом случае можно найти теплоты q_1, q_2, \dots , используемые в каждом процессе, и подсчитать соответствующие энтропии s_1, s_2, \dots

Тогда полная энтропия системы может быть определена в виде суммы

$$S = s_1 + s_2 + s_3 + \dots$$

энтропий, соответствующих каждому из этих обратимых шагов. Если некоторые из этих процессов необратимы (химические реакции взрыва, нескомпенсированное нагревание), мы уже не в состоянии точно оценить энтропию конечной системы; каждый необратимый шаг увеличивает полную энтропию на величину, оценить которую довольно трудно. Таким образом, мы приходим к не очень определенному результату:

$$S \geq s_1 + s_2 + s_3 + \dots$$

Следовательно, в случае необратимости фактическая энтропия конечного состояния во всяком случае больше, чем сумма энтропий последовательных шагов при образовании этой системы.

3. ТЕПЛОВЫЕ МАШИНЫ

Принцип Карно имеет очень важное следствие: невозможно превратить тепло в работу, если имеется только один резервуар тепла. Превращение тепла в работу означало бы для такого единственного резервуара тепла уменьшение числа содержащихся в нем калорий, а следовательно, уменьшение энтропии системы. Но это находится в противоречии с абсолютно непрекаемым утверждением о том, что полная энтропия изолированной системы может только возрастать.

Многочисленные попытки, оказавшиеся бесплодными, не смогли создать вечное движение, способное производить работу в неограниченном количестве. Некоторые из этих попыток ставили своей целью получение механической работы без всякой компенсации; это находилось в противоречии с первым принципом термодинамики. В других случаях надеялись извлечь работу из единственного резервуара тепла (используя, например, тепло окружающей нас среды). Полный крах всех этих попыток полностью подтверждает справедливость обоих принципов термодинамики.

Тепловая машина (такая, например, как паровая машина) может превратить данное количество тепла в работу. Однако этот процесс происходит при наличии двух резервуаров тепла, находящихся при различных температурах. Котел, содержащий кипящую воду и пар, представляет собой резервуар, обладающий высокой температурой (T_1); конденсатор (его роль может выполнять просто окружающая нас атмосфера), в который попадает охлажденный пар, является резервуаром с низкой

температурой (T_2). Тепловая машина забирает некоторое количество энтропии ΔS от резервуара с температурой T_1 ; этой энтропии соответствует определенное количество тепла

$$\Delta q_1 = T_1 \Delta S$$

согласно правилу подсчета энтропии, установленному в предыдущем разделе; это количество тепла проносится паром через цилиндры. Совершив работу, например, заставив двигаться поршни, пар охлаждается и выпускается в конденсатор (уже при температуре T_2); здесь он конденсируется и выделяет тепло

$$\Delta q_2 = T_2 \Delta S.$$

Поскольку $T_2 < T_1$, получаемое конденсатором тепло Δq_2 меньше, чем тепло, полученное паром Δq_1 . Разность $\Delta q_1 - \Delta q_2$ превращается в механическую работу в цилиндрах паровой машины. Мы обнаруживаем здесь почти буквальное совпадение с утверждением Карно, если только сделать небольшую замену: слово «теплород» нужно заменить словом «энтропия».

Рассмотренный процесс соответствует идеальной машине, процесс в которой подразумевается «обратимым». Машина должна быть полностью обратимой: мы должны быть в состоянии вернуть пар из холодного резервуара в горячий. Эту работу может выполнить насос; он сжимает пар и нагревает его; затем нагретый пар возвращается обратно в горячий резервуар. В этих обратных операциях величины Δq_1 и Δq_2 и произведенная работа имеют противоположные знаки по сравнению с прямыми операциями.

Но что представляет собой такая машина? Не более, чем домашний холодильник! Мотор холодильника как раз совершает работу, необходимую для удаления тепла из холодильной камеры и переноса его в окружающую среду (нагреватель). Машина поддерживает низкую температуру в холодильной камере, но за счет этого она непрерывно подогревает помещение, в котором холодильник расположен.

Когда все процессы обратимы и могут производиться по желанию в том или другом направлении, энтропия системы не меняется. Ни в одном из процессов она не может уменьшаться. Но осуществить это на деле совсем не просто. Совершенно неизбежно, что в любом процессе обнаруживаются определенные элементы необратимости (трение, тепловые потери и т. д.), которые влекут за собой некоторое увеличение энтропии. Реальная тепловая машина никогда не тождественна с идеальной. Полная обратимость практически недостижима, но лучшие тепловые машины обладают мощностью, лишь немного меньшей, чем мощность идеальной тепловой машины.

4. ЭНТРОПИЯ И ЦЕННОСТЬ, НЕГАЭНТРОПИЯ И ДЕГРАДАЦИЯ ЭНЕРГИИ

Принцип Карно заключает в себе очень любопытную особенность: он указывает на общую тенденцию в эволюции физического мира. С течением времени энтропия любой замкнутой и изолированной системы должна непрерывно возрастать. Возврата назад быть не может. Здесь мы должны приступить к подробному обсуждению этого вопроса, потому что несколько позже нам придется подумать над способами, которыми можно расширить этот принцип, для того чтобы стало возможным его обобщение; необходимо установить также, в какой степени этот принцип может быть распространен на другие явления, в том числе и на процесс мышления.

Прежде всего попытаемся определить, что понимается под «деградацией энергии» в физике и химии. Начнем с классификации различных форм энергии и присвоим высший класс тем из них, которые полностью могут быть превращены в другие формы энергии, а низший класс (С) оставим теплу, энергетические превращения которого ограничены принципом Карно:

- А. Механическая работа, электрическая энергия.
- В. Химическая энергия.
- С. Тепло.

Химической энергии мы присваиваем особый класс (В) по той причине, что химические реакции связаны как с выделением, так и с поглощением тепла. Возрастание энтропии связано с деградацией энергии, сопровождающей ее последовательные преобразования от классов А и В к классу С. Можно нарисовать более наглядную картину, если согласно предложению Шрёдингера ввести вместо энтропии S величину, имеющую обратный знак, отрицательную энтропию $N = -S$, которую мы для краткости будем называть «негаэнтропией».

Энтропия непрерывно возрастает в любой заданной замкнутой системе; напротив, негаэнтропия имеет тенденцию всегда убывать. Негаэнтропия, в конечном счете, отражает качество (класс А, В или С) энергии, а принцип Карно выражает закон обесценения энергии, правило снижения уровня энергии. Дело в том, что наш опыт и наше мышление воспринимают снижение как более естественную тенденцию, нежели рост; предлагаемое новое определение соответствует нашей манере мышления и устанавливает связь между понятиями негаэнтропии, уровня и ценности.

В разделе 2 мы упомянули возможность сопоставления понятий энтропии и ценности; теперь это сравнение полностью приобретает смысл.

Система, способная производить механическую работу (или работу за счет электрических сил), должна рассматриваться как источник негаэнтропии; примерами таких систем могут служить свернутая спиральная пружина, груз, поднятый над землей, заряженная батарея.

Рассмотрим некоторую замкнутую систему, средняя температура которой равна T ; пусть, однако, некоторой области этой системы соответствует другая температура T' . Эта область является источником отрицательной энтропии. Совершенно несущественно, выше или ниже температура T' относительно температуры окружающей среды T . И в том, и в другом случае мы можем построить тепловую машину, использующую разность температур для того, чтобы получить работу. В этом случае мы имеем дело с локальным источником негаэнтропии. Если мы не воспользуемся этой возможностью, то температура будет постепенно выравниваться сама собой за счет прямого теплообмена между различными частями системы: это и есть естественное уменьшение негаэнтропии. Мир неживой природы, управляемый законами физики и химии, подчиняется естественному закону деградации энергии, закону потери ценности энергии. В этом законе сконцентрирована вся сущность термодинамики; однако само представление о ценности остается связанным с инертной материи или, лучше сказать, с энергией. Физики сейчас еще не в состоянии (и, возможно, никогда не смогут) разделить эти две стороны материи.

Однако, в других областях, по-видимому, «ценность» можно определить независимо, причем так, что она также подчиняется закону естественного убывания, по крайней мере в громадном большинстве случаев. Далее мы попытаемся более тесно увязать эти две точки зрения; сейчас же мы постараемся расширить определение негаэнтропии на область, весьма далекую от той, где она была определена, чтобы привлечь это определение в совершенно новую область исследований.

5. ЭНТРОПИЯ И ВЕРОЯТНОСТЬ

Приложив немалые усилия, физики мало-помалу дошли до понимания пределов применимости законов термодинамики и исследовали все возможные области их приложения; тем самым было постигнуто глубочайшее значение этих двух принципов термодинамики. Эти действительно всеобщие законы приложимы ко всем отраслям физики и химии: к свойствам газов, жидкостей и твердых тел; к химическим реакциям; к электрическим и магнитным явлениям; к излучению; к астрофизике.

Долгое время возможность приложения законов термодинамики к проблемам излучения оставалась загадкой. Эта загадка была разрешена только около 1900 г. благодаря трудам крупнейшего немецкого физика Макса Планка, причем ее решение потребовало введения новых революционных идей — квантовой теории. Пришлось отказаться от того, чтобы считать энергию неким непрерывным образованием, и принять, что энергия имеет гранулярную структуру, другими словами, принять атомизацию энергии, частицы которой получили название квантов. Эта новая теория достигла громадных успехов и восторжествовала во всех областях физики и химии. В настоящее время квантовая теория совместно с теорией относительности составляют основу всей теоретической физики. Но не следует думать, что термодинамика пострадала от появления новых идей, наоборот, из этого испытания она вышла еще более крепкой и еще более жизнеспособной, чем была до этого. Новые идеи уточнили само понятие энтропии и сблизили его с понятием вероятности. Цепочка состоит теперь из следующих звеньев: негаэнтропия — ценность — редкость.

В мире неживой природы мы часто смешиваем понятие ценности и редкости той или иной вещи; то, что является исключительным, нас удивляет; то, что является неожиданным и необычным, нас восхищает. Разумеется, такое смешение недопустимо в области морали, философии или криминалистики. Однако в рамках физики и химии эквивалентность этих понятий представляется полной, поскольку для оценки качества вещей у нас нет иного критерия, чем редкость. В политической экономии редкость составляет лишь один из факторов в образовании цены, являющейся символом ценности; вторым фактором является потребность в предмете (она обусловлена наличием предмета и его спросом). Цена благородных металлов зависит от их редкости и от спроса на них на рынке. Для физиков подобные категории не существуют, и они игнорируют эти существенные отличия.

В течение всего прошедшего столетия возможность пренебрежения ролью самого процесса наблюдения в научном исследовании была догмой, неоспоримой аксиомой. Ученый удовлетворялся наблюдением того, что происходило вокруг него. Его вмешательство в ход процесса сводилось к тому, что он планировал эксперимент, но далее ограничивался лишь констатацией результатов. Считалось само собой разумеющимся, что присутствие ученого (т. е. акт наблюдения или постановки опыта) не влияет на ход событий. Теперь мы уже излечились от этой манеры переупрощать ситуацию. Всякое наблюдение (мы это поняли на опыте) представляет собой возмущение, которое влияет на происходящее явление. Такую взаимосвязь между наблюдателем и объектом наблюдения можно представить себе пренебрежимо малой, если речь идет об астрономии или классической физике, однако она приобретает первостепенную важность, когда мы приступаем к изучению мельчайших частиц, таких как атомы, электроны, фотоны и мезоны. Мы еще очень далеки от того, чтобы исчерпать все содержание этих крайне существенных замечаний. Эти идеи, новые для физиков, были хорошо известны биологам. Врачи и специалисты по

психологии долго учились, чтобы избежать таких тонких взаимодействий. Изучение «связи» между наблюдателем и наблюдаемой системой, между человеком и физикой, возможно, заставит нас пересмотреть наше понятие ценности и отделить его от понятия редкости, однако такой шаг еще не достаточно ясен.

Энтропия выступает как символ вероятности. В математической форме соотношение между двумя этими величинами, согласно Планку, имеет вид

$$S = k \ln P + S_0,$$

где $k = 1,4 \cdot 10^{-16}$ эрг/град — постоянная Больцмана, а S_0 — некоторая постоянная величина.

Энтропия S определяется как логарифм вероятности P рассматриваемого состояния. Проследим за естественной эволюцией изолированной системы. Можно начать с исключительной и мало вероятной ситуации, искусственно созданной экспериментатором. Представим такую систему самой себе, и тогда эта неустойчивая структура будет мало-помалу преобразовываться к более вероятной и более устойчивой структуре. Вероятность состояний будет расти, будет расти также и энтропия. Эта статистическая интерпретация энтропии чрезвычайно полезна. Но она лучше, чем просто сравнение, и больше, чем наглядный способ представления. Эта формула вполне пригодна для расчетов; теория может предвидеть a priori точное значение энтропии системы, и экспериментальные данные подтверждают эти предсказания.

6. ТЕРМОДИНАМИКА И ТЕОРИЯ ИНФОРМАЦИИ

Во всяком эксперименте расходуется негаэнтропия. Недавно созданная теория информации использует многие положения статистической термодинамики².

Рассмотрим типичный пример. Газ, находящийся в сосуде, состоит из мириад молекул, находящихся в непрерывном движении. В любой данный момент времени мы не имеем ни малейшего представления о том, где точно находятся и с какими скоростями движутся эти молекулы. Микроскопическая структура системы нам неизвестна, нам даны только значения макроскопических параметров, таких как давление, объем, температура и химический состав. Эти величины могут быть измерены; что же касается деталей распределения молекул, то определить их на опыте невозможно. Исходя из этого, мы подсчитываем «вероятность» состояния системы и соответствующую энтропию. При подсчете вероятности учитываются все элементарные микроскопические комбинации, удовлетворяющие заданным макроскопическим условиям. Чем более неопределенны эти условия, тем больше число возможных микроскопических комбинаций, тем выше вероятность и тем выше энтропия системы.

Иногда мы можем располагать большей информацией относительно рассматриваемой системы; например, мы можем знать, каким образом она выглядела в определенный момент времени, другими словами, знать начальное распределение плотности частиц и скоростей. Располагая такой дополнительной информацией, мы можем более точно определить состояние системы, уменьшить число возможных элементарных комбинаций и тем самым уменьшить вероятность, а вместе с ней и энтропию.

Любая дополнительная информация увеличивает негаэнтропию системы. Столь замечательное совпадение позволяет сделать очень важное утверждение: можно принять за количественную меру информации соответствующее увеличение негаэнтропии. Этот результат возник как итог целой серии различных работ, появившихся в самое последнее время.

Дополнительная информация, полученная в некоторый определенный момент времени, с течением времени постепенно утрачивает свою ценность, так как система, предоставленная самой себе, естественно, эволюционирует по направлению к наиболее вероятным состояниям, обладающим меньшей негаэнтропией. Во время своего образования газ имеет определенное распределение плотности, но тепловое движение молекул аккуратнейшим образом перемешивает всю массу газа и чрезвычайно быстро приводит к равновесию, которое соответствует структуре с меньшей негаэнтропией.

Такова нормальная эволюция системы. Но мы имеем возможность вмешиваться в ход событий. Вооруженные информацией, находящейся в наших руках, мы можем внести в сосуд с газом стенки, которые разделят области различной плотности газа, помогут таким образом поддерживать структуру с заданным высоким значением негаэнтропии и будут оберегать ее от естественного распада. Следовательно, информация может быть преобразована в постоянную негаэнтропию.

Наоборот, можно преобразовать негаэнтропию в информацию. Позвольте снова обратиться к примеру газа, заключенного в закрытый сосуд; мы ничего не знаем о его внутреннем состоянии, но нам хотелось бы иметь о нем некоторые сведения. Разумный экспериментальный способ состоит в том, чтобы послать пучок света, пронизывающий этот газ. Если в газе есть отступления от однородной плотности, то это приведет к рассеянию света. Наблюдая рассеянный по всем направлениям свет и изучая его интенсивность по этим направлениям, мы можем получить информацию о том, как распределена плотность газа в сосуде. Однако такой эксперимент требует поглощения негаэнтропии. Некоторое количество высококачественной световой энергии (с высокой негаэнтропией) поглощается газом и переходит в тепло, которое представляет собой низкокачественную энергию (с малой негаэнтропией). Следовательно, предлагаемый эксперимент неизбежно состоит в преобразовании негаэнтропии в информацию. Тщательный анализ всевозможных экспериментальных методов наблюдения обнаруживает совершенно общий характер этого вывода: не существует никаких измерений, производимых в лаборатории, следствием которых не была бы затрата определенного количества негаэнтропии. Эксперимент любого типа представляет собой преобразование негаэнтропии в информацию.

Два рассмотренных нами примера могут быть объединены в серию операций, которая приводит к преобразованиям по схеме:

Негаэнтропия → Информация → Негаэнтропия.

Пусть процесс заключается в постановке эксперимента, способного обеспечить нас определенной информацией, и в последующем использовании этой информации с целью уменьшить энтропию системы. Классическим примером, соответствующим схеме такого типа, является демон Максвелла. Однако глубокий анализ проблемы показывает, что если исходить от системы с равновесной плотностью и равновесной температурой, то количество негаэнтропии, потерянной в первой операции, всегда больше количества негаэнтропии, полученной обратно во второй операции. В целом весь переход подчиняется принципу Карно. Деградация энергии существует даже при ее новых преобразованиях, в которых вводится понятие об информации. В конечном счете мы приходим к следующим основным результатам:

А. Эквивалентность негаэнтропии и информации.

Б. Распространение принципа Карно и на эти преобразования. Остановимся на мгновение и задумаемся. Мы вложили в слово «информация»

вполне определенный, хотя и очень ограниченный смысл. Мы связали информацию с негаэнтропией, а поэтому и с невероятностью событий (см. раздел 5).

Всякое упоминание о ценности в человеческом понимании полностью исключено: моральные качества, интеллектуальные и художественные ценности также полностью исчезли. Другими словами, наша «информация» не имеет ничего общего с «наукой» или «знанием». Это ограничение очень жестко, но оно является именно той ценой, которую приходится платить за возможность точного и объективного определения термина «информация».

7. ПРОБЛЕМА ТЕЛЕГРАММЫ (ОБОВЩЕНИЕ ПРИНЦИПА КАРНО)

Другим примером, который приведет нас к интересным вопросам, является проблема телефонных и телеграфных передач. Ситуация, которая привлекает наше внимание, может быть проанализирована по следующей схеме:

- A. Петеру пришла в голову мысль, которую он хочет сообщить Полю.
- B. Петер пишет телеграмму, в которой излагает свою мысль.
- C. Телеграмма переводится на телеграфный код (например, на язык азбуки Морзе).
- D. Передатчик возбуждает электрические сигналы.
- E. Эти сигналы передаются по проводам и доходят до
- F. приемника, который записывает точки и тире на телеграфной ленте.
- G. Оператор на телеграфе расшифровывает точки и тире в буквы алфавита.

H. Восстановленный таким образом текст вручается Полю,

I. который старается понять, в чем состояла мысль Петера. Можно взять в качестве примера также и лектора, адресующегося к аудитории (передача осуществляется звуковыми волнами, распространяющимися в воздухе), а также телефонный разговор. В любом из этих случаев действие происходит в точности согласно приведенной выше схеме.

Мы должны различать следующие процессы:

I. $A \rightarrow B, B \rightarrow C, F \rightarrow G, G \rightarrow H \rightarrow I$, представляющие собой примеры перевода (мысли в слова) или кодирования и декодирования.

II. В процессах $D \rightarrow E \rightarrow F$ информация, содержащаяся в телеграмме, превращается в электрические сигналы, идущие по проводам, а затем снова преобразуется в информацию, когда эти сигналы приняты. Электрические сигналы, распространяющиеся по проводам, представляют собой систему с высокой негаэнтропией. Нормальным состоянием провода является такое состояние, когда по нему не передается никакого сигнала, который мог бы быть обнаружен; в проводе есть только беспорядочные токи (тепловой шум), не подчиняющиеся никакому закону. Отсутствие сигналов означает минимум негаэнтропии. Поэтому в этом случае мы имеем дело с циклом

Информация \rightarrow Негаэнтропия \rightarrow Информация,

очень сходным с тем, который рассматривался в предыдущем разделе.

Другие примеры (перевод, кодирование) также очень интересны: всякий перевод означает потерю информации. Как говорится в старой пословице, переводчик — это предатель (*The translator is the traitor*). Рассмотрим внимательнее процесс $A \rightarrow B$. Петер должен очень точно сформулировать свою мысль перед тем, как написать телеграмму. С этой целью он подчеркивает определенные стороны своей мысли и опускает некоторые оттенки, которые содержались в ее первоначальном виде.

К тому же плохо подобранные слова, неудачные обороты, неправильная пунктуация — все это является возможным источником ошибок.

Приглядимся ко всем остальным примерам перевода: всюду применимо одно и то же общее правило: всякий перевод ведет к потере определенной части информации.

Это же утверждение полностью применимо к циклу $D \rightarrow E \rightarrow F$ передачи по проводам. Сигнал, полученный на другом конце провода, искажен шумами и атмосферными помехами, ослаблен (затуханием по всей длине провода), трудно читаем. Точки и тире, воспроизведенные в приемном аппарате, спутаны и смазаны: операция декодирования $F \rightarrow G$ вносит массу новых ошибок.

Мы теряем информацию на каждом шагу: в цикле $D \rightarrow E \rightarrow F$ эти потери интерпретируются как потери негаэнтропии, подтверждающие принцип Карно.

Мы вынуждены принять обобщенный принцип Карно: информация эквивалентна негаэнтропии и имеет тенденцию к диссипации при каждом превращении.

Только что рассмотренная схема слово в слово приложима к многим другим сходным проблемам. Отметим случай «запоминающих устройств», используемых во многих счетных машинах. Вместо того, чтобы пересыпаться по проводам от Петера к Полю, определенная часть информации преобразуется в некоторую разновидность телеграммы, записываемую специальным устройством, которое сохраняет эту телеграмму в течение заданного промежутка времени и может воспроизвести ее по определенному сигналу.

Идет ли речь о телеграмме или о запоминающем устройстве — в обоих случаях метод состоит в преобразовании информации в нестабильную структуру физической системы и выборе физического образца с продолжительной нестабильностью. Следовательно, мы всегда используем систему в состоянии с высокой негаэнтропией, заботясь выбрать такое устройство, в котором эта высокая негаэнтропия могла бы существовать относительно длительное время: например, время распространения (в случае телеграфного провода) или требуемой продолжительности памяти в случае вычислительной машины. Эти замечания указывают связь между различными примерами, рассмотренными в этом и предшествующем разделах.

8. ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ, ПОДОБНЫЕ ПРОБЛЕМЕ ПЕРЕВОДА

Задача перевода заслуживает специального внимания в силу того, что ее, по-видимому, можно свести к нескольким физическим процессам. Эти сравнения с физическими процессами необходимы, чтобы показать, что перевод сам по себе вовсе не требует какого-либо вмешательства мышления и во всяком случае не требует вовсе никакой фантазии.

Типичный пример перевода в физике может быть взят из оптической области. Каждое физическое тело имеет характеристический спектр поглощения. Он очень чувствителен к излучению хорошо определенного цвета и мало чувствителен к остальным цветам. Пары натрия сильно поглощают некоторую желтую линию, но все остальные цвета проходят через них без заметного поглощения. С другой стороны, известны флуоресцирующие вещества; они поглощают излучение определенного цвета и немедленно излучают свет уже другого цвета. Одно из таких флуоресцирующих веществ может поглощать фиолетовый или ультрафиолетовый свет и испускать желтый свет, к которому необыкновенно чувствителен натрий: это есть перевод света из ультрафиолетового в желтый.

Наш глаз чувствителен ко всей «видимой» части спектра, но он не ощущает ультрафиолетового света. Флуоресцирующий экран, испускающий вторичный желтый свет, переводит ультрафиолет на язык «видимого» света, который «понятен» человеческому глазу.

Обычные фотографические пластиинки чувствительны к фиолетовым и ультрафиолетовым лучам, но не чувствительны к красным. Если добавить к эмульсии некоторые окрашенные вещества, то мы получим панхроматическую пластиинку. Добавленные вещества выполняют роль переводчиков. Сходство между физическими и филологическими задачами простирается довольно далеко: язык соответствует цвету; речь, произносимая или воспринимаемая, соответствует испускаемому или поглощающему свету определенной цветности.

Запомним этот пример, так как он связан с очень сложной физической проблемой. Чрезвычайное разнообразие спектров испускания и поглощения для тел различного химического состава потребовало для своего объяснения немало времени. Длительные усилия понадобились также и для того, чтобы приложить в этой области общие принципы термодинамики. В самом деле, как можно определить энтропию светового пучка? Задача нахождения энтропии излучения в конце концов была решена, но после полуавтоматических поисков; ее решение содержалось в знаменитой работе Макса Планка. Этот пример дает нам надежду и указывает на то, что и при подходе к проблеме информации поиск аналогичного решения отнюдь не является перегруженным. Конечно, в случае информации мы имеем дело с бесконечно более сложной проблемой, чем в случае излучения.

Свет определяется только одним параметром — цветом (физик более точен, он скажет о длине волны). В информации содержится несколько элементов: язык, образование, литературная или научная выучка... Однако мы должны отыскать общий знаменатель, чтобы корректно определить энтропию информации, несмотря на многочисленные аспекты, в которых она предстает перед нами. В некоторых специальных случаях такое определение уже дано; его обобщение потребует длительных усилий, терпения и упорства.

9. МЫШЛЕНИЕ, СОЗДАЮЩЕЕ ИНФОРМАЦИЮ

Используя не очень отчетливое слово «информация», мы охватываем тем самым большое число разнообразных представлений, резко отличающихся друг от друга. Проблемы, рассмотренные в разделах 6 и 7, соответствуют преходящей информации. Мы знаем из способа образования физической системы, что она находится в определенном неустойчивом состоянии; предоставленная самой себе эта система эволюционирует по направлению к устойчивому состоянию, которое соответствует структуре с минимальной негаэнтропией. Начальная информация мало-помалу утрачивает свою ценность по мере того, как негаэнтропия постепенно убывает.

Такая характерная ситуация типична для большинства случаев, рассматриваемых в физике, и появляется снова и снова в самых различных обстоятельствах. Метеорологические сведения, биржевые курсы, газетные сообщения представляют собой примеры того, как большое количество информации постепенно утрачивает ценность с течением времени. Однако существует другой вид информации, который имеет устойчивый характер: великие открытия, законы, установленные наукой. Можем ли мы смешивать и путать эти два типа знаний, обозначая их одним и тем же названием? И если необходимо различие, то как провести границу между ними?

В результате деятельности мышления ученого или философа действительно возникает новая информация. Когда Эйнштейн сформулировал принцип относительности или когда де Бройль придумал волновую механику, эти мыслители на самом деле открывали новые процессы научного предвидения. Они сообщили человечеству информацию, до той поры никому не известную. Из этих замечаний мы можем извлечь следующее предположение: мышление создает отрицательную энтропию. Размышление и работа мозга происходят в направлении, противоположном тому, в котором действуют обычные физические законы. Конечно, может оказаться, что мы слишком поспешили с такой экстраполяцией. Этот вопрос заслуживает самого тщательного изучения.

Прежде всего представляется очень трудным указать границу или провести линию разделя между этими двумя крайними категориями. Легко обнаружить большое число случаев, занимающих промежуточное положение: эмпирические законы с ограниченным применением вскоре заменяются более широкими утверждениями, охватывающими большую область, последние же открывают путь к открытию самых основных законов природы. А эти законы, как мы утверждаем, имеют устойчивый характер. Но верно ли это на самом деле? Ничто человеческое не является абсолютно устойчивым. Физики нашего поколения видели, как механика Ньютона была заменена (или, скорее, обобщена) механикой Эйнштейна. Затем появилась волновая механика, и, глядя вперед, мы ждем некоторого гармонического синтеза этих двух видов механик, которые дополняют одна другую, но отнюдь не полностью согласуются.

Текущая информация, подобная той, которая рассматривалась в предыдущих примерах, представляет собой результат немногих экспериментов, каждый из которых был поставлен за счет некоторого числа единиц негаэнтропии. Более общие законы опираются на большее число экспериментов и подводят итоги большому количеству временной информации. Их мера в единицах негаэнтропии, таким образом, значительно выше, хотя общий баланс установить довольно трудно. Не видно никаких границ в этом непрерывном потоке информации. Возникают только груши все более и более сложных проблем.

Если мы теперь рассмотрим проблемы передачи, то они оказываются очень схожими для самых различных категорий информации. Информация преходящей ценности требует быстрого распространения. Эту роль выполняют в наше время печать и радио. Научные законы, значение которых более продолжительно, публикуются в научных журналах, излагаются на лекциях и в книгах. Но эти механизмы вполне тождественны. Речь, письмо и рисунок — все это передаточные агенты информации и мышления.

Тем не менее появился один существенный момент, новая характеристика: размышление и мысль. Информация, черпаемая из прямых экспериментов, как мы уже сказали, эфемерна; мера ее негаэнтропии может быть установлена без особых трудов, потому что этот вид информации представляет только формулировку результатов сравнительно немногих измерений. Когда мы подходим к научным законам, возникает новый элемент: усилия размышления. Научный закон является не только выражением определенного количества опытных фактов; в этих законах отражается мышление ученого: отбор фактов, сравнение, фантазия, проблеск гения. Но мы плохо представляем себе, как нужно анализировать эти новые составные элементы.

В лучшем случае мы можем попытаться оценить число экспериментов, необходимых для того, чтобы подойти к формулировке определенного физического закона. Мы можем подсчитать количество негаэнтропии,

затраченной в этих опытных измерениях. Однако не представляется возможным подсчитать вклад мышления, хотя он, как правило, соответствует расходованию фосфора в мозгу¹. Наше собственное определение проскальзывает между нашими же пальцами.

10. НАУЧНЫЕ ЗАКОНЫ КАК ИСТОЧНИКИ НЕГАЭНТРОПИИ

Несмотря на эти препятствия и затруднения, представляется необходимым сохранить параллель, установленную нами, и приравнять информацию к негаэнтропии. В той серии процессов, которые приводят нас к у становлению научного закона, должно происходить поглощение негаэнтропии.

Обратно, научные законы дают нам способ предсказания, с помощью которого мы имеем возможность создавать системы с высокой негаэнтропией. Вполне уверенные в информации, содержащейся в этих законах, мы можем изобретать новые лабораторные установки и даже производственные агрегаты, неизвестные до этих пор. Каждое из этих устройств представляет собой чрезвычайно маловероятную структуру, которая не может осуществиться в природе. Если приравнять невероятность негаэнтропии (см. разделы 5 и 6), то научные законы выступают как потенциальные источники негаэнтропии.

Давайте уточним, о чём идет речь, чтобы избежать недоразумений. Любая машина, выполняя любые операции, строго следует второму принципу термодинамики. Не существует случаев, когда какая-либо операция происходила в противоречии с принципом Карно. Фактически мы рассматривали не возможную мощность машины, а процесс ее изобретения; мы сосредоточили внимание на деятельности инженера или ученого, которые задумали некоторую конструкцию и осуществили ее. Мы намерены ввести здесь ценность изобретения, значение патента на изобретение и выразить все эти величины в определенных технических терминах. Мы хотели бы учесть творческую мощь мышления и мощь его практической реализации.

Можно ли говорить о негаэнтропии структуры, когда речь идет о машине? Негаэнтропия всей структуры не является суммой негаэнтропий ее составных частей. Энтропия не является уже больше аддитивным свойством благодаря определенной взаимосвязи различных частей машины. «Функциональная ценность» этих частей представляет собой вклад таких сочетаний. Эти весьма общие соображения применимы ко всем механизмам, изобретенным человеком. Возьмите набор запасных частей и подсчитайте их полную энтропию. Соединим эти части согласно чертежам и соберем паровоз. Разумно ли считать, что энтропия осталась той же? Информация, содержащаяся в рабочих чертежах, представляет собой вклад в полную негаэнтропию. И эта информация была получена за счет знаний инженера (знания физических законов) и за счет его конструкторских способностей (мышления).

Лучшим доказательством того, что следует рассматривать значение негаэнтропии в качестве значения, определяемого структурной ценностью машины, состоит в том, что в этой машине существует нечто, что постепенно разрушается согласно принципу Карно. С течением времени машина изнашивается, ржавеет, ломается и наконец прекращает свое действие. Все эти процессы постепенного разрушения представляют собой необратимые реакции, подпадающие под действие принципа Карно. Может ли называться то самое «нечто», которое обычно разрушается согласно принципу Карно иначе, нежели негаэнтропия структуры? Функциональной ценностью? Эта ценность практически содержится в цене машины. Это лишь ее коммерческая ценность, и она может служить лишь предметом торговых операций.

11. КВАНТЫ И ПРИНЦИП НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ

До сих пор мы сосредоточивались на принципе Карно и на различных способах расширения его. Следует сказать несколько слов, чтобы указать на связь этого принципа с современными физическими теориями, в частности с квантовой теорией. Волновая механика позволяет дать превосходную интерпретацию свойств атомов и молекул. Одним из лучших достижений волновой механики является объяснение химических связей и возможность свести валентные силы к чисто физической схеме. Благодаря квантам слияние физики и химии происходит быстрыми темпами. И мы уверены в чрезвычайной важности этих идей в области биологии. Одним из самых замечательных признаков этих теорий является то, что они придают чрезвычайную важность статистическим представлениям. Статистическая термодинамика становится все более могущественной и все более строгой.

В современной физике существует новый принцип — *принцип неопределенности*, сформулированный Бором и Гейзенбергом. Ученый всегда стремится увеличить, сколько возможно, точность своих наблюдений, но он всегда наталкивается на непреодолимое препятствие — на возмущение, которое вносится самим измерительным прибором в тот объект, который измеряется. В старых классических теориях считалось возможным игнорировать роль наблюдателя. Думали, что экспериментатор наблюдает именно то, что происходит вокруг него; считалось, что его присутствие никоим образом не влияет на ход событий. В астрономии, а также в классической механике такая точка зрения может быть легко оправдана. Но когда мы исследуем атомы или электроны, мы не можем наблюдать эти мельчайшие элементы так, чтобы не внести возмущение в их состояние.

Вместо того чтобы основывать рассмотрение на принципе неопределенности, можно опереться на другую идею — идею дополнительности. Фактически две эти точки зрения вполне эквивалентны. Все доказательства принципа неопределенности основаны на использовании идеи дополнительности. Попытаемся кратко просуммировать идеи Бора по этому поводу: электроны, протоны, мезоны, фотоны — все эти основные компоненты материального мира — не могут рассматриваться как частицы в обычном смысле. Мы должны воспринимать их как нечто среднее между частицей и волной. Наши обычные представления, выкованные по опыту повседневной жизни, вовсе не приложимы к этим мельчайшим элементам. В некоторых экспериментах корпускулярное описание является вполне достаточным. Однако в других случаях волновое представление оказывается более естественным; квантовые условия сочетают две эти интерпретации, которые на первый взгляд кажутся противоречивыми.

Если рассматривается модель, состоящая из частиц, то приходится отказываться от точного описания их движения. Принцип неопределенности или наличие дополнительности в природе призывают нас к этому.

Строго детерминированное описание оказывается неприменимым. Физические законы приобретают принципиально статистический смысл и не могут касаться деталей движения.

Ограничения, о которых идет речь, определяются принципом неопределенности или идеей дополнительности; эти ограничения, однако, не имеют никакого отношения к вопросам, рассматривавшимся до сих пор, по крайней мере в той степени, в какой рассматривается роль энтропии в измерениях. Неопределенность в измерениях определяется известной физической величиной \hbar — постоянной Планка. Количество негаэнтропии, необходимое для проведения наблюдения, характеризуется другой вели-

чиной — постоянной Больцмана k . Оба обстоятельства — принцип неопределенности и затрата негаэнтропии — накладывают некоторые ограничения на методы экспериментального исследования; влияние взаимодействия между наблюдателем и объектом наблюдения существенно в обоих случаях. Замечания, сделанные по поводу двух этих различных случаев, дополняют друг друга, но квантовый принцип неопределенности нельзя свести к негаэнтропии информации и vice versa.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. V. La Mer, *Science* 109, 598 (1949).
 2. R. J. Seeger, *Amer. J. Phys.* 26, 248 (1958); L. Brillouin, *Science and Information Theory*, Academic Press, Inc., New York, 1956 (см. русск. перевод: Л. Бриллюэн, *Наука и теория информации*. М., Физматгиз, 1960); *Vie, matière et observation*, Albin Michel, Paris, 1959.
-